

力学モデルによる近未来気候の超高解像度ダウンスケールシミュレーション

課題責任者

山崎 剛 東北大学 大学院理学研究科

著者

川瀬 宏明 気象庁 気象研究所

佐々井 崇博 東北大学 大学院理学研究科

佐々木 秀孝 気象庁 気象研究所

山崎 剛 東北大学 大学院理学研究科

地球シミュレータを利用して、1980年から2010年までの「地域気候モデルを用いた大規模気候アンサンブル実験 (d4PDF)」の10メンバー (計310年分) を5km格子間隔のNHRCMを用いてダウンスケーリングした (d4PDF-DS)。310年間の計算を行うことで、同期間のJRA-55からのダウンスケーリング (JRA55-DS) では評価できないような低頻度の極端降雪が評価可能となった。日降雪量上位30事例の合成解析を行うと、日本海側では主に西高東低、太平洋側では南低北高型の気圧分布となった。名古屋や四国の西部では、日本海側同様に西高東低型で極端な降雪が発生していた。通常の降雪であっても日本海側で冬型、太平洋で南岸低気圧型の降雪が中心となるが、極端降雪の場合には地域による違いが明確に見られた。極端降雪発生時の日平均気温は、太平洋側の平野部では0℃前後だが、日本海側や本州内陸部では0℃を大きく下回った。極端に強い降雪発生時の気温が地域によって異なることは、今後地球温暖化による近未来あるいは21世紀末の日本の降雪への影響を考える上で重要な科学的知見となるであろう。

キーワード：力学ダウンスケーリング, 気候変動, 地球温暖化, 地域気候モデル, 降雪, 極端現象

1. はじめに

我々の課題では、地球シミュレータ上で計算された「地域気候モデルを用いた大規模気候アンサンブル実験 (d4PDF)」の結果をもとに、格子間隔5kmの地域気候モデル (NHRCM) を用いて更なるダウンスケーリングを行うことで、日本付近の高解像度アンサンブル過去気候再現実験を実施した。5km格子間隔の計算では、20km格子間隔のd4PDFでは不十分であった日本の詳細な地形を解像でき、局地気候の再現が可能となった。また、アンサンブル実験を行うことにより、極端に強い雨や雪、高温、低温などの極端現象の再現も可能となった。以下、本課題の計算結果を基に明らかとなった、冬季日本の極端降雪の特徴を紹介する。

日本列島の日本海側の地域は冬季に多量の雪が降り、世界でも有数の豪雪地帯として知られている。冬季モンスーンによる冷たい北西風が温暖な日本海で多量の水蒸気を得て (気団変質)、日本の脊梁山脈にぶつかることで、日本海側に多量の雪をもたらす。一方、冬季モンスーン卓越時に風下のあたる太平洋側では、乾燥した晴れの天気となる。ただし、太平洋側の地域においても年に数回、南岸低気圧の通過により降雪が発生することがある。南岸低気圧は発生頻度が低く、普段あまり雪の降らない地域に降雪をもたらす。東京や大阪、名古屋などの人口が多い都市圏を襲うことから、大きな雪害になりやすい。

短期間に降る強い雪は、交通障害や集落の孤立、山岳域で表層雪崩等をもたらす。日本海側の山沿いでは強い

冬型の気圧配置時に多量の雪が降るほか、平野部や沿岸部では、局所的な低気圧や寒冷渦、局所的な収束線によって強い降雪となる (例えば、[1])。特に、朝鮮半島の山や地形によって作られる日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) は、北陸から近畿、山陰に短時間に多量の降雪をもたらすことが知られている (例えば、[2])。一方、低頻度ではあるが、本州の太平洋側でも南岸低気圧によって多量の雪が降ることがある。2014年2月の南岸低気圧では、関東甲信地方で記録的な大雪となり、首都圏や周辺地域の交通機能がマヒするなどの大きな被害が出た ([3], [4], [5])。

近年、気象モデルを用いた高解像度・高精度シミュレーションにより、個々の雪雲や降雪バンド、南岸低気圧の降雪を再現できるようになりつつある。ただ、計算機資源の制約により多数の実験を行い、極端に強い降雪を統計的に議論することはできなかった。一方、出現頻度の低い豪雨や豪雪、高温などの将来変化を評価するために、大規模アンサンブル気候予測実験が行われた ([6], [7], [8])。大規模アンサンブル実験の一つであるd4PDFは、領域実験の解像度が20kmと粗いため、冬季降水に影響を及ぼす日本列島の複雑地形を解像することができない。そこで、本課題で実施したd4PDFデータに対する5km格子間隔の力学的ダウンスケーリングの結果を用いて、日本付近で発生する出現頻度が低い極端降雪の地域分布、及び発生時の特徴を解析した。

2. 実験概要

d4PDF の領域実験と同様に、気象庁気象研究所で開発された非静力学地域気候モデル (NHRCM) を用いる [9]。本課題では、[10] とほぼ同様の物理過程を用いたが、新たに都市モデル Square Prism Urban Canopy Scheme (SPUC) [11] が実装された。

5kmNHRCM の計算領域を図 1 に示す。20km 実験の領域は d4PDF の領域と同様である。5kmNHRCM の過去実験は d4PDF 全 50 メンバーのうち 10 メンバーを選び、各 31 年分 (1980 年～2010 年) の計算を行った (以下、各メンバーを d4PDF-DS01～10、すべてのメンバーをまとめたものを d4PDF-DSall と呼ぶ)。観測に基づく結果と比較するため、境界値に気象庁 55 年長期再解析 (JRA55) を用いた実験も行った。JRA55 からのダウンスケーリングは格子間隔 20km、5km の順で 2 段階のネスティングを行なった。実験設定は d4PDF の 20km、及び 5km 計算と同じ条件を用いる (以下、JRA55-DS と呼ぶ)。5km 実験の積分期間は、JRA55-DS と d4PDF-DS とともに 7 月 24 日から翌年 8 月 30 日までとした。本研究では特に断りのない限り、日降雪量は積雪深の 1 時間差を正の値のみ 24 時間積算した値とする。

降雪発生時の気圧場の特徴を把握するために、気圧パターンの分類を行なった。日降雪量 1cm 以上の日について、モデルの各格子を中心に南北 3 度 (+3 度、-3 度)、東西 3 度の海面更正気圧の差を計算し、下記のように気圧パターンを分類した。

南北気圧差 $dP_{ns} = P_n - P_s$, P_n : 北側 + 3 度の気圧, P_s : 南側 + 3 度の気圧

東西気圧差 $dP_{we} = P_w - P_e$, P_w : 西側 + 3 度の気圧, P_e : 東側 + 3 度の気圧とすると、

$dP_{ns} > 5hPa$: NS パターン

$5hPa \geq dP_{ns} > 0hPa$ and $dP_{ns} \geq dP_{we}$: NS パターン

$5hPa \geq dP_{ns} > 0hPa$ and $dP_{ns} < dP_{we}$: WE パターン

$dP_{ns} \leq 0hPa$ and $dP_{we} > 0hPa$: WE パターン

$dP_{ns} \leq 0hPa$ and $dP_{we} \leq 0hPa$: その他のパターン

NS パターンが南岸低気圧型、WE パターンが西高東低型に対応する。

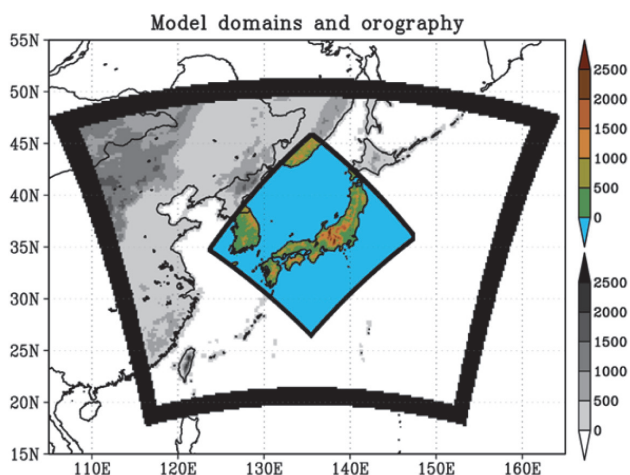


図 1 計算領域。太枠は 20kmNHRCM (d4PDF) の領域、細枠が 5kmNHRCM の領域。

3. 結果

3.1 モデルの再現性

冬季 12 月～2 月の平均気温と積算降水量のバイアスを図 2 に示す。JRA55-DS、d4PDF-DS01 とともに東北地方では低温バイアスが見られる。一方、関東から九州にかけてはやや高温バイアスが見られた。降水量は日本海側でやや過小評価、太平洋側で過大評価となった。ただし、d4PDF の 20km 実験結果 [7] と比較すると再現性は大きく向上したことがわかる。

3.2 極端に強い降雪の特徴

31 年間の JRA55-DS 及び 310 年の d4PDF-DSall の結果を用いて、1cm 以上の降雪があった日の 95%ile から 99.9%ile の値を図 3 に示す。JRA55-DS はサンプル数が少ないため、99%ile 値が太平洋側で評価できていない。また、99.9% 値は日本海側や本州の山沿いを除いて評価できていない。一方、サンプル数が多い d4PDF-DSall は、99.5%ile 値まではほぼすべての地域で評価でき、99.9%ile 値についても太平洋側の一部地域を除いて計算されている。

JRA55-DS と d4PDF-DS01 との極端日降雪量の差、及び JRA55-DS と d4PDF-DSall との極端日降雪量の差を図 4 に示す。JRA55-DS や d4PDF-DS01 では評価できない場所はマスクしている。95%ile 値は 3 つの実験間で差が小さかった。上位 99%ile 値は、関東の内陸部で JRA55-DS が d4PDF-DS01 や d4PDF-DSall より多くなった。これらの地域ではサンプル数が少ないために、99.5%ile 以上の降雪は評価できていない。日降雪量の 99.9%ile 値は、東北北部で JRA55-DS が d4PDF-DS01 や d4PDF-DSall より多くなった。JRA55-DS は過去の気候を現実的に再現するため、この地域では過去 31 年間に d4PDF ではほとんど起こらないような極端に強い降雪が発生した可能性がある。

図 5 に太平洋側の東京と名古屋、日本海側の津南町における日降雪量の累積頻度分布を示す。最寄り点の選出は、標高差 150m 以下で観測点に最も近いモデル格子とした。赤色は JRA55-DS、灰色が d4PDF-DS01 から 10 までの各メンバー、黒太線が d4PDF-DSall から求めた累積頻度分布である。JRA55-DS の分布は d4PDF-DS の各メンバー間のばらつきの中にほぼ収まっていることがわかった。JRA55-DS、及び d4PDF-DS の各メンバーはサンプル数が少ないために、10 年に 1 度以下の低頻度の強い日降雪を評価できない。一方、d4PDF-DSall はサンプル数が多いために、低頻度の強い日降雪量まで評価可能になった。

d4PDF-DSall を用いて、3 地点における日降雪上位 30 事例の合成解析を行った。図 6 に日平均海面更正気圧 (SLP) と日積算降雪量、日積算降雨量を示す。ただし、日降雪量は図 3～図 5 の降雪量とは異なり、NHRCM で計算された水換算の降雪量 [mm] を用いた。東京における合成図 (図 6a) では、関東の南に低気圧が見られる典型的な南岸低気圧パターンとなった。関東東部では降雨、西部では降雪が卓越しており、東京はその境目に当たることがわかった。一方、下層 925hPa の気温は関東南部で 0 度～-2 度であり、比較的気温が高い状況下での降雪で

