

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04120

研究課題名（和文）QZSS-TECの地震学・火山学・超高層物理学への応用

研究課題名（英文）Application of QZSS-TEC for seismology, volcanology, and upper atmospheric physics

研究代表者

日置 幸介（Heki, Kosuke）

北海道大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：30280564

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：半日で地球を周回する従来の測位衛星と異なり、天頂に一定時間とどまる準天頂軌道衛星と静止軌道衛星から成るQZSSは、衛星の見かけの移動に伴う変化がほとんど無いため、電離圏擾乱の観測に適している。この研究ではQZSSを利用した電離圏全電子数（TEC）の観測によって、最近発生した地震や火山噴火に伴う電離圏擾乱を解析した。その結果、2021年福徳岡の場の海底火山噴火に伴って励起された四種類の周波数を持つ大気モードを検出した。また2022年のトンガ海底火山の噴火によるラム波が地球を複数回周回したことに伴って、日本上空の電離圏で生じた擾乱を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

米国のGPSに代表される従来の衛星測位システムに加えて、わが国独自の測位衛星システムとして打ち上げられた準天頂衛星システム（QZSS）の、地球物理学的な有用性に注目した初めての研究であり、日本の科学行政に関わる社会的意義がある。またQZSS-TEC法を用いると衛星の見かけの動きに伴う変化に邪魔されずに純粋に電離圏の時間変化に注目できるが、その有用性が火山噴火に伴う大気モードの観測に明確に発揮されたこと。これは研究期間中に二度の大規模な海底火山の噴火が生じたという偶然に味方された側面が大きいが、火山噴火による大気擾乱のダイナミクスの一環を明らかにした学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Unlike GNSS (Global Navigation Satellite System) satellites with conventional half-day period orbits, QZSS is composed of 3 satellites having quasi-zenith orbits, staying around local zenith for 1/3 day, and 1 geostationary orbit satellite. They are useful for studying ionospheric disturbances because their data do not suffer from changes due to apparent movement of satellites in the sky. Here, I studied ionospheric disturbances in terms of changes in ionospheric total electron contents (TEC) associated with recent earthquakes and volcanic eruptions using QZSS. Remarkable findings include the detection of atmospheric modes with four different frequencies excited by the 2021 eruption of the Fukutoku-Okanoba submarine volcano. I also clarified the disturbances of ionosphere above Japanese Islands caused by multiple passages of the Lamb wave by the 2022 eruption of the Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai submarine volcano.

研究分野：地球物理学

キーワード：準天頂衛星 GNSS-TEC 電離圏擾乱 火山噴火 大気モード 福徳岡の場 トンガ海底火山

## 1. 研究開始当初の背景

全球測位衛星(GNSS, Global Navigation Satellite System)から来る二つの周波数の搬送波位相の差から電離圏全電子数(Total Electron Content, TEC)を求めることができる。一方 GNSS 連続観測網が 1990 年代から地殻変動の計測のために急速に展開され始めた。それらの観測網を利用した GNSS-TEC 法を用いた電離圏擾乱の観測は昨今広く行われるようになった。我が国でも、国土地理院が展開する GEONET (GNSS Earth Observation Network) の千点を超える連続観測局のデータを利用した TEC 観測は、電離圏で生じる様々な現象を明らかにしてきた。

しかし、GPS に代表される従来の GNSS 衛星は半日で地球を一周する軌道を採用しているため、地上から見ると、衛星は地平線から昇って数時間後に沈むというサイクルを繰り返す。そのため衛星と地上の受信機を結ぶ視線が電離圏を貫く角度が変化し、たとえ電離圏の状態が変化していなくても大きな振幅を持つ U 字型の変化を見せる。また視線は電離圏に対して動くため、時間変化と空間変化の合計が合わさったものが観測されることになる。そのため振幅の小さな擾乱の信号をノイズから見分けることが困難であった。

