

南極重力波の季節変化と発生源に関する研究

佐藤 薫^{1*}

Seasonal variation and sources of atmospheric gravity waves in the Antarctic

Kaoru Sato^{1*}

(2010年3月22日受付; 2010年5月13日受理)

Abstract: In the last recent ten years, our knowledge of gravity waves in the Antarctic has been significantly improved through numerous studies using balloon and satellite observations and high-resolution model simulations. In this report, we introduce results from two studies which were performed as a part of the NIPR project “Integrated analysis of the material circulation in the Antarctic atmosphere-cryosphere-ocean” (2004–2009), i.e., Yoshiki *et al.* (2004) and Sato and Yoshiki (2008). These two studies focused on the seasonal variation and sources of the gravity waves in the Antarctic, because horizontal wavelengths and phase velocities depend largely on the wave sources. The former study used original high-resolution data from operational radiosonde observations at Syowa Station. In the lowermost stratosphere, gravity waves do not exhibit characteristic seasonal variation; instead, the wave energy is intensified when lower latitude air intrudes into the area near Syowa Station in the upper troposphere. This intrusion is associated with blocking events or developed synoptic-scale waves. In the lower and middle stratosphere, the gravity wave energy is maximized in spring and particularly intensified when the axis of the polar night jet approaches Syowa Station. The latter study is based on intensive radiosonde observation campaigns that were performed in 2002 at Syowa Station as an activity of JARE-43. Gravity wave propagation was statistically examined using two dimensional (i.e., vertical wavenumber versus frequency) spectra in each season. It was shown that the gravity waves are radiated upward and downward from an unbalanced region of the polar night jet. This feature is consistent with the gravity-wave resolving GCM simulation.

要旨: ここ 10 年にわたり、気球や衛星観測、高解像モデルによる南極域重力波の研究が行われ、重力波の季節変化や大規模場への作用を議論する上で重要な、水平波長や位相速度に影響する発生源・発生メカニズムに関する理

¹ 東京大学大学院理学系研究科, Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033.

* E-mail: kaoru@eps.s.u-tokyo.ac.jp

解が深まってきた。本論文では、このような背景の中、南極重力波の季節変化と発生源について、国立極地研究所プロジェクト「南極大気—雪氷—海洋圏における物質循環の総合解析」（2004-2009年度）に行われた2つの研究Yoshiki *et al.* (2004)、およびSato and Yoshiki (2008) について紹介する。これらの研究は、それぞれ昭和基地の高層気象観測オリジナル高分解能データ、および、第43次日本南極地域観測隊にて行った高解像ラジオゾンデ集中観測に基づき行われた。前者では、成層圏最下層では重力波に特徴的な季節変化はなく、波のエネルギーは上部対流圏の非線形性の高い総観規模擾乱に伴い、低緯度の空気塊が侵入しているときに大きくなっている傾向がみられること、成層圏中部および下部では春に重力波エネルギーが極大となるが、季節内のより短い時間スケールでは、極夜ジェットが昭和基地に近づくときに強まることが示された。後者では、重力波の周波数・鉛直波数スペクトルを示し、極夜ジェットの非平衡度の高い領域から重力波が放射されている可能性を示した。これは、高解像気候モデルのシミュレーション結果とも調和的であった。

1. はじめに

重力波はロスビー波と同様、主として対流圏で生成し、上方に伝播し、中層大気で碎波して運動量を落とし、中高緯度における子午面循環を駆動する。その影響は循環の鉛直流部分を介して下層にも及ぶ。この過程はダウンワードコントロールと名付けられている。波により駆動された子午面循環の下降流は、断熱圧縮により太陽放射の届かない冬の極域成層圏を暖かく保っている。この極域成層圏の温度は、オゾン層の存在する高度20 km付近の極成層圏雲の雲量を決め、雲の表面で起こる不均一反応によるオゾン破壊をコントロールする。現在の気候モデルの多くでは、極域成層圏の温度が低めになるバイアスがある。これは、パラメタリゼーションによる重力波の効果が正しく表現されていないためと考えられている。

もう一つの重力波の役割は、重力波そのものに伴う運動がもたらす物質混合である。オゾン層は、鉛直にオゾン量の多い層と少ない層が重なったシャープな構造を持つことが多い。これをオゾンラミナと呼ぶ。オゾンラミナは、風の鉛直シアの存在により物質輸送経路が鉛直方向に大きく異なる時、または、もともとオゾン混合比に大きな鉛直勾配があり、これが鉛直波長の短い大気重力波に伴う鉛直運動によって変形を受ける時、生じると考えられている。このようなラミナが生じると、大気中の乱流拡散により異なる大気質を持つ空気同士が鉛直に混合し、特定の化学反応を促進・抑制する可能性がある。

ところが、極域の重力波は、中緯度・熱帯の重力波研究と比べて観測データが少ないため研究が遅れがちであった。2000年ごろから、ラジオゾンデ等による定常観測(Pfenninger *et al.*, 1999; Yoshiki and Sato, 2000; Yoshiki *et al.*, 2004) や集中観測 (Sato and Yoshiki, 2008) により極域重力波の研究が徐々に行われるようになり、最近では重力波解像が可能な高解像大気大循環モデル (Sato *et al.*, 1999; Hamilton *et al.*, 1999; Watanabe *et al.*, 2006, 2008; Sato *et al.*, 2009) や、重力波の検出が可能な高解像衛星観測による研究 (Preusse *et*

al., 2002; Jiang *et al.*, 2004; Wu and Jiang, 2002; de la Torre and Alexander, 2005; de la Torre *et al.*, 2006; Alexander and Teitelbaum, 2007; Baumgaertner and McDonald, 2007; Hei *et al.*, 2008), スーパープレッシャーバルーンによる大規模な南極周回観測 (Vincent *et al.*, 2007) による研究等が行われている。そして極域に限らず, グローバルな重力波分布やその作用を定量的に捉えようという研究の動きがある (Alexander *et al.*, 2010)。

重力波の研究の中で, とりわけその起源の特定は, 波長や位相速度などの大循環との相互作用を議論するうえで大事な波のパラメータに大きく影響するため重要である。

Yoshiki and Sato (2000) では, 10年間の32地点における定常ラジオゾンデ観測データを用いて, 南極と北極の重力波の統計解析を行った。その結果, 北極では冬季に重力波の振幅が極大となるのに対し, 南極では一様に春季に極大となる季節特性があることなどがわかった。南極の春季の重力波の振幅極大は, 極渦の上部からの崩壊に伴い現れる高安定度層と対応している。Yoshiki and Sato (2000) の解析した南極観測地点は主に南極大陸沿岸部であったが, 同じような春季の重力波振幅の極大は, Pfeninger *et al.* (1999) による南極大陸内部(南極点)でのデータ解析でも示されている。また, Yoshiki and Sato (2000) は, 各高度での水平風の強度と成層圏重力波強度の相関から, 南極域では成層圏に発生源がありうること, 北極域では地形性重力波(山岳波)が主であることを示した。南極沿岸域では, 対流圏下層で東風が卓越することが多く, 冬季上空は西風となることから, クリティカルレベルが対流圏に存在し, 山岳波が成層圏に到達できないことが理由と考えられた。Baumgaertner and McDonald (2007) および Hei *et al.* (2008) でも, 衛星GPS観測に基づき, 同様な南極における春季の重力波の振幅極大を示し, 成層圏にも重力波起源がありうることを議論している*。

Sato (2000) は, 以上の研究から極域重力波の起源として, 山岳, 成層圏極夜ジェットの自発的調節に加え, 上部成層圏以上では熱帯の対流起源の重力波が存在しうることを示した。その後, 対流圏上部の総観規模擾乱に伴う自発的調節過程やカタバ風を起源とする重力波の報告もなされている。

本報告では, 南極重力波の季節変化と発生源について, 国立極地研究所プロジェクト「南極大気—雪氷—海洋圏における物質循環の総合解析」(2004–2009年度)に行われた2つの研究 Yoshiki *et al.* (2004) および Sato and Yoshiki (2008) の概要をそれぞれ第2章および第3章にて紹介する。詳しくは原著論文を参照されたい。

* Hei *et al.* (2008) では, 同様な結果や議論をしているにもかかわらず, Pfeninger *et al.* (1999), Yoshiki and Sato (2000), Yoshiki *et al.* (2004) の南極重力波研究が引用されていない。

2. 成層圏極渦と対流圏擾乱に伴う南極下部成層圏の重力波の卓越

この研究では、昭和基地（南緯 69.0 度，東経 39.6 度）における 1 日 2 回の定常高層気象観測によって得られた，気温および水平風のオリジナルの高分解能データを用いた．解析期間は 1997 年 2 月～1999 年 1 月の 2 年間である．昭和基地では，欠測がほとんどなく継続的に観測が実施されている．さらに，油漬けの手法（気球を灯油につけ，温めてから用いる）により，南極域冬季成層圏の低温においてもゾンデの到達高度は 28 km 以上がほぼ確保されている．重力波は鉛直波長 2-8 km の成分として取り出した．

図 1a は，期間中の東西風 u および気温 T の時間高度断面図である．対流圏界面は高度約 10 km に存在している．夏以外の期間には高度 15 km 以上において極夜ジェットが見ら

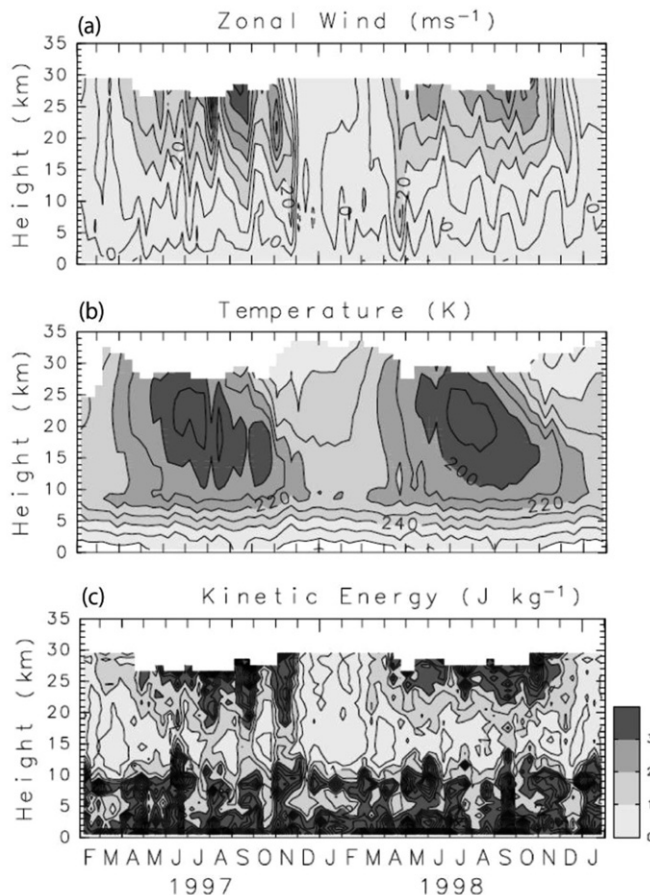


図 1 昭和基地における (a) 東西風，(b) 気温，(c) 重力波運動エネルギーの時間鉛直断面図．等値線間隔は (a) 10 m/s，(b) 10 K，(c) 0.5 J/kg (Yoshiki et al., 2004)．

Fig. 1. Time-height sections of (a) zonal wind, (b) temperature and (c) gravity wave kinetic energy at Syowa Station. Contour intervals are (a) 10 m/s, (b) 10 K, (c) 0.5 J/kg (Yoshiki et al., 2004).

れる。下部対流圏は東風で、高度約 3 km で東西風はゼロとなる。高度 15–25 km では、極夜ジェットが弱まる春において、高い高度から昇温が起り、安定度の高い領域が下方に伝播する様子がわかる。図 1b は、重力波の運動エネルギーの時間高度断面図である。波のエネルギーは大気安定度の高い領域が下降する春に最大となり、Yoshiki and Sato (2000) で得られたクライマトロジーと一致している。このような特徴的な季節変化に加え、より短い時間スケールでの重力波エネルギーの変動が見られる。対流圏直上の高度 13–15 km においては、重力波のエネルギーは上部に比べて相対的に弱く、顕著な季節変化は見られない。

次に、Yoshiki and Sato (2000) と同様の hodograph 解析を行い、重力波の位相速度や水平波長など、波の構造を記述するパラメータを統計的に調べた。図 2 は、各季節における水平波長の頻度分布である。影のないもの(付いているもの)は、エネルギー上向き(下向き)伝播重力波の割合を示す。エネルギー下向き伝播重力波の割合は、冬の時期に高い高

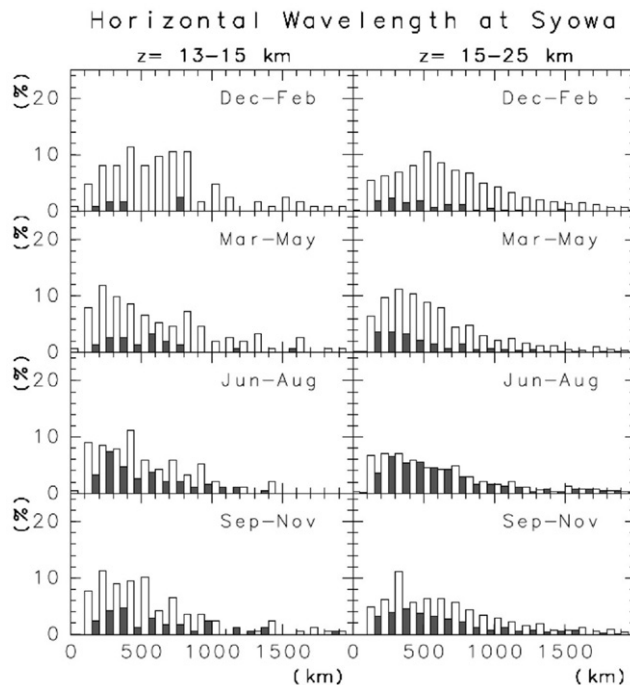


図 2 ホドグラフ解析により得られた水平波長の頻度分布。左が高度 13–15 km、右が高度 15–25 km の結果。白抜きは上向きエネルギー伝播成分、グレーは下向きエネルギー伝播成分 (Yoshiki et al., 2004)。

Fig. 2. Frequency distribution of horizontal wavelengths estimated by Hodograph analysis. Left and right panels show results for height ranges of 13–15 km and 15–25 km, respectively. White and gray bars show components of upward and downward energy propagation components, respectively (Yoshiki et al., 2004).

度領域で増加するが、夏と秋には減少する。重力波エネルギーが増大する春の時期には、夏や秋に比べると相対的に割合は大きいものの、エネルギー下方伝播重力波は減少している。

図 3a および図 3b はそれぞれ、背景風に相対的な水平位相速度方向、地面に相対的な水平位相速度方向の分布を表わす。高度 13-15 km と 15-25 km で、背景風に相対的な伝播方向が若干異なる。秋から春にかけて、高度 15-25 km では重力波は背景風に相対的に西向きに伝播し、高度 13-15 km では背景風に相対的に西向きまたは北西方向に伝播する。一方、対地位相速度は秋から春にかけて、どちらの高度でも東向きである。このように、秋から春にかけてドップラーシフトの効果が見られる。対地位相速度の絶対値は高度 13-15 km ではすべての季節において位相速度はゼロに近く、高度 15-25 km では、夏に 0-20 m/s が卓越し、それ以外の季節では 0-60 m/s の範囲で広く分布している (図は省略)。

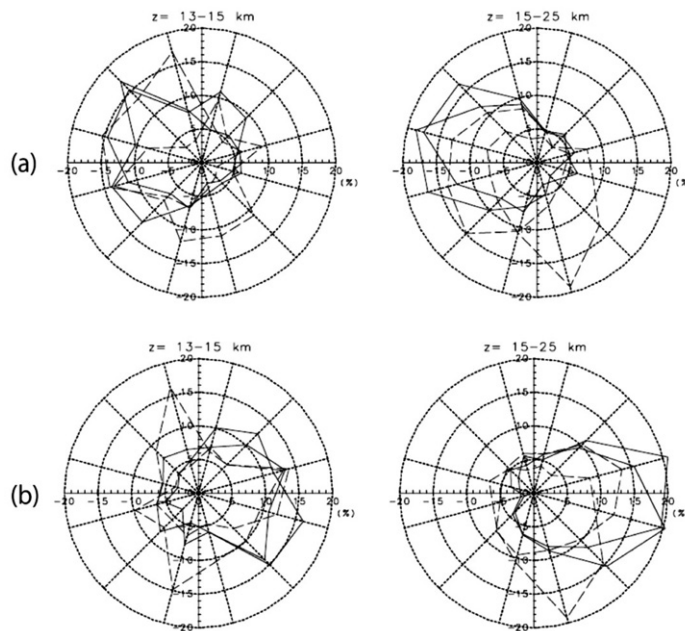


図 3 ホドグラフ解析により得られた重力波の (a) 背景風に相対的な位相速度の向きと (b) 地面に相対的な位相速度の向きの頻度分布。左が高度 13-15 km、右が高度 15-25 km の結果。細い破線、太い破線、細い実線、太い実線はそれぞれ夏 (DJF)、秋 (MAM)、冬 (JJA)、春 (SON) の結果を表す (Yoshiki et al., 2004)。

Fig. 3. Frequency distribution of directions of gravity wave phase velocity (a) relative to the background wind and (b) relative to the ground. Left and right panels show results for height ranges of 13-15 km and 15-25 km, respectively. Thin dashed, thick dashed, thin solid and thick solid curves show results for summer (DJF), autumn (MAM), winter (JJA), spring, respectively (Yoshiki et al., 2004).

高度 13-15 km に存在する重力波の位相速度はゼロに近く、下部対流圏にクリティカルレベルが存在するため、山岳波とは考えにくい。図 4 は、この高度領域において重力波エネルギーが大きい時の上部対流圏（等温位面 300 K、高度 7-8 km に対応）における渦位の一例である。黒丸は昭和基地の位置を示す。一般的に渦位の絶対値は高緯度の方が大きい。昭和基地の東側に、渦位の絶対値が小さな（つまり低緯度起源の）空気塊が南極大陸深くに入り込んでいる様子がわかる。これは、準定常ロスビー波に伴うブロッキングに伴うものである。他の事例についても、重力波の卓越はこのような総観規模の低渦位の出現に伴うことが多いことがわかった。これを統計的に示したのが図 5 である。300 K 面における渦位の頻度分布を白で、それぞれの事例における高度 13-15 km での重力波ポテンシャルエネルギーが 1.5 J/kg より大きい事例の割合をグレーで表している。これより渦位の絶対値が小さいときに、振幅の大きな重力波の割合が増えていることがわかる。

次に、高度 15-20 km の重力波エネルギーと極渦の関係を調べた。極渦特性の季節変化を調べるため、等温位面 480 K (高度約 18 km) における、渦位を基に定義した等価緯度 (Nash *et al.*, 1996) 上での渦位勾配を図 6a に示す。折れ線は昭和基地の等価緯度を示す。冬と早春の時期には、昭和基地は通常極夜ジェットの高緯度側に位置する。晩春になると、成層圏のプラネタリー波増大のため、昭和基地の等価緯度は大きく変動し始め、極夜ジェットが何度か昭和基地に近づく。1997 年 11 月には、渦位の緯度勾配の消失に示されるように極渦が減衰している。この期間中、極夜ジェットは昭和基地に 11 月 8 日、11-18 日、24-28 日の 3 回近づいている。重力波エネルギーは、極渦が減衰し、かつ極夜ジェットが昭和基地の近くにある時に増大している。9 月にも、極夜ジェットが昭和基地に近づいている時にポテンシャルエネルギーが増大している。局所的な風速は極夜ジェットが昭和基地に近づくときと増大するので、風速もポテンシャルエネルギーと相関が良い。しかし、ポテンシャルエネルギーが最も大きい 11 月には、風速は 9 月と比べてむしろ減少している。重力波エネルギーの季節変化は 1997 年と 1998 年とでは異なっていたが、極夜ジェットの軸が昭和基地に近付くときに増大する傾向は、1998 年にも見られた。

以上の解析結果をまとめると次のようになる。対流圏界面直上 (高度 13-15 km) での重力波は特徴的な季節変化は示さず、総観規模波動やブロッキングのような、対流圏の擾乱が重力波の励起に寄与していると考えられる。下部中部成層圏 (高度 15-25 km) では、重力波のエネルギーは春に最大となる年変動を示す。特に重力波エネルギーは、春に極渦が崩壊し、かつ観測地点が極夜ジェットの軸に近づく時に増大し、また、下向きエネルギー伝播の割合も増加することから、重力波の起源は極夜ジェットである可能性が高いことがわかる。

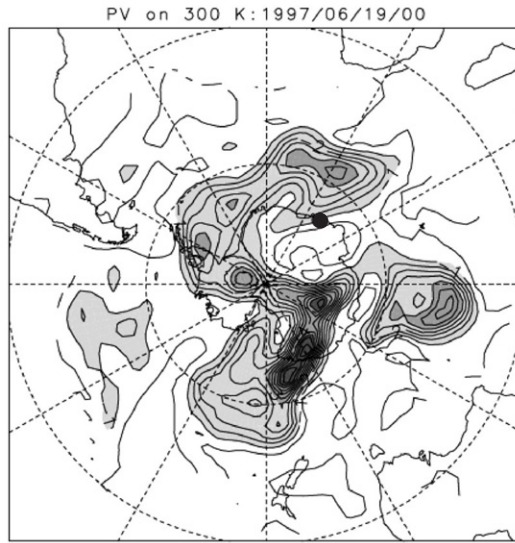


図4 1997年6月19日、高度13-15 kmにおいて重力波のエネルギーが増大した時の300 K温位面における渦位分布。黒丸は昭和基地の位置。等値線間隔は0.5 PVU (Yoshiki *et al.*, 2004)。
 Fig. 4. A map of potential vorticity on an isentropic surface of 300 K on 16 June 1997 when gravity wave energy was enhanced in the height region of 13-15 km. The closed circle indicates the location of Syowa Station. Contour intervals are 0.5 PVU (Yoshiki *et al.*, 2004).

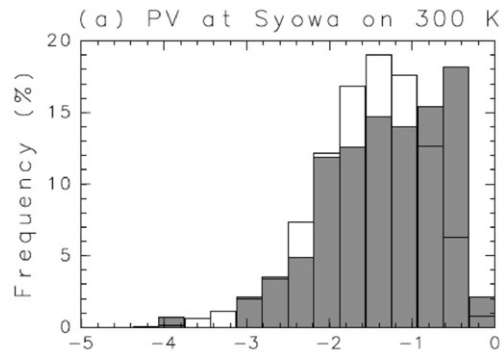


図5 白抜きは300 K温位面における渦位の頻度分布。横軸は渦位で単位はPVU。グレーはそれぞれの事例のうち、高度13-15 kmにおいて重力波のエネルギーが 1.5 J/kg より大きな割合 (Yoshiki *et al.*, 2004)。
 Fig. 5. Frequency distribution of potential vorticity on the 300 K isentropic surface (white bars). The potential vorticity in units of PVU is shown on the horizontal axis. Gray bar indicates cases when gravity wave energy was greater than 1.5 J/kg in the height region of 13-15 km.

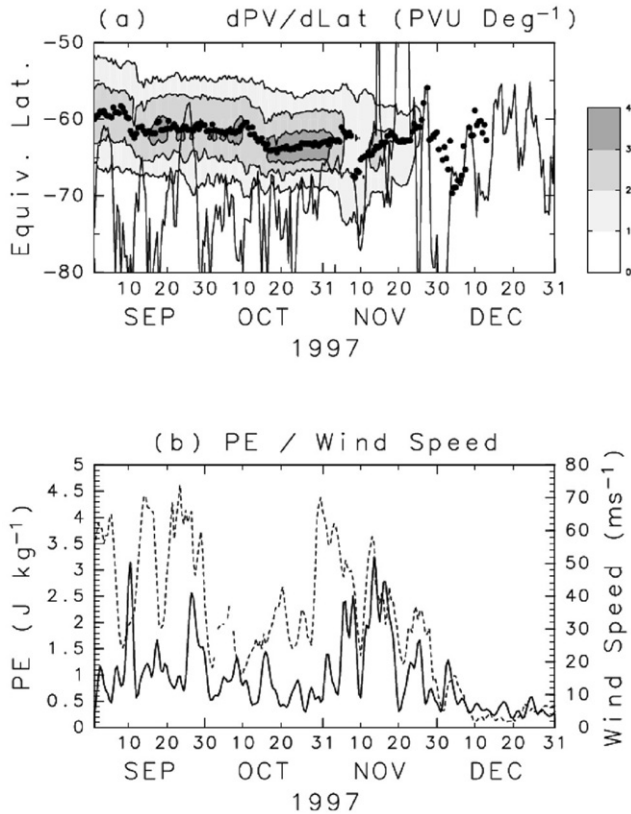


図6 (a) 1997年における480 K温位面における渦位の南北勾配の時間—等価緯度断面図。黒丸は極夜ジェットのエッジの等価緯度、実線は昭和基地の等価緯度を示す。(b) 同年の高度15–25 kmにおける重力波のポテンシャルエネルギー(実線)と風速(破線)の時系列(Yoshiki *et al.*, 2004)。

Fig. 6. (a) Time-equivalent latitudes of latitudinal gradient of potential vorticity on an isentropic surface of 480 K in 1997. Closed circles show equivalent latitudes of the polar night jet axis. A solid curve shows the equivalent latitude of Syowa Station. (b) Time series of gravity wave potential energy (a solid curve) and background wind speed (a broken curve) (Yoshiki *et al.*, 2004).

3. 成層圏極渦と対流圏擾乱に伴う南極下部成層圏の重力波の卓越

2002年3, 6, 10, 12月の各月に、それぞれ約80回連続で3時間ごとにラジオゾンデ観測を行った。観測に用いたのはヴァイサラ社製のRS80-15GHである。また、2002年3–12月までのNCEP/NCARの再解析データを用いて、重力波の背景場としての極渦の季節変化や成層圏循環について解析した。さらに、定常ラジオゾンデ観測データも用いて、集中観測期間を含む同期間中の重力波のエネルギー変化を調べた。その結果、3月の観測は極渦形成前、12月は極渦崩壊後、6月は極渦安定期であり、昭和基地は極渦の内側に位置していることがわかった。10月の観測は9月の終わりに起こった突然昇温で小さくなった極渦

が存在している時期であるが、プラネタリー波の活動により極渦の位置は不安定であり、昭和基地の極渦に相対的な位置も大きく変動していた。重力波の活動度としては、10月、12月の集中観測時は比較的低い時期であったが、3月は秋の平均的な時期、6月も冬の平均的な時期であった。

図7に、3月および6月の観測期間における、南北風の時間平均からの偏差の時間高度断面図を示す。3月には高度約10 km以上の成層圏で、時間とともに位相が下降する構造の卓越がきれいに見える。図には示さないが12月も同様である。これに対し、6月では位相構造がはっきりせず、位相の下降だけでなく上昇も混在しているように見える。同様な特徴は10月にも見られた。(図略)

そこで、統計的特徴を明らかにするため、周波数と鉛直波数の2次元のパワースペクトルを計算した。結果を図8に示す。鉛直の太線は低周波数側が1日、高周波数側が昭和基地の緯度での慣性周波数(約13時間周期)を示す。スペクトルの周波数は正としたので、鉛直波数が正の時位相は上向き伝播であり、負の時位相は下向き伝播である。背景風のドッ

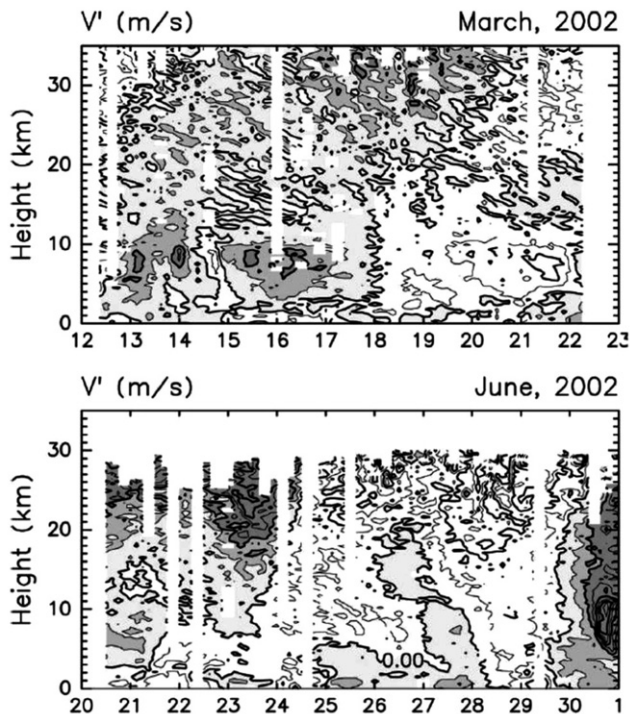


図7 2002年(上)3月、(下)6月の観測で得られた南北風。各高度の時間平均からのずれを示す。等値線間隔は5 m/s (Sato and Yoshiki, 2008)。

Fig. 7. Time height sections of meridional winds observed in March (top) and June (bottom) 2002. Plotted are deviations from the time mean at respective heights. Contour intervals are 5 m/s (Sato and Yoshiki, 2008).

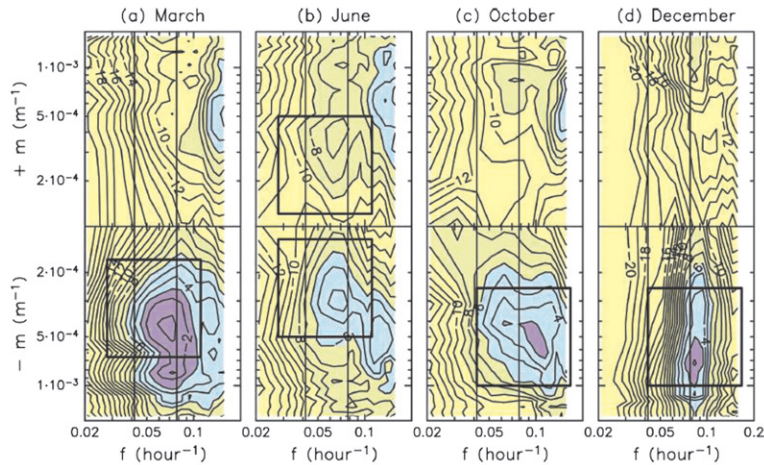


図8 2002年 (a) 3月, (b) 6月, (c) 10月, (d) 12月における南北風の周波数, 鉛直波数スペクトル. エネルギーコンテンツ表示. 単位は dB. 等値線間隔は 1 dB. 四角はホドグラフ解析を行ったスペクトル領域. 鉛直の2本の直線は, それぞれ1日, および慣性周期(約13時間)を表す (Sato and Yoshiki, 2008).

Fig. 8. Frequency and vertical wavenumber spectra of meridional wind fluctuations in (a) March, (b) June, (c) October and (d) December 2002 at Syowa Station in the energy content form. Contour intervals are 1 dB. The rectangles show the region in which the hodograph analysis was made. Two vertical lines show diurnal (1 day) and inertial period (about 13 h) (Sato and Yoshiki, 2008).

プラー効果が小さい時には, 重力波の力学理論から正の鉛直波数はエネルギー下向きを意味し, 負の鉛直波数はエネルギー上向きを意味する. 4つの観測期間とも負の鉛直波数成分が卓越している. 特に3月, 12月は顕著である. 12月には慣性周波数付近にピークが見られる. この特徴は, Sato *et al.* (1999) による高解像度気候モデルを用いた研究により明らかになった, 冬の極域と赤道域を除く各緯度での慣性周波数における重力波ピークの存在と調和的である. ここで重要なのは, 6月と10月には, 正の鉛直波数領域にも大きなスペクトル成分が存在することである.

極渦が安定していた6月に注目し, 四角で囲んだスペクトル領域の成分を取り出して, 正, 負の鉛直波数成分のそれぞれについて時間高度断面図を作成した. その結果が図9であり, 上図は下向き位相速度成分, 下図は上向き位相速度成分である. 2つの四角で囲んだ領域に矢印で示すように, 上図の下向き位相速度成分は波束(エネルギー)が上方伝播しており, 下図の上向き位相速度成分は波束が下方伝播している様子がわかる. その波束の元は上図, 下図ともほぼ同じ高度付近にあるように見える.

特に波束がきれいに見えた6月22日12時~23日21時のデータを使ってホドグラフ解析を行い, 重力波の水平波長や水平位相速度などのパラメータ推定を行った. 波のパラメータが有意に推定された事例の結果を図10に示す. 丸印, +印はそれぞれ上向き位相速度の

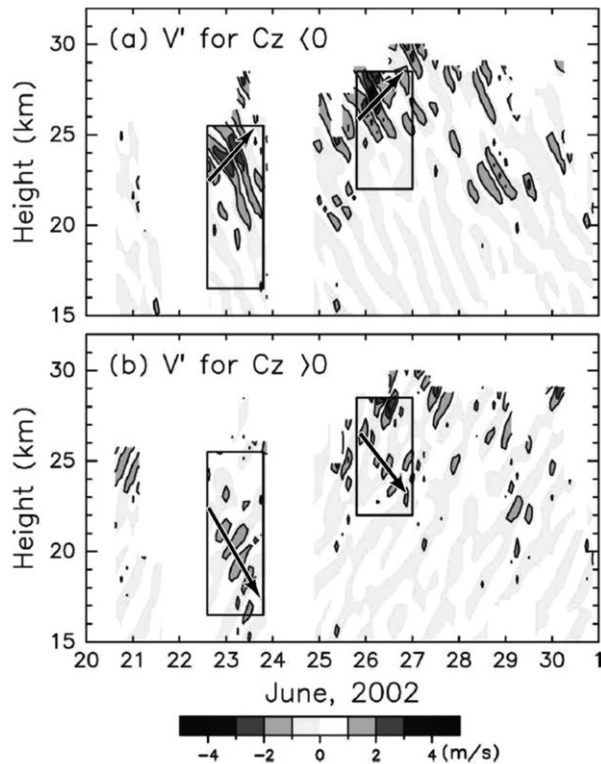


図9 2002年6月の重力波の時間高度断面図。(a)は位相速度下向き成分、(b)は位相速度上向き成分。波束の伝播方向を矢印で、ホドグラフ解析の領域を四角で表す。

Fig. 9. Time-height sections of gravity waves observed in June 2002. (a) Gravity waves having upward phase velocities and (b) those having downward phase velocities. The propagation direction of wave packets is shown by arrows. A hodograph analysis was made for the fluctuations in the regions denoted by rectangles.

事例、下向き位相速度の事例である。それぞれの平均水平波長は270 km, 380 kmと、比較的近い波長を持つことがわかった。水平位相速度はどちらも約5 m/sと推定され、その方向は、背景風の方角に対して直角右向きと、共通する特徴があることがわかった。また、背景風に直角の位相速度を持つことは、背景風の波の周期に及ぼすドップラーが小さいことも意味することに注意したい。水平波長および水平位相速度が等しいことから、上向き位相速度成分、下向き位相速度成分とも、同じような起源から発生した重力波であることが推定される。

この波の起源を特定するために、NCEP/NCAR再解析データを用いて、平衡からのずれを表わす二つのパラメータである局所ロスビー数および ΔNBE （非線形平衡方程式の残差項）を計算した。図11は、高度50 hPaにおける6月25日21時の分布である。等値線はジオポテンシャル高度を表す。これを見ると昭和基地（×印）の低緯度側に極夜ジェットが

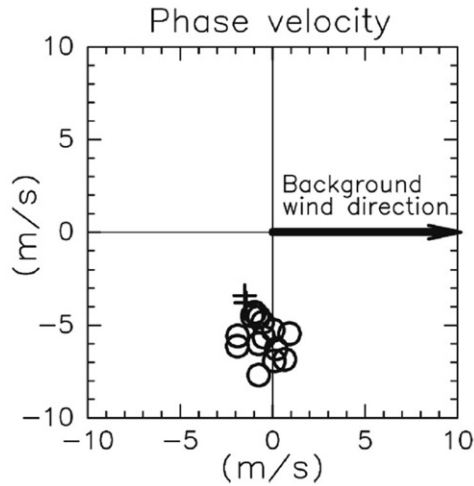


図 10 2002 年 6 月の事例についてのホドグラフ解析の結果得られた対地水平位相速度。背景風の風向を右向きにとっている。○と+はそれぞれ上向き、および、下向き位相伝播成分の結果。(Sato and Yoshiki, 2008)。

Fig. 10. Horizontal phase velocities relative to the ground estimated from the hodograph analysis for cases in June 2002. The rightward direction shows the background wind direction. Circles and cross marks show gravity waves with upward and downward phase propagation, respectively (Sato and Yoshiki, 2008).

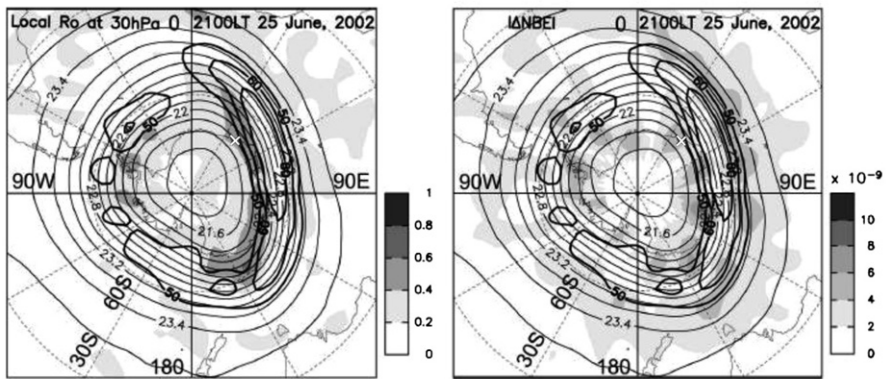


図 11 2002 年 6 月 25 日 21 時での 30 hPa における (左) 局所ロスビー数、(右) 非線形バランス方程式の残差項の絶対値のポーラステレオ図。NCEP/NCAR 再解析データによる。細い等値線はジオポテンシャル高度(km)、等値線間隔は 300 m。太い等値線は水平風の絶対値の等値線 (50, 60, 70 m/s)。×は昭和基地の位置 (Sato and Yoshiki, 2008)。

Fig. 11. Polar stereo projection maps of (left) the local Rossby number and (right) the absolute value of the residual of the nonlinear balance equation at 30 hPa at 2100 UTC 25 June 2002 based on NCEP/NCAR reanalysis data. Thin contours show geopotential height in km with an interval of 300 m. Thick contours show absolute values of horizontal winds (50, 60, 70 m/s). Cross marks show the location of Syowa Station (Sato and Yoshiki, 2008).

存在しており、局所ロスビー数の大きな領域が見られる。昭和基地で観測された重力波は、この極夜ジェット領域から直角右向き、すなわち、昭和基地向きに発生したものをとらえたものと推定できる。

他の流体内部での重力波発生メカニズムとして、シア不安定が考えられるが、リチャードソン数を計算したところ 6.3 と得られた。これは不安定となる最大値 0.25 よりかなり大きい。したがって、シア不安定により発生したとは考えにくい。

この重力波は、Sato *et al.* (1999) で行った T106 L53 の水惑星モデルのシミュレーションデータに現れた、極夜ジェットに伴うと考えられる重力波とよく似ていた。このモデルの水平分解能は約 120 km、鉛直グリッド間隔は 600 m である。図 12 にモデルで得られた適当な時刻における高度 25 km 付近の水平発散成分のポーラステレオ図を示す。等値線はジオポテンシャル高度である。極渦がプラネタリー波により大きくゆがんでいる様子が見える。そのゆがみの大きなところで大きな水平発散成分が見られる。同高度同時刻での局所ロスビー数および ΔNBE を計算したところ、水平発散成分の大きなところで、平衡から大きくずれていることがわかった。すなわち、これらの重力波は、場が自発的に地衡風平衡からはずれ、平衡に戻る過程、自発的調節過程で発生したものと考えられる。

これらの結果は次のようにまとめられる。2002 年に行った昭和基地でのラジオゾンデ集中観測データを用いて、重力波の季節特性を調べた結果、オゾンホールが存在する極渦が安定した時期および崩壊期に、エネルギー下向きの重力波が多いことがわかった。局所ロ

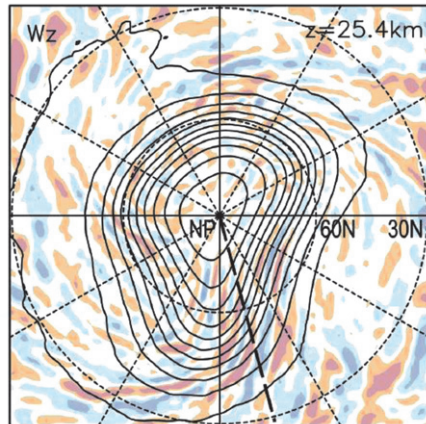


図 12 Sato *et al.* (1999) による水惑星実験でシミュレートされた高度 25.4 km における水平発散成分。符号の違いは暖色および寒色で区別してある。等値線はジオポテンシャル高度で等値線間隔は 200 m (Sato and Yoshiki, 2008)。

Fig. 12. A map of horizontal wind divergence at a height of 25.4 km obtained from a high-resolution aqua planet experiment by Sato *et al.* (1999). Different sign is distinguished with warm and cool colors. Contours show geopotential height with an interval of 200 m (Sato and Yoshiki, 2008).

スピー数の解析およびホドグラフ解析による重力波パラメータの推定の結果、これは極渦周辺での自発的調節過程により発生した可能性が高いことが分かった。先に行われた高解像度気候モデルを用いたシミュレーション結果もこれと調和的であった。

4. 結 語

本プロジェクトの期間中、ラジオゾンデの定常観測および集中研究観測データに基づく重力波解析を行い、その起源を特定した。成層圏冬～春季においては、極渦縁辺での重力波の卓越が見られ、これはゆがんだ極渦に伴う流れの非平衡領域から重力波が発生しているためと考えられた。また、対流圏直上では、ブロッキングや総観規模擾乱に伴う低緯度大気の高緯域への流入時に重力波の卓越が見られ、これも同じく流れの自発的調節過程に伴い発生したものと推定された。今後、このような重力波が平均風へ及ぼす影響を定量的に調べる必要がある。高解像度気候モデルの有効利用に加え、現実大気における実態を把握するため、近々昭和基地に設置予定の大型大気レーダーによる運動量フラックス観測が大いに期待される。

謝 辞

本報告を執筆するに当たり、吉識宗佳さんの協力をいただきました。

文 献

- Alexander, M.J. and Teitelbaum, H. (2007): Observation and analysis of a large amplitude mountain wave event over the Antarctic Peninsula. *J. Geophys. Res.*, **112**, D21103, doi:10.1029/2006JD008368.
- Alexander, M.J., Geller, M., McLandress, C., Polavarapu, S., Preusse, P., Sassi, F., Sato, K., Eckermann, S., Ern, M., Hertzog, A., Kawatani, Y., Pulido, M., Shaw, T.A., Sigmond, M., Vincent, R. and Watanabe, S. (2010): Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1103–1124.
- Baumgaertner, A.J.G. and McDonald, A.J. (2007): A gravity wave climatology for Antarctica compiled from Challenging Minisatellite Payload/Global Positioning System (CHAMP/GPS) radio occultations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D05103, doi:10.1029/2006JD007504.
- Hamilton, K., Wilson, R.J. and Hemler, R.S. (1999): Middle atmosphere simulated with high vertical and horizontal resolution versions of a GCM: improvement in the cold pole bias and generation of a QBO-like oscillation in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 3829–3846.
- Hei, H., Tsuda, T. and Hirooka, T. (2008): Characteristics of atmospheric gravity wave activity in the polar regions revealed by GPS radio occultation data with CHAMP. *J. Geophys. Res.*, **113**, D04107, doi:10.1029/2007JD008938.
- Jiang, J.H., Wang, B., Goya, K., Hocke, K., Eckermann, S.D., Ma, J., Wu, D.L. and Read W.G. (2004): Geographical distribution and interseasonal variability of tropical deep convection: UARS MLS observations and analyses. *J. Geophys. Res.*, **109**, D03111, doi:10.1029/2003JD003756.
- Nash, E.R., Newman, P.A., Rosenfield, J.E. and Schoeberl, M.R. (1996): An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity. *J. Geophys. Res.*, **101** (D5), 9471–9478.

- Pfenninger, M., Liu, A.Z., Papen, G.C. and Gardner, C.S. (1999): Gravity wave characteristics in the lower atmosphere at south pole. *Geophys. Res.*, **104** (D6), 5963–5984.
- Preusse, P., Dörnbrack, A., Eckermann, S.D., Riese, M., Schaefer, B., Bacmeister, J.T., Broutman, D. and Grossmann, K.U. (2002): Space-based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA 1: sensitivity, analysis method, and a case study. *J. Geophys. Res.*, **107** (D23), 8178, doi:10.1029/2001JD000699.
- Sato, K. (2000): Sources of gravity waves in the polar middle atmosphere. *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **14**, 233–240.
- Sato, K., and Yoshiki, M. (2008): Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa Station. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3719–3735, doi:10.1175/2008JAS2539.1
- Sato, K., Kumakura, T. and Takahashi, M. (1999): Gravity waves appearing in a high-resolution GCM simulation. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1005–1018.
- Sato, K., Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K. and Takahashi, M. (2009): On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19801, doi:10.1029/2009GL039908.
- de la Torre, A. and Alexander, P. (2005): Gravity waves above Andes detected from GPS radio occultation temperature profiles: Mountain forcing? *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17815, doi:10.1029/2005GL022959.
- de la Torre, A., Alexander, P., Llamedo, P., Menéndez, C., Schmidt, T. and Wickert, J. (2006): Gravity waves above the Andes detected from GPS radio occultation temperature profiles: Jet mechanism?. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24810, doi:10.1029/2006GL027343.
- Vincent, R.A., Hertzog, A., Boccara, G. and Vial, F. (2007): Quasi-Lagrangian superpressure balloon measurements of gravity-wave momentum fluxes in the polar stratosphere of both hemispheres. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L19804, doi:10.1029/2007GL031072.
- Watanabe, S., Sato, K. and Takahashi, M. (2006): A general circulation model study of the orographic gravity waves over Antarctica excited by katabatic winds. *J. Geophys. Res.*, **111**, D18104, doi:10.1029/2005JD006851.
- Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., Takahashi, M. and Sato, K. (2008): General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12110, doi:10.1029/2008JD010026.
- Wu, D.L. and Jiang, J.H. (2002): MLS observations of atmospheric gravity waves over Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), 4773, doi:10.1029/2002JD002390.
- Yoshiki, M. and Sato, K. (2000): A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, **105** (D14), 17995–18011.
- Yoshiki, M., Kizu, N. and Sato, K. (2004): Energy enhancements of gravity waves in the Antarctic lower stratosphere associated with variations in the polar vortex and tropospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, **109**, D23104, doi:10.1029/2004JD004870.