

## 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30日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340123

研究課題名（和文）4次元GPSトモグラフィーによる地震動に伴う電離層内短周期波動現象の解明

研究課題名（英文）Analysis of the short-period wave propagation in the ionosphere associated with earthquakes using 4D GPS tomography

研究代表者

大林 政行（OBAYASHI MASAYUKI）

独立行政法人海洋開発研究機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号：30359179

研究成果の概要（和文）：

大規模地震直後に電離層で発生する電子密度擾乱は、GPS衛星からの送信波の伝搬遅延量からもとめられる。国土地理院が全国に展開するGEONET GPS観測網の1秒データから、電離層擾乱の3次元構造の時間変化を求める手法を開発した。その手法を2004年十勝沖M=8に適用して、電離層擾乱が分散性を示す音波であること、大気音波は大規模地殻変動により地表（または海面）では発生し電離層まで到達することを示した。

研究成果の概要（英文）：

Ionospheric electron density disturbance that is often observed after large earthquakes can be measured from the delay of the carrier wave from the GPS navigation satellites. We developed a method to obtain the time variation images of the 3D structure of the ionospheric disturbance using 1Hz-sampling data from GEONET operated by GSI. By applying the method to the 2004 Tokachi-Oki earthquake, we have shown that the ionosphere disturbance is the dispersive sound wave from the ground and the ocean surface. The sound waves were generated by the large-scale crustal deformation and reached to the ionosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
総計	10,600,000	3,180,000	13,780,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球物理学

キーワード：トモグラフィー、電離層擾乱、地震が発生する大気波動、GPS-TEC 擾乱、GEONET、大気重力波、長周期音波、大気境界波

## 1. 研究開始当初の背景

マグニチュード6以上の地球浅部地震発生直後に上空80-600キロにある電離層内に

電子数密度の擾乱が発生することが、電離層内の全電子数変化(TEC)により生じるGPS衛星信号の伝播遅延として観測されている

(Calais and Minster 1995, Ducic et al. 2003, Heki and Ping 2005)。この電離層擾乱の3次元トモグラフィー研究では、アラスカの巨大地震後にカリフォルニア稠密 GPS 観測網により捉えられた電離層内擾乱について、その電離層擾乱の3次元構造の時間変化から電離層内部の波動伝播抽出が試みられた(Garcia et al. 2005)が、解の像強度が明らかに不足など結果に問題を抱えており明確な結論に至っていない。またこれまでのGPS 電離層研究では 30 秒サンプリングのGPS 連続観測データが用いられてきたが、地震発生直後の電離層擾乱の周期は短周期側に 20 秒まで伸びているため (Artru and Lognonne 2001, Heki and Ping 2005)、30 秒サンプリング GPS データではエイリアシングの問題があるため不适当であることが指摘されている (Garcia et al. 2005)。そのため地震発生直後に生じた電離層内擾乱が、高層大気中のどのような波動現象 (例えば重力波や長周期音波) を反映しているのかコンセンサスは得られていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、国土地理院の GPS 1 秒データを用いて電離層内の擾乱を高時間・空間解像度をもつトモグラフィーを実行し、これまで時間解像度がなかった周期数秒から数十秒の現象をはじめ捉えることを最大の目的としその上で、

- (1) 地震発生直後発生に日本列島 GPS 観測網で電離層内擾乱として測定される現象が、実際にどのような高層大気中の波動現象を観測しているのか、を解き明かす。さらに、
- (2) 電離層内波動がどのような地面・大気間の力学的結合により引き起こされているのか理解するため、地震の発生から電離層内の擾乱伝播に至るまでの、固体地球・大気(対流圏)・電離層結合システムの振舞いを明らかにする。

## 2. 研究の方法

研究手法は主に次の3ステップによる。

- (1) 1 秒サンプリング GPS データの収集・および GPS データから TEC データへの変換。
- (2) TEC データを用いた4次元電離層トモグラフィーの開発と実行及び結果の解釈。
- (3) トモグラフィー結果とシミュレーションの比較による地震発生後の電離層内波動現象の解明。

## 4. 研究成果

### (1) 電離層トモグラフィー

電離層トモグラフィー手法の開発を行った。本研究のトモグラフィーで独創的な点は電離層の電子数密度異常  $n(\mathbf{x}, t)$  を求める線型方程式①を解く際に

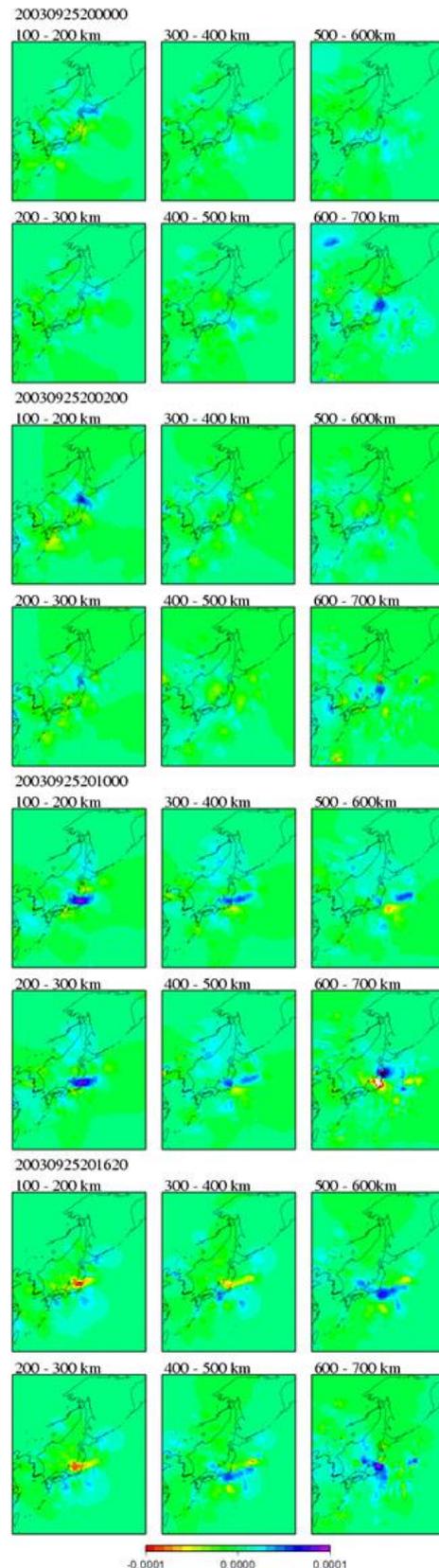


図1 2003 年十勝沖地震後の電離層における電子数密度異常の時間変化

$$\mathbf{d} = \mathbf{A} \mathbf{n}(\mathbf{x}, t) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\partial \mathbf{n}(\mathbf{x}, t) / \partial x_i = 0 \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\partial \mathbf{n}(\mathbf{x}, t) / \partial t = 0 \quad \dots \textcircled{3}$$

(ここで  $\mathbf{d}$  は TEC データ、 $\mathbf{A}$  はデータカーネル、 $\mathbf{n}(\mathbf{x}, t)$  はモデルパラメータ ( $\mathbf{x}, t$  はそれぞれ空間、時間) を表す。)

空間方向と時間方向にそれぞれに連続であるという先駆的情報 (それぞれ方程式②、③に対応) を与えることにより解を安定に求めるものである。

このコードで 2003 年十勝沖地震について、GPS 伝播遅延データから電離層内の全電子数変化 (TEC) への変換を行い、TEC データを使ってトモグラフィを実行し、地震後の電離層の擾乱伝搬について結果を得た。図は高度 100 km から 700 km までの厚さ 100 km の層における電子数密度異常を時間ごとに示したものである。この結果により地震で発生した電子数密度の異常が時間とともに伝播している様子が明らかになり、擾乱は音波として伝搬していることが妥当であるといことが分かった。また電離層の擾乱の伝搬に速度の違うフェーズがあり、分散していることが観測された。

#### (2) 大気波動シミュレーション

現実大気の水平密度成層構造で、重力波やラム波、音波に対応するモード計算が、数千キロに及ぶ長波長から数キロの短波長まで、周期が 1 時間を超える長周期から周期 10 秒程度の音波領域まで可能になった。大気波動の長時間・長距離伝搬の計算に必要な放射境界条件について、音波は重力波の区別なく任意の波動に対して、周波数領域と時間領域ともに適応可能な基本原理を発見した。さらに大気波動伝搬計算コード開発をすすめ、現実大気の水平密度成層構造で、重力波やラム波、音波に対応するモード計算が、ハスケル行列法で行って可能になった。

等温密度成層大気の下に任意の周期と波長で変形を与え、大気側に発生する波動や波動エネルギー伝搬についての解析解を求めた。

#### (3) 2011 年東北沖太平洋地震

2011 年東北沖太平洋地震では巨大津波と共に大気波動が発生し、GPS TEC や HF ドップラー探査により電離層擾乱として各種観測の報告が相次いだ。非常に長周期 (約 500 秒) でほぼ音速で伝搬した大気波動は日本国内をはじめ、ロシア極東で観測された。その圧力波形は、沖合の海底ケーブルで計測された津波波形とよく似ており、津波起源と大気波動の起源が同一の海面隆起であること、また長周期の大気波動がほとんど分散せずに音速で伝搬したことから、大気境界波として伝搬したことが分かった。波形の方位依存

性から津波波源とおなじく南北に伸びた大気波波源であることが推定された。また、津波が沿岸に到達する時刻より前に日本の陸上で大気波動が到達していた。

#### 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 7 件)

- ① Arai, N. M. Iwakuni, S. Watada, et al., Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL049146, 2011. 査読有
- ② 村山貴彦・今西祐一・綿田辰吾・大井琢磨・新井伸夫・岩国真紀子・野上麻美, ナノ分解能気圧センサーを用いた可搬型インフラサウンド観測システムの開発, 地震研究所技術研究報告所, 17, 63-76, 2011. 査読無
- ③ Watada, S., H. Kanamori, Acoustic Resonant Oscillations Between the Atmosphere and the Solid Earth During the 1991 Mt. Pinatubo Eruption, *J. Geophys. Res.*, 115, B12319, doi:10.1029/2010JB007747, 2010. 査読有
- ④ T. Mikumo, S. Watada, Acoustic Gravity Waves from Earthquakes, in *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne, Springer, 259-275, 2010. 査読有
- ⑤ 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
- ⑥ 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:10.1029/2008JB005710, 2008. 査読有
- ⑦ 綿田辰吾, 大地震に伴う気圧変動, 地震ジャーナル, 47, 25-26, 2009. 査読無

[学会発表] (計 15 件)

- ① Nobuo, A., M. Iwakuni, S. Watada, Y.

- Imanishi, T. Murayama, M. Nogami, Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, American Geophysical Union fall meeting, San Francisco (USA), Dec. 07, 2011.
- ② 綿田辰吾, acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, SGEPPS 秋季大会, 神戸大学, Nov. 6, 2011.
- ③ Watada S., Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, Todai forum, New horizons in the earth science, Imaging and monitoring active subduction zones and volcanoes, Paris (France), Oct 18, 2011.
- ④ Watada, S., Hiroo Kanamori, Acoustic Resonant Oscillations Between the Atmosphere and the Solid Earth During the 1991 Mt. Pinatubo Eruption, IUGG general assembly,メルボルンコンベンションセンター (オーストラリア), July 2, 2011
- ⑤ Shingo Watada, Hiroo Kanamori, Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid Earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, Japan Geoscience Union, Makuhari (Japan), May 24, 2011.
- ⑥ Nobuo Arai, Yuichi Imanishi, Shingo Watada, Takuma Oi, Takahiko Murayama, Makiko Iwakuni, Mami Nogami, Dispersion of infrasound signals excited by explosive eruptions of the Sakura-jima volcano, American Geophysical Union fall meeting, San Francisco (USA), December 17, 2010.
- ⑦ Watada. S., N. Arai, T. Murayama, M. Iwakuni, M. Nogami, Y. Imanishi, T. Oi, Y. Kitagawa, Azimuthal Traveltime and Amplitude Anomalies of Tropospheric and Thermospheric Acoustic Waves From the Explosive Eruption of the Sakurajima Volcano in Japan, American Geophysical Union fall meeting, San Francisco, Dec13, 2010.
- ⑧ 綿田辰吾, ハスケル行列法による大気・固体地球結合系のモード計算, 日本地震学会秋期大会, 広島国際会議場(広島市), 10月29日, 2010.
- ⑨ Nobuo Arai, Yuichi Imanishi, Shingo Watada, Takuma Oi, Takahiko Murayama, Makiko Iwakuni, Mami Nogami, Dispersion of infrasound signals excited by explosive eruptions of the Sakura-jima volcano, Monitoring Research Review on Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies, Orlando, Florida (USA), September 21-23, 2010.
- ⑩ 新井 伸夫, 今西 祐一, 綿田辰吾, 大井 拓磨, 村山 貴彦, 村田 和則, 岩國 真紀子, 野上 麻美, インフラサウンドの観測 - 桜島の爆発噴火に起因するシグナルの速度分散性 -, 日本音響学会 2010 年秋期研究発表会, 関西大学(吹田市), 9月14日, 2010.
- ⑪ 綿田辰吾, 横尾亮彦, 今西祐一, 大井拓磨, 中埜彰洋, 安藤秀樹, 佐藤峰司, 寺菌佳高, 低周波マイクロフォン比較実験, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場, 5月25日, 2010.
- ⑫ 綿田辰吾, 新井伸夫, 村山貴彦, 岩國真紀子, 野上麻美, 今西祐一, 大井拓磨, 桜島火山の爆発的噴火後に見られる低周波音波の方位に依存した振幅・伝播時間異常, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場, 5月24日, 2010.
- ⑬ 綿田辰吾, 密度成層する流体波動の放射境界条件, 日本地震学会秋季大会, 京都大学吉田キャンパス (京都市), 10月23日, 2009.
- ⑭ Watada, S., M. Obayashi, S. Ozawa, Wave Propagation in the Ionosphere Associated With Earthquakes Revealed by GPS-TEC 4D Tomography, American Geophysical Union fall meeting, San Francisco, Dec., 17, 2008.
- ⑮ 綿田辰吾, 大林政行, 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波動現象の解明, 地球電磁気・地球惑星圏学, 会仙台市戦災復興記念館, 10月11日, 2008.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大林 政行 (OBAYASHI MASAYUKI)  
独立行政法人海洋開発研究機構・地球内部  
ダイナミクス領域・主任研究員  
研究者番号: 30359179

### (2) 研究分担者

綿田 辰吾 (WATADA SHINGO)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 30301112

### (3) 連携研究者

小沢 慎三郎 (OZAWA SHINZABURO)  
国土地理院・地理地殻活動研究センター・

主任研究官

研究者番号：70370806