

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760447

研究課題名(和文) マルチフィジックス対応汎用音響数値解析オープンソースパッケージの開発

研究課題名(英文) Development of general-purpose open source package for multiphysical acoustic numerical simulations

研究代表者

大嶋 拓也 (OSHIMA TAKUYA)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：40332647

研究成果の概要(和文)：連成問題(マルチフィジックス)に対応した汎用音響数値解析コードおよび付随するプリ・ポストプロセッシングインターフェースの開発を行い、成果物の公開を図った。特に対象とした連成問題は、非一様気流中の音響伝搬解析のための線形化オイラー法、および音響-振動連成解析である。既存の優れた汎用オープンソースライブラリを援用しながら、前者は計算効率に優れた有限差分法、後者は汎用性に優れた有限体積法による実装を行った。

研究成果の概要(英文)：In the research was developed general-purpose software package for multiphysical acoustic numerical simulations and its accompanying pre- and post-processing interfaces, with effort to open resulting products on the web. The multiphysical problems being focused on were acoustic propagations under influence of nonuniform air flow which is solved with linearized Euler approach, and classical vibro-acoustics. The former solver was implemented by finite-difference technique whereas finite-volume technique was applied for the latter, with the effective help of existing general-purpose open-source libraries.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：音・振動環境、計算音響学、汎用コード、気流・音響連成、音響・振動連成

1. 研究開始当初の背景

わが国における建築音響数値解析の研究分野は、世界的に見ても当該分野への貢献度の高い精力的かつ活発な領域である。その成果として、計算規模および技術的完成度の面からかつて困難と言われた実建築空間への適用は、継続的な精力的研究の結果、研究レベルにおいては既に十分可能であった。しか

しながら、それら画期的研究成果の実務への適用は、数値流体解析(以下 CFD)、構造解析といった建築学における他の主要数値解析分野と比較して大きく遅れているのが実情であった。その理由としては、主に以下2点が挙げられた。

- (1) 容易に利用可能な汎用コードの不在。すなわち音響分野は、建築および機械分野

の一部で概ね閉じた、比較的小規模な分野である。そのため個別の研究者の努力によって実建築空間問題への適用にまで漕ぎつけても、汎用化・実用化にまで回すマンパワーが残っていないのが実情であった。結果として、研究成果の具体化物たるプログラムコードが各研究者の下で公開される事無く閉じたままとなり、実務者が比較的容易かつ即座に利用可能な汎用コードが希少となっていた。また商用化されても、市場規模的な問題から高価となりがちであった。

- (2) 音響問題の複雑性。音響伝搬現象そのものの構成方程式自体は線形であり、比較的単純であるものの、実際的な問題の多くは、例えば流体機械から建築躯体への音響振動伝搬といった問題例から想像されるように、流体・構造など複数の物理現象が連成した、いわゆるマルチフィジックス問題である。それゆえ、異なる物理現象間の連成実装および境界条件設定テクニックなど、たとえ意欲ある経験豊富な実務者であっても、多くは数値解析に関しては初学者であり、そのような実務者が公刊論文の“行間を読んで”の解析コード自作は至難であった。

ところで、有限体積法はこれまで音響数値解析に用いられて来なかったが、その数学的な表現が有限差分法に次いで簡潔でありながら、任意形状の解析対象を任意多角形のセルで格子分割する、いわゆる非構造格子の取扱いが可能な柔軟な手法である。数学的な表現が簡潔である事はマルチフィジックス問題を扱う場合、定式化および実装が容易である事を意味し、さらに非構造格子の取扱いが可能である事は、実務で要求される複雑形状の解析が可能であり、さらに CFD・構造解析用としてエンジニアリングの現場で幅広く普及している、汎用プリプロセッシングソフトウェア、および可視化ソフトウェア等の汎用ポストプロセッシングソフトウェアをそのまま流用可能である事を意味する。これらの有限体積法の特徴は、上記 2 点の問題解決策として求められるニーズ、すなわちマルチフィジックス対応汎用音響解析コードの開発にあたって求められる要件と非常に良く一致する。

