

ユポに圧電性付与、ギターのコントラクトセンサーに 従来拾えなかった振動をカバーし自然な生音再現

(株)ユポ・コーポレーション / (一財)小林理学研究所 / ヤマハ(株)

弦の振動などをピエゾ素子によって電気信号に変換し、アンプで増幅してスピーカーから音を鳴らすエレクトリック・アコースティックギターは、セラミック製のピエゾ素子の特性から、生音とは異なる独特の音色となって再現されるのが一般的。ヤマハ(株)は、今年5月、自然な生音に近い表現が可能な新開発エレクトリック・アコースティックギター「FG/FS Red Labelシリーズ」の販売を開始した。キーマテリアルとなったのが、圧電特性を付与した合成紙「ユポ」で、これをピエゾ素子に用いたコントラクトセンサーの搭載により、従来はキャッチできなかった周波数帯域の振動を捉えることが可能となった。圧電特性発現のためユポの製法から最適化を図った(株)ユポ・コーポレーション、圧電分野の専門家の立場から高精度測定・解析技術などを提供した(一財)小林理学研究所、ギター用センサーとして実用化し従来にはない音色を実現したヤマハ(株)の3社による取り組みを取材した。(📷的場大祐)

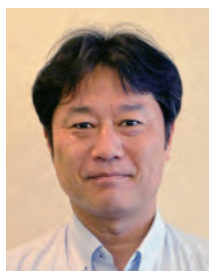
る専門研究機関である小林理学研究所との出会いまでは、開発を本格化するには至りませんでした」。

小林理学研究所は、1940年に設立され、当初は物理学の基礎および応用研究を主要な研究テーマとしていたが、太平洋戦争終結後は研究の軸足を音響学へとシフト。その一方で、同研究所の深田栄一博士がセルロースなどの生体高分子の圧電性に関する先駆的な研究に取り組んでおり、69年には、河合平司博士が、世界に先駆けてPVDF（ポリフッ化ビニリデン）の圧電性を発見するなど、圧電ポリマーの基礎物性や応用デバイス研究でも実績をあげている。また、最近では、古川猛夫博士（元東京理科大学理学部教授）を特別研究員として招聘した。同研究所 圧電デバイス研究室 主任研究員の児玉秀和氏は「日本における圧電研究の草分け的な役割を担った歴史があり、現在も世界先端レベルの研究スタッフと設備を保有しています」と述べる。

児玉氏によると、2000年前後から、フィンランドやドイツなどの海外の研究グループを中心に、PPの多孔質体に高電圧を印加すると優れた圧電材料になり得るとの報告が活発に行われるようになったという。児玉氏もこうした分野への関心を高めている中で、

■当初は課題が山積みも高性能化に到達

ユポは、PP（ポリプロピレン）と無機充填剤、少量の添加剤を原料とする合成紙で、ベースとなる基層と、基層の両側に積層された表層の3層構成で延伸して成膜される。基層は縦および横方向に延伸配向されているのに対し、表層は横方向にのみ延伸配向されており、この縦横延伸の過程で、内部に微細孔（マイクロポイド）の形成が起きる。この微細孔の作用によって印刷性や筆記性といった特性が生じ、また、微細孔で光が乱反射するため白色度が高く不透明な外観が得られている。厚みは60～500 μmまで幅広く調整可能。

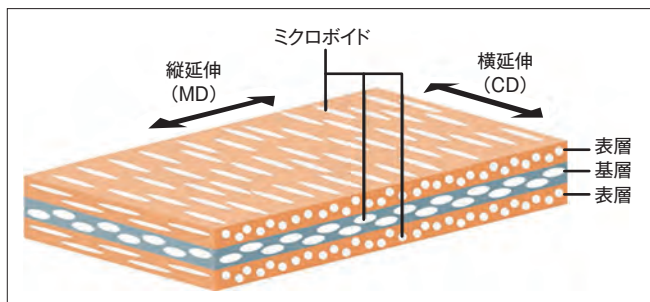


ユポ・コーポレーション
商品開発本部の
飯田誠一郎氏

「ユポは約50年の歴史があり、ラベルをはじめとする印刷用基材として国内外の市場で普及しています。一方、さらなる市場開拓を目指し、多孔性の高性能フィルムとしての活用の幅を広げるための研究開発にも力を入れています」とユポ・コーポレーション 商品開発本部 市場開発部長の飯田誠一郎氏。同社では、15年以上前に、圧力を加えた際に生じるひずみに応じて電圧が発生する圧電特性をユポに付与した「圧電性ユポ」の可能性に着目していた。「しかしながら、当社は圧電分野に関する知見を十分に持っておらず、圧電ポリマーに関する



小林理学研究所の
児玉秀和氏



ユポの基本構造

07年に同研究所にユポが持ち込まれ、ユポ・コーポレーションと小林理学研究所との共同研究開発が開始された。

「当時、市販の各種ユポ製品に圧電性を付与する実験を行ったのですが、海外の先行研究の成果に比べ非常に低い圧電性しか発現せず、また、すぐに機能低下が見られるなど、課題は山積みでした。そこで、ユポの断面の電子顕微鏡写真を撮影してもらい、これを元に微細孔のサイズや形状の問題点を指摘したところ、わずか数カ月後には改良したサンプルが完成しました。ユポ・コーポレーションの卓越した加工技術と、開発スピードの速さに大変驚いたことを鮮明に覚えています」と児玉氏は振り返る。「現在まで、国内外においてさまざまなPPの多孔質体が圧電材料としての応用を検討されてきたはずですが、結果として、ユポほどの高性能化を達成した材料は他にないように思います」。

■微細孔の最適化に成膜・加工ノウハウ結集

圧電性ユポとは、具体的にどのようなものなのか。

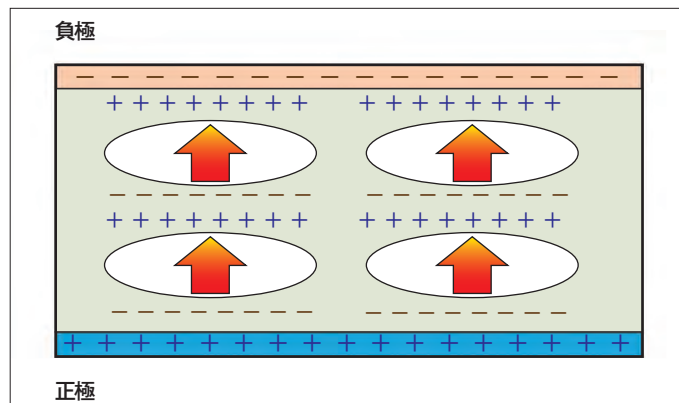
「ポリマーの多くは、電圧を加えると電荷を貯蔵する性質を持った誘電体です。代表的な圧電ポリマーのPVDFは、一对のプラス電荷とマイナス電荷から成る電気双極子が高電場により配向して分極を生じ、電場を除いた後もこの分極が保持され圧電性を発現します。PPにこのような性質はありませんが、ユポのようなPPの多孔質フィルムにコロナ放電を照射すると、電荷が注入され、半永久的に電荷が保持されるエレクトレットとなり、同時に微細孔の1つひとつに分極が形成されます。フィルムの厚み方向に収縮が起きた際には、個々の微細孔の分極量が変化して電極に誘起された電荷量が変化しま

す。つまり、圧電特性が発現します」と児玉氏は説明する。

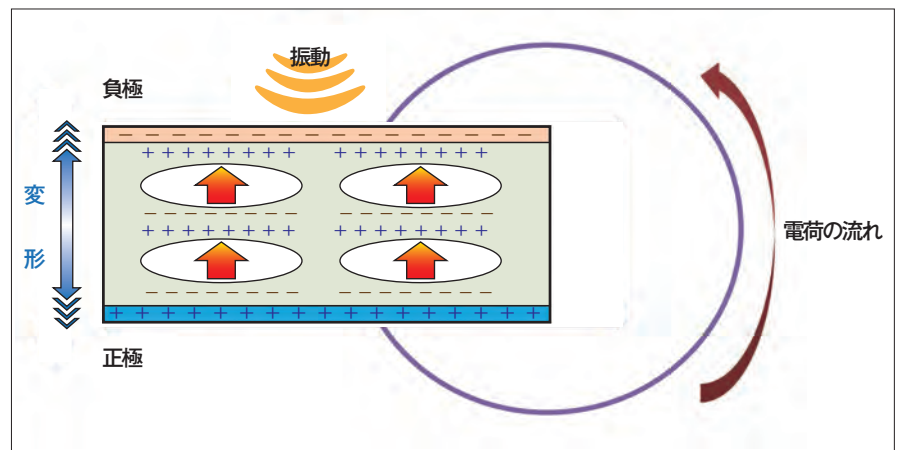
「ユポにおいて、圧電特性の発現にかかわっているのは基層の微細孔です。まず、無数の微細孔のサイズ・形状を圧電特性の発現に最適化する必要があります。また、時間が経っても、このサイズ・形状を維持することも非常に重要となります。開発の初期では、流動性が極めて高い超臨界二酸化炭素をPPフィルム内部に行き渡らせ、次いで減圧することで二酸化炭素を膨張させて微細孔を形成するという手法も検討しましたが、これは、時間の経過と共に二酸化炭素が抜けて孔が潰れてしまいやすいことが課題にな

