室内音場の受音点に到来する個々の反射音の特性抽出手法の開発

DEVELOPMENT OF METHOD FOR DETECTION OF CHARACTERISTIC OF RESPECTIVE SOUND WAVE ARRIVED AT RECEIVING POINT IN A ROOM SOUND FIELD

羽入 敏樹*, 木村 翔**, 関口 克明***

Toshiki HANYU, Sho KIMURA and Katsuaki SEKIGUCHI

This paper describes the development of a method for detecting individual characteristics of reflected sounds arriving at a sound receiving point in a sound field in a room. The development is based on the regular tetrahedron peak point method, which we developed, for computing virtual sound sources, in combination with the spherical array microphone system, a method for measuring impulse responses by directions.

In this method, we compute the arriving time and direction of each reflected sound by the regular tetrahedron peak point method in order to grasp the individual characteristics of each reflected sound arriving at a sound receiving point, then measure the directional response through spherical array microphone system in the direction of each reflected sound, separating the reflected sound of the extracted object from those of others, and finally separating it by a suitable length of time window from the arrival time of each reflected sound, thus extracting the time series characteristics of each individual reflected sound.

Further, we give some single plate reflection experiments, verification experiments of extraction accuracy at an actual sound field, and analyses of virtual sound source distribution by frequencies in an actual sound field, thus showing a possibility in which physical characteristics of a sound field can be observed in detail including directional information at the initial response.

Keywords : *virtual sound source, regular tetrahedron peak point method, spherical array microphone system, reflective sound, impulse response, spatial information*

仮想音源, 正四面体頂点法, 球面上配置マイクロホンシステム, 反射音, インパルス応答, 空間情報

1. はじめに

近年, デジタル信号処理技術の進歩により, 音源と受音点間のインパルス応答をデジタル信号として精度良く測定できるようになり, 時間, エネルギー, 周波数に関する種々の音響物理指標が算出可能となっている。

この単一のインパルス応答は, 音場空間の様々な方向から時々刻々受音点に到来する多数の反射音による振幅変化を, ある時間刻みで記録した反射音群の総合的な情報である。そのため, ある時刻の振幅が単一の反射音によるものか, 複数の反射音の干渉によるものかはわからない。さらに, その振幅がどの方向から到来した反射音のものかもわからず, 聴感上重要とされている音場の方向情報を得ることはできない。したがって, 音場の物

理的特性をより詳細に把握するためには, 反射音がインパルス応答として単一時系列に合成される前の, 受音点に到来する個々の反射音の到来方向とそのレベル, 特性を知る必要がある。

筆者らは, これまで, 個々の反射音の到来方向とそのレベルを算出する実用的な解析手法として, 山崎らの近接4点法¹⁾を発展させた正四面体頂点法²⁾を開発し, 音場のより詳細な把握を試みてきた。

近接4点法は, 4点でのインパルス応答の時間構造のわずかな違いから, 短時間相互相関の手法を用いて, 音波の抽出とその到来方向の算出を行うが, この手法では時間経過とともに複数の波形が重なった場合, 相関の値が下がって反射音の特定が難しくなり, 音波の抽出と音

* 日本大学大学院・松下通信工業・工修

** 日本大学理工学部 教授・工博

*** 日本大学理工学部 教授・工博

College of Science and Technology Nihon Univ., Matsushita Communication Industrial Co. Ltd, M. Eng.

Prof., College of Science and Technology Nihon Univ., Dr. Eng.

Prof., College of Science and Technology Nihon Univ., Dr. Eng.

波の到来方向の両方に関しての精度が低下する。

一方、正四面体頂点法は、複数の音波が重なった場合でも個々の音波の到来方向に関する精度の確保を重視し、反射音の特性の抽出は行わずに、音波の到達時間とレベルと4点の幾何学情報を用い、音波の到来方向とレベルのみを精度良く抽出する方法である。すなわち正四面体頂点法は、個々の音波の到来方向を精度良く算出するため、時間とレベルに着目しており、周波数情報は全く得られない。

そこで、正四面体頂点法の方向情報を補完するために、筆者らは周波数情報を含んだ方向別のインパルス応答を測定する手法として、球面上配置マイクロホンシステム³⁾を開発して実用化してきた。

この手法は、一度測定を行えば、3次元の全空間を対象とした任意方向のインパルス応答が何回でも算出可能で、3次元空間の全方向に対してほぼ同等の指向特性を実現でき、さらに指向性受音方向からの音波に対しては、何らその特性に影響を及ぼさずに收音することができる。これにより、時間経過による周波数特性の変化等を方向別に把握することができる。しかし、得られる方向別インパルス応答は、任意方向のエリアから到来する音波群の総合的な情報であり、個々の反射音の詳細な情報は得られない。

そこで筆者らは、実際に受音点に到来する個々の反射音の特性を把握するため、正四面体頂点法で反射音の到達時間と到来方向を算出した後、それらの方向に球面上配置マイクロホンによる指向性受音を行い、抽出対象の反射音とその他の反射音を空間的に分離し、さらに反射音の到達時間から適当な大きさの時間窓により時間的分離を行って、個々の反射音の時系列特性を抽出する手法を開発して、実音場でその有用性を確かめたので、その結果について報告する。

2. 個々の反射音特性の抽出手法

ホール等の実音場において、個々の反射音の特性を知るためには、受音点に到来する多数の反射音の中から一つ一つの反射音波形を分離抽出する必要がある。そのための手法として、相関手法による分離、指向性受音による空間的分離、時間的分離等の手法が考えられる。

相関手法による分離は、反射音が単独で存在する場合は、その反射音波形の継続時間を判定して、波形を切り取る時間窓を変化させながら抽出できるが、複数の反射音が干渉している波形から分離抽出するのは困難である。

指向性受音による空間的分離は、抽出したい反射音の到来方向以外からの反射音を分離できるが、そのためには、あらかじめ反射音の到来方向を知っておく必要がある。また、指向性受音だけでは方向別インパルス応答が

算出されるだけで、個々の反射音の特性とはいえない。

時間的に分離する方法は、あらかじめ反射音の到達時間がわかっており、かつ他の反射音がその時間に到来しない場合には有効である。しかし、ホール等の実音場においては、一般に同一時間に多数の反射音が到来していると考えられるので、時間的分離だけでは反射音の抽出は難しい。

以上のことから、これらの手法を個々に用いただけでは、精度良く反射音波形を抽出することは難しいことがわかる。しかし、これらの手法を組み合わせ、空間的分離を行った後に時間的分離を行い、さらに相関手法によって波形を切り出せば、より精度良く反射音を抽出することができると考えられる。

その前提として、反射音の到達時間と到来方向を精度良く測定する必要がある。筆者らが音場の方向情報の定量化の一環として用いている正四面体頂点法²⁾は、反射音の特性の抽出を行わずに、複数の反射音が重なって到来した場合でも、デコンボリューション手法と4点の受音点相互の幾何学情報から、個々の反射音の到達時間を精度良く検出することができる、到達時間と到来方向に関する精度をとくに重視した仮想音源の算出手法である。

したがって、正四面体頂点法で得られる反射音の到達時間と到来方向の情報をもとにして、空間的分離、時間的分離、相関手法による分離を組み合わせることで、個々の反射音特性の分離抽出ができると考えられる。

正四面体頂点法は、仮想音源を算出する際、図—1に図すように、レベルとして波形の振幅値を参照しており、周波数情報は得られていないので、この正四面体頂点法に周波数情報を付加するためには、個々の反射音の特性を考慮した波形としての抽出が必要である。

次に、空間的分離のためには指向性受音方法を確立することが必要であるが、そのための指向性受音方法が備えるべき必要条件を考えてみると、

(1) 測定現場で、正四面体頂点法で算出されたそれぞれの反射音に対して、繰り返し指向性受音を行うのは現

図—1 正四面体頂点法における仮想音源レベルの算出と反射音波形の抽出

図-2 本手法における測定方法の概念図

実的ではないので、一度の測定によって後処理で何回でも指向性受音波形が算出できること。

(2) 音場の全空間を等価な対象として正確に把握するために、3次元空間のあらゆる方向から到来する音波に対して、同様の指向特性で收音できること。

(3) できるだけ広い帯域にわたって同様の指向特性であること。

(4) 指向角についてある程度の制御ができること。

(5) 指向性收音することで反射音の特性が変化しないこと。

などがあげられる。

これらの条件を満たすために、我々は、球面上配置マイクロホンシステム³⁾を指向性收音手法として用いることにした。この手法は、複層球面上にランダムに設定した128点の各收音点で一度測定を行えば、3次元の全空間を対象とした任意方向のインパルス応答が何回でも算出可能で、3次元空間の全方向に対してほぼ同等の指向特性を実現でき、球の半径を変えることで指向角の制御が可能で、各周波数帯域ごとに同等の指向特性を実現できる。また、指向性收音に際しては、球面上の各收音点でのインパルス応答を、音波が通過する際の各收音点間の時間差を考慮して合成するという手法を用いているため、指向性收音方向からの音波に対しては何らその特性に影響を及ぼさずに收音することができる。

これらの点を踏まえ、正四面体頂点法と球面上配置マイクロホンシステムの特徴を活かし、両者を組み合わせることで、個々の反射音の特性を精度良く抽出できるものと考えられる。

測定は図-2に示すように、正四面体頂点法と球面上配置マイクロホンシステムによる收音を、解析の際に想定する座標軸が一致するように同一のポイントで、正四面体の重心と球の中心を一致させ、それぞれ別々に行う。

解析は図-3に示すように、正四面体頂点法で仮想音源位置を算出した後、算出された個々の仮想音源に向けて球面上配置マイクロホンの指向合成を行い、指向性受

図-3 反射音抽出手法の概念図

音による空間的分離を行う。さらに、仮想音源の時系列上の位置は正四面体頂点法で算出しているため、その時間から適当な大きさの時間窓 Δt により時系列上での分離を行って、反射音の時系列特性を抽出する。この時、波形の継続時間が未知の場合、相関手法により時間窓 Δt を決定することも考えられる。

このように、空間的分離と、時間的分離を組み合わせることで、抽出する対象となる仮想音源の存在するエリアを限定し、個々の反射音の特性の抽出が可能となる。さらに、音波の到来方向に向けてそれぞれ指向合成を行い、收音することになるので、抽出の対象になる仮想音源は、指向特性の影響を受けない。また、このように反射音の到来方向の算出と、その波形としての時系列特性の抽出を別過程としていることにより、反射

音の到来方向とその特性の両方を、より精度良く算出することができる。

3. 単板反射実験による検討

本手法の検討を行うために、壁からの反射音の影響を分離できる体育館のアリーナ中央付近において、図—4に示すように板の法線方向から15度、30度方向にあたる受音点で、単板（56 cm×200 cm）からの反射音を、正四面体頂点法と球面上配置マイクロホンシステムにより測定し、反射音特性の抽出を行った。

図—5に正四面体頂点法で解析した仮想音源を示す。これを見ると15度、30度方向ともに、直接音と床からの反射音（反射音①）、単板からの反射音（反射音②）、さらに単板と床に反射した音波（反射音③）による仮想音源が算出されており、音源、反射板、受音点が必ずしも幾何学的反射位置関係に無くとも、波面としての反射音が到来すれば、仮想音源が算出できることがわかる。

また、15度と30度方向の結果を比較すると、直接音と床からの反射音（反射音①）のレベルは15度と30度方向でほぼ同じレベルであるが、単板からの反射音（反射音②）と単板と床に反射した反射音（反射音③）のレ

図—4 単板反射実験の配置図

図—5 単板反射実験における各受音点で正四面体頂点法により算出された仮想音源

ベルは、幾何学反射位置にある30度方向に比べ、15度方向のレベルの方が小さい。これは、反射音が幾何学反射方向には大きなレベルで反射し、幾何学反射位置からずれるとレベルが小さくなることを示している。

次に、これらのそれぞれの仮想音源に向けて、球面上配置マイクロホンシステムを用いて指向性受音を行い、抽出した反射音波形と再合成波形を、無指向性の実測波形とともに図—6に示す。なお、反射音波形は直接音データと同じデータ数の512データ以内で収束しているため、512データの時間窓で切りとっている。これを見ると、反射音が波形として分離抽出されていることがわかる。また、それらを再合成した波形と、無指向性の実測波形もほぼよい対応を示している。

図—6 抽出した反射音波形と再合成波形

図—7 15度、30度方向における直接音と反射音②のパワースペクトルの比較

図-8 15度、30度方向の反射音②のパワースペクトルの比較

図-9 15度、30度方向の周波数別仮想音源分布

15度、30度方向の反射音②と直接音のパワースペクトルを比較したものをそれぞれ図-7、図-8に示す。図-7をみると、直接音に比較して、15度、30度方向ともに反射音②の低音域においてレベルが減衰している。これは、単板の幅56 cmに相当する波長を持つ音波の周波数が約600 Hzとなり、これより長い波長の音波は、この単板では有効に反射することができないことを示している。また、図-8では、幾何学反射位置にある30度に比較して、幾何学反射位置にない15度での反射音の方が、高音域においてレベルが小さくなっている。これは、一般に反射板に対する音波の反射指向特性は、高音域ほど幾何学反射方向にシャープな指向特性となることを裏付けている。

さらに、反射音のオクターブバンドレベルを仮想音源のレベルとし、500 Hzと2 kHzのオクターブ帯域の周波数別仮想音源を求めたものを図-9に示した。15度方向と30度方向を比較してみると、幾何学反射位置にある30度に比較して、幾何学反射位置にない15度での反射音の仮想音源レベルの方が小さくなっており、その傾向は500 Hz帯域より2 kHz帯域でより顕著である。

以上のことから、本手法により音波の単板に対する周波数ごとの、また角度ごとの反射特性の違いをとらえることができたと考えられる。

図-10 小ホールにおける実験配置図

図-11 検証実験における正四面体頂点法のブロックダイアグラム

4. 実音場での抽出精度に関する検討

本手法による実音場での反射音抽出精度を検証するため、比較的初期の段階から反射音密度が大きくなると予想される小ホールにおいて実験を行った。また、実音場では、音源より音が発せられてから、受信点に到来するまでの反射音の密度は、時間とともに変化しているものと考えられるので、そのそれぞれの反射音密度の中で、反射音特性の抽出精度の検証を行う必要がある。

そこで、図-10に示すようにステージ上に2つの音源S1、S2を設定し、S1を通常のインパルス応答を測定する際の音源、S2をS1から出た多数の反射音の中に埋もれている抽出対象の反射音音源と仮定し、ホールのほぼ中央点で本手法による測定を行った。

正四面体頂点法と球面上配置マイクロホンシステムの測定ブロックダイアグラムをそれぞれ図-11、図-12に示す。音源S2から出た音を、S1によるインパルス応答の中の任意の時間に到来した反射音と仮定するために、音源S1に対し任意のディレイを設定できるようにした。なお、今回はディレイを50 msec、100 msec、200 msec、500 msecの4パターンに設定し、それぞれのパ

図—12 検証実験における球面上配置マイクロホンシステムのブロックダイアグラム

図—13 抽出する 1 kHz トーンバースト波形とパワースペクトル

ターンについて測定を行った。

音源は、S1 については 80 μ sec 幅の三角波を用い、S2 については波形抽出精度を検証するために、あらかじめ抽出する反射音波形を知っておいて、それと比較する必要があることから、80 μ sec 幅の三角波に 1 kHz のオクターブバンドフィルタを通し、図—13 に示すような 1 kHz のトーンバースト波形を用いることにした。音源 S2 のレベルは、図—14 に示すように各ディレイ設定パターンごとに距離減衰等を考慮し、S1 によるインパルス応答の中に埋もれるように設定した。図中のトーンバーストが埋もれている時間範囲の拡大波形を見ても、S2 によるトーンバースト波形はその他の反射音と干渉していて、はっきりとは認められない。この波形の中から、本手法によって図—13 のトーンバースト波形の抽出を試みた。

S1 のみを音源としたときの正四面体頂点法による仮想音源分布を図—15 に示す。これを見ると、仮想音源が原点付近に集中して多く算出されているが、これは初期応答の段階から反射音が受音点に多数到来していることを表している。

次に、音源 S1 と各ディレイを設定した音源 S2 を同

図—14 各ディレイ設定パターンごとの無指向性インパルス応答とトーンバーストが埋もれている時間範囲の拡大波形

時に用いた場合の正四面体頂点法による仮想音源の中から、S2 方向の指向角 20 度の範囲に存在する仮想音源のみを表示したものを図—16 に示す。ここで、ディレイ設定 500 msec の仮想音源分布図だけは表示範囲の都合上縮尺が異なっている。また、図中には受音点と S2 を結んだ直線を破線で示し、S2 による仮想音源に矢印でマークしてある。さらに、S2 による仮想音源は、受音点からみて S2 方向の延長線上に各ディレイ設定に応じた距離だけ遠くに存在するはずであるので、その仮想音源座標 (X, Y, Z) の理論値を算出し、正四面体頂点法で算出された S2 の仮想音源座標 (X, Y, Z) と比較して付記した。

これを見ると、受音点と S2 を結んだほぼ直線上の各

図—15 S1のみを音源としたときの正四面体頂点法による仮想音源分布

図—16 各ディレイ設定パターンごとの仮想音源分布 ((S2方向に指向角 20 度の範囲) と S2 による仮想音源座標の理論値と測定値

図—17 今回用いた球面上配置マイクロホンシステムの指向特性

図—18 各ディレイ設定パターンごとの
(1) 空間的分離後の波形
(2) 空間+時間的分離による抽出波形
(3) 抽出波形のワースペクトル

ディレイ設定に応じた距離のところに仮想音源が算出されており、また、その座標も理論値と良い対応を示していることから、実音場において、ある程度反射音密度が大きい場合でも、正四面体頂点法により仮想音源が算出されていることがわかる。

次に、この算出された仮想音源に向けて球面上配置マイクロホンシステムで指向合成を行った。今回は図—17に示すような指向特性で約 350 Hz～5 600 Hz までの約 4 オクターブ帯域を対象に解析を行った。図—18には、各ディレイ設定パターンごとに、(1) 指向性受信により空間的分離を行った後の波形、(2) さらにその波形を正四面体頂点法で得られた S2 による仮想音源 (図—16) の時系列上の到達時間から、512 データ分の時間窓で切りとり、時間的分離を行った波形、(3) (2) で得られた空間的、時間的分離を行った後の波形のワースペクトルを示す。

この抽出された波形 (2) を図—13に示した無響室での抽出対象波形と比較して見ると、時系列後半に他の反射音によるものと思われるレベルの小さな差異が認められるものの、図—14に示した複数の音波が干渉している応答波形の中から、1 kHz トーンバースト波形が、どのディレイ設定においても精度良く抽出されていることがわかる。また、抽出波形のワースペクトルを図—13に示したトーンバースト波形のワースペクトルと

比較してみると、抽出した波形のパワースペクトルの低音域と高音域に、他の反射音もしくは暗騒音の影響と思われるエネルギーが混在しているが、各ディレイ設定とも、1 kHz オクターブ帯域のトーンバーストのスペクトルとして、20 dB 程度の S/N 比をもって抽出されている。

以上のように、比較的反射音密度の大きい小ホールで、反射音密度が変化するインパルス応答の各時間帯において、個々の反射音特性の抽出を試みた結果、本手法によって個々の反射音が比較的精度良く抽出できることが確認された。

5. 実音場における解析例

実音場への適用例として、サントリーホールにおいて図—19 に示すような音源、受音点位置で測定を行い、本手法により、683 msec までの解析を行った。

抽出した反射音の時系列特性の例を直接音波形とともに図—20 に示す。(1) は直接音波形であり、(2)～(4) は、正四面体頂点法で得られた反射音到来方向と到達時間から検討すると、それぞれ(2) ステージ後壁、(3) ステージ側壁、(4) 浮き雲反射板からの反射音波形であることがわかる。これらの反射音波形は、伝搬してきた壁面の伝達関数により、直接音波形に比して変化している。

図—19 サントリーホールにおける測定配置図

図—20 直接音波形と本手法により抽出された反射音波形の例

図—21 無指向性実測波形と抽出した反射音波形の再合成波形

このように、本手法では音場の初期応答において、正四面体頂点法により、音波の到来方向と到達時間から音波の伝搬してきた壁面を見だし、さらに球面上配置マイクロホンシステムによる計測と組み合わせることにより、その反射音波形を観察することが可能となる。また、そのフーリエ変換からパワースペクトルによる音場の解析が可能となる。

なお、今回は便宜上、直接音データの継続時間に相当するデータ数の 512 データの時間窓で切りとっている。初期反射音の例であるため、512 データ内ではほぼ収束しているが、多次回反射した反射音の波形の継続時間は一定ではないので、この点については今後の検討が必要である。

本手法の検証の一つとして、抽出した反射音波形を再合成し、無指向性の実測波形と比較して図—21 に示す。これを見ると、抽出の際に反射音のピーク値だけでなく波形として抽出しているために、683 msec までの解析では本手法による顕著なエネルギー欠損は生じておらず、良い対応を示している。

