

# 南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) と 高解像中層大気力学研究

—2018年度藤原賞受賞記念講演—

佐 藤 薫\*

## 1. はじめに

このたびは、藤原賞を賜りましたことを誠に光栄に存じます。記念講演として、「南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) と高解像中層大気力学研究」と題し、これまでの私の18年間の仕事を紹介させていただきますが、まだ、研究の途上にありますので、この時点で、諸先輩方よりお先に受賞することは畏れ多いことと思っております。

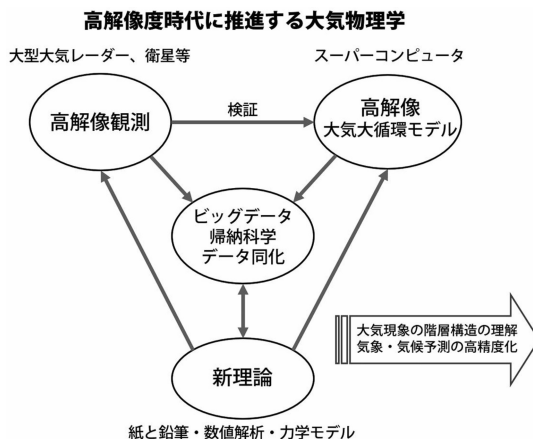
第1図は私が考える高解像度時代に推進する大気物理学像です。観測・モデル・理論は現在の気象学の研究に必須のものです。これが高解像になりますと、いわゆるビッグデータの世界となります。ビッグデータの世界では理論に基づく演繹科学だけでなく、ケプラーがティコブラーエの取得した膨大な観測データから、惑星軌道に関する法則を経験的に求めたように、情報学の技術を駆使した帰納科学が重要になってきます。また、観測とモデルをつなぐデータ同化の高解像度化も必要となります。そしてこの観測・モデル・理論・情報科学の4つの手法をうまく循環させることにより、「大気現象の階層構造の理解を深める」ことが私の研究の目標です。これは気象・気候予測の高精度化にもつながるものだと考えています。

## 2. 南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY)

まず、高解像観測として世界で初めて南極昭和基地に設置された大型大気レーダー、PANSYレーダーの計画の紹介をいたします (Sato *et al.* 2014)。

PANSYは高さ約3mのアンテナを1045本、甲子園球場の広さに並べたレーダーです。ここで東京ドームと比較しないのはプロジェクトメンバーに関西人が多いからです。PANSYは今年60年目となる日本の南極観測の歴史においてドームふじ基地の氷床掘削と並ぶ大型研究ですが、プロジェクトメンバーは引退された方を含めて13人 [佐藤 薫・堤 雅基・佐藤 亨・中村卓司・齊藤昭則・富川喜弘・西村耕司・高麗正史・橋本大志・山岸久雄・山内 恭・麻生武彦・江尻全機 (敬称略)]、現在は9人で進めています (第2図)。

大型大気レーダーの計測対象は乱流です。乱流は風に乗って流されていますので、強い電波ビームを空に向かって打ち、乱流から散乱されて戻ってくる電波の周波数のドップラー変化から風を推定できます。雨滴を対象とする気象レーダーと異なり、晴天時も観測できることが特長です。ビームを鉛直に打つと鉛直風も直接計測可能です。標準的な観測の高度分解能はビー



紙と鉛筆・数値解析・力学モデル  
第1図 高解像度時代に推進する大気物理学像。

\* 東京大学大学院理学系研究科。  
kaoru@eps.s.u-tokyo.ac.jp

—2018年9月14日受領—  
—2018年11月2日受理—



第2図 夏の南極昭和基地のPANSYレーダー(上)とPANSY研究グループ(下)(PANSY研究グループ提供)。

ム方向に150 m, 時間分解能は約1分, 視線速度の精度は0.1 m/sです。また, 中間圏・成層圏・対流圏の同時計測が可能のため, 中層大気力学における主役の1つである重力波に伴う運動量の鉛直流束を定量的にとらえることができます。

PANSYは不可能と思う計画を「夢として」を語ったところから始まりました。私は、1999年12月に国立極地研究所に助教授として着任しましたが、その直後のセミナーで、手堅い研究計画を紹介した後、大きな話でまとめようと思って、「無理だと思いますが、京都大学のMUレーダーのような、大型大気レーダーを南極に建設できれば、面白い科学ができるのではないかと思います」とお茶目に話したのです。すると、驚いたことに、セミナー後に、研究主幹の江尻教授が「僕はできると思う。僕がバックアップするから検討してみなさい」と私にまじめな顔でおっしゃいました。38歳の若手女性研究者の私にこんな大きな仕事をさせてくれる極地研というのはすごいところだなあと心から感動し、検討を始めました。しかし、ほとんどの方々は、「PANSYなんて無謀。現場を見たことがないからそんな計画を考えるんだよ」という予想通りの反応でした。それで、南極観測隊員として、昭和

基地で越冬し、可能かどうか自分で考えることにしました。この時、南極でのオペレーションを勉強し、設営の隊員にも意見を求めました。長い南極の冬が明けて昭和基地に立ち、思ったことは、できるという確信はないけど、できないという確信もない、検討を続ける価値があるということでした。PANSYは計画段階からメディアにも注目され、この南極出張中に朝日新聞の一面トップに取り上げられ、Natureにも紹介されました(Cyranoski 2002)。

PANSYの手本は京大生存圏研究所のMUレーダーでした(Fukao *et al.* 1985)。私はMUレーダーを使った研究で学位を取得し、面白く楽しい研究をいくつもさせていただきました(佐藤 1992; 佐藤 1999)。しかし、MUレーダーそのものは、南極には設置不可能でした。まず消費電力が問題です。MUの稼働に必要な230 kWは昭和基地全体の消費電力を超えています。またPANSY建設のため派遣できる人数はおそらく1桁。つまり10人弱で1か月ほどの短い夏期間に一気に建設する必要があります。MUのアンテナは1本50 kg以上と重く、それを千本余り建設するのは不可能に思いました。PANSYレーダーの実現には抜本的な技術革新が必要だったので。

