

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20700007

研究課題名 (和文) 広範な波動数値音響解析のための次世代境界要素法の構築

研究課題名 (英文) Development of a next generation boundary element method for multi-purpose wave-based sound field analyses

研究代表者

安田 洋介 (YASUDA YOSUKE)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号：90456187

研究成果の概要 (和文)：波動音響解析手法の 1 つである境界要素法に高速多重極法， Krylov 部分空間反復解法という 2 つの高効率手法を適用し，各種構造体・媒質との連成解析を含めて著しく効率化することで，空間的・周波数的な解析可能領域を大幅に拡大する「次世代境界要素法」ともいえる解析システムの構築を目指した．具体的には，吸音材に代表される減衰音場を高速多重極法で扱うための設定式の提案，構造体のモード解析を前提とした音場との効率的連成方法を構築した．さらに，要素メッシュ作成における人間側の負荷低減の観点から，高周波数域用の細かい要素メッシュを用いつつ低周波数域まで低コストで計算可能な手法を組み込んだ．

研究成果の概要 (英文)：A next generation boundary element method (BEM), which enables large-scale calculation of acoustical problems including structural-acoustical and acoustical-acoustical coupled ones with the use of the fast multipole method (FMM) and the Krylov subspace iterative method, has been developed. Specifically, a numerical setting to deal with absorbent materials in conjunction with the FMM has been proposed, and an efficient technique to analyze structural-acoustical problems based on modal analyses of structural fields has been developed. This next generation BEM also enables efficient calculation of so-called low-frequency problems (the boundary mesh size is much smaller than the wavelength), which the conventional FMM-accelerated BEM cannot calculate because of numerical instability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：シミュレーション工学，ソフトウェア開発効率化・安定化，計算物理，音響数値解析

1. 研究開始当初の背景

計算機の進歩により、音響分野においても高精度な波動音響解析の利用が増大している。このような状況の中、実務レベルにおいても従来以上に精度・効率への要求水準は高まってきており、細かな違いまで正確に予測したい、あるいはラップトップ PC 等で手軽かつスピーディに予測したいというシンプルかつ根本的な需要が高まってきている。また最終的な聴感評価のための可聴化への援用という観点から、全可聴域での予測への期待も高い。

こうした需要に応えるにあたり、現在の波動数値解析手法はいずれも計算コストに関わる以下のような大きな問題を抱えている。

- (1) 音響問題の波動数値解析においては、対象空間（または境界面）を解析波長に対し十分細かいサイズの要素に離散化して扱うことから、高周波数域においては必然的に要素数が増大し計算コストが膨大化する。
- (2) 高精度化のためには境界条件の適切な設定が必須であるが、これには各種構造体や吸音体と音場との連成解析が必要となり、プログラミングの煩雑さとともに計算コストが増大する（基本的な連成技術は確立しているものの、効率的観点から広く使われていない）。

以上のような計算自体に関わる問題点のほかにも、

- (3) 計算機能力や効率化手法の開発が進むにつれ、解析対象の形状入力、要素分割（要素メッシュ作成）といったプリプロセッシングに対する人間側の負荷が相対的に増大する。

という問題も研究レベル、実務レベルの双方で無視できない。(3)については、特に要素メッシュ作成に関わる問題が指摘されている。具体的には、要素メッシュを解析周波数ごとに複数用意することの現実的困難や、止むを得ず細かい要素メッシュから荒いものを作成する「コースニング」の難しさ、コースニング成果物の作成者依存性の高さなどである。こうしたことから、「高周波数域解析用の細かい要素メッシュ1つで、低周波数域の解析も効率的に行いたい」という要望が音響数値解析実務者から数多く指摘されている。

(当問題は、低周波数域における大自由度の波動数値解析問題に帰着する。)

このような波動数値解析手法が抱える根本的な問題点に対し、申請者は現在までに「高速多重極法（以下、FMM）」及び「Krylov 部分空間反復解法（以下、Krylov 法）」（い

