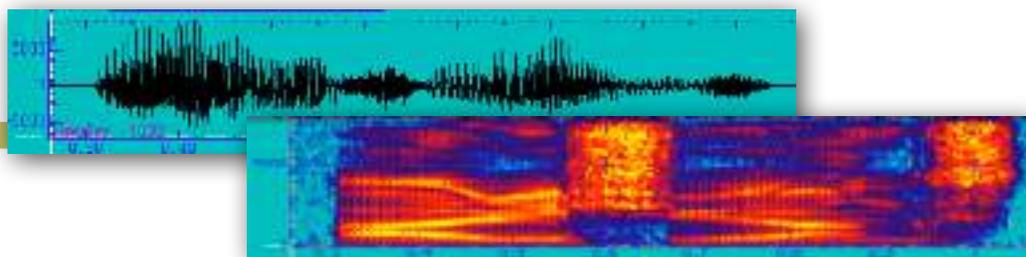


人文社会系研究科基礎文化研究専攻言語学専門分野

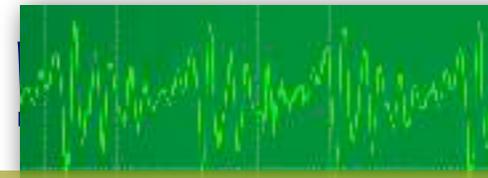
音響音声学

(Topics in Acoustic Phonetics)



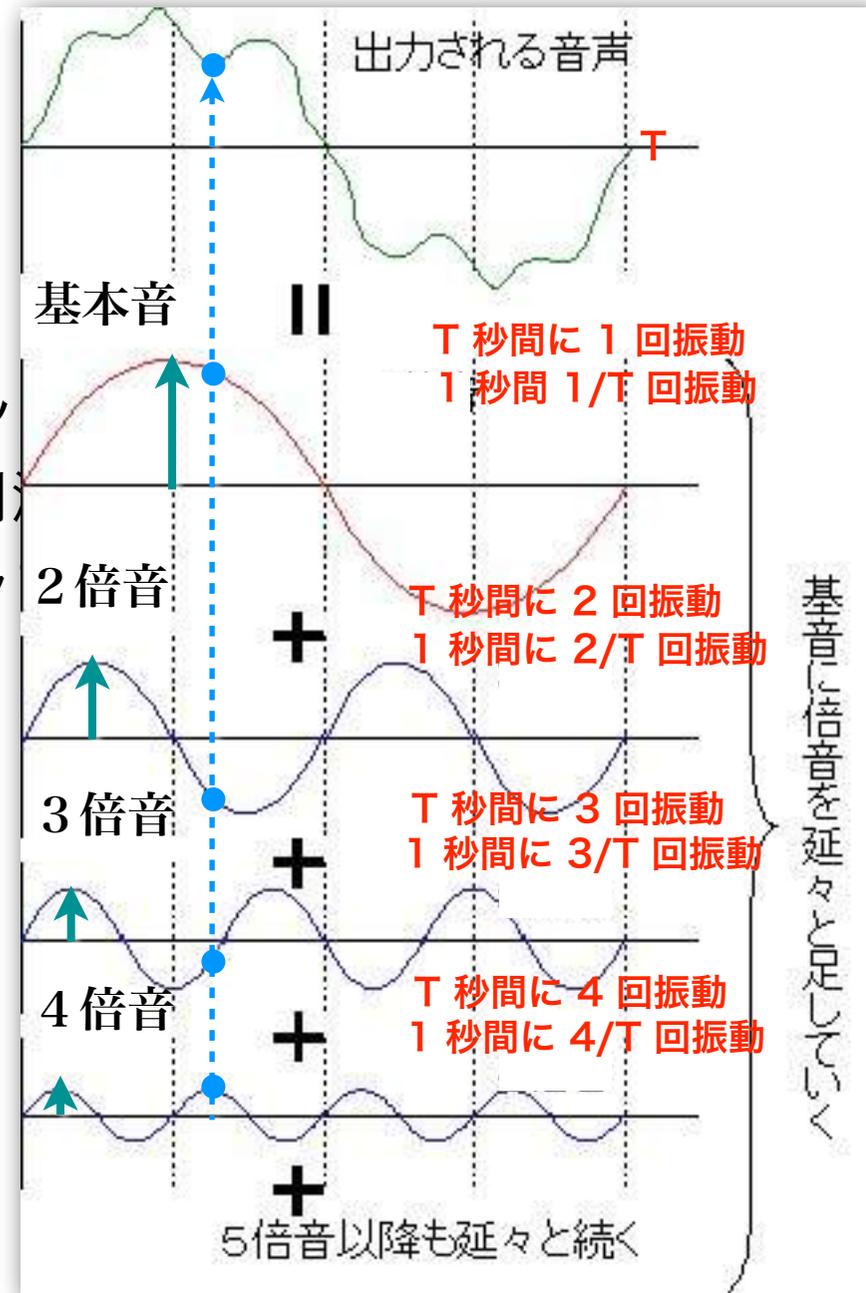
峯松 信明

工学系研究科電気系工学専攻



基本音とその倍音の足合わせ

- 波 = 基本音 + 2倍音 + 3倍音 + ...
- n倍音：n倍の周波数のサイン波形
- 周波数：振動回数/秒 [Hz]
- 波 = これらを適切な強さにして足し
- どの周波数のサイン波は強く、どの周波数
- 横軸を周波数、縦軸を強度としてグラ
- 通知表だってスペクトル!?



$1/T$ [Hz]



うなり (beat, p.23)

定義

- 周波数がわずかに異なる純音を同時に鳴らすと音が大きく／小さくなる現状が周期的に繰り返されること。
- 440 Hz ・ 440.5 Hz ・ 442 Hz ・ 450 Hz の純音
- 440 Hz の純音 + 442 Hz の純音
- 440 Hz の純音 + 440.5 Hz の純音
- 440 Hz の純音 + 450 Hz の純音
- うなりの周波数 (うなり回数／秒) : $f = |f_1 - f_2|$

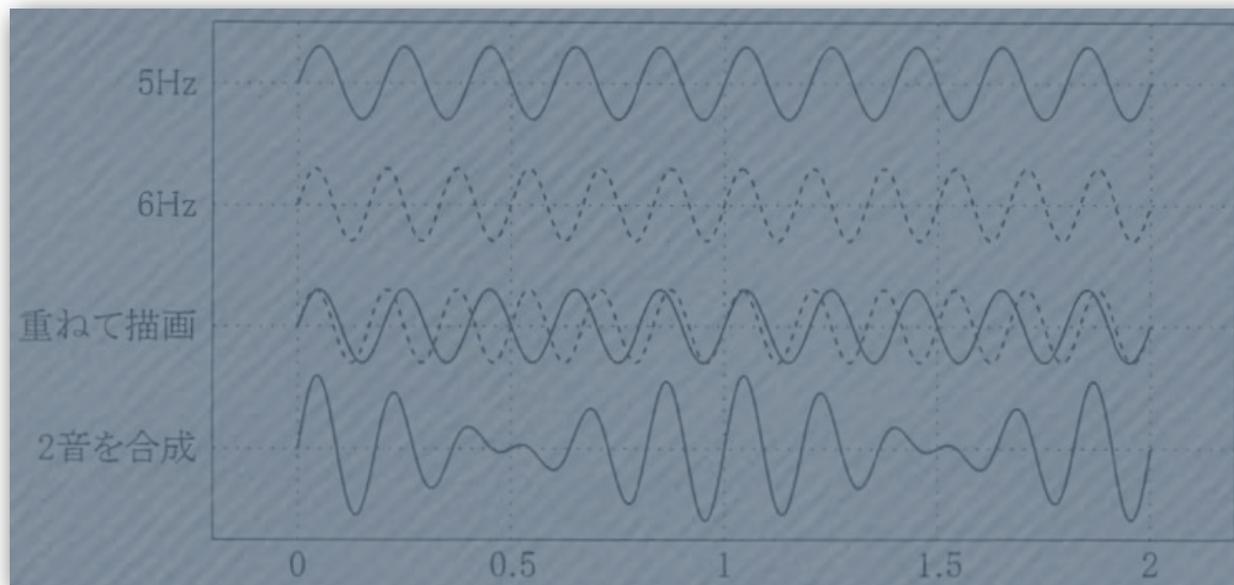
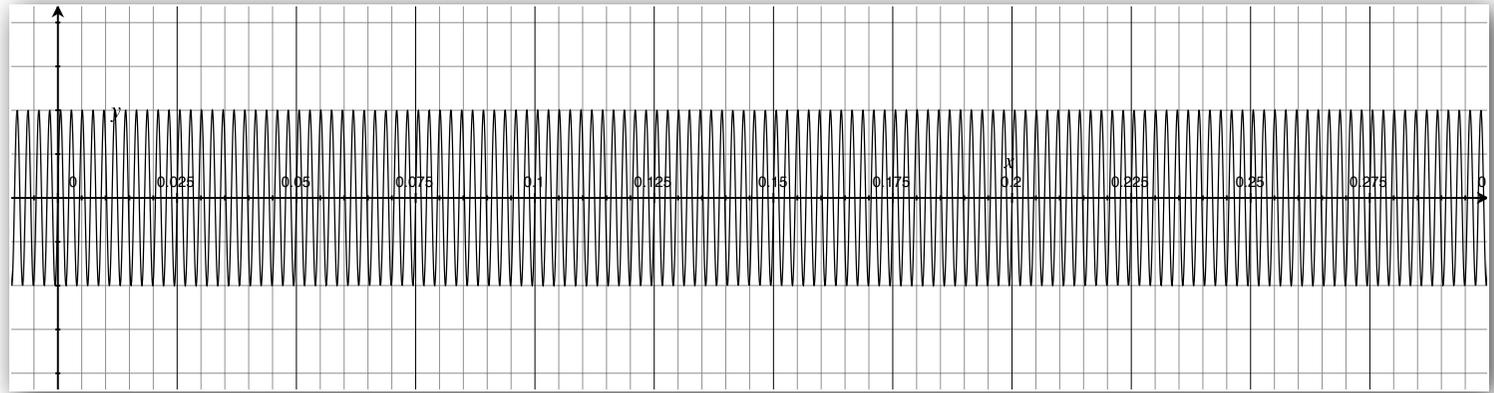


