

Phonak Insight

サウンドリカバーⅡ – これまでにない適応型周波数圧縮アルゴリズム さらなる高音域の可聴性を

2008年のサウンドリカバーの紹介を皮切りに、フォナックは最新の周波数シフト技術を先導してきました。以来、成人や児童を対象にした大規模な世界中の検証研究において、高音域の音の検出、識別、認識の増加、より良い言葉の聞き取り、そして抑揚や全体的声質に対する大きな改善があるということが認められてきました。残聴型や高音急墜型を含める高度～重度難聴者にとっては、周波数圧縮が適用される可聴帯域が制限されるため、得られる効果は限定されていました。新しくなったサウンドリカバーⅡの新しいアルゴリズムは、より良い音質を保つために、低音域構成はそのままにしながら、適切な高音域の可聴性を復元することをねらいとしています。新しくなった周波数シフトについても、高度～重度難聴者への効果をさらに拡大するため、初代サウンドリカバーの本質を維持しながらも、カットオフ周波数に適応型アルゴリズムを加えました。

はじめに

これまで約 10 年間、補聴器ユーザーの知覚的聴覚帯域を広げるために、周波数を置き換えるという手法が市場で利用され続けてきました。フォナックは 2008 年の初代ナイーダのリリースと共に、従来、補聴効果が無いとされる高音域の可聴性を復元させる解決方法を提供するべく、ノンリニア周波数圧縮のサウンドリカバーを紹介してきました。

歪みなく入力信号を増幅するため、母音は低音域エネルギーに影響し、無声摩擦音は高音域エネルギーに影響するという事実からサウンドリカバーは開発されています。このため、サウンドリカバーは圧縮をかけ始めるポイントとなるカットオフ周波数を設計しました。カットオフ周波数より低い周波数帯の入力信号は周波数圧縮の対象にならず、カットオフ周波数より高い周波数帯の全ての入力信号は周波数圧縮の対象となります。つまり、カットオフ周波数と上端周波数の間の出力は一定の圧縮比¹で圧縮され、カットオフ周波数より低い周波数帯の出力はそのまま圧縮されません。上端周波数は最大出力周波数と一致し、個人のオーディオグラムの可聴帯域に基づいて設定されます。サウンドリカバーのカットオフ周波数の最小値は 1.5kHz なので、可聴範囲の重要な母音構成は圧縮せず、雑音のような高音域構成の音声に対して適用されます。サウンドリカバーの周波数シフトシステムに

関する詳細内容は McDermott 2010 による文書をご覧ください。

これまでの経験から、サウンドリカバーの周波数シフトが鳥の鳴き声や環境音といった高音域の音や言葉に作用し、効果的であるということが分かっています。サウンドリカバーは高音域を聞こえる範囲にまで圧縮し、補聴効果のある難聴 1.5kHz 以上に対して適用されます。しかしながら、残聴型や高音急墜型といった、低音域にのみ残存聴力がある高度～重度難聴のフィッティングは独特で困難です。これらの聴カタイプは音質への影響を考慮し、サウンドリカバーを許容可能なパラメータ設定にするよりも、より強力なパラメータ設定（カットオフ周波数は低く、圧縮比は強く）を必要とします。

サウンドリカバーの範囲を広げるため、新しくなったサウンドリカバーⅡのアルゴリズムでは、児童～成人にわたる幅広い人が周波数圧縮の効果を得るため、カットオフ周波数をより低くし、圧縮比を弱めた設計になっています。

¹ 対数的に計測の付いた周波数軸に表示されていれば、圧縮比は一定となる。

基本的な機能原理

サウンドリカバーⅡは初代サウンドリカバーの理論を踏襲した適応型周波数シフト手法です。新しいアルゴリズムでは、低音域エネルギーに影響する母音は圧縮をせず保護し、主に高音域エネルギーを構成する無声摩擦音に対して圧縮をかけます。異なる英語の音素を表したスペクトル分布は図1にて確認できます。

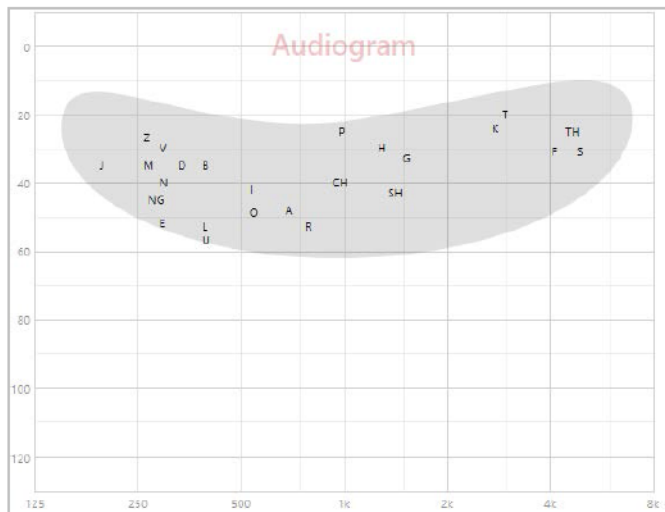


図1：英語でことばの周波数成分を表示したスピーチバナナ

これまでのサウンドリカバーとの大きな違いは、サウンドリカバーⅡでは周波数シフトの範囲、すなわち、保護すべき部分と圧縮すべきスタートポイントは固定されておらず、代わりに入力信号に適応しながら随時且つ遅れることなく切り替わるという点です。2つのカットオフ周波数を利用し、いずれか1つが常に動作しているのがこの適応型の本質です。入力信号の瞬間的エネルギーの分布に基づき、システムが2つのカットオフ周波数のどちらを適用するか瞬時に決定します。サウンドリカバーⅡの機能に関する原理はサウンドリカバーの原理と類似しています。例えば、サウンドリカバーⅡは、以前より増して高性能になったことで、カットオフ周波数1（以下 cf1）とカットオフ周波数2（以下 cf2）、この2つの圧縮のスタートポイントの間で自動的に切り替わります。しかし一方で、サウンドリカバーは、どちらのカットオフ周波数が瞬時に動作するかではなく、予め設定された一定の圧縮比で周波数移シフトが行われます。

そのため、サウンドリカバーⅡはエネルギー成分に合わせて瞬時に入力構成を出力に割り当てます。雑音のような入力信号の成分と音色の異なるエネルギー分布を単純に識別することで、この適応型周波数シフトの動作が可能となります。低音域成分がより多い場合、低音域の音が圧縮されないよう「保護」するため、周波数圧縮は cf2 を選択します。また、高音域成分がより多い場合、高音域の可聴性を還元させるため、cf1 を選択します。この方法

で音声に適用されると、摩擦音にある重要な高音域の情報は十分に低音域の出力周波数まで圧縮をかけますが、母音はそのままで圧縮しません。適応型動作を図式的に出力特性で表したものを図2にて確認できます。

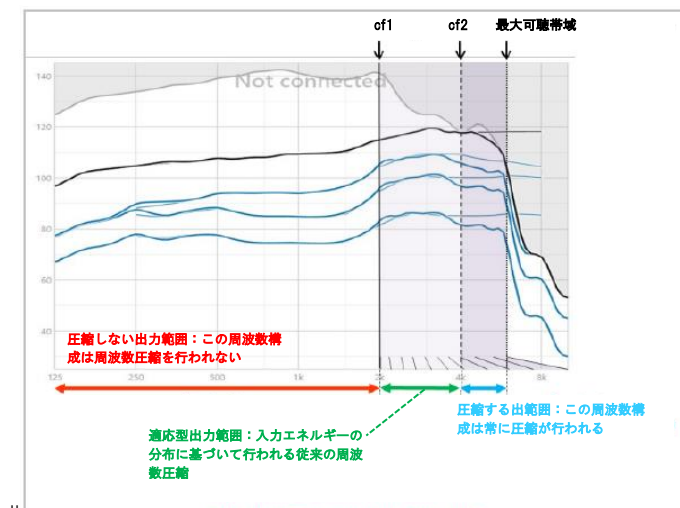


図2：サウンドリカバーⅡの出力特性の例。入力信号のエネルギー分布に合わせて、cf1 および cf2 のいずれかの地点で周波数圧縮が開始

適応型動作による影響

サウンドリカバーⅡの適応型動作による影響は大きく、入力信号に重要な高音域周波数エネルギーが存在する場合のみに、適応して決定された圧縮のスタートポイントが確定します。その結果、これまでの制限地点である1500Hzより低い周波数帯に cf1 を設定し、圧縮できる部分を増やしながらも、初代サウンドリカバーで設定できる中で最も弱い圧縮比よりもさらに弱い圧縮比に設定することができます。入力信号に重要な低音域周波数エネルギーが存在した場合のみ cf2 が適用されるので、制限はあるものの cf2 の値は高めに設定されます。この適用範囲は、信号がシフトされず保護される cf2 より低い帯域の出力部分にまで及びます。そのため、音色構成および低音域周波数の構成部分は絶対に圧縮されずに保護されることが保証されています。特に、重要となる母音のフォルマントに悪影響を及ぼすことがないことは確実です。

効果

初代サウンドリカバーで設定可能であった低い圧縮比よりもさらに圧縮比を低くし、これまでより低く設定できる cf1 を利用した周波数シフトというのが適応型サウンドリカバーⅡの本質です。cf2 の周波数が高いことで、より自然で聞き覚えがあり、且つ音色構成に歪みが無い、より良い音質を生み出します。同時に、cf1 を可能な限りより低い周波数にすることで、全ての聴力低下タイプが高音域にアクセスできるようになります。その結果、残聴型や高音急墜型のような、高度～重度難聴者によく見られる聞こえのダイナミックレンジが限られた人にも対応できるよう、サウンドリカバーⅡのフィッティング範囲

が広がりました。一言で言うと、より多くのユーザーが新しいサウンドリカバーⅡのアルゴリズムを利用して、以前よりも周波数シフトによる効果を得られるということです。より弱い圧縮比を使用することで変化がより少なくなり、中高音域の入力信号に対するスペクトルの形状がより保持されます。その結果、言葉や環境音の聞き取りが改善され、初代サウンドリカバーよりもより自然な受け入れを実現させます。

図 3 は「my name is asa」という例文のスペクトログラムです：(a) 周波数シフトを使用しない、(b) サウンドリカバーを有効、(c) サウンドリカバーⅡを有効。

図 3(a)は、0.2 秒～0.5 秒に発音された 5.5 kHz までのフォルマント構造と 1.2 秒～1.9 秒に発音された 2 つの高音域音素/s/を示しています。

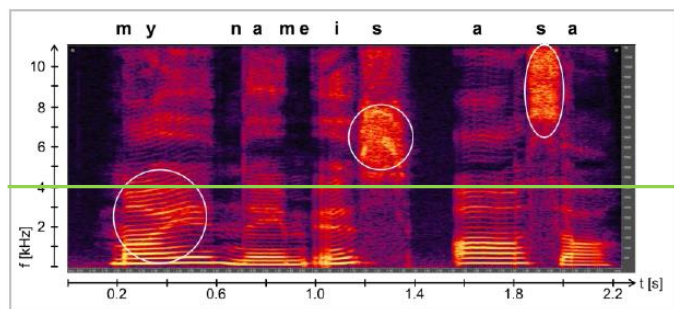


図 3(a)：周波数移動を使用しない、例文「my name is asa」のスペクトログラム

図 3(b)は、可聴閾値が約 4000 Hz までで、カットオフ周波を 1500 Hz、圧縮比を 2.1 に設定したサウンドリカバーを有効にした状態です。1.2 秒～1.9 秒地点の音素/s/は圧縮されて 2.5～4kHz の周波数帯にシフトしています。このようにカットオフ周波数を最大に設定すると、上記にある 1500 Hz 以上のスペクトルの微細構造が完全に保持されていないことが分かります。

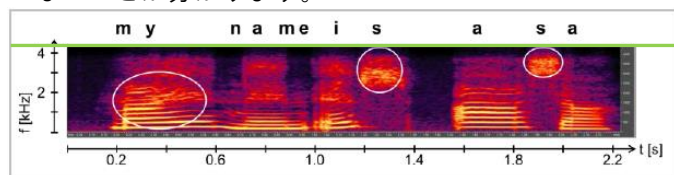


図 3(b)：サウンドリカバー（カットオフ：1500 Hz、圧縮比：2.1）を有効にした、例文「my name is asa」のスペクトログラム

図 3(c)は、同様に可聴閾値が約 4000 Hz までで、cf1 を 1479 Hz、cf2 を 3600 Hz、圧縮比を 1.4 に設定したサウンドリカバーⅡを有効にした状態です。文の始まり 0.2 秒～0.5 秒地点は cf2 の 3600 Hz までのスペクトルの微細構造が保持されており、1.2 秒～1.9 秒地点は 2 つの重要な高音域音素/s/が低音域部分 2000 Hz～3000 Hz に置き換えられていることが分かります。

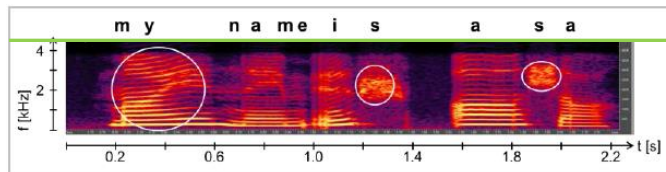


図 3(c)：サウンドリカバーⅡ（cf1：1479 Hz、cf2：3600 Hz、圧縮比：1.4）を有効にした、例文「my name is asa」のスペクトログラム

効果を証明する根拠

表 1 は、フィッティング範囲の拡張と可聴性、識別性、音質の点から見た聴覚的效果、すなわち、初代サウンドリカバーとの比較におけるサウンドリカバーⅡの理論的效果をまとめたものです。また、ほとんどのユーザーがこれまでの周波数シフトテクノロジーからのスムーズな移行を期待しています。特に、初代サウンドリカバーのユーザーは何も心配することなく、概ねがサウンドリカバーⅡへ順応し、切り替わることができます。

フィッティング範囲の拡張	<ul style="list-style-type: none"> より受け入れやすい音質となり、以前にも増して高度～重度難聴に適合 残聴型や高音急墜型の聴力タイプにも適合することが可能
聴覚的機能の向上	<ul style="list-style-type: none"> 高音域の可聴性が改善（根拠は後述を参照） 圧縮された高音域構成に対する検出、識別、認識が改善 音質を維持したまま、特に低中音域構成における聞き覚えや自然さをより具体的に保持 環境音により気付くことで、潜在的に自然な受け入れが改善し、順応期間も短縮

表 1：初代サウンドリカバーとの比較におけるサウンドリカバーⅡの理論的效果

研究結果

表 1 で述べたような理論的效果が調査で確認できました。最初に行った研究では、高音域に高度～重度の感音難聴がみられる児童 14 名を対象に、初代サウンドリカバーから大幅に改良されたサウンドリカバーⅡで得られる効果を測定しました(Wolfe ら. 2016)。その研究において、静かな環境下における言葉の聞き取りや英語の複数形を表現する(s)の聞き取りに改善があったことが分かりました。子音に対する検出や識別の損失は見られず、初代サウンドリカバーを長期利用するユーザーは長い順応期間を設けずにサウンドリカバーⅡへ切り替えることが出来ました。

フォナック本社で実施した別の研究において、聴力低下がある成人男性 8 名（平均年齢：56.8 歳、250 Hz～8 kHz の周波数帯が 90 dB 以上の左右対称の重度感音難聴もしく

は混合性難聴)を対象に、初代サウンドリカバーとサウンドリカバーⅡの聴覚的効果を比較しました。この重度難聴グループに実施した音素認識テスト(Schmitt ら. 2016)において、検出テストにおいては4つの検査音のうち3つが非常に良い検出閾値(図4)で、認識テストにおいては4つの検査音のうち1つが非常に良い認識閾値(図5)であることが分かりました。

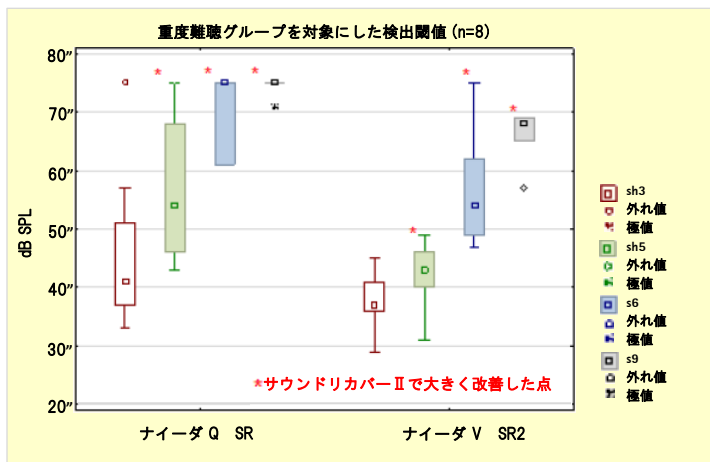


図4：音素認識テスト：重度難聴を対象に Naida Q SR(初代サウンドリカバー)と Naida V SR2(サウンドリカバーⅡ)を比較した検出閾値の平均。測定に使用した提示音4つのうち3つ(sh5、s6、s9)の検出において、サウンドリカバーⅡで大きな改善が見られた

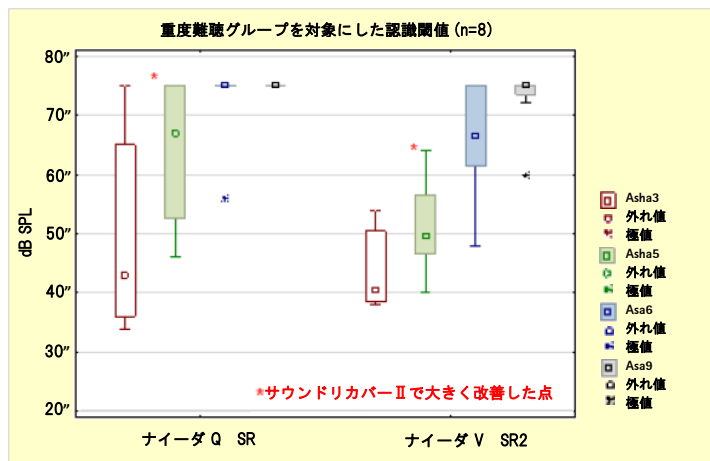


図5：音素認識テスト：重度難聴を対象に Naida Q SR(初代サウンドリカバー)と Naida V SR2(サウンドリカバーⅡ)を比較した認識閾値の平均。測定に使用した提示音4つのうち1つ(Asha5)の認識において、サウンドリカバーⅡで大きな改善が見られた

そして全周波数帯の音の聞き覚えを維持することを目的としています。

周波数シフトにおける知覚的なトレードオフ²

フィッティングにおいては、どの種類の周波数シフトも聴覚的効果と全体的音質とのバランスの知覚的なトレードオフを解消しなければなりません。これまでの周波数シフトのほとんどは高音域の難聴レベル変えることで、トレードオフが十分に解消されます。しかし、2000 Hzより高い周波数帯において、補聴効果のない高度～重度難聴者に周波数シフトを適用することは特に困難です。高音域を提示するために、このような人が持つ非常に狭い可聴閾値に周波数シフトを適用すると、音質を妥協することになり、周波数シフトの効果に制限をかけることとなります。

この困難さは、可聴性と音質の知覚的指標を用いて、周波数シフトの強さ調整変更からもたらされる効果を質的に示した、トレードオフのグラフで説明できます(図6)。

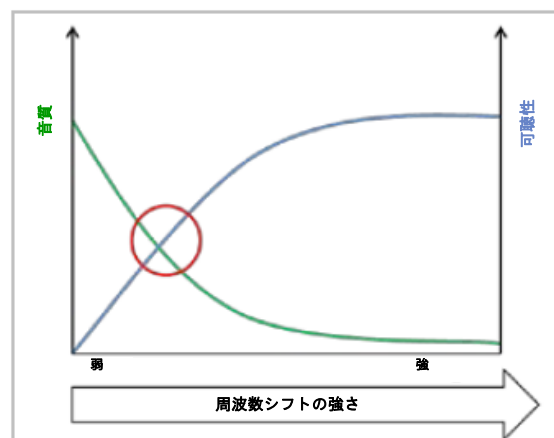


図6：高度～重度難聴者がこれまでの周波数シフトを使用した場合に起こる知覚的なトレードオフのカーブ。聴覚的効果と音質との間で起こる(不満足を含む)妥協を示している。可調性のためには音質を犠牲にしなければならず、その逆も同じ

サウンドリカバーⅡは、上記で述べた制限を克服する技術的手段を提供するだけでなく、補聴器専門家が複雑な知覚的なトレードオフをより解消するための方法でもあります。

サウンドリカバーⅡ 基本原理

周波数シフトの性能は、知覚的指標を使って直観的、且つ簡単な方法で特徴を述べることができます。そのため、サウンドリカバーⅡのフィッティング処方は次の3つの重要な知覚的指標に基づいています：

- 高音域の可聴性(音素：/s/, /f/, /th/)
- 周波数シフトされた高音域の識別性(音素：/s/, /sh/)
- 低中音域の音質(母音：/a/, /e/, /i/)

サウンドリカバーⅡ フィッティング構想

目的

患者に関する大規模な調査研究において、良い可聴性と識別性を獲得することが良い聞こえを提供するのに最も重要であると知られています。同時に、良い音質であることも自然な受け入れや聞こえの快適性には重要です。サウンドリカバーⅡのフィッティングは、高音域の音の可聴性と識別性を保持し、必要に応じて復元させること、

² 複数の条件を同時に満たすことのできないような関係(二律背反)

相互関係のあるこの3つの知覚的指標は「トレードオフトライアングル」を用いてグラフで示すことが可能です。図7では、初期設定、弱設定、強設定を比較対象に、トレードオフトライアングルを使い、考えられる3つのトライアングルを表示しています。

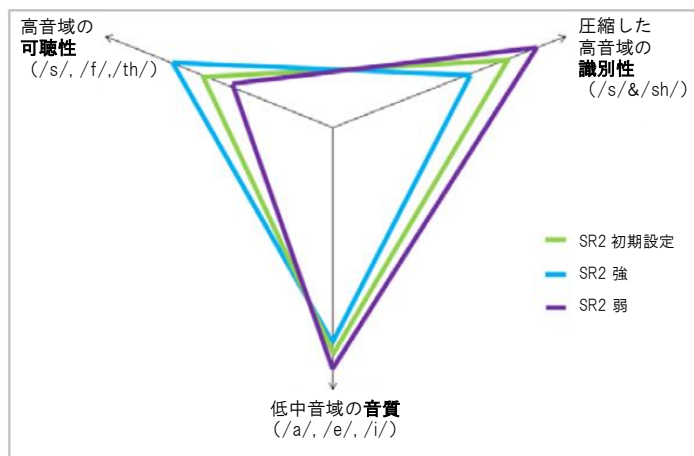


図7: サウンドリカバーIIのトレードオフトライアングル: 初期設定(緑)、可聴性が強(青)、識別性が強(紫)。2つの指標上に1つの知覚的指標が重なる際の変形効果に注意してください

サウンドリカバーIIは、この相互依存する知覚的指標のバランスを最適化することを狙いとし、次のことを行います:

- 1) 可能な限り最善な方法で可聴帯域を利用する
 - 周波数シフトをせず可聴性が得られる部分の聴覚神経を最大に興奮させるため、最大出力周波数は可聴帯域の上端に設定される
 - 損失リスクがない
- 2) 可能な限り最善な方法で低中音域周波数を保護する
 - 圧縮しなくても聞こえることには影響を与えないよう、cf2は十分に高い位置に設定される
 - 低中音域周波数が歪むリスクがない
- 3) 最適と選択された周波数部分に圧縮した音を提示する
 - 圧縮が始まるスタートポイント(cf1)は、弱い圧縮比で広範囲に圧縮をかけるため、可能な限り最も低い周波数帯に設定される
 - より多くのユーザーに周波数シフトの効果を提供するため、高度～重度難聴者には周波数圧縮の強さを全体的に上げる

仮計算

これら3つの要素を考慮し、そして数年間にわたる調査による患者のデータを基にして、フィッティングに最適な仮計算と初期値が慎重に開発されました。その結果、全てのフィッティングにおける初期設定は、高音域に良い可聴性を与えながらも、圧縮した音を十分に識別でき、同時に受け入れられる全体的音質を提供できる、3つの知覚的指標に対して最も良いバランスとなりました。

サウンドリカバーII フィッティング処理

2つの指標「可聴性」と「識別性」は、必要に応じて、微調整の画面から個別調整することができます。可聴性を強くした場合、識別性を良くするために圧縮比が変化する一方、cf1が下がります。3つ目の指標「音質」はPhonak Targetの中で重要なフィッティング指標の変更に合わせて自動的に最適化されます。そのため、特定のユーザーに可聴性と識別性のバランスが最適化されると、音質は常に最適な明瞭性を保つため自動的に調整されます。

音質は音の明瞭性と聞こえの快適性において、より細かく特徴を述べることができます。時に患者は明瞭性と快適性において異なるバランスを取る必要があります。このような場合、最適な明瞭性と個人の聞こえの快適性とのバランスを取るため、予め定義された4つの設定を用いて、さらに音質を調整することが可能です。聞こえの快適性を上げる調整をすると、cf2が最大可聴閾値の方へシフトします。

図8は、サウンドリカバーIIのフィッティング処理として、可聴性と識別性の微調整とその後の音質の微調整を説明しています。この方法はPhonak Target内の微調整画面にある2つの知覚的スライダーから行われます。

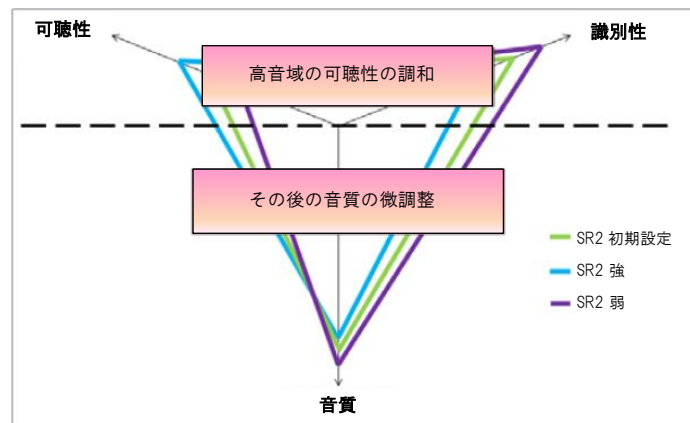


図8: サウンドリカバーIIのフィッティング処理。フィッティングの基本となるのは仮計算で出される初期設定。高音域の可聴性とシフトされた高音域構成の識別性は微調整画面から最適化することが可能。結果、音の明瞭性が自動的に最適化。予め定義された4つの設定を変更し、より聞こえの快適性の方向へ音質を微調整することが可能

成果

この知覚的指標に基づいたフィッティング処理により、補聴器専門家は直感的で、分かりやすく、そしてユーザー志向の方法でサウンドリカバーIIを調整することができます。周波数シフトのフィッティングをしている間の患者の意見によると、初代サウンドリカバーの作用の強弱や拡張パラメータを使用するよりも、サウンドリカバーIIの基本原則となる知覚的指標を使用した方が良いと述べられています。

Phonak Targetの初期計算で出される設定が、圧縮した音の十分な識別性と受け入れられる音質と共に良い可聴性を提供することで、初期設定の制度が高まり、フィッティングが非常にスムーズに始められるのです。

まとめ

新しいサウンドリカバーⅡの周波数シフトアルゴリズムは、既存のサウンドリカバーの母体を拡大するため、弱い圧縮比を用いて cf1 を操作するよう設計されています。さらなるカットオフ周波数の導入と入力信号のエネルギー成分に圧縮をかけるスタートポイントの適応調整によってこの野心的な目標が達成されました。cf1 と cf2 の間で瞬時に切り替わることで、低音域構成はそのまま保護しながらも、高音域構成は低い圧縮比で幅広い周波数帯に作用します。

予備調査（外部）において、子音の聞こえや聞き取りを損失することなく、静寂下における単語の聞き取りと英語の複数形(s)の聞き取りが改善したと述べています。初代サウンドリカバーの長期装用ユーザーは、順応するのに長期間を要することなく、サウンドリカバーⅡに切り替えることができました(Wolfe ら. 2016)。フォナック本社で実施した重度難聴を抱える患者グループを対象にした内部研究において、音素認識テストを行った結果、4 つの提示音のうち 3 つで検出閾値に大きな改善が見られ、4 つの高音域の提示音のうち 1 つで認識閾値に大きな改善があったことが分かりました。

新しい信号処理と共に、聴覚的效果と周波数シフトによる音質との間に起こる困難なトレードオフをより簡単に管理できる新しいフィッティングコンセプトが開発されました。結果、知覚的フィッティングは、相互関係のある知覚的指標：可聴性、識別性、音質を表す「トレードオフ トライアングル」が基となっています。フィッティングの仮計算が、高音域に対する可聴性を上げるために最適なスタートポイントを提供し、圧縮した音を十分に識別することを可能にし、そして全体的に受け入れやすい音質というものを届けます。Phonak Target のサウンドリカバーⅡの画面にある知覚的スライダーから個人のニーズに合う微調整を簡単に行うことが可能です。

参考文献

McDermott, H. (2010). SoundRecover - The importance of wide perceptual bandwidth. Phonak Background Story.

Wolfe, J., Duke, M., Schafer, E., Rehmann, J., Jha, S., John, A., Jones, C. (2016). Preliminary evaluation of a novel non-linear frequency compression scheme for use in children. Submitted to International Journal of Audiology.

Schmitt, N., Winkler, A., Boretzki, M., Holube, I. (2016). A phoneme perception test method for high frequency hearing aid fitting. Journal of the American Academy of Audiology.

著者

Julia Rehmann is an Audiological Engineer at Sonova Headquarters in Switzerland.

Siddhartha Jha is a DSP Engineer in the Science & Technology department at Sonova Headquarters in Switzerland.

Silvia Allegro Baumann is a Senior DSP Engineer in the Science & Technology department at Sonova Headquarters in Switzerland.