PANSYは三重苦を背負っていました。技術的問題の克服のほかに、巨額の外部資金の獲得が必要でした。さらに、予算がいつ通るとも知れない大型計画を、南極観測の中期計画に載せる仕組みがありませんでした。南極観測隊の規模は決まっていますので、PANSYのような大型計画を載せると他の研究に大きく影響するのです。技術の問題の解決には、国際研究集会を開き、世界第一線の研究者にも意見を求め、南極でのフィージビリティスタディを重ねました。巨額予算の獲得には、まず科学目標を明確化し、堅固なものとするために研究集会を積み重ねると共に、大型大気レーダーの南極設置の重要性を謳う提言を、関連する5つの主要国際学術組織から出していただきました(例えば、IUGG 2003)。

技術開発は急ピッチで進めました。レーダーの性能はアンテナ面積と送信電力の積で決まります。そこで、PANSYレーダーのアンテナの本数はMUレーダーのほぼ2倍の1045本としました。次に、MUレーダーではAB級という特性の良いアンプを使っているのですが、これをやめて、携帯電話などで使われている高効率のE級アンプを採用することにしました。その結果、大幅な消費電力削減を達成できまし

た。また、南極での建設を可能とするには夏期間の作業負荷を減らす必要があります。重量と工程数の削減を徹底的に行いました。アンテナ1本の重さは私でも軽々持てる13 kg 以下にすることができました。これでも風速65 m/s に耐える設計です。PANSY のケーブルの数は約4700本、長さは延べ約100 km です。敷設作業の最適化と練習を重ねました。

こうして、PANSY の三重苦の1つである技術的課題は2004年度にほぼ解決し、概算要求書も提出できました。しかし、相変わらず残りの2つの解決の目的はありませんでした。PANSY に忙しく、数年、ろくな論文を書けていないという危機意識もありました。そこで、計画立案当初から一緒に仕事をしてきたPANSY サブリーダーの堤 雅基さんと相談して、最後の手段として立てた作戦が、死んだふり作戦です。つまり研究集会を除き、PANSY の活動をすべて中断する、PANSY 以外の本格研究を始めるというものです。あとで紹介する高解像中層大気循環モデルプロジェクト (KANTO) はこの時に始めました。すると、「あれ、PANSY はどうしたの？あんなに元気だったのにやめちゃうの？所長裁量経費をずいぶん使ったんじゃないの？」などという声が聞かれるようになりました。そして、南極観測は公募制となり、PANSY は予算が付いたらという条件つきで南極地域観測第Ⅷ期6か年計画の重点研究観測の1つに採用されました。そして、前の自民党最後の補正予算を獲得できたのです。「山が動く」とはこういうことかと思いました。

PANSY は建設も簡単ではありませんでした。誰の日頃の行いなのか、1年目は、昭和基地の天気は史上最悪となった上、2年目、3年目は、海水が多く、「しらせ」が2年連続で昭和基地への接岸を断念し、PANSY の機材は大半が運び込めずに持ち帰りという事態になりました。それでも、2011年3月に初観測、持ち込み済みの機材で部分システムを組み上げ、2012年4月には連続観測を開始しました。この頃は皆、根性で頑張っていたと思います (第3図)。

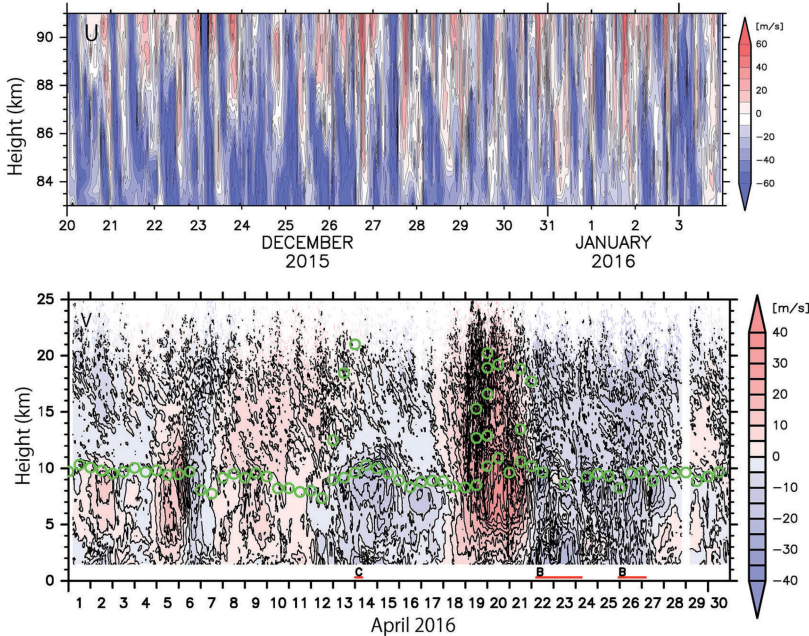
そして2015年3月についてフルシステム観測が始まりました。PANSY は目標以上の省エネに成功したため、フルシステムでの年間連続観測が可能なレーダーになっていました (第4図)。中間圏は、太陽の放射によって大気が電離する日中しか観測できないのですが、南極の夏は白夜なので、約3か月の連続観測が可能です。第5図は世界初の中間圏の広帯域周波数



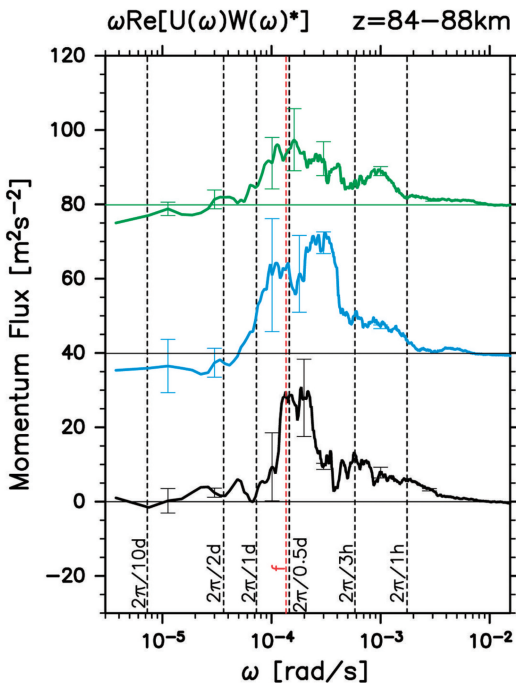
第3図 PANSY レーダー建設風景写真 (PANSY 研究グループ提供)。

スペクトルです。重力波は、中間圏において、夏極から冬極に向かう大規模な物質循環を駆動する重要な役割があるのですが、これまでの多くの研究者の予想と異なり、数時間から十数時間の長周期の重力波が運動量輸送を担うことが明らかとなりました (Sato *et al.* 2017)。

PANSY の観測データを使った研究は、すでに13編出版していますが、その中からいくつか紹介いたします。まず対流圏・成層圏の研究です。PANSY 観測によると対流圏に頻繁に強い鉛直風擾乱が観測されます。そこで、顕著な擾乱が現れた期間を対象に、雲システム解像モデル NICAM (Satoh *et al.* 2008) を使って再現実験を行いました。その結果、この鉛直風擾乱は極域の強い低気圧が近づいてきたときに強まる南極大陸の斜面下降風「カタバ風」に伴うハイドロリックジャンプと地形性重力波であることがわかりました (Tomikawa *et al.* 2015)。これは野本理裕さんの修論です。また、MU レーダー観測でその存在が確認されていた慣性周期 (MU レーダーの場所では



第4図 PANSY レーダー観測データ例 (上図: 中間圏東西風, 下図: 対流圏・成層圏南北風). ○は対流圏界面. B, CはB級ブリザード, C級ブリザードの期間を表す.



第5図 PANSY レーダー夏季中間圏観測による運動量フラックススペクトル (東西運動量の鉛直フラックス). Sato *et al.* (2017) の Fig. 5を改変.

約21時間)に近い周期をもつ重力波の存在が、南極でも確認され (昭和基地での慣性周期は約13時間), しかも季節を問わず存在することが明らかとなりました (Minamihara *et al.* 2018). これは南原優一さんの修論です.

極域の冬は、太陽放射が弱いので、中間圏からの散乱エコーも弱いに違いないと想像していたのですが、ビームを向けてみたところ、意外と強いエコーが頻繁に受信されることがわかりました (Nishiyama *et al.* 2015). PANSY レーダーの建設は自然に苦しめられました, PANSY のサイエンスは自然に助け

られています.

PANSY の冬の中間圏観測データは、ところどころにしか残っていない古代遺跡の壁画のように見えます. しかし、周期約12時間で位相が下がる大振幅の波動の存在が明らかでした. NICAM で再現した結果、この12時間周期の波は、それまで考えられていた大気潮汐ではなく、水平波長約2000 km の大スケール重力波であることがわかりました (Shibuya *et al.* 2017). これは澁谷亮輔さんの博士論文の一部です. 澁谷さんは PANSY レーダーのデータで修論も博論も書いた最初の学生です.

PANSY レーダーは、高性能なフェーズドアレーレーダーですので、標準的な風の3成分観測だけでなく、微細な乱流構造を調べる干渉計観測やイメージング観測が可能です. より中間圏の観測データを充実させるため、流星をターゲットにした風の連続観測も近々始める予定です.

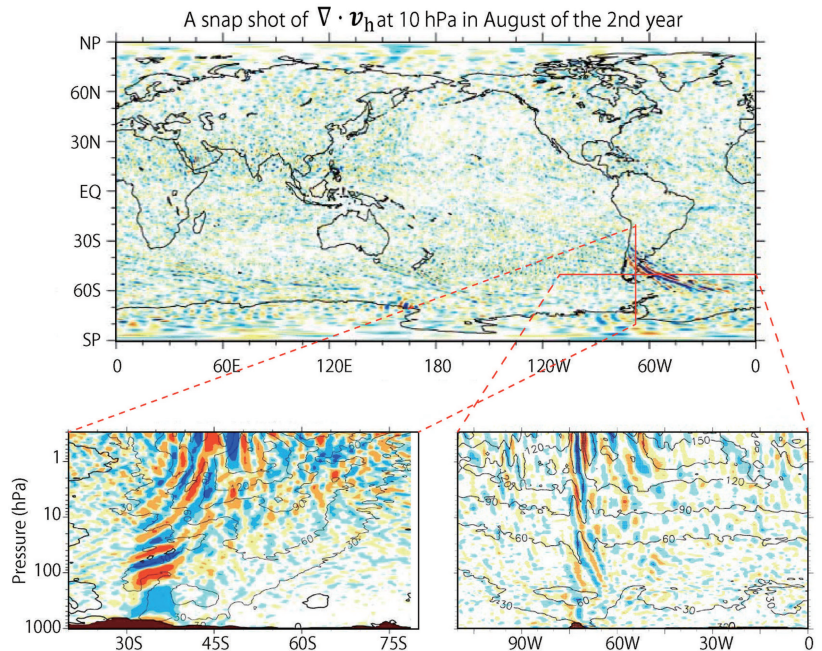
### 3. 高解像中層大気大循環モデルプロジェクト (KANTO)

次に、KANTO プロジェクトについて紹介します. このグループ研究はとても楽しくて、沢山の良い論文を世の中に送り出すことができました. 出版した論文

は17編になります。メンバーは、渡辺真吾さん、富川喜弘さん、河谷芳雄さん、宮崎和幸さん、高橋正明さん、私の6人で、最初の4人は学位を取って間もない若手研究者でした。人生で最も大事といえる時期に、一緒に研究してくれたことに感謝しています。KANTOは重力波パラメタリゼーションを使用せず、重力波も解像できる高解像GCMを用いた、中層大気力学の研究プロジェクトです。まず、全員で議論し、地上から中間圏のほぼ全層をカバーするモデルとしては、世界最高解像度に行いました。積雲パラメタリゼーションのチューニングは、下部成層圏での重力波の振幅が太平洋縦断ラジオ

ゾンデ観測 (Sato *et al.* 2003; Yamamori *et al.* 2006) に近くなるよう設定し、MUレーダーで観測される重力波の平均鉛直波長が約1.6 kmなので (Sato 1994), モデルの鉛直分解能は、これを表現できる300 mとしました。MUレーダーで観測される重力波の平均水平波長は約300 km, KANTOで使ったモデルの再現可能な最小水平波長は約180 kmです。KANTOでは中層大気の季節変化を含む力学を調べたかったので3年分の計算を行いました。これなら、赤道成層圏準2年周期振動 (QBO) も少なくとも1サイクル分余裕で入るはずです。ちなみに、当時QBOのような振動が重力波パラメタリゼーションなしで再現できるのは、私達のこの高解像度モデルだけでした。KANTOで再現された8月の10 hPaの重力波の場を第6図に示します。南アンデスから強力な重力波が中間圏に伝播していく様子が見えます。KANTOの成果をすべて紹介すると長くなりますので、その中からいくつか、それぞれの第1著者に叱られるぐらい簡単に紹介していきます。

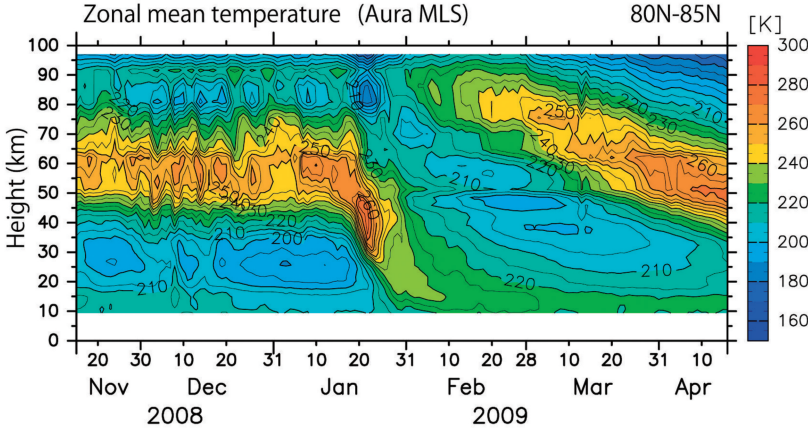
河谷さんはQBOの解析を担当しました。KANTOモデルには重力波パラメタリゼーションなしで、



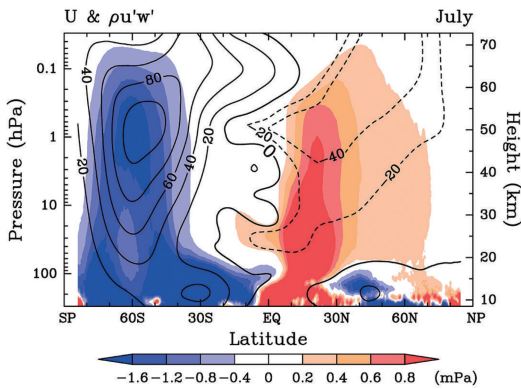
第6図 KANTOモデルにより再現された重力波。南アンデス山脈から振幅の大きな重力波が発生し、風下に流されている様子がわかる。館野 聡氏作成。

QBOに似た振動が出現しました。QBOの駆動は、赤道ケルビン波と重力波が主に担うという先行研究と調和的な結果が得られましたが、そもそも赤道では、重力波は赤道波と呼ばれる赤道捕捉波と、小さな内部重力波の両方が存在します。この研究では東西波数・周波数スペクトル等の解析により内部重力波のほうが加速に寄与していることを示すことができました。また、鉛直1次元、せいぜい南北も含めた2次元の議論がなされることの多かったQBOに対して、波強制の3次元的な分布も示し、力学的議論を深めました (Kawatani *et al.* 2010a, b; 河谷 2012)。

富川さんは突然昇温を担当しました。最近の突然昇温のトピックとしては、2006年に発見された成層圏界面ジャンプ現象があります。第7図は、2009年1月に史上最大の突然昇温が生じたときの、Aura衛星搭載のMLS (Waters *et al.* 2006) の観測による北極域の東西平均気温の時間高度断面図です。12月には、高度60 km付近に気温の極大が存在します。これは重力波強制の作る下降流で維持される冬季極域の成層圏界面です。成層圏の大昇温は、この成層圏界面が高度35 km付近まで下がる現象と捉えられることがわかりま



第7図 Aura MLSで観測された北極の東西平均気温の時間高度断面図。2008年11月15日～2009年1月15日には高度55 km付近に冬極の成層圏界面がみられるが、1月下旬の突然昇温時には成層圏界面が高度30～40 kmに下がる。その後成層圏界面は消滅し、2月上旬に高度80 km付近に再形成される。徐々に成層圏界面は下降し、4月には高度50 km付近に夏極の成層圏界面が見られるようになる。安井良輔氏作成。



第8図 KANTOモデルによる重力波に伴う東西平均東西運動量フラックス  $\rho_0 u' w'$  と東西平均東西風。Sato *et al.* (2009) の Fig. 2を改変。

す。その後、面白いことに、気温の極大つまり成層圏界面が消滅します。そして、通常上部中間圏と呼ばれる高度約80 kmに成層圏界面が再形成されます。この現象は成層圏界面ジャンプ、英語ではelevated stratopause eventと呼ばれます。

この発見されたばかりの現象をKANTOは再現していました。極域の東西平均気温、残差平均下降流、やや低緯度の東西平均東西風、プラネタリー波、重力波、残差平均南北流を解析した結果、成層圏界面の消

滅は重力波が中間圏に届かなくなったため、再形成は重力波の伝播が徐々に回復するためであることがわかりました (Tomikawa *et al.* 2012)。

KANTOは鉛直解像度が高いので、最近注目されている対流圏界面の逆転層 (tropopause inversion layer, TIL) が再現できました。宮崎さんは保存量である渦位や温位に基づいたTILの形成過程の解析を行うとともに、圏界面付近の水平・鉛直の拡散係数の推定と大規模および小規模擾乱のそれぞれの拡散への寄与を明らかにしました

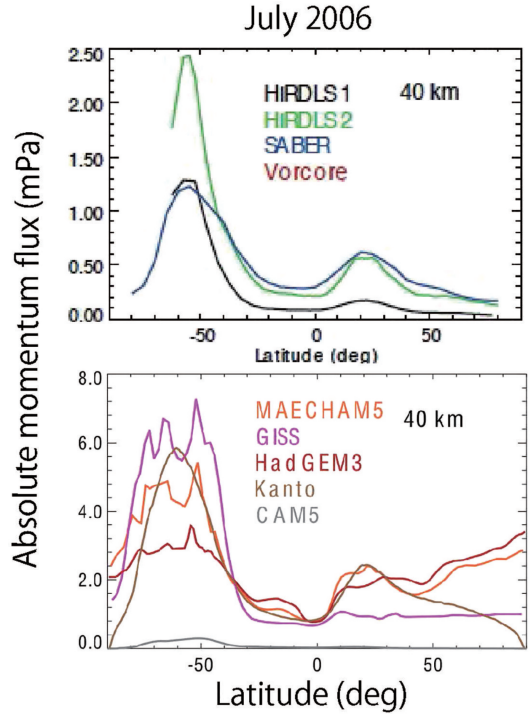
(Miyazaki *et al.* 2010a, b; 宮崎 2013)。

私は重力波の空間分布を解析しました。第8図は、7月における重力波に伴う運動量フラックスの緯度高度断面です (Sato *et al.* 2009)。パラメタリゼーションでは重力波伝播は鉛直のみと仮定しますが、中間圏に至るまでにはかなり水平にも伝播し、特にジェット中心に向かって伝播していることがわかります。第9図は私も参加したスイスの国際宇宙科学研究所の重力波チームの研究結果で、7月における重力波に伴う絶対運動量フラックスを示します (Geller *et al.* 2013)。第9図下のGCMの結果のうちKANTOによる重力波の緯度分布は黄土色で示されています。ほかにはCAM5を除きパラメタリゼーションによる重力波分布です。KANTOでは南半球 (冬) において60°S付近に強いピークが、北半球 (夏) の亜熱帯に弱いピークが見られ、両極域では小さくなっていることがわかります。この特徴は、最近の高解像衛星観測の結果 (第9図上) とよく合っていますが、パラメタリゼーションにより表現された重力波の運動量フラックスには60°S付近のピークがはっきりしないですし、極域の重力波振幅が過剰であることもわかります。この60°S付近の重力波の集中は、南半球極渦の崩壊時期、つまり、オゾンホール消滅時期に大きく影響することが、のちにカナダのグループの研究 (McLandress *et al.* 2012) で示されました。

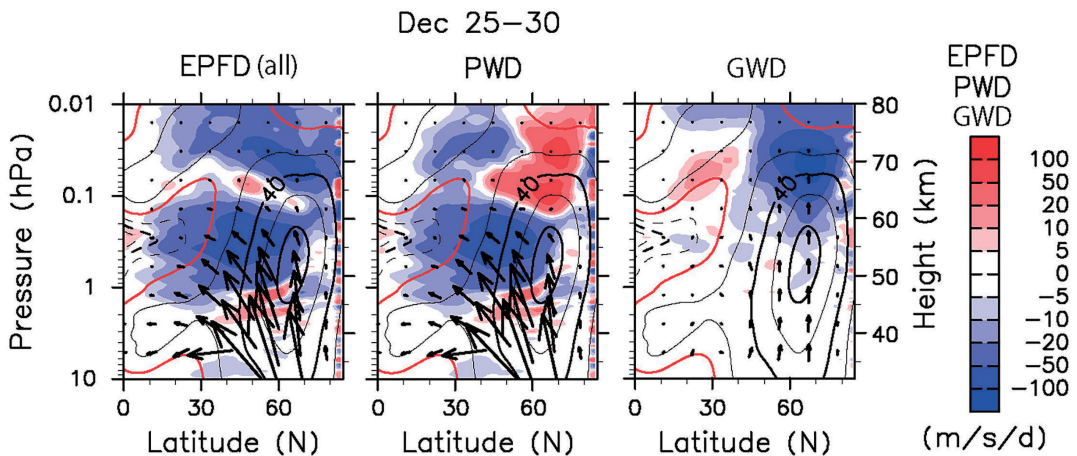
また、重力波の水平伝播のメカニズムの考察を行い、地形性の重力波でも大きく水平に伝播することを示しました (Sato *et al.* 2012). 箱野 聡さんの修論です。また、雨宮 新さんの修論では、この結果に基づき、水平伝播を考慮した地形性重力波のパラメタリゼーションの提案を行いました (Amemiya and Sato 2016).