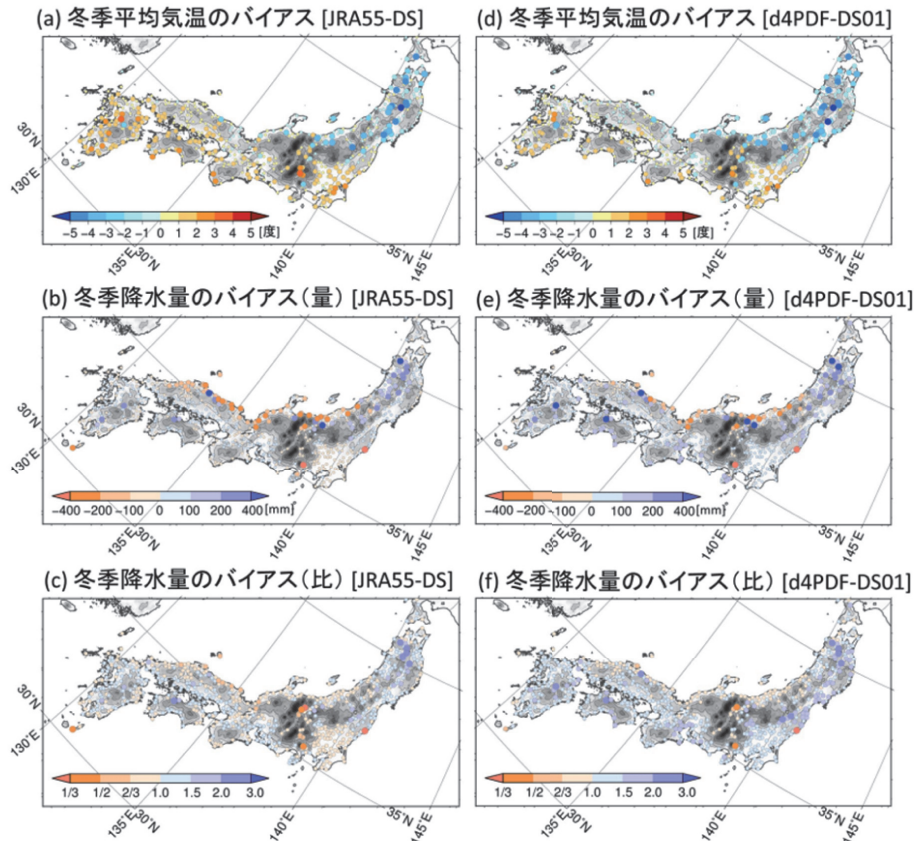


図2 冬季平均気温と降水のバイアス。(左図) JRA55-DS、(右図) d4PDF-DS01。

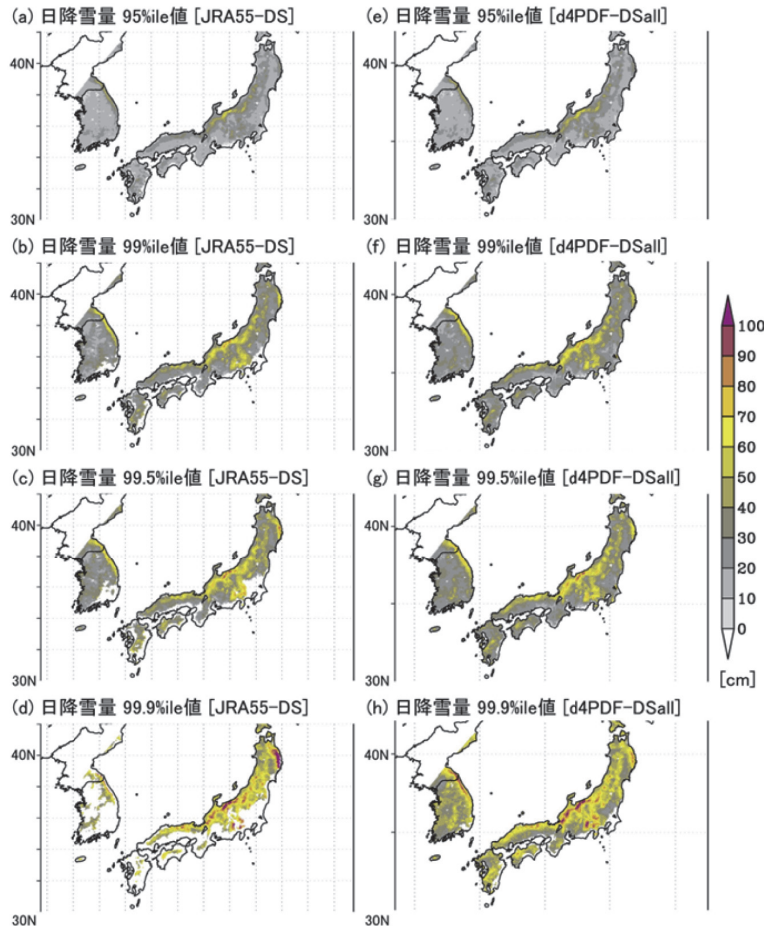


図3 JRA55-DS と d4PDF-DSall で再現された強い日降雪量の分布

あることがわかった。豪雪地帯に位置する新潟県津南町(図6b)では、典型的な西高東低型となっており、降雪域は日本海側の山沿いに限られていた。沿岸部では降雨の割合が大きく、低地では気温が0℃以上の高い時に津南町で強い降雪が発生していた。一方、太平洋側の名古屋における極端降雪発生時の気圧分布は、津南町と同様に西高東低型であった(図6c)。過去の研究でも名古屋では西高東低の気圧配置時に降雪が発生することが知られている[12]。日本海から若狭湾にかけて強い降雪バンドが見られ、JPCZに伴う降雪域と考えられる。名古屋の極端降雪事例では、他の事例よりも気温が低く、太平洋沿岸まで925hPaの気温が-6度以下であった。

東京の極端降雪時をJRA55-DSとd4PDF-DSallとの間で比較すると、d4PDF-DSallでは南海上に低圧偏差が見られ、南岸低気圧がより強まった(図6d)。関東から東北の太平洋側では山脈の東側で高圧部が入り込むCold Air Damming[13]が強化された。関東付近では下層の気温の差はほとんどなく、d4PDF-DSallとJRA55-DSはともに925hPaが0度前後での降雪となっていた(図省略)。津南町の極端降雪事例では、d4PDF-DSで南西から北東の気圧傾度がやや大きくなる傾向が見られたが、明瞭な傾向はなかった。一方、名古屋の極端降雪事例では、北日本に中心を持つ低気圧性偏差が明瞭に現れ、東西の気圧傾度が増大した。日本海上では気圧偏差がくぼみ、帯状に

降雪が増加する領域が見られた。降雪増加域はJPCZと対応していることから、JPCZの強化が降雪増加に大きく寄与したと考えられる。大気下層の気温はd4PDF-DSallの方がJRA55-DSに比べて低かった。特に、名古屋では冬型の気圧配置が強まり、より強い寒気が流れ込んだ時に、降雪がより多くなることがわかった。

3.3 極端降雪発生時の大気場の特徴

日本付近で極端な降雪が発生するメカニズムは複数存在する。図6では特徴的な傾向を示す3地点を示したが、地域によって気圧の場の特徴は異なる。降雪発生時の気圧場の特徴を面的に把握するため、各格子別に東西及び南北の気圧傾度から降雪発生時のパターン分類を行った。

日本海側では7割以上の降雪が西高東低型で出現した(図7a)。また、東海地方や四国の西部、九州北部でも西高東低型の降雪が8割以上を占めた。一方、関東の内陸部や山沿いでは南岸低気圧型による降雪頻度が高く、7割以上であった(図7b)。紀伊半島の東部や四国の東部、瀬戸内地域でも南岸低気圧型での出現頻度が高いことがわかった。太平洋側は日本海側に比べると南岸低気圧による降雪頻度は高いものの、関東の内陸を除けば、西高東低型の降雪は5割程度存在することがわかった。

強い日降雪上位30事例のみを用いて気圧パターン分類を行った結果、全降雪事例を対象にした分類よりも、西

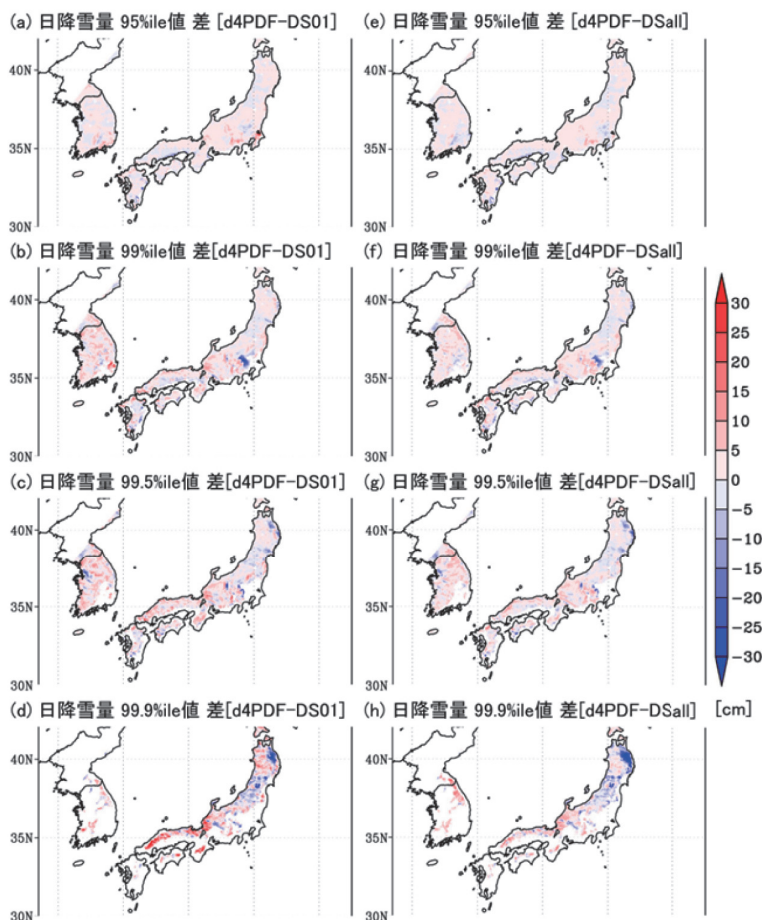


図4 強い日降雪量の差。(左) JRA55-DSとd4PDF-DS01、(右) JRA55-DSとd4PDF-DSallの差。

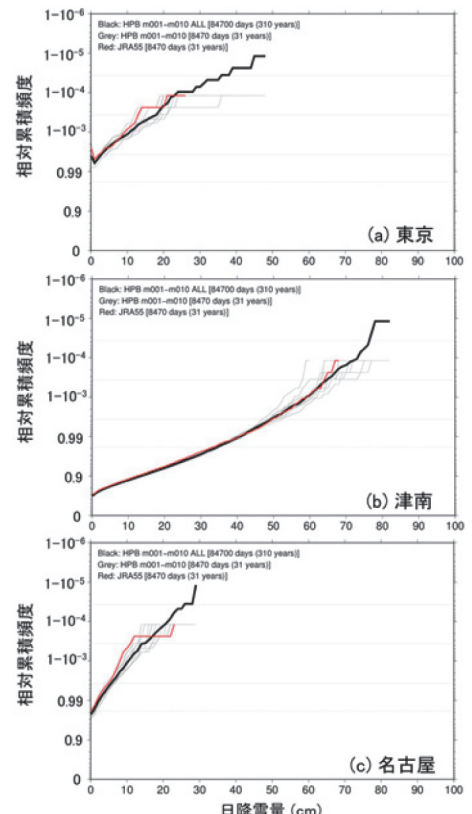


図5 東京と名古屋、津南町、長野における日降雪量の累積頻度分布

高東低型と南岸低気圧型の違いが明瞭に現れた。日本海側、愛知県から岐阜県、四国西部、九州北部では、ほぼすべての降雪事例が西高東低型として発生した（図 7c）。一方、東北の太平洋側、関東の内陸部、甲信、紀伊半島東部、四国東部、瀬戸内、九州北東部では、8割以上の事例が南岸低気圧型であった（図 7d）。若狭湾から東海で発生する極端降雪事例のほとんどは、西高東低型であった。一般的に、関東平野では南岸低気圧型の極端降雪イベントが多く起きるが、今回のアンサンブル実験の解析により、関東東部の沿岸に近いところでは南岸低気圧型

での発生が少なく、西高東低型が7割以上近くを占めることが示された。関東東部沿岸部では、南岸低気圧通過時に海から陸へ向かって暖かい空気が流れ込むため、降雪ではなく降雨となるケースが多かった。銚子における極端降雪時の合成図では、西高東低型で局所的な収束域にかかる場合に極端降雪が発生することがわかった。

謝辞

本研究は、文科省・気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の支援を受けて行われた。

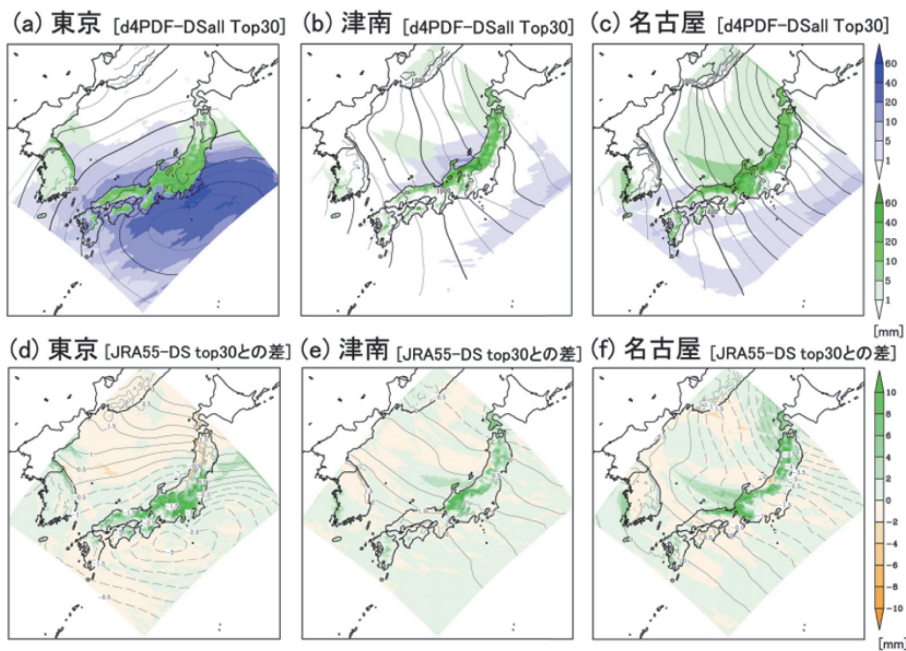


図 6 （上段）d4PDF-DSall における日降雪上位 30 事例の合成解析。（下段）d4PDF-DSall と JRA55-DS との差。正の値は d4PDF-DSall で気圧が高いあるいは降雪量が多いことを示す。破線（実線）は d4PDF-DS で気圧が低い（高い）領域を示す。緑色（オレンジ）は d4PDF-DS で降雪量が多い（少ない）場所を示す。

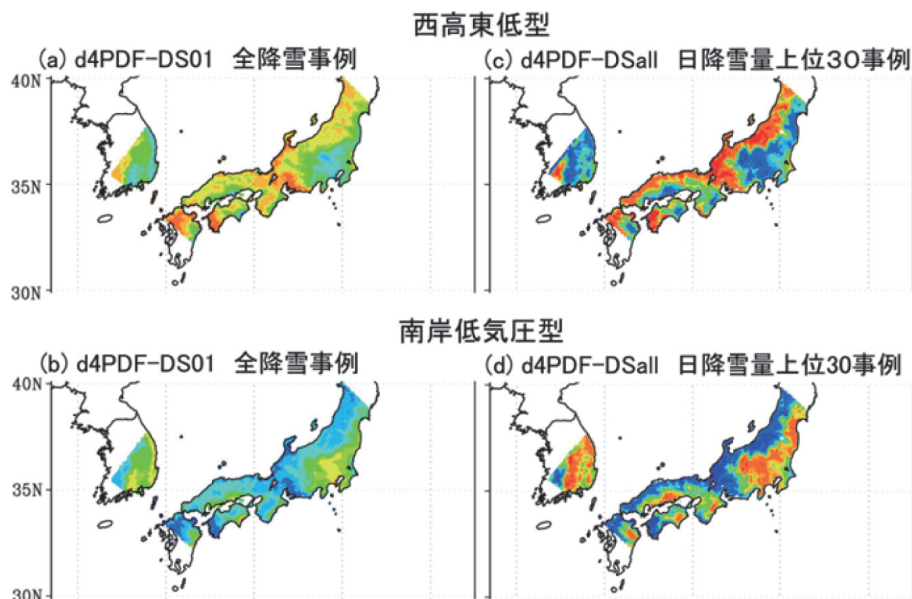


図 7 1cm 以上の降雪及び極端降雪上位 30 事例の気圧パターンの出現割合。全事例は d4PDF-DS01 をもとに計算。上位 30 事例は d4PDF-DSall から抽出。

文献

- [1] Iwamoto T., S. Nakai, and A. Sato, Statistical analyses of snowfall distribution in the Niigata area and its relationship to the wind distribution, *SOLA*, 4, 45-48, 2008.
- [2] Nagata M., M. Ikawa, S. Yoshizumi, and T. Yoshida, On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter; numerical experiments, *J. Meteor. Soc. Japan*, 64, 841-855, 1986.
- [3] Honda M., A. Yamazaki, A. Kuwano-Yoshida, Y. Kimura, and K. Iwamoto, Synoptic conditions causing an extreme snowfall event in the Kanto-Koshin district of Japan on 14-15 February 2014, *SOLA*, 12, 259-264, 2016.
- [4] 安藤・上野, 温帯低気圧による本州中部内陸域での多降水・多降雪の発現傾向, *雪氷*, 77- 5, 397-410, 2015年9月.
- [5] 河島・松元・伊豫部, 2014年2月14-15日の関東甲信地方の大雪における降水形態と雪氷災害の地域性との関連, *雪氷*, 77-4, 313-325, 2015年7月.
- [6] Mizuta, R., and co-authors, Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1, 2017.
- [7] Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu, Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-016-1781-3, 2016.
- [8] Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta, and M. Ishii, Future changes in precipitation extremes in East Asia and their uncertainty based on large ensemble simulations with a high resolution AGCM, *SOLA*, 13, 7-12, doi:10.2151/sola.2017-002, 2017.
- [9] Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model, *SOLA*, 4, 25-28, 2008.
- [10] Murata A., H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, M. Oh'izumi, T. Kato, T. Aoyagi, F. Shido, K. Hibino, S. Kanada, A. Suzuki-Parker, and T. Nagatomo, Projection of future climate change over Japan in ensemble simulations with a high-resolution regional climate model. *SOLA*, 11, 90-94, 2015.
- [11] Aoyagi, T., and N. Seino, A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1476-1496, 2011.
- [12] 藤吉・藤田・武田・小尻・竇・池田, 複雑山岳地形が風下の降雪分布に及ぼす効果－濃尾平野を例として－, *天気*, 43, 391-408, 1996.
- [13] Bailey, C. M., G. Hartfield, G. M. Lackmann, K. Keeter, and S. Sharp, An objective climatology, classification scheme, and assessment of sensible weather impacts for Appalachian cold-air damming, *Wea. Forecasting*, 18, 641-661, 2003.

Estimation of Spatial Patterns of Extremely Heavy Snowfall using High-resolution Regional Climate Ensemble Experiments

Project Representative

Takeshi Yamazaki Graduate School of Science, Tohoku University

Authors

Hiroaki Kawase Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Takahiro Sasai Graduate School of Science, Tohoku University

Hidetaka Sasaki Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Takeshi Yamazaki Graduate School of Science, Tohoku University

High-resolution regional climate ensemble simulations with 5 km grid intervals are conducted using Nonhydrostatic Regional Climate Model (NHRCM) to investigate a characteristic of extreme events. The Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) and ten-ensemble member of the database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) are applied to the lateral boundary conditions of NHRCM from 1980/1 to 2010/11. Total integrated years are 31 and 310 for JRA-55 and d4PDF downscaling (hereafter JRA55-DS and d4PDF-DS), respectively. We focus on heavy snowfall in Japan. The d4PDF-DS enables us to evaluate much heavier daily snowfall events than those simulated by the JRA55-DS. The composite analyses of top 30 heaviest daily snowfall events show that typical sea level pressure (SLP) pattern causes heavy snowfall in each area. A comparison between JRA55-DS and d4PDF-DS indicates that heavier snowfall events at Tokyo can occur when the more developing coastal extratropical cyclone passes along the coast. We classify the SLP pattern in all snowfall events at each grid. The SLP pattern causing heavy snowfall events depends on the region rather than those causing all snowfall events.

Keywords: Dynamical downscaling, regional climate, heavy snowfall

1. Introduction

Extremely heavy snowfall causes traffic accidents, isolation of towns, and surface avalanches in the mountainous areas. Strong cold air outbreaks bring about heavy snowfall into the mountainous areas in the Sea of Japan side. In contrast, meso- β and meso- γ scale phenomena such as a local-scale depression and a local convergence zone cause heavy snowfall over the coastal areas in the Sea of Japan side. The convergence zone appearing in the leeward of Korean Peninsula, which is called as Japan sea polar air mass convergence zone (hereafter, JPCZ), causes heavy snowfall in the central and western part of Sea of Japan side [1]. On the other hand, extratropical cyclones passing at the south of Japan sometimes bring about heavy snowfall in the Pacific Ocean side where the largest urban area, i.e., Tokyo Metropolitan area, is located. The purpose of this study is to clarify the characteristics of extremely heavy daily snowfall in the middle Japan using high-resolution regional climate ensemble experiments. We conduct the composite analysis of extremely heavy snowfall events and discuss the difference of synoptic patterns causing heavy snowfall in each area.

2. Experimental design

2.1 Specification of regional climate model and experimental designs

We used Nonhydrostatic regional climate model (NHRCM) developed in Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, for regional climate simulations [2]. The specification of NHRCM is almost same as that used in [3] except for urban climate model. The NHRCM in this study includes the Square Prism Urban Canopy Scheme (SPUC) [4]. A horizontal grid interval is 5 km. Figure 1 shows the model domains.

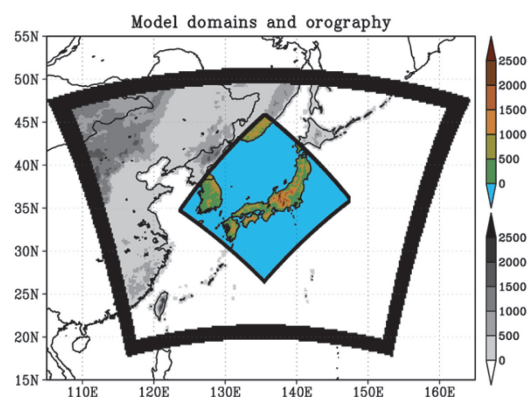


Fig. 1 Model domains and orography. The area with black thick and thin are model boundaries of 20km and 5km NHRCMs, respectively.

The lateral boundary conditions of 5km NHRCM is the database for Policy Decision making for Future climate change (hereafter, d4PDF) ([5][6]). We focus on 31 years from 1980 to 2010 and use 10 ensemble members in the past climate simulation (hereafter, d4PDF-DS01 to d4PDF-DS10). The total number of integrated years are 310 (hereafter, d4PDF-DSall). We analyzed the results from October to following June. We conducted the similar experiments using the Japanese 55-year Reanalysis (JRA55) as an initial and lateral boundary conditions (hereafter, JRA55-DS). The simulated precipitation and temperature are compared with Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS), which is a dense observation network maintained by JMA.

3. Result and discussion

3.1 Simulation skills

Similar temperature biases are found between JRA55-DS and d4PDF-DS01 (Fig. 2). Both experiments show cold biases

in the northeastern parts of Japan main islands and warm biases in the central and western parts of Japan. Winter precipitation is underestimated by the JRA55-DS over the Sea of Japan side in the central and western Japan. Similar biases are found in d4PDF-DS01 except for Kanto district. Kanto district shows positive and negative biases in JRA55-DS and d4PDF-DS01, respectively. In comparison with the 20 km NHRCM in d4PDF, the reproducibility of winter precipitation has much improved [6].

3.2 Heavy snowfall simulated by JRA55-DS and d4PDF-DS

Composite analyzes were conducted using top 30 heavy snowfall events in d4PDF-DSall at three stations, Tokyo, Tsunan, and Nagoya. Figure 3 illustrates the composite of daily snowfall, rainfall, sea level pressure (SLP). In Tokyo, low SLP appears over the south of Japan, indicating the south-coastal extratropical cyclone. This is a typical SLP pattern of snowfall occurring around Tokyo. Tokyo is located at the boundary of

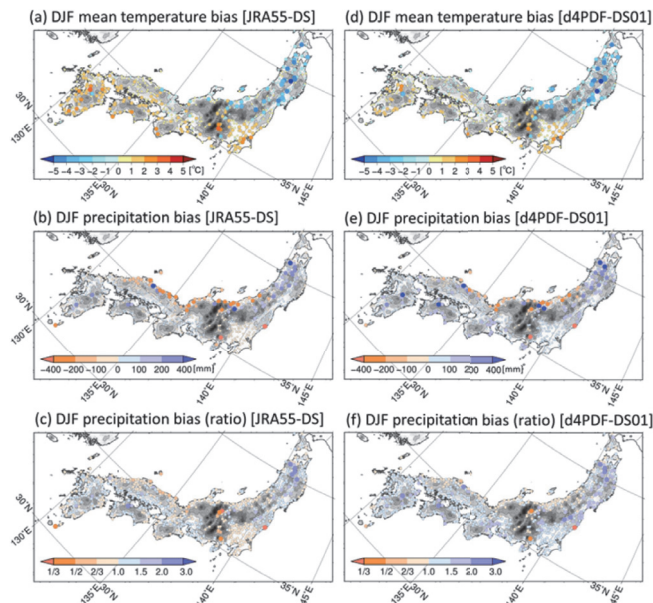


Fig. 2 Horizontal distribution of temperature and precipitation biases in JRA55-DS and d4PDF.

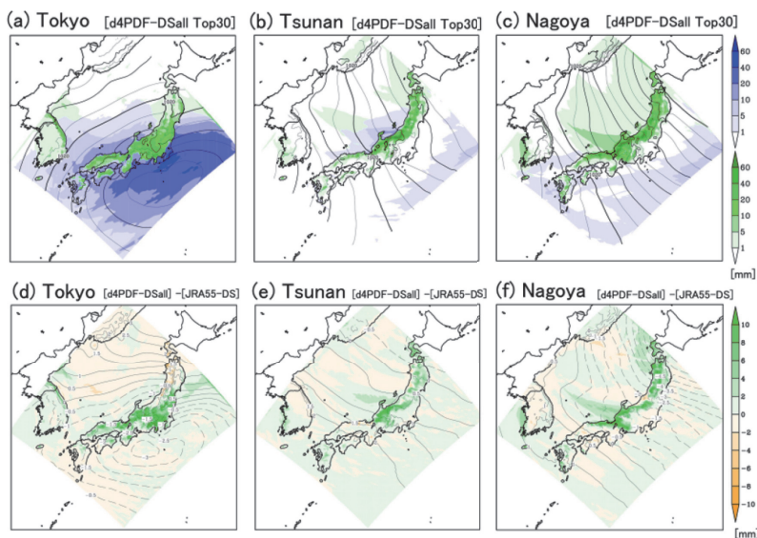


Fig. 3 (Top) Composite of top 30 heavy daily snowfall events simulated by d4PDF-DSall. Colors represent daily snowfall (green) and rainfall (blue), and contours represent sea level pressure. (Bottom) Differences in the composites between d4PDF-DSall and JRA55-DS. Green color represents that snowfall in d4PDF-DSall is larger than that in JRA55-DS. Solid and broken lines mean SLP in d4PDF-DSall is lower and higher than that in JRA55-DS, respectively.

snowfall and rainfall. The penetration of higher SLP is found over the eastern coast of Japan island, which is known as cold air damming [7]. On the other hand, in Tsunan, the composite analysis shows the typical SLP pattern during cold air outbreak, i.e., the prevailing northwesterly. The composite of heavy snowfall in Nagoya shows the similar SLP pattern to Tsunan (Fig. 3c), although Nagoya is located in the Pacific Ocean side. The pressure gradient is larger than that in Tsunan, meaning that the heavy snowfall occurs at Nagoya during stronger cold air outbreak. Moreover, the heavier snowfall band appears over the southwestern part of Sea of Japan, which represents the JPCZ. Therefore, strong cold air outbreak and JPCZ are important to induce heavy snowfall in Nagoya.

The JRA55-DS and d4PDF-DSall have climatic fields for 31 and 310 years, respectively, suggesting that the d4PDF-DSall simulates more infrequently and heavier snowfall events than JRA55-DS does. We compare the composites of top 30 heavy snowfall events estimated by JRA55-DS and d4PDF-DSall (Fig.3d-f). In the case of heavy snowfall event in Tokyo, the low SLP anomaly appears in the south of Tokyo, indicating the enhancement of the south-coastal extratropical cyclone in the d4PDF-DSall (Fig. 3a). The high SLP anomaly appears in the northeastern part of Japan, indicating that cold air damming is strengthened. For the heavier snowfall events in Tsunan, the pressure gradient from southwest to northeast is larger, while the difference is small. The difference of the composites is clear for the heavy snowfall events in Nagoya. An increase in pressure gradient indicates that the stronger cold air outbreaks cause heavier snowfall around Nagoya. Moreover, the snowfall and SLP anomaly show an enhancement of JPCZ extending toward Nagoya. The stronger cold air outbreak, i.e., winter monsoon, and more enhanced JPCZ can produce heavier snowfall around Nagoya.

Acknowledgement

This research was supported by the Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology (SI-CAT) of MEXT, JAPAN.

References

- [1] Nagata M., M. Ikawa, S. Yoshizumi, and T. Yoshida, On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter; numerical experiments, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 841-855, 1986.
- [2] Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model, *SOLA*, **4**, 25-28, 2008.
- [3] Murata A., H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, M. Oh'izumi, T. Kato, T. Aoyagi, F. Shido, K. Hibino, S. Kanada, A. Suzuki-Parker, and T. Nagatomo, Projection of future climate change over Japan in ensemble simulations with a high-resolution regional climate model, *SOLA*, **11**, 90-94, 2015.
- [4] Aoyagi, T., and N. Seino, A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1476-1496, 2011.
- [5] Mizuta, R., and co-authors, Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1, 2017.
- [6] Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu, Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-016-1781-3, 2016.
- [7] Bailey, C. M., G. Hartfield, G. M. Lackmann, K. Keeter, and S. Sharp, An objective climatology, classification scheme, and assessment of sensible weather impacts for Appalachian cold-air damming, *Wea. Forecasting*, **18**, 641-661, 2003.

