

領域気候モデルを用いた日本の地域気候変化予測に関する研究

—2020年度正野賞受賞記念講演—

川 瀬 宏 明*

1. はじめに

2020年度に正野賞という日本気象学会の栄えある賞を頂くことができ、非常に光栄でございます。まず、2020年の受賞からこの原稿が掲載されるまで2年を要したことをお詫び申し上げます。受賞した2020年は新型コロナウイルスが流行り出した年であり、気象学会秋季大会も初めてオンラインで行われました。研究室から参加した授賞式と受賞記念講演は今でもよく覚えております。今回受賞できたのは、大学の頃から多くの方々に出会い、様々な研究に触れる機会があったからこそだと思っております。特に、私の恩師であり、海洋研究開発機構では上司であった木村富士男先生の存在はとても大きいです。限られた紙面ではございますが、受賞に至った私のこれまでの研究や活動の流れを執筆致します。受賞から2年が経ち、その間にも領域気候の研究は進んでおりますので、その部分にも後半で触れさせていただきます。

今から振り返ると、私の転機は三度ありました。一つ目が、2009年からポスドク研究員として国立環境研究所に入れたこと、二つ目が文部科学省の「気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)」に携われたこと、そして三つ目が、気象庁気象研究所に入所できたことです。幸運にも私の興味が、当時の世の中の流れと合致したこともあり、受賞理由に挙げられた研究成果を残すことができました。ここではこの三つの観点から、私の研究成果とそれに付随する活動を紹介してい

きたいと思います。時系列は若干前後することをご承知おきください。今回の寄稿では、私の研究だけでなく、関わってきた文部科学省等の研究プロジェクトや、温暖化適応策に関連した自治体・省庁との関わり、アウトリーチについても紹介させていただきます。

2. 領域気候モデルとの出会いと別れ

私が在学した頃の筑波大学では、大学3年生の冬に所属する研究室を決めることになっていました。2001年当時の筑波大学の気象科学分野は、メソ気象・数値モデルを専門とする木村富士男先生、アジアモンスーン等が専門の安成哲三先生、大気大循環が専門の田中博先生の3名の体制でした。元々、メソ気象に興味があったこともあり、木村研究室を選択しました。今思うと、この時に木村研に入れたことで、このあとの私の人生が大きく変わりました。

大学卒業後、もっと気象のことを学びたいと思い、博士号取得を前提とした5年一貫性博士課程に進みます(現在はこの課程はもうないようです)。木村研究室では、先輩方が領域気候モデルを使った研究を行い、ゼミで発表していました。当時使用した領域気候モデルは、コロラド州立大学を中心に開発されたRAMS (Peilke *et al.* 1992)を筑波大学陸域環境センター(現、アイソトープ環境動態研究センター)で改良したTERC-RAMS (Yoshikane *et al.* 2001; Sato and Kimura 2005)です。この時期はこのほかに、ペンシルバニア州立大学とNCARで開発されたMM5 (the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model; Grell *et al.* 1994)なども使われていました。MM5の後継として作られたのが、Weather Research and Forecasting (WRF) model (Skamarock *et al.* 2005)です。

* 気象研究所。

hkawase@mri-jma.go.jp

—2022年8月30日受領—

—2022年10月31日受理—

領域気象モデルは省略して領域モデルとも呼ばれます。領域気象モデルは特定の領域を対象に、物理法則に基づき大気の流れを計算します。その外側の情報は、モデルの側面境界値条件として、再解析データ等から与えます。気象庁の現業では、5 km 格子のメソモデル (MSM) と 2 km 格子の局地モデル (LFM) がこれに当たり、どちらも領域気象モデル asuca が用いられています。このあと領域気候モデルという名前が出てきますが、基本的には同じものです。積分期間が長く、特定地域の気候の再現や将来予測を行う場合には、領域気候モデルと呼ぶことが多いです。

さて、私が領域気象モデルを用いて初めて行った研究は、冬季日本周辺に発生する筋状雲の再現実験でした。筋状雲と言えば、日本海が頭に浮かぶと思いますが、ここで対象としたのは太平洋に発生する発達した太い筋状雲 (収束雲) でした。地形や地表面温度を変えた感度実験から、太平洋に発生する太い筋状雲は、日本の山岳の風下の力学的な風の収束だけではなく、陸域と湾や水道との間の温度差 (温度コントラスト) によって海上で収束が強まることでも形成されることが分かりました (Kawase *et al.* 2005)。

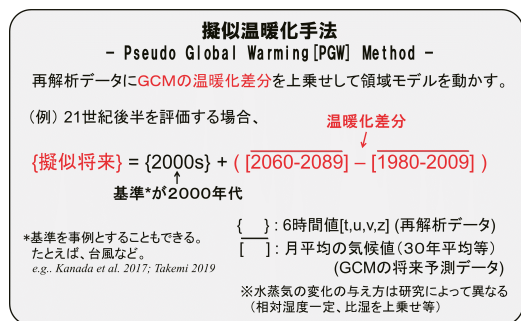
海洋研究開発機構にポスドク研究員として移った後は、モデルを WRF に変え、中国の大規模灌漑による局地循環の変化等を調べていました (Kawase *et al.* 2008)。ちょうどこの頃、IPCC の第 4 次評価報告書 (AR4) が公表され (2007 年)、世間の地球温暖化への関心が高まってきました。IPCC AR4 の時点では、世界全体の気候 (気象の 30 年程度の長期平均的な状態) を計算する全球気候モデルをベースとした将来予測が主流でした。ただ、全球気候モデルでは解像度が粗く、特定の領域をより詳細に見るため部分的に高解像度化をする工夫が必要でした。この高解像度化の手法をダ

ウンスケーリングと呼び、全球気候モデルの予測結果を統計的に高解像度化する統計的ダウンスケーリング手法と、予測結果を側面境界値条件として領域気候モデルに与えて高解像度計算を行う力学的ダウンスケーリング手法 (Wang *et al.* 2004) が提案されました。

全球モデルの結果をそのまま力学的にダウンスケーリングすると、全球モデルの現在気候におけるバイアスを引き継いでしまいます。そこで、木村富士男先生と当時気象研究所の鬼頭昭雄氏が、全球モデルの温暖化差分 (現在の気候値と将来の気候値との差分) を再解析データに上乘せすることで、擬似的に温暖化の状態を評価する擬似温暖化手法 (Pseudo global warming (PGW) method) を提唱しました (Kimura and Kitoh 2007; Sato *et al.* 2007) (第 1 図)。Kimura and Kitoh (2007) はトルコの将来気候の変化、Sato *et al.* (2007) はモンゴルの将来気候の変化を対象としています。擬似温暖化手法の日本語解説は 2010 年の天気 2 月号をご覧ください (佐藤 2010)。なお、類似の手法は 1990 年代後半に欧米でも提案されていました (Schär *et al.* 1996; Frei *et al.* 1998)。