渡辺さんは、モデルのパフォーマンス全体を示す最初の重要な論文を書きました (Watanabe *et al.* 2008; 渡辺・河谷 2018). 1月におけるEPフラックスとその発散 (後者を波強制と呼びます) の子午面断面図を作成したところ、冬季成層圏は惑星規模ロスビー波の負の強制 (西向き加速) が卓越しますが、夏季および冬季中間圏と、夏季成層圏には重力波が卓越していることが明らかでした。

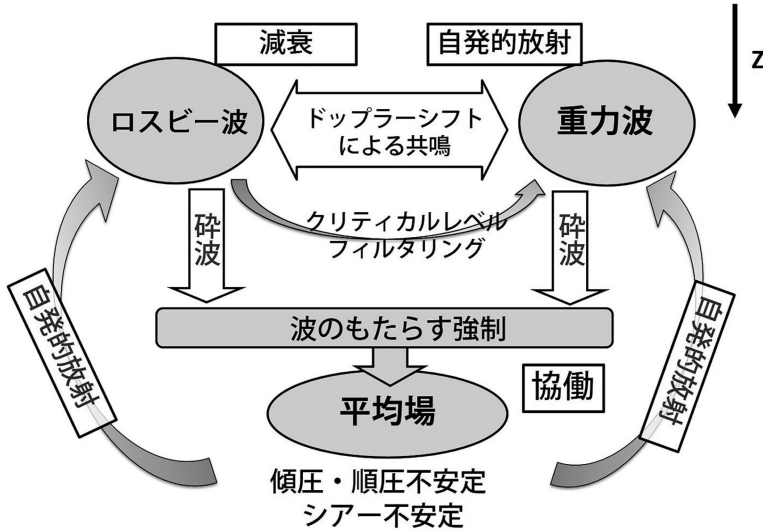
しかしながら、冬季中間圏には重力波強制ほど強くないもののロスビー波強制も存在しています。これは中緯度で負、高緯度で正となっています (第10図)。この構造は傾圧・順圧不安定によるロスビー波の発生 (4日波と呼ばれるものです) を示しており、不安定な場合は、重力波強制によって作られることがわかりました (Watanabe *et al.* 2009; Sato and Nomoto 2015). 傾圧・順圧不安定は渦位の極大の存在で特徴づけられます。また、準地衡理論によれば、波強制は渦位の南北フラックスと等価です。つまり、波強制は渦位極大を緩和するように生じていることがわかります。そして興味深いことに、対流圏の傾圧不安定波と



第9図 衛星観測およびGCMで表現された重力波の絶対運動量フラックスの緯度分布。高度40 km, 2006年7月平均 (KANTOについては年は意味がない)。Geller *et al.* (2013) の Fig. 1と Fig. 2を改変。© American Meteorological Society. Used with permission.



第10図 KANTOモデルで再現した (左) 全EPフラックスとその収束, (中) プラネタリー波の寄与, (右) 重力波の寄与。Sato and Nomoto (2015) の Fig. 4を改変。© American Meteorological Society. Used with permission.



第11図 これまでの研究により見えてきたロスビー波・重力波・平均場の相互作用の描像。

違って、この正と負は一つの波によるものでなく、それぞれ別のロスビー波の「発生」によることがわかりました。つまり、素粒子の分野での、電子・陽電子の対形成と同じことが大気中で起こっているのです (Sato and Nomoto 2015)。この研究は、増田陽洋さんの修論を発展させたものです。

私が、KANTO や研究室での研究を通してみてきたと思っている、ロスビー波・重力波・平均場の相互作用の描像は第11図に示すようなものです。ロスビー波と重力波はスケールが大きく違う波なのですが、ドップラーシフトによって時間スケールが一致し共鳴が起こりえます (Yasuda *et al.* 2015a, b)。その結果、ロスビー波は減衰し、不安定でもないのに重力波が自発的に放射されます。ロスビー波と重力波は上方に伝播すると、振幅が大きくなって砕波しますが、その結果生まれる波強制は平均場を傾圧・順圧不安定にしたり、シアー不安定にしたりします (Sato *et al.* 2018)。そうすると、ロスビー波や重力波が中層大気中で発生します (Yasui *et al.* 2018)。このように、重力波とロスビー波は協働して平均場に作用し、運動量やエネルギーの再分配を行っています。スケールの小さな重力波の作用がスケールの大きなロスビー波を発生させるというのはとても面白いですね。また、通常、重力波は波長だけでなく、波束も小さいので、東西平均ではなく3次元解析が重要です。これには卒業

生の木下武也さんが作り上げた重力波にもロスビー波にも適用できる3次元の波活動度フラックスと残差循環の理論式が役立つはずで (Kinoshita and Sato 2013a, b; 木下 2015)。KANTO のデータは、メンバー以外の国内外の多くの研究者に使用されました (Sakazaki *et al.* 2015; Alexander *et al.* 2016 など)。

#### 4. 最近の研究について

最後に現在取り組んでいる最前線の研究を紹介します。それは大型大気レーダー観測と重力波解像大気

大循環モデルを結びつける研究です。

PANSY レーダーが南極に設置されたことで、グローバルな大型大気レーダー観測網ができあがりました。この観測網を使って中間圏を介した南北両半球結合を調べることにしました。グローバルといっても観測点は点在しているので、そのつながりは簡単にはわかりません。そこで、データ同化を導入して、高解像度大気大循環モデルにより観測された現実の現象を再現することにしました。これは8カ国30名以上の研究者が参加する、Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM) と呼ばれる国際共同研究 (SCOSTEP/VarSITI/ROSMIC の公式プロジェクト) で、私はPIを務めています。

私たちのねらいは成層圏突然昇温から始まる南北結合です。Körnich and Becker (2010) は、北極で突然昇温が起こると平均東西風が大きく変化する、そのため中間圏に伝播し強制をもたらしていた重力波が届かなくなり中間圏循環が弱化する、すると南極の中間圏上部が昇温する、というシナリオを考えました。これは宇宙から見ると、まず北極の成層圏雲が消え、そして次に南極の極中間圏雲が消えるというちょっとロマンチックな現象です。理論的にはありうるし、冬半球の成層圏の月平均気温が高いと、夏半球の極中間圏雲の雲量は少ないといった間接的な観測的証拠もあります (Gumbel and Karlsson 2011)。しかし、実際に



重力波の場がどう変わっているのかはまだ調べられていませんし、どれぐらいの時間差で南極にシグナルが伝播するのか、グローバルに重力波の場はそんなに簡単に変わるのか、この提唱されている南北結合はそもそもロバストなのか、対流圏にはどれくらい影響するのかなど、わからないことだらけなのです。

私たちは2016, 2017, 2018年の各1~2月に、ICSOM 国際共同中間圏重力波同時観測を3回行いました。2回目については、重力波の弱まりが北極から南極に伝播しているように見えなくもないということを示すことができました。1回目はそういう傾向が全く見られませんでした。南北結合が起こるプロセスは、提唱されているほど単純ではないのではないかとKANTO プロジェクト等の研究によりわかったように重力波とロスビー波の中層大気における協働の可能性を考えれば、なおさらそう思われるのです。

確認するためには、高解像大気大循環モデルによる再現が必要です。そのため、現在、博士課程1年の小新 大さんが、中層大気データの同化研究に取り組んでいます。局所アンサンブル変換カルマンフィルタによる4次元のデータ同化のシステムを中層大気大循環モデルに組み込み、グローバル解析データを作っています。その初期結果によれば、北半球成層圏突然昇温もその後の南半球上部中間圏での昇温も解析されていますが、赤道の構造が提唱されているシナリオと大きく異なることもわかりました。今後の研究が楽しみです。

## 5. おわりに

最後に若い方々へのメッセージと謝辞を述べたいと思います。

私はもともとそんなに志高い人間ではないのですが、PANSYをさせていただいて、若いときは志を大きく持ったほうがよいと考えるようになりました。そのほうが断然面白い研究ができるからです。また、いったん始めたら、簡単にあきらめないこと、どんなに大変でも丁寧な仕事を積み重ねることが大切だと思います。そして、自分にとってうれしいコメントだけでなく、厳しいアドバイスも一旦引き取る勇気を持つことが大事だと思います。

PANSY, KANTO, 重力波国際チーム、研究室の学生達も含め、私は良い研究者仲間にも恵まれてきました。一緒に研究してくださり、とても感謝しています。また、現在、東京大学での教育や運営の仕事をす

るうえで、よい教員仲間にも恵まれています。

それから私はよいメンターに出会えました。大学院生のときから今に至るまで、廣田 勇先生には多くのことをご指導いただきました。江尻全機先生・藤井理行先生・山内 恭先生・麻生武彦先生には日本の南極観測のあるべき姿をご教示いただき、PANSYという困難な仕事を支えていただきました。東京大学に異動してからは山形俊男先生に教授としての大学運営の取り組み方に関するご教示をいただきました。

私の出身の京都大学・東京大学の気象学研究室の先輩がた、後輩の皆さま、国立極地研究所の皆さま、京都大学(現)生存圏研究所の先生方はじめ、気象学会の多くの方々に大変お世話になっております。お一人お一人の名前を挙げさせていただきたいところですが、あまりにも多いので思い切って省略いたします。

藤原賞の受賞により、気象学において大きな仕事をしたと認めていただいたことになるのかと思います。私は研究が好きなので、今後も研究を続けてまいります。引き続き皆様方にはお世話になるかと思いますが、どうぞよろしく願いいたします。また、いつも支えてくれる家族に感謝します。

## 参考文献

- Alexander, S. P., K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani and D. J. Murphy, 2016: Southern Hemisphere extratropical gravity wave sources and intermittency revealed by a middle-atmosphere General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 1335-1349.
- Amemiya, A. and K. Sato, 2016: A new gravity wave parameterization including three-dimensional propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 237-256.
- Cyranoski, D., 2002: Radar array tests the atmosphere at pole position. *Nature*, **420**, 594.
- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira, 1985: The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers. *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168.
- Geller, M. A., M. J. Alexander, P. T. Love, J. Bacmeister, M. Ern, A. Hertzog, E. Manzini, P. Preusse, K. Sato, A. A. Scaife and T. Zhou, 2013: A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models. *J. Climate*, **26**, 6383-6405.
- Gumbel, J. and B. Karlsson, 2011: Intra- and inter-hemispheric coupling effects on the polar summer mesosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L14804, doi:10.1029/2011GL047968.

