

福祉音響学: Unit 10

担当: 村上 泰樹

E-mail: murakami@design.kyushu-u.ac.jp

2025 年 5 月 15 日

この単元の目的

この単元の目的は、能動的な蝸牛モデルについて理解することである。能動的な蝸牛モデル（Active Cochlear Model）とは、従来の受動的なモデルと異なる。能動的モデルでは蝸牛が単に音波を受け取るだけでなく、能動的に蝸牛が音の処理を行う。

能動的な蝸牛モデルを理解することは、聴覚障害の理解に役立つ。この単元では、これらの概念や現象について学び、蝸牛の能動的な側面がどのように聴覚障害に影響するかを理解する。

目次

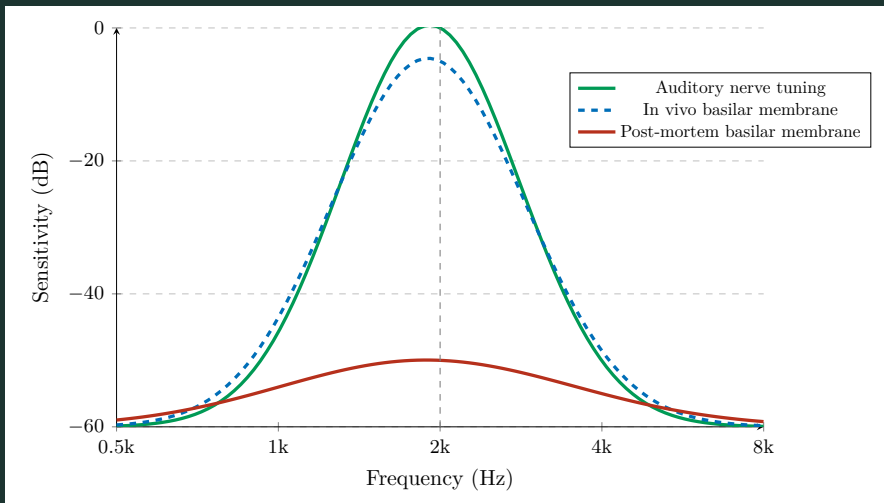
1. 能動的な蝸牛
2. 能動的な蝸牛モデル
 - 蝸牛管の1次元近似とその基本方程式
 - 基底膜モデル
 - 蝸牛モデルの周波数領域解析
3. 数値シミュレーションの結果
 - 外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性
 - 入力周波数への依存性
 - 感音難聴の数値シミュレーション
4. クイズ
5. Unit10 のまとめ

受動的な蝸牛

前の単元で学習した蝸牛の力学は受動的 (Passive) である。ここで述べている受動的という意味は、入力されるエネルギーは音が持つエネルギーだけであるということである。即ち、能動的な蝸牛とは以下の特徴を持つ。

- ▶ 蝸牛は単に外部からの音のエネルギーを受け取るだけの器官
- ▶ 音波のエネルギーが基底膜の振動に変換され、その振動パターンが神経信号に変換される
- ▶ 蝸牛自体はエネルギーを追加したり、音の処理を積極的に変化させたりしない

能動的な蝸牛



- ▶ 蝸牛は、複雑な機構を持つ精密な生体増幅システムとして機能している。この事実、蝸牛内部で音のエネルギーが単に受け渡されるだけでなく、積極的に処理・増幅されていることを示している。
- ▶ 感音難聴は、この精密な増幅システムの機能不全によって生じる。外有毛細胞は、強大な騒音暴露、加齢、ある種の薬物（耳毒性薬物）、遺伝的要因などによって損傷を受けやすい。
- ▶ 通常の補聴器は音を単に増幅するだけで、外有毛細胞の複雑な非線形増幅や周波数選択性を完全に再現することはできない。これが、感音難聴患者が補聴器を使用しても「音は大きく聞こえるが言葉が聞き取りにくい」と感じる理由である。

歴史的観点:1920s – 1970s

- ▶ 初期の蝸牛研究は死体標本を用いて行われており、その基底膜振動は受動的なモデルで説明可能であった。しかし、死体の基底膜振動の周波数選択性は、生体の聴神経の周波数同調性より低いという不一致が観察されていた。この矛盾は受動的モデルでは説明できない現象の存在を示唆する。
- ▶ 1970年代になると、技術の進歩により生きた蝸牛の基底膜振動を直接観測することが可能となった。この研究から、生きた蝸牛の基底膜振動の周波数選択性は聴神経の同調性と同程度に高いという発見がなされた。この発見は、生体内では何らかの能動的メカニズムが働いて基底膜の振動特性を向上させていることを示した。

歴史的観点:1970s – 1980s

- ▶ 1978年、Kempは外耳道に設置したマイクロフォンが外部からの音刺激がないにもかかわらず音を検出することを発見した。この現象は「耳音響放射（OAE: Otoacoustic Emission）」と現在では名付けられ、蝸牛が単に音を受け取るだけではなく実際に音を生成・放出できることを示す証拠となった。
- ▶ 興味深いことに、この発見はGoldが1947年に提唱していた仮説を実証した。Goldは蝸牛内部に「モーター」のような能動的要素が存在すると予測しており、耳音響放射はこのモーターの活動によって生じた音が外耳道に漏れ出したものと解釈できるのである。

歴史的視点: 1980s –

- ▶ その後の研究では、外有毛細胞の細胞体や不動毛束が能動的に運動することが実験的に証明され、遺伝子操作で外有毛細胞の機能をノックアウトしたマウスでは基底膜の感度が死体と同程度まで低下することが確認された。
 - ▶ 能動的運動能力：外有毛細胞は電氣的刺激に応じて長さを変える電気運動性を持つ。これにより基底膜の動きを増幅する。
 - ▶ プレスチン蛋白質の役割：外有毛細胞膜に存在するプレスチンが、この運動性の分子基盤となっている。
 - ▶ 微小増幅システム：入力された小さな振動を選択的に増幅し、基底膜の動きを約 100 倍まで増幅する。
 - ▶ 周波数選択性の向上：特定の周波数に対する応答を選択的に増幅するため、周波数分解能が向上する。
 - ▶ 非線形処理：小さな音に対しては大きな増幅、大きな音に対しては小さな増幅を行うという非線形性を示す。これにより、広いダイナミックレンジ（約 120dB）が実現する。

増幅機能の喪失の影響

- ▶ 聴覚閾値の上昇
- ▶ 周波数選択性の低下
- ▶ ダイナミックレンジの縮小

目次

1. 能動的な蝸牛

2. 能動的な蝸牛モデル

蝸牛管の1次元近似とその基本方程式

基底膜モデル

蝸牛モデルの周波数領域解析

3. 数値シミュレーションの結果

外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性

入力周波数への依存性

感音難聴の数値シミュレーション

4. クイズ

5. Unit10 のまとめ

Neely-Kim モデル

このモデルは、低音レベルでの高い感度と周波数選択性の説明を目的としている。

- ▶ 基底膜の振動モデルが2自由度モデルなので比較的理解しやすい
- ▶ 現在でも Neely-Kim モデルから派生したモデルが提案され続けている

Neely-Kim モデルが今日でも重要な基礎的モデルであり、多くの研究がこのモデルを拡張または修正している。

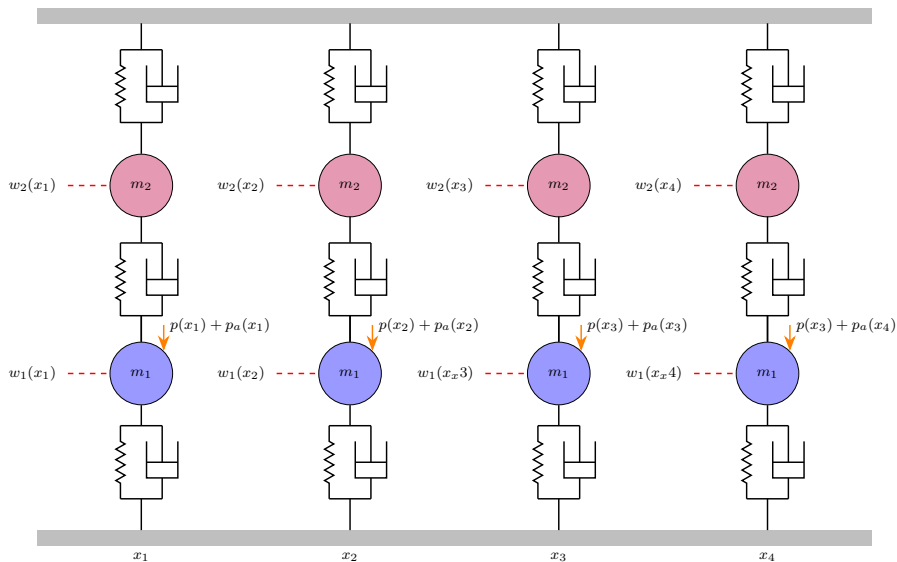
蝸牛管の1次元近似とその基本方程式

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：

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

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。ここで、 ρ は流体密度、 H は蝸牛管の高さを表す。

基底膜モデル



基底膜モデルの運動方程式

質量 m_1 :

$$m_1 \ddot{w}_1 + (c_1 + c_3) \dot{w}_1 - c_3 \dot{w}_2 + (k_1 + k_3) w_1 - k_3 w_2 = p + p_a \quad (2)$$

質量 m_2 :

$$m_2 \ddot{w}_2 - c_3 \dot{w}_1 + (c_2 + c_3) \dot{w}_2 - k_3 w_1 + (k_2 + k_3) w_2 = 0 \quad (3)$$

外有毛細胞の能動性（音を増幅する機能）:

$$p_a = \gamma (c_4 (\dot{w}_1 - \dot{w}_2) + k_4 (w_1 - w_2)) \quad (4)$$

外有毛細胞モデルのゲイン係数

ゲイン係数 γ は次の状態を表現している。

- ▶ $\gamma = 0$: 外有毛細胞の能動性がない状態（受動的な蝸牛）
- ▶ $0 < \gamma < 1$: 外有毛細胞が基底膜の振動を増幅する状態（能動的な状態）
- ▶ $\gamma > 1$: システムが不安定になる状態

このゲイン係数は、外有毛細胞の健康状態や機能に対応しており、聴覚の感度や選択性に直接影響する。

蝸牛モデルの周波数領域解析：機械インピーダンス Z

ここでは、蝸牛モデルを周波数領域で解析する。基本的な解法の手順はUnit 9で説明した手法と等しい。唯一の違いは、この解析で使用する機械インピーダンス Z の定式化にある。Neely-Kimの2自由度モデルにおける総合的な機械インピーダンス Z は、以下の式で表される。

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2(Z_3 - \gamma Z_4)}{Z_2 + Z_3} \quad (5)$$

目次

1. 能動的な蝸牛

2. 能動的な蝸牛モデル

蝸牛管の1次元近似とその基本方程式

基底膜モデル

蝸牛モデルの周波数領域解析

3. 数値シミュレーションの結果

外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性

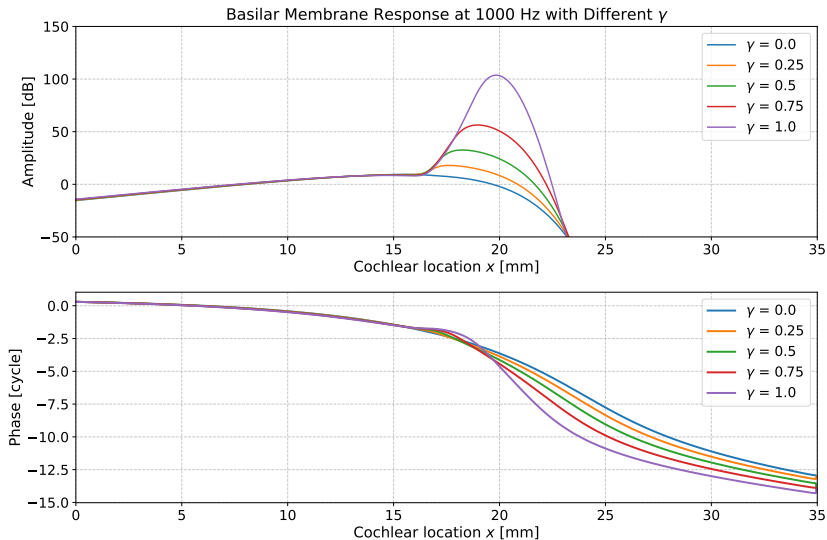
入力周波数への依存性

感音難聴の数値シミュレーション

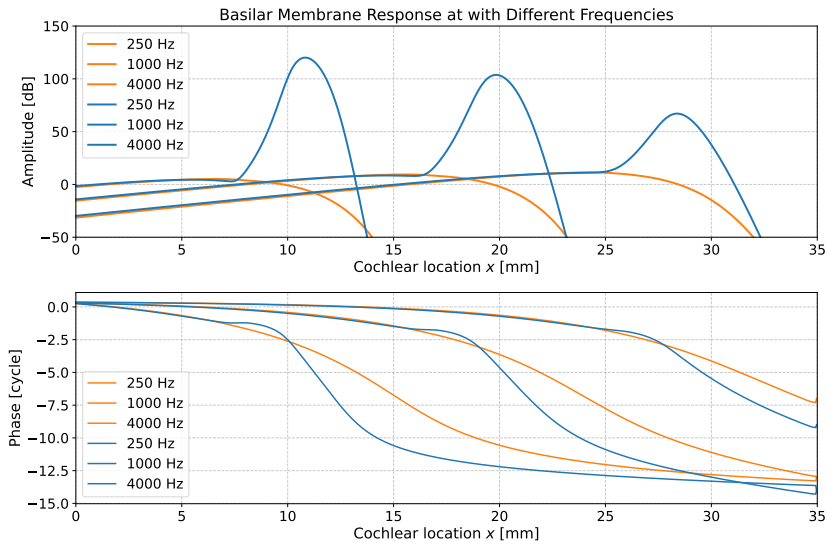
4. クイズ

5. Unit10 のまとめ

外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性



入力周波数への依存性



オーディオグラムのシミュレーション方法

1. モデル設定

- ▶ 難聴モデル：蝸牛入り口側のゲイン係数 (γ) を小さく設定
- ▶ 正常モデル：全ての場所でゲイン係数 ($\gamma = 1$) を設定（完全に機能する外有毛細胞）

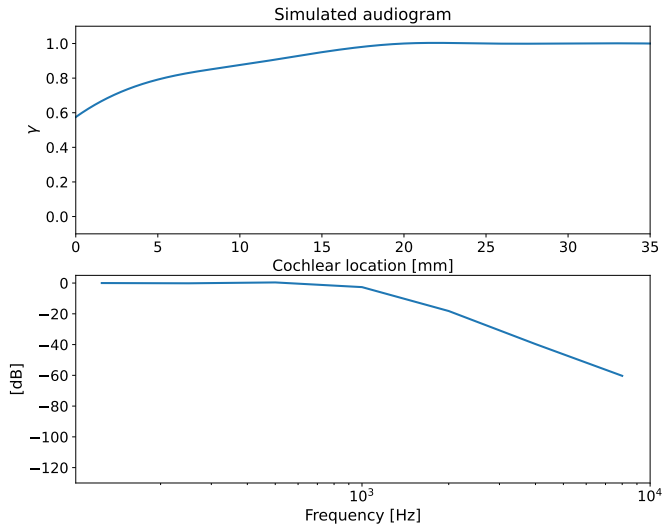
2. 計算手順

- ▶ 両モデルで基底膜の振動パターンをシミュレーション
- ▶ それぞれの振動パターンからピーク値を抽出
- ▶ 難聴モデルと正常モデルのピーク比を計算（これが「失われた利得」となる）
- ▶ この計算を様々な入力周波数で繰り返す

3. 結果表示

- ▶ 入力周波数ごとの失われた利得をプロットすることで、オーディオグラム（聴力検査の結果グラフ）を模擬

オーディオグラムのシミュレーション結果



シミュレーション結果からわかること

- ▶ 蝸牛の基底部（入り口側）は高周波数音の共振位置に対応している
- ▶ 模擬実験ではこの部位のゲイン係数を低く設定している
- ▶ ゲイン係数の低下は外有毛細胞の機能低下を表している
- ▶ 外有毛細胞の機能低下は音の増幅能力の低下を意味する
- ▶ その結果、対応する周波数（高周波数）での聴力損失が生じる

このシミュレーション結果は、老人難聴における周波数特異的な聴力低下のメカニズムを説明しており、「高音から聞こえにくくなる」という老人難聴の一般的な特徴を裏付けています。

目次

1. 能動的な蝸牛
2. 能動的な蝸牛モデル
 - 蝸牛管の1次元近似とその基本方程式
 - 基底膜モデル
 - 蝸牛モデルの周波数領域解析
3. 数値シミュレーションの結果
 - 外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性
 - 入力周波数への依存性
 - 感音難聴の数値シミュレーション
4. クイズ
5. Unit10 のまとめ

クイズ

Neely–Kim モデルを時間領域から周波数領域へ変換し、次の形式にせよ。

$$P = V \cdot \dot{W} \quad (6)$$

目次

1. 能動的な蝸牛
2. 能動的な蝸牛モデル
 - 蝸牛管の1次元近似とその基本方程式
 - 基底膜モデル
 - 蝸牛モデルの周波数領域解析
3. 数値シミュレーションの結果
 - 外有毛細胞のゲイン係数 γ への依存性
 - 入力周波数への依存性
 - 感音難聴の数値シミュレーション
4. クイズ
5. Unit10 のまとめ

Unit10 のまとめ

この講義では、蝸牛の能動的モデルについて学習した。

- ▶ 蝸牛モデルは2つに分類される：受動的と能動的
- ▶ 能動的蝸牛モデルの存在を裏付ける証拠：耳音響放射 (OAE) の発見, 外有毛細胞の電気運動性, プレスチン蛋白質, 遺伝子操作実験.
- ▶ 能動的蝸牛モデルとして、Neely-Kim モデルを紹介した。
- ▶ 数値シミュレーションを行った：ゲイン係数の影響、入力周波数への依存性、老人難聴のシミュレーション
- ▶ このモデルは聴覚障害のメカニズム理解に役立つ。
 - ▶ 外有毛細胞の損傷が感音難聴を引き起こす
 - ▶ 通常の補聴器は単純な増幅だけで、外有毛細胞の周波数選択性を完全に再現できない
 - ▶ 老人難聴における高周波数帯域の選択的な聴力低下のメカニズムを説明