擬似温暖化手法を用いた研究は、木村先生の研究グループを中心に様々な現象に対して行われました。Hara *et al.* (2008) は、本手法を日本の積雪変化予測に初めて適用しました。都市気象と擬似温暖化実験を組み合わせた評価が Adachi *et al.* (2012) によって行われています。実際に気候差分を与えるだけで気候変化を評価できるのかの検証は Kawase *et al.* (2008) や足立・木村 (2010) などで行われました。当初、擬似温暖化実験の温暖化差分として単一の GCM (MRI-AGCM や MIROC5) が用いられていましたが、この手法は GCM の 3 次元の月平均データがあれば適用することができます。そのため、世界で開発されている複数のモデル (マルチモデル) のデータを気候差分として与えた実験も容易に行うことができ、Kawase *et al.* (2009) では梅雨期の複数モデルの気候差分とマルチモデル平均の差分を与え、擬似温暖化実験を実施しました。この中で、マルチモデル平均及び複数モデルで温暖化の進行に伴って梅雨前線の北上が遅れることを指摘しています。

擬似温暖化実験は、その後、京都大学の竹見哲也教授や名古屋大学の金田幸恵氏などによって台風の将来予測にも適用されています (Ito *et al.* 2016; Takemi *et al.* 2016; Kanada *et al.* 2017a, b; Nayak and Takemi 2019; Takemi 2019)。また、米国や欧州でも使われており、特に米国大気研究所 (NCAR) では 2 km 格子



第 1 図 擬似温暖化手法の概要。

の WRF で計算した大規模な擬似温暖化実験が実施され、多数の研究成果が発表されました（例えば、Rasmussen *et al.* 2014 ; Prein *et al.* 2017 ; Gutmann *et al.* 2018 ; Rasmussen *et al.* 2020). Adachi and Tomita (2020) において、擬似温暖化実験の手法の解説や擬似温暖化実験を用いた研究のレビューがなされているので、興味のある方は是非ご覧ください。

2008年11月に海洋研究開発機構を退職し、大学院生の頃から愛用してきた領域モデルとはしばらくお別れすることになります。

3. 全球気候モデルとの出会いと IPCC 第 5 次評価報告書に向けた計算

2008年12月に国立環境研究所に異動し、全球気候モデルのグループに所属することになります。本節の内容は受賞理由とは直接関係がありませんが、地域気候研究を進める上で大きな力となっているので紹介します。国立環境研究所では野沢 徹さん（現、岡山大学教授）の研究室で雇われました。また、隣の江守正多さんが室長を務める研究室には、現在、気候変動研究の一線で活躍する研究者が多数在籍していました。

国立環境研究所では、東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構で共同開発した大気海洋結合モデル (MIROC) の開発・研究が行われており、私も素人ながら MIROC を使うことになりました。この頃、IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) に向けた実験の準備が進められており、私のいた研究室では MIROC に外部強制として与える各種化学物質のエミッション（排出量）やオゾン濃度などの境界条件ファイルの整備を行っていました。エミッションはシナリオごとに整備され、AR5では代表的濃度パス (Representative Concentration Pathways: RCP) が用いられました。エミッションは世界の研究機関で基本的には同じものが使われていますが、それぞれの全球モデルに与えるためには、データ加工や化学物質の調整が必要になります。もし、そこに人為的ミスが入ると、過去の気温変化を再現できなかったり、将来温暖化しなかったりする可能性もあります。エミッションの整備が終わり、AR5用の MIROC の計算も無事に終わりましたが、しばらくは、どこかで間違いが発見されないかドキドキしながら過ごしていました。

当時の MIROC には、エミッションからオゾン濃度を計算する MIROC-ESM と、オゾンの濃度は外部から与える MIROC5がありました。後者では、MIROC

に与えるオゾン濃度を計算するため、提供された化学種のエミッションから、名古屋大学の須藤健悟教授が開発した CHASER を用いて別途、オゾン濃度を計算します。エミッション整備の仕事に加え、国立環境研究所の永島達也さんと須藤教授ご指導の下、CHASER を用いたオゾンの計算も行いました。せっかくなので、いくつかエミッションの感度実験を行ったところ、オゾン濃度の変化は将来の気温変化に加え、メタンの変化によって大きく変わっていたことが分かりました。その成果をまとめたのが Kawase *et al.* (2011b) で、私の業績の中でもかなり異質な論文となっています。

国立環境研究所では、上記のエミッション・オゾン濃度の整備・計算の思い出が大きいです。MIROC を用いた Detection and Attribution (検出と要因分析) の研究も行いました。MIROC で計算された20世紀の降水変化を地域別に調べると、アフリカでは顕著な降水減少が検出され、MIROC による降水減少の再現性も良いことが分かりました。そこで、アフリカの降水変化に対する人為的要因を調査すると、アフリカ熱帯域の降水量変化には、温室効果ガスの増加よりも硫酸塩の増加に伴う局所的な冷却と、黒色炭素の増加に伴う大気下層の加熱（太陽放射の吸収）による循環場の変化の影響が大きかったことが分かりました (Kawase *et al.* 2010 ; Kawase *et al.* 2011a)。

国立環境研究所には2011年6月まで約2年半滞在しましたが、この間、MIROC の研究グループにも加わり、MIROC グループの活発な研究活動を垣間見ることができました。ここで全球モデルの研究者と知り合えたことは、現在、地域気候変化予測研究を行う上で、非常に大きな力になっています。もう一点、国立環境研究所の江守正多さんは、当時（今もですが）、気候変動予測の研究成果を一般の方に伝える活動（アウトリーチ）を積極的に行っていて、こちらも参考にさせていただきました。

4. 再び領域モデルの世界に～降雪積雪を対象とした地域気候研究～

4.1 積雪の観測と再現計算

話は地域気候に戻ります。学生の頃、指導教員の木村先生から、「気象モデルの結果をそのまま信じてはいけない。必ず観測での検証が必要だ」と教えられました。気象モデルは平地、山岳関係なく、降水や降雪や積雪を計算し、将来変化も評価することができ。ただ、気象庁の観測は標高の低い場所に多く、高

標高の山岳地域にはあまりありません。例えば、日本海に面した北アルプス北部は特に雪の多い地域として知られていますが、実際にどの程度の積雪があるのかは十分に把握されていない現状がありました。一方で、富山大学や富山県立山カルデラ砂防博物館では、数十年前から北アルプス立山室堂平（標高2450m）において、毎年春に積雪断面観測を実施しており、ピンポイントでは積雪が観測されていました。積雪断面調査は、雪を掘って、積雪の内部構造を調べるものです。数センチ毎に積雪の密度や雪温、粒形、全層の積雪水量などを調べます。また、積雪層に含まれる化学物質を調査する場合もあります。立山室堂平では、毎年6メートルから7メートルの雪が積もり、地面まで雪を掘るだけでも大仕事です。

一方、立山での断面調査は3月と4月にそれぞれ別の研究チームが1回ずつ行うだけであり、一冬を通した積雪の変化を知ることはできません。また、他の標高帯での日々の積雪の変化も分かりません。そこで2014年度から始まった（科研費若手B）研究の一環として、立山カルデラ砂防博物館の飯田 肇学芸課長の助けを借り、立山黒部アルペンルート沿いに標高約500m おきにカメラを仕掛け、日々の積雪の変化を把握する試みを行いました。1時間ごとにカメラで目盛りの書かれたポールを撮影し、それを後日、目視で読み取るという原始的なものです。積雪を知りたいなら、レーザー式あるいは超音波式の積雪深計を用いれば良いんじゃないかと思うかもしれませんが、雪に閉ざされる山の中では電源の確保ができません。また、立山は国立公園なので設置できる場所も限定されます。

このようにして得られた観測データと、気象研究所非静力地域気候モデル（NHRCM）の高解像度気候計算の結果とを比較すれば、モデルの再現性の検証が可能になると考えました。結果として、2 km 格子のNHRCMは当初想定した以上に積雪深や日々の積雪変化を再現しており、また、5 km 格子のNHRCMでは特に北アルプスの中腹（標高1500m から2000m）で積雪深が過大評価されていることも分かりました（川瀬ほか 2019）（第2図）。さらに、過去に約20年間に観測された積雪深や積雪水量の年々変動は、JRA-55を境界値としてNHRCMで計算した積雪深の変動と非常によく合っていること分かりました（Kawase *et al.* 2018b；川瀬ほか 2019）。

4.2 降雪と積雪の将来予測

現在では多くの時間を、日本の降雪・積雪の将来予

測研究に割いていますが、このような研究を始めたのは、2011年に海洋研究開発機構に戻った時からです。当初、文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム（RECCA：平成22年度から26年度）」の予算で雇われて（いわゆるポスドク研究員として）入りました。関わったテーマは「日本海沿岸域における温暖化に伴う積雪の変化予測と適応策のための先進的ダウンスケーリング手法の開発」（課題代表：木村富士男）です。

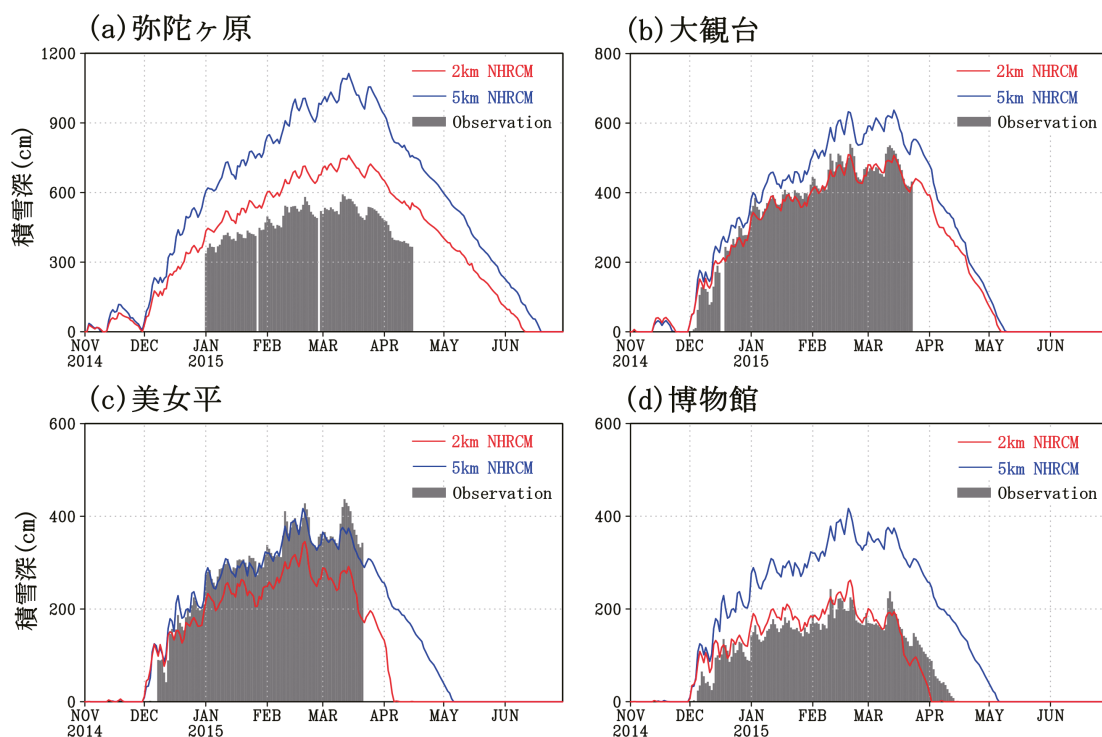
RECCA が始まった平成22年（2010年）は、温室効果ガスの排出削減などによる地球温暖化の緩和策の話は出ていましたが、気候変動への適応策の話は一般にはまだそれほど広まっていない時期でした。このプログラムは、各地域に特化した気候変化予測を行うことで、該当する地方自治体の適応策の立案に貢献しようとするものです。私が関わった上記の課題（雪課題）では、富山県環境科学センターと組み、富山県の降雪、積雪の将来予測を実施するのが目的でした。RECCAの目的である自治体と連携は、当時まだ若手研究者だった私にとって未知の領域で、自治体の意見を直接知ることができる貴重な体験となりました。研究者と自治体の関係者は気候変動に関する捉え方がそもそも異なります。科学的に気候変動を研究する研究者と、気候変動適応策の社会実装が求められる自治体がうまく連携するためには、コミュニケーションが重要となります。RECCAの途中で企画した公開シンポジウム「富山シンポジウム」は、まさにこの点を重視したシンポジウムでした。研究者と自治体の間に気象キャスターが入り、三者の良さを生かしながら、富山県民に地球温暖化の現状、富山の将来予測を伝えました。研究者として登壇したのが、課題代表の木村富士男先生と国立環境研究所の江守正多さん、気象キャスターとして登壇したのが天達武史さんと井田寛子さんでした。このシンポジウムの詳細は、川瀬ほか（2013）をご参照ください。

地球温暖化に伴う降雪・積雪の将来予測の研究は、2014年4月に気象研究所に異動した後も続きます。RECCAの後継として始まった気候変動適応研究社会実装プログラム（SI-CAT）には研究協力者として関わり、防災科学技術研究所、東北大学、海洋研究開発機構とともに、長野県と岐阜県の降雪と積雪、大雨の将来予測を行いました。この時は、北海道と沖縄を除く地域を5 km 格子のNHRCMでダウンスケーリングした後、2 kmあるいは1 km 格子のNHRCMを用いて大雨や大雪の将来予測を実施しました（Kawase *et*

al. 2018a ; Sasai *et al.* 2019 ; Kawase *et al.* 2020b). ここで境界値に用いたのが「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)」と呼ばれる大規模なアンサンブル実験です (Mizuta *et al.* 2017). d4PDF は文部科学省の「気候変動リスク情報創生プログラム (平成24~28年度)」の一環として作られました. 当初, d4PDF は過去実験, 非温暖化実験, 4度上昇実験で構成されていましたが, SI-CAT の中でさらに2度上昇実験 (Fujita *et al.* 2018), 後継の統合的気候モデル高度化プログラムの中で1.5度上昇実験が追加されました (Nosaka *et al.* 2020). Ishii and Mori (2020) において, d4PDF を用いた研究がレビューされているので, 是非ご参照ください.

d4PDF の登場によって, 日本の豪雨や豪雪, 猛暑などの極端気象の将来予測が可能になりました. そこで, RECCA の頃から気になっていた極端降雪 (いわゆるドカ雪) の将来予測に取り組みました. RECCA

の中で行った実験でも, 積算期間が短いほど温暖化による降雪量の減少率が小さいことは分かっていました, サンプル年数の関係で稀な大雪については評価できませんでした (Kawase *et al.* 2013). そこで, d4PDF の20km 領域版を過去, 将来, それぞれ3000年分のデータを分析した結果, 地球温暖化が進行すると, 一冬の総降雪量は全国的に減少するものの, 10年に1度相当の日降雪量は北海道や北陸地方の山沿いで増加することが分かりました (Kawase *et al.* 2016) (第3図). この要因として, Kawase *et al.* (2016) では, 地球温暖化に伴う脊梁山脈での気塊の地形性上昇強化による降雪量の増加と, 日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) の強化を挙げています (第4図). さらに, 20km 格子の結果を5km 格子, 1km 格子へとネスティングし, 中部山岳の北アルプスの降雪量について調べると, 極端日降雪量だけでなく, 12月下旬から1月にかけての厳冬期の積雪や多雪年の総降雪量も, 温暖化が進行すると増加する可能性があることが分かりました (Kawase *et al.* 2019). 一方, 文部科学省統合的気候モデル高度化



第2図 2014年冬季に立山黒部アルペンルートで観測された積雪とNHRMで再現された積雪。(a) 弥陀ヶ原, (b) 大観台, (c) 美女平, (d) 博物館. 標高はそれぞれ, 1850m, 1450m, 984m, 475m. 棒グラフはタイムラプスカメラによる観測 (博物館は目視観測), 青線が5km格子のNHRM, 赤線が2km格子のNHRM. 川瀬ほか (2019) の図4を転載.

プログラムで作成された 5 km 格子 NHRCM/20km 格子相当 AGCM の分析から、北海道や本州の山では厳冬の降雪量が増える可能性があること、北海道に関しては降雪量の増加に循環場の変化が影響している可能性があることも分かってきました (Kawase *et al.* 2021a)

d4PDF や SI-CAT 等の研究プロジェクトで作られたデータは、昨今、地球温暖化の影響評価や適応策立案のために、各省庁や自治体で幅広く使われています。国土交通省では平成30年から「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」が開催され、d4PDF や SI-CAT の降水量の予測結果を踏まえて、将来の治水

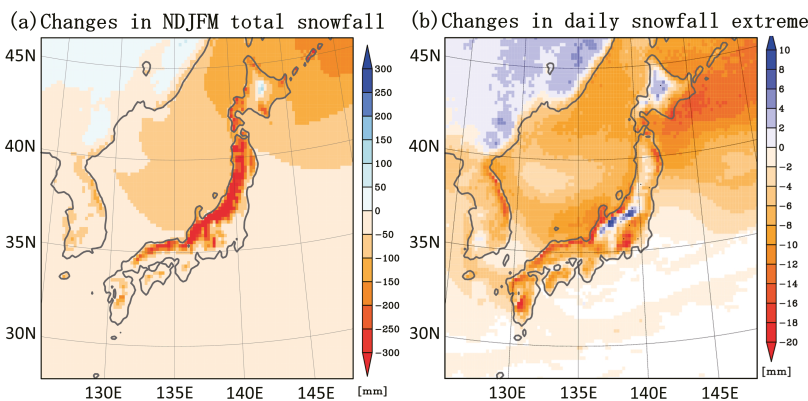
対策が検討されました。一度、この委員会にオブザーバーとして参加し、研究と政策が合わる現場を目の当たりにしました。我々の研究成果がこのような場で使われることを光栄に感じた一方で、責任の生じる仕事をしているのだと実感しました。

5. 実際に発生した極端気象に対する温暖化の影響～イベント・アトリビューション～

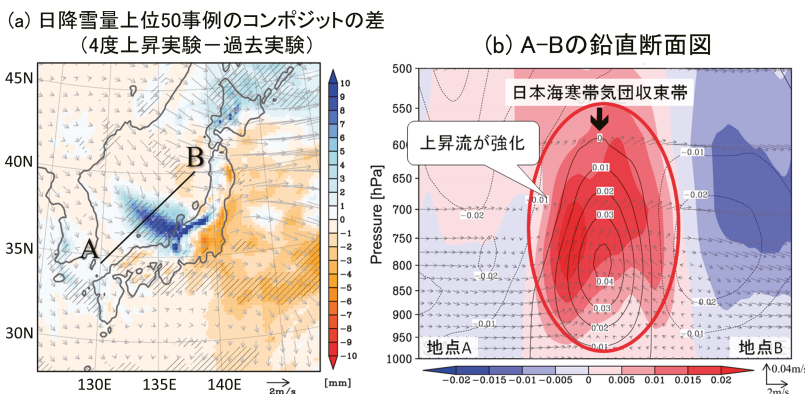
ここまでは将来の地域気候予測に焦点を置いて書いてきました。一方で、既に地球温暖化は進行しており、IPCC AR6では「人為起源の気候変動は多くの気象及び気候の極端事象に既に影響を及ぼしている」と言及

されています。実際に発生した極端気象に対して地球温暖化等の影響を見積もる研究は、イベント・アトリビューション (EA) と呼ばれます。EA は特定時期の海面水温の状況を大気循環モデル (AGCM) に与え、温暖化あり・なしの条件下で数百から数千メンバーの大規模アンサンブル実験を実施し、極端事象の発生確率が温暖化によってどの程度変化しているかを定量化する研究です (Stott 2016)。日本で発生した猛暑や豪雨などの極端事象についても、多くの EA 研究が実施されています (Imada *et al.* 2013, 2014; Takahashi *et al.* 2016, 2019; Imada *et al.* 2019, 2020)。

d4PDF は過去実験と将来予測実験に加えて、人為起源の温暖化の影響を除いた非温暖化実験が存在します (Shiogama *et al.* 2016)。この非温暖化実験の結果を分析することで、近年発生した極端気象にどの程度、温暖化が影響を及ぼしたのかを評価することができます。気象研究所では、今田由紀子さんが EA の先駆者のひとりとして、



第3図 積算降雪量と極端な日降雪量の将来変化。(a) 11月から3月の積算降雪量、(b) 10年に1度相当の日降雪量。d4PDFの4度上昇実験と過去実験の差で示す。降雪量はいずれも水換算した量 (mm) で示す。

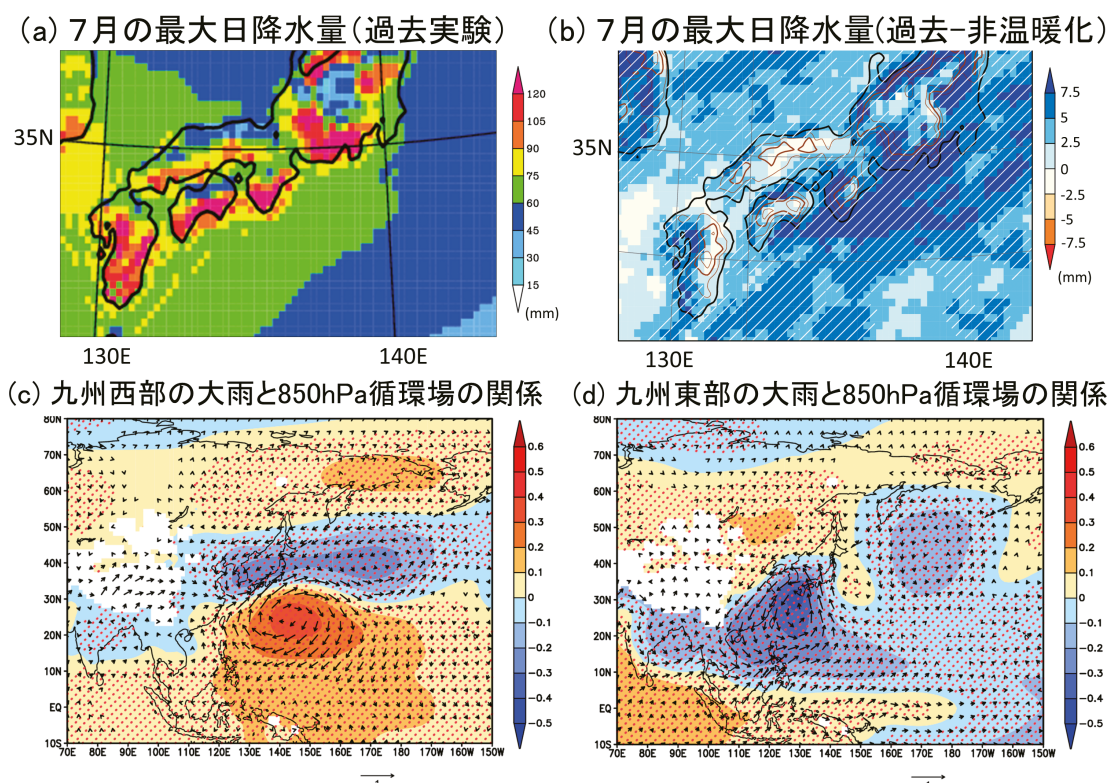


第4図 津南町付近の日降雪量上位50事例の合成図(コンポジット)。d4PDFの4度上昇実験と過去実験の差を示す。(a) 降水量(シェイド)と地上風(ベクトル)の差。(b) A-Bの鉛直断面図。コンターは過去実験の鉛直流、シェイドは4度上昇実験と過去実験の鉛直流の差。ベクトルはA-B断面に沿った風。水平方向と鉛直方向でスケールが異なる。

MIROC AGCM を用いた EA の研究を進めていました。今田さんと私は、気象研究所に選考採用として2014年に同じタイミングで入所しました。入所するまでは名前を知っている程度で、研究交流はありませんでしたが、d4PDFを用いたEA研究をきっかけに共同研究を始め、複数の共著論文を執筆することができました。例えば、Kawase *et al.*(2019) では、過去実験と非温暖化実験の降水量を比較することで、7月の最大日降水量が温暖化に伴い九州西部では増加する一方、九州東部では変化が小さいことが分かりました(第5図)。大雨が発生する要因が九州西部では梅雨前線に伴う南西からの水蒸気流入、九州東部では台風とそれぞれ要因が異なることで、温暖化の影響の現れやすさが変わったと考えられます。これをEAに発展させたのがImada *et al.*(2020) です。この論文の中ではd4PDFの全球60km、領域20kmの過去実験と非温暖

化実験の結果を基に、平成29年7月九州北部豪雨は温暖化によって発生確率が約1.5倍になっていたことを明らかにしました。また、平成30年7月の瀬戸内の大雨については、発生確率が約3.3倍になっていたと見積もられています。

さて、極端事象に対する温暖化の寄与を確率的に評価するためには、d4PDFのような全球モデルを用いた大規模アンサンブル実験が必要となります。また、その全てを領域モデルによって高解像度にダウンスケールするのも大変です。一方、私が以前行っていた領域モデルを用いた擬似温暖化実験は、全球モデルの温暖化差分のみを利用して、高解像度で特定事象を評価することができました。そこで、全球モデルの非温暖化実験と過去実験の差分を再解析に上乗せすることで、近年の豪雨に対する過去の気温上昇の影響を見積もりました(Kawase *et al.* 2020a, 2021b, 2022b)。擬



第5図 (a) 過去実験における7月最大日降水量と (b) 7月最大日降水量の非温暖化実験と過去実験の差。 (c-d) 九州西部および九州東部において、NHRMCで計算された7月の日降水量100mm以上の日数をインデックスとして、AGCMで計算された850hPaの高度と鉛直積算水蒸気フラックスの回帰係数を計算したもの。 (c): 九州西部, (d) 九州東部。陰影は850hPa高度 (m)、ベクトルは鉛直積算水蒸気フラックス ($\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$)。ドットは統計的に有意な値を示す。d4PDFの過去再現実験の1981年から2010年の100メンバーのアンサンブル計算の結果(3000メンバー)を利用。

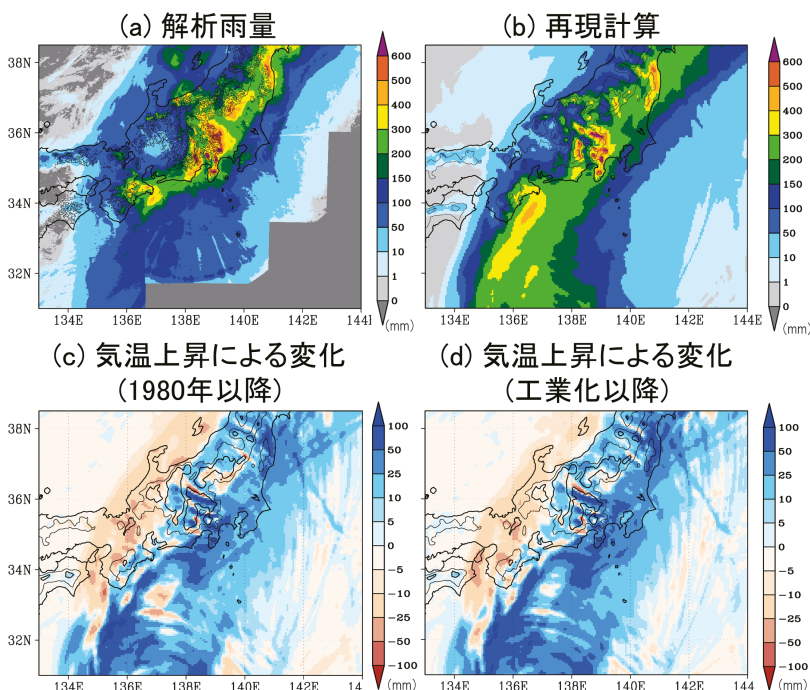
似的に非温暖化の状態を再現するため、擬似非温暖化実験と呼んでいます。過去に行った擬似温暖化実験では3次元の気温と風、高度場の差分を与えましたが、事例を限定した場合に風を変えてしまうと、大雨が発生した場所がずれる可能性があるため、ここでは領域平均した気温と高度場の差分の鉛直プロファイルを用

いています。相対湿度を変えないことで、水蒸気量は気温変化に応じて変わっています。

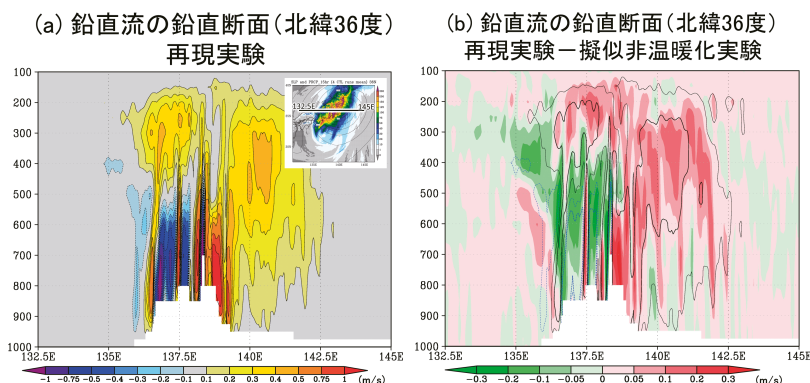
第6図は令和元年東日本台風 (Hagibis) がもたらした大雨を対象に行った評価です。関東甲信及び周辺地域で領域平均した降水量は、1980年以降の気温上昇によって10.9%、産業革命以降の温暖化によって13.6%

増加したと見積もられました。降水量の増加は一様に起こるのではなく、台風の進行方向の東側で増加量が大きく、西側では増加量がやや減少しました。台風の関東上陸時までの経路は、再現実験と擬似非温暖化実験でほとんど差がありませんでしたが、気温上昇による水蒸気量の増加や台風の若干の強化により、平均すると上昇流が卓越した場所で上昇流偏差、上昇流が弱いあるいは下降流となる場所で下降流偏差になったことで、降水量の応答が不均一になったと考えられます (第7図)。

過去の変化を見積もる際、d4PDFの非温暖化実験と過去実験の差分ではなく、再解析データ (例えば、JRA-55) の過去のトレンドから見積もる方法もあります。この場合、実際に観測された気温変化を評価するため、モデル (d4PDF) の差分よりも現実的な値で評価することができ、過去の気温トレンドには地球温暖化の効果だけではなく、自然変動も含まれてしまうことに注意が必要です。令和元年東日本台風以降、令和2年7月豪雨 (Kawase *et al.* 2022b) (第8図) や令和2年12月の大雪、令和3年8月の大雨、同年12月の大雪に対しても本手法を適用し、気象庁の異常気象分



第6図 令和元年東日本台風 (Hagibis) の降水を対象とした擬似非温暖化実験の結果。(a) 解析雨量、(b) 再現実験、(c,d) 再現実験と擬似非温暖化実験の差。(c) は JRA-55 のトレンドから見積もった1980年以降の気温上昇、(d) は d4PDF から見積もった工業化以降の気温上昇の影響。



第7図 北緯36度到達前15時間平均した鉛直流の断面図。(a) 再現実験、(b) 再現実験と擬似非温暖化実験の差。再現実験、擬似非温暖化実験共に、北緯36度到達時の位置に近い4実験で比較。

析検討会等で速報結果を紹介しています。なお、冬季の大雪への温暖化の寄与については、気温上昇よりも日本海の海面水温の上昇が重要であることも分かっています (Kawase *et al.* 2022a)。

今後は、d4PDF などの大アンサンブル実験を基にした確率的な評価と、擬似非温暖化実験による量的な評価を併用し、温暖化の寄与を調べていく必要があるでしょう。確率的な評価の場合でも、領域モデルの解像度を 5 km まで上げてアンサンブル計算を行うことで、線状降水帯の発生頻度の変化を評価できる可能性が Kawase *et al.* (2022b) で示されています (第 9 図)。

一方、擬似温暖化実験の結果を分析することで、極端気象を引き起こした降水システムを温暖化がどのように変調させたかを調べることも可能です。さらに、擬似非温暖化実験の結果を河川流出モデルや氾濫モデルに与えることで、「もし温暖化が進行していなかったら、〇〇川で発生した氾濫の規模は〇〇であった」といった影響評価も可能となるでしょう。2022年から新しく始まった文部科学省の「気候変動予測先端研究プログラム」では、気候・気象、河川の専門家などが協力し、速報性と影響評価を重視した人々の行動につながる EA「アクションナブル EA」の取り組みが始まったところです。

6. おわりに

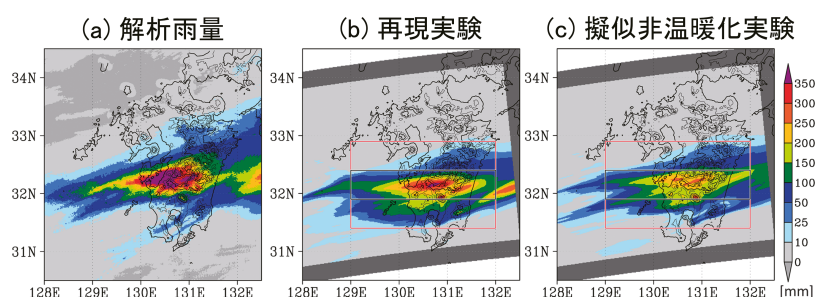
私の筆が遅く、本原稿が受賞から 2 年遅れとなってしまい、申し訳ございません。受賞後に第一子を授かり、この 2 年間で私の生活が激変しました。それまでは自分の時間の多くを研究に使うことができていたのですが、勤務時間以外はほぼ育児に変わり、本原稿についても筆が進まなく

なりました (というより、頭から抜けてしまっていました)。共働き夫婦の宿命です。共働きで活躍している研究者の方々はすごいです。気象学会でも男女共同参画やワーク・ライフ・バランスの重要性が叫ばれています。これからは育児とのバランスを保ちながら、研究を進めていきたいと思います。

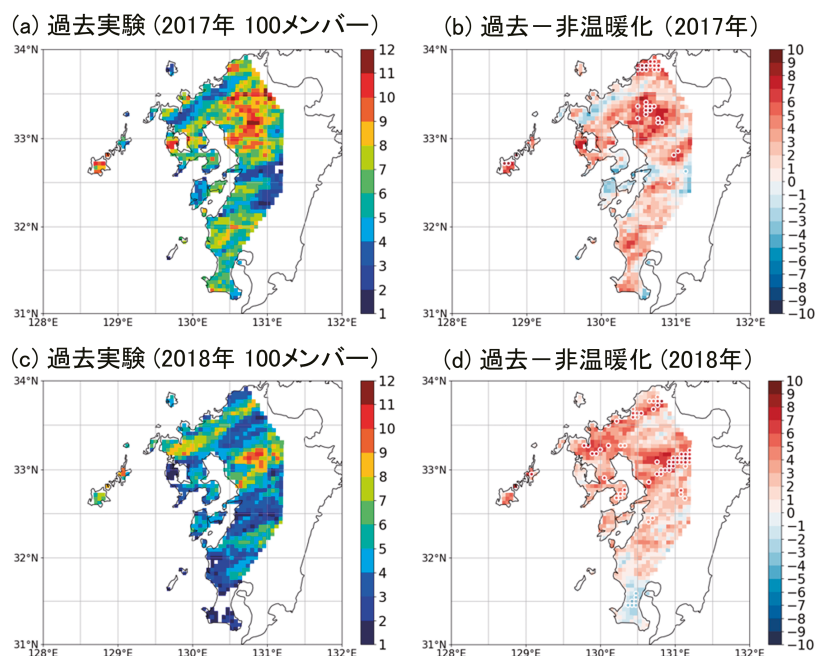
謝 辞

本賞に推薦していただいた鬼頭昭雄様、行本誠史様、田中 博先生には大変感謝申し上げます。

ここに至るまでには、非常に多くの素晴らしいの方々



第 8 図 球磨川に発生した線状降水帯の再現計算と擬似非温暖化実験。Kawase *et al.* (2022b) の Figure 1 の一部を抜粋。



第 9 図 2017 年 7 月を対象とした d4PDF の過去実験と非温暖化実験の差。線状降水帯の抽出には Hirockawa *et al.* (2020) の手法を適用。Kawase *et al.* (2022b) の Figure 2 の一部を抜粋。

との出会いがありました。まず、筑波大学に入学した際に気象の授業をしていただいた恩師の木村富士男先生、安成哲三先生、田中 博先生。この方々の授業や実験がなければ、気象学の面白さを知って、今の状況になることはなかったでしょう。筑波大学大学院では木村富士男先生の研究室で多くの先輩、後輩に囲まれながら楽しく濃厚な大学院生活を送ることができました。木村富士男先生には、研究の進め方、論文の書き方、査読者への対応、申請書の書き方など、時間をかけて丁寧に教えていただきました。同研究室の同期である足立幸穂さん（現、理化学研究所）には、博士課程の頃から現在に至るまで、時には愚痴を言いながらも研究の相談に乗っていただきました。研究室の先輩である原 政之さん（現、気象庁数値予報課）と佐藤友徳さん（現、北海道大学地球環境科学研究院）には、研究室に入った当初から気象学の知識や、プログラミングの基礎、論文の書き方など、多岐に渡りご指導いただきました。感謝申し上げます。

二度所属した海洋研究開発機構では、吉兼隆生さん（現、東京大学）、馬雙鈔さん（現、南京信息工程大学）が上司となり、大変お世話になりました。馬さんと徐健青さん（現、関東学院大学）には、当時研究対象としていた中国黄河流域の大規模灌漑地域に連れて行っていただきました。衛星画像や数値モデルの中でしか見ていなかった灌漑地域を目の前にしたときの感動は今でも忘れません。

国立環境研究所では野沢 徹さん、江守正多さん、永島達也さん、横畠徳太さん、小倉知夫さん、塩竈秀夫さんには、大学院のアルバイト時代からポスドク研究員の時代まで、昼夜問わず、大変お世話になりました。

気象研究所に異動後、最初は戸惑うことも多かったのですが、入所当時の藤部文昭部長、佐々木秀孝室長（後の研究部長）、高数 出室長（後の研究部長、研究総務官）、同研究室の村田昭彦さん（現、室長）、野坂真也さんの助けもあり、何とか業務を進めることができました。

初めて獲得した科学研究費助成事業（若手B）では、富山県立山カルデラ砂防博物館の飯田 肇学芸課長、富山大学の青木一真教授に、立山室堂平の積雪観測に関して大変お世話になりました。実際に現地の状況を目で見て、肌で感じることの大切さを教わりました。

気象学会では同世代の多くの横のつながりもできました。杉本志織さん（海洋研究開発機構）と下瀬健一さん（防災科学技術研究所）とは、大学院の時に若手

会や夏の学校で会うたびに色々語り合い、ポスドク研究員になったあと、若手研究者交流会（通称 YMO）を立ち上げました（川瀬ほか 2011）。YMO は第4回まで関わりましたが、ここで出会った当時博士課程の学生や若手研究者が、今では中堅の研究者となり、それぞれの分野で精力的に活動しています（今でも中手会に形を変えて楽しんでいます）。特に、海洋研究開発機構の山田洋平さん、山崎 哲さん、木下武也さん、松田景吾さん、気象研究所の廣川康隆さん、日本大学の宇野史陸さんとは、昼間の研究会話だけでなく、夜遅くまでビール片手に楽しく過ごさせていただきました。

本原稿の執筆にあたり、担当編集委員の城岡竜一氏と査読者の方には、私の原稿を細かいところまで丁寧に見ていただきました。ここに感謝申し上げます。また、筑波大学の後輩であり、天気編集委員の高根雄也さんには、止まっていた私の筆を進める後押しをしていただき、大変感謝しております。

ここに名前を挙げられなかった方も含め、多くの皆さまのご支援、ご協力があったからこそ、ここまで研究を進めることができました。関係のあったすべての方に感謝申し上げます。

最後に、子どもの頃からずっと支えてくれた両親、遅くまで研究し、空や雪ばかり見ていた私を見限らずに付いてきてくれた妻の久美子、コロナ禍で大変な中、生まれてきてくれた娘の紗由季に感謝の意を表しまして、結びの言葉とさせていただきます。

参考文献

- 足立幸穂、木村富士男、2010：近年の関東域における高温化傾向の要因分析、影響・利用研究会会報, 28, 5-13.
- Adachi, S. A. and H. Tomita, 2020: Methodology of the constraint condition in dynamical downscaling for regional climate evaluation: A review. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, doi:10.1029/2019JD032166.
- Adachi, S. A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue and H. Ueda, 2012: Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo Metropolitan area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 1441-1454.
- Frei, C., C. Schär, D. Lüthi and H. C. Davies, 1998: Heavy pre-cipitation processes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1431-1434.
- Fujita, M., R. Mizuta, M. Ishii, H. Endo, T. Sato, Y. Okada, S. Kawazoe, S. Sugimoto, K. Ishihara and S. Watanabe, 2018: Precipitation changes in a climate with 2-K sur-

- face warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 435–442.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) (No. NCAR/TN-398+STR). UCAR, doi:10.5065/D60Z716B.
- Gutmann, E. D., R. M. Rasmussen, C. Liu, K. Ikeda, C. L. Bruyere, J. M. Done, L. Garré, P. Friis-Hansen and V. Veldore, 2018: Changes in hurricanes from a 13-yr convection-permitting pseudo-global warming simulation. *J. Climate*, **31**, 3643–3657.
- Hara, M., T. Yoshikane, H. Kawase and F. Kimura, 2008: Estimation of the impact of global warming on snow depth in Japan by the pseudo-global-warming method. *Hydrol. Res. Lett.*, **2**, 61–64.
- Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti and N. Seino, 2020: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 835–857.
- Imada, Y., H. Shioyama, M. Watanabe, M. Mori, M. Kimoto and M. Ishii, 2013: Contribution of atmospheric circulation change to the 2012 heavy rainfall in southern Japan. *Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective* (T. C. Peterson *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, S52–S54.
- Imada, Y., H. Shioyama, M. Watanabe, M. Mori, M. Kimoto and M. Ishii, 2014: The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013. *Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective* (S. C. Herring *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, S52–S54.
- Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shioyama and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, **15A**, 8–12.
- Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, H. Shioyama and I. Takayabu, 2020: Challenges of risk-based event attribution for heavy regional rainfall events. *NPJ Climate Atmos. Sci.*, **3**, doi:10.1038/s41612-020-00141-y.
- Ishii, M. and N. Mori, 2020: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00367-7.
- Ito, R., T. Takemi and O. Arakawa, 2016: A possible reduction in the severity of typhoon wind in the northern part of Japan under global warming: A case study. *SOLA*, **12**, 100–105.
- Kanada, S., T. Takemi, M. Kato, S. Yamasaki, H. Fudeyasu, K. Tsuboki, O. Arakawa and I. Takayabu, 2017a: A multimodel intercomparison of an intense typhoon in future, warmer climates by four 5-km-mesh model. *J. Climate*, **30**, 6017–6036.
- Kanada, S., K. Tsuboki, H. Aiki, S. Tsujino and I. Takayabu, 2017b: Future enhancement of heavy rainfall events associated with a typhoon in the midlatitude regions. *SOLA*, **13**, 246–251.
- Kawase, H., T. Sato and F. Kimura, 2005: Numerical experiments on cloud streets in the lee of island arcs during cold-air outbreaks. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2005GL023256.
- Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, T. Sato, S. Ohsawa and F. Kimura, 2008: Impact of extensive irrigation on the formation of cumulus clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2007GL032435.
- Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura, T. Yasunari, T. Inoue and H. Ueda, 2009: Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **114**, doi:10.1029/2009JD011803.
- Kawase, H., M. Abe, Y. Yamada, T. Takemura, T. Yokohata and T. Nozawa, 2010: Physical mechanism of long-term drying trend over tropical North Africa. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, doi:10.1029/2010GL043038.
- Kawase, H., T. Nagashima, K. Sudo and T. Nozawa, 2011a: Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2010GL046402.
- Kawase, H., T. Takemura and T. Nozawa, 2011b: Impact of carbonaceous aerosol on precipitation in tropical Africa during austral summer in 20th Century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, doi:10.1029/2011JD015933.
- 川瀬宏明, 杉本志織, 下瀬健一, 小玉知央, 稲飯洋一, 沢田雅洋, 坂井大作, 中野満寿男, 井上知栄, 永野良紀, 2011: 若手連携の土壌作り～気候気象若手研究者交流会の立ち上げ～. *天気*, **58**, 269–274.
- 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. Atmos.*, **118**, doi:10.1002/2013JD020429.
- 川瀬宏明, 石崎紀子, 宇野史睦, 吉兼隆生, 馬雙銚, 木村富士男, 初鹿宏壮, 相部美佐緒, 源 将, 本谷 研, 岩谷忠幸, 田代大輔, 天達武史, 井田寛子, 2013: 研究者, 行政担当者及び気象キャスターの連携～「富山の気候変化と県民生活を考えるシンポジウム」をとおして～. *天気*, **60**, 625–631.

- 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, 2018a: 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.
- Kawase, H., A. Yamazaki, H. Iida, K. Aoki, H. Sasaki, A. Murata and M. Nosaka, 2018b: Simulation of extremely small amounts of snow observed at high elevations over the Japanese Northern Alps in the 2015/16 winter. *SOLA*, **14**, 39–45.
- 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 (NHRCM) を用いた積雪再現実験の比較. *地学雑誌*, **128**, 77–92.
- Kawase, H., Y. Imada, H. Sasaki, T. Nakaegawa, A. Murata, M. Nosaka and I. Takayabu, 2019: Contribution of historical global warming to local-scale heavy precipitation in western Japan estimated by large ensemble high-resolution simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **12**, 6093–6103.
- Kawase, H., Y. Imada, H. Tsuguti, T. Nakaegawa, S. Naoko, A. Murata and I. Takayabu, 2020a: The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. *Explaining Extreme Events of 2018 from a Climate Perspective* (S. C. Herring *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, S109–S114.
- Kawase, H., T. Yamazaki, S. Sugimoto, T. Sasai, R. Ito, T. Hamada M. Kuribayashi, M. Fujita, A. Murata, M. Nosaka and H. Sasaki, 2020b: Changes in extremely heavy and light snow-cover winters due to global warming over high mountainous areas in central Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-0322-x.
- Kawase, H., A. Murata, K. Yamada, T. Nakaegawa, R. Ito, R. Mizuta, M. Nosaka, S. Watanabe and H. Sasaki, 2021a: Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. *SOLA*, **17**, 1–7.
- Kawase, H., M. Yamaguchi, Y. Imada, S. Hayashi, A. Murata, T. Nakaegawa, T. Miyasaka and I. Takayabu, 2021b: Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming. *SOLA*, **17A**, 7–13.
- Kawase, H., Y. Imada and S. Watanabe, 2022a: Impacts of historical atmospheric and ocean warming on heavy snowfall in December 2020 in Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, in press.
- Kawase, H., S. Watanabe, Y. Hirockawa and Y. Imada, 2022b: Timely event attribution of extreme precipitation in Japan: An example of heavy rainfall in July 2020. *Explaining Extreme Events of 2020 from a Climate Perspective* (S. C. Herring *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **103**, S118–S123.
- Kimura, F. and A. Kitoh, 2007: Downscaling by pseudo global warming method. *The Final Report of ICCAP*, 43–46.
- Mizuta, R. et al., 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- Nayak, S. and T. Takemi, 2019: Dynamical downscaling of Typhoon Lionrock (2016) for assessing the resulting hazards under global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 69–88.
- Nosaka, M., M. Ishii, H. Shiogama, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase and H. Sasaki, 2020: Scalability of future climate changes across Japan examined with large-ensemble simulations at +1.5K, +2K, and +4K global warming levels. *Prog Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00341-3.
- Peilke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee and J. H. Copeland, 1992: A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, **49**, 69–91.
- Prein, A. F., C. Liu, K. Ikeda, S. B. Trier, R. M. Rasmussen, G. J. Holland and M. P. Clark, 2017: Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nat. Clim. Change*, **7**, 880–884.
- Rasmussen, R., K. Ikeda, C. Liu, D. Gochis, M. Clark, A. Dai, E. Gutmann, J. Dudhia, F. Chen, M. Barlage, D. Yates and G. Zhang, 2014: Climate change impacts on the water balance of the Colorado headwaters: high-resolution regional climate model simulations. *J. Hydro-meteor.*, **15**, 1091–1116.
- Rasmussen, K. L., A. F. Prein, R. M. Rasmussen, K. Ikeda and C. Liu, 2020: Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. *Clim. Dyn.*, **55**, 383–408.
- Sasai, T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita and T.

- Iwasaki, 2019: Future projection in extreme heavy snowfall event with 5-km large ensemble regional climate simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 13975–13990.
- 佐藤友徳, 2010: 擬似温暖化実験. *天気*, **57**, 37–38.
- Sato, T. and F. Kimura, 2005: Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1626–1636.
- Sato, T., F. Kimura and A. Kitoh, 2007: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- Schär, C., C. Frei, D. Lüthi and H. C. Davies, 1996: Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 669–672.
- Shiogama, H. et al., 2016: Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, **12**, 225–231.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR/TN-468+STR, 88pp.
- Stott, P. A., 2016: Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Clim. Change*, **7**, 23–41.
- Takahashi, C., M. Watanabe, H. Shiogama, Y. Imada and M. Mori, 2016: A persistent Japanese heat wave in early August 2015: roles of natural variability and human-induced warming. *Explaining Extreme Events of 2015 from a Climate Perspective* (S. C. Herring *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, S107–S112.
- Takahashi, C., M. Arai, M. Watanabe, H. Shiogama, Y. Imada, Y. Kosaka, M. Mori and Y. Kamae, 2019: The effects of natural variability and climate change on the record low sunshine over Japan during August 2017. *Explaining Extreme Events of 2017 from a Climate Perspective* (S. C. Herring *et al.*, eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, S67–S71.
- Takemi, T., 2019: Impacts of global warming on extreme rainfall of a slow-moving typhoon: A case study for Typhoon Talas (2011). *SOLA*, **15**, 125–131.
- Takemi, T., R. Ito and O. Arakawa, 2016: Robustness and uncertainty of projected changes in the impacts of Typhoon Vera (1959) under global warming. *Hydrol. Res. Lett.*, **10**, 88–94.
- Wang, Y., L. R. Leung, J. L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wand, Y. Ding and F. Kimura, 2004: Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1599–1628.
- Yoshikane, T., F. Kimura and S. Emori, 2001: Numerical study on the Baiu front genesis by heating contrast between land and ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 671–686.

Studies on Future Regional Climate Projections in Japan Using RCMs

Hiroaki KAWASE*

* *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan*
E-mail: hkawase@mri-jma.go.jp

(Received 30 August 2022; Accepted 31 October 2022)