

7. これからの南極観測

—南極昭和基地大型大気レーダー計画—

Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY)[†]

佐藤 薫*・堤 雅基**・麻生 武彦**・
佐藤 亨***・山内 恭**・江尻 全機**

1. はじめに

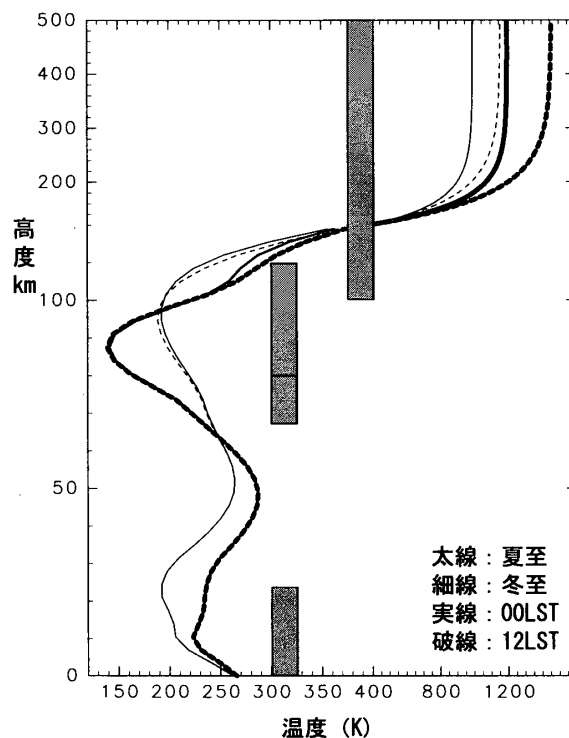
中層大気は成層圏から下部熱圏までを含む10~100 kmの高度領域である。極域中層大気は、他の緯度帯と同様、地面や対流圏に起源を持ち、上方に伝播するロスビー波、重力波、潮汐波等、様々な波動の作用が重要であると共に、太陽風をエネルギー源とする極域特有の電離圏擾乱の影響を受ける領域である。地表に到達する紫外線量を支配するオゾン層が存在し、春季にはオゾンホールが出現する領域でもある。しかし、他の緯度帯に比べて過酷な極域環境下での観測はかなり不足している。現在、国立極地研究所を中心として、南極昭和基地に広い高度領域を同時に高精度高分解能で観測可能な大型大気レーダーを設置し、既存の大気測器による観測も有機的につなぐことで、極域大気研究のブレークスルーを目指す計画を進めている。ここでは、極域大気の特徴(特に力学を中心とする)、南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダーと呼ぶ) 計画の概要、PANSY に向けての研究観測、設置運用上の課題について順に議論する。

2. 極域大気の特徴

地球大気の大気温度プロファイルは、高さとともに下降と上昇を繰り返す、その温度勾配の違いから大気は下から対流圏、成層圏、中間圏、熱圏と分けられている。

(第1図). 100 km 以上では大気は太陽エネルギーにより電離するので電離圏とも呼ばれる。高さ50 km 付近に位置する成層圏界面での温度の極大は、火星や金星には存在せず、地球大気のみ見られる構造である。地球にはオゾン層が存在し、そのオゾンが太陽からの紫外線を吸収して大気を加熱するためである。興味深いことに、冬の極域は一日中太陽光線が届かないにも

南極昭和基地(69S, 39E)での鉛直温度プロファイル



第1図 昭和基地の温度の鉛直プロファイル (CIRA-86, IRI-95による気候値)。実線は00LST, 破線は12LST。縦棒はPANSY レーダーで観測可能な高度領域。

