

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287127

研究課題名(和文) 深内部磁気圏における高エネルギーイオン生成・輸送機構とそのイオン種依存性の解明

研究課題名(英文) Investigation of creation and transport mechanisms of energetic ions in deep inner magnetosphere and their dependence on ion species

研究代表者

能勢 正仁 (Nose, Masahito)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90333559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：気象衛星ひまわりやGPS衛星が飛翔する地球周辺の宇宙空間(内部磁気圏)は、荷電粒子からなるプラズマで満たされている。内部磁気圏のプラズマは、平時は水素イオンが主成分であるが、磁気嵐が起こると酸素イオンの含有量が急激に増加する。この研究では、内部磁気圏を観測している科学衛星のデータを解析し、その原因の究明を行った。その結果、「電離層から内部磁気圏へ酸素イオンが直接流出しており、それが磁場双極子化に伴う微小磁場擾乱によりその場で選択的に加速される」ためであることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The inner magnetosphere, that is, the near-Earth space where the weather satellite "Himawari" and the GPS satellites are flying, is filled with plasma consisting of charged particles. The dominant component of plasma in the inner magnetosphere is proton during ordinary times, whereas it becomes O<sup>+</sup> ion once geomagnetic storms occur. In this study, we investigated the cause of the ion composition change, using data obtained by scientific satellites surveying the inner magnetosphere. It was found that O<sup>+</sup> ions are directly flowing into the inner magnetosphere and they are accelerated locally and selectively by electromagnetic field disturbances accompanying with magnetic field dipolarization.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：リングカレント イオン組成 磁気嵐 サブストーム 酸素イオントールス 内部磁気圏

1. 研究開始当初の背景

内部磁気圏における高エネルギープラズマのイオン組成は、静穏時には大半が水素イオン(H<sup>+</sup>)であるが、磁気嵐時には酸素イオン(O<sup>+</sup>)の割合が急激に増加し、時には半分以上を占めることが1980年代から報告されてきた[e.g., Williams, 1981; Hamilton et al., 1988]。O<sup>+</sup>イオンの供給源は究極的には電離層の低エネルギープラズマであり、そこから内部磁気圏へ至るまでにO<sup>+</sup>イオンがどのように加速され、どのような経路を辿るのかについては論争が続いている。

このような「内部磁気圏における高エネルギーイオンの生成と輸送、およびそのイオン種依存性」は、宇宙科学分野での重要な研究テーマとして捉えられ、世界各国で研究が行われてきた。

2012年8月には、深内部磁気圏を詳細に観測するためのVan Allen Probes衛星が米国により打ち上げられ、電磁場や高エネルギーイオンのデータを取得しはじめている。3年の研究期間(2013年4月~2016年3月)内にこの衛星データを解析し、深内部磁気圏におけるイオン加速・輸送のメカニズムを明らかにしておけば、その結果を基にして、日本で2016年冬に打ち上げを予定しているERG衛星のデータを有効に活用することができ、大きな意義・波及効果が期待できる。

2. 研究の目的

- 深内部磁気圏において、磁気嵐時には高エネルギープラズマのイオン組成が大きく変化するが、その原因(イオンの加速と輸送、およびそのイオン種依存性)については、統一的な見解はない。
- 研究代表者は、これまでの自分自身の研究結果に基づき、「電離層から深内部磁気圏へ低エネルギーO<sup>+</sup>イオンが直接流出して酸素イオントールラスが事前に形成されており、それが磁場双極子化に伴う微小磁場擾乱によりその場で選択的に加速され、深内部磁気圏におけるリングカレントのイオン組成変化を引き起こしているのではないか」という独自のアイデアを提唱した。
- この研究では、内部磁気圏を飛翔する編隊型人工衛星Van Allen Probes衛星およびその他の衛星のデータ解析を行い、上記のアイデアの是非を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、具体的には次のような研究課題を設定し、研究を進めた。

研究課題1：磁場双極子化イベントについての衛星データ解析

- (a) 磁場双極子化中に現れる微小電磁場擾乱の性質(典型的周波数、擾乱の原因となるプラズマ不安定性モードなど)の解明。

- (b) イオンフラックス変化(イオン種依存性、スペクトル変化など)の解明。

研究課題2：微小電磁場擾乱とイオン加速の計算機シミュレーション

- (a) 微小電磁場擾乱の再現と衛星観測の比較。  
 (b) 再現された電磁場擾乱の下でのイオン加速の数値計算実験と衛星観測の比較。

研究課題3：酸素イオントールラスについての衛星データ解析

- (a) 酸素イオントールラスの性質(発生するL値、プラズマ圏界面との相対位置、磁気嵐のフェーズ依存性など)の解明。  
 (b) プラズマ圏界面付近で低エネルギーO<sup>+</sup>イオンが集積する機構の解明。

4. 研究成果

(1) ETS-VIII衛星・AMPTE/CCE衛星のデータ解析に基づいたO<sup>+</sup>イオン加速の研究

ETS-VIII衛星・AMPTE/CCE衛星のデータを解析し、磁気嵐中に起こった内部磁気圏における磁場双極子化を7例解析した。すべてのイベントにおいて、①磁場双極子化は微小磁場擾乱を伴い、その擾乱の典型的な周波数は酸素イオンの旋回周波数に近いこと、②微小磁場擾乱は磁力線に平行方向に卓越すること、③擾乱の出現に伴って、1-10 keVのO<sup>+</sup>イオンのフラックス増加が見られること、が分かった(図1, 2)。

以上の微小磁場擾乱の性質(①、②)から、それがドリフト励起電磁イオンサイクロトロン波動によるものであることを示した。そして、微小電磁場擾乱が、その場でのO<sup>+</sup>イオンの選択的加速に重要な役割を果たす可能性があることを議論した。

次に、この加速過程を明らかにするため、計算機シミュレーションを行った。簡単な磁場モデル中でのドリフト励起電磁イオンサイクロトロン波動の線形分散関係式を用いて、この波動を計算機の中で再現し、それによるイオン加速の効率を調べた。その結果、H<sup>+</sup>よりもO<sup>+</sup>のほうが強く加速され、粒子スペクトルの形も大きくゆがめられることが明らかになった(図3)。この特性は③の観測結果とよく一致していた。

この研究成果は2014年にJ. Geophys. Res. 誌に掲載された。(論文番号⑦)

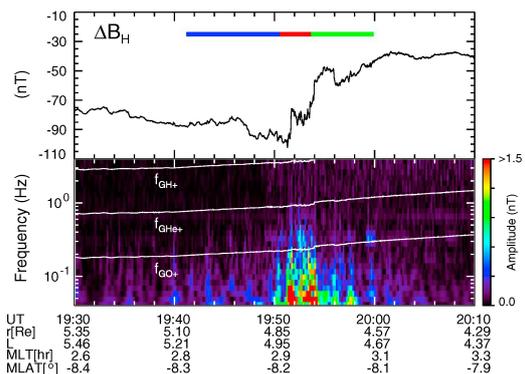


図1: AMPTE/CCE衛星で1987年12月10日に観測された磁場双極化イベント。磁場と平行方向に微小磁場擾乱が現れ、その擾乱の典型的な周波数は酸素イオンの旋回周波数に近いことが分かる。

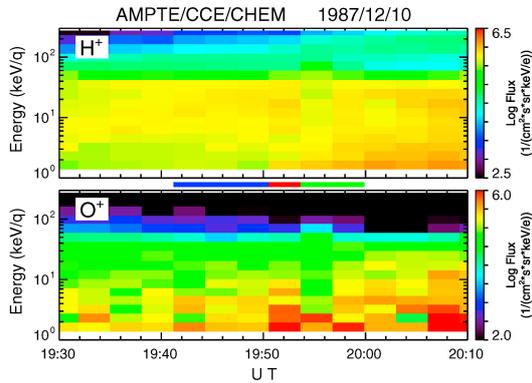


図2: AMPTE/CCE衛星で1987年12月10日に観測された磁場双極化イベント。磁場と平行方向に微小磁場擾乱が現れ、その擾乱の典型的な周波数は酸素イオンの旋回周波数に近いことが分かる。

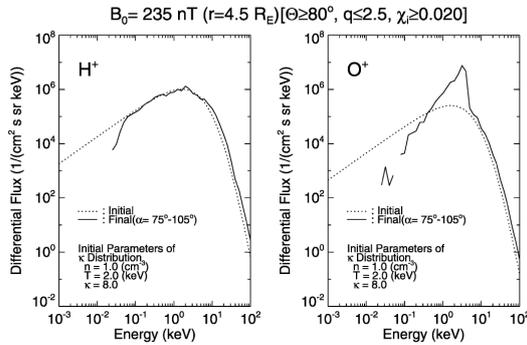


図3: 計算機シミュレーションで求めた粒子スペクトルの変化。H<sup>+</sup>よりもO<sup>+</sup>のほうが強く加速され、粒子スペクトルの形が大きく歪められている。

## (2) Van Allen Probes 衛星のデータ解析に基づいたO<sup>+</sup>イオン加速の研究

編隊型人工衛星Van Allen Probes衛星の磁場データ、イオンフラックスデータを用い、磁場双極化イベントについての解析を行った。2012年10月1日から2013年10月31日までの13ヶ月の期間から74例の磁場双極化イベントを見出し、それらの統計的性質を調べた。これほど多くの磁場双極化イベントが内部磁気圏で起こりうることを発見したのは、本研究が世界で初めてである。

統計解析の結果、①双極化の時間スケールは5分程度であること、②双極化中に強い磁場擾乱が現れ、その擾乱の典型的な周波数はO<sup>+</sup>イオンの旋回周波数に近いこと、③20-50 keVのイオンフラックスが増大し、その増加はO<sup>+</sup>イオンのほうがH<sup>+</sup>イオンより大きいこと、④双極化の開始後数分してから、O<sup>+</sup>イオンのみに、時間分散性を持つ0.1-5 keVのフラックス増加が見られること、⑤この時間分散性O<sup>+</sup>イオンフラックス増加は磁場と平行方向または反平行方向のみに現れること、が明らかになった(図4)。

①-③の結果は、過去にNosé et al. [2010, 2014]がイベント解析に基づいて報告してきたことと調和的であり、こうした性質は内部磁気圏における磁場双極化の一般的なものであることが確実にされた。④、⑤の結果は、今回の研究により初めて明らかになったことであり、内部磁気圏への電離層起源イオン(O<sup>+</sup>イオン)の供給に磁場双極化が重要な役割を果たしていることを示唆するものである。

以上の研究成果は、J. Geophys. Res. 誌に投稿中である。

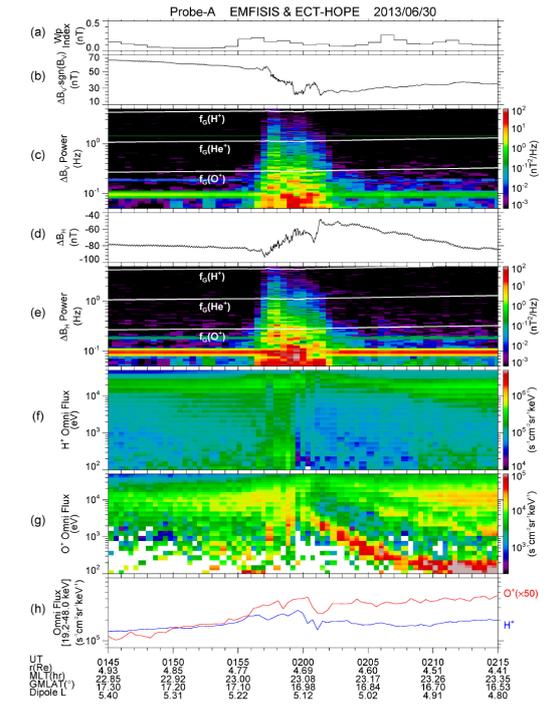


図4: Van Allen Probes衛星により2013年6月30日に観測された磁場双極化現象。双極化に伴って、典型的な周期がO<sup>+</sup>イオンの旋回周波数に近い微小磁場擾乱が現れていることが分かる。また、20-50 keVのイオンフラックスが増大し、その増加はO<sup>+</sup>イオンのほうがH<sup>+</sup>イオンより大きいことや、O<sup>+</sup>イオンのみに時間分散性を持つ0.1-5 keVのフラックス増加が見られる様子が分かる。

## (3) Van Allen Probes衛星のデータ解析に基づいた酸素イオントラスの研究

2012年11月12日から15日にかけて、Van Allen Probes衛星は朝側において、継続的にULF波動を観測していた。このULF波動の周波数と磁気圏磁場モデルにおける波動方程式の数値解より、プラズマの平均質量密度( $\rho$ )を算出した。同時に取得されていたプラズマ波動のデータから高域混成周波数を選び出し、電子密度( $n_e$ )を算出した。この両者のデータから $\rho/n_e$ を計算することにより、プラズマ平均質量(M)を推定した。その結果、磁気嵐主相においては、プラズマトラフ全体ではM=4-7 amu、プラズマ圏ではM $\sim$ 1 amuであることが分かった。しかし、磁気嵐回復相においては、プラズマトラフではM=1-2 amuに減少

する一方、プラズマ圏界面に近い $L=3.0-4.5$ では、 $M=4.5-8$  amuにも到達するような重イオン密度の高い領域、すなわち酸素イオントラスが見つかった(図5)。

この結果は、磁気嵐が始まってすぐに、低エネルギーの $O^+$ イオンがプラズマトラフ全体に供給され、その後、回復相になってから酸素イオントラスが形成されることを示している。

そこで、酸素イオントラスの形成過程を計算機シミュレーションの方法を用いて調査した。計算の結果、電離層から内部磁気圏へ供給される低エネルギーの酸素イオンが、磁気嵐回復相で徐々に減少していく対流電場中で東向きにドリフト運動を行うためであることが分かった。さらに、酸素イオントラスの形状は、経度方向に一様ではなく朝側から昼側に局在化したものであることも分かった(図6)。

この研究成果は2015年にJ. Geophys. Res. 誌に掲載された。(論文番号③)

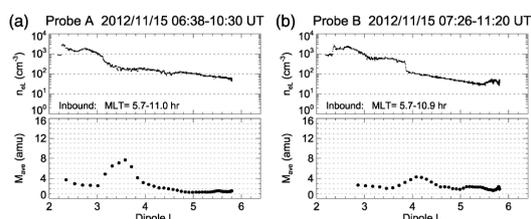


図5: Van Allen Probes衛星により2012年11月15日に観測された酸素イオントラス。プラズマ圏界面に近い $L=3.0-4.5$ で、プラズマ平均質量が $4.5-8$  amuにも到達するような重イオン密度の高い領域が局所的に現れている。

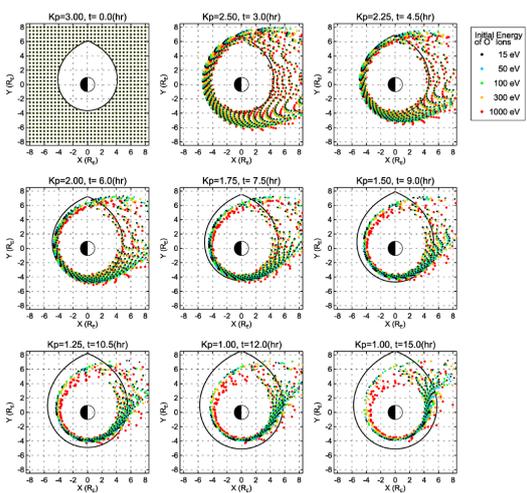


図6: 計算機シミュレーションで求めた酸素イオントラスの形成過程。経度方向に一様ではなく朝側から昼側に局在化した酸素イオントラスが形成されていく様子が分かる。

#### (4) プラズマシートイオン組成とサブストーム発生頻度の長期間変化の研究

この研究課題に関して、プラズマシートのイオン組成が1992年10月から2015年10月までの23年間にどのように変化しており、そ

れがサブストームの発生頻度にどのような影響を及ぼし得るかについての研究も行った。

Geotail衛星で取得されたイオンフラックスのデータと柿岡地磁気観測所の地磁気データを用いて解析したところ、①プラズマシートのプラズマ平均質量は、太陽活動度最小時には $1.1$  amu程度だが、太陽活動度最大時には $1.5-2.7$  amuにまで増加すること、②その変化は、太陽紫外線量の指数であるMgII指数と良い相関にあること、③サブストーム発生の指標であるPi2地磁気脈動のうち、非外部励起性イベントの発生頻度については、プラズマ平均質量と逆相関であること、が明らかになった(図7)。

