

一般化調和解析を用いた近接4点法による音場分析*

大内康裕^{*1} 中沢 誠^{*1} 山崎芳男^{*1}

【要旨】 1976年に山崎らにより提案された近接4点法は短時間相互相関を用いて仮想音源分布の算出に用いられている。また、近年では、一般化調和解析を仮想音源分布の算出に取り入れ細かな周波数に対しての音源位置推定を行っている。しかし、周波数ごとに音源位置推定を行う場合、大きなエネルギーの周波数成分から抽出する一般化調和解析の処理ではエネルギーの小さな帯域に関しては処理が困難である。そこで、本研究では解析を帯域ごとに限定した一般化調和解析を用い、計算量を大幅に削減する手法を提案する。その結果、従来の解析周波数を限定しない手法に比べ約1/30程度に計算量の削減が確認できた。

キーワード 近接4点法, 一般化調和解析, 狭帯域, 解析の効率化

Closely located four-microphone method, Generalized harmonic analysis, Narrow band, Improving an efficiency of analysis

1. ま え が き

人間は二つの耳を巧みに使い音源の方向や位置を非常に正確に判断している。また、音源が移動している場合であっても移動する音源の様子を正確に捉えることが可能である。このような機能をマイクロホンと計算機を用いて実現しようとする場合、人間の耳のように受音点が二つならば、情報量が少なく音源の方向や位置を正確に把握することは困難である。一般に空間内の3点からの距離が決まれば空間内の2点が特定され、更にこの3点とは別の平面にある1点からの距離が決まれば空間の1点が特定できる。この理論に基づいた時間的・空間的情報の把握手法として山崎らは1976年に近接4点法を提案し様々な音場の空間情報の計測を行ってきた[1-4]。近接4点法マイクロホンは同一平面上にない近接する4点の無指向性マイクロホンを用い収録した信号の時間構造のわずかな違いに着目し短時間相関あるいはインテンシティなどの手法により音源の位置や大きさ等の空間情報を算出するものである。実用分野においてはインパルス応答を用いたホール等の仮想音源分布の状況を求め音場の特徴の測定手法・表現手法として用いている。全帯域のインパルス応答に対しては短時間相互相関関数を用いて時間的・空間的情報を把握し、帯域通過フィルタを用

いインテンシティを求めることにより更に周波数ごとの空間的把握が可能となる。

また、信号の正弦波表現手法の一つである一般化調和解析を用いることにより周波数ごとの振幅の時間変化に着目した音源位置の推定の試みが行われている[5]。一般化調和解析は信号から残差エネルギーを最小とする正弦波を逐次抽出する単純な処理であり解析区間長に関係なく高い周波数分解能を持つという特徴があるが単純な処理過程の繰り返しが膨大な計算量の要因となっている[6-9]。一般化調和解析は信号の全帯域を対象に処理が行われており、所望とする周波数成分を得るには解析に用いる周波数帯域を制限する必要がある。周波数別に近接4点法による音源分布を算出する場合、従来の一般化調和解析では非常に効率の悪い処理となる。

本報告では近接4点法マイクロホンにより収録された信号から一般化調和解析を用いて周波数ごとの音源分布を効率よく算出することを目的としている。具体的には一般化調和解析に用いる解析周波数がある範囲に限定することによって計算量の削減を実現している。

2. 一般化調和解析の近接4点法への導入

2.1 近接4点法

近接4点法とは同一平面上にない近接する4点の全指向性マイクロホンによりインパルス応答を測定し短時間相関やインテンシティなどの方法により仮想音源の位置や大きさ等の空間情報を得ようという測定手法である。4点のマイクロホンは計算の便宜上Fig. 1のように直交軸上の原点及び原点より等距離の3点に配置する。一般に同一平面上にない4点からの距離が決まれば空間の1点が特定できる。Fig. 2, Fig. 3に近

* Analyzing sound field using the closely located four-microphone method with generalized harmonic analysis, by Yasuhiro Ouchi, Makoto Nakazawa and Yoshio Yamasaki.

^{*1} 早稲田大学

(問合せ: 大内康裕 e-mail: ouchi@waseda.jp)

(2005年9月16日受付, 2006年3月20日採録決定)

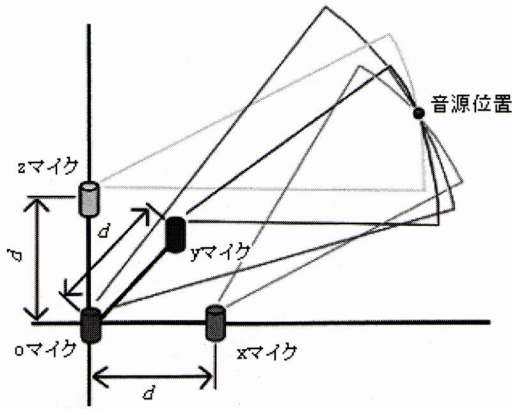


Fig. 1 近接4点法マイクロホンの構成図

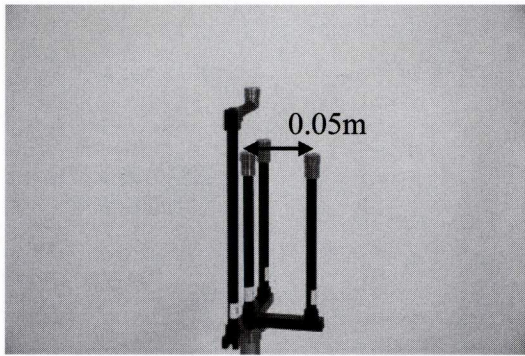


Fig. 2 近接4点法マイクロホン (エレクトレット)

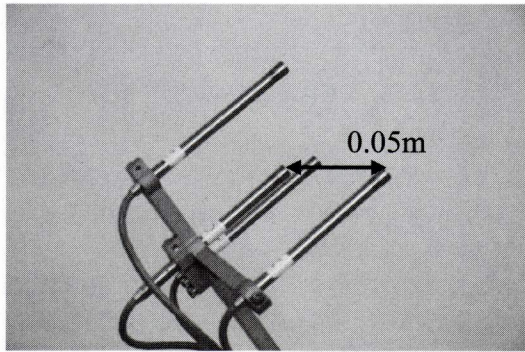


Fig. 3 近接4点法マイクロホン (B&K Type 4135)

接4点法マイクロホンの写真を示す。近接4点法マイクロホンにより収録された信号から音源の分布を求める手法として以下の手法が用いられている。それぞれのマイクロホンまでの音波の到達時間を t_o, t_x, t_y, t_z とすると、音源からそれぞれのマイクロホンまでの距離 r_o, r_x, r_y, r_z は、音速を c とすると

$$r_o = ct_o, r_x = ct_x, r_y = ct_y, r_z = ct_z \quad (1)$$

である。音源の座標を (x, y, z) , o マイクロホンと他

の三つのマイクロホンとの間隔を d とすると、各マイクロホンを中心とする半径が r_o, r_x, r_y, r_z である四つの球の方程式は、(2) 式となる。

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 &= r_o^2 \\ (x-d)^2 + y^2 + z^2 &= r_x^2 \\ x^2 + (y-d)^2 + z^2 &= r_y^2 \\ x^2 + y^2 + (z-d)^2 &= r_z^2 \end{aligned} \quad (2)$$

これを解いて音源の座標を求めると (3) 式となる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{d^2 + r_o^2 - r_x^2}{2d} \\ y &= \frac{d^2 + r_o^2 - r_y^2}{2d} \\ z &= \frac{d^2 + r_o^2 - r_z^2}{2d} \end{aligned} \quad (3)$$

この手法では信号の絶対時間すなわち信号の発生する時間が既知である信号によって室空間の時間的、空間的情報を導き出すことが可能である。

また、インテンシティ法を用いた周波数ごとに室内空間の時間的・空間的情報について把握する手法に関して研究が行われている。インテンシティ法は、音圧だけでなく粒子速度にも着目した手法である。あらかじめ帯域分割を行い解析することによって音源の到来方向の周波数解析が可能となる。二つのマイクロホンのインパルス応答を約 10 ms の窓で FFT レクロススペクトルの虚数部を用い各軸方向の短時間インテンシティベクトル成分を求める。時間軸上で観測区間を移動することによって時間経過に伴う音の到来方向と強さの変化を知ることが可能である。

2.2 一般化調和解析

一般化調和解析は、一般に調和的な有限個の周期関数の和で表すことのできる概周期関数のスペクトルについて“Generalized Harmonic Analysis”として1933年 N. Wiener が論じた解析法である [6]。この理論をもとに、観測区間内において原波形から残差が最小となる正弦波を逐次減算処理するアルゴリズムが考案され、東山、平田らによってピアノの音や人の歌声など、非定常信号の解析に導入された [7]。また、筆者らは雑音と信号の分離に導入し、解析手法の有用性を示し [8]、信号の特徴を利用し効率のよい解析手法を提案してきた [9]。

一般化調和解析は次に示す過程によって信号を逐次分析する。信号 $x_o(t)$ から (4) 式に示す周波数 f [Hz] の正弦波 $W(t, f)$ を減算したときのエネルギー減少量 e は (5) 式によって表される。このとき L は観測区間長とする。

$$w(t, f) = S_f \sin 2\pi ft + C_f \cos 2\pi ft \quad (4)$$

$$e = \frac{2z}{L\{z^2 - 2(1 - \cos z)\}} \{(z + \sin z)s^2 - 2(1 - \cos z)cs + (z - \sin z)c^2\} \quad (5)$$

ただし, z, s, c は (6) 式で示される。

$$\begin{cases} z = 4\pi ft \\ s = \int_0^L x_0(t) \sin 2\pi ftdt \\ c = \int_0^L x_0(t) \cos 2\pi ftdt \end{cases} \quad (6)$$

(5) 式の e を最大とする周波数 f [Hz] を求め (7) 式により \sin 振幅値 S_f , \cos 振幅値 C_f を得ることができる。

$$\begin{aligned} S_f &= \frac{2z}{L} \cdot \frac{s(z + \sin z) - c(1 - \cos z)}{z^2 - 2(1 - \cos z)} \\ C_f &= \frac{2z}{L} \cdot \frac{s(z - \sin z) - c(1 - \cos z)}{z^2 - 2(1 - \cos z)} \end{aligned} \quad (7)$$

