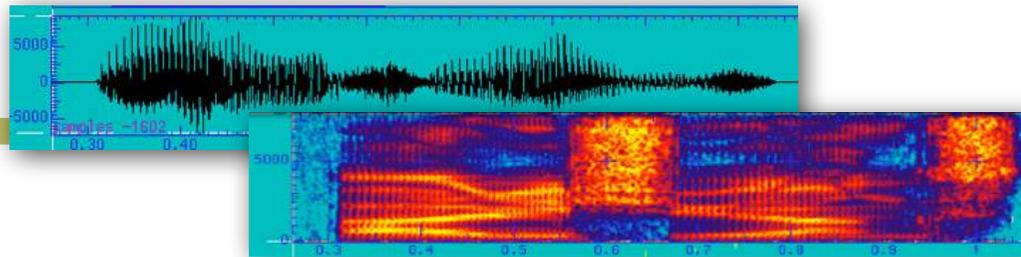


# 音響音声学

(Topics in Acoustic Phonetics)



峯松 信明

工学系研究科電気系工学専攻

## 様々な情報＝四要素の組み合わせ

### 音の高さ

- 高い音, 低い音

### 音の大きさ

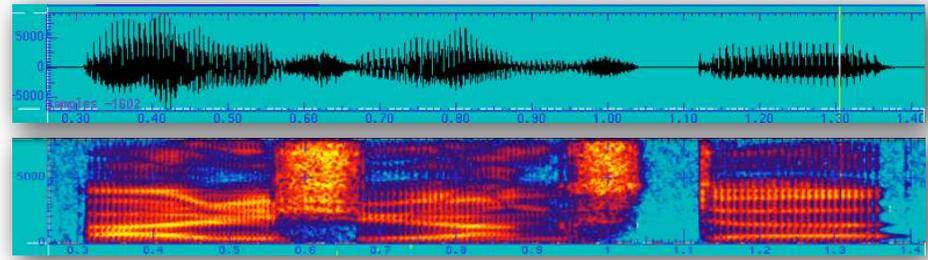
- 大きい音, 小さい音

### 音の長さ

- 長い音, 短い音

### 音の音色 (声色)

- 太い声, 細い声, 黄色い声, 甘い声, 渋い声, 色っぽい声 . . .
- 高さ・大きさ・長さが同じ2音を「違う音」と認識した場合, その2音は**音色**が異なる。
- 「あ」と「い」      「あ」と「あ」



- 1) 高さ, 2) 大きさ  
3) 長さ, 4) 音色

ある情報

# 音の強さ・音の大きさ・音圧

## 強さ (intensity)

- 物理的なエネルギー。物理的な刺激の程度（物理量）。

## 大きさ (loudness)

- 聞こえのうるささ。心理的な感覚の程度（心理量）。

## 音圧

- 音声は空気粒子の縦波，即ち圧力波（粗密波）
- 空気の圧力変化が伝搬する様子＝音声の伝搬
- 「粗密差＝圧力差」が大きいと，強さ／大きさは大に

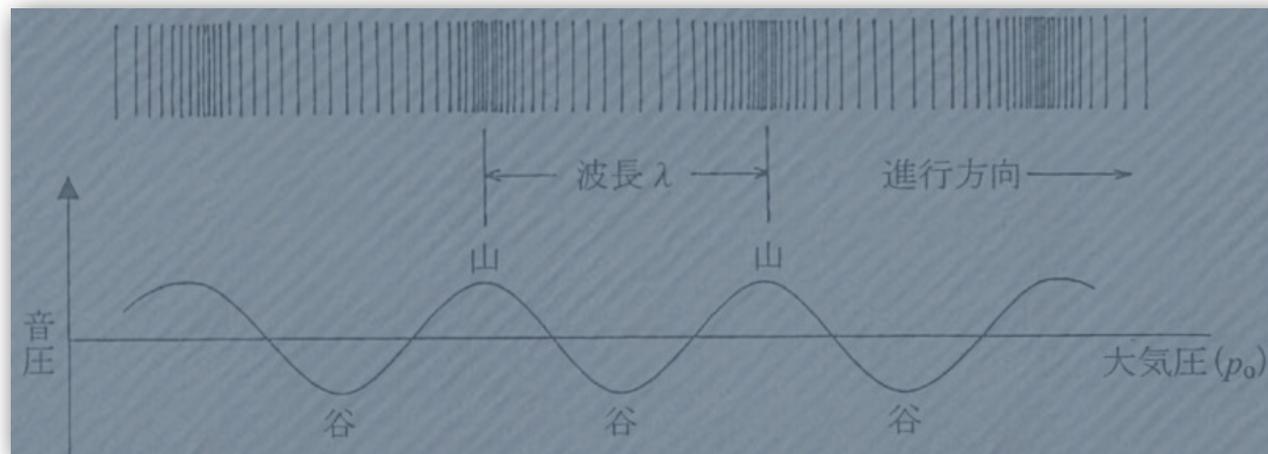


図1-5

# 音圧から音の「強さ」へ

## 音の「強さ」（物理量）は音圧から計算される

- 音の強さ = 音のエネルギー
- $= \text{比例定数} \times \text{音圧}^2 = \text{音圧}^2 / [\text{空気の密度} \times \text{音速}]$
- 「音圧の2乗に比例する」という事実が大切

## 音の「強さ」（物理量）と音の「大きさ」（心理量）

- 音の強さが10倍, 100倍, 1000倍となる時,
- 音の大きさが同じ割合で増加するように感じる → 対数
- 対数に沿って音の「強さ」を記述する単位を設定する → ベル
- 1ベル = 10デシベル [dB] → 変化量を記述する単位

音圧	音の強さ	音の大きさ	ベル	デシベル
	10倍	$a$ だけ増加	1	10
10倍	100倍	$2a$ だけ増加	2	20
	1000倍	$3a$ だけ増加	3	30
100倍	10000倍	$4a$ だけ増加	4	40
	100000倍	$5a$ だけ増加	5	50

表2-1

# フォン (phon)

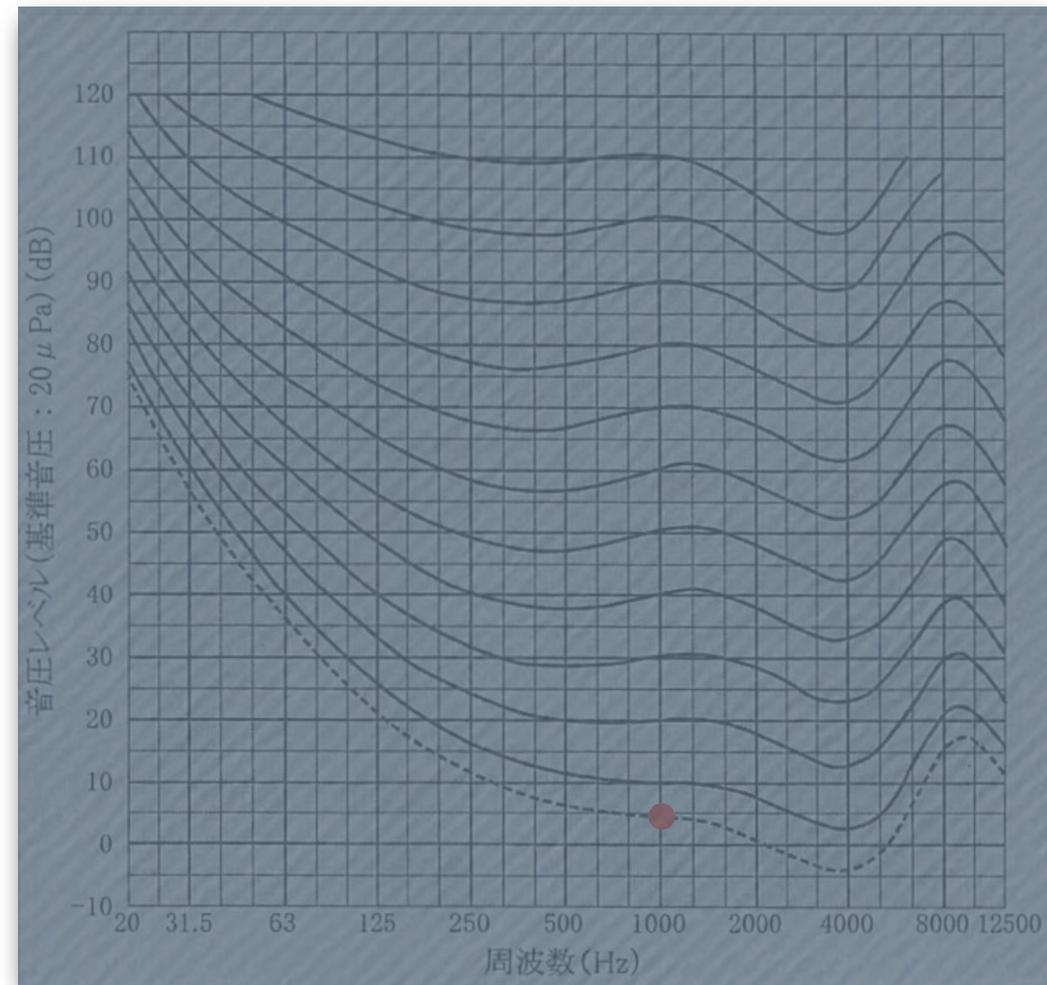
## 音の大きさの周波数依存性

- 二音が同じ「大きさ」であると感覚されても、その二音が物理的に同じ「強さ」であるとは限らない ← 周波数依存性

## ● 音の等感曲線

- 同じ「大きさ」と感覚される「強さ」(音圧)を曲線表示
- 任意の周波数の任意の音圧の音を1000Hzの音圧に変換  
→ phon (フォン)
- 波線の音は全て 4 dBSPL  
つまり, 4 phon

図2-2



# 音の大きさの知覚

## 物理量から心理量へ

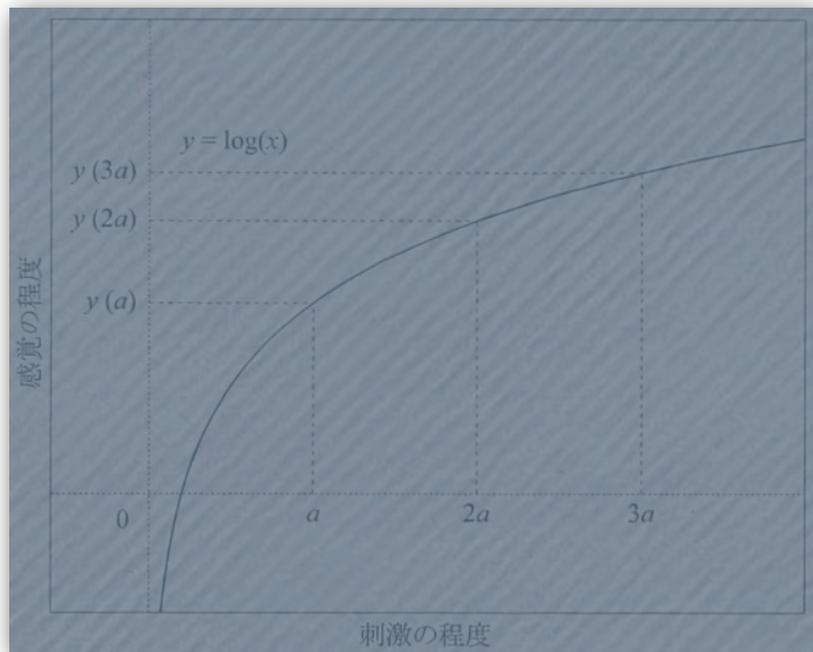
- 個人個人が主観的に感じている「もの」を客観的に表現する。
- 多くの被験者実験の結果から見いだされる法則性を数式化。

## フェヒナーの法則 (Fechner's law)

- 感覚は刺激の対数に比例する。

- $L = k \times \log I$

- 物理的には等比的な変化が、知覚的には等差的に感じられる。



- 弱い刺激 → 差に敏感, だが,  
強い刺激 → 差に鈍感

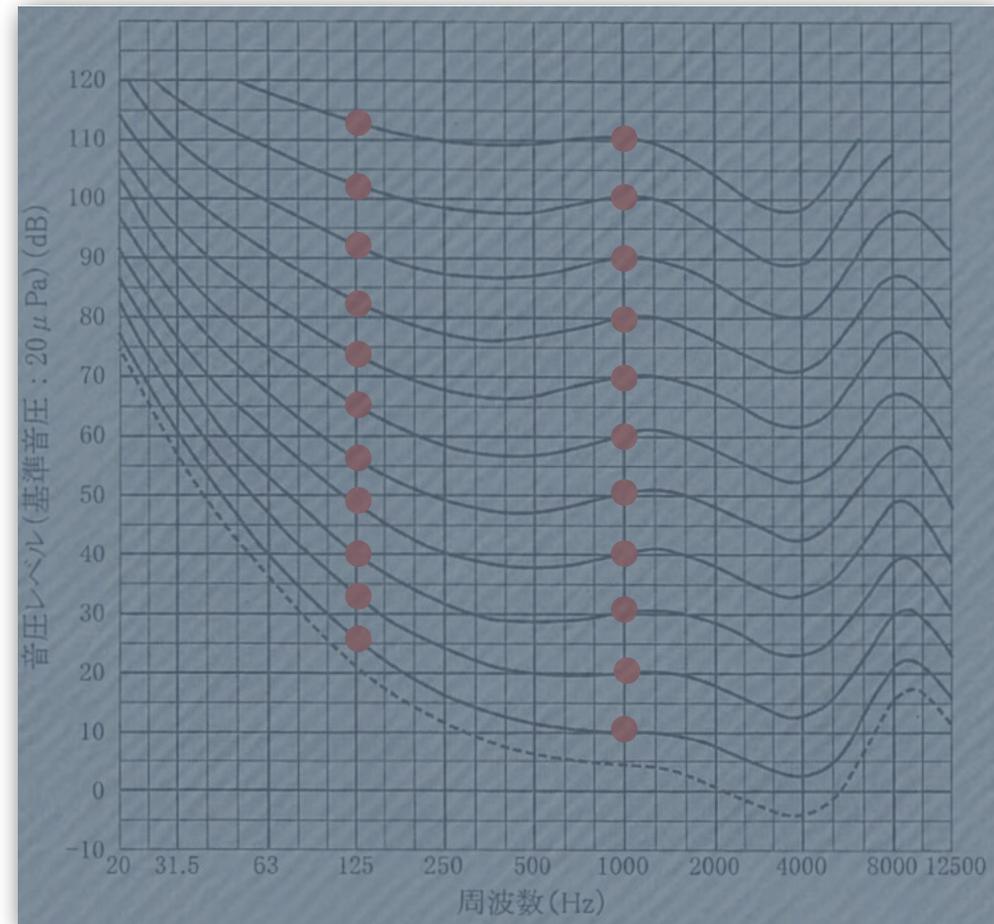
図4-1

# 等ラウドネス曲線 (phon) 再考

## フェヒナーの対数則に従った考え方

- 1000 Hzの音 (10, 20, 30,,,, dB) を作成
- 各音と等しい「大きさ」となる別周波数の音の強さを計測
- 1000 Hz では等間隔にとった
  - でも別周波数だと等間隔になってくれない
  - 等ラウドネスとなる dB がずれるのはよいとして
  - 対数則が正しいなら, 等間隔になって欲しいところ
- **そもそも 1000 Hz の等間隔も怪しいのでは?**

図4-2



# 音の大きさの知覚

## スティーブンスのべき法則 (Steven's law)

● フェヒナーの法則だと実験値に合致しないことがある。

● 感覚は刺激のべき (何乗か) に比例する。

●  $L = k \times I^\alpha$  ( $\alpha < 1.0$ )      ←  $L = k \log I$

●  $\alpha$  は 0.27 ほど。

● Stevens vs. Fechner

● 大きく異なるものではない。  $\alpha$  が小さいほど、大刺激に鈍感に。

図4-3

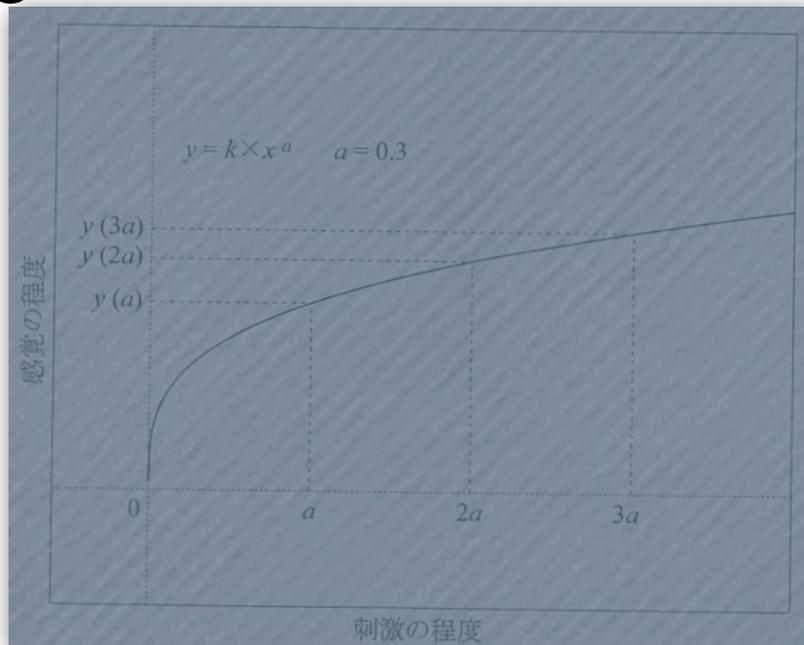
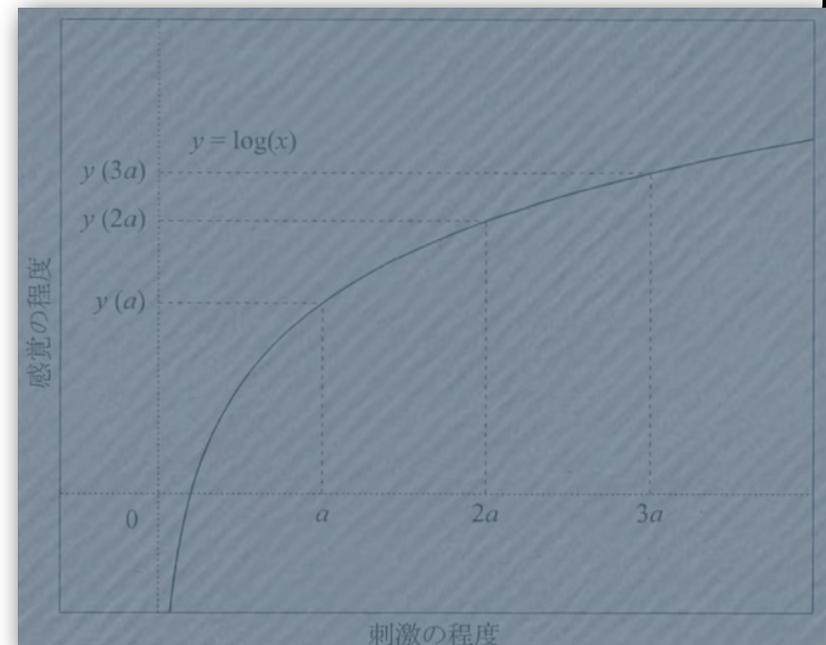


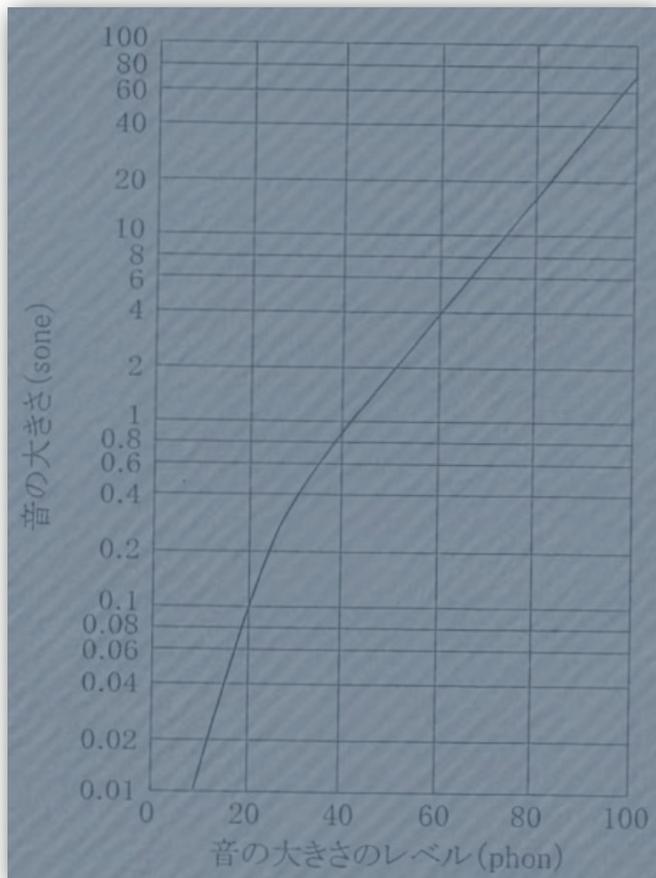
図4-1



# phon から sone へ

## べき法則に基づく「大きさ」定義：ソーン (sone)

- 1000 Hz, 40phon (40 dB SPL) = 1 sone
  - その後聴取実験によって 2 sone, 3 sone . . . の dB SPL を得る。
  - つまり「聞こえ」の n 倍に対応させる。
- sone as a function of phon



- 縦軸は sone, 横軸は phon (dB)
- 縦軸は対数軸, 横軸は線形軸
- $y = k \times x^\alpha$
- $\log y = \log k + \alpha \log x$
- $\log y = K + \alpha X$

図4-4

# 聴取実験の実際

## 1000 Hzのある音と等しい「大きさ」の $n$ Hzの音

- 片方の耳に 1000 Hz のある純音を呈示する。
- 別の耳に  $n$  Hzの純音を呈示。そのボリュームを操作させる。
- 等しい「大きさ」になった時のボリュームを測定。

## 1000 Hz のある音の2倍の「大きさ」の $m$ Hzの音

- 片方の耳に 1000 Hz の純音と、 $n$  Hz の純音を呈示する。
  - 両者は同じ「大きさ」と判定された二音。
  - つまり、大きさは2倍・・・のはず。
- 別の耳に  $m$  Hz の純音を呈示。そのボリュームを操作させる。
- 等しい「大きさ」になった時のボリュームを測定。
  - この時、 $m$  Hz の音の大きさは、1000 Hz の音の2倍
  - $m$  Hz の音の大きさは、 $n$  Hz の音の2倍

# 検知できる変化量・差

## ウェーバーの法則 (Weber's law)

- 刺激の変化に気付くためには、どの程度の刺激変化が必要か？
- 小さな刺激は小変化で検知可能。大きい場合は大変化が必要。
- 検知できる最小の変化量は、刺激の強さに比例する。
  - $\Delta I = k \times I$
  - $k = \frac{\Delta I}{I}$
  - 音の場合、検知できる変化の比率は約 1 dB
    - 音圧比：1.12倍，音の強さ比：1.25倍， $k = 0.25$

# 音響特性は口だけが決めるのではない

## 外耳道による音響変化・音響効果

- 外耳道の入口と、鼓膜上での音圧差
- 特定の周波数帯域に対して、約 10 dB のアンプとして機能している。

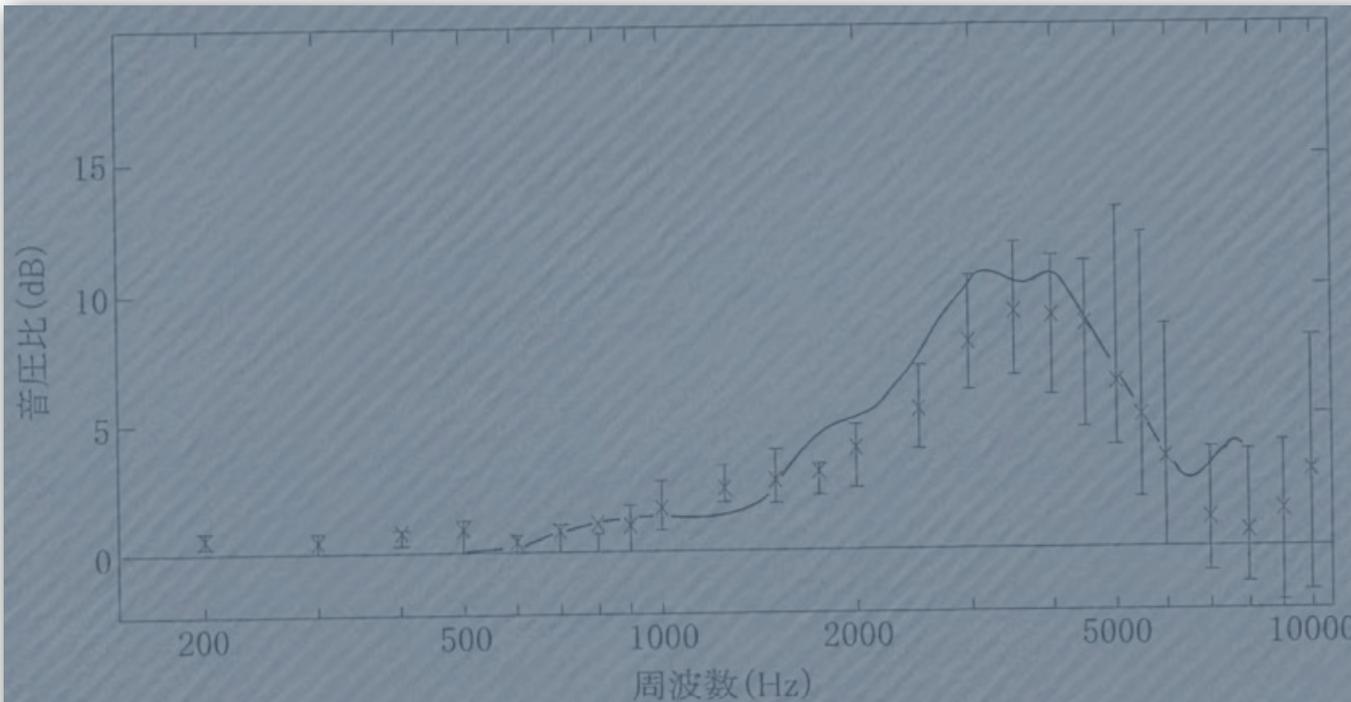
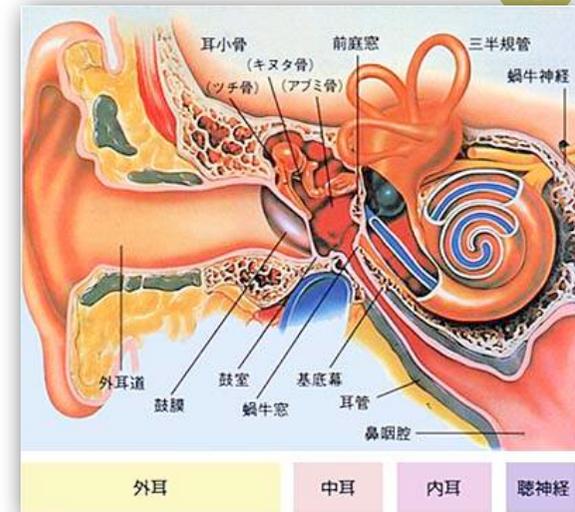


図4-5 鼓膜と外耳道入口における音圧の差。外耳道入口での音圧に対する鼓膜での音圧の倍率をdBで示している。(出典：B.C.J.ムーア著/大串健吾監訳『聴覚心理学概論』誠信書房、1994)

図4-5

# 外耳道だけが「隙間」を作る訳ではない

## 聴力レベル：dB HL

- 聴覚閾値：被験者にとってその音が検知できる境目の音圧

周波数 Hz	125	250	500	800	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
AD-02	47.5	27	13	9.5	7	6.5	7	8	9.5	12	16.5
AD-06 (高出力)	45.5	25	11	8.5	7	7	7.5	8.5	9.5	12	12.5
ISO 226 (旧)		11	6		4		1	-3	-4		
ISO 389-7 (新)	22	11	4	2	2	0.5	-1.5	-6	-6.5	2.5	11.5

- ヘッドホン装着時とスピーカ時で外耳道付近の隙間は変化

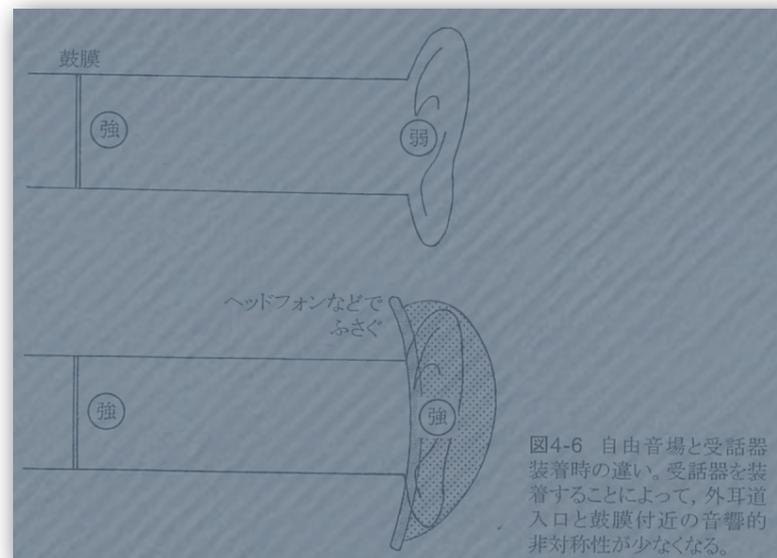


図4-6 自由音場と受話器装着時の違い。受話器を装着することによって、外耳道入口と鼓膜付近の音響的非対称性が少なくなる。

図4-6

- 隙間の形が共鳴／共振の様子を支配する別の例

# 同じコーン+異なる筐体



スピーカー工作の基本&実例集 2013年版  
特別付録:ダブルバスレフ型エンクロージャキット  
予価3,780円(スピーカーユニットは付属しません)



スピーカー工作の基本&実例集 2013年版  
特別付録:バックロードホーン型エンクロージャキット  
予価3,990円(スピーカーユニットは付属しません)

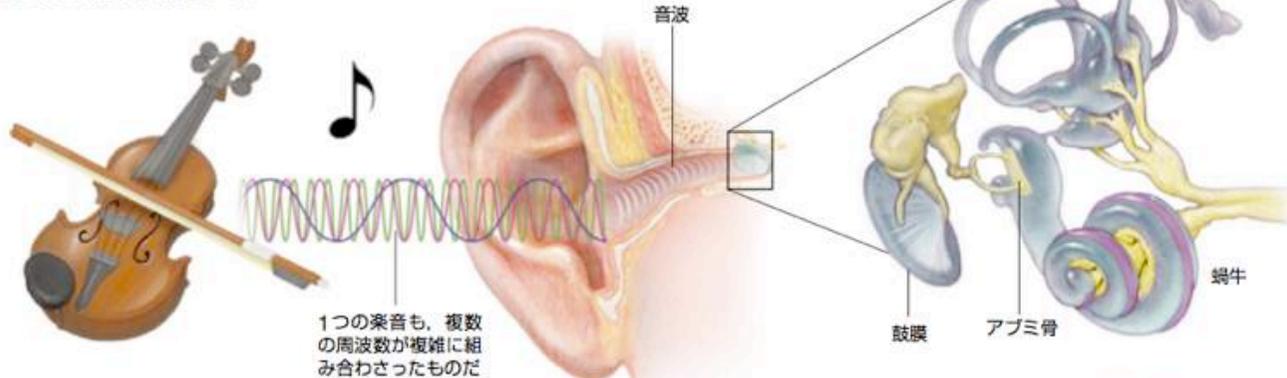
# 音の強さを弁別する仕組み

外耳→内耳→中耳→基底膜→（神経発火）→脳

[http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0040f/contents/high/ear\\_3d/index.html](http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0040f/contents/high/ear_3d/index.html)

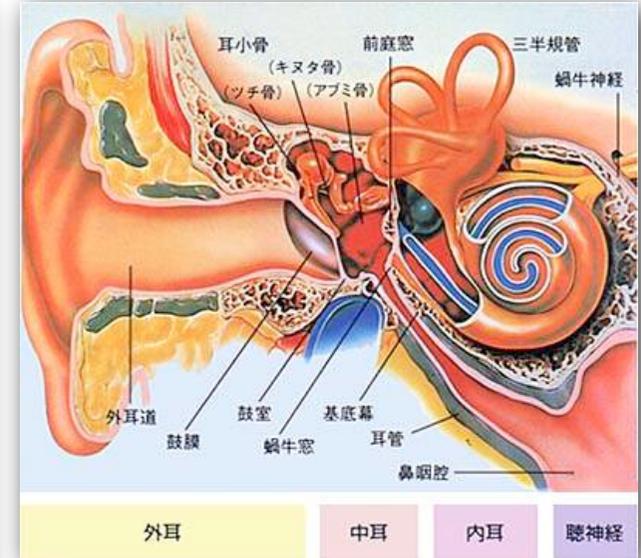
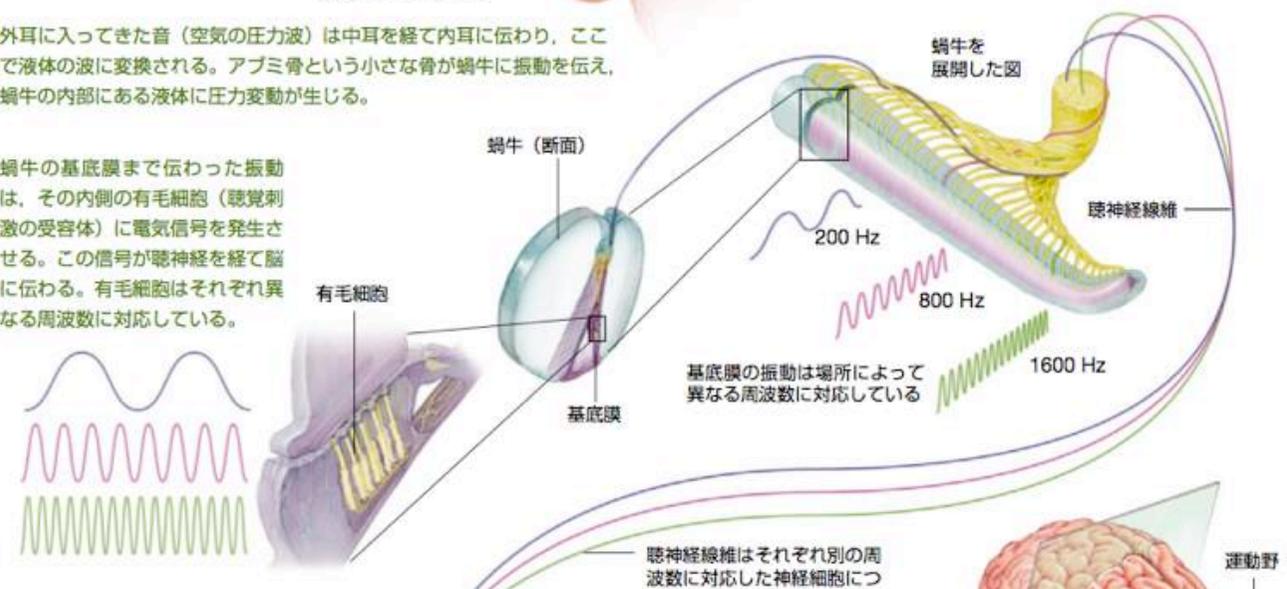
## 耳から脳へ 音楽の通り道

音楽を聴くと、脳では聴覚野だけでなく、さまざまな領域が反応する。通常なら音とは別の処理に関係している領域も加わり、視覚や触覚、感情といった体験すべてが脳の音楽処理に影響する。



外耳に入ってきた音（空気の圧力波）は中耳を経て内耳に伝わり、ここで液体の波に変換される。アブミ骨という小さな骨が蝸牛に振動を伝え、蝸牛の内部にある液体に圧力変動が生じる。

蝸牛の基底膜まで伝わった振動は、その内側の有毛細胞（聴覚刺激の受容体）に電気信号を発生させる。この信号が聴神経を経て脳に伝わる。有毛細胞はそれぞれ異なる周波数に対応している。



# 音の強さを弁別する仕組み

## 一つの謎

- 基底膜の神経繊維の多くは60dBまでに興奮しきってしまう。
- それ以上のレベルの音に対しては、そもそも弁別不可能なのでは？

## 一つの解答

- 周波数選択性
  - n Hz の純音に対して反応する基底膜の部位は決まっている
  - 但し、ある部位の発火は、隣の部位の発火を促す。
  - 実線の領域から波線の領域へ

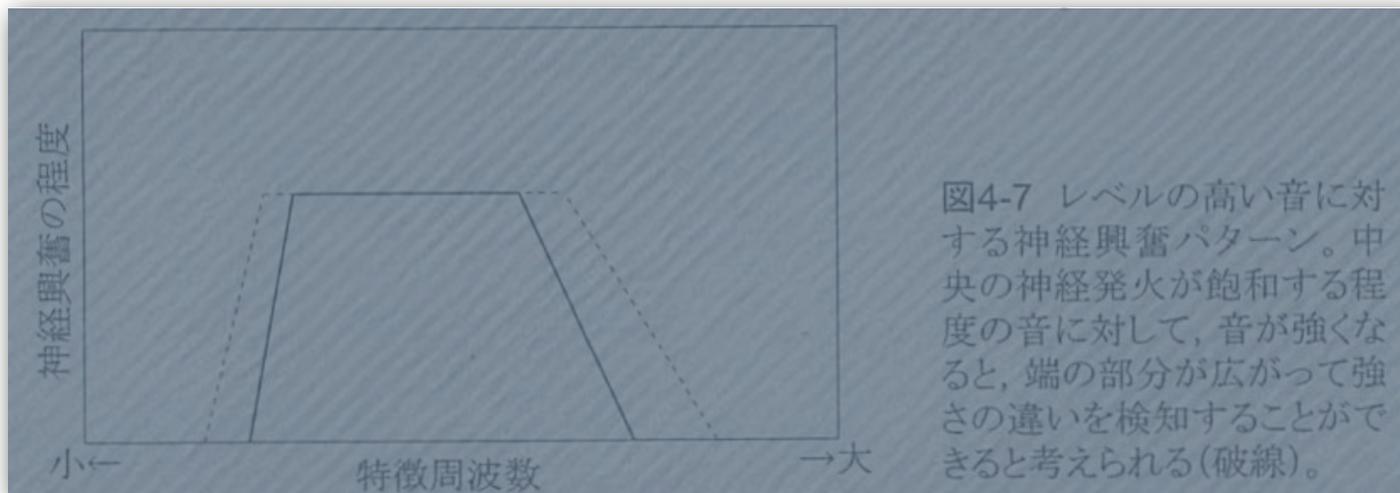


図4-7

# 音の長さ と 音の大きさ

## 長い音は短い音より「大きい」と感じるのか？

- 音の大きさ：各時刻の音の物理的強さだけの関数なのか？  
：ある時間幅の音の物理的強さの積分値なのか？
- 500[msec]以下だと，長さによって「大きさ」は変わる。
- 音の長さ と，長さ x 強さ（積分値）に対する検知能力  $d'$ 
  - 長さ x 強さ，を一定にしたまま長さを調節
  - 20~150[msec]は  $d'$  がおよそ一定 → 積分値が重要

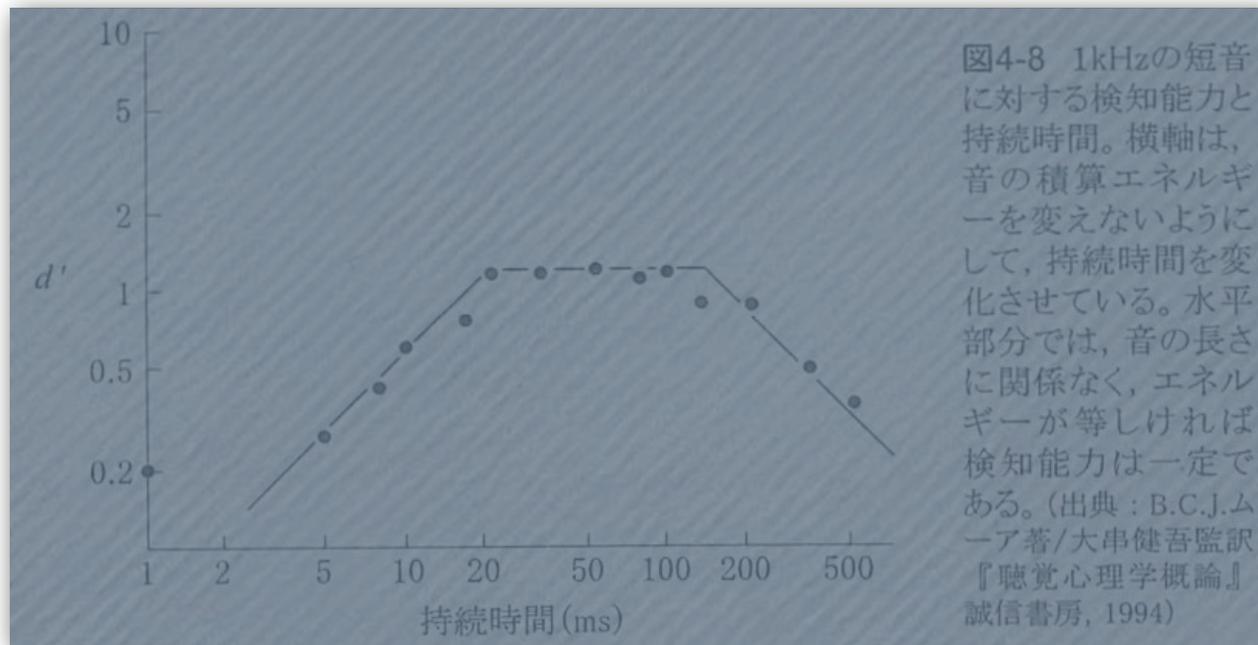


図4-8

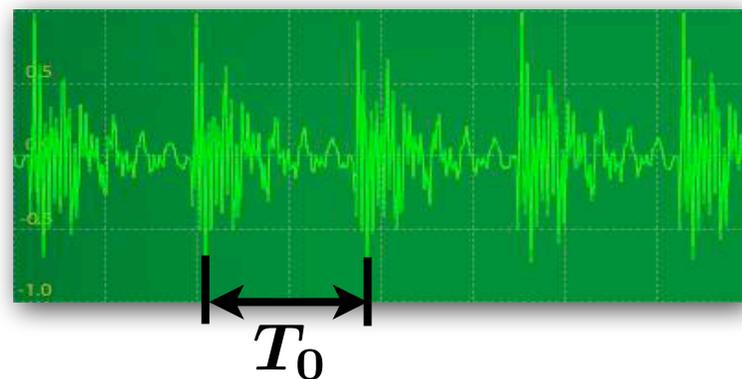
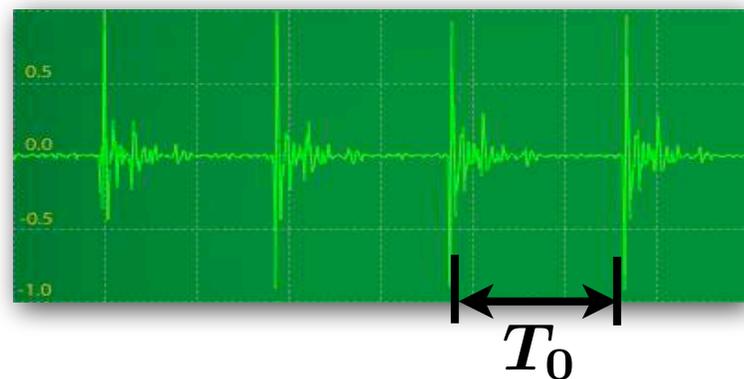
# 音の高さの物理量と心理量

## 基本周波数 (fundamental frequency)

● 基本周期の逆数。ピッチに対応する物理量。

## ピッチ (pitch)

● 聞こえの音の高さ。心理的な感覚の程度 (心理量)。

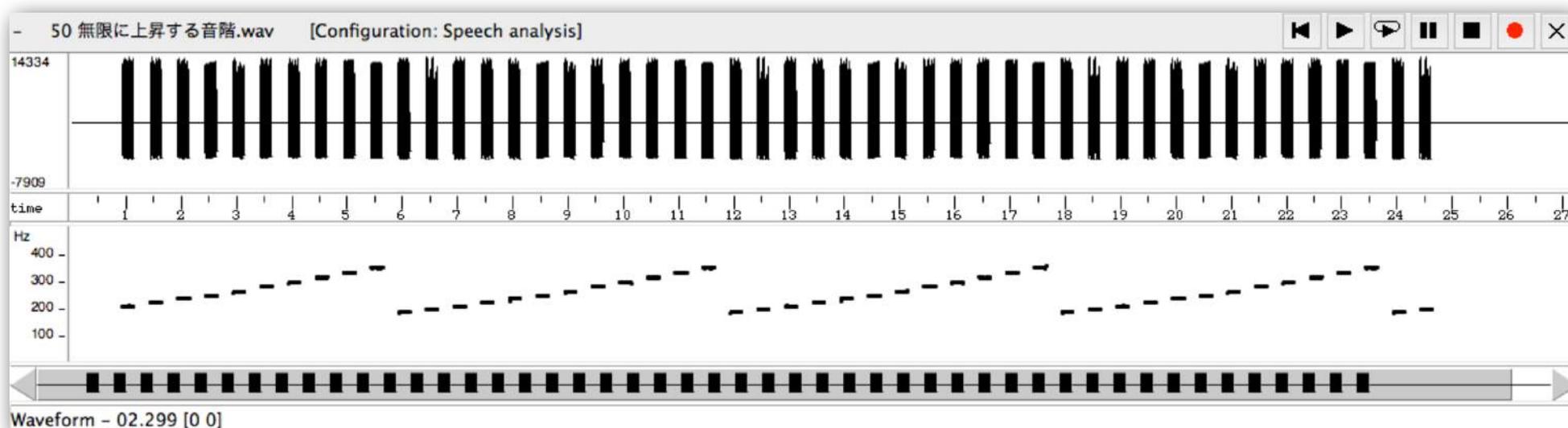


●  $T_0 =$  基本周期,  $F_0 = (1/T_0) =$  基本周波数 [Hz]

# 音の高さの知覚

## オクターブ感覚

- 基本周波数比が2倍となる2音の関係：オクターブ (octave)
- オクターブ感覚：1オクターブ上下すると，元の音に戻る感覚
- 興味深い錯聴
  - オクターブ感覚を使った，エンドレスな音列
  - 無限に上昇する音階？ その1 その2
  - 無限に下降する音階？ その1



- 1オクターブの差は音の高さの知覚を本当に2倍にするのか？

# 聴取実験を通して調べると・・・

## ピッチが2倍になる ≠ 1オクターブ上下する

- 音の高さに対する心理尺度：メル (mel)
- 1000 Hz, 40 phon (40dB SPL) のピッチ → 1000 mel
- 1000 mel の2倍の高さとして感じられる時 → 2000 mel
- ピッチ2倍は1オクターブよりかなり高い周波数に

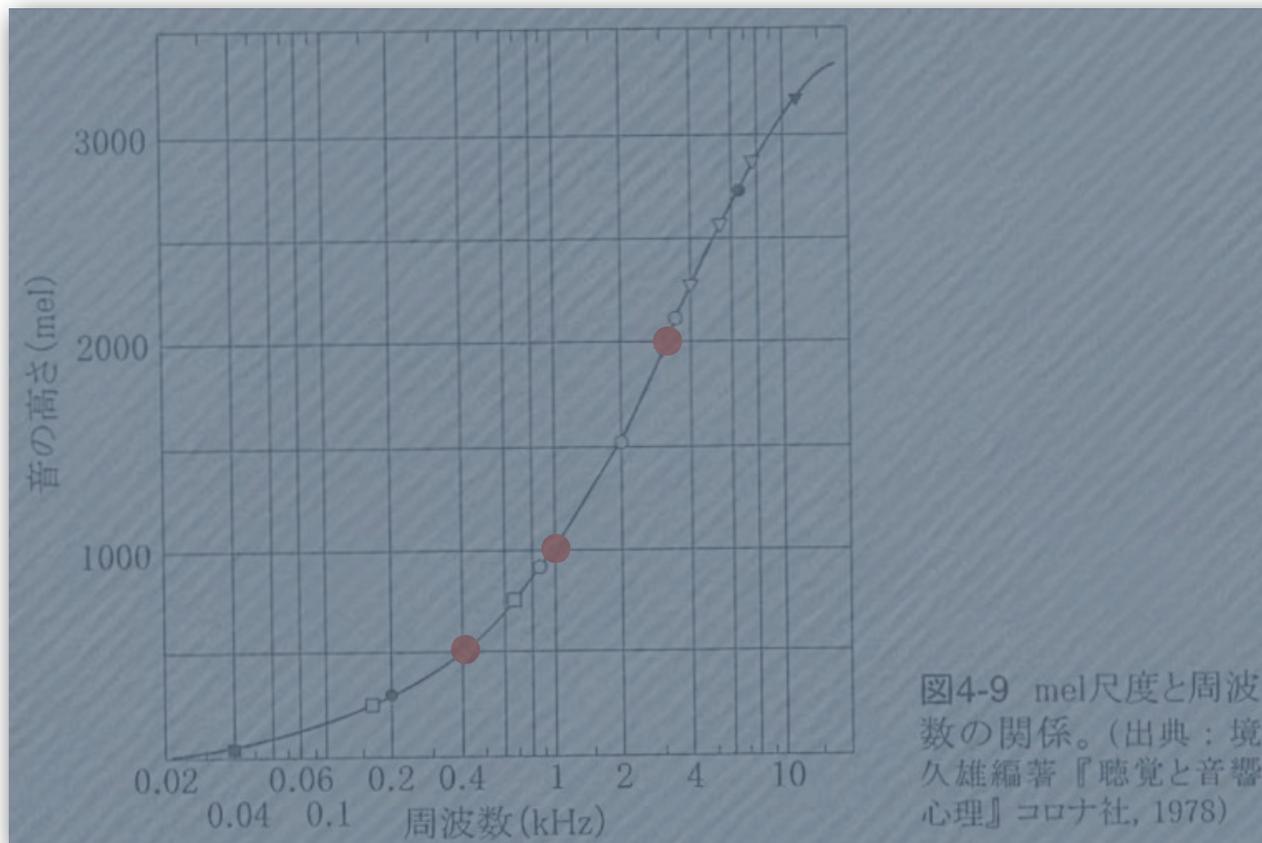


図4-9 mel尺度と周波数の関係。(出典：境久雄編著『聴覚と音響心理』コロナ社, 1978)

# Mel尺度の科学的説明

## ある基本周波数の純音に対する二つの測定量

- ピッチ (心理量, メル)
- 基底膜における共振位置の蝸牛頂からの距離
  - ピッチは蝸牛上の位置関係を反映していると考えられる。
  - 実線：メル, ●○□：規定膜上の位置

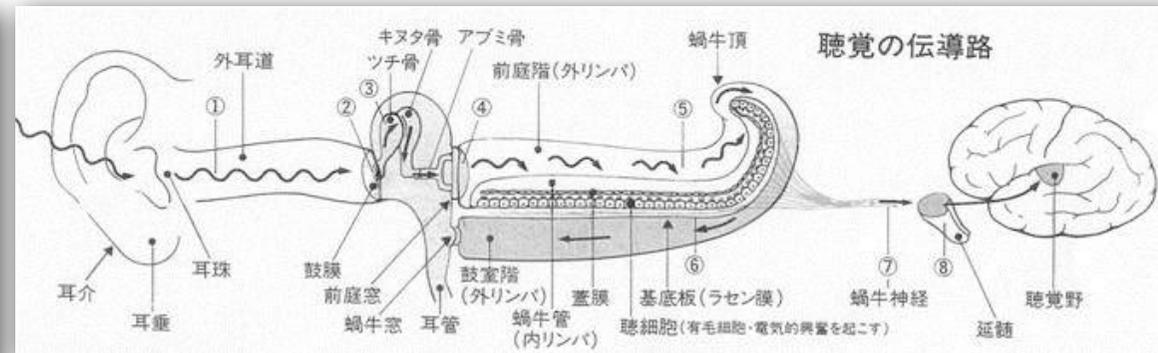
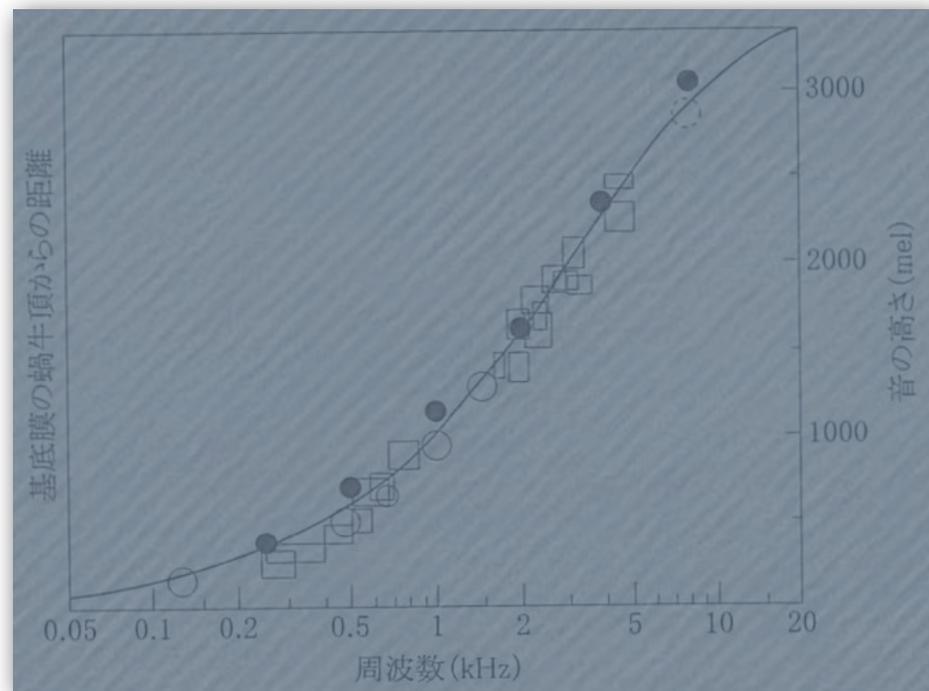


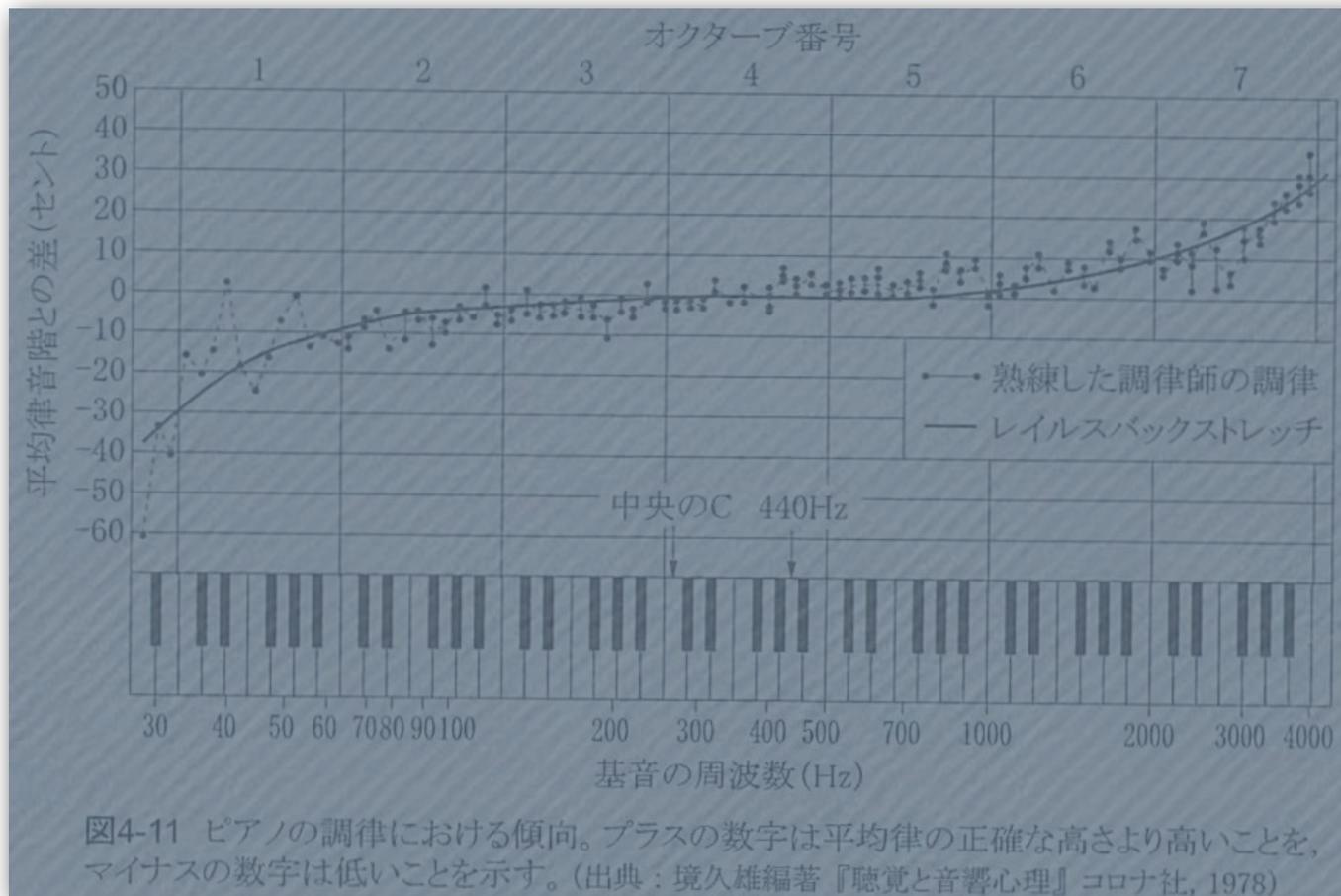
図4-10 周波数に対する音の高さと蝸牛上の位置。プロットされているのは、周波数と基底膜の共振の位置である。実線はmel尺度を示す。(出典：境久雄編著『聴覚と音響心理』コロナ社、1978)

図4-10

# オクターブ≠2倍, じゃない?

## 物理的な2倍と心理的な2倍のずれ

- 音の大きさのように, ずれの大きさは周波数に依存するの?
- 高音や低音において, 心理的2倍 = 物理的2倍より大きな差
- ピアノの調律では高音, 低音部ではオクターブ > 物理的オクターブ



# 短い音に対する高さの知覚

## 短音では音の高さが明確でなくなる

- トーンピッチ：純音としての高さの知覚
- クリックピッチ：純音としては知覚されないが、高低判断は可能
  - 2 msec の音列 (500.0, 562.5, 625.0, 666.7, 750.0 Hz)
  - 6 msec の音列 (500.0, 562.5, 625.0, 666.7, 750.0 Hz)
  - 15 msec の音列 (500.0, 562.5, 625.0, 666.7, 750.0 Hz)

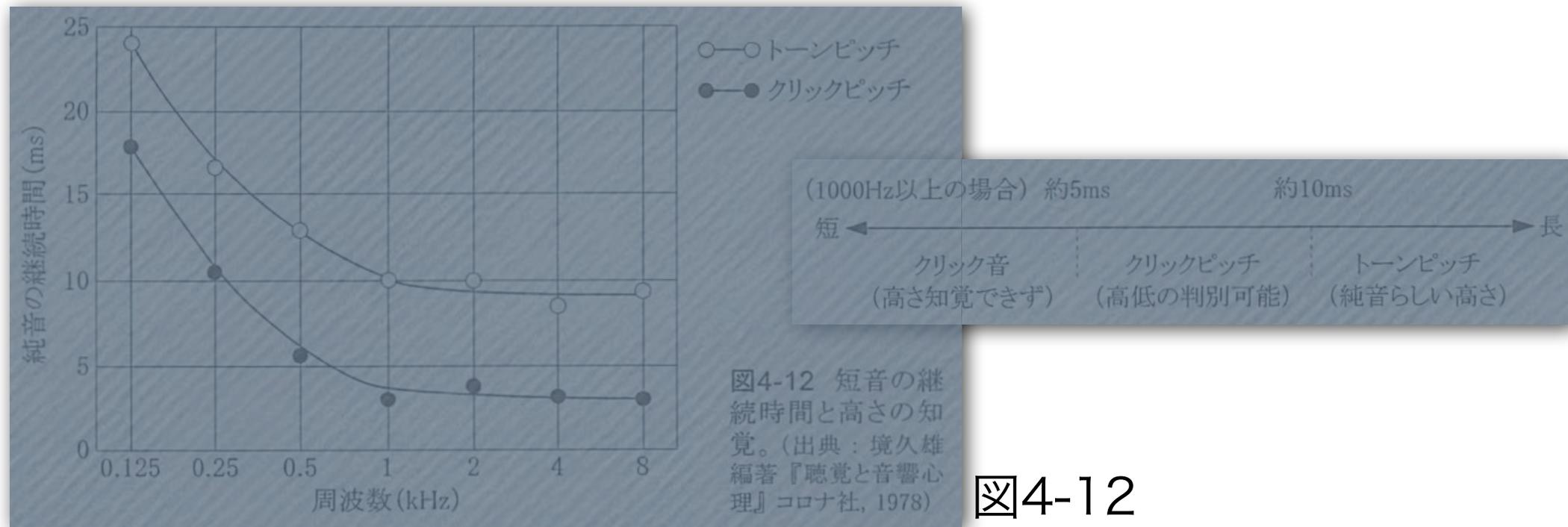


図4-12

# 場所ピッチ (place pitch)

## 基底膜における共振位置の違いがピッチ感覚の違い

- 実際には基底膜での神経発火は広がりを持つ

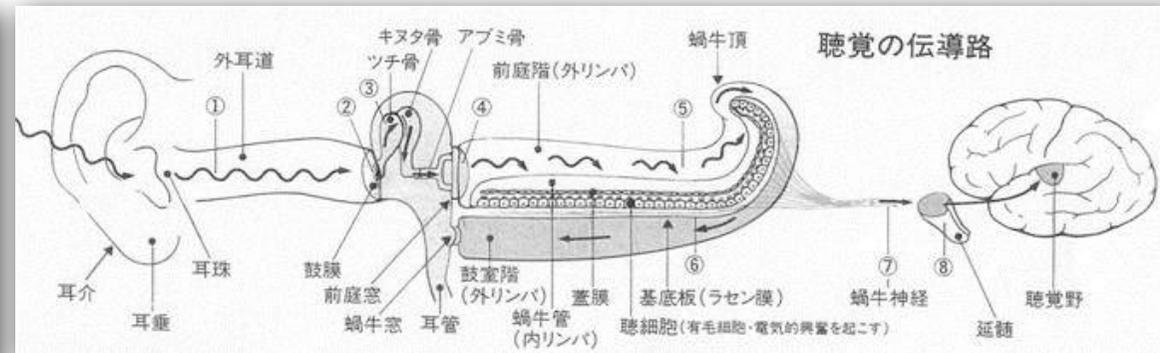
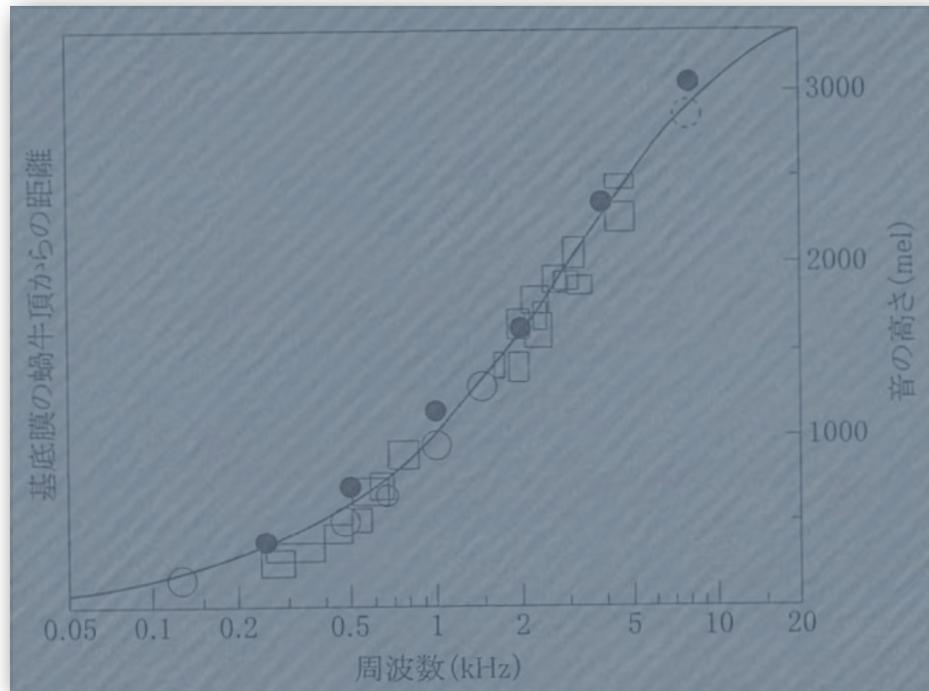


図4-10 周波数に対する音の高さと蝸牛上の位置。プロットされているのは、周波数と基底膜の共振の位置である。実線はmel尺度を示す。(出典：境久雄編著『聴覚と音響心理』コロナ社、1978)

図4-10

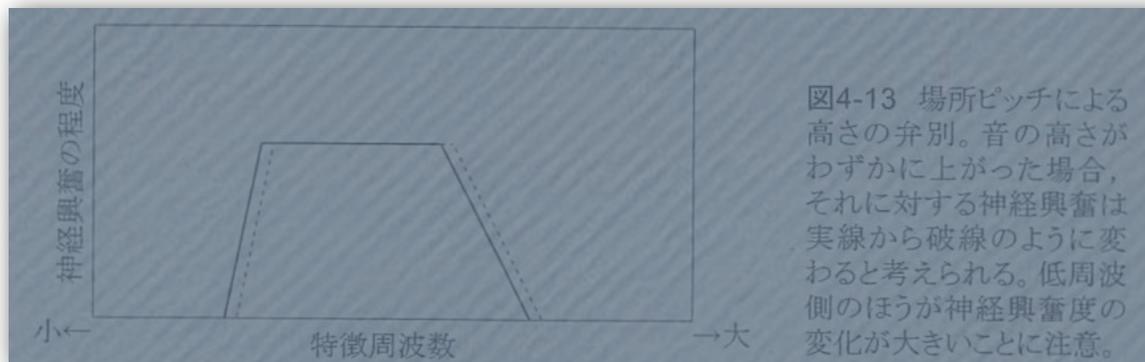


図4-13 場所ピッチによる高さの弁別。音の高さがわずかに上がった場合、それに対する神経興奮は実線から破線のように変わると考えられる。低周波側のほうが神経興奮度の変化が大きいことに注意。

図4-13

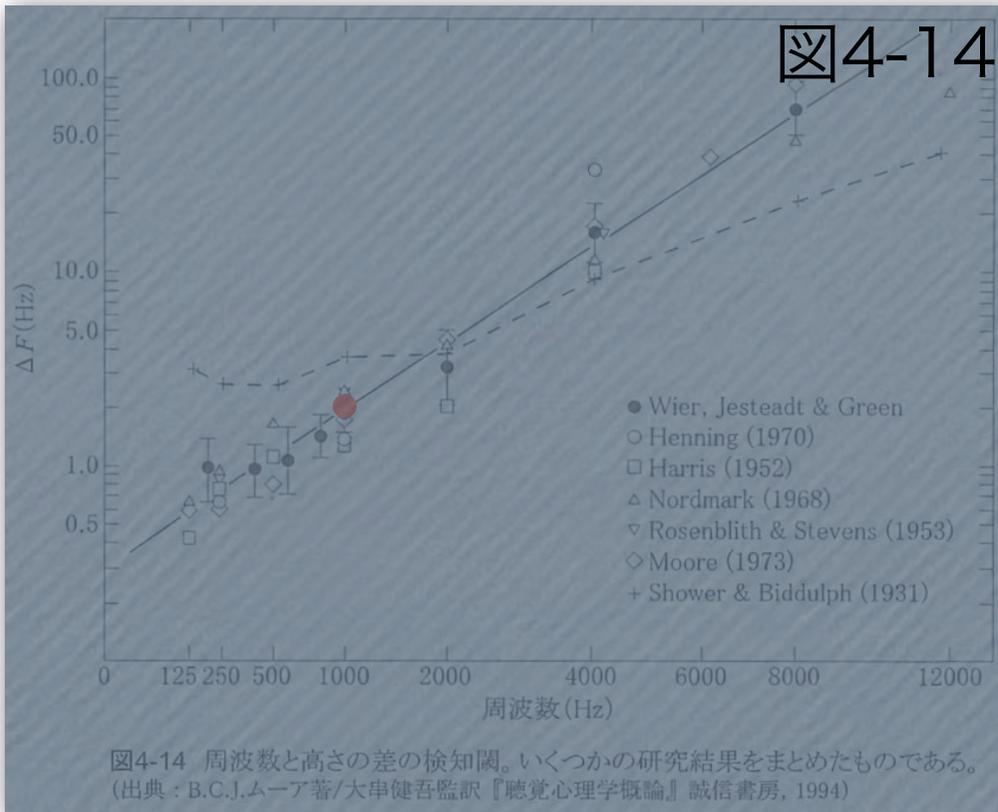
# 高さの検知閾

## 一つの謎

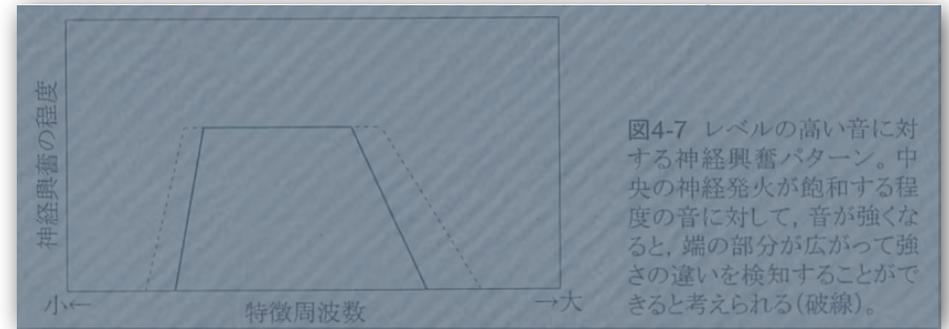
● 音の強さの場合，検知できる変化の比率は約 1 dB

● 音圧比：1.12倍，音の強さ比：1.25倍， $k = 0.25$  (25%)  $k = \frac{\Delta I}{I}$

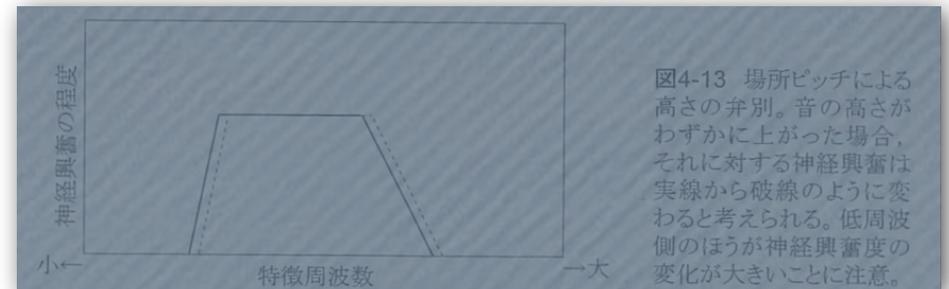
● 音の高さの場合，検知できる変化の比率は 0.2 % (!!)



● 音の強さに対して



● 音の高さに対して



● 場所ピッチ以外にピッチを感じる機構がある？

# 時間ピッチ (temporal pitch)

## 場所ピッチ

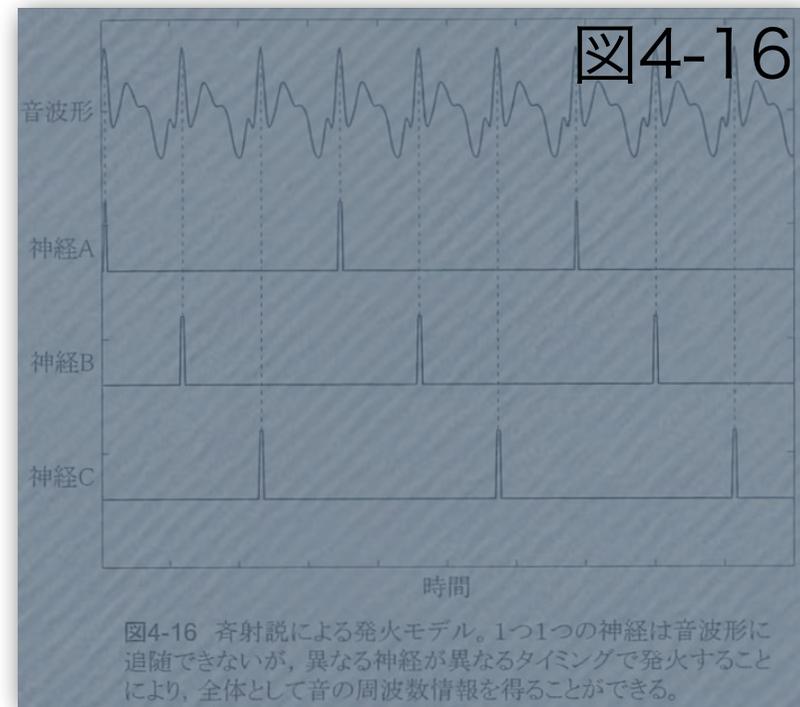
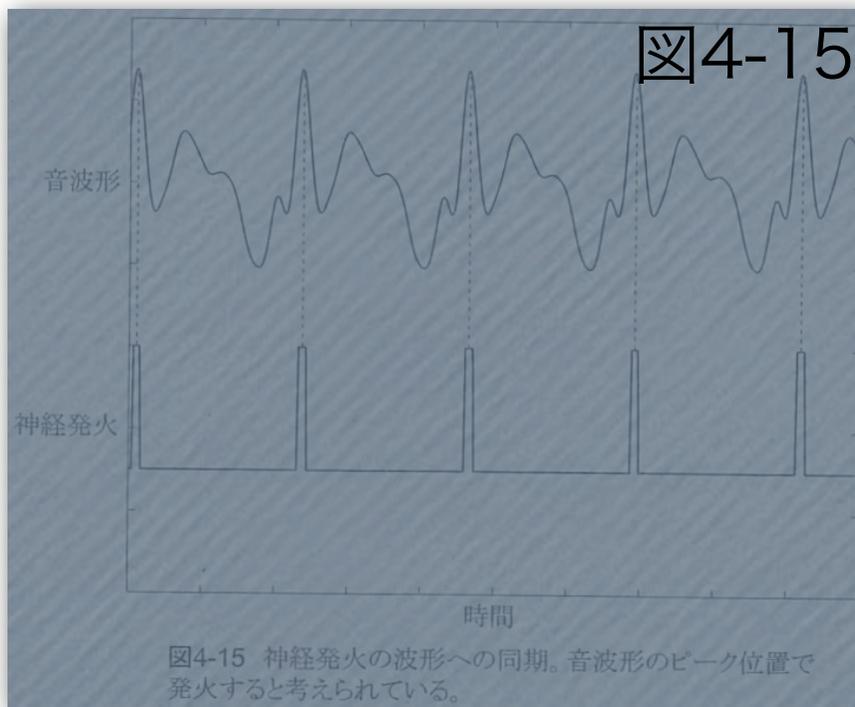
● 強さ知覚同様，大雑把な知覚とならざるを得ないはず。

## 波形のピーク出現頻度を数える機構を仮定

● 1秒間のピーク出現回数を直接中枢に送られると仮定

● 波形ピークへの同期。しかし神経発火の同期能力  $< 1000\text{Hz}$

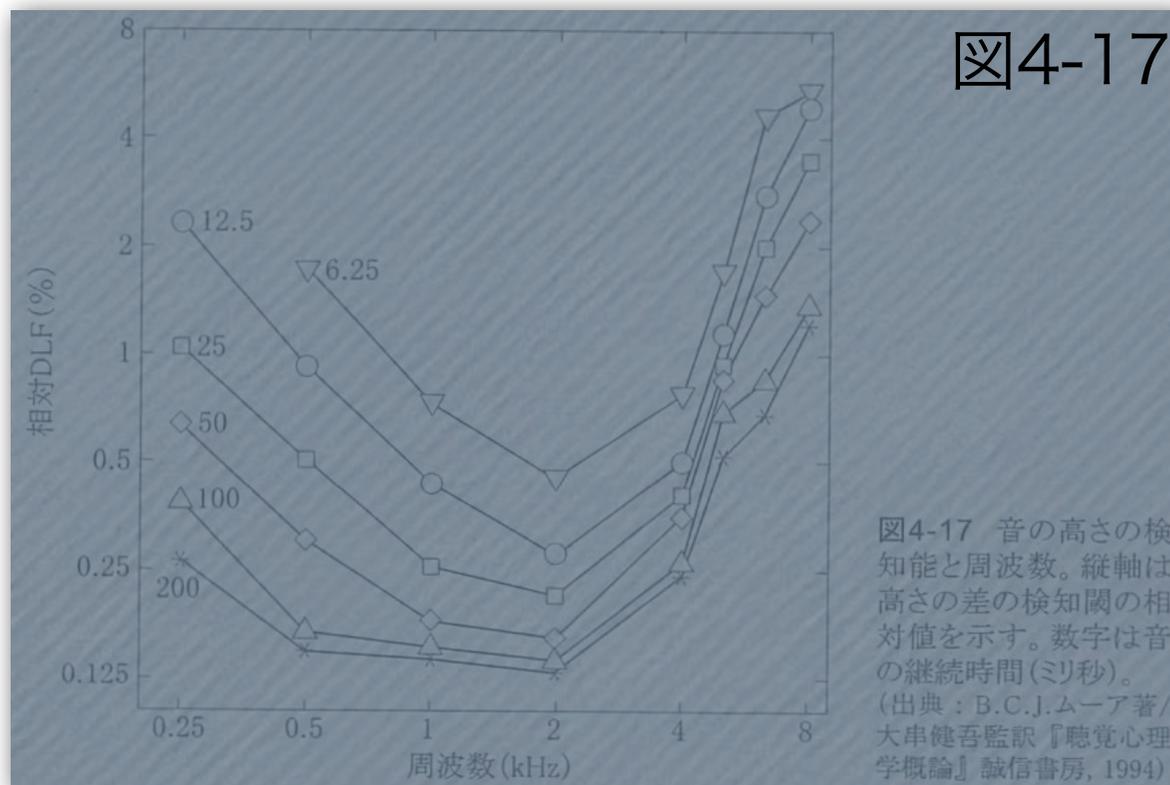
● 4~5000Hzでの同期能力の存在 → 斉射説へ



# 場所ピッチと時間ピッチ

## 両者の機能・棲み分け

- 場所ピッチ：大雑把な高さの感覚を与える。
- 時間ピッチ：詳細な高さの感覚を与える。
- ドかレかミかの感覚は時間，どのオクターブかの感覚は場所
- 位相同期が困難な 5kHz 以上では，メロディーの知覚が困難

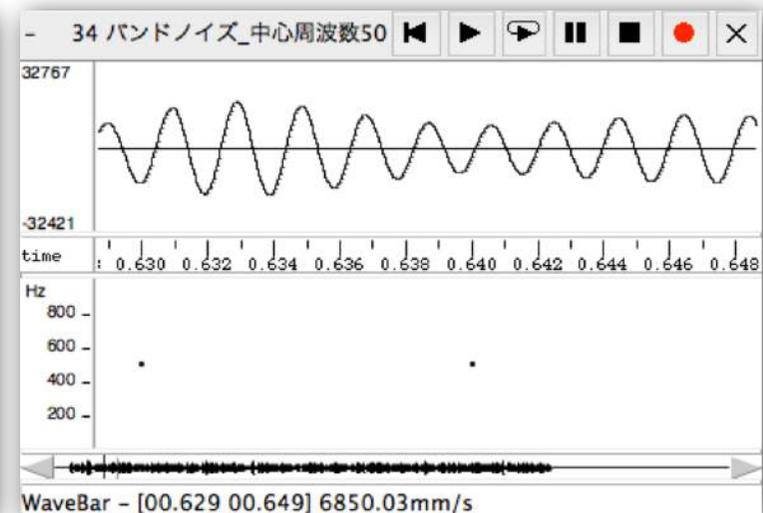
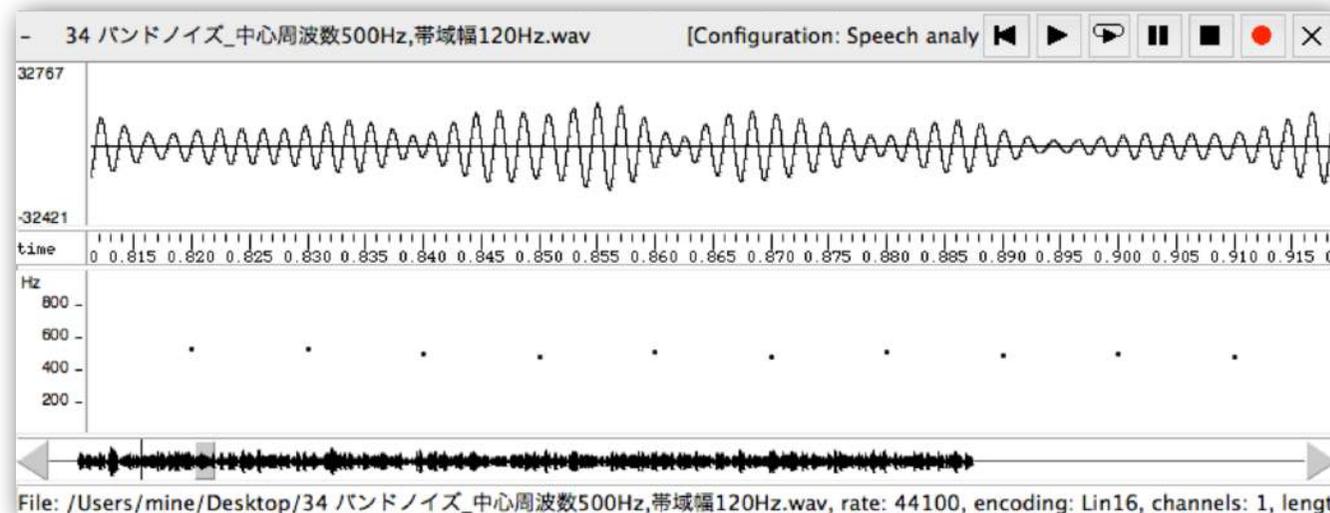


# 場所ピッチと時間ピッチを聞く

## 場所ピッチのみが機能する音

### ● バンドノイズ

- ある周波数帯域におよそ均等にエネルギーが存在する
- 波形を見ると、**明確な周期波形が存在しない**
  - 中心周波数 2000 Hz, 帯域幅 $\pm 150$  Hz
  - 中心周波数 1000 Hz, 帯域幅 $\pm 100$  Hz
  - 中心周波数 500 Hz, 帯域幅 $\pm 60$  Hz

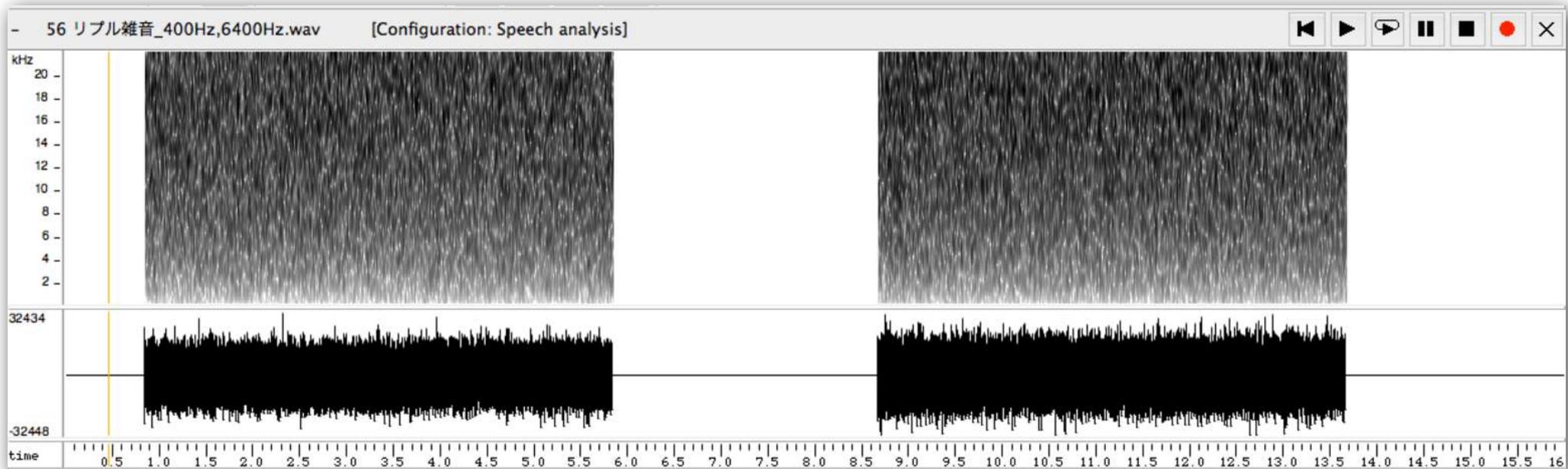


# 場所ピッチと時間ピッチを聞く

## 時間ピッチのみが機能する音

### ● 繰り返しリップルノイズ

- スペクトルが平坦な音（ホワイトノイズ）を時間軸でずらしつつ重畳
- 強引に繰り返し構造を作る。
- スペクトル平坦（低）→スペクトル平坦（高）



# 複合音の高さの知覚

## 純音から複合音（倍音構造を持つ音）へ

- 一本の線スペクトル → 櫛状の線スペクトル群へ
  - 線スペクトル群の音に対して、複数の高さの音であるとは感じない。
  - 「周期波形に対する時間ピッチ」による高さ知覚
  - しかし、複数個の高さを感じる人もいる。
- 線スペクトル群から基本音成分を除外するとどうなる？
  - その場合でも、基本音成分に相当する高さを感じる
    - バーチャルピッチ
    - Missing fundamental
  - 倍音構造を有する音@200Hz
  - 基本音・2倍音を削除した音

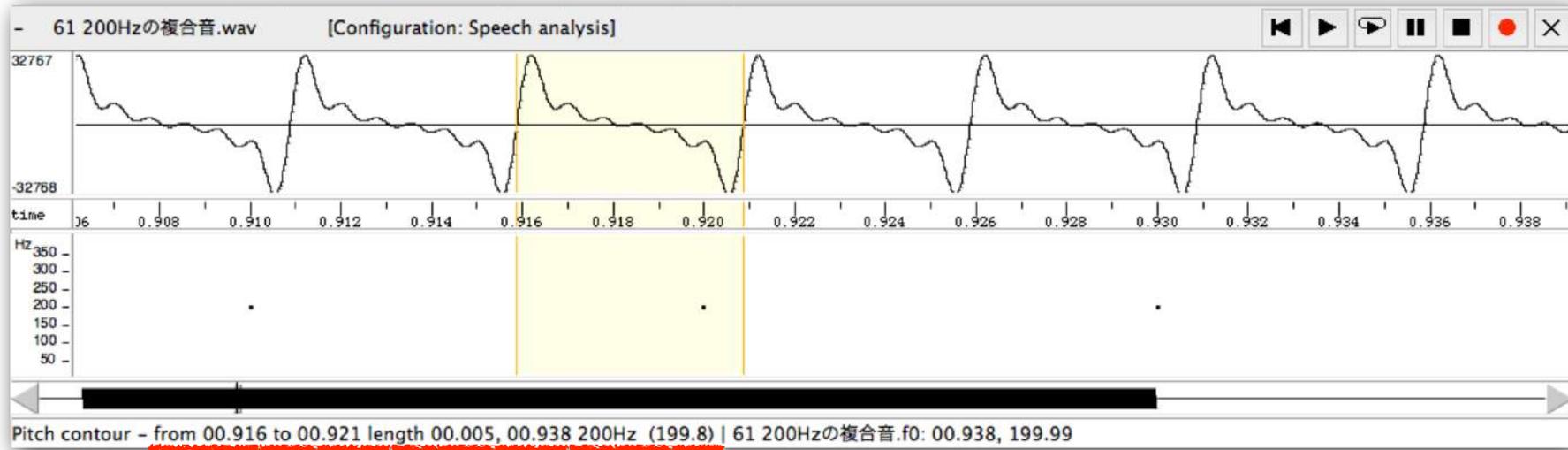


図3-14 短音のスペクトル(周期的複合音の場合)。

# 複合音の高さの知覚

## 二種類の音を波形を通して眺めると

### ● 倍音構造を有する音@200Hz



### ● 基本音・2倍音を削除した音

