

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の 開発と気候変動リスク評価研究成果の社会実装

—2021年度岸保・立平賞受賞記念講演—

石井 正好*¹・森 信人*²

1. はじめに

本稿をアンサンブル気候予測データベースの国内利用者向け解説として位置付けるといふ著者らの思惑により、口語体で講演内容を記述する本誌通例と異なるスタイルで以下記述することを最初にお断りする。

国内の研究機関と大学とが連携・協力して、地球温暖化対策を進める上で不可欠となる大規模アンサンブル気候予測データベースを作成した。このデータベースを活用し、気象、気候、影響評価に関わる研究を進め、これまでに数多くの成果を得た (Ishii and Mori 2020)。2014年に始まった一連の研究活動は、現在までにその裾野を広げ、本データベースは、研究・実務、営利・非営利を問わず国内外の利用者に幅広く提供・活用されている。2021年5月の日本気象学会春季大会において上記の成果は岸保・立平賞受賞の荣誉に浴することとなった。本賞はデータベース開発に関与した全ての仲間へ贈られたと解釈し、皆で受賞の喜びを分かち合うとともに、今後ますます重要となる道半ばの気候予測データベース開発作業を着実に進めていく決意を新たにしたい。

本稿では、まず初学者にも役立つように、気候予測データベースについて解説する。次に、本データベースを活用した科学研究や影響評価研究と、得られた成果とその社会実装にまで至った事例について紹介する。ここまでの文面で、d4PDFを活用して得られた、可能なかぎり全ての成果を紹介する。最後に、本デー

タベースの開発の背景を紹介し、開発の過程で直面した課題やその解決の顛末などを記す。

2. 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

気候予測データベースの正式名称は本節表題のとおりで、英語表記を database for Policy Decision making for Future climate change とし、この略称を d4PDF としている。名称には、科学的成果の強調よりも社会貢献を打ち出すという製作者側の意図が反映されている。

本気候予測データベースができる前に、先行して地球温暖化への適応やその緩和の方策を検討していたいくつかの機関では、当時利用可能な気候シミュレーションデータを用いて、対策の検討が行われていた。概して気候シミュレーションデータは不確実性が高いため、それぞれの機関で使用されるデータが異なれば、近接する自治体間や各種産業や行政などのセクター間で異なる対策がとられるという事態になってしまうおそれがある。そこで、d4PDF は、地理的に整合し、様々なセクター間で整合する国内の温暖化影響評価とこれに基づく温暖化対策が実現可能となることを目標に掲げて開発された。社会的関心の高い豪雨や台風などの顕著な大気現象の将来変化を評価することを重視して、高解像度の気象モデルを用いて、過去と将来の気候シミュレーションで構成されている。また、将来変化の統計的評価結果をロバストなものにするために、大規模なアンサンブル実験が実施され、それぞれの実験で3000年から6000年分のサンプルが利用可能となっている。さらに、複数の地球温暖化レベルを対象とした予測情報を用意することで、気候変化の度合いや影響評価の違いが議論できるようにしている。近

*1 (連絡責任著者) 気象庁気象研究所。

*2 京都大学防災研究所。

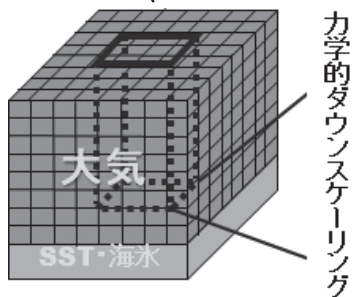
—2021年9月6日受領—

—2022年2月16日受理—

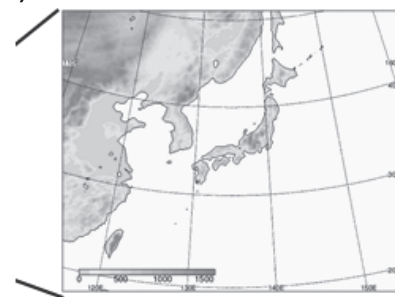
第1表 d4PDFに含まれる実験一覧.

実験名	メンバ数	積分期間	境界条件	参考文献
過去	100	60年間 (1951~2010)	観測された全球一様の温室効果ガス濃度と、化学モデルで推定した月平均エアロゾル・オゾンの三次元分布 観測の海面水温と海水 (COBE-SST2)	Mizuta <i>et al.</i> (2017)
非温暖化	100	60年間 (1951~2010)	1850年時点の温室効果ガス濃度および1850年でのエアロゾルと1961年でのオゾンの三次元分布で固定 長期トレンドを除いた海面水温 (δT) と海水	Mizuta <i>et al.</i> (2017) Kawase <i>et al.</i> (2019)
+1.5K 将来	54	29年間	RCP8.5の2030年の温室効果ガス濃度およびエアロゾル・オゾン分布で固定 CMIP5の温暖化レベル (2020-2039) + δT (1982~2010の内部変動)	Nosaka <i>et al.</i> (2020)
+2K 将来	54	60年間	同上、ただし2040年のもの CMIP5の温暖化レベル (2030-2049) + δT (1951~2010年の内部変動)	Fujita <i>et al.</i> (2019)
+4K 将来	90	60年間	同上、ただし2090年のもの CMIP5の温暖化レベル (2080-2099) + δT (1951~2010年の内部変動)	Mizuta <i>et al.</i> (2017)

60km全球大気モデル MRI-AGCM3.2 (Mizuta *et al.* 2012)



20km領域気候モデル NHRCM (Sasaki *et al.* 2011)



第1図 d4PDFで用いた全球(左)と領域(右)大気モデル.

年は、毎年、豪雨による災害発生を数多く経験しており、地球温暖化は遙か遠い将来の問題ではなく、現在の問題であると社会は認識しはじめています。現在の気候状態に対する温暖化影響を観測事実とも対比して評価できるように、温暖化しない条件下(非温暖化)で実施した気候シミュレーション出力も含めたデータベース構成になっている。第1表に、d4PDFに含まれる全実験をまとめた。

以下に記述するように、大規模アンサンブルで構成されたデータベースの有効性は高い。d4PDFを用いて将来変化の抽出などの統計解析を行えば、その平均値を正確に求めることができる。また、大雨や台風などの稀にしか発生しない大気現象についての多数の実験サンプルを得ることができるため、これらについて

の統計的推定結果の信頼性は高くなる。加えて、多数のサンプリングデータにより統計的仮定や分布推定が不要となり、直接的に確率分布を得ることができるため、ノンパラメトリックな統計手法を採用することができる。影響評価研究に関わる研究者は、この新たな状況を「パラダイムシフト」と評価している。

2.1 実験システム

過去と将来の気候状態のシミュレーションを行うために、d4PDFでは、全球域と日本周辺領域を対象とした高解像度大気モデルを使用した。それぞれ、MRI-AGCM3.2 (Mizuta *et al.* 2012) と NHRCM (Sasaki *et al.* 2011; Murata *et al.* 2013) と称されるモデル(第1図)で、いずれも気象庁の現業モデルをもとに気候計算(長期積分)向けの調整が施されている。

大気モデルと領域モデルの空間解像度は、それぞれ、60km (GCM 60km) と20km (NHRCM 20km) である。まず、全球モデルで気候シミュレーションが行われ、この結果を領域モデルで日本域にダウンスケーリングし、時空間的に詳細なシミュレーション出力を得る。これは力学的ダウンスケーリングと呼ばれる。加えて、領域モデルに採用されている詳細な地形と精

緻な物理スキームにより、現実的な大気現象の表現が可能となっている。領域モデルの計算対象領域境界では、全球モデルの毎6時間出力の大気場に近づくように強制を与え、さらに、スペクトルナッジングと呼ばれる手法で領域モデルの上空部分も強制することで、全球モデルのものに類似した大気循環が再現される。

過去、将来、そして温暖化が発生していないと想定した3つの気候状態を対象に、上記の2種類の大気モデルによるシミュレーション実験を行った(第1表)。ここでは、各実験に見合うように、温室効果ガス、エアロゾル、オゾンの濃度や分布と、大気海面境界条件である海面水温、海水密接度、海水厚を構成して、全球域大気モデルに与えた。海水密接度は、各格子内で海水が海面を覆っている割合である。二酸化炭素などの温室効果ガスは、過去実験においては観測された全球平均の時間変化する濃度を与え、+4 K 将来実験ではRCP8.5実験で使用された2090年での値を、非温暖化実験では1850年時点の観測値でそれぞれ固定した。エアロゾルとオゾンの分布は、本計算とは別に実施した気候モデルと化学モデル計算で求めた月平均値を与えた。また、領域モデル実験では、全球モデルで使用したのと同じ海面境界データを使用した。更なる詳細は Mizuta *et al.*(2017) を参照されたい。