* 国立極地研究所, kaoru@nipr.ac.jp

** 国立極地研究所。

*** 京都大学大学院情報科学研究科。

[†] PANSY は、フランス語の penser (考える) に語源をもつ花の名前。

URL: <http://www-pansy.nipr.ac.jp>

© 2003 日本気象学会

関わらず、成層圏界面の温度の極大が見られる。また、高さ90~100 km 付近の中間圏界面の温度極小にも面白い特徴がある。太陽光線が一日中降り注ぐ夏のほうが日のあたらない冬よりも低いという点である。夏の極域中間圏界面の温度は地球大気における最低の値となる。これらの特徴は重力波やロスビー波、潮汐波等の波動によって駆動される中層大気子午面循環により維持されていると考えられているが (Kanzawa, 1989; Hitchman *et al.*, 1989), 定量的な評価にはいたっていない。この問題は、気候モデルの極域成層圏における低温バイアスの解決にも結びついている。

さらに、このような温度構造は、極域に固有な大気現象である極成層圏雲、極中間圏雲 (夜光雲とも呼ばれる) の発生とも関連する (写真は例えば, PANSY パンフレット (2001; 2002) 参照)。極成層圏雲は良く知られているように、冬を中心として成層圏極渦の内側の低温下で現れ、春にはオゾン破壊反応の触媒としてオゾンホール形成に重要な役割を果たしている。したがって、オゾンホールの将来予測には、極成層圏の温度の正確な再現が必要である。また、極中間圏雲は19世紀終わりに発見され、それ以前は記録がないことから存在しなかったと考えられている。つまり、人間活動に伴い中層大気温度が低下したこと、エアロゾルが増えたこと、水が増えたこと (140 K 以下で 1 ppmv の水蒸気が凝結する) などが原因で近年現れるようになったということである。したがって、気候変動のカナリアとも言える極中間圏雲の監視や発生メカニズムの研究は重要である。極域レーダー観測 (MF~UHF 帯) ではこの極中間圏雲に深く関連すると考えられている PMSE (Polar Mesospheric Summer Echo) と呼ばれる強いエコーが受信される (Cho and Kelly, 1993)。

極域大気は、物質輸送という視点からも興味深い特徴を持つ。成層圏極渦はその周辺で大きな渦位勾配をもち、物質の行き来しにくい境界を形成しているため、極渦縁辺部には物質濃度の大きな勾配が存在する。ここでは、ロスビー波砕波により発生する小規模な乱流 (フィラメントやストリーマと呼ばれる現象もその一種) や波動が存在し、そのあるものは独自の物理を持っていることがわかってきた (Tomikawa and Sato, 2003)。数値モデルや気候データ解析によりそのマクロな特徴は理解されつつあるが (Allen and Nakamura, 2001; Haynes and Shuckburgh, 2000), 観測による現状把握が不足している。視点を鉛直に移せば、極域

対流圏界面、特に冬季圏界面は他の緯度帯に比べ、上下の安定度の差が小さいため、ゆるい物質境界面となっている可能性がある。冬季オゾン加熱がないので、成層圏での正の温度勾配が小さいためである。中緯度の温度構造を意識した世界気象機関 (WMO) による対流圏界面の定義を当てはめると二十数 km というとんでもない高度になることがある。極域は中層大気物質循環によって運ばれる大気微量成分の終着点であるが、ここから対流圏や中緯度へ戻る仕組みは未解決の問題である。

極域中層大気を理解するための要素はこれだけではない。極域は太陽風エネルギーの地球大気への入口であり、他の緯度帯に比べて太陽活動の影響がより直接的に現れ得る領域である。たとえば、一度のオーロラ爆発に伴う等価消費電力は1~10億キロワットに及ぶと言われ (赤祖父, 1975), それがジュール熱となって大気を加熱する。しかし、その中性大気への影響がどの程度のものかまだよく調べられていない。直接的な波動の発生、大規模場の変化、それに伴う下層からの波動の伝播特性の変化などが考えられる。

また、中層大気で重要な大気波動の発生源は主に対流圏に存在すると考えられている (Sato, 2000)。南極大陸の斜面を駆け下りる大規模なカタバ風 (Parish and Bromwich, 1991; 菊地, 1993) や、中緯度からの空気が高緯度まで入り込むブロッキング現象 (Hirasawa *et al.*, 2000), 南緯55度付近を中心とする南半球ストームトラック (Sato *et al.*, 2000) などが極域対流圏力学を特徴づける現象として考えられる。しかし、対流圏もまた、南極の過酷な環境下において、その観測は十分ではない。カタバ風は高度数百 m 以下の地面付近の現象であるが、その補償流は対流圏全層に広がり、物質循環に寄与し、上層に西風を励起するとも考えられている (この西風による減衰効果に対抗してのカタバ風の維持メカニズムは未解決の問題である。例えば, King and Turner, 1997)。非常にシンプルな現象でありながら、このユニークで大規模なカタバ風の南極大気に対する役割は十分理解されているとはいいがたい。極域境界層の力学もまた興味深い。極域は雪水面の高いアルベドと、放射冷却により、地表面付近に強い逆転層が形成される。混合層の発達として理解できる中低緯度の境界層とは異なる性質を持つこの極域境界層の構造や、その日変化、自由大気との混合などの問題がある。特に日変化については、同じ南極大陸上で位相が南極点を中心に日時計のように伝播する

ため、水平的な大気交換といった面白い問題が存在する（平沢，私信）。

時間スケールの長い現象について少し述べれば，例えば，ここ数年盛んな議論がなされた北極振動（AO, Arctic Oscillation）の南半球版である南極振動（AAO, Antarctic Oscillation）の問題がある。北極振動は統計解析上出てきた見かけの環状モードとの議論もあるが，南半球は地形や海陸分布が南極点を中心にほぼ軸対象であり，モードとして存在してもよさそうである。これらの振動は極渦の強さの変動とも捉えられ，ダイレクトに地球温暖化とも結びつく問題である。地球温暖化は対流圏の現象であるが，対流圏界面は緯度によって高さが異なるので，温暖化に伴い，低緯度では上部対流圏，中高緯度では下部成層圏にあたる高度10～17 kmの領域での温度の南北勾配が大きくなり，極渦が強くなるからである（Rind *et al.*, 1998）。極域は，アイスアルベドフィードバックによる温暖化シグナルが大きいことで知られるが，上記の意味においても，極域の観測は気候変動を知る上で重要である。

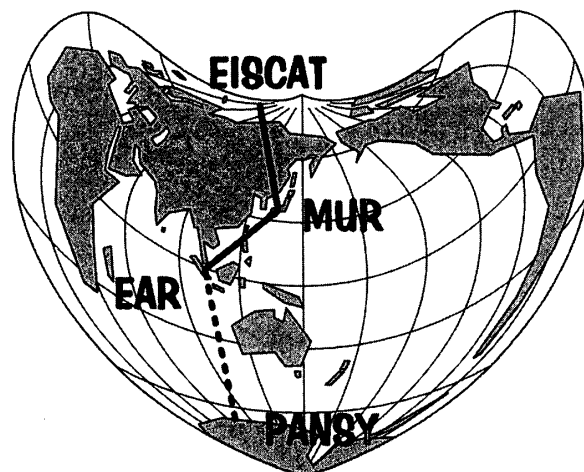
以上のように，極域は研究テーマの宝庫といえる。そして，魅力的なのは，新たな観測による新しい発見も大いに期待できる点である。

3. 南極昭和基地大型大気レーダー計画

1) 計画の意義

この計画には，3つの意義が考えられる。第1に，現在の南極観測態勢の中での位置づけである。これまで，南極昭和基地では，国立極地研究所を中心に，他の研究機関との共同研究の形態をとりながら，極域大気の研究を目的として，HF/MFレーダーや，ファブリペロ干渉計，全天カメラ，ライダー，ラジオゾンデ等の様々な測器の設置，観測が行われてきた。これは世界的に見ても充実した観測態勢と言える。これらはそれぞれ長所があるものの，広い鉛直高度領域の力学的つながりを調べるのに必須の大気の鉛直運動を観測できない。大型大気レーダーは大気の鉛直運動を高精度・高分解能で捉えることのできる唯一の測器であり，また，電離圏大気組成や中層/下層大気の運動を他の測器にない精度で連続的に観測できるため，極域大気科学にブレイクスルーをもたらすものと考えられる。

