

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 24 年 06 月 14 日現在

機関番号：62611  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21740355  
 研究課題名（和文）  
 極域大気流出と電離圏電子輸送との因果関係の解明  
 研究課題名（英文）  
 Study on relationship between ion outflow and thermal electron transportation  
 研究代表者  
 小川 泰信（OGAWA YASUNOBU）  
 国立極地研究所・研究教育系・講師  
 研究者番号：00362210

研究成果の概要（和文）：

本研究では、極域電離圏イオンの流出過程に、電子（熱的エネルギーを持つ電離圏電子や降下粒子による大気の電離によって生成される二次電子）がどのような役割を担っているかを観測的に明らかにすることを目的として、欧州非干渉散乱（EISCAT）スバルバルレーダー（ESR）を用いた新規特別観測及び ESR データベースを用いた統計解析研究を実施した。その結果、昼側カusp領域近辺における電離圏イオン上昇流と電子温度上昇、イオン音波擾乱の関係に関する新たな知見を得ることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

The relationship between ionospheric ion upflow and electrons (thermal electrons and secondary electrons caused by particle precipitations) in/near the dayside cusp region has been investigated. This study was based on new observations with the European Incoherent Scatter (EISCAT) Svalbard radar (ESR), and statistical analysis using ESR database. From these investigations, relationships between ion upflow, electron heating, and ion-acoustic turbulences were quantitatively understood.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000 円	480,000 円	2,080,000 円
2010 年度	900,000 円	270,000 円	1,170,000 円
2011 年度	900,000 円	270,000 円	1,170,000 円
総計	3,400,000 円	1,020,000 円	4,420,000 円

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：カusp領域、電離圏、極冠域、イオン流出

1. 研究開始当初の背景

地球電離圏からのイオン流出現象は、1960年代に Axford によりその理論が提唱され、その後磁気圏を飛翔する人工衛星により、その

存在が明らかにされてきた。イオンが流出し始める上部電離圏高度では、極域に設置された非干渉散乱（IS）レーダーにより、その流出開始時の加熱・加速の特徴が把握されつつある [Ogawa et al., Geophys. Res. Lett., 2000;

Ogawa et al., J. Geophys. Res., 2003 and 2008]。電離圏イオンは重力を振り切って磁気圏に脱出するために必要なエネルギーを元々は有しておらず、流出に至るためには、プラズマの準中性を保ち、電磁気的な影響を及ぼす電子の振る舞い（運動や拡散、エネルギーの散逸）が重要な役割を担っている。しかしながら、電子に関しては温度や降下エネルギー/フラックス以外のパラメータの観測的事実は驚くほど少なく、そのために電離圏イオン流出の物理機構を定量的に議論できないのが現状である。その理由として、高度約 500-1000 km を飛翔する人工衛星は、衛星自身の速度が速いため、熱的電子を含む低エネルギー電子の運動を観測することが困難であることが挙げられる。非干渉散乱レーダー観測については、電子音波ライン（プラズマラインと呼ばれる）観測による熱的電子の移動速度の導出が理論的に考察されてきた [Nilsson et al., Ann. Geophys., 1998] が、高い周波数帯のデータの扱いが困難であったため、電子の運動を観測的に導出するまでには至っていない。その電子音波ライン観測データは、電子密度の校正やラングミュア擾乱の研究にこれまで利用されてきた。しかし、ここ数年のレーダー観測における技術革新により、電子音波ライン用の観測手法は急速に発展し、欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーを用いた 2007 年 3 月以降の観測では、高度 170-260 km の電子音波ラインを高空間分解能 (16 km) で導出しており、非干渉散乱レーダーを用いて熱的電子の運動を定量的に扱える下地がようやく整ってきたと言える。

## 2. 研究の目的

本研究では、イオン流出が頻繁に起きているカस्प領域近辺におけるイオン上昇流と、熱的エネルギーレベルの大多数の電子及び、降下電子の電離によって生成された二次電子の振る舞いに焦点を当て、それらの相互関係を明らかにする。太陽風粒子が唯一直接電離圏に流入するカस्प領域は、電離圏イオン上昇流との対応関係が良い (ケース 1) 磁気圏対流電場の増大や、(ケース 2) 500 eV 以下のエネルギーの電子の降り込み、が共に頻繁に生じている領域である。

(ケース 1) の対流電場の増大領域では、イオンの中性大気との衝突による摩擦加熱がイオン上昇流発生の主要因であるとこれまで考えられているが、その際に電子の役割が全く考慮されていない。この領域では、沿磁力線下向き電流を担う電子の上向きの流れが存在すると予想される。この電子の流れが電荷分離を引き起こし、両極性拡散電場を介

してイオンを上向きに引きずる効果を促進していることも考えられる。この電子の流れを本研究で観測的に明らかにすることにより、摩擦加熱によるイオン圧力勾配力と両極性拡散電場との相対的な重要性を理解する。

(ケース 2) の 500 eV 以下の電子の降り込み領域では、イオンが流出し始める高度 300 km 付近で中性大気の電離を引き起こし、電子温度の上昇及びプラズマ擾乱が発生していると考えられる。このプラズマ擾乱に起因する各種プラズマ波動が、電離圏イオンの加熱や加速を引き起こしていると考えられているが、観測的には定量的な説明がほとんどできていないのが現状である。さらに、カस्प域のイオン上昇流発生領域以下の高度 (150-300 km) で特徴的に観測されるイオン下降流 [Buchert and Ogawa et al., Ann. Geophys., 2004] や電子密度枯渇 [Nilsson et al., J. Geophys. Res., 1998] についても、その発生要因が未だ解明されていない。そこで本研究では、これらの物理・化学過程を理解する上で鍵を握る、プラズマ擾乱の発生領域及び、そのプラズマ擾乱とイオン上昇流との関係に明らかにすることにより、極域電離圏イオン流出に対する電子 (降下電子及び 2 次電子、背景の電離圏電子) の重要性を理解する。

## 3. 研究の方法

本研究では、スバルバル諸島ロングイアベン (北緯 78.2 度, 西経 16.0 度) に設置された欧州非干渉散乱 (EISCAT) スバルバルレーダー (ESR) を中心に用いている。この ESR は可動式および固定式の 2 機の UHF レーダーにより構成され、カस्प域及び極冠域における電離圏変動を調べる上で最も強力な観測機器の 1 つである。本研究では、ESR を用いた特別実験を実施すると共に、これまでに蓄積された長期間の EISCAT データを用いた統計解析を行った。

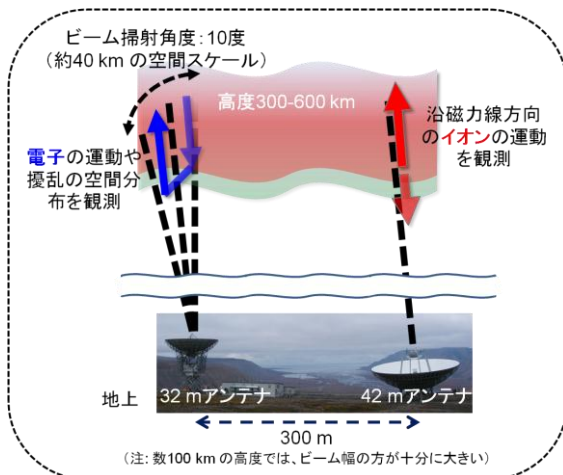
まず EISCAT 特別実験については、電子音波ライン観測のための、新たなレーダースキャン観測プログラムの開発を 2009 年度の冬期にまず行った。その詳細を以下に挙げる。

- (1) 固定式の ESR 42m アンテナについては、イオンの沿磁力線方向の運動を観測し、イオン上昇流の同定に用いる。
- (2) それに対し、可動式の 32m アンテナでは、イオン上昇流発生領域及びその周囲の電子の運動を測定するため、磁力線方向を中心にアンテナを約 10 度掃引 (60 秒間で 1 スキャン) しながら、電子音波ライン観測を行う (図 1 参照)。6 秒毎に 32m 及び 42m アンテナ間のデータ記録をスイ

ッチする。

- (3) これらの ESR 観測に加え、ESR ビーム内外のオーロラ構造の情報を把握するため、高速撮像（時間分解能：1 秒以内）が可能な、狭視野（FOV：約 15 度）及び全天カメラ（FOV：約 160 度）をロングイアピン UNIS 光学施設（KHO）に設置し観測を行う。

様々な検証試験やテスト観測を経て、開発した ESR スキャン観測プログラムを用いた観測を 2010 年度冬期から開始した。2010 年度冬期と 2011 年度冬期の 2 シーズン観測を実施した。



ESR データを用いた統計解析については、昼側カusp付近におけるイオン上昇流及び電離圏電子の特徴を把握するために以下の 3 つの内容を実施した。

- (1) 昼側電離圏におけるイオン上昇流の発生領域が、太陽風や惑星空間磁場に対してどのように変化するかを調査。
- (2) 昼側電離圏におけるイオン上昇流の発生とイオン音波擾乱との関係の調査。
- (3) 電離圏電子の特徴を把握するために必要なプラズマライン位置決定のアルゴリズムの確立。