2. 研究の目的

そこで本応募研究では、過去に代表者が開発した有限体積法に基づいた音響解析コードを元に、マルチフィジックス機能の開発実装を行い、非構造格子対応の汎用オープンソースソフトウェア(以下 OSS)および付随ドキュメント・チュートリアル・解析事例をまとめたパッケージとして Web 上に公開し、以って音響数値解析技術の実務への普及を図

ることを目的とする。

3. 研究の方法

マルチフィジックスとして具体的に扱う問題は、目的達成可能性の観点から、以下 2 現象に絞った。

- (1) 線形化オイラー法による非一様気流中の音響伝搬問題の取扱い。本問題対応のコードは代表者が過去に、科学研究費補助金助成課題として開発しており、その発展版として、汎用プリ・ポストプロセッシングインターフェイスの追加、1. の音響-振動連成機能との機能統合などの汎用化を行う。
- (2) 音響-振動連成問題。実務での音響問題の多くは、何らかの形で固体の振動と空気中の音響伝搬が連成された問題である。従来は、モード領域解法である有限要素法が最も多く適用されてきたが、近年では周波数応答が一回の解析で得られる事、時間を追った克明な現象追跡が可能な事などから、時間領域解法(有限体積法もその一つである)の適用が増えている。従って、マルチフィジックス機能として組み込むべき筆頭と言えた。

なお、数学的な簡潔さ、および非構造格子対応の柔軟性と言った前記の有限体積法の特徴から、離散化スキーム、方程式ソルバ、プリ・ポストプロセッシングへのインターフェイスといった、汎用化に不可欠な基本的要素をあらかじめ実装した、優れた OSS の有限体積法ベース演算ライブラリが存在する。本応募研究では、そのような汎用 OSS を活用する事で、従来の研究者が行ってきたようなゼロからのコード開発を避け、音響解析として独自の部分のみを開発実装する汎用 OSS ベース開発モデルを適用することとした。

4. 研究成果

(1) 非一様気流中の音響伝搬問題

① 背景

屋外における気流など気象効果を考慮した音響伝搬の予測は近年、重要性を増しつつある研究課題の一つである。これに対して筆者の一人は、線形化オイラー法 (LE 法) に基づいた手法を提案し、自由空間中の流れを有する音響場問題において妥当性を示した。しかしながら LE 法は数値流体解析 (以下 CFD) 結果を入力として音響伝搬解析を行う複雑な手法であり、格子生成など前処理技術の確立を含め、現実的な気流・音響場への適用が課題となっていた。今回、数値地形情報を用いて、実在市街地における LE 法を用いた音響伝搬予測を試みた。なお音響解析コードの開発に当たっては、オープンソースの汎用可視化ライブラリである Visualization

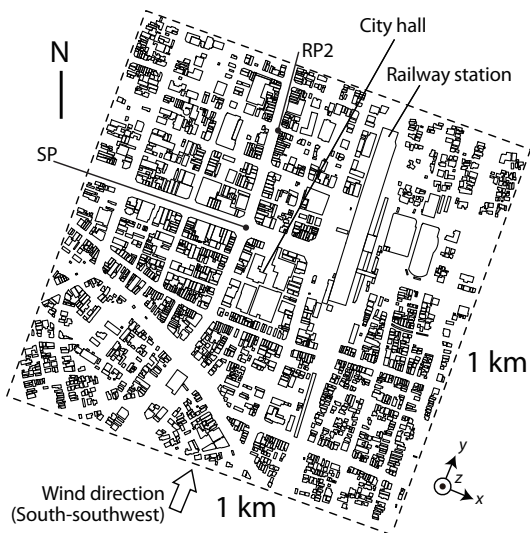


図 1 生成した市街地形状

Toolkit (VTK)を援用した。

② 市街地形状生成

本事例では建物の外形線ポリゴンの情報を有する2次元の数値地図データおよび航空機からのレーザ計測により計測された表層高さデータを組合せ、図1のように自動生成した。

③ CFD用格子生成および解析条件

CFDのための格子生成およびCFD解析は、汎用の非構造格子有限体積法ライブラリであるOpenFOAMを用いた。解析領域は $(x, y, z) = (1024, 1024, 512)$ [m]の寸法を設定した。格子分割は任意寸法の格子を混在可能な非構造格子の特徴を生かし、最上空は一辺8mの立方体セルからなる粗格子分割とし、地上へ行くに従って再分割による一辺4mおよび2mの密格子分割、さらに地表面近傍及び周辺建物の壁面最近傍格子幅は25cm~1mとした。以上によって生成した格子の市役所近傍の建物・アーケード・地表面格子部分を図2に示す。総格子数は、約1,500万である。

音響伝搬は本解析対象のような街区レベルの空間スケールであっても、高々数秒間の時間スケールの現象であることから、流れ場の非定常性の影響は小さいと考え、SIMPLE法による定常解析とした。また乱流モデルとしては、 $k-\epsilon$ 系の中では屋外気流の予測精度に概ね優れ、安定して計算が行なえるRNGモデルを用いた。

風向は対象地のアメダス地域気象観測所における1999年から2008年の10年間での10分間平均風速主風向である南南西とし、風速は10分間平均風速の10年間平均値に対応する初期プロファイルを与えた。

④ LE法解析用格子生成および解析条件

音響伝搬解析は、波動伝搬を全解析領域に渡って解像するため、CFD解析のような疎密を設ける格子分割は非適応であり、したがっ

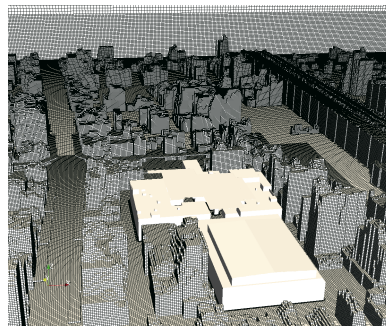


図 2 CFD用格子

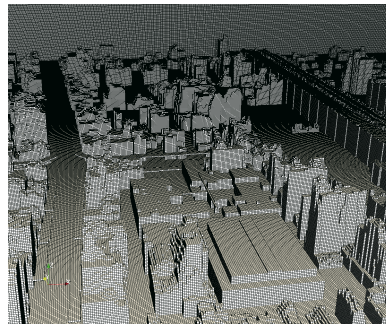


図 3 LE法解析用格子

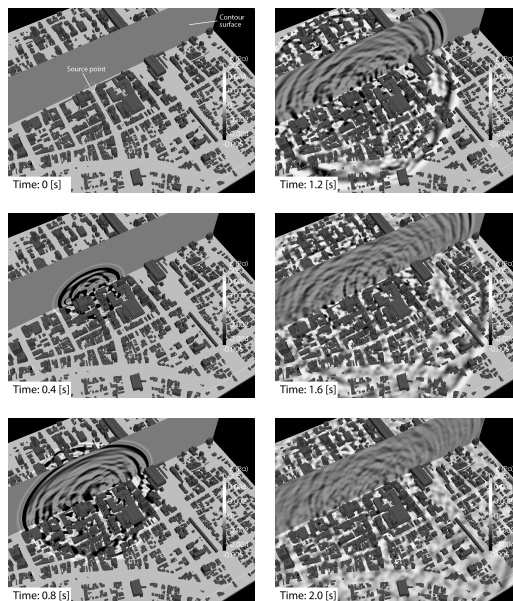


図 4 瞬時音圧のスナップショット

て全領域に渡って波長に対して十分な分割数の等間隔格子をCFD解析とは別に用意した。解析領域寸法は x, y 方向についてはCFD領域の四辺を僅かに切り落とした各1,000m、 z 方向高さを上空部分の地表面付近の音響伝搬への影響は僅少と考え250mとした。格子幅は全領域内で1mとした。解析領域内総格子数は2億4,600万である。以上によって得られた格子を図3に示す。

境界条件は建物・地面を剛とし、解析領域全側面および上端に10セル厚のPML吸収層

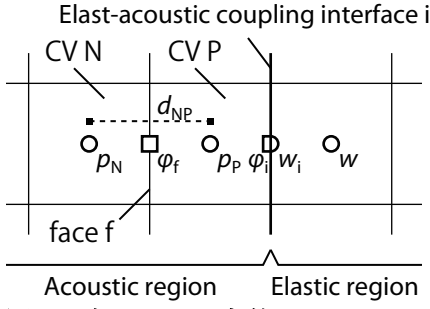


図 5 グリッドの定義

界条件を課した。音源は、図 1 に示す点 SP に、半値全幅 10 m の単位振幅 Gaussian パルスを設定した。当該パルスには概ね半値全幅を波長とする周波数成分までが含まれるため、35 Hz 付近の成分までが含まれることになる。時間刻みは 0.0016 s とし、3.2 s までの解析を行った。

⑤ 解析結果

図 4 に、瞬時音圧分布のスナップショットを 0.4 s ごとに示す。可聴域下限に近い低周波数域の解析ではあるが、建物間の反射と波面の干渉によって、波頭面の内側では複雑な干渉模様を描いている。

(2) 音響-振動連成問題

① 背景

有限体積法による音響伝搬解析手法は有限差分法より計算効率で劣るものの、非構造格子の扱いが可能であることから汎用性に優れる。このような本手法の特徴は、連成問題のような複雑な問題においてよりメリットがあると考えられ、弾性体の振動と空気中の音響伝搬を連成させた弾性体-音響連成解析手法を提案した。なお実装に当たっては、汎用の非構造格子有限体積法ライブラリである OpenFOAM を採用した。

② 音響伝搬解法

p 、 \mathbf{u} をそれぞれ音圧および粒子速度、 ρ_0 、 c_0 、 t をそれぞれ媒質密度、媒質中の音速、時刻としたときの音響伝搬の基礎方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{u}$$

を、有限体積法にそって図 5 に示すコントロールボリューム (CV) P について離散化すると以下となる。

$$\phi_f^{n+1/2} = \phi_f^{n-1/2} - \frac{S_f \Delta t}{\rho_0} \frac{p_N^n - p_P^n}{d_{NP}},$$

$$p_P^{n+1} = p_P^n - \frac{\rho_0 c_0^2 \Delta t}{V_P} \sum_f \phi_f^{n+1/2}$$

ただし、N: P に隣接する CV、f: P-N 間の CV 界面、右肩添字: 時刻ステップ、 ϕ_f : f における体積流量、 d_{NP} : P-N の中心点間距離、 S_f : f の面積、 V_P : P の体積である。

③ 弾性体解法

ここでは 3 次元の均質等方弾性体を扱う。このとき、変位ベクトル \mathbf{w} に関する以下の運動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left[\mu \nabla \mathbf{w} + \mu (\nabla \mathbf{w})^T + \lambda \text{Itr}(\nabla \mathbf{w}) \right] + \mathbf{f},$$

$$\mu = \frac{E}{2\rho_E(1+\sigma)}, \quad \lambda = \frac{\sigma E}{\rho_E(1+\sigma)(1-2\sigma)}$$

ここで ρ_E : 弾性体密度、 μ 、 λ : 平面ひずみ問題または 3 次元問題の場合の Lamé 係数を ρ_E で除した値、 E : Young 率、 σ : Poisson 比、 I : 単位テンソル、 \mathbf{f} : 外力による加速度である。上式について、以下 2 とおりの時間方向離散化を試みた。

陽解法: 上式の全ての項を時刻ステップ n を中心に離散化すると、陽な時間発展の離散化を次式で得る。

$$\mathbf{w}^{n+1} = 2\mathbf{w}^n - \mathbf{w}^{n-1} + \Delta t^2 \nabla \cdot \left[\mu \nabla \mathbf{w}^n + \mu (\nabla \mathbf{w}^n)^T + \lambda \text{Itr}(\nabla \mathbf{w}^n) \right] + \Delta t^2 \mathbf{f}^n$$

陰解法: 弾性体の縦波伝搬速度は通例、空気中の音響伝搬の音速より大幅に速くなるため、Courant 条件に制約される陽解法では小さな時間刻みが必要である。ここではそのような制約の無い陰解法を試みた。上式では時刻ステップ n において陽に評価した項の一部を時刻ステップ $n+1$ において陰に評価し、さらに時刻ステップ $n+1$ および n において、 $\nabla \cdot (\mu + \lambda) \nabla \mathbf{w}$ をそれぞれ加減することで、 \mathbf{w}^{n+1} に関するマトリックス方程式の対角優位化を行う。

$$\mathbf{w}^{n+1} - \Delta t^2 \nabla \cdot \left[(2\mu + \lambda) \nabla \mathbf{w}^{n+1} \right]$$

$$= 2\mathbf{w}^n - \mathbf{w}^{n-1} + \Delta t^2 \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{w}^n)^T + \lambda \text{Itr}(\nabla \mathbf{w}^n) - (\mu + \lambda) \nabla \mathbf{w}^n \right] + \Delta t^2 \mathbf{f}^n$$

④ 連成境界の扱い

音響領域から弾性体領域への連成は、音響側連成境界面上の音圧を、弾性体への外力として与える。すなわち、

$$\mathbf{f}_i^n = -\nabla p_i^n = -\frac{p_i^n \mathbf{S}_i}{V}$$

ただし i : 連成界面、 \mathbf{f}_i : 構造側の i への隣接 CV における i 上の音圧による加速度への寄与、 V : 同 CV の体積、 p_i : 音響側の i への隣接 CV からゼロ勾配条件によって求められた i 上の音圧、 \mathbf{S}_i : i における面積ベクトル

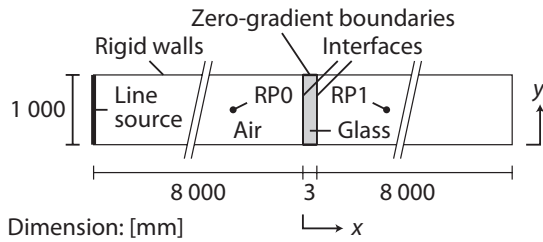


図 6 解析対象

である。

弾性体領域から音響領域への連成は、構造側連成界面における変位の時間微分から求めた体積流量を、音響側へ与える。

$$\phi_i^{n+1/2} = \frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t} S_i$$

連成界面上のメッシュ密度が両領域間で異なる場合、界面中心点から対向界面中心点への距離に対する逆距離補間を行う。

⑤ 解析問題概要

図 6 に示す平面波の 3 mm 厚単板ガラスへの垂直入射問題を解析する。ガラス部分端部をゼロ勾配境界条件として、無限大板の挙動を模した。メッシュは空気部分が (x, y) 方向とも 25 mm、ガラス部分が (x, y) 方向 (3, 20) mm の直交分割とし、z 方向は 200 mm の 1 分割とした。音源は解析領域左端に半値全幅 250 mm の Gaussian パルスを設定した。

時間刻みは弾性体側陽解法について $\Delta t = 3.60 \times 10^{-6}$ s (弾性体側 Courant 数 0.952)、陰解法について $\Delta t = 3.60 \times 10^{-6}$ s、 7.56×10^{-6} s、 1.51×10^{-5} s (同 0.952、2.0、4.0) の計 4 ケースを設定した。

⑥ 解析結果

図 7 に、図 6 に示す透過側受音点 RP1 (1.003, 0.5) における音圧時間波形を示す。解法および Courant 数によらず、波形が良く一致している。

