

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間： 2006 年度 ～ 2008 年度
 課題番号：18740310
 研究課題名 (和文) EISCAT レーダーを用いた極冠域における極風の観測的研究
 研究課題名 (英文) Study on the polar wind in the polar cap using the EISCAT radar
 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：

本研究課題の目的は、極域電離圏及び磁気圏で観測される極風（ポーラーウィンド）の生成機構の解明である。極風が生じ始めると考えられる極冠域の上部電離圏（400-1,000 km）におけるイオン組成の高度分布と各イオン種の世界分布を、2007 年夏期から 2008 年冬期にかけて実施した欧州非干渉散乱（EISCAT）スヴァールバルレーダー（ESR）観測データを用いて調べた結果、（1）酸素イオンに対する水素イオンの比率は、電離圏モデル（IRI-2001）値に比べて観測値の方が大きいこと（高度 400-600 km では約 3 倍）、（2）昼側カusp領域より低緯度側の領域では、主イオンである酸素イオンとマイナーイオンである水素イオンにより、全上昇イオンフラックスの保存が広い高度幅で成り立っていること、等を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

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：(1) 極風, (2) 電離圏, (3) 極冠域, (4) イオン流出, (5) ロングイアビン,

1. 研究開始当初の背景

極域の電離圏イオンは、中性粒子との衝突による力学的・化学的反応、熱力学的な拡散、プラズマ波動や静電場との相互作用といった複雑な加速・加熱過程を経て、磁気圏・惑星間空間に流出する。この流出量は 1 日あた

り数十から数百トン（約 10^{30} – 10^{31} 個）と見積もられ、数億-数十億年のスケールで見れば、惑星大気の進化・変遷にも関わる重要な過程であると考えられるが、その本質の理解は充分ではない。

イオンのエネルギー状態や流出領域により様々に分類される電離圏イオン流出の形

態の内、最も低いエネルギー (< 数 eV) の極風 (ポーラーウィンド) と呼ばれる現象は、太陽風の機構と類似することからその名が付けられ、1960年代に理論的に予測がなされて以来、極冠域内の電離圏と磁気圏遠方との圧力差から生じる熱的かつ定常的な電離圏イオンの流出過程であると考えられてきた。しかしながら、近年の磁気圏観測では超音速の水素イオンや酸素イオンの流出を引き起こす加速源として光電子の役割が挙げられるなど、従来の極風の理論とは異なる結果が明らかになりつつある。また、定常的な現象とは言えない最近の理論的な予測の一例として、ポーラーパッチを中心とした上向きイオンジェットが挙げられる。時間・空間的に様々に変化する極冠域電離圏ポーラーパッチ内では酸素イオンが大量に含まれているため、水素原子との荷電交換反応が促進され、水素イオンが大量に生成される。その水素イオンは背景の酸素イオンと電子によって作られる双極性電場により上向きに加速され、パッチを中心とした上向きイオンジェットとして極風が観測されることが予想されている。しかしながら、この荷電交換反応や上向きジェットが、ポーラーパッチの消滅に対してどのように影響を及ぼすか等の、磁気圏へのイオンの補給という観点から見たポーラーパッチの観測的研究は従来全く行われていない。

さらに、上部電離圏高度での極風発生に関係する双極性電場や化学反応、衝突、拡散などの過程を理論的に計算するために必要なインプットの多くは、現状ではほとんど知られていない。例えば、イオン組成や温度、密度については、充分とは言えない統計的な平均値が用いられている。そのため、上部電離圏高度における極風観測は、シミュレーション研究に必要な基本物理量を与えると共に、グローバルなスケールの電離圏モデルを構築するためにも必要不可欠であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、研究の背景で述べた、最も低いエネルギー (< 数 eV) の電離圏イオン流出の形態である極風 (ポーラーウィンド) に焦点を当て、イオンが流出し始める極冠域の上部電離圏 (400-1,000 km) におけるイオン組成の高度分布と各イオン種々の速度分布を EISCAT スヴァールバルレーダー (ESR) を用いて明らかにすることを目的とする。特に、(1) 昼側カスプ域内外における水素イオンと酸素イオンの数密度及び流出量の分布、(2) 高度 1000km 以下では主イオンである酸素イオンと、マイナーイオンである水素イ

