

対流圏-成層圏相互作用が 2013/2014 年冬季の北米における低温に与えた影響

竹村和人・田中昌太郎・及川義教・宮岡健吾（気象庁気候情報課）

1 はじめに

2013/2014 年冬（2013 年 12 月～2014 年 2 月）は、北米中・東部ではたびたび寒波に見舞われ、社会経済活動に大きな影響が生じた。気象庁では、社会的に大きな影響をもたらした異常気象が発生した場合に、その特徴と要因、天候の見通しをまとめた情報を随時発表しており、2013 年 12 月から 2014 年 1 月にかけての北米の顕著な寒波に関して報道発表¹を行った。

この寒波と関連する循環場を解析した結果、低温をもたらした北米中・東部におけるトラフの強化には、熱帯の対流活動を含む対流圏循環の変動に加えて、下部成層圏におけるプラネタリー波の反射が関連した可能性が考えられる。このプラネタリー波の反射をはじめとする対流圏-成層圏の相互作用は、近年着目されている現象であり、先行研究において多く報告されている。例えば、Perlwitz and Harnik (2003) は、高度の鉛直構造に関する解析結果より、プラネタリー波が成層圏から対流圏に下方伝播する可能性を示し、これには極夜ジェットの構造が関連することを示した。また、Kodera et al. (2008, 2013) も事例解析の結果よりプラネタリー波の反射が生じる可能性を示した。

ここでは、冬の天候や循環場の特徴について述べるとともに、北米の寒波に関する上記の先行研究を踏まえた要因分析の結果について報告する。

2 2013/2014 年冬の循環場の特徴

2013/2014 年冬は、北米で広く低温となり、特にカナダ南部から米国南部にかけては顕著な低温となった。一方、東シベリアからアラスカにかけては高温となった（第 1 図）。

冬平均の海面水温は、中・東部太平洋赤道域で低温偏差、西部太平洋熱帯域で高温偏差となった（第 2 図(a)）。熱帯の対流活動は、平年と比べて、海洋大陸から太平洋西部にかけて活発となり（同図(b)）、これと対応して対流圏上層では発散偏差となった（同図(c)）。

対流圏中・上層では、北西太平洋や東アジア東部付近から北米、大西洋にかけて準定常ロスビー波束の伝播が明瞭となり、北米西部では高気圧性循環偏差（リッジ）、北米中・東部では低気圧性循環偏差（トラフ）となった（第 3 図(a)と(b)）。このことは、気候値で見られるリッジとトラフが強化されたことを示している（図省略）。フィリピンの東海上の高気圧性循環偏差（同図(a)）の形成やそこからの北東向きの波束伝播には、海洋大陸から太平洋西部にかけての活発な対流活動が寄与した可能性が考えられるが、このことについては次節で述べる。海面気圧は北米西部で高気圧偏差、東部で低気圧偏差となり、北米中・東部では北からの寒気が流入しやすい状態となった（同図(c)）。

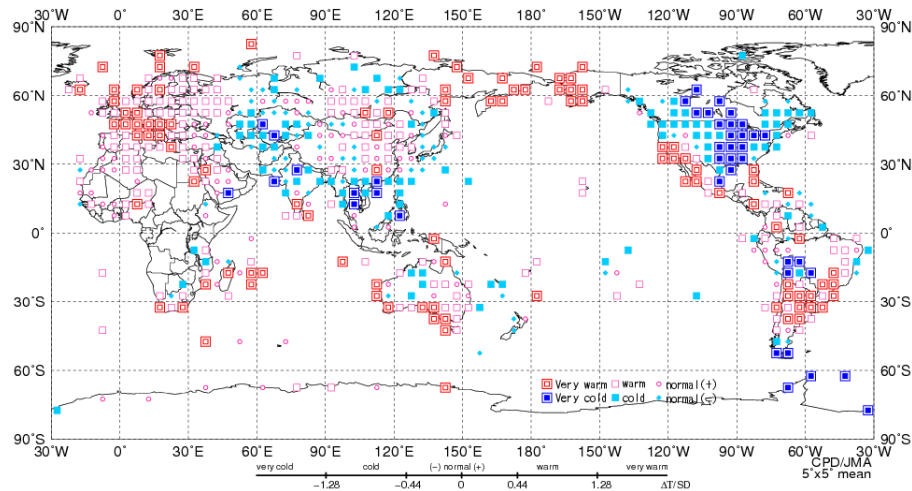
北半球成層圏では、アリューシャン高気圧が発達し、極うずの中心はカナダ側に偏った（第 4 図(a)）。100hPa 面では、プラネタリー波がシベリアからベーリング海付近で上方伝播しており（同図(b)）、シベリアからベーリング海にかけてのトラフが西に傾いていることと対応している（同図(c)）。上方伝