6. 周波数別仮想音源分布の算出

音場の方向情報として、仮想音源分布を周波数別に算出できれば、より詳細に音場を観察することができる。

仮想音源の周波数情報の算出に関しては、山崎らが近接 4 点法で得られたインパルス応答に約 10 msec の時間窓を順次設定し、短時間インテンシティの手法を用い、周波数別の仮想音源分布を算出して音場の可視化を行っている⁴⁾⁵⁾。これは、周波数別の方向情報を視覚的に把握できる有効な手法である。しかし、大きさを固定した時間窓を時間移動させ、その中の短時間インテンシティを計算する手法であるので、得られる仮想音源の数が、時間経過や音場の違いによらず一定になってしまう。また、図—22 に示すように、窓内に複数の波形が混在したり、窓の境界が波形を分断したりする場合、クロススペクトル法で算出される短時間インテンシティベクトルが周波数ごとに異なり、仮想音源位置が周波数ごとに大きく異なることが考えられる。

さらに、それらの仮想音源位置は、個々の音波の真の

窓内に複数の音波が
混在する場合

図—22 時間窓内に複数の反射音が混在する場合

図—23 サントリーホールでの本手法による周波数別仮想音源分布

到来方向ではなく、窓内の複数音波による合成ベクトル方向に算出される。したがって、短時間インテンシティにより得られる周波数別仮想音源分布は、受音点に到来する反射音個々の特性の把握とは意味が異なると考えられる。

筆者らの手法は、図—22のように複数の音波が同一窓内に混在する場合でも、分離検出が可能な正四面体頂点法により反射音の到来方向を算出した後、その個々の反射音波形の抽出を行い、抽出した個々の反射音波形のオクターブバンドレベルを求めて周波数別の仮想音源分布を算出する。したがって、受音点に到来する個々の反射音に仮想音源が対応しており、周波数ごとの仮想音源位置は変わらず、周波数ごとのレベルのみが異なり、近接4点法で算出される周波数別仮想音分布とは意味が異なる。

サントリーホールの受音点R1で本手法により抽出した個々の反射音波形をフーリエ変換してオクターブバ

ンドレベルを求め、図—23に示すような500 Hzと2 kHzの周波数別仮想音源分布を算出した。これを見ると、500 Hzに比較して2 kHzでは全体的に仮想音源のレベルが小さくなっているが、浮き雲反射板からの反射音のレベルは2 kHzの方が大きくなっている。また、指向特性を見ると、2 kHzにおいて浮き雲反射板からの反射音によって、上方向に強い指向性を示している。

このように、個々の反射音の到達時間、到来方向とその特性を波形として抽出しておけば、得たい情報によって、時間と周波数と空間を任意に選択しながら、たとえば任意方向の任意指向角で方向別インパルス応答を算出したり、周波数別仮想音源分布のような情報に加工して音場を観察することが可能となる。

7. まとめ

今回、正四面体頂点法で得られる反射音の到達時間と到来方向の情報をもとに、球面上配置マイクロホンシステムによる個々の反射音の空間的分離、さらに時間的分離による手法を組み合わせることで、多数の反射音が到来する室内音場における個々の反射音特性抽出手法を開発し、単板反射実験と実音場での検証実験、および実音場での周波数別仮想音源分布の解析例により、初期応答において音場の物理的な特徴をより詳細に観察できる可能性を示した。

このことから、本手法によって、正四面体頂点法で得られた音波の到達時間、到来方向、レベルといった方向情報に、周波数情報を付加して、補完することが可能になったといえる。

参考文献

- 1) Yamazaki, Y. & Ito, T.: Measurement of spatial information in sound field by closely located 4-point microphone method., J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10, 2 pp.101~110, 1989
- 2) 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ホ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報告集, 第414号, pp.1~11, 1990.8
- 3) 羽入敏樹, 木村 翔, 関口克明: 球面上配置マイクロホンシステムを用いた室内音場における任意方向インパルス応答測定手法の開発, 日本建築学会計画系論文報告集, 第445号, pp.9~17, 1993.3
- 4) 清水信正, 鈴木大介, 村田清孝, 伊勢史郎, 山崎芳男, 伊藤 毅: 近接4点法へのインテンシティの適用, 日本音響学会講演論文集, 1-8-10, 1987.10
- 5) 清水信正, 金 允起, 中村聡延, 山崎芳男, 伊藤 毅: 近接4点法を用いた短時間インテンシティによる音場の評価, 日本音響学会講演論文集, 1-7-2, 1988.3

(1993年3月10日原稿受理, 1993年7月20日採用決定)