

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2005～2008

課題番号：17340145

研究課題名（和文） 磁気圏-電離圏結合における電離圏の能動的役割の研究

研究課題名（英文） Study on the active role of the ionosphere in the Magnetosphere-Ionosphere coupling process

研究代表者

藤井 良一 (FUJII RYOICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：00132712

研究成果の概要：

ノルウェー・トロムソ（北緯 69.6 度，東経 19.2 度）において、EISCAT レーダー、全天プロトンイメージャ（透過波長 486.1 nm）、4 波長フォトメータ、全天デジタルカメラによる同時観測を実施し、下向き沿磁力線電流領域における、プロトンオーロラ発光（磁気圏内の沿磁力線電場と関連）、電子密度の減少、電離圏電場などの物理量の相互関係を調べ、磁気圏-電離圏結合における電離圏の能動的役割を調べた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	8,100,000	0	8,100,000
2006年度	2,500,000	0	2,500,000
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	15,100,000	1,350,000	16,450,000

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プロトンオーロラ、② 電離圏、③ 磁気圏、④ EISCAT レーダー、⑤ トロムソ、⑥光学観測機器、⑦電離圏加熱実験、⑧磁気圏-電離圏結合

## 1. 研究開始当初の背景

完全電離気体が占める地球磁気圏と中性大気の百万分の一から千分の一しか電離していない電離圏は、主として磁力線を通して、電磁的に又粒子移動を通して深く結びつき、相互に影響を与え合っており、この結び

つきは磁気圏-電離圏 (M-I) 結合と呼ばれている。M-I 結合は磁気圏の大規模な磁場配位やプラズマの分布・運動、電離圏におけるエネルギー散逸に深く関係する重要な過程であり、他の惑星でも見られる基本的な過程であるが、その本質の理解は十分ではない。

## 2. 研究の目的

電離圏のM-I結合への能動的役割という観点から、M-I結合に関わる以下に述べる2つの中心的課題の理解を目指すものであり、SCOSTEPのCAWSES計画の一環である。

### (1) 電離圏電気伝導度の急激な変動に対するM-I結合系の応答

M-I結合の理解が困難な理由の一つは、磁気圏、電離圏各々の領域で、電場、電流、粒子が関係しあい、かつ磁気圏・電離圏の領域間でもこれらの物理量が複雑に関係しあうため、因果関係の把握が難しい点にある。一般的にある系の特性を調べる時の最も基本的な方法は、その系の状態をパルス的に変化させ、それに対する系の応答を調べることである。しかし上記のように自然に生起している現象への適応は、複数の物理量が相互に影響を与え乍ら変化しているので困難である。一つの方法は、電離圏内で、一つの物理量を他の物理量とは独立に恣意的に変えて、M-I結合系の応答をみることである。本課題では、極域電離圏をヒーターで加熱して電離圏の電子密度を変化させて電気伝導度を短時間で変化させ、それにより励起する電場の変動をEISCATレーダーで観測して、加熱領域内での急激な電流の増大(又は減少)に伴う偏極電場の生成/配位及び電離圏電流の変動から、磁気圏-電離圏間での情報の伝達過程、磁気圏-電離圏電場間の不整合とその緩和過程の理解を目指す。

### (2) 下向き沿磁力線電流領域の沿磁力線電場生成への電離圏の能動的寄与

下向き沿磁力線電流は、従来単に3次元電流系を閉じる電流として考えられてきた。しかし、近年のFAST衛星等の観測により、日陰電離圏に磁力線を介して繋がる磁気圏下部では、この電流に伴い、強い下向き沿磁力線電場 $E_{\parallel}$ (M-I「非」結合)が発生することを明らかになってきた。一方電離圏では、夜側のオーロラアーク(上向き電流)領域に隣接した領域で、磁場に直交する方向の電場強度 $E_{\perp}$ が増大し、電離圏電子密度 $N_e$ の急激な低下が見られることがある。この領域が下向き電流領

