

# 地球温暖化で変わる日本の雪

川瀬宏明 (気象庁 気象研究所 応用気象研究部)

## 1. 進行する地球温暖化

産業革命以降、二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量が増加し、地球の気温が上昇する地球温暖化が問題となっている。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) の第5次報告書によると、20世紀半ば以降に観測された気温上昇は、人間活動が主要因であった可能性が極めて高いと結論付けられている。

図1に1890年以降の世界平均気温の変化を示す。年々の変動はあるものの、100年あたり0.73度の割合で気温が上昇している。特に近年、気温上昇の割合が大きく、2016年に観測史上最高の値を更新したのをはじめ、2014年から2018年までの5年間で上位5年を占めている。

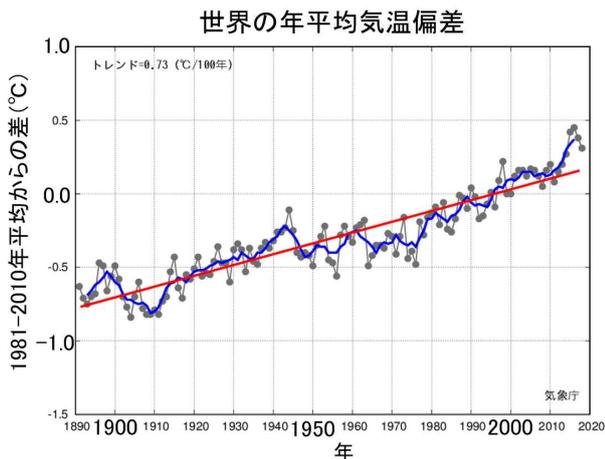


図1 世界の年平均気温の変化。1981年から2010年までの平均との差を示す。青色は5年移動平均、赤色は傾向 (線形トレンド)。気象庁 WEB ページより。

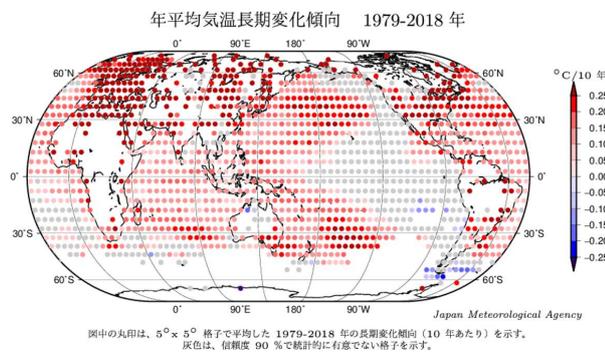


図2 1979年から2018年までの年平均気温の変化傾向。灰色は有意でない格子。気象庁 WEB ページより。

気温はほぼ全世界的に上昇してきているが、気温の上がり方には地域差がある (図2)。気温上昇量は海上より陸上の方が大きく、低緯度より高緯度で大きい。この地域差を生み出す一つの要因が、雪と氷である。雪や氷はアルベド (反射率) が大きく、太陽の光 (短波放射) の大部分を反射する。温室効果ガスは短波放射を吸収しないため、反射した光はそのまま宇宙に逃げていく。温暖化に伴い気温が上昇すると、雪や氷が融けて地面や海面が現れる。そこに太陽の光が入ると地面や海面が暖められ、その結果、さらに雪が融けて気温があがるという温暖化の加速が起こる。これをアイス・アルベドフィードバックと呼ぶ。

## 2. 近年の日本の雪の変化

### 2.1 日本の気温変化

日本においても、近年気温上昇が観測されている。図3に1890年から2018年までの日本の年平均気温の変化を示す。100年あたり1.21度の割合で上昇しており、特に1980年代半ばからの気温上昇が顕著である。なお、この図は都市化の影響が少ないと考えられる地点の気温のみを用いて描かれている。都市域ではヒートアイランド現象の影響で、気温上昇量はさらに大きい (気象庁, 2019)。

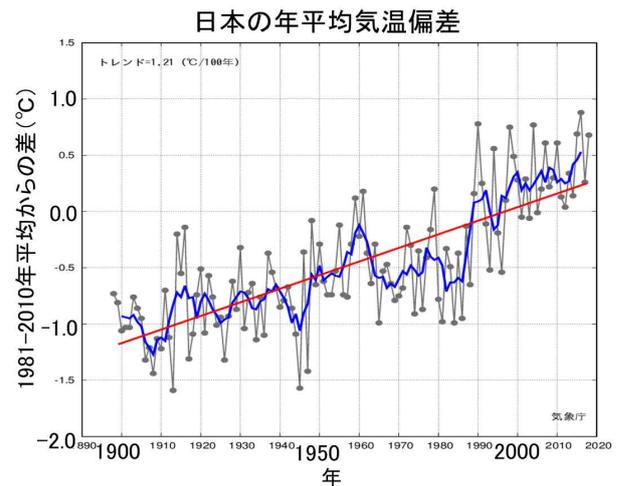


図3 図1と同様。ただし、日本の年平均気温の変化。

### 2.2 日本の過去の積雪変化

気象官署における観測から、年最大積雪深は全国

的に減少していることが分かっている (図 4)。特に、東日本や西日本の日本海側で減少率が大きく、10 年間に 10%から 12%程度の割合で積雪が減少してきている。北日本の日本海側でも積雪の減少が見られるが、減少率は小さく(2.9%/10 年)、2005 年以降は 1981-2010 年の平均値よりも多い年もたびたび見られる。

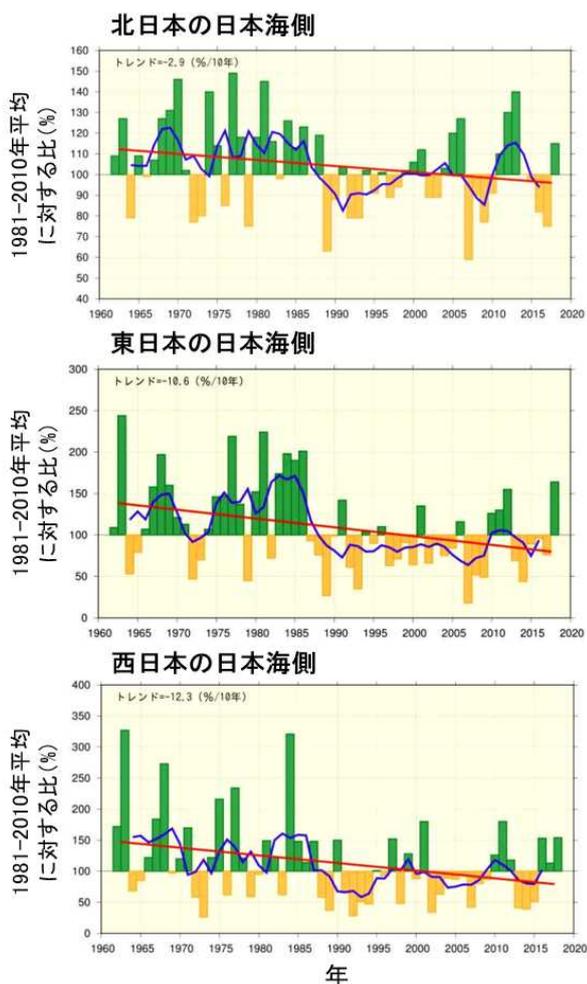


図 4 年最大積雪深の過去の変化。1981 年から 2010 年平均値に対する比で示す。青線は 5 年移動平均、赤線は長期変化傾向を示す。気候変動監視レポート 2018(気象庁, 2019)を加筆。

気象官署や地域気象観測所 (アメダス) の多くは標高の低い地域に立地する。積雪の観測を行なっている最高点は、標高 1292m の栃木県奥日光であり、長野県菅平 (標高 1253m)、群馬県草津 (1223m) と続く。Yamaguchi et al. (2011) は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターが展開する独自の山岳域の積雪観測データを分析し、本州の山岳域では近年平

野で見られるような顕著な積雪減少が見られないことを示した。年最大積雪深の年々変動は、標高の低い場所では気温変化の影響が大きい一方、標高の高い場所では降水量の変動の影響が大きいことを指摘している。ただ、山岳域の観測データは少なく、今後の継続的な積雪モニタリングが課題とされている。

### 3. 将来予測

#### 3.1 将来の気候を予測する気候モデル

地球温暖化が進行した将来の気候を予測するために、世界中の研究機関で気候モデルを用いた気候変動予測実験が行なわれている。気候変動予測に用いる気候モデルは、基本的には日々の天気予報を行う数値予報モデルと同じである。ただ、日々の天気予報では大気の状態 (初期条件) が重要であるが、将来の気候変動予測においては、過去の温室効果ガスや工場からの PM2.5 等の排出、火山噴火や太陽活動の情報 (境界条件) を与えることが重要となる。また、計算は大気だけにとどまらず、海洋や陸面、海水、成層圏など通常の天気予報では扱わない要素も考慮する必要がある (図 5)。これらをすべて考慮した再現実験を行うと、気候モデルは過去に観測された気温変化を再現することができる。

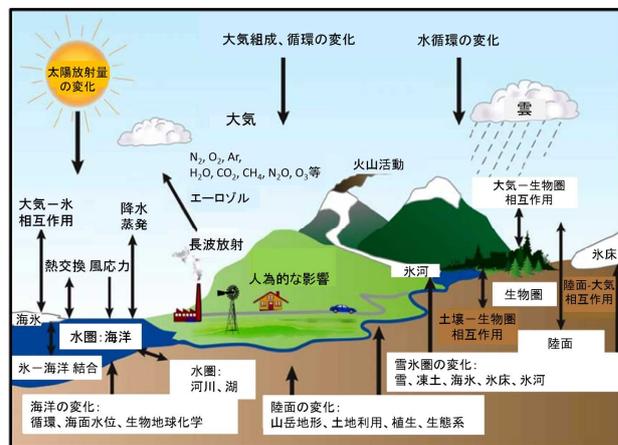


図 5 気候モデルが考慮する過程。IPCC 第 4 次報告書 (IPCC, 2007) の図を気象庁が翻訳したもの。

将来の気候を予測する際には、将来の温室効果ガスの排出量などを見積もり、気候モデルに与える必要がある。排出量は今後の世界の温暖化対策によって大きく変わるため、いくつかの排出シナリオを準備する。IPCC 第 4 次報告書では SRES (Special Reports on Emissions Scenarios)、第 5 次報告書

では RCP(Representative Concentration Pathway) と呼ばれるシナリオが用いられた。IPCC 第 5 次報告書によると、最も温暖化が進行する RCP8.5 シナリオでは、21 世紀末に 20 世紀末と比べて約 4 度程度、気温が上昇すると予測されている。

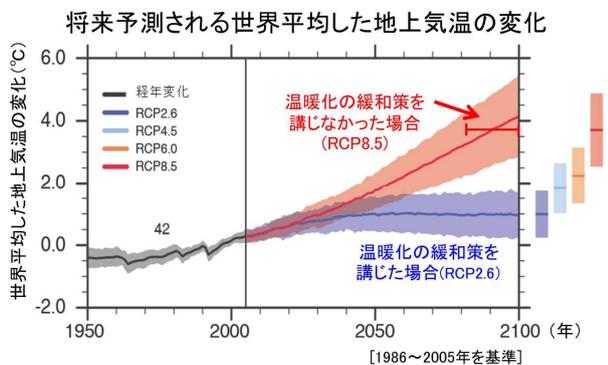


図 6 世界の気候モデルが予測した将来の地上気温の変化。1986 年から 2005 年の平均値からの差で示す。赤色が RCP8.5、青色が RCP2.6。右のバーは、2081 年～2100 年における予測のばらつき。IPCC 第 5 次報告書 (IPCC, 2013) の図を加筆。

### 3.2 日本域を詳細に計算するには

通常、気候変動予測に用いる気候モデル (全球気候モデルと呼ぶ) は、地球の大気や海洋を計算するため、モデルの解像度が粗くなる。そのため、複雑な地形を持ち、周りを海に囲まれる日本の気候を再現するためには、高解像度で計算する必要がある。そこで、全球気候モデルで計算された結果を基に、別途日本域のみを高解像度で計算する手法が開発されている。これを力学的ダウンスケーリングといい、ここで用いる気候モデルは領域気候モデルと呼ばれる。

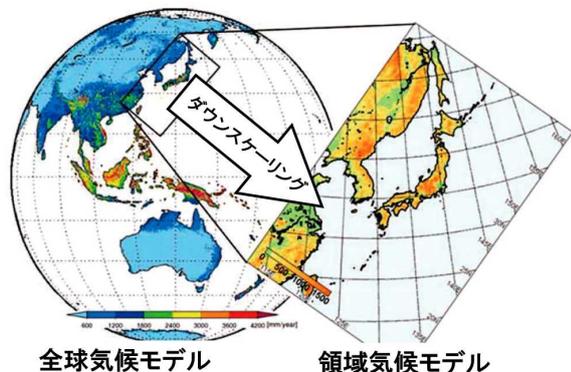


図 7 力学的ダウンスケーリングの模式図。地球温暖化予測情報第 9 巻 (気象庁, 2017) の図を一部改変。

気象庁では、気象研究所で開発した領域気候モデル (地域気候モデル) を用いた将来予測の結果を、地球温暖化予測情報 (最新は第 9 巻) として WEB で公開している (気象庁, 2017)。第 9 巻は RCP8.5 シナリオの 21 世紀末の気候を想定しており、日本では 20 世紀末と比べ、全国平均で約 4.5 度 (冬: 約 5.0 度、夏: 約 4.2 度) の気温上昇が予測されている。

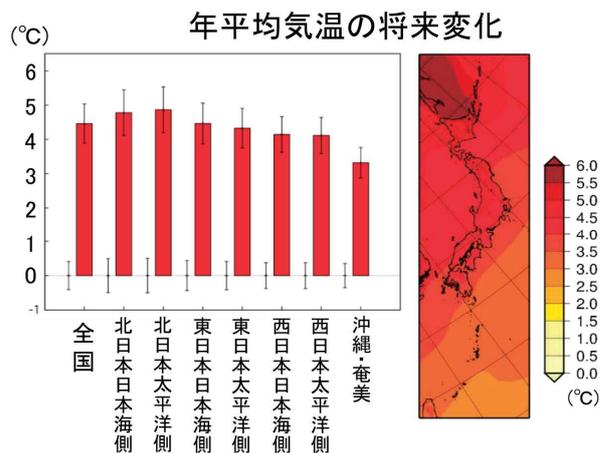


図 8 RCP8.5 における 21 世紀末の年平均気温変化。現在気候は 1980～1999 年、将来気候は 2076～2095 年の平均値。温暖化予測情報第 9 巻の図を加筆修正。

### 3.3 日本の雪の将来変化

#### 年最大積雪深と月最大積雪深の変化

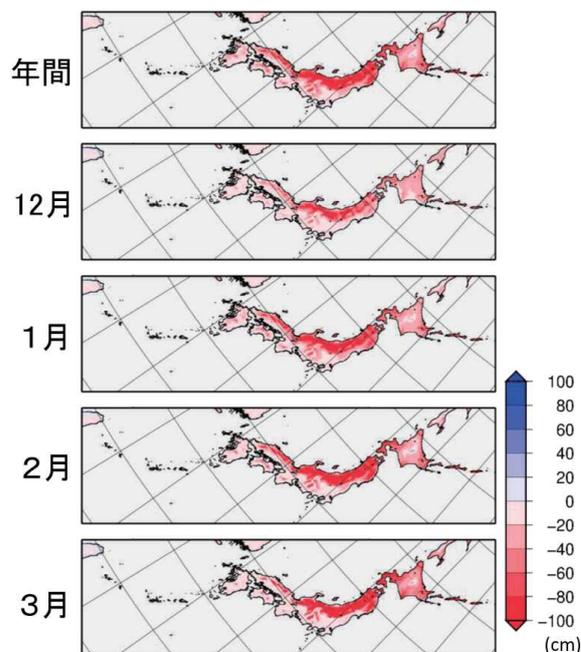


図 9 年最大積雪深と月最大積雪深の将来変化。地球温暖化予測情報第 9 巻の図を一部加筆修正。

図 9 に球温暖化予測情報第 9 巻で示された年最大積雪深と月最大積雪深の将来変化を示す。最大積雪深は全国的に減少し、元々雪の多い本州の日本海側で特に大きな減少が予測されている。ただ、北海道の内陸では減少量が小さく、大雪山系のあたりでは、最大積雪深が増加する場所も見られた。年積算降雪量も年最大積雪深とほぼ同様の变化を示す(図 10)。一方、月別の積算降雪量の変化を見ると、1 月や 2 月の厳冬期においては、北海道の広い範囲で降雪量が増加する予測となっている。東北から北陸にかけての山岳地域では、降雪量の減少は見られるが、減少量は小さい。つまり、地球温暖化が進行すると、北海道や本州の山沿いは、現在と同程度あるいはそれ以上の雪が降ることを示唆している。

