

# 2021年に発生した成層圏突然昇温に伴う対流圏循環場の変化

中村遥暉・野口峻佑・廣岡俊彦(九大院・理)

## 1 はじめに

2021年に発生した成層圏突然昇温(Sudden Stratospheric Warming: SSW)は、北米における寒波などの下方影響をもたらし、注目を集めた。このSSWは、赤道太平洋の海面水温条件がLa Niñaかつ熱帯成層圏のQuasi-Biennial Oscillation(QBO)が西風位相の条件下で発生した。SSWの発生頻度は、以下に述べるように外部条件の影響を受ける。

太平洋赤道域の南米沿岸域で海面水温が平年より高い状態が1年程度継続するEl Niño現象、低下する現象をLa Niña現象と呼ぶが、両者に対応し熱帯域の大気循環も変動するため、これらは総じてENSO (El Niño Southern Oscillation) と呼ばれる。El Niño冬季は、極成層圏の季節平均気温は高くなり極渦が弱く、La Niña冬季は極成層圏の気温が低くなり極渦が強い。しかし観測データ等の解析結果によると両冬季ともにSSWの頻度は増加していることが報告されている

(Butler and Polvani 2011, Garfinkel et al. 2012など)。

QBOは、赤道下部成層圏の東西風が約27か月間周期で振動し、西風と東風が交互に現れる現象である。Holton and Tan(1980)は、QBOが西風の冬季は、東風と比べプラネタリ一波がより赤道域にそれやすく、極渦方向への伝播が弱くなり、極渦がより強い寒冷な冬になることを指摘した。SSWはプラネタリ一波により極渦が崩壊する現象であるため、この議論からいえば、QBOが東風の時の方がSSWの発生頻度が高いことになる。

ただし、QBOとENSOの影響は複合的に考える必要がある。例えば、Taguchi (2015)は、SSWの発生頻度が、QBOが西風時にはEl Niño条件下のほうが多く、QBOが東風時にはLa Niña条件下のほうが多いことを指摘した。これに基づくと、2021年SSWは、La NiñaかつQ

BO西風という比較的発生しにくい外部条件のもとで生じたと言える。

このようにQBOとENSOの両要素を考慮してSSWの発生はしばしば語られるが、これらの外部条件により、SSW後の循環場もまた強く影響を受けていることには留意すべきである。特に、SSWの下方影響としてよく知られている、中高緯度の環状モードや北極振動(Arctic Oscillation: AO)の評価においては、外部条件を踏まえた評価が必要であろう。

またSSWは、中高緯度だけでなく熱帯域にも影響を及ぼすことが示唆されている。例えば、Kodera(2006)は、1979年から2001年までのSSW12事例のコンポジット解析により、SSWに伴う循環変化が、赤道域の下部成層圏と上部対流圏での温度低下をもたらし、それが熱帯域の対流活動のシーソー的な変動(南半球側で活発化、北半球側で抑制)を引き起こす様を示した。

以上を踏まえると、以下の2つの観点から現象を記載することは有益であると考えられる。(1)外部条件を考慮し、SSWの影響にのみ焦点を当てた場合の、2021年事例の中高緯度領域への影響。(2)2021年事例の熱帯域への影響。そこで本研究では、ENSOまたはQBOという外部条件による分類を行い、その条件を満たす気候値を作成し偏差をとることで、SSWの影響による偏差に焦点を当て、中高緯度と熱帯域に着目し解析を行った。

## 2 使用データと設定

本研究で使用したデータはJRA-55再解析データセット(Kobayashi et al. 2015)であり、1979年から2021年の期間を使用した。

Charlton and Polvani(2007)に従い、期間中に28個のSSW事例を抽出した。そして、期間中においてONI=±0.5°CでEl Niñoまた

はLa Niña、それ以外をNeutralと判定し、QB0は、50hPa東西風のDJF(12月から1月)平均の正負で判定を行った。これより、La NiñaかつQB0がWesterly条件下で発生した事例であるLa Niña・Westerly事例(以下LW事例)を合計6事例抽出した。

さらに、QB0がWesterlyかつLa Niña条件を満たす冬季を抽出しその同じ日付で平均を取った後に30日移動平均を施したものをLW気候値とした。

### 3 結果

#### 3.1 中高緯度域

まず、図1に、北緯65度以北での領域平均高度場の規格化偏差の (a) LW事例合成と

(b) 2021年事例、(c) 2021年事例後のAO指数の結果を示す。LW事例合成図では、事例発生前に負偏差、すなわち極渦が強い状態で存在しており、そこから強い正偏差へと変化する特徴がみられる。2021年事例では、極渦が強いというLW合成と同様の特徴がみられるとともに、成層圏から対流圏へのシグナルの伝播が2度発生し、対流圏への影響がより長期間継続したことが確認できる。特に2021年事例は事例日から+40日付近まで対流圏への影響が継続し、この傾向はAO指数でも同様に確認できる。

続いて、事例後の地表面気圧・地表面気温について確認する。図2に事例日から+40日で期間平均した地表面気圧(上)・気温

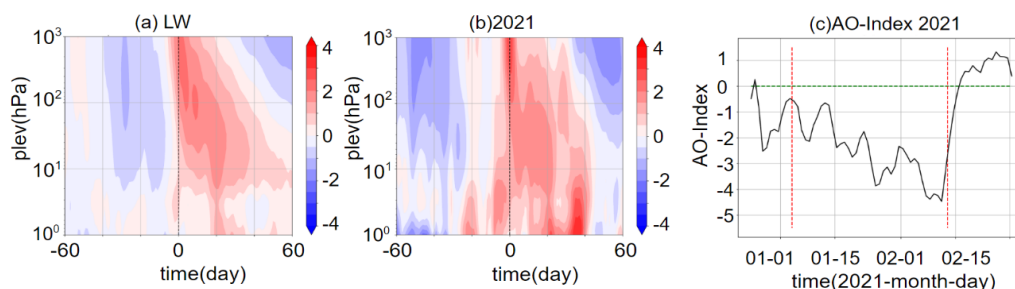


図1: 北緯65度以北での領域平均高度場の規格化偏差の(a)LW事例合成図と、(b)2021年事例。縦軸が高度(hPa)で横軸が事例日を0とした時間(day)で、破線が事例日を表す。(c)2021年SSW発生後のAO指数の時系列変化で、縦軸がAO指数の値、横軸が時間(2021-month-day)を表す。赤の破線が左から事例日、事例日+40dayであり、緑破線がAO指数の値が0の線を表す。

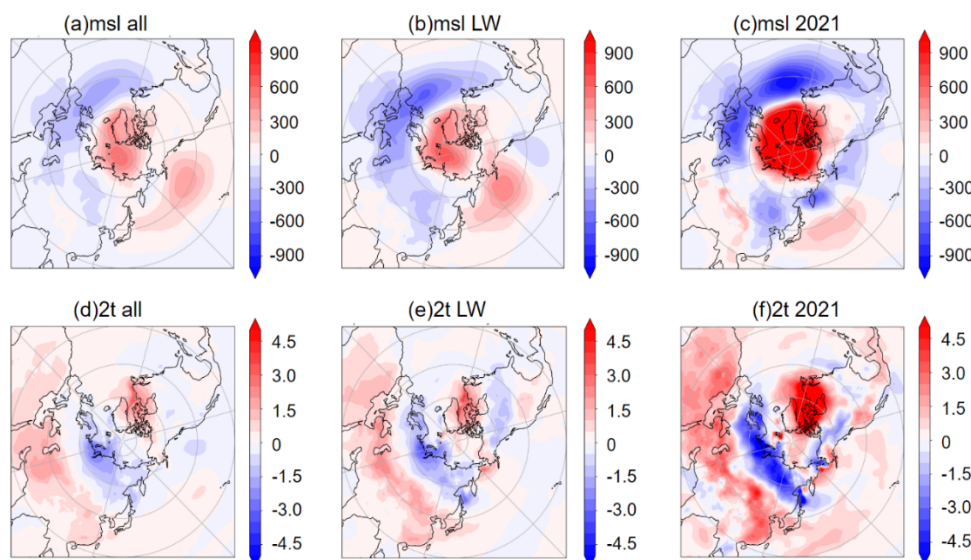


図2: 事例日から+40日までの期間で平均した地表面気圧(Pa、上)と地表面気温(K、下)のポーラーステレオ図。(a)(d)は通常気候値偏差の全SSW事例合成、(b)(e)はLW事例偏差のLW事例合成、(c)(f)は2021事例LW気候値偏差。

(下)の(a) (d)通常気候値偏差の全事例合成図、(b) (e)LW気候値偏差のLW事例合成図、(c) (f)2021年事例LW気候値偏差の結果を示す。(a)と(b)を比較すると、LW事例合成は全事例合成よりも東ユーラシアに強い低気圧偏差が顕著に見られる。さらに(c)より、2021年事例は、ユーラシア東と北大西洋の低気圧偏差がより強く、カムチャッカやアラスカ沿岸でも低気圧偏差が見られる。続いてこれに伴う地表面気温を確認する。(d)と(e)を比較すると、LW事例合成は全事例合成よりも東ユーラシアに低温偏差が顕著に見られる。さらに(f)より、2021年事例は、ユーラシア東の低温偏差がより強く東寄り、カナダ域の高温偏差が強いことが分かる。

### 3.2 熱帯域

図3は、3日移動平均した子午面流線関数の緯度高度断面図であり、(上)等値線が2021年事例で陰影がLW偏差、(下)等値線がLW事例合成で陰影がLW偏差LW事例合成である。それぞれSSW事例から(a)-25日、(b)事例日、(c)+25日である。LW合成と2021年事例の両者において、+25日で対流圏熱帯域における

反時計回りの循環が強化されており、南緯10度付近の上昇流が強まっていることが分かる。2021年事例は特にその循環の強化が明瞭である。

続いて、この対流圏熱帯域の鉛直流とそれに伴う対流活動について着目する。図4は、3日移動平均した500hPaにおける残差平均鉛直流の緯度時間変化図(上)・帯状平均外向き長波放射(Outgoing Longwave Radiation: OLR)(下)であり、(a) (d)は通常気候値偏差の全事例合成図、(b) (e)LW気候値偏差のLW事例合成図、(c) (f)2021年事例LW気候値偏差である。まず(a) (b)に着目すると、全事例合成と比較しLW合成の方がSSW後の上昇流の緩やかな南方シフトが明瞭であり、(d) (e)のOLRでも同様の傾向が見られる。さらに2021年事例では、事例後2週間ほど同じ緯度帯で鉛直流が強まっており、その後急激に南下する特徴が見られ、OLRも同様に、強化された後の急激な南下が顕著である。

さらに、経度帯による違いに注目し、どのように対流活動が変化していたのかを確認する。図5は、3日移動平均、0度から南緯10度で平均したOLRの経度時間変化図であり、(a)は通常気候値偏差の全事例合成図、(b)

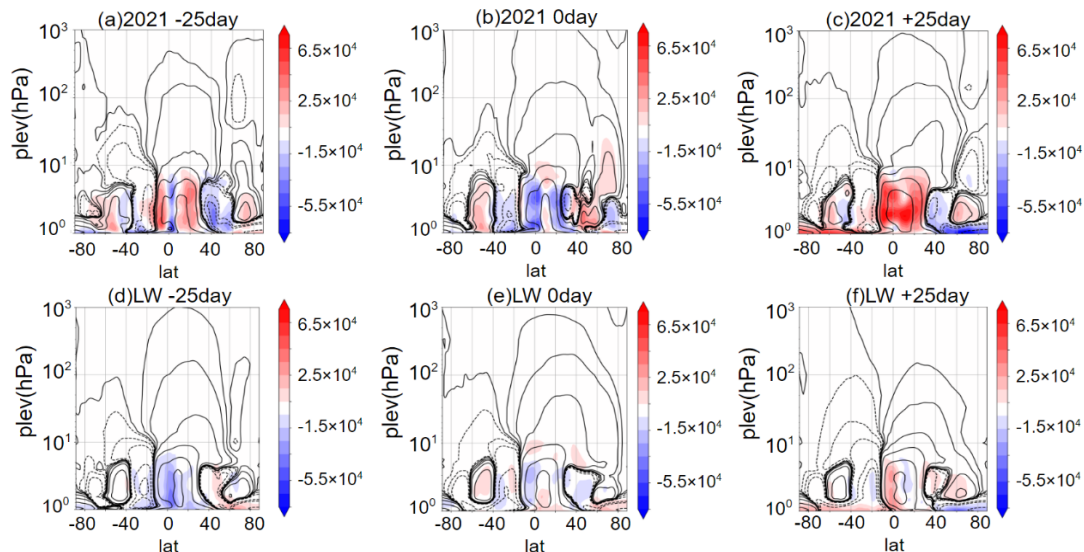


図3: 3日移動平均子午面流線関数( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )。SSW2021年事例における、(a)-25日、(b)事例日、(c)+25日の、緯度高度断面。等値線が値で、陰影がLW気候値偏差。LW事例合成における(d)事例日から-25日、(e)事例日、(f)+25日の緯度高度断面図。等値線がLW事例合成で陰影がLW気候値偏差LW事例合成。

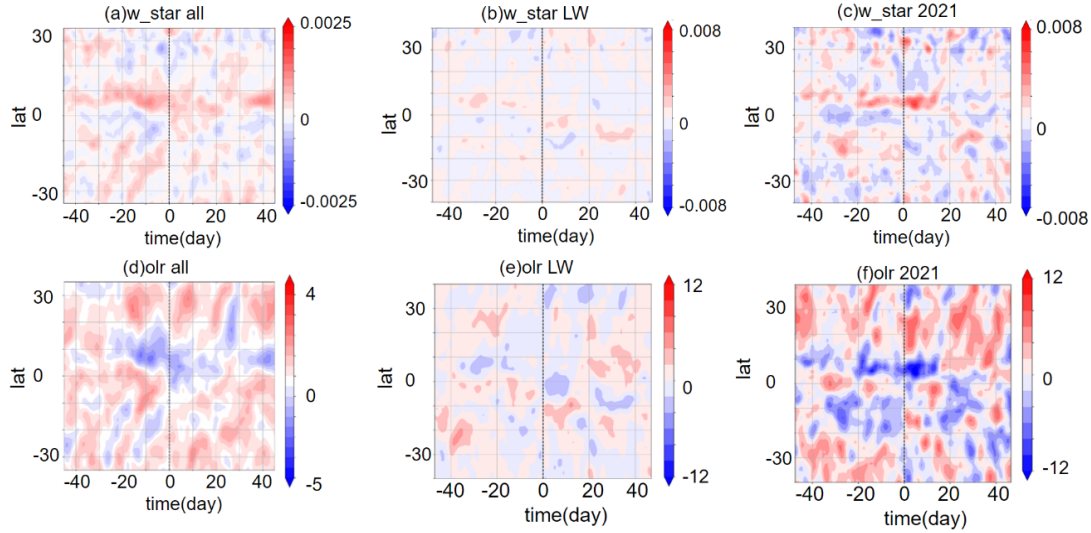


図4: 3日移動平均した、500hPaにおける残差平均鉛直流( $m\ s^{-1}$ 、上)と外向き長波放射( $W\ m^{-2}$ 、下)。(a)(d)は通常気候値偏差SSW全事例合成。(b)(e)はLW気候値偏差LW事例合成。(c)(f)は2021年事例LW気候値偏差。縦軸が緯度で横軸が時間(day)で、黒破線が事例日を表す。

