

地球温暖化が日本の雪に及ぼす影響

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	川瀬,宏明
発行元	養賢堂
巻/号	94巻4号
掲載ページ	p. 296-304
発行年月	2019年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



地球温暖化が日本の雪に及ぼす影響

川瀬宏明*

〔キーワード〕：地球温暖化，気候変動予測実験，気候モデル，日本の雪，降積雪の将来予測

1. 加速する地球温暖化

近年，温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化が大きな問題となっている。2018年7月23日，埼玉県の熊谷市で41.1度を観測し，これまでの日本の最高気温の記録を塗り替えた。同日，東京都青梅市でも40.8度を観測したほか，2018年の夏は各地で40度を超える猛烈な暑さとなった。2018年のユーキャン

新語・流行語大賞で「災害級の暑さ」がトップテン入りしたのは記憶に新しい。過去の世界の気温観測データから，世界平均気温は1880年から2012年の132年間で0.85度上昇したと見積もられている（Hartmann et al., 2013）。気象庁の解析によると，2018年の世界平均気温は観測史上4位の高さとなった（気象庁，2018）。特に，近年の気温上昇が顕著であり，観測史上最高を記録した2016年を筆頭に，2014年から2018年までの5年が上位5位を占めている状況である（図1a）。

一方，日本では100年あたり1.21度の割合で気温

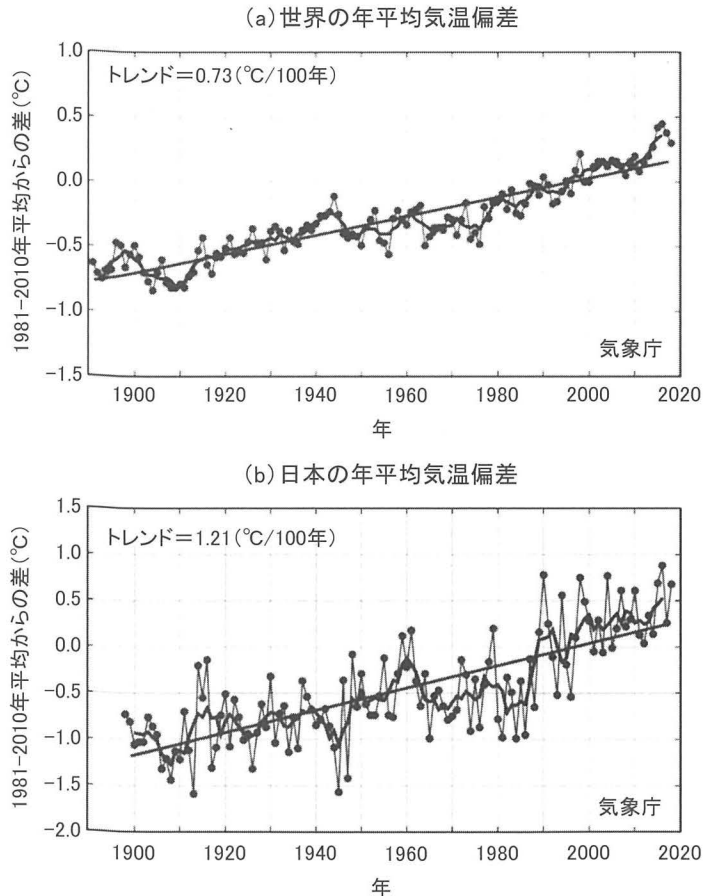


図1 過去の (a) 世界の年平均気温と (b) 日本の年平均気温の変化。気象庁の WEB ページより引用。一部加筆。折れ線は5年移動平均。直線は線形トレンド。

が上昇している(図 1b). この値は都市化の影響が小さいとみなされる全国15観測点のデータを基に算出されており, 東京や名古屋などでは季節によって3度以上の気温上昇が起こっている(気象庁, 2018). ただ, 都市化による気温上昇(いわゆる, ヒートアイランド現象)は, 地球全体で気温が上昇する地球温暖化とは異なり, 局所的な現象である. 詳しくは気象庁の WEB ページを参照されたい(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/index.html).

気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)は, 近年の地球温暖化の要因が人間活動により排出される温室効果ガスの増加である可能性が極めて高いと結論付けている. ただ, 温室効果ガス自体は, 我々が地球上で生活するために必要不可欠なものでもある. もし, 地球上に温室効果ガスが全くなければ, 地球の平均気温は -19°C 程度になると見積もられている. この気温では人類はもちろん, ほとんどの生態系が死滅してしまうであろう. 温室効果ガスは窒素や酸素と比べると大気中にごくわずかししか含まれないが, この微量な温室効果ガスが地球から出る赤外線(赤外放射)を吸収することで, 地球の大気(対流圏)の気温を上げ, 我々が住みやすい気温(世界平均で 14°C 程度)が保たれているのである. 問題は, 産業

革命以降「急速に」温室効果ガスが増加したことである. 図2に西暦0年以降の温室効果ガス(二酸化炭素, メタン, 一酸化二窒素)の濃度変化を示す. 温室効果ガスの濃度は1900年頃から増加しはじめ, 1950年以降, 急激に増加している. 観測は現在も継続されており, 温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の解析によると, 2017年の世界の平均濃度は 405.5ppm であった. ここで, ppmは大気中の分子100万個中にある対象物質の個数であり, 405.5ppm は百分率で表すと 0.04055% である. 産業革命以前(1750年頃)の平均的な値(278ppm)と比べると, 約46%増加した.

地球温暖化は気温だけでなく, 雨や雪, 台風などにも影響を及ぼす. 気象庁は過去約100年間の降水量の観測データを解析し, 日降水量 100mm 以上の大雨日数が統計的に有意な増加を示すことを明らかにした(気象庁, 2018). また, 1975年以降に全国に整備されたアメダス(Automated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS)のデータを分析し, 1時間に 50mm 以上の非常に激しい雨の発生頻度が近年増加していることを示している.

一方, 地球温暖化により大きな影響を受けるのが雪である. 雪は上空でできた氷の粒(氷晶と呼ぶ)に水蒸気が付着して成長したものである. 大気下層

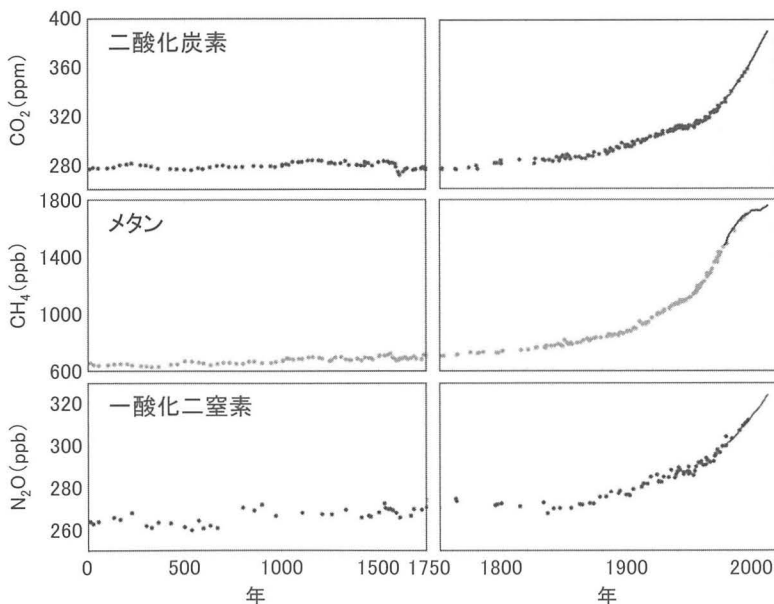


図2 西暦0年から2011年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度変化. IPCC第5次報告書をもとに気象庁が一部加筆.

の気温が 0°C より低ければ雪のまま落下するが、 0°C を超えると融けはじめ、融けきると雨となって落下する。雪のまま地上に達した場合、地上付近の気温が低いと積雪となり、 0°C を超えると融雪が始まる。このように、雪は気温変化に敏感な現象である。北海道や本州の高い山では11月頃から、本州の日本海側の平野部では12月以降、本格的な雪のシーズンが始まる。ところで、2018年は北海道の初雪が記録的に遅く、札幌と稚内では気象台が観測を開始して以降、最も遅い初雪となった。地球温暖化のみがこの要因ではないが、地球温暖化が寄与した可能性は十分に考えられる。

2. 日本の降雪・積雪

北海道から北陸にかけての日本海側は、世界的に見ても降雪量が多い地域である。東北や北陸の内陸部では、積雪が4mを超えることも珍しくない。日本海に面した北アルプス北部では、7mを超える積雪となるところもある(川瀬ほか, 2019)。地球温暖化の雪への影響の話をする前に、日本の降雪メカ

ニズムをおさらいしておこう。

日本の雪の降り方は日本海側と太平洋側で大きく異なる。日本海側で雪が降るのは、西高東低の冬の型の気圧配置の時だ(図3左)。西高東低の気圧配置とは、シベリア大陸で高気圧が勢力を強め、日本の東の海上で温帯低気圧が発達する時に、気圧が日本の西で高く東で低くなる気圧配置である。風は気圧の高い場所(高気圧)から低い場所(低気圧)に向かって吹くため、気圧差が大きいほど強く吹く。摩擦の関係で、西高東低の気圧配置の時は、南北に走る等圧線を少し横切る形で北から北西の風が吹く。このような風は季節によって風向が変わるため、「季節風」と呼ばれる。

日本海側の降雪メカニズムを図4にまとめた。冬季、大陸の空気は極めて気温が低く乾燥している(シベリア気団、大陸性寒帯気団と呼ぶ)。そのような空気が日本海を通る際に空気の性質が大きく変わる。日本海の海水温は、大陸の寒冷な空気と比べるとかなり温かい。いわば冬の露天風呂のようなイメージである。このため、日本海から多量の水が

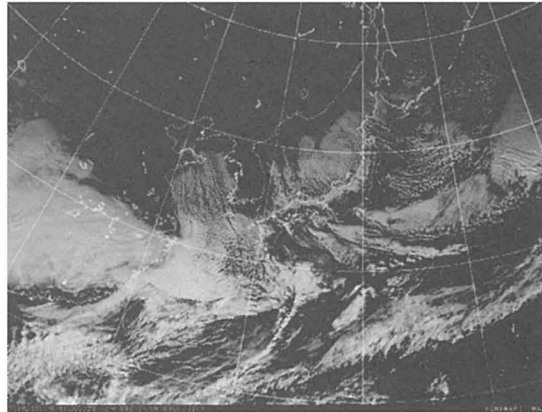
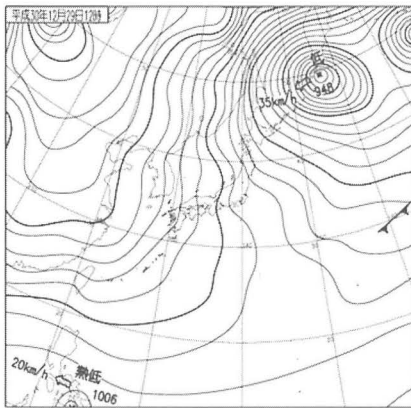


図3 2018年12月29日の地上天気図(左)と同時刻のひまわりの雲画像。

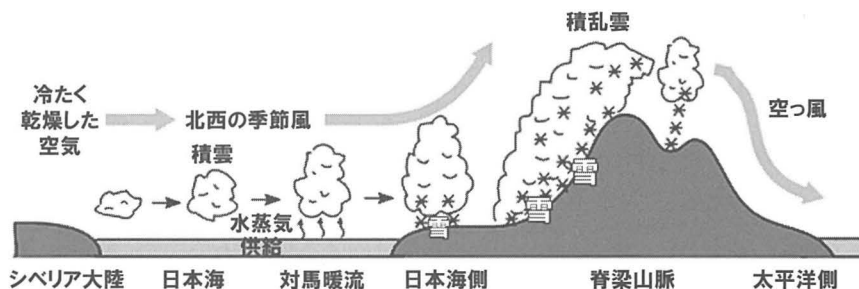


図4 日本海側の降雪メカニズム。松江地方気象台の資料を加筆修正。

蒸発し、大気に供給される。多量の水蒸気が含まれた空気は日本海上で積雲を発生させる。これがいわゆる筋状の雲（図3右）である。この筋状の雲が発達して日本海沿岸部に達すると、日本海側で降雪や降雨となる。さらに、日本を縦断する脊梁山脈にぶつかると、強制的に上昇させられ、雲がさらに発達する。この地形性上昇によって発達した積乱雲が日本海側の山沿いに大雪をもたらすのである。

冬季、雪の多い日本海側と対照的なのが、本州の太平洋側である。特に関東平野では、冬季は晴れて乾燥することが多く、雪はほとんど降らない。ただ、そんな関東平野に雪をもたらすのが、日本の南岸を通過する低気圧、いわゆる南岸低気圧だ。2014年2月には2度の南岸低気圧の襲来を受け、関東甲信地方は大雪に見舞われた。東京都心で27cmの積雪を

観測したほか、北関東や甲信では多量の雪が降り、熊谷で62cm、前橋で73cm、甲府では114cmの最深積雪を観測した。いずれも観測史上最大の値を大幅に更新している。この時は農作物の損傷や積雪の重さで農業用ビニールハウスが多数倒壊し、農業被害が多数発生した。

雪の多い東日本と北日本の日本海側における過去の積雪の経年変化を図5に示す。1980年代後半以降、特に東日本の日本海側で年最深積雪の減少が顕著である。1962年から2017年までの長期傾向としては12.3%/10年の割合で減少している。一方、北日本でも減少傾向は見られるが、東日本に比べるとそれほど割合は大きくない(3.3%/10年の減少)。東日本でも標高が高い北アルプスの室堂平(標高2450m)等では、積雪の減少傾向がほとんど見られ

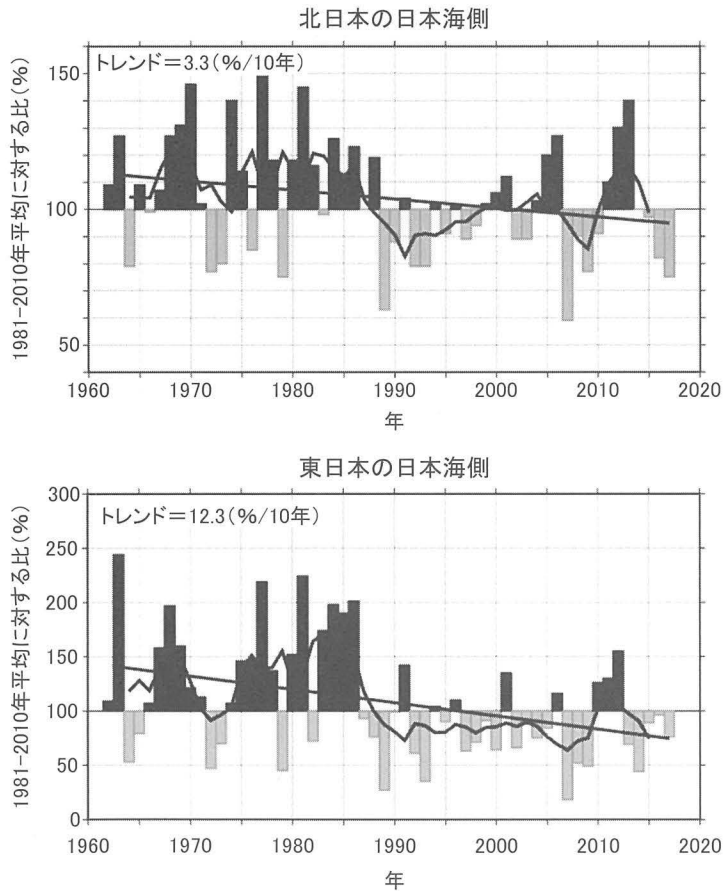


図5 年最深積雪の経年変化. 基準となる1981~2010年の30年平均値に対する比. 北日本の日本海側(上)と東日本の日本海側(下). 太折線は5年移動平均値, 直線は長期変化傾向を示す. 200%は基準値の2倍, 50%は基準値の半分である. 気候変動監視レポート2017の図を一部改変.

ないことが指摘されている(飯田, 2016)。

3. 気候モデルを用いた将来の気候変動予測

ここからは日本の将来の雪の将来予測に話を移していこう。将来の気候を予測するために用いるのが、気候モデルあるいは気象モデルと呼ばれるツールである。気候モデルと気象モデルは、対象とする現象の時空間スケールで区別するが、いずれも大気の流れを表す物理法則(運動量保存の法則、質量保存則(連続の式)、熱力学第一法則等)をもとに構成され、スーパーコンピュータを用いて方程式を解いている。日々の天気予報も気象モデルを用いて行われており、天気図はまさに気象モデルで計算された地上気圧を描いたものである(最後に予報官による修正が入ることもある)。一方、気候モデルは1ヶ月、3ヶ月先の季節予報や気候変動予測に用いられる。天気予報を行う際には、基本的に現在の状態(初期状態)を気象モデルに教えると、数時間、数日先の予報ができる。それに対し、過去の気候変化(例えば20世紀の気温の変化)を再現するためには、過去に観測された温室効果ガス濃度や大気中の微粒子(エアロゾルと呼ぶ)、土地利用等の情報を気候モデルに教える必要がある。将来については、将来想定される変化を与えることになる。この想定は「排出シナリオ」と呼ばれ、地球温暖化に伴う気候変動予測の肝となる。IPCCの第4次評価報告書(2007年)では、Special Report on Emissions Scenarios (SRES)、第5次評価報告書(2013年)では、Representative Concentration Pathways (RCP)が排出シナリオとして用いられた。RCPは放射強制力の大きさによってRCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5の4つのシナリオがある。放射強制力とは地球の気候変化の要因を引き起こす放射エネルギーの収支の変化量(W/m^2)である。放射強制力はやや難しい概念なので、詳細は天気(2009)を参照していただきたい。ここでは、RCP2.6(放射強制力が $2.6W/m^2$)が、地球温暖化の緩和策を行い、温室効果ガスの排出量を大幅に削減したシナリオ、RCP8.5(放射強制力 $8.5W/m^2$)が、特段の緩和策を講じず、現在と同程度の排出を続けたシナリオである。IPCC第5次報告書は、RCP8.5シナリオの場合、21世紀末の世界の平均地上気温は、産業革命前に比べて最大4.8度程度上昇すると指摘している。IPCC第5

次報告書の概要は気象庁のWEBページに日本語で要約されているので、詳しく知りたい方はそちらを参照されたい(気象庁, 2015)。

4. 温暖化によって変わる日本の雪

それでは地球温暖化が進むと、日本の雪はどのように変わっていくのだろうか。気象庁では地球温暖化に伴う日本の将来気候変化予測をまとめて「地球温暖化予測情報」として公開している。2017年3月に公表された「地球温暖化予測情報第9巻」(以後、第9巻)は、RCP8.5シナリオの21世紀末を対象とし、日本に特化した将来予測結果を示している。第9巻では、力学的ダウンスケーリングと呼ばれる手法(図6)を用いて、日本付近を5kmの格子間隔で計算している。実験の詳細な設定は第9巻(気象庁, 2017)を参照されたい。

4.1 平均的な雪の変化

図7に年最深積雪(一年で最も深い積雪)の将来変化を示す。図7は増減の識別が付きにくいので、詳しくはカラーで描かれた第9巻の図を参照されたい。全国的に最深積雪は大きく減少し、特にもともと積雪の多い東日本の日本海側や北日本の日本海側で減少量が大きい。東日本の日本海側では100cmを超える最深積雪の減少が予測されている。北海道の内陸部では変化が小さく、わずかに増加を示す地域もあった。月最深積雪の変化もほぼ同様の傾向を示した。一方、月別の積算降雪量(ひと月に降る雪の合計)を見ると、様子が変わってくる(図8)。12月は北海道の内陸の一部を除いて日本海側で大きく減少し、図7の最深積雪と類似の変化を示す。しかし、1月は北海道の広い範囲で降雪量が増加する予測となっており、東北地方や北陸地方の山沿いでも減少量が少ない。2月もほぼ1月と同様の傾向を示した。図7と同様、増減の識別が付きにくいので、詳しくは第9巻の図を参照されたい。

地域別の降雪量の季節進行に着目する(図9)。北日本の日本海側では、冬季を通じて降雪量が減少するものの、その減少量は小さいことがわかる(図9a)。1月から2月の厳冬期においては、現在気候と21世紀末とでほとんど差がない。年々のばらつきを考慮すると、現在気候に比べて温暖化が進んだ21世紀末に降雪量が増える可能性もある。また、降雪量

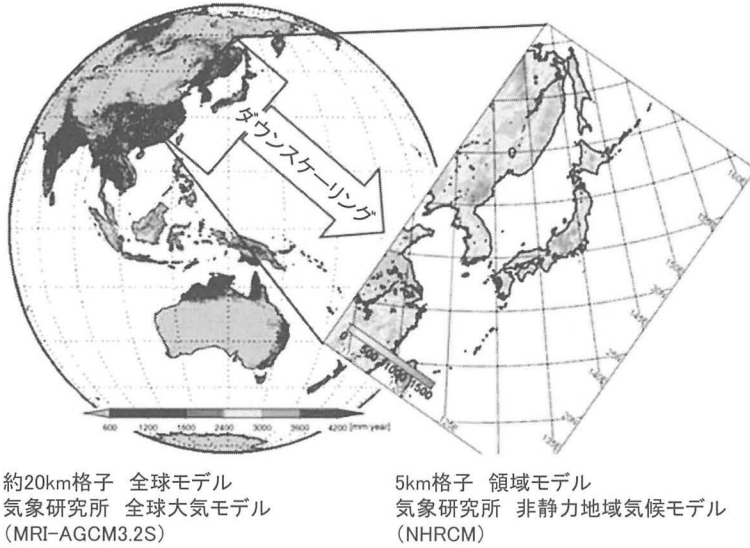
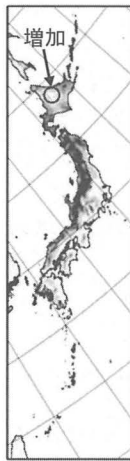


図6 ダウンスケーリングの概要. 地球温暖化予測情報第9巻及び文部科学省研究開発局(2014)の図に加筆.

(a) 分布の変化



(b) 地域別の変化

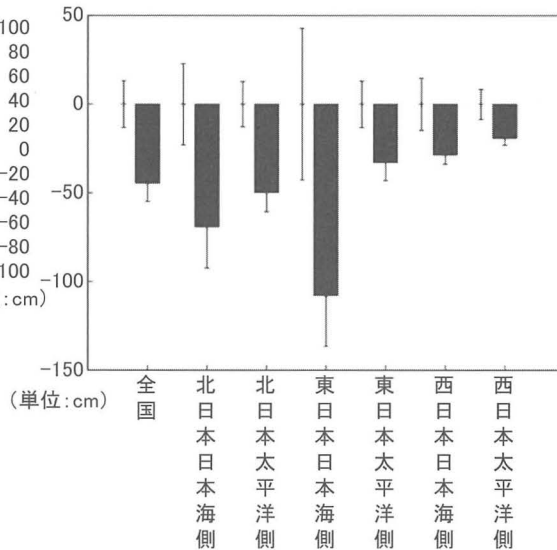


図7 年最深積雪の将来変化. 第9巻の図4.1-1及び図4.1-2を一部改変.

のピークの時期もずれることが予測される. 現在気候では12月から1月頃にピークがあり,その後緩やかに減少する経過をたどるが,温暖化が進行すると,降雪量のピークが1月中旬になり,その後,急激に減少する予測となっている. 現在と比べると降雪量の多い時期が限定される形になる.

東日本の日本海側は北日本に比べると積雪の減少量が大きい(図9b). 積算降雪量は3分の2から

半分程度になる予測となっている. 年々変動を加味しても,将来は現在よりも大幅に降雪量が減少する. また,現在は12月初めから1月末まで降雪量の多い時期が持続するが,21世紀末には11月以降に降雪量が増加し,ピークを迎えたあとすぐに降雪量が減少に転じ,降雪量が多い時期は限定的になる. 緯度の低い西日本では,積雪の減少がさらに顕著である(図9c). もともと北日本や東日本に比べると雪

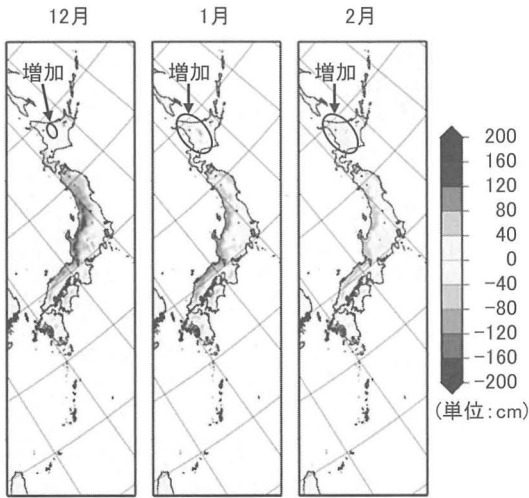


図8 月積算降雪量の将来変化 (単位: cm). 第9巻の図4.2-1を一部改変.

が少ないが、温暖化が進むと厳冬期でも数センチしか降らず、全く雪が降らないような年が出てくる可能性が高い。関東を含む東日本の太平洋側でも降雪量の減少が予測される (図9d)。ただ、減少したとしても、1月から2月初めにかけては、現在気候並みの降雪がありうることも示している。

標高に応じた積雪変化の違いを調べた研究もある。

Kawase et. (2013) は富山県周辺の年最深積雪の将来変化を調査し、標高が高いほど積雪の減少量は大きい。現在の積雪深を基準とした変化率で見ると、標高が低い地域ほど減少率が大きいことを示した。

降雪の量やピークの時期が変わると、融雪時期も変わってくる。融雪量に影響を受けるのが河川流量である。冬季に山岳域に降る多量の雪は、気温が低い間は山に蓄えられる。特に北陸や東北の日本海側の標高の高い山では積雪が多く、例えば立山室堂平では毎年約7mの積雪、液体の水に換算すると約3000mmの量の水が蓄えられる (飯田, 2016; 川瀬, 2019)。春になり気温が上がると、山に積もった雪が融けて川に流れ込み、河川流量が増加する。図10の太線は、気象モデルと河川流出モデルで計算した現在と将来の阿賀野川流域における河川流量の季節変化を示す (Ma et al., 2008)。観測値 (棒グラフ) とモデル (青色の折れ線グラフ) を比較すると、モデルは現在気候における河川流量の変化をよく再現していることが分かる。現在は流量のピークは4月に見られるが、将来4度から5度程度気温が上がった状態では、1月から河川流量が増加し始める。将来は厳冬期であっても、融雪や降雨により河川に水が流れ込むことが原因と考えられる。流量のピークは現

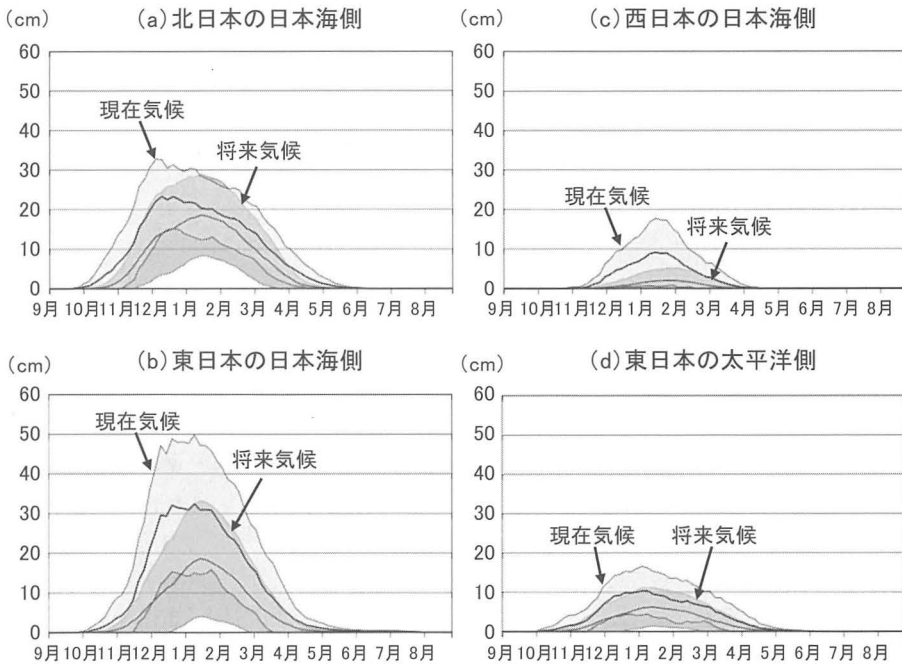


図9 地域別の降雪量の季節進行の変化 (単位: cm). 第9巻の図4.2-3を一部改変.

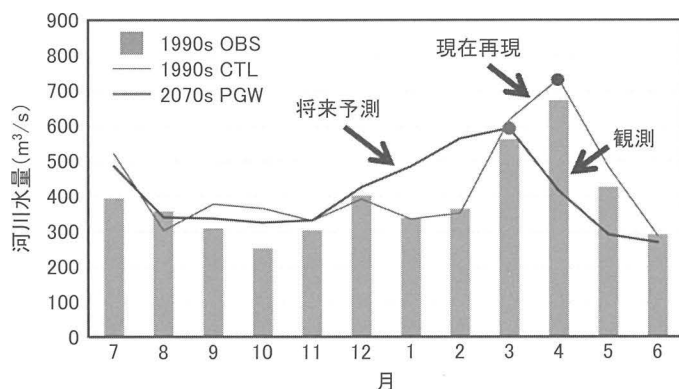


図10 阿賀野川の河川流量の変化. Ma et al. (2010) を一部改変.

在から1カ月早まり、3月にピークとなる。4月以降は減少しはじめ、5月も大きく減少する。春の融雪水は稲作にも利用されており、温暖化に伴う河川流量の変化が農業にも影響を与える可能性が考えられる。

4.2 短期間に多量に降るドカ雪の将来変化

ここまでは冬季を通じた降雪量や季節別の降雪量の将来変化を見てきた。最後に、短期間にまとまって降る雪(いわゆるドカ雪)の将来予測を紹介する。短期間に多量の雪が降ると、道路の除雪が追いつかず、大規模な交通障害が発生することがある。2018年に発生した福井の大雪では、石川県から福井県を通り近畿地方に伸びる幹線道路が不通となり、物流に大きな影響が出た。ドカ雪の要因は様々であるが、主なものとして「日本海寒帯気団収束帯(Japan sea Polar air mass Convergence Zone: JPCZ)」が挙げられる。JPCZは、大陸から吹く北西の季節風が朝鮮半島にある高い山(白頭山)を迂回し、日本海で再びぶつかる現象である。JPCZ周辺では風が集まり上昇気流が発生し、積乱雲が発達する。これが日本海側にかかることで大雪となる。先に紹介した福井のドカ雪は、JPCZがもたらしたものである。

Kawase et al.(2016)は、稀に発生する大気現象の将来変化を評価することを目的として作成された「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」(http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PD_F/)を解析し、ドカ雪の将来変化予測を行った。図11にRCP8.5シナリオの21世紀末における10年に一度の日降雪量の変化を示す。最深積雪や月降雪量は一部を除いて全国的に減少したが(図7, 図8), 10年に一度のドカ雪は北海道や北陸地方の山沿いで増加する

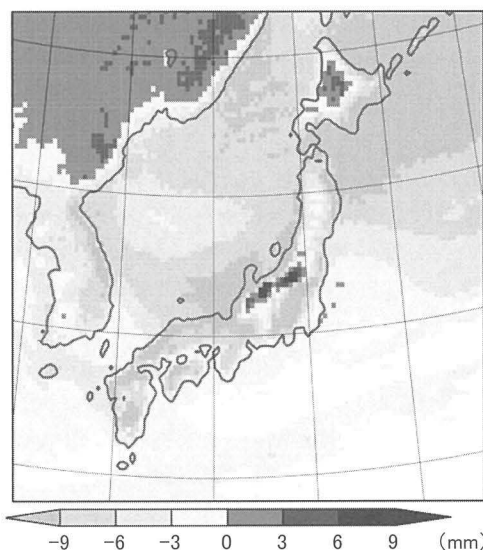


図11 10年に1度の日降雪量の将来変化. 単位はmm. 雪をすべて水に換算した量.

結果となった。特に北陸地方では、地球温暖化によって最深積雪が大きく減少するにも関わらず、短時間で降るドカ雪は増加することを示唆している。

ドカ雪の増加の要因として、将来の水蒸気量の増加が挙げられる。大気中含みうる水蒸気量は気温が高いほど多くなるため、温暖化の進行に伴い水蒸気量も増加する。その結果、JPCZ付近の上昇気流により発達する積乱雲や、脊梁山脈による地形性上昇気流で発達する積乱雲は将来さらに発達し、それにより生じる降水量も増加する。ただし、降雪は気温が0℃を上回ると降雨に変わる。そのため、温暖化により降水量が増えたとしても、降雪が降雨に変われば降雪量は減ることになる。現在、北海道や本州の山沿いでは、厳冬期にはマイナス5度からマイナ

ス10度の気温で大雪が降っている (Kawase et al., 2018). これらの地域では、温暖化による降水量の増加がそのまま降雪量の増加につながり、温暖化に伴って降雪量が増えることになる。一方、北陸の沿岸部や平野部では、現在-5°Cから0°C付近で大雪が発生するため、地球温暖化より降雪が降雨に変化する効果が上回り、大雪の頻度は減少する。これは、南岸低気圧によって大雪が降る本州の太平洋側も同様である。南岸低気圧による大雪は0°C付近で発生することが多く、地球温暖化により太平洋側の大雪は減少していくと考えられる。

5. 地球温暖化への適応を目指して

最後に地球温暖化の適応策について述べる。2018年6月に地球温暖化の適応策に関する法律「気候変動適応法」が可決され、同年12月1日に施行された。この法律は、国や地方公共団体等が気候変動適応の推進のため担うべき役割を明確化し、農業や防災等の各分野の適応を推進する気候変動適応計画を策定することを目的としている。雪の多い地域の自治体においては降雪や積雪に対する適応が求められる。先に述べた温暖化に伴う年最深積雪の減少は、スキーなどのウィンターレジャー産業に大きな打撃を与える可能性が高い。一方、北陸の山沿いや北海道では、年間を通した降雪が減る一方、短期間に降る大雪は増加する予測が出ている。将来は現在の除雪体制では対処できないような状況が発生する恐れがある。雪への適応策を策定する上では、積雪の減少と大雪の増加の両面を考慮する必要がある。また、地球温暖化に伴う気温上昇は、融雪を介して河川流量にも影響を及ぼす可能性が高い。特に春先の融雪が早まり、河川流量のピーク時期がずれることで、融雪水を利用した農業については、何らかの適応が必要となる可能性がある。

適応策の立案は主に地方自治体単位で行うことになる。そのため、今後は地域詳細な気候変動予測が必要となってくる。現在は、格子間隔20kmや5kmの解像度の元での計算が主流となっているが、今後は日本の複雑な山岳地形を再現可能な空間解像度2kmや1kmの計算が必要となるであろう。同時に、地球温暖化の進行を抑えるために、世界的な枠組みとしての温室効果ガスの排出抑制、いわゆる緩和策が求められる。緩和策を実施した際の温室効果ガス

の排出量の違い、つまり将来の温度上昇の違いによって、今後、日本の降雪量及び積雪量がどのように変化していくかを注視していきたい。

引用文献

- 飯田肇, 福井幸太郎, 長田和雄, 2016. 立山・室堂平における長期積雪断面観測, 雪氷研究大会 (2016・名古屋).
- Hartmann, D. L., A. M. G., Klein Tank, M., Rusticucci, et al., 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: 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., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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.
- Kawase, H., T. Sasai, T. Yamazaki, R. Ito, K. Dairaku, S. Sugimoto, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka, 2018. Characteristics of synoptic conditions for heavy snowfall in western to northeastern Japan analyzed by the 5-km regional climate ensemble experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96: 161-178.
- 川瀬宏明, 飯田肇, 青木一真, 島田互, 野坂真也, 村田昭彦, 佐々木秀孝, 2019. 立山黒部アルペンルートにおける積雪観測と異なる水平解像度の非静力学地域気候モデル (NHRM) を用いた積雪再現実験の比較, 地学雑誌.
- 気象庁, 2015. IPCC 第5次評価報告書, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>
- 気象研究所, 2016. 気象研究所報道発表「地球温暖化で豪雪の頻度が高まる～最新気候シミュレーションによる予測～」, http://www.mri-jma.go.jp/Topics/H28/280923/press_release_ER1.pdf
- 気象庁, 2017. 地球温暖化予測情報第9巻, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html>.
- 気象庁, 2018. 気象庁報道発表「2018年(平成30年)の世界と日本の年平均気温(速報)～世界の年平均気温は春までラニーニャ現象でも歴代4位となる見込み～」, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1812/21c/worldtemp2018.html>.
- 気象庁, 2018. ヒートアイランド監視報告2017.
- 気象庁, 2018. 気候変動監視レポート2017.
- Xieyao, M., T. Yoshikane, M. Hara, Y. Wakazuki, H. G. Takahashi, and F. Kimura, 2010. Hydrological response to future climate change in the Agano River basin, Japan, *Hydrological Research Letters*, 4: 25-29.
- 文部科学省研究開発局, 2014. 気候変動リスク情報創生プログラムテーマ C 気候変動リスク情報の基盤技術開発 平成25年度研究成果報告書, 平成26年3月, 249pp.
- 中島映至, 竹村俊彦, 2009. 放射強制力, *天気*, 56: 997-999.