第2に国際的な研究態勢の中での位置づけである。日本においては，大型大気レーダーは，京都大学宇宙電波科学研究センターが中心となり開発され，1984年に中緯度（滋賀県甲賀郡信楽町）に設置された。他国



第2図 地球を縦断する大型大気レーダー観測態勢。

の大型大気レーダーにない様々な機能を持つこのレーダーは，国内のみならず，国際的にも広く利用され，数多くの優れた研究成果をあげてきた。最近，赤道（インドネシア，プキティンギ）での同タイプのレーダーも完成し，今後の赤道大気物理の解明が期待されている。本計画による世界トップクラスの日本の技術を生かした南極大型大気レーダー（PANSYレーダー）が完成すれば，極域，中緯度，赤道の全ての緯度領域をカバーすることになり，地球気候の総合研究を行う態勢が整うことになる（第2図）。また，国立極地研究所を窓口として日本が加盟しているEISCAT（欧州非干渉散乱レーダー）科学協会の北極スバルバルの電離圏観測用レーダー，運用予定の小型対流圏成層圏観測レーダーも合わせると，南北両極の大気特性の比較研究も可能となる。

第3に，学問的位置づけである。高度100 km以下の中性大気とそれ以上の電離大気は，支配方程式が異なり，また，学会も異なるため，両者をつなぐ学問はその必要性が唱えられながらもなかなか発展してこなかった。極域は先にのべたように，両大気領域のつながりが強いため，その理解にはそれぞれの専門家の共同研究が必須である。この計画は，両分野をつなぐ学際的な研究分野を発展させることにもつながる。

PANSYの研究課題として，次のようなものが考えられる。

1. 極域での大気波動（重力波，潮汐波，ロスビー波）の力学と作用
2. 地球規模大気循環のエネルギーバランス
3. オゾンや水蒸気など大気微量成分やエアロゾルの

第1表 PANSY レーダーの諸元.

構成	モノスタティックパルスドップラーレーダー
周波数	約50MHz
アンテナ	略円形アレイ(直径約 100m) 3 素子直交八木アンテナ約 500 本
送信機	固体送受信モジュール約 500 台 ピーク電力 1MW(消費電力約 230kW) 円偏波
受信機	同期直交検波 4 系統 (各モジュールの受信機設置も検討)

輸送・混合過程

4. 極域固有の大気現象 (極成層圏雲, 夜光雲, オーロラ)
5. オゾンホール将来予測
6. 極域大気・オーロラの南北非対称性
7. 太陽活動の地球気候へ及ぼす影響

2) 主要諸元

PANSY レーダーの主要諸元を第1表にまとめる. 基本的に, MU レーダーや赤道大気レーダーと同様の構成である. すなわち, 直径約100 m の円形領域を占め, 約500本の八木アンテナのアレイで構成される, 周波数約50 MHz の大型レーダーである. ピーク電力は, 対流圏は言うまでもなく, 下部成層圏, 中間圏の風の3成分が観測可能であること, 電離圏での組成や大気運動の推定が可能な IS (Incoherent Scatter) 観測ができることを条件としている. 対流圏の最低観測高度は約1 km, 電離圏の最高観測高度は約500 km である. これにより, たとえば, 夏季, PMSE が出現しない時期の風の観測が初めて可能となり, 極中間圏雲の物理に迫ることができる. また, 新技術導入として, 各アンテナモジュールに高速のデジタル受信機をつけ, 受信信号の強度と位相を記録し, 後から受信ビーム構成を行う工夫を検討している. これを用いれば, イメージャとしての新たな観測が可能となる. また, 後でも述べるように, この計画では風力発電, 太陽光パネルなどの自然エネルギーの利用を考えているが, 発電量が十分でない場合に, 送信は一部のアンテナで行って, ブロードなビームを形成し, 受信にはアンテナアレイ全体を用いるといった, 柔軟な観測も可能となる.

3) 現在の進捗状況, 近未来の計画

PANSY レーダーの技術検討, 設計は2001年度から進めている. 2001年度にはレーダー心臓部である送受信モジュールの設計に着手した. 2002年度には

PANSY レーダーの電源確保に必要な電源設計を進める予定である. 安定した電力が得られるディーゼル発電機に加え, 風力発電や太陽光パネル等自然エネルギーの利用も積極的に考慮する. 現地調査も開始した. 現在越冬中の南極地域観測隊43次隊においては, パッシブな電波環境調査や, レーダーシステム設計に必要な地形調査を進めている. 今年11月に出発予定の44次隊では, グランドクラッターや PANSY レーダーの電波が妨害となる可能性, 極限環境下で動作するアンテナ調査等も行う予定である.

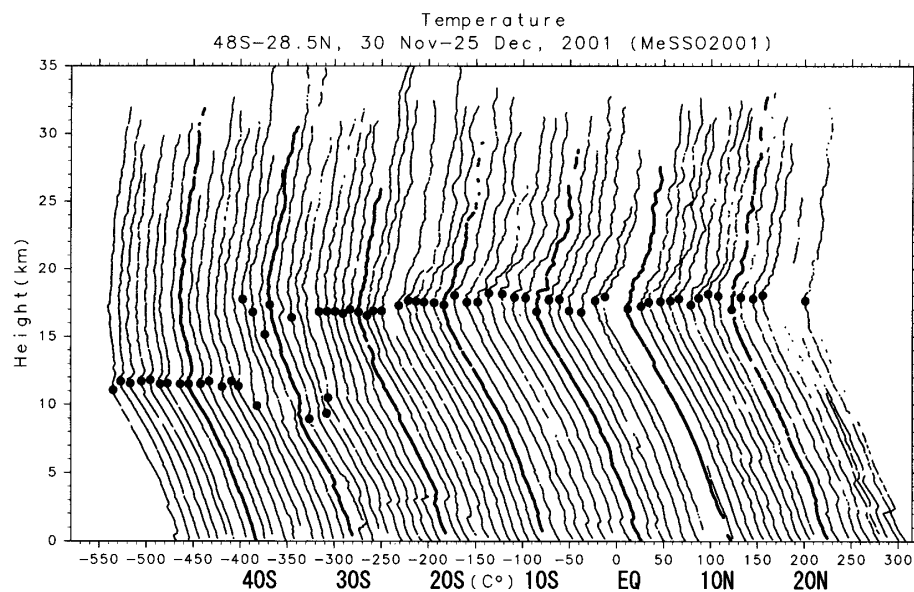
4. PANSY に向けての研究観測

WMO のラジオゾンデ定常観測データアーカイブを用いた研究によれば, 南極成層圏の重力波エネルギーは, 冬季に極大となる北極とは異なり, 春季に極大となる (Yoshiki and Sato, 2000). 対流圏にクリティカルレベルがあることから地形起源の重力波は成層圏に伝播するのが難しいこともわかった. この研究の発展として, PANSY レーダー実現までの期間, これを意識したいくつかの研究観測を計画, 実行している.

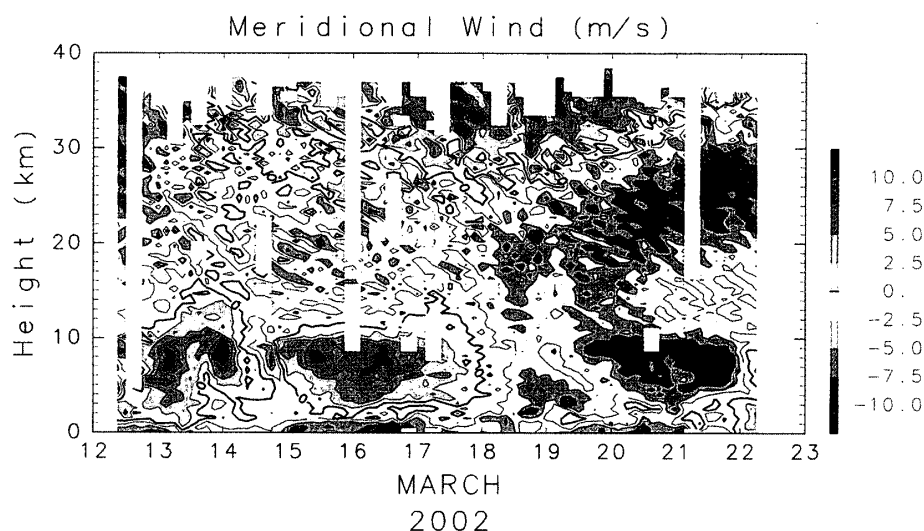
まず, 2001年11月末~12月末にかけては, 東京大学海洋研究所の観測船白鳳丸にて, 太平洋中部の赤道を含む28 N~48 S の70度以上の広い緯度領域をほぼ1度ごとにラジオゾンデを打ち上げ, 対流圏, 下部成層圏スキャン観測を行った (佐藤ほか, 2002). 海洋は地形などの局所的な波動の起源がなく, 南極大気と自然につながる特徴が見られると考えられるからである. 第3図にこの観測で得られた温度プロファイルを示す. 低緯度から高緯度の対流圏界面の変化, 成層圏の小規模擾乱が捉えられている.

昭和基地でも, 2002年に1年間越冬する43次隊においてラジオゾンデによる集中観測を各季節 (3, 6, 10, 12月) に計画している. 3月の観測は開始がブリザードにより遅れたものの, 10日間3時間毎の計80発の観測が欠測なく終了した¹². 第4図に観測で得られた南北風の時間高度断面図を示す. 高さ10~35 km の広い成層圏領域で, 重力波と思われる波状構造が見られ, 時間とともに位相が下降しているのがわかる. 温度や東西風も用いた詳しい周波数スペクトルや位相解析, 季節特性解析などを行う予定である.

¹² この観測は, 第43次南極地域観測隊の吉識宗佳, 木津暢彦, 櫻庭俊昭, 若林裕之, 吉廣安昭, 上野圭介, 長井勝栄, 鎌田浩嗣, 金濱晋各氏により行われた.



第3図 白鳳丸による太平洋成層圏南北スキャン観測による温度の鉛直プロファイルの緯度変化(佐藤ほか, 2002). 横軸は赤道プロファイルに合わせてあり, 緯度に比例して横にずらしてある. 黒丸は対流圏界面(緯度20度より低緯度では温度極小点, 高緯度ではWMOによる定義).



第4図 昭和基地における2002年3月の南北風観測結果(吉識ほか, 私信). 等値線は2.5 m/s 間隔.

2003年に越冬する44次隊では, オゾンホール形成期とオゾンホール回復期の2期間においてオゾンゾンデによるキャンペーン観測を行う. オゾンホール形成期の6月から10月には南極のオゾン化学の解明を目的とした南極初の Match キャンペーン観測が行われる. これはドイツのマックスプランク研究所を中心として, 各国の南極の観測基地でネットワークを組み, 成層圏オゾンのラグランジュ変化を調べる観測であり, 昭和基地では50発のオゾンゾンデ観測を予定している. ま

た, オゾンホール回復期の11~12月では, 昭和基地にて50日間連続のオゾンゾンデとラジオゾンデによる集中観測を予定している. ロスビー波砕波に伴う渦擾乱や重力波のオゾン分布に及ぼす作用を調べるのが目的である. 特に, 宇宙科学研究所, 東北大学との共同研究として上部成層圏まで到達可能な高高度気球による光学オゾンゾンデを開発, 数回観測する予定である.

これは高速のテレメトリが可能であり, 近い将来乱流等微細構造観測, 分光計観測に発展させる計画である. また, PANSY レーダーでは第1図に示すように中上部成層圏, 下部中間圏が観測不能領域となる. この領域をPANSY レーダーと同程度の高度分解能で観測できるレイリー・ラマンライダーシステムの導入を検討している.

5. 設置運用上の問題点

南極においては, 夏が短いため, 1年分の建設作業はほぼひと月の間に行うことになる. 現在の南極観測体制では, 作業は, 研究者を含む夏隊20名と越冬隊40

名で行われ, 専門家が行うわけではないので, 作業工程の簡略化, 安全化が必要である. PANSY レーダーは特に多くの作業工程が予想され, その徹底が望まれる. また, 最も大きな問題となっているのは電力確保である. 現在の昭和基地での平均消費電力は約170 kW であるのに対し, 現在の仕様での PANSY レーダーの標準観測時の消費電力は約230 kW である. 安定した電力を得るためにはディーゼル発電機の使用が望ましいが, 地球環境の研究のための観測が地球環境に厳し

いという矛盾が生じてしまう。そのため、過酷な環境ならではの自然エネルギーの利用を検討している。例えば風力発電技術はここ数年で大きく進歩している。南極でも、オーストラリアではモースン基地に出力300 kWの風力発電機を3基建設する計画がある。モースン基地はカタバ風が頻繁に観測され、平均風速は12 m/sである。昭和基地での年間平均風速は6.4 m/sと弱い、特に冬季の利用は期待できる。レーダー運用については、情報通信技術 (IT) を生かして、日本でもオペレーションを可能とし、リアルタイムでの研究が出来るような形態を目指している。近い将来インテルサットの昭和基地導入が行われる予定であり、その下地は確実に整いつつある。

参 考 文 献

- 赤祖父俊一, 1975: オーロラー地球を取り巻く放電現象一, 中央公論社, 230pp.
- Allen, D. R. and N. Nakamura, 2001: A seasonal climatology of effective diffusivity in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **106**, 7917-7935.
- Cho, J. Y. N. and M. C. Kelley, 1993: Polar mesosphere summer radar echoes: observations and current theories, *Rev. Geophys.*, **31**, 243-265, 1993.
- Haynes, P. and E. Shuckburgh, 2000: Effective diffusivity as a diagnostic of atmospheric transport, 1, *Stratosphere*, *J. Geophys. Res.* **105**, 22, 777-22, 794.
- Hirasawa, N., H. Nakamura and T. Yamanouchi, 2000: Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking formation, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1911-1914.
- Hitchman, M. H., J. C. Gille, C. D. Rodgers and G. Brasseur, 1989: The separated polar winter stratopause: a gravity wave driven climatological feature, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 410-422.
- Kanzawa, H., 1989: Warm stratopause in the Antarctic winter, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 435-438.
- 菊地時夫, 1993: 南極氷床上的カタバ風と大気大循環, 気象研究ノート, **177**, 171-181.
- King, J. C. and J. Turner, 1997: *Antarctic Meteorology and Climatology*, Cambridge University Press, 400pp.
- Parish, T. R. and D. H. Bromwich, 1991: Continental-scale simulation of the Antarctic katabatic wind regime, *J. Climate.*, **4**, 135-146.
- Rind, D., D. Shindell, P. Lonergan and N. K. Balachandran, 1998: Climate change and the middle atmosphere. Part III: The doubled CO2 climate revisited, *J. Climate.* **11**, 876-894.
- 佐藤 薫, 山森美穂, 荻野慎也, 高橋憲義, 富川喜弘, 2002: The Meridional Scan of the Stratosphere over the Ocean in 2001 (MeSSO2001), 日本気象学会2002年春季大会予稿集 P230.
- Sato, K., 2000: Sources of gravity waves in the polar middle atmosphere, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **14**, 233-240.
- Sato, K., K. Yamada and I. Hirota, 2000: Global characteristics of medium-scale tropopausal waves observed in ECMWF operational data, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3808-3823.
- Tomikawa, Y. and K. Sato, 2003: Trapped waves in the edge region of stratospheric polar vortices, *J. Geophys. Res.* in press.
- 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.