

厚生労働科学研究費補助金

感覚障害研究事業

新しい音伝導ルートによる新補聴システムの開発
—現存の気導補聴器が使用できない難聴者（耳漏のある耳、外耳道閉鎖症など）も使用可能な補聴器の開発—に関する研究

平成22年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 細井 裕司

平成 23 (2011) 年 3 月

目 次

I. 総括研究報告	-----	1
軟骨伝導補聴に関する研究	-----	2
細井裕司		
II. 分担研究報告	-----	21
1. 軟骨伝導のメカニズムの解明と改良型軟骨伝導補聴器の作製	-----	22
西村忠己		
2. 軟骨導振動子を用いたラット聴性脳幹反応の測定	-----	39
柳井修一		
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	48
IV. 研究成果の刊行物・別刷	-----	50

I. 總括研究報告

研究代表者 細井 裕司 公立大学法人 奈良県立医科大学 医学部 教授

研究要旨

超高齢化社会において、日常生活の自立支援に関連して補聴器の重要性はますます増大する。補聴器の性能は近年向上してきたが、中耳炎で耳漏がある難聴者や外耳道が閉鎖している難聴者では気導補聴器が使用できない。骨導補聴器は固定が困難で使用は限られている。骨導補聴器の固定の問題を解決するために開発された BAHA (Bone Anchored Hearing Aid) は手術が必要で術後の合併症も報告されている。気導補聴器が使用できない難聴者に対し、手術を要せず新しい音伝導ルート（耳珠軟骨経由）を用いた補聴システムを開発する。

補聴システムの作製は、振動子の開発と本体の作製からなる。作製した補聴システムは、数値計算を用いシミュレーションを行い、実際の人の耳での音の伝導効果、歪などを予測し補聴器の設定に役立てるほか、実際のヒトの耳を用いてその効果について検証する必要がある。それらの結果を用いて調整した補聴器を再評価し徐々に最適な状態へと近づけていく。

さらに人の耳での音の伝導効果を明らかにするため、軟骨伝導音の伝導経路について検証した。軟骨伝導音の伝達経路として以下の3つが考えられる。

- ① 振動子から気導音が直接鼓膜に到達する経路（直接気導音）
- ② 耳軟骨の振動が外耳道に放射され鼓膜に到達する経路（軟骨経由気導音）
- ③ 耳軟骨の振動が頭蓋骨に伝わり内耳に到達する経路（骨導音）

そこで本研究は、直接・軟骨経由気導音を比較するため物理測定（外耳道内音圧測定）、気導音・骨導音を比較するために心理実験（ラウドネスマッチングテスト）を行った。その結果、直接気導音に比べて軟骨経由気導音は、3 kHz 以下の低い周波数帯域で大きいことがわかった。また心理実験の結果から、鼓膜に音が到達する場合は気導音、そうでない場合は骨導音を手がかりに音を知覚している可能性が示唆された。よって、軟骨伝導補聴器は会話に必要な周波数帯域を補うものであり、気導音がほとんど聞こえない難聴者には骨導音でそれを補う効果があることが示唆された。

また本研究では、軟骨伝導音がクロスヒアリングを起こしにくいという特徴を生かし、軟骨伝導音による音の方向感に関する実験を行った。その結果、両耳間強度差 (IID) を手がかりに軟骨伝導音でも音像定位が可能であることがわかった。よってこの補聴器は会話のしやすさを支援するだけでなく、車が近づく方向を把握して危険を回避するなど安全面においても優れているといえる。

研究分担者

西村忠己（公立大学法人 奈良県立医科大学・助教）

柳井修一（東京都健康長寿医療センター研究所 老化制御研究チーム・研究員）

A. 研究目的

現存の気導補聴器が使用できない難聴者を主たる対象として、気導でも骨導でもない新しい音伝導ルートである軟骨導を用いた補聴器を開発する。手術をすることなく良好な音伝達ができる補聴器の開発は、BAHA（Bone Anchored Hearing Aid：手術によって頭蓋骨にボルトを埋め込み、このボルトに骨導振動子を固定するタイプの骨導補聴器）の適応の難聴者に大きな福音となる。本研究では、軟骨導を用いるための振動子を開発し、それを使用した補聴システムを作成する。その上でその新しい補聴システムの効果について実際の臨床で使用し検討する。

また臨床研究と平行して、補聴システムの性能評価も行う。耳軟骨に振動子を接触させると良好な音情報が得られる現象を元に軟骨伝導補聴器の開発・研究は進められているが、実際どのような経路を伝播して音情報が伝わってくるのか明らかになっていない。本研究は音情報が伝わる経路として以下の3つを考えている（図1）。

- ① 振動子から外耳道の空気を伝播し鼓膜に到達する経路（振動子→鼓膜→内耳）
- ② 振動子による耳軟骨の振動から外耳道内の空気を伝播し鼓膜に到達する経路（振動子→耳軟骨→鼓膜→内耳）
- ③ 振動子による耳軟骨の振動が頭蓋骨を伝播し直接内耳に到達する経路（振動子→耳軟骨→頭蓋骨→内耳）

便宜上①を直接気導経路、②を軟骨経由気導経路、③を骨導経路と呼ぶ。また②と③は一度軟骨を経由して伝わる音情報なので、軟骨伝導音と呼ぶ。

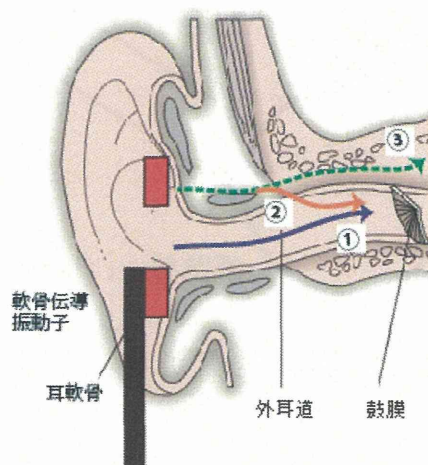


図1 軟骨伝導振動子からの伝達経路

本研究ではまず直接気導音と軟骨経由気導音を比較するため、接触条件・非接触条件で

の外耳道内音圧レベル測定を行った。接触条件とは軟骨伝導振動子を装用した条件、非接触条件とは振動子を装用せず外耳道入り口付近に接近させた条件である。つまり接触条件では直接・軟骨経由両気導音が、非接触条件では直接気導音のみが外耳道内に伝わるので、両条件での音圧レベルを比べることによって直接・軟骨経由気導音の割合が明らかとなる。

続いて気導経路と骨導経路の比較を行うが、骨導経路に関しては非侵襲的に頭蓋骨の振動を測定することが困難である。そこで心理実験による比較を行う。外耳道開放条件・閉鎖条件でラウドネス（心理的音の大きさ）マッチングテストを行った。外耳道開放条件とは軟骨伝導振動子を装用した条件、閉鎖条件とは耳栓で外耳道を埋めて軟骨伝導振動子を装用した条件である。つまり開放条件では直接・軟骨経由両気導音・骨導音、閉鎖条件では骨導音のみが音情報を伝えるので、両条件でのラウドネスを比べることによって気導音・骨導音の割合が明らかとなる。

上記の伝播経路に関する実験に加えて、本研究では軟骨伝導振動子による音の方向感に関する実験を行った。音の方向感は両耳に入る音情報の差異によって得られる（図2）。例えば音源が水平面上の右側にある場合、聴者の右耳に到達する音は左耳のそれよりも早くて大きい。つまりわれわれは両耳に到達する音の時間差（Interaural time difference: ITD）と強度差（Interaural intensity difference: IID）を手がかりとして音源の位置を把握している。一般的な気導補聴器は、両耳装用すると両耳の外耳道を塞ぐことになり、大きな閉塞感から長時間装用に不向きである。しかし軟骨伝導補聴器は、リング状の振動子が外耳道の開放を保つため、この装用感に関する不具合がない。こういった利点を生かし今回新たに開発した軟骨伝導補聴器（HD-GX3）は両耳装用タイプである（後述の西村氏分担研究報告書参照）。コンピューターでITDとIIDを調整しヘッドホンで気導音を提示すると、聴者の頭内に音像が定位し、ある種の方向感を得ることができる（音像定位、Localization）。そこで本研究ではITD・IIDを調整した軟骨伝導音を被験者に提示し、気導音と同様の精度で音像定位できるかどうか検証した。

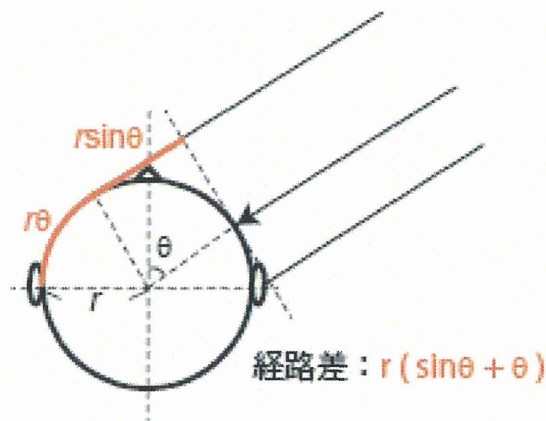


図2 聴者に対して右方向から音が到来する場合の両耳間経路差

B. 研究方法

1. 軟骨導振動子を用いた補聴器の開発

①補聴器のシステムの開発

既存の気導補聴器のシステムを改良し軟骨導振動振動子から十分な出力が得られる

試作機を作製する。

②補聴器の最適化の検討

音質調整機能、最大出力音圧、雑音抑制機能など既存の補聴器が備えている機能を流用する形で作製した試作機は必ずしも最適な状態であるとはいえない。軟骨導振動子を使用したときに最適なるように調整機構の再設定が必要である。そのために必要なデータの測定を行い最適化を行う。

③形状の改良、小型化

現在ポケット型の試作機を改良小型化し、より使用しやすい耳掛け型の試作機を作製を行う。

④装用効果を高めるため両耳装用の補聴システムを作製する。

⑤ハウリングを防止するためクロスヒアリングできるシステムを作製する。

2. 聴取実験について

1) 方法

軟骨導振動子を専用のシステムに接続して音圧制御下に聴取実験を行う。

2) 呈示音

①純音

②ウォーブルトーン

③言語音

3) 対象

①両側聴力正常者を対象に聴取実験を行う。

正常耳を用いて種々の音圧で音伝導効率を検討する。

②一側聾の症例を対象として聴取実験を行う。

対側耳へのクロスヒアリングを検討する。

③感音難聴者を対象に聴取実験を行う。

感音難聴者への適応を検討する。気導補聴器、骨導補聴器との比較を行う。

④耳漏のない伝音難聴者を対象に聴取実験を行う。

伝音難聴者への適応を検討する。気導補聴器、骨導補聴器との比較を行う。

⑤気導補聴器が使用できない中耳炎耳、外耳炎耳を対象に聴取実験を行う。

耳漏のある中耳炎耳、外耳炎耳など気導受話器が装着できないか装着することが原疾患

に悪影響を及ぼす症例に対し聴取実験を行う。

⑥気導補聴器が使用できない片側、両側外耳道閉鎖症例に対し聴取実験を行う。

骨導補聴器と比較する。

(倫理面への配慮)

本聴取実験においては、日常聴取している程度の音を聞くのみで、強大音などの聴取はないので、被検者に不利益は考えられないが、聴力正常被検者、難聴被検者に実験の目的、手法を十分に説明し、協力を得る。

3. 接触・非接触条件での外耳道内音圧測定

1) 軟骨伝導振動子

使用する軟骨伝導振動子（圧電バイモルフ一枚構成型・NEC トーキョー）の振動・音響特性を調べた。振動子に加速度ピックアップ（Type 4374, B&K）を両面テープで接着し、防振台の上で振動加速度を計測した（図 3a）。また振動子の前方 3 mm の位置にプローブマイクロフォン（Type 4182, B&K）を配置して音圧を計測した（図 3b）。軟骨伝導振動子に入力した刺激は 125 Hz から 16000 Hz まで 1/12 octave 間隔でステップ状に周波数を変化させた正弦波信号で、入力電圧は 0.5, 1, 2 V の三段階に変化させた。加速度ピックアップ・プローブマイクロフォンで得られた振動加速度・音圧はプリアンプ（Type 2692, B&K）と AD/DA コンバータ（UA-1000, Roland）を経由してパソコンに収録した。振動子への出力も同様のコンバータを利用した。サンプリングレートは 44.1 kHz、量子化ビット数は 16 bit である。測定は奈良医大耳鼻科所有の防音室内で行った。

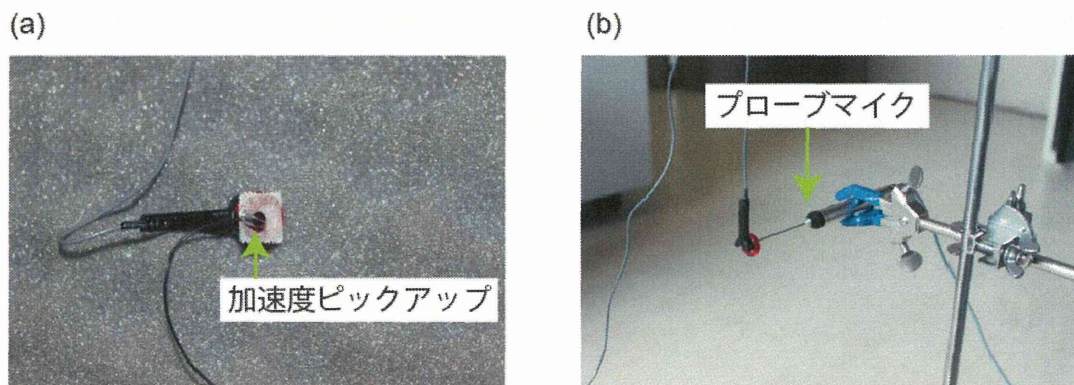


図 3 振動子の(a) 振動加速度計測と(b) 音圧計測

振動子が発する振動と音の周波数的特徴を図 4 に示す。加速度振動レベル・音圧レベルは式 (1) により求まり、 P_{ref} は加速度振動レベルで 10^{-6} m/s^2 、音圧レベルで $20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ である。

$$Level = 10 \log_{10} (p^2 / p_{ref}^2) \quad (1)$$

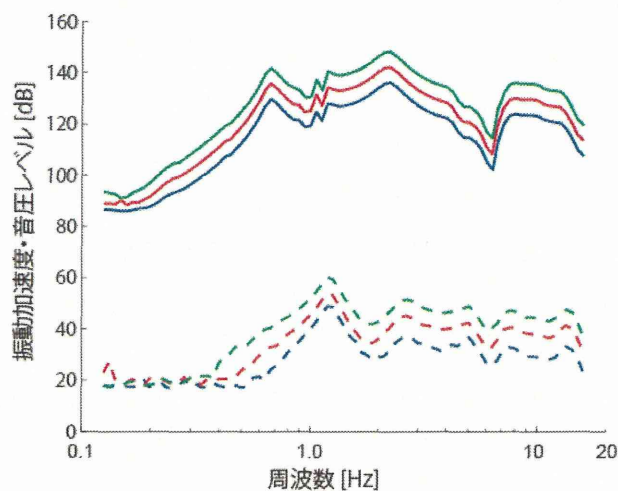


図 4 振動子の振動加速度レベル（実線）と音圧レベル（点線）（—: 2 V, —: 1 V, —: 0.5 V）

振動は周波数帯域 0.8 - 2.5 kHz で強く振動している。これは後述の西村氏分担研究報告書内でも確認できる。よって振動子に使われる圧電素子の素材・形状に起因した機械的特徴といえる。加速度振動レベルに比べると、音圧レベルは低周波数帯域の減衰が大きい。低周波数帯域の音は大気中で拡散するので、これは大気への発散特性と考えられる。

2) 被験者

3名の外耳道に疾患のない男性被験者を選んだ（年齢 34, 29, 28 歳）。軟骨伝導振動子での振動が各被験者の耳軟骨にどのように伝わるのか調べるため、加速度ピックアップを被験者の耳珠に両面テープで接着し、耳軟骨での振動加速度を計測した（図 5）。振動子に入力した刺激、またその他測定手順は 1) と同様である。



図 5 耳軟骨における振動加速度測定

耳軟骨での振動加速度レベルを図 6 に示す。振動子がバンドパス型 (0.8 - 2.5 kHz) の振動特性を有するのに対し、耳軟骨では 1 kHz 以下で強く揺れるローパス型の振動特性を有した。これは耳軟骨自身の振動特性と考えられる。過去の研究によると、豚の耳軟骨（軟部組織：2 mm、皮質：2 mm）を透過する音は低い周波数ほど大きくなる（岡本、2003）。このことから人間の耳軟骨においても同様の透過特性が得られたのだと考えられる。

3) 測定手順

外耳道内音圧測定にはプローブマイクロフォンを用いた。安全のためプローブの先にゴムチューブをつけ、外耳道入り口から 20 mm の深度で外耳道に挿入した。接触条件では、被験者は振動子を装用し、振動子のリングの穴からプローブを挿入した（図 7a）。このとき直接気導音と共に間接気導音も外耳道内に流出されるはずである。

非接触条件では、実験用スタンドから宙吊りした振動子を外耳道入り口に近づけ、振動子と耳軟骨の隙間からプローブを挿入した（図 7b）。このときは直接気導音のみが外耳道内に放射されるはずである。振動子と外耳道入り口との距離は 7 - 10 mm であった。

両条件とも振動子とプローブが接触しないよう注意した。振動子に入力した刺激、被験者、またその他測定手順は 1) と同様である。

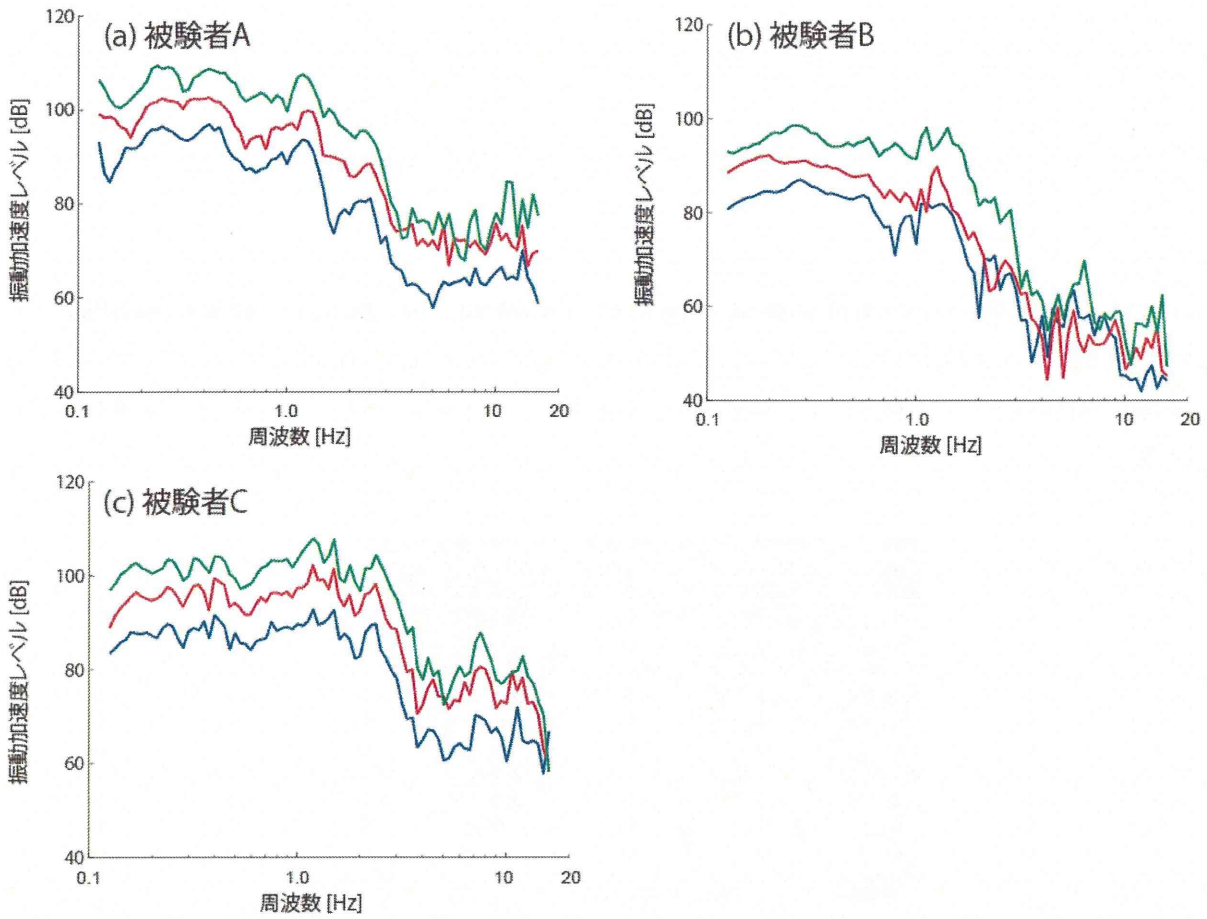
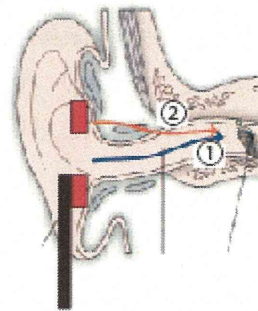


図6 耳軟骨の振動加速度レベル（実線）と音圧レベル（点線）（—: 2 V, -: 1 V, —: 0.5 V）

(a) 接触条件



(b) 非接触条件

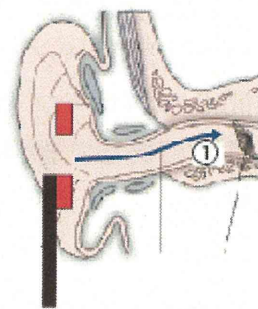


図7 (a) 接触条件・(b) 非接触条件における外耳道内の音圧測定

4. 外耳道開放・閉鎖条件でのラウドネスマッチングテスト

1) 被験者

2名の聴覚正常な男性被験者を選んだ（年齢 34, 29 歳）。純音聴力検査による結果を図 8 に示す。

2) ラウドネスマッチングテスト

軟骨伝導振動子による入力音（基準刺激）を左耳に与え、そのラウドネスを右耳に与えた気導入力音（比較刺激）で調整する心理実験を行った（図 9a）。比較刺激の提示には挿入型イヤホン（EAR Tone 3A, E-A-R）を用いた。

入力した刺激は 250 Hz から 8000 Hz まで 1/3 octave 間隔でステップ状に周波数を変化させた正弦波信号で、入力電圧は 0.5, 1, 2 V の三段階に変化させた。被験者にはモニターで操作画面を提示し、入力音の切り替え（軟骨入力音 or 気導音）、気導音の音圧調整、決定を行ってもらった（図 9b）。まず軟骨入力音（左耳）を与え、被験者はそのラウドネスが記憶できたら切り替えスイッチで提示を気導音（右耳）に変える。そしてスライダーを上下させて軟骨入力音のラウドネスに合うよう気導音の音圧を調整する。切り替えスイッチで両者のラウドネスを微調整し、両者のラウドネスが同等だと判断したら決定ボタンを押す。決定された気導音の音圧レベルを軟骨入力音のラウドネスとした。

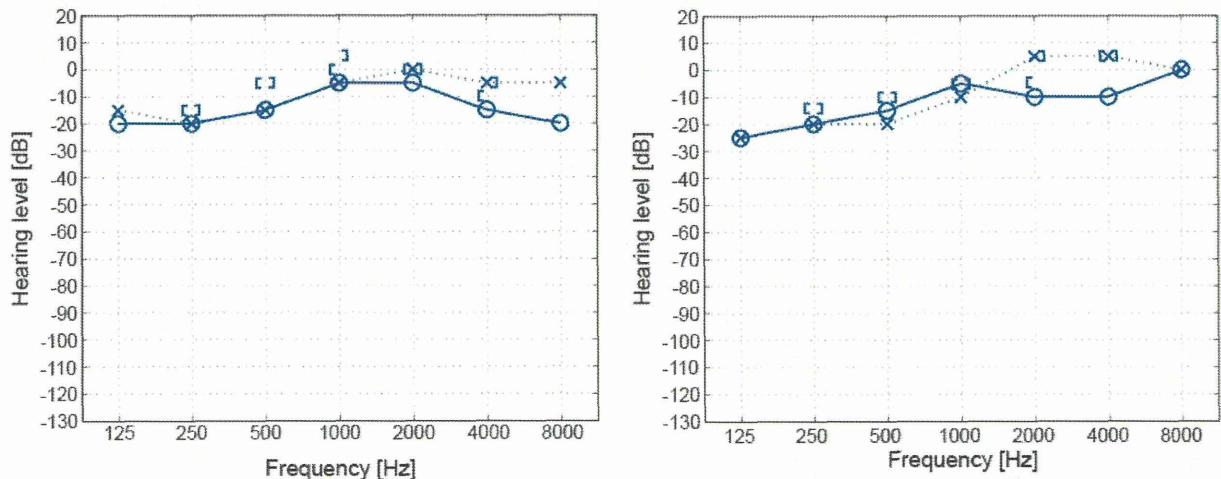


図 8 被験者 A・B のオージオグラム（○：右耳気導、×：左耳気導、[：右側骨導、]：左側骨導）

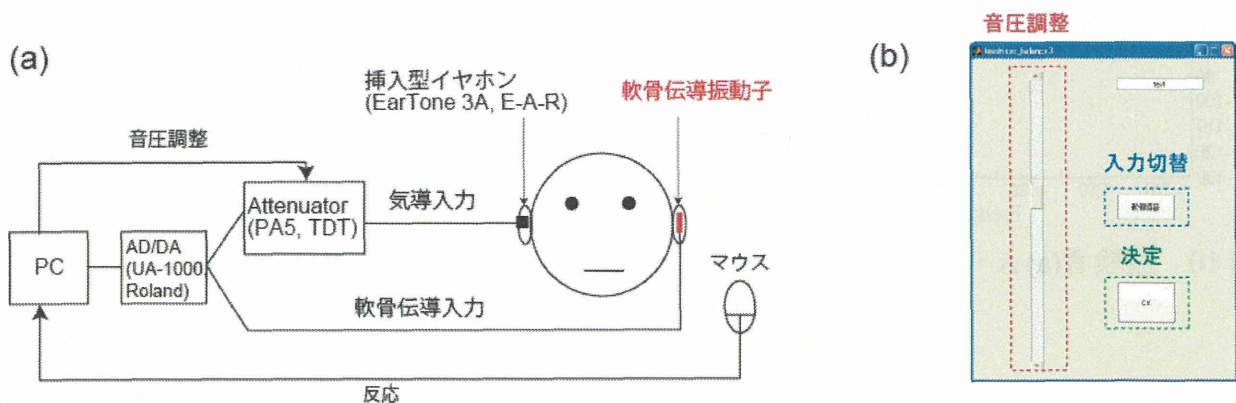


図 9 (a) ラウドネスバランス実験ブロックダイアグラム、(b) モニター画面

このラウドネスマッチングテストは外耳道開放・閉鎖条件で行った。外耳道開放条件では軟骨伝導振動子を通常通り装用し、閉鎖条件では耳栓を用いて外耳道に進入する気導音成分を遮蔽した。テストは奈良医大耳鼻科所有の防音室内で行った。

5. 軟骨伝導音による音の方向感実験

1) 刺激

刺激はホワイトノイズと4種類の純音(0.25, 0.5, 1, 2 kHz)であった。それぞれの刺激に対し、ITD ($AT_r - AT_l$, where AT_l, AT_r : 左耳・右耳への到達時間 [ms]) は-0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6 ms の7段階、IID ($SPL_r - SPL_l$, where SPL_l, SPL_r : 左耳・右耳での音圧レベル [dB]) は-10, -5, -2, 0, 2, 5, 10 dB の7段階で変化させた。

2) 被験者

3名の聴覚正常な被験者を選んだ(年齢30, 29, 22歳)。純音聴力検査による結果を図10に示す。

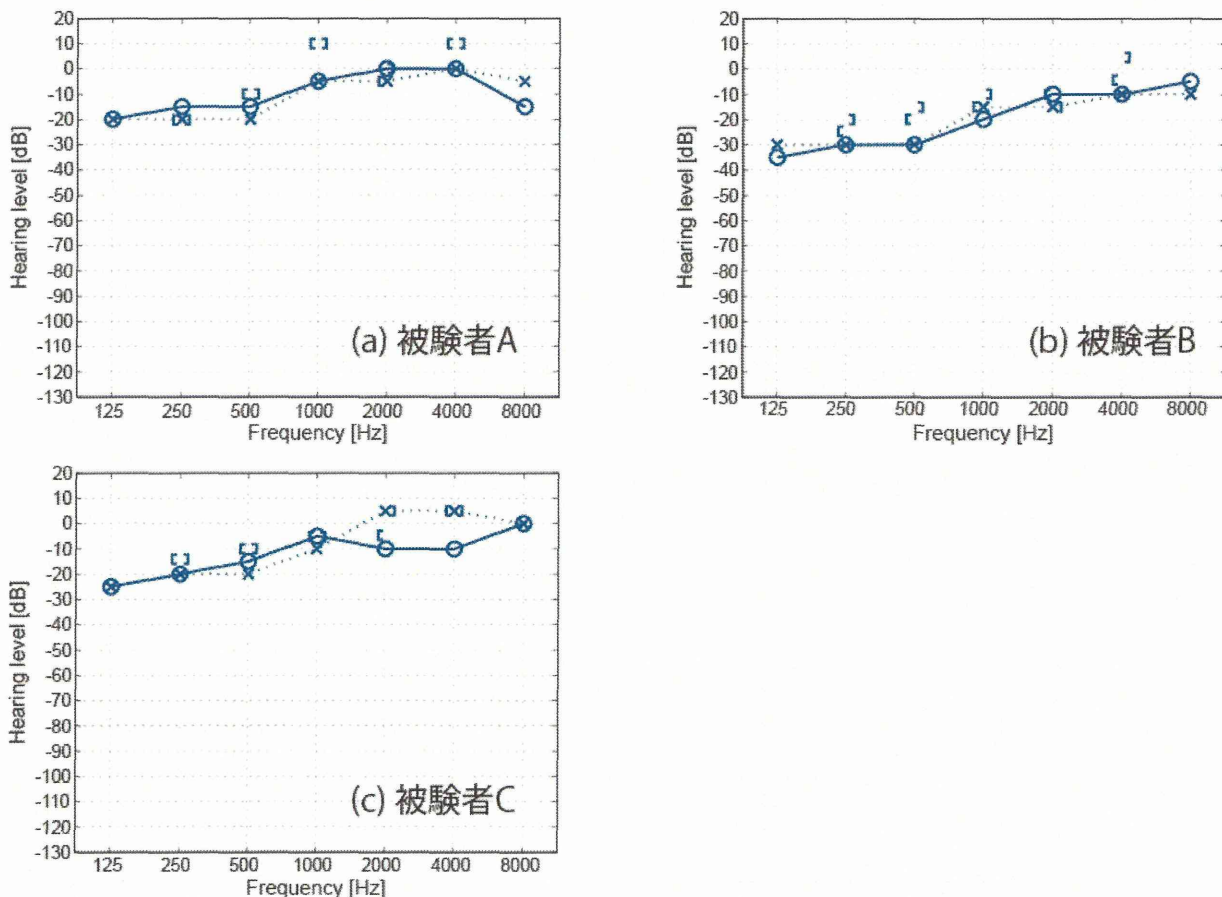


図10 被験者(a)A・(b)B・(c)Cのオーディオグラム (○: 右耳気導、×: 左耳気導、[: 右側骨導、] : 左側骨導)

3) 実験手順

刺激提示は被験者の両耳に行った。提示条件は、ヘッドホン提示(気導音)、軟骨伝導振

動子提示（軟骨入力音：直接気導音と軟骨伝導音）の2条件であった。

まず ITD = 0、IID = 0 の刺激の音像が被験者の中心に来るよう音圧レベルで微調節を行った。その後刺激をランダムに提示し、被験者は提示された刺激に対して音像の位置を半円白地図の上にプロットする投影法を行った（図 11）。刺激の提示時間、音像位置回答時間はともに2秒であった。実験は奈良医大耳鼻科所有の防音室内で行った。

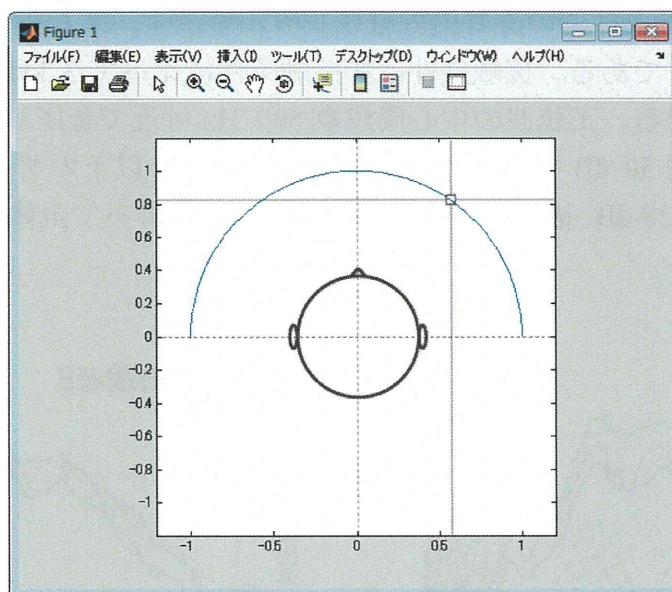


図 11 方向感実験の投影法

C. 研究結果

1. 軟骨導振動子の性能を最も生かすための補聴器の選択と開発

軟骨導振動子を装着して試作する補聴器の元になる補聴器としてリオンのデジタル補聴器を選択した。このデジタル補聴器に開発した振動子を装着し、補聴器の試作器を完成し、HD-GX および HD-GX2,3 と名付けた。

HD-GX はポケット型の形状をしており、HD-GX2,3 は耳掛け型である。HD-GX2 では軟骨導振動子は通用の補聴器のスピーカよりも電力消費が激しいため、既存のシステムをそのまま使用することが困難であった。必要な電力を確保するために電池挿入部分を改良し、通常1つしか入らない場所に3個の電池の挿入を可能とした。しかしながら連続しよう時間は3時間程度である。そこで外部のリチウム電池を電源とする HD-GX3 を作製した。今後回路、振動子を見直すことで電力消費を抑える必要があると考えられた。また HD-GX2 耳掛け型であるため、マイクと振動子の位置が近くなり、ハウリングがおきやすいことも判明した。このためハウリング抑制機能の強化とマイクと振動子の位置を離すことが可能な HD-GX3 の作製を行った。今年度作製した新しい HD-GX3 の詳細な仕様については、分担研究者西村忠己の項で詳細を示した。

2. 軟骨導補聴器の効果についての検討

作製した振動子、補聴器を用いて聴取実験および難聴者で実際の日常生活で使用してい

ただきその効果について評価を行った。その結果昨年度に報告と同様な効果を認めた。軟骨伝導についての詳細について検討するため聴取実験を行った。その結果周波数ごとに伝導経路および効率の違いがあることが分かった。結果についての詳細は分担研究者西村忠己の項で述べる。

3. 接触・非接触条件での外耳道内音圧レベルの比較

図 12 に接触・非接触条件での外耳道内音圧レベルを示す。スムージングのためこれは 3 回測定平均値のデータである。接触条件は非接触条件に比べて 3 kHz 以下の低周波数帯域で音圧レベルが高くなる。正弦波の中心周波数 500 Hz 付近で音圧レベルは最も高くなり、その差（ゲイン）は約 50 dB であった。中心周波数 3 kHz 以下のゲインの平均は被験者 A で 33 dB、被験者 B で 28 dB、被験者 C で 26 dB であった。よって全体の平均ゲインは 29 dB である。

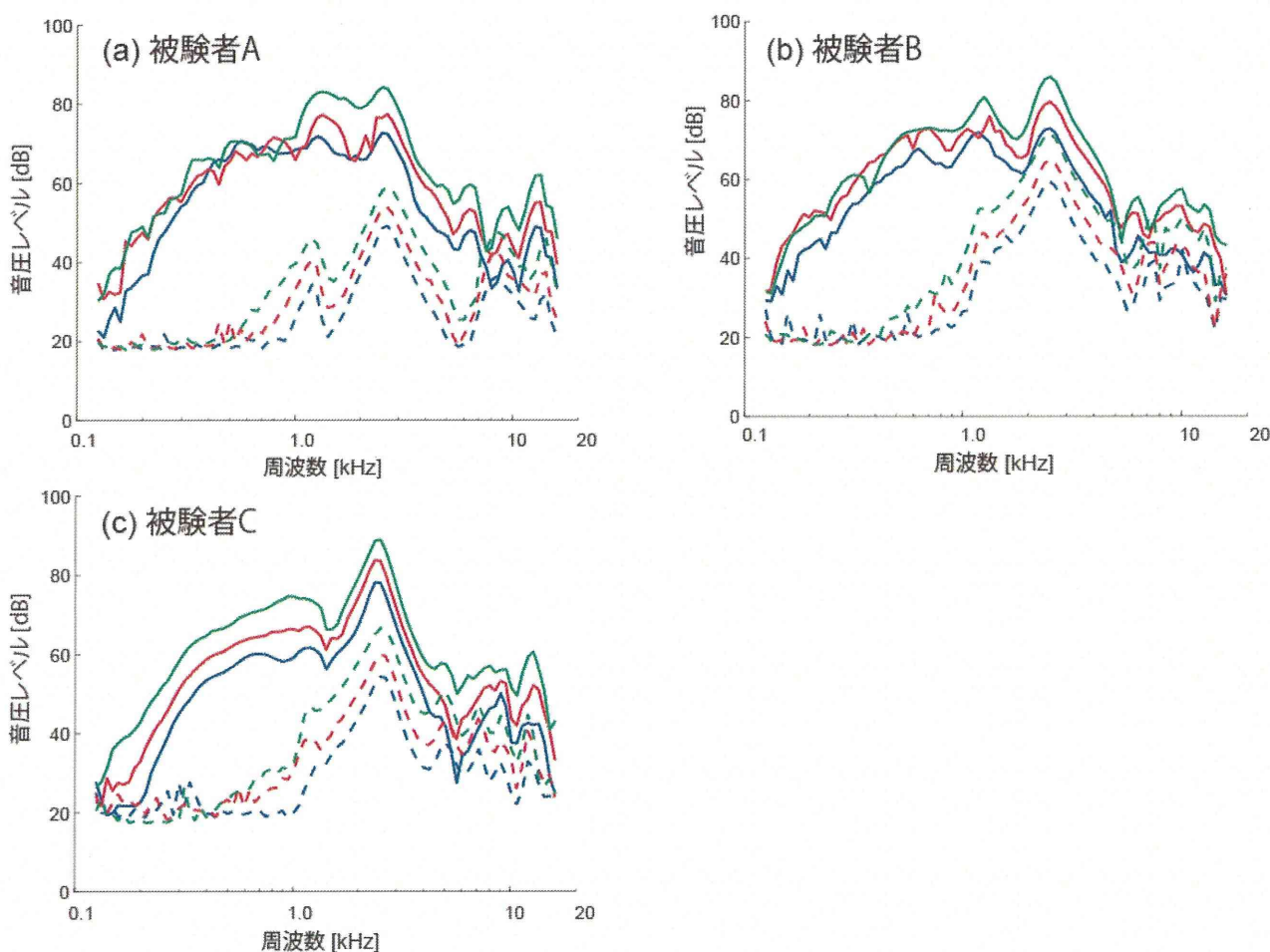


図 12 接触（実線）・非接触（点線）条件の外耳道内音圧レベル（—: 2 V, —: 1 V, —: 0.5 V）

4. 外耳道開放・閉鎖条件でのラウドネスの比較

図 13 に外耳道開放・閉鎖条件でのラウドネスを示す（実線）。スムージングのためこれは 3 回測定平均値のデータである。開放条件では中心周波数 2 kHz 付近で、閉鎖条件では 1 kHz 以下の低周波数帯域でラウドネスが最も高くなった。この図に各被験者で測定され

た外耳道内音圧レベル、耳軟骨振動レベル（点線）を加えると両者はよく一致した。開放条件のラウドネスと外耳道内音圧レベルとの相関値は 0.57（被験者 A）、0.73（被験者 B）閉鎖条件のラウドネスと耳軟骨振動加速度レベルとの相関値は 0.89（被験者 A）、0.94（被験者 B）であった。

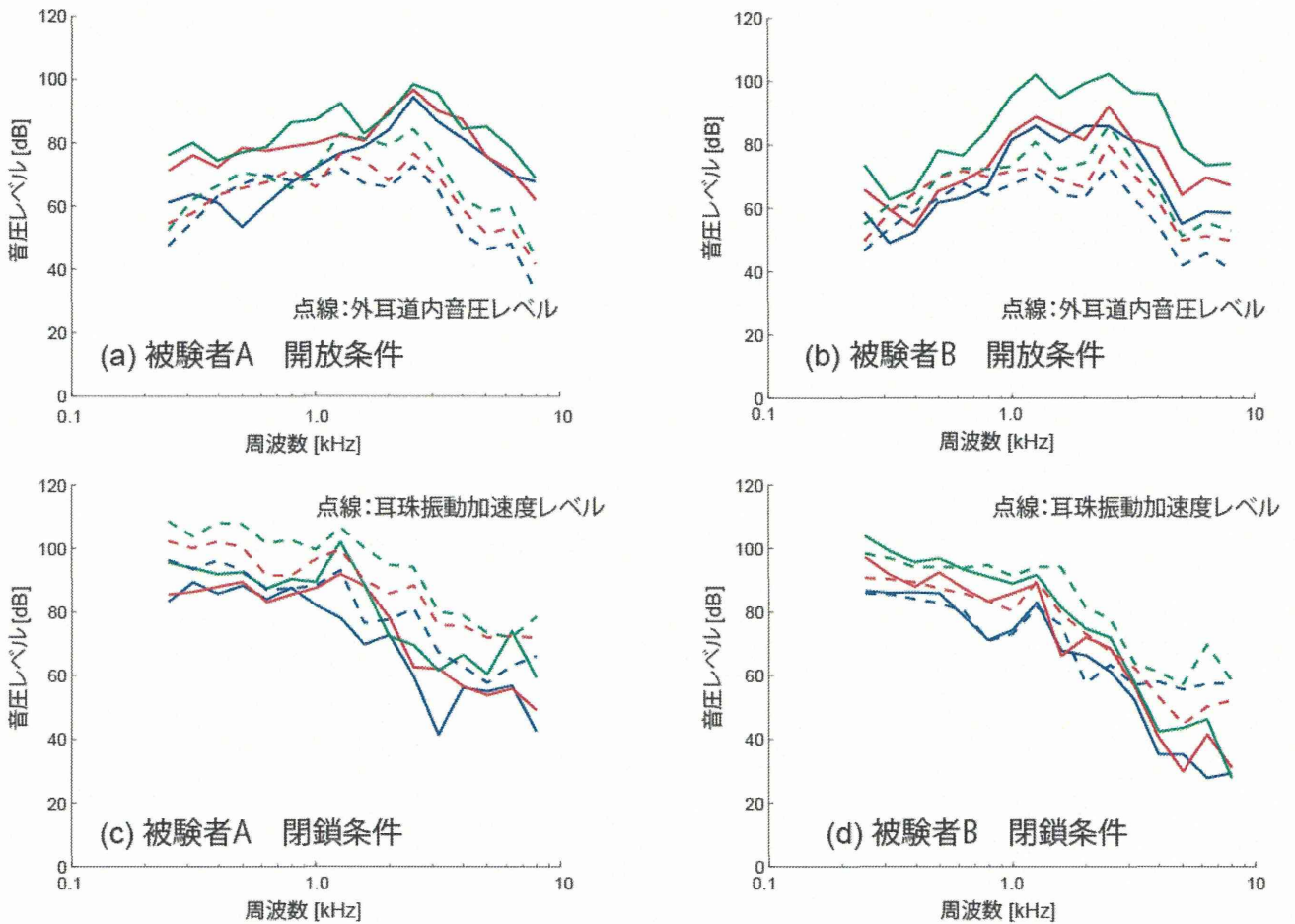


図 13 開放 (a, b)・閉鎖 (c, d) 条件でのラウドネス（点線：外耳道内音圧レベル (a, b)・耳珠振動加速度レベル (c, d)、—: 2 V, —: 1 V, —: 0.5 V)

5. 軟骨伝導音による音像定位

図 14・図 15 に ITD を変化させた場合の気導音・軟骨入力音の水平到来方向を示す。さらに図中に回帰直線を各被験者に対して表示した。ホワイトノイズをヘッドホンで提示した場合、ITD が負のときは左側に、正のときは右側に音像を知覚していた（図 14a）。ヘッドホン提示の場合、純音 250 Hz、500 Hz までは同様の左肩上がり結果を得られるが、純音 1 kHz、2 kHz ではその傾向が見えなくなった。これは低い周波数に対して ITD が効果的であるという従来の研究の結果と一致している（Shaw, 1974）。

一方ホワイトノイズを軟骨伝導振動子で提示した場合、同じ左肩上がりの図が描けているが、ヘッドホン提示の結果と比べると定位精度が低かった（図 15b）。また純音に対する音像定位も精度が低かった。中には ITD が負のときは右側に、正のときは左側に音像を知覚する被験者も見受けられた。

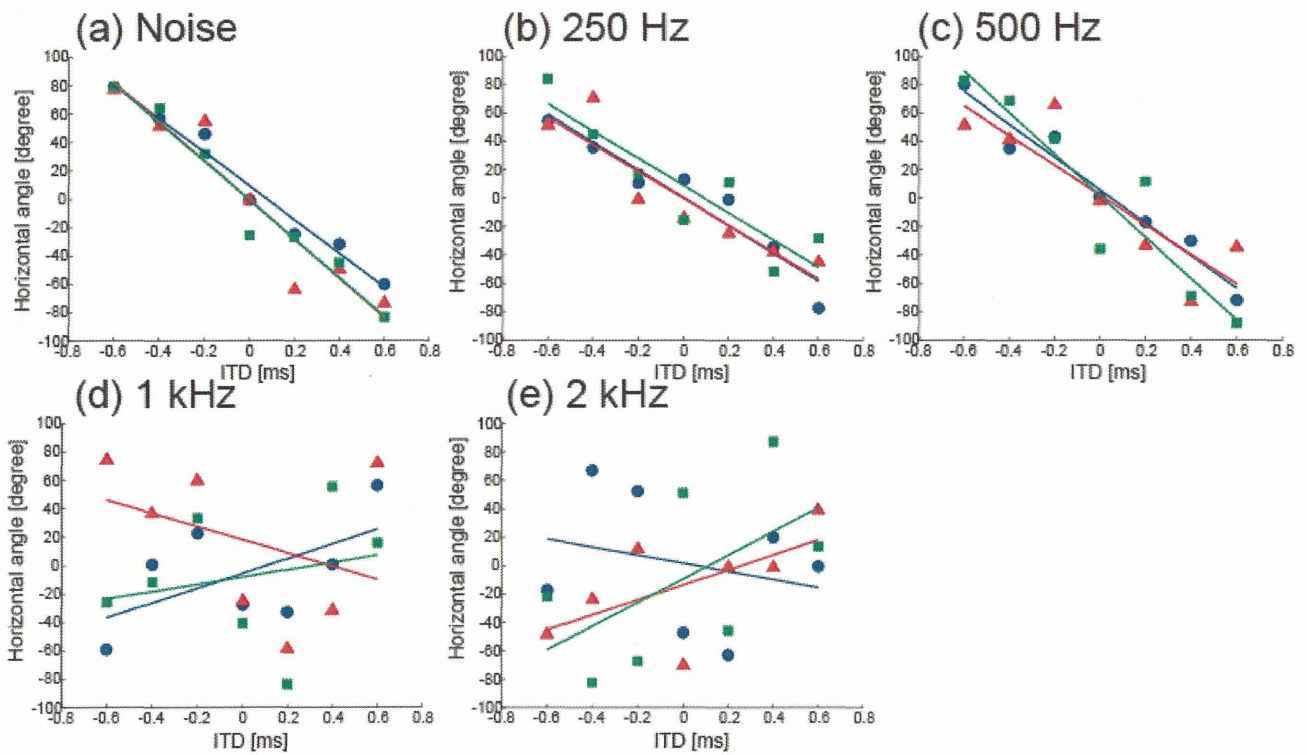


図 14 ITD を変化させた場合の気導音による水平方向到来角

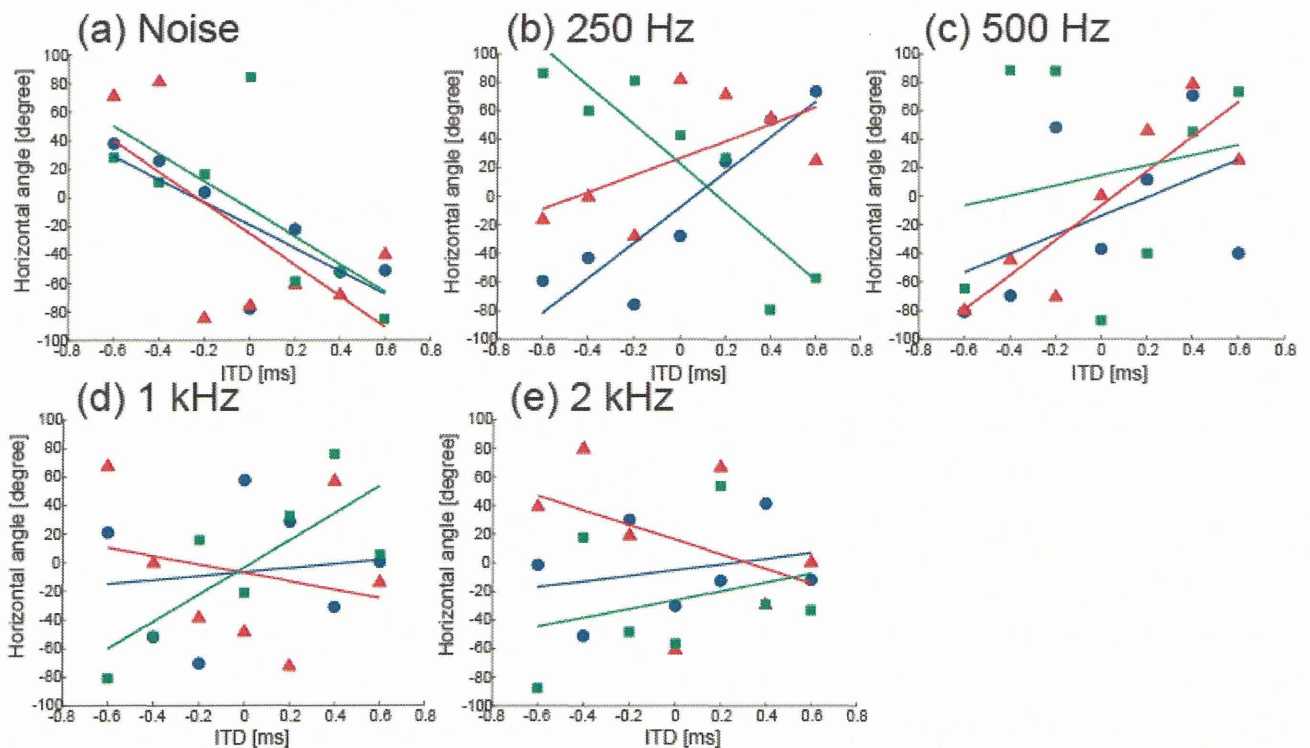


図 15 ITD を変化させた場合の軟骨入力音による水平方向到来角

図 16・図 17 に IID を変化させた場合の気導音・軟骨入力音の水平到来方向を示す。ホワイトノイズをヘッドホン・軟骨伝導振動子で提示した場合、IID が負のときは左側に、正のときは右側に音像を知覚していた (図 16a, 図 17a)。純音についても、軟骨伝導振動子提示

のほうが若干定位精度が劣る傾向を観察できるが、おおむね提示方法にかかわらず音像定位が可能であった。

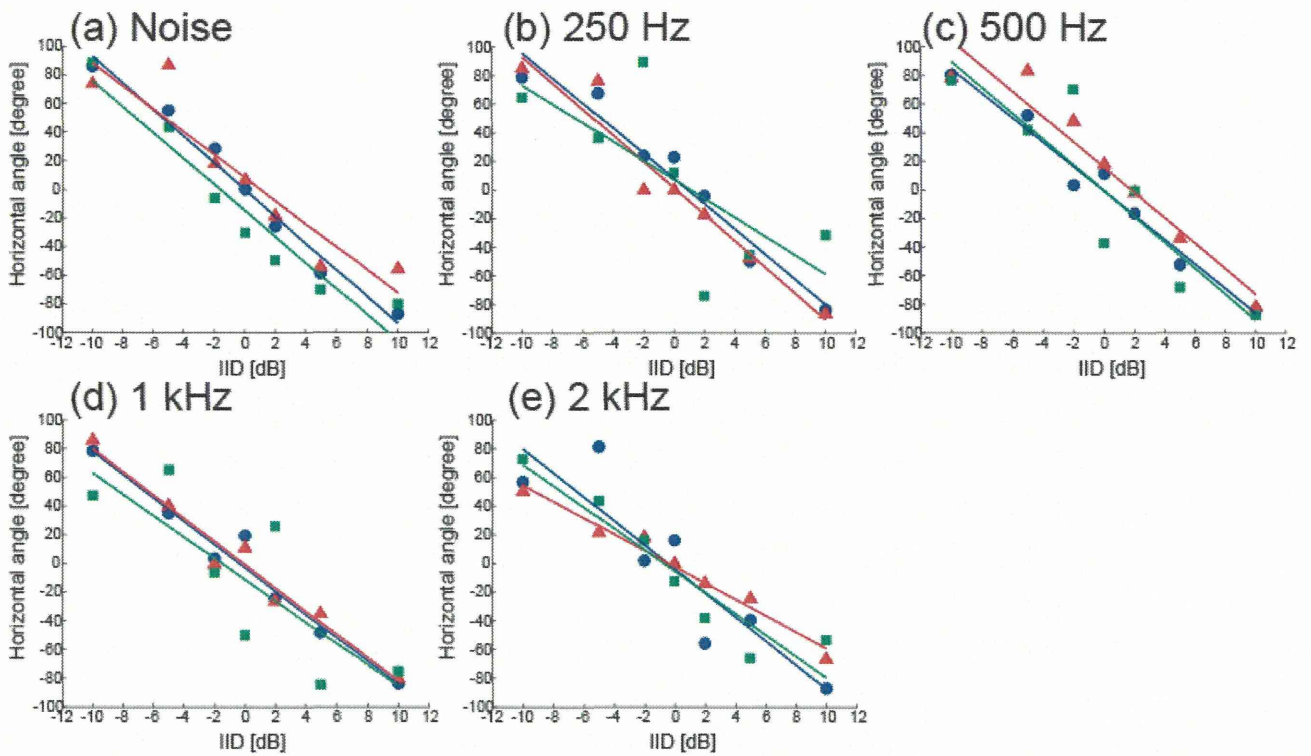


図 16 ITD を変化させた場合の気導音による水平方向到来角

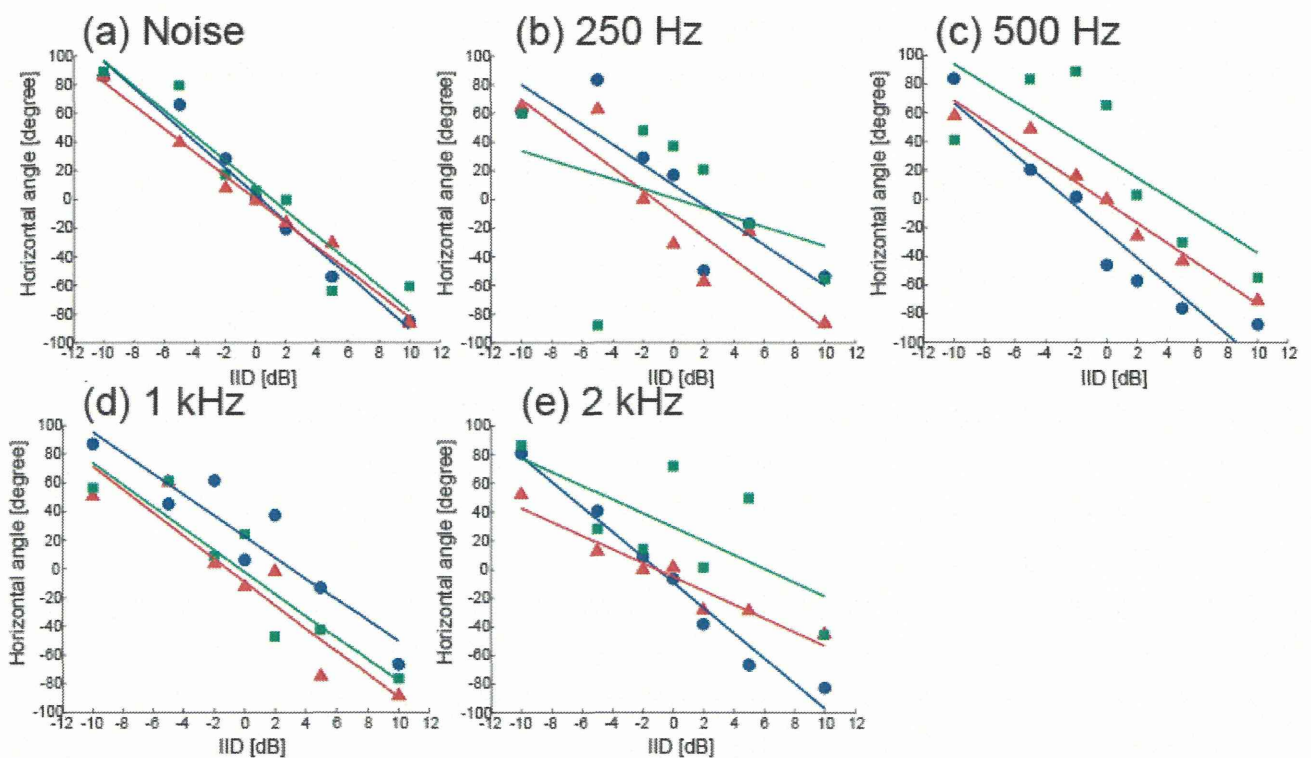


図 17 ITD を変化させた場合の軟骨入力音による水平方向到来角

D. 考察

本研究は①軟骨導振動子の開発、②この振動子の性能を最も発揮でき、現在気導補聴器が使用できない人でも音声情報を容易に得ることができる補聴器本体の開発、③臨床試験によりその性能、実用性の確認と臨床データを基にした試作器の改良、開発からなっている。

本年度は、両耳装用可能な耳掛け型タイプの補聴器の開発、試作機の完成が達成できた。また昨年度の補聴器で問題となったハウリングの問題に対処することができた。しかしながら実用化するためには今後さらなるデータの蓄積と補聴器の改良が必要であると思われる。

既存の軟骨伝導振動子に対しては、物理測定・心理実験を行いながら、その性能評価を行った。外耳道入口部に振動子を装用した条件（接触条件）・7 - 10 mm 離れた条件（非接触条件）での外耳道内音圧レベルを比較すると、3 kHz 以下の低い周波数帯域で平均 29 dB の音圧上昇が確認された。接触条件のとき耳軟骨が 3 kHz 以下で強く振動していることから、この音圧上昇は振動した軟骨が外耳道内に音を放射する軟骨経由気導音のためだと考えられる。われわれ健聴者が軟骨伝導補聴器を使い、「音が大きくなった」と感じる感覚はこの軟骨経由気導音によってもたらされる。

一般的な気導補聴器はスピーカのコーンが空気を震わせて音を生成する。一方軟骨伝導補聴器は耳軟骨が空気を震わせて音を生成する。このように肉体組織が音源となる補聴器は他に類を見ない。また気導補聴器の閉塞感を軽減させるために、オープン型イヤープラグを使用する難聴者がいるが、この場合低音が外耳道から漏れて、十分な挿入利得を得られない。そのためオープン型気導補聴器は、低音の聞こえが悪くない軽度難聴者に適応される。しかし軟骨伝導補聴器は、外耳道を開放しているにもかかわらず、高い挿入利得を得ることができるので、重度難聴者に対しても快適な装用感を提供できる可能性がある。

このように軟骨伝導振動子で提供される気導音は外耳道内音圧測定で明らかとなったが、骨導音は直接内耳まで到達するため、物理計測を行うことができない。そのため骨導音が聞こえに与える寄与を調べるため、心理実験（ラウドネスマッチングテスト）を行った。その結果、外耳道内に高い音圧がある場合はその音を手がかりに、ない場合には耳軟骨の振動を手がかりにラウドネスを知覚している可能性を示唆された。例えば、耳漏はあるものの伝音系が正常な難聴者は気導音を、外耳道閉鎖症で鼓膜まで外耳道が組織で埋まっている難聴者は骨導音を聞いている可能性がある。今回耳栓を使用して直接気導音・軟骨経由気導音を遮蔽したと仮定したが、その仮定が正しいのか、耳栓越しの外耳道内の音圧レベルを測定して検証する必要がある。

軟骨伝導振動子から伝導経路を明確にする物理測定・心理実験に加えて、既存補聴器では実現が困難な両耳装用の可能性について検証した。気導補聴器は両耳装用すると、両耳外耳道をイヤープラグで塞ぐので、強い閉塞感から長時間装用することができない。また骨導補聴器は両耳装用すると、右（左）側乳突部に入力した音が対側に伝わるクロスヒアリングを引き起こすため、左右パラレルな音知覚ができず、音の到来方向を把握することができない。これらの既存補聴器の難点に対して、軟骨伝導補聴器は両耳の外耳道を閉鎖

しない、クロスヒアリングが起きにくいというという2点で、両耳装用を可能にする見込みがある。

本研究では、両耳に入る音の時間差 (ITD)、強度差 (IID) を調節した刺激を使用し、気導音と軟骨入力音の水平到来方向の知覚実験を行った。その結果 ITD を変化させた場合、軟骨入力音では、気導音のように個人差の少ない正確な方向知覚ができないことがわかった。その理由としては、直接気導音と軟骨経由気導音、二つの異なる気導音が鼓膜に到達するためだと考えられる。左右の直接気導音のみであれば ITD を保持したまま鼓膜に到達するが、時間差を持った軟骨気導音が到来する場合 ITD が乱される。軟骨入力音の ITD で音像定位ができない理由を検討するため、非接触条件・耳栓条件での方向感実験を行う必要がある。

一方で IID を変化させた場合は、気導音には劣るものの、おおむね軟骨入力音でも音像定位できることがわかった。例えば IID が正の値のとき、右耳の直接気導音・軟骨経由気導音共に音圧が上昇する。そのため鼓膜付近での IID がおおむね保たれたものと考えられる。以上の方向感実験の結果から、軟骨伝導補聴器を両耳装用した場合、IID を手がかりに方向知覚ができることが示された。これらの実験結果を受けて、われわれは両耳装用可能な試作軟骨伝導補聴器 HD-GX3 新たに開発した (後述の西村氏分担研究報告書参照)。この補聴器を左右の耳に掛け、耳裏の本体にあるマイクから左右独立の音を収集すると、IID を表現することができる。今後は被験者の周囲にいくつかスピーカを配置し、HD-GX3 を用いて実音場での方向感実験を行う予定である。

E. 結論

軟骨導振動子を用いた補聴器システムは、難聴者に効果があることが明らかになった。軟骨伝導振動子を装用した場合、振動子から外耳道の空気を伝播し鼓膜に到達する気導音と振動子による耳軟骨の振動から外耳道内の空気を伝播し鼓膜に到達する気導音があり、後者は3 kHz以下の周波数帯域で平均29 dBの外耳道内音圧上昇をもたらす。軟骨伝導振動子を装用した場合、外耳道が開放しているときは気導音を、外耳道が閉鎖している場合は骨導音を聞いている可能性がある。軟骨伝導振動子を両耳装用した場合、両耳間強度差を手がかりに音像定位することができる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Hosoi Hiroshi, Yanai Syuichi, Nishimura Tadashi, Sakaguchi Takefumi, Iwakura Takashi, Yoshino K, Development of cartilage conduction hearing aid, Archives of Materials Science and Engineering, 42(2), 104-110, (2010)

福田英美, 柳井修一, 西村忠己, 清水直樹, 細井裕司, 軟骨伝導によるラット聴性脳幹反応の測定, 日本音響学会聴覚研究会資料, 40(6), 531-534, (2010)

西村忠己, 細井裕司, 特集 耳鼻咽喉科・頭頸部外科の検査マニュアルー方法・結果とその解釈 I. 聴覚検査 4. 補聴器適合検査, 耳喉頭頸, 82(5), 29-34, (2010)

細井裕司, 特集・高齢者の補聴ー実地診療に役立つ最新の知識ー 補聴器フィッティングの全体像の理解, ENTONI, 115, 1-5, (2010)

呉将延, 猿渡洋, 鹿野清宏, 細井裕司, ICA による雑音推定に基づいた平均二乗誤差最小化短時間振幅スペクトル推定法の両耳補聴器への応用, 日本音響学会講演論文集, 2-9-8, 691-694, (2011)

斉藤修, 西村忠己, 吉田悠加, 福田美美, 柳井修一, 細井裕司, 補聴器適合検査のための雑音負荷時の語音明瞭度の検討, Audiology Japan, 54, 147-152, (2011)

吉田悠加, 西村忠己, 福田美美, 斉藤修, 細井裕司, 補聴器特性図から算出した利得とファンクショナルゲインの関係, Audiology Japan, 54, 118-122, (2011)

Tadashi Nishimura, Tadao Okayasu, Yuka Uratani, Fumi Fukuda, Osamu Saito, Hiroshi Hosoi, Peripheral perception mechanism of ultrasonic hearing, Hearing Research, in press

Tadao Okayasu, Tadashi Nishimura, Akinori Yamashita, Seiji Nakagawa, Yoshiki Nagatani, Shuichi Yanai, Yuka Uratani Yuka, Hiroshi Hosoi, Duration-dependent growth of N1m for speech-modulated bone-conducted ultrasound, Neuroscience Letters, in press

2. 学会発表

Sakaguchi Takefumi, Hosoi Hiroshi, Post-operative hearing of the reconstructed ear with soft posterior meatal wall, Association for Research in Otolaryngology 33rd MidWinter Meeting, Anaheim, (2010)

Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, A case of intracochlear schwannoma with progressive hearing loss, Association for Research in Otolaryngology 33rd MidWinter Meeting, Anaheim, (2010)

Okayasu Tadao, Nishimura Tadashi, Yamashita Akinori, Yanai Shuichi, Nakagawa Seiji, Uratani Yuka, Nagatani Yoshiki, Hosoi Hiroshi, Temporal-integration mechanism of bone-conducted ultrasonic speech sound, Association for Research in Otolaryngology 33rd MidWinter Meeting, Anaheim, (2010)

Yamashita Akinori, Nishimura Tadashi, Nagatani Yoshiki, Sakaguchi Takefumi, Okayasu Tadao, Hosoi Hiroshi, Speech recognition for bone-conducted ultrasound, Association for Research in Otolaryngology 33rd MidWinter Meeting, Anaheim, (2010)

細井裕司, 新しい音伝導ルートによる新補聴システム開発, 感覚器障害研究成果発表会 (研究者向け) プログラム, 東京, (2010)

柳井修一, 阪口剛史, 細井裕司, 周波数領域特異的な劣化処理音声による語音明瞭度の測定, 第312回日耳鼻大阪地方連合会, 大阪, (2010)

柳井修一, 阪口剛史, 細井裕司, 聴・平衡覚と住居環境に関する研究ー歪語音を用いた音環境評価法と透過音の影響について, 2009年度「住居医学」共同研究成果報告会, 橿原市, (2010)

岡安 唯, 西村忠己, 山下哲範, 斉藤 修, 柳井修一, 細井裕司, 当科における放射線化学療法によるシスプラチンの聴力障害について, 第111回日本耳鼻咽喉科学会総会, 仙