国立大学法人
電気通信大学
Unique & Exciting Campus

2つの剛体円形スピーカアレイを用いた仮想音源生成

☆任 逸, 羽田 陽一

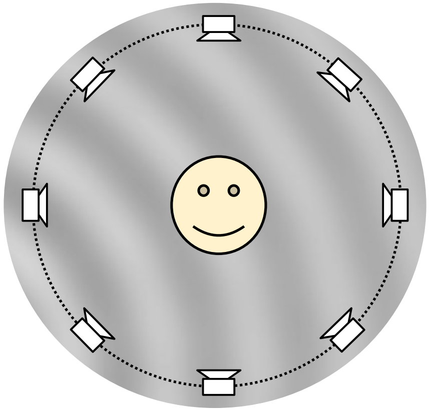
2018/09/12

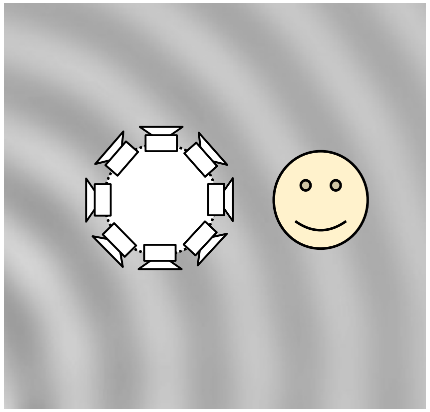
電気通信大学大学院 情報理工学研究科
情報学専攻 羽田研究室

はじめに

- 円形スピーカアレイでの音場再現

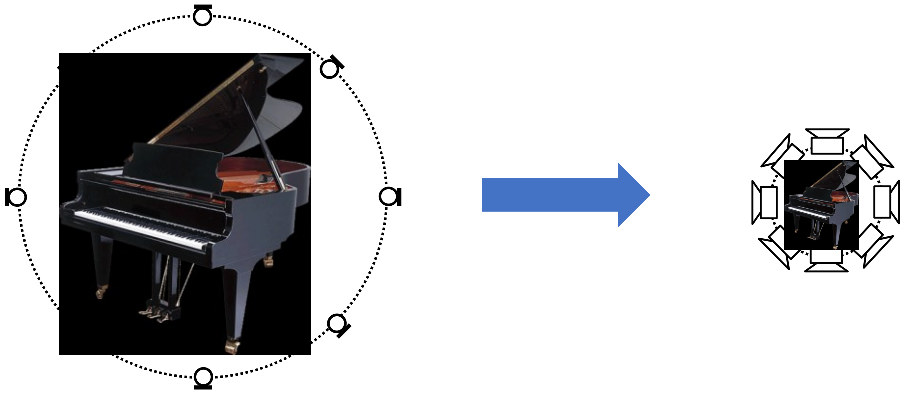
- 内側音場再現
  - 受聴者の位置は制限されている
  - 実環境でのスピーカ配置と室内残響は課題である
- 外側音場再現
  - 受聴範囲は広くなる
  - 部屋の残響を加えることで，楽器の響はより自然になる



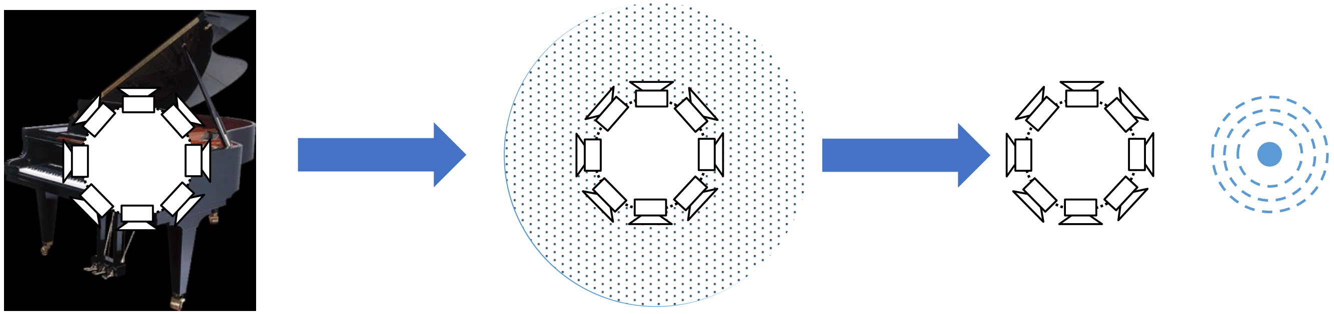


はじめに

- 音源の大きさは制限されている

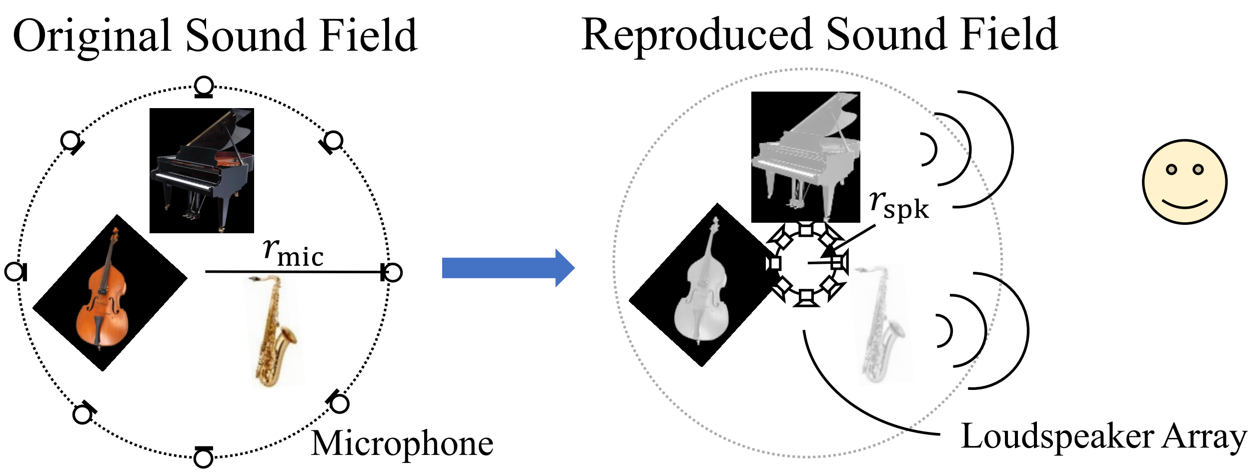


- 大きい音像　⇔　スピーカ外側の音源



従来手法

- 円形スピーカアレイの外側への仮想音源生成
  - 半径r_{mic}の円形マイクロホンアレイで収音
  - 半径r_{spk}の円形スピーカアレイで再生
    - $r_{\mathrm{mic}} > r_{\mathrm{spk}}$
  - 受聴領域はマイクロホンアレイの外側
  - 音源をスピーカアレイの外側に出すことを目標とする



任逸, 佐藤航也, 羽田陽一, "円形スピーカアレイの外側へのモードマッチングによる仮想音源生成",
日本音響学会講演論文集, 2018年春季, pp. 525-526, Mar. 2018.

