

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05669

研究課題名(和文) 磁気リップル現象の生成機構解明と短周期大気波動の全球的モニタリングへの応用

研究課題名(英文) Generation mechanism of magnetic ripples and their application to monitoring atmospheric waves

研究代表者

家森 俊彦 (Iyemori, Toshihiko)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：40144315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：低高度磁場観測衛星でほぼ常時観測される振幅数nT以下の微小な磁場の揺らぎ(磁気リップル)の成因と、当研究で新たに発見した低緯度昼間側電離圏F層に頻繁に出現する電子密度の波状構造(振幅数%以下、波長100km-300km程度)の成因、およびそれらの間の関連を、ESAが2013年に打ち上げた3機のSwarm衛星により得られた磁場および電子密度データと、タイ・ビマーイでの微気圧変動、GPS-TECおよび降雨量等の地上観測データを用いて調べた。個別のイベント解析および、JAXS/GSMaPを用いた全球的な降雨分布との比較からは、降雨との関連を強く示唆する結果を得たが、明確な結論には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低高度極軌道衛星で常時観測される磁気リップルは下層大気から電離圏に伝搬する大気波動が原因であると推測されるが、対応する気象現象や波動のモードについては明確な結論が得られていない。また、当研究により低緯度昼間側の電離圏F層に、軌道に沿うスケールが約100km-300kmの波状構造が頻繁に出現することが明らかになった。これら現象は、振幅および空間スケールが小さいが、下層大気で生成された音波モードの大気波動が駆動している可能性が高く、内部重力波に比較して研究が比較的少なかった音波モードの大気波動が電離圏プラズマに及ぼす影響、より一般的には中性大気波動と部分電離気体との相互作用という観点で意義がある。

研究成果の概要(英文)：The relationship between two small scale phenomena of magnetic and electron density variations with spatial scale shorter than 100-300km, both of which are observed in low-latitude ionospheric F-region on the dayside, and their source were investigated by using the ESA/Swarm satellite data (vector magnetic field and electron density) and ground based micro-barometric, GPS-TEC, rainfall data observed at an unmanned observatory in Phimai/Thailand. It was suggested a mutual relationship among the two ionospheric phenomena and rainfall from some case studies. The averaged global distribution of the two ionospheric phenomena and their comparison with global rainfall distribution obtained from JAXA/GSMaP data also suggest the possible relation with rainfall. However, the results were still not conclusive enough and more analysis is necessary.

研究分野：太陽地球系物理学

キーワード：電離圏電子密度 磁気リップル 重力音波 音波共鳴 電離層ダイナモ 赤道電子密度異常 降雨 微気圧変動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 大気レーダーや GPS-TEC(全電子数)あるいは高感度大気光撮像装置など、観測技術の発展により、下層大気起源の波動、特に内部重力波と呼ばれる 10 分またはそれよりも長い周期の大気重力波が超高層に様々な物理現象を引き起こしていることが詳細に調べられてきた。一方、1991 年のピナツボ火山噴火や 2004 年のスマトラ地震以降、数分周期の音波モードの波も超高層に様々な影響を及ぼしていることが明らかになった (e.g., Iyemori et al., 2005; Saito et al., 2011)。例えば、2004 年のスマトラ地震発生直後にタイ東部の Phimai (PHI) で観測された周期約 220 秒の地磁気脈動は、下層大気から電離層に伝搬した周期 4 分前後の音波が電離層ダイナモ電流を発生させ、それが発散して沿磁力線電流になり、図 1 のような沿磁力線電流系を形成したと推測された (Iyemori et al., 2005)。しかし、音波モードの波は、内部重力波モードに比較して、一般的に検出が難しく、そのため、観測事実の多くは大きな地震や火山噴火などの場合の地上観測に限られてきた。

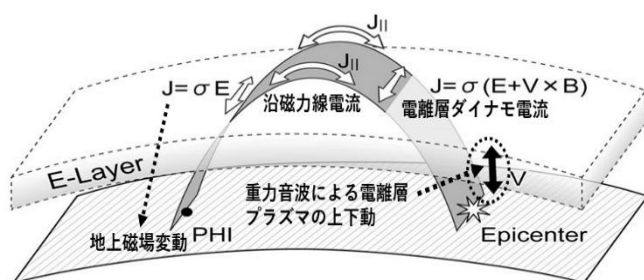


図 1 音波モードの大気波動で生成される沿磁力線電流の模式図

(2) 一方、精密磁場観測衛星 CHAMP や Swarm の観測データから、図 1 のような沿磁力線電流がほぼ常時存在し、その成因は下層大気からの音波モードの波による電離層ダイナモ電流の発散であることが明らかになってきた (Nakanishi et al., 2014; Iyemori et al., 2015)。しかし、観測される微細な沿磁力線電流構造の各々に、下層大気のような現象が対応しているかは、台風や前線に伴う降雨領域などとは統計的にある程度対応するものの、必ずしも一対一対応は見られない。すなわち、従来の方法では観測困難な大気現象が磁場変動として見えている可能性がある。他方、気象衛星による雲の写真では磁力線の両共役点付近で晴天領域であっても、衛星による磁場観測には変動が現れている。すなわち、人工衛星による精密磁場観測データを解析することにより、従来の方法では困難な、下層大気から上空に伝搬した音波のグローバルな分布や、更には晴天乱気流の領域を推定できる可能性も示している。

(3) 磁気リップル現象の出現形態はほぼ明らかになったが、生成メカニズムは未だ推測の域を出ない。Zettergren and Snively (JGR 2015) による数値シミュレーションが音波による沿磁力線電流の生成に成功した程度である。

### 2. 研究の目的

そこで、以下の目的を中心にして研究を開始した。

- (1) SWARM 衛星による磁場および電子密度観測データと、気象データや微気圧変動あるいは GPS-TEC(Total Electron Content)変動などの観測データとの対応関係を詳細に調査することにより、原因となる気象現象あるいは大気状態を特定する。
- (2) 大気波動の振幅・周期・分布を推定する。

### 3. 研究の方法

以下の方法で研究を行った。

- (1) 低高度磁場観測衛星 Swarm により得られた磁場と電子密度を大容量 NAS にすべてダウンロードする。
- (2) 周期が数十秒以下の微細な変動を、磁場および電子密度データから同一の high-pass フィルターで取り出し、解析用のデータベースを作成する。
- (3) 下層大気で生成される波動、特に音波モードの発生領域を推測するために、降雨を推測手段として用いることにする。そのために、タイ・ピマライとトカラ列島・中之島で行ってきた微気圧および高時間分解能降雨観測を継続するとともにデータベース化し解析に用いる。
- (4) タイ・ピマライで観測される熱帯スコール時の上空の GPS-TEC 変動を調べる。
- (5) 2019 年から JAXA が公開したグローバル降水マップ(GSMaP)の 1 時間毎の観測値を 2014 年 3 月分から全てダウンロードし、ローカルタイムおよび季節毎に平均した降水マップを作成して、磁気リップルおよび電子密度のグローバル分布と比較する。

#### 4. 研究成果

(1) Swarm衛星による磁場観測データを解析することにより、CHAMP衛星の磁場観測で得られた磁気リップルに関する研究(e.g., Nakanishi et al., 2014)と同じ結果が得られることを確認した。また、台風上空に磁気リップルが発生していることが示された。(Aoyama et al., EPS, 2017)

(2) Swarm衛星の電子密度観測データに、磁気リップル検出に用いたのと同じフィルターを適用したところ、昼間側の低緯度に磁気リップルと同程度かあるいは少し波長の長い電子密度の波状構造がほとんど常時観測されることを見いだした。

