

# 音場の計測・評価・制御

尾本章<sup>1,a)</sup>

**概要:** 室内音響学や騒音制御など、いわゆる環境音響の分野の研究対象を、音場の「計測・評価・制御」と便宜的に分類し、それぞれについてこれまでの取り組みをまとめた。計測に関しては、直交する3方向に近接して配置したマイクロホンで測定したインパルス応答から音響インテンシティを算出し、反射音の到来方向情報を360°パノラマ写真と共に可視化する方法を紹介する。評価に関しては、コンサートホールの多数の座席におけるインパルス応答測定結果の取り扱いや、残響過程の理論的な評価手法の提案を、また制御に関しては、音場の再生に関して、物理的な手法と、芸術的な方法の融合を目指すシステム構築の試みを中心に、人工的な反射音を放射する反射率可変の音響壁面システムなどに関して紹介を行う。

**キーワード:** 建築音響学, 室内音響学, 音場の計測・評価・制御

## Measurement, Evaluation, and Control of Sound Field

OMOTO AKIRA<sup>1,a)</sup>

**Abstract:** This report shows examples of research topics relating to architectural or room acoustics, in which the contents are expediently categorized as 'measurement', 'evaluation', and 'control' of sound field. As for the measurement, visualization of reflection inside the enclosure with 360 degree panoramic photo is introduced, in which the incoming directions of dominant reflections are obtained by sound intensity responses calculated from impulse responses measured at orthogonally and closely located microphones. As for the evaluation, large scale measurement in concert halls and theoretical analysis of reverberation process are shown. The sound field reproduction system is discussed in the topic of control, in which the integration of physical and artistic method is attempted. Also, a variable reflection acoustic wall system which radiates artificial reflection behind acoustical material is shown as a effective device for reproduction.

**Keywords:** Architectural Acoustics, Room Acoustics, Measurement, Evaluation, Control of Sound Field

### 1. はじめに

建築音響、室内音響学の分野は学際的と言われる。物理音響に基づいた、音を波動として扱うことに加えて、建築、騒音制御、電気音響、主観評価、そして演じられる内容の芸術的な観点も必要となるからである。この多彩な分野の中で、特に工学に関係する研究対象を、音場の「計測・評価・制御」と表現してみる。音場の「計測」を精度よく行う手法や、その特徴を適切に「評価」する方法を探求し、

さらに所望の音場にするために「制御」する手法の構築を研究するという考え方である。あくまで一つの便宜的な分類方法であるが、当該分野を俯瞰するには便利な方法であるとも考えられる。本稿では、それぞれについてこれまでの取り組みの中から、幾つかのトピックを概説する。具体的には、閉空間音場における反射音の可視化、その等方性の評価、ホールの大規模測定と残響過程の理論的考察、そして音場再生に関する最近の試みである。いずれもこれまでに発表してきた内容が多い。詳細が必要な場合は、適宜文献をご参照願いたい。

<sup>1</sup> 芸術工学研究院, 九州大学  
Faculty of Design, Kyushu University, Fukuoka 815-8540,  
Japan

a) omoto@design.kyushu-u.ac.jp

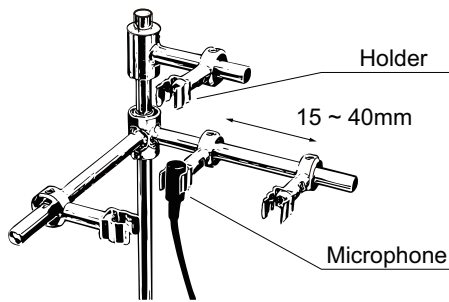


図 1 インテンシティ測定のためのマイクとマイクホルダ

Fig. 1 Microphone and holder for sound intensity measurement.

