OSS を用いた音場合成のための残響音付加手法の検討

STUDY ON A METHOD TO MAKE A REVERBERATION PART FOR SYNTHETIC SOUND FIELD BY USING OSS

渡辺 充敏*, 木村 翔**, 山口 順***, 平野 滋*
Mitsutoshi WATANABE, Shou KIMURA, Jun YAMAGUCHI
and Shigeru HIRANO

This paper proposes that a method to make reverberation part, which considered a time pattern of reflection and head related transfer function, to make time short to get impulse responses from numerical simulation, which used for synthetic sound field by using OSS, and shows that effectiveness of proposed method through evaluation of difference between measured and operated synthetic sound field by using proposed method as to reverberation part.

Keywords : OSS, Synthetic sound field, Time pattern of sound reflection, Head related transfer function

OSS、合成音場、反射音時間構造、頭部伝達関数

1. はじめに

近年、コンピュータの急速な性能向上、また数値シミュレーション技術の発展に伴い、基本設計段階から室形状、仕上げ材等の室内音場を決定する要素を、入力データの変更により様々に変化させ、比較検討する音響設計支援システムが研究開発され、有効な設計支援手法の一つになっている。しかし、最終的な仕様の決定に至るまでの各段階において、計算出力に基づく検討結果を室形状等に反映させるための試行錯誤が繰り返されるため、コンピュータを用いた音響設計支援システムには迅速な処理が要求される。

筆者らも、数値シミュレーション手法および音場の可視化、可聴化技術¹⁾の開発を進め、これらを統合した音響設計支援システムを開発してきた。開発してきたシステムにおいて、音場の可視化は主に検討の初期段階に、音響障害の有無の確認、対策等の基本的検討のために行う。幾何的手法による計算結果に基づき、室形と応答の関係等についてインタラクティブな処理を可能とすることで、基本的検討に要する時間の短縮を図っている。また、音場の可聴化は、初期段階の幾何的数値シミュレーション手法による基本的検討結果に、更に合成音場を用いて聴感上の検討を加えるため行うが、可聴化の際には幾何的手法では予測できない音場の諸特性を受聴者に正確に提示するため、精度の良い音場の予測計算が必要になる。そのため、

現在、波面積分法¹⁾と呼称する波動性を考慮した数値シミュレーションを用いて、両耳におけるインパルス応答を算出し、OSS²⁾を用いて計算結果に基づく音場を受聴者に提示している。波面積分法によれば、音場合成に必要な全時間インパルス応答計算に要する時間はアルゴリズムの工夫により軽減されているが、なお音響設計支援システムの演算系の中で大きな割合を占めており、演算時間短縮が望まれた。

従来より、音場合成に必要な全時間のインパルス応答算出に要する時間の短縮のため、数値シミュレーションにより、拡散状態に到達したと見られる時刻までの初期反射音を計算し、それに別途算出した残響音を付加する手法が多く用いられている。しかし、初期反射音の性状を考慮せず、残響音の減衰のみを与えることが多く、初期反射音と付加する残響音の整合性に問題を残すなど、残響音付加手法に関する検討は十分ではない。

また、全時間インパルス応答について初期反射音と残響音とに分けて論じられる事が多いが、インパルス応答の時間構造に着目すれば、主に幾何的経路により説明される初期反射音の時間構造が、時間経過に伴い次第に複雑となり残響音を形成する、と言う連続した反射音時間構造の変化と見る事ができる。初期反射音から連続する反射音時間構造を残響音領域において考慮できれば、残響音付加の

* 大林組技術研究所 工修
** 日本大学理工学部 教授・工博
*** 大成建設(元日本大学大学院) 工修

Obayashi Corporation Technical Research Institute, M. Eng.
Prof., College of Science and Technology Nihon Univ., Dr. Eng.
Taisei Corporation, M. Eng.

