

2024 年 1 月上旬に発生した成層圏小規模突然昇温における惑星規模波束伝播の特徴と対流圏への影響について

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

1 はじめに

2024 年 1 月中旬、北半球の成層圏で大規模突然昇温が発生したが、これに先立ち 1 月上旬にも 10hPa 気圧面において数日間で約 60K にもおよぶ小規模昇温 (MN_SSW24) が発生していた (第 1 図)。2023/24 年冬季の中では MN_SSW24 における昇温が最も顕著であった。しかしながら WMO の定義では、10hPa 気圧面の極域における東風の卓越が大規模突然昇温と分類される条件とされている (WMO 1987, item 9.4, 35-36)。そこで北半球高緯度の東西風の時間経過を確認すると (第 2 図)、1 月初めに上部成層圏から成層圏界面で西風減速が生じているが、5hPa 気圧面付近から下層は西風が持続している。また 1 月上旬後半には 3~20hPa 付近で弱いながら西風加速が生じている。このため MN_SSW24 は小規模昇温に分類される。なお、1 月中旬には再び上部成層圏で MN_SSW24 より弱い昇温と西風減速が発生し、東風領域が 10hPa より下層に到達して大規模突然昇温となった (大規模突然昇温は 2023/24 年冬季中に計 3 回発生)。

本稿では、何故 MN_SSW24 は季節中最も急激で大きな昇温にも拘わらず、大規模突然昇温に至らなかったかを明らかにすべく、2024 年 1 月上旬を中心とした大気循環場や惑星規模波束伝播についての解析を行なった。また 2024 年 1 月中旬には北米大陸で記録的寒波による被害が発生しており、これに対する MN_SSW24 に関連した惑星規模波束伝播の影響についても考察を行った。

2 使用データおよび解析手法

循環場の解析用データとして気象庁第3次長期再解析 (Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; JRA-3Q, Kosaka et al. 2024) を使用する。等圧面プロダクトは最上層が 0.01hPa 面まで利

用可能であり、等温位面プロダクトも 4000K 温位面まで拡張されている。

角運動量収支や帯状平均場における惑星規模波束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 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) を用いて 3 次元空間内の惑星規模波束の解析を行なう。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束の取り扱いが可能である。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時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 結果

まず初めに 1 月上旬後半に上部成層圏で弱い西風加速が発生した時期の角運動量収支の整合性を確認する。第 3 図に領域平均した帯状平均東西風加速および Andrews et al. (1987) に基づき計算した強制項の時系列図を示す。10.0hPa、2.18hPa の東西風加速をみると (第 3 図 a、b の黒色線)、2024 年 1 月 8 日頃にいずれも加速ピークがみられており、強制項の合計 (第 3 図 a、b の赤色線) とも概ね整合している。また強制項の中でも EPflux の鉛直発散 (divEPFz、第 3 図 e、f の紫色線) が 10.0hPa、2.18hPa のどちらのレベルでも寄与が大きい。ただし、2.18hPa 面では EPflux の水平発散 (divEPFz、第 3 図 f の橙色線) も一部寄与している。つまり 1 月上旬後半の上部成層圏における西風加速には、主に波動による強制の寄与が

大きかったと言える。そこで 2024 年 1 月 8 日における全波数と東西波数別の、EPflux およびその収束発散の緯度-高度断面図をみると(第 4 図)、全波数では(第 4 図 a)、上部成層圏の明瞭な EPflux の発散や下部成層圏の下方伝播がみられているが、東西波数 1 成分(WN1)で計算された EPflux では(第 4 図 b)、成層圏全域で上方伝播を示していることに加えて、上部成層圏で EPflux の収束が分布しており、全波数で示されている特徴を説明できない。一方、東西波数 2、3 成分(WN2、WN3)による EPflux では(第 4 図 c、d)、下方伝播が明瞭にみられ、成層圏界面から上部成層圏で EPflux の発散が明瞭であり、同領域で WN2、WN3 が生成・増幅された可能性を示唆している。なお、WN4~6 による EPflux についても下部成層圏で弱い下方伝播がみられている(第 4 図 e-g)。以上の結果から、成層圏界面付近から上部成層圏において発生・増幅した WN2、WN3 が下方伝播し、その波強制によって西風加速が生じたことによって、MN_SSW24 は大規模突然昇温に至らなかったと考えられる。

これまで帯状平均場における解析結果を述べてきたが、ここからは惑星規模波束の伝播経路を 3 次元空間でみるとどのような特徴を持つのかを示す。3D-flux-W を用いて、2024 年 1 月 8 日頃の下部成層圏における波束伝播の経度分布をみると(第 5 図)、下方伝播はアリューシャン高気圧の東側、60~120° W 帯に集中している。またアリューシャン高気圧の西側では上方伝播がみられており、3 次元空間内における惑星規模波束伝播は東西一様ではないことが分かる。次に上述の 60~120° W 帯に集中している下方伝播において、どのような時間スケールの変動成分の寄与が大きいかわ調査を行った。ここでは 25 日以上の変動成分を定常成分、8~25 日周期帯の変動成分を非定常成分、8 日以下の短周期の変動成分を高周波成分とする。第 6 図に様々な周期帯で計算した 3D-flux-W の鉛直成分(3D-flux-W_z)の経度分布を示す。25 日周期以上の定常成分(第 6 図黄色線)では、時間フィルタ無の場合の下方伝播

ピーク(第 6 図灰色陰影)について、およそ 30%しか説明できない(第 6 図黄色線)。一方、8~25 日周期の非定常成分を含むと 75%まで説明でき、比較的寄与が大きい(第 6 図紫色線)。また同ピークを定量的に全て説明するには高周波の変動も含む必要があることも指摘しておく。上述の 8~25 日周期の非定常成分について、2024 年 1 月 8 日頃の下方向伝播ピーク直前の経過を確認すると(第 7 図)、1 月 5 日から 7 日にかけて、成層圏界面付近から上部成層圏において波動の増幅がみられ、また 60~120° W 帯では位相の東傾が次第に明瞭となっている。このことから、60~120° W 帯に集中した下方伝播に対して、成層圏界面付近から上部成層圏における波動の増幅が非常に重要であったと考えられる。

ここからは、2024 年 1 月中旬に北米大陸で発生した記録的な寒波イベントに対する上述の 60~120° W 帯に集中した惑星規模波束の下方伝播の同イベントへの影響を考察する。まずこの寒波イベントについて簡単に述べる。カナダアルバータ州メディシンハットでは、1 月 10 日頃から急激に降温し、1 月 14 日には-33.1℃の最高気温を記録している(第 8 図 a)。また第 8 図 b には 2024 年 1 月中旬の地上気温偏差分布を示す。カナダの西部から米国の中部・東部にかけて-10℃以下の低温偏差域が分布しており、-6℃以下の低温偏差は米国南部のテキサス州まで広がっている。このため、凍死や交通事故等により、少なくとも 95 名が死亡するという甚大な被害が発生した。

上述の上部成層圏における西風加速ピークから 2 日後の惑星規模波束の鉛直伝播の様子を見ると(第 9 図)、60~120° W 帯に集中した惑星規模波束の下方伝播は対流圏上層まで到達している。これと同期して、対流圏上層では WN2、WN3 の増幅がみられており、その振幅は 2023/2024 冬季中最も大きくなっている(第 10 図)。特に WN2 は上層ほど振幅が大きく、成層圏からの惑星規模波束の下方伝播の寄与が示唆される。これら WN2、WN3 の増幅期における下部成層圏の渦位分布をみると

(第 11 図 a-c)、1 月 7 日には高緯度にまとまっていた極渦が(第 11 図 a)、ユーラシア側と北米大陸側に分裂しており(第 11 図 b、c)、それと同期して対流圏の寒気塊の切離が発生している(第 11 図 d-f)。これらの結果は、 $60^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{W}$ 帯に集中した惑星規模波束の下方伝播は、北極期における対流圏上層における WN2、WN3 の増幅、更には対流圏における寒気塊の切離に少なからず影響を及ぼしたことを示唆している。

4 まとめ

1 月上旬に発生した小規模昇温は、成層圏圏界面付近において WN2、WN3 の増幅が発生し、その後下部成層圏内を下方伝播したため、上部成層圏で西風加速が生じ、1 月上旬の期間においては大規模昇温には至らなかったと考えられる。

惑星規模波束の伝播経路を解析した結果、上部成層圏から対流圏上層への下方伝播は西半球に限定され、特に $60^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{W}$ の経度帯に集中していた。このような局所的な波束伝播のピークについて、25 日周期より長周期の定常成分では 30% 程度しか説明できないこと、8~25 日周期の非定常な変動成分を含むと 75% まで説明できることなどから、非定常成分の寄与が重要であることが分かった。

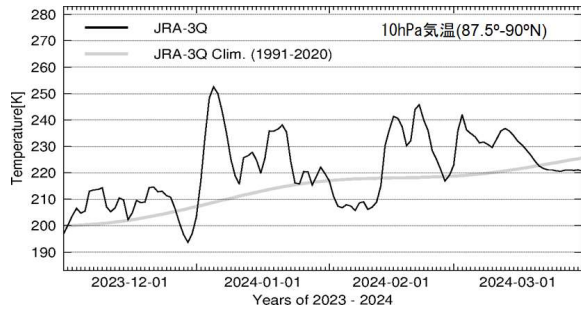
1 月上旬の小規模昇温発生後に、成層圏圏界面付近において増幅した WN2、WN3 が対流圏上層へ下方伝播し、対流圏上層で収束したことにより、対流圏上層で WN2、WN3 の増幅が発生した(ただし対流圏内における波束伝播の寄与もみられる)。これにより、極付近の寒気塊の一部が切離し、北米方面へ南下した。以上の結果は MN_SSW24 の発生後に成層圏圏界面付近から上部成層圏で増幅し、下方伝播した惑星規模波束が 1

月中旬に北米大陸で発生した記録的寒波の発生に対して少なからず影響を及ぼしたことを示唆している。

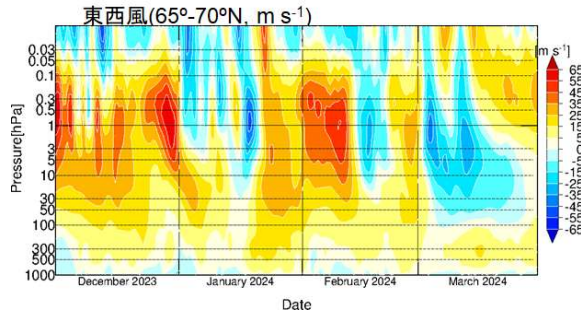
最後に、MS_SSW24 と同様に急速かつ 60K 前後の昇温は、1979 年以降 8 回発生しているが、その中で小規模突然昇温となった事例は MN_SSW24 も含めて 4 事例だった(2002 年 12 月、2008 年 1 月、2016 年 2 月、2024 年 1 月)。これらの事例は成層圏内で惑星規模波束の下方伝播の発生が共通していた。今後はこれら過去事例についても詳細な調査を行っていくことを予定している。

参考文献

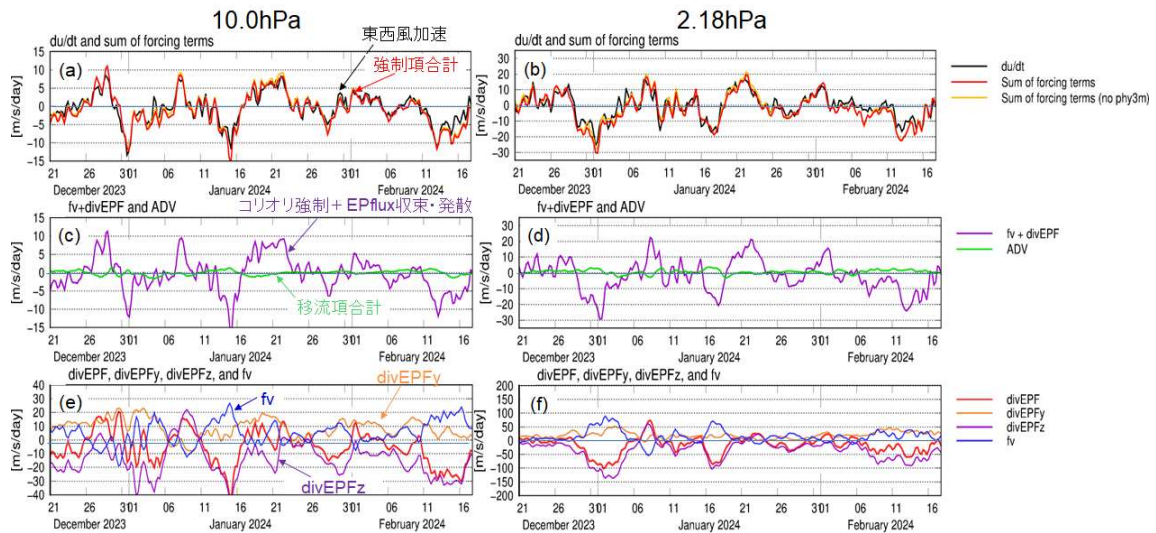
- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. *Academic Press, Orland*, 489 pp.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Met.*, **18**, 1016–1022.
- Harada, Y., K. Sato, T. Kinoshita, R. Yasui, T. Hirooka, and H. Naoe, 2019: Diagnostics of a WN2-type major sudden stratospheric warming event in February 2018 using a new three-dimensional wave activity flux. *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.
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y. Tanaka, T. Tokuhito, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.
- 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.
- WMO, 1978: Abridged final report of the seventh session of the Commission for Atmospheric Sciences. WMO Rep. 509, 113 pp.



第 1 図 10hPa、北極付近(87.5°-90°N 平均)の日別気温[K]時系列図。
黒色線は 2023/2024 年、灰色線は日別平滑年平値(1991-2020 年平均)を示す。

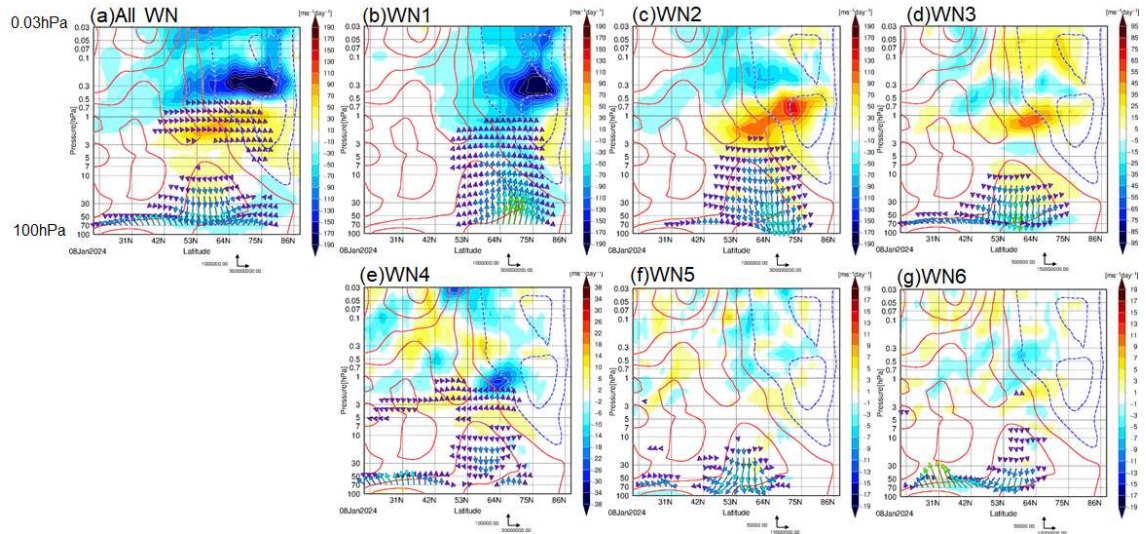


第 2 図 東西風(65°-70°N, m s^{-1})の時間-高度断面図。



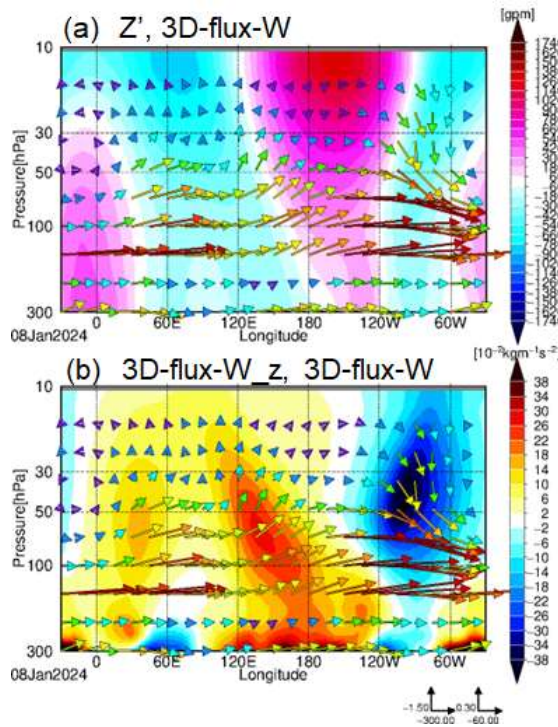
第 3 図 55°-65°N で領域平均した帯状平均東西風加速および Andrews et al. (1987)に基づき計算した強制項の時系列図(左段は 10.0hPa、右段は 2.18hPa 面)。

(a, b) 黒色線は解析値から計算した東西風加速、赤色線は強制項の合計値、(c, d) 紫色線はコリオリ強制と EPflux 収束・発散の合計、緑色線は移流項の合計、(e, f) 赤色線は EPflux 収束・発散、橙色線は EPflux 収束・発散の水平成分、紫色線は EPflux 収束・発散の鉛直成分、青色線はコリオリ強制をそれぞれ表す。単位は $\text{m s}^{-1}\text{day}^{-1}$ 。



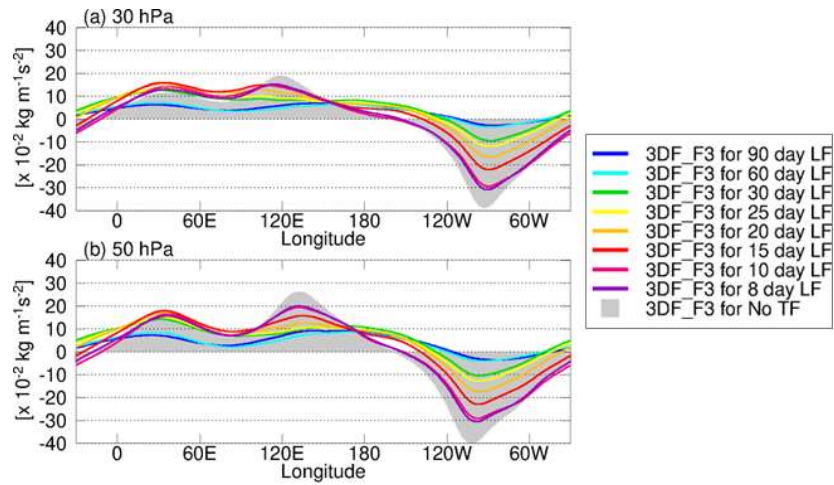
第 4 図 2024 年 1 月 8 日における EP flux(ベクトル), EP flux 収束・発散(陰影), 帯状平均東西風(等値線)の緯度－高度断面図。

EPflux および EPflux 収束・発散については(a)は全波数、(b-g)は東西波数 1～6 にそれぞれ対応している。帯状平均東西風は全波数で計算したものを示している。等値線間隔は 10 m s^{-1} 、ベクトルの単位は kg s^{-2} 、ベクトルのスケールは図の右下の通り。

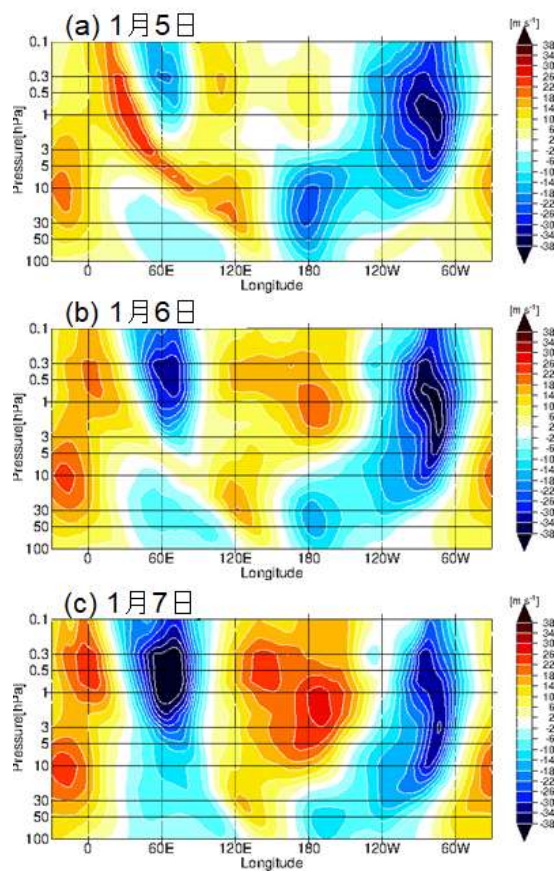


第 5 図 2024 年 1 月 7-9 日、 50° - 80° N 平均の 3D-flux-W(ベクトル)等の経度－高度断面図。

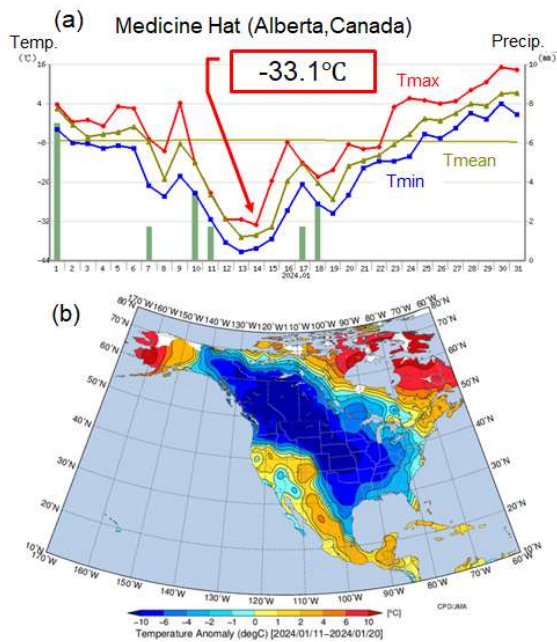
(a)の陰影は帯状平均からの高度偏差、(b)の陰影は 3D-flux-W_z を表す。ベクトルのスケールは図の右下の通り。



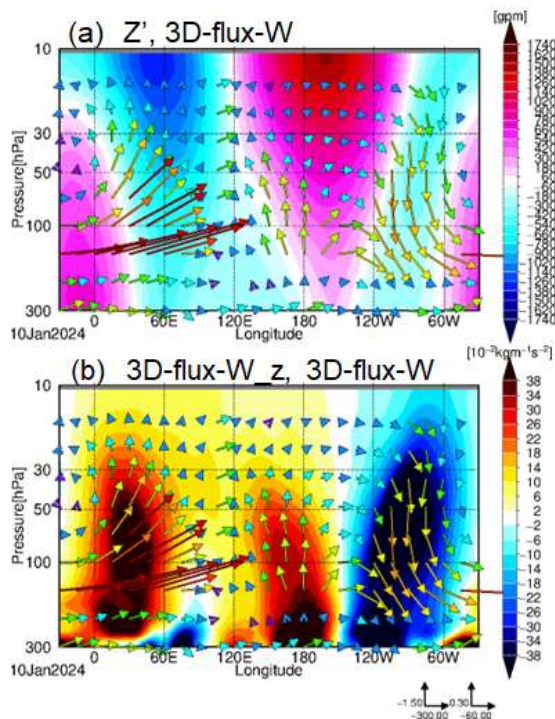
第 6 図 下部成層圏における様々な周期帯で計算した 3D-flux- W_z の経度分布 (2024 年 1 月 7-9 日、50°-80°N 平均)。



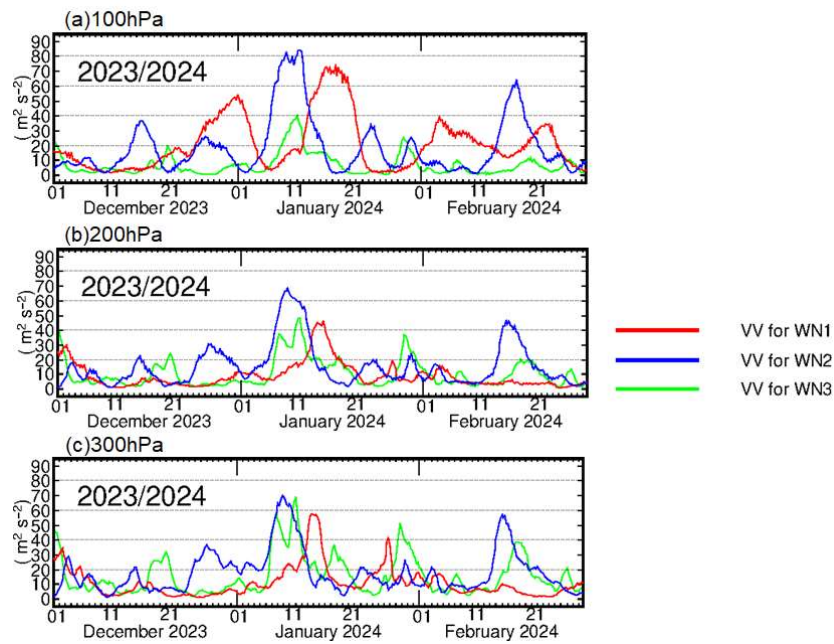
第 7 図 8-25 日周期帯の南北風成分の経度一高度断面図 (2024 年 1 月 5~7 日、65°-69°N 平均)。



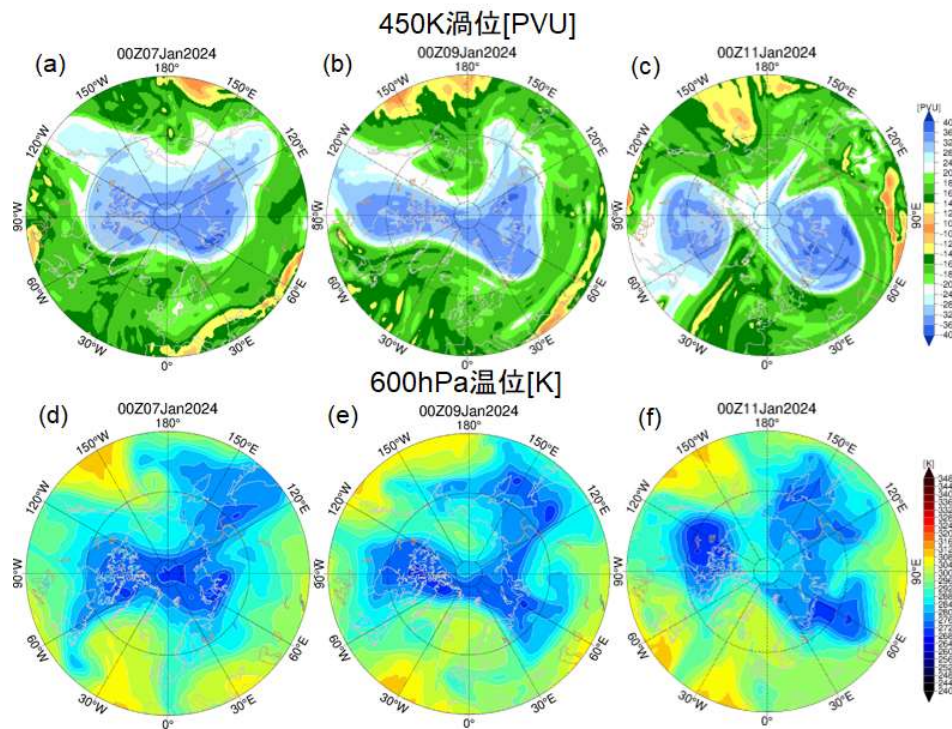
第 8 図 (a)メディシンハット(カナダアルバータ州)の気温時系列図および(b)2024 年 1 月中旬の地上気温平年偏差。
いずれも気象庁 HP <https://www.data.jma.go.jp/>より取得。



第 9 図 第 5 図と同じ、ただし 2024 年 1 月 9-11 日、65°-69°N 平均。



第 10 図 2023 年 12 月～2024 年 2 月における波数成分別に計算した南北風の二乗($v^2[m^2 s^{-2}]$)日別値の時系列図(60°–90°N 平均)。



第 11 図 2024 年 1 月 7、9 および 11 日における(a-c) 450K 温位面の渦位[PVU]および(d-f) 600hPa 気圧面における温位[K]の分布図。