

■2群 (画像・音・言語) - 6編 (音響信号処理)

7章 音場再現

(執筆著者：伊勢史郎) [2012年6月受領]

■概要■

ホイヘンスの原理に基づいて波面を生成できることは、古くから知られており、例えば Camras の論文 (1968年) では図7・1のような概念図が示されている¹⁾。

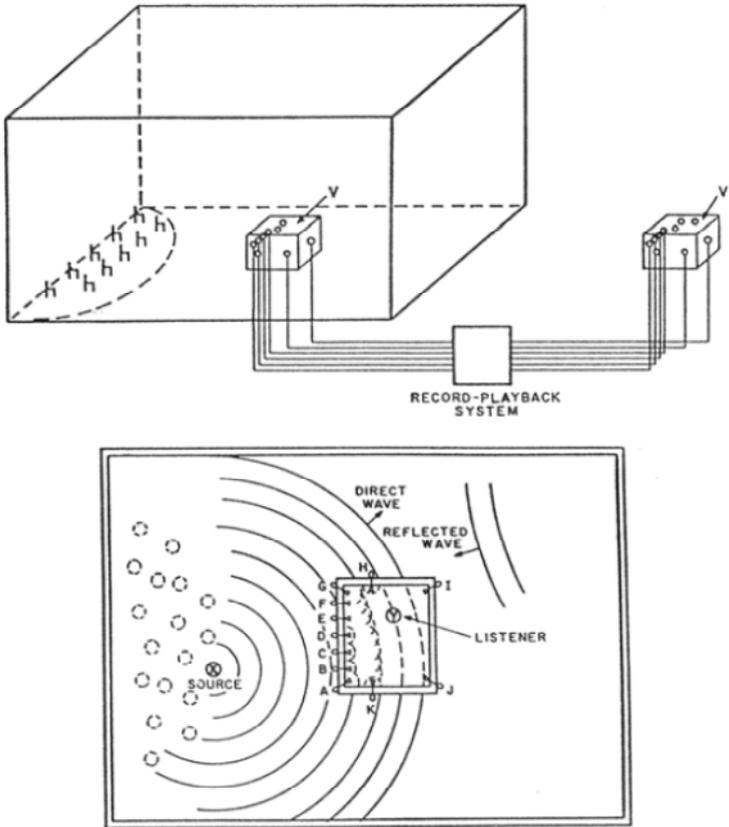


図7・1 ホイヘンスの原理に基づいた音場再現

この図ではコンサートホール内の領域Vの境界面上に配置されたマイクロホンにより音を収録し、領域Vを囲む境界面上においてマイクロホンと同じ位置に配置された音源を駆動することにより、V内の音場がV内に生成されることを示している。しかし、この概念図を示した同じ論文で、1952年に開催された IRE Audio Symposium で完全な音場再現は不可能だと

いう意見が満場一致の結論だったと述べられている。その理由は音場再生室において V を囲む壁面が完全吸音である必要があり、また壁面に設置する無数の音源が音場に影響しない点音源である必要があるためである。

そこで空間全体に波面を生成するのではなく、鼓膜の位置という限られた空間範囲で音圧信号を再生する技術であるバイノーラル録音再生方式が、アナログ音響技術の時代には音場再現の主流となった。この方法はヘッドフォン再生による実現が技術的にも容易であるため、一般的な音響技術として定着した。また、デジタル信号処理技術が1980年後半以降に著しく発展し、音場の逆システムの設計が可能となり、逆フィルタ処理された音響信号をスピーカから出力するトランスオーラル再生技術が実現した。

一方、ハードウェア技術の継続的な発展は、多チャンネル音響信号処理を次第に身近なものにした。多数のスピーカを用いて、多数のマイクロホン位置で制御を行う実験の試みが行われた。空間的なサンプリング間隔内に多数のマイクロホンを設置すれば、空間的な制御が可能であることが次第に明らかになり、3次元空間の音場再現は不可能という従来の理論に修正が必要となった。そこで、キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式に逆システム理論を適用した境界音場制御の原理が提案された。この原理に基づけば従来必要とされていた無響室や点音源を必要としないため、3次元空間の音場再現の可能性が再び着目されている。