りました。潰れてしまえば、圧電特性が減衰してしまいます。圧電特性を活かしたセンサー等の用途で実用にするには、微細孔のサイズ・形状が最適で、どの孔も均一であり、さらに経時変化が非常に少ないことが求められるのですが、基本的に安定性が高いとは言えないポリマー材料でこれらを実現するのは容易ではありません。圧電性ユポは、共同研究開発の結果、すべての課題の克服に成功しています」。

ユポ・コーポレーション 開発研究所 主任研究員の小池 弘氏は、圧電性ユポの製造には、同社が培ってきた技術的知見を結集する必要があったと明かす。「PPと無機充填剤、添加剤の配合割合



コロナ放電で電荷を蓄積し分極（矢印）を形成した圧電性ユポ（エレクトレット）。微細孔の1つひとつに分極が形成されている。この微細孔のサイズ・形状が均一で、かつ、経時変化しないことが求められる



厚み方向に力が加わると、微細孔の厚みが変わり、分極量が変化して電荷の移動が起きる（電気が流れる）。移動する電荷の量は力の大きさに比例するため、外部電極をつなげば変形量を電気信号として取り出せる



ユポ・コーポレーション
開発研究所の
小池 弘氏

やこれらの混合プロセスから見直しを行っています。また、延伸の加減によって微細孔のサイズと形状をコントロールするのはもちろん、成膜時の厚みや面

内方向の温度を均一にするなど、どの部分でも同じ微細孔が形成されるように各種加工条件の徹底的な検討を実施しました。これらの工夫によって形成した微細孔は、どの部分であっても同一のサイズ・形状で、かつ、無機充填剤やポリマーが塑性変形してしまうような極端な力を加えない限り、経時変化もほとんど起こしません。加えて、上下左右の微細孔同士がくっついて連結孔になっては意味がありませんので、それぞれが必ず独立するように調整しています。これは当社独自の技術ノウハウであり、簡単に真似できるものではないとの自負があります」。

2007年の共同開発のスタートから約3年後には微細孔の最適化に目途が立ち、その後は成膜・加工技術の検討に着手したとのこと。「2013年から、私達にヤマハが加わった3社の共同研究開発体制が発足し、具体的なセンサーアプリケーションへの応用開発へと移行しましたが、このときには圧電性ユポ自体の開発はほぼ完了していました。性能や安定性、歩留まりなどの面で、自信を持って提供できる段階に達しており、ヤマハにも、この点を高く評価していただきました」と小池氏は胸を張る。

■明らかな音の違いに驚いた！

エレクトリック・アコースティックギター（エレアコ）は、弦の振動などを、

ピエゾ素子（圧電素子）を介して電気信号に変換するピックアップと呼ばれる装置を搭載しており、この電気信号がアンプによって増幅されてスピーカーに送られ、スピーカーから音が鳴る仕組みとなっている。一般的に、ピックアップは、弦の振動をギター本体に伝えるためのサドルと呼ばれる部位の下に組み込まれるため、アンダーサドルピックアップと呼ばれる。

従来のエレアコの音色について、ヤマハ 研究開発統括部第2研究開発部 素材グループ 主事の樋山邦夫氏は、こう説明する。

「アンダーサドルピックアップのピエゾ素子はセラミック製で、キャッチできる振動の周波数帯域が限定的であり、またある特定の帯域を強調する性質を持っているため、ギターの生音とは少し趣が違った音色になります。この独特の音色は、ギターの愛好家の間で『ピエゾ臭さ』と呼ばれており、エレアコならではの味わいとして認知されています」。

児玉氏と樋山氏は以前から交流があり、2013年に児玉氏が樋山氏にユポを紹介したところ、エレアコに応用できるのではとのアイデアが浮上。圧電性ユポをボディの振動をキャッチするためのピエゾ素子として用いたコンタクトセンサーを作製し、これをボディの裏側に貼り付け、弦の振動を拾うアンダーサドルピックアップと併用して演奏してみたところ、その場にいた全員が驚いたという。「アコースティックギターの自然な生音に近い音色がスピーカーから発せられ、『これは今までにない製品の開発につながるぞ』という期待にわくわくしました」と樋山氏。



ヤマハの樋山邦夫氏

大きな違いが現れたのはなぜなのか。「圧電性ユポは、薄くて軽量で変形しやすい素材であり、中でも厚み方向の弾性率が低く空気の圧縮率に近いことに特長があります。この薄い・軽い・柔らかいという性質から、貼り付けによりギター本体の振動に影響を与えにくく、かつキャッチできる周波数帯域が広がります。圧電性ユポをコンタクトセンサーとしてギター本体に貼り付けたことで、アンダーサドルピックアップでは拾いきれない、低周波数帯域から高周波数帯域までの振動をまんべんなく電気信号に変換でき、より生音に近いニュアンスの再現につながっています」。

ちなみに、弾性率の低さ（変形しやすさ）により、圧電性ユポは、PVDFよりも力に対する圧電応答（d定数）に優れていることも明らかになっている。「圧電性により機械共振が電気インピーダンスで観測される、いわゆる圧電共鳴測定という測定・解析技術により、圧電性ユポは、厚み変化に対する圧電応答（e定数）はPVDFの1/1,000であるものの、弾性率が1/10,000しかなく格段に変形しやすいことが判明しました。これらの結果から、圧電特性がPVDFの10倍という結果が導き出せます」と児玉氏。つまり、PVDFをピエゾ素子に用いたセンサーに比べ、より繊細な力のセンシングに対応でき、ギターのボディに使われている木材のような柔らかい材料の微振動を検出できるという。

■センサーの内製化は初、サンプル検査に高度な測定手法も

3社による共同研究開発の内容について、樋山氏は「圧電性ユポの完成度が高かったため、当社による、ギターのコンタクトセンサーへの応用がメインとなりました」と述べる。「コンタ

クトセンサーに適用するには、面内のどこに圧力がかかっても同じ応答が出るという感度の均一性など、いくつもの要求仕様をクリアしている必要があります。また、あるサンプルは上手くできていても、別のサンプルはイマイチだったりといった性能のバラツキがあったりしては、実用上は使い物になりません。今回の開発で試作したセンサーを全数検査したところ、圧電性ユボに関してはそうしたトラブルは皆無であり、常にハイレベルな品質が確保されていました。世界中にギターメーカーはたくさんありますが、ピエゾセンサーは社外品の使用が普通であり、自社で手掛けているケースは聞いたことがありません。当社でも初めてでしたが、こうした品質の高さは、チャレンジングな試みに説得力を与える意味でも大きな後押しとなりました」。

開発サンプルの全数検査に用いたのが、非線形誘電率測定という特殊技術。「ごく簡単に言うと、誘電体に対し高電圧を印加しながら誘電率を測定することで、圧電特性や弾性率に関する情報を得るといえるものです。非接触で検査できるため、検査工程による対象へのダメージの心配がありません。そもそも、この非線形測定は本来ポリマーの物性研究に用いられる高度な測定手法です。楽器に限らず、他の分野においても、品質管理にこれを応用している例はほとんどないと考えられます」。

■製品化への思いで妥協を排除

今年5月、ヤマハは、エレアコの新製品「FG/FS Red Labelシリーズ」を発売した。最大の特徴として打ち出しているのが、ギターの自然な生音を表現可能な3ウェイハイブリッドピックアップシステム「Atmosfeel（アトモスフィール）」の搭載で、アトモスフィールとは、英語で空気を意味す

るAtmosphereと雰囲気の意味するFeelを組み合わせた造語。弦の振動を捉えるアンダーサドルピックアップ、ギター内部の空洞の音を拾うマイクロフォン、そして、総厚100μmに満たない圧電性ユボをピエゾ素子に用いたコンタクトセンサーの3つによって音を再現する仕組み。

発売からまだ間もないが、樋山氏は手ごたえを感じている様子だ。「当社のエレアコのラインアップの中でもハイエンド品という位置付けですが、現在、注文に対し生産が追い付いていない状況です。おそらく、世界でも当社だけが出せる音を実現しており、既存のエレアコの愛好家のみならず、これまでエレアコにあまり関心がなかった層にも訴求できる可能性を感じています。さらに、国内のみならず、海外市場の営業担当者もいち早くプロジェクトに参画しており、ギターの本場であるアメリカ市場でもインパクトを与えられるのではないかと期待しています」。

「今回の3社の共同開発は本当に得難い経験になりました」と飯田氏。「開発に携わった関係者には、従来にない画期的な製品が実現できるという確信があり、クオリティに関する妥協を徹底的に排除するなど、労を厭わずに常に前向きな姿勢で進めることができました。モノ作りの完遂に必要なのは、詰まるところ人間なのだ」と再認識した次第です」と熱く語る。

児玉氏も感慨を口にする。

「当研究所の主要な業務は、圧電ポリマーの基礎研究と依頼された測定・計測を行って評価データをまとめる受託測定です。圧電共鳴測定や非線形誘電測定など、古川先生の下で学生時代から研鑽を積んできた先端的な物理計測手法



アトモスフィールを搭載したFG/FS Red Label シリーズ

をコンシューマプロダクトの開発に駆使できたのは満足感があります」。

なお、現状、圧電性ユボは開発品という位置付けだが、すでに本生産ラインで試作しているとのこと。「スケールアップはすでに終了していますので、今後、より大面積が必要であったり、量が求められたりする新たな用途の相談が寄せられた場合でも、即応できる体制は整っています」と小池氏は強調していた。



従来のエレアコとの音色の違いは素人でもはっきり分かる。マイクロフォン、アンダーサドルピックアップ、コンタクトセンサーが一体となった3ウェイピックアップシステムの成果だ（赤丸は設置位置のイメージ）