### 年積算降雪量と月積算降雪量の変化

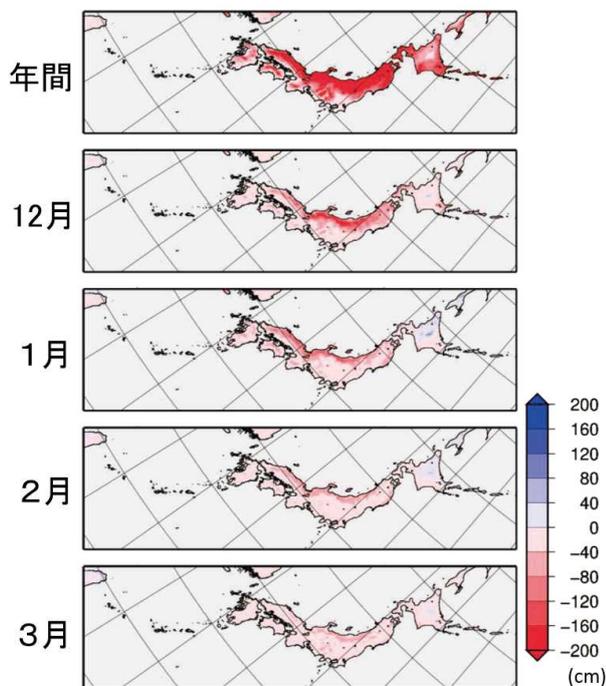


図 10 年積算降雪量及び月積算降雪量の将来変化。地球温暖化予測情報第 9 巻を加筆修正。

次に、北日本、東日本、西日本の日本海側における降雪量の季節変化を比較した(図 11)。将来、北日本では、10 月から 12 月上旬にかけて降雪量が大きく減少しているが、1 月から 3 月初めは現在と匹敵する程の降雪が予測されている。現在気候では、12 月頃に降雪量のピークがあり、その後、2 月末にかけてなだらかに減少する。一方、将来気候では 1 月半ばにピークがあり、現在よりも遅れる予測な

っている。また、ピーク後、降雪量はすぐに減少する。東日本の日本海側では、北日本に比べて降雪量の減少が顕著である。厳冬期であっても、他の季節同様に降雪量の減少が予測されている。現在気候では 12 月から 1 月まで降雪量の多い時期が続くが、将来気候では 1 月半ばにピークが見られ、その後急速に減少する。北日本の日本海側と同様にピークの遅れと形の変化が見られた。降雪量が少ない西日本の日本海側では、将来、ほとんど降雪がなくなる予測となった。降雪は山岳域に限られる可能性がある。

### 降雪量の季節変化

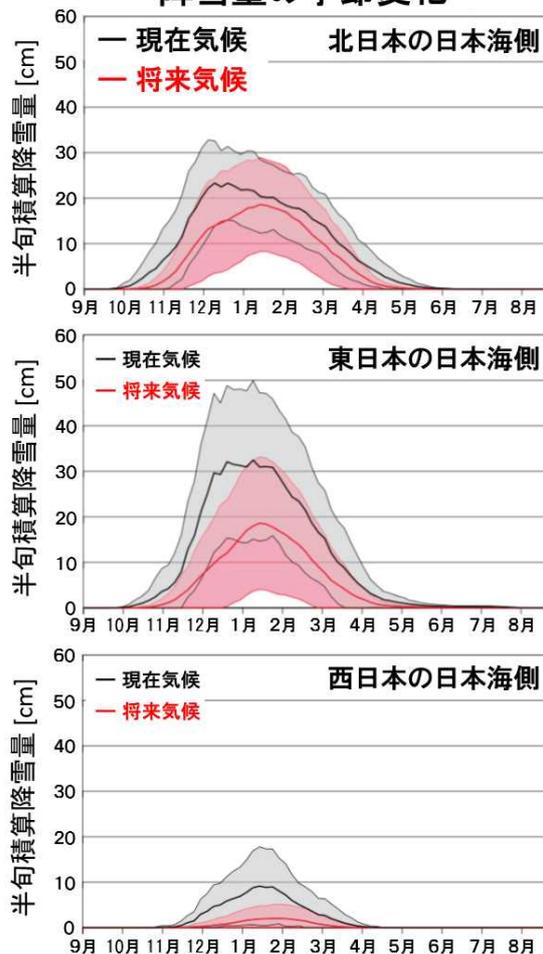


図 11. 半旬(5日)積算降雪量の季節変化。上から順に北日本の日本海側、東日本の日本海側、西日本の日本海側。黒線は現在気候、赤線は将来気候。陰影は年々変動を示す。第 9 巻の図を加筆修正。

### 3.4 極端に強い大雪の変化

将来、年最大積雪深が大きく減少することから、過去に起こった 38 豪雪や 56 豪雪、平成 18 年豪雪のような豪雪は減少すると考えられる。一方、1 日

あるいは一晩で一気に降るような短期間の大雪、いわゆるドカ雪も雪害をもたらす恐れがある。ここでは、数年から 10 年に一度の頻度で起こるようなドカ雪の将来変化を調査した。発生頻度の低い現象を対象とするため、ここでは「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)」を用いた。d4PDF は約 60km 格子間隔の全球気候モデルの実験と 20km 格子間隔の領域モデルの計算から作られたデータセットである。現在気候を想定した実験を約 6000 年 (日本域は約 3000 年) と産業革命以前から 4 度上昇を想定した実験を約 5400 年実施している。

図 12 に d4PDF を用いて分析した 10 年に一度の極端に強い日降雪量の将来変化を示す。全国的には減少するが、北海道や北陸の内陸部では増加する地域が見られる。特に北陸の山沿いでは、積算降雪量や厳冬期の降雪量は減少しているにもかかわらず、極端に強い日降雪が大きく増加する予測となった。つまり、温暖化が進行すると、通常の降雪量は減少するが、極端に強い降雪は増えることを示唆している。

10年に1度の日降雪量の変化

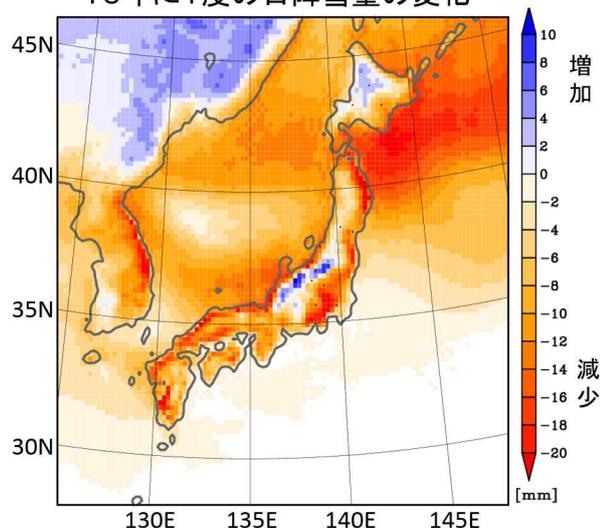


図 12 10 年に一度程度の強い日降雪量の将来変化。Kawase et al. (2016) を一部改変。

どのような状況で極端な降雪が発生し、それが地球温暖化に伴い増加するかを調べた。現在気候において、北陸の山沿いで大雪が発生する時は、日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) が発生し、それが北陸にかかっていた。2018 年の福井県の豪雪や 2017 年の山陰地方の豪雪は JPCZ が原因であると言われている。

将来においても、北陸の山沿いの大雪は JPCZ が関連していた。地球温暖化が進行すると、気温だけで

なく海面水温も増加する。暖かい海面からは現在よりも多くの水蒸気が蒸発し、それが JPCZ 付近に集まり、積乱雲が発達する。その結果、北陸地方では JPCZ による降水量が増加する。ただ、気温上昇に伴い、沿岸部ではほとんどの場合、降水の増加は降雨の増加となる。一方、気温の低い山岳域では、将来も 0°C を上回らず、増加した降水量がそのまま降雪量の増加に繋がる。結果として、日本海側の内陸部や山岳部では短時間の大雪が増加することになる。

### 3.5 山の雪の今と将来

最後に山岳域の積雪、降雪の変化について、最新の研究結果を紹介する。2.2 で紹介した通り、標高の高い山岳域では、過去の積雪変化が標高の低い地域とは異なることが知られている。また、高標高域は、低標高域に比べて将来の積雪減少率は小さいことが指摘されている (Kawase et al. 2013)。一方、日本の山岳地形は非常に複雑なため、積雪分布を詳細に再現、予測するためには、20km や 5km の解像度でもまだ不十分である。文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) では、気象研究所の地域気候モデルを用いて、d4PDF を最大 1km 格子間隔まで力学的ダウンスケーリングをして、中部山岳域の降雪と積雪の将来予測を行った。ここでは、多雪年と少雪年に分けて、将来、産業革命前から 2 度あるいは 4 度上昇した将来を想定する。

北アルプスの標高 2000m 以上の地域では、2 度上昇した将来は積雪開始時期が遅くなるものの、多雪年には 12 月から 3 月半ばまで、現在と同等の積雪が再現された (図 13)。4 度上昇した将来においても、2 月中旬は、現在に匹敵するほど積雪深が一時的に再現された。半月積算降雪量を比較すると、4 度上昇では、12 月から 1 月にかけて現在よりもかなり多くの降雪が予測されていた。一方、少雪年は、2 度上昇、4 度上昇ともに、現在に比べて大きく減少した。多雪年で見られたような、厳冬期の降雪量の増加も再現されず、積雪は 5 月下旬にはなくなった。

これらの結果から、将来の多雪年において、厳冬域の北アルプスでは現在と同等の積雪が積もる一方、少雪年は現在よりも大幅に減少することが分かった。つまり、将来は現在よりも山岳域の積雪の年々の変動が大きくなることを示唆している。

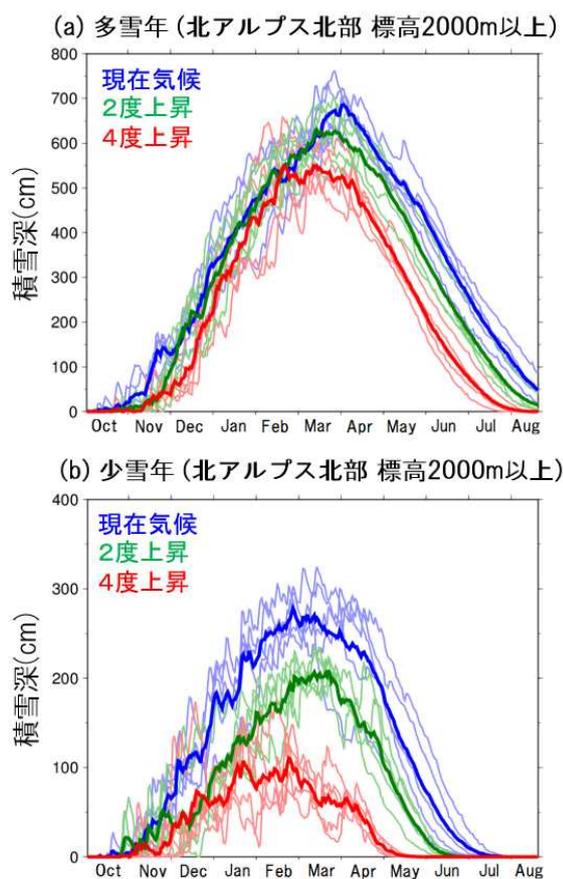


図 12 北アルプス北部の高標高地域における積雪深の季節変化。10月から8月まで。青は現在気候、緑は2度上昇気候、赤は4度上昇気候。

#### 4. まとめ

地球温暖化の影響もあり、すでに東日本や西日本の沿岸部では積雪が減少しはじめている。気候モデルを用いた気候変動予測実験から、将来、総降雪量は北海道の一部を除いて全国的に大きく減少すると予測されている。一方、北海道では厳冬期の降雪量の増加が予測されている。さらに、短時間に降る大雪（ドカ雪）は、北海道だけでなく、北陸の山沿いでも増加する可能性がある。

標高の高い地域では、低標高地域とは積雪の変動が異なる。北アルプスでは、将来の多雪年には、現在の多雪年と同等の積雪が厳冬期に予測されており、降雪量は現在よりも増加する可能性が高い。一方、少雪年の積雪は現在よりも大幅に減少する可能性が高く、将来は現在よりも山岳域の積雪の年々変動が大きくなることを示唆している。

#### 参考文献

- 気象庁, 2017: 地球温暖化予測情報第9巻, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/>
- 気象庁, 2018: ヒートアイランド監視報告2017.
- 気象庁, 2019: 気候変動監視レポート2018, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kawase, H., M. Hara, T. Yoshikane, N. N. Ishizaki, F. Uno, H. Hatsushika, and F. Kimura, 2013: Altitude dependence of future snow cover changes over the Central Japan evaluated by a regional climate model. *J. Geophys. Res.*, **118**, doi:10.1002/2013JD020429.
- Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, M. Ishii, and I. Takayabu, 2016: Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change*, **139**, 265-278.
- Yamaguchi, S., Abe, O., Nakai, S. and Sato, A. (2011): Recent fluctuations of meteorological and snow conditions in Japanese mountains, *Ann. Glaciol.*, **52**, 209-215.