¹

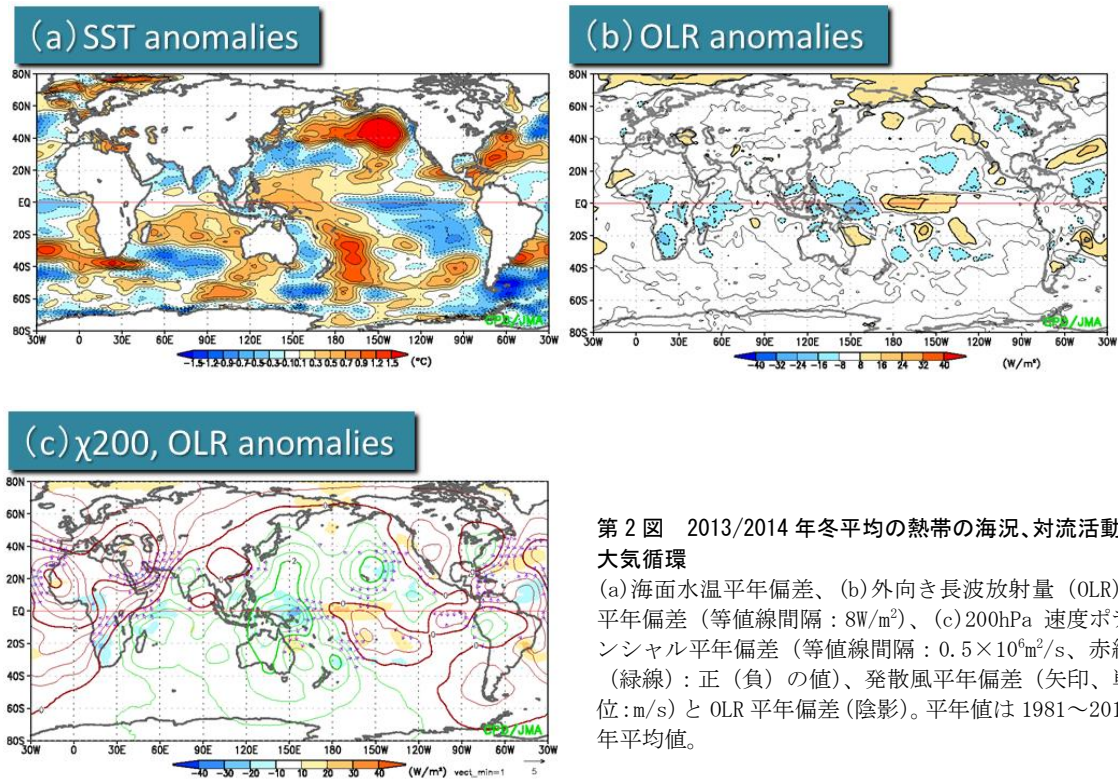
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1401/22a/world20140122.html>

播した波束の一部は、下部成層圏において伝播の向きを変え、カナダ付近で下方伝播しており（同図(b)と(c))、北米中・東部のトラフの強化に寄与したように見える（第3図

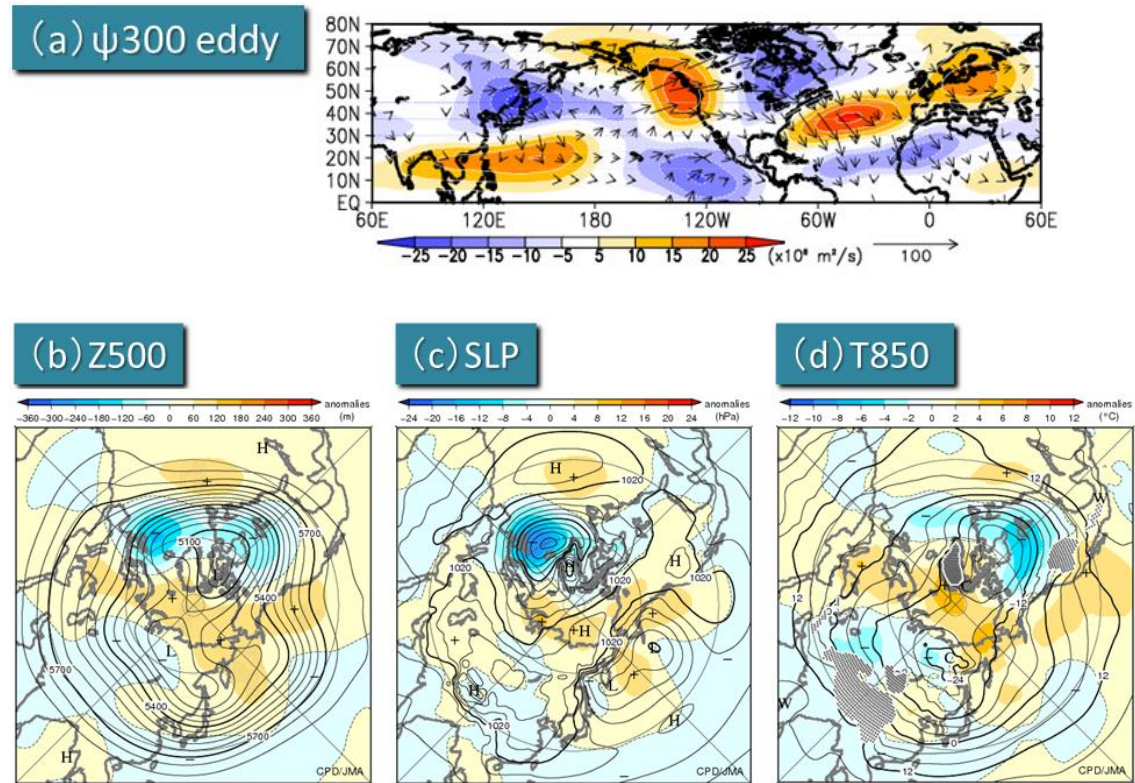
(b))。このようなプラネタリー波の伝播の特徴は、先行研究で報告されているプラネタリー波の反射と類似している。



第1図 2013/2014年冬（2013年12月～2014年2月）平均気温の規格化平年差の分布
3か月平均気温の平年差を標準偏差で割り、規格化した。平年値及び標準偏差は、1981～2010年のデータに基づく。



第2図 2013/2014年冬平均の熱帯の海況、対流活動、大気循環
(a)海面水温平年偏差、(b)外向き長波放射量（OLR）平年偏差（等値線間隔：8W/m²）、(c)200hPa 速度ポテンシャル平年偏差（等値線間隔：0.5×10⁶m²/s、赤線（緑線）：正（負）の値）、発散風平年偏差（矢印、単位：m/s）と OLR 平年偏差（陰影）。平年値は1981～2010年平均値。