【本章の構成】

本章ではまずバイノーラル録音・再生技術について述べる(7-1節)。原音場においてダミーヘッド録音を行い、ヘッドフォンを用いて再生する伝統的な方法、ヘッドフォンを用いずにスピーカにより両耳信号を再生するトランスオーラル再生、トランスオーラル再生よりも広範囲で波面を生成するステレオダイポール再生について述べ、更にバイノーラル録音における原音場を頭部伝達関数を用いて求める方法について述べる。

次に空間的に波面を生成する波面合成法(7-2節)について述べる。まず、従来の音場制御理論を理解するために、ホイヘンスの原理とその数学的表現であるキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式について説明する。また、波面合成法を実現するため一つの方法としてレイリー積分に基づく方法を紹介する。

次に、キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式に逆システム理論を適用することにより柔軟なシステム構成を実現可能とした境界音場制御の原理(7-3節)について説明する。最後に厳密な意味での音場再現ではないが極めて実用的な方法である、スピーカアレイによる音場制御、6チャンネル音場再生システムについても触れる(7-4節)。

■2群 - 6編 - 7章

7-1 バイノーラル録音・再生

(執筆著者：伊勢史郎) [2012年6月受領]

ある空間において両耳の鼓膜に生じた音圧信号を録音し、別の場所で同じように両耳の鼓膜上で音圧信号を再生することができれば、その空間の音をそのまま感じることができるはずである。このような音場再現技術をバイノーラル録音・再生技術と呼ぶ。バイノーラル録音は、通常、精密に模擬された耳介をもつダミーヘッドあるいは HATS (Head and Torso Simulator) を用いて、外耳道の奥に設置されたマイクロホンによって原音場の音響情報を収録する。バイノーラル再生については、これまで様々な方法が提案されており、ヘッドフォンを用いる古典的な方法、スピーカによって耳元で音圧信号を生成するトランスオーラル再生、比較的広範囲で波面を生成するステレオダイポール再生などがある。

7-1-1 原音場のダミーヘッド録音とヘッドフォン再生

図7・2のように原音場にダミーヘッドを設置し、バイノーラル録音を行う。バイノーラル録音した信号をヘッドフォンを用いて再生することにより、音場再現が可能となる²⁾。

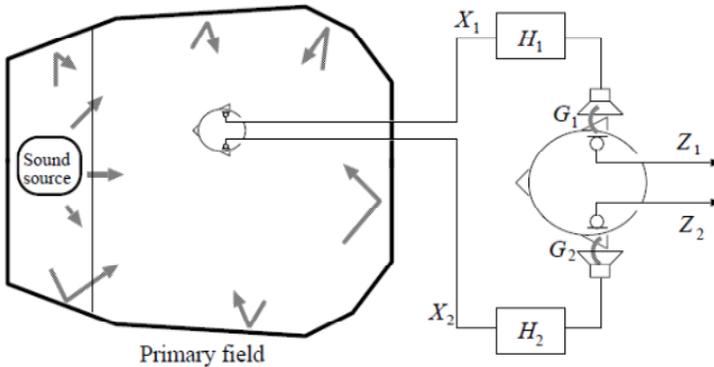


図7・2 バイノーラルシステムの構成

ヘッドフォンおよび外耳道の音響特性 $G_{1,2}$ の影響を補正するため、 $X_{1,2} = Z_{1,2}$ となるように $H_{1,2}$ を設計する必要がある。この場合、 $H_{1,2} = G_{1,2}^{-1}$ とすればよい。

原音場において収録する際に用いるダミーヘッドが受聴者とは異なる点が二つある。一つは頭部の形状、もう一つは頭部の動きである。これらは原理的に解決できないため、高い臨場感を再現する場合には問題となる。

7-1-2 トランスオーラル再生

ヘッドフォンを装着することによる圧迫感が問題となる場合には、スピーカで再生する方法が考えられる。バイノーラル録音した信号をそのままスピーカで再生すると左のスピーカから右耳への音波と右のスピーカから左耳への音波が到来するという、クロストークの問題

が生じる。スピーカの前段にクロストークをキャンセルするためのシステムを挿入することにより、この問題を解決することが可能となる^{3),4)}。

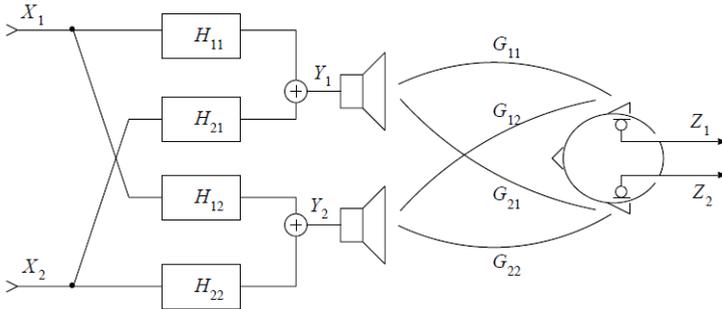


図 7・3 トランスオーラルシステムの構成

図 7・3 のように、二つのスピーカから両耳への伝達関数は G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} と四つ存在する。したがって、スピーカ入力 Y_1 , Y_2 と両耳に設置されたマイクロホン出力 Z_1 , Z_2 との関係は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{21} \\ G_{12} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad (7 \cdot 1)$$

また、スピーカ入力 Y_1 , Y_2 とフィルタ入力 X_1 , X_2 との関係は次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{21} \\ H_{12} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (7 \cdot 2)$$

因果性の条件より $(Z_1, Z_2)^T = (X_1, X_2)^T$ とはなりえないため、 τ 秒の遅延を考慮する。すなわち

$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} e^{-j\omega\tau} \quad (7 \cdot 3)$$

となるようなフィルタを求めればよい。式(7・3)に式(7・1)、式(7・2)を代入して、フィルタ係数を求めると次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{21} \\ H_{12} & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{21} \\ G_{12} & G_{22} \end{pmatrix}^{-1} e^{-j\omega\tau} \quad (7 \cdot 4)$$

スピーカが二つのときは H を逆フーリエ変換した時間信号は原理的に無限長インパルス応答 (IIR) となる。スピーカの数を三つ以上に増やし、時間軸上で逆フィルタのインパルス応答を求めることにより、有限長インパルス応答 (FIR) の逆フィルタ設計が可能であることが知られている⁵⁾。

7-1-3 ステレオダイポール再生

逆フィルタ設計において G^{-1} の固有値が非常に大きくなる周波数が存在する可能性が高い。その場合、スピーカ出力は大きくなり、結果として頭部の移動などにより生じる微小な G の変化が、音場再現において著しい誤差を生じることになる。 G^{-1} の固有値はどのようにしても生じるが、二つのスピーカを近づけることにより最大固有値となる周波数を低域にシフトすることが可能となる。

これにより逆フィルタによって生じる共鳴周波数が低域化するため、空間的にはロバストな音場再生が可能となる。この方法は受聴者から見て再生用の二つのスピーカが正面方向に近接した配置をとるため、ステレオダイポール再生と呼ばれる⁶⁾。また、理論的にはスピーカの最適配置は周波数ごとに異なるため、図7・4のように低域、中域、高域にわけて再生スピーカを別の場所に配置する最適分散配置 (OSD) も提案されている⁷⁾。

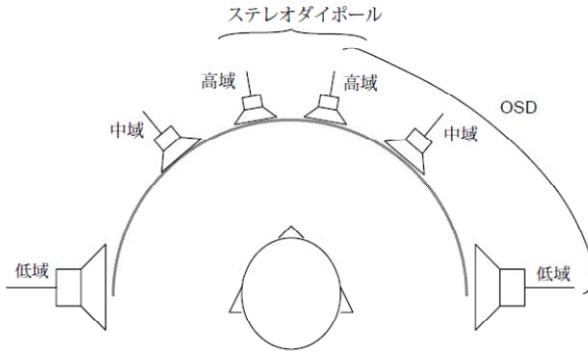


図7・4 ステレオダイポールと OSD

7-1-4 頭部伝達関数の応用

自由音場において点音源を想定し、点音源から鼓膜上の一点の間の伝達関数を頭部伝達関数と呼ぶ。頭部がないときの頭部中心までの伝達関数や平面波音源による頭部伝達関数などで正規化する場合があるが、音場再現で用いる場合にはこの定義がよく用いられる。頭部伝達関数を利用して原音場を数値的に求めることが可能であり、原音場の計測が難しい場合には有効となる。例えば、自由空間内に N 個の点音源があり、それらが音響信号 Y_i ($i = 1 \cdots N$) を発生しているときに両耳の鼓膜上において生成される音響信号 Z_L, Z_R を計算する方法について考える。 i 番目 ($i = 1, \cdots, N$) の点音源の位置から左右の鼓膜への伝達関数を H_{Li}, H_{Ri} とすると、 Z_L, Z_R は次のように表される。

$$Z_j (j = L, R) = \sum_{i=1}^N Y_i H_{ji} \quad (7 \cdot 5)$$

頭部伝達関数の測定は通常、無響室で行われるが、音源の位置を正確に保ちながら移動し、多数の伝達関数を計測する必要があるため、技術的な困難が伴う。そこで頭部の形状を3次元スキャナやMRIなどで計測し、境界要素法などの数値計算によって頭部伝達関数を求める

方法が提案されている^{8),9)}。

このように頭部伝達関数がわかれば、現実にはあり得ない音場（例えば広大な自由空間）を原音場とするような音場再現が、バイノーラル再生やトランスオーラル再生などとの併用により可能となる。しかし、反射のある室内などにおける音場を再現するためには、その室内の音響情報を含む頭部伝達関数が必要となる。

室内の音響情報と頭部伝達関数を別々に扱うための方法として、頭部周囲の境界上の音圧と粒子速度を計測して、それらの値から頭部伝達関数を予測する方法¹⁰⁾、境界要素法を用いる数値計算において各壁面要素からの頭部伝達関数から全体の頭部伝達関数を求める方法¹¹⁾などが提案されている。しかし、これらの方法は実際には膨大な計測あるいは計算が必要となるため実用化までの距離は大きい。

一方、頭部伝達関数をどの程度厳密に求める必要があるのかという疑問が大きくなりつつある。頭部伝達関数が極めてセンシティブな関数であり、個人ごとの頭部伝達関数の時不変性が保証できないことと、頭部の動きと音の変化の関連性の方が頭部伝達関数の精度よりも音像定位に及ぼす影響が大きいという事実が見逃せないためである¹²⁾。

■2群 - 6編 - 7章

7-2 波面合成法

(執筆：伊勢史郎) [2012年6月受領]

7-2-1 ホイヘンスの原理

波の伝搬において、ある時点での波面の形状は、その前段階の波面上の各点から球面状に波が出た結果として生じたものと説明することができる。すなわち、図7・5のように前段階の波面を音源と考えることにより、波の回折の現象などを直感的に説明することが可能となる。

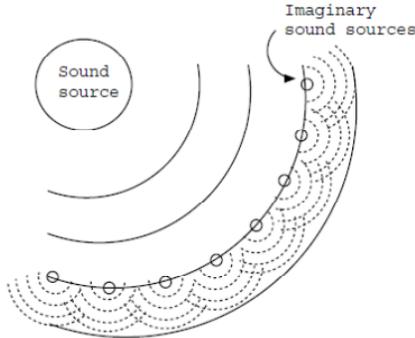


図7・5 ホイヘンスの原理

7-2-2 キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式

図7・6のように音源を含まない閉曲面 S で囲まれた領域 V を想定する。

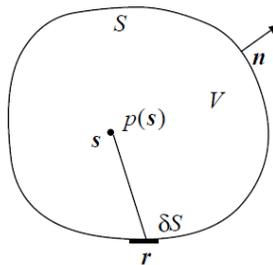


図7・6 ある媒質中の境界 S に囲まれた空間

ヘルムホルツ方程式とそのグリーン関数 G を用いて $\nabla^2 p - p \nabla^2 G$ を計算し、領域 V で積分し、グリーン関数の定理を用いると、閉曲面 S 上の面積分に変形され、以下のようなキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式（以下、積分方程式と呼ぶ）が得られる。

$$p(s) = \iint_S G(\mathbf{r}|s) \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} - p(\mathbf{r}) \frac{\partial G(\mathbf{r}|s)}{\partial n} \delta S \quad (7 \cdot 6)$$

グリーン関数の解は自由音場における点音源（モノポール音源）による音場を表すため、

式(7・6)の右辺第一項 $\partial p(\mathbf{r})/\partial n G(\mathbf{r}|\mathbf{s})$ は大きさ $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ のモノポール音源と考えられる。また G の法線方向微分は、近似すると $(G(\mathbf{r} + \delta \mathbf{n}) - G(\mathbf{r}))/\delta n$ となり、これは法線方向に置かれた二つの逆位相のモノポール音源を意味するため、ダイポール音源と考えられる。つまり、積分方程式は大きさ $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ のモノポール音源と大きさ $-p(\mathbf{r})$ のダイポール音源が面 S 上に分布することによって領域内の音場 $p(\mathbf{s})$ が生じていると考えることができる。このようにキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式はホイヘンスの原理の数学的解釈と考えられている。

したがって、図 7・1 を用いて再び説明すると、原音場における領域 V の境界面上の音圧と粒子速度を計測し、再現音場における領域 V' を取り囲む境界面上に粒子速度から計算した大きさ $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ のモノポール音源と大きさ $-p(\mathbf{r})$ のダイポール音源を設置することにより、領域 V 内で完全な音場再現が実現する。

7-2-3 波面合成法の実現

境界面 S をもつ無限に薄い板がピストンする場合の音場について考える。板の裏表では音圧は同じ値の正負となるため、式(7・6)の面 S 上の音圧 $p(\mathbf{r})$ に関する項、すなわち第 2 項が打ち消され、

$$p(\mathbf{s}) = \iint_S G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} \delta S \quad (7 \cdot 7)$$

となる。この式はレイリー積分と呼ばれ、ピストン振動などの解析に用いられる。面 S 上にピストン振動源ではなく、ダイポール音源を想定すると、式(7・6)の第 1 項が打ち消され、

$$p(\mathbf{s}) = \iint_S -p(\mathbf{r}) \frac{\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})}{\partial n} \delta S \quad (7 \cdot 8)$$

が得られる。ヨーロッパで研究されている Wave Field Synthesis (WFS) の理論的説明では式(7・8)が用いられる¹³⁾。つまり、7-2-2 項で述べたようなモノポール音源とダイポール音源の両方を必要とせず、どちらかでよいということになる。したがって、原音場で音圧を測定し、再現音場でその音圧と同じ大きさの振幅をもつダイポール音源を壁面上に分布させることにより、完全な音場再現が可能となる。この論理は積分方程式の解の一意性の問題により必ずしも真ではないが、領域 V のもつ固有周波数以外では成立する¹⁴⁾。

■2群 - 6編 - 7章

7-3 境界音場制御の原理

(執筆著者：伊勢史郎) [2012年6月受領]

積分方程式におけるグリーン関数が音源であるという解釈は、グリーン関数の元々の数学的な定義によるものである。この考えが積分方程式はホイヘンスの原理の数学的表現であるという根拠にもなっている。一方、音場の数値計算手法で用いる境界要素法における積分方程式の解釈では、 $p(\mathbf{r})$ は音圧、 $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ は粒子速度、 G および $\partial G/\partial n$ は境界の形状から決まる係数となる。つまり、境界上に音源を配置する必要はなく、図7・7のように境界上の音圧と粒子速度が原音場と等しくなるように再生音場を制御することにより、領域 V 内の音場は再生音場において完全に再現される。これを境界音場制御の原理と呼ぶ¹⁵⁾。

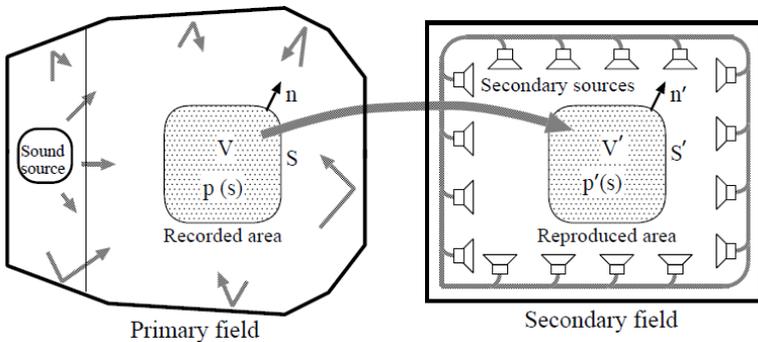


図7・7 境界音場制御の原理に基づいた音場再現

境界音場制御の原理に基づいて音場再現システムを構成する場合、次のような手順となる。

1. 原音場のある領域 V を囲む境界 S 上に多数のマイクロホンを設置し、音圧と粒子速度を収録する。粒子速度は2点の音圧から求められるため、二つのマイクロホンを法線方向に設置する。
2. 再生音場において、原音場と同じ形状の領域 V' を想定し、その境界上の原音場と等しい位置にマイクロホンを設置する。
3. 再生音場において、多数のスピーカを設置し、各マイクロホンとの伝達関数 G を測定する。
4. 逆システム G^{-1} を設計し、原音場で収録した信号と畳み込み、再生音場において音響出力する。

上記をブロック図で表すと図7・8のようになる。

積分方程式における解の一意性が問題とならない周波数（境界面 S の形状により決まる固有周波数以外の周波数）については粒子速度は音圧から一意に決まるため、粒子速度の収録は必要ない。実際には解の一意性が問題となる周波数は高域に多く現れるため、それよりも空間サンプリングすなわちマイクロホンの数の問題の方が影響が大きい。

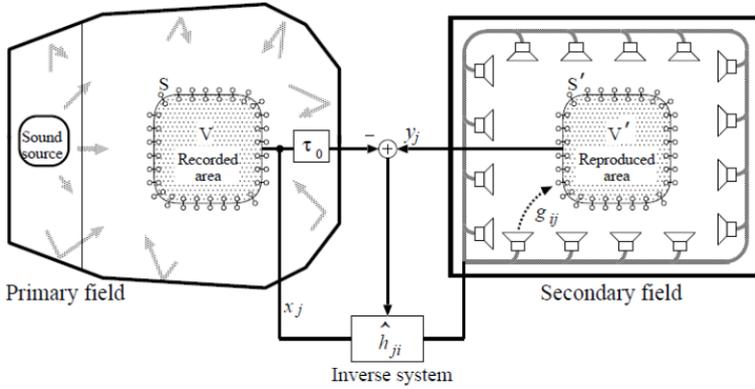


図 7・8 境界音場制御の原理に基づいた音場再現システム

従来の WFS では概要で述べた通り，音場再生室において V' を囲む壁面が完全吸音である必要があり，また壁面に設置する無数の音源が音場に影響しない点音源である必要があった．しかし，逆システムを適用することによりこれらの制約がすべて取り除かれ，音場再現システムを実現するための目標は逆システム設計に帰着する．完全な音場再現を行うためには多くの点の制御が必要となるなど課題が残るが，無響室や点音源という問題が取り除かれた分，実用化への距離は近くなった．

