

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540446
 研究課題名（和文） 新しい SuperDARN 高空間・時間分解能観測手法による極域電離圏の研究
 研究課題名（英文） Study on polar ionosphere and magnetosphere by SuperDARN radars with high temporal and spatial resolution observation
 研究代表者
 行松 彰（Yukimatu Akira Sessai）
 国立極地研究所・研究教育系・准教授
 研究者番号：70260007

研究成果の概要：Yukimatu and Tsutsumi, GRL, 2002 で開発した、SuperDARN レーダーによる高時間分解能観測・解析手法を発展させ、周波数領域干渉計(FDI)手法によるレンジ方向の高空間分解能観測を SuperDARN で初めて実現し、中間圏界面領域の高精度中性風観測に成功し、又、電離圏沿磁力線不規則構造(FAI)の生成・消滅過程に関する重要な知見を得た。更に、方位角方向の高空間分解能観測実現の為の重要な基礎データを得た。これらの新しい観測手法の実現は、電離圏・磁気圏相互作用や中性大気の研究発展に寄与するものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	480,000	3,880,000

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：地球惑星電離圏

1. 研究開始当初の背景

- (1) SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) は、日本の極地研究所を含めた10カ国、13研究機関からなる国際短波レーダー網観測プロジェクトとして平成7(1995)年より開始され、多数の短波帯レーダーによる広大な観測視野で極域電離圏の大部分を覆うことにより、極域電離層対流(電場)の全体像を1～2分毎という高時間分解能で時々刻々得ることの可能な、これまでにない画期

的な国際共同研究プロジェクトである。各国が共同・競争し合いながら、広範な研究領域にわたる電離圏・磁気圏研究が推し進められ、多くの成果が生み出されてきており、国際的にも広く認知されているものである。

- (2) 一方、SuperDARN レーダーは、大気重力波や流星エコーもとらえられることが知られ、流星エコーの自己相関関数(ACF)データからは中間圏界面領域の中性風速度が近年推定される様になり、電離圏・磁気圏研究だけでなく、中間

圏・下部熱圏 (MLT) 領域にまで研究領域は広がってきた。しかし、ACF データだけでは重要な風速の高度情報を得ることは不可能であった。当研究代表者らはこれを克服すべく、これまでにない新しい生時系列観測・解析手法を開発し、これを南極昭和基地レーダーに適用し、真の流星エコーのみを抽出して、風速及びその高度分布を精度よく導出し、且つ又下方に位相伝播する半日周期大気潮汐波を検出することに SuperDARN を用いて初めて成功した

(Yukimatu, A. S., and M. Tsutsumi, A new SuperDARN meteor wind measurement: Raw time series analysis method and its application to mesopause region dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 29(20), 1981, doi:10.1029/2002GL015210, 2002)。この新手法が全 SuperDARN に適用されることが合意され、今後 MLT 領域研究に大きな貢献をするものと期待されている。

- (3) 他方、更にここ数年で、デジタル受信機のレーダーへの応用が始まった。アナログ受信機より低コストであり柔軟性に富むことから導入され始めており、昭和基地レーダーへも 2005 年に導入がなされた。現在までのところ、各研究機関ではアナログ受信機代替程度の役割であるが、柔軟性に富むデジタル受信機の導入は、さまざまな応用的観測手法が行える潜在性を秘めている。我々の提案する新しい観測手法により、ビームに垂直な方向のみならず、ビーム方向（電波送信方向）の高空間分解能観測への応用が可能となる。

2. 研究の目的

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) レーダーに、新しい生時系列観測・解析手法と、デジタル受信機による新しい高空間分解能観測手法を組み合わせることで、従来の ACF 観測手法と比べ、高い時間・空間分解能観測データを得ることを実現し、この手法を用いて、極域電磁圏ダイナミクスの諸問題について新たな知見を得ることが本研究課題の目的である。より具体的には、以下の 2 点が研究の目的である。

- (1) 新しい生時系列観測・解析手法と、デジタル受信機による新しい高空間分解能観測を組み合わせることで、従来の（数秒間程度の時間分解能で 15km 程度の空間分解能の）ACF 観測手法と比べ一桁以上高い (0.1 秒程度、1km 程度)

時間・空間分解能データを得ることが可能となる。この実現可能性を様々な観点から検証する。

- (2) 上記新しい観測・解析手法を極域電離圏・磁気圏ダイナミクスの研究に応用し、多様なスペクトルが存在する原因、沿磁力線不規則構造 (FAI) 発生機構、電離圏-磁気圏マッピングや電離圏・磁気圏結合について、これまでの ACF 観測では時間・空間分解能の低さゆえに解明困難であった極域電磁圏ダイナミクスの諸問題点について新たな知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 2006 年度

