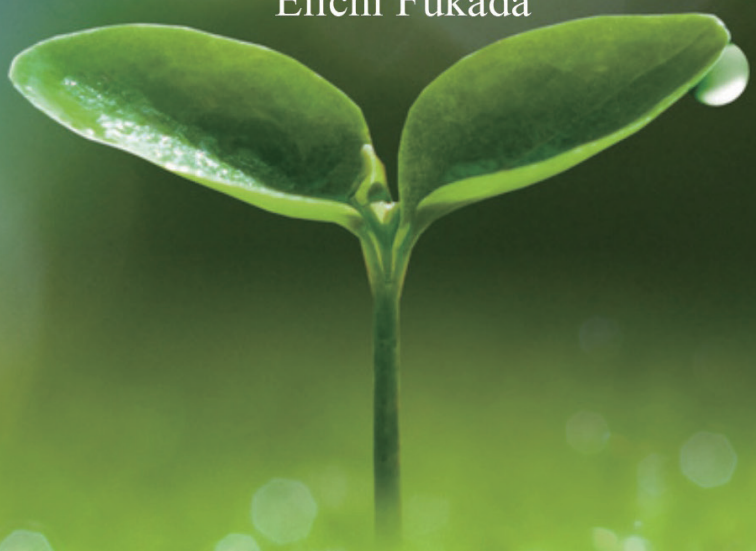
研究生活70年史

My Research life 70 years

深田栄一

Eiichi Fukada



本書には URL やメールアドレスを簡単に読み込めるように QR コード（二次元バーコード）が添えられている箇所があります。お手持ちのスマートフォンなどで読み取ってご利用ください。iOS11 以降の iPhone なら標準のカメラアプリでそのまま読み取れます。他の機種の場合は、お好みの QR コードリーダーアプリをインストールしてご利用ください。リーダーアプリはアプリをインストールするストアに豊富にあります。「QR コード」で検索してみてください。

研究生活 70 年史

My Research life 70 years

深田栄一
Eiichi Fukada

研究生活 70 年史
My Research Life 70 Years

深田栄一
Eiichi Fukada

目次

圧電高分子研究 70 年の思い出 4

転載　深田研究室の 50 年　圧電気とレオロジー

研究と人の思い出 16

研究室の歴史 46

Publications in English 49

和文報告 66

略歴 78

記念講演、寄稿、高分子の昔を語る 81

2004 年から 2017 年までの記録 155

Curriculum Vitae　November 15, 2015 166

International Activities 168

Recollections of a Research Life 175

まとめ 202

圧電高分子研究 70 年の思い出

深田栄一

2003 年（平成 15 年）初夏に、私の 81 歳（盤寿）の記念と、研究室の貝原真氏の還暦の記念のために祝賀会が開かれた。その時の講演を集めて、『深田研究室の五十年　圧電気とレオロジー』という本が出版された。研究室の伊達宗宏、古川猛夫、田実佳郎の３氏に編集していただいた。

それから早くも 14 年の月日が流れた。私は小林理学研究所の寛大なご厚意のおかげで、いまだに研究から離れていない。この書は、『五十年』の本に、その後 14 年の記録と、国際的な研究活動の記録を加えたものである。また過去 14 年の間に、多くのホームページによる写真アルバムを作ることもできた。電子出版することによって、この本の内容とともに、写真も保存されることを望んでいる。ところどころに、私の生活の記録も含まれているため、研究自分史に近いものである。

私が30代のころ、ドイツのある町で観光バスに乗った。バスを降りてから、バスの中で知り合った少女に、あなたの職業はなんですかと訊かれた。とっさに Scientist と答えたら、彼女の態度が変わり敬意を表してくれた。いろいろな書類に職業を記入する欄がある。大学の先生であれば「教員」と書くし、私のように研究所で働いていれば、「研究所員」と書くのが普通であろう。しかし、職業欄に「科学研究者」と書くことはまれであると思われる。ドイツでは科学研究者という職業が一定の評価を持って成立していることに感心したものであった。

私は東京大学物理学科を卒業後、財団法人小林理学研究所に入り、約 20 年後、特殊法人理化学研究所に移った。定年後、日本真空の超材料研究所に約 10 年務め、その後また小林理学研究所に戻って現在に至り、生涯を研究所員として過ごした。その間、国内の多数の大学から非常勤講師として講義を依頼された。また海外の大学から客員教授の招聘があって、英国、米国、ブラジル、ドイツなどで長期間にわたって研究を行う機会にも恵まれた。

私が研究者として育ったのは、小林理学研究所という私立の小さい研究所のおかげである。

1944 年ごろ、小林采男という鉱業経営者が将来の科学発展のために基金を出されて、東京大学物理学科の音響学の教授であった佐藤孝二先生が、小林理研を創立された。当時の主任研究員は高分子物理学の岡小天先生、Ｘ線結晶学の三宅静雄先生、超音波の能本乙彦先生、圧電音響の

河合平司先生など 40 代の気鋭の研究者ばかりであった。敗戦後の不自由な時代に、セミナーを開き、他の大学の研究者も参集した。

私は、岡小天先生から物理学の新しい境界領域である高分子の物性を学び、特に誘電体の研究に興味を持った。河合先生からは実験研究の直接の指導をいただき、先生の独創性、積極性には大きな感化を受けたほか、公私にわたって大変なお世話になった。河合先生の指導で始まった私の最初の研究は木材の粘弾性、つづいて圧電性の研究であった。

考えてみると、圧電気 Piezoelectricity は私の研究生活の初めから終わりまでの課題であった。1944 年、戦時の学徒動員のため、私は学生のまま、小林理研でロッセル塩結晶の培養作業に従事していた。研究所の裏にある坂の中腹に建てられた実験室の中で、ガラス板の間に小さなロッセル塩単結晶をはさみ、培養液の中に沈め、温度を管理して、板状単結晶を成長させる。これを適当な角度に切り出し、電極を付け防湿処理をすると、サイコロ状の圧電センサーができる。これを組み込んだ潜水艦探知機が三崎の海岸に設置されて潜水艦の探知に使われた。河合先生はロッセル塩の圧電気の専門家であった。

木材の圧電気の大きさは水晶の 10 分の 1 位で小さかったが、実験を工夫して、圧電正効果と逆効果の証明に成功した。配向したセルロースにずりの変形を与えると、ずり面に直角に電気分極があらわれる。結晶体でない高分子セルロースに圧電性が確認されたことは、大きな波及効果が期待された。絹糸シルクフィブロイン、羊毛ケラチンなどを配向させてセラックで接着した試料でも、圧電性が確認された。

物理学会の欧文誌に発表した木材の圧電気の論文を読まれた京都府立医科大学の保田岩夫先生が、小林理研を訪問された。整形外科医である保田先生は、骨を曲げると電気が出ることを発見された。最初の論文は、1953 年の京都医学会の邦文雑誌であった。その上、保田先生は生きた骨に 1 μ A ほどの電流を流すと、骨の成長が起こることを実験しておられた。

木材に圧電気があるのだから、骨にも圧電気はあると確信した。木材に用いたと同じ装置をつかって、骨の正逆のずり圧電効果を証明した。この論文を保田先生と共著で日本物理学会の欧文誌「Journal of Physical Society of Japan」に 1957 年に発表した。意外なことに、この論文は 2017 年 1 月現在の「Google Scholar」によると引用数が 1260 件を超し、私の論文の中では引用数最大になっている。

1964 年には、再び保田先生と共著で、アキレス腱のコラーゲンの圧電気の研究を発表した。この論文では、ずり圧電のほかに伸び圧電の効果もあることを報告した、コラーゲンの配向に極性があることが確認された。コラーゲンの極性配向は骨の生長方向との関連が想像される。骨には応力を支える役割があり、外力をもっとも支えやすいように骨は形を作る。この Wolff の法則

に、コラーゲンの圧電気が関与しているのではないかと想像された。

コラーゲンの圧電性は、整形外科関連の医学分野で関心を呼んだ。保田先生は 1953 年の論文で、骨に圧力を与えて生ずる力学的仮骨と、電流を与えて生ずる電気的仮骨を提案しておられる。実際に海外では 1970 年代から骨折治療のために、電気パルスや交流電流を用いる各種の電気刺激装置が考案され、臨床にも用いられた。また 1980 年代からは超音波刺激装置が実用化された。日本でも骨折治療の臨床に用いられ、現在は健康保険の適用にもなっている。しかし、電気的力学的刺激の細胞レベルでの詳細なメカニズムはまだ解明されていない。

1976 年に、保田先生と一緒に、骨の電気刺激の研究会を始めた。整形外科や歯科の関係の研究者や理工系の研究者の関心が集まり、幸いにこの会は大きく成長して、2017 年には第 44 回の日本生体電気物理刺激研究会が、保田先生がおられた京都府立医科大学に近い都ホテルで開催された。

骨の主要な成分には、コラーゲン繊維のほかに、ハイドロオキシアパタイト（HAP）という無機の結晶質がある。2004 年チェコの学会で、HAP の結晶の圧電気の可能性を研究しているアイルランドの Dr.Tofail に逢った。通常は、HAP の結晶は対称中心をもつため圧電気はないと考えられてきた。しかし、その後 2012 年に、イスラエルの Prof. Lang が Si 基板上で合成した HAP の単斜晶系の結晶で水晶より一桁大きい圧電率を発見した。

骨の圧電気と成長に興味を持つ Dr.Tofail は、2010 年に、アイルランドの University of Limerick に私を特別講演に招いてくれた。また彼の友人である、Dr.Rodriguez は 2013 年 3 月 28 日に、University College Dublin で Electromechanics in biosystems という Workshop を開き、私を特別講演に招待してくれた。その日は私の 91 歳の誕生日であり、無上の光栄であった。1957 年に Piezoelectricity of Bone の論文が「Journal of Physical Society of Japan」に発表されてから 56 年が経っていた。

1990 年代から、原子間力顕微鏡を改良して圧電応答顕微鏡が発達した。電界を加えた圧電体の変形量をナノメーターの単位で光学的に計測し、逆圧電効果の二次元的観察が可能である。60 年前には cm の大きさの試料を用いたが、現在は μ m の大きさの試料でよい。Dr. Rodriguez はこの顕微鏡の創始者の一人である。

圧電応答顕微鏡による最近の研究は、生物学の見地から見ても非常に興味深い。ポルトガルではたんぱく質のモノマーであるガンマグリシンの単結晶に圧電性と強誘電性が発見された。カリフォルニアではウイルスの圧電性を用いた圧力センサーの試作が発表された。またシアトル では動脈壁エラスチンに圧電性と強誘電性が発見された。シンガポールではあわび貝や真珠貝に圧電性と強誘電性が観察された。

生体高分子の圧電性は生体を構成する、多糖類、たんぱく質、核酸などの持つ物性である。しかしそれらが生理学的、生物学的な意味をもつかどうかについては、まだよくわかっていない。骨の成長に関して言えば、電流や応力の刺激が仮骨の生長を促すことは、実験的に証明されている。また宇宙空間の無重力が骨や筋肉の縮小をもたらすことも事実である。骨細胞が電気パルスや超音波の影響で増殖分化することも実証されている。細胞内へのCaイオンの流入や、DNAの増加も認められているが、まだ細胞の増殖分化の詳細な機構は分かっていない。生体に力が働けば、体内のタンパク質などの結晶部分に圧電分極が現れ、それによって引き起こされる微弱な電流が細胞に影響することは想像される。しかし、生体の運動や重力が与える生理学的影響に、生体高分子の圧電気発生がどのように関与しているかは大変興味のある謎として残されている。

東大物理の高橋秀俊先生は強誘電体理論で有名な学者である。私がセルロースやコラーゲンの圧電気を研究していたときに、高橋先生から「強誘電体の高分子はありませんか」と質問されたことがある。この予言は1969年、小林理研で河合平司先生の圧電性ポリフッ化ビニリデン（PVDF）の発見によって実現された。PVDFはCH_2CF_2分子のつながった合成高分子であり、CF_2の双極子が高分子の分子鎖に沿って並んでいる。この高分子を延伸配向させたフィルムに高電界を加えると、残留分極が発生する。この状態のPVDFは水晶の10倍に達する伸びの圧電率をもつ。

圧電性PVDFは新しいセンサーとして、すぐに工業的応用に発展した。水中音探知用ソナー、診断用超音波トランスデューサー、スピーカー、マイクロホンなど、音響振動に関する広い用途に用いられている。河合先生の圧電PVDF発見の論文が「Japanese Journal of Applied Physics」に発表されてから48年が過ぎ、PVDFは合成圧電高分子の代名詞として使われるほどになった。理研から東京理科大学に移った古川猛夫氏はPVDFの研究で世界の第一人者となった。

合成高分子の圧電性の研究は、その後、合成ポリペプチド、ナイロンなど、多くの種類に発展した。私は、理化学研究所を退任後、ULVACの筑波超材料研究所で、蒸着重合ポリウリアや旋光性ポリ乳酸の圧電性を研究した。ポリ乳酸の研究は関西大学の田実佳郎氏に引き継がれて発展し、スマートホンのセンサーをはじめ、圧電布や圧電組紐などが開発された。また有孔性ポリプロピレンのエレクトレットフィルムが、水晶の100倍以上の伸び圧電率を持つことが見いだされ、新しい応用が期待されている。

小林理研の研究生であった頃、岡小天先生が岩波書店から出版された誘電体論の原稿を貸していただいて勉強したことがある。岡先生は理論物理学者であったが、高分子や生物学と重なる境界領域の研究が重要であると唱えられて、次々と新しい研究を切り開かれた。粘弾性の力学的研究をレオロジーと呼ぶが、岡先生は生物のレオロジーの理論的研究を始められた。その影響を受けて、私は貝原真氏の協力を得ながら、血液やその凝固過程のレオロジーの研究を行った。

1977 年に岡先生の呼びかけで、日本バイオレオロジー学会が誕生した。内科の医学系研究者と理工学系の研究者が集まる活気のある学会であった。1981 年に国際バイオレオロジー学会が慈恵会医科大学で開催された時には会長を務めた。国内と海外の多くの学者と知り合う機会が増えたことは幸いであった。1995 年にアメリカの Big Sky で International Congress of Biorheology があったとき、Poiseuille Gold Medal を受賞したことは望外の名誉であった。国際学会の理事であった慈恵会医科大学の磯貝行秀先生のお世話に感謝している。

小林理研と理研を通して、私の研究の伴侶となってくれたのは伊達宗宏氏である。伊達さんは独創的な頭脳を持ち、エレクトロニクスに精通した研究者であり、装置作りの名人である。伊達さんが理研の工作室と協力して作った実験装置の数は数えきれない。その一つが高分子フィルムの動的粘弾性測定器である。弾性率の実部と虚部を分けて、温度や振動数の関数として測定するもので、レオログラフとも呼ばれた。製品化されて、国内外に 100 個以上売れたという。

小林理研は現在は音響学を中心とした一般財団法人の研究所である。圧電性は音響学とは関係が深い。定年後、小林理研にお世話になった後、圧電材料と音響を繋ぐ興味深い課題が見つかった。伊達さんの独創による負性容量回路である。この回路を圧電材料に結合させると、圧電材料の見かけの弾性率や粘性率を自由に変化させることができる。児玉秀和氏の協力を得て、遮音や防振のための基礎研究としてはすでに 10 篇以上の論文を発表した。将来、大規模な実験を行えば、実際の役に立つかもしれない。

研究は千差万別である。私は物理出身であるが、研究の分野は化学に近い高分子の物性や医学に近い生体高分子の物性であった。境界領域であるため、工学的応用や医学の臨床に近い分野にも近づいたが、それほど役に立つ貢献はなかった。

30 代の初めに行った木材や骨の圧電気の研究が、私の研究人生に最も深い影響を与えたと思う。大げさに言えば、新しい自然現象の発見であった。骨の圧電気の場合は骨の生長のメカニズムに関係する可能性があった。圧電性は生体高分子で発見されたが、その後多くの合成高分子が、延伸や分極の処理によって、圧電性、焦電性、さらに強誘電性を持つことが明らかになった。研究は進歩するものである。

圧電応答顕微鏡の進歩もあって、最近生体高分子の電気力学的変換とその生物学的意味に若い研究者が注目していることは、大変うれしいことである。Nanotechnology と biotechnology の総合した技術が、新しい研究の発展を促すことが期待される。

私は科学研究者として、非常な幸運に恵まれたと思う。著名な学者である茅誠司先生、河合平司先生、岡小天先生のご指導をいただいた。国内の多くの科学研究者と交流して共同研究を行うことが出来た。国外の多くの優れた研究者と知り合い、海外での研究の機会にも恵まれた。すべての人々に心から感謝を捧げる。

小林理研は私の研究の原点でありまた終点でもあった、90 歳を超える年まで、研究の場を与えていただいた小林理学研究所の理事長山下充康先生と所長山本貢平先生に深く感謝の意を表する。

(2017 年 1 月　記)

転載

深田研究室の 50 年

―圧電気とレオロジー―

以下は 2005 年 1 月に刊行された
『深田研究室の 50 年―圧電気とレオロジー―』
よりの転載（抜粋）です。

序

小林理学研究所常務理事・所長　山本貢平

深田栄一先生は，戦争という激動の時代に東大の物理学科を卒業され，昭和 19 年（1944 年）に小林理学研究所に入られました。ここでは研究者としての第一歩を踏み出されると同時に，多くの新鋭物理学研究者と共に若き時代を過ごされました。その間には，英国留学も経験されて，高分子の物性と圧電気の研究を精力的に行われました。その後，昭和 38 年（1963 年）には理化学研究所に移られることになりましたが，ここでもさらに多くの優秀な研究者に囲まれて多数の業績を残されました。その業績はこの本の中で多くの方々が記されている通りです。

理化学研究所を退任された後，深田栄一先生が古巣である小林理学研究所に戻って来られたのは平成 3 年（1992 年）のことでした。これは，当時の五十嵐寿一理事長（現在名誉顧問）の働きかけによるものであり，小林理学研究所に圧電材料と超音波の研究を復活させ，また発展させたいとの意向によるものでした。

小林理学研究所は昭和 15 年（1940 年）に物理学の研究所として発足し，当時は理論物理，結晶物理，圧電気，超音波，音響が研究の大きな柱でした。戦中・戦後を通じてこれらの分野で先駆的な研究が行われ，高い業績が得られていましたが，昭和 40 年以降は様々な社会情勢の変遷を経て，小林理学研究所の研究の中心は音響・振動に移行しました。そして，圧電研究はやや衰退気味となっていたのです。

このような時期に戻って来られた深田先生は，圧電研究を復活させるためには人材の育成が重要であるとし，落合研究員（当時リオン（株）へ出向中）の学位論文とりまとめの指導，学習院大学の学部生であった山本健君（現在小林理研の研究員）への超音波研究の指導などを積極的に行われました。さらに，圧電研究を広げるためには最新の情報が必要であるとして，圧電材料の基礎研究から応用研究に関わる国内外の第一人者を集めて情報交換を行う場を設けられました。これはピエゾサロンという名称で平成 9 年（1997 年）から開催されており，圧電研究室のみならず広く圧電研究分野の将来の発展にも寄与しています。

小林理学研究所に戻られた深田先生の研究として特筆すべきものは，圧電高分子材料の応用による音響・振動制御の研究です。まさに圧電分野と音響・振動分野の結合による独創的で無限に広がる可能性を秘めた新しい研究分野です。また，それは環境や安全を重視する現代の社会的要

請にも叶うものであります。深田先生は伊達宗宏先生と児玉秀和君ほか数人の協力者とともに，この研究に精力的に取り組まれており，今日も次々に新しい成果を得られています。

今回の「深田研究室の 50 年　– 圧電気とレオロジー —」は，深田研究室の歩みの重要な記録であり，深田先生の研究に対する情熱と努力の結晶というべきものです。この本で多くの方が述べられている通り，深田先生は若き研究者に物理現象の神秘さ，実験の楽しさと大切さを教えられ，また多くの優秀な研究者を育成されてきました。理論は人間が産み出したものであるのに対し，物理現象は名も無き創造者が産み出したものであると考えられます。それが故に物理現象への興味は尽きることはありません。深田先生の興味と追求は，ますます創造者の意図に近づきつつあるのだと感じて止みません。

参加者名簿

氏名　　所属
安部明廣　東京工芸大学工学部
飯島正行　（株）アルバック
石田勝巳　（株）東洋精機製作所
磯貝行秀　総合病院衣笠病院
伊藤耕三　東京大学新領域創成科
伊部高由　元・リオン（株）
岩永達也　元・三菱化学
植田浩義　（株)PCF テクノロジー
江村恒夫　東京農工大学物理
遠藤妙子　元・理化学研究所
及川悠平　キャノン（株）
大内正之　旭エンジニアリング
大久保朝直（財）小林理学研究所
大野寿彦　技術士大野壽彦事務所
岡野光治　東京大学名誉教授
奥山哲生　（株）東芝研究開発センター
押木満雅　富士通ストレージ研究所
貝原　真　理化学研究所
鎌田義英　日産自動車
川村泰彬　元・理化学研究所
木村和則　（財）小林理学研究所
木村三郎　東邦中・高校
久谷昌之　（株）東洋精機製作所
児玉秀和　リオン（株）
阪井　茂　学校法人電子学園
坂西明郎　群馬大学工学部
佐々木伸太郎　北陸先端科学技術大学院大学
椎名雅裕　日立エンジニアリング (株)
敷波保夫　タキロン（株）
志村　勇　日本電波工業
須貝宏行　日本原子力研究所
瀬尾尚也　東レインターナショナル
関川公成　リオン
高橋哲郎　東邦大学薬学
高橋善和　（株）アルバック
高松俊昭　東京理科大学工学部電気
高橋芳行　東京理科大学
田川浩行　日本大学量子科学研究所
田實佳郎　関西大学工学部
伊達宗宏　（財）小林理学研究所
田村雅彦　元・パイオニア
近久芳昭　東京農工大学
千葉明夫　早稲田大学理工学部
西成勝好　大阪市立大学
服部　武　北斗電工 (株)
原　薫　（株) イースタン
平井信之　静岡大学農学部
深田栄一　（財）小林理学研究所
藤川　昇　旭化成（株）
古川猛夫　東京理科大学理学部
増田俊哉　（株）リコー
三宅　彰　国際基督教大学名誉教授
山口則子　東京女子大
山口剛男　（株）リコー　画像技術開発本部
森山信宏　呉羽化学（株）

まえがき

世話人　伊達宗宏　古川猛夫　田實佳郎

平成 15 年 5 月 17 日に、深田栄一先生の盤寿と貝原真博士の還暦の祝賀のために、記念講演会を開催した。場所は小林理学研究所に近い国分寺駅の８階にあるＬサロン飛鳥であった。講演者と題目は次のとおりである。

深田栄一（小林理研）：　研究論文と共同研究者の回顧
貝原　真（理研）：　血液レオロジーの研究
伊達宗宏（小林理研、リオン）：新測定器開発の歴史
伊部高由（リオン）：　河合研での研究回顧
平井信之（静岡大）：　木材の圧電性の研究
古川猛夫（東京理科大）：　強誘電性高分子の研究
佐々木伸太郎（北陸先端大）：　Ｘ線と高分子の研究
西成勝好（大阪市立大）：　ゲルレオロジーの研究
高橋善和（ULVAC）：　蒸着高分子膜の開発
敷波保夫（タキロン）：　ポリ乳酸バイオマテリアルの開発
田實佳郎（山形大）：　圧電高分子の研究
児玉秀和（小林理研、リオン）：圧電高分子膜による遮音の研究

講演会に引き続いて、「高分子物理の昔を語る会」の懇談会を開催した。岡野光治先生（東大工）の高分子物理の源流についての講演があり、高松俊昭先生（東京理科大）の乾杯のあと、磯貝行秀（衣笠病院）、近久好昭（東京農工大）、三宅　彰（国際キリスト教大）、安部明廣（東京工芸大）、千葉明夫（早稲田大）の諸先生から談話をいただいた。

わが国の物理学者が高分子の研究に取り組み始めたのは 1940 年代である。岡小天先生が阪大理学部から小林理研に移られて高分子物理学の研究室を創設された。また同じ頃，理化学研究所では木下正雄先生が高分子物質の研究を開始された。懇談会には理研の高分子物理研究室に在籍した方々も参加された。

この文集は記念講演会と懇談会の内容に加えて、理研の生体高分子物理研究室の出身者からの寄稿や、研究に関連した方々からの寄稿を編集したものである。

深田栄一先生の約 50 年間にわたる研究の内容は、圧電高分子の研究を主体として、バイオレオロジー、骨成長の電気刺激、エレクトレット、放射性高分子、抗血栓材料など多岐にわたっている。この文集の「研究と人の思い出」は深田先生の研究人生の自伝になっている。しかし、現代の先端的科学の研究はもはや個人のみで行われることはない。したがって、この文集は 50 年と言う時間の一つの研究者群像の記録とも言えるであろう。原稿をいただいた皆様に深く感謝いたします。

研究と人の思い出

深田栄一　小林理学研究所

はしがき

80 歳の翁というともう大変な老人と思っていた。知らない間にその歳になり 1 年が過ぎた。それなりの健康に恵まれてまだ仕事を続けていられることは大変な幸運である。理化学研究所の貝原真さんが昨年還暦を迎えられたこととあわせて、深田研究室の記念講演会を開くことになった。私の「研究論文と共同研究者の回顧」という講演につづいて、かって研究室に居られた 10 人の方々から往時の研究や現在の研究の発展についての講演があった。それぞれの分野で新しい研究が発展していることを知り、講演者の方々の成長をお祝いするとともに、研究は進歩するものという深い感慨を覚えた。

人は人生の終わりに近づくと、自分の存在意義について考えるようになる。私は子供の頃、科学者になるか外国に行く仕事をしたいと思っていた。幸に 80 歳を越す年まで研究を続けることが出来たし、また何度か海外で生活する期間を持つことも出来た。いささかの研究成果を残すことも出来たし、幸運な恵まれた人生であったことを感謝している。

人は社会の中で生きており、孤独では生きてゆくことは出来ない。科学研究も特別な場合を除いて個人一人で行うことは難しく他の研究者との交流のなかで生まれてくるものである。　私は多勢の先輩、同輩、後輩の研究者との交流のおかげで研究をすすめることが出来たことを大変幸せに思っている。

過去の研究を回顧する時に思い出すのは、研究の課題であるが、同時にその研究について教えを受けた先生や一緒に仕事をした人々のことである。研究の内容とそれに関係した人とは一体になって記憶の中に残っている。研究と人とを組み合わせて私の研究生活の回顧を試みたいと思う。

小題目の見方

この文章に現れる小題目の大部分は、研究課題と人との組み合わせから成っている。研究題目の後に付した数字は、その研究テーマについてその人と始めて発表した論文に対する後述の論文リストの番号である。実際の論文題名と雑誌の年号と頁は論文リストで見ていただきたい。番号の前に和とあるのは和文の論文リストの番号である。人の名前の後にある年号は最初にお会い

したと思う年である。記録にない方の場合は間違っているかもしれない。共著の論文を多数書いた人が多いが、最初の論文だけを掲げた。一番思い出が深いためである。共著論文のある方すべてを掲げることが出来なかったことはお許しいただきたい。

小林理学研究所

財団法人小林理学研究所は、私が研究人生の青春時代をすごした最も懐かしい場所である。1944 年（昭和 19 年）の 9 月、戦時中の期間短縮のため、2 年 6 ヶ月で東京大学の物理学科を卒業し、所長の佐藤孝二先生のお招きで小林理研に入所することが出来た。学徒動員のため、在学中から小林理研でロッシェル塩結晶製作のお手伝いをしていた。ロッシェル塩結晶を音響探知機に応用する軍事研究が当時の最重要課題であった。

この研究を指導しておられた河合平司先生の研究室で、音響振動の実験的研究を始めた。またその頃、高分子物理学を始められた岡小天先生について高分子の理論の勉強を始めることが出来た。河合先生は独自なアイデアに富む先生で現象の核心をつかむことの大切さを教えていただいた。また物理の基礎実験から進んで応用に発展する重要さと面白さを教えていただいた。岡先生からは基礎理論の勉強とともに新しい分野に挑戦する重要さと面白さを教えていただいた。このお二人の優れた研究指導者のおかげで、私は研究者となることが出来た。

1945 年（昭和 20 年）から約 10 年ほどの期間の小林理研には、戦後の生活の苦難はあったけれども自由闊達な研究の雰囲気があふれていた。高分子物理の岡小天先生の研究室には、大川章哉、斎藤信彦、杉田元宜、中田修、池田勇一さんなどがおられたが、斎藤先生以外は故人になられたのは寂しいことである。X 線結晶の三宅静雄先生の研究室には、加藤範夫、本庄五郎、久保ミエさんなどが居られた。超音波の能本乙彦先生の研究室には、岸本匡、池田拓郎、根岸勝雄さんが居られた。圧電材料と高分子の河合平司先生の研究室には、私の他に、丸竹正一、時田昇、武田秋津、小川智哉さんたちが居られた。音響の佐藤孝二先生と小橋豊先生の研究室には藤村靖、時田保夫、織田厚さんがおられた。その後、理論の押田勇雄、大鹿譲、X 線の萩原仁、打越肇、山下秀治、磁性の大田恵造、有機化学の市木崎巌さん達が来られて活発な研究が行われた。その後、研究所の縮小に伴って多くの人達が大学や研究所に移ったが、それぞれの分野で著名な研究者となられた。また原子核物理の朝永振一郎先生やX線の西川正治先生も非常勤で来られた。そこには大学の大学院や基礎研究所の雰囲気があった。後年は音響学の分野で特色のある研究所として発展したが、初期の小林理研は戦後いち早く基礎科学の研究活動を開始し、また多くの優秀な研究者を育てるという大きな功績を残した。

私は幸にもその時期に小林理研で育てていただいた研究者の一人である。1960 年（昭和 35 年）から 1963 年（昭和 38 年）まで、高分子研究室の室長に任命された。その時、所員としておられたのは、伊達宗宏、植松淑子、鈴木萬英、鈴木邦夫、金城和子さんたちであった。委託研究の研究員として、雪印乳業研究所の曽根敏麿さんと福島正義さんが来られ、日本油脂から増沢光信

さんが来られた。昭和電工からは田中宗さんが来られた。卒業研究の学生としては、早稲田大学から世良昇（1955)、慶応大学から岩永達也、田辺洋輔（1960)、学習院大学から伊達宗宏、増田耕造、木島保晴（1959)、中司昌志（1960)、増井公道（1961)、岩居文雄、甲野格、斎藤秀俊（1962）さん達が来られた。今はもう皆さん還暦を過ぎ、亡くなられた方もあるが、大変懐かしい人ばかりである。

木材の振動的性質　(1,2)

河合平司先生からはじめて与えられた研究課題は木材の動的弾性率と振動損失の測定であった。その頃、理工学研究所におられて、後にリオン（株）の取締役になられた秋山朗さんから約30 種類の木材試料を譲って頂いた。板状試料の横振動を使って、対数減衰率の振動数変化が広葉樹と針葉樹で違うことや、ピアノやバイオリンに使う楽器用木材には、ヤング弾性率が大きく、振動損失が小さいものが良いことなどを結論した。基礎物性の研究から実際的応用へという私の研究姿勢はこの当時から河合先生に教えられたものである。

木材の圧電性 (6)

ロシアの Bazhenov と Konstantinova による木材の圧電気の報告が chemical abstract にでたことを、河合先生から教わった。高分子物質は大部分が非結晶性であり、圧電性があるとは思われていなかった。もし本当であれば画期的なことである。木材をいろいろな形に切り出して、てこを使って力を加えた。繊維にずりがかかる方向に圧力をかけると、ガルバノメーターの振れが左右に変わることが分かった。木材片とロッシェル塩結晶を直列に固定して、木材に交流電圧を加えると、その振動をロッシェル塩で検出することが出来た。正圧電効果と逆圧電効果の係数が一致した時、木材の圧電効果の存在を確信した。 圧電高分子という私の研究人生での最大の課題が決まった瞬間であった。

木材の圧電性には、英国の Forest Research Establishment から疑義が出されていた。1965 年アメリカの Pullman で木材非破壊試験会議が開かれた時、木材の圧電気について講演を招待された。その時ドイツの木材物理学者 Prof. Kollmann が、あなたの講演を聞いて木材の圧電気が事実であることが分かったと言われた。Prof. Kollmann はその著書に私の研究結果を引用し、また 1966 年に設立された International Academy of Wood Science (IAWS) の Fellow に私を選任された。1967 年オーストリアの Saltzburg で開かれた IAWS の第 1 回の会議で木材の圧電気の講演を行った。会場となったモーツァルト記念ホールは美しい花々で飾られた公園の中にあった。私が生涯忘れることの出来ない光栄である。

古材の弾性率と圧電率（和 16）小原二郎 (1955)、岡本一 (1955)

京都大学の小原二郎先生と岡本一先生が古材の機械的性質の年代変化を調べる為に、奈良の法隆寺、宇治の平等院、京都の高台寺などの寺院からヒノキの古材を収集しておられた。幸運にもこれらの古材の試料を頂いて、弾性率と圧電率を振動法で測定することが出来た。木曾産の新

材に比べると、ヒノキ材の弾性率と圧電率は約 300 年まで増加し、以後減少するが、約 1300 年後は新材とほぼ同じ値を保つ。この変化は常温でのセルロースの結晶化と熱分解が重なったためと結論された。小原先生はその後千葉大学に移られ、家具の設計など人間工学の研究で有名になられた。懐かしい方である。

骨の圧電気 (8, 19)　保田岩夫（1955）

1955 年、京都府立医科大学の保田岩夫先生が小林理研を訪ねてこられた。大腿骨の片方を固定し骨の表面と固定端に電極をつける。骨の自由端を叩いたり曲げたりすると、電圧が発生し凹部が負に凸部が正に帯電する。あなたが J.Phys.Soc.Jpn に発表した木材の圧電気の論文を読んだ。骨の圧電気の研究を一緒にやらないかという申し出でを受けた。植物の木材に圧電気があるのなら動物の骨にも圧電気があると私は確信した。木材に使ったと同じ装置で牛、馬、人の骨に圧電正効果と逆効果を証明することが出来た。また保田先生から派遣された後藤亮太先生の協力を得て、腱の圧電効果が水晶に匹敵することを発見した。乾燥した木材や骨のずり圧電率の値は約 d_{14}= -0.1pC/N であるが、乾燥した腱のずり圧電率は約 d_{14}= -2.0 pC/N である。骨はコラーゲン繊維と hydroxyapatite との複合体であるが、腱は大部分の組成が配向したコラーゲン繊維である。

木材の主成分はセルロースであるが、ラミーや麻糸を一軸配向した試料でも圧電効果が観測された。絹糸（シルクフィブロイン）や羊毛（ケラチン）にも圧電効果が測定された。従って、圧電効果は動植物の構造物質である多糖類とたんぱく質に普遍的に存在する効果ではないかと推論された。その頃理論物理の押田勇雄先生と「万物ピエゾ論」の気炎を上げたことがある。万物は大げさであるが、その後の研究で核酸 DNA にも圧電気は確認されたし、多くの合成高分子にも圧電気が発見された。

保田先生との出会いで始まった骨の圧電気の研究は多くの幸運をもたらしてくれた。骨と腱の圧電気について J.Phys.Soc.Jpn (8) と Jpn.J.Appl.Phys. (19) に発表した保田先生と共著の英語論文が海外で注目を浴びたことである。1964 年 New York Univ. の Prof. Shamos と Prof. Lavine が骨の圧電気の研究を始めたとき、私は Visiting Professor として招待され、家族とともに 8 ヶ月間 New York に滞在することが出来た。

保田岩夫先生は整形外科が専門であったので、骨の圧電気には生理的な意味があると考えられた。ウサギの大腿骨にステンレス線を巻いて負電極とし、少しはなれた骨膜に近い筋肉のなかに陽電極を置いて、約 1 μ A の直流電流を流し続けると、約一週間後、負電極から陽電極に向かって仮骨が成長していることが X 線で確かめられた。骨が電気刺激によって成長するという重要な研究の始まりであった。

保田先生の電気的仮骨の研究が海外の整形外科の分野で有名になるにつれて、Fukada and Yasuda の J. Physical Society of Japan の論文が度々引用されるようになった。おそらく数百回を超え

ると想像されるが、その半数ぐらいは J, Physiological Society of Japan と誤記されていた。実際には読まれなかったのかもしれない。

British Council Scholar (1956-58) R.W.B.Stephens(1956), A. Charlesby(1956)

小林理研での思い出として忘れられないのは、英国への留学である。1955 年頃、高分子への放射線照射効果の研究が注目され始めた。英国のハーウエル原子力研究所の Dr. A. Charlesby が原子炉内で照射した polyethylene の棒状試料を小林理研に送ってくれた。照射の 1 単位は原子炉内 1 日の線量であった。木材に使ったのと同じ装置で粘弾性を調べてみると、約 10 日間の照射によってポリエチレンがプラスチックの状態からゴムのように軟らかくなりさらにガラス状に変化することが分かった。放射線による分子間の架橋結合による変化である。また摩擦帯電の値が負から正に次第に変化することもわかった。

英国政府留学生の募集があったので思い切って応募した。大学の卒論を指導していただいた茅誠司先生が審査委員会の中に居られたので、後から聞いてみたら英語はまぁまぁだが筋は良いそうだと励ましてくださった。幸いに London の Imperial College of Science and Technology の Dr.R.W.B.Stephens　の研究室に滞在して、Dr.A.Charlesby　の指導を受けながら研究することができた。Stephens 先生は音響学で有名な方で、その研究室からは英米の著名な音響学者が多数輩出している。非常に親切な先生で、帰国後も London や東京で何度もお会いした。米国音響学会で金メダルを受賞された後、London のお宅をお訪ねしたときの Stephens ご夫妻の写真が今も残っている。

原子炉照射したポリエチレンや Co^{60} の γ 線照射のポリエステルについて粘弾性の変化を研究した。帰国後、日本でも放射線高分子の研究が盛んになり、高分子学会の荒井敬吉さんが応援をしてくださった。化学工業会社の協力もあって、日本放射線高分子研究協会が発足し、理化学研究所の傍の東京研究所に Van de Graaf 加速器や Co^{60} の線源が設置された。所長の篠原健一先生にお目にかかったのもこの頃であった。

脂肪の粘弾性　（和 31）　曽根敏麿 (1958)、福島正義 (1958)

雪印乳業研究所の委託研究として、曽根敏麿さんと福島正義さんと、バター、チーズなどの乳製品のレオロジーの研究を行った。曽根さんはバターの粘弾性と tryglyceride の結晶性との関連を見出した。また食品レオロジーの著書も書かれた。福島さんはバターをロールで練るとき、縞模様が現れる興味深い現象を発見した。後年東京都立大学の山本三三三さんと理論解析を行った。その頃岡小天先生がレオロジーの測定で慣性を考慮する理論を展開しておられた。平行板プラストメータによる脂肪の粘弾性について、岡先生と共著の唯一の論文が残っている。岡先生とはバイオレオロジーの分野で長年親しくご指導をいただいたので、初期の時代の共著論文は大変に懐かしい。

この頃は北大の中川鶴太郎、東大の神戸博太郎、京大の小野木重治先生達がレオロジーの研究を盛んに始められていた。変形と流動の科学、レオロジーは高分子科学にとって重要な学問であり、現在も盛んな研究活動が続けられている。私は食品や血液など高分子と境界を接する異分野でレオロジーの研究を行うことになった。

英国の Dairy Product Research Institute の Dr.G. Scott Blair は牛乳やチーズのレオロジー研究の先駆者であった。生体高分子の圧電現象に興味を持たれ、その著書で electrorheology と名付けて紹介してくださった。

動的粘弾性測定器 (16)　伊達宗宏 (1959)

伊達宗宏さんは学習院大学の卒論のときから始まって、小林理研、理研、定年後再び小林理研と終生の共同研究者である。電気回路やコンピューターに精通し、独特のアイディアに富む非凡な才能の持主である。また謙虚で温厚な人柄のため多くの人から敬愛されている。私の研究の大部分は伊達さんとの二人三脚の仕事であり、伊達さんの協力がなければ私の研究はなかったかもしれない。心からの感謝を捧げる。

1960 年頃には高分子の繊維やフィルムの動的粘弾性の測定器は市販されていなかった。九州大学の高柳素夫先生がフイルムに強制振動を与えながら、応力と歪を測り、弾性率と弾性損失角を測定する tan δ メーターを発表された。これに刺激されてフィルムの動的弾性率の実部と虚部を振動数と温度の関数として自動的に測定する装置を伊達さんが完成した。更に圧電率と誘電率の実部と虚部の自動測定の機能も追加され、この装置は研究室の最も重要な研究機器となった。現在も東洋精機製作所で Reolograph-solid として市販されている。国内国外を含めて 100 ヶ所以上の研究室で使われているのは大変に嬉しいことである。東洋精機製作所の池田勝則さん、石田勝巳さんその他の方々の長年にわたるご協力に厚く感謝する。伊達さんはその後も液体の動的粘弾性の測定器を始めとして、新しいアイディアに基づく測定器を考案し、理化学研究所の工作技術室でも有名になった。

圧電性高分子の大部分は圧電性をもつ結晶相と圧電性をもたない非結晶相の複合体である。伊達さんは圧電性を持つ球が非圧電性の媒体に分散している球状分散系の圧電理論を展開した (M.Date, Polymer J.8,60,1976)。この理論は種々の高分子圧電分散の実験結果を説明する重要な指針になった。

小試料血液粘度計（和 55）　伊部高由 (1966)

河合先生のアイディアにもとづいて、注射器に二本の針をつけ、一方からは空気を他方からは液体を吸い上げその量を比較する原理で、1cm^3 ほどの小試料の液体に使える粘度計を試作することができた。伊部さんはこの簡易粘度計を使って、横浜の大沢病院で大勢の患者さんの血液粘度の統計的測定を行った。また東京大学の渥美和彦先生と協力して、犬の頚静脈で in vivo の

血液粘度を測定することに成功した。この研究についてはリオン（株）の庄野久男さんにもお世話になった。

血液のレオロジーに関心が集まり始めた時期であった。1993 年に Boston の International Congress of Rheology で Hemorheology（血液レオロジー）のシンポジュームが開催された。岡先生と一緒にこの会に出席し、小試料血液粘度計の研究を発表した。その時の座長が California Institute of Technology の Prof. H.Wayland であった。Prof.Wayland はその後たびたび日本を訪れ、hemorheology に関する日米セミナーも開催された。貴重な出会いの思い出である。

伊部さんはその後、河合先生の下で、高分子エレクトレットについて詳細な研究を行い、リオンにエレクトレットマイクロホンの技術の基礎を築かれた。最近までリオンの専務取締役として活躍された。私は大変なお世話になったことを感謝している。

振動板粘度計と静電気測定器（和 22）大野寿彦 (1956)

現場用の粘度計として、振動板粘度計を試作したが、リオンの大野寿彦さんや清水修平さんのお世話になった。大野さんは簡単な回転式粘度計を市販することに成功された。また回転式静電気測定器の市販にも成功された。測定器の開発は新しい研究に必須の武器であるが、現場で実用されれば社会貢献の手段にもなる。

小林理研で思い出す研究

上に述べた研究以外にも小林理研ではいろいろの研究を体験した。私はまだ若く仕事の面でも人付き合いの面でも未熟であった。1952 年頃アメリカでマルカイトという電気を通すプラスチックスが出現したというニュースがあった。実現の可能性は別として面白いというので、小川智哉さんとパラフィンにカーボンブラックを懸濁した液体の電気伝導度を測定したことがある（和 9）。今流行りの electrorheology や導電性高分子の入門であったかもしれない。

植松淑子さんは高分子レオロジーの女性科学者としてもっとも早く頭角をあらわした方である。その結晶ゲル化の理論は後に血液レオロジーでフィブリンのゲル化を考察する際に大変役に立った。最近東京工芸大学の教授を定年退職された事を知り、時の流れの速さを改めて感じた。

1962 年、液体の弾性による法線応力が注目されていた時に、幸いにも小林理研で Weissenberg Rheogoniometer を英国から初めて輸入することが出来た。鈴木邦夫さんがシリコンオイルなどの法線応力の測定に成功した。（和 51） 非線形レオロジーの研究の始めであった。

固体の動的粘弾性を音響振動数範囲で測定するために Fitzgerald の装置がある。1960 年頃、この電磁変換式粘弾性測定器の試作に繊維工業試験所の小川成夫さん、畠山立子さんたちと取り組んだ。しかし難しい装置で失敗に終わった。100 - 5000 Hz での粘弾性の測定器は多年の宿題

である。最近のレーザードップラー法を利用すれば実現できるのではないかと思っている。

放射線照射効果の研究は興味があった。甲野格さんは日本皮革研究所に就職したが、コラーゲンの希薄溶液へのガンマ線照射の効果 (37) をレオロジーの方法で研究した。

日本油脂の増沢光信さんは小林理研と理研の両方の研究室に来られて、トリグリセライドの放射線照射効果 (22) やトリステアリン・トリオレイン系のレオロジーについて研究された（和54）。

河合研究室で同門であった時田昇さんは懐かしい人である。繊維の粘弾性の研究をされたが、その頃始まったばかりの核磁気共鳴装置を自作して高分子の研究を行われた。その後早稲田大学に招かれたが、アメリカに渡って永住され、最近まで Cabot で活躍されていた。何度か connecticut のお宅を訪ねたことがある。在米の高分子科学者として有名な方である。弟さんの時田保夫さんは小林理研の所長をされた後、今は監事を勤めておられる。

理化学研究所

理化学研究所では 1960 年ごろから、高分子物理研究室で岩柳茂夫先生が高分子の研究を始めて居られた。PMMA の側鎖分散から始まる高分子の緩和現象の理論と実験は大変魅力のあるものであった。秀島光夫、岡野光治さんなどのほか、日本大学の和田英一先生や東京大学の和田八三久先生、古賀正三先生などがセミナーに参加されて居り、高分子物理研究の中心であった。

私は放射線高分子の研究を通して原子物理研究室の篠原健一先生とお会いした。先生のお招きで理研の嘱託となり、高松俊昭さんの放射線グラフト重合の研究をお手伝いした。その頃は小林理研が規模を縮小し始めた時代であったが、篠原先生と理研理事の菅義夫先生から理化学研究所へ転職するお招きをいただいた。

大学卒業以来指導していただいた河合先生に、理研に換ってもよいですかとお伺いしたら即答はなさらなかった。3 日ほど後、実験室の窓の外に立って、行っても良いとおっしゃったお姿を今でも憶えている。1963 年 4 月に私は理研に入所し、同時に伊達さんも小林理研から理研に移った。

理化学研究所は戦後株式会社科学研究所となり、経営の苦難をなめたが、1958 年に科学技術庁傘下の特殊法人となり、1966 年からは駒込から和光市に移転した。Max Plank Institute を理想とする自由な研究の理想の場所であった。1966 年 4 月に篠原先生が定年退職された後、原子物理研究室の流れを継いで、放射線化学研究室の主任研究員に今村昌先生が就任し、生体高分子物理研究室の主任研究員に私が就任した。1980 年定年前に理事に任命され、1984 年に退職した。その間約 20 年間思う存分研究に専念できたことは大変な幸せであった。

エレクトレット (42)　高松俊昭（1960）

上野の科学博物館に江口エレクトレットが保管されている。厚さ 1cm 直径 20cm の円板である。1920 年頃江口元太郎がカルナウバ蝋と松脂の等量混合体に溶融状態で高電界を加えたまま冷却することによって、両面に正負の電荷が安定に保存されることを見出した。理研では西川正治先生や数元伊之助さんがエレクトレットの研究を続けてきた。高松さんは江口エレクトレットの表面電荷の測定を行い、作成後 50 年経過しても約 1/7 の電荷が保存されていることや、時間の経過と共にヘテロ電荷からホモ電荷に変化することを観測した。エレクトレットの安定性についての日本で無ければ出来ない研究であった。（高松俊昭、数元伊之助 . 理研報告 . 45,141,1969.）

合成高分子のエレクトレットを加熱すると、分子運動が活発になるにつれてイオンが動いたり、双極子が再配向したりする。高松さんはこの熱刺激電流の研究を多くの高分子について活発に行った。エレクトレット熱分析装置は東洋精機製作所によって市販されている。高松さんはまたガンマ線を用いるグラフト共重合の研究に成果を挙げ、有孔テフロン管に親水性高分子をグラフト重合して抗血栓性を付与するなどの研究でも注目された。研究室では毎年大勢の卒論学生の指導に当られた。精力的に仕事に打ち込む真摯な研究一筋の態度は理研の研究者の真髄を示すものであった。

血液凝固のレオロジー (30)　貝原　真　(1964)

レオロジーは流動と変形の科学である。生物レオロジーで身近な例は血液の流動と血管の収縮である。ゾルゲル変換の動的測定の例として、血液凝固のレオロジーは非常に興味が有り、また医学的にも重要なテーマであった。研究室には伊達さんが開発した液体の動的粘弾性の測定器があった。化学出身の貝原さんが血液レオロジーの研究に参加されたことは大変な幸運であった。

ドイツの Prof. Hartert が開発した Thromboelastograph が血液凝固能の測定器として臨床に使われていた。理研の同心円筒型の測定器では血液凝固の過程での動的弾性率と動的粘性率の時間変化を定量的に測定することができた。凝固していない血液の非ニュートン粘性の研究も行った。血液凝固は本質的には fibrinogen が酵素 thrombin との作用で fibrin というゲル構造をつくる反応である。しかし実際には、赤血球、白血球、血小板などの影響を受ける生理学的反応であり、これを力学的測定から追究するという複雑な課題である。貝原さんはこの広範な問題に対して忍耐強く周到で行き届いた研究を進められた。また近年は減衰振動型レオメーターを駆使して、ゲル化が起きる前の酵素反応期間の力学的測定に成功し臨床医学的に有用な成果を挙げている。最近、血液凝固第 9 因子活性化酵素が赤血球膜に存在することを発見し、その同定に成功されたのは大きな業績である。

バイオレオロジーは私の研究活動の重要な分野であったが、その大部分は貝原さんに負うものである。最近、貝原さんは日本バイオレオロジー学会の会長を勤められているが、落ち着いた

大人の風格があり感心させられている。

バイオレオロジー　　磯貝行秀　(1966)

1965 年頃から生物レオロジーに関する研究が盛んになった。特に血液のレオロジーに関して、慈恵会医科大学の磯貝行秀先生や順天堂大学の東健彦先生が研究室に来られて、医学的な知識をいろいろ教えていただいたことは大変有益であった。磯貝先生は内科学がご専門で、血液の粘弾性と糖尿病との関係について精力的な研究を行われた。

1981 年に国際バイオレオロジー会議が日本で開かれた時、岡小天先生が名誉会長、私が会長であったが、慈恵医科大学が会場になり磯貝先生に大変なお世話をいただいた。1992 年に日本で二度目の国際バイオレオロジー会議が開かれた時には磯貝先生が会長になられ、横浜パシフィコで盛大な会議を開催された。その後磯貝先生は国際バイオレオロジー学会の会長を勤められ、1995 年アメリカの Big Sky で国際バイオレオロジー会議が行はれた時にはポアズイユ賞の審査委員長を勤められた。私がその時の受賞者になったことは大変な光栄であった。

日本バイオレオロジー学会

1977 年に岡小天先生の呼びかけで日本バイオレオロジー学会が誕生した。物理、工学系の研究者と医学、生物系の研究者とが交流する学会であり、多方面の方たちと知り合う機会となった。学会の事務局の世話をされた慶応大学の松信八十男先生、群馬県立循環器病センターの谷口興一先生をはじめ、毎年の学会の会長をされた、東健彦（信州大）、梶谷文彦（川崎医大）、神谷瞭（東大）、浅野牧茂（公衆衛生院）、志賀健 (大阪大)、松田保（金沢大）、大島宣雄、（筑波大）、峰下雄（手塚山短大）、平川千里（岐阜大）、菅原基晃（東京女子医大）、貝原学、（帝京大）、辻隆之（国循セ）、増田善昭（千葉大）などなどの先生方に思い出はつきない。

木材圧電率の温度依存性　（28）　平井信之　(1964)

平井信之さんは東大農学部から理研の研究室に来られてから、現在までづっと木材の圧電性の研究を続けて居られる。木材の圧電効果は他の場所ではあまり研究する人が居なかったので、平井さんが研究を続けてくださることは大変嬉しかった。セルロースの誘導体に大きな圧電率のあることを見出された。現在は、静岡大学で学部長の激務につかれているようで、ご健康を祈念する。

酢酸セルロースの圧電温度分散　（和 70）　江村恒夫 (1964)

木材のずり圧電率は約 d_{14}=-0.1pC/N であるが、酢酸セルロースの延伸膜のずり圧電率は約 d_{14}=-0.5pC/N で木材の５倍であった。江村さんは今東京農工大学の原子核物理の教授になられた。

New York University (1965 Aug. – 1966 Mar.)　M.H.Shamos, L.Lavine

New York University 物理学科の Prof. Shamos と State University of New York 整形外科の

Prof. L. Lavine が骨の圧電気の研究を始めるために、1965 年に私を客員教授に招いてくれた。Washington Square の傍のアパートの 15 階に家内と娘とともに住み、当時は平和であった New York の町を楽しむことが出来た。研究室で始めた骨の圧電率や誘電率の測定に協力した。保田先生も来られて、電流による骨の成長の実験を指導された。保田先生が New York に滞在中に大停電が起きたのも懐かしい思い出である。

Colombia University の Prof.C.A.L.Bassett や Prof.A.A.Pilla, State University of New York の Prof.R.O.Becker など骨の電気刺激の研究を通じて知己となった。また New York Medical College の Prof.A.L.Copley や Columbia University の Prof.S.Chien などバイオレオロジーで有名な科学者とも知り合うことができた。8 ヶ月の海外滞在であったが、その後多くの外国の学者と国際的に交流する発端となった。

血管壁の圧電気 (33)　　原田清志 (1966)

コラーゲンやケラチンの圧電気の研究から種々の生体組織にも圧電気のあることが予想された。血管の壁はコラーゲン、エラスチン、筋たんぱく質から成る。豚の血管をアルコールにつけて脱水し延伸した膜を作り、動的歪みを与えて、圧電率を測定することが出来た。気管や小腸壁でも圧電性を観測した。元気で好奇心に富む原田さんのおかげで、珍しい研究ができた。延伸した血管壁の試料では、木材なみの d_{14} = -0.1 pC/N という圧電率が得られた。

PBLG の圧電温度分散　(49) 古永捷慶　(1966)

生体高分子に圧電性のあることは確認されたので、合成高分子の圧電性に研究を進めた。Poly- γ -methyl-L-glutamate (PMLG) や Poly- γ -benzyl-L-glutamate (PBLG) などの polypeptide が市販で入手できた。これらを溶媒から成膜して延伸した。古永さんは PBLG の圧電率が結晶化度と配向度に比例することを見出した。また圧電率の温度変化で、側鎖の運動によると思われる分散を 10℃ と 70℃ の二つの温度で観測した。最近東京工業大学の安部明廣先生の講演で、ある温度でヘリックス分子が右巻きから左巻きに変化する現象が起こることを知った。このことと関係があるかもしれないと想像している。

信州大学に居られた呉祐吉先生が PBLG のヘリックス溶液を約 1Tesla の強磁場に置くことで高度に配向したフィルムを作られた。この試料では d_{14} = -5 pC/N という高い圧電率が得られた。コラーゲンの 2.5 倍である。このとき信州大学の飯塚英策さんにもお世話になった。飯塚さんはシルクフィブロインのレオロジーで良い仕事をされた方である。古永さんは磁場配向の PBLG でも特異な温度分散を観測した。若くして早世されたのは大変残念である。

DNA の圧電性 (52) 安藤穣　(1967)

炭水化物とたんぱく質に圧電性があることがわかったので、核酸 (DNA) にも圧電性があるに違いないと思った。子牛胸腺の繊維状 DNA が市販されていた。安藤さんは DNA のフィルムを

苦心して作り圧電率の測定に成功した。d_{14} = -0.01 pC/N 位の小さい値であったが、-50℃ で d_{14} の符号が負から正に変わるという興味深い結果を得た。安藤さんはその後含水率の異なる DNA について分子運動が圧電率に及ぼす影響について詳しい研究を行った (79)。

青山学院大学に移った後、Poly- β -hydroxybutylate (PHB) について配向非結晶相の圧電率を丁寧な実験結果から複合体理論を用いて導いた。私がドイツに滞在中に協力を得たのは有り難かった。PHB では d_{14} = -1 pC/N である。

DNA の圧電性については我々の研究以外には行われていないと思う。最近は各種 DNA を入手することは容易になったし、Poly-A などの合成核酸も市販されている。試料の作成に工夫が必要であろうが、今後に残された極めて興味深い研究対象である。

β型ポリペプタイドの圧電性 （45) 高下（木村）三郎 （1967)

Polypeptide には分子がヘリックスを巻く α 型のほかに、分子が平行に配向した β 型がある。高下さんは Poly- γ -methyl-L-glutamate (PMLG) の β 型配向フィルムの圧電率を始めて測定した。また β 型 polypeptide の分子鎖の間にずり歪みを与えた時、CONH の面が回転する角度を計算して、β 型 polypeptide 結晶のずり圧電率を理論的に推定した。d_{14} =-10pC/N という大きい値が得られた。高下さんの成果は、高分子結晶の圧電率を理論的に計算する初めての試みで高く評価される。

その頃東京工業大学から東京農工大学に移られた神原周先生がテレビで高分子の話をするときに、圧電気の話をするように私も呼び出された。高下さんが作ってくれた α ポリペプチドの模型が大変役に立った。

光学活性高分子の圧電性 (31) 古川猛夫 （1968)

生体高分子の分子構造には水素結合に関与する NHCO などの双極子があり、その内部回転が圧電性の起因であると考えられた。またその配向状態には $D_{¥}$ の対称性が存在し、光学活性をもつ。生体由来でなく合成された高分子でも、その構造が光学活性の対称性をもつならば圧電性を発現する可能性がある。東京大学の鶴田禎三先生から合成された Polypropylene Oxide のフィルムを頂くことが出来た。この試料を用いて古川さんは圧電率が約 d_{14}=-0.1pC/N であること、局所分散 -130℃ および主分散 -60℃ の温度で圧電率の緩和が起こることを見出した。

古川さんはまた合成ペプチドである PBLG について、圧電緩和の実験及び理論で大きな成果を挙げた。1969 年に河合先生が PVDF の圧電性を発見された後は、理論実験の両面で PVDF 及びその共重合体の強誘電性の確立に貢献された。現在は東京理科大学化学科の教授であるが、2008 年日本で開催される International Symposium on Electrets を会長として主催することが決まっている。江口エレクトレットの伝統に基づいて高分子の圧電性、強誘電性の研究がわが国

で大きく発展することを期待している。

PVDF の圧電効果の発見　　河合平司

木材や骨の圧電気の研究をしていた頃、東京大学の誘電体研究で有名な高橋秀俊先生から、ずりの圧電性ではなく伸びの圧電性を示す高分子はないのですかと質問されたことがある。河合平司先生もずり圧電の高分子だけでは満足されなかった。小林理研の定年 5 年前からこの研究に集中された。まづ振動実験の装置を自分で作り、いろいろの種類の高分子のフィルムを集められた。フィルムを延伸し高電圧を加えて分極し、伸び圧電の効果を調べられた。10 種類以上の高分子の中から、ポリフッ化ビニリデン（PVDF）の延伸分極膜に d_{31} ＝ 5pC/N という大きな伸び圧電率を発見された。更にこの圧電率は残留分極と電歪定数の積によるという理論も展開された。このお仕事が高分子強誘電体が誕生する発端であった。1969 年に発表された河合先生の論文、Jpn.J.Appl.Phys.8,975 (1969)、はその後各国の多数の研究者に引用されており、引用数はおそらく数 1000 を超えると想像される。応用の面からも圧電セラミックと並んで圧電高分子が注目される端緒となった。河合先生の PVDF 圧電性の発見は、serendipity（偶然の大発見の才能）の好例といわれることもあるが、圧電と音響の長年の経験に基づいて、現象の真髄を見抜く能力と集中した努力の凝集した精華であると私には思われる。

PVDF の逆圧電効果　(66) 押木満雅　(1968)

河合平司先生が PVDF の延伸分極フィルムに大きな圧電率のあることを発見されたころ、私は河合先生とよくお会いしていたので、PVDF の圧電率の異方性や温度変化の測定について高下さんと一緒に報告することが出来た (35)。また PVDF の逆圧電効果も測定しなければならないと思った。

PVDF フィルムに交流電界を加えて動的歪みを測る逆圧電効果の装置を押木満雅さんが苦労して組み立ててくれた。複素圧電率、複素電歪率、複素誘電率の温度変化や時間変化が測定され、d_{31}=10pC/N の値が得られた。また非平衡熱力学を用いて、複素圧電率や複素電歪率の理論式を導くことにも成功した。理論と実験が揃い、学習院大学理学部物理学科の学位論文として価値あるものであった。

コラーゲンの圧電分散（和 90）藤川（熊川）昇 (1968)

骨の圧電性はコラーゲンによる。日本皮革研究所の甲野格さんからコラーゲンのフィルムをもらい、その複素圧電率の温度分散を熊川さんが測定した。コラーゲンが変性したゼラチンのフィルムでは圧電率の値は小さいが、温度変化はコラーゲンに似ていることがわかった。

その頃光弾性の研究で有名な西田正孝先生から、先生が編集されている「応力と歪」という雑誌に投稿して欲しいと依頼された。コラーゲンの動的圧電分極という熊川さんとの共著の論文が懐かしく思い出される。

筋肉の圧電性　(41)　植田浩義 (1969)

筋肉はアクチンとミオシンという繊維蛋白質から成る。東京大学の丸山工作先生からウサギの腰筋をいただいた。植田さんは乾燥した筋肉の圧電率が約 d_{14} = -0.1 pC/N であることを見出した。また圧電異方性や温度変化も観測した。その後、アクチンとミオシンのフィルムについても測定し、筋肉よりもそれぞれ一桁及び二桁小さい圧電率を観測した (47)。

植田さんはコラーゲンとゼラチンの系についても研究を続けた。特に poly- γ -methyl-L-glutamate の ethylene dichloride 溶液での液晶配向状態での圧電性の観測は新奇性があり注目すべき結果であると思っている (123)。

米国に長く留学されて帰国後新しい事業を展開されたと聞いている。成功をお祈りしたい。

ポリペプタイドのマイクロホン　(29) 田村雅彦 (1967)

パイオニアの田村雅彦さんが高分子フィルムの圧電性に興味を持ってくださった。ドーム状の振動板の中心と周辺の間に、ポリペプタイド PMLG フィルムを貼り渡して、マイクロホンを試作してくださった。実際に講演に使うことが出来た。理化学研究所へ当時の皇太子殿下が見学に見えたとき、理事長の赤堀四郎先生とともに、ポリペプタイドのフィルムとそのマイクロホンをご覧に入れたことがある。

