

方向別インパルス応答を用いた音場再生・創生の試み

尾本, 章
九州大学大学院芸術工学研究院音響設計部門

<https://hdl.handle.net/2324/7347399>

出版情報 : 2025-03-07

バージョン :

権利関係 :



KYUSHU UNIVERSITY



方向別インパルス応答を用いた音場再生・創生の試み

An attempt of reproduction and creation of sound field
using directional impulse responses

尾本 章

九州大学 芸術工学研究院 音響設計部門

Akira Omoto

Dept. of Acoustic Design / Faculty of Design / Kyushu University

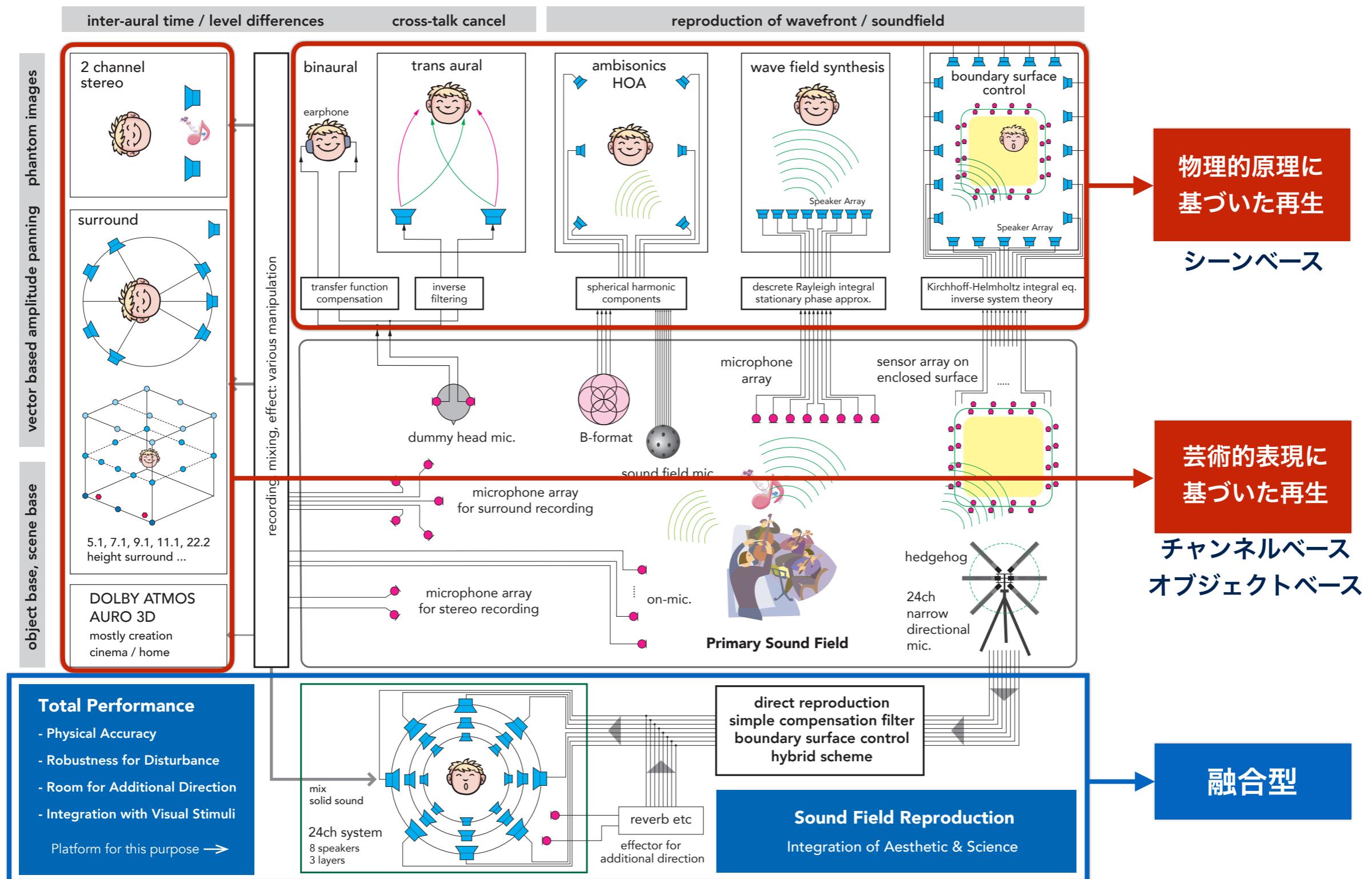


Table of Contents

- ❖ はじめに
- ❖ 音場情報の収集と再生
 - ▶ 具体的なシステム構成
 - ▶ 再生にあたっての信号処理～相関低減フィルタの提案
- ❖ 空間ミキシングを併用した再現方法
 - ▶ インパルス応答測定・畳み込み～空間ミキシングの提案
 - ▶ 音の収録（と伝送）による方法 + HME育成プログラム（余談）
 - ▶ 再現の精度と適切な評価指標
- ❖ おわりに



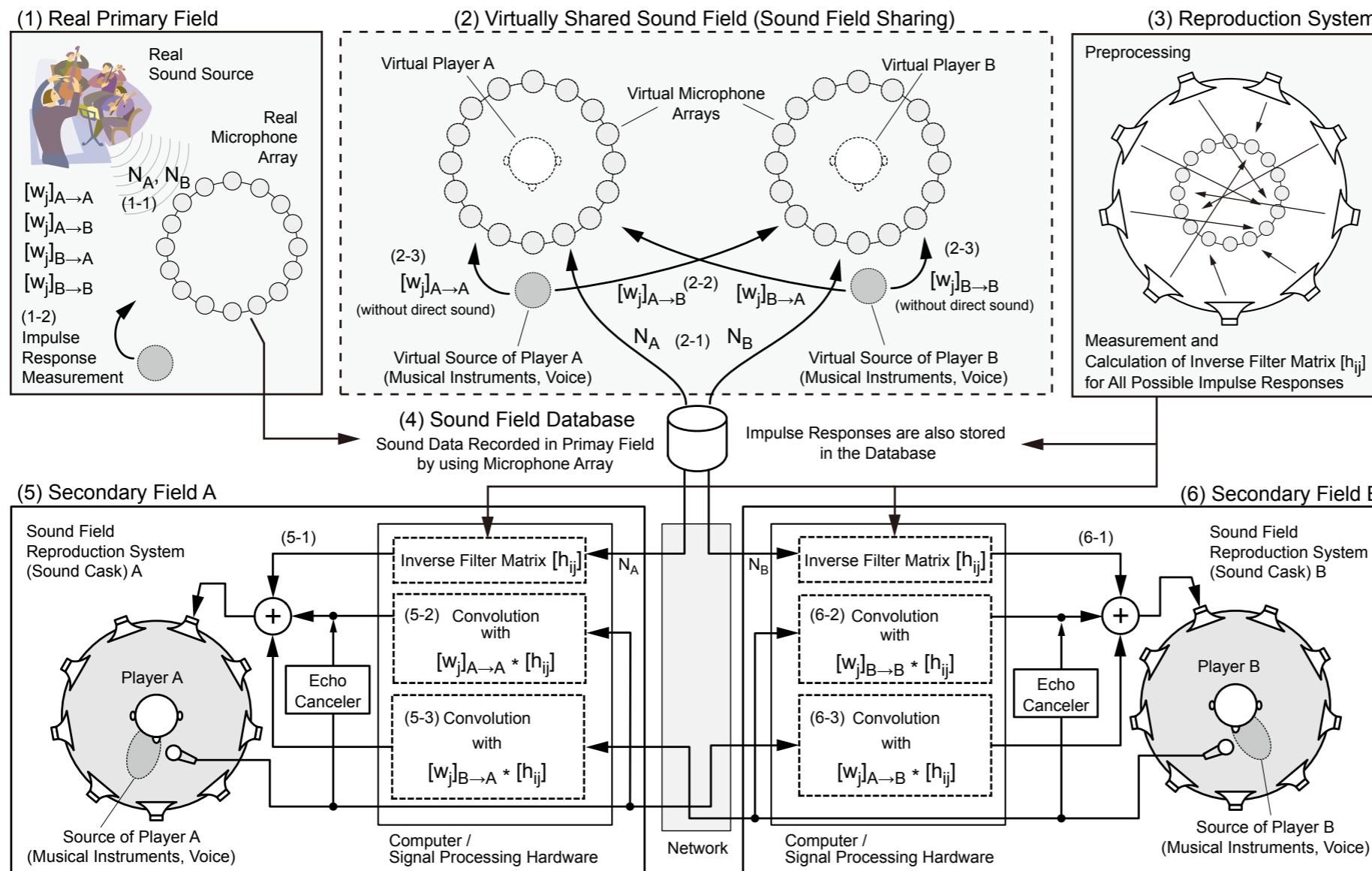
物理的音場再生と芸術的な音場創成



物理的音場再生と芸術的な音場創成～なぜこの研究？

❖ 物理的な音場再生

✓ 境界音場制御の原理に基づいた収録再生



A. Omoto, S. Ise,
et al., Acoust. Sci.
and Tech., 36,
1-11, 2015.



物理的音場再生と芸術的な音場創成～なぜこの研究？

❖ 物理的な音場再生

境界音場制御の原理に基づいた収録再生

80ch フラーレンマイク + 音響樽 (96ch)・音積木 (48ch)



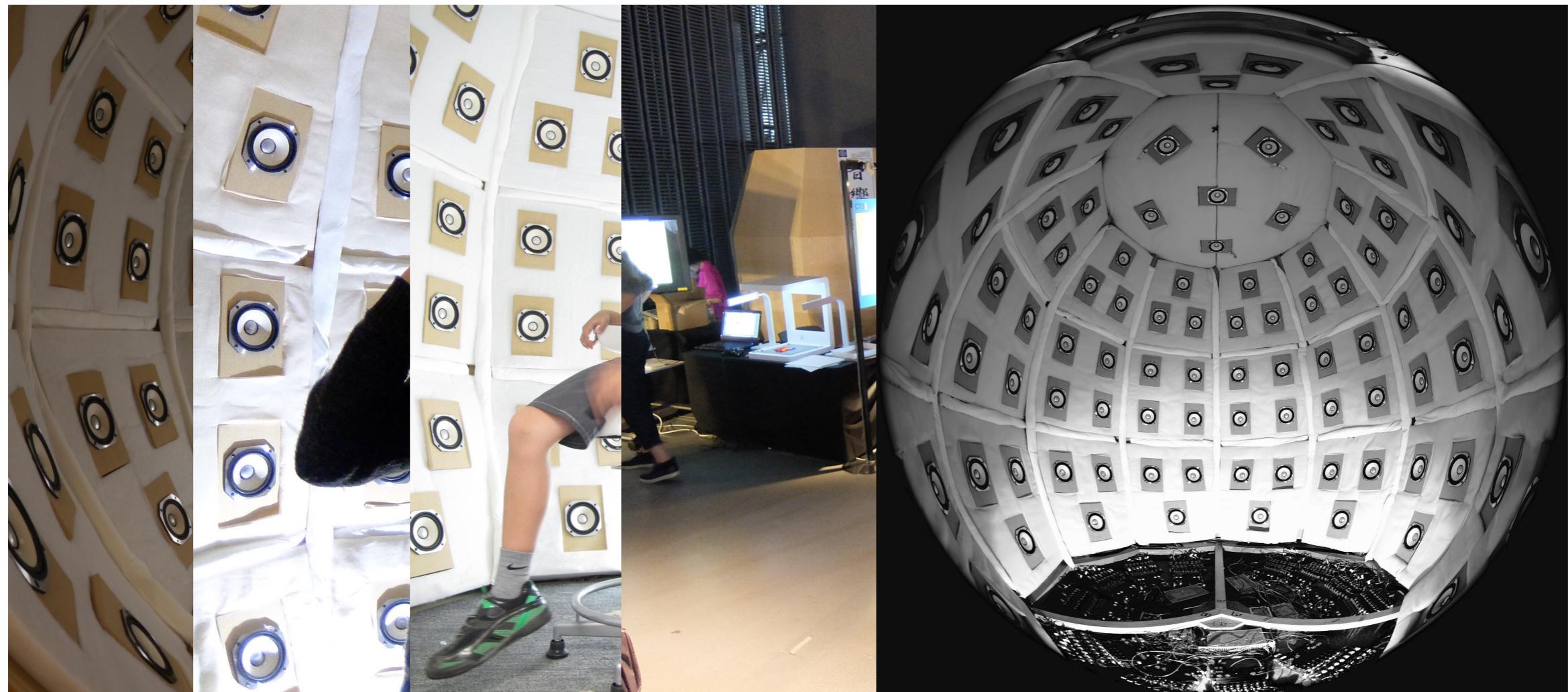


物理的音場再生と芸術的な音場創成～なぜこの研究？

❖ 物理的な音場再生

境界音場制御の原理に基づいた収録再生

80ch フラーレンマイク + 音響樽 (96ch)・音積木 (48ch)



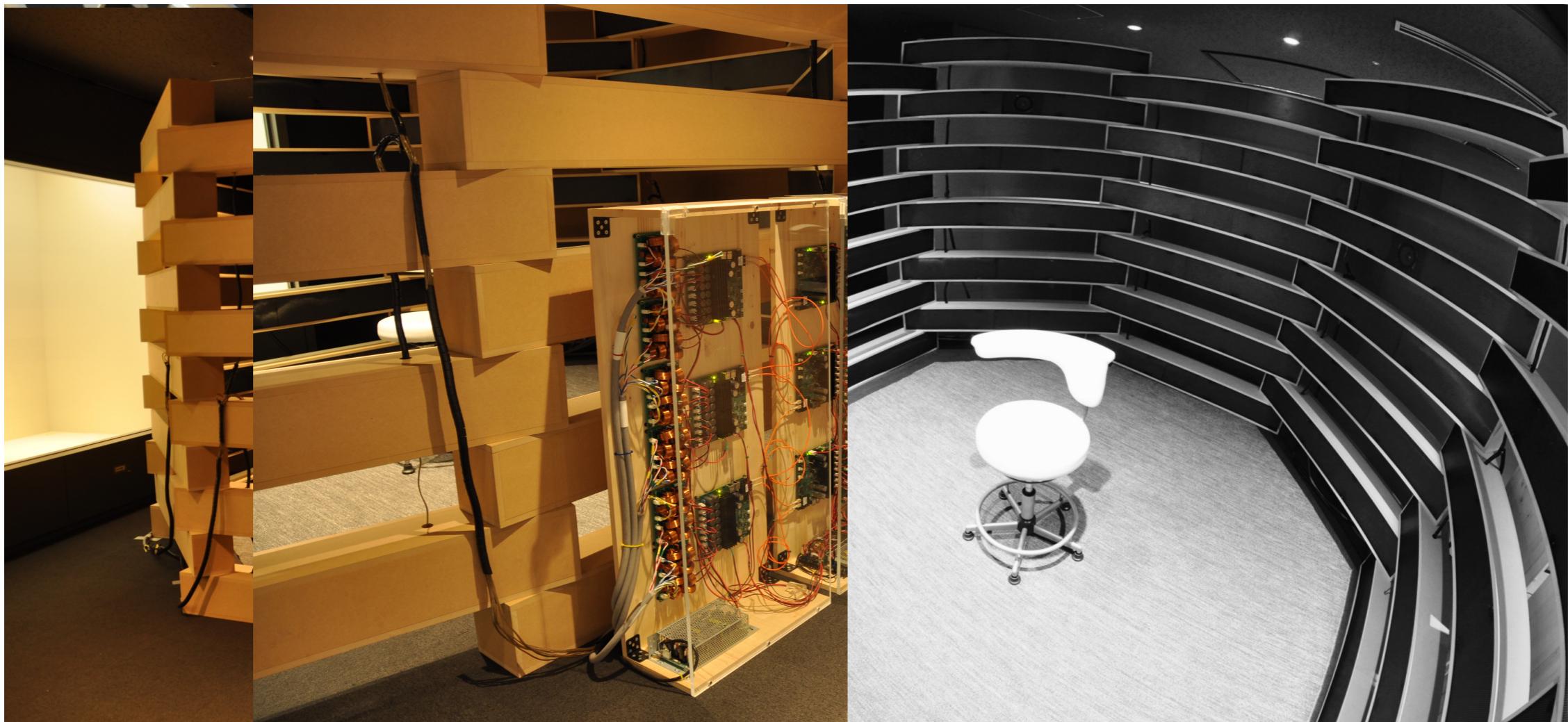


物理的音場再生と芸術的な音場創成～なぜこの研究？

❖ 物理的な音場再生

境界音場制御の原理に基づいた収録再生

80ch フラーレンマイク + 音響樽 (96ch)・音積木 (48ch)





物理的音場再生と芸術的な音場創成～なぜこの研究？

❖ 物理的な音場再生

境界音場制御の原理に基づいた収録再生

80ch フラーレンマイク + 音響樽 (96ch)・音積木 (48ch)

- ✓ Champion Model のひとつ
- ✓ 良い音との評判と、さらなる改善点の指摘
- ✓ 不可避な「正則化パラメータ」との関係性：理論的最適値は音的に最適？



- ★ 少しシンプルに、録音などで実績のある機材に頼ってみるか！
- ★ 指向性を大事にしてみるか！
- ★ ショットガンマイクにしてみるか！



SENNHEISER MKH416, MKH8060
AKG C480B+CK69ULS
FOSTEX MC35
Audio-Technica BP4073
RODE NTG3
Sanken CS-1e, CS-2, CS-3e

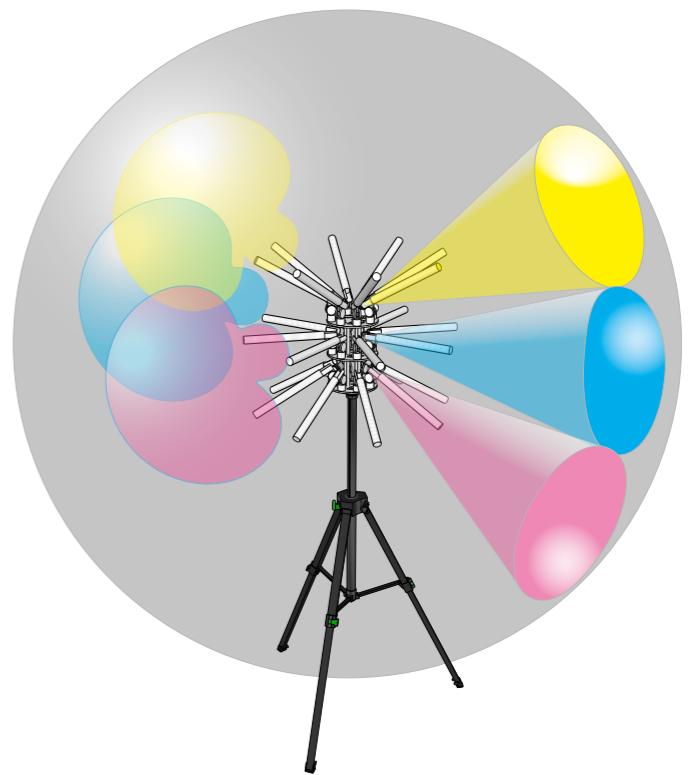
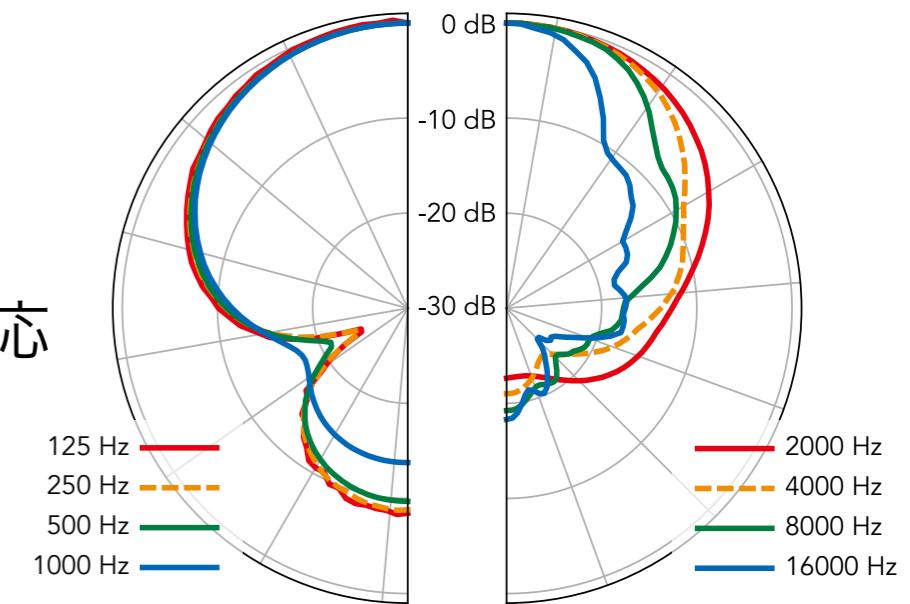
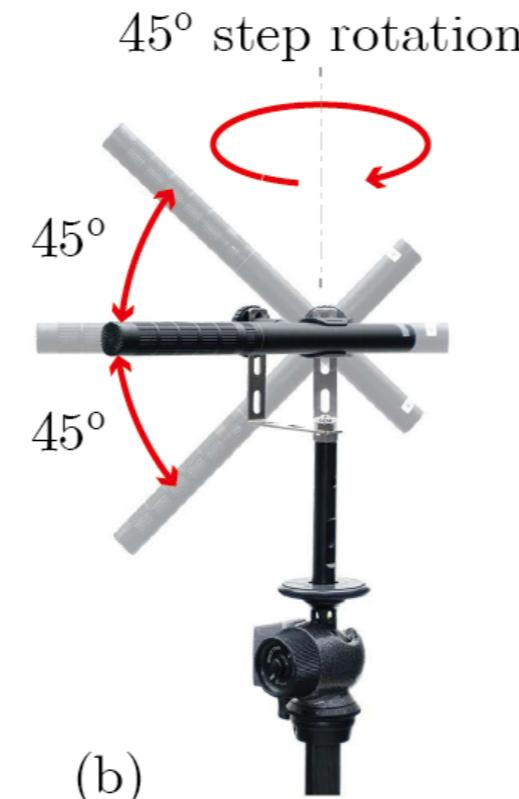
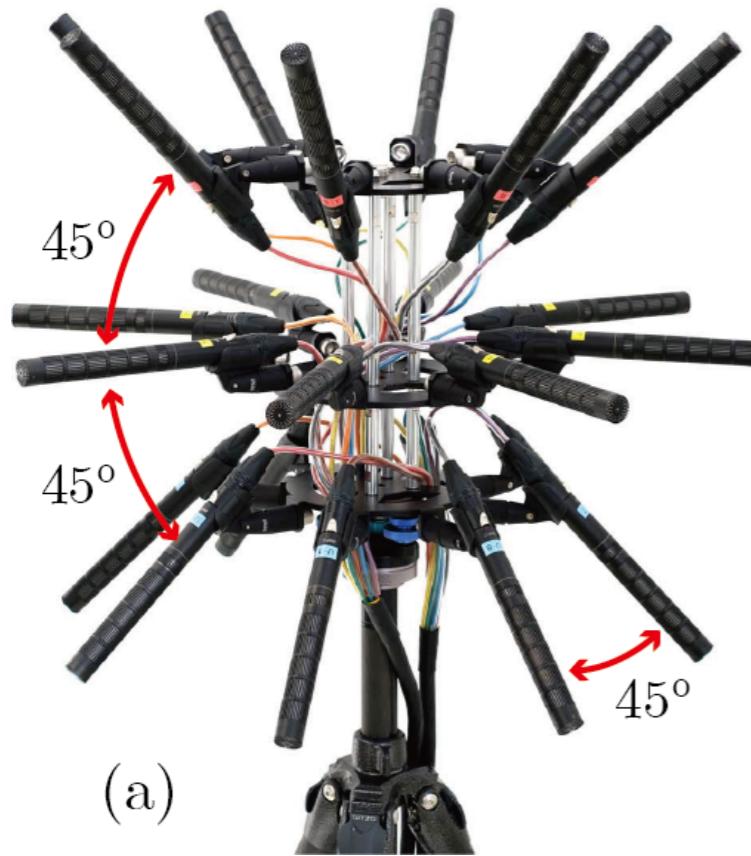
DPA 4017B
SCH0EPS CMIT5U
AKG CK8+C452EB
SHURE VP89
QUE AUDIO Que



具体的なシステム構成

❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネル 鋭指向性マイクロホンアレイ
- ✓ 同時収録・逐次インパルス応答測定の双方に対応





性能向上のために～システム構築のよりどころ～

A. 物理的な再生性能

- ✓ **波面の再生性能**：正確・精密な原音場の再現
- ✓ **音響測定に使える性能**：拡散度合いの算出

物理的な基礎体力
の強化

B. 外乱へのロバスト性

- ✓ **聴取者**：複数人数への（ある程度）正しい情報の提供
- ✓ **再生音場**：「雰囲気」をどの程度再現できるか

芸術的表現力
の強化

C. 演出導入の可能性

- ✓ **他の録音とのミキシング**：芯のある音の創出
- ✓ **残響付加**：再生音場での演出

D. 映像情報との融合

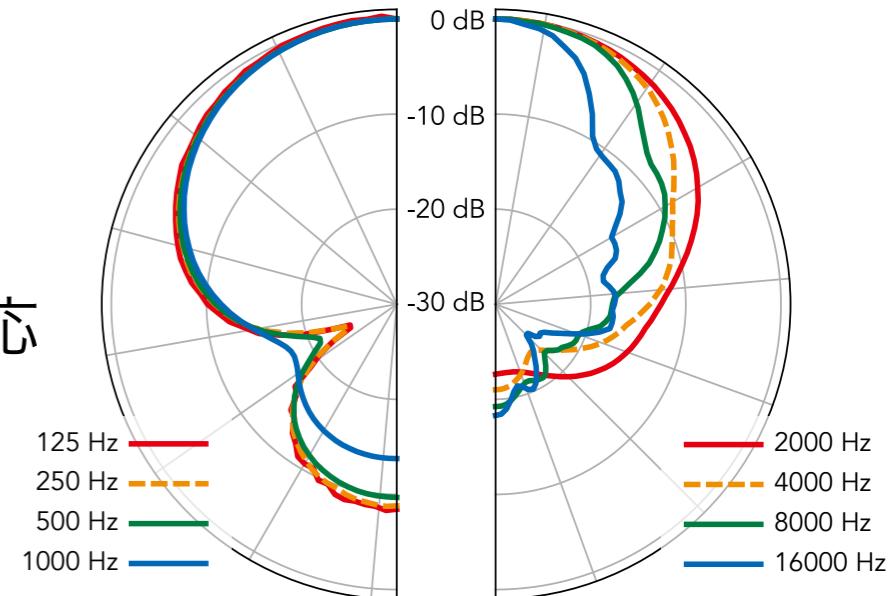
- ✓ **音と映像の相互作用**：定位感の向上などが達成できるのか



具体的なシステム構成

❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネル 銳指向性マイクロホンアレイ
 - ✓ 同時収録・逐次インパルス応答測定の双方に対応
 - ✓ 大きい Ver. も構築（低域カブリ改善のため）





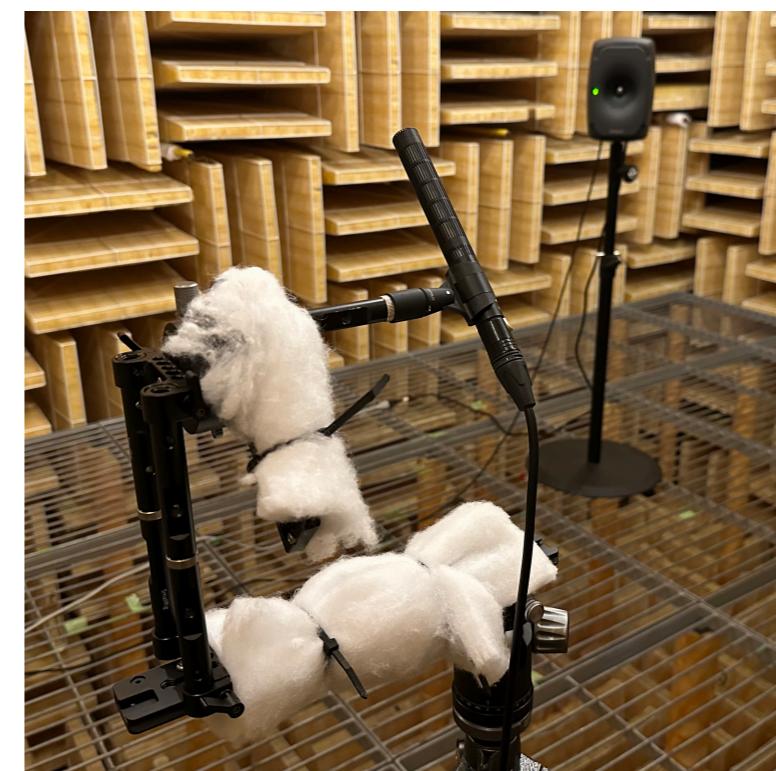
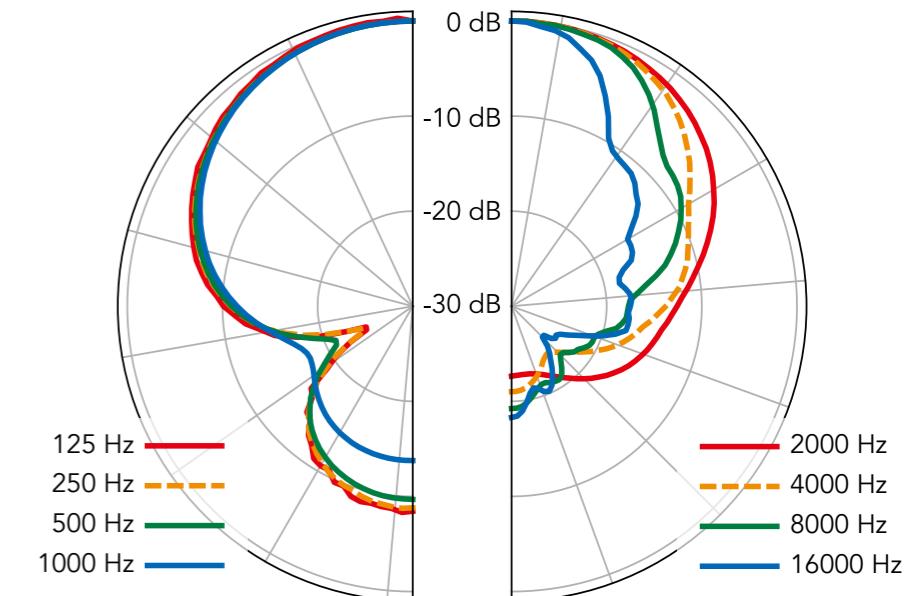
具体的なシステム構成

❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネル 鋭指向性マイクロホンアレイ

✓ 逐次インパルス応答測定の場合には

2ch, 1ch バージョンでつかうことも

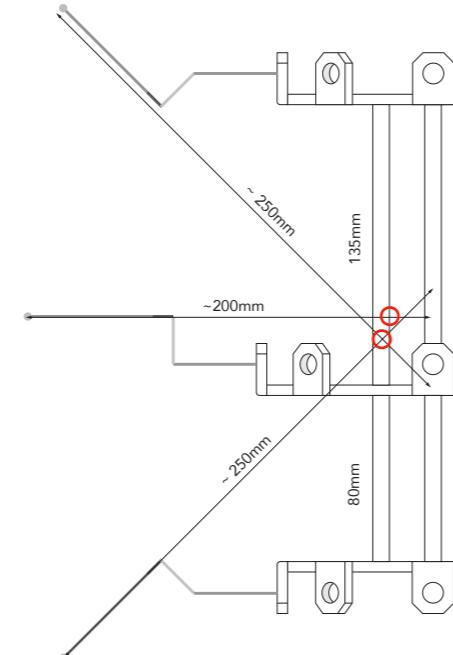




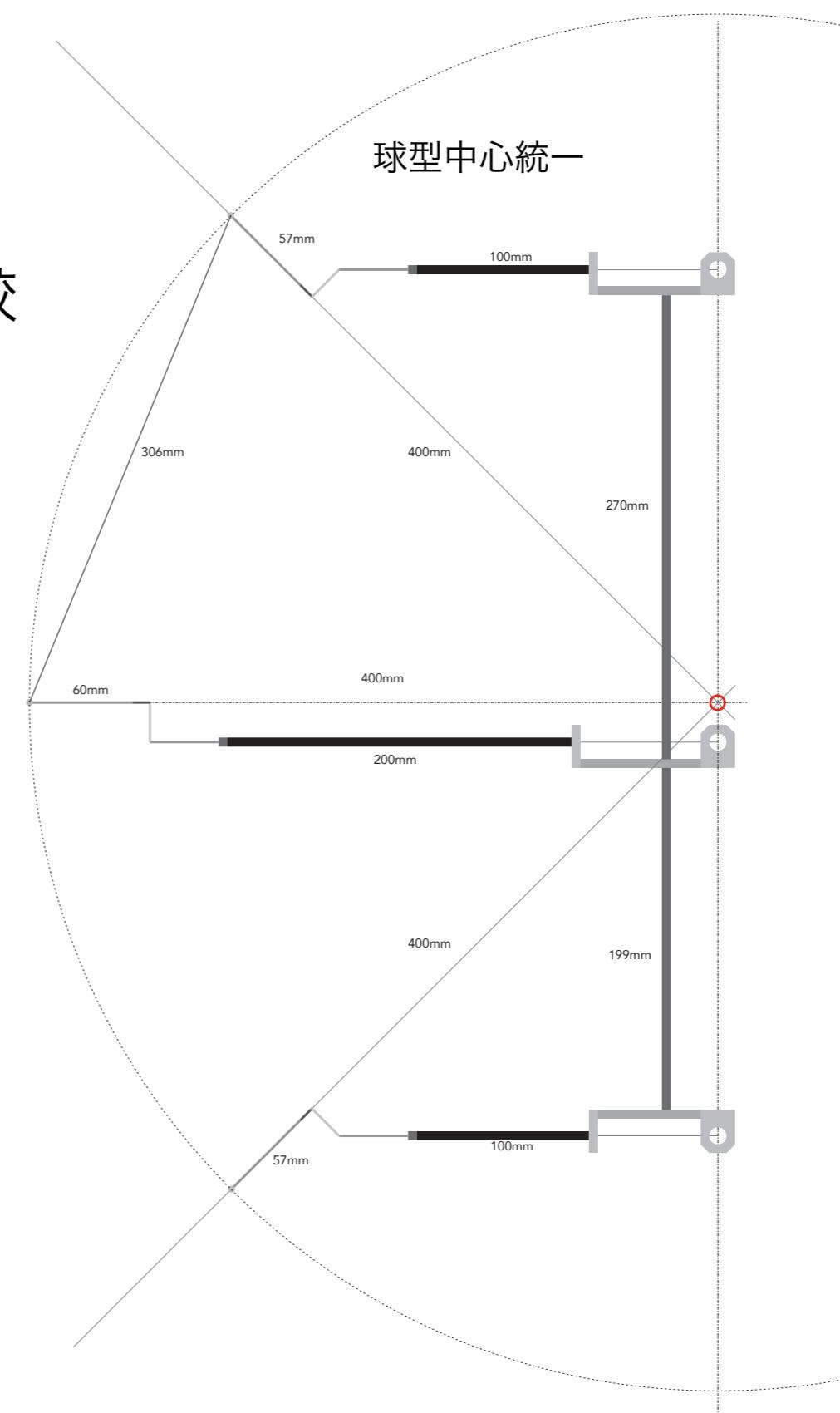
具体的なシステム構成

❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネルアレイ：大小の比較



なんとなくの円筒形
中心がややズレ

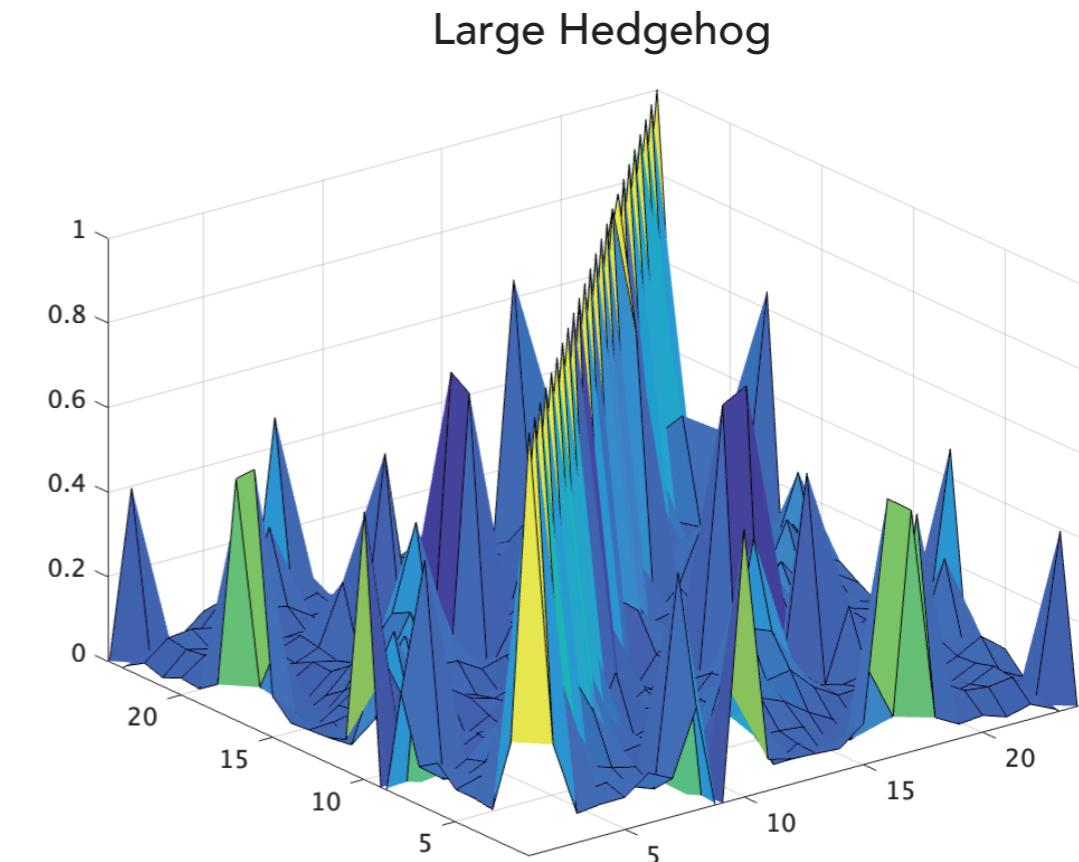
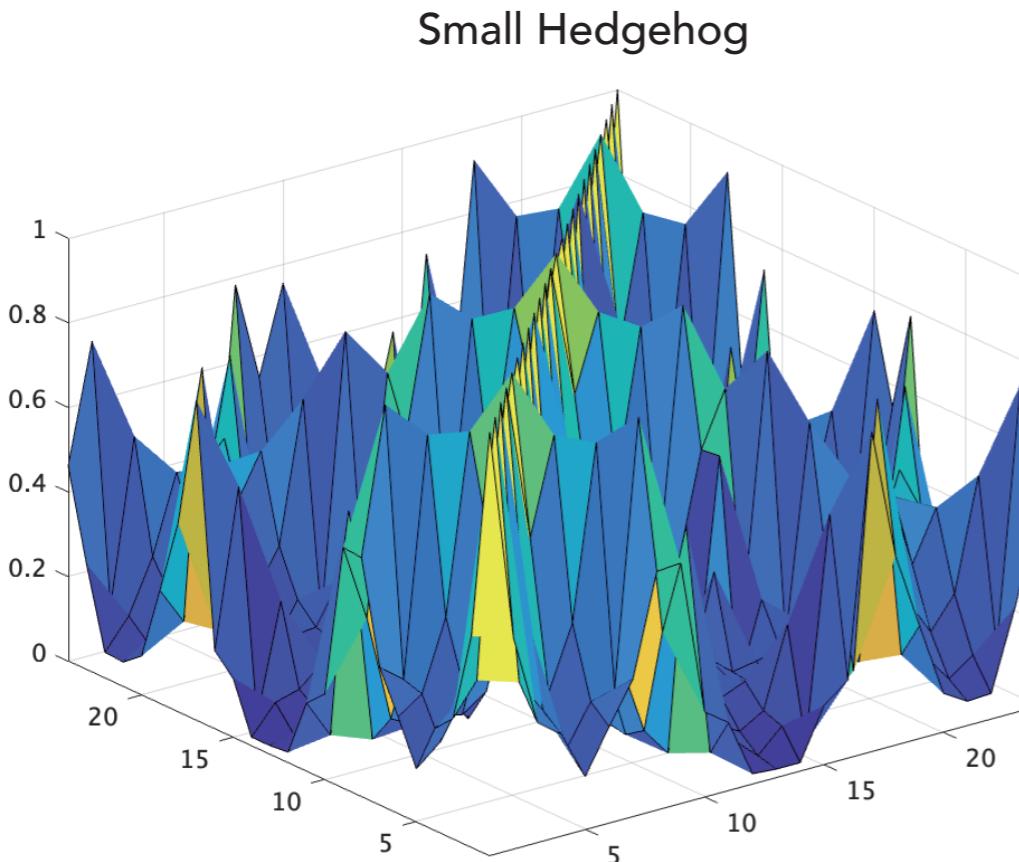




具体的なシステム構成

❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネルアレイ：大小の比較→マイク間相関係数



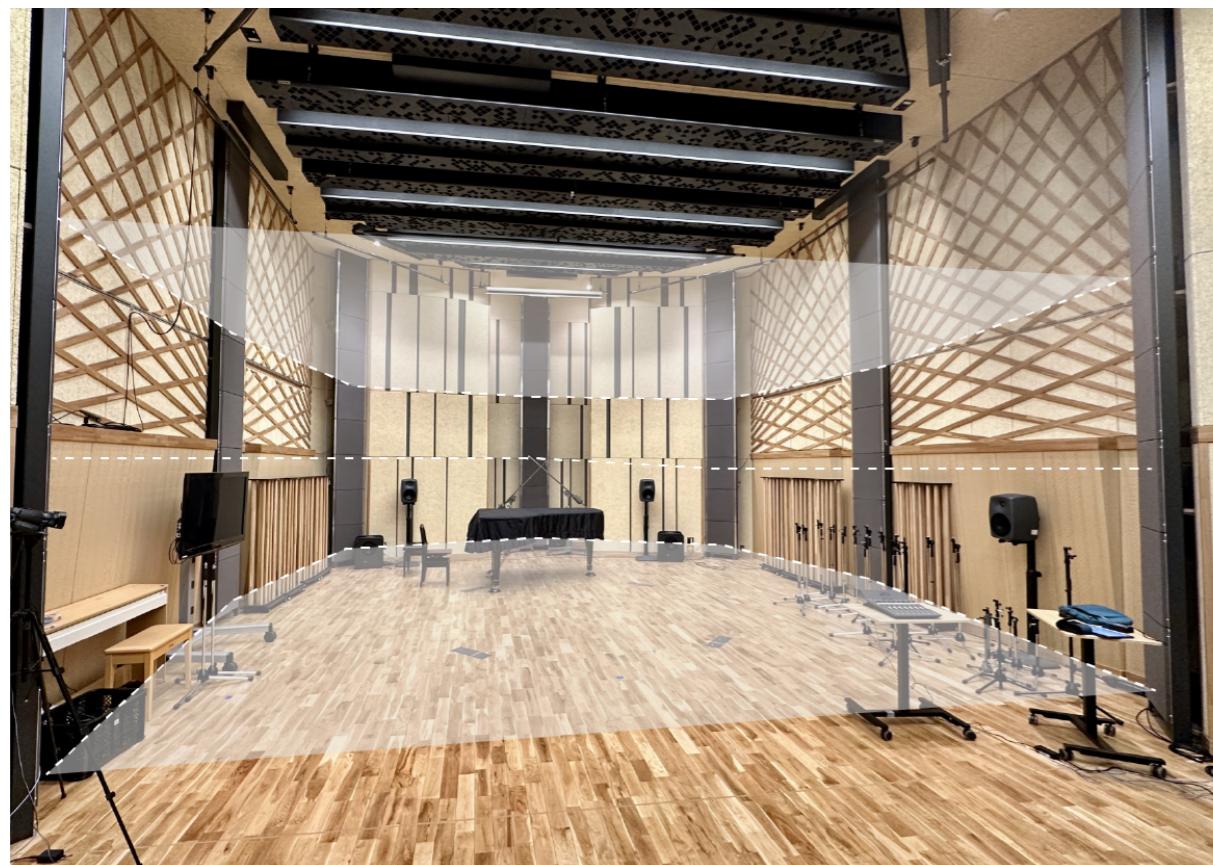
Correlation coefficient of 24-ch impulse responses measured in the concert hall
with reverberation time approximately 2.5 seconds.:
Frequency band was limited to [50 2000] Hz,



具体的なシステム構成

❖ 再生システム

- ▶ 24 ch スピーカアレイ
 - ✓ 収録マイクと同方位からの再生
 - ✓ 規模感や高さ方向の表現等には改善の余地あり

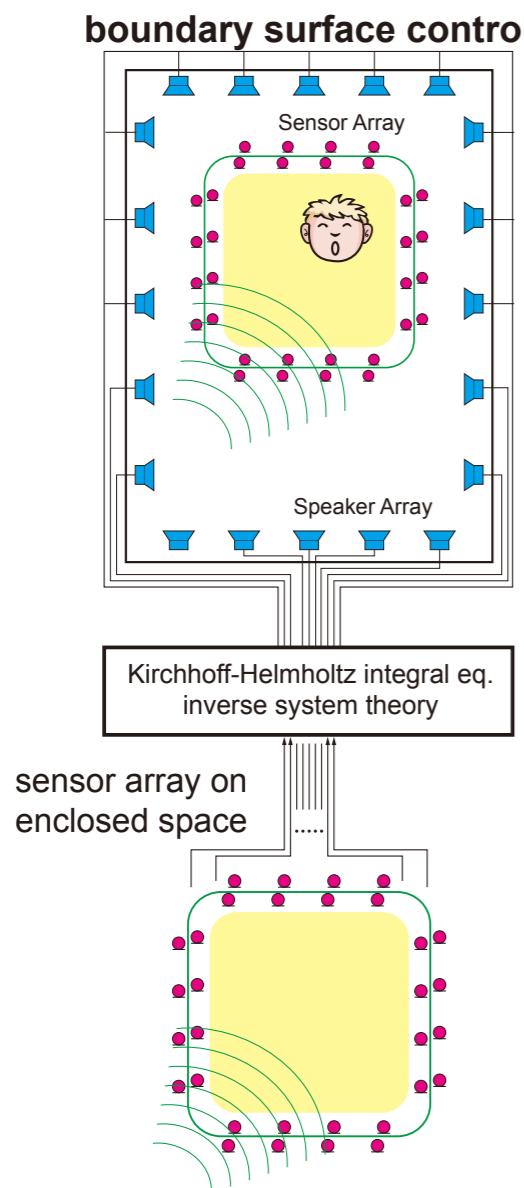


尾本, 山内, 高田, "九州大学大橋キャンパス 音響特殊実験施設の改修について"
建音研資料 AA2021-43



再生にあたっての信号処理

❖ 境界音場制御・HOA・ビームフォーミング

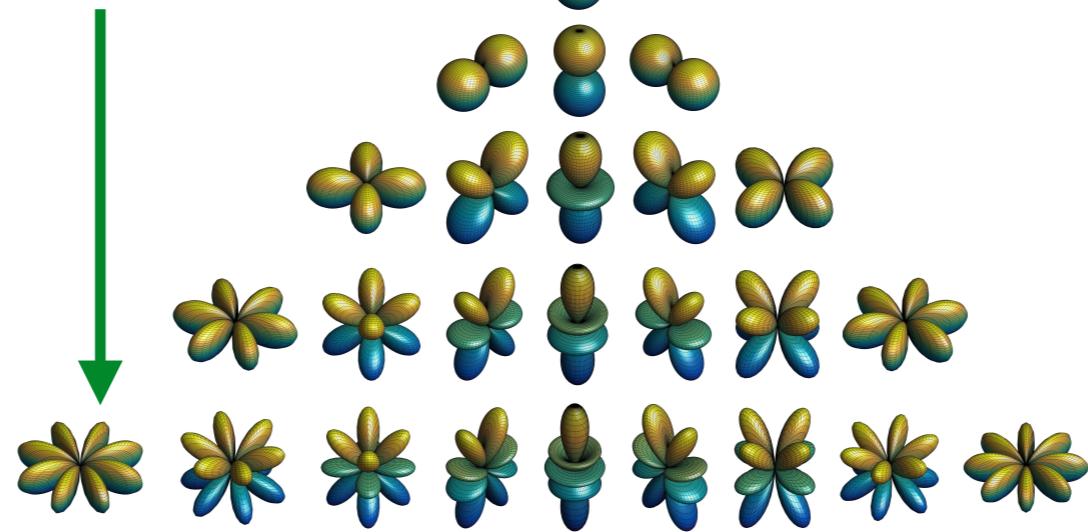


$$s(kR, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} W_n(kR) \sum_{m=-n}^n B_n^m Y_n^m(\theta, \varphi)$$

$$\mathbf{B}(k) = \text{diag}[1/W_n(kR)] \cdot \mathbf{Y}^\dagger \cdot \mathbf{s}(kR)$$

$$\mathbf{p}(kr) = \text{diag}[1/F_n(kr, kR)] \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{B}(k)$$

次数

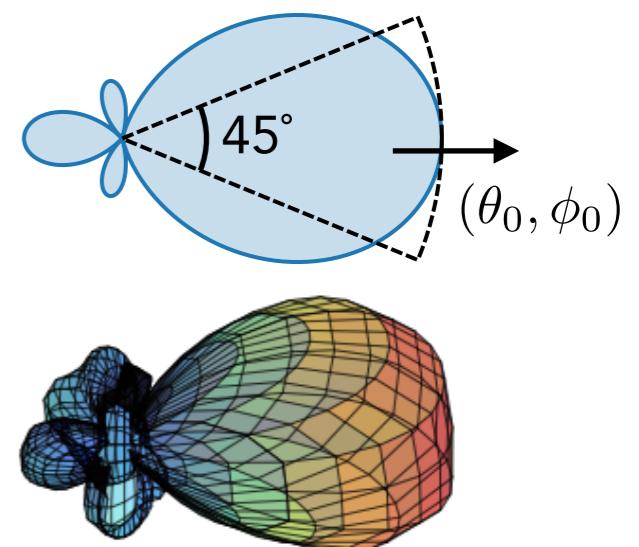


$$F(\theta_0, \phi_0)$$

$$= \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_n \sqrt{\frac{4\pi}{2n+1}}$$

$$Y_{n,m}^*(\theta_0, \phi_0) \frac{B_{n,m}(k)}{i^n}$$

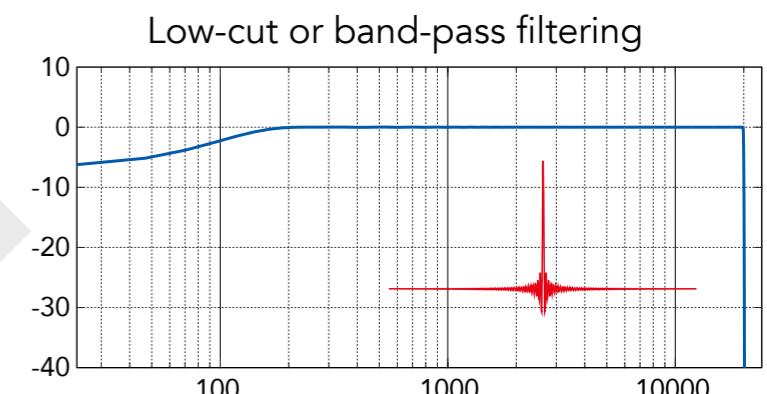
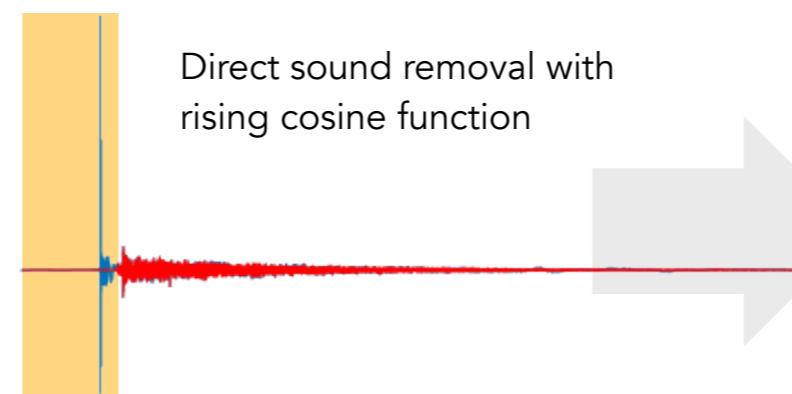
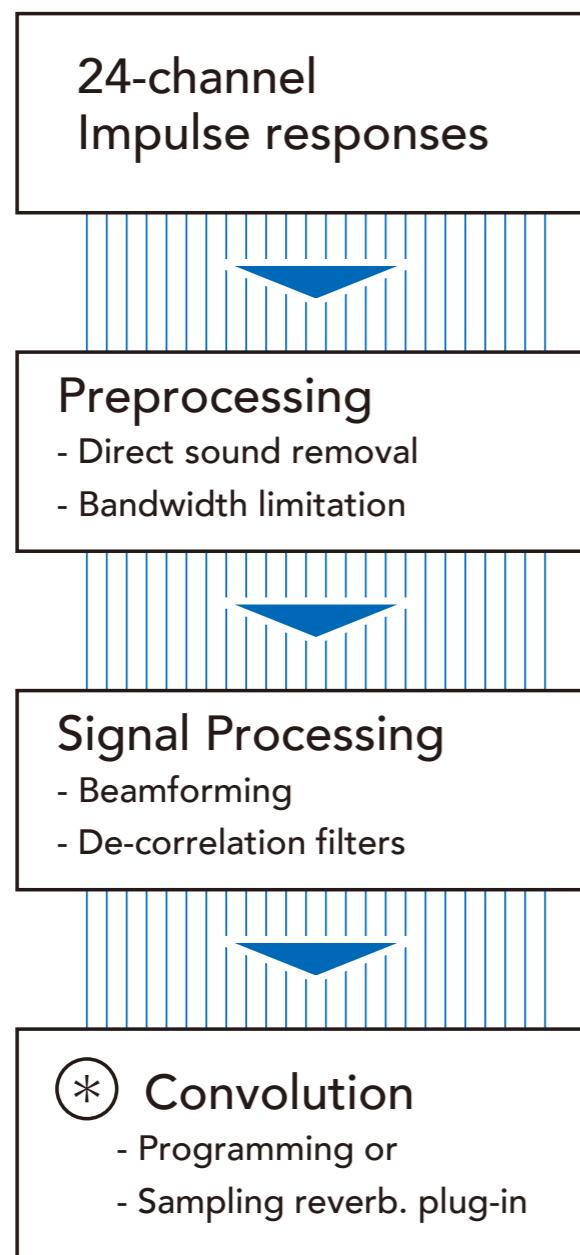
- Look-direction (θ_0, ϕ_0) is the same 24 directions as the Hedgehog array.
- Coefficients c_n are set according to the desired beam-pattern.





再生にあたっての信号処理

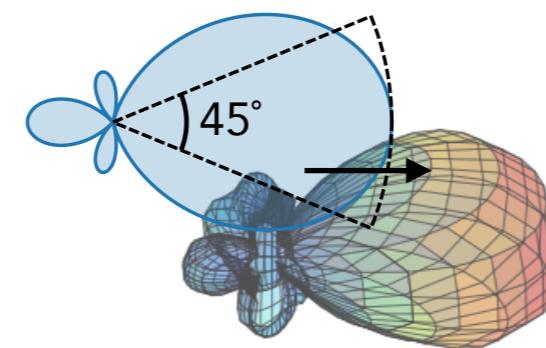
❖ 下ごしらえ的信号処理 ~ ビームフォーミング



$$s(\mathbf{r}, k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n B_{n,m}(k) b_n(kr) Y_{n,m}(\theta, \phi)$$

$$b_n(kr) = \alpha j_n(kr) - (1 - \alpha) i j'_n(kr)$$

$$\tilde{F}(\theta_0, \phi_0) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_n \sqrt{\frac{4\pi}{2n+1}} Y_{n,m}^*(\theta_0, \phi_0) \frac{B_{n,m}(k)}{i^n}$$

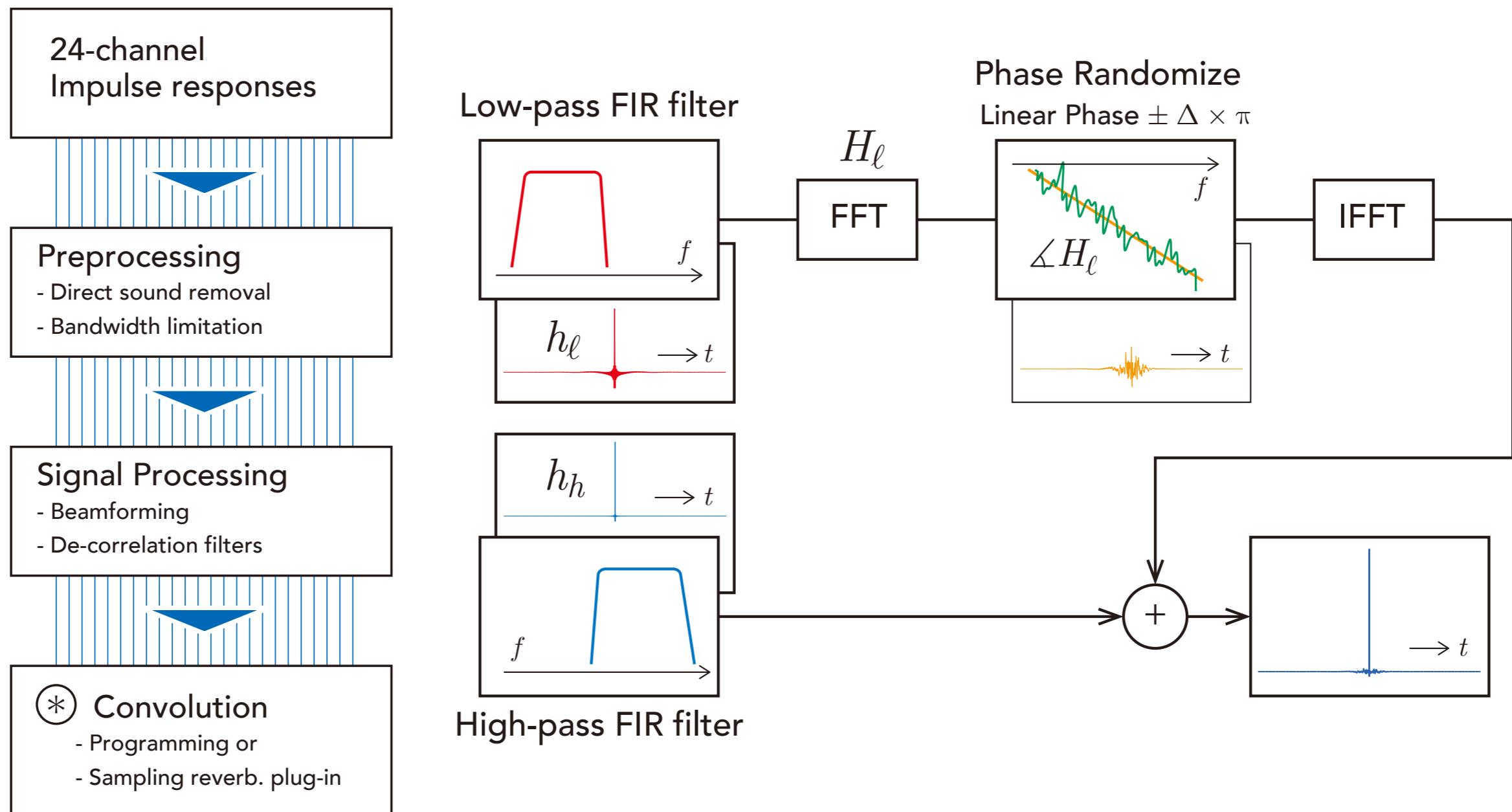


- ✓ インパルス応答の場合24個のフィルタ係数として整理可能
- ✓ DAWのプラグインに導入可能
- ✓ いずれも低域のみに処理 (<1.6kHz)



再生にあたっての信号処理

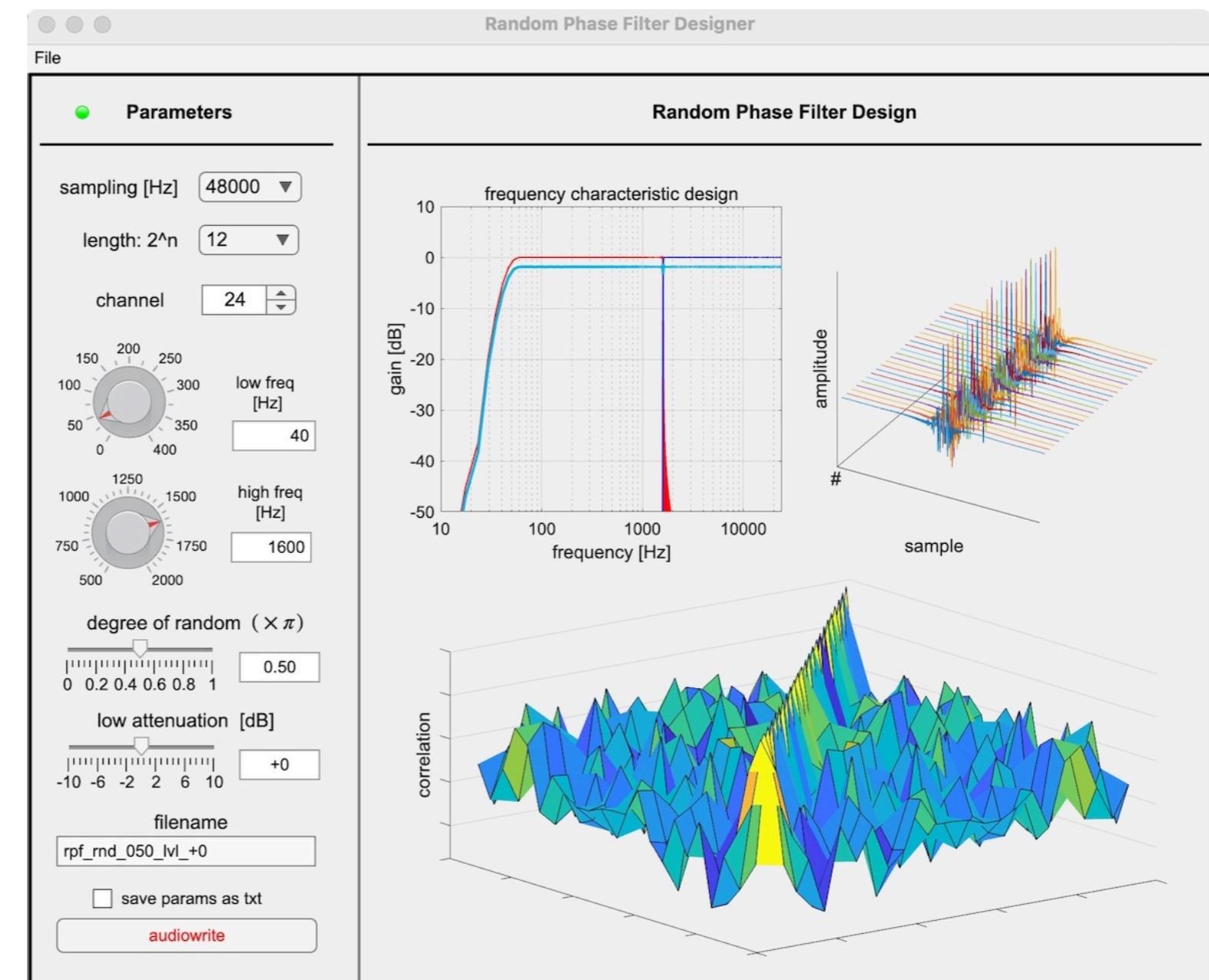
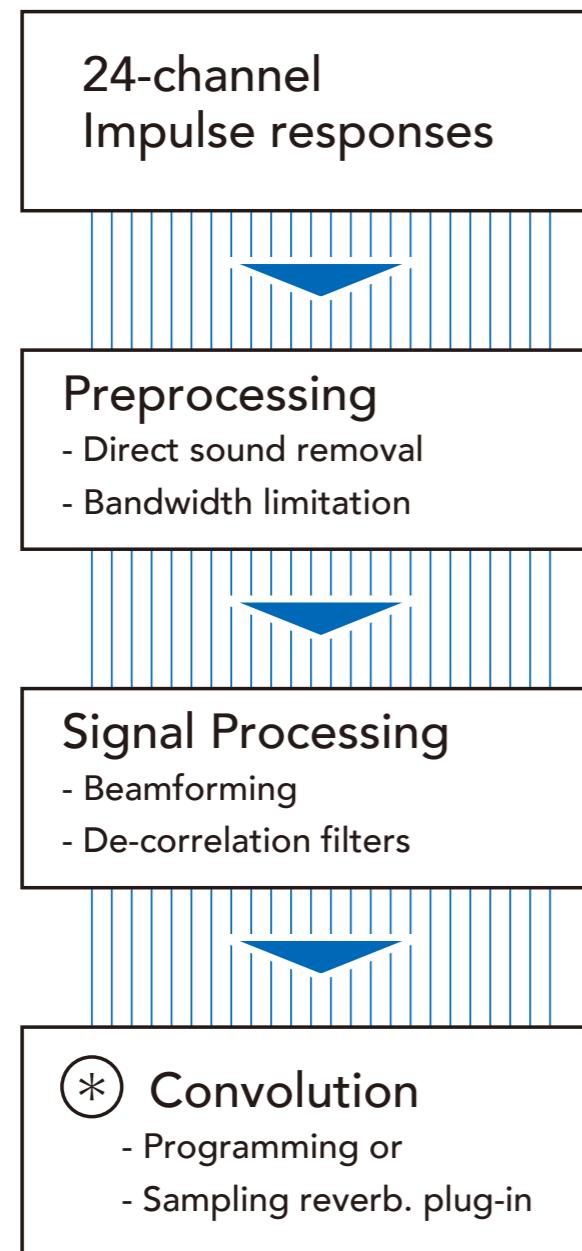
❖ 相関低減フィルタの提案





再生にあたっての信号処理

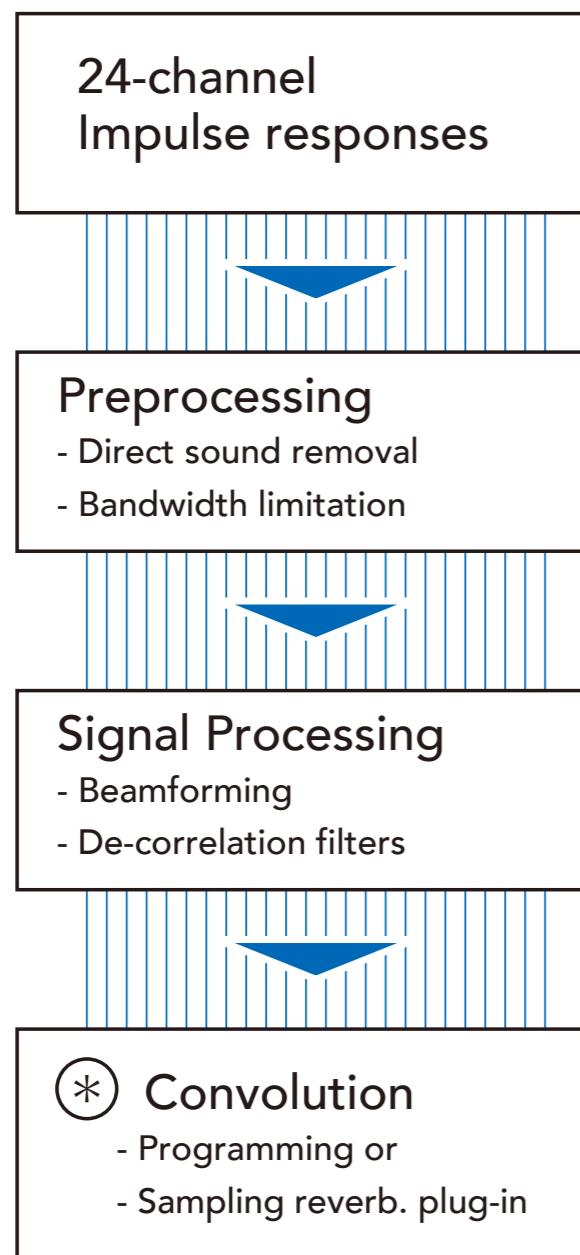
❖ 相関低減フィルタの提案



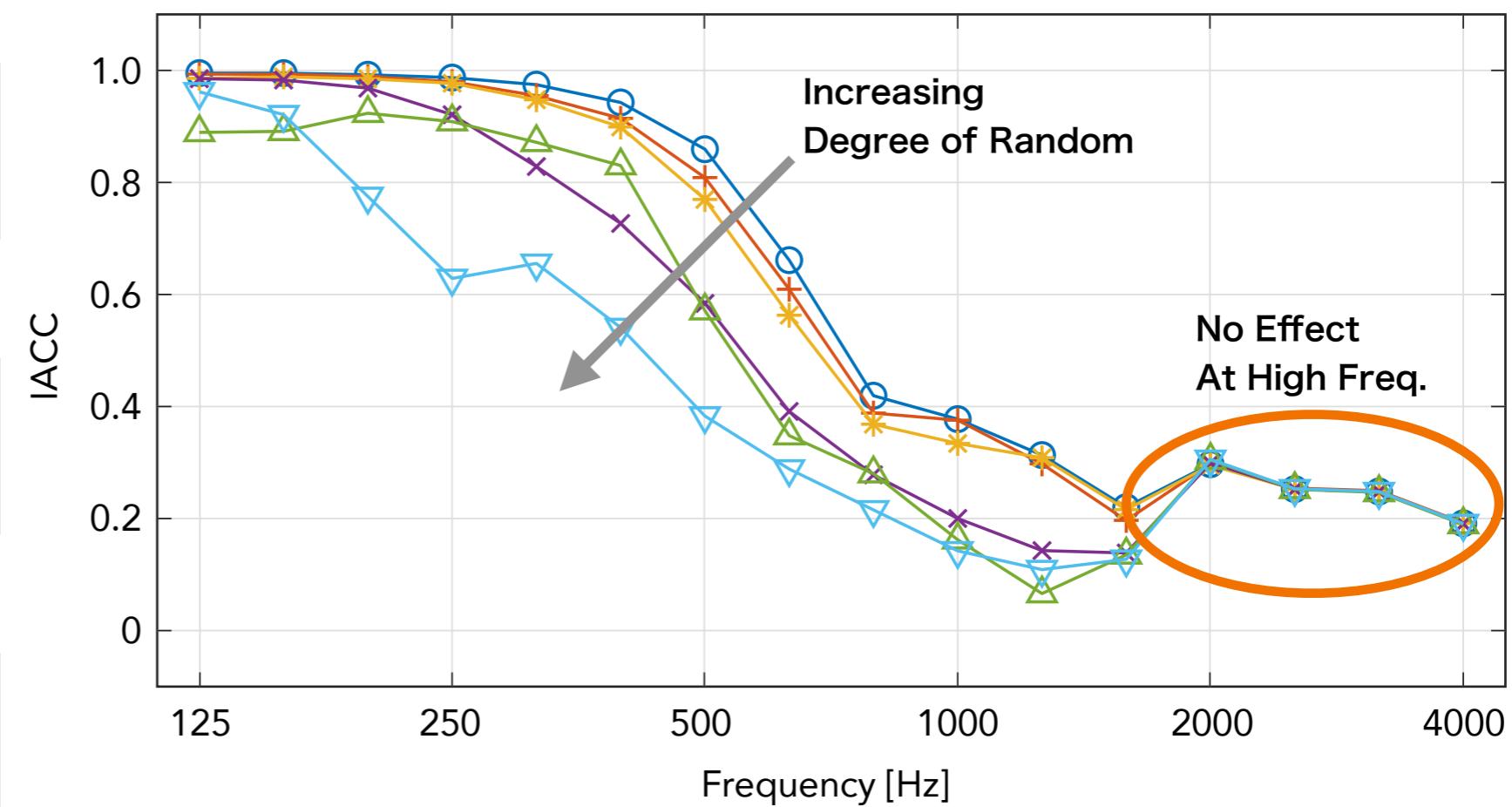


再生にあたっての信号処理

❖ 相関低減フィルタの提案



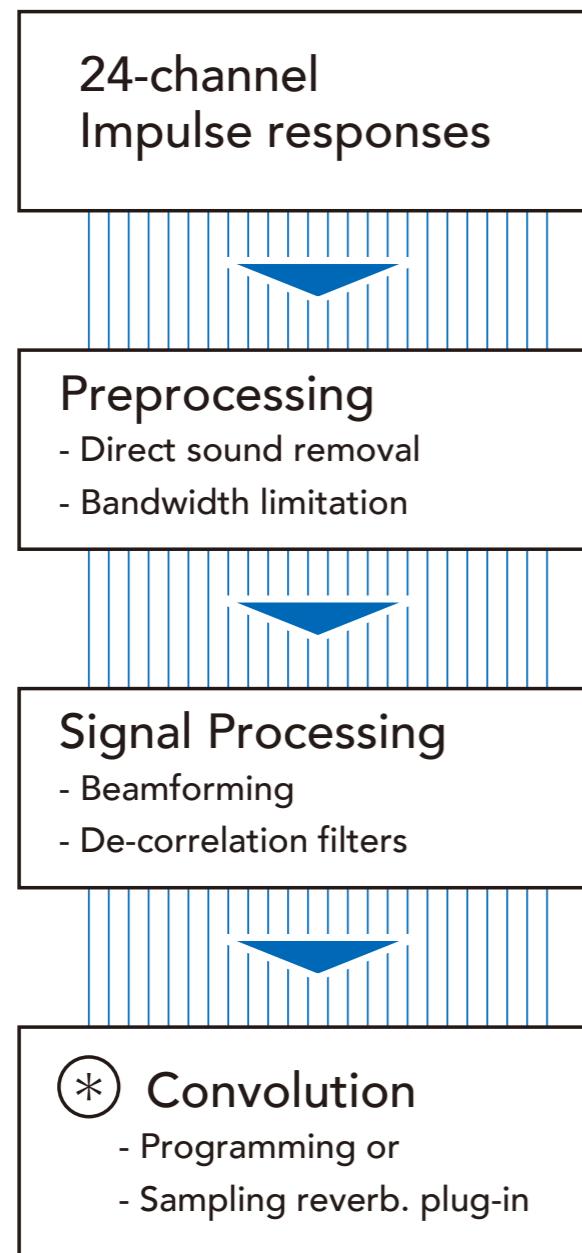
- ✓ 半無響室での実験結果
- ✓ 24チャンネルの残響成分出力に相関低減フィルタを作用
- ✓ 中心に設置したダミーヘッドにおけるIACCを測定



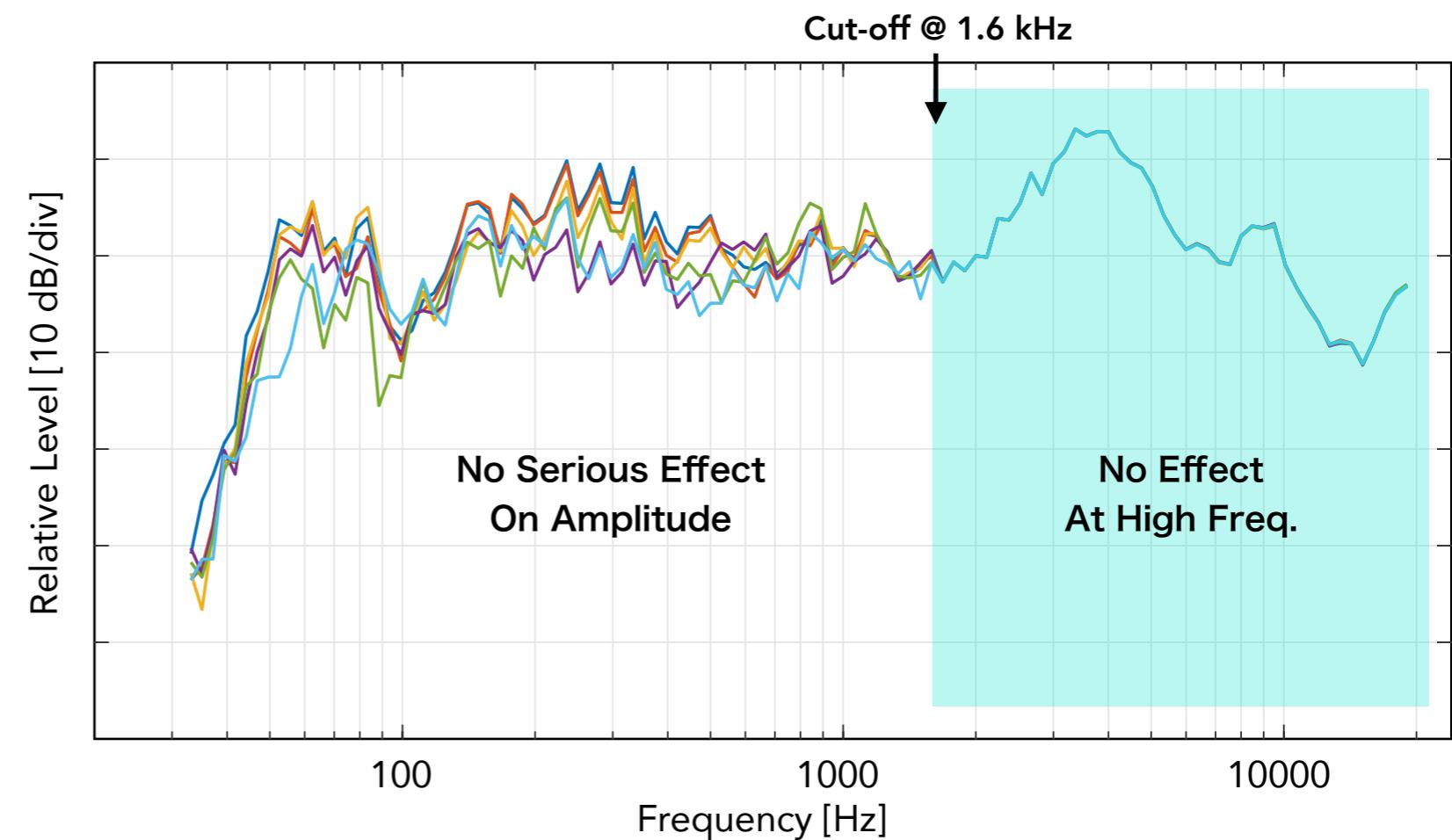


再生にあたっての信号処理

❖ 相関低減フィルタの提案



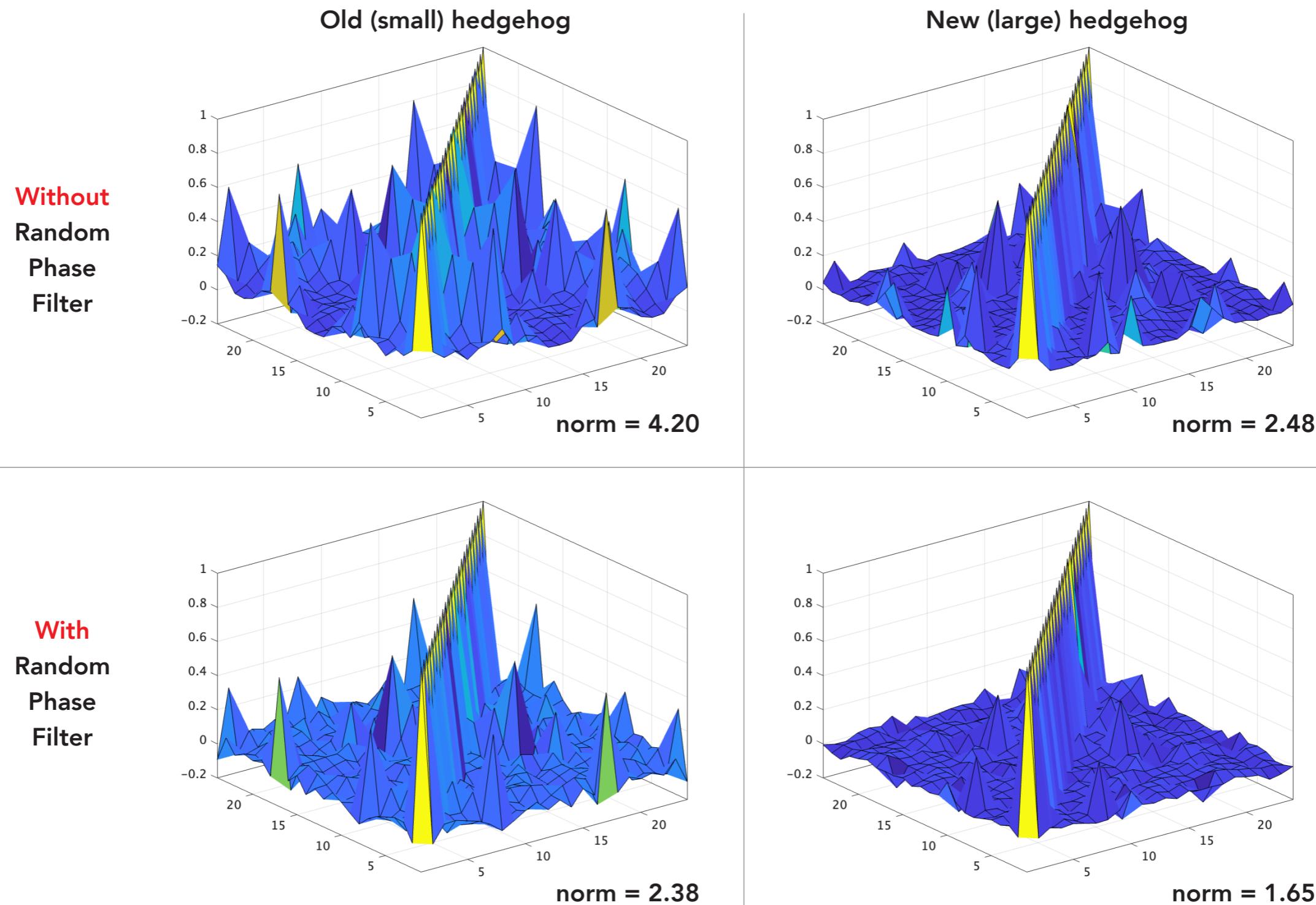
- ✓ 半無響室での実験結果
- ✓ 24チャンネルの残響成分出力に相関低減フィルタを作用
- ✓ 中心に設置した全指向性マイクによる周波数特性測定





