

1.3 立体音場再生技術の現状と展望

尾本, 章
九州大学芸術工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/7178693>

出版情報：音響技術. (205), pp.19-24, 2024-03-01. Acoustical Materials Association of Japan
バージョン：
権利関係：



1. 実験室測定・立体音場再生の現状と展望

1.3 立体音場再生技術の現状と展望

Current Status and Future Prospects of Stereoscopic Sound Field Reproduction Technology

尾本 章 (Akira Omoto)

九州大学 芸術工学研究院
(Faculty of Design, Kyushu University)

1. はじめに

音場再生、あるいは音場再現の目的はさまざまであり、純粹に精密な再生を目指す学術的な目的から、映画やゲームに代表されるように、どれだけ多くの人が没入感を得られるかというエンターテインメント的な目的のものまで存在する。筆者はしばしば前者を「物理的な再現」、後者を「芸術的な再現」あるいは「芸術的な表現」と称している。調査不足の感は否めないが、筆者が感じている双方における最近の重要なキーワードを挙げてみると、物理的な再現においては、アンビソニックス、高次アンビソニックス、バイノーラル、個人化、また芸術的な表現においては、オブジェクトベース、といったものであろうか。

特に物理的な再現に関しては、高次アンビソニックス、つまり音場の情報を何らかのマイクアレイで収録して球面調和展開係数にエンコードし、さらに適切な処理と共に、何らかのサラウンドフォーマットのスピーカ配置に適したデコードを行い、再生する、という流れが確立しつつあると感じている。本来の性能発揮のためには、アンビソニックスの次数に応じたスピーカ数が必要であるが、現実的には7.1.4 ch程度のサラウンドが使われているのではないだろうか。あるいは携帯端末とヘッドホン・イヤホン聴取のためにバイノーラルレンダリングを行うことも一般的であろう。5.1 ch以上のサラウンドが広く一般的に普及しているとはやや言い難いが、手軽な再現としての裾野は広がる気配である。

この流れに徹底的に抗って、という意図は全くないが、これまでに多少勉強し、関わらせてもらった再生手法の概略も紹介しつつ、今後の見通しと筆者の私見を述べたいと思う。なお、原理や理論的な裏付けについては幾つかの成書^{1~2)}があり、また論文なども大量

に検索できる。筆者も数度同様な内容で書かせていただいたことがある^{3~4)}。詳細は適宜それらを参照いただきたい。

本稿で紹介する手法の概念図を図1に示すが、このあとの説明では、原理の簡単な紹介と、特にスピーカを使った再生においては、具体的にどんな機材を揃えて、どのような準備をすれば音が聴けるのか、という情報を《必要なシステム》として示している。なお、演算を行う計算機や、収録する際に信号をデジタル化し、出力に際してアナログ信号に変換するコンバータ類は、手法によらず共通のものとして、別途必要と考えていただきたい。

あくまで目安であるが、これなら自分たちでも、あるいはどこかと組めば実現できそう、やはり難しそう、などの直感的な判断の参考になればと思っている。参考文献についても、原典を示すよりも、その解説を行なったもの、さらに機材やソフトウェアを紹介するサイトのURLを中心に示している。ご了承いただければと思う。

2. いくつかの音場再生技術

2.1 波面合成法

図1の(a)は、この手法の原理を端的に表している。音源から出た音の波面を、平面上に並んだ多くのマイクで収録し、その位置関係を崩さずに、同様に平面上に配置したスピーカから放射することで再現するというイメージである。実際には、Kirchhoff-Helmholtz積分方程式によって表された音場の積分領域を無限に広がる平面として、いくつかの近似を行ない、Rayleigh積分に置き換えて・・・という厳格な理論が後ろに隠れている。提案されたのは30年ほど前であるが、スピーカの駆動信号をどのように導き出すかは、最近でも研究が続いている方式である。また実際には面的にマイクやスピーカを並べるより、直線状に配置したものが一般的だと思われる。それでもある程度面的な再現が行える手法である。

実際にある程度の密度でマイクを並べて、さらに駆動信号を計算しながら他の場所で再現することを相互に行う、という音場の共有の実験も行われている。奥行き感の再現が可能、またスイートスポットを限定しないなどのメリットもしばしば言及される手法である。

マイクあるいはスピーカが並んだ特定の方向のみの再現という限界も存在するが、この点は、後述の高次アンビソニックスとの理論的な統合を通して、全方位

1.3 立体音場再生技術の現状と展望

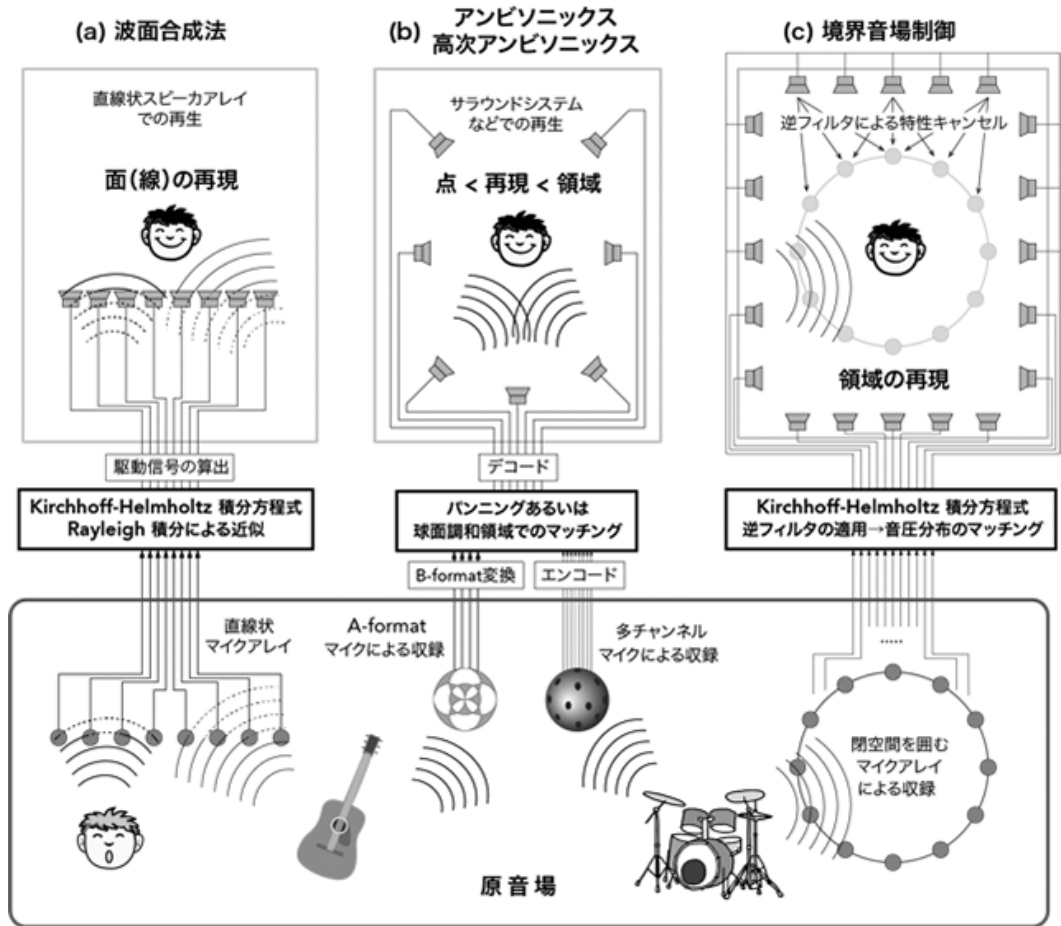


図1 いくつかの音場再生手法

的な再現手法へと、更なる成長を続けている。

最近の活用事例を見ると、ある音場全体の様子を収録してきて再現する、というよりも、架空の(所望の)音場の様子をシミュレートして、スピーカから放射する音を算出する、という使い方の方が目立っているようである。例えば映画館での音源の移動を伴うコンテンツの提示の事例や、車内での適用例などが、散発的にはあるがしばしばニュースなどで紹介されている。物理的な原理に基づきながらも、「芸術的な表現」に利用されている例と思われる。例えば「wave field synthesis car」などのキーワードで、特に画像の検索をしてもらうと、多くの事例を見ることができる。

《必要なシステム》 音場を収録して再現するというより、何らかのコンテンツの提示のためにこの手法を採用すると仮定すると、何より数多くのスピーカが必要である。それも、原理的には半波長より短い間隔で

並べる必要がある。しかし、実際に人間の可聴域全体をカバーして、その半波長以下となると、数ミリの間隔で十分なパワーが出るスピーカが必要となり、これは不可能である。実際にはある程度現実的に、所望の周波数帯域が再生可能なスピーカを並べるような間隔で配置しても、感覚的には許容されるようである。

いずれにせよ、いわゆるアンプ内蔵のパワード型にするか、電源が不要で配線も容易な通常のスピーカにするか、多数のスピーカを駆動するアンプをどうするかなどを、予算と相談しながら決めていくことになる。最近ではEIA規格19インチラック1Uサイズ(約44.5 mmの高さ)で32チャンネルまで駆動可能なアンプもあり⁵⁾、機材としての選択肢は広がっている。なお、肝心の出力信号を計算するためのソフトウェアであるが、基本的に自前で理論に基づいて作成する必要があるが、音楽ライブなどでの利用を想定したソフトウェ

アも一部市販されている⁶⁾ようである。気軽に組みめるきっかけになるかもしれない。

2.2 アンビソニックス

ambisonic.net というサイトがある⁷⁾。今はすでに更新は行われておらず、資料的な意味のために存続しているサイトである。1990年代の終わりから2000年代の初めにかけて、DVDの登場とともに「サラウンド」という言葉が一般的となった時期で、5.1チャンネルの配置とアンビソニックスがどのように折り合うか、などの記事が残っている。当時はいわゆるアンビソニックマイクで得た信号からサラウンド配置への変換とその再生が主たる話題である。

この手法は、イリノイ大学のCooperと、日本コロニアの志賀によって、1971年に提案された録音の手法を起源としている。主として録音の世界で発展してきた手法であり、単一指向性のマイクの組み合わせと加減算、つまりミキシングによって、方向性を有する信号を取り出す。

一般的には、A-formatと呼ばれる、単一指向性のマイクをコンパクトな4面体状に配置した専用のマイク^{8~11)}で収録して、これを、全指向性と直交する3方向の双指向性を表現するB-formatと呼ばれる4つの信号に変換するというエンコードのプロセスを経る。これらに、さらにスピーカの配置に応じた加減算を施すことで、再生信号を得ることができるし、あるいは自由にパンニングすることもできる。ちなみにアンビソニックスの効果を得るために必要なスピーカ数は、最低4である。

これも極めて単純なデコードのプロセスであり、アナログの機材でも対応可能である。実際にAlan PersonsのStereotomyやTina TurnerのBreak Every Rule、Paul McCartney's Liverpool Oratorioなど、いくつかの古いアルバムで使われていたようである。

《必要なシステム》 現在、A-formatマイクは録音用に数種類が市販されている。さらにA-B format変換や、その後音像の位置を自由にパンニングできるソフトウェアも、DAW(Digital Audio Workstation)のプラグイン¹²⁾の形式などで多く供給されている。スピーカの数に特に厳密な制限があるわけではないが、一般的なサラウンドフォーマットへの対応や、さらにそれをバイノーラル化することが行われている。主として「芸術的な表現」のために広く利用されている手法である。この後の高次アンビソニックスと併せて図1(b)にイ

メージを示している。

2.3 高次アンビソニックス

上記のアンビソニックスでは、直交する3方向の情報を用いていた。これをさらに多くの基本的方向要素に分解して、角度の分解能を向上させる方法が、高次アンビソニックスと呼ばれる手法である。音の時間波形を基本的な周期波形である三角関数の集まりに分解することはフーリエ分析としてよく知られていると思う。これと同様な考え方で、音の到来方向の分布を、基本的な方向要素(指向性)に分解して、それぞれの重みとして収録する(エンコード)。これはアンビソニック信号と呼ばれる。再生に際しては、この信号を任意の位置に配置したスピーカに割り当てていく(デコード)。この場合の基本的な指向性としては、球面調和関数と呼ばれる、三角関数とその親戚のような特殊関数を含んだものである。

時間波形を分析するためには、サンプリングを行う。これと同じく、空間的にサンプリングを行うために、複数のマイクを用いて収録する必要がある。この数によって、方向をどの程度細かく分解できるかが決まる。理論的、物理的な取り扱いが容易であり、さらにデメリットが少ない形態である、剛体の球に全指向性のマイクを配置したものが多い。

