

温暖化で変わる日本の気候 ～将来の雪と雨の変化～

Future climate changes due to global warming -changes in snowfall and rainfall-

川瀬宏明*

1. はじめに

産業革命以降、温室効果ガスの増加に伴い世界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）（以後、IPCC）の第5次報告書¹⁾では、近年の温暖化は疑う余地がなく、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高いと結論付けて

いる。世界の平均地上気温は100年あたり0.73度の割合で上昇を続けており、2018年は観測史上第4位となった（図1上）。近年の気温上昇が特に顕著であり、2014年から2018年までの5年間で上位5位を占めている状況である。日本の気温も上昇しており、都市化の影響が小さい15地点においても、100年あたり1.21度の気温上昇が観測されている（図1下）。

気温の長期変化に加え、日本では過去100年を超える気象官署のデータから、日降水量100mm以上の大雨日数が増加していることも分かっている。ただ、日降水量1mm以上の降水日数は減少しており、降水の極端化が進行している（図2）。一方、最深

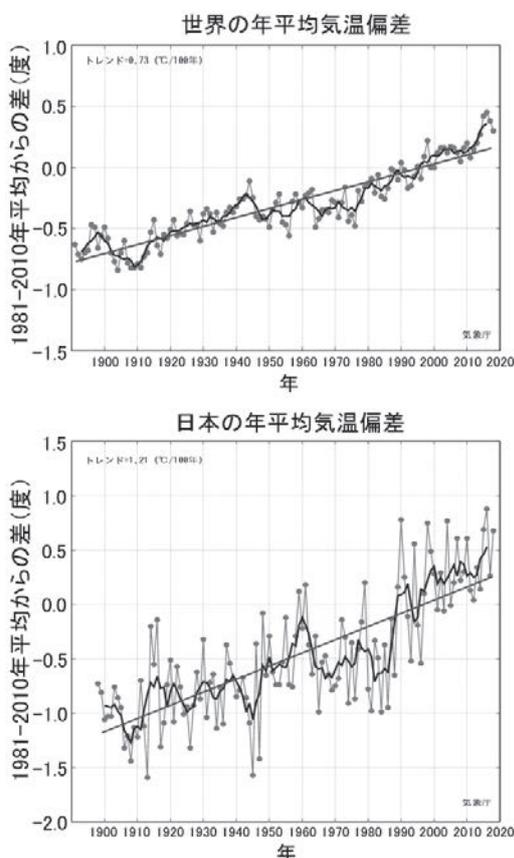


図1 世界と日本の年平均気温偏差の経年変化（速報値）。太折線は5年移動平均値、直線は長期変化傾向（トレンド）を示す。気象庁のWEBページ²⁾から引用。

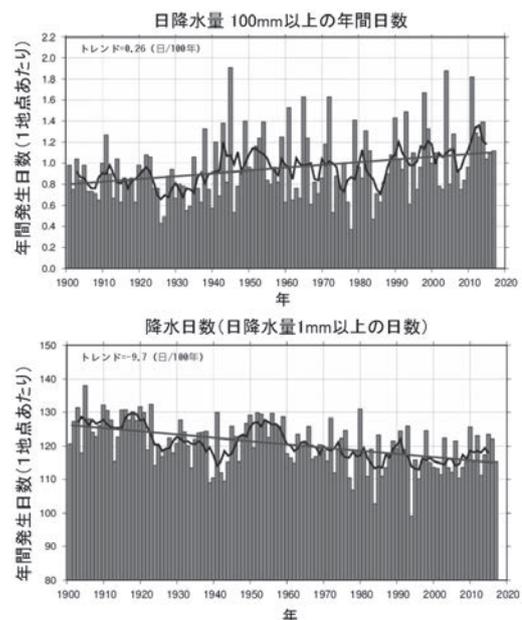


図2 世界と日本の年平均気温偏差の経年変化（速報値）。太折線は5年移動平均値、直線は長期変化傾向（トレンド）を示す。気候変動監視レポート2017³⁾の図を一部修正。

