

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 9 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760440

研究課題名（和文）

時間領域有限差法を用いた異方性粘弾性体の振動音響連成解析に関する研究

研究課題名（英文）

Study on vibroacoustic analysis of heterogeneous anisotropic media using the finite-difference time-domain method

研究代表者

豊田 政弘 (TOYODA MASAHIRO)

関西大学・環境都市工学部・助教

研究者番号：30504716

研究成果の概要（和文）：

集合住宅における騒音トラブルのひとつである重量床衝撃音を主な対象とし、木材を含めた幅広い材料で構成された建物の設計段階における精緻な騒音予測手法を提案した。また、専門家でなくとも予測が可能となるよう、汎用騒音予測ソフトウェアを開発した。本ソフトウェアとGPU（Graphic Processing Unit）を利用することにより、小規模な建物であれば実用に耐える計算時間で予測が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Prediction method using the finite-difference time-domain method for floor impact noise was proposed. The method can deal with heterogeneous and anisotropic media including wooden materials. Software with a graphical user interface was also developed for nonprofessionals to practically predict the noise using graphic processing units.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

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・振動音響、床衝撃音、時間領域有限差分法、異方性、不均質媒質、木材、GPU

1. 研究開始当初の背景

(1) 高密度化する都市において、騒音による居住者間のトラブルは重要視されるべき問題のひとつであり、その中でも特に子供の飛び跳ねなどの重く柔らかい上階での衝撃に

より下階へ放射される重量床衝撃音に関する問題は建築躯体そのものの影響が強く、建設後の対策が極めて困難である。そのため、設計段階での床衝撃音の予測や評価が必要とされているが、振動伝搬経路の複雑さから

それらは容易ではない。

(2) ある室の床に加えられた振動は、その床板そのものから下階へ音を放射するとともに、建築躯体を振動が伝搬して、壁面や下階の床などを揺らし、それらからも音が放射される。このような現象を含めて床衝撃音を精緻に予測するためには部材から部材への振動伝搬を厳密に考慮に入れなければならない。

(3) 研究代表者は時間領域有限差分法 (FDTD 法) を用いた床衝撃音予測を試みており、この手法では複雑な振動伝搬経路を特別な処理なしに考慮することが可能であるが、建築躯体もしくは内装材として広く用いられる木材は、その繊維方向、半径方向、接線方向によって大きく物理的な特性が違っており、このような異方性を示す材料には対応が不可能である。

2. 研究の目的

(1) FDTD 法を用いた床衝撃音の発展形として、異方性を示す材料にも対応可能な振動音響連成理論を構築し、それらの材料を含めた構造体からの放射音を予測する手法を提案する。

(2) 専門家でなくとも予測が可能となるよう、GUI(Graphical User Interface)を備えた汎用的な騒音予測ソフトウェアを開発する。

(3) アルゴリズム、ソフトウェア、ハードウェアの各側面から計算負荷を低減する方法を検討し、実用に耐えうる計算時間で予測が可能となるシステムを提案する。

3. 研究の方法

(1) 粘弾性物理の支配式のひとつとなる構成方程式 (応力とひずみの関係式) 内の剛性テンソルと減衰テンソルに異方性を導入する。木材を取り扱うに十分である直交異方性を考え、独立なパラメータとして3つの軸方向の Young 率、3つの面内の剪断弾性係数、3組の縦横ひずみの組み合わせに関する Poisson 比の計9つを使用し、また、応力とひずみの対称性および相反性を利用して、コンプライアンスマトリクスを作成する。これの逆マトリクスから剛性テンソルを導出する。減衰テンソルは簡単のため、剛性テンソルに比例する形で与えて構成方程式とする。これを FDTD 解析用に離散化し、基礎式のひとつとして利用することで、異方性媒質を含む幅広い媒質に対応可能な予測手法を構築する。

(2) ユーザーインターフェイスの基本的なプログラミング言語として Microsoft C# を採用し、汎用の GUI ソフトウェアを作成する。安定条件の算出に必要な固有値解析にはフリー数値計算ライブラリの CLAPACK を採用し、C# から C++ のライブラリを呼び出す。また CAD ソフトウェアから形状データをインポートし、形状や対象を目で確認しながら各種設定を行える環境を構築する。FDTD 解析そのもののプログラミング言語には Fortran を採用して並列化による高速化を施し、実用的な計算時間で床衝撃音を予測することができるシステムを提案する。

(3) 計算負荷低減のために、不等間隔の離散化に対応できるよう平均媒質定数や境界条件などを導出する。また GPU(Graphic Processing Unit) を利用したアルゴリズムを採用し、高速計算を行うことで、計算時間を短縮する。

4. 研究成果

(1) 直交異方性を決定付ける9つのパラメータから導かれる剛性テンソルおよび減衰テンソルを用いた FDTD 解析のための基礎方程式を導出した。また、解析の際の安定条件を算出した。これにより、コンクリートや空気などの等方性とみなせる材料だけでなく、異方性を持つ木材や合成材などの幅広い材料を対象とした振動伝搬および放射騒音の予測が可能となった。一例として木片からの放射音に関する実験の概略図を図1に示す。実験室内に吊るした木片をハンマーで加振した際の木片からの放射音を実測および予測する。放射音圧に関する実測結果と予測結果の比較を図2および図3に示す。時間領域、周波数領域ともに高い精度で予測できていることがわかる。

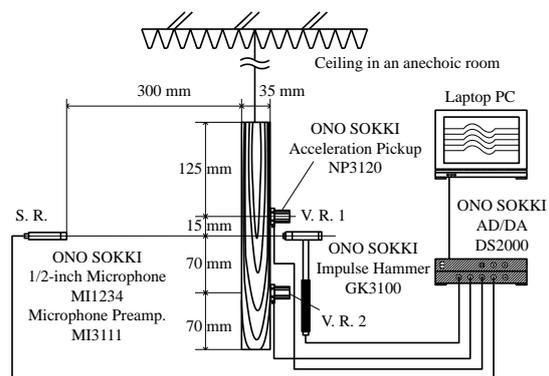


図1 実験条件の概略図

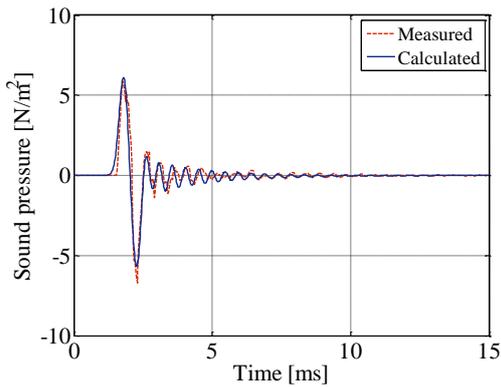


図2 時間応答に関する実測および予測結果の比較

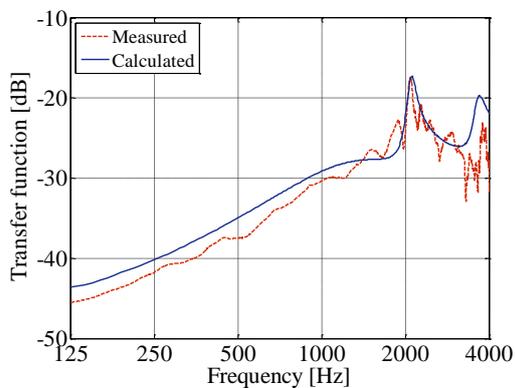


図3 周波数応答に関する実測および予測結果の比較

(2) 市販のCADソフトで作成した形状をインポートし、その形状や要素を見ながら材料情報や解析条件などを設定するための汎用インターフェイスソフトウェアを開発した。また、インターフェイスソフトウェアからデータを読み込み、GPUを利用して高速にFDTD解析を行うFDTDソルバーを開発した。これらにより専門家でも床衝撃音を含む騒音の予測を行うことが可能となった。また、予測結果は市販のグラフ描画ソフトや音楽再生ソフトなどでそれぞれ可視化・可聴化が可能となり、数値的な評価だけでなく、直感的な評価も可能となった。図4に開発したソフトウェアのスナップショットを示す。市販のCADソフトウェア、グラフ描画ソフトとの連携により、必要最小限の工程で床衝撃音を含むさまざまな騒音予測を行うことが可能となった。

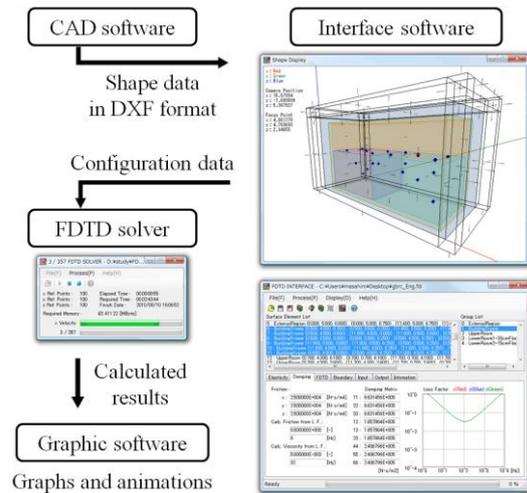


図4 汎用ソフトウェアのスナップショット

(3) 不等間隔の離散化を可能にするための平均媒質定数と境界条件を導出した。均質な媒質についてはすでに不等間隔の離散化手法が提案されていたが、本研究の成果により不均質な媒質でも不等間隔の離散化を実装することが可能となった。この手法はFDTD法以外の手法でも応用が可能であると思われる。不等間隔の離散化と併せて、FDTD解析の計算機としてGPUを用いることで更なる計算の高速化を実現できた。2階建て程度の小規模な建物であれば、振動伝搬と音響放射の可視化および音圧のピーク値のみが必要とされる床衝撃音レベルの予測なら数時間程度、残響時間などの比較的長時間の解析結果が必要となる各種音響指標を計算する場合でも1日もしくは数日で予測が可能であり、実用に耐える計算時間を実現できたと言える。

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3件)

- ① Masahiro Toyoda、Daiji Takahashi、Yasuhito Kawai、Averaged Material Parameters and Boundary Conditions for the Vibroacoustic FDTD Method with a Nonuniform Mesh、Acoustical Science and Technology、33巻4号、査読有、2012、掲載決定、DOI: 未定
- ② Masahiro Toyoda、Hideo Miyazaki、Yoshihide Shiba、Ami Tanaka、Daiji Takahashi、Finite-difference time-domain method for heterogeneous orthotropic media with damping、Acoustical Science and Technology、

33 卷 2 号、査読有、2012、pp. 77—85、
DOI: 10.1250/ast.33.77

- ③ 豊田政弘、振動音響連成を考慮した床衝撃音の予測、日本音響学会誌、査読無、67 卷 7 号、2011、pp. 290—295

[学会発表] (計 4 件)

- ① 豊田政弘、連成系 FDTD 解析と建築音響分野への応用、日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会、2011 年 12 月 18 日、産業技術総合研究所関西センター(大阪府)、招待講演
- ② 豊田政弘、高橋大式、河井康人、振動音響連成 FDTD 法の汎用ソフトウェア開発に向けて、日本音響学会秋季研究発表会、2011 年 9 月 20 日、島根大学(島根県)、招待講演
- ③ 豊田政弘、高橋大式、河井康人、時間領域有限差分法を用いた振動音響連成解析、日本音響学会建築音響研究会、2011 年 7 月 15 日、キャンパスポート大阪(大阪府)
- ④ Masahiro Toyoda、Daiji Takahashi、Averaged material parameters and boundary conditions for the vibroacoustic FDTD method with irregular grid systems、Forum Acusticum 2011、2011 年 7 月 1 日、Aalborg Congress & Culture Center (Denmark)、招待講演

[図書] (計 1 件)

- ① 日本建築学会編、日本建築学会、音環境の数值シミュレーション —波動音響解析の技法と応用—、2011 年、pp. 189—197

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊田 政弘 (TOYODA MASAHIRO)
関西大学・環境都市工学部・助教
研究者番号：30504716