れも米国 SIAM により 20 世紀のアルゴリズムトップ 10 に選定) を従来の境界要素法（以下、BEM）に適用した「高速多重極境界要素法（以下、FMBEM）」を開発し、大幅な効率化により空間的・周波数的な解析可能領域を拡大してきている。しかしながら、連成解析の高効率化（上記(2)への対応）は、申請者による検討も含め十分なされているとは言えない。また、上記(3)のような実務的観点からの要望を根本的に解決する検討は見当たらない。

2. 研究の目的

上記諸問題の解決のために、境界要素法（BEM）をベースに、各種の連成手法を FMM, Krylov 法といった優れた効率化手法を利用して組み入れ、高精度・高効率（人間側の負荷も含む）な総合的解析ツールとして開発することが本研究の目的である。本課題では、このような汎用的音響解析手法の構築を目指して、大きく以下の2点を検討する。

- (1) 連成系解析のための高効率解析手法の構築：高精度な音響予測のために今後必須となる各種構造体・媒質との連成問題に関して、BEM, FMM, Krylov 法をベースとした効率的かつ汎用的な連成システムを構築する。
- (2) 低周波数域での大自由度波動解析の効率化：要素メッシュ作成における人間側の負荷低減、及び要素メッシュのコースニングにつきまとう作成者依存性回避等の観点から、高周波数域用の細かい要素メッシュ（自由度大）をそのまま用いながら低周波数域での計算コストを低減するための手法を開発する。

3. 研究の方法

上記目的に対応した形で以下に示す。

- (1) 連成系解析のための高効率解析手法の構築：連成問題は、全領域におけるすべての未知数を含む全体方程式を解くことに帰着することから、これを如何に効率的に解くかが問題となる。本研究では、方程式を効率的に解くために Krylov 法を適用し、Krylov 法で必要となる行列ベクトル積を、部分領域ごとの独立した計算を基に構成するシステムを構築する。部分領域での計算の独立性を高めることで、部分領域それぞれに適した効率化手法を適用可能なことと、プログラミングの移植の容易さが期待できる。計算の解析プログラムを計算機に実装した後、各種典型的な連成問題や車室といった複雑な連

成問題の解析を行い、従来法及び実測との比較を通して精度・効率を検証する。

- ① 音響 - 音響連成系解析：音響 - 音響連成系（例：吸音材内部音場と空気音場の連成）については、申請者らが既に開発した FMBEM を個々の部分領域に適用することを念頭に手法を構築する。
- ② 音響 - 振動連成系解析：音響 - 振動連成系（例：スピーカーからの音響放射、窓からの音響透過）についても、基本的枠組みは音響 - 音響連成系と同様のものを考える。即ち連成を行う部分領域ごとに閉じた形で行列ベクトル積を算出し、それらを重ね合わせることで、Krylov 法に必要な全体行列ベクトル積を算出する手法とする。音場には FMBEM を、振動系に関しては汎用性を考え有限要素法 (FEM) を用いることとする。
- (2) 低周波数域での大自由度波動解析の効率化：高周波数域での大自由度問題の解析には前述の FMBEM で高効率に計算可能であるが、FMBEM の基礎である Rokhlin の対角化に基づく FMM は低周波数域で精度が劣化することが知られており、自由度に比べて著しく低周波数で解析する場合には適用できない。オリジナルの FMM に基づく手法が考えられるが、展開係数の変換に多大な計算が必要なことが知られており、その効率化について検討が必要である。本研究では、低周波数域の解析のための FMBEM (Low-frequency FMBEM: LF-FMBEM) の開発を目指し、以下の手順で研究を遂行する。
- ① 効率的な展開係数変換手法の検討：主として計算工学分野において、効率的な係数変換手法に関わる文献を調査し、FMBEM に組み込むことを念頭にアルゴリズムを複数構築する。数値解析による比較検討を通して、最も有効なアルゴリズムを選定すると共に、その数値的な取り扱いに関する諸問題、即ちアルゴリズム内の特殊関数や漸化式、無限級数等の取り扱いについて検討し、それらの設定を具体的に決定する。
- ② LF-FMBEM の構築・検証：以上の変換手法を FMBEM に組み込んだ解析アルゴリズムを構築し、実装する。数値実験を通して、解く問題の自由度と計算効率の関係を明確にし、BEM や既存の高周波数域のための FMBEM と比較しつつ、高精度・高効率に機能する適用範囲を明らかにする。