これらの統計的研究に必要な ESR データベースをまず作成・整備し、さらに大容量のデータを統一して扱うための解析プログラム開発を行った。特に、国際極年 (IPY) の 2007-2008 年に実施された ESR1 年間連続観測で得られたデータを用いて、イオンライン及びプラズマラインデータの詳細な解析を行うために必要な、生スペクトル情報を含んだ各種データベースの作成を今回重点的に実施した。

#### 4. 研究成果

「3. 研究の方法」の欄で述べた EISCAT 特別実験と ESR データベースに基づく統計研究の成果について、それぞれ以下に述べる。

##### (1) EISCAT 特別実験

2010 年度の EISCAT 特別実験公募 (2010 年 3 月末に申請締切) に採択後、2010 年冬の 12 月 16 日 08-11 世界標準時 (UT) と 12 月 17 日 08-11 UT に EISCAT 特別観測を実施した。この 2 回の時間帯は、共に地磁気静穏時における静穏な電離圏状態の観測となり、本研究で必要とされるイオン上昇流を観測することができなかった。

2011 年度の冬期には、2011 年 12 月 02-05 日 05-07 UT (約 08-10 磁気地方時 (MLT))、2011 年 12 月 20-23 日 05-07 UT (約 08-10 MLT) の計 16 時間の ESR 特別観測を実施した。その結果、オーロラアークがレーダーの視野を通過することに伴う、間歇的なプラズマ温度上昇 (電子温度/イオン温度上昇) を、32m 及び 42m アンテナ共に頻繁に観測することに成功した。これらの ESR 観測データを用いて、磁気圏からの熱流入に伴う電子温度上昇とイオン上昇流の関係等について詳細な解析を進めているところである。得られた初期結果として、①電子温度上昇領域とイオン温度上昇領域は明確に区別できるが、両者が密接していることが多く、その空間スケールは数 km-10 km であること、②午前側の間歇的 (< 5 分間) な電子温度上昇は、極方向へのオーロラアーク移動時に起きており、その温度上昇時にはイオン上昇流を伴わないケースが多いこと、等が挙げられる。

##### (2) ESR データベースに基づく統計研究

1997 年から 2006 年までの ESR データベースを用いて、昼側電離圏におけるイオン上昇流の発生領域が、太陽風や惑星空間磁場 (IMF) に対してどのように変化するかを調べた。その結果、①太陽風密度及び IMF  $B_y$  成分の増大に比例して、イオン上昇流の発生頻度は高くなること、②それに対し、太陽風速度及び IMF  $B_z$  負成分の増大に対しては、イオン上昇流の発生頻度は途中でピークを持つ分布 (すなわち太陽風速度や IMF  $B_z$  負成分が非常に大きい場合には、発生頻度が低くなる傾向) を示すこと、を明らかにした。特に②の結果は、カusp領域で発生するイオン上昇流が、カuspの移動に伴って、その発生領域を変化させていることを意味していると考えられる。また、昼側の時間帯のイオン上昇流は、それ以外の時間帯に比べ、電子温度とイオン温度共に上昇している頻度が高いこと等も明らかにした。これらの研究成

果を論文にまとめ、学術雑誌（JGR 誌）に出版した。

また、プラズマラインを精度良く導出するための手法開発を、国際極年（IPY）の2007-2008年に実施された ESR1 年間連続観測データを用いて実施した。その結果、このプラズマラインの同定には、①複数の積分時間データの組み合わせ及び、②カルマンフィルターを用いる方法が有効であることを見いだした（図 2 参照）。このプラズマラインを精度良く導出する手法を用いて、国際極年（IPY）の2007-2008年に実施された ESR1 年間連続観測データからプラズマラインデータベースの作成を進めた。このデータベースを基にした高い精度の電子密度分布及びその変動の特徴に関する研究を進めている。

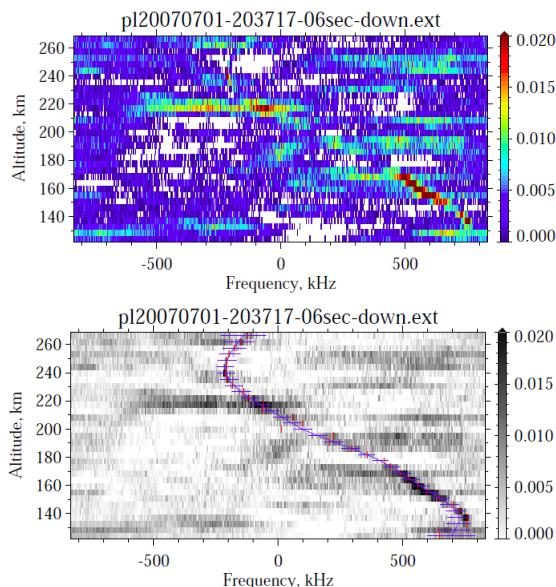


図 2：(上図) EISCAT スヴァールバルレーダーで観測されたプラズマラインを含む信号の例（2007年7月1日 2037:17 UT に取得。6秒値）。信号強度をカラースケールで表している。(下図) 上記 2 つ（①と②）の統計的・数的手法を用いて推定された、同時刻のプラズマラインの結果（青線）。

さらに、この IPY 期間に得られた ESR1 年間連続観測データを用いて、イオン上昇流とイオン音波擾乱の関係について解析を行った結果、①イオン上昇流は 08 及び 13 磁気地方時（MLT）に発生頻度が高いのに対し、イオン音波擾乱は 09 MLT 付近の午前側のみ発生頻度が高いこと、②カusp領域付近で発生するイオン音波擾乱の約 10%は、低高度（100-150 km 付近）の擾乱を伴っていること、等を発見した。これらの研究成果を論文にま

とめ、学術雑誌（JGR 誌）に出版した。

### (3) その他

本研究に関係した成果として、ESR データベースを含む大容量の EISCAT データ処理及びその可視化に関する手法について学術論文にまとめ、宇宙科学情報解析論文誌に出版したことが挙げられる。また、1984 年から 2008 年までの EISCAT トロムソ UHF レーダーデータベースを用いて、夜側オーロラ帯で発生するイオン上昇流の太陽活動度に対する依存性を調査した結果、イオン上昇流の発生頻度や発生高度が、磁気圏からの電磁・粒子エネルギーの注入量のみならず、電子密度のピーク高度の変化や、背景の中性大気密度の変化に影響されていることを明らかにした。この研究成果についても学術論文にまとめ、学術雑誌（JGR 誌）に出版している。

## 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 9 件）

1. 小川泰信, 野澤悟徳, I. Häggström, 大山伸一郎, 元場哲郎, 津田卓雄, 齋藤昭則, 宮下幸長, 田中良昌, 堀智昭, 上野玄太, 宮岡宏, 藤井良一, 欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーの大規模データ処理と可視化, 宇宙科学情報解析論文誌, vol. 1, 83-89, 2012. (査読有)
2. Fujiwara, H., S. Nozawa, S. Maeda, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, K. Terada, Polar cap thermosphere and ionosphere during the solar minimum period: EISCAT Svalbard radar observations and GCM simulations, Earth, Planet and Space, in press, 2012. (査読有)
3. Lund, E. J., M. R. Lessard, F. Sigernes, D. A. Lorentzen, K. Oksavik, P. M. Kintner, K. A. Lynch, D. H. Huang, B. C. Zhang, H. G. Yang, and Y. Ogawa, Electron temperature in the cusp as measured with the SCIFER-2 sounding rocket, J. Geophys. Res., in press, 2012. (査読有)
4. Ogawa, Y., S. C. Buchert, I. Häggström, M. T. Rietveld, R. Fujii, S. Nozawa, and H. Miyaoka, On the statistical relation between ion upflow and naturally enhanced ion-acoustic lines observed with the EISCAT Svalbard radar, J. Geophys. Res., vol. 116, A03313,

doi:10.1029/2010JA015827, 2011. (査読有)

5. Kitamura, N., Y. Ogawa, T. Nishimura, N. Terada, T. Ono, A. Shinbori, A. Kumamoto, V. Truhlik, and J. Smilauer, Solar zenith angle dependence of plasma density and temperature in the polar cap ionosphere and low-altitude magnetosphere during geomagnetically quiet periods at solar maximum, *J. Geophys. Res.*, vol. 115, A07310, doi:10.1029/2009JA014766, 2011. (査読有)
6. Ogawa, Y., S. C. Buchert, A. Sakurai, S. Nozawa, and R. Fujii, Solar activity dependence of ion upflow in the polar ionosphere observed with the European Incoherent Scatter (EISCAT) Tromsø UHF radar, *J. Geophys. Res.*, vol. 115, A07310, doi:10.1029/2009JA014766, 2010. (査読有)
7. Kosch, M. J., Y. Ogawa, M. T. Rietveld, S. Nozawa and R. Fujii, An analysis of pump-induced artificial ionospheric ion upwelling at EISCAT, *J. Geophys. Res.*, vol. 115, A12317, doi:10.1029/2010JA015854, 2010. (査読有)
8. Ogawa, Y., S. C. Buchert, R. Fujii, S. Nozawa, and A. P. van Eyken, Characteristics of ion upflow and downflow observed with the European Incoherent Scatter Svalbard radar, *J. Geophys. Res.*, vol. 114, A05305, doi:10.1029/2008JA013817, 2009. (査読有)
9. Ogawa, Y., I. Häggström, S. C. Buchert, K. Oksavik, S. Nozawa, M. Hirahara, A. P. van Eyken, T. Aso, and R. Fujii, On the source of the polar wind in the polar topside ionosphere: First results from the EISCAT Svalbard radar, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L24103, doi:10.1029/2009GL041501, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 15 件)

1. Ogawa, Y., and S. C. Buchert, Recent results of ion up/outflow observed with the EISCAT radars, The 2011 IUGG General Assembly, Melbourne Australia, July, 2011. (招待講演)
2. 小川泰信, 田中良昌, 元場哲郎, 宮岡宏, 門倉昭, 極域電離圏における降下粒子と熱流の関係, 地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ, 2011 年 5 月. (ポスター発表)
3. Ogawa, Y., and S. C. Buchert, EISCAT observations of field-aligned ion flow in the topside ionosphere, The 3rd EISCAT\_3D User

meeting, IRF Uppsala, 19 May, 2011.

4. Ogawa, Y., G. Ueno and I. Häggström, Investigations of the upper polar atmosphere by incoherent scatter plasma line observations, European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Austria, 08 April 2011. (Poster)
5. Ogawa, Y., S. C. Buchert, I. Häggström, R. Fujii, S. Nozawa, and H. Miyaoka, On the statistical relation between ion upflow and naturally enhanced ion-acoustic lines observed with the EISCAT Svalbard radar, IPY Open Science Conference, Oslo, 2010.
6. Ogawa, Y., S. C. Buchert, I. Häggström, R. Fujii, S. Nozawa, and H. Miyaoka, On the statistical relation between ion upflow and naturally enhanced ion-acoustic lines observed with the EISCAT Svalbard radar, European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, Austria, 2010. (招待講演)
7. 小川泰信, S. C. Buchert, I. Häggström, 藤井良一, 野澤悟徳, 宮岡宏, EISCAT スヴァールバルレーダーにより観測されたイオン上昇流とイオン音波擾乱の関係: IPY 連続観測データによる統計解析結果, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2010 年 5 月.
8. 小川泰信, 野澤悟徳, 宮岡宏, 大山伸一郎, 齊藤昭則, 元場哲郎, 藤井良一, 欧州非干渉散乱 (EISCAT) データベースを用いた極域超高層大気研究, 第 128 回 SGEPS 学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010 年 11 月.
9. 小川泰信, 上野玄太, I. Häggström, 非干渉散乱波のプラズマラインの検出手法開発, 第 128 回 SGEPS 学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010 年 11 月 2 日. (ポスター発表)
10. 小川泰信, S. C. Buchert, I. Häggström, 藤井良一, 野澤悟徳, 宮岡宏, EISCAT スヴァールバルレーダーにより観測されたイオン上昇流とイオン音波擾乱の関係: IPY 連続観測データによる統計解析結果, 国際極年 2007-2008 シンポジウム, 日本学術会議講堂, 2010 年 3 月 1 日. (ポスター発表)
11. Ogawa Y., I. Häggström, and A.P. van Eyken, EISCAT observations during the International Polar Year, Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2), Tokyo, 9 December, 2010. (Poster)

12. 小川泰信、上野玄太、齊藤昭則、田丸裕史、I. Häggström、非干渉散乱プラズマラインを用いた極域超高層大気の研究、第 34 回極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所、2010 年 12 月 2 日。(ポスター発表)
13. Ogawa, Y., S. C. Buchert, I. Häggström, H. Miyaoka, R. Fujii, S. Nozawa, Ion upflows and naturally enhanced ion-acoustic lines seen in the IPY ESR continuous run, the International EISCAT Workshop, Tromsø Norway, August 4, 2009.
14. Ogawa, Y., H. Miyaoka, R. Fujii, S. Nozawa, and S. Oyama, EISCAT observations during the International Polar Year, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2009 年 5 月.
15. Ogawa, Y., Ion upflow and downflow in the cusp and polar cap, Dayside Cusp and Polar Cap Ionosphere: Present knowledge and future planning, Oslo, Norway, April 23-24, 2009. (招待講演)

[その他]

ホームページ:

<http://polaris.nipr.ac.jp/~yogawa/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小川 泰信 (OGAWA YASUNOBU)  
国立極地研究所・研究教育系・講師  
研究者番号: 00362210

(2)研究分担者 無し

(3)連携研究者 無し