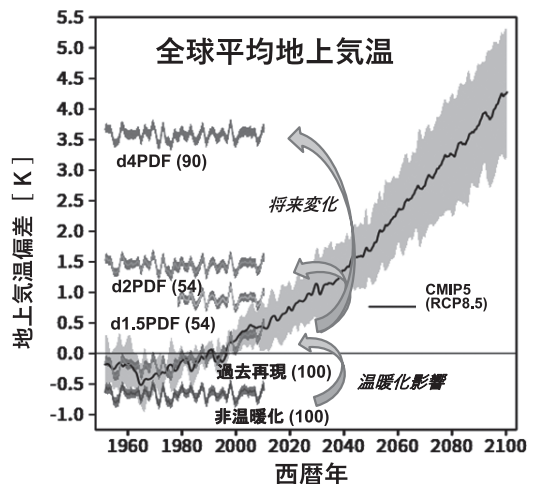
海洋の境界条件には、観測データに基づく月平均海面水温客観解析データ(COBE-SST2; Hirahara *et al.* 2014)の長期トレンド成分とこれを除いた内部(自然)変動成分に分けたものを使用した。観測の長期トレンドは、1850年から2012年までのCOBE-SST2を5年移動平均して求めた経験的直交関数の第一モードで定義した。この第一モードはHirahara *et al.*(2014)で使用したものとほぼ同様である。また、COBE-SST2には海水密接度データも含まれているのでこれを使用した。ただし、この海水の長期トレンドは使用せず、各実験で使用した海面水温値と整合するように、統計的關係に基づいて一意に海水密接度を求め、使用した。さらに、海水厚の時間変化は気候値の海水厚(Bourke and Garrett 1987)に海水密接度を乗じたもので定義した。実験ごとの海洋境界条件の与え方は以下で記述する。

使用した海面水温データには、観測データの時空間での偏りや観測の代表性、測器の誤差等に起因する不確実性がある。COBE-SST2には、その不確実性を各格子、各時刻で求めた情報が含まれている。この情報に基づく摂動を海面水温および海水の内部変動成分に

加えて、全実験で使用する。摂動を与えた大気モデルアンサンブルシミュレーションを行うことで、観測された海面水温と海水に対する大気モデルの応答が標準化されるという利点がある。つまり、シミュレーション出力のアンサンブル平均は、月々の海面水温や海水の状態の影響で生じた大気の気候偏差を的確に捉え、正規分布の仮定の下で発生しやすいさを確率的に取り扱うことができる。互いに独立な任意の数の摂動が利用可能で、個々の摂動は時空間で連続であることなど利便性を持つ(Ishii and Mori 2020)。一点注意がある。観測の不確実性は、時空間における観測データの多寡によってその大小が決まるが、将来実験でも過去実験のものと同じ摂動を使用するために、d4PDF実験では、不確実性の大きさは年代によらず一定とした。この不確実性の大きさは、月平均海面水温の年々変動の標準偏差の30%で、近年の海面水温データの不確実性の代表的な値に相当する。

2.2 過去実験と非温暖化実験

過去実験では、1951年～2010年までの60年間の期間を対象に、COBE-SST2の海面水温と海水密接度に100種類の摂動を与えて、100メンバの全球・領域大気モデルの積分を行った。加えて、それぞれのメンバのモデル積分は、幾つかの異なる大気初期値から開始された。これに対して、非温暖化実験では、COBE-SST2から長期トレンドを除いたものに過去実験と同様の摂



第2図 d4PDFの全実験とCMIP5参加6モデルの過去・将来実験出力を全球平均した地上気温の時系列。実線は各実験のアンサンブル平均で、陰影はアンサンブルスプレッドを表す。

動を与えた100メンバの計算を実施した。海氷密度と海氷厚の与え方は、前節で記述したとおりである。第2図に示すように、過去実験では温暖化による全球平均地上気温の上昇トレンドが見られるが、非温暖化実験では平坦な時系列となっていることが確認できる。

過去実験出力は、注目する気象・気候要素の変動特性が観測されたものと同等なものになっているかどうかの検証を行った上で、次項で述べる将来実験と比較し、その将来変化が求められる。第3節で詳しく述べるように、観測された代表的な大気変動事例についての再現性は高いことが過去実験出力から確認されており、このような事実は、本データベースの信頼性を保証する1つの要件を満たすものと言える。また、大規模アンサンブルの強みを活かせば、注目する現象の再現値の不確実性や発現確率などをノンパラメトリックに評価することができる。Mei *et al.* (2019) は、観測海面水温で強制されたd4PDFの大気モデルによる大西洋のハリケーン発生数時系列が観測と良く対応することを示し、この推定に必要なアンサンブル数は20もあれば十分であると結論している。時空間スケールを変えた降水変動の評価に必要なアンサンブル数を見積ったものとしては、Hibino and Takayabu (2020) の調査がある。

非温暖化実験出力は、過去に発生した気象・気候イベントが温暖化影響をどれくらい受けているのかを調査するために活用される。この影響を確率的に評価するためイベントアトリビューションと呼ばれる手法がしばしば採用され(例えばImada *et al.* 2019)、注目するイベントの生起確率を過去実験と非温暖化実験の出力間で対比させ、温暖化影響による超過確率密度を求

める。d4PDFを活用したこのような評価が可能となっている理由は、与えた海面水温に対して適切にモデルが応答しているから、また、海面状態に摂動を与えているからであると考えている。

現在、これらの過去を対象とした2種類の実験は、2010年以降についても延長計算され、準リアルタイムに顕著イベントの温暖化影響を評価する体制が採られている。

2.3 将来実験

将来実験では、CMIP5のRCP8.5実験のマルチモデル平均で1850年からの全球平均地上気温が+1.5K、+2K、+4K上昇に相当する気候状態が恒常的に持続するという条件設定で、3つの温暖化レベルを対象とした実験が行われた(第1表、第2図)。これらはタイムスライス実験と呼ばれるもので、将来のとある年代の温暖化レベルを対象に、高解像度で多数の気候シミュレーションが実現できる手法として、これまで採用されてきた。将来実験では、COBE-SST2の長期トレンドを、CMIP5実験に参加した6つの代表的なモデル(第2表)による将来実験の海面水温温暖化パターンに差し替えて海面境界データを構成した。将来の海面水温変化トレンドパターンは、観測された1991年から2010年の20年平均海面水温値と、将来の各温暖化レベルに対応した2030年、2040年、2090年を中心とする20年間の平均値との差で定義した。今回使用した大気モデルと異なるモデルが計算した将来変化トレンドパターンを本実験でそのまま使用しても、望みの温暖化レベルを再現できないので、それぞれの将来変化パターンにスケーリング(Shiogama *et al.* 2010)を施してから使用した。非温暖化実験と同様に、将来の海面

第2表 実験に採用した6つのCMIP5参加モデルの一覧。IPCC第5次評価報告書からの抜粋。

通称	解像度(水平, 鉛直)	実施機関名/国名	参考文献
CCSM4	AGCM: 0.9°×1.25°, 27 OGCM: nominal 1°, 60	National Center for Atmospheric Research, 米国	Gent <i>et al.</i> (2011)
GFDL-CM3	AGCM: ~200km, 48 OGCM: 1°, 50	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 米国	Delworth <i>et al.</i> (2006); Donner <i>et al.</i> (2011)
HadGEM2-AO	AGCM: 1.875°×1.25°, 60 OGCM: 1.875°×1.25°	National Institute of Meteorological Research, 韓国	Collins <i>et al.</i> (2011); Martin <i>et al.</i> (2011)
MIROC5	AGCM: 1.41°×1.41°, 40 OGCM: 1.4°×0.5-1.4°, 50	Univ. Tokyo and JAMTEC, 日本	Watanabe <i>et al.</i> (2011)
MPI-ESM-MR	AGCM: approx. 1.8°, 95 OGCM: approx. 0.4°, 40	Max Planck Institute for Meteorology, ドイツ	Giorgetta <i>et al.</i> (2013)
MRI-CGCM3	AGCM: approx. 110km, 48 OGCM: 1°×0.5°, 50	Meteorological Research Institute, 日本	Yukimoto <i>et al.</i> (2011) Yukimoto <i>et al.</i> (2012)

水温に対応する2つの海水要素を作成して使用した。6つの将来変化パターンと15種類の摂動を掛け合わせて90のアンサンブルメンバを構成したのが+4K実験である。他の2つの将来実験では海面水温摂動の数を9とした54メンバとなっている。過去実験と同様に、それぞれのメンバについて60年間分の積分を行ったが、+1.5K実験の積分期間は、観測の1982年から2010年に相当する29年間である。

第2図に示すように、各メンバでは設定した温暖化レベルに対応する全球平均気温が再現されており、全ての実験で内部変動の位相が揃っているのが分かる。それぞれの温暖化レベルの実験の詳細は、Nosaka *et al.*(2020), Fujita *et al.*(2019), Mizuta *et al.*(2017) で報告されている。

3. 科学的成果

本節では、d4PDFを活用して得られた、気象学や気候学的視点での研究成果について紹介する。

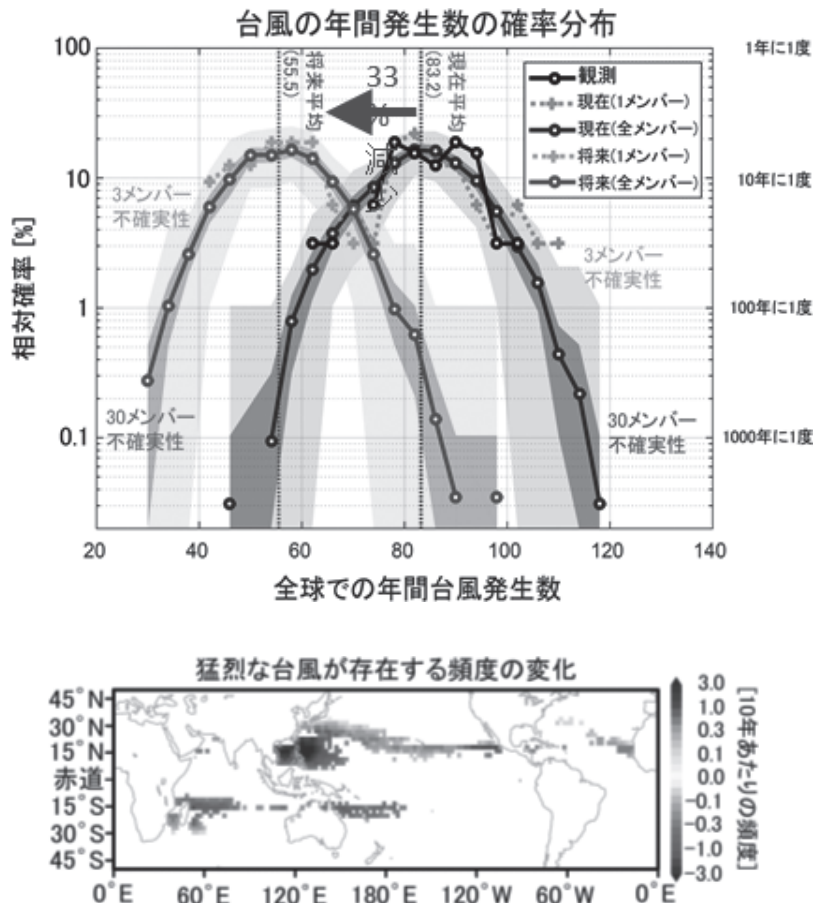
3.1 過去気候の再現とメカニズム解析

過去を対象とする気候シミュレーション結果は、概ね、観測された気候特性を適切に説明しており、この気候予測データベースを用いて高品質の気候研究や影響評価研究が行われてきた。温暖化影響と内部変動を分離して、注目する顕著な大気・気候イベントとの関連性が統計的にロバストに議論できることというd4PDFの大きい利点を生かして、以下に述べる成果がこれまでに得られている。

世界で発生する顕著なイベントはエルニーニョに代表される熱帯の海面水温変動に影響を受けており、d4PDFで使用した大気モデルの過去の気候変動事例の再現性が高いのは、観測された熱帯海面水温への応答が適切に表現され

ているためであると考えている。低緯度域ではエルニーニョの直接的影響を大気を受けることになるが、d4PDFは、エルニーニョと熱帯収束帯の季節変動メカニズム (Xie *et al.* 2018) や台風発生の季節変動 (Ueda *et al.* 2018) などの調査にも有効であった。さらに、太平洋十年規模振動や大西洋数十年振動などの長期の海面水温変動の大気変動への影響について調査した研究 (Kamae *et al.* 2017a) からは、それらが北米での早魃や高温事例の発現に影響するという結論が得られている。

アジア域でのモンスーン活動による強い降水の気候値は観測との対応が良く (Endo *et al.* 2017)、中国大陸での季節ごとに調べた調査では空間相関は0.7を超える (Duan *et al.* 2019)。台風の発生頻度も観測と良く対応しており (第3図; Yoshida *et al.* 2017)、大西



第3図 全球での年間台風発生数の頻度分布 (上) と猛烈な台風が存在する頻度変化 (下). カラーの図は Yoshida *et al.*(2017) を参照されたい。

洋での全ハリケーン発生数の時間変化の観測との相関係数は0.84と高い (Mei *et al.* 2019). 全球大気モデルの解像度が60kmと比較的高いことから、異常気象をもたらす大気の川 (Kamae *et al.* 2017b) やブロッキング (Matsueda and Endo 2017) の再現性も良い。中高緯度での陸面と大気 (Sato and Nakamura 2019) や北極海氷との相互作用 (Hori and Oshima 2018) を調査した研究例もある。

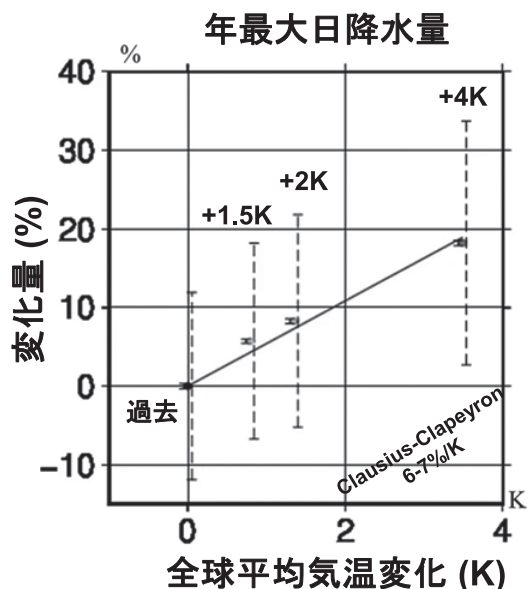
領域モデル実験出力を用いれば、日本域の詳細スケールでの調査が可能である。ただし、モデル解像度が20kmであるため、日平均までの時間スケールの現象の信頼性が高いが、それより短い時間スケールのものには再現性の限界があるので注意が必要である (Takayabu and Hibino 2016)。全球モデルに比べて領域モデルの地形ははるかに現実に近いので、降水 (Nosaka *et al.* 2020)、降雪 (Kawase *et al.* 2016)、極端降水 (小坂田・中北 2018; Hatsuzuka and Sato 2019) などは良く再現される。いずれの場合でも、季節に依存する比較的大きなバイアスがある (Mizuta *et al.* 2017) ため、利用目的に応じたバイアス補正 (Watanabe *et al.* 2020) の採用が推奨される。

非温暖化実験出力を併用して、過去の気候変動を温暖化の影響を受けたものと内部変動を分離して調査をすれば、例えば、2000年代になって陸上での気温と降水量の極値が、温暖化の進行に伴って全球的に増大していることが確認される (Shiogama *et al.* 2016)。日本域に目を向ければ、Imada *et al.* (2017) は、太平洋の十年スケールの海面水温変動と関連して、近年の日本域で暑い夏と寒い冬のコントラストが強まっていることを示した。イベントアトリビューションによる、過去に発生した特定イベントについての温暖化影響の評価も精力的に進められてきている。2018年の猛暑の場合では、モデルは観測と酷似した大気場を再現しておりイベントアトリビューションの結果でも温暖化が無ければ減多に発現することはないイベントであったことが確認できた (Imada *et al.* 2019)。領域モデルによる非温暖化実験も d4PDF には含まれており、全球モデルでは困難であった顕著な降水イベントについての確率の評価が可能となるとのことで期待が大きい。Kawase *et al.* (2019) は、手始めに、九州の東西で温暖化影響が明瞭に異なることを示し、それぞれの地域に降水をもたらす要因が異なるためであると結論した。

3.2 将来予測と温暖化のスケラビリティ

大規模アンサンブルであることから、台風や豪雨な

どの極端事例を含めた多くの大気事象について統計的にロバストな将来変化が検出できる。第3図に示すように、将来の台風発生数が減少するかどうかについては議論の余地が残されているが、猛烈な台風が日本の南方海上で増加するという d4PDF 実験結果 (Yoshida *et al.* 2017) と同様の結論をした既存研究もある (Knutson *et al.* 2015)。猛烈な台風が増加するという将来変化に対応して、日本での90パーセンタイルに相当するような低頻度で発生する日降水は増加する (Kitoh and Endo 2019) と考えられている。また、中緯度での台風の移動速度が減じることで積算降水量が増加し、雨による災害リスクが将来高まることから、データ解析 (Yamaguchi *et al.* 2020) や今回使用した領域モデルよりも高機能なモデルによる実験 (Kanada *et al.* 2020) で確認されている。将来予測の不確実性をもたらす要因には様々あるが、採用した6つのCMIP5参加モデルで代表させた気候モデルの相違に起因する不確実性により、調査対象とした大気事象についての多様な将来変化が表現されていることが確認されている (Matsueda and Endo 2017; Kamae *et al.* 2019; Watanabe *et al.* 2019)。年最大日降水量の将来変化には、将来変化と内部変動振動の2種類の不確実性を与えた将来海面水温による影響が地理的に分離されて現われる (Endo *et al.* 2017) が、その要因の1つは、低緯度で