## 2. 音場の計測について

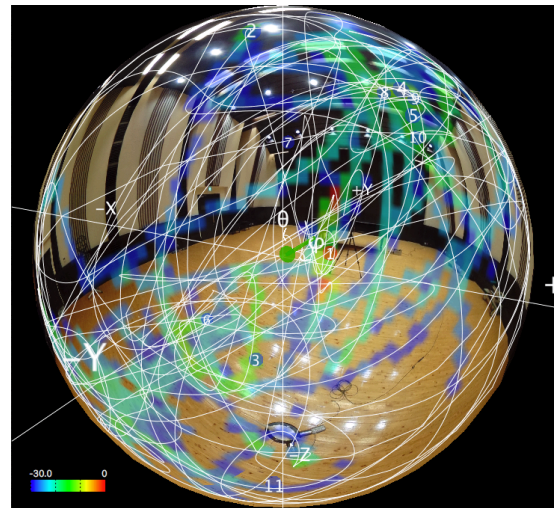
### 2.1 音場の反射音可視化について

室内の音響状態を測定する際には、インパルス応答を測定することが多い。これにより受信点に到達する反射音の情報を得ることが出来るが、さらに近接した複数点で同時に情報を得ることで、三角測量の様に反射音の到来方向情報を算出することができる。様々な手法が提案されているが、我々のシステムは音響インテンシティを用いている [1]。形状としては直交座標系の原点及び  $x, y, z$  各方向に微小距離離れた位置の計 4 点にマイクを配置して、各点においてインパルス応答を測定し、その和と差から各方向の音圧と粒子速度を算出してインテンシティを求める基本的なタイプである。500Hz ~ 2kHz 程度の周波数で有効な結果が得られるように、マイクロホン間隔は 15mm ~ 40mm に設定している。

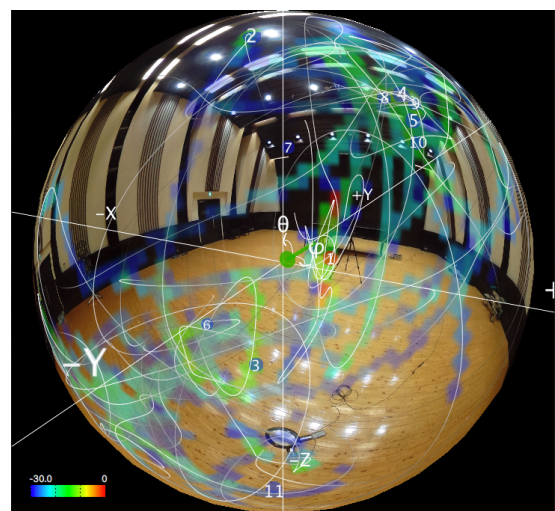
図 1 に示すように、マイクロホンはエレクトレットコンデンサ型で全指向性の直径 5mm 程度のものを使用しているが、複数マイクロホンでの感度差、位相差による誤差を排除するために、単一のマイクを逐次移動して 4 回インパルス応答を測定することが多い。

得られた 4 つのインパルス応答から、「インテンシティ応答」と呼べるものを各方向で得ることができる。これは直接音や反射音の到来方向を表す 3 次元空間のベクトル座標そのものであり、特にピークの値は顕著な反射音に相当する。多くの場合は帯域制限後にインテンシティ応答を算出し、さらに波形のエンベロープからピークを表示することで主要な反射音位置と強さを表示する。表示に際しては 360° パノラマ写真の上に結果を重ねて表示することで、直感的に理解しやすい方法を提案している。主要な反射音はその方向に存在する仮想的な音源とも解釈できるため、この手法を Virtual Source Visualizer: VSV と称している。

仮想音源の検出には幾つかのパラメータとノウハウが存在する。我々は取りこぼしや誤抽出を避けるために、インテンシティ応答をサンプルごとにプロットし、反射音の軌跡を直接概観することで、主要な音のエネルギーの流れを



(a) plotting trajectory as calculated



(b) plotting only slow intensities

図 2 VSV による測定結果の例

Fig. 2 Example of VSV measurement.

把握することも試みている。また最近の検討で、ピーク検出に軌跡の移動速度を利用する方法 [2] が有効であることがわかっている。急速に移動するインテンシティは帯域制限フィルタなどの特性による「ドリフト」インテンシティであり、一方、ある速度以下で滞留するインテンシティは実際の反射音に対応するという解釈である。精度向上の試みを継続している。図 2 にその一例を示す。

### 2.2 音場の方向情報収集の定量的な把握について

次節で扱う音場の評価にも関連するが、VSV の測定で得た結果から、反射音の方向情報を定量的に把握することは重要である。現在、どの方向からどの程度のエネルギーが到来しているのか、 $4\pi$  空間を等立体角分割して分散を求めることを試みている [3]。式 (1) で表され、到来方向の一様性という意味で Uniformity of Arrival Direction: UAD と称している。

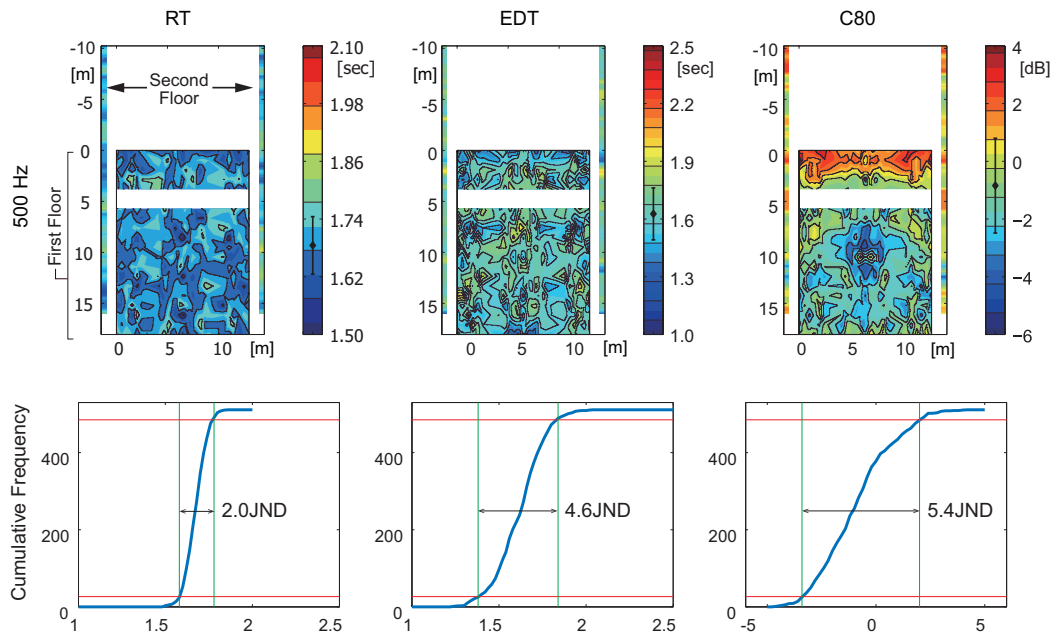


図 3 ホール C における物理指標測定結果の例

Fig. 3 Example of physical parameter measurement in hall C.

$$UAD = \frac{\left( \sum_{n=1}^N L_n \right)^2 - \sum_{n=1}^N L_n^2}{(N-1) \sum_{n=1}^N L_n^2} \quad (1)$$

ここで  $N$  は立体角分割の数,  $L_i$  はそれぞれの立体角に到来するエネルギーの積算値である. 特にデッドな空間での評価などを行う際には,  $L_i$  にレベルを用いることもある. この場合, 到来がない領域では  $-\infty$  dB を考慮しなければならず, 例えばピークから 40 dB 以下はすべて同一の値にするなど, 適切なダイナミックレンジの設定が不可欠である. この妥当性には更に議論が必要であるが, 音場の相対的な比較などには有効である.

### 3. 音場の評価について

ここでは音場の物理的評価という観点から, コンサートホールでの大規模な測定と, 音場の残響過程の散乱を考慮した理論的考察に関して紹介する.

ホールなどでの音響物理指標の測定に関して規定する ISO 3382 においては, 測定点数に関して, 最低限の目安が示されている. 確かに, 多すぎる測定点での平均は音場の特徴を消してしまい, 少なすぎる測定点では音場全体を表すことができず, 判断は難しい. この問題に関する基礎的検討資料に資することを目的として, ホールの座席にてできるだけ多くの測定点を設定する試みを行った.

残響過程の解析に関しては, 吸音率と同様に散乱の程度を考慮して提案された新しい理論を増強し, 鏡面反射と散乱成分の分離を試みた事例を紹介する.

#### 3.1 ホールの多数座席測定について

全指向性の音響物理指標を対象とし, 8 チャンネルの同時インパルス応答測定システムを用いて, 測定時間が許す限りの点数を 3 つのホールで設定した [4]. 座席数 1,871 のホール A では 1,427 席, 1,704 席のホール B では 180 席, 511 席のホール C ではその全席を測定点として設定することができた. 特にホール C では, 511 席を 3 時間強で測定することができた. このため, 全席の測定を 3 回行い, 測定結果の再現性についても検討した.

図 3 にホール C での測定結果の一例を示す. 500Hz オクターブバンドでの結果である. 上段は残響時間, 初期減衰時間, 明瞭性を表す C80 の分布, 下段はその累積度数曲線であり, 図中の数字は全体の 90% が丁度可知差異の何倍に及ぶかを示したものである. 結果の詳細は文献 [4] に譲るが, 以下に全体的な結果の概要を示す.

- 音場の物理的な特徴を示す残響時間は, ほぼ一応な分布を示す. 全体で JND の 2 倍程度の分布である. また統計的にもほぼ正規性が確保されている.
- EDT や C80 などの指標においては, 分布はホールによって特徴的であり, JND の 5 倍程度の分布が生じている.
- 測定点を段階的に減らす考察を行ったところ, 平均を算出するためには, 全体を一応にカバーする 30 点から 40 点の測定点を設定すれば十分である.
- しかし, 音場にどのような分布が生じているのかをモニターする場合には, できるだけ多くの測定点を設定することにも意味があると考えられる.

実際の測定は, 2006 年から 2007 年にかけて行った. 現在では測定器を取り巻く環境も大きく変わり, 更に大規模



で安定した測定が短時間で行える可能性がある。最近では数十万点の測定を実際の音場内で行う報告 [5] も見られるようになり、新しい評価手法の確立も期待される。

### 3.2 残響過程における鏡面反射成分と散乱反射成分の分離の試み

測定に基づく解析の他に、純粋な理論的な解析も行っている。Hanyu によって示された音場の拡散理論 [6] は、残響過程に音場の拡散度合いを取り入れた点などで画期的である。特に壁面の吸音率で残響時間が決まるように、散乱係数によって拡散が進む過程を定式化している。この理論に、鏡面反射成分のみの減衰過程と、散乱係数によって定まる割合で生じる散乱反射成分の減衰過程を区別して取り入れることを試みた [7]。鏡面を繰り返す成分、散乱を繰り返す成分の他に、鏡面と散乱を行き来する成分を新しく定義し、それぞれの減衰過程を時間  $t$  の関数として定式化することができた。これらは以下の 4 種類に分類できる。

$$P_1(t) = (1 - \bar{\alpha})^{ct/d} \cdot (1 - \bar{\beta})^{ct/d} \quad (2)$$

$$P_2(t) = (1 - \bar{\alpha})^{ct/d} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\beta})^{ct/d} \right] \quad (3)$$

$$P_3(t) = (1 - \bar{\alpha})^{ct/d} \cdot \bar{\beta}^{ct\bar{\beta}/d} \quad (4)$$

$$P_4(t) = (1 - \bar{\alpha})^{ct/d} \cdot \left( 1 - \bar{\beta}^{ct\bar{\beta}/d} \right) \quad (5)$$

ここに  $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$  はそれぞれ平均吸音率と平均散乱係数、 $c$  は音速、 $d$  は室の容積と表面積で決まる平均自由行路である。

例として  $\bar{\alpha} = 0.2, \bar{\beta} = 0.8$  の時のそれぞれの減衰の様子を図 4 に示す。鏡面、散乱、混在それぞれの過程は、最終的には吸音に支配されて減衰しており、室の固有モードの減衰過程と同様、直接的に観測することはできない。この過程を可観測にして定量的な評価に結びつけることなどが大きな課題であるが、散乱反射面、吸音反射面の極端な偏在などを通して検討が行えないかと考えている。またこの理論を用いて、残響室法吸音率の測定と同様に、実空間で拡散過程分離による散乱係数測定法などが提案できないだろうかと模索している。

## 4. 音場の制御について

ここでは音場の制御の一環として音場再生システムに関して最近取り組んでいる例を紹介する。能動的に音を出すことで音場に何らかの変化を生じさせることを広く制御と捉える拡大解釈である。特に物理的に正しい方式と、その限界を何らかの方法で補完することを試みている。

### 4.1 物理的音場再生システムの限界とその補完

これまで、80 チャンネルのマイクアレイで収録した音場の情報を、96 チャンネルのスピーカで再生するシステムを構築し、音場再生の正確性や音場共有の可能性に関し

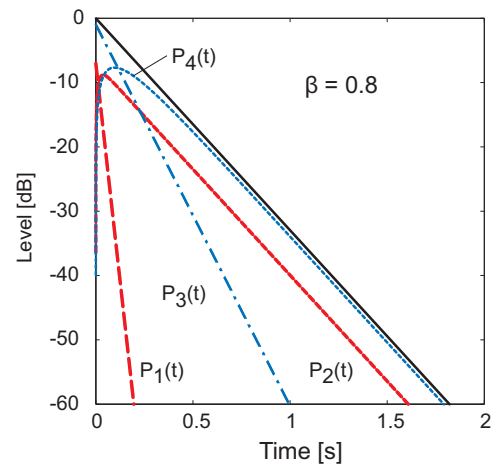


図 4 平均吸音率 0.2, 平均散乱係数 0.8 の場合の鏡面反射成分および散乱反射成分、および相互に行き来する成分の減衰の様子  
 Fig. 4 Reverberation characteristics of specular reflection, scattering, and mixture components in the case of  $\bar{\alpha} = 0.2$  and  $\bar{\beta} = 0.8$ .



図 5 鋭指向性マイクを用いた“はりねずみ”マイクアレイ  
 Fig. 5 The Hedgehog array using narrow directional microphone.

て検討を進めてきた [8]。「音響樽」と名付けられた没入型聴覚ディスプレイシステムであるが、このシステムのように、十分なチャンネル数が確保出来るハイエンドモデルであっても、例えば音場の情報を収集するマイクの間隔が半波長以上になると、空間エリアシングの影響で物理的に正しい再現は難しい。

この限界は特に音源の方向情報再現の正確さに表れると考えられるので、これをマイク自身が持つ指向性に頼ることは出来ないかと考えて検討を進めている。具体的な例

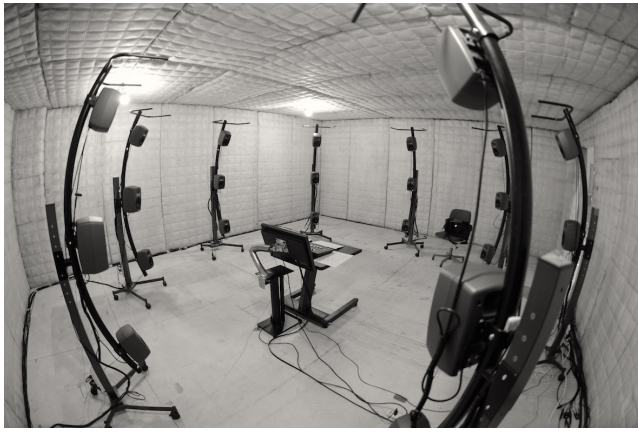


図 6 24 チャンネル再生システム

Fig. 6 The 24 channel reproduction system.

として、図 5 に示すような鋭指向性マイクのアレイを構築しており、低域は境界音場制御、高域はマイクの指向性をそのまま活かすようなハイブリッド構成を導入している [9], [10]. 再生システムとしては図 6 に示す、マイクと同じ数の 24 チャンネルのスピーカを聴取者のまわりに均等に配置したシステムを標準的に用いている。

さらに、例えば音楽の再生のように音源が特定できる場合、マイクアレイでの全方向の収録とともに、音源に近接した位置で、「オン」の音を別途収録し、これを同時に再生することも試みている。もはや純粋な音場再生システムとは言えず、意図的な操作を加える録音芸術との距離が近い。物理的な評価とともに、主観評価による性能検証を丁寧に行っていきたいと考えている。

#### 4.2 反射率可変の音響壁面システム

さらに、再生システム側でも工夫を行っている。例えば聴取者が出す音、衣擦れや咳払い、足音などが再現する音場の響きに近いものを出せるように、再生スピーカ近辺で収録し、残響付加を行った後に再放射するシステムである。これまで、スピーカ前面に配置した多孔質系の吸音材料と組み合わせて使うことが多く、等価的に材料表面の反射率を可変することとなるため、反射率可変の音響壁面システムの意味で、Variable Reflection Acoustic Wall System; VRAWS と称している [11]. 図 6 の場合には、天井に 4 本の単一指向性マイクを仕込み、ここで検出した音に残響を付加して、24 チャンネルに適宜レベルの増減を行なった後に割り振っている。

幾つかの形状を製作して、実験的な検討を行ってきた。いずれの場合も、実用化への大きな問題は近接して配置するマイクとスピーカ間のハウリングである。適応信号処理を用いたハウリングキャンセラを導入することで、「大崩れ」を防ぐ方法も有効である。実験的なコンサートで聴取者の環境を曲によって積極的に変化させる試み [12] も行っており、安定した稼働を確認している。

これらの考えを取りまとめると、図 7 のようなシステム構成となる。Main Sound は、従来のステレオ、あるいはサラウンドマイクアレイで収録した音、あるいは音源近くで収録した「オン」の音である。また Ambient (Surround) Sound はマイクアレイで収録した音であり、境界音場制御とマイクの指向性のハイブリッドで正確な方向情報を提示できる音場再生の音である。Artificial Reverberation は、上述の VRAWS で生じさせる人工的な響きであり、音場再生というよりは、「演出」のための付加音である。

#### 5. まとめ

音場を「計測・評価・制御」という観点でこれまでの取り組みを概観した。もちろん、建築音響、環境音響の分野で、これら 3 つの領域を明確に区別することにあまり意味はなく、互いに連関しているものである。あくまで便宜的なものごと理解いただければと思う。全体をまとめると、図 8 のような様相である。図には本稿では紹介していない項目も記入している。

ここに示した様々な取り組みを通して、最終的に何らかの「良い音・良い音場」を提供できる成果を目指したいと考えている。

**謝辞** ここで示した研究内容に関して、鈴木久晴博士には、研究課題の設定やシステムの構築など、特に初期段階において多大な貢献をいただいた。また中原雅考博士には、反射音可視化の研究成果等に関して、実用化の面で大いにサポートしていただいている。また紹介した研究は、JST CREST, JSPS 科研費 JP 25282003, JP 26560012, JP 17H00811 の補助を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Y. Fukushima, H. Suzuki, A. Omoto, "Visualization of reflected sound in enclosed space by sound intensity measurement," *Acoust. Sci. and Tech.*, **27**, 187-189, 2006.
- [2] 中原雅考, 尾本章, 長友康彦, "音響インテンシティを測定・分析・可視化するための音響設計支援ツール「VSV4」の開発," 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会講演論文集 3-P-11, 2016.
- [3] A. Omoto, K. Sugiura, "Visualization and Evaluation of Reflections inside an Enclosed Space using Sound Intensity Measurement," *Building Acoustics*, **21**, 135-144, 2014.
- [4] T. Akama, H. Suzuki, A. Omoto, "Distribution of selected monaural acoustical parameters in concert halls," *Appl. Acoust.*, **71**, 564-577, 2010.
- [5] I. B. Witew, M. Vorländer, "Sampling the sound field in auditoria using a large scale microphone array," *J. Acoust. Soc. Am.*, **140**, Pt.2, 3128, 2016.
- [6] T. Hanyu, "A theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls," *J. Acoust. Soc. Am.*, **128**, 1140-1148, 2010.
- [7] A. Omoto, "Comment of "A theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based

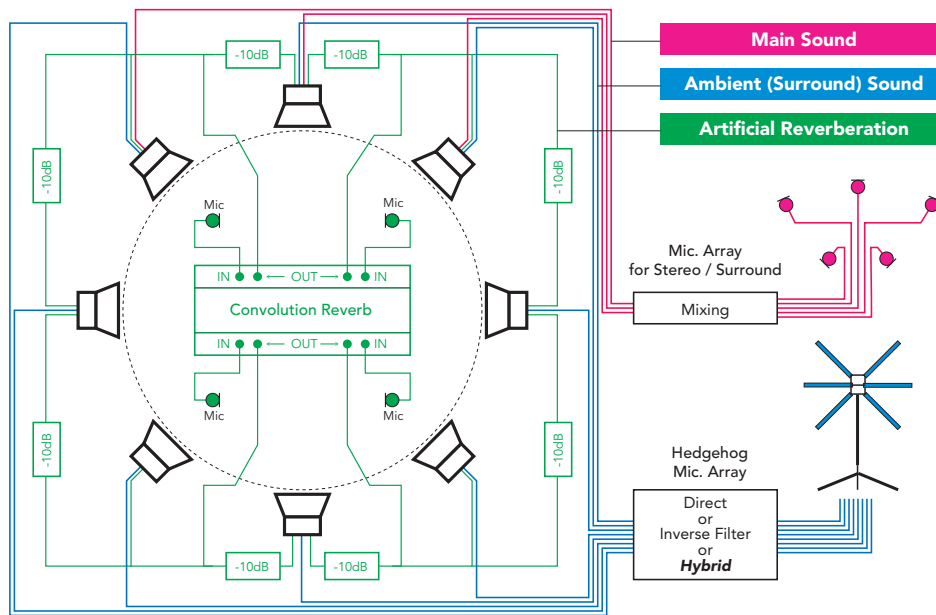


図 7 音源からの音の再生と、正確な音場再生、それに演出のための付加的残響音を有する再生システム

Fig. 7 Concept of sound reproduction system with main sound, precisely reproduced sound, and additional reverberation for further directions.

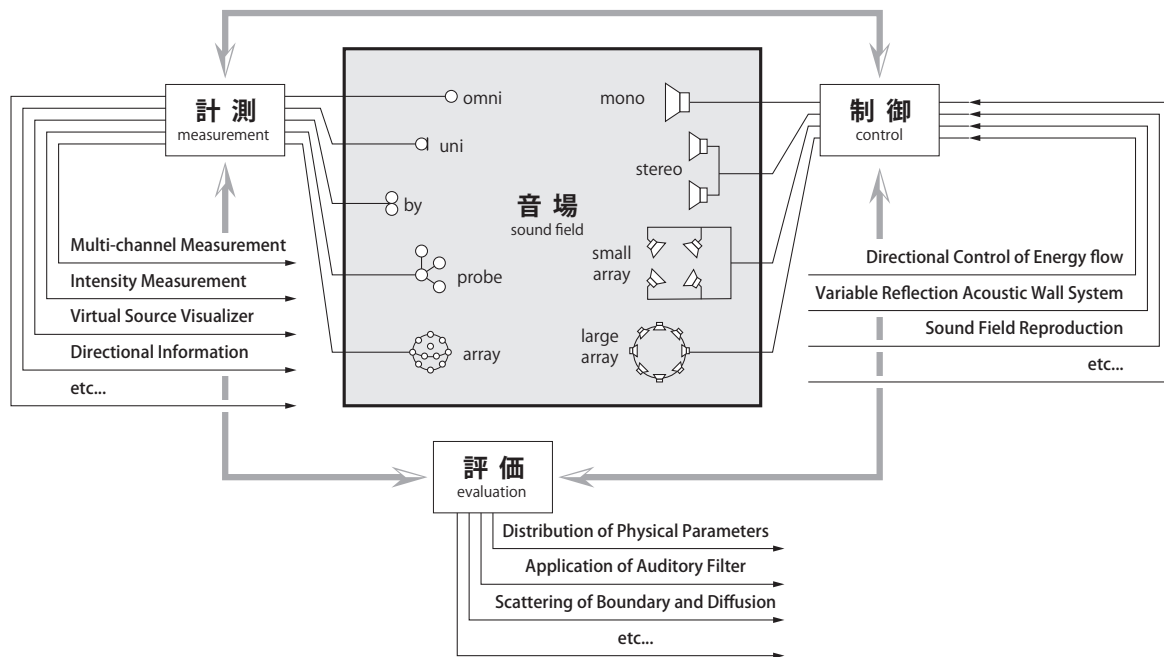


図 8 音場の計測・評価・制御に関する取り組みのイメージ

Fig. 8 Image of measurement, evaluation, and control of sound field.

on scattering coefficient and absorption coefficient of walls,” [J. Acoust. Soc. Am. 128, 1140-1148 (2010)] (L), J. Acoust. Soc. Am., **133**, 9–12, 2013.

[8] A. Omoto, S. Ise, Y. Ikeda, K. Ueno, S. Enomoto, M. Kobayashi, “Sound field reproduction and sharing system based on the boundary surface control principle,” Acoust. Sci. & Tech. **36**, 1–11, 2015.

[9] 齋藤 悠人, 石橋 敬彦, 星加 慧, 尾本章, “多チャンネル鋭指向性マイクを用いた音場情報収集センサー-スピーカーと組み合わせた簡易音場再生システムの構築,” 日本音響

学会 2015 年秋季研究発表会, 1-6-6, 2015.

[10] 齋藤悠人, 尾本章, “3次元音場再生システムの性能向上に関する研究,” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2016-09, 2016.

[11] Y. Nagatomo, N. Hiramatsu, G. Yamauchi, A. Omoto, “Variable reflection acoustic wall system by active sound radiation,” Acoust. Sci. & Tech., **28**, 84–89, 2007.

[12] A. Omoto, T. Nishiyama, Y. Yoshimura, “Music performance with Variable Reflection Acoustic Wall System,” Proc. Forum Acusticum, PJ04-2, 2014.