

音って、どうやって聴こえるの？

新潟大学大学院 医歯学総合研究科 分子生理学分野

日比野 浩、太田 岳

1. はじめに

ふだん、わたしたちは身の回りの音を聴きながら生活しています。では、音をどのようにして聴いているのでしょうか？実はわたしたちは音の大小だけでなく、高さ低さも上手に聴き分けているのです。このようなことは、どのような仕組みでできるのでしょうか？頭の中には「うずまき管」と呼ばれるカタツムリのような形の臓器があります(図1)。これが、音を聴き分けるのに重要な場所な

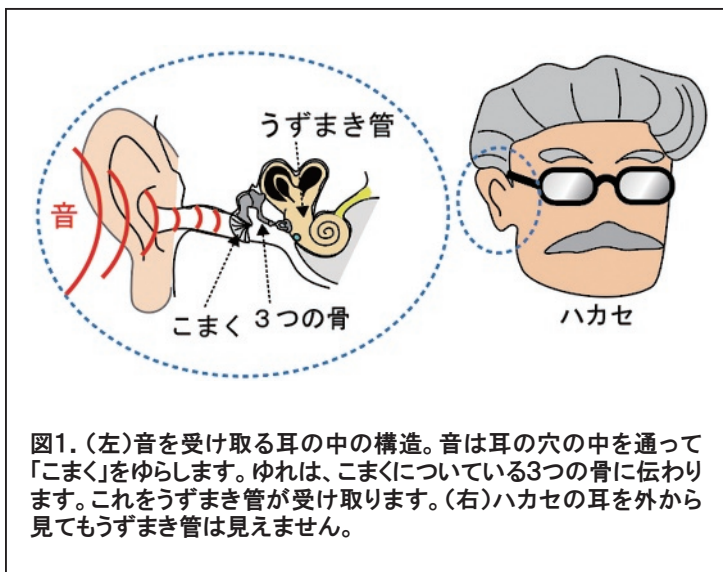


図1. (左)音を受け取る耳の中の構造。音は耳の穴の中を通過して「こまく」をゆらしませます。ゆれは、こまくについている3つの骨に伝わります。これをうずまき管が受け取ります。(右)ハカセの耳を外から見てもうずまき管は見えません。

のです。うずまき管で作られた音の信号は、神経(しんけい)を通過して脳に届けられます。そう、わたしたちは、脳で音を感じるのです。この記事では、音がどんなものなのかを紹介しつつ、「きこえ」に大切なうずまき管のふしぎな仕組みをくわしく説明していきます。

2. 音ってどんなもの？

歌声や鳥のさえずり、車のクラクションや川のせせらぎ、わたしたちのまわりには音があふれています。どんな種類の音であっても、録音はマイクを一つ使えばできます。では、マイクはいったい“なに”を測っているのでしょうか。これを知るには、音がどんなものであるかを理解する必要があります。

誰もが水たまりに石を落としたことがあるでしょう。落とした場所を中心に波紋(はもん)が広がっていくのを見たことがあると思います。この様子を真横から見てみましょう

(図2左半分)。あるところでは、はじめは水面が上がって波の山ができますが(図2右上)、同じ場所を観察していると、その次は水面がへこんで谷ができます。その後、波はやがて小さくなって、石を投げこまれる前と同じように水面の動きが止まります。この波の「形」は、正弦波(せいげんは)と呼ばれる、くり返しの波です(図2右下)。

