

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05672

研究課題名(和文)新しいトモグラフィ法で明らかにするオーロラ波状構造形成における非一様電離圏の役割

研究課題名(英文) Role of non-uniform ionosphere in the formation of auroral vortices revealed by tomography method

研究代表者

田中 良昌 (Tanaka, Yoshimasa)

国立極地研究所・研究教育系・特任准教授

研究者番号：50425766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：オーロラトモグラフィ法を基にして、過去に例のない10秒以下の高時間分解能で電離圏におけるメソスケールオーロラの3次元分布、降下電子エネルギー分布、電離圏電導度分布、電離圏電場分布、3次元電流系等の一連の物理量を導出する新しい手法を確立した。この手法をスカンジナビア半島北部の多点単色光イメージャ観測網、磁力計観測網、非干渉散乱レーダーのデータに適用することで、時々刻々と変化するディスクリートオーロラの渦構造の3次元電流系を導出すると共に、これに内包される電離圏カウリング効果による成分を抽出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで水平2次元の研究が主だったオーロラ研究を3次元に拡張し、イメージャや磁力計等の地上多点観測網のデータを最大限活用することで、電離圏磁気圏結合過程における様々な物理量を10秒以下の高い時間分解能で導出できること、電離圏の能動的役割を抽出できることを示したという点で本研究の学術的意義は大きい。開発した手法は、2022年頃から観測が始まる国際共同プロジェクトEISCAT 3Dと組み合わせることで、新しい極域電離圏3次元観測・研究に寄与する。本成果は、地上総合観測によって地球近傍宇宙空間と極域超高層大気との結合過程を時々刻々とモニターできる可能性を示しており、宇宙天気研究の発展に貢献する。

研究成果の概要(英文)：We established a new method based on the auroral tomography to retrieve various physical quantities of mesoscale aurora, such as three-dimensional (3D) distribution of volume emission rate, energy distribution of precipitating electrons, and electrical conductivity, electric field, and 3D electric current system in the ionosphere, with a time resolution less than 10s. We applied this method to data obtained with multi-point imager network, magnetometer network, and incoherent scatter radar in the northern Scandinavia. We succeeded to obtain 3D current system of auroral vortices in the discrete aurora, which change their form quickly, and further to extract the component due to the ionospheric Cowling effect included in the current system.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：オーロラ 磁気圏電離圏結合 トモグラフィ解析 電離圏電気伝導度 3次元電流系 電離圏カウリング効果

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

オーロラは、地球近傍の宇宙空間「磁気圏」と極域上空高度約 90 ~ 1000km にある「電離圏」が結合した系で生じる地球電磁気現象である。この磁気圏 - 電離圏結合過程において、電離圏の役割は磁気圏中のプラズマ現象が投影される単なるスクリーンとして例えられることが多く、その能動的な役割は未解明な部分が多い。しかし、近年、電離圏の能動的な役割として、電離圏の非一様性から生じるカウリング (Cowling) 効果の重要性が再認識され、注目を集めている (Yoshikawa et al., J. Geophys. Res., 2013)。カウリング効果とは、非一様な電離圏を Hall 電流が流れる際に分極電場が生じ、2 次的な Hall 電流が流れることで、元の電流が歪められたり、強められたりする効果である。

オーロラがグローバルに爆発的に発達する現象「サブストーム」の発達過程で生じる西向き伝搬する大波 (サージ) 構造 (Westward Traveling Surge: WTS) は、最もダイナミックなオーロラ現象であるが、このサージの形成にカウリング効果が重要な役割を果たしていることが過去の研究により強く示唆されてきた (Kan and Kamide, J. Geophys. Res., 1985)。しかし、一般的にオーロラの動きは非常に速く、カウリング効果の観測的、定量的な検証は未だ為されていない。例えば、既存のレーダー観測から得られる電離圏電気伝導度分布や電場分布の時間分解能は低く (数分)、サブストームのような時々刻々と激しく変化するオーロラ現象を捉えることはできなかった。他方で、コンピュータトモグラフィ (CT) 解析手法の発達により、近年、オーロラの 3 次元 (3D) の観測的研究が実現可能となった。このオーロラトモグラフィ法を応用し、オーロラ 3 次元構造を復元することにより、電離圏の電気伝導度分布を数秒の時間分解能で取得することができるはずである。さらに、限られた領域内の地上磁場、電気伝導度データから局所的な電流・電場分布を推定できる新たな手法「Local KRM 法」(Vanhamäki and Amm, Ann. Geophys., 2007) を応用することにより、メソスケールのオーロラ現象におけるカウリング効果を検出できる可能性が高まった。

2. 研究の目的

本研究では、オーロラトモグラフィ法や Local KRM 法等の最新の手法を組み合わせ、オーロラ 3 次元構造、降り込み電子のエネルギー分布、電離圏電気伝導度、3 次元電流系等を導出する解析方法を確立する。この手法を用いて、サブストーム発達過程に一般的に現れるメソスケールの波状構造である夕方側の西向き伝搬性サージ (Westward Traveling Surge) や明け方側のオメガバンドオーロラ (omega bands)、ブレークアップ前に出現するオーロラ波状構造等の 3 次元電流系を 10 秒以下の高時間分解能で導出する。さらに、沿磁力線電流から非一様電気伝導度により生じる成分を分離し、これら波状構造の形成過程におけるカウリング効果の役割を定量的に明らかにすることが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

スウェーデン宇宙物理研究所、フィンランド気象研究所、ソダンキュラ地球物理観測所、ノルウェー北極大学との国際共同研究に基づき、冬季 (10 ~ 3 月) の夜間、スカンジナビア北部において、高感度カメラ観測網、磁力計観測網、EISCAT レーダーによるオーロラ同時観測を行う。本研究では、ノルウェー・シーボトンに多波長全天イメージャを新たに設置する。得られたイメージャ画像データは、太陽地球系物理学分野の標準フォーマットである Common Data Format (CDF) に変換してウェブサイトで公開し、データ利用を促進させる。

観測されたメソスケールのオーロラ波状構造について、多点イメージャ画像にオーロラトモグラフィ解析を応用して水平約 300km x 300km の範囲の発光強度分布、電離圏電気伝導度を導出し、EISCAT レーダーデータとの比較を行う。さらに、磁力計観測網で得られた地磁気データと上記の電離圏電気伝導度分布に対して Local KRM 法を応用し、過去に例のない高時間分解能で 3 次元電流系を導出する。電流の発散から非一様電気伝導度により生じる成分を分離し、これら波状構造の形成過程におけるカウリング効果の役割を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 高時間分解能のメソスケールオーロラの 3 次元電流系導出方法の確立

以下に示すように、高時間分解能 ($\Delta t = 10\text{s}$) で水平約 300km x 300km の領域の電離圏におけるメソスケールオーロラの 3 次元電流系を導出する手法を確立した。

[1] 高感度イメージャによる多点同時観測で得られた単色光オーロラ画像 (波長 427.8nm、露出 1 ~ 2 秒) に、オーロラトモグラフィ法 (Tanaka et al., Ann Geophys., 2011) を適用し、オーロラ発光強度の 3 次元構造、及び、降下電子のエネルギー分布を再構成する。この際、各イメージャの相対感度は、ハイパーパラメータとして交差検定法により導出する新たな手法を用いて決定する。

[2] オーロラ発光モデル (Rees, 1993)、中性大気モデル (MSIS90) 等のモデルを用いて、オーロラ 3 次元分布から水平領域約 300km x 300km における高度積分した電離圏電気伝導度分布を導出する (図 1 (a))。

[3] 同時刻の北欧の磁力計ネットワーク「IMAGE」の地磁気データから、電離圏等価電流系を導出する (図 1 (b))。

[4] [2] で求めた電離圏電気伝導度分布と [3] で求めた電離圏等価電流系に対して Local KRM 法

を用いて、ディスクリートオーロラ周辺における電離圏電場分布 (図 1 (d))、3次元電流系 (図 1 (e)) を導出する。

この手法により、過去に例のない高時間分解能でオーロラの 3次元電流系を導出することができるため、サブストームに伴う様々なメソスケールオーロラ現象に対して応用可能となった。

