

気候変動影響評価のための共通気候・社会経済シナリオ

Common climate and socio-economic scenarios for climate change impact assessment

石崎 紀子^{1*}・花崎 直太¹・塩竈 秀夫²・高橋 潔³

Noriko N. ISHIZAKI^{1*}, Naota HANASAKI¹, Hideo SHIOGAMA² and Kiyoshi TAKAHASHI³

¹ 国立研究開発法人 国立環境研究所 気候変動適応センター

² 国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域

³ 国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域

¹ Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies, Japan

² Earth System Division, National Institute for Environmental Studies, Japan

³ Social Systems Division, National Institute for Environmental Studies, Japan

摘 要

気候変動の影響は多岐にわたるが、分野横断的な影響評価を行うためには、共通の気候シナリオと社会経済シナリオを用いた研究が重要となる。我々は、日本域を対象とした分野横断的な影響評価のために、気候シナリオと社会経済シナリオを組み合わせた共通シナリオを整備し、その使い方を規定したプロトコルとともに影響評価研究者に提供してきた。本稿では、この共通シナリオのデザインについて解説する。どのような狙いを持って共通シナリオが整備されたかを説明することで、様々な分野での円滑な影響評価実施を促進するだけでなく、影響評価研究者や政策決定者が評価結果を解釈し気候変動適応策の立案・検討につなげるための助けとなることを期待している。

キーワード：気候変動影響評価，気候変動適応策，共通シナリオ，
ダウンスケーリング，バイアス補正

Key words：climate change impact assessment, climate change adaptation,
common scenarios, downscaling, bias correction

1. はじめに

温暖化が疑いのないものとなっている現在、将来への備えのために気候変動影響の定量的な評価が必要となっている。気候変動の影響は豪雨や熱波などの気象災害だけにとどまらず、農産物や産業、水資源、生態系など、様々な分野に及び、影響やその大きさは地域ごとに異なる。また、気候変動影響を軽減するための対策、すなわち、気候変動適応策に必要とされる時間、費用、実施規模なども様々である。地域ごとの気候変動の影響を包括的に理解し、気候変動適応策の優先順位や効果を調べておくことは、安心、安全な将来に向けた重要な取り組みである。また、気候変動は、今や企業にとっても大きな関心事である。2017年には、気候関連財務情報タスクフォース(Task Force on Climate-related Financial Disclosures：TCFD)の枠組みのもと、企業に対して気候変動に関連するリスクを分析し、情報を開示することが推奨されるようになった。この取り組みは、環境(Environment)や社会(Social)、企業統治

(Governance)に配慮している企業に対する投資や融資(ESG 投融資)を行う機関も重視しており、持続可能な社会を目指す中で気候変動に対するリスク分析が不可欠になりつつある。さらに、2018年12月に気候変動適応法が施行されたことに伴い、自治体には地域気候変動適応計画の策定が努力義務として位置付けられた。このような社会背景のもと、将来の気候変動の見通しとリスクの見積もりのために、将来の気候変動予測データ(気候シナリオ)と、人口の変化や社会の在り方に関するデータ(社会経済シナリオ)が必要とされる場が増えてきた。

気候変動の影響評価のために、これまで様々な気候シナリオや社会経済シナリオが開発されてきた。様々な分野における気候変動影響の全容を把握し、包括性の高い影響評価をするためには、共通した気候シナリオ及び社会経済シナリオ(共通シナリオ)を用いることが有効である。例えば、全球を対象とした様々な分野の影響評価モデルの相互比較プロジェクトである Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)では、Coupled

受付：2023年4月1日，受理：2023年6月8日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail：ishizaki.noriko@nies.go.jp

Model Intercomparison Project (CMIP) のモデル群の気候シナリオをバイアス補正した気候シナリオを共通の入力値として、様々な影響評価モデルの計算を行い、分野横断的な気候変動影響の把握に役立ててきた。日本でも、環境省環境研究総合推進費「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究(S-8; 2010~2014年)」において、共通シナリオを用いて多分野の影響評価研究が進められてきた。S-8では、影響評価モデルの入力値とする気候シナリオと、人口や土地利用データの社会経済シナリオだけでなく、影響予測を実施する際にそれらのシナリオをどのように用いるかをまとめた実験設定書(プロトコル)があわせて公開された(花崎ほか, 2012; 2014)。これによって多くの分野の影響評価結果を相互に比較することが可能になった(S-8の影響評価結果は、気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT; <https://adaptation-platform.nies.go.jp/>)から公開されている)。

このような共通シナリオとそれを用いた影響評価研究は一旦実施すれば完成ということではなく、定期的な見直しが必要となる。気候シナリオのベースとなる予測データを生み出す気候モデルには改良が加えられて年々高度化していることがその理由のひとつである。我々は国立環境研究所(NIES)の第4期中長期計画における気候変動適応研究プログラム(2018~2020年度)における影響評価研究のために、まずCMIP5の気候モデル群の予測データをベースにした共通気候シナリオ(NIES, 2019; 石崎, 2020)の開発を行い、S-8で使用された社会経済シナリオ(花崎ほか, 2014)と合わせて様々な分野の影響評価を行った。影響評価の詳細については花崎ほか(2023)を参照されたい。また、2020年には最新のCMIP6モデルの全球予測データを基にした気候シナリオ(NIES2020; 石崎, 2021)を開発し、新しい社会経済シナリオと合わせて整備し直した。共通シナリオには、それぞれの使用法を記述したプロトコルも作成した。これらの共通シナリオはNIESの気候変動適応研究プログラムにとどまらず、S-8の後継課題である環境省環境研究総合推進費「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究(S-18; 2020年~)」においても参考にされ、特にNIES2020はS-18の共通気候シナリオとして設定された。

このように日本域の影響評価において我々が整備した共通シナリオは幅広く使われている。本稿では、これらの共通シナリオの設計とそのプロトコルについて紹介する。気候モデルや排出シナリオの様々な選択肢の中から共通事項をどのように決定したのか、従前のプロトコルの設定とどのように異なるのか、またNIES2019とNIES2020がその他の気候シナリオとどのような関係にあるのかといったことに焦点を当てて解説する。

2. 共通シナリオのプロトコル

2.1 NIES2019とNIES2020の概要

共通シナリオは、東経122-146度、北緯24-46度の範囲の日本陸上のみを対象としており、気候シナリオ、人口・土地利用の社会経済シナリオ、適応策シナリオからなる。日本域の影響評価研究では、国土数値情報やそれに基づくメッシュ農業気象データ(大野ほか, 2016)を用いる分野が多く、その空間解像度は3次メッシュ(約1km格子)である。そのため、気候シナリオも同じ空間解像度で整備した。なお、適応策は分野ごとに異なるため、適応策シナリオの共通化はしていない。

NIES2019はCMIP5の過去再現及び将来予測実験の出力データを1km格子に内挿した後、飯泉ほか(2010)が提案したノンパラメトリックなCumulative distribution function-based downscaling method(CDFDM法)でバイアス補正された1900年から2100年の日別値データである(表1; Ishizaki *et al.*, 2020)。大野ほか(2016)のメッシュ農業気象データを参照値としてバイアス補正が施されており、日平均気温、日最高気温、日最低気温、日降水量、全天日射量、風速、湿度の7種類の要素に対応している。Ver.1では補正後の気温が観測値よりもやや高いことや、各気象変数の月ごとの平均値が観測値と合わないという課題があったが、Ver.2では一度にバイアス補正を実施する期間を表す時間窓を6か月から1か月に変更したことなどにより改善している。

NIES2020はCMIP6の過去再現及び将来予測実験の出力データを1km格子に内挿した後、NIES2019 Ver.2と同じ月ごとのCDFDM法でバイアス補正を施した。期間は1900年から2100年の日別値データである(Ishizaki *et al.*, 2022)。対象とした気象変数は、NIES2019の7要素に下向き長波放射を加えた8要素である。なお、NIES2020 Ver.1.1は、Ver.1に含まれていなかった排出シナリオに対応した気候シナリオが追加されたものである。

NIES2019/2020は、気候モデルや排出シナリオ、計算時間について、複数の選択肢が存在する。例えば、NIES2020 Ver.1では5つの気候モデルと3種類の排出シナリオについて、それぞれ1900年から2100年のデータがあり、全部で3015年分の計算が可能である。影響評価モデルによって計算できる実験数や期間の長さが異なるため、プロトコルでは選択肢と優先順位を設定し、実現可能性の高いものを利用者が選ぶ形式とした。

2.2 気候モデルの選択について

同じ温室効果ガス濃度の想定を与えても気候モデルによって異なる応答を示すため、複数の気候モデルの結果を使うことが推奨されている(Knutti *et al.*, 2010)。しかし、CMIP5/6に参加した気候モデルは

表1 NIES2019, NIES2020 とその他の気候シナリオの概要.

	NIES2019		NIES2020		NARO2017	NHRCM02
	Ver.1	Ver.2	Ver.1	Ver.1.1		
領域	日本全域	日本全域	日本全域	日本全域	日本全域	日本全域
空間解像度	3次メッシュ	3次メッシュ	3次メッシュ	3次メッシュ	3次メッシュ	2 km (補正データは 3次メッシュ)
時間解像度	日	日	日	日	日	時/日
現在/過去期間	1900-2005	1900-2005	1900-2014	1900-2014	1980-2005	1980-1999
将来期間	2006-2100	2006-2100	2015-2100	2015-2100	2006-2100	2076-2095
排出シナリオ	RCP8.5* ¹ RCP2.6	RCP8.5 RCP2.6	SSP5* ² -RCP8.5 SSP2-RCP4.5 SSP1-RCP2.6	SSP3-RCP7.0 SSP1-RCP1.9	RCP8.5 RCP2.6	RCP8.5 (SST×4) RCP2.6 (SST×4)
全球気候 モデル	[CMIP5] MRI-CGCM3 MIROC5 GFDL-CM3 HadGEM2-ES	[CMIP5] MRI-CGCM3 MIROC5 GFDL-CM3 HadGEM2-ES	[CMIP6] MRI-ESM2-0 MIROC6 ACCESS-CM2 MPI-ESM1-2-HR IPSL-CM6A-LR	[CMIP6] MRI-ESM2-0 MIROC6 IPSL-CM6A-LR	[CMIP5] MRI-CGCM3 MIROC5 GFDL-CM3 HadGEM2-ES CSIRO-Mk3-6-0	[CMIP5] MRI-AGCM3.2S
ダウン スケージング	線形内挿	線形内挿	線形内挿	線形内挿	線形内挿	NHRCM による DDS* ³
バイアス補正	CDFDM 法* ⁴	CDFDM 法(月)	CDFDM 法(月)	CDFDM 法(月)	正規分布型 スケージング法	CDFDM 法(月)
シナリオが 使用された 課題など	国環研適応 PG (第4期) 地域適応コン ソーシアム事業	国環研適応 PG (第4期) 地域適応コン ソーシアム事業	国環研適応 PG (第5期) S-18	S-18	国環研適応 PG (第4期) 地域適応コン ソーシアム事業 S-18	国環研適応 PG (第4期, 第5期) S-18
参考文献	Ishizaki <i>et al.</i> , 2020		Ishizaki <i>et al.</i> , 2022		西森ほか, 2019	Murata <i>et al.</i> , 2017

*¹: RCP (Representative Concentration Pathways; 代表的濃度経路)*²: SSP (Shared Socioeconomic Pathways; 共有社会経済パス)*³: DDS (Dynamical Downscaling; 力学的ダウンスケージング)*⁴: CDFDM (Cumulative distribution function-based downscaling method)

非常に多く、すべてを対象とした影響評価を実施するのは時間的及び計算資源的に現実的でない。そのため、NIES2019やNIES2020では、少数の気候モデルを選択して気候シナリオを作成している。

共通シナリオ開発の際の気候モデル選択の基準には様々な考え方があられる。第3期 ISIMIP (ISIMIP-3b) では、CMIP6のモデル群から、物理過程の再現性能、物理スキームの独自性(他の気候モデルで使用している物理スキームの模倣・派生ではないこと)、気候感度、過去の再現性、海洋生態系などで必要とされる入力データが提供されているかどうかなどを考慮してモデルが選択されている(Lange, 2021)。日本域を対象とした花崎ほか(2012)では、過去再現実験における様々な気象現象や指標の再現性が良いモデルの中から、全球昇温量の将来変化量の小さいものから大きいものまでバランスよくカバーするように4つの気候モデル(MRI-CGCM3, MIROC5, GFDL-CM3, HadGEM2-ES)が選択された。NIES 2019はこれと同じ4モデルを対象とした。

しかし、Shiogama *et al.* (2020)は、日本における昇温量のばらつきで選択されたNIES2019の4つの

モデルが、短波放射の将来変化については全CMIP5アンサンブルの将来変化幅を十分にカバーしておらず、偏りがあることを示した。そこで我々は、影響評価でよく利用される8つの気象変数の日本周辺での将来変化について、利用可能なすべてのモデルが示す幅をできるだけ捉えることができるモデル選択手法を考案した(Shiogama *et al.*, 2021)。モデル群の中で全球昇温の将来予測が大きいものは、過去期間での全球昇温トレンドを観測よりも大きく見積もる傾向があることから(Hot model問題と呼ばれる; Hausfather *et al.*, 2022)、前もって除外した。また、モデルは開発された地域で検証が重点的に行われることを考慮し、日本で開発されたMIROC6とMRI-ESM2-0を含めることを前提としている。この手法を用いて、NIES2020ではMRI-ESM2-0, MIROC6, ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR, IPSL-CM6A-LRの5つの気候モデルを選択した。モデルの優先順位はこの通りである。この5つのモデルは、気温以外の気象変数についても解析に用いられた全モデルが示す将来変化の幅を広く抑えることができていることが確認されている(Hayashi and Shiogama, 2022)。

図1, 2に NIES2020 による日本域の年平均気温と年降水量の時間変化を示す。将来変化は SSP5-RCP8.5 に基づく。2090 年頃には、1981-2010 年の平均と比べて 2.8 度から 6.8 度の昇温が見込まれている。また、年降水量は昇温に伴って増加傾向だが、内部変動やモデル間のばらつきが大きい。詳細なモデルの位置づけについては Hayashi and

Shiogama(2022)を参照されたい。NIES2020 は NIES 2019 と同様に格子間隔が 100 km スケールの全球モデルの結果から作成されたもので、大きなスケールの現象の将来変化量しか考慮されていない。降水量のようなローカルな地形やそれによる風の収束の影響を受ける要素を使用する場合には、注意が必要である。

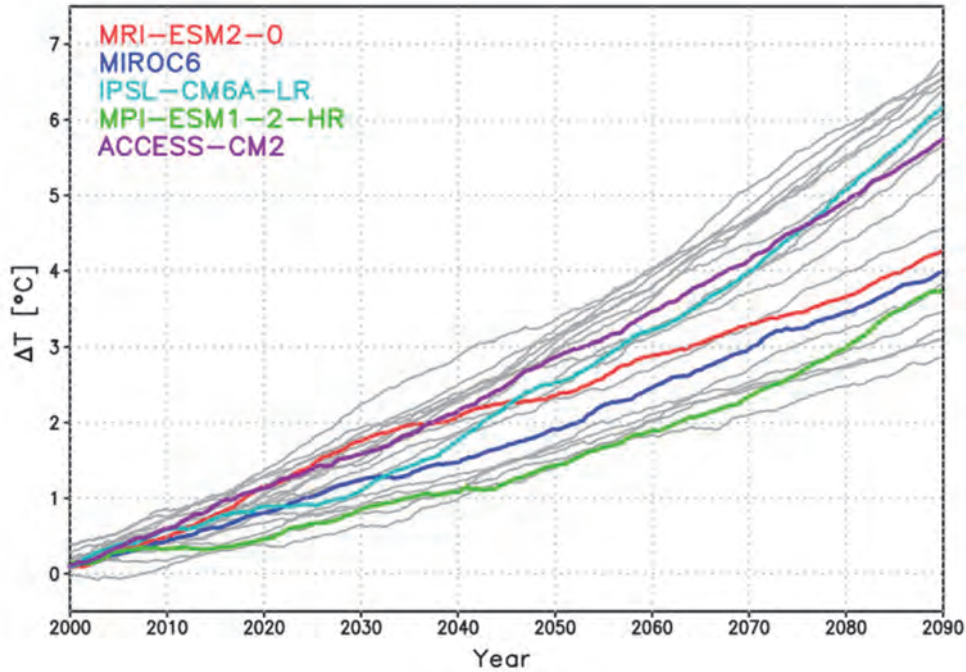


図1 日本付近(東経 120-150 度, 北緯 20-50 度)における年平均の地上気温の変化(°C)。将来の排出シナリオは SSP5-RCP8.5 である。各実線はモデル選択手法(Shiogama *et al.*, 2021)で検討された 21 モデルであり、色付きは共通シナリオの 5 モデル、灰色はその他の 16 モデルを示す。いずれも 1981-2010 年の平均値からの偏差を 20 年移動平均したものである。

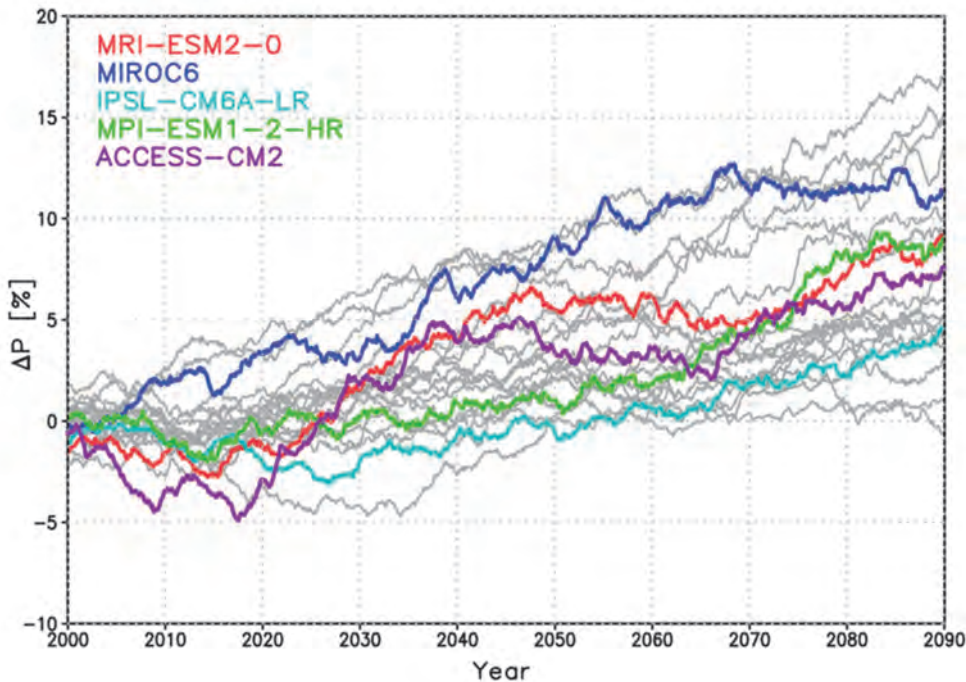


図2 日本付近(東経 120-150 度, 北緯 20-50 度)における年降水量の変化割合(%)を示す。将来の排出シナリオは SSP5-RCP8.5 である。各実線はモデル選択手法(Shiogama *et al.*, 2021)で検討された 21 モデルであり、色付きは共通シナリオの 5 モデル、灰色はその他の 16 モデルを示す。いずれも 1981-2010 年の平均値からの偏差を 20 年移動平均したものである。

表2 計算期間の選択肢.

	NIES2019	NIES2020
①	2005, 2030, 2050, 2090	2015, 2030, 2050, 2090
②	1986-2005, 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099	1995-2014, 2021-2040, 2041-2060, 2081-2100
③	1979-2099	1980-2100

2.3 計算期間

NIES2019 または NIES2020 を用いれば現在から 21 世紀末までの連続した影響評価が可能だが、計算資源などの制約から影響評価モデルによってはそのような長期の連続計算が難しい場合がある。そのため NIES2019 及び NIES2020 のプロトコルでは、計算期間について表 2 に示すように①から③の 3 種類の選択肢を設け、どの選択肢を選んだとしても、現在、近未来、21 世紀半ば、21 世紀末を対象とした影響評価を行うこととした。このように柔軟なプロトコルとすることで、計算コストなどが異なる様々な分野の影響評価の結果を、整合性を保って取りまとめることが可能になる。

2.4 温室効果ガス濃度シナリオ

CMIP5 将来予測実験では、温室効果ガス濃度シナリオとして 4 つの Representative Concentration Pathways (RCP; 代表的濃度経路) が用いられた。日本の影響評価報告書(環境省, 2020)や「日本の気候変動 2020」(文科省・気象庁, 2020)では濃度増加の最も大きい RCP8.5 と最も小さい RCP2.6 の比較を軸に議論されており、CMIP5 ベースの気候シナリオである NIES2019 もその 2 種類で整備した。

一方 CMIP6 では、世界的な社会の在り方を示した Shared Socioeconomic Pathways (SSP; 共有社会経済パス) の下で複数の温室効果ガス濃度をめざす排出削減経路を描いた SSPx-RCPy 濃度シナリオを用いて、気候モデルによるシミュレーションが行われた(x は 1~5, y は 1.9, 2.6, 3.4, 4.5, 6.0, 7.0, 8.5)。5 種類の SSP は人口や経済発展、技術、資源の使い方などの違いで特徴づけられている。一方で RCP1.9~8.5 は 21 世紀末までの放射強制力の水準を表現している。

NIES2020 の開発に当たっては、NIES2019 等を用いて実施された影響評価の結果と比較をするために、同じ気候安定化レベルで計算が実施された SSP5-RCP8.5 と SSP1-RCP2.6 を選択した。また、中間的な排出想定として SSP2-RCP4.5 も用いることとした。プロトコルでは、優先度の高い順に SSP5-RCP8.5, SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5 を解析対象としている。

2015 年にパリ協定が成立して以降の緩和努力によって、温室効果ガスの濃度増加が RCP8.5 で想定されるようなレベルに達する可能性は低くなってきたため、以前のように RCP8.5 を成り行きシナリオ