オンとの流出フラックスの関係、(3) ポーラーパッチ内外の酸素イオンと水素イオンとの電荷交換反応、(4) 熱的エネルギーから超熱的エネルギーへの遷移過程、(5) イオン流出と太陽風パラメータとの関係、を明らかにする。これらの観測結果から、極風発生の本質についての理解を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、スヴァールバル諸島ロンググイアピン (北緯 78.2 度、西経 16.0 度) に設置された欧州非干渉散乱 (EISCAT) スヴァールバルレーダー (ESR) を用いて、極風の観測的研究を実施している。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、カスプ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。以下に本研究の具体的な計画・方法を順に述べる。

(1) ESR は通常 90-600 km の電子密度の高い高度領域に焦点を合わせた観測をしており、本研究のような水素イオンのスペクトルから有益な物理量を導出するための高高度 (400-1,000 km) における受信効率の良い観測を実施するためには、新たなレーダーパルススキームの開発が必須である。そこで 2006 年の夏期に EISCAT 本部 (スウェーデン・キルナ) にて、I. Haggstrom 博士と共に、高高度における受信効率の良いパルススキーム (tau7) を開発した。そのパルススキームの詳細を以下に挙げる。

- 1 チャンネル 16 ビット x 120 μ s の Alternating code (AC)、
- Duty cycle : 21.2% (ESR は最大 25%)、
- サンプリング : 5 μ s、
- バンドパスフィルター : ± 75 kHz

さらに、2 機ある ESR アンテナを同時に利用することにより、受信効率を高める工夫をしている。具体的には、ESR 42m アンテナから送信した電波を 42m アンテナと 32m アンテナの両方で受信する観測プログラムを用いることにより、受信効率を通常の観測よりも 70% 高めている。

(2) 水素イオンの非干渉散乱 (IS) スペクトル解析に関して、水素イオンの IS スペクトル分布は、主イオンの酸素イオンに比べて分布が広がりノイズレベルに近くなる。そのため有意義なスペクトルデータを得るためには、数 10 分間から数時間のデータの積分時間を要する。意味のある IS スペクトルデータのみをできる限り多く積分して SNR を高く

するために、人工衛星やスペースデブリなどの反射波によるエコーや、プラズマ不安定による受信強度の強いエコーを自動判別し、それらをリスト化及び除去するためのルーチンを本研究期間中に開発した。

(3) (1) で述べた 2006 年の夏期に作成したパルススキームを用いて、同年 12 月に ESR によるテスト観測を実施し、パルスコードや観測プログラム調整、解析プログラムの作成を行った。2007 年 7 月から本格的に観測を開始し、その後 2008 年 12 月までキャンペーンベースで ESR 観測を実施した。得られたデータから水素イオンの IS スペクトル分布を詳細に調べるため、時間分解能や高度分解能を変えて、水素イオン及び酸素イオンのそれぞれにおけるスペクトル解析を実施し、各イオン種の密度や速度等の物理量に関する複数のデータセットを作成した。その用意された各イオン種のデータセットから、カusp 領域及びその周辺における水素イオンと酸素イオンの組成比、上向き水素イオン速度の高度分布、水素イオンと酸素イオンの速度の対応関係を調べた。

(4) 新しい観測手法の開発及び得られたデータの解析に加え、これまで蓄えられてきた過去のデータを用いてイオン上昇流の統計的性質を調べる研究を実施した。具体的には、1997 年から 2006 年までに得られた ESR 観測データを用いて、昼側カusp 及び極冠域におけるイオン上昇流/下降流の地磁気活動度及び太陽風パラメータに対する依存性を調査した。さらに、ESR で観測される熱的イオン上昇流やプラズマ加熱の結果が、超熱的イオンの振る舞いとどのような関係にあるかを調べるため、極域上部電離圏 (高度約 650 km) を飛行する「れいめい人工衛星」を用いた同時観測を 2005 年から 2008 年にかけて実施し、イオン流出時における熱的イオンと超熱的イオンの関係を調べた。

4. 研究成果

極風が生じ始めると考えられる極冠域の上部電離圏 (400-1,000 km) におけるイオン組成の高度分布と各イオン種の速度分布を EISCAT スヴァールバルレーダー (ESR) を用いて詳細に調べた結果、以下に述べる新たな観測的事実が得られた。

(1) 2007 年 8 月 3 日から同年 9 月 25 日までに得られた ESR 観測データ (計 16 イベント) を用いて、地磁気静穏時 ($Kp < 3$) における極冠域昼側での酸素イオンに対する水

素イオンの比率を調べた結果、高度 500 km では約 5%、高度 600 km では約 9%の比率であった。今回の観測値を電離圏モデル (IRI-2001) によるイオン比の値と比較したところ、高度 400-600 km では観測値の方がモデルに比べて約 3 倍大きいことが明らかになった (図 1 参照)。

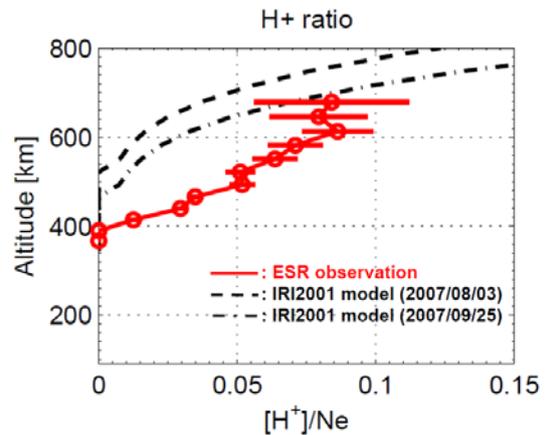


図 1. 全イオンに対する水素イオンの割合。ESR によって観測された値は赤線で、IRI2001 モデルの結果をダッシュ線でそれぞれ表している。

(2) 極風が発生し始める高度領域である 400-1,000 km で、酸素イオンと水素イオンの沿磁力線方向速度の高度分布を比較した。その結果、昼側カusp 領域より低緯度側の領域では、主イオンである酸素イオンの沿磁力線向上速度が数 10 ms^{-1} と小さい場合でも、マイナーイオンである水素イオンの沿磁力線速度が数 100 ms^{-1} に達していた (図 2 参照)。さらに、酸素イオンと水素イオンの上向きフラックス (速度×密度) を比較したところ、高度 350-500 km では酸素イオンが主たる上向きフラックスの担い手であるのに対し、高度 550 km 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 350-600 km 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が明らかになった (図 3 参照)。

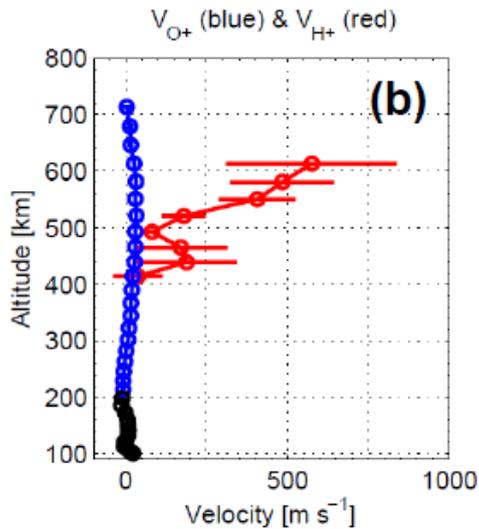


図 2. 酸素イオン及び水素イオンの沿磁力線方向速度の高度分布。酸素イオン速度の高度分布を青線で、水素イオン速度の高度分布を赤線でそれぞれ表している。

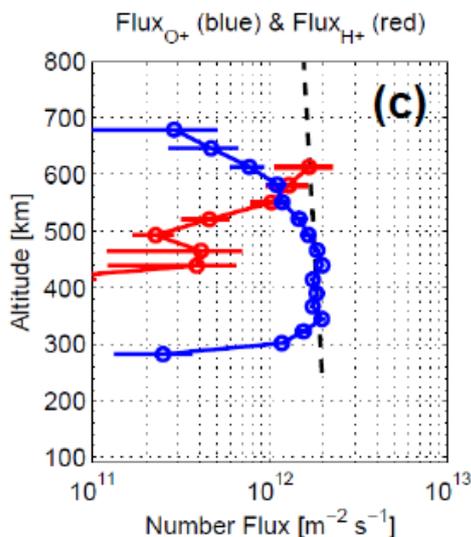


図 3. 酸素イオン及び水素イオンの沿磁力線方向速度の高度分布。酸素イオン速度の高度分布を青線で、水素イオン速度の高度分布を赤線でそれぞれ表している。

(3) 太陽風粒子が直接降り込み、イオン上昇流が頻繁に起こる領域である昼側カスプ域と、カスプ域外部の領域における極風の特徴の違いを明らかにするため、領域毎に分けた ESR データ解析を行った。その結果、(a) カスプ域における酸素イオンに対する水素イオンの割合は、カスプよりも低緯度側の領域での割合に比べて小さいこと、(b) カスプ域の上向きイオンフラックスは少なくとも

高度 700 km までは酸素イオンが担っており、その量はカスプよりも低緯度側の領域でのフラックス量に比べて 1 桁大きいこと、を明らかにした。

これらの成果については、学術論文にまとめ、国際雑誌に投稿中である。さらに、2008 年冬期には、極冠域電離圏ポーラーパッチ内外の観測データが得られており、その極冠域ポーラーパッチ内・外部における極風の観測結果を現在解析中である。

(4) 2005 年 8 月に打ち上げられた日本の科学観測用人工衛星である「れいめい人工衛星」と、北欧に設置されている EISCAT スヴァールバルレーダーを用いて、極域電離圏の共同観測を 2005 年 11 月から 2006 年 8 月にかけて実施した。その 2 つの観測機器を用いて、電離圏イオンが磁気圏に流出し始めている領域を詳細に調べた結果、(a) 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、(b) 超熱的エネルギーイオンの発生には低エネルギー電子 (<500eV) の降り込みを伴っていること、を発見した。

(5) 1997 年から 2006 年までに得られた ESR 観測データを用いて、昼側カスプ域及び極冠域におけるイオン上昇流/下降流の地磁気活動度及び太陽風パラメータに対する依存性を調べた結果、(a) 惑星空間磁場の Z 成分や太陽風速度、地磁気活動度の変化に応じて、イオン上昇流の発生緯度を変えること、(b) 一方、惑星空間磁場の Y 成分や太陽風密度に対しては、イオン上昇流の発生緯度は変わらずに発生頻度が高くなること、を明らかにした。

(4) と (5) の研究成果は国際学術論文としてそれぞれ出版されており、イオン流出現象の生成機構のより深い理解に貢献するものである。

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 8 件)

- ① Y. Ogawa, 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) .
- ② Y. Ogawa, 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.*, vol. 113, A05306, doi:10.1029/2007JA012791, 2008 (査読有) .
- ③ 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.*, 26, 2485-2502, 2008 (査読有) .
- ④ K. M. Frederick-Frost, K. A. Lynch, P. M. Kintner Jr., E. Klatt, D. Lorentzen, J. Moen, Y. Ogawa, M. Widholm, SERSIO: Svalbard EISCAT Rocket Study of Ion Outflows, *J. Geophys. Res.*, vol. 112, A08307, doi:10.1029/2006JA011942, 2007 (査読有) .
- ⑤ D. A. Lorentzen, P.M., Kintner, J. Moen, F. Sigernes, K. Oksavik, Y. Ogawa, and J. Holmes, Pulsating dayside aurora in relation to ion upflow events during a northward IMF dominated by a strongly negative IMF BY, *J. Geophys. Res.*, vol. 112, A03301, doi:10.1029/2006JA011757, 2007 (査読有) .
- ⑥ E. Yordanova, D. Sundkvist, S. Buchert, M. Andre, Y. Ogawa, M. Morooka, O. Margithu, O. Amm A. N. Fazakerley, and H. Reme, Energy Input from the Exterior Cusp into the Ionosphere: Correlated Ground-Based and Satellite Observations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L04102, doi:10.1029/2006GL028617, 2007 (査読有) .
- ⑦ Y. Ogawa, S. C. Buchert, R. Fujii, S. Nozawa, and F. Forme, Naturally enhanced ion-acoustic lines at high altitudes, *Ann. Geophys.*, vol. 24, p3351-3364, 2006 (査読有) .
- ⑧ O. Amm, R. Nakamura, H.U. Frey, Y. Ogawa, M. Kubysheikina, A. Balogh, and H. Reme, Substorm topology in the ionosphere and magnetosphere during a flux rope event in the magnetotail, *Ann. Geophys.*, vol. 24, p735-750, 2006 (査読有) .
- [学会発表] (計 14 件)
- ① 小川泰信, 宮岡宏, 藤井良一, 野澤悟徳, 大山伸一郎, 平原聖文, 坂野井健, 阿部琢美, 小野高幸, 細川敬祐, 門倉昭, 行松彰, EISCAT レーダーを用いた日本の極域超高層大気観測の現状、第 122 回地球電磁気・地球惑星圏学会、仙台、2008 年 10 月 09 日 (招待講演)。
- ② 小川泰信, 麻生武彦、宮岡宏、藤井良一、野澤悟徳、大山伸一郎、平原聖文、I. Haggstrom、A. Westman、EISCAT スヴァールバルレーダーを用いた極冠域電離圏における極風の観測的研究、第 32 回 極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所、2008 年 08 月 4-5 日
- ③ 小川泰信、平原聖文、関華奈子、麻生武彦、浅村和史、坂野井健、山崎敦、I. Sandahl、S. C. Buchert、藤井良一、野澤悟徳、大山伸一郎、栗原宜子、津田卓雄、岩田陽介、門倉昭、細川敬祐、宮岡宏、人工衛星-地上光学機器-レーダー総合観測による夜側オーロラ帯で発生するイオン上昇流とオーロラとの関係、地球惑星科学関連学会 2006 年合同大会、幕張メッセ国際会議場、2008 年 5 月 25-30 日。
- ④ Y. Ogawa, K. Seki, M. Hirahara, K. Asamura, T. Sakanoi, Y. Ebihara, Y. Obuchi, S. C. Buchert, I. Sandahl, S. Nozawa, and R. Fujii, Relationship between ion upflows and suprathermal ions observed with the EISCAT Svalbard radar and Reimei satellite, SCAR/IASC IPY Open Science Conference, St. Petersburg, Russia, July 07-10, 2008.
- ⑤ 小川泰信, 麻生武彦, 藤井良一, 野澤悟徳, 大山伸一郎, 平原聖文, S. C. Buchert, I. Haggstrom, A. Westman, and M. Langteigen, EISCAT スヴァールバルレーダーを用いた極冠域電離圏における極風の観測的研究, 第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋大学、2007 年 09 月 29 日。
- ⑥ Y. Ogawa, S. C. Buchert, A. Sakurai, S. Nozawa, and R. Fujii, Solar activity dependence of ion upflow in the polar ionosphere, CAWSES/IHY workshop, 名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール, 2007 年 03 月 14-16 日
- ⑦ 小川泰信, 澤津橋磨由子、野澤悟徳、藤井良一、サブストーム時における極域電離圏イオン上昇流の時間・空間変化、第

