

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540419

研究課題名 (和文) 全地球複合系の波動計算

研究課題名 (英文) Seismic wave calculation for the whole earth coupled system

研究代表者

小林 直樹 (KOBAYASHI NAOKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30272660

研究成果の概要：

地震計測技術の進展と共に固体地球，海洋に加え大気まで含んだ全地球系でなければ説明の付かない現象が報告されるようになってきた。そうした現象には常時自由振動，地震に伴う電離圏全電子数変動，地震に伴う音波などがある。本研究は大気を含んだ全地球のモード計算を行ないモードの重ね合わせ法で全地球地震波動場の波形計算を可能にした。計算結果は観測された現象を良く再現する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,000,000	0	2,000,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	330,000	3,430,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震波，音波，重力波，モード結合，重ね合わせ，波形計算

1. 研究開始当初の背景

地球大気の質量は固体地球の質量に比べれば百万分の一しかない。またインピーダンスも固体地球のそれと大きく異なる。そのため地震学では地表を自由境界条件として扱うことで十分であるとされてきた。確かに多くの地震波動現象では大気を無視することは良い近似となっている。しかし以前から地震に伴う電離圏の擾乱現象は知られており (e.g. Weaver et al. 1970)，最近でもスマトラ巨大地震の際に地震後に地磁気脈動が観測されている。これは巨大地震で励起された音波によって電離圏が乱されたために生じた

と考えられている (家森他 2005)。また、1991 年のピナツボ噴火の際には 3.68mHz と 4.44mHz に単色なレイリー波が励起され世界各地の広帯域地震観測網で記録された (Kanamori & Mori 1992)。この二つの周波数は固体表面波の分散ブランチが長周期音波モードの基本ブランチ，1 次の高調波のブランチと交差する箇所にそれぞれ位置する。即ち大気側で生じた擾乱が地球を揺らしやすい周波数だと考えられる。これらの他にも固体地球と大気の力学結合が重要と思われる現象として我々がここ数年取り組んできた常時地球自由振動という現象がある (e.g.

Kobayashi & Nishida 1998). 我々は巨大地震が起こっていない期間でも地球が常時揺れていることをグローバルに展開された広帯域地震観測網のデータから確立し、その常時自由振動の振幅が季節変動を示すことを示した。また、ピナツボの噴火の際に生じた単色表面波と同じ周波数の振動モードは周囲の振動モードより2, 3割ほど振幅が大きいことも分かってきた (Nishida et al. 2000). 我々はこの常時自由振動の励起源が下層大気の流れ擾乱であると考えているが、大気モードと結合しやすいモードで超過振幅が観測されていることもその考えを裏付けている。以上のように感度の高い地球観測機器の展開によって従来あまり考えられてこられなかった固体地球と海洋に更に大気を含めた全地球での波動現象の取り扱いが必要とされる現象が発見されてきた。

2. 研究の目的

本研究では上で述べた地球物理学現象を定量的に扱えるようにするため、全地球複合系での波動計算の手法を開発し地震に伴う電離圏の擾乱、火山噴火に伴う長周期表面波の励起問題、常時自由振動や常時大気音波モードの励起問題に応用することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 全地球系でのモード計算

固体地球、海洋、大気複合系の波動現象を扱うため固体モード (通常大気を無視して扱われるモード)、海洋モード (同上)、大気モード (音波、重力波、通常固体は剛体壁扱い) のそれぞれを全地球系で計算する。この際もちろん固体モード、海洋モードといえど大気を含めて計算を行ない、大気モードも固体を弾性体として扱う。標準的な大気モデル (NRLMSISE-00)、固体地球モデル (PREM) を結合した全地球モデルに対して様々なモードの分散関係、固有関数を可能な限り調べておくことは観測される複合系の波動現象を解釈する際のリファレンスになる。

(2) 励起問題に対する地震波計算法

モード重ね合わせ法による波動場の計算自体は取り立てて新しいものではない。しかし現象によっては非常に短周期な波を扱う必要がある。そうした場合、波動計算のために必要なモードおよびその固有関数のデータベースは莫大なものになりうる。また、大気まで含めるとイベントの生じた地域、季節あるいは時刻に依存した (ローカルな) 大気構造でなければ観測された現象を十分説明できない可能性もある。そのため単純な固有関数のデータベースに依ったモード重ね合わせ法では効率が悪い。そこで固有関数のデー

