

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400442

研究課題名(和文)大地震直前直後の電離圏：不思議な挙動の解明

研究課題名(英文)Mysterious behavior of ionosphere immediately before and after large earthquakes

研究代表者

日置 幸介 (Heki, Kosuke)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：30280564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：GNSS衛星を利用した観測によって地震に伴う電離圏全電子数の異常に関する総合的な研究を行った。本研究では地震十分後に生じる異常の振幅と背景となる電離圏全電子数と地震のモーメントマグニチュードの関係を定式化した。また地震直前に電離圏全電子数に異常が生じることが2011年東北沖地震によって発見されたが、本研究では数多くの地震のデータ解析から、異常が始まる時間がM9クラスで40分前、M8クラスで20分前であること、全電子数の変化率でみた異常の大きさが $M_w$ と背景全電子数の関数として表されることを明らかにした。また異常の空間構造から、地震前に地表に発生する正電荷が原因である可能性が高いことがわかった。

研究成果の概要(英文)：I studied anomalies of ionospheric total electron content (TEC) related to earthquakes using GNSS satellites. The quantitative relationship between the magnitude and coseismic TEC pulsation has been established. Preseismic ionospheric changes have been discovered shortly after the 2011 Tohoku-oki earthquake. I collected similar observation cases before over ten large earthquakes with moment magnitudes ( $M_w$ ) 7.8-9.2, and revealed several kinds of  $M_w$  dependences of these anomalies, e.g. precursor times (40 min. for M9 and 20 min. for M8 events), spatial dimensions, and strength of preseismic changes in terms of changing rate of TEC. From 3-D structure of ionospheric anomalies, it was found that the preseismic ionospheric anomalies are due to positive electric charges on the surface.

研究分野：地球惑星物理学

キーワード：GNSS TEC 電離圏擾乱 地震前兆 三次元構造

### 1. 研究開始当初の背景

GNSS (Global Navigation Satellite System、米国の GPS 等) の稠密観測網は、本来の目的である地殻変動の計測に加えて、電離圏を通過する電磁波の分散性を利用した電離圏全電子数 (TEC) の測定にも有用である。筆者は、2011 年 3 月 11 日の東北沖地震によって大気中に励起された波動を電離圏の擾乱として観測する過程で、震源域上空の TEC が地震 40 分前から増え、地震後に回復する現象を見出した。同様の地震直前の TEC 増加は、他の M9 級地震すなわち 2004 年スマトラ・アンダマン地震や 2010 年チリ・マウレ地震の直前にも見られた。この結果 (Heki, GRL 2011) は地震の直前予測に希望をもたらすものとして反響を呼んだ。しかし多くの地球物理学者はこの観測結果に懐疑的であった。例えば、2011 年東北沖地震は磁気嵐の最中に発生したため、地震と関係なくこの時期の TEC は「荒れ」ており、地震直前の上昇はその範囲内という指摘がある。また津波時の海面の下降に伴って高度を下げた電離圏電子が、正イオンと再結合して電子数が減少するという仮説が提唱され、それを受けて津波が作った電子の「穴」と荒れた TEC 時系列が、本当は起こっていない地震前の電子数増加という「まぼろし」を見せたと主張する研究者もいる。

### 2. 研究の目的

本研究では、Mw8.5 以上の巨大地震の直前 (約 40 分前) に震源域上空で観測される下部電離圏の電子密度の上昇について、現実には発生したことを立証した上で、なぜ起こり、どう観測すれば地震の直前予測に役立つのかを研究する。また音波や内部重力波による地震直後の電離圏擾乱を支配する物理法則を徹底解明し、津波早期警戒システムへの応用可能性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

GNSS 衛星による TEC 観測には、衛星の仰角変化に伴う見かけの U 字型変化が伴う。TEC の時間変化を直観的に理解するには、これを除去して鉛直 TEC に変換する必要がある。そこで曖昧性のない疑似距離データとの比較によって、位相データから整数値バイアスを除去する手法を確立し、またハードウェア固有の周波数間バイアスの除去して鉛直 TEC に換算する手法を確立する。

また、地磁気活動による TEC 変化と地震起源の TEC 変化の識別に取り組む。地磁気活動の活発な時期は、大小の TEC 変化が頻発し、地震関連の TEC 変動との識別が課題となる。それらのほとんどは日本列島を秒速 0.3~0.5 km で縦断する顕著な移動性を示し、その起源はオーロラ帯から伝搬してくる内部重力波 (大規模移動性電離圏擾乱) である。一方地震前の TEC 異常は伝搬性を示さない。本研

