

## 1 はじめに：なぜ聴覚系の理解が重要なのか

Unit 1 では、音響工学が直面している新たな課題について議論した。人口の 25% が聴覚障害を持つ時代において、健聴者中心の「高音質」追求から、すべての人のための音響技術へと視点を転換する必要性を提起した。また、心理学的測定による「能力障害」の診断から、「機能障害」の理解へと進むことの重要性も述べた。

では、機能障害を理解するためには何が必要だろうか。それは、聴覚系がどのように機能しているかを正確に理解することである。聴覚系の正常な機能を知らずして、その機能の障害を理解することはできない。

本章では、音が耳に入ってから脳で認識されるまでの過程を、構造と機能の両面から詳しく見ていく。特に、Unit 4 と 5 で扱う数値シミュレーションの基礎となる蝸牛の構造と機能については、詳細に解説する。

## 2 聴覚系の全体像

### 2.1 音から神経信号への変換過程

聴覚系は、空気の振動である音波を、脳が理解できる電気信号に変換する精巧なシステムである。この変換過程は、大きく以下の段階に分けられる。

1. 音波の収集と増幅（外耳・中耳）
2. 機械的振動から神経信号への変換（内耳）
3. 神経信号の伝達と処理（聴神経・脳幹・大脳皮質）

それぞれの段階で、特有の構造が特定の機能を担っている。これらが協調して働くことで、我々は複雑な音環境の中から必要な情報を抽出し、理解することができるのである。

### 2.2 聴覚系の区分

解剖学的に、聴覚系は以下のように区分される。

- 末梢聴覚系：外耳、中耳、内耳
- 中枢聴覚系：聴神経、脳幹の聴覚核、大脳皮質の聴覚野

本章では主に末梢聴覚系、特に内耳の構造と機能に焦点を当てる。これは、感音性難聴の多くが内耳の機能障害に起因するためである。

## 3 外耳の構造と機能

### 3.1 外耳の構成要素

外耳は、耳介（じかい）と外耳道から構成される。耳介は、我々が「耳」として認識している外側の部分である。複雑な形状をしており、音波を効率的に集める役割を果たす。外耳道は、耳介から鼓膜までの約 2.5cm の管状の通路である。

## 3.2 外耳の音響学的機能

外耳は単なる音の通り道ではない。重要な音響学的機能を持っている。

**共鳴による増幅効果：**外耳道は片側が閉じた管として機能し、約 2.7kHz 付近で共鳴する。この共鳴により、この周波数帯域の音は約 10-15dB 増幅される。これは人間の音声の重要な周波数帯域と一致しており、音声コミュニケーションに有利に働く。

**方向知覚への寄与：**耳介の複雑な形状は、音源の方向によって異なる周波数特性を生み出す。特に前後や上下の方向判断において重要な役割を果たす。

## 4 中耳の構造と機能

### 4.1 中耳の構成要素

中耳は、鼓膜と 3 つの小さな骨（耳小骨）から構成される。耳小骨は、ツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨の 3 つで、これらが連結して耳小骨連鎖を形成している。中耳腔は耳管を通じて咽頭とつながっており、気圧の調整が行われる。

### 4.2 インピーダンス整合

中耳の最も重要な機能は、インピーダンス整合である。音は空気中から内耳の液体（リンパ液）へと伝わる必要があるが、空気と液体では音響インピーダンスが大きく異なる。もし中耳がなければ、音のエネルギーの 99.9% が反射されてしまい、わずか 0.1% しか内耳に伝わらない。

中耳は以下の 2 つのメカニズムでこの問題を解決している。

1. **面積比による増幅：**鼓膜の面積（約 55mm<sup>2</sup>）はアブミ骨底板の面積（約 3.2mm<sup>2</sup>）の約 17 倍である。この面積比により、圧力が増幅される。
2. **てこの原理による増幅：**耳小骨連鎖はてこのように働き、約 1.3 倍の力の増幅を行う。

これらの効果により、中耳は約 25-30dB の利得を提供し、効率的な音の伝達を可能にしている。

### 4.3 保護機能

中耳には、アブミ骨筋反射という保護機能もある。大きな音が入ると、反射的に中耳の筋肉が収縮し、音の伝達を減衰させる。これにより、内耳を過大な音から保護している。

## 5 内耳（蝸牛）の構造と機能

### 5.1 蝸牛の基本構造

蝸牛（かぎゅう）は、カタツムリの殻のような渦巻き状の構造をしている。ヒトでは約 2.5 回転しており、伸ばすと約 35mm の長さになる。蝸牛は骨迷路と膜迷路から成り、内部は 3 つの階（前庭階、中央階、鼓室階）に分かれている。

前庭階と鼓室階は外リンパ液で満たされ、蝸牛頂で連結している（蝸牛孔）。中央階は内リンパ液で満たされ、他の2つの階とは分離している。これらの液体の組成は異なり、特に内リンパ液は高カリウム濃度という特殊な環境を維持している。

## 5.2 基底膜とその物理的特性

基底膜は蝸牛の中で最も重要な構造の一つである。この膜の上にコルチ器という感覚器官が乗っている。基底膜の物理的特性は、蝸牛の長さに沿って系統的に変化している。

- 基底部（蝸牛の入口側）：狭く（約 0.04mm）、硬い
- 頂部（蝸牛の先端側）：広く（約 0.5mm）、柔らかい

この特性の変化により、基底膜は位置によって異なる周波数に共振する。基底部は高周波数（約 20kHz）に、頂部は低周波数（約 20Hz）に最もよく反応する。この周波数-位置対応を「トノトピー」と呼ぶ。

## 5.3 進行波理論

音が蝸牛に入ると、基底膜上に「進行波」が生じる。これはベケシーによって発見された現象である。進行波は以下の特徴を持つ。

1. 波は基底部から頂部に向かって進行する
2. 特定の周波数に対して、特定の位置で振幅が最大となる
3. 最大振幅点を過ぎると、波は急速に減衰する

この進行波のメカニズムにより、蝸牛は音の周波数分析を行っている。これは、蝸牛が天然の「周波数分析器」として機能していることを意味する。

# 6 有毛細胞：機械-電気変換器

## 6.1 有毛細胞の種類と配置

コルチ器には2種類の有毛細胞がある。

- 内有毛細胞（IHC）：1列に並び、約 3,500 個
- 外有毛細胞（OHC）：3列に並び、約 12,000 個

興味深いことに、数の少ない内有毛細胞が聴神経線維の 95% と接続しており、主要な感覚受容器として機能している。一方、外有毛細胞は聴神経との接続は少ないが、別の重要な機能を持っている。

## 6.2 機械-電気変換のメカニズム

有毛細胞の頂部には、不動毛（stereocilia）と呼ばれる毛状の構造がある。基底膜の振動により、不動毛が屈曲すると以下のプロセスが起こる。

1. 不動毛の屈曲により、先端部のチャンネルが開く

2. 内リンパ液の高カリウムが細胞内に流入する
3. 細胞が脱分極し、電位変化が生じる
4. 神経伝達物質が放出され、聴神経が興奮する

このメカニズムにより、機械的振動が電気信号に変換される。

### 6.3 外有毛細胞の能動的機能

外有毛細胞は、単なる受容器ではない。電氣的刺激に応じて長さを変える「電気運動性」という特殊な性質を持っている。この収縮・伸長運動は、プレスチンというモーター蛋白質によって駆動される。

この能動的な運動により、外有毛細胞は以下の機能を果たす。

1. **増幅機能**：小さな音に対して基底膜振動を約 100 倍（40dB）増幅する
2. **周波数選択性の向上**：特定周波数への応答を鋭くする
3. **非線形性の付与**：小さな音は大きく増幅し、大きな音はあまり増幅しない

この外有毛細胞の機能は「蝸牛増幅器」と呼ばれ、高感度で周波数選択性の高い聴覚を実現している。Unit 4 で詳しく扱うが、感音性難聴の多くは、この外有毛細胞の機能低下に起因する。