タベースへの入出力と励起係数を処理する計算と波動場の重ね合わせ計算をする部分を並列処理化し膨大なデータベースアクセスにかかるオーバーヘッドを回避することを行う。

(3) 観測されている諸現象への応用

全地球複合系のモード計算と最適化した重ね合わせ法が確立したら本研究計画の最終目的である固体、海洋、大気複合系の波動現象への応用を行う。特にピナツボ火山の噴火の際の単色レイリー波のメカニズムの再検討、スマトラ地震で放射された音波の定量的な計算、常時励起音波モードの励起問題、十勝沖地震で見られた震源域の海洋底観測で観測された音波、海洋重力波問題などを解釈・説明する。

4. 研究成果

(1) 岩手・宮城内陸地震に伴う音波

本研究課題で作成したモードの重ね合わせ法を用いて岩手・宮城内陸地震の際に観測された地震音波の波形計算をおこなった。計算対象としたモードは周期 10 秒以上の (大気を含む) 固体モードの伸び縮み基本振動 (レイリーモード) と周期 10 秒以上の音波モード (固体地球を含む) の 1,347,924 個のモード (マルチプレット) である。岩手・宮城内陸地震の音波記録であるが、観測点夷隅は震源から 100km 以上の上空に伝わった音波と地面と中層大気の間で2度折り返す音波の着地が重なる。

そのため長周期の音波波形は複雑な様相を示す。今回、岩手・宮城内陸地震の震源を9つの破壊領域に区分けし破壊の指向性も考慮した計算をおこなった。その結果、合成波形は観測音波の長周期成分を概ね再現することが分かった。但し微弱であるが音波観測にはレーリー波も見られるがレイリー波と音波の到着時刻差は観測と理論計算では若干の違いが見られた。この違いは大気モデルの違い特に東西風の影響が強いと思われる。東西風の波形への影響は今後の課題である。

(2) 電離圏全電子数変動

計算法の応用として 1994 年北海道東方沖地震の際に見られた電離圏全電子数 (TEC) 変動を計算した。周期 10 秒以上であるが固体地球から高層大気まで含んだ地震波および地震音波のグローバルな計算は世界初である。日置らは北海道東方沖地震で見かけ速度 4 km/s と約 1 km/s の TEC 変動を報告している。今回、レイリーモードと音波モードの両方を入れて高度 100km から 300km の範囲に着目して地震波形を計算した。結果は見かけ速度 4km/s の TEC 変動はレイリー波の大気成分であること、見かけ速度 1km/s の変動は熱圏

内に折り返し点を持つ長周期音波に対応することが分かった。しかし各高度の圧力変動がそのまま TEC 変動である訳ではないため細部を詰めて行く必要がある。

(3) 常時自由振動の励起メカニズム

常時自由振動は大気音波モードと分散ブランチが重なる伸び縮みモードで顕著に振幅が大きい。それ故その励起は大気中で生じていると考えられる。固体モードの固有関数は地表面（海面）以深では大気の有無に関わらずほとんど変わらない。このことは常時自由振動に見られる振幅の増大を説明するには大気中に励起擾乱を置かなければ説明できないことを意味する。そこで、大気圧変動による地表面への力の働きに加え、大気擾乱に地面直上に体積的な圧力源としての効果も加えた。結果は大気音波モードと分散ブランチが重なるモードの振幅の増大だけでなく、その前後のモードの振幅パターンもうまく説明できるものであることが分かった。しかし地表面への面力と体積的な圧力源という2つの項として力源を表現することに対し明確な理由付けを与えることができなかった。しかし観測を良く説明する二つの項の重ね合わせの符号のあり方を検討しているうちに地面直上ではなく、高さ1 km ほどにランダムなシングルフォースを分布させることで同じ効果を得ることに気づいた。これは非常にシンプルな解であり、常時自由振動の大気励起メカニズムに迫る結果である。

(4) モード重ね合わせ法

爆発震源、ダブルカップル震源の点震源に対して励起される波動場をモード重ね合わせ法によって計算するプログラムを作成した。計算コードが正しいことを確認するために、大気中の爆発源に対する Rayleigh 波を計算した過去の文献と照合し、振幅、波形の形とも合っていることを確認した。そこで、スマトラ巨大地震およびピナツボ噴火を模した単純化した震源に関して Rayleigh 波、Tsunami 波を固体地球から大気上層迄をモード重ね法で計算した。Rayleigh 波の大気中の伝播は上方に音速で伝播し、Tsunami 波の大気成分は大気重力波として振る舞う結果を得た。

(5) モード計算

本研究課題は固体地球、海洋、大気を含めた全地球複合系の波動場計算を目指したものである。その基礎となる全地球複合系における種々のモード計算を行った。モード計算にはこの研究課題の準備段階で開発した新しいモード計算法を用いた。この方法は固体地球の非弾性効果や大気上部での波動場の放射境界条件を取り入れたもので、複素数とな

るモードの固有周波数を安定かつ効率的に計算する方法である (Kobayashi 2007)。計算したモードは周期 50 秒以上の固体モード (基本モードに関しては 10 秒)、周期 50 秒以上の津波モード、周期 10 秒以上の音波モード (約 130 万モード) である。角次数が大きな基本モードは水平方向の波長の短いモードで表面付近にエネルギーが集中するモードである。このため、粗いグリッドでは精度が出ない場合もあるので、計算結果の精度に応じて自動的にグリッドを細かくする工夫を行った。

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 2 件)

- ① Naoki Kobayashi, Tatehiko Kusumi and Naoki Suda, *Infrasounds and Background Free Oscillations, Theoretical and computational acoustics* 2007, 105-114, 2008, 査読有
- ② Naoki Kobayashi, *A new method to calculate normal modes*, *Geophys. J. Int.*, 168, 315-331, 2007, 査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① Naoki Kobayashi, *Zonal winds and Earth's free oscillations -effects on seismic waves in the atmosphere-*, 第7回アジア国際地震学連合 (ASC) 総会, 2008.11.26, つくば国際会議場
- ② 日置幸介, 小林直樹, *GPS=TEC に見える周期 4.5 分の振動と大気-地球カップリング*, 2008 年地球惑星科学関連学会連合大会, 2008.5.28, 幕張メッセ国際会議場
- ③ 小林直樹, *東西風と自由振動*, 2008 年地球惑星科学関連学会連合大会, 2008.5.27, 幕張メッセ国際会議場
- ④ 久須見建弘, 須田直樹, 小林直樹, *大気-固体地球結合系の常時自由振動*, 2008 年地球惑星科学関連学会連合大会, 2008.5.27, 幕張メッセ国際会議場
- ⑤ 久須見健弘, 須田直樹, 小林直樹, *常時地球自由振動で観測される大気-固体地球音響カップリングの時間変動*, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 2007.10.26, 仙台国際センター
- ⑥ 小林直樹, 久須見健弘, 須田直樹, *常時自由振動と超低周波音波*, 日本惑星科学会 2007 年秋季講演会, 2007.9.27, 高知大学朝倉キャンパス

- ⑦ Naoki Kobayashi, Tatehiko Kusumi and Naoki Suda, Infrasounds and background free oscillations, Infrasound technology workshop 2007, 2007.11.14, 日本気象協会 (サンシャイン 60)
- ⑧ Naoki Kobayashi, Tatehiko Kusumi, Naoki Suda, Infrasounds and background free oscillations, 8th International conference on Theoretical and Computational Acoustics, 2007.7.3, Heraklion, Crete, Greece.
- ⑨ Kiwamu Nishida, Yoshio Fukao, Shingo Watada, Naoki Kobayashi, Background atmospheric acoustic waves from 0.01 to 0.1 Hz, 8th International conference on Theoretical and Computational Acoustics, 2007.7.2, Heraklion, Crete, Greece
- ⑩ Naoki Kobayashi, Seismic waves in the atmosphere and oceans, American geophysical union Fall meeting, 2006.12.15, San Francisco, CA, USA

[その他]

ホームページ

<http://www.geo.titech.ac.jp/~shibata/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 直樹 (KOBAYASHI NAOKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30272660

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし