

音場制御システムを考慮したホール音場シミュレーション

羽入 敏樹 飯田 一博¹⁾

1) 松下通信・AVC研
224
神奈川県横浜市都筑区佐江戸町 600
松下通信工業(株)
技術本部 AVC 研究所

あらまし

本論文では、音場制御システムを考慮したホール音場シミュレーションの開発を目的として、音像定位システムにおける音像定位効果のシミュレーション方法と、音場創生システムにおける音響帰還ループのシミュレーション方法について検討した。さらに音像定位システムについては、定位効果予測の逆問題として所望の定位効果から定位パラメータを自動計算する方法についても検討した。

キーワード 音場シミュレーション、音場制御、音像定位、定位確率、音像分離チャート、帰還ループ

Simulation of Sound Field in which Sound Field Control System Is Installed

Toshiki Hanyu Kazuhiro Iida¹⁾

1)AVC Research Lab.
Matsushita Comm. Ind. Co.,Ltd.
AVC Research Lab.
Matsushita Communication Industrial Co.,Ltd.
600 Saedo-cho, Tsuzuki-ku, Yokohama,
224 Japan

Abstract

This paper describes a simulation of sound field in which the sound field control system has been installed. We study methods for predicting the audience seat area where the objective sound image localization is achieved by the sound image localization system, and for calculating acoustical characteristics taken feedback loop effects of the sound field control system into account. Furthermore, we also study a method for automatic calculation of the parameter of the sound image localization system.

key words Sound field simulation, Sound field control, Sound image localization, Localization probability, A chart of %-split of sound image, Feedback loop

1 はじめに

劇場や音楽ホールにおいて、高付加価値な電気音響システムとして音場制御システムが導入されるようになってきている。音場制御システムには、所望のスピーカに音像を定位させるための音像定位システムや、劇場や音楽ホールの建築音響的制約を越えてさまざまな音環境を創り出すための音場創生システムがある。これらのシステムの設計思想は、従来の電気音響システムとは一線を画しており、新しい設計手法と設計ツールが必要になってくる。

音像定位システムは、第一波面の法則[1]を利用して、話者の近くにあるスピーカからの音波が受聴者にとって第一波面となるように他のスピーカに遅延時間を設定することと、十分な定位効果が得られるような音量抑制を設定することによって音像を話者方向に定位させるためのシステムである。音響システムが大規模になってくると、その定位システムは複雑になり、定位の効果を予測して最適なパラメータを設計するのが難しくなる。しかし、そのための設計ツールは、ほとんど用意されていないのが現状である。音像定位システムを適切に設計するには、まず定位効果の定量化方法と定位効果のシミュレーション方法の確立が必要である。

音場創生システムは、演奏者の音をマイクで收音し、DSFC(Digital Sound Field Controller)により信号処理を施した後、スピーカで音場に再生することによって音場を所望の特性に制御する。しかし、マイクとスピーカが同一空間に存在するため、スピーカから再生された音が再度マイクに收音されることによって音響エネルギーの閉ループが形成される。これは音響帰還ループとよばれ、音場創生システムの音質を劣化させる主要因となっている。音場創生システムの設計にあたっては、音響帰還ループを引き起こしている要因を特定し、帰還ループをいかに低減するかが鍵となる。そのためには、音響帰還ループのシミュレーション方法の確立が必要である。

そこで本報では、音場制御システムを考慮したホール音場シミュレーションの開発を目的として、音像定位システムにおける定位効果のシミュ

レーション方法と音場創生システムにおける音響帰還ループのシミュレーション方法について検討した。さらに音像定位システムについては、定位効果予測の逆問題として所望の定位効果から定位パラメータを自動計算する方法についても検討したので報告する。

2 音像定位システムのシミュレーション

音像定位システムによって得られる定位効果の定量的な予測方法と、所望の定位効果を得るための定位パラメータを自動計算する方法について検討する。

2.1 定位効果の予測方法

定位効果を定量的に予測するには、

- 1) 定位効果の定量化方法
- 2) 定位効果のシミュレーション方法

の2つの課題がある。以下で、これらの課題を検討する。

2.1.1 定位効果の定量化方法

図1は先行音と単一反射音からなる音場において、先行音に対する遅れ時間とレベル差から音像が分離して聞こえる確率を Morimoto ら[2]が音響心理実験によって明らかにした音像分離チャートである。この音像分離チャートを用いて定位の効果量をあらゆる評価指標として定位確率を以下のように定義する。

$$\text{定位確率}[\%] = 100 - \text{音像分離確率}[\%]$$

但し、所望の方向のスピーカからの音が先行音となっていることが前提となる。定位確率は、定位スピーカに音像が分離しないで定位する確率を表しており、この確率が大きいほど定位効果が大きいことを意味する。この指標によって定位効果を定量化する。これにより先行音-後続音間のレベル差、時間差といった物理量から心理量である定位確率への変換が可能になる。

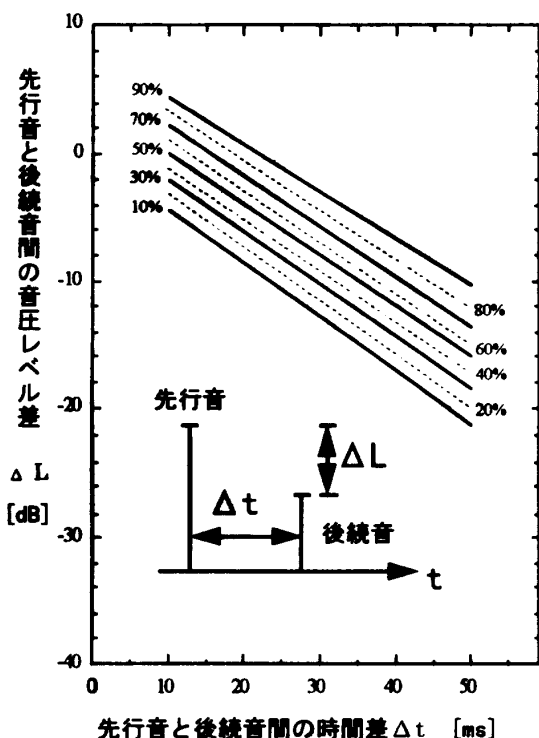


図1 音像分離チャート、Morimotoら[2]より

2.1.2 定位効果のシミュレーション方法

定位効果を定量化するときに必要な先行音と後続音のレベル、到達時間は虚像法で計算したエコータイムパターンより得る。得られたエコータイムパターンは、設計時に与えた定位パラメータにしたがって遅延時間とレベルの補正をする。このエコータイムパターンから先行音-後続音間のレベル差と時間差を求め、定位確率に変換することによって定位効果を予測する。定位効果のシミュレーションの具体的な方法を図2に示す。

まず、音場の客席エリア内に分布状に受音点を設定し、各受音点において定位パラメータを考慮したエコータイムパターンを算出する。そして、各受音点で定位スピーカの音が先行音となって第一波面の法則を満たしているかどうかを調べる。満たしていない場合、その受音点では定位しないと判定する。

定位スピーカの音が先行音である場合、後続音を検出して先行音-後続音間のレベル差と時間差を算出する。そして、その時間差とレベル差の情報に、音像分離チャートを適用することによって定位確率を求める。この定位確率を客席エリア

内全受音点において算出することによって定位確率の分布を得る。これをカラーエリアマップ表示または等定位確率曲線表示することによって定位効果の客席内分布を把握することができる。

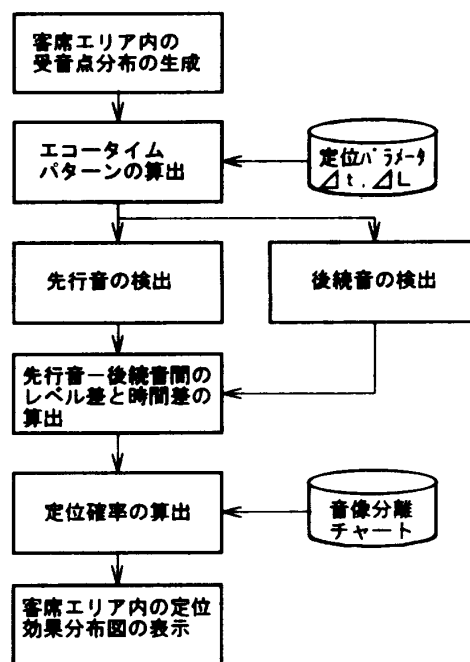


図2 定位効果の予測方法

2.2 定位パラメータの自動計算方法

所望の定位効果を得るための定位パラメータを計算することは、定位効果予測の逆問題となる。定位パラメータの自動計算方法を図3に、その概念図を図4に示す。

まず、所望の定位効果として、客席内の定位エリアとエリア内の定位確率を指定する。次に、客席エリア内の受音点におけるエコータイムパターンから先行音と定位スピーカ間の時間差を求め、客席エリア内すべての受音点で定位スピーカを先行音とするために必要なディレイ Δt を算出する。そして、そのディレイ Δt を考慮した後の定位スピーカ-後続音間の時間差とレベル差の情報に音像の分離チャートを適用することによって、指定した定位確率を実現するために必要なアッテネート量 ΔL を決定する。

これにより、所望の定位効果（定位エリアと定位確率）を満たすように定位パラメータを自動計算することが可能になる。

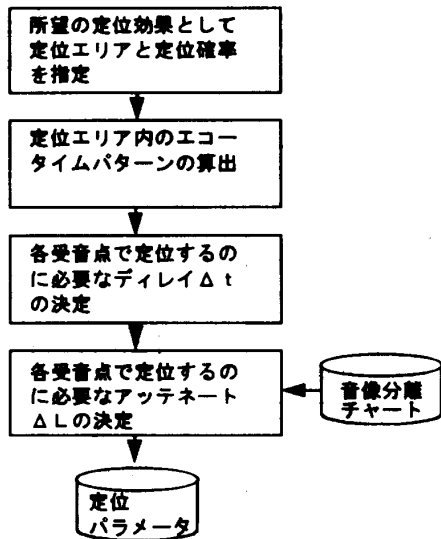


図3 定位パラメータ自動計算方法

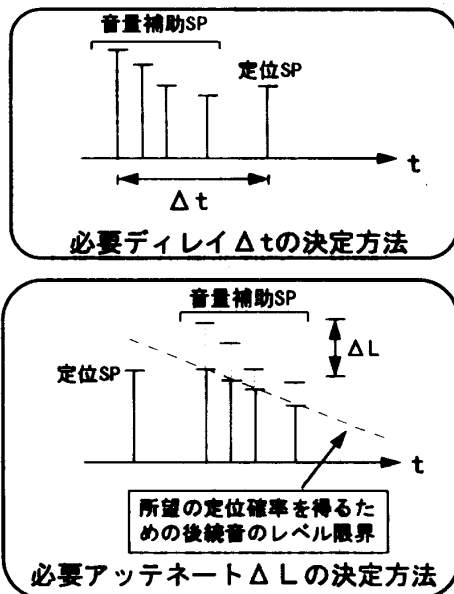


図4 定位パラメータ自動計算方法の概念図

2.3 音像定位システムのシミュレーション例

音像定位システムのシミュレーション例として、上手と下手に2つのスピーカを設置し、上手に定位させる条件でシミュレーションを行った。まず、所望の定位エリアを設定し、その中で50%の定位確率が得られるような条件で、定位パラメータを自動計算させた。次に、計算したパラメータを定位システムにセットし、得られる定位効果を予測した。定位確率分布とその時の音圧分布を定位システムの有無で比較したものをそれぞれ図5、図6に示す。なお、図6の中の白線で描かれた四角形は、定位パラメータ設計時に設定した

定位エリアを表している。

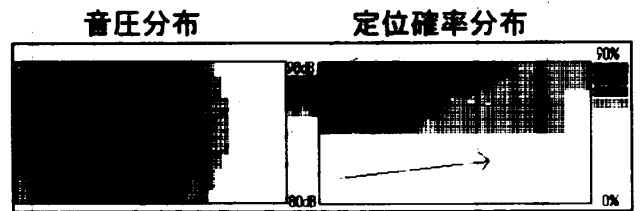


図5 定位確率分布と音圧分布(定位システム無)

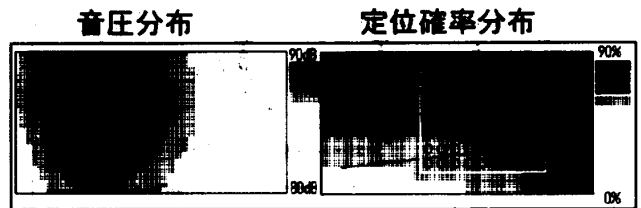


図6 定位確率分布と音圧分布(定位システム有)

これらを見ると、定位システム無の場合、広い範囲で音圧が確保されているが、下手側の客席では上手スピーカに定位せず、上手側の客席でも下手スピーカの影響を受けて定位効果が低いことがわかる。

これに対し、定位システム有の場合、設計時に設定した定位エリア内で、設計目標である定位確率50%以上が確保されており、設計エリア外でも定位効果が大きくなっている。音圧分布を見ると、後方において定位無しの場合より音圧レベルは低くなるが、図7に示した上手スピーカのみで拡声した場合の音圧分布と比較すると、定位の効果を確保しながら下手スピーカによる拡声効果があることがわかる。



図7 上手SPだけで再生した場合の音圧分布

3. 音場創生シミュレーション方法

3.1 帰還ループ計算式の導出

音響帰還ループをシミュレートするために、音場創生システムが導入された音場を図8のようにモデル化した。

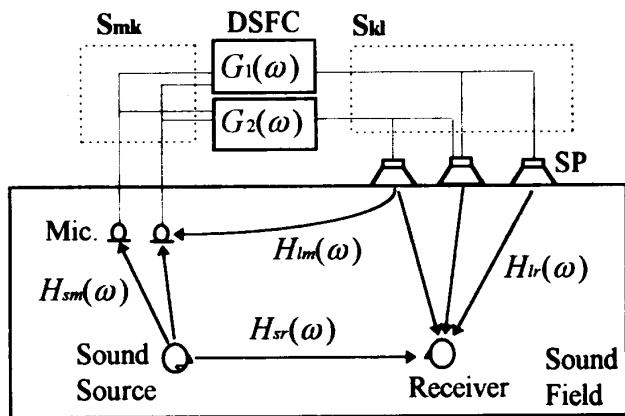


図8 帰還ループを解くための音場のモデル化

受音点での応答 $H_{total}(\omega)$ は式1のように、演奏者-受聴者間の応答 $H_{sr}(\omega)$ と創生系の帰還ループを含んだ応答 $H_{res}(\omega)$ が合成されたものとなる。

$$H_{total}(\omega) = H_{res}(\omega) + H_{sr}(\omega) \quad \dots \text{式1}$$

単一の閉ループ系の応答 $H_{loop}(\omega)$ はループ経路の伝達関数を $H(\omega)$ とすると、 $H_{loop}(\omega) = (1 - H(\omega))^{-1}$ のようになるのはよく知られている。マイク、スピーカ、創生系統(DSFC)がそれぞれ1つの場合、 $H_{res}(\omega)$ は式2のようになる。

$$H_{res}(\omega) = H_{lr}(\omega) \cdot [(1 - G_{ml}(\omega)H_{lm}(\omega))^{-1} G_{ml}(\omega)H_{sm}(\omega)] \quad \dots \text{式2}$$

ここで、 $G_{ml}(\omega)$ は DSFC の伝達関数を含んだマイク-スピーカ間の伝達関数である。

マイク、スピーカが複数で創生系統が1つの場合には、 $H_{res}(\omega)$ は式3のようにマトリクス表現となる[3]。

$$H_{res}(\omega) = H_{lr} \cdot [(E - G_{ml}H_{lm})^{-1} G_{ml}H_{sm}] \quad \dots \text{式3}$$

ここで、

H_{lr} : column vector of $H_{lr}(\omega)$ ($SP \times 1$)

E : unity matrix ($SP \times SP$)

G_{ml} : matrix of $G_{ml}(\omega)$ ($SP \times mic.$)

H_{lm} : matrix of $H_{lm}(\omega)$ ($mic. \times SP$)

H_{sm} : column vector of $H_{sm}(\omega)$ ($mic. \times 1$)

しかしこの場合、 G_{ml} は各要素が DSFC の伝達関数を含んだマイク-スピーカ間の伝達関数マトリクスとなり、マイクやスピーカが増えると多

くの計算時間とメモリを必要とする。そこで、モデルを単純化して計算時間とメモリ消費量を縮小するために「マイク-DSFC 間、DSFC-スピーカ間の伝達関数はフラットである」という仮定を導入する。この仮定によってマイク-DSFC 間、DSFC-スピーカ間を単なるスイッチと考えることができるため、式3を式4のように変形することができる。

$$H_{res}(\omega) = H_{lr} \cdot [(E - S_l G(\omega) S_m H_{lm})^{-1} S_l G(\omega) S_m H_{sm}] \quad \dots \text{式4}$$

ここで、

S_l : vector of switching factor of SP ($SP \times 1$)

S_m : vector of switching factor of mic. ($mic. \times 1$)

$G(\omega)$: DSFC の伝達関数

式4では、式3における伝達関数マトリクス G_{ml} を、スイッチ S_l 、 S_m と伝達関数 $G(\omega)$ に分解したために、マイクやスピーカ数が大きいときにもメモリ消費量は小さくてすむ。しかし、導入した仮定と大きく異なる条件では誤差が生じるので注意が必要である。

