

平成 2 8 年 6 月 2 1 日現在

機関番号： 6 2 6 1 1

研究種目： 挑戦的萌芽研究

研究期間： 2014 ~ 2015

課題番号： 2 6 6 1 0 1 5 8

研究課題名 (和文) 非干渉散乱レーダーの新技术を用いた超高層大気の立体観測

研究課題名 (英文) 3-D observations of the upper atmosphere using new incoherent scatter radar techniques

研究代表者

小川 泰信 (Ogawa, Yasunobu)

国立極地研究所・国際北極環境研究センター・准教授

研究者番号： 0 0 3 6 2 2 1 0

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 2,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : 次世代の非干渉散乱レーダー計画 (EISCAT 3D) では、超高層大気の3次元立体観測を目指している。その実現には、複数受信局の多ビーム観測手法を確立することが重要である。本研究では、EISCAT 3Dのプロトタイプ受信局 (KAIRA) を用いて、現行の欧州非干渉散乱 (EISCAT) VHFレーダーから2方向に送信される電波を分離して検出する手法を開発し、その有用性を実験的に明らかにした。さらに、ポスト・ビームステアリング方式とビーム高速走査方式による観測データを取得し、両者の比較・検証を初めて実施した。

研究成果の概要 (英文) : The next generation incoherent scatter radar (EISCAT 3D) will enable us to investigate three-dimensional structures of the upper atmosphere, and we need several verifications of multi-static phased-array techniques for its realization. In this study, we performed multi-static and multi-beam observations using the current EISCAT VHF radar and the proto-type phased-array receiver (KAIRA). We succeeded in receiving 2 beams of the VHF radars with the KAIRA receiver separately, and also compared data obtained from the multi-narrow beam observations with results using post-beam steering techniques.

研究分野： 超高層物理学

キーワード： 地球惑星電離圏 レーダー工学 非干渉散乱 超高層大気

1. 研究開始当初の背景

非干渉散乱 (IS) レーダーは、大口径のアンテナと、大出力の VHF/UHF 帯電波、超高感度の受信機を用いて、電離圏電子からの微弱なエコーを観測し、広い高度範囲のプラズマ温度や密度などの電離圏物理量データを取得できる強力な観測手段である。複数のフェーズドアレイ式 IS レーダーを用いた次世代 IS レーダー建設計画 (EISCAT_3D) が、欧州や日本による国際共同で立案され、数年後の建設開始に向けて技術実証試験などの準備が進められている。この EISCAT_3D 計画で想定している多ビームの複数受信局観測を実現するためには、複数局の正確な時刻同期を含む様々な技術的課題がある。それらを克服するための技術的試験が、ソダンキラ地球物理観測所 (フィンランド) を中心に EISCAT_3D のプロトタイプ受信局 (KAIRA) を用いて現在行われている。しかし、この KAIRA と現行の EISCAT レーダーを組み合わせ用いた、多ビームの複数受信局観測はまだ行われていない。そのような多ビームの複数受信局観測を実施し、その観測技術を確認することで、EISCAT_3D を用いた超高層大気・電離圏の 3 次元立体観測の実現に向けて、大きな前進をもたらすと期待できる。

2. 研究の目的

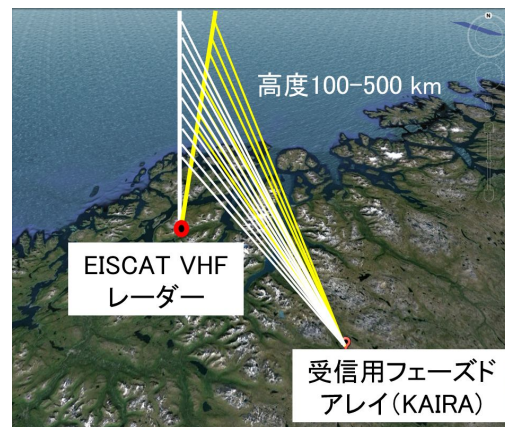
本研究では、現行の EISCAT VHF レーダーを用いて電波を 2 方向に送信し、KAIRA により分離して検出する実験を実施する (図 1 参照)。その方法を具体的に検討し、実際に検証することにより、IS レーダービームを複数受信するシステムとしての有用性を実験的に明らかにする。さらに、将来の多点フェーズドアレイ方式の実現に必要な、様々な信号処理技術 (電波受信ビームの高速走査やポスト・ビームステアリング方式) を実験的に確立することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に模式図を示したように、EISCAT VHF レーダーから 2 方向に送信される電波を、KAIRA により分離して検出する。この EISCAT 特別実験を 2014 年 9 月に

実施した。本研究には、最先端のレーダー工学技術及び信号処理技術を必要としており、それらの専門家である海外共同研究者 (Ilkka Virtanen 博士 (オウル大) や Derek McKay 博士 (ソダンキラ地球物理観測所) の助言や協力を仰ぎながら計画を進めた。また、KAIRA による電波受信ビームの高速走査やポスト・ビームステアリング (生の時系列データを取得後に受信ビームを形成) 観測を実施し、2 つの方式で得られた結果を比較・検討した。

図 1 : EISCAT VHF レーダーと KAIRA に



よる観測の模式図。VHF レーダーから送信される 2 つのビームを、KAIRA で受信する。

4. 研究成果

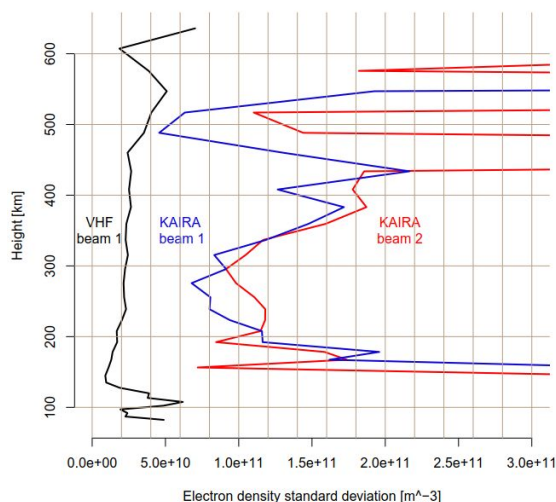
(1) 2 方向の電波受信観測実験

2014 年 9 月に実施した、EISCAT VHF レーダーを用いた 2 方向の電波送信及び、KAIRA による分離検出の結果を図 2 に示す。KAIRA ビームによって得られる電子密度の標準偏差 (サンプルのばらつき具合) は、高度 250-300 km では VHF レーダーに比べ約 4 倍、高度 200 km 及び 400 km 付近では約 6-8 倍であることが見て取れる。これは KAIRA 受信ビームの仰角や、VHF レーダービームまでの距離 (レンジ) によって決まる値であり、理論的に想定されるエラーの範囲内で複数ビームのデータが取得できていることを確認した。現在の KAIRA システムでは、16 倍 (4 の 2 乗) の時間をかけることで、EISCAT VHF レーダーと同程度の観測精度を得られることを意味する。

また、2 つの KAIRA ビームで電子密度の標準偏差が異なる結果 (具体的には、beam1の方が beam2 に比べて標準偏差が小さい)

については、KAIRA から VHF レーダービームまでの両者の距離が異なることに起因する。これらの電子密度の標準偏差であれば、IS レーダービームを複数受信するシステムとして有用であり、電離圏物理量を複数ビームかつ各高度で導出可能であることを今回初めて実証することができた。

図 2 : EISCAT VHF レーダー及び 2 方向の KAIRA ビームによって得られた電子密度の標準偏差の高度分布。



(2) 複数の IS レーダー観測手法の検証

(a) ビーム高速走査方式(角度分解能が狭い受信ビームを 10 本形成) と、(b) ポスト・ビームステアリング方式(ワイドなビームで電波を受信し、後からビーム形成) との比較・検証が可能な実験データを 2016 年 3 月に取得し、そのデータを用いた解析を実施した。その両者の感度 (SNR) を調べた結果を図 3 に示す。両者の観測データを 10 分間積分することにより、なめらかな高度分布にしている。ポスト・ビームステアリング方式のデータ解析の流れを以下に示す。

(i) 今回の送受信ビームに用いた Alternating コードを復号し、 20μ 秒の分解能をもつ Lag プロファイルを用意する。

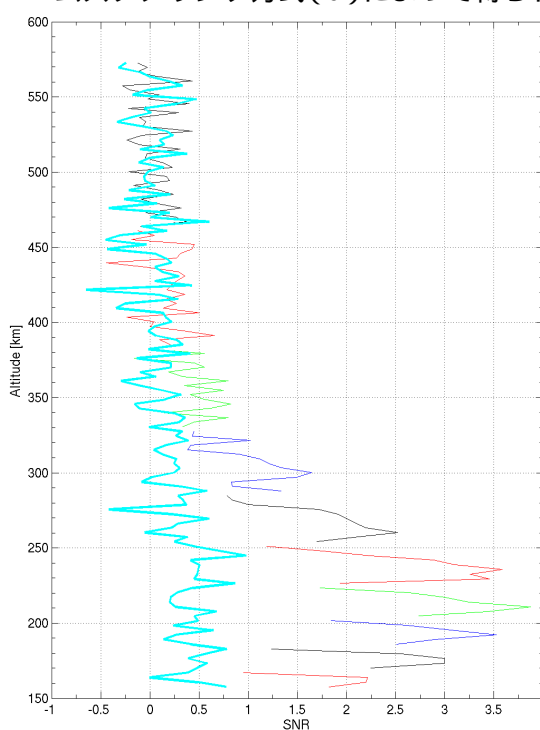
(ii) その Lag プロファイルデータを、KAIRA の持つタイル (計 47 枚) すべてについて 10 分間足し合わせる。

(iii) さらに、2 つの極性 (x 方向と y 方向) を持つ Lag プロファイルデータを足し合わせ、zero lag の実部 (real part) の強度とその標準偏差から SNR を見積もる。

理論的には、ビーム高速走査方式の狭いビーム (a) の SNR は、ポスト・ビームステ

アリング方式のワイドビーム (b) に対して、 $(N)^{1/2}$ 倍になると想定される (注 : N は KAIRA のタイル数) 。今回の実験では、47 枚のタイルを利用したため、約 7 倍の SNR の違いになると見積もられる。今回の観測結果は、高度 150-300 km の (a) のビームが、同高度の (b) のビームと比べ 4-8 倍の SNR を持つことを示していた。そのことから、理論的に見積もられる両者の違いを、観測的に実証することができたと考えている。

図 3 : 2 つの観測方式による SNR の違い。細線はビーム高速走査方式 (a) によって得られた各ビームの SNR、太線はポスト・ビームステアリング方式 (b) によって得られ



たワイドビームの SNR を示す。

(3) まとめと今後の課題

本研究では、EISCAT_3D のプロトタイプ受信局 (KAIRA) を用いた複数の観測手法を実施し、そのデータを比較・検証を行った。これらの検証結果は、EISCAT_3D レーダーの具体的な観測モード検討・製作時に生かされることが期待される。特に、(2) で調査したポスト・ビームステアリング方式のビームについては、SNR が低い欠点を有するが、(i) スペースデブリなどの受信強度の大きいターゲットの検出や、(ii) レーダーイメージングに対して有益であるため、更なる観測手法の改善が求められる。また、ビーム高速走査方式については、今

回用いた KAIRA の受信ビーム数(計 10 ビーム)よりも多くのビーム(具体的には最大 20 ビーム)を今後試みるにより、信号処理及びデータ通信技術に関する課題を引き続き調査する予定である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Hosokawa, K. and Y. Ogawa, Ionospheric variation during pulsating aurora, J. Geophys. Res., DOI: 10.1002/2015JA021401, July 2015. (査読有り)
2. McCrea, I. W., A. Aikio, L. Alfonsi, E. Belova, S. Buchert, M. Clilverd, N. Engler, B. Gustavsson, C. Heinselman, J. Kero, M. Kosch, H. Lamy, T. Leyser, Y. Ogawa, K. Oksavik, A. Pellinen-Wannberg, F. Pitout, M. Rapp, I. Stanislawska, and J. Vierninen, The science case for the EISCAT_3D radar, Progress in Earth and Planetary Science, doi:10.1186/s40645-015-0051-8, July 2015. (査読有り)
3. Ogawa, Y., T. Motoba, S. C. Buchert, I. Haggstrom and S. Nozawa, Upper atmosphere cooling over the past 33 years, Geophys. Res. Lett., 41, 5629-5635, doi: 10.1002/2014GL060591, September 2014. (査読有り)
4. Kero, A., J. Vierinen, D. McKay-Bukowski, C.-F. Enell, M. Sinor, L. Roininen, and Y. Ogawa, Ionospheric electron density profiles inverted from a spectral riometer measurement, Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/2014GL060986, 2014. (査読有り)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 小川泰信、宮岡宏、野澤悟徳、中村卓司、大山伸一郎、津田卓雄、藤井良一、EISCAT サイエンスチーム、EISCAT 及び EISCAT_3D レーダーを用いた北極域超高層大気の国際共同研究、第 29 回大気圏シンポジウム、宇宙科学研究所、相模原、2016 年 3 月 8 日
2. 小川泰信、宮岡宏、野澤悟徳、大山伸一郎、津田卓雄、中村卓司、藤井良一、EISCAT サイエンスチーム、EISCAT 及び EISCAT_3D レーダーを用いた北極域超

高層大気の国際共同研究、SGEPSS 秋学会、東京大学、東京、2015 年 11 月 1 日

3. Ogawa, Y., Study on ion upflow based on high latitude IS radars and future EISCAT_3D, JpGU meeting 2015, Makuha ri messe, Makuhari, Chiba, May 28, 2015.
4. Ogawa, Y., S. Nozawa, Y. Miyoshi, A. Mizuno, Y. Saito, T. Abe, and EISCAT_3D Japan team, Japanese plans of ground-based and in-situ measurements related to EISCAT_3D, The 6th EISCAT_3D User Meeting, Uppsala, Sweden, May 12, 2014
5. Ogawa, Y., Study on ion upflow and outflow based on EISCAT_3D, JpGU meeting 2014, Pacifico Yokohama, Yokohama, April 30, 2014.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小川 泰信 (OGAWA, YASUNOBU)
国立極地研究所・国際北極環境研究センター・准教授
研究者番号：00362210

(2)研究分担者

無し

(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