

1 はじめに

音の再現を目指した国内の研究としては古くはNHKの牧野, 早稲田大学の伊藤らによる立体音響再生に関する研究, 東京電気大学の三浦, 浜田らによるOSSやNTTの金田, 三好らによるMINTを使ったトランスオーラル系に関する研究, さらに伊勢らによるキルヒホッフの積分公式に基づく音場制御に関する研究が行われてきた<sup>1),2),3),4)</sup>。

今回, ます伊藤により提案された立体音響再生法について再考し, さらにこれを多チャンネルに拡張した場合について説明する。

2 2チャンネル立体再生理論

広い空間内にある1個の点音源から発せられる持続正弦波を2つのスピーカによって別の広い空間内に再生する場合を解析する。図-1は録音空間を示し,  $A_0$ 点にある点音源から発せられた音を間隔  $m$  なる2個のマイクロホン  $M_1$  と  $M_2$  とで受音する場合を示している。マイクロホン間隔の中点を  $O_0$ ,  $A_0O_0$  とマイクロホン軸とのなす角を  $\theta_0$ , 点音源の強さを  $A_0e^{-i\omega t}$  とすると,  $M_1$  点,  $M_2$  点の音場はそれぞれ

$$\phi_1 = \frac{A_0}{r_{10}} e^{ikr_{10}-i\omega t}, \quad \phi_2 = \frac{A_0}{r_{20}} e^{ikr_{20}-i\omega t} \quad (1)$$

と表わされる。

マイクロホン, 伝送系およびスピーカが完全なものと仮定すれば,  $M_1$  点および  $M_2$  点に再生用スピーカを置くことによって,  $M_1$  点,  $M_2$  点に式(1)となるような相対関係をもつ音場を再現させることができる。また, 図-2のように再生用スピーカの間隔を  $d$  とし, この再生空間内の受音点  $B$  とスピーカの距離  $r'_1, r'_2, r'_3$  を図のようにすると,  $S_1$  および  $S_2$  から再生される音波を合成した  $B$  点の音場は

$$\phi'(B) = \left[ \left( \frac{A}{r_1} e^{ikr_1} \right) \frac{e^{ikr'_1}}{r'_1} + \left( \frac{A}{r_2} e^{ikr_2} \right) \frac{e^{ikr'_2}}{r'_2} \right] \quad (2)$$

となる。

一方, もし像音源  $A$  から発せられた音波が直接  $B$  点に到達するものとすれば  $B$  点の音場は

$$\phi'_0(B) = \frac{A}{R} e^{ikR-i\omega t} \quad (3)$$

$$R = \sqrt{r_0^2 + r_0'^2 + 2r_0r_0' \cos(\theta + \theta')} \quad (4)$$

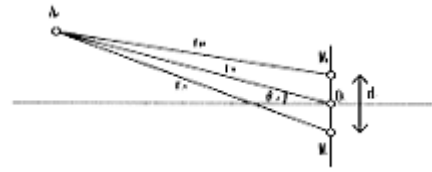


図-1: 原空間

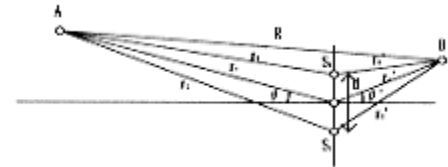


図-2: 再現空間

と表される。もしこの立体再生音場が理想的に実現されるものとすれば, 式(2)と式(3)とが物理的に等価でなければならない。

$$\begin{aligned} r_1^2 &= \left( r_0 m \frac{d}{2} \sin \theta \right)^2 + \left( \frac{d}{2} \cos \theta \right)^2 \\ r_2^2 &= \left( r_0 m \frac{d}{2} \sin \theta' \right)^2 + \left( \frac{d}{2} \cos \theta' \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

とにおいて式(2)に代入して見ると,

$$\begin{aligned} \left( \frac{d}{2r_0} \right)^2 &\ll 1, \frac{d}{r_0} \sin \theta \ll 1, \\ \left( \frac{d}{2r_0'} \right)^2 &\ll 1, \frac{d}{r_0'} \sin \theta' \ll 1 \end{aligned} \quad (6)$$

となる場合には,

$$\begin{aligned} \phi'(B) &\approx \frac{A}{R} e^{ikR-i\omega t} \left( \frac{R}{r_0 r_0'} \right) \\ &\cdot \left[ e^{ik(r_0 r_0' / R) \{1 - \cos(\theta + \theta')\}} \right] \\ &\cdot 2 \cos \left\{ \frac{kd}{2} (\sin \theta + \sin \theta') \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

となり,  $(\theta + \theta')$  が余り大きくなり, かつ  $\pi d(\sin \theta + \sin \theta') / \lambda$  も余り大きくない場合には

$$\phi'(B) \approx \frac{2A}{r_0 r_0'} e^{ikR-i\omega t} = \left( \frac{2R}{r_0 r_0'} \right) \frac{A}{R} e^{ikR-i\omega t} \quad (8)$$

となり, 再生音場の合成波面の位相一定面の形は周波数に無関係に自然音場と近似させることができる。ただし振幅一定面を自然音場と等しくすることはできず,  $2R/r_0 r_0'$  だけ異なっており,  $O$  を中心として  $r_0'$  を半径とする面となることがわかる。

\* Extension of stereophonics to sound field reproduction by using multiloudspeaker.  
 By Yasuhiro Oikawa, Kiyoshi Ogino, Takashi Arai and Yoshio Yamasaki (Waseda University).

