骨 伝 導 マ イ ク イ ヤ ホ ン

伊 藤 勲[†], 沖 由 香^{††}
黒 田 英 一^{†††}

携帯電話、PHS 等の普及により屋外で電話機を使用する機会が増え、高騒音下における通話品質の改善や、ハンズフリー機能の実現が望まれている。上記解決手段のひとつとして、周囲騒音を検出しにくく、両手が自由に使える骨伝導マイクイヤホンが考えられる。本稿では、通信端末用骨伝導マイクイヤホンの技術内容について解説する。

1. ま え が き

近年、自動車・携帯電話用途を目的とした、エレクトレットコンデンサマイクを使用した気導型のイヤホンマイクセットが発表されているが、音質は優れているものの、騒音下での使用に際しては周囲騒音を検出してしまうという問題がある。一方、骨伝導マイクは空中を伝搬する音声振動ではなく、気密性の高い人体を伝搬する声帯振動を検出する方式であるため、周囲騒音を検出しにくいという利点があり、すでにいくつかの報告がなされている¹⁾²⁾。表 1 に気導型と骨伝導型マイクの特徴を挙げる。

骨伝導に関する基礎研究は、1920 年代 Bezold, Runge Krainz らから、主として骨伝導を聴覚に利用することから始まっており、現在も補聴器等で受話用に活用されている。一方、近年の我が国では、送話用としての研究が活発に行われ^{1)~6)}、1970 年代から送話器としての製品提案が多く見られるようになった。それらのものは、頭頂部、咽頭部、前側頭部、後側頭部、外耳道壁等から骨伝導音声振動を検出し、送話信号としているものである。しかし、実用化に至っているものは数少なく、それぞれ欠点を抱えている。頭頂部からの検出は、検出素子の設置方法が難しく、ヘル

表 1 気導型と骨伝導型マイクの特徴 (マイク・イヤホン一体型の場合)

項 目	気導型マイクイヤホン	骨伝導型マイクイヤホン
音 質	良い	こもる
マイク検出感度	高い	低い
脱・装着時	雑音が発生しない	振動を拾うため雑音が発生する
周囲騒音	拾いやすい	拾いにくい
ハウリング	しやすい	抑えることが可能
形 状	マイク部を口元付近に設置する必要有 ↓ 耳周辺以外の部分が存在する	マイク部を耳内に収納可能
具体例

メット内部に設置する等、全体の形状が大きくなってしまう。咽頭部からの検出は、使用者の違和感を誘い、また明瞭度が悪いため、あまり実用向きではない。外耳道壁での検出は、人それぞれ耳の形・大きさが違うため形状の決定が難しく、また、外耳道壁に密着させるため、嫌悪感、痛みを使用者に感じさせてしまう。

携帯電話、PHS 等の普及に伴い、電話が室内から屋外へ出てきたことによって、高騒音下での利用が重要視されることとなり、携帯端末機への骨伝導マイクの適用が期待されるようになってきた。本稿では、骨

[†] 日本ゼックス株式会社

^{††} 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

^{†††} 三菱電機株式会社 PHS 事業センター

“Bone Conductive Mic-Earphone” by Isao Ito (Nihon XEX Corporation, Tokyo), Yuka Oki (Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura) and Eiichi Kuroda (PHS Business Center, Mitsubishi Electric Corporation, Gunma)

伝導マイクと小型イヤホンを一体化した骨伝導マイクイヤホンについての技術解説を行う。

2. 骨伝導マイクイヤホン

写真1は、マイクイヤホンの使用形態の一例である。図1にマイクイヤホンの内部回路を示す。発声した時、その音声振動は身体の内側で共振し身体各部へ伝わるが、骨伝導マイクは頭蓋骨を経て耳近傍の骨に伝わった音声振動を検出し、送話電気信号に変換するものである。マイクイヤホンは、耳近傍へ伝搬してきた骨伝導音声振動を検出する振動検出素子と、その出力を増幅する電界効果トランジスタ(FET)とで構成されるマイクと、受話電気信号を音響変換するスピーカとで構成されている。携帯電話、PHS等への適用

写真1 マイクイヤホンの使用形態

図1 マイクイヤホンの内部回路図

を想定する上では、小型であることと装着性の良さが重要視される。

2.1 気導と骨伝導の周波数特性

人の発声器官は4つの部分に大別できる。第一は体内から空気を押し出す肺と気管。第二はこの気流を途中でさえぎって周期的に変化させる声帯。第三は声帯によって発生した音のスペクトルを変化させるフィルタの役目をする口腔と鼻腔。第四は摩擦音や雑音を作るために用いられる舌、唇および歯である。図2に発声器官の略図を示す⁷⁾。これらの4つの部分の働きによって、ホルマント(音声スペクトルの分布の形)が決定される。発声された気導音を最も忠実に検出するには、口腔前面10~15cmで検出するのが良いとされている⁸⁾。

一方、骨伝導音は頭蓋骨等を伝搬してくるものであり、気導音とはホルマントが異なる。ホルマントが異なる要因は、生体組織での振動の吸収に周波数特性があることである。生体組織の音の吸収率を表2に示す。生体組織においては、吸収係数 α を振動数 f で割った α/f がほぼ一定値をとるものが多く⁹⁾、そのことから、 α と f は共に比例の関係と考えられるので、周波数特性は6dB/octの減衰が推測でき、実際、骨伝導音は、極端に高域が落ちた周波数特性を持っている。文献¹⁾によると、頭部の中でも検出場所によって感度が異なっており、感度の良い所は咽頭、前歯となっている。しかしその文献は、イヤホンマイクとして考えられる耳部またはその内部を測定項目に加えていないので、耳部に伝わる骨伝導音の周波数特性は定かではない。そこで、我々が実測した気導音と耳部から検出した骨伝導音の比較結果を図3に示す。気導音は、唇前14cmから気導音声検出用コンデンサマイ

図2 人の発声器官の略図

表 2 生体組織の音の吸収

組 織	条 件	吸収係数 α (cm^{-1})	振動数 f (MHz)	α/f (s/cm) $\times 10^{-7}$
筋肉 (muscle)	固定	0.1	0.8	1.25
脳 (brain)	フォルマリン固定	0.085	0.3	2.83
脂肪 (fat)	一度溶融したもの	0.045	0.87	0.5
頭蓋骨 (skull bone)	新鮮または固定	0.17	0.3	5.7

図 3 気導音と骨伝導音の長時間スペクトル平均 (20 秒)

クで採取し、骨伝導音は、加速度型ピックアップを外耳道壁に押し当てて採取したものである。これらからも明かなように、骨伝導音は気導音に比べて極端に高域が減衰してしまう。この実測から気導音と骨伝導音との差は、約 -12 dB/oct という数値が得られる。上記推測値とは異なっているが、これは採取した骨伝導音が頭蓋骨単体のみを伝搬したのではなく、筋肉、脂肪等の伝搬経路を含んでいるため、また、人によっても異なるものと思われる。以上から、発声周波数全域にわたって約 10 dB/oct 程度の補正を行えば、気導音に近い再生音を得ることが可能となる⁵⁾。実現方法としては、骨伝導音検出用圧電セラミック素子における周波数特性を利用すると共に、外部のフィルタを用いて周波数特性の補正を行うという方法が考えられる。

2.2 骨伝導マイク

骨伝導マイクは、加速度ピックアップ型振動検出素子と FET で構成される。声帯を振動源とする骨伝導音声振動の振動エネルギーは比較的大きく、電気信号への変換は容易に行えるが、検出するための接触面積

表 3 主な圧電セラミック材料の特徴

名 称	性 質
BaTiO ₃	チタン酸バリウム
PbTiO ₃	チタン酸鉛 (PT)
PbZrO ₃	ジルコン酸鉛 (PZ)
Pb(Zr, Ti)O ₃	チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT)
Pb(Mg, Nb)O ₃	マグネシウム酸ニオブ酸鉛 (PMN)