SuperDARN レーダーを用いての、生時系列観測・解析手法と、デジタル受信機による新しい高空間分解能観測手法を組み合わせた新しい観測手法を確立することに重点を置き、この新手法を用いた昭和基地 SuperDARN レーダー初期観測データの解析に努める。このために、デジタル受信機ボードを一式導入する。

また、SuperDARN レーダーによるこの新しい観測手法を EISCAT レーダーによる電離圏加熱実験との共同観測にも応用し、この観測及び解析のために、英国レスター大学を訪ね、研究を推進する。

(2) 2007~2008 年度

SuperDARN レーダーを用いての、生 IQ 時系列観測・解析手法、特に、周波数領域干渉計による高空間分解能観測手法の確立、及び、デジタル受信機による新しい高空間分解能観測手法を確立すること、に重点を置き、この新手法を用いた昭和基地及び CUTLASS SuperDARN レーダーでの観測の実施、及び、初期観測データの解析に努める。

又、2006 年度実施した SuperDARN レーダーによる周波数領域干渉計観測手法を用いた EISCAT レーダーによる電離圏加熱実験との共同観測をより高精度化し、この観測及び解析のために、英国レスター大学や EISCAT グループとの共同研究を通して、研究を進め、総括する。

4. 研究成果

(1) 周波数領域干渉計法 (FDI) の SuperDARN で初の観測の実現

Yukimatu and Tsutsumi, GRL, 2002 で開発した、SuperDARN レーダーを用いた、生 IQ 時系列観測・解析手法を発

展させ、近接する2周波の送信波を用いた周波数領域干渉法(FDI)をSuperDARNレーダー制御ソフトに付加する開発を行い、これを、英国Leicester大学のCUTLASS SuperDARNレーダーに組み込み、SuperDARNで初めて実験に成功した。

(2) **2周波FDI法による、中間圏界面領域中性風観測の精度向上の実現**

上記2周波FDI法での流星観測に成功し、従来のACF観測を損なうことなく、観測が問題なく可能であり、レンジ方向に高空間分解能の流星風(中性風)観測が可能であることを、oversampling手法とこのFDI法との比較により確認し、極域中間圏界面領域の中性風観測の高空間分解能観測(主に高度分解能の向上)を実現することに成功した。

(3) **高時間分解能観測による人工励起沿磁力線不規則構造(FAI)の観測によるFAI生成機構の解明**

EISCAT Tromsoの電離圏加熱装置で人工励起されたFAIのSuperDARN生IQ時系列法による高時間分解能観測を実施した。これにより、

① 時間規模の短く且つ極めて大きなエコーパワーの変動を観測した。

② ドップラースペクトルの中に、相関時間や時間発展の異なる2乃至3種のスペクトル成分が共存していることが初めて見出された。

③ 生IQ時系列の位相の「跳び」の解析から、観測領域内部のFAIの消長と直接的に関係している可能性が高いことが示された。

④同時に実施されたEISCATレーダーによる高時間分解能の2次元の電子密度、温度等の分布観測によって、加熱領域の空間的な広がりを捉えるとともに、イオン音波擾乱に起因する受信パワーの大きな変動が1秒以下の時間スケールで捉えられ、上記①との関連性の可能性が議論された。

という、人工励起FAIの生成・消滅過程の理解の為に重要な新しい知見が得られた。

(4) **多周波周波数領域干渉計法による高空間分解能観測のSuperDARNで初めての實現**

上記(3)①~④の結果を受け、上記(2)を発展させ、多周波数によるFDI観測を可能とするレーダー制御ソフトの開発を行い、SuperDARN初の観測を実現した。多周波FDI法は近距離流星エコーを用いてその成功を確認した。

(5) **多周波FDI法による人工励起FAIの高空間分解能観測データ解析手法の開発**

上記(4)の多周波FDI法を用いて、EISCAT Tromso電離圏加熱装置による人工励起FAIの観測を実施した。近距離流星エコーを用いてFDI観測データ解析に必要な初期位相の決定を行ったが、これを遠方エコーに適用することが困難であることが判明し、問題点にぶつかった。しかし、遠方エコー自身を用い、ある仮定を置いて、観測領域内のエコー分布を求める方法や、最小エントロピー法を用いて解を求めるという新しい方法を用いることで、尤もらしい解を得ることがわかり、多周波FDI法により、初めて高空間分解能のFAI観測の實現に至った。但し、この手法は更に今後詳細な検討が必要である。