■2群 - 6編 - 7章

7-4 その他の空間的な音場再現

(執筆者：伊勢史郎) [2012年6月受領]

原音場を波面という完全な形で再現するわけではないが、ある空間範囲の音場を制御する方法として極めて実用的な方法が提案されている。例えば、スピーカアレイによる音場制御は、ある壁面上に多数のスピーカを設置し、位相を制御することにより、受聴者の近くの位置で音圧のピークを創り出す方法である。ピーク近傍の受聴者はそこに音源があるかのような感覚を得ることができる。少人数で映像作品を楽しむ場合などは有効である¹⁶⁾。もう一つの例として6チャンネル収音・再生システムがあげられる。原音場において前後左右上下の6方向の指向性をもつマイクロホンで測定した信号を無響室の同じ6方向に設置したスピーカで再生する方法である。無響室をもつ大学や研究所などで音響心理実験を行うための道具として用いられている¹⁷⁾。

■参考文献

- 1) M. Camras, "Approach to recreating a sound field," J. Acoust. Soc. Am., vol.43, pp.1425-1431, 1968.
- 2) Jens Blauert, "Spatial hearing," The MIT press, Cambridge, pp.120-123, 1986.
- 3) B. B. Bauer, "Stereophonic earphone and binaural loudspeakers," J. Audio. Eng. Soc., vol.9, pp.148-151, 1961.
- 4) M. R. Schroeder and B. S. Atal, "Computer simulation of sound transmission in rooms," IEEE Int. Conv. Rec., vol.7, pp.150-155, 1963.
- 5) M. Miyoshi and Y. Kaneda, "Inverse filtering of room acoustics," IEEE Trans. ASSP, vol.36, no.2, pp.145-152, 1988.
- 6) O. Kirkeby, P.A. Nelson, and H. Hamada, "The stereo dipole -a virtual source imaging system using two closely spaced loudspeakers," Journal of the Audio Engineering Society, vol.46, pp.387-395, 1998.
- 7) T. Takeuchi and P.A. Nelson, "Optimal source distribution for virtual acoustic imaging," In Proceedings of the Audio Engineering Society 110th Convention, Amsterdam, 5, 2001. preprint No.5372.
- 8) B. F. G. Katz, "Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. i. rigid model calculation," J. Acoust. Soc. Am., vol.110, pp.2440-2448, 2001.
- 9) Makoto Otani and Shiro Ise, "Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method," J. Acoust. Soc. Am., vol.119, no.5, pp.2589-2598, 2006.
- 10) S. Takane and T. Sone Y. Suzuki, T. Miyajima, "a new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE," Acoust Sci. and Tech., vol.24, no.5, pp.276-283, 2003.
- 11) 大谷 真, 伊勢史郎, "反射音を含む音場の可聴化に適した両耳信号の数値解析手法," 日本音響学会誌, vol.62, no.6, pp.425-432, 2006.
- 12) 平原達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹, "頭部伝達関数論考," 日本音響学会聴覚研究会資料, vol.38, pp.19-24, 1 2008. H-2008-4.
- 13) A. J. Berkhout, "A holographic approach to acoustic control," J. Audio Eng. Soc., vol.36, no.12, pp.977-995, 1988.
- 14) R. E. Kleinman and G.F. Roach, "Boundary integral equations for the three dimensional Helmholtz equation," SIAM Review, vol.16, no.2, pp.214-236, 1974.
- 15) 伊勢史郎, "キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理," 日本音響学会誌, vol.53, pp.706-713, 1997.
- 16) 小野一穂, 小宮山撰, "音像・音場制御用スピーカアレイの駆動法に関する検討," 電子情報通信学会技術報告, pp.15-21, 4 1994. EA94-20.
- 17) Yokoyama Sakae, Ueno Kanako, Sakamoto Shinichi, and Tachibana Hideki, "6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields," Acoust Sci. and Tech., vol.23, no.2, pp.97-103, 2002.