4. 研究成果

上記目的・方法に対応した形で以下に示す。

- (1) 連成系解析のための高効率解析手法の構築

築

- ① 音響-音響連成系解析：FMBEM による多孔質吸音材内の解析を可能とすることを目的として、以下の検討を行い、成果を得た。(i) 3次元音場基本解の多重極展開表現の誤差評価：解析の基礎となる3次元音場基本解の多重極展開表現に関して誤差評価を行った。吸音材内部での波動の減衰により相対的に数値誤差が増大することなどから展開表現が発散する危険があることを示した。(ii) 設定式の提案：上記問題を克服するため、減衰の大きい遠方からの影響評価を限定する設定式を提案した。本設定式は非常にシンプルなものでも適用も容易である。(iii) 基本問題の解析による有用性検証：設定式を FMBEM に実装した後、単純な形状をした非連成の多孔質材内部音場を解析し、上記設定式の有効性を検証した。設定式を用いることで計算精度が保持できることを確認した (Fig. 1)。(iv) 実問題の解析による連成手法の有用性検証：吸音体を有する複雑形状の居室を想定し、吸音体内部音場との連成解析を行うことで設定式の有効性・実用性を検証した。解析にあたっては、PUプローブ（音圧・粒子速度センサー）を用いて吸音体表面インピーダンスの測定を行い、数値解析結果と比較することで解析に必要な吸音体の流れ抵抗を推定した。流れ抵抗が大きい場合、提案した設定により誤差の低下を防ぐことができた。また、計算効率に直結する Krylov 法の反復計算の収束についても改善が見られた。

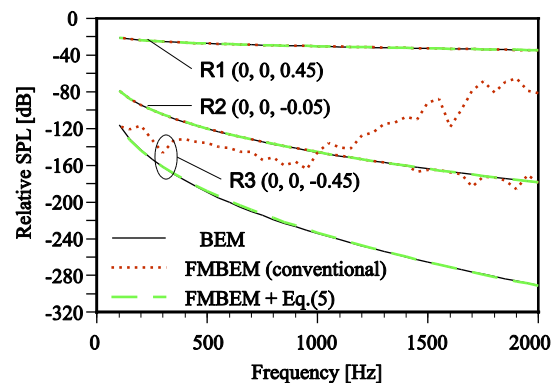


Fig. 1 : 多孔質材内部音場における音圧レベル分布. 設定式 (Eq. (5)) を用いたものは従来の BEM と同様の分布となっている。

- ② 音響 - 振動連成系解析：(i) 手法の構築：連成を行う部分領域ごとに閉じた形で行列ベクトル積を算出し、それらを重ね合わせることで、Krylov 法に必要な全体行

列ベクトル積を算出する手法を検討した。音場には効率的な FMBEM を用いる一方、振動系には従来の FEM を用いるが、扱う振動モード数が音場の自由度に比べ小さいことから、計算に特段の効率化を施さなくとも FEM の計算負荷は過大とならない。(ii) 手法の実装・有用性検証：手法を実装し、単純な問題の解析を通して精度・効率を検証した。Krylov 法の収束は、共鳴周波数付近を除けば良好であり、実用性は高いと考えられる。

(2) 低周波数域での大自由度波動解析の効率化

① 効率的な展開係数変換手法の検討：オリジナルの FMM に基づく手法を複数実装し比較検討した。数値実験を通して手法の計算精度・安定性・効率を相互比較し特徴を明らかにした。多重極 - 多重極展開及び局所 - 局所展開間の変換には Taylor 展開に基づく手法、多重極 - 局所展開間の変換には座標系の回転・軸方向変換・逆回転手法に漸化式を併用する手法が有効なことを示した。また、Taylor 展開の項数は多重極 - 多重極展開及び局所 - 局所展開の項数の 1/2 で十分な計算精度が得られること (Fig. 2)、座標系の回転による計算精度の劣化はほとんどないことなどを明らかにした。これらの具体的な知見は実際に数値解析を行う上で必要不可欠といえる。

