

2019 年度研究課題設定のためのメモ

1. 概 要

尾本研究室では、従前より比較的小規模な閉空間内音場の「計測・評価・制御」を柱として、建築音響と電気音響の中間あたりでやや建築音響よりも位置付けられる研究を進めています。特にここ 10 年近くは、獲得した外部資金の関係で、「音場再生」や「音場移設」を中心に具体的なテーマを設定してきました。CREST による音響樽や音積木の構築が代表的な成果物です。2016 年 3 月で CREST の研究期間は終了しましたが、樽は残存していて、施設公開やデモンストレーションで活躍しています。また一昨年度から新たな科研費研究もスタートして、マイクアレイやグローバルイノベーションセンターに新しいシステムを構築しています。これらに付随して、音を収録し、再生できる A/D, D/A, DAW, インパルス応答を測定するソフトウェアなども一通りは揃っています。なお、スピーカを用いた手法にこだわりたいという個人的な思いもあり、ヘッドホン、イヤホンを用いた再生手法には踏み込んでいません。必要に応じてこれらのハード、ソフトの資源を駆使しながら、皆さんの興味、意向に沿った研究テーマを設定して、卒論、修論の執筆へと向かってもらえればと思います。

現在主要な音の入出力設備として以下のものが活用可能です。

- CREST で製作したもの（2010 年～2016 年）

- － フラールマイク：80 チャンネル
- － 音響樽：96 チャンネル再生装置@3 号館 1 階無響室測定室内
- － 音積木：48 チャンネル再生装置@音響特殊棟 1 階残響室内

- 科研費で製作したもの（2013 年～2015 年，2017 年～2020 年）

- － はりねずみマイク：AKG C568B 24 本，DPA 4017C 24 本
- － 24 チャンネルスピーカアレイ：Genelec 8030/8040 @音響特殊棟 1 階残響室内 半無響室
- － 24 チャンネルスピーカアレイ：Genelec 8331A @グローバルイノベーションセンター

特に昨年度からは「音場再生システムの総合的な性能向上」を大きなテーマとして設定しています。やや漠然とした題目ですが、この大きな題目の下に、各自の副題を付随させるようなイメージです。この総合的な性能の向上は、以下の 4 つの条件を満たすことで達成できるという仮説を立てています。

- A) 再生が何らかの物理的な原理に基づいていること
- B) 聴取者の存在など、不可避な外乱に対して頑健であること
- C) チャンネル間の音量バランスの変更や残響の付加など、付加的な演出を受け入れる余地があること
- D) 映像情報との親和性が高いこと

皆さんの興味の対象となる場合は、コンサートホール、ステージ、車室内など様々だと思います。それぞれの考察において、直接的でなくても構いませんが、何らかの形で皆さんの研究成果がこれらの仮説の検証に向かうように意識してもらえると、研究室全体としての方向性が揃うので力強くなっていると思います。

以下に、昨年度までの研究を踏まえながら具体的な研究課題の例を示します。それぞれの課題の中に示す【必要な知識・やるべきこと】は、具体的に推進する際に必要なチェックリストにあたります。このリストが全て、という訳では無いですが、勉強する際の参考にしてください。

2. 具体的なテーマの例

★ 音場再生システムにおける物理的な「よりどころ」に関連した研究

仮説 A) と B) に対応する課題です。音場を再生する場合、自らの感性と職人的な技によって音源信号を作り、所望の場所に配置し、周りの音環境を作り上げることもできます。映画や音楽コンテンツなどの制作などに代表される、芸術的な音場の創造です。我々が目指す音場再生は、これとは少し異なり、音響理論や建築音響学の知見を用いて、何らかの物理的手法を「よりどころ」としてスタートする方法に設定したいと思います。

現在一般的に用いられている「よりどころ」は、聴取者の耳元で音場を再現するものとしてバイノーラル、トランスオーラルなど、またスピーカを用いてももう少し広めの領域を対象とした場合は高次アンビソニックス、波面合成法、境界音場制御などが代表的です。音響樽からの研究の流れで、主として境界音場制御を用いてきましたが、最近はアンビソニックスも一部取り入れています。また、マイクが持つ鋭い指向性をそのまま使う簡易的な方法もかなり有効であることが明らかになっています。

先輩達の考察から、どれも一長一短あり、またコンテンツの種類にも依存しそうなことがわかってきました。さらに、例えば低域は境界音場制御かアンビソニックス、高域は簡易的にマイクの指向性を用いるなど、複数の「よりどころ」を融合させる方法も有効です。これらの物理的な「よりどころ」に関連して、さらに具体化した以下のようなテーマが考えられると思います。