1968 年に東京で第 6 回国際音響学会が開かれた時、田村さんと一緒にポリペプタイドのマイクロホンについて研究発表をした。座長をされた Stephens 先生に誉めてもらって嬉しかったことを覚えている。

PVDF の発見以後は田村さんはご自分でも研究を進められ、1975 年には PVDF 圧電フィルムを用いたマイクロホン､ヘッドホン､高音スピーカーの新製品を市場に出された。私も高分子ヘッドホンで音楽を楽しむことが出来た。圧電高分子の音響分野への初めての応用であり、圧電高分子の研究者にとって大きな朗報であった。しかし数年で市場から姿を消したのは残念であった。

圧電緩和のモデル実験　(61) 山上洋之 (1971)

圧電性を持つ結晶相は緩和しないが、結晶相を取り囲む圧電性の無い非結晶相は温度や振動数に対して緩和現象を示す。圧電性の絹糸を無定形のエポキシやポリビニルアルコールで被覆した系で圧電率、誘電率、弾性率の測定を行い、モデル計算の結果と比較した。

山上さんはリオンに就職しエレクトレットの研究を続けた。後年リオンでいろいろお世話になった。

三酢酸セルロースの圧電性　(80) 佐々木伸太郎 (1973)

セルロースの誘導体で圧電性がどう変化するかに興味があった。佐々木さんは三酢酸セルロースのフィルムの d_{14} が温度の上昇につれて負から正に変化することを見出した。また水分が大きな影響を持つことも見出した。お得意のX線解析で結晶部分にも水分子が入り、結晶格子が膨張することを証明した。温度上昇による圧電率の符号の反転は興味ある現象で、理論的な解明が残されている課題である。

University of Sao Paulo, Sao Carlos (1974 Apr.-Sep.) S.Mascarenhas

1974 年に Brazil の Sao Paulo University に Visiting　Professor として招待され、Sao Paulo の郊外にある SaoCarlos に 8 ヶ月滞在した。Brazil はエレクトレットの材料であるカルナウバ蝋の特産地である。Austria から Sao Carlos に移住した Prof. Gross は誘電体やエレクトレットの著名な学者であった。物理学科の Prof.Mascarenhas　は生体高分子をエレクトレット化して熱刺激電流を測定し、バイオエレクトレットと名付けていた。

エレクトレットや高分子圧電気の講義をした。英語の講義ははじめてであったが、アメリカ人の Dr.R.L.Zimmerman が親切に手伝ってくれ、ノートを取って本の形にまとめてくれた。その時の学生だった人達が、最近はエレクトレット国際会議などで盛んに活躍しているのは嬉しいことである。

日本から圧電気を測定する回路を持参して実験も始めた。牛の角のケラチンの圧電率が変性によって変化する論文を書いた (67)。またポリ塩化ビニルやポリエチレンなどの高分子フィルムに直流バイアス電界を加えると電歪との結合で圧電効果が現れるという実験の論文も書いた (68)。

Prof. Mascarenhas は江口エレクトレットのことをよく知っていて、海軍大学教授だった江口元太郎先生の写真が手に入らないかと依頼してきた。ご長男の九州大学教授の江口鉄男先生にお願いしたら、江口元太郎先生ご夫妻の結婚式の写真が送られてきた。この写真は今でも Sao Carlos の物理教室の壁に飾られていると思う。

ブラジルの田舎の町は広々としてのどかであった。農作物のほとんどは日本から移住した人達が作っているそうで、大学生のほとんどは二世であった。Sao Paulo 市に出ると、赤い鳥居の立つ日本人町があり、ぼた餅などの懐かしい食べ物を売っていた。

骨の圧電性の水分依存性 (124) 前田秀篤 (1975)

木材や骨の圧電率は水分が増えると減少する。結晶部の圧電分極が水分の伝導性のために打ち消されるからである。前田さんはこの複雑な問題を水分量、温度、周波数などを変えて、周到丁寧な研究を行われた。骨の 10Hz での圧電率は水分が約 30％に達すると測定できないほど小

さくなる。

1953 年に保田岩夫先生は骨の圧電気がその成長に影響すると初めて提案された。1970 年に Stockholm の Karolinska Institute の Dr.C.Eriksson は骨の流動電位が浸した液体の等電点で零になることを報告した。1975 年に University of Pennsylvania の Prof.S.L.Pollack　が骨の流動電位について活発な研究を開始した。長骨を曲げると、圧縮部から伸張部へ体液が流動し、骨の細管内面のゼータ電位に比例したイオン分極が生じる。圧電位と反対に流動電位は水分が多いほど大きくなる。生体内での骨の応力誘起電位の大部分は流動電位によるといわれるようになった。しかし、微視的に考えると、骨細胞の周囲に存在するコラーゲン繊維の圧電分極を打ち消すためにイオン電流が流れ、このイオン電流が骨細胞膜の生理活性に影響する可能性がある。

アミロースの圧電緩和 (107) 西成勝好 (1976)

セルロースと分子構造が類似しているアミロースの圧電性には興味があった。西成さんはアミロースの延伸フィルムを用いて、その圧電率が温度の上昇と共に、負から正に符号を変えて増加する緩和現象を見出した。セルロースと似た変化であった。約 -80℃ に圧電緩和、誘電緩和、弾性緩和をそれぞれ観測した。アミロース分子内のメチロール (CH_2OH) 双極子がエネルギーポテンシャルを越えて内部回転するモデルを用いて、誘電緩和強度の理論値と実験値がほぼ一致することを示した。圧電緩和の分子論は残された大きな課題であるが、初めての貴重な試みであった。

血液の非線形レオロジー (128) 杉浦嘉彦 (1976)

1976 年に高分子物理研究室の岩柳先生が定年退職され、杉浦嘉彦さんが生体高分子物理研究室に移籍された。貝原さんの血液凝固のレオロジーに関連して、血液のゲル化による動的粘弾性率の非線形項の時間変化について詳しい研究を行われた。杉浦さんは生体物理研究室とも協力して、脂質の凝集構造についても興味深い成果を挙げられた。

電荷減衰と熱刺激電流　(和 112) 奥山哲生 (1977)

早稲田大学化学科の篠原功先生には高分子学会でいろいろお世話になった。また高松さんのところへ卒論研究のために優秀な学生さんを大勢送ってくださった。奥山さんもその一人である。ポリアルキルメタクリレートの末端基をいろいろに変えると電気的特性が変化する。これらの高分子をエレクトレット化しその電荷の時間的減衰や温度を上げたときの熱刺激電流を測定した。お蔭で篠原先生との共著の論文が残った。

ポリアミドの圧電性　(96) 加藤恵士　(1977)

ポリアミドは耐熱性高分子として知られている。Poly(m-phenylene isophthalamide) (PPIA) は 450℃ が融点である。PPIA フィルムを延伸し分極処理をすることによって、伸び圧電率が観測され、d_{31} = 0.1 pC/N　の値が 200℃ の高温まで得られた。

P(VDF/TrFE) の結晶相転移 (105) 田實佳郎　(1978)

ビニリデンフロライドとトリフロロエチレンの (55/45) 共重合体は約 70℃ で圧電率や誘電率が極大値を示す。田實さんは X 線の測定から結晶の格子定数が 55℃ から 75℃ の温度域で増加し、格子歪が残留分極の二乗と電歪定数の積に比例することを見出した。P(VDF/TrFE) の結晶が強誘電相から常誘電相に転移し、70℃ が結晶のキュリー点であることを見事に示した研究である。その後田實さんは非線形誘電性の研究から、ポリウレアの強誘電性、ポリ乳酸の旋光性など活発な研究を進めている。

PVDF の赤外吸収二色性　(109) 高橋哲郎　(1979)

PVDF の分極は CF_2 双極子の配向によることが定説になっていたが、実験的な証明がなかった。伊達さんのアイデイアに基づき、CF_2 の対称振動のモーメントと非対称振動のモーメントが直交していることを利用して、赤外吸収の二色性を測定する装置を日本分光（株）で製作してもらった。高橋さんは CF_2 の赤外二色比が周期 1000 秒の三角波電界に対してヒステレシスを示し、電気分極のヒステレシスと対応するきれいな実験結果を得た。電界を加えると CF_2 双極子が回転することを見事に示したものであった。

PVDF の光電効果 (117)　雀部博之

東京農工大学に居られた雀部博之先生が分極した PVDF フィルムに光を照射すると電圧が発生するという面白い効果を発見され、共著者に私を加えて頂いた。私が定年後、雀部さんは生体高分子物理研究室の主任研究員に就任された。海外との研究交流に熱心で、理研の国際フロンティア研究システムの発足に大きく貢献された。

1984 年に科学技術広報財団の主催で米国のバイオエレクトロニックスと先端材料の視察団が組織された。私が団長、雀部さんがコーディネーターとなり、企業からは上羽良信（住友電工）、川上敞（日本石油化学）、多田純一郎（神戸製鋼）、堀内康夫（旭化成）、宮寺博（日立）の諸氏が参加した。また野崎正興、兵頭建二（三菱製紙）の二氏も臨時参加した。Biotech84 (Washington) の会議に参加した後訪問した場所を列記する。Naval Research Laboratory (Dr.F.L.Carter), National Bureau of Standards (Dr.M.G.Broadhurst, Dr.G.T.Davis), National Institutes of Health (Dr. I.Tazaki), Johns Hopkins University (Prof.R.S.Potember), University of Pennsylvania (Prof.A.G. MacDiarmid), Massachusetts Institute of Technology (Prof.G.E.Wnek), University of Massachusetts, Amherst (Prof. J.C.W.Chien), University of Utah (Prof.M.Okano), University of California, Santa Barbara (Prof.A.J.Heeger). バイオテックから分子デバイス、導電性高分子まで盛り沢山であったが報告書も印刷された。

パルス電磁場による細胞増殖 (139)　金子一郎　高橋和秀

パルス電磁場による骨折治療の装置が臨床で用いられるようになった。骨芽細胞が電気刺激で活性化されると考えられる。理研放射線生物学研究室の金子一郎先生が興味を持ってくださり、

繊維芽細胞を組織培養する間に電気刺激をして、細胞の増殖速度に対する影響を見るという生物学的に興味のある研究をすることが出来た。ハムスター繊維芽細胞 V79 を培養しながら、パルス電磁場を与え、媒体の 3H チミジン DNA への取り込み量を時間的に測って細胞増殖速度を求めた。

高橋和秀さんの協力を得て、パルス幅 25msec、パルス振動数 10 または 100Hz が有効であり、磁場強度 0.4 Gauss では 増殖促進、4 Gauss では増殖阻害が起こる結果を得た。その後、鹿児島大学整形の酒匂崇先生、松永俊二先生の骨折治療の動物実験でも、パルス電磁場の同じ波形が有効であることが示されて驚いた。Prof. Pilla 等は刺激波形に有効な " 窓 " があると述べているが、この証明は大変難しい問題であると思う。

エレクトレットフィルムによる仮骨形成 (89)　　井上四郎　大橋俊郎

保田先生を通じて、岐阜の朝日大学の井上四郎先生と大橋俊郎先生とお知り合いになった。テフロンのエレクトレットフィルムや PMLG の圧電フィルムをラットの大腿骨の周りに巻いておくと､その周囲に仮骨が生成される。エッレクトレットは電荷が減衰すると効果がなくなるが、圧電フィルムの効果はなくならない。動物の運動によってフィルムに力が働き分極を生ずる。これを打ち消す為に流れる電流が骨細胞を刺激すると考えられる。

骨と電気刺激の研究会―日本生体電気刺激研究会

1976 年に保田先生と一緒に骨の電気刺激の研究会をはじめた。第一回は京都第二赤十字病院で､第二回は理化学研究所で行った。はじめはエレクトレットや圧電気についての話であったが、次第に整形や歯科の先生がたの電流刺激による臨床の研究発表が盛んになった。

1980 年には Philadelphia で Bioelectrical Repair and Growth Society (BRAGS) という国際学会が発足した。

1983 年には第 4 回の BRAGS の会議が京都で開かれ、前年亡くなられた保田先生のために保田記念シンポジュウムを開いた。1988 年からは日本生体電気刺激研究会と改名して研究会誌も発行している。朝日大学の井上先生が編集事務の世話をされたが、最近は大橋俊郎先生が引き継がれている。

私はこの研究会を通じて大勢の整形外科や歯科の先生達と知り合いになった。保田先生とともに研究された京都第二赤十字病院の岡田皖先生、鹿児島大学の酒匂崇先生、東京大学の津山直一先生、東京医科歯科大学の古屋光太郎先生、群馬大学の五十嵐高先生、新潟大学の高橋栄明先生、東京医科大学の三浦幸雄先生、筑波大学の林浩一郎先生、日本医科大学の伊藤博元先生、神戸大学の塚本康夫先生などなど。河北総合病院の湯川佳宣先生にはオペラ観劇に誘っていただいたりお世話になった。毎年の研究会の会長をしていただいた先生方であるが、ほとんどの方が定年を

過ぎて名誉会員になられた。

この研究会は大部分の整形外科の研究者と少数の理工系の研究者が集まった、骨の電気的治療を目的とする整形外科の中の小さい専門分野の学会である。私は保田先生との共同研究が機縁となってこの研究会に参加したため、整形外科の分野の先生達から大変温かく受け入れていただき感謝している。専門分野の違う研究者の交流から新しい研究が生まれるというのは私の持論であるが、この研究会は大変楽しく学ぶことが多かった。理研で始めたパルス電磁場装置を多くの研究室で使用していただいた。物理系の学会と違って、小人数の医学系の学会では、懇親会などが華やかであるのも楽しみであった。

2004 年には第 31 回の研究会の会長を鹿児島大学の松永俊二先生が勤められる。最近の研究会は研究発表の数が減少しているようである。40 年の時間を経て、学会が成熟し平衡状態に入ったのかもしれない。初期には電気刺激で偽関節が癒合するのは驚きであった。現在では多くの電気刺激装置が存在し健康保険も適用されるようになった。一方アメリカの BRAGS の会は The Society of Physical Regulation in Biology and Medicine と改称してより基礎的な分野とより広い分野に進んでいるように見える。骨細胞に対する電界や応力の作用の分子的解明はまだ進行中である。分子生物学やバイオテクノロジーの研究者が骨と電気の相互作用という興味ある現象に関心を持つことを期待している。

歯科診療とレオロジー　　深田邦雄

1980 年頃と思うが、歯科医の深田邦雄先生が理研にお出でになりガッタパーチャのレオロジーの測定をされた。“ 抜かずに治す根管治療 ” という著書がある。歯の中心の管を丁寧にけずり菌を除いてから、温めたガッタパーチャを充填する。根気と熟練を必要とする治療法であるが、患者は歯を失わないですむ。透明な樹脂で歯のモデルをつくり研修会を開いてこの方法を普及させておられた。臨床に熱心な求道心に富む先生である。歯界展望 58,941(1981)

骨の電気刺激の研究会にも関心をもたれ、最近は応力の掛け方で歯骨が自然の力で成長する方法を治療に取り入れられている。私も患者としてお世話になった。2000 年に研修会の記念の集いがあったとき、思いがけず私に感謝状を贈っていただき大変恐縮した。

理研ライフサイエンス担当理事　(1980 – 1984)

1980 年定年を前にして理化学研究所の理事に任命された。理研は科学技術庁傘下の特殊法人であるが、ライフサイエンス推進部という事務機構があり、科学技術庁の進める生命科学推進の一端を担っていた。遺伝子組み替えの研究が急に盛んになったため、筑波に理研の支所としてライフサイエンス研究所を作ることになった。

この研究所には遺伝子組み替え実験の安全性を研究するため、微生物の漏出を完全に遮断す

る為の P4 実験室の建設が予定されていた。当時は遺伝子組み替えの研究が始まったばかりであり、危険な微生物が作られるのではないかという不安感が存在した。そのために建設予定地の周辺の住民の間に建設反対運動が起こり、谷田部町議会でも大きな議論が起こった。

予算執行の制約の為に、理研側が建設予定地にはじめて立ち入った日のことは忘れられない。住民との衝突を避けるために、前夜から理研の事務系職員の人たちが作業服姿で待機して当日未明に予定地に入り、土木業者がくい打ちと囲いを始めた。これに反発して周辺の反対の人々が抗議に集まり、シャベルカーで怪我人が出そうになった。私は立ち入りの延期を決断し、住民代表の方たちと話し合いをする約束をした。それから 3 日間 P4 実験室の安全性について理研側と住民側の話し合いが町会議員さんの立会いの下で行われた。　立ち入り騒動の日は、社会党の車がスピーカーで反対したり、新聞社のヘリコプターが飛んできたり、NHK が駒込の推進部に取材に来たり、大騒ぎになって私は悪役の顔を売った。

科学技術庁から　藤岡淳介さんが推進部長として赴任された。原子力反対運動の取りまとめの経験豊かな方であり心強い援軍であった。私は藤岡さんから対人関係が事を成就するのに如何に大切かを教えてもらった。遺伝子研究施設を作るためには谷田部町議会で建設の許可を得なくてはならない。住民からは建設反対の署名申請書が提出されていた。これに対抗するためには建設賛成の署名を集めねばならなかった。筑波には筑波大学をはじめ多数の国立研究所がある。さいわいに研究面での知り合いの人がかなりあったので、署名を集めていただくようにお願いしてまわった。大部分の研究者は遺伝子組み替え研究の重要性を認識しておられたので、筑波の研究者の皆さんのおかげで賛成の申請書を町議会に提出することが出来た。町議員の方々への藤岡さんの説得の努力が実って、矢田部町議会では 13 対 11 で建設が議決された。

20 数年前は遺伝子とか DNA という言葉はまだ新しく、農家の方々が十分に理解することは難しく、遺伝子組み替えの危険性が議論されれば不安に思われるのは当然であった。誠意を持って説明する以外に方法はなかった。不幸なことは理研のライフサイエンス研究所の建設用地が学園都市の計画段階で住宅地に隣接した場所に予定されていたことである。理研の敷地に面した道路の反対側には農林省の広大な土地があり、農林関係の研究所群と農場が広がっていた。科学技術庁の課長さんに土地の交換が出来ないかと提案したが今からでは無理だという返事であった。P4 反対の立看板が道路に沿って立ち並び、数年にわたってつくば市を騒がせる騒動であった。しかし幸にして現在は敷地一杯に研究所の建物が完成し、遺伝子組み替えの安全性の議論は終了した。理事を退職して数年後、研究所の一般公開のときに、かっての反対運動の代表者のおじさんが研究所の見学に訪れ、握手を交わしたのは嬉しかった。

現在ではスーパーストアで遺伝子組み替えの豆や野菜などの農産物が棚に並んでいる。僅か 20 年間で科学技術の進歩と社会の変化にはすさましいものがある。P4 反対運動は一体なんだったのかと思う。しかし当時は遺伝子組み替え研究所の建設は国家的要請であり特殊法人の理研の

使命であった。組織としての活動である為、理研の事務系職員の苦労は大変なものであった。理研の伝統として研究を第一とする事務部門の支援体制は研究者であった時から有り難く思っていたが、理事の立場になって事務部門の縁の下のご苦労が身にしみて分かった。藤岡さんをはじめ大勢の事務部門の方々に厚く感謝する。

私にとってはこの理事の 4 年間は世の中を勉強するかけがえのない貴重な時間であった。理研の研究室は研究には理想の場所であるが世の中からはやや隔絶されている。つくば騒動のおかげで、科学技術庁の大勢の方々、ライフサイエンスに関係した大学や研究所の大勢の科学者、財界の方々、矢田部町の役所、議員、住民の方々その他無数の人々に出会って、社会の中にいるという実感をもった。大学の卒論以来お世話になった茅誠司先生にご相談に上がった時には、ご自分の経験を話して励ましてくださった。医師会長で有名な武見太郎先生の知己を得たことも幸であった。理研理事長であった宮島龍興先生には万事につけて援助をしていただいた。理事を退任した後、大変な役に任命してすまなかったとねぎらっていただいたが、私はかけがえのない人生体験をさせていただいたことを有り難く思っている。

Technical University of Darmstadt (1986 Apr. – Sep.) G.M.Sessler

1986 年にドイツのダルムスタット工科大学の Prof. G.M.Sessler から visiting professor の招聘を受けた。アメリカの Bell Laboratories でエレクトレットマイクロホンを発明したことで有名である。理事の仕事が済み、再び実験室に戻ることが出来て嬉しかった。PVDF フィルムに電子線を打ち込みモノモルフを作った。曲げの圧電率 β_{31} と伸びの圧電率 d_{31} を測定して、それらの比例関係について簡単な理論を作った (142)。大学の傍にマチルデの丘と言う美しい公園があった。その傍の家に家族と共に住み、楽しい日を過ごすことが出来た。

University of Constance (1986 Oct.-Dec.) K.Dransfeld

ドイツとスイスとの国境にあるボーデン湖の傍に古都コンスタンツがある。夏休みの旅行でコンスタンツ大学を訪ねた時、Prof.Dransfeld から招待を受けた。Prof.Dransfeld は 1971 年に PVDF を使った超音波トランスデューサーを発表した有名な教授である。Dr.G.Von Eynatten が Conversion Electron Mossbauer Spectroscopy という方法を使って、P(VDF/TrFE) フィルムの d_{33} の精密測定に成功した (144)。フィルムの厚さ方向に 30MHz、5volt 程度の高周波電圧を加えると、メスバウアスペクトルのサイドバンドの強度が加える電圧に比例して増加する。振幅の測定精度が 0.01Å に達する。

Constance は古い歴史のある古都であるが、大学はモダンな建物が立ち並び美しいボーデン湖を見晴らすことが出来た。町のバスに乗ると、スイスの隣町に買い物に行くことも出来た。家族とともに楽しい滞在であった。

Technical University of Aachen (1987 Jan.-Feb.) G.Arlt

高分子の複素圧電率の研究を始めた頃、Prof. Arlt が見学にこられたことがある。圧電率の虚数部の測定に興味を示され、今までにない研究だと誉めていただいたことが良い励ましになった。Constance の後 Aachen に招いてくださった。Darmstadt で始めた非線形圧電率の理論を進めようとしたがうまく行かなかった。冬の Aachen は雪が深く空は雲に覆われ、厳しい寒さが続いた。家族は年末に帰国していた。Prof. Arlt が見かねて、車で迎えに来たり、自宅の食事に招いたりしてくださった。心の温かい先生であった。

Eisenhauer Medical Center (1988 Mar.-May) D.Liepsch

South Calfornia の保養地 Palm Spring の傍に Palm Desert という町がある。Eisenhauer Medical Center という大きな病院の研究所長に Munchen の Prof.Liepsch が就任した。Biorheology の国際会議で知己であった私をどういうわけか招いてくれた。広いゴルフ場のなかに美しい別荘が立ち並ぶ別世界であった。しかし夏は 40℃ を超え呼吸が苦しいほど暑くなるそうだ。

Oregon State University の Prof. G.V.F.Seaman が polystylene latex の研究と事業を始めていたが、研究所に参加した。血液のモデル液体として、polystylene 粒子と水の分散系を作った。Dextran と Ca イオンを加えて凝集粒子を作ることも出来た。濃度依存性や動的粘弾性の測定を行い、血液に似た特性をもたせることが出来た。実験に協力してくれた M. Lee さんは後にカナダで学位を取り今はアメリカで研究を続けている。約 3 ヶ月の滞在の間に、Liepsch さんの主催した国際会議で講演したり、San Diego の University of California に Prof.Fung や Prof. Schmidstein を訪ねたりした。またアメリカで初めて自動車の運転免許を取った。こわごわながら、アメリカの広い道路をドライブ出来て嬉しかった。

日本真空技術つくば超材料研究所 (1987-1998) 林 主税

東大物理の同期生である林主税さんは、日本真空技術株式会社の社長を務めながら、科学技術庁の創造科学推進事業 ERATO の超微粒子プロジェクトのリーダーとして活躍した人である。林さんは老人研究所の構想を持ち何人かの定年後の学者を技術顧問として招聘した。幸いに私もその一人に選ばれた。理研のプラズマ物理研究室の主任であった岡本耕輔さんも日本真空に居られて誘っていただいた。ドイツに行く前にしばらく茅ヶ崎の本社に通ったが、帰国後、つくばの超材料研究所に来るように所長の伊藤昭夫さんから丁重なお誘いをいただいた。そのご縁でつくば研究学園都市に 10 年ばかり住むことになった。初めて研究所に伺ったとき、ブラジルで会った塚原園子さんがおられたので驚いた。塚原さんは電気総合研究所から超材料研究所に移られ後に所長を勤められた。つくばで始めての女性研究所長である。

筑波研究コンソーシアム 河本哲三

つくば市の西に東光台研究団地がある。スタンレー電気、日本エアリキード、日本重化学工

業、日本真空技術、浜松ホトニックス、ハリマ化成、安川電機の七つの中堅企業が出資してそれぞれの研究所がある。中央に筑波研究コンソーシアムがあり、筑波学園都市の研究交流の 1 つの中心になっていた。コンソーシアムの代表の河本哲三さんは、元は科学技術庁の筑波事務所の所長であったが、ざっくばらんな人柄で研究者を含めて人々に人気があった。研究の話に素人の立場からずばりと切り込んだ質問をするが、憎まれない風格の人であった。

筑波研究コンソーシアムでは毎週木曜日の午後にフォーラムという談話会があった。いろいろな分野の活発な研究者の講演の後に簡単な夕食パーティがあり、大変楽しかった。高エネルギー物理研究所の放射光研究施設長であった高良和武先生が筑波に新しい工科大学を作る構想を持っておられた。私もお手伝いして、これからの大学のあり方について連続懇談会を開いた。現在の大学改革の大きな流れのはしりであったと思う。コンソーシアムは民間、公立の研究所、大学を含めて研究者の交流の場として大変貴重な役割を果たしていると思った。

1991 年に、河本さんの発案で、東光台の研究所から研究者の代表を集めてグループを作り、フランスの University of Bordeaux と University of Toulouse を訪問して講演をすることになった。いわば研究発表で道場破りをして、日仏の共同研究のきっかけが出来ないかという試みであった。このグループの団長に私が選ばれて、7 人の若い研究者と河本さんと一緒にフランスを訪問した。日仏双方からの研究発表の交換と研究室の見学は充実したものであった。ボルドーのワイナリーの見学をしたり、バス旅行の途中で有名なラスコーの洞窟を見学することもできた。

ボルドー大学で Prof. Etourne から Scud Kazaoui さんを紹介された。学位を得たばかりで日本に行って研究を続けたいという希望であった。帰国後、電気総合研究所の南信次先生にお願いして科学技術振興会の研究員として採用して頂くことが出来た。優秀で幸運なカザウイさんは今は産業技術総合研究所の正式所員に採用されて、日本人の奥さんと子供さんと共につくば市に住んでいる。

蒸着重合ポリ尿素膜の焦電性 (148)　高橋善和　飯島正行　(1987)

超材料研究所で、ポリイミドの蒸着重合という新しい技術を知った。二つのモノマーを真空中で蒸発させ、基板上で蒸着重合させる。任意の形の基板面を数ミクロンの厚さで被覆することができる。ポリイミドは 400℃ 以上の耐熱性を持つ。高橋善和さんと飯島正行さんが 1985 年に報告されていた。ポリイミドは無極性であるが、極性のある高分子が蒸着重合出来たら圧電性が期待できると思った。

Diamine monomer と diisocyanate monomer を蒸着重合させて、極性のある尿素結合を持つ高分子の膜が得られた。この膜に電界を加えながら加熱して分極した。ある温度で電流に極大が現れ、双極子の回転分極が起こったことを示した。分極した膜を加熱すると両面の間に電流が流れ、冷却すると電流の向きが反転した。焦電性のあることが証明されたのである。焦電率 $p = 0.2$

μ C/m^{2}K の値が約 200ºC まで安定であった。

芳香族ポリ尿素膜の圧電性 (166)　王 賢珊 (1991)

1977 年に分子科学研究所の井口洋夫先生と大阪大学の三川禮先生と一緒に中国の上海有機化学研究所を訪ねたことがある。その時自作のエレクトレットマイクロホンを持って現れたのが聞建勲さんであった。1981 年に聞さんは理研に留学し古川さんの指導で学位を取得した。1991 年に上海有機化学研究所を再び訪ねたとき聞建勲教授の紹介で王賢珊さんに出会った。王さんは日本真空の契約社員として来日し、芳香族ポリ尿素膜の蒸着重合に取り組んだ。尿素結合 NH-CO-NH は 4.9 debye という大きな双極子能率を持つ。モノマーの成分比を調整すると、圧電率 d_{31} = 10pC/N の値が約 200ºC まで保たれることが分かった。

脂肪族ポリ尿素膜の圧電性 (176) 服部 武 (1993)

脂肪族ポリ尿素の蒸着膜の作成に服部武さんが成功した。大変な努力家である服部さんは山形大学の大東弘二先生の博士課程の研究も同時に行い学位を取得された。脂肪族ポリ尿素膜の圧電率 d_{31} = 2pC/N ぐらいであったが、柔軟性のある特徴がある。

ポリ尿素の強誘電性 (194) 大東弘二

圧電高分子の研究で大きな貢献をされた大東弘二先生とは長いおつきあいで大変お世話になった。1969 年に PVDF の圧電性が報告されたが、その 2 年後には東レの研究所で世界で始めて PVDF フィルムを用いる超音波トランスデュサーの開発に成功された。山形大学教授になられてからは、VDF と TrFe の共重合体の単結晶膜の作成に成功され、圧電高分子結晶フィルムの極限的物性を解明された。

ご一緒に研究する機会はなかったが、山形大学の田實さんがポリ尿素の分極反転の研究をされたとき、共著者として、大東先生と私の名前をいれてくれたので、共著の論文が出来たのは幸であった。

ポリ乳酸膜の圧電性と骨形成 (190) 敷波保夫 (1990)

大阪高校理甲の同期生でタキロン株式会社の社長だった八木隆太郎さんから、同窓会の席で敷波保夫さんを紹介された。ポリ乳酸を生体材料として開発されていることを知った。ポリ乳酸は -O-(CH_3)CH-CO- の構造をもつ。光学活性を持つ不整炭素に極性基 CO-O がついた圧電性にもっとも有利な分子構造である。早速敷波さんにお願いして延伸したポリ -L- 乳酸 (PLLA) フィルムをいただいた。測定してみると、ずり圧電率 d_{14} = - 10 pC/N が得られた (152)。これは高分子のずり圧電率では最大の値である。

早稲田大学の小林謙三先生は結晶の光学活性を精密に測定する HAUP の方法の開発で有名である。有機物の光学活性に興味を持たれ、ポリ乳酸膜を使って、その結晶構造を決定し異常に大

きな旋光定数を発見された (184)。

猫の脛骨の骨髄に PLLA の延伸した棒を挿入すると仮骨が成長すること (190) 、兎の脛骨の周りに PLLA 延伸フィルムを固定して仮骨が成長すること (193) が実験で示された。PLLA は生体内では加水分解するので体内に放置することができる。その後、敷波さんは骨折治療の臨床材料として PLLA と hydoxyapatite の複合体を開発された。

小林理学研究所とリオン (1992-2002)　　五十嵐寿一

1992 年に小林理研の理事長の五十嵐寿一先生から、小林理研の理事にお招きをいただいた。また同時にリオン株式会社の常務取締役だった伊部高由さんからリオンの技術顧問に招いていただいた。小林理研の圧電研究室は、丸竹さん、池田さんその他の優秀な研究者が居て、圧電セラミックや強誘電結晶の研究に伝統を持っていた。しかしその頃は、落合勉さんが超音波診断装置の開発のためにリオンに出向して研究室は空席であった。五十嵐先生は超音波と圧電材料の将来の発展を希望しておられた。私は懐かしい古巣の研究所に帰ることができて何よりも幸いであった。五十嵐先生に深く感謝している。2002 年に研究所の理事とリオンの顧問は定年になったが、その後は研究所の顧問としてお世話になっている。

ポリ乳酸の圧電共鳴　(196) 落合勉　(1992)

結晶体の圧電率は、高周波の圧電共鳴を測定して決定するのが普通である。落合さんは PLLA フィルムにこの標準の方法を適用して、impedance circle から、PLLA の圧電率、誘電率、弾性率を決定した。

圧電セラミックはキュリー点が存在するために普通は圧電率の温度変化が大きい。落合さんは二種類の圧電セラミックを複合させて、高温まで温度変化のない加速度計を開発することに成功した。また透明な圧電セラミック PLZT の開発にも成功した。1999 年電気通信大学の佐々木行彦先生のお世話で学位を取得された。リオンでの 30MHz 超音波診断装置の開発にも熱心に協力された。思いがけず急逝されたのは大変残念である。

落合さんは小林理研の圧電セラミック研究の伝統をつぐ最後の人であった。人付き合いの広い人で私は大変お世話になった。超音波に関係した研究では学習院大学大学院の山本健さんが能本乙彦先生の古い文献を沢山勉強して、超音波速度と分子構造の関連と言う面白い研究をしたことを思い出す。山本さんはフランス留学の後小林理研の所員になっている。室長だった横田明則さんはリオンの取締役に移られた。

圧電材料による遮音防振　(204)　　児玉秀和　(1998)

2000 年に伊達さんが圧電体の電気的制御という画期的な論文を発表した。J.Apl. Phys.87,863(2000) 負性容量回路というフィードバック回路を圧電セラミックや圧電ポリマー

に結合すると、応力が働いたとき、逆相の電界が作用して、ひずみがコントロールされる。見かけの弾性率を負にすることもできるという面白いアイディアである。

音響インピーダンスの電気的制御も可能であるので、研究所長の山本貢平先生に騒音制御や防振の研究に協力をお願いした。山本先生の積極的なお世話で、伊達さんに加えて、研究所の木村和則さん、大久保朝直さん、リオンの児玉秀和さんのチームが出来た。木村さんと大久保さんは音響学のベテランである。児玉さんは東京理科大の古川研で圧電ポリマーで学位をとった後リオンに入社したが、現在は研究所に出向している。また学習院大学の大学院生の及川悠平さんが熱心に実験に協力している。

長い音響管の中央にドーム状のPVDFフィルムを固定する。音が来るとフイルムが振動するが、フィードバックの電圧がかかると逆相の歪が生じてフイルムの振動がなくなる。したがって単一周波数では完全に音を遮断することができる。周波数範囲の広い雑音の場合は回路の設計が難しくて、まだ10dBぐらいの減衰しか得られていない。広い面積ではさらに難しくなる。

圧電高分子の実際的応用はソナーや超音波トランスデュサーを除いては開発が遅れている。圧電フィルムの騒音遮断の実用化は成功すれば、圧電高分子の最大の応用になると思われる。幸にも、国土交通省から実用化研究費を獲得することが出来た。現在研究チームが懸命に努力中である。

高分子圧電膜による遮音の理論　(205) Pavel Mokry (2001)

早稲田大学の小林謙三先生からチェコのProf. Fousekが日本とチェコの科学交流のために日本へ留学生を送りたいが、小林理研で引き受けてくれないかという話があった。日本政府の奨学金を受けるので、公式の引受者は東京理科大学の古川猛夫教授が当り、実際の指導は小林理研で私が引受けることになった。Fousek先生の当初の目的は高分子の圧電性の物理であったが、圧電高分子の遮音への応用は最新のテーマであるので、その基礎理論を作ることをPavel Mokryさんにお願いした。

チェコのTechnical University of LiberecでPhDをとってすぐに来日したMokryさんは長身の眉目秀麗な青年であり、数学に秀でた優秀な研究者であった。途中から新婚の奥さんも来日して2年間を小林理研で過ごした。その間、山本所長をはじめ研究所の人達が親身でいろいろな世話をしていただいたことは感謝に耐えない。

湾曲した圧電高分子のフィルムに音が垂直入射した場合について、フイルムの運動方程式からはじめて、音響インピーダンスを求め、音の透過損失および吸音率の理論式を導いた。既にJAPに二編の論文が掲載された。

超磁歪材料による振動制御　(207) 関川公成　(1992)

伊達さんの圧電材料の弾性制御の方法は圧電セラミックで振動を減衰させる実験にも応用された。加振機と金属円筒の間に挿入した PZT 板に負性容量回路を接続する。PZT 板の弾性率を減少させると、全体の系の共鳴振動数が減少する。したがって、共鳴振動数よりも高い振動数では伝達される振動が減衰する。電気回路の作用で PZT が防振ゴムに変わるわけである。

1999 年頃、東京医科歯科大学に居られた増原英一先生にお会いした時、Terfenol-D という超磁歪材料を教えていただいた。超磁歪材料の円筒棒の周りにコイルをつけた actuator　が市販されている。この超磁歪アクチュエータに負性インダクタンス回路を接続すれば、超磁歪材料の弾性率が変化するので、振動制御に使えるかもしれないと考えた。

リオン研究開発部の関川公成さんが加振機と金属円筒の間に超磁歪アクチュエータを挿入して実験した。予想どうり、フィードバックを正負に切り替えることによって、系の共鳴振動数が増加または減少し、特定振動数範囲での制振に成功した。負性容量回路を拡張して負性インピーダンス回路を作ることが出来る。オペアンプ 1 個だけの比較的簡単な回路であるので、いろいろ応用が出来るかもしれない。

圧電高分子の研究課題

多数の高分子の圧電性を探索しながら実験的研究を進めてきたが、理論的な現象の解釈はまだ十分ではない。いくつかの残された研究課題を挙げてみたい。

圧電率の温度による符号反転

たんぱく質や合成 polypeptide のずり圧電性は不斉炭素に付随した双極子に起因するので光学活性と対応している。圧電率 d_{14} の符号は光学活性の L 型では負であるが、D 型では正である。ところが、多糖類の polysaccharide では圧電率 d_{14} の符号が温度の上昇とともに反転することがある。例えば、三酢酸セルロースやアミロースでは、d_{14} は -150℃ では負であるが、室温以上では正になる。アミロースの場合にはメチロール CH_2OH の回転が正の圧電率の原因であると解釈されている (107)。分子構造あるいは結晶構造の中に負の圧電機構と正の圧電機構が重なっておりそれぞれの温度変化が異なると考えられるが、まだ十分な解答は得られていない。

高分子の圧電率の値は、試料の延伸度と結晶化度に依存しており正確な値を決めることは難しい。また温度や含水率に依存する。誘電性、粘弾性とも密接に関係する。分子構造や化学修飾に敏感である。生体高分子、合成高分子を含めて、圧電性と分子構造の関係についての研究課題は無限に残されているように思われる。

高分子結晶の圧電率の理論

高分子フィルムの圧電率の最大値はその高分子の単結晶の圧電率である。高分子の分子構造

に基づいて、理論的に圧電率を計算した論文はまだ 2 編しか知らない。一つは東大の和田八三久先生の研究室で α -helix polypeptide について行われたもので、ずりの圧電率 d_{14}= -6.2pC/N が得られた。K.Namiki, R.Hayakawa and Y.Wada,. J.Poly.Sci.Phys 18,93(1980)

もう一つは、阪大の田所宏行先生の研究室で田代孝二先生が PVDF 単結晶について計算されたもので、d_{33} =-25pC/N, d_{31}=-0.25pC/N が得られた。(111) これらの値は北海道大学の小田島晟先生が X 線回折で逆圧電効果を測って求めた値とほぼ一致した。圧電性を示す高分子は多数見出されており、それぞれ分子構造や結晶構造が異なる。種々の高分子に対する結晶圧電率の定量的計算は今後に残された興味ある課題である。

圧電分散－ Nano-Piezoelectricity

固体高分子の特徴の一つはその性質が温度や測定振動数で変化することである。無定形状態では、温度の上昇と振動数の減少とは等価性がある。動的測定では、誘電率、弾性率、圧電率はそれぞれ複素数で表される。温度上昇または振動数減少とともに､誘電率は増加し位相は遅れる。逆に弾性率は減少し位相は進む。ところが、側鎖分散の起こる温度での圧電率の変化は、始め増加しついで減少する。それにつれて位相は遅れから進みに変化する。

この奇妙な圧電分散の挙動は、圧電性を持つ主分子鎖が非圧電性の側鎖の媒体の中に存在する構造によって説明されている。圧電分散では誘電緩和と弾性緩和が共存するという考えである (39)。一方、圧電相のドメインが境界域を隔てて配向するモデルを考えると弾性緩和のみでも説明することができる (84)。最近は原子間力顕微鏡の普及によってナノ次元の構造の観察が可能になった。ナノ次元での圧電効果の測定をしたいものである。

イオンチャネル蛋白分子の圧電効果　Bio-Nano-Piezoelectricity

生体の恒常活動に電気的あるいは力学的刺激が必要であることは一般に認められたといってよい。電気刺激や超音波刺激による骨折治療や、宇宙空間での滞在による骨量の減少はその好例である。培養骨細胞にずり応力が作用すると Ca イオンの取り込みが増える。血管の内皮細胞に流体のずり応力が作用すると細胞内への Ca イオンの流入が増えることも知られている。

細胞膜に存在するイオンチャネル蛋白分子がイオン透過の主役を果たしている。イオンチャネルには多くの種類があるが、 α -helix の分子鎖が平行に並んだ構造を持つものも知られている。このようなイオンチャネル分子の圧電効果を調べてみたいと思う。 α -helix の構造を持つ高分子鎖に応力または電界が作用すれば、その conformation が変化する。圧電効果は応力による双極子の内部回転に起因し、分子鎖の歪と分極は相伴っている。Conformation の変化は分子鎖の間の相互作用を変化させ、イオンチャネル分子の空間的配置を変化させ、イオンのための穴を広くすることが想像される。イオンチャネル蛋白分子の DNA 塩基配列は既に解明されたという。大量に作成することも可能である。イオンチャネル分子のセンサーとしての役割を測定できる日も

遠くないと思う。

思い出の人々

この小文では記念講演会に参加された方を中心にして、研究論文の内容と共著者についての回顧をほぼ年代順に述べてきた。研究を一緒にした人は、おおげさにいえば、自然に対する共同の挑戦者であるが、個人的にも両方の利益が共通する良さがある。たとえば先生と学生の場合には、良い研究をすることは学生の資格取得の役に立つとともに先生の業績にもなる。もちろん両方が苦労することもあるし、一方がより得をする場合もある。しかし、研究者にとって共同研究者はもっとも忘れがたい人々である。

直接の研究以外でも多くの方々にお世話になった。理研の総務部長であった山本剛男さんは、私が理事を退任後一時ジャパンライフ (株) の顧問をしていたとき、取締役をしておられた。また梅沢邦臣理事長からライフサイエンス振興財団の理事を数年間依頼されたとき財団の事務局長をしておられた。1993 年に瑞宝章の叙勲に同席したのがもっとも懐かしい思い出である。

科研製薬 (株) の鍵和田和男さんは電磁場による骨折治療の研究に興味をもってくださり、日本生体電気刺激研究会にも出席して経済的にも応援していただいた。科研製薬と理研は駒込以来の密接な連携があったが、私もその恩恵に浴して、公私に渉ってお世話になった。

ダイキンの八木俊治さんは VDF と TrFE の共重合体 P(VDF/TrFE) でキュリー温度を発見した研究で有名である。国内外に試料を配布して、高分子強誘電体の発展に寄与された。私も度々貴重な資料をいただいた。定年後も応用のことでいろいろお世話になった。神奈川歯科大学の斎藤滋先生と八木さんとの共同研究で、P(VDF/TrFE) フィルムを使った咀嚼度数計を試作したことがある。頬につけるセンサーで他にも応用があるかもしれない。英国の ICI の研究所を一緒に訪問したり、八木さんが New York に在勤中にオフイスを訪問したり、思い出すことが多い。

圧電高分子材料については呉羽化学の村山直広さんから PVDF の沢山の試料をいただいた。PVDF の圧電性がエレクトレットのような安定した残留電荷によるというご研究が強く記憶に残っている。東京農工大学の宮田清蔵先生と三菱化学の瀬尾巌さんが発見された vinylidene cyanide/ vinyl acetate copolymer の圧電性は、非晶質でありながら強い誘電分極が圧電性を示すという興味深い研究であった。

理研の研究室へは会社からの委託研究生として大勢の方が来られた。諸沢敬二（資生堂）、塩入健史（日本ビクター）、池田勝則、石田勝巳、三原観治、久谷昌之（東洋精機）、梶巻正男（ダスキン）、福士紀晃（昭和電工）、 稲葉行勇（協和発酵）などの人々とはまだ年賀状を交換している。

あとがき

研究の課題と共同研究者の名前を年代順に思い出す形で、過去約 50 年の研究の歴史をたどっ

た。名前を上げることの出来なかった方々がまだ多数残っている。本当に大勢の人々のおかげで、研究生活に没頭することができたことに深く感謝している。先に世を去った妻具子にも心から感謝を捧げる。

仕事の評価は歴史が決めることであろうが、私の中心的課題であった圧電高分子は、約 50 年前に始まり現在は高分子物理学の 1 章を占める程度には成長したと思う。科学の研究の目的は知的財産の創造とともに人間社会への貢献であるといわれる。圧電高分子の産業への寄与はこれから拡大されてゆくに違いない。

ある人からあなたは “ 面白いですね ” とよく言うと指摘された。気が付いてみると自分でもそう思う。何か実験を見たりアイディアを聞いたりすると、思わずそう言うことが多い。何か新しい可能性があると本当にそう思うからである。相手を元気づけて “ おやりなさいよ ” という気持ちのときもある。

研究の原動力は面白いと思う気持ちである。好奇心と言えるかもしれない。

小林理研での研究の初期に木材や骨のような生体構成物質に圧電気現象のあることを確認した。この面白い現象の追求が私の研究生活の駆動力になったと思う。理化学研究所では約 20 年間ポリペプチドや PVDF などの圧電高分子の研究が主流であった。研究室の歴史を振り返ってみると、1966 年から 1980 年までの約 15 年間若い研究者の方々と一緒になって、高分子の圧電性に取り組んだ時代が私の研究室のもっとも輝いた時代であった。勿論同時にエレクトレット、バイオレオロジー、骨の電気刺激など応用につながる研究が種々の新しい分野への発展につながった。理化学研究所という自由な研究環境の大きな恩恵に浴したと思う。

理研定年後は、日本真空超材料研究所での蒸着重合高分子ポリウレアや生分解高分子ポリ乳酸の圧電性の研究を続けることが出来た。その後は小林理学研究所で圧電高分子の音響的応用の研究を行い、新しい低周波遮音システムの将来の発展を楽しみにしている。小林理学研究所の山下充康理事長と山本貢平所長のご支持を感謝する。

記念の会で講演をしていただいた方また特にお願いした方から多くの寄稿を頂いたことに厚くお礼を申し上げる。どの文章も懐かしい思い出に満ちている。このような形で記録を後世に残すことが出来るのは何よりの幸せである。終わりになるが、記念講演会を開催しこの文集の刊行のために熱心に尽力された伊達宗宏、古川猛夫、田實佳郎の三氏に厚く感謝する。

後記する “ 研究室の歴史 ” は経年順に研究室に在籍あるいは関係した方を記録したものであるが、完全なものではない。記録漏れや間違いのある方はお知らせいただきたい。研究室の同窓会のお役にでも立てば有難い。記念会の通知の時に用いた住所録も残っている。

研究室の歴史

深田栄一

1944（昭和 19）年 10 月、小林理学研究所入所

1955（昭和 30）年 4 月、世良 昇（早稲田大）電気化学

1956（昭和 31）年 8 月～ 1958（昭和 33）年 2 月、British Council Scholar, Imperial College, University of London

1958（昭和 33）年 12 月、（曽根敏麿）、福島正義（雪印研究所）

1959（昭和 34）年 4 月、（鈴木萬英）（所員）、昭和 36 年、八丈島高校、伊達宗宏（学習院大）、増田（芳賀）耕造（学習院大）、（木島保晴）、（学習院大）

1960（昭和 35）年 4 月、伊達宗宏、植松淑子、金城和子（所員）、岩永達也（慶応大）三菱化成、（田辺洋輔）（慶応大）東レ、中司昌志（学習院大修士）、田中 宗（昭和電工中研）昭和 38 年 3 月迄

1961（昭和 36）年 4 月、増井公道（学習院大）積水化学

1962（昭和 37）年 4 月、鈴木邦夫（所員）、岩居文雄（学習院大）小西六、甲野 格（学習院大）日本皮革、斎藤秀俊（学習院大）日本航空機、8 月、増沢光信（日本油脂）、12 月、植松淑子渡米

1963（昭和 38）年 4 月、理化学研究所入所（原子物理研究室）、4 月、伊達宗宏（入所）

1964（昭和 39）年 3 月、笹川麗子（所員）、4 月、貝原 眞、松平義昌（学習院大）、平井信之（東大農）、松崎（福地）幸江、幸地（兼次）須摩子（所員）

1965（昭和 40）年 4 月、臼井（遠藤）妙子（所員）、江村恒夫（理科大）、昭和 43 年 3 月、農工大、8 月～ 1966（昭和 41）年 3 月、New York University

1966（昭和 41）年 4 月、生体高分子物理研究室発足、、高松俊昭、伊達宗宏、臼井妙子、（所員）、原（原田）清志（学習院大）昭和 43 年 3 月迄、（古永捷慶）（学習院大）昭和 50 年 3 月迄、諸

沢敬二（資生堂研）、平井信之（東大農）昭和 41 年 9 月、名古屋大農、12 月、貝原 真（入所）

1967（昭和 42）年 4 月、高下三郎（学習院大）昭和 44 年 6 月迄、安藤 穣（学習院大）昭和 48 年 3 月理博、昭和 51 年 5 月農工大、町田和子（学習院大）、7 月、理化学研究所、駒込から和光へ移転、10 月、鈴木裕視（井の頭整形）、星野義昭（ICU）

1968（昭和 43）年 4 月、古川猛夫（入所）押木満雅（学習院大）昭和 48 年、理博、富士通、熊川（藤川）昇（早稲田大）昭和 45 年 3 月、旭化成

1969（昭和 44）年 4 月、桜井 伝（学習院大）日商岩井、植田浩義（学習院大）昭和 50 年、理博、昭和 53 年 Northwestern Univ.、8 月、角田興一（千葉大医）12 月、安部真一（東大教養丸山研）

1970（昭和 45）年 4 月、西山公司（学習院大）、町田孝久（東海大）、池田勝則（東洋精機）、5 月、塩入健史（日本ビクター）

1971（昭和 46）年 4 月、沼野幹男（学習院大）、山田恒夫（学習院大）雪印、佐藤俊昭（日大理工）、5 月、山上洋之（嘱託）昭和 47 年、リオン

1972（昭和 47）年 4 月、富山（山田）美和子（研究補助員）井坂昌昭（学習院大）スタンダード、等々力 滋（学習院大）東京海上火災、長沢佳克（学習院大）、中島義博（日大文理）、湯本久美（東理大）

1973（昭和 48）年 4 月、佐々木伸太郎（特別研究生）、藤野宏次（慶応大）、蓮尾果門（日大）、福士紀晃（昭和電工中研）、石田勝巳（東洋精機）、9 月、A.Eisenberg　McGill Univ. Canada

1974（昭和 49）年 4 月～ 9 月、University of Sao Paulo, Sao Carlos, Brazil

1975（昭和 50）年 4 月、劉（平松）東峰（学習院大）、望月 久（日大文理）、合場淳市（東理大）、浜島裕英（農工大）、梶巻正男（ダスキン）、前田秀篤（繊高研）、9 月、高松俊昭　カナダ McGill Univ.　昭和 51 年 10 月帰国、10 月　J.Watson, University of Wales, U.K.（客員研究員）、12 月、Lance Breger（学振外人共同研究員）

1976（昭和 51）年 4 月、杉浦嘉彦　高分子物理研より移籍、藤沢武夫（学習院大）、5 月、西成勝好（食総研）昭和 54 年、フランス Univ.Toulouse、田坂 茂（農工大工）

1977（昭和 52）年 1 月、R.Zimmerman, Univ.of SaoPaulo, Brazil、4 月、大田知裕（学習院大）、奥山哲生（早稲田大）、阪井 茂（東理大）、日本電気専門、香山 聡（日大文理）、9 月、加藤恵士

（流動研究員）昭和 54 年 2 月、富士フィルム中研

1978（昭和 53）年 4 月、田實佳郎（早稲田大）山形大工、赤眞正人（早稲田大）、丸山満也（東理大）、田辺幹雄（東理大）、貝原 眞　Johns Hopkins Univ., Rice Univ. 昭和 55 年 5 月帰国、9 月、S.Mascarenhas　Univ.of SaoPaulo, Brazil

1979（昭和 54）年 4 月、猪鼻嘉行（学習院大）ヘキスト、和田仁一（日大文理）、小川栄一（日大文理）、赤尾忠昭（日大理工）、高橋哲郎（特別研究員）昭和 55 年 9 月北大小畠研、7 月、古川猛夫　Bell Lab　昭和 56 年 8 月帰国、9 月、宮田清蔵（農工大）研究嘱託、雀部博之（農工大）研究嘱託

1980（昭和 55）年 4 月、原 薫（早稲田大）、8 月、高橋 昇（慶応大）ソニー、11 月（山本和彦）（日本合成ゴム）、12 月、ライフサイエンス担当理事

1981（昭和 56）年 8 月、聞 建勲（上海有機化学研）昭和 59 年 1 月帰国、3 月理博

1983（昭和 58）年 4 月、雀部博之　主任研究員

1984（昭和 59）年 12 月、理化学研究所　退任

1986（昭和 61）年 4 月～ 10 月、Technical University of Darmstadt, Germany、11 月～ 12 月 University of Konstance, Germany

1987（昭和 62）年 1 月～ 2 月、Technical University of Aachen, Germany、6 月～ 1998（平成 10）年 12 月、日本真空技術筑波超材料研究所　顧問、高橋善和、平成 6 年　工博、飯島正行、平成年　工博、王 賢珊（上海有機化学研）東理大、服部 武　平成 8 年　工博、明電舎

1988（昭和 63）年 3 月～ 6 月、Eisenhauer Medical Center, Palm Desert, U.S.A.

1992（平成 4）年 4 月～ 2002（平成 14）年 9 月、小林理学研究所　理事、落合 勉　平成 11 年　工博、山本 健（学習院大）平成 6 年東大　平成 9 年　工博、馬場健太郎（学習院大）コンパック、小山将司（電通大）リオン　顧問、伊達宗宏、瀬上 隆、山上洋之、関川公成、児玉秀和

1993（平成 5）年 7 月、McMaster University, Hamilton, Canada

2002（平成 14）年 10 月～、小林理学研究所　顧問、山本貢平（所長）、木村和則、大久保朝直、及川悠平（学習院大）

Publications in English

1950

1. Fukada,E. The vibrational properties of wood I. J. Phys.Soc.Japan 5, 321-327, 1950.
2. Fukada,E. Vibrational study of the wood used for the sound boards of pianos. Nature 166, 772-773, 1950.

1951

3. Fukada,E. The vibrational properties of wood II. J. Phys. Soc. Japan 6, 417-421, 1951.
4. Fukada.E. On the relation between creep and vibrational loss of polymethyl methacrylate. J. Phys. Soc. Japan 6, 254-256, 1951.

1954

5. Fukada,E. The relation between dynamic elastic modulus, internal friction, creep and stress relaxation in polymethyl methacrylate J.Phys. Soc. Japan 9, 786-789, 1954.

1955

6. Fukada,E. Piezoelectricity of wood. J. Phys. Soc. Japan 10, 149-154, 1955.

1956

7. Fukada,E. On the piezoelectric effect of silk fibers. J. Phys. Soc. Japan 12, 1301, 1956.

1957

8. Fukada,E. and Yasuda, I. On the piezoelectric effect of bone. J. Phys. Soc. Japan 12, 1158-1162, 1957.

1958

9. Fukada,E. and Fowler, J.F. Triboelectricity and electron traps in insulating materials: some correlations. Nature 181, 693-694, 1958.
10. Charlesby, A. and Fukada, E. Dynamic viscoelasticity of polyester cured by irradiation. Rheology of Elastomers. Pergamon Press, 1958, pp. 150-163.

1960

11. Sone,T., Fukushima, M. and Fukada,E. On the stripe pattern during rolling of viscous materials. J. Phys. Soc. Japan 15, 1708, 196O.
12. Kanamaru,K., Ikari,K., Kishimoto,K. and Fukada,E. Non-destructive quality test of adhesive

joints by means of resonance measurements. Kolloid Zeitschrift 170, 123-131, 1960.
13. Fukada,E. and Kanamaru,K. The non-destructive testing of strength of adhesive bonds. Proc. 3rd Intern. Conf. Non-destr. Test. 1960, pp.671-676.
14. Fukada,E. , Stephens, R.W.B. and Charlesby, A. Dynamic mechanical properties of irradiated high density polyethylenes. J. Phys. Chem. Solids 16, 53-59, 1960.

1962

15. Sone.T., Fukushima.M. and Fukada,E. The rheological behavior and thixotropy of butter. The 16th Intern. Dairy Congr. Repr., Copenhagen, Sec.111:1, 165-174, 1962.
16. Fukada,E. and Date,M. A new apparatus for measuring dynamic viscoelastic properties of polymers. Japan. J. Appl. Phys. 1, 59-63, 1962.

1963

17. Fukada,E. and Date, M . Viscoelastic properties of collagen solutions in dilute hydrochloric acid. Biorheology l, 101-l09, 1963.
18. Kawai,H., Fukada,E., Ibe,T. and Shono,H. A new capillary viscometer for measuring the viscosity of small amounts of blood. Proc. 4th Intern. Congr. Rheology. 1963, pp.281-297.

1964

19. Fukada,E. and Yasuda,I. Piezoelectric effects in collagen. Japan. J. Appl. Phys. 3, ll7-121, 1964.

1965

20. Fukada,E. Piezoelectric effect in wood and other crystalline polymers. Proc. 2nd Symp. Non-destr. Test. Wood. 1965, pp.143-172.

1966

21. Fukada,E. Measurement of blood viscosity with respect to clinical diagnosis Ann. New York Acad. Sci. 130, 920-924, 1966.
22. Fukada,E. and Masuzawa, M. Radiation effects on triglyceride. J. Am. Oil Chem. Soc. 43, 657-660, 1966.
23. Fukada,E. and Date,M. and Hirai,N. Piezoelectric effect in poly-gamma-methyl-L-glutamate. Nature 211, 1079, 1966.

1967

24. Fukada,E., Ibe,T., Atsumi,K. and Oosawa,T. Viscosity of blood with respect to clinical diagnosis. Hemorheology. Pergamon Press 1967, pp.729-733.

1968

25. Fukada,E. Mechanical deformation and electrical polarization in biological substances. Biorheology 5, 199-208, 1968.
26. Fukada,E. Piezoelectricity in polymers and biological materials. Ultrasonics 6, 229, 1968.
27. Fukada,E. Piezoelectricity as a fundamental property of wood. Wood Sci. Techn. 2, 299-307, 1968.
28. Fukada,E. , Date,M. and Hirai,N. Effect of temperature on piezoelectricity in wood. J. Polym. Sci. Part C, 23, 509-517, 1968.
29. Fukada,E., Yamamuro,I. and Tamura,M. Polypeptides piezoelectric transducer. 6th Intern. Congr. Acous. D 69-71, 1968.

1969

30. Kaibara,M. and Fukada,E. Non-Newtonian viscosity and dynamic viscoelasticity of blood during clotting Biorheology 6, 73-84, 1969.
31. Furukawa,T. and Fukada,E. Piezoelectric effect and its temperature variation in optically active polypropylene oxide. Nature 221, 1235-1236, 1969.
32. Fukada,E., Date,M. and Hara,K. Temperature dispersion of complex piezoelectric modulus of wood. Japan. J. Appl. Phys. 2, 151-158, 1969.
33. Fukada,E. and Hara,K. Piezoelectric effect in blood vessel walls. J. Phys. Soc. Japan. 26, 777-780. 1969.
34. Go,Y., Ejiri,S. and Fukada,E. Magnetic orientation of poly-gamma-benzyl- L-glutamate. Biochim. Biophys. Acta. 175, 454-456, 1969.
35. Fukada.E. and Takashita,S. Piezoelectric effect in polarized poly (vinyidene fluoride). Japan. J. Appl. Phys. 8, 960, 1969.

1970

36. Kaibara,M. and Fukada,E. Dynamic viscoelastic study for the structure of fibrin networks in the clots of blood and plasma. Biorheology 6, 329-339, 1970.
37. Kohno,K., Nishihara,T. and Fukada,E. The effect of gamma irradiation on the very dilute solution of collagen in the atmosphere of air and nitrogen. Japan.J. Appl. Phys. 9, 1431-1436, 1970.
38. Fukada,E. Piezoelectric dispersion in oriented polymers. Proc. 5th Intern. Congr. Rheol. 3, 285-294, 1970.
39. Fukada,E. and Date,M. Mechanical and electrical models for piezoelectric dispersions in oriented polymers. Polymer J. l, 410-417, 1970.
40. Date,M., Takashita,S. and Fukada,E. Temperature variation of piezoelectric moduli in oriented poly(gamma-methyl-L-glutamate). J. Polym. Sci. Part A-2, 8, 61-70, 1970.

41. Fukada,E. and Ueda,H. Piezoelectric effect in muscle. Japan. J. Appl. Phys. 9, 844, 1970.
42. Takamatsu,T. and Fukada,E . Thermal change of depolarization current in polymer electrets. Polymer J. l, 101-106, 1970.

1971

43. Kaibara,M. and Fukada,E. The influence of the concentration of thrombin of the dynamic viscoelasticity of clotting blood and fibrinogen-thrombin systems. Biorheology 8, 139-147, 1971.
44. Fukada,E. and Dintenfas,L. The clotting of blood and fibrinogen-thrombin systems as studied by two dynamic instruments with large and small amplitudes. Biorheology 8, 149-155, 1971.
45. Fukada,E. and Takashita,S. Piezoelectric constant in oriented beta form polypeptides. Japan. J. Appl. Phys. 10, 722-726, 1971.
46. Fukada.E. and Sakurai.T. Piezoelectricity in polarized poly(vinylidene fluoride) films. Polymer J. 2, 656-662, 1971.
47. Ueda,H. and Fukada,E. Piezoelectricity in myosin and actin. Japan. J. Appl. Phys. 10, 1650, 1971.
48. Fukada,E. Piezoelectric phenomena in biological polymers. Proc. Conf. Chemeca 70, Butterworth. Session 4, 55-73, 1971.
49. Konaga,T. and Fukada,E. Piezoelectricity in oriented films of poly(gamma-benzyl-L-glutamate). J. Polym. Sci. A-2, 9. 2023-2032, 1971.
50. Fukada.E. Piezoelectric dispersion in polymers. Progr. Polym. Sci. Japan, Kodansha, Tokyo, 2, 329-372. 1971.

1972

51. Fukada,E. and Nishiyama,K. Piezoelectric properties in polarized poly(vinyl fluoride). Japan. J. Appl. Phys. 11. 36-40, 1972.
52. Eukada,E. and Ando,Y. Piezoelectricity in oriented DNA films. J. Polym. Sci. A-2. lO, 565-567, 1972.

1973

53. Fukada,E. and Kaibara,M. The dynamic rigidity of fibrin gels. Biorheology lO, 129-138, 1973.
54. Yamada,T. and Fukada , E . Non-Newtonean viscosity of liquid crystals formed by cholesteryl oleyl carbonate. Japan. J. Appl. Phys. 12, 68-72, 1973.
55. Tachibana,T., Takamatsu,T. and Fukada,E. Thermally stimulated current in smectic liquid crystals. Chem. Lett. 907-910, 1973.

56. Takamatsu,T. and Fukada,E. Surface charge depolarization and piezoelectricity in electrets. In: Electrets Charge Storage and Transport in Dielectrics. M.N.Perlman (Ed.). Princeton: Electrochemical Society. 1973, pp.128-140.
57. Fukada,E. Recent Research on the piezoelectricity of polymers. In: Electrets Charge Storage and Transport in Dielectrics. M.M. Perlman (Ed.). Princeton: Electrochemical Society. 1973, pp.486-491.
58. Fukada,E. Piezoelectric phenomena in biological macromolecules. Proc. 4th Intern. Biophys. Congr. 4(2), 467-482, 1973.
59. Fukada.E. and Date,14. Piezoelectric relaxations in polymers: spherical dispersion model. J. Macrom. Sci. Physics B8(3-4), 463-474. 1973.
60. Fukada,E., Furukawa,T., Baer,E., Hiltner,A. and Anderson,J.M. Piezoelectr ic relaxations in homopolymers and copolymers of gamma-benzyl-L-glutamate and L-leucine. J. Macrom. Sci. Physics B 8(3-4), 475-481, 1973.
61. Yamagami.H. and Fukada,E. A model experiment for piezoelectric relaxations in polymers. Polymer J. 5, 309-315, 1973.

1974

62. Maruyama,K., Kaibara,H. and Fukada.E. Rheology of F-actin I. Network of F-actin in solution. Biochim. Biophys. Acta 371. 20-29. 1974.
63. Maruyama,K., Kaibara,M. and Fukada,E. Rheology of F-actin II . Effect of tropomyosin and troponin. Biochim. Biophys. Acta 371, 30-38, 1974.
64. Fukada,E. Piezoelectric properties of organic polymers Ann. New York Acad. Sci. 238, 7-25, 1974.
65. Fukada,E. Piezoelectric properties of biological macromolecules. Adv. Biophys. Univ. Tokyo Press, 6, 121-155, 1974.

1975

66. Oshiki,M. and Fukada,E. Inverse piezoelectric effect and electrostrictive effect in polarized poly(vinylidene fluoride) films. J. Mater. Sci. lO, 1-6. 1975.
67. Fukada.E., Zimmerman,R.L. and Mascarenhas,S. Denaturation of horn keratin observed by piezoelectric measurements. Biochim. Biophys. Res. Commun. 62, 415-418, 1975.
68. Zimmerman,R.L., Suchicital,C. and Fukada,E. Electric field-induced piezoelectricity, in polymer film. J. Appl. Polym. Sci. 19, 1373-1379, 1975.
69. Fukada,E. and Sasaki,S. Piezoelectricity of alpha-keratin. J. Polym. Sci. Phys. 13, 1845-1847, 1975.
70. Fukada,E., Takamatsu,T. and Yasuda,I. Callus formation by electret Japan. J. Appl. Phys. 14, 2079-2080, 1975.

71. Fukada,E. and Oshiki,M. Piezoelectricity in polarized polyvinylidene fluoride. Proc. Piezo- and Pyroelectr. Symp.- Workshop. M.G. Broadhurst (Ed.). NBS, Washington 1975. pp.8-33.
72. Fukada,E. Elettreti. Enciclopedia della Chimica. Uses Edizioni Scientifiche Firenze vol.4, 596-599, 1975.

1976

73. Fukada,E. and Kaibara,M. Rheological measurements of fibrin gels during clotting. Thrombosis Res. Suppl. I I 8, 49-58, 1976.
74. Kaibara,M. and Fukada,E. Dynamic viscoelasticity of fibrin gels: dependence on ionic strength. Thrombosis Res. Suppl. I I 8, 45-48, 1976.
75. Fukada,E. and Kaibara,M. Measurement of viscoelasticity of blood. Proc. Intern. Congr. Angiol. 382, 1976.
76. Kaibara,M. and Fukada,E. Viscoelasticity of blood during aggregation of erythrocyte. Proc. Intern. Congr. Angiol. 383, 1976.
77. Fukada,E. and Kaibara,M. Dynamic viscoelastic studies of blood and fibrinogen-thrombin systems. Proc. Intern. Congr. Hematology, 744, 1976.
78. Oshiki,M. and Fukada,E. Piezoelectric effect in stretched and polarized polyvinylidene fluoride film. Japan. J. Appl. Phys. 15, 43-52, 1976.
79. Ando,Y. and Fukada,E. Piezoelectric properties of oriented deoxy-ribonucleate films. J. Polym. Sci. Phys. 14, 63-79, 1976.
80. Sasaki, S. and Fukada, E. Deformation of the crystal lattice by water absorption and piezoelectricity of cellulose triacetate. J. Polym. Sci. Phys. 14, 565-567, 1976.
81. Fukada,E., Ueda,H. and Rinaldi,R. Piezoelectric and related properties of hydrated collagen. Biophys. J. 16, 911-918, 1976.
82. Breger,L., Furukawa,T. and Fukada,E. Bending Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. Japan. J. Appl. Phys. 15, 2239-2240, 1976.
83. Furukawa.T., Fujino,K. and Fukada,E. Electromechanical properties in the composites of epoxy resin and PZT ceramics. Japan J. Appl. Phys. 15. 2119-2129, 1976.
84. Furukawa,T. and Fukada,E. Piezoelectric relaxation in poly(gamma -benzyl-glutamate). J. Polym. Sci. Phys. 14, 1979-2110, 1976.
85. Maeda.H., Tsuda,K. and Fukada,E. The dependence on temperature and hydraticn of piezoelectric, dielectric and elastic constants of bone. Japan. J. Appl. Phys. 15, 2333-2336, 1976.

1977

86. Kaibara,M. and Fukada,E. Effect of temperature on dynamic viscoelasticity during the clotting reaction of fibrin. Biochim. Biophys. Acta 499, 352-361, 1977.
87. Kaibara,M. and Fukada,E. Viscoelasticity of blood J. Soc. Rheol. Japan 5, 29-31, 1977.

88. Furukawa,T. and Fukada.E. Piezoelectric relaxation in composite epoxy-PZT system due to ionic conduction. J. Appl. Phys. 16, 453-458, 1977.
89. Inoue,S., Ohasi,T., Yasuda,I. and Fukada,E. Electret induced callus formation in the rat. Clin. Orthop. Relat. Res. 124, 57-58, 1977.
90. Ando,Y. ,Fukada,E. and Glymcher,M.J. Piezoelectricity of chitin in lobster shell and apodome. Biorheology 14, 175-179. 1977.
91. Fukada,E. and Furukawa.T. Piezoelectric properties of polymer ceramics mixtures. Ultrasonics Intern. 1977, 493-499.
92. Date,M. and Fukada,E. Infrared dichroism and piezoelectricity in polarized polyvinylidene fluoride. Rept. Prog. Polym. Phys. Japan. 20, 339-342, 1977.

1979

93. Ueda,H. and Fukada,E. Piezelctric relaxations in collagen gelatin systems. Polymer J. 11, 103-lll, 1979.
94. Furukawa,T., Aiba,J. and Fukada,E. Piezoelectric relaxation in polyvinylidene fluoride. J. Appl. Phys. 50, 3615-3621, 1979.
95. Furukawa,T., Ishida,K. and Fukada,E. Piezoelectric properties in the composite systems of polymers and PZT ceramics. J. Appl. Phys. 50, 4904-4912,1979.
96. Kato,K., Furukawa.T. and Fukada,E. Piezoelectricity in poly(m-phenylene isophthalamide) Rept. Progr. Polym. Phys. Japan 22, 343-344, 1979.
97. Fukada.E. Piezoelectric polymers and their applications. Proc.2nd Meeting on Ferroelec. Mater. Applic. 1-1, 1979.
98. Fukada,E. and Ueda,H. Temperature dependence of the piezoelectric constant of hydrated bone and collagen. In: Electrical Properties of Bone and Cartilage. C.T.Brighton. J.Black. and S.R.Pollack (Eds.). New York: Grune and Stratton 1979, pp.3-12.
99. Inoue.S., Ohasi,T. Fukada,E. and Ashihara,T. Electric stimulation of osteogenesis in the rat: Amperage of three different stimulation methods. In: Electrical Properties of Bone and Cartilage. C.T.Brighton, J.Black and S.R.Pollack (Eds.) New York: Grune and Stratton. 1979, pp.199-213.

1980

100. Fukada. E. and Kaibara. M. Ciscoelastic study of aggregation of red blood cells. Biorheology 17. 177-182, 1980.
101. Kaibara,M. and Fukada,E. An analysis of the clotting curves of complex dynamic rigidity for fibrinogen-thrombin solutions. Biorheology 17. 255-259, 1980.
102. Fukada,E. and Kaibara,M. Rheological studies of blood clotting. In: Biomedical Polmers. E.P. Goldberg and A. Nakajima (Eds.) Academic Press 1980. pp.31-52.

103. Furukawa,T., Date,M. and Fukada,E. Hysteresis phenomena in polyvinylidene fluoride under high electric field. J. Appl. Phys. 51, 1135-1141, 1980.
104. Furukawa,T., Date.M., Fukada.E., Tajitsu.Y. and Chiba,A. Ferroelectric behavior in the copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene. Japan. J. Appl. Phys. 19, L109-112, 1980.
105. Tajitsu,Y., Chiba.A., Furukawa,T., Date,M., and Fukada,E. Crystalline phase transition in the copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene. Appl. Phys. Lett. 36, 286-288, 1980.
106. Date,M., Furukawa.T. and Fukada,E. Dipolar orientation and hysteresis in polyvinylidene fluoride. J. Appl. Phys. 51. 3830-3832. 1980.
107. Nishinari,K. and Fukada.E. Viscoelastic, dielectric and piezoelectric behavior of solid amylose. J. Polym. Sci. Polym. Phys. 18, 1609-1619. 1980.
108. Marino,A.A., Spadaro,J.A., Fukada,E., Kahn, L.D. and Becker,R.O. Piezoelectricity in collagen films. Calc. Tissue Intern. 31, 257-259, 1980.
109. Takahashi,T., Date,M. and Fukada,E. Dielectric hysteresis and rotation of dipoles in polyvinylidene fluoride. Appl. Phys. Lett. 37, 791-793, 1980.
110. Furukawa,T., Ogiwara,K. and Fukada,E. Piezoelectric relaxation in poly(gamma-methyl-L-glutamate) at high temperature. J. Polym. Sci. Polym Phys. 18. 1697-1706, 1980.
111. Tashiro,K., Kobayashi,M., Tadokoro,H. and Fukada,E. Calculation of elastic and piezoelectric constants of polymer crystals by a point charge model: Application to poly(vinylidenefluoride) form I. Macromolecules 13. 691-698, 1980.

1981

112. Kaibara,M., Fukada,E. and Sakaoku,K. Rheological study on network structure of fibrin clots under various conditions. Biorheology 18, 23-35, 1981.
113. Kaibara,M. and Fukada,E. The effect of steady flow on transient viscoelastic behavior of blood. Biorheology 18, 405-413, 1981.
114. Fukada,E. and Furukawa.T. Piezoelectricity and ferroelectrity in Polyvinylidene fluoride. Ultrasonics 19, 31-39, 1981.
115. Furukawa,T., Johnson,G.E., Bair,H.E., Tajitsu,A., Chiba,A. and Fukada,E. Ferroelectric phase transition in a copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene. Ferroelectrics 32, 61-67, 1981.
116. Takahashi,T., Date.M. and Fukada,E. Ferroelectric behavior of polyvinylidene fluoride. Ferroelectrics 32, 73-77. 1981.
117. Sasabe,H., Nakayama,T., Kumazawa,K., Miyata,S. and Fukada,E. Photovoltaic effect in polyvinylidene fluoride. Polymer J. 13, 967-973, 1981.
118. Fukada,E. Piezoelectricity of bone and osteogenesis by piezoelectric films. In: Mechanisms

of Growth Control. R.O.Becker(Ed.) Charles C. Thomas, 1981, pp.192-210.

119. Marino,A.A., Cullen,J.M., Becker,R.O. and Fukada,E. Electret induced bone formation in rats. IEEE Frontiers Eng. Health Care, 1981, pp. 220-222.

1982

120. Kaibara,M. and Fukada,E. Transient viscoelastic behavior of blood. Clinical hemorheology 2, 7-11, 1982.

121. Fukada,E. Electrical phenomena in biorheology. Biorheology 19, 15-27, 1982.

122. Fukada,E., Date,M., Furukawa.T., Tajitsu,Y., Chiba.A. Hiltner.A. and Anderson,J.M. Effect of hydration on piezoelectric, elastic and dielectric constants of crosslinked poly(hydroxyethyl glutamine). J. Macromol. Sci. Phys. B21, 145-156, 1982.

123. Fukada,E. and Ueda,H. Shear piezoelectricity in ethylene dichloride solution of poly-gamma-methyl-L-glutamate. Appl. Phys. Lett. 41, 1004-1006, 1982.

124. Maeda,H. and Fukada,E. Effect of water on piezoelectric, dielectric and elastic properties of bone. Biopolymers 21, 2055-2068, 1982.

125. Fukada,E. Piezoelectricity of biological materials. In: Electronic Conduction and Mechano-electrical Transduction in Biological Materials. B.Lipinski (Ed.). New York, Marcel Dekker 1982, pp.125-155.

1983

126. Kaibara,M. and Fukada,E. Rheology of blood clotting. Polym. Eng. Rev. 3, 383-418, 1983.

127. Fukada,E. Piezoelectric properties of biological polymers. Quart. Rev. Biophys. 16, 59-87, 1983.

1984

128. Fukada,E., Sugiura,Y., Date,M. and Kaibara,M. Methods to study rheological properties of blood during clotting. Biorheology Suppl.I, 9-14, 1984.

129. Kaibara,M., Date,M. and Fukada,E. Dynamic evaluation of aggregation and agglutination of red blood cells. Biorheology Suppl. I, 43-47, 1984.

130. Fukada,E. Electro-biorheology. Biorheology 21, 75-84, 1984.

131. Fukada,E. Piezoelectricity of natural biomaterials. Ferroelectrics 60, 285-296, 1984.

132. Ando,Y. and Fukada,E. Piezoelectric properties and molecular motion of poly(beta-hydroxybutyrate) films. J. Polym. Sci. Polym. Phys. 22, 1821-1834, 1984.

1985

133. Ando,Y., Minato,M., Nishida,K. and Fukada,E. Primary piezoeletric relaxation in copolymers of beta-hydroxybutyrate and beta-hydroxyvalerate. Proc. 5th Intern. Symp. Electrets, 871-

876, 1985.

134. Fukada,E. Piezoelectricity of bone and electrical callus - Reminiscence of Dr.Iwao Yasuda. In: Bioelectrical Repair and Growth. E.Fukada, S.Inoue, T. Sakou, H.Takahashi and N.Tsuyama (Eds.). Nishimura 1985, pp. 26-31.
135. Kaneko,I., Takahashi,K., Date,M. and Fukada,E. Optimal conditions of pulsing electromagnetic fields for the enhancement of DNA synthesis of mammalian cells in culture. In: Bioelectrical Repair and Growth. E.Fukada, S.Inoue, T.Sakou, H.Takahashi and N.Tsuyama (Eds.). Nishimura 1985. pp. 92-95.

1986

136. Ueda,H., Fukada,E. and Karasz,F.E. Piezoelectricity in three-phase systems: Effect of the boundary phase. J. Appl. Phys. 60, 2672-2677, 1986.
137. Fukada,E. and Ando.Y. Piezoelectric properties of poly-beta-hydroxybutyrate and copolymers of beta-hydroxybutyrate and beta-hydroxyvalerate. Intern. J. Biol. Macrom. 8, 361-366. 1986.
138. Date,M., Kaneko,I. and Fukada,E. Pulse magnetic stimulator for biological system. Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. 80, 1l-16, 1986.
139. Takahashi.K., Kaneko,I., Date.M. and Fukada,E. Effect of pulsing electromagnetic fields on DNA synthesis in Mammalian cells in culture. Experimentia 42, 185-186, 1986.

1987

140. Takahashi,K., Kaneko,I., Date,M. and Fukada,E. Influence of pulsing electromagnetic field on the frequency of sister-chromatid exchanges in cultured mammalian cells. Experimentia 43, 331-332, 1987.
141. Maeda,H. and Fukada.E. Effect of bound water on piezoelectric, dielectric and elastic properties of wood. J. Appl. Polym. Sci. 33. 1187-1198, 1987.
142. Fukada,E., Sessler,G.M., West,J.E., Berraissoul,A. and G>nther,P. Bending piezoelectricity in monomorph polymer films. J. Appl. Phys. 62, 3643-3646, 1987.

1988

143. Fukada,E. Date,M, Neumann.H.E. and Wendorff.J.H. Nonlinear piezo electricity in poly(vinylidene fluoride). J. Appl. Phys. 63, 1701-1704, 1988.
144. Eynatten,G.von, Fukada,E. and Dransfeld,K. The dynamics of piezoelectric polymer materials at high frequencies measured with conversion electron M=ssbauer spectroscopy (CEMS) . Hyperfine Interactions 42, 1095-1098, 1988.
145. Fukada,E. and Ando,Y. Bending piezoelectricity in microbially produced poly-beta-hydroxybutyrate. Biorheology 25, 297-302,1988.

1989

146. Date,M., Fukada.E. and Wendorff,J.H. Nonlinear piezoelectricity in oriented films of PVDF and its copolymers. IEEE Trans. Elec. Insul. 24, 457-460, 1989.
147. Fukada,E. Introduction: Early studies in piezoelectricity, Pyro-electricity, and ferroelectricity in polymers. Phase Transitions 18, 135-141. 1989.
148. Takahashi,Y., Iijima.M. and Fukada,E. Pyroelectricity in poled thin films of aromatic polyurea prepared by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 28, L408-410, 1989.
149. Fukada,E., Seaman,G.V.F., Liepsch,D., Lee,M. and Friis-Baastad,L. Blood modeling using polystyrene microspheres. Biorheology 26, 401-413, 1989.
150. Fukada,E. Biophysical background of mechanocytology. In:Mechano-biological Research on the Masticatory System. K.Kubota (Ed.) Berlin, VEB Verlag, pp.239-243, 1989.

1990

151. Fukada,E. and Kaibara,M. Dynamic viscoelasticity of blood. In: blood flow in Large Arteries: Applications to Atherogenesis and Clinical Medicine. D.W.Liepsch (Ed.) Basel, Karger, pp 170-180, 1990.

1991

152. Fukada,E. Piezoelectric properties of poly-L-lactic acid. Rept. Prog. Polym. Phys. Jpn. 34. 269-272. 1991.
153. Fukada.E. Bioelectret and biopiezoelectricity. Proc. 7th Intern. Symp. Electrets. 695-705, 1991.
154. Ukishima,S., Onoe,K., Iijima,M., Takahashi,Y. and Fukada,E. Poling of thin films of aromatic polyurea during polarization and crystallization. Proc. 7th Intern. Symp. Electrets. 275-280, 1991.
155. Schellin,R., Hess,G., Kuehnel,W. ,Sessler,G.M. and Fukada,E. Silicon subminiature microphones with organic piezoelectric layers: Fabrication and acoustical behaviour. Proc.7th Intern. Symp. Electrets 929-934, 1991.
156. Takahashi,Y. Ukishima,S. Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric properties of thin films of aromatic polyurea prepared by vapor deposition polymerization. J. Appl. Phys. 70, 6983-6987, 1991.
157. Kajikawa,K.,Nagamori,H.,Takezoe,H.,Fukuda,A., Ukishima,S., Takahashi,Y., Iijima,M.,and Fukada,E. Optical second harmonic generation from poled thin films of aromatic polyurea prepared by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 30, L1737-1740. 1991.
158. Fukada.E. In memory of Syoten Oka - Biorheologist and person. Biorheology 28, 123-131, 1991.
159. Matsunaga,S., Sakou,T., Ijiri.K., Ali.M.A., Fukada,E. and Date,M. Histochemical investigation

of intramedullarly callus by pulsed electromagnetic fields (PEMFs). In: Electromagnetics in Medicine and Biology C.T.Brighton and S.R.Pollack (Eds.). San Francisco Press 1991, pp. 177-186.

1992

160. Nagamori,H., Kajikawa,K., Takezoe,H., Fukuda,A., Ukishima,S., Iijima,M., Takahashi,Y. and Fukada,E. Poling dynamics and negligible relaxation in aromatic polyurea studied by in situ observation of second-harmonic generation. Jpn. J. Appl. Phys. 31, L553-L555, 1992.

161. Takezoe,H., Kajikawa,K., Nagamori,H., Fukuda,A., Ukishima,S., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Optical second-harmonic generation in poled polyurea prepared by vapor deposition polymerization. Nonlinear Optics, Miyata,S. (Ed.) Elsevier Science 1992. Pp.213-218

162. Ichiki,M., Watanabe,T., Asahi,T., Kobayashi,J. and Fukada,E. Optical and Structural Studies on poly-lactic acid. Rept. Prog. Polym. Phys. Japan. 35,441-448, 1992

163. Schellin,R., Hess,G., Kuehnel,W. ,Sessler,G.M. and Fukada,E. Silicon subminiature microphones with organic piezoelectric layers: Fabrication and acoustical behaviour IEEE Trans. Elec.Insul. 27, 867-871, 1992

164. Fukada.E. Bioelectret and biopiezoelectricity. IEEE Trans. Elec. Insul. 27, 813-819, 1992

1993

165. Herminghaus,S., Aust,E.,Knoll,W.,Takahashi,Y., and Fukada,E. Electrooptic polyurea waveguides by in-situ polymerization from the vapor phase. Proc. SPIE Conf. 2025,149-155, 1993.

166. Wang, X.S., Iijima,M., Takahashi,Y. and Fukada,E. Dependence of piezoelectric and pyroelectric activities of aromatic polyurea thin films on monomer composition ratio. Jpn. J. Appl. Phys. 32, 2763-2773, 1993.

167. Takahashi,Y., Matsuzaki,K., Iijima,M., Fukada,E., Tsukahara,S., Murakami,Y. and Maesono,A. Determination of evaporation rate and vapor pressure of organic monomers used for vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 32, L875-L878, 1993.

1994

168. Fukada,E., Wang,X.S., Hattori,T., Iijima,M. and Takahashi,Y. Piezo- and pyroelectricity in thin films of polyurea synthesized by vapor deposition polymerization. Ferroelectrics, 151, 281-286, 1994.

169. Hattori,T., Iijima,M., Takahashi,Y., Fukada,E., Suzuki,Y., Kakimoto,M. and Imai,Y. Synthesis of aliphatic polyurea films by vapor deposition polymerization and their piezoelectric properties. Jpn. J. Appl. Phys. 33, 4647-4651, 1994.

170. Wang,X.S., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Dielectric relaxation in polyurea thin films

prepared by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 33, 5842-5847, 1994.
171. Fukada, E. Pyroelectricity and piezoelectricity of polyurea. Key Eng. Mater. 92-93, pp143-160, 1994.

1995

172. Wang,X.S., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric and dielectric properties of aromatic polyureas synthesized by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 34, 1585-1590, 1995.
173. Wang,X.S., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Low-temperature piezoelectric and dielectric properties of aromatic polyureas prepared by vapor deposition polymerization. High Perform. Polym. 7, 293-301, 1995.
174. Wang,X.S., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric thickness resonance of aromatic polyurea films prepared by vapor deposition polymerization. Ferroelectrics 171, 339-349, 1995.
175. Ukishima,S., Iida,K., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. FT-IR observation on orientation of dipolar urea bonds in polyurea prepared by vapor deposition polymerization. Ferroelectrics 171, 351-361, 1995.
176. Hattori,T., Iijima,M., Takahashi,Y. and Fukada,E. Piezoelectric properties of thin films of aliphatic polyurea 79 synthesized by vapor deposition polymerization. Ferroelectrics 171, 363-372, 1995.
177. Herminghaus,S., Aust,E., Knoll,W.,Takahashi,Y., Ukishima,S., Fukada,E. and Boese,D. Evaporated polyurea films for optical modulators. Ferroelectrics 171, 191-201, 1995.
178. Fukada,E. Professor Heiji Kawai and piezoelectricity. Ferroelectrics 171, 1-3, 1995.
179. Iijima,M., Ukishima,S., Iida,K., Takahashi,Y. and Fukda,E. Fourier transform infrared observation of the orientation of dipolar urea bonds in polyurea during corona poling. Jpn. J. Appl. Phys. 34, L65-L68, 1995.
180. Fukada,E., Tasaka,S. and Nalwa,H.S. Polyureas and polythioureas. Ferro electric Polymers Nalwa,H.S. (Ed.) Marcel Dekker 1995, Chap.8, pp353-392.
181. Fukada,E. Piezoelectricity and pyroelectricity of biopolymers. Ferroelectric Polymers, Nalwa,H.S. (Ed.) Marcel Dekker 1995, Chap.9, pp393-434.
182. Fukada,E. Piezoelectricity of biopolymers (Poiseuille Medal Award Lecture). Biorheorogy, 32,593-609, 1995.
183. Fukada,E. Recollections of a Research Life. Rept. Progr. Polym. Phys. Japan 38, 1-26, 1995.
184. Kobayashi,J., Asahi,T., Ichiki,M., Oikawa,A., Suzuki,H., Watanabe,T., Fukada,E., Shikinami,Y. Structural and optical properties of poly lactic acids. J. Appl. Phys. 77, 2957-2973, 1995.

1996

185. Hattori,T., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric and ferroelectric properties of polyurea-5 thin films prepared by vapor deposition polymerization. J. Appl. Phys. 79, 1713-1721, 1996.
186. Hattori,T., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric and ferroelectric properties of polyurea thin films copolymerized by vapor deposition of aliphatic and aromatic monomers. Jpn. J. Appl. Phys. 35, 2199-2204, 1996.
187. Linford,M.R., Iijima,M., Hattori,T., Takahashi,T. and Fukada,E. Piezoelectricity in aromatic polyimide thin fils prepared by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 35, 677-678, 1996.
188. Iijima,M, Shen,G.H., Takahashi,Y., Fukada,E., Tanaka,A. and Sakata,S. Characteristics of pyroelectric sensors of polyurea films prepared by vapor deposition polymerization. Thin Solid Films 272, 157-160, 1996.
189. Herminghaus,S., Conradt,R.,Aust,E., Knoll,W., Takahashi,T., Ukishima,S., Fukada,E. and Boese,D. Evaporated polyurea optical waveguides: electrooptic and structural properties. Optics Commun. 123, 250-258, 1996.
190. Ikada,Y., Shikinami,Y., Hara,Y., Tagawa,M. and Fukada,E. Enhancement of bone formation by drawn poly(L-lactide). J. Biomed. Mater. Res. 30, 553-558, 1996
191. Hattori,T., Takahashi,Y., Iijima,M. and Fukada,E. Piezoelectric properties of nylon 79 thin films prepared by vapor deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 35, 5763-5764, 1996
192. Tajitsu,Y., Ohigashi,H., Hirooka,A., Yamagishi,A., Date,M., Hattori,T., and Fukada,E. Ferroelectric behavior in thin films of polyurea-5. Jpn. J. Appl. Phys. 35, 5199-5202, 1996.
193. Shimono,T.,Matsunaga,S.,Fukada,E.,Hattori,T and Shikinami,Y. The effects of piezoelectric poly-L-lactic acid films in promoting ossification in vivo. In Vivo 10, 471-476, 1996.

1997

194. Tajitsu,Y., Ishida,M., Ishida,K., Ohigashi,H., Date,M. and Fukada,E. Ferroelectric switching behavior in thin films of polyurea-5. Jpn. J. Appl. Phys. 36, L791-L793, 1997.

1998

195. Fukada,E. New piezoelectric polymers. Jpn. J. Appl. Phys. 37, 2775-2780, 1998.
196. Ochiai,T. and Fukada,E. Electromechanical properties of poly-L-lactic acid. Jpn. J. Appl. Phys. 37,3374-3376, 1998.
197.Tajitsu,Y., Ishida,K., Kanbara,S., Ohigashi,H., Date,M. and Fukada,E. Temperature dependence of switching characteristics in polyurea-5 thin films. Jpn. J. Appl. Phys. 37, 5375-5378, 1998.
198.Fukada,E. History and recent progress in piezoelectric polymer research. 1998 IEEE Utra-

sonics Symp., 597-605, 1998.

1999

199.Tajitsu,Y., Hosoya,R., Maruyama,T., Aoki,M., Shikinami,Y., Date,M. and Fukada,E. Huge optical rotatory power of uniaxially oriented film of poly-L-lactid acid. J. Mat. Sci. Lett. 18, 1785-1787, 1999.

200.Tajitsu,Y., Date,M. and Fukada,E. Pockels effects of polyurea-5 film prepared by vapor-deposition polymerization. Jpn. J. Appl. Phys. 38, 5653-5656,1999.

201.Fukada,E., Date,M., Ochiai,T., Koyama,S. and Sasaki,Y. Piezoelectricity in polyurethane films induced by electrostriction and bias electric field. Proc.10th Int'l Symp.Electrets,1999.

2000

202.Tajitsu,Y., Yonezawa,M., Sato,A., Tomiyama,H., Date,M., Fukada,E. and Yamashita,Y. Dielectric and piezoelectric properties of 0.91Pb($Zn_{1/3}$ Nb $_{2/3}$)O_3 -0.09$PbTiO_3$/polyvinylidene fluoride composites produced by the sol-gel method Jpn.J.Appl.Phys.39,5672-5675,2000.

203.Fukada,E. History and recent progress in piezoelectric polymers. IEEE Trans. Ultra.Ferro. Freq.Cont.47,1277-1290,2000.

2002

204.Kodama,H., Okubo,T., Date,M. and Fukada,E. Sound reflection and absorption by piezoelectric polymer films. Mat.Res.Symp.Proc. 698,43-52,2002.

2003

205.Mokry,P., Fukada,E. and Yamamoto,K. Noise shielding system utilizing a thin piezoelectric membrane and elasticity control. J.Appl.Phys. 94,789-796,2003.

206.Mokry,P., Fukada,E. and Yamamoto,K. Sound absorbing system as an application of the active elasticity control technique. J.Appl.Phys. 94,7356-7362,2003.

207.Fukada,E., Date,M., Sekigawa,K. Vibration control by magneto strictive actuator coupled with negative inductance circuits. Jpn.J.Appl.Phys. 42,7124-7128,2003.

208.Tajitsu,Y., Sukegawa,M., Kikuchi,M., Sudo,N., Kudo,M., Masuko,T., Date,M. and Fukada,E. Piezoelectric poly-L-Lactic acid film prepared by a new method. Jpn.J.Appl.Phys. 42,6172-6175,2003.

2004

209.Fukada,E., Date,M., Kimura,K., Okubo,T., Kodama,H., Mokry,P. and Ymamoto,K. Sound insulation by piezoelectric polymer films connected to negative capacitance circuits. IEEE Trans. Dielec. Electr.Insul. 11,328-333,2004.

210.Tajitsu,Y.,Kawai.S.,Kanesaki.M.,Date.M.,Fukada.E. Microactuators with Piezoelectric Polylactic Acid Fibers- Toward the Realization of Tweezers for Biological Cells. Ferroelectrics 304,195-200,2004.

211. Nakiri.T., Imoto.K., Ishizuka.M., Okamoto.S., Data.M., Uematsu.Y., Fukada.E., Tajitsu.Y. Piezoelectric Characteristics of Polymer Film Oriented under a Strong Magnetic Field. Jpn.J.Appl. Phys. 43,6769-6774,2004.

2005

212. Fukada.E.,Date.M.,Kodama.H.,and Oikawa.Y. Elasticity Control of Curved Piezoelectric Polymer Films. Ferroelectrics 320, 3-13,2005.

213. Tajitsu.Y., Kanesaki,M., Tsukiji.M., Imoto.K., Date.M., and Fukada.E. Novel Tweezers for Biological Cells Using Piezoelectric Polylactic Acid Fibers. Ferroelectrics 320, 133-139,2005.

214. Imoto.K., Nishiura.M., Yamamoto.K., Date.M.,Fukada.E., and Tajitsu.Y. Elasticity Control of Piezoelectric LeadZirconate Titanate (PZT) Materials Using Negative Capacitance Circuits. Jpn.J.Appl.Phys.44. 7019-7023,2005.

2006

215. Fukada.E., Recent Developments of Polar Piezoelectric Polymers. IEEE Trans.Dielec.Elec. Insul. 13, 1110-1119, 2006

216. Tahara.K., Ueda.H., Takarada.J., Imoto.K., Yamamoto.K., Date.M., Fukada.E., and Tajitsu.Y. Basic Study of Application for Elasticity Control of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Materials using Negative Capacitance Circuits to Sound Shielding Technology. Jpn.J.Appl.Phys. 45,7422-7425, 2006.

2007

217. Takarada. J., Tahara. K., Imoto.K., Data.M., Fukada.E., Yamamoto.K., and Tajitsu. Y. Basic Study of Elasticity Control of Soft and Hard Piezoelectric Materials Using Different Types of Negative-capacitance Circuits. Jpn. J. Appl. Phys.46,7053-7057,2007.

218. Kodama.H., Yamamoto.K., Date.M., and Fukada.E. Vibration Control of Curved Piezoelectric Sheets Using Negative Capacitance Circuits. Ferroelectrics 351, 33-42, 2007.

2008

219. Kodama.H., Date.M.,Yamamoto.K., Fukada.E. A Study of Sound Shielding Control of Curved Piezoelectric Sheets Connected to Negative Capacitance Circuits. J. Sound Vibr. 311, 898-911, 2008.

220. Takarada.J., Imoto.K., Yamamoto.K., Data.M., Fukada.E., Tajitsu.Y. Vibration Control of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Ceramics Using Negative Capacitance. Jpn.J.Appl.

Phys.47,7698-7701,2008

2009

221. Imoto.K., Date.M., Fukada.E., Tahara.K.,Kamaiyama.Y., Yamakita.T., and Tajitsu.Y. Piezoelectric Motion of Poly(L-lactic acid) Film Improved by Supercritical CO_2 Treatment. Jpn. J. Appl. Phys. 48,09KE06,2009.

2010

222. Yoshida.T., Imoto.K., Tahara.K., Naka.K., Uehara.Y., Kataoka.S., Date.M., Fukada.E.,and Tajitsu.Y. Piezoelectricity of Poly(L-lactic Acid) Composite Film with Stereocomplex of Poly(L-lactide) and Poly(D-lactide). Jpn.J.Appl.Phys. 49,09MC11, 2010.

2011

223. Uehara.Y., Fukumoto.T., Kamimura.Y.,Kuroda.S., Kimura.T., Date.M., Fukada.E., Tajitsu.Y. Piezoelectric Characteristics of Poly(γ -benzyl-L-glutamate) Film Oriented under Strong Magnetic Field. Jpn.J.Appl.Phys. 50,09ND02. 2011.

2012

224. Ito.S., Imoto.K.,Takai.K.,Kuroda.S., Kamimura.Y., Kataoka.T., Kawai.N., Date.M., Fukada.E., and Tajitsu.Y. Sensing Using Piezoelectric Chiral Polymer Fiber. Jpn.J.Appl.Phys. 51, 09LD16 2012

2013

225. Shomi.Y., Onishi.K., Nakiri.T., Imoto.K., Ariura.F., Miyabo.A., Date.M., Fukada.E., and Tajitsu.Y. Improvement of Piezoelectricity of Poly(L-lactide)Film by Using Acrylic Symmetric Block Copolymer as Additive. Jpn.J.Appl.Phys. 52 09KE02 2013.

2014

226. Tanimoto.k.,Nishizaki.H.,Tada.T.,Shiomi.Y.,Ito.N.,Shibata.K.,Furuya.H.,Abe.A., Imoto.K.,Date.M.,Fukada.E., and Tajitsu.Y. Effect of Helix Inversion of poly(β -phenethyl L-aspartate) on Macroscopic Piezoelectricity. Jpn.J.Appl.Phys.53.09PC01. 2014.

2016

227. Fukada.E. Piezoelectricity and Electrostimulation in Bone. In Electrically Active Materials for Medical Devices, S.A.M.Tofail and J.Bauer (eds.) Imperial College Press, London, 19-28, 2016.

228. Fukada.E. Research on Bioelectromechanics for 70 years. J. Biorheol.30:1-5. 2016.

和文報告

1949（昭和 24）年

1 深田栄一：木材の振動的性質（I）応用物理 19，130 － 13 4 .1949.

1950（昭和 25）年

2 深田栄一：ビアノ響板用木材の振動的性質 科学 20，568 － 569．1950.

3 深田栄一：楽器用木材の振動的性質 小林理学研究所報告 1，180 － 184．1950.

4 深田栄一：楽器用木材の振動的性質 日本音響学会誌 7，49 － 54．1950.

1951（昭和 26）年

5 深田栄一：疲労による木材の振動損失の変化　小林理学研究所報告 1，278 － 281．1951．6 深田栄一：木材の振動的性質　小林理学研究所報告 1，21 － 28．1951.

1953（昭和 28）年

7 深田栄一：木材の振動的性質　木材工業 8，1 － 5．1953.

8 深田栄一：黒鉛と珪素油の懸濁液の電気伝導度　小林理学研究所報告 3，1 － 5．1953.

9 深田栄一、小川智哉：パラフィン・カーボンブラツク混合体の電気伝導度について　小林理学研究所報告 3，161 － 164．1953.

1954（昭和 29）年

10 深田栄一：ポリメタアクリル酸メチルエステルの振動弾性率、振動損失、クリーブ、及び歪力緩和の相互関係について　小林理学研究所報告 4，1 － 7．1954.

1955（昭和 30）年

11 深田栄一：誘電体の帯電現象　応用物理 24，206 － 209，255 － 258，299 － 302，341 － 345　1955.

12 深田栄一：放射線をあててつくられる新しい高分子　科学 25，554 － 558．1955.

13 深田栄一：高分子の圧電気　高分子　4 、200 － 209．1955.

1956（昭和 31）年

14 深田栄一：高分子への放射線の効果　日本物理学会誌 11，1 － 10．1956.

15 深田栄一、安田栄夫、小原二郎、岡本一：木材の動的弾性率及び圧電率の年代経過による変化　小林理学研究所報告 6，104 － 107．1956.

1957（昭和 32）年

16 深田栄一、保田栄夫、小原二郎、岡本一：木材の動的弾性率及び圧電率の年代経過による変化　応用物理 26，25 － 28．1957.

17 深田栄一：振動粘度計の試作　高分子 6，52 － 55．1957.

1958（昭和 33）年

18 深田栄一、J．F．Fow1er：絶縁物質の摩擦帯竃と電子捕獲準位との関係　小林理学研究所報告 8，136 － 137．1958.

19 深田栄一：海外こぼれ話　高分子 7，485 － 490．1958.

20 深田栄一：圧電気材料　特許公報 245465（特許出願公告、昭 33 － 3467）

1959（昭和 34）年

21 深田栄一：緒晶性高分子物質の圧電効果　小林理学研究所報告 9，45 － 56．1959.

22 深田栄一、清水修平、大野寿彦：振動板粘度計の改良について　材料試験 8，91 － 95．1959.

23 深田栄一：東海村の原子力研究所を訪ねて　高分子 8，54 － 56．1959.

24 深田栄一：固体の静電気測定法（セクター方式測定器）高分子 8，583 － 586．1959.

25 深田栄一：高分子物理　日本物理学会誌 14，708 － 714．1959.

26 深田栄一：高分子の摩擦帯電　電子写真 1，3 － 7．1959.

1960（昭和 35）年

27 深田栄一：粘鯛物質の工業的レオロジー　高分子 9，240 － 256．1960.

28 深田栄一、曽根敏麿、福島正義：練圧によるバターの粘度の変化　材料試験 9，316 － 320 1960.

29 深田栄一：照射高分子の電気伝導度　高分子 9，999 － 1003．1960

1961（昭和 36）年

30 深田栄一、伊達宗宏：直読式固体粘弾性測定器の試作　材料試験 10，344 － 347．1961，

31 岡小天、深田栄一、曽根敏麿：平行板プラストメーターによる可塑性脂肪の粘弾性　材料試験 10，333 － 336．1961.

32 深田栄一、曽根敏麿、福島正義：バターのチクソトロピーと緒晶化度　材料試験 10，338 － 341．1961.

33 深田栄一：高分子絶縁体への放射線の効果　物性 2，287 － 291．1961.

34 深田栄一、福島正義、曽根敏麿：粘調物質のローリングによつて起る新しい流動現象　小林理学研究所報告 11，36 － 47．1961.

35 深田栄一、伊達宗宏：ポリ酢酸ビニル・スチレン・グラフト共重合体の動的粘弾性　小林理学研究所報告 11，53 － 60．1961.

36 深田栄一、伊違宗宏：直読式固体粘弾性測定器の試作　小林理学研究所報告 11，29 － 35 1961.
37 深田栄一：最近の粘弾性測定装置　高分子 10，837 － 840．1961.
38 深田栄一：ポリエチレンの放射線架橋　樹脂加工　9 － 15．1961.
39 小原二郎、野田茂、深田栄一、伊達宗宏：座の機構に関する実験的研究　第 2 報　座の動的変形測定装置としての多次元図形シンクロスコープの試作　日本建築学会論文報告集 69，297 － 304．1961.
40 深田栄一、保田岩夫：圧電体特許公報 289402（特許出願公告、昭 36 － 13276）
42 深田栄一：圧電素子特許公報 289406（特許出願公告、昭 36 － 13479）
43 深田栄一：振動による粘性測定法　特許公報 294455（特許出願公告、昭 36 － 19042）

1962（昭和 37）年

44 曽根敏磨、深田栄一：ミルクおよびミルクゲルのレオロジー　材料試験 11，298 － 302 1962.
45 深田栄一：高分子物性の最近の研究　高分子 11，258 － 265．1962.
46 矢作吉之助、深田栄一、静帯電効果　電気通信学会雑誌 45，519 － 522．1962.
47 深田栄一、福島正義、曽根敏磨：粘凋物質のローリングによつて起こる新しい流動現象　II 縞模様の条の高さ　小林理研報告 12，1 － 6．1962.
48 深田栄一、福島正義、曽根敏磨：曲げ回転法による可塑性物質の粘弾性の研究　小林理研報告 12，51 － 60．1962.
49 深田栄一、伊達宗宏：コラーゲンのレオロジー　高分子 11．1284 － 1286．1962.
50 鈴木邦夫、深田栄一：ポリエチレン、酢酸ビニル、グラフト共重合体の溶融粘度小林理研報告 12，169 － 171．1962.

1963（昭和 38）年

51 鈴木邦夫、深田栄一：被照射シリコンオイルの法線応力、粘度、動的粘弾性　材料 12　335 － 338．1963.
52 福島正義、曽根敏磨、深田栄一：可塑性物質の非線形粘弾性現象　材料 12，295-299. 1963.

1964（昭和 39）年

53 伊達宗宏、深田栄一：レオロジー測定法概観　日本油化学協会誌 13，52 － 62．1964，
54 深田栄一、増沢光信：トリステアリン－トリオレインニ成分系のレオロジー的性質　材料 13，325 － 330．1964.
55 河合平司、深田栄一、伊部高由、庄野久男：小試料の新しい毛細管粘度計と血液の粘度研究への適用　材料 13，313 － 318．1964.
56 深田栄一：血液のレオロジー、invivo の研究が今後の課題　化学と生物 2，21 － 22、1964

57 深田栄一：圧電性高分子　日本物理学会誌 20，185 － 186．1964．

1965（昭和 40）年

58 深田栄一、増沢光信：油脂の結晶化挙動と粘弾性　材料 14，274 － 278．1965．
59 福島正義、曽根敏磨、深田栄一：Cheese の粘弾性と水分効果 材料 14，270 － 273．1965．
60 深田栄一、伊部高由：少試料粘度計の改良とその応用　材料 14，252 － 256．1965．

1966（昭和 41）年

61 深田栄一：骨の圧電気　固体物理 1，50 － 53．1966．
62 深田栄一：レオロジー入門 I、II　化学と生物 4，614 － 617，677 － 682．1966．

1967（昭和 42）年

63 深田栄一：セルロースとコラーゲンの圧電気　化学と生物 5，15 － 16．1966．
64 深田栄一：生体高分子の圧電効果　化学と工業 20，927．1967．
65 深田栄一：圧電気材料　材料科学 4，244 － 250．1967．
66 深田栄一：生体高分子の圧電気　高分子 16，795 － 800．1967．
67 高松俊昭、古永捷慶、深田栄一：放射線によるポリエチレン単結晶累積膜へのスチレングラフト共重合　高分子化学 24，795 － 800．1967．

1968（昭和 43）年

68 深田栄一：木材科学国際アカデミー　高分子 17，164 － 165．1968．
69 深田栄一、貝原真：凝固過程での血液の非ニュートン粘性と動的粘弾性　材料 17，304 － 306．1968．
70 深田栄一、伊達宗宏、江村恒夫：酢酸セルロースの複素圧電率の温度による分散吸収　材料 17，335 － 338．1968．
71 伊達宗宏、深田栄一：複素圧電率の測定法　応用物理 37，642．1968．
72 平井信之、伊達宗宏、深田栄一：木材の圧電効果に関する研究 I、II　木材学会誌 14　247 － 251，252 － 256．1968．

1969（昭和 44）年

73 高松俊昭、深田栄一：ポリフツ化ビニリデンのエレクトレット　理研報告 45，1 － 9．1969．
74 深田栄一：レオロジー国際会議　応用物理 38，382．1969．
75 高松俊昭、深田栄一：ポリフツ化ビニリデンエレクトレットの脱分極電流と分子運動　理研報告 45，1 － 9．1969．
76 高松俊昭、深田栄一：ポリエチレンおよびテフロンエレクトレットの脱分極電流と分子運動　理研報告 45，73 － 78．1969．

77 深田栄一：繊維と高分子の電気的性質（2）高分子の圧電性　繊維と工業 2，718 － 724 1969.

78 深田栄一：内科学におげるレオロジーの導入（2）生体レオロジーにおげる測定方法　日本内科学会雑誌 58，43 － 46．1969.

1970（昭和 45）年

79 深田栄一：応用面広がるエレクトレット現象　電気学会雑誌 90，223 － 226．1970.

80 深田栄一：圧電現象　化学と工業 23，187 － 192．1970.

81 高松俊昭、深田栄一：ポリスチレンおよびポリカーボネートのエレクトレット熱分析　理研報告 46，47 － 52．1970.

82 深田栄一、貝原真、植田浩義：低ずり速度での血液の構造粘性　材料 19，371 － 374．1970.

83 高松俊昭、石田勝巳、深田栄一：カルナウバ蝋エレクトレットの二三の性質について　理研報告 46，139 － 146．1970.

84 高松俊昭、深田栄一：ポリエチレンおよびパラフィン類のエレクトレット熱分析　理研報告 46，131 － 138．1970.

85 深田栄一、甲野格：コラーゲン希薄溶液に対するガンマ線の照射効果　Collagen Symposium 8，173 － 184．1970.

1971（昭和 46）年

86 高松俊昭、大竹国広、深田栄一：液晶のエレクトレット熱分析　理研報告 47，116 － 124 1971.

87 深田栄一、高松俊昭：エレクトレット　物性 12，513 － 528．1971.

88 深田栄一：高分子のビエゾ電気とエレクトレット　日本物理学会誌 26，845 － 849．1971.

89 高松俊昭、町田孝久、深田栄一：トリグリセライドのエレクトレット熱分析　応用物理 40、1093 － 1099．1971.

90 深田栄一、熊川昇：コラーゲンの動的圧電分極　応力と歪 1，40 － 44．1971.

1972（昭和 47）年

91 深田栄一：電石　精密機械 38，316 － 320．1972

92 深田栄一：有機物のビエゾ電気　固体物理 7，176―78．1972.

93 長谷川嗣夫、水野明、松本博志、山本光伸、三枝正裕、深田栄一、高松俊昭、小坂雄二：抗血栓生成物質ならびに薬剤に関する研究（第 2 報）人工臓器 1，68 － 69．1972.

94 高松俊昭、深田栄一：ポリエチレンおよびポリブロビレンの熱エレクトレットについて　高分子化学 29，505 － 510．1972.

95 貝原真、深田栄一：フイブリノーゲンートロンビン凝固反応の動的粘弾性による研究　材料 21，376 － 380．1972.

96 植田浩義、深田栄一：フィブリン延伸膜の圧電性、誘電性および粘弾性　材料 21，397 － 400．1972.

1974（昭和 49）年

97 高松俊昭、中島義博、深田栄一：直鎖式炭化水素およびその誘導体のエレクトレット　熱分析　応用物理 43，460 － 467．1974.
98 貝原真、深田栄一：フィブリン凝固反応の動的粘弾性による研究（温度の影響について）日本レオロジー学会誌 2，23 － 25．1974.

1976（昭和 51）年

99 深田栄一、植田浩義：液状圧電体　特許公報（昭和 51 － 38074）

1977（昭和 52）年

100 高松俊昭、深田栄一、数元伊之助：カルナウバ蝋およびそれから分離したエステル類　脂肪酸類、アルコール類の熱エレクトレツトの表面電荷の時間依存性　理研報告 53　49 － 61．1977.
101 高松俊昭、湯本久実、深田栄一：カルナウバ蝋エレクトレットの熱刺激電流による表面電荷の研究　理研報告 53，139 － 146．1977.
103 高松俊昭、深田栄一：カルナウバ蝋および松脂の熱エレクトレットにおけるヘテロ電荷よりホモ電荷への変換時間の温度依存性　理研報告 53，199 － 206．1977.
104 深田栄一：生物の成長と電気　応用物理 46，958．1977.
105 深田栄一：高分子誘電体　工業材料 25，40 － 46．1977.
106 深田栄一：生体とエレクトレット　スチールデザイン 163，29 － 30．1977.

1978（昭和 53）年

107 井上四郎、保田岩夫、津山直一、深田栄一、高橋栄明：電気刺激による仮骨形成の間題保田岩夫先生を囲んで　整形外科 29，498 － 520．1978.
108 井上四郎、大橋俊郎、市田正成、長谷斎、瀬理純、深田栄一：電気刺激による骨増生を惹起する微小電流について　中部日本整形外科災害外科科学会雑誌 21，298 － 300　1978.
109 高松俊昭、香山聡、深田栄一：ポリマーエレクトレットの表面電荷に対する消毒処理の影響　静電気学会誌 2，268 － 275．1978.

1979（昭和 54）年

110 深田栄一：高分子の圧電性と焦電性　静電気学会誌 3，83 － 91．1979.
111 高松俊昭、牟田口則子、深田栄一、松本博志：多孔質ポリテトラフルオロエチレンの吸水性と抗血栓性　高分子論文集 36，231 － 239．1979.

112 高松俊昭、深田栄一、奥山哲生、篠原功：コロナ荷電によるポリアルキルメタクリラート樹脂の表面電荷の減衰　高分子論文集 36，667 － 670．1979.

113 古川猛夫、五宝友哉、伊達宗宏、高松俊昭、深田栄一：コロナ分極したポリフッ化ビニリデンの圧電性　高分子論文集 36，685 － 688．1979.

114 深田栄一　電気刺激と仮骨　応用物理 48，381 － 386．1979.

1980（昭和 55）年

115 深田栄一：骨の成長と電気現象　生物物理 20，313 － 315．1980.

116 深田栄一、岩間清徳、井上四郎、今井勉、高松俊昭、福士紀晃、渡辺正司：エレクトレットの応用と今後の応用　静電気学会誌 4，55 － 65．1980.

117 高松俊昭、和田仁一、深田栄一、松本博志：放射線による多孔質ポリテトラフルオロエチレングラフト共重合体の吸水性と抗血栓性　高分子論文集 37，781 － 787．1980.

118 矢吹武、林浩一郎、田淵健一、大野敦也、佐藤正明、深田栄一、藤井忠彦、岩本国治、松友勝巳：コラーゲン圧電膜による電気的仮骨形成の研究　整形外科基礎科学 7［骨 . 軟骨代謝の生理と病態］別刷 127 － 133．1980.

119 井上四郎、大橋俊郎、梶川究、佐々木信幸、深田栄一、伊達宗宏、田辺幹雄、芦原司、浦池正浩：変動する電磁場の骨および内臓諸器官への影響について 整形外科基礎科学 7［骨 . 軟骨代謝の生理と病態］別刷 161 － 169．1980.

120 深田栄一：骨の圧電気と圧電フィルムによる仮骨形成 整形外科基礎科学 7［骨 . 軟骨代謝の生理と病態] 別刷 491 － 500．1980.

1981（昭和 56）年

121 高松俊昭、松本強、深田栄一、松本博志：エチルアルコール－生理食塩水混合溶液による溶血性と凝血性　理研報告 57，63 － 70．1981.

122 赤真正人、篠原功、高松俊昭、深田栄一：コロナ荷電した塩素化ポリエチレン－ポリスチレンブレンドマーの表面電荷減衰と熱刺激電流　高分子論文集 38，587 － 591　1981.

123 深田栄一：生物の生長と静電気　静電気学会誌 5，223 － 227．1981

124 古川猛夫、深田栄一：トランスデューサとしての有機材料　材料科学 18，2 － 7．1981.

125 深田栄一：測定装置を作る楽しみ　高分子 30，401．1981.

126 深田栄一：高分子強誘電体　高分子 30，826 － 828．1981.

127 深田栄一：バイオレオロジーの電気現象　医用電子と生体工学 19，475 － 479．1981.

1983（昭和 58）年

128 深田栄一：私の高分子の考え方　高分子 32，252 － 253．1983.

1984（昭和 59）年

129 深田栄一：高分子圧電気の研究とロマン　蟻塔 5．6，16 － 19，7．8，19 － 21．1984.

130 深田栄一：寿命と地球磁場　竹栄 16，22．1984.

1987（昭和 62）年

131 深田栄一：西ドイツの大学に滞在して　日本バイオレオロジー学会誌 1，1 － 4．1987.

132 深田栄一：西ドイツの大学での雑感　静電気学会読 11，228．1987.

1988（昭和 63）年

133 深田栄一：電流で骨を作る　交流 19，10 － 12．1988.

134 平井信之、深田栄一、鈴木養樹、宮地康彦：セルロースおよび木材の低温での圧電緩和　材料 37，560 － 564．1988.

1989（平成元）年

135 深田栄一：静電気と血液レオロジー　静電気学会誌 13，73．1989.

136 深田栄一：これからのバイオレオロジー　日本バイオレオロジー学会誌 3，98 － 105．1989.

137 深田栄一：和田八三久教授を悼む　日本物理学会誌 44，686．1989.

138 飯島正行、高橋善和、深田栄一：有機機能薄膜の新たな展開を拓く蒸着重合　日経ニューマテリアルズ　12 月号 93 － 101．1989.

1990（平成 2）年

139 深田栄一：レオロジー研究の回顧　日本レオロジー学会誌 18，1．1990.

140 深田栄一：生体への電気刺激の意義 - 物理的観点から - 骨、関節、靱帯 3，317 － 322．1990.

141 深田栄一：電気機能性高分子の応用　Ulvac Technica1 Journal 34, 1990.

142 深田栄一：骨の圧電気をめぐる話　超音波 TECHN0　6 月号 50 － 53．1990.

143 高橋善和、飯島正行、深田栄一：極薄のポリユリア圧電 , 焦電材料　化学と工業 43,1495 － 1497, 1990.

144 深田栄一：高分子物質の圧電緩和現象　日本レオロジー学会誌 18，151 － 161．1990.

1991（平成 3）年

145 深田栄一：高分子の圧電、焦電、強誘電性　応用物理 60，375 － 376．1991.

146 深田栄一：岡小天先生を悼む　高分子 40，113．1991.

147 深田栄一：岡小天先生の研究の追憶　生物物理 31，47 － 49．1991.

148 深田栄一：電磁場が骨折をなおす　らいふ 51、30-33,1991.

1992（平成 4）年

149 深田栄一：私の恩師一北から南から一岡小天先生　臨床科学 28，139 － 143, 1992.

1993（平成 5）年

150 深田栄一：電気刺激の研究に関する歴史と将来の展望　電気刺激による骨 . 軟部組織修復の促進 , その基礎と応用 . 生体電気刺激研究会編、文光堂　1993, 3-10.

151 深田栄一：骨の成長に及ぼす応力および電磁場の影響　日本バイオレオロジー学会誌 7,19-25,1993.

1994（平成 6）年

152 深田栄一：強誘電性高分子の最近の話題、ポリ尿素とポリ乳酸 .　高分子 43, 214-217, 1994.

1997（平成 9）年

153 高橋善和 , 深田栄一 : 蒸着重合ポリ尿素膜圧電材料　超音波 Techno, 9, 26-29, 1997.

1998（平成 10）年

154 深田栄一 : バイオレオロジー研究の進歩、日本バイオレオロジー学会誌 12, 2-11, 1998.

155 深田栄一 : ソフトマテリアルの研究、静電気学会誌、22,63,1998.

156 深田栄一：岡　小天先生　－高分子物理からバイオレオロジーへ－ , 高分子増刊　47, S7, 1998.

157 深田栄一 : 生体電気刺激研究の進歩、日本生体電気刺激研究会誌　12,1-12,1998.

2000（平成 12）年

158 深田栄一：エレクトレットマイクロホン、静電気学会誌 24,177,2000.

2010（平成 22）年

159 深田栄一：骨の電気力学的刺激の研究　回顧と展望　日本生体電気物理刺激研究会誌 24,1-10,2010.

2013（平成 25）年

160 深田栄一：有機圧電高分子の歴史的変遷　機能材料　33,No.10,4-13,2013.

2016（平成 28）年

161 深田栄一：生体圧電気から細胞増殖まで　日本バイオレオロジー学会誌 (電子版)30.3, 1-2, 2016

和文著書分担

1959（昭和 34）年

1. 放射線物性、岩波講座現代物理学　小谷正雄 , 伴野雄三共編　岩波書店
　　4 章　高分子物質への放射線の効果　p.61-75

1962（昭和 37）年

2. 技術者のための物性物理　押田勇雄編　日刊工業
　　5 章　高分子物質　p.135-195
3.　現代物理学の眼　日本物理学会編　東大出版会
　　13．高分子物理
4. 繊維物理学　　繊維学会編　丸善
　　電気的性質　　p.153-168

1963（昭和 38）年

5. 高分子の物理学　高分子工学講座 2　高分子学会編　地人書館
　　10．1　静電気　　p.334-338
6. 高分子の物理　　日本物理学会編　朝倉書店
　　8．液体粘弾性　　p.174-197

1965（昭和 40）年

7. レオロジー測定法　高分子学会編　共立出版
　　10．超低周波領域の動的粘弾性　　p.178-195
8. 生体高分子　　今堀和友、大沢文夫編　朝倉書店
　　レオロジー　　p.252-263

1966（昭和 41）年

9. 生体高分子Ⅱ　生物物理学講座 5　日本生物物理学会編　吉岡書店
　　レオロジー　p.387-414

1969（昭和 44）年

10. 生物物理化学研究法Ⅱ　今堀和友、野田晴彦、坪井正道編　朝倉書店
　　コラーゲンの圧電性　　p.92-97

1970（昭和 45）年

11. レオロジー入門　　岡　小天編　　工業調査会

4 章　生物レオロジー　　p.77-83

1972（昭和 47）年

12. 高分子の電気物性とその応用　　高分子学会編
　　生体高分子と電気　　p.179-205

1973（昭和 48）年

13. 高分子測定法．構造と物性上　高分子学会編　　培風館
　　3-3. 固体の動的粘弾性　p.286-302
　　4-4. 圧電性　　p.498-510

1974（昭和 49）年

14. ポリアミノ酸―応用と展望　　藤本康夫編　　講談社
　　7．ポリアミノ酸の圧電気とその応用　　p.259-271

1981（昭和 56）年

15. 静電気ハンドブック　　静電気学会編　　オーム社
　　11 章　生体の電気現象　　p.336-346

1982（昭和 57）年

16. 緩和現象の科学―高分子を中心として－　高分子学会編　共立出版
　　10 章　高分子の圧電緩和　　p.163-181

1984（昭和 59）年

17. 熱力学的 . 電気的および光学的性質　　高分子実験学 12　共立出版
　　（編者）

1989（平成元）年

18. 生体電気刺激　Ｊ．ブラック著　深田栄一 . 井上四郎訳　共立出版
　　（翻訳）

1993（平成 5）年

19. 電気刺激による骨 . 軟部組織修復の促進－その基礎と応用―
　　監修：津山直一、深田栄一　編集：酒匂崇、井上四郎、湯川佳宜 文光堂
　　序論：電気刺激の研究に関する歴史と将来の展望　p.3-10.