(6) **シングルパルス及びダブルパルス法によるFDI観測の實現**

人工励起FAIの生成・消滅の時間規模に比べ、FDI法の1観測にかかる時間が長過ぎ重要な物理情報を得られていない可能性が考えられた為、従来のマルチパルス法によるACF観測との協調の考えを一旦やめ、シングルパルスやダブルパルス法を用いての高速FDIモードの開発を行った。これによる人工励起FAIデータは現在も鋭意解析中である。

また、副産物として、この手法を用いて、高時間分解能の地磁気脈動の詳細な観測研究が可能であることが、Leicester大との共同研究で明らかとなり、今後も共同でダブルパルス法を用いた高時間分解能観測研究を実施してゆくこととなった。

(7) **カスプ域の高時間・空間分解能観測結果の解析**

カスプ域における生IQ時系列高時間分解能観測データの解析を進め、FTEの電離圏signatureと考えられる電離圏における高速流におけるドップラースペクトルについて、従来の数秒の時間分解能より一桁高い時間分解能での動態の研究を進め、カスプ域におけるスペクトル幅が広い原因、また、LLBLやcuspでの高速流領域での広いスペクトル幅の原因について、少なくともスペクトルの(1秒以下の時間規模での)変化が関与していることが明らかになった。

(8) **高空間・時間分解能デジタルイメージングレーダー化の為に予備実験の實施**

より安定で且つより柔軟性に富んだ観測モードを実現する為に、デジタル受信機の導入の為に準備を行い、これを南極昭和基地レーダーに導入することに成功した。

更に、方位角(ビーム)方向の高空間分解能観測を可能とする、「イメージン

グ化」(即ち、各アンテナ受信波を別々に独立に取得し、adaptive なビーム生成により、従来のビーム分解能以下の分解能を実現する事)の実現に向けた予備調査の為の比較試験観測(レーダー設置場所での RF/IF sampling 法の直接比較実験)を昭和基地で実施することに成功した。

(9) デジタルイメージングレーダーの設計

上記(8)の結果を受け、英国 Leicester 大学との共同で、南極昭和基地レーダーのイメージングレーダー化の為の設計を行い、その実現に向けて開発を開始した。今後、開発が完了すれば、Finland での同型レーダーでの試験観測を経て、南極昭和基地での長時間・空間分解能観測の実現を目指す。

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 10 件)

- ① Tsutsumi, M., A. S. Yukimatu, D. A. Holdsworth, and M. Lester, Advanced SuperDARN meteor wind observations based on raw time series analysis technique, *Radio Science*, 44, RS2006, doi:10.1029/2008RS03994, 2009, 査読有.
- ② Taguchi, S., K. Hosokawa, A. Nakao, M. R. Collier, T. E. Moore, N. Sato, and A. S. Yukimatu, HF radar polar patch and its relation with the cusp during B[Y]-dominated IMF: Simultaneous observations at two altitudes, *J. Geophys. Res.*, 114, A02311, doi:10.1029/2008JA013624, 2009, 査読有.
- ③ Miyashita, Y., K. Hosokawa, T. Hori, Y. Kamide, A. S. Yukimatu, M. Fujimoto, T. Mukai, S. Machida, N. Sato, Y. Saito, I. Shinohara, and J. B. Sigwarth, Response of large-scale ionospheric convection to substorm expansion onsets: A case study, *J. Geophys. Res.*, 113, A12309, doi:10.1029/2008JA013586, 2008, 査読有.
- ④ Jayachandran, P. T., N. Sato, Y. Ebihara, A. S. Yukimatu, A. Kadokura, J. W. MacDougall, E. F. Donovan, and K. Liou, Oscillations of the equatorward boundary of the ion auroral oval – radar observations, *J. Geophys. Res.*, 113, A08208,

doi:10.1029/2007JA012870, 2008, 査読有.

- ⑤ Yukimatu, A. S., K. Nishimura, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, N. Sato, M. T. Rietveld, J. D. Borderick, D. M. Wright, T. K. Yeoman, T. R. Robinson, and M. Lester, Range imaging by single pulse FDI - heater induced FAIs observed by SuperDARN and EISCAT, *Proc. SuperDARN workshop 2008*, , 2008, 査読無.
- ⑥ Murata, Y., S. Taguchi, K. Hosokawa, A. Nakano, M. R. Collier, T. E. Moore, N. Sato, H. Yamagishi, and A. S. Yukimatu, Correlative variations of the neutral atom emission in the high-altitude cusp and the fast anti-sunward convection in the low-altitude cusp, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2007JA012404, 2007, 査読有.
- ⑦ Yukimatu, A. S., K. Nishimura, M. Tsutsumi, Y. Ogawa, N. Sato, D. M. Wright, T. K. Yeoman, M. T. Rietveld, and M. Lester, Range Imaging by FDI - heater induced FAIs observed by SuperDARN and EISCAT-, *Proc. SuperDARN workshop 2007, Japan*, , 2007, 査読無.
- ⑧ Nagai T., A. S. Yukimatu, A. Matsuoka, K. T. Asai, J. C. Green, T. G. Onsager, H. J. Singer, Timescales of relativistic electron enhancements in the slot region, *J. Geophys. Res.*, 111, A11205, doi:10.1029/2006JA011837, 2006, 査読有.
- ⑨ Taguchi, S., K. Hosokawa, A. Nakao, M. R. Collier, T. E. Moore, A. Yamazaki, N. Sato, A. S. Yukimatu, Neutral atom emission in the direction of the high-latitude magnetopause for northward IMF: Simultaneous observations from IMAGE spacecraft and SuperDARN radar 2006, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03101, doi:10.1029/2005GL025020, 2006, 査読有.
- ⑩ Taguchi, S., K. Hosokawa, Y. Murata, A. Nakao, M. R. Collier, T. E. Moore, N. Sato and A. S. Yukimatu, Neutral atom emission coming from the direction of the high-latitude magnetopause under northward IMF, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, 20, 17-26, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 行松彰, SuperDARN レーダーのイメージ

- ングレーダー化、平成 20 年度太陽地球環境研究所研究集会「中緯度短波レーダー研究会」、名古屋大学、名古屋、愛知、2008 年 12 月 8 日。
- ② 行松彰、SuperDARN as a ground-based tool for future satellite missions、平成 20 年度 磁気圏電離圏シンポジウム、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)/ 宇宙科学研究本部 (ISAS)、相模原、神奈川、2008 年 11 月 26~28 日。
 - ③ 行松彰、SuperDARN による超高層大気研究と南極昭和基地大型大気レーダー、第 124 回 地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会 (2008 年 秋学会)、仙台市戦災復興記念館、仙台、宮城、2008 年 10 月 9~12 日。(招待講演)
 - ④ 行松彰、西村耕司、小川泰信、堤雅基、佐藤夏雄、M. T. Rietveld, D. M. Wright, T. K. Yeoman, M. Lester、SuperDARN 及び EISCAT による人工励起電離層沿磁力線不規則構造の観測 (2)、2008 年地球惑星科学関連学会合同大会、仙台市戦災復興記念館、仙台、宮城、2008 年 10 月 9~12 日。
 - ⑤ Yukimatu, A. S., SuperDARN studies on ionospheric and mesospheric phenomena, Japan-China Scientific Cooperation Program sponsored by JSPS and NSFC ~ Joint Seminar ~ “Study on polar ionosphere-magnetosphere coupling”, 国立極地研究所、板橋、東京、2008 年 8 月 5~7 日。
 - ⑥ 行松彰、西村耕司、小川泰信、堤雅基、佐藤夏雄、M. T. Rietveld, D. M. Wright, T. K. Yeoman, T. R. Robinson, M. Lester、SuperDARN 及び EISCAT による人工励起電離層沿磁力線不規則構造の観測 (2)、第 32 回極域宙空圏シンポジウム、2008 年 8 月 4~5 日。
 - ⑦ Yukimatu, A. S., Range imaging by single pulse FDI - heater induced FAI observed by SuperDARN and EISCAT, SuperDARN 2008 Annual Meeting, Newcastle, Australia, 2008 年 6 月 1~6 日。
 - ⑧ 行松彰、西村耕司、小川泰信、堤雅基、佐藤夏雄、M. T. Rietveld, D. M. Wright, T. K. Yeoman, M. Lester、SuperDARN 及び EISCAT による人工励起電離層沿磁力線不規則構造の観測 (2)、2008 年地球惑星科学関連学会合同大会、幕張メッセ 国際会議場、千葉、2008 年 5 月 25~30 日。
 - ⑨ 行松彰、電離圏人工励起 FAI の SuperDARN 観測、平成 19 年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「中緯度短波レーダー研究会」、名古屋大学 (愛知)、2008 年 1 月 28 日。
 - ⑩ 行松彰、SuperDARN/EISCAT による電離圏人工励起 FAI の観測、平成 19 年度名古屋大学太陽地球環境研究所「れいめいー地上同時観測研究集会」、国立極地研究所「電離圏・磁気圏のリモートセンシングデータとモデルの結合」合同研究集会、東北大学東京分室 (東京)、2008 年 1 月 17~18 日。
 - ⑪ 行松彰、西谷望、亘慎一、細川敬祐、菊池崇、小川忠彦、佐藤夏雄、SuperDARN: 現状と将来、第 122 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、名古屋大学 (愛知)、2007 年 9 月 28 日~10 月 1 日。
 - ⑫ 行松彰、西村耕司、小川泰信、堤雅基、佐藤夏雄、M. T. Rietveld, D. M. Wright, T. K. Yeoman, M. Lester、SuperDARN 及び EISCAT による電離圏人工励起沿磁力線不規則構造の観測、第 122 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、名古屋大学 (愛知)、2007 年 9 月 28 日~10 月 1 日。
 - ⑬ Yukimatu, A. S., K. Nishimura, M. Tsutsumi, Y. Ogawa, N. Sato, D. M. Wright, T. K. Yeoman, N. Rietveld, and M. Lester、SuperDARN 及び EISCAT による人工励起電離層沿磁力線不規則構造の観測、第 31 回極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所 (東京)、2007 年 7 月 23~24 日。
 - ⑭ Yukimatu, A. S., K. Nishimura, M. Tsutsumi, Y. Ogawa, N. Sato, D. M. Wright, T. K. Yeoman, M. T. Rietveld, and M. Lester, Range Imaging by FDI - heater induced FAIs observed by SuperDARN and EISCAT -, SuperDARN Workshop 2007, Hokkaido, 2007 年 6 月 4~8 日。
 - ⑮ Yukimatu, A. S., Fitacf, lag-0 power, new ROS and TMS mode, SuperDARN Workshop 2007, Hokkaido, 2007 年 6 月 4~8 日。
 - ⑯ 行松彰、西村耕治、堤雅基、小川泰信、佐藤夏雄、D. M. Wright, T. K. Yeoman, T. R. Robinson, M. Lester、時系列データ取得法及び FDI 手法を用いた SuperDARN 短波レーダーと EISCAT 加熱装置による人工励起 FAI の観測、2007 年地球惑星科学関連学会合同大会、幕張 (千葉)、2007 年 5 月 19~24 日。
 - ⑰ 行松彰、堤雅基、佐藤夏雄、小川泰信、D. M. Wright, T. K. Yeoman, T. R. Robinson, and M. Lester、EISCAT 加熱装置、Tromso UHF レーダー、及び SuperDARN レーダーによる電離圏 FAI の研究、EISCAT 研究集会、国立極地研究所 (東京)、2007 年 3 月 27 日。

- ⑮ 行松彰、堤雅基、北海道短波レーダーを用いた時系列データ取得とその応用、2006年度名古屋大学STE研研究集会「中緯度短波レーダー研究会」、名古屋大学(愛知)、2007年2月19日。
- ⑯ 行松彰、堤雅基、山岸久雄、佐藤夏雄、JARE46 昭和基地越冬隊宙空系関連隊員、更新された南極昭和基地 SuperDARN レーダーによる新しい観測手法について、地球電磁気・地球惑星圏学会第120回総会及び講演会、相模原(神奈川)、2006年11月4~7日。
- ⑰ 行松彰、堤雅基、山岸久雄、佐藤夏雄、昭和基地 SuperDARN 短波レーダーの46次観測隊での更新について、第30回極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所(東京)、2006年8月3~4日。

[その他]

- ① Yukimatu, A. S., H. Takahashi, H. Yamagishi, M. Taguchi, A. Kadokura, Upper Atmosphere Physics Data Obtained at Syowa Station in 2005, JARE data reports, Upper atmosphere physics, 25, 1-59, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

行松 彰 (Yukimatu Akira Sessai)
 国立極地研究所・研究教育系・准教授
 研究者番号：70260007

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

堤雅基 (Tsutsumi Masaki)
 国立極地研究所・研究教育系・准教授
 研究者番号：80280535

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

西村耕司 (Nishimura Koji)

情報・システム研究機構・新領域融合研究センター・融合プロジェクト特任研究員
 研究者番号：60455475

佐藤夏雄 (Sato Natsuo)

国立極地研究所・研究教育系・教授
 研究者番号：50132709

(4) 研究協力者

Mark Lester

英国 Leicester 大学・物理・天文学科・教授

Timothy K. Yeoman

英国 Leicester 大学・物理・天文学科・教授

Darren M. Wright

英国 Leicester 大学・物理・天文学科・講師

Terry R. Robinson

英国 Leicester 大学・物理・天文学科・教授

Mike T. Rietveld

EISCAT 科学協会 (EISCAT Scientific Association)・Tromsø site・シニア研究員