### 3 多スピーカへの拡張

図 - 3, 図 - 4 に示すような原空間, 再現空間を考える。スピーカの数  $n$  とし, スピーカは等間隔  $d$  で配置されているとする。このとき点  $B$  では

$$\begin{aligned} \phi'(B) &= \sum_{j=1}^n \left( \frac{A}{r_j} e^{ikr_j} \right) \frac{e^{ikr'_j}}{r'_j} e^{-i\alpha r} \\ &= \left[ \sum_{j=1}^n 2 \frac{1}{r_j r'_j} e^{ik(r_j+r'_j)} \right] \frac{A}{2} e^{-i\alpha r} \end{aligned} \quad (9)$$

となり,  $(\theta + \theta')$  があまり大きくなり, かつ  $\pi d(\sin \theta + \sin \theta')/\lambda$  もあまり大きくない場合には,

$$\begin{aligned} \phi'(B) &\approx \left[ \sum_{j=1}^{n-1} \frac{2}{r_{j0} r'_{j0}} \right] \frac{A}{2} e^{-i\alpha R - i\alpha r} \\ &= \left[ \sum_{j=1}^{n-1} \frac{R}{r_{j0} r'_{j0}} \right] \frac{A}{2} e^{-i\alpha R - i\alpha r} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。2つのスピーカを用いた場合と同様に再生音場の合成波面の位相一定面の形は元の音場と近似させることができる。振幅一定面に関しては,  $O_j(j=$  を中心とする  $r'_{j0}$  を半径とする面の和で表される。

目的とした波面と合成された波面の差の大きさは

$$f(n, d) = \left| \frac{1}{R} - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{r_{j0} r'_{j0}} \right| \quad (11)$$

となる。

### 4 シミュレーション

音源の位置, スピーカ位置, 受音点位置は図 - 5 に示す条件でシミュレーションを行った。スピーカ間隔を  $0.1\text{m}$ ,  $0.25\text{m}$ ,  $0.5\text{m}$ ,  $1\text{m}$  とした場合のスピーカの数と式 (11) で表すことのできる誤差の関係を図 - 6 に示す。またスピーカの個数を 4 個, 5 個, 6 個, 7 個とした場合のスピーカの間隔と誤差の関係を図 - 7 に示す。

### 5 むすび

今回, 伊藤により提案された立体音響再生法を多スピーカに拡張した場合について説明し, シミュレーションにより基礎的検討を加えた。今後, さらにさまざまな音源位置, 受音点位置について検討を加え, さらに聴覚特性等を考慮した音場再生について検討を加える。

### 文献

- 1) 伊藤 毅, 音響工学原論(下) (コロナ社, 東京, 1969).
- 2) 浜田晴夫, "基準的収音・再生を目的とする System の構成," 音響学会誌 39, 337-349 (1983).
- 3) 三好正人, 金田豊, "音場の逆フィルタ処理に基づく能動騒音制御," 音響学会誌 46, 3-10 (1990).
- 4) 伊製史郎, 鮫島俊哉, 山崎芳男, "キルヒホッフ積分方程式に基づく音場制御理論とその応用," 建築音響研究会, AA94-5 1-8 (1994).

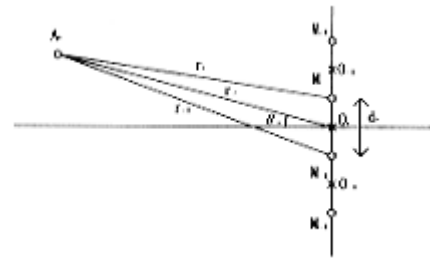


図 -3: 原空間 (チャンネル)

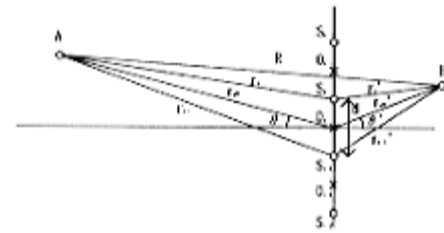


図 -4: 再現空間 (チャンネル)

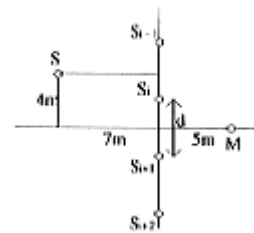


図 -5: シミュレーション

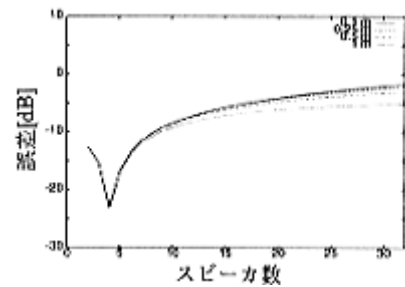


図 -6: スピーカ数と誤差の関係

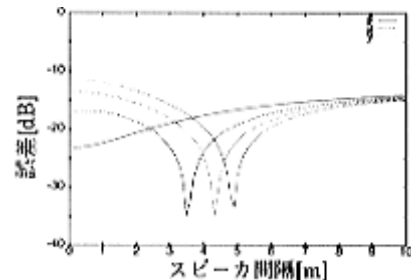


図 -7: スピーカ間隔と誤差の関係