

# 2021年1月に発生した北半球大規模突然昇温における惑星規模波束伝播の特徴

原田やよい\*(気象研究所), 佐藤薫(東京大学), 木下武也(JAMSTEC), 廣岡俊彦(九州大学)

## 1 はじめに

2021年1月に発生した成層圏大規模突然昇温(MSSW21)における大気循環場の特徴を、気象庁第3次長期再解析(Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; JRA-3Q, [Kosaka et al. in preparation](#))を用いて解析する。特に惑星規模波束伝播については3次元波活動度フラックス(3D-flux-W, [Kinoshita and Sato 2013a, 2013b](#); [Sato et al. 2013](#); [Harada et al. 2019](#))を用いる。

## 2 使用データおよび解析手法

解析に使用するJRA-3Qのデータ同化システムでは、数値予報モデルの鉛直レベルを100層まで上げ(最上層は0.01hPa)、[Scinocca\(2003\)](#)に基づく非地形性重力波スキームを導入している。JRA-3Q気温や東西風の経過を気象庁55年長期再解析(JRA-55, [Kobayashi et al. 2015](#))と比較する。これらに加えて、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リム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。

上述の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。

3D-flux-Wに加えて、惑星規模波動の解析にはプリミティブ方程式系に基づくEPflux([Andrews et al., 1987](#))を用いる。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

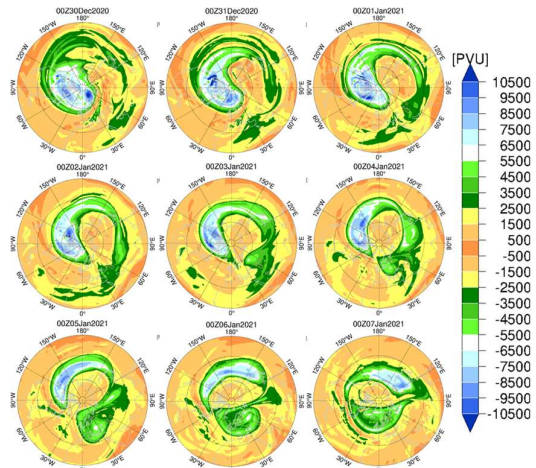
動量をかけたものを加えている([Harada et al. 2019](#))。

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。

## 3 解析結果

### (1) MSSW21の概況

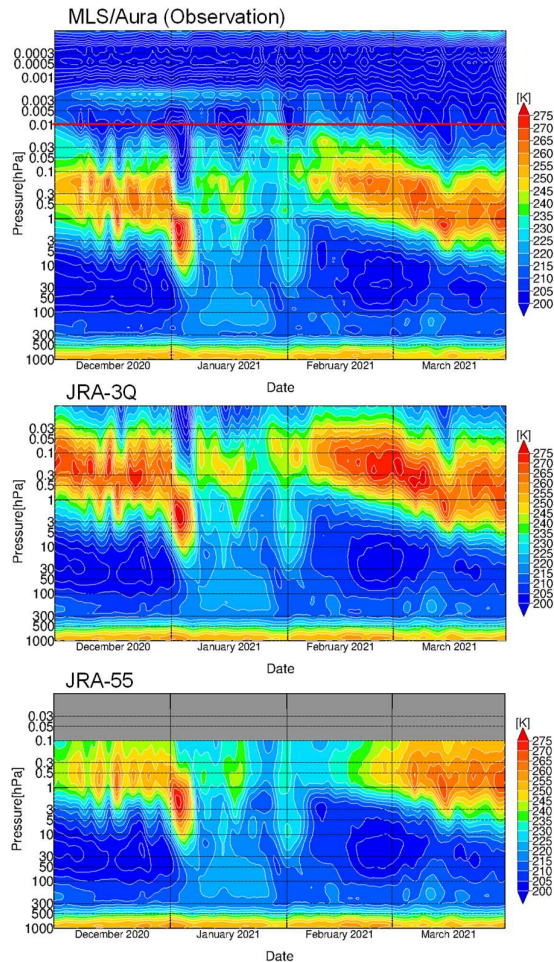
第1図に等温位面渦位でみた上部成層圏(2~3hPa気圧面に相当)の循環場の経過を示す。2020年12月末には極渦に対応する高渦位の西半球中緯度へのずれがみられ、この時点では東西波数1(WN1)の波動の卓越が示唆される。2021年1月になると極付近では低渦位が優勢となり、それに分断されるように極渦はいったん分裂し東半球にも高渦位域がみられるようになっていく。このことはWN1の卓越後により大きな東西波数の波動が発達した可能性を示唆している。



第1図 2020年12月30日00UTC~2021年1月7日00UTCまでの北半球1500K等温面の渦位  
単位はPVU(1PVU =  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ )。

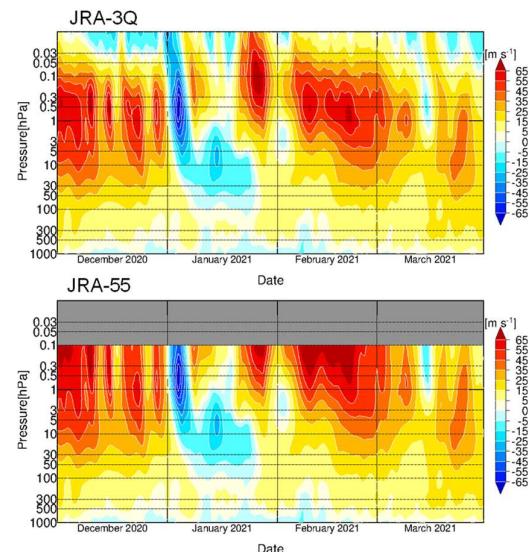
第2図にMLS/Aura観測からリトリバルされた気温とJRA-3QおよびJRA-55により解析された気温の経過の比較を示す。MLS/Aura観測(第2図上段)によると、2020年12月中に数回

小さな昇温が生じた後、12月末から2021年1月初めにかけて約50Kの昇温が発生している。JRA-3Q(第2図中段)では、成層圏内の昇温発生時に同時にみられる中間圏の降温が明確に表現されている。成層圏圏界面付近に高温バイアスがみられるものの、12月中の小さな昇温や成層圏界面の高高度での再生成・降下の経過はMLS/Aura観測と概ね一致している。一方、JRA-55(第2図下段)では、上部成層圏の昇温は表現されているものの中間圏の降温はほとんどみられない他、12月中の小さな昇温などの成層圏圏界面付近の気温変動の表現がMLS/Aura観測やJRA-3Qに比べると寡少となっている。



第2図 2020年12月1日から2021年3月31日までのMLS/Aura観測、JRA-3QおよびJRA-55の帯状平均気温 [80° -82.5° N 平均]の時間-高度断面図

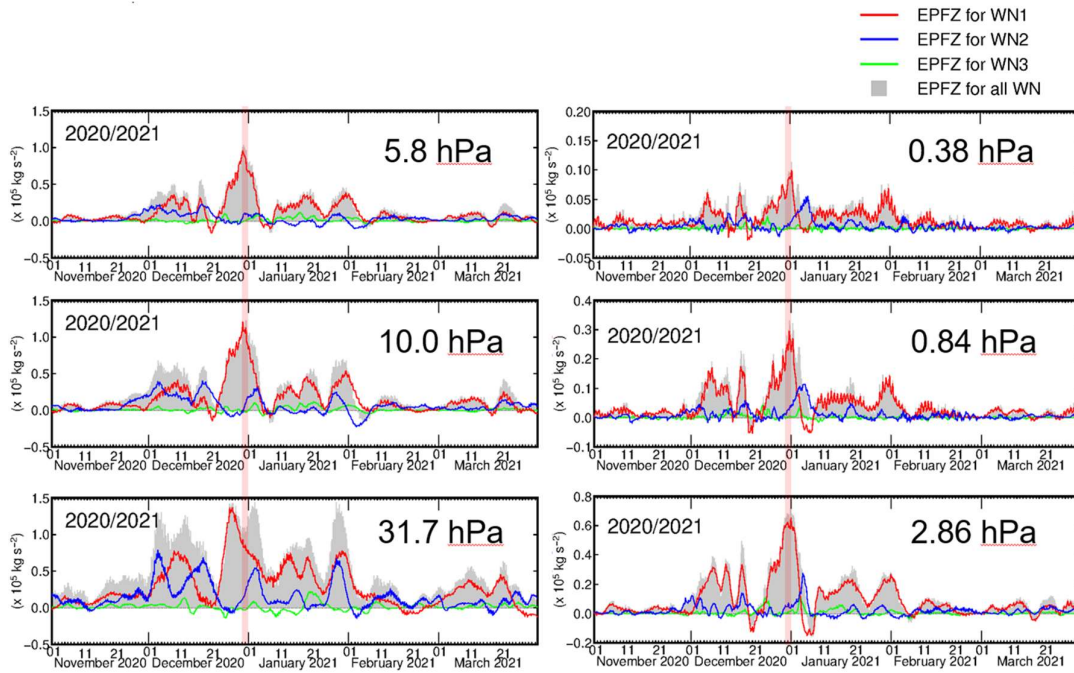
東西風についても比較すると(第3図)、JRA-3Q(第3図上段)、JRA-55(第3図下段)のどちらにおいても昇温に伴って東西風が1月初めに東風に転じ、MSSWと解析されている。東風のピークは気温のピークにやや遅れており、1月4日に $70\text{ m s}^{-1}$ 超に達した。成層圏の東風は1月中旬に再度強化され、1月下旬まで持続している。JRA-3Qでは成層圏圏界面から中間圏にかけての西風がJRA-55より弱く表現されており、前述のJRA-3Qの高温バイアスに関連している可能性がある。



第3図 第2図に同じ、ただしJRA-3QおよびJRA-55による帯状平均東西風(65° N)

## (2) 惑星規模波束の伝播状況

ここでは、MSSW21期間中の惑星規模波束の伝播状況について述べる。対流圏界面付近の惑星規模波束の鉛直伝播の経過を、EPflux鉛直成分(EPflux<sub>z</sub>)で確認すると(第4図)、上部成層圏の上方伝播のピークは12月末にみられ、上部成層圏ではWN1が卓越しているが5hPaより上層では(第4図右列図)、1月初めにWN1の上方伝播は急速に減衰している。それに加えてWN2、WN3の上部成層圏への伝播もみられているが、その上方伝播は5hPa付近でいったん不明瞭となっている。一方、5hPaより上層では1月



第4図 EPflux<sub>z</sub>(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<sub>z</sub> 表す。

上旬に明瞭な WN2 の上方伝播のピークが解析されている。

第5図には1月3日の成層圏における東西波数別惑星規模波束の伝播経路を示す。全波数の EPflux と WN1 の EPflux を比較すると、WN1 は 1~3hPa の東風領域内で上方伝播が弱まり、収束している。一方、WN2 や WN3 は、同領域より下層で明瞭な EPflux 発散、上方伝播がみられ、1hPa よりも上層で収束している。WN2 の惑星規模波束の伝播経路を詳しくみると、対流圏界面中緯度から伝播してきた波束は 10~30hPa 付近で低緯度方面に向きを変えて伝播しており、高緯度の極夜ジェット付近の東風加速に直接的な寄与は低いと考えられる。また WN3 についても 60N° 以北で下部成層圏から上部成層圏への弱い波束伝播がみられるものの、5~10hPa 付近で収束しており、更なる上層への伝播はみられていない。このことから上述の 1~3hPa 付近における WN2 や WN3 の明瞭な発散は下部成層圏から

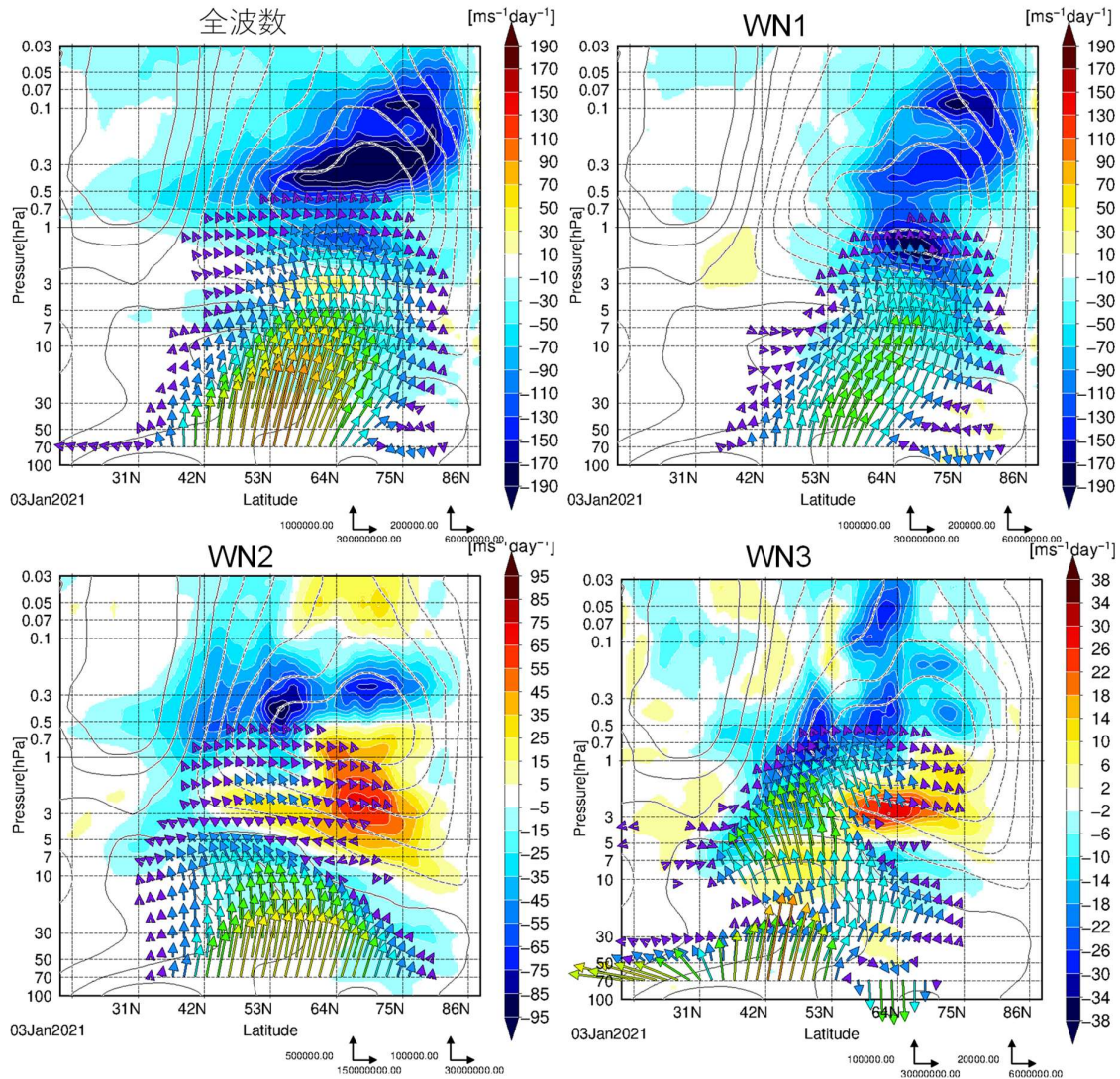
の上方伝播ではなく同領域で生成・発達したことを示唆している。

次に 3D-flux-W の鉛直成分(3D-flux-W<sub>z</sub>)を用いて惑星規模波束の鉛直伝播の経度分布の時間経過(第6図)をみると、12月中旬や下旬にみられる局所的な上方伝播極大の経度帯は期間を通じて 120° E 付近であり、下部成層圏から上部成層圏にかけて概ね一致している。一方 5hPa より上層では、12月末から1月初めにそれまでと異なる経度帯で東西非一様に上方伝播が強化されている。この時期の上部成層圏では、下層から上方伝播してきた波束とは別の惑星規模波束が生成され上方伝播していることを示唆している。第7図に 1hPa、0.3hPa 気圧面において、12月末から1月初めの 3D-flux-W<sub>z</sub> の水平分布を示す。いずれの気圧面も 12月27~29日には全体的に弱い上方伝播が分布していたが、12月30日~1月1日に全経度帯において強化



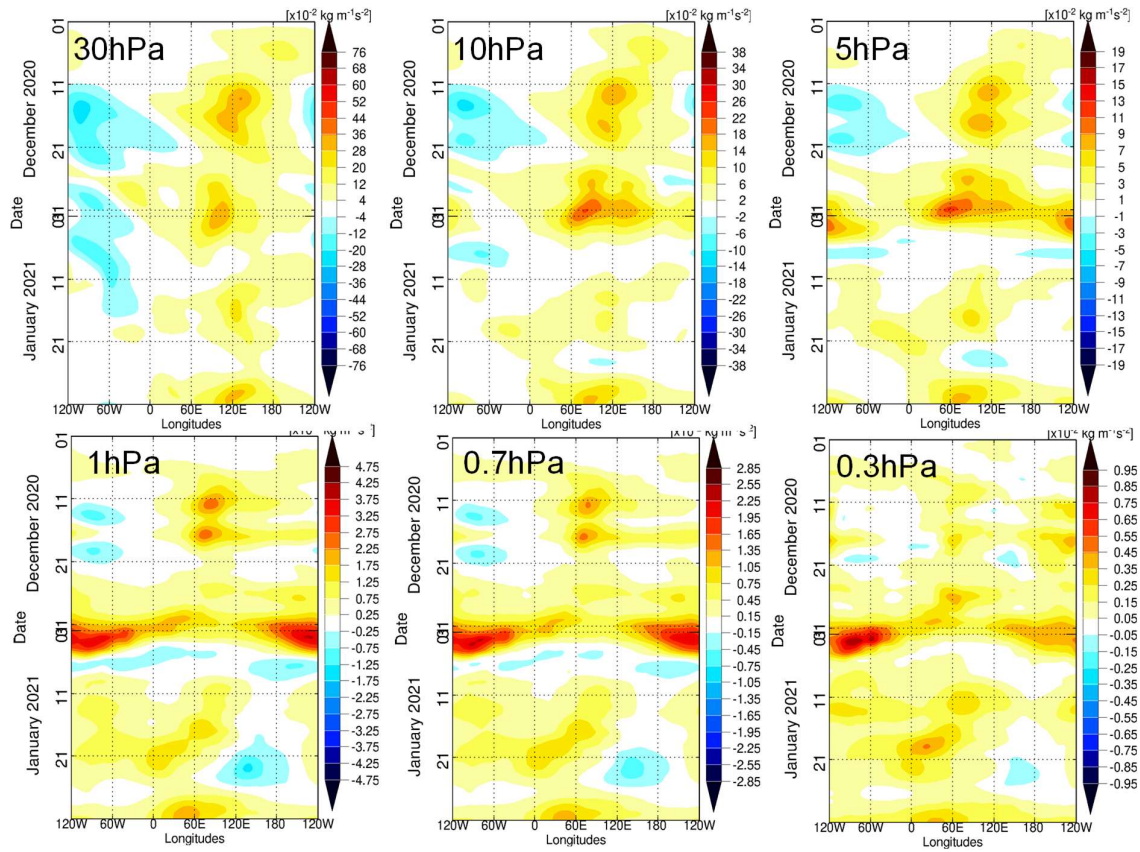
されている。ただしこの時点で完全に東西一様というわけではなく、上方伝播の強さに経度帯による偏りはすでに見えている。そして1月2~4日

には上方伝播はより局所的となつて、主に北米大陸上空でみられるようになっている。

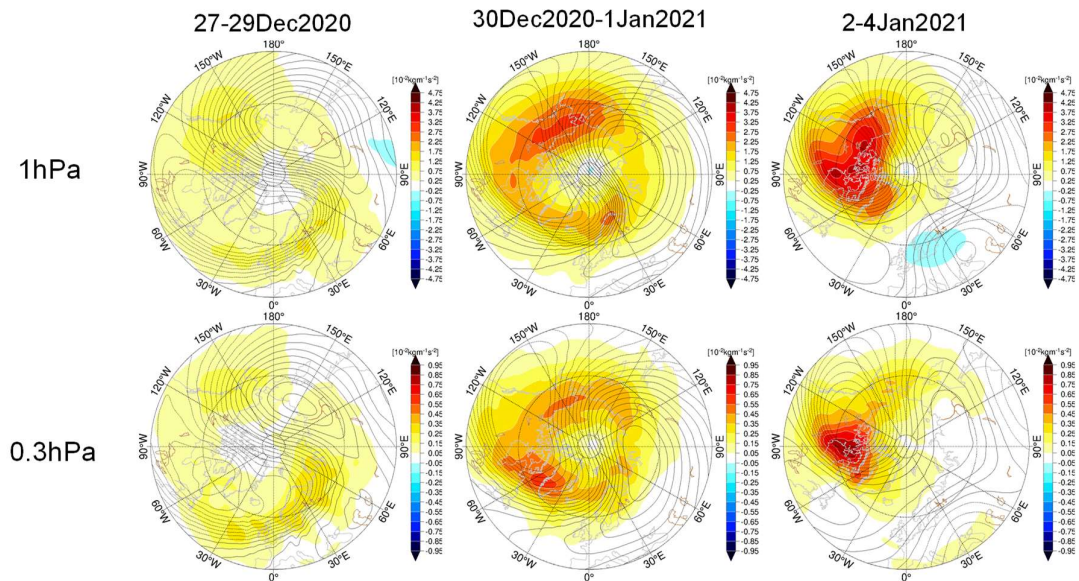


第5図 2021年1月3日の成層圏から下部中間圏における全波数および東西波数別(WN1~WN3)惑星規模波束の鉛直伝播の状況

ベクトルは EPflux[ $\text{kg s}^{-2}$ ]、陰影は EPflux の収束・発散、等値線は全波数の帯状平均東西風を表し、等値線間隔は  $5\text{ m s}^{-1}$ 。



第 6 図 2020 年 12 月～2021 年 1 月における  $60^{\circ} - 75^{\circ} \text{N}$  平均した  $3\text{D-flux-}W_z$  の経度-時間断面図



第 7 図 2020 年 12 月 27～2021 年 1 月 4 日における  $3\text{D-flux-}W_z$  (陰影) とジオポテンシャル高度場の東西平均からの偏差(等値線)の水平分布  
等値線間隔はいずれも  $200\text{gpm}$ 。

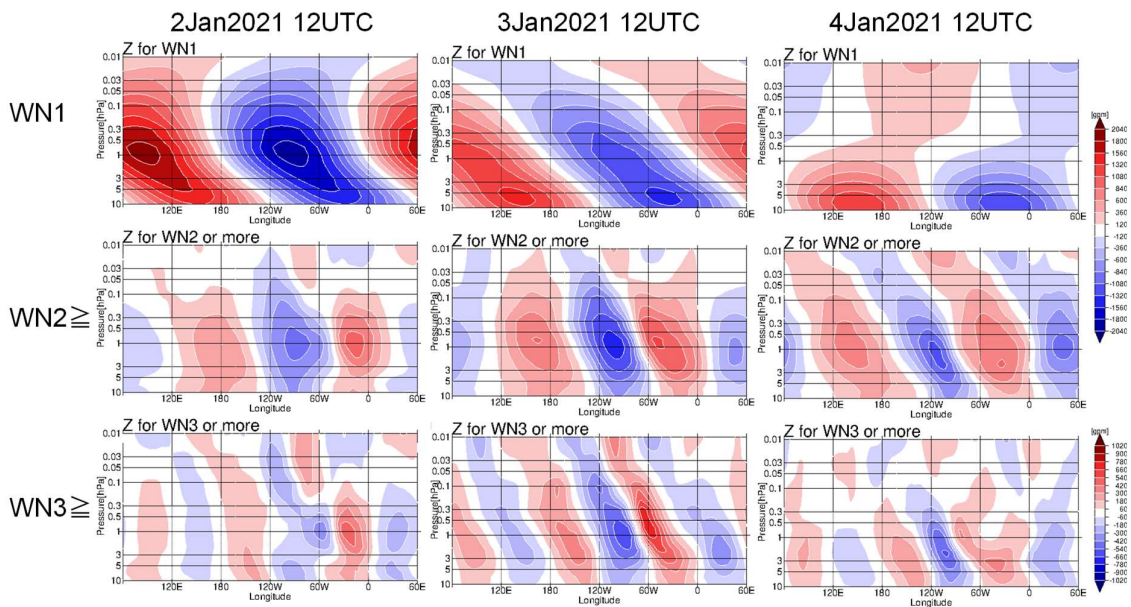


(3) 上部成層圏における東西非一様な惑星規模波束の鉛直伝播

上述のように MSSW21 が発生した 1 月初めには、上部成層圏の高緯度において東西非一様な惑星規模波束の伝播がみられたので、ここではもう少し詳しく解析する。

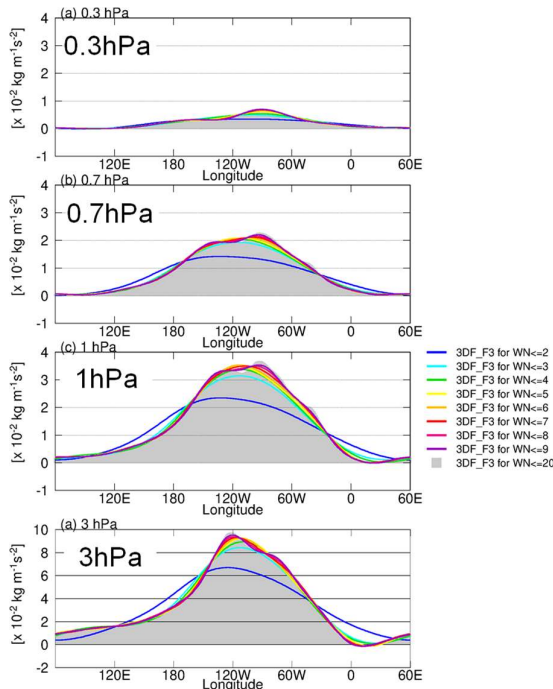
第 8 図には 2021 年 1 月 2 日 12UTC ~ 1 月 4 日 12UTC における空間フィルタを施したジオポテンシャル高度の経度-高度断面図を示す。上段は WN1 成分のみの高度場を示しており、1 月 2 日から 3 日にかけて上部成層圏で WN1 成分の位相西傾がみられているが、その振幅は減衰していることが分かる。そして 1 月 4 日には成層圏圏界面付近における WN1 の振幅は更に減衰し、位相もより中立に近い。このことは、第 4 図に示

したように、1 月初めに上部成層圏で WN1 の上方伝播が急速に減衰したと整合している。一方、WN2 以上の波数帯をフィルタした場合 (WN2  $\geq$ 、中段) をみると、1hPa 気圧面を中心に WN2 の波動が 1 月 2 日から 1 月 3 日にかけて増幅している。そして振幅の大きさは 60° ~ 120° W 帯において他の経度帯より大きく、東西非一様となっている。また 1 月 2 日には概ね中立状態のようだが、1 月 3 日から 1 月 4 日にかけては位相の西傾が持続しており、EPflux\_z で解析された上方伝播に対応している。WN3 以上の波数帯をフィルタした場合 (WN3  $\geq$ 、下段) でも、振幅そのものは WN2  $\geq$  の場合と比較して半分程度だが、1hPa 気圧面、60° ~ 120° W 帯を中心とした増幅や位相の西傾がみられている。



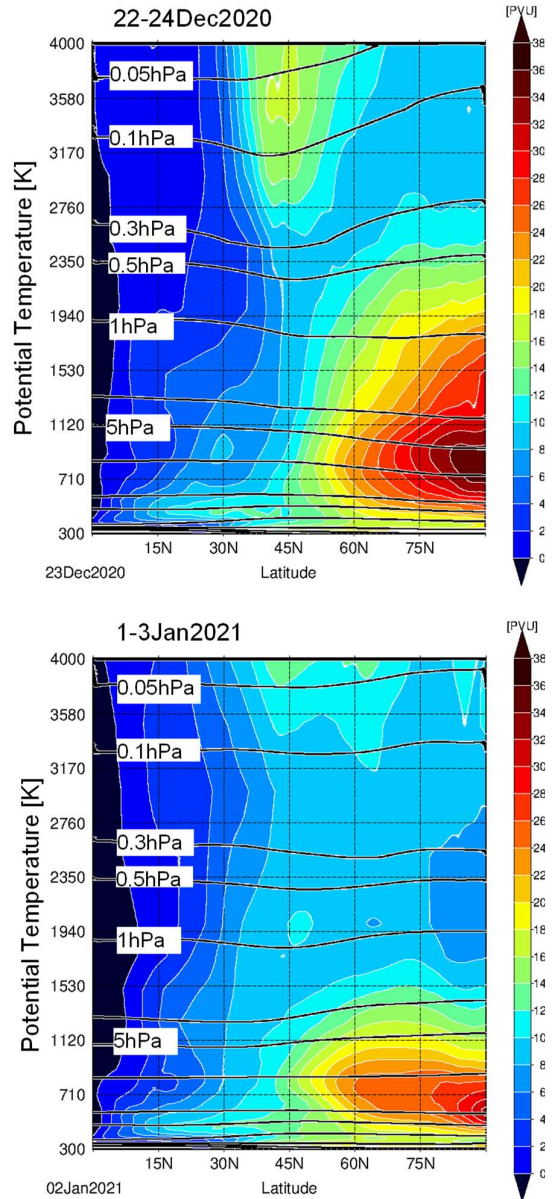
第 8 図 2021 年 1 月 2 日 12UTC ~ 1 月 4 日 12UTC における空間フィルタを施したジオポテンシャル高度 (65° - 69° N 平均) の経度-高度断面図 (上部成層圏 ~ 下部中間圏)  
上段は WN1 のみ、中段は WN2  $\geq$ 、下段は WN3 以上の東西波数帯でランチョスフィルタを施している。

3次元空間におけるWN2もしくはWN3以上の東西波数成分の惑星規模波束上方伝播への寄与を定量的に評価するため、様々な東西波長帯について計算された3D-flux- $W_z$ の経度分布図をみると(第9図)、WN2以下の東西波数帯、つまりWN1とWN2のみを考慮した場合(青色線)には、WN20まで考慮して計算した場合(灰色陰影)の上方伝播の極大を7割程度しか表現できないが、WN3まで考慮した場合(水色線)には、上方伝播の極大のかなりの部分を表現できることが分かる。このことから2021年1月初めに成層圏界面付近でみられた東西非一様な惑星規模波束の上方伝播にはWN2、WN3の発達、位相の西傾によってもたらされたと考えられる。このようなWN2、WN3の発達のメカニズムとして順圧不安定(Phister 1979; Charney and Stern 1962)が考えられる。このため上述のWN2、WN3の発達期である3日間平均および帯状平均したModified Potential Vorticity(MPV, Lait 1994)の緯度-高



第9図 2021年1月2~4日平均した様々な東西波長帯について計算された3D-flux- $W_z$ ( $60^{\circ}$  -  $75^{\circ}$  N 平均)の経度分布図

度断面図を第10図に示す。MSSW21発生前には(第10図上段)、極渦に対応する高緯度域の高渦位域(20PVU以上のオレンジから赤色の領域)が上部成層圏では $60^{\circ}$  N以北に分布し、1hPaより少し上層にまで分布している。また



第10図 帯状平均したMPV[PVU]の緯度-高度断面図

上段は2020年12月22~24日平均、下段は2021年1月1~3日平均をそれぞれ示す。

10PVU 以上の領域(水色から黄色陰影)は下部中間圏 0.3hPa 付近まで広がっている。MSSW21 が発生した際には、この高渦位域は半分くらいの層厚に圧縮されている(第 10 図下段)。その結果、上部成層圏の 75° N 以北に MPV の南北傾度(MPV<sub>y</sub>)の負の領域がみられるようになる一方、45~60° N では MPV<sub>y</sub> は正のままである。つまり 60~75° N 帯では MPV<sub>y</sub> はゼロに近い値をとり、その南北で符号が変化していることから、上部成層圏の 60~75° N 帯では順圧不安定波の発達条件を満たしている。

#### 4 まとめ

2021 年 1 月 MSSW21 について、JRA-3Q を用いて上部成層圏から成層圏界面付近を中心に惑星規模波束の伝播状況の解析を実施した結果、WN1 が卓越した極渦ずれ型だが、一時的に極渦の分裂がみられ、成層圏界面付近の東風は 70m s<sup>-1</sup> 超に達した。1 月中旬には東風が再度強化され、下旬まで持続した。MSSW21 発生時、特に西風減速ピーク時において、上部成層圏から成層圏界面付近においても、惑星規模波束の上方伝播が東西非一様な分布を示しており、WN2、WN3 以上の波動成分の発達・西傾と同期していた。このような上部成層圏から成層圏界面付近の極端な西風減速イベントには、下部成層圏から上方伝播してくる惑星規模波束だけではなく、上部成層圏内で発達する順圧不安定波も重要であったことを示した。

最後に波束伝播の局地性について述べておく。上述の通り 2021 年 1 月初めの成層圏界面付近でみられた東西非一様な惑星規模波束の上方伝播は、WN3 までを考慮すれば上方伝播の極大を概ね表現できることを示した(第 9 図)。しかしながら 1hPa の図を詳しくみると、WN20 まで考慮した 3D-flux-W<sub>z</sub> の極大値分布(灰色陰影)は WN3 までを考慮した 3D-flux-W<sub>z</sub> では十分に表現できていない。WN9 まで考慮するとかなりその分布に近づくことから、このような波束の上方

伝播の強化には惑星規模波動よりも小規模な擾乱も重要である可能性を示唆している。波束上方伝播の局所的な強化は南下しつつある極渦内部に小規模な渦がみられ(第 1 図)、これらが順圧不安定波動の東西非一様な発達に参与した可能性も考えられる。この点については今後さらなる解析を行っていく予定である。

#### 参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. *Academic Press, Orland*, 489 pp.
- Charney, J. G. and M. E. Stern, 1962: On the stability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **19**, 159–172.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Met.*, **18**, 1016–1022.
- Harada, Y., K. Sato, T. Kinoshita, R. Yasui, T. Hirooka, and H. Naoe, 2019; *J. Geophys. Res.*, **124**, 6120–6142.
- 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. Ebata, 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.
- Lait, L. R., 1994: An alternative form for potential vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **51**, 1754–1759.
- 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.
- 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.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60**, 667–682.
- 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.