

音とは何か？

空気など音を伝える媒質の振動

※気体や流体中では疎密波（縦波）。

固体伝搬音は横波成分も有り

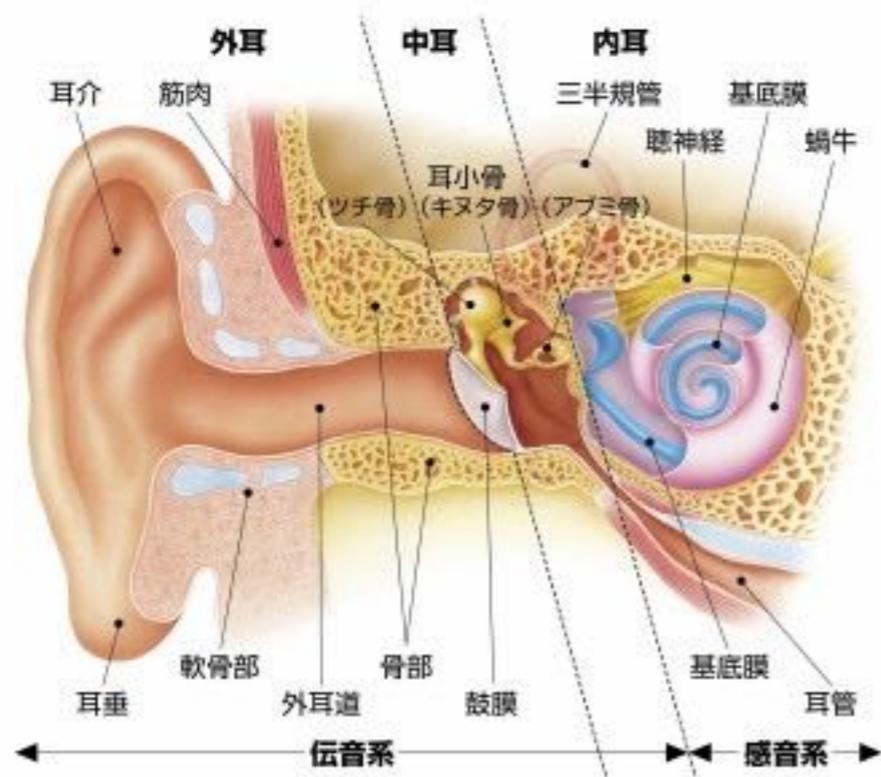
人間に聞こえる音

可聴範囲

20 ~ 20kHz ※年を取ると高音聞こえなくなる

可聴域より高い周波数のものが超音波

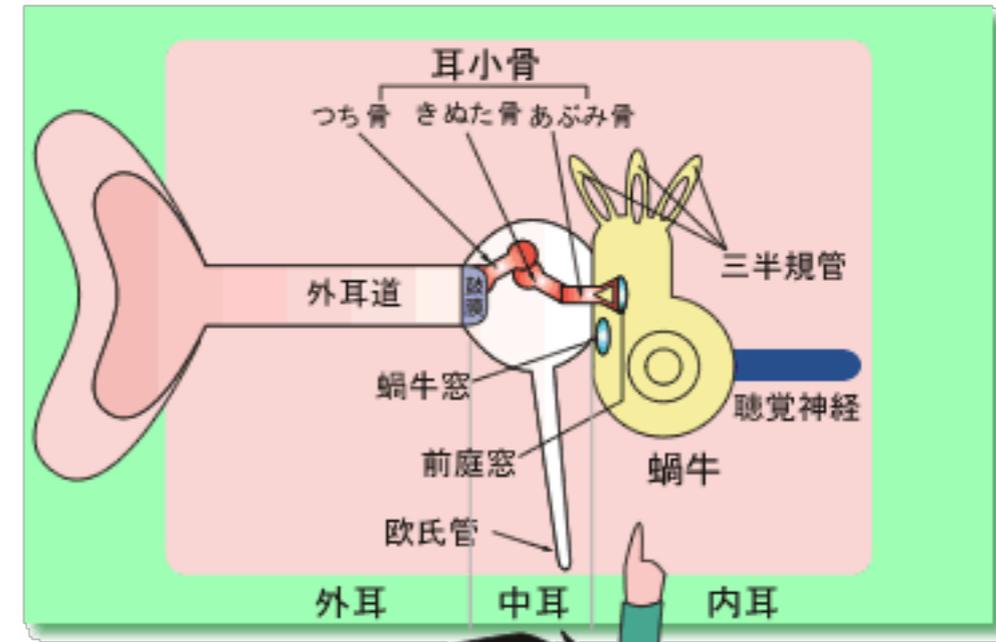
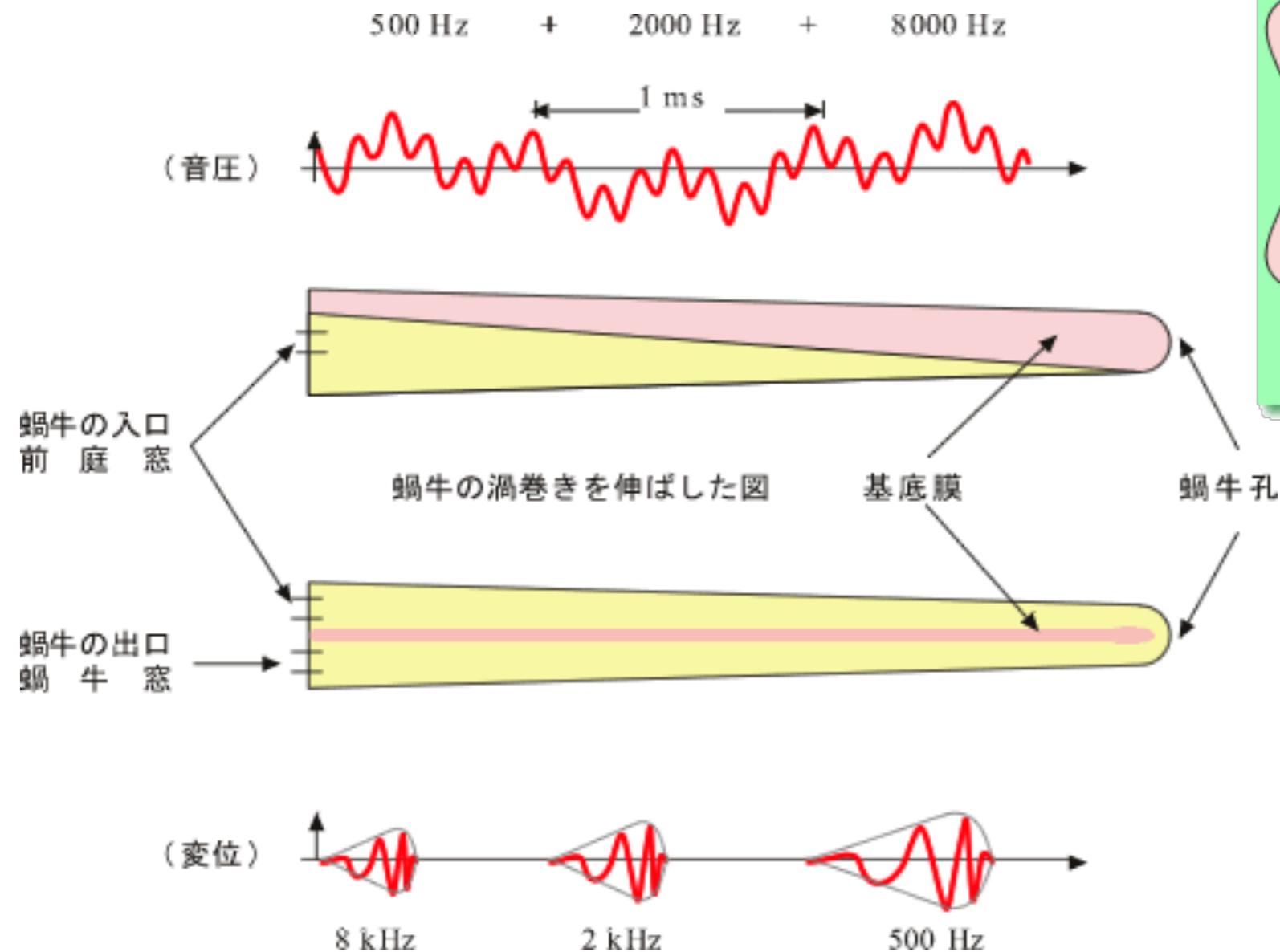
(可聴域より低い周波数のものを超低周波音)



外耳：外耳道を通った音が鼓膜を加振
 中耳：鼓膜の振動が耳小骨で拡大されて
 内耳に伝わる

内耳：基底膜上には先端に毛が生えた
 神経細胞が有り，周波数により
 振動する場所が異なる

蝸牛での周波数の分解

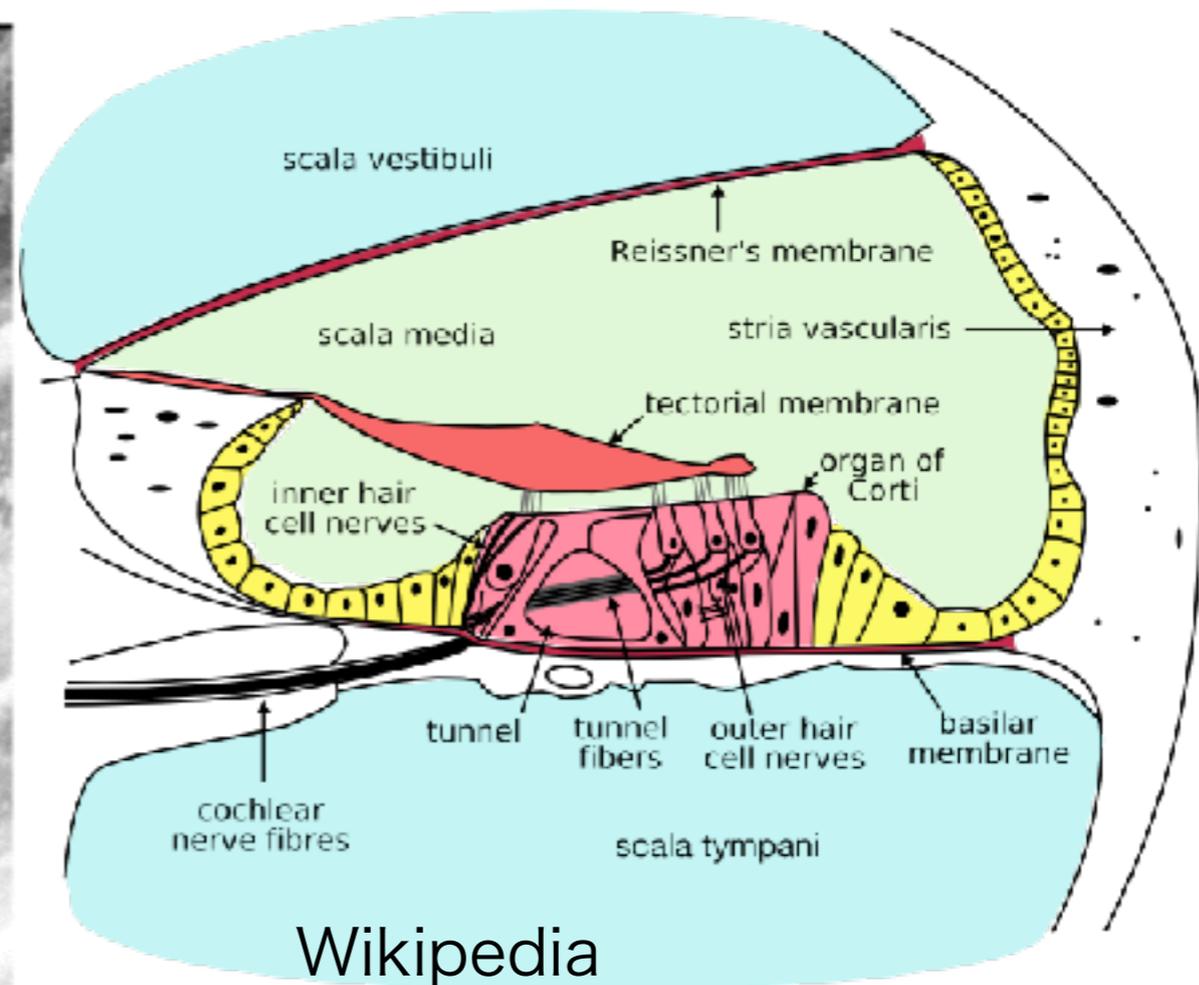
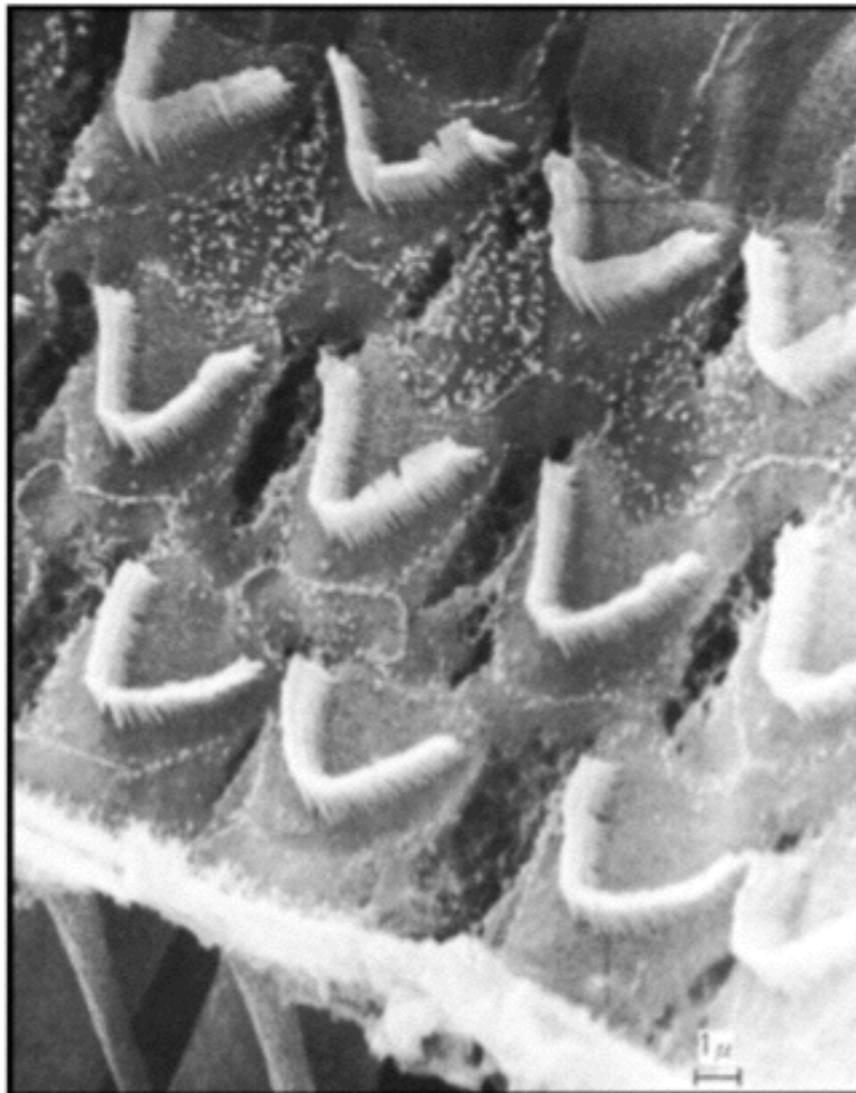


<https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/nakaniwa/keisoku/masking1.htm>

蝸牛の入口近くは高音域，奥側は低音域を感じる。
構造上，強い音と周波数が近い成分は検出できない

音を感じる有毛細胞

基底膜が振動すると蓋膜との相対運動により有毛細胞で検出される。



dB (デシベル)

元々はパワーなど, 例えば基準の電力 P_0 と電力 P の間で

$$\log_{10} \frac{P}{P_0}$$

としたものの単位がベル (B) .

これでは値が小さくなりすぎるので10倍にしたものがdB.

電力は電圧 (あるいは電流) の二乗に比例するから

電圧では

$$10 \log_{10} \frac{V^2}{V_0^2} = 20 \log_{10} \frac{V}{V_0}$$

FFTアナライザ等の測定器で, V_0 を 1[V] とした [dBV] 単位で表示されることがある.

音の大きさ

音は疎密波 → 圧力（音圧）で音の強さを示す

最小可聴音

平均的な成人男子が聞き取れる最も小さい音
2kHz付近で 0.00002Pa ($2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$) と言われる

※通常、音圧は実効値

音圧レベル
SPL

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}]$$
$$p_0 = 2 \times 10^{-5} \quad [\text{Pa}]$$

※ 音圧レベル120dBは最小可聴音の百万倍

音の大きさの目安

騒音レベル[dB]	目安
140	ジェットエンジンの直前, 聴覚機能に異常
130	肉体的な苦痛の限界
100	電車通過時のガード下
90	大声
80	ピアノの音
60	普通の会話
50	静かな事務所
40	静かな住宅, 図書館
30	ささやき声

音の強さ

空気等の媒質中を伝わる音波の単位面積を単位時間で通過するエネルギーを音の強さ（インテンシティ）と呼び

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

ただし、基準となる I_0 は $I_0 = 10^{-12} \text{ [W/m}^2\text{]}$

インテンシティ I と音圧 p （実効値）の関係は、

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

※ 実際には音響インテンシティは方向を持つベクトル

音速 $c=340 \text{ (m/s)}$, 空気の密度 $\rho=1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, $p_0=2 \times 10^{-5} \text{ (Pa)}$

$I = 1 \text{ [W/m}^2\text{]}$ とすると

$$p = \sqrt{\rho c I} \simeq \square \text{ (Pa)}$$

$$L_p = \square \text{ (dB)}$$

dB 補足

電圧, 音圧などは2倍で6dB.

$$20 \log_{10} \frac{V}{V_0} = 20 \log_{10} 2 = 6.020599913$$

電力などでは2倍で3dB.

$$10 \log_{10} \frac{W}{W_0} = 10 \log_{10} 2 = 3.010299957$$

では電圧が5倍になった時, デシベル差は?

演習 1

周波数 f_1 [Hz] で 50 [dBV] の信号と, 周波数 f_2 [Hz] で 50 [dBV] の信号が合成されると何dBV?

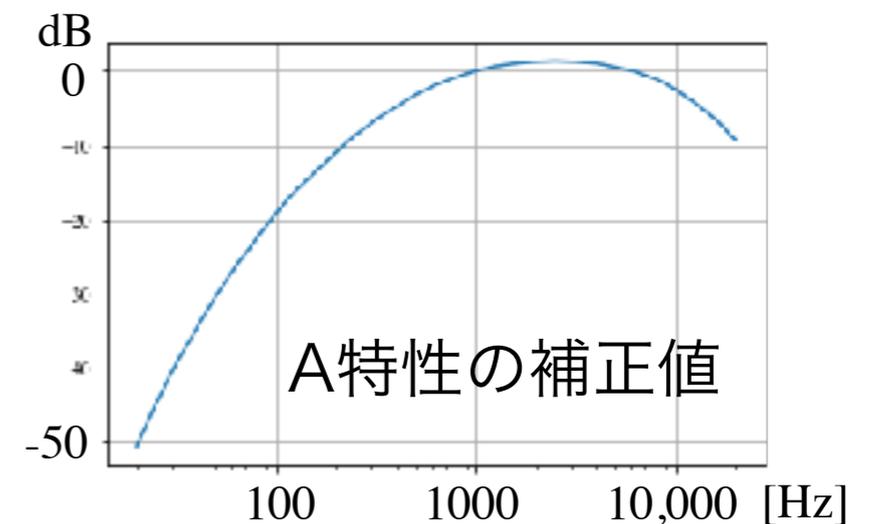
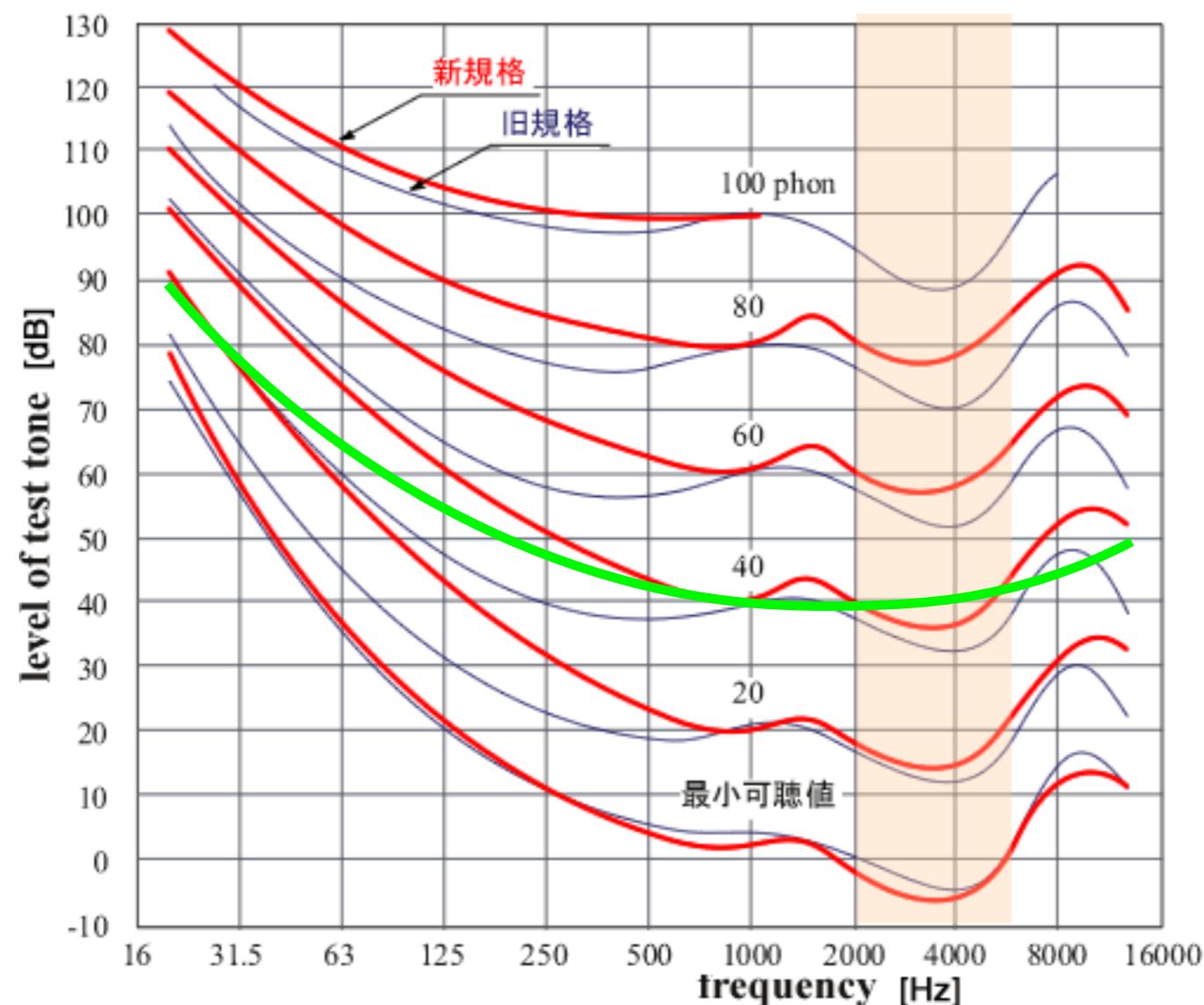
演習 2

人が「感じる」音の大きさ

周波数によって耳の感度は異なる。

聴感上の音の大きさをラウドネス

※等ラウドネス曲線は2003年にISOでも改訂



A特性で補正した音圧を dBA
で表記

https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/soundquality/soundquality_2.htm

音速

音速は媒質の密度と弾性率によって決まる

$$\text{音速 [m/s]} = \sqrt{\text{弾性率} / \text{密度}}$$

	音速	密度	弾性率
	m/s	kg/m ³	Pa
空気	341	1.2	14×10 ⁴
ヘリウム	970	0.18	17×10 ⁴
水	1480	1000	22×10 ⁸

空気中の音速は，気温1°Cあたり約0.6m/s変わる

風があると音速は+αされる

風速10m/sでは風下向けには350m/s

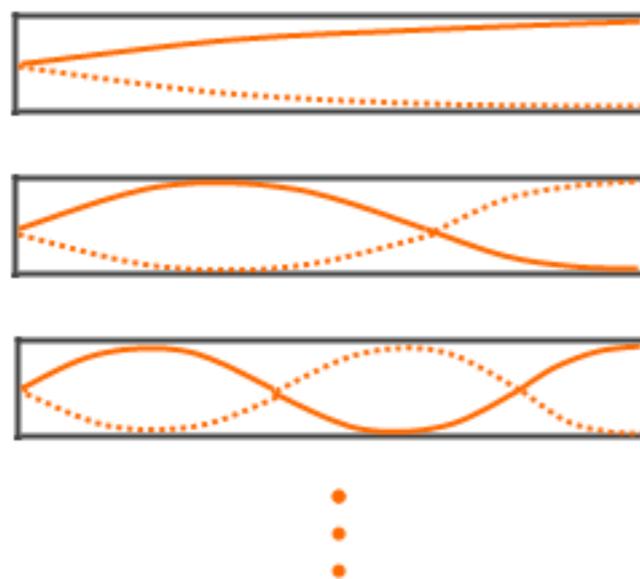
音の周期と波長

空気中での音速 約340m/s (約1200km/h)

水中で約1500m/s, ヘリウム中で約970m/s

空気中で1kHzの音の波長 λ は

1秒間に進む距離 $340[\text{m}] \div \text{波の数 } 1000 = 340 [\text{mm}]$



例えば左端が閉じた管の共鳴では

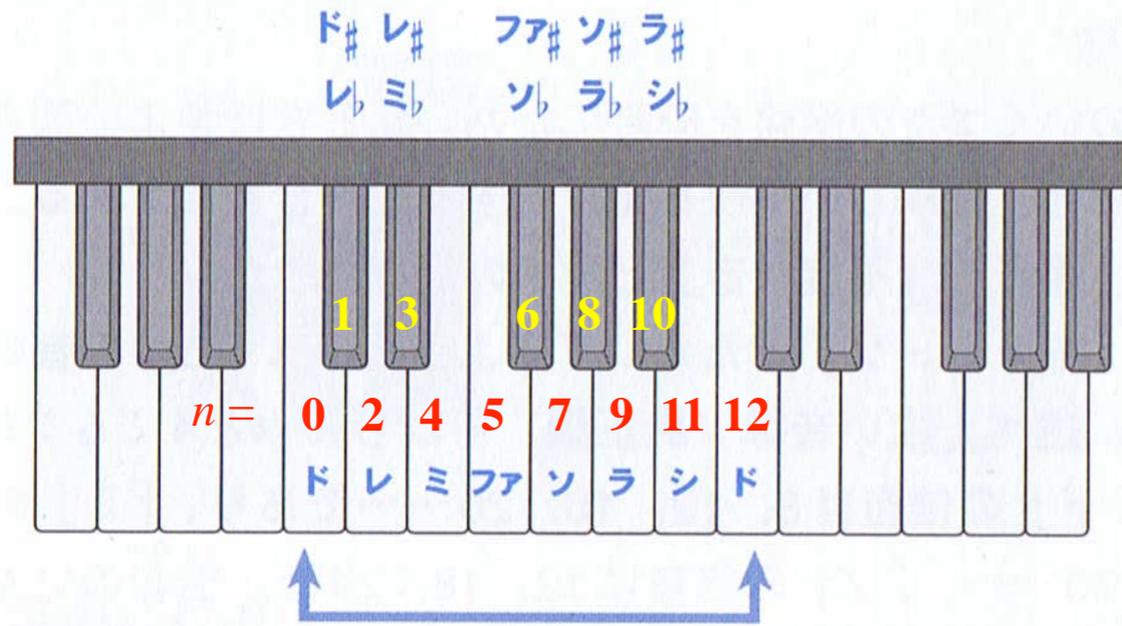
最小1/4波長で共鳴するから

$340 \div 4 = 85$ [mm]の気柱で1kHzの音が
共鳴する

音階と音律

1 オクターブ（ドからドまで）で周波数が2倍
この間をどのように割り振るかを「音律」

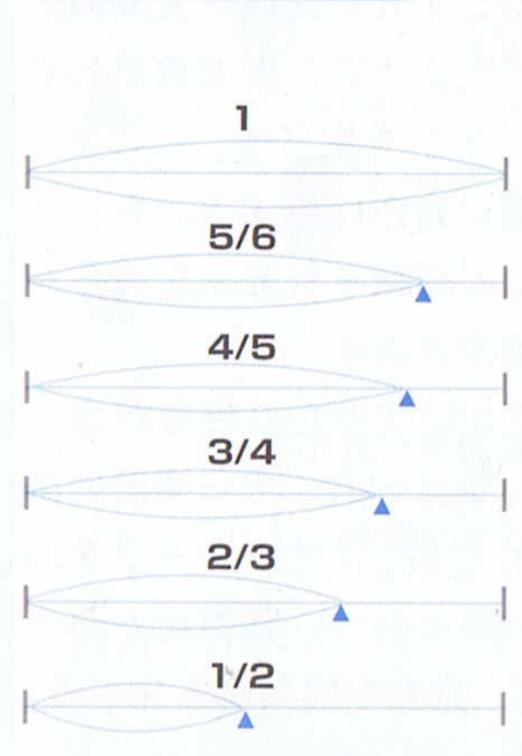
けんばん
ピアノの鍵盤と音階



1 オクターブ = 8度の音程 = 2倍の周波数

1オクターブの中には、7つの白鍵と5つの黒鍵の合わせて12の音があり、隣り合った鍵盤同士は、それぞれ「半音」の関係になる。これに対して、黒鍵をはさんだ白鍵同士の関係は2つの半音からなり、「全音」と言う。

