

## 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 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22740321

研究課題名（和文）

衛星多点観測に基づく地球磁気圏のサブストーム開始に伴うエネルギー解放過程の解明

研究課題名（英文） Study of energy release processes associated with substorm onsets in the Earth's magnetosphere based on multispacecraft observations

研究代表者

宮下 幸長 (MIYASHITA YUKINAGA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・研究員

研究者番号：20435811

研究成果の概要（和文）：

激しいオーロラ活動を伴うサブストームの発生機構を解明するために、衛星多点観測に基づいて、地球磁気圏尾部におけるエネルギーの解放過程と輸送について調べた。解析の結果、サブストーム開始時の磁気リコネクション領域と磁場双極子化開始領域の間の領域と磁場双極子化開始領域におけるエネルギーの収支と輸送形態が明らかになった。特に、磁気リコネクションによって生成された高速プラズマ流が運ぶエネルギーだけでは、磁気圏近尾部の磁場双極子化開始に関係するエネルギーに足りないことを示した。

研究成果の概要（英文）：

To understand the triggering mechanism of substorms accompanied by severe auroral activity, we have studied energy release processes and transport in the Earth's magnetotail, based on multispacecraft observations. We revealed energy balance and transport at substorm onsets midway between the magnetic reconnection and initial dipolarization regions as well as in the initial dipolarization region. In particular, we showed that energy carried by fast plasma flows from the magnetic reconnection region is not sufficient for that related to the initial dipolarization in the near-Earth magnetotail.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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： サブストーム、磁気圏尾部、エネルギー解放、磁気リコネクション、磁場双極子化、オーロラ、衛星多点観測

## 1. 研究開始当初の背景

激しいオーロラ活動に密接な関係があるサブストームは、地球周辺の宇宙空間で見られる、プラズマ・電磁波の激しい擾乱の一つである。サブストームに関して、これまで数十年にもわたり盛んに研究され、非常におお

まかな描像は確立してきている。しかし、サブストームの発生機構は、長年、磁気圏物理学における基礎的な未解決問題の一つとして残されている。

これに対して、磁気リコネクションモデルやカレントディスラプション・モデルなど、

様々なモデルが提唱されてきたが、これらは、物理過程、発展過程、開始領域が大きく異なり、未だに激しい論争が続いている。ここで、磁気リコネクションと磁場双極子化の二つの現象は、サブストーム開始時に磁気圏尾部で起こる現象で、互いに何らかの因果関係があって発生し、ともに磁気圏尾部のエネルギー解放に重要な役割を果たしていると考えられているが、詳細はよくわかっていない。

この問題に対して、これまで私たちが行ってきた Geotail 衛星等のデータを用いた一連の統計解析（たとえば、Miyashita et al., 2000, 2009）により、磁気リコネクションと磁場双極子化がサブストーム発生の数分前に、2分の時間分解能で、ほぼ同時に起こることが示され、サブストーム開始時の磁気圏尾部全体の発展の全体像が明らかになってきた。しかし、鍵である各現象の物理過程や因果関係の詳細については、未解決の大問題のまま残されている。

ところが、Miyashita et al. [2009]により全圧力変化について詳細に調べたところ、サブストーム開始に伴う全圧力の減少（エネルギー解放）は、磁気リコネクションが起こる  $X \sim 18$  Re（地球から地球半径の約 18 倍の距離だけ離れた場所）付近で最初に起こるが、減少量は、磁気リコネクション領域や磁場双極子化開始領域 ( $X \sim 8$  Re) よりもむしろ、これら二領域の中間領域の方が顕著である、つまり、中間領域でエネルギー解放が顕著であることが明らかになった。一方、磁場双極子化開始領域では、エネルギーが増加することがわかった。特に前者は、非常に意外な結果である。過去の多くの研究では、この中間領域は単に、磁気リコネクションによる高速プラズマ流や磁場双極子化による波動が通過するだけだと考えられ、エネルギー解放領域としてはあまり重要視されていなかったが、実は、何か重要な物理過程が起きている可能性が出てきたのである。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では特に、中間領域におけるサブストーム発生に伴うエネルギー解放過程の詳細を明らかにすることを目的とする。統計解析から全体像は明らかになったが、時間空間分解能の制約があるため、詳細はわからなかった。ここで、多数のサブストーム事例における磁気圏尾部の THEMIS や Geotail 衛星等による多点同時観測データに基づいて、高速プラズマ流の振る舞い、波動粒子相互作用、電子加速にも注目して詳細な物理過程を調べ、解放されたエネルギーがどのような形でどこへ運ばれるのかを明らかにする。また、磁気圏・電離圏システム全体や解放されたエネルギーの流れを把握するため、磁気圏現象の反映であるオーロラや地磁気変化

の地上多点観測も合わせて解析する。これらの結果をもとに、磁気リコネクションと磁場双極子化の因果関係を考察し、サブストーム発生機構の解明に対して新たな手がかりを得る。

## 3. 研究の方法

### (1) エネルギーの解放過程と輸送

磁気リコネクション領域と磁場双極子化開始領域の中間領域、および、磁場双極子化開始領域におけるサブストーム開始時のエネルギー解放過程と輸送を調べるために、衛星多点観測によって得られた高エネルギーおよび低エネルギーのイオンと電子、磁場・電場・波動のデータを総合的に解析した。イオン・電子・磁場のエネルギー密度とエネルギーフラックス、および、電磁波動によるエネルギーフラックスから各領域におけるエネルギー収支と輸送を調べ、解放されたエネルギーがどのような形でどこへ運ばれるのかについて検討した。そして、磁場エネルギーとプラズマエネルギーの変換、波動と粒子との間のエネルギーのやり取り、電子加速も含めた物理過程を調べた。

まず、事例解析を行う前に、サブストーム開始時の磁気圏尾部全体のエネルギー解放過程・輸送の様子を把握するために、1287 例のサブストームについての Geotail 衛星のデータを用いて、時間重畳法による統計解析を行った。

次に、統計結果をふまえながら、5機の THEMIS 衛星や Geotail 衛星等による磁気圏尾部の多点同時観測データを基に、個々のサブストームについて事例解析を行った。THEMIS と Geotail 衛星の場合、衛星間距離は地球半径の数倍程度であるため、エネルギー解放が起きている現場とその周囲の、MHD から磁気圏スケールまでの大きな空間スケールで現象を捉えることができる。ここで、サブストームの発生やその影響を把握するために、カナダ・アラスカの広範囲にわたって設置されている THEMIS 地上オーロラカメラや磁力計のデータ、および、他の衛星のデータも調べた。

### (2) 磁気リコネクションと磁場双極子化の因果関係の検討

高速プラズマ流は、エネルギー輸送を担い、エネルギー解放を引き起こすのに重要な役割を果たす磁気リコネクションと磁場双極子化を結びつけていると考えられている。そのため、サブストームの発生機構の解明には、高速プラズマ流の振る舞いを明らかにすることが一つ重要な点である。これをより深く検討するためには、各現象がプラズマシートのどのような構造の中で発生するかを押さえておく必要があるため、これについて調べた。

Geotail 衛星の観測データを用いた統計解析から得たプラズマシートの背景構造をふまえて、THEMIS と Geotail 衛星によるサブストーム事例を解析することで、各過程の発生場所を特定した。この結果をもとに、高速流の振る舞いや磁場双極子化領域の拡大について考察を行った。

#### 4. 研究成果

(1) エネルギーの解放過程と輸送に関して、統計解析と事例解析から次のような結果を得た。

- ① サブストーム開始前から、ポインティングフラックスとして磁場のエネルギーが、ローブからプラズマシートに輸送されるが、サブストーム開始に伴ってポインティングフラックスは強まる。ポインティングフラックスは、磁気圏近尾部と中間領域では周囲よりも大きい。
- ② 中間領域のプラズマシートでは、ローブから運ばれたエネルギーとそこで解放されたイオン・電子の熱エネルギーと磁場エネルギーのうち数%から数十%が、主に高速流による熱フラックスとして地球方向と夕方方向に輸送される。
- ③ 波動によるポインティングフラックスは、磁場に平行なものも垂直なものも、高速流が運ぶエネルギーフラックスの 10%程度の大きさである。波動は、高速流がある時の方が、ない時よりも強い。
- ④ 磁場双極子化開始領域では、磁場双極子化に伴い、イオンと電子の熱エネルギーが増加すると同時に、熱フラックスとポインティングフラックスとしてエネルギーが流出する。
- ⑤ 尾部側から運ばれるエネルギーだけでは、磁場双極子化開始に関係するエネルギーに足りない。エネルギーの大部分は、ローブからポインティングフラックスとして運ばれてくる。

特に⑤の結果は、エネルギーの観点からは、磁気リコネクションだけではサブストーム開始過程のすべてを説明できないということの意味する。しかし、これで高速流が磁気圏近尾部の磁場双極子化を引き起こすことが否定されたわけではなく、その可能性は残されているので、今後さらに検討が必要である。また、本研究ではサブストーム開始前後の数分間に焦点を絞って解析を行ったが、それ以降も続くサブストームの発展に中間領域のエネルギーがどの程度、重要な役割を果たしているかについても、今後の課題である。

(2) 磁気リコネクションと磁場双極子化の因果関係に関連した解析からは、次のような結果を得た。

- ① 中間領域を含む、地球からの距離 $R \sim 12 R_e$

から $R \sim 20 R_e$ にかけては、磁場・イオン圧・電子圧の勾配が多少あるが、それよりも尾部側は勾配がほとんどなくなる。磁気リコネクションは、勾配がある領域の尾部側の端付近で発生する。

② 一方、 $R \sim 12 R_e$  よりも地球側は、磁場・イオン圧・電子圧の勾配が大きくなる領域である。磁場双極子化は、その領域の中で開始する。

これらの結果をふまえて、磁気リコネクション領域からの地球方向の高速プラズマ流の振る舞いや磁場双極子化領域の拡大について考察を行った。特に、プラズマ流は、尾部方向の電場や圧力勾配により経度方向に逸れるが、このことを考慮すると、そもそも本当に高速流が磁場双極子化開始領域に到達するのかが疑問に思われる。現在、高速流が磁場双極子化開始領域に到達して、磁場双極子化を直接引き起こすという説が主流であるが、今後、詳細なデータ解析を行い、高速流が経度方向に逸れる効果を考慮した検討を進める必要がある。

#### 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 11 件)

- ① 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, *Journal of Geophysical Research*, 117, A11214, doi:10.1029/2012JA017925, 2012. (査読有)
- ② Sergeev, V. A., I. A. Chernyaev, S. V. Dubyagin, Y. Miyashita, V. Angelopoulos, P. D. Boakes, R. Nakamura, and M. G. Henderson, Energetic particle injections to geostationary orbit: Relationship to flow bursts and magnetospheric state, *Journal of Geophysical Research*, 117, A10207, doi:10.1029/2012JA017773, 2012. (査読有)

- ③ **Miyashita, Y.**, Y. Kamide, K. Liou, C.-C. Wu, A. Ieda, N. Nishitani, S. Machida, Y. Saito, and T. Mukai, Successive substorm expansions during a period of prolonged northward interplanetary magnetic field, *Journal of Geophysical Research*, *116*, A09221, doi:10.1029/2011JA016719, 2011. (査読有)
- ④ **Miyashita, Y.**, S. Machida, and A. Ieda, A statistical study of pressure changes in the near-Earth magnetotail associated with substorm expansion onsets, in *The Dynamic Magnetosphere, IAGA Special Sopron Book Series, vol. 3*, edited by W. Liu and M. Fujimoto, pp. 125-132, Springer, Dordrecht, Netherlands, doi:10.1007/978-94-007-0501-2\_7, 2011. (査読有)
- ⑤ Ogasawara, K., Y. Kasaba, Y. Nishimura, T. Hori, T. Takada, **Y. Miyashita**, V. Angelopoulos, S. B. Mende, and J. Bonnell, Azimuthal auroral expansion associated with fast flows in the near-Earth plasma sheet: Coordinated observations of the THEMIS all-sky imagers and multiple spacecraft, *Journal of Geophysical Research*, *116*, A06209, doi:10.1029/2010JA016032, 2011. (査読有)
- ⑥ **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, *Journal of Geophysical Research*, *115*, A12239, doi:10.1029/2010JA015608, 2010. (Correction, *116*, A01299, doi:10.1029/2010JA016389, 2011) (査読有)
- ⑦ Zou, S., M. B. Moldwin, L. R. Lyons, Y. Nishimura, M. Hirahara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. J. Nicolls, **Y. Miyashita**, S. B. Mende, and C. J. Heinselman, Identification of substorm onset location and preonset sequence using Reimei, THEMIS GBO, PFISR, and Geotail, *Journal of Geophysical Research*, *115*, A12309, doi:10.1029/2010JA015520, 2010. (査読有)
- ⑧ Morioka, A., Y. Miyoshi, **Y. Miyashita**, Y. Kasaba, H. Misawa, F. Tsuchiya, R. Kataoka, A. Kadokura, T. Mukai, K. Yumoto, D. J. Menietti, G. Parks, K. Liou, F. Honary, and E. Donovan, Two-step evolution of auroral acceleration at substorm onset, *Journal of Geophysical Research*, *115*, A11213, doi:10.1029/2010JA015361, 2010. (査読有)
- [学会発表] (計 22 件)
- ① **Miyashita, Y.**, On the transition between the inner plasma sheet and the outer plasma sheet in the Earth's magnetotail, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012/12/07.
- ② **宮下幸長**、地球磁気圏尾部の内部プラズマシートと外部プラズマシートの遷移について、第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会、札幌、2012/10/21.
- ③ **Miyashita, Y.**, Relationship between substorm-associated processes in the magnetotail and plasma sheet structure, 11th International Conference on Substorms, Lüneburg, Germany, 2012/09/06.
- ④ **宮下幸長**、磁気圏尾部のサブストーム過程とプラズマシート構造の関係、第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会、神戸大学、2011/11/03.

- ⑤ **Miyashita, Y.**, Energy release midway between the magnetic reconnection and initial dipolarization regions in the near-Earth magnetotail and its role in the substorm onset, IUGG 2011 General Assembly, Melbourne, Australia, 2011/07/06.
- ⑥ **Miyashita, Y.**, Energy release between the tail magnetic reconnection and dipolarization regions and its role in the substorm onset, Japan Geoscience Union Meeting 2011, Makuhari, Chiba, 2011/05/27.
- ⑦ **Miyashita, Y.**, Energy release and transport in the near-Earth magnetotail associated with substorms: THEMIS observations, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010/12/16.
- ⑧ **宮下幸長**, 磁気圏近尾部におけるサブストームに伴うエネルギーの解放と輸送: THEMIS 衛星の観測、第 128 回地球電磁

気・地球惑星圏学会、沖縄・那覇、2010/10/31.

- ⑨ **Miyashita, Y.**, Pressure changes in the near-Earth magnetotail associated with substorm expansion onsets: THEMIS observations, 2010 International Space Plasma Symposium, Tainan, Taiwan, 2010/06/29.
- ⑩ **宮下幸長**, THEMIS 衛星の観測によるサブストーム開始時の磁気圏近尾部の圧力変化、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、千葉・幕張、2010/05/26.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮下 幸長 (MIYASHITA YUKINAGA)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・研究員  
研究者番号: 20435811

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし