

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18301

研究課題名(和文)メッシュフリー法を用いた新しい解像度可変型全波形インバージョン手法の開発

研究課題名(英文)Development of a full-waveform inversion method utilizing a 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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、メッシュフリー差分法をフォワード計算手法として用いた、空間解像度が容易に変更可能な全波形逆解析手法を提案し、数値実験によってその実現可能性を検証したものである。メッシュフリー差分法では、空間解像度を容易に変更することができるため、速度構造に応じた計算点密度をアダプティブに生成することで、効率良く高精度な計算を実行することが可能となる。数値実験を用いて、差分法の結果と比較することでその実用性を検証した。その結果、差分法と同程度の精度で逆解析が可能となる一方、計算コスト(メモリ・計算時間)は大幅に削減できることが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a full-waveform inversion using a mesh-free finite-difference method for accurate and efficient calculation. In the mesh-free finite-difference method, it is easy to simulate full-wavefield in an effective manner with adaptive mesh refinement which corresponds to an inverted velocity structure. We investigated the effectiveness of the proposed method using numerical experiments. By comparing with the conventional finite-difference method, it is indicated that we can invert high accuracy velocity structures with considerable reduction of computational costs.

研究分野：応用地球物理学

キーワード：全波形逆解析 メッシュフリー差分法

## 1. 研究開始当初の背景

近年、在来型化石燃料の減耗が指摘されるようになって久しく、この課題に取り組むことは我々の社会にとっての急務となっている。これに伴い、石油増進回収 (EOR) 技術開発の推進や、メタンハイドレート・シェールオイルなどの新資源の開発が世界中でおこなわれている。これら資源開発において最もよく使用される技術の一つに地震探査があり、探鉱段階だけでなく開発・生産段階におけるモニタリング技術にも利用されている。この分野で注目されている新しい技術に全波形を用いたインバージョン手法がある。この手法の導入による地下可視化技術の向上は目覚ましく、当該分野に大きな革新をもたらしており、現在も世界中の研究機関や企業において精力的な研究・開発が進められている。この分野において世界のフラッグシップである米国物理探査学会 (SEG) や欧州物理探査学会 (EAGE) の年次学術講演会においても、会期の全日程に渡って全波形インバージョンのセッションが組まれるなど、現在、まさに世界で全盛期を迎えている技術であると言える。このような革新的技術である全波形インバージョンにとって、唯一とも言える欠点は計算コストである。現在はいかに効率良く全波形インバージョンを適用していくかが本格的な実用化 (とりわけ 3 次元解析) に向けた鍵となっており、そこにフォーカスした多くの研究発表が世界中でなされている。一方、国内学会では全波形インバージョンに関する研究発表は数えるほどしかなく、我が国の資源探査分野が世界の流れに後れを取っている感は否めない。

申請者のこれまでの研究成果として、粒子法・メッシュフリー法を用いた地震波伝播解析手法の開発が挙げられる。これは、解析モデル内の任意の場所における計算点密度を自在に変更できる手法である。一般に地震波が伝播する地下構造は複雑であり、配置する計算点密度もそれに応じたものにする必要がある。しかし、現在、広く使われている差分法では規則的な格子の配列を前提に計算がなされるため、全体の格子間隔は密な配置が必要な一部の低速領域に合わせる必要がある。このような複雑なモデルに完全に対応した格子を生成することは容易ではなく、それが全波形インバージョンの効率化を妨げる一因となっている。一方、申請者らの提案するメッシュフリー法では、波動伝播解析に規則的な計算点の配置は必要なく、計算点の疎密を地下の速度モデルに合わせて任意に配置することが可能であり、これによって無駄のない計算が可能となる。

## 2. 研究の目的

前述の背景およびこれまでの申請者らの研究経過をもとに、本研究では全波形インバージョン手法の実用化 (とりわけ 3 次元解析) に向けた新しいアイデアを提案し、その新手法の適用性を評価することを目的としている。

まず、全波形インバージョン手法において核となる技術が波動伝播解析である。世界の主流では差分法でこれをおこなっているが、本研究はこれをメッシュフリー法に置き換えることを試みるものである。その際に重要となるのが、メッシュフリー法の波動伝播解析能力 (精度や計算コストなど) の正確な評価である。申請者らは既にメッシュフリー法の開発を終えているため、後はその能力を正確に把握した上で、最適な適用法について議論する。

全波形インバージョン手法の重要な能力に、解像度の向上が挙げられる (どのくらい小さな空間スケールのもので解像できるか)。初めは簡単なモデルで提案手法の能力をテストした後、具体的な地質モデル (BP モデルや Marmousi モデルなど) を用いて提案手法の能力を評価する。それにより、どの程度の情報量があれば、どの程度の深さにあるどの程度の大きさのターゲットが解像できるかについて議論する。そして、本研究のメインテーマである解像度可変型全波形インバージョンによる計算コストの削減について定量的な議論をおこなっていく。

## 3. 研究の方法

申請者らが既に開発しているメッシュフリー法による 2 次元波動伝播解析コードを用いて、手法の性能 (精度や計算コスト) を定量的に評価する。全波形インバージョンの性能は波動伝播解析コードの性能に大きく依存するため、この段階で本手法による全波形インバージョンの計算コスト改良効果について、ある程度の検討は可能となる。この計算には申請者の所属する研究室が所有する通常の計算機を使用することで、年度初めから取り組んでいく予定である。また、精度評価には解析解との比較を考えている。その後、メッシュフリー法による 3 次元波動伝播解析コードを開発し、その精度評価をおこなう。3 次元計算には多くの計算機資源を必要とするので、これには本申請で購入予定の大型計算機を使用する予定である。

続いて、2 次元全波形インバージョンコードの試作をおこなう。申請者が所属する研究室には、全波形インバージョンの研究者 (教員、研究員、博士課程学生) が多数在籍しており、申請者らは既に独自のコードを開発済みである。これらは核となる波

動伝播解析コードに差分法を用いているが、これを申請者が開発したメッシュフリー法に置き換える。手法の外枠は既に完成しているため、この手順は容易に進行すると考えている。

提案手法によって得られたインバージョン結果を差分法によるインバージョン結果と比較することで、提案手法の性能を定量的に評価する。その際に注目する評価基準として、計算コスト（計算時間やメモリ）と解像力（どの程度の空間スケールのターゲットまで可視化できるのか）で評価する予定である。比較に用いるモデルとしては、BP モデルや Marmousi モデルなどの世に公開されている速度モデルを使用する予定である。その理由として、これらのモデルは世界中の研究者が自ら開発したコードのテストモデルとして頻繁に使用しているものであり、海外の独立した研究グループによる結果との性能比較までも可能となるからである。

#### 4. 研究成果

本研究の実用性を検討するため、数値実験により従来の差分法の結果との比較をおこなった。モデルとしては、図1に示す

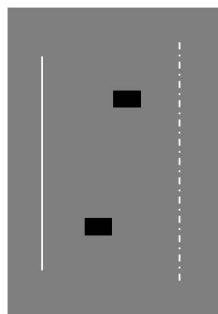


図1 解析モデル

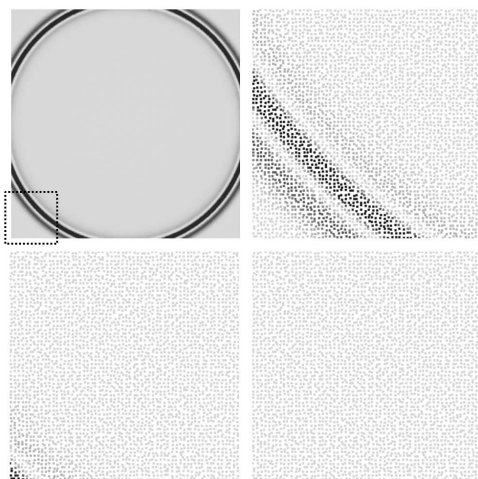


図2 吸収境界条件の適用例

ような、低速度異常体を二つ含むような速度構造を採用した。モデル左端には振源列を、モデル右側には受振器列を採用した。

通常の波動伝播シミュレーションでは、モデル端部からの反射波を抑制するために吸収境界条件を適用する。しかし、それらの多くは規則的なメッシュ構造に基づいて定式化されているため、メッシュフリー法にそのまま適用することはできない。そこで、本研究では、メッシュフリー法独自の吸収境界条件を新たに考案・開発した。その一例を図2に示す。左上は均質媒質内部を波動が伝播している様子を表しており、右上・左下・右下はそれぞれ、左上図点線枠内を拡大した波動場を、時間を追って表示した拡大図である。図からわかるように、不規則な計算点配置でも境界に入射した波動のエネルギーを正確に吸収できていることがわかる。

以下に、メッシュフリー法と差分法との解析結果の比較をまとめる。メッシュフリー法は差分法と同程度の精度で速度構造を逆解析できる一方、計算コスト（計算時間・メモリ）は大幅に削減できることがわかった。これにより、全波形逆解析最大の弱点であった計算コストの問題を、本提案手法により解決できる可能性が示唆された。具体的な解析結果を以下の図に示す。上の図は解析領域のグリッド点分布を表しており、下図は速度のコンター図を表している。図は左から右の方向で解析が進む方向となっており、左が4ステップ目、真中が9ステップ目、右が15ステップ目である。下図の二つの矩形の位置に低速度異常体が存在し、これを均一な速度構造から逆解析している。解析の9ステップ目（真中）において、計算点配置が不規則になっているが、これは低速度層の出現に応じてメッシュがリファインされている様子をあらわしている。15ステップ目（右）では

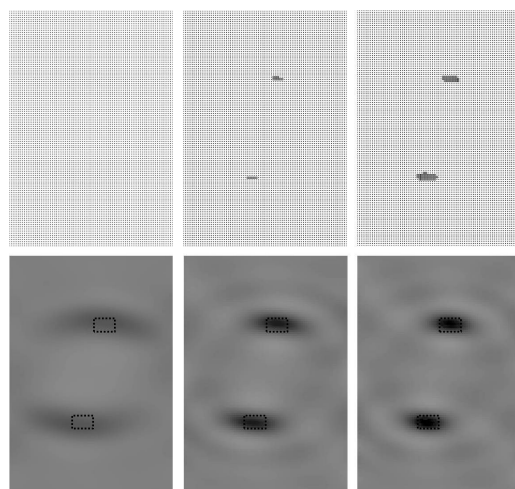


図3 解析結果の一例

計算点分布がさらに変化し、より広い範囲で密な計算点が使用されていることがわかる。このように、メッシュフリー差分法を用いることで、逆解析の進行に伴う低速領域の出現に応じて計算点配置をアダプティブに変更することが可能となることがわかった。差分法と計算コストを比較したところ、計算時間は3分の1以下に、メモリは2分の1以下に抑えることができた。

以上の結果より、精度の良い全波形逆解析が効率良くおこなえる可能性が示唆されたことから、本研究成果が今後の全波形逆解析における波動場計算手法の一選択肢となり得ることが示された。

#### 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)

武川順一, 三ヶ田均 (2016): メッシュフリー差分法を用いた解像度可変全波形逆解析手法の提案, *Journal of MMIJ*, **132**, 9, 152-159.  
doi:10.2473/journalofmmij.132.152

Takekawa, J., Mikada, H., (2016): An absorbing boundary condition for acoustic wave propagation using a mesh-free method, *Geophysics*, **81**, 4, T145-T154.  
doi:10.1190/GE02015-0315.1

Takekawa, J., Mikada, H., (2016): A mesh-free finite difference method for frequency-domain visco-acoustic wave equation, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 3841-3845.  
doi:10.1190/segam2016-13457674.1

〔学会発表〕(計 2 件)

Takekawa, J., Mikada, H., Frequency-domain mesh-free finite-difference operator for visco-acoustic wave equation, 日本地球惑星科学連合大会, STT17-10, 2016年 5 月 24 日.  
doi:10.3997/2352-8265.20140211

Takekawa, J., Mikada, H., An accurate and efficient finite-difference operator for the frequency-domain wave propagation, 日本地球惑星科学連合大会, STT17-10, 2017年 5 月 20 日.  
doi:10.3997/2214-4609.201700488

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

武川順一 (TAKEKAWA, Junichi)

京都大学大学院 工学研究科・助教

研究者番号: 70463304