

図 72 ITD を変化させた場合の気導音による水平方向到来角

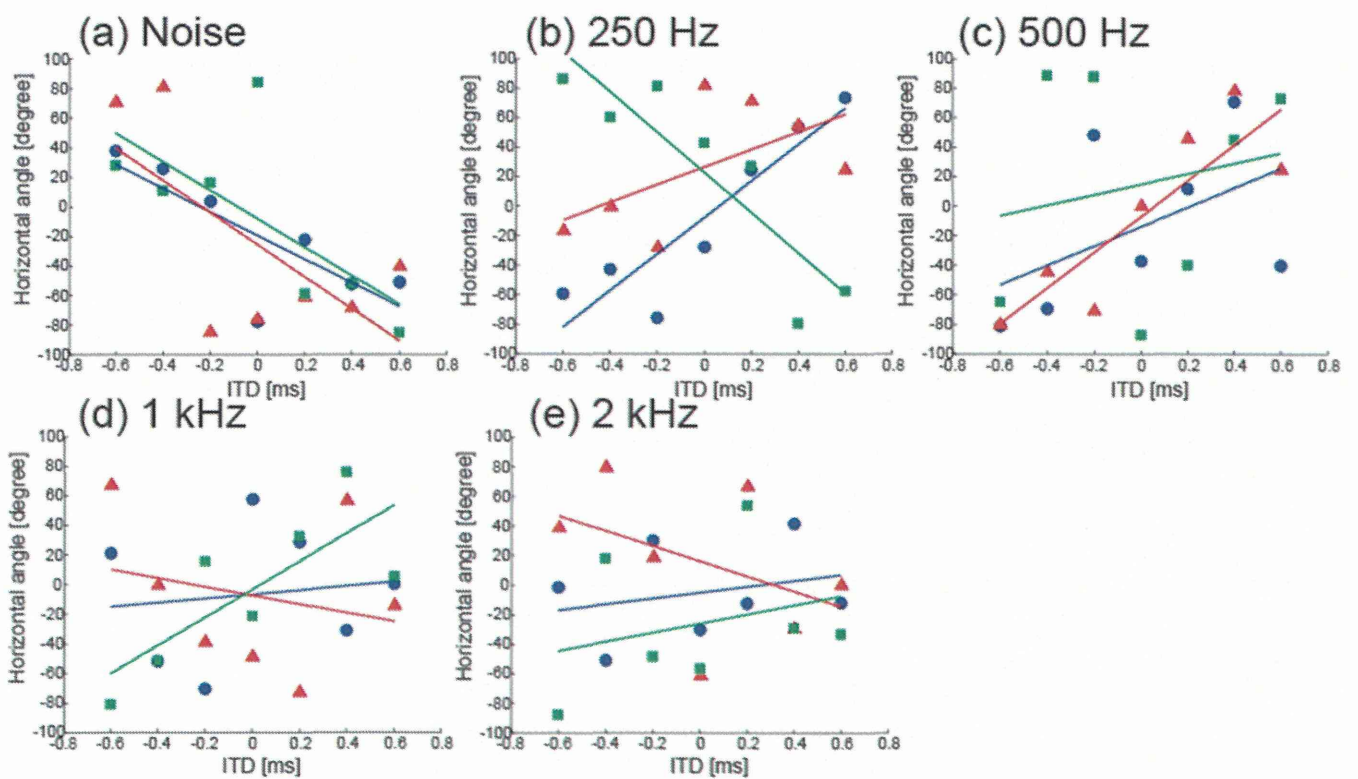


図 73 ITD を変化させた場合の軟骨入力音による水平方向到来角

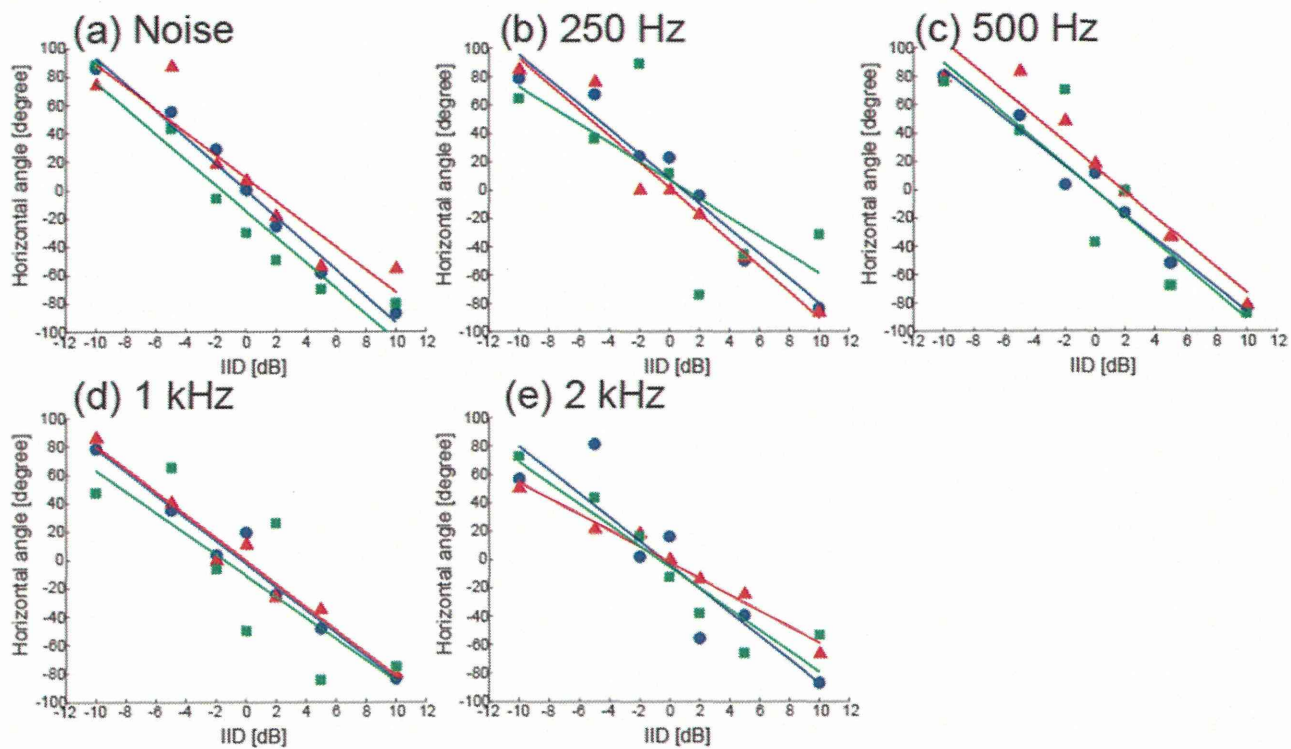


図 74 ITD を変化させた場合の気導音による水平方向到来角

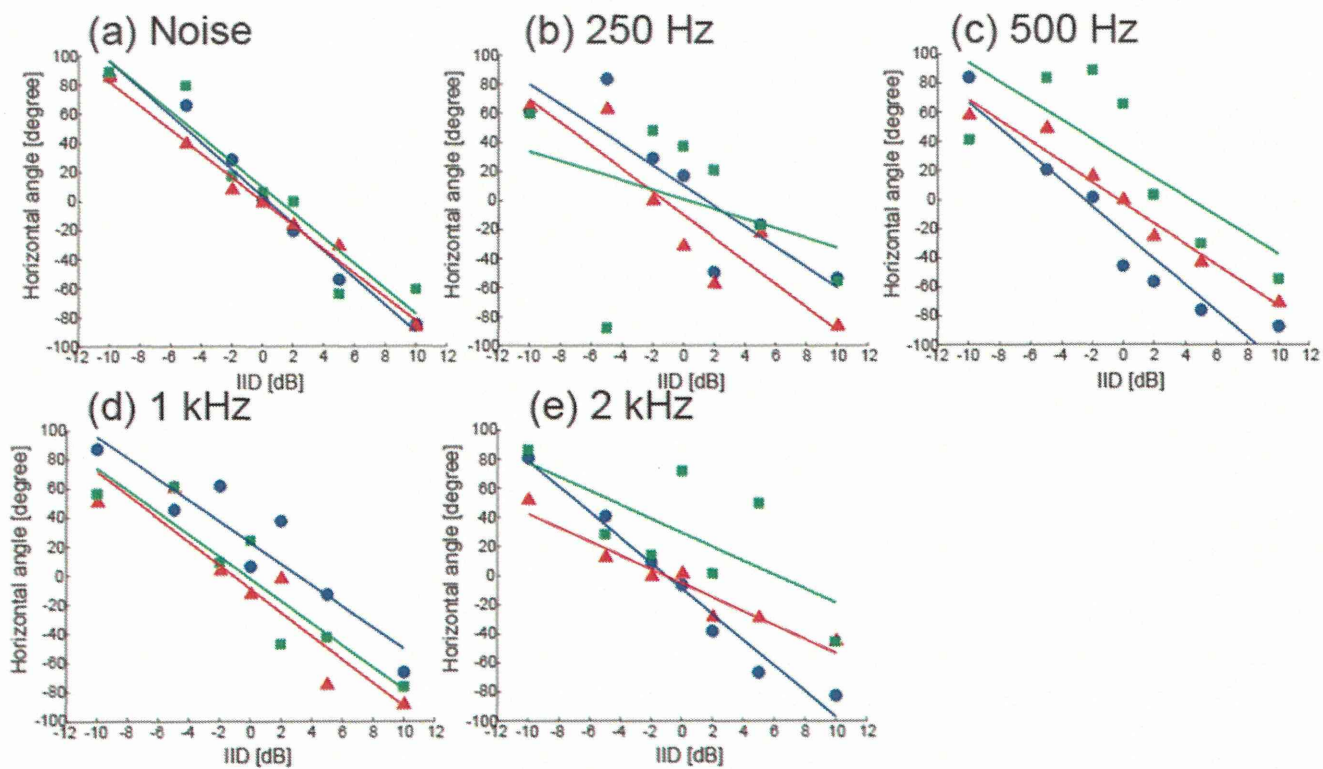


図 75 ITD を変化させた場合の軟骨入力音による水平方向到来角

(4) 外耳道開放・閉鎖条件でのラウドネスの比較

図 76 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。

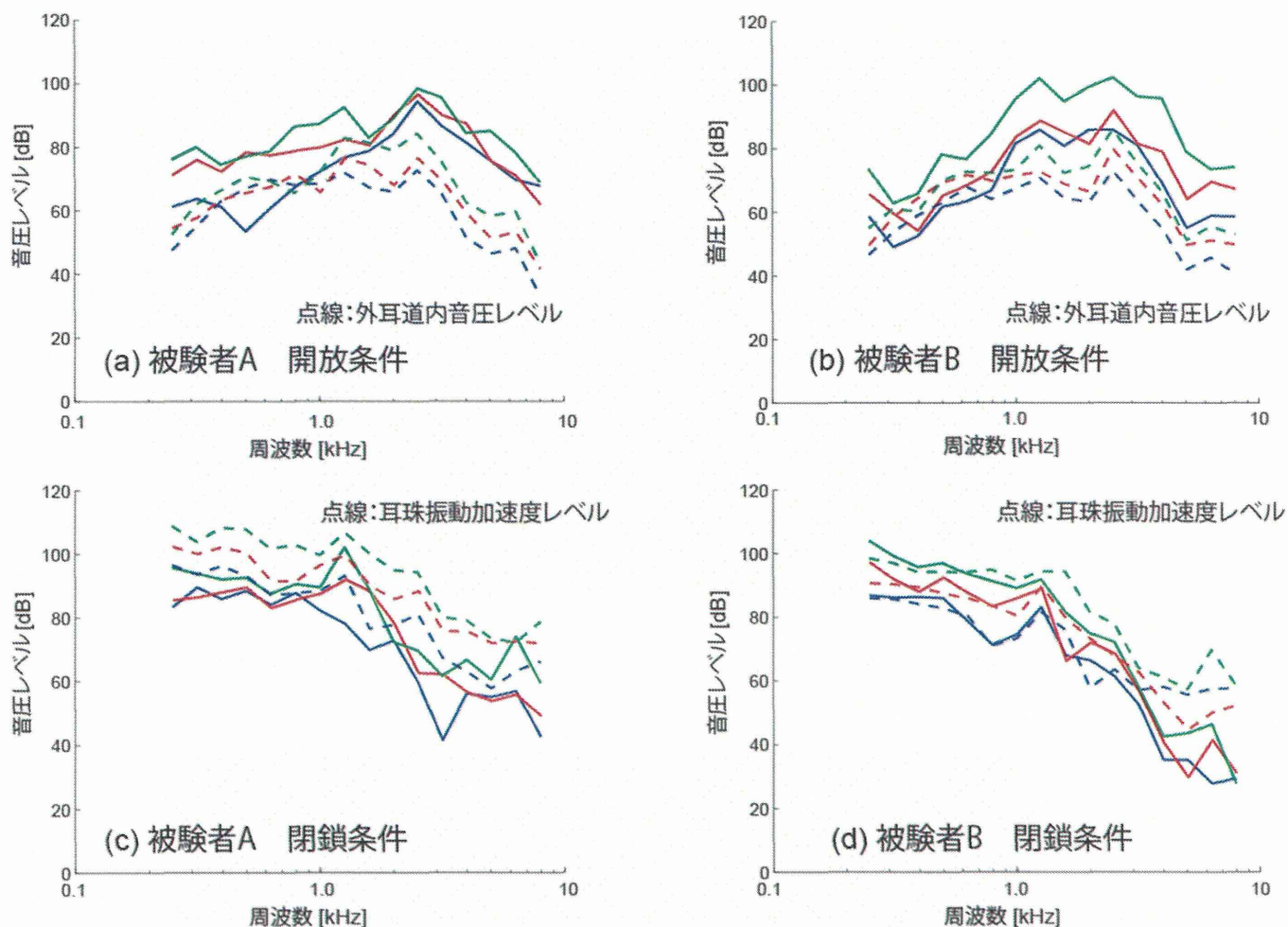


図 76 開放 (a, b)・閉鎖 (c, d) 条件でのラウドネス (点線: 外耳道内音圧レベル (a, b)・耳珠振動加速度レベル (c, d)、—: 2 V, —: 1 V, —: 0.5 V)

2) 動物実験

クリック音による ABR

手術前の測定で得られた ABR の例を図 77 に示した (左: 気導、右: 軟骨導振動子)。手術前の閾値は気導で 2.5dB nHL、軟骨導で 22.5dB nHL であった。両者の間で見られた 20dB の差異は、気導と軟骨導の間で出力と音量のバランスが異なることに起因すると考えられる。

耳小骨離断手術後の測定で得られた ABR の例を図 78 に示した（左：気導、右：軟骨導振動子）。耳小骨離断手術を施した片耳で得られた ABR の閾値は、気導で 30dB nHL、軟骨導で 35dB nHL であった。術前と比較して気導閾値が大きく上昇したことは、耳小骨離断手術が成功し、伝音難聴モデルのラットが作成できたことを意味する。また、軟骨導振動子を用いた ABR の閾値を手術前後で比較した場合、手術後の軟骨導 ABR 閾値が 12.5dB 悪化していたことが認められた。しかしながら、気導と軟骨導の出力レベルに約 20dB の差が存在することを考慮すると、軟骨導振動子を用いることによって聴力が改善されたと考えられる。またこれらの結果から、軟骨導振動子を介した音声刺激は気導経由ではなく、軟骨あるいは骨組織を介して伝達されていることが示唆された。

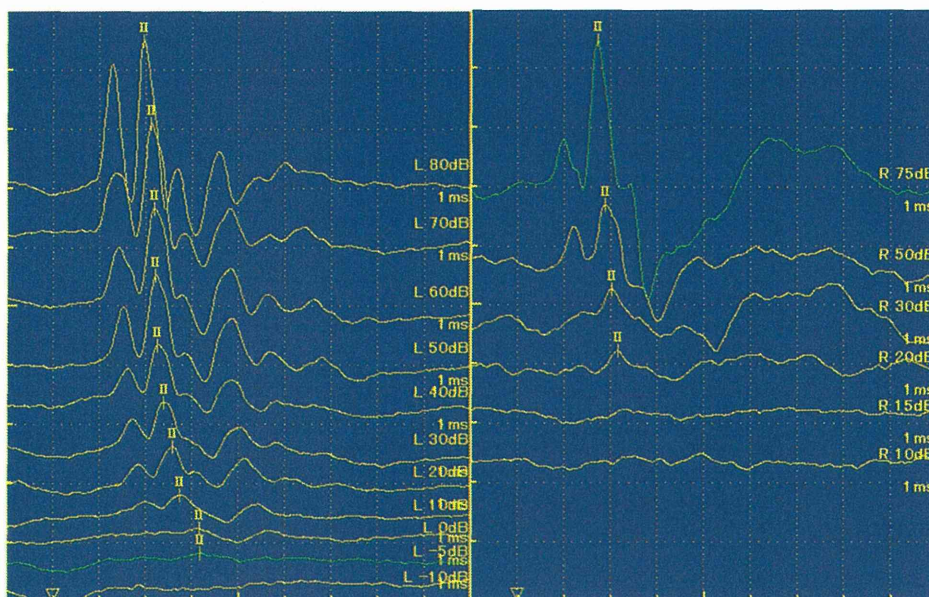


図 77 手術前 ABR の例（左：気導、右：軟骨伝導振動子）

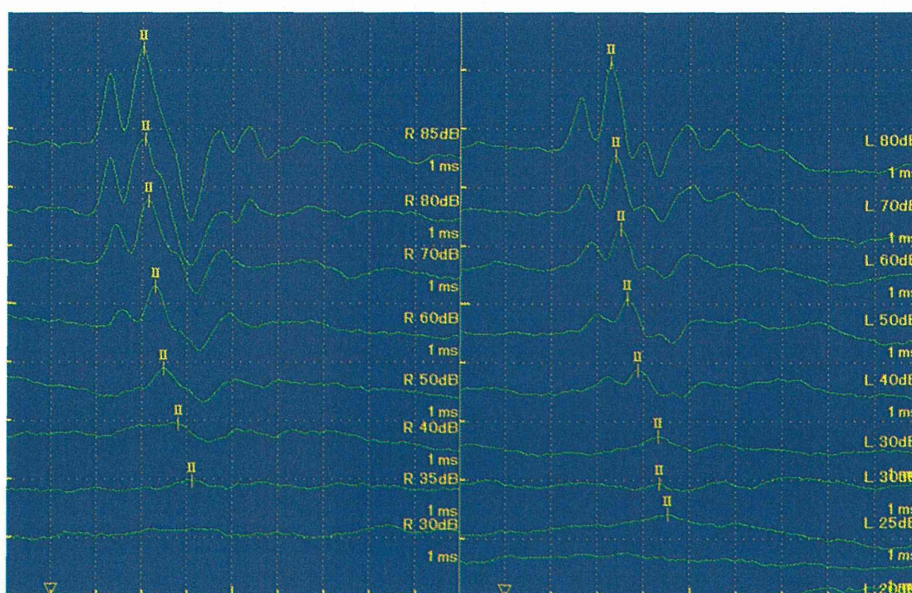


図 78 手術後 ABR の例（左：気導、右：軟骨伝導振動子）

軟骨伝導振動子の特性

条件別の耳小骨手術前後の ABR 測定結果を図 79 に示した。耳介近傍条件では、手術前では 10V-50dB で反応が見られたが手術後では反応が見られなかった。耳介近傍条件では耳介に振動子が触れていないため、気導成分のみの呈示である。この結果は耳小骨離断術によって気導成分が遮断されたことを示している。頭頂条件では、耳小骨離断術前後ともに 10V-30dB の反応であり、手術前後で反応に変化はなかった。このことから、頭頂条件は骨組織を介して伝達した（骨導成分）音での反応であること、また今回の耳小骨離断によって内耳障害は生じていなかったことが考えられた。耳珠軟骨条件では手術前は 10V-70dB で反応が得られ、手術後は 10V-30dB で反応が得られた。手術前後の閾値の変化をみると、耳介近傍条件では 50dB 以上の閾値上昇がみられたのに対し、耳珠軟骨条件では 40dB の閾値上昇がみられた。

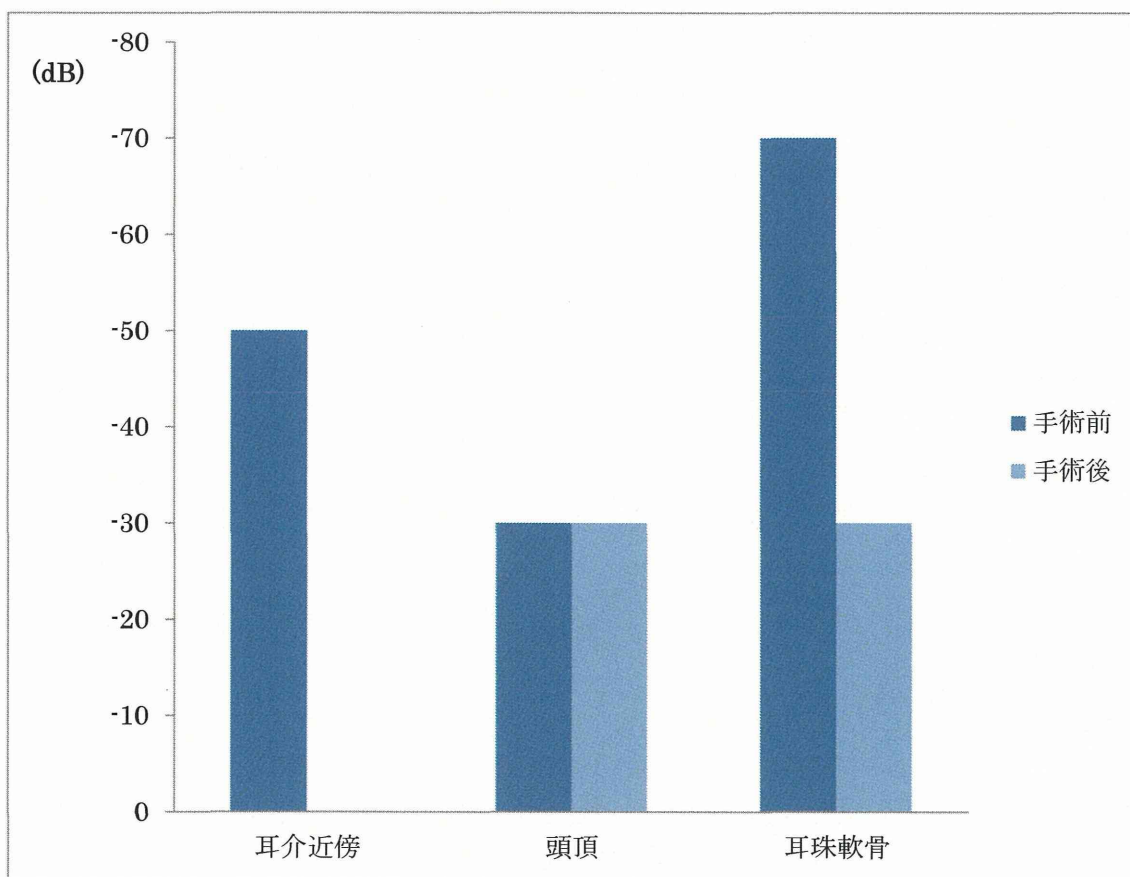


図 79 耳小骨手術前後の ABR 測定結果

トーンバーストによる ABR の測定

耳小骨離断術前の条件別 ABR 反応閾値を図 80 に示した。全ての条件において、低い周波数に比べ高い周波数で閾値が低下していた。次に耳小骨離断手術後の条件別の ABR 反応閾値を図 81 に示した。手術前後で比較すると、耳介近傍条件、耳珠軟骨条件では 4000Hz 以上の周波数で、頭頂条件では 8000Hz 以上の周波数で手術後大幅に閾値が上昇していた。

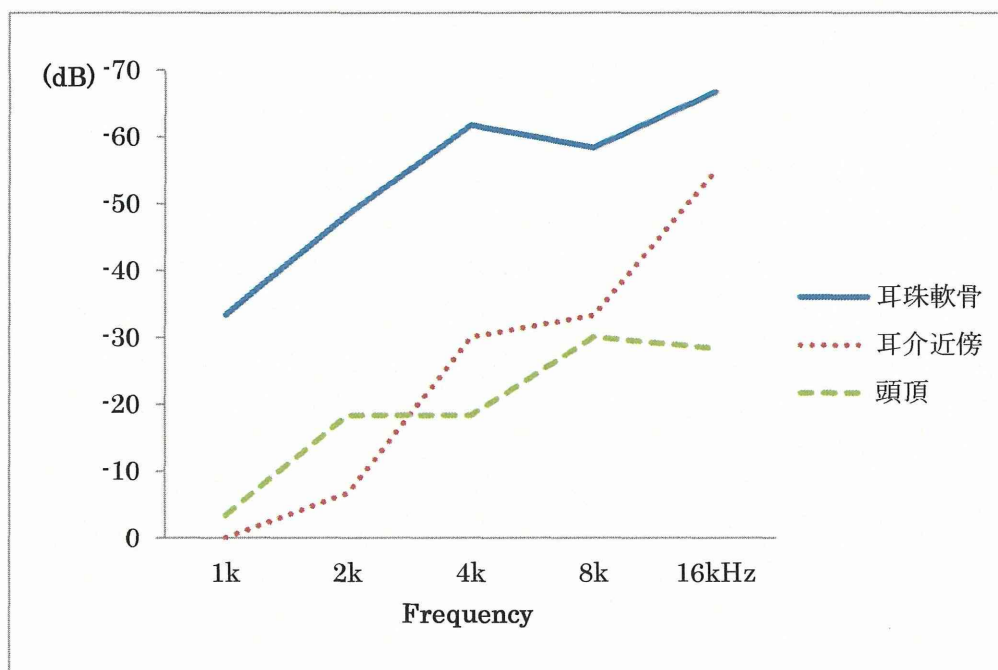


図 80 耳小骨離断術前の条件別 ABR 反応閾値

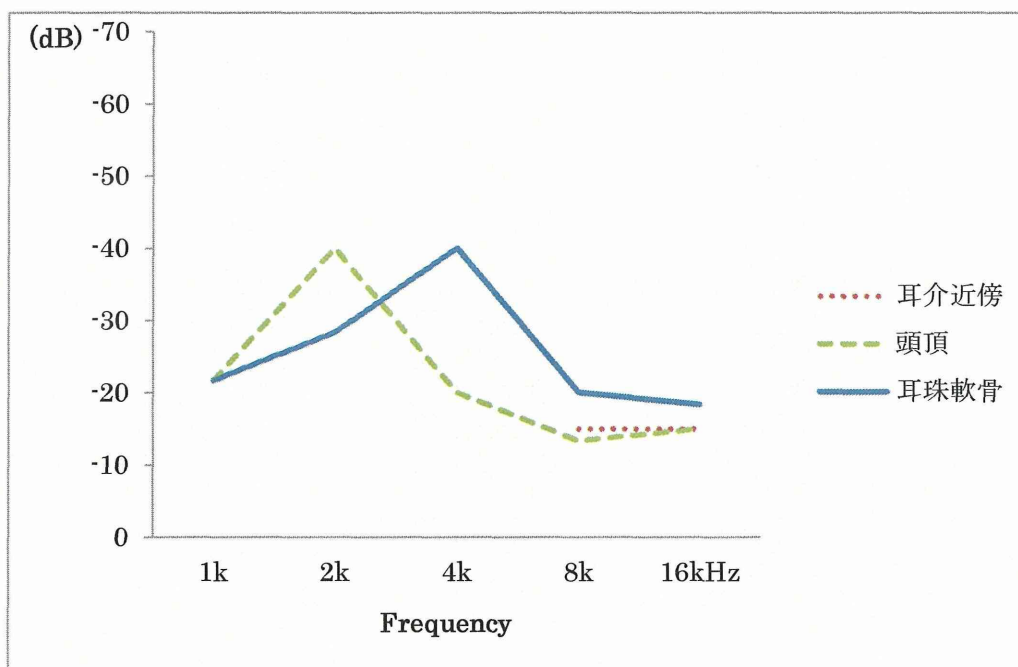


図 81 耳小骨離断術後の条件別 ABR 反応閾値

7. 軟骨伝導補聴器の難聴者に対する効果

1) 試作軟骨伝導振動子を用いた症例

試作した軟骨導補聴器を両側外耳道閉鎖症の本症例に装着させた。その結果、現在左耳に常用している気導聴力補聴器による聴力補償とほぼ同程度の補償が軟骨導補聴器単体で可能であることが分かった。

また、本症例の左耳に気導補聴器、右耳に軟骨導補聴器を装着させ、音の方向感に関する簡易な検査を行ったところ、誤答も若干見られたが、正答率 85 % と両耳聴が行われている可能性が示唆される結果が得られた。

2) 改良型軟骨伝導振動子を用いた症例

難聴者でも軟骨導からの刺激が聴取可能であった。軟骨導補聴器の最もよい適応と考えられるのは通常の補聴器が装用できない症例である。今回の被験者の中でその基準に当てはまるものが 3 名であった。その 3 名に対して説明と同意の上、補聴器のフィッティングを試みた。それぞれの症例の結果を示す。

・症例 1 (76 歳男性)

症例は右耳が外耳道癌のため外側切除術を受けており、手術の影響により外耳道が盲端となっている。外耳道は入口部より閉塞しており、補聴器の装用は不可能である。左耳は外耳道狭窄症と慢性の外耳道炎のため耳漏があり、補聴器の装用が困難である。今回その左耳に対して外耳道拡大術を行うこととなり、手術後しばらくの間ガーゼ挿入を行うため左耳からの音の聴取は不可能である。この例に対して右耳に軟骨導補聴器のフィッティングを行った。

図 82 に音場で実施した装用時と非装用時の聴取閾値の結果を示す。図 82 に示すように会話周波数帯域については十分なファンクショナルゲインが得られた。語音聴力検査でも、十分な明瞭度の改善が得られ、補聴効果があると判断される (図 83)。

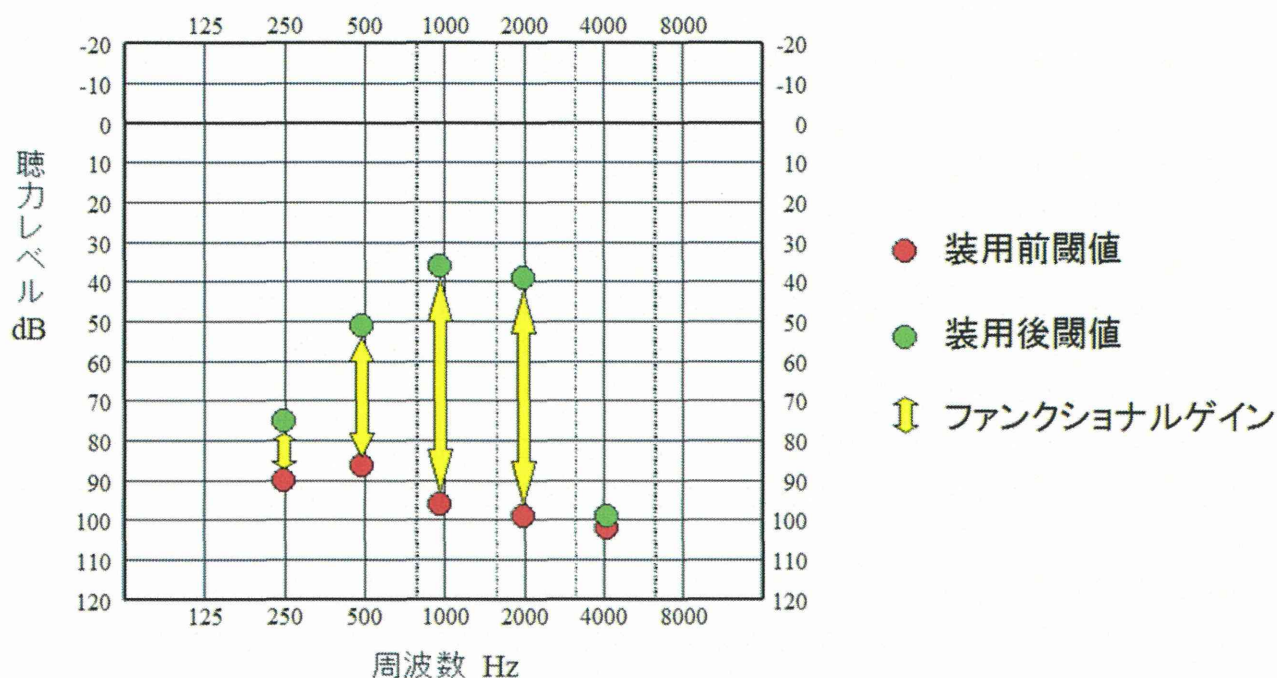


図 82 症例 1 の音場での閾値検査

この例に対して貸し出しを行いアンケートによる評価を行った。ところ補聴効果に対しては十分満足できるものであった。しかし外耳道入口部が術後の影響もあり変形しており、軟骨導振動子の装着が不安定であった。またボリュームを大きくするとハウリングの現象が

生じるとのことであった。このような問題点があるものの、補聴器に対しては満足されており、両耳が聞き取れず通常の補聴器が使用できない現時点では、生活に必要不可欠なものとなっている。このためこの症例では長期間の貸し出しを行っている。現在約4ヶ月経過するが特に装用による問題点は認めていない。

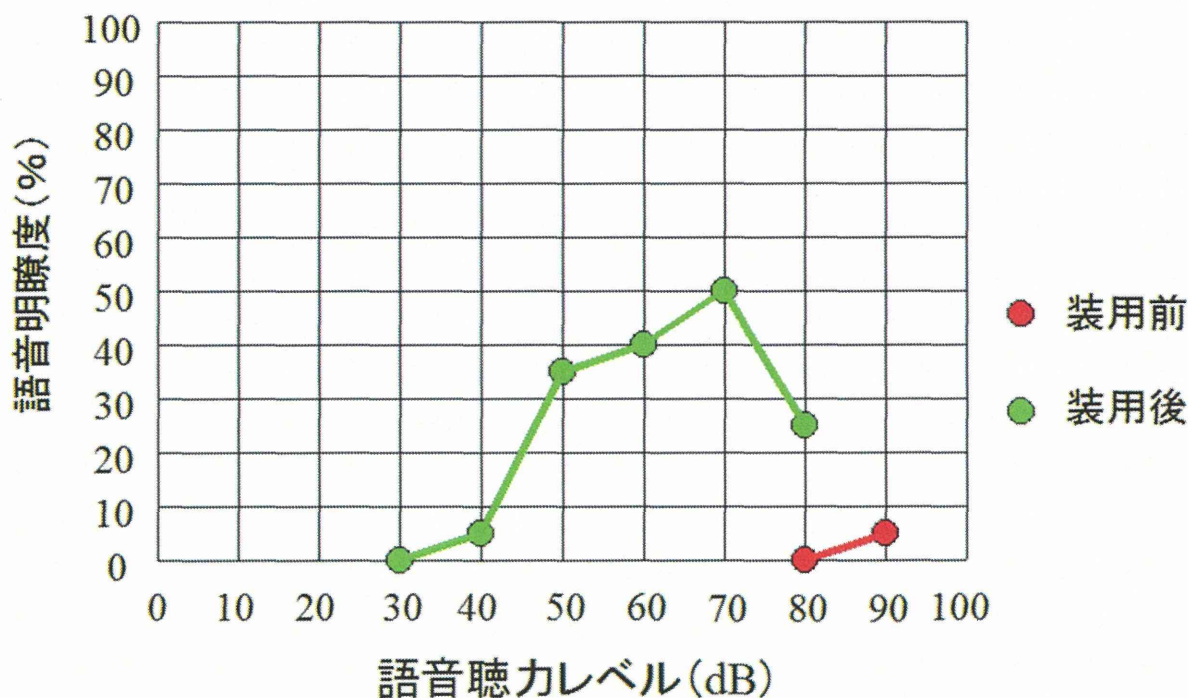


図 83 症例 1 の語音聴力検査

・症例 2 (73 歳男性)

症例は耐性菌による慢性中耳炎のため、常に大量の耳漏がでるため補聴器の装用が不可能な例である。この例に対して左耳に軟骨導補聴器の適合を行った。

音場で実施した装用時と非装用時の聴取閾値の結果では会話周波数帯域については十分なファンクショナルゲインが得られた。語音聴力検査でも、十分な明瞭度の改善が得られ、補聴効果があると判断された。

補聴器は装用することで会話には役に立つとのことであった。しかし貸し出しを行った機種がポケット型であり、持ち運びが不自由であるためあまり使用しなかったとのことであった。

・症例 3 (65 歳女性)

症例は慢性中耳炎のため、常に耳漏がでるため補聴器の装用が不可能な例である。この例に対して左耳に軟骨導補聴器の適合を行った。

音場で実施した装用時と非装用時の聴取閾値の結果では会話周波数帯域については十分なファンクショナルゲインが得られた。語音聴力検査でも、十分な明瞭度の改善が得られ、補聴効果があると判断された。

この症例では補聴器の貸し出しを行ったが、貸し出し後、耳以外の疾患が原因で他院に入院され、使用機会がなかったとのこと返却となった。

D. 考察

1. 補聴外来の分析

以上の特徴を踏まえると、補聴器が比較的簡単に適合する症例では十分な設備や人員のない施設でも行える。一方フィッティングが困難な症例に対するフィッティングや詳細な評価を希望する症例では、多少手間はかかっても詳細な評価と説明を望まれる。このような症例に対応できるのは大学病院など十分な設備や人員の整った施設と考えられる。それぞれの役割分担を考えると大学病院は単に補聴器をフィッティングするだけではなく、周囲の病院と連携を図り他院でのフィッティング困難例のフィッティングなどに積極的に取り組んでいく必要がある。また詳細な評価から得られた結果はフィッティング法のために役立てていくべきである。そのためにも研究成果を積極的に学会などで発表し議論を深めていく必要がある。

2. 再建耳における音場の解析

聴力検査の結果に基づくと、我々の外科手術手技を適用しても、術後聴力の不利益は特に見いだされなかったことを我々は既に報告している。本研究では、音響解析を行って、音響伝播に対する本外科手術手技の影響を物理的観点から検討した。

我々の数値モデルの外耳道の長さは35 mmとした。このモデルは一本のチューブであり、片側が開いており、もう片側が閉じられている。したがって、我々の計算条件下では、一次共振周波数は約2.4 kHzと予測された。そこで、2.0 kHz入力時の算出結果について見てみると、入力したすべての周波数のうち、伝播効率が最も良好であった。我々の計算の妥当性は、これらの結果によって立証される。

音響伝播効率は、軟素材再建術（風船様陥凹なし）と硬素材再建術とでほぼ同程度であり、その差はわずか0.8 dBであった。4.0、8.0 kHzを入力した場合、音響伝播効率は、軟素材再建術（風船様陥凹あり）の方が硬素材再建術より低かったが、その差はわずか1.9 dBであった。さらに、0.5、1.0、2.0 kHzの周波数を入力した結果、音響伝播効率は軟素材再建術の方が硬素材再建術よりはるかに良好であった。これらの結果の中で興味深いことは、2 kHzを入力した場合、軟素材再建術（風船様陥凹あり）の音響伝播効率の方が6.1 dB優れていたことである。外耳道後壁軟素材再建術による鼓室形成術は、硬素材を利用した外科手術手技と比べて、術後聴力に悪影響を及ぼさないというエビデンスを、この事実は提供している。これらの結果は、術後聴力に悪影響が及ばなかったことを示している既報を支持している。

Smithらは1986年に外耳道後壁軟素材再建術を報告しているが、研究目的は術後陥凹ポケット形成の予防ではなく、再建術の簡素化が主要目的であった。我々も自らの研究に軟素材を使用しているが、その主要目的は再建術の強化でも簡素化でもなく、術後の陥凹ポケット形成を予防して、真珠腫再発の可能性を減少させることであった。本外科手術手技を適用すると、術後に中耳の通気障害が生じて、陥凹ポケットではなく、風船様陥凹が誘発される可能性がある。外耳道容量は通常サイズより平均約1.5倍大きくなるが、このことが聴力にどのような影響を及ぼすかについて我々は興味を抱いた。本稿で行った我々の音響解析結果、及び既報の聴力検査結果に基づくと、より詳細な検討（三次元解析又は横波因子

の計算への組入れなど)が必要であるが、術後聴力に対する風船様陥凹の悪影響は見いだされなかった。

3. 軟骨伝導振動子の開発

開発した軽量で軽い接触で効率よく音声を聴覚神経に伝えることができる有機物被覆型軟骨伝導振動子は各種の応用が期待できる。さらにその試作軟骨伝導振動子の構造を変更することで性能向上および製造上の問題を解決できた。これにより実用面での各種の応用展開が可能となった。

この音声伝搬様式は、健聴者にとっては産業分野、アミューズメント分野で活用でき、健康福祉面では聴覚補助、視覚障害者のための音声ガイドらの場で有効に活用できるものと期待できる。特に、外耳道近傍の軟骨との軽い接触で効率よく音声を伝達できる特徴は軟骨伝導と仮称する新規な音声伝達形態であり、既存の骨伝導では困難であった領域の聴覚補助手段として期待できた。

4. 軟骨伝導補聴器の開発

1) HD-GX1

ポケット型の軟骨伝導補聴器を試作した。リオンのデジタル補聴器を基本構造として用い、軟骨導振動子を組み込んで補聴器として使用可能な試作器HD-GXを開発した。新開発の補聴器はポケット型でマイクの音口は本体上部にある。軟骨伝導振動子の接続部は側面下面となるように設計した。電源スイッチも側面に装着した。ボリウムは上面にあり、側面にはボリウムロックをつけた。胸ポケットに入れて落ちないように固定用のクリップをつけた。仕様は、ボリウム可変幅を約15 dB、消費電流約13 mA、使用電池はアルカリ乾電池単4形3本、フィードバックキャンセラ機能有りとした。外形寸法は46 mm (幅) × 89 mm (長さ) × 16 mm (厚さ) で、質量は本体69 g (電池込み)、骨伝導6 gである。

試作された補聴器は補聴効果を評価する上では有用であり、試聴などにより得られた結果は今後の補聴器の改良に有用であると思われた。しかし実際に日常で使用する場合はコードなどが邪魔であるとかマイクロホンの位置が胸元にあるなどポケット型特有の問題点もあるため、小型化や耳かけ型の開発が必要であると思われた。

2) HD-GX2

前年度開発したポケット型の軟骨導補聴器の小形化・装用性向上を目的に耳かけ型の軟骨伝導補聴器を試作した。リオンのデジタル補聴器を基本構造として用い、軟骨導振動子を接続して使用する試作器HD-GX2を開発した。開発した軟骨伝導補聴器は、通常の耳かけ型補聴器と同様の構成であるが、3 V以上の電圧が必要であるため空気亜鉛電池3個を収納する電池ボックスを追加し、これを本体に結合した構造である。仕様は、ボリウム可変幅約12 dB、消費電流約16 mA、使用電池は空気亜鉛電池PR44P 3個、フィードバックキャンセラ機能有りとした。質量は本体12 g (電池込み)、骨伝導振動子5 gである。

小型化されたことで利便性の向上が得られたが、振動子とマイクロホンの距離が近くなることでハウリングを起りやすくなることが起こった。ハウリングが頻発した場合、補聴器が休止するため、今後はこの点をさらに改良していく必要があると思われた。また小

型化のため電池が小さくなり、耐久性の問題も考える必要があった。

3) HD-GX3

前年開発した耳かけ型補聴器の問題点に対処し、さらに補聴効果を高めるため、耳かけ型で両耳に装用するタイプの試作補聴器HD-GX3を開発した。補聴器の調整状態の変更や振動子とマイクロホンの位置を離すことでハウリングの防止が可能であった。また外部電源を取り入れることで電力供給が安定的に可能となり、装用効果が増大した。また両耳装用できることも装用効果を高めることに貢献していると考えられた。

5. 音の伝達についての物理的な計測

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振動子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。

6. 音の伝達に関する生理的な評価

1) ヒトの聴覚実験

(1) 耳栓が聴取閾値に与える影響

いずれの方式でも耳栓装着時には、高周波数より低周波数の音で閾値が低かった。特に骨伝導では耳栓の装着時に閾値が約 15.1dB 低下した。この原因については耳栓をすることによる外耳道閉鎖効果が関与していると考えられる。過去の報告でも外耳道閉鎖効果は低周波数ほど大きく認めている。今回の検討でも低音域で効果が大きいことから外耳道閉鎖効果と考えられた。骨伝導ではその伝達方式から考慮すると耳栓による影響は少なく、閾値の変化はほぼ外耳道閉鎖効果を示していると考えられる。また外耳道へ閉鎖効果は耳栓の内側の外耳道の空洞が影響を及ぼすため、各伝導方式で影響はないと思われた。このことから骨導での閾値の変化は装着した耳栓の外耳道閉鎖効果を示していると推測され、各伝導方式でこの値を差分することで各伝導方式の耳栓をした場合の閾値上昇を求めることが可能となる。

気導では求めた値は周波数ごとに差を認めない。つまり耳栓をすることで気導経路が完全に遮断されるとすべての周波数が均等に閾値上昇していることが分かった。一方軟骨伝

導では 500Hz ではほぼ骨導と同じで耳栓による閾値上昇をしめさなかった。つまり軟骨伝導では 500Hz では気導ではなく軟部組織経由の骨導が聞こえていることが分かった。また 4kHz では閾値上昇は気導と同じであった。高い周波数では軟部組織経由の骨導では伝わりにくく、ほぼ気導経由で音が聴取していると考えられた。

(2) 固定位置と閾値

軟骨伝導端子の音の伝導で最も影響を与えているのは振動子からの気導音と軟骨を振動させることによる音の伝達である。気導音の伝達は振動子と外耳道の関係から外耳道入口部が最も有利で次に空中、耳珠、耳前部、乳突部の順序に伝わりやすいと思われる。一方軟部組織の伝達については外耳道入口と耳珠が軟骨を直接振動させることができ最も有利で、耳前部は軟部組織があるものの耳介軟骨は存在せず、乳突部は側頭骨に音が伝達させる。空中は組織を振動させずこの経路は皆無と思われる。今回の結果を見ると気導音が最も入りやすく、軟骨を振動させる外耳道入口が最も閾値が低かった。耳珠と耳前部を比較すると大きな違いは端子による軟骨の振動の有無であるが、耳珠で有意に閾値が低かったことから軟骨の振動自体が影響を及ぼしていることが分かった。端子からの気導音も影響を与えているものの耳珠よりは有意に影響は高く、この端子からは気導音はそれほど大きくなく振動が伝わりやすい性質があると推定された。しかし通常骨導のように圧着していないため乳突部では閾値が最も悪い結果となったと考えられた。実際に我々が念頭に置く軟骨伝導に最も近いと思われるのは耳珠であるが、補聴器を考えた場合、最も効率的に音を伝えるのは外耳道入口であり、固定方法を考えた場合も同部位が有利であると思われる。以上のことから現在採用している外耳道入口に引っ掛ける方法が、振動子の固定方法として最も優れていると思われた。

(3) 軟骨伝導音による音像定位

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（上述）。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振動子を配置し、HD-GX3を用いて実音場での方向感実験を行う予定である。

（4）外耳道開放・閉鎖条件でのラウドネスの比較

物理特性の測定の結果、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。

2) 動物実験の結果

クリック音による ABR の結果から、耳小骨離断によって作成した伝音難聴モデルのラットを用い、軟骨導補聴システムの動物実験が可能であることが示された。しかしながら、本研究から問題点が明らかになった。一点目は、本研究で用いた Neuropack は元来気導での刺激音呈示を想定した装置であるため、軟骨導振動子への出力電圧が不明な点である。そのため、気導 ABR と軟骨導振動子を用いた ABR を直接比較することは困難である。また、Neuropack から軟骨導振動子へ十分な音声出力を得ることができなかつたため、本研究では Neuropack の音声出力端子と軟骨導振動子の間にアンプを仲介させることにより、音声出力の向上を図った。しかしながら、アンプを介することによって出力音声の周波数特性が変化する可能性も考えられる。実験 I で明らかになったこれらの懸念事項を解消すべく、今後は外部アンプを用いて出力電圧の調整を行うことが必要である。

軟骨伝導振動子の特性から、耳珠軟骨条件では気導成分とともに骨導成分が出力されたこと、また耳小骨離断術によって手術後は気導成分が減衰したことが考えられ、残存した 30dB の反応は気導成分以外の軟骨あるいは骨組織を介した骨導であることが示唆された。しかし頭頂部と耳珠軟骨では組織が異なり、インピーダンスも大きく異なる。今回の測定では頭頂条件と耳珠軟骨条件で同程度の反応が得られたが、両者の伝達経路が等しいとは言えない。今回の測定に用いた音は広帯域の周波数成分を持つクリック音であったため、頭頂条件と耳珠軟骨条件での周波数特性は不明である。これらのことから、頭頂条件と耳珠軟骨条件における周波数特異性を検討する必要があると考えられた。

トーンバーストによる ABR から、手術前には全条件で気導が高周波域に関与しているこ

とが示唆された。頭頂（外耳道閉鎖）条件で得られた反応閾値から頭頂条件で得られた反応閾値を減算した値を外耳道閉鎖効果と考え、その結果を図84に示した。手術前は1kHzから4kHzにかけて20dB程度の外耳道閉鎖効果が見られた。手術後では外耳道閉鎖効果はほぼ見られ無かった。耳珠軟骨条件では外耳道を振動子によって塞ぐため、この外耳道閉鎖効果が影響していることが推測できる。耳珠軟骨条件で得られた反応閾値から外耳道閉鎖効果を差し引いた値を図85に示した。手術前は外耳道閉鎖効果を除外しても、高周波域において気導成分が関与していると考えられる。手術後は外耳道閉鎖効果を除外したうえに、耳小骨離断術によって気導の影響が少ない。すなわち残存した値が軟骨を介した伝導のみを反映した値に近いと考えることができる。これらの値と手術後の頭頂条件（骨導）（図85）が同様の傾向を示していることから、今回のモデル動物における軟骨導の伝達様式は骨導に近い可能性が示唆された。

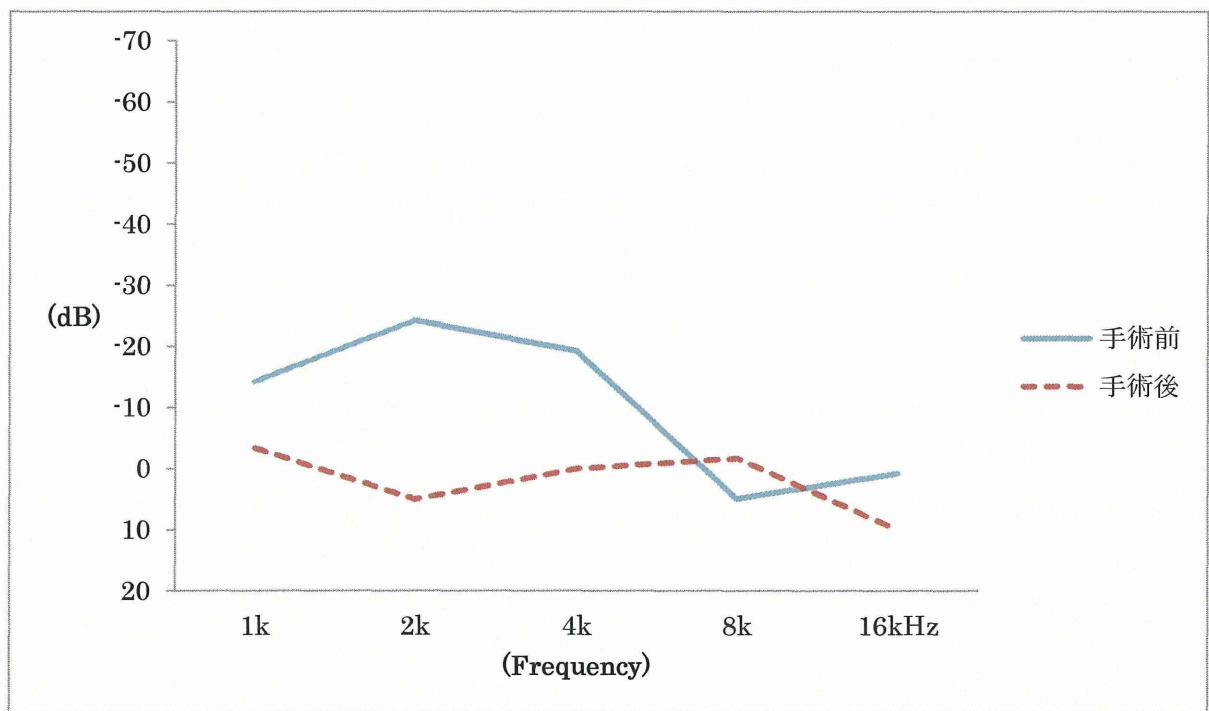


図 84 耳小骨離断術前後の外耳道閉鎖効果

本研究により、クリック音による ABR の実験では耳小骨を離断した伝音難聴モデルのラットを用いた軟骨導補聴システムの動物実験が可能であること、軟骨導振動子を介した音声刺激は軟骨もしくは骨組織を介して伝達されていること、また伝音難聴モデルのラットに対して軟骨導振動子を用いることによって聴力が改善することが示唆された。また本研究では、気導と軟骨導の間で出力が異なるという問題点が明らかになった。また、刺激音を十分に統制するため、以降に行う実験では外部アンプを用いて出力電圧の調整をする必要があると考えられた。軟骨伝導振動子の特性からは耳小骨離断術後の軟骨導は気導成分以外の軟骨あるいは骨組織を介した骨導であることが示唆された。また、周波数特性を検討する必要性が判明した。トーンバーストによる ABR から、気導成分や外耳道閉鎖効果の

影響を排除すると、軟骨導は骨導に類似した周波数特性を持つことが示唆され、軟骨導と骨導の伝達様式が近いことが明らかになった。

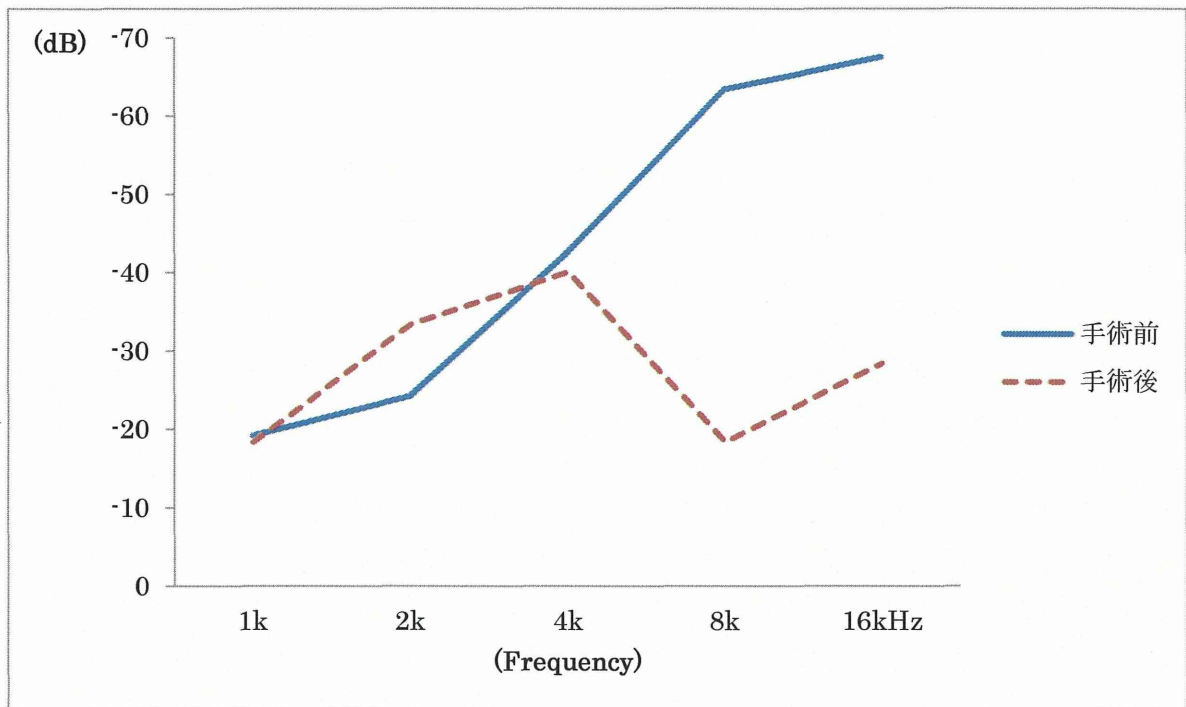


図 85 外耳道閉鎖効果を補正した耳珠軟骨条件の ABR 反応閾値

7. 難聴者で実際に使用した場合の補聴器の評価

本研究の最終目的は、軟骨伝導補聴器を作成することである。この目的を達成するため、我々は外耳道閉鎖症の被験者を対象として、3種の音伝導経路（気導、骨導、軟骨伝導）の聴力を検討した。その結果、軟骨伝導による被験者の聴力は気導によるそれと比較して劇的に向上すること、また軟骨伝導による聴力は骨導によるそれと同程度であることが明らかになった。音伝導における軟骨伝導振動子の有効性が明らかになったことから、我々は軟骨伝導補聴器のプロトタイプを作成した。

本実験で行った軟骨導補聴器による補聴は、初めに述べた既存の骨導補聴器や BAHA®の問題点を解消し、かつ、骨導音では困難であると考えられている「音の方向感の知覚」についても優位性がある可能性が示唆される。

改良型軟骨伝導振動子を用いた補聴器の検査室での検討では、軟骨導を用いても十分な補聴効果が得られることが分かった。しかしながら装用感や外観上の点を考慮する必要があることが判明した。また現在の補聴器は通常さまざまな信号処理を行い、より効果が得られるようになっている。軟骨導補聴器についてはデータに乏しく、どのような信号処理を行えば高い効果が得られるかは不明である。反対に言えばまだまだ改良の余地はあるとも言え、今後データを蓄積することでより効果のある調整方法が判明してくるものと思われる。

E. 結論

圧電式軟骨伝導振動子の性能向上および製造上の問題を解決したことにより、実用面での各種の応用展開が可能となった。この音声伝搬様式は、健聴者にとっては産業分野、アミューズメント分野で活用でき、健康福祉面では聴覚補助、視覚障害者のための音声ガイドらの場で有効に活用できるものと期待できる。

開発した振動子を用いて音を呈示したところ耳珠軟骨に接することで最も大きく音が伝わる。この新しい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。特に外耳道閉鎖症などの症例、特に本症例のような両側外耳道閉鎖症の患者に対しては、有用な補聴手段となり得ることが示唆された。

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。軟骨伝導では周波数ごとに伝導経路が異なっている。低音域は軟部組織経由が有意で高音域になるに従い気導経路が有意になることがわかった。また端子の設置部位の影響については気導からの刺激が最も入りやすく、また軟部組織を効率的に振動させることができる外耳道入口に置くことで最も効率よく音が伝導することが分かった。現時点で採用している振動子の設置方法が、最も快適かつ効率に音が伝導できることがわかった。また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。

動物実験では耳小骨を離断した伝音難聴モデルのラットを用いた軟骨導補聴システムの動物実験が可能であること、軟骨導振動子を介した音声刺激は軟骨もしくは骨組織を介して伝達されていること、また伝音難聴モデルのラットに対して軟骨導振動子を用いることによって聴力が改善することが示唆された。耳小骨離断術後の軟骨導は気導成分以外の軟骨あるいは骨組織を介した骨導であることが示唆された。また、気導成分や外耳道閉鎖効果の影響を排除すると、軟骨導は骨導に類似した周波数特性を持つことが示唆され、軟骨導と骨導の伝達様式が近いことが明らかになった。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Takefumi Sakaguchi, Hiroshi Hosoi, Acoustical analysis of tympanoplasty with soft posterior meatal wall reconstruction, *The Mediterranean Journal of Otology*, Vol. 4, Supplement 1, 137-138 (2008)

Tadashi Nishimura, Hiroshi Hosoi, Progressive hearing loss in intracochlear schwannoma, *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.*, Vol. 265, 489-492 (2008)

Yamashita A, Nishimura T, Nakagawa S, Sakaguchi T, Hosoi H., Assessment of ability to discriminate frequency of bone-conducted ultrasound by mismatch fields, *Neurosci Lett*. 2008 Jun

20; 438(2): 260-2. (2008)

Yoshiki Nagatani, Katsunori Mizuno, Takashi Saeki, Mami Matsukawa, Takefumi Sakaguchi, Hiroshi Hosoi, Numerical and experimental study on the wave attenuation in bone – FDTD simulation of ultrasound propagation in cancellous bone, *Ultrasonics* 48, 607–612, (2008)

長谷芳樹, 橘亮輔, 阪口剛史, 細井裕司 親密度別単語理解度試験用音声データセット (FW03)単音節音声ラウドネス校正, *日本音響学会誌*, 64, 11, 647-649, (2008)

阪口剛史, 斉藤修, 細井裕司 軟骨導音の方向感に関する基礎的検討 *日本音響学会 2008 年秋季研究発表会講演論文集*, 447-448 (2008)

阪口剛史, 細井裕司 軟骨導補聴の基礎的検討 第 53 回日本聴覚医学会学術講演会予稿集 51, 375-376 (2008)

西村忠己 突発性難聴の診断と治療 *奈医報* 21, 17-22 (2008)

西村忠己, 細井裕司 語音聴力検査 *JOHNS* 24, 719-723 (2008)

西村忠己, 山下哲範, 細井裕司 老年性難聴 *神経内科* 68, 436-441 (2008)

西村忠己, 岡安唯, 細井裕司 補聴器の基本知識 *medecina* 45, 1303-1306 (2008)

西村忠己, 細井裕司 補聴器の最新知見 補聴器外来の実態と将来のあるべき姿-大学病院の補聴器外来- *JOHNS* 24, 1333-1336 (2008)

西村忠己, 吉田悠加, 細井裕司 高齢者の補聴器装用希望者の聞こえに関する自己評価と家族評価 *Audiology Japan*, 51, 123-129 (2008)

Nagatani Yoshiki, Mizuno Katsunori, Saeki Takashi, Matsukawa Mami, Sakaguchi Takefumi, Hosoi Hiroshi, Propagation of fast and slow waves in cancellous bone: Comparative study of simulation and experiment, *Acoust. Sci. & Tech.*30(4), 257-264, (2009)

Nishimura Tadashi, Nakagawa Seiji, Yamashita Akinori, Sakaguchi Takefumi, Hosoi Hiroshi, N1m amplitude growth function for bone-conducted ultrasound, *Acta Oto-Laryngologica*, 129, 28-33, (2009)

Akinori Yamashita, Tadashi Nishimura, Yoshiki Nagatani, Tadao Okayasu, Toshizo Koizumi, Takefumi Sakaguchi, Hiroshi Hosoi,, Comparison between bone-conducted ultrasound and audible sound in speech recognition, *Acta Oto-Laryngologica*, 129, 34-39, (2009)

Toshizo Koizumi, Tadashi Nishimura, Takefumi Sakaguchi, Masanori Okamoto, Hiroshi Hosoi, Estimation of factors influencing the results of tinnitus retraining therapy, *Acta Otolaryngol Suppl* 562, 40-45,(2009)

Akinori Yamashita, Tadashi Nishimura, Yoshiki Nagatani, Takefumi Sakaguchi, Tadao Okayasu, Shuichi Yanai, Hiroshi Hosoi, The effect of visual information in speech signals by bone-conducted ultrasound, *NeuroReport* 21, 119-122,(2010)

細井裕司, 軟素材による外耳道再建型鼓室形成術—20 年間の経験と本法における外耳道入口部拡大法—, *頭頸部外科*, 19(1), 25-31, (2009)

細井裕司, 語音聴力検査—最近の動向—, *Audiology Japan*, 52, 563-570, (2009)

赤坂咲恵, 西村忠己, 岡安唯, 細井裕司, 難聴者における 57-S 語表の単音別正答率の検討, *Audiology Japan*, 53, 69-75, (2010)

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)

福田美美, 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

Takefumi Sakaguchi, Hiroshi Hosoi, Acoustical analysis of tympanoplasty with soft posterior meatal wall reconstruction, 8th International Conference on Cholesteatoma and Ear Surgery, Antalya (2008)

Takefumi Sakaguchi, Osamu Saito, Hiroshi Hosoi, Cartilage conduction hearing aid for the patient with atresia auris, Acoustics'08 Paris, Paris (2008)

阪口剛史, 斉藤修, 細井裕司 軟骨導音の方向感に関する基礎的検討 日本音響学会 2008年秋季研究発表会, 九州大学大橋キャンパス, 福岡市 (2008)

阪口剛史, 細井裕司 軟骨導補聴の基礎的検討 第53回日本聴覚医学会学術講演会, 明治記念館, 東京都港区 (2008)

阪口剛史, 齋藤修, 細井裕司 軟骨伝導補聴に関する基礎的検討 日耳鼻大阪地方連合会第306回例会, 大日本住友製薬(株)7階ホール, 大阪市 (2008)

柳井修一, 阪口剛史, 細井裕司, 単音節音声のラウドネスに及ぼす残響の効果に関する予備的検討(第二報), 第308回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

岡安 唯, 西村忠己, 穴川英美, 斉藤 修, 柳井修一, 細井裕司, 語音聴力検査における気導受話器と音場法の比較, 第308回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

細井裕司, 阪口剛史, 柳井修一, 聴・平衡覚と住居環境に関する研究ー残響と透過音の影響についてー, 2008年度「住居医学」共同研究成果報告会, 巖櫃会館, 檀原, (2009)

細井裕司, 補聴器の上手な使用法—成人—, 第110回日本耳鼻咽喉科学会総会, ザ・プリンスパークタワー東京, 東京, (2009)

西村忠己, 山下哲範, 岡安 唯, 森本千裕, 細井裕司, 難聴者の聞こえに対する自己評価の補聴器装用による変化, 第110回日本耳鼻咽喉科学会総会, ザ・プリンスパークタワー東京, (2009)

西村忠己, 福田芙美, 斎藤 修, 浦谷悠加, 細井裕司, 補聴器装用が聞こえに対する自己評価に及ぼす影響, 第309回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

柳井修一, 阪口剛史, 細井裕司, 透過音評定尺度作成の試み, 第309回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

岡安 唯, 西村忠己, 細井裕司, 語音明瞭度曲線からみた加齢変化—ロールオーバーとUCLとの関係について—, 第3回聴覚アンチエイジング研究会, 慶應義塾大学病院, 東京, (2009)

Yanai Shuichi, Sakaguchi Takefumi, Nagatani Yoshiki, Hosoi Hiroshi, The effect of reverberation time on perception of sound level, The 11th European congress of psychology, SAS Plaza Hotel, Oslo, (2009)

山下哲範, 西村忠己, 岡安 唯, 阪口剛史, 柳井修一, 細井裕司, 長谷芳樹, 骨導超音波語音における母音弁別能の検討, 第310回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

福田芙美, 西村忠己, 吉田悠加, 斎藤修, 柳井修一, 山下哲範, 細井裕司, 補聴器装用下におけるMCLと最高明瞭度の関係, 第310回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪, (2009)

齋藤修, 西村忠己, 吉田悠加, 福田芙美, 柳井修一, 山下哲範, 細井裕司, 「きこえについての質問紙2002」と67-S語表、57-S語表との関連, 第310回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪市,(2009)

柳井修一, 阪口剛史, 細井裕司, 残響が音量知覚に及ぼす効果の検討, 日本心理学会第73回大会, 立命館, 京都, (2009)

齋藤修, 西村忠己, 吉田悠加, 福田芙美, 柳井修一, 細井裕司, 「きこえについての質問紙2002」(装用前)と67-S語表、57-S語表を用いた語音明瞭度検査, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

赤坂咲恵, 西村忠己, 岡安唯, 細井裕司, 受聴単音節からみた異聴に関する検討, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

山下哲範, 西村忠己, 長谷芳樹, 岡安唯, 阪口剛史, 柳井修一, 細井裕司, 骨導超音波の母音弁別能,第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

岡安唯, 西村忠己, 山下哲範, 柳井修一, 中川誠司, 吉田悠加, 長谷芳樹, 細井裕司, 骨導超音波語音の母音の長さに対する脳磁界反応, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

齋藤修, 西村忠己, 吉田悠加, 福田芙美, 柳井修一, 細井裕司, 「きこえについての質問紙2002」(装用前)と67-S語表、57-S語表を用いた語音明瞭度検査, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

福田芙美, 西村忠己, 吉田悠加, 齋藤修, 柳井修一, 細井裕司, MCL・語音明瞭度と補聴器装用下の聞こえ, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

西村忠己 吉田悠加, 福田美美, 齋藤修, 細井裕司, 難聴者の聞こえに対する自己評価と家族評価の差と補聴器購入の有無, 第54回日本聴覚医学会総会, 新横浜プリンスホテル, 横浜市,(2009)

岡安 唯, 西村忠己, 山下哲範, 柳井修一, 吉田悠加, 細井裕司, 中川誠司, 長谷芳樹, 骨導超音波語音の刺激の長さがN1mに与える影響, 第311回日耳鼻大阪地方連合会, 大日本製薬, 大阪市, (2009)

Akinori Yamashita, Tadashi Nishimura, Yoshiki Nagatani, Takefumi Sakaguchi, Tadao Okayasu, Hiroshi Hosoi, Speech Recognition for Bone-Conducted Ultrasound, ARO 33rd MidWinter Meeting, Disney land hotel, Anaheim (2010)

Takefumi Sakaguchi, Hiroshi Hosoi, Post-Operative Hearing of the Reconstructed Ear with Soft Posterior Meatal Wall, ARO 33rd MidWinter Meeting, Disney land hotel, Anaheim (2010)

Tadashi Nishimura, Hiroshi Hosoi, A Case of Intracochlear Schwannoma with Progressive Hearing Loss, ARO 33rd MidWinter Meeting, Disney land hotel, Anaheim (2010)

Tadao Okayasu, Tadashi Nishimura, Akinori Yamashita, Yanai Shuichi, Seiji Nakagawa, Yuka Uratani, Yoshiki Nagatani, Hiroshi Hosoi, Temporal-Integration Mechanism of Bone-Conducted Ultrasonic Speech Sound, ARO 33rd MidWinter Meeting, Disney land hotel, Anaheim (2010)

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

Nishimura Tadashi , Hosoi Hiroshi , A case of intracochlear schwannoma with progressive hearing loss, Association for Research in Otolaryngology 33rdMidWinter 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 33rdMidWinter 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 33rdMidWinter 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—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, 齋藤 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, 仙台市, (2010)

柳井修一, 阪口剛史, 長谷芳樹, 細井裕司, 周波数領域特異的な劣化処理音声を用いた語