際の整合性が確保しやすいと考えられる。

初期反射音と残響音との整合性の確保について、高宮らは幾何的予測手法による反射音の時間間隔がカオスであると仮定し、初期反射音における時間間隔のリターンマップから残響音を作成する手法を示している³⁾。また、西らは、音線追跡法による受音点における反射音の分析結果から、残響音領域における反射音時間構造をモデル化し、全時間の計算結果がよく近似できる事を示し、さらに残響時間周波数特性の予測精度が残響付加の際に重要であることを示唆している⁴⁾。

以上の研究からも、残響音付加の際には、反射音時間構造および周波数特性の予測精度が重要であると考えられるが、多大な計算時間をかけて直接予測するのは、实际的でない。数値シミュレーションからの音場合成のためには、原音場との聴感上の差異が生じないような、反射音時間構造等の近似による高速な残響音付加手法の開発が要求される。

本論文は、音響設計支援システム演算系の中で、大きな時間的割合を占める全時間インパルス応答算出の計算時間短縮を目的に、残響音領域の反射音時間構造および周波数特性を考慮し、OSS等のトランスオーラル系を用いた音場合成に適用するための残響音付加手法を提案している。さらに、ダミーヘッドによる実測のインパルス応答の初期反射音に、本手法を用いて残響音を付加した音場と、実測のインパルス応答による音場を用いた一対比較聴感実験結果から、本手法の有効性について示している。

2. 実測による反射音時間構造

実測のインパルス応答測定から、直接、反射音時間構造について検討を加えるのは困難であると考えられる。そこで、実音場の残響音領域における反射音時間構造の把握、それに基づく予測手法の検討のために、正四面体頂点法⁵⁾を用い、実測のインパルス応答から反射音を表すパルス列として離散化（サンプリング周波数:48KHz、データ数:65536個）し、以降の検討を行うことにした。なお、インパルス応答からパルス列として離散化した反射音強度の時間変化を、本稿ではエネルギーパルス応答と呼ぶ。

正四面体頂点法は、正四面体の各頂点位置に設置された4個のマイクロフォンにより測定された各インパルス応答に音源出力によるデコンボリューションの操作を加え、時間分解能を向上させた後、各頂点間に生じるパルスの時間差等から空間の方向情報を解析しようとする手法である。得られた空間情報から短時間指向拡散度の時間変化を残響音領域特定のための手掛かりとしているが、反射音時間構造の検討においては空間情報は用いず、全方向からのエネルギーパルス応答のみを用いている。

シューボックス型ホール(2000席、 $V=20500\text{m}^3$) 1階中央付近(図1)における実測からのエネルギーパルス応答を図2の上側に示す。また、エネルギーパルス応答のある時刻 t に位置する反射音から次の反射音が現れるまでの時間を、時刻 t の反射音に対する反射音時間間隔として、全反射音に対して算出した。その時間変化をエネルギーパルス応答と合わせて図2の下側に示す。なお、反射音時間間隔は当ホールにおいて正四面体頂点法による短時間指向拡散度の時間変化から、ほぼ拡散状態に移行したみなされる直接音到達後180msec.以降⁶⁾について示している。正四面体頂点法による短時間指向拡散

図1 正四面体頂点法による測定位置

図2 実測からのエネルギーパルス応答および反射音時間間隔

図3 反射音時間間隔による度数分布

度は、初期の0付近から時間経過と共に上昇し、ある時刻以降（当ホールでは180msec.）は、1.0に近づいた値で安定する⁶⁾。その段階において室内音場は、ほぼ拡散状態に移行したと見なした。

図2を見ると、反射音時間間隔は不規則に変動しているが、時間経過に伴う一定の変化は確認されない。次に、残響音領域における反射音時間構造の傾向を見るため、反射音時間間隔による反射音数の度数分布を求めたところ、図3に示す指数分布が得られた。

この残響音領域全体の反射音時間間隔の度数分布と、ある時間幅を持って切り出した反射音時間間隔による度数分布が、切り出した時刻によらず同様の傾向を示すのであれば、ある特定時刻の、ある時間幅内の反射音時間間隔の度数分布から残響音全体の反射音時間構造の傾向を捉えることができることになる。

また、反射音時間間隔に時間経過による一定の変化が見られないことから、残響音領域全体の反射音構造の傾向を捉えるために必要な最小時間幅が得られる可能性が示唆され、残響音領域における最小時間幅内の反射音から残響音全体の反射音時間構造の傾向を捉え、これに基づき残響音全体の反射音時間構造を作成する残響音作成方法が可能になるものと考えられる。

そこで、残響音領域全体の反射音時間構造の傾向を示すことができる最小時間幅が得られるかについて検討を行った。ここでは、反射音時間構造に限らず、残響音全体の特性が、最小時間幅を持って切り出した反射音群に関しても共通すると考え、両耳におけるコヒーレンス関数を用い、残響音全体の傾向を示すことのできる時間幅を検討の手掛かりとした。なお、検討には同じシューボックス型ホールの1階中央付近におけるダミーヘッド(高研製)による実測のインパルス応答を用いた。

当ホールにおいて、拡散状態に移行したとみなした直接音から

180msec.以降全体、および180msec.以降50msec.幅、25msec.幅、12.5msec.幅と切り出す時間幅を次第に狭めていった場合の両耳間のコヒーレンス関数を図4に示す。これを見ると、残響音領域全体のコヒーレンス関数は、100Hz付近で最も高く、高周波数域に向かって急激に低下し、500Hz付近からは0.1前後と大きな変動はない。これを、残響音を切り出す時間幅を次第に狭めていった場合のコヒーレンス関数と比較して見ると、切り出す時間幅が短くなるに従い、主に500Hzより高い周波数においてコヒーレント度が上昇している。低周波数域から急激にコヒーレント度が低下し、500Hz付近より高い周波数では変化が小さい、と言う残響音全体のコヒーレンス関数の傾向が見て取れるのは50msec.幅までである。

以上のコヒーレンス関数による検討結果から、残響音全体の傾向を示す反射音群を切り出すための最小時間幅を50msec.と仮定し、この時間幅が反射音時間構造に関して適用できるかを検討した。

図2に示したエネルギーパルス応答を用い、直接音から180msec.以降の反射音を50msec.ごとに切り出し、反射音時間間隔の度数分布を求めた。図5に切り出した各時間帯ごとの反射音時間間隔による度数分布の例を、その指数回帰曲線と合わせて示す。

これを見ると、50msec.ごとの反射音時間間隔の度数分布は時間経過によらず残響音全体と同様に指数分布を示している。また、残響音全体および各時間帯の指数回帰曲線を重ねると、図6に示すようにほぼ一致する。

また、室形状が異なる際にも、残響音全体の傾向を捉えるための最小時間幅を50msec.とできるかを見るために、ワインヤード型ホール(2100席、 $V=21000\text{m}^3$)中央付近における正四面体頂点法によるエネルギーパルス応答を用いて検討した。図7にエネルギーパルス応答および残響音領域における反射音時間間隔を、図8に残響音全体による反射音時間間隔の度数分布および50msec.幅ごとの反射音時間間隔の度数分布による回帰曲線を重ねて示す。これらを見ると、ワインヤード型ホールにおいても、反射音時間間隔による度数分布は指数分布を示しており、また50msec.ごとの反射音時間間隔による度数分布は、シューボックス型ホールと同様に残響音全体によるものと、ほぼ一致している。

以上の2つの大規模コンサートホールの検討結果から、残響音全体の反射音時間構造の傾向は、50msec.幅程度のある時間幅における反射音時間間隔の度数分布によって捉えられることが示唆される。

図7 ワインヤード型ホールのエネルギーパルス応答および反射音時間間隔

図4 切り出す時間幅による両耳間のコヒーレンス関数の変化

図5 各時間帯における反射音時間間隔の度数分布

図6 50msec.ごとの指数回帰曲線の比較

図8 ワインヤード型ホールの残響音全体の反射音時間間隔の度数分布および50msec.ごとの指数回帰曲線の比較

3. 残響音領域における反射音時間構造を考慮した残響音付加手法

3.1 反射音時間構造の作成

残響音領域において50msec. 幅程度で切り出した反射音の反射音時間間隔の度数分布から、残響音全体の反射音時間構造の傾向を示す反射音構造を作成できる可能性が示された。ここでは、数値シミュレーションによる初期反射音への残響音付加が目的であるから、計算時間短縮の点から、切り出す時間帯は、拡散状態に移行したと見なされる直後であることが望ましい。なお、数値シミュレーション結果から、どのように拡散状態に移行したとする時刻を決定するかは今後の重要な検討課題である。

図1に示したシューボックス型ホールにおいて、短時間指向拡散度の時間変化が1.0に近づいて安定し、ほぼ拡散状態に移行したと見なした時刻(180msec.)から50msec. 間の反射音時間間隔による度数分布の指数回帰曲線より、それ以降の反射音時間構造を作成する手法を検討した。用いた指数回帰曲線を図9に示す。

この指数回帰曲線に従う反射音時間構造を作成するため、指数回帰曲線の時間間隔軸(横軸)と正規化した反射音数軸(縦軸)および指数回帰曲線に囲まれた面積(図9の網掛け部)を反射音の出現確率と捉え、反射音時間間隔および反射音数を、それぞれ乱数によって独立に決定し、両者によって示される座標が反射音の出現確率を示す範囲内に存在した場合、座標に対応する反射音時間間隔に基づき反射音位置を逐次時系列上に示していく。なお、乱数は正規化し、各軸の最大・最小内での値を決定する。

この方法では、反射音の作成に結びつかない多数の試行が繰り返されるが、コンピュータ上での処理に適しているため、3秒程度の反射音位置を決定するのに必要な計算時間は1分以下である。また、本アルゴリズムによれば、反射音時間構造作成の基となる度数分布は、検討に用いた指数分布である必要はなく、数式化されたものであればどのような曲線でも適用可能である。

図10に、得られた反射音位置および反射音時間間隔を、実測と同じ表示により示す。また図11には、得られた反射音時間間隔の度数分布と、作成に用いた指数回帰曲線、および50msec. ごとの反射音時間間隔による度数分布を示す。これらを見ると、作成した反射音時間構造は、実測と良い対応を示しており、拡散状態に到達した時刻から50msec. までの反射音を用いて、実測の残響音と同様の傾向を示す反射音時間構造が近似的に作成できるものと考えられる。

3.2 OSSを用いた音場合成のための頭部伝達関数の考慮

OSS等のトランスオーラル系の再生方式に適用するため、前項の方法により作成した反射音時間構造に基づき、頭部伝達関数を考慮して両耳への信号を作成した。

残響音領域において反射音の到来方向に大きな偏りは生じないと仮定して、前項の方法によって求められた各反射音ごとの反射音の到来方向を、逐次乱数によって決定し、入射方向に対応する頭部伝達関数データベースから参照される両耳における応答を、時系列上に重ね合わせていった。

現在保有する頭部伝達関数は、図12に示すように、仰角-30度から60度までを水平角、仰角とも5度おきに、また仰角60度から90度までを10度おきに分割し、ダミーヘッド(高研製)を用

図9 指数回帰曲線に従う反射音作成方法

図10 作成した反射音および反射音時間間隔

図11 作成した反射音時間構造の時間間隔による度数分布

図12 頭部伝達関数測定時の立体角の分割の様子

図13 反射音到来方向の決定

いて、無響室において測定したものであり、測定に用いたスピーカ等の特性は、逆フィルタによって取り除き、データベースを作成した。

各反射音の到来方向は、図13に示すように、水平角(θ)および仰角(ϕ)を用い、それぞれ乱数により独立に順次決定した。その際、水平より下方の反射音は周囲の椅子により遮られ反射音として考慮しにくいものとして、反射音の到来方向は上半球からのみとした。決定された反射音の到来方向に最も近い頭部伝達関数をデータベース内より検索し、左右一対のインパルス応答を、作成した反射音位置に従い両耳への反射音として時系列上に順次重ね合わせていった。

3.3 残響音周波数特性の簡易的予測

数値シミュレーションにより初期反射音の周波数特性が予測されれば、初期反射音との整合性を確保するため、付加する残響音においても周波数特性の時間変化を考慮する必要がある。残響音周波数特性の時間変化を詳細に予測しようとすると反射音時間構造と同様に多大の計算時間が必要になり、残響音付加による計算時間短縮が図れなくなる。そこで、残響音領域における拡散音場を仮定し、空気吸収および壁面の吸音による周波数特性の時間変化を簡易的に予測した。

単一周波数における空気吸収の影響は、ISO/DIS 9613/1に示される減衰率 m 、伝搬距離 x より、1式で表される。また、単一周波数における壁面の吸音の影響は、反射回数 n および平均吸音率による2式を用いた。

$$I = I_0 e^{-mx} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$I = I_0 (1 - \bar{\alpha})^n \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $n = \text{int}(x/d)$ 、 d : 平均自由路

また、時間による周波数特性の変化を考慮するため、50msec.ごとに、空気吸収および壁面の吸音それぞれによる各周波数ごとのエネルギーを算出し、これに基づき4096タップ（サンプリング周波数：48KHz）の直線位相フィルタを作成して、前項までの方法により作成した左右一対の信号に順次畳み込んだ。この時、時間経過に伴い吸音等による減衰が生じるが、簡易的に50msec.ごとに周波数特性を与えているため、その減衰の様子は階段状であり、残響音としての滑らかな減衰が得られない。そこで、残響時間に従う減衰を周波数特性の操作の後に一括して与えることとし、50msec.ごとに周波数特性を畳み込んだ後の実効値が、分割した各時間帯ではほぼ等しくなるように振幅を操作し、全体としてはほぼ定常的な左右一対の信号を得た。なお、吸音率データは、1/oct.ごとのデータをスプライン補完した。

得られた定常的な左右一対の信号は空気吸収と壁面の吸音による周波数特性の変化が考慮されていることになる。そこでこの一対の信号に残響時間による指数減衰を与えた上で、初期反射音に付加する。その際、初期反射音との波形の不連続によるクリック等の異音の発生を防ぐため、図14に示すように、12.5msec.幅のコサインカーブにより初期反射音部を滑らかに収束させ、また残響音部に同様にコサインカーブによる立ち上がり部を設けている。さらに、重ね合わせる12.5msec.幅での実効値が残響音を重ね合わせる前と変化しない様に、残響音全体の振幅を操作した。

4. 残響音付加手法に関する比較聴感実験

提案した反射音時間構造を考慮した残響音付加手法の有効性の検討のため、ダミーヘッドを用いて測定した両耳でのインパルス応答の初期反射音に、提案した手法により作成した残響音を付加し、実測による音場との差異について比較聴感実験をおこなった。実験はこれまで検討に用いてきたシューボックス型ホールの7点(図15)を対象とし、図2に示した正四面体頂点法による測定結果による反射音時間構造を用いて残響音を作成した。また、比較のため、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮しない信号として両耳におけるコヒーレント度を操作したホワイトノイズ⁷⁾、反射音の到来方向による頭部伝達関数は考慮するが反射音構造を考慮せず20 μ sec.ご

図14 残響音接続方法

表1 比較音場の種類

A: 実測音場
B: 実測の初期反射音(～180msec.) + ホワイトノイズによる残響音
C: 実測の初期反射音(～180msec.) + 頭部伝達関数のみ考慮した残響音
D: 実測の初期反射音(～180msec.) + 反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した残響音

表2 評価項目

どちらの音場が
1. 音色の連続性が得られているか
2. 自然な減衰が得られているか

表3 5段階の評定尺度

明らかに 先の音場	どちらかと いうと 先の音場	同じ	どちらかと いうと 後の音場	明らかに 後の音場
--------------	----------------------	----	----------------------	--------------

図15 測定点位置

との等間隔に反射音を時系列上に並べた信号を用い、それぞれ周波数特性時間変化を考慮した残響音を作成した。なお、これらの残響音成分は実測による初期反射音に接続するため、測定に用いた12面体スピーカ特性を別途畳み込んだ。比較聴感実験に用いた4音場を表1に示す。

各音場の物理的特性を比較して、測定点R3における直接音から600msec.位置での周波数特性を図16に、残響音全体でのコヒーレント度を図17に示す。図16を見ると、簡易的予測による残響音

の周波数特性は、いずれも実測とよい対応を示しているが、頭部伝達関数を考慮した場合、わずかではあるが5KHz付近のレベルがホワイトノイズに比べて高く、より実測に近い特性となっている。また、図17のコヒーレンス関数を見ると、反射音構造を考慮した残響音が最も実測に近い特性を示している。

残響音に関する比較聴感実験を行う際に、継続する楽音を用いると、継続部の印象が強くなり、付加した残響音の種類による違いが聴き分けにくくなる恐れがある。そこで、音源には無響室のオーケストラ曲(オペラ「ルスランとリエドミラ」序曲冒頭0.2秒)による短音を用い、音源を実測および残響音を付加したインパルス応答に畳み込んだ後、イヤースピーカ⁸⁾を用いたOSSにより、無響室において再生した。実験は一对比較法により、4音場を2秒の間隔において対とした12対を作成し、回答の信頼性をチェックするための同一音場同士の4対を加えた合計16対について、表2の評価項目について、表3の5段階のカテゴリによって評価させた。回答時間となる対と対の間隔は7秒である。聴取レベルは約65dB(A)、被験者は成人男女17名とした。なお、イヤースピーカによる音場合成の際に、パターン化した正面頭部伝達関数補正データを用い正面方向の定位改善⁹⁾を図った。実験を通して、同一音場対に対して「明らかに先・後」と一度でも評価した2名の回答を除き、15名の回答結果についてシェッフェの一对比較法¹⁰⁾を用いて分析し

図16 実験に用いた4音場の残響音領域における周波数特性比較

図17 実験に用いた4音場の残響音領域におけるコヒーレント度比較

た。得られた各受音点における4音場に対する心理尺度構成値を図18に示す。

図18の全体的な傾向を見ると、実測音場Aが聴感上最も自然な音場として評価されているが、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した音場Dは、実測音場Aと同程度の評価が得られている。頭部伝達関数のみを考慮した音場Cは、周波数特性等は反射音時間構造を考慮した音場Dと同様であったが、実測音場Aとは聴感上有意な差が生じており、反射音時間構造が聴感に与える影響が大きいことが示されている。

今回の検討では、正四面体頂点法によるR2付近の測定データからの反射音構造を作成し全受音点に適用させたが、R7を除く、いずれの受音点においても音場Dは良好な評価が得られており、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した残響音付加手法の有効性が示されたと考えられる。

R7は他の受音点と異なり、音場Aと音場Dに聴感上有意な差が

図18 4音場に対する心理尺度構成値の対応

生じている。この受音点 R 7 は側壁やバルコニ等により、反射音の偏りが生じやすい位置にあり、反射音の到来方向を受聴者を中心とした上半球の範囲内で均一になるようにしたことが、音場 D の評価を下げる原因となったと考えられる。また、音源が見下げる位置にある 3 F 中央付近の R 4 においても、R 7 と同様に反射音の到来方向を均一に設定した影響が見られる。

なお R 6 は測定時に S/N 比を確保しにくい位置にあり、実測のインパルス応答の残響後部にノイズが含まれていたため、実測音場 A に比して、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した残響音を付加した音場 D の方が、より自然な音場として評価されている。ホワイトノイズから作成した残響音を付加した音場 B と実測音場 A の聴感上の差が小さくなったのも、実測に含まれていたノイズの影響と考えられる。

以上の比較聴感実験の結果、反射音構造を考慮した残響音付加手法の有効性を確認することができた。今後、反射音の偏りが生じる受音点に対しては、反射音の入射方向の偏りを含めて、検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

OSS 等のトランスオーラル系による数値シミュレーションからの音場合成に必要な全時間インパルス応答の計算時間短縮のため、初期反射音と残響音の整合性を確保する反射音時間構造および頭部伝達関数等を考慮した残響音付加手法を提案し、比較聴感実験を通して手法の有効性を示した。今後、残響音領域における反射音到来方向の偏りの問題、残響音を付加する時刻の設定についてさらに検討していきたい。

謝辞

OSS 導入にあたって、ご指導を受けた東京電機大学名誉教授 三浦種敏先生、東京電機大学教授 浜田晴夫先生に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坪井、渡辺、平野：波動性を考慮した室内音場シミュレーションシステム日本建築学会技術報告集、第 2 号、p. 121-126、1996 年 3 月
- 2) 浜田晴夫：基準的収音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成日本音響学会誌 vol. 39, p. 337-348 (1983)
- 3) 高宮嗣昌、岸永伸二、川上福司：カオスを仮定した拡散過程の乱数シミュレーション 日本音響学会講演論文集、p831-832、平成 8 年 3 月
- 4) 西 隆司、北村浩一、福西 達：後部残響音付加に関する一検討 日本音響学会講演論文集、p843-844、平成 9 年 3 月
- 5) 関口克明、木村翔、羽入敏樹、松本英一郎：4 チャンネルマイクロフォンシステムを用いた正四面体頂点法による室内音場の解析 日本建築学会計画系論文集、No414, p. 1-11 (1990)
- 6) 羽入敏樹、木村翔、橋本修、坂本吉宏：音場の過渡応答に着目した拡散性の検討 日本建築学会計画系論文集、No. 471, p. 11-18 (1995)
- 7) 渡辺充敏、木村翔、山口順、平野滋：残響音付加手法の違いによる実測音場との聴感上の差異の検討、日本建築学会講演梗概集、p. 213-214 (1996)
- 8) 吉田実、下平美奈子、三浦種敏、浜田晴夫：イヤースピーカを用いた新しい OSS 再生方式 AES 東京コンベンション '91 予講集、p. 138-141 (1991)
- 9) 山口順、木村翔、渡辺充敏、平野滋：頭部近傍に設置したスピーカによる音場再生手法の検討、日本建築学会講演梗概集、p. 211-212 (1996)
- 10) 芳賀敏郎、橋本茂司：実験データの解析 (1) 日科技連

(1997 年 4 月 10 日原稿受理、1997 年 8 月 20 日採用決定)