

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540433

研究課題名（和文） 大気中の地震波伝播における東西風の影響

研究課題名（英文） Effects of zonal winds on seismo-acoustic waves

研究代表者

小林 直樹 (KOBAYASHI NAOKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：30272660

研究成果の概要（和文）：計測技術の進歩に伴い地震によって励起される地震音波が観測されるようになった。観測音波を説明するために音波モードを固体、大気を結合した系で計算できるようにした。これにより地震音波も地震波と区別することなく計算できるようになった。しかし大気は固体地球と違い媒体の運動（風）の影響が見られる。音波の伝播における風の影響を見るために、帯状風の影響をモード計算に組み込み、モードの重ね合わせによる地震音波の波形計算を行なった。

研究成果の概要（英文）：With development of the technology for seismic measurement, seismo-acoustic waves have been often observed in shallow large earthquakes. I developed a numerical method in which we can calculate acoustic modes for a coupled model of the solid earth and atmosphere to explain the observed seismic sounds. The atmosphere however has significant motions (winds) that can affect sound propagation differing from the solid earth. To understand effects of winds on acoustic propagation, I made a code dealing with the effect in the normal mode calculation and calculated seismo-acoustic waves affected by winds.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

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：モード計算，地震波，東西風，音波，カップリング

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 (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 (Shinagawa et al. 2007)。また、

1991年のピナツポ噴火の際には3.7mHzと4.4mHz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それぞれ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固体表面波の分散ブランチが交差する箇所に位置する. 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10年来取り組んできた常時地球自由振動という現象がある(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な広帯域地震観測網のデータから確立した. 特にピナツポ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). この超過振幅は北半球の夏に特に大きくなる. この季節変動は大気構造の季節変動により大気音波モードと固体モードとの音響共鳴の構造が変わることによって説明することができる(Kobayashi et al. 2008). 以上のように感度の高い地球観測機器の展開によって, 海洋を含めた固体地球に, 従来あまり考えられてこられなかった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次々と発見されてきた.

従来こうした現象を説明する際, 大気中の地震波動の計算は大気を無視した地球モデルで得られた地表波動を大気側の境界条件として与え大気を独立して解くことが主流であった. しかし私が開発した全地球複合系でのノーマルモード計算法(Kobayashi 2007)によって地球中心から大気モデル上端までを一つの系としてモード計算が容易にできるようになっていた.

一方, 常時自由振動に見られた超過振幅の季節変動は大気構造の季節変動を考慮する必要があった. 高度90から110kmにおける温度構造の季節変動が長周期音波モードにとって重要である. 音波の遮断周波数は音速と大気スケール高との比で決まるが, 全球平均的に見ても遮断周波数に数%ほどの変動が見られ, 近傍にある固体モードとの共鳴の強さを変化させる. しかし音響構造に影響を与えるのは温度だけではない. 東西風の季節変動も高度100kmでは音速の数%から10%程に達し大気中を伝わる地震波動場に温度変化以上の影響を与えると考えられる.

2. 研究の目的

本研究では東西風に主眼を置いて大気中の地震波動場の理論計算を行い, 波動伝播における東西風の影響を系統的に調べることを目的とする. その際に波動伝播における東西

風の影響の物理が明瞭となるよう単純なモデリングを行う. 即ち風速場は東西成分のみとし, その余緯度 θ 依存性が $\sin(\theta)$ となるものを考える. 東西風のように構造モデルに非球対称成分が加わると縮退していたモードは分裂する. この単純な東西風モデルでは, 各球面調和関数 $Y_l^m(\theta, \phi)$ 成分毎に m にも依存した半径 r の連立常微分方程式を解き数値的に分裂した個々のモードの固有周波数, 固有関数を求めることができる. 通常構造モデルにおける非球対称成分は1次の摂動法にて扱われるが, この研究では数値的に個々のモードを厳密に解く点がユニークな点である.

3. 研究の方法

(1) モード計算において東西風の影響を考慮するために $\mathbf{V} = v(r)Y_l^0(\theta, \phi)\mathbf{e}_\phi$ の型の風速分布を仮定し, 運動方程式の移流項に取り入れる. この場合, 運動方程式はモードの偏角次数 m に依存するが, 各 m 毎に方程式は分離するので m に依存した項を含む連立常微分方程式に帰着し, 球対称のモード計算法と同様に解くことができる. そして, この風速の効果をモード計算に取り入れるためにコード化する.

(2) 地震によって直接励起される音波の波形を計算するために, モードの重ね合わせ法を用いる. その際のモードの励起係数を大気の上端に課せられる放射境界条件の場合に拡張する.

(3) 風速の音波波形に及ぼす影響を理解するためにまず単純な風速モデルに対して計算を行なう. 単純な風速モデルとして地表から高度100kmまで一様に風速が大きくなるものを採用した. この大気モデルを用いて10mHzまでの音波モードを $m = -l, 0, l$ の場合について計算する. それぞれ, 東風に対して追い風方向, 直交方向(南北方向), 向かい風方向に伝播する音波を表現する. 結果を比較し風速の音波波形に与える波動論的影響を考察する.

(4) 2008年岩手・宮城内陸地震の際に発生し千葉県夷隅観測所にて観測された音波を再現する理論波形計算を行い観測波形と比較することで風による長周期音波の波形への影響を考察する. また, 研究計画当初は想定していなかった東北地方太平洋沖地震が発生したため, それによる音波波形の計算を行い観測と比較する.

4. 研究成果

(1) 無風大気に対して東西風を考えると複合地球モデルの大気部分の運動方程式には次

式左辺第二項が加わる。

$$-\rho\omega^2\mathbf{u}+i\omega\rho(\mathbf{V}\cdot\nabla\mathbf{u}+\mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{V})=\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+\rho'\mathbf{g}+\rho\mathbf{g}'$$

ここで ω , \mathbf{u} , ρ , \mathbf{g} , $\boldsymbol{\tau}$ は角周波数, 変位ベクトル, 密度, 重力加速度, 応力テンソルである。プライムの付いたものはその摂動である。ベクトル球面調和関数の直交性を利用し, 少々計算の結果, 左辺第二項に現れる因子は次のように近似できる。

$$\mathbf{V}\cdot\nabla\mathbf{u}+\mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{V}\approx -m\frac{V}{r}u\mathbf{e}_r+m\left(\frac{\dot{V}}{l(l+1)}u-\frac{V}{r}\right)\nabla_l Y$$

ここで右辺は偏角次数 m に依存し, 右辺第一項は運動方程式の鉛直成分, 第二項は運動方程式の水平成分の付加項として加わる。この点を除けば, 球対称地球の場合の取り扱いと何ら変わらない。モード計算法のコードの運動方程式に上記の項を加え, また風速分布を読み込むコードを追加し風速の影響を考慮したモード計算コードを開発した。

(2) 波形計算を実施する際に計算上必要となるモードの励起係数の定式化の改善をおこなった。境界が自由境界条件の場合, 運動エネルギー積分と呼ばれる密度と変位固有関数から計算される積分量に各モードの励起係数は反比例する。しかし上端が放射境界条件の気を含む系では自由境界条件が成立しないためその影響を考慮した励起係数が必要になる。得られた励起係数の妥当性を確認するため先ず単純な系について考察した。二つの性質の異なる媒体からなる半無限円筒内の音波について放射境界条件に適合した励起係数を導出し, それを用いてモードの重ね合わせをおこない波形を計算した。この場合, エネルギーの放射があるため固有周波数, 固有関数とも複素数となる。したがって個々のモードは減衰波となるが, 重ね合わせた波形は伝播に伴う減衰は見られず, 不連続面での透過, 反射波を良く表していた。即ち得られた励起係数を用いて正しく波動場を表現できていることが確認できた。

(3) 風速の音波波形に及ぼす影響を理解するために先ず単純な風速モデルに対して計算を行なった。単純な風速モデルとして地表から高度 100km まで一様に風速が大きくなるものを採用した。この大気モデルを用いて 10mHz までの音波モードを $m=-l, 0, l$ の場合について計算した (図 1)。固有周波数に関しては追い風に向かって進行する場合は向かい風に向かって進行する場合に比べて高い周波数を示した。この結果は初等的には音波が風に流されて進む分速く伝わるため固有周波数は高くなると理解される。固有関数を

比較すると, 高度に対して一様増加する風速を与えた 100km 以下では, 追い風に進行する場合の方が固有関数はやや下方に押しつぶされた形となり, 向かい風に進行する場合は逆に上方に持ち上げられた形になっている。これは追い風の場合は上空に行く程早くなる風によって音波が下方に屈折するためと解釈できる。向かい風の場合はその逆である。この様に得られた結果は波動論的には矛盾

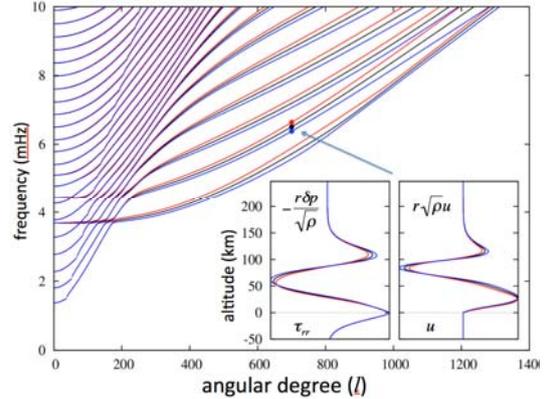


図 1. 風速の分散関係と固有関数に与える影響. 赤は $m=-l$, 黒は 0, 青は $+l$ の場合. 挿入図は圧力固有関数 (左) と鉛直変位固有関数 (右) である。

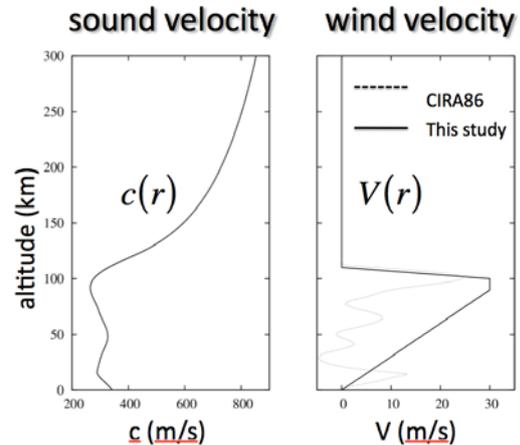


図 2. 計算に使用した大気モデルの音速 (左) 及び風速モデル (右)

の無い結果であり東西風の影響が正しく取り込まれていることが確認できた。

(4) 2008年の岩手・宮城岩手内陸地震, 2011年3月に起きた東北地方太平洋沖地震による音波の計算をおこなった. 2008年の岩手・宮城内陸地震の際には400kmほど離れた夷隅にあるCTBTの観測点で顕著な長周期音波が観測された. この音波波形を再現するために周

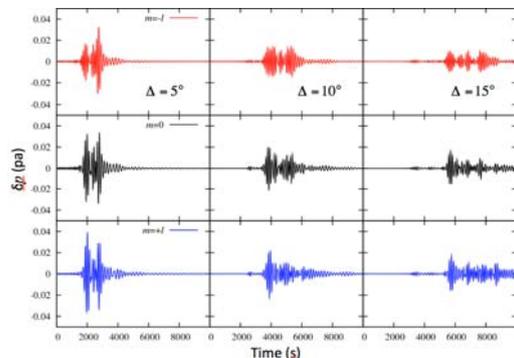


図3. 東西風の音波波形への影響. 上段より東向き(追い風方向), 南北方向, 西向き(向かい風方向)に進行する音波.

期10秒以上の音波モードを約百万個計算し, モードの重ね合わせ法によって大気中を伝わる音波波形を計算した. その波形のうち30秒以上の長周期成分に対して観測波形と比較し, 音波を使った震源パラメータの推定も行なった. 音波の励起は深さに対して顕著な依存性を持つため, 音波を利用すると浅い震源に対するメカニズムの制約に利用できる. 震源域を9つに分割し, 破壊の伝播に伴いそれぞれの分割領域のモーメント解放による音波の励起を重ね合わせた. 無風大気で行なった計算結果は9秒ほどの到着時刻の遅延を除き観測波形と非常に良い一致を示した. この遅延は平均風速17m/sの風の影響で説明できる. 帯状風のモードに与える影響は第一近似としては風速による伝播時刻のずれとして現れるが, 観測と理論計算によってその効果を確認した. また, 2011年3月に東北地方, 北関東を襲った大地震が発生した. この大地震は海溝付近に大きな変位を残し, 大津波を発生させた. この地震に対し, 気象庁のセントロイド解を与え音波の励起を見積もった. 得られた結果は観測された気圧変動より有意に大きな気圧変動を示した. 観測振幅を説明するには与えたセントロイドの深さより20km深い震源が必要であり, 音波の観点ではやや深い地震であることが分かった.

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)

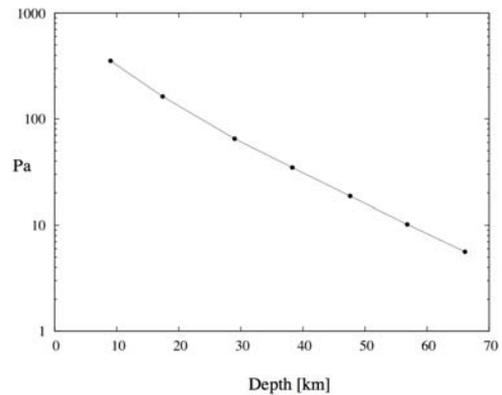


図5. 東北地方太平洋沖地震のCMT深度と震央距離5度にある観測点の周期100秒以上の長周期音波の振幅

[雑誌論文] (計1件)

L. M. Rolland, P. Lognonne, E. Astafyeva, E. A. Kherani, N. Kobayashi, M. M. and H. Munekane, The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 査読有, 63, 853-857, 2011.

[学会発表] (計9件)

① 小林直樹, Synthesis of wind-affected long-period seismoacoustic wave, American Geophysical Union Fall meeting, 2009年12月14日, サンフランシスコ

② 長尾大道, 小林直樹, 深尾良夫, 石原靖, 坪井誠司, Seismic and acoustic wave excitations in a single system of solid earth and atmosphere: the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, 日本地球惑星科学連合大会, 2009年5月21日, 幕張メッセ国際会議場

③ 小林直樹, 長尾大道, 深尾良夫, 風の影響を受けた地震音波の長周期波形計算, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月27日, 幕張メッセ国際会議場

④ 小林直樹, 放射境界条件を持つ系の励起問題, 2010年10月29日, 広島国際会議場

⑤ 小林直樹, On excitation problems of an elastodynamic system with an open boundary condition, American Geophysical Union Fall meeting, 2010年12月13日, サンフランシスコ

⑥ 長尾大道, 小林直樹, 中野慎也, 樋口知之, Fault Parameter Estimation with Data Assimilation on Infrasound Variations Due

to Big Earthquakes, Fusion 2011, 2011年
7月6日, シカゴ

⑦小林直樹, 放射境界条件の地震音波と伝播,
日本地球惑星科学連合 2011年大会, 2011年
5月23日, 幕張メッセ国際会議場

⑧小林直樹, 2011年東北地方太平洋沖地震で
励起された大気擾乱の計算, 日本地震学会秋
季大会, 2011年10月14日, 静岡県コンベン
ションアーツセンター・グランシップ

⑨小林直樹, Synthesis of atmospheric
disturbances generated by the Great
March 2011 Tohoku-Oki Earthquake,
American Geophysical Union Fall meeting,
2011年12月9日, サンフランシスコ

〔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〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 直樹 (KOBAYASHI NAOKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教

研究者番号: 30272660

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし