特 集

骨伝導スピーカの技術と特性解析

Technology for Bone Conduction Speaker and its Characteristics Analysis

北川 亘^{*1} (正員), 竹下 隆晴^{*1}

Wataru KITAGAWA (Mem.) and Takaharu TAKESHITA

This paper presents the principle, characteristics and its analysis for bone conduction speaker. Bone conduction speaker has used under the sound noise, openable ear environment or by impaired hearing people because it is able to send the sound vibration directly to ear through the bone. In this article, introduce the 2 type of bone conduction speaker, then it is mentioned its analysis and results.

Keywords: bone conduction speaker, electromagnetic analysis, voice coil

(2017 年 5 月 15 日受付)

1 緒言

音を聞くという動作は、健常者であれば日ごろ意識せず行われているものである。言うまでもないことではあるが、音は振動であり、その波の振幅が音の大きさ、周波数が高低である。この波は、Fig.1 に示される、耳介によって集められ、外耳道が中耳に波を伝える。さらにこの波は外耳と中耳の境目に備わる鼓膜に伝わり、鼓膜が振動する。この振動が中耳に伝わる。中耳には、3 つの耳小骨と呼ばれる骨があり、この耳小骨を経由して内耳に伝わっていく。内耳には蝸牛と呼ばれるリンパ液が入っている器官であり、振動によってこのリンパ液が振れ感覚神経によってその振れが電気信号に変えられ脳に伝わるという仕組みである。この複雑な仕組みによって伝わる音を気導音と呼ぶ。一方、骨伝導はその名の通り、骨を仲介して音を伝える仕組みである。骨導音も実は我々が意識せずとも聞いている音である。自分の声にマイクを通し話す声、もしくは留守番電話等に録音した自分の声を客観的に聞いてみると、いつも自分が話している声とは違うように聞こえる。これは骨導音の影響である。骨導音をよく感じるには、耳を塞いだ状態で話してみるとよい。そのとき自分の声は、空気を伝わらず、頭部や顔面における頭蓋骨を経由し、直接内耳に伝わる音である。

Fig.1 Structure of ear.

有名なのは、作曲家ベートーベンに関する逸話である。ベートーベンが難聴となったとき、彼は自分の歯にタクトを咥えその先端をピアノにくっつけ、音の振動を直接聞いていたといわれている。これが本当であるならば、まぎれもなく骨導音を利用していたと考えられる。本稿では、この骨導音を利用した、骨伝導スピーカの原理、技術、その特性等について述べる。

2 骨伝導スピーカの製品

骨伝導スピーカは日本国内において、2000 年を過ぎたあたりから、その技術が注目されはじめ、数年後、骨伝導スピーカを利用した電話機が登場している。その後、携帯電話でも骨伝導スピーカを搭載したものが出始め、その技術は加速した。しかし、一般消費者の関心はその当時は非常に低く、それら製品は時代とともに少なくなっていく。そんな中、一般消費者

連絡先： 北川 亘, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
名古屋工業大学大学院 工学研究科 電気・機械工学専攻,
e-mail: kitagawa.wataru@nitech.ac.jp

^{*1} 名古屋工業大学

にはほとんど受け入れられなかったが、医療・看護系では注目されつつあった。難聴の障害を持つ患者や、音が聞こえにくくなった年配の方々を対象とした製品群である。医療・介護機器メーカーでは、骨伝導補聴器や骨伝導増幅器として継続して開発を続け、その技術を高めてきた。この間、いくつかの製品タイプが登場している。

- ・ 耳の中に入れるイヤホンタイプ
- ・ 耳の横あたりにモジュールをつけるヘッドホンタイプ

- ・ 眼鏡のツル部分にモジュールを装着するタイプ
- ・ 歯にモジュールを装着するタイプ
- ・ 耳にモジュールを挟むクリップタイプ

どのタイプも、骨を媒介して直接振動を伝えるため、その原理は変わらない。骨導音の特徴として、一般的に 30kHz 程度以上が不明瞭であるといわれていたが、近年では、その特性を大幅に改善したハイレゾリユーションモジュールも市販されつつある。

3 骨伝導スピーカ基本構造と原理

3.1 一般構造

本章では、ヘッドホンタイプの骨伝導スピーカの構造について述べる。骨伝導スピーカの一般的な構造はダイナミクスピーカ方式を利用している[1]。Fig.2 にダイナミクスピーカの構造例を示す。この構造例では可動コイル、振動板及びリング状磁石で構成されている。可動コイルは電流が流れることによって上下に振動しそれに伴い振動板が振動し、その振動が頭蓋骨などの骨を通じて聴覚神経に伝わることで音が聞こえる仕組みとなっている。

Fig.2 Type of moving coil loudspeaker.

3.2 基本ボイスコイルモデル

本節では、ダイナミクスピーカ方式の中で、最も基本的な構造である基本ボイスコイルモデル[2,3]を紹介する。Fig.3 がヘッドホンタイプの外観図である。サンプルであるので、モジュールは先端の透明な樹脂の中に入っていることが分かる。Fig.4 にそのモジュール本体である基本ボイスコイルモデルの全体構造を示す。この構造はマグネット、ヨーク、コイル、コイルケース、樹脂ケース、樹脂カバー及び振動板で構成されている。また、マグネットの剥離を防止するために、樹

Fig.3 Sample of Headphone type.

(a) Outside structure.

(b) Inside structure.

Fig.4 Whole structure of basic voice coil model.

Fig.5 Magnetic flux flow.

脂カバーを用いてマグネットを支持している。この構造はコイルケースに磁性体の近接部を設けているため、マグネットから出た磁束の多くが振動板上部の空気ではなく近接部に流れるような構造となっている。さらに、マグネットから出た磁束が直接マグネットへ戻り難くするためにマグネットの形状は円錐台を採用している。したがってこの構造の振動板上面の漏れ磁束は少なくなり、磁路の無駄がほとんどない構造である。Fig.5 にリングマグネットモデルの磁束の流れを示す。これらの構造の駆動部はヨークとボイスコイルによって構成され、ヨークの磁極部はボイスコイルの中央から円柱状に突き出ており、ボイスコイルはヨークの磁極部の周囲に巻かれている。振動部はマグネットと振動板によって構成され、マグネットは振動板の下部に接着されており、ヨークの磁極部と向かい合っている。また、ヨークとマグネットの間にはギャップが設けられている。これらの構造はボイスコイルに音声信号による電流が流れることによって、ヨークとマグネットの間の吸引力が変化し、それに伴いマグネットと振動板が振動し、それを頭蓋骨などの骨に当てることによって音が聞こえる仕組みとなっている。駆動原理としては、マグネットは軸方向上向きに着磁されており、ボイスコイルに反時計回りの電流が流れる場合、ヨークを通るマグネットによる磁束とボイスコイルに流れる電流による磁束が同方向に流れる。つまり、ヨークを通る磁束が強め界磁となり、マグネットとヨークの間の磁気吸引力が強められる。ボイスコイルに時計回りの電流が流れる場合、ヨークを通るマグネットによる磁束とボイスコイルに流れる電流による磁束が逆方向に流れる。つまり、ヨークを通る磁束が弱め界磁となり、マグネットとヨークの間の磁気吸引力が弱められる。以上のように、ボイスコイルに流れる電流の向きが時刻と共に変化することによって、マグネットとヨークの間には一定のバイアスが掛かりながら磁気

吸引力は変化し、振動板が振動する。

3.3 高低音出力型 2 way モデル

前節では、基本ボイスコイルモデルの構造を示したが、このモデルでは、可聴音域における全周波数をカバーできないため、振動板を上部と下部に高音域用振動板、低音域用振動板として設置した 2 way モデルも提案されている[4]。本節ではその構造を紹介する。Fig.6 に 2 way モデルの全体構造を示す。この構造は振動板、樹脂カバー、マグネット、ボイスコイル、非磁性体板、ヨーク、コイルケースで構成されている。基本ボイスコイルモデルと同様にマグネットの剥離を防止するために樹脂カバーを設置しており、ヨークを支持するためにステンレス材の非磁性体板を設置している。マグネットの体積は高出力を得るためにそれぞれ基本ボイスコイルモデルと同じ体積のものを使用している。そのため使用しているマグネット量はリングマグネットモデルの 2 倍となっている。マグネット量が倍増し、マグネットとヨークの磁気吸引力が増加するため、基本ボイスコイルモデルよりもギャップを広げている。次に 2 way モデルの特徴を述べる。この構造は上部に高周波域に適した基本ボイスコイルモデルと等しい形状の振動板を設置しており、下部には振動板のアーム部分や天板部分の厚みを変更することで低周波域に適した振動板を設置している。下部の振動板の設計方法については後述する。マグネットは共に上向きに着磁されており、上部マグネットから出

Fig.6 Whole structure of 2 way model.