*気象庁気象研究所

積雪は全国的に減少傾向であり、特に東日本や西日本の日本海側で顕著な減少が見られる。すでに降雨や降雪に地球温暖化の影響が現れはじめていると考えられる。

現在、世界各国の研究機関が、地球温暖化がさらに進行した際に気候がどのように変化していくのかを調査している。この調査結果は、2022年に発刊されるIPCC第6次報告書で取りまとめられる予定である。本稿では、地球温暖化予測に用いる気候モデルと気候変動予測実験の概要を紹介し、最新の日本の雨と雪の将来予測結果について述べる。

2. 気候の再現及び予測に用いる気候モデル

地球温暖化に伴う気候変動予測を行う際には気候モデルを使用する。気候モデルは仮想的な地球と大気、海をコンピュータ上に作り、物理法則に基づいて大気の流れや気温、降水などを計算するコンピュータシミュレーションの一種である。運動方程式や質量保存の法則、熱力学の第一法則等から構成されており、日々の気象庁の天気予報でも用いられている。ただ、過去の気候の再現や将来予測を行うためには、大気の流れだけでなく、地球上で起こる様々な現象を考慮する必要がある。図3に現在の気候モデルが考慮する大気や陸面、海洋等の相互作用を示す。大気や雲の計算のほか、海、植生、土壌、氷床、海水、河川、火山活動、エアロゾル（大気中の微粒子）、人為的な影響などがある。人為的な影響を除き、これらは相互作用をしていることが多く、一連の地球システムとして捉える必要がある。そのため、このような気候モデルを地球システムモデルと呼ぶこともある。

地球温暖化を考える上で重要となるのが、本来地球システムが有していない「人為的な影響」の部分である。温室効果ガスの増加や工場からの排煙、土

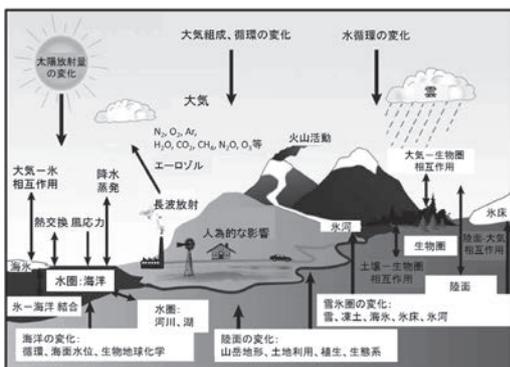


図3 気候モデルが考慮する大気と陸面、海洋の相互作用。IPCC第4次報告書⁴⁾の図を気象庁が翻訳。

地利用の変化等がこれに当たる。これらの変化は気候モデルが自ら計算することができないため、外部から与える必要がある。これを人為起源の外部強制力と呼ぶ。一方で、太陽活動による太陽放射量の変化や火山噴火による噴煙の放出に関しても、気候モデルは自ら再現できない。これらの要素は、人間活動とは関係がないので、自然起源の外部強制力と呼ばれる。過去に観測された人為起源及び自然起源の外部強制力を与えると、過去の世界の気温変化を再現することができる。

図4に気候モデルによって再現された、20世紀の世界平均気温の変化を示す。すべての外部強制力を考慮した実験では、観測された1960年以降の気温上昇がよく再現されている。一方、温室効果ガスの増加などの人為起源の強制力がなかった場合、つまり自然起源の外部強制力のみで計算した場合は、1960年以降の気温上昇は見られず、若干の寒冷化が見られる。これらの結果からも、近年の気温上昇に人為起源の温室効果ガスの増加が深く関係していることがわかる。ところで、観測や再現実験において、定期的に大きな気温低下が見られる時期がある。

