

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06531

研究課題名(和文)メッシュフリー差分法による高精度・高効率な強震動予測シミュレーション手法の開発

研究課題名(英文) Estimation of strong ground motion using accurate and efficient mesh-free finite-difference method

研究代表者

武川 順一 (Takekawa, Junichi)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70463304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地盤の内部を伝播する地震波動を計算機内で高精度にシミュレーションすることは、地震防災や土木工学・地球科学の分野で重要な研究課題である。本研究では、計算精度を落とすことなく効率的に地震波動場を計算するために、メッシュフリー差分法による地震波動場のシミュレーションを提案した。これまで音響波動場のみ適用されていた本手法を弾性波動場の計算にまで拡張し、その計算精度を分散解析や解析解との比較を通して調べた。また、実務上重要となる自由境界条件を導入し、様々な数値実験を通して任意形状の地表面を伝播する地震波を精度良く計算できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、地震波伝播現象を効率よく計算機内で再現できることが示された。これにより、地震が発生したときに各地がどの程度揺れるのかを事前に精度よく評価することができる(強振動予測)。また、目に見えない地下を可視化する物理探査手法においても、全波形逆解析手法などでは精度の良い地震波動場を効率よく計算する必要があり、この分野においても本研究で開発した手法が力を発揮すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel mesh-free finite-difference method for simulating seismic wave propagation with high accuracy and efficiency. The accuracy of the proposed method is validated by the dispersion analysis and comparison with analytical solutions. We also developed a new free boundary condition to implement arbitrary shaped topography. Many kinds of numerical experiments showed that the proposed method can reproduce surface wave propagation with high accuracy.

研究分野：応用地球物理学

キーワード：地震波伝播 強振動予測 メッシュフリー差分法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地盤内を伝播する地震波動場を精度良く計算することは、地震防災や土木工学・地球科学の分野において重要な課題である。任意の3次元地下構造に対して波動場を計算するためには数値解析手法を利用する必要があるが、この分野では差分法が最も広く利用されている。差分法では解析領域を有限サイズの格子で離散化し、各格子点上で変位や応力などの変数を定義する。各格子点上で支配方程式を解くことで、これら変数の近似解を求める。計算精度を確保するためには格子サイズを細かくする必要があるが、細かい格子の使用は計算コストを増加させる。よって、計算精度を損なわない程度なるべく粗い格子で解析領域を離散化する必要がある。しかし、解析モデル内の一部に低速度領域が存在する場合、そこで格子間隔が決定されてしまうため、非常に計算効率が悪い。不等間隔格子のアイデアも利用されているが、岩塩ドームモデルのような複雑な地下構造に対してはあまり効果を発揮しない。任意の大規模な3次元モデルに対する精度の良い地震波動場を計算することに対する需要は近年増しており、この問題に対する新たな解決策が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、メッシュフリー差分法による地震波動場の計算方法を提案し、効率よく高精度な波動場を計算する手法を開発することを目的とした。これまでのメッシュフリー差分法は音響波動場に対してのみ適用されていたため、まずは弾性波動場に対して本手法を適用した場合の精度や計算コストなどについて詳細に調べた。また、実用上重要な各種境界条件についても、メッシュフリー差分法用の新たな手法を開発・実装することで、実際の問題を解ききるための一連の手法を提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

メッシュフリー差分法による数値解法を弾性波動方程式に拡張し、弾性波の伝播を計算するための手法を構築する。弾性波の伝播を計算する際の精度については未知であるため、これを事前に検討しておく必要がある。本研究では、分散解析をおこなうことで、位相速度の誤差を抑えるために必要な1波長内の計算点数を定量的に評価する。均質モデルなどを伝播する波動場を実際に計算し、解析解や他の数値解との比較を通して手法の妥当性を評価する。

次に、単純なモデル(半無限媒質)を伝播する表面波伝播問題に本手法を適用し、解析解と数値解を比較することで精度の検証をおこなう。最後に、実際の複雑な地形を考慮したモデル(SEG foothill モデル)に対して表面波の伝播を計算し、本手法の有効性について検証する。

波動場の数値解法は大きく分けて時間領域解法と周波数領域解法に分類される。時間領域解法では、離散化により計算点で定義された各変数(変位や応力)の時間発展式を立て、これを解いていくことで波動の伝播を計算する。一方、周波数領域解法では、単一周波数に対する波動の支配方程式を離散化して得られる連立方程式を解くことで、その周波数に対する格子点上のレスポンスを得ることができる。時間領域での波形を得たい場合は、異なる周波数に対する応答を個々で計算した上で、逆フーリエ変換を施すことにより時間領域に戻す。両者ともにメリット・デメリットがあるが、本研究では周波数領域解法に対するメッシュフリー法を研究した。周波数領域解法の特徴としては、周波数に依存した減衰を容易に導入できること、振源が複数ある場合にLU分解などで連立方程式を解くことで効率的に解を求められることなどが挙げられる。

### 4. 研究成果

提案手法の精度を分散解析により調べた結果、規則的な格子を用いた差分法に比べて精度は劣るものの、十分な精度で弾性波動場が計算可能であることがわかった。図1は分散解析結果の一例を示す。縦軸は弾性波の位相速度、横軸は1波長内の計算点数の逆数( $G=0.1$ であれば1波長内に10個の計算点が存在することを意味する)を表す。P波、S波の位相速度はそれぞれ4000m/s、2310m/sに設定している。太い灰色線が真の位相速度を、細い黒線が本手法の分散特性を表しており、黒線が複数描かれているのは波動の伝播方向の違いを表している。実体波は分散しないため、どのようなGの値に対しても位相速度は一定となるはずである。しかし、離散化によりそれが成り立たなくなり、Gの値が大きくなるに伴い誤差が大きくなっていく。これが数値分散である。図より、位相速度誤差を1%以内に抑えるために必要な計算点数はおおむね10個以下であることがわかった。規則的な格子を用いた差分法と比べると若干精度は劣るものの、実用上十分な精度を有していることが明らかとなった。

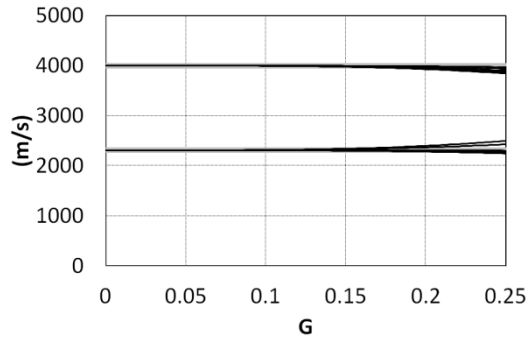


図1 分散解析結果の一例

地震発生時の強振動予測や地震波による浅層探査では、地表面を伝播する表面波を精度良くシミュレーションすることが重要となる。任意形状の地表面を解析に取り入れるため、メッシュフリー差分法用の自由境界条件の導入手法を新たに提案した。規則格子を用いる差分法では、任意形状の地表面を解析に導入するには特別な処置が必要となる。一方、本手法はメッシュフリーであるため、地表面に沿うように計算点を配置することができる。よって、地表面上に設置した計算点に対して境界条件を直接課すことで、任意形状の地形を伝播する表面波の伝播挙動を再現した。手法の妥当性を検討するため、平面状の地表面を有するモデルを作成し、そこを伝播する表面波を計算した。このモデルに対しては解析解が利用できるため、解析解と数値解の比較を通して計算精度の検証をおこなった。

図2に、提案手法により再現された数値解と解析解を比較した結果の一例を示す。横軸が時間を、縦軸は振源からの距離を表している。太い灰色線が解析解を、黒い点線が数値解を示す。両者はほぼ一致しており、提案手法により非常に精度よく表面波の伝播が計算できることが示された。地表面を傾斜させた場合でも同様の精度をしめしたことから、任意の地形に対する提案手法の適用性が示された。

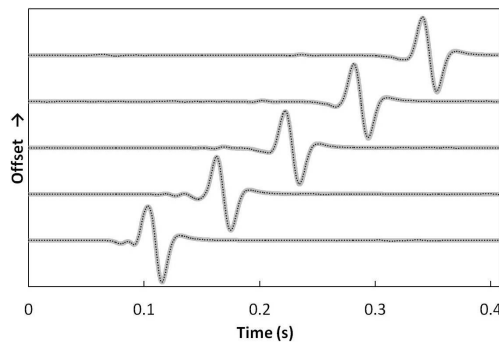


図2 解析解と数値解の比較

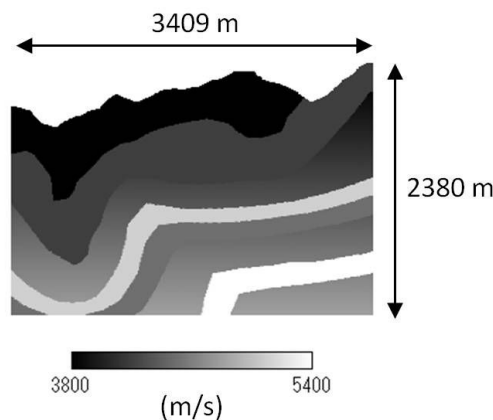


図3 SEG foothill モデルの一部

次に、複雑な地表面を有するモデルに対する提案手法の妥当性を検証するため、SEG foothill モデルの一部を抜き出したモデルに対して波動伝播シミュレーションをおこなった。図3は

SEG foothill モデルから一部を切り出した速度構造を表している。このモデルに対して複雑な地表面形状を有することがわかる。振源と受振器を地表面付近に設置し、振源波形にはリックカーウェーブレットを用いた。振源波形を複数の周波数スペクトルに分解し、単一周波数毎に連立方程式を解くことで求解した。連立方程式の求解にはLU分解法を用いた。

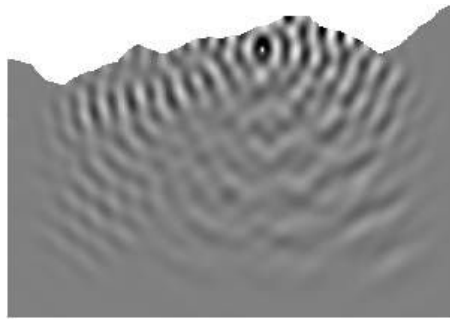


図4 モデル内波動場の一例

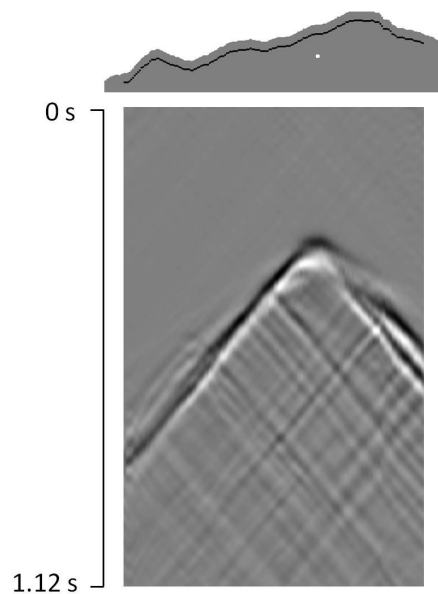


図5 シングルショットギャザー

図4は単一周波数に対するモデル内波動場を表している。複雑な地表面を伝播する波動場が滑らかに再現されている。図5にシングルショットギャザーを示す。地表面を伝播する表面波が再現されている様子が見える。

以上の結果から、任意形状の地表面を有するモデルに対しても、精度良く地震波伝播を計算できることが示された。このことから、今後は地震発生時の強振動予測や、陸上における各種地震探査に対して本手法の適用が可能になると考えられる。これらは従来から用いられている差分法では正確な計算が難しい分野であり、本研究によってより効率良く波動場の計算がおこなえる可能性が示された。

今後の展望として、本研究で提案した手法の各種実務問題への適用が考えられる。強振動予測では大規模3次元モデルに対する地震波伝播をシミュレーションする必要があるため、本手法を適用する際には連立方程式の求解に工夫が必要となる。近年注目を集めている地下可視化手法である全波形逆解析への適用も可能であり、メッシュフリーの特徴を活かした効率の良い求解が力を発揮すると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takekawa, J., Mikada, H.	4. 巻 118
2. 論文標題 A mesh-free finite-difference method for elastic wave propagation in the frequency-domain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computers & Geosciences	6. 最初と最後の頁 65-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cageo.2018.05.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takekawa, J., Mikada, H.	4. 巻 37
2. 論文標題 Frequency-domain acoustic wave modeling using a mesh-free finite-difference method with optimal coefficients of the acceleration term	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SEG Technical Program Expanded Abstract	6. 最初と最後の頁 4030-4034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/segam2018-2998173.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takekawa, J., Mikada, H.	4. 巻 -
2. 論文標題 An accurate and efficient finite-difference operator for the frequency-domain wave propagation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 21st Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG2017)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3997/2214-4609.201700488	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takekawa, J., Mikada, H.	4. 巻 67
2. 論文標題 Free surface implementation in a mesh-free finite-difference method for elastic wave propagation in the frequency-domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Prospecting	6. 最初と最後の頁 2104-2114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1365-2478.12825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 武川順一, 三ヶ田均
2. 発表標題 周波数領域メッシュフリー差分法による地表面形状を考慮した弾性波動場の数値シミュレーション
3. 学会等名 資源・素材学会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takekawa, J., Mikada, H.
2. 発表標題 Frequency-domain acoustic wave modeling using a mesh-free finite-difference method with optimal coefficients of the acceleration term
3. 学会等名 SEG 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takekawa, J., Mikada, H.
2. 発表標題 An accurate and efficient finite-difference operator for the frequency-domain wave propagation
3. 学会等名 JpGU2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	三ヶ田 均	京都大学・工学研究科・教授	
	(Mikada Hitoshi)		
	(10239197)	(14301)	