

〔解説〕

106:108:5012 (南極; MST レーダー)

# 1. 新しい南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY) から見えるもの

佐藤 薫<sup>\*1</sup>・堤 雅基<sup>\*2</sup>・佐藤 亨<sup>\*3</sup>  
中村 卓司<sup>\*2</sup>・齊藤 昭則<sup>\*4</sup>・富川 喜弘<sup>\*2</sup>  
西村 耕司<sup>\*5</sup>・山岸 久雄<sup>\*2</sup>・山内 恭<sup>\*2</sup>

## 1. はじめに

極域は気候システムにおいて重要な役割を担っている。成層圏物質循環においては、極域はその出口に対応する。中間圏物質循環においては、夏は入口、冬は出口となる。この物質循環は基本的に波により駆動されているものであり、中層大気が放射平衡から大きく外れた温度構造を維持する要因となっている。気圧は上ほど低いので、強制された上昇流は断熱膨張により冷却をもたらし、下降流は断熱圧縮により加熱する。夏の上部中間圏は上昇流域となっていて地球大気のなかで最も気温が低く、わずかな水蒸気も凝結して雲が生成する。これが極中間圏雲 (Polar Mesospheric Clouds, PMC) である。冬の中間圏・成層圏は下降流域であり、太陽放射が当たらずオゾン加熱がない極夜期においても成層圏界面の高温が存在する。そして、低温域は下部成層圏に限られここには極成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds, PSC) が生成する。極成層圏雲は、その表面で起こる不均一反応によって、南極の春の時期に激しいオゾン層破壊をもたらし、オゾンホールを生成させる。極中間圏雲は1885年に Nature に報告されて以来、毎年観察されているが、それ以前は記録がないため存在しなかったと考えられている。近年では中緯度で観測されることもあり、2009年の夏にパリ上空にも現れたニュースは記憶に新

しい。このため、極中間圏雲は人間活動を敏感に映し出すと考えられており、気候システムのカナリアとも呼ばれている。したがって、これら極域の大気現象の監視は気候変化を知る上で有益であり、その研究は地球気候の仕組みを知る上で重要である。

また、南極大陸の標高は高く沿岸部は急斜面となっている。南極表面はアルベドが高く強い放射冷却を受けるため斜面下降流 (カタバ風) が卓越する。カタバ風は南極域における主要な重力波源の一つとなっている。また、極域では磁気圏の磁力線がプラズマシートにつながっているため、極域大気は宇宙空間からの強いエネルギーインプットを直接受ける点でも、中低緯度域と区別される。このように極域大気は重要であるにもかかわらず、南極大気の観測はその厳しい環境条件により強く制限されてきた。この観測的空白を埋め、極域あるいは南極固有の現象の物理を解明するため、また、極域大気の地球気候における役割を定量的にとらえるため、私たちは昭和基地 (69°S, 40°E) に南極では世界で初めてとなる本格的な大型大気レーダー (MST/IS (Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter) レーダー, VHF 晴天大気ドップラーレーダー) を設置する計画を立てた (Sato *et al.* 2011, 2013)。2011年3月には9割強のアンテナ1000本弱の設置が終わり (第1図)、一部 (5%) を使った初観測データを取得した。このレーダーはプロジェクトの名前をとって PANSY レーダーと名付けた。PANSY (三色スマイル) は首をもたげて咲く花が考えている様子に似ていることから、フランス語の「考える (penser)」に由来する名前である。

\*1 (連絡責任著者) 東京大学大学院理学系研究科。  
kaoru@eps.s.u-tokyo.ac.jp

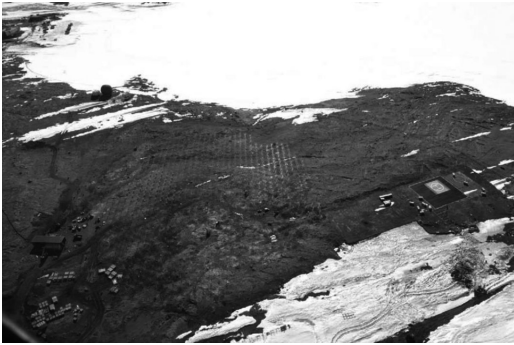
\*2 国立極地研究所/総合研究大学院大学極域科学専攻。

\*3 京都大学大学院情報学研究科。

\*4 京都大学大学院理学研究科。

\*5 国立極地研究所。

© 2013 日本気象学会



第1図 PANSY アンテナの全景。写真中央から左下の円形領域に約1000本のアンテナがみられる。

## 2. PANSY レーダーシステム

PANSY レーダーは中心周波数47 MHz のモノスタティックパルスドップラーレーダーである。アンテナは約160 m の円形領域に1045本の直交八木アンテナが配置され、個々のアンテナの発信電波位相が制御出来るアクティブフェーズドアレイである。ビームは、半値幅が2.4度であり、天頂角30度以内の任意の方向に向けることができる。アンテナはそれぞれ500 W の出力を持つ送受信モジュールが接続されていて、アンテナ面全体では520 kW である。レーダーの基本諸元を第1表に示す。

PANSY レーダーの基本性能は高度1.5 km から600 km をカバーする京都大学生存圏研究所のMU レーダー (Fukao *et al.* 1985) と同等である。しかし、MU レーダーと全く同一の装置を南極に設置するのは様々な点で不可能である。PANSY レーダーの設計に課せられた最も大きな条件の一つは消費電力であった。輸送し貯蔵できる燃料には限界があるからである。このため、AB 級増幅器を持つMU レーダーが230 kW の電力を消費するのに対し、PANSY レーダーが昭和基地で使用可能な最大電力は100 kW 以下である。大気レーダーの感度は総出力とアンテナの開口面積の積で決まる。そのため、PANSY レーダーでは開口面積を倍にすることで総出力を半分抑えることにした。これでも足りないため、新たに全出力効率が50%を超える E 級増幅器の開発を行った。その結果、デジタル信号処理システムを含めた総消費電力を75 kW に抑えることができた。出力効率がよいため冷却ファンが不要となり、故障の原因となりがちな可動部が存在しない、すなわち、南極での過酷な

第1表 PANSY レーダーの諸元。

システム	パルスドップラーレーダー アクティブフェーズドアレイシステム
中心周波数	47 MHz
アンテナ	1045本の直交八木アンテナの準円形アレイ 直径約160 m (アンテナ開口面積18000 m <sup>2</sup> )
送信機	固体送受信モジュール1045台 ピーク電力: 520 kW
受信機	デジタル受信システム55系統 イメージング・干渉計観測可能
周辺装置	E 層 FAI 観測用アンテナ24本

環境下でも長期間運用可能な理想的な送受信モジュールとなった。

もう一つの重要な設計条件は南極における建設が容易なシステムであることである。建設は2ヶ月弱しかない夏の短期間に、しかも研究者等、建設作業には素人の観測隊メンバーを中心に行われる。南極条約により、凹凸があり岩盤や砂利の混在するアンテナエリアを整地することはできない。したがって、大型の建設機械は使用できない。作業軽減のためには、アンテナや送受信モジュールの重量を極力減らす必要があるが、強風にも耐える必要がある。昭和基地はカタバ風のため年平均7 m/s の北東風が吹き、瞬間最大風速は55 m/s を超え、10分平均でも40 m/s 以上の風が吹き続けることも年に数回ある。昭和基地での数度のアンテナ環境試験を経て、現在の地上部12 kg のアンテナができあがった。送受信モジュールの重さは18 kg であり、風圧を避けるような構造とした (第2図)。アンテナやモジュールを固定するアンテナマストは直径130 mm の鉄製で、地面に70 cm の深さの穴を掘って差し込む形とした。1045本のアンテナの高さは地表面の状態により2 m の範囲でばらばらになるが、発射する電波の位相を電氣的に調節することにより空中では一定の波面を形成するよう設計されている。

アンテナは波長の0.7倍に対応する4.5 m 間隔で正三角グリッドに配置されている。正六角形のエリアにたつ19本を1群とし、中心に分配合成モジュールを配置する。従って全アンテナは55群からなる。そして、アンテナフィールドの風下側に設置された観測小屋から各群に信号や電源のケーブル6本を結合する。各群の分配合成モジュールから各モジュール、各モジュールからアンテナ給電部のケーブルも合わせると



第2図 アンテナと送受信モジュール。アンテナ輻射器と送受信モジュールはRF信号ケーブルで接続されている。

PANSY レーダーのケーブルは約4700本になり、総長約100 kmである。

送信パルス長は最短で75 mの高度分解能に対応する $0.5 \mu\text{s}$ である。スパン符号と呼ばれるコンプリメンタリコードを用いたパルス圧縮技術を用いて上層での受信感度を上げる工夫もなされている。E級増幅器は非線形な性質を持つため、パルスコードの各ビットは時間的に離す必要があり、休み時間はパルス長と等しくするようにしている。各アンテナから発射されるパルスの位相を制御することで、ビーム方向は電気的に切替えることができる。

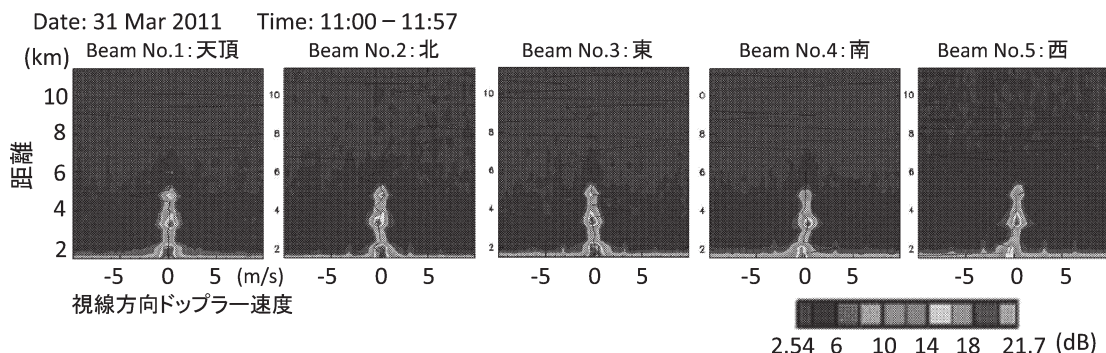
対流圏と成層圏の基本観測は1分の時間分解能で鉛直、北、東、南、西向きの方角である。受信された大気エコーは各群に一つ接続されている計55個のデジタル受信機で処理される。この55個のデジタル受信機

を独立して使用することで、大気乱流の3次元構造や電離圏不規則構造の観測が可能となる。

南極でのVHFレーダー観測では、オーロラ起源の強い電離圏FAI (field-aligned irregularities) コヒーレントエコーが受信される。このエコーは地球の磁力線に直角方向から観測される。昭和基地の場合は天頂角70度の方向である。PANSYのメインアンテナはこの方向には向けられないので、FAI観測用に24本のアンテナを用いた1次元アレイをメインアンテナの周りに配置してあり、8個の受信機に接続出来るようになっている。この付加システムは、FAIエコーが、電離圏の電子密度や電子・イオン温度などの推定に用いられる微弱な電離圏インコヒーレント散乱エコーに与える干渉を軽減するためにも用いられる。このための特別なアダプティブアンテナアルゴリズムを開発する計画である。

レーダー建設の第一段階は2010年12月に昭和基地で開始され、2011年3月に5%システムで最初の観測データを取得した(第3図)。地上1 kmから対流圏中部までと中間圏・下部熱圏の流星風の観測はこの5%システムでも可能である。フルシステムの構築は次の夏2011年12月～2012年3月に行われ、試験観測を含む調整が1年かけて行われる。レーダーオペレータの訓練や新たな観測アルゴリズム開発のために、22本のアンテナからなる小さな国内システム「Sumire」を、京都大学生存圏研究所の協力を得て信楽MU観測所に設置、運用している。

大気レーダーにおける後方散乱体は空気中の屈折率の揺らぎである。より正確に述べれば、電波の半波長



第3図 PANSY 初期観測の例：2011年3月31日11時00-57分に観測された大気散乱信号の周波数スペクトルから求めた視線方向ドップラー速度（風速ベクトルをビーム方向へ投影した速さ）の高度（距離）プロファイル。ビーム方向は、左から天頂、北に天頂角10度傾斜、東に同様、南に同様、西に同様である。ドップラー速度は地面から離れる方向を正としてある。



の長さ (PANSY レーダーの場合3.2 m) を持つ揺らぎ成分からのブラッグ散乱である。屈折率の揺らぎは、下層・中層大気においては大気乱流による大気密度の勾配によりもたらされる。下層大気においては水蒸気の揺らぎも重要である。したがって、この高度領域においては大気乱流強度も推定できる。大気密度は高度とともに指数関数的に減少するので、エコー強度も高度とともに減少する。中緯度下部成層圏におけるエコー強度の平均減率は約 2~3 dB/km である。PANSY レーダーによる成層圏の最大観測高度は約 25 km と推定され、冬の成層圏極渦の下端、極成層圏雲の生成領域、破壊されたオゾン層 (オゾンホール) の 3 次元風と乱流強度が観測できる。

