

成層圏突然昇温前後の中間圏循環の変動

飯田 千尋, 廣岡 俊彦(九大・理), 江口 菜穂(九大・応力研)

1. はじめに

成層圏突然昇温(以下 SSW)は冬季成層圏極域の気温が数日のうちに数十度上昇する現象で, 極渦が崩壊し, 西風極夜ジェットが弱まるもしくは東風に反転する(Andrews et al., 1987). Manney 他 (2009; GRL) は, 2004 年に打ち上げられ高度 90 km 付近まで観測可能な Aura 衛星搭載 Microwave Limb Sounder (MLS) のデータを用いて, 2009 年 1 月に発生した大規模昇温の事例について中間圏を含めて解析し, SSW の特徴である東西風逆転が成層圏に先行して中間圏で起こっていることや昇温後の気温の回復もまた中間圏から起こることを明らかにした. この事例は, SSW 生起前後の期間の, 成層圏・中間圏領域の力学的上下結合の重要性を示唆するものであるが, あくまでも速報であり, 力学的な解析はほとんど行われていない. 中間圏以上の領域は全球的な観測データが少なく, まだ十分な解析がなされていないのが現状である.

これをふまえて, 本研究では, まず, 2009 年 1 月の SSW の事例について, Aura MLS データを用いて昇温前後の中間圏を含めた力学場を解析する(結果 1). 次に, 2008 年, 2010 年の SSW の事例についてもその特徴を示し, 簡単な相互比較を行う(結果 2). これらの解析によって, SSW 生起前後の中間圏循環場の変動を明らかにする.

2. 使用データ

本研究では, NASA 提供の Aura EOS/MLS Version 3.3 Level 2 の気温とジオポテンシャル高度(GPH)のデータを使用する. 鉛直分解能は成層圏で約 4 km, 成層圏界面付近や下部中間圏で約 8-9 km であり, 11-97 km の高度に 41 層ある. 水平方向の視野範囲は約 160 km であり, 緯度は南北それぞれ 82 度まで利用できる. 期間は 2008, 2009, 2010 年について, その前年の

12 月から 3 月までの 4 カ月ずつを用いる.

また, 3 日間の衛星軌道上のデータを緯度経度が $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の格子点の全球的な力学場を作成し, 中央の日付の値として解析に用いる. 風場は GPH から傾度風平衡の式を用いて求める.

3. 結果 1: -2009 年 SSW の事例解析-

まず, 図 1 に北緯 70-82 度と北緯 55-70 度でそれぞれ領域平均した帯状平均気温と帯状平均東西風の時間発展を示す. 成層圏中部である 10 hPa では 1 月 21 日ごろに気温の上昇と東西風の逆転が見られる. また, 中間圏である 0.001 hPa では成層圏に先行して 17 日に東西風の逆転が見られ, SSW 後の気温と西風の回復もまた中間圏から下降するように起こっている.

次に, 図 2 では北半球の各等圧面高度の GPH 分布の特徴を示す. 10 hPa では低気圧性極渦が分裂して高気圧循環と入れ替わる様子が分かり, これは波数 2 が支配的な極渦分裂型昇温の特徴である. また, 1 hPa, 0.01 hPa と高度が上がっていくにつれ, 東西波数 1, 2 に加えて比較的小規模な擾乱が卓越し

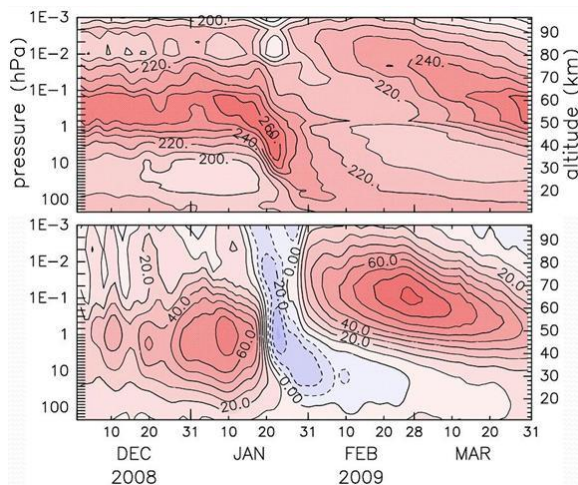


図 1: 2009 年 1 月の SSW 生起前後の期間について, 北緯 70-82 度における帯状平均気温(上)と北緯 55-70 度における帯状平均東西風(下)の時間・高度断面. 等値線間隔はそれぞれ 10 K, 10 m/s.

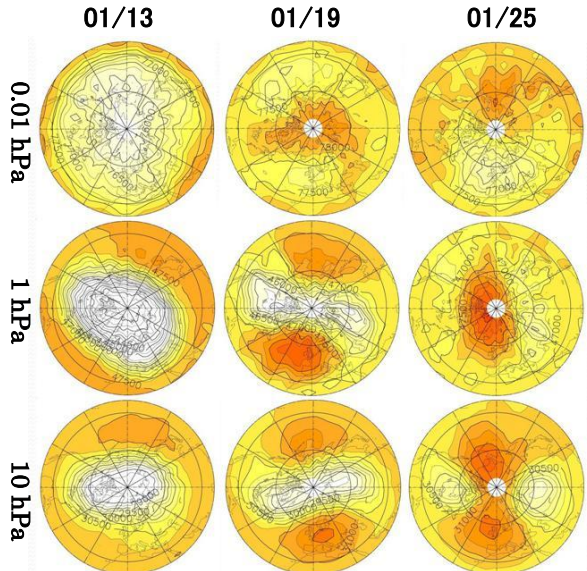


図 2: 2009 年 1 月 13(左列), 19(中列), 25 日(右列)の 10(下段), 1(中段), 0.01 hPa(上段)の等圧面高度場. 等値線間隔は 250 m.

ている. さらに, 0.01 hPa で 1 hPa に先行して極域の低気圧と高気圧が入れ替わっている. これは東西風の逆転に対応している. 比較的小規模な擾乱は中間圏の特徴と考えられるが, 今回は大規模波動のみに着目する.

図 3 では, 図 1 の東西風の緯度に対応する GPH 東西波数 1, 2 成分の 2 乗平均振幅の時間変化を示している. 東西風逆転前では 1 hPa の西風のピークに対応して, 波数 1 のピークが見られる. この高度では, 1 月 9 日に西風が一度極大になるとき, 波数 1 成分は小さくなり, 波数 2 成分は大きくなる. その後, 成層圏で 1 月 21 日に東西風の逆転が起こっている. 一方, 中間圏では 1 月 18 日に成層圏とは独立した波数 2 成分のピークが見られ, 同時に東西風逆転が起こっている. よって, 中間圏の東風はこの波数 2 成分が関係していると考えられる.

図 4(a)は, 等値線が東西風, 矢印が E-P flux, 色が DF (波による東西風加速度項) を示す緯度高度断面図で, E-P flux と DF は東西波数 1-3 の成分のみで計算している. (a2)が中間圏の, (a3)が成層圏の波数 2 のピークの日付である. まず, SSW 生起前の東西風は(a1)を見ると, 成層圏極域では西風が強いが, 中間圏では西風が弱い構造になっている. そして時間が経つにつれ, 中間圏極域

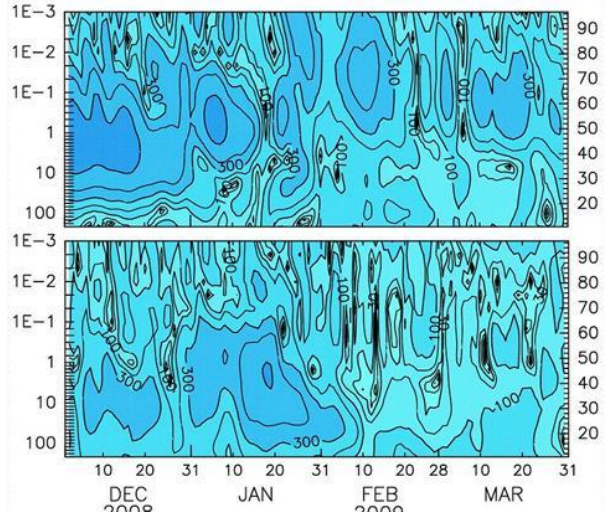


図 3: 北緯 62.5 度の GPH 東西波数 1(上), 2(下)の成分における 2 乗平均振幅の時間変化. 等値線は 1, 3×10^m (m)の値のみ描いている.

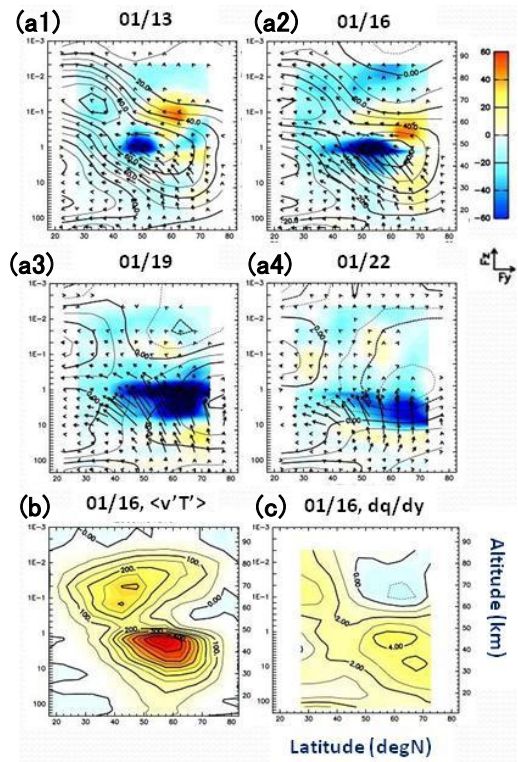


図 4: (a)2009 年 1 月 13, 16, 19, 22 日の帯状平均東西風(コンター), E-P flux(ベクトル), DF(カラー)の緯度高度断面図. コンター間隔は 10 m/s, ユニットベクトルは 10^{1-10^2} hPa の領域で $F_y: 2 \times 10^6$, $F_z: 2 \times 10^8$ (kg/s²), これ以上の $10^{1-n-10^{2-n}}$ hPa ($n=1-3$) の領域ではスケールを 5n 倍, $10^{-3-10^{-2}}$ hPa の領域では 25 倍している. DF の単位は m/s/day. (b)東西風と気温の波の積を帯状平均したもの $\overline{v'T'}$ で, コンター間隔は 50 m²/s². (c)準地衡風渦位の南北勾配 $\partial \bar{q} / \partial \theta$ で, Ω で割った値を示している. E-P flux, DF, $\overline{v'T'}$ は東西波数 1-3 の成分のみで描いている.

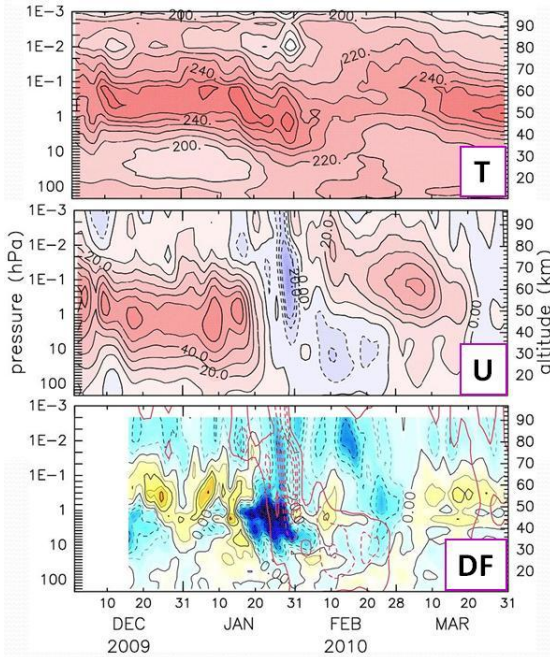


図 5: 2010 年 1 月の SSW 生起前後の期間について、北緯 70-82 度における帯状平均気温(上段)と北緯 60-75 度における帯状平均東西風(中段)と DF(下段)の時間・高度断面。等値線間隔はそれぞれ 10 K, 10 m/s, 10 m/s/day.

に現れた東風領域が成層圏に下降している様子が分かる。次に、成層圏に着目すると、1月13日にE-Pフラックスが対流圏から極渦の西風に沿って上方伝播し、1hPa付近で収束(DF<0)している。このDFが負の領域は次第に広がり、かつ、その絶対値も大きくなり、1月19日にピークを迎える。それに伴って成層圏で東風加速が生じ、1月21日に東西風逆転が起こる。一方、中間圏に着目すると、1月16日に中間圏の極域で、上記とは独立した負の絶対値が大きい領域が見える。この日の特徴として、極域の成層圏でDFが負、その上方で正、中間圏で負のサンドウィッチのような構造をしている。また、(b)で、この日のE-Pフラックスのz成分の主な項である $\overline{v'T'}$ を見ると、極域では成層圏で値が大きく、その上方で小さく、中間圏で再び大きくなる様子が分かり、これは中間圏の波数2の波が成層圏とは異なる要因で励起されたものである可能性を示唆している。さらに、この中間圏の波数2の波の要因を調べるために、不安定の必要条件を示す準地衡風渦位の南北勾配 $\partial\bar{q}/\partial y$ の分布を(c)に図示する。ここで、

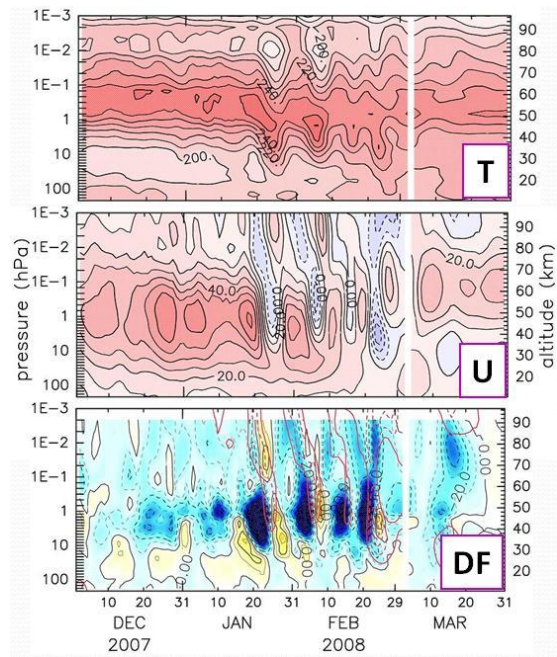


図 6: 2008 年 1, 2 月の SSW 生起前後の期間における図 5 と同様のもの。

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_0 f_0^2 \partial \bar{u}}{N^2 \partial z} \right)$$

であり、 f_0 はコリオリパラメータ、 N は浮力振動数、 ρ_0 は密度、 \bar{a} はある物理量 a の帯状平均を表す。すると、中間圏極域で負の領域になっており、中間圏極域の波数2は平均東西風の不安定によって生じた可能性があることが分かる。

4. 結果 2:

-2008 年, 2010 年 SSW との比較-

2009 年については 3 節で述べた。ここでは、2010 年と 2008 年の特徴を示し、簡単な比較を行う。

4.1 2010 年 SSW の特徴

2010 年の 1 月に生じた SSW は、波数 1 が支配的な極渦移動型の大昇温である。

図 5 (中段)の東西風を見ると、1月27日に成層圏と中間圏で同時に強い東風加速が生じており、東風の極大になる高度は2009年より高高度である。この付近の日付ではDFが成層圏から中間圏まで連続して負になっていることが分かる(図5(下段))。また、この日付の緯度高度断面図(図省略)についても同様の特徴であったので、この東風加速

は対流圏から伝播してきた大規模波動が広く減速を引き起こしたものであると考えられる。

他にも、図 5 (中段)では 1 月 15 日に中間圏のみに東風が現れている。このときもまた東西風逆転の直前に DF 負の領域が見られ、大規模波動の寄与があることが考えられる。この日付の緯度高度断面図(図省略)では、2009 年 SSW の中間圏での東西風逆転時に見られたサンドウィッチ構造が同様に見られる。

4.2 2008 年 SSW の特徴

2008 年の 1 月から 2 月にかけて生じた SSW もまた波数 1 が支配的な極渦移動型である。成層圏中部の 1 hPa では 4 回東西風の逆転が起こっており、これらのうち WMO の定義による大昇温の条件を満たすのは 2 月下旬の 4 回目のみである。

図 6(2)では、東風と西風が交互に現れる様子が分かる。ここで、1 月下旬の 1 回目に現れる東風に着目することになると、中間圏で成層圏に先行して東風が現れるという 2009 年 SSW と同様の特徴が見える。図 6(3)の DF では中間圏、成層圏の東西風逆転の直前にそれぞれ負の領域があり、両者とも大規模波動の寄与が考えられる。また、中間圏で東西風の逆転が起こる 1 月 19 日の緯度高度断面図では 2009 年の事例でも見られたサンドウィッチ構造が見られた。成層圏の東西風の逆転が起こる 1 月 22 日では成層圏の領域のみに DF 負の領域が見られ、このとき中間圏では DF 正の領域が見られた。

5. まとめ

2009 年 1 月に生じた成層圏突然昇温(SSW)に伴う中間圏循環の変動について、Aura 衛星搭載 MLS のデータを用いて調べ、2008 年、2010 年の SSW の特徴との簡単な比較を行った。

まず、2009 年 1 月は SSW の特徴である東西風の逆転が成層圏に先行して中間圏で生じ、その際に、中間圏極域で主に波数 2 を伴う東風加速($DF < 0$)の寄与があることが分かった。このとき、成層圏極域では強い波数 2 が下部中間圏で弱くなり、その上の中部中間圏で強くなっていたことから、中間圏の

波数 2 は成層圏とは異なる要因で励起された可能性があることが分かった。また、中間圏極域では準地衡風渦位の南北勾配が負の領域がみられ、この領域の波数 2 は不安定が要因で生じた可能性がある。さらに、中間圏極域で波数 2 がピークの日付では、大規模波動(波数 1-3)に伴う西風加速 DF が成層圏で正、下部中間圏で負、中部中間圏で正のサンドウィッチのような構造を示した。

次に、2008 年と 2010 年を合わせた 3 年分の SSW の共通点として、中間圏の東風加速には大規模波動の寄与があることが分かった。また、中間圏極域では通常西風が成層圏に比べて弱いので、比較的弱い負の DF (東風加速)でも東風に逆転していることが分かった。さらに、3 年分の中間圏を含めた SSW の東風出現の特徴をまとめると、①中間圏のみ、②中間圏と成層圏が同時、③中間圏が成層圏に先行の 3 つに分類できる。中間圏の東風加速に寄与した大規模波動の要因として、②は対流圏から伝播してきたものであり、③は成層圏とは別の要因で励起されたものである可能性が示唆された。

6. 今後の課題

2009 年 1 月の SSW の事例に関して、中間圏の波数 2 成分は不安定が成因という仮説をもとに、さらなる詳細な解析が必要である。また、3 年分の比較に関して、共通点や相違点をさらに詳しく調べ、中間圏で東風が出現するときの大規模波動のふるまいや基本場の特徴をまとめる予定である。中間圏の重力波の寄与との比較も行う必要がある。

謝辞

図の作成には地球流体電脳ライブラリを使用した。

参考文献

- [1] Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy: *Middle Atmosphere Dynamics*, Elsevier, 489 pp, 1987.
- [2] Manney, G. L., et al.: *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L12815, doi: 10.1029/2009GL038586, 2009