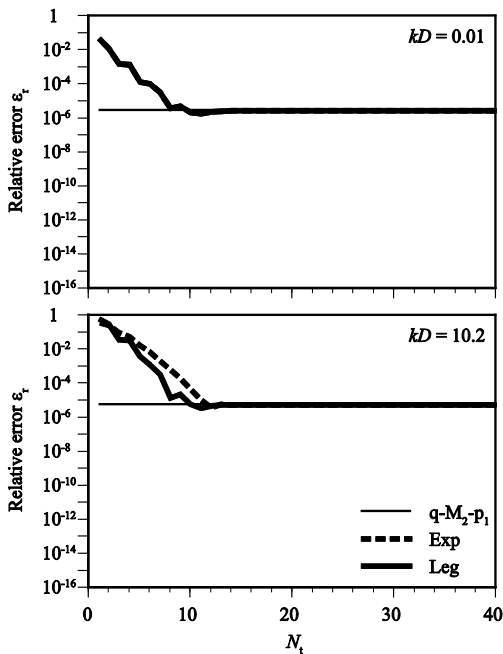


Fig. 2: 3次元音場基本解の多重極展開表現の相対誤差 (q-M₂-p₁: 理論解, Exp: Taylor 展開を用いたもの, Leg: Legendre 多項式を用いたもの。多重極展開打ち切り次数 $N_t =$

20). Taylor 展開の項数 N_t が $N_c/2$ 以上の範囲で誤差が収束している。

② LF-FMBEM の構築・検証：上記の展開係数変換手法を用いて、低周波数域のための FMBEM (LF-FMBEM) の解析アルゴリズムを実装し、理論解の既知である球問題及びホール解析を通して精度・効率を検証した。従来の BEM と同様の計算精度が得られること、低周波数域においては従来の高周波数域のための FMBEM 以上の効率化が得られることを示した (Fig. 3)。また、本解析を通して数値的な各種設定と計算効率の関係について検討し、計算時間・メモリの優先度に応じた具体的な設定方法について論じた。更に LF-FMBEM の汎用性を高めるため、上記解析アルゴリズムを拡張し、縮退境界問題を解析可能とした。これにより厚みが 0 とみなせる物体を解析可能となった (Fig. 4)。外部問題にこの手法を用いることで、BEM の弱点として知られる解の一意性の問題を回避できることから、本手法の有用性は高い。球外部問題、高架上の鉄道からの放射問題を解析し、手法の有効性を確認した。

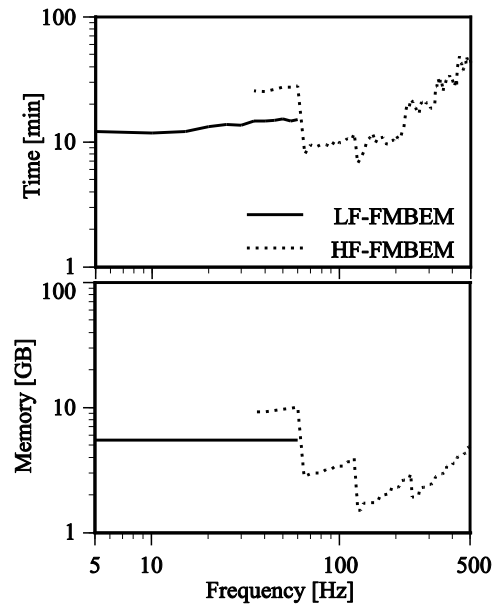


Fig. 3: 低周波数域のための FMBEM (LF-FMBEM) と従来の FMBEM (HF-FMBEM) の計算効率比較。

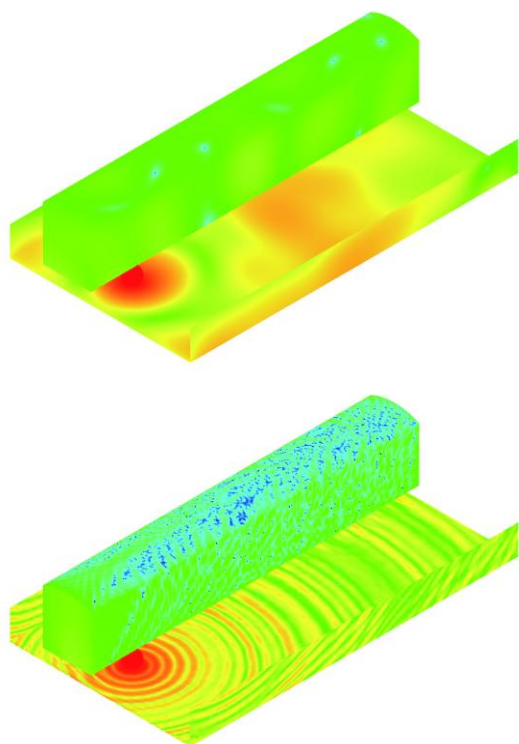


Fig. 4: 鉄道車両周りの音場解析結果 (上: 60 Hz, 下: 800Hz). 高架橋を厚み 0 の縮退境界とみなして解析.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 安田洋介, 江田和司, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, 吸音体を含む室内の高速多重極 BEM による領域分割解析, 日本音響学会講演論文集 (春季, 東京), pp. 1221-1222, (2010. 3. 9).
- ② 榎本貴之, グナワン・アリーフ, 大嶋拓也, 安田洋介, 佐久間哲哉, 低周波数解析のための高速多重極 BEM —計算精度・効率に関する検討—, 日本音響学会講演論文集 (秋季, 福島), pp. 1047-1050, (2009. 9. 17).
- ③ 安田洋介, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, 低周波数解析のための高速多重極 BEM —計算アルゴリズムについて—, 日本音響学会講演論文集 (秋季, 福島), pp. 1043-1046, (2009. 9. 17).
- ④ T. Masumoto, A. Gunawan, T. Oshima, Y. Yasuda and T. Sakuma, Development of low-frequency fast multipole BEM and its performance tests, Proc. Inter-Noise 2009 (Ottawa),

No., 9p., (2009. 8. 26).

- ⑤ 安田洋介, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, 低周波数解析のための高速多重極 BEM —係数変換に関する検討—, 日本音響学会講演論文集 (春季, 東京), pp. 1059-1062, (2009. 3. 17).
- ⑥ 榎本貴之, Arief Gunawan, 大嶋拓也, 安田洋介, 佐久間哲哉, 高速多重極 BEM を用いた音響 - 構造連成解析における反復解法の収束性, 日本音響学会講演論文集 (秋季, 福岡), pp. 975-976, (2008. 9. 10).
- ⑦ Y. Yasuda and T. Sakuma, Analysis of sound fields in porous materials using the fast multipole BEM, Proc. Inter-Noise 2008 (Shanghai), No. 0531, 9p., (2008. 10. 27).
- ⑧ T. Masumoto, A. Gunawan, T. Oshima, Y. Yasuda and T. Sakuma, Coupling analysis between FMBEM-based acoustic and modal-based structural models -Convergence behavior of iterative solutions-, Proc. Inter-Noise 2008 (Shanghai), No. 0308, 10p., (2008. 10. 27).

[その他]

(学会主催研究会発表)

- ① 安田洋介, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, グナワン・アリーフ, 榎本貴之, 低周波数解析のための高速多重極 BEM —縮退境界モデルにおける定式化—, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 (新潟), N-2010-04 (2010. 1. 22).
- ② 安田洋介, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, グナワン・アリーフ, 榎本貴之, 低周波数解析のための高速多重極 BEM, 日本音響学会建築音響研究会資料 (京都), AA2009-69 (2009. 12. 2).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 洋介 (YASUDA YOSUKE)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

研究者番号: 90456187

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: