

# 温暖化が豪雪を強める可能性：寒波と豪雪の関係性が明らかに

課題責任者

山崎 剛 東北大学大学院理学研究科

著者

佐々井 崇博\*<sup>1</sup>, 山崎 剛\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

スーパーコンピュータ“地球シミュレータ”上で地域気候モデルによる大規模な温暖化予測を行い、豪雪を詳細に解析した。大規模温暖化予測実験から作り出された大量の気象データをもとに統計解析を行い、極端な気象現象であるの一つである豪雪について調べた。日本の降雪は、日本海側と太平洋側では原因となる気圧配置が異なる。そこで、日本海側の西高東低型と太平洋側の南岸低気圧型という2パターンに分けて、それぞれについて極値統計解析を実施し、豪雪の不確定性を調べた。その結果、日本海側の標高が高い地域では、温暖化すると現在よりも強い豪雪が起りうるということがわかった。これは、「気温上昇によって空気に含まれる水蒸気が増えること」に加え、「温暖化に対する寒気の昇温度合いが小さいことで、相対的に寒波が強まる」ことが原因である。今後、豪雪対策など、気候変動の適応策を進めるためにも、大規模アンサンブル実験や気象ビッグデータの解析をさらに進めていく必要がある。将来の豪雪を正確に予測するためにも空気に含まれる水蒸気や寒波を長期モニタリングし、早期警戒と雪害への十分な備えを行なっていくことが重要である。

キーワード：気象，温暖化，極端現象，適応策，気候変動

## 1. 背景

豪雪は、交通機関の混乱や雪おろしによる人的被害など、気象災害として我々の生活に大きなインパクトをもたらす。我が国の降雪現象を引き起こす典型的なパターン（気圧配置）は大きく二つあり、一つは日本海側で雪をもたらす西高東低型（いわゆる、冬型）、もう一つが太平洋側の南岸低気圧型である。そのため、成因の異なるそれぞれのパターンについて、「将来、豪雪がどう変化するか？」を理解する必要がある。

これまでの研究では、降雪の成因や将来予測が数多く行われてきたが、極端現象を解析できるほどの十分なシナリオ数を持つ大規模なアンサンブル実験が実施されておらず、豪雪の不確定性を調べるには至っていない。また、温暖化した将来の気候を想定して、豪雪の成因となる寒波との関係性を調べた研究もなかった。

そこで、今回は、大規模な温暖化予測を実施し、産業革命から全球平均気温が2度、ないし4度昇温した将来の豪雪について、本州のほぼ全域を対象に調べた。さらに、豪雪の仕組みを調べるために、寒波との関係性も調べ、将来起りうる強い豪雪の成因を明らかにした。今回の研究成果は、気象災害に対する事前の備えに重要な科学的知見であり、今後の気候変動の適応策において役立つものである。

## 2. 成果

我々は、気象庁気象研究所、海洋研究開発機構と連携し、スーパーコンピュータ“地球シミュレータ”上で地域気候モデルによる大規模な温暖化予測を実施し、本州のほぼ全域をカバーする新たな気象データセットを作成した（図1）。その主な特徴は、「地域スケールの気象

現象を捉えるほどの高い解像度（5km格子）」と、「現実的に起りうる気候シナリオの数を膨大に再現したこと」にある。これらの特徴は、我が国の様々な極端な現象を解析する上で必要不可欠な科学的アプローチであり、将来予測の不確実性を調べる上で有用である。

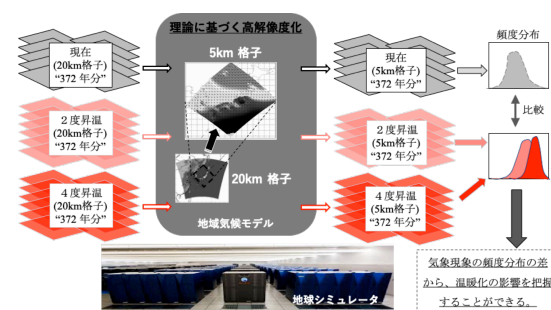


図1：温暖化予測の計算フロー。海洋研究開発機構の地球シミュレータで、理論に基づく高解像度化（気象庁気象研究所の地域気候モデルによる5km格子の計算）を実施した。「現在」、産業革命から「2度昇温」、および「4度昇温」した気候の状態を再現する。気温上昇の影響が小さな場合でも、その影響を確実に捉えるため（正確に頻度分布を描くため）に、それぞれ372年分の予測シナリオ数、計約1000年分の大規模な温暖化予測を実施した。

次に、今回の温暖化予測の特徴である“膨大なシナリオ数”を活かし、我が国の極端な降雪現象（豪雪）の解析を行った。豪雪は、一年間で最も降雪が多い日の降雪現象として定義した。豪雪時の降雪量だけで頻度分布を描き（極値統計解析）、その強度と頻度を現在と将来で

比べることで、豪雪が強まる（もしくは、弱まる）か、を判断した。「産業革命から2度、ないし4度昇温した将来に、太平洋側と日本海側それぞれの豪雪がどう変わるか？」を調べた。

その結果、太平洋側では温暖化による気温上昇が雪を雨に変えるために豪雪が著しく弱まるが、日本海側では豪雪の頻度や強度が現在とほぼ変わらないことがわかった（図2）。そこで、日本海側に注目して詳しく調べたところ、将来温暖化すると、日本海側の比較的標高が高い場所である中部日本山岳地域で現在よりも強い豪雪が起りうるということがわかった（図3）。温暖化すると空気に含まれる水蒸気が増え、潜在的に降ることが可能な降雪量が増えるためであり（図4）、温暖化してもなお寒冷な地域では上空から地面まで雪が解けることなく降ることができる。

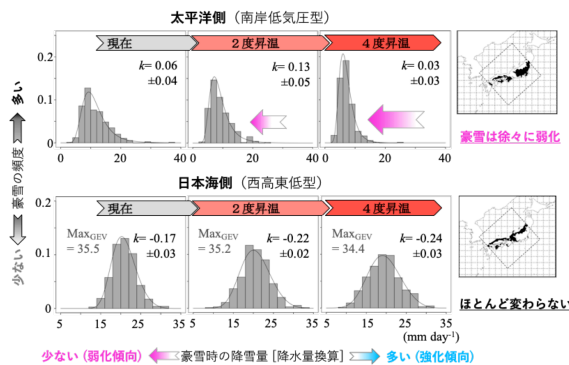


図2：太平洋側(上段)と日本海側(下段)での、「現在」、「2度」、および「4度昇温」した時の豪雪の頻度分布。太平洋側では、温暖化が進行するとともに豪雪が顕著に弱化する。一方で、日本海側全体では、現在と将来にほとんど差がない。今回の解析した領域は、右図の点線四角内。

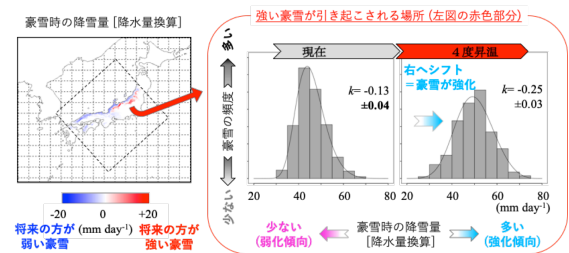


図3：日本海側における、「現在」と「4度昇温」した時の豪雪時の日降雪量の差(左図)。赤が4度昇温時に豪雪を強化、青が弱化することを表す。日本海側の中部日本山岳地域(新潟県、長野県、富山県などをまたがる山脈を中心とした地域)では温暖化によって豪雪が強まる。右のグラフは、豪雪が強化される地域(左図の赤色で示した地域)における豪雪の頻度と強度を表す。横軸の値が高いほど強い豪雪、低いほど弱い豪雪であることを示す。頻度分布が右へシフトしていることから、より強い

豪雪がより高い頻度で起こることが示唆。

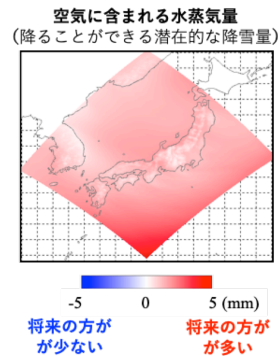


図4：「現在」と「4度昇温」時の「降ることができる潜在的な降雪量(可降水量)」の差。赤色ほど、4度昇温時の方が多いことを表す。温暖化によって空気に含まれる水蒸気は、ほぼ全域で増えることがわかる。

日本海側の降雪の仕組みをもとに、将来起こりうる豪雪の仕組みを考察した(図5)。日本海側で雪が降る一般的な仕組みは、シベリアから流れ込む寒気(寒波)が南から運ばれてくる温かい海水に触れることから始まる。これにより日本海上では対流活動が起こり、空気が海から熱(水)の供給を受けて雪雲が発生する。雪雲は季節風によって日本列島まで運ばれ、日本海沿岸で雪を降らせる。

そこで、雪を作り出す雲の生成に必要な「寒波」と「海からの熱供給(潜熱・顕熱)」について調べた。「寒波」は、南から流れてくる暖気と極域から流れてくる寒気がすれ違う高度をもとに計算された、下層の冷たい空気の総量である。

その結果、温暖化によって海水が常に温められるために「海からの熱供給」は十分であり、将来は「寒波」の方が豪雪を引き起こすより重要な成因だとわかった。

「寒波」と豪雪の関係性をさらに詳しく調べたところ、温暖化が進行するほど豪雪と寒波の結びつきが強くなっていった。一般的に、シベリアから流れこむ寒気が温暖化によって温められ、将来の寒波は平均的には弱体化して雪が減る。しかし、今回の研究では、豪雪の時にシベリアから流れ込む寒気の温度が上がつつも、その量は増えることがわかった(図6)。つまり、大きな寒波の時には、「寒気自体の昇温の度合い」が「温暖化による平均気温の上昇の度合い」よりも小さくなったため、相対的に寒波が強まり、そのタイミングが将来の強い豪雪の日と一致したことを示唆している。

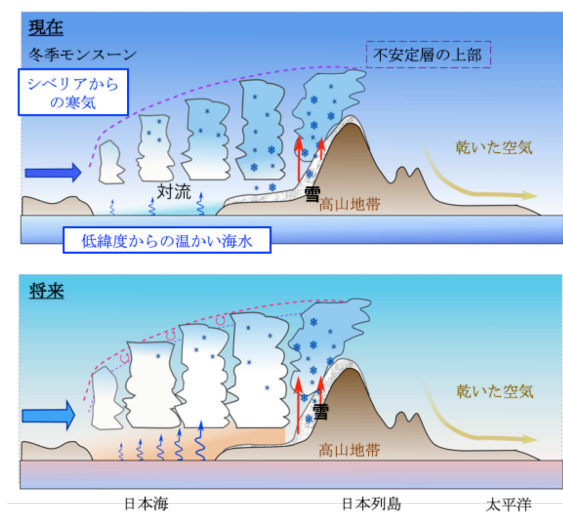


図5：豪雪のメカニズム。シベリアから日本海へ流れこむ寒気は現在と比べて温まるが、豪雪時には流入する量が増えることで、相対的にはより大きな寒波となる（右向きの青色矢印）。「シベリアから日本海に流入した寒気」が「低緯度から流れてきた温かい海水」に触れることで、海上では対流不安定となり（上向きの青色矢印）、雪雲が発生。日本海へ流れ込む寒気は日本海から大量の熱と水を吸収し、雪雲を成長させながら、日本列島まで到達。豪雪時の寒気は将来の方が増えるため、空気がより多くの水と熱を吸収して、より多くの水蒸気を含んだ雪雲を作り出す（雲の白色部分）。日本列島では季節風が高山地帯にぶつかって強制的な上昇気流を発生（赤色の矢印）。結果として、現在よりも空気が含む水蒸気が増えるため、より強い豪雪を引き起こす。

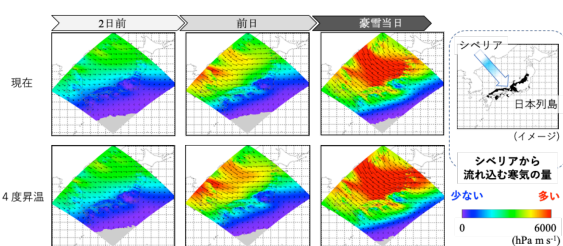


図6：シベリアから日本海、日本列島に向けて流れる寒気量（右の図のような流れで寒気が流れ込む）。現在（上段）と4度昇温した将来（下段）の豪雪時における、2日前から当日までの寒気。赤色ほど、シベリアから流れ込む寒気量が多いことを示す。温暖化に合わせて寒気自体の温度の基準を上げることで、寒気量を計算。豪雪が起こる前日から当日にかけて寒気量が多くなることから、将来寒波が相対的には強まることわかる。

### 3. まとめ

このように、将来起こりうる強い豪雪は、「気温上昇

によって空気に含まれる水蒸気が増えること」に加え、「相対的に寒波が強まること」が成因である。

今後、温暖化によって雪が減少し、我々の生活においても雪を見る機会が減る。そのため、温暖化の進行とともに雪害に対する意識が薄れやすい環境になるが、短時間で一気に沢山の雪が降る豪雪は強まる可能性が高くなる。そのため、雪害対策は十分に維持、進展させていく必要がある。また、気候変動の適応策として豪雪への対策を検討する上で、寒波を常時監視していくことが重要である。大寒波の可能性を観測した時には、日本海側の山岳地域を中心に、今よりも強い豪雪を警戒する必要がある。

### 謝辞

この研究は、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の支援を受けた。また、大規模温暖化実験では、地球シミュレータを利用した。

### 参考文献

Sasai, T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita, T. Iwasaki, Future Projection of Extreme Heavy Snowfall Events with a 5-km Large Ensemble Regional Climate Simulation, Journal of Geophysical Research Atmosphere, doi: 10.1029/2019jd030781  
山崎剛、佐々井崇博、川瀬宏明、杉本志織、大楽浩司、伊東瑠衣、佐々木秀孝、藤田実季子、「5km 力学的ダウンスケーリングデータセット（SI-CAT DDS5TK）の概要」、シミュレーション、38(3)

# Enhancement of Extreme Snowfall by Global Warming: Relationship between Cold Air Outbreaks and Extreme Snowfall

Project Representative

Takeshi Yamazaki

Graduate School of Science, Tohoku University

Authors

Takahiro Sasai \*<sup>1</sup>, Takeshi Yamazaki \*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University

We have experienced several heavy snowfall events under recent climate, but still not sufficiently-understood the extreme snowfall change that occurs with global warming and its mechanism. The prediction requires ensemble experiments with several kilometers horizontal resolution using a regional climate model. The high resolution is especially an essential element. We thus operated a large number of ensemble warming projections for 5km grids spacing dynamically downscaled from the 20-km RCM ensemble dataset to reveal the change of the extreme snowfall event due to the warming shift in Japan, which has two typical snowfall patterns. As the domain-averaged response to the warming shift, the snowfall amount of south-coast cyclone pattern regions was decreasing with the temperature rise. Meanwhile, winter monsoon pattern regions showed little change in canceling between increasing and decreasing trends in mountain- and coastal-snow type area, respectively. Based on the existing snowfall mechanism, the reason for the increase of the mountain-snow type is the temporal-irregular intensification of cold air outbreaks; the cold air mass flux blowing toward Japan Sea clearly increases only around the day of extreme snowfall; the cold dry air obtaining more latent heat on the ocean increases the precipitable water vapor; the air is transported into the land by winter monsoon and more largely encourages the intensification of the precipitation activity resulting from the orographic updraft. Such a set of processes beginning with the cold air outbreak may more strongly control the extreme snowfall phenomena on the warming field.

**Keywords :** meteorology, global warming, extreme event, adaptation, climate change

## 1. Background

An extreme heavy snowfall is one of the mesoscale meteorological phenomena, and sometimes has a disproportionate impact on our human life as weather disasters. There are two typical pressure patterns causing snowfall; “lake or ocean effect snow pattern” (e.g., the downstream area of the Great Lake, Norwegian sea, Japan Sea) and “snowstorm pattern” due to extratropical cyclone (e.g., East Coast of North America, Pacific side of Japan). It is difficult to quantitatively estimate the change of snowfall by the warming shift; the regional-scale snow impact given by the regional climate model (RCM) has left much room for scientific discussion even now. An extreme snowfall event being difficult caught by the single or several model-runs designs because of probabilistic rare event, it needs to realize the climatic relationship with global warming by using a statistical uncertainty derived from an ensemble experiment by RCM. Most existing large-scale ensemble experiments have unfortunately had coarse spatial resolution (>100 km) as well as the climate change projection by AOGCM, and only a few studies had large-scale ensemble experiment with higher resolution. It is not able to pursue an argument to longer-term rare snowfall events due to the limited number of model run in the existing high-resolution ensemble experiments, that unequivocally is an important factor that results in the

uncertainty of the less-frequency event

In this study, we operate a large-scale ensemble experiment with 5 km grid resolution dynamically downscaled from the 20-km RCM in the d4PDF dataset to reveal the change of extreme snowfall event by the warming shift. Japan has many world’s leading snowiest major cities based on two typical pressure patterns causing snowfall on topographical complicated region, and recently several heavy snowfall phenomena. Thus, by applying the estimation of central Japan into the Generalized Extreme Value (GEV) distribution, we examined the difference between the present and future in each typical snowfall pattern, referring to a mechanism of the extreme snowfall event including the relationship with a cold air outbreak. We randomly extracted over 1000 years’ data from the regional 20-km grid resolution d4PDF dataset over several thousand years, and conducted the historical, and 2K- and 4K-warmer future scenarios simulations.

## 2. Methodology

To obtain probabilistic future projections of low-frequency local-scale snowfall events, we used the d4PDF regional climate dataset including 2K warming experiment. The dynamical downscaling to 5 km grid resolution was conducted with NHRCM from the d4PDF 20-km regional climate dataset (Fig. 1). To attempt certainly understanding for



frequency of occurrence of a rare event as the probability density function, we remedy the deficiency of value within the extreme range by using GEV as the extreme value theory. As additional data analysis for the model outputs, we estimated spatial and temporal variations in cold air mass flux by using the isentropic cold air analysis tool which defines the mass below the threshold potential temperature as cold air mass.

