

「自動車運転支援を目的とした骨導受聴システムに関する研究」

伊藤 憲三（岩手県立大学 名誉教授，前 ソフトウェア情報学部 教授）

<要旨>

自動車等を運転している場合の音（おと）情報の提示には、通常、スピーカーあるいはヘッドホンである。ハンズフリーという観点からは、ヘッドホンよりスピーカー提示が安全性の観点から有効である。そこで、オープンイヤー型のヘッドホンがあれば、スピーカー提示の音情報に加え、緊急情報やそれ以外の情報も個別に提示することが可能となる。本研究では、その実現方法の一つとして、骨導音による方法について検討を加えた。

1 研究の概要

車を運転している場合の音情報の提示方法は、通常、スピーカーあるいはヘッドホンである。ハンズフリーという観点からは、ヘッドホンよりスピーカー提示が安全性の観点から有効であるが、オープンイヤー型のヘッドホンがあれば、スピーカー提示の音情報に加え、緊急情報やそれ以外の情報も個別に提示することが可能となる。本研究では、その実現方法の一つとして、骨導音の基礎的な受聴特性を探ると共に、以下の事項について具体的な検討を加えた。(1)効率的な駆動部位の検討。(2)駆動方式の検討、(3)単語了解度試験による性能評価。

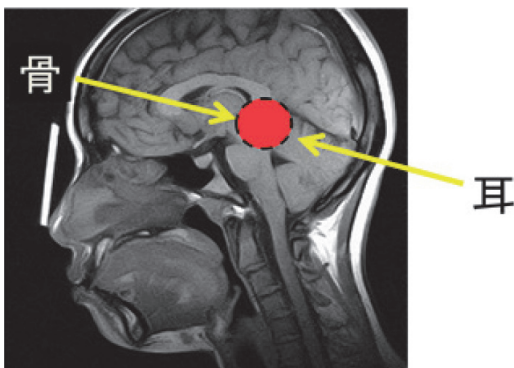


図1 骨導と気導のイメージ図

2 研究の内容

2-1 骨導の基本特性の計測

骨導音は、通常的气導音と異なって音の伝搬経路がより複雑である。ここでは、骨導音の聴こえの基本特性の計測とその効果を、気導音と比較しながら検討を加えた。さらに、骨導音と気導音の頭内加算効果についても検討を加えた。

図2は、骨導と気導の音の経路を示すものである。気導経路は、外耳道、鼓膜、耳小骨、蝸牛、そして聴神経を經由して第1次聴覚野と繋がっている。一方、骨導経路では、頭骨を直接刺激することになるので、音振動情報は、同図の点線で示すように、外耳道、耳小骨、蝸牛を同時に振動させるため、より複雑となる。この

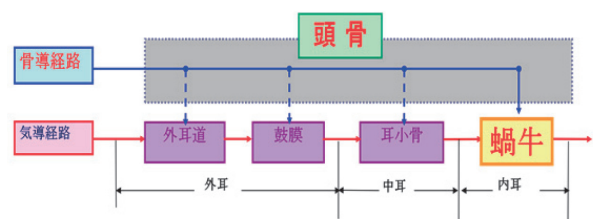


図2 骨導と気導の信号伝達経路

中でも、蝸牛の刺激振動が一番大きいと考えられている。この場合、骨導と気導を同時に刺激した場合には、当然であるが蝸牛で両者が加算されることが予想される。

骨導音が「どの程度聴こえているか？」を直接計測する手法は確立されていない。ここでは、図3に示すような実験系（計測手法）で計測することとした。すなわち、骨導音で聴いた音の大きさと、気導音の大きさと同じ音量で聴こえる時の音量を、被験者の耳介付近で計測し、その時の音量を骨導音の「聴こえの」音量とする。これをここでは「等価音量」と呼ぶ。

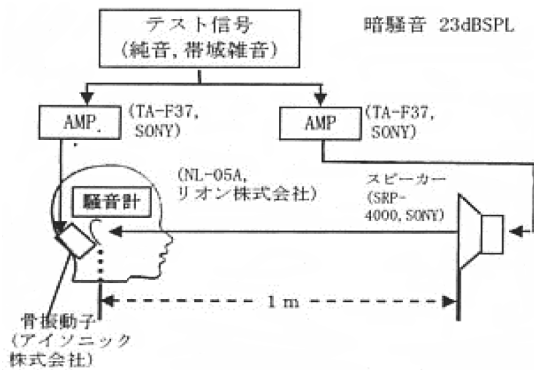


図3 骨導音の音量を計測する実験系

2-2 頭部における駆動部位と伝導効率

図4(a)(b)に、今回検討した頭部の駆動位置を示した。「歯」を含む頭部の駆動部位において、等価音量呈示法(*)を用いて骨導受聴時における信号の伝導効率に関する検討を行った。

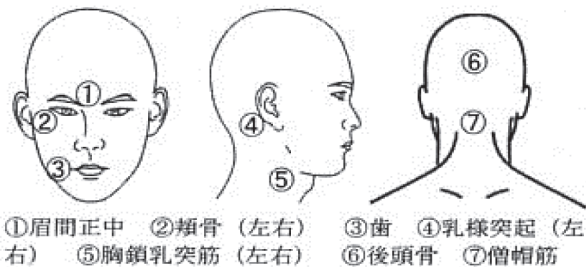


図4(a) 頭部の駆動位置を示す図

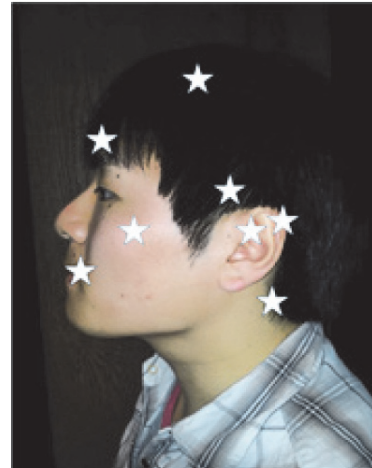


図4(b) 頭部の駆動位置を示す写真

その結果を図5に示した。同図の、横軸は駆動部位、縦軸は受聴レベルを等価音量 (dB)で示した。同図から、頭部における駆動部位は、「歯」が最も伝導効率が高いことが分かった。しかし、実用的な観点からは、耳介周辺部位（特に耳介部）が有効である。「(*) 骨導音を呈示し、その時の音量が気導音の音量と同じに聴こえる条件の気導音レベルを、その部位における等価音量と呼ぶ」

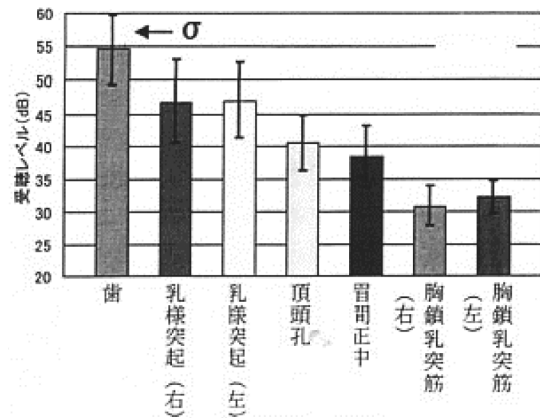


図5 駆動位置と受聴レベルの関係

2-3 駆動方式に関する検討

駆動方式について、消費電力、重量、あるいは形状の自由度などの観点から検討を加えた。対象とした駆動方式は、電磁（電動）方式と圧電方式の2種類である。その結果、新しい圧電素子の開発により、電磁駆動より軽量・低消費

の骨導振動子（ユニット）が実現できた。図6 (a)(b)に、電磁・圧電方式のユニットを示した。(a)の電磁駆動形のユニットは、重量：30g，最大入力電力：100mwである。また、(b)の骨導ユニットは、2g，最大入力電力：20mwであり、携帯端末等への応用には、圧電型のユニットの方が有利と考えられる。周波数帯域は、電磁式で30Hz～8000Hz、圧電式で50Hz～100KHzであり、こちらは超音波域までもカバーできる。

表1 骨導駆動用の振動子の特長

振動子	電磁(電動)型	圧電型
駆動力	◎	△⇒○
重量	×	◎
価格	△	◎
扱い易さ	△	◎



図6(a) 骨導ユニット（電磁式）

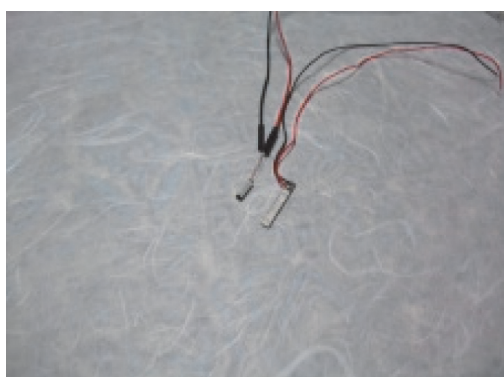


図6(b) 骨導ユニット（圧電式）

図7(a)(b)は、骨導ユニットを駆動するための電力増幅器（アンプ）である、(a)は電磁用、(b)は圧電用である。



図7(a) 骨導ユニット駆動用増幅器（電磁型）



図7(b) 骨導ユニット駆動用増幅器（圧電型）

2-4 骨導方式における性能評価

圧電ユニットの部分に「消しゴム」を細工して駆動部を構成し、これを耳介上部に埋め込み、音楽や音声信号を受聴してみたところ、十分な音量・音質で聴くことができた。そこで、この方式で聴こえ（単語理解度）を定量的に測定することとした。

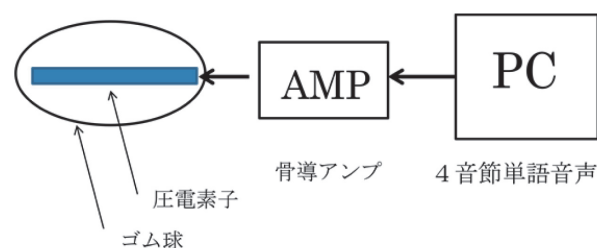


図8 単語理解度試験の概要

単語は、4モーラで構成される「親密度（*）の高い」ものを用い、ランダムに20単語を1セットとして受聴してもらった。被験者は正常な聴力を有する大学生10名である。この単語了解度試験の結果から、通常環境騒音（60dB程度）において、十分な音量条件（等価音量：65dB程度）であれば100%の了解度が得られることが分かった。図8は、単語了解度試験に用いた骨導振動子の様子を示した。音声資料は、国際情報学研究所とNTT研究所が協力して作成した単語了解度用音声データベースで、親密度は1～5段階で設定されている（親密度別単語了解度試験用音声データセット：FW07）。図9は、振動子の設置状態を示した。この部位は、骨導での駆動部位で「歯」に次いで伝導効率の高かった位置である。

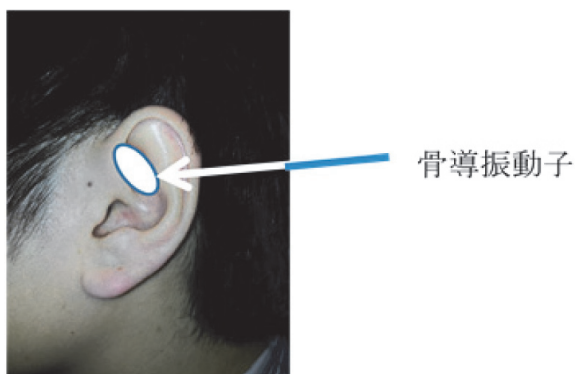


図9 主観評価実験での骨導駆動部位

2-5 骨導音と気導音の加算効果

我々は通常、気導音を聴いて生活しているが、これに骨導音が同時に呈示された場合には、どのような聴こえになるのでしょうか？ 前述の図2に示すように、骨導音における信号伝達経路では、主に蝸牛において気導音と加算される。このような条件下では、我々の音の世界が一変する可能性がある。図10は、この骨導音と気導音の頭内における加算効果のイメージを示す図である。同図から、仮に骨導音と気導音のそれぞれの信号が、同相の場合と逆相の場合には、蝸牛における加算効果は異なってくる。例えば

同相の場合、信号パワーは算術的に2倍となり、逆相の場合には零となる。しかし、実際には信号伝達経路は複雑であるため、同相では低域信号パワーの増加、逆相では相対的に広域信号成分が強調されることとなる。

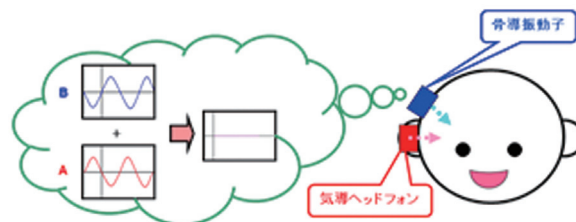


図10 骨導音と気導音の加算効果のイメージ図

以上の加算効果を確認するために、次のような実験を行った。すなわち、信号源を一つにし、骨導伝達系に信号遅延回路を挿入し、気導音と骨導音を同時に受聴し、その時の聴こえについて実験をおこなった。用いた実験系を図11に示した。信号源は、純音と楽音の2種類を用いた。

まず、純音の場合は、次のように評価した。被験者は、骨導音と気導音を同時に聴き、「音量の消失感」に着目して評価する。実際の評価は、聴受レベルに着目して、消失感のレベルに応じて「非常に小さい」～「非常に大きい」までの5段階で行った。

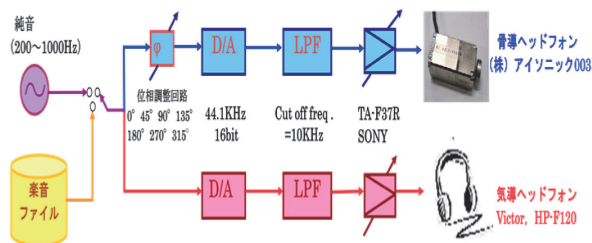


図11 骨導音と気導音の加算効果を求める実験図

図12は、純音を用いた実験結果を示した。横軸は骨導と気導の位相差（度：°）を、縦軸は音像の消失感（1：非常に小さい～5：非常に大きい）を示している。同図から、聴こえの特

長として、位相差180°近辺に山形を形成しており、低い周波数とその効果が顕著であることが分かる。このことから、骨導音と気導音を同時に呈示した場合には、その加算効果を十分に引き出せることが分かった。また、その効果は周波数の低い所で顕著であり、周波数が高くなると伝搬経路の複雑さによって低減されていることも予想される。

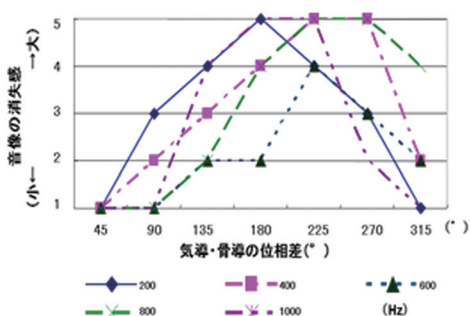


図12 蝸牛加算効果の実験結果（純音）

一方、楽音を用いた実験では、対比較実験を行った。すなわち、骨導音と気導音を同時受聴した場合、同相と逆相の「どちらを好むか？」を選択させた。その結果、声楽やピアノ曲の両者において、同相が好まれた。被験者の受聴の感想から、同相では「重みのある」「重厚な」音質になっていることが分かった。これは、図13に示すように、蝸牛での加算効果によるものであり、同相では低域パワーが増加することによる低域強調、逆相ではその逆の広域強調となる。

以上の実験結果は、まだ途についたばかりの検討ではあるが、骨導受聴システムの新しい応用に結びつくことが期待されるものである。

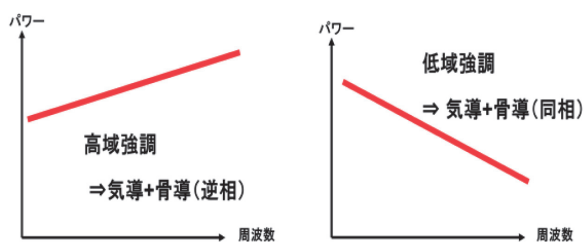


図13 蝸牛加算における聴こえの周波数特性(仮想)

3 これまで得られた研究の成果

以下の3点の結論を得た。(1)頭部における駆動部位は、「歯」が最も伝導効率が高いことが、実用的な観点からは、耳介周辺部位が有効である。(2)駆動方式では、消費電力、重量、あるいは形状の自由度などから、電磁駆動より圧電式が有効である。(3)単語了解度試験の結果から、通常的环境騒音(60dB程度)において、十分な受聴音量(60~70dB SPL)であれば100%の了解度が得られる。

また、新たな研究成果として、蝸牛における骨導音と気導音の加算効果があることがわかり、今後新しい骨導受聴システムの可能性が示された。

図14は、骨導受聴システムの一応用例を示したものである。骨導では、通常の耳はオープンになっているので、例えば、自動車運転時においてカーオーディオを聞きながら、携帯通話が可能になる。また、高騒音下での作業指示や情報授受、高齢者用の音楽・TV受聴、あるいは事務所における音情報授受などが可能になる。

骨導と気導の加算効果の応用については、豊かな受聴システムの構築はもちろんのこと、歯科における「嫌われる研磨音」の低減などにも応用できると考えられる。



図14 骨導受聴システムの応用例

4 今後の具体的な展開

本研究成果は、特に自動車運転時の「音情報」の提示方法の新しい手法として利用できる。今後は、イヤーマールドなどの中に、圧電ユ

ニットを埋め込み、より実用的な形態で受聴試験を繰り返し、商用化に向けた検討を進める予定である。また、蝸牛加算効果の新たな応用についても検討を加える。

5 論文・学会発表等の実績

なし

6 受賞・特許

なし

7 その他

(参考文献)

- ・伊藤、“きめ細やかな補聴技術”、小特集－バリアフリーと音響技術－、日本音響学会誌、54巻5号、399-405 (1998)
- ・新版聴覚と音声、三浦種敏、電子通信学会編、pp400～407
- ・天野、近藤、坂本、鈴木、“親密度別単語了解度試験用音声データセット (FW07) ”、NII音声資源コンソーシアム (2007) 等