❖ 大きさと相関低減フィルタの効果：マイク間相関係数

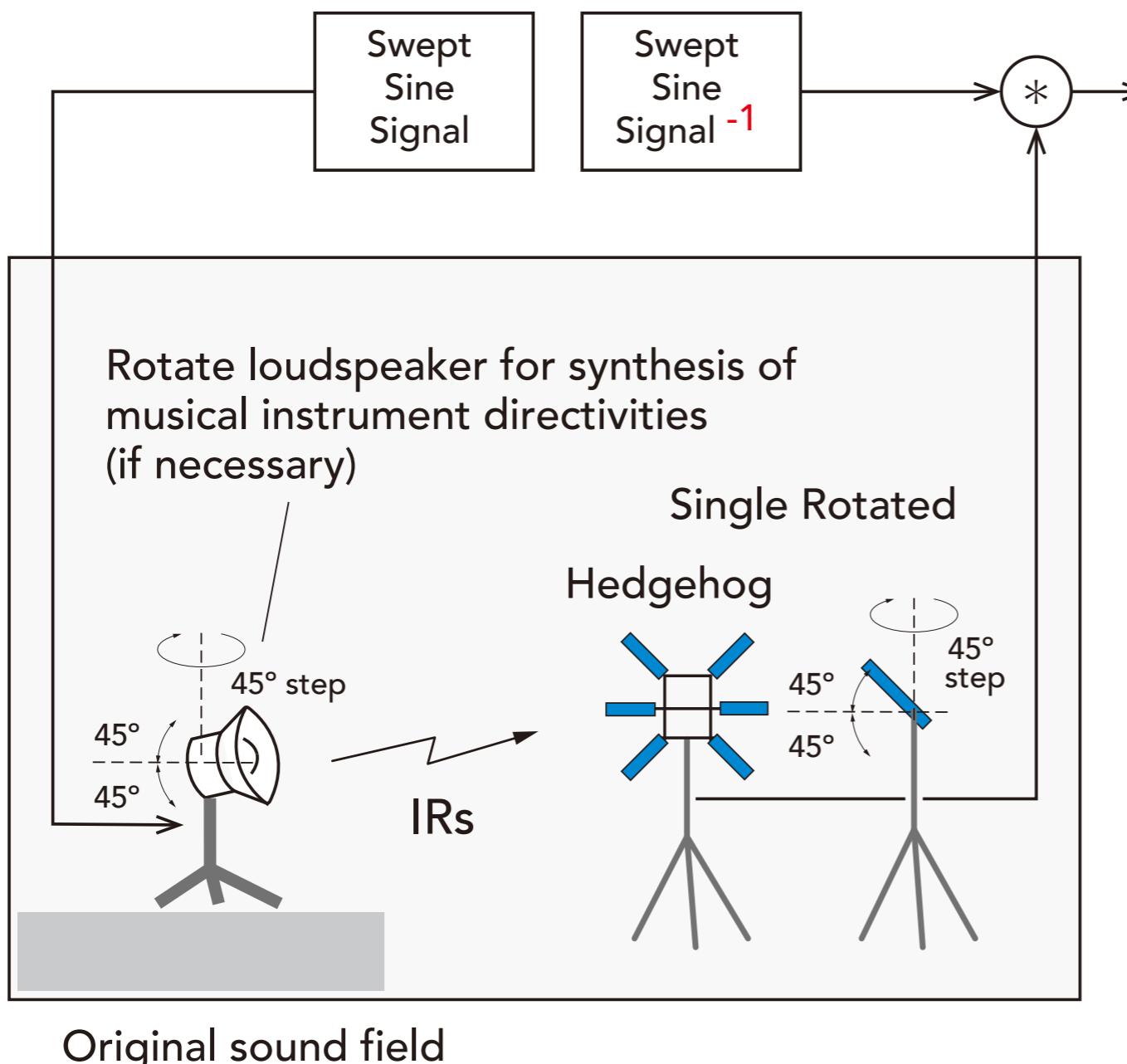
Effect of "size" of hedgehog microphone array





インパルス応答測定

❖ 楽器の指向性を有する音源の模擬



- ✓ 必要に応じて音源の方向や位置を変えながら測定
- ✓ 音源（楽器）の指向性や有限の大きさに対応

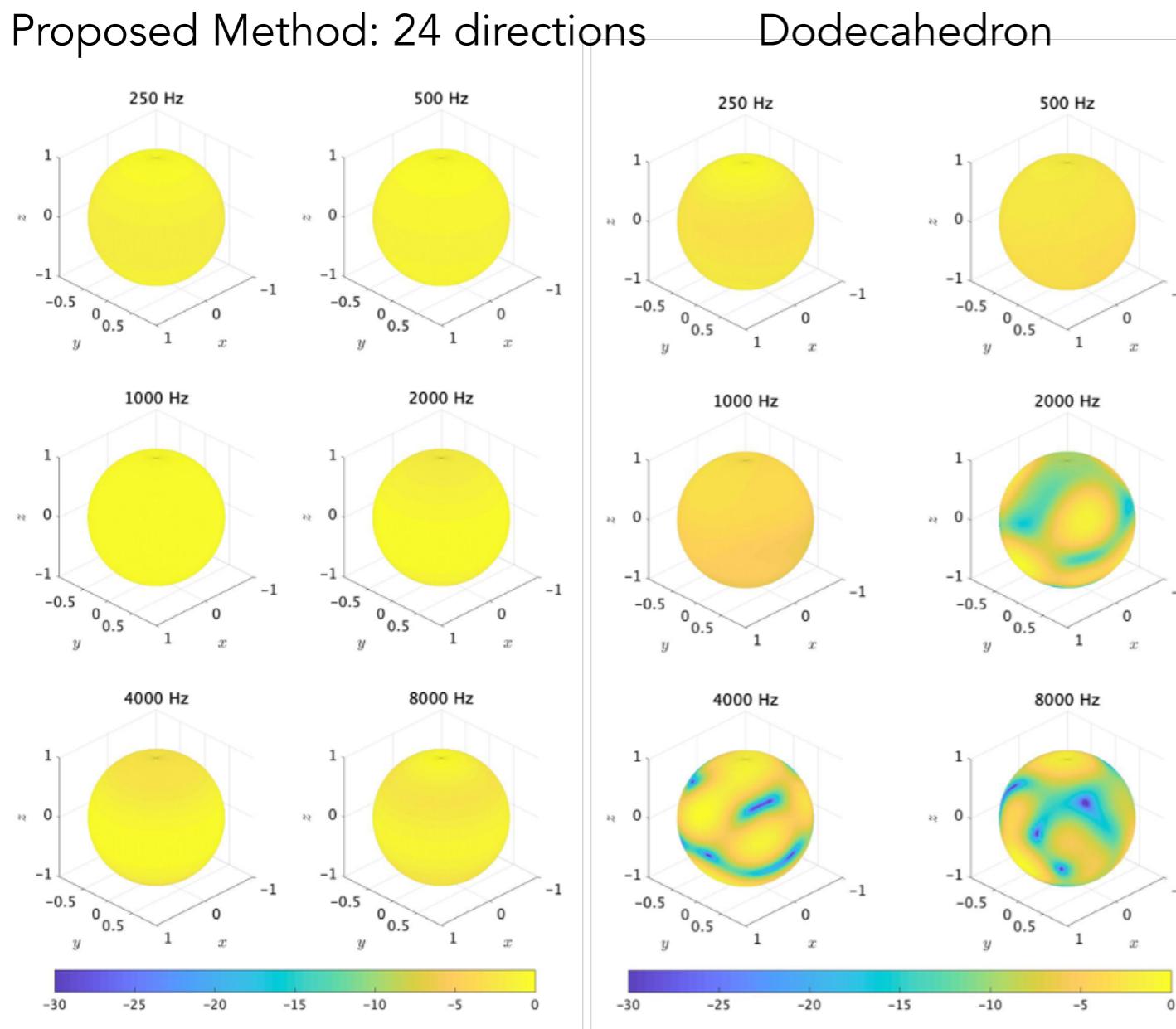
R. Hara, T. Iwami, H. Kashiwazaki, A. Omoto, "Synthesis of musical instrument directivities with a single common loudspeaker (L)," J. Acoust. Soc. Am. 150, 2549–2552 (2021).



インパルス応答測定

❖ 全指向性音源からのインパルス応答測定

Proposed Method: 24 directions



- ✓ 500 Hz以下：全指向性性能に大差なし
- ✓ 2 kHz以上：12面体スピーカの全指向性性能低下
- ✓ 提案手法：高周波数帯域でも全指向性を維持

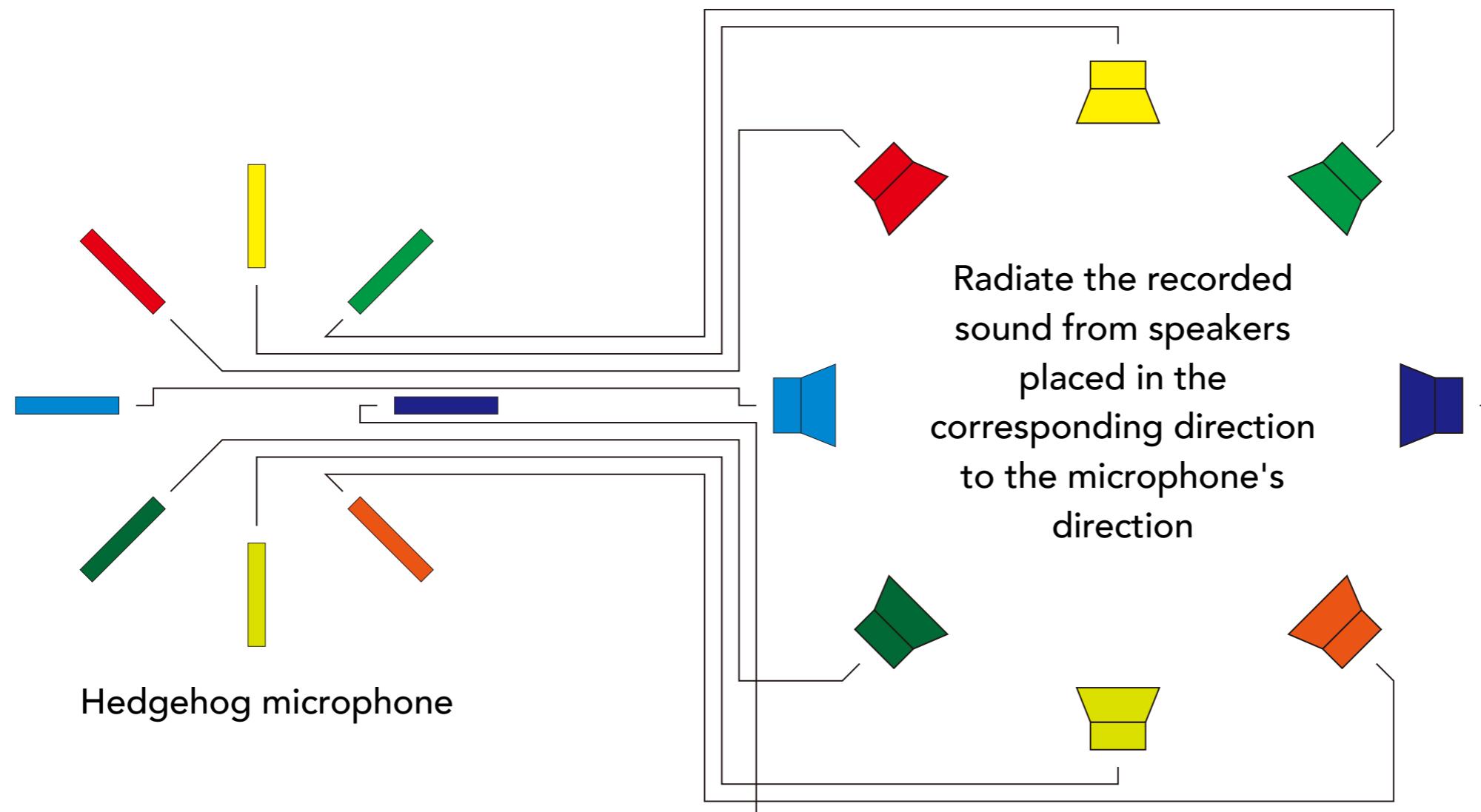
加藤, 岩見, 尾本章, "一般的なスピーカを用いた全指向性音源構成の試み" 音講論(秋), 3-12-5, 2022

加藤, 岩見, 尾本章, "一般的なスピーカを用いた任意の指向性音源構成の試み -全指向性音源に関する検討-" 音講論(春), 1-5-1, 2023



インパルス応答測定・畳み込み

- ❖ 方向的には録って出し

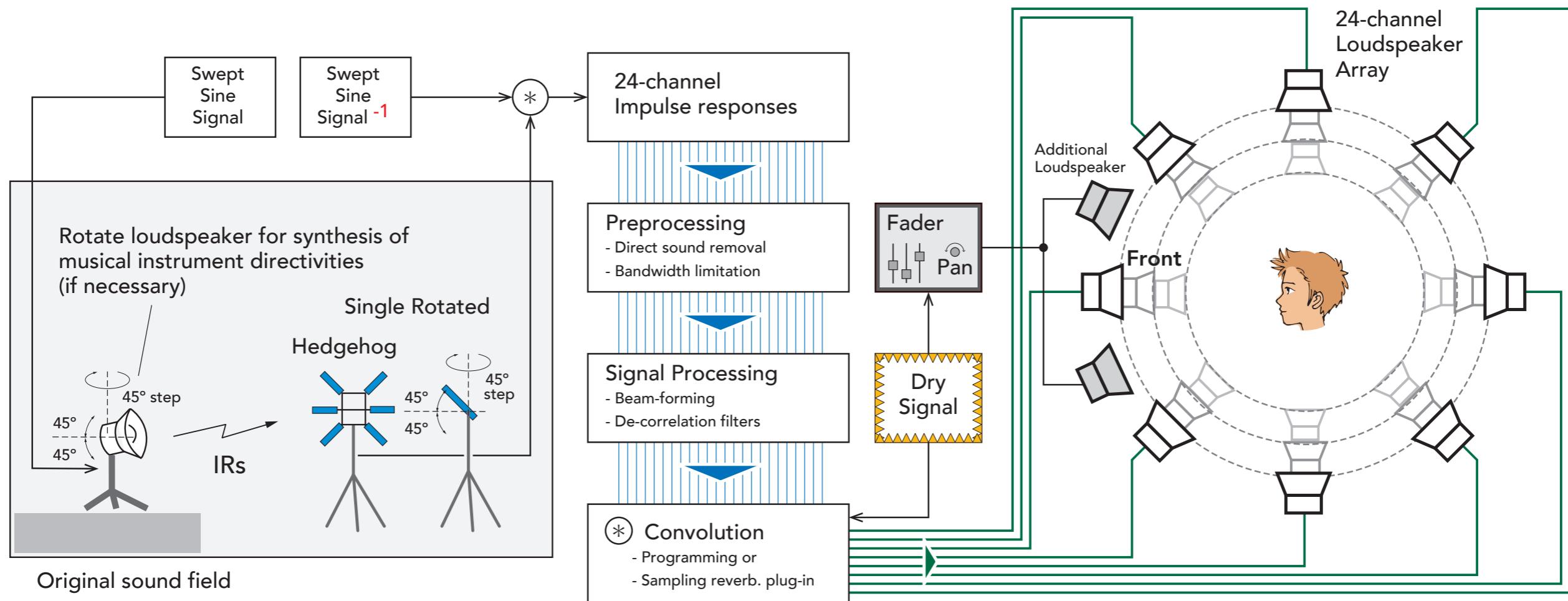
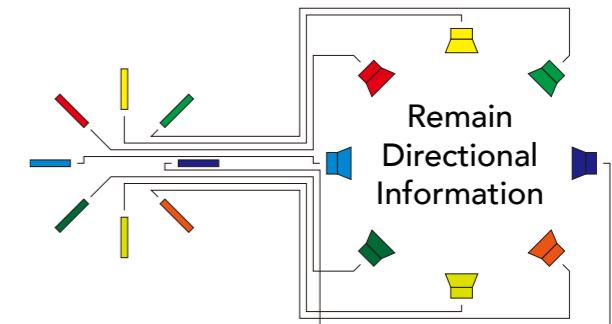




インパルス応答測定・畳み込み

❖ よく使う構成

- ▶ 韶きの畳み込み + ドライソースの空間ミキシング

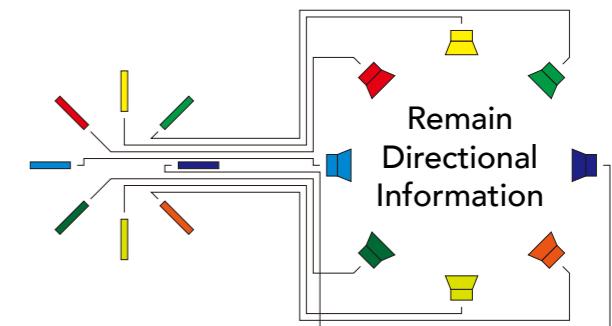


- ✓ 韶き（インパルス応答）をあらかじめ測定しておけば、再生時に必要なのは音源信号（ドライソース）のみ！
- ✓ いくつかの韶きを測定しておけば、切り替えながら楽しむことも可能

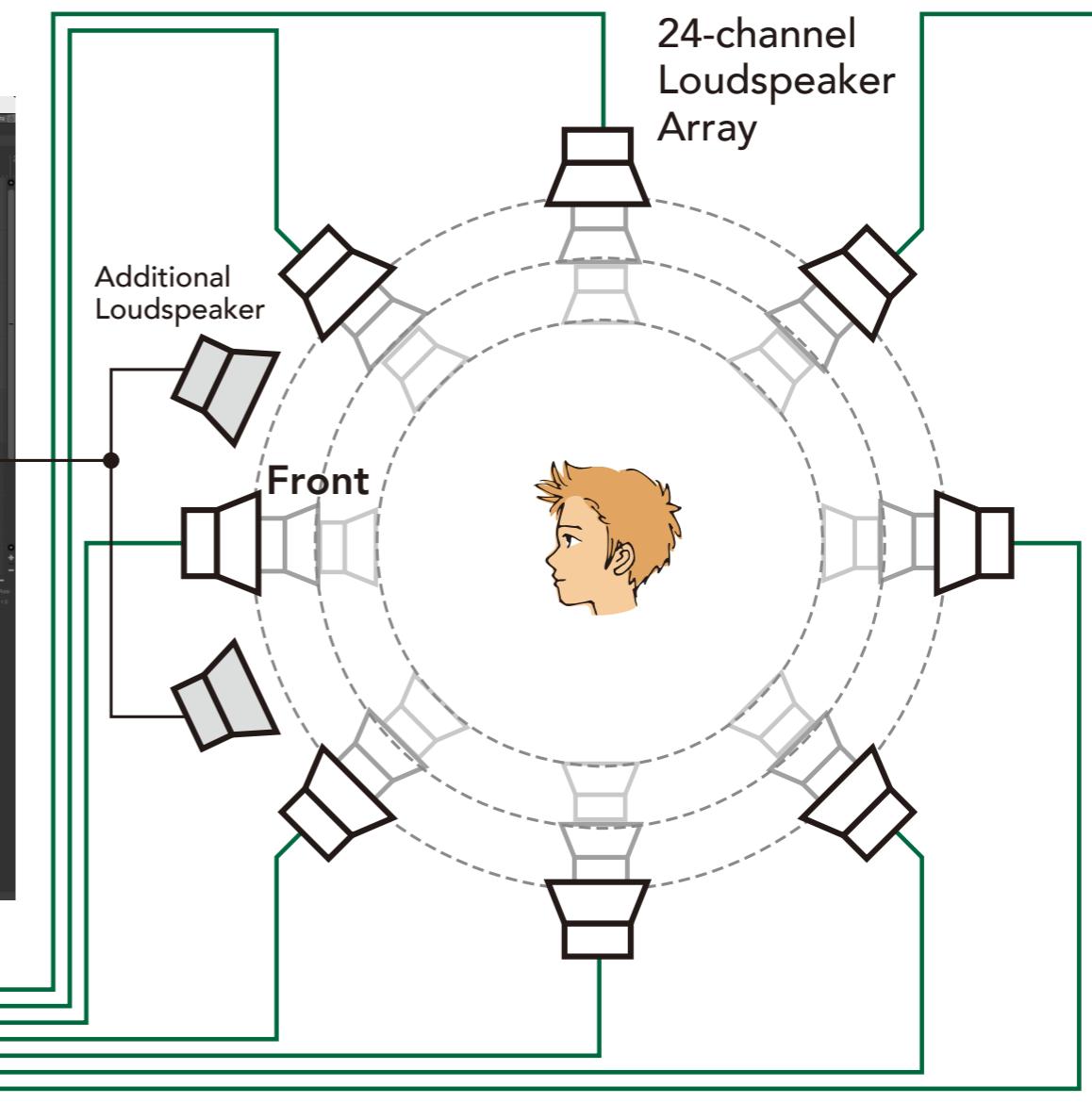


インパルス応答測定・畳み込み

❖ よく使う構成のDAWでの実現



* Convolution
- Programming or
- Sampling reverb. plug-in





インパルス応答測定・畳み込み

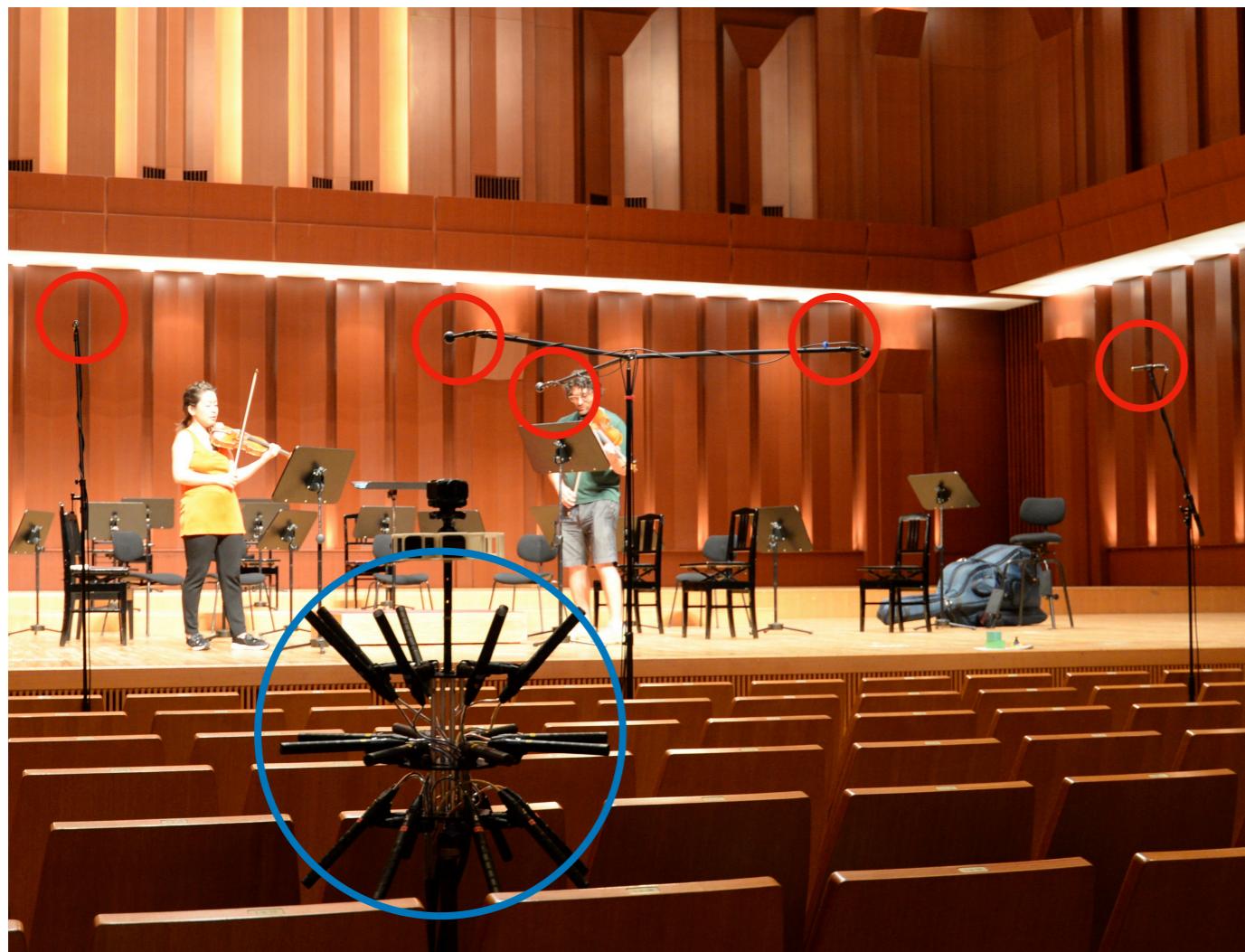
❖ ドライソース（音源信号）の収録：重要！





音の収録による方法

❖ インパルス応答があらかじめ測定できない場合



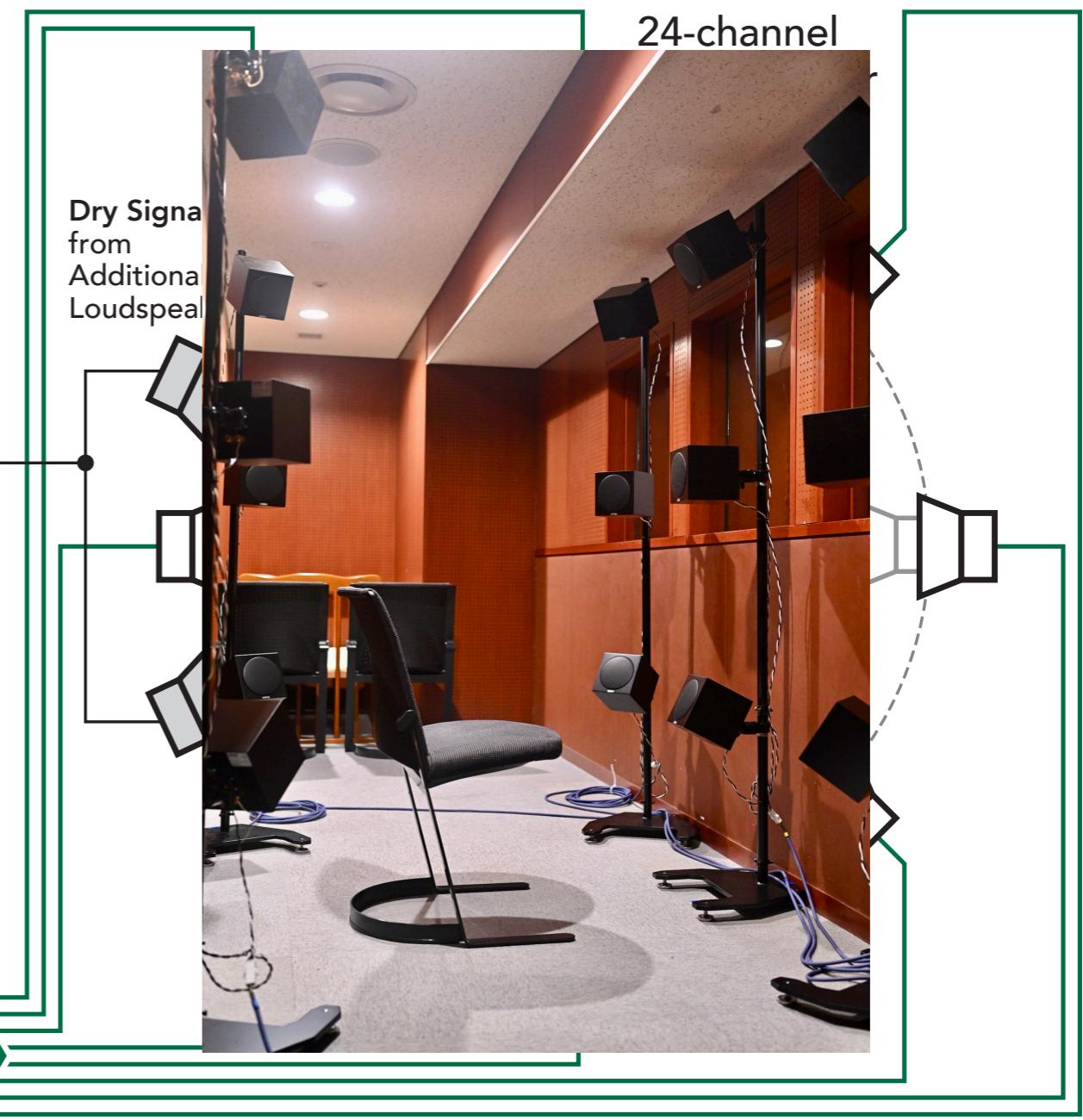
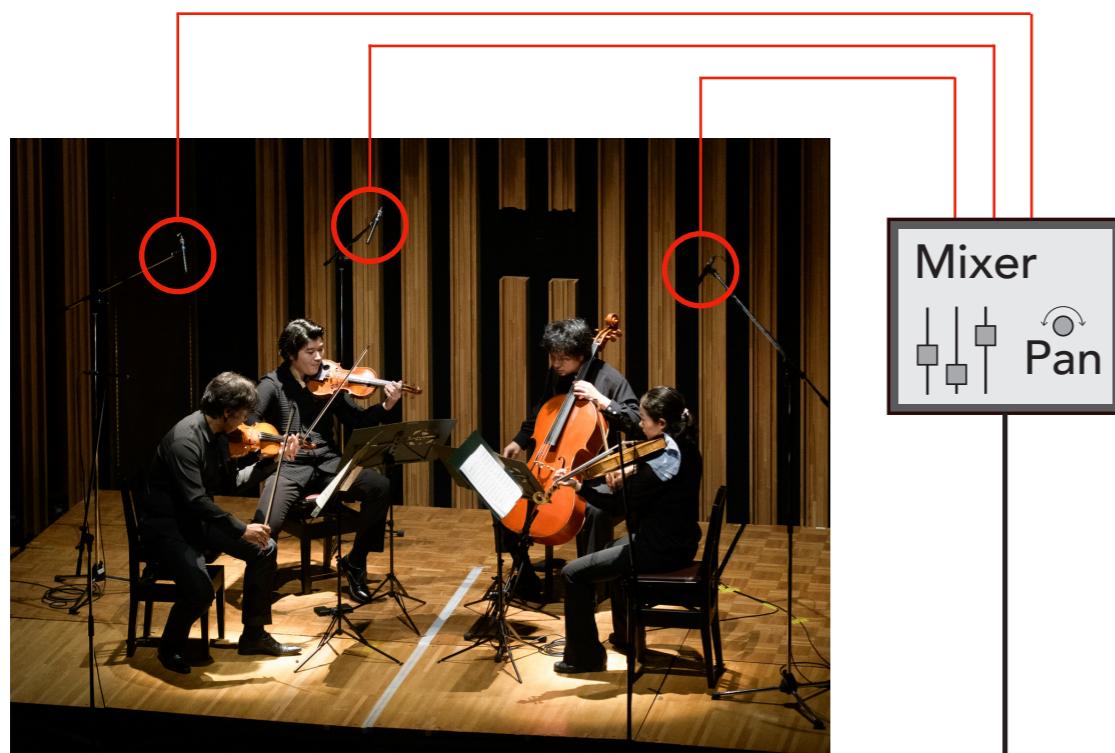
- ✓ メインマイクでの収録と24chマイクでの響きの収録
 - 24チャンネルマイクでの収録とともに、**メインマイク**を配置
 - ステレオ、あるいはサラウンドのマイクアレンジがよい
 - あるいは、楽器へのオンマイクも可
 - 再生時にミキシングは必要
 - 再生時には、直接音成分が重ねて再生されるが、まあまあOK



音の収録（と伝送）による方法

❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合

✓ メインマイクでの収録+畳み込みも可能

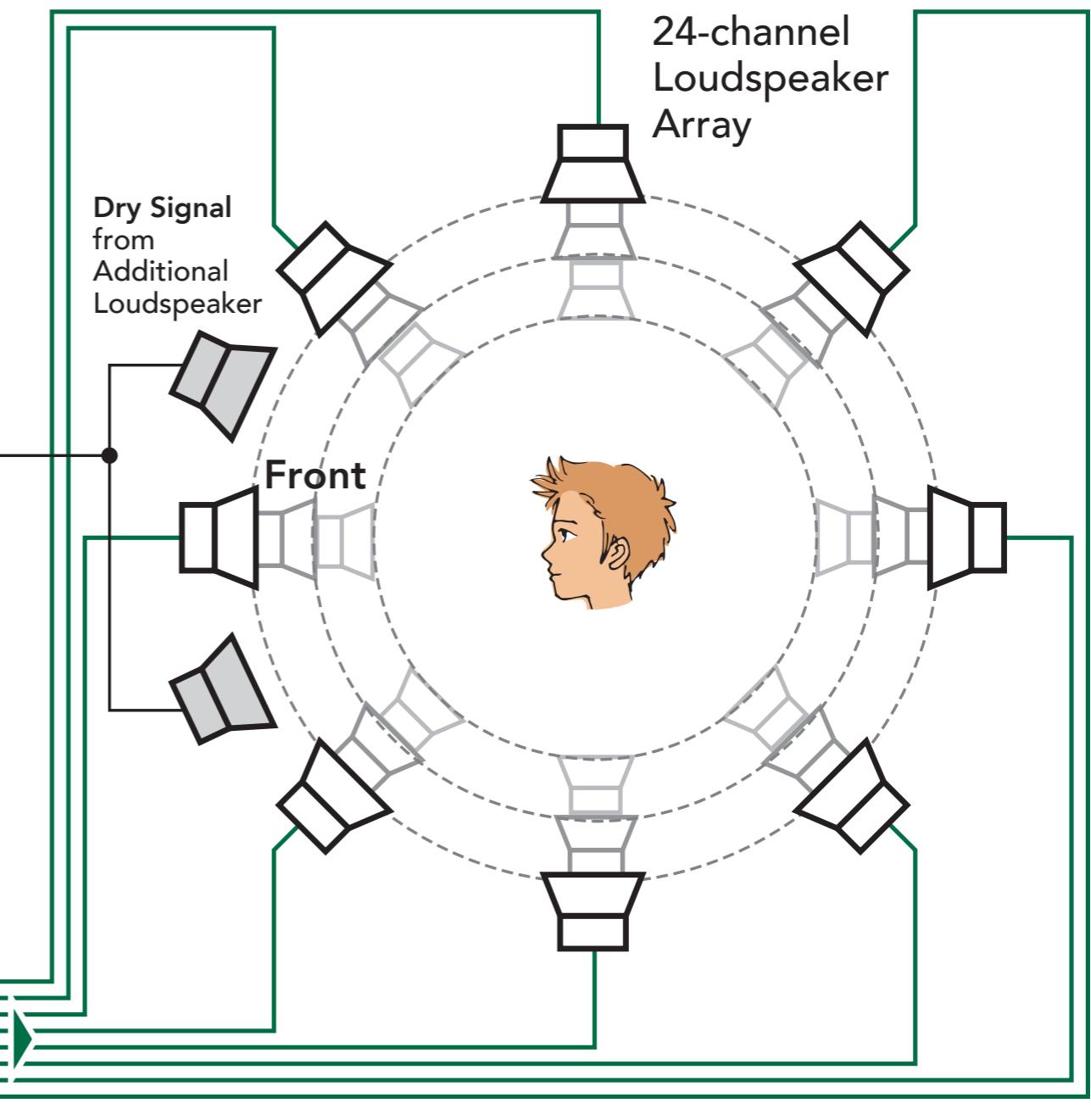
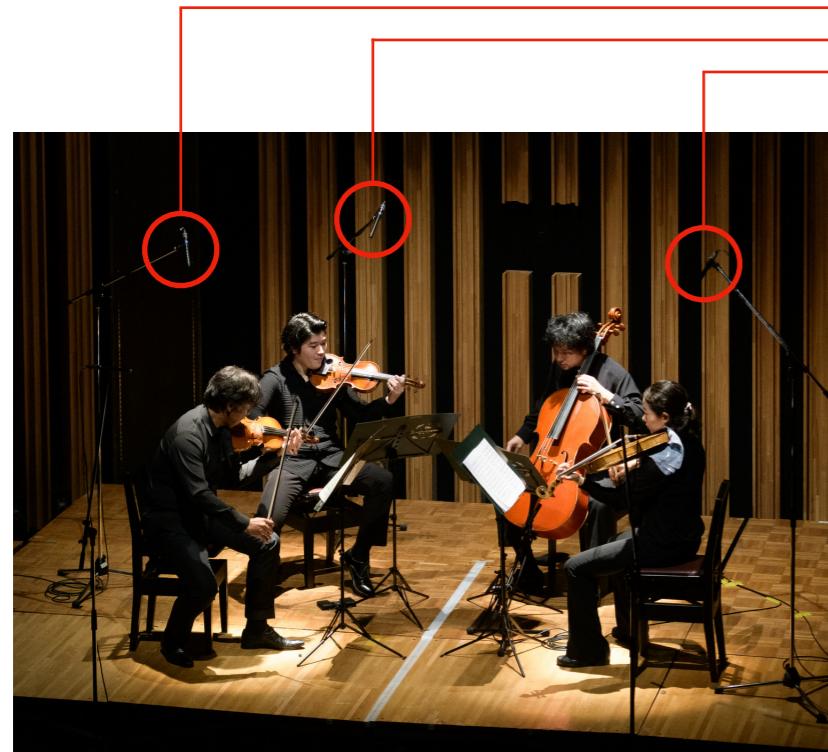




音の収録（と伝送）による方法

❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合

✓ メインマイクでの収録+畳み込みも可能





音の収録（と伝送）による方法

❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合

✓ メインマイクでの収録+（ほぼ）リアルタイム畳み込みによる響きの付加も可能



実験コンサート：Auditorium Journey

スタジオプロジェクト I-B

ホールマネジメントエンジニアリングプロジェクト





音の収録（と伝送）による方法（余談）



❖ ホールマネジメントエンジニア(HME)育成プログラム

なぜ九州大学大学院芸術工学府で開設か？

- 昭和40年代から多目的ホール建設ラッシュ
 - 全国に3000を越える公共ホールが存在
- 一方、メディアでは「箱もの行政」の筆頭に取り上げられる
 - 有効活用が必要との認識
- これまで「建設」に貢献する人材育成を行なってきた
 - 今後は「活用」にも貢献する人材育成が必要
- 育成すべき人材として「設置法」を持つ博物館、図書館に倣って
 - 「**舞台芸術学芸員**」あるいは「**劇場総支配人**」育成ではどうか



JST 科学技術振興調整費 「地域再生人材創出拠点の形成プログラム」

平成19年度(2007) 「ホールマネジメントエンジニア育成ユニット」 申請・採択



音の収録（と伝送）による方法（余談）



❖ ホールマネジメントエンジニア育成プログラム（開設当時）

ホール芸術科目群

- 芸術文化論（※）
- 西洋における舞台芸術
- 東洋における舞台芸術
- 演劇と文化芸術
- 電子音響芸術表現

ホールマネジメント科目群

- アートマネジメント（※）
- 芸術文化と政策
- 芸術文化と環境
- 芸術文化と施設運営
- プロデュースとストラテジー

ホール工学科目群

- ホールと工学技術（※）
- 空間の響き
- 発音機構と音放射
- 拡声と収音
- 舞台と機構
- 舞台と照明

（※）必修 Required

共通科目群

Common

ホールマネジメントプロジェクト
Hall Management Project I

ホールマネジメントプロジェクトII
Hall Management Project II

共通科目のホールマネジメントプロジェクトは地域の文化施設と連携し、自主事業の企画提案を行い、その実施・評価までを2年間のインターンシップ形式で学ぶ

修了認定要件

- * 2年間以上の在学により必修14単位を含む30単位の取得
- * 2年間にわたる「ホールマネジメントプロジェクト」の実施
- * 各授業科目毎に課せられる試験・レポートによる評価

- 30 units incl. 14 required
- Two years Project
- Report, Exam.



音の収録（と伝送）による方法（余談）



❖ ホールマネジメントエンジニア育成プログラム（開設当時）

The grid displays ten event posters from the Hall Management Engineering Program's early days:

- Top Row:**
 - 「食卓につながる劇場」 (July 19, 2009)
 - 「120周年 桧原さくら物語」 (October 25, 2011)
 - 「時空を超えて、夢で語り合おう」 (August 8, 2010)
 - 「この火を守る」 (October 31, 2010)
 - 「法火守千年抄」 (December 4, 2011)
- Middle Row:**
 - 「むなかたの音～響きあう 日韓のこころ～」 (September 19, 2011)
 - 「Tomonari Higaki Acousmonium Recital」 (December 4, 2011)
 - 「侍BRASS in 韶SAMURAI」 (December 4, 2011)
 - 「筑前琵琶と三味線の響演」 (December 11, 2011)
 - 「あいれふ・命のうたコンサート」 (October 8, 2011)
- Bottom Row:**
 - 「アコースモニウム・リサイタル」 (September 27, 2011)
 - 「侍BRASS in 韶SAMURAI」 (December 4, 2011)
 - 「里恋競唄」 (December 11, 2011)
 - None
 - None



音の収録（と伝送）による方法（余談）



❖ ホールマネジメントエンジニア育成プログラム

現在のカリキュラム構成：必修科目14単位を含む20単位の習得

民族音楽学特論
音楽社会文化特論
聴覚文化論特論
メディアアート表現
演劇学特論
映像コンテンツデザイン特論
現代アート実践

文化政策
アーツマネジメント
デザイン哲学
プロデューサ原論
知的財産法
デザインプロジェクト
マネジメント

ホール工学技術演習
ホール工学技術演習
室内音響学（学部）
音響メディア工学（学部）

ホールマネジメントエンジニアリングプロジェクト I, II, III, IV
スタジオプロジェクト科目の一環として



音の収録（と伝送）による方法（閑話休題）

- ❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合



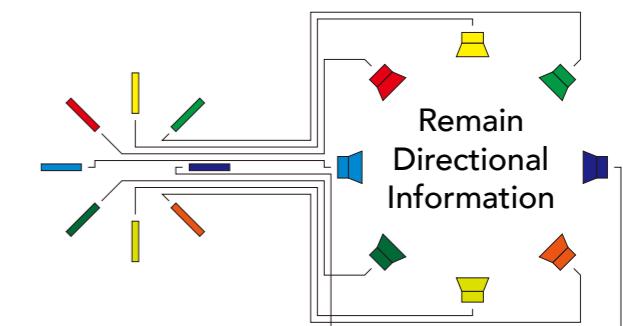
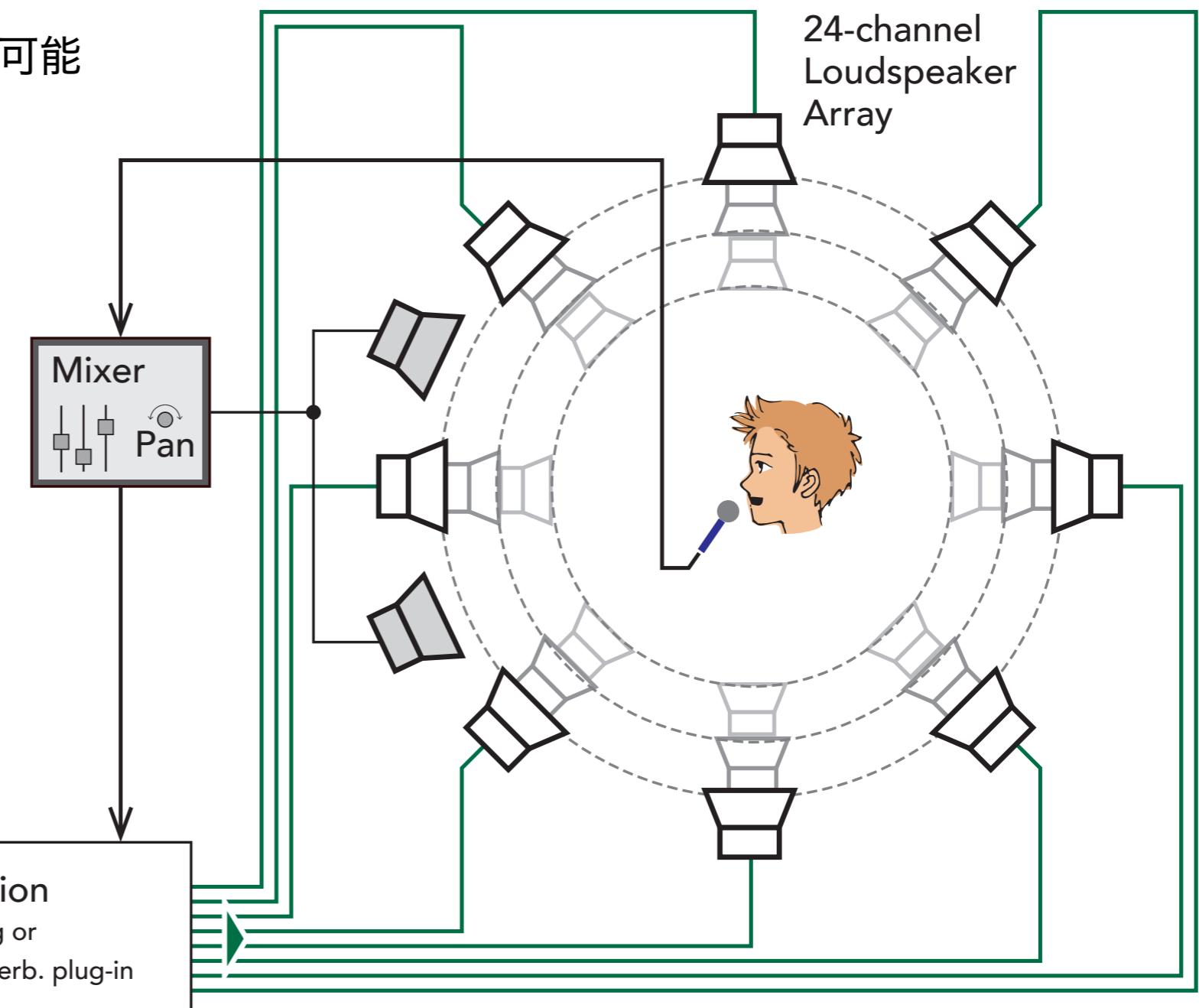
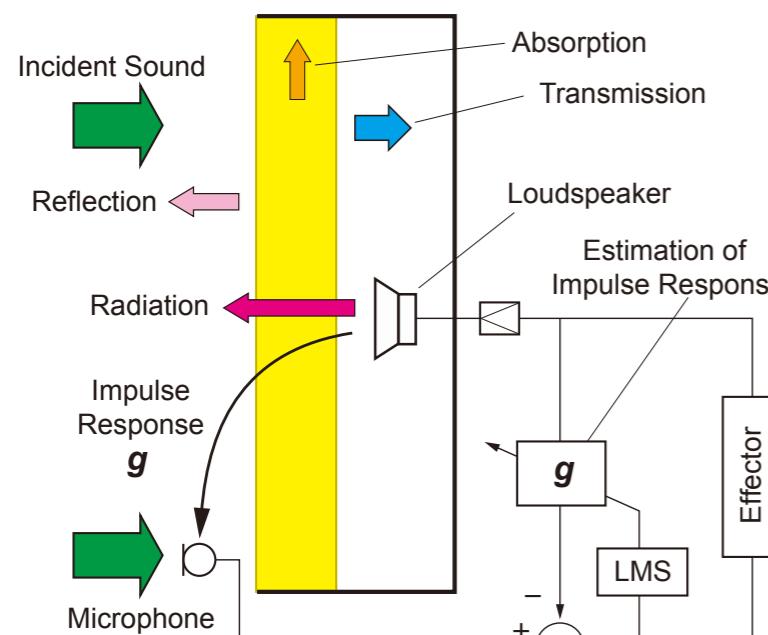


音の収録（と伝送）による方法

❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合

✓ 残響付加装置としても機能可能

Concept of
Variable Reflection
Acoustic Wall System

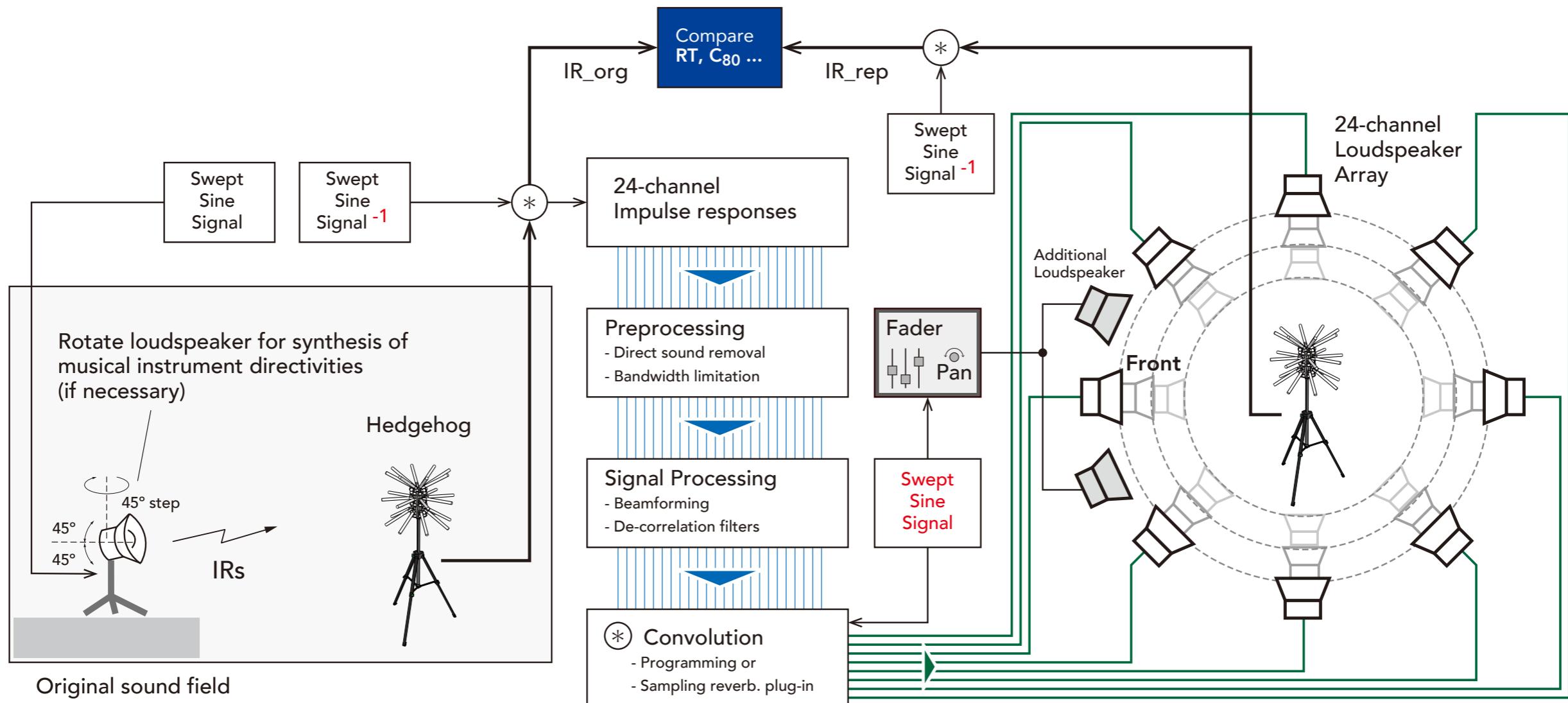
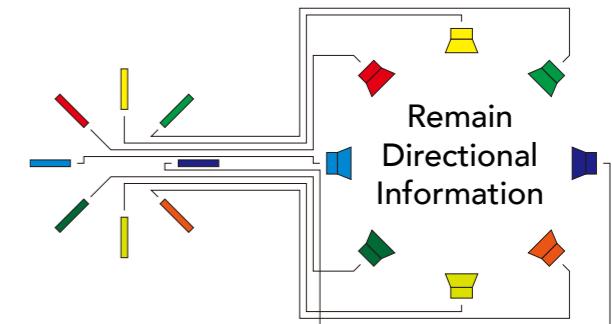




再現の精度と適切な評価指標

❖ 物理指標による検証

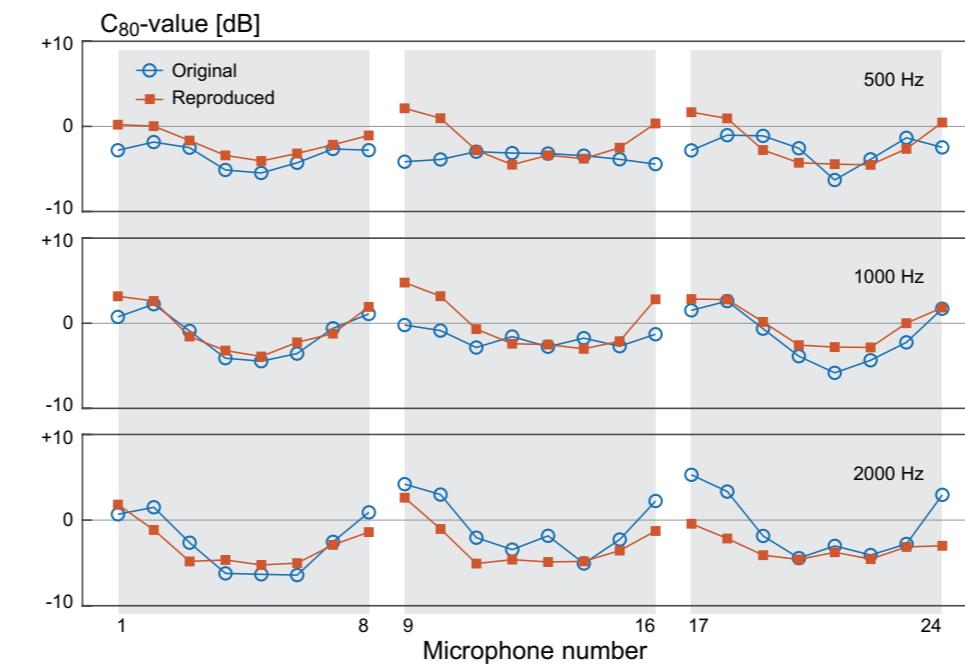
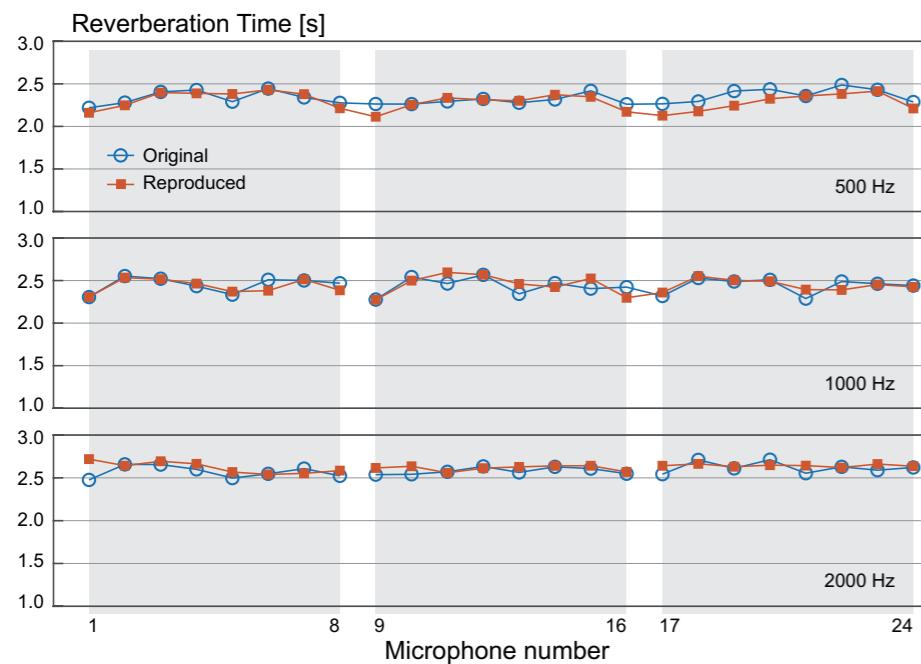
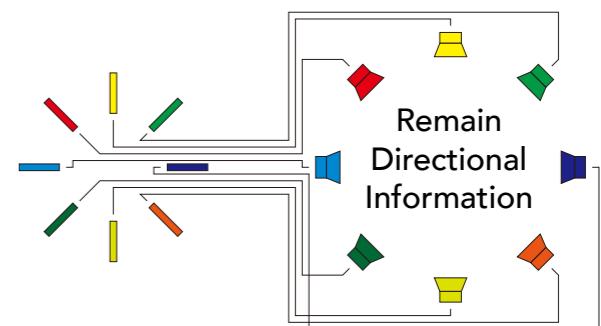
- ▶ 原音場での収録と再現音場での再収録



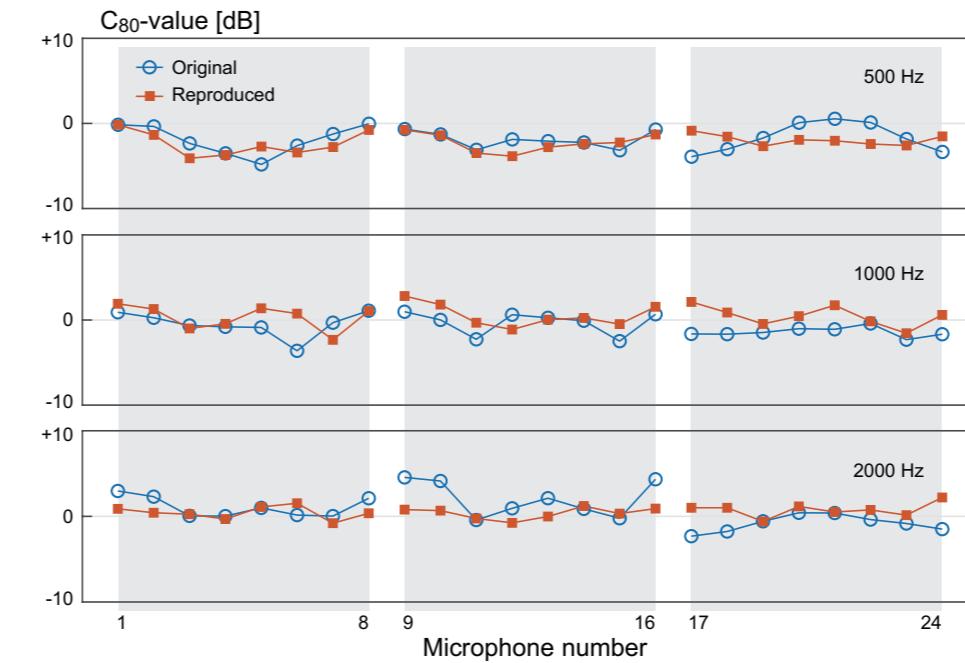
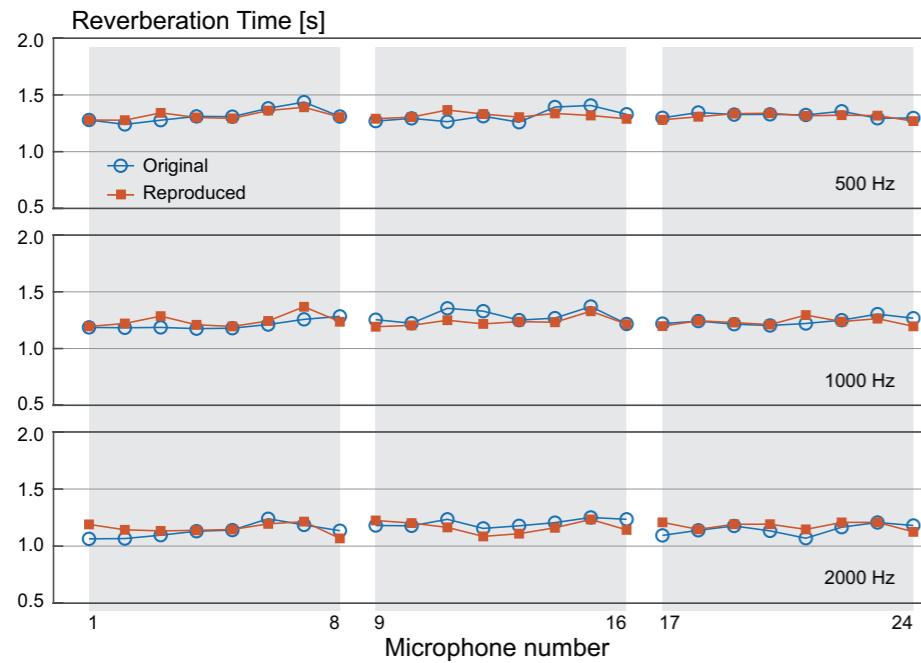


再現の精度と適切な評価指標

❖ 物理指標による検証：RT及びC80



(a) Reproduction of large size concert hall



(b) Reproduction of medium size auditorium

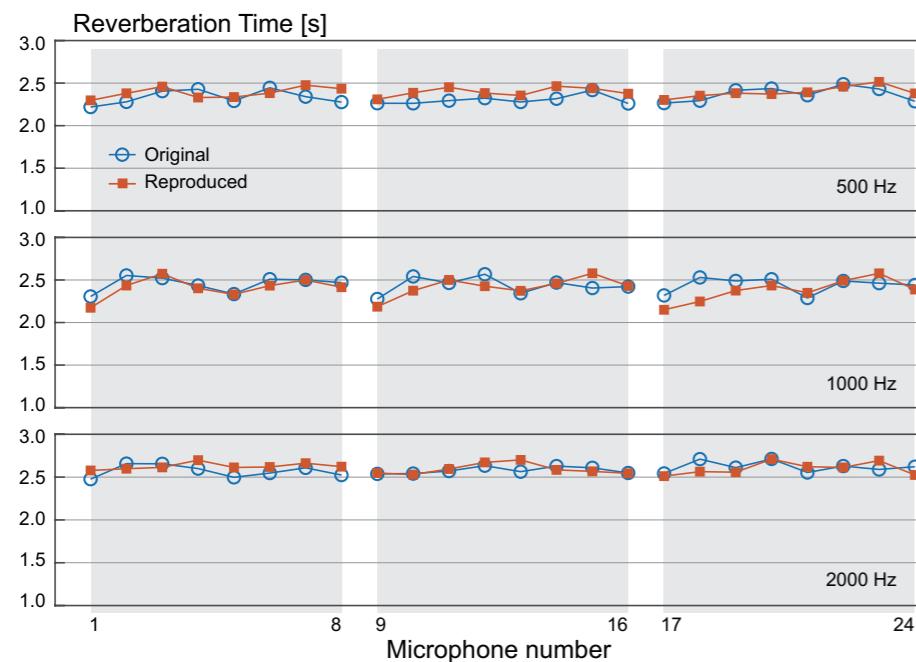
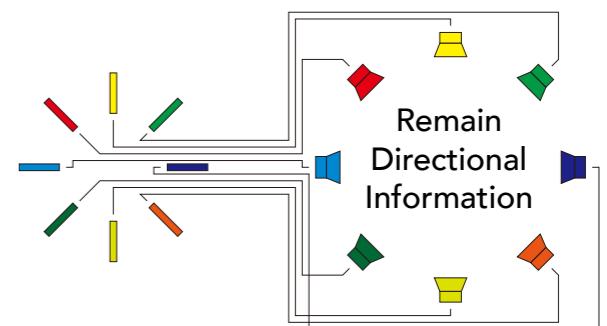
Small System



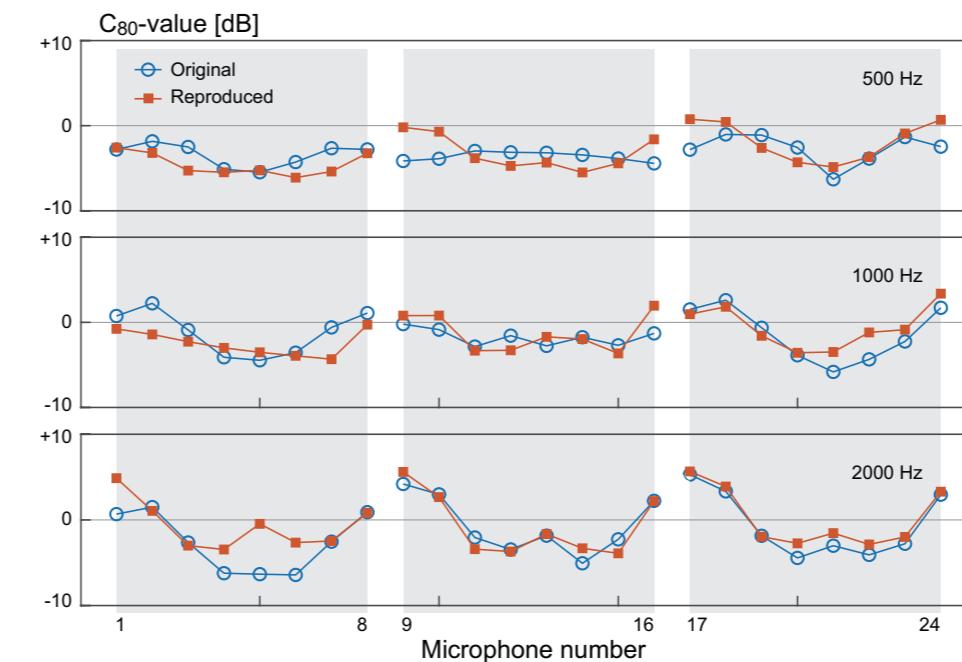


再現の精度と適切な評価指標

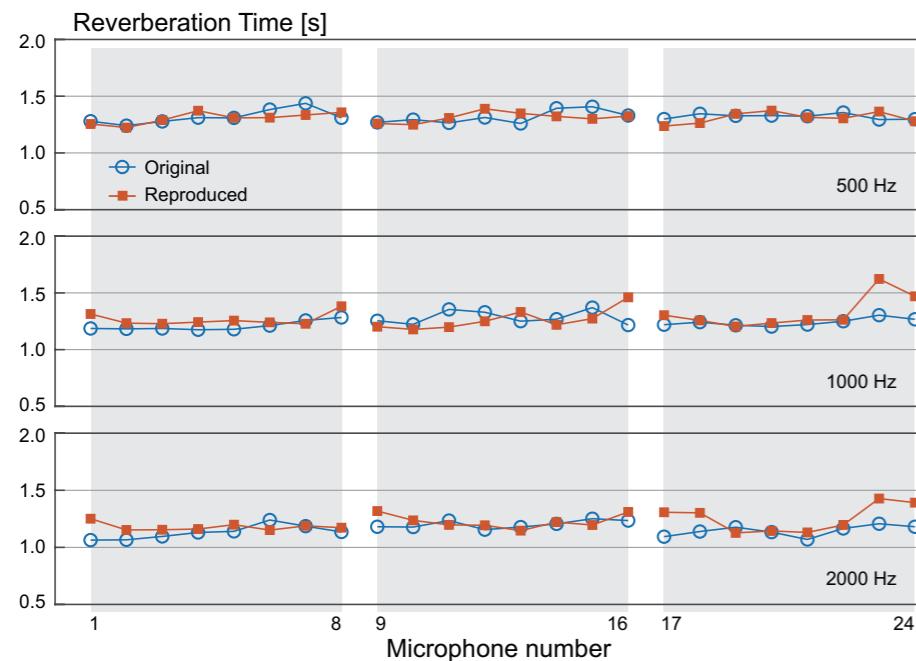
❖ 物理指標による検証：RT及びC80



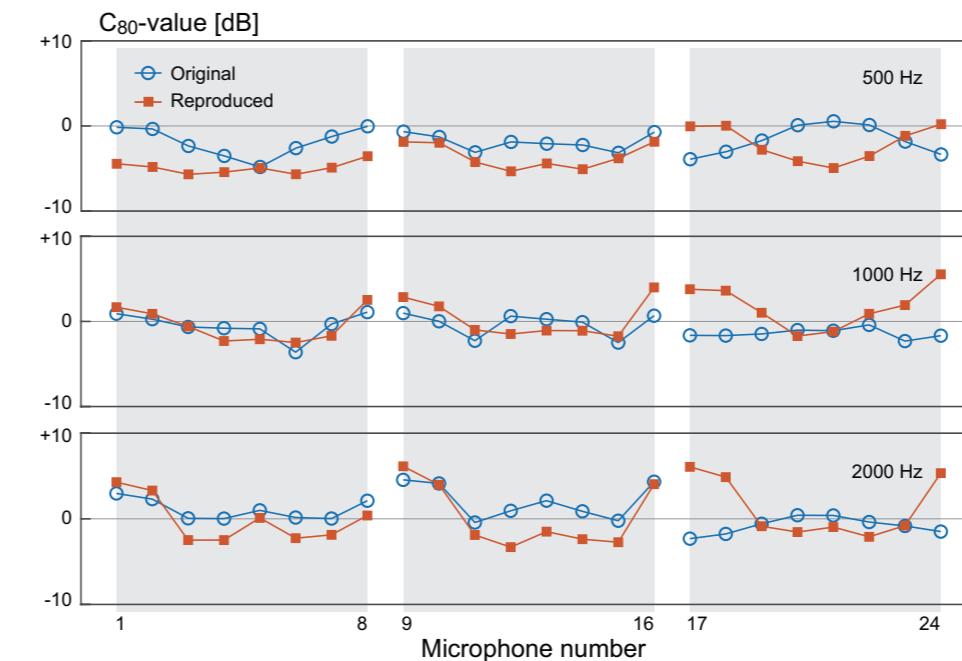
(a) Reproduction of large size concert hall



Large System



(b) Reproduction of medium size auditorium

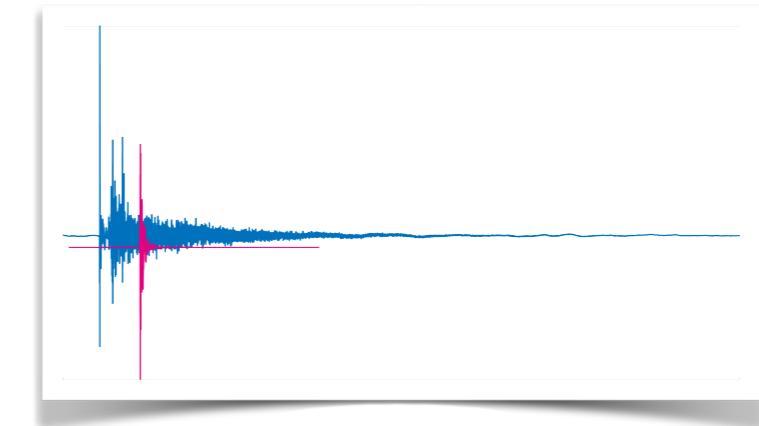




再現の精度と適切な評価指標

❖ 物理指標による検証～実験での所感

- ▶ 設定の任意性が大きい
 - ✓ 直接音と空間リバーブ成分のレベルバランス・遅延管理
- ▶ 直接音を抜いているために単純な録って出しでの再現は難しい
 - ✓ 直接音・ドライソースの別途加算（ミキシング）は必須
- ▶ どのような定位・レベルで加算するか？
 - ✓ 聴感印象？（手っ取り早い）
 - ✓ 物理指標 → 合わすの難しいけどできなくはない → 本当に有効か？
- ▶ 残響が極端に短い空間での再生には？？？
 - ✓ 直接音除去の意味・時間幅などは要検討





24ch マイクアレイ+24ch スピーカアレイシステム

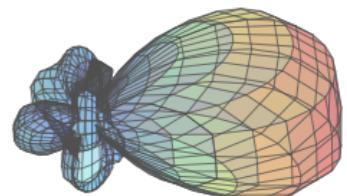
❖ この手法の意味と使い方

マイクの指向性が十分鋭ければ「録って出し」で問題ないはず



→ 実際にはそううまくいかずモヤモヤ

▶ 低域での指向性の緩さを補正するための最低限の信号処理



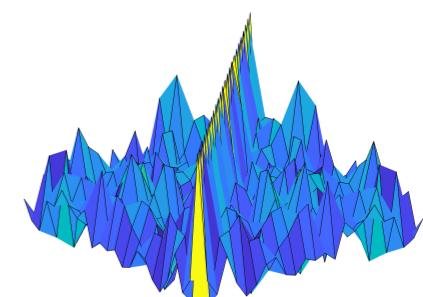
✓ 球面調和領域でのビームフォーミング・相関低減フィルタ

▶ 指向性の緩さや直接音除去に起因する緩さを補正するための処理

✓ 音源信号と空間リバーブの音場でのミキシング

▶ 残響が極端に短い空間・長い空間での使い方

✓ 短い場合：具体的・実効的な手法を検討中



✓ 長い場合：残響（臨界）距離以遠では明らかな演出



24ch マイクアレイ+24ch スピーカアレイシステム

❖ さらに踏み込んだ使い方

▶ 通信を併用した簡易的音場再生

✓ 音源信号（ドライ的な信号）のみ伝送すれば良い

▶ 信号処理後にどの程度の操作・演出が許されるのか

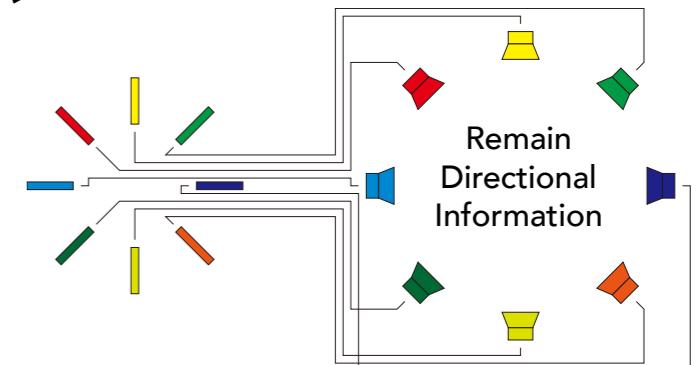
✓ 全体の再生を破綻させずデバイスの不十分さを補うEQなど

✓ より自然（と感じるよう）なバランスのためのレベル変更等々

✓ 「雰囲気の再現」とはJNDの何倍まで許される？

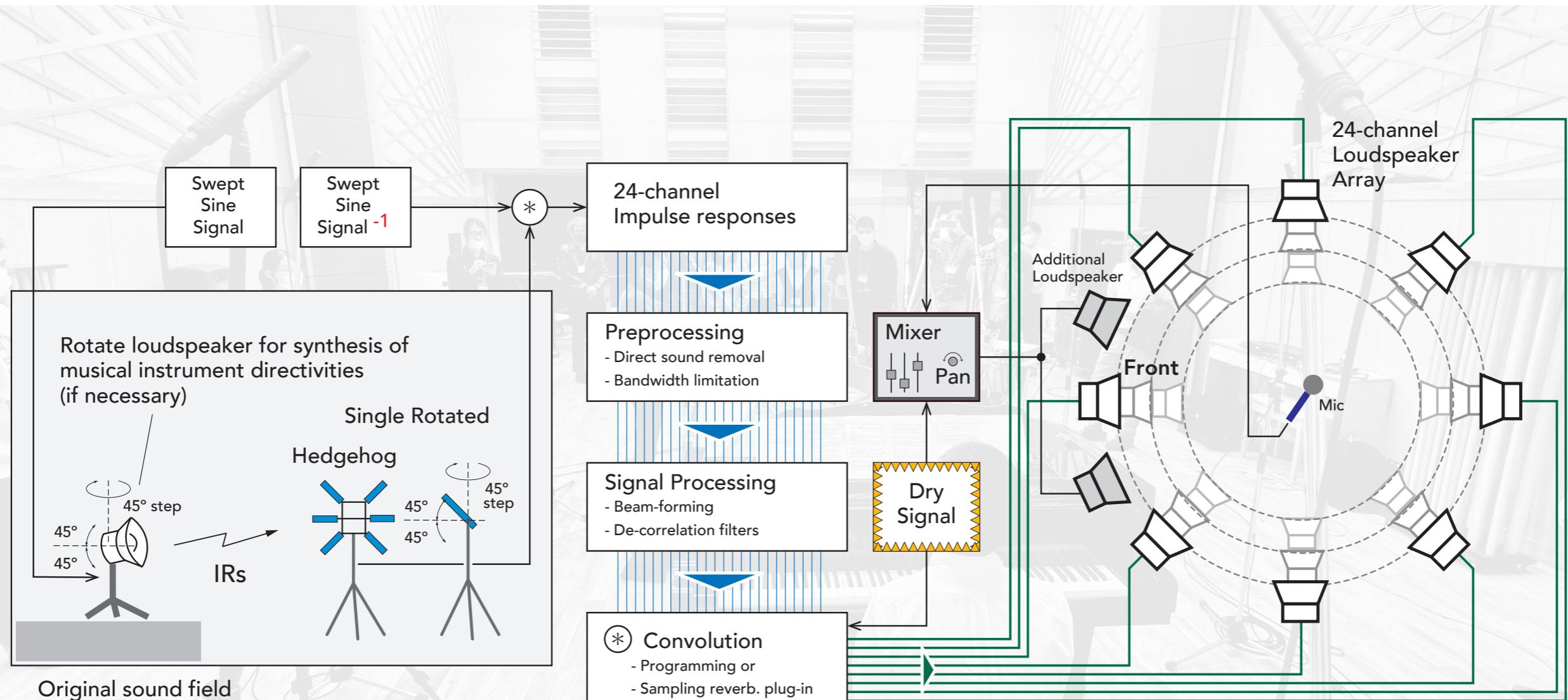
→ ホールにおける音響物理指標のように、音場再生システムにおいてこれさえ再現すればまあ大丈夫という
音場・コンテンツの「エッセンス」を表す指標設定は便利かも！

▶ 音を使った「間接的な福祉工学」へ展開できないか模索中





多目的 24ch マイクアレイ + 24ch スピーカーアレイシステム



ご清聴ありがとうございました