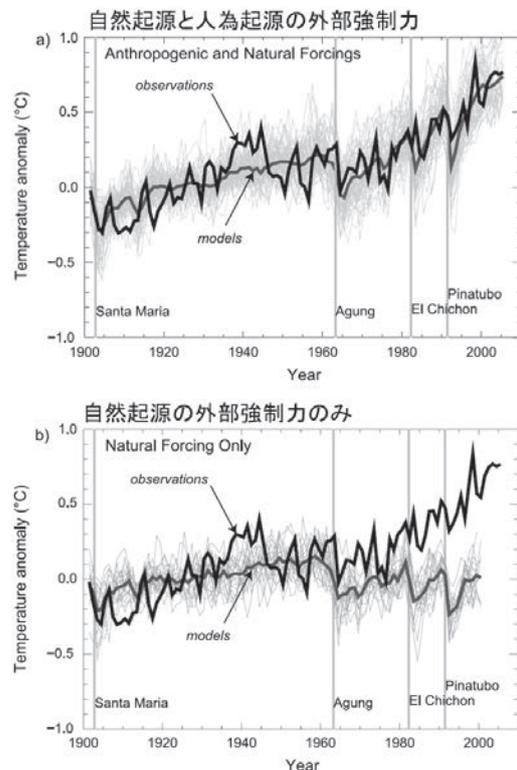


図4 気候モデルで再現された全球平均気温の変化。(上)自然起源と人為起源の外部強制力を与えた実験。(下)自然起源の外部強制力のみを与えた実験。黒太線が観測、灰色線が気候モデルの結果、灰細線が全実験、灰太線が平均。縦軸は1901～1950年平均からの差(°C)を示す。IPCC第4次報告書⁴⁾の図を加筆引用。

これらは大規模な火山噴火に伴うもので、1960年以降ではアグン（1963年）、エルチヨン（1982年）、ピナツポ（1991年）が挙げられる。大規模な火山噴火によって放出された噴煙は成層圏に達し、一部の微粒子が数年間地球の上空を漂う。微粒子は太陽放射を遮る効果があり、地球の気温低下が起こる。このような大規模火山噴火の情報が自然起源の外部強制力（具体的には成層圏へ微粒子の注入）として気候モデルに与えられる。

過去実験において、人為起源の外部強制力は観測に基づいて推定された値を用いればよいが、将来の観測は当然存在しない。そこで、将来実験に用いる人為起源の外部強制力（温室効果ガスの排出量等）はいくつかの想定のもとに作られる。この想定は排出シナリオと呼ばれる。IPCC第4次報告書では温室効果ガス等排出シナリオ（Special Report on Emission Scenarios：SRES）、第5次報告書では代表的濃度経路（Representative Concentration Pathways：RCP）が排出シナリオとして用いられた。そして、2022年に公表予定のIPCC第6次報告書では、RCPと共通社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways：SSP）が用いられる予定である。それぞれ概念は異なるが、温暖化の緩和策が進み、温室効果ガスがほとんど排出されなくなる将来から、これまでと同様に多量の温室効果ガスを出し続ける将来、その中間の将来等を想定している。ここでは個々のシナリオの詳細は省略するが、興味のある方は気象庁の異常気象レポート2014⁵⁾の2.1.2章「将来予測のシナリオ」や国立環境研究所の報道発表「論文誌Climatic Changeに掲載されたIPCC第5次評価報告書に向けた代表的濃度パス（RCP）シナリオについて」⁶⁾等を参照されたい。

RCPシナリオに基づき、気候モデルによって予測された将来の気温変化を図5に示す。RCPには

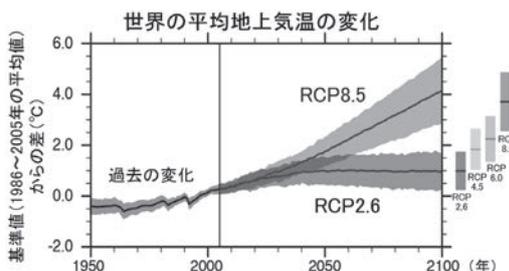


図5 気候モデルで予測された世界の平均地上気温の将来変化。1986～2005年の平均値を基準として、そこからの差で示す。右のバーは2081年～2100年における各RCPの気温変化の平均とばらつきを示す。IPCC第5次報告書¹⁾の図に加筆。

RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5の4つのシナリオがある。数字は放射強制力の値を表す。放射強制力の詳細は気象学会の機関紙「天気」の解説⁷⁾を参照されたい。RCP8.5が地球温暖化の緩和策をほとんど講じず、このまま温室効果ガスの排出を続けていったシナリオ、RCP2.6が温暖化の緩和策を講じ、温室効果ガスの大幅な削減に成功したシナリオと考えていただければよい。RCP8.5では、21世紀末に現在から4度程度気温が上昇する予想となっている。ただ、気候モデルの予測にはばらつきがあり、+2.5度～4.8度がもっともらしい値といわれている。一方、RCP2.6では、2050年頃まで気温が上昇し、その後停滞する。21世紀末の気温は、現在から1度程度の上昇、産業革命以前と比較しても2度以下の上昇に抑えられる。2015年12月12日に採択されたパリ協定は2度目標を掲げており、RCP2.6のような将来が求められている。

3. 地球温暖化予測のダウンスケーリング

通常、気候モデルを用いた気候変動予測実験は、地球全体の大気と海を対象とするため、計算機資源の都合上、空間解像度が粗くなる。IPCC第5次報告書で用いられた気候モデルの解像度は100km～300km程度である。日本に特化した地球温暖化予測を行う場合には、この解像度では不十分である。日本は面積が小さい島国である上、日本列島を縦断する脊梁山脈があり、非常に複雑な地形をしている。このため、太平洋側と日本海側の気候区分が大きく異なっている。日本の地域詳細な気候を再現し、将来の気候を予測するためには、解像度の高い気候モデルを用いた計算が必要となる。

そこで使用されるのが領域気候モデルである。これに対し、これまで説明してきた地球全体を計算する気候モデルは全球気候モデルと呼ばれる。解像度の粗い全球気候モデルの結果を、領域気候モデルを



図6 力学的ダウンスケーリングのイメージ。

用いて特定の地域のみを高解像度（例えば5km）で計算する手法をダウンスケーリングと呼ぶ（図6）。領域気候モデルを用いずに統計的な関係を用いて高解像度化する手法もある。この手法と区別するため、領域気候モデルを用いたダウンスケーリングは力学的ダウンスケーリング、統計関係を用いたダウンスケーリングは統計的ダウンスケーリングと呼ばれる。

気象庁気象研究所では、領域気候モデルの一つである地域気候モデル（Nonhydrostatic Regional Climate Model：NHRCM）を開発し、日本の気候変動予測研究に用いている。気象庁はこれらの研究成果を取りまとめ、地球温暖化予測情報として定期的に公表している。最新版は2017年3月に公表された地球温暖化予測情報第9巻⁸⁾（以後、第9巻と呼ぶ）である。第9巻は、RCP8.5に基づき、21世紀末に予測される日本の気候変化を地域別に示している。日本では現在気候（1986年～2005年）と比較して年平均気温が約4.5度、冬季平均気温が約5度上昇する予測となっている。4章では21世紀末に予測される日本の雨や雪の変化について、第9巻の予測を基に紹介する。

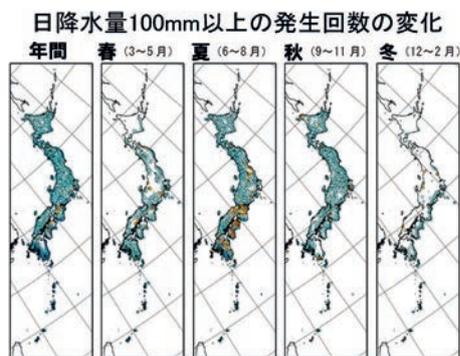


図7 日降水量100mm以上の発生回数の変化。地球温暖化予測情報第9巻⁶⁾から引用，一部加筆。

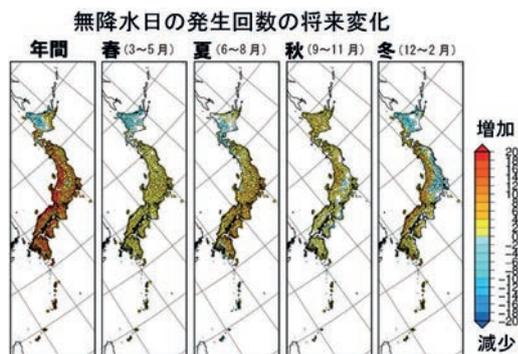


図8 無降水日（日降水量が1mm未満）の日数の将来変化。地球温暖化予測情報第9巻⁶⁾から引用，一部加筆。

4. 地球温暖化で変わる日本の雨と雪

4.1 降水量の変化

図7に日降水量100mm以上の日数の将来変化を示す。年間日数は日本のほぼすべての地域で増加する予測となっている。季節別に見ると、秋は全国的に増加、春は西日本、夏は東日本と北日本で増加が見られる。夏においては、近畿や四国、九州の一部

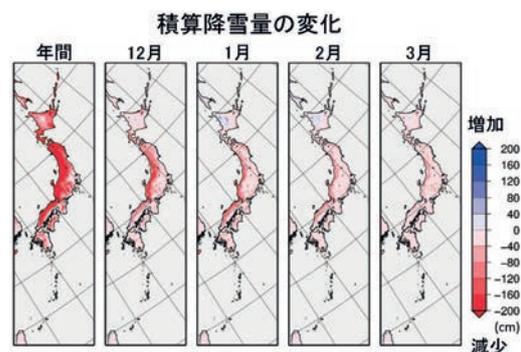


図9 年及び月積算降雪量の将来変化。地球温暖化予測情報第9巻⁶⁾から引用，一部加筆。

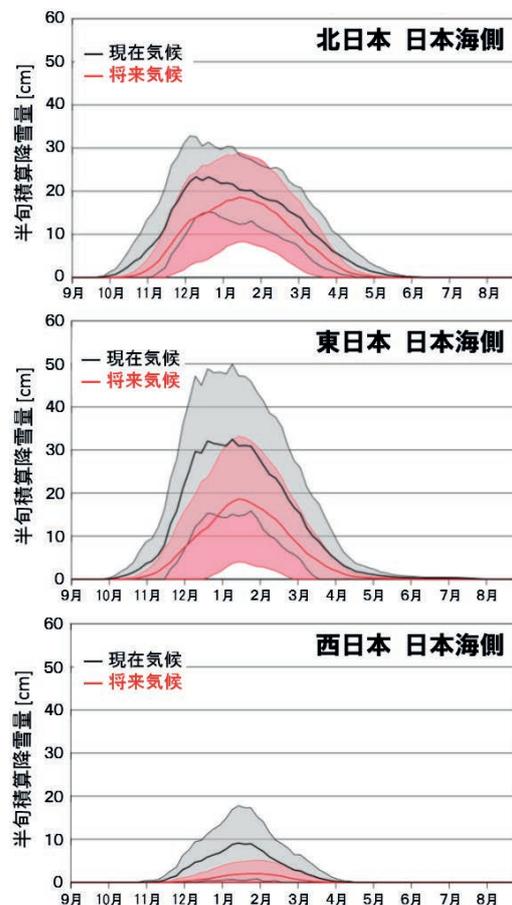


図10 地域別の半月（5日）積算降雪量の季節変化。黒線は現在気候、赤線は将来気候における半月積算降雪量の平均値。陰影は年々変動の標準偏差を示す。地球温暖化予測情報第9巻⁶⁾から引用，一部加筆。

では発生回数が減少する地域も見られた。降水量は気温上昇に伴う水蒸気量の増加により基本的には増加するが、将来の梅雨前線や台風の挙動によっては減少する可能性もある。冬はもともと降水量が少なく日降水量が100mmを超えることは稀であるため、発生回数が増加する地域は、東日本から西日本の太平洋側の一部に限定される。