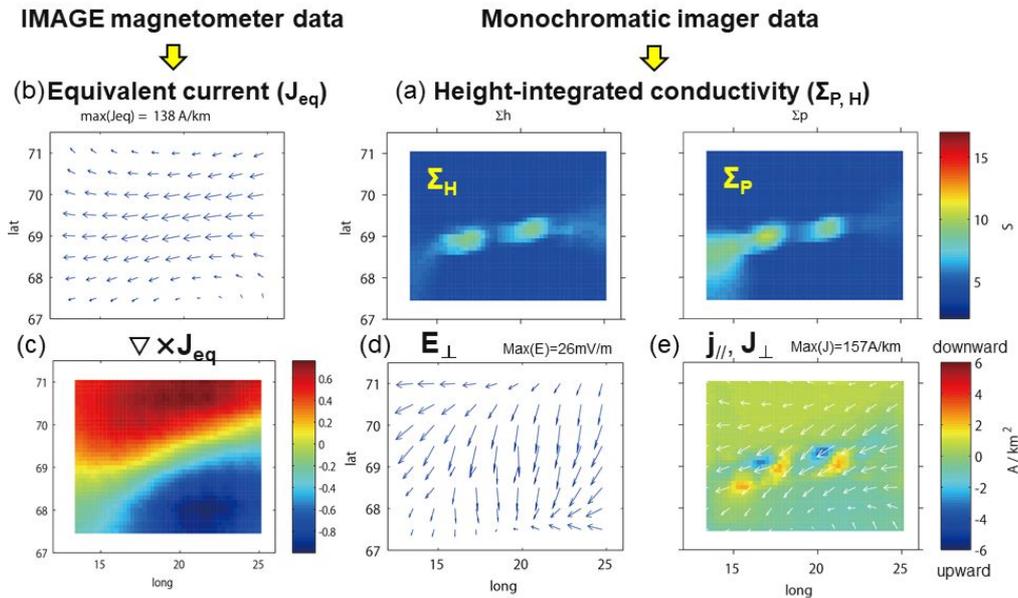


図 1 : ディスクリートオーロラ中の渦構造近傍における 3次元電流系の解析例。(a)高度積分した電離圏電気伝導度、(b)電離圏等価電流系、(c)等価電流系の回転成分、(d)電離圏電場、(e)矢印：電離圏電流、カラー：沿磁力線電流。

(2) ディスクリートオーロラ中の渦構造における電離圏カウリング効果

(1)で求めた手法を、2013年3月9日の東向き拡大するオーロラサージ構造 (Tanaka et al., Earth Planets Space, 2015) 及び、2015年3月14日のディスクリートオーロラ中の渦構造に適用し、3次元電流系を導出した。新たに発見された結果は、以下の通りである。

- ・東向き拡大するオーロラサージについて、アークの中央付近の降下電子の平均エネルギーがその周辺に比べて高い。平均エネルギーは 4keV に中心があり、2~6keV に集中する。発光ピーク高度は、96~114km の狭い範囲に集中している。

- ・ディスクリートオーロラに現れる渦の中心近傍で、降り込み電子の平均エネルギーが周辺と比較して高くなる。この高エネルギー領域が渦の移動と共に伝搬する。

- ・オーラトモグラフィ法により得られたオーロラ光高度分布と EISCAT-UHF レーダーで同時観測された電子密度高度分布は、定性的にはほぼ一致しており、手法の有効性が明らかになった。一方、トモグラフィ解析から得られた発光強度は、EISCAT レーダーで観測された電子密度から推測される発光強度よりも小さく、手法について改善の余地がある。

- ・オーラトモグラフィ解析により得られた降り込み電子の全エネルギーフラックス (Q_0) と全フラックス (F)、平均エネルギー (E_{ave}) の間には、 $Q_0 = E_{ave}^2 \cdot F$ の関係があり、これは、ディスクリートオーロラに一般的に見られる磁力線沿いのオームの法則 $j_{//} = K_{//} E_{//}$ と矛盾が無い。即ち、地上で観測されたディスクリートオーロラが沿磁力線加速を受けた高エネルギー電子によって引き起こされていることを示唆している。

- ・(1)の手法により、世界で初めて 10 秒の時間分解能でディスクリートオーロラ中の渦構造の 3次元電流系を導出することに成功した (図 1)。図 1 (e) では、渦に伴って上向き・下向き沿磁力線電流のペアが存在し、それが渦と共に伝搬している様子が見られる。

- ・得られた 3次元電流系のうち、沿磁力線電流から電気伝導度非一様性が原因で生じる成分を分離した (図 2)。式(1)は、全沿磁力線電流 (左辺) を発散電場に起因する成分 (右辺第 1 項)、 $\nabla \Sigma_P$ に起因する成分 (右辺第 2 項)、 $\nabla \Sigma_H$ に起因する成分 (右辺第 3 項 : カウリング効果) に分離できることを示す。

$$\underline{j}_{//} = \Sigma_P \nabla \cdot \underline{E} + \nabla \Sigma_P \cdot \underline{E} - (\nabla \Sigma_H \times \underline{E})_{//} \quad \dots (1)$$

その結果、上向き・下向き沿磁力線電流のペアの位置の反時計回りの捻れは、電離圏カウリング効果によるものであることが明らかになった。今後、地上・衛星同時観測により、この沿磁力線

電流のペアを衛星観測により検出することが必要である。

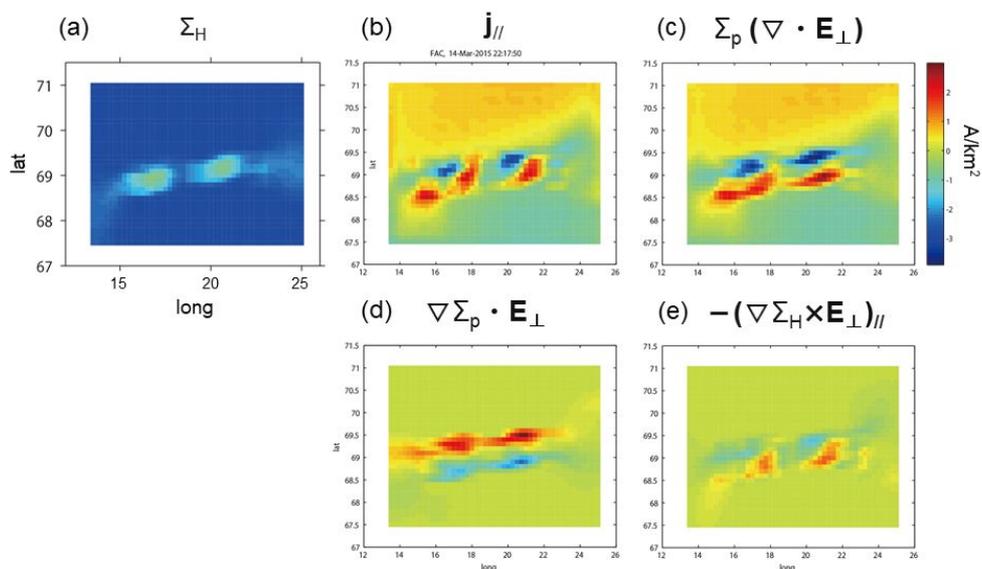


図2：ディスクリートオーロラ中の渦構造近傍における沿磁力線電流を発散電場に起因する成分、 $\nabla\Sigma_p$ に起因する成分、 $\nabla\Sigma_H$ に起因する成分（カウリング効果）に分解した例。(a)高度積分した電離圏 Hall 電気伝導度、(b)全沿磁力線電流、(c) $\Sigma_p \nabla \cdot \mathbf{E}_\perp$ 、(d) $\nabla \Sigma_p \cdot \mathbf{E}_\perp$ 、(e) $-(\nabla \Sigma_H \times \mathbf{E}_\perp)_\parallel$ 。

