

RION Technical Journal

Vol. 1
2021/4

PROJECT STORY

音は、軟骨から伝わるか?

HISTORY OF TECHNOLOGY

第一回 騒音計

FROM NOW ON

社会を支える [微粒子計測器] の世界

IN THE BACKYARD

リオンの「革新」はこうして生まれる

TALES OF RION

建材の遮音性能を測る! の巻

FROM OVERSEAS

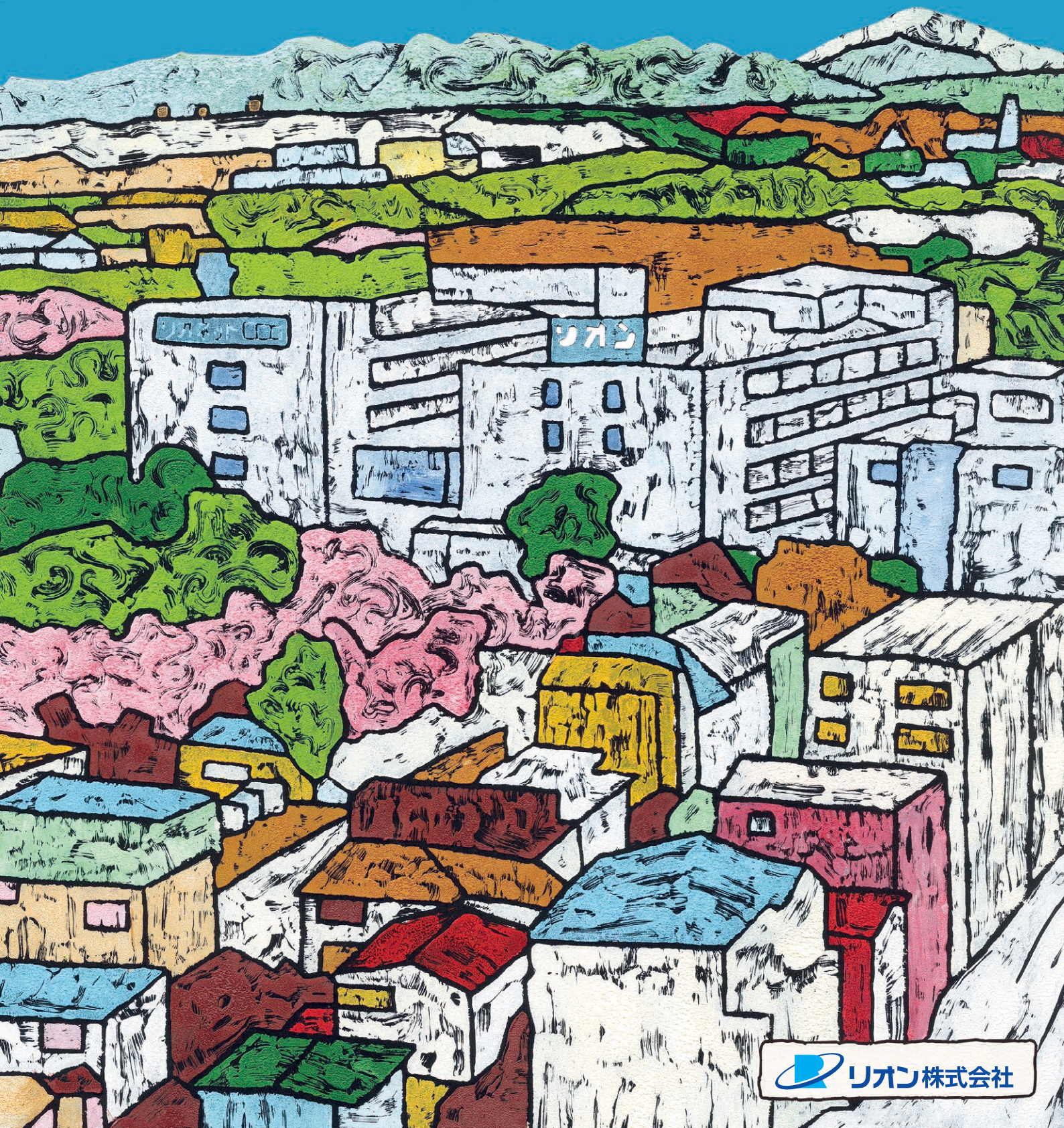
ベトナム編

OUR FAVORITE TOWN KOKUBUNJI

[レトロモダン & グリーン]

