

複数の障害物で構成された 音響調整パネル

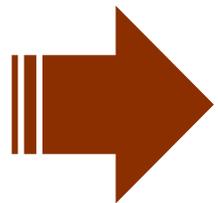
工学院大学 情報学部 情報デザイン学科
准教授 高橋 義典

2024年7月11日

理想的な音場 (コンサートホール)

理想的なコンサートホールの音場

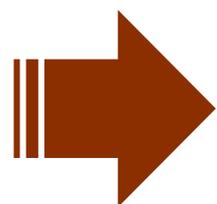
- ✓ 反射音があらゆる方向から一様に到来する.
- ✓ 到来する音のエネルギー密度が均一である.



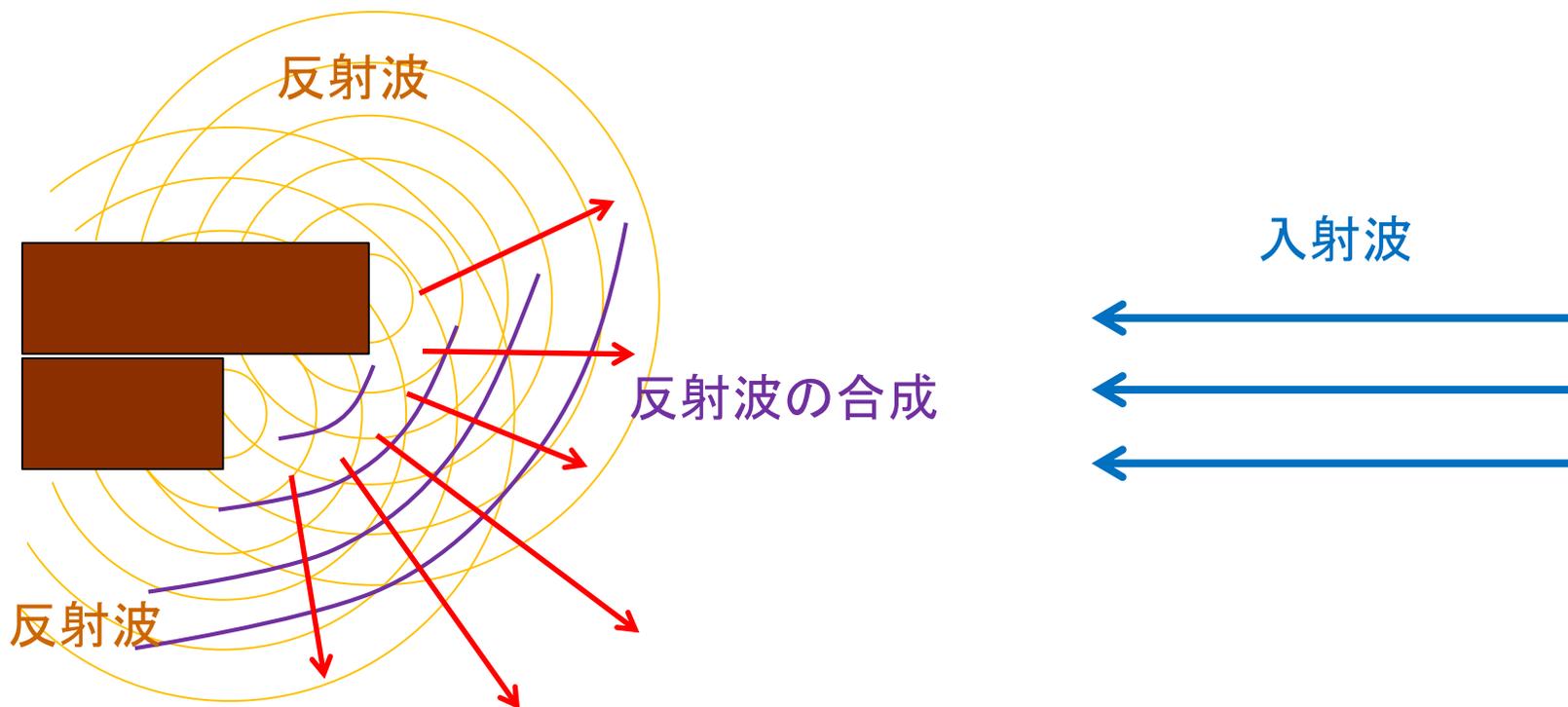
壁面であらゆる方向に音を反射させる.

音響拡散体

壁面に当たった音波をあらゆる方向に拡散させる

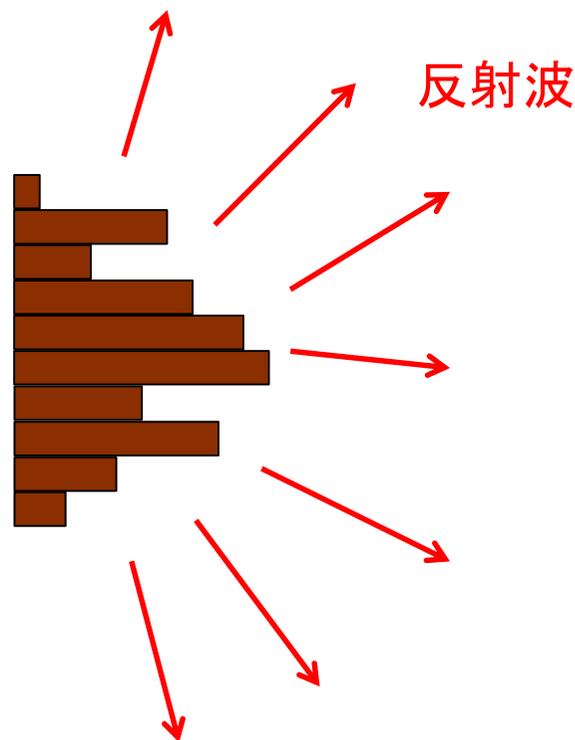


不規則な凹凸をもった構造



凹凸をもった音響拡散体

- ✓ 全て異なる深さの凹凸をランダムに並べることで、さまざまな方向に拡散する
- ✓ 全て異なる深さの凹凸をランダムに並べるのに整数論が使われる



参考文献

M. R. Schroeder, “**Number Theory in Science and Communication**
With Applications in Cryptography, physics, Digital Information, Computing, and Self-Similarity,”
Springer, 1984

ランダムに並べる方法

素数に対する原始根の冪乗剰余を用いる

素数: $p = 7$, 原始根: $g = 3$

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|-------|-------|--------|-----|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | ... |
| g^n | 3 | 9 | 27 | 81 | 243 | 729 | 2187 | 6561 | 19683 | 59049 | 177147 | ... |
| mod 7 | 3 | 2 | 6 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 | 6 | 4 | 5 | ... |

3, 2, 6, 4, 5, 1 が繰り返される. 1 ~ 6 の数字がランダムに並んでいる.
($g = 2$ では 1 ~ 6 の数字が全部は出てこない. 2 は 7 の原始根ではない.)

補足

ランダムに並べる方法

素数: $p = 7$, $g = 2$ は原始根ではない

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|-----|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | ... |
| g^n | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 | 2048 | ... |
| mod 7 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | ... |

2, 4, 1 が繰り返されて, 3, 5, 6 が出てこない

補足

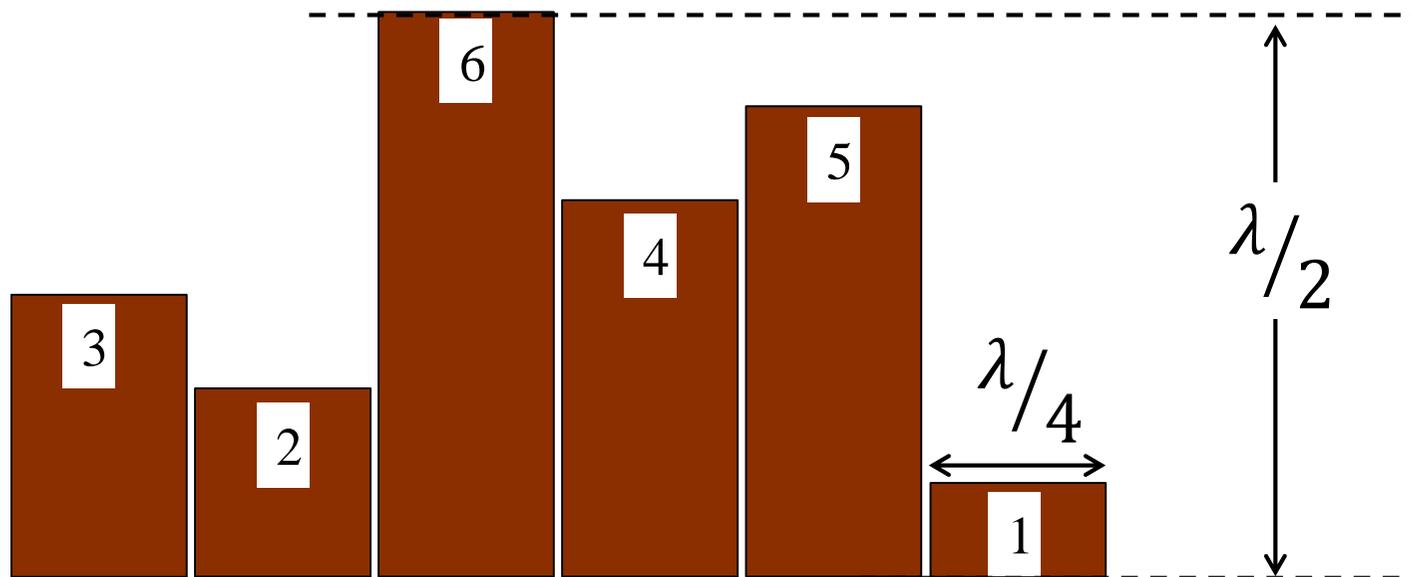
40未満の奇素数と原始根

| 素数 p | 原始根 | 原始根の 個数 | $\phi(p - 1)$ |
|------|---|------------|--|
| 3 | 2 | 1 | $\phi(2)=1$ |
| 5 | 2, 3 | 2 | $\phi(4)=2\phi(2) = 2$ |
| 7 | 3, 5 | 2 | $\phi(6) = \phi(2)\phi(3) = 2$ |
| 11 | 2, 6, 7, 8 | 4 | $\phi(10) = \phi(2)\phi(5) = 4$ |
| 13 | 2, 6, 7, 11 | 4 | $\phi(10) = \phi(2)\phi(5) = 4$ |
| 17 | 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 14 | 8 | $\phi(16) = \phi(2^4) = 2^4 - 2^3 = 8$ |
| 19 | 2, 3, 10, 13, 14, 15 | 6 | $\phi(18) = \phi(2) \phi(9) = 3^2 - 3^1 = 6$ |
| 23 | 5, 7, 10, 11, 14, 15, 17, 19, 20, 21 | 10 | $\phi(22) = \phi(2)\phi(11) = 10$ |
| 29 | 2, 3, 8, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 21, 26, 27 | 12 | $\phi(28) = \phi(4)\phi(7) = 2 \cdot 6 = 12$ |
| 31 | 3, 11, 12, 13, 17, 21, 22, 24 | 8 | $\phi(30) = \phi(2)\phi(3)\phi(5) = 8$ |
| 37 | 2, 5, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 35 | 12 | $\phi(36) = \phi(4)\phi(9) = 12$ |

ランダムに並べる方法

素数: $p = 7$, 原始根: $g = 3$

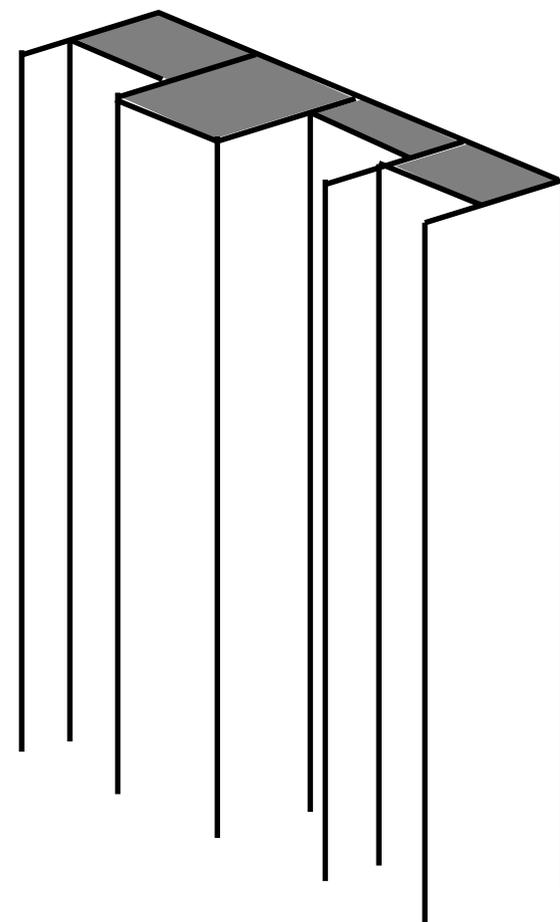
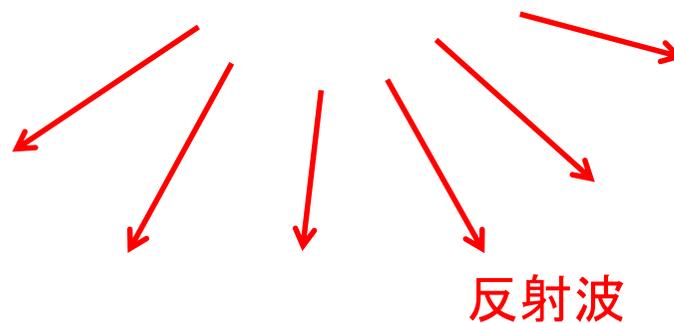
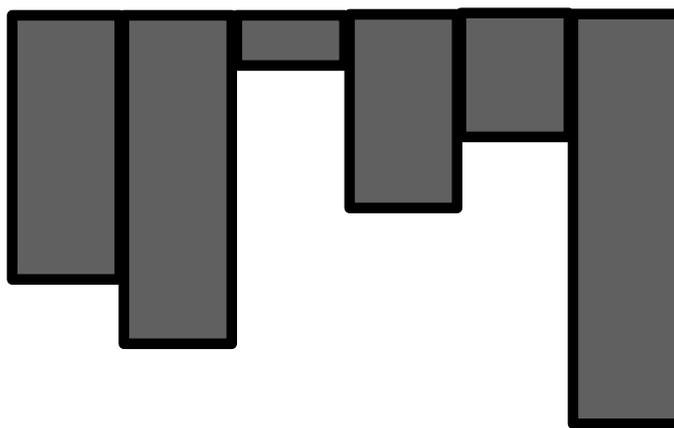
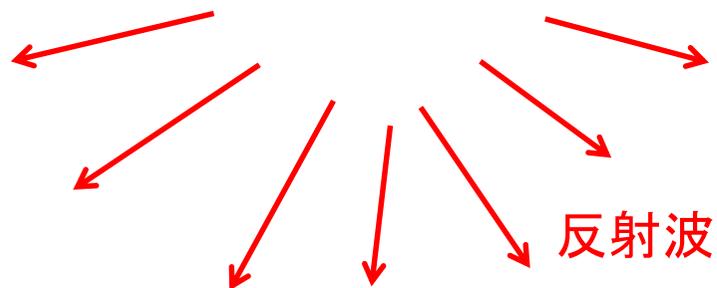
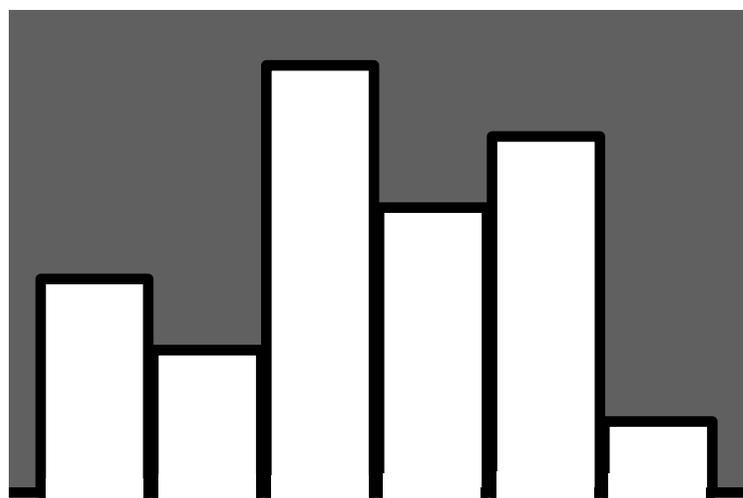
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | ... |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|-------|-------|--------|-----|
| g^n | 3 | 9 | 27 | 81 | 243 | 729 | 2187 | 6561 | 19683 | 59049 | 177147 | ... |
| mod 7 | 3 | 2 | 6 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 | 6 | 4 | 5 | ... |



$p - 1$ 個の凹凸ができる

数論に基づく音響拡散体の実装

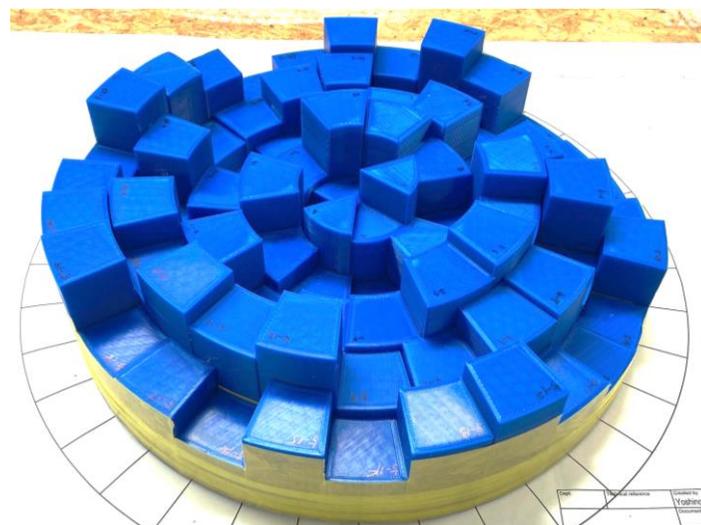
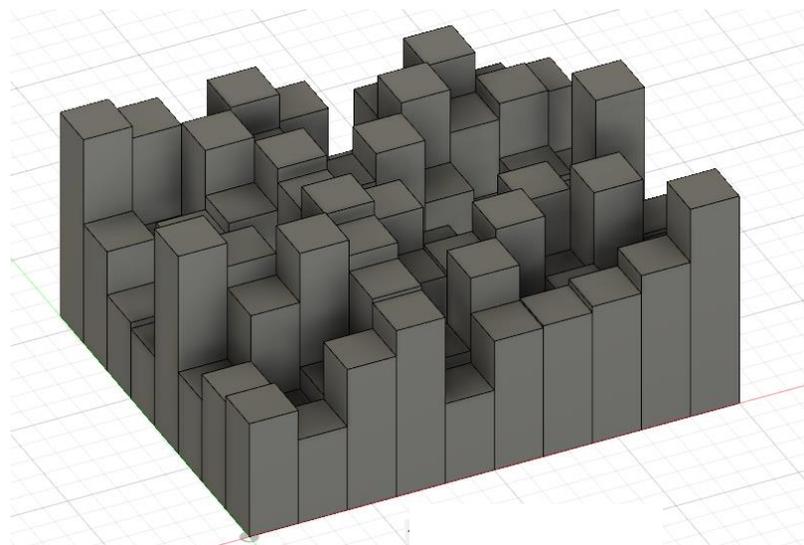
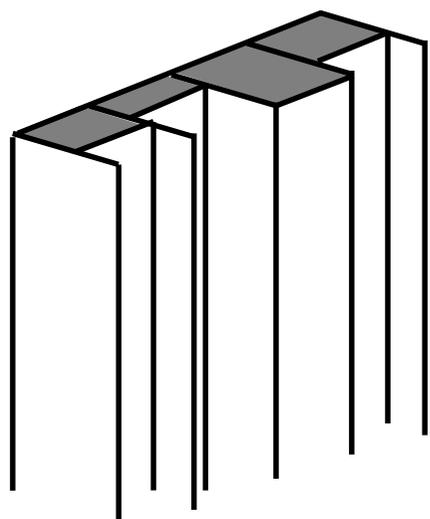
窪みを作るタイプと出っ張りを作るタイプ



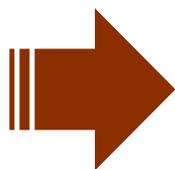
従来の拡散体の問題点

2022年12月

新技術説明会で発表



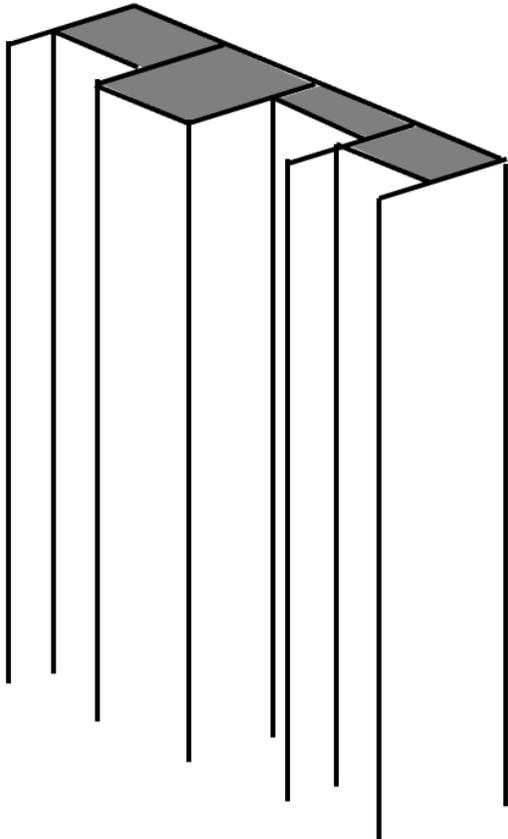
特願2022-125774



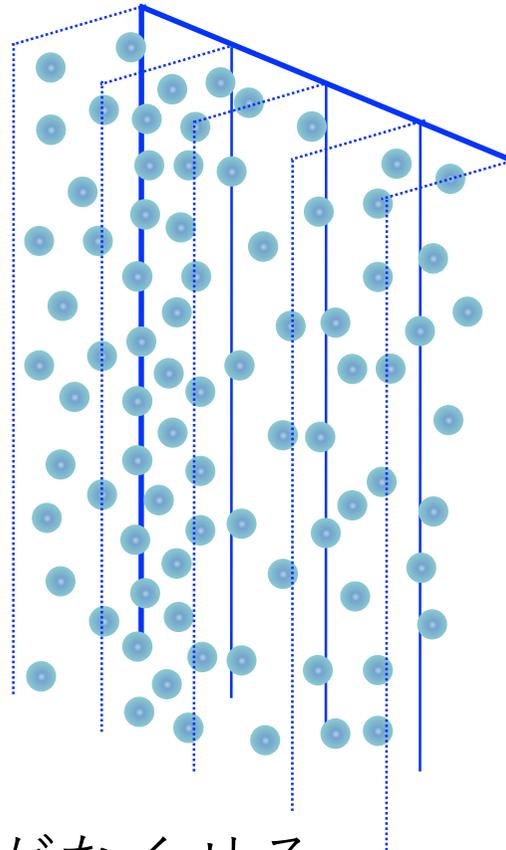
いずれも凹凸のあるデザイン
拡散がメイン、吸音は制御できない

複数の障害物で構成した拡散体

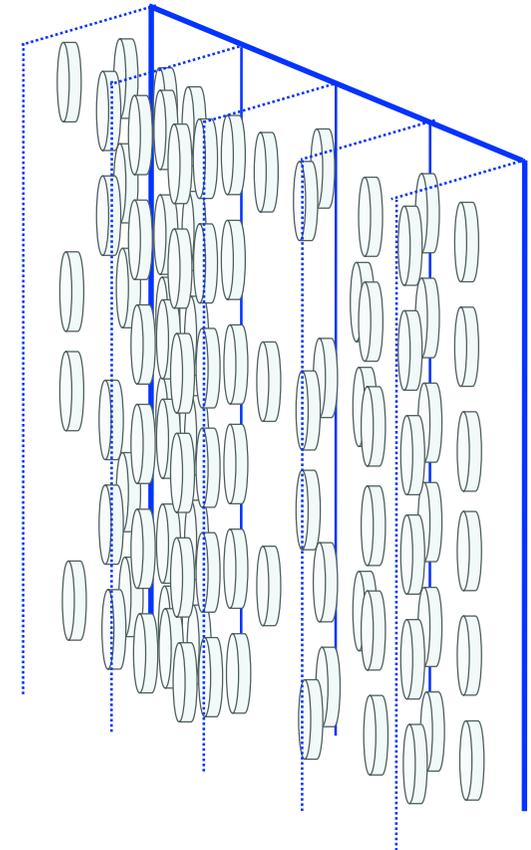
従来の拡散体



提案する拡散体



または



表面の凹凸がなくせる
障害物の密度によって吸音の制御も可能

複数の障害物が音波を拡散する原理

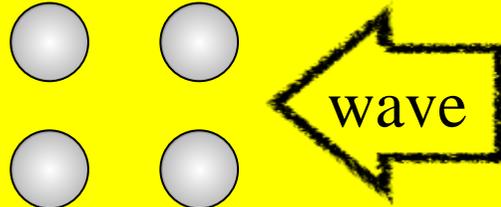
c : 空気中の音速 (340m/s), \hat{c} : 障害物のある空間の音速

$$\left(\frac{c}{\hat{c}}\right)^2 = 1 + \frac{2}{3}\pi a^3 N$$

a : 球体の半径

N : 単位体積あたりの個数

複数の球体

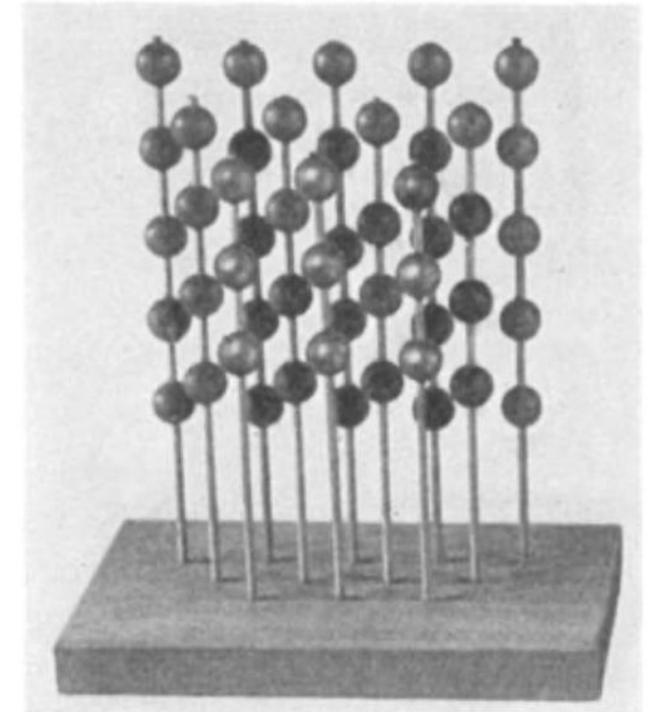
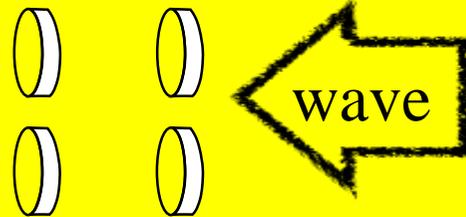


$$\left(\frac{c}{\hat{c}}\right)^2 = 1 + \frac{8}{3}\pi r^3 N$$

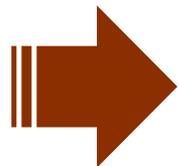
r : 円盤の半径

N : 単位体積あたりの個数

複数の円盤



W. E. Kock and F. K. Harvey
“Refracting sound waves,”
JASA, 21(5), 471--481, 1949



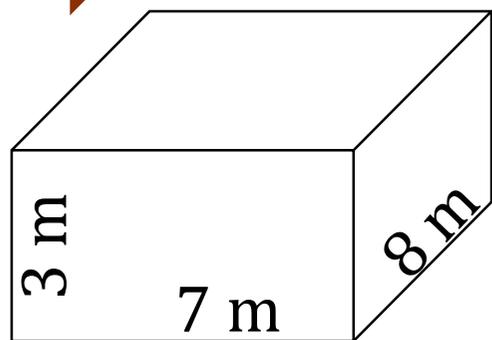
障害物の密度が増えると音速が遅くなる

表面積が増えると吸音力が増える

Eyringの残響時間式 $T_r = \frac{0.163 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)}$ (α : 壁の吸音率)

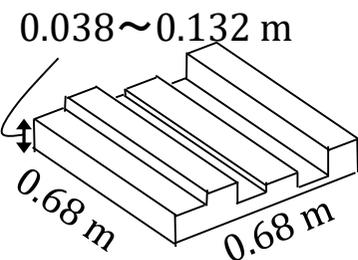
残響時間 T_r は、室容積 V に比例、部屋の壁面積 S に反比例する

➡ 障害物の密度が増えて表面積が増えると、残響時間が短くなる。



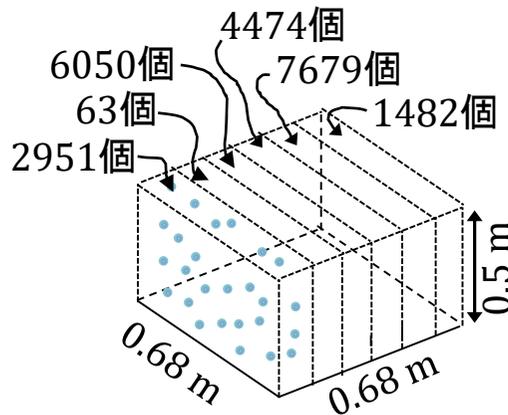
容積 $V = 168 \text{ m}^3$
壁面積 $S = 202 \text{ m}^2$
吸音率 $\alpha = 0.01$ (コンクリート)

残響時間 $T_r = 13.5 \text{ s}$



約437枚敷き詰める
側面の面積 約 78.5 m^2 増

残響時間 $T_r = 9.7 \text{ s}$



半径 0.01 m の球体で構成
側面の面積 約 28.5 m^2 増

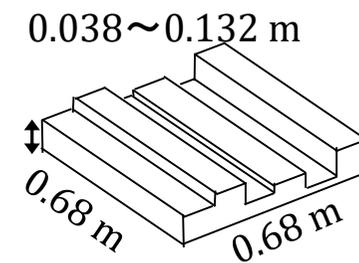
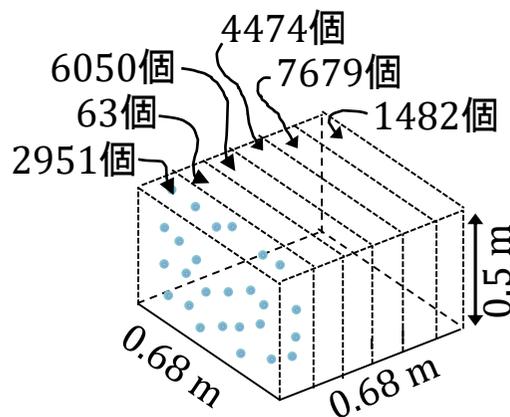
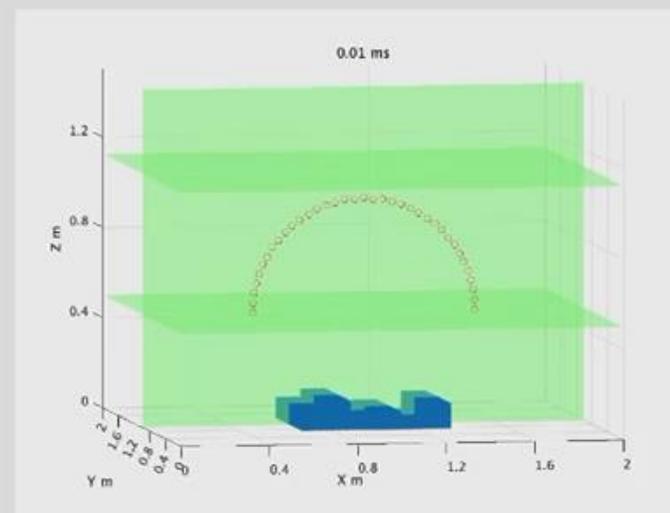
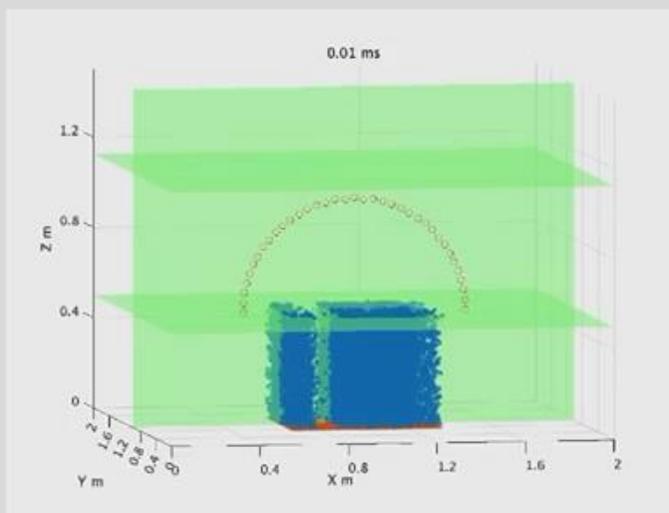
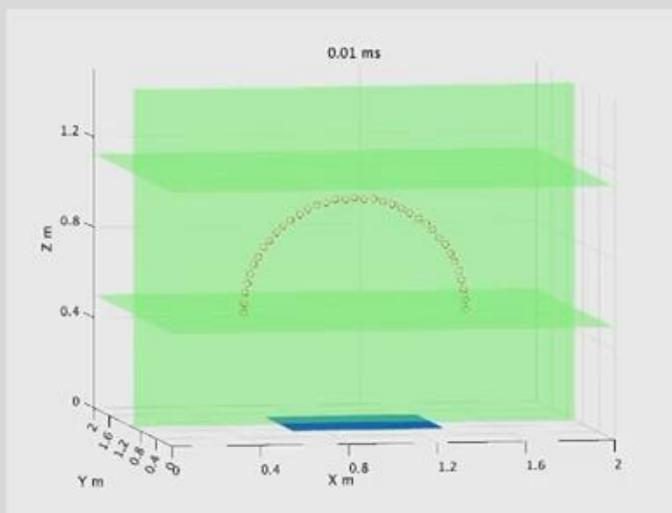
残響時間 $T_r = 11.8 \text{ s}$

波面シミュレーション

平面反射板

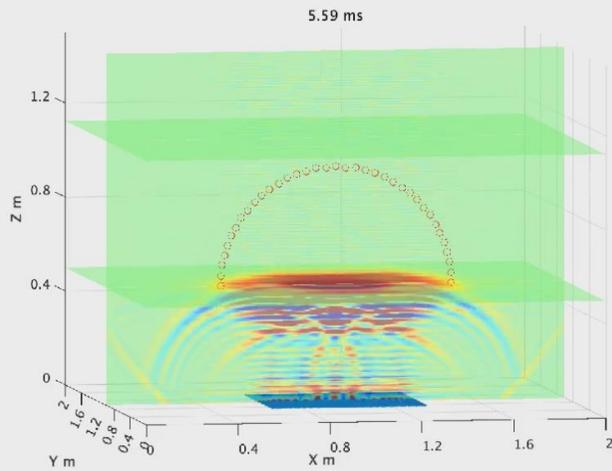
提案する
音響調整パネル

凹凸のある
音響拡散体

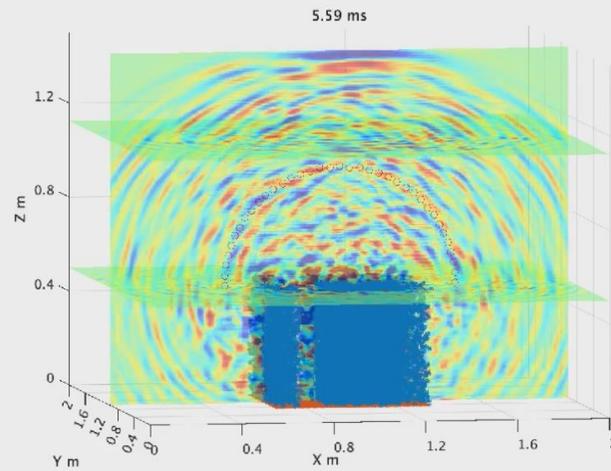


波面シミュレーション

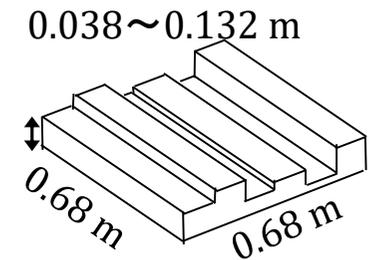
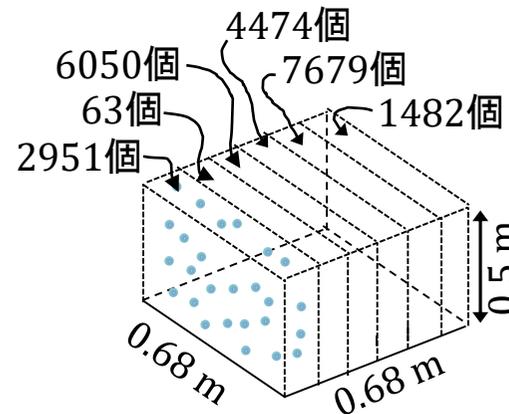
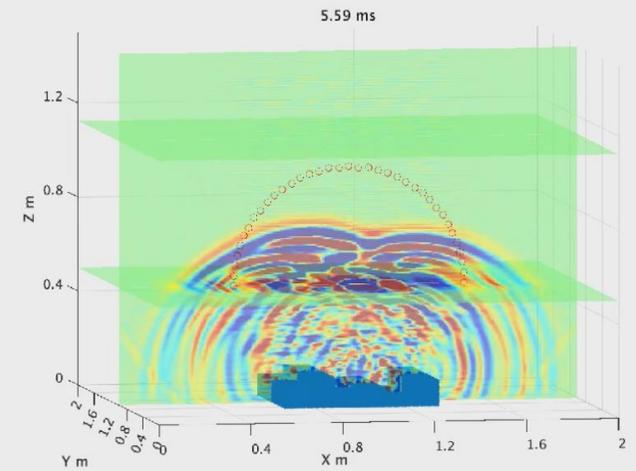
平面反射板



提案する
音響調整パネル



凹凸のある
音響拡散体

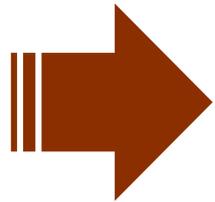


想定される用途

- コンサートホール, レコーディングスタジオ, リスニングルームなどの響きの調整. (空間全体に均一な響きを生成.)
- 不自然な残響が付加される空間の音声の明瞭性の向上も期待できる.
- 指向性の強い音波の拡散.

今後の課題

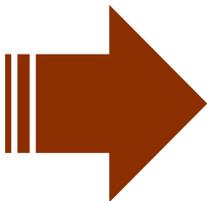
コンピュータシミュレーションと試作



FDTDシミュレーション

3Dプリンタでの試作の検討

拡散性能の評価



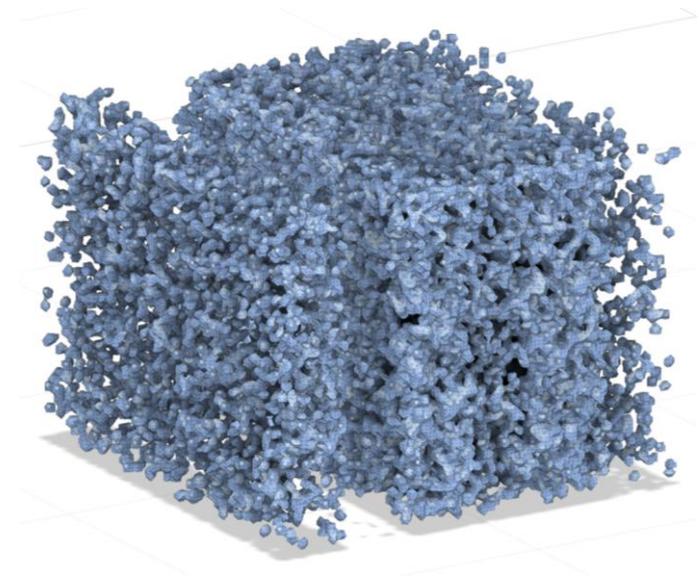
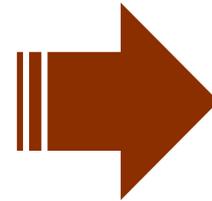
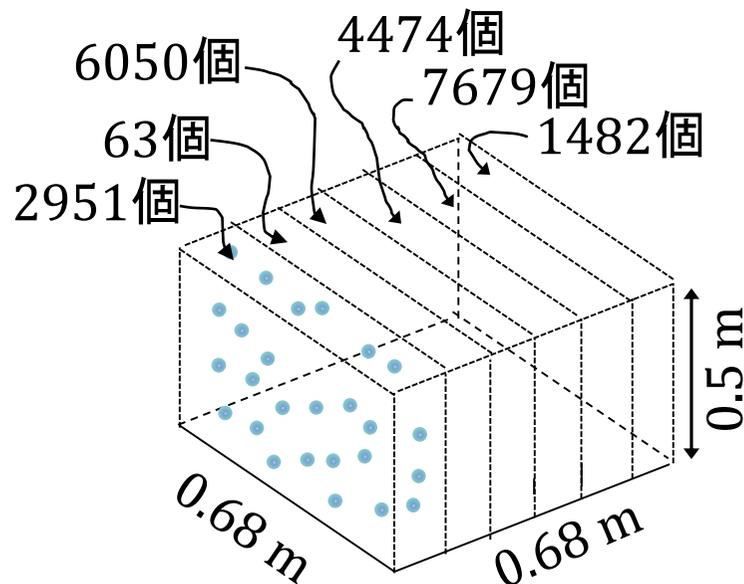
残響室実験 (大きな試料が必要).

1/4模型実験手法なども検討中.

企業への期待

実現するための設計と試作

- 複雑な形状で3Dプリンタでも簡単には試作が難しい。
- 空間に数千個の障害物を配置した形状の設計。



本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 音響拡散パネル
- 出願番号 : 特願2023-185059
- 出願人 : 工学院大学
- 発明者 : 高橋義典、増川英寿、齋藤優真

産学連携の経歴

- 2024年-2025年 ズームグループ(財)研究助成
- 2023年 第27回 R&R建築再生展 出展
- 2022年-2023年 aete社(株)と共同研究実施
- 2021年-2022年 カワイサウンド(財)研究助成

お問い合わせ先

工学院大学
総合企画部 研究推進課

TEL 03-3340-3440

e-mail sangaku@sc.kogakuin.ac.jp