究では、日本列島の北から南までに均等に分布した十数点の GNSS 受信局の TEC 変化時系列から、自動的に移動性を示す成分を抜き出して、地震に関わる成分のみを取り出す計算手法を実用化する。

さらに地震直前の TEC 上昇の物理過程の解明に取り組む。GNSS 観測による証拠と、既存の学説 (圧縮された火成岩から正の電荷が広がり、地表の帯電が電離圏電子を再配置させる) を取り込んで矛盾のない物理モデルを構築する。

### 4. 研究成果

地震時電離圏擾乱 (図 1) に関して、十分な GNSS データが存在する過去の地震をすべて解析し、地震の Mw と擾乱の背景 TEC に対する相対強度の定量的関係を確立した (図 2)。これによって地震十分後に確実に地震の規模を把握し、津波予測等を可能にする基礎ができた。この成果は Cahyadi and Heki (GJI, 2015) として発表された。

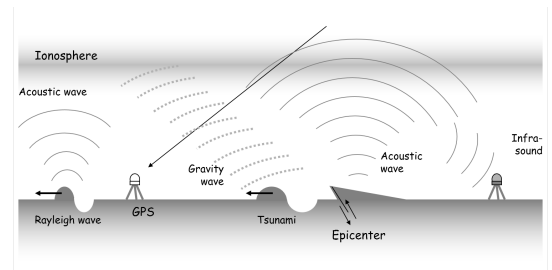


図 1. 地震に伴う大気波動とそれに伴う電離圏擾乱。音波による擾乱は地震約十分後に TEC 変動として現れる。

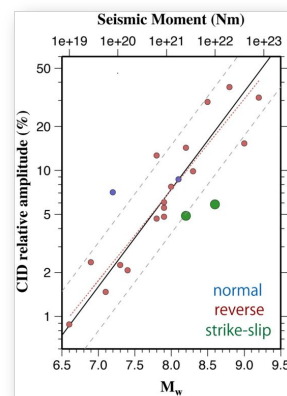


図 2. 20 を超える数の地震で観測された、地震の Mw と、地震時電離圏擾乱の振幅を TEC で正規化した値の関係。緑で示す横ずれ断層ではやや小さな振幅となるが、それ以外では Mw と振幅の対数は線形の関係を示す。

地震前の TEC 異常を直感的に理解するため、斜め TEC を鉛直 TEC に変換するソフトウェアシステムを確立した。それをを用いて表した東北地震直前の TEC 変化は、地震 40 分前に始まるゆっくりとした増加 (前兆) と、地震 10 分後に始まる急激な減少 (回復) であることが理解できる。また地震 40 分前の TEC のトレンドの変化を客観的に検出するために、赤池情報量基準 (AIC) を応用した手法を見出した (図 3)。これらは Heki & Enomoto (JGR, 2015) で発表された。

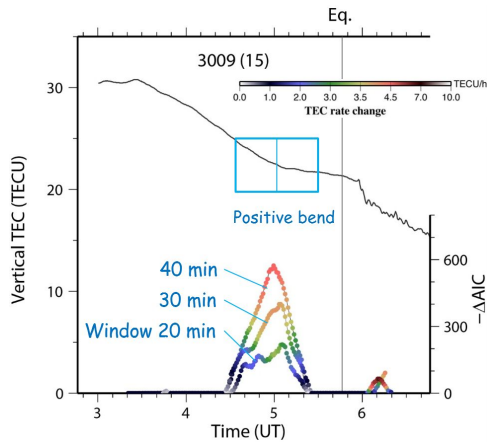


図 3.2011 年東北地震直前の茨城県鹿島局から GPS15 番衛星を見て得られた鉛直 TEC に対して、AIC を用いた手法で折れ曲がりを検出したもの (Heki and Enomoto, 2015)。

さらに、十を超える過去の大地震について GNSS データを取得し、それらの直前に生じる TEC 変化の折れ曲がりに関する一般的な法則性を見出した。それによると折れ曲がりの発生時刻は M9 地震で約 40 分、M8 地震で約 20 分前であることが判明した (図 4)。また折れ曲がりの強さは背景 TEC と  $M_w$  の双方を考慮した簡単な経験式で表すことができることが示された (図 5)。

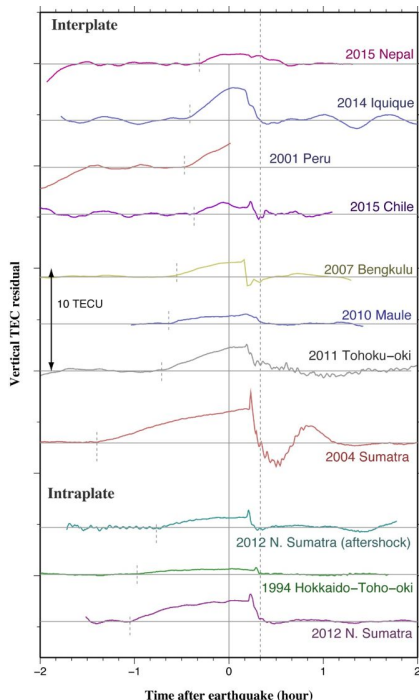


図 4.合計 11 個の地震( $M_w$ 7.8-9.2)の直前の TEC 異常を、基準曲線からのずれとして示したもの(Heki and Enomoto, 2015)。前兆変動の開始が  $M_w$  に依存、また前兆の大きさは  $M_w$  と背景 TEC の双方に依存することがわかった。

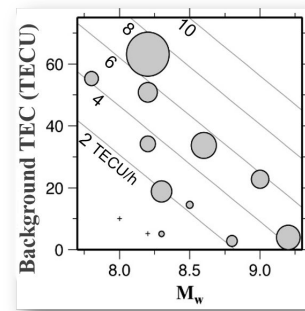


図 5.合計 11 個の地震( $M_w$ 7.8-9.2)の直前の TEC 異常の大きさを円で表し、それが  $M_w$  と背景 TEC の双方に依存することを示したもの (Heki and Enomoto, 2015)。

Kuo et al. (2014)は、地表の正電荷が上向きの電流として電離圏に流れ込んだときに生じる電子の再配置を計算機シミュレーションで求めたが、我々はその結果が予言する正と負の異常の空間構造が実際に生じたことを 2015 年チリで発生した Illapel 地震の直前に生じた TEC 異常から三次元トモグラフィーを用いて示した (He and Heki, GRL 2015) (図 6)。

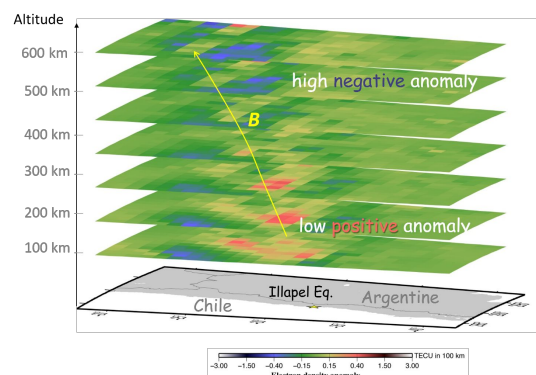


図 6. He and Heki (2016)が求めた 2015 年 Illapel 地震直前の異常の構造を三次元トモグラフィーで推定したもの。低層の正異常と高層の負異常が磁力線に沿って並ぶ様子が見て取れる。

#### 引用文献

Cahyadi, M.N. and K. Heki, Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012:  $M_w$  dependence of the disturbance amplitudes, *Geophys. J. Int.*, 200, 116-129, 2015.

He, L. and K. Heki, Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7287-7293, 2016.

Heki, K. and Y. Enomoto,  $M_w$  dependence of preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 120, 7006-7020, 2015.

Kuo, C. L., L. C. Lee, and J. D. Huba, An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 119, 3189-3205, 2014.

#### 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6件)

1. He, L. and K. Heki, Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7287-7293, 査読有 doi:10.1002/2016GL069863, 2016.
2. Cahyadi, M.N. and K. Heki, Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes, *Geophys. J. Int.*, 200, 116-129, 査読有 doi:10.1093/gji/ggu343, 2015.
3. Kuo, C. L., L. C. Lee, and K. Heki, Preseismic TEC changes for Tohoku-Oki earthquake: Comparisons between simulations and observations, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 26, 63-72, doi:10.3319/TAO.2014.08.19.06(GRT), 査読有 2015.
4. Heki, K. and Y. Enomoto,  $M_w$  dependence of preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 120, 7006-7020, doi:10.1002/2015JA021353, 査読有 2015.
5. Heki, K. and Y. Enomoto, Reply to comment by K. Heki and Y. Enomoto on "Preseismic ionospheric electron enhancements revisited", *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 119, 査読有 doi:10.1002/2014JA020223, 2014.
6. 日置幸介, GNSS データに地震前兆を探す、計測と制御、第 53 巻、第 6 号、pp.469-472, 査読無 2014.

[学会発表](計17件)

1. Heki, K., L. He, and I. N. Muafiry, Preseismic ionospheric anomalies: Current overview and perspective, 2nd Geo-lab and RISH Joint Workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing, Kyoto Univ., Uji, Kyoto, Japan, 7 Mar., 2017 (invited)
2. Heki, K., L. He, and I.N. Muafiry, 3-D structure of ionospheric anomalies immediately before large earthquakes: The 2015 Illapel ( $M_w$ 8.3) and 2016 Kumamoto ( $M_w$ 7.0) cases, AGU Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, USA, 16 Dec., 2016.
3. Heki, K., Ionospheric anomalies immediately before large earthquakes: Observation by GNSS-TEC, ICG+2016, Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai, China, Jul. 28-30, 2016. (Invited)
4. Heki, K. and Liming He, 3-D spatial structure of ionospheric anomalies immediately before large earthquakes, IWEP3, Chiba Univ., Chiba-city, Chiba, Japan, May 27-28, 2016. (Invited)
5. 日置幸介、賀黎明、チリで発生した三つの大地震の直前に起こった電離圏異常の時空間構造、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張メッセ、千葉県千葉市、May 22-26, 2016.

6. Heki, K. and Liming He,  $M_w$  dependence of ionospheric electron enhancement immediately before large earthquakes, American Geophysical Union Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, USA, Dec. 14-18, 2015. (invited)
7. Heki, K., Monitoring Ionospheric Electrons with GNSS for Very Short-term Earthquake Prediction, The 7th International Conference on Geo-information Technologies for Natural Disaster, Dec. 8-10, UAE Univ., Al Ain, UAE, 2015. (invited)
8. 日置幸介、大地震の直前に起こる電離圏電子数の変動：学術雑誌上の討論、関西サイエンスフォーラム公開講演会「地震・火山噴火予知に挑む」、リーガロイヤル NCB、大阪府大阪市、Nov. 19, 2015.
9. 日置幸介、榎本祐嗣、地震直前の電離圏電子数上昇の  $M_w$  依存性、地震学会秋季講演会、神戸国際会議場、兵庫県神戸市、Oct.26-28, 2015.
10. 日置幸介、榎本祐嗣、地震直前の電離圏電子数上昇の  $M_w$  依存性、測地学会秋季講演会、九州大学西新プラザ、福岡県福岡市、Oct.14-16, 2015.
11. Heki, K. and Y. Enomoto, Ionospheric electron enhancement 20-80 min. before large earthquakes: Examples from 8 earthquakes with  $M_w$  8.2 -9.2, The 26th General Assembly of IUGG, International Convention Center, Prague, Czech, Jun.23-Jul.2, 2015.
12. Heki, K., and Y. Enomoto,  $M_w$  dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, International Workshop on Earthquake Preparation Process 2015 - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (IWEP2), Chiba Univ, Chiba-city, Chiba, May 30, 2015.
13. 日置幸介、榎本祐嗣、2011 年東北沖地震発生 40 分前に始まった GPS-TEC と地磁気偏角の前兆変動について、地球惑星関連学会連合大会、幕張メッセ、千葉県千葉市、May. 24-29, 2015.
14. 日置幸介、2015 年ネパール地震の約 20 分前に発生した電離圏全電子数の上昇、地球惑星関連学会連合大会、幕張メッセ、千葉県千葉市、May. 24-29, 2015.
15. Heki, K., Preseismic ionospheric electron enhancements: A few remaining problems, Asia Oceania Geosci. Soc. Meeting, ロイトンホテル札幌、北海道札幌市、Jul.28-Aug.1, 2014.
16. Heki, K., Some problems in preseismic ionospheric electron enhancements, Geodesy for Earthquakes and Natural Hazards (GENAH) 2014, 松島大観荘、宮城県松島町、Jul.22-26, 2014
17. 日置幸介、再び地震直前の電離圏電子数上昇について：移動性の識別と受信機周波数間バイアスの推定、日本地球惑星

科学連合大会、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市、Apr.28-May 2, 2014.

〔図書〕(計1件)

1. Tanimoto, T., K. Heki, and J. Artru-Lambin, Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. in Treatise on Geophysics, 2nd edition, Vol 4., edited by Gerald Schubert, Oxford: Elsevier, pp. 421-443, 2015.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日置幸介 (HEKI, Kosuke)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30280564

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし