

第 11 回 音の性質 (教科書 pp. 110~118)

◎ 音環境の全体像

- └ 【1】 音が出るとき (音源) ————音をどのように捉えるか? 基本
  - ┌ 物理的なお話
  - └ 数字で表す
- └ 【2】 音が出た後—————音をどのようにコントロールするか?
  - └ 音を受け止める (音を遮る, 止める)
  - └ 音を響かせる (音は止めない)
  - ┌ ヒトがどのように評価するか? (好みの問題, 騒音の問題)
- └ 振動

音環境と光環境を比べてみよう

	出し手/受け手の問題 (工夫したいのは?)	出す時の指向性	時間的な変化	ヒトの反応
光環境	主に出し手側を工夫 例) 照明器具  一旦受けた後はあまり考えない	比較的好く考える 例) 立体角  どの向きを照らすか?	ほとんど考えない 昼光の 1 日の変化ぐ らいか 出してから受け手側に 到達するまでが速い	まあまあ敏感 例) 750[lx]と 500[lx] の差はわかる
音環境	主に受け手側を工夫 例) 壁で吸音/遮音  どのように出すかは不明なこともあり (重視せず)	受け手重視なのであまり考えない 例) スピーカー (全方向?)	「伝わる」過程を重視  出してから受け手側に到達するまで時間がかかる (実際には音速でも速いが)  時間は大切 例) 残響時間	あまり敏感ではない 例) デシベル表示 1,000 の音のエネルギーと 1,100 の音のエネルギーの違いはわからず 1,000 と 10,000 ぐ らいにならないとわからない

0 今日の内容

- 1 音をどのように表すか? (今日のポイント)      4 2と3をつなぐ⇒レベル表示 重要
- 2 音を物理的に捉える (音源側)                      5 音のエネルギーの距離による減衰 (距離減衰)
- 3 音を耳で捉える (「聴く」, ヒト側)              ※できるだけ順番に

1 音をどのように表すか？ (今日のポイント)

(1) 物理的に捉える

出す側 音源	ヒトがいなくても	}	音のエネルギーを数値で捉える⇒音の強さ
	問題ない		周波数 (音が振動する回数)

(2) ヒトが音を捉える

受ける側 聴き手	ヒトの感覚で	}	音の大きさ	※ヒトの感覚 (センサー) の問題には
	考える		音の高さ	心理的な要素も入る
			音色	

※音の強さと音の大きさはだいたい対応 (一部対応しないものもあり)

※周波数と音の高さもだいたい対応 (周波数が高いと高い音)

+ (プラスして) 音を出した後の基本的なお話 (距離減衰)

注) 光でも, 「光を出す側 (光源)」と「光を受ける側 (照度)」で分けて考えたことを思い出す

2 音を物理的に捉える (音源側): 数字のお話

(1) 音圧とは? **基本**: 音は空気を前後に振動させて伝わる (参考) 海の波と潮の満ち引き

※波長 = 速度 / 周波数, 周波数 = 1 / 周期

(補足) 音波の伝搬の様子

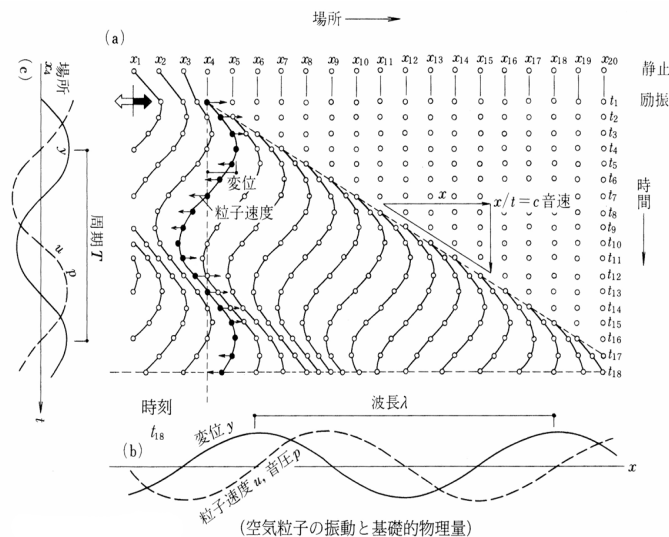


図 音波の伝搬 (出典: 参考文献[1], p. 172)

(2) 音のエネルギーの表し方 (出す側 2 種類 + 受ける側 1 種類, 点と面の関係)

参考) 光環境の光束と照度の関係

①出す側 (点)	②出す側 (面)	③受ける側 (面)
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 秒間に点から出す音のエネルギー</li> </ul> <p>音響出力 (音響パワー) [J/s] ⇒ [W]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 秒間に 1 m<sup>2</sup> の面積から出す音のエネルギー</li> </ul> <p>音の強さ [W/m<sup>2</sup>]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 秒間に 1 m<sup>2</sup> の面積を通過する (1 m<sup>2</sup> の面が受ける) 音のエネルギー</li> </ul> <p>音の強さ [W/m<sup>2</sup>] → I (アイ) で表す</p>

(3) 面を通過する音のエネルギーと立方体の中にある音のエネルギー (面と立体の関係)

音速を C[m/s] とする

① 1 秒間に 通過した音のエネルギーは, 実は,

② 単位体積 (1m<sup>3</sup>) あたり (立方体) にある音のエネルギー

$$I = C \times E \quad (E = I / C)$$

$$[\text{音の強さ}] = [\text{音速}] \times [\text{音響エネルギー密度}]$$

1m<sup>3</sup> の中にある

音のエネルギー :

音響エネルギー密度 E [W・s/m<sup>2</sup>]

← 時間を関係なくするために

s (秒) が必要

3 音を耳で捉える(「聴く」, ヒト側)

(0) 耳の構造

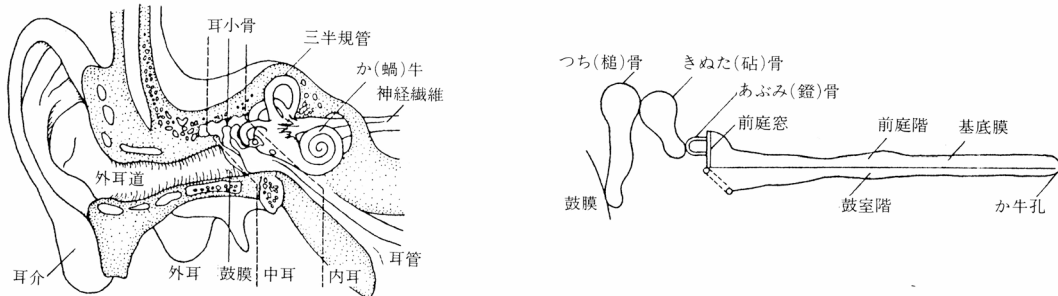


表 耳の構造 (出典: 参考文献[1], p. 174)

(1) 音の大きさ: 基本的には, 「音の強さ」が強いほど(大きいほど), 耳では大きく聴こえる  
ただし, 比例する訳ではない

低い音では実際の音よりも(音のエネルギーで比較するよりも) ヒトには小さく聴こえる

参照) 教科書 p. 115 等ラウドネス曲線(読み取り方をしっかり理解)

(2) 音の高さ: ヒトが聴くことのできる音は 20~20,000Hz

⇔一方で, ヒトの声の高さは, 数百~約 1,000Hz ぐらい

高音: 周波数が大きい(たくさん振動)

低音: 周波数が小さい(ゆっくりと振動)

(3) 音色: スペクトルが違う(主たる音以外の高さの音の出力の様子が違う)と違う音色に聴こえる(同じ高さの「ド」の音でもピアノの音なのかバイオリンの音なのかがわかる)

私たちが耳で聴く音は, いろいろな高さの音がまじっている

左下図では, ピアノもバイオリンも基音は 440Hz であり, 同じ高さの音に聴こえるが, 倍音成分はバイオリンの方がピアノよりも多い。そのため, 異なる音色に聴こえる。

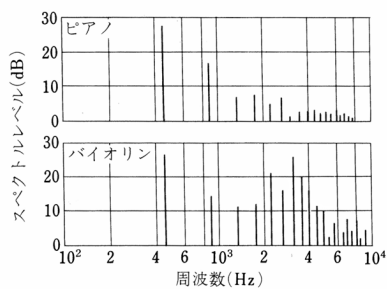


図 ピアノとバイオリンの音のスペクトル  
(出典: 参考文献[1], p. 175)

テレビの放映が終わった後のザ〜ッという音  
(もう聴けない?)

図 ホワイトノイズ

**補足** 等ラウドネス曲線 (教科書 p. 115)

低い音では, 実際の音のエネルギーの音よりも小さく聴こえる

低い音では, より大きな音でないと大きく聴こえない

**4** **2**と**3**をつなぐレベル表示

音のエネルギーの増え方 ≠ ヒトの感覚の上での音の大きさの増え方  
同じにはならない

(1) ヒトにとっては, 桁 (ケタ) が大切: 桁で考える

0 が何個あるか? その増え方を考えると, 音の場合  
では, ヒトの感覚の上での増え方に近くなる

**音のエネルギー**

**ヒト**

$$1 = 1 \times 10$$

$$10 = 1 \times 10$$

$$100 = 1 \times 10$$

$$1000 = 1 \times 10$$

$$10000 = 1 \times 10$$

例えば, お金の話でも

10 円 → 11 円 / 10 円 → 20 円:

増え方にそれほど違いを感じない

10 円 → 1,000 円 / 10 円 → 10,000 円:

増え方に違いを感じる

**指数・対数の復習をしっかりと!**

※熱環境や光環境の分野ではそうでもないが, 大きく変わらないと変わったと思わないものあり

例)  $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ : 変わったとわかる,  $1,000 [1x] \rightarrow 500 [1x]$ : 変わったとわかる

教科書 p. 112 『ウェーバー・フェフナーの法則』

⇒エネルギーの量の「桁」が変わらないと、人間は、大きくなった／小さくなった、と思わない

※マグニチュード (地震の時) と同じ

M6 → M7 : 数字が 1 つ大きくなるとエネルギーは  $10^{1.5} \approx 32$  倍になる

例) 50 [dB] の強さの音と 60 [dB] の強さの音があるとき、

50 [dB] + 60 [dB] ≠ 110 [dB] (この計算は「算術加算」という)  
 実際には  $10 \times 10^5$  の エネルギーを持つ音 + 実際には  $10 \times 10^6$  の エネルギーを持つ音  
 $10 \times 100,000 + 10 \times 1,000,000 = 11,000,000 = 11 \times 10^6$   
 (100 万) (1000 万) (1100 万)  
 (  $10 \times 10^6$  (1000 万) とあまり変わらない )

※50 [dB] の強さの音と 60 [dB] の強さの音を合成すると、60.4 [dB] の強さの音になる

※※桁に注目した計算方法の場合は、エネルギー加算、パワー加算、デシベル加算などという

## (2) 基準にするのは、人間が聴くことができる最小 (最弱) の音

- ・人間が聴くことのできる最小の音の強さ (≒音のエネルギーの大きさ)

$$0.000000000001 \text{ [W/m}^2\text{]} = 10^{-12} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

- ・人間が聴くことのできる最大の音の強さ (≒音のエネルギーの大きさ)

$$100 \text{ [W/m}^2\text{]} = 10^2 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

→ $10^{14}$  倍の幅があり (とても広い範囲, 書くのが大変だし, 間違いも多そう)

⇒そこで, 割合をとる

レベル表示を使えば, ヒトが聴くことのできる音の強さレベルの範囲は

0 [dB] から 140 [dB] と書ける! 間違ってもなさそう!

$10 \times 0$

$10 \times 14$

元に戻すと

$10^0$  : 基準の 1 倍

$10^{14}$  : 基準の  $10^{14}$  倍

(基準と同じ)

⇒例えば, 50dB の音は, 基準の音に対して  $10^5$  倍のエネルギーをもつ音ということ

この 5 を取り出すために対数を使う ( $\log_{10} 10^5 = 5$ )

$10 \times \log_{10} 10^5 = 10 \times 5 = 50 \text{ [dB]}$  と表す

**要確認** 教科書 pp. 112~113 の式

(補足)

常用対数： $\log_{10}$  ←→自然対数： $\log_e$

$e$ ：ネイピア数。自然対数の底。 $e = 2.7182818284\dots$

→高校で学修していない人は、自分で調べておくこと。1年次に履修した(?)数学 I と数学 II の教科書『基礎 微分積分』では、pp. 14~16 に掲載されている(解説は、p. 16)。

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e, \quad \lim_{x \rightarrow 0} (1 + h)^{\frac{1}{h}} = e$$

### (3) レベルの合成の際の注意

①複数の音の強さのレベルを合成するような場合は、「エネルギー加算」や「パワー加算」、「デシベル加算」などと呼ばれる。さらに、レベルの平均は、「エネルギー平均」(「パワー平均」, 「デシベル平均」) などと呼ばれる。一方、一般的な平均は、「算術平均」や「単純平均」などと呼ばれることもある。

②教科書 pp. 113 のように、一般の音場では、

「音圧レベル」[dB] ≙ 「音の強さのレベル」[dB] ≙ 「音響エネルギー密度のレベル」[dB]

とみなせるように、それぞれのレベルを定義している。レベル表示を使うとこの点も便利な点である。

注) 音の強さは、音圧の 2 乗に比例するので、音圧レベルだけ、音圧の 2 乗を使う

(補足) 教科書 p. 114 のレベルの合成を「音圧レベル」で行うと

注) 教科書 p. 114 の式の展開と下の式の展開は必ず自分で手を動かして、解いてみておくこと

音圧レベル  $L_{p1}$  と  $L_{p2}$  を合成する。

$$L_{p1} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1^2}{P_0^2} \right), \quad L_{p2} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_2^2}{P_0^2} \right) \text{ であるので,}$$

$$\frac{P_1^2}{P_0^2} = 10^{\frac{L_{p1}}{10}}, \quad \frac{P_2^2}{P_0^2} = 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \text{ である。}$$

したがって、

$$L_{p1+2} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1^2}{P_0^2} + \frac{P_2^2}{P_0^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

となる。この後、 $L_{p1}$  と  $L_{p2}$  が等しいときは、教科書と同じである。

$$L_{p1+2} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} \right) \neq 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1 + P_2}{P_0} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1 + P_2}{P_0} \right)^2 \text{ である点に注意。}$$

**5** 音のエネルギーの距離による減衰 (距離減衰)

①音源から遠くなれば, 音のエネルギーは弱まる (教科書 pp. 117~118 を参照)

②**重要** いくら (何 dB) 減衰するか (減る割合) は, もとの音の強さに関係なく, 「音源」からの距離だけに関係する (ちょっと面白い点)

(1) 点音源: 音源からの距離が 2 倍になれば, 6 [dB] 減衰する (もとの  $\frac{1}{10^{0.6}}$  倍になる)

・音のエネルギーは, 音源からの距離の 2 乗に反比例して小さくなる

(2) 線音源: 音源からの距離が 2 倍になれば, 3 [dB] 減衰する (もとの  $\frac{1}{10^{0.3}}$  倍になる)

・音のエネルギーは, 音源からの距離に反比例して小さくなる

例) 列車, 車の列 (車列)

(3) 面音源: 減衰なし (※ただし, 本当は理想的な場合 (無限に広い面音源) のみ)

・音のエネルギーは音源からの距離が変化しても小さくならない (減衰しない)



(補足) 点音源での減衰に関する式の展開

→あわせて、教科書 p. 117 と p. 118 の式も自分の手で展開しておくこと

音響出力  $W$  [W] の点音源から距離  $r$  だけ離れた点での音の強さ  $I$  [W/m<sup>2</sup>] は、半径  $r$  [m] の球面全体 (球の表面積:  $4\pi r^2$  [m<sup>2</sup>]) を単位時間に通過するエネルギーの総和が  $W$  [W] であることから、次式で表される。(→球の体積は  $4/3 \cdot \pi r^3$ )

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \langle 1 \rangle$$

音響出力を音響パワー (音響出力) レベルで表すと、次式のようになる (教科書 p. 113 の一番下参照)。

$$L_w = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{10^{-12}} \right) \quad \langle 2 \rangle$$

したがって、音響出力  $W$  [W] の点音源から距離  $r$  だけ離れた点の音の強さのレベル  $L_I$  [dB] は、次のように計算できる (教科書 p. 112 の一番下参照)。

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{I}{10^{-12}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\frac{W}{4\pi r^2}}{10^{-12}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{10^{-12} \times 4\pi r^2} \right) \\ &= 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{10^{-12}} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) \\ &= 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{10^{-12}} \right) + \{-10 \cdot \log_{10} 4\pi - 10 \cdot \log_{10} r^2\} \end{aligned}$$

ここで、 $\langle 2 \rangle$  式から、

$$L_I \doteq L_w - 11 - 20 \cdot \log_{10} r \quad (\because 10 \cdot \log_{10} 4\pi \doteq 10.9921) \quad \langle 3 \rangle$$

よって、同じ点音源から距離  $2r$  だけ離れた点の音の強さのレベルを  $L'_I$  [dB] とすると、

$$\begin{aligned} L'_I &\doteq L_w - 11 - 20 \cdot \log_{10} 2r = L_w - 11 - 20 \cdot \log_{10} r - 20 \cdot \log_{10} 2 \\ &= L_I - 20 \cdot \log_{10} 2 \doteq L_I - 6 \quad (\because \log_{10} 2 \doteq 0.30103) \end{aligned} \quad \langle 4 \rangle$$

となり、教科書 p. 117 の結果と同じ結果が導ける。

**注意)**

例えば、「音源の寸法が受音点までの距離に比べて十分に小さい場合」などは点音源とみなせる。また、線音源の例 (5-2, 教科書 p.117) では、本当は「無限に長い線音源」(点音源が無数に連続している状態) を考えており、面音源の例 (5-3, 教科書 p.117) では、本当は「無限大の面音源」(点音源が無数に分布している状態) を考えている。

**【参考文献】**(順に, タイトル, 編著者名, 出版社, 発行年月, 価格, ISBN。[] 内は熊本県立大学図書館所蔵情報)。

- [1] 『環境工学教科書 第二版』(環境工学教科書研究会編著, 彰国社, 2000年8月, ¥3,500+税, ISBN:4-395-00516-0) [和書(2F), 525.1||Ka 56, 0000275620, 0000308034]  
→第三版(2020年2月, ISBN:978-4-395-32146-9) [和書(2F), 525.1||Ka 56, 0000387929]  
[電子ブック] もあり。

復習プリント

学年：\_\_\_\_\_ 学籍番号：\_\_\_\_\_ 名前：\_\_\_\_\_

今日の講義の内容を，自分なりに，整理してください。まとめてください。

学年：\_\_\_\_\_ 学籍番号：\_\_\_\_\_ 名前：\_\_\_\_\_

【演習問題】 下記の問いに答えよ。

- (1) 音圧レベルが 60 [dB] と 50 [dB] の 2 音を合成したときの音圧レベルを求めよ。
- (2) 音圧レベルが 90 [dB], 80 [dB] ならびに 78 [dB] の 3 音を合成したときの音圧レベルを求めよ。
- (3) 音圧レベルが等しい 2 音を合成したときの 1 音に対する音圧レベルの増分を求めよ。