

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740322

研究課題名（和文） 地上・衛星の多点観測データを用いた深内部磁気圏擾乱の発達・減衰に関する総合解析

研究課題名（英文） Study on development and decay of inner magnetospheric disturbances by using ground and satellite multipoint observations

研究代表者

能勢 正仁 (NOSE MASAHIRO)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：90333559

研究成果の概要（和文）：

磁気圏擾乱の指標である Dst 指数には、リングカレントなどの磁気圏電流と地球内部に誘起された電流の寄与が混在している。これまで、地球内部誘起電流の寄与は約 25% で一定と考えられてきたが、今回の研究により、その割合は 20% から 55% の間で変化し、Dst 指数の時間変化率と高い相関を持つことが明らかになった。また、リングカレントの発達に関しては、過去に報告されてきたような「プラズマシートからの高エネルギー粒子の流入」よりも、「その場に既に存在していた低エネルギー粒子が短周期の磁場擾乱によって受けるローカルな非断熱的加速」がより重要な役割を果たしていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

The field variations during geomagnetic storms are produced by both the magnetospheric currents such as the ring current and the induced currents inside the Earth's interior. Previous studies have reported that the magnetic field variations due to the induced currents are about 25% of the Dst index; but we found that the Earth-induced current contribution varies between 20% and 55%, and depends on the rate of change of the Dst index. With regard to ring current development, we suggest that the non-adiabatic acceleration of preexisting cold ions by magnetic fluctuations associated with dipolarization plays a more important role than the energetic particle injection from the plasma sheet into the inner magnetosphere.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星磁気圏、磁気嵐、内部起因磁場、サブストーム、リングカレント、高エネルギー酸素イオン、粒子加速、酸素イオントラス

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁気圏擾乱の指標としてDst指数が研究

に広く利用されている。このDst指数はリングカレントの強度を表していると考えられ

ることが多いが、実際にはリングカレントの効果(外部起因)だけでなく、地球の内部に誘起された電流の効果(内部起因)が混ざったものである。Dst指数のうち、内部起因電流が寄与している割合については、過去の研究では約25%という一定値で大雑把な評価しか行われてこなかった[e. g., Langel and Estes, 1985]。ところが地球が非一様な電導体である以上、誘起される内部起因電流は一定ではなく、周期依存性(時間変化依存性)があると予想される。そのため、実際の内部起因電流の割合が、約25%という値からどのくらい異なるかを調べる必要がある。

(2) 従来の研究では、L~4あたりのリングカレント領域の磁場構造はそれほど大きく変化しないと考えられることが多く、静的な双極子磁場による近似が行われてきた。しかしながら、深内部磁気圏を飛翔するMDS-1衛星を用いたNosé et al. [2000]の研究結果によると、こうした領域でも、磁場双極子化が頻繁に観測されることが明らかになってきた。一般に、磁場双極子化が起こるとプラズマ粒子のローカルな加速が起こり、その加速は質量依存性を持つと考えられている。そのため、これまで提唱されてきたように「強い対流電場や磁気圏尾部でのサブストームにより、プラズマシートからリングカレントへプラズマが輸送される」のではなく、深内部磁気圏における磁場双極子化が、その場でのリングカレントの発達やイオン組成の変化に重要な役割を果たしているのではないかと考えるようになった。

## 2. 研究の目的

(1) Dst指数のうち誘起電流(内部起因電流)および磁気圏電流(外部起因電流)の効果を正しく評価するためには、ある程度均質に分布した世界中の観測所から、高時間分解能の地磁気データを収集する必要がある。これらの多点観測のデータを用いて、数分から1時間程度の時間間隔で球関数展開し、得られたガウス係数の比較から、内部起因・外部起因の割合が時間的にどのように変化しているかを調べることを目的とする。

(2) 磁場双極子化によるその場での粒子加速というアイデアの正否を判断するには、リングカレント領域を直接的・間接的に観測する人工衛星のデータが必要になる。今回の研究では、MDS-1衛星とIMAGE衛星の同時観測イベントに注目して、L~4辺りでの磁場双極子化がリングカレントをその場でどの程度まで形成しうることについて調べることを目的とする。特に、その加速メカニズムに質量依存性があるかどうかに関心を当てる。

## 3. 研究の方法

(1) ① 第23太陽活動周期の極大期であった2000年以降に起こった磁気嵐イベントを選び出す。それらのイベントについて、世界約80ヶ所の1分値のデータを用いて数分~1時間程度の時間間隔で球関数展開し、内部起因項と外部起因項に分離する。

② 内部起因項がDst指数に対してどの程度の大きさを持つのかに着目し、その割合が時間的にどのように変わるのかについてイベント解析・統計解析を行う。また、同じDst指数の値でも、擾乱の発達・減衰の速さや擾乱の相(主相・回復相)によって、内部起因項の大きさが異なるのかについて調査する。

(2) ① 深内部磁気圏で起こった磁場双極子化イベントを約1年半の期間に及ぶMDS-1衛星のデータベースから抽出する。

② これらのイベントに対し、IMAGE/HENA撮像器のデータを用いて、双極子化が起こったときにH+イオン、O+イオンのどちらが多く増加しているかを解析し、加速が質量依存性を持つかどうかについて調べる。

③ IMAGE/HENAのデータを用いて、双極子化が起こった後、リングカレントが広い地方で発達していくのかそうでないかを調査する。発達が起こっていれば、深内部磁気圏での双極子化がその場での粒子加速によってリングカレントを効果的に生成しうると推定できる。

## 4. 研究成果

(1) 地磁気緯度が60度から-60度の中低緯度に位置する約80ヶ所の地磁気観測所のデータを用いて、10分間隔で球関数展開を行った。推定するガウス係数としては、 $g_1^0$ 、 $g_1^1$ 、 $h_1^1$ 、 $q_1^0$ 、 $q_1^1$ 、 $s_1^1$ の6項を考えた。これらの係数からDst指数の4観測所での内部起因磁場と外部起因磁場を求め、Dst指数算出と同様の方法で、内部起因のDst(Int)指数と外部起因のDst(Ext)指数を計算した。図1は2006年12月15日の磁気嵐についての解析例である。

2006年に起こった磁気嵐について統計的に調べたところ、内部起因電流の割合は、従来の研究で報告されてきたようなDst指数の約25%で一定という単純なものではなく、20%から55%の間で変化していた。さらに、この割合は、Dst指数が5-7時間の間にどの程度変化したかという時間変動率と高い相関を持つことが示された。これらは、研究開始当初の予想通り、「地球は有限な電気伝導体であるため、内部起因磁場が生じる基本原理は電磁誘導である」ということを初めてデータか

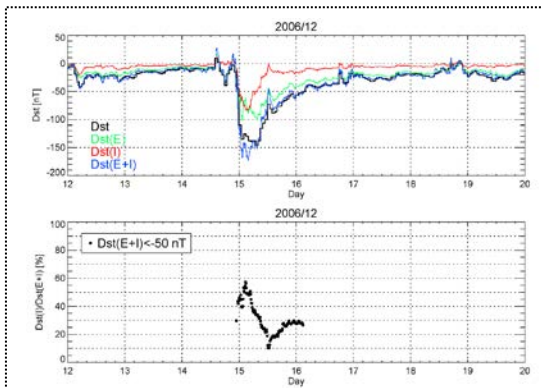


図1：(上)2006年12月15日に起こった磁気嵐について、Dst指数[黒線]、Dst(Ext)指数[緑線]、Dst(Int)指数[赤線]、およびDst(Ext)+Dst(Int)[青線]を示した。(下)内部起因電流の割合の時間変化。20%から55%の間で割合が変化していることが分かる。

ら明らかにした成果である。磁気嵐、リングカレントの過去の研究では、内部起因の効果はDst指数の約25%という一定値を考慮することが多かったが、これでは、磁場が急激に減少している際には過小な見積もりとなることが分かった。

(2) ① 内部磁気圏を飛翔するMDS-1衛星の磁場データと極軌道のIMAGE衛星で取得された高速中性粒子イメージングデータを用いて、サブストーム時の磁場変動とそれに伴う粒子加速・リングカレントの発達について解析を行った。地球半径の3.0倍から6.5倍まで離れた領域について、2002年の約半年間のデータを調べたところ、図2に示すようなイベントを17例見つけることができ、それらを解析したところ、次のような結果が得られた。(a)サブストームに伴って、磁場双極子化現象が深内部磁気圏においても観測される、(b)この観測確率は、衛星の場所に応じて20-50%程度の範囲になる、(c)この双極子化現象の後、磁気嵐が発達しており、特に0+イオンのフラックスが大幅に増大する、(d)磁場双極子化現象と共に、時間スケールが3-5

