

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02162

研究課題名（和文）電磁波斜め伝搬効果とオーロラ4Dイメージングによる宇宙プラズマのエネルギー写像

研究課題名（英文）Energy mapping of precipitating plasmas by oblique electromagnetic wave propagation effects and auroral 4D imaging

研究代表者

尾崎 光紀 (Ozaki, Mitsunori)

金沢大学・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：70422649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：高エネルギープラズマが「いつ」、「どこで」、「どれくらいの強さ」で発生したかを検出する地上リモートセンシングの技術基盤確立のため、学習器を用いた解析対象オーロライベントの検出、信号処理による雑音除去、自然電磁波の伝搬特性を厳密に考慮した降下プラズマの様相を模擬する計算モデル開発を行った。そして、電磁波と相互作用した高エネルギープラズマが作る特殊なオーロラ現象を対象に、降下プラズマの空間3次元+時間変動に対する振舞いを詳細に解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した学習器を用いたオーロライベント検出、信号処理による自然電磁波の雑音除去と降下プラズマのモデル計算により、自然電磁波によって散乱されたプラズマの様相を自然電磁波の伝搬特性を厳密に考慮しながら評価できるようになった。これにより、特にこれまで評価されてこなかった降下プラズマの空間変動が自然電磁波の伝搬効果を反映するものであることが明らかになった。本研究成果は、地上へ向けて降下する宇宙の高エネルギープラズマを、空間3次元+時間変動の新たな知見を与え、その学術的意義は大きい。さらに、宇宙から降下する高エネルギープラズマの地上リモートセンシングの技術発展につながる社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed auroral event classification using a machine learning technique, signal processing for noise reduction of natural electromagnetic waves, and calculation model for precipitating energetic particles driven by natural electromagnetic waves, to detect "temporal", "spatial", and "energetic" characteristics of precipitating plasmas. Based on detailed analyses of auroral phenomena, three-dimensional spatial and temporal variations of precipitating plasmas were investigated.

研究分野：電磁波計測工学

キーワード：電磁波伝搬 オーロラ プラズマエネルギー 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体の微細化と低電圧化により、宇宙放射線の影響の懸念対象は、人工衛星だけでなく、地上のスーパーコンピュータ、自動運転車、高信頼産業機器分野へと拡大している。このため、「いつ」、「どこで」、「どれくらいの強さ(エネルギー)」のプラズマ粒子が地上に降り注いできたかを安価に検出できる地上リモートセンシング技術構築が重要となっている。地上からのオーロラ現象計測は、keV 帯電子などの低いエネルギーのプラズマ粒子を高い時空間把握力で検出できる。一方で、プラズマ粒子の広いエネルギーをカバーするエネルギー推定技術が確立されていないという課題が残されている。従来は、複数波長のオーロラ明るさの違いからプラズマエネルギーの推定が行われてきたが、自然電磁波により散乱された高エネルギープラズマにより生じるオーロラ現象は、一般的に暗く、光学計測だけでそのエネルギー推定は難しい。10 keV 以上の高エネルギープラズマは、自然電磁波(周波数、伝搬方向)の振舞いに強く依存するため、本研究は高エネルギープラズマのエネルギー推定範囲拡大のために、自然電磁波の伝搬特性を厳密に考慮し、電磁波伝搬効果と光学計測の融合に着目した。

2. 研究の目的

地上の電磁波とオーロラ観測より、高エネルギープラズマ発生域から「いつ」、「どこで」、「どれくらいの強さ(エネルギー)」のプラズマ粒子が地上に降り注いできたかを検出する地上リモートセンシング技術の深化が本研究の目的である。このために、学習器を用いた解析対象イベントの検出、信号処理による雑音除去、自然電磁波の伝搬特性を厳密に考慮した降下プラズマの様相を模擬する計算モデル開発を主に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 学習器を用いたオーロラ現象の検出と自然電磁波の雑音除去

数万 km 離れた宇宙から到来する自然電磁波は地上で fT~pT オーダーとなり、地上起因の雷電波や人工雑音が重畳し優位な信号を検出することが極めて難しい。さらに、対象となるオーロラ現象の明るさは数十~1 kR 程度と肉眼ではほとんど見えないほど暗く、迷光など雑音に埋もれ現象検出が解析者の目視に頼っている。このような低い SN 比の電磁波データやオーロラデータを対象とする本研究では、学習器を用いてオーロラ現象の検出と信号処理による電磁波の雑音低減を行った。オーロラ現象に対しては、オーロラの形状多様性より、通常の物体認識のように形状を学習させることが不向きな条件にあった。一方で、対象オーロラ現象は時間変化に突出した特徴があるため、時空間特徴を同時に学習させ、学習データの工夫により学習器の精度改善を図った。

(2) レイトレース解析を用いた降下粒子の 4 次元変動のモデル計算

磁化プラズマ中を伝搬する電磁波は、プラズマ条件によりその様相は大きく変動する。このため、磁化プラズマ中の自然電磁波の伝搬解析手法の一つであるレイトレース解析より得られる電磁波の伝搬定数を参照することで、厳密に磁化プラズマ中を伝搬する自然電磁波の影響を考慮しながら降下プラズマの様相を模擬する計算モデルを開発した。このために、レイトレース解析による自然電磁波の伝搬定数を用いてサイトロトロン共鳴を解析し、散乱されたプラズマが地球へ向けて降下する様子を空間 3 次元で磁力線トレースしながら電離圏へ投影させ、空間 3 次元+時間変化の 4 次元変化として降下プラズマの振る舞いを評価できるようにした。降下プラズマは、二流体近似に基づくある基線の体積放射率を電離圏中で計算し、オーロラ現象として観測データと比較できるようにした。

4. 研究成果

(1) 学習器を用いたフラッシュオーロラのイベント検出と自然電磁波の雑音除去

本研究では、時空間で変動するオーロラ現象を対象としているため、空間変動と時間変動を同時に学習できる学習データを用いて、対象のオーロラ現象を識別する学習器を生成した。学習データは、ケオグラムと呼ばれる全天画像の南北断面の時系列変化を用いることで、オーロラ現象の時空間変動を学習させた。そして、時間幅 1 秒、空間幅 60km に分割したケオグラム画像を学習させ、畳み込みニューラルネットワークにより研究対象である脈動オーロラ、フラッシュオーロラの自動検出器を開発した。交差検証より約 75%の精度を確認し、従来 解析者が目視で検出

できたイベントに対しては全て検出できる結果を得た。図1に、脈動オーロラとフラッシュオーロラを分類した例を示す。図1上のパネルで白く点滅している領域が、下のパネルの学習器による判別結果より脈動オーロラとして検出できていることがわかる。また、作成した学習器がどのような特徴を基に現象を分類しているかを解析するために、オクルージョン感度マップを用いて評価を行った。図2に、フラッシュオーロラに対するオクルージョン感度マップを示す。オクルージョン感度マップより、フラッシュオーロラの孤立した発光という特徴に基づき、学習器が現象分類していることが分かった。

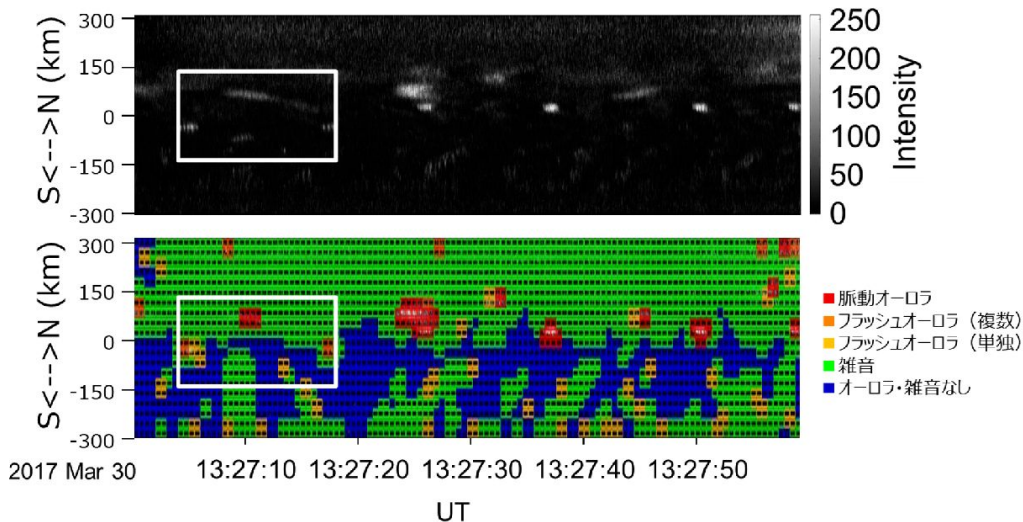


図1：学習器によりオーロラ現象の分類結果の例（上：入力画像、下：分類結果）

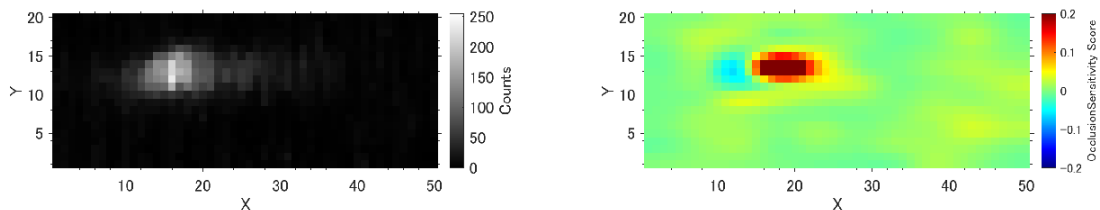


図2：学習器のフラッシュオーロラに対するオクルージョン感度マップの例（左：入力画像、右：感度マップ）

電磁波雑音低減に対しては、風などに伴う ULF 帯電磁波データに含まれる多様な時間幅を有するパルス性雑音を抑圧するために、観測データから統計的に振幅が極端に大きいもののみを抑圧する信号処理を新たに組んだ。雑音を模擬した ULF 帯電磁波データのテストデータに対して、約 21dB の向上 SN 比を得た。この雑音除去では、対象とする現象よりもパルス性雑音の振幅が大きい場合は、事前知識なしで信号の大きさの統計分布から、除外対象が決まるため、大量の学習データを必要としないという利点がある。

(2) レイトレース解析による電磁波伝搬効果を考慮した降下電子の4次元空間特徴

フラッシュオーロラの観測データの統計解析より、経度方向には、東西方向にそれぞれ等方的に変化するのに対し、緯度方向には、高緯度側よりも低緯度側に2.4倍大きく拡大することを見出した。このような観測から得られた降下プラズマの空間特徴に対し、3(2)で開発したモデル計算を用いてコーラス電磁波のレイトレーシング解析とオーロラの体積放射率計算を組み合わせた数値計算により、低緯度側の優位的な発光は、コーラス電磁波の発生源からの伝搬特性によるものであることを明らかにした(図3)。コーラス電磁波は、プラズマ屈折率の影響で、高い周波数帯において発生域に沿う磁力線から地球に向かう方へ伝搬するのに対し、低い周波数帯では、発生域に沿う磁力線から地球から遠ざかるように伝搬する。伝搬してくる電磁波により散乱され地球へ向けて降下するプラズマは、散乱された領域から磁力線に沿って電離圏でオーロラ現象として表れるため、緯度方向のオーロラ現象の変化は、発生域から伝搬するコーラス電磁波の様相を直接反映できることを報告した(引用文献)。さらに、降下電子のエネルギーが高いほどオーロラ発光高度は低くなる特徴に対し、計算モデルで再現されたフラッシュオーロラは、初期発光から時間の経過と共に発光高度下端が上昇する様子が見られ、降下電子のエネルギー分散性を示唆する結果を得た。これは、1秒以下のフラッシュオーロラの現象において、広

いエネルギー（数十 keV 帯 ~ keV 帯）が時間差を有して降下することを直接示すものと考えられる。これらの成果は、Journal of Geophysical Research: Space Physics より論文として報告し、2021 年の Top Downloaded Article の一つとして選出され、本研究で開発した電磁波伝搬とオーロラ現象を組み合わせたモデル計算が高い注目を集めた。

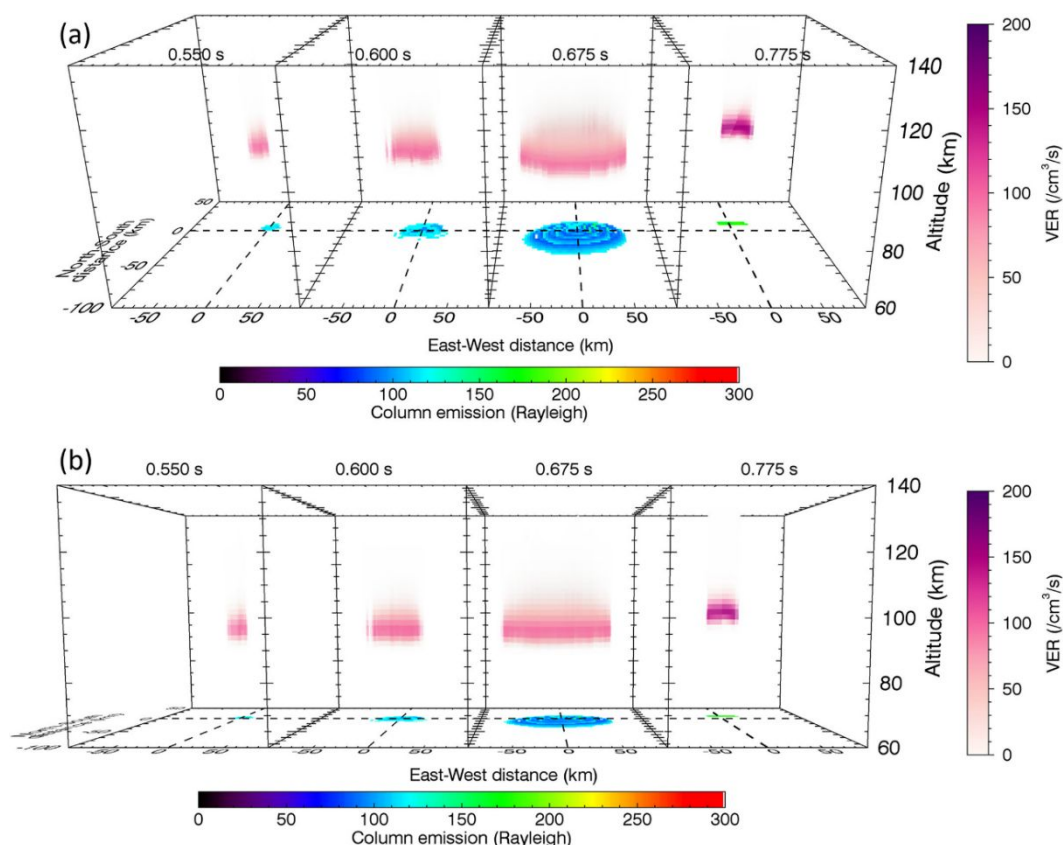


図 3：計算モデルから再現されたフラッシュオーロラの 4 次元（空間 3 次元 + 時間）変動。(a) 初期発光の後、低緯度側に優位な拡大を示す様子を再現している。(b) 時間と共に発光高度が上昇する様子が示された (Ozaki et al., JGR space physics, 2021)

(3) オーロラの時間特徴から推定する発生域におけるコーラス電磁波の周波数分布

本研究で対象とするフラッシュオーロラは、コーラス電磁波の一つの波束により散乱され電離圏へ降下する電子によって発生するオーロラ現象のため、コーラス電磁波の一つの波束の詳細を推定できる現象である。しかし、オーロラの明るさが暗く、かつ持続時間が 1 秒以下と短いため、その時間変化を詳細に知ることは難しかった。この問題に対し、本研究では高速処理を施したレベルセット法と呼ばれる輪郭形状進化を追跡できる画像処理法を用いて解決を図った。レベルセット法は、詳細な輪郭形状進化を追跡できる画像処理法として、医用画像処理などにも使われるが、画像解析が複雑なため処理時間が莫大になり、ハイスピードカメラ画像への適用が困難であった。特に、初期輪郭を変更することでレベルセット法の高速化を図り、従来よりも雑音の影響を受けることなくオーロラを詳細に解析できるようにした(引用文献)。観測されたフラッシュオーロラの時間特性について、レベルセット法を用いて詳細に解析した結果、発光領域が拡大するのに要する継続時間よりも発光領域が縮小するのに要する継続時間が、平均で 1.7 倍も長くなることを見出した。この特徴的な時間特性についても、コーラス電磁波の点波源モデルを用いてフラッシュオーロラの数値計算を行ったところ、コーラス電磁波の周波数分布に伴い発光領域が縮小するのに要する継続時間が変化することを明らかにした(引用文献)。特に高周波コーラスは、エネルギーの低い電子と共鳴することから、高周波コーラスによる低エネルギー（数 keV）電子が、オーロラ発光の縮小時の時間特性を特徴づけていたことがわかり、観測されたフラッシュオーロラの時間特徴を再現するには、発生域において一つの波束のコーラス電磁波に対し 0.2 ~ 0.7 倍の電子サイクロトロン周波数の範囲で発生していることが強く示唆される結果を得た(図 4)。電磁波の周波数は、降下させる電子のエネルギー帯と直接関係するパラメータである。電磁波だけの観測では、伝搬の影響を受けてしまうため、発生域の周波数分布を精確に知ることは衛星観測の観測場所に依存してしまうが、本研究では、電磁波により散乱される電子の時間特徴を使うことで、発生域でのコーラス電磁波周波数の分布の推定につながった。

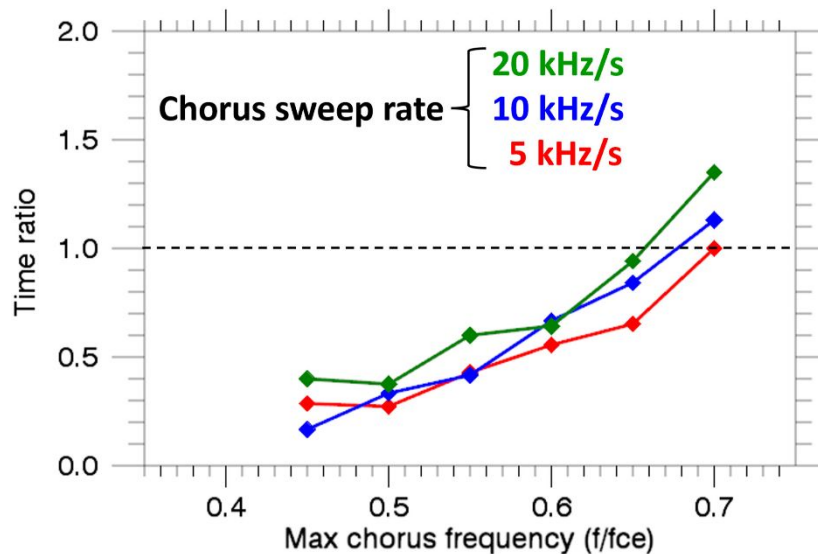


図4：コーラス電磁波の上限周波数に対するフラッシュオーロラの時間比特性（縮小時間 / 拡大時間）。下限周波数は0.2倍の電子サイクロトロン周波数に固定されており、典型的な周波数上昇率として3つのケースで比較（Ozaki et al., GRL, 2022）。

< 引用文献 >

Ozaki, M., Inoue, T., Tanaka, Y., Yagitani, S., Kasahara, Y., Shiokawa, K., et al. (2021). Spatial evolution of wave-particle interaction region deduced from flash-type auroras and chorus-ray tracing. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029254. <https://doi.org/10.1029/2021JA029254>

井上 智寛、尾崎 光紀、八木谷 聡、今村 幸祐、塩川 和夫、三好 由純、片岡 龍峰、レベルセット法とスペクトルエントロピー法を用いた脈動オーロラ領域検出の改善、*情報処理学会論文誌*、61(12), pp.1947-1959, 2020.

Ozaki, M., Yagitani, S., Shiokawa, K., Tanaka, Y., Ogawa, Y., Hosokawa, K., et al. (2022). Slow contraction of flash aurora induced by an isolated chorus element ranging from lower-band to upper-band frequencies in the source region. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097597. <https://doi.org/10.1029/2021GL097597>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ozaki Mitsunori, Inoue Tomohiro, Tanaka Yoshimasa, Yagitani Satoshi, Kasahara Yoshiya, Shiokawa Kazuo, Miyoshi Yoshizumi, Imamura Kousuke, Hosokawa Keisuke, Oyama Shin ichiro, Kataoka Ryuho, Ebihara Yusuke, Ogawa Yasunobu, Kadokura Akira	4. 巻 126
2. 論文標題 Spatial Evolution of Wave Particle Interaction Region Deduced From Flash Type Auroras and Chorus Ray Tracing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	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) 10.1029/2021JA029254	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 Nanjo Sota, Hozumi Yuta, Hosokawa Keisuke, Kataoka Ryuho, Miyoshi Yoshizumi, Oyama Shin ichiro, Ozaki Mitsunori, Shiokawa Kazuo, Kurita Satoshi	4. 巻 126
2. 論文標題 Periodicities and Colors of Pulsating Auroras: DSLR Camera Observations From the International Space Station	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	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) 10.1029/2021JA029564	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 Ozaki Mitsunori, Shiokawa Kazuo, Horne Richard B., Engebretson Mark J., Lessard Marc, Ogawa Yasunobu, Hosokawa Keisuke, Nos? Masahito, Ebihara Yusuke, Kadokura Akira, Yagitani Satoshi, Miyoshi Yoshizumi, Hashimoto Shion, Sinha Shipra, Sinha Ashwini K., Seemala Gopi K., Jun Chae Woo	4. 巻 48
2. 論文標題 Magnetic Conjugacy of Pc1 Waves and Isolated Proton Precipitation at Subauroral Latitudes: Importance of Ionosphere as Intensity Modulation Region	5. 発行年 2021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) 10.1029/2020GL091384	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 Hosokawa K., Miyoshi Y., Oyama S. I., Ogawa Y., Kurita S., Kasahara Y., Kasaba Y., Yagitani S., Matsuda S., Ozaki M., Tsuchiya F., Kumamoto A., Takashima T., Shinohara I., Fujii R.	4. 巻 126
2. 論文標題 Over Darkening of Pulsating Aurora	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	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) 10.1029/2020JA028838	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 井上 智寛、尾崎 光紀、八木谷 聡、今村 幸祐、塩川 和夫、三好 由純、片岡 龍峰	4. 巻 61
2. 論文標題 レベルセット法とスペクトルエントロピー法を用いた脈動オーロラ領域検出の改善	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1947-1959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20729/00208758	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 Yagitani Satoshi, Ozaki Mitsunori, Sahraoui Fouad, Mirioni Laurent, Mansour Malik, Chanteur Gerard, Coillot Christophe, Ruocco Sebastien, Leray Vincent, Hikishima Mitsuru, Alison Dominique, Le Contel Olivier, Kojima Hirotsugu, Kasahara Yoshiya, Kasaba Yasumasa, Sasaki Takashi, Yumoto Takahiro, Takeuchi Yoshinari	4. 巻 216
2. 論文標題 Measurements of Magnetic Field Fluctuations for Plasma Wave Investigation by the Search Coil Magnetometers (SCM) Onboard Bepicolombo Mio (Mercury Magnetospheric Orbiter)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	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) 10.1007/s11214-020-00734-2	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 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 尾崎光紀、橋本至音
2. 発表標題 Pc1 周期を有する銀河雑音電波吸収
3. 学会等名 脈動オーロラ研究集会 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所 研究集会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎光紀
2. 発表標題 Spatiotemporal and energy characteristics of wave-particle interaction regions deduced from flash aurora and isolated proton aurora
3. 学会等名 国立極地研究所 宙空圏研究グループセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Mizuki Fukizawa, Takeshi Sakanoi, Keisuke Hosokawa, Takuo Tsuda, and Akira Kadokura
2. 発表標題 Auroral Computed Tomography analysis method for each aurora type
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Gustavsson Bjorn, Kauristie Kirsti, Enell Carl-fredrik, Brandstrom Urban, Sergienko Tima, Kozlovsky Alexander, Tero Raita, Mizuki Fukizawa, Takeshi Sakanoi, Keisuke Hosokawa
2. 発表標題 Current and future perspectives on 3D analysis of aurora
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本 至首, 尾崎 光紀, 八木谷 聡
2. 発表標題 孤立プロトンオーロラの発光強度と高エネルギープロトンの共鳴エネルギーの数値計算評価
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千田 哲平, 尾崎 光紀, 八木谷 聡
2. 発表標題 フラッシュオーロラにおけるコーラス波動の周波数帯域の影響評価
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Ozaki, T. Inoue, Y. Tanaka, S. Yagitani, Y. Kasahara, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, K. Imamura, K. Hosokawa, S. Oyama, R. Kataoka, Y. Ebihara, Y. Ogawa, A. Kadokura
2. 発表標題 Flash-type auroral model using chorus-ray tracing analysis
3. 学会等名 PWING-ERG conference and school on the inner magnetosphere (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎光紀、井上智寛、田中良昌、八木谷聡、笠原禎也、塩川和夫、三好由純、今村幸祐、細川敬祐、大山伸一郎、片岡龍峰、海老原祐輔、小川泰信、門倉昭
2. 発表標題 フラッシュオーロラの時空間特性を用いたコーラス伝搬特性の推定
3. 学会等名 脈動オーロラ研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中良昌、小川泰信、門倉昭、細川敬祐、津田卓雄、吹澤瑞希、坂野井健
2. 発表標題 一般化オーロラトモグラフィ法のEISCAT_3Dデータへの応用
3. 学会等名 EISCAT研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ogawa, Y., A. Kadokura, Y. Tanaka, and WMI team
2. 発表標題 Network observations of aurora and airglow with low-cost multi-wavelength imager system
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Takanori Nishiyama, Akimasa Yoshikawa, Gustavsson Bjorn, Kauristie Kirsti, Enell Carl-fredrik, Brandstrom Urban, Sergienko Tima, Kozlovsky Alexander, Tero Raita, Vanhamaki Heikki
2. 発表標題 3D current system of auroral vortices in the discrete arc estimated by auroral tomography and local KRM methods
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ogawa, Y., A. Kadokura, Y. Tanaka, and WMI team
2. 発表標題 Network observations of aurora and airglow with low-cost multi-wavelength imager system
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science
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
研究分担者	八木谷 聡 (Yagitani Satoshi) (30251937)	金沢大学・電子情報通信学系・教授 (13301)	
研究分担者	田中 良昌 (Tanaka Yoshimasa) (50425766)	国立極地研究所・先端研究推進系・特任准教授 (62611)	
研究分担者	小川 泰信 (Ogawa Yasunobu) (00362210)	国立極地研究所・共同研究推進系・教授 (62611)	

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 分 担 者	細川 敬祐 (Hosokawa Keisuke) (80361830)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	

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