課題

- 再現可能なスピーカからの音源距離が短い，帯域が狭い
  - 再現可能な最大音源距離r_s，最大周波数fとスピーカ数Lの関係

$$\frac{L-1}{2} > \frac{2\pi f r_s}{c}$$

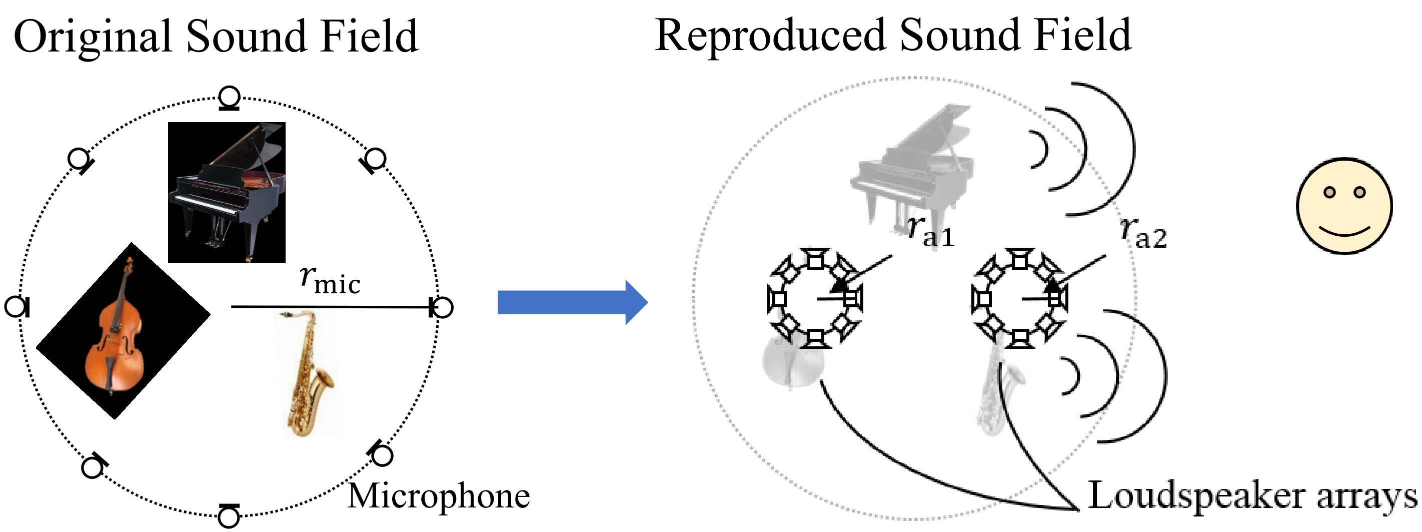
- フィルタゲインが大きい

$$\text{Filter Gain [dB]} = 10\log_{10}\frac{\sum_{l=1}^{L}|d_l|^2}{L|P(r_s,\phi_s)|^2}$$

  - 0 dB以上の場合，再生音が歪みやすい

提案手法

- ２つのスピーカアレイを用いて再生を行う
- 半径r_{a1}のスピーカアレイIと半径r_{a2}のスピーカアレイIIをマイクロホンアレイの内側に配置
  - $r_{\mathrm{mic}} > r_{\mathrm{a1}}$，$r_{\mathrm{mic}} > r_{\mathrm{a2}}$



Pressure Matching

原音場で線音源の音圧を観測する（水平面だけを考える場合）

$$P\,(r,\phi,\omega)=-\frac{j}{4}H_0^{(2)}(k|r-r_{\mathrm{s}}|)$$

再生音場でスピーカから再生した音を観測

$$\hat{P}(r,\phi,\omega)=\sum_{l=1}^{L}G(r,\phi|r_l,\phi_l,\omega)d(r_l,\phi_l,\omega)$$

行列で書くと

$$\hat{\mathbf{P}}=\mathbf{Gd}$$

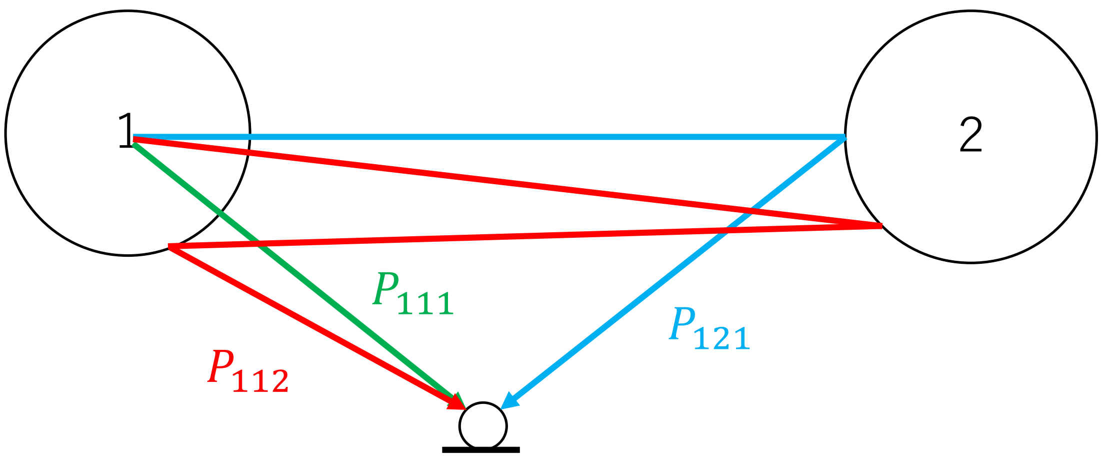
最小二乗法で音圧を一致させ，$\mathbf{G}$の逆行列は不安定となることが多いため，Tikhonov正則化を用いて駆動信号を求める

$$\mathbf{d}=\left(\mathbf{G}^{\mathrm{H}}\mathbf{G}+\lambda\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{G}^{\mathrm{H}}\mathbf{P}$$

