

講義名
福祉音響学

担当
村上 泰樹

連絡先
murakami@design.kyushu-u.ac.jp

Unit
12

1 この単元の目的

非線形蝸牛モデルについて理解することがこの単元の目的である。聴覚には圧縮特性という非線形性があり、非線形蝸牛モデルはこの特性を模擬する。このモデルを理解することで、聴覚障害の理解に役立つ。この単位では、これらの概念や現象について学び、蝸牛の非線形特性が聴覚障害にどのように影響するかを理解する。また、非線形モデルは、周波数領域ではなく時間領域で解析する。その方法についても学ぶ。

2 圧縮特性

これまでに、蝸牛内の能動的プロセスの基本的なメカニズムについて述べた。このプロセスでは、音刺激によって基底膜が振動し、その振動が外有毛細胞に伝わる。外有毛細胞はこの入力に応じて能動的に運動（伸縮）を行い、その運動が再び基底膜へとフィードバックされるという循環的な仕組みになっている [1](図 1 左上)。

しかし、この外有毛細胞の能動的な運動能力には生理学的な限界が存在する。すなわち、外有毛細胞が基底膜に与えることができる力や変位量には上限がある。この限界が聴覚系の非線形特性を形成する重要な要因となっている。

外有毛細胞の運動能力の限界を決定する主要な要因として、外有毛細胞の先端（不動毛束）に存在する機械対電気変換（mechano-electrical transduction: MET）チャネルの特性が挙げられる [2]。この MET チャネルは、基底膜の振動に伴う不動毛の偏位に応じて開閉する (図 1 右上)。

特に重要なのは、この MET チャネルの開閉確率が非線形的な特性を持つことである。低レベルの刺激では、チャネルの開閉確率は刺激強度に対してほぼ線形に変化するが、刺激が強くなるにつれて、チャネルの開閉確率の変化率は徐々に飽和し、最終的にはすべてのチャネルが開状態（あるいは閉状態）になる。

この MET チャネルの非線形的な開閉特性により、外有毛細胞の運動応答 [3]、そして最終的には基底膜への増幅作用にも非線形性が生じる。具体的には、弱い音に対しては大きな増幅効果が得られるが、音が強くなるにつれて増幅効果は徐々に減少し、最終的には増幅効果がほとんど得られなくなる (図 1 左下)。

この性質は聴覚系の「圧縮特性」と呼ばれる非線形性を生み出す基盤となっており、弱い音を効果的に検出しながらも、広いダイナミックレンジの音を処理できるという聴覚系の特徴的な能力を支えている [4](1 右下)。また、この非線形性は、聴覚障害、特に感音性難聴における基底膜の振動特性の変化を理解する上でも重要である。

3 聴覚補充現象

蝸牛の非線形性である圧縮特性が損なわれることによって生じる重要な病態として「聴覚補充現象」(auditory recruitment) がある [5]。この現象は、内耳、特に外有毛細胞の機能障害に起因する感音性難聴に特徴的に見られるものである。

聴覚補充現象とは、閾値（音を検知できる最小の音圧レベル）が上昇しているにもかかわらず、一度閾値を超えると音の大きさの増加が急激に感じられる現象である。つまり、難聴者は小さな音を聞き取ることができない一方で、ある程度の大きさを超えた音に対しては健聴者とはほぼ同じように、あるいは場合によってはより強く「うるさい」と感じることもある (図 2)。

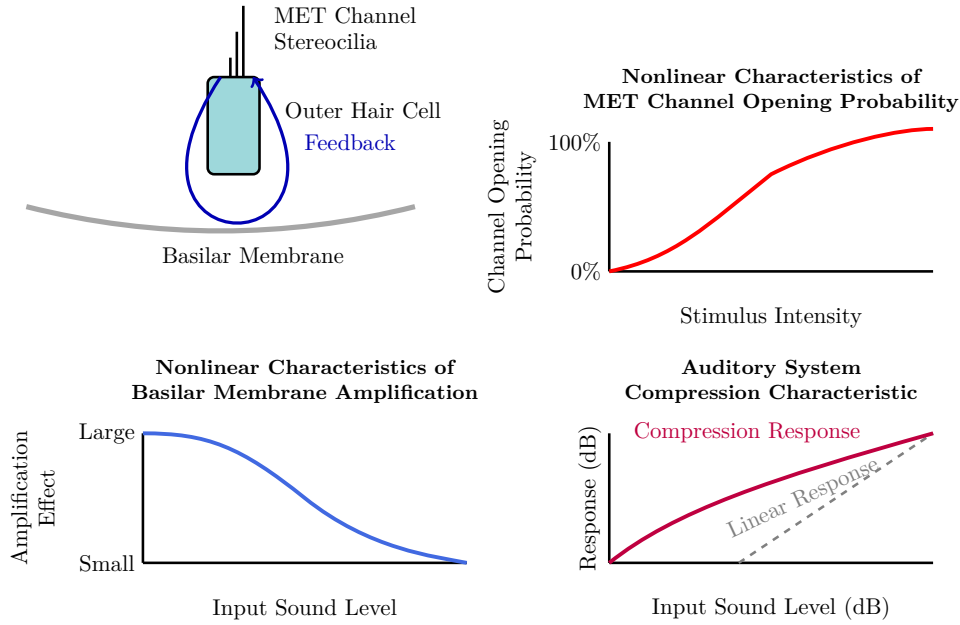


Fig. 1 Cochlear active process and compressive amplification. Cochlear compressive nonlinearity can detect weak sounds while processing sounds over a wide dynamic range

この現象が生じるメカニズムは、外有毛細胞による非線形増幅機能の喪失と密接に関連している。健常な蝸牛では、外有毛細胞が弱い音に対して選択的に大きな増幅効果を提供し、強い音に対しては増幅効果を減少させるという非線形な圧縮特性を持っている。この特性により、非常に広いダイナミックレンジ（約 120dB）の音を適切に処理することができる。

しかし、外有毛細胞が障害を受けると、この非線形増幅機能、特に弱い音に対する増幅効果が失われる。その結果、弱い音を検知するための感度が低下し、聴覚閾値が上昇する。一方で、強い音に対する応答特性は比較的保存されており、ある一定の音圧レベルを超えると健聴者と同様の応答が見られるようになる。

この状態では、音の大きさに対する応答曲線が本来の非線形な曲線（圧縮特性を持つ）から、より線形的な曲線へと変化する。その結果、閾値を超えた音に対しては、音圧の増加に伴って知覚される音の大きさが健聴者よりも急激に増加することになる。

聴覚補充現象は、難聴者の日常生活において重大な不便をもたらす可能性がある。例えば、会話音などの小さな音を聞き取るためには音量を上げる必要があるが、音量を上げすぎると急に不快に感じられてしまうという問題が生じる。このような特性は、従来の単純な増幅型補聴器では適切に対応することが難しい。

現代の補聴器は、この聴覚補充現象に対応するために、弱い音に対しては大きな増幅を、強い音に対しては小さな増幅を行う「圧縮増幅」機能を備えている。これにより、失われた蝸牛の非線形圧縮特性を人工的に補償し、より自然な聴覚体験を提供することを目指している。

4 非線形聴覚モデル

4.1 定義

Unit 9 で説明したとおり、蝸牛管を 1 次元として近似することで、蝸牛管と基底膜の運動の相互作用を以下の方程式で表すことができる：

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{2\rho\ddot{w}_1}{H} = 0 \quad (1)$$

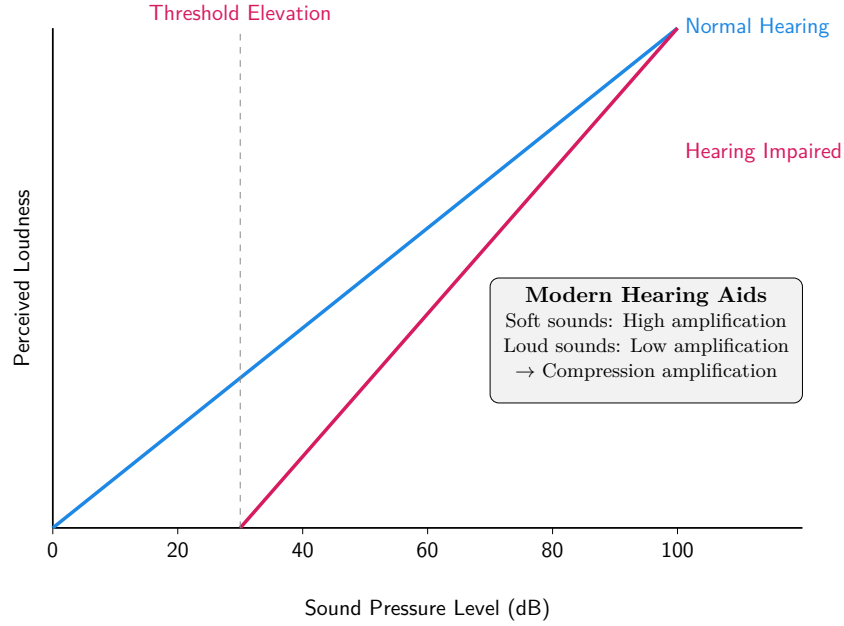


Fig. 2 Auditory recruitment

この方程式は、蝸牛管内の圧力勾配 ($\frac{d^2 p}{dx^2}$) と基底膜の加速度 (\ddot{w}) の関係を表している。境界条件は次のとおりである：

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0} = -2\rho\ddot{u}_s \quad (2)$$

$$p|_{x=L} = 0 \quad (3)$$

次に、基底膜モデルとして、Unit 10 で紹介した Neely–Kim モデルを用いる。このモデルは、基底膜の複雑な振動特性をより現実的に捉えるために、基底膜を 2 自由度の振動系として、基底膜の振動を 2 つの質量の連成振動として表現する。最初の質量 m_1 の運動は次の方程式で表される：

$$m_1\ddot{w}_1 + (c_1 + c_3)\dot{w}_1 - c_3\dot{w}_2 + (k_1 + k_3)w_1 - k_3w_2 = p + p_a \quad (4)$$

第二の質量 m_2 の運動は次の方程式で表される：

$$m_2\ddot{w}_2 - c_3\dot{w}_1 + (c_2 + c_3)\dot{w}_2 - k_3w_1 + (k_2 + k_3)w_2 = 0 \quad (5)$$

外有毛細胞に由来した圧力 p_a は、外有毛細胞の MET チャネルが飽和特性を示していることから、飽和関数で近似する。

$$p_a = \gamma \tanh((c_4(\dot{w}_1 - \dot{w}_2) + k_4(w_1 - w_2))) \quad (6)$$

4.2 時間領域解法

蝸牛モデルは、式 1 に示す境界値問題と式 4 と 5 に示す期値問題を同時に解いていく。この問題を解くために、Diependaal らによって提案されている解法を採用する [6]。

まず、式 1 に式 4 を代入すると次の式が得られる。

$$\frac{d^2 p(t)}{dx^2} + \alpha p(t) + \alpha g(t) = 0, \quad (7)$$

但し、 α と g は次のとおりである。

$$\alpha = \frac{2\rho}{m_1 H}, \quad (8)$$

$$g = (c_1 + c_3) \dot{u}_1 + (k_1 + k_3) u_1 - c_3 \dot{u}_2 - k_2 u_2 + p_a. \quad (9)$$

式 10 で表現される初期値境界値問題を解く。そのために、差分法を用いて式の中に含まれるを差分方程式にする：

$$\frac{p_{n-1}(t) - 2p_n(t) + p_{n+1}(t)}{(\Delta x)^2} + \alpha p_n(t) + \alpha g(t) = 0, \quad (10)$$

この差分方程式を行列表現にする：

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{g} \quad (11)$$

但し、 \mathbf{A} ならびに \mathbf{p} 、 \mathbf{g} は次のとおりである。

$$\mathbf{A} = \frac{-1}{(\Delta x)^2} \begin{pmatrix} 2 + \alpha & -2 & & & 0 \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -1 & 2 & -1 \\ 0 & & & & -2 & 2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{p}(t) = (p_1(t) \dots p_N(t))^T \quad (13)$$

$$\mathbf{g}(t) = (-\alpha g_1(t) \dots -\alpha g_N(t))^T. \quad (14)$$

これらの式を用いて、初期値境界値問題を解く。数値解は次の 5 つのステップから構成される。

- (i) 時系列 t を時間ステップ Δt で離散化し、時系列 t_i を得る。
- (ii) 式 (9) に基づいて \mathbf{g} を計算する。
- (iii) LU 分解を用いて $\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{g}$ から \mathbf{p} を求める。
- (iv) 式 (4) と式 (5) を用いて、それぞれ \ddot{w}_1 と \ddot{w}_2 を計算する。
- (v) \ddot{w}_1 と \ddot{w}_2 を積分して、時間 t_{i-1} から t_i における \dot{w}_1 、 \dot{w}_2 、 w_1 、および w_2 を求める。

ここでは、数値積分に Unit 11 で紹介した修正オイラー法を採用する。

パラメータの値は先の数値シミュレーションと同様にヒトの特性を模擬した値を使用する。外有毛細胞モデルのゲイン係数は 0.65 に設定した。これは、外有毛細胞を非線形化することで、高いゲイン係数の時に蝸牛モデルが不安定になるためである。ゲイン係数が 0.65 程度であれば不安定にならない。

5 数値シミュレーション結果

5.1 基底膜の振動パターン

図 3 は、入力強度を変化させた正弦波信号によって誘発される基底膜の振動パターンを示す。

1. 周波数依存性位置変化：

入力信号の周波数が高くなるにつれて、基底膜振動のピーク位置が蝸牛の基部（基底窓側）へと系統的に移動する。これは蝸牛の周波数トノトピー（tonotopy）特性を示すもので、高周波音は基部近くで、低周波音は蝸牛頂部近くで最大振幅を示す。

2. 強度依存性チューニング変化：

入力強度の増加に伴い、基底膜振動のピークの鋭さ（Q 値）が徐々に低下している。低強度（0 dB 付近）では鋭いピークが得られるが、強度が 80 dB に近づくにつれてピークは徐々に平坦化し、周波数選択性が低下する。

3. 振動速度の非線形増加パターン：

- **基部側領域：** 基底膜の基部側では、入力強度の増加に伴い振動速度が等間隔に増加している。つまり、入力が 20 dB 増加するごとに振動速度も一定の倍率で増加する。

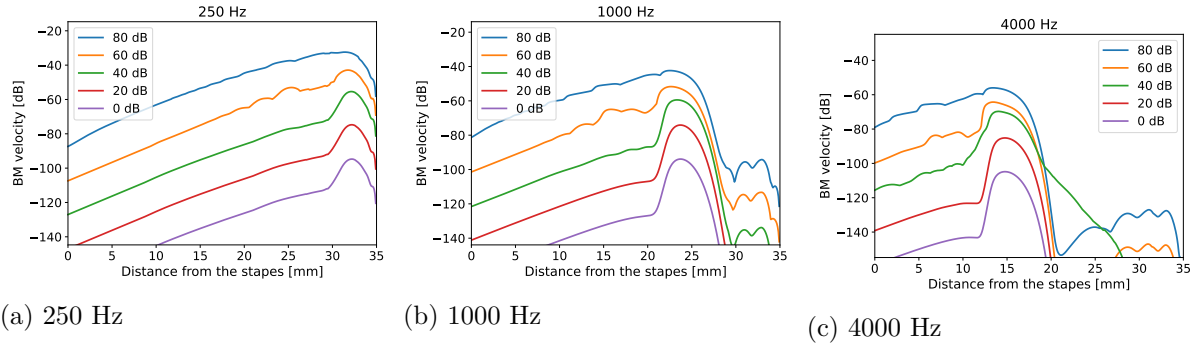


Fig. 3 Basilar membrane velocity distribution along the cochlear length with 250, 1000 and 4000 Hz tones. Input intensities varied 0 to 80 dB in 20 dB-step.

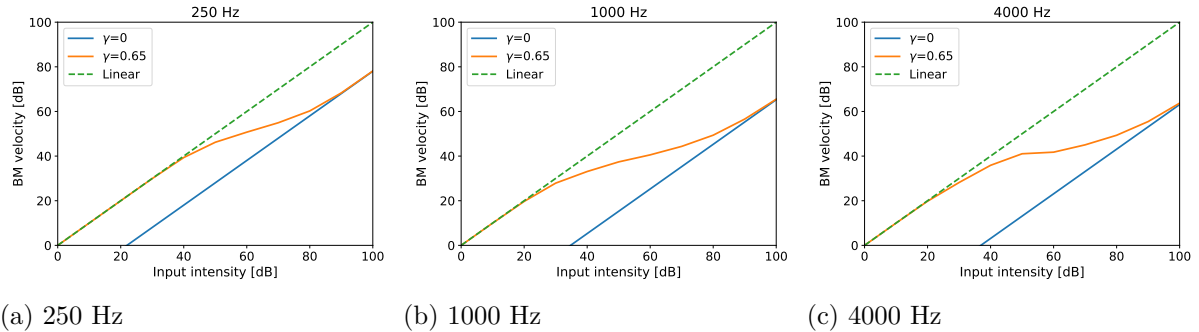


Fig. 4 Basilar membrane input-output functions.

- **ピーク近傍領域:** ピーク付近での振動速度増加パターンは強度依存性を示します。低入力強度域では振動速度の増加は等間隔だが、高入力強度域では増加幅が狭くなる。

5.2 圧縮特性

図 4 は、基底膜振動パターンにおける最大振動速度を出力量として表示した入出力関数を示す

全ての入力周波数において入出力関数は類似したパターンを示す。特に、入力強度によって 3 つの顕著な領域に分けられる。

1. **低入力強度領域（線形領域）:**
 - この領域では入出力関数の傾きが 1 dB/dB となっている
 - 入力音響信号の増加に比例して基底膜の振動速度も線形的に増加する
 - 外有毛細胞による能動的増幅メカニズムが最大に働き、微弱な音に対する感度を高めている
2. **中間入力強度領域（圧縮領域）:**
 - 入力強度が中程度になると、入出力関数の傾きは 1 dB/dB 未満に減少し、圧縮特性を示す。
 - 外有毛細胞の飽和応答による機械的な振動の増幅が抑制されている
3. **高入力強度領域（線形領域）:**
 - 入力強度が非常に高くなると、曲線の傾きは再び約 1 dB/dB の線形特性に戻る
 - この領域では外有毛細胞による能動的増幅メカニズムは完全に飽和し、基底膜は受動的な振動系として機能する

ゲイン係数 γ の値を 0 に設定すると、全入力強度範囲で傾き 1 dB/dB の完全な線形特性が得られる。これは外有毛細胞機能の完全な喪失を模擬している。

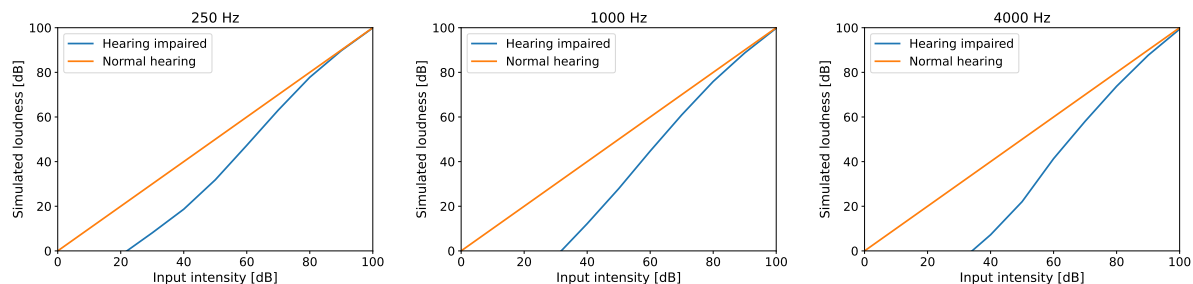


Fig. 5 Loudness function varied with input intensity. Hearing impaired and normal hearing set gain coefficient γ to 0 and 0.65, respectively.

5.3 聴覚補充現象の再現

聴覚補充現象を再現するためにラウドネスの計算モデルを構築する際には、心理物理学の現象と生理学的モデルの間の重要な区別を理解することが不可欠である。

ラウドネスは本来、音の大きさに関する主観的な心理量であり、純粋に心理物理学的な概念である。この量は次の特徴を持つ：

- ・ 音の知覚された強さを表す主観的な測度
- ・ 物理的な音圧レベル（dB SPL）と直接的な線形関係を持たない
- ・ 心理物理学の実験（例：マグニチュード推定法、ラウドネス比較法）によって測定される

一方、現在の生理学的モデルは、心理量としてのラウドネスを直接計算できるような理論的枠組みは確立されていない。そのため、基底膜振動パターンのピーク値を用いて便宜的なラウドネス定義を行う。ここでは、ラウドネスの値は入力強度に比例すると仮定する。但し、外有毛細胞の損傷によって生じた基底膜振動のゲインの損失を入力強度から除した値をラウドネスとする。

$$\text{Loudness} = \text{Sound intensity} + \text{Loss of outer hair cell gain} \quad (15)$$

この便宜的定義を用いることで、聴覚補充現象の重要な特徴である「閾値の上昇」と「ダイナミックレンジの縮小」を定量的に評価することが可能になる。

図5は、健聴者と感音性難聴を模擬した蝸牛モデルを用いて計算したラウドネス値の比較している。

外有毛細胞の機能不全により、低強度音に対する能動的増幅機構が損なわれている状態を反映している。このため、健聴者が容易に検出できる微弱な音が、感音性難聴モデルでは検出閾値以下になる。

感音性難聴モデルでは、閾値を超えた音に対するラウドネスの増加率が健聴者モデルよりも顕著に急峻になる。健聴者モデルでは、入力音圧の増加に対してラウドネスが緩やかに増加する非線形圧縮特性が見られる。一方、感音性難聴モデルでは、わずかな入力音圧の増加に対してラウドネスが急激に上昇する。

入力音圧レベルが十分に高くなると、健聴者と感音性難聴モデルのラウドネス値が近似していく。高音圧レベルでは、健聴者の蝸牛においても外有毛細胞の能動的増幅機構は既に飽和しており、基底膜は受動的な振動特性を示す。感音性難聴モデルでは、元々外有毛細胞の機能が低下しているため、全ての強度で受動的な振動特性を示している。したがって、高音圧レベルでは両者の基底膜振動特性が類似し、結果としてラウドネス値も近似していく。

図5は、外有毛細胞の機能と聴覚補充現象の間に直接的な因果関係があることを強く示唆する。

外有毛細胞は基底膜振動に対する能動的増幅と非線形圧縮の両方に寄与している。これらの細胞の損傷により、低強度音に対する感度低下（閾値上昇）と圧縮特性の喪失（ラウドネス成長の急峻化）が同時に生じる。結果として、正常な蝸牛で処理される広いダイナミックレンジが縮小する。この結果は、聴覚補充現象が中枢性の処理異常ではなく、主に蝸牛の外有毛細胞機能不全に起因することを示唆する。

6 クイズ

今回、説明した聴覚モデルを医療や福祉に応用するとしたら、どのような応用ができるか答えよ。

7 Unit 12 のまとめ

7.1 蝸牛の非線形特性と外有毛細胞の役割

蝸牛は単なる線形的な音響分析装置ではなく、外有毛細胞による能動的プロセスを通じて高度な非線形特性を示す。外有毛細胞の先端にある機械対電気変換（mechanoelectrical transduction: MET）チャネルの特性が重要であり、このチャネルの開閉確率は刺激強度に対して非線形的に変化する。この非線形性により、蝸牛は「圧縮特性」と呼ばれる特徴的な応答を示し、弱い音に対しては大きな増幅効果を提供し、強い音に対しては増幅効果を徐々に減少させる。

7.2 基底膜振動パターンの特性

基底膜の振動パターンには以下の特徴がある：

1. 周波数依存性位置変化：高周波数の音は基部側、低周波数の音は蝸牛頂部側で最大振幅を示す
2. 強度依存性チューニング変化：入力強度が増加するとピークの鋭さ（Q 値）が低下する
3. 振動速度の非線形増加：
 - 基部側では線形的な増加を示すが、ピーク近傍では入力強度によって増加特性が変化する

7.3 基底膜の入出力特性

基底膜振動の入出力関数には 3 つの特徴的な領域がある：

1. 低入力強度領域：傾き約 1 dB/dB の線形な特性
2. 中間入力強度領域：1 dB/dB 未満の圧縮特性
3. 高入力強度領域：再び傾き約 1 dB/dB の線形特性

外有毛細胞機能を示すゲイン係数 γ を 0 に設定すると、全入力強度範囲で線形特性が得られる。

7.4 聴覚補充現象のメカニズム

聴覚補充現象は感音性難聴に特徴的な症状で、外有毛細胞の機能障害による圧縮特性の喪失によって生じる。感音性難聴では：

1. 閾値が上昇する（弱い音が聞こえにくくなる）
2. 閾値を超えると音の大きさが急激に増加する
3. 高い音圧レベルでは健聴者と同様のラウドネス知覚となる

これは、外有毛細胞の損傷により低強度音への増幅効果が失われる一方、高強度音では元々増幅効果が小さいため、健聴者との差が少なくなるためである。

7.5 便宜的ラウドネスモデル

本来ラウドネスは心理量であるが、生理学的モデルからの便宜的な定義として：

$$\text{Loudness} = \text{Sound intensity} + \text{Loss of basilar membrane gain} \quad (16)$$

という式を用いることで、聴覚補充現象の「閾値の上昇」と「ダイナミックレンジの縮小」を定量的に評価できる。

7.6 臨床的意義

数値シミュレーションから得られた知見は、感音性難聴の補償において単純な線形増幅では不十分であることを示している。現代の補聴器は聴覚補充現象に対応するため、弱い音に対しては大きな増幅を、強い音に対しては小さな増幅を行う「圧縮増幅」機能を備えている。これにより、失われた蝸牛の非線形圧縮特性を人工的に補償し、より自然な聴覚体験を提供することを目指している。

References

- [1] P. Robert, “Cochlear micromechanics and macromechanics,” in *The Cochlea*, edited by P. Dallos, A. N. Popper, and R. R. Fay (Springer, New York, 1996), Chap. 4, pp. 186–257.
- [2] A. N. Lukashkin and I. J. Russell, “Analysis of the f_2 - f_1 and $2f_1$ - f_2 distortion components generated by the hair cell mechanoelectrical transducer: Dependence on the amplitudes of the primaries and feedback gain,” *J. Acoust. Soc. Am.* **106**(5), 2661–2668 (1999).
- [3] B. N. Evans and P. Dallos, “Stereocilia displacement induced somatic motility of cochlear outer hair cells,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **90**(18), 8347–8351 (1993).
- [4] E. J. Williams and S. P. Bacon, “Compression estimates using behavioral and otoacoustic emission measures,” *Hear. Res.* **201**(1-2), 44–54 (2005).
- [5] J. B. Allen, J. L. Hall, and P. S. Jeng, “Loudness growth in 1/2-octave bands (LGOB)—a procedure for the assessment of loudness,” *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(2), 745–753 (1990).
- [6] R. J. Diependaal, H. Duifhuis, H. W. Hoogstraten, and M. A. Viergever, “Numerical methods for solving one-dimensional cochlear models in the time domain,” *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 1655 (1987).