得られた \sin 振幅値 S_f , \cos 振幅値 C_f より導出した正弦波 $W(t, f)$ を $x_0(t)$ から減算することで (8) 式により残差信号を得る。

$$x_1(t) = x_0(t) - W(t, f) \quad (8)$$

以上の処理の繰り返しによって解析を行う一般化調和解析は, 周波数分解能の自由度が高い一方で解析周波数分解能によっては膨大な演算が必要となる。

2.3 室内音場解析への一般化調和解析の導入

細かな周波数に対する仮想音源分布の算出法として一般化調和解析を用いた分析の導入が行われている [5]。一般化調和解析は解析区間に依存せず高い周波数分解能を持つ。この特徴を生かし近接 4 点法により収録された信号に対して周波数解析を行い, 周波数ごとの音源分布を算出することができる。しかしながら, 信号から残差エネルギーを最小とする正弦波を抽出する過程を経るので解析に膨大な時間を要する。近接 4 点法における仮想音源分布算出に一般化調和解析を用いるには次の (1)~(4) の流れによって処理を行う。また, Fig. 4 に (1)~(4) に相当する流れ図を示す。

- (1) \circ マイクロホンで収録した信号に対し一般化調和解析を行う。解析周波数 f [Hz] を決定する。
- (2) (1) により得られた周波数 f [Hz] を \circ マイクロホン, x マイクロホン, y マイクロホン, z マイクロホンの解析周波数として使用し一般化調和解析により f [Hz] 成分の振幅を抽出する。
- (3) Fig. 5 に示すように解析区間を時間軸方向に 1 サンプル移動し (1) へ戻る。

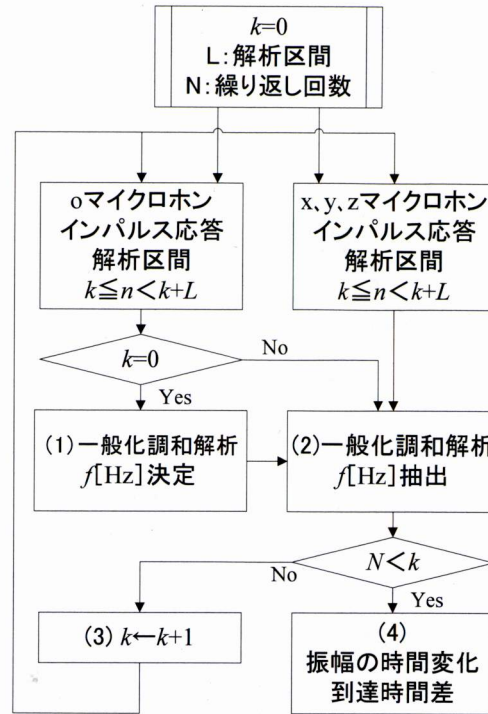


Fig. 4 振幅の時間変化の導出の流れ

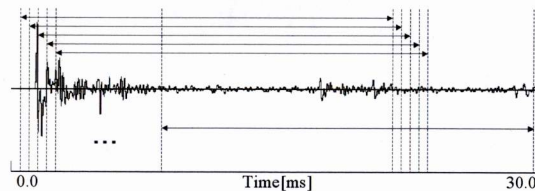


Fig. 5 解析区間を時間軸方向へ移動

- (4) (1)~(3) の処理により求められた振幅から振幅時間変化を求め, 各マイクロホン間の相互相関関数により到達時間差を算出する。

以上の過程によって近接 4 点法によって得られたインパルス応答に対して一般化調和解析を行い仮想音源分布を求める。Fig. 6 に各マイクロホンで収録されたインパルス応答を示す。音源が y マイクロホン方向にあるので直接音はまず y マイクロホンに到達し, 他の \circ, x, z マイクロホンにはほぼ同時に到達する。マイクロホン間隔 d は 0.05 m であるので y マイクロホンと \circ マイクロホン間の遅延時間は約 0.14 ms である。Fig. 7 は Fig. 6 に示す信号から算出した 61 Hz に関する周波数成分の振幅の時間変化を示す。

2.4 解析周波数の限定

一般化調和解析を音場解析に導入する場合, 近接 4 点法により収録された四つの信号それぞれに対して同様の周波数解析を行わなければならないので非常に多

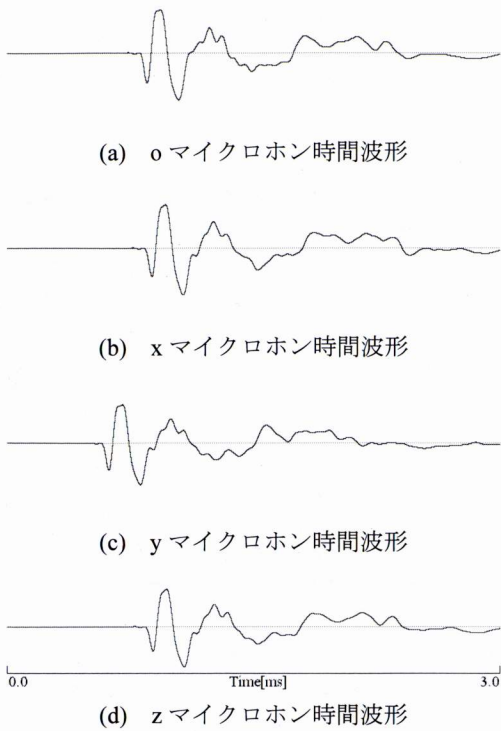


Fig. 6 各マイクロホンにより収録された信号

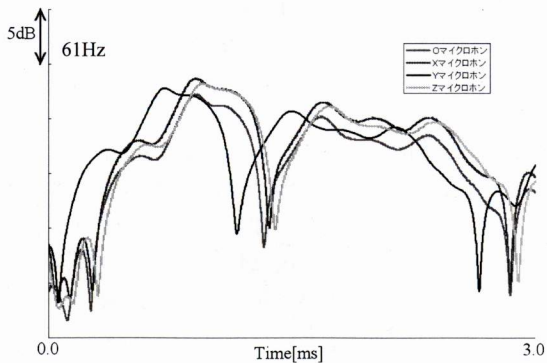


Fig. 7 振幅の時間変化 (61 Hz)

くの計算量が必要となる。しかし、一般化調和解析を周波数分析手法として導入し音波の到来方向の分析に導入することによって、その周波数成分に関して分析可能となる。

Fig. 8 にインパルス応答の時間波形の先頭部分を示す。サンプリング周波数は 48 kHz、量子化ビット数は 16 bit である。この信号の全帯域に対して一般化調和解析を行った結果を Fig. 9 に示す。この結果から所望の周波数帯域を代表する周波数成分を得るには、その周波数帯域の周波数成分が出現するまで周波数成分の抽出を繰り返す必要がある。中心周波数を 250, 500,

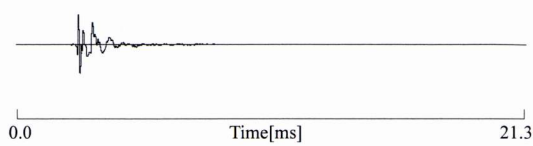


Fig. 8 インパルス応答の先頭部

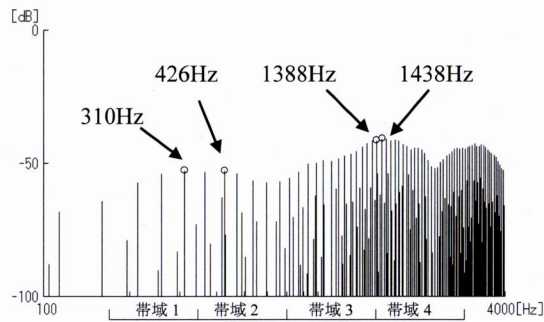


Fig. 9 一般化調和解析の結果 (全帯域)

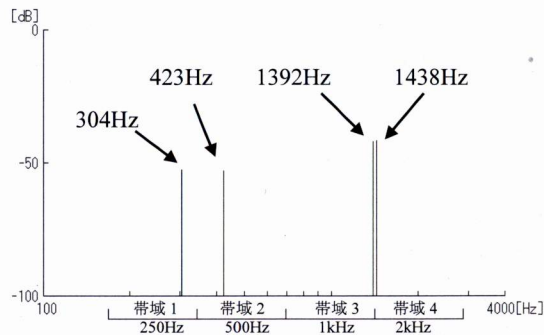


Fig. 10 一般化調和解析の結果 (帯域を限定)

1 k, 2 kHz の 1 oct 幅に分割した場合、各帯域を代表する周波数は Fig. 9 により 310, 426, 1,388, 1,438 Hz となる。この場合、四つの周波数帯域を代表する四つの周波数成分は抽出を 38 回繰り返すことにより得られた。

一方、周波数成分を抽出する際に本手法による解析周波数を限定し各帯域から 1 個の周波数成分を抽出する一般化調和解析を行う。解析する周波数を各帯域に限定をした一般化調和解析の結果を Fig. 10 に示す。この場合、解析を行う信号には帯域通過フィルタは用いていない。Fig. 10 による結果で得られた周波数成分は 304, 423, 1,392, 1,438 Hz の 4 個となった。この場合、本手法による周波数成分の抽出は従来に比べて演算量は 4/38 となった。また、抽出される周波数は全帯域に対して行われる一般化調和解析と本手法とを比べ誤差は見られるが、各マイクロホン間の到来時間差を得ることから、周波数に現れる誤差の影響は少な