さらに図 8 には、図 6 に示す入射側受音点 RP0 (-1, 0.5) および RP1 の音圧を周波数分析して得られた垂直入射透過損失および位相差を質量則と比較して示す。いずれのケースも質量則と良く一致しており、Courant 数が 1 を大きく超える状況での陰解法の有効性を示している。

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 6 件)

- ① Takuya Oshima, Comparative study on finite-difference and finite-volume implementations of the Linearized Euler model for outdoor sound propagation simulations, Proc. ICA

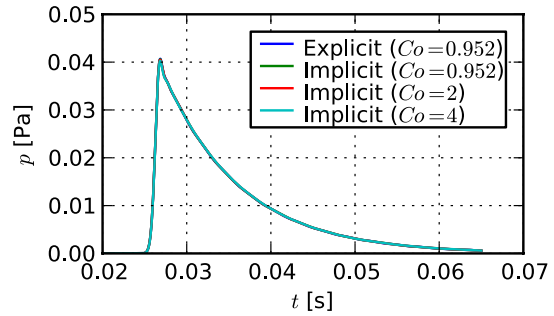


図 7 点 RP1 における音圧時間波形

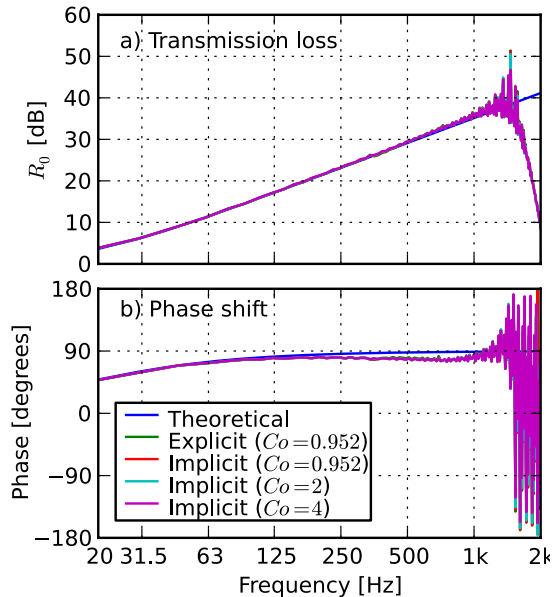


図 8 垂直入射透過損失および位相特性

- ② 大嶋拓也、石塚崇、鈴木久晴、星和磨、谷川将規、音響数値解析環境“OpenAcoustics”プロジェクト：開発状況と展望、日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集、査読無、D-1 巻、2010、263-266
- ③ 大嶋拓也、今野雅、LE 法による屋外音響伝搬解析における市街地モデル解析格子自動生成に関する研究、日本騒音制御工学会秋期研究発表会講演論文集、査読無、2010、55-58
- ④ 大嶋拓也、屋外音響伝搬解析のための LE 法における有限差分および有限体積解法の比較、日本音響学会騒音・振動研究会資料、査読無、N-2010-05 巻、2010、1-8
- ⑤ 安田洋介、佐久間哲哉、大嶋拓也、グナワン・アリーブ、榎本貴之、低周波数解析のための高速多重極 BEM 一縮退境界モデルにおける定式化一、日本音響学会騒音・振動研究会資料、査読無、N-2010-04 巻、2010、1-8

- ⑥ 坂本雄三、柴田良一、今野雅、大嶋拓也、
オープンソース CAE-展開と諸課題、建
築雑誌、査読有、124-1594 巻、2009、
38-39

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 大嶋拓也、有限体積法による時間領域音
響振動連成解析に関する基礎的検討、日
本音響学会、2011 年 3 月 10 日、早稲
田大学(東京都)
- ② 大嶋拓也、音分野のシミュレーション技
術と将来展望、日本建築学会、2009 年
8 月 28 日、東北学院大学(宮城県)

〔その他〕

ホームページ等

<http://oshima.eng.niigata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大嶋 拓也 (OSHIMA TAKUYA)
新潟大学・自然科学系・助教
研究者番号：40332647

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し