- IUGG, 2003: Resolution 8: MST/IS Radar in Antarctica, Resolutions of the Union Adopted at the XXIII General Assembly, The International Union of Geodesy and Geophysics. <http://www.iugg.org/resolutions/sapporo03.pdf> (2018.10閲覧)
- 河谷芳雄, 2012: 赤道準2年振動における赤道波と慣性内部重力波の役割—2011年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. 天気, **59**, 807-825.
- Kawatani, Y., K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara and M. Takahashi, 2010a: The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part I: Zonal mean wave forcing. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 963-980.
- Kawatani, Y., K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara and M. Takahashi, 2010b: The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part II: Three-dimensional distribution of wave forcing. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 981-997
- 木下武也, 2015: 大気大循環の3次元構造を記述する新理論の提唱—2014年度山本賞受賞記念講演—. 天気, **62**, 935-947.
- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013a: A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1577-1602.
- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013b: A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1603-1615
- Körnich, H. and E. Becker, 2010: A simple model for the interhemispheric coupling of the middle atmosphere circulation. *Adv. Space Res.*, **45**, 661-668.
- McLandress, C., T. G. Shepherd, S. Polavarapu and S. R. Beagley, 2012: Is missing orographic gravity wave drag near 60°S the cause of the stratospheric zonal wind biases in chemistry-climate models? *J. Atmos. Sci.*, **69**, 802-818.
- Minamihara, Y., K. Sato, M. Tsutsumi and T. Sato, 2018: Statistical characteristics of gravity waves with near-inertial frequencies in the Antarctic troposphere and lower stratosphere observed by the PANSY radar. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 8993-9010.
- 宮崎和幸, 2013: 高分解能大気大循環モデルを用いた中高緯度対流圏界領域における輸送・混合過程の研究—2012年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. 天気, **60**, 783-795.
- Miyazaki, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, M. Takahashi and K. Sato, 2010a: Transport and mixing in the extratropical tropopause region in a high-vertical-resolution GCM. Part I: Potential vorticity and heat budget analysis. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1293-1314.
- Miyazaki, K., K. Sato, S. Watanabe, Y. Tomikawa, Y. Kawatani and M. Takahashi, 2010b: Transport and mixing in the extratropical tropopause region in a high-vertical-resolution GCM. Part II: Relative importance of large-scale and small-scale dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1315-1336.
- Nishiyama, T., K. Sato, T. Nakamura, M. Tsutsumi, T. Sato, M. Kohma, K. Nishimura, Y. Tomikawa, M. K. Ejiri and T. T. Tsuda, 2015: Height and time characteristics of seasonal and diurnal variations in PMWE based on 1 year observations by the PANSY radar (69.0°S, 39.6°E). *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 2100-2108.
- Sakazaki, T., K. Sato, Y. Kawatani and S. Watanabe, 2015: Three-dimensional structures of tropical nonmigrating tides in a high-vertical-resolution general circulation model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 1759-1775.
- 佐藤 薫, 1992: MU レーダーで観測される対流圏及び下部成層圏の鉛直風擾乱—1991年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. 天気, **39**, 337-346.
- Sato, K., 1994: A statistical study of the structure, saturation and sources of inertia-gravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **56**, 755-774.
- 佐藤 薫, 1999: 中層大気重力波の研究—1998年度日本気象学会賞受賞記念講演—. 天気, **46**, 803-818.
- Sato, K. and M. Nomoto, 2015: Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3609-3624.
- Sato, K., M. Yamamori, S.-Y. Ogino, N. Takahashi, Y. Tomikawa and T. Yamanouchi, 2003: A meridional scan of the stratospheric gravity wave field over the ocean in 2001 (MeSSO2001). *J. Geophys. Res.*, **108**, 4491, doi:10.1029/2002JD003219.
- Sato, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki and M. Takahashi, 2009: On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19801, doi:10.1029/2009GL039908.
- Sato, K., S. Tatenno, S. Watanabe and Y. Kawatani, 2012: Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1378-1396.
- Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito,

- Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi and T. Yamanouchi, 2014: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **118**, 2-15.
- Sato, K., M. Kohma, M. Tsutsumi and T. Sato, 2017: Frequency spectra and vertical profiles of wind fluctuations in the summer Antarctic mesosphere revealed by MST radar observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 3-19.
- Sato, K., R. Yasui and Y. Miyoshi, 2018: The momentum budget in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. Part I: Contributions of different wave types and in situ generation of Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3613-3633.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Shibuya, R., K. Sato, M. Tsutsumi, T. Sato, Y. Tomikawa, K. Nishimura and M. Kohma, 2017: Quasi-12h inertia-gravity waves in the lower mesosphere observed by the PANSY radar at Syowa Station (39.6°E, 69.0°S). *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 6455-6476.
- Tomikawa, Y., K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki and M. Takahashi, 2012: Growth of planetary waves and the formation of an elevated stratopause after a major stratospheric sudden warming in a T213L256 GCM. *J. Geophys. Res.*, **117**, D16101, doi:10.1029/2011JD017243.
- Tomikawa, Y., M. Nomoto, H. Miura, M. Tsutsumi, K. Nishimura, T. Nakamura, H. Yamagishi, T. Yamanouchi, T. Sato and K. Sato, 2015: Vertical wind disturbances during a strong wind event observed by the PANSY radar at Syowa Station, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1804-1821.
- 渡辺真吾, 河谷芳雄, 2018: 重力波解像モデルを用いた中層大気大循環の研究—2017年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **65**, 385-408.
- Watanabe, S., Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi and K. Sato, 2008: General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12110, doi:10.1029/2008JD010026.
- Watanabe, S., Y. Tomikawa, K. Sato, Y. Kawatani, K. Miyazaki and M. Takahashi, 2009: Simulation of the eastward 4-day wave in the Antarctic winter mesosphere using a gravity wave resolving general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **114**, D16111, doi:10.1029/2008JD011636.
- Waters, J. W. *et al.*, 2006: The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 1075-1092.
- Yamamori, M. and K. Sato, 2006: Characteristics of inertia gravity waves over the South Pacific as revealed by radiosonde observations. *J. Geophys. Res.*, **111**, D16110, doi:10.1029/2005JD006861.
- Yasuda, Y., K. Sato and N. Sugimoto, 2015a: A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part I: Derivation of the renormalization group equations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 957-983.
- Yasuda, Y., K. Sato and N. Sugimoto, 2015b: A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part II: Verification of the theoretical equations by numerical simulation. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 984-1009.
- Yasui, R., K. Sato and Y. Miyoshi, 2018: The momentum budget in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. Part II: The in situ generation of gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3635-3651.

---

## The Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY) and High-resolution Middle Atmosphere Dynamics Study

Kaoru SATO\*

\* *Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*  
*E-mail: kaoru@eps.s.u-tokyo.ac.jp*

(Received 14 September 2018; Accepted 2 November 2018)