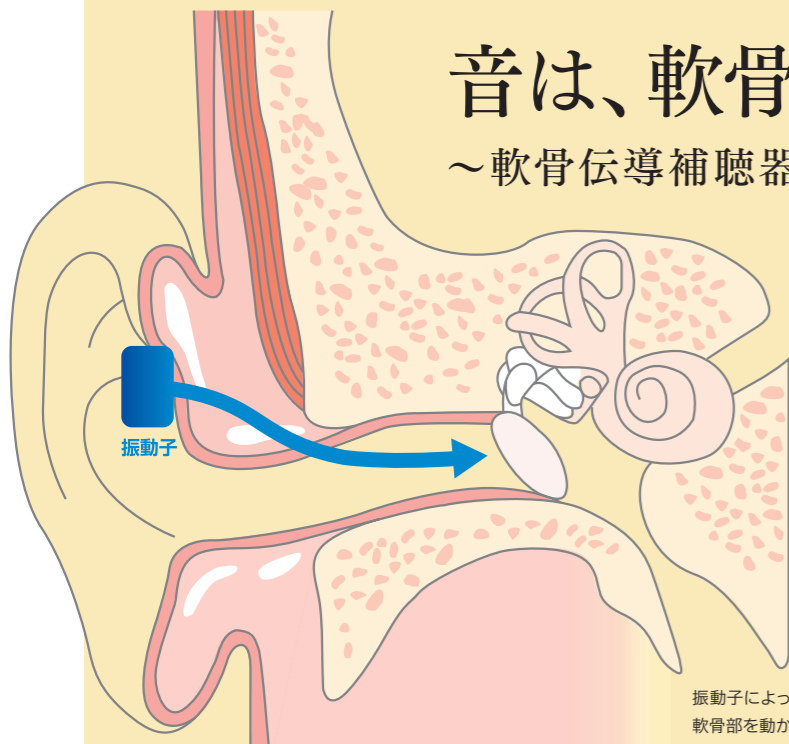
EPILOGUE-SCIENCE, SCIENCE!

「エーレンフェストの壺」不可逆性のふしぎ



音は、軟骨から伝わるか？

～軟骨伝導補聴器ができるまで～



振動子によって発生した軟骨部の振動が、外耳道の軟骨部を動かし、外耳道内に気導音を生成する。

2017年、リオンは世界初[※]となる軟骨伝導補聴器を発売した。新たに発見された第三の聴覚経路「軟骨伝導」を活用したプロダクトだ。この補聴器がどのように開発され、世に広まっていったのかを追う。

※2017年9月当社調べ

軟骨伝導補聴器の音の伝わり方 (外耳道がある場合) 編井裕司先生監修

一般的な補聴器といえば、耳あな型や耳かけ型が思い浮かぶかもしれない。これらの補聴器は鼓膜に音を伝えているため、外耳道の閉鎖により鼓膜に音を伝えることができない外耳道閉鎖症などの場合は、使用できないことが多い。こうした場合、これまでは骨導補聴器（ヘッドバンドタイプ、埋め込み型など）を使用するケースがほとんどであり、身体への負担も少なからずあった。そのような状況を大きく変えるべく開発されたのが、イヤホンの代わりに振動子と呼ばれる小さな部品を耳に装着する軟骨伝導補聴器である。外耳道が閉鎖している場合や、閉鎖はしていないが中耳炎などで耳だれがある場合でも、快適、容易に装着できる。世界で初めて「軟骨伝導」を利用した補聴器なのである。



2009年、試作段階の軟骨伝導補聴器は、バイモルフ型圧電振動子を採用したもので、1000 Hz以下の出力が低く、電源電圧は3 V以上必要であり、消費電力は60 mW以上（一般的な補聴器は1 mW程度）も要した。結局、この延長線上に完成形はないと判断された。

突然、訪れた全く新しい聴覚経路の発見

全ては、耳の周囲の軟骨を振動させることで音を効率よく伝えられる、という着想を得たことから始まった。この「軟骨伝導」を発見し、製品化の起点となった研究者が奈良県立医科大学の細井裕司先生だ。「音は振動として外耳道から鼓膜、耳小骨に伝わり、内耳で神経刺激に変換されて脳で知覚しています。音を伝達する主な媒体は空気であり、空気の振動を介して知覚する音を『気導聴覚』と呼びます。また、内耳を入れる側頭骨に直接振動を与えることでも音を伝達でき、こうした振動を介して知覚する音を『骨導聴覚』と呼びます。長年、音を伝える経路は、この『気導』と『骨導』のみと考えられていました。ところが2004年、私は突如、第三の聴覚経路である『軟骨伝導』を発見することになります」

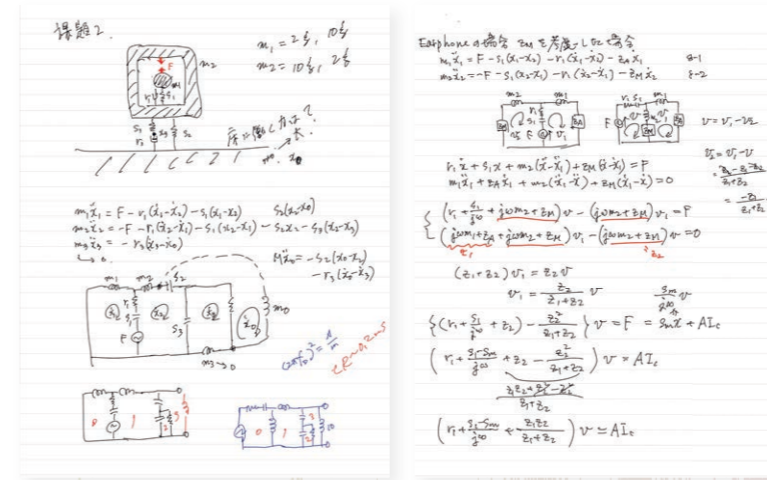
耳の内部にある骨と軟骨は似て非なるもの。英語ではbone（骨）、cartilage（軟骨）と呼ばれる通り、両者は全く異なる耳の構成要素だ。長年、骨の振動によって音を知覚できることは知られていたが、軟骨の振動が音の伝達経路として取り上げられたことはなかった。そして2004年のある日、大きな発見をすることになる。

「振動子を種々の部位に当てて音を聞いていた時に、あれっと思ったんです。振動子を骨に当てた時と、軟骨に当てた時で音の聞こえが違くと。仮説も予想ありませんでしたが、とにかく直感的に違つて感じた。その違和感を頼りに振動子をいろいろな部位に当てて慎重に確かめてみると、やはり骨と軟骨では、はっきりと音の聞こえが違つて分かりました。私が骨伝導の専門家であれば、聴覚経路には空気と骨しかないということかと思いましたが、そこからはどうということかと研究を重ねていきました」

そして、この軟骨を介した音の伝導は、細井先生によって「軟骨伝導」「Cartilage Conduction」と命名される。



細井裕司
奈良県立医科大学理事長・学長。MBT研究所所長。医学博士。軟骨伝導聴覚の存在を世界で初めて発見し、16篇の論文を発表。軟骨伝導に関するリオンとの共同研究の中心となり、軟骨伝導補聴器開発を成功に導いた。