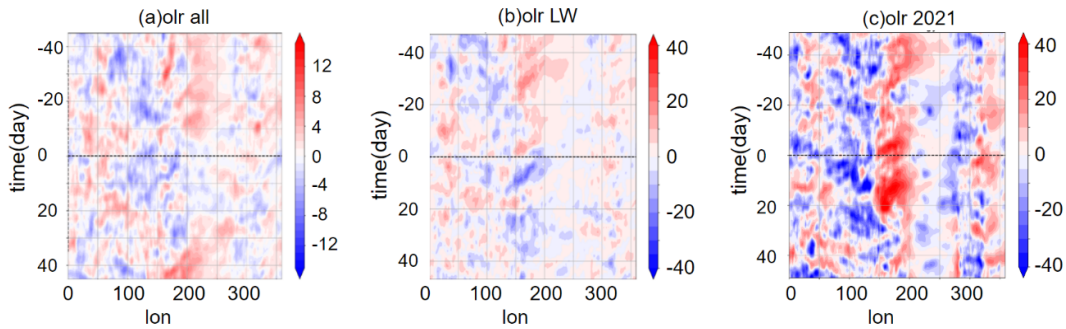


図5: 3日移動平均、0度から南緯10度で平均した外向き長波放射( $W\ m^{-2}$ )。(a)は通常気候値偏差SSW全事例合成。(b)はLW気候値偏差LW事例合成。(c)は2021年事例LW気候値偏差。縦軸が時間(day)で横軸が経度、黒破線が事例日を表す。

はLW気候値偏差のLW事例合成図、(c)は2021年事例LW気候値偏差の図である。全事例合成は東経150度付近で対流が活発化し、LW合成は発生後に東経75度付近から日付変更線付近まで対流活発域の東進が見られる。2021年事例も同様の東進が確認できるが、OLR負偏差の強化が見られ、対流活発域と不活発域の差が明瞭であることが特徴である。なお、上記の対流活発域の東進は、熱帯域の季節内振動であるMadden-Julian Oscillation (MJO)と関係している可能性がある。

対流活発域の位置をより明確にするため、図6に3日移動平均したOLRの2021年事例LW気候値偏差を地図上に投影した図を示す。(a)

が事例日、(b)+15日、(c)+30日である。対流活発域がインド洋北部から海洋大陸、日付変更線付近にかけて東に移動する様子が確認でき、+15日における対流活発域がフィリピン域で特に強く、+30日では日付変更線付近まで強化されている。

#### 4 考察

本研究では、ユーラシア東と北大西洋で顕著である低気圧偏差、東ユーラシアの低温偏差とカナダでの高温偏差に異なった特徴が捉えられた。これについて、同事例について概観しているLu et al. (2021)の結果をもとに考察する。そこでは、対流圏の500

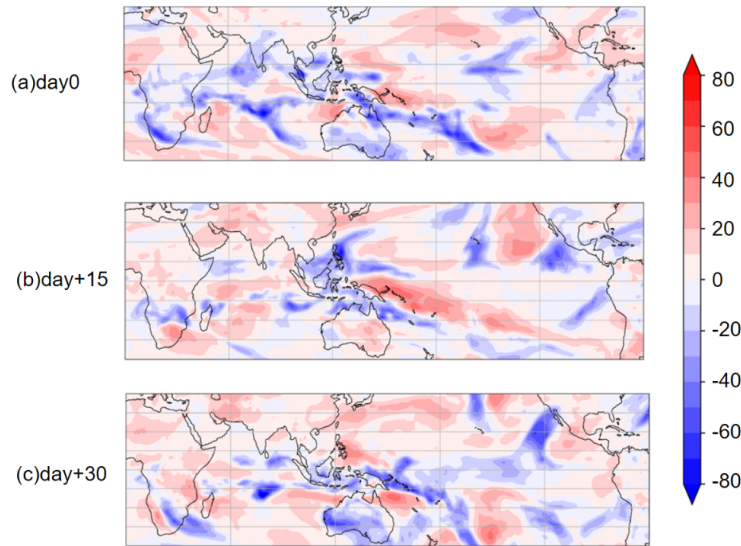


図6: 3日移動平均した外向き長波放射の2021年事例LW気候値偏差( $W m^{-2}$ )。(a)が事例日、(b)が+15日、(c)が+30日。

hPaにおけるSSW発生前後での波数2パターン形成に触れており、ユーラシア東付近での高度場の負偏差が2021年1月23日から2021年2月3日平均まで長期間にわたり顕著であったことが示されている。さらに、北大西洋付近の負偏差も持続的であり、渦熱フラックスの結果によると、SSW発生後も惑星規模波の上方伝播が強く波数1・2成分が寄与していた。よってこのユーラシア東と北大西洋で顕著である低気圧偏差は、SSW2021年事例の発達・持続過程とも絡む、長期にわたる継続が原因である可能性があり、それに伴い東ユーラシアの低温偏差とカナダでの高温偏差に異なった特徴が表れたと考えられる。

次に、熱帯域について考察する。熱帯域では、2021年事例はSSW発生から+15日付近で対流圏熱帯域の時計回りの循環が強化された。それとともに、500 hPaの上昇流の強化と急激な南下が確認できた。これについては、Kodera et al. (2011)により指摘された、SSW後に成層圏下部での循環が強化され、それに伴い熱帯域での循環がウォーカー型からハドレー型に変化し、南半球での上昇流が強化されるという結果をもとに考察する。SSW2021年事例も同様に、成層圏下部の

循環・南半球熱帯域対流圏の上昇流が強化された。さらに、前述の通りSSW2021年事例は、SSW発生後の1月下旬にも惑星規模波の上方伝播が寄与していたことから、この波の寄与により成層圏下部の循環強化がもたらされたため、SSW発生から上昇流・対流活発域の強化・南下までに時間差が生じたと考えられる。

ここで気になるのは、熱帯域の季節内振動(MJO)との関係であるが、この時期のMJO位相図、例えばLu et al. (2021)の図3からは、SSW発生後の2月中旬において、MJO位相が6から7へ変化していたこと、振幅が急激に増加したことを観察でき、2021年SSW事例のこの急変化への寄与が窺われる。ただし、対流活動の急変がSSWによるものなのかを決定するには、さらなる研究が必要である。

## 5 まとめ

本研究では、2021年1月に発生した成層圏突然昇温に伴う対流圏循環場の変化を明らかにするため、ENSOとQBOという外部条件による分類を行い、LW気候値偏差をとることでSSWの影響に焦点を当てた。さらに、通常気候値偏差の全SSW事例合成、LW気候値偏差のLW事例合成、2021年事例のLW気候値偏差

を比較し、LWで発生したSSWの特徴、その中での2021年事例の特徴を示した。結果、中高緯度では、低気圧偏差と低温偏差がユーラシアのより東で発生し、熱帯域では上昇流と対流活発域の急激かつ明瞭な南方シフトが起こり、さらに対流活発域がインド洋から日付変更線付近まで東進したことが明らかになった。ただし、LW条件で起こるSSWはサンプル数が6事例と極めて少ないため、統計的有意性も踏まえた議論をする必要がある。予報データ等を用いてサンプル数を増やした解析を行うことも有益であると考えている。

### 参考文献

- Butler, A. H., and Polvani, L. M. (2011), El Niño, La Niña, and stratospheric sudden warmings: A reevaluation in light of the observational record, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L13807, doi:10.1029/2011GL048084.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani (2007), A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks, *J. Clim.*, **20**(3), 449-469, doi:10.1175/JCLI3996.1.
- Garfinkel, C.I., Butler, A. H., Waugh, D. W., Hurwitz, M. M., and Polvani, L. M. (2012), Why might stratospheric sudden warmings occur with similar frequency in El Niño and La Niña winters?, *J. Geophys. Res.*, **117**, D19106, doi:10.1029/2012JD017777.
- Holton, J. R., and Tan, H. C., (1980), The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb, *J. Atmos. Sci.*, **37**(10), 2200-2208, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2.
- Kodera, K. (2006), Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06804, doi:10.1029/2005GL024510.
- Kodera, K., Eguchi, N., Lee, J. N., Kuroda, Y., and Yukimoto, S. (2011), Sudden changes in the tropical stratospheric and tropospheric circulation during January 2009. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **89** (3), 283-290, doi:10.2151/jmsj.2011-308.
- Lu, Q., Rao, J., Liang, Z., Guo, D., Luo, J., Liu, S., Wang C., and Wang T. (2021), The sudden stratospheric warming in January 2021, *Environ. Res. Lett.*, **16**(8), 084029, doi:10.1088/1748-9326/ac12f4.
- Taguchi, M. (2015), Changes in frequency of major stratospheric sudden warmings with El Niño/southern oscillation and quasi-biennial oscillation, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**(1), 99-115, doi:10.2151/jmsj.2015-007.