2013（平成 25）年

20. 生体電気物理刺激による骨軟部組織修復法　　金芳堂

監修 : 深田栄一、大橋俊郎、久保俊一　編集 : 金郁喆、伊藤聡一郎、山本謙吾、小宮節郎

生体電気刺激の回顧と展望　p.2-13

略歴（平成 26 年 1 月現在）

氏名　深田栄一

生年月日　大正 11 年 3 月 28 日生（満 91 歳）

本籍　東京都国分寺市東元町 3 丁目 2447

現住所　352-0011 埼玉県新座市野火止 5 丁目 18-21 めいと新座志木 221

電話　048-479-2815

Email　fukada@s5.dion.ne.jp

学歴

昭和 9 年 3 月　大阪市神津小学校卒業
昭和 13 年 3 月　大阪市北野中学校 4 年終了
昭和 16 年 3 月　大阪高等学校卒業
昭和 19 年 9 月　東京帝国大学理学部物理学科卒業
昭和 31 年 8 月～ 33 年 2 月
　英国ロンドン大学インペリアルカレッジ英国政府留学生
昭和 35 年 9 月　理学博士

職歴

昭和 19 年 10 月～ 38 年 3 月
　財団法人小林理学研究所
昭和 19 年 10 月　研究生
昭和 26 年 4 月　研究員
昭和 34 年 4 月　高分子研究室 主任研究員
昭和 38 年 4 月～ 64 年 3 月
　理化学研究所
昭和 38 年 4 月　原子物理研究室研究員
昭和 38 年 7 月　副主任研究員
昭和 41 年 4 月　生体高分子物理研究室　主任研究員
昭和 55 年 12 月　理事（ライフサイエンス担当）

昭和 59 年 10 月～ 59 年 12 月	筑波研究センター所長
昭和 60 年 4 月～平成元年 3 月	研究顧問
昭和 56 年 5 月～現在	理化学研究所 名誉研究員
昭和 62 年 4 月～平成 10 年 12 月	日本真空技術 (株) 超材料研究所　顧問
平成 3 年 4 月～現在	小林理学研究所
平成 3 年 4 月～ 14 年 9 月	理事
平成 14 年 10 月～ 25 年 6 月	研究顧問
平成 25 年 6 月～現在	名誉研究員

非常勤講師等

昭和 34 年 4 月～ 36 年 12 月	学習院大学理学部
昭和 35 年 6 月～ 38 年 3 月	理化学研究所嘱託
昭和 34 年 6 月～ 36 年 3 月	慶応大学工学部
昭和 36 年 12 月～ 55 年 12 月	学習院大学理学部非常勤教授
昭和 38 年 10 月～ 4 年 5 月	東京大学農学部
昭和 43 年 4 月～ 43 年 10 月	東京農工大学農学部
昭和 44 年 10 月～ 45 年 3 月	東京農工大学工学部
昭和 46 年 4 月～ 46 年 9 月	北海道大学理学部
昭和 46 年 4 月～ 47 年 3 月	九州大学工学部
昭和 47 年 11 月～ 48 年 3 月	名古屋大学農学部
昭和 48 年 12 月～ 49 年 3 月	名古屋大学理学部
昭和 49 年 10 月～ 50 年 3 月	東京工業大学工学部
昭和 50 年 10 月～ 51 年 3 月	大阪大学理学部
昭和 50 年 10 月～ 51 年 3 月	山形大学工学部
昭和 51 年 3 月～ 64 年 3 月	早稲田大学大学院理工学研究科
昭和 51 年 4 月～ 59 年 12 月	早稲田大学理工学研究所特別研究員
昭和 52 年 4 月～ 53 年	東京工業大学理学部
昭和 53.10 月～ 54 年 3 月	名古屋大学農学部
昭和 54 年 4 月～ 55 年 9 月	慶応大学工学部
昭和 55 年 4 月～ 55 年 9 月	山形大学工学部
昭和 58 年 12 月～ 59 年 3 月	京都大学木材研究所
昭和 56 年 2 月～ 63 年 7 月	科学技術会議ライフサイエンス部会専門委員
昭和 61.4 月～平成 5 年 3 月	ライフサイエンス振興財団理事

海外客員教授

昭和 40 年 8 月～ 41 年 3 月	米国ニューヨーク大学物理学科
昭和 49 年 4 月～ 49 年 9 月	ブラジル、サンパウロ大学

昭和 61 年 4 月～ 61 年 10 月	西ドイツ、ダルムスタット工科大学
昭和 61 年 11 月～ 61 年 12 月	西ドイツ、コンスタンツ大学
昭和 62 年 1 月～ 62 年 2 月	西ドイツ、アーヘン工科大学
昭和 63 年 3 月～ 63 年 6 月	米国アイゼンハウアー医学センター

学会

日本物理学会	終身会員
応用物理学会	功労会員
高分子学会	終身会員
静電気学会	会員
日本レオロジー学会	会員
日本バイオレオロジー学会	名誉会員
日本バイオマテリアル学会	名誉会員
日本微小循環学会	名誉会員
日本生体電気刺激研究会	名誉会員
木材科学国際アカデミー	終身会員

賞罰

昭和 45 年 5 月	山路自然科学奨学賞
昭和 54 年 10 月	静電気学会功績賞
昭和 59 年 5 月	高分子学会科学功績賞
昭和 62 年 10 月	東京通産局長賞
昭和 63 年 11 月	日本バイオマテリアル学会科学功績賞
平成元年 4 月	ガルバニ賞（イタリー）
平成 2 年 5 月	日本レオロジー学会賞
平成 5 年 11 月	勲３等瑞宝章
平成 7 年 7 月	ポアズイユ賞（国際バイオレオロジー学会）
平成 15 年 9 月	岡小天特別賞（日本バイオレオロジー学会）

記念講演

新測定器開発の歴史

伊達宗宏（小林理研→理研→）小林理研、リオン

はじめに

深田研では、測定器作りが多い。それは、研究室の主な研究テーマである木材や骨を始めとする高分子の圧電性は、深田先生が始められたもので、測定法が今までの市販の測定器では間に合わなかったことによる。ここでは、研究室で作った装置の紹介という面から深田研の研究の歴史を紹介する。

測定器を新規に開発するメリット
1）新しい装置から新しい研究分野が開ける。只、認知させる努力は必要。
2）機能を限定すると既存の装置を買うより安上がりである。予算の獲得にあまり力を入れなくて良い。
3）個人的かもしれないが、“ 既存の装置で新しい研究 ” をするより楽しい。

測定器開発の流れ

私は 1959 年、学習院大学の四年の時、大川先生の薦めで深田研に入った。当時の圧電性の主な測定器は、空間電荷制御グリッドを持った四極管 UX54 を使ったスタティックな正圧電効果の測定器と、試料と水晶に同じ電圧を加えたとき発生する応力の比をロッシェル塩を使って検出する逆圧電装置であった。測定試料は形状は 2cm 角、厚み 1cm 程度の形状の木材が主であった。これにアルコールに溶かしたシェラック（SP レコードの原料）でスズ箔を電極として貼り付けて測定していた。
以来、色々な測定器を造ってきたが、パーツは真空管からトランジスター、さらに IC，オペアンプと変化をしていった。更にアナログからデジタルに、次いでパソコンの発展と共にハードウエアーからソフトウエアーに、単なる測定から測定データーのソフトによる解析に重点が移っていった。

これらの開発した装置（主として粘弾性と圧電性の装置）を以下に紹介する。

1）粘弾性測定装置

高分子材料の弾性は、分子運動に対応した緩和が特徴である。マクロな粘弾性特性を測定することにより、内部構造や分子運動に関した情報を得ることが出来る。振動測定では、応力と歪みの比だけでなく、その位相差を測定する必要がある。

1-1) リサジュー図で測定した粘弾性測定器（真空管式）

卒研生として初めに作った装置である。非接着型抵抗線歪計を二個用い、フィルム状の試料に

加えた引っ張り力と変形量を検出する。加振は電音製のラッカー盤の録音用カッターヘッドを用いた。全体が小型にできたため、200Hz まで測定が可能であった。力と変位の信号を 2 電子銃型のオシロの一方のビームの X-Y 軸に入れ楕円を描かせた。他方のビームは掃引モードにして、4 本の水平な輝線を描かせた。測定は、楕円の横幅（変位）を一定に保ち、二本の輝線で上下から楕円を挟み、残りの二本を中央のふくらみ部分に合わせ、その輝線の間隔を調節するダイアルの目盛りから固さと位相角を求めた。

1-2) 手動バランス式粘弾性測定器（真空管）

1-1 の改良型。2 ビームのオシロを使わず、メーターのふれを最小にするという操作のみで測定出来るようにした。力と変位信号を、一方の振幅が増えるときに他方の振幅が減る二連のボリュームを通し、出力の差を測定した。その差が最小になるボリューム位置から固さが、差と元の信号の振幅比から位相差が求められる。VAc,St グラフト重合体の粘弾性を測定し、初めて小林理研報告に載った。この装置は小林理研で商品化し、繊高研が購入した。
ここまでは小林理研で行った。

1-3) 直読式粘弾性測定器（真空管）

手動操作なしで弾性率の実部と虚部を求める方式である。応力と歪みの検出は、これまでと同じ非接着型の抵抗線歪み計を使った。抵抗線歪計のブリッジに交流を加えた場合は歪みで変調された交流が出力として得られる。一般に、正弦波信号で振幅変調された波は搬送波の上下に一つずつサイドバンドを持ち、このサイドバンドには元の変調信号の振幅と位相情報を持っている。このサイドバンドの振幅と位相を測定すれば、元の変調信号の振幅と位相が求められる。歪みの実部成分と虚部成分を得るために歪み計で変調された交流のサイドバンドを直交する 2 個の位相検波器で検波した。それにより、XY レコーダーに弾性率の実部と虚部の温度変化のグラフを書かせる事が出来た。小林理研で考え、駒込の理研で完成した。試料の部分を 2 重円筒に換えたものを使い、貝原君がフィブリノーゲンの凝固課程を測定していた。

1-4) 直読式粘弾性測定器（オペアンプ）

理研が和光市に移ってすぐの頃である。1-3 の方式を三鬼エンジニアリングというところがオペアンプを用いて製品化したものである。この装置は慈恵医大の磯貝先生のところに入った。

1-5) 振動型粘度計（オペアンプ）

1-3 と同じ原理のもの。モーターを使い 6 試料の液体の粘弾性を同時に測定できる装置を作成した。1 試料のものが東洋精機で商品化された。貝原君が血液の粘弾性に使用した。これも和光市の理研である。

1-6) 広弾性率範囲粘弾性測定器（液体からゲルまで）

従来の粘弾性測定器は歪み一定で測定を行っていたが、試料が堅いときは歪み一定とし、柔らかいときは応力一定とし、その間を連続的に変化をさせて測定する装置を考案した。ダイナミックレンジが広く、6 桁にわたり連続して測定できるので、ゲルや接着剤の凝固過程等を測定するのに適している。東洋精機で商品化された。

1-7) 減衰振動型（密封試料方式）

これは容器を自由回転振動をさせたときの慣性モーメントと振動の減衰率が内部の粘性により変化する性質を利用して、密閉容器内の粘度変化を測定する装置である。密閉状態で測定できるので、空気に触れたくない試料や揮発性の試料の測定に適している。血液のように凝固に際して壁の材質に大きく影響されるものでは、人工血管そのものを測定容器に使った。数ヘルツで自由回転振動させ、周期と減衰率を測定した。10 センチポアズ前後の粘度の試料に適していた。加振と振動の検出を同じ可動コイルで行った。昔、特殊法人になる前の理研はガルバノメーター等の測定器を造っていたが、その当時のマグネットやコイルが工作部に残っていたので、それに試料容器をぶら下げて一号機を作った。これも東洋精機で商品化された。

1-8) 表面弾性測定器

これは探触子を物体の表面に当て、その動き易さから表面の弾性率を測定する装置である。探触子は当てた面の接線方向と法線方向に二次元的に動き、その二つの動きに対する固さをそれぞれ測定する。膠原病の一種である強皮症の測定を青梅市立病院の桜井先生と一緒に行った。従来は生検をして固さを測るか医者の感覚で評価するしかなかったが、非侵襲で精度良く皮膚の硬さの変化が測定できた。また、皮膚の老化度や老化を防ぐ化粧品の研究をカネボウの松井さんと行った。

1-9) エマルジョン転相評価装置

一般に粘度測定器は測定中に水分の蒸発などが起き難い構造になっている。この装置は逆に水分が蒸発しやすいように試料を薄層に展開し外気に触れた状態で、プローブで表面をこする構造である。その時の摺動抵抗から粘性の変化を測る。粘度が低いほどギャップが狭くなるので、測定可能な粘度範囲が広いという特徴がある。水中油滴型のエマルジョンは、水分の蒸発に伴い相が逆転（転相）し油中水滴型に変化する。この転相過程では粘度の上昇と共に弾性があらわれる。化粧用クリームは、皮膚に塗っている最中に転相を起こし、この転相挙動は塗り心地に密接に関連している。従来型の粘度測定器では測定中に転相を起こすほど水分を蒸発させることが出来なかったが、この装置によってクリームの転相過程の粘度変化をうまく測定することが可能になった。初め協和発酵の稲葉さん、本多さん、篠原さん、後に資生堂の草苅さんと一緒に研究をした。

2）圧電性測定装置

高分子の圧電性の測定では、セラミック、水晶などの従来の測定法と二つ違いがある。第一は試料形状である。セラミック等では静的測定法、共振法のどちらもブロック状の試料を使っていた。それに対し新しく開発した装置の試料形状はフィルム（薄片）状である。第二は、それまでは圧電率は実数として取り扱ってきたが、我々の測定器は圧電率を始めから複素数として測定したことである。複素数として扱うと言うことは周波数依存性があるということである。高分子の粘弾性の世界では不思議ではないが、結晶を扱う人から、それは圧電定数という定数ではないと言われた。

粘弾性と比較したときの一番大きな違いは、圧電性の場合は位相差が進みと遅れと両方を取りうる事である。従って、1-1,1-2 の方法は進み遅れが分からない為圧電率の測定には適していない。

2-1) 手動バランス式圧電性測定器 (真空管）

初めに作成した装置は、水平に保ったフィルムを、左右から銜え、片側から可動コイル型の加振器で振動応力 (10Hz) を加え、フィルムの上下の面に貼り付けた電極から圧電で生じた電荷を取り出す構造だった。測定は、加振器コイルの電流に比例した電荷とコイル電流と 90 度位相の異なる電荷を作り、圧電電荷を打ち消す事で行われる。打ち消し量はポテンシオメーターで調節する。ポテンシオメーターのダイアルより、加振力と電荷の比が読み取れる。トータルの電荷量がゼロになるときの打ち消し量から圧電率を求める。そのゼロ点の検出は、打ち消し点に現れる 10Hz の交流電荷を、90 度位相の異なる二組の位相検波器をとおし、それぞれの出力をオシロスコープの X、Y 軸に入れ、輝点がオシロの画面の中央（零位置）に来るようにして求めた。駒込の理研で始めた。

途中で平井さんが名古屋大学に移られた。

2-2) バランス型圧電率測定器（オペアンプ）

これは、手動バランス式のポテンシオメーターをアナログ乗算器に変え、位相検波出力の積分値で乗算器の出力を変えることにより、マニュアル動作を自動化したものである。同じ回路で、印加電圧と分極の比から複素誘電率、応力と歪みの比より複素弾性率を求めることもできた。これは東洋精機で製品化された。理研が和光市に移ってすぐ、古川君が理研に入ってきたが、この回路はもっぱら彼が造った。彼のこれ以降の大活躍はご存じの通りである。

2-3) 圧電逆圧電効果測定器

試料に応力を加え分極を計る代わりに、試料に電圧を加え、そのとき生じる応力を PZT で測定する装置である。機械系が簡単なため、高周波まで測定できた。押木君の装置である。

2-4) パソコン制御方式粘弾性、誘電性、圧電性測定器

ここまではゼロメソッドであったが、この頃よりパソコンが使えるようになったので、応力、歪み、分極を AD 変換し振幅比と位相差から各種の定数を求めるタイプに変わった。OS は、はじめ CP/M 後に MS-DOS に変わった。ベーシックで書ける部分はもっぱら古川君がやり、アセンブラーの部分を私が書いた。東洋精機で商品化し、100 台売れたヒット商品であった。

3）強誘電体関連の測定器

PVDF,VDF-TrFE 共重合体の強誘電性がらみの装置について述べる。

3-1) 誘電温度、周波数分散、誘電ヒステリシス、焦電性、マルチパルス分極反転測定システム

データージェネラルの NOVA というミニコンを使った測定装置である。AD､DA インターフェースも既製品が無く手作りであった。焦電はチョップしたレーザー光を熱源として用い、温度や印加電界を変えて測定出来るようにした｡マルチパルスの分極反転は､メモリー特性を見る為に使った。誘電分散の温度依存性の測定は色々な人に使われた。

3-2) 電界下の赤外二色性測定器

赤外吸収の装置を改造し、直交する赤外を交互に出しその強度比を測定する装置である。初

期の検出器は光伝導型の検器 (Au-Ge) であったため電流ノイズが大きかったが、後に光起電力型 (HgCdTe) のものと換え良いデーターがとれるようになった。PVDF 双極子が電界により回転するのを初めて観測した。電界印加中に試料がパンクすると、回路のオペアンプもやられてしまうので、測定が大変だった。

3-3) スイッチング、高周波誘電測定器

これは、古川君がベル研に行く前後に作っていた物である。スイッチング用のステップ電圧はサイリスターを使って発生させた。誘電率は、YHP のベクトルボルトメーターを使い数メガから 100MHz まで測っていた。彼の広い周波数範囲の誘電測定の始まりはこの辺りと思う。

3-4) 強誘電性光メモリー測定器

VDF 共重合体薄膜の二次元分極情報の書き込み読みだし装置である。NEC のパソコン PC98 を使った。書き込みは、常温の抗電界以下の電界を加えた状態で、熱で抗電界を下げて反転させ、読み出しはスポット光による焦電流を読み出して行った。1cm2 当たり 1Mbit 程度の書き込みは出来た。ただ、千万回程度の反転でへたりが見られた。これは熱処理により回復するが、記録媒体としての実用化には後一つ工夫が必要である。

4）その他の測定器

4-1) 回転検光子型複屈折測定器

偏光子と検光子の間に間に 1/4 波長板を入れリターデーション零近傍の精度を上げ、更に検光子を回転させて透過光の強度変化を測定する方法で、主軸の回転や、吸収／散乱についての情報も得られる。これは早大の武政君がゲルの配向を見る為に作った装置である。彼は一年前博士になった。4 年生からの長いつきあいだった。

4-2) 紫外・可視・赤外画像測定器

協和発酵化粧品部の依頼で紫外、可視、赤外 CCD を用い広い波長域のカメラを作り、皮膚の観察を行った。日焼け、その戻り、将来現れるシミの予備軍の顕在化といったものの定量的な測定が出来た。また最近はやり出した血管ネットワークの抽出など色々おもしろい測定が出来た。しかし、将来発生する、“ しみ ” が明瞭に分かっても、それを回避する化粧品が未だ開発されていなかったこともあり、今ひとつ先の発展に繋がらなかった。

5）番外編：測定器ではないが

5-1) 測定ソフトの作製

作製した解析ソフトの例として、動画像の 1 ラインを抽出し、時系列で並べそのパターンから新しい情報をつかむというものがある。これは初め､国立精神神経センターの吉田さん（同級）の電気刺激による筋収縮の挙動を見る為に作ったが、後に植松さんにより液晶に電界をかけると発生する縞模様の動特性を見るのに使われた。

5-2) 負性容量回路を用いた圧電体の固さの制御

圧電体の負荷として負性容量をつなげると見かけの固さが変化をするという原理に基づいたシ

ステムである。PVDF 系では見かけの弾性率が 1 桁以上変わることが確認されている。現在、理科大の古川研から数年前リオンに入った児玉君が小林理研でこの原理を使った可変遮音壁の研究を行っている。セルロース系でもこの原理が使えるはずであるが、結合係数が小さく難航している。

理想的な測定器の作り方

よく測定回路を造ってくれと相談を受けることがある。そのときは、まず“作らずに済ませる”方法を考える。作らないで済ませるという事は価格はゼロ、故障もせず、動作は理想的、即ち理想的な測定器を作ったことになる。これで相談の 6 割は消える。次に“買えるものは買う”という事で 8 割は消える。それで解決出来ない場合とは、“既製品はあるが高くて買えない”か“そのような測定器は存在しない”かのどちらかである。

高くて買えない場合、普通は、同じ物を安く作るのは不可能なので諦める。しかし、学生の投入による人海戦術で人と時間は只にするとか、目的を達せられる最小限の機能だけにするという手法である程度は解決できる。商品としては問題だが、保護回路をなくし性能を極限まで上げるとか、長時間安定性を犠牲にするとか、部品のばらつきを頼みに使えそうな物を選別するとか、使い勝手を犠牲にするとかいうことも、実験室の装置としてはあり得る選択肢である。
“今まで存在しなかった測定器”作りの結果が、前節に述べた測定器群である。

装置作りのもと

最近は、装置を作るより予算を獲得して高価な最先端の装置を買って、人より先にデーターを出すという類の研究も一部で行われているが、装置作りはやはり研究の基本だと思う。今まで種々の実験装置を作ってきたが、その基は何であったか考えてみた。

いま学習院大学の二年の物理実験を見ているが、最近は、昔ならば小学生や中学生の時にやっていたような電池を使ったおもちゃ作りと言った事と全く無縁な学生が増えている。数年前であったら考えられないような、家庭に来ている電気が“交流 100V,50Hz”という事を知らない学生が、特に化学科で年々増えている。これでは装置作りなどは思いもよらなくなってしまう。このような学生にどの様な教え方をしたらよいだろうか。自分の小、中、高校時代を後から振り返ってみると、時代的に非常に幸運に恵まれていたと思う。何が良かったか、当時の環境を箇条書きにしてみた。

1) 理屈より先に物にふれた

小学校時代は丁度戦後の物のない時代で遊ぶ物が何もなかった。真空管が切れて使えないラジオが家に沢山あった。暇なので端から徹底的に分解した。即ち、コンデンサーは箔まで、トランスは、ピッチで固まっていたが、線をほどいてバラバラになるまで、真空管は割ってプレート、グリッド、カソード、ヒーター迄分解した。真空管は割るとガラスの銀色が白くなるのが不思議だった。抵抗は火鉢で真っ赤になるほど熱すると、長さ 2 ～ 3cm の白いマカロニみたいな瀬戸物（ステアタイトと後に分かる）が得られた。不思議なことに、一台すっかり解体すると次の一台という塩梅で次々に壊して行くにつれ、段々その仕組みが分かってきた。今でもおぼえているが、トランスの二次側 230V30mA の巻き線と 2.5V2A の巻き線の区別が分からなくなり、1mm

径の太い線が高電圧と思い念入りに絶縁テープで絶縁し、一次側（これは分解する時に分かっていた）に 100V を加え、何気なく細いより線に触ってショックを受けたことがある。電線の太さと電圧は無関係であるということを身を以て体験したわけだが、ものにふれ、肌で感じるということは非常に良かったと思う。

2) 自作する動機がある（自作は完成品より 1 桁以上安かった）

最近のテレビ、ビデオなどは高度の技術が詰め込まれており、自作は不可能であるし、出来たとしても遙かに高価なものになってしまう。しかし、その当時は民生用の機械は自作すると一桁以上安く同じ性能のものが作ることが出来た。それが一つの魅力であった。
中学になると高一からスーパー（高校 1 年とスーパーマーケットではなく、高周波一段増幅とスーパーヘテロダイン）のラジオを作り祖母の家に持って行った。これが資金源になった。
又、お小遣いが少なかったので、間違った使い方をして部品を壊さないということに細心の注意を払わなくてはならなかったが、これも物の理解に役に立った。

3) 結果の良否が自分で分かる（当時は盛んだったオーディオに興味を持ったこと）

オーディオの回路作りでは、良い音のものを作るのが目標である。音の良い悪い、ノイズ、特にハム音の混入は誰が聞いてもすぐ分かるものであり、同時に組み立ての技術の上手下手と直結しているものである。自分で作ったものの善し悪しが自分ですぐ分かったので、教える人がいなくてもある程度の所まで進歩できた。

4) 活字を鵜呑みにしない（アマチュア向けの雑誌は間違いが多い）

無線やオーディオ関係の月刊誌には 1 冊あたり平均 3 ～ 4 ヶ所は中学生でも分かる理論的な間違いがある。慣れてくると、まず “ これは変だ ” と言うことが分かる様になった。そして、“ 何故おかしいか ” は後からゆっくり考えるというやり方を覚えてからは、間違いが見つけやすくなった。オーディオの世界にはおかしな理屈付けが幅をきかせていたが、丁度良い反面教師になった。

5) 楽しみながら知識が身に付いたこと（新しい技術の揺籃期に接した）

テープレコーダー等が出始めたのが中学の頃で、ヘッドのパーマロイの水素アニール法とか、易しい原理の解説などがふんだんに雑誌に載っていた。又、トランジスターの一般向けの解説が出始めたのもそのころである。成長型、合金型、ドリフト構造と言った新しい技術が、教科書で読むのではなくリアルタイムに新製品として現れて来た。丁度サーフィンでうまく波に乗ると何もしなくてもどんどん進むように、知らず知らずのうちに知識が身に付いていった。

TV も未だ一般的ではなく、NHK と NTV が毎日数時間試験放送していた。2 インチ（後に 5 インチの静電偏向型）のブラウン管をジャンク屋から買ってきて、非同調鉱石テレビを組み立て、相撲中継を眺めた記憶がある。同調はアンテナの向きで行い、ゲルマニウムダイオードでアンテナ入力を直接検波し映像信号を得た。その話をしても、不可能だといって誰も信用してくれなかった。

以上は、高校までの話であるが、コンピューターに関しても同じような経験をした。理研で最

初に使ったコンピューターは、駒込時代、板橋の分室にあったトランジスター式の大型計算機で、メモリーはフェライトコアーだった。その後、ミニコン、ワークステーション、パソコンという流れに乗る事が出来た。研究の面でも高分子の圧電性という波に乗ることが出来、合計三つの恩恵を受けられたのは幸せだった。

今の学生の環境を見ると、電気を使った身の回りの道具は完全にブラックボックス化されており、使っている物に含まれている技術レベルと使う人の知識の差は非常に開いてしまっている。この様なときほど、易しい事は小さい時から学んでおかないと間に合わない筈であるが、現実には昔の様にモーター作りといった易しい経験を子供時代に積んできた学生は減ってきている。勿論全ての事を基礎から理解をするのは不可能であり、道具として使いこなせればよいという場合も多い。しかし、道具として使うものにもある程度の内部構造に関する理解は必要である。この様な時代にどの様に学生を教えてゆけばよいか、難しい問題である。

今教えている物理実験に上記の五箇条を当てはめると、先ずは、実験が上手くいっているか否かが自分に分かり、実験上の工夫が結果に直ぐ反映できる、というような実験を与える事だと思う。又、1 年の授業は基礎から教え始め、4 年から急に最先端の研究に関わるようになる。このギャップをクリアー出来たものだけが次世代の研究者となれるという感じがするが、この先、ギャップが限界を超えて大きくなり過ぎて破綻することはないだろうか。

最後に、研究室で作成した測定器を大勢の方々に使って頂いたことを感謝致します。

E-mail：date@estate.ocn.ne.jp

記念講演

血液レオロジー研究の思い出

貝原　真　　理研

はじめに

筆者は 1966 年の 12 月に理研生体高分子物理研究室に入った。その頃の理研はまだ駒込にあり、半年後に和光（当時は大和町）に移ったように記憶している。昨年（2002 年 3 月）に理研を定年退職したが、現在理研情報環境室で研究を続けさせてもらっている。本稿では、筆者の理研での 35 年間の研究を振り返って、その思い出、現在行っている研究について述べる。

1．理研入所の頃

最初に深田先生より頂いた研究テーマは、合成ポリペプチドの圧電性であった。ポリペプチドや圧電性についての知識が全くなかったこともあり、調べたことや勉強したことについて毎週 1 回セミナーで話をするようにと深田先生に言われたのを覚えている。約 2 ヶ月間ポリペプチド（主にポリ - γ - ベンジル -L- グルタメート）に関する文献を集めて勉強したような気がする。

2．血液凝固の研究のスタート

2 ～ 3 ヶ月が経過した頃、半年後（？）に京都で国際レオロジー会議があるので、しばらくの間血液凝固のレオロジーに関する測定をして欲しいとの話があった。このことが理研で約 35 年間におよぶ血液に関する研究の始まりであった。最初は高分子フィルムなどの固体の動的粘弾性を測定する装置を液体用に改良した装置を用いて、ウマやウシの血液の凝固過程の動的粘弾性を測定した。当時は実験関連器機が全くなかったので、リオンの伊部高由さんの所に行き、遠心分離機などを借用して急場をしのいだ。

国際会議用のデータを無事に取り終わって、圧電の研究に戻るはずであったが、このまま血液凝固の実験を終えてしまうのは惜しい気がしたので、深田先生にもうしばらく血液凝固の実験を続けたいことを伝えると、“ どうぞどうぞ ” の返事が返ってきた。

3．都立大でのセミナーの思い出

血液レオロジーの研究をすることになったものの、筆者はレオロジーとか非ニュートン粘性などの言葉をほとんど聞いたことがない状態でのスタートであった。そのころ都立大の岡小天先生の研究室で血液レオロジーに関するセミナーを行っていることを伺い、おそるおそる出席することにした。参加してみると、岡先生、松信先生、村田先生、荒川先生などほとんどが理論屋であった。最初は話を聞いても全く理解できなかったのを覚えている。しかし、当時わからないながらもセミナーに参加したことが大変良い勉強になった。

このセミナーは岡先生が都立大を退職されて慶応大学に移られてからも続けられ、だんだんと実

験屋も参加するようになり、いろいろな話を聞くことができて楽しかった。

4．来訪者の思い出

筆者が 20 歳代に、理研に来られて実験をされた 3 人の先生が思い出に残っている。駒込時代には東健彦先生（当時東大医学部、後に信州大）が血管を持参し、血管の動的粘弾性を測定された。血管はクランプが難しく、張力や水分によって測定値が変化してしまうので、苦労されていた。測定が午後 6 時過ぎに終わると、私のような若僧を駒込駅付近の店にビールを飲みに連れて行っていただいたのを思い出す。

磯貝行秀先生（慈恵医大）に初めてお会いしたのは、先生が駒込の理研の研究室を訪ねて来られたときであった。それ以来現在まで、磯貝先生とは公私にわたってお世話になっている。理研が大和町に引っ越してからも、新橋の慈恵医大から理研まで車を運転されて来られ、患者さんの血液の凝固過程をご自身で測定された。当時の装置は、自動記録などできなかったので、装置にへばりついていて測定値をノートに書き写す必要があり大変であった。

もう一人印象に残る先生は、丸山工作先生（当時東大教養、後に京大から千葉大）である。筋肉の成分であるアクチン、ミオシン、トロポニンなどの水溶液の粘度を回転粘度計で、また動的粘弾性を二重円筒型粘弾性測定装置で測定された。先生は大和町の理研に午前中から弁当持参で来られ、お昼休みも取らずに弁当を食べながら測定されていた姿を今でも思いだす。研究者のあるべき姿を教えていただいたのが丸山先生である。

5．血液凝固過程の解析に関する研究

血液凝固の研究を中心に行った 1970 年代は、主にフィブリノゲンとトロンビンの系を用いて実験を行った。ボトルに入ったフィブリノゲン粉末を取り出して、その重さを天秤で量る必要があった。フィブリノゲン粉末が空気中をふわふわ漂ったり、フィブリノゲン水溶液が手などに付着しても、当時はあまり気にせずに試料の調製をしていた。今考えると感染などの危険性があったわけでぞっとする。

フィブリノゲン水溶液のゲル化過程の動的弾性率と損失弾性率の時間変化の測定と解析から、フィブリン網目構造と溶液の pH 、イオン強度および温度との関係を中心に検討した。レオロジーで有名な Ferry 先生らは、1950 年頃に光の透過の測定から、各条件下で形成されるフィブリンゲルの網目構造に関する論文を発表している。 レオロジー的解析から予想したフィブリンゲルの網目構造が、Ferry 先生らの結果と良く一致し、うれしかったことを思い出す。

フィブリンのゲル化過程の解析と平行して、フィブリンゲルのレオロジー的性質も調べた。特に思い出に残るのは、ゲルの応力とひずみの関係が著しい非線形性を示すので、何とか理論と合わせることができないかといろいろと考えたことである。例えば逆ランジュバン関数を用いてひずみと応力の関係を表すことを試みたり、岡先生や前田秀篤さんに相談したりしたが、この研究は結局論文にすることができなかった。

6．研究テーマを模索した頃

1978 年から二年間アメリカに行く機会を得たが、帰国後にどのような研究をしたら良いかを考えた時期がしばらく続いた。血液レオロジー関係で興味ある問題として、赤血球の凝集構造

（rouleau、ルロー）形成機構の研究や凝固していない血液の動的粘弾性を測定することがあった。幸い高感度の二重円筒型レオメータを理研の技術部で試作してもらえたので、この装置を用いて 1 dyn/cm2 (0.1 N) 以下の非常に小さな動的粘弾性の測定ができた。ヒト、ウマ、ウシ血液の動的粘弾性の測定を行ったのもこの頃である。ウシの赤血球は生理的条件で凝集しないという報告があったので、遊び半分に人工的ルローを作製することを試みたりした。後述の現在行っている赤血球の凝固活性に関する研究では、ヒトとウシの赤血球の凝固活性とルロー形成との関係なども調べており、当時集めたデータが役に立っている。

同じ研究室の高松俊昭先生は、当時人工血管の開発に取り組んでいた。人工血管の抗血栓性をイヌに埋め込んで評価する実験を東大の松本博志先生のところで見学させてもらったことがあった。その見学がきっかけで、動物実験を行わずに人工血管の抗血栓性を評価する方法はないものかと伊達宗宏さんに相談した。その結果、伊達さんのアイデアと技術部の協力を得て開発したのが、現在も使用している減衰振動型レオメータである。最初の頃は減衰振動型レオメータを用いての抗血栓性の評価を確立することを中心に研究を行ったが、その後減衰振動型レオメータの医学への応用を考えた研究も行った。抗血栓性の評価はもちろん、血液凝固過程、血栓溶解過程、血沈の迅速測定などいろいろ応用することを試みた。この装置のおかげで、多数の論文を書くことができたし、特許を申請することもできた。深田先生がどこかにお書きになった、“ 新しい装置の開発が独創的な研究につながる ” という言葉を思い出す。

減衰振動型レオメータを用いて血液凝固に関する新しい領域の研究ができないかということを 1985 年頃から考えはじめた。1970 年代後半に血管内皮細胞が培養できるようになったことを知り、放射線生物学研究室の金子一郎先生のところで細胞培養技術を習うことにした。最初は線維芽細胞を用い、回転培養法によってガラスチューブ内面を一様に細胞を培養する技術を確立した。その後しばらくしてから、内皮細胞の培養法を東京医科歯科大学の下門顕太郎先生に教えていただき、培養内皮細胞をガラスチューブ内面に一様に被覆した簡単なハイブリッド型血管モデル作製することができた。

7．ハイブリッド型人工血管の開発

ガラスチューブのかわりに高分子材料を用いてハイブリッド型人工血管を作製する研究を 1987 年ごろからスタートした。このころ研究に参加されたのが、会社から理研に派遣された川本義貴さんであった。最初に、血管を構成する成分である各種タイプのコラーゲン、内皮細胞、平滑筋細胞および線維芽細胞の抗血栓性やコラーゲン上での細胞の増殖性に関する基礎データを集めた。高分子材料としては、柔らかでしかも抗血栓性の良いセグメント化ポリウレタン（SPU）を用いることにした。抗血栓性が良いということは、細胞が材料表面に接着しにくいということでもあるので、細胞が接着・増殖できるように表面を改質する必要があった。鈴木嘉昭氏（当時ソニー、現理研）らとの共同研究で、SPU 表面にイオンを注入することによってその表面で細胞が増殖できるようになることを発見した。さらにプラズマ処理やカーボン蒸着した SPU 表面にも細胞が生着することがわかった。

筆者らの人工血管の開発は、基礎的なところを一つ一つ明らかにしながらであったので、そうこうしているうちに後発グループに先を越される羽目になってしまった。しかし、新規性が無いことがわかってからも、せっかく行ってきたのだからということで研究を続け、1998 年ごろに内径が 2 mm のポーラスな SPU チューブを用いたハイブリッド型人工血管を作製することがで

きた。この研究を行ったおかげで、コラーゲンや細胞等に関する知識を身につけることができた。ハイブリッド型人工血管の実用化には解決しなければならないいろいろな問題があり、臨床応用されていないのが現状である。

8. 赤血球の凝固活性に関する研究

ハイブリッド型人工血管の構築と平行して、ハイブリッド型血管モデルと減衰振動型レオメータを組み合わせた計測系で、血流停滞での血液と内皮細胞との相互反応に伴う血栓形成や血液凝固に関する研究をスタートした。 実験を始める前は、内皮細胞と血液が接触する場合には、内皮細胞は抗血栓性機能を有するので、内皮細胞と接触する血液の凝固や血栓は起きないであろうと予想していた。そこで、実験としては活性酸素や無酸素状態下で刺激した内皮細胞、あるいは流れのズリ応力で損傷した内皮細胞と血液の相互反応を調べる必要があると考えた。しかし、実際に測定してみると、予想に反して正常な内皮細胞と接触する血液は 30 分もすれば凝固してしまうことがわかった。少々がっかりしたが、気を取り直して取りあえずなぜ凝固が起こってしまうのかを調べてみることにした。

その頃、高等学校の先生の山中恵子さんが、サバティカルを利用して 1 年間私どもの研究に参加した。早速、山中さんの血液をいただいて減衰振動型レオメータで凝固過程を測定したところ、血沈が速く起こるために対数減衰率（LDF：液体の粘度を表す）がみるみる低下しまい、血液の凝固開始時間を決定することができなかった。しかし奇妙なことに、50 分を経過したときにわずかに LDF が増加し、再び減少するという結果が得られた。その現象について詳細に調べたところ、50 分ごろに起こる LDF の変化は、血漿（血小板と白血球を含むが赤血球を含まない）部分の凝固が起こったためであり、赤血球が存在する部分の凝固は血沈の過程で早々と起こってしまっていることが明らかとなった。この結果から、赤血球の存在が血液凝固反応に重要に関与している可能性を考えるようになった。

さらにいろいろデータを集めた結果、血液中の凝固因子が赤血球によって活性化することで凝固反応が開始することが明らかとなった。そこで数ある凝固因子の中で、どの因子が赤血球によって活性化されるかを調べることにした。この実験を行ったのが、当時慈恵医大の磯貝先生のところから理研に派遣された大学院生の川上哲さんであった。一つの凝固因子が欠損する血漿（無血小板血漿、PFP）を購入し、それに赤血球を加えた系での凝固過程を測定した。その結果、赤血球によって第 IX 因子あるいは第 X 因子が活性化されることがわかった。次の段階として第 IX、第 X 因子のどちらの因子が活性化するのかを決定する必要があった。これを明らかにするためには、生化学的な手法を用いなければならず、われわれのグループには生化学の実験を経験した者がいなかったために研究はストップしてしまった。

３年ほど経過したときに、大学 4 年生の時に私のところで卒研を行った岩田宏紀君が、博士課程を私のところで行うことを希望して再び戻ってきた。幸いに岩田君は修士課程で生化学関連の研究を行っていた。早速、赤血球の凝固活性に関する研究を学位論文のテーマとして決め、 1 年かけて赤血球によって第 IX 因子のみが活性化することをつきとめた。こうなると欲がでてきて、赤血球膜に第 IX 因子を活性化する酵素が存在するとの仮定を設け、その酵素を探す研究をスタートさせた。 最終的に赤血球膜に存在する第 IX 因子活性化酵素を抽出、精製、同定することができたが、結果がでるまでに約 5 年かかってしまった。現在、その論文を執筆している最中である。

赤血球が関与する新しい凝固反応を偶然なことから発見できたが、この反応が血管内血栓形成

に関与しているかどうかを明らかにすることが重要である。ここ２、３年、エコノミークラス症候群という言葉がマスコミで取り上げられることが多かった。この病態は、飛行機の中で長時間じっと座っていると、下肢深部静脈でできた血栓（主にフィブリンゲル）が心臓を経由して肺の動脈を閉塞してしまうことによって起こり、重篤な場合には死に至ることさえある。一般には静脈血栓症と捉えられており、外科的手術、長期臥床、脱水などにより静脈系の血流の停滞、ヘマトクリット（赤血球濃度）の増加などにより血液粘度が増加すると起こりやすくなることが報告されている。まさに血液レオロジーと密接に関連している疾患であるように思える。
血流停滞やヘマトクリットの増加は静脈血栓形成の危険因子であるとしても、危険因子だけでは血栓を引き起こすことはできず、何らかのトリガー機構が存在すると考えられる。減衰振動型レオメータでは、試料中のズリ速度は非常に小さく、この装置を用いての測定は血流停滞状態での測定と考えられる。そこで赤血球膜に存在する酵素による第 IX 因子の活性化が静脈血栓形成の一つのトリガーであるとの考えの基に、現在その説を証明するための研究を行っている。血流の停滞とヘマトクリットの増加は赤血球による第 IX 因子の活性化を促進し血液凝固が早く起こること、凝固亢進状態にあるヒトの血液の赤血球は第 IX 因子の活性化を促進し血液凝固が早く起こることなどが明らかとなってきた。

この研究を開始して十数年が経過するが、最初のうちは赤血球に凝固活性があるということを学会や論文で発表しても全く信じてもらえなかった。最近になってやっと多くの研究者に興味を持ってもらえるようになってきた。

おわりに

研究生活を振り返ったときに、多くの方々に助けられ、支えられ、理研という最高の環境で研究できたことを幸せに思っています。深田先生をはじめ、長い間の研究生活でめぐりあった方々に感謝の意を表します。

〒 351-0198 和光市広沢 2-1
理化学研究所情報環境室
Tel : 048-467-9381
e-mail : kaibara@postman.riken.go.jp

記念講演

高分子強誘電体　研究の歴史と展望

古川猛夫　東京理科大学理学部（理研）

はじめに

最近，強誘電体がまた面白くなってきた．1920 年頃ロッシェル塩について発見された強誘電体は，協力現象の典型として多くの研究者を魅了し，固体物理学の進歩に貢献した．応用面では，強誘電性に付随する圧電性や焦電性を利用したトランスデューサーが，幅広い分野に貢献してきた．これに対して，強誘電体を象徴する分極反転を利用するメモリーへの応用は，1950 年代に寄せられた大きな期待に反して，磁性体との競争に敗れた形をとった．しかしながら最近，強誘電体の超薄膜や超微粒子の製法が大きく進歩し，分極消失や反転疲労といった問題点が少しずつ克服されて，電子回路に直結した不揮発メモリーの実現に向けて，着実に前進を続けている．

1970 年代，それまでの強誘電体がすべて硬い結晶であったのに対し，柔らかさを特徴とする新しい強誘電体が出現した．一つは強誘電性液晶で，高速ディスプレイへの応用を背景に急速な発展を遂げた．もう一つが強誘電性高分子である．1969 年，小林理学研究所の河合平司先生はポリフッ化ビニリデン (PVDF) に延伸とポーリング処理を加えると顕著な圧電性を示すことを見出された．すぐさま理化学研究所の深田研究室では，当時開発されたユニークな動的圧電測定装置を活用して実験を行い，複素圧電率の温度分散の定量的な測定を行った．さらに逆圧電効果や電歪の実験も行い，ポーリング条件と圧電性の詳細な関係が得られた．いま思えば，当時のデータは PVDF が強誘電体であることを強く支持するものであったが，高分子結晶中で分子が反転するということは信じがたく，局在電荷によるエレクトレット説を撃破するにいたらなかった．

70 年代半ばごろ，伊達さんと強誘電体ならば DE ヒステリシス曲線を測定できるはずだという結論になり，装置作りをはじめた．高電圧を交番的に印加できる電源をつくり，圧電測定に使う電荷増幅器と組み合わせて測定を行った．このとき NOVA3 というぴかぴかのミニコンを活用することができ，伊達さんは上機嫌であった．呉羽化学から提供された厚さ 7 μ m の PVDF の配向フィルムはすばらしく，図 1 に示すような明らかなヒステリシス曲線を得た．室温で残留分極が Pr=60 m C/m2，抗電場が Ec=50MV/m という数値は，現在も通用する数値である．さらに重要な点は温度を下げると残留分極が増大する強誘電体に特有の現象である．ガラス転移点よりはるかに低い -100℃においても明瞭なヒステリシスが観測できることに大いに興奮したのを覚えている．

我々はこの結果から，PVDF が高分子強誘電体であることを深く確信した．しかし，ヒステリシス曲線に強誘電性の主張に誤りが多いことは歴史の教えるところである．1979 年，米国のベル研究所に行く機会に恵まれ，そこで階段状高電場を用い，スイッチング特性とよばれる分極反転のダイナミクスの測定をやることを思いついた．文献を調べていると，1954 年 Merz による歴史的なチタン酸バリウムのスイッチング測定は，ベル研でやられたことがわかり勇気を得た．Johnson と一緒にやった実験はうまくいき，200MV/m の高電場では分極反転は 4 μ s の高

速で起きることを見出して，図２を APL に投稿した． PVDF のスイッチング特性の実験によって，ベル研の仲間に強誘電性高分子の存在を示すことができた．”Principles and Applications of Ferroelectric and Related Materials” を著した Lines と Glass も当時ベル研におり，著書中で彼らは PVDF をエレクトレットと位置づけていたので，新しいデータを見せたのを覚えている．

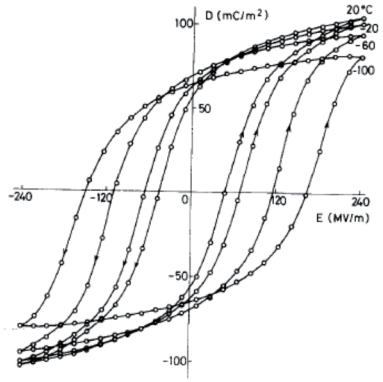


図１ PVDF のヒステリシス特性

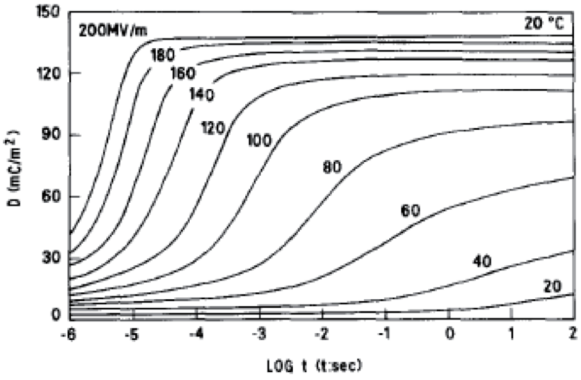


図２ PVDF のスイッチング特性

1980 年代に入り強誘電性高分子の研究が急速に発展したのは，ダイキン工業によって全分率にわたって合成されたフッ化ビニリデン (VDF) と三フッ化エチレン (TrFE) 共重合体に負うところが極めて大きい．我々は VDF 分率が 52mol% 共重合体について，昇温時に 70℃近傍に残留分極の消失，30MHz 近傍の分子運動の開始，X 線面間隔の変化，比熱のピークを観測し，キュリー点の存在を証明した．PVDF と違って，TrFE 共重合体は延伸処理を行わなくても，強誘電性結晶フィルムをとる．さらに延伸と熱処理を行うと，きわめて結晶性と配向度の高いフィルムになる．図３のヒステリシス曲線と図４のスイッチング曲線をそれぞれ図１，２と比べると，共重合体が理想的な強誘電特性を示すことがわかる．さらに，図３に示す，ように VDF 分率が 50mol% 以下になるとヒステリシスが反強誘電的なプロペラ形になり，やがて消失する．

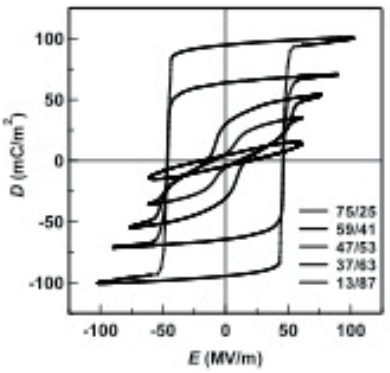


図３ VDF/TrFE のヒステリシス特性の分率依存性

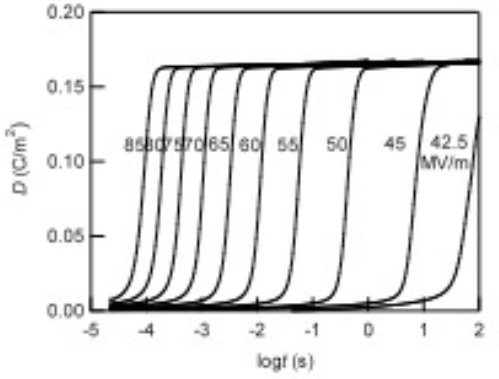


図４ VDF/TFE のスイッチング特性

多くの研究者の膨大な努力の結果，強誘電性高分子に関する理解は基本的には達成されたと考

えている．理解の一端を VDF/TrFE 共重合体の分率に依存する相変化として図 5 に示す．低温の強誘電相は全トランス鎖の平行パッキングにより構成され，モノマーの永久双極子がすべて一方向を向いた自発分極を形成する．分極反転は個々の分子鎖が軸周りの回転することにより起きる．VDF 分率が 50 － 80mol% の共重合体は，昇温により分子形態が TT，TG，TG’ の不規則な組み合わせからなる常誘電相への転移が起きる，常誘電相は熱運動により 10 － 100MHz の周波数で揺らいでいる．さらに温度を上げると，融解により分子鎖は直線性を失う．VDF 分率が 50mol% 以下では，強誘電相から全トランス形態を保ったままパッキングだけが乱れた反強誘電相を経て，常誘電相への転移が起きる．また VDF 分率が 80mol% 以上になると，強誘電相が直接融解する．

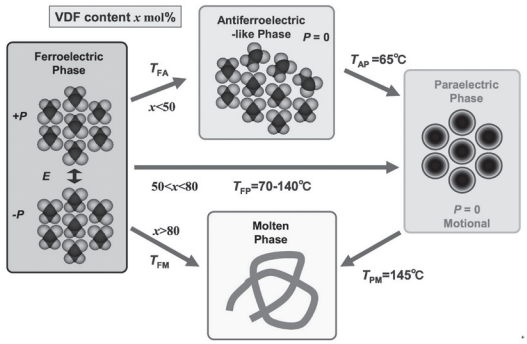


図 5　DVDF/TrFE 共重合体の逐次相転移と構造変化

話を少し定量的にしよう．溶融相は TT，TG，TG’ の 3 つの組み合わせがランダムな構造であるので，モノマーあたりの統計エントロピーは S=kln3=9J/molK となる．常誘電相は TT，TG，TG’ の組み合わせが分子鎖の直線性の要請のため少し制限される．簡単な計算の結果，状態数は約 1.6 となり，統計エントロピーは S=kln1.6=4J/molK となる．これらのエントロピー値は，キュリー点および融点におけるエンタルピー変化の実測値とよく一致している．こうしてみると，フッ化ビニリデン系高分子の強誘電的挙動は，高分子鎖の形態とパッキング状態の変化という高分子特有の言葉で語ることができる．このような振る舞いは高分子結晶の相転移において一般的に現れることが期待されるが，VDF/TrFE 共重合体ではモノマーのもつ永久双極子の配向秩序を伴うため，強誘電転移として観測されることになる．少し過激な表現になるかもしれないが，一般に強誘電体の原因とされるクーロン遠距離相互作用は，フッ化ビニリデン系高分子においては本質的な役割を果たしていないと考えている．強誘電相における分子間および分子内秩序が，逐次的に崩壊して融解に至る多様な相系列は，逆の極性を持つフッ素と水素のファンデルワールス半径が少しだけ違うことに起因する凝集構造の ”Instability” を引き起こしていると考えている．

最近東京理科大学の研究室では，VDF/TrFE 共重合体の超薄膜の研究を，若い学生諸君と一緒にやっている．強誘電性は分子の長距離秩序に起因するものであるので，寸法を小さくしてくとどこで消失するか興味をひかれる．スピンコート法を用いると，ナノオーダーの超薄膜を比較的容易に作成できる．しかしながら，厚さが 100nm 以下になると図 6 に示すように，ヒステリシス曲線が急激に消失する傾向を示す．いろいろな実験を行っていくうちに，どうやら VDF/TrFE 薄膜には数ナノメーターの非強誘電的表面層というものが存在すると考えざるを得ないという結

論に達した．電極の金属種にも強誘電特性は大きな影響を受けてくる．もっと深刻には，AFM観察を行うと，図７に示すように，薄膜の表面には結晶粒の集合が見え，数十ナノメーターの凹凸が残る．実際のナノデバイスを実現するには，このような構造を制御し，活用あるいは回避する必要がある．このような構造内で，高分子鎖は電場に対してどのように応答して強誘電性を発現しているのか，想像をめぐらすのは楽しい時である．同時に強誘電性高分子薄膜を用いた不揮発メモリーの実現にも大きな期待を寄せている．

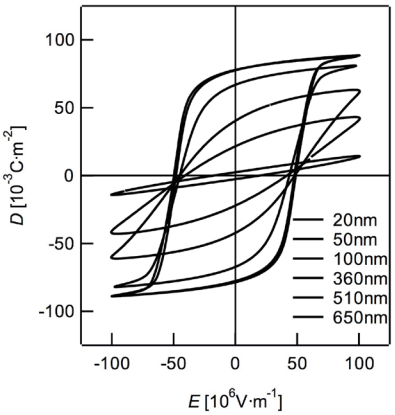


図６ VDF/TrFE のヒステリシスの膜厚依存性

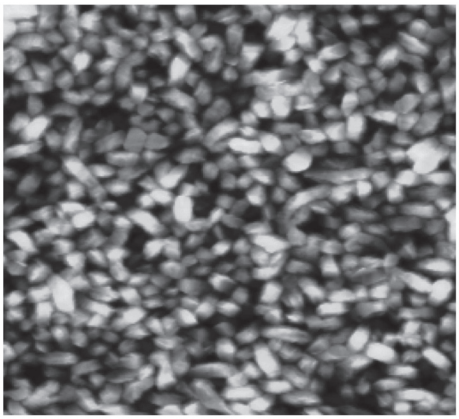


図７VDF/TrFE 薄膜の AFM 像（2 μ mx2 μ m）

e-mail : tfurukaw@rs.kagu.tus.ac.jp

記念講演

樹木の生長と木材の圧電性

平井信之　静岡大学農学部

はじめに

研究会に出席する機会を与えられ心より感謝致しております。深田先生から、理化学研究所での研究の歴史、先生にご指導を受けた方々についてのお話をお聞きし、大変懐かしく思いました。岡野先生のお話で、当時巣鴨にあった理研の様子を思い出しました。また先生のご指導を受け、現在第一線でご活躍の皆様の最新の研究についてのご講演は私にはいずれも大変難解でしたが、私にとって新鮮でした。

私自身木材の圧電性に興味を惹かれこれまで細々と検討を行ってきました。私が現在も興味を感じこの研究を続けて来られたことに大変感謝致しております。最近になって特に興味を感じて検討をはじめたことについて簡単に述べてみたいと思います。生命体としての樹木の成長と材質に関係して木材の圧電性がどのような情報をもたらすことが出来るのかということです。まだ、実験を始めたばかりでそれなりの結果を得ているわけではないのですが、現在の段階でのことを述べてみたいと思います。

樹木の成長と木材の圧電性

セルロース結晶の対称性により１８個の圧電率のうち８個の圧電率が存在する。木材中でのセルロース結晶の配列の仕方により、存在する木材中の圧電率の数が決まる。直交座標軸 X1、X2、X3 を樹幹の半径方向（髄から表皮の方向に正）、接線方向、繊維軸方向（地上から上に向かって正）に左手系にとる。木材中のセルロース結晶が繊維軸方向に配向していることにより、セルロース繊維を軸方向に互いに滑らせるようにずり応力を作用させると力の働く面と直角方向に分極する圧電率、d14 、d25　の２個がはじめに観測された。この場合、木材中でセルロース結晶が一軸配向しており、対称群としては「∞２」とみなされる 1)。木材が一軸配向でなく、繊維軸方向、放射方向、接線方向からなる直交異方性体として対称群「D2 」とすれば、d14、d25、d36 の３個の圧電率を持つことになる。木材の弾性的性質においては直交異方性体として扱う場合が多い。

従来、木材の成長と材質について、木材の組織、結晶性、力学的性質等の関連から多くの研究がなされてきた。木材の圧電性が木材中のセルロース結晶に依存していることより、木材の成長と材質に大いに関係していることが見出されている。木材の圧電性から木材の成長、材質に関連して新たな情報を得ることが出来るのではと期待している。

木材を直交異方性体としてみなし、セルロース結晶の配列もそれに従うとしたとき、木材の圧電定数として、前述したように、d14、d25、d36 の３個が存在するとことになる。木材の d36 は木口面で放射方向にずりを与えた場合に繊維軸方向に電気分極する場合である。d31' は木口面試料で繊維軸 X3 の回りに X1、X2 軸を回転させそれぞれを X1'、X2' とすると X1' 軸の

方向にに応力を加えた場合に繊維軸方向に分極することを示す圧電定数である。d31' は次の式で表わせる。d31' = c2d31+s2d32+scd36　ただし c=cos θ、s=sin θ、θ は X3 軸の回りの X1、X2 軸の回転角を表わす。測定値 d31' から d36 が得られる。実験としては木口面試料で、半径方向、接線方向および半径方向に４５度の試料を用いてそのときの圧電分極を測定することになる。これより d36 の値を得ることが出来る。針葉樹材では、d36 の値は d14、d25 の 1/10　オーダの値を示している。驚くことに針葉樹材約１０種を測定した現段階ではいずれも極性が同じで、負の値を示した。もしこれがすべての樹種においてこのようなことが示されるなら、木材が天地上下のについて極性を示していることになる。即ち、約 1 mm 厚さの木口面の試験片から、樹木が育っていた上下が判断できることになる。

Fig.1 にヒノキの d31'　の分布を示す。回転角度０度即ち d31　、回転角度９０度即ち d32 の場合には圧電出力は小さい。従って針葉樹の場合、d31' が主として d36 によるものと考えられる。 Fig.2 にヒノキの樹幹の髄から樹皮の方向に材料を採取し、木口面試料で半径方向に４５度の方向に応力を加えた場合の圧電率の測定値 d31'（回転角度 θ ＝４５度）を示す。いずれの場合も圧電率の値は負である。この場合には成長との関係が有りそうにも見える。

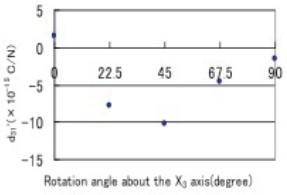


Fig.1. Piezoelectric modulus d_{31}' of Hinoki for rotation about X_3 axis.

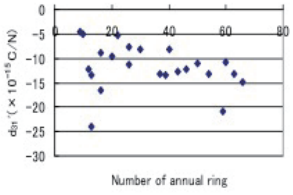


Fig.2.. Piezoelectric modulus d_{31}' of Hinoki for rotation by 45degree about X3 axis.

広葉樹について現在検討を続けている。多くの場合、d36 の値は正を示し、ある程度の傾向が見られるが、針葉樹のように単純でなく、複雑な様相を示している。d36 の値も針葉樹に比べて小さい。d36 になぜ極性が見られるのか。広葉樹では多くは一致しているが、なぜ異なる場合があるのか。針葉樹と広葉樹でなぜ異なるのか。それらの理由については残念ながら今の段階では不明である。広葉樹が針葉樹と異なって、複雑な様相を示すことに鍵があるともいえる。針葉樹は細胞としては仮道管が９０％以上であること、それに対して広葉樹は細胞組織の多様化、放射組織の発達等が大きく影響しているのではないだろうか。また樹幹の成長過程での樹幹内の成長応力はどうなのだろうか。応力としては些細であろうが、重力の影響は有るのだろうか。もくざいの圧電性は樹木が育つ過程での樹幹内の組織の成長の様子の一部を表わしているのであろうか。d31' そして d36 は d14 、d25 に比較するとそれらの値は小さいが、樹木の成長についてこれまで知られていなかった情報を提供することであろうことが期待できよう。今後少しでも検討をしたいと考えている。

文献

1）E.Fukada:J.Phys.Soc.Japan 10 149(1955); 深田栄一：小林理学研究所報告 9 45 (1955)

静岡大学農学部　平井信之

記念講演

圧電性と水

佐々木 伸太郎　　北陸先端科学技術大学院大学

弟子入りの頃

1973 年春、汚れた特大キスリングザックを背負って雨に濡れ、やっとの思いで和光市の理研にたどり着いた。ふらふらと守衛所のところでへたりこんでしまったが、助けられて敷地はずれの独身寮に入ることができた。それから毎日、今はなくなってしまったグラウンドを横切って研究室との間を往復する特別研究生としての生活が始まった。わずかな謝金ではあったが生活するには十分で、将来に対する不安を除けば何のしがらみもなく、とくかく毎日が楽しかった。
X 線回折だけやってきた者にとって、IC チップがころがる研究室の風景はかなり異質なものであった。果たしてやっていけるかという不安は隠しようもない。しかし、そこはメンバーの笑顔や理研の雰囲気が直ぐにカバーしてくれることとなった。

深田先生から酢酸セルロース系が面白いからやってごらんなさいと言われ、早速、ある装置を使うこととなったが、誰かが今は壊れているよと言う。装置の不具合は接続まわりであることが多いのでヒューズを変えてみたらこれが動いてしまった。些細な出来事だったが少し安心した。この装置は伊達さんが考案したものらしかったが、大きな 2 つのダイアルを回し CRT の中心に輝点をもってくることで複素圧電率を測定するというものだった。これをやると目の前に火の玉（の残像）が飛ぶよと押木さんに笑われたが、ダイアルを回すと火の玉がゆっくりと動き、使うほどに愛着のわく装置であった。古川さんのアドバイスでまず発信器から作ってみることになり、車で初めて秋葉原へ連れて行ってもらった。これがこののち自分の研究の中で IC 回路を組み立てるようになる初めとなった。

研究

毎朝、研究室に来ると酢酸セルロースの火の玉とにらめっこした。ところが、日々、圧電率の値が違うのである。初めは理由が分からず、とにかくやたらと測定を繰り返した。その頃、古川さんが自動打消し法で弾性率と圧電率を同時に測定できる装置を作られ、私もそれを使わせてもらえるようになった。朝から夜遅くまでかかって -150 から +150℃までの測定を 6 回繰り返したこともあった。150℃を超えた炉に液体窒素をほおりこんで一変に低温にまでもっていくのだから装置もたまったものではない。しかし、そんな酷使にもびくともしないのであった。

得意の X 線回折も測定し、結晶化度や配向度を求めた。X 線回折に関してはこちらが教える立場になった。多くの測定データから分かってきたことは、酢酸セルロースの圧電率が結晶化度と配向度の関数であり、結晶領域の圧電率の符号が温度上昇に伴い室温付近で反転し、かつ、吸湿によって大きく変わるということだった。重さにしてわずか 2％ほどの水が結晶の中に入り、これが電気物性を変えていたのである。水分子がどの場所にどのように付くのか、これは未だに

解明されていない。現代科学においてもこのような水の役割を調べることは難しい課題である。

この研究の合間にカニの甲羅からとったキチンの圧電率も測定した。タンパク質などを除去したカニの甲羅はもとの不規則なでこぼこの形をしており、電極を貼り付けるのに困った。研究室の隅に大きなロール圧延機があった。これを 100℃以上に熱しておき、これに熱水をかけながらもうもうたる湯気のなかで圧延すること十数回、ついにカニの甲羅は平らなものになったのである。これは高温の蒸気処理による木材や竹の加工法と同じものと言えよう。当初は研究室の名前に多少の違和感があったが、理研で私が扱ったものはまぎれもなく水素結合に満ちた生体高分子であった。以来、水の絡む話やセルロース系物質に興味を持つようになった。余談になるが、後年、進化の系統の違うカブトガニの甲羅のキチン質を調べてみたが、X 線回折では現代のカニと区別が付かなかった。

理研を去る頃

謝金からは毎回 1 割の源泉徴収が差し引かれていた。謝金は雑所得であると言う税務官にこの微財に課税するのはけしからんと主張し、結局、大半は還付された。神風クライマーを気取って夜行列車で東京を発ち谷川岳や穂高の岩登りも随分したが、岩場でケガをしてやっとの思いで寮に帰ったこともあった。運転免許も成増のホンダレインボースクールでとった。2 年目終わりの土壇場になって東京工大に助手の口が見つかった。最後の日はとりたて免許のレンタカーで東京荏原町にきわどい引越しをした。理研の風景と古い駅舎や町並みの幻影の中に確かに若い自分が居た。以来、あぶなっかしい綱渡りの人生を歩むことになるのだが、多くの人に助けられてここまで来たことに深く感謝している。

その後

高分子の X 線回折の分野に戻って 30 年近くになる。あの頃、長時間の測定を強いられた X 線回折も今では短時間でデジタル画像が得られ、ノートパソコンで数値処理や解析ができるようになった。高分子のあいまいな X 線データの中から最大限の情報を簡便かつ正確に抽出できるよう、これまで培ったノウハウを埋め込んだ解析ソフトウエア作りに取り組んでいる。

（e-mail: s-sasaki@jaist.ac.jp）

記念講演

深田研究室の思い出と現在の私

西成勝好　大阪市立大学大学院生活科学研究科

私が深田研究室にしばしば出入させていただきましたのは、1973 年から 1979 年くらいの間でした。その後も、時々お邪魔させていただいたことはありました。

多糖類の固体物性と言うことで、アミロースフィルムの圧電性、誘電性、粘弾性測定を行い解析しました。深田先生にご紹介いただきました北大の堤耀広先生の研究室で広幅 NMR 測定を教わり、固体の分子構造と分子運動との関係について勉強しました。私が勤務しておりました農水省食品総合研究所では生分解性高分子の開発にも取り組んでいましたので、分子構造、分子運動と生分解性との関係について理解しようとしましたが、なかなか深まりませんでした。食品における包装の問題は高分子化学と深い関係がありますが、大したことができないまま、別の領域へ研究の重点を移しました。食品の領域ではレオロジーが大切で、特に食品のおいしさを決める重要な要因がテクスチャー〈現在では食感と言う言葉が頻繁に使われています。口当たり、歯ごたえ、のど越しなどの総体です〉であるということですので、ゲル化する生体高分子特に多糖類、たんぱく質のゲルのレオロジーに取り組んでいきました。

ゲルの縦振動の解析から複素弾性率を決定する方法に基づいた装置を簡易化し、当時、深田先生の研究室におられた東洋精機の石田勝巳さんに協力をしていただいて、測定器を世の中へ出すことができました〈西成、堀内、石田、池田、伊達、深田、日食工誌、1980〉。早速、私の共同研究者、研究仲間たちが買って、いろいろな機関で使われるようになりました。澱粉ゲルを冷蔵庫で貯蔵していると老化して硬くなりますが、この装置によってそのようなゲルの弾性率の温度変化を測定しますと、面白いことがわかります。温度が上昇しますと弾性率は低下しますが、再び温度を降下させましても、元の値には戻りません。これはアガロース（寒天の主要成分）、カラギーナン、ジェランなどの多糖類ゲルの挙動と違います。後者のようなゲルでは、多少ヒステリシスはありますが、5 度くらいの低温での弾性率の値はほぼ回復します。澱粉ゲルの場合には、網目の骨格構造を形成するのがアミロペクチンでその形成過程はかなりゆっくりしたものですので、普通の実験条件（辛抱強い人でも毎分 1 度くらいの速度で降温させているでしょう）では、低温に長く貯蔵しておいた状態での弾性率を回復するまでには至らないわけです。このような実験は姫路工大の助教授になった女性研究者が社会人大学院生としてやってくれました。

深田先生が岡小天先生と設立なされました日本バイオレオロジー学会には設立総会のころから参加させていただいております。血液の凝固の研究は面白そうでしたが、勤務先の関係で、自分でもやってみると言うことにはなりませんでした。貝原真先生がなさっておられる研究を外野席から見学をしておりました。関節液その他に含まれていて重要な働きをしているヒアルロナンについて、レオロジー特性が面白いので、細々とではありますが研究をしました。ご存知のようにこれは現在、醗酵法で大量に安価に製造されるようになり、医療用のほか、化粧品などにも使われております。

15 年ほど前から、ゲル化現象、ゲルの構造と特性を理解するのに、微生物多糖類ジェランガムをモデル物質、共通試料として共同研究をしようと言うことになり、高分子学会の高分子ゲル研究会の中にそのような研究グループを組織しました。ポリイソブチレンのような基準物質があると、異なる研究室間の実験データ比較を行いやすいと言う高分子のレオロジーの歴史でも有名な史実に習って考えられたものです。私の指導教官でもありました荻野一善先生はじめこのような試みに関心をもたれる方々が集まって、共通試料を使って研究をしました。その成果は 3 回にわたり国際学術誌（Food Hydrocolloids, Carbohydrate Polymers, Progress in Colloid and Polymer Science）の特集号として公表されました。その後も、この試みは続いております。ジェランガムのゲルの弾性率の温度依存性を測定したところ、25 度付近で虚数部に階段状の変化が見られ、これはヘリックスーコイル転移であると思っております。示差走査熱量測定や円偏光二色性の測定でもそれを裏付けるような結果が出ました。前述のような粘弾性測定装置があったことで、ささやかではありますが、このような発見が可能であったと思っております。

食品というのは途轍もなく複雑で、科学のメスを入れようにもどうしてよいかわからないと途方にくれることも多いのですが、寺田寅彦の随筆などを読みまして、大変面白いと思ったものです。深田先生はまさにこのような雄大な物理学を発展させられた先生ですので、その広く深いご研究には大変学ぶことが多かったと感謝しております。初めて深田先生のご講演を拝聴しましたのは、1970 年ころ高分子学会の招待講演をなされたときで、そのころ深田先生は圧電現象が木材工学、整形外科学、音響工学と言う三つの一見まったく無関係の分野で非常に重要な役割を果たしていることをご指摘になられました。勉強していくうちに深田先生の規模雄大なお考えの一端が少しずつわかるようになり、本当に面白いと思うようになりました。

5 年ほど前にド・ジェンヌ教授の科学普及書を翻訳しましたが、ド・ジェンヌ教授もかなり広い分野で業績を上げられ、研究対象を変えることをなさってこられた方ですが、昨年、日本バイオレオロジー学会の年会長をおおせつかった際に、特別講演をしていただき、深田先生にその座長をしていただきまして、大変ありがたく存じました。

また、伊達先生のご指導を仰いでいた早稲田の武政誠博士が昨春から私の研究室でポスドクとして頑張ってくれて、大変助かっております。

深田先生の研究室で勉強させていただきましたことが、いろいろな形で私の支えになっておりまして、心から感謝申し上げております次第です。

また、深田先生を囲んで同窓会のようなことができますことを期待しております。

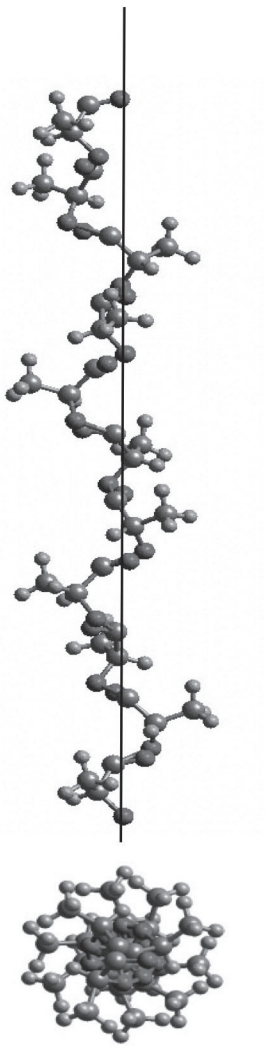
記念講演

深田研究室の末席を穢して 25 年　温故知新

田實佳郎（深田研究室昭和 53 年組）　関西大学

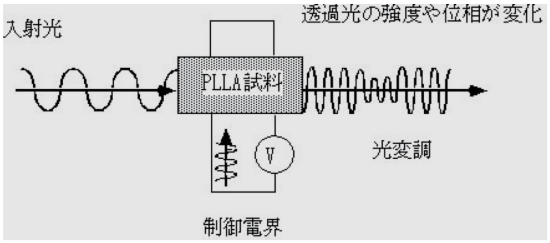
キラル高分子の特異な物性に魅せられて

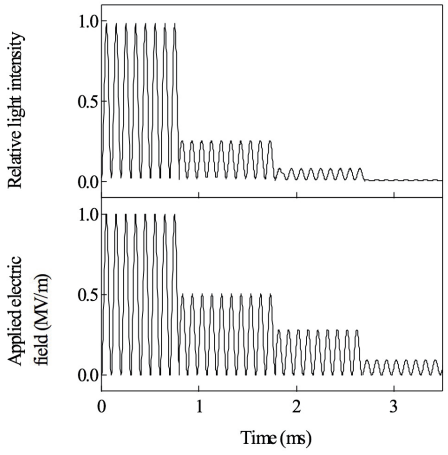
現在、私が最も興味を引かれている研究対象はキラル高分子と呼ばれている一群の物質です。“ キラル ” という言葉は、数年前の野依先生のノーベル賞受賞から新聞でも良く見かけるようになりました。最近では、光学活性高分子を含め広い意味でキラリティを持つ高分子を、“ キラル高分子 ” と便宜的に呼ぶことが多いと思います。ポリ乳酸 (PLA) と呼ばれるキラル高分子を右図にモデル化してみました。右図を見つめていただくと、キラルな分子が左向きにら旋構造をなすその華麗さに、きっとため息がでると思います。一般にキラル高分子の結晶は、このような美しい高分子が規則正しくパッキングしてできています。私は、このモデルを見ると、自然の織り成す神秘的な力に魅せられ、いつまでも飽きることを知りません。キラル高分子が示す特異な物性はこの美しいらせん構造によって、発現しているわけです。



ところで、このキラル高分子、光学活性高分子の圧電性につては、深田先生が古くから注目され、ご研究をされてこられました（この足跡はこの記念誌に深田先生がお書きになった玉稿の中に見ることができます）。このように深田先生のご研究が、世の中より数十年先を進んでいたかと思うと、あらためて深田先生の “ 先見性 ” を垣間見る思いがします。このキラル高分子が示すであろう特異な物性に、「旋光性」や「圧電性」を挙げることができます。旋光性や圧電性を示す結晶として、α - 水晶が有名ですが、ここで重要なことは、ヘリカルキラリティを持つ高分子は、無機材料を凌駕する光学物性や電気物性を示すことが理論的に予測され、それを機能として利用できる可能性が高いことです。一般に、機能性高分子として、その開発に成功しても、通常、無機材料の代替品の域をでません。

これに対して、この予測される特異な物性、旋光性や圧電性は、キラル高分子の構造から導かれる必然であり、その大きさから、全く新しい応用、工業的な展開を意識できます。





V_0=1MV/m, f=1,5,10kHz

ヘリカルキラリティを持つ高分子の圧電性

物質	圧電率 (pC/N)
ポリγベンジル -L- グルタメート（構造制御）	18
ポリγベンジル -L- グルタメート（従来）	4
酢酸セルロース	0.1
ポリ -D- プロピレンオキシド	0.02
骨	0.2
腱	2

私達は近年、キラル高分子の高次構造制御やその物性研究を進めてきました。幸運にも、数年前、それが新聞記事にもなりました。その時の説明資料が上の図です。これは光変調という性質を現しています。光変調性とは、入射した光の振幅や位相が、試料に加えた電界で変化する性質をいいます。グラフはキラル高分子の繊維軸に平行に直接レーザ光を入射し、印加交流電界の振幅や周波数に対する透過光強度の変化を表しています。この透過光強度は、測定範囲内で、効率よく変化します。またグラフから分かりますように透過光強度が印加電界の二乗に比例し、変化していることが分かります。この実験事実は作製したキラル高分子試料に光変調性が存在することを示すものとされています。そして、その後この実験事実をもとに、現在多くの実用化研究が進んでおり、近いうちにその一部をお見せできることを信じております。その中では、深田研究室の教えである“新しい物性は正確な物性評価から”の信念の下、世界に一台しかない新しい評価装置を開発していくことが、飛躍的な研究の進展につながりました。それを深田先生にご報告した

ときに、とても喜んでくださったことは私の一生忘れえない宝ものとなっています。またごく最近、高次構造を制御したキラル高分子に上表のような従来極限値といわれていた数 pC/N を遥かに凌駕する値を得ることができました。この圧電性の原因がヘリカルキラリテイにあるので、その圧電性は高分子構造に立脚したものです。即ち、キラル高分子の圧電性は、時間が経過しても、減少しません。これに対して、強誘電性高分子の圧電性発現には poling 処理が必要であるために、絶えず圧電率の経時変化が、応用面からいうと問題になります。キラル高分子の安定性は、応用を考えると、垂涎の的となります。

深田先生、そして理研時代の深田研究室

私が、深田先生のご指導を受けるようになってから、もう 20 年の月日が流れています。私のような者が現在大学に籍を置き、そして自分の能力以上のことを経験できているのも、深田先生の「励まし」があればこそと、自戒しております。深田先生のお人柄に触れた方々、研究成果を深田先生に聞いて頂いた方々は、真摯なご性格に基づくその折に発せられるお言葉の温もりを忘れることはできないでしょう。私はそれを 25 年間、聞くことが出来ました。その幸せを最近特に感じるようになりました。大学院生という最も多感な時期に、理研の生体高分子物理研究室で勉強ができたことは、今思えば本当に幸運でした。私は、深田先生が理研の生体高分子物理研究室の主任研究員であられた時に直接ご指導を受けた最後の学生のはずです。その時期に学生であったことは私の人生に大きな影響をあたえました。その幸運を今でも神に感謝する気持ちで一杯です。

私が深田研に初めてお伺いしたのは、早稲田大学理工学部の千葉先生の研究室に所属する学生の時でした。千葉先生は、応用物理学科に赴任されて間もない頃で、高分子の溶液物性を X 線の小角散乱から説き明かすことをご提案され、学会からも期待されておられた気鋭の研究者でした。本来その研究を遂行すべく配属された私が、高分子の固体物性に強い興味を持っていることに気づいた千葉先生は、私に最高の教育を受けさせるべく、理研の深田先生のところに派遣をしてくださいました。今、自分も大学に籍を置き、研究室に学生がいます。その学生が、私が今最も興味を持っている研究ではなく、他のことに興味を持っているときに、本当に快く他の先生のところへ送り出せるでしょうか。私には全く自信がありません。自分に置き換えると、千葉先生の人物のスケールの大きさに驚かされるばかりです。千葉先生には、その後、家内との結婚の仲人もしていただきましたし、今でも研究のご指導を受けております。千葉先生の深田先生へのご推薦がなければ、今の私はなく、本当に有難いことだったと絶えず感謝しております。

理研の生体高分子物理の研究室には、高松先生、伊達先生、貝原先生、古川先生と世界的な研究者が研究員として在籍されておられました。古川先生には、以来、古川先生が東京理科大へ移られるまで、直接実験のご指導を受けるばかりでなく、私的な面でもご鞭撻を賜りました。この長期にわたる辛抱強いご指導が、私のようなごく普通の人間に、「研究」という知的な挑戦ができる礎を築いたと思います。本当に多くのことを学びました。心から感謝しております。伊達先生には、古川先生が理科大へ移られてから、特に私的な面でもご指導をいただくようになりました。一人立ちしてからの私の研究の実践は、そのご指導に負う所が大変多いのです。キラル高分子の研究を進めていくうえで、絶えず実践的なアドバイスを頂くことで、困難をその都度乗り越えることができました。近年、多少まとまった業績ができてきましたのは、伊達先生のお陰であります。心から感謝申し上げます。貝原先生には、直接研究のご指導をうることはありませんで

した。今思うと、血液のレオロジーの研究はとても興味深いもので、貝原先生のご指導をいただく機会を作らなかったことは本当に悔やまれます。その一方、貝原先生は、研究室に出入りしておりました私にいつも変わらぬ暖かさで接してくださいましたし、多くの我侭を許してくださいました。御礼の言葉もございません。また、高松先生は苦しい次期も含めいつも心遣いをしてくださいました。本当に有難く思っております。振り返りますと、深田先生をはじめ、先生方に支えられ、理研という最高の環境で「研究」に触れることができたことを、本当に幸せに思っています。この場を借りて心から御礼申し上げます。本当に有難うございました。

最後に今一度、深田先生に心から御礼を申し上げますと同時に、これからもご指導を賜ることを御願い申し上げます。そして、深田先生の益々のご健勝をお祈り申し上げます。

関西大学大学院工学研究科　物性物理工学研究室
Tel : 06-6368-1121 内線 6513
e-mail : tajitsu@ipcku.kansai-u.ac.jp

記念講演

圧電高分子膜による遮音の研究

リオン株式会社　計測器技術部　児玉　秀和

はじめに

1999 年にリオンに入社し、この頃より深田先生にご指導頂くようになりました。その年の夏頃、深田先生より表題の研究テーマをご提案いただきました。深田先生のお考えは、当時、伊達宗宏先生が論文 ”Elasticity Control by Piezoelectricity” を Journal of Applied Physics に投稿される準備を進めており、音や振動の分野に長けたリオンおよび（財）小林理学研究所の協力を仰ぎ、この技術を遮音や制振に応用できないかという事でした。PVDF は、可聴域ではヘッドフォンやスピーカーへの応用、超音波領域ではセンサへの応用、低周波では加速度センサへの応用というように、音響との間に密接な関係があります。PVDF による遮音は、これまでにない新たな応用であるといえます。ここでは基礎実験から最近の成果までご紹介いたします。

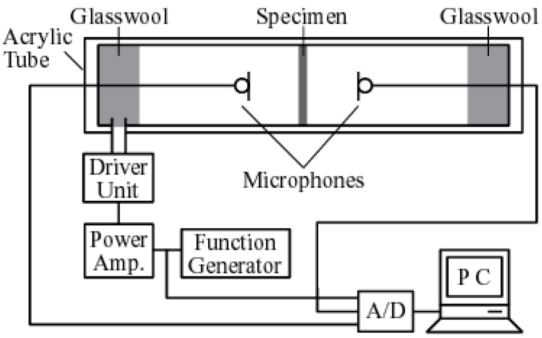


図１　音響管測定装置

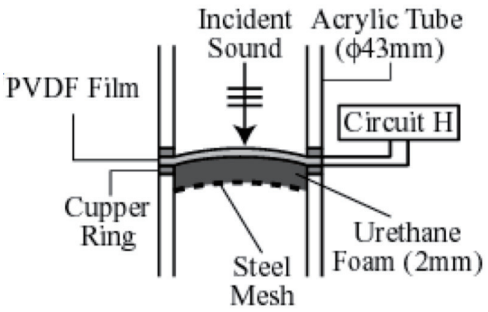


図２　サンプルの形態

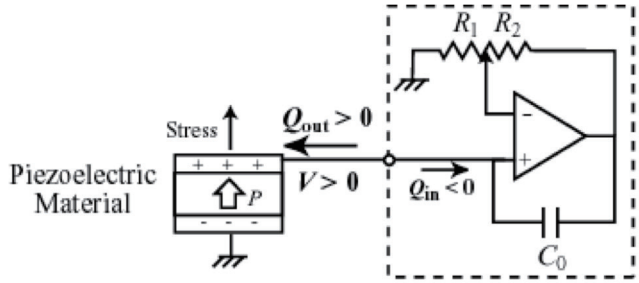


図３　負性容量回路

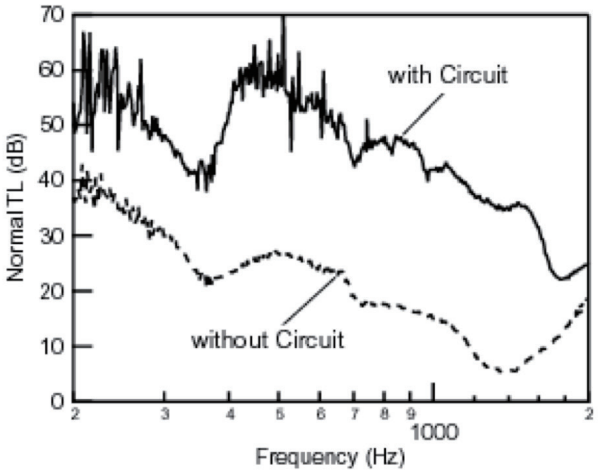


図４　PVDFフィルムの音響透過損失の周波数依存性

音響管実験

はじめに、内径 43mm のアクリルチューブを用いた、音響管法による遮音性能の評価を行いました。図１に音響管実験装置を示します。チューブの中央にサンプルを装填します。チューブ内に音を伝搬させ、サンプルの前面と背面の音圧を測定します。それぞれの音圧エネルギーの比の対数から音響透過損失が求まります。音響透過損失は試料の遮音性能を表す量で、数値が大きいほど遮音性能が大きいことを表します。

図２は本研究で用いた PVDF フィルムの形態です。フィルムは音圧によって厚み伸縮を生じません。そこで、背後よりウレタンフォームとスチールメッシュを押し当てることによってフィルムをドーム状に成形し、音圧によって面内の伸縮振動を生じるようにしました。フィルムは d31 に起因する圧電応答を生じます。フィルムには、電気回路が接続されます。図では Circuit H と表記されております。これは、伊達先生が先述の論文で報告した負性容量回路です。

図３に回路図を示します。これは、オペアンプ、コンデンサ及び可変抵抗から成る帰還回路です。試料が圧電応答に起因する電荷を生じますと、回路は電荷量に比例した帰還電圧を試料に印加します。試料は、この帰還電圧のため歪みを生じます。この逆圧電効果に起因する歪みと応力による歪みが逆位相のため、試料の正味の歪みは減少し、見かけの弾性率が増加します。

PVDF の透過損失制御の一例を図４に示します。破線で示すフィルム本来の透過損失は 1.5kHz

以下で低周波になるにつれて増加する傾向があります。これに回路制御を加えることによってフィルムの透過損失を電気的に最大 35dB 増加させることに成功しました。

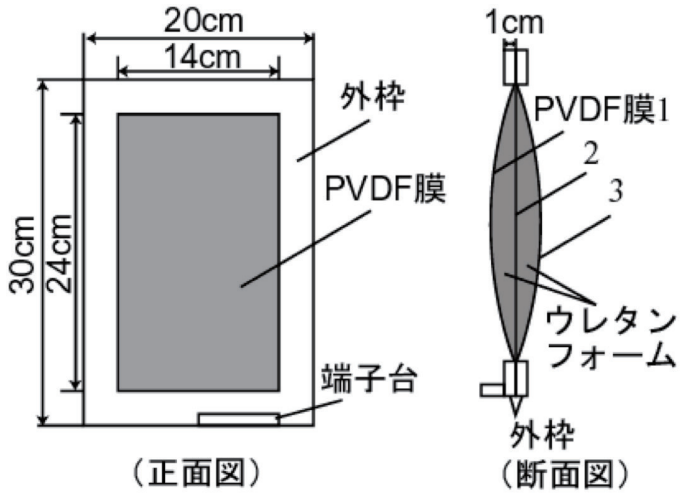


図５　PVDFパネル

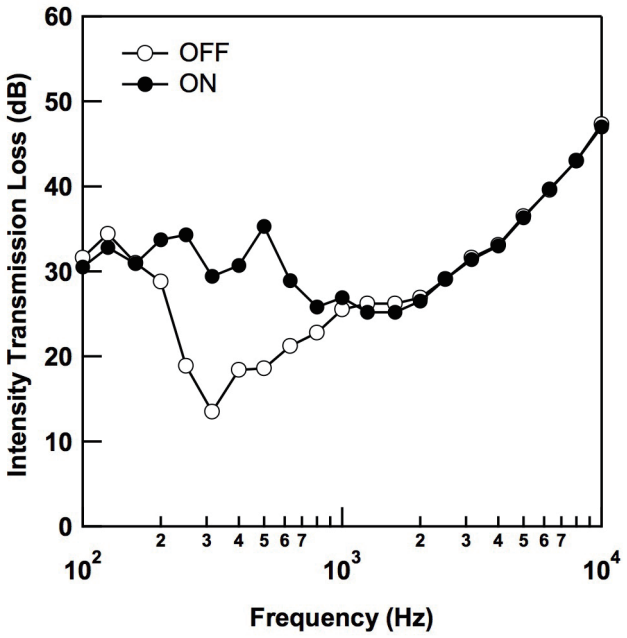


図６　PVDFパネルの遮音性能

PVDF パネルの作成

深田先生のご尽力により、2003 年度に国土交通省より補助金を頂き（平成 16 年度建設技術研究開発助成制度）、大型化への検討が進められました。はじめに A4 サイズパネルの開発を行い、続いてこのパネルを 2 次元に並べた大型パネルの開発を進めております。

図 5 は PVDF パネルの構造図です。ここでは 3 枚の PVDF 膜が用いられております。中央の平らな膜は回路素子として用いられており、遮音効果を持ちません。両面に設けられた 2 枚のドーム状膜で音を遮断する構造としました。

図 6 にパネルの音響インテンシティ透過損失を示します。音響管を用いずに小面積試料の透過損失測定を行うためには、パネルを透過した音圧を抽出して評価する必要があります。インテンシティ法は、このような測定を行うための手法です。パネルの透過損失は 300Hz でディップを示しました。回路制御を与えますと、透過損失は 100Hz から 1kHz にかけて最大 20dB 増加し、1kHz 以下でほぼ 30dB で平坦な特性となりました。

面積を広げるとフィルムに音圧の位相差が問題となります。例えば、音の波長は 1kHz で約 34cm と、パネルサイズに近くなります。このことから、A4 サイズパネルは低周波音のみに有効であろうと予想しました。しかしながら、この結果は負性容量回路による PVDF の遮音性能制御が広帯域にわたり可能であることを示しております。

終わりに

PVDF と負性容量回路を組み合わせた遮音性能制御方法について紹介いたしました。この方法の特徴は、電気的に遮音性能を任意に制御できることです。最近、深田先生の独創的発想に基づき、この組み合わせの代わりに硬質プラスチックを取り入れた遮音方法についても研究を始めました。これは、質量に依存する従来の遮音方法とは異なり、プラスチックの弾性を利用した新しい遮音方法で、特に 1kHz 以下の遮音性能が高いという特徴があります。既に、この技術に興味を持った複数の会社と共同開発がはじまりました。実用化には解決すべき課題が多くありますが、近いうちに深田先生のアイディアを取り入れた製品が見られるでしょう。

記念講演

機能性ポリ尿素薄膜の開発

高橋善和　㈱アルバック (旧社名 : 日本真空技術㈱)

はじめに

２成分のモノマーを真空中で二元蒸着すると基板上で重合反応を起こし高分子薄膜が生成する蒸着重合法を開発（1984 年）し、応用分野を探索していた 1987 年、深田先生が日本真空技術㈱筑波超材料研究所の顧問として着任された。ポリイミド・ポリアミド・ポリ尿素などの蒸着重合高分子薄膜を多層薄膜コンデンサーに応用するために松下電器産業と共同開発をしていた時期である。(図 1)

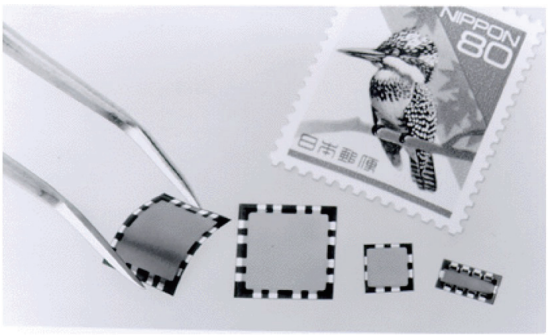


図 1　同静電容量のコンデンサーを複数個内蔵したシートコンデンサー（1996 年 4 月 23 日 , 日刊工業新聞）

深田先生が提案された開発テーマは、『高分子薄膜の圧電性・焦電性・強誘電性のセンサーへの応用』。コンデンサーの開発に注力していたこの時期は、蒸着重合ポリ尿素膜の電気特性の異常に悩まされていた。 直流電圧を印加したまま高温負荷試験をすると電気抵抗や静電容量が変化する現象である。 理研の伊達先生から教えていただいた焦電率の測定法〔1〕で焦電性の計測をしてみると、蒸着重合ポリ尿素膜に焦電性があることが確認できた。これが蒸着重合機能性高分子薄膜開発の出発点となった。

ポリ尿素薄膜の焦電性を発見できたのは、①蒸着重合ポリ尿素膜形成技術を持っていたこと、②薄膜コンデンサーの開発をしていたこと、③分極高分子の専門家である深田先生が顧問として着任されたこと、の三つが重なっていたことによる。

ポリ尿素薄膜

芳香族ポリ尿素は、尿素結合同士で分子間水素結合を形成する。このため高結晶性で有機溶媒に不溶であることから薄膜形成が困難であるとされてきた〔2〕。　また、融点付近（250℃）で

解重合 (重合の逆反応) することから熱安定性に劣り、耐熱性高分子材料の研究開発者からは注目されず、過去において研究例の少ない材料のひとつであった。蒸着重合法はこのような溶媒に不溶な高分子材料の薄膜化に有効な手段となる。

ポリ尿素は、図 2 の反応式に示すように重付加反応で生成し、反応副生成物が生じないことから誘電体層と金属電極層を重ね合わせる圧電・焦電素子の基本構造が簡単に作製できる。尿素結合部は、4.9debye の双極子モーメントを持ち、電場による配向により圧電・焦電性が発現する。

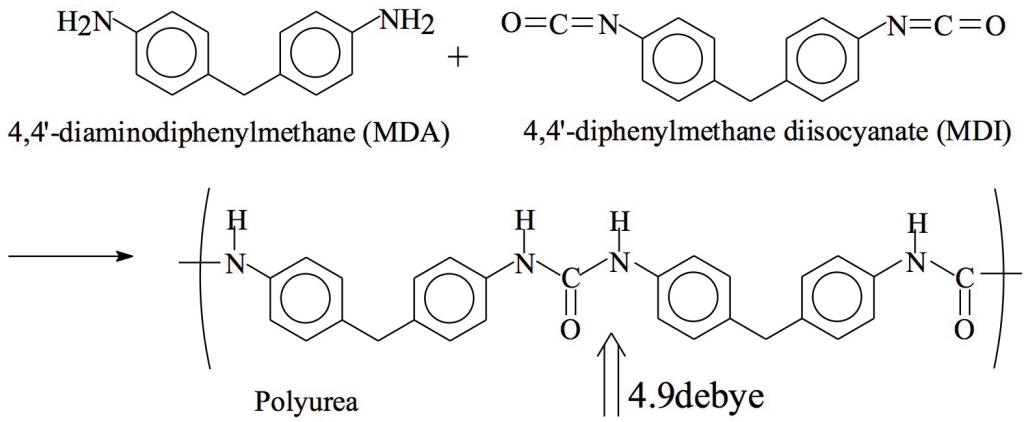


図 2　ポリ尿素重合反応式

分極合成高分子の圧電性と焦電性

深田先生の唱えられた「分極合成高分子の圧電性と焦電性の新材料出現 10 年周期説」に見事にあてはまって機能性ポリ尿素膜が出現した。

◎分極合成高分子の圧電性と焦電性新材料出現 10 年周期説

1969　ポリフッ化ビニリデン（PVDF) の圧電性
　　河合平司 (小林理研）
1971　ポリフッ化ビニリデン（PVDF) の焦電性
　　山香英三 (松下技研)　和田八三久（東工大）
　　J.G.Bergman(Be Ⅰ Ⅰ)　　村山直広（クレハ）
1979　フッ化ビニリデン・トリフッ化エチレン共重合体の強誘電性
　　八木俊治（ダイキン）　田村雅彦（パイオニア）
　　北山豊樹（NTT)
1980　ビニリデンシアナイド・ビニルアセテート共重合体の圧電性
　　宮田清蔵（農工大）　瀬尾巌（三菱油化）

深田先生が日本真空技術㈱に在籍しておられた約 10 年間、機能性ポリ尿素膜の基礎研究から応用開発まで幅広く指導していただき、数多くの業績をあげることができた。現在でも機能性ポリ尿素膜を応用した素子開発は各所で試されている。以下に研究開発の状況を年表形式で表した。

1989　芳香族ポリ尿素の焦電性（ULVAC）〔3〕
1991　芳香族ポリ尿素の圧電性（ULVAC）〔4〕
1991　超小型圧電マイクロフォン　(Darmstadt 工科大，ULVAC) 〔5〕
1990　第二次高調波発生（SHG）機能　（東京工業大学，ULVAC）〔6〕
1995　流体振動検出センサ（矢崎総業）〔7〕
1995　Optical Modulators　（Konstanz 大，ULVAC）〔8〕
1996　焦電センサー　(浜松フォトニクス，ULVAC) 〔9〕
1996　脂肪族ポリ尿素の強誘電性　〔10〕
1996　SHG　(名古屋大)　〔11〕
1997　非線形光学効果 (東京農工大)　〔12〕
1999　超音波送受特性の検討　(東工大，小林理研) 〔13〕
1999　脂肪族ポリ尿素のポッケルス効果　（山形大，小林理研）〔14〕
2000　配向メカニズムの研究（Chiao Tung University, Taiwan）〔15〕
2000　焦電センサー　（福島県ハイテクプラザ）〔16〕
2000　振動膜トランスデューサー　(東工大，小林理研)　〔17〕
2002　可変フォーカストランスデューサー　(東工大，小林理研) 〔18〕

1994 年当時の超材料研究所有機材料部スタッフ (左上から，服部武，飯島正行，著者，佐藤昌敏，深田先生，鈴木哲雄，左下から，王賢珊，浮島貞之，飯田敬子）

おわりに

筆者は、企業内研究所に在籍していて、最近、有機 EL、バイオ MEMS、光機能膜等の応用分野での蒸着重合ポリ尿素への関心が非常に高くなってきたことを実感している。特許調査でも蒸着重合ポリ尿素膜の応用分野が着実に増加していることがわかった。

深田先生とともに研究開発した機能性ポリ尿素膜はまもなく全盛期を迎えることを確信している。

参考文献
〔1〕伊達宗宏：静電気学会誌 , 9, 4 (1985) 289-295.
〔2〕 Oishi, M.Kakimoto and Y.Imai, J.Polym. Sci. Part A, 25, 2185 (1987).
〔3〕Y.Takahashi M.Iijima E.Fukada, Jpn.J.Appl.Phy.,28, L2245 (1989)
〔4〕Y.Takahashi M.Iijima S.Ukishima E.Fukada ,J.Appl.Phys.,70,6983 (1991)
〔5〕R.Schellin, G.Hess, W.Kuehnel, G.M.Sessler and E.Fukada, Proc. Int. Symp. Electrets, Berlin, 1991, p929 (1991).
〔6〕Kajikawa,NagamoriTakezoe,Fukuda Ukisima Takahashi Iijima,Fukada・Jpn.J.Appl. Phys.,30, L1737(1991)
〔7〕特開平７－４９９６
〔8〕S.Herminghaus,R.Conradt E.Aust,W.Knoll Y.Takahashi,S.Ukishima E.Fukada,D.Boese , Optics Communications123 (1996) P250-258
〔9〕M.Iijima, Guo Hua SHEN, Y.Takashi,E.Fukada, A.Tanaka, S.Sakata, Thin Solid Films 272, 157-160(1996)
〔10〕T.Hattori,Y.Takahashi M.Iijima, E.Fukada, J.A.P.(1996) 79(3) p1713-172
〔11〕T.Segi, Y.Suzuoki, A.Tabata, T.Mizutani and K.Takagi, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35 (1996) pp.4444-4450.
〔12〕H. Usui, H. Kikuchi, K. Tanaka, S. Miyata, T. Watanabe, W. Knoll and H. Bock, Opt. Soc. Am. Tech. Digest Ser., Vol. 14, ThE22, pp. 170-172(1997).
〔13〕高橋大三，石井孝明，中村健太郎，上羽貞行，落合勉，平尾善裕：日本音響学会講演論文集 1999 年 9 月～ 10 月 ,1019.
〔14〕Y.Tajitsu, M.Date, E.Fukada,Jpn. J. Appl.Phys.,Part 1 Vol 38 (1999) 5653-5656.
〔15〕PAO-KENG YANG, JUNG-YAW HUANG, AND JWO-HUEI JOU，Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)Vol. 24, No. 4, (2000). pp. 310-315
〔16〕伊藤嘉亮，笹山淑弘，藤井正沸，本田和夫，渡部一博：福島県ハイテクプラザ平成 12 年度試験研究報告，43(2000).
〔17〕小杉勉，高橋大三，石井孝明，中村健太郎，上羽貞行，平尾善裕，落合勉：日本音響学会講演論文集 2000 年 3 月 ,967.
〔18〕小杉勉，長塚弘美，石井孝明，中村健太郎，上羽貞行，平尾善裕：日本音響学会講演論文集 2002 年 3 月 ,1025.

高橋善和：㈱アルバック 筑波超材料研究所 有機材料部
〒 300-2635 茨城県つくば市東光台 5-9-7
TEL 029-847-8781 e-mail：takahasi@ulvac.trc-net.co.jp

記念講演

ポリ乳酸骨接合材の開発

敷波保夫　タキロン (株) メディカル事業部

1. はじめに

私が深田先生に最初にお目にかかったのは、多分 1990 年であったように記憶しています。当時のタキロン（株）の八木会長が大学の同期生であり、私が研究の領域の拡大に行き詰まっていたので先生を紹介して戴いたのが、きっかけでした。兵庫県安富町にあるタキロン Medical　研究棟にお越しいただきました。当時、私どもの主要テーマの一つが、強化したポリ乳酸 (PLLA；Poly L-Lactide) による生体内分解吸収性骨接合材の実用化に向けた開発でした。先生にこの Polymer の延伸によって強化した物性について説明しましたところ、先生は直ちに、その構造式からするとこれには圧電性があるに違いなく、また、それは結晶の配向度によって増加するはずであると予想されました。私は当時、先生の Life Work の一つが、骨に圧電性のあることを、物理化学的に実証されたことに基づく応用であることを知りませんでしたが、その経験からすれば、当を得て容易なる推察であったと思われます。そして一軸延伸したﾌｨﾙﾑを持ち帰られて、自ら測定なされて、その圧電定数を見事に確認されました。圧電性は著しいﾌｨﾌﾞﾘﾙ化の生ずる直前の Draw　Ratio が 4.0 － 5.0 で最大値の -d14=20pc/N, -e14=12~13mC/m2　を示し 1）、予想外に高い値でありました。

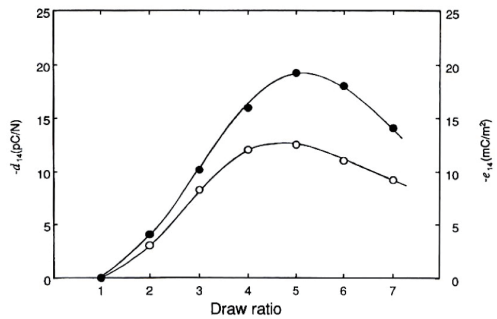


Figure 1. The piezoelectricity of PLLA film as a function of raw ratio at room temperature.
○, d_{14}；●, e_{14}

2.　圧電性と仮骨形成の相関性の立証

PLLA は摺り応力により生ずる大きな圧電性を、結晶の配向度に相応して発現するという先生の実験結果（Fig. 1）1）を踏まえて、私はその生体内での効果を確認しようと考えましたが、相談した全ての biomaterial　scientists や、整形外科の医師はその相関の in vivo における実証は難しいと、一笑に付しました。そこで、私の曲がった根性に火がつき、日本獣医畜産大学の原先生にお願いして延伸倍率の異なる PLLA　Rod を家兎の大腿骨内に髄内釘として埋入して、仮骨形成の変化を経時的に調べました。コントロールに bioinert で全く圧電性のない Polyethylene

を選びました。その結果が Fig. 2 です 2)。

経験的に家兎の両足の重量は変わらないとの条件から増量された仮骨の重量を計算しました。Fig. 3 に示すように圧電の大きさに比例して、仮骨量の増大が見事に確認されました 2)。

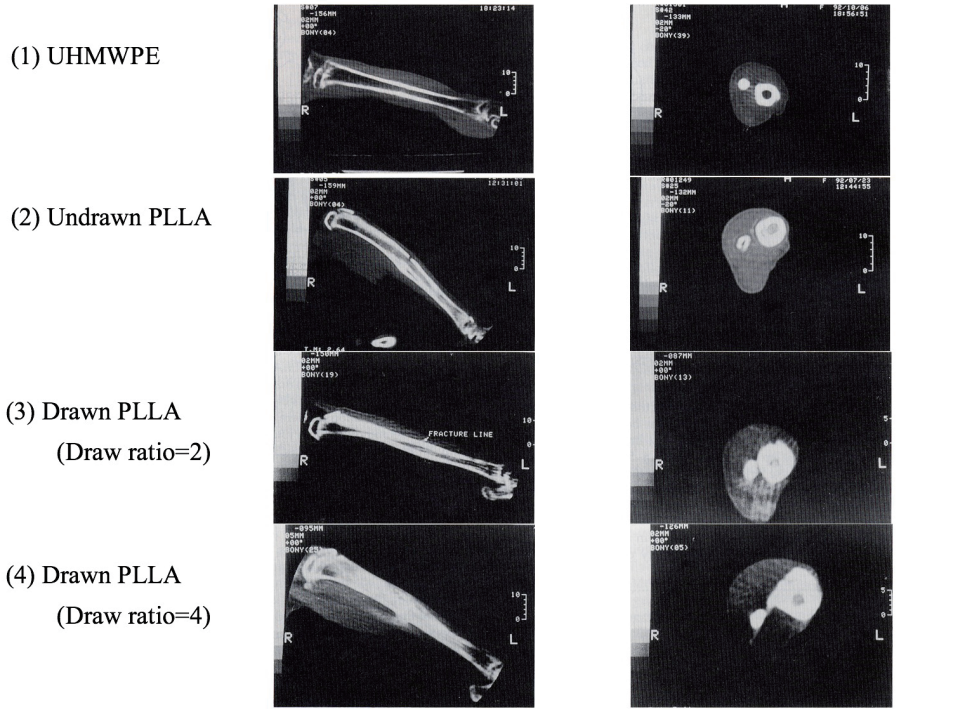


Figure 2. X-ray CT photographs of the tibiae of cats at 8 weeks after implantation of rods of different materials.

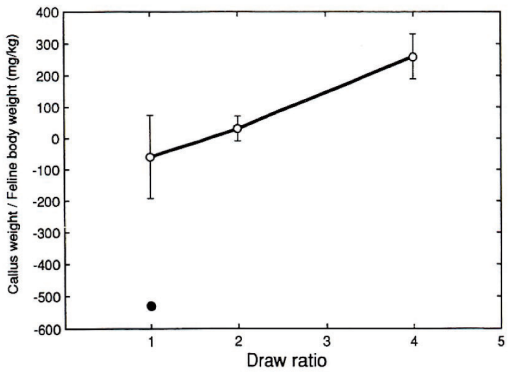


Figure 3. The effect of draw ratio of PLLA rod on the weight of callus formed at 8 weeks after implantation (n = 4). ○, PLLA ; ●, UHMWPE

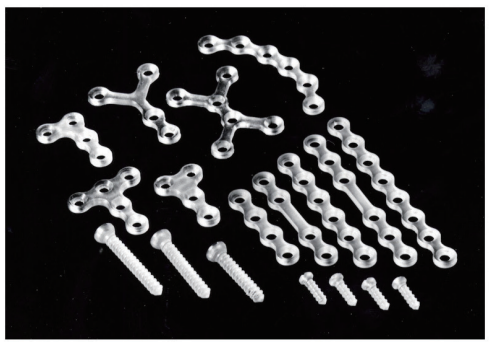


Figure 4. PLLA bone fixation devices

3. PLLA 骨接合材と圧電効果

その後、タキロン（株）は Fig.4 の如き PLLA 骨接合材（フィクソーブ）を厚生省の認可を得て、1994 年臨床の場に送り出しました。時として、部位によりフィクソーブの周囲は骨形成が従来の金属品と比べて旺盛であるとの報告があり、その効果を際立たせるための試みがあったものの、総じて臨床的には余り顕著な効果は見出せないようです。というのは、骨形成を促進する他の要因（例えば生体骨よりも剛性の低い PLLA　Devices　による micro movement 効果等）も併存するために圧電効果のみを特定して立証できないためです。

PLLA は生体内で非特異的に加水分解して CO2 と H2O となって体外に排出されるので、人の皮質骨以上の強度を、一般的な骨癒合の期間である 3-5 ヶ月以上維持すれば、金属製のそれとは異なり、抜釘が不要なので、臨床的に見て有用な骨接合材です。現在までにフィクソーブは約 5 万症例以上に用いられていますが、材料由来の副作用はほとんど見られず、新規骨接合材としての地位を固めつつあります。

4. PLLA 骨接合材の改良点 3）

生体内には乳酸は存在するものの、PLLA は合成物であり、細胞はこれを異物として認識するので、埋入されるや、直ちに介在性の線維性結合性組織 (Fibrous connective tissues) によりその周囲が覆われ、PLLA が全吸収されるまでの間継続します。それで、臨床上の問題はないにもかかわらず、Device のあった穿孔部位は PLLA の完全吸収後でも生体骨によって全置換されずに、何らかの組織を含有したままの状態で残るので、骨の強度の全回復に不安があるとの指摘を時として受けます。また、一軸方向の高延伸物は強度的に異方性であり、結晶軸に沿って縦割れを起こす危惧があります。

5. 生体活性 (bioactivity) による骨伝導性 (direct bonding/osteoconductivity) の付与と多軸配向による強化

そこで、われわれは理想的な全吸収性 (total resorbable) 骨接合材を求めて、PLLA と吸収性 HA 微粒子（30 － 40wt%）の複合体を特異な圧縮、鍛造成形法により強化したスーパーフィクソーブ (Fig.5) 4）を世界に先駆けて、1995 年頃に開発し、最近（2003 年 8 月）、漸く日本における認可を取得しました。これは、非焼成の HA 微粒子を用いることで、全吸収に至るまでの間、骨伝導性と生体骨との直接結合を維持させることを目的にしたものです。またこれは特殊な鍛造成形法に由来して、結晶が多軸に複雑に配向しているので、強度の異方性が著しく減少しています。更に、HA に由来して強度が総じて向上し、皮質骨に近い剛性を示します。この複雑な結晶の多軸配向の確認に関しては、田實先生にご指導いただきました。

Figure 5.　吸収性 HA/PLLA コンポジット製骨接合材
（Super-Fixsorb™）

6.　終わりに

現時点に置いて世界で最も進んでいる、生体活性と生体内吸収性を併せ持つ、第三世代の代表的 Biomaterials の一つであるスーパーフィクソーブが、臨床の場に到達するまでには、多大の難関がありました。結晶配向よって強化された PLLA には圧電性があり、圧電性を持つ生体骨に対する新規骨接合材としての、骨形成増進の効果と、材料の物理的、化学的有用性を認識する上で、深田先生の要所における貴重なご指摘と実証が私の知識を広め、意欲を刺激し、その開発に多大の影響を与えました。先生の御指導を仰げた事は小生にとって名誉であり心より御礼申し上げます。

7.　文献

1) Fukada, E., Piezoelectric properties of Poly L-lactic acid. Rep. prog. polym. phys. Jpn., 34: 269-272, 1991.

2) Ikada, Y., Shikinami, Y., Hara.Y., Tagawa, M., Fukada, E., Enhancement of bone formation by drawn poly (L-lactide). J. Biomed. Mater. Res., 30: 553-558, 1996.

3) 敷波保夫　生体材料としてのポリ乳酸の特性と応用 . リウマチ科 , 21 (3): 267-278, 1999.

4) Shikinami, Y., Okuno, M., Bioresorbable devices of forged composites of hydroxyapatite (HA) particles and poly L-lactide (PLLA): Part I. Basic characteristics. Biomaterials, 20: 859-877, 1999.

寄稿

我が青春の思い出

高松俊昭　（東京理科大学）

昭和 20 年から 23 年にかけては第二次世界大戦の敗戦、占領米軍支配の混乱期で明日どうなるのか皆目わからぬ時代であった。

私は、中学四年生で、昭和 20 年 3 月に東京物理学校に入学した。なぜ、物理学校を選んだのかは、父親の影響が大と言える。

父親は、青春時代に栃木県より上京し、物理学校の理科学部に大正 9 年 10 月に入学している。もし、同校を卒業すれば親子二代の同窓となる。それ故、何の疑いも持たずに受験した。

昭和 21 年 1 月に元気であった父が他界したため、家族は生活苦に追われる結果となる。この苦しみと平行して物理学校を卒業することは、大変なことであると気づく。特に 1 年生より 2 年生に合格しないと忽ちに留年する。

昭和 17 年度を例にとると物理学校の入学者数は､第一部（昼間部）5495 人､第二部（夜間部）3680 人。このうち、1 年生より 2 年生への進級は、200 名程度である。それ故、多くの学生が留年することとなる。私の場合、昼間は理化学研究所の助手として、夜間は物理学校生として勉強した。

昭和 26 年に東京理科大学（Ⅱ部）学生として編入され 2 年間で理学士を取得した。昭和 33 年に財団法人理化学研究所は特殊法人理化学研究所に改組され、和光市に移転し今日に至っている。

昭和 23 年 3 月、物理学校を卒業し、理化学研究所の職員として研究に取り組む。初めの仕事は低分子有機物（有極性）の分子運動について調べた。次いで高エネルギー放射線を用いて様々な高分子の照射効果について結果を得て論文としてまとめることができた。

昭和 41 年 7 月に学習院大学より新制度による理学博士第一号を取得することができた。　同じ年度に小林理学研究所より深田栄一先生をはじめ伊達宗宏さんが理化学研究所の職員として迎えられ、新しい分野の研究に進展した。

理化学研究所在職中に関わった主な研究は次の通りである。

エレクトレット

大正 4 年頃、我が国の江口元太郎は世界に先駆けてエレクトレット（永久静帯電した物質）を発見したが応用面に至るまでには四半世紀の年月が必要であった。電気伝導率が低く、耐熱性に富み成形加工の優れたフッ素系樹脂は、フィルム形成に適しており、高電圧で印加して容易にエレクトレット化させることができた。

昭和 45 年、ライデン大学（オランダ）での国際会議で研究発表以後、新しい研究成果が次々と得られるようになり、昭和 50 年には、カナダのマックギル大学の客員研究者として 1 年間カ

ナダで研究活動をすることができた。

江口エレクトレットは南米特産のカルナウバ蝋と松脂の等量混合物を加熱溶融し、直流の高電圧を印加しながら室温に冷やしてやるとエレクトレットができる。カルナウバ蝋は高級脂肪酸と高級アルコールのエステルである。エステル及び脂肪酸では安定なエレクトレットを生成はするが、高級アルコールは電荷減衰が非常に早い。

熱エレクトレットの生成機構は一般に次のような分極が考えられている。

（1）双極子の配向

（2）不純物イオンのトラップを含む微視的及び巨視的電気変位

（3）電極と試料表面間のコロナ放電によるホモ電荷の形成

電気刺激による生体の活性化

昭和 25 年代になって電気的絶縁性に優れた合成ポリマーフィルムによるエレクトレットが作られ、生体との静電気の関わりの研究が開かれた。片面メッキした厚さ 20 ミクロンのテフロンのエレクトレット膜を動物の骨折部位に挿入しておくと、マイナス荷電面ではプラス荷電面より仮骨形成が顕著であり、荷電量の低下に伴い骨形成の度合いが減少した。

2 枚のポリマーエレクトレット膜を同極同志重ね合わせ（バイモルフという）これを骨周辺の筋肉に縫いつけておくと、エレクトレット膜の曲げ歪により両面に電位が発生し、仮骨形成が促進された。

抗血栓性材料

現役時代の 10 年間は、「循環系および代謝系人工臓器」に関する研究グループに加わり、工業サイドから抗血栓性材料の開発に従事した。多くのポリマー材料は in-vitro テストでは短期的に優れた抗血栓性を示しても、in-vivo テストでは血栓形成が顕著であった。

我々は特殊なレオメーターを用いて抗血栓性の評価を行ったり、材料表面に動物細胞を接着させた後、血小板リッチプラズマ (PRP) を接触させ、血小板の粘着挙動を調べてきた。これらの研究と平行して組織培養法による動物細胞に電気・磁場刺激を与えると細胞の増殖がコントロールされることが見いだされた。

生体の血管壁はマイナスに荷電し、赤血球や血小板などの血球成分もマイナスに荷電しているので同種電荷の間にはクーロン力によって反発され、血栓形成が抑制されるものと考えられる。

昭和 21 年 1 月理化学研究所に入所以来、昭和 63 年 9 月までの 41 年間にわたる研究生活を終えて定年を迎えることができた。

その後、縁あって東京理科大学工学部の非常勤講師として後輩の指導にも当たらせて頂くことができた。

高松俊昭（昭和２年生）略歴

昭和 21 年 1 月　　理化学研究所入所
昭和 31 年 4 月　　原子物理研究室研究員
昭和 41 年　　学習院大学　理学博士（第 1 号）
昭和 41 年 4 月　　生体高分子物理研究室研究員

昭和 46 年 4 月　　副主任研究員
昭和 50 － 51 年　カナダマックギル大学客員研究員
昭和 62 年 9 月　　理化学研究所定年退職
昭和 41 年―平成 13 年　日本大学文理学部非常勤講師
昭和 63 年―平成 4 年　　東京理科大学工学部非常勤講師
平成 2 年―平成 4 年　　早稲田大学理工学部非常勤講師

昭和 54 年　　静電気学会功績賞（エレクトレットの熱刺激電流に関する研究）
昭和 62 年　　東京通商産業局長賞（高分子物質の転移温度の測定法）
昭和 63 年　　日本バイオマテリアル学会賞（循環系人工臓器材料に関する研究）

高松俊昭博士指導学生（五十音順）

日本大学文理学部
赤尾忠明　浅野宏　荒井俊彦　荒堀幹雄　出雲直人　伊東国宏　浮谷泰之　円乗伸子
小川栄一　加藤賢一郎　香山聡　菜池高行　須貝宏行　高橋一郎　武井信義　谷口晃
梨本久夫　蓮尾果門　藤井啓蔵　増子明美　松本強　目黒智子　望月久　森勇　和田仁

日本大学理工学部
佐藤俊昭　中島義博

早稲田大学理工学部
赤真正人　奥山哲生　小原稔　野際武彦　原薫　松浦智

学習院大学理学部
石田恒雄　梶巻正男　関口守　千田章喜　長沢佳克　開実　松田光正　宮田定次郎　村越鐘二
猪鼻嘉行

東京理科大学
合場淳市　阪井茂　田辺幹雄　丸山満也

寄稿

河合研での研究回顧

伊部高由（リオン）

私がリオンに入社した 1961 年当時河合先生は小林理研の理事で研究所長、リオンでは技術担当取締役をしておられ大変多忙の人でした。先生が再び研究を開始されたのは研究所の所長と会社の担当取締役を退任され時間的余裕が出来たときでした。確か 1965 年頃で河合先生が 55 歳の時だったと思います。これから仕事を一緒にやらないかと誘われて天然性の高分子の圧電気については深田先生がやられているので合成高分子の圧電気の研究をやろうと言うことになり 1 年間程一緒に仕事をさせていただきなした。2 年目から私は圧電セラミックの材料開発をやることになりましたので、実際に高分子の圧電気の実験を始めたのは 1970 年からである。

当時河合先生は一応の結論を出しておられ，延伸高分子の圧電気は電歪と poling によって配列した自発分極（理論値の約 20％が配列）によるとし、PVF2 より感度の良い圧電性高分子物質を求める事は容易でないと言っておられたように記憶しています。また PVF2 と PVF 膜には大きな曲げ圧電気があることも報告している。

曲げ圧電気は木材や PZT 等の圧電物質にも生じるが一般には小さい、何故延伸高分子膜に大きな曲げ圧電気が起こるのかに私は興味を持った。延伸高分子膜 PVF2 と PVF の曲げ圧電気は仮に圧電気定数 (d31) が厚さ方向に大きく傾斜していれば起こっても良いと考えられるのでこれを確認する実験を行った。

PVF2 と PVF の 50 μ m 程のフイルムを何枚も重ねて等間隔に幅の狭い銀リボン電極を厚さ方向に 3 個挿入し軟化点近傍で圧力を掛けて 480 μ m から 900 μ m の試料を作り、この試料を 80℃から 140℃の温度で静電圧を印加し厚さ方向の電界強度を測定した。測定結果は厚さ方向の電界 PVF2 では＋極側の電界が大きく、PVF では－極側の電界が大きい。また、150 μ m から 200 μ m のロール延伸した試料 poling し＋極面から少しづつサンドペーパーで削って厚さ方向の圧電定数 (g31) を測定すると PVF2 では＋極側の圧電定数が大きく、PVF では反対に－極側の圧電定数が大きかった。一般に延伸分極した PVF2 と PVF 膜をベンドした時曲げ圧電定数の符号が異なる。これらの実験結果から合成高分子膜の曲げ圧電気は poling した時に厚さ方向に不平等電界が生じ、この不平等電界によって厚さ方向に圧電定数 (g31) の傾斜ができることにより起こると考えている。

次に補聴器用の小型エレクトレット・マイクロホンを開発した時に 140℃から 180℃の温度でエレクトレット化（Ni 蒸着面を＋極，蒸着してない面を－極とし－極から－電荷を注入）した 12.5 μ m から 20 μ m の FEP 膜と PTFE 膜の表面電位が室温では非常に安定した電位であることを確かめた。例えば室温で 300V の表面電位が 270V（10％減衰）になるのに数千年から 1 万年近くもかかることが実験から分った。また、エレクトレット化した表面電位は所望の表面電位に調整することもできる。表面電位が所望の電位より高い時は高温槽の中で 150℃から

180℃の温度に一定時間放置し、電位が低い時は電極のついていない面をアルミ箔に静電吸着させ高温に一定時間保持すれば所望の表面電位に調整できる。この事はエレクトレット化した時に注入された電荷の平均位置が両面からの電界の強さの差で僅かに厚さ方向に移動するものと考えられる。

PTFE フイルムの表面電位が室温で安定なことから PTFE フイルムの曲げ圧電気について実験した。厚さ約 50 μ m の PTFE フイルムを 100℃から 300℃近くの温度範囲で 430kV ／ cm の電圧で分極した試料の曲げ圧電気定数は 225℃で分極した時最大で β 331 ＝ 2.1cgsesu が得られた。この値は厚さ 50 μ m で長さ 1cm の試料の一端を固定し他端に 1 μ m の変位を加えた時約 3mV の電圧が発生する。曲げ圧電気は試料に注入された電荷によって形成された 4 重極と電歪の積によると考えている。

最後に入社した当時小試料毛細管粘度計の開発等で深田栄一先生に、また深田研究室の伊達宗宏先生には眼科、皮膚科用の超音波診断装置の開発で大変なご指導を戴いたことを深く感謝いたします。

寄稿

応用開発の立場から

田村 雅彦（元 パイオニア（株））

鯨のひげのフォノカートリッジ

もう四十年近く前のことになります。1967 年に当時音響機器メーカで開発に携わっていた私に、同僚が面白い話として「電子材料」誌に掲載された深田先生が試作された鯨のひげ、腱などをシェラックで固めたフォノカートリッジの囲み記事を教えてくれました。フォノカートリッジは、今はあまり使われなくなりましたが、LP レコードの再生に使う電気機械トランスデューサです。まだほんの駆け出しの技術屋だった私は早速深田先生に教えを乞いに出かけました。当時の理化学研究所はまだ駒込にあり、夜の指定された時間には風が強く木々の枝を揺らしていて、木造の建物の二階にあった深田研究室に行くために薄暗くきしむ階段を上りました。深田先生は快く試作カートリッジを見せて下さり、木材、骨などの生体高分子の圧電気や発見されて日の浅い合成高分子として初めての PMGL の圧電性 1) の話を丁寧に教えていただきました。

PMLG の圧電性

PMLG(poly- γ -methyl-L-glutamate) は味の素（株）によって合成皮革用に開発されたアミノ酸の高分子で、溶液からキャストしたフィルムを延伸すると水晶と同程度の圧電性を示します。高分子圧電材料を用いた実用的な音響機器のゴールははるかかなた先と思われましたが、なんとか会社の上司を説得してテーマとして認めてもらいました。深田先生からの紹介の味の素（株）の研究所へ日参して溶液を貰い、PMLG フィルム作製、延伸をおこないスピーカやマイクロホンの試作を始めました。PMLG の圧電性は FS モードのため 45° 板を使う必要があり、PMLG フィルム自体を振動板とすることは難しく、振動板としてはスピーカのコーン紙を使いました。PMLG フィルムの弾性率は振動リード法でおこない、圧電率の測定は B&K 振動ピックアップ較正用加振器を用いておこないました。試作したスピーカやマイクロホンは 1967 年 10 月の理研大和研究所皇太子殿下視察の閲覧に供したり、東京でおこなわれた第六回国際音響学会で深田先生が発表されたり 2)、話題を提供しました。二年程前久しぶりに小林理学研究所に深田先生を訪問した折に、伊達宗宏さんから保管されていた当時の試作品を見せていただき、なつかしく当時を思い起こしました。

エレクトレットヘッドホン

当時の深田研究室では高松俊昭先生がエレクトレットの研究を担当されており、Bell 研究所のエレクトレットマイクロホンの発表 3）の刺激もあって、深田先生からエレクトレットの応用開発の示唆をいただきました。高誘電率をもつ PVDF を開発した呉羽化学（株）も PVDF を素材としたエレクトレットに興味をもっており、深田、高松両先生にご指導いただき、呉羽化学（株）

と共同でエレクトレットを用いた静電型スピーカ（ヘッドホン）の開発を始めました。エレクトレットの音響機器への応用が提案されて 45 年が経過しており 4)、FEP フィルムのエレクトレットを振動板としたエレクトレットマイクロホンは実用期にさしかかっていました。静電型スピーカではマイクロホンの場合と異なり振動板の張力や機械的特性に影響され、その特性の制御が難しいため、材料に制約のあるエレクトレットを振動板に使わず、エレクトレットを固定極側に配置しました。厚さ 4 μ m のポリエステルフィルムの振動板は高音用ユニットとなる高張力の中央部と中低音用ユニットになる低張力の周辺部に分離されています。厚さ 1mm の多数の孔を明けた PVDF/PMMA のエレクトレットを振動板の両側に配置してプッシュプル静電スピーカを構成しましたが、電圧感度が低いために昇圧トランスを使いました 5)。長期間にわたるエレクトレットの湿度安定性を調べるために、調湿した大型のデシケータで実験室を埋め尽くしたことも忘れがたいことでした。

PVDF の圧電性

エレクトレットヘッドホン開発着手に相前後して河合平司先生の延伸分極処理後の PVDF の圧電性の発表があり 6)、1972 年から PVDF の音響機器への応用開発に着手しました。スピーカユニットの構造は薄いフィルム状の圧電材料である PVDF を振動板として用いるために、発泡体で振動板の背後から圧力をかける簡単なものでした。1974 年には、球帽型ユニットのヘッドホンと円筒型ユニットの無指向性高音スピーカを実用化し 7)、当時としてはかなりの数量の製品を販売することができました。ヘッドホンの振動板は厚さ 8 μ m と薄く、音波が放出されるキャビティが小さいため直接駆動が可能でしたが、高音スピーカの場合には感度不足を補うために、19:1 の昇圧トランスを通して厚さ 30 μ m の振動板に入力電圧を印加しました。

おわりに

このように振り返ってみますと、長期間にわたって深田先生の研究成果を利用させていただき、実用的な機器の開発に結び付けることができたことは大変幸運な経緯であったことに気が付き、改めて深田先生に謝意を表したいと思います。

[参考文献]

1）E. Fukada, M. Date and N. Hirai; Nature, 211, 1079 (1966)
2）E. Fukada, I. Yamamuro and M.Tamura; 6th ICA, D-3-1 (1968/8, Tpkyo)
3）G. M. Sessler and J.E.West; J. Acoust. Soc. Amer., 35, 1354 (1963)
4）江口元太郎、西川正治、抜山大三；特許第 69025 号（1928）
5）田村雅彦、大矢場隆史、岩間清徳、内川昭司、角谷治子；電気音響研究会資料
EA-71-25 (1972)
6) H. Kawai; Japan. J. Appl. Phys., 8, 975 (1969)
7) M.Tamura, T. Yamaguchi, T. Oyaba, T. Yoshimi; 49th Conv, Audio Eng. Soc., G-4 (1974/9)
e-mail: tamasa@plum.plala.or.jp

寄稿

歯牙救出法に活かされた圧電気理論とレオロジー

深田邦雄　　深田口腔顎難治疾患研究所

歯科の被抜歯原因の二大疾患は「歯周病」(＝歯と歯肉の境目から歯周組織が歯周病菌に感染し骨が溶ける疾患) と「重度の虫歯」(＝根管《いわゆる神経の管》から感染して根尖部で骨が吸収し化膿する疾患) です。私はこれら二大疾患に対し画期的な有効策として OBET(Oral Bio Energetic Therapy) 理論と RET(Rheological Endodontic Therapy) 理論を提唱し、その普及に努めています。

実は私にとって (患者さんにとっても), この二つの重要な理論の発展に、深田栄一先生と理化学研究所生体高分子物理研究室の御支援が重大な役割を果たしているのです。

1979 年頃、当時雪印乳業中央研究所の所長をされていた故曽根敏麿博士のご紹介で生体高分子物理研究室に出入りさせて頂くようになりました。それは「重度の虫歯」の根管治療に使われていた「ガタパーチャーの粘弾性」のデータを測定して頂くためでした。この基礎研究を基に、未だ混乱期にあった「ウォームガタパーチャーテクニック」(＝ガタパーチャーを暖めて根管に充填する方法) を再構築し、Rheological Endodontic Therapy としてシステム化しました。その成果は 1981 年 AAE(米国歯内療法学会) で発表し、評価を得ました。ガタパーチャーのレオロジー的研究をしたのは私が世界で初めてでした。

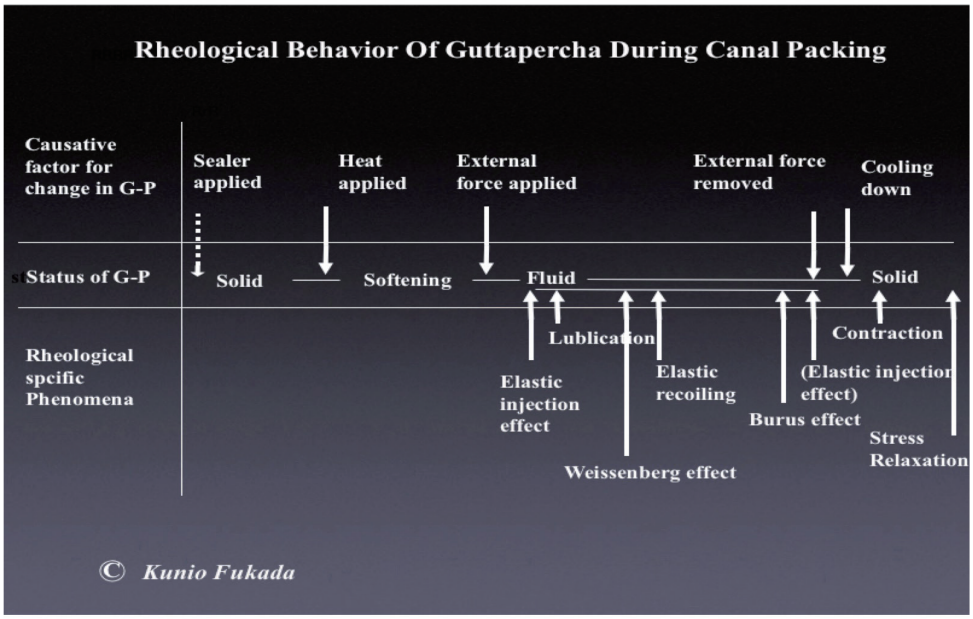
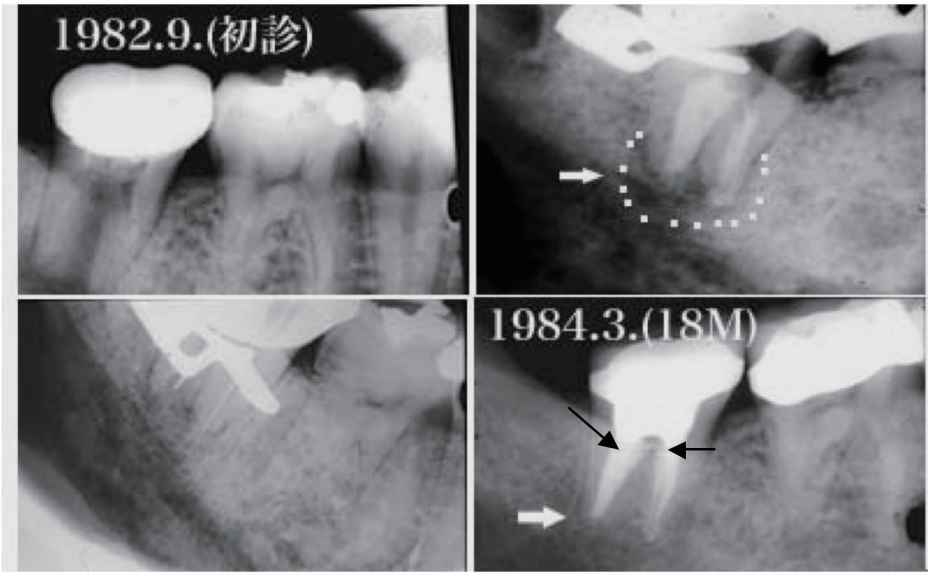


図-1　ガタパーチャーが根管内を流動する時に発現するレオロジー的特異現象

臨床的には Elastic Injection Effect が極めて重要な要素になる。

現在、根管の密閉精度に優れ、治癒率の高い RET は根管治療の分野では最も評価が高く、良識ある歯科医の中では広く認識されています。

ちなみに、Rheological Endodontic Therapy の名の由来は 1979 年 7 月 11 日、理化学研究所生物物理・生体高分子物理研究室合同で、私のために開催して頂いた研究発表会の帰り道、東武電車の中で思い付いたものです。



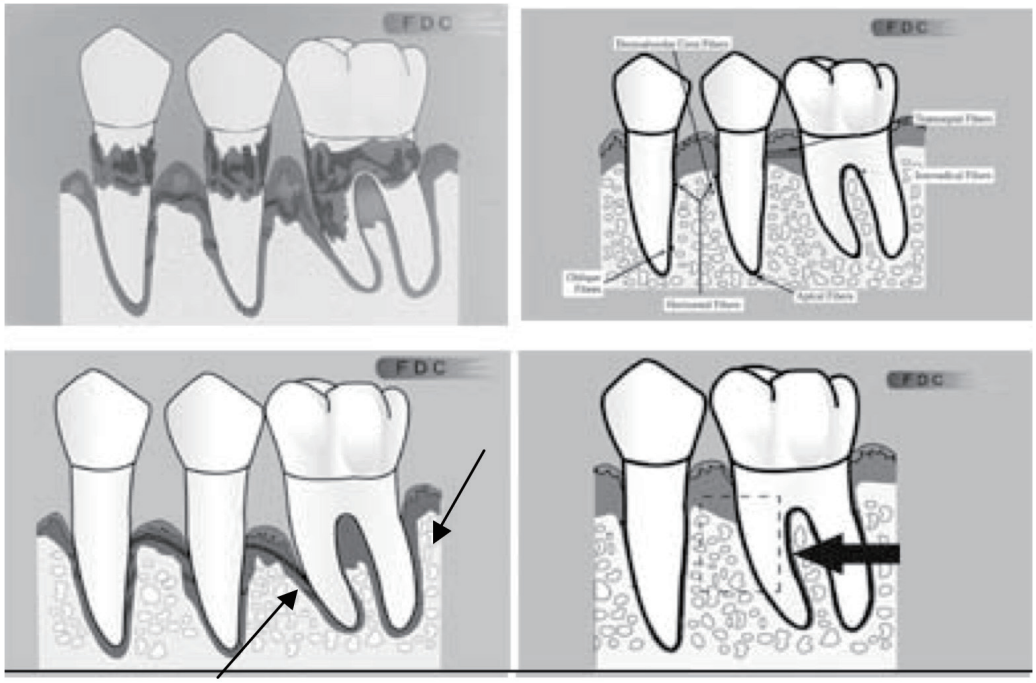
図―2　治療前(左上)、治療中(左下)、治療直後(右上)、18 か月後(右下)4 枚の Xray 写真。

治療直後まで存在していた化膿病巣 (点線枠内に存在した陰影) は 18 か月後にはきれいに消失している (太めの白矢印が示す部分)。黒矢印の白色部分は根充されたガタパーチャー。

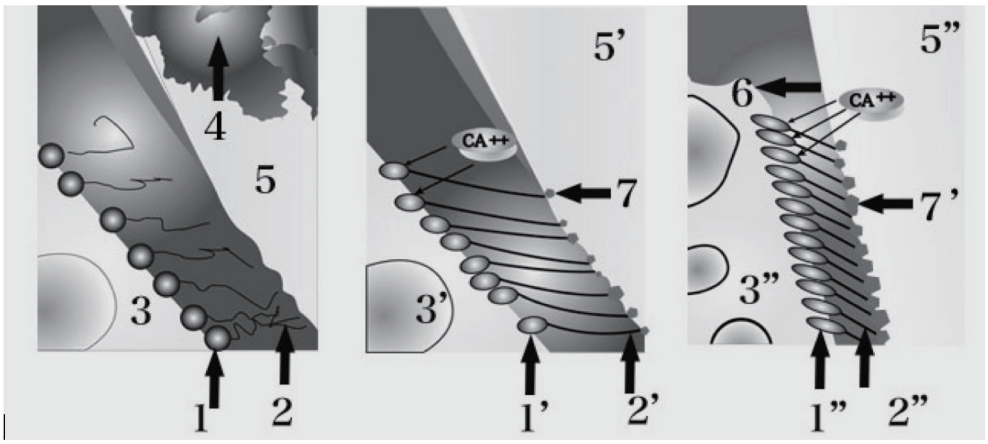
この症例は極めて根管の形態が複雑で、治療の難しい症例であるが、RET の「根管をしっかり密閉出来る」長所が発揮出来たケースである。

次に、OBET 理論のことに移ります。生体高分子物理研究室に出入りしていた折り、故保田岩夫先生らと共同研究されている「骨と電気刺激」のことを深田栄一先生から伺いました。その時、将来､これらの研究は私の医療活動に重大な影響を与えるだろうと言う予感がしました。そこで、早速研究会に入会させて頂きました。

当初，これらの研究は　ピエゾフィルム等を用いた外科 (手術をする) 療法に活用出来ないものかと模索しましたが、上手く行きませんでした。それから数年経ったある日、深田栄一先生から歯科とは直接関係のない２つの論文が送られてきました。それがこれからお話しする自発的 (非外科的) 骨再生療法の理論構築に大きな足場になりました。それらの論文の内容は骨芽細胞の変形と Ca イオン代謝の研究でした。



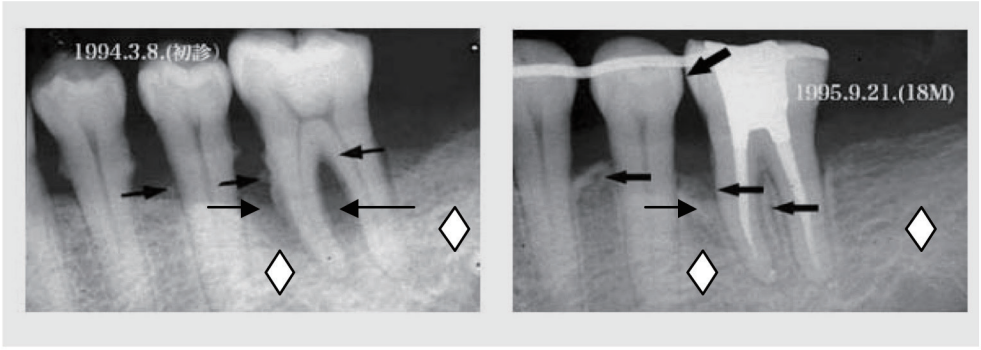
図―3　治療前(左上)、炎症消退時(左下)、骨再生後(右上)、拡大図(図―4)当該部(右下)
上の矢印部は歯根膜が多い側、下の矢印部は歯根膜が少ない側。



図―4　左、中央、右はそれぞれ図―3の治療前(左上)、炎症消退時(左下)、骨再生後(右上)を拡大したもの。1は骨芽細胞、2は歯根膜、3は歯槽骨、4は歯石、5は歯根部、6は再生した歯槽骨、7はセメント芽細胞。歯根膜は図のように骨芽細胞と歯根部を接合しているが、炎症時は断裂していたり、弛緩していたりする。そのため、細胞の正常な変形が起りにくい。炎症消退とともに、歯根膜が回復し、骨芽細胞は正常な変形が起き、細胞膜の透過性が増し、Caイオンの通過性が良くなり、Caイオンの代謝が増す。それが骨芽細胞の活性化をもたらし、結果的に歯槽骨の再生が起きる。歯槽骨の再生には、歯根膜の再生が最も重要であり、そのためには歯石の除去と歯根面の清掃が不可欠である。　　(図版の作製は太田宅哉氏(長野県開業)の御厚意による。)

私の臨床では、時折、非外科 (手術をしない) 療法でも歯槽骨が再生している例が見られました。そのことは「患者に肉体的負担を強いる外科療法は、日本人の歯周病患者に恩恵をもたらすのか」という私の疑念を更に深めて行きました。ですから、自発的 (非外科的) 骨再生療法の第一歩の理論 (表の理論) 構築が出来たことは大変な感激でした。

歯槽骨の再生と言っても失われた骨が 100% 回復する訳ではありません。しかし、非外科的骨再生の場合、骨は自然治癒で再生されたものですので、これらによって支えられた歯牙を上手に連結すれば通常の食生活には充分耐えられる骨として機能します。　もちろん、自発的 (非外科的) 骨再生療法の表の理論構築が出来たからと言っても、これだけでは不十分でした。それから数多くの自発的 (非外科的) 骨再生例を調査している内に大変なことに気が付きました。



図―5　左は治療前、右は 18 か月後の Xray 写真。菱形印の部分が歯槽骨。
右 18 か月後の Xray 写真の下の矢印群が骨再生の部分。治療前より黒い部分が白くなっている。治療前の当該部と比較されたし。右図、上の大き目の矢印部には歯間離開 (歯と歯の間に隙間があること) が生じている。

図ー 5 のように歯槽骨が再生した症例では多くの場合、歯牙が移動していることに気付きました。すなわち、「自発的骨の再生は自発的歯芽の移動とともに起きる」そしてその移動には「歯根膜の付着量の適度な差が必要である」という結論に達しました (結論の説明は紙数がありませんので割愛させて頂きます)。図―3 左下のように歯根膜が多い側 (上の矢印部) と歯根膜の少ない側 (下の矢印部) が存在する場合、図―5 の Xray 写真でも分かるように歯牙 (この場合大臼歯) が遠心 (写真の右) 側に自発的に移動します。これで裏の理論が確立しました。

これらの現象が必ず起きるようにする臨床的重要ポイントがありますが、それは「無歯磨剤の多回法ブラッシング」、「丁寧なルートプレーニング」です。自発的骨再生療法の表裏 2 大理論の確立と臨床技術の改善で、その後の治癒の確実性と迅速さは著しく向上しました。理論確立のための実験成果及び臨床成績は 2001 年～ 2003 年の日本歯周病学会で 7 件発表し、大きな反響を得ました。有難うございました。

深田栄一先生の末長いご健勝を切にお祈り致します。

寄稿

理研（生体高分子研究室）での３年＋α

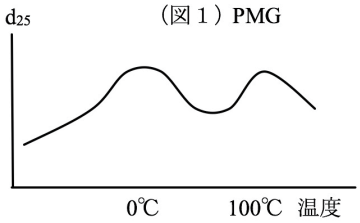
木村（高下）三郎　（学習院大）

手元に資料がないので記憶にたよって書いています。

研究について

1967.4. ～ 1968.3（学習院大４年）

PMG(poly-methyl-L-glutamate) の圧電性を調べました。０℃付近と 100℃付近に２つの温度分散がありました（図１）。まだ学部の４年になったばかりで、測定結果を深田先生に見てもらったとき、「面白いですねぇ」と言われても、どこがどう面白いのかも全然わからない状態でした。



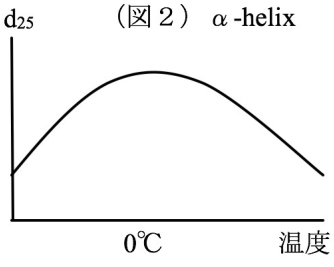
（図１）PMG

ただ、L 型と D 型では圧電率の符号が反対になるはずだと提案し、その通りの結果を得ました。これが後に古川さんがされた、光学活性高分子の圧電性の存在確認につながったものと思います。

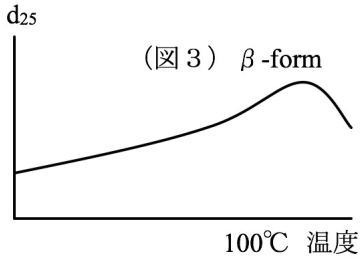
1968.4 ～ 1969.3（学習院大修士１年）

前年同様 PMG の圧電を調べました。前年は味の素 K.K より提供された延伸までしてある試料を使っていましたが、この年にはいろいろ自分で手を加えた試料をつくっていました。しかし、目立った結果はでませんでした。

そのなかで、β -form のとき、yz の歪みで x 方向に分極する仕組みを直感的にとらえるモデルを考えました。個人的な事情で３月に中退しましたが、このモデルのことを深田先生に論文に仕上げていただきました。



（図２）α -helix



（図３）β -form

1974.4. ～から 1975.3.（学習院大修士２年）

５年のブランクのあと復学しました。この時も PMG の圧電性を調べました。PMG は通常では α -helix ですが、ギ酸で処理すると β -form になることを文献で知りました。β -form が混じらないで α -helix だけになるように圧延しないで配向させたもの（図２）と、圧延配向してからギ酸処理をし β -form にしたもの（図３）を測定し、それぞれ０℃付近と 100℃以上に分散が１つだけあることを見いだしました。このことと、結晶化度、配向率などの解析（前年から来ておられた佐々木さんにいろいろアドバイスいただいた）から、最初に測定したもの（図１）は、延伸の結果 PMG の主鎖が伸びきって部分的に α -helix が β -form に転換していたからであることがわかりました。また、前に古永さんが PBG(poly-benzyl-L-glutamate) において延伸倍率を大きくしても圧電率が大きくならないことを見つけていましたが、そのことは PBG が β -form をつくらないので α -helix がほどけてしまうためであると関連づけられました。

思い出

液晶のこと

液晶という興味深い物質があると、深田先生がよく言われていました。当時シャープの方も時々来ていました。１～２年してから「やっと商品化できました」と液晶表示の新製品の電卓を持って来られたことも憶えています。

私は、液晶というのはそんなに面白いのだろうか、と思っていたのですが、現在の液晶の発展ぶりを見て、今更ながら先生の先見性に驚いています。

バブル崩壊後の不況の中、液晶分野での日本企業（シャープ）の健闘ぶりを、以上のことを例にとって、「20 年以上前に成功するかどうかわからない状態でも投資していたから」と、授業（中学）のときに生徒によく話しています。

将棋のこと

将棋に熱中し、昼休みに始めで３時までかかったこともありました。将棋好きな方が多く、リーグ戦までしました。囲碁もしましたが、少数派でした。

卒業後

1975 年に卒業した後もよく理研に顔を出しました。1979 年から教職（中学、高校）についたのですが、東邦音大で「音響学」「物理学」を教えていた 1981 ～ 1984 の３年間はほぼ週に１度理研に行きました。図書館の文献を利用し、古川さんや伊達さんと話しながら講義の下調べなどしました。理研に行ったときは学生時代にもどった感じがしたものです。

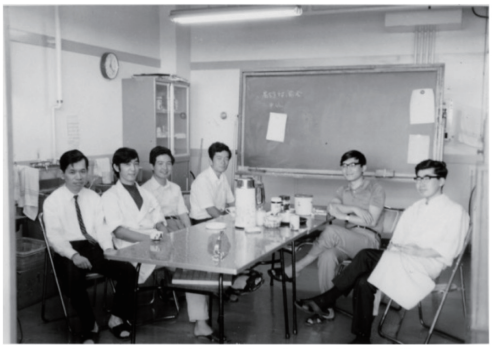
深田研究室の、世の中がまだ研究すべき対象としていない分野を研究テーマとして取り上げていく、という姿勢は、その後の私の考え方の根本を支えています（世の中の人はみんなそう考えているのだとつい錯覚してしまうのですが）。

寄稿

「私の理研時代」

押木満雅

私が深田先生の生体高分子物理研究室にお邪魔していた時期は、4 年生の卒業研究から大学院博士課程の博士論文までの 1968 年 4 月から 1974 年 3 月の 6 年間で、みっちりと指導していただきました。1968 年の当初は、駒込から移転直後で、正面の研究棟がまだ右半分しか無い時期で、自宅の鎌倉から約 2 時間をかけて、和光市まで通っておりました。実験の最盛期には、研究室のボンボンベットが定宿で、1 週間のうちの大部分を研究室で過ごしていました。夜中には、FM 放送の番組「ジェットストリーム」をステレオで聞きながら実験を行い、明け方には、南側の米軍住宅との間の凹地に霧がたなびき徐々に日が昇ってくる光景が今でも眼に浮かびます。自分が、熱心な学生であったかとの問いに対して、「はい」とハッキリ言う自信がありませんが、実験する時はする、遊ぶ時は徹底的に遊ぶことを実践した様に思っております。その当時、私はスキーに凝っており、冬、春さらに夏までも滑っておりました。学部 3 年生の終わりに、卒業研究の研究室を選ぶ際に、先生に質問した事は、遊びの時間を確保したいとの気持ちから、「学校の休みの時期には休んでもいいのですか」でした。今から思うと、何と恥ずかしいことを、何の恥じらいも無く質問したものだと、赤面の至りです。



昭和 47 年頃の研究室（左から 4 人目が筆者）

実験は、ポーリング処理したポリ弗化ビニリデンの逆圧電効果を測定致しました。実験装置の作成、オペアンプによる測定回路作成を行い、逆圧電定数測定、さらに圧電効果発現の根本である電歪定数測定などを行っていました。学部では、チャンと勉強してこなかったので、理研に来てから、物性物理や電磁気などの研究活動に必要な基礎学力的部分を自分で勉強した様に思い出します。

この時期に、先生からは、後の私自身の行動様式を決める大きな二つの事を教えていただいたと思っています。その一つに研究は、多くの人が関わり初めて出来るものであるという事です。装置を製作するのに、工作部門の技術者にこちらの思っている物を作って貰わなければならない

し、事務部門の人には事務手続をして貰わなければならない。寺田寅彦の随筆にあるような、『地下室の片隅で実験している研究者』は、たった一人で研究をしているものと思っていたのでした。自分の不得意な、人との対話、折衝や議論などが重要だと言う事を認識、理解し、その後の、社会生活の重要な要素の一つを学んだ時期でした。もう一つは、まずやってみよう、と言う事でした。やはり、寺田寅彦の随筆に『頭の良い学者と頭の悪い学者』の話がありますが、頭の良い学者は、実験をする前に、出来ない、ダメな理由を並べ立てて、手を出さない。一方、頭の悪い学者は、兎に角やってみる。すると色々な成果が得られて来る。この後者を、教えて頂いたと思っています。最近、若い人たちを管理、指導する立場になり、出来ない理由を並べ立てる輩や、ガチガチに道具を揃え、絨毯爆撃的に実験して、後でデーター整理して結果を出そうとする人たちが何と多いのにあきれています。実験全体のイメージやストーリー作り、データー採取、整理そして自分のイメージやストーリーの検証という研究の基本的思考方法を学生時代に身につけて来ていない者が多く、自分の受けてきた教育に感謝しております。

ソフトボール（昭和 47 年）

理研時代には、研究ばかりしていたのでは無く、研究室対抗のソフトボール大会に出場し、優勝した経験もあります。ソフトボール大会が近くなると、我々、学生は、午後に実験もせず、サイクロトロン棟との間のグラウンドで練習に明け暮れていました。この写真はその際の一コマです。また、秋には、研究室の車を連ねて、1 泊旅行に出かけたものでした。よく学び、よく遊びを実践した時期でした。

1974 年（昭和 49 年）春に、富士通入社。その後、富士通研究所へ移動し、強磁性薄膜を応用した薄膜磁気ヘッドの開発を行い、量産工場の建設や工場運営など色々な業務を行って今日に至っております。その過程は、日本応用磁気学会誌に寄稿してありますので御参考にされて下さい。

私の、青春の重要な時期を理研で過ごすことが出来、そこで見たこと、感じた事や学んだことが、今日、自分の根底にあるのだとしみじみと感じるこの頃です。

2003.7.31

参考：日本応用磁気学会誌 vol.25,No.3-1,2001P109-110

論　説

薄膜磁気ヘッドとともに四半世紀

With the Thin Film Head for a Quarter of a Century

押木満雅　（株）富士通研究所ストレージシステム研究所
M. Oshiki, Fujitsu Laboratories Ltd., Storage Systems Laboratories

先日，書類棚の整理をしていると，古い報告書が出てきた．1977年9月の日付で題目は『磁気抵抗効果の研究』であった．入社して磁性研究に携わり，初めて書いた技術報告書である．ほぼ，四半世紀が経過している．この間，薄膜磁気ヘッドはインダクティブヘッドからMRヘッドへ，さらにスピンバルブヘッドへと次々に変わっていった．これらの変遷に携わり，激流の中で揉まれながら生きてきた自分ではあるが，この年になると少し足跡を見つめ直したくなった．いろいろな場面があったが，今日の私を形作る糧となっていると信じている．同じような境遇におられる会員の方の参考になるかもしれないと思いつつ，自分の薄膜磁気ヘッドとともに歩いた四半世紀を，思い起こして見ることとしよう．

薄膜磁気ヘッド揺籃期　学生時代には，高分子の強誘電的性質を研究していたのであるが，どうゆうわけか，会社に入ってから，強磁性体薄膜を扱うことになった．最初の実験は，パーマロイ薄膜の磁気抵抗効果を評価することであった．バブルメモリーのセンサー研究を進めていた研究室へ出かけていき，磁気抵抗素子の作製方法や測定法などを教えてもらい，実験を開始した．E-ガン蒸着機による成膜にはずいぶん手こずった記憶がある．E-ガンに過度の電力を投入してしまい，パーマロイを突沸させてしまった．試作基板はおろか真空チャバー全域をパーマロイ溶融物の残骸で埋め尽くしてしまった．また，E-Beamの位置調整を誤り，蒸着材料の入っているハースに穴をあけてしまったり，数多くの失敗を繰り返した．この時期の失敗や基礎的な勉強などは貴重な経験であったと改めて思い起こさせる．今では，若い研究者に『そんな初歩的なミスをしないように注意して実験しろ！』などと言う立場になっているが，本当はどんどん失敗をして，その経験を，後の研究生活に活かしてくれれば良いのであるが……．（1977年秋）

その頃，垂直磁気記録が提唱され，我々の研究室でも磁気ディスク装置をターゲットに研究を開始した．私の担当は，垂直磁気記録用薄膜磁気ヘッドを試作することであった．薄膜主磁極の先端にコイルを配置したいわゆる，単磁極ヘッドを試作した．磁気ディスク用基板（ϕ14インチ）に成膜したCoCr垂直記録膜と組み合わせて電磁変換特性評価をしたが，思うような結果が得られず，媒体作成者と『ヘッドが悪い』の『媒体が悪い』のと喧嘩もどきの討論を繰り返した．その後，新しいヘッド構造を考案し，試行錯誤を繰り返しながら試作ヘッドを完成させた．特性評価を行ったところ，良好な記録・再生特性が得られ，その成果を論文にまとめて米国アトランタで開催されたMMMで発表することができた．入社して初めての海外出張であった．（1980年秋）

インダクティブ薄膜磁気ヘッド　薄膜磁気ヘッドが磁気ディスク装置に採用されるとの情報がもたらされた．急遽，めっき技術を応用した薄膜磁気ヘッドを開発することになった．たった二人でのスタートである．昔のワイアーメモリ時代の報告書を読み返したり，社内の表面処理技術者の話を聞いたりして実験計画を練った．餅屋は餅屋で，その表面処理技術者のシアンまみれの実験室（シアン化合物による実験をしていた）の一部を借り共同開発を進めることにした．めっき成膜，基板切断，磁気特性評価までの一連の作業を繰り返し，めっき浴組成を決定した．成膜時間は短いのだが，評価，整理までの時間がかかり，段取りの重要さを認識したのであった．約半年後，コア幅40 μm，5ターンの試作ヘッドが完成した．絶縁層の剥離，クラックやめっき膜の剥離などウエファープロセスや加工などでの多くの問題，困難を乗り越えた試作であった．特性評価では，良好な電磁変換特性を測定することができた．自分で調べ，考え，実験を行った成果である．やっつた……！このときの達成感，充実感を今でも思い出す．今の研究者，技術者にこのような達成感が得られるようなテーマを選定し指導しているだろうか．自責の念．（1981年早春）

その後，IBM薄膜磁気ヘッドの全容が明らかになり，形状を真似た1層8ターンと2層16ターンコイルヘッドを試作して評価した．この基本プロセスを基に事業部のパイロットプラントを構築した後，研究所より事業部へ転属となった．このときの研究総合報告書のあと書きには，『我々の薄膜磁気ヘッドが世界のいたる所で稼働することを夢みている．』と結んだ．（1982年早春）

技術移転の難しさや工場運営の煩雑さなどを思い知らされた時期でもある．2層16ターンヘッドの少量量産を進め，特性とプロセスの相関などを綿密に調査した．このときの知見を詰め込んだプロセスが今日の量産ヘッドまで脈々と継承されている．我々の開発した薄膜磁気ヘッドが磁気ディスク装置用に採用されたのは，電電公社向けの大

型装置が最初であった．その後，いくつかの商用機へ採用され，出荷されていった．しかし，装置評価が進むに伴い，薄膜磁気ヘッドにまつわるノイズ関連の問題が表面化した．バルクハウゼンノイズ，ウイッグル，ポップコーンノイズなどいろいろな呼び方をされているが，いずれも，磁性膜磁区の不安定移動に起因する．このノイズが装置評価技術者から指摘された際には，内心，出るものが出たとドキッとしたが，装置側が発生させているノイズだろうと白を切っていた．しかし，証拠を突きつけられ，白状させられてしまった．それ以来，ノイズから離れられないで，今日まできている．最近，『以前からバルクハウゼンノイズという言葉を聞いているが，まだ直らないのか』よく言われる．その場では，いろいろ言いわけを言っているが，完全になくなるなんて口が裂けても言えないと思っている．(1988年春)

MRヘッド　磁気抵抗効果(MR)を利用した磁気ヘッドの開発は研究所内で進行していたが，MRヘッドの磁気ディスク装置での商用化が近いとの情報に，研究所および事業部開発部隊を集結したMRヘッド開発プロジェクトチームを結成し，開発促進を図った．今度は，事業部側の技術者としてMRヘッドを量産体制まで持ち込むことが使命であった．研究所，事業部の考え方の差に苦しみながら要素技術開発段階を進めた．当面の開発が終わった時点で，開発および量産立ち上げ期間の短縮をねらって事業部開発部隊を量産工場に移転した．私は，単身赴任したが，ノウハウを保有する現場作業員の地方工場転籍ができず，量産立ち上げ大幅遅延という大きな混乱の一因をなしたと考えている．このときには，倒産企業の企業主のように工場作業者約100名の人員整理，仕事先斡旋など非常に苦しい業務を約半年間経験した．MRヘッドの量産では，技術的に数百Åの薄膜積層，磁区制御などに手こずり，また，量産工場の物の考え方，Not Invented Hereなど技術移転問題や，量産工場運営の難しさを思い知らされた．精神的に一番苦しい時期であった．(1993年秋)

量産ヘッドの製造歩留まりが思ったように向上せず，苦しんでいる時期に，上司に，『今のものもできないのに，将来技術などない』とまで言われたが，最小限の人員で，将来技術の開発を進めておいた．その結果，その技術が必要となったときに，スムーズに量産に結び付けることができたと自負している．今でも，必要と信じていることを実行する技術者の気持ちを大事にしなければならないと思っている．その後，MRヘッド増産のため新工場建設企画からその実行までを行った．企画段階での社内関連部署への根回しや社内稟議など，また実行段階での工場レイアウト，設備選定，工程短縮，24時間勤務などなど，かなり挑戦的な試みも果敢に採り入れた．そのときの社内，外の方々との多くの出会いは，苦労も多かったが，今でも面白い経験であったと思い出す．新工場を量産部隊へ引き渡した後，再び研究所に舞い戻った．2年半の単身赴任であった．(1995年暮れ)

スピンバルブヘッド　急激な面記録密度の上昇により，MRヘッドの特性的限界も近いと考え，より再生効率の良いGMR素子の開発を手がけた．MRヘッドからスピンバルブヘッドへの移行は，以前のインダクティブヘッドからMRヘッドへの移行ほど手間取らなかったと記憶している．薄膜をさらに薄く，多層にということで，基本プロセスや評価手法が類似であったということが幸いしたのであろう．しかし，量産工場では，相次ぐ新機種開発によりヘッドの歩留まりが思うように上がらず悲鳴に近い声があがってくる．今度は研究所側の研究者として，事業部との問題意識や開発に関する考え方の大きな差に愕然とし，事業部の支援をどうするかの難問に苦しんだ．また，スピンバルブヘッドにおいても，ノイズ問題に悩まされている．高密度記録に伴う素子の狭小化によりさらに難しい問題になっているように思われる．また一方，記録ヘッドでは，高トラック密度になり，記録磁場のサイド方向漏れ磁場による問題が顕在化している．今までは，再生ヘッドの高能率化に目がいき，あまり問題視されていなかった記録ヘッドにも火の手が上がった．実のところ，20年前のインダクティブヘッド時代に，コア幅を変えたヘッドを試作して，O/W特性を比較したことがある．狭コア幅の方が悪く，横方向の書きにじみの効果と考えていた．そのときの疑問を突き詰めていたらと悔しくもなる．今後のさらなる高密度記録化にとって，再生ヘッド以上に記録ヘッドが重要な問題を抱えていると考えている．薄膜磁気ヘッドの開発は，再生ヘッド，記録ヘッド共に，相互に矛盾する事象の折り合い点を探していることになる．高記録密度化はまだまだ進行する．苦労は尽きない．

これまでの私自身の経過を書いてみた．『意地』と『思い込み』でここまできたとの感がある．寺田寅彦の『暗い研究室の片隅で細々と実験している，あたまの悪い研究者』を夢見ていた私．しかし，周囲の有形無形の協力や後押しがあったからこそ，ここまでくることができたと思っている．感謝．まだまだ道は続く．同じような道を歩んでおられる読者の方もおられと思うが，『なんとかなるさ，気楽にいこう』．(2001年正月)

(2001年1月15日受理)

押木満雅　おしき・みつまさ
昭49　学習院大学大学院自然科学物理学専攻博士課程終了，**同年**　富士通入社，**昭50**　富士通研究所，**昭57**　富士通，**平7**　富士通研究所ペリフェラルシステム研究所主席部長を経て，**平12**　ストレージシステム研究所所長代理，現在に至る．
専門　磁気記録，薄膜プロセス技術(理博)

寄稿

「磁気と生体」の実験の日々

上本道久（東京都立産業技術研究所）

私は 1985-1987 年の 2 年間、博士研究員として理研生体高分子物理研究室にお世話になりました。当時深田先生はすでに退任されており、後任の雀部先生のもとで貝原さんや伊達さんと一緒に「生体に及ぼす磁場の効果」の研究を進めておりましたが、深田先生はこのプロジェクトに関連してよく研究室にお越しになりました。いつも満面の笑みを浮かべておられた印象が残っております。

深田先生は、私が元々の専門としていた電解質水溶液の無機化学について深い造詣を示してくださり、これは岡小天先生も同様で、生体内の電解質の挙動と生命現象は重要である、とよくエンカレッジしてくださいました。また、外国に持っていくため国内学会の要旨原稿を英訳して欲しい、と頼まれたことがあり、医学系の文章を苦心して訳すと「なかなかうまいね。」とお褒めいただいたのが記憶に残っております。

益々ご研究の道に邁進される先生のお姿は、私にとっては研究者としての目標のようにも感じられます。先生の一層のご健勝とご活躍をお祈り申し上げます。

磁気と生体についてのエピソード

1）磁気の生体影響の実験の一つとして、幅広のフラットケーブルコイルを毛布に縫い付けて、接続された磁場発生装置より動的磁場を発生させ、その人体影響を調べてみようした時のことです。二重盲検というほどではないものの事情を知っていると先入観で評価するので、被験者を募ることになり、卒研生が協力してくれることになりました。「もしよかったらそいつを布団に掛けて一晩寝てみて､明日どうだったか聞かせてくれないか」と依頼したわけです。伊達さんは「明日万一彼が目を覚まさなかったらどうする」と冗談半分で心配しておられましたが、勿論その可能性が乏しい弱いレベルであることは文献調査等でわかっていました。何度か磁場強度やパルス間隔などの磁場発生パラメーターを変えて行ってみたのですが、日によって被験者の反応が大きく異なる（今日は気分がいい、今日はなんの変化もない、など）ことがわかり、同じ印加条件ですら著しい差があることに苦慮していました。磁場発生装置のパワーランプの赤い LED がやけに鮮やかなのが気になった私は、伊達さんと相談してパワーランプが点いてもコイルに電流が流れないように調整して、学生さんに「これで最後だからよろしく」と言って明日の面談に賭けました。

次の日の朝、彼は息せき切って私のところに来てこう言いました。「ゆうべは効きましたよ、今までで最高でした！」磁気の生体影響の実験とは斯くも難解なものであることが身をもってわかった次第でした。

２）単離細胞の継続培養は、無機化学が専門であった私には決して易しい操作ではなく、バンデ棟の放射線生物研に日参してはトレーニングを繰り返した後に細胞を本棟３階の培養器に移し替えて、いよいよ磁場印加実験が始まりました。増殖については有意差があるようでないような微妙なデータに終始したわけですが、あるとき飛び抜けて巨大な異形細胞が出現しました。この分野では当然のことなのかもしれませんが、顕微鏡下でその姿を直視した時の驚きと戦慄は今でも忘れることができません。

３）磁場環境下で飼育したラットの血流動態を調べることも試みました。希土類磁石を全面に埋め込んだテフロン板の上でラットを飼育し、一定期間の後に肝臓に電極を挿入して血流に対応した信号を捉える、というものでした。定期的に動物飼育室に体重測定に向かうのですが、ラットがテフロン板の角という角をかじったもので、排泄物で一部の磁石が腐食してしまいました。磁場の問題よりも、これだけかじって摂食影響はないのかなどと考えてしまいました。ラットもすることがなくて暇だからなあ、と思っていたのですが、齧歯類は常に歯を磨がせないといけないということに、後になって気付いた次第でした。

また血流測定は貝原さんと一緒に小石川の東大分院(貝原さんの兄上が居られた研究室)にラットを持ち込んで行いましたが、慣れない私は何度か麻酔注射をする時に噛み付かれて取り逃がしてしまい、部屋中大捕り物をしたこともありました。ようやく捕まえたら埃だらけのただのドブねずみのようで、本当に持ってきた病原体フリーの由緒正しいラットなのか、元々居た連中なのか見分けがつかないのには閉口しました。

「磁気と生体」の実験は、とにかく驚き・思案・落胆・工夫の繰り返しで、得難い新鮮な面白い体験でありました。

上本　道久

高分子の昔を語る

旧理研における高分子物理研究の源流をたずねて

岡野光治　東京大学

生体物質の圧電性やレオロジーなどの生物物理学、および高分子物理学で数々の先駆的な業績を挙げられた深田栄一先生が傘寿を迎えられてもなお矍鑠として研究活動を続けておられるということは、まことにおめでたいことで心よりお祝い申し上げると同時に、真の研究者はかくあるべしとの範を示されたものとして、私ども凡人は身の引きしまる思いがする。先生のますますのご健勝を祈念して止みません。

過日催された深田先生を囲む講演会に引き続いて行われた「高分子物理の昔を偲ぶ会」にお招きをうけた際に、私の個人的な回顧を中心に、木下研―菅研―高分子物理研（岩柳研）と続いた理研における高分子物理研究の事始めについて述べさせていただいたが、以下の小文はそれを要約したものである。

私は 1954 年（昭和 29 年）に東大工学部応用物理学科を卒業した。卒業論文のテーマはハロゲン化銀の電子回折で、菅義夫教授、園池実覧講師（以下、肩書きはすべて当時のものとする）のご指導をうけた。学部卒業後大学院に進学し、和田八三久助教授のご指導をうけることになったのだが、振り返ってみるとこれが今でいうソフトマターの物理、とりわけ高分子物理との出会いであった。当時、和田八三久先生はもっぱら超音波を用いてアミノ酸などの低分子（の溶液）や高分子固体の力学物性を研究しておられた。この時期、菅先生は理研の主任研究員を兼務していた関係で、私の修士論文の実験は理研の菅研究室（旧理研では 1955 年頃まで研究室の名称は主任の名前で呼ばれていた）で行うことになり、私は多くの時間を駒込上富士前町（現在の本駒込）にあった旧理研の 3 号館（と 2 号館の図書室）で過ごすことになった。そして、これが機縁で修士終了後も所員として約 10 年の研究生活を理研で送ることになった。

私の大学院時代、菅研のメンバーは和田英一、岩柳茂夫、秀島光夫、中根平之助といった方々で全員が高分子物理とりわけ力学物性の実験的研究を主たるテーマにしていた（注 1 ）。

1953 年に、わが国では初めて開催された理論物理の国際会議に Flory や Kirkwood などの高分子の統計力学のビッグショットたちが招かれたことからも明らかであるが、この時期高分子は物性物理のホットなテーマの一つであった。当時、理論面では小林理学研究所がわが国でもっともアクティブなセンターであったように思う。斎藤信彦先生はじめ中田修、池田勇一といった方々が続々とセミナルな論文を発表していて大きな刺激をうけた。小林理研の理論グループの成果は 1958 年に初版が出た斎藤先生の名著：高分子物理学に明快に記述されている。

注 1　ただし、菅先生ご自身は半導体に軸足を移しつつあった

ここで時代を遡ると、菅研の前身は昭和の初めから終戦後 (1926 ～ 1951) まで続いた木下研であって、主任は東工大教授の木下正雄先生であって、菅先生ご自身も木下研の出身であった。木下先生のご専門は熱学（熱放射や､気体の状態方程式から絶対零度を決定すること)､低温物理、高圧物性、超音波など多岐にわたるものであって、これらのテーマの多くは大正年間に先生が留学されたベルリン、ロンドン、ライデンなどでのご経験をもとに、その種子をわが国に播かれたものであった。

話をもとへもどすと、その頃菅研では毎週金曜日の午前にセミナーが開かれていた。これには東大の応用物理から和田八三久先生や古賀正三講師（古賀先生も木下研のご出身で、後に東大の応用微生物研究所―この附置研の名称もその後変わっているーの所長をなされた）も参加され、木下先生もほとんど毎回お顔を見せられていた。テーマのほとんどは高分子に関するものであった。この頃の理研の菅研と東大応物の和田研は研究面のみならず人事の交流もあって、おのずから一つの研究グループを形成していた。

それでは、理研の菅研における高分子物理研究のルーツはどこにあるのであろうか（注２)。それは終戦直後に木下研で始まったということは漠然と耳にしてはいたが、幸にして最近、それを具体的に裏付ける資料を目にすることができて、私の長年の疑問が解決した。それは 1947 年(昭和 22 年)の 8 月に木下先生が理研の主任会議での報告のために毛筆で認めた草稿で「22．8．30　主任会議に用意せる研究報告」と題する文書である。以下に、その主要部分を紹介する。

「研究項目　高分子物質の物理的及び物理化学的性質

戦前から超音波の研究をしておりまして、戦時中に陸海両軍部から委託された武器としての水中超音波利用及び超音波に関係する潜水艦対策に室員全部が専念して体得した超音波テクニックと室員協力の強みとをわが国産業の甦りに役立てるべく協議しました結果、石器時代―ブロンズ時代―鉄時代と変遷し来った世界に次に来るらしいものの一つとして合成樹脂時代が考えられますので高分子物質の研究を始めることといたしました。これには超音波テクニックが役立つのであります。

物理的方面では最近外国特に米国における合成樹脂、合成ゴム、合成繊維等の工業の著しい発展に伴って無定形物質あるいは高分子化合物の特異性すなわち弾性余効、履歴現象等を説明する理論が多数提出されつつあるので、まづ力学的諸性質を、次には熱的、光学的、電気的性質を系統的に実験で調べようとしております。(中略)

実験室の整備が充分でないので（注３)、実験研究は準備時代と申すありさまで、研究に関してご報告致す材料はまだありません。」

注２　東大の和田八三久先生は直接理研に所属されたことはなかったが、終戦直後に先生が研究活動を開始されたときに超音波や高分子をテーマとして選ばれたのは、菅先生との密接な関係から、理研の影響が大きかったことはたしかである。

注３　旧理研の３号館は 1945 年に戦災にあい、建物の内部はほとんど焼失したと聞いている。

なお、昭和 22 年にはこの研究に対して理研から 35,000 円が、また文部省科研費 11,000 円が交付されている。このことから、研究室を挙げて高分子物質を研究するという意思決定は、おそくとも 1946 年（昭和 21 年）にはなされていたことがわかる。

木下研から菅研にいたるこの時期の主要な研究成果の一つは岩柳、秀島両先生を中心としてなされた、典型的な無定形高分子であるポリメチルメタクリレートの応力緩和やクリープの研究である。その結果は 1961 年に初版が出た高分子粘弾性の古典とも言うべき Ferry の著書：Viscoelastic Properties of Polymers に引用され、この分野での基本的に重要なデータとして評価されている。

おわりに、筆者が木下文書を見ることができたのは川村泰彬博士のご尽力によるところが多い。記して感謝の意を表する。

「高分子物理の昔を語る会」に御招きをうけて
御挨拶

磯貝行秀　総合病院衣笠病院、東京慈恵会医科大学客員

深田栄一先生が 80 歳、貝原真先生が還暦を迎えられ、門下生および関係者の方々が記念談話会を開催し、50 年に亘る研究室のあゆみの歴史を顧み、昔話の追憶から近況報告までを語ろうと言うことで、私まで御招きを頂き、晴れがましい席でご挨拶できますことを大変光栄に思っております。深田研究室の長い歴史の中で、多くの優れた業績をもとに社会に出て、指導的地位にあって現在活躍されている多くの門下生および関係者から近況報告をお聞きするこで深田先生のお慶びご満足いかばかりと拝察いたし真に慶賀にたえず、心からお祝いを申し上げます。同時に恩師を囲む会を企画設定されました田實佳郎先生および伊達宗宏先生はじめ幹事の先生方に深い敬意と感謝を申し上げます。

私が深田先生と貝原先生にはじめてお会い致しましたのは大分前で昭和 40 年ごろ、いまから 40 年ほど前で、まだ、理化学研究所が本郷・駒込にあったときで、岡小天先生のお薦めによるものでした。そのころ貝原先生は紅顔の新進気鋭の若手研究者といった感じで大変好感の持てる方であり、深田先生はいかにも学者タイプの少し近寄り難い感じの印象を持ちました。丁度アメリカから深田先生のところへお客様が見えられており、お話は余り出来なかった記憶があります。ただ、大きな収穫がありました。お客さんはたしかフレッシャーさんとか言う方でしたが、私が Wells － Brookfield 回転粘度計を使って病人の血液粘度を計っていると話したところ、その機器はガードリングが無いので血液と空気の接触層でタンパクの変化によるフィルムが形成され粘度に影響を及ぼすと言われたのが大変印象的でした。以来理研が和光市に移転してからも、さらに今日までひき続き両先生からご指導をいただいております。とくに深田・伊達先生の開発された高感度粘弾性測定装置は私の研究になくてはならないものであり多くの仕事ができましたことに大きな師恩を覚えております。

私が最も嬉しく喜びにたえなかったのは第 9 回国際バイオレオロジー学会が 1995 年モンタナ州、ビッグスカイで開催された時、Poiseuille 金メダルを深田先生が受賞されたときです。御奥様およびお嬢様もご出席されておりました。最も輝きに満ちたひと時であったと拝察致しております。その後もなお圧電のご研究を続けておられるということでなお現役としてご活躍されておられることに非常に感銘を受けております。

最近、長寿と長命は違うという記事をみたことがあり、とくに説明はありませんでした。辞書を調べてみましたが、いずれも長生きをすることしかか書かれておりません。そこで寿命とは何かをみますと、命のある長さ、転じて物が壊れずに働く期間とあり、例として「この洗濯機はも

う寿命だ」がのっておりました。結局私の勝手な考えでは、長寿とは生涯現役で働く期間と云うことになります。

どうか先生には益々お元気で長寿をお楽しみ頂きたいと切に願っております。

貝原先生におかれては還暦を迎えられ、真に御めでたいこととお慶びを申し上げます。先生は日本バイオレオロジー学会長であり、かつ、国際バイオレオロジー学会の副会長と云う要職にあってその責務とご苦労は大変なことと存じますが、ご健康に配慮され、持ち前の自然体で結構ですから、どうか私共をお導きください。

磯貝行秀　2003/7/27
e-mail; y296@ta3.so-net.ne.jp

高分子の昔を語る

三人の師と私の研究

近久芳昭（学習院大学　都立大学　東京農工大学）

この５月に開催された深田研究室記念講演会に出席して，同研究室に脈々と受け継がれる研究の伝統の凄さを感じました．この機会に，小林理研当時から深田先生の近くにあった岡小天先生をはじめ私が師事した３人の先生と，それぞれの先生に関わった私のささやかな研究について紹介させていただきます．

１９５０—１９５４：大学時代，力学，光学，電磁気，熱力学，熱統計力学等のほとんどの物理学を大川章哉先生に習った．緻密なその講義を完全に理解するのはなかなか難しく，一夜漬けで試験をパスすることもできなかった．大学４年次で理論研に所属し，先生の下で行ったゼミは Rushbrooke の Introduction to Statistical Mechanics, 次いで H.S. Green: The Molecular Theory of Fluids でした．特に後者は後に私の博士論文の基礎を与えるものでした．先生は物理研究の対象に対して，″思い方″という言葉をよく使われた．物理的考え方，筋道，式の立て方などを総括している言葉かと思う．物理を初めて学ぶとき，その簡潔さ，その美しさに魅せられるが，それではまだ一人前でなく，物理の泥臭さ，ねばねばさを理解して初めて一人前といえると云われたことを忘れません．

１９５４—１９６０：はじめの２年間は院生として，学習院大教授を併任された岡小天先生に師事しました．命じられた第一はタイプを習得することで，ゼミ用の一冊しかない text をガリ版用のロウ紙にタイプしガリ刷りをし，出席者に配布したものでした．当時の岡研は小林理研にあり，助手として中田修，池田勇一の両先生がおり，また杉田元宣先生も出席されました．蒼々たる先生方の前で毎週の発表者は私一人です．修士論文の課題は紆余曲折の後に絹繊維の形成過程についてでした．これは，M2 の夏（1959）に上田の信州大繊維学部で開催された絹のシンポジュウムに岡先生とご一緒したときに，デモを交えて呉祐吉先生から，蚕の液状絹の急速伸張によってテグスを作るお話を伺ったことが契機でした．当時は，絹フィブロインのアミノ酸成分比は分かっていても，そのシークエンスまでは判明していなかった．かなり無理な想像的な分子モデルを作り，いくつかの実験事実を定性的には説明できました．論文作成時，ご不幸にして病床にあった先生の枕元で，一枚一枚原稿を点検いただいた情景が脳裏に焼き付いています．その論文は小林理研報告，5, no. 4(1955), p.239-255 に掲載が許可された．1956 年に大学助手として採用され，大学には週４日勤務し，小林理研岡研には２日引き続き通いました．この間高分子物理の手ほどきを主に中田さんから受け，結晶性高分子のレオロジーや希薄高分子溶液の誘電性などの計算を行った．

１９６０－１９６５：この期間の初期ごろ小林理研は経済的危機に陥り，岡先生は都立大学に移って，助教授に京大から山本三三三先生を迎え，新たに高分子物理学の講座をたてられた．私は助手公募に応募し幸いに採用され，その後大木新平さんが助手として加わり講座は完成した．緊迫した厳格なしかし非常に楽しい研究期間だった．岡先生は細かいことはいっさい云わず，大所高所からご意見を述べられた．大勢の人が追求しているテーマでなく，世界中で一人とか二人の人が扱っている対象を研究するのが良いと忠告された．高分子の排除体積，粘性，すぬけ - 非すぬけ効果，またレオロジーについて，山本先生とは口角泡を飛ばして議論したものだった．そして先生の明晰な考え方，見事な式の変遷には頭が下がった．個人的には溶融高分子の分子量と粘度関係を，単純液体論を高分子に拡張して論じ，ln $\eta \propto 3.0$ ln M を導いた（J.Phys.Soc.Jpn. 19(1964),92-100）．その後，院生だった藤木時男さんと協力して，Θ状態にある希薄高分子溶液の非 Newton 粘性を研究した (ibid.19(1964) 2188-2194）．1965 年 11 月 , 岡先生の推薦もあり，東京農工大学に助教授として赴任した．

１９６５－１９９５：農工大一般教育部で物理学，現代物理学，高分子物理の教育を担当するとともに，研究面では排除体積と非 Newton 粘性の関係を追求した (ibid,21(1966)2324-2331)．1968,9 月 -1970,8 月の間，Dartmouth Collage, 化学教室の Visiting Fellow として招聘され，Prof. Walter H. Stockmayer に師事した． 1 年目は日本で手をつけていた排除体積の z 展開の収束性の問題を引き続き行うことが許され一応の結論を得た（J.Chem.Phys. 52(1970) 206-211）．２年目は鎖状高分子溶液のダイナミックス　モデルの Stockmayer 先生らとの共同研究であった（Discs. Faraday Soc.no.49(1970)182-192）．毎週，または各週の先生と二人きりの討論や指示は的確であり，愛情に満ちたものだった．同じ時期に同じ研究室にチェコスロバキアから来た Dr.Karel Solc と生涯の友となったことは忘れ得ない．

以上３人の私の師，岡先生，大川先生，Stockmayer 先生はスケールの大きな，それぞれの分野で創造的研究をされ，世界的にも著名な先生であった．その先生方に師事できたことは最高な幸福であった．しかし私はあまりに近くにいて過ぎて，その偉大さがなかなか理解できず，ただ甘えていた不肖な弟子であったことを深く反省している．

高分子の昔を語る

高分子物理への関わりはじめ

三宅　彰　（国際基督教大学）

本日の深田栄一氏の傘寿および貝原真氏の還暦を記念する深田研究室講演会にお招きを頂き、光栄であり、また心から感謝を申し上げる。

私は 1947（昭 22）年 9 月末に東大物理学教室を卒業した東京帝国大学最後の卒業生であり、深田さんの 3 年後輩に当る。9 月卒業というのは、戦時中で旧制高等学校が 2 年半に短縮されたためである。 指導教官は日本における高分子物理理論のパイオニアであった坂井卓三教授であったが、同教授は戦時中の無理なご生活が祟ってか、私の旧制大学院在学中に病臥の身となられ、1954（昭 29）年 9 月に東大教授現職のままで逝去されたのは、誠に残念な次第であった。私が坂井研究室に関わる以前から既に、坂井先生は Kuhn のゴム弾性論 (1934) に始まる高分子物理の理論的研究に取り組んでおられた。1943 年頃の日本数物学会の例会における坂井・久保論争については、私は後で聞いたに過ぎないが、坂井先生の主張するところは（数物会誌、17, 1943)、ゴムのエントロピー弾性は分子鎖のミクロブラウン運動に起因するもので、分子鎖全体のブラウン運動ではないから、Kuhn の理論のように分子鎖全体の分子量ではなく、ミクロブラウン運動の単位であるセグメントの分子量が現れるべきであるという点にある。これについては、James-Guth らの網目構造に関する理論の発展により（久保亮五「ゴム弾性」（河出書房、1947))、無延伸状態の網目構造における分子鎖の拡がりに関する仮定如何では、鎖の分子量で表わすことも可能であることが分かった。

私の学部学生時代のセミナーは Mott-Jones の「The Theory of the Properties of Metals and Alloys (Oxford, 1936)」がテキストであり、与えられた課題は van der Pol 方程式（Relaxation oscillation の一例で、R.Thom のカタストロフィー理論や今日のカオス理論の先駆）の摂動解を求めることであったり、大学院生時代でも F.London の Bose-Einstein 凝縮理論を液体 He に適用して得られる λ - 転移温度は、完全気体でなく分子間力の効果を分子の有効質量に繰り込むと、観測値に近付くことを示す等で、物性一般の勉強をするようにとの指導を受けたが、これは先生のそれまでの幅広い学問的業績を反映するものであったと思われる。私が学部卒業後に参加した坂井研究室のセミナーは高分子物理に関するものが主体であり、当時のメンバーは先輩の菊池良一、石原明、市村浩の諸氏、同輩の橋爪夏樹、後輩の島尾和男、立花正雄氏等であった。戦時中は入手できなかった海外文献が、当時日比谷にあった CIE（連合軍民間情報教育局）図書館で閲覧できるようになり、各自日参して筆写した論文を次々に紹介したものであった。本日の岡野光治氏の講演で図示された高分子研究の年表にあったとおり、1940 年代の高分子物性では溶液の統計熱力学が盛んで、Flory-Huggins の格子模型、Zimm のビリヤル展開、Debye の光散乱、Kirkwood の粘弾性理論など華々しかった。

当時坂井先生の関心は羊毛状弾性（ケラチン弾性）に移っていて、Pauling-Corey の α - ヘリッ

クス (1951) が常識となる以前のことであったが、比較的折畳まれたα - 型と、水素結合が切れて伸びた形態のβ - 型との間にはエネルギー差があり、ゴム弾性のようにエントロピー効果だけでなく、エネルギーの効果も効いてくるというものであった（水島三一郎編「高分子物質（共立出版、1949)」第 2 編：坂井卓三「力学的性質」)。私もケラチン弾性などに関する論文（物性論研究、30, 1950）を発表したのが高分子物性研究への第一歩となった。

日本物理学会が数学会から独立したのは 1946（昭 21）年であるが、当時の物性論分科会は高分子物理が主流であり、その後他の分野に進出していった錚々たる先生方が高分子を論じたものであった。1953 年戦後国内で最初の国際会議となった国際理論物理学会議（東京、京都）に Flory や Kirkwood 等が招待されていたのはその証しである。

岡小天先生は 1939 年小林理研に創立時から参与され、1942 年には束縛回転鎖に関する有名な「岡の式」を発表しておられた。岡研究室には大川章哉、斉藤信彦の両氏、後には池田勇一、中田修の諸氏が加わっていたが､同研究室のセミナーには私もしばしば参加させて頂いた。実は、私も学部卒業時に岡研究室入りのお話があり、何度か岡先生をお訪ねしたことがある。また高分子の実験関係の知見については､小林理研で深田さんや時田昇氏に度々ご教示頂いたものである。ついでながら、高分子学会の設立は 1951（昭 26）年 12 月のことで、その少し前同年 9 月に私は静岡大学文理学部に任用になっていた。この頃、若手研究者グループの研究会が京都地区（高分子懇話会）でも東京地区（高分子懇談会）でも開催されるようになり、東京地区では毎月一回土曜日に開かれたので通称土曜会と呼ばれていたが、大川章哉、永沢満、植松市太郎、石原明等の諸氏が世話役で毎回活発な討論が行われていた。

なお、私が国際基督教大学に移ってから、米国 Dartmouth 大学の Stockmayer 教授のところで Visiting fellow として二年間（1963~65）滞在するときに、フルブライト研究員の旅費申請で推薦状を深田さんにお煩わせしたので、大分昔のことながら、ここに感謝の意を表させて頂く。終わりに、深田さんが今後もお元気でお仕事を続けられるように、また深田研究室の益々のご発展を祈る次第である。

e-mail : akmiyake@tky.3web.ne.jp

高分子の昔を語る

北大高分子物理の昔について

坂西明郎、群馬大学工学部

昭和 34 年、北海道大学（北大）の理学部に物理学を中核にした、世界でも珍しい高分子学科が作られた。戦後急激に発展した石油化学産業の要請に沿ったものであったが、一方ではワトソン・クリックに続く生物科学に関わるノーベル賞ラッシュにも対応した将来の方向性をも考えていたように思われる。

私は、昭和 37 年北大の理学部物理学科を卒業し、修士課程に進学することになっていた。その 1 年前から、高分子誘電体研究室で学生実験（卒研はなかった）として、金子元三教授（故北大名誉教授）の提案で、大きなチタン酸バリウム振動子を使った超音波発振回路を仲間の学生（今堀稔君）と組み立てていた（洗濯機と渾名された）。今堀君は、当時盛んであった学生運動の活動に熱心で、留年していたように思う。その年には、安保闘争で岸内閣に反対する国会デモで、樺美智子さんが機動隊によって亡くなり、我々もそれに憤って道警本部にデモを掛けたりした。また、この超音波発振器は高出力であったので、周囲に電波障害をもたらす程であった。あるとき、LC 発振回路のインダクタンス調整のため、私がドライバーで接点を変えて、彼がスウィッチのオンオフを繰り返していた。そのうち、順番を間違えて 1 メートルほど吹っ飛ばされた。２千ボルトの電圧で命の危険もあったようで、指導教官の三宅康博先生（当時助教授）はこの感電に驚いて、その日はすぐに帰宅させられた。