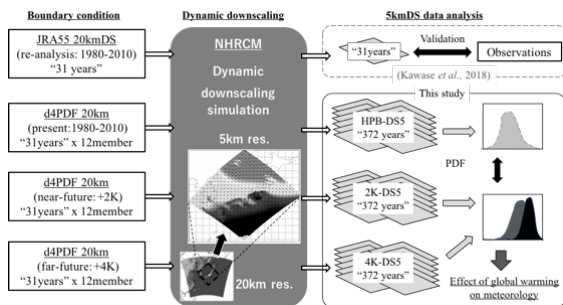


Fig. 1. A design of the ensemble warming prediction by the regional climate model

### 3. Results and Discussion

As a Japanese snowfall pattern is divisible into two regions according to the atmospheric pressure pattern, each frequency of the extreme snowfall events was statistically analyzed with PDF relevant to the extreme event extracted from all snowfall data (Fig. 2). The winter monsoon pattern experienced little warming impact from temperature rise field compared to the south-coast cyclone pattern. Thus, we examined PDF in each increasing and decreasing regions with the same way as Fig. 2 (Fig. 3). The spatial variation had an increasing trend in the mountainous area and decreasing in the coastal area.

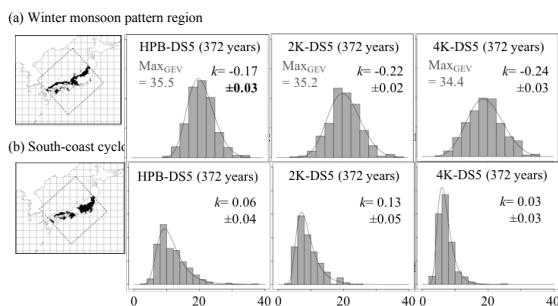


Fig. 2. Statistical comparison of extreme snowfall between (a) the winter monsoon and (b) south-coast cyclone pattern regions among present, near- and far-future. The south-coast cyclone pattern indicates a condition of atmospheric pressure distribution locating cycles off the south-coast of Japan, whereas the winter monsoon pattern is atmospheric pressure in which high pressure lies to the west and low pressure to the east.  $Max_{GEV}$  is a maximum snowfall value that is statistically defined by GEV distribution ( $SLSC < 0.03$ ) and  $k$  represents a shape parameter of GEV with an error range ( $\pm\sigma$ ).

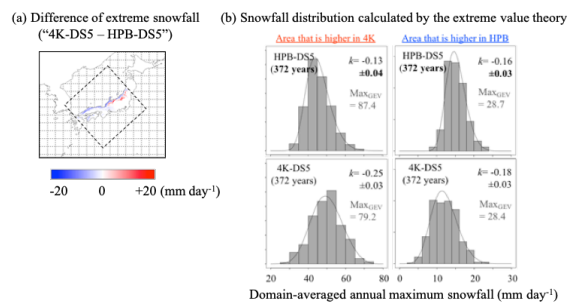


Fig. 3. (a) A difference of the extreme snowfall between present and future climates in the winter monsoon pattern region. (b) Comparison of extreme snowfall distribution between increasing and decreasing regions.

### 4. Conclusion

The domain-averaged amount of the extreme snowfall of south-coast cyclone pattern regions has quantitatively decreasing trends along with the global-scale temperature rise, but that of the winter monsoon pattern regions had little difference among present and future climates. Thus, this study mainly focuses on the future changes in the extreme snowfall event under typical winter monsoon pattern regions. As a result of the composite analyses with the ensemble experiment, we concluded that, the future warming shift largely increases saturated water vapor based on the Clausius-Clapeyron relation, leading to an increase in the winter precipitation; the temperature rises results in crossing the threshold for water phase change in a part of the region. For the Japan Sea side, the reason for the precipitation change is increasing the dry cold air mass flux from Siberia. Consequently, it augments opportunities for a snow cloud formation by more sufficiently supplying the heat and water from the ocean. It suggested a need to add further weight to the constant monitoring of the cold air outbreak in the extreme weather forecast on the warmer field.

### Acknowledgement

This research was mainly supported by SI-CAT of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), JAPAN. The large-scale ensemble simulation was operated in the Earth Simulator (ES) of JAMSTEC.

### References

Sasai, T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita, T. Iwasaki, Future Projection of Extreme Heavy Snowfall Events with a 5-km Large Ensemble Regional Climate Simulation, *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, doi: 10.1029/2019jd030781