

重力波解像全球モデルを用いた成層圏突然昇温時の中層大気の力学変動の研究

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 大気海洋科学講座 修士2年 奥井 晴香

1. はじめに

成層圏・中間圏・下部熱圏を含む中層大気で起こる物理現象は、対流圏にも影響を与えることが観測およびモデルを用いた研究から知られている[e.g., Son et al. JC 2017]。そのため、中層大気力学の理解やモデルにおける現象の現実的な再現は、対流圏の気象・気候予報の精度向上やリードタイムの延伸にもつながることが期待できる。これまで、特に中間圏・下部熱圏は、観測が少なくモデルによる現象の再現も十分にできない領域であった。しかし近年、衛星・地上観測の充実や計算技術、理論研究の発展により、研究の可能性が拓げられている。

中層大気では、惑星規模波（以下PW）や小スケールの大気重力波（以下GW）などの大気波動に伴う運動量の再分配により、放射平衡により定まるものとは大きく異なる気温・風構造が維持されている（図1）。碎波で生じる波強制は東西平均場ではEliassen-Palm (EP) fluxの発散（以下EPFD）によって表現され、中高緯度では残差平均南北風 \bar{v}^* にはたらくコリオリ力と釣り合う。これにより、負

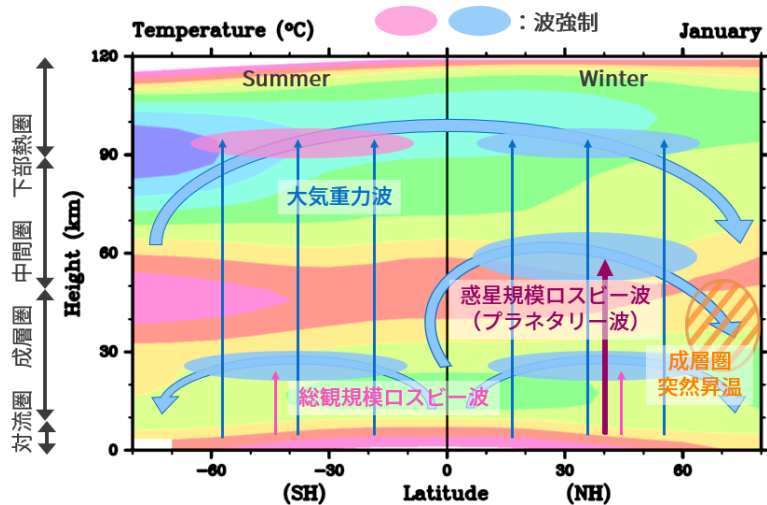


図1 緯度高度断面における1月の気温分布（色）と中層大気の大循環（曲線矢印）の模式図。矢印は主な波の伝播、楕円は波の与える強制（赤は東向き、青は西向き強制）を表す。斜線の領域は成層圏突然昇温時の主な昇温域を表す。

（西向き）の波強制（EPFD < 0）域では極向きの流れが駆動され、補償流として赤道側下方で上昇、極側下方で下降する残差平均鉛直風 \bar{w}^* が生じる。

冬半球中・上部成層圏では、PWの負の波強制による赤道から極へ向かう循環が存在する。大振幅のPWにより負の波強制が強まると、この循環が強められ、下降流強化に伴う断熱圧縮により冬極域成層圏の気温が数日で数十Kも上昇する**成層圏突然昇温 (stratospheric sudden warming; SSW)** と呼ばれる現象が発生する。図2は、2008/09年SSW時の北緯70°東西平均気温の時間高度断面図である。SSWは温度極大である成層圏界面の下降として捉えられるが、いくつかの大規模なSSWにおいては昇温後に成層圏界面が消失し、通常より高高度の $z = 80 \sim 85$ kmにおいて再形成される場合がある。これを**elevated stratopause (ES)** と呼ぶ[e.g., Manney et al. JGR 2008]。

