

近接4点法による音場計測*

○山崎芳男, 小西雅 (早大・理工学術院)

1 まえがき

人はたった2つの耳で驚くほど正確に音源の方向や距離, 音空間の様子を知覚している。我々の研究室では, 「人の聞き分けられる音の違いは機械にでも把握できるはずである」との考えに基づき研究を重ねてきた。

近接4点法は同一平面上に無い近接した4受音点で収録した信号を使って, 音場の直接音や反射音の位置, 音空間の把握を目指した音場計測手法である。筆者らは1970年台半ばからこの方法を用いて様々な音空間の計測を行い, 音楽ホールや学校教室等の音場評価・音響設計に役立ててきた。

2 近接4点法

W.C.Sabineの巧みな実験と鋭い推察により残響理論が生まれて以降, 現在でも残響時間は室内音響設計・評価の重要な指標である。しかるに, 容積と残響時間がほぼ等しい空間で, 驚くほど音の違いを感じることもしばしばある。これは初期反射の時間, 空間構造の違いによるものと考えられる。

我々の研究室では人間の聴覚に着目して1960年代後半から穴沢, 柳川らが両耳間あるいは2つのマイクロホンで収録した信号間の相関による音場の評価, 拡がり感に関する研究を始めた。当初はダミーヘッドマイクロホンによる測定などを検討してきたが, 2点からの距離が決まっても音源の位置を特定することはできない。3点からの距離が決まれば空間内の2点が特定され, 4点からの距離が決まればはじめて空間内の1点の位置が特定される。

マイクロホン間隔は広いほど準線長が長くなり, 精度が向上する。一方, 間隔が狭いほうが各マイクロホンで収録したインパルス応答波形の相関が高く個別の反射音を抽出し易い。既知の音源を使ってマイクロホン位置の校正を行い, 標本間を十分細かく補間したうえで演算を行えば, マイクロホン間隔は小さ

くとも精度は確保できるので, 最近は原点及び直交座標上あるいは正四面体頂点に30~60 mm 間隔に配置している (図-1 参照)。

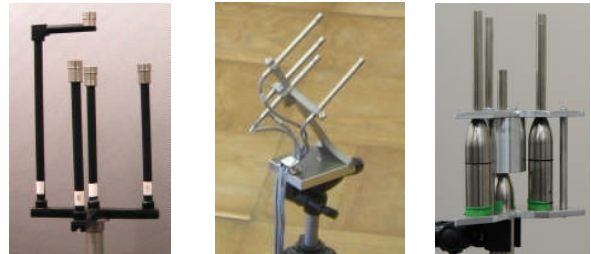


図-1 近接4点法用マイクロホン

直接音あるいは特定の反射音のそれぞれのマイクロホンへの到来時間が決まれば, 音速から音源までの距離 r が求められる。すなわち受音点を中心とした半径 r の点を中心とした半径 r の球面上に仮想音源が存在することになる。複数の受音点を中心とする球面を描けば, 反射音としての対応関係にある標本値が構成する球面の交点として仮想音源の位置が求められる。

1つの受音点を原点として, 他の3つの受音点が間隔 d で直交座標を形成するように配置した場合 (図-2), 仮想音源の座標 (x, y, z) は式(1)から求めることができる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{d^2 + r_o^2 + r_x^2}{2d} \\ y &= \frac{d^2 + r_o^2 + r_y^2}{2d} \\ z &= \frac{d^2 + r_o^2 + r_z^2}{2d} \end{aligned} \quad (1)$$

実際の解析では, 相互相関係数が予め定めた閾値を越える区間を特定の反射音とみなし抽出している。

1974年に早稲田大学61号館5階の無響室で行った基礎実験の配置と結果を図-3~5に示す[1]。火花放電音源を用い0.9×1.8 mの鉄板を反射板として設置し, 鉄板にウレタンを張った場合のインパルス応答の測定結果と

* Sound field measurement by closely located 4-point microphone, by Yoshio YAMASAKI, Tadashi KONISHI (Waseda University).

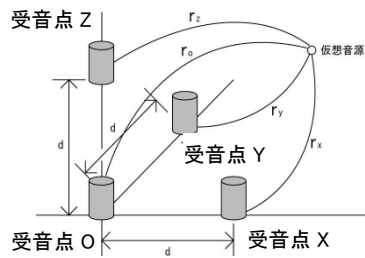


図-2 仮想音源の座標

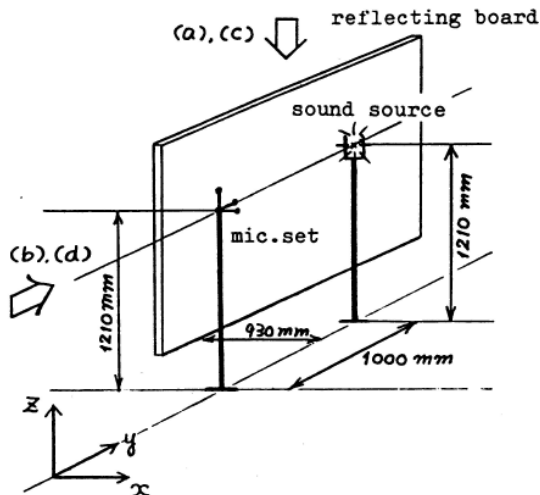


図-3 無響室における実験配置図

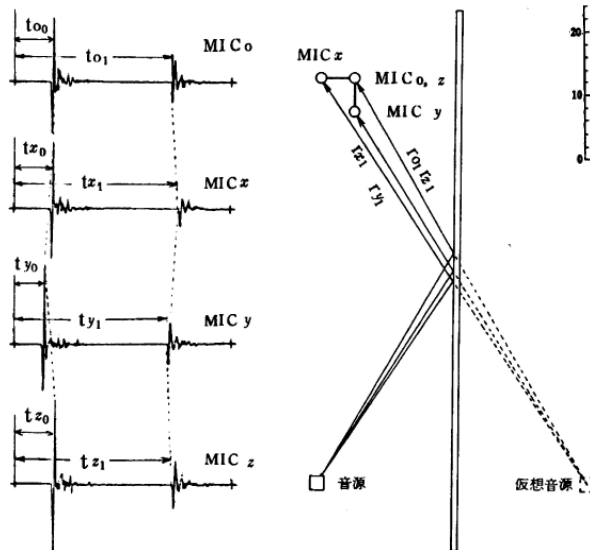


図-4 音源・仮想音源と反射音の行程およびそのインパルス応答(反射板1枚)

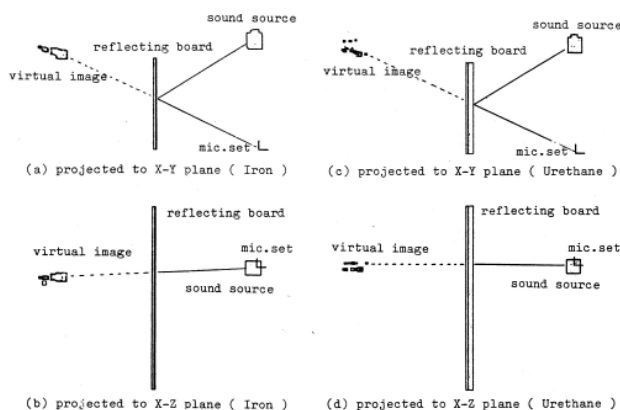


図-5 反射板1枚時の仮想音源分布

計算された仮想音源分布である。直接音は変わらないが、1次反射音はウレタンにより減衰し、なまっている様子が観測されている。

3 近接4点法の測定例

3.1 早大大隈記念講堂

1980年に早大大隈記念講堂における最初の近接4点法による測定を行った[2]。大隈記念講堂は、黒川兼三郎・佐藤武夫らにより日本で初めて本格的な音響設計が行われた建物である[3, 4]。インパルス応答の測定は、試作したVTRを利用した4チャンネルPCMレコーダに一旦録音した上で後処理により分析を行った。

図-5に大隈記念講堂の概要図、図-6に近接4点法により得られた反射音の渡来方向に基づく1階前部中央座席(図-5中のA点)の指向性パターンを示す。大隈記念講堂の音響は音声の明瞭度の良さが知られているが、反射音の分布からその特徴の一端を知ることができる。

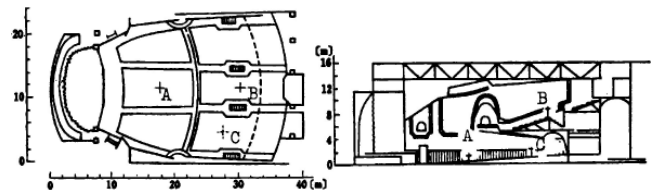


図-6 大隈記念講堂の平・立面図

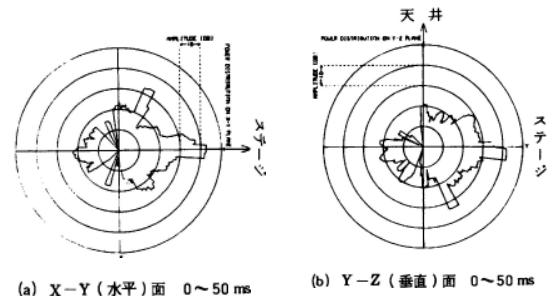
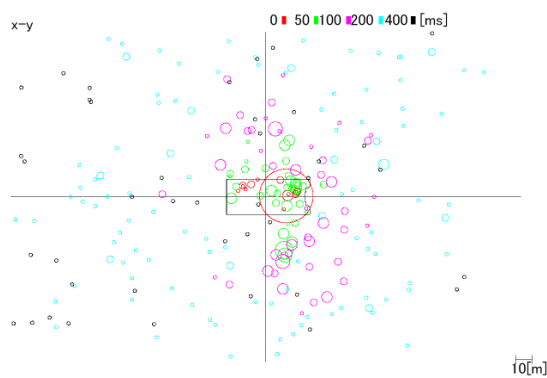


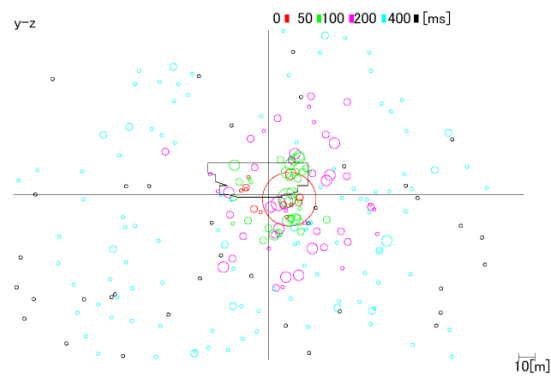
図-7 大隈記念講堂の指向性パターン

3.2 欧州コンサートホールの測定

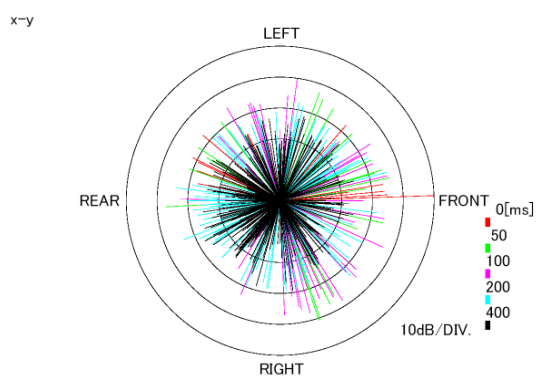
1979年にニューヨークの国連本部とワシントンのリンカーンセンター、1985年2月から3月にかけてはドイツでコンサートホールや教会の測定をヤマハのDSP開発チームと一緒にいった。以来今日までボストン・シンフォニーホールやシカゴ・オーケストラホール、ザ・シンフォニーホール、サントリーホール[5]、シドニー・オペラハウスとコンサートホール[6]、パリの新旧オペラ座[7]など特色のあるホールやエジプト・ギザのピラミッド



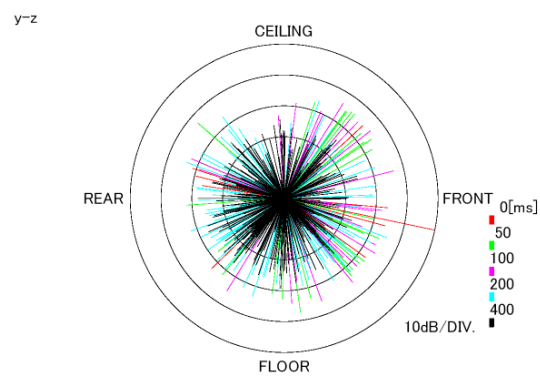
(a) X-Y 平面 仮想音源分布



(b) Y-Z 平面 仮想音源分布

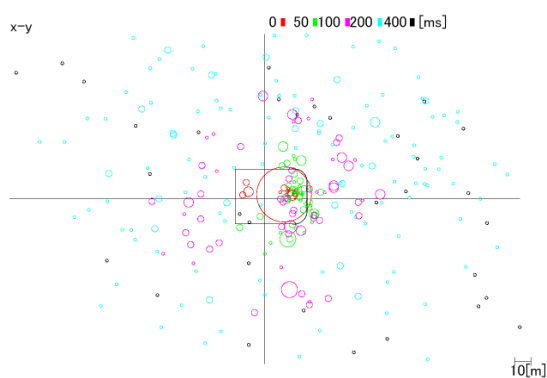


(c) X-Y 平面 指向性パターン

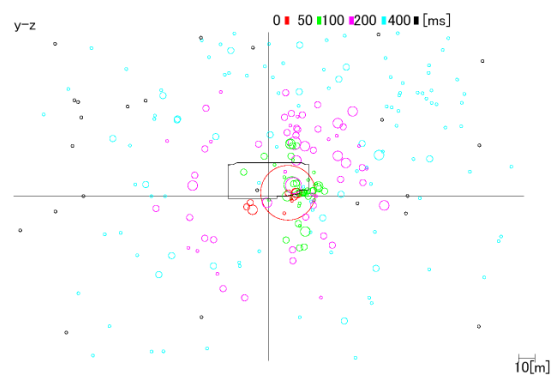


(d) Y-Z 平面 指向性パターン

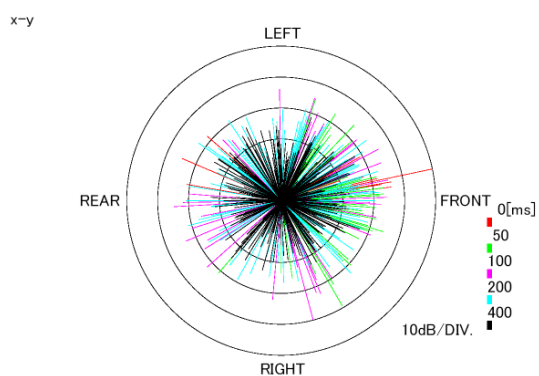
図-8 ウィーン 楽友協会大ホールの測定結果



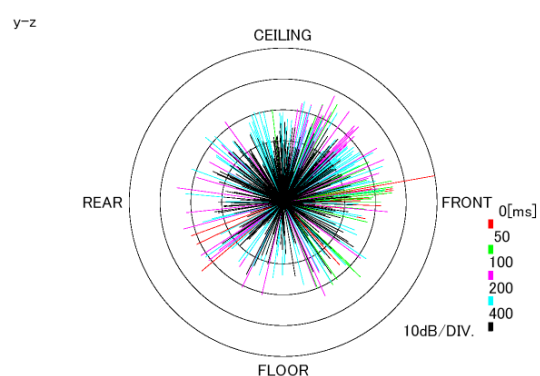
(a) X-Y 平面 仮想音源分布



(b) Y-Z 平面 仮想音源分布



(c) X-Y 平面 指向性パターン



(d) Y-Z 平面 指向性パターン

図-9 アムステルダム コンセルトヘボウの測定結果

内の空間を含む世界各地の様々な音場の計測を続けてきている。

また筆者らが計画に参加した、愛知県芸術劇場[8]、登米祝祭劇場[9]、別府国際コンベンションセンター・フィルハーモニアホール[10]、いわき芸術文化交流館[11]などでは、竣工時に近接4点法を含めた音響測定を行い、設計の検証と音場の評価を試みている。