その頃、古市二郎教授（当時理学部長後北大学長）をはじめとした高分子誘電体研究室の努力で、新学科の北大理学部高分子学科が開設されて２－３年が経っていた。一方、新進気鋭の若手教授であった高分子誘電体研究室の三井利夫教授が、まさに米国留学から帰国したばかりであった。三井研の強誘電体グループは非常に人気が高く、多くの学生が 4 年生の学生実験と大学院進学を志望した。それに反して、高分子グループは希望者が前記の今掘君と私の２人だけで不人気であった。私は、今堀君もそうであった（後に物性理論に進学）が、理論の方が好きで、その頃ノーベル賞受賞で人気の高かった素粒子グループに惹かれていた。迷っているのは勉強不足のためだと、古市先生に言われて、荻野一善先生（当時高分子学科第二講座助教授）の許可を得て、Flory の高分子溶液論の講義を聴講させていただく一方、素粒子論研究室のセミナーにも出席させて貰った。結局多いに迷った挙句に、古市先生から高分子は人が幾らいても足らず食いはぐれがないと言われて、物理の高分子の最後の院生になることになった。修士の一年先輩に永田伸夫（日本ゼオンに就職）、博士に山口成厚（北大医放射線技師学校）、引地邦男（北大理学部長）の諸氏が在籍していた。また、確か助手として、千葉明夫氏（現早大教授）も群馬大学から呼び寄せられていた。

大学院では、三井研の結晶構造のセミナーや最新の外国語論文を全教官の前で紹介するなど、物理学科のカリキュラムに従うとともに、高分子学科の第三講座金子研究室で田中秀次郎氏（当

時研究生、後三井石油化学研究所）の指導を受けることになった。しかし、修士課程の大半は、新学科の学生実験室の配線、高分子夏の学校の雑用や研究室のペンキ塗りなど作業に追われる毎日であった。周りの物理の同期生と較べて悩んだが、幸い残り数ヶ月で Mason の捩れ水晶振動子を使った「高分子希薄溶液の動的粘弾性」の修士研究が成功した。その結果は、室蘭工業大学で開かれた物理学会北海道支部研究会で、三井研の同期の塩崎洋一（後北大教授）も一緒に発表した。

高分子学科は、高分子溶液の第三講座の他に第一講座の高分子固体（古市研、後に引地研）、第五講座の生体高分子（須貝新太郎教授、鎌島一夫助教授）の物理系と、第二講座の高分子物理化学（中川鶴太郎教授）と第四講座の高分子合成（野口順蔵教授）の化学系がそれぞれ意欲的に新しい研究と教育を進めていた。特に、第四講座は酵素の人工合成を目指してポリアミノ酸の合成に取り組んでいた。我々も、幾つか試料を戴いて、α - ヘリックスの希薄溶液の動的粘弾性の研究に使わせて貰った。その当時は、Doty や和田昭允らの合成ポリアミノ酸溶液での構造や物性の研究が出始めた頃で、世界的にも貴重な試料であった。中川教授は名著「レオロジー」岩波全書で有名であるが、我々の研究にも強い関心を持たれていた。先生はサイコレオロジーなど広い視野を持っておられたが、フランス語にも堪能で、フランス語会話（シャンソン？）の勉強会も開かれていたように思う（残念ながら出席しなかった）。ちなみに、私は大学院入試に第二外国語としてフランス語を受験したが、問題は中川先生が作られた。デカルトの方法叙説の一部からで、フランス語の受験生は私一人だったので、配点に苦労されたようであった（たまたま採点について相談されているのを聞いてしまった）。

昭和 38 年、修士課程の最後の年、東京都立大学で開かれた第１２回レオロジー討論会で初めて出席して発表した。確かその時に、田中秀次郎氏と一緒に深田栄一先生にお会いした最初のように記憶している（共同研究者と注射器を使った in situ でヒトの血液粘度を測定する方法について発表された）。その後、バイオレオロジー学会で貝原真氏とも知り合になって、長い年月が経ってしまった。まだまだ書き足りないことが山のようにあるような思いですが、最後に両先生の寿賀を祝し、今後のご健康とご発展をお祈り申し上げます。

Reports on Progress in Polymer Physics in Japan (RPPPJ)

高分子物理年報

深田栄一　小林理学研究所

高分子物理の昔を語る会に関連して、Reports on Progress in Polymer Physics in Japan（通称RPPPJ）について報告したい。わが国の高分子科学の発展に過去約半世紀にわたって大きな寄与をした刊行物である。合成化学の分野は含まなかったが、物理および物理化学の基礎分野の研究者によって愛用されてきた出版物である。

1958年に小林理研の岡小天先生が、文部省科学研究費による高分子物理研究班の活動の1つとして、高分子物理の英文年報の刊行を始められた。毎年の研究成果を4頁以内の英文報告として集録し内外に配布するものである。毎年日本での高分子物理研究の概観が得られること、著者責任の速報であるのでoriginalityの時期の主張が出来ること、大学や研究所の研究室では毎年学生による英文報告作成の実績ができることなど好評を博して、1973年からは文部省出版助成費の援助を受けることも出来た。1992年からは、定年後の研究者からの長文のreview paperも掲載した。2000年の最終巻では、過去半世紀の高分子物理の諸分野についての総説を集録して刊行を終了した。白川英樹先生の導電性高分子に関するノーベル賞講演が最終巻を飾った。

43年間にわたるRPPPJの編集刊行の仕事には、高分子物理の主要な研究者が大勢力を尽くした。以下に敬称を省いてお名前を掲げる。1958年初期の編集委員は岡小天（編集委員長）、古市二郎、小寺明、竹田政民、深田栄一、1962年には理研に事務が移り、岩柳茂夫（代表幹事）、斎藤信彦、篠原健一、和田英一、和田八三久。1974年に東大工学部物理工学科に事務が移り、和田八三久（代表幹事）、安部明廣、和田昭允、早川禮之助（代表幹事）、近久芳昭、三宅彰、1992年、深田栄一（編集委員長）、安藤勲、千葉明夫、古川猛夫、堀江一之、貝原真、小出直之、美宅成樹、西敏夫、野瀬卓平、1998年伊藤耕三（代表幹事）。この他、東京地区以外の大勢の研究者にadvisory boardに入っていただいた。お名前を列記して感謝の意を表する。1993年から引地邦男、増子徹、高橋利禎、野田一郎、升田利史郎、寺本明夫、斎藤省吾、1997年から中西八郎、畑田耕一、梶慶輔、彦坂正道、筒井哲夫。

1958年の最初の年報は68頁の小冊子であったが、小寺明先生が代表者であった高分子溶液についての科学研究費グループの研究者も参加し、国内のすべての研究者に投稿を依頼するようになり、次第に論文数が増大した。1998年には197論文、700頁の分厚い論文集になった。代表幹事は毎年の投稿依頼、論文の校閲編集、出版社との折衝など大変な責務を担われた。和田八三久先生の逝去のあとを引受けられた早川禮之助先生は特に熱心にRPPPJのために尽力された。そのための過労が先生のご病気の一因であったかもしれないことを誠に申し訳なく思う。伊藤耕三先生は早川先生の後を受けて終了までの困難な時期をお引受いただいたことに厚く感謝する。また43年間にわたって刊行に尽力された東京工業大学文献普及刊行会の岡田哲二および廣瀬禎恒の両氏に深く感謝する。

RPPPJの論文には通常の学会誌で行うレフェリーの制度はなかった。しかし毎年一度在京の

編集委員が東大工学部の物理工学科の会議室に集まって、投稿論文の形式や英語の表現について目を通した。10 人余りで半日はかかる仕事であったが、毎年一度の会合で楽しみでもあった。内容のレフェリーが無い為、研究論文としての実績が認められないという批判があった。また最近は多数の学会誌や速報誌が出版されるようになり、著作権の問題も生じた。

もともと RPPPJ は岡先生を中心とする高分子物理研究者の自発的な活動として出発しクラブ的な要素ももっていた。海外の有名な学会誌の初期にも似た例がある。毎年自分の独創的研究を報告して、国内での交流をはかり、更に日本の活動を一冊の本にして海外にも普及を図るというのが岡先生のはじめのお考えであった。過去約 40 年の高分子科学の発展は目覚しいものがある。現在では高分子物理の論文を発表する権威のある学会誌は国の内外に数え切れない。 RPPPJ は過去約半世紀の日本における高分子物理の発展過程を記録した貴重な出版物である。

毎年の投稿論文のほかに、定年後の優れた研究者による招待総合論文も貴重な記録である。わが国の代表的な研究者のライフワークの総説が集められている。最終巻の招待展望論文は、現在現役の研究者による過去の総括と将来の展望が 10 数分野について述べられている。

RPPPJ の最終刊およびバックナンバーは現在でも東京工業大学の文献普及会から入手することが出来る。

Email: fukada@s5.dion.ne.jp

編集後記

この度，皆様のお力添えのおかげで，深田先生の記念誌を発行することができました．お忙しい中，題字を財団法人小林理学研究所理事長の山下充康先生に，そして，序文を所長の山本貢平先生に頂きました．心より御礼申し上げます．また，原稿をご用意くださいました皆様，本当に有難うございました．

この記念誌をご覧になると，あらためて深田先生の先見性，洞察力の凄さを感じていただけるのではないかと思います．また皆様ご存知のように，先生のご研究の広がりも計り知れないものがあります．これだけの各分野の研究者を束ねてこられたのは，深田先生のお人柄の賜物であることに異論を挟まれる方はおられないと思います．先生は，2004 年 9 月のチェコご出張では、ご講演の際の Power Point の操作までご自身の手でなさっておられます．更に驚くべきことは，そこでご発表なさることが，決して過去の回想のものではなく，現在小林理研で多くの研究者の方々と共同で進めていらっしゃる研究の成果であることです．このような真摯な姿勢，そしてお人柄を慕い，先生の廻りにはいつも賑やかな輪ができております．これらのことは，皆が深田研究室の一員であることを誇りに思う所以でもあります．

ところで，2003 年 5 月に深田先生の会を開き，2004 年も暮れようとしている時期にこの編集後記を書いております．この記念誌が皆様のお手許にわたるのは，2005 年になると思います．深田先生におかれましても，本当にやきもきされたことと推察いたします．本当に申し訳なく思います．改めて深くお詫び申し上げます．

最後に，この記念誌の刊行が深田先生の益々のご活躍につながるものとなることを，皆様とともに祈念いたしたいと思います．また，来るべき 2005 年こそ，平和で子供たちにとって安寧な世界が来ることを祈ります．

2004 年 12 月吉日

世話人　伊達宗宏，古川猛夫，田實佳郎
（文責　田實佳郎）

後記　番外編

長年の学会発表の予稿の締め切りが無くなった反作用で期限の感覚がなくなり、編集に長時間かかってしまいましたが、やっと出来上がりました。

深田先生にもこの冊子作りの過程で楽しんで頂けた事は良かったと思います。実質的には深田先生監修です。昔の話も色々伺えました。この次は昔の写真を主体にしたものを作ろうか（CD版？）という話も出ています。

深田先生の原点は小林理研との事、小林理研の山下さんと山本さんにはこの冊子の顔を作って頂き有り難うございました。又、事務の方々にも冊子の発送で色々助けて頂くことになりそうです。先にお礼を申し上げます。

大学３年の時、大川（章哉）先生から小林理研という所に助手を捜している研究者が居るから弟子にならんかと言われてから 45 年、深田先生にはずっとお世話になりっぱなしです。

古くから理研のメンバーだった高松さんは、一時病気をされ、まだ本調子ではありませんがこの会には出席されました。

理研の３人組（貝原、古川、伊達）のその後：貝原君は、“ 血液凝固、血栓 ” に関して大きく研究をまとめられました。この会で理研定年と還暦の記念を兼ねてお祝いしました。古川君は、その “ 血栓 ” で危うかった所を命拾いし、後遺症もなく益々元気に研究をされています。理科大に移ってから 12 年たち、今年の３月還暦を迎えられました。私はリオンに週３日いて、技術よろず相談と、プログラム作りをしています。

田實君は、山形大から関西大に移った激動の年でした。

この記念会にお集まり頂いた方々は私にとっても懐かしい方々ばかりでした。「高分子の昔を語る会」の時代は、当時駒込の理研で行われていた高分子の研究会（木曜会？）の最後の方に参加でき幸せでした。研究会の内容は忘れましたが、研究会にたまたま遅刻したとき、大川先生に、‘ 何時に小林理研を出たの？ ’ と聞かれたことは未だに覚えています。

なお、撮って頂いた当日の写真を CD 化したものが有ります。ご希望の方、また、出席された方の連絡先をお知りになりたい方は伊達宛にご連絡ください。

皆様のおかげでこの冊子がまとまりました。有り難うございました。

〒 108-0071　港区白金台 2-12-24
伊達宗宏
email:date@estate.ocn.ne.jp

深田研究室の 50 年

－圧電気とレオロジー－

2005,1　発行
編集
伊達宗宏
古川猛夫
田實佳郎

2004 年から 2017 年までの記録

2004 年

2004 年 8 月から 9 月にかけて、チェコに旅行した。Internoise 2004　という騒音に関する国際会議がプラハであり、研究所の人たちが大勢研究発表に出席した。 1 週間ほど後に、7th European Conference on Application of Polar Dielectrics という会議がチェコの Liberec で開催された。2001 年から 2 年間小林理研に滞在した Mokry さんがいる大学が会場であった。Mokry さんは、小林理研で、圧電高分子フイルムに負性容量回路を結合して遮音を行うという良い論文を書いてくれた。その後に続く研究を、学習院大学の及川悠平さんが行ったので、それを Liverec で発表することにした。

Liberec の Hotel Babylon の食堂に乃木大将のような威厳のある顔つきの人がいた。Pennsylvania State University の強誘電体研究の大御所 Prof. E. Cross であった。

たまたまエレベーターで乗り合わせたので、挨拶をして、大学までタクシーに同乗させてもらった。

遮音の研究発表には、Naval Undersea Warfare Center の Dr. O. R. Hughes が興味を示し、Mokry さんと 3 人の会談で DARPA の研究費の申請をしようと話し合ったが、その後進展がなかった。Mokty さんの先生である Prof. J.Fousek、ポーランドの Prof. Hilczer、イスラエルの Prof. Lang などと会った。

アイルランドの Dr. S. Tofail が骨の成分であるハイドロオキシアパタイト（HA）の結晶相に圧電性の可能性があることを発表した。講演の中で日本人が骨の圧電性を発見したと何度も話していた。講演の後で私がそうだと名乗ったら、大変驚いて敬意を表してくれた。

プラハの町は観光の名所である。Mokry 夫妻が山本所長、土肥さん、児玉さん、私を連れて、カレル橋、天文時計、プラハ城、旧市街などを案内してくれた。私一人で広場を歩いていたとき、偶然にも岐阜の朝日大学におられた大橋佳郎先生、奥様、息子さんと出会った。日本生体電気物理刺激研究会の幹事をしておられる旧知の先生であった。奇遇でうれしかった。

http://fukadae.g2.xrea.com/prague.html

http://fukadae.g2.xrea.com/liberec.html

2005 年

9 月 5 日成田を出てトロントに着いた。Dundas に滞在。7 日に TSN のコーンオフ会があった。Vineland に住む斉藤ハンクさんが自分の畑で採れたトウモロコシを焼いて皆さんにふるまわれた。ブラジルからカナダに移住された明るいおじさんである。

8 日に、トロントからサンパウロに飛び、日本人街にあるホテル日系プラザに宿をとった。赤鳥居で有名なガルボンブエノ通りである。この辺りは日本人の店が多く、昔サンカルロスにいたとき、この通りで、ぼた餅を買って喜んだおぼえがある。夕方散歩に出たら、坂を下りてくる日本人夫妻に出会った。なんと信州大学の大原先生夫妻であった。大原先生には数年前ギリシャのアテネで学会があったとき、日本食のレストランでご家族とお会いしたことがある。研究の取り持つ不思議なご縁である。

10 日に、サンパウロからサルバドールに飛んだ。バイーア州の首都で、ブラジル最初の首都でもある。海岸に臨んだホテル Pestana でエレクトレット国際会議を Prof. Giacometti が主催した。2 日目の午後招待講演を行った。圧電高分子の中でもっとも有名な PVDF を除いて、他の圧電高分子の総説をしてほしいというのが、上海の Xia 教授の要請であった。講演の後、イスラエルの Prof. Lang から、角膜の圧電率が異常に高いのはなぜかと質問があったが、これは私の疑問と同じであった。夕方バヒアの古い伝統を伝える男女の踊りがあった。Banquet の後、Prof. Mascarenhas、Prof. Milton Campos と私の 3 人にエレクトレットの研究に寄与したという記念のプレートが贈られた。

http://fukadae.g2.xrea.com/Salvador.html

2005 年（平成 17 年）9 月 26 日、西国分寺の公団住宅から、埼玉県新座市にある老人ホーム、めいと新座志木に引き越した。2 部屋で風呂台所があり、公団住宅とあまり変わりない。朝昼夜の 3 食がついており、食堂に集まって食べる。朝は寝坊なのと、紅茶とトーストだけでよいので、朝食はとらないことにした。部屋の中にも風呂の中にも手すりがついている。非常用の呼び出しボタンもついている。必要なときはヘルパーさんたちが手伝ってくれる。老人にとってはありがたい場所である。

2006 年

7 月にアイルランドの Univ. of Limerick の Dr. Tofail から招待講演に招かれていた。6 月 15 日福岡のバイオレオロジー学会に出席した時、頭がふらふらすると、磯貝先生に話したら、九州大学医学部の丸山先生が、万一の場合の手配をしてくださったので大変恐縮した。その後体調不良だったので、アイルランドまでの旅行は自信が無くなりとりやめることにした。

2007 年

1 月 15 日に、慶応義塾大学病院に入院し、泌尿器科の村井勝先生に前立腺肥大の手術をして

いただいた。1月28日に退院した。妹の千枝さんが何度も遠い横浜から見舞いに来てくれた。幸い経過は順調であった

8月22日，　洋子、大樹のカナダへの転出届を新座市役所に提出した。

2008年

9月14～18日に、お台場の未来科学館で、エレクトレット国際シンポジウムがあった。東京理科大学の古川猛夫教授の主催であった。圧電高分子に関するもっとも重要な3年ごとの国際会議である。私は開会式の opening lecture で将来の有望な研究として、東北大学和田仁教授の Prestin の研究と静岡大学久保野淳史准教授の無電界蒸着重合による圧電膜の研究を紹介した。Ladies Program がなかったので、TSN の小野寺さんと糸川さんにお願いして、折り紙教室を開催していただいた。外国の奥さんたちや学生が喜んで参加していた。

小林理研のピエゾサロンを最終日に開催した。Oakridge National Laboratory の Dr. S. V. Kalinin が最近の圧電応答顕微鏡による新しい発見について講演した。また University of Potsdam の Prof. Gerhard が新しい圧電高分子の設計について講演した。

http://fukadae.g2.xrea.com/ISE13.html

7月30日に、赤坂のカナダ大使館から、「カナダ複合材料技術移転セミナー」に招待され、児玉秀和さんと一緒に出席した。懇親会の時、Royal Millitary College の Prof. G. Akhras と知り合いになった。

2008年10月23～24日に Montreal で Prof. Akhras が主催する International Workshop on Smart Materials and Structures に参加して研究発表をすることになった。伊達さんが考案した負性容量回路を圧電材料に結合すると、遮音や防振に役立つという研究について私が講演をし、児玉さんがポスター発表を行うことができた。トロント在住の娘の洋子も Workshop に参加した。Akhras 先生が乗り気になって、この研究について小林理研と Royal Millitary College の共同研究を発足させ、洋子を RMS 側に加えることになった。

Sensor Technology Ltd の Dr. S. E. Prasad もこの研究に興味をもち、後に PZT 試料を提供していただいた。Collingwood の会社の見学のために、洋子とともに、Grayhound のバスで片道3時間をかけて往復した。Prasad さんの家族が経営する会社であった。インド風ランチで歓迎していただいた。

http://fukadae.g2.xrea.com/Montreal.html

2009 年

2009 年 3 月 23 日に、Salt Lake City で　開かれた American Chemical Society, Division of Polymeric Materials のシンポジウムに招かれた。NASA Langley Research Center の Dr. Cheol Park からの招待であった。約 1 年ほど前から、Dr. Park の所属する University of Virginia の PhD の学生 C. Lovell とメールでの交流が続いていた。Lovell さんの研究課題は、合成圧電高分子の Polybenzyl-L-Glutamate (PBLG) に Carbon Nanotube を混合して圧電性の変化を見ることであった。

PBLG の私の論文を読んだ lovell さんは、試料の作り方や圧電率の測定方法などを質問してきて、数回にわたって議論を重ねてきた。PhD の論文が出来上がった機会に、先生の Park さんが同じ学会発表の機会に招待をしてくれたのである。良い機会であったので、ずり圧電性を持つ高分子の研究を展望する講演を行った。

Salt Lake City には、いろいろ思い出がある。1974 年、ブラジルから帰国する途中、Salt Lake City にある University of Utah の Prof. P. Gibbs を訪れた。Gibbs 先生から、この大学に来ないかと誘われたが、帰国後理化学研究所の主任研究員になる可能性があったので承諾の返事ができなかった。

http://fukadae.g2.xrea.com/saltlake.html

Toronto Senior Net（TSN）というインターネットのネットワークがある。NHK から出版された『ホームページの作り方』という本の中で、トロントの藤本温子さんが TSN を主催していることを知った。ご主人の藤本稔さんは、むかしイギリスへの留学生として 40 日の船旅を一緒にした友人であった。カナダ在住の日本人が主体となって日本に住む人や、英国や米国に住む日本人たちが作るサークルである。何でも、感想や写真などを自由に投稿できて、その返事が誰かから返ってくるというシステムである。私は写真アルバムをホームページの形にして投稿することを楽しんでいた。

TSN のおかげで、California に住む浦田伸夫さんと知り合いになった。私が学会の帰途、SanFrancisco に寄ることを知った浦田さんは、その機会にアメリカでの TSN のオフ会を開くことを提案された。有名な Golden Gate に近いサウサリートの海の傍のレストランで、Idaho から来られたニールセン妙子さん、Sacramento から来られた渡辺昌子さんと浦田さんが集まってくださった。ちょうど私の 87 歳の誕生日であった。忘れることのできない喜びであった。

http://fukadae.g2.xrea.com/sanfoff.html

8 月 21 日に、カナダの ottawa で Active Noise Control の国際会議があり出席した。Gorgia Institute of Technology の Prof. Cunefare のグループからの研究発表があり、負性容量回路として伊達さんの回路が示された。工学系の研究者に我々の仕事が知られ始めたのはよいことである。

2010 年

2010 年の 3 月、アイルランドの Dr. Tofail が大変親切に、二度目の招待をしてくれた。疲労を少なくするために、Ireland 訪問の前後に London に滞在することにした。South Kengsington の HolidayInn に宿泊し、久しぶりに Imperial College の周りを歩いた。初めて Albert　Hall のカフェテリアに入って食事をした。桜が満開であった。Victoria　の昔下宿していたアパートを訪ねてみた。外観は少しも変わらず、入口に Bed and Breakhast の掲示が出ていた。50 年以上続いているのに驚いた。

http://fukadae.g2.xrea.com/ImpColl.html

http://fukadae.g2.xrea.com/London3.html

3 月 4 日に、London から、Shannon に飛び、Kilmurry Lodge Hotel に宿泊した。6 日に University of Limerick の The Materials & Surface Science Institute（MSSI）で、圧電気と電気刺激の歴史的展望の講演を行い成功であった。Dr.Tofail の研究室で、Dr. Gandhi が圧電応答顕微鏡を使って、ハイドロオキシアパタイトの圧電の測定を試みていた。耳の外有毛細胞にある Prestin の圧電性について、生物学者の Dr.Soulimane も加わって、議論した。田舎の静かな大学であるが、日本人のための英語学校もあるそうである。

http://fukadae.g2.xrea.com/limerick.html

http://fukadae.g2.xrea.com/CliffsMoher.html

帰途再び London に寄り、TSN で活発に投稿しておられる Lauber 和さんのお宅を訪問した。Winbledon の方角の住宅街にある庭の広い良いお宅であった。ご主人が自分で腕を振るってメニュー付のディナーをご馳走してくださった。太ったスイスの人で大きな犬をかわいがっておられた。

5 月 30 日にアルカディア市ヶ谷で、私の米寿の祝賀会が開かれた。小林理研の安野功修さんが中心になって世話をしていただいた。25 人もの方が集まっていただき、大変な光栄であった。また植田浩義さんの大変なご努力で過去の研究室に関係した方々で栄会を作り、参会者の近況集も作っていただいた。

http://fukadae.g2.xrea.com/beiju.html

2011 年

3 月 5 日に日本生体電気物理刺激研究会の年会が東京医科歯科大学の山下仁大教授の主催で開かれた。その特別講演に、Ireland の Dr.Tofail を招待できないかと考えて、河北総合病院整形外科の湯川芳宣先生に相談してみた。学会で旅費は出せるが滞在費はどうかというご返事であった。理化学研究所の特別主任研究員の長田義仁先生に相談したら、理研に数日間招待する計らいをしていただいて、大変有難かった。Tofail さんは、理研と小林理研のピエゾサロンと生体電気研究会で 3 回、ハイドロオキシアパタイトの圧電性の講演を行った。

3 月 11 日　東日本大震災。早稲田大学で音響学会があり、帰途東上線和光市駅のプラットホームで乗り換え電車を待っているときに地震が起きた。電車は止まったので、駅を降りてタクシーの列に並び自宅まで帰ることができた。

8 月 27 ～ 31 日 に France の Montpellier で 14th International Symposium on Electrets を Prof. Henn が開催した。Prof. Bauer が私が 1957 年に発表した骨の正逆の圧電効果のグラフを引用して、生体圧電気の重要性を述べられたのは嬉しかった。Prof. Lang が Tofail さんと協力して、Si 基板上で合成した hydroxyapatite で大きな圧電率と焦電率の測定に成功した。東京医科歯科大学の山下仁大教授や中村美穂さんも HAP の研究発表をされた。

http://fukadae.g2.xrea.com/mont1.html

http://fukadae.g2.xrea.com/mont2.html

10 月 2-4 日、Montreal で Cansmart Conference があった。圧電材料 PZT と負性容量回路の基礎研究を RMC との共同研究として、洋子が発表した。Prof. Akhras の案内で、児玉秀和さんと洋子とともに、Kingston の Royal Military College を見学した。

2012 年

3 月 17 ～ 19 日に Soft Iinterface Mini-symposium on Biomaterials Science in Tsukuba を筑波大学の長崎幸夫先生が主催された。聴覚を司るたんぱく質プレスチンの圧電性のことを、度々話していたことを覚えていて、招待講演に誘ってくださった。講演を始めようとしたら、顔なじみの東京工業大学の赤池敏弘先生が突然、年齢はいくつですかと質問された。90 歳と答えると、皆さんがびっくりされたようであった。圧電たんぱく質の研究の歴史を述べて、次の課題は圧電率が 1000pC/N にも達するプレスチンであると持論を述べた。司会の University of Utah の

Prof. Grainger が親切に議論を進めてくれた。後日、理研の OB 会で副理事長だった土肥義治先生からあの講演は好評だったと聞いて嬉しかった。

5 月 29 ～ 30 日に、ドイツの Potsdam で Euro EAP International Conference があり、イタリアの Pisa 大学の Dr. Carpi から招待講演を依頼されていた。5 月の中旬から数日ごとに血尿が出るので慶応病院で超音波検査などを受けた。海外旅行は無理と判断して、やはり招待講演に招かれた関西大学の田実佳郎先生に代読をお願いした。その会議の後、University of Potsdam の Prof. Gerhard の 60 歳の誕生日を祝うシンポジウムがあり、お祝いの講演を予定していた。最初の部分は TSN の和さんのご主人の Lauber さんにお願いしてドイツ語に訳していただいた。この講演は Pisa 大学の Prof. DeRossi が代読してくださった。

2013 年

3 月 19 日に London に寄り、Queen Mary University of London でセミナー講演に招かれた。昨年体調不良で欠席した EuEAPConference の創立者だった Dr. F. Carpi がイタリアから London の大学に赴任された。再度の親切な招待があり、アイルランドに行く途中で、お会いすることができた。

3 月 26 ～ 28 日に、アイルランドの University College Dublin で Electromechanics in Biosystems Workshop が開催された。主催者の Dr. B. Rodriguez は Dr. Tofail の友人であり、私の誕生日を記念して、記念講演に招待してくれた。大変な名誉であった。Dr. Rodriguez は圧電応答顕微鏡の創始者の一人であり、コラーゲンフィブリルのナノメーターレベルでの圧電測定を行っていた。ミクロの状態でコラーゲンは極性を反平行にして配向していることを発見した。

ポルトガルの Prof. Kholkin によるガンマグリシン単結晶の圧電性と強誘電性の発見、University of California の Prof. Lee によるウイルスの DNA タンパク集合体の高い圧電性など、最近の新しい進歩に興奮した。健康に心配があったので、洋子にも学会に参加してもらった。洋子は負性容量の研究を紹介した。

http://fukadae.g2.xrea.com/rodriguez.html

Denning という PhD の学生が、顕微鏡レベルでのコラーゲンの圧電マトリックスの定数を決める実験に取り組んでいた。その結果を 12 月 6 日､Boston での MRS Conference で発表したが、共同研究者の中に私の名前も入っていたのは光栄であった。

2014 年

8 月に、Baltimore の International Symposium on Electrets に出席した古川さんから、イスラエルの Ben-Grion University の Prof. Sydney Lang が IEEE の Interview に来るという知らせがあった。Institute of Electrical, Electronic Engineering は電気関係で世界最大の学会であるが、

History Section で著名な学者との会話の記録を残している。まったく思いもかけない名誉であった。

1995 年に RPPPJ に書いた Recollections of a Research Life の別刷りを Prof. Lang がもって居られたので、メールを交換して入念な準備をした。12 月 1 日から 6 日まで Prof.Lang は奥様の Lili さんと一緒にイスラエルから訪日され、国分寺駅の傍のホテルに滞在された。12 月 3 日の午前と午後に 2 時間ずつ、会話の録音とビデオ撮影を行った。12 月 4 日には、小林理研のピエゾサロンで、Prof. Lang の講演をお願いし、ヒドロキシアパタイトの圧電性に関する最近の研究について述べられた。

会話の CD の記録は、イスラエルで Lili さんがタイプで文字に変換してくださったので訂正や校正を行うことが出来た。ただ最初と最後を含めた 3 か所はビデオがそのまま残ったので、英語の会話がそのままで気恥ずかしいものになった。

12 月 13 日には、伊豆熱川で International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM22) が開催され、Dublin の Dr. Rodriguez が招待講演に参加された。私も出席したが、温泉宿から学会に出るのは初めてであった。折角の機会なので、12 月 15 日には、小林理研のピエゾサロンで、16 日には理研の伊藤研究室で、Dr. Rodriguez に講演をお願いし、PFM によるコラーゲンなど生体材料の最近の研究を学ぶことができた。

2015 年

2 月の終わりに、昨年 12 月に行った Lang 先生との会話の URL が、IEEEHistory の Web に掲載された。

http://ethw.org/Oral-History:Eiichi_Fukada

2014 年に University of Limerick の Dr. Tofile がアイルランド政府から、Ireland-Japan の共同研究基金の獲得に成功した。理研では、長田義仁先生の紹介で、ナノ医工学研究室主任研究員の伊藤嘉浩先生が理研側の担当者になられた。

Dr. Tofile は 2015 年 6 月 8 〜 10 日に Limerick で、Electrically Active Materials for Medical Devices (EAMMD) の会議を開催し、日本から私と理研の長田先生、伊藤先生、東京医科歯科大学の山下仁大先生を招待した。

私は Piezoelectricity and electrostimulation in bone の講演を予定していた。大変残念なことに、2015 年前半は体調が低下し、歩行のふらふらも懸念されたので、長途の旅行は断念しなければならなかった。代読を Lang 先生にお願いしたが、IEEE の Web も紹介して、良い講演をしていただいた。この会議の内容は、来年一冊の本として出版されるので楽しみにしている。

Limerick の会議に関連して、ドイツの Rostock University の Prof.Eberhard Burkel から 6 月 4 ～ 5 日の Materials' Days というシンポジウムでの講演に招待された。旅行の中止を告げたところ、ビデオ会議ではどうかと提案された。理研の伊藤先生の研究室の磯島隆史博士の熱心なご協力によってこれが実現した。6 月 4 日午後 4 時、ドイツでは午前 9 時の開会の直後に講演と討論を行うことが出来た。得難い初めての体験であった。

6 月 6 日、一ツ橋の国立情報学研究所で、バイオレオロジー学会に出席した。この日の理事会で、岡小天特別賞の授与が決まった。前会長の土橋敏明先生と現会長の関真佐子先生からお話があった。岡先生は小林理研でお世話になり、バイオレオロジー学会で、長い間お世話になった懐かしい先生である。

9 月 23 日、神戸大学工学部で、バイオレオロジー学会とレオロジー学会の共同主催のレオロジー討論会があった。その時岡小天特別賞の授与と講演があった。岡先生の御令嬢の樋口陽子先生が学会の岡文庫に寄贈された岡先生の写真アルバムをお借りしたので、私のアルバムとあわせて、岡先生とバイオレオロジーの写真集を作って紹介した。

また、1966 年に学習院大学の学生だった原さんが動脈壁の圧電性を測定したことと、2012 年に University of Washington の Prof. Li が最新の圧電応答力顕微鏡を用いて、動脈壁の圧電分布を測定したこととを紹介した。生体高分子が持つ圧電性の生理学的意義の解明は将来の研究に俟たねばならない。

2016 年

東京医科大学整形外科教授の山本謙吾先生から眼科の後藤先生を紹介していただいたので、4 月 14 日に右目、28 日に左目の白内障手術を行っていただいた。直後の白い明るさは印象的だった。

6 月 27、28 日に、東京麹町のアイルランド大使館で、アイルランドと日本の共同セミナー、Design and Characterization of Advanced Materials が開かれた。Dr,Tofail が講演し、日本側からは、関西大学の田実佳郎教授と、元タキロン研究所長の敷波保夫博士が講演された。Tofail さんは娘の Yasuna（14 歳）と Iman（7 歳）を連れてこられたので、秋葉原や三越に案内した。

9 月 6 日に、S. A. M. Tofail と J. Bauer 編著の『Electrically Active Materials for Medical Devices』(Imperial College Press) の本が届いた。2015 年 6 月に Limerick で開かれた学会の講演の内容を出版した本であった。私は出席出来ず、Prof. Lang が代読してくれた論文の内容が、書籍の形で残されたのは嬉しいことであった。

2017 年

1 月 25 日に、東京医科大学病院で研究懇談会が開かれた。昨年中頃から、群馬大学土橋敏明教授の発案で、培養細胞への電磁場刺激の共同研究が始まっていた。東医大の宮本先生が骨細胞の中の mTor 伝達系の電磁刺激の話に続いて、私が伊達さんの磁場に対応する誘導電流の値を決

める実験の話をした。土橋先生は、リオン製の小型コイルによる細胞培養の話をされた。そのあと元東芝開発センターの山下洋八さんが、多重振動数の超音波装置を風呂の中で用い、骨関節症を治癒する話をされた。ちょうどアイルランドの Tofail さんから、国際会議への招待があることを紹介した。

4 月 28 日に、足が痛むので、東医大の正岡先生を訪ねたら、脱腸（鼠経ヘルニア）があることが判明した。消化器外科の長江先生を紹介していただき、5 月 18 日に石崎先生に手術をしていただいた。幸いに、その後の経過は順調であった。7 月の初めにアイルランドへの海外旅行を控えており、2 年前には体調不良で欠席したので不安な心境であったが、手術後の痛みはなく、順調に回復したのは大変幸運であった。東医大の関係の先生達に深く感謝している。

7月9日の朝､羽田から British Airways で London まで､そこから Air Lingus で Shannon 空港に､9日の夕方に到着した。約 15 時間の旅であった。Tofail さんと Bauer さんが車で迎えに来てくれ､Kilmurry Lodge Hotel という 7 年前と同じホテルに宿泊した。翌日には、群馬大学の土橋敏明先生と東京医科大学の澤地泰昇先生が同じホテルに到着された。お二人も招待講演者であった。

Frontiers in Materials Characterisation towards Industrial Translation (FRIMACHAT) International Workshop 2017 July 11-13, University of Limerick, Limerick, Ireland Organized by Modelling, Simulation And Innovative Characterisation (MOSAIC) Group, Bernal Institute, University of Limerick and European Materials Characterisation Council (EMCC) という長い名前のワークショップであった。E U諸国の大学や企業の有名な研究者達が招かれていた。新しいキャンパスに医学部を新設したリムリック大学の発展を示すものであった。

最初の招待講演として、Polymer piezoelectricity : Bases and Applications の題で、生体高分子と合成高分子の圧電研究の歴史と応用を述べ、最近触覚細胞のイオンチャンネル膜蛋白が Piezo と命名されたことを報告した。圧電高分子の研究総括であり将来の生物学的発展への予想であった。

体調不安の中で参加したことで、Tofail さん達が大歓迎してくれた。特に Bernal Institute の所長である Prof. Soulimane には特別扱いの歓迎をしていただき嬉しかった。ちょうど、イオンチャンネル膜蛋白の圧電の研究をしておられ、土橋先生から試料配向用のゼラチン膜の提案があった。

3 年前に、IEEE の interview のために、小林理研に来られた Lang 夫妻にも再会することができた。群馬大学の土橋先生は、旅行中ずっと付き添って世話をしていただき、大変心強かった。親切なご配慮に心から感謝を申し上げる。

http://fukadae.g2.xrea.com/Limerick.html

Ireland から帰って２月ほど経ったころ、中国の武漢大学に客員教授として招かれている西成勝好さんが、私の写真を見たと言って Limerick 大学の広報のブログを送って下さった。国際ワークショップの主催者であった Prof. Soulimane と私の写真をトップに飾って、会議の紹介が行われていた。体調を気使いながらの旅であったが、行って本当によかったと思った。

http://www.ul.ie/research/blog/unique-international-workshop-materials-characterisation-held-ul

Curriculum Vitae November 15, 2015

Name	Eiichi Fukada
Born	March 28, 1922, Kokura, Japan
Office	Kobayasi Institute of Physical Research
	3-20-41 Higashi-Motomachi, Kokubunji, Tokyo, 185-0022 Japan
Home	5-18-21-221, Nobidome, Niiza, Saitama,352-0011 Japan
	E-mail: fukada@s5.dion.ne.jp

Education

1944	Bachelor of Science, Department of Physics University of Tokyo
1956-1958	British Council Scholar, Department of Physics
	Imperial College of Science and Technology, London, England
1960	Doctor of Science, University of Tokyo

Academic Experience

1944-1963	Research Member, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo
1963-1980	Research Director, Biopolymer Physics Laboratory,
	The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Saitama
1980-1984	Executive Director, RIKEN, Saitama
1981-present	Emeritus Scientist, RIKEN, Saitama
1987-1998	Research Advisor, Institute of Super Materials, ULVAC Japan Ltd, Tsukuba
1992-2002	Director, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo
1992-2002	Research consultant, Rion co. Ltd., Tokyo
2002-2013	Research Advisor, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo
2013-present	Emeritus Scientist, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo

Concurrent Appointment

1961-1980	Professor, Department of Physics, Gakushuin University, Tokyo
1965.8-1966.3	Visiting Professor, Department of Physics, New York University, USA.
1974.4-9	Visiting Professor, Institute of Physics and Chemistry at Sao Carlos,
	University of Sao Paulo, Brazil
1986.4-10	Visiting Professor, Institute of Electroacoustics,
	Technical University of Darmstadt, Germany
1986.11-12	Visiting Professor, Faculty of Physics, University of Constance, Germany
1987.1-2	Visiting Professor, Institute for Material of Electrotechnology,
	Technical University of Aachen, Germany
1988.3-6	Guest Scientist, Hal B. Wallis Research Facility, Eisenhouer

Medical Center, Rancho Mirage, USA

Honors and Awards

1966	Fellow, International Academy of Wood Science
1970	Yamaji Natural Science Award
1979	Achievement Prize, The Institute of Electrostatics, Japan
1984	Scientific Achievement Award, The Society of Polymer Science, Japan
1988	Scientific Achievement Award, Japan Society for Biomaterials
1989	Galvani Award, International Symposium on Electrobiology, Bologna, Italy
1990	Society Prize, The Society of Rheology, Japan
1993	The Third Order of the Sacred Treasure, Japan
1995	Poiseuille Gold Medal Award, International Society of Biorheology, Big Sky, USA.
2015	Oka Syoten Special Award, Japanese Society of Biorheology, Japan.

International Activities

1956 (昭 31) 8.19 – 1958 (昭 32) 2.10
British Council Scholar
Imperial College of Science and Technology, University of London　London
A.Charlesby,　R.W.B. Stephens
1963(昭 38) 8.20 – 9.23
International Congress of Rheology, Boston　H.Wayland
1965(昭 40) 4.20 – 5.22
Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Pullman　Kollmann
1965(昭 40) 7.25 – 1966 (昭 41) 3.31
Visiting Professor, New York University, New York　M.H. Shamos,　Lavine
1967(昭 42) 5.13 – 14
US–Japan Cooperative Seminar on Microcirculation, Hiroshima　Takagi, Wayland
1967(昭 42) 8.21 – 9.19
International Academy of Wood Science, Saltzburg　Kollmann,　Morath
1968 (昭 43) 8.21-28
International Congress on Acoustics, Tokyo　Stephens
1970(昭 45) 6.7 – 6.22
US – Japan Seminar on Microcirculation, Pasadena　Wayland,　Sakaoku
1970(昭 45) 8.21 – 9.9
Chemeca 70 Symposium, Sydney　L.Dintenfass
1971(昭 46)8.15 – 20
International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto　Baer
1972(昭 47) 8.7 – 14
International Congress of Biophysics, Moscow　(代読 Prof. Kotani)
1972(昭 47) 8.20 – 9.9
International Congress of Biorheology, Lyon
1972(昭 47) 10.7 – 22
US – Japan Seminar on Polymer Solid State, Cleveland,　Baer, Wada
International Symposium on Electrets, Miami
1973(昭 48) 9.3 –
A.Eisenberg,　RIKEN
1973(昭 48) 9.17 – 10.3
New York Academy of Sciences, New York　Akutsu
1974(昭 49) 4.1 – 9.27
Visiting Professor, Sao Paulo University, Sao Carlos　S. Mascarhenhas

1974(昭 49) 7.26 –31

International Symposium on Macromolecules, Rio de Janeiro

1975(昭 50) 4.13 – 4.22

Workshop on Piezoelectric Polymers, NBS,Washington Broadhurst

1975(昭 50) 4.28 – 5.2

US–Japan Seminar on Hemorheology and Thrombosis, Kobe　Okamoto, Copley

1975(昭 50) 5.7

Symposium on Biorheology, Riken

1976(昭 51) 9.5 –11

International Congress of Hematology, Kyoto

1976(昭 51) 9.13

Riken Symposium, Gakushi Kaikan, Tokyo

1977(昭 52) 2.11 – 23

Tour to Beijing and Shanghai Inokuchi, Mikawa

1977(昭 52) 6.6 – 7.7

Stockholm, Swansea (J.Watson), London (Stephens), Kaiserslautern (Hartert)

1977(昭 52) 6.28 – 7.4

Ultrasonics International 77, Brighton

1978(昭 53) 3.10 – 4.7

American Chemical Society, Anaheim Broadhurst

IBM Research Laboratory, San Jose Yoon

Stanford University, San Jose Frank

A.A.M.I. Saha

1978(昭 53)8.27-9.1

International Congress of Biorheology, LaJolla　Fung

1978(昭 53) 9.18 – 20

Conference on Electric and Magnetic Control of Musculoskeletal Growth and Repair, Philadelphia Brighton, Pollack

1978(昭 53) 10.1-20

S.Mascarhenhas RIKEN

1978(昭 53)10.9 – 12

International Workshop on Electric Charges in Dielectrics, Kyoto　Wada

1978(昭 53)10.16

Riken Symposium, Electrical Properties of Polymers DasGupta, Bhatnager, Turnhout, Sessler, Carr, Lacabanne, Campos, Micheron, Malmkvist,Capelletti

1978(昭 53)10.19

Fifth Meeting of Japanese Committee of Electrical Enhancement of Bone Healing, SICOT, Kyoto Yasuda, Paterson, Brighton, Weigert, Watson, Pilla

1979(昭 54) 4.2- 11

American Chemical Society/Chemical Society Japan, Honolulu,Kona

1979(昭 54) 9.23 – 10.19

Mechanism of Growth Control, Syracuse R.O.Becker

Bell (Furukawa), Evanston (Ueda), Houston (Kaibara)

1980(昭 55)10.4 – 19

Japan-Brazil Symposium on Science and Technology, Rio de Janeiro, Sao Carlos

1980(昭 55) 10.20 – 22

Japan – Korea Symposium on Polymer Science and Technology, Kyoto

1980(昭 55) 11.30 – 12.13 Philadelphia (Brighton, Pollack, and Harren, Broomfield), Honolulu

12.1 – 10 Visiting Professor, University of Pennsylvania, BRAGS foundation

1981(昭 56) 7.27 – 8.1

Fifth International Congress of Biorheology, Tokyo (President)

1981(昭 56) 8.16 – 24

IUPAC meeting, Vancouver

1981(昭 56) 11.9 –11

First Meeting of Bioelectrical Repair and Growth Society, Philadelphia

1982(昭 57) 5.7 –15

China – Japan – USA Conference in Biomechanics, Wuhan

1983(昭 58) 6.18 – 25

International Symposium on Piezoelectricity in Biomaterials and Biomechanical Devices, Pisa, DeRossi Brussels (Hinsenkamp)

1983(昭 58) 8.18 – 31

Fifth International Congress of Biorheology, Baden-Baden

Goteborg (P.I.Branemark), Paris(Thomson, AirLiquid)

1984(昭 59) 9.9 – 23

Biotech 84 Tour (Sasabe) Washington, Philadelphia, Boston, Salt Lake, Santa Barbara, Los Angeles

1984(昭 59) 11.6 – 8

Fourth Meeting of BRAGS, Yasuda Memorial Symposium, Kyoto

1985(昭 60) 3.16 – 4.11

American Physical Society (3.25-29), Baltimore (Liboff)

Stanford, New York, Philadelphia, Baltimore, St Paul, Shreveport, LosAngeles

1985(昭 60) 8.12 – 16

Sixth International Meeting of Ferroelectricity, Kobe

1985(昭 60) 8.31 – 9.15

Fifth International Symposium on Electrets(9.4-6), Heidelberg (G.M. Sessler)

Paris, Darmstadt, Gottingen, Amsterdam, Chester (Yagi)

1985(昭 60)10.12 – 11.5

Fifth BRAGS(10.14-16), Boston

Pennwalt (10.23,25,28,seminar), King of Prusia

Bell, New York, Philadelphia, Michigan (Yang, Avery, Hanks)

1986(昭 61) 3.30 – 9.30

Visiting Professor, Technical University of Darmstadt (G.M.Sessler)

1986(昭 61) 7.21 – 23

Biologically Engineered Polymers, Cambridge

1986(昭 61) 10.1 – 12.31

Visiting Professor, University of Constance (Dransfeld)

1987(昭 62) 1.1 – 2.17

Visiting Professor, Technical University of Aachen, Aachen (Arlt)

1987(昭 62) 9.28 –10.2

Japan-USA-China Joint Symposium on Biomechanics, Osaka

1988(昭 63) 3.15 – 6.9

Guest Scientist, Eisenhower Medical Center, Rancho Mirage, Calif. (Liepsch)

1988(昭 63) 8.26 – 9.7

International Symposium on Applied Ferroelectricity (8.29-9.1), Zurich

Sixth International Symposium on Electrets (9.1-9.3), Oxford DasGupta

Konstanz (Dransfeld)

1989(平 1) 4.12 – 26

Symposium: Electrobiology Today to honour Luigi Galvani, Bolognia, (Galvani Award)

Pisa, Genoa , Milano

1989(平 1) 6.17 – 7.2

International Society of Biorheology, Nancy

Biofluid Mechanics, Munchen Liepsch

Darmstadt (Sessler)

1990(平 2) 6.19 – 25

Tonji University

Shanghai Institute of Organic Chemistry, Academia Sinica, (J.J.Wen)

1990(平 2) 8.19 – 9.6

International Congress of Biophysics, Vancouver

First World Congress of Biomechanics, LaJolla Fung

Vancouver, Seattle, Pasadena, LosAngeles

1991(平 3) 8.24 – 9.7

Third USA-China-Japan Conference of Biomechanics, Atlanta

World Congress of Microcirculation,Louisville

Electronics Technology & Device Laboratory, New York (Jow) Copley

1991(平 3) 9.22 – 10.6

Seventh International Symposium on Electrets, Berlin , G. Multhaupt

Sessler, Arlt, Dransfeld

1991(平 3) 11.17 – 25

University of Bordeau and University of Toulouse, Tsukuba Research Consortium Tour,

Kawamoto

1992(平 4) 8.3 – 8

Eighth International Congress of Biorheology , Yokohama (Honorary Chairman)

1992(平 4) 9.1 – 9.12

McMaster University, Hamilton, (P.S.Nicholson) Toronto, San Francisco

1993(平 5) 7.22 – 10.1 Hamilton

1993.7.22 Permanent visa in Canada

1993(平 5) 8.8 –15

Ferroelectrics meeting, Geithersburg DeReggi, Broadhurst, Kobayashi

1993(平 5) 12.21 – 1994(平 6) 2.25 Hamilton

1994(平 6) 4.12 – 5.21 Hamilton

1994(平 6) 8.6 – 8.9

International Symposium on Applied Ferroelectrics, Penn State, State College

Brown, Bauer

1994(平 6) 6.28 – 9.22 Hamilton, Dundas

1994(平 6) 9.5 – 16

Eighth International Symposium on Electrets, Paris, Lewiner

Workshop on Ferroelectric Polymers, Saint-Louis, Bauer

1994(平 6) 12.6 – 11

International Conference on Biomechanical Engineering, Singapore

1994(平 6) 12.19 – 1995(平 7) 3.23 Dundas

1995(平 7) 4.5 – 6.1 Dundas

1995(平 7) 6.28 – 9.13 Dundas

1995(平 7) 7.23 – 28

International Congress on Biorheology, Big Sky ,Cokelet (Poiseuille Medal)

1995(平 7) 10.15 - 1996(平 8) 2.29 Dundas

1996. 2.10 Tomoko

1995(平 7) 10.17 – 19

Symposium on Piezoelectric Polymers, Sandia, K-Tech, Alburquerque

1996(平 8) 4.16 – 5.9 Dundas

1996(平 8) 7.29 – 9.21 Dundas

1996(平 8) 9.24 – 10.1

Nineth International Symposium on Electrets, Shanghai Xia

1996(平 8) 12.22 - 1997(平 9) 2.4 Dundas

1997(平 9) 4.17 – 5.15 Dundas

1997(平 9) 8.25 – 27

Ultrasonics Symposium, Yokohama

1997(平 9) 10.5 – 11.5 Dundas

IEEE Ultrasonics, Toronto (10.6-8)

Lake Louise Conference (10.12-10.17)

1997(平 9) 12.23 - 1998(平 10) 1.15 Dundas

1998.1,11

permanent visa of Canada ended

1998(平 10) 8.3 – 8

World Congress on Biomechanics, Sapporo Hayashi

1998(平 10) 10.6 – 8

IEEE Ultrasonics, Sendai Chubachi

1999(平 11) 1.5 – 15 Dundas

1999(平 11) 9.20 – 29

Tenth International Symposium on Electrets, Delphi, Athens A.Konsta

2001(平 13) 5.7 – 5.12 New Zealand

2001(平 13) 10.27 – 12.6 Dundas

Yoko PhD (11.9)

Lake Louise Conference (10.28-11.3)

2001(平 13) 11.24 –12.2

Boston, Philadelphia

Electroactive Polymers Symposium, Boston (11.26-28) Zhang

2002(平 14) 9.28 – 10.7 Melbourne

International Symposium on Electrets, Melbourne (10.1 – 4) Yazaki

2003 (平 15) 2.11 – 21 Dundas Jim Smith

2004 (平 16) 8.21 – 9.12

Internoise 2004 , Prague (8.22-25)

Seventh European Conference on Application of Polar Dielectrics, Liberec, Czech (9.5-9)Mokry

2005 (平 17) 9.5 – 9.26 Dundas

Intrenational Symposium on Electrets, Salvador, Brazil (9.11 -15) Giacometti

12.26 Mate Niiza-Shiki

2006 (平 18) 7- 8

Limerick Tofail cancel

2007 (平 19) 1. 15 – 28

Keio Hospital operation

2007(平 19)8. 22

Yoko, Hiroki Canada Immigration

2008 (平 29) 9.14 – 9.18

Thirteenth International Symposium on Electrets, Tokyo, Takeo Furukawa, Kalinin

2008 (平 20) 10. 20 – 11.5.

Cansmart 2008, International Workshop Smart Materials and Structures, Montreal (10.23-24) G. Akhras,

10.25 – 11.5 Toronto E. Prasad

2009(平 21) 3. 20 – 31.

American Chemical Society, Division of Polymeric Materials: Science and Engineering

Salt Lake City, USA C. Park C. Lovell
TSN San Francisco N. Urata
2009(平 21) 8.18 – 8.30. Otawa Toronto
8.20 - 8.22. Active Noise Control
2010(平 22) 3.31 – 4.15. London England Limerick Ireland
4.4 – 4.10. MSSI , University of Limerick S. Tofail Soulimane。
2011 (平 23) 8.22 – 9.4 Paris
International Symposium on Electrets Montpellier Henn, Lang, Bauer
10.31 – 11.12 Cansmart Conference Montreal, Kingston , Toronto
Royal Military College Kingston G.Akhras
2012 (平 24) 3.17 – 19
International Mini-Symposium on Soft Interface, Tsukuba Nagasaki
2012 (平 24) 5.29 – 30
Euro EAP International Conference, Potsdam read by Y. tajitsu
5.31
Symposium honouring the 60th birthday of Prof. Dr. Reimund Gerhard
read by Danilo DeRossi (Pisa)
2013 (平 25) 3.17 – 4.2
London Dublin
3.19 Seminar, Queen Mary University of London F. Carpi
3. 27 – 28 Electromechanics in Biosystems University College Dublin B.Rodriguez,
Tofail, Lee
2014 (平 26) 12.3
IEEE Interview Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo S.Lang
2015 (平 27) 6. 4-5
Materials' Days, Rostock, Germany Eberhard Burkel
2015(平 27) 6.8-10
Electrically Active Materials for Medical Devices University of Limerick
Limerck, Ireland S.Tofail
read by S. Lang
2017(平 29) 7.11-13
Frontiers in Materials Characterisation towards Industrial Translation. International
Workshop. Limerick, Ireland T.Soulimane S.Tofail

Reports on Progress in Polymer Physics in Japan Vol. 38 1995

Recollections of a Research Life

Eiichi Fukada

Kobayasi Institute of Physical Research
Kokubunji, Tokyo 185, Japan
and
Institute for Super Materials, ULVAC
Tokodai, Tsukuba 300-26, Japan

1. Rochelle Salt Crystals

In 1944, I was a student in the Department of Physics, the University of Tokyo. The previous year, Professor Seiji Kaya came from the Hokkaido University to the Department and I entered his laboratory for my graduation work. At his weekly seminar, I read the book "Ferromagnetism" by Bekker and Döring. Professor Kaya suggested I study the thermoelectromotive force in superalloys for experimental work. I made a furnace of nichrome wires on an asbestos tube and showed it to him. He said, "It looks as if it will work, but you must measure the temperature distribution inside." I made the measurement. That was all I did for graduation work.

In those days students in universities and high schools were sent to factories and institutes to work on war production. I attended a lecture on acoustics by Professor Koji Sato, the Director of the Kobayasi Institute of Physical Research. Research and production in support of the army was being carried out at that establishment. He arranged I go to the Kobayasi Institute.

My work at the Kobayasi Institute involved growth of Rochelle-salt crystals on production scale. A small seed crystal of few mm size was placed at the center of two parallel glass plates. It was then immersed in a saturated solution of Rochelle salt in a glass vessel maintained at controlled temperatures in a large thermostat. A plate-shaped single crystal of Rochelle salt of few cm size grew as the solution very slowly cooled.

The crystal was then cut to suitable size, electroded and coated against moisture. Several such pieces were bonded together and finally an electromechanical sensing element of about 1 cubic cm volume was obtained. This unit exhibited the highest piezoelectric activity achieved at that time. These elements were installed in hydrophones to detect the underwater sounds generated by submarines.

This was my first encounter with piezoelectric materials. On graduation, I entered the Kobayasi Institute as a Research Assistant. Dr.Heiji Kawai was head of the

laboratory. He was investigating the effect of deliquescence and efflorescence on the dielectric properties of Rochelle salt crystals. He was responsible for research on and applications of Rochelle salt crystals, which, after the end of war, had become a major component of acoustic devices, such as microphones and gramophone pickups. These were produced by the Rion Co., which had been founded by and were affiliated with the Kobayasi Institute of Physical Research.

2. The Viscoelasticity of Wood

Acoustics is one of the most important research fields at the Kobayasi Institute of Physical Research. The quality of musical instruments, such as the violin and the pianoforte, is largely determined by the acoustic properties of wood. I started the study of the dynamic viscoelasticity of wood in Dr. Kawai's laboratory. Mr.Akiyama, later to become an Executive Director of the Rion Co., gave me different kinds of wood to investigate including needle-leaf and broadleaf trees.

I carried out extensive measurements of the elastic constant and damping coefficient of wood over the acoustic frequency range using the bending resonant vibration of long plates. I reached the conclusion that high elastic constant and low damping capacity are the important criteria for the sound board of a piano. Although this seems a common sense, I was happy to have my report accepted by Nature [1].

In those days, Prof.Jiro Kohara of Kyoto University, later of Chiba University, who became famous for his work on human engineering, was studying the mechanical properties of old timber, collected from the temples of Nara and Kyoto. I had the good fortune to work on old samples of Japanese cypress he supplied to me.

Japanese cypress (Hinoki) is the wood most commonly used for the historical temples of Japan. The oldest sample I tested was in Horyuji, built approximately 1300 years ago. Most samples obtained from the temples of Kyoto were about 300 years old. Newer samples were recently obtained from the Kiso mountains.

We found that the elastic constant of old wood increases with age exhibiting a maximum at ~ 300 years. Thereon it gradually decreases to a minimum value after ~1300 years. X-ray diffraction studies showed that the degree of crystallinity of old wood increases for ~ 300 years, then decreases to ~ 1300 years. At this point the sample is almost 100% amorphous. The variation of piezoelectric constant with age was similar to the elastic constant. Since both are proportional to the degree of crystallinity, the results were in good agreement. In the natural environment, the crystallization of cellulose takes place slowly at room temperature. The thermal degradation of cellulose slowly takes place at the same time, both transformation involving a time scale of 100 years [2].

The viscoelasticity of wood aroused in me an interest in the linear viscoelasticity of polymers. I was very fortunate. Dr.Syoten Oka, the head of the Polymer Physics Laboratory of the Kobayasi Institute gave me guidance. From his manuscripts I learned the theories and experiments on the dielectric properties of polymers. He kindly lent me these and later published them as "The Theory of Dielectrics" (Iwanami Book Co: 1954).

Dr.Shigeo Iwayanagi was starting to study mechanical relaxation of synthetic polymers, such as polymethylmethacrylate at the Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN) in Tokyo. His discovery of secondary relaxation due to the rotation of side chains was very attractive as was his general theory on linear viscoelasticity. I conducted experiments on polymethylmethacrylate trying to correlate dynamic viscoelastic properties with static behavior of creep and stress relaxation.

Prominent polymer physicists gathered for a seminar at the laboratory of Dr.Iwayanagi. Present were Prof.Yasaku Wada of the University of Tokyo, Prof.Eiichi Wada of Nihon University, Dr.Hideo Hideshima, later a Professor of Hokkaido University, and Dr.Koji Okano, later a Professor at the University of Tokyo. The laboratory was the center of polymer physics research in those days.

Dr.Oka started his theoretical work on polymer physics at that time. In his laboratory were brilliant theoretical physicists, the late Dr.Akiya Ohkawa, later a Professor at Gakushuin University, Dr. Nobuhiko Saito, later a Professor at Waseda University, Dr. Yuzo Ikeda, later Director of the Kanebo Research Laboratory, and Dr.Osamu Nakada later at the Hitachi Central Research Laboratory. Prof. Motoyosi Sugita of Hitotubashi University and Dr.Isao Oshida, later a Professor at Sophia University and other physicists from different Universities and Institutes in Tokyo were also present at this seminar.

3. The Piezoelectricity of Wood

One day in 1953, Dr.Kawai told me, "I have heard that there is a report by Russian scientists on the piezoelectric effect in wood. Would you like to test if it is true or not". I had never heard that polymeric materials exhibited any piezoelectric effect. Piezoelectricity is an inherent property to crystals. Polymers, like amorphous rubber, should not exhibit piezoelectric effects. However, cellulose, the main constituent of wood, is known to be crystalline. My curiosity thus excited, I decided to investigate piezoelectric effects in wood.

My first problem was to produce electric charge in wood. I cut a number of small cube samples at different orientations to the wood grain and placed silver foil as electrodes on the various faces. I connected a pair of opposing electrodes to a

galvanometer. I applied pressure to the sample by a lever and tried to detect deflection of the galvanometer mirror. After many attempts and failures, I found the mirror moved in one direction when the sample was pressed and the mirror moved in the opposite direction on pressure removal. This only happened when I applied the pressure 45° to the grain. Current flowed perpendicular to the plane of pressure, leading to the conclusion that a shear with respect to the grain direction induced polarization perpendicular to the plane of stress.

The charge produced by the pressure was very small. Current might be produced by frictional charge or contact potential. If the effect is to be true, thermodynamics require the inverse-piezoelectric-effect, that is, if an electric field is applied to wood, then mechanical strain should be generated therein. I decided to explore the inverse- piezoelectric-effect in wood.

I set up an interferometry microscope apparatus to measure the deformation of wood under high electric fields. I observed no inverse-effect because the wood brokedown before the deformation was large enough to be observed.