ESをはじめ、SSW時の中層大気の力学変動に対するGWやPWの相対的役割については多く調べられているが[e.g., Tomikawa et al. JGR 2012; Limpasuvan et al. JASTP 2012]、まだ十分解明されていない。中層大気においてはPWとGWはそれぞれ単独に働くばかりでなく、PWとGWの協働が重要との指摘もある[Sato & Nomoto JAS 2015]。そこで本研究では、GW解像大気大循環モデル(GCM)を用いた各波成分の寄与の定量的解析を通じ、SSWに伴う中層大気全体の力学変動のメカニズム解明に取り組んだ。

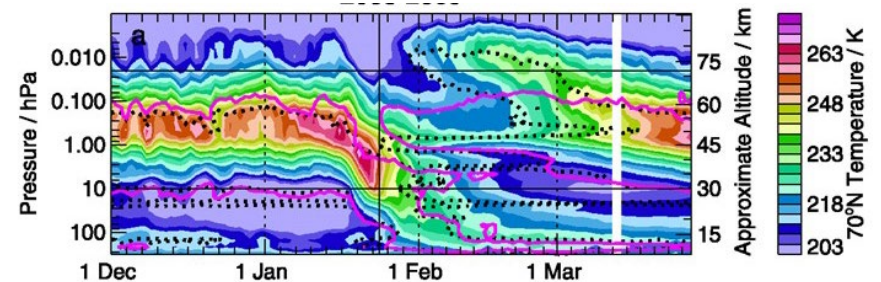


図2 Aura MLS衛星観測データによる2008/09年成層圏突然昇温発生時の北緯70°の東西平均気温の時間高度断面図 [Manney et al. GRL 2009]。破線および赤の実線はそれぞれAura MLSと衛星観測システムGEOS-5による静的安定度が $4 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$ の高度を示す。

2. 研究手法

使用したモデルは、Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research (JAGUAR) [Watanabe & Miyahara JGR 2009]である。方程式と計算手法についてページ下部のパネルに示す。モデルの詳細を以下の表に示す。

高度範囲	地表～約150km	ビッグデータ
解像度	水平解像度: T639 ($\lambda_h \geq 60\text{km}$), 鉛直解像度: 300m (340層)	
重力波パラメタリゼーション	なし	
初期値	中解像度JAGUAR (T42L124) で作成した解析値 ◀ PREPBUFR, MLS, SABER, SSMISのデータを4D-LETKFにより同化[Koshin et al. 2020; private communication]	
計算サイクル	ナudging1日, スピンアップ2日, フリーラン4日 → 解析	
計算期間	2018年12月5日～2019年1月17日 (11ラン)	

本実験は、世界初の重力波解像ハイトップモデルを用いた現実大気のSSW再現実験に位置付けられる。ナudging期間は運動量が保存せず、また、計算開始直後に放射されるGWの影響を除くため、解析には2日のスピンアップ後の4日間のフリーランの結果のみを使用した。このサイクルを繰り返し、解析対象期間全体の結果を得ている。波強制の解析には、Transformed Eulerian-mean (TEM) primitive方程式系[Andrews & McIntyre 1976]および3次元理論[Kinoshita et al. 2019; Kinoshita & Sato 2013]を用いた。渦位 (potential vorticity; PV) を除き、鉛直座標はlog-p座標系である。平均流の安定性の解析にはLait [1994]のmodified PV (MPV) を用いた。PWを東西波数1~3の波、GWを水平全波数21以上の波と定義した。

