



室内音響設計支援のための陽的時間領域有限要素法 による実用的な波動音響解析手法の開発

吉田, 卓彌

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8638号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482386>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 吉田卓彌 _____

専 攻 _____ 建築学 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

室内音響設計支援のための陽的時間領域有限要素法による
実用的な波動音響解析手法の開発

指導教員 _____ 阪上公博 教授 _____

音環境のコンピュータシミュレーション技術は建築の音響設計において重要な室内インパルス応答 (RIR)の強力な予測ツールであり、同手法の中でも音波の波動現象を厳密に取り扱い可能な波動音響解析手法は室形状や音響材の効果を適切に反映できるため信頼性の高い予測手法として期待されている。しかし、波動音響解析手法は計算負荷が大きいいためその実用的な活用のためには計算効率の改善が必須である。近年、室内音響設計ツールに適した波動音響解析手法として陽的な時間領域有限要素法 (TD-FEM)が提案されている。本手法は建築で想定される複雑な幾何学形状の近似性能に優れ、かつ、陽的なスキームにより時々刻々の音場発展を時間領域で効率的に計算可能という利点を有するが、室内音響設計支援への活用のためには未解決の問題がある。本論文では室内音響設計支援に活用可能な計算効率に優れ、かつ、高精度な新しい陽的 TD-FEM による室内音響解析手法の開発を目的とし、以下の4つの課題に取り組む。

- (1)要素形状の制限を克服した高精度なスキームの定式化。
- (2)境界面における吸音特性の周波数依存性・入射角依存性を考慮できる手法の実装。
- (3)領域分割法 (DDM)に基づく並列アルゴリズムを用いた大規模並列音響解析への適用性の検討。
- (4)ハイブリッド可聴化に基づく室内音響のバイノーラル可聴化への応用。

第1章では、研究の背景として建築空間の音環境の重要性とその予測技術について説明し、本研究で扱う波動音響解析手法の特徴や既往研究について述べた。

第2章では、FEM による室内音響解析手法の基礎理論について整理し、さらに、理論解析と数値実験を通して従来の陽的 TD-FEM の性能を提示した。

第3章では、修正 Adams 法による時空間4次精度の陽的 TD-FEM による室内音響解析手法を新たに構築した。同手法は修正積分則による分散低減要素と独自に設計した時間積分法からなる。特筆すべき点としては、従来の陽的 TD-FEM の課題であった時間離散化の高精度化のための要素形状に関する制限を完全に克服しており、複雑な境界形状を有する室内音場を階段近似することなく、高精度にモデル化可能である。理論的な分散誤差解析より、数値的な音速が複素数となる場合に振幅誤差が発生することを明らかにした。修正 Adams 法による陽的 TD-FEM の標準的な陰的 TD-FEM に対する計算性能を2種の形状の複雑な2次元室内音場の解析を通して検証した。修正 Adams 法による陽的 TD-FEM は複雑な室内音場の数 kHz 帯域までの解析を標準的な手法と比べて高い解析精度を保ちつつより高速に実施可能なことを明らかにした。

第 4 章では、第 3 章の知見に基づき新たに定式化した 3 段の時間積分法により、修正 Adams 法による陽的 TD-FEM の課題であった振幅誤差を完全に排除した 2 種の高精度な陽的 TD-FEM を構築した。本章で構築した手法は時空間 4 次精度をもつ 4th-E TD-FEM と分散誤差の最適化を行った Opt-E TD-FEM の 2 つで、このうち Opt-E TD-FEM は 4th-E TD-FEM と比べて追加の計算負荷なしに高周波数域における音場の近似性能を向上できる。2 つの新たな陽的 TD-FEM の性能を 3 種の数値実験を通して検証した。第 1 の実験では、立方体室を対象に立方体形状 FE を用いた 2 種の陽的 TD-FEM が標準的な陰的 TD-FEM と比べ優れた計算精度と計算速度のもと広帯域の音響シミュレーションが可能なことを示した。第 2, 第 3 の実験ではそれぞれ Opt-E TD-FEM の直方体 FE ならびに不整形六面体 FE を用いた解析への適用性を検証し、Opt-E TD-FEM は使用する要素形状によらず 4th-E TD-FEM より高い解析精度がもち、同一の計算負荷のもとより高域まで音場をシミュレートできることを明らかにした。