▶ 境界音場制御を用いた音場再生システムに関連した内容

- ・音響樽で用いられている境界音場制御の原理に関する課題です。マイクアレイで収録した音信号を音響樽などのシステムで再生するためには、逆フィルタを用いて再生場に特有の「歪み」を補正する必要があります。このフィルタ設計の規範は色々ありますが、試行錯誤で良いものを探しているのが現状です。フィルタの算出方法を勉強しながら、実際に音を聴き比べたり、物理測定によって性能評価する課題が考えられます。

- ・また、現在 24 チャンネルのはりねずみマイクと 24 チャンネルと Genelec スピーカの組み合わせに対しても境界音場制御を適用しています。この性能を定量的に把握し、評価して限界を知ることも重要な課題です。特に指向性マイクを使った場合に適した逆フィルタがあるのかを考えることも面白い課題になるかと思います。

▶ アンビソニックスを用いた音場再生システムに関連した内容

- ・80 チャンネルフラーレンマイクアレイや、24 チャンネルはりねずみマイクアレイを用いた収録信号を高次アンビソニックス係数を用いて展開し、複数のスピーカで再生する手法を確立する課題です。すでに出来上がっている部分もありますが、例えば DAW のプラグインで再生環境を構築し、性能を評価したり、境界音場制御との比較を行う課題などが考えられます。

▶ 簡易的な補正フィルタやスピーカの間引きに関連した内容

- ・はりねずみマイクと 24 チャンネルのスピーカを組み合わせたシステムでは、より簡易な逆フィルタとして、スピーカとマイクで得られる 24 組の主要な組み合わせだけを用いて、周波数・時間特性を揃えるフィルタを（適応的に）求めることも試みています。あるいは、再生するスピーカの数を低域で削減する方法も試みており、単純ではありますが、定位性能の向上など、内観報告の段階ながらも有効性が確認されています。このような簡易的な手法が、どの程度有効なのか、定量的に評価する課題も考えられます。できるだけシンプルなシステムで如何に良い音を出力するか、という課題といってもいいでしょう。

▶ 複数の手法の融合に関連した内容

・現在、低域は境界音場制御やアンビソニックスなど何らかの波動的な手法で、ある程度以上の周波数にはマイクの指向性、あるいはパンニングやオブジェクトベースの音源配置テクニックをつかう方法など、積極的に帯域を分ける方法が有効ではないかと考えています。このハイブリッド手法の確立と DAW での実装、性能評価も継続的に行なっていきたい重要な課題です。

▶ 方向別インパルス応答を用いたアップミックスに関連した内容

・境界音場制御やアンビソニックスとは異なる原理ですが、方向別に収録したインパルス応答を用いて、少ないチャンネルの音源信号を 24 チャンネルにアップミックスする再生手法が考えられます。これまでの検討ではその有効性が見込まれています。方向別に収録したドライソースとの組み合わせも有効な手法だと思います。どの程度の方向情報が必要で、どの程度再現できるのか、物理的な性能の定量的な検証と主観的な評価を継続的に行なっていきたいと考えています。

・これは仮説 C) にも関わりますが、アップミックスには、各チャンネルのバランスなどの「コツ」があるように思われます。このコツは物理的にどの程度正しいものなのか、不正確なものなのかなど、定量的に検討する課題も考えられます。

▶ 物理的な再現精度検証に関連した内容

・さまざまな再生手法を試みる際に、基本的な性能をどのように評価すべきかを確立する研究です。現在は MEMS マイクアレイを用いた波面の観測と、類似度を用いた定量的な評価が有効であることがわかっています。このような評価をどのような領域で行うべきか、主観評価との相関などを丁寧に考察する課題も考えられます。

・また、聴取者の存在などの外乱の影響も是非検討を行いたいです。どの手法がどの程度頑健なのか、定量的、定性的に把握できればと思います。

【必要な知識・やるべきこと】

- ☐ 境界音場制御やアンビソニックスなど物理的再生の原理の理解と実装
- ☐ 逆フィルタの各種算出手法に関する最近の動向調査と理解
- ☐ 多チャンネルマイクと多チャンネルスピーカの組み合わせでのインパルス応答測定手法の修得
- ☐ 再生音の主観的・客観的評価手法の理解と修得 ☐ DAW の操作方法修得
- ☐ 多チャンネルシステムでの収録・再生方法の修得 ☐ 音像定位の評価手法の理解と修得
- ☐ VST プラグイン制作 ☐ 適応信号処理など

