

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007~2010

課題番号：19403011

研究課題名(和文) 低高度極軌道衛星と地上観測網によるジオスペース電離圏現象  
の多次元・同時総合観測研究課題名(英文) Multi-dimensional Simultaneous Observations of the  
Geospace-Ionosphere Phenomena using Low-Altitude Polar Satellites  
and Ground-Based Facilities

研究代表者

平原 聖文 (HIRAHARA MASAFUMI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：50242102

研究成果の概要(和文)：

2005年8月23日に打ち上げられた「れいめい」衛星は極域低高度を飛行する小型科学探査衛星であり、世界初の高空間・高時間分解能によるオーロラ粒子・発光の同時観測成果をもたらした。この観測データにより、電離圏・磁気圏結合、及び、磁気圏尾部でのプラズマダイナミクスに関する新しい知見を得た。特に、極域磁気圏におけるオーロラ・電磁気圏プラズマの同時・多点・多元観測を遂行し、電離圏・磁気圏結合、及び、磁気圏尾部でのプラズマダイナミクスに関する観測データ・事象の相互比較を行った。

研究成果の概要(英文)：

A micro-satellite of the Japanese mission was successfully launched from Baikonur Cosmodrome in Kazakhstan on August 23, 2005. We can simultaneously observe spatial distribution and time variation of fine aurora emissions associated with auroral electron precipitation and ionospheric ion outflows with a full pitch-angle coverage and a high-time resolution. Our Reimei team has also started some collaborative observations with EISCAT, all-sky cameras, and SuperDARN. Almost every new moon interval, we have been achieving simultaneous observations with Reimei and the ground-based instruments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

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：オーロラ、オーロラ粒子、衛星観測、地上観測、衛星・地上同時観測、電磁気圏

## 1. 研究開始当初の背景

2006年からの5年間は、複数の低高度極域探査衛星と世界的に展開されている地上観測網によるジオスペース電離圏現象の同時総合観測が最盛期を迎える。特に2005年8月23日のれいめい(INDEX)衛星打ち上げにより日本は世界に先駆けて衛星・地上の多次元・高精度のオーロラ現象観測を実現させつつある。1989年に打ち上がったあけぼの衛星以

来、オーロラ・極域磁気圏探査のための衛星計画は日本国内では皆無であり、最新の観測技術を導入したオーロラ観測衛星の将来計画は提案どころか本格的な議論さえ行われていない。この状況を打破すべく、我々の衛星観測班は、2000年より5年間に渡り、日本国内で初めてと言える本格的な小型科学衛星「INDEX」計画に精力的に取り組んできた。この衛星の理学目的は「オーロラ微細構造の

解明」であり、限定されてはいるが先鋭・最新技術の観測機器が開発・搭載されている。

## 2. 研究の目的

最新のれいめい衛星・地上観測網を活用した共同研究を推進し、極域オーロラ粒子・発光現象の両面から多面多角的・包括的な観測的知見を獲得することを目的とする特に、従来の単独衛星・地上観測では迫り切れなかったジオスペース電離圏におけるオーロラの微細構造とダイナミクスに関する綿密な衛星・地上共同観測を、各観測担当の中核的研究者が集結することで集約的・精力的に実施する。

## 3. 研究の方法

従来の単独衛星・地上観測では迫り切れなかったジオスペース電離圏におけるオーロラの微細構造とダイナミクスに関する綿密な衛星・地上共同観測を、各観測器・観測設備の中核的研究者が集結し、2007年度からの4年間にわたり集約的・精力的に実施する。衛星や海外観測網での取得データを最大限に活用するためには、これまで日本では本格的に着手されてこなかった統括的データベースサイトの構築を行う必要があると考え、専門的指向を持つ研究体制を確立し、この環境を早急に改善する。これにより、衛星・地上観測に携わる研究者に対して、データ解析上の利便性を格段に向上させ、短期間でより多くの共同研究成果を輩出することを目指す。以下に具体的な計画を示す。

(1) アルフベン波により加速された沿磁力線降下電子とオーロラ発光に関する相関をれいめい衛星観測を主軸に、可能な限り地上観測データも用いて確認する。また、れいめい衛星のプラズマ粒子・電流センサーにより、オーロラ粒子加速域における降下電子のエネルギー・ピッチ角分布と背景プラズマ密度との相関を調べる。

