

1. はじめに

北海道は、世界でも有数の豪雪地帯である。大雪は、交通機関の混乱や雪おろし中の事故、農作物への被害など、気象災害として生活に大きな影響をもたらす側面がある。

北海道の札幌周辺における大雪について、自己組織化写像（SOM）（Kohonen 1982）により冬季モンスーン下での気圧パターンを分類し、d4PDF の結果を使用して温暖化による影響を調べた研究によると、寒気移流を伴う日本海側の大雪は真冬で増加傾向、暖気移流を伴う太平洋側の大雪は減少傾向となることがわかった。（Kawazoe et al. 2020）。

同様に SOM により分類した気圧パターンと西太平洋（Western Pacific: WP）パターン（Wallace and Gutzler 1981; Barnston and Livezey 1987）との関係を調査した研究（Inatsu et al. 2021）では、WP 負符号は日本海側における大雪、正符号は太平洋側における大雪と関係することが示されている。また、d4PDF 実験の結果を利用し、20 世紀後半のトレンド、地球温暖化応答ともに、負の WP パターンの傾向があることを示した。

このように冬の北海道における大雪の地球温暖化による変化を調査した研究例はあるものの、北海道の内陸部については詳細に調べられていない。北海道の中部には標高 2,000m 前後の山々が連なっており、内陸部への風の流入のしかたによって豪雪となる地域が大きく異なる可能性がある。本研究では、北海道内陸部における降雪特性の将来変化を明らかにする。

2. データと解析手法

本研究では、北海道内陸部を豪雪が同時に生じやすい複数の領域に分け、領域ごとに地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース d4PDF 実験（Mizuta et al. 2017; Ishii and Mori 2020）の結果を用いて、大雪日の要因と温暖化による変化について調査した（図 1）。

また、d4PDF 領域モデル実験の HPB 日降雪量データを用いて、各領域において日降雪量が $\mu+3\sigma$ を超える日を大雪日と定義した。

さらに、大雪をもたらす要因のうち、北海道の南を低気圧が通過する大雪日を調査するために、Mizuta et al. (2011) を参考にして、低気圧を抽出した。d4PDF 全球実験の 6 時間ごとの SLP データを 1.25 度格子に内挿したものをを用いて、周囲の格子点全てよりも SLP が低い点、かつ周囲の格子点の平均 SLP よりも 0.3hPa 以上低い点を低気圧として抽出した。このようにして抽出された低気圧が、北海道の南（北緯 38～43 度、東経 138～146 度）の範囲内において、抽出された大雪日を、低気圧通過時の大雪日とした。

3. 結果

図 2 は、HPB における A～C 各領域の大雪日の SLP と 850hPa 面水平風および日降雪量のコンポジット平均である。北海道内陸部各領域の特徴を調査すると、北海道の南～東に低気圧が位置するとき、北海道内陸部に流入する風が山地にぶつかることで大雪がもたらされている。また、3 つの大雪日に共通した大雪日の変化として、各領域の低気圧位置は全体的に

北東方向へシフトしており、それぞれ低気圧の中心気圧は低くなっている。

大雪日は、低気圧の通過に伴うもの、冬季モンスーンによるものというように、いくつかの異なる要因による事例が混ざっていると考えられる。そこで、低気圧通過時の大雪日を抽出し、大雪をもたらす要因とその将来変化を調査した。図3は、大雪日に占める低気圧通過時の大雪日の割合を示す。HPBでは、領域C、B、Aの順で低気圧通過時の大雪日の割合として多い。MMEとHPBの差を見ると、温暖化時にはどの領域においても低気圧通過時の大雪日の割合が減少している。領域AとCでは10%ほど減少しており、領域Bでは5%ほど減少している。

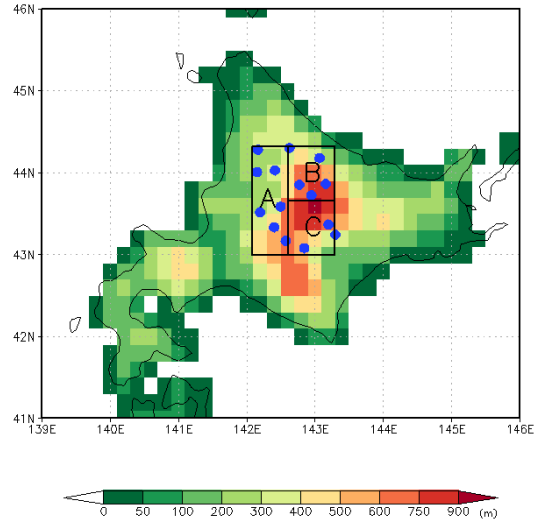


図1 d4PDF 領域実験で用いられる北海道の標高分布。A, B, Cの枠は調査領域を示す。青点は調査領域内にあるAMeDAS観測点。

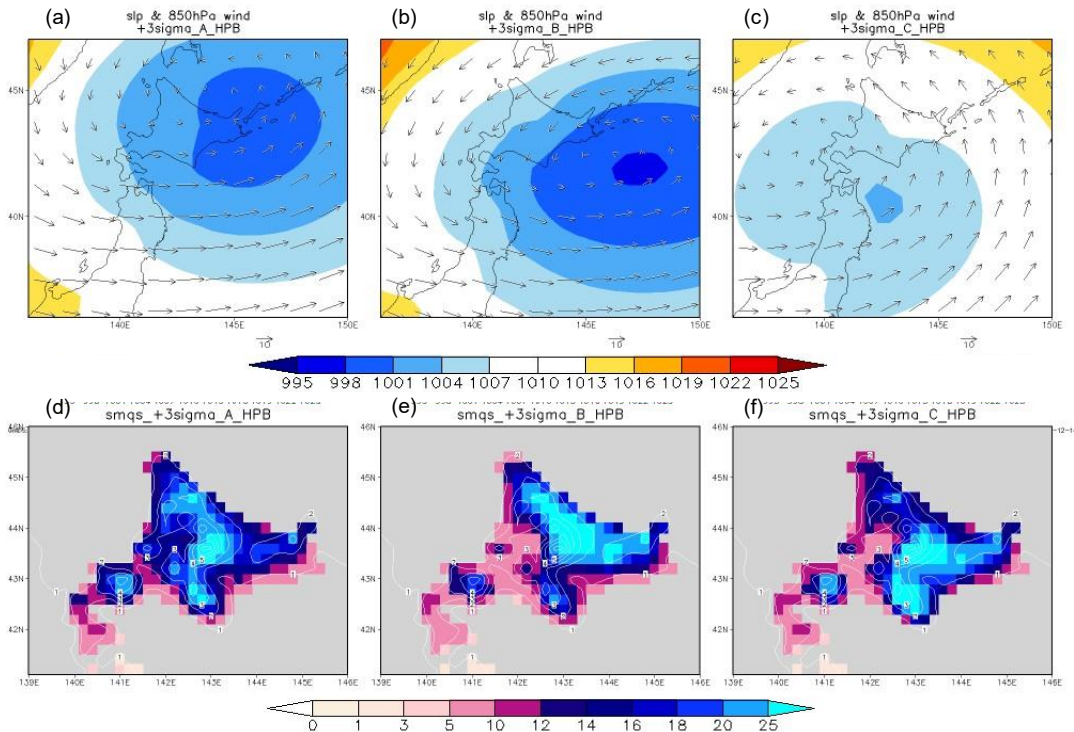


図2 大雪日のSLPと850hPa面水平風および日降雪量のコンポジット平均。上段は、大雪日平均のSLP(陰影, 単位:hPa)と850hPa風(矢印, 単位:m/s)。下段は、大雪日平均の日降雪量(陰影, 単位:mm/day)と日降雪量の気候値(等値線, 単位:mm/day)。それぞれ左から順に領域A, B, Cの大雪日平均を示す。

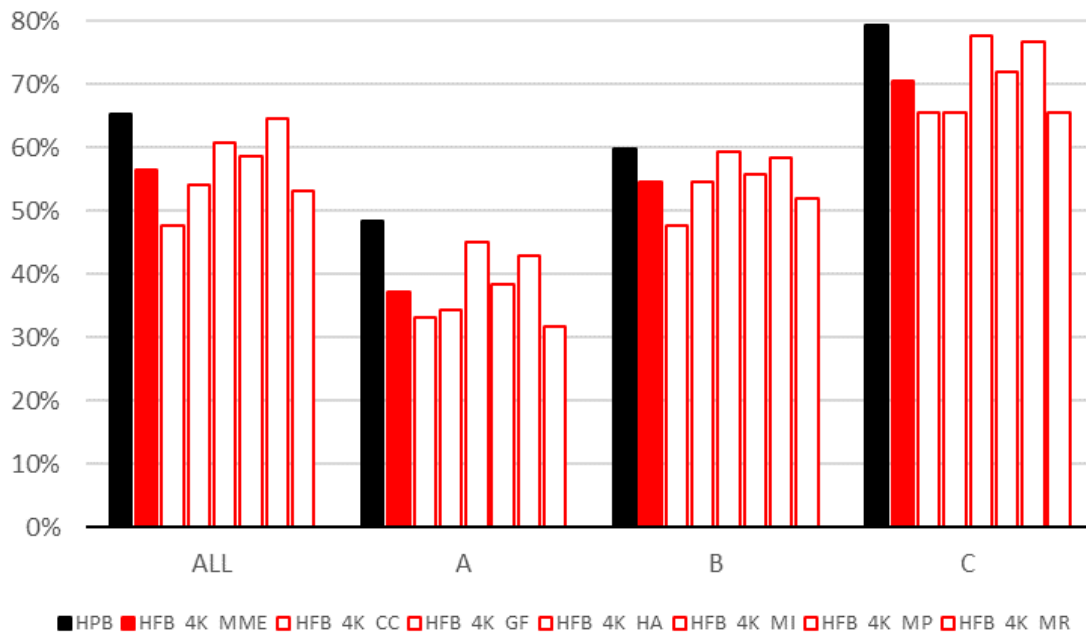


図3 大雪日のうち低気圧が抽出された割合とその将来変化. 大雪日に占める低気圧通過時の大雪日割合 (単位: %). 黒塗りは過去実験, 赤塗りがMME, 白抜きは各実験の値でそれぞれ左から順にCC, GF, HA, MI, MP, MRである.

4. 考察

図2より, HPBにおいて, 北海道内陸部が大雪となる日についてコンポジット平均された気圧配置から, 北海道付近に低気圧が見られる. 領域Aでは北海道のすぐ東, 領域Bでは北海道南東沖, 領域Cは北海道の南方沖に位置している. この低気圧の位置の違いにより, 北海道内陸部に吹き込む風の向きが変わり, 北海道内陸部の地形の影響により大雪となる位置が異なるのだと考えられる. 温暖化時においてもこの傾向は同様であるが, 低気圧の中心位置がどの領域においても北東方向へシフトしている.

このシフトは, 単純に大雪をもたらす低気圧の位置が変化するという意味しているのでは無いと考える. この大雪日には, 西高東低型のものと, 発達した低気圧の通過によるものが混ざっており, この2つは低気圧の位置が

大きく異なる. 西高東低型の場合, 低気圧の位置はより北東方向にあり, 大雪日のコンポジット平均による低気圧の位置が北東方向へシフトするということは, 温暖化時には西高東低型の大雪日が増加することを反映している可能性が考えられる. そこで, 大雪をもたらす要因を区別するために, 大雪日のうち, 北海道の南岸を低気圧が通過した日を抽出し, その将来変化を調査した.

図3より, 低気圧通過時の大雪日は, 3つの領域全てで5~10%ほど減少するという可能性が示唆された. これは, 暖気移流を伴う低気圧通過時において, 温暖化時には温度上昇により雪が雨に変わりやすくなるからであると考えられる. その一方で, 寒気移流を伴う西高東低型の場合, 温度上昇してもなお気温の低い北海道内陸部では雪として降ることが多く, そのため温暖化時の大雪日に占める西高東低型の割

合が増えたと考えられる。加えて、気温上昇による水蒸気量の増加が要因となって、西高東低型の気圧配置時の平均的な降雪量が増加することで、全体的な大雪日の日数が増加する可能性が考えられる。特に、もともと西高東低型の大雪日が多いとされる領域Aでは、大雪日が大きく増加すると考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、北海道内陸部における降雪特性の将来変化を明らかにするため、北海道内陸部を豪雪が同時に生じやすい3つの領域に分け、領域ごとにd4PDF実験の結果を用いて、日降雪量が $\mu+3\sigma$ を超える大雪日の要因と温暖化による変化について調査した。

北海道内陸部各領域の特徴を調査すると、北海道の南～東に低気圧が位置するとき、北海道内陸部に流入する風が山地にぶつかることで大雪がもたらされている。また、温暖化により、低気圧の中心位置がどの領域においても北東方向へシフトする。

大雪をもたらす要因を区別するために、大雪日のうち北海道の南岸を低気圧が通過した日を抽出した。地球温暖化時には、低気圧の通過によってもたらされる大雪日の割合が減少する。暖気移流を伴う低気圧型の降雪が、温暖化によって雨として降ることが多くなることが要因に挙げられる。

今後の課題は、温暖化時に仮定する海面水温上昇パターンを変更することで、予測の不確実性を評価することである。実験結果を比較することにより、温暖化時の北海道内陸部における大雪の変化の要因を探る手掛かりになることが期待される。

参考文献

- Barnston, A. G., R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083–1126.
- Inatsu, M., S. Kawazoe, M. Mori, 2021: Trends and projection of heavy snowfall in Hokkaido, Japan, as an application of self-organizing map. *Amer. Meteor. Soc.*, **60**, 1483–1494.
- Ishii, M., and N. Mori, 2020: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 58.
- Kawazoe, S., M. Inatsu, T. J. Yamada, T. Hoshino, 2020: Climate change impacts on heavy snowfall in Sapporo using 5-km mesh large ensemble simulations. *SOLA*, **16**, 233–239.
- Kohonen, T., 1982: Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, **43**, 59–69.
- Mizuta, R., M. Matsueda, H. Endo, and S. Yukimoto, 2011: Future change in extratropical cyclones associated with change in the upper troposphere. *J. Climate*, **24**, 6456–6470.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, M. Kimoto, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- Wallace, J. M., D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784–812.