

令和元年6月9日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14774

研究課題名（和文）次世代型振動音響連成FDTD法の構築と床振動シミュレーションへの応用

研究課題名（英文）Development of the next-generation vibroacoustic finite-difference time-domain method and application to the floor vibration simulation

研究代表者

朝倉 巧 (Asakura, Takumi)

東京理科大学・理工学部機械工学科・講師

研究者番号：60778207

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高い柔軟性・解析効率・精度を実現する「次世代型振動音響連成FDTD法」の構築である。初年度には、乾式二重床構造を対象とした振動解析手法の構築を行うため、主な課題として、部材間の緩い接触部分をモデル化できる解析スキームの構築、および防振ゴムを含む支持脚のモデル化手法の構築に取り組み、実現象を精度よくモデル化できる手法を提案した。次年度は、この手法を用いて実スケールの床構造モデルを対象とした床衝撃音解析に取り組んだ。床下構造について、空気層厚さや支持脚ゴム部位のゴム硬度などを検討パラメータとして、数種の構造について数値解析を実施し、実現象をよくとらえた解析結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築音環境における床構造の遮音性能確保の社会的ニーズ 都市住環境の質に対する要求は急激に高まっており、建築空間内の音環境に対する要望も顕在化している。近年、床下における配管スペース確保等の利便性を高めるため、乾式二重床や二重天井などの構造を含むことが多く、振動の伝達メカニズムが複雑化し、その遮断性能予測が現状では難しい。この予測が可能となれば、建設業界における画期的な予測技術の一つとして、重要な役割が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to construct the "next-generation vibro-acoustic coupled FDTD method" which realizes high flexibility, analysis efficiency and accuracy. In the first year, to construct a vibration analysis method for the double-floor structure, the main task is to construct an analysis scheme that can model loose contact parts between parts. We worked on the construction of the modeling method of the support leg parts, and proposed the method which can model the real phenomenon with high accuracy. In the next year, we worked on floor-impact sound analysis for a full-scale floor scale model using this method. Numerical analysis was carried out on several types of structures changing the thickness of the air layer and the rubber hardness of the support leg rubber part of the underfloor structure, and analysis results were obtained that generally described the actual phenomenon well.

研究分野：振動工学

キーワード：床衝撃音 時間領域差分法 振動解析 音響解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

建築音環境における床構造の遮音性能確保の社会的ニーズ 都市住環境の質に対する要求は急激に高まっており、建築空間内の音環境に対する要望も顕在化している。集合住宅等において、上階からの子供のとびはね音の伝搬などが問題となるケースも多く見受けられる。近年、床下における配管スペース確保等の利便性を高めるため、乾式二重床や二重天井などの構造を含むことが多く、振動の伝達メカニズムが複雑化し、その遮断性能予測が現状では難しい。この予測が可能となれば、建設業界における画期的な予測技術の一つとして、重要な役割が期待できる。

一方、音響学の諸分野において、近年、時間領域差分法（FDTD 法）がしばしば用いられる（例えば D. Botteldooren, JASA, 1994）。FDTD 法は、波動理論に基づいた離散数値解法のひとつであり、解析時間および必要記憶容量の観点において、有限要素法（FEM）などの他手法と比較して劣らぬ効率を有しており、アルゴリズムのシンプルさ故の音場解析への適用しやすさから、産業界の CAE へ応用されては始めている。そこで、本手法を、建築床構造の振動音響伝搬特性の予測に利用できれば、室内への放射音を対象とした FDTD 音響解析と連成して解くことで、上階からの床構造を介した伝搬を効率的に解析できる。しかしながら、振動に関する FDTD 法はまだ歴史が浅く、振動場については十分な解析要素技術のメニューが整備されていない現状がある。