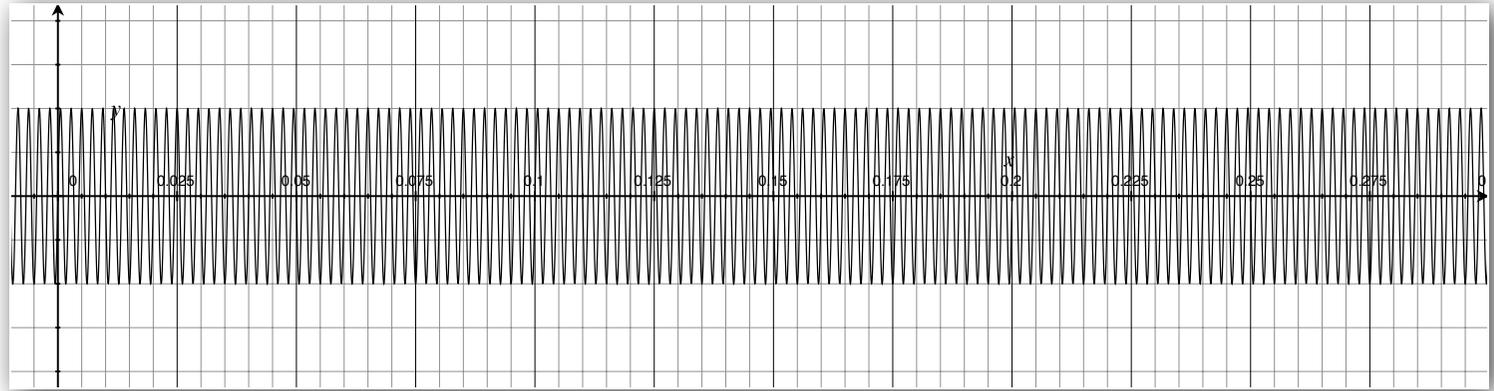
図1-15

実際の例

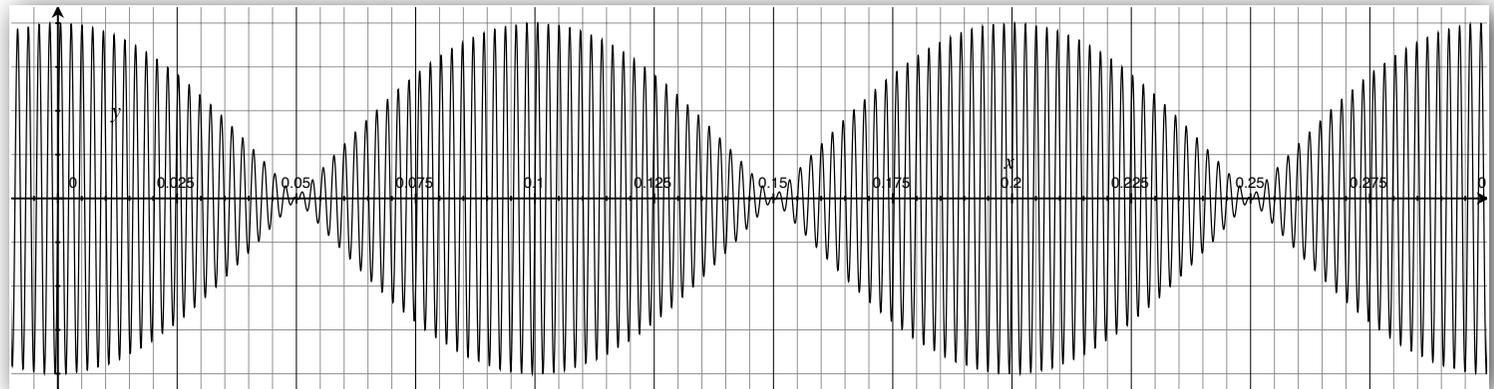
440 Hzのみ



450 Hzのみ



両方



何故， うなるのか？

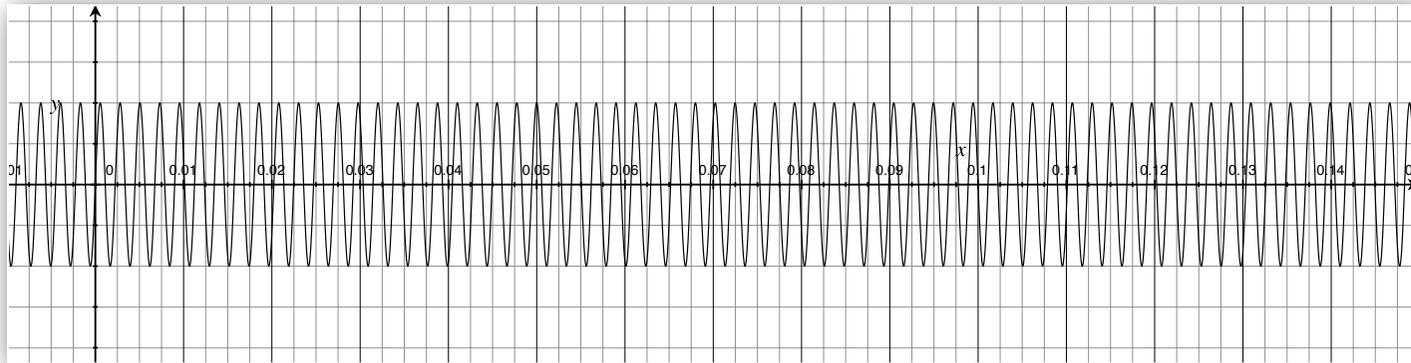
三角関数の公式が雄弁に語ります。

$$\bullet \sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$\bullet a \sin(2\pi f_1 t) + a \sin(2\pi f_2 t) = 2a \cos \left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t \right) \sin \left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t \right)$$

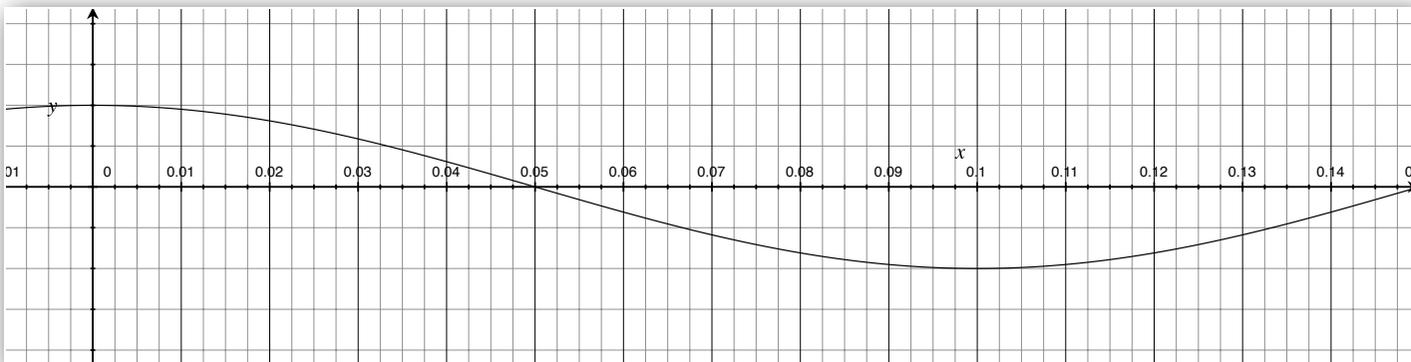
$$\sin \left(2\pi \frac{440+450}{2} t \right)$$

$$\sin(\omega t) = \sin(2\pi f t)$$



$$\cos \left(2\pi \frac{440-450}{2} t \right)$$

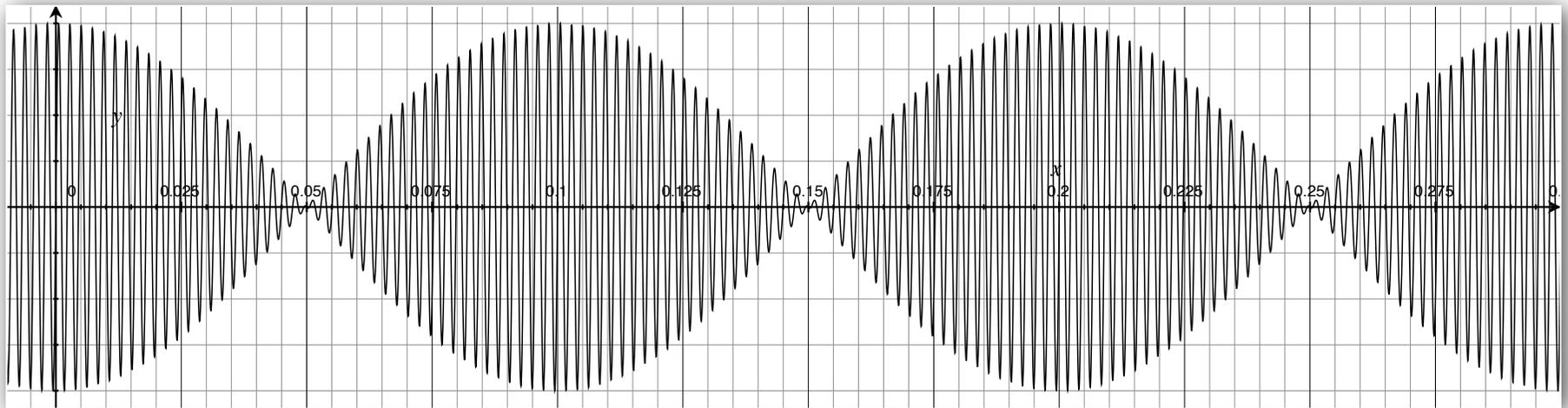
$$\cos(\omega t) = \cos(2\pi f t)$$



一点, 注意事項

うなりの周波数 (回数/秒) って?

- うなりの周波数 (うなり回数/秒) : $f = |f_1 - f_2|$
- $a \sin(2\pi f_1 t) + a \sin(2\pi f_2 t) = 2a \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right)$
- うなりの回数なのか?
- うなりを生む \cos 項の周波数なのか?





音で対数と言えば・・・オクターブ



1オクターブの音高変化 = x [Hz] \rightarrow $2x$ [Hz]



C \rightarrow C# \rightarrow D \rightarrow D# \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow F# \rightarrow G \rightarrow G# \rightarrow A \rightarrow A# \rightarrow B \rightarrow C

$\times 1.059$

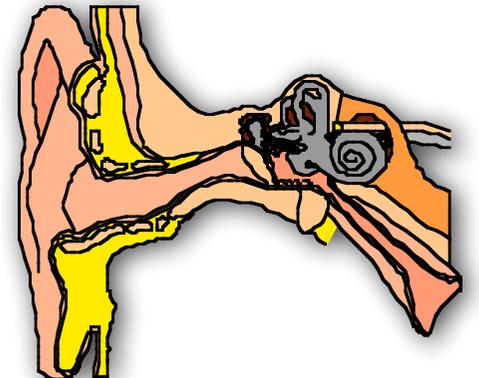
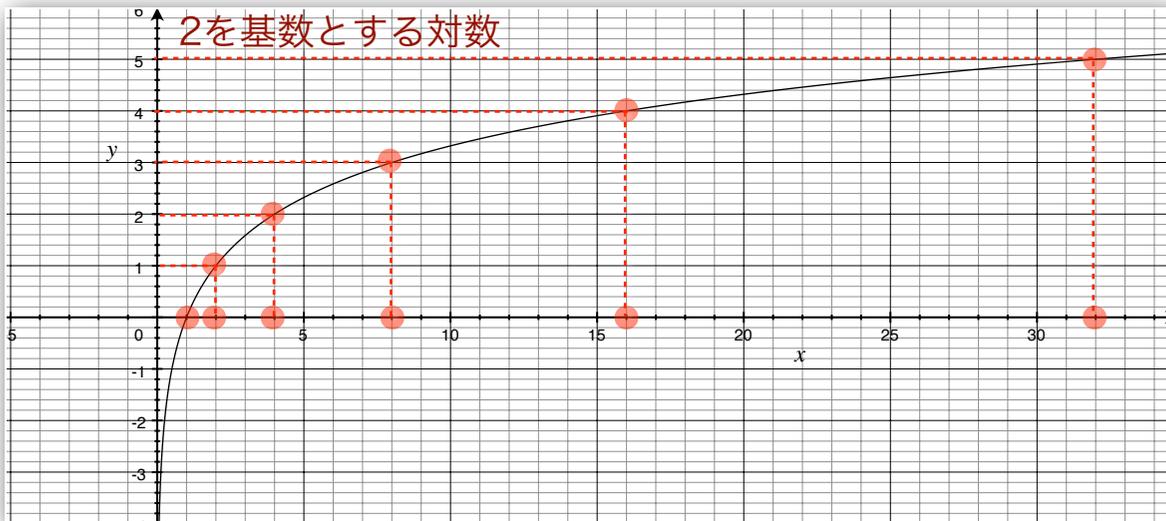
$\times 1.059$

$\times 1.059$

$\times 1.059$

$\times 2.0$

$1.059 = 2^{\frac{1}{12}}$



ちゃんと計算してみましよう

ぴったり n 倍なんかにはならない

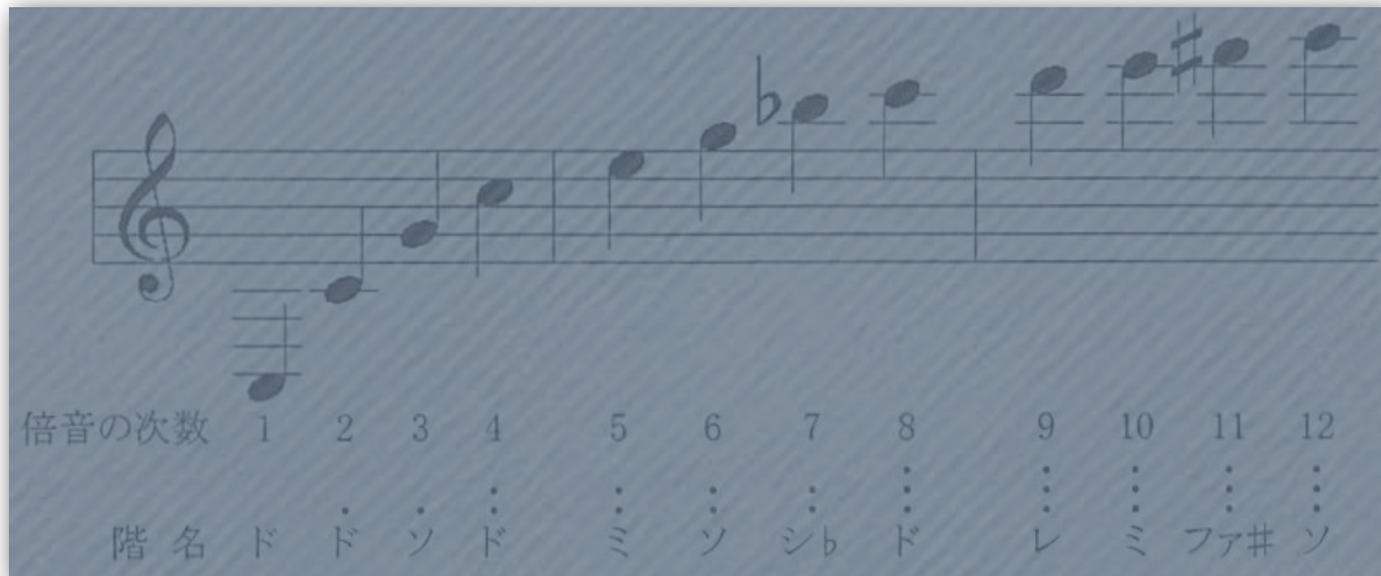


図1-12

$$2^{\frac{19}{12}} = 2.9966$$

$$2^{\frac{24}{12}} = 4.0000$$

$$2^{\frac{28}{12}} = 5.0397$$

和音と不協和音

● 同時に呈示された二音が心地よく響く（溶け合う）条件は？

● 二音の周波数比が簡単な整数比であること

● ド : ド = 1 : 2

● ド : ミ : ソ = 4 : 5 : 6

平均律

1 オクターブを12等分して半音とした音階

- 全・全・半・全・全・全・半 (=12半音)
 - 半音の音高差 (音高比) = $2^{\frac{1}{12}}$
- C音を主音 (=ド) とした場合 (C-major)



図1-14

- どの白鍵・黒鍵を主音としても，全全半全全全半は弾ける。
 - 移調や転調しても，ちゃんと弾ける。
- あるキーと別のキーとの厳密な周波数比は整数でなくなる。

純正律

主音 (=ド) との周波数比が単純な整数比となる音階

- 純正律の一例 (ド : x = n : m)

階名	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ	ド
周波数の比率	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

図1-13

- 任意の二音が混ざりやすい。溶けやすい。
- **でも、連続する二音の音高差 (比) は一定でなくなる。**
- レの音を主音 (=ド) として純正律を構成してみる
 - 上記の鍵盤は使えなくなる。
 - ハ長調, ト長調など調別に異なる鍵盤が必要。
 - パイプオルガンの例
- 純正律のドミソと平均律のドミソ
 - その違いが分るか？



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

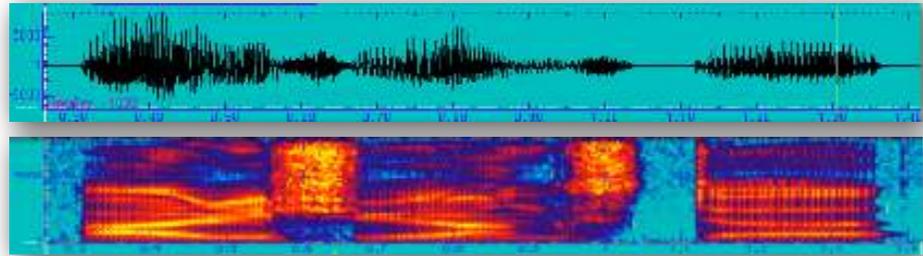
- 大きい音, 小さい音

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

音の大きさに行く前に

二種類の波 ～縦波と横波～

- 波 = (局所的な) 物質の振動が、周りの物質へと伝わる現象
- 物質の振動方向と波が伝わる進行方向
 - 水面の波
 - 水粒子の振動方向は上下 / 波として伝わる進行方向は水平
 - 物質の振動方向 \perp 波の進行方向 \rightarrow 横波
 - 音声
 - 空気の振動方向は前後 (水平) / 波として伝わる進行方向も水平
 - 物質の振動方向 = 波の進行方向 \rightarrow 縦波 (= 粗密波 = 圧力波)
- <http://www.hayakawayukio.jp/school/eq/earthquake2.html>

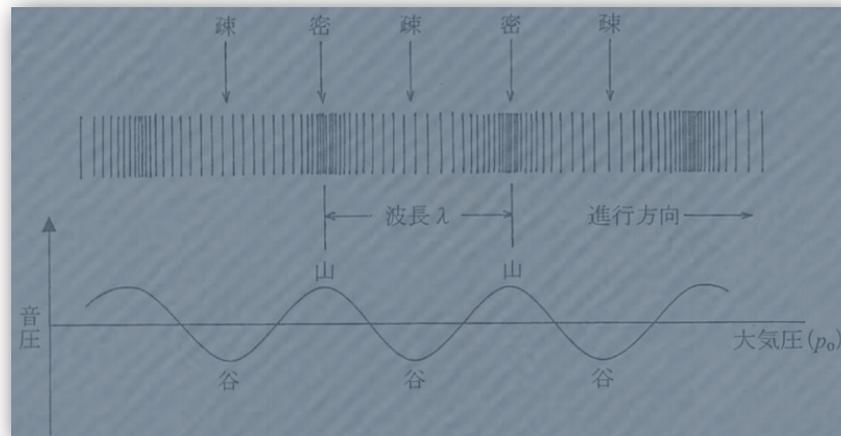


図1-5

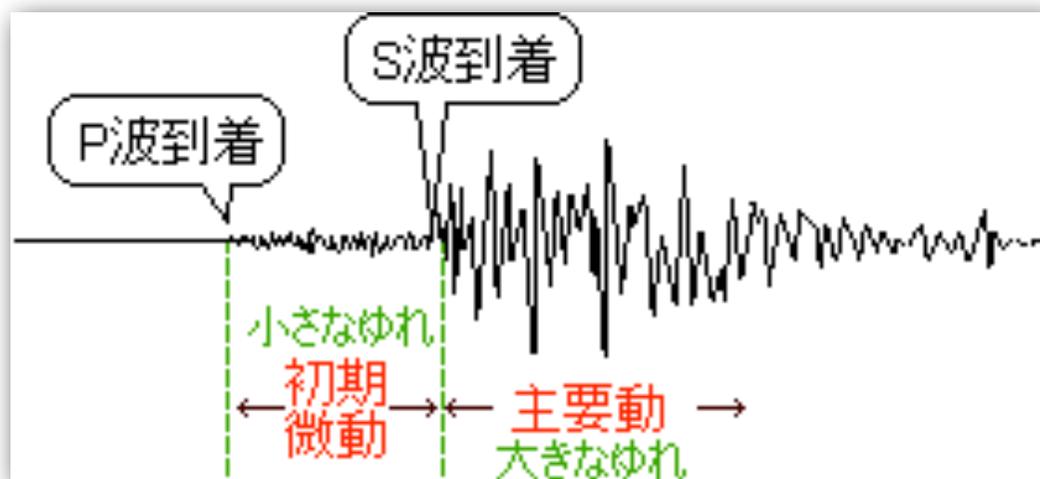
P波とS波

地震波の第一波 (Primary wave) : P波

- これは縦波
- 秒速 6 km ~ 7 km

地震波の第二波 (Secondary wave) : S波

- これは横波
- 秒速 3.5 km
- 結局, P波, S波両方同時に発生するが, S波の方が進行速度が遅いので, 遅く到達する。



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

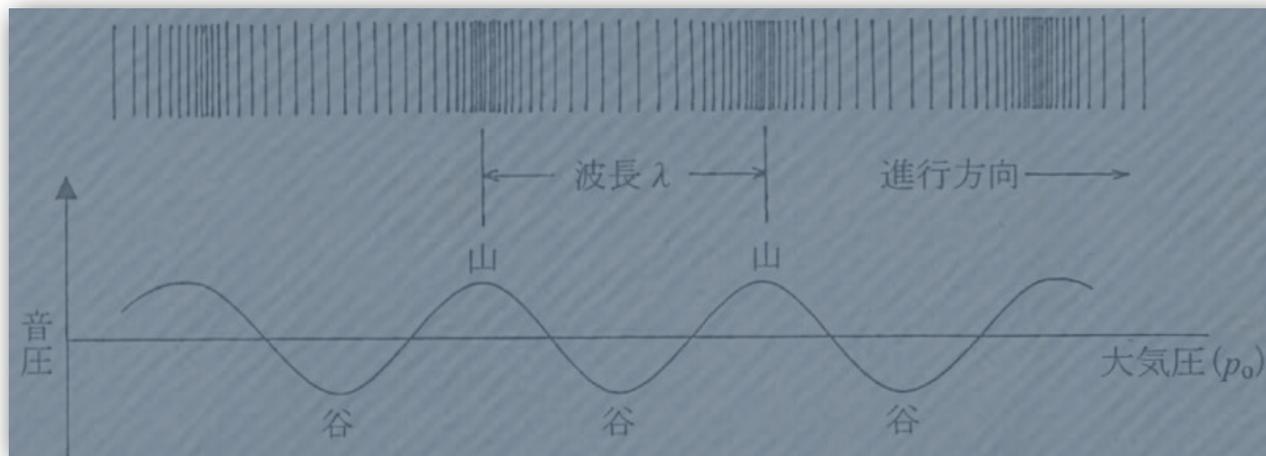


図1-5

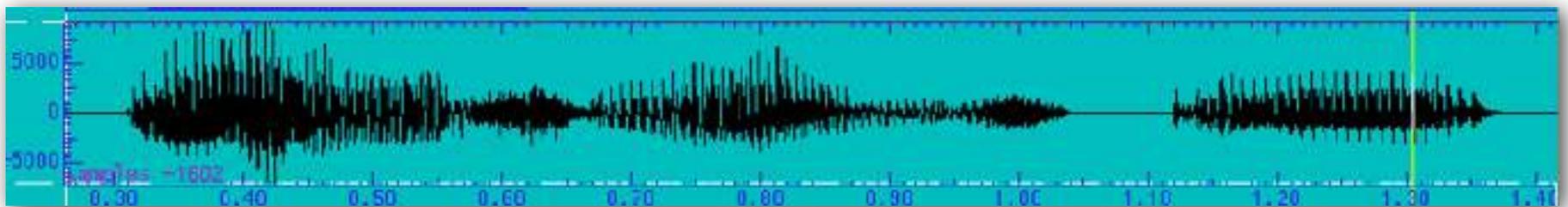
音圧と大気圧

デフォルトでかかる空気の圧力=大気圧

- 大気圏中の空気粒子と地球の重量が作る，空気粒子による圧力

音を作る圧力，音圧とは？

- デフォルトでかかる気圧（大気圧）からの局所的なずれ
 - 大気圧よりより高くなる，より低くなるの繰り返し
 - この局所的な気圧のずれ=音圧（Sound Pressure）
- 音声波形の縦軸は実は音圧



音圧を定量的に扱う

音圧は圧力的一种 → Pa

- 単位はパスカル [Pa]
- $1 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [N/m}^2\text{]}$
 - 1m^2 あたり 1N (ニュートン, 約102g重) の力がかかる
 - $F=ma=mg = 0.102 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 1.0$

大気圧による力・人間が聞ける最も弱い音による力

- 大気圧 = 約1000 hPa = $1000 \times 100 \text{ Pa} = 100000 \text{ N/m}^2$
- $\sim 10200\text{kg重/m}^2 = 10.2\text{t重/m}^2$
 - 人間の表面積は約 1m^2 → 体全体で10.2t重の力がかかっている。
- 最も弱い音 = $20 \mu\text{Pa} = 20 \times 0.000001 \text{ Pa} = 0.00002\text{N/m}^2$
- $\sim 0.002\text{g重/m}^2$
 - もし鼓膜が 1m^2 あるとすると, $0.002\text{g重} = \text{砂糖一粒よりも軽い力}$
- $10\text{t重の力を受けながら, } 0.002\text{g重の変動を感覚できる聴覚}$
- http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0040f/contents/high/ear_02/index02.html

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
- = 比例定数 × 音圧² = 音圧² / [空気の密度 × 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

強さ, 音圧, dB

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

- 10dBの変化で, 音の強さが10倍になる。
- 20dBの変化で, 音圧が10倍 (強さは100倍) になる。

● dB の変化を実際に聞いてみる

- 10dB ずつ音を弱くする。
- 5dB ずつ音を弱くする。
- 3dB ずつ音を弱くする。
- 1dB ずつ音を弱くする。

ベルをもう少し詳しく

ベル＝基準値の何倍か？

- 与えられた音の強さ I ，基準となる音の強さ I_0

- $$B = \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

- $$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

- 与えられた音圧 P ，基準となる音圧 P_0

- $$B = \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 2 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

- $$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

- 基準値の取り方によって，デシベル表示は複数存在。

- dB SPL, dB HL, dB SL などなど

- ベルやデシベルを，倍率表示のために使うこともしばしば。

- 工学的には，この意味で使うことが多い。

基準値は何？

dB SPL (Sound Pressure Level)

- $20\mu\text{Pa}$ の音圧を基準値としたデシベル
 - $20\mu\text{Pa} =$ 人間が聞ける一番弱い音 (0 dB SPL)
- $P_0 = 20\mu\text{Pa}$ とした時の, $\text{dB SPL} = 20 \log_{10}(P/P_0)$
- dB SPL は音圧比 \rightarrow 音の強さ (物理量) を対数化

同じ dB SPL だけど周波数が異なる音

- 音の大きさ (聞こえ, loudness) は異なる
- 聞こえは dB SPL 以外に周波数にも依存する。

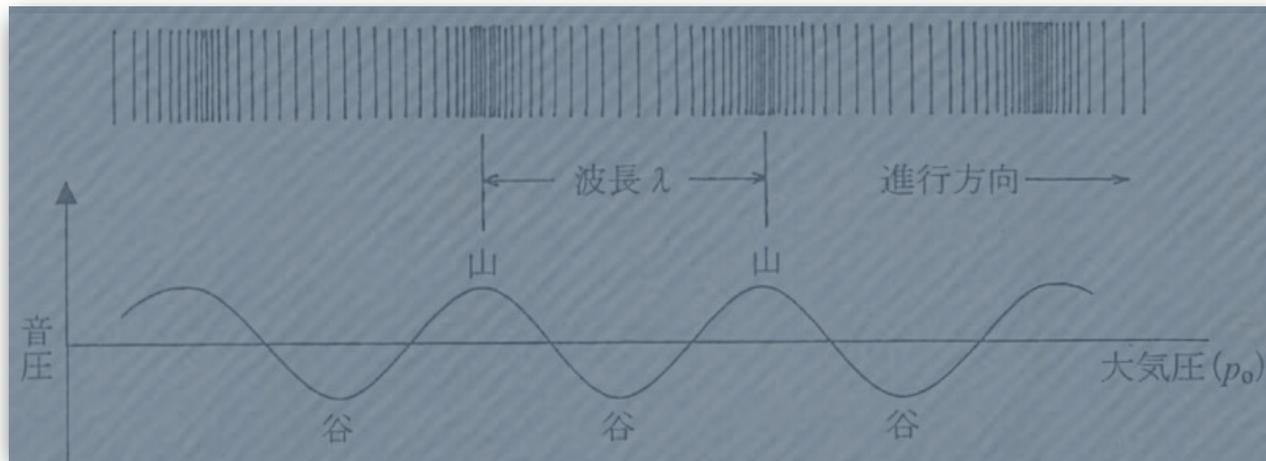


図1-5

物理量から心理量へ

重み付け音圧レベル (A, C, F特性)

- dB SPL に対して周波数帯に基づく重みづけ
- 低域, 高域には鈍感
- 波線は許容範囲
- 普通はA特性を使う
- 騒音に対してはC特性を使うことも

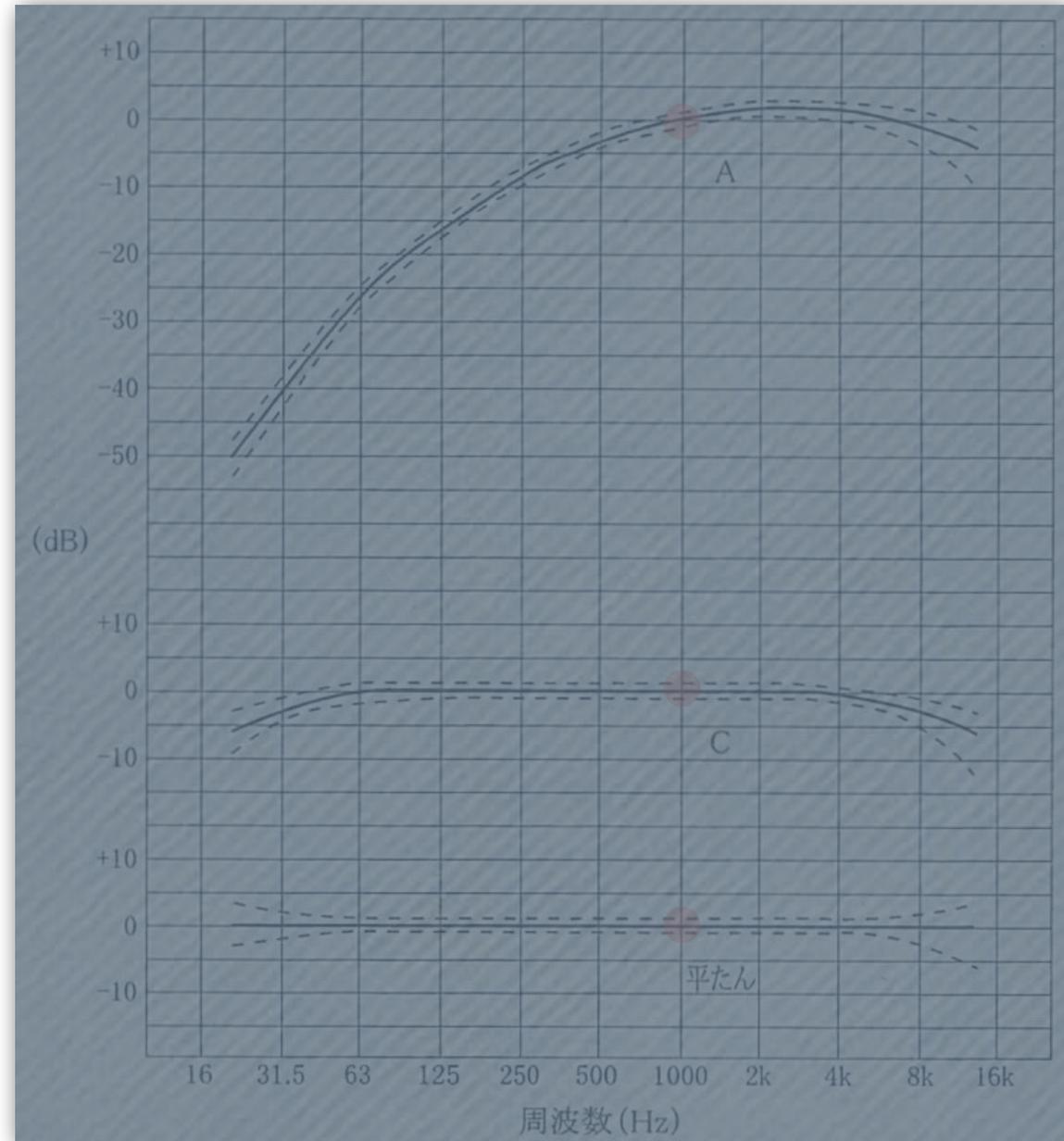


図2-1

聴力レベル, dB HL

健聴者の平均的な聴覚閾値を基準値に

- 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
 - threshold of hearing
- 当然, 周波数にも依存する。
 - 各周波数に対する聴覚閾値 (dB SPL)

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

表2-4

- AD-02, AD-06：ヘッドホン使用時（後者は難聴者用）
- ISO226, ISO389-7：スピーカ使用時
- 上記を基準値とした dB 表示 → dB HL (Hearing Level)

聴力レベル, dB HL

二種類の使われ方

- 各周波数毎に定義された閾値を基準値として、音圧を示す。
 - 「～dB HLの音です」
- 被験者の聴覚閾値（聴力）を健聴者平均と比較して示す。
 - 「～さんの聴力は～dB HLです」

平均聴力レベル

- 被験者の聴力を一つの数値で表現したい。
 - 各周波数の聴力を平均するのではなく、下記式で算出。
 - 平均聴力レベル = { [500HzのdBHL] + 2 [1000HzのdBHL] + [2000HzのdBHL] } / 4

感覚レベル, dB SL

特定の被験者に対して定義される基準値を利用

- dB SPLの基準値 = $20 \mu\text{PA}$
- dB HLの基準値 = 健聴者の平均的な聴覚閾値
- ある被験者の聴覚閾値を基準値としたdB = dB SL
 - SL = Sensation Level
 - 被験者依存, 周波数依存
 - ある音がその被験者にとってどれくらいの大きさに聞こえているのか

フォン (phon)

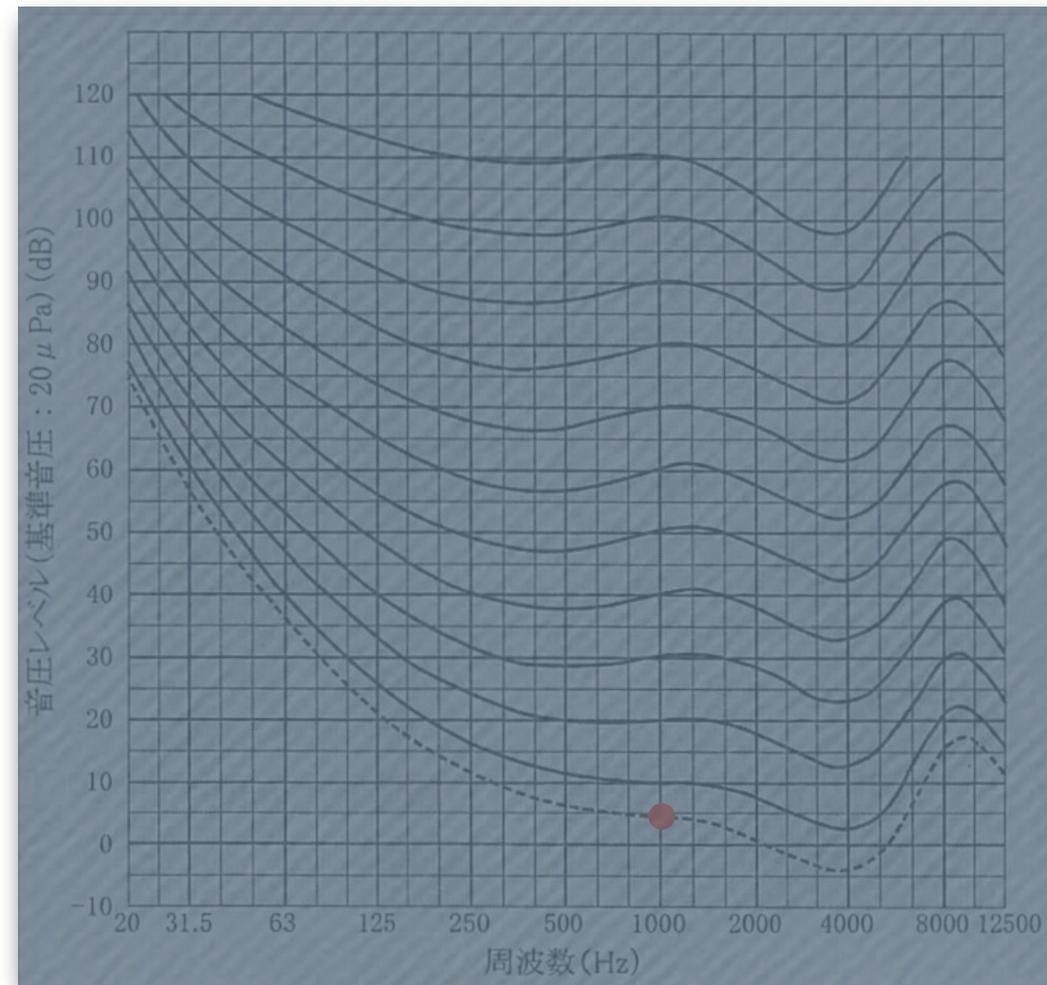
音の大きさの周波数依存性

- 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



A特性と等感曲線

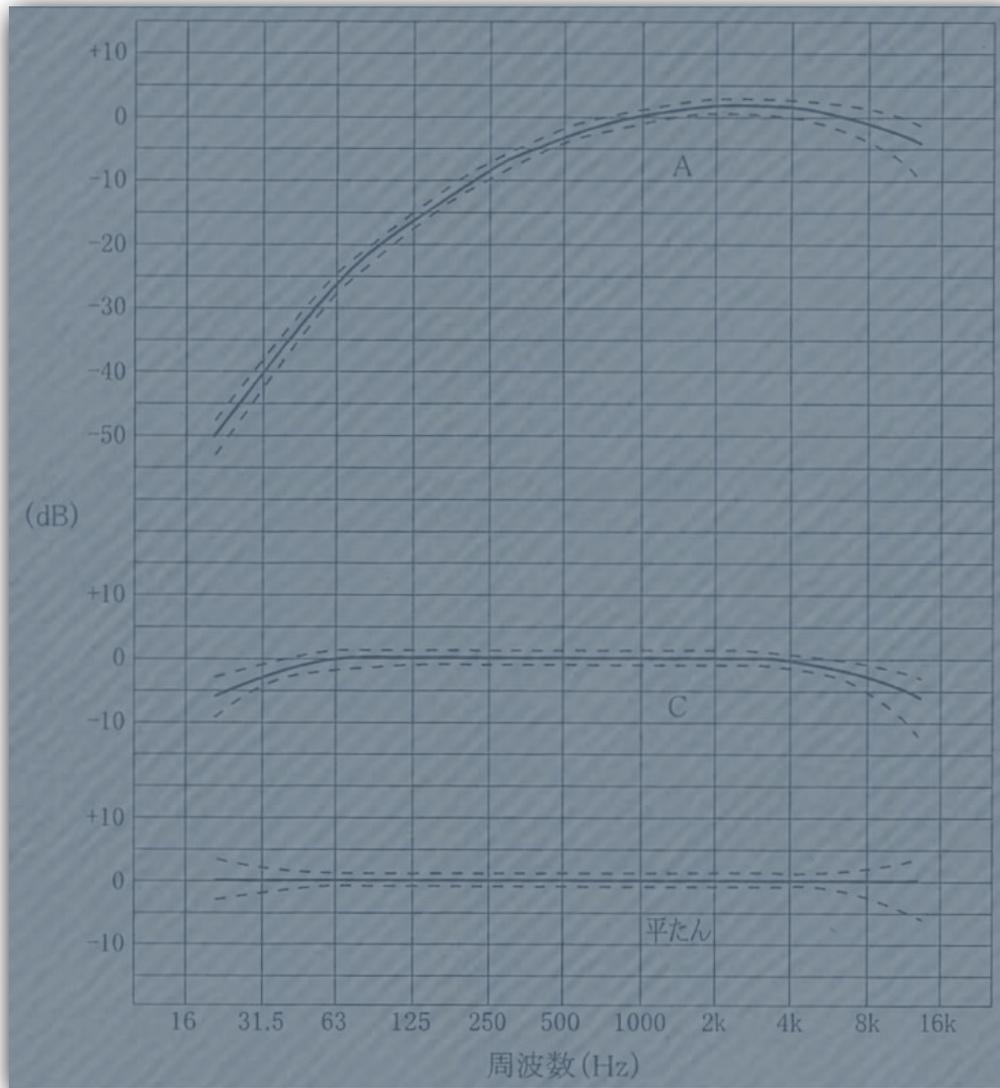


図2-1

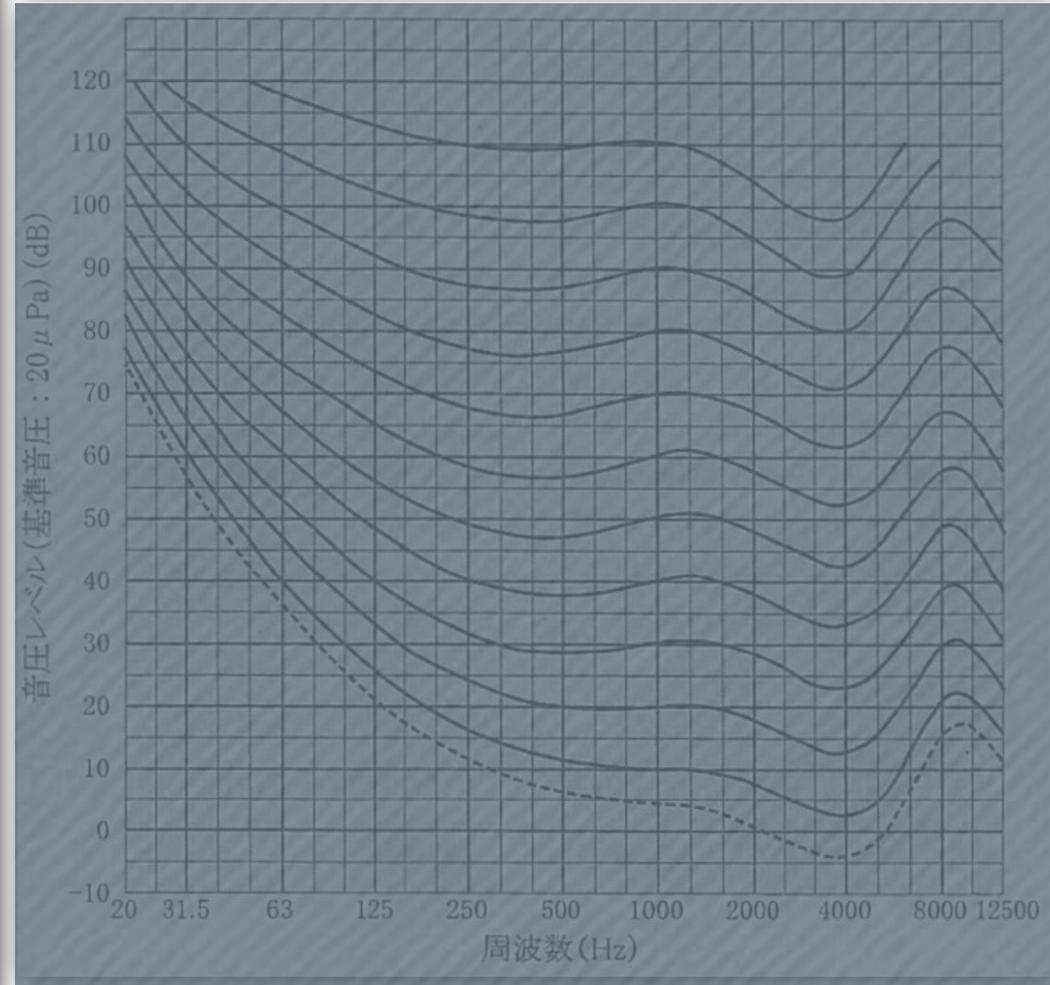
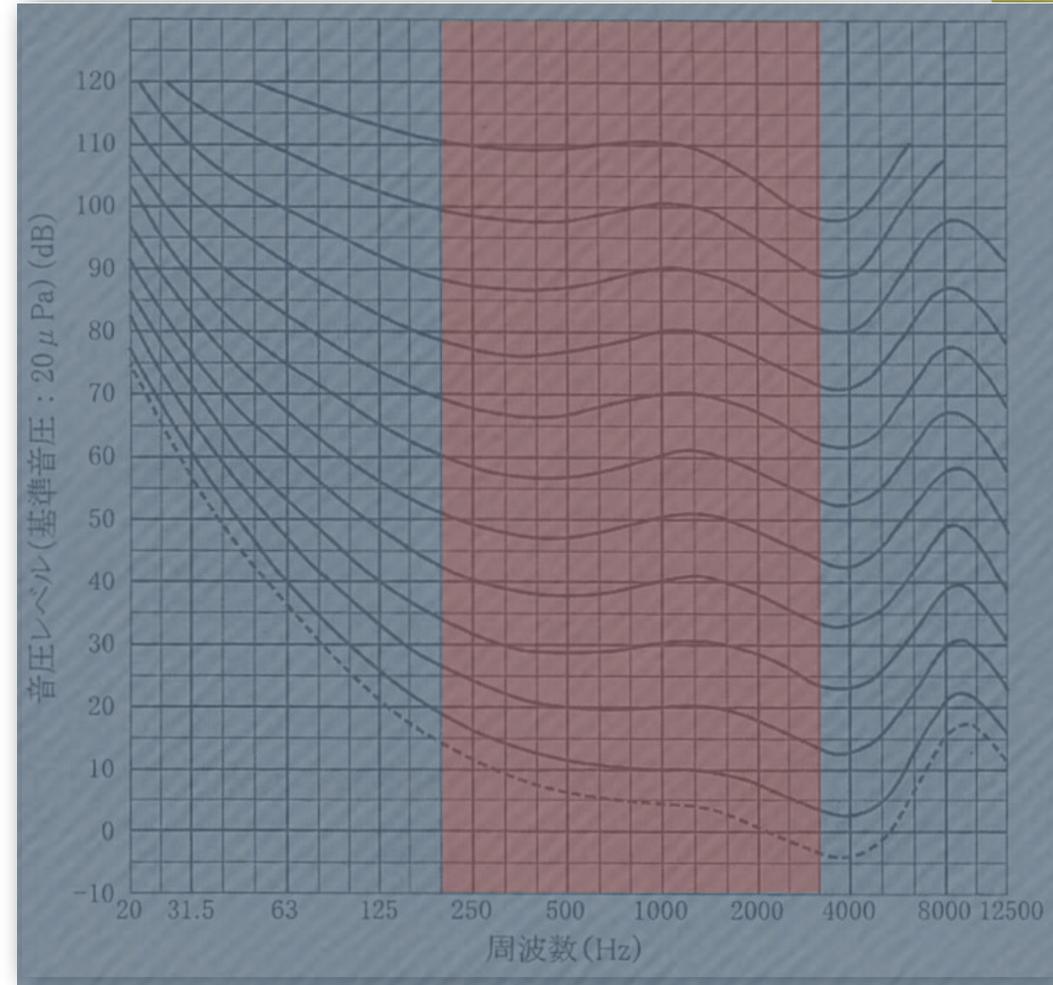
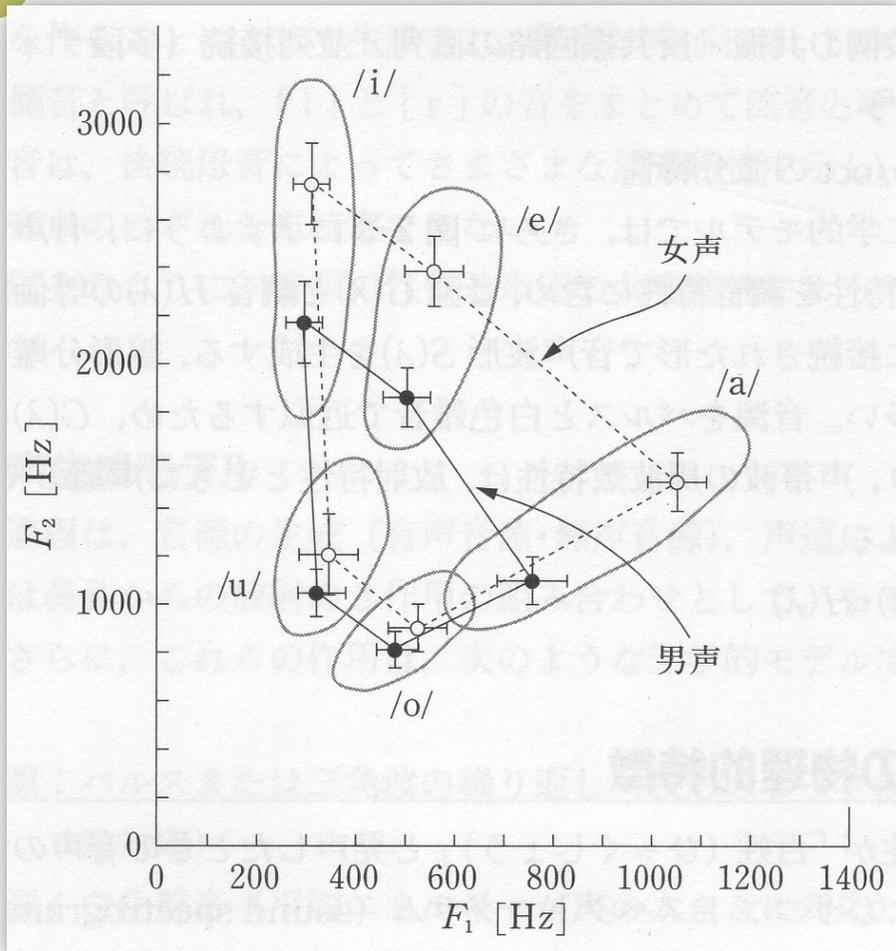


図2-2

フォルマント周波数と等感曲線



4000Hz付近の谷は何？

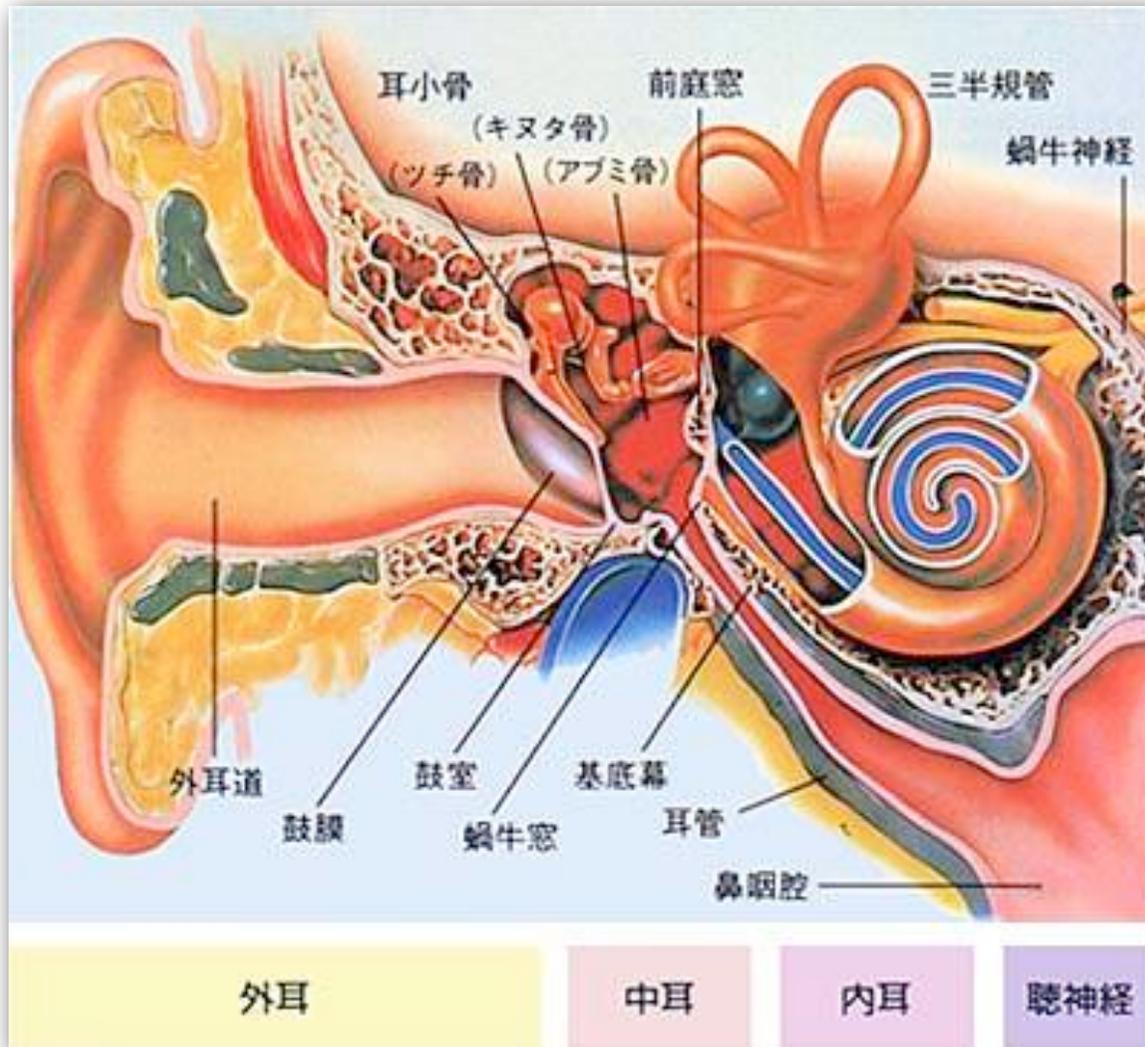
- 発声から聴取に至るプロセスで声道以外の管の存在
- 管の存在 = ある周波数領域にエネルギーが集中

図2-2

鼓膜に届くために通る管

外耳道という管も当然共振特性を持つ

- 外耳道による共振周波数 = 3000~4000 Hz



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

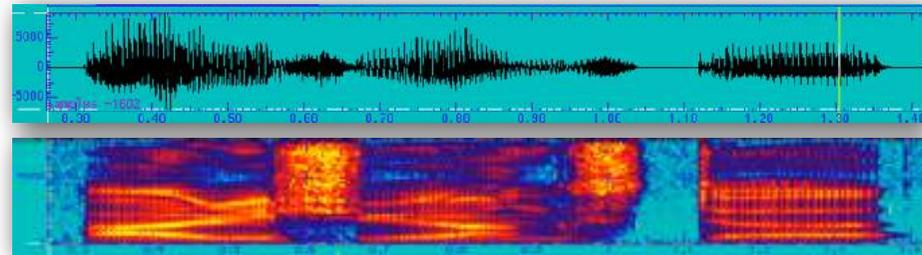
- 大きい音, 小さい音

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