日本が 2010 年代に打ち上げた地域的な測位衛星である QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) は準天頂軌道と静止軌道を持つ衛星から成り、前者の衛星は約 8 時間日本の天頂近くにとどまり、後者は 24 時間南の空に方向が固定される。そのため QZSS 衛星を用いて計測した TEC は U 字型の見かけの変化がなく、かつ電離圏の空間変化の影響をあまり受けない。そのため電離圏のわずかな擾乱を研究するために適している。本研究は QZSS が 4 機になり、常時一機の衛星が天頂に見える体制になった時点で開始された。

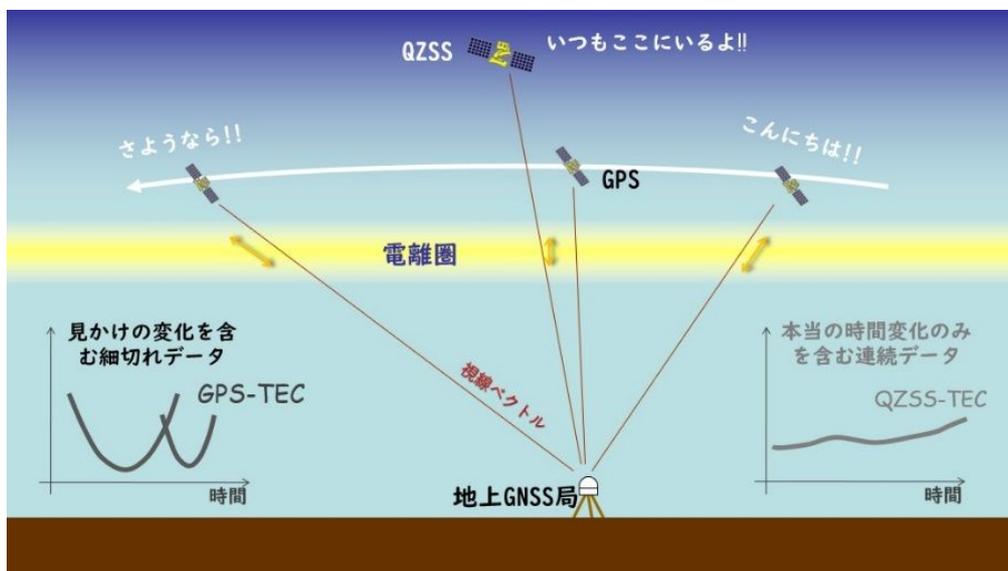


図1. 従来の軌道を持つ GNSS 衛星と QZSS 衛星での電離圏全電子数の挙動の比較。後者では視線が電離圏の同じ場所を貫くため、時間変化と空間変化の識別が容易である。

## 2. 研究の目的

GNSS-TEC による電離圏擾乱の観測では、太陽 地球系に起因するもの（磁気嵐に伴う大規模移動性擾乱など）や、高層風の状態変化によるもの（スプラディック E など）など超高層物理学な研究対象を当初多く扱ってきた。2000 年前後からそれらに加え、大規模な地震や火山噴火が励起する大気波動（主に音波と内部重力波）が電離圏高度に達して作る電子密度の揺らぎを GNSS-TEC 法で観測する研究手法が盛んになってきた。本研究では衛星の移動による見かけの変化のない QZSS-TEC 観測によって、従来の GNSS-TEC 研究の対象である様々な移動性、非移動性の擾乱を再検討し、その物理を明らかにするという目的で開始した。

火山噴火には様々なタイプがあるが、プリニー式連続噴火（2021 年 8 月の福徳岡の場の噴火など）では大気の固有振動が励起され、TEC の振動が観測される。また爆発的なブルカノ式噴火（2004 年 9 月の浅間山噴火など）では音波パルスが上方に伝搬し、N 字型の TEC 変化をもたらす。本研究の研究期間である 2020-2024 年という期間はたまたま大きな火山噴火が複数回起こり、火山噴火に伴う電離圏擾乱の研究は主な目的の一つとなった。また 2024 年 1 月に発生した能登半島地震も様々な特徴を持つ電離圏擾乱を引き起こした。QZSS-TEC 観測データは従来の GNSS-TEC 観測ではわからなかったいくつかの現象を研究するという新たな研究の目的を生んだ。

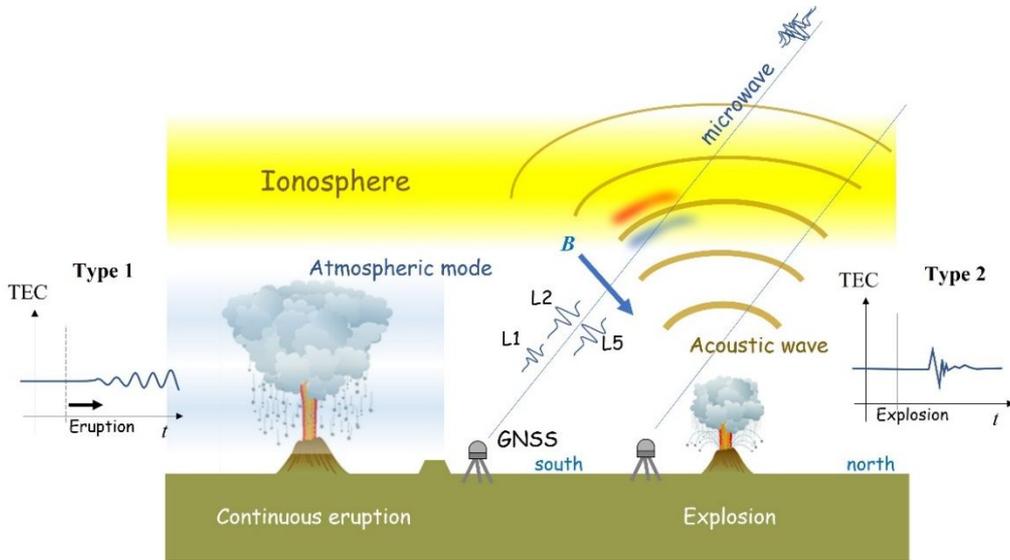


図2. 研究の主要な目的の一つである、火山噴火に伴う電離圏擾乱の模式図。プリニー式連続噴火では大気固有振動が励起され、ブルカノ式の爆発的噴火では音波パルスが励起される。いずれの場合も電離圏擾乱を伴う。

### 3. 研究の方法

GNSS-TEC法は、従来型のGNSSの代表である米国のGPS(Global Positioning System)を用いて発展してきた。まず日本のQZSSだけでなく、ロシアのGLONASS衛星、欧州のGalileo衛星や中国の北斗衛星(BDS)を用いてTECを算出するためのソフトウェアの整備をする必要があった。本研究ではそれらの異なるGNSSの特性に合わせて、既存のGPSを対象としたソフトウェアを基にして、利用可能な他GNSSからもTEC情報を抽出するプログラム群を作り上げた。

次にQZSS衛星の4機体制が確立した以後の、様々な電離圏擾乱現象に注目し、必要なQZSS生データを手入れし、TEC変化を解析した。それらの現象に含まれるものとして、2021年8月の福徳岡の場海底火山のプリニー式噴火、2022年1月のフンガトンガーフンガハアパイ海底火山の大噴火、2024年1月の能登半島地震などが挙げられる。これらの、多様な電離圏擾乱を伴う自然現象について研究を行い、論文として発表した。

### 4. 研究成果

QZSS-TEC観測による顕著な研究成果をイベントごとに概観する。

#### (1) 2021年福徳岡の場海底火山の噴火に伴って観測された大気モード

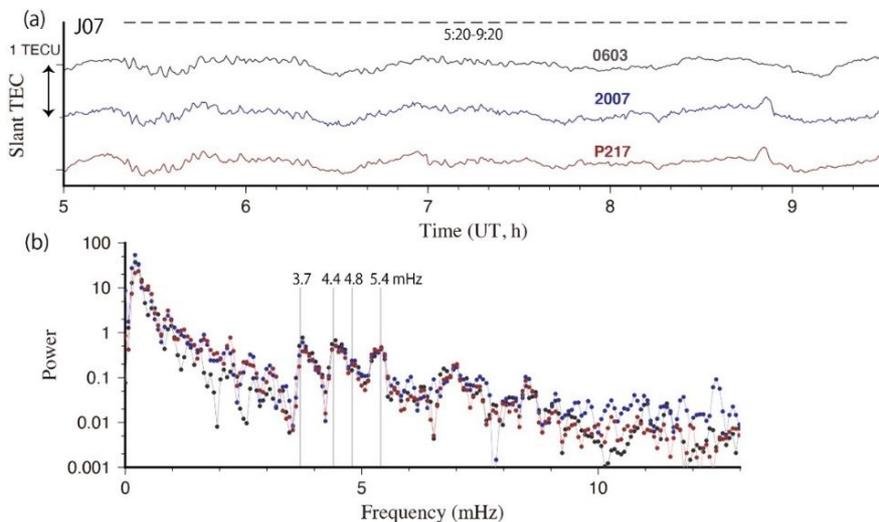


図3 2021年8月の福徳岡の場海底火山の噴火開始時のTEC変化をQZSS衛星を用いて小笠原諸島のGNSS局から観測したものの、時系列(a)と周波数スペクトル解析(b)を示す。

大規模なプリニー式噴火はしばしば大気固有振動である 3.7 mHz と 4.4 mHz の振動を励起することが知られているが、本研究では福徳岡の場の上空の電離圏を小笠原諸島の GNSS 点から QZSS 衛星データを利用して解析することにより、これらの周波数の成分を見出した。また連続した長時間の TEC 時系列が得られる QZSS の特性を利用することによって、従来火山噴火では観測されなかった高調波成分である 4.8 mHz や 5.4 mHz の成分も初めて見出された(図3)。これらが報告された EPS 誌の論文(Heki & Fujimoto, 2022)は 2022 年度の EPS 誌のハイライト論文に選定された。

#### 参考文献

Heki, K. and T. Fujimoto, Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS, Earth Planets Space, 74, 27, doi:10.1186/s40623-022-01587-5, 2022.

#### (2) 2022 年トンガ海底火山の噴火に伴って観測された Lamb 波が励起した電離圏擾乱

トンガにある Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai (HTHH)海底火山が 2022 年二月に大噴火を起こし、わが国に原因不明の津波が押し寄せるなど、従来の知識では説明しきれない様々な現象を引き起こした。なかでも大気境界波の一種であるラム波が地球を何周もしたことが気圧計網で観測された。私は日本列島を通過するラム波が作り出す電離圏擾乱を GEONET の QZSS データから得られた TEC 情報から研究した(図4)。EPS 誌に掲載された論文(Heki, 2022)は、出版から二年しか経過していないのに数十回すでに引用されるヒット論文となった。