軟骨伝導を活用した補聴器開発への道

それまで古今東西の研究者たちも聞いていたであろう軟骨伝導による音。だが、それは骨伝導による音として見過ごされてきたのだらうと細井先生は話す。その後、軟骨の振動について詳しく調べていくと、自身の直感は正しかったことが徐々に分かってきたという。

「骨伝導というのは、骨が振動して音が伝わるという経路。つまり、骨の振動は必須です。軟骨伝導のメカニズムは骨伝導と異なり、骨の振動は、必須ではありません。外耳道の外半分は軟骨の筒、内半分は骨の筒でできています。軟骨に振動子を当てて振動させると軟骨の筒が振動し、軟骨部外耳道の中、つまり耳の中に音が生成されます。スピーカーにおいては、コーンが振動して空気の粗密波を作り、音を発生させますが、円筒状の軟骨部外耳道がこのコーンの役割を果たしています。種々の聴覚実験で、軟骨伝導音は気導音とも骨伝導音とも異なる性質を持っていることがわかりました」

世界の誰も気づいていなかった軟骨伝導という聴覚経路。細井先生はその存在を知って以来、研究チームの先生方と共にいくつもの論文を立て続けに発表した。軟骨伝導がきつと新たな補聴器の開発につながると確信していたからだ。

「軟骨から音を伝えるということは、耳の中に音源をつくるということ。つまり自分には音が聞こえる一方、隣の人には聞こえないという利点を持った聴覚・音響機器ができるだろうと。補聴器については、振動子を軟骨に接触させるだけで聞こえるので身体的な負担が少ない。骨伝導の補聴器は、振

動を伝えるために骨伝導振動子の装着部の骨を圧迫する必要があり、痛みを感じる場合も多いんです。なんらかの理由で外耳道が閉塞した方でも、振動子を軟骨に当てることによって音が聞ける。私は耳鼻科医ですから、ぜひともこの軟骨伝導を活用した補聴器で、ひとりでも多くの方に快適な聞こえを提供したいと考えたんです。でも、軟骨伝導を発見してから何年もの間、有力国際誌に掲載することができませんでした。それは、論文の査読者が発見されて間もない現象“Cartilage Conduction”を知らないこと、先行論文がないので参考文献がないことが理由として挙げられます。ある時、医学誌のチーフエディターが来日されましたので、軟骨伝導音を試聴していただきました。初めての体験に「オー」と驚かれ、興味を持っていただきました。その結果、直後に投稿したある論文は、掲載されました。そのような努力と啓蒙活動により、ようやく軟骨伝導の存在が認知されるようになったんです」

そして、軟骨伝導を活用した補聴器の開発に向け、2010年、リオンとの共同研究が始まり、リオン側ではこの新たな聴覚経路をどう補聴器に活かしていくか、模索が始まっていく。

次々と立ちはだかる大きな壁

現在、リオン技術開発センターの顧問を務める岩倉行志は、軟骨伝導補聴器の開発に挑んだ技術者だ。ところが初期段階で大きな壁にぶち当たり、製品化は難しいという結論に到達してしまう。岩倉はその理由をこう説明する。



岩倉行志
技術開発センター顧問。リオン入社以来、磁石を利用したBA型イヤホン等の開発に尽力。軟骨伝導補聴器のコア技術となるBA-S方式の振動子開発に成功し、製品化において重要な役割を果たした。

振動子の構造開発において、毎日のように課題やアイデアをメモして考えたという岩倉。こうした積み重ねが画期的な構造開発につながっていった。

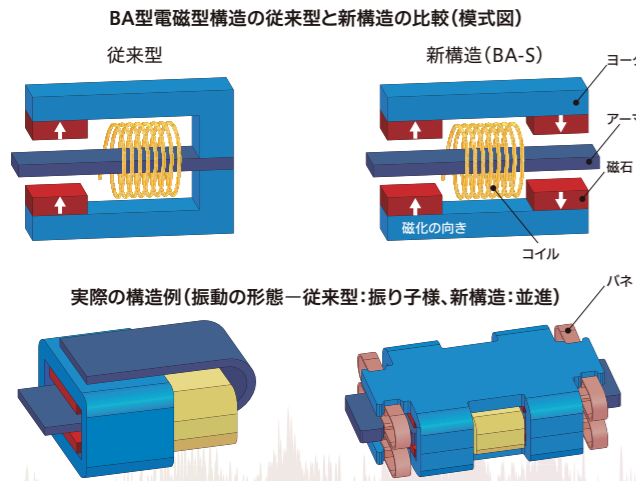
「圧電型の振動子は、聞こえがいいということで試作を始めたんですが、これを駆動するためのICには3 V以上の電源供給（一般的な補聴器は1.4 Vのボタン型空気亜鉛電池を利用）が必要でした。また、ICの消費電力は60 mW以上で一般的な補聴器の60倍以上です。それに、圧電型は低音域の振幅が小さく、出力がとれない（足りない）。これはちよつと製品化は難しいと、自分の中で早々に結論を出したんです」



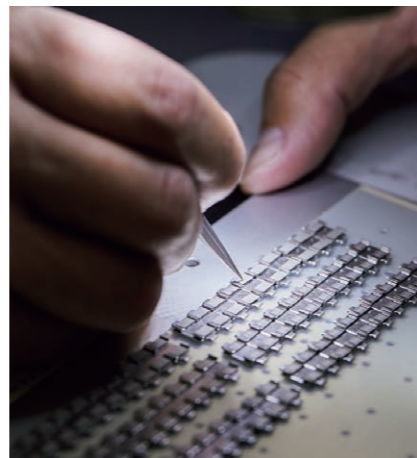
軟骨伝導補聴器

通常の補聴器ではイヤホンを耳の穴に装着するが、軟骨伝導補聴器は振動子と呼ばれる部品を外耳道入り口の軟骨部に装着し、増幅した音を軟骨部に伝えて聞き取る。通常の補聴器と同様にボタン型電池1個で使用可能。現在、全国102カ所の指定医療機関を受診後に購入可能。

[製品に関する問い合わせ先]
医療機器事業部 営業部
フリーコール:0800-500-2933
(受付時間/9:00～17:00/土・日・祝日・当社指定日は除く)



軟骨伝導補聴器用に開発した新構造の電気機械変換器(左は従来型、右は新構造BA-S型)。新構造では左右に適度な空隙がある点が最も大きな特徴。振動の形態も新構造では並進振動する方式。



軟骨伝導補聴器に採用されるBA-S型の電気機械変換器はこのような大きさ。



軟骨伝導補聴器の心臓部である振動子の製造現場。



藤嶋 葉子
認定補聴器専門店「リオネットセンター」勤務。認定補聴器技能者。店舗と医療機関における補聴器販売、メンテナンスを担当する。都内取扱医院にて、これまで約80名に対する軟骨伝導補聴器の販売、調整に携わっている。

製品化はいきなりパラダイムシフトを迫られた格好に。圧電型に代わる手法で振動子を動作させる方法を模索していった岩倉。リオンに入社直後、バランスド・アーモチュア方式(BA方式/電磁型駆動方式)のイヤホン開発に携わった経験から、電磁型振動子を採用する方向で開発を進めることになる。この電磁型振動子開発にはNICT(国立研究開発法人情報通信研究機構)から助成金を得られることになり、新たな開発がスタート。ただ、この先もすんなりとはいかなかったという。「電磁型構造の振動子を試作したところ、圧電型振動子を上回る出力を得ました。でも衝撃に弱く、使用には耐えられないものでした。落下などの際、磁性材のアーモチュアが影響を受けてしまうんです。ここでも大きな壁が立ちはだかったように思いました」

それでも、この段階で岩倉の頭の中に「諦める」という選択肢は不思議と浮かんでこなかったという。試作を依頼されてから約2年後の2011年に定年を迎えたことも吉と出た。多くの業務を管理するという職責から離れ、自由に開発に打ち込める環境と心

情が整っていったからだ。とはいえ、まだリオン内部でも大人数を動員して開発する状況にはなく、一人で黙々と試行錯誤を重ねる日々。はた目からは道筋の定まらない孤独な戦いにも見えた。

**正しい理論を重ねれば
きっとゴールは見える**

そして大きな変わり目が訪れる。何度も何度も試作を重ねて部内で発表を続けてきた岩倉。そんな模索のさなか、ある人物から大きなヒントを得るのだ。「理化学研究所を定年後、リオンの顧問となった伊達宏宗先生から、しばしばアドバイスをいただいていた、ある時、空隙はアーモチュアの片側だけでなく、両側に設けてはどうかとアイデアをくれたんです。それが大きなヒントになりましたね。少し前に動きは違うが似た構造の特許を出していて、これだという感覚があった。新発想のBA-S型振動子の構造へと頭の中で理屈が繋がっていったんです」

アーモチュアは別名・可動鉄片と呼ばれ、従来のBA型構造では2つの磁石の間に

空隙をもって置かれる。アーモチュアがヨーク(継鉄)と固定される片持ち梁構造である。そしてアーモチュアは磁性材でなければならず、磁気特性を確保するために高温の水素炉でアニールされる。ゆえにアーモチュアのパネ性は通常のパネ材より著しく弱い。一方、新構造のBA-S型では4つの磁石を用いて左右両方にBA型構造を用意し、その間に板状のアーモチュアを適度な空隙を設けた上で配置。アーモチュアとヨークの間に4つのパネを配置し、アーモチュアが変位した際の復元力をパネが受け持つ構造とした。この新発想によって耐衝撃性が飛躍的に向上。大型化も小型化も自在で、設計の自由度を兼ね備えた振動子が完成することになる。

「試作してみた時は、わあ、素晴らしいという感動がありましたね。2013年のことです。今後、これは振動子のスタンダードになるかもしれないとさえ思いました」

今ではリオン社内で「i振動子」と呼ばれるこの構造。iはもちろん岩倉の頭文字から取られたものだ。あらためて、この構造を実現させた経緯について本人はこう振り返る。

「苦労といえば苦労ですが、結局は理屈の積み重ねだとも思っていました。ですから、ゴールが明確に見えていたわけではありませんでしたが、自分なりに失敗から学びつつ、アドバイスもいただいて、少しずつでも前に進んでいる感覚はありました。それにしても、私は遅咲きですよ(笑)」

そして、2013年に軟骨伝導補聴器の開発が経済産業省の委託事業に採択され、奈良県立医科大学(臨床評価を担当)と調布電子工業株式会社(振動子部品の金型製作を担当)およびリオンの共同体で3年間開発を行うこととなり、人・物・金の確保が実現。後の製品化へとつながっていくことになる。

どんな耳型にも合うイヤチップの模索

軟骨伝導補聴器の開発に綿貫敬介が関わったのは2013年のことだ。振動子開発に取り組んでいた岩倉とは異なる道筋で、暗中模索することになる。それまで補聴器の筐体設計において実績を積んでいた綿貫。ここで担ったのは補聴器を耳に固定するためのイヤチップ(装着部)開発であった。

「開発途中の軟骨伝導補聴器を初めて見た時は、電池も大きくて、これは製品になるのかなと、正直、半信半疑でした。でも岩倉と一緒に開発を進めていくうちに、きっとすごい製品になるだろうという思いが強くなって。最終段階に向けて、どんどん熱量が高まっていった感覚ですね」

困難を極めたのは、この補聴器を使用するであろう人々の耳の形状に、どうイヤチップを合わせていくかという点だった。外耳

のない人、手術によってほんの少し耳にくぼみがある人など、想定される利用者の耳は千差万別だ。誰の耳にも振動子を安定して装着させるには、個々の耳に合わせた装着部が必要なのである。「イヤチップの質量が増加すると、高域の感度が低下するので軽量化を実現しなくてはならない。また別の問題として、なるべく感度を落とさないように、振動する方向を頭の方向に向くようにする必要がありました。そこで、複雑な形状のイヤチップを作成可能な、オーダーメイド補聴器の3Dプリンティング技術を応用して設計を進めることにしたんです」

さまざまな耳型を採取し、3Dスキャンとモデリングを行った後、3Dプリンティングを進めていく。こうした作業を延々と繰り返したが、軽量化を進めつつイヤチップを安定させ、振動方向を所望の方向に保つのは極めて困難な道のりだった。「一般的な補聴器であれば耳型を取った時点でその人にあったイヤチップが作れます。でも軟骨伝導補聴器の利用者は、さまざまな耳の形が想定されるので、ひとりひとりの耳を写真撮影した資料も交えて最適な形を探していったんです。その上で重量が重くなってしまうと聞こえが悪くなったり、落ちてしまったりするリスクが高まるので、極限まで削って軽量化を目指す必要がありました。当初は製造担当者から、これは実現できないと言われたこともありましたが、ひとつひとつの試作を進めていくうちに、自分や製造担当者の中で蓄積されていくノウハウも確かにありました。ゴールは決して近くはなかったですけどね」

そして、製造担当者と協力してイヤチップの製作法をマニュアル化することに成功し

た綿貫。その達成感はいかほどだったかと問うと、こんな答えが返ってきた。「奈良県立医科大学で軟骨伝導補聴器の使用感の検証に立ち会ったんです。お母さんが心配そうに見ている中、小さいお子さんが恐る恐るこの補聴器を装着しました。途端にパッとお子さんの表情が変わったんです。音が伝わったわけですね。それを見てお母さんが涙を流し、もう、私ももらい泣きです。代え難い感動ですよ。頑張ってよかったです」

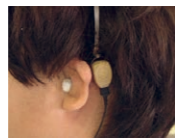
開かれた、補聴器の新たな扉

リオネットセンターの藤嶋葉子は、日々、顧客から聞こえに関する相談を受け、最適なソリューションを提供する、いわば最前線で働くスタッフだ。彼女は軟骨伝導補聴器の登場で、顧客への提案の幅が広がったと話す。「生まれながらに外耳道が形成されていない方に気導補聴器をご提案できません。そのような場合、骨導補聴器をご紹介しますしかなかったのですが、選択肢が広がったのは大きな変化でした。骨導補聴器の振動子は強い圧力で頭部に固定しなければならず、身体的なストレスを感じる方も多くいます。軟骨伝導補聴器は小さく目立たない点もメリットです」

開発に費やしたのは、細井先生の発見から約13年の歳月。その道程はまさに山あり谷あり、ハードルの連続だったが、取扱医療機関は増えつつあり、軟骨伝導補聴器は多くの人の暮らしに寄り添うようになってきた。補聴器の新たな扉は、確かに開かれたのだ。



綿貫 敬介
技術開発センター 要素技術開発室 第一グループグループ長。機械工学の知見を活かし、補聴器筐体の設計等に長年携わる。軟骨伝導補聴器の開発においては、専用の補聴器特性試験装置の設計にも尽力した。



骨導型の補聴器は、ヘッドバンドを装着し、強く圧迫する必要があり、身体への負担も少なからずあった。

耳型の採取から3Dスキャンを経て、3DモデリングをPC上で行う。その後、3Dプリンティングによって個々の耳型にあったイヤチップができあがる。こうした一連の工程を綿貫が製造部門と協力しながら構築した。