律
純正調と平均率



長さ	音階	半音の数	純正調	平均率 ^律
1	ド	—	1.0	1.000
5/6	ミ ^b	3	1.2	1.189
4/5	ミ	4	1.25	1.260
3/4	ファ	5	1.33	1.335
2/3	ソ	7	1.5	1.498
1/2	ド	12	2.0	2.000

平均律の周波数は $f_{ド} \times 2^{n/12}$

純正律はそれに近い整数比倍

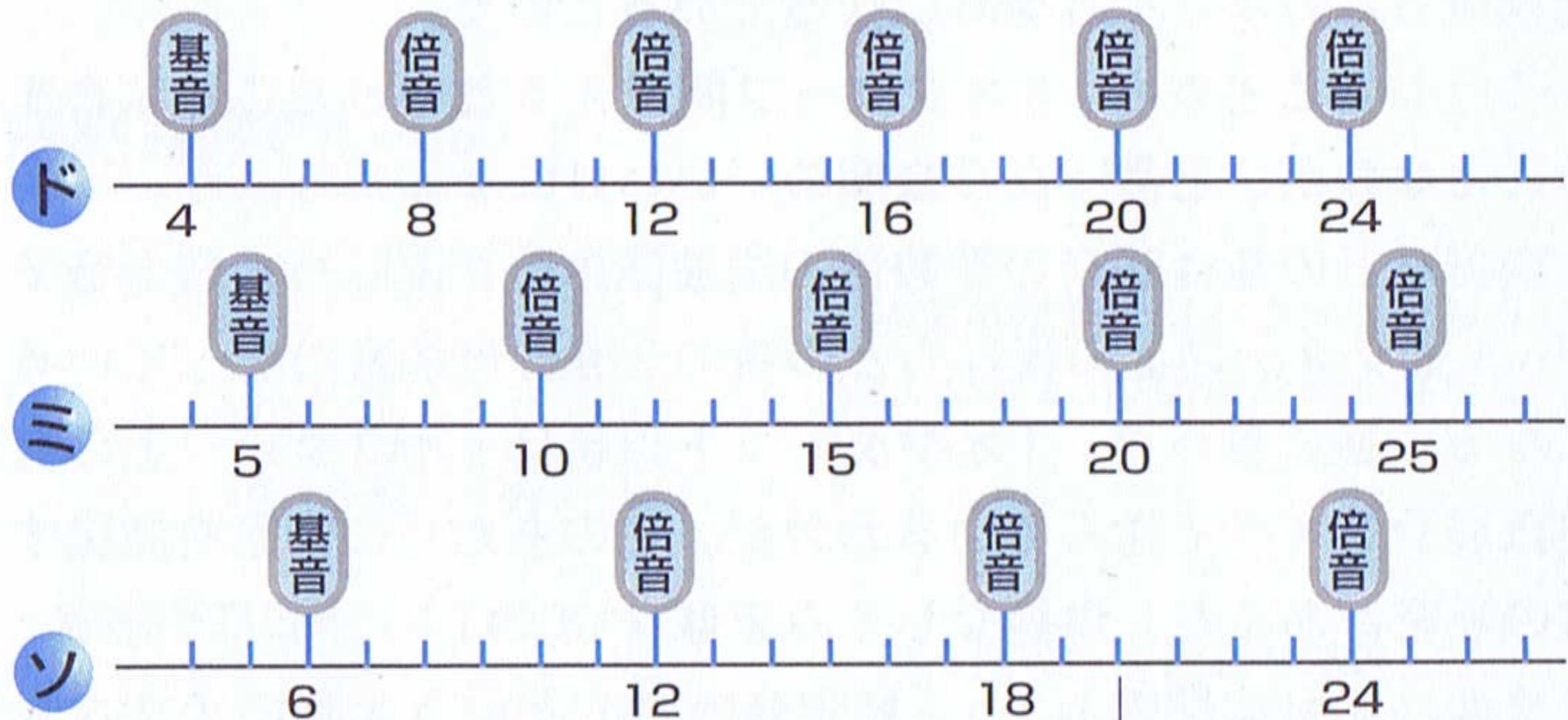
440Hz が ラ

出典：図解雑学 音の仕組み

中村健太郎 ナツメ社

和音

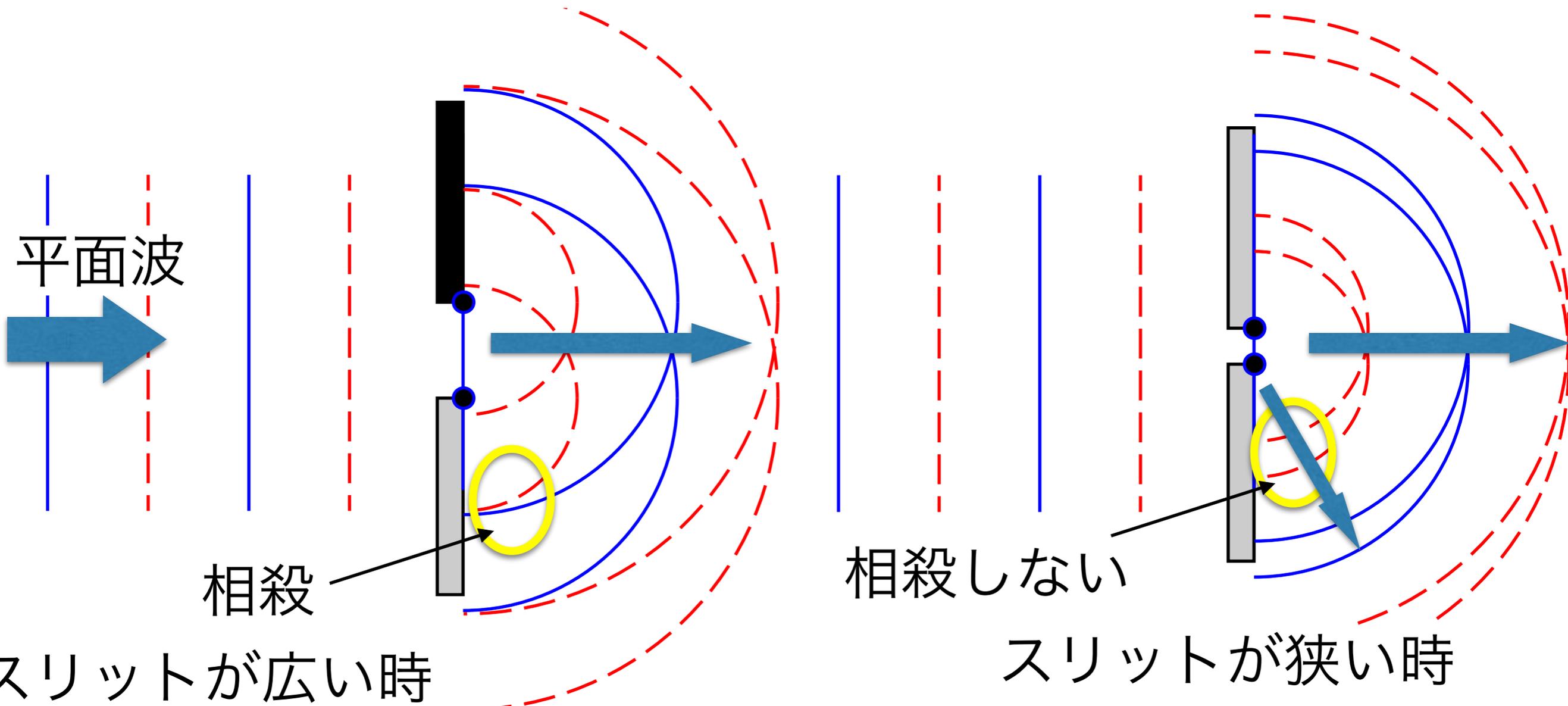
●和音「ド・ミ・ソ」の純正調での比率



ドとソの倍音が一致
ミはドの前の倍音と
の間にある

ドとミの倍音が一致
ソはドの前の倍音と
の間にある

音の回折



スリットが広い時
相対的に波長が短い時
周波数が高い

相殺しない
スリットが狭い時
相対的に波長が長い時
周波数が低い

周波数が低い音は回折しやすい

新幹線試験車両での騒音低減例

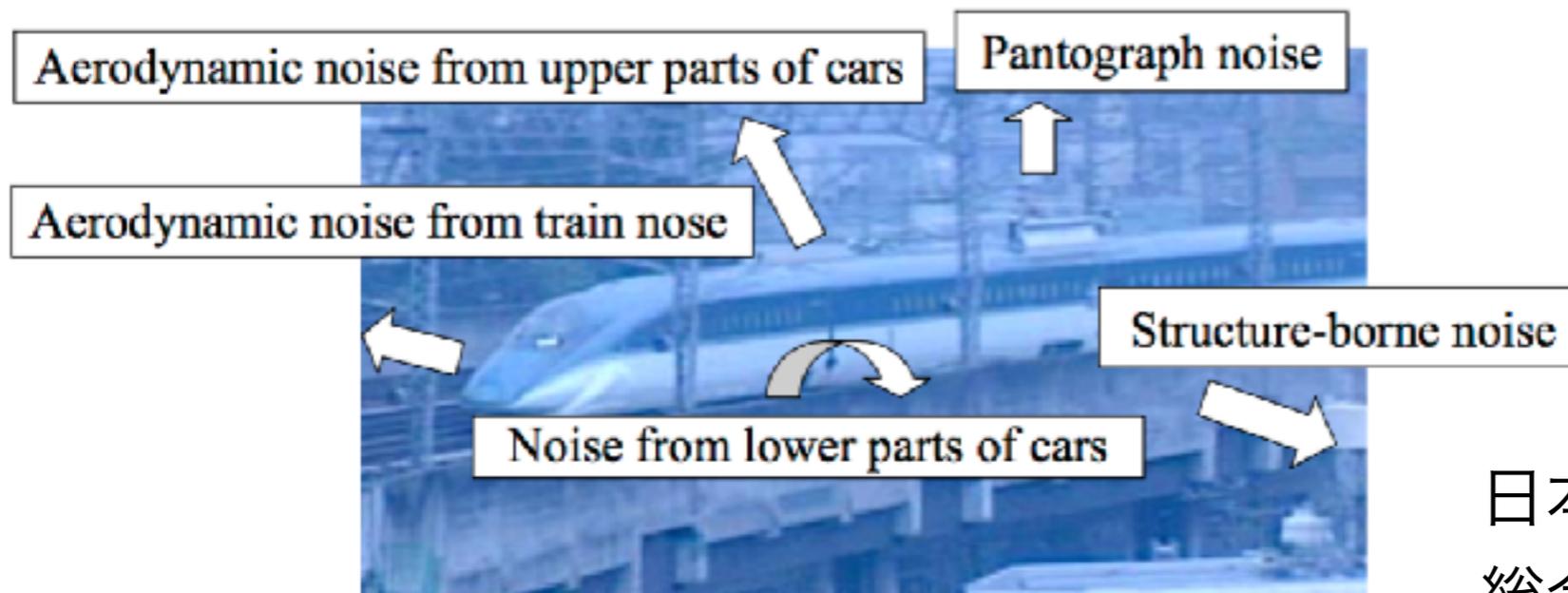


Fig. 1 Noise sources of Shinkansen

日本機械学会 第17回環境工学
総合シンポジウム2007講演論
文集



Fig. 8 Snowplow cowl



Fig. 9 Circumferential bellows

JR東日本 栗田健 他
新幹線高速試験電車
FASTECH360の騒音性能

マイクアレイによる音源推定

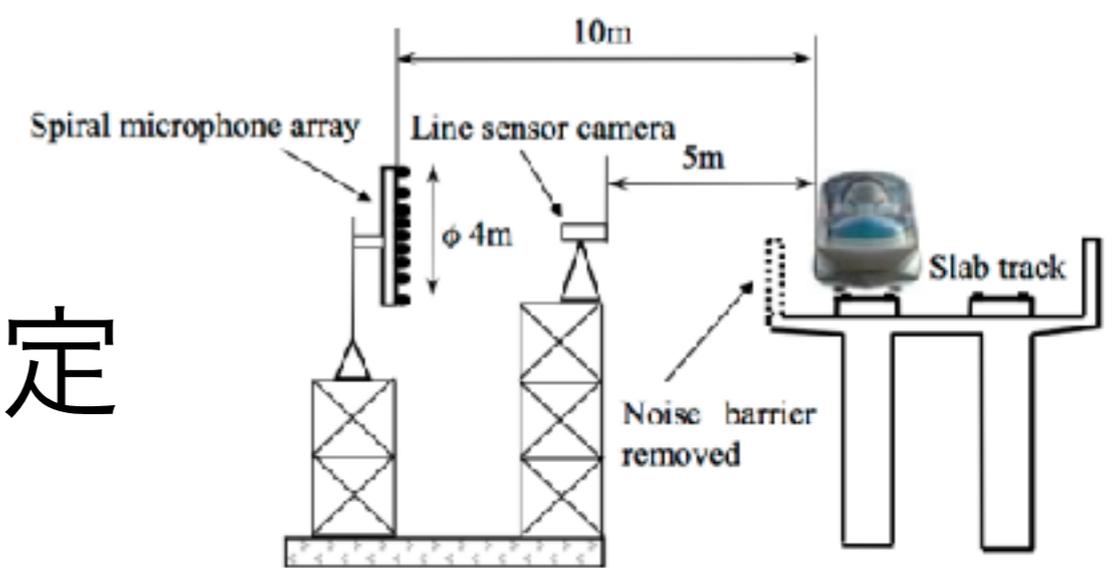


Fig. 10 Schematic diagram of measurement using spiral microphone

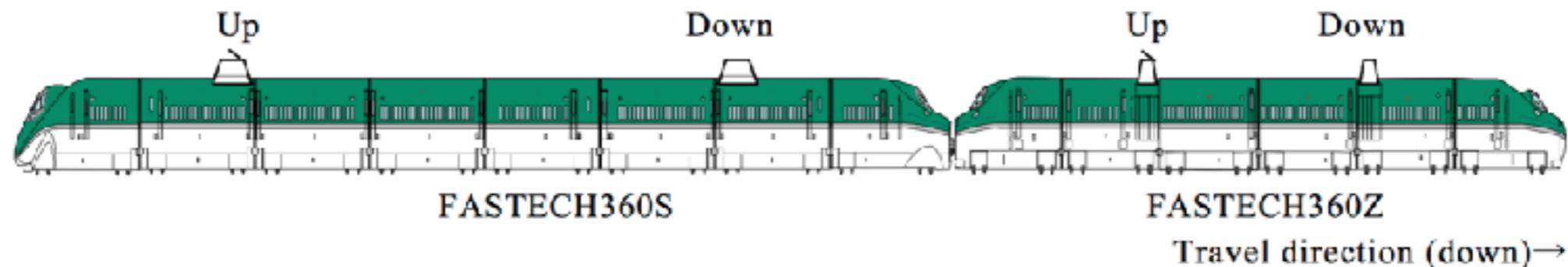


Fig. 5 Pantograph positions (FASTECH360Z and FASTECH360S (connected))

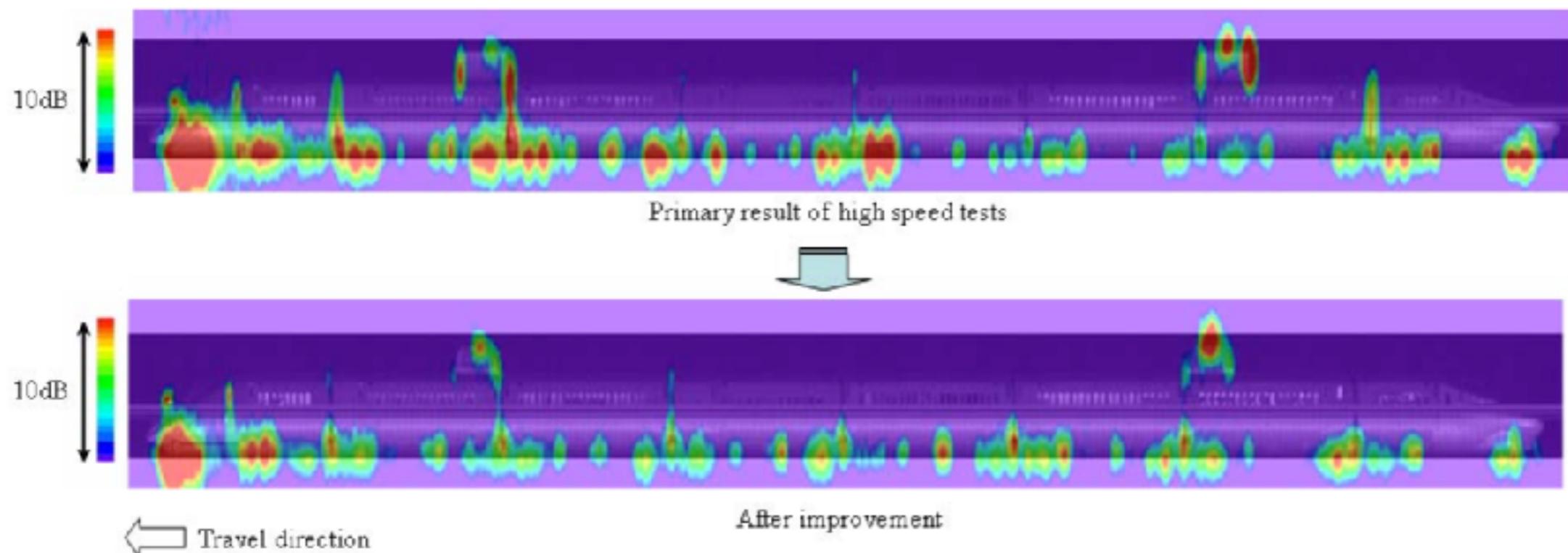


Fig. 11 Noise source distribution of FASTECH360S using spiral microphone array (340km/h)



図2 楕円体收音装置

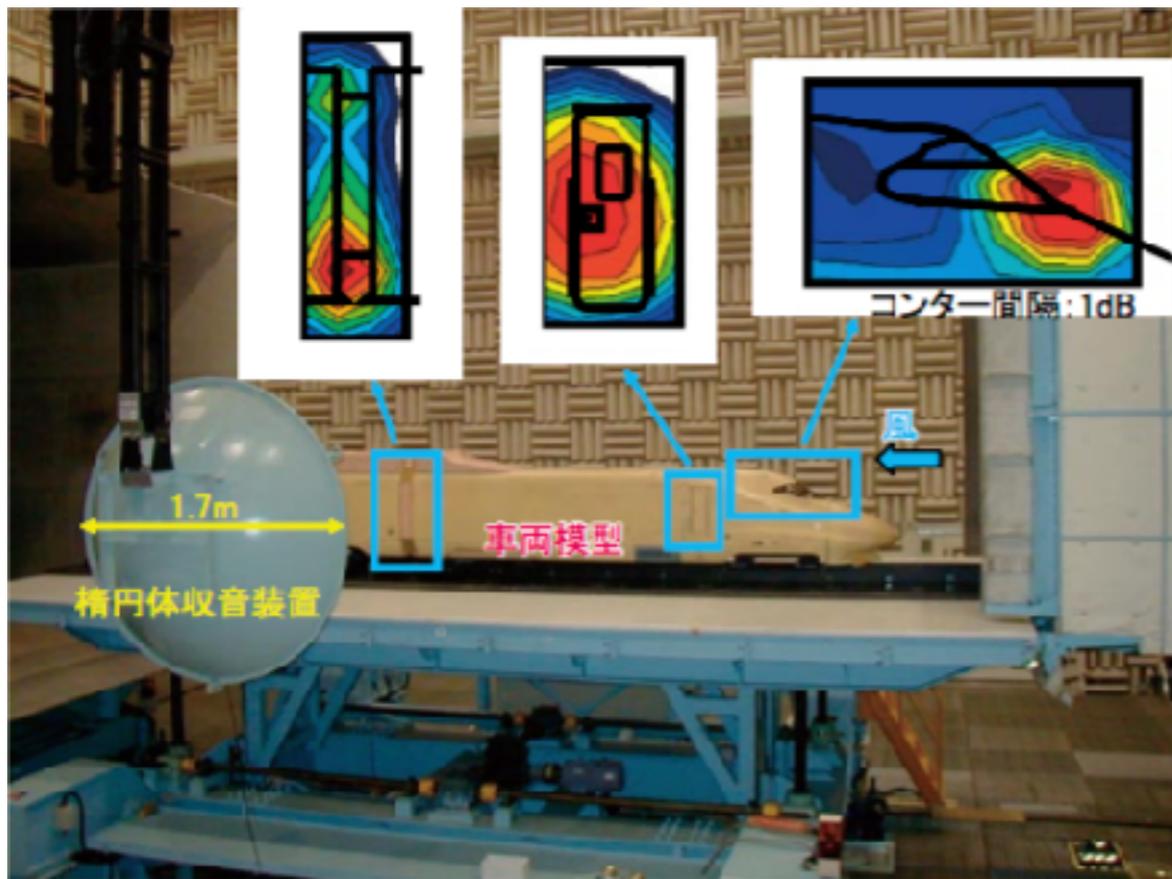


図3 楕円体收音装置で測定した1/5縮尺新幹線車両から発生する空力音の音源分布

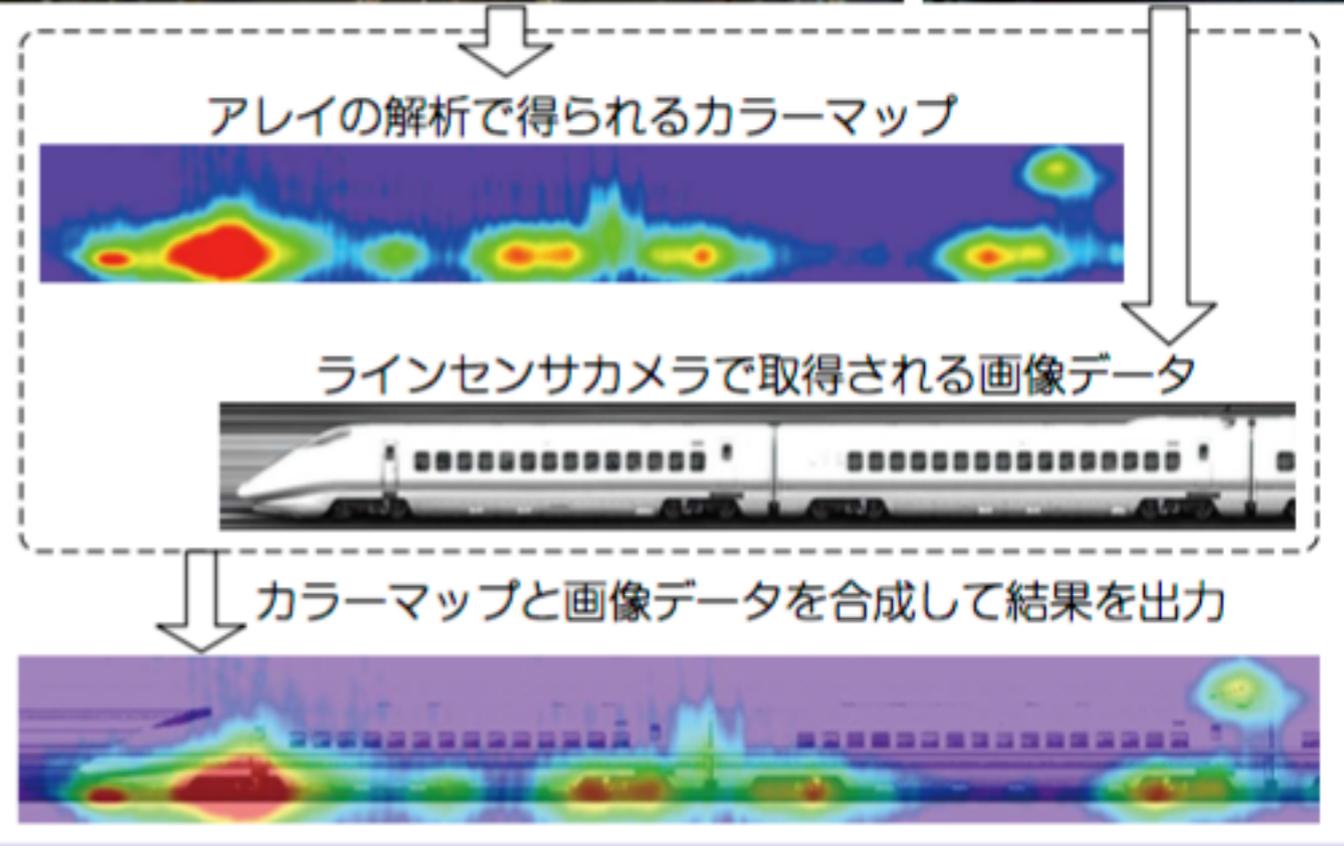


図5 2次元マイクロホンアレイによる音源可視化例⁸⁾

パンタグラフの改良



Fig. 2 PS207 type pantograph (series E2)



(a) "<"-shaped arm type

(b) Single arm type

Fig. 3 New low-noise pantograph

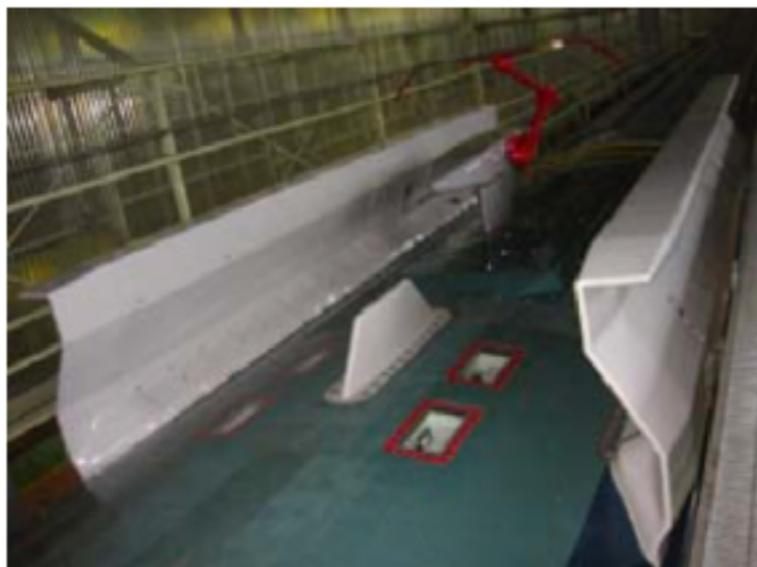


Fig. 4 Pantograph noise insulation plates (Z-shaped type)

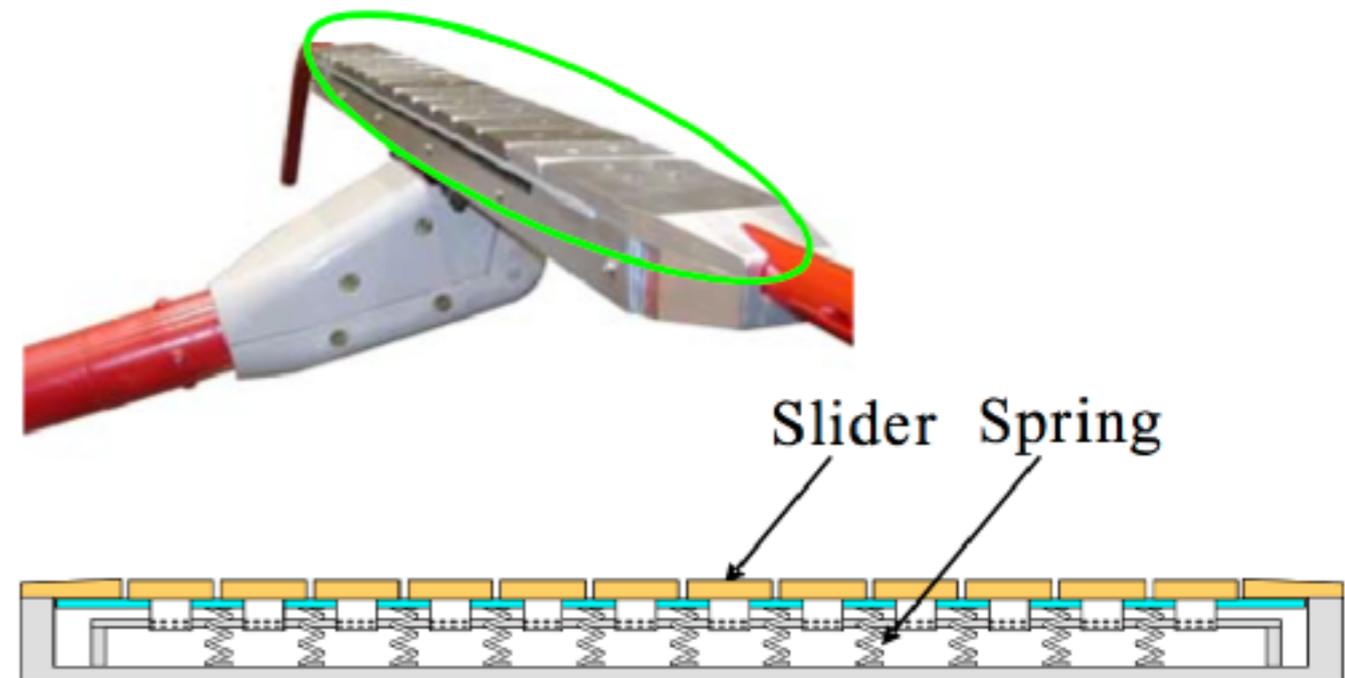
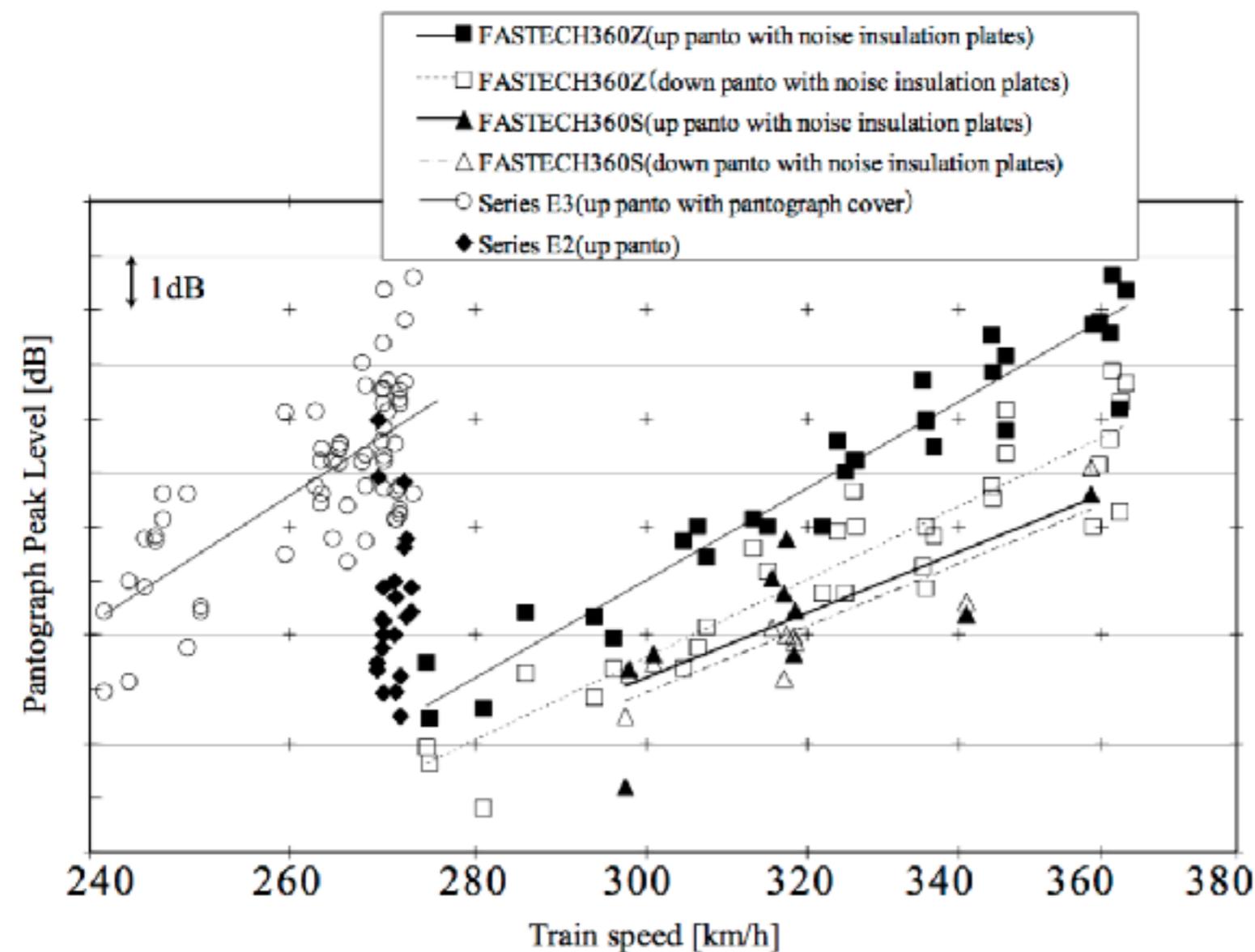


Fig. 6 Structure of "multi-segment slider"

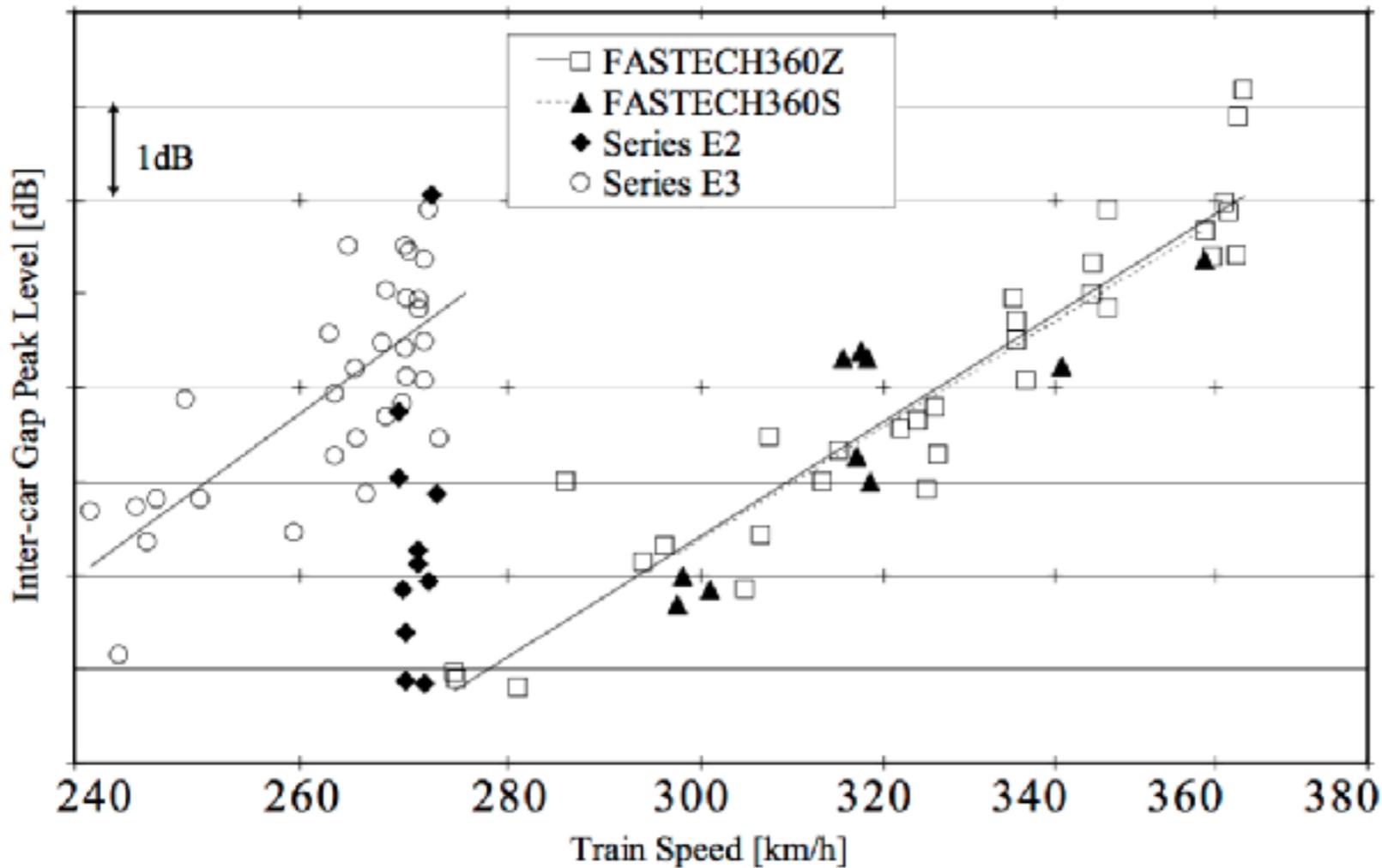
パンタグラフ改良の効果



パンタグラフの改良により従来機種と比べ5dB以上騒音低減
従来機種_の275km/h走行時と330km/hで同程度の騒音。

Fig. 14 Pantograph peak level using microphone array

車体関係の改善



連結部のホロと車両下部の吸音板などで
4dB低減

Fig. 15 Inter-car gap peak level (between the first car and the second) using microphone array

超指向性音響システム

三菱電機エンジニアリング

http://www.mee.co.jp/sales/acoustics/kokodake/pdf/sales_acoustics_MSP-50E-1_MSP-30M.pdf

通算第40回静粛工学セミナー（2005年）

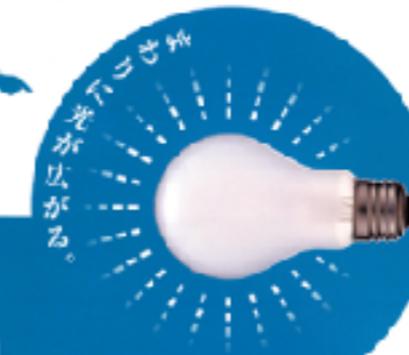
従来のスピーカーと超指向性音響システムとは

たとえるなら
懐中電灯と裸電球ほどの違いがあります。

【ここだけ】



【裸電球の場合】



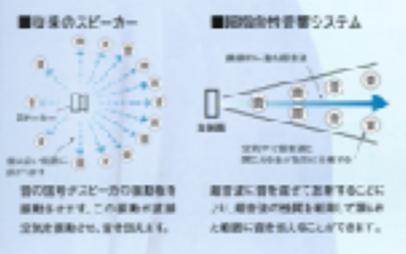
【懐中電灯の場合】



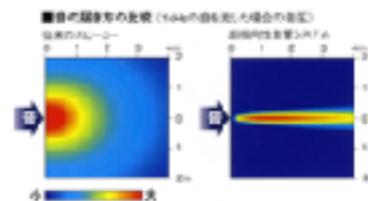
限られた場所だけに光が届く。

私たちは考えました。
音も懐中電灯と同じようにできないか。

私たちの提案する、超指向性音響システム「ここだけ」は、限られた場所だけに音声を伝えられる画期的なシステムです。

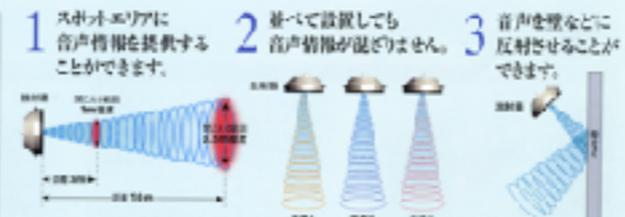


超指向性音響システムは、通常のスピーカーとは異なる発音原理に基づき、発音に先んき各方向に指向性があり、ポイント状の狭いエリアにのみ音情報を届けることができる音響システムです。



◎超指向性音響システムの特長

超指向性音響システムは特定の狭いエリアにいる人に限定した音声を届けることが可能です。複数の音声を同時に届ける必要が生じるとき、音声を必要としている人だけに音声を届けることができます。



指向性マイク

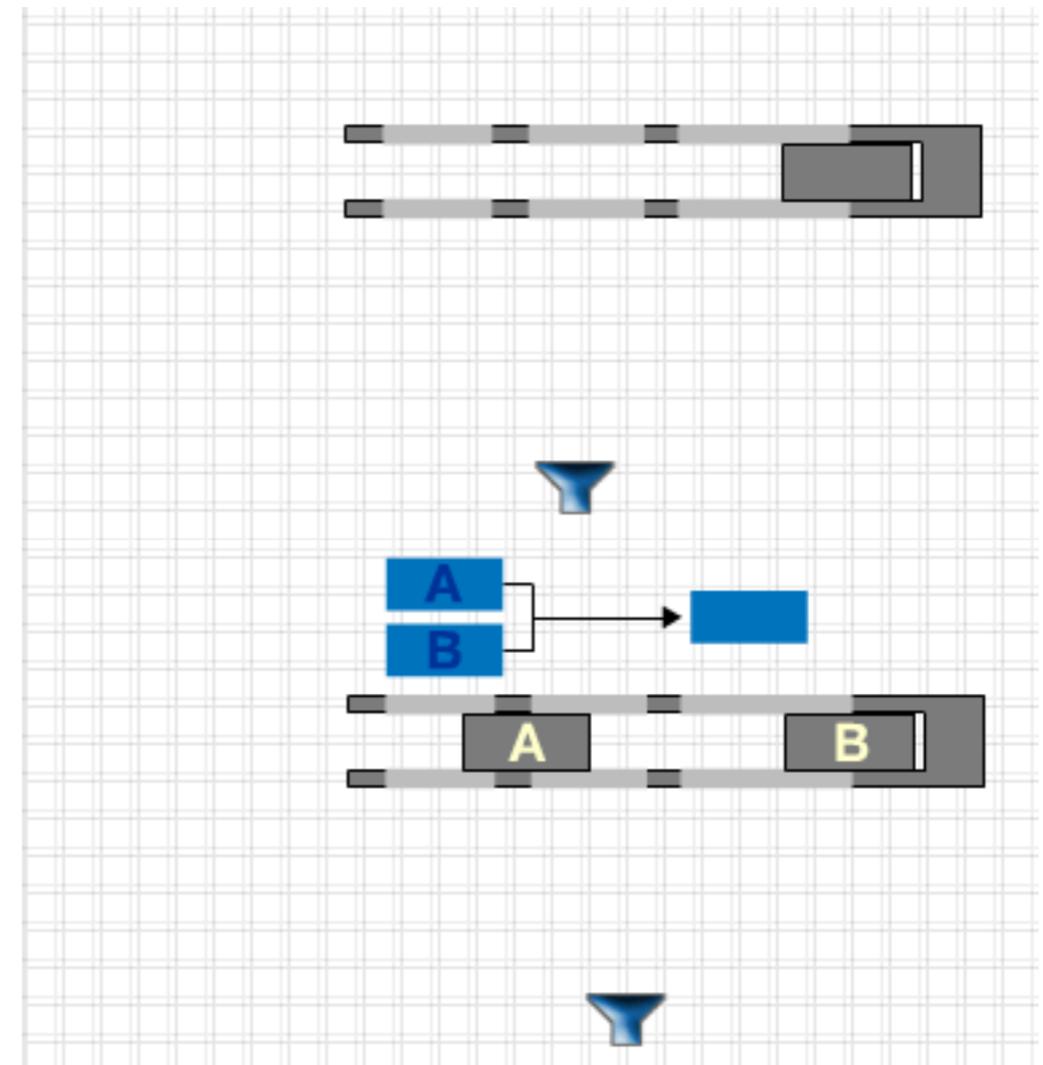


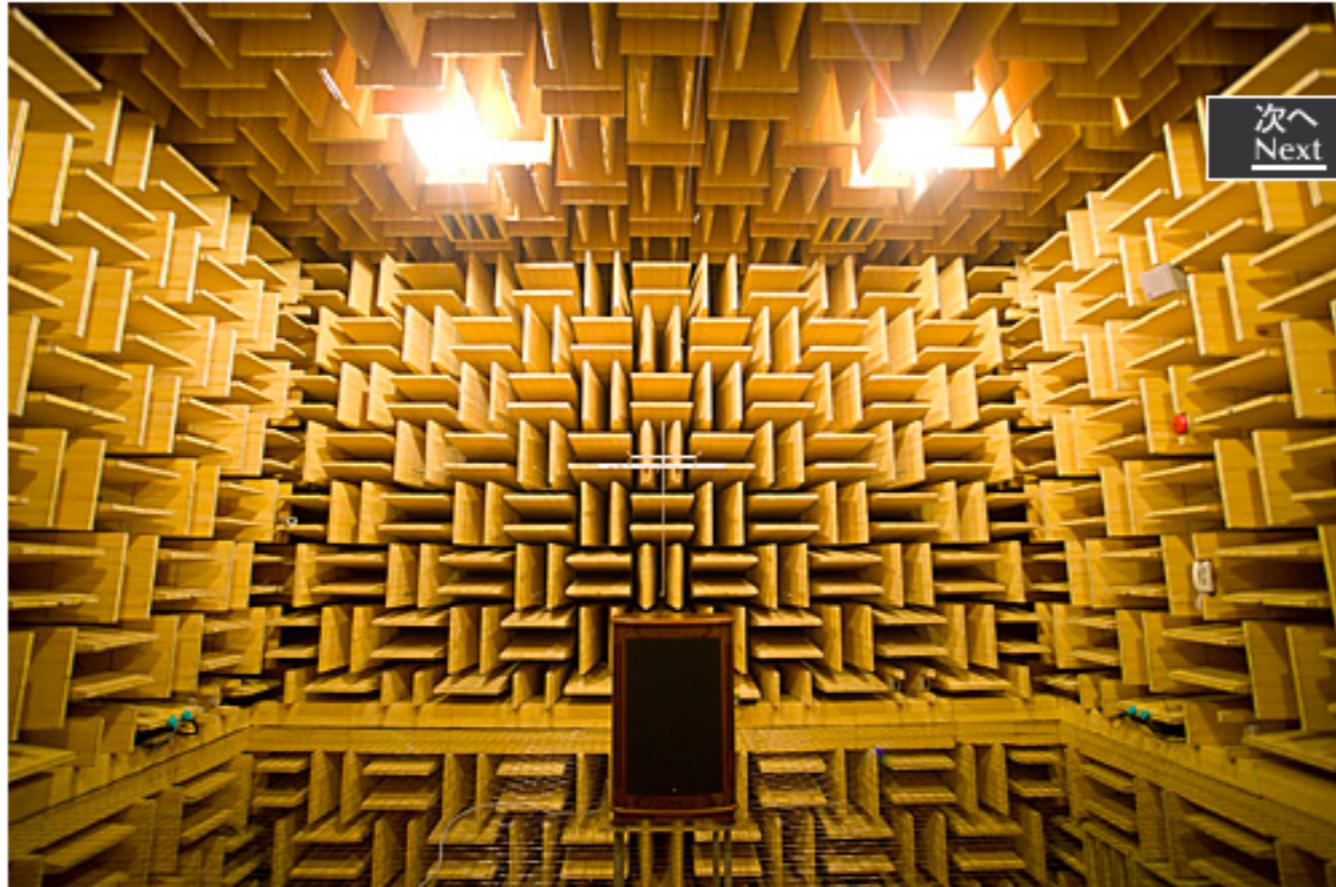
パラボラ集音器

ガンマイク



<https://www.audio-technica.co.jp/atj/html/mic/02/index.html#shotgun>





無響室
Image 6 of 15



<https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/company/contents/jigyousho.htm>

期末試験

6月1日（木） 1-2時限

大岡山 石川台3号館304号室

すずかけ台 G111

計算機等持ち込み無し

A4用紙1枚の「手書き」メモの持ち込み可

※学籍番号+氏名を書いて解答と共に回収

【試験には出さないもの】

4/6 ハニング窓等のスペクトルへの影響詳細

4/13

4/20 空間上のフーリエ変換

4/27 雑学：ラジオ放送，コヒーレンス，コスペクトル，クオドスペクトル

5/11 FFT，移動平均，クルトーシス，スキューネス

5/18 クランク軸系の回転振動，振動計測例

5/25 人間の聴覚機構，音階・音律・和音，事例