

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540413

研究課題名（和文） 地動と大気圧の同時観測による大気 地球音響結合の研究

研究課題名（英文） Study of acoustic coupling between the atmosphere and solid Earth by the simultaneous observation of ground motion and atmospheric pressure

研究代表者

氏名（アルファベット） 綿田 辰吾（WATADA SHINGO）

所属機関・所属部署名・職名 東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：30301112

研究成果の概要：

大気下端が地動や海面変動により時間変化すると大気側に波や境界波が発生する。2003年十勝沖地震時に、伝播する地震波の表面波により発生した大気下端に圧力波を、地震観測点に設置した微気計記録で測定し、地動と発生圧力の比が広帯域で理論値と一致することを示した。また、等温大気について、下端で発生する圧力変動の位相と振幅を、下端境界の周波数と波数を独立変数として理論的に表現し、大気下端の一般的な運動による重力波・音波・境界波の発生とエネルギー伝播についての統一的理解が得られた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	390,000	4,090,000

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：地震動、気圧変動、微気圧、音響結合、伝達関数、音波、圧力波、重力波、地震現象、大気地動音響結合

## 1. 研究開始当初の背景

地震による音波の発生はしばしば報告されているが地震との同時解析は行われず、大気-地球間の音響結合度の明確な報告はない。常時自由振動励起源の研究では、独立した励起イベント検出ができないため、地球大気の大気擾乱分布はある統計的性質を持った大気擾乱時空間スペクトルが定常かつ一様に存在すると仮定して、観測量に合致する、大気擾乱の統計的性質を規定するパラメータを求める問題に帰着させていた(Tanimoto and Um 1999, Fukao et al. 2002)。Fukao et al. (2002)

は、大気擾乱の空間スケール10キロ以下の構造に励起源があるとする仮説(Fukao et al. 2000)を検証すべく実際に測線10キロの微気圧アレイ観測を行っているが、測線距離が短すぎて長周期大気音波モードの検出には成功しなかった(Nishida et al., 2005)。大気中で数分～十数分の周期を持つ重力波・ラム波の観測事例は数多く報告されている一方、長周期音波モードの伝搬の報告は空中核実験や大規模火山噴火(Harkrider 1972, Tahira et al. 1996)などの特異な現象を除いては皆無である。大気圧と地動を同時にアレイ観測し、

種々の大気擾乱源と固体地球のカップリングを直接明らかにしようとするのは世界でも初めての試みである。

## 2. 研究の目的

2003年十勝沖地震により、大気中に地震動を起源とする、周期50秒に及ぶ長周期音波が放出されていることが判明した(綿田 2005、図1)。これまでの大気-地球音響結合研究は、1964年アラスカ地震や、2002年アラスカDenali地震から短周期音波や、長周期重力波の放出が報告されている。一方、常時地球自由振動が検出され(Nawa et al. 1998, Kobayashi Nishida 1998)、大気・海洋中の種々の励起源や励起メカニズムの研究(Tanimoto 1999, Fukao et al. 2000, Rhie and Romanowicz 2004)が進展してきた。

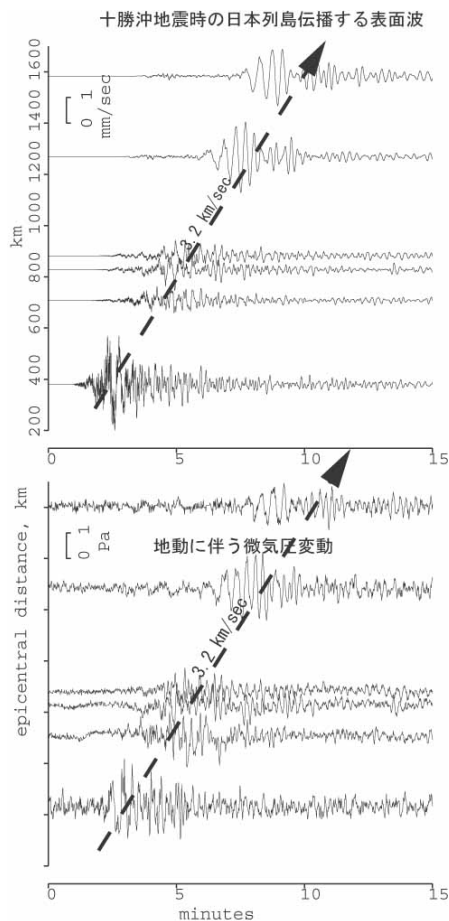


図1 綿田(2005)に加筆

本研究では、地震動時の長周期の音波の発生や、固体地球とカップルする周期約270、230秒の大気自由振動(=大気音波モード)を、精密大気圧変動と長周期地動の同時観測により直接測定する。そのため、微気圧計からなる精密大気圧変動観測装置を既存の広帯域地

