

有限要素法による室内音場の時間応答解析 -反復解法の選定と小ホール内音場解析-

*Time domain sound field analysis by finite element method
-Comparison of iterative methods and analysis of small hall-*

奥園 健

OKUZONO Takeshi

大鶴 徹

OTSURU Toru

岡本 則子

OKAMOTO Noriko

末吉 俊秀

SUEYOSHI Toshihide

研究の背景

-室内音場の予測-

室内音響シミュレーション



- ・幾何音響学に基づく手法
- ・波動音響学に基づく数値解析手法

コンサートホール等の音響設計

→室内インパルス応答の予測

(可聴化、残響時間等の音響物理指標の算出)



従来

コンサートホール規模の建築空間の音場解析



幾何音響学に基づく手法が実用的

「幾何音響解析法によって得られるインパルス応答は精度が保証されず、実務では可聴化に利用されているもののその妥当性は将来的にも期待できない」

佐久間, 日本音響学会誌57巻, 2001

研究の背景

波動音響学に基づく数値解析手法による音場予測

⇒計算コスト(記憶容量や計算時間)が高い

有限要素法(FEM)、有限差分法(FDM)、境界要素法(BEM)

- Their applications is generally limited to low frequencies and/or simple room shape.
- Finite- and boundary-element methods can be ..., and work well for small rooms with arbitrary geometry at low frequencies.

A. Wareing et al., J. Acoust. Soc. Am. **118** (4), pp 2321-2331, 2005

波動音響学に基づく数値解析手法による 大規模音場解析に関する既往の研究

○ T. Otsuru et al., Proc. ICA 2004(Kyoto), I-479-I-482, 2004.

FEM → 12000 m³ のホールを対象に、1k Hzまでの周波数応答を算出

○ S. Sakamoto et al., International Symposium on Room Acoustics : Design and Science 2004.

FDTD → 6000 m³ のホールを対象に、1.4 kHzまでの周波数成分をもつインパルス応答を算出

安田洋介, 建築音響研究会資料, AA-2005-12, 2005.

FMBEM → 3000 m³ のホールを対象に、500 Hzまでの周波数応答を算出

研究の背景

FEMによる大規模音場解析に向けた研究

Large-scale Finite Element Sound Field Analysis : LsFE-SFA

- 27 節点スプライン音響要素の開発
 - 反復解法の適用
 - 絶対対角スケーリングの開発
 - 集中減衰行列の開発

Otsuru T et al., J. Acoust. Soc. Jan(E), 21(2), 87-95 2000
T. Otsuru et al., Proc. ICA 2004(Kyoto), I-479-I-482, 2004.
Okamoto N et al., The 9th Western Pacific Acoustics Conference, 2006

→大規模解析への適用は**周波数応答解析**へと限定

室内音場の時間応答解析(時間領域で直接応答を算出)

時間領域有限要素法:TDFEM

⇒小規模空間への適用
(模型室・車室) T. Otsuru et al., inter noise94,
芹川他, 日本音響学会誌, 1996

⇒コンサートホール等の大規模音場の予測は試みられていない

本研究の目的

時間領域有限要素法による大規模音場予測の実現

大規模連立一次方程式の効率的な求解が必要
実現

問題点 計算コストが高い

大規模空間／高周波数領域までの解析

時間ステップごとに数百万～数億の自由度を持つ連立一次方程式の求解が必要

大規模連立一次方程式の解法

Krylov部分空間反復解法

CG, GMRes, QMR, BiCGStab etc...

利点 省メモリ、かつ、並列計算との相性が良い

- ・算法上、係数行列の非ゼロ要素のみの記憶で $[A]\{x\}=\{b\}$ を求解可能
- ・基本演算は、「行列-ベクトル積」、「内積」

問題点 収束が不規則(適用する問題に依存する)

- ・反復演算過程で演算が破綻する可能性、適用する問題により収束性が異なる
- ・反復解法の収束性は係数行列のスペクトルに強く依存する

既報

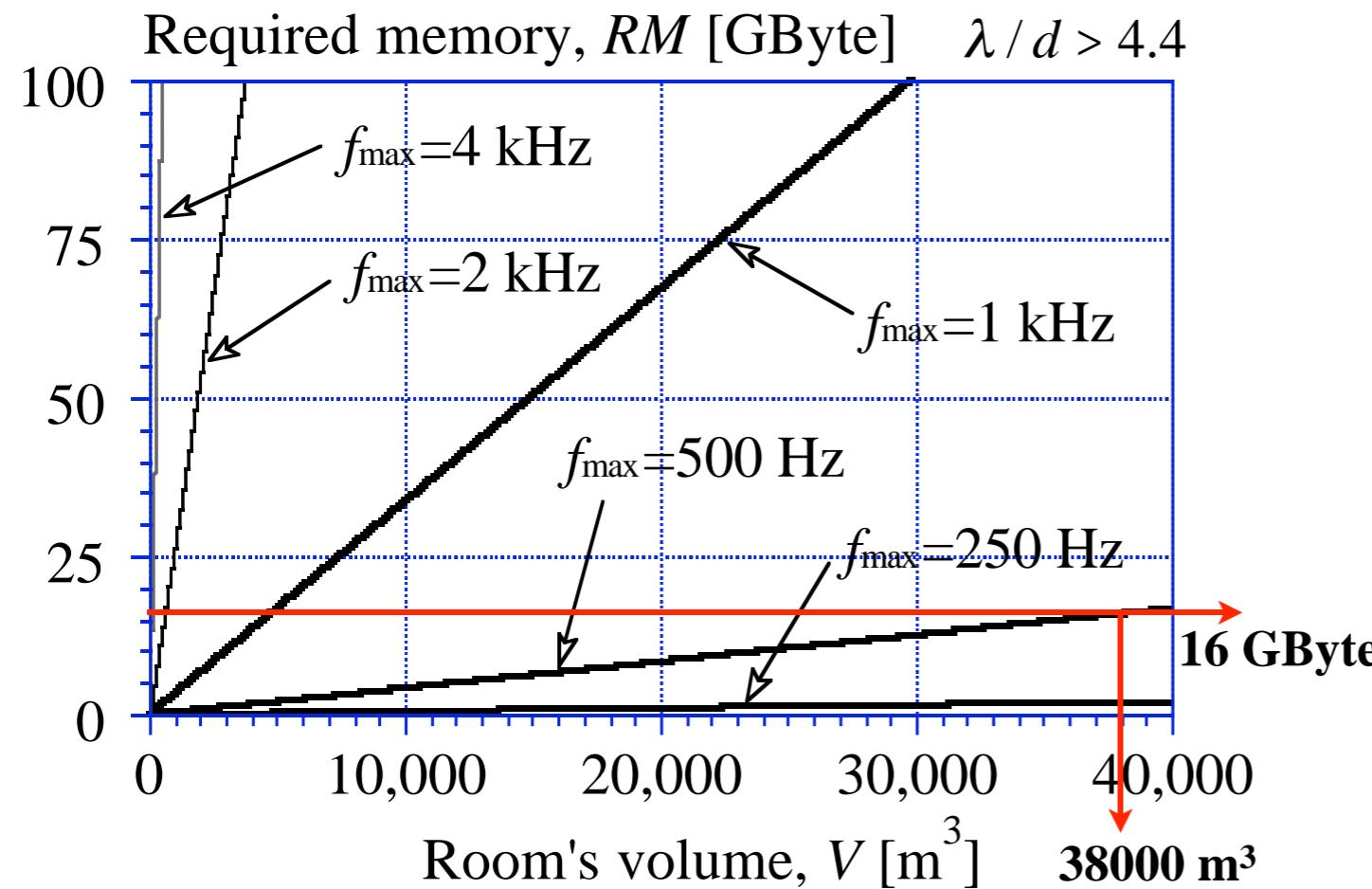


時間領域有限要素法へのKrylov部分空間法の適用

T. Okuzono et al., Inter noise2006, 2006.

必要記憶容量の概算式

必要記憶容量と室容積の関係



記憶容量の概算式

$$RM \approx 1600V \left(\frac{\lambda / d \cdot f_{\max}}{c} \right)^3 \text{ [Byte]}$$

f_{\max} : 解析上限周波数 [Hz]

λ / d : 音波長 / 要素節点間距離

c : 音速 [m/s]

V : 室容積 [m^3]

27節点スプライン要素

集中減衰マトリクス

ニューマーク β 法

反復解法(ランチョス原理に基づく解法)

解析例 1 小ホール内音場解析

〔音源〕 トーンバースト
(12波, $f_c = 250, 500 \text{ Hz}$)

FE解析の設定

〔音響要素〕 27節点スプライン要素

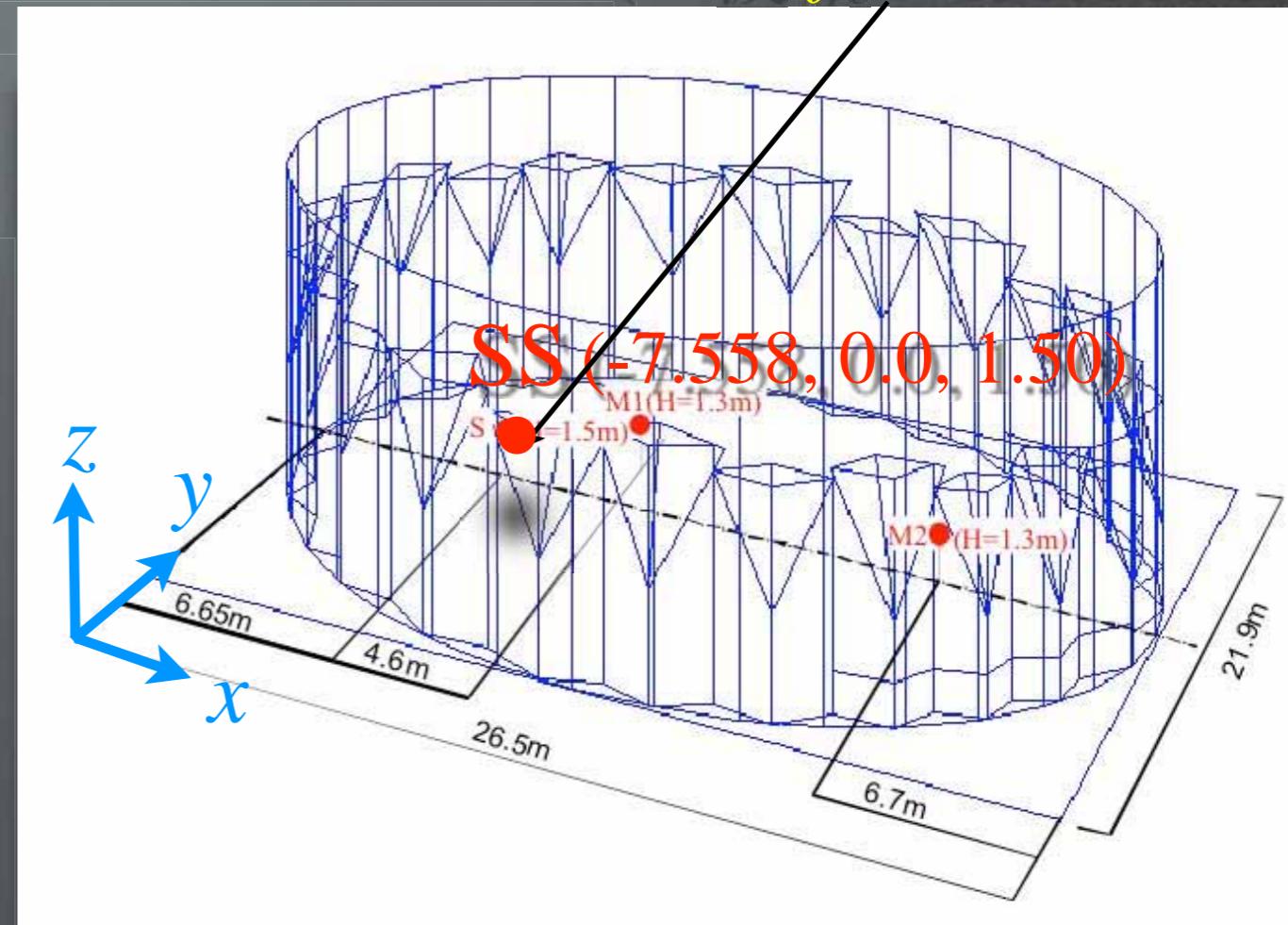
〔総自由度数〕 8926001

〔解析時間長〕 300 ms

〔総時間ステップ数〕 13,230

〔プロセッサ数〕 6(250 Hz), 8(500 Hz)

