

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：62611

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610145

研究課題名(和文)南極大型大気レーダーによる流星を利用した下部熱圏風速3次元イメージング観測

研究課題名(英文)Three dimensional lower thrmosphere wind observations

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：南極昭和基地大型大気レーダーを用い、中間圏乱流観測による高精度な風速測定手法をさらに補強する手法として、流星エコーを利用した風速観測法の基礎開発を行った。通常の流星レーダー観測と比べ、1ヶ
タ多い55系統の受信チャンネルを用いることが大きな利点であると同時に挑戦的要素も多かったが、受信アンテナの最
適な選択方法および微弱な流星エコーをオンライン検出する手法を確立した。併せて、乱流エコー観測中に副産物とし
て流星エコー観測を行う付加受信装置について検討した。

研究成果の概要(英文)：A meteor wind observation technique has been developed using the large aperture
atmospheric radar at Syowa, Antarctica (PANSY radar) in order to strengthen the existing turbulence echo
based mesosphere observation. This meteor technique is characterized by the use of 55 receiving channels.
The unprecedented number in the history of meteor echo observations is 10 times as many as that of
conventional meteor radars. The selection method of 55 receiving antennas from the whole antenna array
and also algorithm to detect very faint meteor echoes in real-time have been developed and successfully
tested using PANSY radar. A feasibility study has also been made to conduct meteor observations as a
by-product of the turbulence echo measurement.

研究分野：中層大気物理学

キーワード：南極昭和基地大気レーダー 流星エコー観測 中間圏 多チャンネル観測

1. 研究開始当初の背景

極域は、その厳しい気象条件やアクセスの困難さのために研究の遅れが際立つ。この状況を打破するため2000年から検討を進めてきた南極昭和基地大型大気レーダー計画(PANSY: Program of Antarctic Syowa MST/IS Radar、代表: 東京大学 佐藤薫教授)が、予算措置されて2010年に建設された。対流圏、成層圏、中間圏には、それぞれ乱流からの散乱エコーを利用した高精度な風速観測モードがあるが、中間圏においては乱流に加えて太陽直達光による大気の電離が必要であり、残念ながら極域冬季の中間圏乱流観測は限定的である。また、下層大気から運動量やエネルギーを上層に運び、中間圏領域に至って大気大循環場をも変化させる大気重力波の役割を定量的に理解するには、その伝搬や散逸過程を3次元的に捉える必要があるが、大気光イメージングでは水平2次元のみ、通常のレーダー観測では鉛直構造のみに制限され、未だ3次元構造の直接観測手法は存在しない。さらに、気候変動により近年出現頻度が増加しているとされる極中間圏夏季エコー(PMSE)の生成メカニズムの詳細な理解についても背景風速・温度場の3次元情報が必要である。

2. 研究の目的

2010年に南極昭和基地(南緯69度)に設置された大型大気レーダー(PANSY)を用い、これまでになく多チャンネルの受信手法に基づく高品質な流星エコー観測手法を開発し、極域中間圏・下部熱圏の精密観測を行う。一般的な流星レーダーと比べて数十倍程度のエコー数の流星観測を実現し、従来はエコー数の制約からもっぱら風速の鉛直プロファイル推定に限定されていた流星エコー観測を、水平2次元空間も含む3次元空間における風速・温度場の時間発展を捉える前例のないイメージング観測手法として確立させる。これにより極域の冬季に実施困難な中間圏乱流観測を補完するだけでなく、水平方向500km(経度方向に10度以上)・高さ75-100kmの3次元領域内の各種大気波動の空間構造の研究、極中間圏夏季エコー出現時の背景場の詳細観測など、従来は不可能であった観測を実現する。

3. 研究の方法

(1)送信は全アンテナを使用し、受信は各群から1本ずつの八木アンテナを選択し、全天から戻ってくる流星エコーを受信する。PANSYレーダーは全55群からなる大型アレイレーダーであるため、全55本のアンテナに

よる受信となる。そのため、従来型の数本のアンテナによる干渉計とは異なり、受信アンテナだけで細いビームをポストビーム走査により作ることができると考えられる。できるだけサイドローブの低いアンテナパターンとなるように、各群からのアンテナ選択をする最適設計を行う。

(2)受信されるエコーの中に含まれる流星エコーは全体のごく一部であり、またすべての受信データを記録することは非現実的に大きな記憶領域を必要とする。そのため、実時間で流星エコー検出を行って流星エコー部分のみを記録して残すことが必要となる。アンテナ5本程度の流星エコー観測では実時間処理は実用化されているが、その10倍にもなるデータ量を実時間処理することは容易ではなく、効率の良いエコー検出方法を開発する。なお、本研究計画開始時点では、厳しい海氷状況のために観測船しらせによる物資輸送に大幅な遅れが生じ、PANSYレーダーは部分システムによる運用を余儀なくされ、流星エコー検出法開発も部分システムにより実施することとした。

(3)予定していた研究計画の最終年度(2年目)の最後によりやく物資がすべて昭和基地に到着したが、全群を使った流星観測試験を年度内に実施できる状況ではなく、計画を一年延長することとした。加えて、PANSYレーダーが対流圏・成層圏・中間圏などの観測(MST観測)を実施しているときにも副産物として流星観測を行えるように付加受信装置を設ける検討を行うこととした。

4. 研究成果

(1)アンテナ19本からなる各群より1本ずつのアンテナを選ぶ組み合わせ方法は、19⁵⁵通り存在し、すべての組み合わせについて受信パターンを計算して選択するのは全く非現実的である。そのため、ランダムにアンテナを選択し、得られた55本のアンテナによる受信パターンのサイドローブが統計的にどのように分布するかを調べることにした。

当初計画期間の2年間には12群の部分システムでの運用となったため、試験も12群で開始した。図1に使用した12群を正六角形のハッチで示す。ランダム選択により得られた1万通りのアンテナ組み合わせについて、受信パターンのサイドローブレベルを見積もった統計結果を図2に示す。図1の12群の場合、最も低いサイドローブレベルはメイ

ンビームに比較して4.4dB程度低いレベルが限界であることがうかがえる。選択された最適組み合わせ例は図1に黒丸で示された12本のアンテナとなる。この組み合わせにおいて、メインビームを鉛直に向けた受信パターンを図3に示す。また、同様のサイドローブレベルを持つ組み合わせ候補は複数あるため、仮に不具合のあるアンテナがあった場合は、そのアンテナを避けた別の組み合わせを選ぶことができる。

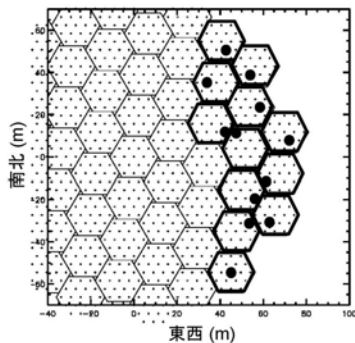


図1 初期試験に用いた12のアンテナ群(正六角形)、および受信アンテナ(黒丸)

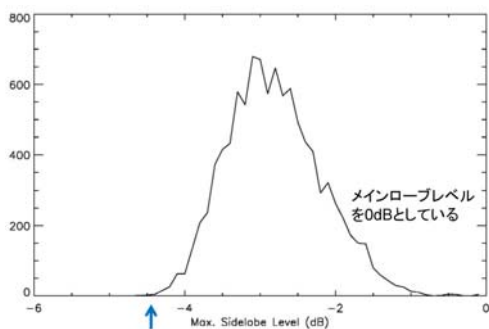


図2 1万回のランダム選択により選ばれた12受信アンテナのサイドローブレベル分布

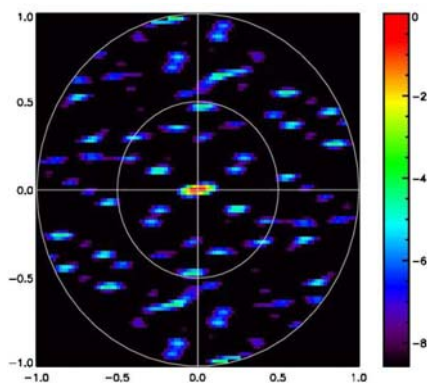


図3 図1の12本の受信アンテナによる受信パターン

(2)実際に図1に示される送信アンテナ群と受信アンテナの組み合わせを用いて、流星エ

コーの短時間試験観測を2013年6月より数回実施し、12本のアンテナの時系列出力を全レンジに渡って記録した。流星エコー観測では、膨大な生データの中から流星エコーを検出してデータの取捨選択を行うことが非常に重要であるが、計算機能力は限られるため、実時間で全レンジ・全時刻に受信ビームを振り回して流星エコー検出を行うことは現状では非現実的である。そのため、疑似的に受信ビームを走査して効率よくエコー検出する方法を検討した。微弱であっても流星エコーが存在すれば、受信アンテナ信号間には到来方向によって決まる一定の位相差があり、一方で流星エコーが無ければ位相差はノイズによってランダムな値となる。流星の受信アンテナ間の位相差を、一定時間ごとに流星エコーの有無に関わらず求め、位相差をキャンセルするように12アンテナの出力を合成(コヒーレント積分に相当)した。これにより、1本のアンテナ出力では微弱でほとんど分らないようなエコーも、疑似的に到来方向に受信ビームをに向けた状態となり強いシグナルとして認識された。その例を図4に示す。この合成操作は十分に実時間で処理可能であり、膨大な生データを残す必要なく流星データのみを検出して記録する基本アルゴリズムが完成した。

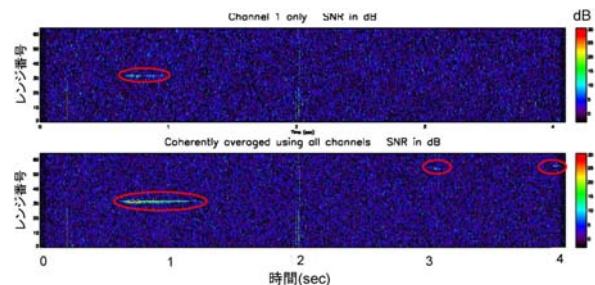


図4 検出された流星エコー強度の例。上:アンテナ1本での受信強度、下:12本のアンテナ出力を位相合成した結果。位相合成すると1アンテナではほぼノイズに埋もれた微弱なエコーまで検出できる

(3)研究計画を延長した2015年度には、前年度の末に観測船しらせにより届けられた物資を用いてレーダーの最終調整がなされ、9月に全群を用いた流星エコー観測試験が可能となった。調整の終了した全55群のアンテナ配置を図5に示す。12群を用いた場合と同様に、55群の各群から1本のアンテナをランダムに選ぶ1万通りの組み合わせを生成し、最大サイドローブレベルの分布を統計的に調べた(図6)。メインビームと比べて9dB以上レベルの低いサイドローブレベルが実

現可能であることが分る。図5の中で◇で示されるアンテナ組み合わせが最適組み合わせ例であり、その放射パターンを図7に示す。このアンテナ組み合わせを2015年9月の試験観測に使用し、12群試験時と同様に良好な結果を得た。

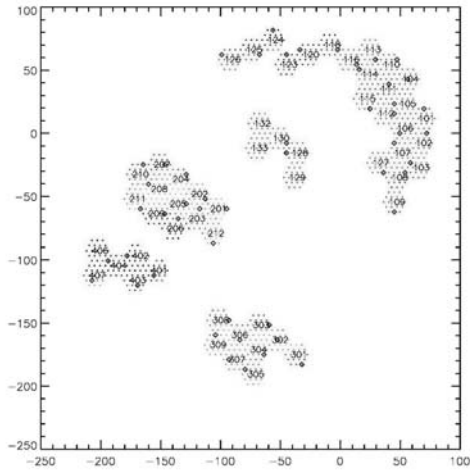


図5 調整の終了した55群全体図、および流星試験観測に用いた受信アンテナ (◇)

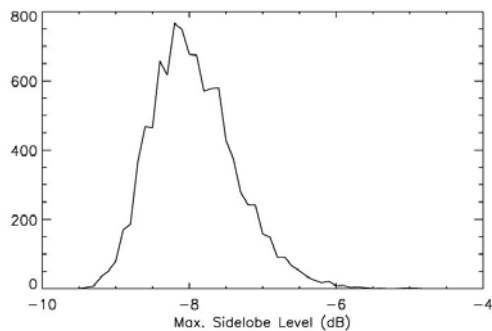


図6 1万回のランダム選択により選ばれた55受信アンテナのサイドローブレベルの分布図

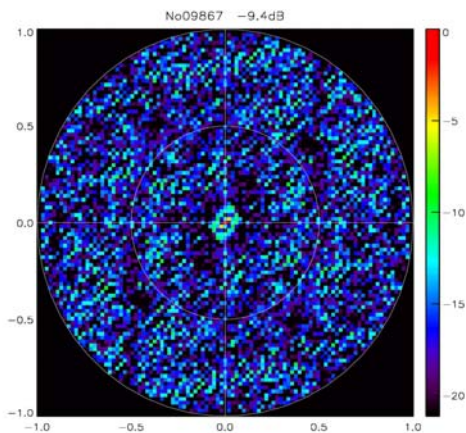


図7 図5の55受信アンテナによる受信パターン

PANSY レーダーは MST 観測を連続的に行うことを主目的とするため、流星エコー観測の

ために占有することは難しい。残念ながら本研究期間中には長期間にわたる流星エコー観測は実施できなかったため、本研究の次のステップとして考えていた PANSY レーダーが MST 観測中でも流星エコー観測を副産物として実施する手法の検討を前倒しで行った。通常の MST 観測モードは、55 チャンネルある受信機の中の1チャンネルしか使用しない。そのため、受信専用の付加干渉計アンテナを用意して空きチャンネルに接続することで副産物としての流星エコー観測が可能となる(図8)。本研究費を一部使用し、屋外敷設用の RF ケーブルと、レーダー小屋内の既存空き受信機への接続用小型増幅器パーツを購入し、簡易的な観測試験装置を用意した。装置は2015年11月出発の第57次南極地域観測隊に託し、試験は2016年度の後半に予定されている。将来的な本格流星観測に向けた評価観測を行う予定である。

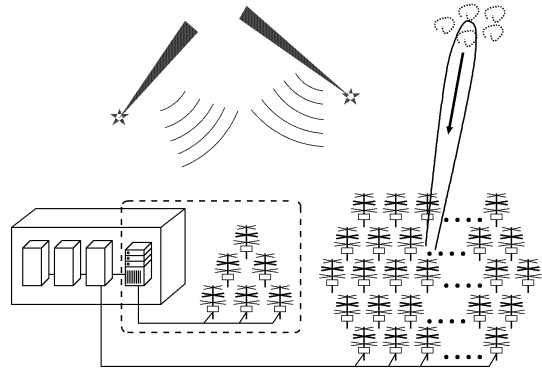


図8 2016年度に評価試験を実施予定の付加システム(破線内)の概念図

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 17 件)

- ① Properties of inertia-gravity waves in the lowermost stratosphere as observed by the PANSY radar over Syowa Station in the Antarctic, Mihalikova, M., K. Sato, M. Tsutsumi, and T. Sato, Ann. Geo., 34, 543-555, doi:10.5194/angeo-34-543-2016, 2016 (査読有).
- ② Characteristics of vertical wind fluctuations in the lower troposphere at Syowa Station in the Antarctic revealed by the PANSY radar, Minamihara, Y., K. Sato, M. Kohma, and

- M. Tsutsumi, SOLA, in press, 2016 (査読有) .
- ③ Seasonal and interannual variation of mesospheric gravity waves based on MF radar observations over 15 years at Syowa Station in the Antarctic, Ryosuke Yasui, Kaoru Sato and Masaki Tsutsumi, SOLA, doi:10.2151/sola.2016-010, 12, 46-50, 2016 (査読有) .
- ④ A study of multiple tropopause structures caused by inertia-gravity waves in the Antarctic, Ryosuke Shibuya, Kaoru Sato, Yoshihiro Tomikawa, Masaki Tsutsumi, and Toru Sato, Journal of the Atmospheric Sciences, 72(5), 2109-2130, DOI: 10.1175/JAS-D-14-0228.1, 2015 (査読有) .
- ⑤ Vertical Wind Disturbances during a strong wind event observed by the PANSY radar at Syowa Station, Antarctica, Yoshihiro Tomikawa, Masahiro Nomoto, Hiroaki Miura, Masaki Tsutsumi, Koji Nishimura, Takuji Nakamura, Hisao Yamagishi, Takashi Yamanouchi, Toru Sato, Kaoru Sato, Monthly Weather Review, 143, 1804-1821, DOI:10.1175/MWR-D-14-0028.9.1, 2015 (査読有) .
- ⑥ Height and time characteristics of seasonal and diurnal variations in PMWE based on 1 year observations by the PANSY radar (69.0S, 39.6E), Nishiyama, T., Sato, K., Nakamura, T., Tsutsumi, M., Sato, T., Kohma, M., Nishimura, K., Tomikawa, Y., Ejiri, M.K., Tsuda, T.T., Geophysical Research Letters 42(7), 2100-2108, DOI: 10.1002/2015GL063349, 2015 (査読有)
- ⑦ New statistical analysis of the horizontal phase velocity distribution of gravity waves observed by airglow imaging, Takashi S. Matsuda, Takuji Nakamura, Mitsumu K. Ejiri, Masaki Tsutsumi and Kazuo Shiokawa, Journal of Geophysical Research, 119(16), 9707-9718, DOI: 10.1002/2014JD021543, 2014 (査読有) .
- ⑧ Meteor Trail Echo Rejection in Atmospheric Phased Array Radars Using Adaptive Sidelobe Cancellation, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Tsutsumi, and T. Sato, J., Atmos. Oceanic Technol., 31(12), 2749-2757, http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00035.1, 2014 (査読有) .
- ⑨ Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY), Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., Yamanouchi, T., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, DOI: 10.1016/j.jastp., 2014 (査読有) .
- ⑩ Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012, Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara, and H. Maezawa, Geophys. Res. Lett., 41 2568-2574, DOI:10.1002/2014GL059360, 2014 (査読有) .
- ⑪ Simultaneous PMC and PMSE observations with a ground-based lidar and SuperDARN HF radar at Syowa Station, Antarctica, Suzuki, H., T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Ogawa, M. Tsutsumi, M. Abo, T. D. Kawahara, Y. Tomikawa, A. S. Yukimatu, N. Sato, Annals Geophysicae, 31, 1793-1803, doi:10.5194/angeo-31-1793-2013 2013 (査読有) .
- [学会発表] (計 12件)
- ① Characteristics of mesosphere echoes over Antarctica obtained using PANSY and MF radars (invited), Masaki Tsutsumi, Kaoru Sato, Toru Sato, Takuji Nakamura, Koji Nishimura, Yoshihiro Tomikawa, Masashi Kohma, Japan Geoscience Union meeting 2016, 24 May, Makuhari-messe, Makuhari, Chiba, 2016.
- ② PANSY レーダーおよびMF レーダーによる中間圏高度エコーの比較、堤雅基、佐藤薫、佐藤亨、中村卓司、西村耕司、富川喜弘、高麗正史、地球電磁気・地球惑星圏学会 第138回総会・講演会、東京大学、東京、2015年11月1日
- ③ ノルウェー北極域における長期流星レーダー観測、堤雅基、Chris Hall、日本地球

惑星科学連合 2015 年大会、千葉、幕張メッセ、2015 年 5 月 26 日

- ④南極昭和基地(69S)上空の高度 65-110km における大気重力波活動度、堤雅基、日本地球惑星科学連合 2015 大会、千葉、幕張メッセ、2015 年 5 月 26 日
- ⑤Long term meteor wind radar observations in Arctic Norway, Masaki Tsutsumi and Chris Hall, the Fourth International Symposium on the Arctic Research, Toyama International Conference Center, Toyama, 28 April 2015.
- ⑥南極昭和基地 MF レーダーを用いた高度 65-110km における大気重力波活動度の研究、堤雅基、第 136 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会、松本、信州大学、2014 年 10 月 31 日
- ⑦Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY) (invited), K. Sato, M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi, T. Yamanouchi, The 14th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST14/iMST1, Sao Paulo, Brazil, 25 May, 2014.
- ⑧Characteristics of Short Period Tidal Components in Antarctic MLT above Syowa and Davis, M. Tsutsumi and D. Murphy, Japan Geoscience Union meeting 2014, Pacifico Yokohama, Yokohama, 2 May, 2014.
- ⑨Characteristics of Short Period Tidal Components in Antarctic MLT above Syowa and Davis, Masaki Tsutsumi and Damian Murphy, International CAWSES-II Symposium, Nagoya University, Nagoya, 18 November, 2013.
- ⑩Observations of three-dimensional structures of MLT wind fields based on meteor echo measurement using the PANSY radar, M. Tsutsumi, K. Sato, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, H. Yamagishi, and T. Yamanouchi, The 4th symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research, Tokyo, 12-15 November, 2013.
- ⑪南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY) による流星を利用した下部熱圏風速 3 次元構造観測手法の開発、堤雅基、佐藤薫、佐藤亨、中村卓司、齊藤昭則、富川喜弘、西村耕司、山岸久雄、山内恭、地球電磁気・

地球惑星圏学会、高知、高知大学、2013 年 11 月 2 日

- ⑫南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY) による流星を利用した下部熱圏風速 3 次元構造観測手法の開発、堤雅基、佐藤薫、佐藤亨、中村卓司、齊藤昭則、富川喜弘、西村耕司、山岸久雄、山内恭、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、千葉 幕張メッセ、2013 年 5 月 19-24 日

[その他]

ホームページ等

<http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

富川 喜弘 (TOMIKAWA, Yoshihiro)

国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：20435499

(3) 連携研究者

中村 卓司 (NAKAMURA, Takuji)

国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：40217857

佐藤 薫 (SATO, Kaoru)

東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：90251496

佐藤 亨 (SATO, Toru)

京都大学・情報学研究科・教授
研究者番号：60162450