## 7 聴覚障害の生理学的分類

### 7.1 伝音性難聴

伝音性難聴は、外耳または中耳の障害により、音が内耳まで効率的に伝わらない状態である。主な原因には以下がある。

- 耳垢栓塞
- 鼓膜穿孔
- 中耳炎
- 耳小骨連鎖の離断
- 耳硬化症

伝音性難聴の特徴は、音が小さく聞こえるが、十分に大きな音であれば比較的明瞭に聞き取れることである。多くの場合、医学的治療や手術により改善が可能である。

### 7.2 感音性難聴

感音性難聴は、内耳（主に蝸牛）または聴神経の障害による難聴である。主な原因には以下がある。

- 加齢（老人性難聴）
- 騒音暴露
- 薬物（耳毒性薬物）
- 遺伝性疾患
- メニエール病

- 突発性難聴

感音性難聴の特徴は、音が小さく聞こえるだけでなく、歪んで聞こえることである。特に外有毛細胞の障害では、以下の問題が生じる。

1. **聴力閾値の上昇**：小さな音が聞こえない
2. **周波数選択性の低下**：音の明瞭度が低下する
3. **ダイナミックレンジの狭小化**：小さな音は聞こえないが、大きな音はすぐにうるさく感じる（補充現象）

### 7.3 混合性難聴

混合性難聴は、伝音性難聴と感音性難聴の両方の要素を持つ難聴である。例えば、慢性中耳炎が長期間続いて内耳にも影響が及んだ場合などに生じる。

## 8 機能障害の理解へ向けて

### 8.1 なぜ機能の理解が重要なのか

本章で詳しく見てきたように、聴覚系は極めて精巧なシステムである。音が神経信号に変換されるまでに、多くの構造が複雑に関与している。この正常な機能を理解することで、初めて機能障害の本質が見えてくる。

例えば、「高音が聞こえない」という能力障害の背後には、「蝸牛基底部の外有毛細胞の変性」という機能障害がある。この理解は、単に学術的な意味だけでなく、実践的な意義も持つ。

### 8.2 数値シミュレーションへの橋渡し

Unit 4 では、本章で学んだ蝸牛の構造と機能を数理モデルで表現し、コンピュータ上でシミュレーションする方法を学ぶ。特に重要なのは以下の要素である。

- 基底膜の物理的特性（質量、剛性、減衰）
- 進行波の伝播メカニズム
- 外有毛細胞の増幅機能

これらを数式で表現し、正常な状態と障害がある状態をシミュレーションすることで、機能障害を可視化することができる。

### 8.3 耳鳴りへの展開

Unit 5 では、耳鳴りという症状を自励振動として理解する。これも聴覚系の機能を理解していなければ、そのメカニズムを説明することはできない。特に、外有毛細胞のフィードバック機構が不安定になることで、自発的な振動が生じるという考え方は、聴覚系の能動的な性質を理解して初めて納得できるものである。

## 9 クイズ

聴覚系の構造と機能について学んだことを踏まえて、以下の問いについて考えてみよう。

1. 中耳がない場合、音の伝達効率ほどの程度低下するか？ その理由を説明せよ。
2. 外有毛細胞の機能が完全に失われた場合、聴覚にどのような影響が現れるか？
3. 「高音が聞こえない」という症状から、蝸牛のどの部分に問題があると推測できるか？ その理由も述べよ。

## 10 Unit2 のまとめ

本章では、聴覚系の構造と機能について詳しく見てきた。外耳による音の収集、中耳によるインピーダンス整合、そして内耳における周波数分析と機械-電気変換。これらすべてが協調して働くことで、我々の聴覚は成立している。

特に重要なのは、蝸牛における外有毛細胞の能動的な増幅機能である。この機能により、我々は微小な音から大きな音まで、約 120dB という広いダイナミックレンジで音を聞くことができる。しかし、この精巧なシステムは、同時に脆弱でもある。騒音、加齢、薬物などにより外有毛細胞が障害されると、単に音が小さく聞こえるだけでなく、音の質そのものが劣化する。

この理解は、Unit 1 で提起した問題—機能障害の可視化による外在化の促進—への第一歩である。聴覚系の正常な機能を知ることで、その機能の障害を客観的に理解することができる。これは、当事者の障害受容を助けるだけでなく、より効果的な支援方法の開発にもつながるであろう。

次の Unit 3 では、この複雑な聴覚系の機能を数学的にモデル化し、コンピュータでシミュレーションするための数値計算法を学ぶ。そして、Unit 4 と 5 で、実際に聴覚障害と耳鳴りのシミュレーションを行い、機能障害の可視化を実践することになる。