震計に併設して構成し、それら観測データから

- (1) 周波数解析とアレイ解析により、到達する地震波と大気音波を同定・検出し、
- (2) 大気中の各種検出された波動に伴う圧力変動と固体地球地震動の振幅比の周波数依存性からこれまで観測されていない長周期帯域(1秒~300秒)での大気-固体地球地震学的結合強度を明らかにする。

本研究の特色は、音波モードに近接した周波数帯域で最も大きな大気圧変動源となっている他の大気中の慣性重力波、ラム波などから、アレイ解析により判明する圧力変動の空間スケールを用いて音波モードを分離同定し、同時に観測される地動と比較することで音響結合強度を直接測定することである。

特色の第2は、高感度な微気圧計を音波モード検出に利用し、これまで検出されていない固体地球とカップルする大気音波モードを世界で初めて直接検出する点にある。大気中の長周期音波モードの存在は理論的に予測され、音波モードが共鳴条件を満足する特定の固体地球自由振動モードの振幅異常観測からその存在が傍証されていたが、精密大気圧変動のアレイ観測からいまだ直接検出されていない。

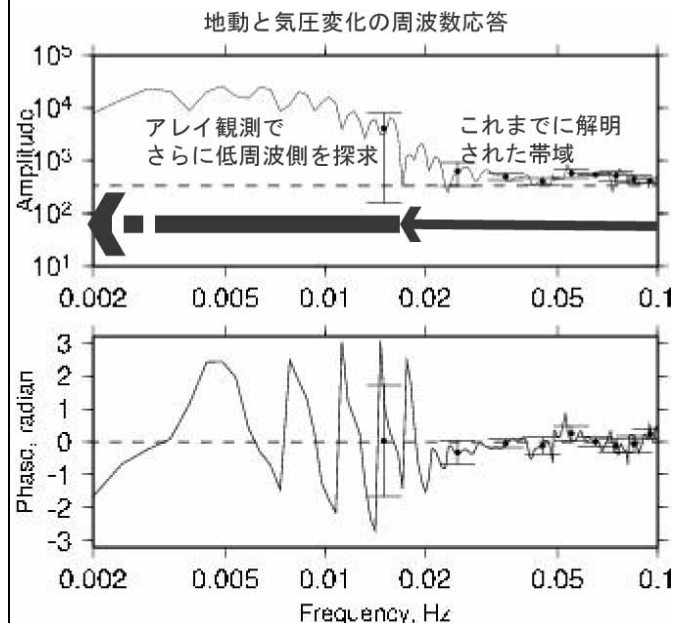


図2

この研究の独創性の第3は、連続時間空間スペクトルから大気音波モードを検出するのではなく、長周期音波モードと重力波の周波数-波数構造の違いに着目し、大気音波モードのイベント的な発生をアレイ観測により検出しようとする点にある。大気音波モードが頻繁に検出されれば、大気長周期音波の周期は温

度に敏感で、その鉛直方向のスケールが大気熱圏(高度150キロ以上)に到達するので、地表で観測される長周期大気音波の周波数により高層大気の平均的温度が定常的にモニタリング可能となることが期待される。本研究は地震学がその対象とする領域を大気から電離層まで広げようとしている一翼をにない、真に独創的である。以下に本研究の進展による結果が波及すると期待される学術的課題を述べる。

大気音波モードはこれまでの気象学などでは看過され、どの周期と波長の音波がどのような強度で存在するかようやく計測されるようになった(Nishida et al. 2005)。この音波モードの鉛直方向の群速度は大気力学で存在があきらかになっている慣性重力波のそれにくらべて桁違いに早く、このモードの検出は鉛直方向の大気中のエネルギー輸送の新しい提唱につながる可能性を秘めている。