プラズマシートの重イオンは、サブストームを引き起すプラズマ不安定性を抑制し、発生頻度を下げると考えられる。

この研究成果は2016年にGeosci. Lett. 誌に掲載された。(論文番号①)

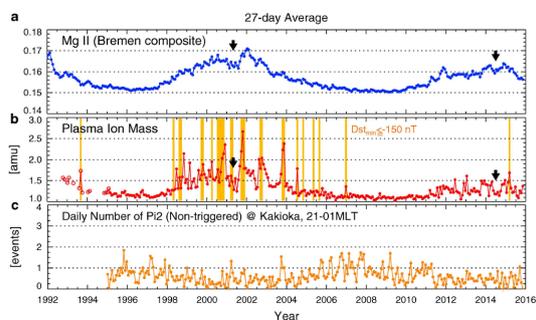


図7: Geotail衛星および柿岡地磁気観測所のデータから明らかになった、23年間に亘るプラズマシートのプラズマ平均質量と非外部励起性サブストーム発生頻度の長期変動。

#### 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 9件)

- ① Nosé, M., Long-term variations in the plasma sheet ion composition and substorm occurrence over 23 years, Geosci. Lett., doi:10.1186/s40562-015-0033-0, 2016.
- ② Yamamoto, K., M. Nosé, N. Mashiko, K. Morinaga, and S. Nagamachi, Estimation of magnetospheric plasma ion composition for 1956-1975 by using high-time resolution geomagnetic field data created from analog magnetograms, J. Geophys. Res., 121, doi:10.1002/2016JA022510, 2016, in press.
- ③ Nosé, M., S. Oimatsu, K. Keika, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, S. De Pascuale, C. W. Smith, R. J. MacDowall, S. Nakano, G. D. Reeves, H. E. Spence, and B. A. Larsen, Formation of the oxygen torus in the inner magnetosphere: Van Allen

- Probes observations, *J. Geophys. Res.*, 120: 1182-1196, doi:10.1002/2014JA020593, 2015.
- ④ Ohtani, S., M. Nosé, Y. Miyashita, and A. T. Y. Lui, Responses of different ion species to fast plasma flows and local dipolarization in the plasma sheet, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JA020517, 2015.
- ⑤ Gkioulidou, M., S. Ohtani, D. G. Mitchell, A. Ukhorskiy, G. D. Reeves, D. L. Turner, J. W. Gjerloev, M. Nosé, K. Koga, J. V. Rodriguez, L. J. Lanzerotti, Spatial structure and temporal evolution of energetic particle injections in the inner magnetosphere during the 14 July 2013 substorm event, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JA020872, 2015.
- ⑥ Nakamura, S., Y. Omura, M. Shoji, M. Nosé, D. Summers, and V. Angelopoulos, Subpacket structures in EMIC rising tone emissions observed by the THEMIS probes, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JA020764, 2015.
- ⑦ Nosé, M., K. Takahashi, K. Keika, L. M. Kistler, K. Koga, H. Koshiishi, H. Matsumoto, M. Shoji, Y. Miyashita, and R. Nomura, Magnetic fluctuations embedded in dipolarization inside geosynchronous orbit and their associated selective acceleration of  $O^+$  ions, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2014JA019806, 2014.
- ⑧ Machida, S., Y. Miyashita, A. Ieda, M. Nosé, V. Angelopoulos, and J. P. McFadden, Statistical visualization of the Earth's magnetotail and the implied mechanism of substorm triggering based on superposed epoch analysis of THEMIS data, *Ann. Geophys.*, 32, 99-111, doi:10.5194/angeo-32-99-2014, 2014.
- ⑨ Nakamura, S., Y. Omura, S. Machida, M. Shoji, M. Nosé, and V. Angelopoulos, Electromagnetic ion cyclotron rising tone emissions observed by THEMIS probes outside the plasmopause, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JA019146, 2014.
- ⑩ Nosé, M., S. Oimatsu, K. Keika, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, S. De Pascuale, C. W. Smith, R. J. MacDowall, S. Nakano, G. D. Reeves, H. E. Spence, and B. A. Larsen, Formation of the oxygen torus in the inner magnetosphere: Van Allen Probes observations, Asia Oceania Geosciences Society 12th Annual Meeting, August 2015, Singapore (Oral, Invited).
- ⑪ Nosé, M., Long-term variations of ion composition in the plasma sheet and its possible effect on substorm occurrence, Asia Oceania Geosciences Society 12th Annual Meeting, August 2015, Singapore (Oral, Invited).
- ⑫ Nosé, M., S. Oimatsu, K. Keika, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, S. De Pascuale, C. W. Smith, R. J. MacDowall, S. Nakano, G. D. Reeves, H. E. Spence, and B. A. Larsen, Formation of the oxygen torus in the inner magnetosphere: Van Allen Probes observations, IUGG 2015, Prague, Czech Republic, June 2015 (Oral, Invited).
- ⑬ Nosé, M., Long-term variations of ion composition in the plasma sheet and its possible effect on substorm occurrence, IUGG 2015, Prague, Czech Republic, June 2015 (Oral, Invited).
- ⑭ Nosé, M., Van Allen Probes observations of the oxygen torus in the inner magnetosphere, Korean Space Science Society 2015 Spring Meeting, April 2015, Gohan, Korea (Oral, Invited).
- ⑮ Nosé, M., Long-term variations of substorm occurrence rate estimated from geomagnetic observations over 30 years, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, June 2014, Sapporo (Oral, Invited).
- ⑯ Nosé, M., Long-term variations of substorm occurrence rate estimated from geomagnetic observations over 30 years, IAGA 2013, August 2013, Merida, Mexico (Oral, Invited).
- ⑰ Nosé, M., K. Takahashi, R. R. Anderson, and H. J. Singer, Oxygen torus in the deep inner magnetosphere and its contribution to recurrent process of  $O^+$ -rich ring current formation, Asia Oceania Geosciences Society 10th Annual Meeting, June 2013, Brisbane, Australia (Oral, Invited).
- ⑱ Nosé, M., K. Takahashi, K. Keika, K. Koga, H. Koshiishi, and H. Matsumoto, Magnetic fluctuations embedded in dipolarization inside geosynchronous orbit and their possible role in selective acceleration of  $O^+$  ions, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年

[学会発表] (計 10 件)

国際会議における招待講演のみ。

- ① Nosé, M., K. Keika, C. A. Kletzing, C. W. Smith, R. J. MacDowall, G. D. Reeves, and H. Spence, Van Allen Probes observations of dipolarization and its associated  $O^+$  flux variations in the inner magnetosphere, 2015 AGU Fall Meeting, December 2015, San Francisco, USA (Oral, Invited).

5月, 千葉県・幕張 (Oral, Invited).

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/~nose/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

能勢 正仁 (NOSE, Masahito)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 90333559

### (2) 研究分担者

桂華 邦裕 (KEIKA, Kunihiro)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助

教

研究者番号: 10719454

宮下 幸長 (MIYASHITA, Yukinaga)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助

教

研究者番号: 20435811

野村 麗子 (NOMURA, Reiko)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機

構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェク

ト研究員

研究者番号: 30637690

中野 慎也 (NAKANO, Shinya)

統計数理研究所・モデリング研究系・助教

研究者番号: 40378576

尾花 由紀 (OBANA, Yuki)

大阪電気通信大学・工学部・講師

研究者番号: 50398096

小路 真史 (SHOJI, Masafumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助

教

研究者番号: 80722082

### (3) 連携研究者

該当なし