

平成21年 5月29日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540438

研究課題名（和文） 介在物分布による地震波エンベロープ形成の研究

研究課題名（英文） Study of seismic wave envelope formation due to inclusions

研究代表者

河原 純 (KAWAHARA JUN)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：80282276

研究成果の概要：

リソスフェアに含まれるランダムな小規模不均質構造のモデルとして介在物分布を考え、それによる地震波エンベロープ（包絡形）形成を理論と数値実験の両面から検討した。その結果、実験結果を定量的に再現できる理論や、エンベロープの形状を規定するモデルパラメータ等を確認し、実際の観測エンベロープへの介在物分布モデルの適用可能性を示した。また不均質構造の不連続性がエンベロープ形成に及ぼす影響について若干の知見を得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	900,000	270,000	1,170,000
20年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑物理学

キーワード：地震波エンベロープ、地震波散乱、介在物

## 1. 研究開始当初の背景

リソスフェア（地殻～最上部マントル）の詳細な構造を知ることは、その形成史や地震発生場の環境を考える上で重要である。これまで、大規模な空間スケール（数十～数百 km）で見たリソスフェアの構造については、地震波トモグラフィーなどの探査手法によってその詳細が明らかにされつつある。しかし地震波の波長に由来する分解能の限界のため、より小規模な（空間スケール $\leq$ 数 km 程度）不均質構造を同様な手法で解明することは難しい。一般に 1Hz 以上の高周波地震波の波

形は、リソスフェア内部を伝わる間に小規模不均質構造によって強く散乱され、その波形は著しく変形する。観測によれば、高周波地震波波形は近接した観測点間でも大きく変動し、リソスフェアの不均質構造が空間的にかなりランダムであり、決定論的な推定が難しいことを示唆する。しかし一方、観測波形のエンベロープ（包絡形）の形状とその時間発展は、比較的広い地域内で均質かつ安定に求められることが経験的に知られている。このことは、不均質性の統計的性質自体は空間的定常性が高く、地震波エンベロープから推定

可能であることを示唆する。

不均質構造中の地震波エンベロープ形成の問題は1970年代以降、順問題（エンベロープの理論的予測）と逆問題（理論の応用による構造推定）の両面から精力的に研究されてきた。その際に用いられる不均質構造の数理モデルには、媒質の弾性定数と密度に確率論的な摂動を与える「ランダム媒質」モデルと、空隙や亀裂などの「離散的散乱体分布」モデルの2種類がある。前者のモデルは今日、リソスフェアの小規模不均質構造推定に広く利用されているが、その物理的実体は必ずしも明確では無い。特に、このモデルでは不均質の空間的連続性が暗に仮定されており、リソスフェア内部の不連続的な地質構造を反映していない。一方、後者のモデルは物理的イメージが明快であるが、従来扱われてきた散乱体（中空の空隙や単純化された亀裂）はリソスフェアの不均質性を説明する上で普遍性を欠いていた。

研究代表者らは近年、空隙分布によって形成される地震波エンベロープが「輻射伝達理論」によってよく説明できることを示した。また、周囲との弾性的・密度的コントラストの低い介在物（inclusions）の分布による散乱減衰に関して、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルが実質上等価であることを理論的に示した。これらの研究を背景として、明確な物理的イメージを持ち、かつ空隙などよりも現実的な散乱体である介在物の分布について、従来のエンベロープ研究を拡張し、その特性を明らかにするとともに、ランダム媒質のエンベロープ理論との関係も明らかにすることを着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、リソスフェアの不連続的な小規模不均質構造の近似として、媒質中に介在物をランダムに分布させ、介在物内部の物性を周囲と変化させたモデルを取り扱うことにより、以下の2点を明らかにすることである。

(1) 介在物分布モデルによる高周波地震波の散乱過程と伝播特性を、理論と数値実験の両面から明らかにする。具体的には、このモデルによる地震波エンベロープを数値的に合成し、その特性（「コーダQ」などのエンベロープを記述する観測量と、モデルパラメータとの関係）を解明することで、実際に観測されるエンベロープへの同モデルの適用可能性を検討する。

(2) この分布モデルを通じて、これまで完全に独立に発展してきた「ランダム媒質の理論」と「離散的散乱体分布の理論」の関係を

明らかにする。第1節で述べたように、周囲との弾性的コントラストの低い介在物の分布による散乱減衰に関して、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルが等価であることが確認されている。この等価性がエンベロープ形成に関して成り立つかどうかを検討するとともに、コントラストの増大によって生じる両理論の不一致を調べ、不均質構造の不連続性がエンベロープ形成に及ぼす影響を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 介在物分布モデルによる波動伝播の数値シミュレーションをおこない、波形のエンベロープを数値実験的に求める。具体的には、一定領域内に2次元円形介在物を一様ランダムに分布させ、介在物のS波速度と密度を周囲の媒質よりも一定比率だけ増加または減少させる（以下、この比をコントラストと呼ぶ）。その上で、平面SH波を入射させ、介在物分布によって生じる散乱を厳密にシミュレートすることで、模擬的な地震記象（観測地震波形）を合成する。こうして得られた地震記象群の二乗平均平方根を取り、エンベロープを求める。また主要動部分の波形を詳細に見るため、波形群を直接スタックして平均波形も求める。数値シミュレーションのための計算手法は北海道大学の蓬田清氏らが開発した「境界積分法」であり、氏の協力により計算プログラムを使用させていただいた。