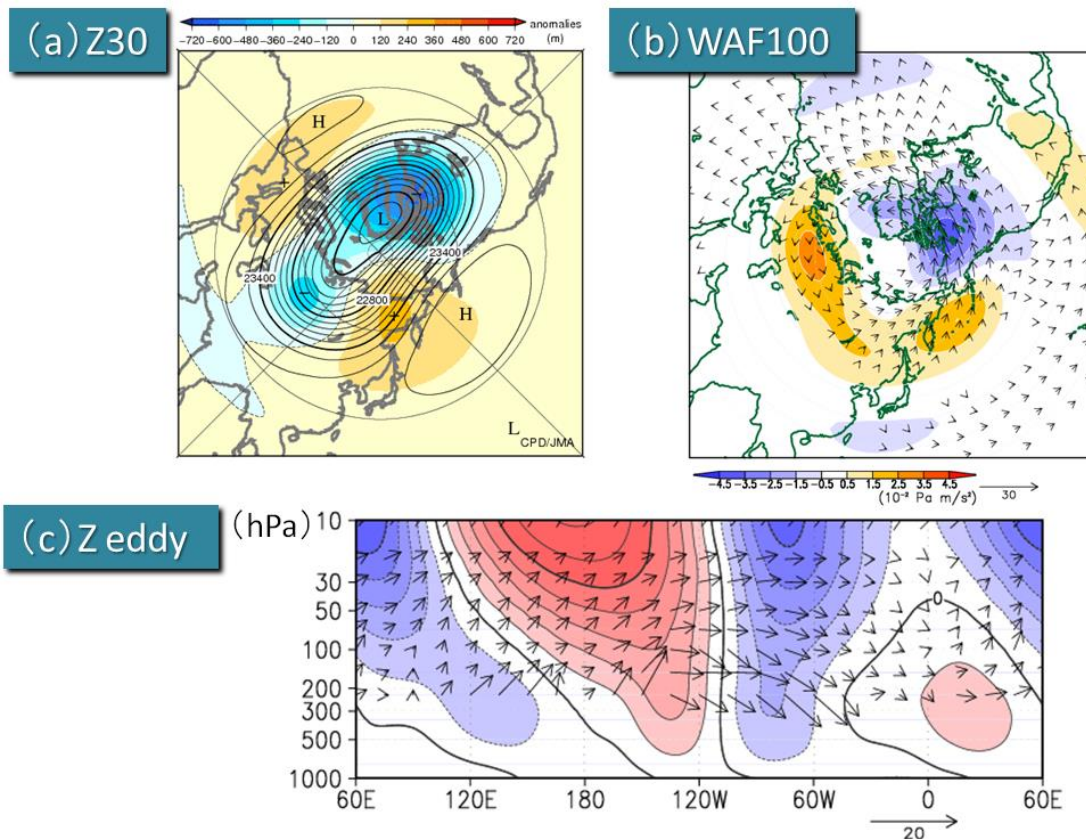
第 3 図 2013/2014 年冬平均の北半球中高緯度の大気循環

(a) 300hPa 流線関数の帯状平均からのずれ(陰影; 単位は m^2/s) と Plumb(1985) の波の活動度フラックス、(b) 500hPa 高度、(c) 海面気圧、(d) 850hPa 気温。等値線間隔は (b) 60m、(c) 4hPa、(d) 4°C で、陰影は平年偏差。平年値は 1981～2010 年平均値。

3 熱帯の対流活動による北半球の循環場への影響

前項で述べたように、冬平均の熱帯の対流活動は、海洋大陸から太平洋西部にかけて平年と比べて活発となった。線形傾圧モデル (Linear Baroclinic Model: LBM, Watanabe and Kimoto 2000) を用いて、この領域における非断熱加熱平年偏差 (第 5 図(a)) に対する大気の定常応答を調べた。その結果、対流圏上層では海洋大

陸から西部太平洋熱帯域にかけて発散偏差の応答を示し (同図(b))、300hPa の流線関数では、2013/2014 年冬平均の循環場の偏差パターン (第 3 図(a)) と類似した、北西太平洋から北米にかけての波列パターンがみられる (第 5 図(c))。この結果より、海洋大陸から太平洋西部にかけての活発な対流活動が、北西太平洋から下流側への波束伝播を通して、北米中・東部の低温に寄与した可能性がある。



第4図 2013/2014年冬平均の(a)30hPa高度及び平年偏差、(b)100hPaのPlumb(1985)の波の活動度フラックスの水平成分(矢印; 単位: m^2/s^2)と鉛直成分(陰影; 単位: $\text{Pa} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)と(c)40°N~80°Nで平均した高度の帯状平均からの差(等値線、陰影: 100m間隔)及び波の活動度フラックス(矢印)の経度-高度断面図

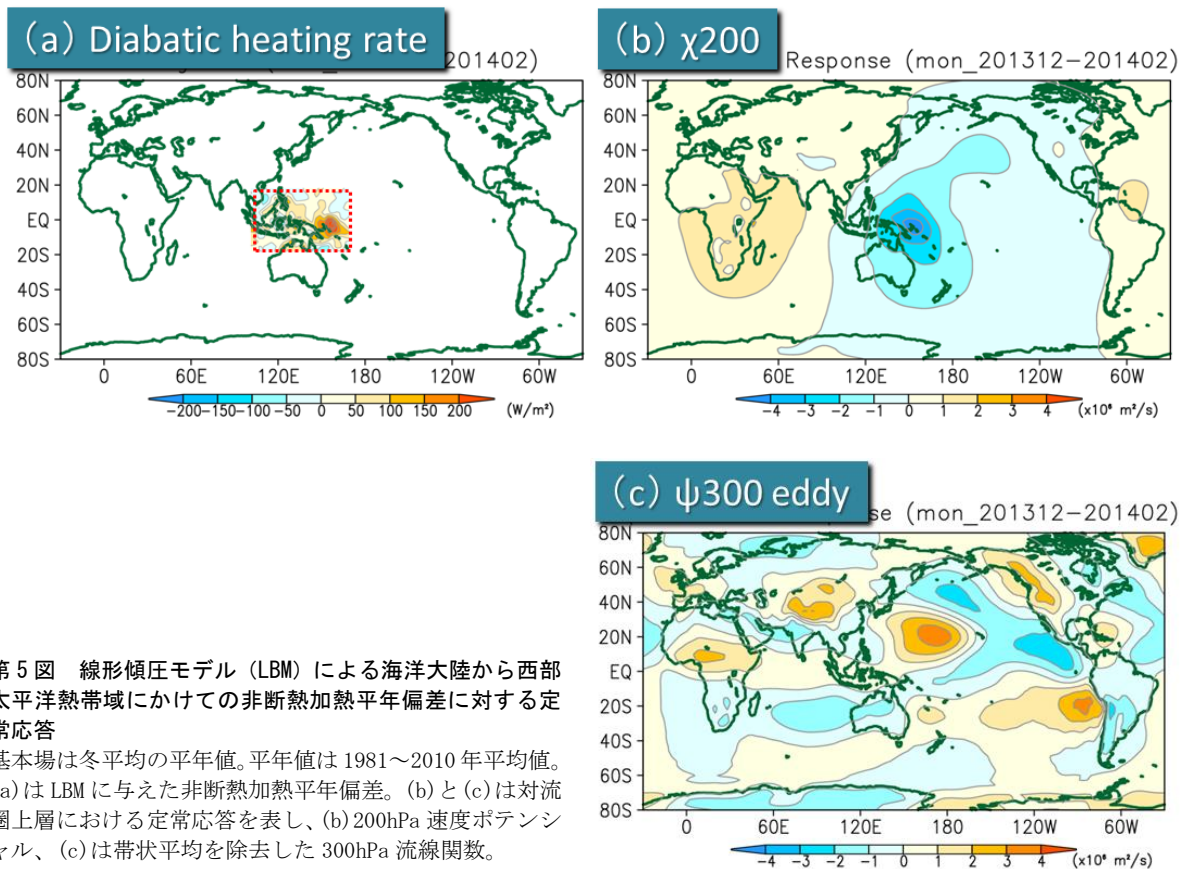
(a)等値線間隔は120m。波の活動度フラックスの単位は、水平成分は m^2/s^2 、鉛直成分は $\text{Pa} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。(b)正の値(暖色)は上方伝播を、負の値(寒色)は下方伝播を示す。平年値は1981~2010年平均値。

4 1月後半の低温イベントの事例解析

冬の期間の北米中・東部における対流圏下層の気温は、1月中旬前半や2月中旬後半頃を除いて平年と比べて低くなり、たびたび顕著な低温となった(第6図の青点線)。一方、カナダ北部付近では、プラネタリー波の反射と関連して、波束が下方伝播しやすかった(同図の赤線)。これらの時系列より、カナダ北部付近でのプラネタリー波の下方伝播に数日遅れて、北米中・東部で低温が明瞭になる傾向がみられる。ここでは、代表例として、1月後半の北米中・東部における低温について、循環場の推移を示す。

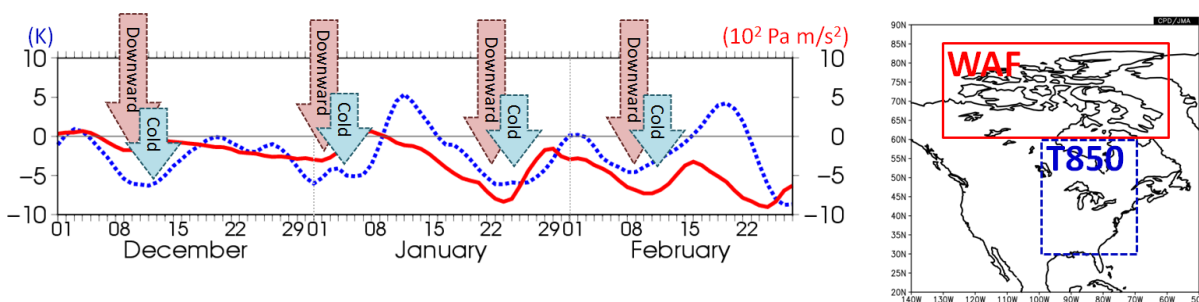
1月中旬前半では、対流圏から成層圏にかけてのプラネタリー波の上方伝播は弱かったが、

対流圏上層では北西太平洋に高気圧性循環偏差がみられ、そこから北東への波束伝播がみられた(第7図(a)の下段)。中旬後半から下旬前半にかけて、北西太平洋やシベリア・ベーリング海付近から大西洋にかけての波束伝播が明瞭になるとともに(同図(b)と(c)の下段)、鉛直伝播もみられた(同図(b)と(c)の上段)。ベーリング海付近で上方伝播したプラネタリー波は、下部成層圏で反射してカナダ付近で下方伝播しており、北米中・東部のトラフの強化に寄与したようにみえる。下旬後半以降は、プラネタリー波の反射や北米中・東部のトラフは弱まった。



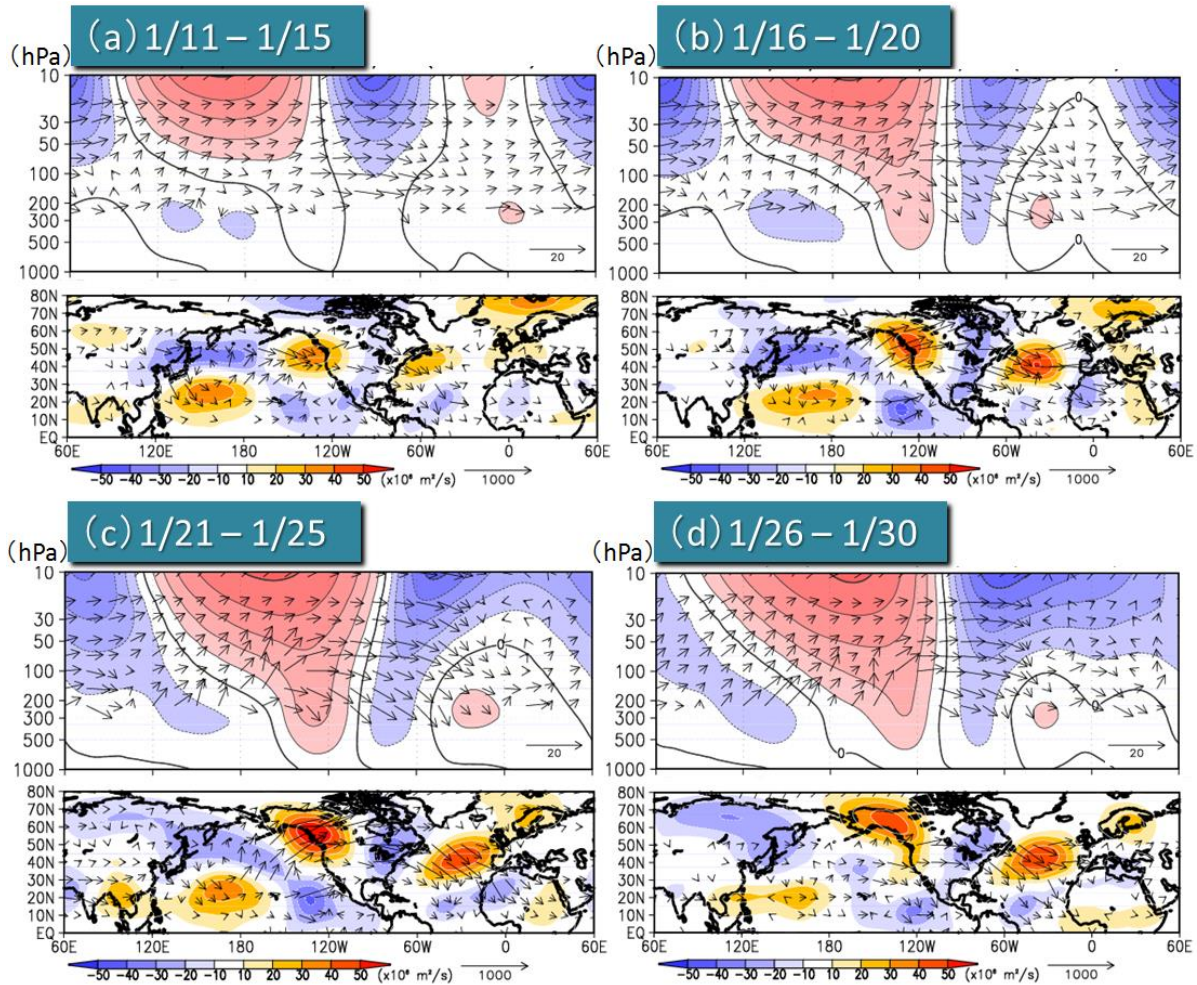
第5図 線形傾圧モデル (LBM) による海洋大陸から西部太平洋熱帯域にかけての非断熱加熱平年偏差に対する定常応答

基本場は冬平均の平年値。平年値は1981～2010年平均値。(a)はLBMに与えた非断熱加熱平年偏差。(b)と(c)は対流圏上層における定常応答を表し、(b)200hPa速度ポテンシャル、(c)は帯状平均を除去した300hPa流線関数。



第6図 カナダ北部付近 (60°N～85°N、130°W～80°W; 右図の赤枠領域) で領域平均した100hPaの波の活動度フラックス (Plumb 1985) の鉛直成分 (赤線) と、北米中・東部 (30°N～60°N、100°W～70°W、右図の青枠領域) で領域平均した850hPa気温平年偏差 (青点線) の5日移動平均の時系列 (2013年12月1日～2014年2月28日)

波の活動度フラックスの鉛直成分の正 (負) の値は上方 (下方) 伝播を示す。平年値は1981～2010年平均値。



第 7 図 (上段) 40°N～80°N で平均した高度の帯状平均からの差 (等値線、陰影; 200m 間隔) と波の活動度フラックス (矢印) の経度-高度断面図、及び (下段) 300hPa 流線関数の帯状平均からのずれ (陰影; 単位は m^2/s) と波の活動度フラックス

(a) 2014 年 1 月 11 日～15 日、(b) 1 月 16 日～20 日、(c) 1 月 21 日～25 日、(d) 1 月 26 日～30 日。波の活動度フラックスは Plumb (1985) に基づき、単位は水平成分は m^2/s^2 、鉛直成分は $\text{Pa} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

この期間における 3 次元に拡張した定常波の屈折率² (Karoly 1983) をみると、1 月中旬後半以降、反射がみられた領域の上空には屈折率が小さな領域が、下層には屈折率が大きな領域

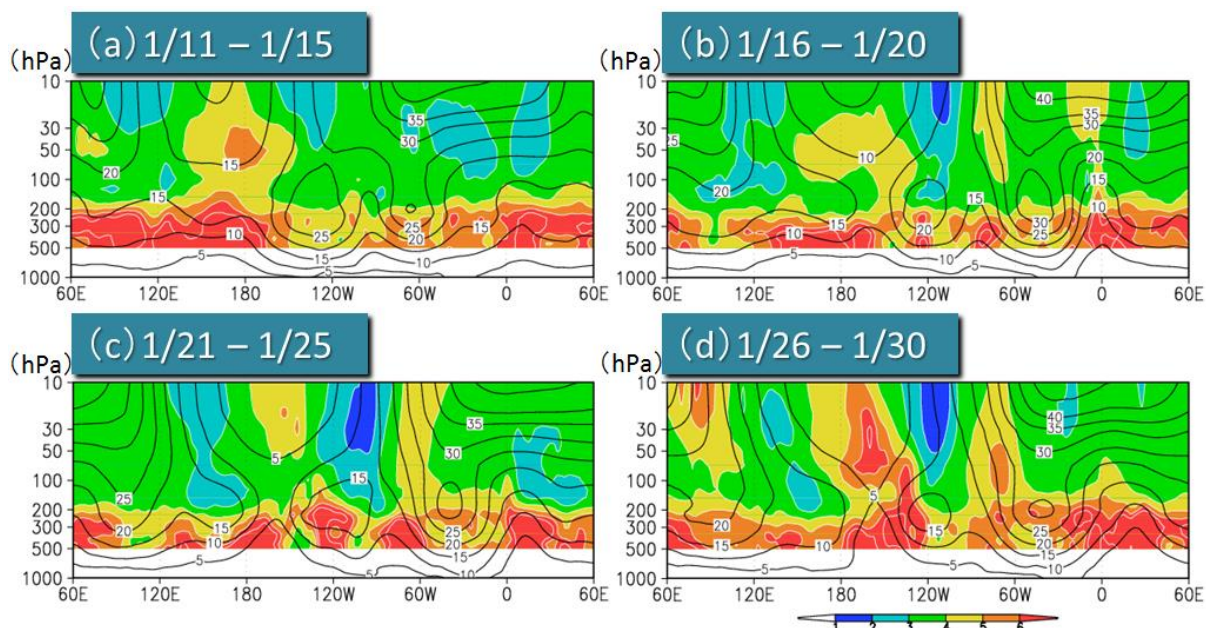
がみられ、プラネタリー波の反射との対応がみられる (第 8 図)。この屈折率の分布と極夜ジェットの変化との対応については、詳しく調査する必要がある。

このような循環場の特徴は、この冬の期間における他の事例でもみられた。以上の結果より、対流圏-成層圏相互作用が北米中・東部における寒波と関連した可能性が考えられる。

² 定常波の 3 次元伝播の特性を表す量であり、その 2 乗量は次の式で定義される (Karoly 1983)。

$$K_s^2 = \frac{|\nabla_H Q|^2}{|U|^2} - \frac{f_0^2}{4N^2 H_0^2} \left(1 - 4H_0 N \frac{dN^{-1}}{dz} + 4H_0^2 N \frac{d^2 N^{-1}}{dz^2} \right)$$

ここで、 $\mathbf{U}$ は水平風ベクトル、 f_0 はコリオリパラメーター、 N はブラント-ヴァイサラ振動数、 H_0 はスケールハイト、 Q は準地衡ポテンシャル渦度、 ∇_H は水平勾配演算子を表す。屈折率が正で大きな領域はロスビー波の導波管に対応し、波は屈折率の大きな領域に向かって伝播する。算出方法は Nishii and Nakamura (2004) に従い、 N の鉛直微分の項は十分小さいとして無視した。



第 8 図 40°N~80°N で平均した 3 次元に拡張した波の屈折率 (陰影) と東西風 (等値線: 5m/s 間隔で 0m/s の線は省略) の経度-高度断面図

(a) 2014 年 1 月 11 日~15 日、(b) 1 月 16 日~20 日、(c) 1 月 21 日~25 日、(d) 1 月 26 日~30 日。屈折率は Karoly (1983) の定義に基づいて算出し、地球半径を乗じて無次元化した。

5 まとめ

2013/2014 年冬 (2013 年 12 月~2014 年 2 月) は、北米中・東部では顕著な低温となった。この低温と関連する大気循環場の特徴とその要因についての解析結果の概要は、以下のとおりである。

- ・ 冬平均の循環を解析すると、北西太平洋から北米、大西洋にかけてプラネタリー波束の伝播が明瞭であり、これは北米西部の明瞭なリッジと北米中・東部の顕著なトラフの形成 (気候値で見られるリッジとトラフの強化) に寄与したと考えられる。
- ・ 線形傾圧モデルを用いた実験より、この波束伝播には、海洋大陸から西部太平洋熱帯域にかけての活発な対流活動が関連したと考えられる。
- ・ 波束は、中・高緯度域において鉛直伝播を伴い、シベリアからベーリング海付近で上方伝播した波束は、下部成層圏において反

射してカナダ付近で下方伝播し、北米中・東部におけるトラフの強化に寄与したと見られる。このことから、プラネタリー波の反射が北米中・東部の低温を強めた可能性が考えられる。

プラネタリー波の反射と北米大陸での低温の関係については、先行研究 (たとえば、Kodera et al. 2008) の結果と整合しているが、波の反射と関連する極夜ジェットの変動の特徴については、より詳細な調査・研究が必要である。

参考文献

- Karoly, D. J., 1983: Rossby wave propagation in a barotropic atmosphere. *Dyn. Atmos. Oceans*, **7**, 111-125.
- Kodera, K., H. Mukougawa, and S. Itoh, 2008: Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L1806, doi:10.1029/2008GL034575.
- , and —, and A. Fujii, 2013: Influence of the vertical and zonal propagation of stratospheric planetary waves on tropospheric blockings, *J. Geophys. Res.*, **118**, 8333-8345.

- Nishii, K., and H. Nakamura, 2004: Lower-stratospheric Rossby wave trains in the Southern Hemisphere: A case-study for late winter of 1997. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 325-345.
- Perlwitz, J., and N. Harnik, 2003: Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection, *J. Climate*, **16**, 3011-3026.
- Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 2000: Atmospheric-ocean thermal coupling in North Atlantic: A positive feedback, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 3343-3369.