モデルで用いている方程式：Primitive方程式系と計算手法

$$\begin{aligned} \bar{u}_t + \bar{v}[(a \cos \varphi)^{-1}(\bar{u} \cos \varphi)_\varphi - f] + \bar{w}\bar{u}_z - \bar{X} &= -(a \cos^2 \varphi)^{-1}(\bar{v}'u' \cos^2 \varphi)_\varphi - \rho_0^{-1}(\rho_0 \bar{w}'u')_z & (1) \\ \bar{v}_t + a^{-1}\bar{v}\bar{v}_\varphi + \bar{w}\bar{v}_z + \bar{u}(f + \bar{u}a^{-1}\tan \varphi) + a^{-1}\bar{\Phi}_\varphi - \bar{Y} &= -(a \cos \varphi)^{-1}(\bar{v}'^2 \cos \varphi)_\varphi - \rho_0^{-1}(\rho_0 \bar{w}'v')_z - \bar{u}'^2 a^{-1} \tan \varphi & (2) \\ \bar{\Phi}_z - H^{-1}R\bar{\theta} \exp(-\kappa z/H) &= 0 & (3) \\ (a \cos \varphi)^{-1}(\bar{v} \cos \varphi)_\varphi + \rho_0^{-1}(\rho_0 \bar{w})_z &= 0 & (4) \\ \bar{\theta}_t + a^{-1}\bar{v}\bar{\theta}_\varphi + \bar{w}\bar{\theta}_z - \bar{Q} &= -(a \cos \varphi)^{-1}(\bar{v}'\theta' \cos \varphi)_\varphi - \rho_0^{-1}(\rho_0 \bar{w}'\theta')_z & (5) \end{aligned}$$

- (1) 東西方向運動方程式 \bar{A}, \bar{A}' : Aの東西平均量とそこからの偏差
 (2) 南北方向運動方程式 u, v, w, θ, Φ : 東西・南北・鉛直風、温位、ジオポテンシャル
 (3) 静水圧平衡の式 t, φ, z : 時間、緯度、高度
 (4) 連続の式 $a, f, \rho_0, H, R, \kappa$: 地球半径、コリオリパラメータ、標準密度、スケールハイト、大気の気体定数、 R/c_p (c_p は定圧比熱)
 (5) 熱力学方程式 X, Y, Q : 東西・南北方向の非保存的な効果、非断熱加熱

上の方程式を離散化し、Leap-frog法により積分を行っている。本モデルの力学コアは全球スペクトルモデルで、三角形切断のため全球様な水平解像度を持つ。

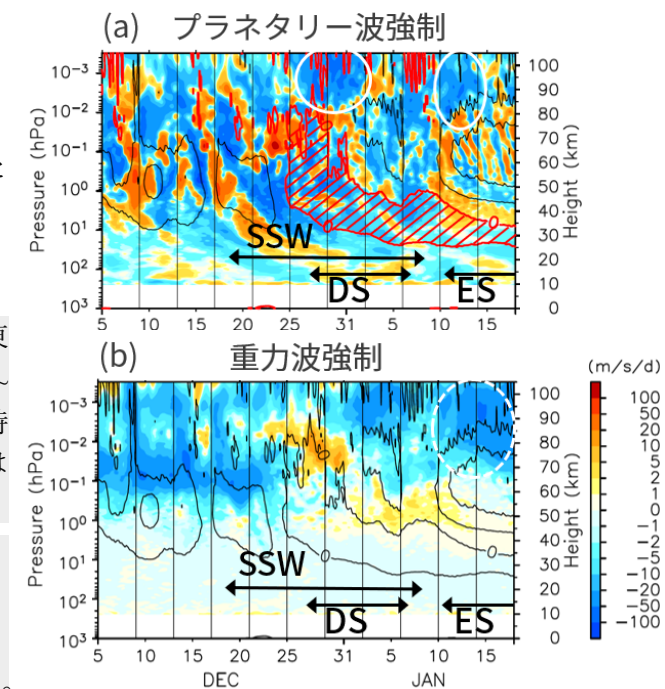
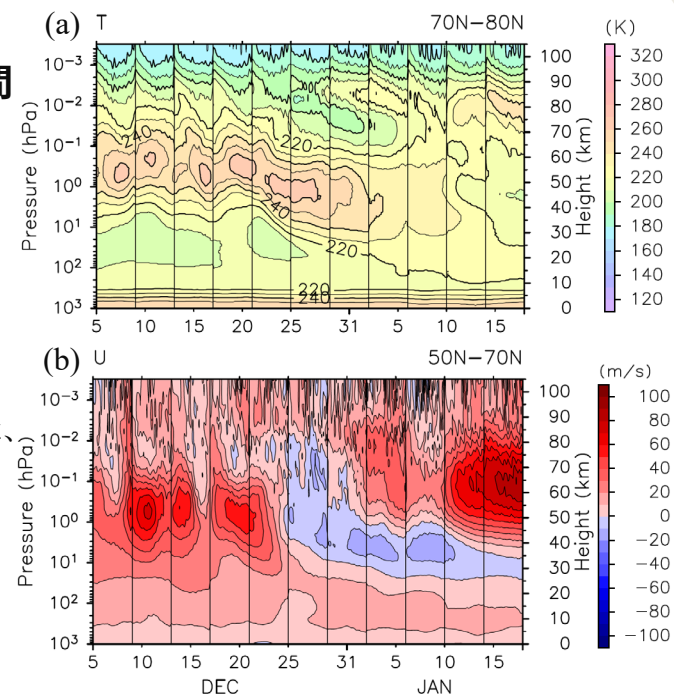
3. 結果

3.1 東西平均場の時間変化

図3は、北緯70~80°の東西平均気温および北緯50~70°の東西平均東西風の時間高度断面図である。SSWに伴う成層圏界面の下降が12月下旬から1月初旬にかけてみられる。1月10日以降には、高度80 km付近にESとみられる温度極大が生じている。ここで、12月28日以降、成層圏界面の消失以前に、高度85~90 kmに温度極大が生じていることに注目されたい。このとき、温度極大は鉛直方向に2つ存在する。そこで、本研究ではこの構造を2重成層圏界面 (double stratopause; DS) と呼ぶこととし、ESの形成過程とともにこのDSの形成についても詳しく調べた。

図3(上) (a) 北緯70~80°の東西平均気温、(b) 北緯50~70°の東西平均東西風の時間高度断面図。縦の線は各ランの境界を示す。

図4(下) 北緯50~70°の (a) PWと (b) GWのEPFDの時間高度断面図。コンターは東西風 (20m/s毎)。



東西平均東西風は、12月25日頃に高度40~80 km付近で西風から東風へと転じ、その後東風が下降して1月10日頃強い西風が回復している。

続いて、図4に北緯50~70°平均のPWおよびGWの波強制の時間高度断面図を示す。DS形成期間にはプラネタリー波強制が、ES形成期間にはプラネタリー波強制と重力波強制の両方が高度80 km以上で負であることがわかる。これらは極域で下降流を駆動し、DS、ES形成に寄与したと考えられる。なお、これら2つ以外の波成分の寄与は常に小さかったため、ここではこれらにのみ注目する。

ここで、PW強制の図に示す赤の斜線の領域では、平均風が東風となっている。PWのようなロスビー波は、東風中を伝播することができないため、対流圏を起源とする波は強制域に到達しにくいと考えられる。そこで、どのようにしてこれらの強制がもたらされたか、以下で詳しく見ていく。

3.2 Double stratopause (DS) の形成

図5は、4日毎に平均した気温、東西風、MPV、PWおよびGWの波強制の緯度高度断面図である。最後の期間の図5cには極域の高度80 km付近に温度極大が生じており、DSが形成されていることがわかる。図5aの期間には、高度65km、北緯50°で強い負の、その低緯度側で正のGW強制がみられる。この中間の領域では、上昇流が駆動される。この上昇流収束域にあたる、3500K温位面、北緯40°にはMPV極大が見られる。MPVは静的安定度と渦度の積で決まるため、このMPV極大は下方の上昇流による気温の低下で静的安定度が上昇したことで生じたと推測される。極大の高緯度側ではMPVの緯度勾配が負であり、これは順圧/傾圧不安定の必要条件を満たしている。

その後、図5bの期間には先ほどのMPV極大の高緯度側にPWの正の強制が現れている。これは、PWの励起を示唆する特徴である。このとき、MPVの負の緯度勾配は緩められていることが分かる。また、このとき、高度70 km、北緯30°の極に向かって傾いた西風ジェットの上方では負、下方では正のGW強制が見られる。これらの波強制に挟まれた領域では下降流が駆動される。この領域では、気温の図に破線で示したように、弱い高温域が生じている。この下方にあたる北緯45~80°、5000~8000 Kの領域にMPV極大が現れていることがわかる。このような位置関係から、この期間においても下降流によって昇温が発生したことによって下方で静的安定度が上昇し、MPVが上昇したと考えられる。極大の高緯度側では、再びMPVの緯度勾配が負である。

図5cにおいては高度70~80 km付近で正のPW強制が生じており、MPVの負の

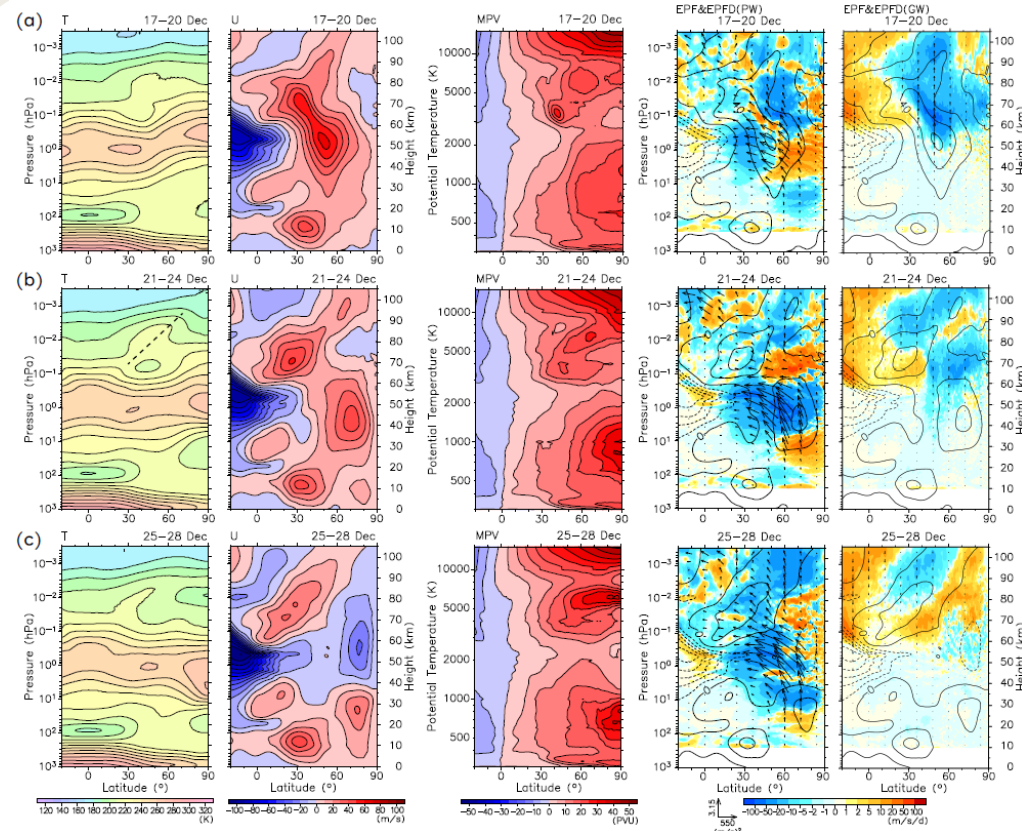


図5 12月 (a) 17~20日、(b) 21~24日、(c) 25~28日における (左から右に) 気温、東西風、MPV、PWとGWのEPFDの緯度高度断面図。EPFDの図のコンターは東西風 (20 m/s毎) で矢印はEPフラックスを表す。

緯度勾配はほぼ解消されている。これらの事実は、重力波強制に起因して生じた鉛直風により平均流の不安定化が起こり、PWが励起されたことを示唆している。これらのPWが上方伝播し、高度80 km以上の負の波強制 (図4a・5c) をもたらしDS形成に寄与したと考えられる。

3.3 Elevated stratopause (ES) の形成

ES形成前の1月6~9日には、PW強制は中層大気全層で負値を示していた。また、MPV極大が北緯60°付近に存在していた (not shown)。図6はこのときのMPVとジオポテンシャルハイト (GPH) の北半球の水平分布を示している。GPHは地衡流的である極渦の形状を示すが、GPHが極小である極渦の中心にMPV極大が見られる。極渦は東経60°付近でコマ状に歪んでいる。これは、PWの碎波に典型的な構造である。つまり、PWの碎波に伴う東経60°側での混合により、極渦中

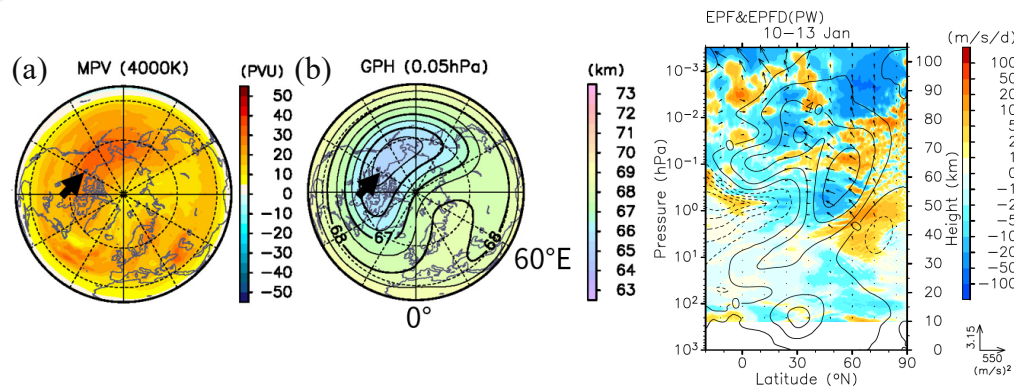


図6 1月6~9日の (a) MPVおよび (b) GPHの北半球正射図。矢印はおおよその極渦中心の位置を示す。

心とともに低緯度側にシフトしたMPV極大が東西平均場における北緯60°付近の極大として現れていると考えられる。このうち、ES形成時にはMPV極大の高緯度側で正のPW強制が、その上方で負のPW強制が生じている(図7)。つまり、ここではPW強制によって生じた不安定でPWが2次的に励起され、極域の高度80 km以上で負の強制を与えてES形成に寄与したと考えられる。

3.4 ESの東西非対称性

図8は、ES形成時の1月10~13日におけるGPHの北半球の水平分布を中心に、周りに星印の地点における気温の時間高度断面図を示している。黄色の★の地点では赤い矢印で示すようにESの形成が見られるが、白い☆の地点ではESの形成が見られないか、あるいは非常に不明瞭である。このときの鉛直風と波強制的分布を図9に示す。ESありの地点では下降流が見られる一方、ESなし地点では鉛直風はほとんど0である。

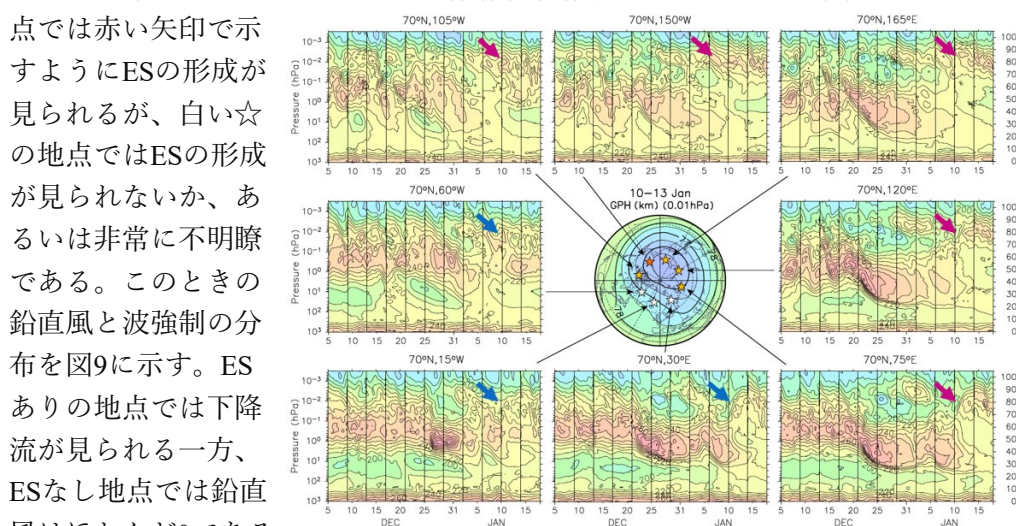


図8 1月10~13日のGPHの北半球正射図と星印の地点での気温の時間高度断面図。

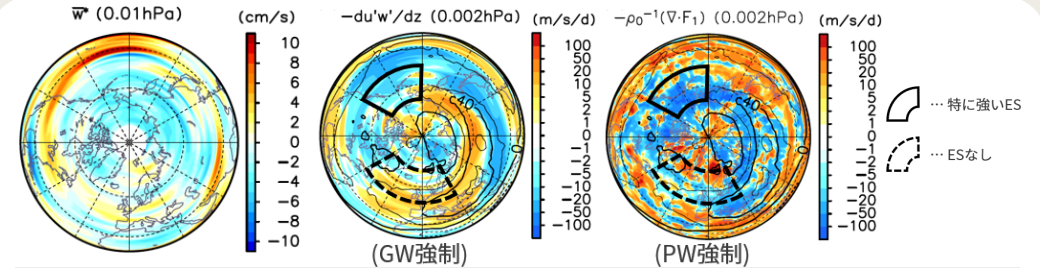


図9 1月10~13日の残差平均鉛直風、GW強制、PW強制の北半球正射図。

経度帯ではどちらの強制も負の一方、ESなしの経度帯では高緯度側でPW強制が正、低緯度側でGW強制が正であり、正味の波強制はおおよそ0または正にであることがわかる。よって、ESと波強制の経度依存性は整合的であるといえる。

4. まとめ

高解像度ハイトップGCMによる2018/19年SSW再現実験の出力結果を北半球中層大気の平均場の変動と波強制に着目して解析した。

- Double stratopause (DS) 形成過程： **PWF**が重要
- Elevated stratopause (ES) 形成過程： **PWF, GWF**が重要
- **中層大気中で励起されたPW**がDSとESの形成に寄与

↑ { DS形成時： **GWF** }
 { ES形成時： **PWF** } により生じた **BT/BC不安定** から放射

- ESの東西非対称性と正味の波強制の経度構造は整合的な関係を示した

また、ここでは示さなかったが、GWの運動量フラックスは、斜め方向の伝播あるいは中層大気中での波の発生のDS・ES形成における重要性を示唆していた。このことから、GWパラメタリゼーションでは表現できない波が重要な役割を果たした可能性が考えられる。DSとESの考え得る関係として、ES形成に寄与した波は極域中間圏の西風中を伝播し強制域に到達しており、この西風の回復に、放射緩和に加えて **DSの温度構造が影響した可能性**がある。

今後の展望

- 南半球も含めてSSW発生時の中層大気の力学変動を調べる。特に、南北半球間結合 [e.g., Karlsson et al. 2009] のメカニズム解明に取り組む。
- GWの特徴を表す各パラメータを調査し、全球・全中層大気でのGWの振舞いの定量的解明を目指す。また、2次発生GW [e.g., Vadas & Becker 2018] や、間欠性 [e.g., Minamihara et al. 2020], 中間圏逆転層 (mesospheric inversion layer) における非線形的な振舞い [Fritts et al. 2018], 斜め方向伝播 [e.g., Sato et al. 2009, 2012] など、**GWに関する新しい観点**での研究を進める。