域に対応し、沿磁力線電流を担う電子の不足が $E_{\parallel}$ を形成し、電離圏クロージャー電流内の電気伝導度低下が $E_{\perp}$ 増大の原因となっている可能性が指摘されている。本課題ではアークに近接するオーロラ発光の無い下向き沿磁力線電流領域における $N_e$ の極端な減少現象をEISCATレーダーと光学手法により観測して、 $N_e$ の極端な減少と $E_{\perp}$ の空間時間発展、プロトンオーロラ(下向き $E_{\parallel}$ )領域、及びアークの動きとの関連、 $E_{\parallel}$ 生成と日陰電離圏との関連、 $E_{\perp}$ と $E_{\parallel}$ との関連、の解明を試みる。

## 3. 研究の方法

研究期間を通して、各年度、以下に述べるEISCATのヒーターとレーダーを用いた実験の実施と、光学観測、データ解析からなる。実験を複数年次繰り返す必要性は、限られた期間の実験では、動きを伴うアークがレーダービームの視野に入ってくる確率が低いこと、またヒーターとレーダーの同時実験も、普遍的な性質を得るためには、繰り返し実施する必要があるためである。

本計画の課題1(電離圏電気伝導度の急激な変動に対するM-I結合系の応答)においては、ノルウェーの北部トロムソ近郊に設置されているEISCATヒーター(電離圏加熱機)と3局方式のUHF帯EISCATレーダーを用いた同時実験を実施する。レーダーのモードはARCモードと呼ばれる0.44秒時間分解能のモードを用いる。課題2(下向き沿磁力線電流領域の沿磁力線電場生成への電離圏の能動的寄与)においては、光学観測機器(プロトンオーロラ全天カメラ)の製作と設置、既存の電子オーロラTVカメラの設置、これらの光学機器と、UHF帯EISCATレーダーとの同時観測を実施する。

## 4. 研究成果

オーロラアークに伴う3次元電流系の構造、沿磁力線電流(FAC: Field-Aligned Current)を担う電子の運動、粒子の加速過程の研究は、磁気圏-電離圏結合を理解する上で重要である。特に、上向きFACを伴うオーロラ

アークの近傍に存在する下向きFAC領域では、しばしば強い電離圏電場や電子密度の減少、ブラックオーロラなどの生起が指摘されているが、それらの性質と相互の関係は観測的に明らかではない。ひとつの電流系モデルとして、上向き及び下向き2方向のFACが電離圏ペダーセン電流により閉じる電流系における、下向きFAC領域では、電離圏電子はFACのキャリアとして磁気圏に運び去られてしまう為、その場の電子密度が著しく減少する可能性がある。この時、電子の減少によりFACのキャリアは不足するので、絶対条件である電流の連続性を保つためには、沿磁力線電場が生成されて電子を上向きに加速し、必要とされる電流量を作り出すことが要求される。実際衛星観測から、日陰の下向きFAC領域における電子の上向きの沿磁力線加速が確認されている。電子を上向きに加速する沿磁力線電場は、同時に磁気圏起源のプロトンを下向きに加速するので、下向きFAC領域の電離圏ではプロトンオーロラ発光が期待される。さらに、電離圏電子の減少は電離圏電気伝導度を低下させるので、上向きと下向きのFACを閉じる電離圏水平電流の連続性から、電気伝導度が相対的に低い下向きFAC領域では、電気伝導度が高い上向きFAC領域に比べて、より強い磁場に垂直方向の電場が生起されることも予想されている。このように3次元電流系、特に下向きFAC領域で、電離圏は能動的な役割を果たす事が示唆されているが、磁気圏内の沿磁力線電場と電離圏の状態との関係は分かっていない重要な課題である。

本研究では全天プロトンイメージャ（透過波長 486.1 nm）、4波長フォトメータ（427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm, 844.6 nm）、全天デジタルカメラをノルウェー・トロムソ（北緯69.6度、東経19.2度）で運用し、これらの光学観測機器とEISCATレーダー、IMAGE地上磁力計ネットワークを用いて同時観測を行い、下向きFAC領域における、プロトンオーロラ発光（磁気圏内の沿磁力線電場と関連）、電子密度の減少、電離圏電場などの物理量の相互関係を明らかにすることを目的としている。使用したデータセットは2006年10月20日の光学機器-EISCATレーダー同時観測で得られたもので、プロトンオーロラの発光と電離

圏電子の著しい減少（背景密度の1/10にも及ぶ）、磁場に垂直の強い電離圏電場が同時におきるイベントを捉えることに成功した。解析の結果、以下の特徴が得られた。

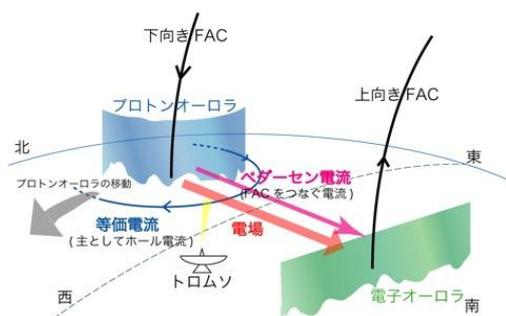
- (1) 1/10以下になる電子密度減少は1〜2分という短時間で生じた。また、この電子密度減少はペダーセン電流が最も強く流れる高度120 kmより高い高度で顕著であった。さらに電子密度減少の開始時間は高度が高くなるにつれて遅くなる特徴が見られた。これはDoe *et al.* [1993, 1995]が示したいくつかの消失原理のうち、沿磁力線電流に伴う電子流出効果を支持するもので、観測的に初めての結果である。
- (2) 赤道方向に移動する東西方向に延びるオーロラアーク（南北方向の幅約10 km）の極側近傍で見られたE領域とF領域の電子数密度の急激な減少は、磁力線に垂直な水平電場の増大（ $\sim 80$  mV/m）を伴い、下向きFACに関連していると推定されたが、従来考えられていたプロトンオーロラ発光は同じ場所では見られなかった。この点についての解釈は以下の通りである。太陽光による電離がない夜間電離圏で、電子密度の著しい減少を伴う下向きFACは、その場所に留まる限り電流キャリアが不足して電流の連続性を保てなくなる。上向きFACに見合う下向きFACを維持するためには、主として二つのケースが考えられる。一つはプロトンオーロラにより電離圏電子密度を増やす物理過程が発動する場合であり、もう一つは、電流系自体が、豊富な電子を求めて、新たな領域に移動する場合である。赤道側へ移動する幅の狭いオーロラアークに伴う上向き電流は、同じ程度の幅の下向き電流を伴うと考えられるので、後者の電流系自体が移動することにより十分な電子密度を得ることができたと考えられる（この場合プロトンオーロラによる電離は必要なくなるために出現していない）。電子密度減少に伴った、上記のオーロラアークの移動によって、下向きFACのキャリアとなる電子

の不足分を補って、電流の連続性を保持していたと考えられる。

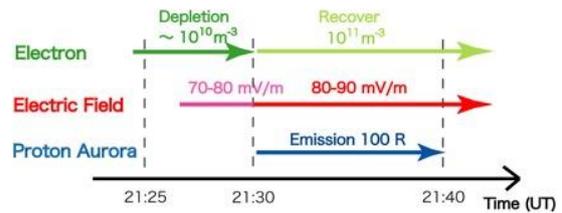
- (3) 電子オーロラよりも高緯度側に出現したプロトンオーロラは、磁力線に垂直な電離圏電場の強い増大 ( $\sim 90$  mV/m) を伴っていた。等価電流系からの推定で、この領域には下向きFACが流れ、低緯度側のディスクリートオーロラに伴う上向きFACとペアーになっていたと考えられる。このプロトンオーロラ領域では、フォトメータ観測から電子の降り込みがほとんど認められないにも関わらず、電子密度が増大し、強い電離圏電流が見られることから、降下プロトンが電離に重要な貢献をしていることが判明した。前述した移動するアークに伴う下向き電流領域とは異なり、プロトンオーロラに伴う下向きFAC流入領域はその範囲が広く、移動によっては十分な新たな電子が得られないために、プロトン降下（下向き沿磁力線電場の生成）を引き起こすことによりE領域の電子密度を増大させて、必要な電子を確保するという、一連の物理過程が生じていたことが示唆される。

これらの結果は世界的にみても新たな知見で、磁気圏電離圏結合、特に下向き沿磁力線電流系のより深い理解に貢献するものである。

この研究成果は、論文にまとめ、米国地球物理学会誌に投稿した。現在、レフリーコメントに対する修正を行っている段階である。



図：全天カメラによって確認されたオーロラの空間配置と、磁場変動から推定される等価電流系の空間配置の概念図。西へのプロトンオーロラの移動とともに、トロムソで観測される等価電流の向きは西北西→南西へ変化し、このような等価電流を担う電場の向きは南南西→南東へと変化する。この電場の方向に流れるペダーセン電流が、下向き及び上向きFACを結ぶ閉電流である。



図：電子数密度変化、電場強度変化、プロトンオーロラ発光の時間変化。

## 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35件)

- ① Ogawa, Y., S. C. Buchert, R. Fujii, S. Nozawa, and A. P. van Eyken, Characteristics of ion upflow and downflow observed with EISCAT Svalbard radar, *J. Geophys. Res.*, *114*, accepted. 査読有
- ② Tsuda, T. T., S. Nozawa, S. Oyama, T. Motoba, Y. Ogawa, H. Shinagawa, N. Nishitani, K. Hosokawa, N. Sato, M. Lester, R. Fujii, Acceleration mechanism of high-speed neutral wind observed in the polar lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, *114*, doi:10.1029/2008JA013867, 2009. 査読有
- ③ Amm, O., and R. Fujii, Separation of Cowling channel and local closure currents in the vicinity of a substorm breakup spiral, *J. Geophys. Res.*, *113*, A06304, doi:10.1029/2008JA013021, 2008. 査読有
- ④ 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.*, *113*, doi:10.1029/2007JA012791, 2008. 査読有
- ⑤ Oyama, S., B. J. Watkins, S. Maeda, H. Shinagawa, S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Brekke, C. Lathuillere, and W. Kofman, Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EISCAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic

disturbance, *Ann. Geophysicae*, 26, 1491-1505, 2008. 査読有

⑥ Fujiwara, H., R. Kataoka, M. Suzuki, S. Maeda, S. Nozawa, K. Hosokawa, H. Fukunishi, N. Sato, and M. Lester, Electromagnetic energy deposition rate in the polar upper thermosphere derived from the EISCAT Svalbard radar and CUTLASS Finland radar observations, *Annales Geophysicae*, 25, 2393-2403, 2007. 査読有

〔学会発表〕(計65件)

① 大山伸一郎、非干渉散乱レーダーとれいめい衛星との同時観測データを用いたオーロラアーク近傍での電流系微細構造の研究、地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会、2008年10月9日-12日、仙台

② 大山伸一郎、EISCAT レーダーと多波長フォトメータを用いた電離圏電気伝導推定、地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会、2008年10月9日-12日、仙台

③ 岩田陽介、多波長光学観測機器およびEISCAT レーダーを用いた磁気圏-電離圏結合におけるプロトンオーロラの研究、地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会、2008年10月9日-12日、仙台

④ 岩田陽介、トロムソにおける多波長光学観測機器および EISCAT レーダーを用いた磁気圏-電離圏結合の研究、地球惑星科学連合2008年大会、2008年5月25-30日、幕張(千葉)

⑤ Fujii, R., Dependence of the electromagnetic and precipitating particle energy inputs to the ionosphere

upon the sunlit/shade condition of the ionosphere, EISCAT Workshop, 6-10 August, 2007, Mariehamn, Finland

⑥ 野澤悟徳、2005年9月のEISCAT ロングレンジデータを用いた極域下部熱圏風の研究、地球惑星科学連合2007年大会、2007年5月19-24日、幕張(千葉)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 良一 (FUJII RYOICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：00132712

### (2) 研究分担者

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

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

宮岡 宏 (MIYAOKA HIROSHI)

国立極地研究所・教授

研究者番号：10150046

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

### (3) 連携研究者

なし。