OpenMPによる並列化



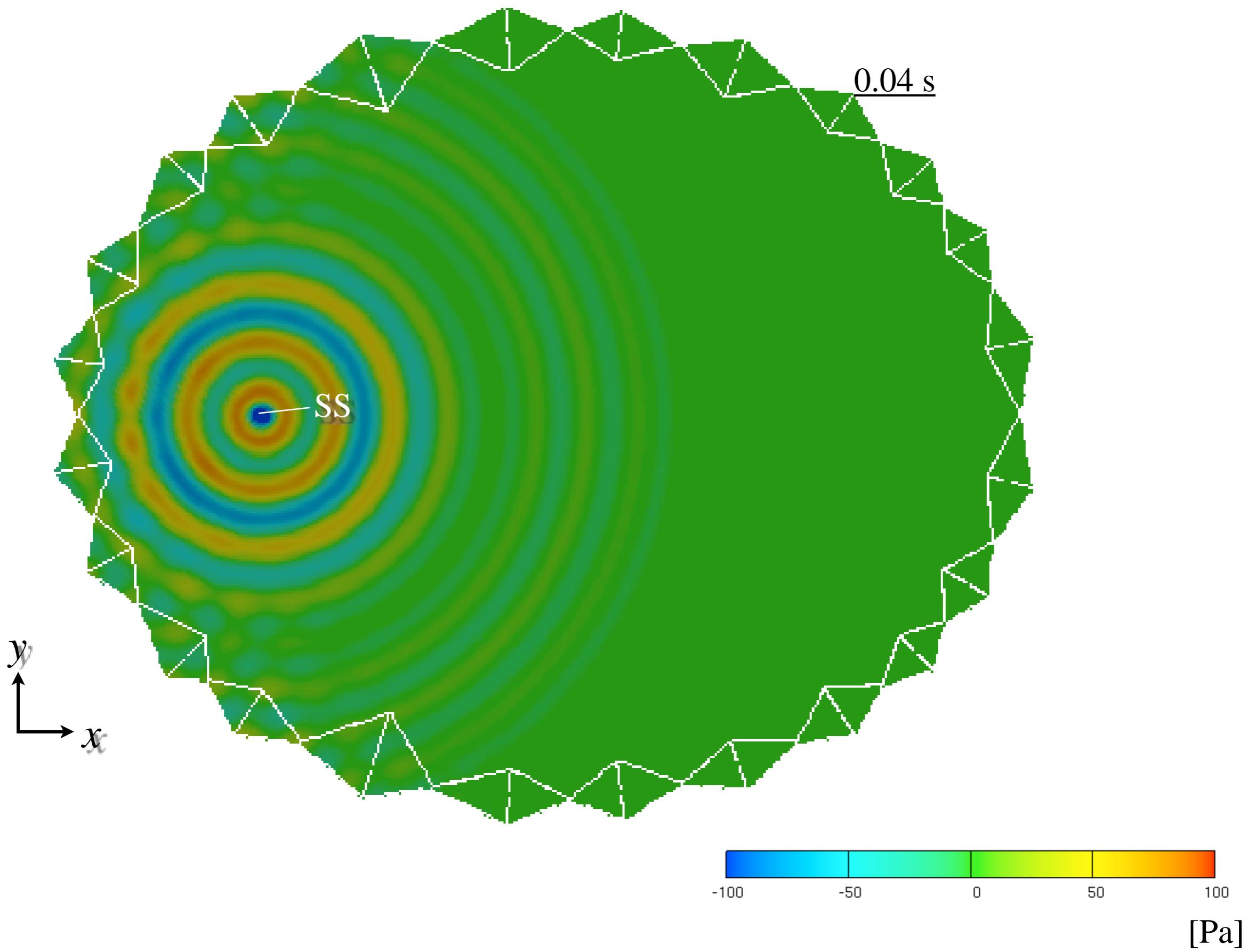
〔壁面の吸音設定(垂直音響インピーダンス比: z_n)〕

床、壁 $z_n = \infty$ (剛)