第 5 章では、第 4 章で構築した 4th-E TD-FEM ならびに Opt-E TD-FEM の室内音響のモデル化精度の向上に必要な周波数依存の吸音境界を組み込んだ。

前半では、最も基本的な周波数依存の吸音境界である周波数依存のインピーダンス境界を扱うための手法を新たに構築した。本手法は周波数依存のインピーダンス境界条件式に伴う計算負荷の大きい畳み込みを補助微分方程式法により効率的に処理している。また、境界面における精度と安定性を両立するため境界面のみ陰的となる時間進行スキームを形成するが反復解法を局所的に適用することで効率的な計算を実現している。音響管と小立方体室の解析を通して定式化の妥当性を確認した。音響管問題では陽的 TD-FEM により計算した 3 種の吸音体の吸音特性が理論解と良好に一致することを示した。小立方体室の解析では周波数依存の吸音境界を自然に扱える周波数領域 FEM (FD-FEM) による数値解との比較を行い、構築した陽的 TD-FEM が複数の周波数依存吸音境界をもつ室内音場を適切にモデル化できることを明らかにした。さらに、4th-E TD-FEM, 4 つの最適化条件における Opt-E TD-FEM の広帯域の室内音響解析における計算性能を 2 種の陰的 TD-FEM との比較により検証し、適切な最適化条件において Opt-E TD-FEM が陰的 TD-FEM と比べて高速かつ高精度に周波数依存の吸音境界をもつ室内の音響予測が可能であることを明らかにした。

後半では、吸音特性の入射角依存性まで考慮できる手法として PM 吸音体を取り扱うための手法について検討し、既往研究で構築した従来法と比べて吸音モデル化精度と計算効率が向上した手法を新たに提案した。さらに、従来法における連立一次方程式の求解に伴う計算負荷を低減するため提案法では反復法の局所的な適用を行った。提案法の従来法に対する有効性を 2 種の数値実験により検証した。音響管問題を通して提案法は PM の種類

によらず従来法より高い精度で PM 吸音体の吸音特性をモデル化できることを示した。単一 PM 吸音体を設置した小会議室を対象とした実験では、従来法は膜の物性値が小さい場合に解析精度が低下するのに対して提案法は膜の物性値によらず高い精度で音響解析可能なことを示した。また、従来法と比べて計算速度が 2 倍近く高速であり、その優れた計算性能を確認できた。さらに、提案法は FD-FEM と比べると解析精度は若干低下するが非常に高速に解析可能であり、FD-FEM の代替手法としても十分に活用できる。

第 6 章では、Opt-E TD-FEM に DDM に基づく並列計算法を組み込み、スーパーコンピュータシステムとクラウド HPC 環境のそれぞれを用いて大規模音響問題への応用を試みた。また、開発手法の実用的な室内音響の評価への応用として 1 次アンビソニックス (FOA) と頭部伝達関数 (HRTF) に基づくバイノーラル可聴化法を構築した。FOA に必要な球面調和展開係数を有限要素の内挿関数の空間微分により算出する方法を新たに構築した。

スーパーコンピュータシステムを用いた検討では、2000 m³ 程度の複数の周波数依存吸音境界を有するオーディトリウムの 3 kHz までの周波数成分を含む 3 s 間のインパルス応答を 2 つの吸音条件のもと計算した。問題の自由度数は約 1 億 5 千万程度と巨大であったが、512 コアを用いたハイブリッド並列により吸音条件によらず 9,000 s 程度と非常に高速に計算が行えた。また、音場の可視化や 2 つの吸音条件間における RIR、減衰曲線、室内音響指標の比較を通してその実用的な室内音響設計ツールとしての可能性を示した。

クラウド HPC 環境を用いた検討では、まず、2 つの実大の建築音響問題を対象に 6144 コア使用時までの並列性能を検証した。並列陽的 TD-FEM は 6144 コア並列により自由度数が 3 千 5 百万ならびに 1 億の大規模室内音場の 6 kHz までの周波数成分を含む 1 s 間のインパルス応答をそれぞれ 217 s、613 s と超高速に計算可能であり、主要演算部については並列ノード数と共にリニアに計算時間が短縮される優れたスケーラビリティが確認できた。続いて、バイノーラル可聴化法の妥当性と有効性の検証として、2 種の吸音条件を設定したオーディトリウム内の 5 kHz までの周波数成分を含むバイノーラル可聴化を実施した。吸音条件間での FOA 信号と受音点の指向性の比較により FOA 信号の計算法の妥当性を示した。また、室内音響指標の計算結果の吸音条件間での比較により計算した RIR が音場の特徴を捕らえられていることを確認し、さらに、FOA と HRTF を畳み込み生成した両耳 RIR を異なる受音点で比較することで算出した両耳 RIR が音源・受音点の位置関係を適切に反映していることを示した。最後にバイノーラル可聴化による聴感的な印象と音場の物理的な特徴の対応を確認し、提案する可聴化法の妥当性と有効性を提示した。

以上、本研究を通して従来の陽的 TD-FEM の課題を克服した新たな陽的 TD-FEM による実用的な室内音響解析手法を構築した。同手法によれば吸音材の周波数依存性を考慮し

(氏名：吉田卓彌 NO. 4)

た信頼性の高い吸音モデリングのもと，従来では困難とされていた任意形状の実大室内の音場を数 kHz 帯域まで高精度かつ高速に解析できる．また，バイノーラル可聴化法によりシミュレートした音場を直感的に評価可能である．本研究の成果は室内音響設計技術の発展に大きく貢献すると考えられる．

氏名	吉田卓彌		
論文 題目	室内音響設計支援のための陽的時間領域有限要素法による 実用的な波動音響解析手法の開発		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	阪上公博
	副 査	教授	向井洋一
	副 査	准教授	佐藤逸人
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
音環境のシミュレーション技術は建築の音響設計において重要な室内インパルス応答 (RIR)の強力な予測ツールであり、同手法の中でも音波の波動現象を厳密に取り扱い可能な波動音響解析手法は室形状や音響材の効果を適切に反映できるため信頼性の高い予測手法として期待されている。しかし、波動音響解析手法は計算負荷が大きいいためその実用的な活用のためには計算効率の改善が必須である。近年、室内音響設計ツールに適した波動音響解析手法として陽的な時間領域有限要素法 (TD-FEM)が提案されている。本手法は建築で想定される複雑な幾何学形状の近似性能に優れ、かつ、陽的なスキームにより時々刻々の音場発展を時間領域で効率的に計算可能という利点を有するが、室内音響設計支援への活用のためには未解決の問題がある。本論文では室内音響設計支援に活用可能な計算効率に優れ、かつ、高精度な新しい陽的 TD-FEM による室内音響解析手法の開発を目的とし、以下の4つの課題に取り組む。 (1)要素形状の制限を克服した高精度なスキームの定式化。 (2)境界面における吸音特性の周波数依存性・入射角依存性を考慮できる手法の実装。 (3)領域分割法 (DDM)に基づく並列アルゴリズムを用いた大規模並列音響解析への適用性の検討。 (4)ハイブリッド可聴化に基づく室内音響のバイノーラル可聴化への応用。 第1章では、研究の背景を説明し、本研究で扱う波動音響解析手法の特徴や既往研究について述べた。 第2章では、既存の FEM による室内音響解析手法の理論を述べた。まず、最も基本的な陰的 TD-FEM と周波数領域 FEM (FD-FEM)に基づく手法について説明した。続いて、従来の陽的 TD-FEM による室内音響解析手法として2種の時間進行スキームの定式化を示し、従来法における要素形状の制限ならびに吸音モデリングに関する課題を説明した。さらに、従来の陽的 TD-FEM の性能を示した。 第3章では、修正 Adams 法による時空間4次精度の陽的 TD-FEM による室内音響解析手法を新たに構築した。同手法は修正積分則による分散低減要素と独自に設計した時間積分法からなる。特筆すべき点としては、従来の陽的 TD-FEM の課題であった時間離散化の高精度化のための要素形状に関する制限を完全に克服しており、複雑な境界形状を有する室内音場を階段近似することなく、高精度にモデル化可能である。本章で開発した時間積分法は従来の陽的 TD-FEM と比較して時間ステップあたりの疎行列ベクトル積演算数が同一であり、演算量が増加しない。理論的な分散誤差解析より、数値的な音速が複素数となる場合に振幅誤差が発生することを明らかにした。この振幅誤差は時間刻み幅のみに依存し、数値的な振幅誤差解析を通してその制御法を提示した。修正 Adams 法による陽的 TD-FEM の標準的な陰的 TD-FEM に対する計算性能を2種の形状の複雑な2次元室内音場の解析を通して検証した。修正 Adams 法による陽的 TD-FEM は複雑な室内音場の数 kHz 帯域までの解析を標準的な手法と比べて高い解析精度を保ちつつ4.6～5倍の計算速度で実施可能なことを明らかとし、その有効性を示した。 第4章では、第3章の知見に基づき新たに定式化した3段の時間積分法により、修正 Adams 法による陽的 TD-FEM の課題であった振幅誤差を完全に排除した2種の高精度な陽的 TD-FEM を構築した。本章で構築した手法は時空間4次精度をもつ4th-E TD-FEM と分散誤差の最適化を行った Opt-E TD-FEM の2つで、このうち Opt-E TD-FEM は4th-E TD-FEM と比べて追加の計算負荷なしに高周波数域における音場の近似性能を向上できる。分散誤差の最適化は特定の空間解像度における軸方向ならびに対角線方向に伝搬する音波の分散誤差を最小化する方法である。理論的な分散誤差解析を通して本最適化により広域に渡って小さな分散誤差を維持できることを示した。2つの新たな陽的 TD-FEM の性能を3種の数値実験を通して検証した。その結果、次の知見を示した。まず、立方体形状 FE を用いた2種の陽的 TD-FEM が標準的な陰的 TD-FEM と比べ優れた計算精度・速度のもと広帯域音響シミュレーションが可能なことを示した。			

氏名	吉田卓彌
また、Opt-E TD-FEM の直方体 FE ならびに不整形六面体 FE を用いた解析への適用性を検証し、Opt-E TD-FEM は使用する要素形状によらず 4th-E TD-FEM より高い解析精度をもち、同一の計算負荷で高域まで音場をシミュレートできる。さらに、非一様な FE からなるメッシュを使用する Opt-E TD-FEM では要素ごとに最適化を行うことが有効であることを明らかにした。 第 5 章では、第 4 章で構築した 4th-E TD-FEM ならびに Opt-E TD-FEM の室内音響のモデル化精度の向上に必要な不可欠な周波数依存の吸音境界を組み込んだ。 前半では、周波数依存のインピーダンス境界を扱うための手法を新たに構築した。本手法は周波数依存のインピーダンス境界条件式に伴う計算負荷の大きい畳み込みを補助微分方程式法により効率的に処理している。また、境界面における精度と安定性を両立するため境界面のみ陰的となる時間進行スキームを形成するが反復解法を局所的に適用することで効率的な計算を実現している。定式化の妥当性を検討するため音響管と小立方体室の解析を実施した。音響管問題では陽的 TD-FEM により計算した 3 種の吸音体の吸音特性が伝達マトリクス法による理論解と良好に一致することを示した。小立方体室の解析では周波数依存の吸音境界を自然に扱える FD-FEM による数値解との比較を行い、構築した陽的 TD-FEM が複数の周波数依存吸音境界をもつ室内音場を適切にモデル化できることを明らかにした。さらに、4th-E TD-FEM、4 つの最適化条件における Opt-E TD-FEM の広帯域の室内音響解析における計算性能を 2 種の陰的 TD-FEM (2nd-I TD-FEM, 4th-I TD-FEM) との比較により検証し、適切な最適化条件において Opt-E TD-FEM が 4th-I TD-FEM の 1.4 倍、2nd-I TD-FEM の 76.4 倍の計算速度のもと、4th-I TD-FEM と同程度の精度、2nd-I TD-FEM より高い精度で周波数依存の吸音境界をもつ室内の音響予測が可能であることを明らかにした。 後半では、吸音特性の入射角依存性を考慮して PM 吸音体を取り扱う手法について検討し、従来法と比べて吸音モデル化精度と計算効率が向上した手法を新たに提案した。提案法では減衰項の時間離散化に 2 次精度の差分近似を適用した。さらに、計算負荷を低減するため提案法では反復法の局所的な適用を行った。提案法の従来法に対する有効性を 2 種の数値実験により検証した。音響管問題を通して提案法は PM の種類によらず従来法より高い精度で PM 吸音体の吸音特性をモデル化できることを示した。単一 PM 吸音体を設置した小会議室を対象とした実験では、従来法は膜の物性値が小さい場合に解析精度が低下するのに対して提案法は膜の物性値によらず高い精度で音響解析可能なことを示した。また、従来法と比べて計算速度が 1.7-1.9 倍高速であり、その優れた計算性能を確認できた。さらに、提案法は FD-FEM と比べると解析精度は若干低下するが 62-117 倍の計算速度で解析可能であり、FD-FEM の代替手法としても十分に活用できる。 第 6 章では、Opt-E TD-FEM に DDM に基づく並列計算法を組み込み、スーパーコンピュータシステムとクラウド HPC 環境の各々を用いて大規模音響問題への応用を試みた。また、開発手法の実用的な室内音響の評価への応用として 1 次アンビソニックス (FOA) と HRTF に基づくバイノーラル可聴化法を構築した。FOA に必要な球面調和展開係数を有限要素の内挿関数の空間微分により算出する方法を新たに構築した。 スーパーコンピュータシステムを用いた検討では、2000 m³ 程度の複数の周波数依存吸音境界を有するオーディトリウムを 3 kHz までを含む 3 s 間のインパルス応答を 2 つの吸音条件の下で計算した。問題の自由度数は約 1 億 5 千万と巨大であったが、512 コアを用いたハイブリッド並列により吸音条件によらず約 9,000 s と非常に高速に計算が行えた。また、音場の可視化や 2 つの吸音条件間における RIR、減衰曲線、室内音響指標の比較を通してその実用的な室内音響設計ツールとしての可能性を示した。 クラウド HPC 環境を用いた検討では、2 つの実大の建築音響問題を対象に 6144 コア使用時までの並列性能を検証した。並列陽的 TD-FEM は 6144 コア並列により自由度数が 3 千 5 百万ならびに 1 億の大規模室内音場の 6 kHz までの周波数成分を含む 1 s 間のインパルス応答をそれぞれ 217 s、613 s と超高速に計算可能であり、主要演算部については並列ノード数と共にリニアに計算時間が短縮される優れたスケーラビリティが確認できた。続いて、バイノーラル可聴化法の妥当性と有効性の検証として、2 種の吸音条件を設定したオーディトリウム内の 5 kHz までの周波数成分を含むバイノーラル可聴化を実施した。問題の自由度数は 7 億 5 千万と非常に巨大であったが、6144 コアを用いた大規模並列により 3 s 間のインパルス応答を 12,000 s 以内で高速計算できた。吸音条件間での FOA 信号と受音点の指向性の比較により FOA 信号の計算法の妥当性を示した。また、室内音響指標の計算結果を吸音条件間で比較して計算した RIR が音場の特徴を捕らえていることを確認し、さらに、FOA と HRTF を畳み込み生成した両耳 RIR を異なる受音点で比較して算出した両耳 RIR が音源-受音点の位置関係を適切に反映していることを示した。最後にバイノーラル可聴化による聴感的な印象と音場の物理的な特徴の対応を確認し、本可聴化法の妥当性と有効性を示した。 以上、本研究は有限要素法による音場シミュレーションについて、従来の陽的 TD-FEM の課題を克服した新たな陽的 TD-FEM による実用的な室内音響解析手法を構築し、境界面の吸音特性の周波数依存性を考慮して、従来は困難であった任意形状の実大室内音場の解析を数 kHz 帯域まで高速に実現し、室内音場シミュレーションに関する重要な知見を得ており、価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の吉田卓彌は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。	