高次アンビソニックスは、当初どちらかというと学術的な世界で発展し、2000年あたりから、非常に多くの論文が書かれている。その中でも、厳密な信号処理を取り扱う学会誌(例えばIEEE)とともに、最終的に音を聴くことに重心があるオーディオ系の学会誌(例えばAES)の双方に、程よくバランスされて投稿されていることが特徴のように感じられる。録音テクニックを起源とする手法の発展系という理由があるのかもしれない。球面調和関数による基本的な指向性をモードと呼び、その係数を合わせて再現を行うために、しばしば Mode matching の手法とも呼ばれている。

論文における式の演算などは一見ややこしいものが並んでいるが、まとめて処理を実行するDAWのプラグイン¹²⁾も公開されている。これらを使えば、エンコードからデコードまでを一貫して行うことができ、そのためのチュートリアル¹³⁾も公開されている。スピーカでの聴取はもちろんのこと、イヤホン・ヘッドホンでの聴取を前提としたバイノーラル形式に仕上げることもできる。もちろん中身を正確に理解して使う方が良いということは間違いがないが、とりあえず試してみる

1.3 立体音場再生技術の現状と展望

ことができる利便性は普及という観点からは大きい。

なお、高次を含んだアンビソニックスの手法は、原音場である聴取点における音の到来方向を再現するものであり、「点」の再現と、その周りの「領域」の再現の中間の性能を持つとしばしば言われている。

《必要なシステム》 前述のアンビソニックマイクと違い、高次の分解能を発揮できるマイクは、大学や一部の企業で製作されているものの、広く流通しているとは言い難い。あるメーカーのFacebookページ¹⁴⁾では、64チャンネルのマイクが販売される予定が写真とともに紹介されて、多くの期待するコメントが書かれていたが、2019年以降更新が行われておらず、「どうなってるの?」という書き込みが見られる。

感度が揃った多くのマイクが必要で、必然的に高価になることと、需要がそう多くは見込めないことが理由であろう。一方最近では、分解能的に劣るが、19個のマイクを球面上に配置したもの¹⁵⁾が、比較的安価に販売されているようである。

収録した後に必要なエンコード・デコードの一連の処理は、前述のようにDAWとプラグインで行える。スピーカについては、研究用などでは多くの数を設置することが多いが、既存のサラウンドの配置に合わせてデコードして再生することも可能である。

2.4 境界音場制御

原理を端的に表すイメージを図1(c)に示す。波面合成法と同じく、Kirchhoff-Helmholtz積分方程式に基づく再生方法である。音場内のある領域を取り囲む境界上の音圧とその傾きを収録し、別の場所でその境界上の物理量分布の様子を再現すれば、同じ音場が再現できるという原理¹⁶⁾に基づいている。実際には、音圧のみを多くのマイクで収録して、それを多くのスピーカによって再現する方法が実現されている。音場のある領域をコピーして、別の場所にペーストして再現するというイメージには一番合致する手法である。音圧分布を再現ということで、Pressure Matchingという名称で、高精度の再生を行う一連の研究もある。

さまざまなコンテンツを提示できる具体的なシステムとしては、音響樽が代表的である¹⁷⁾。筆者もこのプロジェクトに参画させていただいたが、この時に用いたのは80個の小型マイクをC80フラレーンと呼ばれる形状の頂点に配置したマイクアレイで音場の音圧分布を収録(コピー)し、これを音響樽と称する閉空間内で、壁面に設置した96個のスピーカで再現(ペースト)する

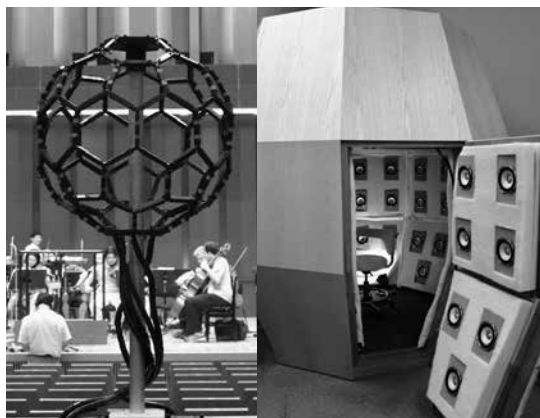


図2 フラレーン状マイクアレイと音響樽

システムである。図2に実際のマイクと音響樽を示す。

この時にスピーカから再生する音を、うまく収録した音に合致させるために、音響樽内の伝達特性をキャンセルする必要がある。このために $80 \times 96 = 7680$ の逆フィルタを作成するのだが、再生される音の品質に直接的に影響するため、算出に際しては注意が必要である。具体的には、正則化パラメータと呼ばれる値の設定などに、ある程度ノウハウの蓄積が重要だと感じた。安定した計算を行うための規範はいくつも提案されているが、良い音のための規範は存在しない。

《必要なシステム》 このシステムの実現には、やや規模の大きなシステムが必要である。閉空間を構成できる数のマイクと、そのためのアンプ類、さらに再生のためのスピーカもある程度の数は確保したい。音響樽から数を半減したシステム(音積木と称していた)も試作運用したが、この場合も48チャンネルのスピーカへ信号を供給するアンプは必要である。また先述のフィルタをかけるためのソフトウェアも、やはり一般的に市販されているわけではなく、自作を含め、調達の手段を考える必要がある。

2.5 その他の再生方法

コンサートホールの音場の再生に限定されるが、フィンランドのAalto大学で試みられてきた一連の手法³⁾は、効果的だと感じている。この手法では、あらかじめホールの響きを収録しておく。いわゆるインパルス応答と呼ばれる響きの元を、4本以上の、近接して配置したマイクで収録し、それらの相関を求めることで、反射音が到来する方向とその強さを時々刻々と算出する。算出の中身は異なるが、三角測量のようなイメージである。

抽出した主要な反射音はその方向にパンニングし、ある程度拡散状態が進んできた響きの後期成分は、全体的に散りばめて再生するなどの工夫によって、例えばホール の性質の違いなどを明確に感じることができ るシステムが構築されている。当初から、波面を正確に再現するのではなく、人間が感じる肝心な部分を再現する手法であると宣言しており、潔い、何度か肝心の音を聴く機会があったが、ホールの特徴の違いを明確に知覚できて、音質的にも優れた再生方式だと感じた。成果の一部は、やはりプラグインとしても公開されている¹⁸⁾。

我々も、原理的にはAalto大のものと近いが、さらに簡便な手法を継続的に試みている¹⁹⁾。比較的鋭い指向性を持つマイクを水平角45度ごとに、また仰角も45度ごとに、上下の極方向を除いて合計24本配置し、それから音場の方向情報を得て、同等の方向に配置したスピーカから放射する単純なものである。

響きの元であるインパルス応答が測定できるときは、24本のマイクで収録した応答から直接音成分のみを除去して、純粋に響きの成分のみを再生する。直接音に対応する響きを伴わない音は別途レベルを調整しながらミキシングする方法を試みているが、今の所、個人的にこの方法に対して聴感上かなり良い印象を持っている。前述の波動的に再現を目指す手法と比べるとかなり稚拙な手法であるが、「音場の雰囲気再現」には十分使えると考えている。

3. おわりに

最近の音場再現についての研究動向を、Chat GPTに尋ねてみたところ、以下のような答えが返ってきた。

音場再現の研究トレンドでは、以下のような詳細な進展が見られます：

1. 空間オーディオ技術の進化：アンビソニックス、ウェーブ・フィールド・シンセシス(WFS)、ハイオーダーアンビソニックス(HOA)などの空間オーディオ技術の改良により、より精緻な音場再現が可能になっています。
2. 個人に合わせた音響体験：個々のリスナーに合わせた音響再生を実現するための適応型アルゴリズムやパーソナライズドな音響レンダリングの研究が進んでいます。これにより、没入感と快適性が向上しています。

3. 仮想現実(VR)や拡張現実(AR)への統合：音場再現技術をVRやAR環境に統合し、仮想世界での正確な空間音響位置決めを可能にしています。
4. オブジェクトベースの音声技術：サウンド要素を個別のオブジェクトとして扱うオブジェクトベースの音声システムの採用が進んでおり、音場再現においてより柔軟性が増えています。
5. リアルタイム処理の向上：音場再現におけるリアルタイム処理能力の向上により、より精密な空間的表現が可能になり、レイテンシーが低減しています。
6. 部屋の音響シミュレーション：様々な環境での部屋の音響をシミュレーションし再現する技術の進展があり、異なる環境でのより正確な音場再現が可能になっています。
7. バイノーラル再生技術の発展：標準のヘッドフォンを使用して立体的な音の知覚を作り出すバイノーラル再生技術の進展があり、音場再現における空間的リアリズムが向上しています。

これらの進展は、エンターテインメントやゲームからコミュニケーションや仮想環境まで、様々な分野でより没入感のある、リアルな、そして個々に合わせた音響体験を提供することを目指しています。

見事にそつなく、満遍なくまとめている。この中でも、1, 2, 5, 6, 7あたりは、「物理的な再現」に関わるものの、3, 4は主にエンタメやゲームで新しい音場の表現を模索するものであり、「芸術的な表現」に関わるものである。自分が感じているトレンドと、感覚的にはあまりずれておらず、安心したところである。

一度、波面合成法を提唱した研究者とお話する機会があったが、「普及させるには、コンテンツをどうやって永続的に提供できるかが大きな問題」と言われていた。これはどの手法でも同じかもしれない。普及という観点では、収録から再生までがDAWで完結でき、コンテンツ作りのツールが提供されているアンビソニックスが、性能というより使い勝手の意味で抜きん出ている印象を持っている。もちろん、高次アンビソニックスまでの利用を考えると、適切なマイクの調達が難しいという困難さも存在する。

どのような目的のために音場を再現するのか、ということに大きく依存するが、

・物理的に何らかの拠り所があり(出鱈目ではなく)、

1.3 立体音場再生技術の現状と展望

- ・工学的にも妥当な方法で実現できて(ある程度の数のマイク, スピーカで可能),
- ・価格的にも現実的な範囲で調達できて(べらぼうではない),
- ・しかも比較的簡単に取り扱いえて(DAW + Plugin程度で計算可能),
- ・芸術的な表現力も十分にある(作品の鑑賞などに耐えうる)

といったシステムが理想なのだと思う。この実現に向けて、種々の検討を行なっているところである。

また、本稿ではイヤホン・ヘッドホンでの聴取については触れていない。最近では上記Chat GPTの答えにもあるように、個人に合わせたレンダリング手法なども充実してきており、自分の耳の写真をアップロードすれば、適したフィルタを提供してくれるサービスも一般的になってきた。試聴した同僚が、目の前に置かれたスピーカが鳴っているのか、ヘッドホンで聞いているのかわからない程度の再現能力であると教えてくれた。それが一般的になってくると、また一味違う再生のトレンドができてくるのだと思う。

[参考文献]

- 1) 安藤彰男, 音場再現, コロナ社
- 2) 安藤彰男, 他, “立体音響技術の最新動向” ならびに, その後の一連の解説記事, 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, 8, 602-624, 2014
- 3) 尾本章, “音場計測・再生の最近の研究動向”, 日本音響学会講演論文集, 2-6-12, 2014, 9
同発表資料 <https://hdl.handle.net/2324/7159650>
- 4) 3次元音場の収録・再生手法 -騒音環境シミュレータとしての音場再生システム-, 騒音制御, Vol. 44, 4, 173-176, 2020
- 5) https://tacsystem.jp/products/innosonix/ma32_lp2
- 6) <https://pro.miroc.co.jp/solution/spat-revolution-ultimate-wfs-proceed2022-2023/>
- 7) <https://www.ambisonic.net/>
- 8) <https://www.acousticfield.jp/soundfield-sps200-tech>
- 9) <https://www.sennheiser.co.jp/sen.user.item/id/11116.html>
- 10) <https://rode.com/ja/microphones/360-ambisonic/nt-sf1>
- 11) <https://zoomcorp.com/ja/jp/handheld-recorders/handheld-recorders/h3-vr-360-audio-recorder/>
- 12) <https://plugins.iem.at/>
- 13) 例えば <https://synthaxjapan.blogspot.com/2018/12/reaperiem-plugin.html>
- 14) <https://www.facebook.com/mhacoustics/>
- 15) <https://www.zylia.co/zylia-zm-1-microphone.html>
- 16) 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の理論”, 日本音響学会誌, Vol. 53, 9, 709-713, 1997
- 17) <https://www.caskacoustics.co.jp/>
- 18) <https://leomccormack.github.io/sparta-site/>
- 19) 尾本章, “方向別インパルス応答を用いた簡易音場再生手法”, 騒音制御, Vol. 47, 4, 145-148, 2023

参考文献のうち、URL記載のものについてQRコードを示す。いずれも2024. 1. 25閲覧

3)	5)	6)	7)	8)
				
9)	10)	11)	12)	13)
				
14)	15)	17)	18)	
				