(2) 単一介在物の微分散乱断面積を理論的に計算し、これを用いて「輻射伝達理論」によるエンベロープの予測をおこない、(1)の実験結果と比較することで、同理論の有効性を検証する。輻射伝達理論はランダム媒質中のコーダ波エンベロープ形成を評価する上で最も優れた方法であると考えられており、過去にさまざまな検証例があるが、介在物に関する検証はこれが初めての事例である。輻射伝達理論の解は、モンテカルロ法に基づき数値的に推定する。また、輻射伝達理論と並んで広く用いられている諸理論についても同様の検証をおこなう。具体的には、主要動波形を説明する候補としての「Foldy 理論」と「Beltzer-Brauner 理論」、およびコーダ（後続波群）エンベロープを簡便に予測するための「1次等方散乱モデル」、「エネルギーフラックスモデル」、および「拡散モデル」を扱う。これらの解は解析的に求めることが可能である。

(3) 実験で得られたエンベロープに関して、コーダQなどのエンベロープの現象論的パラメータと介在物分布のモデルパラメータ

との関係を調査する。その結果を基に、実際に観測される地震波エンベロープへの介在物分布モデルの適用可能性について検討する。

(4) 介在物分布を自己相関関数で記述されるランダム媒質と再解釈してエンベロープ形成を考えることにより、低コントラスト介在物分布によるエンベロープ形成に関して、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルが等価であることを確認する。また、コントラストが比較的高い場合に両者がどのように一致しなくなるかを明らかにすることで、不均質構造の不連続性がエンベロープに及ぼす影響を調べる。

#### 4. 研究成果

(1) 数値実験に先立ち、研究代表者が本研究開始以前に展開した理論の一般化をおこなった。第1節で述べたように、以前の研究では、低コントラスト介在物分布による散乱減衰に関して、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルが実質上等価であることを理論的に示したが、その時点での証明は2次元SH波散乱に限定されていた。そこで、同理論を最も一般的な場合である3次元弾性波散乱に拡張し、P波-S波間の変換散乱も含める形で一般化した。その結果、上記の等価性が現実的な3次元弾性波散乱についても成り立つことを示すとともに、その等価性が成り立つ範囲が「波数×介在物直径×コントラスト $<1$ 」であることを確認した。また、各介在物のサイズが冪乗則に従って確率分布する場合には、従来の研究から示唆されているリソスフェアの不均質性の空間パワースペクトル密度と同様の性質（波数の3~4乗に反比例）を再現し得ることも明らかにした。以上の成果については、査読付き雑誌に近日中に投稿予定である。

(2) 実験で得られた平均波形に関して、Foldy理論およびBeltzer-Brauner理論との比較をおこなった。前者は平均波形の減衰と分散関係（それゆえ主要動エンベロープ）を記述する古典理論として知られているが、高速度介在物が存在する場合には因果律（Kramers-Kronig関係）を破ることが、BeltzerとBraunerによって指摘されている。因果律を満たす代替理論として彼らが提案したものが後者である。比較の結果、平均波形は介在物の性質によらず、常にFoldy理論により高精度で記述可能であることと、高速度介在物が存在する場合にBeltzer-Brauner理論は有効でないことが示された。これは空隙分布に関する過去の研究と調和的である一方、「個々の観測波形が因果的でも、その

平均はKramers-Kronig関係を満たすとは限らない」という予想外の結論を示唆する。これはおそらく本研究で初めて見出された現象であり、波動論的研究全般にインパクトを与えるものと思われる。今後、その合理的解釈について検討予定である。

(3) 実験で得られた合成エンベロープについて、第3節で述べた4種類のエンベロープ理論との比較をおこなったところ、以下の結果が得られた。

① 輻射伝達理論に単一介在物の微分散乱断面積を厳密に取り入れることにより、介在物が高速度か低速度かに関わらず、幅広い周波数帯と（主要動とコーダの両方を含む）時間帯にわたって合成エンベロープをよく再現することができた。これは空隙分布に関する過去の研究と調和的であり、輻射伝達理論が介在物のコントラストの強さに関わらず普遍的に有効であることを強く示唆する。

② 輻射伝達理論において等方散乱近似を併用（微分散乱断面積を方位平均値などの代表値で代用）した場合は、同理論の有効範囲は著しく限定された。これは空隙分布の場合の結果とは対照的である。このことは、低コントラスト介在物は散乱異方性が非常に強いいため、等方散乱近似が有効に機能しないからであると解釈できる。それゆえ、実測されたエンベロープの定量的解釈には、介在物の微分散乱断面積の考慮がきわめて重要であることが示唆された。

③ 1次等方散乱モデルは、1次散乱が卓越する時間帯（初期コーダ）であっても、合成エンベロープを定量的に再現できるのは比較的低周波の場合に限られることが示された。この結果も空隙分布の場合とあまり調和的でなく、前述の通り、強い散乱異方性によるものと解釈される。ただし同モデルはエンベロープの相対的な形状自体はよく再現し、初期コーダのQ値の解釈には適用可能であることも示唆された。このことは、初期コーダのQ値が介在物の全散乱断面積（微分散乱断面積の方位積分値）と介在物の分布密度の積で規定され、散乱異方性の詳細には依らないためであると解釈される。

④ 本研究の数値実験では、現実のリソスフェアの典型的な不均質強度（ランダム媒質と見なしたときのいわゆる「速度ゆらぎ」が数%）と矛盾しないように、介在物のコントラストと分布密度を選択したが、結果的に多重散乱はあまり卓越せず、多重散乱を前提としているエネルギーフラックスモデルと拡散モデルはいずれも有効で無いことが確認された。

リソスフェアの中でも火山地帯のような強不均質領域では、多重散乱の卓越が実際に確認されており、そのような場合に関するこれらのモデルの有効性の検討は今後の課題である（後述の計算コスト抑制の問題とも関連する）。

⑤合成地震記象のコーダの振幅や初期コーダのQ値は実際の地震観測と矛盾が無く、かつそのQ値は1次等方散乱モデルで説明可能であること、また前述の通り、リソスフェアの不均質性の空間パワースペクトル密度が介在物分布で再現可能であることなどから、実際の地震波エンベロープを解釈するための近似モデルとして、介在物分布は適用の余地があると考えられる。また輻射伝達理論の利用により、エンベロープ形状の詳細から、介在物の微分散乱断面積に関して拘束条件が得られることが期待される。

(4)前項(1)で述べた通り、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルが実質的に等価であるための条件は、波数（または周波数）とコントラストで規定される。本研究の数値実験では計算コスト上の制約のため、この条件を超える（高コントラスト介在物分布による高周波散乱の）場合に関する検討が十分にできなかった。従って予備的な解析にとどまっているが、その範囲内では両モデルの輻射伝達理論解の等価性が示唆された。両モデルの不一致度のコントラスト依存性に関して定量的な結論は未だ得られていないものの、少数の介在物に関する試験的な調査によれば、かなり低速度（例えばコントラスト $\sim 50\%$ ）の介在物では、同じ絶対値のコントラストを持つ高速度介在物に比べてはるかに強い散乱波を発生し、かつ波動エネルギーの捕捉と一定時間後の放出という特殊な現象が認められた。それゆえこのような介在物が分布する場合には、コーダエンベロープの時間発展に関してランダム媒質モデルが適用できないことが予想される。この予想は今後、計算コストの抑制を図りつつ、実証を進める予定である。また今後の別の課題として、マルコフ近似理論の介在物分布への適用が挙げられる。同理論はランダム媒質中の高周波主要動エンベロープを予測するもので、もし離散的散乱体への適用可能性が示せれば、ランダム媒質モデルと離散的散乱体分布モデルの等価性を示す独立な証拠となることが期待される。

## 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1件）

- ①河原 純、弱い離散的不均質による弾性波の散乱減衰、月刊地球、29巻、237頁-241頁、2007年、査読無し

〔学会発表〕（計5件）

- ①河原 純、蓬田 清、介在物分布を含む2次元媒質中のSHコーダ波エンベロープ、日本地球惑星科学連合2009年大会、2009年5月17日、幕張メッセ国際会議場（千葉県千葉市）
- ② Jun Kawahara, Kiyoshi Yomogida, Attenuation and dispersion of SH waves due to scattering by inclusions, The 7th ASC General Assembly for Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall meeting, 2008年11月26日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）
- ③河原 純、弱い離散的不均質による弾性波の散乱減衰(2)、日本地球惑星科学連合2008年大会、2008年5月25日、幕張メッセ国際会議場（千葉県千葉市）
- ④ Jun Kawahara, Scattering attenuation due to weak discrete inhomogeneities: Comparison of the Born and Foldy approximations, American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, 2007年12月14日、Moscone Center（米国サンフランシスコ市）
- ⑤河原 純、弱い離散的不均質による弾性波の散乱減衰、日本地球惑星科学連合2007年大会、2007年5月21日、幕張メッセ国際会議場（千葉県千葉市）。

〔その他〕

研究者データベース

<http://info.ibaraki.ac.jp/Profiles/4/0000384/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河原 純 (KAWAHARA JUN)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：80282276