大気中音波は重力の影響を受け、標準的な密度成層下で周期約300秒にカットオフが存在し、この周期以下のみで存在する。カットオフ周期に近づくにつれ、大気と固体地球の音響結合は2003年十勝沖地震で観測された鉛直地動速度成分と圧力変動応答に振幅と位相のずれがあることが理論的に予測される。これまでの観測が周波数応答のずれは検出されていない(図2)。大気-固体地球結合系の音響結合がカットオフ周波数近傍でどのように振舞うか、観測事例は皆無であり、本研究のねらいどおりに300秒付近まで地動と大気音波の結合が測定できれば、大気-固体地球結合系の振る舞いが理論的に予測と合致するか検証される。この周期帯はまさに常時自由振動が観測されている周波数であり、常時自由振動の大気励起問題における単純な圧力励起源の物理像に修正を迫るものになる。

### 3. 研究の方法

気圧と固体地球変位の同時観測から、世界に先駆けた固体地球と音響結合する大気音波モードの検出と、種々の大気現象が固体地球の長周期地動を励起するメカニズムの解明を目的としている。その目的達成のために以下の研究計画を遂行した。

既存の広帯域地震計が設置してある地震研究所富士川観測所(FUJ, 山梨県)、防災科学技術研究所高遠(TTO, 長野県)、足尾(ASI, 栃木県)、鬼石(ONS, 群馬県)、中伊豆(JIZ, 静岡県)、都留菅野(SGN, 山梨県)、金谷(KNY, 静岡県)、金山(KNM, 岐阜県)広帯域地震観測点、名古屋大学旭地震観測所(NNA,

愛知県)に微気圧計測システムを設置し、オフラインにより4ヶ月に1回データを収集した。

### 4. 研究成果

大気は固体地球を下端として存在している。そのため、下端が地動や海面変動により時間変化すると大気下端から大気側に波や境界波が発生する。2003年十勝沖地震時に、大気下端が地表を伝播する地震波の表面波により揺すられ下端大気中に圧力波が発生していることが、地震観測点に設置した微気圧記録から明らかとなった(Watada et al. 2006)。

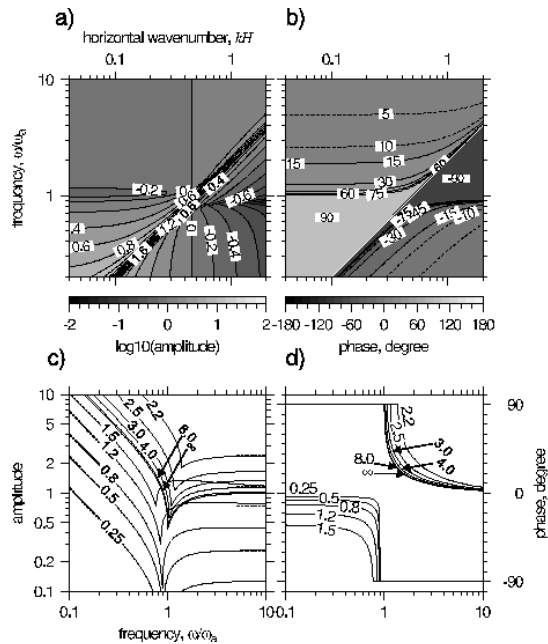


図3 Watada 2009 figure 3 を編集

地表変位速度と発生した大気圧変動の間には比例関係が成り立ち、その比例定数は大気波動線形運動方程式から導かれる。地震波は大気音波より一桁速い速度だが、津波は大気音波よりも遅く伝播する。下端の変形の水平位相速度が音速より速い場合と遅い場合、大気はどのように応答するだろうか。下端の変形の周期が acoustic cut-off 周期よりも長い場合と短い場合、また buoyancy 周期よりも長い場合と短い場合でそれぞれ大気の応答が異なると予想される。

等温大気について、下端で発生する圧力変動の位相と振幅を、下端境界の周波数と波数を独立変数として表現に成功した(Watada 2009, 図3)。

それによれば、1 境界波領域であっても下端の変動に応答する圧力変動が存在し、2 ラム波の分散関係に沿って圧力変動が無限大となり、3 発生する圧力と変位の位相のずれは鉛直方向の端数により一意に決まる。また、下端から上方に伝播する波動のエネルギー

ギ - 流量も解析解から求めた。周波数と端数領域の音波と重力波の伝播領域から、境界波領域に近づくとき急速にエネルギー伝播効率が低下し、境界波領域では完全にエネルギー伝播効率がゼロとなることが判明した。

#### 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 9件)

綿田辰吾、大地震に伴う気圧変動、地震ジャーナル、印刷中、査読無

Watada S., Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time-varying bottom boundary, *J. Fluid Mech.*, 627, 361-377, 2009., 査読有

Mikumo T., and S. Watada, Acoustic-gravity waves from earthquake sources, in "Infrasound monitoring for atmospheric studies" Le-Pichon et al. (eds), Springer, in press, 2008, 査読有

Mikumo, T. T. Shibutani, A. L. Pichon, M. Garces, D. Fee, T. Tsuyuki, S. Watada, W. Morii, Low-frequency acoustic-gravity waves from tectonic deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw=9.2), *J. Geophys. Res.*, 113, B12402, doi:10.102-2008JB0057, 2008., 査読有

Kawakatsu, H., S. Watada, Seismic evidence for deep water transportation in the mantle, *Science*, 316, 5380, 1468-1471, 2007. 査読有

Rosat, S., S. Watada and T. Sato, Geographical variations of the OS0 normal mode amplitude: predictions and observations after the Sumatra-Andaman earthquake, *Earth Planets Space*, 59, 4, 307-311, 2007. 査読有

綿田辰吾、大湊隆雄、振動台を用いた気圧測定装置の加速度応答、地震研究所技術研究報告、12、19-23、2006、査読有

綿田辰吾、功刀卓、日本列島傾斜計アレイからみた破壊継続時間、月刊地球、56、95-99、2006、査読無

Shingo Watada, T. Kunugi, K. Hirata, H. Sugioka, K. Nishida, S. Sekiguchi, J. Oikawa, Y. Tsuji, H. Kanamori Atmospheric Pressure Change Associated with the 2003 Tokachi-Oki Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 33, L24306, doi:10.1029/GL027967, 2006, 査読有

[学会発表](計 8件)

Shingo Watada, Masayuki Obayashi,

Shinzaburo Ozawa, Wave Propagation in the Ionosphere Associated With Earthquakes Revealed by GPS-TEC 4D Tomography, American Geophysical Union 2008 Fall meeting, 2008年12月18日、米国サンフランシスコモスコーンセンター

綿田辰吾、大林正行、小沢慎三郎、GPS 4次元トモグラフィーによる地震発生に伴う電離層内は動減少の解明、地球電磁気・地球惑星学会、2008年10月11日、仙台市戦災復興記念館

Shingo Watada, Energy flow of acoustic-gravity waves from the time-varying bottom boundary in the isothermal atmosphere, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008年11月25日、つくば市国際会議場

綿田辰吾、時間変動する大気下端からの大気音波・重力波の放射と境界波の発生：密度成層する等温大気の場合、日本地震学会、2007年10月24日、仙台国際センター

綿田辰吾、重力成層圧縮性流体の時間変動する下端境界からの音波・重力波の放射と境界波の発生、日本流体力学会、2007年8月8日、東京大学教養部

今西祐一、綿田辰吾、森井互、田村良明、和田安男、神岡・池ノ山山頂における気象観測、日本地球惑星科学連合大会、2007年5月22日、幕張メッセ国際会議場

綿田辰吾、関口涉次、2007年能登半島地震に伴う大気圧変動、日本地球惑星科学連合大会、2007年5月19日、幕張メッセ国際会議場

綿田辰吾、大林政行、小沢真三郎、2003年十勝沖地震に伴う電離層擾乱、日本地震学会秋季大会、日本地震学会、2006年10月31日、名古屋国際会議場

[産業財産権]

出願状況(計 1件)

名称：空気圧計測方法及びその計測装置

発明者：綿田辰吾他

権利者：同上

種類：特許

番号：2008-57124

出願年月日：2008年3月

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

綿田辰吾 (WATADA SHINGO)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：30301112

(2)研究分担者

関口涉次 (SEKIGUCHI SHOJI)

防災科学技術研究所・地震研究部門・総括主任研

究員

研究者番号：40399358