

micon 周波数圧縮機能：

- 開発の背景と臨床的検証 -

SIEMENS

www.siemens.com

Maja Serman（博士）
Ronny Hannemann（博士）
Ulrich Kornagel（博士）

摘要：

本ホワイトペーパーでは、Siemens micon プラットフォームに新たに導入した周波数圧縮機能について解説する。同機能は、これまで多くの難聴者が諦めかけていた音の情報の獲得を得ることができる独自の機能である。

micon 周波数圧縮では、有効性を選択するステージを設け、同機能による効果が高い装用者であるかを自動的に決定する。そして、フィッティング処方計算式の中で、各装用者に最も適したパラメーターを提示することができる。

I 序論と背景

周波数圧縮機能の背景にあるアイデアは古くから存在しており、そのアルゴリズム手法は、数十年前から複数の種類がある「低周波数コントロール技術」に属するものである

(Mazoretal.,1977などを参照)。この技術は、高周波数領域における難聴を補償することを目的として開発された。人間の聴覚システムの機能は年齢とともに徐々に低下するが、その影響が最初に現れるのは高周波数領域であり、残りの低周波数領域の聴力は保たれる。そこで信号の要素のうち、内耳の高周波数の処理機能を知覚する要素を、健全性が保たれている内耳他の周波数領域で処理するために変換するという考えが生まれた。アルゴリズムの観点からは、この処理を実施した後の信号の帯域幅は大幅に狭まることになる。

周波数圧縮は有効か？

「この種のシステムにおける基本的な問題として、音声信号の帯域幅を狭めるため、必然的に情報の一部が失われる点があげられる」(Mazor et al., 1977)。音声信号の高周波数帯域には、母音認識と子音認識の双方に重要なフォルマント (Harrington, 2010) や、子音 (特に摩擦音) の識別に必要なスペクトルキュー (Jongman et al., 2000) が含まれている。また語音の認知度を左右すると考えられているスペクトルキューにとって重要なのは語音の絶対値ではなく、ある程度の幅を有する相対値であり、また前後の文脈によっても変化する。周波数の低域化によって生じる帯域幅の縮小により、音声信号のスペクトルキューの多くが失われるか、もしくは劣化する。どの低周波数化アルゴリズムも、帯域幅を縮小した信号の一部に失われた情報を追加することにより、上記の情報損失を「埋め合わせる」試みを行っている。その際に生じる問題について、現在利用されている以下の2種類の低周波数化の補聴方式を比較してみよう。

- 1) ノンリニア周波数圧縮法
- 2) リニア周波数変換法

ノンリニア周波数圧縮法では、高周波数領域を圧縮し、その周波数成分を低周波数化させる (図1を参照)。この方法では、圧縮した情報のある周波数 (F_{min}) 以下に低下させることはできない。したがって F_{min} 以上の周波数の情報は圧縮され、その周波数が低下する一方、 F_{min} 以下の周波数の情報は完全に保存される。 F_{min} 以上の周波数の語音関連スペクトルキューは、信号の圧縮に伴って変化する。

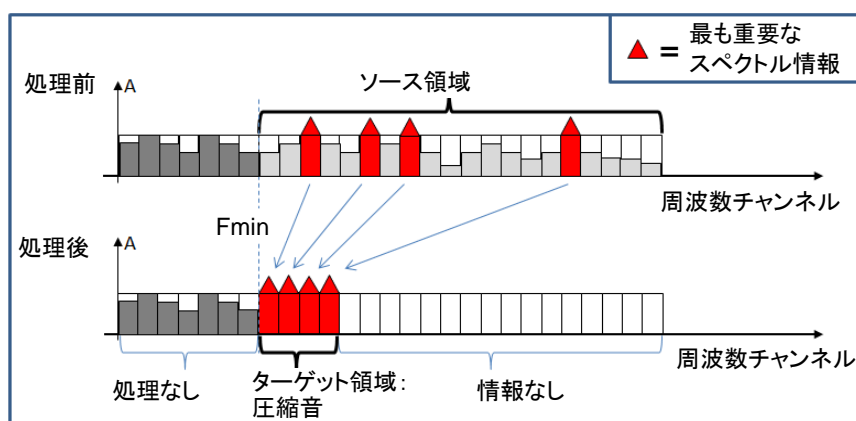


図1. ノンリニア周波数圧縮法:

上図では例として、ソース領域の最大ピークを選択している (スケール法とピーク選別法の詳細については、Timms, 2003を参照)。最も重要なスペクトル情報 (赤色のピーク) のみを選択し、周波数を低下させていることに注目。図1と図2を比較できるようにするため、チャンネルについては便宜的に分かりやすく表示した。

リニア周波数変換法では、高周波数領域の信号成分の周波数を、低周波数側のターゲット領域にまで低下させる（図2を参照）。スペクトル成分の周波数のみを圧縮せずに低下させる（変換する）ため、変換後も語音関連スペクトルキュー間の関連性が維持されると言える。ただし、周波数を低下させたスペクトル成分が元のスペクトル成分と混合するため、処理後の混合音における語音関連スペクトルキューは変化する。

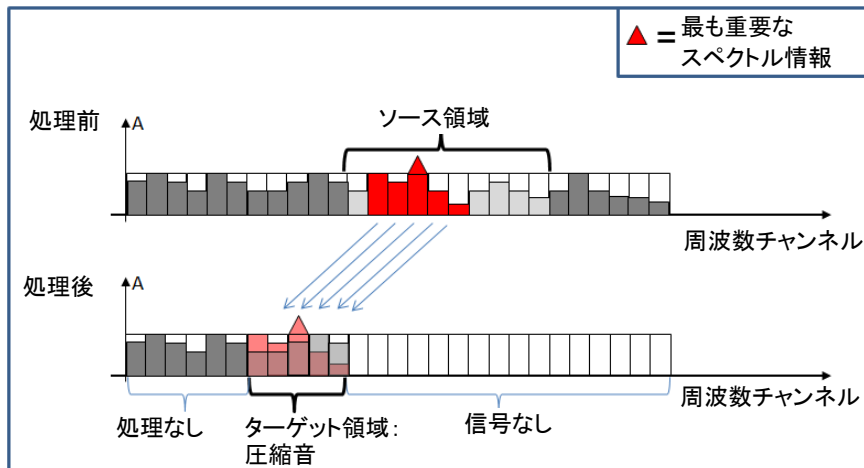


図2.リニア周波数変換:最大ピークとそれに隣接する信号をソース領域からターゲット領域にシフトさせる。変換後のターゲット領域にはソース領域からシフトしたピークと元の音声の双方が成分として含まれる(Kuk *et al.* 2006 など)最も重要なスペクトル情報(赤色)のみ周波数を低下させていることに注目。図1と図2を比較できるようにするため、チャンネルについては便宜的に分かりやすく表示した。

上記の低周波数化方式では、いずれも信号の高周波要素を完全に除去している。この場合、高周波領域の刺激が障害になると考えられる装用者にとっては、処理によって生じる励振による悪影響を受けずに済むという利点がある(Vickers *et al.*, 2001; Baer *et al.*, 2002; Gordo and lorio, 2007。Preminger *et al.*, 2005; Cox *et al.*, 2012も参照)。ただし低周波数化方式の場合、その代償として信号の帯域幅の縮小、または元の信号へ他の要素の混入が生じ、処理された信号で聞く音の成分と、装用者がこれまで可聴域で聞いていた音の成分(語音スペクトルキューなど)とが異なるものとなる。

代替法はあるか

低周波数化法の代替法としては、利得の処方計算と振幅圧縮方式を用いた補聴器による標準的な増幅法があげられる。この方法が効果を発揮すれば、スペクトルキューをある程度維持しつつ、難聴を発症する前の状態を再現することができる。そのため、一般にはこの方法が最も多く利用されている。だが、この方法はどのような場合でも効果を発揮するのだろうか？

残念ながら、補聴器の増幅機能を通じた高周波数信号の増幅にはある程度の限界がある。最も一般的な理由を以下に示す。

- 1) 知覚する音量が過剰に大きいため、または許容可能なレベルよりも音質が劣るため、不快感が生じる。
- 2) 聴取可能な状態であっても、周波数を識別する機能が劣化する。
- 3) 補聴器自体の性能に限界があるため、十分な利得が得られない。
- 4) 補聴器の音響フィードバックが生じる。

以上の制限により、高周波数利得の補償が不十分となり、場合によっては装用者にとって障害となる可能性がある(Ching *et al.*, 1998; Hornsby and Ricketts, 2006など)。

すなわち、従来の高周波数増幅法や低周波数化方式には、いずれも処理後の帯域幅やスペクトル情報に関する限界が生じるのである。また低周波数化法の場合には変化したスペクトルキ

ユーに順応する必要があるが (Smith and Faulkner, 2006; Kuk *et al.*, 2010; Glista *et al.*, 2012)、標準的な増幅法の場合には変化した (音の大きさに対する) ラウドネスキューに順応する必要がある (Vestergaard, 2004)。したがって低周波数化方式の場合、個々の装用者がそれぞれに最大の効果を得ることができるように、その長所と短所を慎重に比較評価しなければならない。そのため Siemens micon 補聴器では、装用者によってパラメーターを効果的に選択することができるノンリニア周波数圧縮 (FCo) 機能を搭載している。

II 周波数圧縮機能 (以下 FCo) の説明

Siemens の FCo 機能は、ノンリニア周波数圧縮方式の一つである。このアルゴリズムでは、周波数スペクトルの低周波領域を処理せずに残す。約 1500 Hz 以下の音声信号に含まれる情報を利用することにより、基本周波数 (男性と女性の音声の識別、声調言語の理解、韻律の変化などに重要な要素) や第 1・第 2 フォルマント情報 (母音や有声子音の認識などに重要な要素) などの語音情報を抽出することができる。この情報に他の要素が混入すると、装用者にとって語音明瞭度 (Speech Intelligibility) や音質が大幅に低下することが多い。

FCo 機能の説明では、以下の 3 つの用語を使用する (図 3)。

Fmin : 以下の双方を示す用語。

- 圧縮処理を行う必要があるターゲット高周波数領域の下限。
- 圧縮処理を行った領域の下限。

Fmax :

- 圧縮処理を行った領域の上限。想定される装用者の最高可聴周波数もしくはその近傍に設定するのが理想的である。

Fend :

- 補聴器の信号帯域幅の最高周波数。

選択可能な Fmin の最小値は 1500 Hz である。残りのスペクトル要素 (Fmin から Fend まで) はより狭い周波数レンジにノンリニア圧縮される。Fmin が等しい場合、Fmax を Fmin に近づけるほど (Fend から遠ざけるほど)、圧縮の強度が増加する。

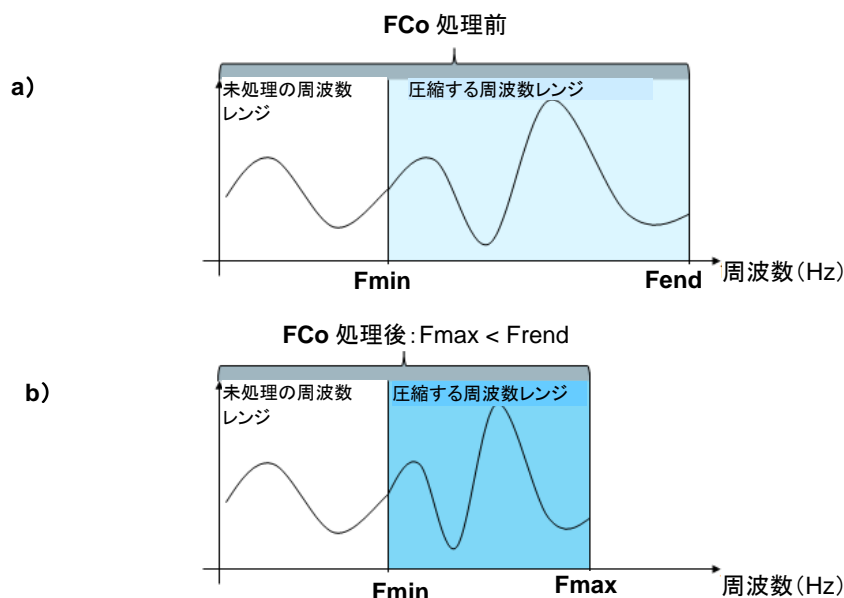


図 3.ノンリニア周波数圧縮法について簡単に示した模式図: a) Fmin~Fend: 圧縮処理を行う高周波数領域 b) 周波数圧縮領域: Fend が Fmax に移動したことに注目。

研究結果によれば、周波数圧縮法を使用した場合に語音明瞭度に与える効果は、各パラメーターの選択の適正度と学習プロセスの促進度によって大きく左右されることが示されている (Simpson *et al.*, 2005; Simpson *et al.*, 2006; Smith and Faulkner, 2006; Alexander, 2009; Scollie *et al.*, 2010; Glista *et al.*, 2012)。

このように適正なパラメータの選択の難しさがあるため、シンプルな方法の一つとして、周波数圧縮の強度が極めて小さくなるようにパラメータの設定を最も軽くする方法が提案される。その理由としては、この方法を採用した場合、高周波数の出力を制限すること以外に悪影響が生じないことがあげられる。またこの方法の長所として、フィードバックや音声のひずみが生じる可能性が小さくなり、したがって従来型補聴器の信号帯域幅の縮小を補償することができることもあげられる。この方法は、以前から利用可能な周波数圧縮技術の初期設定でも一般的に利用されている。

実際には、周波数圧縮強度を弱めても必ずしも言葉の認識が改善されるとは限らない。しかも信号帯域幅が大幅に縮小するため、装用者が語音明瞭度に対する効果や音声経験を十分に得ることができないことを認識しておかなければならない (Moore and Tan, 2003; Hornsby and Ricketts, 2006; Ricketts *et al.* 2008; Sjolander and Holmberg, 2009)。micon 補聴器では信号帯域幅を 12 kHz とすることにより、必要に応じて高周波数領域を直接増幅することが可能であることに加え、極めて効果の高いフィードバック・キャンセレーション・システムを搭載している。したがって Siemens フィッティング・アルゴリズムでは、必ずしも全ての装用者に対して FCo 機能を適用するわけではない。

FCo 機能を実行する装用者とは

FCo 機能では、装用者の聴カレベル、ならびに選択した増幅方式に対する処方利得を考慮し、機能を実行する装用者を選択する。この情報を利用して、各装用者の最高可聴周波数を決定する。最高可聴周波数と選択した音響パラメータをベースにして、特定の装用者に対して機能を実行するかどうかを判断する。そのため、シーメンスの適用対象者の選択機能では、オーディオグラムおよびフィッティング方式を参照にして、さらに音響パラメータの効果を考慮している。上記の適用対象者の選択方法の基準を以下に示す。

- 従来の高周波数増幅法が有効であると予測される装用者については、FCo 機能を実行せず、最大限の聴覚刺激を与え、実生活における音声のニュアンスを全て維持する。
- 従来の増幅戦略よりも FCo 機能による効果の方が高いと予測される装用者については、最も効果的なパラメータを個別に計算した上で FCo 機能を実行する。

最も効果的な FCo パラメータを決定する方法とは

パラメータを決定する際には、いくつかの制限事項について考慮する必要がある。

1. Fmin の選択 :

- a. Fmin を設定し、圧縮処理を行うターゲット高周波数領域の下限を定める (上限については Fend によって定める)。Fmin を設定する理由は、できるだけ幅広い低周波数信号成分を処理せずに残すことによって、(母音および有声子音の認識に関して重要であることが判明している) 低周波数領域の語音関連スペクトルキューと、(音声をできるだけ自然な状態に維持するために必要となる) 性別による音声の違いや韻律に関するスペクトルキューを維持することにある。したがって Fmin の設定値が低すぎると、重要な語音関連スペクトルキューが必要以上に圧縮され、音質が劣化する。
- b. また Fmin により、圧縮処理を行った周波数領域の下限も決まる。したがって Fmin の設定値が高すぎると、圧縮処理を行った信号が聞き取れない、あるいは圧縮の強度が過剰に大きくなるリスクが生じる。

2. Fmax の選択 :

Fmax を設定し、圧縮した周波数領域の上限を定める。Fmax の設定値が高すぎると、圧縮処理を行った信号が可聴周波数を上回るリスクや、圧縮処理を行った信号に聴取不能な周波数領域 (Dead Region) が生じるリスク、あるいは処方利得によって不快な音が発生するリスクが生じる。(Fmin の設定と同様に) Fmax の設定値が低すぎると、圧縮の強度が過剰に大きくなる可能性がある。

3. FCo 機能による圧縮の強度の設定 :

- a. 圧縮の強度は、Fmin と Fmax の差の大きさによって決まる。この差が小さいほど、圧縮の強度は大きくなる。すなわち Fmin が同じ場合、Fmax が低いほど、圧縮の

強度が大きくなる。圧縮の強度が小さすぎる場合、処理後の信号が可聴領域から外れてしまうため、語音明瞭度に対する効果が得られなくなる。圧縮の強度が大きすぎる場合には、元の信号に別の要素が混入し、スペクトル情報が失われるために音質が劣化し、この場合も語音明瞭度に対する効果が得られなくなる。

FCo フィッティング方式は、上記の制限事項を全て考慮した上で、語音明瞭度と音質とのバランスを最適化するように策定されている。**FCo** 圧縮領域については、以下の規則に重みをかけて組み合わせた上で装用者毎に検討される。

1. 聴力レベルと選択した処方計算式より、最高可聴周波数を計算する。
2. オーディオグラムより、聴き取り不能な周波数領域が生じる可能性を計算する。
3. 個々の HA 周波数チャンネルに対し、語音関連スペクトルキューを設定する。
 - 特定の入力信号に対し、摩擦音「s」と「sh」を聞き分けることが可能となるように、その最小可聴弁別差を維持しなければならない (Jongman *et al.*, 2000; Scollie *et al.*, 2011)。
 - 特定の入力信号に対し、母音「i」と「e」聞き分けることが可能となるように、その第2フォルマントの平均値と第3フォルマントの平均値の最小可聴弁別差を維持しなければならない (Alexander, 2009)。

III FCo 機能とフィッティングの検証

FCo アルゴリズムの開発中、いくつかの研究が行われた。Hörzentrum Oldenburg で実施した研究では、micon **FCo** フィッティング方式に関する調査を実施した。この研究は、中度から重度の難聴者を対象とした当社のフィッティング方式の有効性の評価を目的としたものである。このフィッティング方式は、低・高周波数領域の語音関連スペクトルキューに対する装用者の認知度に基づき、語音了解度と音質とのバランスを最適化することを目指して設計されている。全ての被験者に対し、以下の2種類のフィッティング法を用いてフィッティングを行った。

FCo フィッティング 1 : NAL-NL2 フィッティング方式をベースに、最高可聴周波数を計算した。また TEN テストを実施し、聴取不能な周波数領域 (Dead Region) が存在するかどうかを確認した (Moore *et al.*, 2000; Hornsby and Dundas, 2009)。聴取不能な周波数領域が存在し、かつ聴取不能な周波数領域の下限がその装用者の最高可聴周波数の計算値を下回っているとみられる場合には、聴取不能な周波数領域の下限を最高可聴周波数として使用した。この最高可聴周波数について考慮した上で、「s」と「sh」のマッピングと母音「i」と「e」の高次フォルマントがそれぞれ別の周波数チャンネルに組み込まれるように Fmax と Fmin を調整した。すなわちフィッティング 1 では、特定の聴力レベルに対する語音関連スペクトルキューの可聴性の最適化に重点を置いている。

FCo フィッティング 2 : Fmin と Fmax とを 1 臨界帯域幅 (対象となるオーディオグラムの固有値) ほど高周波数領域にシフトし、**フィッティング 1** で求めたパラメーターを変更した。すなわちフィッティング 2 では、個々の装用者に対し、低周波数領域の元の語音関連スペクトルキューをそのまま残すことによって音質を改善することに重点を置いている。

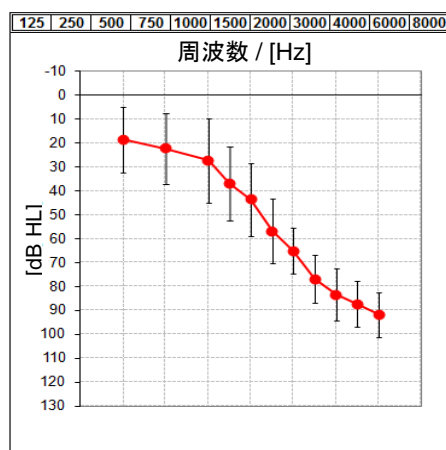


図 4.平均オーディオグラム。FCo フィッティング最適化の研究

本研究には、補聴器装用経験のある 17 人の装用者（平均年齢 69 歳）が参加した。図 4 に、上記装用者の平均オーディオグラムを示す。テストの構成は、TEN テスト、音質の許容度に関するアンケート、静かな環境での語音テスト（クローズ方式の無意味音節テスト：Logatome テスト、Bellanova *et al.*, 2010 を参照）、騒音下での語音テスト（OLSa 適応語音テスト、Wagener *et al.*, 1999 参照）とした。各被験者に対し、両フィッティング法（クロステスト方式）を用いた場合と、周波数圧縮機能を実行しない場合の双方についてテストを実施した。また FCo トレーニング専用に調整された「スピーチ・トレーニング・ソフトウェア」を用いてトレーニングを 1 回実施した（Serman, 2012）。

結果

全体的な結果から、オーディオグラムと利得処方に基づいて FCo のパラメーターを決定する場合、最高可聴周波数が最も重要な要素となることが示唆される。また利得処方のみを行うことによって低周波数領域の語音関連スペクトルキューの聴取が可能となる装用者の場合、このスペクトルキューを圧縮せずに維持することが重要であることも示されている。

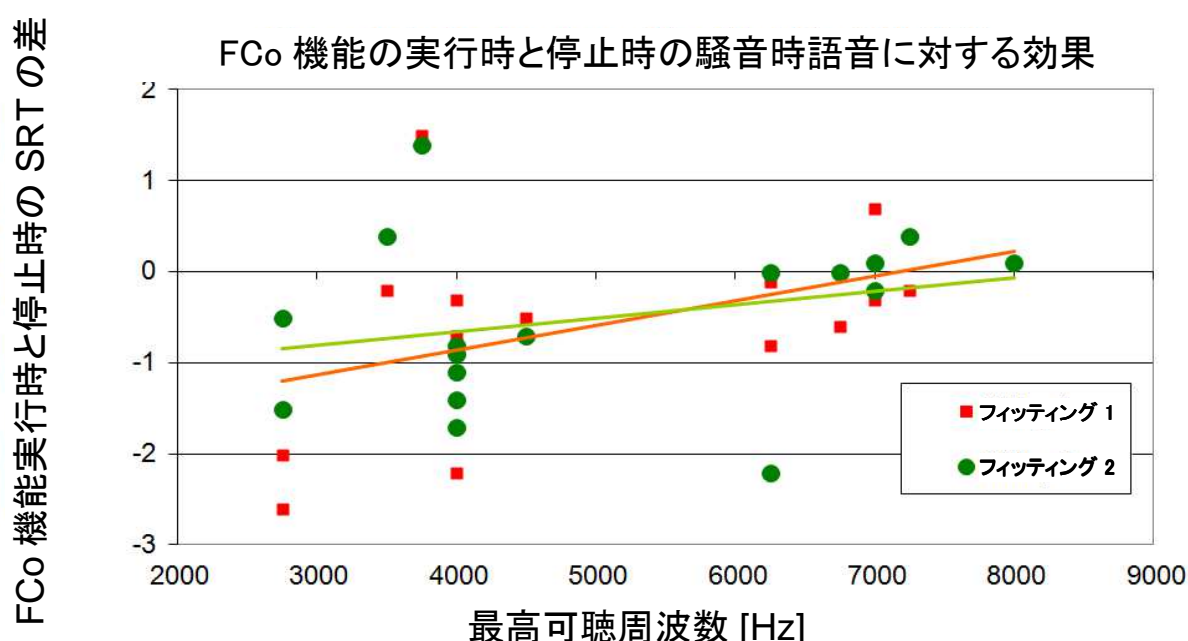


図 5. FCo 機能の設定の違いによる語音明瞭度テスト結果（65dB S0N0 OLSa テスト）。

図中のプロットは、FCo 機能実行時と停止時との語音聴取閾値の差を示す（SRT の値が低いほど、FCo 機能の効果が大きい）。両者の傾向をみるために、個々のデータに対して線形回帰法による分析を行った。（赤色直線：フィッティング 1、緑色直線：フィッティング 2 の回帰直線）

OLSa テストからは、特に難聴が軽度の装用者ほど、フィッティング 2 による効果が大きい傾向が示されている（図 5）。例えば、最高可聴周波数が高い装用者の場合（図 5 グラフの右寄りの分布）、圧縮の強度が大きい設定（フィッティング 1）の方が、圧縮の強度が中等度の設定（フィッティング 2）よりも効果が小さい（回帰直線の SRT の変化が小さい）ことが判る。

また最高可聴周波数が高くなるほど、両フィッティングによる効果が小さくなる傾向があることに注目されたい。この効果の差は大きくはないが、このことから音声のスペクトルキューをできるだけ圧縮せずに維持することの重要性が浮き彫りとなる。

最高可聴周波数が高い装用者に対して圧縮の強度が大きいパラメーター（フィッティング 1）を設定した場合、語音明瞭度に対する効果が非常に小さく、さらに音質評価もわずかに低下する（図 6）。したがって当然、パラメーター設定の圧縮の強度を大きくすれば（フィッティング 1）、主観的な音質がわずかに低下する。静かな環境での無意味音節テストの場合も、最高可聴周波数とフィッティングの強弱との間と同じ傾向がみられた。

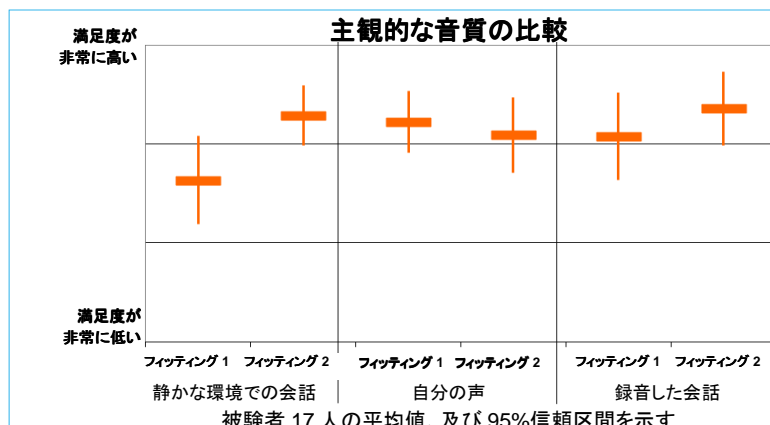


図 6. 2 種類のフィットリング方式の違いによる主観的な音質の比較。
許容度と音質の評価に関するアンケートに基づく。
テスト項目毎に行った 7 項目の質問に対する回答の平均値とバラツキを表示。
評価は 4 点満点で実施。

騒々しい環境での言葉の聞き取りに関するテストでは、成人の装用者を対象とした場合、騒音環境での言葉の聞き取りに効果がみられるという興味深い結果が示されている。これは、これまでの研究において低周波数化法では効果が出にくいことが報告されている (Glista *etal.*, 2009; Kuk *etal.*, 2009)。この効果は、ごく短期間のトレーニングのみを実施した後で観察された。図 7 に、聴力レベルの指標として最高可聴周波数を用いた騒音時の語音了解閾値の結果を示す。

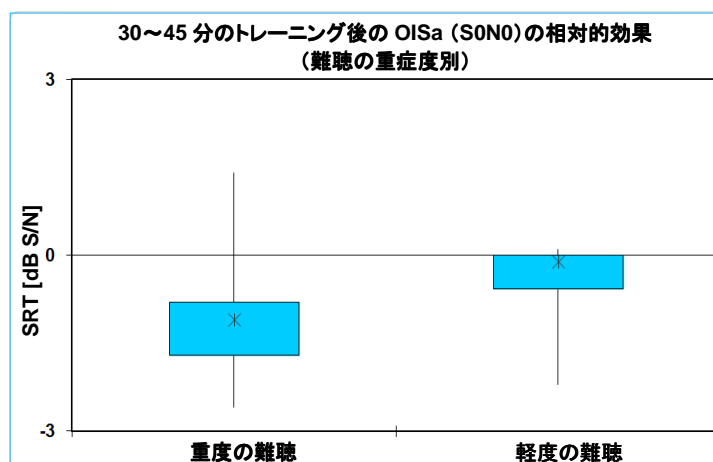


図 7. 65dB S0N0 OLSa テストによる語音了解域値の結果
プロットは FCo 機能実行時と停止時の語音了解閾値の差を示す (SRT の値が低いほど、FCo 機能の効果が大きい)。実験結果を最高可聴周波数に基づいて分けて表示している (重度の難聴 : $F_{max} < 4000$ Hz、軽度の難聴 : $F_{max} > 4000$ Hz)。

IV Connex 7 における FCo パラメーター

Connex 7 では、全ての装用者に対し、上記の統一フィットリング法に基づいて FCo パラメーターが設定される。初期設定では、語音明瞭度の改善効果が見込まれる装用者に対してのみ、この機能を実行することができる。またオープンフィットリングの場合には FCo 機能を実行しない。ただし、Connex で最適な FCo パラメーターが示される場合には、全てのオーディオグラムと音響パラメーターに対して機能を実行することができる。

Connex は、FCo 機能を用いて周波数圧縮パラメーターを柔軟に設定することが可能であるという独自の機能を備えている。聴覚専門家は、この機能を利用して語音明瞭度に対する効果や音質

の改善を各装用者のニーズに応じて FCo 機能の強度を個別に調節することができる。このような幅広い柔軟性は、異なる低周波数化パラメーターを設定すべき難聴者にフィッティングを行う際に特に効果が発揮される。

V まとめ

現時点で利用可能な補聴器の機能のうち、高周波数領域に重度の難聴を伴うために標準的なフィッティング方法では可聴性を高めることができないケースがある。そのような難聴者の聴力レベルを補償することが可能な機能は、周波数圧縮による高音域の低周波数化以外に存在しない。成人の語音明瞭度、ならびに小児の語音明瞭度と発話の育成には、高周波数帯域の聞き取りがとて重要となる。したがって高周波数帯域の利得を利用できない場合、装用者が補聴器から得られる効果と満足度は大きく低下するであろう。

周波数圧縮法を利用すれば、自然な語音了解度と認知に関して極めて重要である低周波数信号領域に他の信号を混入させることなく、聴力を維持している低周波数領域を活用することができる。研究結果によれば、利用者の聴力レベルによっては、圧縮の強度が弱すぎて語音認識に実質的な効果が得られない場合がある。その一方でパラメーターの強度が強すぎる場合、語音了解度と音質が劣化するため、装用者がその機能の利用を拒否することもある。この度 micon に導入された FCo 機能は、高周波数の増幅が難しい様々なケースの難聴者に効果を与えることが期待できる特徴を備えている。同機能は、装用者選択方法を独自に組み入れ、効果が高いと思われる装用者に対して自動的に有効にすることができる。また同機能のフィッティング方式に基づき、各装用者に対する最適パラメーターを処方することができる。

謝辞

本ホワイトペーパーの出版に際し、Gus Mueller 氏からいただいた貴重なコメントに感謝申し上げます。また Hörzentrum Oldenburg チームとその患者の方々の協力に対しても心から感謝申し上げます。

References

- Alexander, J.M. (2009) "Candidacy, selection and verification of Sound Recover options". 3rd Phonak Virtual Audiology Conference.
- Baer, T., Moore, B.C.J. & Kluk, K. (2002) Effects of low pass filtering on the intelligibility of speech in noise for people with and without dead regions at high frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 112(3), 1133 - 1144.
- Bellanova, M., Serman, M., Latzel, M., & Hoppe, U. (2010) "Entwicklungsneurologische Logatom tests zur mikroskopischen Differenzierung unterschiedlicher Hörgeräte Algorithmen". Paper presented at: 13. DGA Jahrestagung 2010, Frankfurt, Germany.
- Cox, R.M., Johnson, J.A., & Alexander, G.C. (2012) Implications of High-Frequency Cochlear Dead Regions for Fitting Hearing Aids to Adults With Mild to Moderately Severe Hearing Loss. *Ear & Hear.* 33(5), 573-587.
- Ching, T.Y., Dillon, H., & Byrne, D. (1998) Speech recognition of hearing-impaired listeners: Predictions from audibility and the limited role of high-frequency amplification. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(2), 1128-1440.
- Glista, D., Scollie, S., Bagato, M., Seeward, R., Parsa, V., & Johnson, A. (2009) Evaluation of nonlinear frequency compression: Clinical outcomes. *Int. J. of Aud.*, 48(9), 632-644.
- Glista, D., Scollie, S., & Sulkers, J. (2012) Perceptual Acclimatization Post Nonlinear Frequency Compression Hearing Aid Fitting in Older Children. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, published online May, 2012.
- Gordo, A., & Iorio, M.C.M. (2007) Dead region in the cochlea at high frequencies: Implications for the adaptation to hearing aids. *Rev. Bras. Otorinolaringol.*, 73(3), 299-307.
- Harrington, J. (2010) *Acoustic Phonetics*. In William J. Hardcastle, John Laver, Fiona E. Gibbon (Eds.), *A Handbook of Phonetics*. Wiley-Blackwell: Oxford. (pp. 81-129).
- Hornsby, B.W., & Ricketts, T.A. (2006) The effects of hearing loss on the contribution of high- and low frequency speech information to speech understanding. II. Sloping hearing loss.

- J. Acoust. Soc. Am.*, 119(3), 1752-1763.
- Hornsby, B.W.Y., & Dundas, J.A. (2009) Factors Affecting Outcomes on the TEN(SPL) Test in Adults with Hearing Loss. *J. Am. Acad. Audiol.*, 20(4), 251-263.
- Jongman, A., Wayland, R., & Wong, S. (2000) Acoustic characteristics of English fricatives. *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(3), 1252-1263.
- Kuk, F., Keenan, D., Korhonen, P., & Lau, C. (2009) Efficacy of linear frequency transposition on consonant identification in quiet and in noise. *J. Am. Acad. Audiol.*, 20(8), 465-479.
- Kuk, F., Keenan, D., Auriemma, J., Korhonen, P., Peeters, H., Lau, C., & Crose, B. (2010) Interpreting the efficacy of frequency-lowering algorithms. *The Hearing J.* 63(4), 30-40.
- Mazor, M., Simon, H., Scheinberg, J., & Levitt, H. (1977) Moderate frequency compression for the moderately hearing impaired. *J. Acoust. Soc. Am.*, 65(5), 1273-1278.
- Moore, B.C., & Tan, C.T. (2003) Perceived naturalness of spectrally distorted speech and music. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(1), 408-419.
- Moore, B.C., Huss, M., Vickers, D.A., Glasberg, B.R., and Alcantara, J.I. (2000) A test for the diagnosis of dead regions in the cochlea. *Br. J. Audiol.*, 34(4), 205-224.
- Preminger, J., Carpenter, R., & Ziegler, C.H. (2005) A Clinical Perspective on Cochlear Dead Regions: Intelligibility of Speech and Subjective Hearing Aid Benefit. *J. Am. Acad. Audiol.*, 16, 600-613.
- Ricketts, T.A., Dittberner, A.B., & Johnson, E.E. (2008) High frequency amplification and sound quality in listeners with normal through moderate hearing loss. *J. Speech Lang Hear Res.* 51, 160-172.
- Scollie, S., Seto, J., Glista, D., & Parsa, V. (2011) "Electro acoustic characterization of frequency lowering signal processing". American Auditory Society Annual Meeting, Scottsdale, AZ.
- Serman, M. (2012) "SchooLo: new speech training method based on changes in speech cues." Paper presented at: 15. DGA Jahrestagung, 2010, Erlangen, Germany.
- Sjolander, M., L., & Holmberg, M. (2009) Broader Band width Improves Sound Quality for Hearing Impaired Listeners. *Hear. Rev.* 6, 40-45.
- Simpson, A., Hersbach, A.A., & McDermott, H.J. (2005) Improvements in speech perception with an experimental nonlinear frequency compression hearing device. *Int. J. of Aud.*, 44, 281-292.
- Simpson, A., Hersbach, A.A., & McDermott, H.J. (2006) Frequency-compression outcomes in listeners with steeply sloping hearing audiograms. *Int. J. of Aud.* 45, 619-629.
- Smith, M.W., & Faulkner, A. (2006) Perceptual adaptation by normally hearing listeners to a simulated "hole" in hearing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(6), 4019-4030.
- Timms, O. (2003) "Speech Processing Strategies Based on the Sinusoidal Speech Model for the Profoundly Hearing Impaired". PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Vestergaard, M.D. (2004) "Benefit from amplification of high frequencies in hearing impaired: aspects of cochlear dead regions and auditory acclimatization". PhD Thesis, Technical University of Denmark, Oersted DTU, Lyngby, Denmark.
- Vickers, D.A., Moore, B.C.J., & Baer, T. (2001) Effects of low-pass filtering on the intelligibility of speech in quiet for people with and without dead regions at high frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(2), 1164-1175.
- Wagener, K., Kühnel, V., & Kollmeier, B. (1999) Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache: Design des Oldenburger Satztests. *Z. Audiol.* 38(1), 4-15.