

新しい3次元波活動度フラックスを用いた 2018 年 2 月北半球大規模突然昇温の解析結果

原田やよい*(気象研究所), 佐藤薫(東京大学), 木下武也(JAMSTEC),
安井良輔(東京大学), 廣岡俊彦(九州大学), 直江寛明(気象研究所)

1 はじめに

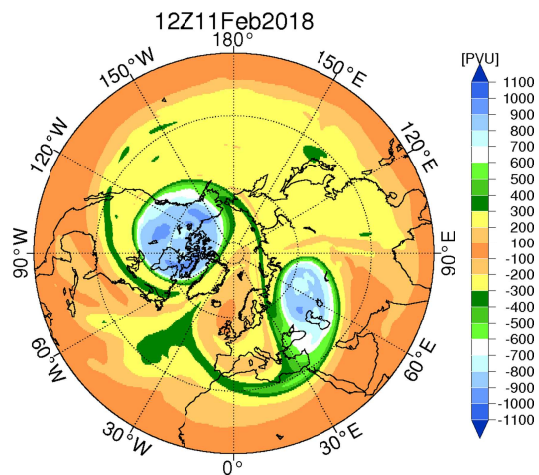
2018 年 2 月に東西波数 2 (WN2) 型の成層圏大規模突然昇温 (MSSW) が発生し、極渦の分裂が観測された (第 1 図)。極渦の分裂が発生したのは 2009 年 1 月後半に発生した大規模突然昇温 (MSSW09) 以来、実に 9 年ぶりのことである。そこで本研究では、気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) を用いて MSSW18 発生期間における成層圏および対流圏循環場を解析し、過去の WN2 型 MSSW 事例との比較を行う。特に惑星規模波動の解析には、Kinoshita and Sato (2013a, 2013b) によって開発された新しい 3 次元波活動度フラックス (3D-flux-W) を用いる。これまで成層圏の惑星規模波動の解析には Plumb (1985) に基づく波活動度フラックス (Plumb's WAF) が多く用いられてきたが、同フラックスの導出には、対象とする波動のスケールを定常ロスビー波に限定する等の制限が設けられている。このことは、基本場が西風の場合にのみ計算可能であることを意味する。一方、3D-flux-W はプリミティブ方程式系に基づいて導出されており、波束の大きさ、方向を正確に記述可能なことに加えて、重力波からロスビー波までの幅広いスケールの波動の取り扱いが可能である。更に成層圏大規模突然昇温が発生した後に、極域で東風が広範囲に分布し持続するような場合においても、波束伝播の解析が可能となっている。

2 使用データおよび解析手法

使用したデータは、大気循環場については気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi et al. 2015) に加えて、米国航空宇宙局により打ち上げられた Aura 衛星搭載のマイクロ波放射計観測によりリトリバルされたデータセット (Aura MLS, Waters et al. 2006) を用いる。

惑星規模波動の解析には EPflux (Andrews et al., 1987) および第 1 章で述べた 3D-flux-W を用いた。また 3D-flux-W の計算において、位相依存性を取り除くため、拡張 Hilbert 変換 (Sato et al. 2013) を用いたほか、3D-flux-W の水平東西成分には基本場に擬運動量をかけたものを加えている (Harada et al. submitted)。

なお、大気要素から波成分を抽出する空間フィルタとしてランチョスフィルタ (Duchon, 1979) を用いている。



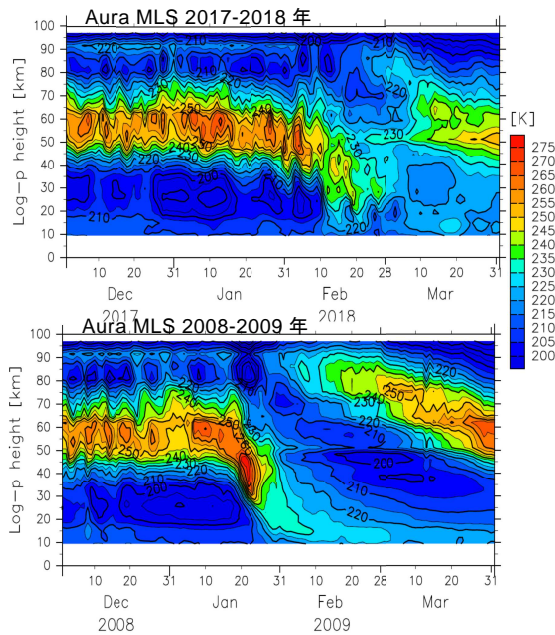
第 1 図 2018 年 2 月 11 日 12UTC の北半球における 850K 等温位面の渦位

3 解析結果

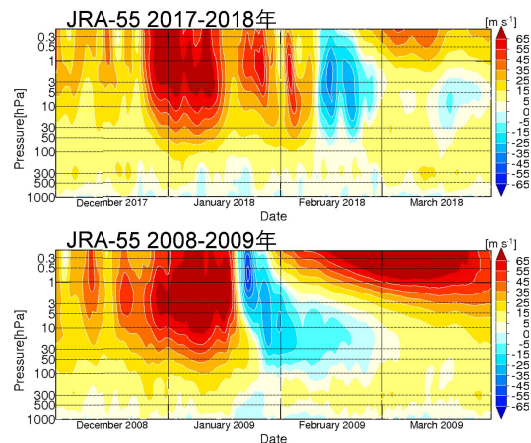
(1) MSSW18 の特徴と MSSW09 との比較

第 2 図に Aura MLS 観測からリトリバルされた帯状平均気温の時間-高度断面図を示す。MSSW18 が発生した 2018 年 2 月の昇温 (第 2 図上段) は MSSW09 が発生した 2009 年 1 月 (第 2 図下段) と比べて緩慢な傾向がみられる。また MSSW09 では成層圏界面の一時的な消失、高高度での圏界面の生成・降下が明瞭に見られるが、MSSW18 ではいずれも不明瞭となっている。

東西風についてしてみると(第3図)、MSSW18では(第3図上段)、MSSW発生直前に上部成層圏において西風がかなり弱まっており出現した東風域は2018年2月末まで持続している。また明瞭な2つの東風の極大がみられている。



第2図 AuraMLS観測からリトリーブされた帯状平均気温[K、80° -82.5° N平均]の時間-高度断面図。上段は2017/2018冬、下段は2008/2009冬をそれぞれ表す。



第3図 第2図に同じ、ただしJRA-55による帯状平均東西風(65° N)

一方、MSSW09ではMSSW発生直前まで西風が強く、MSSW発生と同時に急速に減速している。MSSW18、MSSW09のどちらも明瞭な極渦の分裂が観測された事例ではあるが、気温や東西風の経過はかなり異なっていることが分かる。

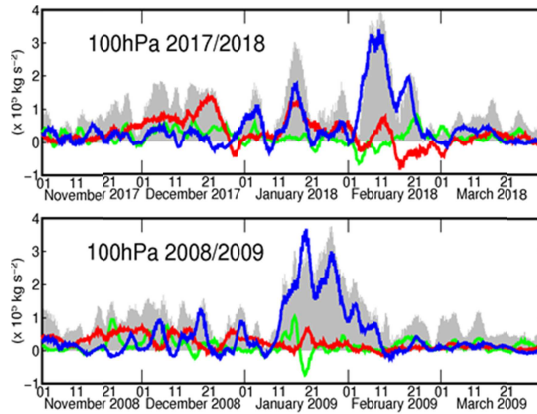
次に対流圏界面付近の惑星規模波動の鉛直伝播の経過を、100hPaのEPflux鉛直成分によりみてみると(第4図)、MSSW18では(第4図上段)、2018年2月10日頃に上方伝播のピークがみられ、その値は2009年1月のピーク(第4図下段)に匹敵する値となっているが、上部成層圏では2009年1月の半分程度だった(図省略)。つまりMSSW18は対流圏からMSSW09に匹敵する惑星規模波動の上方伝播があったが上部成層圏に到達するまでに惑星規模波動は何らかの要因によりMSSW09より多く減衰したと考えられる。

また2018年1月には極夜ジェットの減速、アリューシャン高気圧の強化に対応する上方伝播がみられている(第4図上段)一方、2009年1月(第4図下段)にはそのような上方伝播がみられないことは、前述の気温や東西風の経過の特徴と一致している。

(2) MSSW18期間中の日々の波束伝播

ここでは、MSSW18期間中の日々の波束伝播の特徴を述べる。まず第5図は北半球帯状平均場における惑星規模波束の鉛直伝播の様子を示しており、ベクトルはEPflux、陰影はEPfluxの収束・発散、等値線は帯状平均東西風を表している。MSSW18期間初めの2018年2月8日(第5図左)には、対流圏から明瞭な上方伝播がみられ、上部成層圏で弱いながら西風が分布しているにも拘わらず、波束は下部成層圏で収束してしまっている。対照的にMSSW09期間には、波束伝播は上部成層圏から成層圏界面付近に到達し、上部成層圏から下部中間圏におよぶ顕著な波束の収束がみられていた(図省略)。なお、

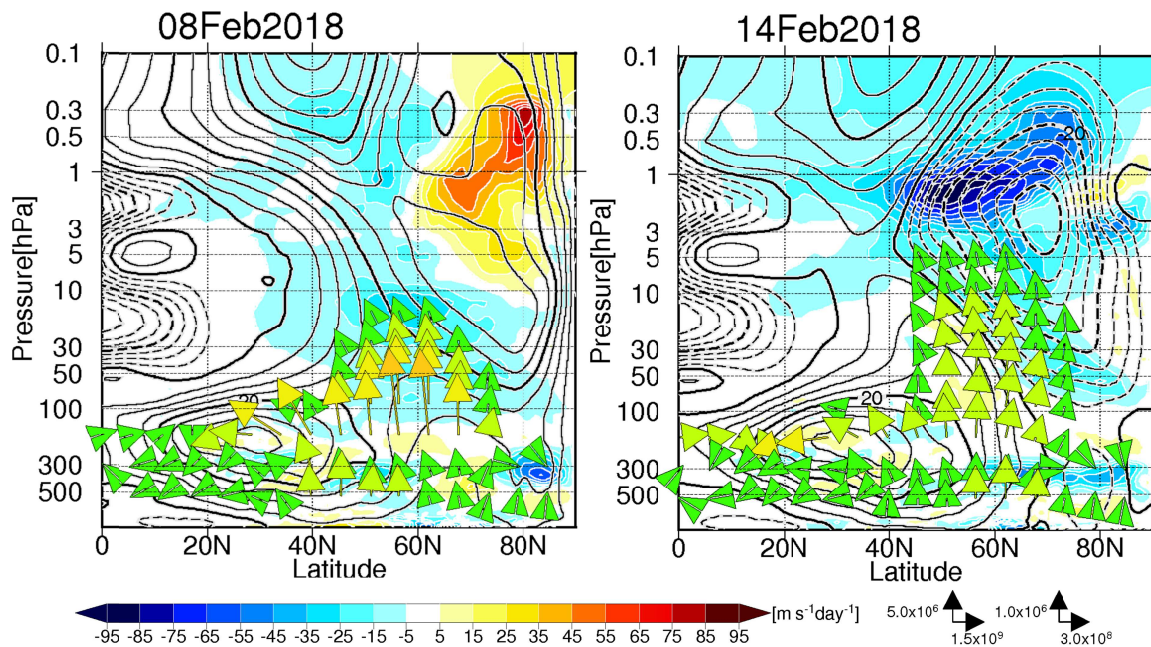
2018年2月11日以降は上部成層圏で東風が広く分布するようになるが(図省略)、依然として東風領域中でも波束の上方伝播が持続してみられ、非常に興味深い。第5図右にはMSSW18期間の中頃の2018年2月14日の波束伝播の様子を示す。上部成層圏では40N以北は全て



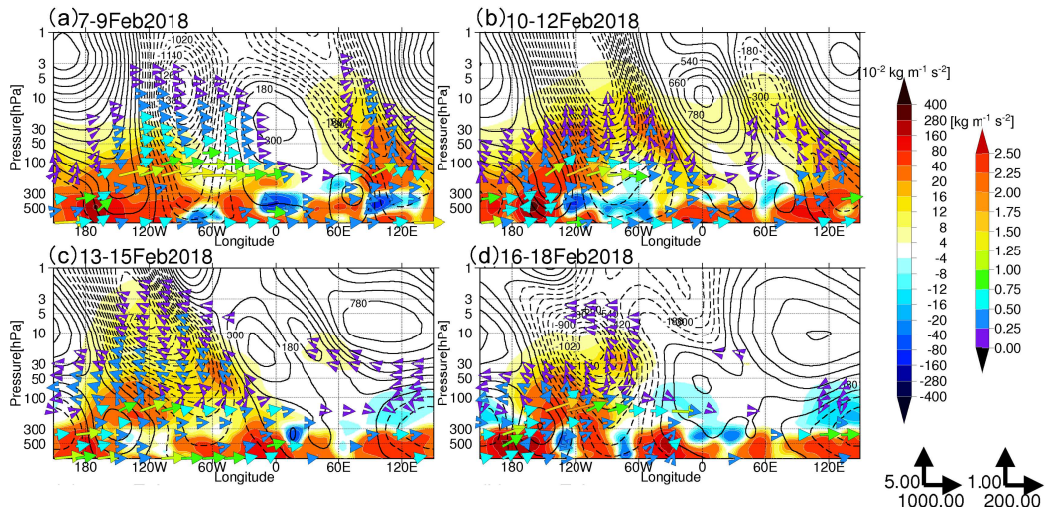
第4図 第3図に同じ、ただし100hPaにおけるEPflux鉛直成分(30-90N平均)の時系列図
赤線、青線および緑線は、それぞれWN1、WN2およびWN3に対応している。灰色は全波数を考慮したEPfluxの鉛直成分を表す。

東風領域となっているが、MSSW18期間初め(第5図左)より、むしろ多くの波束が上部成層圏へ伝播していることが分かる。

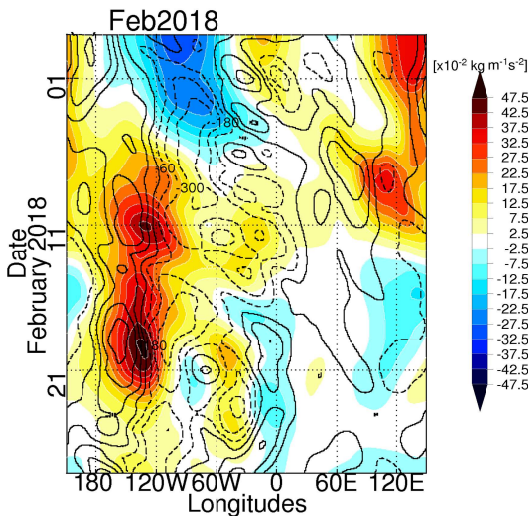
次に波束伝播の特徴を詳しく解析するため、MSSW18期間の3D-flux-Wおよびその鉛直成分(3-Dflux-W_z)を用いた波束伝播の分布を経度-高度断面図で示す(第6図)。2018年2月7~9日には(第6図a)、西半球と東半球の2か所に対流圏から成層圏への上方伝播がみられていた。しかし東半球の波束はアリューシャン高気圧の西縁で収束し上部成層圏にはそのほとんどが伝播せず、その後は減衰してしまった(第6図b、c)。一方、西半球側の波束については、その後更に強まり、上部成層圏へ到達している(第6図b)。その後も西半球側からの上方伝播は持続してみられていた(第6図c、d)。西半球側の上方伝播の強化には、対流圏上層のアラスカ上空(140W°付近)におけるリッジの発達に同期しており、同領域では2018年2月にリッジの発達が繰り返し発生していた(第7図)。



第5図 2018年2月8日(左)および14日(右)の北半球での惑星規模波束の鉛直伝播の様子
ベクトルはEPflux[kg s⁻²]、陰影はEPfluxの収束・発散、等値線は帯状平均東西風を表し、等値線間隔は5m s⁻¹。

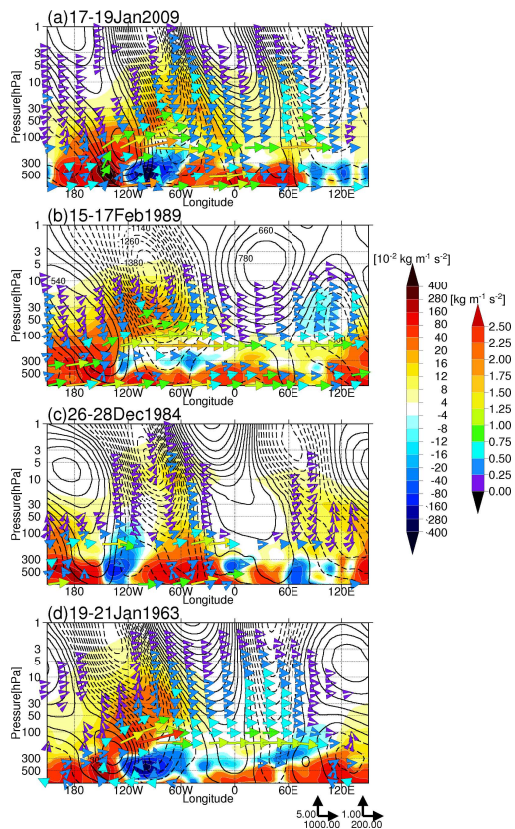


第 6 図 2018 年 2 月 7～18 日におけるジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差(等値線)、3D-flux-W_z (陰影)および 3D-flux-W(ベクトル)の経度-高度断面図(45°-75°N 平均、3 日平均)
等値線間隔は 120gpm。70hPa より下層、上層におけるベクトルのスケールをパネルの右下にそれぞれ示す。



第 7 図 2018 年 2 月における 45° - 75° N 平均した 250hPa 高度 平年 偏差 (等 値 線) およ び 100hPa 3D-flux-W_z (陰 影) の 経 度 - 時 間 断 面 図

第 8 図に過去の WN2 型の MSSW 発生事例における波束の上方伝播ピーク時の経度-高度断面図を示す。西半球側からの上方伝播が全ての事例でみられており、対流圏上層のアラスカ付近のリッジから波束が射出されている点も共通している(ただし 1984 年 12 月の事例を除く)。



第 8 図 第 6 図に同じ、ただし期間は(a)2009 年 1 月 17～19 日、(b)1989 年 2 月 15～17 日、(c)1984 年 12 月 26～28 日および(d)1963 年 1 月 19～21 日

(3) 成層圏における波束伝播の減衰

これまで述べてきたように MSSW18 期間には対流圏から成層圏に MSSW09 に匹敵するような顕著な惑星規模波動の波束伝播がみられており、その伝播経路も過去の WN2 型の MSSW 発生事例、特に MSSW09 と共通して西半球側からみられていた。しかしながら MSSW18 期間前半には、上部成層圏での波束伝播が MSSW09 に比べて弱く、昇温は緩慢であった。ここではその原因について考察する。第 9 図には、2018 年 2 月 10~12 日および 2009 年 1 月 18~20 日平均の上部成層圏における様々な波数帯で計算した 3D-flux-W_z の経度分布を示す。どちらの事例も東西波数 2 以下のみを考慮した場合(青線、WN<=2)には 3D-flux-W_z の局所的なピーク(同図の灰色域を参照)が下部成層圏だけではなく上部成層圏においてもほとんど表現できておらず、3D-flux-W_z の経度分布を適切に表現するには、少なくとも東西波数 7 から 8 以上を考慮しなければならないと考えられる。また第 10 図には第 9 図と同時期のランチョスフィルターを施した風南北成分の経度-高度断面図を示す。風南北成分の東西波数 2 成分についてみると(第 10 図 a、b)、いずれの事例においても波の位相の鉛直方向の西傾が明瞭にみられるものの、その分布は東西に一樣である。

ここで再び 2018 年 2 月 10-12 日における 3D-flux-W_z の分布(第 9 図 a、c、e および g)を詳しくみてみる。まず下部成層圏の 120° W 付近に着目すると(第 9 図 e、g)、50hPa では 3D-flux-W_z の最大値が $30 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ なのに対して、30hPa では $25 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ に減少している。同領域における東西波数 3 以上の小スケールな波の位相は弱い東傾となっている(第 10 図 c)。更に上部成層圏では、60° W 付近に明瞭な 3D-flux-W_z の減衰が見られ(第 9 図 a、c)、同領域では小スケールな波は等価順圧的となっている。一方 2009 年 1 月 18-20 日の事例では(第 9 図 b、d、f および h、第 10 図 b、d)、

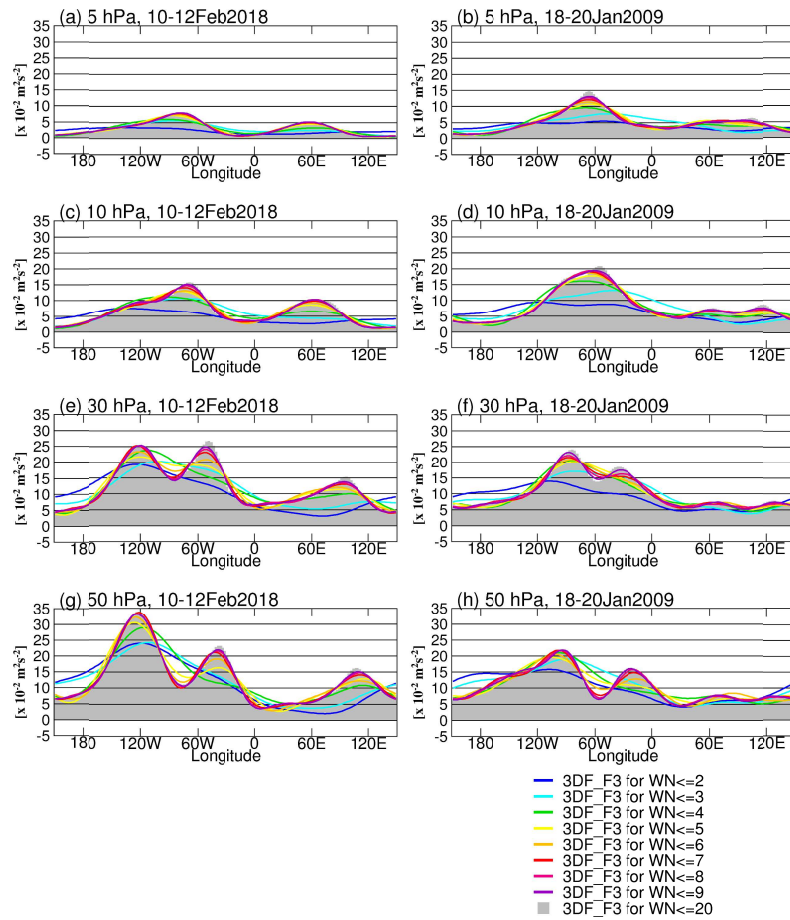
3D-flux-W_z の減衰が少なく、小スケールな波の位相の明瞭な西傾が上部成層圏で特に明瞭にみられ、2018 年 2 月の事例とは対照的である。結果的に 5hPa における 2018 年 2 月 10-12 日の 3D-flux-W_z の最大値は 2009 年 1 月 18-20 日のおよそ半分程度となった。

南半球成層圏において、東西波数 4~7 のいわゆる中間規模波動と呼ばれる波動の存在は 1970 年代から指摘されてきた(Kao et al. 1970; Randel and Stanford 1985; Miles and Grose 1986)。北半球成層圏においても中間規模波動の存在は以前から指摘され、解析されてきたものの(Hirooka et al. 1988; Sato et al. 2000)、MSSW 発生における中間規模波動の役割についてはこれまで指摘されてこなかった。しかしながら、上記の解析結果から、中間規模波動もしくはそれよりも小スケールな波動の状態は、MSSW18 における成層圏中の波束の減衰に重要であったと考えられる。

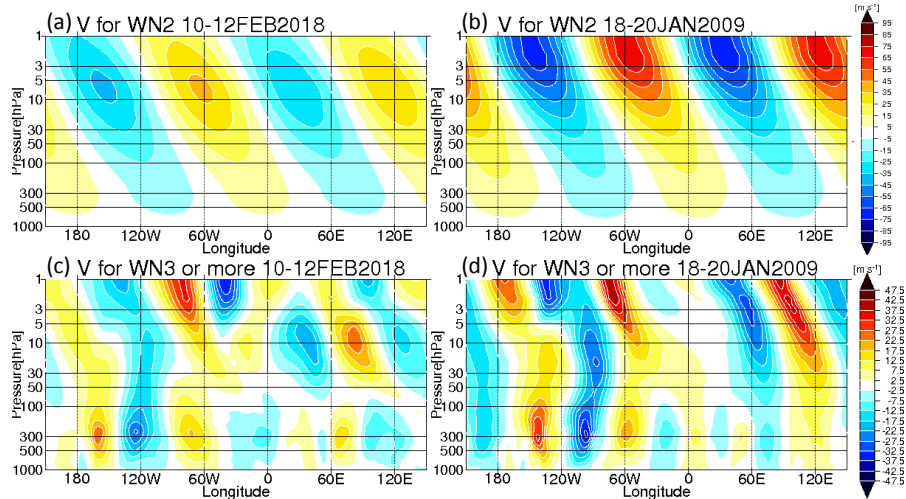
4 まとめ

2018 年 2 月に発生した WN2 型の MSSW 事例、MSSW18 について解析を行った結果、2009 年 1 月後半に発生した MSSW09 と比較して対流圏から成層圏へ伝播した惑星規模波動が同じくらい顕著であったにも拘わらず、昇温は緩慢で成層圏界面の消失、高高度での圏界面の生成・降下は MSSW09 と比較して不明瞭であった。そのような状況においても極渦の分裂が明瞭にみられたのは、MSSW 発生前に西風が十分に減速されていたため、少ない東風運動量の伝達でも循環場の反転が可能であったと考えられる。こうした点を含めて、MSSW18 は MSSW09 とはかなり異なる経過を示していたといえる。

日々の波束伝播について解析を行った結果、MSSW18 期間初めには、帯状平均場でみると上部成層圏で西風が分布しているのにも拘わらず、波束は下部成層圏で収束してしまっていた。この時の波束の経度分布をみると、東半球側からの



第 9 図 各波長帯について計算された 3D-flux- W_z ($10^{-2}m^2s^{-2}$ 、 $45^{\circ} - 75^{\circ}$ N 平均)の経度分布図
 (a), (b) は 5 hPa, (c), (d) は 10 hPa, (e), (f) は 30 hPa, および (g), (h) は 50 hPa 気圧面での計算結果を、左列は 2018 年 2 月 10-12 日、右列は 2009 年 1 月 18-20 日の期間の計算結果をそれぞれ表す。



第 10 図 第 9 図に同じ。ただしランチョスフィルターを施した風南北成分 ($m s^{-1}$ 、 $45^{\circ} - 75^{\circ}$ N 平均)の経度-高度断面図
 (a), (b) は東西波数 2、(c), (d) は東西波数 3 以上の成分をそれぞれ表す。

明瞭な上方伝播がアリューシャン高気圧の西縁で収束していた(Harada and Hirooka 2017)。その後、西半球側からの波束の上方伝播が卓越するようになり、上部成層圏で東風が広く分布するようになるが(図省略)、依然として東風領域中でも波束の上方伝播が持続してみられた。このときの鉛直伝播の水平分布は局所的で西半球側で持続的にみられていた。この特徴は過去のWN2型のMSSW事例とも一致しており、アラスカ付近の対流圏上層のリッジから波束が射出されていたことも1984年12月の事例を除いて一致していた。

更に、MSSW18でみられた成層圏における波束伝播の減衰について詳細な解析を行った結果、小スケールな波動の鉛直構造がMSSW18における成層圏中の波束の減衰に重要であることが分かった。小スケールな波動の発生要因として、下部成層圏では対流圏からの伝播、上部成層圏では強い極夜ジェット軸付近の順圧不安定などが考えられる(Matsuno and Hirota 1966; Phister 1979)が、さらなる解析が必要である。

参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. *Academic Press, Orland*, 489 pp.
- Barriopedro, D., and N. Calvo, 2014: On the relationship between ENSO, stratospheric sudden warmings, and blocking. *J. Climate*, **27**, 4704–4720.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Met.*, **18**, 1016–1022.
- Harada, Y., and T. Hirooka, 2017: Extraordinary features of the planetary wave propagation during the boreal winter 2013/2014 and the zonal wave number two predominance. *J. Geophys. Res.*, **122**, 11,374–11,387.
- Harada, Y., K. Sato, T. Kinoshita, R. Yasui, T. Hirooka, and H. Naoe; submitted to *J. Geophys. Res.*
- Hirooka, T., Kuki, T., & Hirota, I. (1988). An intercomparison of medium-scale waves in the Northern and Southern Hemispheres. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **66**, 857–868.
- Kao, S.-K., Jenne, R. L., & Sagendorf, J. F. (1970). The kinetic energy of the large-scale atmospheric motion in the wavenumber-frequency space: II. Mid-troposphere of the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **27**, 1008–1020.
- Kinoshita, T., & Sato, K. (2013a). A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby Waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70**, 1577–1602.
- Kinoshita, T., & Sato, K. (2013b). A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70**, 1603–1615.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Matsuno, T., & Hirota, I. (1966). On the dynamical stability of polar vortex in wintertime. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **44**, 122–128.
- Miles, T., & Grose, W. L. (1986). Transient medium-scale wave activity in the summer stratosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **67**, 674–686.
- Pfister, L. (1979). A Theoretical Study of Three-Dimensional Barotropic Instability with Applications to the Upper Stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **36**, 908–920.
- Plumb, R. A., 1985: On the three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217–229.
- Randel, W. J., & Stanford, J. L. (1985). An observational study of medium-scale wave dynamics in the Southern Hemisphere summer. Part I: Wave structure and energetics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **42**, 1172–1188.
- Sato, K., Yamada, K. & Hirota, I. (2000). Global characteristic of medium-scale waves observed in ECMWF operational data. *Mon. Weather Rev.*, **128**, 3808–3823.
- Sato, K., Kinoshita, T., & Okamoto, K. (2013). A new method to estimate three-dimensional residual-mean circulation in the middle atmosphere and its application to gravity wave-resolving general circulation model data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70**, 3750–3779.
- Waters, J. W., and Coauthors (2006). The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 1075–1092.