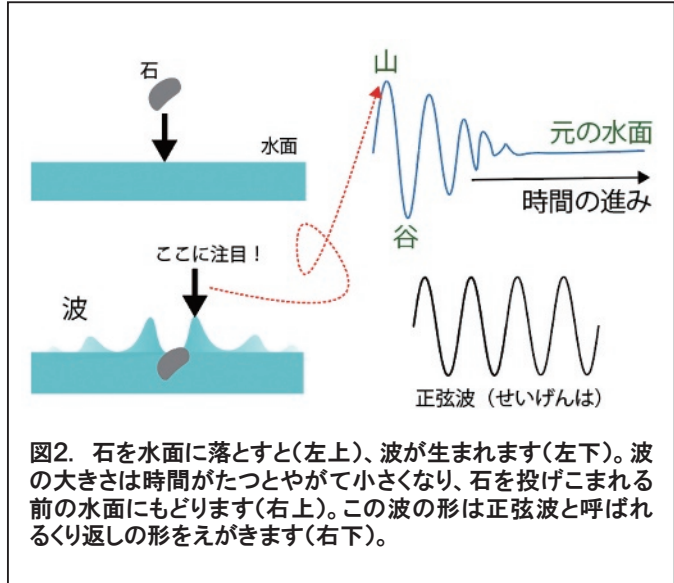


図2. 石を水面に落とすと(左上)、波が生まれます(左下)。波の大きさは時間がたつとやがて小さくなり、石を投げこまれる前の水面にもどります(右上)。この波の形は正弦波と呼ばれるくり返しの形をえがきます(右下)。

なめらかな形をしていますね。このような動きを正弦波振動(しんどう)と呼びます。

今、水面の振動を説明しました。目には見えませんが、わたしたちのまわりの空気も同じように振動しています。ただし、ゆれ方は水面のそれと少し違ってきます。この様子を「ばね」を使って説明します。ばねを図3左上の様に手でおすと、最も近い部分がちぢまります。このちぢみはすばやく波うって右側に伝わります(図3左下)。

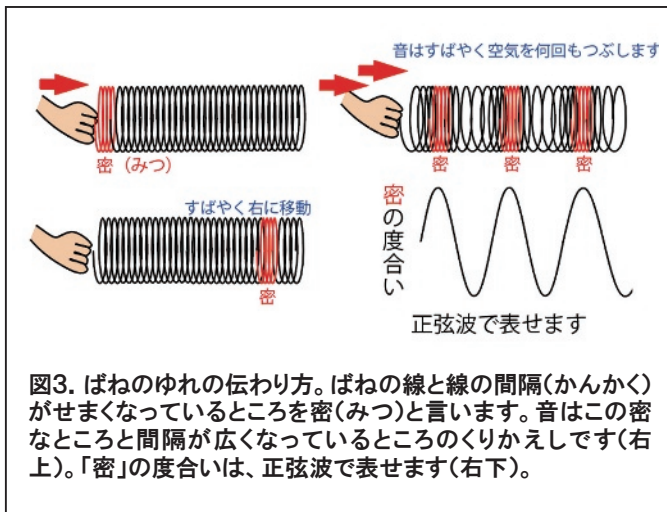


図3. ばねのゆれの伝わり方。ばねの線と線の間隔(かんかく)がせまくなっているところを密(みつ)と言います。音はこの密なところと間隔が広がっているところのくりかえしです(右上)。「密」の度合いは、正弦波で表せます(右下)。

わたしたちが声を発すると、空気がものすごい速さで何回もつぶされます。それはまるで、ばねのつぶれのくり返しの波が、どんどん遠くに伝わっていくようです(図3右上)。この波を縦波(たてなみ)と言いますが、つぶれの大きさは正弦波をえがきます。谷の部分には

ねの線と線の間が広がっています。

マイクの中では、空気の振動が、太鼓(たいこ)のような膜(まく)をゆらします。膜はこのゆれを電気に変える特別な物体でできています。電気はアンプで大きな信号になります。スピーカーは、電気を再び空気の振動に変えます。録音した音を聴くときは、この空気のゆれを聴いているのです。

3. うずまき管のしくみ①～音の高さ低さの聴き分け

うずまき管は音の振動をどのように受け取っているのでしょうか？うずを説明のためにほどこきます(図4)。台形の形をしたプレートが内部にあります。

これは「感覚上皮帯(かんかくじょうひたい)」といって、後で説明しますが、変わった細胞(さいぼう)を含んでいます。管の頂上に向かうほどその厚みがうすく、幅が広がっていき(図4右下)、ま