Dr.Kawai advised me that a dynamic measurement would be more sensitive than a static one. So I clamped a sample in a metal frame with a Rochelle salt element as used for hydrophones. On application of an ac voltage between the electrodes of the wood sample, I detected an output from the Rochelle salt proportional to the alternating deformation of wood. The sensitivity of Rochelle salt was very high as also was the ac gain of the vacuum tube amplifier utilized. The mechanical resonance of the clamped system gave a further increase of output signal.

The piezoelectric constant calculated from the inverse-effect agreed well with that from the direct effect. I became convinced that wood has a piezoelectric effect, which originates from the cellulose crystals as well as the wood structure. The cellulose fibers orient uniaxially in the grain direction. They have triclinic symmetry and eight components in the piezoelectric constant matrix are finite. In a nonpolar uniaxially symmetric structure such as wood, only two components of the matrix should be present, the shear piezoelectric constants, $-d_{14} = d_{25}$,. Experimental results agreed with theoretical predictions [3].

The magnitude of the shear piezoelectric constant of dry wood is $d_{14} \sim -0.1$ pC/N, i.e.: one twentieth the constant for a quartz crystal. It is, however, remarkable that a property similar to that of quartz is present in wood. The piezoelectric effect should occur thus in any substance containing cellulose fiber.

Meanwhile, the Forest Products Research Establishment in England reported that the piezoelectric effect could not be detected in wood. Naturally there was suspicion of this entirely unknown phenomenon.

In 1961 there appeared a book, translated from Russian, "Piezoelectric Properties of Wood" [4] by V.A.Bazhenov, whose original work with V.P.Konstantinova was referred to in Chemical Abstracts in 1950. This book summarizes the work on the piezoelectricity of wood carried out in Russia. I learned that Professor A.V.Schubnikov, an eminent crystallographer at the Academy of Sciences of USSR, had developed a theory for the piezoelectricity of textures with uniaxial symmetries and had predicted the occurrence of piezoelectricity in wood.

In 1965, I was invited to talk at the Second Symposium on the Nondestructive Testing of Wood, held at Washington State University, Pullman. There I learned that Dr.W.L.Galligan had used the piezoelectric signal to determine the strength of wood. He gave an impulsive shock to the end of a lumber sample and detected the piezoelectric signal produced at a fixed distance. The sound velocity in the lumber was easily measured, correlated with the elastic modulus and thus with the mechanical strength.

I presented a review of my work for the previous ten years. I reviewed the piezoelectric effect in wood and other crystalline polymers. I dealt with the direct and inverse effects, the influence of measurement frequency, temperature and chemical modification of the cellulose. After the lecture, Prof.F.Kollmann of the University of München told me, "Your talk has convinced me that wood has piezoelectric properties". That was indeed praise from the most distinguished wood physicist in the world! Later, he added a section on piezoelectricity to his book on Wood Science.

In 1966 Prof. Kollmann founded an International Academy of Wood Science (IAWS), and invited me to give a lecture on the piezoelectricity of wood at the Society's first symposium at Salzburg. I will never forget the lecture hall of the Mozart Music School with its park full of beautiful flowers. I was elevated to a Founding Member of IAWS. This was indeed a great honour and encouraged my research [5].

The piezoelectric properties of wood have since been studied in detail by Dr.Nobuyuki Hirai, later a Professor at Shizuoka University and Dr.Hideatsu Maeda of the National Institute for Materials and Chemical Research, Tsukuba.

4. The Piezoelectricity of Bone

In 1956, Dr. Iwao Yasuda, Associate Professor of Orthopedics, Kyoto Prefectural Medical University visited me at the Kobayasi Institute of Physical Research. He said, "I have read your paper on the piezoelectricity of wood published in the Journal of the Physical Society of Japan. I have been observing the electric potential developed in bone on deformation by mechanical force. Would you like to

join me and study the piezoelectric effect in bone?" That was one of the most important encounters of my life. He later became a world pioneer of the electrical healing of bone fractures as well discovering of stress-generated electricity in bone.

The study of piezoelectricity in wood assured me that all biopolymers with a uniaxially-oriented structure will possess piezoelectric properties. Wood and bone have a mechanically similar structure. From a macroscopic viewpoint, wood consists of oriented cellulose crystals and bone consists of oriented collagen crystals. These materials support mechanical stress in plants and animals, respectively.

I commenced to measure piezoelectric effects in bones from cow and man. I confirmed both direct and inverse shear piezoelectric effects in cubic samples, cut from dried femur. The polarization generated in the direct effect was linear with the applied stress and the strain produced in the inverse effect was linear with the applied electric field. The effects were similar to those in wood. The piezoelectric constant for dry bone is d_{14} = -0.2 pC/N, about twice that for dry wood. I confirmed the anisotropy of the effect and derived the matrix of the piezoelectric tensor for bone[6].

Dr.Goto of the laboratory of Dr.Yasuda came to work with me and carried out measurements of piezoelectric effects in tendons. Bone consists of collagen and hydroxyapatite. Crystallographic symmetry suggests that collagen crystals may be piezoelectric but hydroxyapatite not so. Tendon consists of ~100% oriented collagen fibers. It was anticipated that tendon would show a large piezoelectric effect. The shear piezoelectric constant observed was d_{14} = -2.0 pC/N, i.e.; ten times that of bone. The piezoelectric constant of a quartz crystal, for example, is d_{11} = 2.2 pC/N. It was wonderful that a dried tendon had a piezoelectric constant the same magnitude as quartz! [7].

In his original experiments, Dr.Yasuda applied a shock or static pressure to the end of a femur clamped in cantilever mode and measured the potential generated at the surface. This is usually termed the bending piezoelectricity and the degree of polarization is proportional to the derivative of the stress. Quantitative bending piezoelectric constants for bone were reported in 1974 by Prof.W.S.Williams and Dr.L.Bregar of the University of Illinois, Urbana-Champaign[8].

In those days, the piezoelectric effects in wood and bone were new. I wished to develop an easy demonstration of these effects. I substituted a bone or tendon element for the Rochelle salt crystal element in a commercial gramophone pickup and played record successfully. I was happy with this simple demonstration.

During the experiments on tendon, tensile piezoelectricity was also detected in bone and tendon. When pressure was applied parallel or perpendicular to the collagen axis, electrical polarization was observed in the direction of orientation. The

magnitudes of the piezoelectric constants d_{33} and d_{31} were, however, two orders of magnitude smaller than d_{14}.

In 1966, Prof.S.B.Lang, currently of Ben Gurion University of the Negev, measured pyroelectric effects in bone and tendon. He showed later the effects may be secondary ones due to the piezoelectric effect [9].

Later, Dr.H.Athenstaedt of University of Aachen, Julich conducted extensive work on pyroelectricity and piezoelectricity in vertebrate skeletons. His results suggest that a polar orientation of the constituent biopolymers exists in most biological systems [10].

5. Radiation Effects on Polymers

At the beginning of the 1950's, the peaceful use of atomic energy was a hot topic. Dr.A.Charlesby at the Atomic Energy Establishment, Harwell, England started work on the crosslinkage and degradation of polymers on high energy irradiation. I was bold enough to write him a letter with no introduction and he courteously sent me samples of polyethylene rods, exposed to radiation in the atomic pile at Harwell.

I measured the dynamic elastic constants for these irradiated polyethylene samples. The elastic constant decreased with increasing radiation dose, approaching a rubber-like state. It subsequently increased to become glass-like. Strong radiation introduced crosslinks between polymer molecules. I also discovered a definite change of triboelectricity in the irradiated polyethylene. The sign of the frictional charge was negative for unirradiated samples and positive for highly irradiated samples.

I applied for a British Council Scholarship and was fortunate enough to pass the examination in 1956. My supervisor in England was Dr.R.W.B.Stephens of the Department of Physics, Imperial College of Science and Technology, University of London. He was a Reader of Acoustics and a friend of Dr.Charlesby. I worked fifteen months in the laboratory of Dr.Stephens and kept close contact with Dr.Charlesby, then the Research Director at the Tube Investment Research Laboratories in Cambridge. Soon after he became the Professor of Physics at the Royal Military College of Science, Swindon.

I worked on the dynamic viscoelasticity of polyesters cured by γ -ray from a Co^{60} source[11]. I also studied the dynamic viscoelasticity of high density polyethylene irradiated by a van de Graaf electron accelerator [12]. Thus I became familiar with radiation-induced polymerization of monomers and the modification of polymer properties via the crosslinks and scissions produced by irradiation.

Whilst in Britain I had the good fortune to meet Prof.J.F.Fowler of the Physics Department, Kings College Hospital, London. We discussed the triboelectricity of

irradiated polyethylene and published a letter in Nature about the electron traps in the insulators [13].

The mechanism of the elastic and dielectric relaxations in polyethylene, a simple hydrocarbon macromolecule, was of interest in those days. One day I met a scientist from the Imperial Chemical Industries Company, and he explained to me in detail his interpretation of the three relaxations in polyethylene. The γ-relaxation, he suggested, is due to local thermal motion of molecules, the β-relaxation due to macroscopic thermal motion of molecules in amorphous regions and the α-relaxation due to the thermal motion of molecules in the crystalline regions. At this time I learned the importance of personal communication in research.

In 1968 I returned to the Kobayasi Institute of Physical Research. About that time a movement started to establish the Research Association for Radiation Polymers. This was supported by the Japanese Society of Polymer Science and many polymer industries. Research laboratories were founded in Tokyo and Osaka. The former was built close to the Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN). The director was Dr.Kenichi Shinohara, the head of the Atomic Physic Laboratory in RIKEN. Later he invited me to join his laboratory.

6. Studies on Rheology

Studies on Rheology rapidly became popular around 1960 owing to the activities of such eminent scientists as Prof.Tsurutaro Nakagawa and Prof.Hirotaro Kambe of Tokyo University and Prof.Sigeharu Onogi of Kyoto University. Rheology is the science of flow and deformation. My interest therein was aroused by joint work with Dr.Toshimaro Sone of the Research Laboratory of Snow Brand Milk Co.. Mechanical properties such as viscosity, elasticity, and plasticity are very important in the processing of milk, butter, cheese and other dairy products. The property/ structure relationships in these materials are a challenge for both basic and applied researches.

Dr.Sone discovered a close relationship between the viscoelasticity of butter and the crystallinity of triglyceride. Dr.Masayosi Fukushima of the Snow Brand Milk Co. worked for several years on the rheology of butter and cheese in my laboratory at the Kobayasi Institute. One of his most remarkable results was the observation of "stripe" patterns during the rolling of butter. The number and shape of the stripes varied depending on the viscosity of the fluid and the speed of rotation of a roll. A theoretical analysis based on hydrodynamics and rheology was required but was obviously very difficult. Prof.Misazo Yamamoto, an excellent theoretical physicist at the Tokyo Metropolitan University was interested in this phenomena and later developed a theory thereabout with Dr.Fukushima [14]. Mr.Mitsunobu Masuzawa of

Japan Oil and Fat Co. also worked with me on the radiation and rheology of triglyceride [15].

Dr.Syoten Oka was also active in theoretical research in rheology and developed a series of theories to explain viscoelasticity measurements. His rigorous treatments took into account the effect of inertia.

Few rheometers were commercially available in those days and construction of laboratory instruments for specific purposes was necessary. I was involved in considerable efforts to develop new rheometers for a number of years. In this endeavours I was fortunate to have the help of Dr.Munehiro Date. He worked with me at the Kobayasi Institute and the RIKEN Institute. He was ingenious and creative in mechanics and electronics. The cooperation of the workshop in RIKEN was also indispensable. I wish to express my sincere thanks to them.

We began with a vibration plate and a rotational viscometer. Around 1960, I was fortunate enough to obtain research funds to buy a Weisenberg rheogoniometer. It was the first such English machine in Japan. I worked with Mr.K.Suzuki on the normal stress of silicone oil. I also worked with Dr.Date on the dynamic viscoelasticity of collagen solutions over a wide range of shear rate. Dr.T. Nishihara, who made a pioneering work on collagen in the Japan Leather Co. was highly appreciative of our results and inspired my interest in biopolymers.

As originally worked on acoustics, the measurement of the viscoelastic constants of materials in the acoustic frequency range, for example, from 50 to 5000 Hz, was of great interest. The Fitzgerald apparatus was the only one reporting data in this frequency range. I tried to construct this difficult instrument with the help of Dr.Shigeo Ogawa of the National Institute of Textile Engineering, Yokohama (now the National Institute of Materials and Chemical Research, Tsukuba). However, resonant frequencies of a large electromagnet interfered with the measurements, and we finally had to give up. To my limited knowledge, no commercial equipment is yet available to determine viscoelasticity in the audio frequency range. Construction of such an instrument remains one of my unsolved problems.

In 1959, Prof.Motowo Takayanagi and Mr.M.Yoshino of Faculty of Engineering, Kyushu University invented a new apparatus for measuring the dynamic viscoelasticity, called Vibron. Previous apparatus for dynamic viscoelasticity measurement utilized a resonance of vibration, whilst the new one used forced vibration and measured the stress and strain of the sample independently. The measurement frequency could be continuously changed below the resonant frequency.

I was impressed with this idea and tried to construct an apparatus to measure directly the real and imaginary parts of the complex elastic constant of polymer films

and liquids [16]. Later this apparatus was developed to measure the real and imaginary components of the piezoelectric constant as well as the elastic and dielectric constants. Dr.Date's unique ideas and deep knowledge of electronics were essential for the successful production of this apparatus. The cooperations of Messrs.Ikeda and Ishida of Toyo Seiki Co. are also sincerely acknowledged.

7. Hemorheology and Biorheology

Dr.Kawai once suggested to me an idea for a simple viscometer for small amounts of blood. It consisted of two hollow needles attached to the top and bottom of a glass tube, and when the pressure inside the tube is reduced by pressing a rubber ball jointed to the tube, the blood sample is sucked through the bottom needle and air through the top needle. By comparing the amounts of blood and air sucked into the tube, the viscosity of blood can be determined.

This handy rheometer is useful for measuring small samples of patient's blood for diagnostic purposes. Mr.Takayoshi Ibe, now the Managing Director of Rion Co., measured the viscosity of numerous blood samples at the clinic of Dr.T.Oosawa at Yokohama. He also conducted an experiment to determine the viscosity of blood in vivo in the jugular vein of a dog. This work he did jointly with Prof. K.Atsumi of Research Institute of Medical Electronics, the University of Tokyo.

I reported these results at the Symposium on Hemorheology of the International Congress of Rheology held at Brown University in 1963. There I met Prof.H.Wayland of the California Institute of Technology. He originally studied physics with Prof. Niels Bohr, Copenhagen and later entered the field of microcirculation. Since then his research and charming personality have been a great stimulation for me.

Dr.Oka, the Professor of Physics at the Tokyo Metropolitan University started theoretical studies on the viscosity and circulation of blood. Thrombosis is a fatal problem of blood circulation. Gelation and coagulation of fibrinogen in the blood required many rheological investigations. The Thromboelastgraph, invented by Prof.H.Hertart of the University of Kaiserslautern, Germany, has been clinically used to determine the coagulation of blood.

The dynamic viscoelasticity of gel is described via complex rigidity, so the real and imaginary components of dynamic rigidity must be determined for solution of the problem. The principle of the dynamic viscoelastometer designed for solid polymers was applied to blood for that purpose. A parallel plate device held the sample liquid, and the time variation of the dynamic rigidity and dynamic loss for clotting blood were quantitatively determined and recorded separately against time

in 1969 [18]. Thus commenced the long-term research of Dr.Makoto Kaibara and myself on the clotting of blood and of fibrinogen thrombin systems.

The effects of a number of parameters on clotting of blood such as the amplitude and frequency of oscillation, temperature, concentration of blood cells (hematocrit), pH, ionic strength, etc. were elucidated in detail by the careful work of Dr.Kaibara. Theoretical analysis of the clotting curves was also developed. We also studied the viscosity and dynamic viscoelasticity of unclotted blood using a new, in-house constructed, coaxial cylinder viscoelastometer. Dr.Kaibara recently constructed a damping oscillation rheometer to detect the time change of the viscosity of blood during the period of enzymatic reactions prior to gelation. The nonlinear viscoelasticity of clotting blood was first quantified by Mr.Yoshihiko Sugiura. He moved to my laboratory when Dr.Iwayanagi retired from RIKEN.

We were fortunate to collaborate on hemorheology with many active medical scientists such as the late Prof.Takehiko Azuma of Shinshu University (later President of Juntendo University) and Prof.Yukihide Isogai of the Tokyo Jikeikai University School of Medicine.

In 1966, Prof..A.L.Copley of the Polytechnic University, New York founded the International Society of Hemorheology, the name of which was changed to the International Society of Biorheology in 1972. The Society holds the International Congress of Biorheology (ICB) every four years. I was elected President of the International Society of Biorheology at the 3rd ICB at the University of California at La Jolla in 1978 and became responsible for organizing the 4th ICB in Tokyo, 1981.

Prof.Syoten Oka founded the Japanese Society of Biorheology in 1977 and since then the number of scientists interested in hemorheology and biorhelogy has increased. The membership of the Society was about 300 when the 4th ICB was held at the Tokyo Jikeikai University School of Medicine in 1981.

The 4th ICB was a great success especially due to the enthusiastic support of the professors in Tokyo Jikeikai University. A satellite Symposium on Hemorheology was organized at the National Cardiovascular Center Research Institute, Prof.Oka Director. The 9th ICB was organized in 1992 again at Yokohama by Prof.Y.Isogai, who then became the President of the International Society of Biorheology.

My friendship with Prof.Copley has greatly influenced my life. He was a painter as well as a physiologist. A person of broad sighted view and many international friendships. He was always passionate when spreading the research of biorheology. He believed it the interlink in Life Sciences. From him I learned of passion for science and the courtesy of international scientists.

8. The Electrical Stimulation of Bone Growth

Dr.Yasuda was an orthopedist with a concept as to how fractured bone naturally healed and interest in the piezoelectricity of bone originated therefrom. In 1953, he showed the effect of electricity on bone growth. He wound a metal wire around the femur of a rabbit as the negative electrode, another ring-shaped positive electrode was placed in muscle close to the periosteum. New bone was observed to form along the path of the current, when ~ 1 μA was passed for several weeks between two electrodes from a 1.5 V battery.

A dog with a broken leg often shakes it. Dr.Yasuda assumed the electricity generated by the vibration would heal the fracture. The Wolff law in orthopedics tells that bone develops its shape in response to the mechanical stress on it. The feedback parameter in this law could be electricity caused by mechanical deformation.

The relationship between the electrical properties of bone and the mechanism of bone growth aroused the interest of many scientists world-wide and there was remarkable research activity in subsequent years. Work on electricity and bone was initiated in two groups in the U.S.A. around 1960. These groups also consisted of physicists and orthopedists.

Prof.M.H.Shamos of the Physics Department of New York University and Prof.L.S.Lavine of the State University of New York, Down State Medical Center asserted piezoelectricity in bone originates from the crystalline properties of collagen, a similar conclusion to mine. Prof.C.A.L.Bassett of Columbia University and Prof.R.O.Becker of State University of New York, Upstate Medical Center, Syracuse proposed a mechanism based on p-n junctions. They assumed the latter exist at boundaries between the collagen and hydroxyapatite.

In 1965, Prof.Shamos invited me as a Visiting Professor to his laboratory. There I worked on the anisotropy of the piezoelectric effect in bone and its dielectric properties. During my stay in New York, Dr.Yasuda visited and described how to apply electric current to bone and induce new callus. He gave a seminar on his original work at the Rockefeller Institute in New York City. I helped as interpreter.

During subsequent relaxed conversations in the hotel, we got the idea to use a piezoelectric polymer film to induce callus formation. If the piezoelectric potential naturally induced in bone is effective to stimulate proliferation, artificial piezoelectric film implanted near periosteum should have a similar effect. Implantation of a teflon electret film around a rabbit femur successfully showed that bone formed around the film [19]. Later a number of different polymer films, possessing higher piezoelectric activity, were shown to generate new bone [20].

It is unfortunate the pioneering work of Dr.Yasuda was not properly appreciated in the orthopedic communities of Japan at the early stages of his work. He was an enthusiastic physicist and was full of novel ideas. He was a charming personality and loved to drink. His work was popular abroad, though he did not publish in English.

In 1973, the Symposium on Electrically Mediated Growth Mechanisms in Living Systems was held by the New York Academy of Sciences in New York City. I talked about my research on the piezoelectric properties of biopolymers such as polypeptides and deoxyribonucleates, carried out over the previous ten years. Dr.Yasuda gave a talk on his original work on piezoelectricity on bending and the electrical growth of bone. It was received with great interest.

Dr.C.Eriksson of the Karolinska Institute, Stockholm who presented a paper on the streaming potential of bone, told me before his talk that he might be knocked down after the lecture because, at that time, piezoelectricity prevailed as the origin of stress-induced electricity in bone. I had met him before in London when I was at Imperial College. He published an article in Nature that the streaming potential in bone and tendon became zero at the isoelectric point of the immersing fluid [21].

All piezoelectric materials have a matrix consisting of 18 piezoelectric constants. It represents the relations between the six components of mechanical stress and the three components of polarization. If the collagen fibers in the structure of bone have a nonpolar uniaxial symmetry, then only the shear piezoelectric constants $d_{14} = -d_{25}$ have finite values, all other components being zero. However, measurements on bone and tendon showed finite values for other components of the piezoelectric matrix. This observation was usually ascribed to heterogenious structure of bone. However, it may suggest an other origin of the stress-induced potential generated in bone.

Bone in the living state contains considerable water. The observed piezoelectric constant is a function of the water content. d_{14} measured at 10 Hz is highest in the dried state and decreases with increasing water content being zero at ~ 30% water in the collagen. Piezoelectric polarization of bone is neutralized by the ionic conduction of water.

Around 1975, Prof.S.L.Pollack at the Department of Bioengineering, University of Pennsylvania, Philadelphia commenced energetic work on the streaming potential of bone. He clearly demonstrated a distribution of electric potential across the section of bent bone and ascribed it to the streaming potential induced by the flow of fluid through canaliculi, the minute tubes penetrating the structure of bone. When a long bone is bent, body fluids flow from the compressed regions to the expanded ones. The ionic species in the fluid and the ζ potential at the surface of the canaliculi determine the sign and magnitude of the streaming potential. Contrary to the

piezoelectric effects, the streaming potential effects persevere in the moist bone. From his active studies, the main origin of the stress-generated potential in bone in vivo is the streaming potential.

Prof.C.T.Brighton of the Department of Orthopedics, University of Pennsylvania carried out extensive research on the electrical stimulation of repair and growth of bone. Again a clinical orthopedist collaborated with a biophysicist.

From the viewpoint of clinical application, the largest achievement of electrical stimulation was the success with the healing of pseudoarthrosis. The latter is a delayed nonunion unhealable by previous methods. Several apparatus and devices have now been commercialized. The simplest one involves insertion of an electrode into the lesion and passing a direct current of ~10 μA. Prof.Bassett invented an apparatus that applies a pulsing electromagnetic field to the fracture. A pair of coils is placed on the body surface. Prof.Brighton proposed an apparatus to pass a 60kHz ac current through electrodes placed on the skin.

In 1975, Dr.J.Watson of the Department of Electrical Engineering, University of Wales, Swansea visited my laboratory in RIKEN. He invented an iron-cored pulsing magnetic stimulator for bone healing and collaborated with Dr. E.M.Downes, a clinical orthopedist. He contributed a paper on the electromagnetic treatment of fracture to the Japanese Journal of Applied Physics, when I was serving as the Editor-in-Chief. Since then I treasure the warm friendship with him.

In 1977, Prof.M.R.Urist invited Dr.Yasuda to submit his original work of 1953 to the Journal of Clinical Orthopedics and Related Research, the most authoritative journal on orthopedics in the U.S.A.[22]. I was pleased to help him. His pioneering work is now known worldwide. Papers we coauthored on the piezoelectric effects of bone and tendon also became popular and have been cited in a number of publications. Unfortunately there have been the misunderstandings. The J.Phys.Soc.Japan was changed to the J.Physiol.Soc.Japan. Some researchers believed the electrical growth of bone was first reported in these journals. Since Dr.Yasuda had not published his work in English, his work was unknown for many years. My English papers with Dr.Yasuda introduced his work on the electrical stimulation of bone to the fraternity outside Japan.

In 1980, an international society, "The Bioelectrical Repair and Growth Society" (BRAGS) was founded in Philadelphia. I was a founding member. 25 years after our discovery of the piezoelectric effect in bone, research on bone and electricity had developed to such an extent that an international society merited organization.

Dr.Yasuda and I decided to promote research in this field in Japan. In 1976, the Japanese Committee for Electrical Enhancement of Bone Healing held its first meeting at the Kyoto Second Red Cross Hospital, the home of Dr.Yasuda and the

second meeting at RIKEN. A number of enthusiastic orthopedists gathered at these meetings. The meeting developed a scientific society "Japanese Society for Bioelectrical Stimulation", which holds an annual meeting every year. The efforts of Prof.S.Inoue of Asahi University, Gifu as the Secretary General of the Society were significant to its development.

In 1984, the 4th BRAGS meeting was held in Kyoto. A special Symposium dedicated to Dr.Yasuda was held the day before the meeting. He died in 1983. At which time the Yasuda Award was established. This is given to the scientist who contributes the most original paper to the meeting.

It is now established that mechanical stress produces an electrical potential in bone. The origin may be mainly the streaming potential via fluid flow and partly the piezoelectric polarization of the collagen in moist living bones. It has been also established that an electric field ~ 1 mV/cm or an electric current ~ 10 $\mu A/cm^2$ stimulates activity in bone cells. The most important remaining question is how electric current affects the biologic activity of cells?

In Riken I was fortunate to work with biologists Dr.I.Kaneko and Dr.K.Takahashi. We examined the effect of a pulsing magnetic field on the proliferation of fibroblast cultures. We investigated the effect of the waveform of the applied electromagnetic field on the rate of growth of cells. Some of our conclusions are as follows: The optimum bandwidth of pulse is 25μsec. The optimum field strength for fibroblast proliferation is ~2 Gauss. A higher field causes a deceleration of growth rate. The variation of the frequency of pulse repetition from 1 to 100 Hz has little effect on the proliferation rate[23].

Numerous studies have been carried out on cultured cells to understand why an electric field affects bone. One possible explanation is that the electric field on the surface of a cell membrane changes the electrification of protein molecules, such as ion channel protein molecules, and the resultant change of molecular conformation alters the penetration of ions like Ca, thus affecting the succeeding biochemical reactions.

The electrical stimulation of bone healing is now focused on its molecular mechanisms. In 1994, BRAGS was changed to "The Society for the Physical Regulation in Biology and Medicine (SPRBM)".

9. Electret

Prof.Mototaro Eguchi prepared an electret consisting of carnauba wax and resin in 1925. Prof.M.Nishikawa, Prof.T.Nukiyama and Prof.Eguchi patented a transducer and a microphone with a wax electret in 1926. Two original Eguchi electrets are stored in the National Science Museum, Ueno, Tokyo. Dr. Toshiaki Takamatsu of

the RIKEN Institute measured the surface charge on them and found its magnitude has only decayed to ~ one seventh of its original value, 50 years after preparation![24)]

Mr.Inosuke Sumoto worked on wax electrets for many years with Prof.Nishikawa at RIKEN and left a large number of precious samples. Dr.Takamatsu initiated studies on electret of carnauba wax, which is produced in Brazil. He also worked on a number of polymers using a new technique called Thermally Stimulated Current Analysis (TSC). He published a large number of papers.

Besides electret, the most remarkable work of Dr.Takamatsu was the development of antithrombogenetic polymers for artificial blood vessels. He modified the surface of porous polytetrafluoroethylene via graft copolymerization. The coexistence of hydrophobic and hydrophilic surfaces effectively prevents thrombus formation in blood.

One day in 1973 I spoke with my wife about visiting Brazil in the future. Surprisingly, a week later I received a letter from Prof.S.Mascarenhas of the Institute of Physics and Chemistry at Sao Carlos, University of Sao Paulo. He was working on electret and the piezoelectricity of bone and invited me to be a Visiting Professor at his Institute. I stayed at Sao Carlos from April to September, 1974, and lectured on the piezoelectric properties of polymers. With the help of Prof.R.Zimmerman I set up an apparatus to measure dynamic piezoelectric constants.

Prof..Mascarenhas asked me were it possible to obtain a photograph of Prof. M.Eguchi. I wrote a letter to Prof.T.Eguchi of the Faculty of Engineering, Kyushu University, his son. He kindly sent me a photograph of his father and mother taken at their wedding. This photograph is now displayed on the wall of the Institute of Physics and Chemistry, Sao Carlos.

Whilst in San Carlos I discovered a correlation between the thermally stimulated current and the thermal change of piezoelectric constant for the horn keratin of cows [25)]. I also demonstrated that any polymer film may show a piezoelectric effect in a dc-biased electric field. I found the piezoelectric constant is proportional to the product of the dc field and the electrostriction constant of the polymer [26)].

Prof.B.Gross, famous for his studies on electret, has a home in Sao Carlos. During my stay in Sao Carlos, I met Dr.L.R.Duarte of the Department of Orthopedics, University of Sao Paulo at Riberon Preto. He healed a bone fracture by imposing ultrasonic vibration. The biologic activity of bone cell can be accelerated, not only by electrical but also mechanical stimulation [27)]. This concept confirms the piezoelectric effect in bone, i.e., mechanical stress and electrical polarization are always associated.

Later Prof.Mascarenhas visited Japan and stayed at RIKEN. He wished to establish a close relationship between scientific research in Brazil and Japan. In 1980, the first Brazil-Japan Symposium on Science and Technology was held at Rio de Janeiro, Sao Paulo, and Sao Carlos.

10. Studies on Piezoelectric Relaxation

Characteristic properties of polymers are relaxation and retardation. The mechanical properties of polymers must be represented by a complex elastic constant. In dynamic experiments, a phase lag exists between the applied stress and the resultant strain. The elastic constant represents the ratio of stress over strain and the phase angle between. Both are a function of frequency and temperature.

I wondered whether there was a phase difference between the applied stress and the piezoelectric polarization, i.e.; whether the piezoelectric constant of polymers is complex.

Dr.Date and I built an apparatus to measure dynamically the complex piezoelectric constant of polymer films. The first sample was a thin plate of wood cut aslant to the grain to show the shear piezelectric effect. The absolute value of the piezoelectric constant increased when the temperature was gradually increased from -150°C to 0°C. The phase of polarization lagged the applied stress. These results were anticipated. When the temperature increased above 0°C, however, the piezoelectric constant decreased and the phase of polarization led beyond the applied stress.

If the complex piezoelectric constant is defined as $d = d' - id''$, the phase angle δ is given by $\tan \delta = d''/d'$. When d increases with temperature or time, $\tan \delta$ is positive, when d decreases, $\tan \delta$ is negative. This was a new finding. This type of variation has never been observed in the elastic and dielectric constants.

In the case of wood, below 0°C, the dipolar deformation, which is proportional to the polarization, increases with time, the phase lagging the alternating applied stress. Above 0°C, the ionic conductivity due to water neutralizes the dipolar polarization and thus the observed polarization decreases with time. The phase angle leads the alternating applied stress. Time and temperature were found equivalent in piezoelectric relaxation phenomena[28].

Prof.G.Arlt of Technical University of Aachen visited my laboratory in 1968. I was studying films of cellulose diacetate and cellulose triacetate, which demonstrated two clear piezoelectric relaxations with temperature. He was a famous scientist in piezoelectric ceramics. He was impressed by our measurements of the complex piezoelectric constants and the observation of piezoelectric relaxation. His praise encouraged me and later, after my retirement, I visited his laboratory for two

months. I still remember the courteous hospitality he and his wife extended to me during the very cold winter of 1987.

Date and I found that films of poly-γ-glutamate exhibited a large piezoelectric effect and a characteristic retardation-relaxation phenomenon at the side chain relaxation temperature [29]. If temperature increased from -150°C to 150°C, the piezoelectric constant $d = -d_{14} = d_{25}$ increased until about 0°C and then decreased. Tan δ showed a positive peak below 0°C and a negative one above 0°C. Around 0°C, the elastic constant c decreased and the dielectric constant ε increased. The piezoelectric constant increased and decreased with increasing temperature. How can we explain this behavior?

Dr.Date developed a theory of piezoelectricity for a spherical dispersion system, where piezoelectric crystalline spheres are uniformly dispersed in a nonpiezoelectric amorphous medium[30] . This system is a model for semicrystalline piezoelectric polymers. He explained the increase of d as due to the decrease of c of the amorphous phase and the decrease of d due to the increase of ε of the crystalline phase.

With regard to this theory, I recall with gratitude the discussions with the late Prof.A.Ohkawa of Gakushuin University. He had been kind to me since the days I worked under his guidance on the growth of Rochelle salt crystals at the Kobayasi Institute in 1944. I visited him often during I worked as a Visiting Professor at Gakushuin University from 1961 to 1980.

Dr.Takeo Furukawa conducted thorough study of the piezoelectric properties of poly-γ-benzylglutamate, which showed piezoelectric behavior similar to poly-γ-methylglutamate. He introduced the concept of grain boundaries in a piezoelectric crystalline phase. Piezoelectric polarization is caused by the internal rotation of peptide dipoles in helical molecules and the mechanical relaxation is caused by the thermal motion of side chains. The elastic constants of helices and grain boundaries do not relax, but do so in the side chains surrounding helices in the crystallites. The local elastic field on helices, which induces piezoelectric polarization, increases and decreases with increasing temperature, mainly due to the elastic relaxation of side chains[31].

11. The Piezoelectricity of Biopolymers

I have explored the piezoelectric properties of a number of biopolymers with the cooperation of many young scientists. Mr.K. Hara detected the shear piezoelectric effect in elongated and dried samples of blood vessel walls, which consisted of collagen, elastin, and muscle. Dr.Hiroyoshi Ueda proved the piezoelectric effect for dried myosin, actin, as well as muscle. He also conducted an extensive work on the

piezoelectric effect in collagen. Dr.Yutaka Ando found remarkable piezoelectric relaxation in oriented deoxyribonucleate films below 0°C. He also found the sign of the piezoelectric constant changes with water content. Hydrated water changes the helical structure of molecules and thus significantly affects piezoelectric effects in DNA.

Dr.Sintaro Sasaki demonstrated the sign reversal of piezoelectric constant with temperature for oriented films of cellulose triacetate. Dr.Katsuyoshi Nishinari also showed the same for oriented films of amylose. He pointed out that the piezoelectric relaxation around -100°C is due to the rotation of methylol groups. Dr.Hidemaro Maeda studied extensively the effects of hydration on the piezoelectric effect in collagen and cellulose.

Our investigations concluded that piezoelectricity is a universal property for polysaccharides, proteins, and deoxyribonucleic acids, three typical types of biopolymer.

12. Piezoelectricity in Optically Active Polymers

Shear piezoelectricity in biological polymers originates from the structure of atomic groups of asymmetric carbon atoms and polar groups such as CONH bonds as well as uniaxial orientation of the polymer molecules. Asymmetric atomic groups give rise to optical rotation. The structural symmetry of optically active substances is closely related to that of piezoelectric substances.

In 1969, Prof.Teiji Tsuruta of the University of Tokyo kindly gave me oriented films of optically-active polypropylene oxide (PPO) $[-O-CH(CH_3)-CH_2-]_n$. Dr.Furukawa observed a clear piezoelectric relaxation around the glass transition temperature Tg = -60°C., and obtained d_{14} = -0.1 pC/N at -100°C [32].

In 1984, ICI in England kindly provided me with oriented films of poly-β-hydroxybutylate (PHB) $[-O-CH(CH_3)-CH_2-CO-]_n$. Dr.Ando made an extensive study of piezoelectric relaxation therein around Tg = 20°C and found d_{14} = -1.3 pC/N at 0°C [33]. He also studied the piezoelectric properties of copolymers of hydroxybutyrate and hydroxyvalerate [34].

In 1991, Dr.Yasuo Shikinami of Takiron Co. kindly gave me elongated films of Poly-L-lactic acid (PLLA) $[-O-CH(CH_3)-CO-]_n$. I found a piezoelectric relaxation around Tg = 85°C and obtained d_{14} = -10 pC/N at room temperature. Using spherical dispersion theory, the piezoelectric constants for crystalline regions of PLLA were constant and independent of temperature around the glass temperature range [35].

The correlation between the chemical structure and the magnitude of piezoelectric constant is significant in these three polymers.. It is obvious the molecular structure

piezoelectric effect in collagen. Dr.Yutaka Ando found remarkable piezoelectric relaxation in oriented deoxyribonucleate films below 0°C. He also found the sign of the piezoelectric constant changes with water content. Hydrated water changes the helical structure of molecules and thus significantly affects piezoelectric effects in DNA.

Dr.Sintaro Sasaki demonstrated the sign reversal of piezoelectric constant with temperature for oriented films of cellulose triacetate. Dr.Katsuyoshi Nishinari also showed the same for oriented films of amylose. He pointed out that the piezoelectric relaxation around -100°C is due to the rotation of methylol groups. Dr.Hidemaro Maeda studied extensively the effects of hydration on the piezoelectric effect in collagen and cellulose.

Our investigations concluded that piezoelectricity is a universal property for polysaccharides, proteins, and deoxyribonucleic acids, three typical types of biopolymer.

12. Piezoelectricity in Optically Active Polymers

Shear piezoelectricity in biological polymers originates from the structure of atomic groups of asymmetric carbon atoms and polar groups such as CONH bonds as well as uniaxial orientation of the polymer molecules. Asymmetric atomic groups give rise to optical rotation. The structural symmetry of optically active substances is closely related to that of piezoelectric substances.

In 1969, Prof.Teiji Tsuruta of the University of Tokyo kindly gave me oriented films of optically-active polypropylene oxide (PPO) $[-O-CH(CH_3)-CH_2-]_n$. Dr.Furukawa observed a clear piezoelectric relaxation around the glass transition temperature Tg = -60°C., and obtained d_{14} = -0.1 pC/N at -100°C [32].

In 1984, ICI in England kindly provided me with oriented films of poly-β-hydroxybutylate (PHB) $[-O-CH(CH_3)-CH_2-CO-]_n$. Dr.Ando made an extensive study of piezoelectric relaxation therein around Tg = 20°C and found d_{14} = -1.3 pC/N at 0°C [33]. He also studied the piezoelectric properties of copolymers of hydroxybutyrate and hydroxyvalerate [34].

In 1991, Dr.Yasuo Shikinami of Takiron Co. kindly gave me elongated films of Poly-L-lactic acid (PLLA) $[-O-CH(CH_3)-CO-]_n$. I found a piezoelectric relaxation around Tg = 85°C and obtained d_{14} = -10 pC/N at room temperature. Using spherical dispersion theory, the piezoelectric constants for crystalline regions of PLLA were constant and independent of temperature around the glass temperature range [35].

The correlation between the chemical structure and the magnitude of piezoelectric constant is significant in these three polymers.. It is obvious the molecular structure

of PLLA is the most effective for piezoelectric activity. The magnitude of the shear piezoelectric constant for PLLA is the highest ever observed for polymers.

In 1995, Prof. Junzo Kobayashi of the Waseda University discovered the optical rotatory power of PLLA amounts 9000 degree/mm in the direction of helical molecular axis. This is two orders higher than those of ordinary inorganic crystals [53].

13. Piezoelectricity in Poled Polymers

Piezoelectricity is caused in biopolymers and synthetic polypeptides by the internal strain of polar atomic groups around an asymmetric carbon atom. The latter is optically active, being located in the polymer molecules. Uniaxial orientation only is required to generate shear piezoelectricity in such polymers.

Piezoelectric ceramics show a large tensile piezoelectric effect when poled, i.e. after being subjected to a high dc electric field. Can polar polymers with no asymmetric carbon atoms be rendered piezoelectric by poling ?

After persistent experiments, Dr.Heiji Kawai of the Kobayasi Institute of Physical Research discovered the large piezoelectric effect in polyvinylidene fluoride (PVDF) and several other polymers in 1969 [36].

Dr.Kawai elongated and poled films of various kinds of polymer and tested their piezoelectric effect in the tensile mode. Polar polymers such as PVDF, polyvinyl chloride, polyvinyl fluoride, and nylon-11 exhibited a piezoelectric effect that did not decay with time. Nonpolar polymers such as polyethylene, polypropylene, and polytetrafluoroethylene showed little effect, which quickly decayed with time. The highest piezoelectric constant he obtained was $d_{31} = 5$ pC/N for PVDF. This was the dawn of world-wide research on ferroelectric polymers [37].

Inspired by these findings I carried out extensive work on PVDF with the help of my colleagues. Dr.Oshiki studied inverse piezoelectricity and electrostriction in PVDF. Dr.Date determined the orientation of CH_2 dipoles under an applied electric field by observing the infrared dichloic ratio. Dr.Furukawa observed the electric displacement - electric field hysteresis between -100°C and 50°C. This strongly suggested the ferroelectric property of PVDF.

In 1979, it was reported that the dielectric constant and the piezoelectric constant for copolymers of trifluoroethylene and vinylidenefluoride showed a peak against temperature [38]. The Curie-Weiss law predicted the relationship between reciprocal permittivity and temperature [39]. This was the first report of a Curie temperature for ferroelectric polymers.

Prof.Yasaku Wada of the University of Tokyo made a significant contribution to understanding the mechanisms of piezoelectricity in polymers. He considered the

characteristic features of semicrystalline polymers, i.e.; crystalline lamellae and noncrystalline regions and good insulating capacity. The residual polarization after poling can be generated by the separation and trapping of space charge as well as dipolar orientation of molecules. He showed that, when a poled polymer film is elongated lengthwise, the thickness change causes the variation of charge on surface electrodes. The latter is induced by residual polarization in the polymer[40].

Prof.Y.Wada and Prof.R.Hayakawa of the University of Tokyo developed a general theory for the piezoelectric effects of poled polymers based on the spherical dispersion model. In addition to the intrinsic piezoelectricity in crystalline regions, a term proportional to the residual polarization in crystalline regions was introduced, which involved the Poisson's ratio and the electrostriction constant[41].

Prof.A.Odajima of Hokkaido University determined the piezoelectric constant of crystals of PVDF by x-ray measurements of the change of lattice spacing induced on applying an electric field. He reported that the piezoelectric constant for a PVDF crystal, d_{31c} , is negligibly small while the piezoelectric constant, d_{31} , for an elongated and poled film of PVDF is 20 pC/N. He also reported that the piezoelectric constant for a crystal d_{33c} = -20 pC/N.

Prof.Hiroyuki Tadokoro and Dr.Koji Tashiro of Osaka University were the first to succeed in theoretically calculating the piezoelectric constants for a crystal of PVDF [42]. They obtained d_{31c} = -0.25 pC/N and d_{33c} = -25 pC/N for a crystal of PVDF. Agreement with the experimental data of Odajima was remarkable. Using the Wada-Hayakawa equation, they calculated the piezoelectric constants for an elongated and poled film of PVDF as d_{31}= 6 pC/N and d_{33} = -14 pC/N, in good agreement with observed values.

Dr.Furukawa conducted a detailed investigation of the phase transition in crystals of TrFE/VDF copolymers and demonstrated the ferroelectric properties of PVDF and its copolymers. He derived a rigorous theory for the piezoelectric constants of polymer films and concluded that e_{31} = 0 and e_{33} = -Pr, where, for example, e_{31} is the rigorously-defined piezoelectric-stress-constant for strains in the 2 and 3 axes fixed at zero and Pr the residual polarization, respectively[43]. Assuming a rigid dipole model, Furukawa also derived the relations, $e_{31a} = \nu_{31}Pr$ and e_{33a} = -Pr, where e_{31a} and e_{33a} are the apparently observed values of respective piezoelectric constant and ν_{31} is the Poisson's ratio[44].

Prof.Hiroji Ohigashi of Yamagata University conducted thorough studies on the piezoelectric thickness-resonance of PVDF and its copolymers at ultrasonic frequencies. He showed that the value of e_{33} = -13 pC/N is almost constant between -170°C and 80°C, whereas the value of e_{31} increases with increasing temperature around the glass temperature of about -50°C [45].

Dr.H.Sussner and Prof.K.Dransfeld first suggested that the increase of the piezoelectric constant around the glass transition temperature is caused by an increase of Poisson's ratio [46].

In 1984, Prof.Seizo Miyata and Dr.S.Tasaka of Tokyo University of Agriculture and Technology and Dr.Iwao Seo of Mitsubishi Chemistry Co. discovered the large piezoelectric effect in poled films of copolymers of vinylidene cyanide and vinylacetate, which are completely amorphous. Glass-like ferroelectricity was first found in noncrystalline polymers [47].

In 1995, the special issue of Ferroelectrics is to be published in commemoration of the 25th anniversary of Prof.Kawai's paper on the discovery of piezoelectricity in PVDF.

14. Piezoelectricity in Polymers Prepared by Vapor Deposition Polymerization

In 1987, after my retirement from RIKEN and my stay in Germany, I was invited by Dr.Chikara Hayashi, President of ULVAC Japan Ltd, to join the Tsukuba Institute for Super Materials as a Research Advisor. The Institute is located close to the Tsukuba Research Consortium.

I was impressed by the pioneering work of Dr.Yoshikazu Takahashi and Dr.Masayuki Iijima on the vapor-deposition-polymerization of thin films of polyimides. I suggested they synthesize thin films of polar polymers with functional activities and worked with them thereon. We discovered that thin films of aromatic polyurea can be synthesized by concurrently evaporating aromatic diamine and aromatic diisocyanate monomers and that, after poling, these films exhibit large pyroelectric and piezoelectric effects [48,49].

Monomers deposited on a substrate react with each other at room temperature and form oligomers with urea bonds. When the deposited film is heated in an electric field, the oligomers polymerize and simultaneousy urea bond dipoles align. The final poled films of aromatic polyurea possess pyroelectric and piezoelectric activity stable to 200°C. The thickness of the films can be varied from ~ 0.3 to 10 μm. Dielectric hysteresis was also observed, showing the ferroelectric characteristics of polyurea.

The preparation of thin films of polyurea has been impossible so far because of the lack of solvents. Vapor-deposition-polymerization is the only way to prepare poled, thin films of polyurea. Various industrial applications are anticipated for thin films of polyurea, polyimide and other polymers synthesized by vapor- deposition polymerization.

In past studies of polymers, I used to obtain the polymer samples from industrial chemists. Synthesis was out of the question for a physicist. However, I am now in a fortunate situation that synthesis and physical characterization can be carried out in

the same laboratory. My dream is that the technique of vapor deposition polymerization will be applicable to the synthesis of a variety of functional polymers.

15. Life After Retirement

In 1980, just before I retired from RIKEN, I was appointed as Executive Director for Life Sciences at RIKEN. The construction of the Tsukuba Research Center for Life Sciences with focus on recombinant DNA biotechnology was my mission. Since the Center included a high biosecurity laboratory (rank P4) there was strong opposition from the local inhabitants. As a result I had to struggle with many political problems entirely different from scientific research.

My four years as Executive Director of RIKEN gained me much experiences as a man-in-society but little as a scientist. I would like to thank many people in the administration department of RIKEN, who gave me tremendous help during my tenure thereat. I am also very grateful to the many scientists of the national laboratories in Tsukuba, who supported my promotion of the Research Center of RIKEN.

I retired from RIKEN in 1984. In 1986, I was lucky enough to be invited as a Visiting Professor by Prof.G.M.Sessler of the Technical University of Darmstadt, Germany. He was well known for research on polymer electrets. I was happy to once again be making measurements myself in a laboratory and giving seminars on polymer piezoelectricity. I studied the bending piezoelectricity of monomorph films of PVDF, poled by electron irradiation[50].

After my stay with Prof.Sessler, Prof.K.Dransfeld of the University of Konstanz invited me as a Visiting Professor. I was pleased to be able to work with the late Dr.G.von Eynatten on the inverse piezoelectric vibration of copolymers of VDF and TrFE using the Mössbauer effect[51]. After Konstanz, I went as a Visiting Professor to the Technical University of Aachen at the invitation of Prof. G.Arlt. The study of a nonlinear piezoelectricity in PVDF was initiated in his laboratory.

My stay in Germany with these three distinguished Professors was an unforgettable experience. I had the opportunity to work in the academic atmosphere of Germany, a country where original scientific research is greatly valued. My family and I enjoyed life in the kind hospitality of the German people.

In 1988, Prof.D.Liepsch of Eisenhower Medical Center, Palm Springs, U.S.A gave me a sudden invitation. I worked there for three months with Prof.G.V.F.Seaman of Oregon Medical University on the viscoelasticity of polystyrene latex with an aim of rheologically modeling blood[52].

Since 1993, I have worked occasionally in the Ceramic Engineering Laboratory of McMaster University, Hamilton, Canada at the kind invitation of Prof.

P.S.Nicholson. I work there with Dr.N.D.Patel on ultrasonic velocity measurements in latex.

In 1992, Prof.J.Igarashi, President of the Kobayasi Institute of Physical Research kindly invited me to be an Executive Director and a Chief Research Member of the Kobayasi Institute and also a Consultant to the Rion Co. I was very happy to be able to come back to the Institute where I started my research career.

In this article I have described the various fields of research I have explored in the past. It appears diverse. A fortune cookie in a Chinese restaurant once told me that you had better consolidate your work. I partly agree with it and regret that I did not get involved in the elaborate theoretical work necessary to interpret my experimental findings.

I started work with an experimental method involving vibration to measure the dynamic viscoelasticity of solids and liquids. As a physicist working at a basic research institute, I could proceed with any promising subject of interest. I was fortunate to meet many excellent scientists in my life. They were an important influence on the direction of my research. For example, Prof.Kawai for polymer piezoelectricity, Prof.Oka for biorheology and Prof.Yasuda for electrical problems in bone.

Recollecting my research life, I feel I have been an extremely lucky man.I was fortunate to receive many invitations to laboratories at home and abroad. I have been able to perform research in several fields still developing. I have had good teachers, good friends, good students, and good colleagues. I wish to express my sincere gratitude to all of them. I have tried to include as many of their names as possible in this short article. However, many may still be unlisted. I apologize for this and thank them no less sincerely. I am also most grateful to my wife Tomoko for her generous help which made all these activities possible.

I am indebted to Prof. P.S.Nicholson and Prof. L.F.Brown for their kind review of English in this article. Finally I wish to acknowledge the generous invitation of the Editorial Board to write this review of my research.

References

1) E.Fukada, Nature 166, 772 (1950)
2) E.Fukada, H.Yasuda, J.Kohara and H.Okamoto, Oyobuturi 26, 25 (1957)
3) E.Fukada, J.Phys.Soc.Japan 10, 149 (1955)
4) V.A.Bazhenov, "Piezoelectric Properties of Wood" Consultant Bureau (1961)
5) E.Fukada, Wood Sci.Tech. 2, 299 (1968)
6) E.Fukada and I.Yasuda, J.Phys.Soc.Japan 12, 1158 (1957)
7) E.Fukada and I.Yasuda, Jpn.J.Appl.Phys. 3, 117 (1964)

8) W.S.Williams and L.Bregar, Ann.New York Acad.Sci. 238, 121 (1974)
9) S.B.Lang, Nature 224, 798 (1969)
10) H.Athenstaedt, Nature 228, 830 (1970)
11) A.Charlesby and E.Fukada, "Rheology of Elastomers" Pergamon Press, p.150 (1958)
12) E.Fukada, R.W.B.Stephens and A.Charlesby, J.Phys.Chem.Solids 16, 53 (1960)
13) E.Fukada and J.F.Fowler, Nature 181, 693 (1958)
14) T.Sone, M.Fukushima and E.Fukada, J.Phys.Soc.Japan. 15, 1708 (1960)
15) E.Fukada and M.Masuzawa, J.Am.Oil Chem.Soc. 43, 657 (1966)
16) E.Fukada and M.Date, Jpn.J.Appl.Phys. 1, 59 (1962)
17) H.Kawai, E.Fukada, T.Ibe and H.Shono, Proc.4th Intern.Congr.Rheology. p.281 (1963)
18) M.Kaibara and E.Fukada, Biorheology 6, 73 (1969)
19) E.Fukada, T.Takamatsu and I.Yasuda, Jpn.J.Appl.Phys. 14, 2079 (1975)
20) E.Fukada, "Mechanisms of Growth Control" R.O.Becker(Ed) Charles C.Thomas, p.192 (1981)
21) J.C.Anderson and C.Eriksson, Nature 227, 491 (1970)
22) I.Yasuda, Clin.Orthop.Rel.Res. No 124, 53 (1977)
23) K.Takahashi, I.Kaneko, M.Date and E.Fukada, Experimentia 42, 185 (1986)
24) T.Takamatsu and I.Sumoto, Bull.Inst.Phys.Chem.Res. 45, 141 (1969)
25) E.Fukada, R.L.Zimmerman and S.Mascarenhas, Biochim.Biophys.Res.Comm. 62, 415 (1975)
26) R.L.Zimmerman, C.Suchicital and E.Fukada, J.Appl.Polym.Sci.19, 1373 (1975)
27) L.R.Duarte, Arch.Orthop.Trauma Surg. 101, 153 (1983)
28) E.Fukada, M.Date and N.Hirai, J.Polym.Sci. C 23, 509 (1968)
29) M.Date,S.Takashita and E.Fukada, J.Polym.Sci.A2, 8, 61 (1970)
30) M.Date, Polymer J. 8, 60 (1976)
31) T.Furukawa and E.Fukada, J.Polym.Sci.Phys.Ed. 14, 1979 (1976)
32) T.Furukawa and E.Fukada, Nature 221, 1235 (1969)
33) Y.Ando and E.Fukada, J.Polym.Sci.Polym.Phys. 22, 1821 (1984)
34) E.Fukada and Y.Ando, Intern.J.Biol.Macrom. 8, 361 (1986)
35) E.Fukada, Rep.Prog.Polym.Phys.Jpn. 34, 269 (1991)
36) H.Kawai, Jpn.J.Appl.Phys. 8, 975 (1969)
37) E.Fukada, Phase Transitions 18, 135 (1989)
38) T.Yagi, M.Tatemoto and J.Sako, Polymer J. 12, 209 (1980)
39) Y.Tajitsu, A.Chiba, T.Furukawa, M.Date and E.Fukada, Appl.Phys.Lett. 36, 286 (1980)
40) Y.Wada,"Electronic Properties of Polymers" J.Mort and G.Pfister Ed, John

Wiley & Sons Inc. p.109 (1982)
41) R.Hayakawa and Y.Wada, Adv.Polym.Sci. 11, 1 (1973)
42) K.Tashiro, M.Kobayashi, H.Tadokoro and E.Fukada, Macromolecules 13, 691 (1980)
43) T.Furukawa, J.X.Wen, K.Suzuki, Y.Takashina and M.Date, J.Appl.Phys. 56, 829 (1984)
44) T.Furukawa and J.X.Wen, Jpn.J Appl.Phys. 23, L677 (1984)
45) H.Ohigashi, J.Appl.Phys. 47, 949 (1976)
46) H.Sussner, Phys.Lett. 58A, 426 (1976)
47) S.Miyata, S.Yoshikawa, S.Tasaka and M.Ko, Polymer J. 12, 857 (1980)
48) Y.Takahashi, M.Iijima and E.Fukada, Jpn.J.Appl.Phys. 28, L224 (1989)
49) Y.Takahashi, S.Ukishima, M.Iijima and E.Fukada, J.Appl.Phys. 70, 6983(1991)
50) E.Fukada, G.M.Sessler, J.E.West, A.Berraissoul and P.Günther, J.Appl.Phys. 2, 3643 (1987)
51) G.von Eynatten, E.Fukada and K.Dransfeld, Hyperfine Interactions 42, 457 (1989)
52) E.Fukada, G.V.F.Seaman, D.Liepsch, M.Lee and L.Friis-Baastad, Biorheology 26, 401 (1989)
53) J.Kobayashi,, T.Asahi, M.Ichiki, A.Oikawa, H.Suzuki, T.Watanabe, E.Fukada, and Y.Shikinami, J. Appl. Phys. 77, 2957 (1995)

まとめ

自分史というのは、自分の私事を含めて過去の生活を記録するものである。この研究生活 70 年史は、科学研究を一生の仕事として生きた一人の人間の研究の記録を述べることを主眼とした。人生の終わりを前にして、自分の研究生活を振り返ると、大変な幸運に恵まれたと思う。研究は一人ではできない。多くの先生、同僚と後輩に恵まれたおかげで、研究生活を過ごすことが出来た。すべての方々に深く感謝したい。

1922 年に東京で生まれたので、翌年の東京大震災で住居は全焼した。1943 年、大阪と東京にあった父親の家は空襲で全焼し、父親は全財産を失った。1944 年に、私が小林理学研究所に入ったときには、国分寺の農家の二階にある蚕室を改造した部屋に、家族で住んでいた。研究所の所長の佐藤先生の計らいで、リオン株式会社の社宅に入れていただいたのは、大変ありがたかった。

1952 年に友人の紹介で、白井具子と結婚した。優しい子煩悩な女性であった。体が弱かったので、1996 年にこの世を去った。和歌が趣味で、歌集が残っている。『窓広き家』。

http://fukadae.g2.xrea.com/mado.html

1954 年に長女洋子が生まれた。学習院大学の化学科を卒業した。一度結婚したが、離婚してカナダにわたり、McMaster 大学工学部で PhD を得た。カナダ人と結婚し、今はトロント日本語学校の校長を務めている。孫の大樹が障害児だったため、養育に大変な苦労をしたが、現在はカナダの高度な厚生福祉制度の恩恵にあずかり深く感謝している。

研究者は研究が生き甲斐なので、その評価は大変気になるものである。幸いに、いくつかの学会から賞をいただくことが出来た。特に老年に近づいてから、思いがけない評価をいただいた。研究者として非常な幸運に恵まれたと思う。

2005 年のある日、日本物理学会の会長を勤められた東京大学物理の鹿児島誠一先生が、小林理研を訪問された。骨の圧電気に関する、1957 年の Fukada Yasuda の論文の被引用回数が Web of Science (Thomson Scientific) で記録的に長いことに気が付かれたという。鹿児島先生は、物理学会誌の談話室に、「こんな論文をご存知ですか？―日本人が発見した骨の圧電効果」という記事を投稿された。「日本物理学会誌 61」p.49-50, 2006。また「Journal of Physical Society of Japan」の Highlights にこの論文を収録していただいた。

http://journals.jps.jp/doi/pdf/10.1143/JPSJ.12.1158

その後、Google Scholar Citations で調べると、2015 年末で被引用回数は 1100 を超えた。他の論文は、多くても 200 程度なので、この論文が非常に注目されたことが分かり大変喜んでいる。酒豪の保田先生も祝杯を挙げられるであろう。

2015 年の 2 月に、IEEE History の Web に Prof. Lang との会話が掲載された。IEEE はアメリカの最大の電気関係の学会であり、その Transaction には圧電気に関する Review 論文を何度か発表したことがある。Lang 先生のお世話で、私の研究の歴史を IEEE の memory に残していただけたのは、最高の名誉であった。

過去に Memory を残された日本人は電気学会に関係した方が多い。圧電気に関しては、古典的著書で著名な Prof. Cady やセラミック圧電体の大御所である Pennsylvania State University の Prof. Cross の名前が見られる。またバイオレオロジーの分野では、University of California, San Diego の Prof.Fung の名前が見られた。私には過分の名誉である。

http://ethw.org/Oral-History:Eiichi_Fukada

http://www.ieee-uffc.org/main/history.asp

2005 年の暮れに、埼玉県新座市の老人ホーム、めいと新座志木に入居した。小林理研には JR 新座駅から 1 時間足らずで通えるし、東京の都心へは、東上線の志木駅から 1 時間以内に行ける便利な場所である。自宅をオフイスにして、パソコンに向かう生活が、もう 10 年も続いた。写真を撮るのが好きで、インターネットのホームページに写真アルバムを作ることを覚えた。いささか恥ずかしいが、将来の記録に残すことにした。

http://fukadae.g2.xrea.com/

まだお会いしたことがない二人の研究者が、私に献呈する論文を書いていただいたことは、嬉しく名誉なことであった。ポーランドの科学アカデミーの Prof. M. Kryszewski は生体物質の圧電気研究 50 年と題して、私達のグループの研究を紹介された。Acta Physica Polonica 105, 389 (2004). また . スイスのベルン大学の Prof. J. Hulliiger は極性を持つコラーゲンの分子が、Markov 過程で同じ方向に配向すると述べられた。Chem. EUR. J, 8, 4579 (2008).

振り返ってみると、1950 年代のセルロースとコラーゲンの圧電気の発見あるいは確証の研究が、私の研究生活の原点であったと思われる。生体高分子の新しい性質に興味を持ち、多糖類、タンパク質、核酸のすべてに共通して存在する物性であることを実験で確かめた。多くの若い共同研究者の情熱があったと思う。1969 年、河合平司先生が、合成高分子の PVDF などの圧電気を発見された。これを契機にして、高分子の圧電性、焦電性、強誘電性の研究が世界中に広がり、応用としても、音響機器をはじめとしてセンサー、トランスデューサーなど多くの工業的発展につながった。生体高分子の延長としては光学活性の大きい合成高分子であるポリ乳酸の圧電気が、スマートホンや圧電ファブリックに応用されるようになったことは、大変嬉しいことである。

生体高分子の圧電性は、工業的応用ではなく、生物学的立場での研究がこれから発展すると期待される。骨の圧電現象は 1953 年保田岩夫先生が発見され、その後私との共同研究によって、海外で特に整形外科の分野で有名になった。保田先生が始められた力学的仮骨と電気的仮骨は正に画期的であった。その後の研究によって、骨折の早期治療の目的で、種々の電気刺激や超音波刺激の装置が実用化された。

骨に応力を加えると電気分極が発生するが、その原因の重要な一つはコラーゲン繊維の圧電気であると考えられている。骨の他の重要な成分であるヒドロキシアパタイトも単結晶化すると圧電性を示すことが最近見出された。圧電性ポリ乳酸や PVDF を動物の骨に埋め込むと仮骨が形成される。また骨の生長する方向とコラーゲンの極性方向とが一致するという研究もある。整形外科の分野で古くから知られている Wolff の法則は、“ 骨は外力を最もよく支えられるような形に生長する ” と述べている。

骨の生長が外から加える応力や電界の影響を受けることは間違いがない。コラーゲンが圧電性によって、応力と電気の変換作用をすることも知られている。最近骨細胞の増殖に対する電場や応力の影響についての研究も盛んになった。骨の生長の分子的機構の解明が求められている。

無重力空間に滞在した宇宙飛行士の骨や筋肉が減少することはよく知られている。逆にリハビリの運動で骨や筋肉が増加することも知られている。この理由の解明は重要である。生体高分子の圧電性が骨の生長に対する生理学的解明につながるのかどうか、夢は尽きない。

本書の編集にあたられた悠々社の山崎修氏に厚く感謝する。

研究生活 70 年史
My Research Life 70 Years

深田栄一
Eiichi Fukada

2018 年 2 月 28 日　初版第 1 刷発行
著　者　深田栄一
発行者　深田栄一
©2018, Eiichi Fukada