

# 自作スタジオのための音響理論入門

## Practical Acoustic Theories to Start Building DIY Studios

July 23, 2009

Tutorial Seminar 2

AES 14th Regional Convention, 2009 Tokyo

中原雅考

Masataka NAKAHARA

(SONA / ONFUTURE)

# Today's Menu

## 1. 音の伝搬：波長，周波数，音速

What is sound? : Wave length, Frequency, Sound speed

## 2. 高い音と低い音

High frequency and Low frequency sound

## 3. 波動音響の世界：定在波，固有モード

Wave acoustics : Standing wave, Eigen mode

## 4. 幾何音響の世界：虚像法，反射による位相干渉

Geometrical acoustics : Mirror method, Phase interference and a reflection sound

## 5. 統計音響の世界：残響時間，吸音率

Statistical acoustic : Reverberation time, Absorption coefficient

## 6. 音の距離減衰：臨界距離

Distance decay : Critical distance

## 7. 簡易コントロールルームの音響設計の流れ

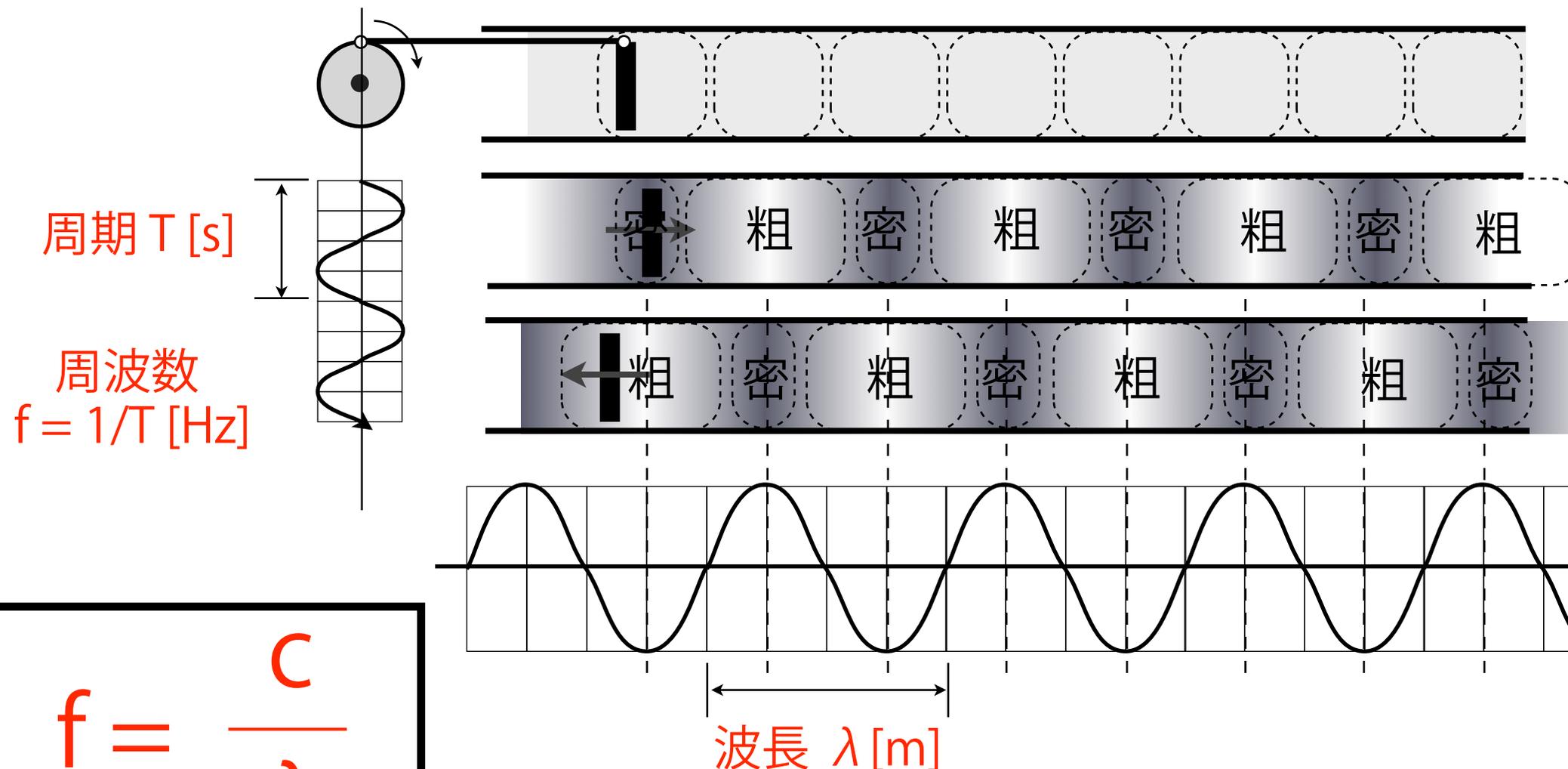
Flow of acoustic design for DIY studio

## 1. 音の伝搬：波長, 周波数, 音速

What is sound? : Wave length, Frequency, Sound speed

# 1. 音の伝搬 (音とは)

- 空気の圧縮・膨張の変化という情報が伝搬  $\Rightarrow$  波動音響
- ✕ 音という固まりが移動するのではない  $\Rightarrow$  幾何音響



$$f = \frac{c}{\lambda}$$

(音速  $c = 331.5 + 0.61 t$  [m/s],  $t$  [°C] 気温)  
 (344[m/s] @ 20[°C], 340[m/s] @ 14[°C])

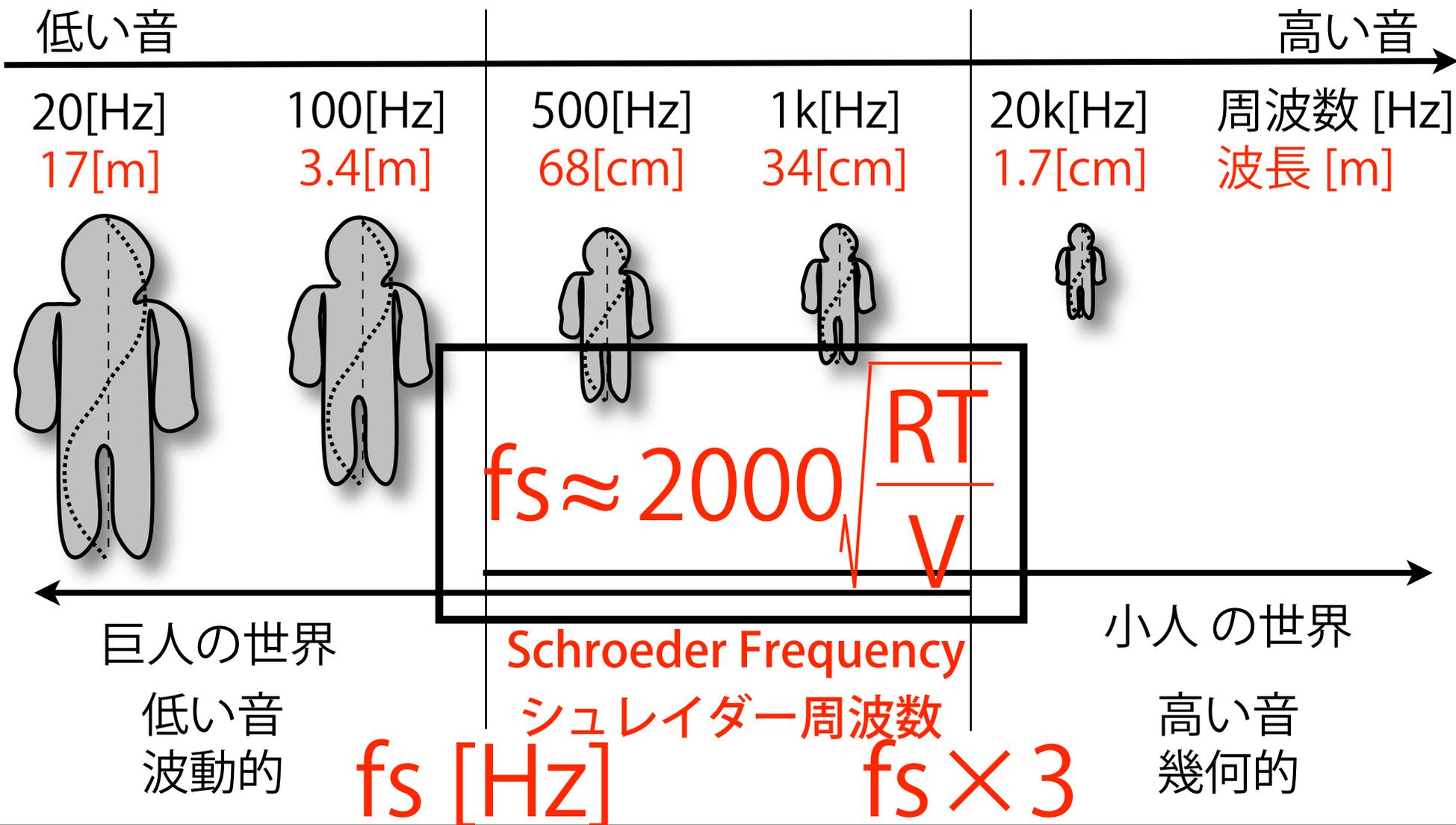
## 2. 高い音と低い音

High frequency and Low frequency sound Frequency, Sound speed

## 2-1. 小人の世界, 巨人の世界

小人と巨人の国境は, 住んでいる環境によって変化する (高い音と低い音の境界は, 音の存在している状況によって変化する)。

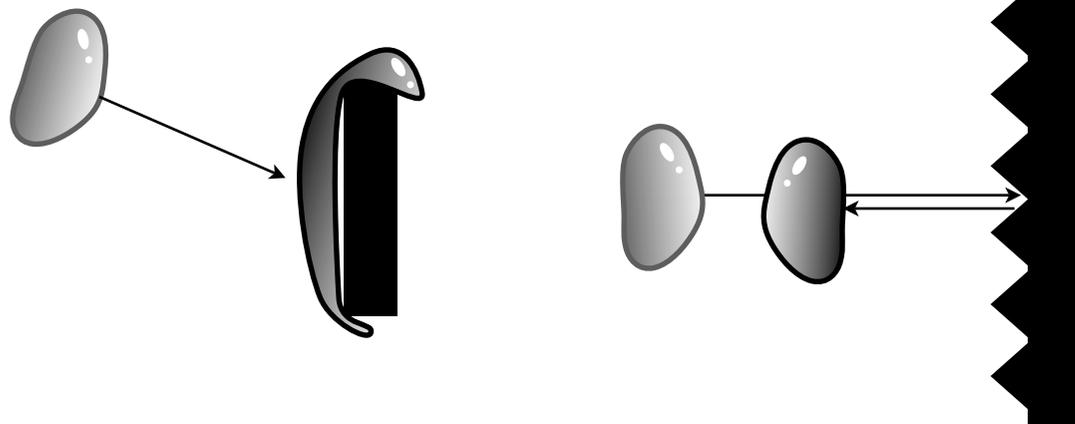
$$f = \frac{c}{\lambda}$$



## 2-2. 巨人の性格, 小人の性格

- ・ 巨人の性格 (低音, 波動的)

回折, (干渉)



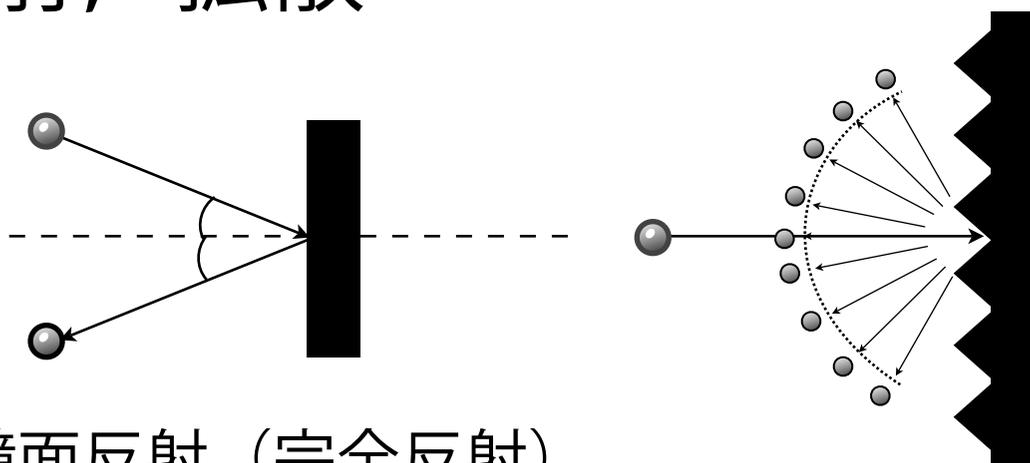
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}$$

← 波動音響で解析  
音を「波」として扱う

- ・ 小人の性格 (高音, 幾何的) ⇒ 大勢いる場合は, 統計的に扱う

反射, 拡散



← 幾何音響でも解析可能  
音の玉が飛んでくるイメージ  
波動音響だと正確な  
解析が可能

鏡面反射 (完全反射)