一方、年間の無降水日の発生回数は、北海道の一部を除いて全国的に増加する予測となった(図8)。季節別に見ると、春と夏は北海道を除いて増加、北海道では減少、秋は全国的に増加する。冬に関しては、西日本と本州の日本海側で増加、東日本と北日本の太平洋側で減少し、日本海側と太平洋側で明瞭なコントラストが見られる。これは、将来、冬季季節風(冬型の気圧配置)による降水が減少し、日本の南岸を通る低気圧(南岸低気圧)が増加することを示唆している。この原因として以下のことが考えられる。地球温暖化が進むと、積雪や氷の減少に伴い北半球高緯度の気温が特に上昇する。冬季季節風は海陸の温度コントラスト(冬季は大陸が冷たく、海が暖かいこと)によって励起される。そのため、地球温暖化によってユーラシア大陸の気温が上がると、冬季季節風が弱まり、結果的として日本海側の降水日数が減少することになる。また、冬季季節風が弱まることで、日本の近くを温帯低気圧が通りやすくなり、太平洋側の降水が増えると考えられる。

4.2 降雪量の変化

1年を通して降る雪の総量(年積算降雪量)は、北日本から東日本、西日本のほぼ全域で減少する(図9)。特に、もともと雪の多い本州の日本海側の山沿いでは減少量が多い。年最深積雪に関しても年積算降雪量とほぼ同じ分布を示した(図省略)。一方、北海道の内陸では、わずかであるが増加する地域が見られた。地球温暖化が進行した21世紀末においても、北海道の大雪山系などの標高の高い山では降雪量が増える可能性がある。

各月別の積算降雪量の変化は年積算降水量の変化とはやや異なり、厳冬期の1月から2月にかけて、北海道の内陸部や日本海側で降雪量が増加する予測となっている。また、本州の日本海側の山沿いでは、年積算降雪量でみられたような減少がほとんど見られない。一方、本州の日本海側の沿岸部では、厳冬期でも降雪量が大きく減少している。北海道や本州の標高の高い山岳部では、冬季の気温がかなり低いため、地球温暖化により気温が4度前後上昇したとしても、依然として気温は氷点下である。つまり、

気温が上昇した将来であっても、雪のまま降ることになる。さらに、地球温暖化によって気温や日本海の海面水温が上昇することで、大気中の水蒸気量が増え、より多くの降水が日本にもたらされる。その結果、北海道では降雪量が増加すると考えられる。本州の山沿いでは、温暖化に伴い降水(降雪)頻度が減少する予測となっているため(図8)、両者の効果が相殺し、積算降雪量がほとんど変化しなかったとみられる。

地域別に半旬積算降雪量の季節進行の将来変化を調べた結果を図10に示す。半旬積算は5日積算のことである。閏年の2月末のみ6日間と定義する。北日本の日本海側では、21世紀末、降雪量が減少するものの減少量はそれほど大きくない。1月から2月のかけての厳冬期には、21世紀末においても現在気候に匹敵するほどの降雪量が予測されている。年々変動を加味すると、現在よりも多くの雪が降る可能性もある。また、現在気候では12月に降雪量のピークが見られるが、21世紀末は1月半ばにピーク時期が移動している。東日本の日本海側では、北日本の日本海側よりも降雪量の減少が大きく、平均的には現在の約半分になる可能性がある。また、現在気候では12月から1月まで降雪量のピーク時期が長く続くが、将来は1月半ばに限定される予測となっている。西日本の日本海側はさらに降雪量の減少が顕著となり、どの時期も降雪量が大幅に減少する。西日本では21世紀末にはほとんど雪が降らなくなる可能性が高い。

4.3 極端降雪の将来変化

最後に短期間に多量に降る雪、いわゆるドカ雪の将来予測を紹介する。短期間に降るドカ雪は急速な積雪の増加を招き、人々の生活に大きな影響を与える。特に、数年に1度発生するような極端な大雪(極端降雪)は、雪に慣れた豪雪地帯でも、集落の孤立や雪崩などの雪害が発生するおそれがある。このような稀に発生する大雪の将来予測を行うためには、数百年規模の多量の計算を行う必要がある。先に紹介した第9巻は、計算年数が少ないために、数年～数十年に一度発生する大雨や大雪を評価することができない。