観測点の座標(r,ϕ)，原点から音源の距離r_{s}，0次第二種ハンケル関数$H_0^{(2)}$，駆動信号d，スピーカ数L，l個目スピーカの座標(r_l,ϕ_l)，スピーカと観測点の間の伝達関数$G(r,\phi|r_l,\phi_l,\omega)$，周波数$\omega$，波数$k$，正則化パラメータ$\lambda$

２つの円形スピーカアレイ

- 伝達関数G
  - スピーカアレイは剛円仮定
  - 1つの剛円の場合，伝達関数は既に提案された
  - 2つの剛円の場合，剛円の間の反射があるため，改めて伝達関数を導出する必要がある

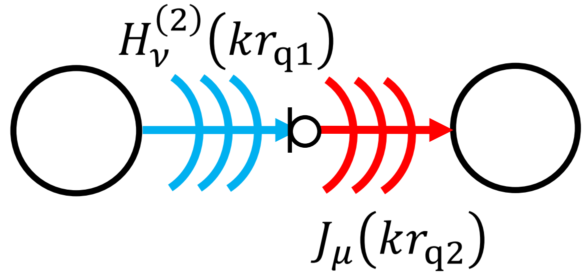


二円間の反射

剛円１からの放射波P_{1s}は剛円２の入射波P_{2i}になり（ν,μは次数である）

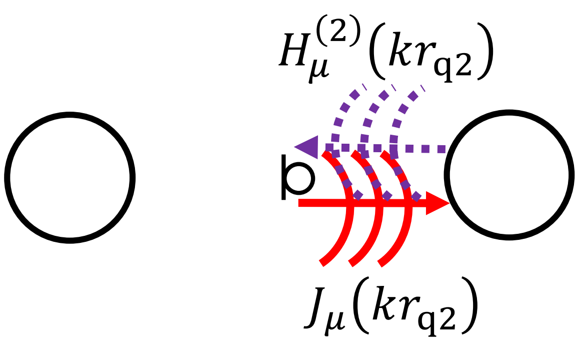
$$P_{1s}(r_{q1},\phi_{q1}) = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \gamma_{\nu,1} H_\nu^{(2)}(kr_{q1}) e^{j\nu\phi_{q1}}$$

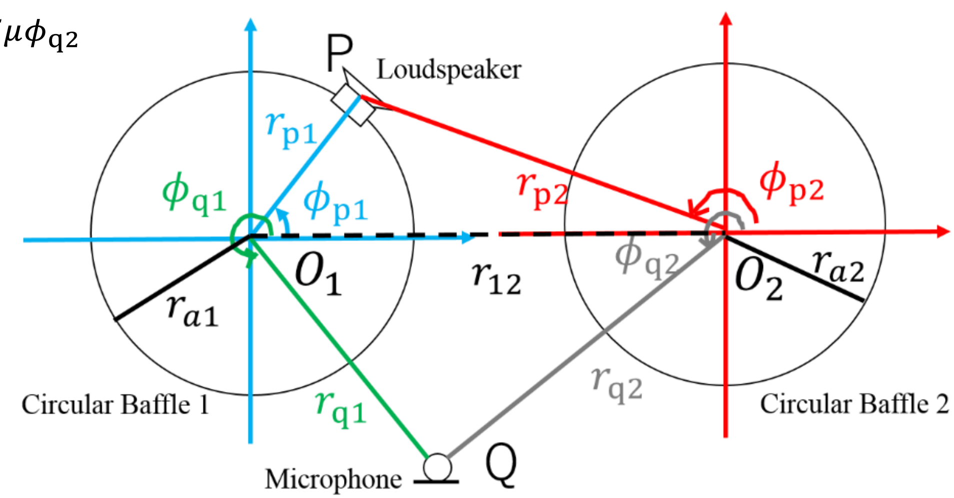
$$P_{2i}(r_{q2},\phi_{q2}) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \alpha_{\mu,2} J_\mu(kr_{q2}) e^{j\mu\phi_{q2}}$$



この入射波は剛円２の表面で反射され，剛円２からの放射波P_{2s}になる

$$P_{2s}(r_{q2},\phi_{q2}) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \beta_{\mu,2} H_\mu^{(2)}(kr_{q2}) e^{j\mu\phi_{q2}}$$





二円間の反射

Grafの加法定理とベッセル関数の性質より

$$H_{\nu}^{(2)}(kr_{\mathrm{q1}})e^{j\nu\phi_{\mathrm{q1}}} = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} H_{\nu-\mu}^{(2)}(kr_{12})J_{\mu}(kr_{\mathrm{q2}})e^{j\mu\phi_{\mathrm{q2}}}$$

$$\alpha_{\mu,2} = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} H_{\nu-\mu}^{(2)}(kr_{12})\gamma_{\nu,1}$$

剛円２の表面上では，法線方向の音圧傾度が0になるため

$$\beta_{\mu,2} = -\frac{J_{\mu}'(kr_{\mathrm{a2}})}{H_{\mu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a2}})}\alpha_{\mu,2}$$

整理すると

$$\beta_{\mu,2} = -\frac{J_{\mu}'(kr_{\mathrm{a2}})}{H_{\mu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a2}})}\sum_{\nu=-\infty}^{\infty} H_{\nu-\mu}^{(2)}(kr_{12})\gamma_{\nu,1}$$

同様に，剛円２からの放射波は剛円１の入射波になり，剛円１の表面で反射され，反射波は求められる。ただし，座標系定義の関係で，変換式が異なる

スピーカからマイクの直接音と全部の反射音を足し合わせば，伝達関数は導出可能

伝達関数

剛円1にある音源の直接音

$$P_{111}=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}-\frac{e^{-j\nu\phi_{\mathrm{p1}}}}{2\pi kr_{\mathrm{a1}}H_{\nu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a1}})}H_{\nu}^{(2)}(kr_{\mathrm{q1}})e^{j\nu\phi_{\mathrm{q1}}},$$

1次反射音

$$P_{121}=\sum_{\mu=-\infty}^{\infty}\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}H_{\nu-\mu}^{(2)}(kr_{12})\frac{J_{\mu}'(kr_{\mathrm{a2}})}{H_{\mu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a2}})}\frac{e^{-j\nu\phi_{\mathrm{p1}}}}{2\pi kr_{\mathrm{a1}}H_{\nu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a1}})}H_{\mu}^{(2)}(kr_{\mathrm{q2}})e^{j\mu\phi_{\mathrm{q2}}}$$

2次反射音

$$P_{112}=\sum_{\kappa=-\infty}^{\infty}\sum_{\mu=-\infty}^{\infty}-H_{\kappa-\mu}^{(2)}(kr_{12})\frac{J_{\kappa}'(kr_{\mathrm{a1}})}{H_{\kappa}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a1}})}\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}H_{\nu-\mu}^{(2)}(kr_{12})\frac{J_{\mu}'(kr_{\mathrm{a2}})}{H_{\mu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a2}})}\frac{e^{-j\nu\phi_{\mathrm{p1}}}}{2\pi kr_{\mathrm{a1}}H_{\nu}^{(2)\prime}(kr_{\mathrm{a1}})}H_{\kappa}^{(2)}(kr_{\mathrm{q1}})e^{j\kappa\phi_{\mathrm{q1}}}$$

この式は畳み込み演算の形であり，最大次数Nで打ち切って，行列化することができる

剛円1にある音源の音場（伝達関数）は

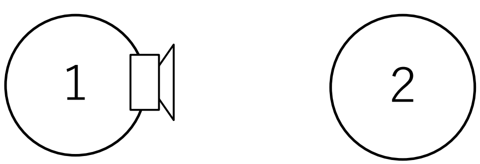
$$G_1=P_{111}+P_{121}+P_{112}+P_{122}+\cdots$$

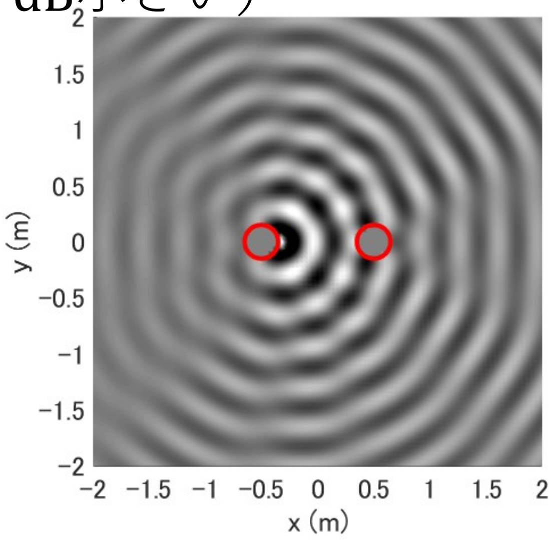
剛円2にある音源の音場（伝達関数）は

$$G_2=P_{221}+P_{211}+P_{222}+P_{212}+\cdots$$

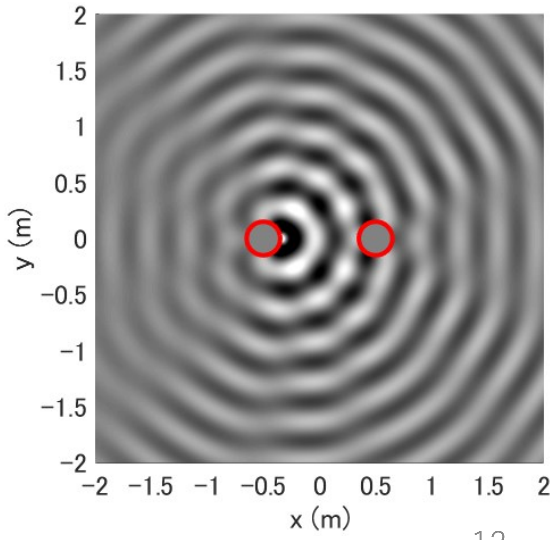
伝達関数シミュレーション

- 伝達関数の妥当性を確認するため，FDTD法（時間領域差分法）と比較した
  - スピーカアレイの中心は$(-0.5\ \mathrm{m}, 0\ \mathrm{m})$と$(0.5\ \mathrm{m}, 0\ \mathrm{m})$，$r_{\mathrm{a1}} = r_{\mathrm{a2}} = 0.15\ \mathrm{m}$，$(-0.35\ \mathrm{m}, 0\ \mathrm{m})$に音源を配置し，$1000\ \mathrm{Hz}$正弦波で駆動したときの波面
  - 赤線は剛円の位置を示す
  - 最大次数$N = 8$（$N = 20$との誤差$-60\ \mathrm{dB}$以内），最大反射回数6（直接音より$-60\ \mathrm{dB}$小さい）





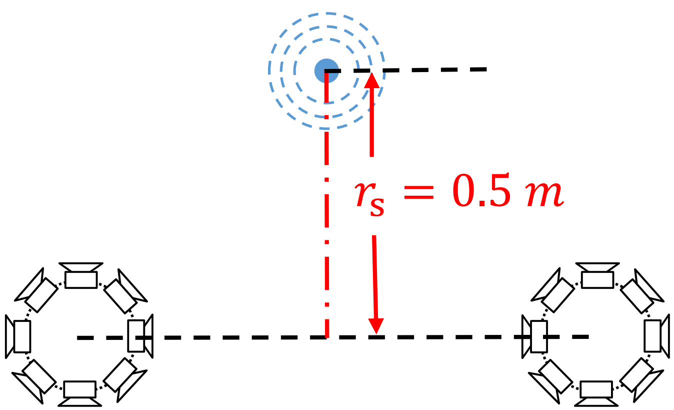
提案法

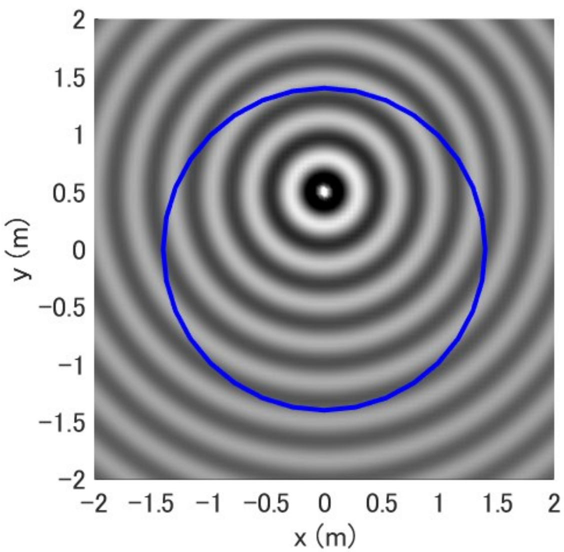


FDTD法

音場再現シミュレーション

- (0 m, 0.5 m)に1000 Hzの線音源を配置したときの波面
  - 制御点数48, $r = 1.4$ m
  - 二円アレイの剛円配置は伝達関数シミュレーションと同じ, 一円アレイは同じ半径の剛円を中心に配置
  - 青線は制御点位置

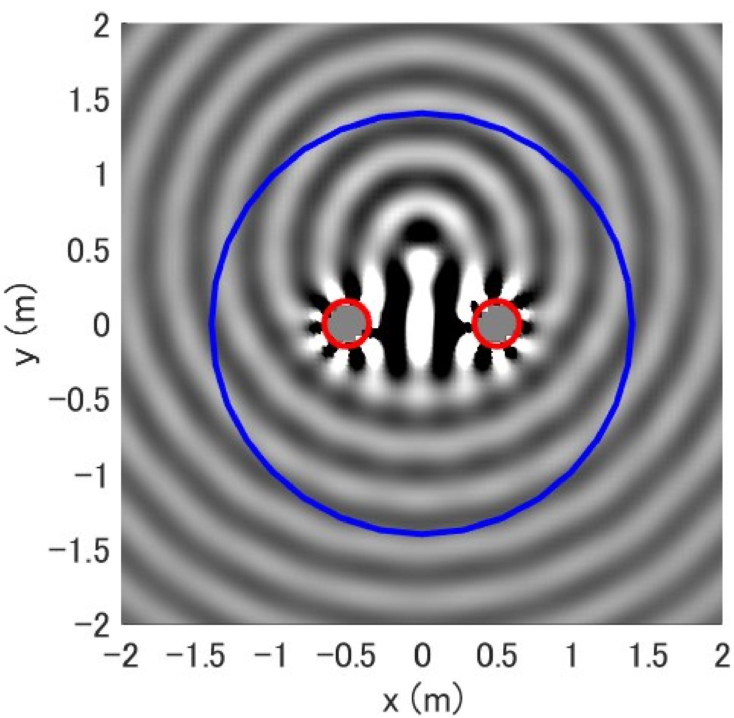




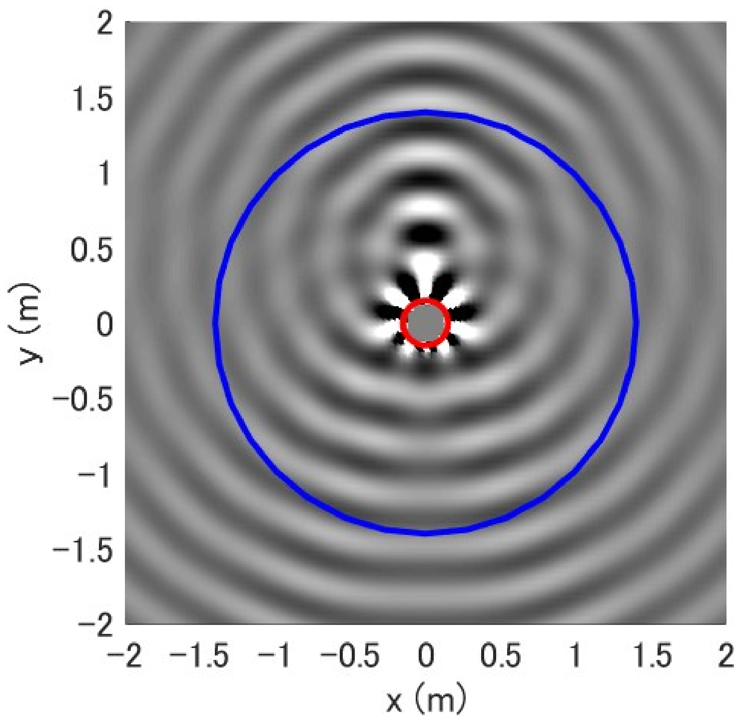
所望音場

音場再現シミュレーション

- 各アレイスピーカ数$L = 15$
- 30 ch単一円形アレイと比較
- 青線は制御点位置，赤線はスピーカ位置を示す



二円アレイ



一円アレイ

２つの円形スピーカアレイ

- SDR(Signal-to-distortion ratio)

$$\mathrm{SDR\ [dB]} = 10 \log_{10} \frac{\sum |P|^2}{\sum \left|P - \hat{P}\right|^2}$$

  - 音場再現の精度を示す
  - 今回では15 dBを基準とする

$\mathrm{Filter\ Gain} = 0\ \mathrm{dB}$

Single：一円モデル（30 ch）

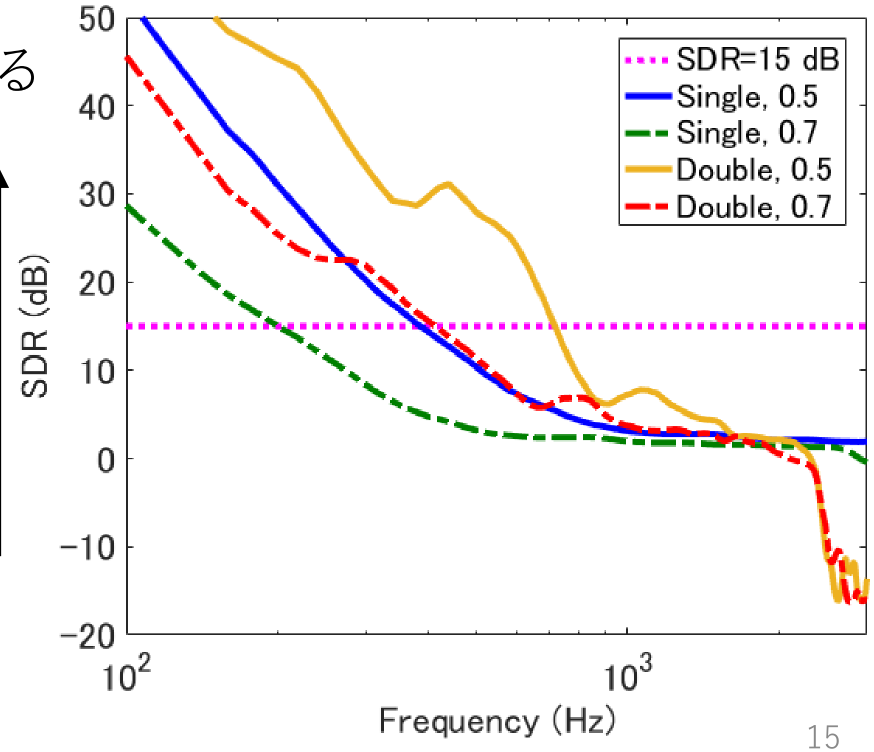
Double：二円モデル（15 ch × 2）

0.5：音源距離$r_s = 0.5\ \mathrm{m}$

0.7：音源距離$r_s = 0.7\ \mathrm{m}$

紫点線：$\mathrm{SDR} = 15\ \mathrm{dB}$

良い



まとめと今後

- 2つの円形スピーカアレイを用いる仮想音源再現の手法を提案した
  - ２つの剛円の伝達関数を提案した；FDTD法と比較し，妥当性を確認した
  - Pressure Matching法で音場を再現できた；一円アレイより良い結果得られた

- 今後の予定
  - 2つ剛円形スピーカアレイのMode Matching法を検討
  - パラメータの決定法を検討
  - 実機を作成し，実験を行う

補足

- 二次元音場
  - 無指向性音源：三次元内では無限長線音源
  - 剛円形：三次元内では無限長剛円筒
- 線音源(Line Source)があるときの音場

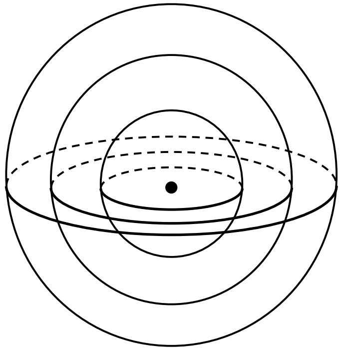
$$P(r,\phi,k,t)=e^{j\omega t}H_0^{(2)}(k|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}|)$$

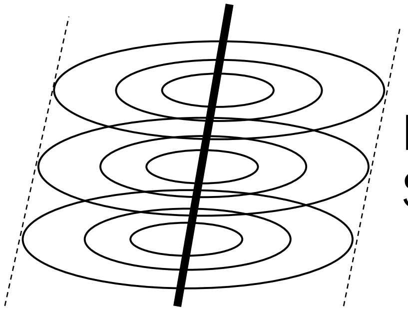
- 内部音場（$r<r_0$の領域内音源がない）

$$P_{\mathrm{i}}(r,\phi,k)=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}J_\nu(kr)\alpha_\nu(k)e^{j\nu\phi}$$

- 外部音場（$r>r_0$の領域内音源がない）

$$P_{\mathrm{s}}(r,\phi,k)=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}H_\nu^{(2)}(kr)\beta_\nu(k)e^{j\nu\phi}$$





観測点位置$\boldsymbol{r}=(r,\phi)$，波数k，ν次第一種ベッセル関数$J_\nu(\cdot)$，内部音場展開係数A_ν，外部音場展開係数B_ν，ν次第二種ハンケル関数$H_\nu^{(2)}(\cdot)$，$j=\sqrt{-1}$, 角周波数ω，時間t，線音源位置$\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}$

補足

- 剛円の伝達関数

直接音

$$P_{\mathrm{i}}(r,\phi,k)=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}J_\nu(kr)\alpha_\nu(k)e^{j\nu\phi}$$

剛円の反射音

$$P_{\mathrm{s}}(r,\phi,k)=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}H_\nu^{(2)}(kr)\beta_\nu(k)e^{j\nu\phi}$$

剛円の表面上$(r=r_0)$音圧傾度は0になるので

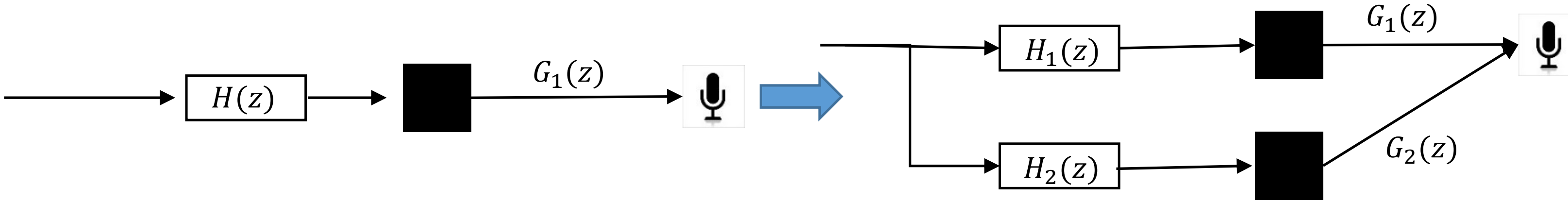
$$\beta_\nu=-\frac{J_\nu'(kr_0)}{H_\nu^{(2)\prime}(kr_0)}\alpha_\nu$$

Wronski行列式により，伝達関数

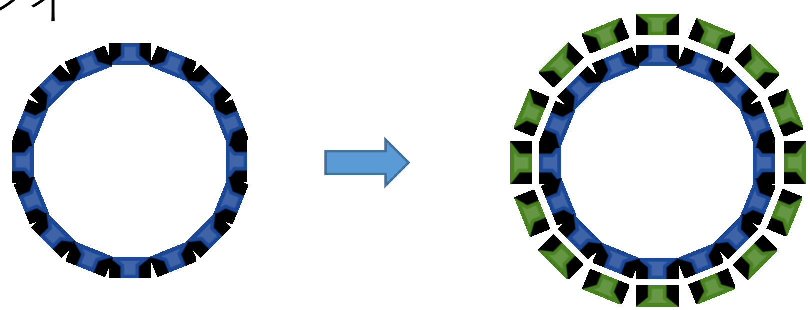
$$G^{\mathrm{rigid}}(r,\phi|r_0,\phi_0)=P_{\mathrm{i}}(r,\phi)+P_{\mathrm{s}}(r,\phi)=\sum_{\nu=-\infty}^{\infty}-\frac{e^{-j\nu\phi_0}}{2\pi kr_0H_\nu^{(2)\prime}(kr_0)}H_\nu^{(2)}(kr)e^{j\nu\phi}$$

補足

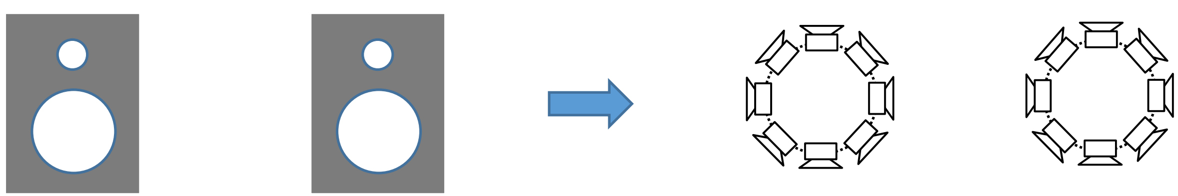
- 二円モデルについて
  - MINT（Multiple-input/output inverse-filtering theorem）



  - 二重円形アレイ



  - ステレオスピーカ

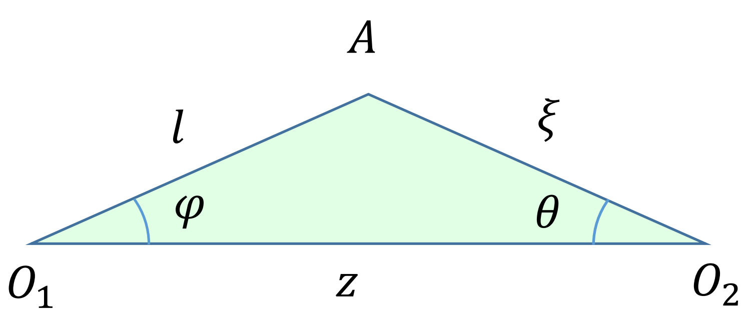


Grafの加法定理

- O_1を中心とした座標系で点Aで観測された散乱波をO_2を中心とした座標系の入射波に変換するとき

$$H_\nu^{(2)}\left(\sqrt{z^2+\xi^2-2z\xi\cos\theta}\right)e^{j\nu\varphi}=\sum_\mu H_{\mu+\nu}^{(2)}(z)J_\mu(\xi)e^{j\mu\theta}$$

- $l=\sqrt{z^2+\xi^2-2z\xi\cos\theta}$
- $|\xi|<|z|$
- ξとzはさむ角がθ，ξに対する角がφ



伝達関数行列化

$$P_{111}=\boldsymbol{\psi}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}_1, P_{121}=\boldsymbol{\psi}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_2\boldsymbol{\gamma}_1, P_{112}=\boldsymbol{\psi}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\boldsymbol{\gamma}_1, P_{122}=\boldsymbol{\psi}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_2\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\boldsymbol{\gamma}_1,\dots$$

$$P_{221}=\boldsymbol{\psi}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}_2, P_{211}=\boldsymbol{\psi}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_1\boldsymbol{\gamma}_2, P_{222}=\boldsymbol{\psi}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_2\mathbf{T}_1\boldsymbol{\gamma}_2, P_{212}=\boldsymbol{\psi}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\mathbf{T}_1\boldsymbol{\gamma}_2,\dots$$

$$\boldsymbol{\gamma}_1=\left(\gamma_{-N,1},\gamma_{-N+1,1},\dots,\gamma_{N,1}\right)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\gamma}_2=\left(\gamma_{-N,2},\gamma_{-N+1,2},\dots,\gamma_{N,2}\right)^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{\psi}_1=\left(\psi_{-N,1},\psi_{-N+1,1},\dots,\psi_{N,1}\right)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\psi}_2=\left(\psi_{-N,2},\psi_{-N+1,2},\dots,\psi_{N,2}\right)^{\mathrm{T}}$$

$$\mathbf{T}_1=\begin{pmatrix} T_{-N,-N,1} & \cdots & T_{-N,N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N,-N,1} & \cdots & T_{N,N,1} \end{pmatrix},\qquad \mathbf{T}_2=\begin{pmatrix} T_{-N,-N,2} & \cdots & T_{-N,N,2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N,-N,2} & \cdots & T_{N,N,2} \end{pmatrix}$$

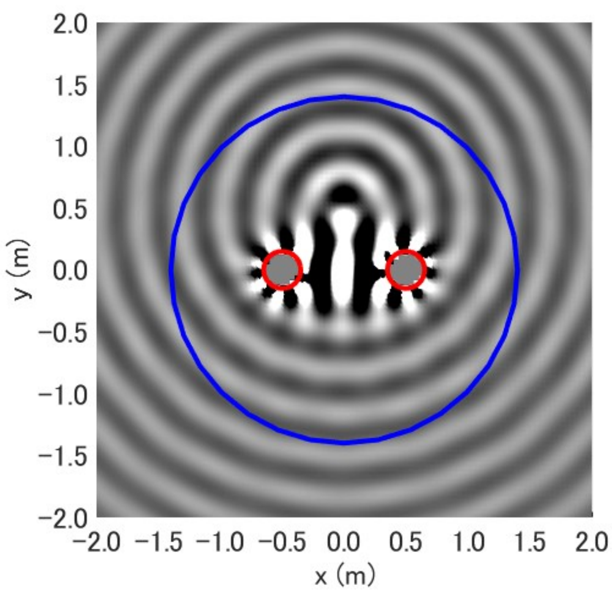
$$\gamma_{\nu,1}=-\frac{e^{-j\nu\phi_{\mathrm{p1}}}}{2\pi k r_{\mathrm{a1}} H_\nu^{(2)\prime}(k r_{\mathrm{a1}})},\quad \gamma_{\nu,2}=-\frac{e^{-j\nu\phi_{\mathrm{p2}}}}{2\pi k r_{\mathrm{a2}} H_\nu^{(2)\prime}(k r_{\mathrm{a2}})},$$

$$\psi_{\nu,1}=H_\nu^{(2)}(k r_{\mathrm{q1}})e^{j\nu\phi_{\mathrm{q1}}},\qquad \psi_{\mu,2}=H_\mu^{(2)}(k r_{\mathrm{q2}})e^{j\mu\phi_{\mathrm{q2}}},$$

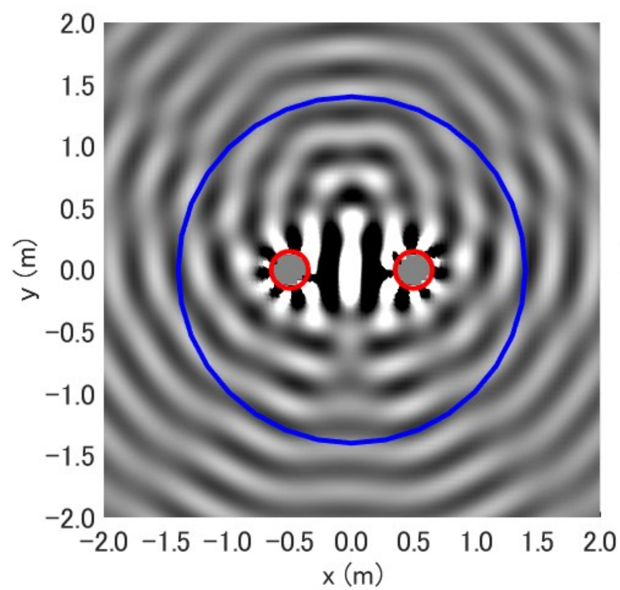
$$T_{\mu,\kappa,1}=-\frac{J_\kappa'(k r_{\mathrm{a1}})}{H_\kappa^{(2)\prime}(k r_{\mathrm{a1}})}H_{\kappa-\mu}^{(2)}(k r_{12}),\qquad T_{\nu,\mu,2}=-\frac{J_\mu'(k r_{\mathrm{a2}})}{H_\mu^{(2)\prime}(k r_{\mathrm{a2}})}H_{\nu-\mu}^{(2)}(k r_{12})$$

反射の影響

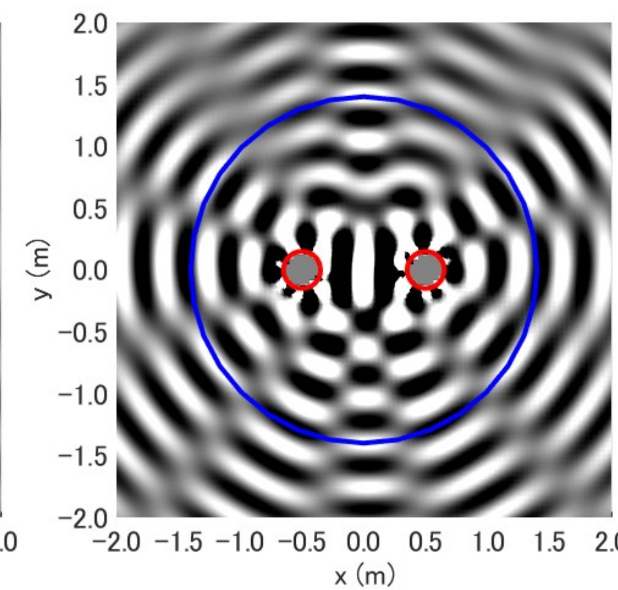
仮想音源再現における最大反射次数の影響
シミュレーションは最大12次反射まで



12次反射



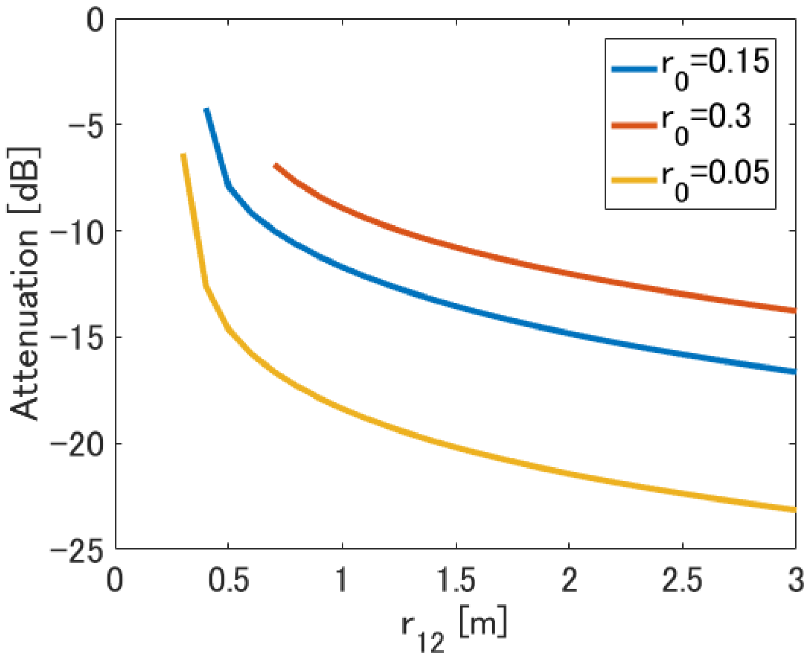
1次反射



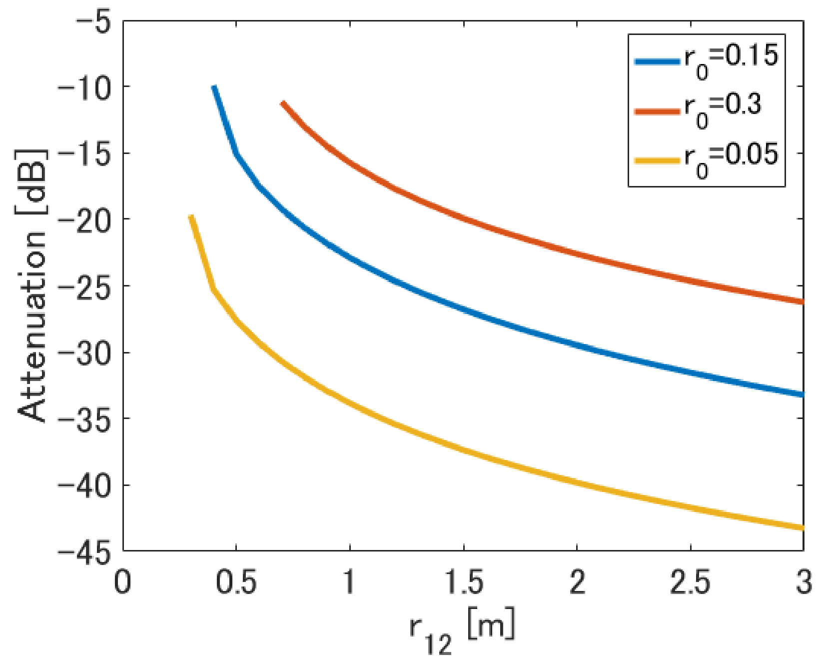
0次反射(剛円)

反射の影響

二円間距離による反射の減衰



1次反射の減衰



2次反射の減衰