天井 $z_n = 1.0$

小ホール内音波伝搬の可視化

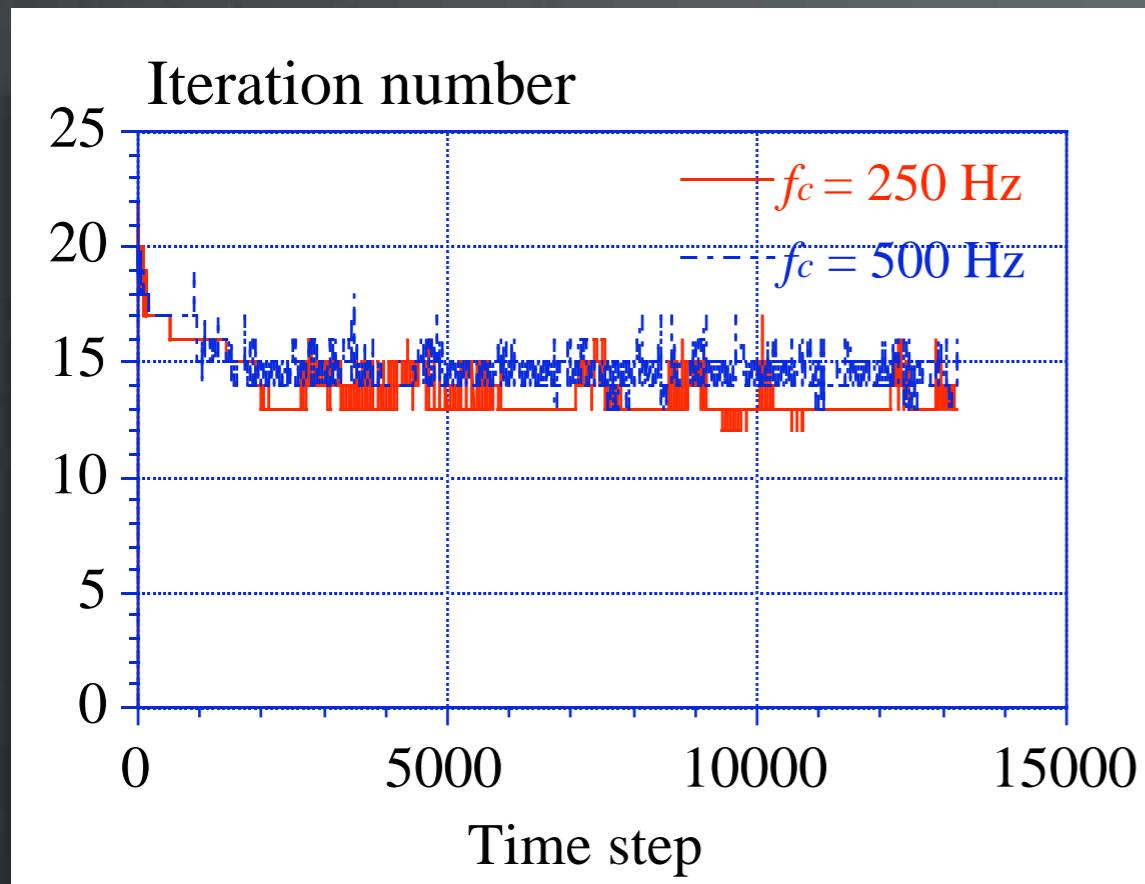
高さ=1.5m x-y 平面



小ホール内音場解析における反復解法の収束性

反復解法の特徴

問題点 収束が不規則(適用する問題に依存する)



| f_c [Hz] | Average of iteration number |
|------------|-----------------------------|
| 250 | 13.8 |
| 500 | 14.7 |