このような稀な現象を再現し、将来変化を予測するために、「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(database for Policy Decision making for Future climate change : d4PDF)」(以後、d4PDF)⁹⁾が作成された。このデータベースは、格子間隔約60kmの全球版と、日本域

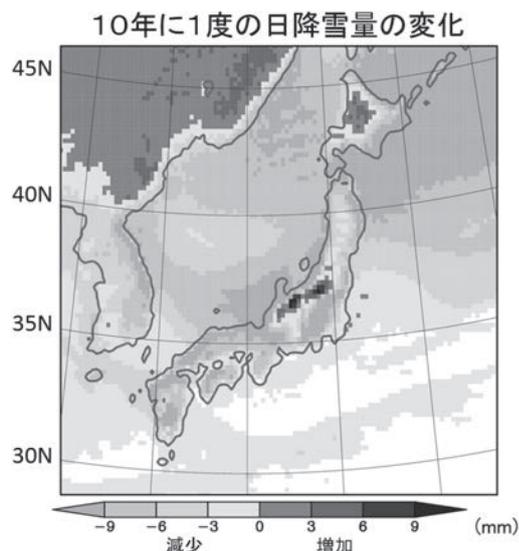


図 11 10年に1度の日降雪量の将来変化. 単位は mm. 降雪量を水に換算した量で示している.

を対象とした格子間隔 20km の領域版が存在する. 領域版は 20 世紀後半を想定した気候下での計算が 3000 年, RCP8.5 の 21 世紀末 (気温が約 4 度上昇した世界) を対象とした計算が 5400 年保存されている. この巨大なデータベースを用いて, 極端降水量の変化¹⁰⁾や台風の将来予測¹¹⁾, 極端降雪の予測¹²⁾等, さまざまな研究が行われている. ここでは, d4PDF を用いた極端降雪の将来予測研究の結果¹²⁾を紹介する.

図 11 に 10 年に 1 度の強い日降雪量の将来変化を示す. 濃灰色は降雪量が増加する地域, 薄灰色は降雪量が減少する地域を示す. 全国的には減少する地域が多いものの, 北海道や北陸では降雪量が増加する地域が見られる. 北海道は厳冬期に降雪量の増加する地域 (図 10) と対応しているように見える. 一方, 北陸の内陸部では, 年積算及び月積算降雪量では増加が見られなかったが, 強い降雪量では増加が見られた. つまりこのような地域では, 冬季の降雪量や降雪頻度, 積雪は減少するが, 稀に降る大雪は増加することを示唆している.

北陸の内陸部でこのような大雪が発生するときの大気場を調べると, 現在気候・将来気候のいずれも日本海寒帯気団収束帯 (Japan sea Polar air mass Convergence Zone : JPCZ) が日本海にできた時に大雪が発生していることがわかる. JPCZ は冬型の気圧配置の時に吹く北西の風が朝鮮半島の山を迂回し, 日本海上で再びぶつかる (収束する) ことで発生する. このような場所では雪雲が発達し, それが風に流されて日本に到達すると大雪となる. 実際に, 2018 年 2 月に発生した福井市の大雪や 2017 年 1 月

と 2 月に発生した山陰地方の大雪は, この JPCZ が原因で発生した.

地球温暖化が進行すると, 気温だけでなく日本海の海水温も上昇する. 海水温の上昇に伴い多くの水が蒸発し, 海から出た水蒸気は収束帯 (JPCZ) に集められる. その結果, 将来は現在より JPCZ 付近で雪雲・雨雲が発達することになる. 海上や沿岸部では降水量が増加したとしても, 気温上昇により降水が雪から雨に変化するため, 降雪量は減少する. しかし, 気温の低い北陸の内陸部や山間部では, 降水量の増加がそのまま降雪量の増加となるため, 将来, JPCZ に伴う大雪が増加することになる. 地球温暖化の進行に伴い, 積雪や降雪頻度が減少し除雪に対する意識が低くなる中で, 稀に降る大雪が増加することは, 将来の雪害対策が現在よりもより困難になることを示唆している.

5. まとめ

世界の平均気温は過去 100 年で 0.73 度, 日本の平均気温 (都市化除く) は 1.21 度上昇してきている. 同時に, 二酸化炭素などの温室効果ガスの増加も観測されており, 人為的な温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化は, もはや疑う余地のないものとなってきている. 日本では気温上昇のほか, 日降水量 100mm 以上の日数の増加や降水日数の減少も観測されている.

一方, 将来の気候を予測するために, 世界中で全球気候モデルを用いた研究が行なわれている. 将来予測実験では, 複数の温室効果ガス排出シナリオを想定し, それぞれのシナリオにおける気温や降水量等の将来変化を計算している. 日本では, 全球気候モデルの計算結果を基に, 地域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリングを実施し, 日本域に特化した地球温暖化予測が行なわれている.

気象庁が発表した地球温暖化予測情報第 9 巻によると, 21 世紀末には日降水量 100mm 以上の日数の増加と降水日数の減少が予測されている. これらは過去に観測された傾向とも整合的であり, 地球温暖化の進行によってさらに深刻になることを示唆している. 一方, 年最深積雪や年積算降雪量に関しては, 将来, 全国的に減少する予測となっている. ただ, 月別の積算降雪量に着目すると, 1 月～2 月の厳冬期は北海道の内陸で増加するおそれがある. また, 地球温暖化は降雪量の季節変化にも影響を与え, 北日本や東日本の日本海側では降雪量のピーク時期がずれる可能性が高い. 東日本の日本海側では, これ

まで12月から1月にかけて降雪量のピークがあったが、将来は1月の中旬に集中する予測となっている。

稀に発生する短期間の大雪（ドカ雪）については、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を基に将来変化を分析した。その結果、10年に1度発生するような強い日降雪は、全国的には減少するものの、北海道や北陸の内陸部では増加するおそれがあることが分かった。北陸では総降雪量や月降雪量が減少するにもかかわらず、極端な大雪は増加する予測となった。

地球温暖化に伴う気候変動に適応するため、2018年12月に気候変動適応法が施行された。これにより、今後は各地方自治体に地球温暖化の適応への取り組みが求められる。将来、北陸や北海道では現在と雪の降り方が異なる可能性が高く、それに適応するために新たな除雪体制を築く必要があるだろう。

6. 参考文献

- 1) 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.
- 2) 気象庁, 気温・降水量の長期変化傾向, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html>
- 3) 気象庁, 気候変動監視レポート2017, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>
- 4) 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.
- 5) 気象庁, 異常気象レポート2014, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/climate_change/
- 6) 国立環境研究所, 気候変動研究で分野横断的に用いられる社会経済シナリオ (SSP; Shared Socioeconomic Pathways) の公表, <http://www.nies.go.jp/whatsnew/20170221/20170221.html>
- 7) 中島映至・竹村俊彦, 放射強制力, 天気, 56 (2009), 997-999.
- 8) 気象庁, 地球温暖化予測情報第9巻, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/index.html>
- 9) 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), <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>
- 10) R. Mizuta, A. Murata, M. Ishii et al., Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, Bulletin of the American Meteorological Society, 98 (2017), 1383-1398.
- 11) K. Yoshida, M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii, Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, Geophysical Research Letters, 44 (2017), 9910-9917.
- 12) Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu, Enhancement of extreme daily snowfall in Japan due to global warming projected by enormous ensemble regional climate experiments. Climatic Change, 139 (2016), 265-278.

著者略歴



[生まれ・学歴]

1980年11月 三重県生まれ

2003年3月 筑波大学第一学群自然科学類卒業

2007年3月 筑波大学大学院生命環境科学研究科 博士課程卒業*

2007年3月 博士(理学)取得(筑波大学)

[職歴]

2007年4月 海洋研究開発機構 特任研究員

2008年12月 国立環境研究所 特別研究員

2011年7月 海洋研究開発機構 特任研究員

2012年4月 海洋研究開発機構 研究員*

2014年4月 気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部 研究官

2017年4月 気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部 主任研究官

(現在に至る)