

# 『音響①』

「音波」 音波は縦波。

音は縦波、光は横波

横波

媒質の揺れる方向が、波の進む向きと垂直

縦波 (疎密波)

媒質の揺れる方向が、波の進む向きと同じ

縦波を横波に変換する。(便宜上)

P波 (縦波)

地震発生

S波 (横波)

※P波とS波は同時に発生する。

エネルギーが小さい。 伝わる速度が速い。(先に伝わる)

エネルギーが大きい。 伝わる速度が遅い。(後から伝わる)

## 「音の3要素」

音の大きさ、音の高低、音色

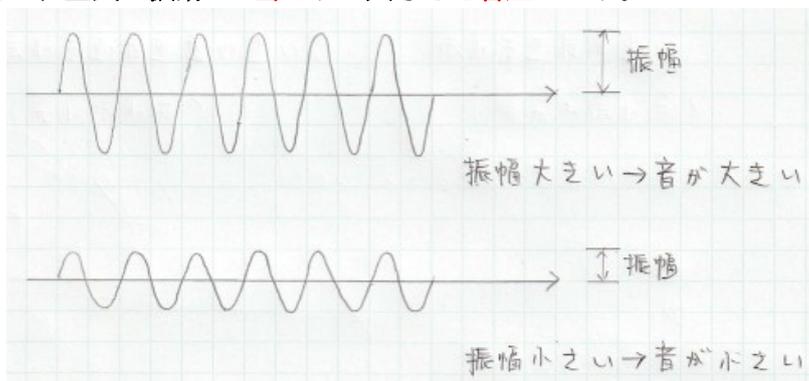
### <大きさ (音圧: Pa) > → 感覚量

音は、耳の鼓膜が空気の振動を受けることで聞こえ、音の大きさとは、人の耳が受ける振幅の大小をいう。

音の大きさは、音圧だけでなく、周波数（音の高低）によっても違って来る。

JISによると、音の強さに関する聴感上の属性と定義されている。

また、空気の振動  $1\text{m}^2$  当たりの大きさを音圧という。



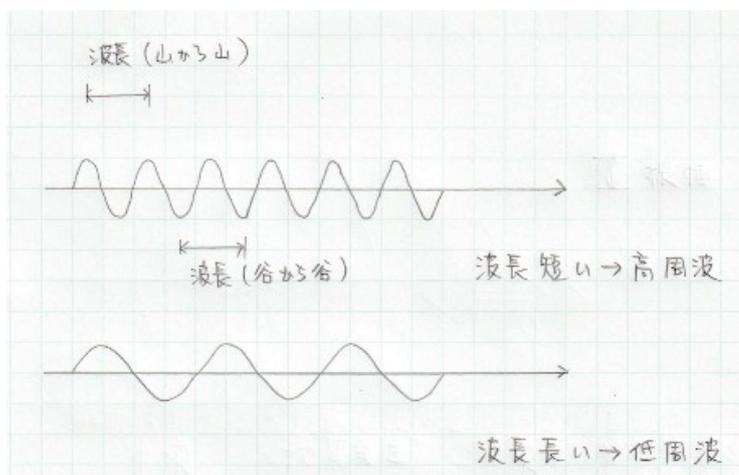
### <高低 (周波数) > → ドレミファソラシド～♪などの音階

周波数とは1秒間の振動数をいい、音による大気の圧力が1秒間に変化する回数である。

高い音は周波数が大きい。

「人間の可聴範囲」は、周波数では  $20\sim 20000\text{Hz}$  ( $20\text{kHz}$ ) 程度であり、音階にすると10オクターブに相当する。

この範囲で、最もよく聞こえる周波数は、 $3000\sim 4000\text{Hz}$  ( $3\sim 4\text{kHz}$ ) 付近の音である。



### 【音速】

空気中の音速： $C=331.5+0.6t$ （ $t$ ：気温）

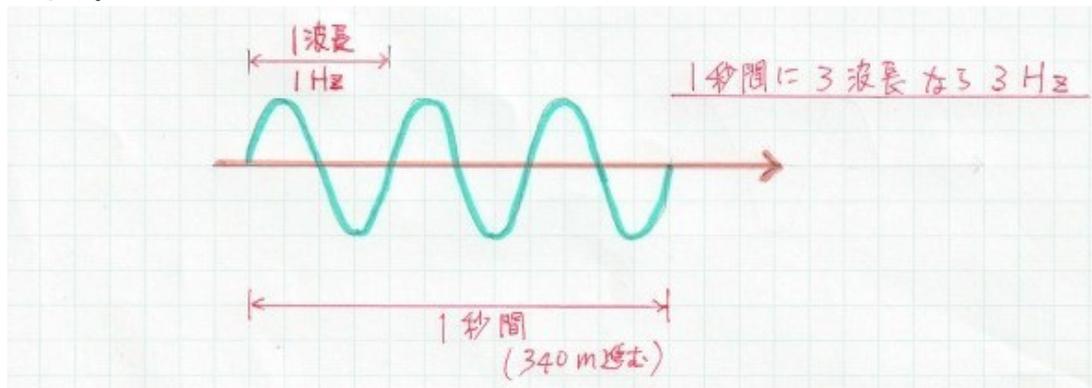
気温  $15^{\circ}\text{C}$  のとき、音速は  $340\text{ m/s}$  となる。

### 【波長】

1秒間に波が進む距離を周波数で除したもの。

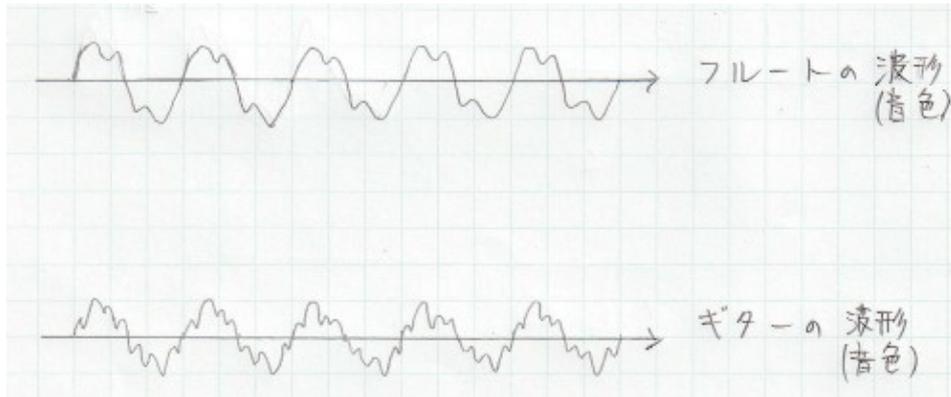
波長 =  $340\text{m}/\text{周波数}$  ( $20\sim 20000\text{Hz}$ )

上記の計算式に代入すると、人の可聴周波数に対応する波長の範囲は、約  $17\text{mm}\sim 17\text{ m}$  となる。



### <音色（波形）>

例えば楽器によって、同じ「ラ」の音でも聞こえ方が違う。音の特性のこと。

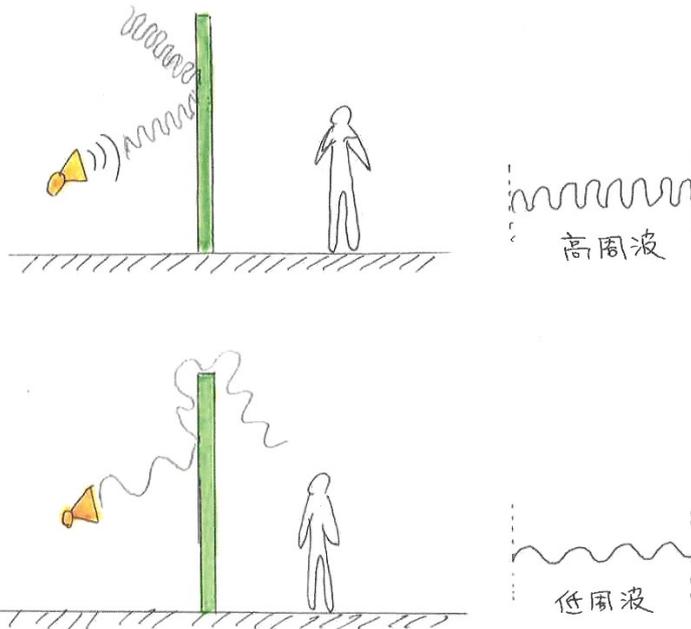


## 「音の進み方」

### <回折 (かいせつ) >

音が回り込む現象 低周波数 (波長が長い) の音は回折しやすく、高周波 (波長が短い) の音は回折しにくい。

防音塀は、高音域の遮断に有効である。



(回折 イメージ図)

### <干渉>

二つ以上の音波が同時に媒質内の1点にきたとき、音波が互いに打ち消しあったり、重なりあったりして振幅が変化する現象をいう。

(大きい音がしたり小さい音がしたりする場所ができる。)

干渉しあうと、音がうねる現象が生じる。

### <屈折>

音速が変化すること

空気中から別の性質をもった媒質に音が伝達するとき起こる。

温度や風により音速が変化する場合にも生じる。

音速は温度に比例するので、例えば昼間は地面が暖かく、下向きに音が広がるが、夜は地面が寒く、上空のほうが地面に比べて暖かいので、音が上向きに広がり、遠くまで音が届く、このような現象をいう。

## 「音の単位」

<音響出力  $W$  (W:ワット) > →物理量

音源から単位時間に発する音のエネルギー → 採光でいうところの光束

<音の強さ  $I$  ( $W/m^2$ ) > →物理量

単位時間に、単位面積を通過する音のエネルギー

音の強さ (エネルギー) は、点音源であれば距離の2乗に反比例して減衰する。

<音圧  $P$  (Pa:パスカル) > →感覚量 (人の耳で感知)

空気の振動  $1m^2$ 当たりの大きさ

## ※音の関係式

$$I = P^2 / \rho c$$

音の強さは、音圧の2乗に比例する。 (物理量は感覚量の2乗に比例する)

音の強さは、媒質の密度  $\rho$  と音速  $c$  に反比例する。

$$I = W / 4\pi r^2$$

$W$ : 音響出力  $4\pi r^2$  = 球体の表面積  $r$  = 点音源からの距離

<音のエネルギー密度  $E$  ( $J/m^3$ ) >  $1W = 1J/m^3$

音のもつ単位体積  $1m^3$ 当たりの音の力学的エネルギー量。

<パワーレベル  $PWL$  (dB:デシベル) > 可聴範囲は  $0dB \sim 130dB$  (dB値は共通)

$PWL = 10 \log_{10} W / W_0$  ( $W$ : その時の音響出力  $W$ )

音響出力の基準値  $W_0$  を  $10^{-12}W$  として、上記の式で表される。

<音の強さのレベル  $PI$  (dB:デシベル) > 可聴範囲は  $0dB \sim 130dB$  (dB値は共通)

$PI = 10 \log_{10} I / I_0$  ( $I$ : その時の音の強さ  $W/m^2$ )

音の強さの基準値  $I_0$  を  $10^{-12}$  (最小可聴値) として、上記の式で表される。

<音圧レベル  $PL$  (dB:デシベル) > 可聴範囲は  $0dB \sim 130dB$  (dB値は共通)

$PL = 20 \log_{10} P / P_0$

音圧の基準値  $P_0$  を  $2 \times 10^{-5}$  として、上記の式で表される。

※要するに、0.000000・・・などで話をすると扱いづらいので、デシベル変換して共通の値にすることで、話を扱いやすくしている。

「音の大きさのレベル（ラウドネスレベル：phon（フォン））」

最小可聴値は **4phon**

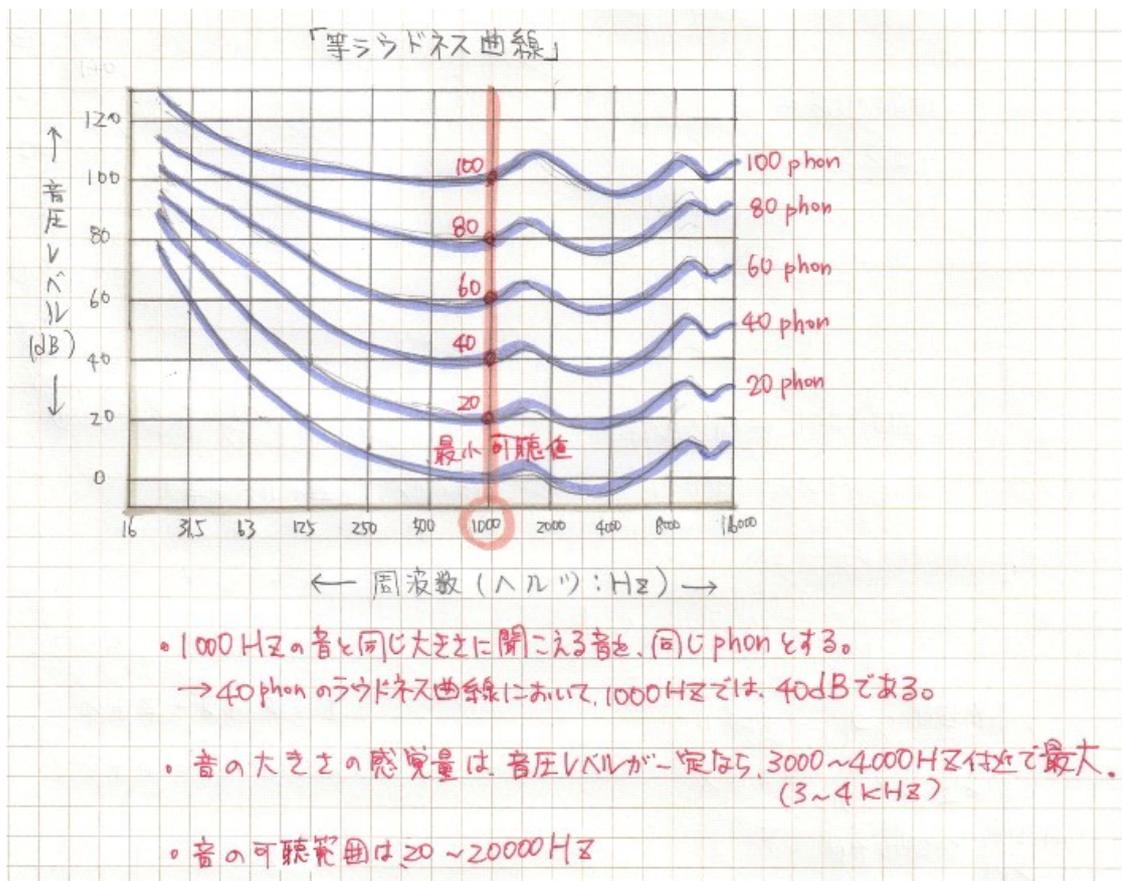
「等ラウドネス曲線（等感音度曲線）」

**1000Hzの純音**を基準として、同じ大きさに聞こえる音を曲線で結んだもの。

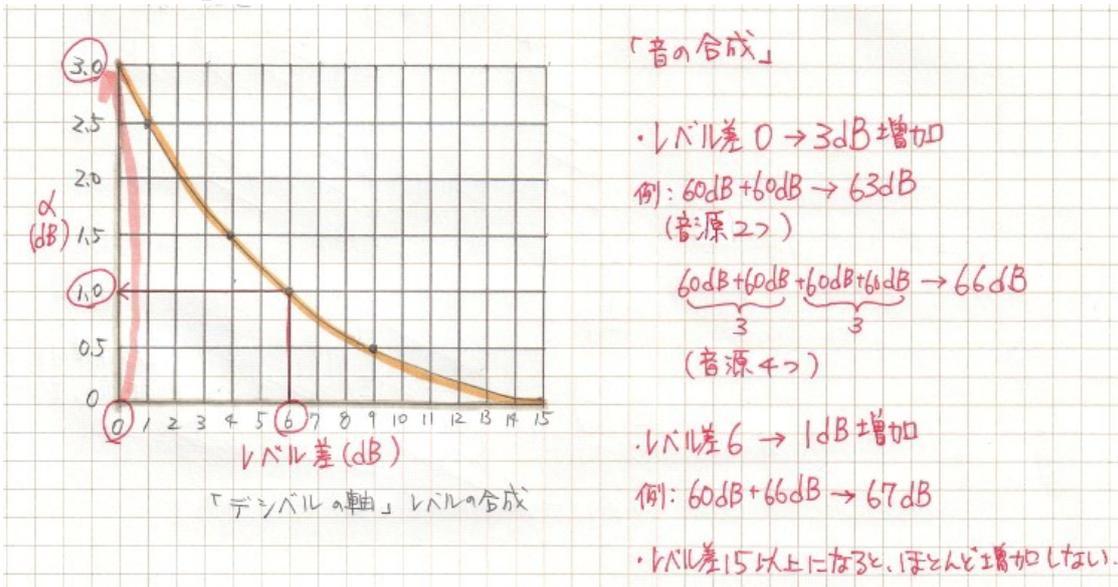
**音圧レベル**と人間の耳に聞こえる**音の大きさ**の関係を表している。

ラウドネス曲線において、一般に、一つの曲線上で音圧レベルの高いところは、人が聞き取りにくい周波数で、音圧レベルの低いところは、人が聞き取りやすい周波数を表す。

下図に示すように、人間の耳の聴覚は、**3000~4000Hz**付近の音を最も大きく感じ、この範囲から低い周波数にずれても、高い周波数にずれても感度が悪くなり、**音圧を大きくしないと、同じ音の大きさには聞こえない。**



## 「レベルの合成」



### <音の強さのレベルの値が異なる場合のレベルの合成>

音の強さのレベルが 56dB と 50dB を同時に鳴らした場合、音の強さのレベル差は 6dB。

上図により、音の強さのレベル差は 6dB (横軸) になると、レベルの増加分  $\alpha$  は、1dB (縦軸) となる。

$$56\text{dB} + 50\text{dB} = 57\text{dB}$$

音の強さのレベル差が 15dB 以上になると、増加分  $\alpha$  は 0 に近くなる。

### <音の強さのレベルの値が同じ場合のレベルの合成 (レベル差 0) >

音の強さが 2倍 になると、音の強さのレベルが 3 dB 大きくなる。←覚える

$$60\text{dB} + 60\text{dB} = 63\text{dB}$$

(問題例)

- ・同種で同じ音圧レベルの音源の数がほぼ同じ位置において四つになると、音源が一つの場合に比べて、音圧レベルの値は約 6dB 増加する。→○

「ウェーバー・フェヒナーの法則」

(等比2倍、4倍、8倍・・・等差+3 dB ずつUP)

感覚量 (レベル値) は、外界の刺激量 (物理量) の対数に比例する。

音の強さ (エネルギー密度) : 物理量		音の強さのレベル : 感覚量
1/8倍	$2^{-3}$	-9dB
1/4倍	$2^{-2}$	-6dB
1/2倍	$2^{-1}$	-3dB
<b>2倍</b>	$2^1$	<b>+3dB</b>
4倍	$2^2$	+6dB
8倍	$2^3$	+9dB
<b>10倍</b>	$10^1$	<b>+10dB</b>
16倍	$2^4$	+12dB
32倍	$2^5$	+15dB
64倍	$2^6$	+18dB
<b>100倍</b>	$10^2$	<b>+20dB</b>
128倍	$2^7$	+21dB
256倍	$2^8$	+24dB
512倍	$2^9$	+27dB
<b>1000倍</b>	$10^3$	<b>+30dB</b>

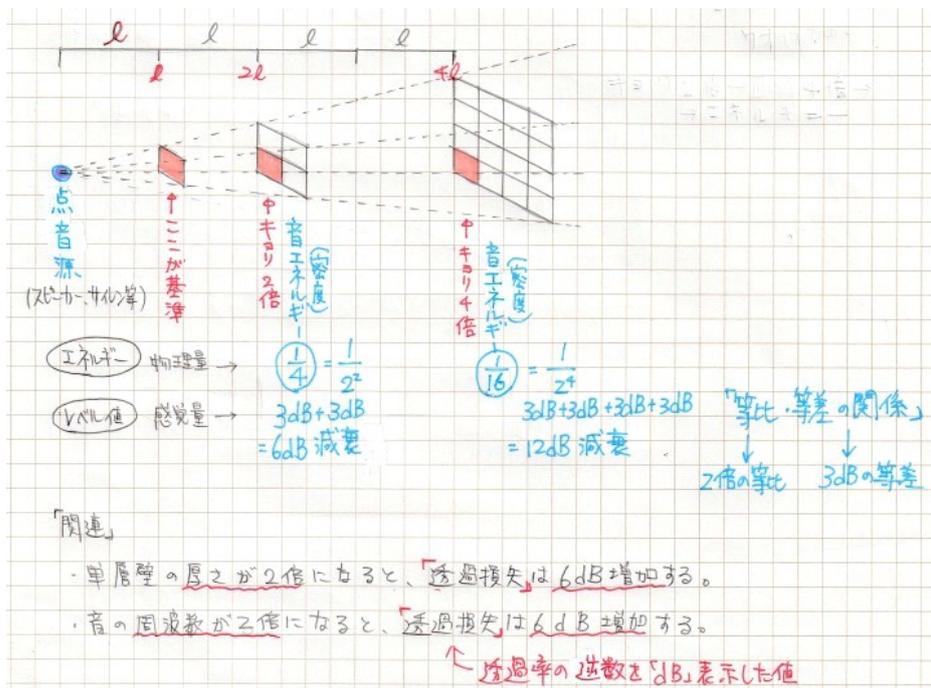
(問題例) 下記全て○

- ・音の強さのレベルを 20dB 下げるためには、音の強さを 1/100 にする。
- ・音の強さのレベルを 30dB 下げるためには、音の強さを 1/1,000 にする。
- ・音源の音響パワーを 50% に下げると、受音点の音圧レベルは約 3dB 下がる。
- ・音源の音響パワーを 4 倍にすると、受音点の音圧レベルは約 6dB 上がる。

## 「距離減衰」

### <点音源からの減衰>

- 音の強さ  $I$ 、音のエネルギー密度は、**距離の2乗**に反比例して減衰する。  
つまり、**距離が2倍**になるときに、音の強さ、音のエネルギー密度は  $1/4$  ( $1/2^2$ ) になり、レベルでは **6dB ずつ減衰**する。
- 音圧は**距離**に反比例して減衰する。  
**距離が2倍**になるときに、音圧は  $1/2$  になり、レベルでは **6dB ずつ減衰**する。

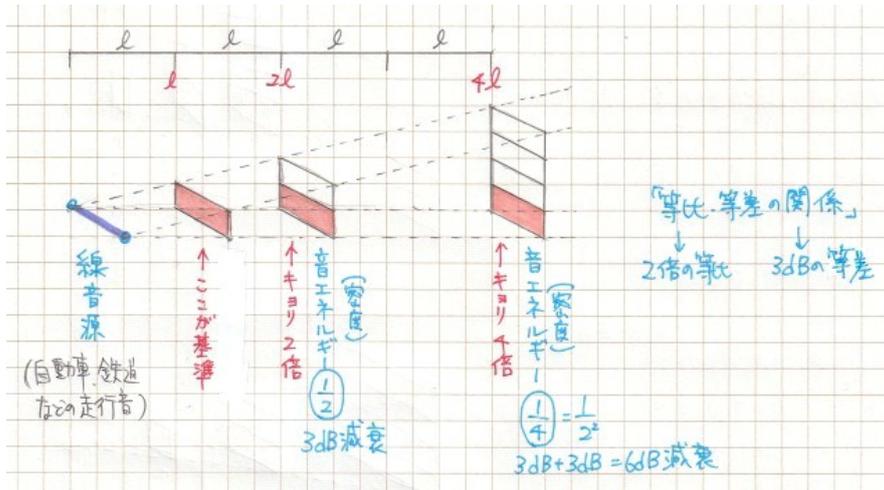


### (問題例)

- 自由音場において、無指向性点音源とみなせる騒音源から 50m 離れた位置における騒音レベルの値が 73dB の場合、100m 離れた位置における騒音レベルの値は約 70dB になる。  
→× 67dB
- 自由音場において、全指向性の点音源(指向性のない点音源)からの距離が 1m の点と 2m の点との音圧レベルの差は、3dB となる。  
→× 6dB
- 音の反射のない空間において、無指向性の点音源からの距離が 1m の点と 4m の点との音圧レベルの差は、約 12 dB となる。 →○
- 自由音場において、無指向性点音源から 25 m 離れた位置における音圧レベルの値が約 70dB の場合、100m 離れた位置における音圧レベルは約 58dB になる。 →○

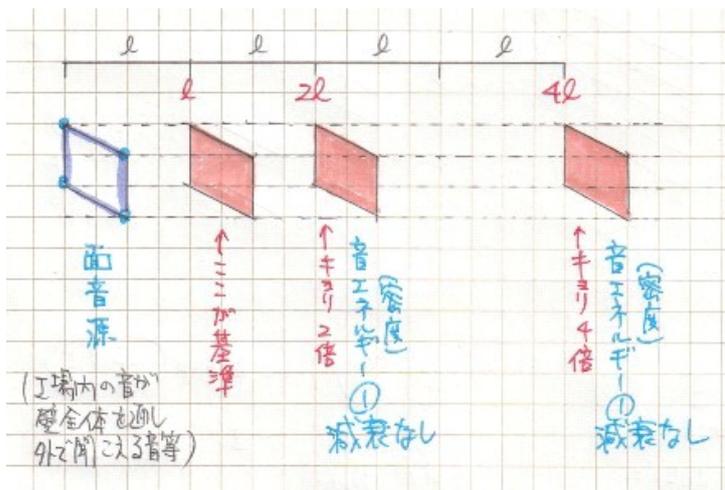
### <線音源からの減衰>

道路を2台の車が並行して直線走行しているような場合は、音の強さ  $I$  は、距離に反比例して減衰し、距離が2倍になると、音の強さは  $1/2$  になり、レベルでは3dBずつ減衰する。



### <面音源からの減衰>

さまざまな音源が広範囲に点在するような面音源の場合は、騒音源が面であるため、距離による減衰はほとんど見込めない。



#### <その他>

- ・音の強さ、音のエネルギー密度は、距離減衰するほかに、空気吸収されることにより減衰される。

この空気吸収による音の減衰は、音の周波数、気温、湿度、気圧の4要素によって異なり、周波数が高いほど空気吸収による音の減衰は大きくなる。

- ・固体伝搬音（固体音）とは人や車などの振動源から発生した振動が建築物の躯体や地面などを振動して伝わり、天井や壁などを振動させて空気中に音として放射する音のことを指します。

#### 「騒音」

<騒音レベル (A特性音圧レベル) dB(A)> ← Aは騒音特性のAを表す。

- ・普通騒音計における周波数補正回路のA特性で測定した騒音の大きさをいう。
- ・A特性は最も聴覚に近い40phonのラウドネス曲線に近似するように表示し、人間の聴覚の周波数特性に合わせて、低い周波数の音を小さく感じるように補正するもの。
- ・C特性は、ほぼ音圧レベルに等しく、250Hzの低音では、C特性の方がA特性に比べて大きい値を示す。

#### <等価騒音レベル>

- ・等価騒音レベルとは、普通騒音計で測定したA特性音響エネルギーを観測時間内で平均し、レベルで表したものをいう。
- ・不規則音、間歇音（かんげつおん）などの騒音指標として有効であり、特に時間的に大きく変動する道路交通騒音などの測定によく使われる。
- ・等価騒音レベルは、聴感補正された音圧レベルのエネルギー平均値であり、一般に、変動する騒音の評価に用いられる。

### <NC値>

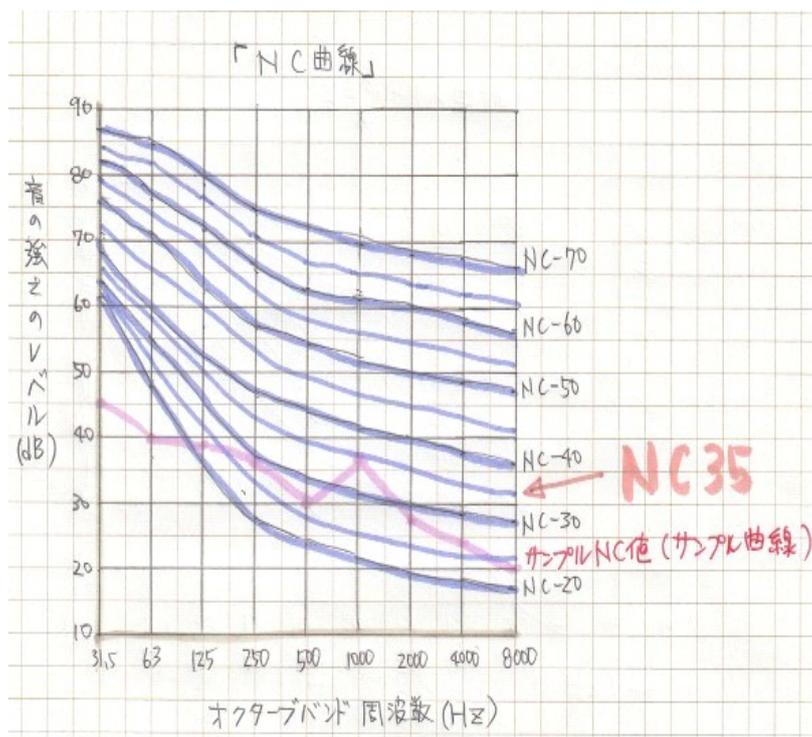
- ・騒音レベルは、ほぼ人間の耳に感じる大きさを表すが、**騒音が高音になるほど不快感やうるささが増す。**

そのため、**騒音を一定の周波数帯域（バンド）に分け、帯域ごとに分析するオクターブバンド分析**を行い、下図に示す**NC曲線**というグラフを使って、許容値を定めることがある。

これを**NC値**という。

- ・各オクターブバンドごとの音圧レベルをNC曲線の図中にとり、そのすべての点が**NC曲線より下回り、かつ一番近いNC曲線の数値がNC値**となる。

- ・騒音の許容値は騒音レベルで表されることが多いが、**室内騒音の許容値についてより詳しく検討する場合にNC値**を使う。



dB値	NC値	室内の状態
20～25	NC15以下	最も静か 小さな声でも会話が可能
25～35	NC-20～30	非常に静か 大勢の会議に使用可能
35～45	NC-30～35	静か 会話距離10mまで
45～50	NC-35～40	会話距離4m 電話支障なし
50～55	NC-40～50	普通会話距離2m やや大声で4m 電話少し困難なとき有り
55～60	NC-50～55	やや大声で会話2mまで 電話少し困難 会議には不適
60以上	NC-55以上	非常にやかましい 電話困難

### 「騒音の許容値」

#### <外部の騒音>

- ・屋外の騒音の基準値は、環境基本法に基づく「騒音に係る環境基準について」に定められている。
- ・主として住居の用に供される地域では、原則として昼間は**55dB(A)以下**、夜間は**45dB(A)以下**とされる（NC45～35）。

#### <室内の騒音>

- ・室内の騒音は、概ね下記になる。  
**NC値 ≒ 騒音レベル [dB(A)] - 10**

#### <騒音源の合成音圧>

騒音源の合成音圧（実効値）については、次の式となり、音圧が同じ値である場合、二つの音の合成音圧（実効値）は、 $\sqrt{2} \cdot P$ となる。（ $P_1$ と $P_2$ に1を代入）

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

## 「暗騒音と音のマスキング」

### <暗騒音（バックグラウンドノイズ）>

- ・外部や室内のざわめきなど、その場所における特定できる騒音以外のすべての騒音をいう。
- ・暗騒音が、評価対象とする音の騒音レベルよりも **15dB 以上** 低ければ、その暗騒音の影響を無視することができる。

### <カクテルパーティー効果>

いろいろな音が混在して聞こえる場合でも、着目している音だけを騒音の中で聞き分ける能力のこと。

### <音のマスキング効果>

#### 音がかぶさる効果

- ・二つの音が同時に存在するとき、一つの音がほかの音を聞こえにくくする現象をいう。
- ・低音は**高音をマスキング**する。
- ・二つの音が同じ周波数ならば、マスキング効果が大きくなる。
- ・目的音（マスクされる音）の周波数に対して、妨害音（マスクする音）の周波数が低い場合に生じやすい。

## 「騒音防止対策」

- ・壁の透過損失を大きくする。  
壁の材料を重くしたり、厚くする。または多重壁にする。
- ・室全体の吸音力を大きくする。  
内装仕上げ材の吸音率を大きくする。
- ・室全体の気密性を高める。  
特にサッシの気密性を高める。  
**2重サッシ**にし、相互の間隔を **10～15cm** あける。
- ・建築設備機器に防振装置を設ける。  
防振ゴムや金属バネを使用する。
- ・配管などの防振対策。  
構造体に直に接しないようにする。
- ・床衝撃音対策。  
コンクリートスラブを厚くしたり、2重床や2重天井にする。

## 「残響」

室内で発生した音が、周りの壁などに反復反射するため、音源を停止した後でも室内に音が残る現象。

### <残響時間>

室内に一定の強さの音を出し、定常状態に達してから音源を止め、室内の音の平均エネルギー密度が最初の百万分の一に下がるまで、すなわち音の強さのレベルが60dB下がるまでに要する時間。

### <最適残響時間>

- ・ 室の使用目的に対して最も適した残響時間をいい、室の用途と室容積により決まる。
- ・ 音楽主体の室は、比較的長めの残響時間(1.5秒程度)とする。
- ・ 講演や会話を主体とした室では、明瞭度を重視するので、比較的短い残響時間(1秒程度)にする。
- ・ 最適残響時間は、一般に室容積が増大するほど大きくなる。

### <セービンの残響式>

$$\text{残響時間} = 0.161V/A = 0.161V/\alpha S$$

V：室容積

A：室内の吸音力 (m<sup>2</sup>)

$\alpha$ ：平均吸音力

S：室内全表面積 (m<sup>2</sup>)

- ・ 残響時間は室容積に比例し、室内の総吸音力に反比例する。
- ・ 総吸音力は室内各部の吸音率や表面積が大きくなれば、また人間やイスなどが多くなれば大きくなる。
- ・ 残響時間は、発生音の大小の要素は含まれていない。
- ・ 天井高が1/2になっても、室容積Vは1/2になるが、室内の総表面積Sも変化するので、残響時間は1/2にはならない。
- ・ 直方体の室で室容積Vを2倍にしても、室内の総表面積Sもそれに応じて増加するので、残響時間は単純に2倍にはならず、2倍よりも小さくなる。
- ・ 人間には吸音力があるため、空席時より満席時のほうが、音が吸収され減衰が早まり、残響時間は短くなる。
- ・ 室内の平均吸音率が大きい場合、セービンの残響式により求めた残響時間は、アイリングの残響式により求めたものよりも長くなる。  
(アイリングの方が正確)

## 「音響計画の留意点」

- ・直接音や反射音を含め、音圧分布をできるだけ均等にすることが望ましい。
- ・反響(エコー)を避ける。

「反響」とは、反射音と直接音の差が1/20秒程度以上ずれて、一つの音が二つ以上に聞こえる現象をいう。

反響の防止対策としては、反射音と直接音の行程差が17m（音速の1/20）を超えないようにする。

劇場など大きな空間では、17mを超えるおそれがあるので、後方壁や天井面に吸音材を使い、音の反射を防止する。

- ・凹曲面を避ける。

ある程度の強い反射音が1か所に集中することにより音の焦点ができる可能性があり、音圧分布が均等でなくなる。

壁や天井面を不規則面として、音を拡散させる。

- ・フラッターエコー（反射性の壁面間を、音が繰り返し往復反射する現象）を避ける。
- ・音の回走（凹面で音が順次反射しながら凹面に沿って進む現象）、音の干渉（二つの音波が一つの点でぶつかり、うなりを生じる現象）を避ける。

## 「音響障害」

### <ブーミング現象>

不自然に低音が強調されて響いてしまう現象。

低い周波数領域になるほど、また、**室の寸法が小さいほど、固有周波数密度が疎になる**のでこの現象が起りやすくなる。

### <フラッターエコー（定在波）> 例：日光東照宮の鳴き龍

平行な二つの壁や、床と天井の間で起こる音の反射のことで、反射音が重なり合って、音の大きい所と小さい所ができてしまう現象。

フラッターエコーは壁や天井が平行して並んでいる場合に起りやすい傾向にあり、それを防ぐには、天井や壁面の形状を家具を置いて平行ではなくして音の逃げ場を作ったり、音の反射を減らすために吸音したりするといった方法で解消させる。

床面へはカーペット、壁面はタペストリーやカーテンを取り付けることで対策することが可能。

### <カラーレーション>

発せられた直接音と、壁や家具などの反射して遅れてくる反射音との干渉によって、音色が変化して聞こえる現象。

### 【バツ問例】

- ・カラレーションは、「直接音」と「短い遅れ時間の反射音」の干渉によって、音の高さの変化が知覚される現象をいう。
- ・音の大きさの感覚量は、音圧レベルが一定の場合、低音域で小さく、10kHz付近で最大となる。
- ・屋外において、遠方の音源から伝搬する音の強さは、空気の音響吸収によって、低周波数域の音ほど減衰する。
- ・聴覚のマスクングは、マスキング（マスクする音）の周波数に近い音ほどマスクされやすく、マスキングの周波数に比べ、低い音のほうが高い音よりもマスクされやすい。
- ・カクテルパーティー効果は、周囲が騒がしいことにより、聞きたい音が聞き取りにくくなる現象をいう。
- ・空気中を伝搬する音のエネルギーの一部は、空気の粘性や分子運動等によって吸収されその吸収率は、周波数が低くなるほど大きくなる。
- ・アナウンススタジオの室内騒音の NC 推奨値は、一般に、NC-35 とされている。
- ・自由音場において、全指向性の点音源（指向性のない点音源）からの距離が 1m の点と 2m の点との音圧レベルの差は、3dB となる。
- ・障壁において生ずる回折による音の減衰効果は、一般に、高音域よりも低音域のほうが高い。

**【図問題】**

表に示す条件をもつ室A、B、Cにおける残響時間の大小関係として、最も適当なものは、次のうちどれか。

室名	室容積(m <sup>3</sup> )	室内表面積(m <sup>2</sup> )	平均吸音率
A	1,000	750	0.2
B	1,500	1,000	0.3
C	3,000	1,500	0.2

1.  $A > B > C$
2.  $A > C > B$
3.  **$C > A > B$**
4.  $C > B > A$