★ 音場再生システムを用いた材料の物理特性計測に関する研究

音響樽や音積木、24 チャンネルスピーカなどの多チャンネル再生システムは、優れた音場再生装置であるとともに、多くのスピーカを有する測定装置にも成り得ると仮定しています。例えば内部に設置した材料に色々な方向から音波を入射させることで、インピーダンスなどの物理量を精密に測定することを想定しています。このために、材料表面での測定手法を習得する必要があります。すでに多くの研究が行われており、我々も EA-Noise 法などを用いた基礎的検討を行っています。更に我々の持つインテンシティ計測のノウハウを、材料の計測に活かさないかと考えています。

材料の表面近くにマイクアレイを設置してインテンシティを計測、材料のかわりに剛な材料があるときとのインテンシティの差をもとに、インピーダンスを精密に測定する試みです。ひょっとしたら 4

本のマイクは必要なく、2本で充分かもしれません。理論的な背景と既往の研究の十分なサーベイと実験的な検証が必要です。

この内容は、仮説 A) の中身を強化して、システムの工学的な基礎体力を鍛えるような課題だと位置付けています。

【必要な知識・やるべきこと】

☐ これまでに提案されている材料の音響インピーダンスの測定方法の調査（実験室・現場）

☐ 計測に適したインテンシティプローブの製作 ☐ マイクから PC への音の取り込み方法の修得

☐ 実験装置の取り扱い方法の修得

☐ 実践的な測定アルゴリズムの考案など

★ 音場再生システムにおける空間再現性能のコンテンツ依存性と演出の可能性に関する検討

仮説 A) と C) に関する内容です。音響樽や音積木、24 チャンネル再生システムなどにおいて様々な音場の再生を行なう場合、どの程度の音がどのように再現されれば良いのか、明確な指標がある訳ではありません。まずはスタンダードな方法として、建築音響分野において用いられている「音響物理指標」がどの程度再現されるかを検証してきました。ホールなどの特定の音場での収録・再生であれば非常に有効です。しかし、現在の音響樽や音積木で使っているデモ音源のように、一般的な音場で収録した音にはこの指標は通用しません。そもそも反射音で構成されている音場ではないことも多いはずです。

このように広く一般的な音場を対象にする場合、どのように再現性能を評価すれば良いのかを考える課題です。これは、その音場の性質を明確にすることともつながります。特定された性質を再現すれば、その場はうまく再生されたことになるわけですし、さらに人為的に特性を変化させることで、主観的な評価は高まる可能性もあります。特に仮説 C) に関連する演出を取り入れた課題は、システムの芸術的な表現力を強化するものと位置付けられます。現在のところ、以下の様な具体的課題を思い浮かべています。

▶ コンテンツの特徴を表す指標の構築に関する研究

・再生対象となる音場、つまり音場再生システムにとっては「コンテンツ」の種類によって、適した再生方法があると考えています。例えばコンテンツが音楽演奏などであれば、ステージ方向から伝わってくる音にはそれなりの音量が必要であり、取り巻く方向からは反射音に応じた大きさで再生されるべきでしょう。一方、コンテンツが自然音や移動性の音源である場合、各方向からの音は一律なエネルギーバランスを有していて良いと思われます。この区別のために、音場で収録を行う際の方向情報の時変性を鍵として、指標化できないかと考えています。

・例えば、インテンシティを用いた反射音可視化システム、VSV (Virtual Source Visualizer) の測定時に算出していた反射音到来方向の均一性指標、Uniformity of Arrival Direction, UAD を時間関数として $UAD(t)$ と定義しなおし、この積分などを行うことで単一の値とする方法や、あるいは変化の度合いを定量化することを足がかりにできないかと考えています。

・この達成のために、4 チャンネルの測定からリアルタイム、あるいは計算で $UAD(t)$ を算出する方法を確立する必要があります。何も最初からハードウェアを意識する必要はなく、収録したデータから地道に計算すれば良いと思われます。また、はりねずみマイクのどの個体で最大の音圧が得られたかを時々刻々追跡する方法なども試みてもらっています。コンテンツの違いによる

性状の違いは確実にあると思われますが、これをどの様に定量化し、評価指標として成立させるかが鍵になります。すこし難しい課題ですが、継続的に考えてもらえると良いかと思います。

▶ コンテンツに応じた演出導入に関する研究

・再生するコンテンツによっては、例えばコンサート会場のステージの方向など、特定の方向の再生音圧を上げたほうが、評価が向上することが経験的に明らかになっています。またステージ近辺で別途録音した「オンの」音をミキシングすることも非常に有効です。このような演出で、物理的な再現性能はどの程度低下し、主観的な評価はどの程度変化するのか、定量的に検証することは非常にユニークで面白い課題だと思われます。

▶ VRAWS による残響付加の影響に関する研究

・反射率可変の音響壁面システム、Variable Reflection Acoustic Wall System, VRAWS を用いて残響を付加し、再生音場を演出対象にする内容です。これまで、色々な形式を試みて、現在は Genelec のスピーカにヤマハのサンプリングリバーブで生成した残響成分を出力する方式を多用しています。全チャンネルを動作させるためのハウリングキャンセラなどが無いため、限定的にはなりますが、VRAWS によって生じる反射音（もどき）の変化が、音場の物理的、心理的な変化にどのように寄与するかを考察できればと思います。

【必要な知識・やるべきこと】

- | | |
|---|---|
| ☐ 多チャンネルシステムでの収録・再生方法の修得 | ☐ DAW の操作方法修得 |
| ☐ インテンシティ計測手法の理解と修得 | ☐ VSV, UAD 算出原理の理解と修得 |
| ☐ ステレオ録音手法の調査と理解、修得 | ☐ 音場の空間印象の評価手法の理解と修得など |
| ☐ VRAWS の動作方法の修得 | ☐ 音場再生装置としての基本的動作の修得など |

★ 音場再生と映像情報との融合に関する研究

仮説 D)、つまり音場再生システムに映像を付加した場合の性能向上に関する検討課題です。どのような方法でどの程度の映像を付加すれば効果的なのか、継続的に検討していきたいと思っています。同時に、多チャンネルの特性を活かして、既存の音場を再現するのみではなく、新しい表現のツールとして用いることも試みたいと思います。作品作りなどに積極的に用いてもらい、どのような種類のコンテンツが再生に適しているのか、評価の軸はどのようなものかを探る研究へと繋がればと考えます。

▶ 映像提示のためのワークフロー確立

- ・現在のところ、他学科、他コースの皆さんの力を借りないと、360 度の映像が提示できない状況です。完成度の高い全周映像にこだわらず、スピーカの間を埋めるディスプレイによる簡易提示などの効果も探れればと考えています。
- ・いきなりシステムを構築することは難しいので、これまでの映像に関する知見の調査や、簡単な実験から始められればと考えています。

【必要な知識・やるべきこと】

- | | |
|--|--|
| ☐ 画像情報の提示方法の調査・実装 | ☐ 音と映像をシンクロさせて提示する手法の確立 |
| ☐ VR/AR への拡張手法の模索 | ☐ コンテンツ制作・提示の仕組みの検討 |

3. 研究をスタートするにあたって

▶ 文献調査 (Literature Survey) を徹底しよう

研究をスタートするとき、それまでに公表されている成果の調査をすることは必須です。例えば論文を学術雑誌に投稿しても、従前の文献調査などが不十分である場合（内容にもよりますが、通常は少なくとも数十編の論文を参照していないと）、内容を吟味する前にリジェクトされることがあります。いい加減な研究とみなされるわけです。英国の大学では研究プロジェクトをスタートする際、最初の1ヶ月程度が「Literature Survey」の期間として設定され、徹底的に過去の類似研究を調べたりしていました。

皆さんもそれぞれのテーマを考えるときには、これまでの研究を調べることを徹底してください。そのとき、先輩の論文を見るだけでなく、世の中に公表されている学術雑誌などを中心に、できるだけ広く調べてください。世の中には驚くほど多くの研究成果があります。検索のための Google Scholar などは強力な武器だと思います。十分に活用してください。

ただし、必要な文献はいつも Web 上にあるとは限りません。また学会の会員でないと見ることができないなど、限定的な場合もあります。すこし古い方法ですが、図書館を通して文献の複写を取り寄せることも可能です。費用は研究費から支出することができますし、到着までの時間も早いです。労力を惜しまず、図書館などに足を運ぶことも忘れずに。

また調べた文献は、いつでも参照して活用できるように工夫しましょう。九大図書館のホームページにも具体的なツールの案内がありますので参考にしてください。

<https://guides.lib.kyushu-u.ac.jp/referencemanagementtool>

なお、各課題に対応した卒業論文や修士論文はサーベイの入り口になるでしょう。これは冊子として尾本が持っていますし、電子的には研究室のデータ共有のための「残響サーバ」にもあります。ご活用ください。

また、これまでに研究室のメンバーが対外的に発表した論文や学会発表の梗概にたどり着くための情報は、九州大学の Web ページ内、尾本の研究者情報の研究活動にまとめています。

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K002321/research.html>

このサイトの情報から、実際の文献にたどり着くルートも確立してみてください。

▶ 読んでおいた方がよい本

広く内容を網羅して、授業ではカバーできていない基礎的な用語などを解説してくれる教科書的な位置付けとして、以下の文献をあげておきます。適宜ご参照ください。

- ★ 飯田, 森本, 空間音響学, 日本音響学会編 音響サイエンスシリーズ 2
- ★ 安藤, 音場再現, 日本音響学会編 音響サイエンスシリーズ 10
- ★ 飯田, 頭部伝達関数の基礎と 3 次元音響システムへの応用, 日本音響学会編 音響テクノロジーシリーズ 19
- ★ 原島, 超臨場感システム, 映像情報メディア学会編, オーム社
- ★ ウィリアムズ, 吉川・西條訳, フーリエ音響学, シュプリンガー・フェアラーク東京
- ★ 大賀, 山崎, 金田, 音響システムとデジタル処理, 電子情報通信学会
- ★ 前川, 森本, 阪上, 建築・環境音響学, 共立出版
- ★ クットルフ, 藤原・日高訳, 室内音響学, 市ヶ谷出版社
- ★ 久野 他, 建築音響, 技法堂出版
- ★ 橘, 矢野, 環境騒音・建築音響の測定, 日本音響学会編 音響テクノロジーシリーズ 8
- ★ Nelson, Elliott, **Active Control of Sound**, Academic Press
- ★ 上野, コンサートホールの科学, 日本音響学会編 音響サイエンスシリーズ 6
- ★ ベラネク, 日高, 永田, コンサートホールとオペラハウス, シュプリンガー・フェアラーク東京
- ★ メイヤー, 日高, ホールの響きと音楽演奏, 市ヶ谷出版社

▶ パソコンについて

多くの台数をメンテナンスする煩雑さと、最近の限られた研究予算に対応し、さらに学生さんに PC が必須となったことを勘案して、基本的に日常の研究活動には個人所有のパソコンを利用していただくことを想定しています。まずは Office, TeX などで、研究遂行に必要な環境を構築してみてください。

Matlab が必要な場合は、学生用ライセンスを購入していただくか、Python や Julia など、他の言語、環境でのプログラミングを検討していただけると助かります。その上で、著しく不便がある場合は別途相談してください。なお、いくつかの主要な測定用 PC (MacBookPro) や計算用 PC (iMac) には Matlab, Adobe Creative Cloud などインストールしていますので、規模が大きな計算や画像処理、精密な図の描画などにはご活用ください。

4. 研究の遂行と成果の発表

▶ 協力関係を構築しよう

上記 2 で紹介した具体的な課題を中心に、いろいろとアレンジしながら、皆さんそれぞれが主体的に取り組む課題を見つけてもらえれば良いと思います。一つお願いしたいことは、誰が中心的に取り組むにしても、すべての課題を「研究室全体で取り組んでいる」という意識を持ってもらうことです。課題を並べてみておわかりのように、実験や測定等を行なうことや、いくつかの内容が交錯していることが多いです。いつも一人やごく少数の限られた人数で行なうことは、効率もわるく、また機材の運搬や設置に伴う危険度も上がってしまいます。

もちろん論文をまとめる段階では、それぞれが考察して執筆を行なってもらう訳ですが、その前段階までは、「さまざまな課題にみんなで協力して取り組む」という意識を持ってください。大学院生と卒研生のコンビも良いと思います。この目的のためにも、4 つの仮説のどこに対応しているか、という観点を活用してもらえればと思います。

▶ 研究成果を発表しよう

また、自分の研究成果を、学会などで外に発表することを積極的に意識してください。日本音響学会は年に 2 回研究発表会を開催していますし、その中に設置されている建築音響研究会などは年に 10 回程度、全国各地を回る研究発表会を企画しています。計算や実験の結果がある程度まとまれば、それを対外的に発表できる形に整理してみてください。音響学会の梗概で 2 あるいは 4 ページ、研究会では 8 ページが標準です。

またそのような口頭発表で色々な意見を伺ったのちには、学術雑誌に掲載される論文を目指しましょう。この場合は比較的厳しい査読を乗り越える必要があります。同時にかんりの「実績」にもなり、企業などから皆さん自身に対する評価へと直接的につながります。

5. スタッフ紹介

現在、科研の事務の関係で以下の方に勤務して頂いております。出張やアルバイト（短期雇用）の手続きなどでお世話になることも多いと思います。ご承知おき下さい。

お名前	職 名	居 室	備 考
中牟田智子さん	科研・テクニカルスタッフ	3 号館 6 階 609 室	今年度は月曜から金曜まで勤務