(2) れいめい衛星と EISCAT レーダーの同時観測により、上昇イオン流現象の空間的・時間的変動とそれに対応する磁気圏からの降下電子の特徴を調査する。また、非等方ピッチ角分布を示す超熱的イオン成分が、上昇イオン流現象と空間的・時間的にどう関係しているかを調べる。高高度観測の条件が良い夏期(6-8月)及び地上光学同時観測が可能な冬期(11-2月)の昼側カスプ域を対象にして、バルクなイオンの上昇流と超熱的イオンの流出との関係を探る。

(3) 欧州・北米・アイスランド・南極・シベリアのオーロラカメラ・レーダー観測網と協同し、れいめい衛星・地上同時観測を行う。半径400kmの領域内に分布するオーロラ・電離圏の全体像を地上レーダー観測により把握する一方で、れいめい衛星により微細で時間変動に富むオーロラを多波長で観測し相互比較する。

(4) れいめい衛星・地上観測の共同研究により取得された観測データを一元的に管理し、総合データ解析の利便性を高めるための統一データベース、データ処理・表示ソフトを構築する。

## 4. 研究成果

(1) 2007年度から2009年度にかけて、れいめい衛星と EISCAT レーダーを相補的に組み合わせた共同観測を継続して実施し、得られたデータを基に電離圏イオン流出及びオーロラダイナミクスの研究を実施した。主な研究実績として、以下の2点が挙げられる。①熱的レベル(1eV以下)のエネルギーを持つイオンと、それより高い超熱的エネルギー(約2-5eV)を持つイオンとでは、流出時の加熱の様子が異なり、イオン上昇流発生時には超熱的エネルギーのイオンが効果的に加熱されていることを明らかにした。②昼側カスプ領域より低緯度側の領域では、高度350-500kmにおいて酸素イオンが主たる上向きフラックスの担い手である。それに対し、高度550km以上では上向き酸素イオンフラックスが減少し、その代わりに上向き水素イオンフラックスが増加していること、高度350-600kmではイオン種を変えながら全上向きイオンフラックスの保存が成り立っていることを明らかにした。

(2) れいめい衛星の長期間にわたる光学-粒子同時観測データを解析に用いて、脈動オーロラのソース領域や生成メカニズムについて議論を行った。その結果、磁気赤道の波動粒子相互作用がメカニズムであることが観測的に示唆された。特に、降下電子のエネルギー分散について、波動粒子相互作用にもとづく新しい Time of Flight (TOF) モデルを提案した。このモデルからは、共鳴を引き起こすホイッスラー波動の空間分布や熱的プラズマ密度の情報を引き出すことができるが、推定されたこれらの値は過去の赤道面付近の人工衛星の観測結果と調和的であった。

(3) れいめい衛星は2005年8月の打ち上げ以降、軌道上で約4年間以上に渡り運用を継続している。電子計測器(ESA)以外の理学機器(イオン分析器ISA、オーロラカメラMAC、プラズマ密度モニターCRM)、バス機器ともに現在においても健全な状況である。電子分析器(ESA)は、2008年8月2日に異常が発生し、調査によりプリアンプが発振状態となっていることが分かり、現状では回復がみられない。ESAがない現状においても、低軌道衛星でオーロラ微細構造とらえる衛星はいまだ存在せず、れいめい衛星の多波長高速撮像を行うMAC、ならびに高時間分解能を有するISAにより貴重なデータが提供されている。特に、2008年3月に開始した中緯度・低緯度の大気光・スプライト発光観測では、統計的な結果が示された。まず、大気光発光の鉛直

分布・水平分布を求めたところ、水平方向の分布について、緯度依存性が見られた。その傾向は、過去の観測結果とは異なるものであった。発光モデルにおいて仮定されているよりも、発光源の数密度は大きく、また大気潮汐の影響も大きく受けているものが観測されたと考えられる。

(4) れいめい衛星データを統計的に踏査したところ、オーロラ発光を引き起こす電離圏への電子降下の加速域の近傍で、逆方向となる下向きの準静電的円磁力線電場構造を示唆する電磁圏イオンの降下を発見し、その継続時間・空間分布が、従来の電子降下を生成する電場構造よりはるかに小さいことを示した。これに関連して、電離圏高度の重(酸素)イオンの加熱・上昇現象が下向き沿磁力線電流領域と高い相関があることが確認され、一度上昇した電離圏起源加熱イオンが上空の下向き電場により再度電離圏に降下するという複雑な運動を示すことが分かった。

(5) オーロラアーク生成電子のエネルギー・ピッチ角分布に着目したところ、アークの端で分布が沿磁力線ビーム上に変化している傾向が見られた。この傾向は、オーロラ形状や活動度によらず確認できることから、オーロラアーク電子の主加速領域より低高度にピッチ角を小さくさせる加速領域が存在することを示唆する。

(6) れいめい衛星と THEMIS 衛星・GBO を用いた同時多点観測では、多重アークをれいめい衛星が観測した後、THEMIS 衛星により磁場の双極子化やフローリバーサルが観測され、GBO でもオーロラ発光が見られた。Inverted-V 電子のエネルギーから得られた電位差を、磁気圏尾部へ投影することで導出したフローの速度は、THEMIS 衛星の観測結果をおおよそ一致することが示された。

#### 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 17 件)

1. Obuchi, Y., T. Sakanoi, K. Asamura, A. Yamazaki, Y. Kasaba, M. Hirahara, Y. Ebihara, S. Okano, Fine-scale dynamics of black auroras obtained from simultaneous imaging and particle observations with the Reimei satellite *Geophys. Res.*, in press, 2011.
2. Nishiyama, N., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Asamura, S. Okano, and M. Hirahara, The source region and its characteristic of pulsating aurora based on the Reimei observations, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 116, 2011, doi:10.1029/2010JA015507.
3. Samara, R. G. Michell, K. Asamura, M. Hirahara, D. L. Hampton, and H. C.

Stenbaek-Nielsen, Ground-based observations of diffuse auroral structures in conjunction with Reimei measurements, *Ann. Geophys.*, 査読有り, 28, 2010, 873-881.

4. Miyoshi, Y., Y. Katoh, T. Nishiyama, T. Sakanoi, K. Asamura, and M. Hirahara, Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 115, 2010, doi:10.1029/2009JA015127.
5. Ebihara, Y., T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, and M. F. Thomsen, Reimei observation of highly structured auroras caused by nonaccelerated electrons, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 115, 2010, doi:10.1029/2009JA015009.
6. Frey, H. U., O. Amm, C. C. Chaston, S. Fu, G. Haerendel, L. Juusola, T. Karlsson, B. Lanchester, R. Nakamura, N. Ostgaard, T. Sakanoi, E. Seran, D. Whiter, J. Weygand, K. Asamura, M. Hirahara, Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 115, 2010, 2010JA015537.
7. Zou, S., M. Moldwin, L. Lyons, Y. Nishimura, M. Hirahara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Nicolls, S. B. Mende, C. Heinselman, Identification of substorm onset location and pre-onset sequence using Reimei, THEMIS GBO and PFISR, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 115, 2010, doi:10.1029/2010JA015520.
8. Chaston, C. C., K. Seki, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, Motion of aurorae, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, 37, 2010, doi:10.1029/2009GL042117.
9. Asamura, K., C. C. Chaston, Y. Itoh, M. Fujimoto, T. Sakanoi, Y. Ebihara, A. Yamazaki, M. Hirahara, K. Seki, Y. Kasaba, M. Okada, Sheared flows and small-scale Alfvén wave generation in the auroral acceleration region, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, 36, 2009, CiteID L05105.
10. Ebihara, Y., T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, A. Ieda, Optical and particle observations of type B red aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, 36, 2009, CiteID L20105.
11. Oyama, S., T. T. Tsuda, T. Sakanoi, Y. Obuchi, K. Asamura, M. Hirahara, A. Yamazaki, Y. Kasaba, R. Fujii, S. Nozawa, and B. J. Watkins, Spatial evolution of frictional heating and the predicted thermospheric-wind effects in the

vicinity of an auroral arc measured with the Sondrestrom incoherent-scatter radar and the Reimei satellite, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 114, 2009, CiteID A07311.

12. Ebihara, Y., T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, A. Ieda, Optical and particle observations of type B red aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, 36, 2009, CiteID L20105.

13. Obuchi, Y., Sakanoi, T., Yamazaki, A., Ino, T., Okano, S., Kasaba, Y., Hirahara, M., Kanai, Y., Takeyama, N., Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite, *Earth Planets Space*, 査読有り, 60, 2008, 827-835.

14. J. Lunde, S. C. Buchert, Y. Ogawa, M. Hirahara, K. Seki, Y. Ebihara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Okada, T. Raita, and I. Haggstrom, Ion-dispersion and rapid electron fluctuations in the cusp: a case study, *Ann. Geophys.*, 査読有り, 26, 2008, 2485-2502.

15. Ebihara, Y., Y. Miyoshi, K. Asamura, and M. Hirahara, Microburst cusp ion precipitation observed with Reimei, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 113, A03201, 2008, doi:10.1029/2007JA012735.

16. Ogawa, Y., K. Seki, M. Hirahara, K. Asamura, T. Sakanoi, S. C. Buchert, Y. Ebihara, Y. Obuchi, A. Yamazaki, I. Sandahl, S. Nozawa, and R. Fujii, Coordinated EISCAT Svalbard radar and Reimei satellite observations of ion upflows and suprathermal ions, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 113, 2008, 05306, doi:10.1029/2007J.

[学会発表] (計 76 件)

1. Sakanoi, T., Y. Miyoshi, A. Demekhov, Y. Kato, T. Nishiyama, Y. Ebihara, A. Yamazaki, K. Asamura, T. Takada, M. Hirahara, Characteristics of fine-scale black aurora and its generation process using Reimei image-particle data, Chapman Conference, Invited, 2011.3.2, Westmark Fairbanks Hotel and Conference Center, Fairbanks, Alaska, US.

2. Zou, S., M. Moldwin, Y. Nishimura, L. R. Lyons, M. Hirahara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. J. Nicolls, Y. Miyashita, S. B. Mende, C. J. Heinselman, Identification of substorm onset location and pre-onset sequence using Reimei, THEMIS GBO, PFISR and Geotail, American Geophysical Union Fall Meeting, 2010.12.16, Moscone Convention Center, San Francisco, US.

3. Hirahara, M., Y. Ebihara, K. Seki, T. Sakanoi, K. Asamura, Y. Yamazaki, Reimei observations of sporadic downgoing ion beams in/near discrete electron signatures in the cusp and auroral regions, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010.7.24, Bremen Convention Center, Germany.

4. Sakanoi, T., T. Nishiyama, Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Asamura, S. Okano, M. Hirahara, Source region and characteristics of pulsating auroras based on Reimei observations, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010.7.24, Bremen Convention Center, Germany.

5. Hirahara, M., T. Sakanoi, Y. Ogawa, K. Asamura, A. Yamazaki, K. Seki, and Y. Ebihara, Reimei observations of aurora and magnetosphere-ionosphere coupling, 37th COSPAR Scientific Assembly, 2008.7.14, Montreal, Canada. [図書] (計 1 件)

Saito, H., and M. Hirahara, Japan's Small Scientific Satellite, "INDEX" (Reimei), in "Small Satellites: Past, Present, and Future" edited by H. Helvajian and S. W. Janson, The Aerospace Press, 2008.

[その他]

<http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/reimei/index.shtml>

<http://www.index.isas.ac.jp/>

<http://www.isas.ac.jp/j/forefront/2010/ebihara/index.shtml>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平原 聖文 (HIRAHARA MASAFUMI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：50242102

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

浅村 和史 (ASAMURA KAZUSHI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50321568

山崎 敦 (YAMAZAKI ATSUSHI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：00374893

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20301723

坂野井 健 (SAKANOI TAKESHI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80271857

笠羽 康正 (KASABA YASUMASA)  
研究者番号：10295529  
東北大学・大学院理学研究科・教授

岡野 章一 (OKANO SYOICHI)  
研究者番号：10004483  
東北大学・大学院理学研究科・准教授

宮岡 宏 (MIYAOKA HIROSHI)  
情報・システム研究機構・国立極地研究所・准教授  
研究者番号：10150046

門倉 昭 (KADOKURA AKIRA)  
情報・システム研究機構・国立極地研究所・准教授  
研究者番号：70185883

岡田 雅樹 (OKADA MASAKI)  
情報・システム研究機構・国立極地研究所・准教授  
研究者番号：40270425

小川 泰信 (OGAWA YASUNOBU)  
情報・システム研究機構・国立極地研究所・講師  
研究者番号：00362210

齊藤 昭則 (SAITO AKINORI)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：10311739

野澤 悟徳 (NOZAWA SATONORI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号：60212130

関 華奈子 (SEKI KANAKO)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号：20345854

塩川 和夫 (SHIOKAWA KAZUO)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授  
研究者番号：80226092

家田 章正 (IEDA AKIMASA)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
研究者番号：70362209

菊池 崇 (KIKUCHI TAKASHI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授  
研究者番号：70358977

大山 伸一郎 (OYAMA SHIN-ICHIRO)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
研究者番号：20444424

海老原 祐輔 (EBIHARA YUSUKE)  
京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号：80342616

田口 真 (TAGUCHI MAKOTO)  
立教大学・理学部・教授  
研究者番号：70236404

細川 敬祐 (HOSOKAWA KEISUKE)  
電気通信大学・電気通信学部・助教  
研究者番号：80361830

亙 慎一 (WATARI SHINICHI)

情報通信研究機構・電磁波計測研究所・研究マネージャー  
研究者番号：40358825

村田 健史 (MURATA TAKESHI)  
情報通信研究機構・電磁波計測研究所・室長  
研究者番号：20274342