さらに、図8において想定したモデルのように創生系統が複数存在し、マイク出力を任意のDSFCにアサインでき、DSFCの出力を任意のスピーカにアサインできるように式4を一般化すると式5のようになる。

$$H_{res}(\omega) = H_{lr} \cdot [(E - S_{kl} G_{kk} S_{mk} H_{lm})^{-1} S_{kl} G_{kk} S_{mk} H_{sm}] \quad \dots \text{式5}$$

ここで、

S_{kl} : switching matrix of DSFC-SP ($SP \times DSFC$)

S_{mk} : switching matrix of mic.-DSFC ($DSFC \times mic.$)

G_{kk} : matrix of $G(\omega)$ ($DSFC \times DSFC$)

G_{kk} は ($DSFC \times DSFC$) のサイズで、DSFC の伝達関数を対角要素に持ち、その他の要素はすべて零となる。一般には、スピーカ数より DSFC の数の方が少ないため、スイッチングマトリクスを導入しない場合に比較して伝達関数マトリクスのサイズを小さくすることができる。また、DSFC の伝達関数を対角要素にのみセットすれば良いため DSFC が複数の場合でも計算時間およびメモリ消費量を抑えることが可能になる。

3.2 音場創生システムのシミュレーション例

残響時間 0.6 秒の小ホールにおいて、残響時間 1.8 秒のインパルス応答を FIR フィルタの係数として DSFC にセットした条件で、音場創生システムの帰還ループの計算を行った。なお、收音マイクは1本、創生スピーカは2台とした。計算に必要な伝達関数は、虚像法によって得られた 125Hz~4kHz のオクターブ帯域ごとのエコータイムパターンを合成して疑似インパルス応答を求め、これをフーリエ変換したものを用いた。なお、エコータイムパターン計算時の反射回数は1回である。

帰還ループを含む音場のランニングパワースペクトルのシミュレーションおよび実測の結果を図9に示す。両者を比較すると、レベルに差異はあるが時間経過とともに卓越してくる周波数の傾向は対応している。しかし、收音してからスピーカで再生するまでの電気信号部分の伝達関数にはシミュレーション段階では予測できない要因(例えばマイクアンプの位相特性など)が存在する。そのため本シミュレーションの適用範囲は、スピーカやマイクの取付位置などが卓越周波数にどう影響するのかといった定性的検討にとどめるのが妥当であろう。

4. まとめ

音場創生システムや音像定位システムなどの音場制御システムを考慮した音場シミュレーション方法を検討した。今後は、実測値との対応をとりながら検討を加えていくつもりである。

参考文献

- [1]H.Haas,"Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hørsamkeit von Sprache [On the influence of a single echo on the intelligibility of speech],"Acustica 1, 49-58.
- [2]M.Morimoto, K.Iida, and Z.Maekawa, "A chart of %-split of sound image,"J. Acoust. Soc. Jpn.(E)11,3(1990).
- [3]P.U.Svensson, "Influence of electroacoustic parameters on the performance of reverberation enhancement systems,"J. Acoust. Soc. Am. 94(1), 162-171.

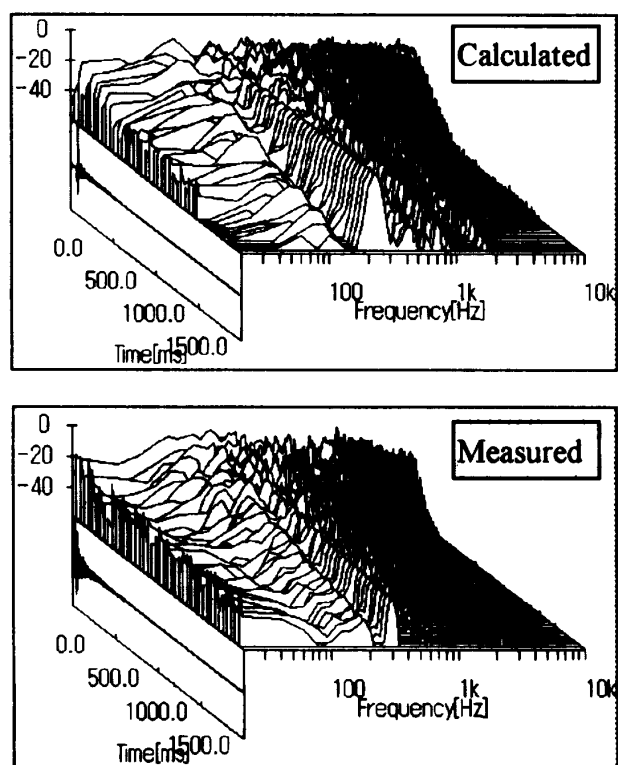


図9 ランニングパワースペクトルの比較