

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：





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

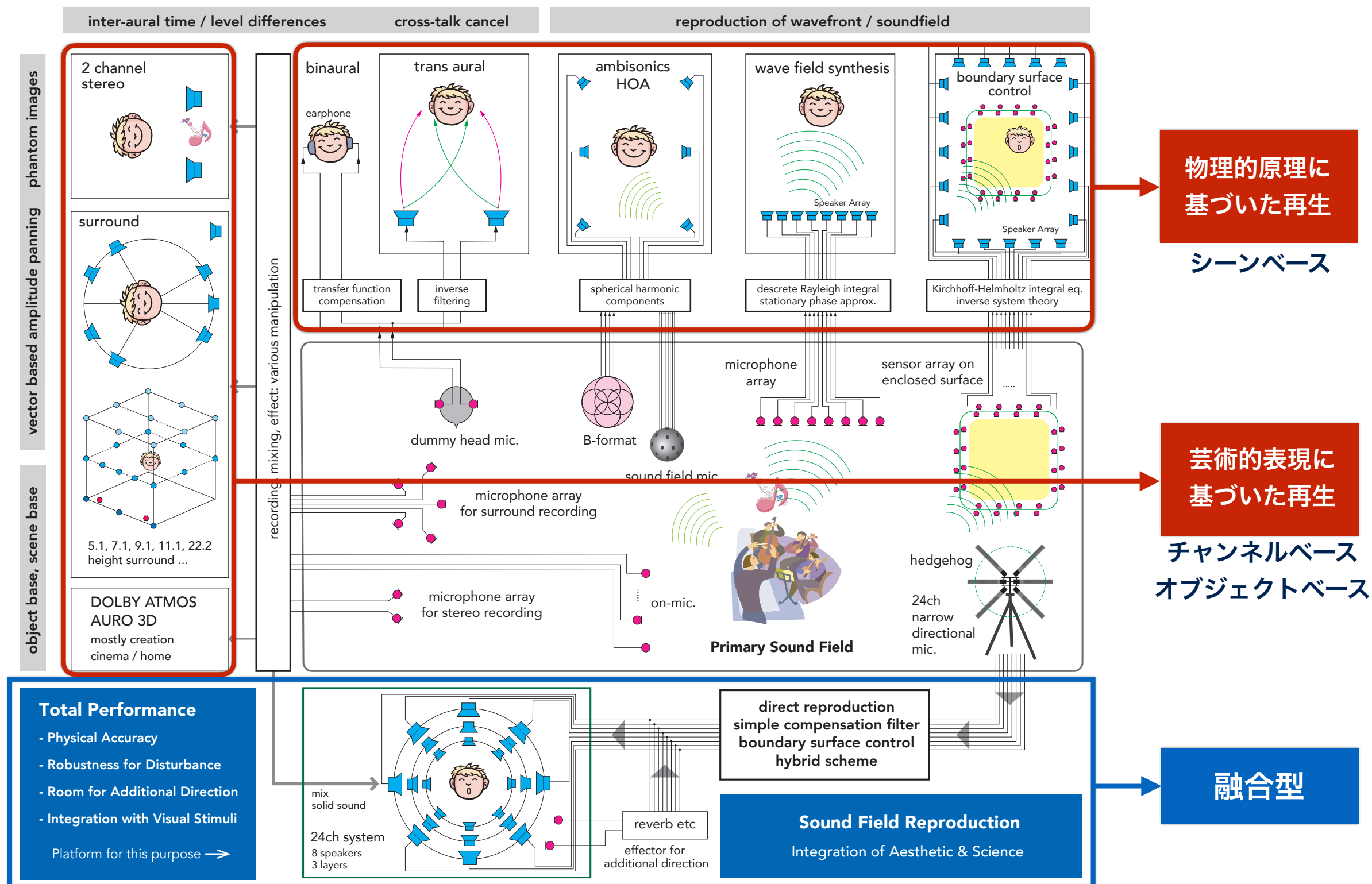
Dept. of Acoustic Design / Faculty of Design / Kyushu University



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

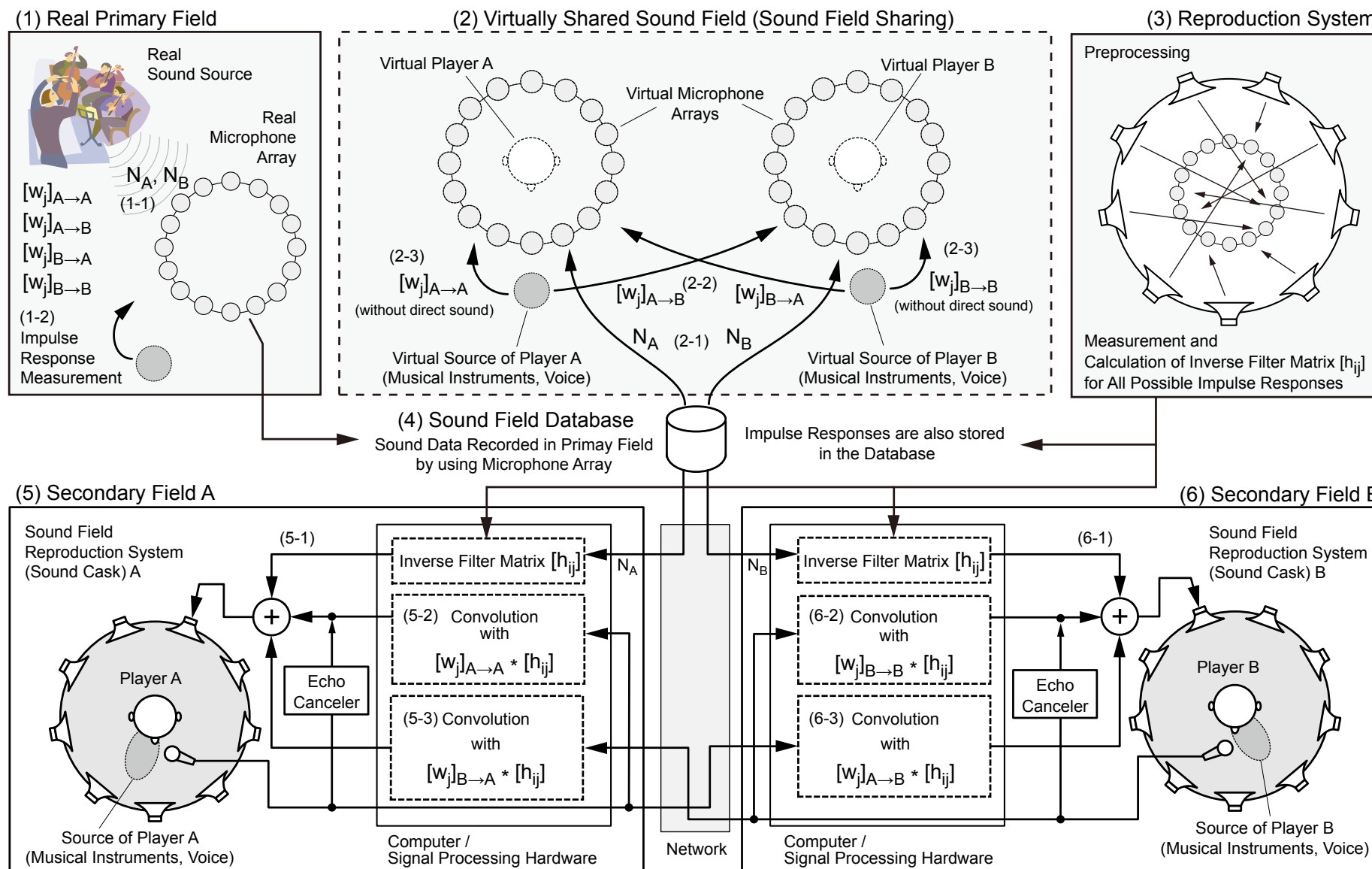
物理的音場再生と芸術的な音場創成



物理的な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 フラールンマイク + 音響樽 (96ch) ・ 音積木 (48ch)

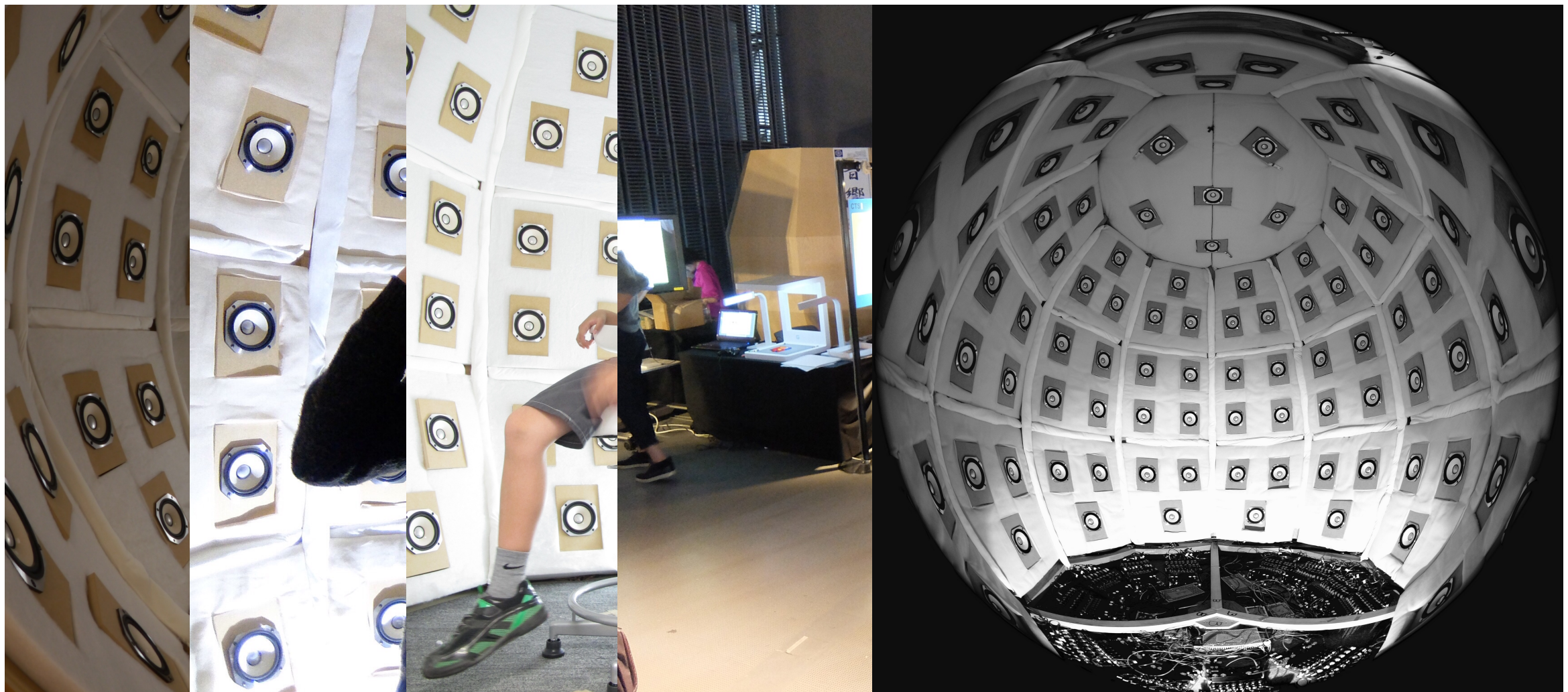


物理的音場再生と芸術的な音場創成 ～ なぜこの研究？

❖ 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 フラールンマイク + **音響樽 (96ch)** ・ 音積木 (48ch)

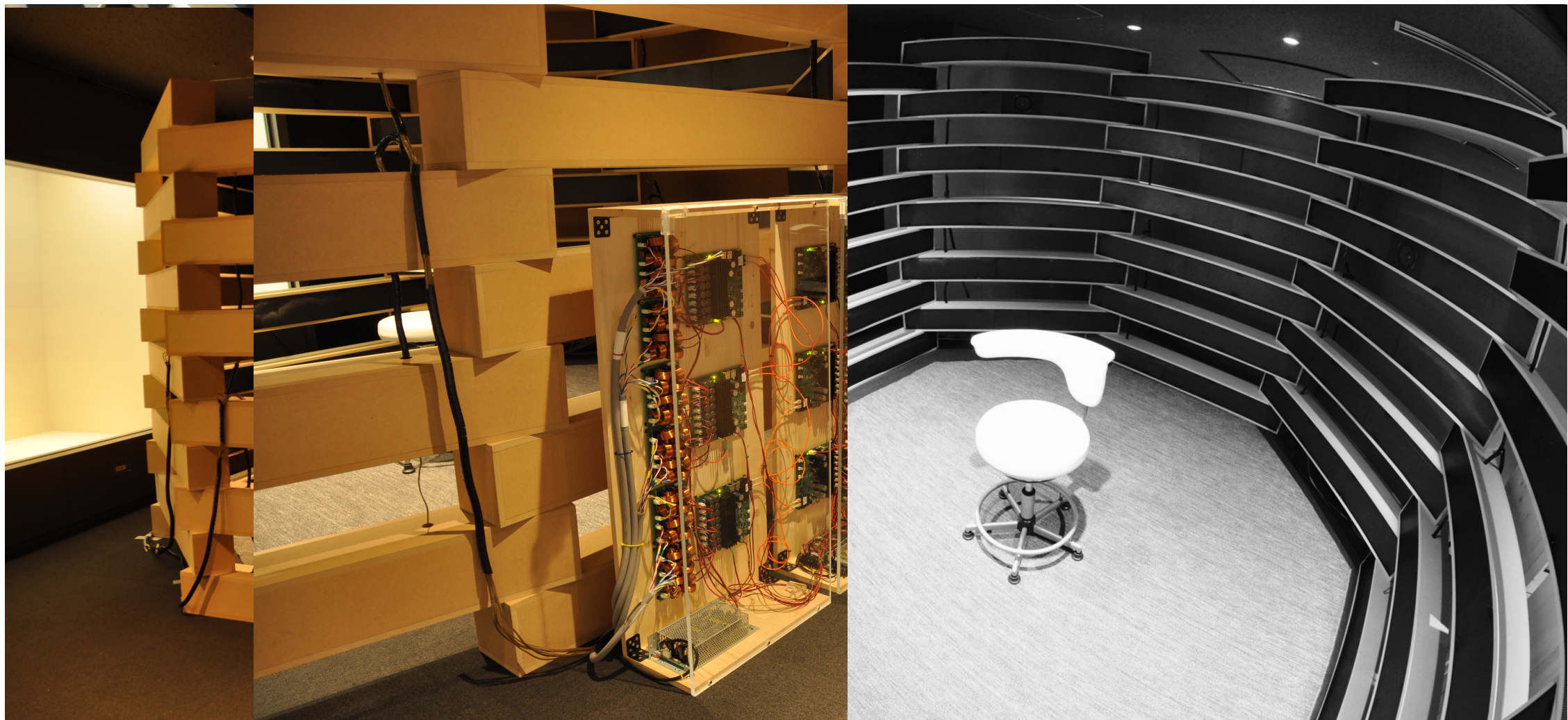


物理的音場再生と芸術的な音場創成 ～ なぜこの研究？

❖ 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 フラールンマイク + 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！



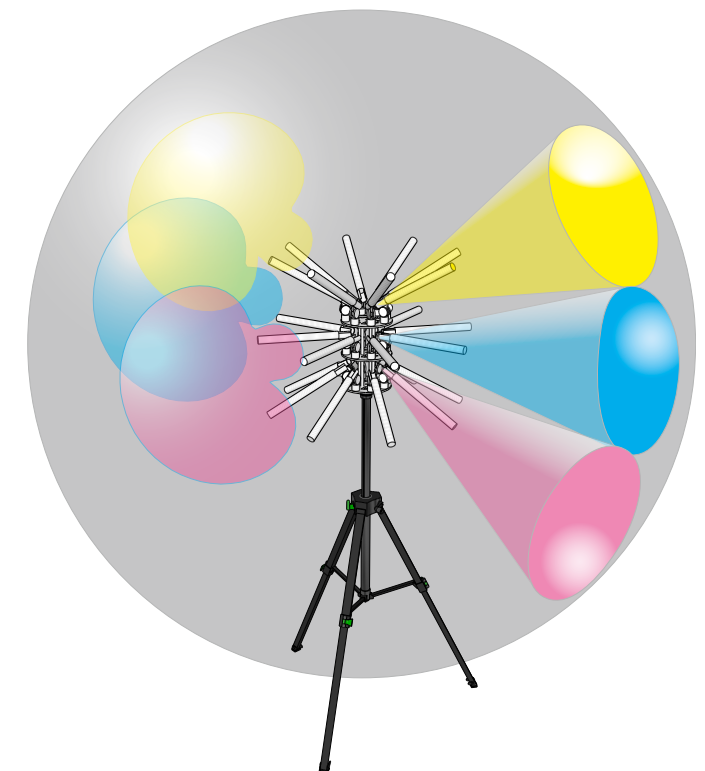
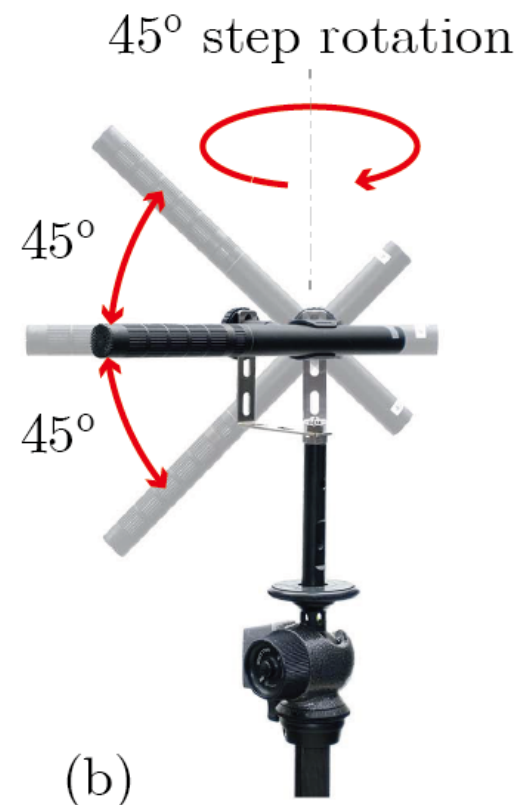
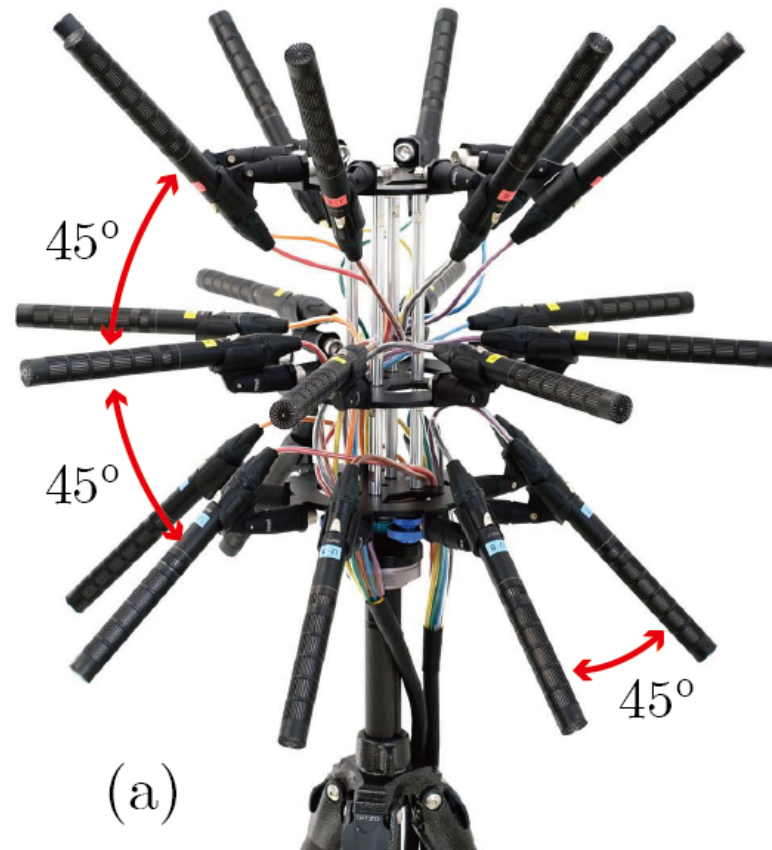
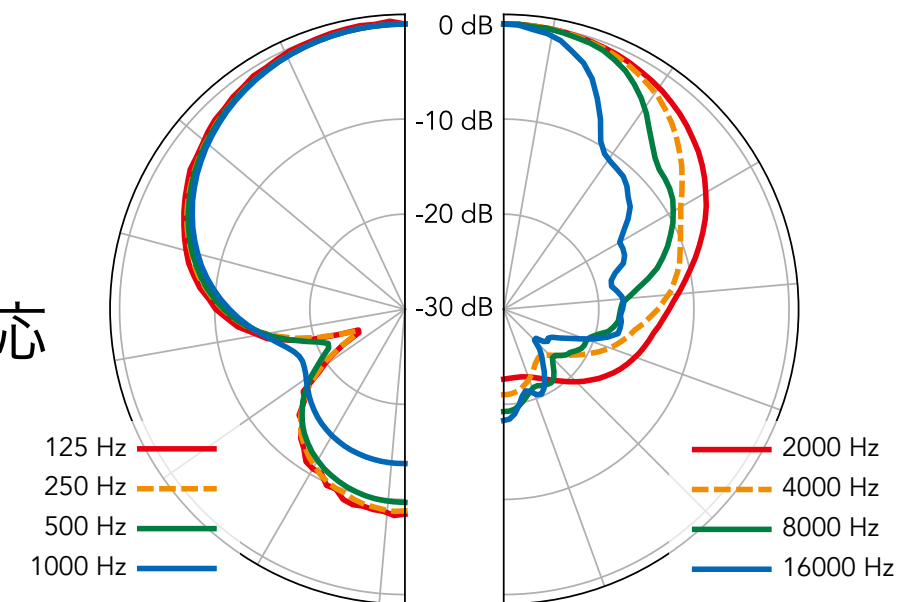
SENNHEISER MKH416, MKH8060
AKG C480B+CK69ULS
FOSTEX MC35
Audio-Technica BP4073
RODE NTG3
Sanken CS-1e, CS-2, CS-3e

DPA 4017B
SCHOEPS 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 of 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

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

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

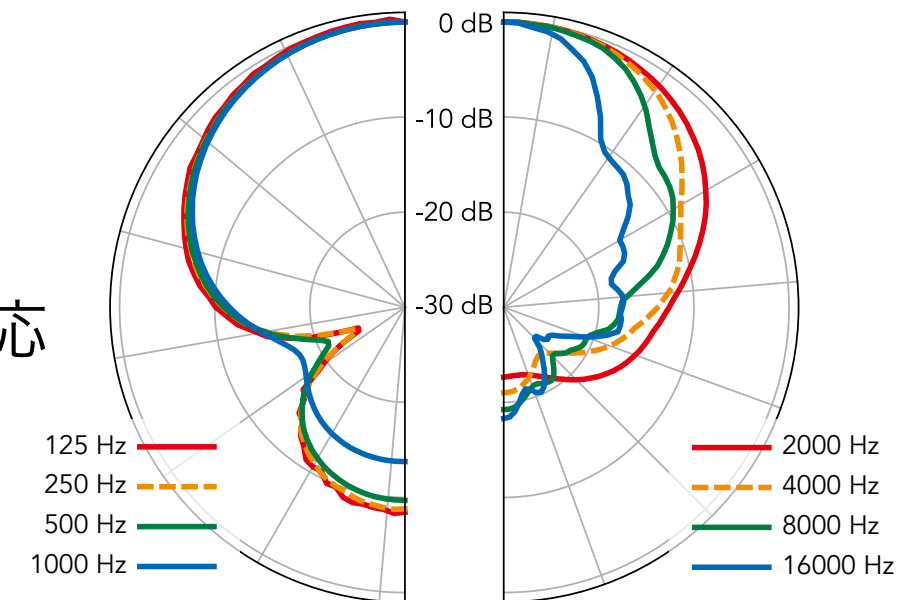
物理的な基礎体力
の強化

芸術的表現力
の強化

具体的なシステム構成

❖ 収録システム

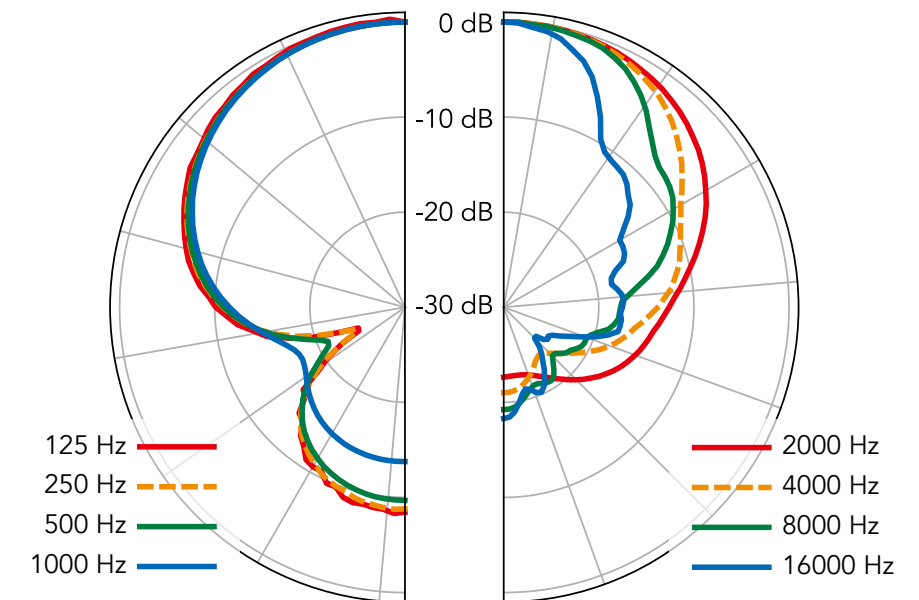
- ▶ 24 チャンネル 鋭指向性マイクロホンアレイ
 - ✓ 同時収録・逐次インパルス応答測定 of 双方に対応
 - ✓ 大きい Ver. も構築（低域カブリ改善のため）



具体的なシステム構成

❖ 収録システム

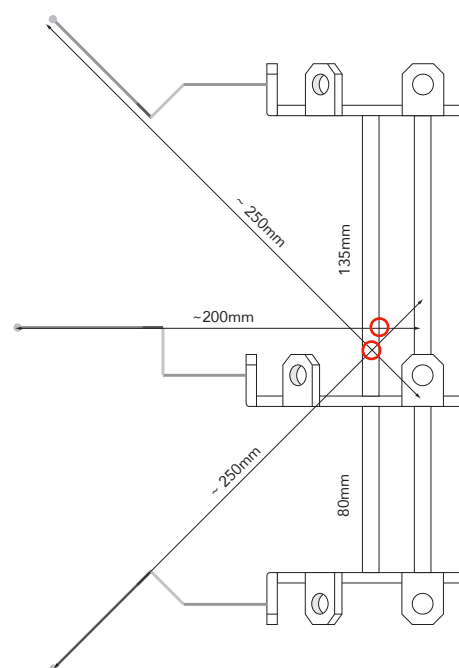
- ▶ 24 チャンネル 鋭指向性マイクロホンアレイ
 - ✓ 逐次インパルス応答測定の場合には
2ch, 1ch バージョンでつかうことも



