

学 位 論 文 題 名

Pseudospectral 法による理論地震記象の研究

学位論文内容の要旨

近年、地下構造探査技術の進歩により、地殻および上部マントルの3次元構造が詳細に推定されるようになってきた。これらの成果からプレート沈み込み帯の速度構造や下部マントルへの沈み込みの問題など、地下数百 km にもおよぶ地球規模の構造への関心が高まってきた。また、大地震がプレート境界などのように複雑な構造境界で発生するという事実や、地表近傍の不均質構造が強震動に与える影響（Site Effects）の問題が重要視されるようになってきた。強震動を予測するためには、このような不均質性を考慮した地下構造のもとで波動計算を行う必要がある。このほかにも、推定される地下構造のもとで理論記象を作成し、効率のよい探査計画をたてる目的や、新しい解析法の開発のためのテストデータの作成にも波動計算が必要になる。さらに、震源過程を正確に推定したり地下構造を詳細に調査するためには、地震波動の走時だけでなく短周期の波形情報を積極的に利用する必要がある。したがって、これらの目的のためには任意の不均質構造のもとで短周期の理論地震記象を得るための高速な計算手法の開発は重要な課題である。

従来、これらの目的のためには差分法に代表される領域型解法が用いられてきた。領域型解法では計算領域を格子に分割し、運動方程式を数値的に解き、各格子点の波動を求める手法である。差分法は任意の不均質構造を扱うことができる長所を持つ。しかし、膨大な計算時間と記憶容量を必要とするため、大規模な領域の波形計算は事実上不可能であった。

ところが、1980 年代前半に *Pseudospectral* 法と呼ばれる偏微分方程式の数値解法が現れた。*Pseudospectral* 法は差分法と同様に領域型解法の特徴を持つ。しかも

空間微分を *Fourier* 変換を用いて実行するため、領域型解法の本質的な問題である格子間隔をかなり粗く選ぶことができる。したがって、*Pseudospectral* 法は不均質構造における波動計算に最も適しており、現在のところ大規模領域の短周期波動を扱える唯一の計算法であると考えられる。

しかしながら、*Pseudospectral* 法の波動計算への適用はこれまでほとんど進んでおらず、特に自然地震の理論記象のための基礎研究は全く行われていなかった。

本研究の目的は、不均質構造における理論地震記象の作成のために *Pseudospectral* 法の適用を行うことである。そのためには、自然地震特有の現象の扱いを可能にしなければならない。また、従来の研究における未解決の問題や、不適切な計算手順の完成を行う必要がある。

本研究の成果を以下に列記する。

まず、断層型震源の導入を行った。そこでは、位置とメカニズムが任意の地震の波動を効率よく求めるために相反定理を利用を提案した。この震源の表現は、位置とメカニズムが時空間的に変化する地震の震源メカニズムのインバージョンに適している。ここで用いられる震源は厳密には点震源ではなく空間分布を持つため、分布震源から計算される波動の物理的な意味を明確にした。そして、その波動は点震源の波動に零位相の低域透過特性を持つ波数フィルタを施したものと等価であることを示した。また、震源分布の影響を小さくするために、*Mapping* を用いて不規則格子を作成し、震源近傍の格子間隔を狭くする操作を提案した。また、*Mapping* の際にしばしば発生する計算不安定の原因を明らかにし、その解決策を示した。

第二に、データに不連続があっても安定な微分法（対称法）を開発した。多くの物理探査では地表に震源が置かれる。また、相反定理を用いて地表の観測点の波動を計算するためには地表に物体力を与える必要がある。ところが地表には応力と変位の不連続が存在し、地表に震源を置く操作は不連続を助長するため、*Pseudospectral* 法で従来の微分演算を用いると不安定が発生するという問題があった。しかし、対称法による新しい微分法を利用することにより、両端で不連続なデータであっても安定に微分演算が実行できるようになった。また、対称法は微分演算の過程で

Nyquist 成分が失われないという特徴を持つことを示した。

第三に、吸収境界条件の検討を行った。*Pseudospectral* 法では空間微分演算に有限 *Fourier* 変換を用いるため、空間的には周期連続が仮定される。このため、有限の空間領域から外へ出る波動は反対側の領域境界から再び現れるという問題 (*Wrapround*) がある。従来の研究では *Wrapround* の消去のために、領域の端に吸収領域を設け、領域内の波動の変位を徐々に減衰させる操作が行われていた。ただし、この吸収境界条件は物理的な意味を持たないという問題があった。このため、減衰に関するパラメータを事前に求めることができず、試行錯誤的に決める必要があった。本研究では従来の手法を若干修正し、物理的な意味づけを行った。そして、適切なパラメータを計算から求められるようにした。次に、周期連続性を逆に利用した新しい吸収境界条件を開発した。この吸収境界条件は、やや計算時間を必要とするが、偶数回目の *Wrapround* を完全に消去できるという長所を持つ。

第四に、3次元計算の実用化のために記憶容量と計算時間の節約に関する検討を行った。*Pseudospectral* 法によって、大規模な2次元波動計算が可能になったが、現在の計算機の能力では3次元計算は非現実的である。しかし、観測記象との波形合わせを行うためには3次元波動場の計算が不可欠である。そこで、一方向に均質な3次元構造のための3次元波動場の計算 (2.5次元問題) のための、記憶容量節約型の計算法 (*DWPS* 法) を開発した。*DWPS* 法により、2次元計算とほぼ同等の記憶容量で3次元計算が可能になった。次に、波動計算の大部分の時間を占める *Fourier* 変換の高速化のために、ビット並べ換え処理を省いた *Hartley* 変換の利用を提案した。

最後に、本研究によって完成した *Pseudospectral* 法を用いて幾つかの応用計算を行い、本研究の成果の検証と *Pseudospectral* 法の有効性を示した。その一つである日高山脈南西部の人工地震探査のフォワードモデリングでは、*DWPS* 法を用いて3次元波動計算を行った。従来の2次元計算による理論記象との比較を行い、波形や距離減衰の違いから3次元計算の必要性を示した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	岡 田	廣
副 査	助教授	森 谷	武 男
副 査	助教授	中 西	一 郎
副 査	講 師	笹 谷	努

学 位 論 文 題 名

Pseudospectral法による理論地震記象の研究

地震記象は (1)震源過程、(2)地震波伝搬経路の構造や媒質、(3)観測点近傍の不均質な地下浅部構造できまる。理論地震記象の研究は、これら3つの変量について初期条件や境界条件を仮定し、運動方程式を解いて得られる理論地震記象と観測された地震記象とを時間軸上で比較して、各変量を定量的に推定することを目的とする。

地球内部の構造は複雑で、震源過程もそれを反映して複雑である。本研究では、この複雑な震源過程や地下構造を旨くモデル化し、それらをできるだけ正確に取り入れて地震記象を計算する方法の工夫、開発を行った。その計算方法は1980年代前半に現われたPseudospectral法なる偏微分方程式の数値解法を応用したものである。Pseudospectral法は差分法と同様に領域型解法の特徴を持つ一方、空間微分にFourier変換を用いるために、領域型解法の本質的問題である格子間隔をかなり粗く選ぶことができるという特徴がある。申請者はこの点に注目し、この方法を従来の方法では困難だった不均質のもとでの短周期成分の波形まで計算でき、しかも従来にない短い時間と少ない記憶容量で計算できるものに改良した。

第一に、震源に断層型震源を導入、その位置とメカニズム任意の地震波動を効率よく計算するために相反定理を利用した。なお、ここでの震源は点震源ではなく空間分布

を持つが、このような震源を仮定して計算される波動は点震源の波動に零位相の低域透過特性を持つ波数フィルタを施したものと等価であることを明らかにした。また分布震源の影響を小さくするために、Mappingによる不規則格子を作成し、震源近傍の格子間隔を狭くする工夫をした。

第二に、データに不連続があっても安定な微分法（対称法）を開発した。地表に震源がある場合、地表の応力と変位が不連続のために、Pseudospectral法では従来の微分演算を用いると不安定になるが、この対称法の開発により、それをうまく解決している。また、対称法は微分演算の過程でNyquist成分が失われないという特徴を持つことも示した。

第三に、吸収境界条件の検討を行った。Pseudospectral法では空間微分演算に有限Fourier変換を用いるため、空間的な周期連続が仮定される。そのために、有限の空間領域から外へ出る波動は反対側の領域境界から再び現れるという問題（Wrapround）が生じる。従来の研究ではWraproundの消去は、領域の端に吸収領域を設け、領域内の波動の変位を試行錯誤的に減衰させることによって行われていた。これに修正を加え、周期連続性を逆に利用した新しい吸収境界条件を開発した。

第四に、記憶容量と計算時間の節約を工夫した。Pseudospectral法は、大規模な2次元波動の計算を可能とするが、3次元計算は難しい。観測記象との波形対比には3次元波動場の計算が不可欠であるため、本研究では、一方向に均質な3次元構造のための3次元（2.5次元ともいう）波動場を計算できるよう、記憶容量節約型の計算法（DWPS法）を開発した。これにより、2次元計算とほぼ同等の記憶容量で3次元計算が可能になった。

最後に、本研究で開発したPseudospectral法を実際の地震記象に適用し、この方法の有効性を示した。そのうち日高山脈南西部の人工地震探査のフォワードモデリングでは、DWPS法による3次元波動計算を行い、波形や距離減衰の違いから3次元計算の必要性を示した。

以上、申請者は理論地震記象の新しい計算法を開発し、優れた研究成果を挙げた。

審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。