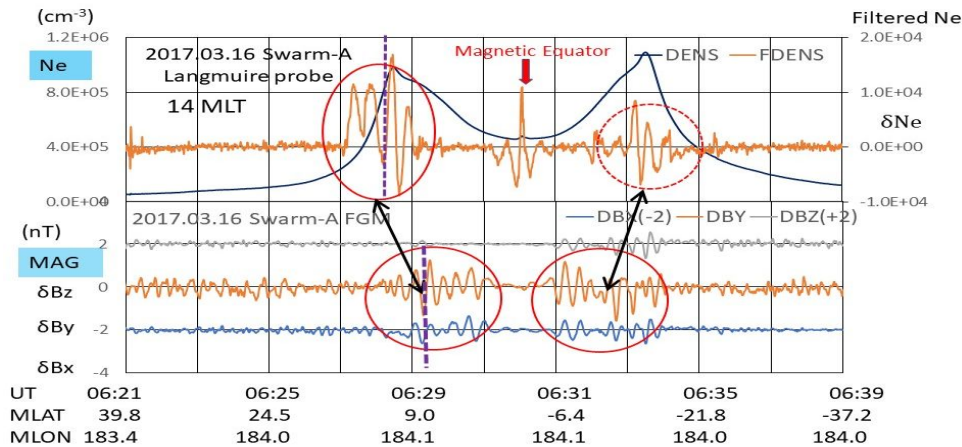


図2 Swarm-Aが観測した電子密度および電子密度波状構造(上の2本のトレース)と磁気リップル(下3本のトレース)。

(3) しかし、衛星によるwakeの影響の可能性があり、明らかに自然現象由来ではない変動が、約1/3の電子密度観測データに含まれることがわかり、全データをプロットして目視により、そのような日のリストを作成し、統計的解析から除外した。

(4) 磁気リップルおよび電子密度波状構造の振幅を、季節およびLocal Timeで分類して、それらのグローバルな統計的分布を求め比較した(図3)。その結果、昼間側に関しては、季節変化は類似点が多少存在する。すなわち、北半球の夏の期間は、東南アジアからバングラデシュの領域の磁気リップルおよび電子密度構造の振幅が大きく、北半球の冬の期間は、東太平洋あるいは南太平洋域の振幅が大きい。

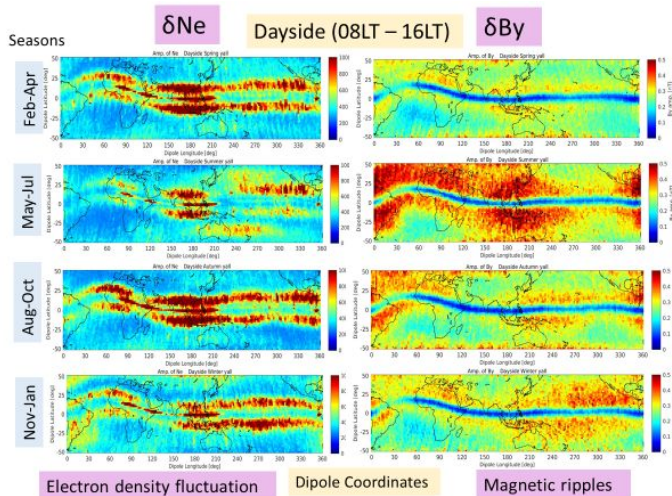


図3 電子密度波状構造と磁気リップルの振幅分布

(5) 昼間側電子密度の波状構造は、電子密度の赤道異常帯の密度が高い領域で振幅が大きい。電子密度の分布と比較すると、対応が見られるが、対応しない領域も存在する。(図4)

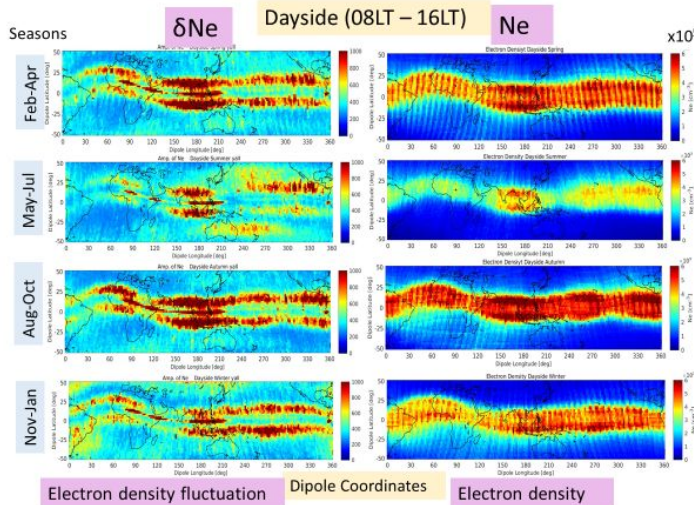


図4 電子密度波状構造の振幅 (  $\delta Ne$  )と電子密度( $Ne$ )の比較

(6) タイ・ピマイで取得した微気圧、磁場、降雨およびGPS-TEC データから、スコール発生時の微気圧変動と電離圏TECおよび磁場変動の関連を調べた。スペクトルを比較したところ、同じ周期にピークをもつイベントが見つかり、スコールによる微気圧変動が上空に伝搬し、電離圏の電子密度を変動させると共に、地上で微小な磁場変動が観測されるという解釈を支持する。この結果は、2018年5月の日本地球惑星科学連合(JpGU)で発表した。

(7) GSMaPデータを、季節およびLocal Timeで分類し、グローバルな統計的分布を求めた。その結果、大陸の内陸部を除いては、昼間と夜間でそれほど大きな差はないこと、季節によって大きく異なることが示された。特に、北半球の秋と春では、両半球とも大きく異なる。

(8) GSMaPデータから求めたグローバルな降水分布と、磁気リップルおよび電子密度のグローバル分布を北半球の夏の期間と冬の期間を比較したところ、図5に示すように、降水の多い領域と電子密度変動の振幅が大きい領域に対応関係のある領域の存在が示された。

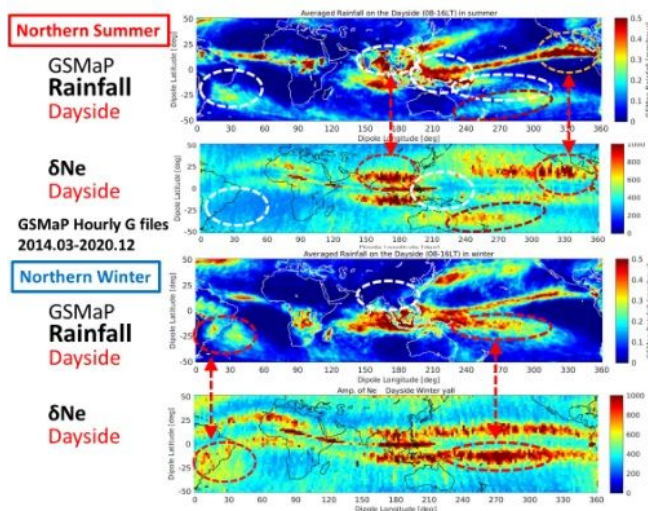


図5 降水分布と電子密度波状構造分布の比較

(9) 電離圏の状態は比較的似ていると予想される北半球の秋と春の電子密度波状構造の振幅分布と、降水分布を、それぞれ秋と春の差を取って比較したところ、電子密度振幅分布と降水分布の間に比較的良く相関する領域が存在する(図6)。ただし、相関しない領域も存在する。

Comparison of the differences between Autumn and Spring

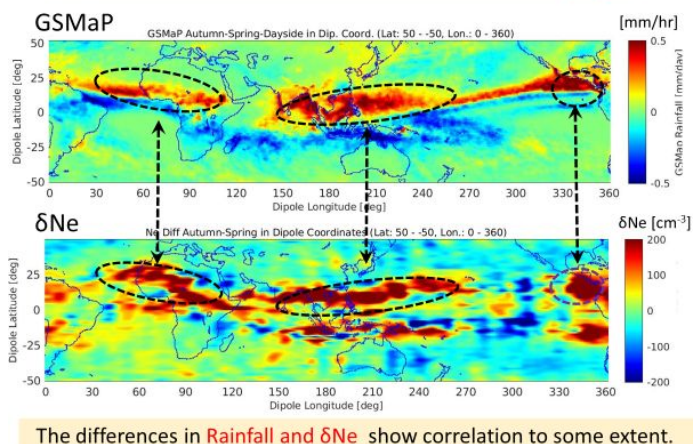


図6 北半球の秋の期間の分布から春の期間の分布をそれぞれ差し引いた分布。

The differences in Rainfall and  $\delta Ne$  show correlation to some extent.

(10)地上微気圧観測データを解析し、重力音波モードと内部重力波の発生状況とそれらのパワースペクトルを統計的に解析した。図7は、トカラ列島中之島で観測した磁場変動と微気圧変動のパワースペクトルのピーク出現頻度を地磁気活動度の比較的低い期間について統計的に求めた結果で、微気圧変動と地磁気D成分の分布がよく似た変動をしていることがわかる。これは、地震などの特殊な期間だけではなく、普段の状況で下層大気による音波共鳴現象が発生していることを示している。結果はH29年8月末の南アフリカ・ケープタウンで開催されたIAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assemblyで発表した。また、H29年12月に開催されたAGU Fall Meeting 2017でも発表した。

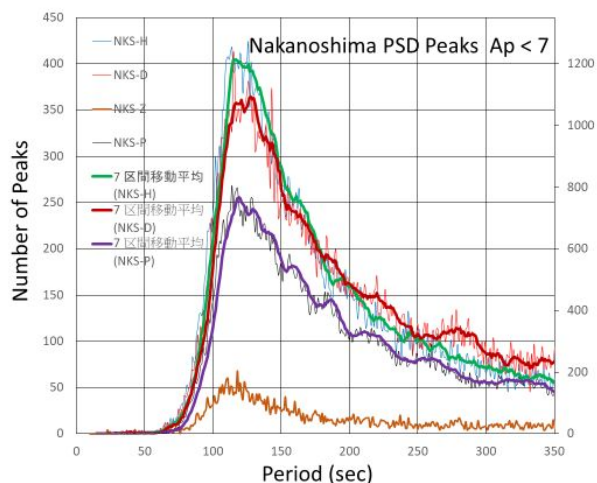


図7 パワースペクトルのピーク出現頻度。理論的に計算される音波共鳴周期(例えば、192, 228, 276 sec)付近に出現頻度のピークが存在する傾向がある。

上記の(2),(4),(5),(7),(8),(9)については、2017年から2021年までに開催されたSGEPSS秋期大会およびJpGU大会で発表した。

[References]

Aoyama et al, 2017, DOI: 10.1186/s40623-017-0679-2  
 Iyemori et al., 2005, DOI: 10.1029/2005GL024083  
 Nakanishi et al.,2014, DOI: 10.1186/1880-5981-66-40  
 Saito et al., 2011, DOI: 10.5047/eps.2011.06.034  
 Zettergren and Snively,2015, DOI: 10.1002/2015JA021116

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Yokoyama, S. Taguchi, T. Iyemori and K. Hosokawa	4. 巻 -
2. 論文標題 The quasi-persistent feature of highly structured field-aligned currents in the 2 duskside auroral oval: Conjugate observation via Swarm satellites and a ground all sky imager	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res.	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） 10.1029/2019JA027594	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 T. Aoyama, T. Iyemori, and K. Nakanishi	4. 巻 69
2. 論文標題 Magnetic ripples observed by Swarm satellites and their enhancement during typhoon activity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 89-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-017-0679-2	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Toshihiko Iyemori, Tadashi Aoyama, Akiyasu Yamada, Yoko Odagi, Kornyanat Hozumi, Yoshihiro Yokoyama, Kunihiro Nakanishi, Yasuharu Sano, Thanawat Jarupongsakul, Vijak Pangsapa, Masato Iguchi
2. 発表標題 Vertical propagation of acoustic waves which generate magnetic ripples and electron density fluctuation as observed by Swarm satellites caused by lower atmospheric disturbances
3. 学会等名 European Geophysical Union (EGU) General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiko IYEMORI, Tadashi AOYAMA, Yoshihiro YOKOYAMA
2. 発表標題 A Morphological Study on the Relationship between Electron Density Fluctuations and Magnetic Fluctuations Observed by Low Altitude Satellites in Low and Middle Latitudes
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiko IYEMORI, Tadashi AOYAMA, Yoshihiro YOKOYAMA
2. 発表標題 Relationship Between Electron Density Fluctuations and Magnetic Fluctuations Observed by Low-Altitude Satellites in Low and Middle Latitudes
3. 学会等名 IUGG 2019 The 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 家森俊彦, 青山忠司, 横山佳弘
2. 発表標題 中・低緯度でSwarm衛星が観測する磁場および電子密度変動微細構造の比較
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第144回総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 家森俊彦, 青木学窓, 梶田将司, 元木環, 川口朋子, 天野絵里子
2. 発表標題 京都大学での研究データ公開に関する アンケートと個別調査
3. 学会等名 第3回 京都大学 研究データマネジメントワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家森俊彦, 青山忠司, 山田彬泰, Hozumi Kornyanat, 中西邦仁, 横山佳弘, 佐納康治, 小田木洋子, Jarupongsakul Thanawat, Pangsapa Vijak
2. 発表標題 Magnetic variations observed by the Swarm satellites over south-east Asia during the conjunction events of strong tropical rainfall
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 A.Yamada, T.Iyemori, Y.Sano, Y.Odagi, Y.Tanaka, K.Hozumi, T.Aoyama, Y.Yokoyama, V.Pangsapa, and J.Thanawat
2 . 発表標題 Common period oscillations in geomagnetic, GPS-TEC and micro-barometric variations observed just after sudden heavy rain fall in Thailand
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Iyemori
2 . 発表標題 Characteristics of Magnetic Ripples as Observed by Swarm Satellites and Their Relation to Micro-Barometric and Ground Magnetic Variations
3 . 学会等名 IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Iyemori, T. Aoyama, K. Nakanishi, Y. Odagi, Y. Sano, Y. Yokoyama and A. Yamada
2 . 発表標題 Magnetic Ripples Observed by Low-altitude Satellites and their Relation to Micro-barometric and Ground Magnetic Variations
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 A. Yamada, T. Iyemori, Y. Sano, Y. Odagi, Y. Tanaka, K. Hozumi, T. Aoyama, Y. Yokoyama, V. Pangsapa, J. Thanawat
2 . 発表標題 Common period oscillations in geomagnetic, GPS-TEC and micro-barometric variations observed just after sudden heavy rain fall in Thailand
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4 . 発表年 2018年



1. 発表者名 T. IYEMORI, T. AOYAMA, Y. YOKOYAMA
2. 発表標題 A possible effect of rainfall on medium scale electron density fluctuations on dayside
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. IYEMORI, T. AOYAMA, Y. YOKOYAMA, A. YAMADA, K. HOZUMI
2. 発表標題 Spatial and temporal relation among magnetic ripples, wavy structure of electron density fluctuation and GPS TEC variations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. IYEMORI, T. AOYAMA, Y. YOKOYAMA
2. 発表標題 A comparison of global rainfall distribution with amplitude of magnetic ripples and wavy structure of electron density
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回総会・講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>(1) Swarm data are provided by a research proposal (ID: 10230) to the Swarm Science and Validation Opportunity Project under the ESA.  (2) The GSMaP data are provided by JAXA GSMaP project.  (3) トカラ・中之島における磁場・微気圧・降雨観測は、京都大学防災研究所桜島火山研究センターとの共同観測として実施された。</p>
--

## 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
研究分担者	齊藤 昭則  (Saito Akinori)  (10311739)	京都大学・理学研究科・准教授    (14301)	
研究分担者	能勢 正仁  (Nose Masahito)  (90333559)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授    (13901)	

	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
研究協力者	青山 忠司  (Aoyama Tadashi)		
研究協力者	横山 佳弘  (Yokoyama Yoshihiro)		
研究協力者	山田 彬泰  (Yamada Akiyasu)		
研究協力者	穂積 コーンヤナット  (Hozumi Kornyanat)		
研究協力者	小田木 洋子  (Odagi Yoko)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	中西 邦仁  (Nakanishi Kunihito)		
研究協力者	ジャルポンサクル タナワット  (Jarupongsakul Thanawat)		
研究協力者	パンサパ ビジャック  (Pangsapa Vijak)		

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			
タイ	Chulalongkorn University			