### 3. 波動音響の世界：定在波，固有モード

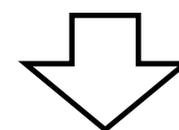
Wave acoustics : Standing wave, Eigen mode

### 3-1. モードの基本

部屋には、あるいくつかの決まった周波数の音しか存在できない。

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

「定在波」の発生  $\Rightarrow$  音が滞留  $\Rightarrow$  ピークディップの発生

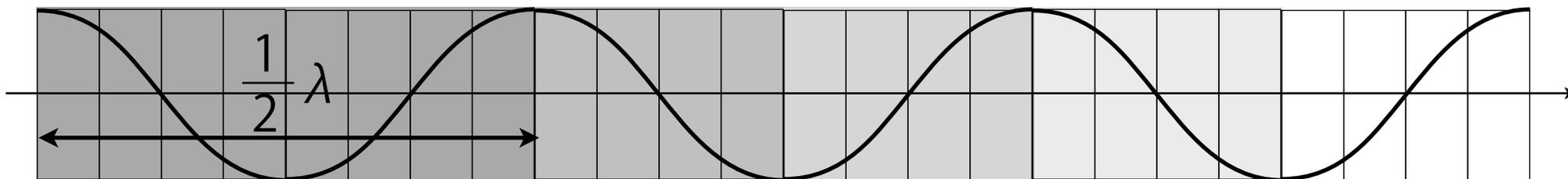


部屋の固有モード（部屋の共鳴）

## モードの基本

1. 壁際では、必ず音圧は最大となる。
2. 半波長の倍数の波形が部屋の寸法にフィットしたとき、定在波が発生する。

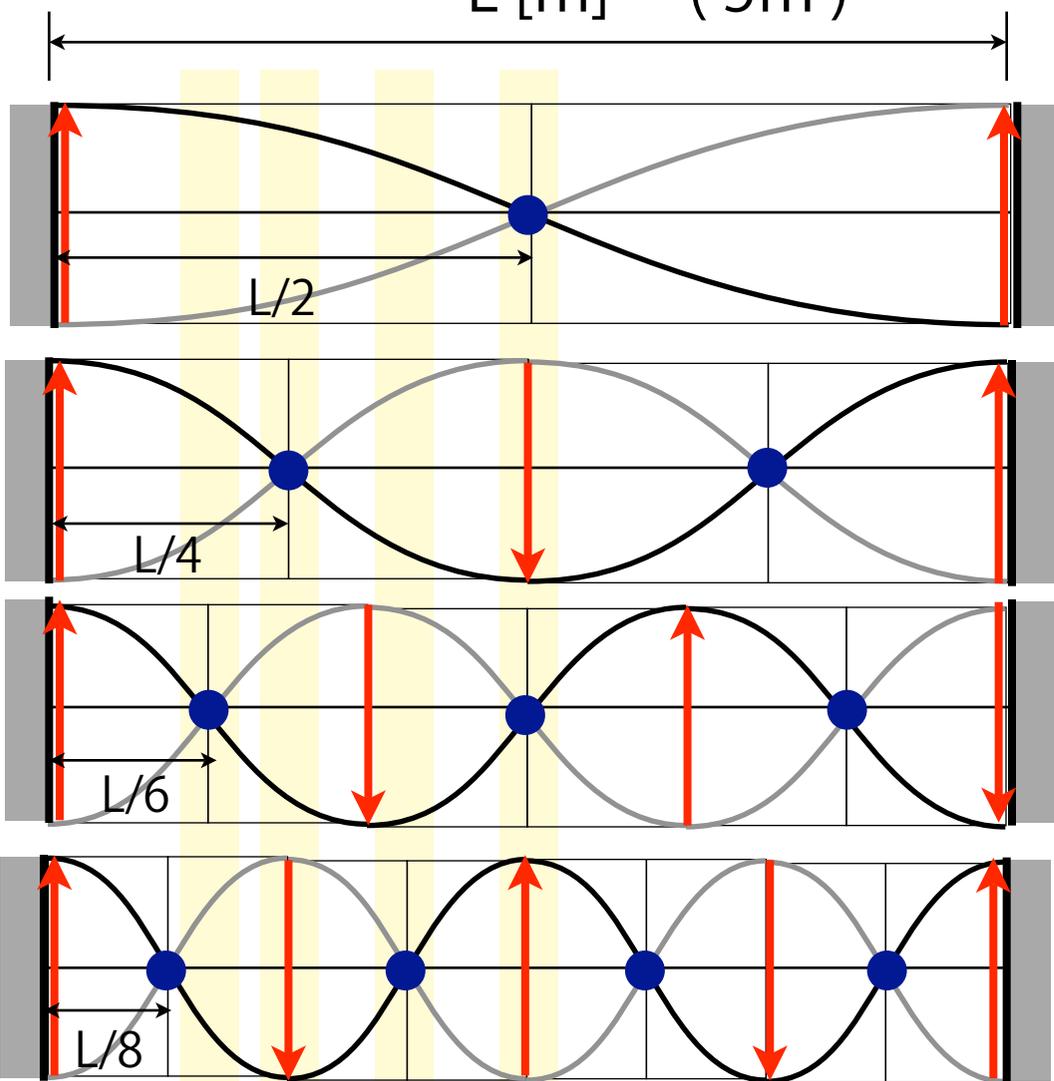
$$\frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots \Rightarrow \frac{m}{2}\lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots)$$



### 3-2. 一次元モード (Axial Mode)

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

↑↓ 腹：音圧最大  
 ⇒ ピーク  
● 節：音圧0  
 ⇒ デイップ  
 L [m] (5m)



$$L = \frac{m}{2} \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2}{m} L \Rightarrow f = \frac{m}{2} \cdot \frac{c}{L}$$

(m=1, 2, 3, ...)

第1次モード

$$L = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow \lambda = 2L \Rightarrow f = \frac{c}{2L}$$

(34Hz)

第2次モード

$$L = \lambda \Rightarrow \lambda = L \Rightarrow f = \frac{c}{L}$$

第3次モード

$$L = \frac{3}{2} \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2}{3} L \Rightarrow f = \frac{3c}{2L}$$

(68Hz)

第4次モード

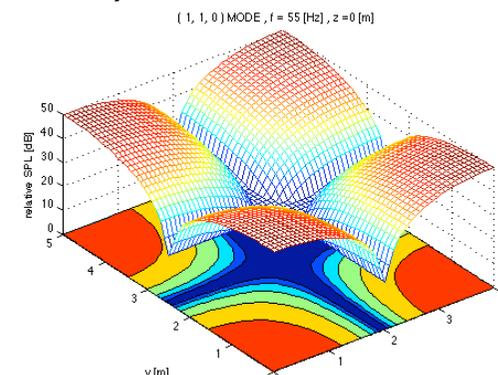
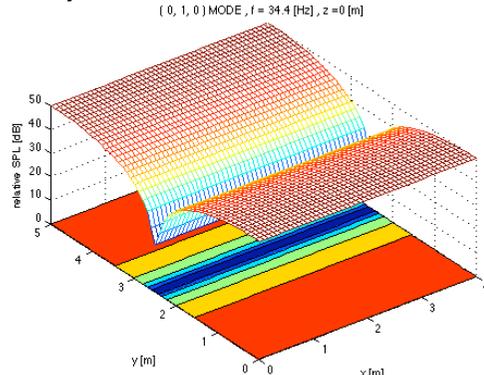
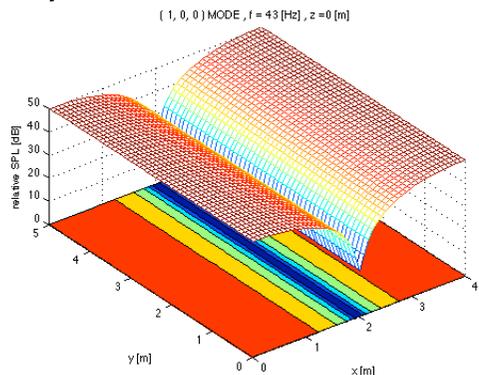
$$L = 2 \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{1}{2} L \Rightarrow f = \frac{2c}{L}$$

(102Hz)

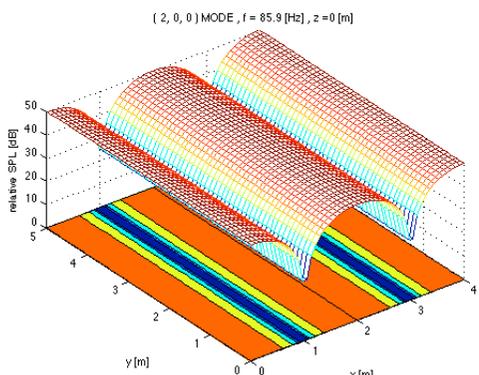
$$f = \frac{2c}{L}$$

(136Hz)

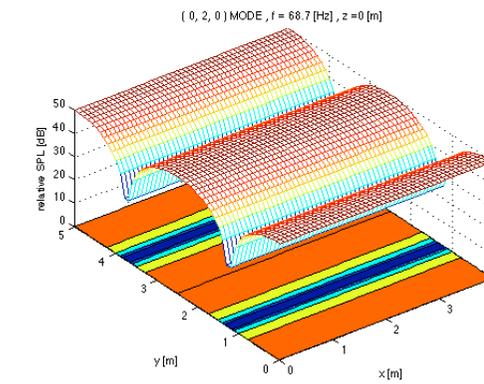
# 3-3. 一次元モード (Axial Mode) , 二次元モード (Tangential Mode)



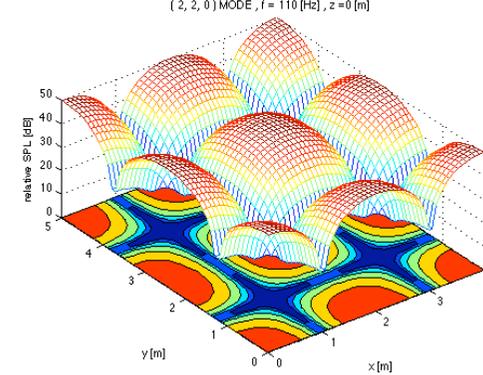
## (2, 0) モード



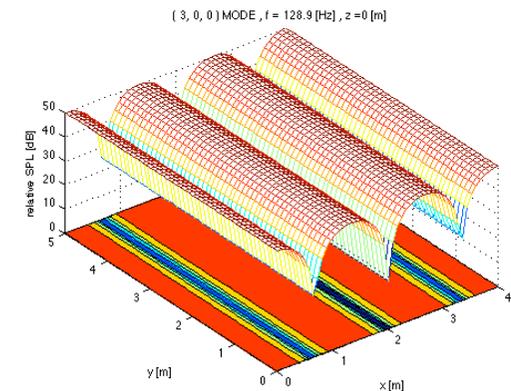
## (0, 2) モード



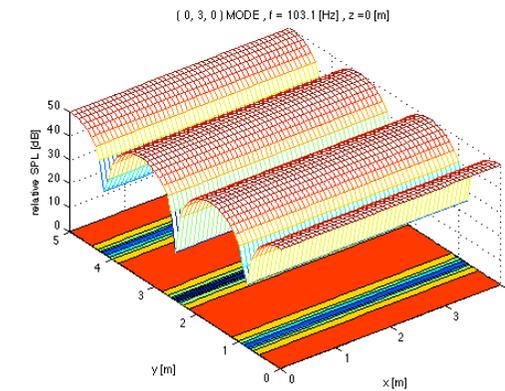
## (2, 2) モード



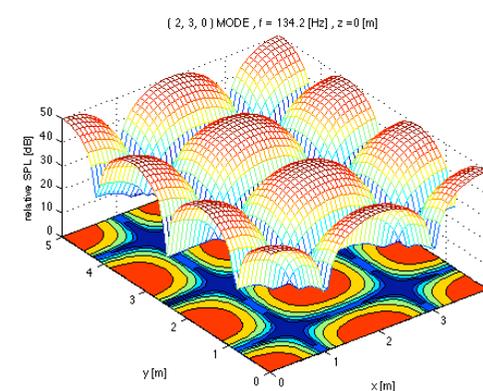
## (3, 0) モード



## (0, 3) モード



## (2, 3) モード



# 3-4. 一次元モード (Axial Mode)

二次元モード (Tangential Mode)

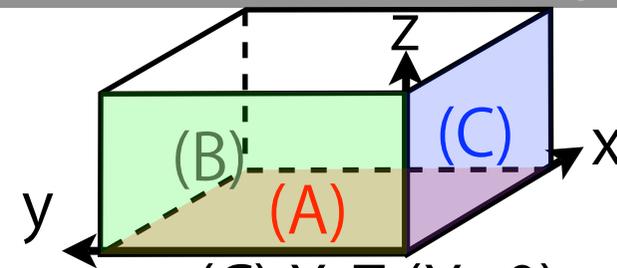
三次元モード (Oblique Mode)

(x, y, z)

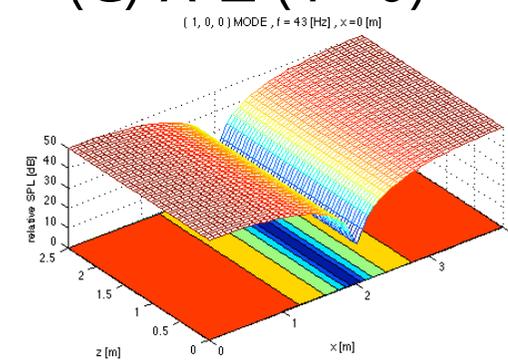
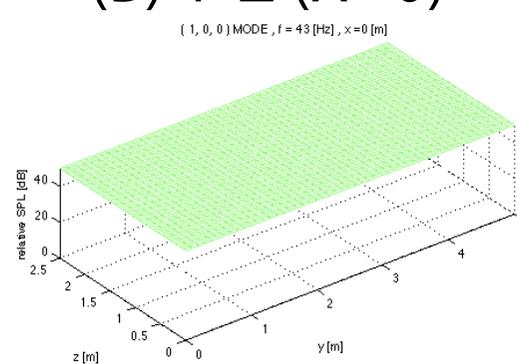
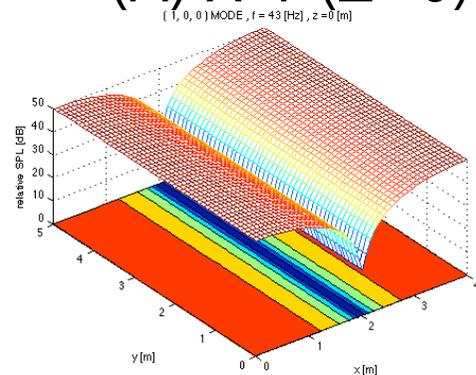
(A) X-Y (Z=0)

(B) Y-Z (X=0)

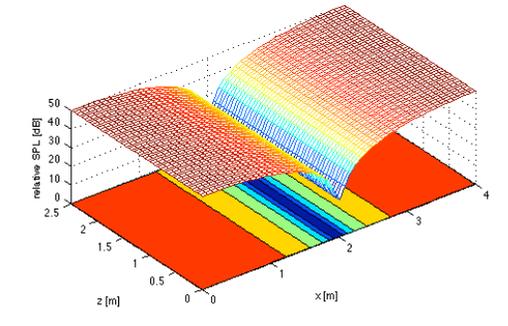
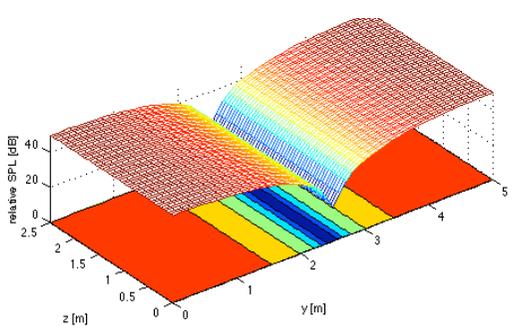
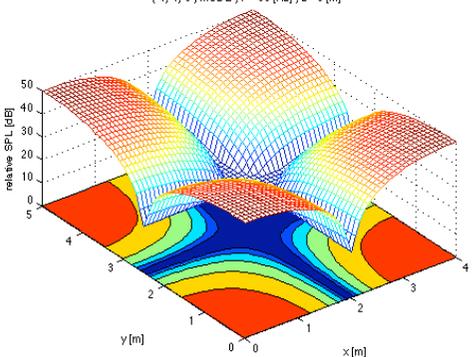
(C) X-Z (Y=0)



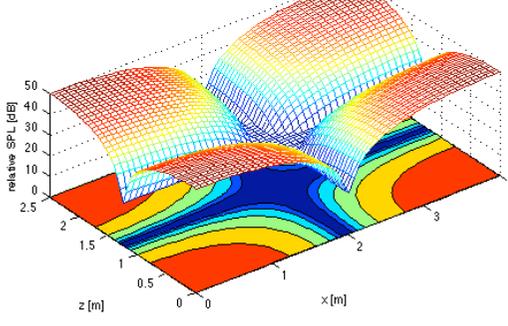
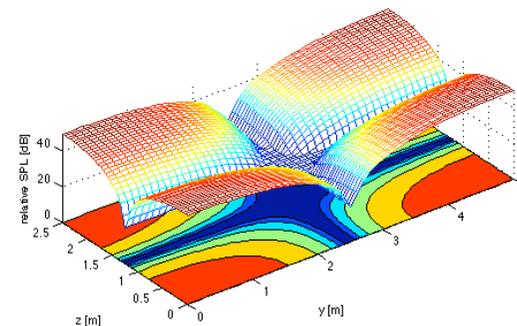
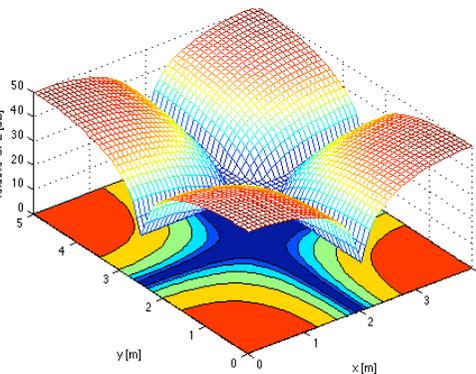
(1, 0, 0)



(1, 1, 0)



(1, 1, 1)



### 3-5. 固有モード周波数と縮退

#### 固有モード周波数 [Hz]

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

( $l_x, l_y, l_z$ ) = (5, 5, 5)

Axial Mode												Tangential Mode				Oblique Mode			
x				y				z											
$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]
1	0	0	34.4	0	1	0	34.4	0	0	1	34.4	1	1	0	48.6	1	1	1	59.5
2	0	0	68.7	0	2	0	68.7	0	0	2	68.7	0	1	1	48.6	2	2	2	119.1
3	0	0	103.1	0	3	0	103.1	0	0	3	103.1	1	0	1	48.6	3	3	3	178.6
4	0	0	137.5	0	4	0	137.5	0	0	4	137.5	1	2	0	76.9	1	2	1	84.2
5	0	0	171.9	0	5	0	171.9	0	0	5	171.9	0	2	2	97.2	2	1	1	84.2
6	0	0	206.2	0	6	0	206.2	0	0	6	206.2	2	0	2	97.2	1	1	2	84.2
7	0	0	240.6	0	7	0	240.6	0	0	7	240.6	3	3	0	145.8	2	2	1	103.1
8	0	0	275.0	0	8	0	275.0	0	0	8	275.0	0	3	3	145.8	1	2	2	103.1
9	0	0	309.3	0	9	0	309.3	0	0	9	309.3	3	0	3	145.8	2	1	2	103.1

( $l_x, l_y, l_z$ ) = (6, 3, 6)

Axial Mode												Tangential Mode				Oblique Mode			
x				y				z											
$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	f [Hz]
1	0	0	57.3	0	1	0	28.6	0	0	1	57.3	1	1	0	64.0	1	1	1	85.9
2	0	0	114.6	0	2	0	57.3	0	0	2	114.6	0	1	1	64.0	2	2	2	171.9
3	0	0	171.9	0	3	0	85.9	0	0	3	171.9	1	0	1	81.0	3	3	3	257.8
4	0	0	229.1	0	4	0	114.6	0	0	4	229.1	1	2	0	81.0	1	2	1	99.2
5	0	0	286.4	0	5	0	143.2	0	0	5	286.4	0	2	2	128.1	2	1	1	131.3
6	0	0	343.7	0	6	0	171.9	0	0	6	343.7	2	0	2	162.0	1	1	2	131.3
7	0	0	401.0	0	7	0	200.5	0	0	7	401.0	3	3	0	192.1	2	2	1	140.3
8	0	0	458.3	0	8	0	229.1	0	0	8	458.3	0	3	3	192.1	1	2	2	140.3
9	0	0	515.6	0	9	0	257.8	0	0	9	515.6	3	0	3	243.0	2	1	2	164.5

音圧分布

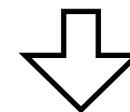
$$p = A \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right)$$

$$\Rightarrow 10 \times \log(p^2) = 20 \times \log(|p|) \text{ [dB]}$$

モード次数 ( $n_x, n_y, n_z$ )

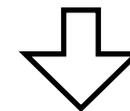
部屋の大きさ ( $l_x, l_y, l_z$ )

部屋の寸法比が単純



同じ固有モード

周波数が多発



部屋が激しく共鳴

**縮退**

モードの分散

- 黄金分割比 1 : 1.62
- 白銀比 1 : 2.41

## 3-6. モードの分散

寸法比の工夫

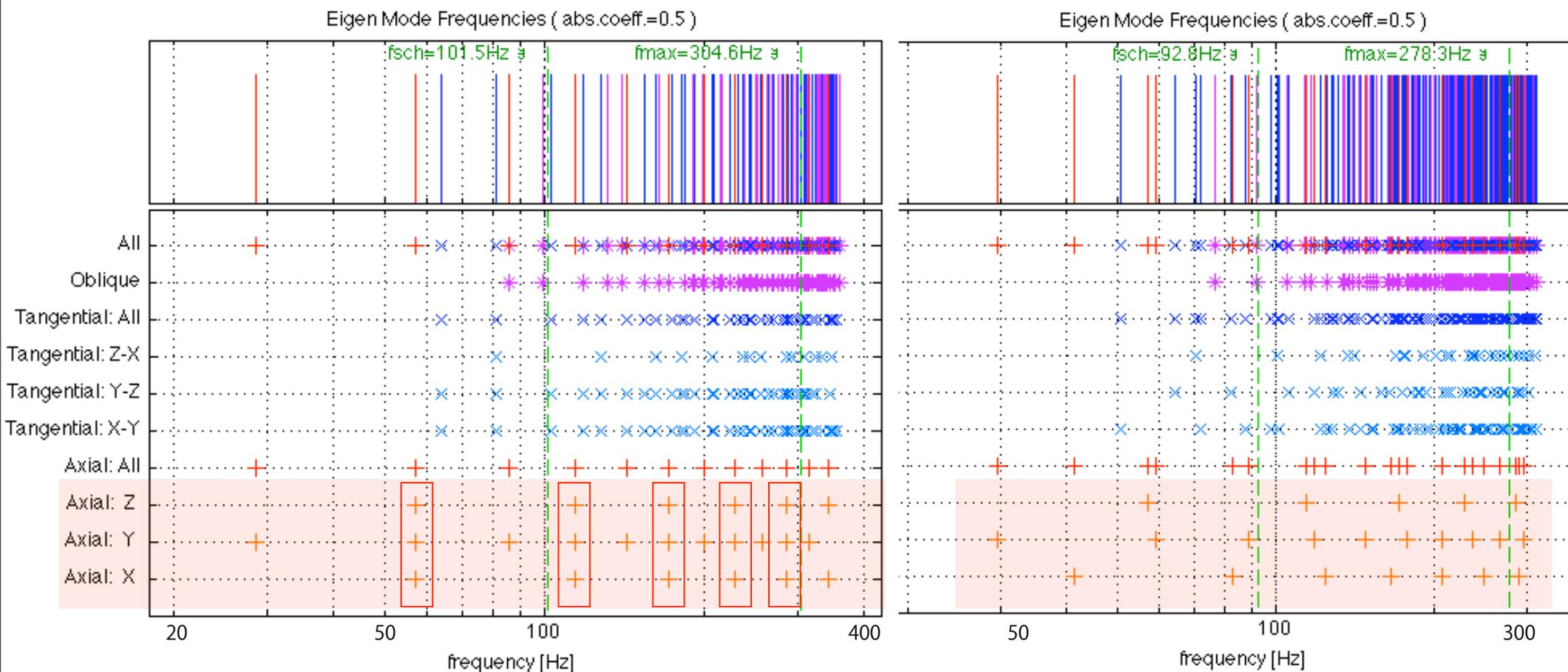
• 黄金分割比 1:1.62

• 白銀比 1:2.41

• ITU-R BS 1116-1  $1.1 (W/H) \leq L/H \leq 4.5 (W/H) - 4$ ,  $L/H < 3$ ,  $W/H < 3$

**【A】**  $(l_x, l_y, l_z) = (3, 6, 3)$

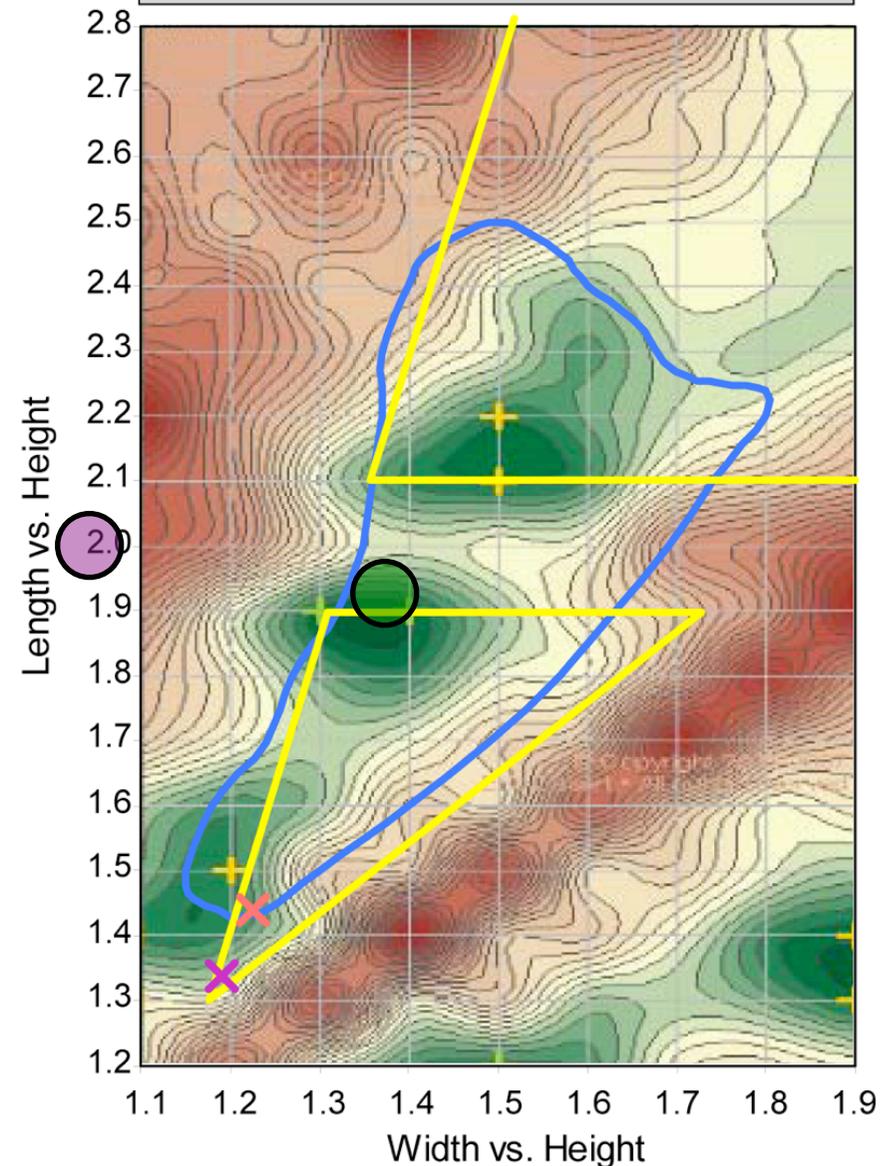
**【B】**  $(l_x, l_y, l_z) = (4.15, 5.8, 3)$



## 3-7. 室寸法比の評価チャート

- 【A】 (W, L, H) = (3, 6, 3)  
 $\Rightarrow L/H=2, W/H=1$
- 【B】 (W, L, H) = (4.15, 5.8, 3)  
 $\Rightarrow L/H=1.93, W/H=1.38$

- Contour map with  $\text{+}$   $\text{+}$  : M. M. Louden (Graphed by E. Desart)
- $\text{—}$  : R. Bolt
- $\text{—}$  : ITU-R / EBU
  - $\begin{cases} 1.1 (W/H) \leq D/H \leq 4.5 (W/H) - 4 \\ D/H < 3, W/H < 3 \end{cases}$
- $\text{x}$   $\text{x}$  : S. Ishii (Diamond/Golden Proportion (Log/Linear))



### 3-8. モードの制御

#### 吸音

$\lambda/4$  [m]の吸音材の厚みが必要

例)  $f = 100\text{Hz}$ の音を吸音しようとするとき、  
 $\lambda = c / f = 3.4\text{m}$ , すなわち,  $\lambda/4 = 86\text{cm}$ の厚さの吸音材が必要

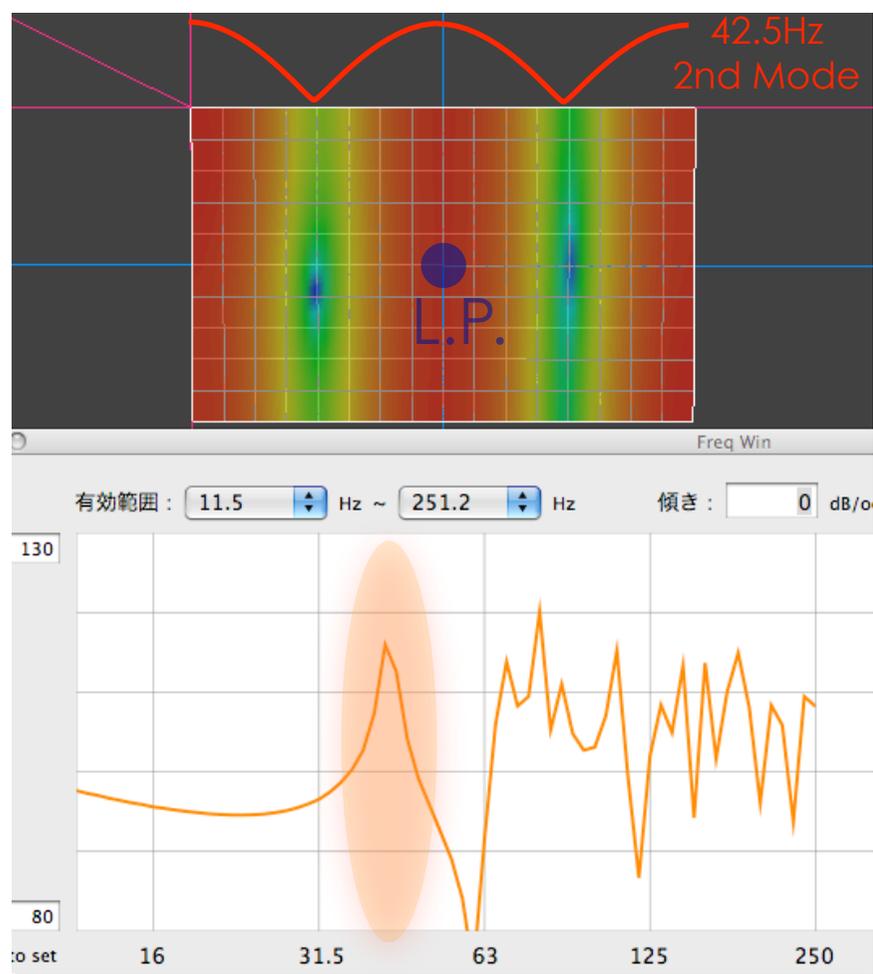
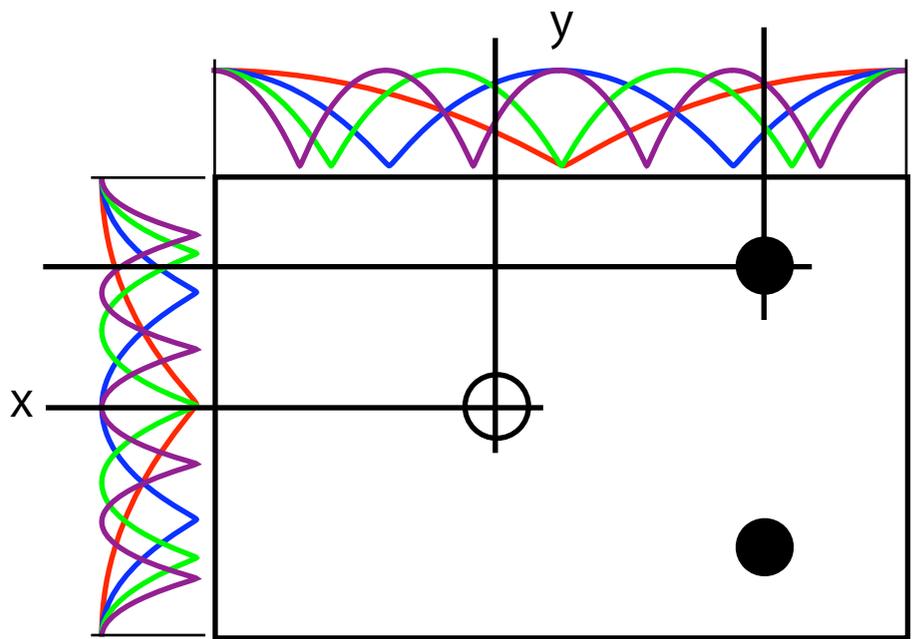
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

#### 節点駆動

モードの節点に音源がある場合, そのモードは生じない

音源 (スピーカ)  $\Rightarrow$  モードの節となる位置に配置  
 リスニングポイント  $\Rightarrow$  モードの節や腹となる位置を避けて配置 (特に節は避ける)

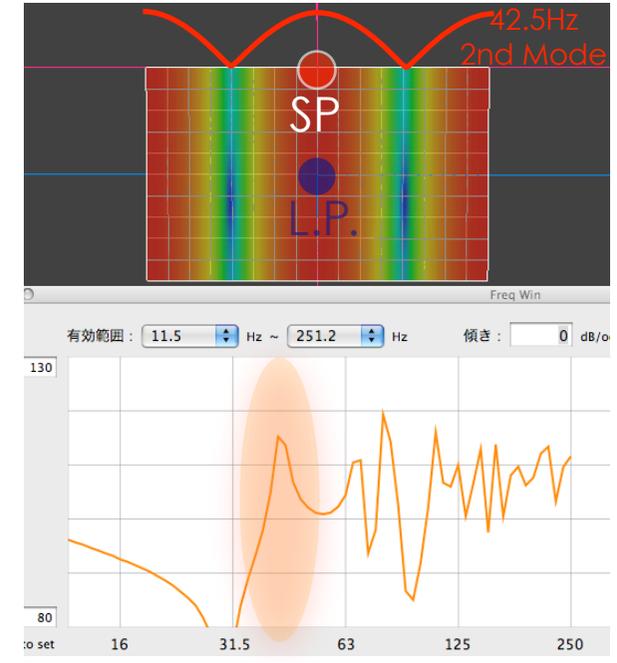
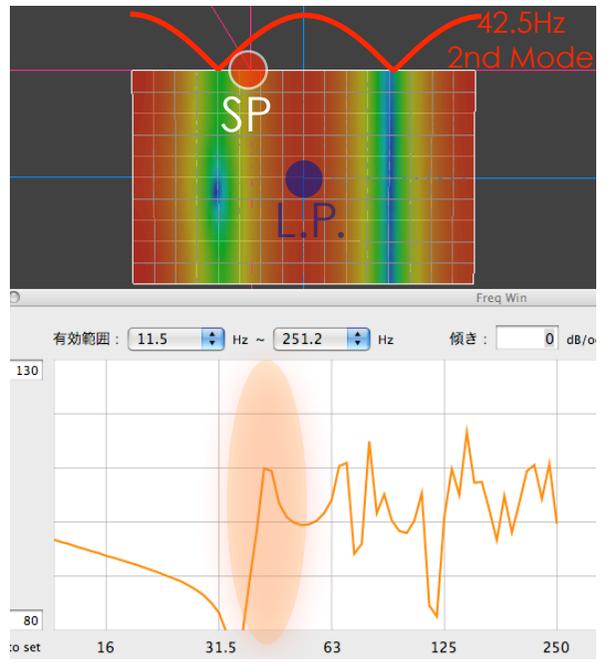
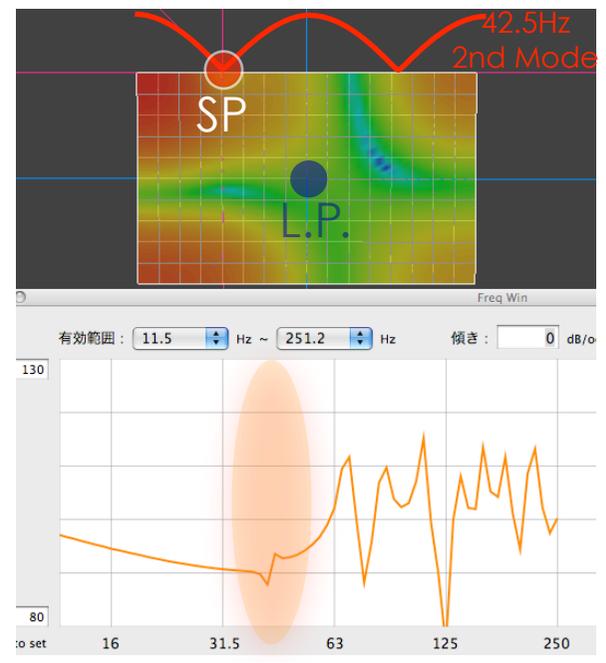
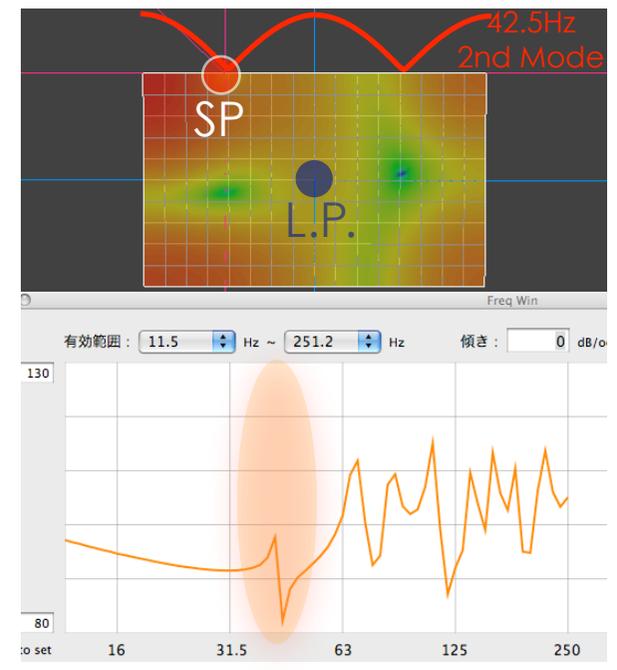
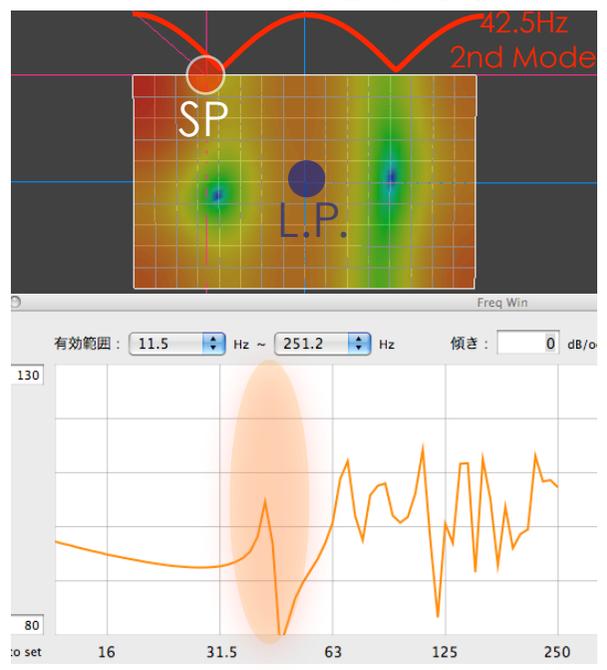
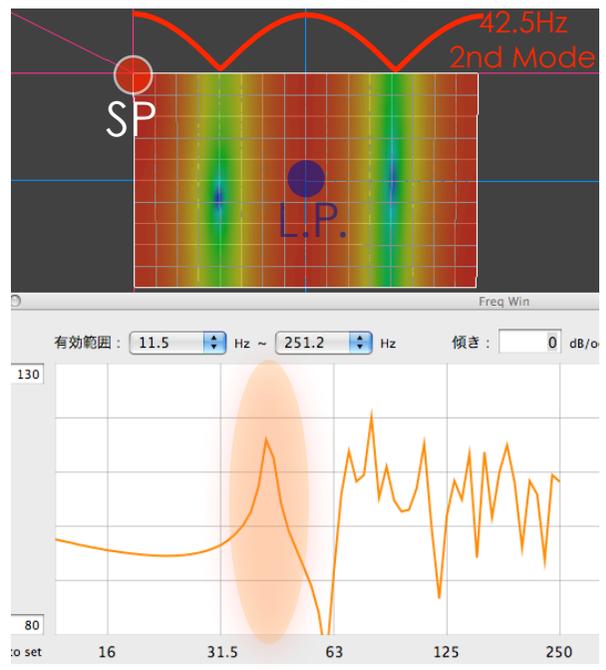
- 1次モード
- 2次モード
- 3次モード
- 4次モード



(2D, 8mx5m, 42.5Hz (2,0))

**節点駆動**

モードの節点に音源がある場合, そのモードは生じない  
音源 (スピーカ) ⇒ モードの節となる位置に配置



## 4. 幾何音響の世界：虚像法, 反射による位相干渉

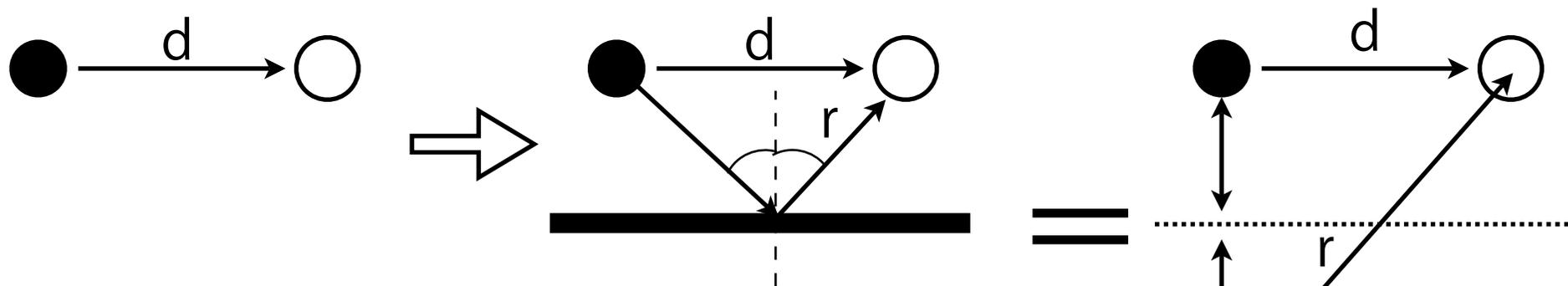
Geometrical acoustics :

Mirror method, Phase interference and a reflection sound

# 4-1. 幾何音響の世界 ( $f_s \sim f_s \times 3$ )

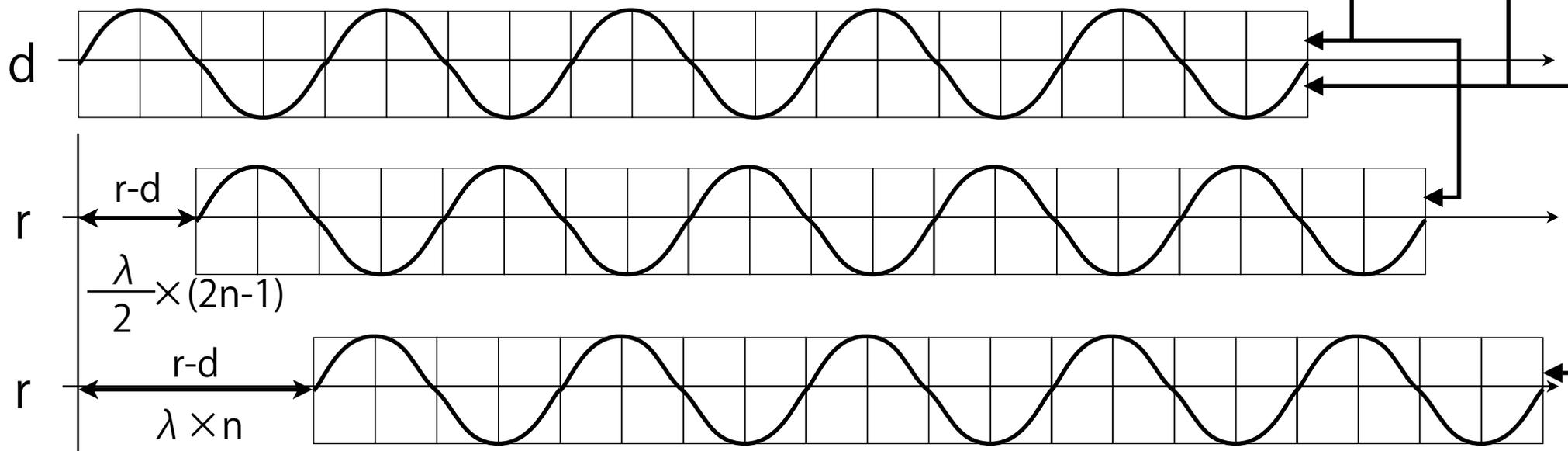
音の反射 = 虚音源の出現  $\Rightarrow$  幾何音響

実音源と虚音源との位相干渉  $\Rightarrow$  波動音響



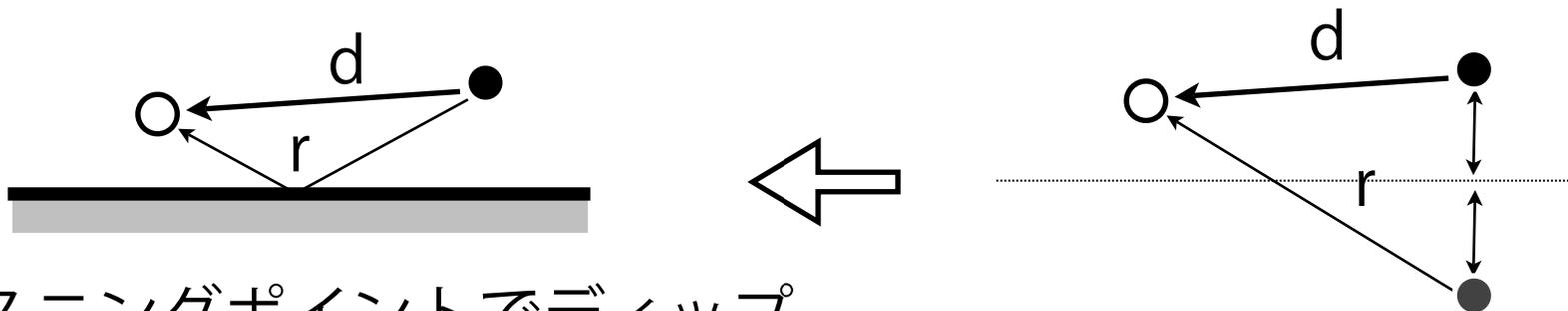
大きい反射面, 固い反射面  $\Rightarrow$  低域まで含んだ虚音源  
 小さい反射面, 柔らかい反射面  $\Rightarrow$  高域だけの虚音源

ディップ  $-\infty\text{dB}$       ピーク  $+6\text{dB}$



# 4-2. 反射による位相干渉

波動音響的なとらえ方：低域の音響処理

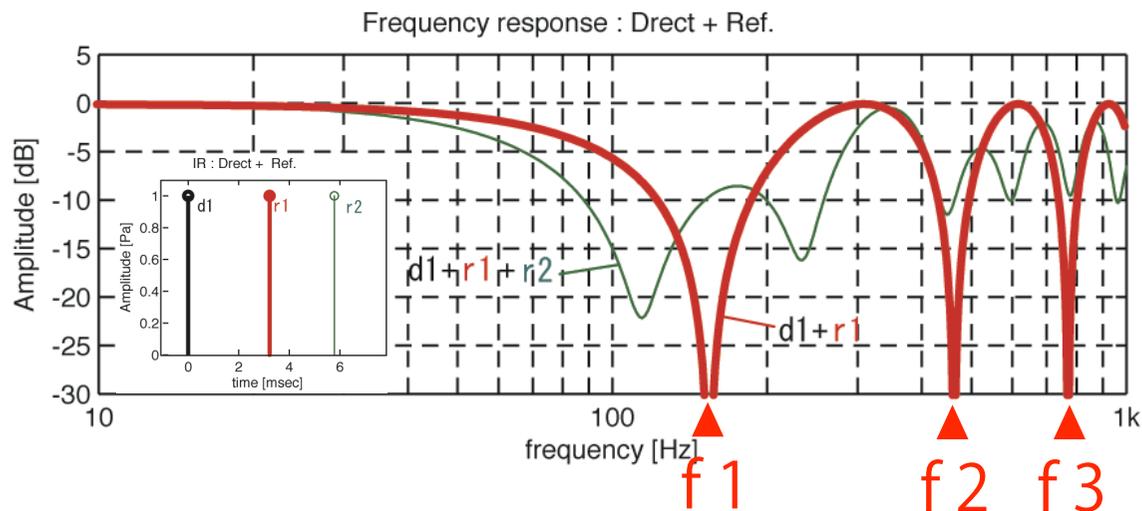
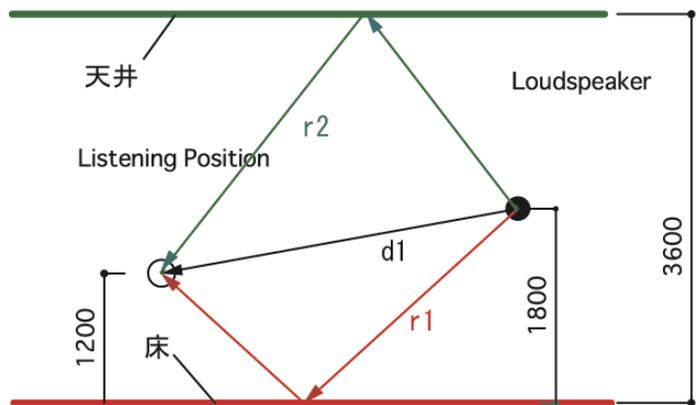


リスニングポイントでディップ

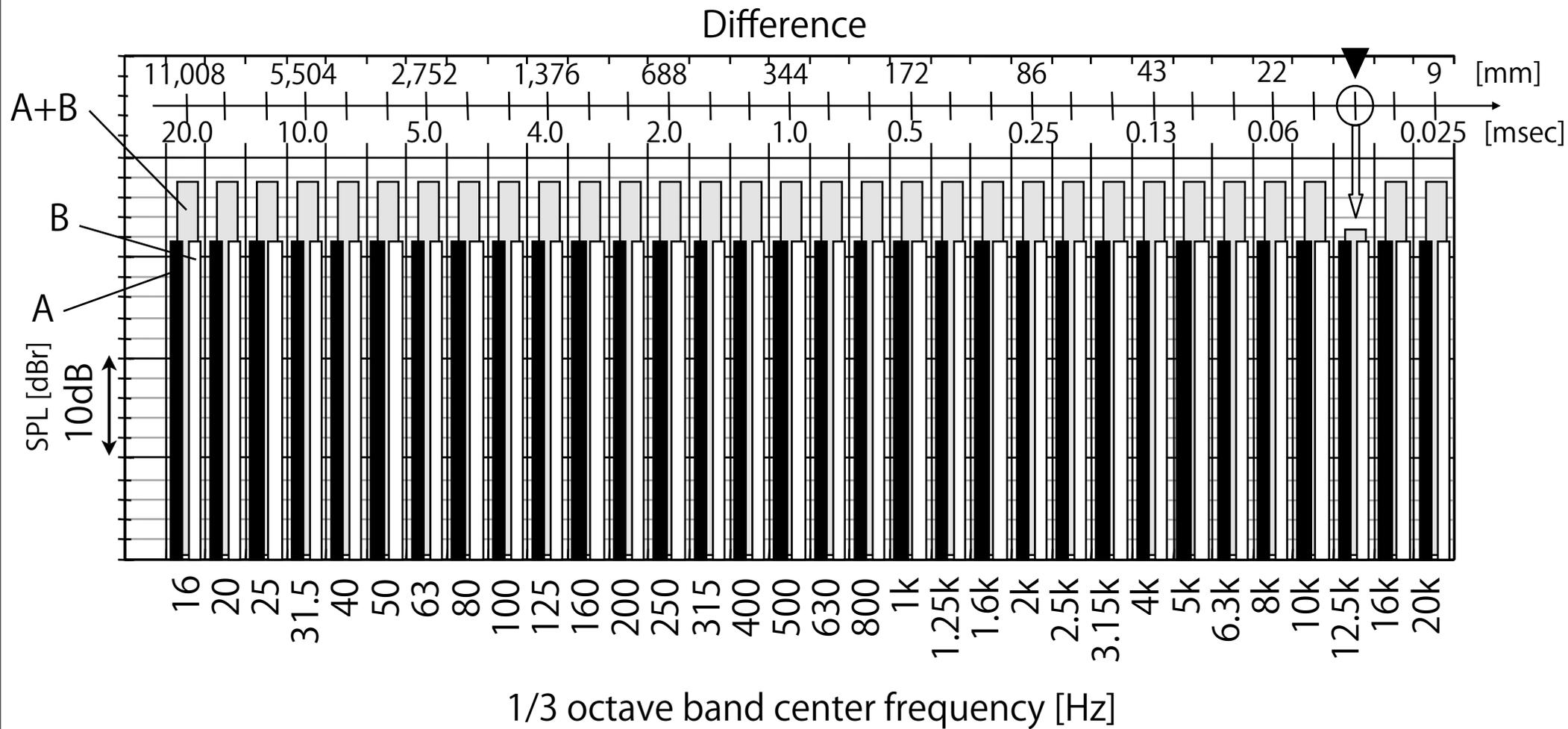
$$r-d = \frac{\lambda}{2} \times (2n-1) \Rightarrow \lambda = \frac{2 \times (r-d)}{(2n-1)} \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c \times (2n-1)}{2 \times (r-d)} \quad [\text{Hz}]$$

(n = 1, 2, 3, ...)

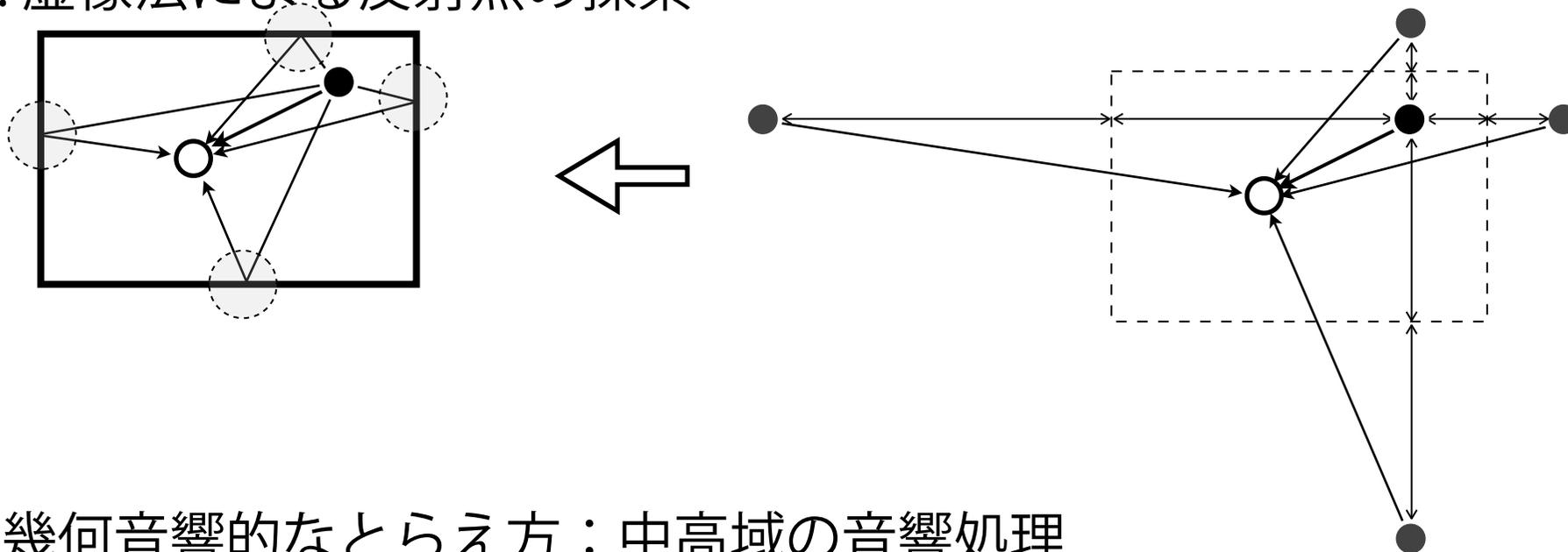
$$\Rightarrow f_1 = \frac{c}{2 \times (r-d)}, \quad f_2 = 3 \times f_1, \quad f_3 = 5 \times f_1, \quad f_4 = 7 \times f_1 \quad \dots \quad [\text{Hz}]$$



## 4-3. 距離差, 時間差によって生じるディップ周波数



# 4-4. 虚像法による反射点の探索

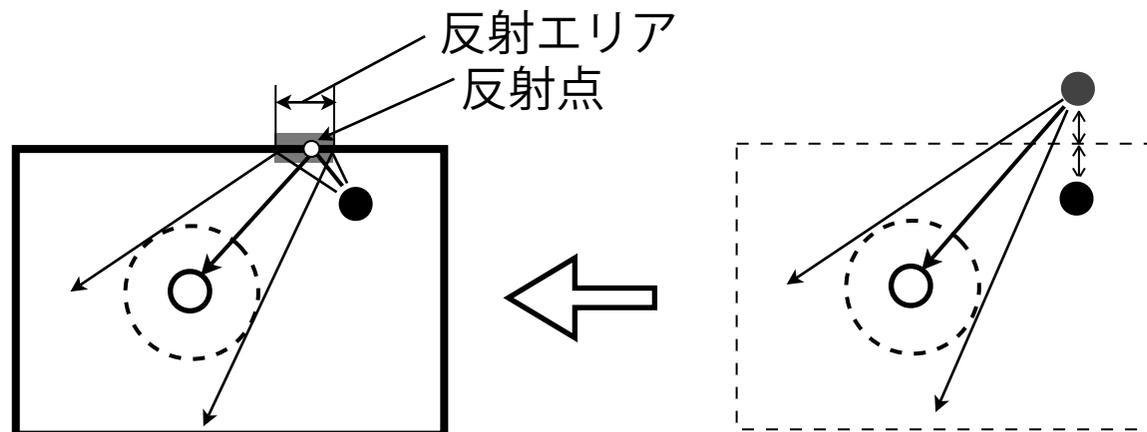


## 幾何音響的なとらえ方：中高域の音響処理

- の箇所を吸音 ⇒ リスニングポイントに反射音を与えない (RFZ: Reflection Free Zone)
- の箇所を反射 ⇒ リスニングポイントに初期反射音を与える (DFR: Decorrelated First Reflection)
- の箇所を拡散 ⇒ リスニングポイントに多少反射音を与える (Ambechoic)

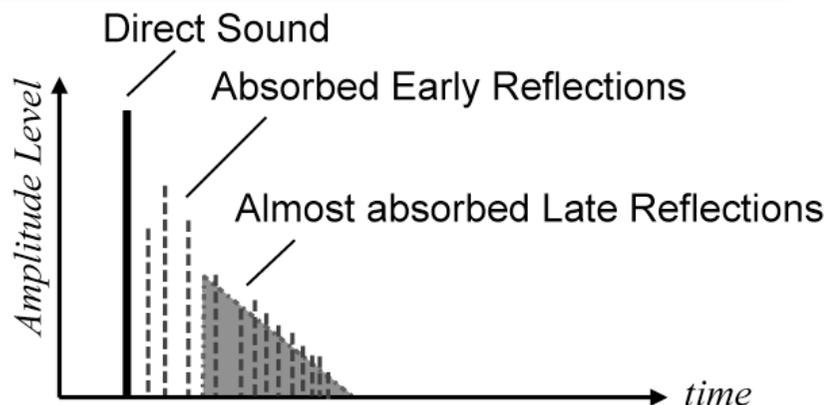
## 虚像法の応用

リスニングエリアと  
反射エリア

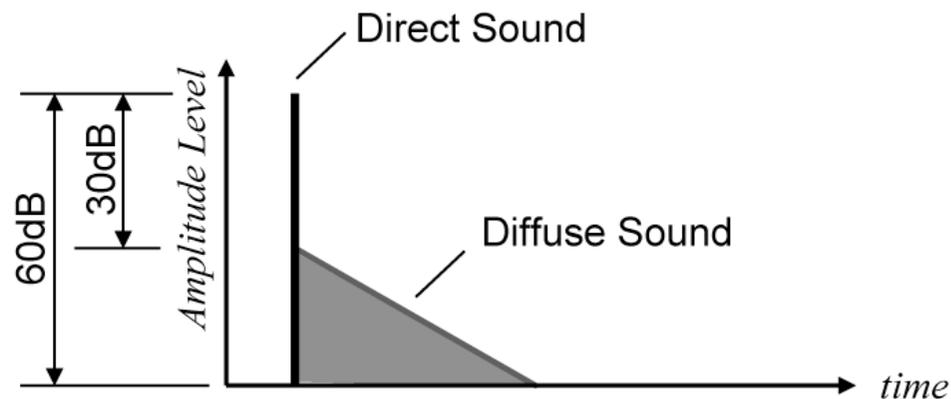


## 4-5. モニター環境における反射音処理の代表例

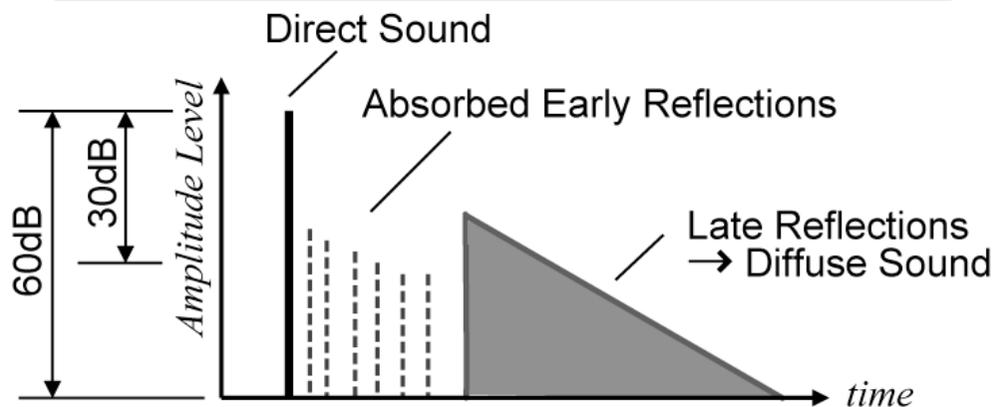
(A) Absorption (Non-Environment Room)



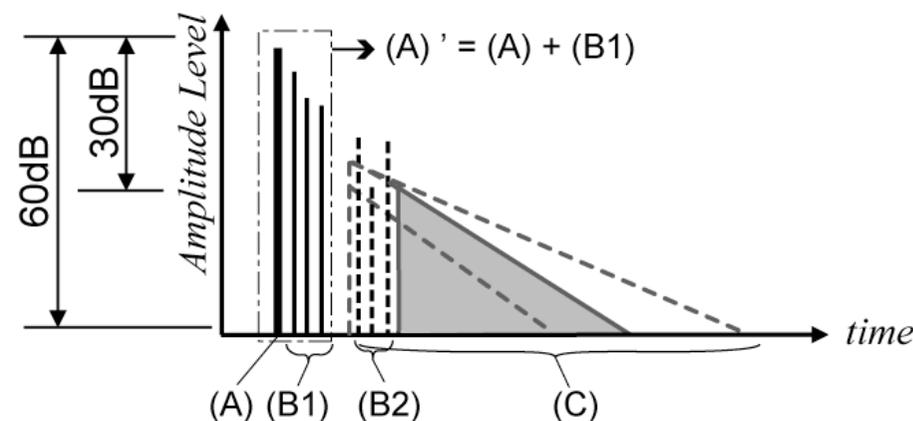
(C) Ambechoic (Ambient Anechoic)



(B) RFZ (Reflection Free Zone)



DFR (Decorrelated First Reflections)



- (A) Direct Sound
- (B1) Decorrelated Useful Reflections
- (B2) Absorbed or Diffused Useless Reflections
- (C) Adjusted Diffuse Sound
- (A') Listening Impression of a Direct Sound

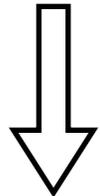
## 5. 統計音響の世界：残響時間，吸音率

Statistical acoustic : Reverberation time, Absorption coefficient

## 5-1. 統計音響の世界 (3×fs 以上)

幾何的な振る舞いをする音がたくさん存在する ⇒ 統計的に処理する

統計音響学：拡散音場を基本とした理論



室内のどの場所でも音響エネルギーが一定 (均一なエネルギー分布)

室内のどの場所でもあらゆる方向から音が到達している (定位の無い音場)

残響理論 (W.C. Sabine, 1900)

【音が60dB減衰するまでの時間】

(A) Sabineの残響式 
$$RT = K \frac{V}{S \bar{\alpha}} \text{ [s]}$$

※デッドな部屋では、実際より大きな値となる

(B) Eyringの残響式 
$$RT = K \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \text{ [s]}$$

※虚像法, 平均自由行路の考え方を導入して  
デッドな部屋にも対応

(C) Eyring-Knudsenの残響式

$$RT = K \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}) + 4mV} \text{ [s]}$$

※空気吸音の影響を考慮

V: 室容積 [m<sup>3</sup>]

S: 室の総表面積 [m<sup>2</sup>]

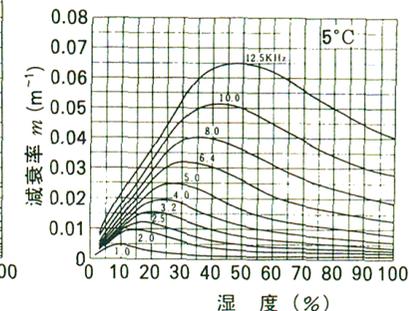
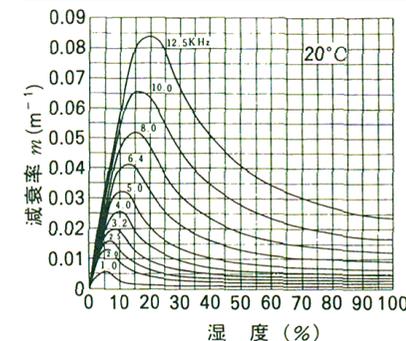
$\bar{\alpha}$ : 室の平均吸音率

(A = S  $\bar{\alpha}$ : 吸音力 [m<sup>2</sup>])

$$K = \frac{24}{c \log(e)} \approx 0.161 \text{ [s/m]}$$

平均自由行路  $mfp = \frac{4V}{S} \text{ [m]}$

(反射から反射までの平均距離)



## 5-2. 残響計算

$$\text{Eyringの残響式} \quad RT = K \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \approx \frac{0.161 V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad [s]$$

V : 室容積 [m<sup>3</sup>]  
 S : 室の総表面積 [m<sup>2</sup>]  
 $\bar{\alpha}$  : 室の平均吸音率  
 (A = S  $\bar{\alpha}$  : 吸音力 [m<sup>2</sup>])

残響時間を計算 ← 部屋の平均吸音率を算出 ← 各面の吸音力を算出

5m×5m×2m (S<sub>all</sub>=90 [m<sup>2</sup>], V=50[m<sup>3</sup>]) の部屋で, 以下のような吸音割り付けの場合,

部位	吸音率 $\alpha$	面積 S [m <sup>2</sup> ]	吸音力 A = $\alpha \times S$ [m <sup>2</sup> ]
壁1	0.5	15	7.5
壁2	0.2	25	5
床	0.1	25	2.5
天井1	0.3	10	3
天井2	0.1	15	1.5
合計	-	90	19.5
平均	0.22	← $\bar{\alpha} = A \text{の合計} / S \text{の合計}$	

$$\begin{aligned} RT &= \frac{0.161 V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \\ &= \frac{0.161 \times 50}{-90 \ln(1-0.22)} \\ &= 0.36 [s] \end{aligned}$$

逆に, 測定した残響時間から, 部屋の平均吸音率を算出する場合,

$$RT = K \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \Rightarrow \bar{\alpha} = 1 - e^{\frac{-K \times V}{S \times RT}} \approx 1 - 2.718^{\frac{-0.161 \times V}{S \times RT}}$$

【参考】吸音率資料(1)：出展「建築・環境音響学第2版」前川純一，森元政之，坂上公博（共立出版）

2-A 一般建築材料吸音率予測値

周波数(Hz)

No.	材 料	周波数(Hz)					
		125	250	500	1 k	2 k	4 k
1	コンクリート打放し面	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
2	モルタル こてみがき，プラスター 大理石，タイル張り仕上	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
3	壁クロス張り（コンクリート下地）	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.08
4	床プラスチックタイル張り（ 〃 ）	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
5	根太床（寄木，縁甲板張り舞台床）	0.16	0.14	0.11	0.08	0.08	0.07
6	ニードルパンチカーペット	0.03	0.04	0.06	0.10	0.20	0.35
7	パイルカーペット・10mm	0.09	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40
8	ガラス壁 10mm	0.15	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
9	ガラス窓（木製サッシュ）	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
10	プラスチック照明板（910×910×2mm）	0.40	0.25	0.20	0.20	0.22	0.25
11	ビロードカーテン（ひだなし）	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
12	2倍ひだ（空気層 100mm）	0.10	0.25	0.55	0.65	0.70	0.70
13	〃 500mm）	0.15	0.25	0.50	0.75	0.80	0.85
14	砂利 厚 150mm	0.15	0.30	0.80	0.42	0.61	0.72
15	砂（乾燥） 厚 125mm	0.24	0.34	0.45	0.62	0.76	0.95
16	水 面	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
17	舞台反射板	0.20	0.13	0.10	0.07	0.06	0.06
18	反射板なしで同位置の等価吸音率	0.40	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60
19	プロセニウム開口	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
20	投光室開口（内部吸音なし）	0.10	0.15	0.20	0.22	0.25	0.30
21	換気口，ダクト開口等	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85
吸 音 力 (m <sup>2</sup> /個)							
22	ベニヤ木製椅子	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03
23	ビニールレザー張り劇場椅子	0.04	0.13	0.22	0.17	0.16	0.11
24	モケット張り劇場椅子	0.14	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
25	人物（劇場椅子に坐った成人）	0.25	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40

2-B 多孔質材料吸音率予測値

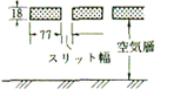
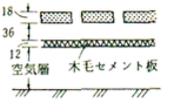
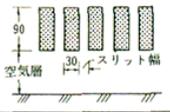
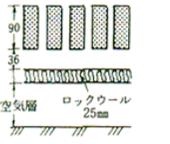
No.	材 料 名	厚さ (mm)	空気層 (mm)	周 波 数 (Hz)					
				125	250	500	1 k	2 k	4 k
1	グラスウール 16~24 (kg/m <sup>3</sup> )	25	0	0.10	0.30	0.60	0.70	0.80	0.85
2		50	0	0.20	0.65	0.90	0.85	0.80	0.85
3		100	0	0.60	0.95	0.95	0.85	0.80	0.90
4		25	40	0.15	0.40	0.70	0.85	0.90	0.95
5		50	40	0.25	0.80	0.95	0.90	0.85	0.90
6		25	100	0.22	0.57	0.83	0.82	0.90	0.90
7		50	100	0.45	0.97	0.99	0.85	0.80	0.92
8		25	300	0.65	0.70	0.75	0.80	0.75	0.85
9		50	300	0.75	0.85	0.85	0.80	0.80	0.85
10	グラスウール 32~48 (kg/m <sup>3</sup> )	25	0	0.12	0.30	0.65	0.80	0.85	0.85
11		50	0	0.20	0.65	0.95	0.90	0.80	0.85
12		25	40	0.12	0.45	0.85	0.90	0.85	0.90
13		50	40	0.28	0.90	0.95	0.87	0.85	0.94
14	25	100	0.25	0.70	0.90	0.85	0.85	0.90	
15	グラスウール 32~40 (kg/m <sup>3</sup> ) (グラスクロス仕上)	100	0	0.70	1.00	0.98	0.85	0.70	0.80
16		100	40	0.78	1.00	0.99	0.94	0.90	0.90
17		100	100	0.80	1.00	0.99	0.93	0.84	0.84
18	ロックウール 40~140 (kg/m <sup>3</sup> )	25	0	0.10	0.30	0.70	0.80	0.80	0.85
19		50	0	0.20	0.65	0.95	0.90	0.85	0.90
20		25	40	0.20	0.65	0.90	0.85	0.80	0.80
21		50	40	0.35	0.85	0.95	0.90	0.85	0.85
22		25	100	0.35	0.65	0.90	0.85	0.85	0.80
23		50	100	0.55	0.90	0.95	0.90	0.85	0.85
24		25	300	0.65	0.85	0.85	0.80	0.80	0.85
25		50	300	0.75	0.95	0.95	0.85	0.85	0.90
26		軟質ウレタンホーム	20	0	0.07	0.20	0.40	0.55	0.70
27	20		40	0.10	0.25	0.60	0.90	0.80	0.85
28	発泡スチロール	25	0	0.04	0.05	0.06	0.14	0.30	0.25
29	吹付けロックウール	12	0	0.05	0.12	0.40	0.55	0.70	0.75
30		25	0	0.12	0.35	0.80	0.88	0.85	0.90
31	〃 パーライトプラスタ	5	0	0.04	0.10	0.17	0.17	0.19	0.20
32	細木毛セメント板	25	0	0.03	0.14	0.30	0.55	0.65	0.60
33	木片セメント板	50	0	0.15	0.20	0.70	0.80	0.70	0.85
34	岩綿吸音板	12	300	0.35	0.30	0.40	0.55	0.65	0.70
35	(下地石膏ボード捨張)	12	300	0.20	0.20	0.40	0.60	0.70	0.75
36	セラミック吸音板	20	0	0.05	0.10	0.20	0.40	0.80	0.60
37	1.36 (g/cm <sup>3</sup> )	20	200	0.40	0.90	0.80	0.55	0.55	0.70

【参考】吸音率資料 (2) : 出展「建築・環境音響学 第2版」前川純一, 森元政之, 坂上公博 (共立出版)

2-C ボード状材料吸音率予測値

No.	材 料 名	厚 (mm)	空気層 (mm)	周 波 数 (Hz)						
				125	250	500	1 k	2 k	4 k	
1	石膏ボード	9~12	45	0.26	0.13	0.09	0.05	0.05	0.05	
2	フレキシブルボード	3~5		90	0.23	0.12	0.08	0.06	0.05	0.05
3	珪酸カルシウム板	6~8		180	0.18	0.10	0.08	0.06	0.06	0.05
4	ラワン合板	3		45	0.45	0.16	0.10	0.08	0.07	0.08
5		6~9		45	0.15	0.28	0.12	0.07	0.07	0.08
6		6~9		90	0.25	0.17	0.09	0.07	0.07	0.08
7		12		45	0.25	0.14	0.07	0.04	0.07	0.08
8	パーティクルボード	20		45	0.27	0.08	0.08	0.06	0.08	0.07
9	ポリエステル大波板			90	0.26	0.41	0.22	0.12	0.10	0.15

2-D スリット構造吸音率予測値

No.	構 造 詳 細	スリット幅 (mm)	空気層 (mm)	周 波 数 (Hz)					
				125	250	500	1 k	2 k	4 k
1	 スリット幅 空気層	4.5	80	0.08	0.35	0.22	0.15	0.15	0.15
2		4.5	180	0.22	0.33	0.17	0.24	0.14	0.12
3		20	80	0.07	0.15	0.33	0.20	0.18	0.17
4		20	180	0.12	0.37	0.28	0.25	0.17	0.15
5	同上, 裏張材 洗ったキャラコ1枚	4.5	80	0.18	0.77	0.40	0.24	0.20	0.26
6		20	80	0.12	0.50	0.68	0.40	0.26	0.22
7	 空気層 木セメント板	4.5	50	0.15	0.37	0.40	0.27	0.15	0.12
8		20	50	0.10	0.25	0.44	0.42	0.35	0.30
9		20	300	0.45	0.50	0.37	0.40	0.40	0.37
10	 空気層 スリット幅	10	50	0.08	0.20	0.30	0.24	0.35	0.38
11		10	300	0.37	0.40	0.32	0.40	0.40	0.44
12	 空気層 ロックウール 25mm	10	50	0.25	0.87	0.55	0.40	0.50	0.44
13		10	300	0.68	0.70	0.67	0.64	0.52	0.50
14		4.5	50	0.65	0.65	0.50	0.40	0.40	0.40
15		30	50	0.20	0.60	0.75	0.65	0.70	0.60

2-E 穿孔板吸音構造吸音率予測値

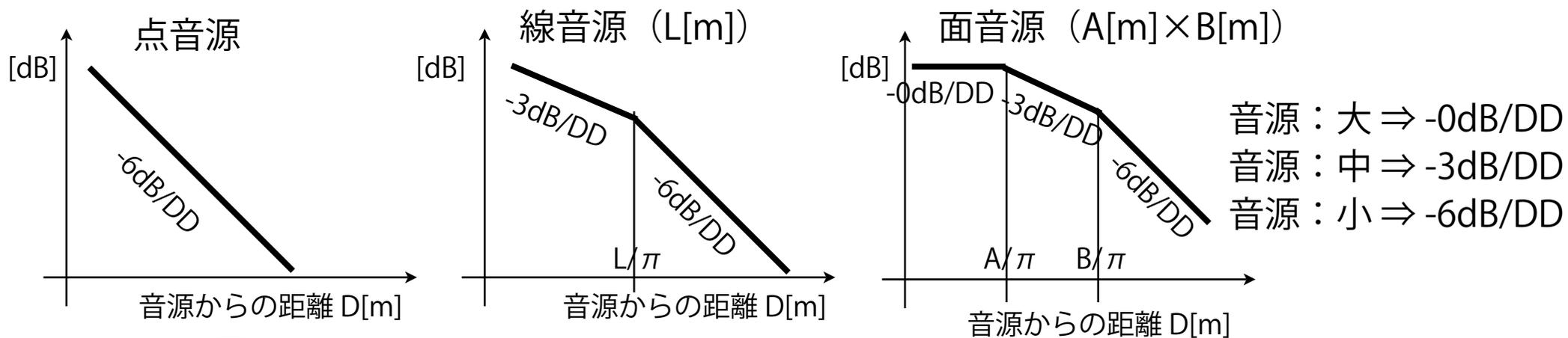
No.	孔径-ピッチ (開孔率)	板厚 (mm)	下 地 材 (厚さmm)	空気層 (mm)	周 波 数 (Hz)						
					125	250	500	1 k	2 k	4 k	
1	4φ-15	5	なし	45	0.02	0.09	0.25	0.31	0.15	0.10	
2	(6%)		グラスウール (25)	45	0.15	0.35	0.82	0.52	0.23	0.22	
3			なし	180	0.12	0.45	0.30	0.25	0.23	0.16	
4			"	500	0.45	0.31	0.31	0.30	0.30	0.28	
5			グラスウール (25)	500	0.87	0.61	0.70	0.65	0.46	0.33	
6	6φ-22	9	なし	45	0.03	0.09	0.46	0.31	0.18	0.15	
7	(6%)		ロックウール (25)	45	0.09	0.50	0.94	0.44	0.22	0.21	
8			なし	300	0.35	0.37	0.25	0.22	0.23	0.22	
9			ロックウール (25)	300	0.68	0.82	0.58	0.53	0.33	0.23	
10	6φ-15		5	なし	45	0.02	0.08	0.16	0.31	0.20	0.18
11	(13%)			グラスウール (50)	45	0.13	0.32	0.78	0.69	0.40	0.31
12				なし	500	0.35	0.29	0.30	0.35	0.36	0.39
13				グラスウール (25)	500	0.87	0.68	0.76	0.82	0.71	0.50
14	8φ-16			4	なし	300	0.22	0.30	0.29	0.23	0.19
15	(20%)	グラスウール (25)			300	0.61	0.73	0.64	0.61	0.62	0.58
16		ロックウール (25)			300	0.85	0.94	0.83	0.75	0.66	0.60
17	9φ-15	5	なし		45	0.01	0.05	0.11	0.21	0.16	0.13
18	(28%)		グラスウール (50)	45	0.15	0.30	0.68	0.78	0.59	0.58	
19			ロックウール (25)	45	0.08	0.25	0.71	0.91	0.78	0.72	
20			なし	500	0.30	0.25	0.27	0.36	0.39	0.42	
21			グラスウール (25)	500	0.83	0.72	0.80	0.90	0.87	0.70	

## 6. 音の距離減衰：臨界距離

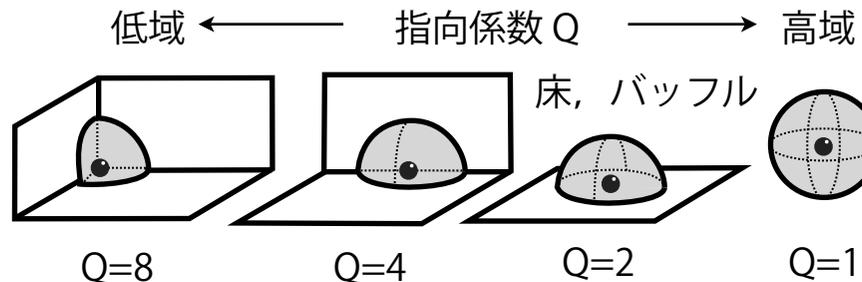
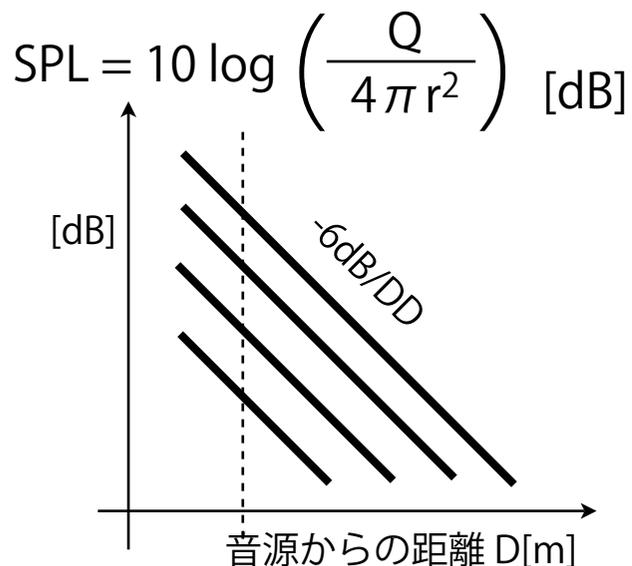
Distance decay : Critical distance

# 6-1. 無響環境での音の減衰

音源の大きさによる減衰の違い



音源の指向性 (音源の設置環境) による減衰の違い



距離減衰の特性は, Qによらず同じ  
Qが大きいほど, 同じ場所で大きな音で聞こえる  
⇒ Qが大きいほど放射効率が高い

# 6-2. 室内（響きのある空間）での音の減衰

$$SPL = 10 \log \left( \underbrace{\frac{Q}{4\pi r^2}}_{\text{直接音}} + \underbrace{\frac{4}{R}}_{\text{部屋の響き}} \right) \text{ [dB]}$$

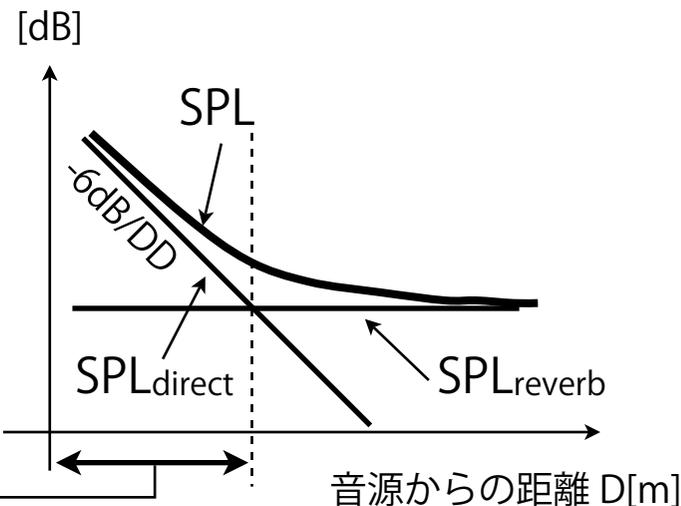
室定数  
(部屋のデッドさ)

$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \text{ [m}^2\text{]}$$

直接音 (距離減衰)      部屋の響き (距離によらず一定)

$$SPL_{\text{direct}} = 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) \text{ [dB]}$$

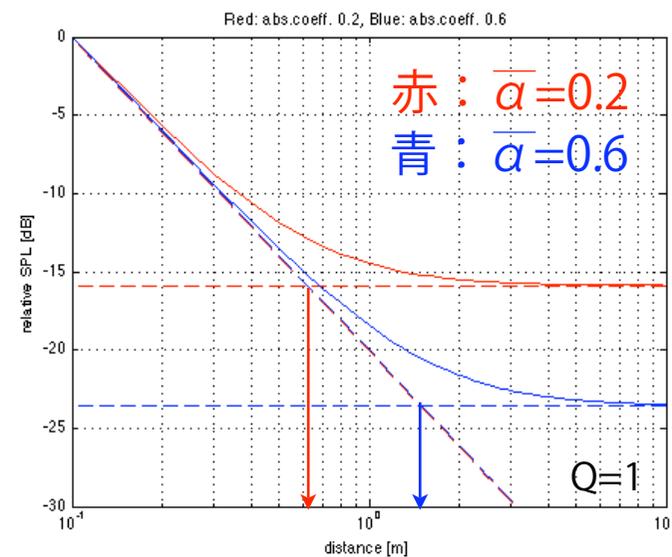
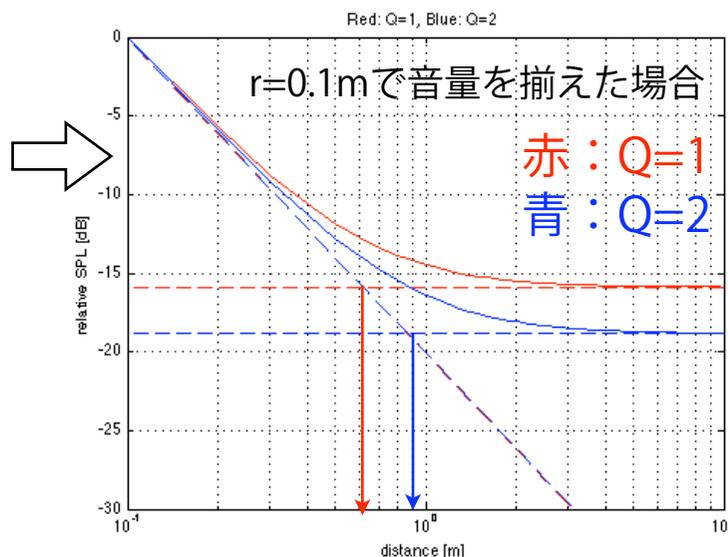
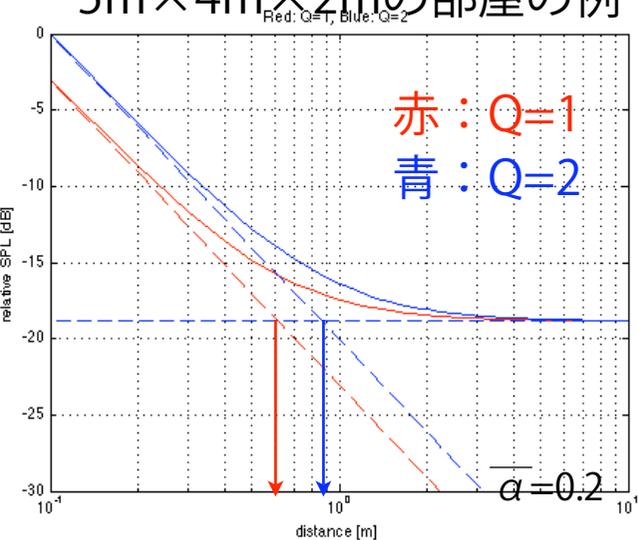
$$SPL_{\text{reverb}} = 10 \log \left( \frac{4}{R} \right) \text{ [dB]}$$



臨界距離 (Critical Distance)

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{R} \Rightarrow r = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{Q \times R}{\pi}} \text{ [m]}$$

5m×4m×2mの部屋の例



## 7. 簡易コントロールルームの音響設計の流れ

Flow of acoustic design for DIY studio

## 7-1. DIYスタジオの設計のために

### • 部屋の寸法比の決定

固有モード周波数（特に一次元モード）が分散するように ⇒ p.13～15

問題となる低域の  
周波数の把握

### • リスニングポイント及びスピーカの配置

X, Y, Z方向の一次元モードの分布を検討（特に第1次モード～第3次モード）

リスニングポイント：モードの節でも腹でも無い位置が理想

スピーカ：モードの節の位置が理想 ⇒ p.16

モニター距離と臨界距離との関係をチェック（残響が多すぎないか？） ⇒ p.30

LP/SP配置で、  
出来る限り改善  
を試みる

### • 残響時間or平均吸音率の設定

モニタールームに適した響きとは？ スタジオの平均吸音率 0.3～0.6

残響計算， 残響時間 ⇔ 平均吸音率の変換 ⇒ p.25

室定数， 臨界距離， シュレイダー周波数の算出 ⇒ p. 30, 6

シュレイダー周波数（×3）以下 ⇒ モードや位相干渉の検討が必要な帯域

低域吸音： $\lambda/4$   
の厚みが必要  
中高域吸音：残  
響計算によりバ  
ランスを考える

### • 吸音材， 拡散体などの配置

虚像法により， 反射点を算出 ⇒ p.21

低域（⇒ p.19,20）， 高域（⇒ p.22）に分けて処置を考える。

高域：適切な反射・吸音・拡散処理とは？

低域：強烈な反射によるディップは回避できているか？

限られた音響材料を最も  
最適な場所に配置する  
低域の反射は，ディップ  
に，高域の反射は音質に  
影響する