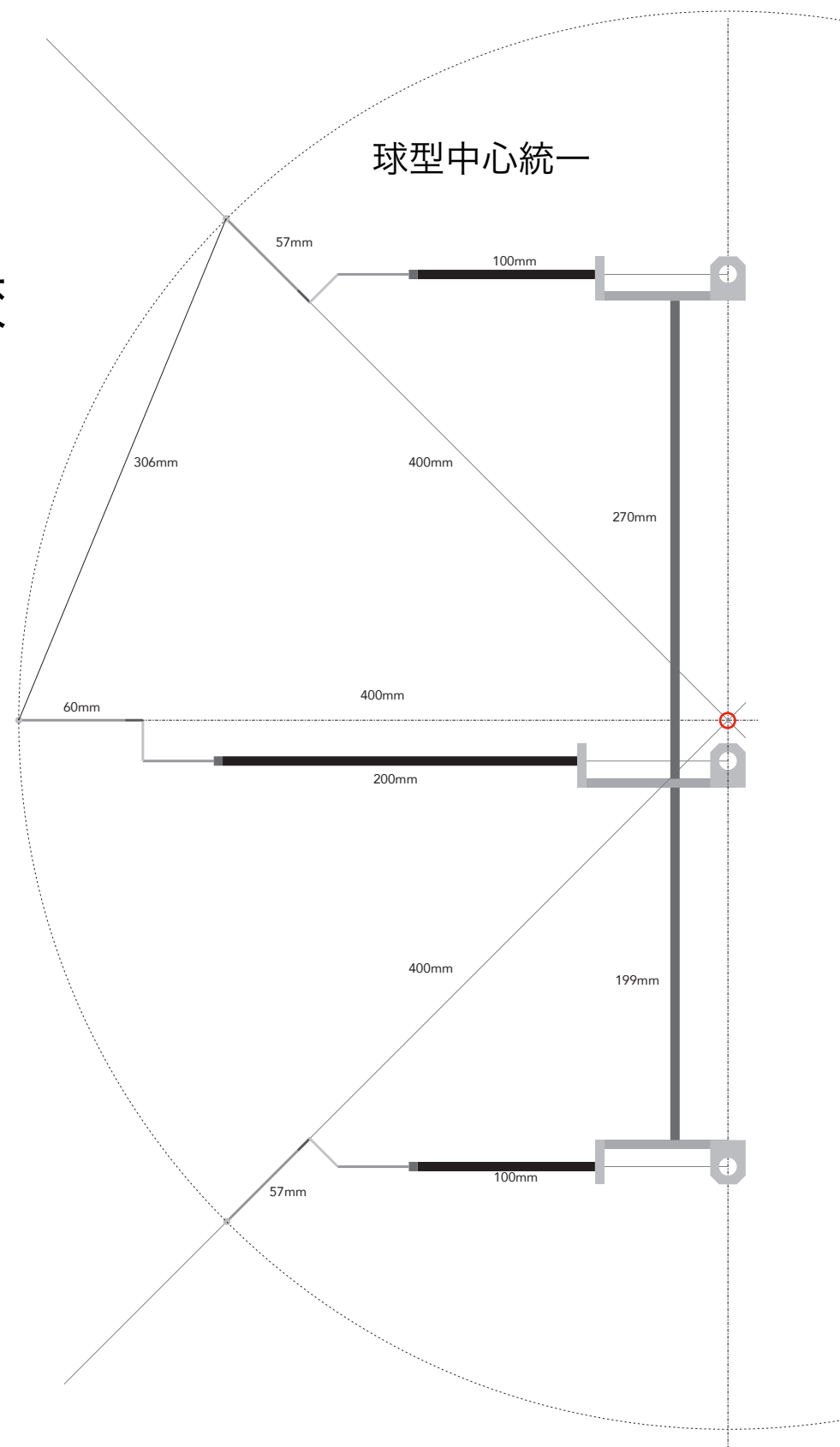
具体的なシステム構成

❖ 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

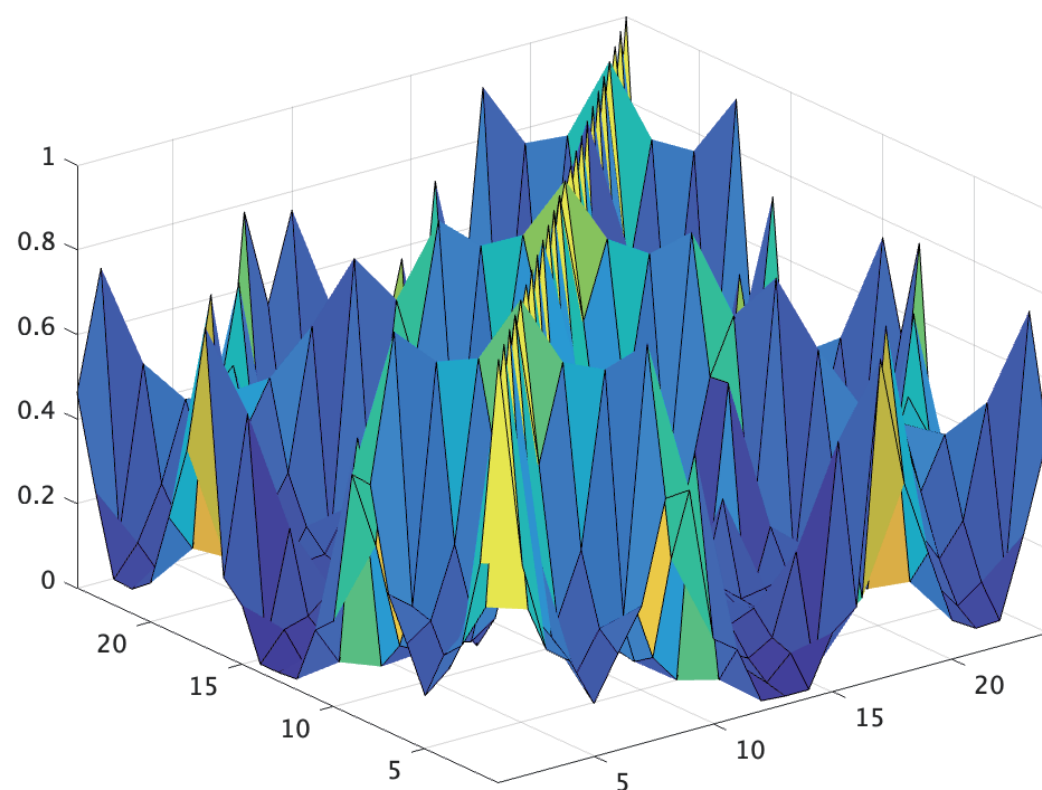


具体的なシステム構成

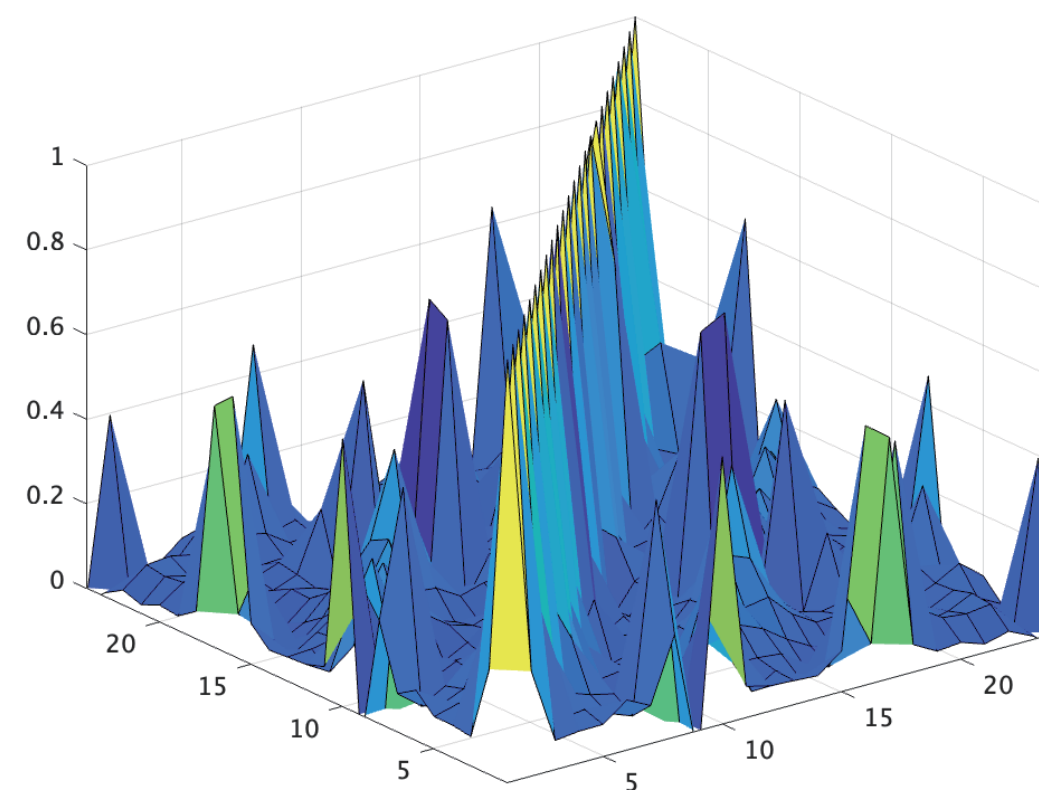
❖ 収録システム

- ▶ 24 チャンネルアレイ：大小の比較→マイク間相関係数

Small Hedgehog



Large Hedgehog

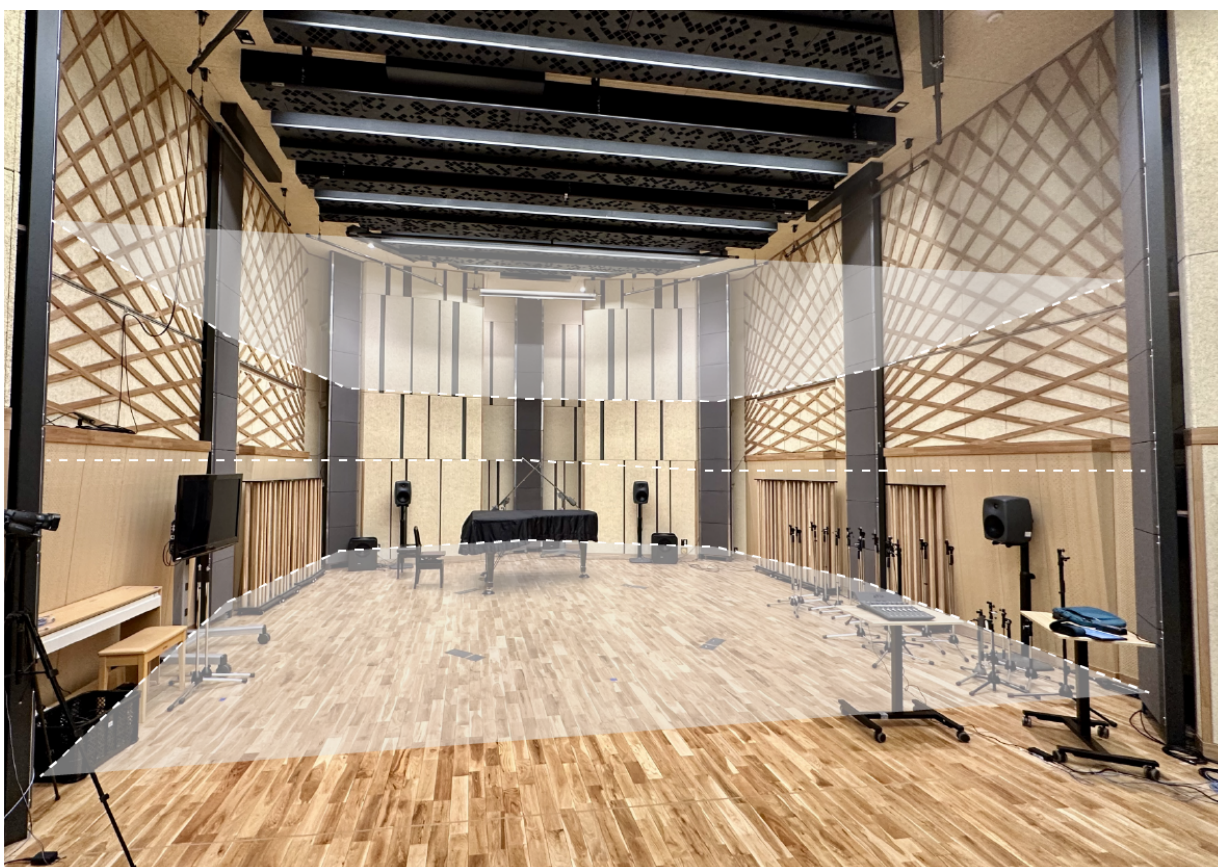


Correlation coefficient of 24-ch impulse responses measured in the concert hall
with reverberation time approximately 2.5 seconds.:
Frequency band was limited to [50 2000] Hz,

具体的なシステム構成

❖ 再生システム

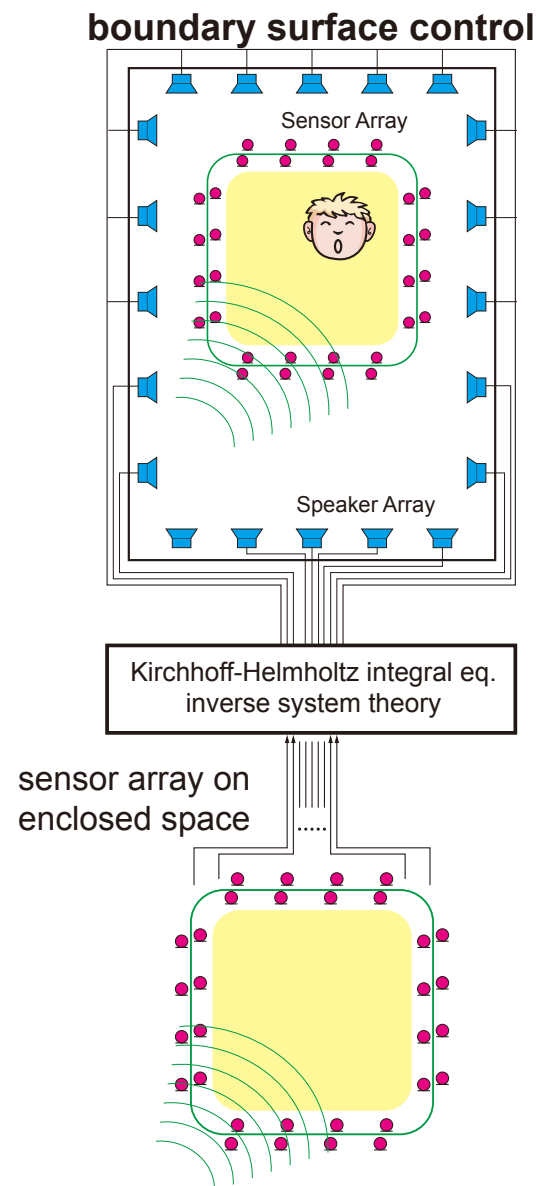
- ▶ 24 ch スピーカアレイ
 - ✓ 収録マイクと同方位からの再生
 - ✓ 規模感や高さ方向の表現等には改善の余地あり



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

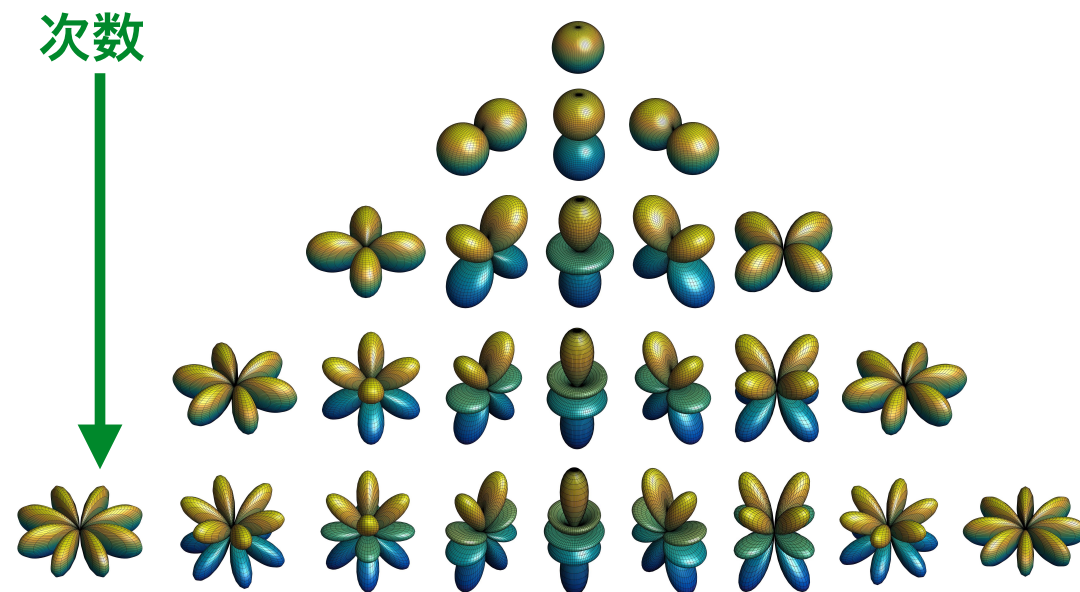
❖ 境界音場制御・HOA・ビームフォーミング



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

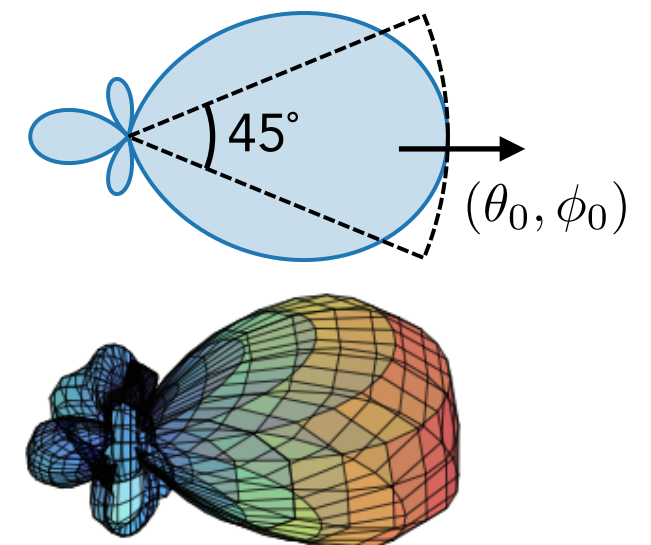
$$B(k) = \text{diag}[1/W_n(kR)] \cdot Y^\dagger \cdot s(kR)$$

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



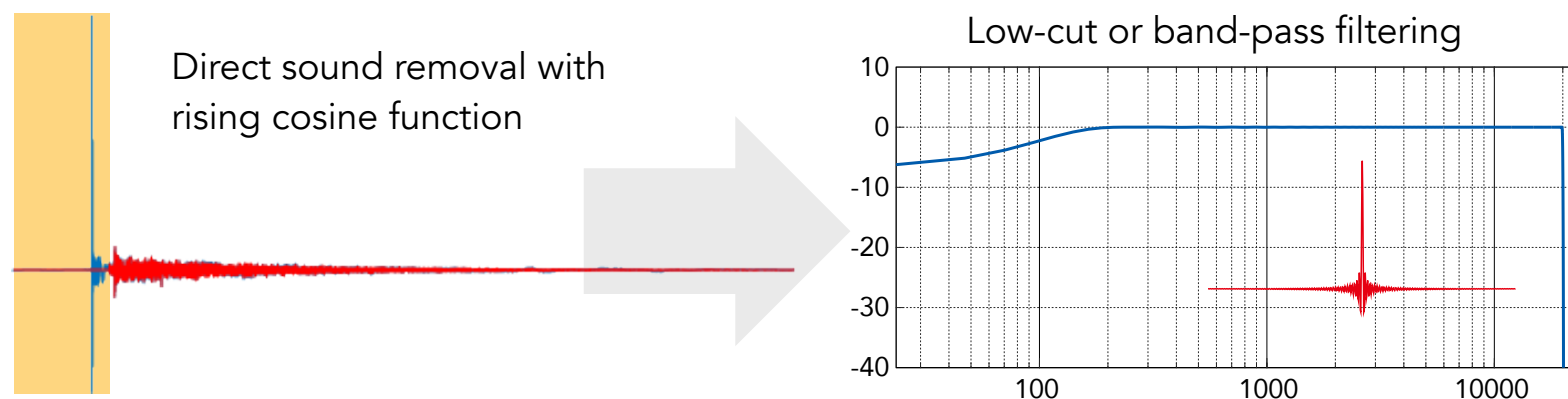
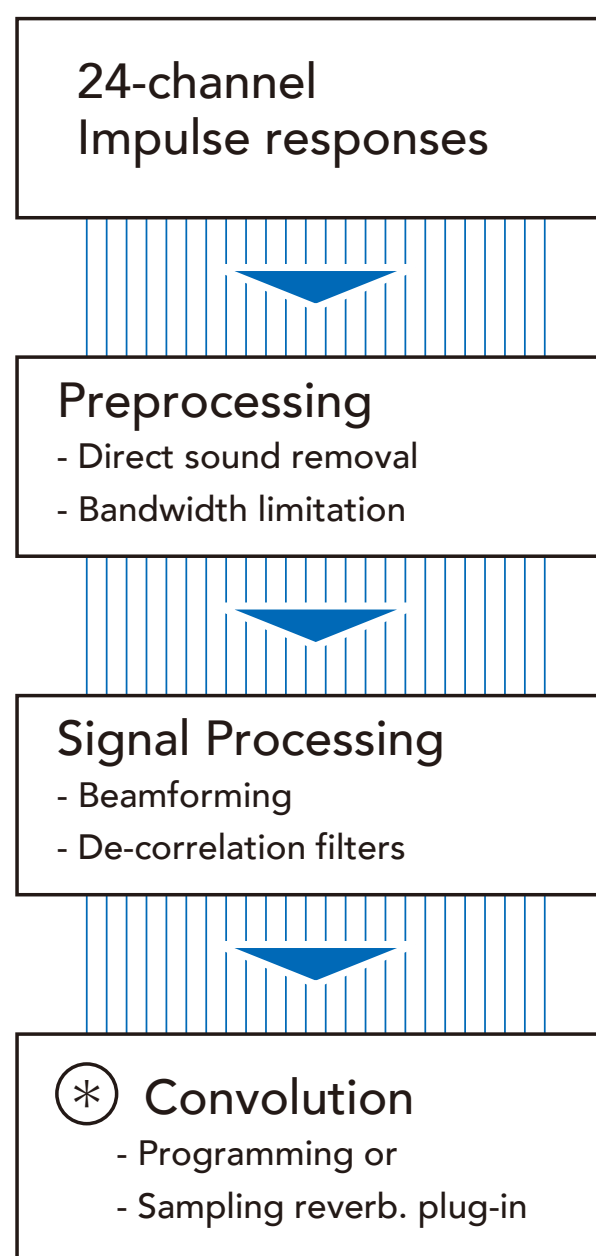
$$F(\theta_0, \phi_0) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_n \sqrt{\frac{4\pi}{2n+1}} Y_{n,m}^*(\theta_0, \phi_0) \frac{B_{n,m}(k)}{i^n}$$

- ▶ 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

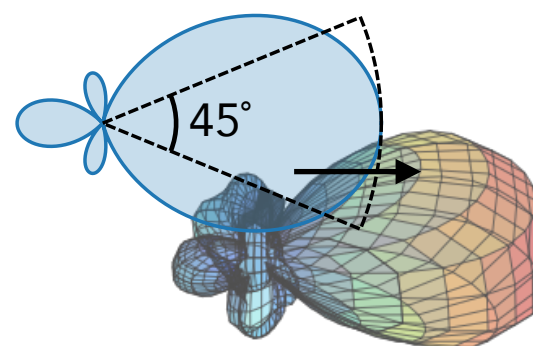
❖ 下ごしらえ的信号処理 ～ ビームフォーミング



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

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

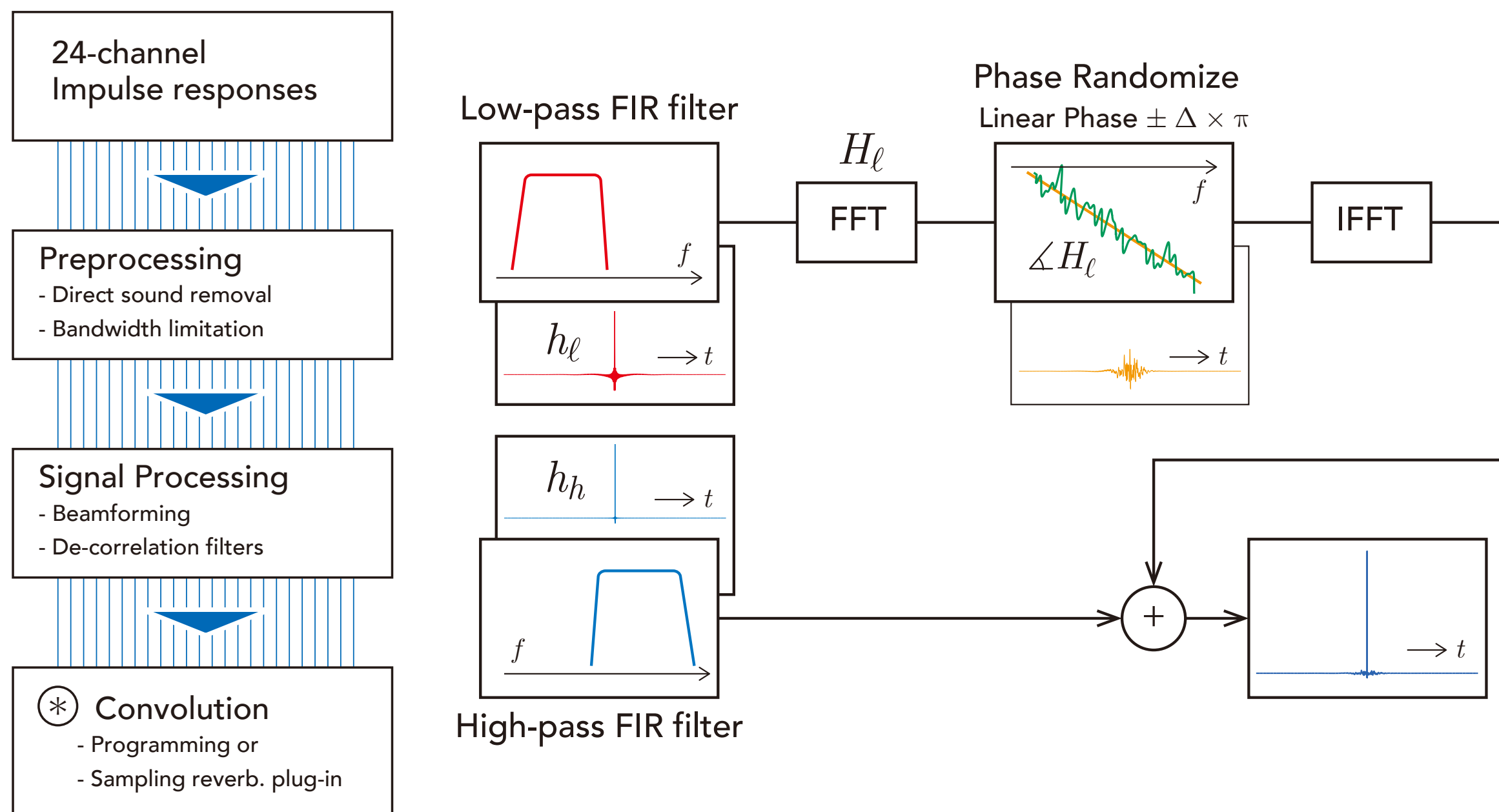
$$\tilde{F}(\theta_0, \phi_0) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_n \sqrt{\frac{4\pi}{2n+1}} Y_{n,m}^*(\theta_0, \phi_0) \frac{B_{n,m}(k)}{i^n}$$



- ✓ 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)

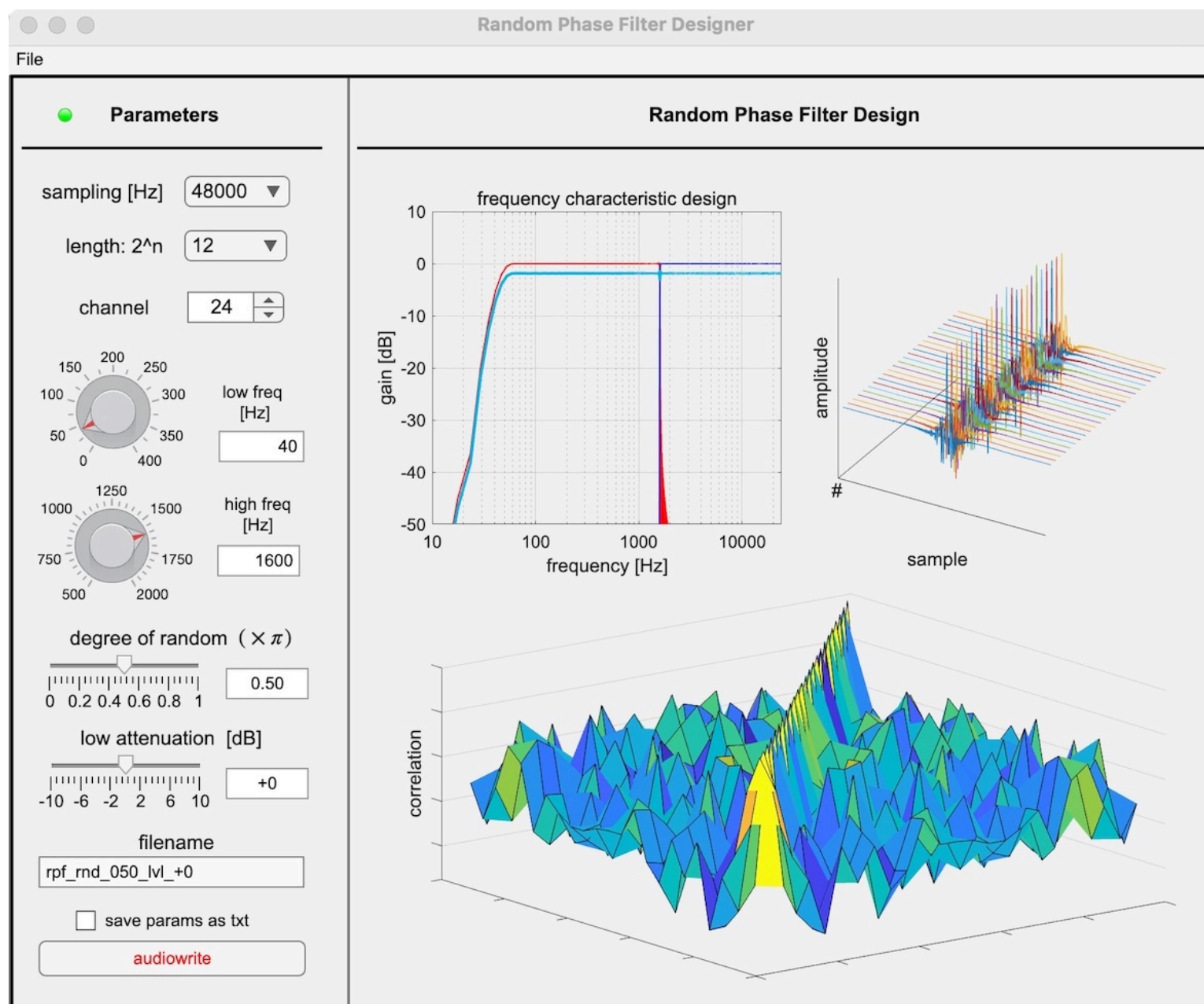
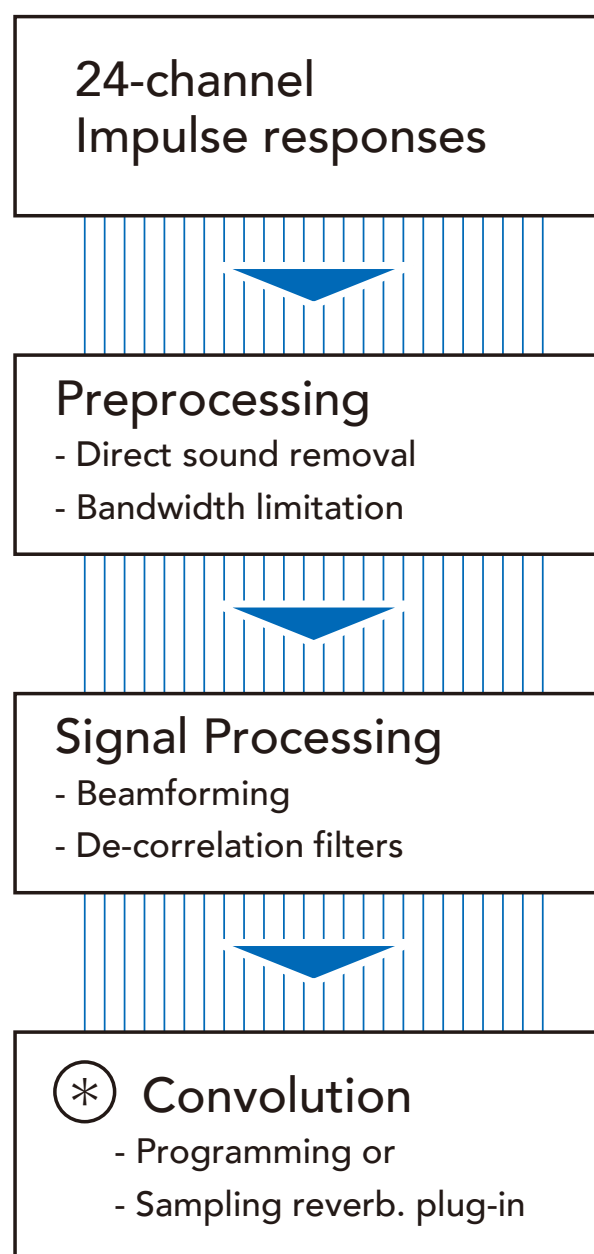
再生にあたっての信号処理

❖ 相関低減フィルタの提案



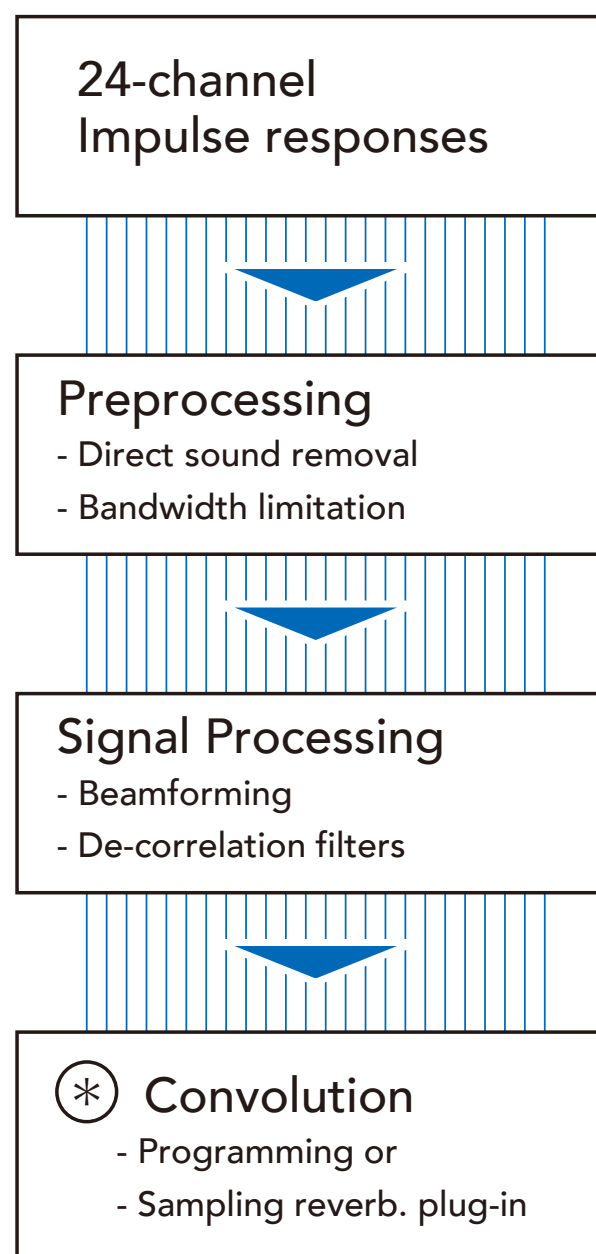
再生にあたっての信号処理

❖ 相関低減フィルタの提案

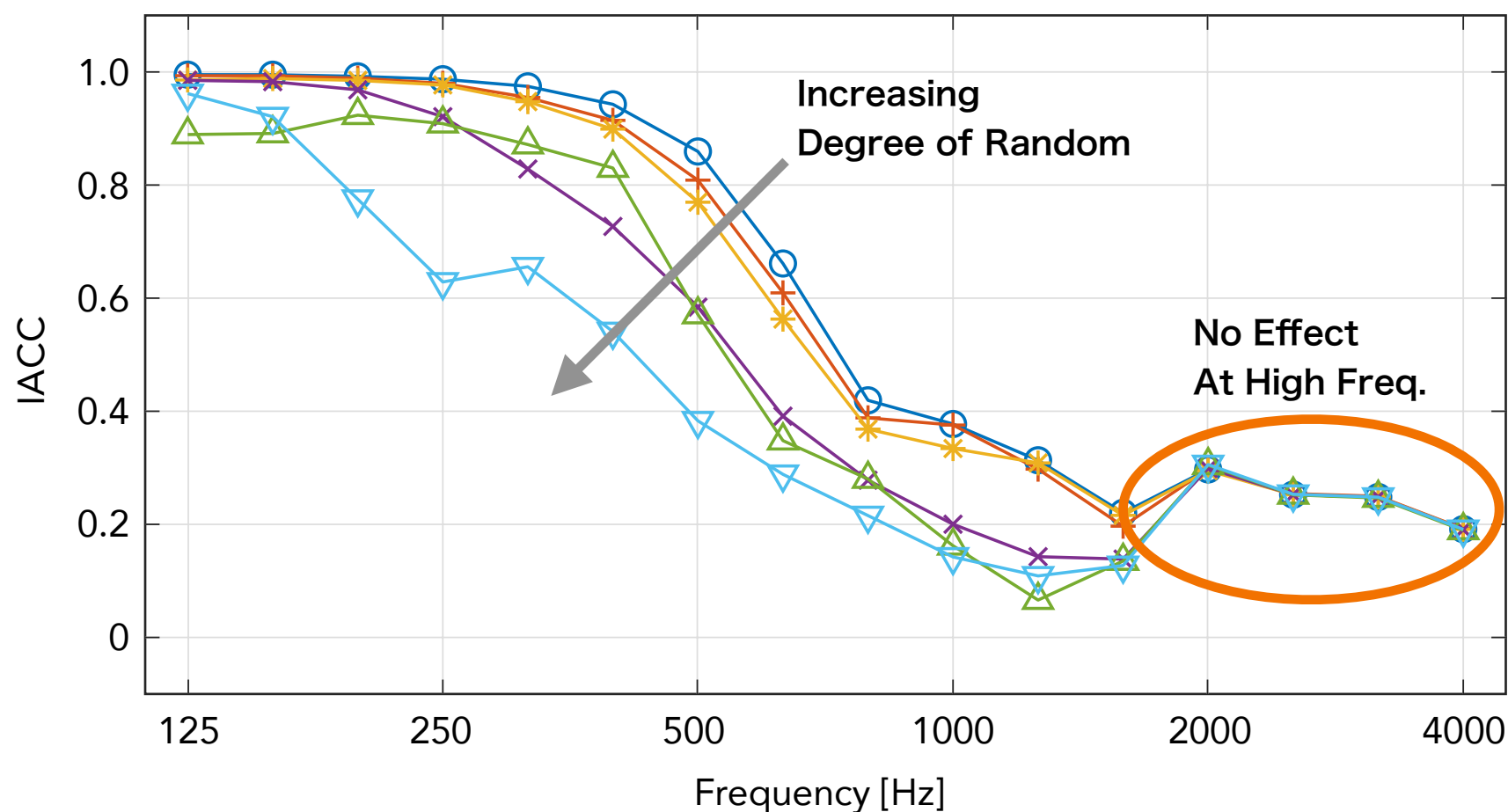


再生にあたっての信号処理

❖ 相関低減フィルタの提案

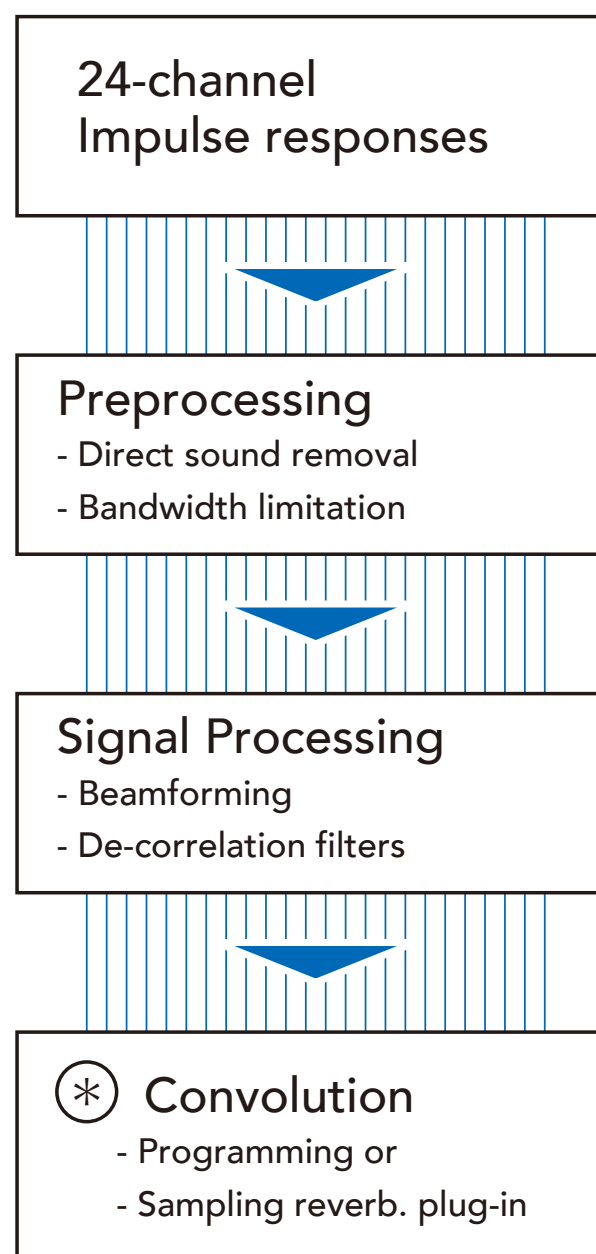


- ✓ 半無響室での実験結果
- ✓ 24チャンネルの残響成分出力に相関低減フィルタを作用
- ✓ 中心に設置したダミーヘッドにおけるIACCを測定

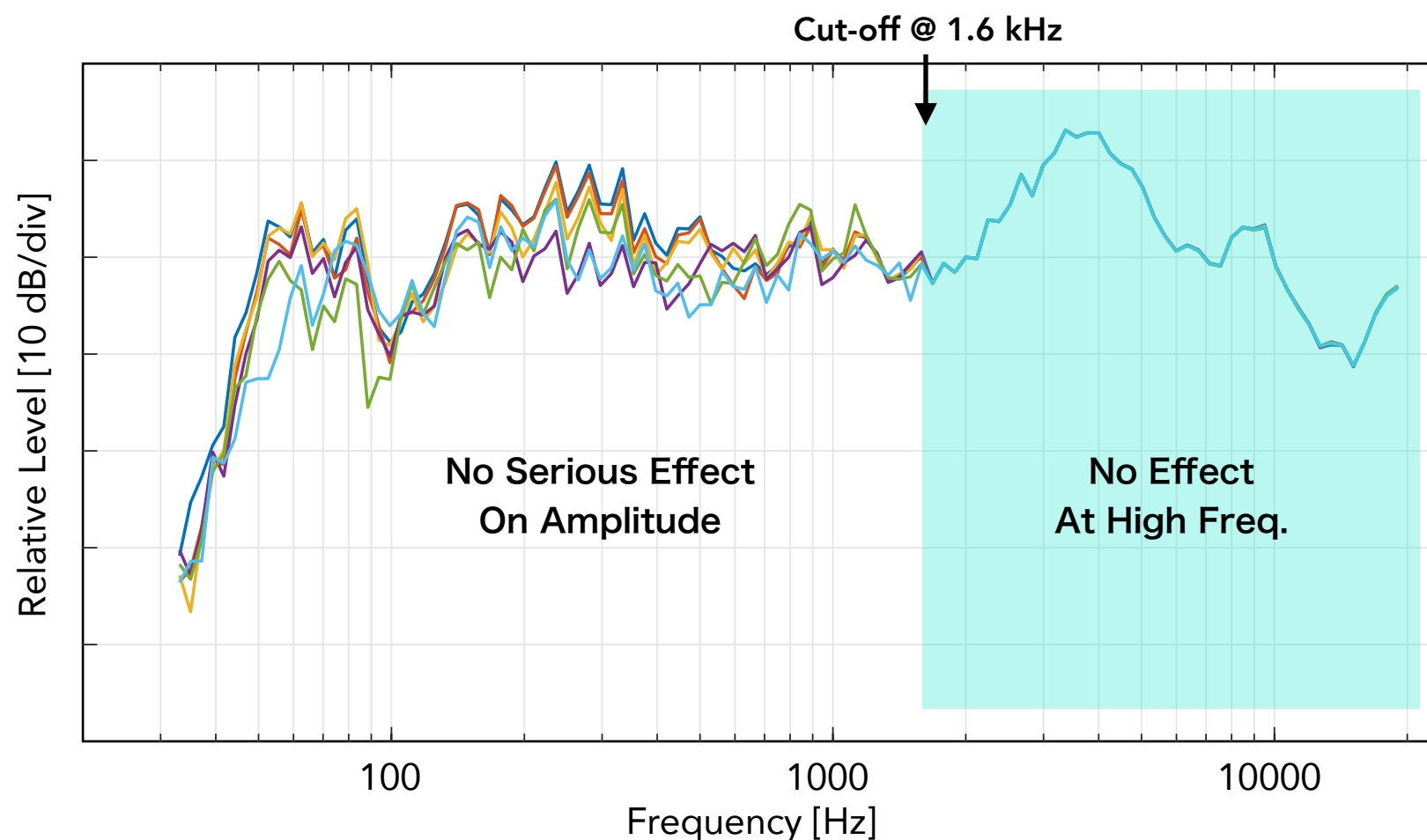


再生にあたっての信号処理

❖ 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

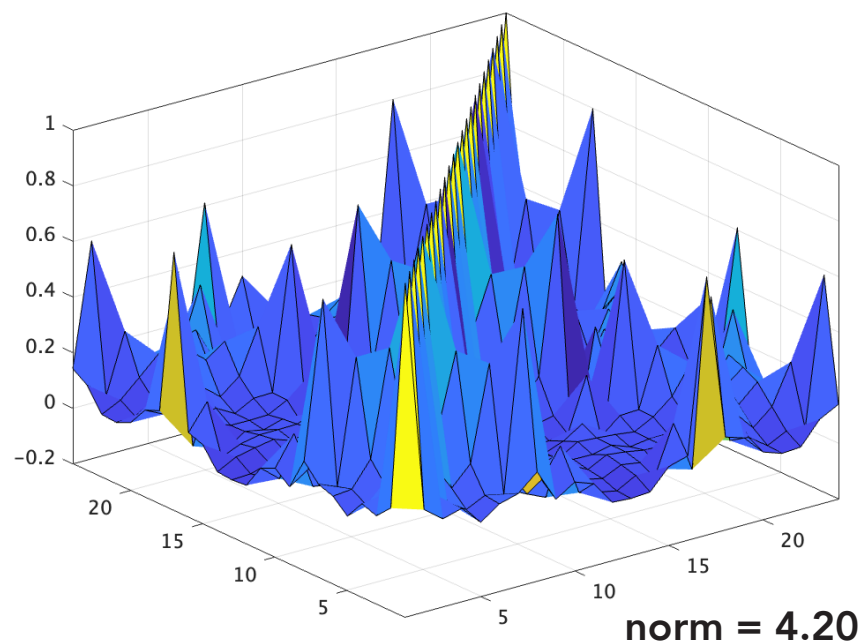


❖ 大きさと相関低減フィルタの効果：マイク間相関係数

Effect of "size" of hedgehog microphone array

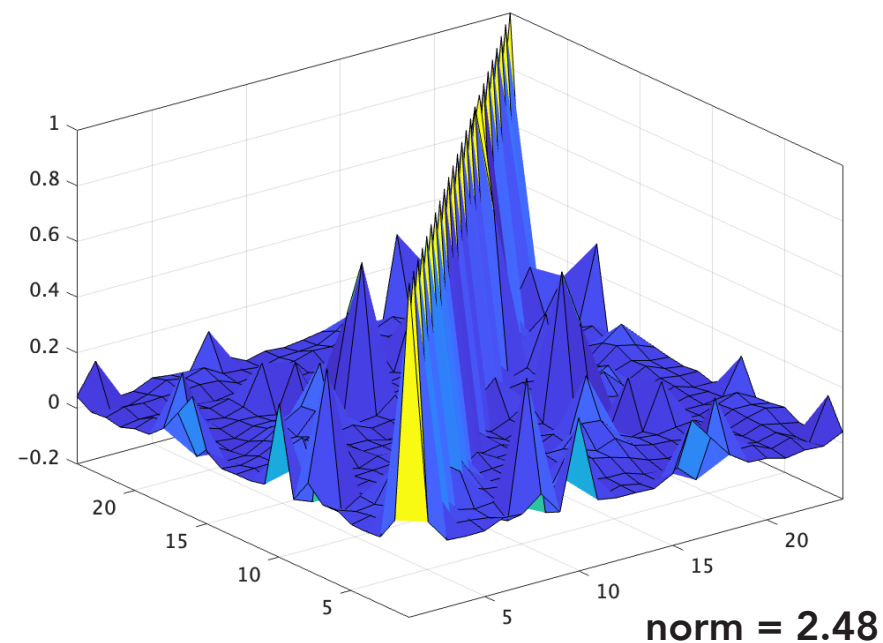


Old (small) hedgehog



Without
Random
Phase
Filter

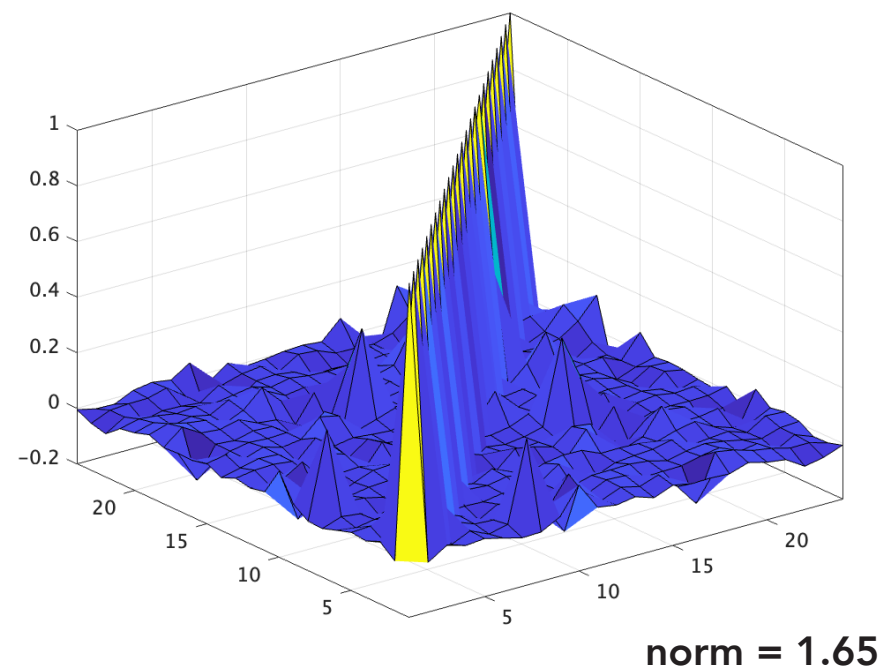
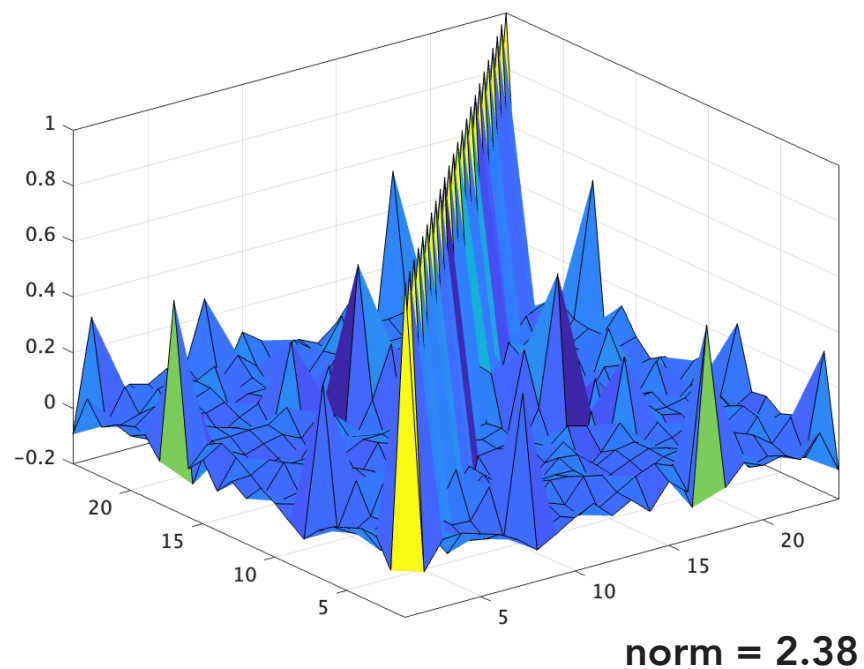
New (large) hedgehog



Effect of "decorrelation" by random phase filter

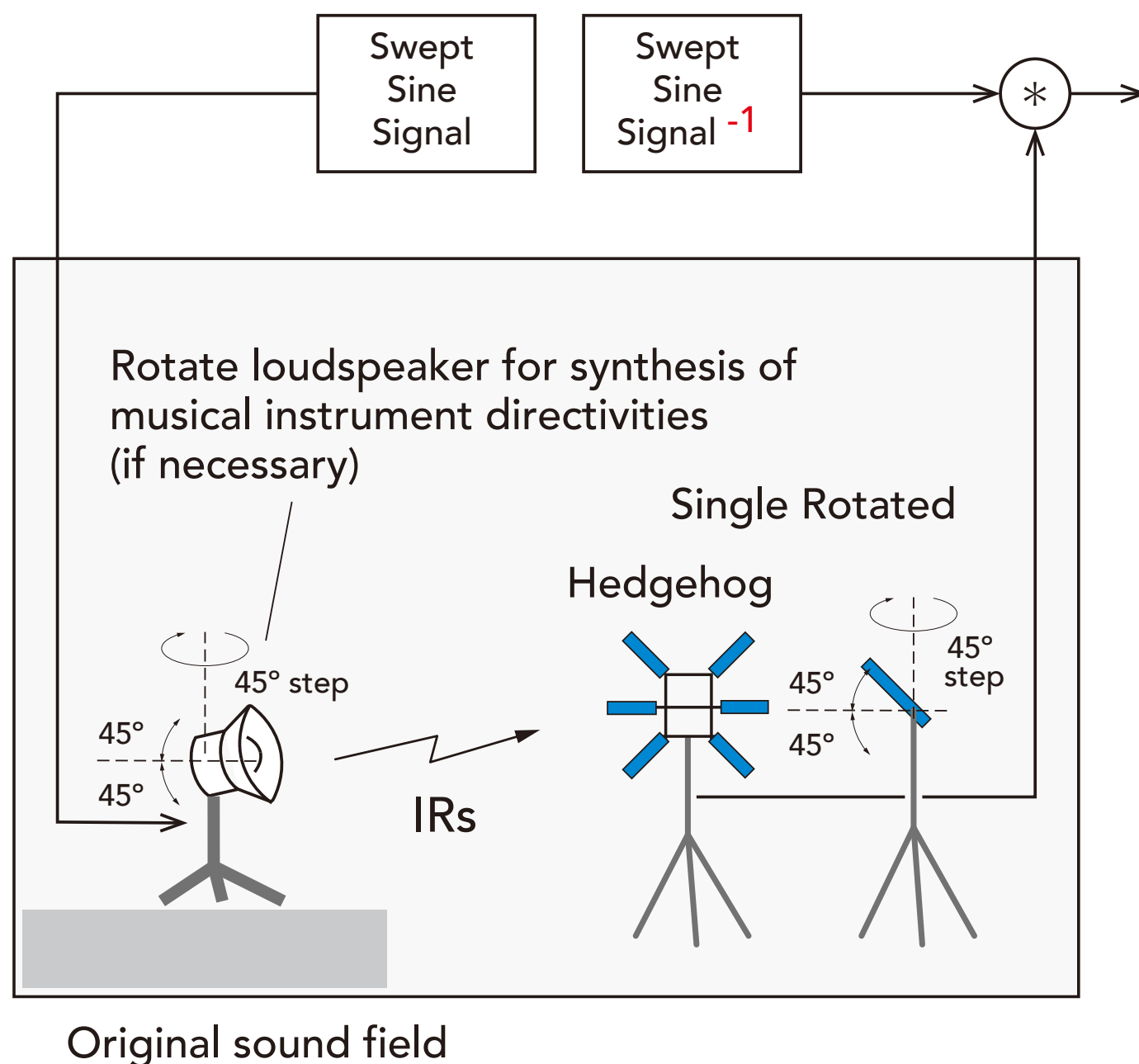


With
Random
Phase
Filter



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

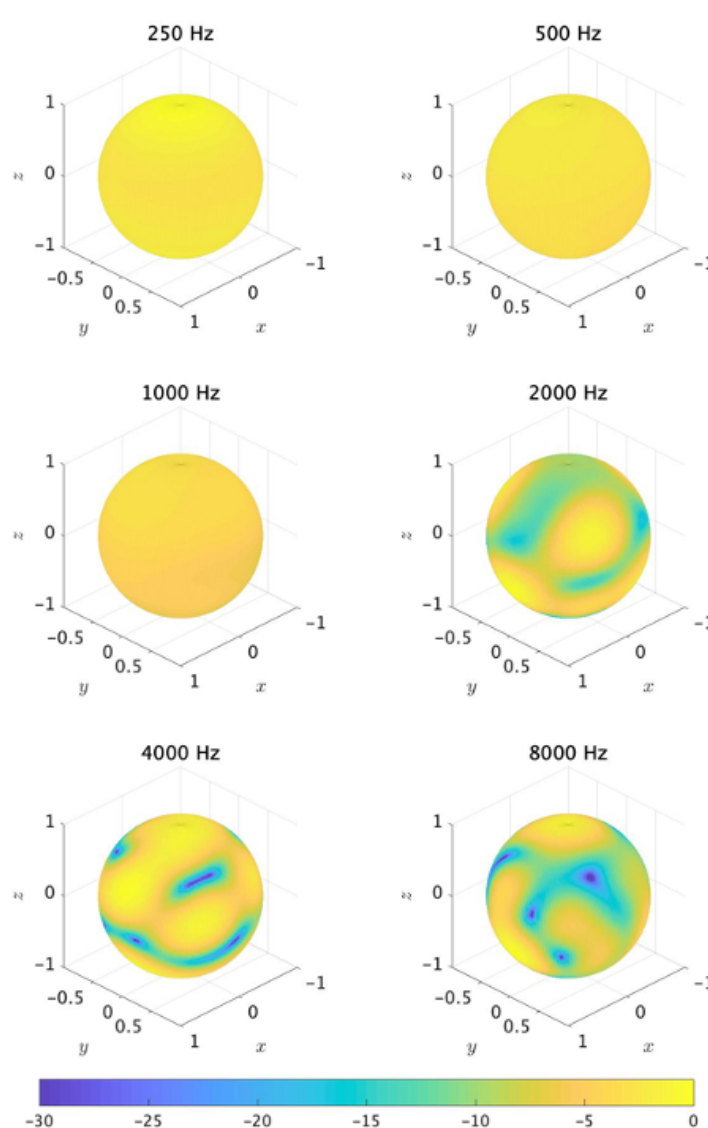
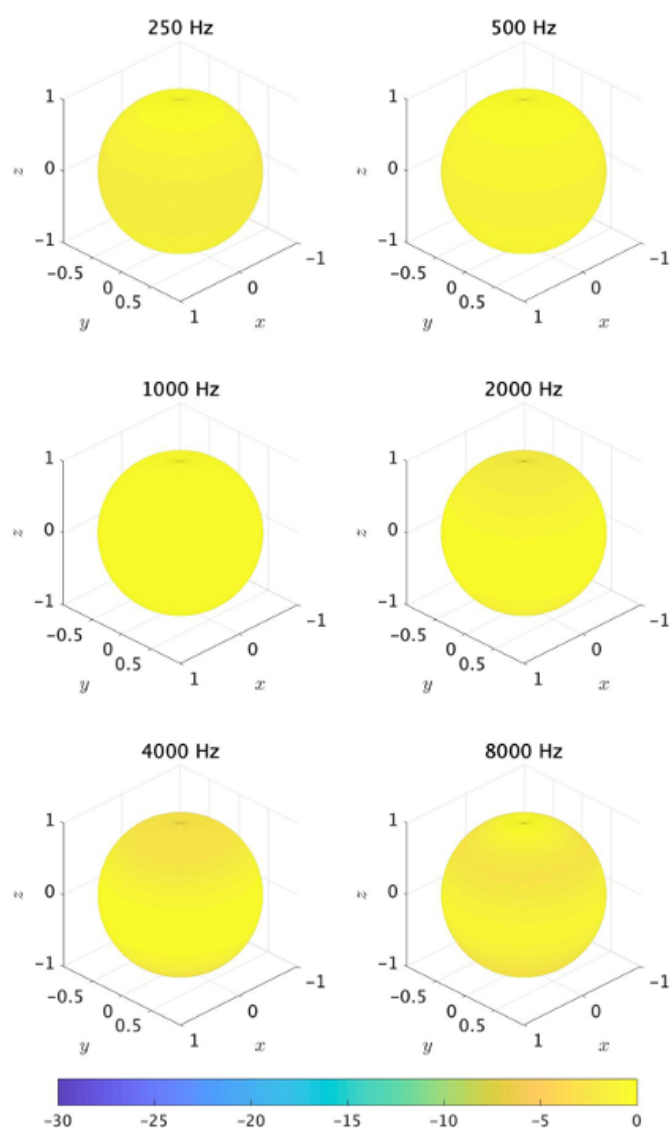
R. Hara, T. Iwami, H. Kashiwazaki, A. Omoto, "Synthesis of musical instrument directivities with a single common loudspeaker (L)," J. Acoust. Soc. Am. 150, 2549–2552 (2021).

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

Dodecahedron



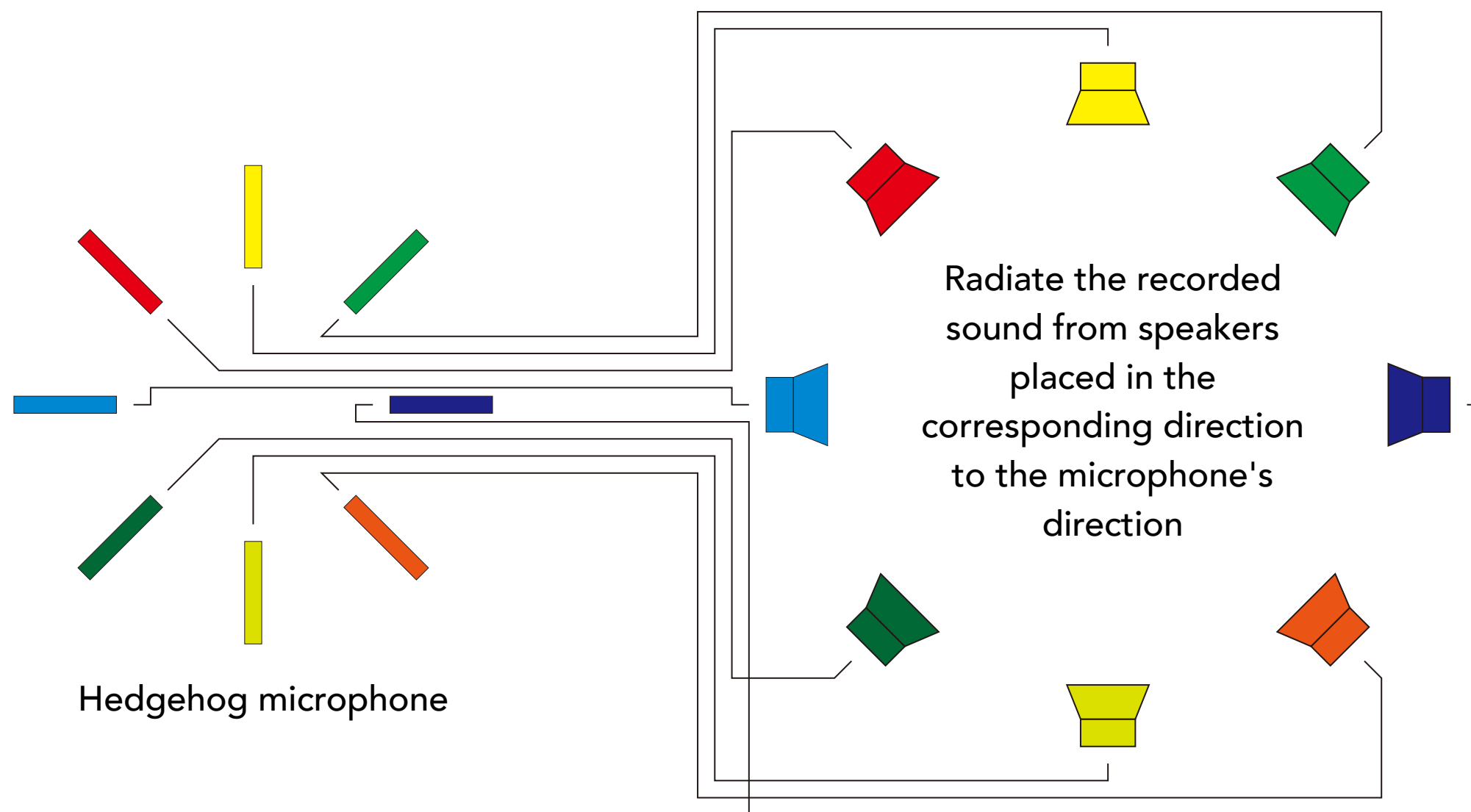
- ✓ **500 Hz以下**：全指向性性能に大差なし
- ✓ **2 kHz以上**：12面体スピーカの全指向性性能低下
- ✓ **提案手法**：高周波数帯域でも全指向性を維持

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

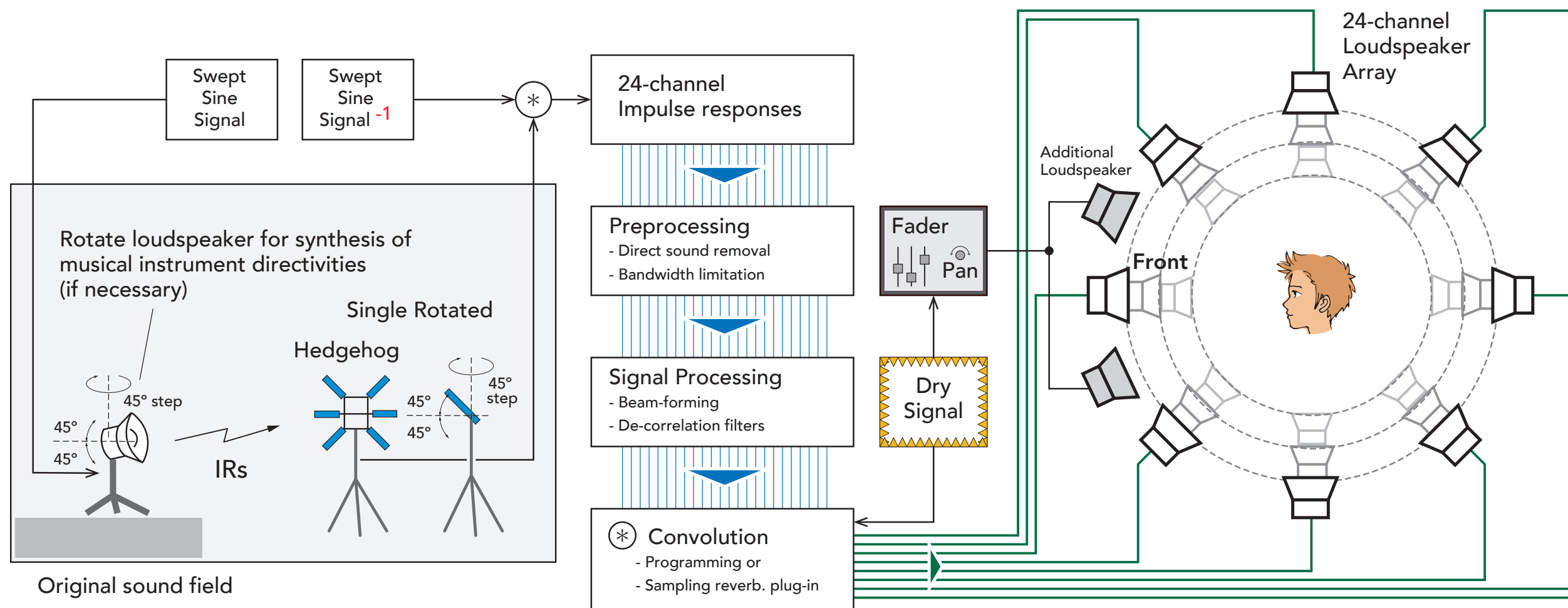
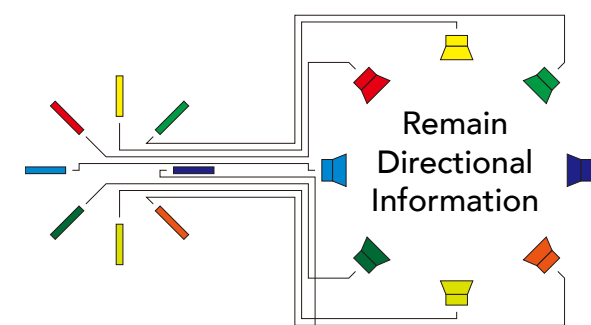
❖ 方向的には録って出し



インパルス応答測定・畳み込み

よく使う構成

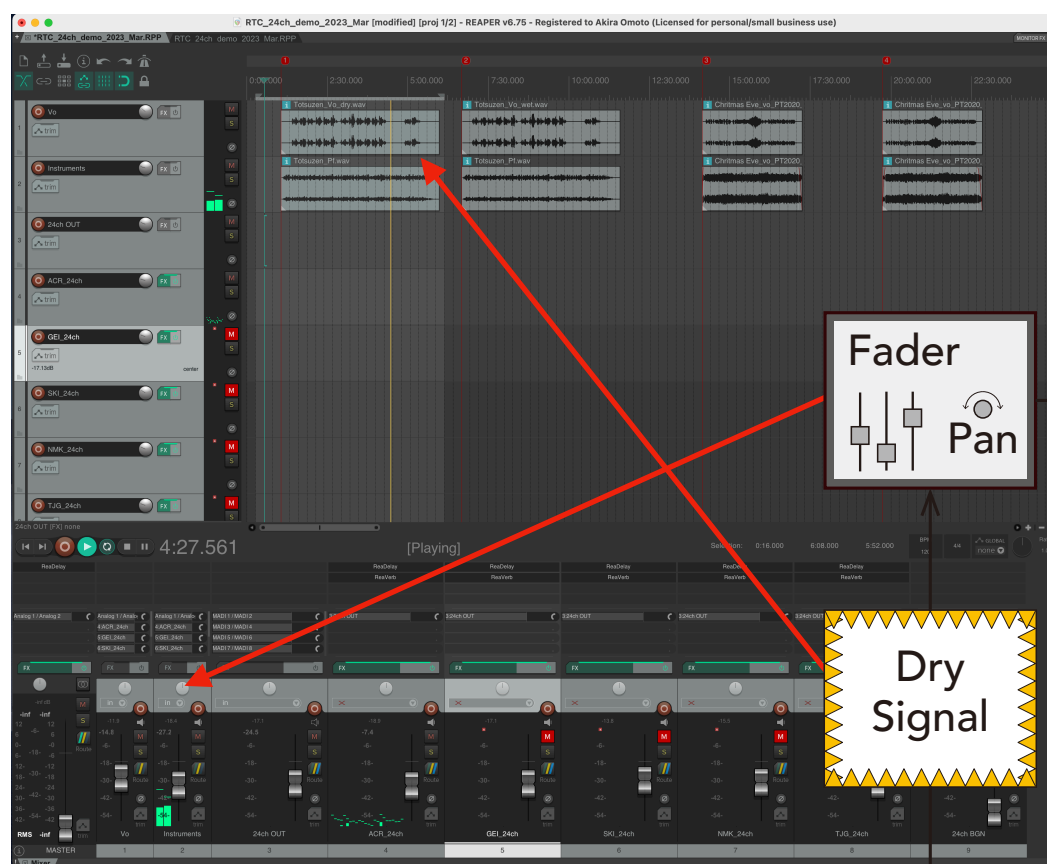
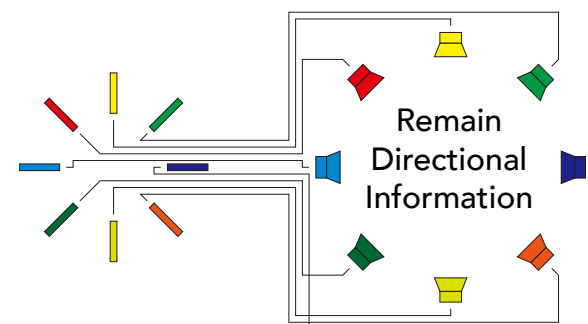
- 響きの畳み込み+ドライソースの空間ミキシング



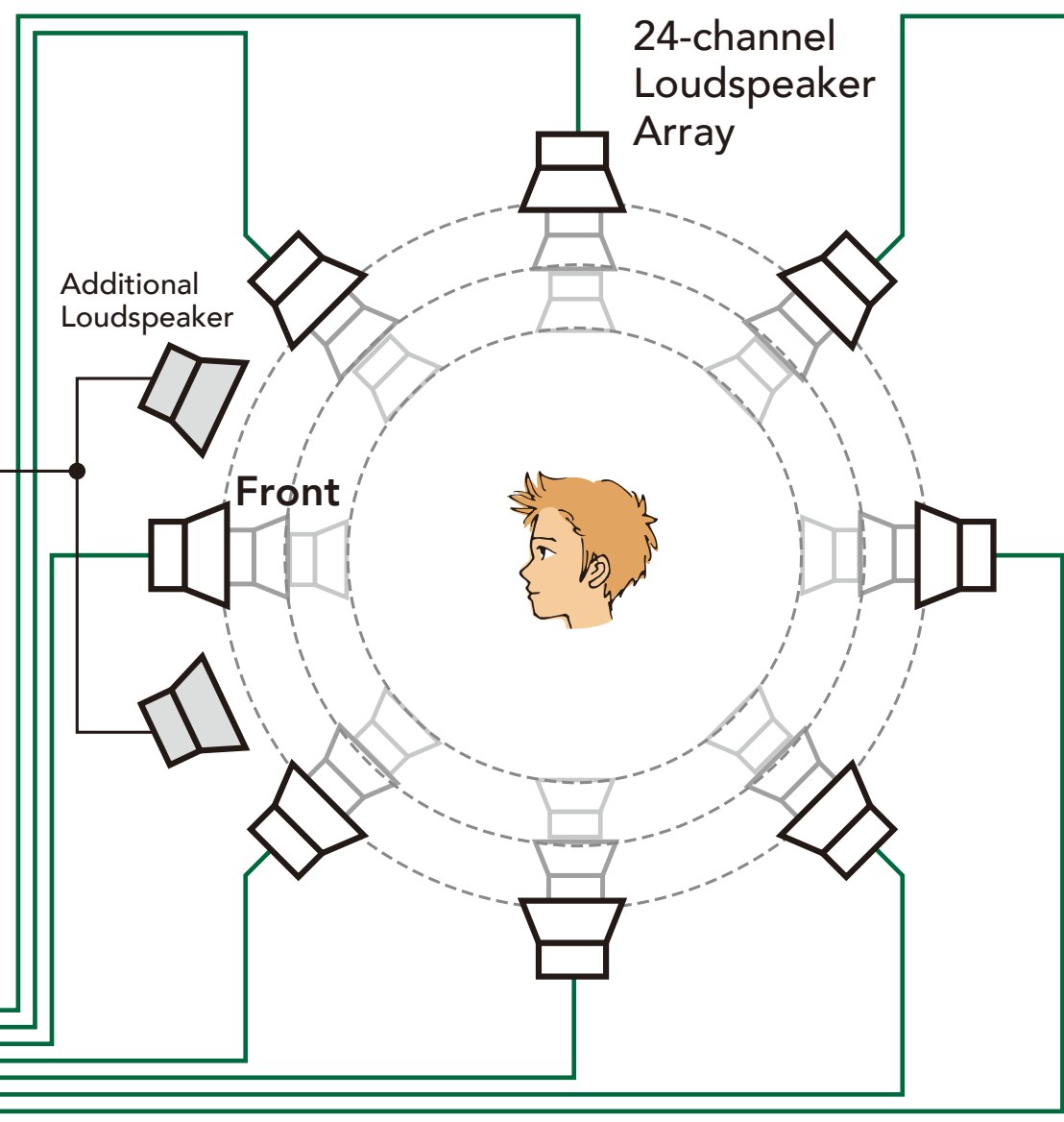
- ✓ 響き（インパルス応答）をあらかじめ測定しておけば、再生時に必要なのは音源信号（ドライソース）のみ！
- ✓ いくつかの響きを測定しておけば、切り替えながら楽しむことも可能

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

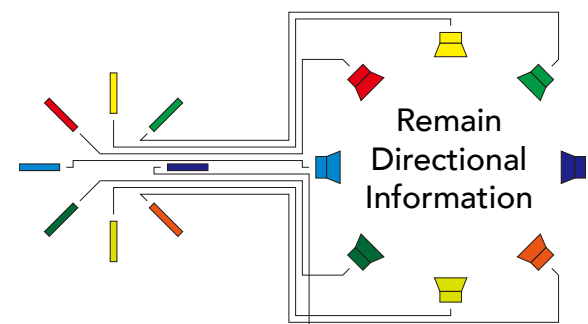


✓ **メインマイク**での収録と**24chマイク**での響きの収録

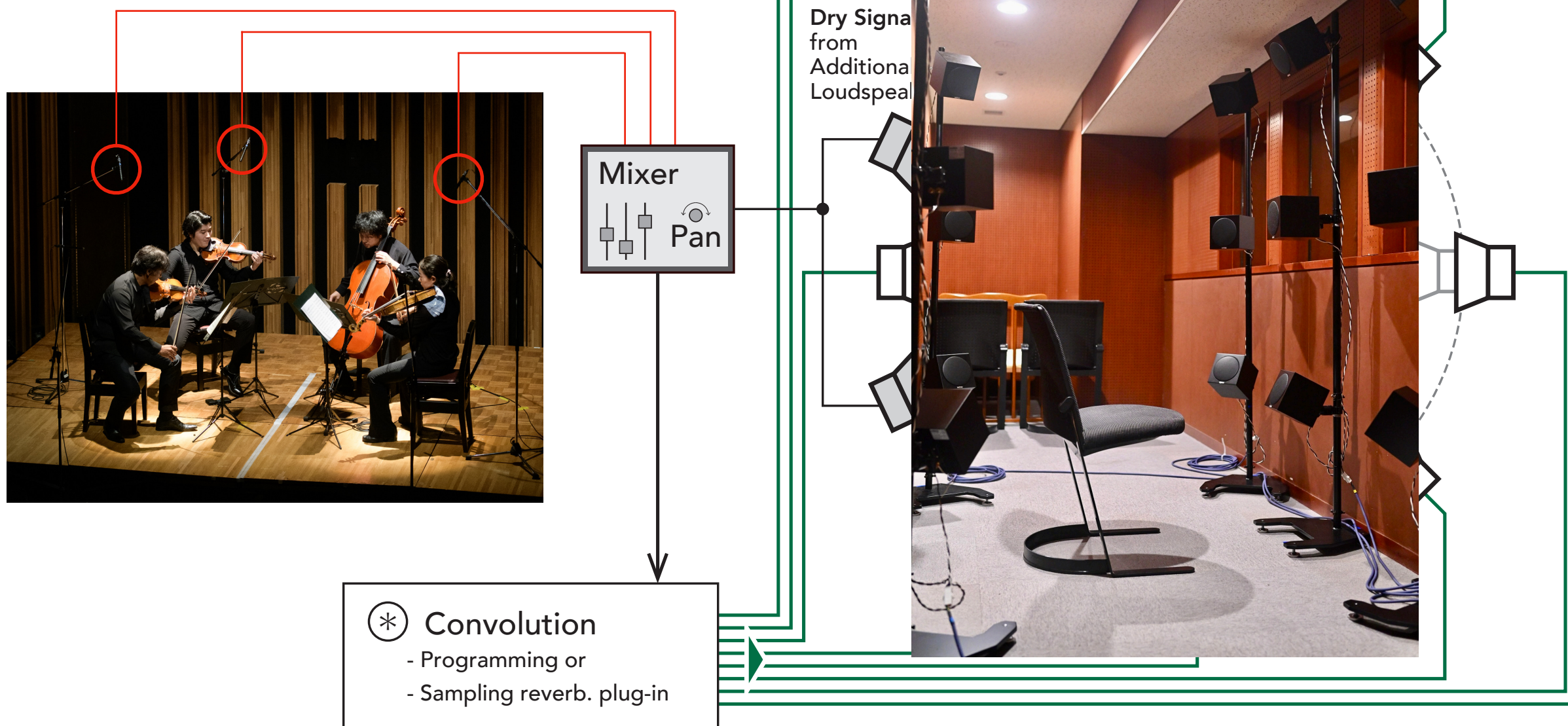
- ➡ **24チャンネルマイク**での収録とともに、**メインマイク**を配置
- ➡ ステレオ、あるいはサラウンドのマイクアレンジがよい
- ➡ あるいは、楽器へのオンマイクも可
- ➡ 再生時にミキシングは必要
- ➡ 再生時には、直接音成分が重ねて再生されるが、まあまあOK

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



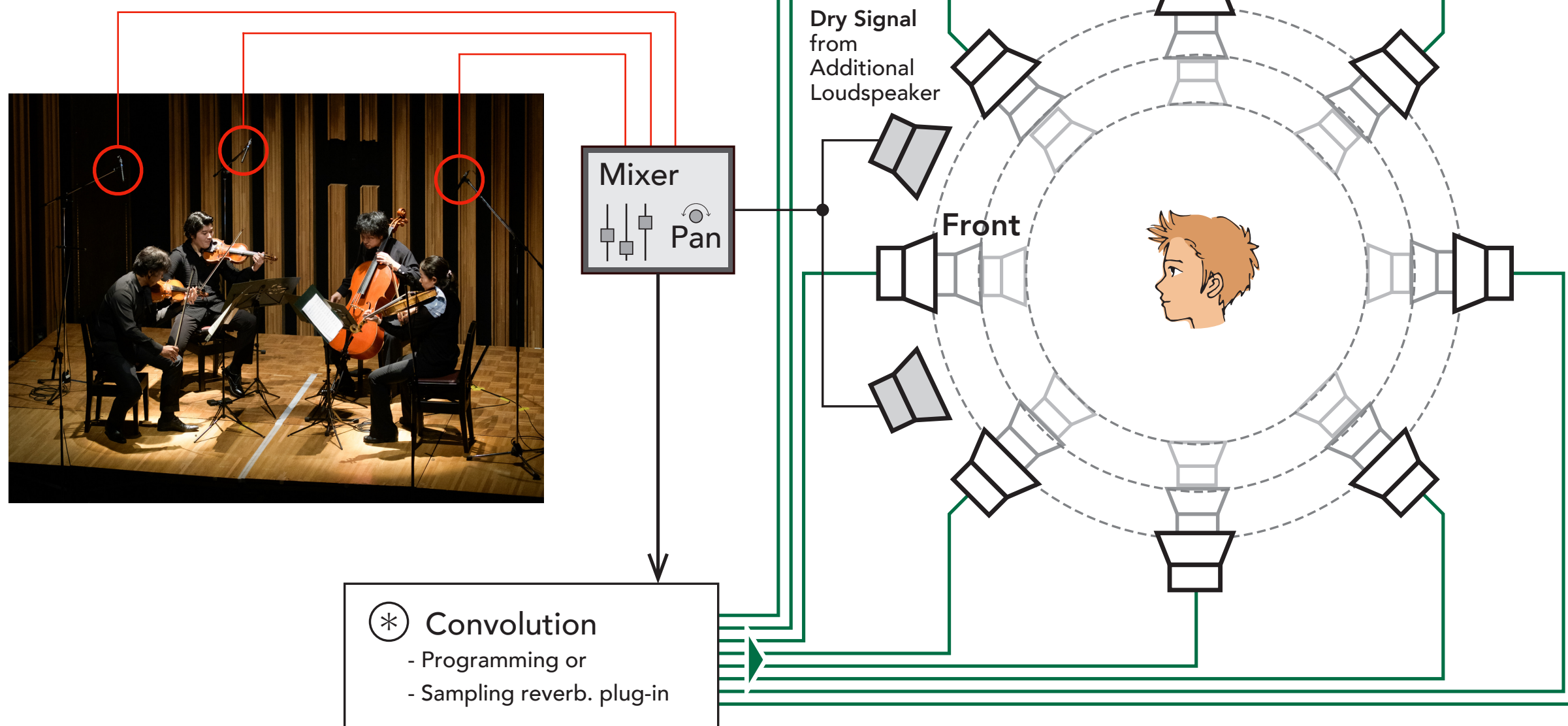
✓ **メインマイク**での収録＋畳み込みも可能



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

弦楽四重奏コンサート 九響と行く音の旅

AUDITORIUM JOURNEY

九州交響楽団 弦楽四重奏

2024 7.26 FRI. 19:00開演(18:30開場)

Violin 扇谷泰朋 九州交響楽団首席ヴァイオリン奏者	Violin 山下大樹 九州交響楽団首席ヴァイオリン奏者	Viola 細川泉 九州交響楽団首席ヴィオラ奏者	Cello 宇野健太 客席首席奏者
------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------	-------------------------

九州大学大学院芸術工学府
ホールマネジメントエンジニアリングプロジェクト

音場再生技術の実験 CONCERT

at 九州大学大橋キャンパス 多次元デザイン実験棟 | 入場無料 |
福岡県福岡市南区塩原4-9-1 | 定員80名 |

主催：九州大学大学院芸術工学府「ホールの音場再生技術（ホールマネジメントエンジニアリングプロジェクト）」（指導教員：尾本孝、長津裕一郎）
共催：九州大学大学院芸術工学府芸術系社会情報デザイン・イノベーション 協力：公益財団法人九州交響楽団 後援：福岡市
助成：科学研究費補助金（J22105764「高解像度音場再生システムの性能向上および聴覚工学との連携に関する研究」）J24K05222「音場再生システムの統合的な性能向上および人の福祉への適用に関する研究」、令和2年度大学改革推進特別補助（聴覚と音楽工学との連携を通じた芸術工学の発展「音楽の場と人間の関わりに着目した文理融合研究」）



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を超える公共ホールが存在
- ◎ 一方、メディアでは「箱ものの行政」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
拡声と收音
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

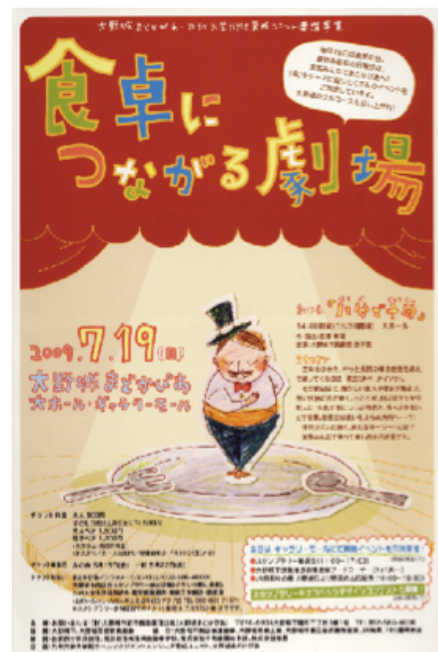
- * 2年間以上の在学により必修14単位を含む30単位の取得
 - * 2年間にわたる「ホールマネジメントプロジェクト」の実施
 - * 各授業科目毎に課せられる試験・レポートによる評価
- 30 units incl. 14 required
 - Two years Project
 - Report, Exam.



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）





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

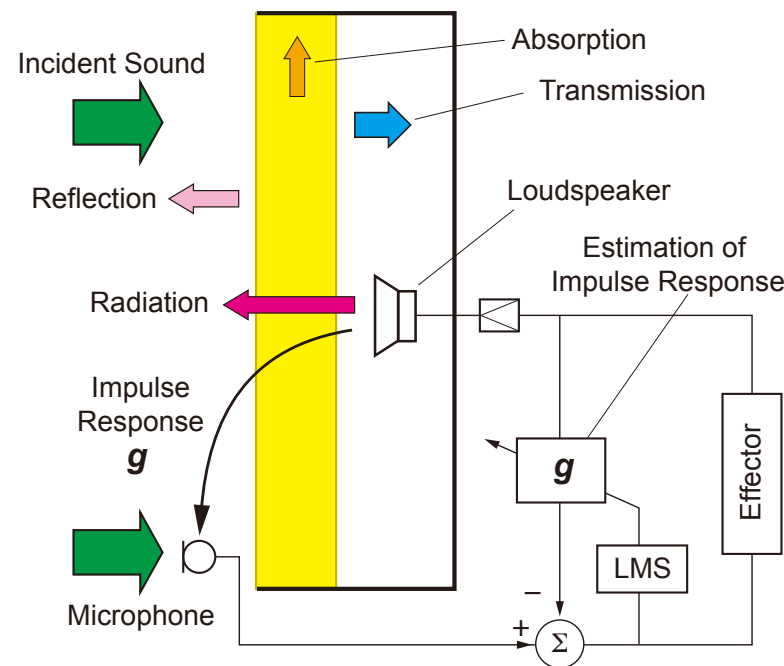


音の収録（と伝送）による方法

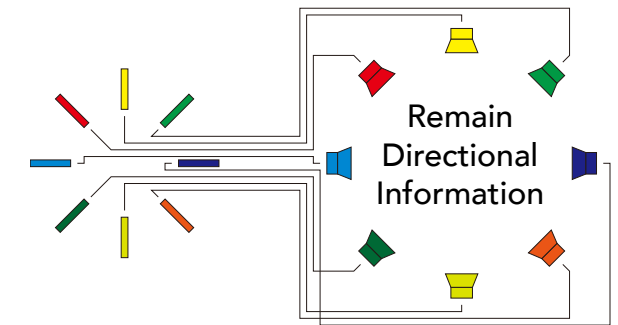
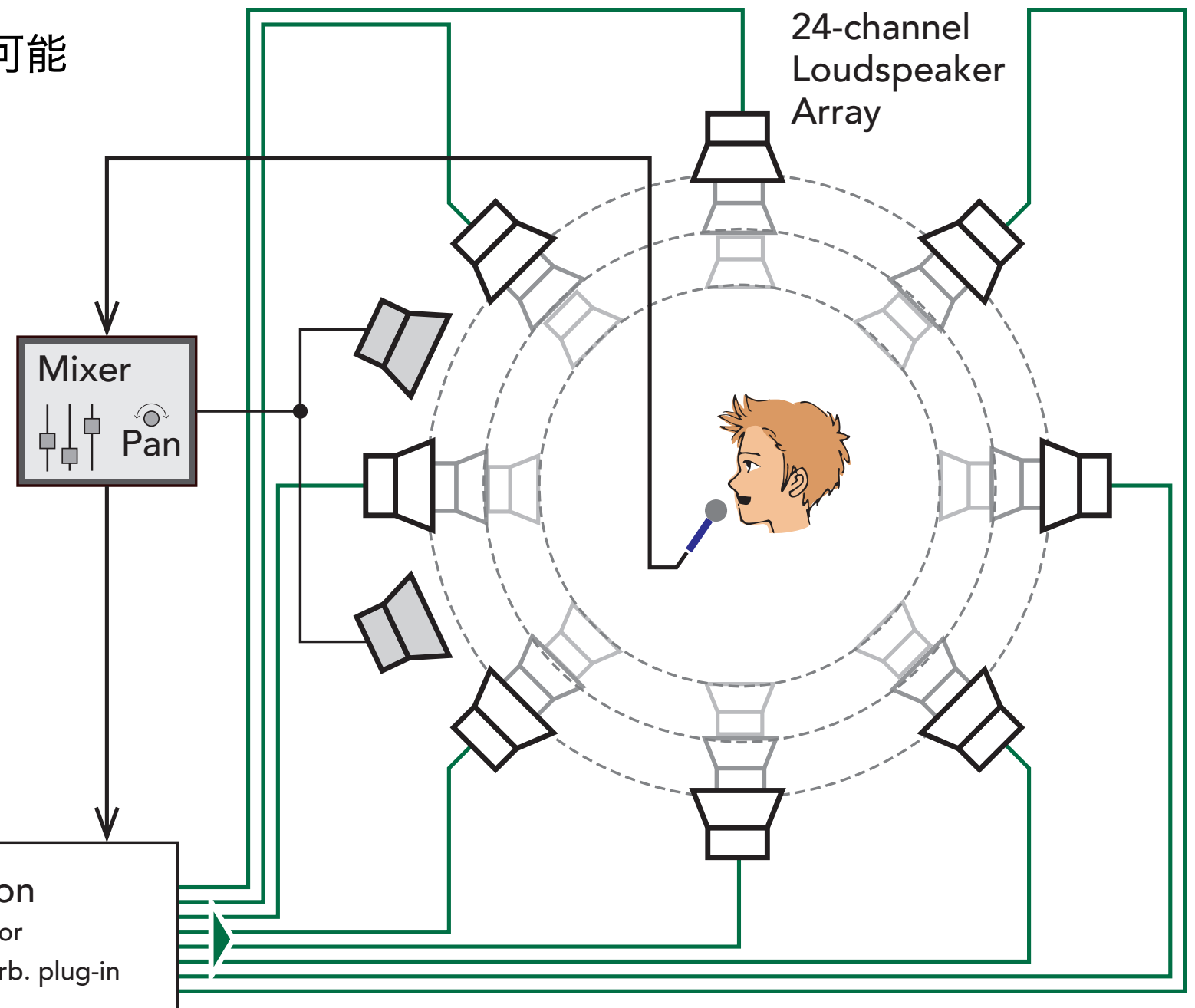
❖ インパルス応答があらかじめ測定できる場合

✓ 残響付加装置としても機能可能

Concept of Variable Reflection Acoustic Wall System



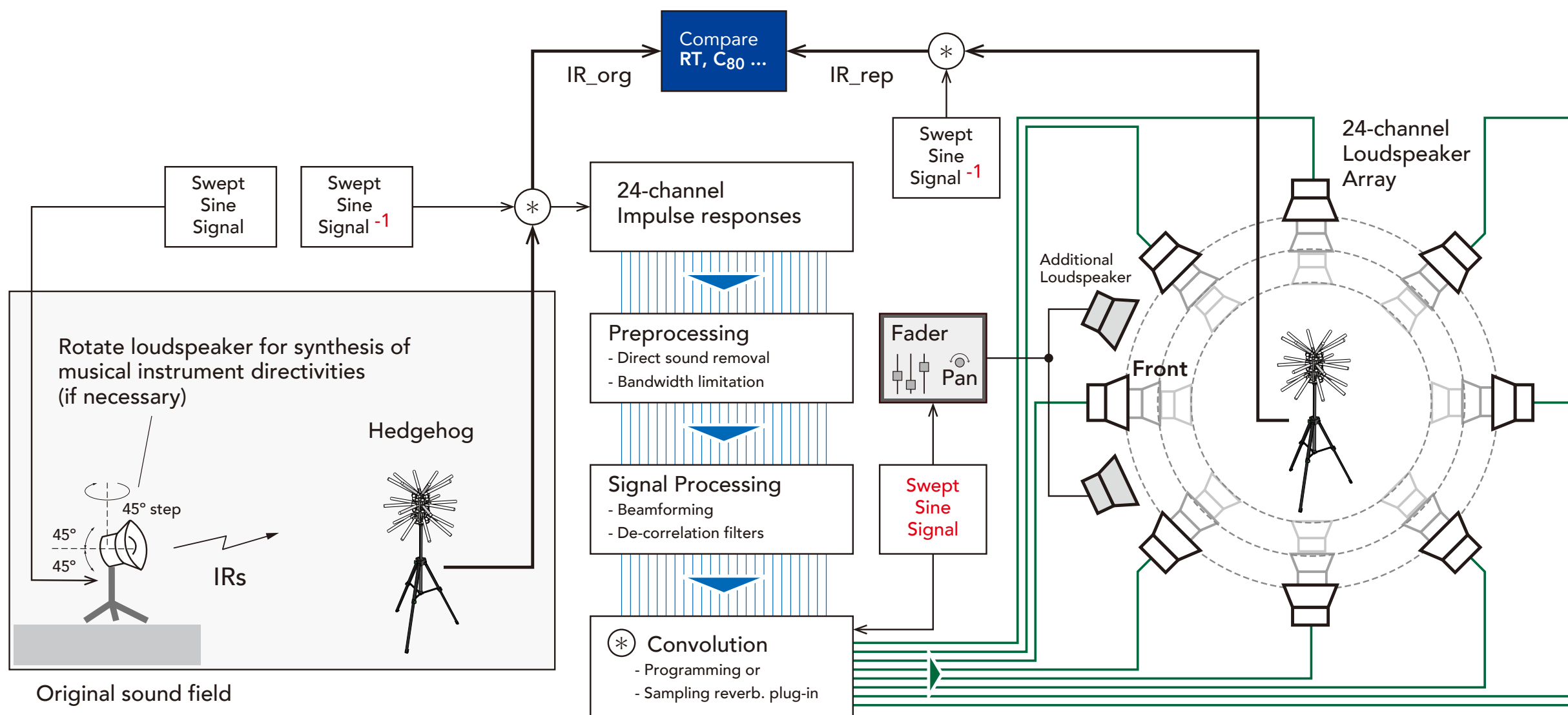
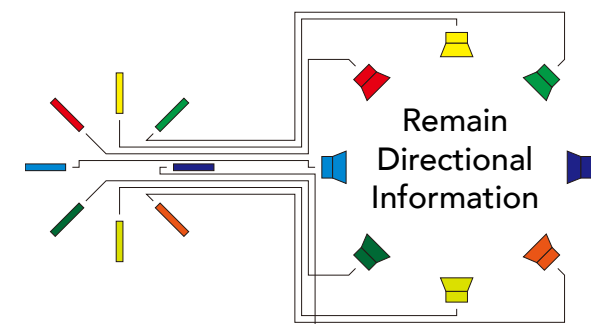
⊛ Convolution
- Programming or
- Sampling reverb. plug-in



再現の精度と適切な評価指標

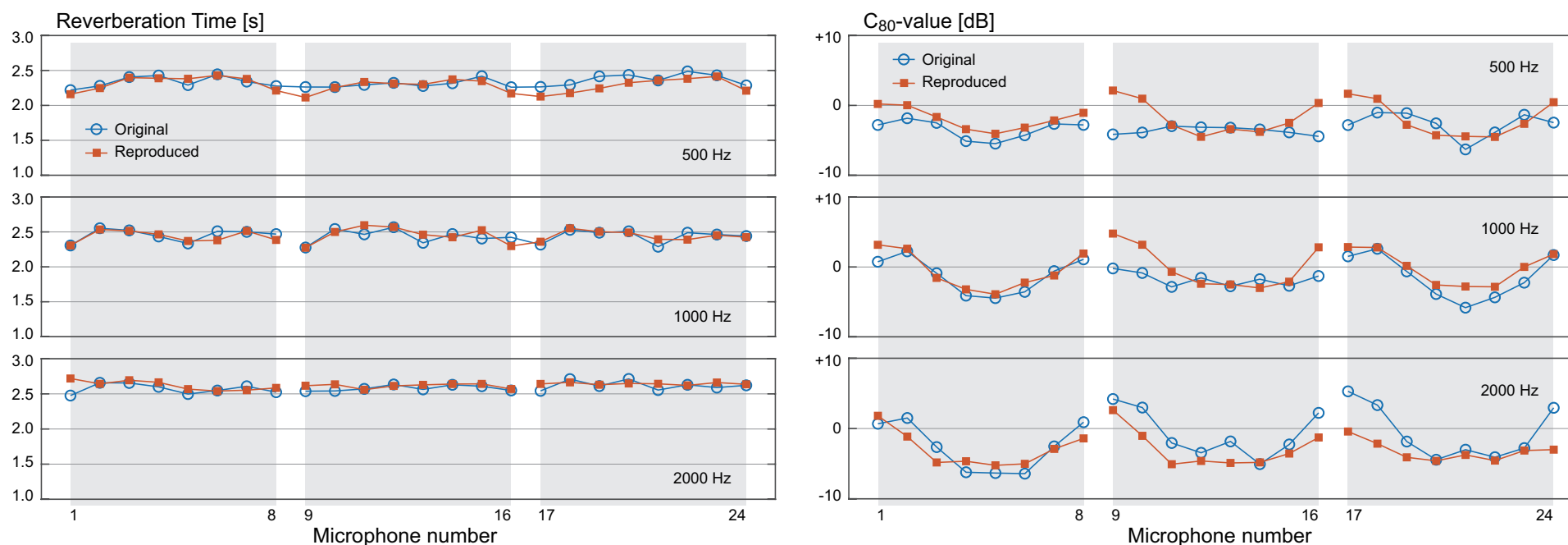
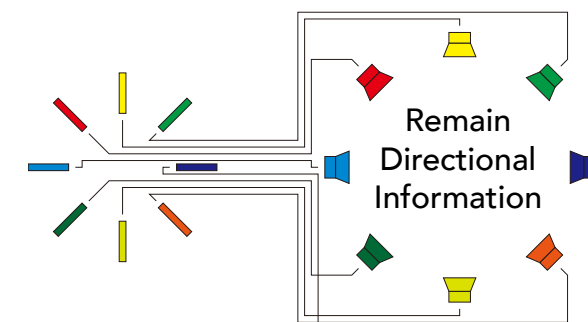
❖ 物理指標による検証