図 4 動作原理図

を大きく取らないと、検出感度はさほど高くない。従来の骨伝導マイクは、電磁型、静電型、有機圧電フィルム型等が使われることが多かったが、最近では圧電セラミック材料が広く用いられている。その理由としては、簡単な構成で小型にできることと、実用上十分な性能の出せる PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) 等の材料が入手できるようになったことが挙げられる。表 3 に主な圧電セラミック材料の特徴をまとめる。

図 4 は、圧電セラミック素子を用いて骨伝導振動を電気信号に変換する動作原理図である。圧電セラミックを分極処理すると、図 4(a) のように結晶内の電荷が揃い、内部に束縛電荷が発生する。さらに、その束縛電荷と同量の逆極性の自由電荷が引きつけられ、表

図 5 骨伝導マイク用エレメントの電気的等価回路

面は帯電している状態になる。これを湾曲させると、一面は引張り応力、他面は圧縮応力が加わった状態となる。引張り応力が加わった側の束縛電荷は減少方向になり、また、圧縮応力が加わった他方側の束縛電荷は増加方向になる。圧電セラミック表面の自由電荷は、この動きに瞬時に対応できないため、外部回路を通して電荷が流れることになる。この際、負荷に発生する電圧 v を検出電圧として利用している。この素子を図 4(b) のように金属板に間にはさみ、分極方向を逆にして重ねたバイモルフ構造にすることによって、高感度化を図っている。圧電セラミックで実現した、このバイモルフ構造の電気的な等価回路を図 5 に示す。図 5 中の抵抗 R はとても大きく、すなわち、出力インピーダンスがとても高いため電流は流れない。よって信号増幅には、この等価回路の後段に電圧駆動型増幅器である FET を設けている。

上記で説明した振動検出素子を使って、骨伝導マイクの実現方法を説明する。図 6 のように、振動検出素子を片方が開放、他方が支点となる片持梁、または両方が支点となる両持梁にし、ケースに入れてそのケースを骨伝導音を検出する箇所に密着させる。発声によりケースに振動が伝わると支点が揺れ、バイモルフ構造をしている圧電セラミック素子がたわみ、湾曲する。そこで、上記の説明により電圧が発生するのである。

次に、骨伝導マイクの周波数特性について述べる。前記したように骨を伝搬する振動は、高域が著しく減衰するという特徴があるため、発声の際に生じる骨伝導音振動をそのまま音響信号に変換すると、モゴモゴしたこもった音質になってしまう。したがって明瞭性を良くするためには、高域周波数 (2~3 kHz 付近) 感度を高くしなければならない。そこで高域レベル補償は、圧電セラミック素子の共振周波数 (感度が高くなるポイント) をその高域周波数に合わせることで行う。圧電セラミック材料の原理的な共振周波数 $f_r^{10)}$ は

図 6 圧電セラミックの固定方法

図 7 圧電バイモルフ素子の共振周波数 f_r と厚さ t 、長さ l の関係

$$f_r = \frac{1.875^2}{4\sqrt{3}\pi} \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

Y_{11}^E : 圧電体のヤング率 (N/m^2)

t : 厚さ (m), l : 長さ (m), ρ : 密度 (kg/m^3)

として知られているが、実際のマイクとして使用する場合、複合化されたエレメントと、接着剤の影響等で (1) 式を適用するのが難しい。マイクイヤホンのように限定された条件下では、共振周波数 f_r と厚さ t と長さ l の関係は

$$f_r = (6.8t^2 \times 10^5 + 29t) / l^2 \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

の実験式が成り立つ (図7 参照)。

出力電圧 v は

$$v = \frac{\Delta Q}{c} = g_{31} \frac{f}{w} \quad (\text{V}) \quad (3)$$

ΔQ : 電荷の変化量 (C), c : 静電容量 (F)

g_{31} : 圧電出力定数

f : 応力 (N), w : 幅寸法 (m)

で求めることができる¹¹⁾。この出力電圧を FET を介して電気信号として取り出す。

2.3 イヤホン

イヤホンとマイクの両方の機能を備えたものを耳に装着するためには、ヘッドホンステレオ用イヤホンや補聴器用イヤホン等、小型のイヤホンを使用する必要がある。図8にイヤホンの一例を示し、その周波数特性を図9に示す。本例は装着性を考慮し、骨伝導マイクイヤホン用に開発した小型イヤホンである。音楽鑑賞用と比較して低域の特性は良くないが、音声为主体の通話用途としては十分な性能が得られるものである。

3. 骨伝導マイクイヤホンの問題点

3.1 音響結合

骨伝導マイクは、高感度な振動検出センサであるため、イヤホン内部の振動板の振動を容易に検出してしまう。その結果として起こる現象がハウリングおよびエコー感である。図10に発生要因の説明図を示す。

図8 小型イヤホンの構成

ハウリングは通話相手がアナログ電話回線である場合等にかかる可能性のあるもので、骨伝導マイクイヤホンにおけるマイクとイヤホンの音響的な結合と、アナログ電話機特有 (一対の電話線に送話信号と受話信号を同時に伝送している) の2線-4線変換のハイブリッド回路により生じる帰還のために起こる現象である¹²⁾¹³⁾。一方、エコー感は上記帰還の時間的遅延が大きい時に起こるもので、骨伝導マイクイヤホン使用者の通話相手が感じる「こだま」のことであり、骨伝導マイクイヤホンの音響結合および回線の遅延時間が主な原因である。

この問題解決のひとつとして、骨伝導マイクの設置角度に着目する方法がある。これは、骨伝導マイクを形成している圧電セラミックの振動検出感度特性に方向性があるという特徴を利用して音響結合を和らげるものである。すなわち、骨伝導マイクをマイクイヤホン内部に固定する際、骨伝導音声振動に対して検出感度が高くなるようにすると同時に、イヤホンが振動することにより生じるケースの振動に対しては、検出感度が低くなるようにマイク角度を設定するものである。

3.2 振動雑音

実用化の際の大きな問題点に、脱・装着時にマイクイヤホン本体を触ること、および送受信機との接続線が擦れることによって発生する振動をマイクが検出してしまうという雑音がある。この雑音レベルが比較的

図9 イヤホンの音圧周波数特性

図10 発生要因図

大きく、通話相手に不快感を与えるものとなることが多い。これを解決する手段としては、電気回路で処理する方法や、振動雑音を吸収する素材の使用、振動検出素子の固定方法等、いろいろな手段が考案されている。

3.3 装着感

実用化されている骨伝導マイクイヤホンは、マイク部を外耳道内へ挿入する形態のものとなっている。この構成においては、検出感度が大きく、かつ、振動検出素子が外部にさらされないため周囲騒音の検出を抑えることができる。しかし、外耳道の中へ直接振動検出素子を内蔵した突起物を挿入することにより、使用者に不快感、嫌悪感を与え、長時間の使用には痛みを伴ってくる可能性がある。したがって、マイクイヤホンの実現に際しては、長時間の使用に耐えうる形状となるように工夫する必要がある。

4. 骨伝導マイクイヤホンの一例

ここでは、骨伝導マイクイヤホンの一例として、上記の事項を踏まえて試作した装置について紹介する。試作品を写真2に示す。本品は外耳道に挿入せず、イヤホンとマイク全体が耳珠と対珠との間に収まる、装着面が平坦な形状を実現した（図11参照）。限られた寸法条件で骨伝導音を高感度、かつ安定的に検出するため、骨伝導マイクを耳甲介腔底面部に沿わせ、一面を接触させるようにした。また、イヤホンは前記した新規開発の外径10mmのダイナミック型スピーカを使用した。これによってより小型化を実現し、外耳道に挿入しないため使用者の圧迫感と痛みが軽減され、また、骨伝導マイクの一側面が全体にわたって振動を

検出するので、出力は数mV～数十mVを実現し、検出感度の改善が得られた。さらに、骨伝導マイク部が耳珠と対珠により押さえられるため、装着が安定し、検出感度も高感度の状態を保つことができるようになった。しかし、この形状によりマイク部が外耳道の外部に存在するため、マイク部のほとんどを外耳道

図11 耳介の構造とその周辺の名称

図12 骨伝導マイクの検出感度特性

写真2 試作品

図13 試作骨伝導マイクの長時間スペクトル平均 (20秒)

内に挿入してしまう構造のものと比較すると、対周囲騒音性能に 10 dB 程度の劣化がみられるが、気導型のマイクと比較すると、20 dB 以上の周囲騒音削減を実現している。

なお、外部回路の追加を行わずに音質を良くするため、マイク素子の共振点を 2.7 kHz 近傍として高域周波数を補償した。実際に試作した骨伝導マイクの周波数特性を図 12 に示し、このマイクを使用した時の周波数特性を図 13 に示す。この骨伝導マイクが気導音に近く、音質が優れていることがわかった。

5. む す び

骨伝導マイクは、騒音下での通話品質が優れていることがその特徴であり、屋外で使用する機会の多い携帯端末機に適したデバイスである。また、音声入出力デバイスとしてコンパクトにまとめることで、広くその応用が期待できる。

今後は、さらに骨伝導マイクイヤホンとして小型化、高音質化を進めると同時に、その主要部品である圧電セラミックについて、圧電出力定数の大きな材料を開発することが、低コストに向けた課題であるといえる。

超小型イヤホンの開発に関して御協力頂いた(株)アツデン技術部、圧電セラミック素子に関して御協力を頂いた(株)メガセラの皆様へ深く感謝致します。また、本開発品に関し、(株)クボタ事業開発室 田中俊取締役を初め、事業開発室諸氏の御協力を頂いたことを記し、ここに感謝致します。また、本開発に関して御指導、御助言を頂いた三菱電機(株)社内関係各位にお礼申し上げます。

(1995 年 10 月 31 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 柳沢, 隆旗: “高騒音下の音声通信における振動ピックアップの利用”, 日本音響学誌, 31, 3, pp. 213-220 (1975)
- 2) 丸谷, 寛: “骨導送話器を用いた電話機について”, 日本音響学会講演論文集, pp. 595-596 (1980)
- 3) 丸谷: “骨伝導送話の検討”, 電気音響研究会, 11, pp. 5-12 (1983)
- 4) 丸谷: “骨導送話器に関する基礎検討”, 研究実用化報告, 35, 10, pp. 1063-1071 (1986)
- 5) 丸谷: “骨導音の検討”, 電気音響研究会, 6, pp. 13-20 (1977)
- 6) 丸谷: “骨導変換器の検討”, 日本音響学会講演論文集, 10, pp. 149-150 (1976)
- 7) 西巻: “電気音響振動学”, コロナ社 (1955)
- 8) 早坂, 吉川: “音響振動論”, 丸善 (1983)
- 9) 実吉, 菊地, 熊本: “超音波技術便覧 新訂版”, 日刊工業新聞社 (1991)
- 10) (株)富士セラミックスカタログ
- 11) 日本特殊陶業(株)カタログ
- 12) 藤島: “音声データ混合ネットワークの設計法①”, コミュニケーションテクノロジー, 6, pp. 62-64 (1989)
- 13) 藤島: “音声データ混合ネットワークの設計法②”, コミュニケーションテクノロジー, 7, pp. 54-59 (1989)

いとう いきお
伊藤 勲 1963 年, 東京理科大学理学部物理学科卒業。(株)東光およびアルプス電気(株)にて、主として電子部品の研究開発に従事。現在、日本ゼックス(株)取締役技術本部長。

おき ゆか
沖 由香 1992 年, 中央大学理工学部電気電子工学科卒業。同年、三菱電機(株)に入社。現在、情報技術総合研究所において、骨伝導マイク等の音響機器の開発に従事。

くろだ えいいち
黒田 英一 1979 年, 電気通信大学電波通信学科卒業。1989 年, 三菱電機(株)に入社。現在、PHS 事業センターにおいて、PHS 端末の開発に従事。