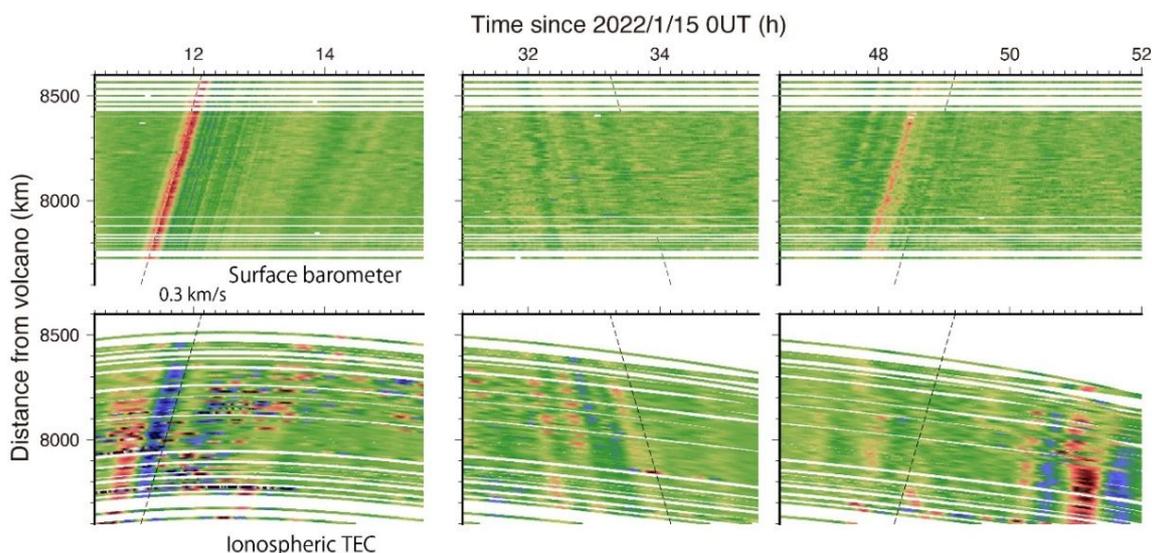


図4 日本列島を東南から西北に抜けたラム波を気圧計(左上)とQZSS-TEC(左下)の両方で検出して比較したもの。Long-path を通って日本を西北から東南に伝搬した第二波、第一波が地球をもう一周してきた第三波による擾乱を中央および右側にしめす。

#### 参考文献

Heki, K., Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga-Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan, Earth, Planets and Space, 74:112, doi:10.1186/s40623-022-01674-7, 2022

#### (3) 2022 年 Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai 海底火山の噴火に伴って励起した大気モードによる電離圏擾乱

トンガの HTHH 海底火山の 2022 年噴火は、福徳岡の場の事例と同様に大気モードを励起し、それによる電離圏擾乱(TEC の調和振動)も近傍の GNSS 局から観測された。ただし福徳岡の場(四種類の周波数が検出された)と違い 3.7 mHz の単一周波数の振動であった。本研究は GJI 誌に Heki (2024)として掲載された。本事例には特筆すべき長所がいくつかある。例えば、この噴火では大気モードが固体地球の固有振動  ${}_0S_{27}$  を次二的に励起したことが知られるが、その固体地球の固有振動の振幅が大きい地域で TEC の振動も大きいことが初めて観測された(図5)。これは大気モードが固体地球のモードを励起するだけでなく、逆に後者が前者を強めて長時間持続させる作用もあったことを示唆する。

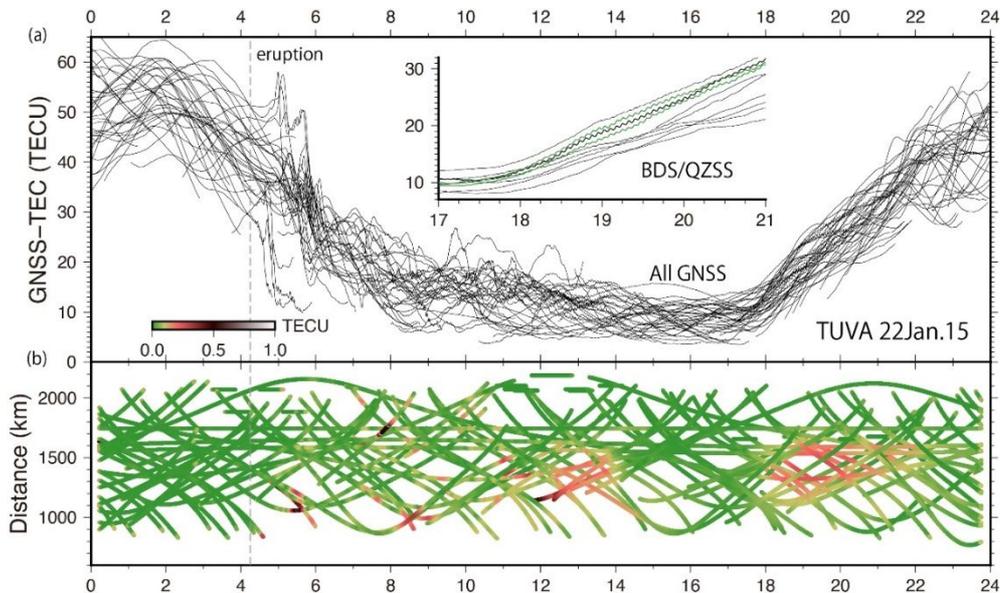


図5 トンガのHTHH 海底火山が励起した大気モードをツバル GNSS 局から様々な衛星を用いて観測したもの。(a)が TEC の時系列、(b)が 3.7 mHz の振動が強い部分を赤で示し、縦軸に火山からの距離を取ったもの。距離が千数百キロのところでは振幅が最大となる。

参考文献

Heki, K., Atmospheric resonant oscillations by the 2022 January 15 eruption of the Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano from GNSS-TEC observations, *Geophys. J. Int.*, 236, 1840-1847, doi:10.1093/gji/ggae023, 2024.

(4) 2024 年能登半島地震に伴って励起した音波による電離圏擾乱

今年の元旦に発生した Mw7.5 の能登半島地震の隆起域で発生した音波が上空に伝搬して作った電離圏擾乱が QZSS をはじめとする GNSS-TEC 法で観測された。複数音波源で励起された複雑な擾乱波形を解説した論文が Heki (2024)として本プロジェクト終了後に掲載された。

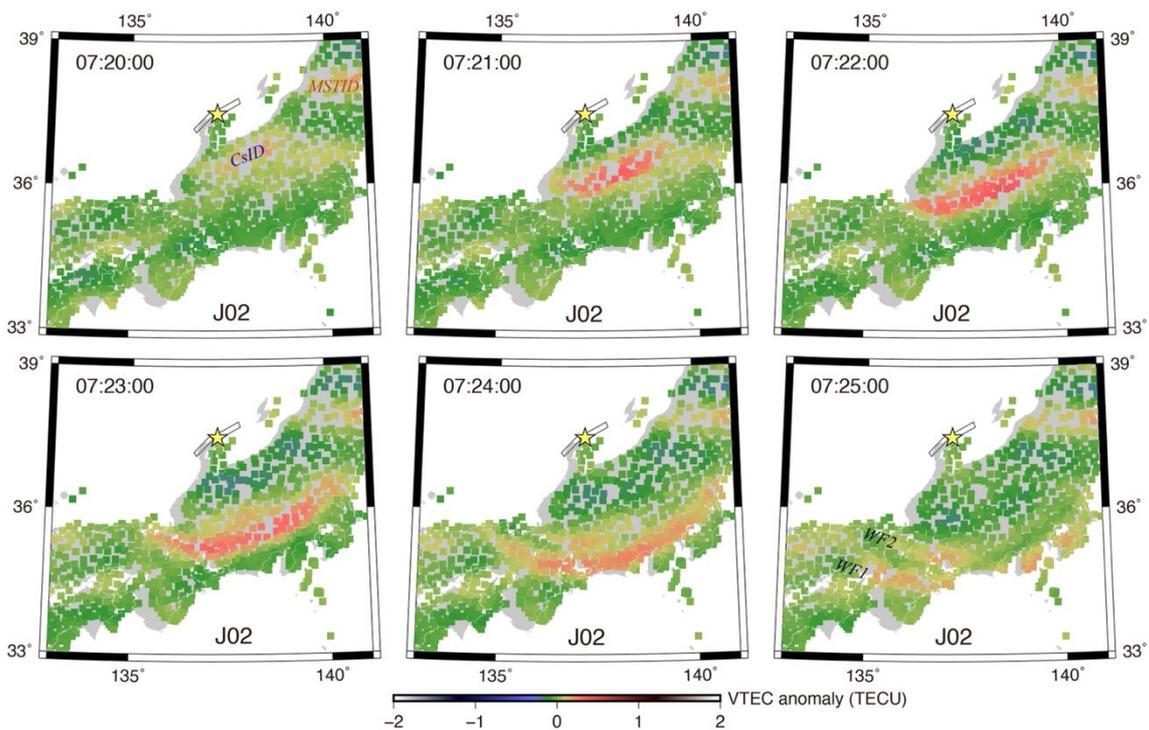


図6 QZSS 二番衛星で観測された、2024 年 1/1 の能登半島地震後の電離圏擾乱が音波で伝搬するようす。

参考文献

Heki, K., Decoding multiple source signatures in coseismic ionospheric disturbances of the 2024 January Mw7.5 Noto-Peninsula earthquake, Central Japan, *Earth Planet. Sci., Lett.*, 640, 118796, doi:10.1016/j.epsl.2024.11879, 2024.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Heki Kosuke, Fujimoto Tatsuya	4. 巻 74
2. 論文標題 Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01587-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Heki Kosuke	4. 巻 74
2. 論文標題 Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01674-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Muafiry Ihsan Naufal, Meilano Irwan, Heki Kosuke, Wijaya Dudy D., Nugraha Kris Adi	4. 巻 13
2. 論文標題 Ionospheric Disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption above Indonesia from GNSS-TEC Observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 1615 ~ 1615
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atmos13101615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Heki Kosuke, Bagiya Mala S., Takasaka Yuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Slow Fault Slip Signatures in Coseismic Ionospheric Disturbances	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL101064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Muafiry Ihsan Naufal, Fitriah Rahma, Wahyudi Ilham, Nursyaifullah Iqbal, Heki Kosuke	4. 巻 18
2. 論文標題 Struktur 3D dari Gangguan Ionosfer saat Gempa (CID) Magnitudo 9.0 di Tohoku-Oki Jepang Tahun 2011 Menggunakan Data GPS-TEC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geoid	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12962/j24423998.v18i1.13254	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Heki, K and Fujimoto, T	4. 巻 74
2. 論文標題 Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Planets and Space	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-022-01587-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kundu, B., B. Senapati, A. Matsushita, K. Heki	4. 巻 11
2. 論文標題 Atmospheric wave energy of the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-82355-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Muafiry, I. N. and K. Heki	4. 巻 125
2. 論文標題 3-D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Space Phys.	6. 最初と最後の頁 JA027993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020/JA027993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cahyadi, M. N., R. W. Rahayu, K. Heki, Y. Nakashima	4. 巻 405
2. 論文標題 Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Volcanol. Geothermal Res.	6. 最初と最後の頁 107047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2020.107047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Heki, K.
2. 発表標題 Recent topics in ionospheric disturbances induced by earthquakes
3. 学会等名 International Conf. on Advances in Sci. of the Earth: Relevance to the Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Heki, K. and I. N. Muafiry
2. 発表標題 Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Tonga eruption: Comparison of QZSS-TEC observations in Japan with GPS-TEC observations in Indonesia
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Heki, K, Matsuhita, T, and Fujimoto, T
2. 発表標題 Ionospheric studies with Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Heki, K
2. 発表標題 Ionospheric anomalies immediately before large earthquakes: Review and perspective
3. 学会等名 IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Heki, K and Takasaka Y
2. 発表標題 Slow earthquake signatures in the ratio between acoustic and internal gravity wave amplitudes in coseismic ionospheric disturbances
3. 学会等名 JPGU
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Heki, K and Takasaka Y
2. 発表標題 Slow earthquake signatures in the ratio between AW and IGW amplitudes in coseismic ionospheric disturbances
3. 学会等名 EGU General Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本達也、日置幸介
2. 発表標題 マルチGNSS-TEC法によるSporadic E層の観測とL5の活用
3. 学会等名 日本測地学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Heki, K., S. Arief, W. Zhan
2. 発表標題 Integrated space geodetic study of the 2019 Typhoon Habigis: Signatures in troposphere, lithosphere, and ionosphere
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takasaka, Y. and K. Heki
2. 発表標題 Ionospheric TEC changes immediately before and after the 2010 Mentawai earthquake, Indonesia
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muafiry, I. N. and K. Heki
2. 発表標題 3D-tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インド	Indian Institute of Geomagnetism			
インド	National Institute of Technology			
インドネシア	ITS Surabaya			