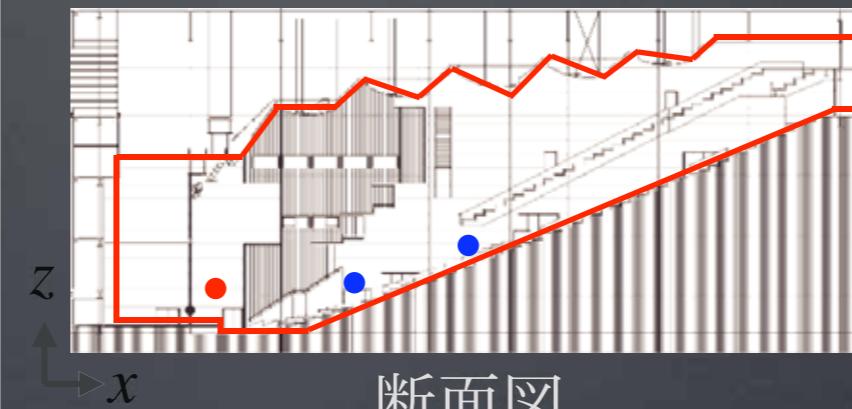
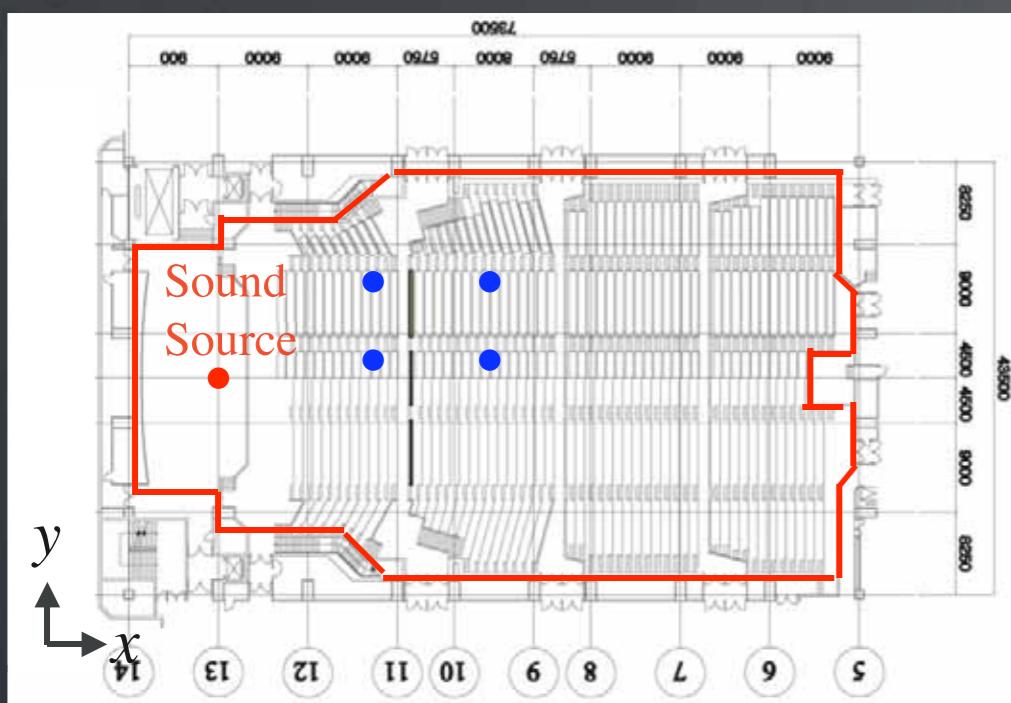
反復回数の平均値は十数回程度

記憶容量: 14 GByte

計算時間: 94 h (250 Hz)

101 h (500 Hz)

解析例 2 大規模多目的ホール内音場解析



容積: $37,184 \text{ m}^3$
総面積: $2,844 \text{ m}^2$
座席数: 2,572 席

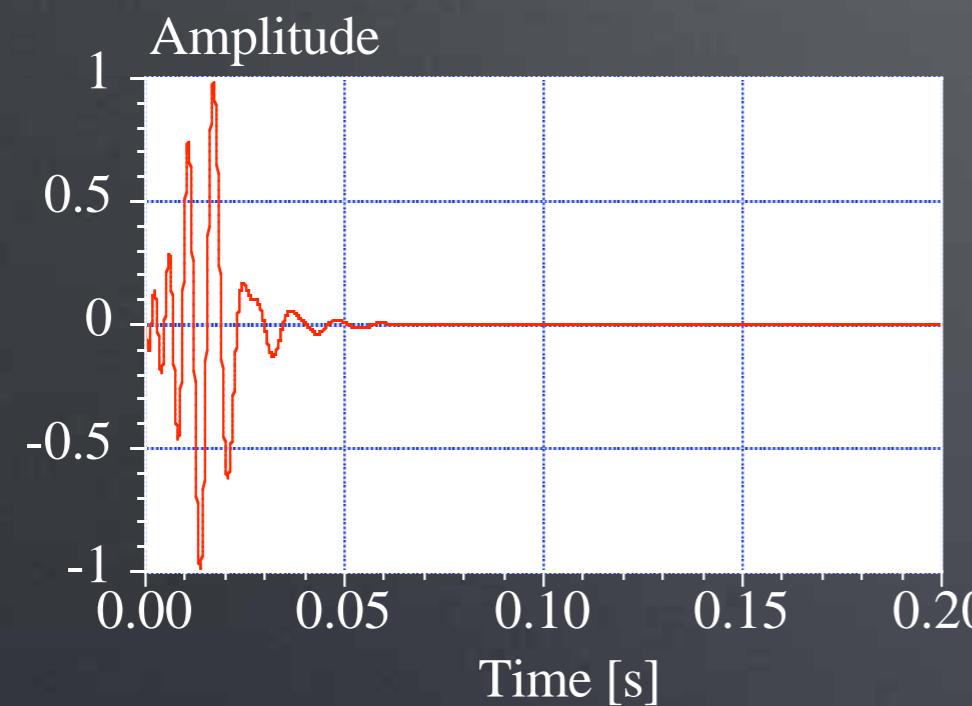
FE解析の設定

[音響要素] 27節点スプライン要素

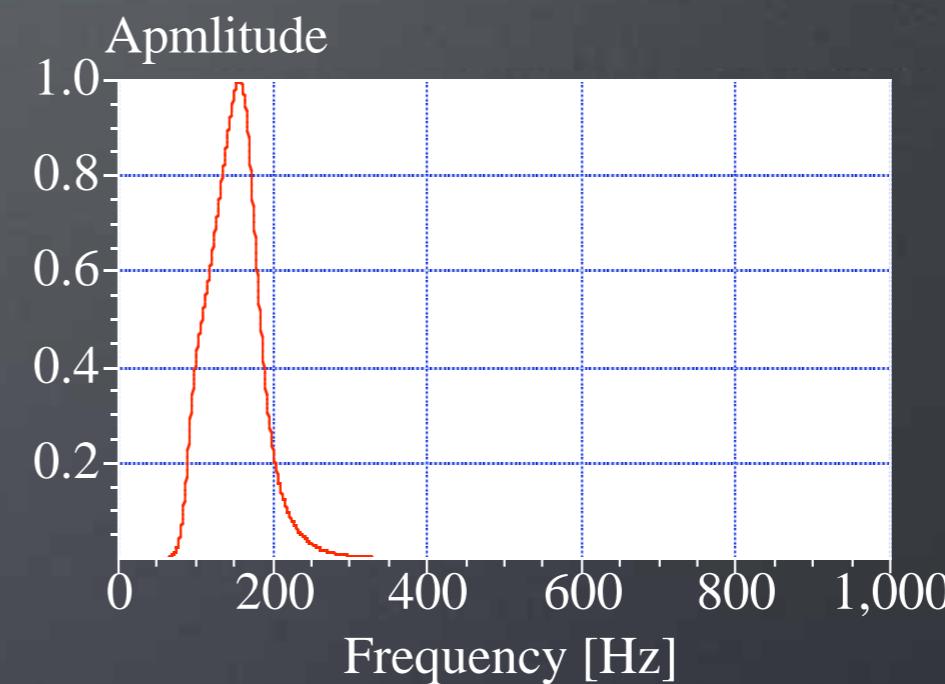
[総自由度数] 196090

[解析時間長] 1000 ms

[総時間ステップ数] 20000

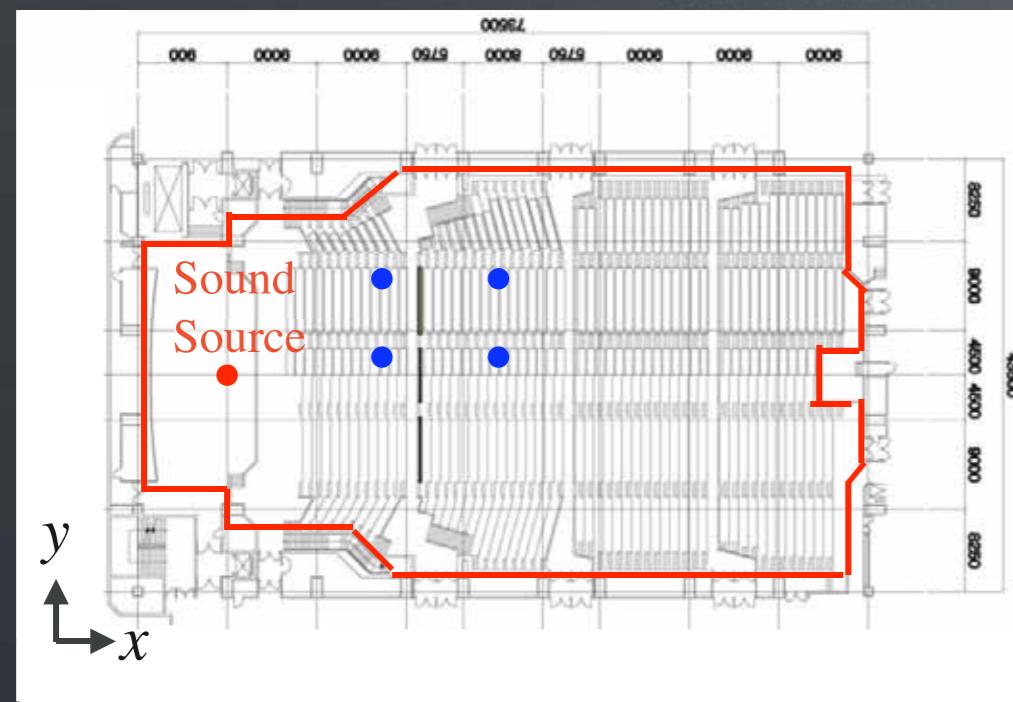
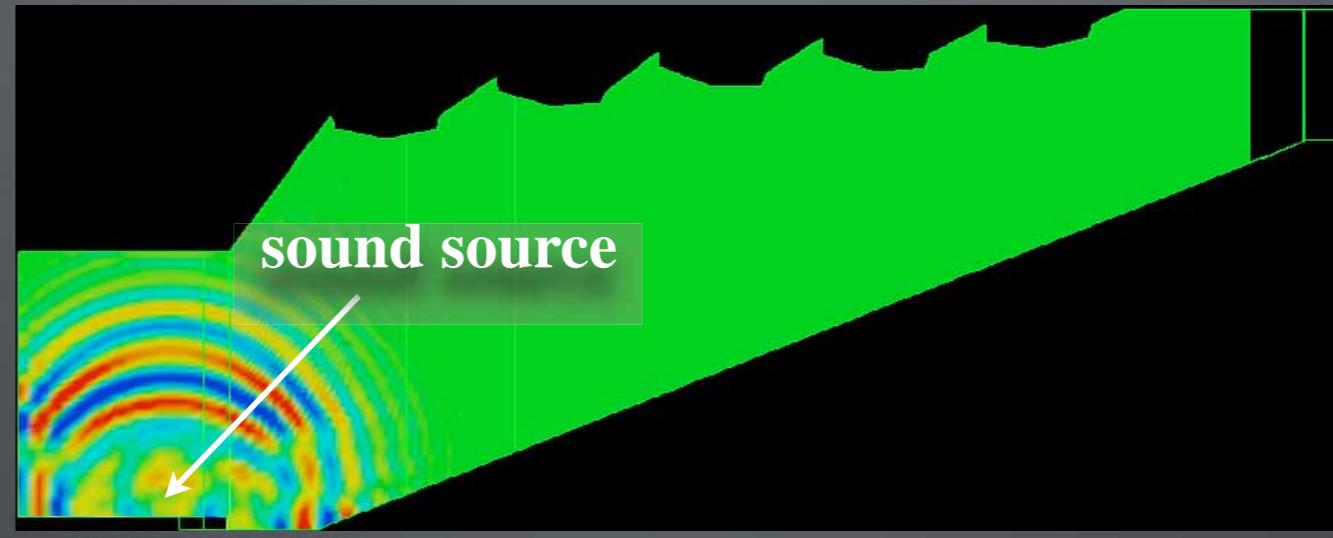


音源波形



周波数特性

大規模多目的ホール内音波伝搬の可視化



平面図

記憶容量:4.9 GByte 計算時間:127 h

まとめ

時間領域有限要素法による大規模音場予測の実現

⇒2種のコンサートホール内音場の試行的な解析例を示した

- ・音波伝搬の可視化から、小ホール・大規模多目的ホール内部の音波伝搬の傾向が得られた
- ・TDFEMへと適用した反復解法は良好な収束性を示した



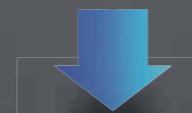
TDFEMによる大規模音場予測の基本的な可能性

今後の課題

- ・算定結果の詳細な精度検証(実測値や他の数値解析手法との比較)
- ・更なる演算の高速化

今後の課題

- ・壁面の吸音設定に用いる複素音響インピーダンスのデータベース化
- ・任意形状の3次元領域の自動6面体要素分割生成技術の開発
- ・インピーダンスの周波数特性を考慮した境界条件の組み込み



時間領域有限要素法による室内音場予測の実用化