1986年10月には鹿島学術振興財団からの研究助成を受け、神戸大学の前川純一先生を団長に森本政之（神戸大）、平澤佳男（オンキヨー）・橘秀樹（東大生研）の各位、早稲田大学から山崎、伊勢史郎、清山信正が参加して、ルール大学のJ.Blauert教授、故Dr.C.Posseltら現地の方々の協力も得て大阪フィルハーモニー交響楽団の演奏ツアーにほぼ同行する形で、欧州各地のコンサートホール（4か国、7ホール）の音響測定調査を行った[12]。

出発前に大隈記念講堂と東京カテドラル教会で予備調査を行い機材の確認を行った。近接4点法測定時の音源信号の発生、インパルス応答の取り込み、仮想音源の計算用としてNEC PC-9800を持参することとした（バックアップとしてPCMレコーダによる録音も併用した）。音源としては幅10 μ s、波高値70Vのパルス信号で駆動した口径200mmのフルレンジ・コーン形の対向スピーカを使用した。

一部古い建物における測定では、遮音が十分ではなくSN比の確保には悩まされたが、周期的な暗騒音の影響を軽減すべくパルス信号の出力間隔5~6sの範囲に乱数を使って設定し、測定時の暗騒音に応じて32~64回の平均化を行うことにより対処した。

音源はステージ前方中央の高さ1.5m、測定点は音源から12m離れ1階中央からわずかに横にずれた客席の高さ1.2mの位置をどのホールでも測定する基準位置とした。

測定したホールのうち、ウィーンの楽友協会大ホールとアムステルダム・コンセルトヘボウにおける仮想音源分布と指向性パターンを図-7、8に示す。

この調査では測定した各ホールで同じ楽団による同じ曲目を聴くことができた。時には楽団員に演奏直後の印象を聞くことができ、測定結果と合わせて検討する機会を得た意義は大きかった[13]。

4 むすび

近接4点法は4点で収音した信号の時間構造の違いを利用して音場の時間空間構造を把握しようとするものである。従って専ら受動的に4点で収録した4つの信号を利用する解析方法と、特定の音源と4つの受音点間の伝送特性を測定した上解析する2つの方法に大別される。音場を評価するには、使用している状態で、できるだけ多くの点を測定すべきであろう。測定系も30年前に比較すると小型軽量になった。最近では4点収録には専ら高速1bit信号方式による自作の8チャンネル半導体レコーダ[14]を使って、使用状態の受動信号からの4点法測定にも挑戦している。さらに移動する音源の特定[15]や地中探査への応用[16]など、新たな試みも行っている。

近接4点法を生み育ててきた早稲田大学音響研究室の卒業生はじめ多くの方々、ご指導を賜った故伊藤毅先生、また測定したホール、劇場、教会、学校などでご協力いただいた設計・施工・管理担当者および海外の現地大学の方々に深謝する。

参考文献

- [1] 山須田、小路、安川、斉藤、山崎、伊藤、建音研資、AA79-03、1979.
- [2] 海老名、石原、山崎、伊藤、建音研資、AA81-06、1981.
- [3] 佐藤武夫、早稲田建築学報、6、13-28、1929.
- [4] 伊藤毅、音響工学、電気書院、1977.
- [5] 山崎、伊藤、JAS Journal、27-37、1987.10.
- [6] 山崎、岡田、金子、白石、橘、伊勢、音講論(春)、767-768、1992.
- [7] 工藤、山崎、永野、松本、黒澤、藤田、音講論(秋)、1001-1002、1994.
- [8] 新井、子安、音響技術、No.81、53-60、1993.
- [9] 工藤、及川、渡邊、永野、山崎、音講論(秋)、913-914、1995.
- [10] 山崎、工藤、渡邊、永野、音講論(秋)、891-892、1995.
- [11] 安岡、山崎、建音研資、16-24、2008.2.9.
- [12] 山崎、橘、森本、平澤、前川、音響学会誌、43(4)、277-285、1987.
- [13] 前川純一、音響技術、No.57、71-75、No.58、64-67、1987.
- [14] 八十島、武岡、及川、山崎、音講論(春)、2-9-21、2011.
- [15] 小野、田中、及川、山崎、音講論(秋)、489-490、2000.
- [16] 金子、後藤、山崎、音講論(春)、2-9-18、2011.