た磁束がコイルケース、下部マグネット及びヨークを
通ってループする。

4 骨伝導スピーカの特性解析

4.1 電磁界解析諸元

本章では、前章で紹介した 2 つのモデルの特性解析
について述べる。両モデルのボイスコイルに流す電流
は正弦波で、反時計回りを正としている。電流の大き
さは 14.76 mA とし、実際の使用条件と合わせている。
また、周波数は 100-4000 Hz の範囲を用いており、100-
1000 Hz は 100 Hz 刻みで 1000-4000 Hz は 500 Hz 刻み
で解析する。一般的に、人間の可聴域は 20 Hz-20 kHz
と言われているが、本解析でこの範囲の周波数を用い
ているのは、100 Hz 以下の低周波数の音、及び 4000 Hz
以上の高周波数の音はその多くが骨に吸収されてしま
い、聴覚神経まで届かないことが実験的に分かっている
ためである。本解析では音声信号電流として正弦波
電流を使用して解析している。また、積分路はヨーク
とマグネットの中間部分にとっているため、ギャップ
部分は積分路付近となるため、他の部品よりもメッシ
ュを細かく分割している。

4.2 音圧レベル

音圧は大気圧に対する圧力の変化である。人が聞く
ことが出来る最小の音圧は、 $20 \mu\text{Pa}$ である。もし周波
数が等しいならば、高い音圧の音が大きな音である。
しかし、一般的には音を評価する時に音圧は使われず、
音圧レベル(SPL)が使用される[5]。音圧レベルは各節
点の音圧 P と最小音圧 P_{ref} の割合の対数をとったもの
であり、可聴音圧レベルは、0 dB から 140 dB である。
音圧レベルは次式で与えられる。

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{|P|}{\sqrt{2} P_{ref}} \right) \quad (1)$$

本解析において、各節点の音圧 P は振幅値で、最小音
圧 P_{ref} は $20 \mu\text{Pa}$ で一定値である。各節点の音圧 P は、
音圧条件に設定された面の変位速度や振動モード及び
測定地点によって一意に決まる。音圧条件とは、本解
析で設定される条件の一つであり、一般的に変位する
部分の表面を音圧条件に設定している。そのため、本
解析では振動板とマグネットで構成される振動部の表
面を音圧条件に設定する。振動モードは固有モード解

析[6]の結果から得られ、測定地点は評価面と呼ばれる
面で定義される。これらの条件から、各節点の音圧 P
は、評価面における波の重ね合わせの理によって計算
される。

4.3 電磁界解析結果

Fig.7 に基本ボイスコイルモデルの推力特性を示す。
ボイスコイルを流れる電流は大きさが 14.76 mA で、
周波数は 100-1000Hz を 100 Hz 刻みとする。しかし解
析結果より、周波数によって推力特性の peak-to-peak 値
及び平均値は変化しないことが確認されたため、100
Hz 以外の周波数は省略する。またこの推力特性は、電
磁界解析の結果から得られた磁束密度より、マクスウ
ェルの応力法[7]によって計算されている。積分路はヨ
ークとマグネットの間にあるギャップの中間部分に取
っている。Fig.7 より、正弦波状の推力特性が得られて
おり、正弦波電流に対応していることからこの構造は
原理通りに動作していることが確認できる。peak-to-
peak 値は 0.038 N、平均値は-3.33 N である。Fig.8 に 2
way モデルの推力特性を示す。2 way モデルも同様に
周波数によらず、推力特性の peak-to-peak 値及び平均
値は等しいため、100 Hz 以外の周波数の推力特性は省
略する。Fig.8 (a)より、2 way モデルの上部のギャップ
の推力特性の peak-to-peak 値は 0.01 N であり、平均値
は-1.06 N である。また、Fig.8 (b)より、下部のギャ
ップの推力特性の peak-to-peak 値は 0.01 N であり、平均
値は-1.10 N である。基本ボイスコイルモデルと比較し
て、上下ギャップ間の推力特性は peak-to-peak 値及び
平均値共に大きく低下しているのは 2 way モデルのマ
グネットの体積が基本ボイスコイルモデルと比較して、
半分であることや、磁路が長くなった上、空気部分を通
る磁束が多くなったことが主な理由である。

Fig.7 Thrust characteristic of basic voice coil model.

(a) Thrust characteristic of upper part.

(b) Thrust characteristic of lower part.

Fig.8 Thrust characteristic of 2 way model.

(a) Basic voice coil model.

(b) 2 way model.

Fig.9 Distribution for magnetic flux density of each structure.

Fig.9に基本ボイスコイルモデルと2 wayモデルの磁束密度分布を示す。解析条件は前節と等しいため省略する。磁束密度の範囲は0-1.63 Tとしており、2 wayモデルの振動板、ヨーク及びコイルケースの材料であるステンレス材の飽和磁束密度と合わせている。Fig.9より、共にヨークは飽和していないことが確認できる。

4.4 音圧レベル解析結果

Fig.10に基本ボイスコイルモデルと2 wayモデルの音圧レベルのグラフを示す。これらは電磁界数値解析の推力特性及び固有モード解析の結果を入力荷重とした連成解析によって得られた結果である。音圧条件は振動板とマグネットで構成される振動部の表面とし、評価面はそれぞれ振動板に接する球面とする。Fig.10より、基本ボイスコイルモデルと2 wayモデルは共に可聴音を生じており、100-1000 Hzの2 wayモデルの音圧レベルは基本ボイスコイルモデルと比較すると16.1%高い。また1000-4000 Hzにおける音圧レベルは共に同等の値が得られた。

4.5 測定結果

本節では実機検証の際に用いた実験条件について説明する。サンプルについては基本ボイスコイルモデルと2 wayモデルの測定を行った。実験方法として、はじめにファンクションジェネレータを用いてボイスコイルに10-20 kHzの正弦波電流を印加する。その際に発生する振動を人工マストイドで検出し、チャージコンディショニングアンプを介してFFTアナライザで読み取る。出力は、1/3 オクターブ解析結果である。Fig.11-Fig.12に実験結果を示す。Fig.11より、基本ボイスコイ

Fig.10 Sound pressure level.

Fig.11 Measurement result of basic voice coil model.

Fig.12 Measurement result of 2 way model.

ルモデルの最大出力は 33.93 dBm/s²r であるが、500 Hz 以下の周波数域において出力が低く、4 kHz 以上の周波数域の出力も低くなる傾向が読み取れる。Fig.12 より、サンプルの最大出力は 33.72 dBm/s²r であり、250-2 kHz 間では比較的フラットな特性を示していることが分かる。

5 結言

本稿では、骨伝導スピーカに関する技術や原理またそれらに使用される基本構造例とその解析について述べた。この骨伝導スピーカの技術は、今後また盛り上がりを見せ、一般消費者の目にも多く留まる製品となる可能性を多く秘めている。この技術のさらなる発展が期待される。

参考文献

- [1] 吉川 滉也, 北川 亘, 竹下 隆晴, 増田 明弘, 中嶋政広, 中谷 明子, 中谷 任徳, 小型骨伝導スピーカの設計と特性解析, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム (SEAD2015), pp91-96
- [2] Koya Yoshikawa, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita, Akihiro Masuda, Masahiro Nakashima, Akiko Nakatani, and Hidenori Nakatani, Design and Characteristic Analysis for New Structure of Bone Conduction Speaker, 21th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2014), Proceedings of ICEM 2014
- [3] Koya Yoshikawa, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita, Akihiro Masuda, Masahiro Nakashima, Akiko Nakatani, and Hidenori Nakatani, Improvement Efficiency and Miniaturization of Bone Conduction Speaker, Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (APSAEM2014), Proceedings of APSAEM 2014
- [4] 吉川 滉也, 北川 亘, 竹下 隆晴, 増田 明弘, 中嶋政広, 低周波域拡大のための骨伝導スピーカの設計と特性解析, 第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku (MAGDA2015), pp409-414
- [5] J. W. Kim and M. J. Bae, A Study on Hearing Loss According to Sound Pressure Level of The Ear-Phone, KEE Trans, Vol. 32, No. 1, pp.1086-1087, 2009.
- [6] Xuezhi Zheng, Volski. V, Vandenbosch. G. A. E, and Moshchalkov. V. V, Eigenmode analysis of plasmonic scatterers by volumetric integral equation tech-nique,, Antennas and Propagation, pp.618 - 621, 2013.
- [7] Meessen. K. J, Paulides. J. J. H, and Lomonova. E. A, Force Calculations in 3-D Cylindrical Structures Using Fourier Analysis and the Maxwell Stress Tensor, IEEE Trans Vol.49, pp. 536 - 545, 2013.