第4図 日本域で平均した年最大日降水量変化 (%) と全球平均気温変化 (K) との関係。

の台風活動が海面水温の将来変化の違いに敏感である(井手ほか 2018) ことと考えられる。

日本域の気温の将来変化は、与えた海面水温と同様に緯度が高くなるほどに昇温傾向が強まり、降水量については日本海側と太平洋側で特徴的な将来変化を示すことが認められる(Nosaka *et al.* 2020)。全球平均気温の将来変化量に比例して日本の平均気温は上昇し、顕著な日降水量も増大する(第4図)。気温増加の割合は全球平均よりも大きい(Nosaka *et al.* 2020)。地球温暖化により大気中に含まれる水蒸気が増加しているため、年最大日降水量は、クラウドジウス-クラベイロンの式に概ね従って、理論値の7%/Kに近い増加率で降水量が変化することも確認されている(Fujita *et al.* 2019; Nosaka *et al.* 2020)。将来の梅雨の変化に焦点を当てると、強い降水が増加することや、これまで主に西日本で発生していた強い降水イベントは、将来は、東日本でも見られるようになると思われる(Osakada and Nakakita 2018; 中北・小坂田 2018)。また、d4PDFの大量アンサンブル情報を用いた、平成30年7月豪雨時に日本域へ流入していた水蒸気流入量の調査からは、現在気候で最大レベルの水蒸気が流入しており、将来では同等かそれ以上の水蒸気が流入する頻度が増加することが示された(中北・小坂田 2018)。台風と強い降水との関係を調べた報告(Hatsuzuka *et al.* 2020)によれば、風向きに面した地形をもつ地域では強い降水が発現しやすくなる。また、冬季の気温上昇は降雪の機会を減少させるが、温暖化しても氷点下以下の気温になる日本中部の山岳地域や北海道では、豪雪となる機会が増える(Kawase *et al.* 2016; Kawase *et al.* 2020) という興味深い結果も得られている。

3.3 研究の広がり

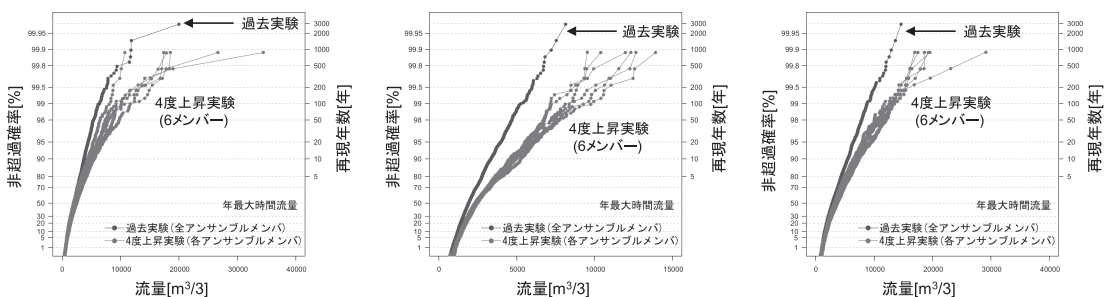
膨大なモデル出力データを解析するために情報工学

の手法を採用することは有効であろう。梅雨や豪雪などの顕著現象が発生している時の総観場との対応を調べるために自己組織化マップを採用した研究が行われている(Ohba and Sugimoto 2019, 2020; Ohba and Kawase 2020)。ニューラルネットワークは20kmモデル計算出力から前線を検出するのに有効で(Matsuoka *et al.* 2019)、検出データをデータベース化すればそれを活用する後継の研究展開も期待できる。d4PDFから利用者の関心の高い気象イベントが発生している事例を予めデータベース化したSEALと呼ばれるデータサービスシステム(Nakagawa *et al.* 2020)は、研究者の負担を大幅に削減することに貢献している。

4. 影響評価研究での活用

気候変動は、極端な風水害に大きな影響を与えることが予想されており、特に豪雨や台風は、東アジアおよび北西太平洋における主要な自然災害であるため、d4PDFを用いた様々な研究展開が図られている(Mori and Takemi 2016; Mori *et al.* 2021a)。d4PDFは、これまで行われてきた20~30年程度のタイムスライス実験と比べて、気候変動影響評価研究における極端現象評価の転換点となった。一般的な防災・減災対策において、数年から数百年に一度発生する豪雨、洪水、高潮などの極端ハザードの評価では、1年間に1/Nの確率で発生するN年再現値が重要となる。洪水では200年、高波では50年が施設設計に用いられることが多いが、過去の限られた観測期間のデータからの推定誤差は大きく、さらに気候変動を考慮した将来変化予測でのこのような極端な値の評価は困難であった。

このような極端な豪雨や台風等の極端現象の影響評価を行うためには、強度や発生確率を定量的に把握するための大規模アンサンブルが必要不可欠である。ここでは、d4PDFを用いた代表的な風水害についての



第5図 年最大時間流量の確率プロット(右:荒川, 中:庄内川, 左:淀川)(立川ほか 2017)。

研究成果を対象にレビューする。

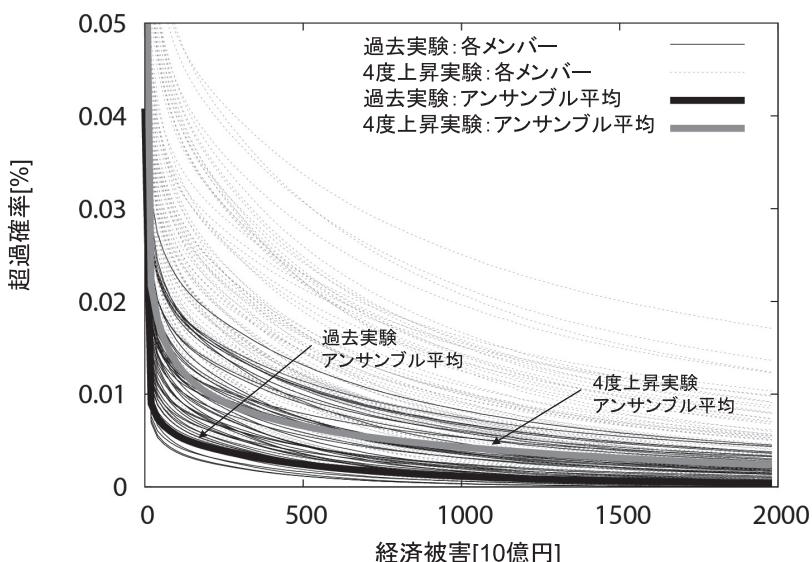
4.1 大雨や河川の氾濫によるリスクの評価

立川ほか (2017) は、NHRCM 20km の結果を用いて、日本の3つの主要流域を対象に極端な河川流量における将来変化を予測した。第5図は、荒川、庄内川および淀川の代表河川流量の非超過確率の将来変化を示している。+4K実験の結果、過去実験よりも大きくなり、将来変化の増加率は、非超過確率が大きくなるほど大きくなることがわかる。特に+4K実験による最大クラスである再現年数900年の流量は大きくばらつき、極めて大きな流量発生の可能性が示されている。日本の主な河川流域における+4K実験の再現年数200年の年最大24時間降水量は、1.3~1.4倍であるのに対し、同じ確率の年最大時間流量は1.5~1.7倍の変化が予想されている。主要河川の時間流量については、先の降水量についてのクラウドスークラペイロンの関係7%/Kよりも増幅率が大きいという特徴が得られている。同様の検討は、日本や海外の様々な流域で展開されている。例えば、一級水系すべて(小林ほか 2020)、長良川流域(原田ほか 2018)、北海道(Kimura *et al.* 2018; 舂屋ほか 2018)、インドシナ半島(Hanittinan *et al.* 2018)による研究成果が得られている。また、これらアプローチの発展形として、日本の一級水系の氾濫の同時発生確率を、d4PDFを用いて推定し、2019年台風19号による同時発生がどの程度の確率であったか、+4K実験で同時発生確率がどう

変化するかについて、現実に発生した事例を対象に、d4PDFを用いて分析した研究も行われている(田中ほか 2020)。

河川流量の評価ではより詳細な降雨情報が必要とされる。このため、アンサンブル数は少なくなるものの、複雑な地形を伴う降水量の時間変化を検討するためにNHRCM 20kmを更に局所的にダウンスケールしたNHRCM 5kmを用いた河川流域への影響評価も進められている。星野・山田(2018)は、北海道の十勝川流域における年最大降水量の時空間分布を解析し、将来の気候では年最大降水量が空間的に集中することを示している。さらに星野ほか(2018)や田中ほか(2019)により、日本全国の一級河川の各流域の平均的な年最大降水量が将来的に増加し、その増加率は地理的な位置に依存することを明らかにしている。