- ▶ 原音場での収録と再現音場での再収録

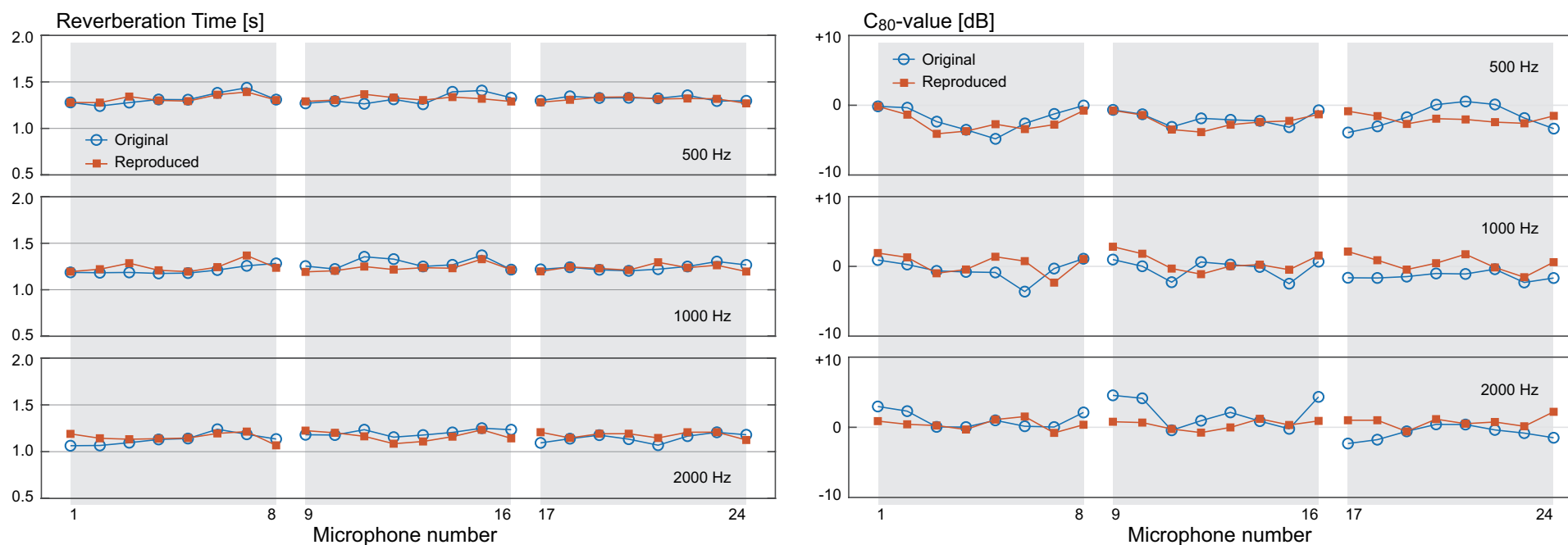


再現の精度と適切な評価指標

❖ 物理指標による検証：RT及びC80



(a) Reproduction of large size concert hall



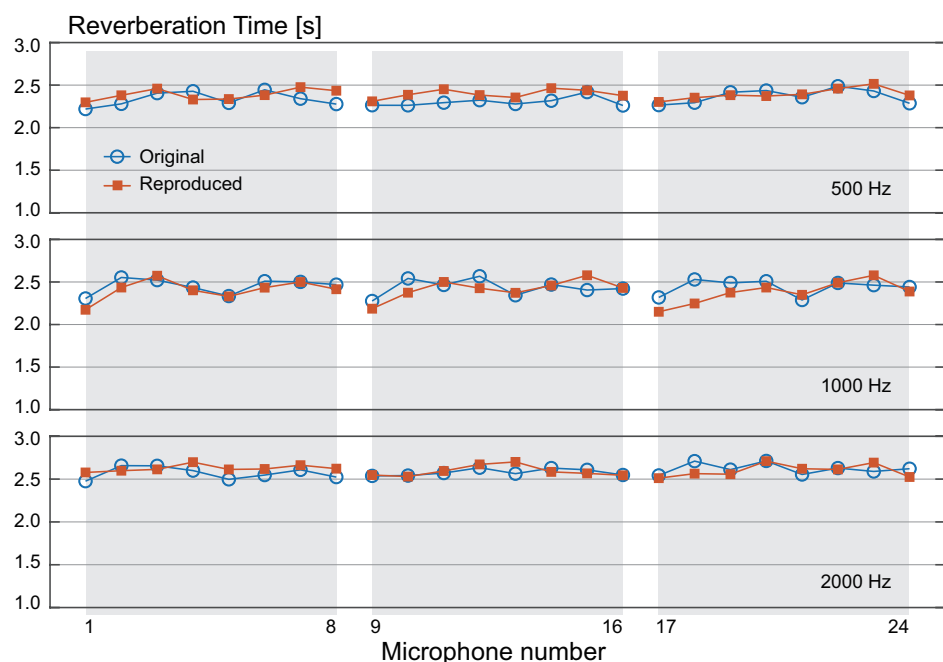
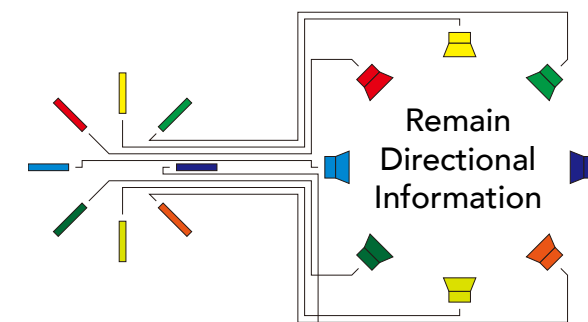
(b) Reproduction of medium size auditorium

Small System

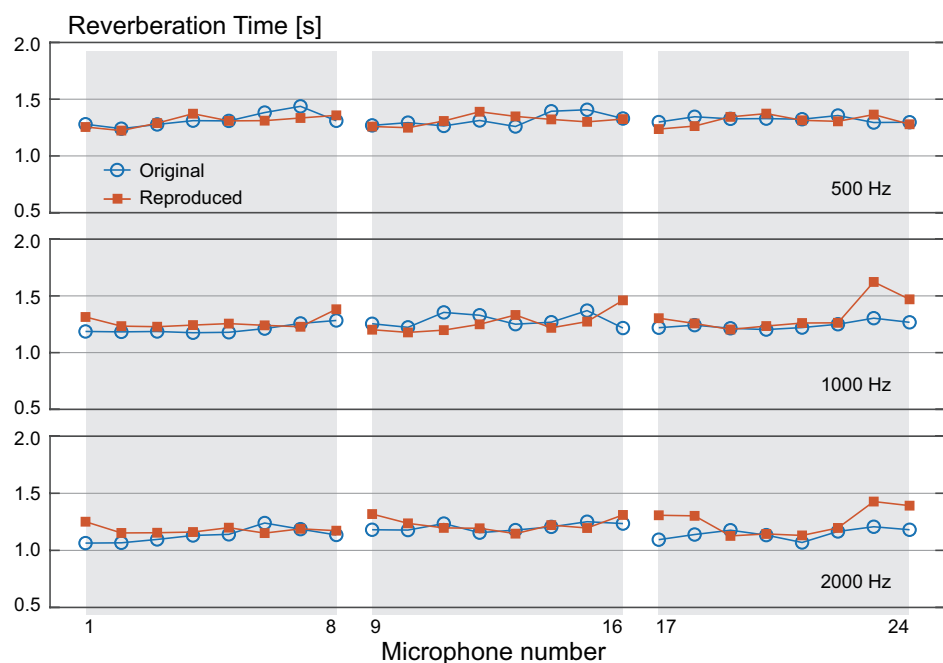
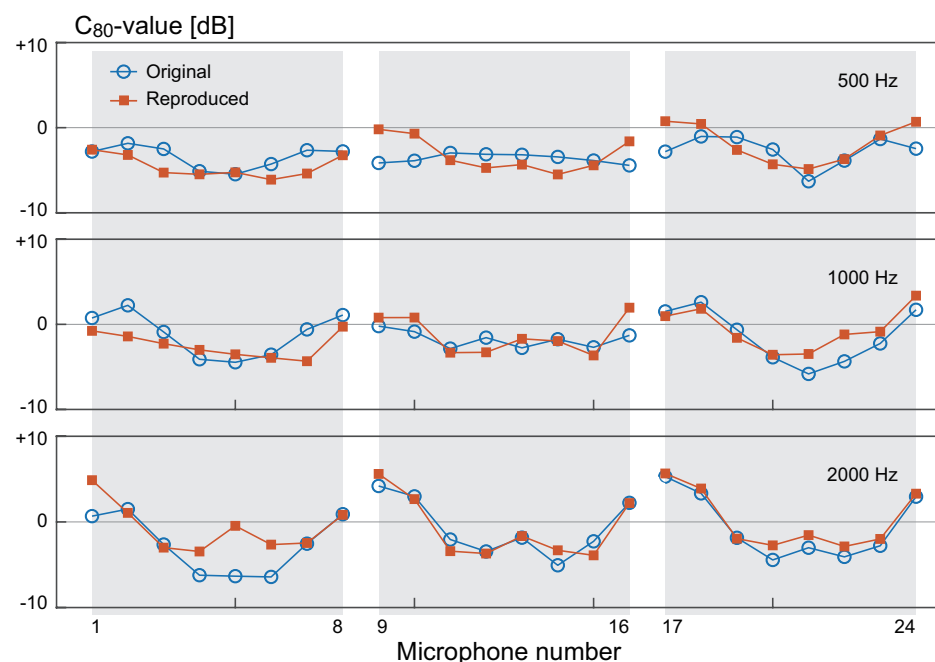


再現の精度と適切な評価指標

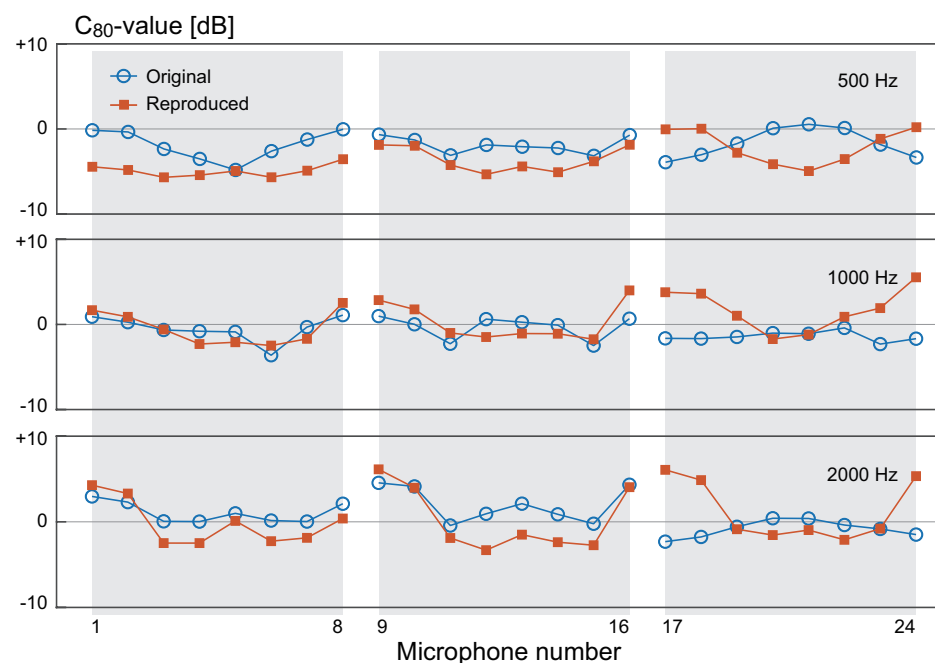
❖ 物理指標による検証：RT及びC80



(a) Reproduction of large size concert hall



(b) Reproduction of medium size auditorium

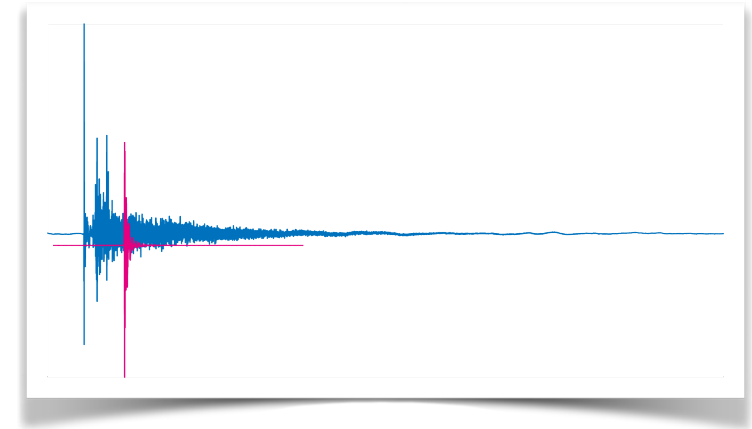


Large System



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

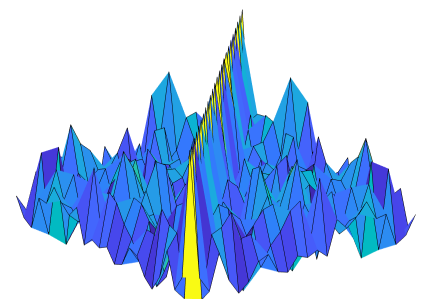
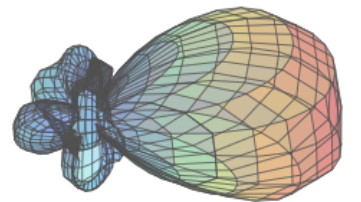
▶ 指向性の緩さや直接音除去に起因する緩さを補正するための処理

✓ 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

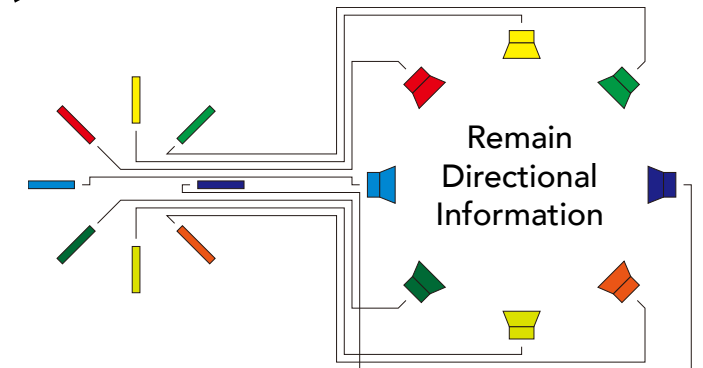
✓ より自然（と感じるよう）なバランスのためのレベル変更等々

✓ 「雰囲気再現」とはJNDの何倍まで許される？

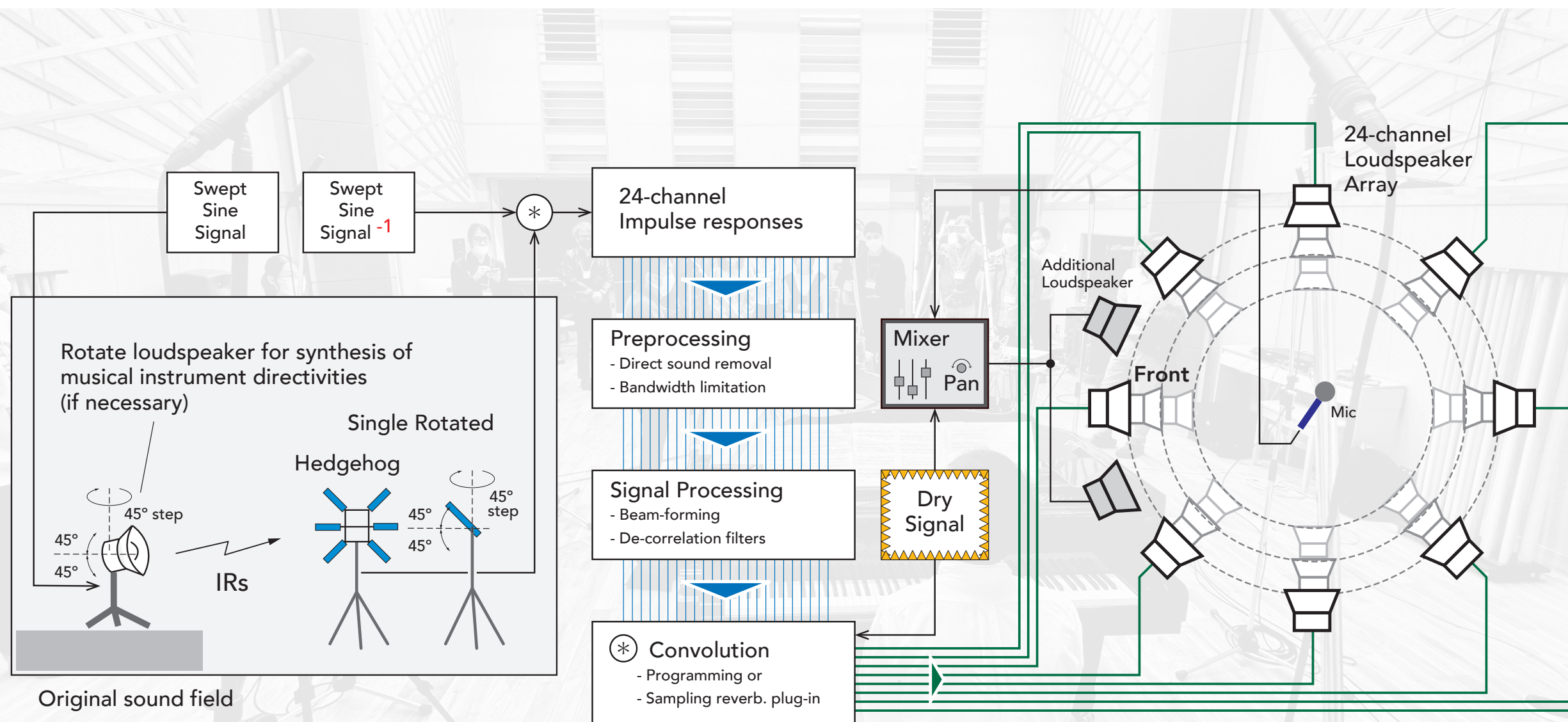
➡ ホールにおける音響物理指標のように、音場再生システムにおいて
これさえ再現すればまあ大丈夫という

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 スピーカアレイシステム



ご清聴ありがとうございました