(Business As Usual; BAU) と呼ぶことは難しくなってきた(例えば Hausfather and Peters, 2020)。しかしながら、パリ協定以前は世界の排出量は RCP8.5 のような経路をたどる可能性が高かったことを考えると、RCP8.5 を共通気候シナリオに加えて低排出のシナリオと比較することで、パリ協定以降の緩和努力による影響低減の効果を評価することが可能になる。CMIP6 では、SSP5-RCP8.5 と並ぶ高排出シナリオとして SSP3-RCP7.0 を用いた将来実験予測実験も行われており、第 3 期 ISIMIP では、SSP3-RCP7.0 が共通気候シナリオとして選択された。しかし、SSP3-RCP7.0 は、エアロゾルなどの大気汚染物質が他の SSP と比べて多くなる特殊な想定となっており、他の SSP-RCP との比較には注意が必要であるため、我々は高排出シナリオとして SSP5-RCP8.5 シナリオを選択した。

現時点では、各国が決定する貢献(NDC)が履行されてようやく RCP4.5 に近づくという状況であり、高排出シナリオを辿る危機から完全に脱しているわけではない。一方で、2020 年に菅内閣総理大臣(当時)が、日本が 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言したように、パリ協定以降、産業革命からの昇温量を 1.5 度やそれ以下に抑えるための更に野心的な気候政策が提言されるようになった。決して簡単な目標ではないものの、これらが達成できた場合にどのような便益があるかを調べておくことも重要である。そのため、一部のモデルについては SSP1-RCP1.9 の結果についても追加で公開している(NIES2020 Ver1.1)。

CMIP5/6 では排出シナリオの前提が上述の通り異なるが、RCP の設定は共通しているため、別モデルとして同じ RCP での予測結果を使用することは可能と考えられる。ただし、過去実験の期間が異なることや、同じ系列のモデルであってもモデルのバージョンによって気候変動の予測結果が似た特徴を持つとは限らない点には注意が必要である。

2.5 人口・土地利用シナリオの選択

気候シナリオとして NIES2019 など CMIP5 ベースのデータを用いる場合には、S-8 で使用された人口・土地利用データ(花崎ほか, 2014)を用いることとした。一方、CMIP6 ベースの気候シナリオは前述の通り SSP と RCP の組み合わせに基づいて計算が行われている。すなわち、どの気候シナリオを使うかによって前提とされる社会経済シナリオが決まる。しかし、ローカルな評価をする場合には、人口の変化など社会の変化の方が相対的に大きな影響を持つ場合があり得る。日本域の気候変動影響を評価する際に、異なる社会経済シナリオと気候シナリオを組み合わせ使用しそれらの感度を調べることも、全球的には整合的ではないものの有効と考えられる。このような場合の社会経済シナリオとしては、全球的 SSP に整合するように開発された日本版 SSP の使用

が推奨される。

CMIP6 をベースとした場合の人口データは、国立社会保障・人口問題研究所(社人研)の平成30年の地域別推計値を基に、SSPのシナリオの世界観に合致するようなパラメータを調整して推計された。各市区町村を大都市圏市街地、大都市圏非市街地、地方圏市街地、地方圏非市街地の4つの地域区分に分類し、SSPのシナリオごとに地域区分別の移動率を設定する。これに加えて、出生率、死亡率、移民数などのパラメータを設定して人口シナリオの推計が行われた。各市区町村の中での空間分布変化は基準年値固定として、3次メッシュで推定された人口が用意されたものが、A-PLATから公開されている(<https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html>)。将来の土地利用データは人口変化と現在の土地利用区分に従って推定された。これらと気候シナリオを組み合わせることで、気候変動のみの影響の変化や、社会構造の変化の影響などの様々な感度解析を行うことが可能である。

NIESの気候変動適応研究プログラム内では、社会経済シナリオの優先順位を設定していないが、より広範囲の影響評価を行う日本の影響評価相互比較研究プログラムS-18では、研究期間前半で用いる第一版の共通社会経済シナリオとしてグローバルなSSPとの定性的な関連性に基づくJapan SSP1, Japan SSP5, 現状維持の3シナリオを設定した(Yoshikawa *et al.*, 2022)。Japan SSP1は低炭素で持続可能な社会を、Japan SSP5は化石燃料に依存し、温室効果ガスを大量に排出する社会を想定している。現状維持シナリオは、日本の現状から将来的に変化がないことを想定している。

3. ダウンスケーリング手法とバイアス補正手法の多様性

本稿で紹介したNIES2019やNIES2020以外にも、同時期に開発・公開された気候シナリオが複数ある。これらの気候シナリオを特徴づけるのが、ダウンスケーリング手法とバイアス補正手法である。この章では気候シナリオの開発方法の種類や利用する際の注意点について記述する。

3.1 ダウンスケーリング手法とバイアス補正について

将来の気候予測は全球気候モデルで実施されるが、地域の気候変化を調べるには粗すぎるために空間詳細化、すなわちダウンスケーリングが行われる。ダウンスケールには数値モデルを用いる力学的手法と、各種統計量を観測に近づける統計的手法が存在する。日本域でこれまで共通シナリオとして公開してきた気候データは、主に統計的手法によるもので構成されていた。例外的に花崎ほか(2012, 2014)では「補遺データ」として統計的手法に加え、力学

的手法でダウンスケールされたデータを提供している。共通気候シナリオに統計的手法によるものが多い背景には、力学的ダウンスケーリングにかかる計算コストと所要時間が関係している。力学的ダウンスケーリングによる気候学的高解像度シミュレーションの実施には、年単位での時間を要するため、実験開始から利用できるまでに時間差が生じる。また、同じ理由から複数の全球モデルを対象としたダウンスケーリングを実施するのは困難である。さらに、力学的ダウンスケーリングの結果は、初期値・側面境界値を作成するデータに大きく依存する。このデータが系統的なバイアスを持っていると、時間とコストをかけて力学的ダウンスケーリングを行っても、得られる結果の信頼性は低くなる。系統的なバイアスは必ずしも線形的に処理できないためである。この問題は気候計算においてしばしば指摘されるもので、“garbage in, garbage out”と呼ばれる(Rummukainen, 2010)。日本は周囲を海に囲まれており、その気候は海面水温の状況に大きく左右されるため、海の状態も含めてモデルで予想する大気海洋結合モデルは、過去再現実験であってもモデルごとの予測の幅が大きく、バイアスが少なからず含まれる。このような背景から、日本域で実施される力学的ダウンスケーリングは海面水温を境界値として与える大気モデルの結果を用いることが多い。このような実験体制は日本特有の気候特性を考慮したものではあるものの、大気海洋結合モデルのCMIP実験と同等に比較することができないことや、複数モデルの不確実性を議論することが難しいために、影響評価に利用されにくい側面があった。一方、力学的ダウンスケーリングには物理的整合性の観点から大きなメリットがあり、極端現象を含む降水の再現性の高さから、防災分野では力学的ダウンスケーリングの結果が優先的に利用される傾向がある。気候シナリオは用途に応じて適切なものが選択されるべきであり、用途を考慮せずにデータ共通化が優先されることはあってはならないが、包括的で矛盾のない議論をするための実験デザインの工夫が今後必要であろう。

国際的には、東アジアやヨーロッパなどといった地域ごとのダウンスケーリングを行い相互比較や評価を行うことを目的としたCoordinated Regional Climate Downscaling(CORDEX; <https://cordex.org/>)という枠組みがある。こちらでも、各国・各地域で開発されたRegional climate model(RCM; 領域気候モデル)を用いたダウンスケーリングが主に行われてきたが、計算資源削減などを目的に統計的手法を用いたRCMエミュレーターの開発を進める地域もある。このような手法の中には、近年機械学習や人工知能(AI)を活用する研究も出てきており(例えばDoury *et al.*, 2022)、今後のダウンスケーリングにおける新たな潮流となる可能性もあり、注視すべきで

ある。

また、バイアス補正手法も予測データにおける不確実性の要因となることが知られている (Iizumi *et al.*, 2017)。モデルの出力を扱う上で、モデルの系統的な誤差を補正するバイアス補正は不可欠なプロセスである。一方で、万能なバイアス補正手法は存在せず、不適切なバイアス補正を適用することが誤った将来変化のシグナルを引き起こす可能性もある (Maraun *et al.*, 2017)。扱う現象を捉えるために十分な時空間解像度や再現性が気候シナリオにあるのか、影響評価モデルの気候シナリオに対する感度がどれくらいあるのかといったことを調べることも、影響評価の信頼性を高める上で重要と考えられる。

3.2 その他の気候シナリオの特徴

ここでは、NIES2019やNIES2020と同時期に開発・公開された気候シナリオ(表1)について概要を紹介し、その特徴を解説する。

NARO2017(西森ほか, 2019)は、正規分布を仮定して日々の気温や降水量の平均値と分散を観測値に合わせる正規分布型スケーリング法(Haerter *et al.*, 2011)によるバイアス補正を施した3次メッシュのデータである。NIES2019と同様に、CMIP5をベースとしており、花崎ほか(2012)で選択された4モデルにCSIRO-Mk3-6-0を加えた5モデルを対象としている。時間解像度は日別値で、1980年から2100年の期間のデータが作成されており、2006年以降の将来期間はRCP8.5とRCP2.6での気候シナリオが利用可能である。NIES2019と主に異なる点は、使用しているバイアス補正手法である。Ishizaki *et al.* (2020)はNARO2017とNIES2019(Ver.1)の比較を行った。両者には、気温の予測においては大きな違いは見られないものの、降水量については正規分布を仮定したNARO2017では過大評価の傾向があることが報告されている。

NIES2019やNARO2017は統計的手法によるダウンスケールされたデータだが、前述の通り降水量など地形の力学的効果が重要となる気象変数を扱う影響評価においては、RCMを用いた力学的ダウンスケールデータが適している場合がある。そこで、NIESの気候変動適応研究プログラムにおいては、NIES2019やNIES2020に加えて力学的ダウンスケールデータであるNHRCM02(Murata *et al.*, 2017)も共通気候シナリオとして定め、用途に応じて選択するようにした。NHRCM02は、CMIP5のモデル群の熱帯域の海面水温(SST)の将来変化をクラスタリングして、4種類のSSTの偏差パターンを与えた全球大気モデル(Mizuta *et al.*, 2014)を力学的にダウンスケールしたものである。全球大気モデルの格子間隔は約20 kmで、気象庁/気象研究所の非静力学モデルNHRCMを使って空間解像度5 kmにダウンスケールを実行し、その出力を用いて2 kmの実験(NHRCM02)が実施されている。計算コスト

が高いため、20年間のタイムスライス実験で構成されているが、4種類のSSTパターンがあるために将来期間は80年分のデータが利用可能である。実験は、土壌水分量など陸面過程が平衡状態になるまでのスピニングアップを効率化するために雨の多い7月から開始し、翌年の8月末までの連続実験が各年で実施される。そのうち、最初の7、8月を除いた9月~8月のデータが解析に用いられている。現在気候では1980年9月から1999年8月まで、将来期間では2076年9月から2095年8月までのデータが利用可能である。将来期間については、RCP2.6とRCP8.5の排出シナリオがあり、それぞれ4種類の海面水温パターンでの出力がある。なお、NHRCM02の結果をバイアス補正したデータは、1 kmに内挿した上で2077年1月から2096年12月のデータに変換されている(石崎, 2022)。NHRCM02からは特別値の様々な地表面変数や物理モニター値が出力されているが、バイアス補正したデータは日平均気温、日最高気温、日最低気温、日降水量、全天日射量、風速、下向き長波放射、湿度の日別値となっている。バイアス補正したものは、メッシュ農業気象データ(大野ほか, 2016)を参照値としている。このデータは1 kmメッシュではあるものの、気象庁のアメダス観測を基にしたデータであるため20 km程度より細かい水平解像度の現象を表現していない。そのため、バイアス補正されたデータは領域モデルが解像した現象を平滑化している可能性がある。特に、時間単位の降水量を用いる場合には、NHRCM02のバイアス補正前のデータを使うことが望ましい。

CMIP6のモデルに対応した日本域の気候シナリオは2023年3月時点ではNIES2020のみである。

4. まとめと今後の課題

本稿では、分野横断的な気候変動影響の理解と気候変動適応策立案のために設定された、日本域の共通シナリオについて解説した。CMIP3からCMIP5、CMIP6へと移行するにつれ、ますます多くの気候モデルによる気候変動予測が実施されており、各モデルが高度化している。気候モデルの不確実性は未だに大きいですが、不確実性を考慮しつつ、気候変動影響を調べ具体的な気候変動適応策に結び付けていく必要がある。そのためには、共通シナリオを定期的に見直して、課題を解決したり情報を更新したりしていくことが重要であろう。

共通シナリオにおける課題のひとつが、日本域の海洋シナリオである。長らく水産資源や生態系の評価に利用できる日本周辺海域の細かいシナリオがなかったが、海洋モデルによるダウンスケールデータ(FORP-NP10, FORP-JPN02; Nishikawa *et al.*, 2021)が2022年に公開された。これは、CMIP5のMIROC5とMRI-CGCM3による大気データや再解

析データを外力として作成された、海域の過去再現・将来予測データセットである。国立開発法人海洋研究開発機構と気象庁気象研究所が協力して開発しており、塩分濃度やプランクトン濃度などの3次元データが出力されている。ただし、統計的にダウンスケーリングされたNIES2020や、力学的ダウンスケーリングNHRCM02とは基準とするモデルが異なるため、それぞれの出力を合わせて使うことは適切でない。また、データのバイアス補正はされていない。なお、同じモデルで、再解析データを用いた結果も公開されていることから、これらを使用することで大気外力に起因するバイアスを評価することができる。海中の観測データは限られる上、分野によって対象とする時空間スケールが異なるため、海洋モデルに起因するバイアスを補正したり、データを共通化したりすることには課題が多い。同じ大気海洋結合モデルの外力を用いたRCMによる力学的ダウンスケーリングと、海洋の力学的ダウンスケーリングの実験デザインの検討が今後求められる。

また、統計的手法におけるダウンスケーリングとして単純な内挿を採用して格子ごとの統計量で補正を実施すると、地点間の相関関係が元のモデルに依存して観測された相関関係と隔たりが発生する課題や(Ishizaki *et al.*, 2023)、日本域バイアス補正の参照値として使用されているメッシュ農業気象データについて、要素によっては観測地点数が不十分であることも指摘されている。これらの技術的な問題の解決に加え、データ利用者からのニーズや要望を収集することが気候シナリオの高度化に重要であり、それによって効果的な気候変動適応策の導入が促進されることが期待される。

謝 辞

NIES2019とNIES2020の開発と、共通シナリオの議論は国立環境研究所気候変動適応プログラムで実施されました。また、S-18での気候シナリオや排出シナリオの議論の際には、三村信男 茨城大学特命教授、吉川沙耶 花長崎大学准教授、若月泰孝 茨城大学准教授に大変重要なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- Doury, A., Somot, S., Gadat, S. *et al.* (2022) Regional climate model emulator based on deep learning: concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9>
- Haerter, J. O., Hagemann, S., Moseley, C. and Piani, C. (2011) Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1065–1079. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1065-2011>
- 花崎直太・高橋 潔・肱岡靖明(2012)日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・社会経済シナリオ. *環境科学会誌*, 25(3), 223–236.
- 花崎直太・高橋 潔・肱岡靖明・日下博幸・飯泉仁之直・有賀敏典・松橋啓介・三村信男(2014)日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・人口・土地利用シナリオ(第2版). *環境科学会誌*, 27(6), 362–373.
- 花崎直太・永島達也・小出 大・芦名秀一・岡 和孝・伊藤昭彦・岡田将誌・本田 靖・池上真木彦・石崎紀子・真砂佳史・増富祐司(2023)国立環境研究所気候変動適応研究プログラムによる気候変動の影響予測と結果の公開. *地球環境*, 28, 45–58.
- Hausfather, Z. and Peters, G. P. (2020) Emissions-the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577, 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z., Marvel, K., Schmidt, G. A., Nielsen-Gammon, J. W. and Zelinka M. (2022) Climate simulations: recognize the 'hot model' problem. *Nature*, 605, 26–29. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>
- Hayashi, M. and Shiogama, H. (2022) Assessment of CMIP6-Based Future Climate Projections Selected for Impact Studies in Japan. *SOLA*, 18, 96–103. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-016>
- 飯泉仁之直・西森基貴・石郷岡康史・横沢正幸(2010)統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門. *農業気象*, 66, 131–143. <https://doi.org/10.2480/agrmet.66.2.5>
- Iizumi, T., Takikawa, H., Hirabayashi, Y., Hanasaki, N. and Nishimori, M. (2017) Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 7800–7819. <https://doi.org/10.1002/2017JD026613>
- 石崎紀子(2020)CMIP5をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ, Ver.1 and Ver.2, 国立環境研究所. <https://doi.org/10.17595/20200415.001>
- 石崎紀子(2021)CMIP6をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ, Ver.1 and Ver.1.1, 国立環境研究所. <https://doi.org/10.17595/20210501.001>
- 石崎紀子(2022)力学的ダウンスケーリングデータNHRCM02をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオ, Ver.1 and Ver.1.1, 国立環境研究所. <https://doi.org/10.17595/20220415>

001

- Ishizaki, N. N., Nishimori, M., Iizumi, T., Shiogama, H., Hanasaki, N. and Takahashi, K. (2020) Evaluation of two bias-correction methods for gridded climate scenarios over Japan. *SOLA*, 16, 80–85. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-014>
- Ishizaki, N. N., Shiogama, H., Hanasaki, N., and Takahashi, K. (2022) Development of CMIP6-based climate scenarios for Japan using statistical method and their applicability to heat-related impact studies. *Earth and Space Science*, e2022EA002451. <https://doi.org/10.1029/2022EA002451>
- Ishizaki, N. N., Shiogama, H., Hanasaki, N., Takahashi, K. and Nakaegawa, T. (2023) Evaluation of the spatial characteristics of climate scenarios based on statistical and dynamical downscaling for impact assessments in Japan. *International Journal of Climatology*, 43, 1179–1192. <https://doi.org/10.1002/joc.7903>
- 環境省(2020)気候変動影響評価報告書. <https://www.env.go.jp/content/900516663.pdf>(2023年5月18日確認)
- Knutti, R., Abramowitz, G., Collins, M., Eyring, V., Gleckler, P. J., Hewitson, B. and Mearns, L. (2010) Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. and Midgley, P. M. (eds.) Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 13pp.
- Lange, S. (2021): ISIMIP3b bias adjustment fact sheet. <https://www.isimip.org/gettingstarted/isimip3b-bias-adjustment/>(2023年3月23日確認)
- Maraun, D., Shepherd, T., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M. M., Hall, A. and Mearns, L. O. (2017) Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Clim Change* 7, 764–773. <https://doi.org/10.1038/nclimate3418>
- Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A. (2014) Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, 10, 167–171.
- 文部科学省, 気象庁:日本の気候変動2020:大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書. <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>(2023年5月18日確認)
- Murata, A., Sasaki, H., Kawase, H., Nosaka, M., Aoyagi, T. and Takayabu, I. (2017) Projection of future climate change over Japan in ensemble simulations using a convection-permitting regional climate model with urban canopy. *SOLA*, 13, 219–223. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-040>
- Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Ishizaki, H., Sakamoto, K., Tanaka, Y., Tsujino, H., Yamanaka, G., Kamachi, M. and Ishikawa, Y. (2021) Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 7. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00399-z>
- 西森基貴・石郷岡康史・桑形恒男・滝本貴弘・遠藤伸彦(2019)農業利用のためのSI-CAT日本全国1 km 地域気候予測シナリオデータセット(農研機構シナリオ2017)について. *日本シミュレーション学会誌*, 38, 150–154.
- 大野宏之・佐々木香織・大原源二・中園 江(2016)実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. *生物と気象*, 16, 71–79. <https://doi.org/10.2480/cib.J-16-028>
- Rummukainen, M. (2010) State-of-art with regional climate models. *WIREs Clim Change*, 1, 82–96. <https://doi.org/10.1002/wcc.8>
- Shiogama, H., Ito, R., Imada, Y., Nakaegawa, T., Hirota, N., Ishizaki, N. N., Takahashi, K., Takayabu, I. and Emori, S. (2020) Selecting Future Climate Projections of Surface Solar Radiation in Japan. *SOLA*, 16, 75–79. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-013>
- Shiogama, H., Ishizaki, N. N., Hanasaki, N., Takahashi, K., Emori, S. and Shibuya, R. (2021) Selecting CMIP6-Based Future Climate Scenarios for Impact and Adaptation Studies. *SOLA*, 17, 57–62. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-009>
- Yoshikawa, S., Takahashi, K., Wu, W., Matsuhashi, K. and Mimura, N. (2022) Development of common socio-economic scenarios for climate change impact assessments in Japan, *Geosci. Model Dev. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-169>



石崎 紀子／Noriko N. ISHIZAKI

国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動影響評価研究室主任研究員。博士(理学)。専門は気候・気象学。大学院在学中より領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリングによる領域気候解析を行ってきた。現在は気候変動の影響評価に資するため、大きな空間スケールの気候予測情報を統計的にダウンスケーリングする手法の開発・改良に取り組んでいる。



花崎 直太／Naota HANASAKI

国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動影響評価研究室室長。博士(工学)。2018年より現職。専門は水文学、環境学。大学院在学中より全球水資源モデルの開発に取り組み、様々な地球水問題の解析を行ってきた。現在は全球水資源モデルを様々なスケールや問題に適用するための研究や、気候変動の影響評価全般に関する研究に取り組んでいる。



塩竈 秀夫／Hideo SHIOGAMA

1976年福井県鯖江市生まれ。博士(理学)。専門は、気象学、気候モデル。2004年8月に国立環境研究所に入所。現在は、同研究所地球システム領域地球システムリスク解析研究室室長。気候モデルを用いた過去の気候変動の検出と要因分析及び将来予測の不確実性低減を専門とする。近年は気候変動の将来予測と影響評価の分野間連携に関する仕事に多く携わっている。



高橋 潔／Kiyoshi TAKAHASHI

1973年山形県鶴岡市生まれ。博士(工学)。専門は、環境システム工学、地球環境モデリング。1996年7月に国立環境研究所に入所。環境計画研究室、温暖化リスク評価研究室、統合評価モデリング研究室、広域影響・対策モデル研究室を経て、現在は社会システム領域副領域長。経済・政策研究室長を兼務。大学在学時より気候政策分析のための統合評価モデル開発に携わり、特に全球規模の気候影響予測の部分を担当。近年は地球規模の脱炭素と持続可能性の同時達成に関する研究に取り組んでいる。