極端な河川氾濫の予測は、適応策や経済的なリスク分析に直接適用されている。時岡ほか(2018)は、北海道地方の事例として、治水計画を考案するための様々な対策を検討し、治水対策の違いによる被害軽減効果を経済的に評価している。また、Tanaka *et al.*(2018)は、日本の淀川流域を対象に、確率論的降雨モデリングを用いて洪水リスクを検討している。第6図は、d4PDF-NHRCM 20kmに基づく淀川の洪水による経済被害の超過確率を示している。洪水リスクによる経済的被害は、+4K実験の気候条件で明らかに高くなり、その増加原因は、主に河川流域での豪雨の



第6図 淀川氾濫の経済的被害の超過確率 (Tanaka *et al.* 2018)。

頻度が増加したことに起因することを示している。また、Tanaka *et al.*(2020)では、名古屋市街地を対象としてd4PDFの過去実験を用いた氾濫計算を行い、内水氾濫と外水氾濫に分けて、リスクカーブの違いを分析している。さらにメコン川流域(Meema *et al.* 2021)では、水力発電量への影響評価が行われている。これら経済評価まで踏み込んだ研究では、d4PDFを用いることにより、パラメトリックな誤差分布を仮定することなく、プロセススペースの精緻なモデルによる洪水リスク曲線の推定を可能

としている。

河川流域の降雨を対象とした研究では、d4PDFの降水量に対するバイアス補正手法についても多く議論されている。渡部ほか(2018)は、d4PDF-NHRCM 20kmの1時間降水量に対する2つのバイアス補正法を適用し、d4PDFの降水量の過大バイアスが低減できることを示している。同様のバイアス補正方法はいくつも提案されている。バイアス補正は、過去の事例と整合しつつ定量的な評価が行われる影響評価研究では重要であり、d4PDFの様々な変数について応用が進みつつある。

さらに、解析結果に対して極端イベント数が大きく関与する極値統計解析においてもd4PDFを用いた研究が進められている。北野ほか(2017)は、d4PDFの降水量データを用いて極値理論の検証を行い、サンプル数が少ないために観測データでは検証できない極値の収束に大規模なアンサンブルを用いることの利点を示している。

4.2 沿岸リスクの評価

d4PDFは、沿岸部の風水害リスク評価にも広く用いられている。伊勢湾台風など歴史的に高潮被害が多い我が国では、高潮の将来的な変化を予測することは、沿岸域リスク推定で重要である。高潮は、台風の強さ、移動速度、特定の湾への進路の組み合わせによって強さ(水位)が大きく変化するため、ある湾に注目した場合の有意な水位上昇が発生する発生確率は極めて低頻度と予想されている。このため、高潮の確率評価が難しく、あらかじめ決められた条件(例えば伊勢湾台風等の過去のイベント)に基づく想定台風による評価か、エミュレーターの一種である確率台風モデルを用いた評価が行われてきた。d4PDFは、計算される台風のバイアスがあるものの、これまでの高潮評価研究に対して新しいアプローチを促している。

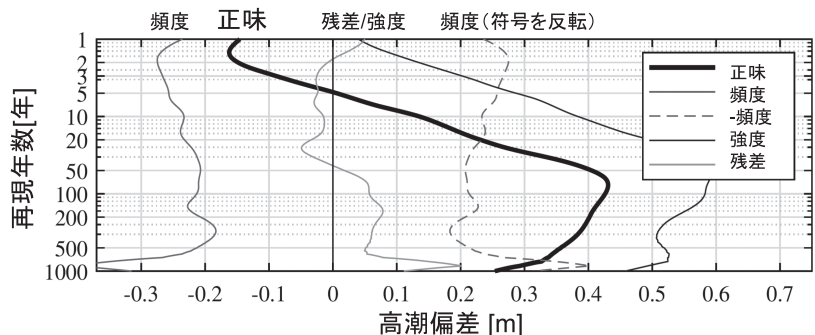
Mori *et al.*(2019)は、d4PDFの風速と気圧を直接用いて東京湾と大阪湾を対象とした地域高潮の将来変化を検討し、再現年数100年の場合、0.3~0.45m増加することを予測している。第7図はその一例であり、頻度の将来変化が再現年度毎の高潮を0.2m程度減少させる一方、

強度の将来変化は再現年度が長くなるに従い高潮を増加させ、正味が短い再現年数では将来の高潮が減少、長い再現年数では増加する特徴的な将来変化を与えることを示している。避難計画に用いられる再現年数数百年の最大クラス高潮(L2高潮)についても検討が進められつつあり、d4PDFはその評価や検証に活用されている(例えばMori *et al.* 2021b)。

冬の温帯低気圧は、日本海から北海道沿岸を中心に高潮や高波を発生させ、しばしば被害を与えている。d4PDFを用いた冬の温帯低気圧の将来変化についても検討が行われている(高ほか 2018; Ninomiya *et al.* 2021)。高ほか(2019)は、爆弾低気圧に起因する根室の高潮の将来変化について、平均値では有意な将来変化が見られないが、上限値で7%程度の増加が見られることを示している。

気候変動に関する沿岸災害リスク評価では、高潮と並行して短周期の水位変化である波浪の将来変化についても検討が必要である(Morim *et al.* 2019)。平均波浪場は砂浜や環境場に対して重要であり、極端波浪は越波などを伴う浸水リスク評価に重要となる。特に我が国の沿岸部の極端波浪の将来変化は海岸施設の設計に密接に関わるため、その評価が注目されている。その中で、極端な海洋波は、沿岸・海洋・環境工学にとって重要である。Shimura *et al.*(2017)では、タイムスライス実験をもとに、北太平洋西部地域では、台風の将来変化の影響を受けて再現年数10年の高波の増加と減少の両方が報告されている。波浪を評価するプロセスモデルは計算負荷が高いため、d4PDF全実験について計算することは非常に難しい。このため、高波にかかわる台風の評価から研究が進められている。

d4PDFを用いることで、上記のような沿岸災害に関連する極端ハザードの確率評価ができるようになり



第7図 大阪湾の高潮の将来変化 (Mori *et al.* 2019)。

つつある。また、d4PDFを用いることで、これまで広く使われてきた確率台風モデル等のエミュレーターの改善も行われている（梅田ほか 2019）。

4.3 様々なリスク評価

d4PDFは、上記の河川や沿岸の風水害以外にも、様々な分野で活用が進んでいる。気候変動が水資源や農業に与える影響は、正負の影響が考えられている。Iizumi *et al.* (2018a, b) は、d4PDFの現在と非温暖化実験をもとに、20世紀初頭に観測されたものと比較して、これまでの世界規模での主要作物の経済的生産損失を推定している。作物の収穫量シミュレーションでは、低緯度地域では大幅に減少し、高緯度地域では大幅に増加することが示されている。水資源での活用も進んでおり、適応策に関連して将来の河川流量変化に伴うダム利水操作への影響等の応用例がある（野原ほか 2018）。

暑熱環境としては、Kim *et al.* (2018) は、日本の横

浜みなとみらい21地区を対象に、気候変動が空調用冷暖房システムに与える影響を調査している。その結果、+4K実験結果では、電力消費量が140%以上に増加することが示されている。

d4PDFのような大規模アンサンブル気候シミュレーションの利用は、影響予測・評価にとって大きな研究テーマとなっている。紙面の関係上、この節ではごく一部の成果をあげている。d4PDFのように、アンサンブルの数が非常に多い場合、データストレージや計算資源に限られるため、プロセスモデルの利用が困難になりつつある。先に述べたようなSEALのような新しいデータサービスシステムは、このようなユーザの問題を解決する1つのアプローチであり、d4PDF関連の重要なプロダクトの1つと言える。

5. 研究成果の社会実装

上記の気候変動に伴う風水害リスクの予測結果は、

第3表 d4PDFの成果を社会実装した実績一覧。

項番	内容
1	北海道開発局、検討会資料「気候変動に伴う北海道沿岸域の海象変化の検討」、気候変動に伴う北海道沿岸域の海象変化検討会、2020年10月
2	日本学術会議 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会、提言「低平地等の水災害激甚化に対応した適応策推進上の重要課題」、2020年9月 http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t290-1.pdf
3	国土交通省、気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会、答申「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」、2020年7月 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou_suigai/pdf/03_honbun.pdf
4	農林水産省・国土交通省、気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会、提言「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方」、2020年7月 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/teigen.pdf
5	国土交通省、気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会、提言参考資料「気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について」、2020年6月 https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000659.html
6	農林水産省・国土交通省、高潮浸水想定区域図に関する検討会、手引き「高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 2.00」、2020年6月 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/saidai_takashio/pdf/takashio_tebiki_ver2.pdf
7	国土交通省北海道開発局、北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会、中間とりまとめ「気候変動を踏まえた適応策（水害リスクの低減）について」、2020年5月 https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001weys-att/splaat000001wf3d.pdf
8	国土交通省、気候変動を踏まえた砂防技術検討会、検討会資料「気候変動による災害環境への影響予測」、2020年1月 https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo.html
9	国土交通省、気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会、提言「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」、2019年10月 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/r0304/01_teigen.pdf
10	熊本県環境センター、常設展示「地球温暖化と気象変動シミュレーション」、2019年3月 https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000016.000023638.html
11	大阪府河川構造物等審議会、審議資料「気候変動を踏まえた設計外力設定の考え方」、2019年2月 https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/18198/00333967/r1-3_shiryou3_gairyokusetteikangaekata.pdf
12	国土交通省北海道開発局、北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会、最終とりまとめ資料（詳細）「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」、2018年3月 https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html

風水害に関わる社会基盤インフラ整備の政策に活用され、大きな影響を与えている。

国土交通省および農林水産省等の治水、都市浸水、砂防そして海岸保全に関する委員会の答申、提言および関連した基礎資料に活用されている(第3表の第1, 3~6, 8, 9項)。当初は、河川の治水計画に関わる降雨の将来変化予測情報としての利用から始まり、その後、砂防や沿岸域の保全についての利用に拡大している。中央省庁だけでなく、地方自治体での利用も進みつつある(第3表の第7, 11, 12項)。例えば第3表第11項に示す大阪府河川構造物等審議会では、現在導入の検討が進んでいる大阪3大水門の新規設計条件策定に実際に活用されつつあり、今後の社会インフラ整備への利用が期待される。

これらに加えて、損害保険会社等の民間企業の気候リスク評価にも活用、さらに博物館での展示資料など様々な分野で活用されている(第3表の第10項)。

6. データベース開発の舞台裏

2014年に発行された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書は、地球温暖化に人間活動が寄与していることは明確であると報告した。その後、国内外で温暖化にいかに対応し緩和策を講じていくかについての政治主導での議論が進められることになった。そのような中、文部科学省の支援の下でのべ15年間推進されていた地球温暖化研究プロジェクトに白羽の矢が立てられた。すなわち、「研究成果を社会に還元せよ」との要請である。当時の温暖化プログラムであった「気候変動リスク情報創生プログラム」が最終年度を迎え、次のプログラムへの継続が文部科学省で検討され始めていた状況下では、なおのこと、研究者は投げられた石を受けとめざるを得なかった。2014年10月、福岡で開催されていた日本気象学会秋季大会会場でのセッションの合間に、東京大学の木本昌秀教授(現、国立環境研究所理事長)が「気候予測データベースを作ろう」と温暖化プログラム関係者に呼び掛けた。これが出発点であった。翌年の1月に、東京大学、気象研究所、国立環境研究所、京都大学からの有志が集まり、第1回の会合を行い、開発するデータベースの仕様について検討を開始した。同時期、海洋研究開発機構が運用する地球シミュレータの更新が並行して進められており、高性能となる新しい計算機の有効活用を図るために、「特別推進課題」の募集が行われていた。これに気候予測データベース開発のテーマ

で応募し、首尾よく採択された。2015年末までに都合6回の会合を持った。2回目となる2月の会合では、木本教授、京都大学防災研究所の中北英一教授、および気象研究所環境・応用気象研究部の高敷 出室長(当時)を共同代表として、6機関からの参加者による総勢31名による実施体制を組んだ。その後の動きは速く、3月までの準備期間を経て、本番実験を開始し、8月までには、約3.5万年分の計算を完了させた。同年12月には、本データベースのお披露目をする公開シンポジウムを開催し、研究や適応策検討にデータを活用するよう呼び掛けた。その後も日本気象学会2017年度秋季大会の専門分科会やユーザ研究会合(2018年10月)を企画して、気候予測データベースの宣伝と利活用の推進に努めた。文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT; 2015~2019年度)」では、海洋研究開発機構のメンバを中心に+2K実験を加えたd4PDFの拡充が図られた。この頃になると、データの社会的関心が高まり、ユーザの裾野も広がってきた。このような状況の中、2018年8月には、商用利用も可能とするデータポリシーへの変更も行われた。

最初に行った実験の話に戻ると、短期間で多種・大量の実験を行って、実験出力データの総量は5PB(ペタバイト)以上となった。データ公開にあたってはGRIB2にフォーマット変換して1.2PBまで圧縮し、データ統合・解析システム(DIAS)の協力を得て公開した。ただ、データを地球シミュレータからDIASまで転送する作業に半年近くを要したため、公開シンポジウムから半年遅れの2016年6月ようやくデータ公開に至った。公開後は、自前のウェブサイトやメーリングリストを活用して利用者からの問い合わせやトラブル対応を研究者で手分けして行い、本データベースの普及に努めた。

上記したように、d4PDFは多くの学術的成果を挙げることに貢献した。データベース作成から2年間に、データベース制作者による15編の主要論文が執筆・公開され、2020年にd4PDFのレビュー(Ishii and Mori 2020)を行った時点では、70編超の関連論文が出版されていた。

7. おわりに

気候予測データベースd4PDFが世の中に広まるにつれて、研究だけではなく幅広い分野の関係者との交流が進んだ。結果として、d4PDFは、科学的成果が効果的に社会実装された好例となったと同時に、温暖化

に関わる国内の学際的研究コミュニティの形成にも一役買ったと考えている。一方で、彼らからの気候予測データに対する要請は厳しく、現在の気象学や気候学の知見では、それらの全てに対応することは困難であるが、逆にこれを好機と捉えれば、気象や気候、そして気象データを活用した影響評価に関わる学問分野の発展的な将来展開の実現が可能であろうとも感じている。

d4PDFは大気中心の予測データであるが、海に囲まれた日本の気候を適切に扱うためには、海洋を含めて予測システムを構成することが肝要である。多くのCMIPモデルは日本周辺の複雑な海洋環境を的確に再現できていないので、日本独自のアプローチも必要ではないかと考える。併せて、大気と同様に需要の高い海洋の予測プロダクト開発も求められる。実際、SI-CATおよびその後継課題で海洋予測プロダクト開発が進められてきており（例えばNishikawa *et al.* 2021）、今後は、大気と海洋に関わる研究グループが連携・協力して研究を進めていくことが大切である。

第3表にまとめたアウトリーチを見ていただくとわかるように、d4PDFのプロダクトは、環境展示等の一般的な啓発活動に加えて、国土交通省、農林水産省、地方自治体等の実務機関において非常に多くの活用が行われているという特徴がある。2018年の国土交通省北海道開発局および2019年の国土交通省本省における治水計画に係る技術検討会において、d4PDF作成メンバーが委員として参画して詳細な説明を行うことにより、d4PDFの存在やその価値が認識され、その後の各実務省庁での様々な活用の道が開けたと思われる。また、実務省庁での検討では、d4PDF関係者が詳細にd4PDF作成の背景から特徴等について直接説明する機会が設けられ、ユーザとのコミュニケーションが積

極的な活用につながったと思われる。河川や海岸等整備の基礎資料、指針や技術基準においては、過去のデータとの定量的な整合性が厳しく追及される。このため、d4PDFの降雨や台風強度などの詳細なバイアス特性なども検討され、研究への大きなフィードバックもあった。また、大阪市街地を高潮から守る高潮ゲート更新の際には、供用後半の2100年前後の高潮等の設計条件推定にもd4PDFの情報が積極的に活用され、おそらく日本で初めての気候変動に適応した防災施設設計であり、数年後の完成が待たれる。

ともかくにも、社会的なニーズが非常に高まりつつある中で、研究課題は山積している。これまでの経緯から地球温暖化問題は遙か未来の問題と捉えられがちではあるが、現状を客観的に見ればそうではないことは明らかで、現在の気候状態を温暖化の時間スケールで理解しつつ、我々の最大限の知見を生かした気象、海洋、気候に関わる確信度の高い科学的成果および影響評価研究成果を創出して、社会と共有することが求められる。

日本気象学会員の皆様をはじめとする多くの研究者とデータや研究成果を共有しつつ、気象研究所の今田由紀子主任研究官によって制作された、第8図に示す新しいd4PDFのロゴを掲げて、今後、現在の課題解決に向けて研究を進めていければと思う。

謝 辞

本データベースの開発は文部科学省の一連の温暖化関連プログラム、「気候変動リスク情報創生プログラム」、「気候変動適応技術社会実装プログラム」、および「統合的気候モデル高度化研究プログラム(統合プロ; JPMXD0717935561, JPMXD0717935498)」の中で進められてきました。それぞれにおいてプログラムディレクターを務められた任 明正様、木村富士男様、三上正男様、統合プロのプログラムオフィサーである原澤英夫様、文部科学省環境エネルギー課の課長補佐であられた石橋和昌様と葛谷暢重様および関係者の皆様には、d4PDFの開発にあたりご鞭撻とご支援を賜りました。気候予測データベースを構成する気候モデル計算は、海洋研究開発機構の地球シミュレータの特別推進課題のもとで実施されました。高橋桂子地球情報基盤センター長(当時)と関係者の皆様には、本データベースの意義を深くご理解いただき、ひとかたならぬご支援を頂戴しました。また、データをDIASで公開するにあたっては、東京大学工学系研究科の小池俊



第8図 d4PDFの新しいロゴ。原図はカラーである。

雄教授（当時）と東京大学生産技術研究所の根本利弘准教授のご協力を得ました。さらに、データポリシー作成・改訂にあたり、気象庁気象研究所企画室の笹川悠調査官（当時）の協力を得ました。上記の皆様、大変お世話になりました。最後に、岸保・立平賞の受賞にあたり日本気象学会理事長をはじめとする関係者の皆様ならびに推薦者の皆様のご尽力に厚く御礼申し上げます。

本稿で述べた一連の成果は、初期の d4PDF 開発に関わった31名の参加者が、いくつもの課題を乗り越えて築き上げたものをベースとしています。本稿の末尾になりますが、2015年当時の所属のままの31名の参加者リストを掲載します。

気象庁気象研究所所属

高藪 出, 石井正好, 水田 亮, 遠藤洋和,
今田由紀子, 吉田康平, 佐々木秀孝, 村田昭彦,
青柳暁典, 川瀬宏明, 野坂真也

東京大学大気海洋研究所所属

木本昌秀, 渡部雅浩, 森 正人, 高橋千陽,
荒井美紀

京都大学防災研究所所属

中北英一, 森 信人, 田中賢治, 竹見哲也,
立川康人, 岡田靖子, 志村智也,

Khujanazarov Temur

国立環境研究所所属

塩竈秀夫

筑波大学所属

鬼頭昭雄, 荒川 理, 釜江陽一, 日比野研志,
長友利晴

海洋研究開発機構所属

池田美紀子

略語一覧

CMIP5: Climate Model Intercomparison Project Phase 5
d4PDF: database for Policy Decision making for Future climate changes

DIAS: Data Integration and Analysis System

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

RCP8.5: Representative Concentration Pathway with a radiative forcing level of 8.5 W/m^2

参 考 文 献

Bourke, R. H. and R. P. Garrett, 1987: Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **13**, 259-280.

Collins, W. *et al.*, 2011: Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 997-1062.

Delworth, T. L. *et al.*, 2006: GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *J. Climate*, **19**, 643-674.

Donner, L. J. *et al.*, 2011: The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *J. Climate*, **24**, 3484-3519.

Duan, W., N. Hanasaki, H. Shiogama, Y. Chen, S. Zou, D. Nover, B. Zhou and Y. Wang, 2019: Evaluation and future projection of Chinese precipitation extremes using large ensemble high-resolution climate simulations. *J. Climate*, **32**, 2169-2183.

Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta and M. Ishii, 2017: Future changes in precipitation extremes in East Asia and their uncertainty based on large ensemble simulations with a high-resolution AGCM. *SOLA*, **13**, 7-12.

Fujita, M. *et al.*, 2019: Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 435-442.

Gent, P. R. *et al.*, 2011: The community climate system model version 4. *J. Climate*, **24**, 4973-4991.

Giorgetta, M. A. *et al.*, 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **5**, 572-597.

Hanittinan, P., Y. Tachikawa, Y. Ichikawa and K. Yorozu, 2018: Future river discharge projections at the Indochinese Peninsula using large ensemble climate dataset. *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. B1 (Hydraulic Engineering)*, **74** (4), I_193-I_198.

原田守啓, 丸谷靖幸, 児島利治, 松岡大祐, 中川友進, 川原慎太郎, 荒木文明, 2018: アンサンブル気候変動予測データベースを用いた洪水頻度解析による長良川流域の温暖化影響評価. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, **74** (4), I_181-I_186.

Hatsuzuka, D. and T. Sato, 2019: Future changes in monthly extreme precipitation in Japan using large ensemble regional climate simulations. *J. Hydrometeorol.*, **20**, 563-574.

Hatsuzuka, D., T. Sato, K. Yoshida, M. Ishii and R. Mizuta, 2020: Regional projection of tropical-cyclone-induced extreme precipitation around Japan based on large ensemble simulations. *SOLA*, **16**, 23-29.

Hibino, K. and I. Takayabu, 2020: Effective sample size for precipitation estimation in atmospheric general circula-

- tion model ensemble experiments: dependence on temporal and spatial averaging scales. *Clim. Change*, **163**, 297-315.
- Hirahara, S., M. Ishii and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57-75.
- Hori, M. E. and K. Oshima, 2018: Robustness of the Warm Arctic/Cold Eurasian signature within a large ensemble model experiment. *SOLA*, **14**, 69-73.
- 星野 剛, 山田朋人, 2018: 大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握〜十勝川流域を対象として〜. 土木学会論文集 G (環境), **74** (5), I_25-I_31.
- 星野 剛, 山田朋人, 稲津 将, 佐藤友徳, 川瀬宏明, 杉本志織, 2018: 大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74** (5), I_13-I_18.
- 井手喜彦, 中尾直幸, 児玉充由, 橋本典明, 山城 賢, 2018: 海面水温の将来変化パターンによる近未来の台風特性の相違に関する研究. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), **74** (2), I_587-I_592.
- Iizumi, T., H. Shiogama, Y. Imada, N. Hanasaki, H. Takikawa and M. Nishimori, 2018a: Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels. *Int. J. Climatol.*, **38**, 5405-5417.
- Iizumi, T., Y. Masutomi, T. Takimoto, T. Hirota, A. Yatagai, K. Tatsumi, K. Kobayashi and T. Hasegawa, 2018b: Emerging research topics in agricultural meteorology and assessment of climate change adaptation. *J. Agric. Meteorol.*, **74**, 54-59.
- Imada, Y., S. Maeda, M. Watanabe, H. Shiogama, R. Mizuta, M. Ishii and M. Kimoto, 2017: Recent enhanced seasonal temperature contrast in Japan from large ensemble high-resolution climate simulations. *MDPI Atmosphere*, **8**, 57, doi:10.3390/atmos8030057.
- Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama 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.
- Ishii M. and N. Mori, 2020: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Prog. Earth Planet Sci.*, **7**, 58, doi:10.1186/s40645-020-00367-7.
- Kamae, Y. *et al.*, 2017a: Forced response and internal variability of summer climate over western North America. *Clim. Dyn.*, **49**, 403-417.
- Kamae, Y., W. Mei, S.-P. Xie, M. Naoi and H. Ueda, 2017b: Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. *J. Climate*, **30**, 5605-5619.
- Kamae, Y., W. Mei and S.-P. Xie, 2019: Ocean warming pattern effects on future changes in East Asian atmospheric rivers. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 054019, doi:10.1088/1748-9326/ab128a.
- Kanada, S., K. Tsuboki and I. Takayabu, 2020: Future changes of tropical cyclones in the midlatitudes in 4-km-mesh downscaling experiments from large-ensemble simulations. *SOLA*, **16**, 57-63.
- 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. *Clim. Change*, **139**, 265-278.
- 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.*, **124**, 6093-6103.
- Kawase, H. *et al.*, 2020: 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**, 1-17.
- Kim, K.-M., S. Ito, S. Yoshida and S. Sadohara, 2018: Analysis of influence of climate change on demand and system of heating and cooling predicted by d4PDF: A case of Minatomirai 21 DHC Area in Yokohama. *Int. J. Environ. Eng. (Transactions of AIJ)*, **84**, 83-91.
- Kimura, N., H. Kiri and I. Kitagawa, 2018: The impact of multiple typhoons on severe floods in the mid-latitude region (Hokkaido). *MDPI Water*, **10**, 843, doi:10.3390/w10070843.
- 北野利一, 高橋倫也, 田中茂信, 2017: 気候モデルから得られる多数のアンサンブルデータを用いた確率降水量の推定法. 土木学会論文集 B1 (水工学), **73** (4), I_1-I_6.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2019: Future changes in precipitation extremes associated with tropical cyclones projected by large-ensemble simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 141-152.
- Knutson, T. R., J. J. Sirutis, M. Zhao, R. E. Tuleya, M. Bender, G. A. Vecchi, G. Villarini and D. Chavas, 2015: Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *J. Climate*, **28**, 7203-7224.
- 小林敬汰, 田中智大, 篠原瑞生, 立川康人, 2020: d4PDFを用いた日本全国一級水系における極値流量の将来変化

- 分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76 (1), 140-152.
- Martin, G. *et al.*, 2011: The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.*, 4, 723-757.
- 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉 学, 戸村 翔, 山本太郎, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴, 星野 剛, 山田朋人, 2018: 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく不確実性を考慮した将来気候下での確率雨量. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74 (5), I_121-I_126.
- Matsueda, M. and H. Endo, 2017: The robustness of future changes in Northern Hemisphere blocking: A large ensemble projection with multiple sea surface temperature patterns. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5158-5166.
- Matsuoka, D., S. Sugimoto, Y. Nakagawa, S. Kawahara, F. Araki, Y. Onoue, M. Iiyama and K. Koyamada, 2019: Automatic detection of stationary fronts around Japan using a deep convolutional neural network. *SOLA*, 15, 154-159.
- Meema, T., Y. Tachikawa, Y. Ichikawa and K. Yorozu, 2021: Uncertainty assessment of water resources and long-term hydropower generation using a large ensemble of future climate projections for the Nam Ngum River in the Mekong Basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 36, 100856, doi:10.1016/j.ejrh.2021.100856.
- Mei, W., Y. Kamae, S.-P. Xie and K. Yoshida, 2019: Variability and predictability of North Atlantic hurricane frequency in a large ensemble of high-resolution atmospheric simulations. *J. Climate*, 32, 3153-3167.
- Mizuta, R. *et al.*, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 233-258.
- Mizuta, R. *et al.*, 2017: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383-1398.
- Mori, N. and T. Takemi, 2016: Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean. *Wea. Clim. Extrem.*, 11, 53-69.
- Mori, N., T. Shimura, K. Yoshida, R. Mizuta, Y. Okada, M. Fujita, T. Khujanazarov and E. Nakakita, 2019: Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model. *Coast. Eng. J.*, 61, 295-307.
- Mori, N., T. Takemi, Y. Tachikawa, H. Tatano, T. Shimura, T. Tanaka, T. Fujimi, Y. Osakada, A. Webb and E. Nakakita, 2021a: Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia (review). *Wea. Clim. Extrem.*, 32, 100309, doi:10.1016/j.wace.2021.100309.
- Mori, N., N. Ariyoshi, T. Shimura, T. Miyashita and J. Ninomiya, 2021b: Future projection of maximum potential storm surge height at three major bays in Japan using the maximum potential intensity of a tropical cyclone. *Clim. Change*, 164, 25, doi:10.1007/s10584-021-02980-x.
- Morim, J. *et al.*, 2019: Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nat. Clim. Change*, 9, 711-718.
- Murata, A., H. Sasaki, M. Hanafusa and K. Kurihara, 2013: Estimation of urban heat island intensity using biases in surface air temperature simulated by a nonhydrostatic regional climate model. *Theor. Appl. Climatol.*, 112, 351-361.
- Nakagawa, Y. *et al.*, 2020: Development of a system for efficient content-based retrieval to analyze large volumes of climate data. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, 9, doi:10.1186/s40645-019-0315-9.
- 中北英一, 小坂田ゆかり, 2018: 気候変動に伴う梅雨期集中豪雨と大気場の将来変化に関するマルチスケール解析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74 (4), I_139-I_144.
- Ninomiya, J., Y. Taka and N. Mori, 2021: Projecting changes in explosive cyclones and high waves around Japan using a mega-ensemble projection. *Ocean Eng.*, 237, 109634, doi:10.1016/j.oceaneng.2021.109634.
- Nishikawa, S. *et al.*, 2021: Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8, 7, doi:10.1186/s40645-020-00399-z.
- 野原大督, 鈴木俊亮, 佐藤嘉展, 2018: 将来の河川流量変化に伴うダム利水操作への影響の評価と適応策に関する基礎的検討. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74 (5), I_85-I_90.
- Nosaka, M., M. Ishii, H. Shioyama, R. Mizuta, A. Murata, H. Kawase and H. Sasaki, 2020: Scalability of future climate changes across Japan examined with large-ensemble simulations at + 1.5 K, +2 K, and + 4 K global warming levels. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, 27, doi:10.1186/s40645-020-00341-3.
- Ohba, M. and H. Kawase, 2020: Rain-on-snow events in Japan as projected by a large ensemble of regional climate simulations. *Clim. Dyn.*, 55, 2785-2800.
- Ohba, M. and S. Sugimoto, 2019: Differences in climate change impacts between weather patterns: possible effects on spatial heterogeneous changes in future

- extreme rainfall. *Clim. Dyn.*, **52**, 4177-4191.
- Ohba, M. and S. Sugimoto, 2020: Impacts of climate change on heavy wet snowfall in Japan. *Clim. Dyn.*, **54**, 3151-3164.
- Osakada, Y. and E. Nakakita, 2018: Future change of occurrence frequency of Baiu heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis. *SOLA*, **14**, 79-85.
- 小坂田ゆかり, 中北英一, 2018: 領域気候モデルによる梅雨豪雨継続時間と積算雨量の将来変化予測と過去の事例を用いた検証. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74** (5), I_19-I_24.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi and K. Kurihara, 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. *SOLA*, **7**, 173-176.
- Sato, T. and T. Nakamura, 2019: Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions. *Sci. Rep.*, **9**, 1-8.
- Shimura, T., N. Mori and M. A. Hemer, 2017: Projection of tropical cyclone-generated extreme wave climate based on CMIP5 multi-model ensemble in the Western North Pacific. *Clim. Dyn.*, **49**, 1449-1462.
- Shiogama, H. *et al.*, 2010: Emission scenario dependencies in climate change assessments of the hydrological cycle. *Clim. Change*, **99**, 321-329.
- Shiogama, H. *et al.*, 2016: Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, **12**, 225-231.
- 立川康人, 宮脇航平, 田中智大, 萬和明, 加藤雅也, 市川温, キムスンミン, 2017: 超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), **73** (3), 77-90.
- 高裕也, 二宮順一, 森 信人, 2018: 大規模アンサンブル気候予測データを用いた爆弾低気圧の将来変化. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74** (4), I_175-I_180.
- 高裕也, 二宮順一, 森 信人, 金 洙列, 2019: d4PDFを用いた根室における爆弾低気圧に起因する高潮の将来変化. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **75** (2), I_1225-I_1230.
- Takayabu, I. and K. Hibino, 2016: The skillful time scale of climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94A**, 191-197.
- Tanaka, T., Y. Tachikawa, Y. Ichikawa and K. Yorozu, 2018: Flood risk curve development with probabilistic rainfall modelling and large ensemble climate simulation data: a case study for the Yodo River basin. *Hydrol. Res. Lett.*, **12**, 28-33.
- 田中智大, 河合優樹, 立川康人, 2019: d4PDFによる全国一級水系河川流域の年最大流域平均雨量の再現性評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), **75** (2), I_1135-I_1140.
- Tanaka, T., K. Kiyohara and Y. Tachikawa, 2020: Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: a case study in Nagoya, Japan. *J. Hydrol.*, **584**, 124706, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124706.
- 田中智大, 小林敬汰, 立川康人, 2020: d4PDFを用いた2019年台風19号による氾濫水系数の再現期間とその将来変化分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), **76** (1), I_159-I_165.
- 時岡真治, 池内幸司, 大塚健太, 魚波勝彦, 石井光太郎, 2018: アンサンブル気候予測実験データを用いた適応策としての治水対策の経済的評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74** (5), I_1-I_6.
- Ueda, H., K. Miwa and Y. Kamae, 2018: Seasonal modulation of tropical cyclone occurrence associated with coherent Indo-Pacific variability during decaying phase of El Nino. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 381-390.
- 梅田尋慈, 中條壯大, 森 信人, 2019: 大規模アンサンブル気候予測データ (d4PDF) を用いた全球確率台風モデルの開発. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **75** (2), I_1195-I_1200.
- Watanabe, S. *et al.*, 2011: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 1063-1128.
- Watanabe, S., M. Fujita, S. Kawazoe, S. Sugimoto, Y. Okada, R. Mizuta and M. Ishii, 2019: Frequency change of clear-air turbulence over the North Pacific under 2 K Global Warming-Ensemble projections using a 60-km atmospheric general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 757-771.
- 渡部哲史, 中村みゆき, 内海信幸, 2018: アメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正降水量データセットの開発. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74** (5), I_127-I_132.
- Watanabe, S., M. Yamada, S. Abe and M. Hatono, 2020: Bias correction of d4PDF using a moving window method and their uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth. *Hydrol. Res. Lett.*, **14**, 117-122.
- Xie, S.-P., Q. Peng, Y. Kamae, X.-T. Zheng, H. Tokinaga and D. Wang, 2018: Eastern Pacific ITCZ dipole and ENSO diversity. *J. Climate*, **31**, 4449-4462.
- Yamaguchi, M., J. C. Chan, I.-J. Moon, K. Yoshida and R. Mizuta, 2020: Global warming changes tropical cyclone translation speed. *Nat. Commun.*, **11**, 1-7.
- Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity

- in high-resolution large-ensemble simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9910–9917.
- Yukimoto, S. *et al.*, 2011: Meteorological Research Institute–Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1): Model Description. *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, (64), 88pp.
- Yukimoto, S. *et al.*, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3–Model description and basic performance-. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 23–64.

Large-Ensemble and High-Resolution Climate Simulations for Global Warming Risk Assessments and Social Implementation

Masayoshi ISHII^{*1} and Nobuhito MORI^{*2}

^{*1} (*Corresponding Author*) *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.*

^{*2} *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan.*

(Received 6 September 2021; Accepted 16 February 2022)