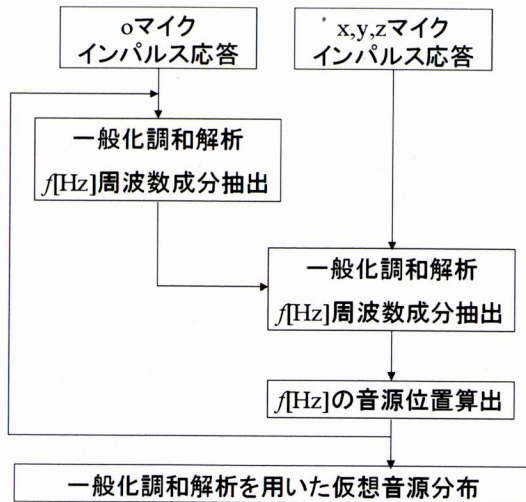


Fig. 11 一般化調和解析を取り入れた処理の流れ

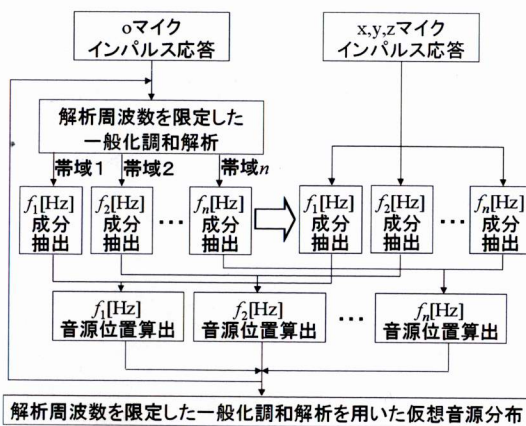


Fig. 12 解析周波数を限定した処理を取り入れた流れ

いと考えられる。

以上のように、全帯域を対象に最大振幅となる成分を抽出し仮想音源を算出する手法に比べ、解析周波数を限定して一般化調和解析を行うことにより分析過程が短縮され効率化が可能となる。

Fig. 11 に示す流れは一般化調和解析を取り入れた流れである。一般化調和解析により細かな周波数に対する仮想音源分布の算出を可能としている。Fig. 12 は本手法により Fig. 11 に対して帯域ごとで分析を行うことによって処理過程の効率化を行ったものである。

3. 演算結果及び効果

3.1 単純な音場の演算結果

本手法における解析を単純な音場において実測された信号に対して行った。測定は早稲田大学本庄キャンパス実験棟の外壁を用いて行われた。測定配置図を Fig. 13 に示す。音源は TSP 信号を用いサンプリング周波数

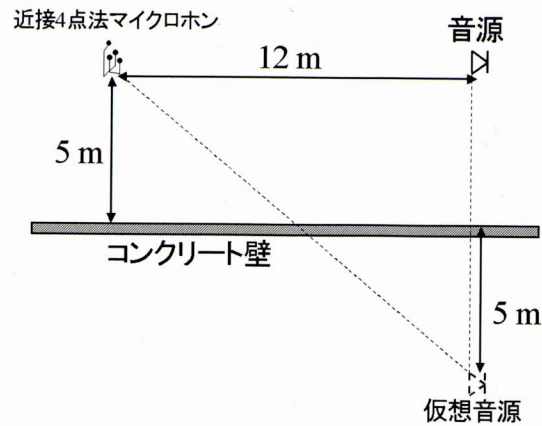


Fig. 13 近接4点法マイクロホンと音源の配置図

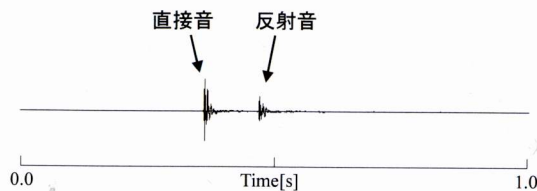


Fig. 14 Fig. 13 において測定されたインパルス応答

48 kHz, 量子化ビット数 24 bit において収録を行った。反射板として用いられた実験棟外壁はコンクリート製であり厚さ約 0.3 m である。音源と近接 4 点法マイクロホンの距離は 12 m であり、音源と近接 4 点法マイクロホンはコンクリート壁からそれぞれ 5 m の位置に設置した。Fig. 13 のような音源・マイクロホンの配置により観測される音源位置は Fig. 13 に示す真の音源位置及びコンクリート壁に関して対照となる仮想音源の位置が考えられる。Fig. 14 に o マイクロホンにより測定されたインパルス応答の時間波形を示す。0 ms が信号の発生時刻を示し、36 ms 付近に直接音、46 ms 付近に反射音の存在が確認できる。収録された信号を用いて仮想音源分布を算出した。Fig. 15 に短時間相関による仮想音源分布を示す。原点が近接 4 点法マイクロホンの位置を示し、Front 方向にある大きな丸が演算により得られた音源の位置を示す。また、更に下方にある丸が仮想音源の位置を示す。丸の個数が演算により求められた真の音源及び仮想音源の個数となる。Fig. 16 に一般化調和解析による仮想音源分布を示す。周波数帯域は中心周波数 250, 500, 1 k, 2 kHz の 1 oct 幅である。いずれの周波数帯域においても真の音源の位置及びコンクリート壁による仮想音源の位置が確認できる。音源として用いた信号は広帯域信号なので、いずれの周波数帯域においても同様な仮想音源の位置となる。

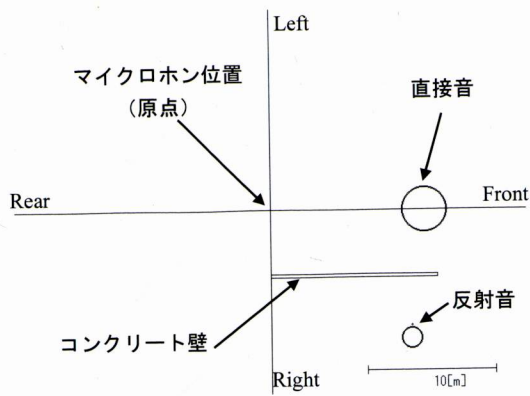


Fig. 15 短時間相関を用いた仮想音源分布

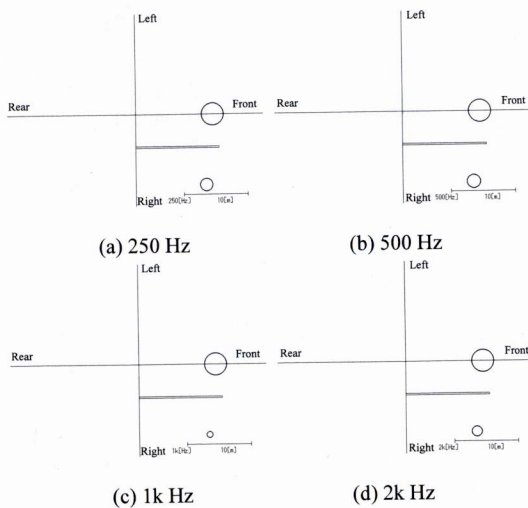
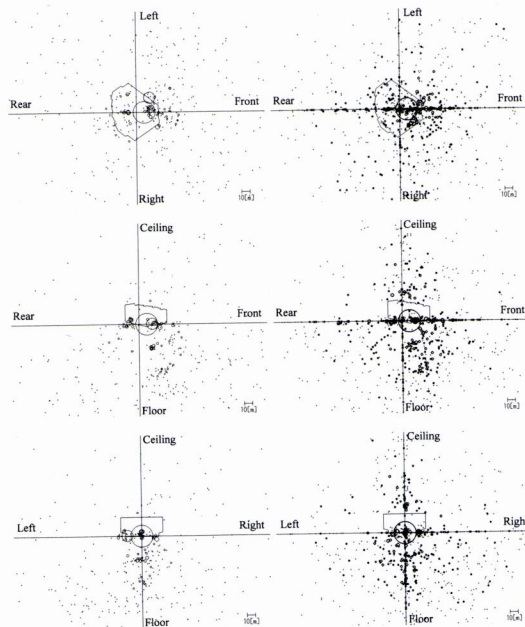


Fig. 16 本手法を用いた仮想音源分布

3.2 音響ホールの演算結果

音響ホールにおいて実測したインパルス応答を用いて仮想音源分布の算出を行った。音源はステージ上に配置し、近接4点法マイクロホンは客席に配置した。音源と近接4点法マイクロホンの距離は12mである。

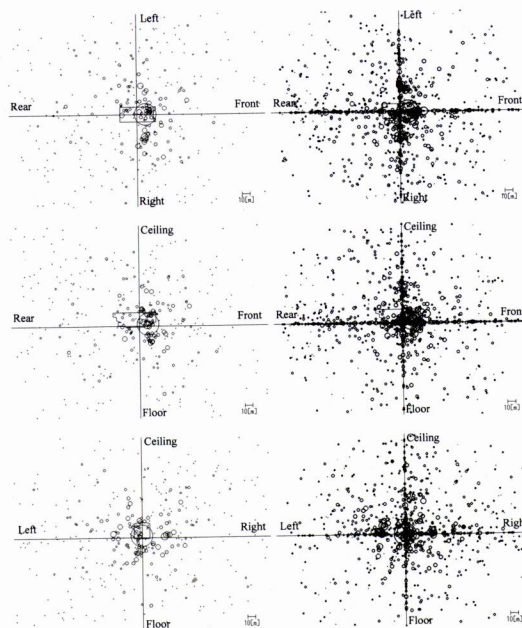
Fig. 17 に Munich Philharmonie Hall における短時間相関による仮想音源分布と従来の一般化調和解析による仮想音源分布を示す。Fig. 18 に Musikvereinssaal における短時間相関による仮想音源分布と従来の一般化調和解析による仮想音源分布を示す。図中に示す丸は音源又は仮想音源の位置を示し、大きさは音圧を表す。図中の原点が近接4点法マイクロホンの位置を表し、Front 方向12m付近にある大きな円が直接音を表す。Fig. 17 と Fig. 18 のいずれも直接音は確認できるが、一般化調和解析の場合周波数成分ごとに仮想音源分布を算出しているため短時間相関による仮想音源分布に比べ分布が密になる。また、Fig. 19



(a)短時間相関 (b)一般化調和解析

ホール名：Munich Philharmonie Hall

Fig. 17 短時間相関を用いた仮想音源分布

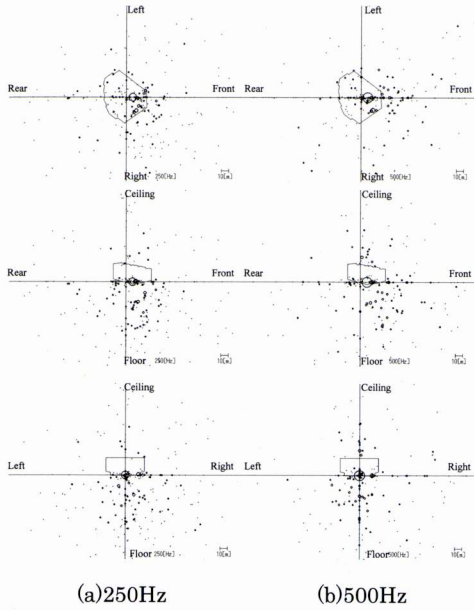


(a)短時間相関 (b)一般化調和解析

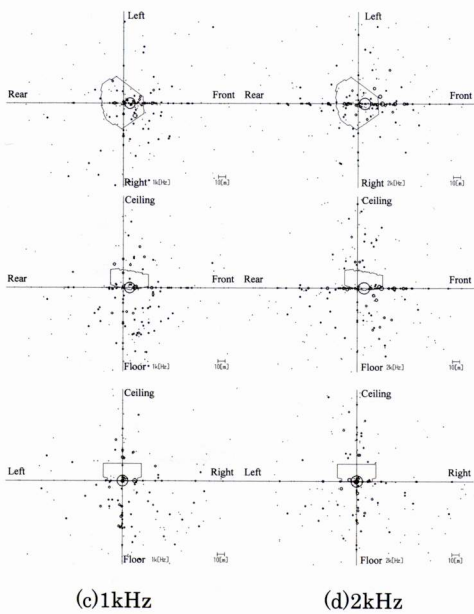
ホール名：Musikvereinssaal

Fig. 18 従来の一般化調和解析を用いた仮想音源分布

に Munich Philharmonie Hall における解析周波数を帯域ごとに限定して求めた仮想音源分布、Fig. 20 に Musikvereinssaal における解析周波数を帯域ごとに限

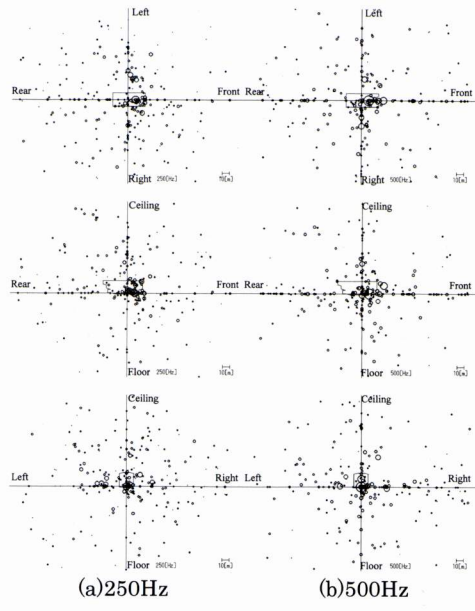


(a)250Hz (b)500Hz
ホール名 : Munich Philharmonic Hall

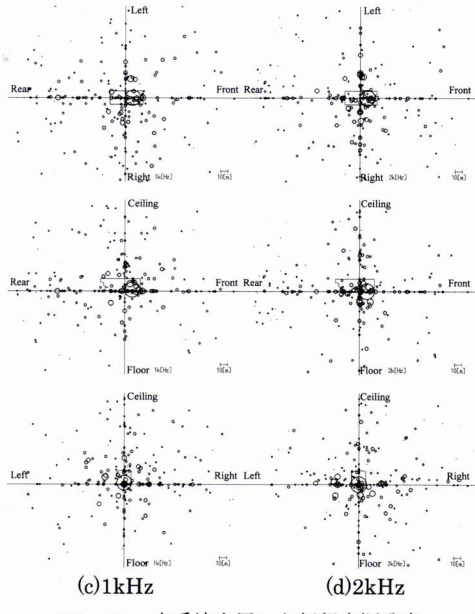


(c)1kHz (d)2kHz

Fig. 19 本手法を用いた仮想音源分布



(a)250Hz (b)500Hz
ホール名 : Musikvereinsaal



(c)1kHz (d)2kHz

Fig. 20 本手法を用いた仮想音源分布

定して求めた仮想音源分布を示す。Fig. 19, Fig. 20 では四つの周波数帯域のそれぞれから 1 個の周波数成分を抽出しているため Fig. 18 のような仮想音源分布が密にはならない。各周波数ごとに直接音の位置は推定できるものの、遠距離における仮想音源分布は短時間相関の結果と同等とは言い難い。

室内音場を分析するにあたり、1 oct 幅の各周波数帯域でインパルス応答の分析を行った。インパルス応答は音楽信号などと異なり広帯域に周波数成分が分布している。それゆえにインパルス応答の解析では通常多

くの周波数成分を扱うことになる。本手法では、周波数全体を扱うのではなく帯域ごとに分割して処理を行うことで効率の良い解析を行うことを目指した。本手法導入の効果として、全帯域を対象とする一般化調和解析と帯域ごとに解析周波数を限定した一般化調和解析とで抽出した周波数成分の比を用いた。今回用いた帯域は 1 oct 幅で中心周波数 250~2kHz の四つの帯域それぞれから 1 個の周波数成分を抽出している。すなわち、4 個の周波数成分を抽出していることになる。一方、解析周波数の限定を行わずに全帯域に対して行

Table 1 演算回数と比較
(全帯域での分析における演算量を1とした場合)

ホール名	演算量
Munich Philharmonie Hall	0.029
Musikvereinssaal	0.031

う従来の一般化調和解析では平均120個の周波数成分の抽出を行うことで本手法と同等の結果が得られ、演算量は1/30の短縮につながった。Table 1に一般化調和解析で全帯域にわたって分析した結果と各帯域で一般化調和解析を行う手法についての比較を示す。各帯域で1個の周波数成分を抽出しているの、解析対象となる帯域数が増加すればそれに比例して抽出する周波数成分の個数も増加する。従って、解析する周波数帯域数が変われば演算量もTable 1から変化することになる。

4. む す び

近接4点法による音場把握手法について、一般化調和解析を用いた解析手法の効率化について検討した。近接4点法は様々な音場の時間的、空間的な把握手法として導入されている。近接4点法では、音響空間を仮想音源によって表し、更に周波数帯域ごとの分析把握にはインテンシティ法が用いられてきた。一般化調和解析による分析法によってインテンシティ法による分析と同様に、仮想音源の周波数を帯域別に分析することが可能である。また、一般化調和解析は分析周波数を自由に選択できるので、各帯域で特徴的な変化を示す周波数に対して限定的に分析を行い音響空間の周波数ごとの特徴について把握することも可能となる。今回はインパルス応答の長時間信号に対する一般化調和解析によりインパルス応答に含まれる強い周波数成分を帯域ごとに限定した分析により仮想音源分布を算出した。

本手法による演算量は2.4節において述べたように4/38へ削減、また実際の音響ホールの解析に適用した場合およそ1/30へ削減となった。解析する信号の違いや解析を行う周波数帯域の数により削減量は変わると考えられるが、今回の結果からは1/10~1/30程度となり演算量の削減が確認できた。また、3.1節で述べたように直接音と反射音一つのみと考えられる単純な音場の解析では従来と同等の結果が得られていることが確認できた。しかし、3.2節に述べた音響ホールにおける

音場解析の結果では直接音は確認できるものの、その他の反射音については従来法と同等の結果が得られているという確認は困難である。特に近接4点法マイクロホンから数十m離れるような仮想音源の位置については従来法と一致しているとは言い難い。人間が信号の到来方向を知覚する際には、特に2kHz以下の信号では包絡線情報よりも搬送波情報を手がかりにしているという報告がある[10]。本手法では音源位置を算出する際に、周波数成分の振幅時間変化を求め各マイクロホン間の時間差を求めており、周波数成分の振幅時間変化は信号の包絡線情報と似ている。このことから、本手法による誤差が遠距離における仮想音源分布に大きく影響しているのではないかと考えられる。今後は周波数成分の振幅時間変化のみではなく搬送波情報も利用する手法なども検討する必要がある。しかしながら、本手法による周波数ごとの音源位置推定は広帯域信号を用いる音響ホールの測定だけではなく、ある特定の周波数を解析することにより自然環境における動物等の位置の把握、話者の位置特定など広く応用が期待できる。

文 献

- [1] Y. Yamasaki and T. Itow, "Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 10, 101-110 (1989).
- [2] 山崎芳男, 清山信正, 高林和彦, 伊藤 毅, 伊勢史郎, "近接4点法による室内音場の時間・空間情報の把握," 音響学会建築音響研資 AA88, 13-1 (1988).
- [3] 山崎芳男, 金 充起, 吉川浩史, 新解雅也, 清山信正, 伊勢史郎, 榎田葉子, 伊藤 毅, "近接4点法とウィグナー分布によるコンサートホールの解析," 音講論集, pp. 561-562 (1987.10).
- [4] 山崎芳男, 伊藤 毅, "近接4点法によるコンサートホールの音響測定," *JAS Journal*, 10, 27-37 (1987).
- [5] 吉田訓康, 山崎芳男, "周波数変動を考慮した近接4点法による音源位置推定," 音講論集, pp. 491-492 (1997.9).
- [6] N. Wiener, *The Fourier Integral and Certain of Its Applications* (Dover Publication Inc., London, 1933).
- [7] 牛山 聡, 東山三樹夫, 飯塚昌弘, 平田能陸, "一般化調和解析による波形分析," 信学技報, EA93-103, pp. 39-44 (1994).
- [8] 大内康裕, 及川靖広, 山崎芳男, "一般化調和解析を用いた基本周波数の推定および雑音と信号の分離," *JAS Journal*, 2, 30-36 (2000).
- [9] 中沢 誠, 大内康裕, 山崎芳男, "信号の特徴を利用した一般化調和解析," 音響学会誌, 61, 192-196 (2005).
- [10] D.M. Leakey, B.M. Savers and C. Cherry, "Binaural fusion of low and high-frequency sounds," *J. Acoust. Soc. Am.*, 30, 222-223 (1958).