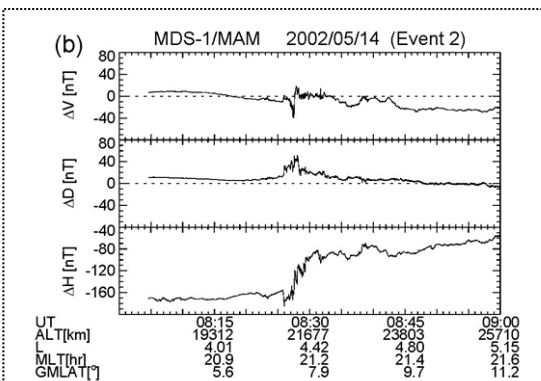


図2：2002年5月14日にL=4.3の内部磁気圏でMDS-1衛星により観測された磁場双極子化現象。双極子化に伴って、時間スケールの短い磁場擾乱が現れている。

秒の短周期の磁場擾乱が現れる。過去の研究では、「深内部磁気圏は安定しており、ダイナミックな変動は存在しない」と考えられてきたため、以上の解析結果は世界で初めてのものである。

これらの観測結果から、リングカレントの発達には、過去の研究で報告されてきたような「プラズマシートからの高エネルギー粒子の流入」よりも、「その場に既に存在していた低エネルギー粒子が短周期の磁場擾乱によって受けるローカルな非断熱的加速」がより重要な役割を果たしている」と結論付けた。

② AMPTE/CCE衛星による磁場および高エネルギーイオンフラックスの直接観測データを解析し、上記結論の是非をさらに検討した。

1987年12月10日の1951UTごろに起こった磁場双極子化をAMPTE/CCE衛星は、真夜中過ぎの内部磁気圏(L~4.9, MLT~2.9 hr)で観測していた(図3)。この磁場双極子化の際には微小な磁場擾乱が現れており、スペクトル解析の結果、その特性周期は数秒程度で、その場における酸素イオンの旋回周期に近いことが分かった。これは、MDS-1衛星で観測されたイベントの性質と非常によく似ており、擾乱のこうした特性が内部磁気圏で一般

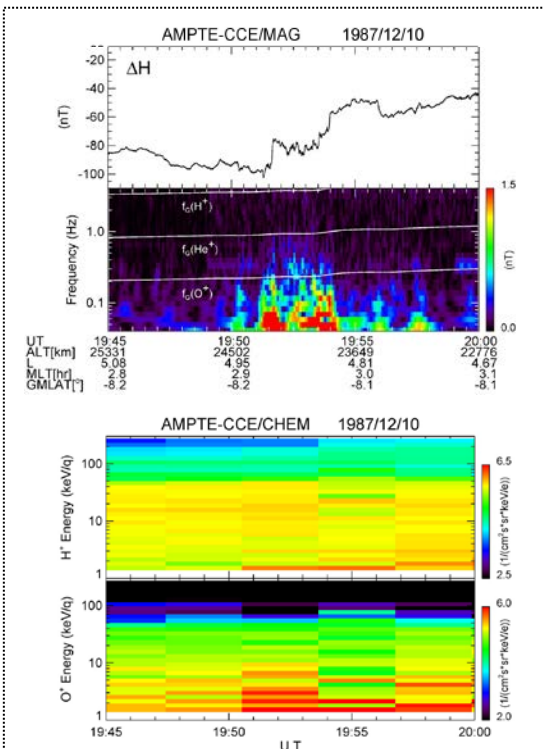


図3：(上)1987年12月10日にL=4.9の内部磁気圏でAMPTE/CCE衛星により観測された磁場双極子化現象。MDS-1衛星の観測結果と同様、双極子化に伴って、時間スケールの短い磁場擾乱が現れている。(下)磁場双極子化現象が起こった時の高エネルギーH+イオンとO+イオンのフラックス変化。特に、1-10 keVのO+イオンフラックスが大きく増加している様子が分かる。

的なものであることを示唆している。次に、イオンフラックスの変化を調べたところ、O<sup>+</sup>イオンは1-10 keVのエネルギー範囲で増大している一方、H<sup>+</sup>イオンはほとんど変化していなかった。また、O<sup>+</sup>イオンフラックスの増大は、主に磁力線に垂直な方向の速度を持つものだけに見られた。

以上のAMPTE/CCE衛星データの解析結果からも、今回の研究課題で提唱したリングカレントの発達メカニズムの正当性が裏付けられた。

③ 「その場に既に存在していた低エネルギー粒子が短周期の磁場擾乱によって受けるローカルな非断熱的加速」について、計算機シミュレーションの手法を用いて検証を行った。具体的には、磁場双極子の際に現れる周期数秒程度の電磁場擾乱を、ドリフト励起電磁イオンサイクロトロン不安定によるものと考え、このプラズマ不安定性の線形解析結果から電磁場擾乱の計算機上での再現を行った。再現された擾乱が、衛星観測のものに似ていることを確認した上で、この擾乱中でイオンがどのような加速を受けるかについて、単一粒子軌道トレーシングの手法によって調べた。その結果、数eVのO<sup>+</sup>イオンはリングカレントのエネルギー帯の数十keV程度まで加速されることが明らかになった。逆に、数eVのH<sup>+</sup>イオンは、O<sup>+</sup>イオンほど有効に加速されないことも分かった。これらの結果は、実際に人工衛星で観測されるイオンの特性とよく一致する。

④ 低エネルギー酸素イオンが常に深内部磁気圏に存在しうるのかどうかについて、CRRES衛星の磁場・プラズマ波動データを用いて解析した。CRRES衛星で観測された長周期地磁気脈動の周期とプラズマ波動から推定される電子密度から、プラズマの平均イオン質量を求めることができる。4例について事例解析を行った結果、地球半径の4-5倍程度の場所に、酸素イオン高密度領域がトーラス状に存在することが明らかになった。図4は4例のうちの一つである。この酸素イオントーラスは、リングカレントの生成に重要な役割を果たしていると考えられる。

## 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19件)

- ① Nosé, M., Y. Ono, S. P. Christon, and A. T. Y. Lui, Revisiting the role of magnetic field fluctuations in nonadiabatic acceleration of ions during dipolarization, *J. Geophys. Res.*,

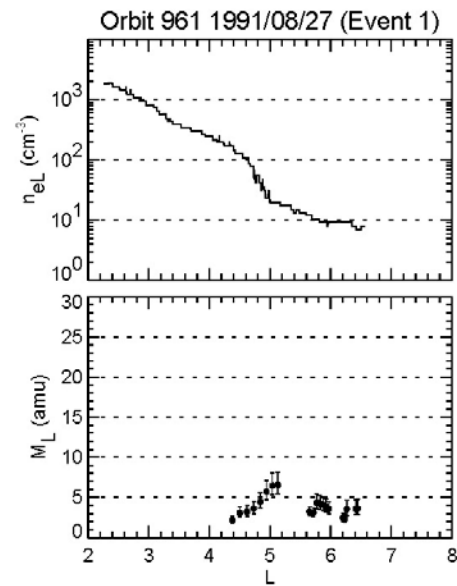


図4：(上)CRRES衛星で観測されたプラズマ波動から推定される電子密度分布。L~5あたりにプラズマ圏界面が存在する。(下) CRRES衛星で観測された長周期地磁気脈動の周期を用いて推定したプラズマの平均イオン質量。プラズマ圏界面のすぐ外側に平均イオン質量が増加した領域、すなわち酸素イオントーラスが認められる。

117, A02207, doi:10.1029/2012JA017518, 2012. (査読有)

- ② Nosé, M., T. Iyemori, L. Wang, A. Hitchman, J. Matzka, M. Feller, S. Egdorf, S. Gilder, N. Kumasaka, K. Koga, H. Matsumoto, H. Koshiishi, G. Cifuentes-Nava, J. J. Curto, A. Segarra, and C. Çelik, Wp index: A new substorm index derived from high-resolution geomagnetic field data at low latitude, *Space Weather*, 10, S08002, doi:10.1029/2012SW000785, 2012. (査読有)
- ③ Miyashita, Y., S. Machida, M. Nosé, K. Liou, Y. Saito, and W. R. Paterson, A statistical study of energy release and transport midway between the magnetic reconnection and initial dipolarization regions in the near-Earth magnetotail associated with substorm expansion onsets, *J. Geophys. Res.*, 117, A11214, doi:10.1029/2012JA017925, 2012. (査読有)
- ④ Nosé, M., S. Ohtani, P. C:son Brandt, T. Iyemori, K. Keika, and D. Y. Lee, Magnetic field depression at the Earth's surface during energetic neutral atom emission fade-out in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A06220, doi:10.1029/2010JA015799, 2011. (査読有)
- ⑤ 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<sup>+</sup>-rich ring current

- formation, *J. Geophys. Res.*, 116, A10224, doi:10.1029/2010JA016651, 2011. (査読有)
- ⑥ Fok, M.-C., T. E. Moore, S. P. Slinker, J. A. Fedder, D. C. Delcourt, M. Nosé, and S.-H. Chen, Modeling the super storm in November 2003, *J. Geophys. Res.*, 116, A00J17, doi:10.1029/2010JA015720, 2011. (査読有)
- ⑦ Reay, S. J., D. C. Herzog, S. Alex, E. P. Kharin, S. McLean, M. Nosé, and N. A. Sergeeva, Magnetic observatory data and metadata: Types and availability, in *Geomagnetic Observations and Models, IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 5*, edited by M. Manda and M. Korte, pp. 149-181, Springer, doi:10.1007/978-90-481-9858-0\_7, 2011. (査読有)
- ⑧ Menvielle, M., T. Iyemori, A. Marchaudon, and M. Nosé, Geomagnetic indices, in *Geomagnetic Observations and Models, IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 5*, edited by M. Manda and M. Korte, pp. 183-228, Springer, doi:10.1007/978-90-481-9858-0\_8, 2011. (査読有)
- ⑨ Keika, K., P. C. Brandt, M. Nosé, and D. G. Mitchell, Evolution of ring current ion energy spectra during the storm recovery phase: Implication for dominant ion loss processes, *J. Geophys. Res.*, 116, A00J20, doi:10.1029/2010JA015628, 2011. (査読有)
- ⑩ Tomita, S., M. Nosé, T. Iyemori, H. Toh, M. Takeda, J. Matzka, G. Bjornsson, T. Saemundsson, A. Janzhura, O. Troshichev, and G. Schwarz, Magnetic local time dependence of geomagnetic disturbances contributing to the AU and AL indices, *Ann. Geophys.*, 29, 673-678, doi:10.5194/angeo-29-673-2011, 2011. (査読有)
- ⑪ Teramoto, M., K. Takahashi, M. Nosé, D.-H. Lee, and P. R. Sutcliffe, Pi2 pulsations in the inner magnetosphere simultaneously observed by the Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers/Charge Composition Explorer and Dynamics Explorer 1 satellites, *J. Geophys. Res.*, 116, A07225, doi:10.1029/2010JA016199, 2011. (査読有)
- ⑫ Ohtani, S., M. Nosé, S. P. Christon, and A. T. Y. Lui, Energetic O<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> ions in the plasma sheet: Implications for the transport of ionospheric ions, *J. Geophys. Res.*, 116, A10211, doi:10.1029/2010JA016532, 2011. (査読有)
- ⑬ Iyemori, T., M. Hashizume, A. Saito, M. Nosé, N. Choosakul, T. Tsuda, Y. Odagi, Geomagnetism and the orientation of temples in Thailand, *J. Siam Soc.*, 99, 139-149, 2011. (査読有)
- ⑭ Nosé, M., Excitation mechanism of low-latitude Pi2 pulsations: Cavity mode resonance or BBF-driven process?, *J. Geophys. Res.*, 115, A07221, doi:10.1029/2009JA015205, 2010. (査読有)
- ⑮ Nosé, M., H. Koshiishi, H. Matsumoto, P. C. Brandt, K. Keika, K. Koga, T. Goka, and T. Obara, Magnetic field dipolarization in the deep inner magnetosphere and its role in development of O<sup>+</sup>-rich ring current, *J. Geophys. Res.*, 115, A00J03, doi:10.1029/2010JA015321, 2010. (査読有)
- ⑯ Shibahara, K., M. Nosé, T. Fritz, and J. Niehof, A new generation mechanism of butterfly pitch angle distributions of energetic ions: Multiple pitch angle scattering in the stretched magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 115, A07229, doi:10.1029/2010JA015281, 2010. (査読有)
- ⑰ Miyashita, Y., S. Machida, A. Ieda, D. Nagata, Y. Kamide, M. Nosé, K. Liou, T. Mukai, S. P. Christon, C. T. Russell, I. Shinohara, and Y. Saito, Pressure changes associated with substorm dipolarization in the near-Earth plasma sheet, *J. Geophys. Res.*, 115, A12239, doi:10.1029/2010JA015608, 2010. (査読有)
- ⑱ Takahashi, K., J. Bonnell, K.-H. Glassmeier, V. Angelopoulos, H. J. Singer, P. J. Chi, R. E. Denton, Y. Nishimura, D.-H. Lee, M. Nosé, and W. Liu, Multipoint observation of fast mode waves trapped in the dayside plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 115, A12247, doi:10.1029/2010JA015956, 2010. (査読有)
- ⑲ Keika, K., P. C. Brandt, S. Ohtani, D. G. Mitchell, K. Min, M. Nosé, T. Obara, H. Koshiishi, H. Matsumoto, Mass-dependent evolution of ENA energy spectra during storm-time substorms: Implication for O<sup>+</sup>-nonadiabatic acceleration, *J. Geophys. Res.*, 115, A00I12, doi:10.1029/2010JA015889, 2010. (査読有)
- [学会発表] (計 30 件)
- ① Nosé, M., K. Takahashi, K. Keika, L. Kistler, H. Koshiishi, H. Matsumoto, K. Koga, and P. C. Brandt, Dipolarization in the deep inner magnetosphere and selective acceleration of O<sup>+</sup> ions, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会、2012 年 10 月、北海道・札幌 (Oral).
- ② Nosé, M., T. Iyemori, L. Wang, A. Hitchman, J. Matzka, M. Feller, S. Egdorf, S. Gilder, N. Kumasaka, K. Koga, H. Matsumoto, H. Koshiishi, G. Cifuentes-Nava, J. J. Curto, A. Segarra, and C. Celik, Wp index: A new substorm index derived from high-resolution geomagnetic field data at low latitude, XVth IAGA Workshop on Geomagnetic

Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, June 2012, San Fernando, Cadiz, Spain (Poster).

- ③ Nosé, M., Evaluation of the earth-induced current contribution for a precise prediction of the Dst index, 2011 AGU Fall Meeting, December 2011, San Francisco, USA (Poster).
- ④ 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, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会、2011 年 11 月、兵庫県・神戸 (Oral).
- ⑤ 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, Workshop on Physical Processes in Non-Uniform Finite Magnetospheric Systems, September 2011, Fukuoka (Poster).
- ⑥ Nosé, M., Temporal variation of the Earth-induced current contribution to the Dst index, IUGG XXV 2011, July 2011, Melbourne, Australia (Oral).
- ⑦ Nosé, M., K. Takahashi, R. R. Anderson, and H. J. Singer Search for "oxygen torus" in the deep inner magnetosphere - Possible source of O+-rich ring current, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月、千葉県・幕張 (Oral, Invited).
- ⑧ Nosé, M., K. Takahashi, R. R. Anderson, and H. J. Singer, Detection of the oxygen torus in the inner magnetosphere using toroidal Alfvén waves, 2010 AGU Fall Meeting, December 2010, San Francisco, USA (Poster).
- ⑨ 能勢正仁、Temporal variation of the Earth-induced current contribution to the Dst index、第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会、2010 年 10 月、沖縄県・那覇 (Oral).
- ⑩ 能勢正仁、越石英樹、松本晴久、P. C:son Brandt、桂華邦裕、古賀清一、五家建夫、小原隆博、Magnetic field dipolarization in the deep inner magnetosphere and its role in development of O+-rich ring current, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会、2010 年 10 月、沖縄県・那覇 (Poster).

[その他]

ホームページ等

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

<http://s-cubed.info>

## 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

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：