(3) 西向き伝搬性サージ (WTS) の3次元構造

2018年2月16、19日に観測された西向き伝搬性サージ (WTS) 及び、ディスクリートアークの3次元分布再構成を行った。これらの現象については、(1)の手法[1]を用いて、オーロラ発光の3次元分布、及び、降下電子のエネルギー分布のみ再構成し、[2]～[4]の解析については、残念ながら、信頼性の観点から物理量の導出に至らなかった。

得られた結果は、以下の通りである。

- ・2月19日のディスクリートアークイベントについては、シーボトンに設置した全天イメージャと同種の低コスト多周波イメージャシステムで取得したオーロラ画像を利用して、オーロラ光の3次元分布を推定可能であることを示した (Ogawa et al., 2019)。これにより、今後さらに、オーロラトモグラフィ解析例が飛躍的に増やすことができることが期待される。

- ・2月16日のWTSについて、世界で初めてWTSの3次元構造を導出した。これにより、サージの先端付近では、降下電子の平均エネルギーが約8～10keVに達していることが明らかになった。一方、サージ内部のディフューズオーロラ、脈動オーロラは、導出した降下電子のエネルギー分布の信頼性が十分でないことから、電気伝導度の導出は困難であり、手法の更なる改良が必要との結論を得た。このサージイベントは、国立極地研究所のアウトリーイベント「めざせ極地の研究者～オーロラ写真を推理する」でも取り上げ、解説を行った。

(4) データ整備・公開

本研究でノルウェー・シーボトン天文台に新たに設置した多波長全天イメージャで取得された2018年2月～2020年2月の画像、及び、ケオグラムデータをCommon Data Format (CDF)に変換し、一般に公開した。これに加え、同時期に北欧、及び、南極で得られた全天イメージャのデータについても、同様に以下のサイトから公開した。

全天画像：<http://iugonet0.nipr.ac.jp/data/asi/>

ケオグラム：<http://iugonet0.nipr.ac.jp/data/ask/>

オーロラQLビューワ：<http://133.57.20.115/www/AQVN/index.html>

これらのデータは、大学間連携プロジェクト「IUGONET」で開発した一般公開されている統合解析ツール「宇宙環境データ解析ソフトウェア：SPEDAS」等で容易にダウンロード、読み込み、解析できる。これらのツールについて、論文にまとめ国際誌に投稿した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件(うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件)

1. 著者名 Sato, N., A.S. Yukimatu, Y.-M. Tanaka, and T. Hori	4. 巻 69:103
2. 論文標題 Morphologies of omega band auroras	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 1, 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0688-1	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 Tanaka, Y.-M., T. Nishiyama, A. Kadokura, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa S.-I. Oyama, R. Kataoka, M. Tsutsumi, K. Nishimura, K. Sato, Y. Kasahara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, M. Hikishima, S. Matsuda, A. Matsuoka, I. Shinohara, M. Nose, T. Nagatsuma, M. Shinohara, A. Fujimoto, M. Teramoto, R. Nomura	4. 巻 124
2. 論文標題 Direct Comparison Between Magnetospheric Plasma Waves and Polar Mesosphere Winter Echoes in Both Hemispheres	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 9626, 9639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026891	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

1. 著者名 Ogawa Y., Y.-M. Tanaka, A. Kadokura, K. Hosokawa, Y. Ebihara, T. Motoba, B. Gustavsson, U. Brandstrom, Y. Sato, S. Oyama, M. Ozaki, T. Raita, F. Sigernes, S. Nozawa, K. Shiokawa, M. Kosch, K. Kauristie, C. Hall, S. Suzuki, Y. Miyoshi, A. Gerrard, H. Miyaoka, R. Fujii	4. 巻 23
2. 論文標題 Development of low-cost multi-wavelength imager system for studies of aurora and airglow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Science	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) 10.1016/j.polar.2019.100501	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

〔学会発表〕 計25件(うち招待講演 5件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Takanori Nishiyama, Bjorn Gustavsson, Kirsti Kauristie, Carl-fredrik Enell, Urban Brandstrom, Tima Sergienko, Alexander Kozlovsky, Tero Raita, Vanhamaki Heikki, and Akimasa Yoshikawa
2. 発表標題 Preliminary Results of Tomography Analysis of Westward Traveling Surge
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中良昌, 小川泰信, 門倉昭, 西山尚典, 吉川顯正, Gustavsson Bjorn, Kauristie Kirsti, Enell Carl-fredrik, Brandstrom Urban, Sergienko Tima, Kozlovsky Alexander, Tero Raita, Vanhamaki Heikki
2. 発表標題 Tomography analysis of westward traveling surge observed in February, 2018
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 2018年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Bjorn Gustavsson, Noora Partamies, Kirsti Kauristie, Daniel Whiter, Carl-fredrik Enell, Urban Brandstrom, Tima Sergienko, Alexander Kozlovsky, Heikki Vanhamaki, Akimasa Yoshikawa, Hiroshi Miyaoka
2. 発表標題 3D current system of eastward expanding auroral surges
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Kauristie Kirsti, Carl-fredrik Enell, Urban Braendstroem, Tima Sergienko, Bjorn Gustavsson, Daniel Whiter, Alexander Kozlovsky, Hiroshi Miyaoka, Mike Kosch
2. 発表標題 Spatiotemporal variation of precipitating electron energy in auroral vortices
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Norio Umemura, Shuji Abe, Atsuki Shinbori, Masahito Nose, Satoru UeNo
2. 発表標題 IUGONET tools for Solar-Terrestrial Physics Research
3. 学会等名 The Second VarSITI symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中良昌, 小川泰信, 門倉昭, 宮岡宏, Bjorn Gustavsson
2. 発表標題 ノルウェー・シーボトンにおける全天ワテック並列イメージャ観測
3. 学会等名 低廉光学機器による超高層大気ネットワーク計測に関する研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Takanori Nishiyama, Akimasa Yoshikawa, Bjorn Gustavsson, Kirsti Kauristie, Carl-fredrik Enell, Urban Brandstrom, Tima Sergienko, Alexander Kozlovsky, Tero Raita, Vanhamaki Heikki
2. 発表標題 Study on auroral 3D structure in the northern Europe
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (ISAR-6) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Takanori Nishiyama, Akira Kadokura, Mitsunori Ozaki, Mitsunori Ozaki, Yoshizumi Miyoshi, Kazuo Shiokawa, Shin-Ichiro Oyama, Ryuho Kataoka, Masaki Tsutsumi, Koji Nishimura, Kaoru Sato, Yoshiya Kasahara, Atsuki Kumamoto, Fuminori Tsuchiya, Mizuki Fukizawa, Mitsuru Hikishima, Shoya Matsuda
2. 発表標題 Simultaneous observation of magnetospheric plasma waves and PMWE observed by Arase satellite and MST radars
3. 学会等名 SuperDARN Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Takanori Nishiyama, Akimasa Yoshikawa, Bjorn Gustavsson, Kirsti Kauristie, Carl-fredrik Enell, Urban Brandstrom, Tima Sergienko, Alexander Kozlovsky, Tero Raita, Vanhamaki Heikki
2. 発表標題 3D structure of discrete arcs obtained by auroral computed tomography analysis
3. 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Takanori Nishiyama, Akimasa Yoshikawa, Bjorn Gustavsson, Kirsti Kauristie, Carl-fredrik Enell, Urban Brandstrom, Tima Sergienko, Alexander Kozlovsky, Tero Raita, Vanhamaki Heikki
2. 発表標題 3D analysis of discrete arcs based on auroral computed tomography
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第145回総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中良昌, 小川泰信, 門倉昭
2. 発表標題 一般化オーロラトモグラフィ法逆問題解析手法
3. 学会等名 太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用
4. 発表年 2019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
連携研究者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu) (00362210)	国立極地研究所・研究教育系・准教授 (62611)	
連携研究者	門倉 昭 (Kadokura Akira) (70185883)	国立極地研究所・研究教育系・教授 (62611)	
連携研究者	西山 尚典 (Nishiyama Takanori) (00704876)	国立極地研究所・研究教育系・助教 (62611)	