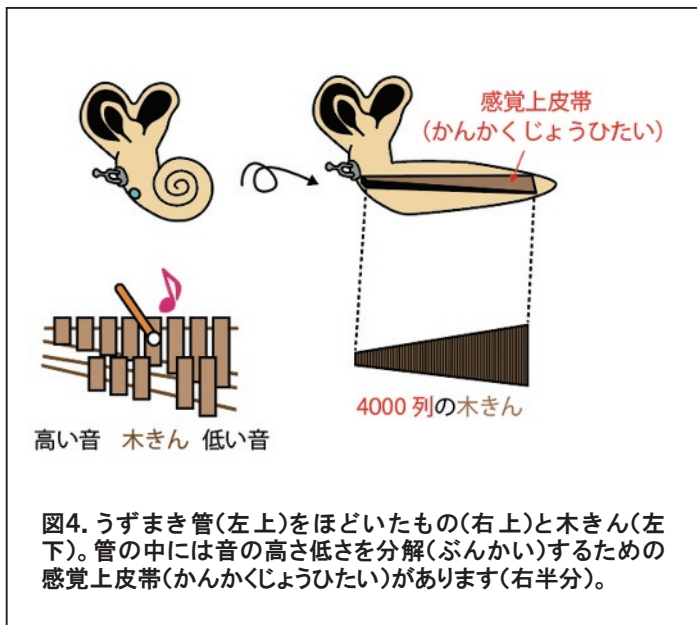


図4. うずまき管(左上)をほどこいたもの(右上)と木きん(左下)。管の中には音の高さ低さを分解(ぶんかい)するための感覚上皮帯(かんかくじょうひたい)があります(右半分)。

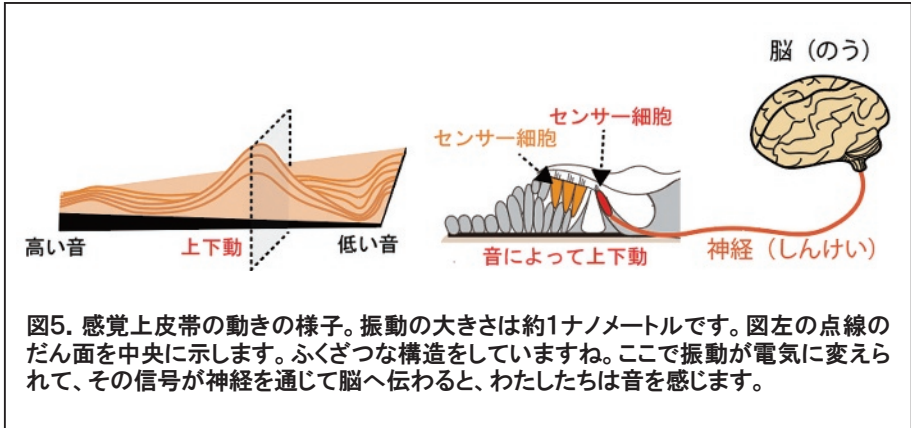
るで木きんの様な形をしています(図4左下)。みんなが音楽の時間に使う木きんの音の高さは何で決まっていますでしょうか？それは音板の長さですね。ばちで“ド”の板を叩くと、目には見えませんがその音板がゆれます。これと同じで、うずまき管に“ド”のゆれが入ると、感覚上皮帯の“ド”に反応しやすい幅を持った場所が振動するので。この振動の大きさは、音と同じで正弦波をえがきます(図3右下)。

木きんには、ドとレの間に、その間の音のド#を出す音板があります(図4左下)。長さのちがう音板をたくさん用意すれば、もっと細かく音の高さを変えられそうですね。感覚上皮帯には、音板にあたるものがなんと4,000個も並んでいます。ピアノの鍵盤(けんぱん)が88個であるのに比べると、とても数が多いです。広い範囲(はんい)の音の高さ低さを知ることができそうです。感覚上皮帯と木きんにはさらに違いがあります。それは硬さです。感覚上皮帯は、幅の広いところほど柔らかくなります。同じサイ

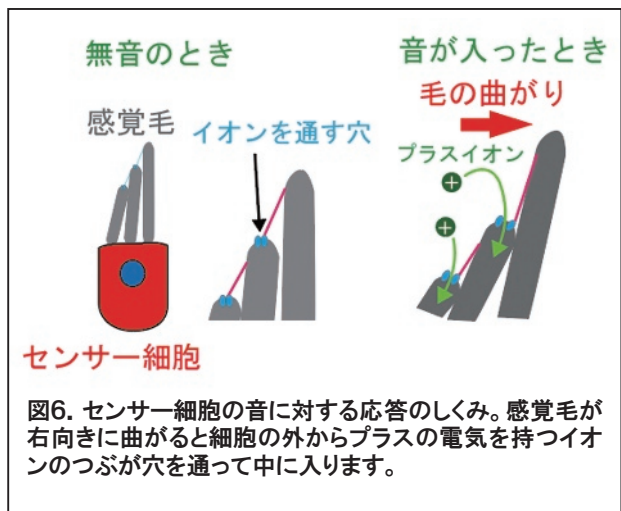
ズの鉄板とゴムを叩くとどちらの音が高いでしょうか？鉄の方が高い音を出すでしょう。感覚上皮帯はこのような特徴（とくちょう）もいかして、すどく音の高低を聴き分けているのです。年れいにもよりますが、わたしたちは、1秒に20回から20,000回の振動（図2右下）を、ピアノの鍵盤4,000個分の細かさで聴き取ることができます。

4. うずまき管のしくみ②～ボリュームの調節

音の高さ低さは選り分けられた後、感覚上皮帯はどれくらいの大きさを振動するのでしょうか。正解は、おおよそ1ミリの100万分の1、つまり約1ナノメートルです。顕微鏡（けんびきょう）でも決して見えない、とても小さい動きなんです。



いろんな高さの音が入ったときの感覚上皮帯は図5左の様になります。図5中央は、点線で囲った輪切りの部分です。感覚上皮帯はその内部にセンサー細胞をふくみます。赤色で示した細胞は「内毛細胞（ないゆうもうさいぼう）」と呼ばれ、振動を感じてそれを電気に変えます。この細胞には電気を通すためのケーブル、神経がついており、電気がコンピューターである脳に伝えられます。脳ではじめて音を「きこ



え」として感じます。

内有毛細胞はどのようにして働いているのでしょうか？細胞の上には感覚毛が生えています(図6)。この毛は、プラスの電気をもった小さな粒であるイオンを豊富(ほうふ)にふくんだ液体にひたされています。毛の先にはイオンを通す穴があります。感覚上皮帯が上側に動くと毛は図6の右向きに曲がります。すると穴がより開いて細胞の中にイオンが入ります。感覚上皮帯が下側に動いているときは毛は逆向きに曲がって、穴が閉じ、イオンが通りにくくなります。内有毛細胞は入ってきたイオンの数に応じて電気信号を神経に伝えます。

センサー細胞には、内有毛細胞の他に別の種類があります。図5中央のオレンジで示した細胞は、外(がい)有毛細胞と呼ばれます。この細胞でも、感覚上皮帯のゆれに合わせて感覚毛がたおれますが、その後の反応がちがいます。イオンが入ると、自分自身の体の長さもちぢめるのです。入ってくるイオンの量が

減ると体がのびます。感覚上皮帯が上下に振動する時は「のびちぢみ」になりますね。これが感覚上皮帯の振動を調節します。不思議なことに、音が小さければ小さいほど振動の大きさが増えます。この調節された振動の大きさに応じて、内有毛細胞が神経に電気を伝えます。つまり、小さな音のボリュームを大きくして聴こうとする仕組みが感覚上皮帯に備わっているのです。わたしたちは3メートル先にいる“カ”の虫が出す小さな音を聞くことができれば、一方で、飛行機のジェットエンジン音という大きな音も聴くことができます。

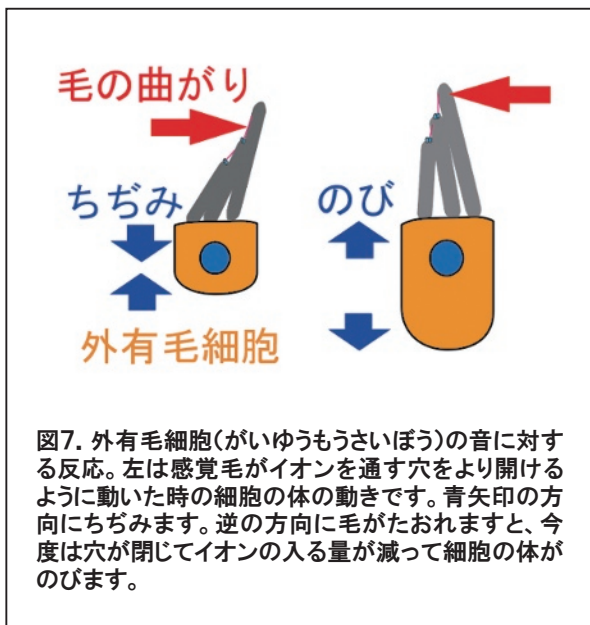


図7. 外有毛細胞(がいゆうもうさいぼう)の音に対する反応。左は感覚毛がイオンを通す穴をより開けるように動いた時の細胞の体の動きです。青矢印の方向にちぢみます。逆の方向に毛がたおれますと、今度は穴が閉じてイオンの入る量が減って細胞の体がのびます。

5. 最後に。小さなゆれの測り方:「うちゅう」との共通点

わたしたちのまわりにあふれている様々な音は、頭の中にあるうずまき管のさらに中にある「感覚上皮帯」の、とても小さな振動をはじめりとして、その後、いくつかの仕掛けで音が「きこえ」になることがわかりましたか？最後に、本誌のタイトルである「うちゅう」とわたしたちの研究の関わりについて話します。

わたしたちの国で、「きこえ」が悪い人は、10人に1人もいます。人々のきこえを良くするには、感覚上皮帯のしくみを解き明かす必要があります。しかし、どのようなしくみでセンサー細胞が感覚上皮帯の動きを調節しているかはまだよくわかっていません。つまり、聴こえづらい原因が感覚上皮帯のどこにあるのかをうまく説明することができていないのです。

わたしの研究室では、自分たちで装置を作って、1ナノメートルの感覚上皮帯の振動を測っています。レーザー干渉計(かんしょうけい)と呼ばれるとくべつな機械を使うのですが、この仕組みは、2017年にノーベル賞を受賞した「重力波の検出」に使用された装置のものとほとんど同じです。測定された重力波は、遠い宇宙で2つのブラックホールがぶつかった時に生まれた、1ナノメートルよりももっともっと小さい、ほんのわずかな波です。こんな小さいものを測るのには、3~4キロメートルもあるとても大きな機械が必要です。不思議なことですね。重力波に比べれば感覚上皮帯の振動の大きさはとても大きく感じるかもしれませんが、それでも普通の顕微鏡でも見えない、わずかな動きです。これを測る機械の大きさは、およそ1メートルくらいです。これなら研究室の部屋に入りますね。研究室では自分たちで作った機械を使って、耳のしくみを明らかにしようと日々がんばっています。研究室の中の小さなうちゅうから、皆さんの健康な「きこえ」に役立てることを目標に、これからも研究を続けていきます。

<参考文献>

「聴覚モデル」 日本音響学会編 コロナ社

著者紹介 日比野 浩(ひびの ひろし)



新潟大学大学院 医歯学総合研究科 分子生理学分野 教授。うずまき管のふしぎな世界に魅せられて、その研究に没頭しています。将来、難聴の患者さんの聴こえを少しでも回復させるような治療法の開発につなげたいと思っています。趣味は歴史小説の読書、好きな映画はスターウォーズ。

著者紹介 太田 岳(おおた たける)



同分野 助教。理工学部で物理を学び、この世界でさまざまな形で存在している振動に興味を持ちました。いつも世の役に立つ研究を、と思っています。好きな映画はソラリス。