31回 極域宙空圏シンポジウム, 国立極地研究所, 2007年07月24日.

- ⑧ Y. Ogawa, K. Seki, M. Hirahara, K. Asamura, T. Sakanoi, Y. Ebihara, Y. Obuchi, S. C. Buchert, I. Sandahl, S. Nozawa, and R. Fujii, Relationship between ion upflows and suprathermal ions observed with the EISCAT Svalbard radar and Reimei satellite. The 13th International EISCAT Workshop, Mariehamn, Finland, August 06-10, 2007.
- ⑨ 小川泰信、澤津橋磨由子、野澤悟徳、藤井良一、サブストーム時における極域電離圏イオン上昇流の時間・空間変化、第120回地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋大学、2007年09月29日
- ⑩ Y. Ogawa, S. C. Buchert, A. Sakurai, S. Nozawa, and R. Fujii, Solar activity dependence of ion upflow in the polar ionosphere, International CAUSES Symposium, Kyoto University, October 23-27, 2007
- ⑪ Y. Ogawa, M. Hirahara, T. Sakanoi, K. Asamura, K. Seki, S. Nozawa, R. Fujii, S. Buchert, Y. Kasaba, Y. Obuchi, T. Ino, and A. Yamazaki, Coordinated Reimei and EISCAT observations of ion upflows in the polar ionosphere, AOGS 2006 meeting, Singapore, July, 2006 (招待講演) .
- ⑫ 小川泰信、I. Haggstrom、A. Westman、EISCATレーダーによる高高度/高時間分解能/高空間分解能観測手法について、STE研究集会「リモートセンシングによる極域電離圏・磁気圏プラズマの動態の解明」、豊川市民プラザ、2006年09月27日。
- ⑬ Y. Ogawa et al., Current and future EISCAT observations of ion upflows in the polar ionosphere, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, Multipurpose Conference Hall, Tachikawa Memorial Buildin Rikkyo University, Tokyo, Japan, November 1-3, 2006.
- ⑭ 小川泰信、その他、EISCATレーダーによるイオン上昇流観測の現状と今後、第118回地球電磁気・地球惑星圏学会「特別セッション: 地上-衛星観測・データ解析・モデリングの統合型ジオスペース研究に向けて」、相模原市民会館、2006年11月05日 (招待講演)。

〔図書〕 (計1件)

- ① 阿部学, 小川忠彦, 小川泰信, 上出洋介, 河合崇欣, 菊池崇, 関華奈子, 川田佳史, 松本英二, 才野敏郎, 中村健治, 塩川和夫, 野澤悟徳, 松見豊, 元場哲郎, 増田公明, 藤木利之, 檜山哲也, 佐藤淳, 安成哲三, 渡邊誠一郎, 山口靖, 新しい地球学 太陽-地球-生命圏相互作用系の変動学, 渡邊誠一郎+檜山哲也+安成哲三 編, 名古屋大学出版会, ISBN978-4-8158-0590-6, 2008

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.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