高度 50 km を超えると電離分子が屈折率をもたらす主要な原因となる。PANSY レーダーで低い VHF 帯を使用する理由は、中間圏において電波の散乱に寄与する大きさの乱流強度が十分大きく、中間圏の風観測が可能だからである。観測は 60~80 km において電離が進む日中でのみ観測可能である。夏は白夜となるため一日中観測が可能となる。夏には極中間圏雲に関連すると考えられている強力な極域中間圏夏季エコー (Polar Mesosphere Summer Echo, PMSE) が観測される。

高度 100~500 km では、電離圏電子によるインコヒーレント散乱が強くなる。これも PANSY レーダーで観測できる。電子密度・温度、イオン密度・温度、イオンドリフト速度が推定される。しかし、周波数的に PANSY は中間圏観測に合わせているので、電離圏インコヒーレント観測には限界がある。高度 80~105 km では流星痕からのスボラディックなエコーが受信され、これを用いることで水平風を推定することができる。

### 3. PANSY の科学

PANSY レーダーの中性大気に対する基本観測モードでは、対流圏、成層圏、中間圏の風の 3 次元ベクトルの鉛直プロファイルが得られる。鉛直分解能は最高で 75 m であるが、通常は対流圏・成層圏では 150 m、中間圏では 300 m である。ビームの半値幅 2.4 度に対応する水平分解能は高度 20 km では 840 m、75 km では 3.14 km と非常に高い。この高い空間分解能を持つ風の鉛直プロファイルを約 1 分の時間分解能で連続観測を行うことで様々な大気現象や力学過程が研究できる。たとえば、強いブリザードをもたらす極域

低気圧、カタバ風に伴う対流圏循環、対流圏界面、成層圏界面 (成層圏昇温のあと高度が 70 km 付近にジャンプすることがある)、中間圏界面の微細な構造、(滅多に起こらないが) 成層圏突然昇温、極渦の崩壊、極渦の縁辺に存在する捕捉波 (ロスビー波)、極成層圏雲・極中間圏雲の力学、大気乱流、大気重力波などが挙げられる。また、磁気圏からの高エネルギー粒子の降り込みに対する中性大気の応答も PANSY の重要な研究対象である。このように多くの研究テーマが存在するが、ここでは特に重要な重力波と極中間圏雲の物理に関する研究について述べることにする。

大気重力波はロスビー波や傾圧不安定波に比べると時空間スケールが小さいことで特徴付けられる。しかし、様々なスケールのものが存在し、数桁にわたる広い周波数、水平波数、鉛直波数のスペクトル帯域に分布している。観測器はそれぞれ固有の観測フィルターを持つため (Alexander *et al.* 2010)、単一の観測器ですべてのスペクトル帯域を捉えることはたいへい不可能である。大型大気レーダーによる地理的に 1 地点での高い時間分解能を持つ連続観測データは、重力波の持つ高周波数という特性に着目してこれを時間フィルターにより取り出すことができる。大型大気レーダーは水平、鉛直分解能が高いので、対地周波数が高ければ、ほぼすべての水平波長、鉛直波長を持つ重力波を捉えることができる。この大型大気レーダーの観測フィルターは、伝統的なラジオゾンデ観測や最近重力波研究にも用いられている高解像衛星観測では検出できない重力波のスペクトル帯域の一部を捉えることができる。さらに、背景場が定常なとき、対地周波数は伝播する間保存する。背景風はたいへい鉛直シアを持つがその時間変化は重力波の周期に比べてゆっくりであることが多いので、周波数保存の仮定は、たとえば鉛直波数保存より妥当である。したがって、大型大気レーダーで推定された運動量フラックスの鉛直プロファイルを用いて、平均風加速力 (wave force) の推定が可能である。特に、対称ビームの視線速度の分散を用いた運動量フラックスの推定方法は精度が高いことが知られている (Vincent and Reid 1983)。

Yoshiki and Sato (2000) による極域複数地点での定常高層観測データ (ラジオゾンデ観測データ) を用いた研究によれば、昭和基地で観測される重力波はほかの南極基地での観測結果とよく似た特性を持つことが確認されている。PANSY レーダーは 1 地点での

観測ではあるが、これによって捉えられる波の特性は東南極（南極大陸の大部分）を代表するものと考えられる。最近の高解像衛星観測 (Ern *et al.* 2004; Alexander *et al.* 2008) や重力波も解像可能な中層大気大循環モデル (Watanabe *et al.* 2008; Sato *et al.* 2009) を用いた研究によれば、南半球高緯度では冬から春にかけて重力波エネルギーが大きくなることがわかっている。PANSY レーダーに加え、昭和基地での気象庁による定常高層気象観測、各種ライダー観測（予定も含む）、デービス基地（豪）での大気レーザー観測、高解像衛星観測、高解像大気大循環モデルの組み合わせによる総合的なデータ解析により、重力波の発生や3次元伝播特性、高緯度での平均風加速度などが明らかになるであろう。

極域中層大気におけるもう一つの重要な研究テーマは夏季に現れる極中間圏雲である。これは極域夏季中間圏からの強いPMSE エコーと関連すると考えられている (Cho and Roettger 1997; Rapp and Luebken 2004)。PMSE は数 MHz から数百 MHz の周波数を使う様々なレーダーで観測されている。PANSY レーダーはPMSE だけでなく乱流からのエコーも受信する感度があるので、極中間圏雲の有無に関わらず3次元風ベクトルを推定できる。PANSY とほぼ同時に昭和基地に設置されるレイリーライダーによる雲観測との組み合わせにより、極中間圏雲やPMSE の構造や時間発展の解明が期待される。また、PANSY によるイメージング観測により、PMSE や雲の中の大気乱流の3次元構造も捉えられるであろう。北極域においては、ドイツのグループがPANSY とほぼ同規模の観測システムを設置し観測を開始しつつある (Latteck *et al.* 2010)。両極の極中間圏雲を含む中間圏の力学的特徴の違いを調べるのは大変興味深い。たとえば、南極のPMSE は北極に比べてとても弱いことが知られている。また、最近では中間圏に注目が集まってきており、中間圏を通じて両半球の大気がつながっているとの研究もある (Becker and Fritts 2006; Karlsson *et al.* 2009)。

気象予測や気候予測に用いられる全球モデルは、計算機資源の制限により比較的低解像度であり、重力波の平均風加速効果はパラメタリゼーションの形で取り入れられている。この気候モデルには共通して冬季極域成層圏の低温バイアスの問題がある。低温バイアスはモデルに用いられている重力波のパラメタリゼーションが現実的でないことが主要な原因であると考えられ

ている。この低温バイアスは極成層圏雲の量に影響し、オゾンホール生成や消滅の正確な予測が困難である大きな原因の一つとなっている。PANSY レーダーを現在の観測網に加え、重力波解像可能な大循環モデルを総合的に研究に用いることで、極域大気力学の定量的理解が可能となり、モデルバイアスを減らし気候予測の改善に結びつけることが可能となろう。詳しいことはPANSY プロジェクトのホームページ (<http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp>) を参照されたい。

#### 参考文献

- Alexander, M. J. *et al.*, 2008: Global estimates of gravity wave momentum flux from High Resolution Dynamics Limb Sounder observations. *J. Geophys. Res.*, **113**, D15S18, doi:10.1029/2007JD008807.
- Alexander, M. J. *et al.*, 2010: Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1103-1124.
- Becker, E. and D.C. Fritts, 2006: Enhanced gravity-wave activity and interhemispheric coupling during the MaCWAVE/MIDAS northern summer program 2002. *Ann. Geophys.*, **24**, 1175-1188.
- Cho, J. Y. N. and J. Roettger, 1997: An updated review of polar mesosphere summer echoes: Observation, theory, and their relationship to noctilucent clouds and subvisible aerosols. *J. Geophys. Res.*, **102**, 2001-2020.
- Ern, M., P. Preusse, M. J. Alexander and C. D. Warner, 2004: Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data. *J. Geophys. Res.*, **109**, D20103, doi:10.1029/2004JD0004752.
- Fukao, S. *et al.*, 1985: The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers. *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168.
- Karlsson, B., C. McLandress and T. G. Shepherd, 2009: Inter-hemispheric mesospheric coupling in a comprehensive middle atmosphere model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **71**, 518-530.
- Latteck, R., W. Singer, M. Rapp and T. Renkowitz, 2010: MAARSY - the new MST radar on Andøya/Norway. *Adv. Radio Sci.*, **8**, 219-224.
- Rapp, M. and F.-J. Lübken, 2004: Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding. *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 2601-2633.

- Sato, K. *et al.*, 2009: On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19801, doi: 10.1029/2009GL039908.
- Sato, K. *et al.*, 2011: The program of the Antarctic Syowa MST/IS radar. *SPARC Newsl.*, (36), 23-26.
- Sato, K. *et al.*, 2013: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, in press.
- Vincent, R. A. and I. M. Reid, 1983: HF Doppler measurements of mesospheric gravity wave momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1321-1333.
- Watanabe, S. *et al.*, 2008: General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12110, doi:10.1029/2008JD010026.
- Yoshiki, M. and K. Sato, 2000: A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17995-18011.
-