上述の学術的・社会的背景を受け、筆者らは効率化された振動 FDTD 解析を開発してきた (Asakura et al., JASA, 2014)。これまで、既に、3次元ソリッド要素による弾性波 FDTD 法が検討されていたが (Toyoda et al., AST, 2009)、解析対象を3次元的に離散化するため解析負荷が増大する。これを回避し、計算効率（解析時間の短縮および必要計算記憶容量の低減）を高めるため、我々は、低次要素（2次元板要素、1次元梁要素）を利用できる FDTD 法ベースの振動解析法を開発した。この研究成果により、これまで実現できなかった大規模構造の振動解析を可能とした (Asakura et al., JSV, 2019)。一方で、床構造のように複雑な構造体の振動音響伝達性状を解析するためには、より精緻なモデル化を可能とできるように検討する必要がある。このような精緻なモデル化が可能となれば、これまで行われていた過大な安全側設計の回避による建築コストの大幅な削減、柱等の構造軽量化、CAE による設計期間の短縮など、社会的な観点において、建設技術の大幅な向上へ繋げることができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、離散モデリングにおける高い柔軟性・解析効率・精度を実現する「次世代型振動音響連成 FDTD 法」の構築、および本手法を利用した、建築床構造の振動音響伝達性状の予測とメカニズム解明である。建築の床構造では、コンクリートスラブへ、乾式二重床・二重天井が付設される場合が多い。このような振動伝達系では、様々なメカニズムが複雑に影響しあい、振動伝達特性の予測が困難である。そこで、本研究は、建築床構造の振動音響伝達性状の予測とメカニズム解明、および実用的な予測ツールの構築を行う。

床構造は、防振ゴム等を含んでおり、柔構造を有するため、加振力の大小などに影響を受けて異なる振動特性を有するなど、非線形の強さからその予測が難しい。このメカニズムを把握し、高精度な予測を可能とするため、波動性を考慮した振動音響 FDTD 解析法を高度化し、振動伝搬予測へ活用する。具体的には、

- (1) 乾式二重床構造を対象とした振動解析手法の構築
(部材間の緩い接触部分をモデル化できる解析スキームの構築)
- (2) 乾式二重床構造を対象とした振動解析手法の構築
(防振ゴムを含む支持脚のモデル化手法の構築)
- (3) 実スケールの床構造の振動伝達特性の解析
- (4) 床衝撃音において特有の非線形性に関するメカニズムの解明

を目的とした検討を実施した。

3. 研究の方法

初年度は、下記に述べるような振動 FDTD 解析における各種の基礎的な要素技術を構築する。

- (1) 支持脚における防振ゴムの振動伝達特性のモデル化できるスキームの構築

防振ゴムは、床材へ作用した加振力が、最終的にスラブへ伝わる際の伝達特性に大きく影響するため、重点的に検討する。二重床構造の振動特性の予測を困難にする要因として、ゴムの振動伝達特性が有する非線形性の影響が大きい。その影響を予測するため、ゴムの振動特性における非線形性を数値モデル化し、実現象との比較により当該モデルの確からしさを検証する

- (2) 支持脚-スラブ間の緩い接触部分における振動伝搬のスキームの構築

支持脚（防振ゴム部分）とスラブは突付けの単純な構造であり、圧縮剛性は有するが引張剛性がないため、これらの構造は、接触しているが剛には結合していない状態となっ

しており、その程度は床材や天井材による重量によって変化する。このような、緩い接触部分に作用する拘束力を把握し、接触部分を介した振動伝達特性を解析する。

上記の検討結果を基にして、次年度は下記の項目を実施する。

(3) 実スケールの床構造の振動伝達特性の解析

コンクリートスラブへ二重床を施工した状況を想定して、床構造の振動伝達特性について解析する。また、既往の実測結果の報告事例などと比較して、その妥当性を検証する。

(4) 床衝撃音の非線形性に関するケーススタディ

加振力および加振点位置を変化させて、振動伝達特性に対して及ぼす影響を詳しく把握する。

4. 研究成果

(1) 支持脚における防振ゴムの振動伝達特性のモデル化できるスキームの構築

乾式二重床に代表されるような二重床構造における振動伝搬特性を解析するため、Fig. 1に示すような解析モデルを時間領域差分 (FDTD) 法の解析理論上で構築した。ここで、二重床は板要素、その間の支持脚は棒要素、防振ゴムの部位についてはバネ要素でモデル化した。

(2) 支持脚-スラブ間の緩い接触部分における振動伝搬のスキームの構築

上記の(1)に加えて、実際の床構造を考えた場合、支持脚および床スラブが完全に剛な状態で結合している状況は稀であり、接着剤等で部分的に結合しているか、あるいは置いてある状況に近い場合がほとんどである。そのため、本解析手法においては、振動方程式内において重力項を新たに追加し、乾式構造の自重が床スラブに作用するよう考慮した。さらに、バネ要素は、床スラブと結合していない場合には、過大な加振力が入力された場合にバネ要素が飛び跳ねることとなる。このような飛び跳ねについても解析中で考慮した。以上の手法により、Fig. 2に示すようなアクリル模型の振動特性を解析した。二重構造については、Fig. 3に示すような各条件を検討した。実験との比較をFig. 4に示すが、床の条件が異なった時の振動特性の変化について、解析結果は実験結果に示された特性をよく模擬しているといえる。このことから、FDTD法による二重床の解析手法の妥当性を確認した。

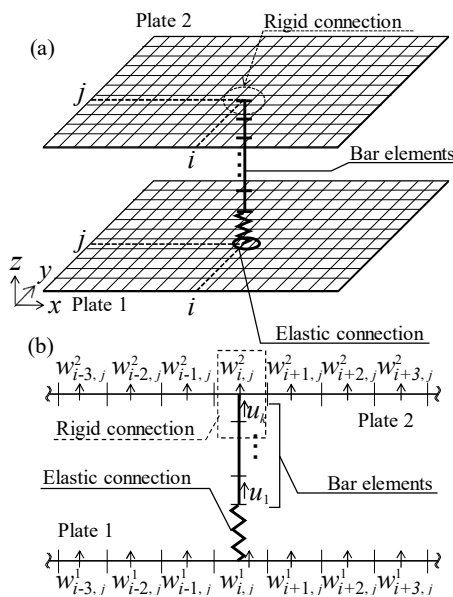


Fig. 1 Discrete model.

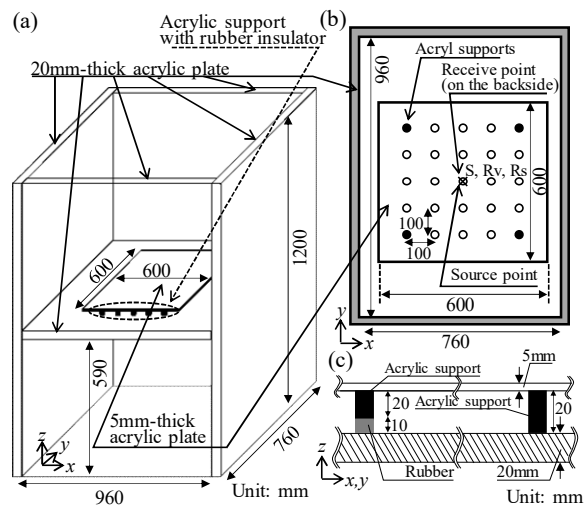


Fig. 2 Investigated acrylic model.

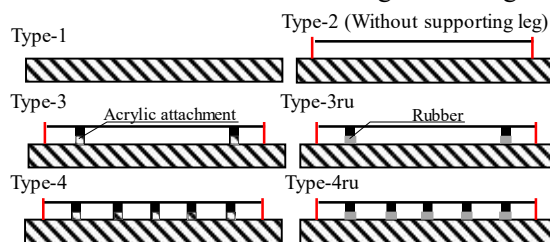


Fig. 3 Investigated conditions.

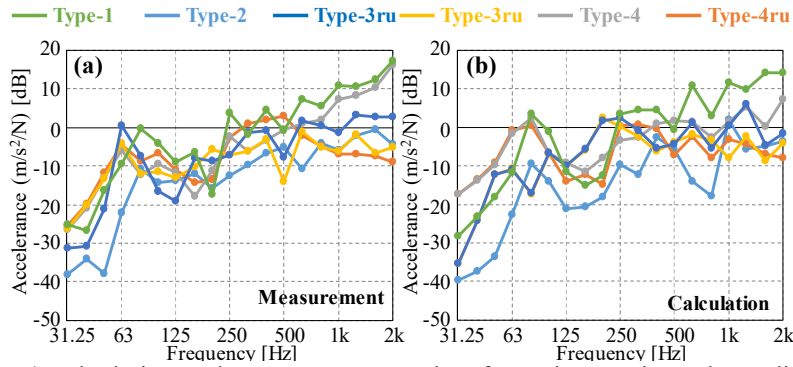


Fig. 4 Calculation and measurement results of Accelerance in each condition.

(3) 実スケールの床構造の振動伝達特性の解析

(1) および (2) の検討によって、アクリル製の縮尺模型に関する振動解析結果の妥当性を検証することができたため、次年度の研究においては、実スケールの床構造の振動特性に関する解析を実施した。Fig. 5 に示すように、実際の乾式二重床構造を模擬したモデルを作成し、これを対象とした振動解析を実施した。Fig. 5 に示す空気層厚 α を150 mmとし、支持脚のゴム硬度を30°, 50°, 70°と3段階変化させた場合における床衝撃音レベルの解析結果をFig. 6 に示す。このように、支持脚のゴム硬度を固くするほど、床衝撃音レベルが上昇している様子がわかる。

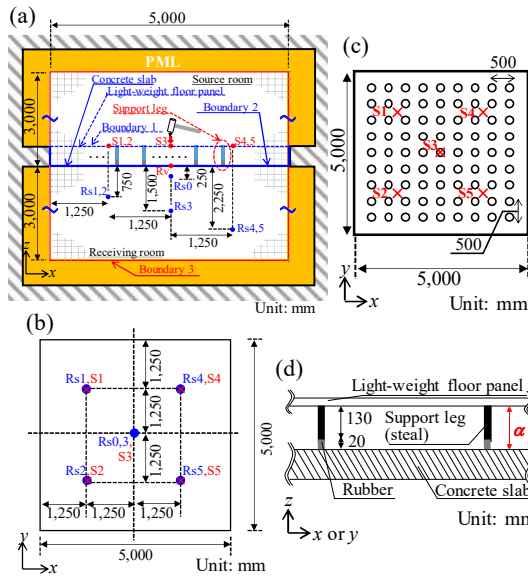


Fig. 5 Investigated full-scale model.

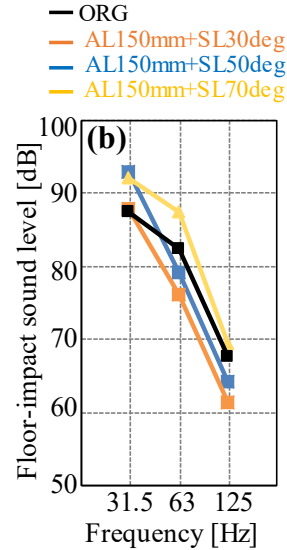


Fig. 6 Calculated floor-impact sound level.

(4) 床衝撃音の非線形性に関するケーススタディ

(3) の実スケールモデルを対象とした検討において、妥当性を確認できたため、この手法を用いて、さまざまな加振力特性、また様々な加振位置に関する依存特性を検討することが可能である。本検討では、(3)までのステップを主な検討目標としていたため、これを用いたケーススタディについては、まだ検討したケース数は多くないものの、特に加振力の大小によって、振動伝搬特性に変化が生じる結果を得ている。これについては、今後さらなる実際的な検討を実施し、公表を予定している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

[1] T. Asakura, "Finite-difference time-domain analysis on structure-borne sound transmission characteristics of double-plate structures connected by elastically supported bars," Acoust. Sci. Tech., 2018, 39(6), 436-439. (査読あり)

[2] T. Asakura, "Prediction of vibroacoustic transmission characteristics through double-plate floor structures by using finite-difference time-domain analysis," Acoust. Sci. Tech. (in press). (査読あり)

[3] 朝倉巧, FDTD 法による床衝撃音予測, 音響技術, 48(1), 2018. (査読なし)

[学会発表] (計 9 件)

- [1] 朝倉巧, 時間領域差分法による床振動解析, 日本音響学会秋季研究発表会, 2017.
[2] 朝倉巧, 時間領域差分法による二重板構造を対象とした振動音響伝搬解析, 日本音響学会秋季研究発表会, 2018.
[3] 竹島理夫, 朝倉巧, 個別要素法および時間領域差分法を併用した振動解析の試み, 日本音響学会秋季研究発表会, 2018.
[4] 竹島理夫, 朝倉巧, DEM-FDTD を用いた粒状体による防振作用の解析, 日本音響学会春季研究発表会, 2019.
[5] 竹島理夫, 朝倉巧, 粒状体による振動減衰の数値解析, 日本音響学会騒音振動研究会, 2019. 1.
[6] T. Asakura, “Finite-difference time-domain analysis on vibration of floor structure,” Proc. ICSV 25, 2018 (in Hiroshima, Japan).
[7] T. Asakura, “Prediction of floor-impact sound transmission through double-plate floor structures by using finite-difference time-domain analysis,” Proc. Inter-noise 2019 (in Madrid, Spain).
[8] T. Asakura, and M. Takeshima, “Numerical simulation of floor vibration by using finite-difference time-domain method,” Proc. ICSV 26, 2019 (in Montreal, Canada).
[9] M. Takeshima, and T. Asakura, “Numerical simulation of vibration damping by granular materials,” Proc. ICA 2019 (in Aachen, Germany)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。