

— 研究資料 —

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)

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^{****}

* 独立行政法人国立環境研究所 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

** 筑波大学計算科学研究センター 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*** 独立行政法人農業環境技術研究所 〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3

**** 茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町
4-12-1

† Corresponding author: hanasaki@nies.go.jp

摘 要

1 地球温暖化の影響範囲は多岐に渡る。包括的な温暖化の影響評価と適応策立
2 案のためには、共通した将来想定（共通シナリオ）の下で分野横断的に研究を
3 実施する必要がある。本稿では、最新の気候・人口予測情報を用いた日本の共
4 通シナリオを提案する。気候予測情報は Coupled Model Intercomparison Project
5 Phase 5 (CMIP5)による4つの気候モデルと3つの放射強制力シナリオを利用し
6 た。これらと整合的な領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケールの結果も
7 バイアス補正して活用した。また人口の総数に加え、その空間分布の変化も考
8 慮した9つのシナリオを利用した。また、これらの人口予測に整合的な土地利
9 用シナリオも開発した。これらのシナリオを共通に用いて複数分野の研究を実
10 施することで、日本における温暖化影響の全容把握につながると考えられる。

キーワード：地球環境、温暖化

簡略表題：気候・人口・土地利用シナリオ

1. はじめに

地球温暖化の影響を評価し適応策を立案していくことは、将来の安心・安全な社会を構築していくために重要である。温暖化の影響が及ぶ範囲は農業、防災、健康など多岐に渡る¹⁾。日本全体の包括的な影響評価と適応策立案を実施するためには、共通した将来想定（以下、共通シナリオ）の下で複数分野の研究を実施する手法が有効である。

共通シナリオを利用した分野横断的な温暖化影響評価の事例は限られる。温暖化影響総合予測プロジェクトチームは気候の共通シナリオを設定し、水資源、森林、農業、沿岸域、健康の5分野に関する日本の包括的な温暖化影響評価を行った^{2~3)}。その後、人口や土地利用の共通シナリオを追加し⁴⁾、対象分野も増やして、より包括性の高い評価に向けて研究が続けられている（http://www.nies.go.jp/s8_project/）。世界を対象としたものとして、Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)は水循環、陸域生態系、農業、健康（マラリア）の4分野に関する世界の包括的な温暖化影響評価を行った⁵⁾。これは合計20の気候シナリオを利用し、35以上の影響評価モデルが参加した大規模な研究であった。

現在利用可能であり、既に利用されている日本全体を対象とした温暖化影響評価のための共通シナリオとして、花崎ほかに示されたものがある⁴⁾。この共通シナリオは遵守すべき規約と、その規約に従って作成されたサンプルデータからなる。規約は気候と人口・土地利用に関するものから構成されている。気候の規約は、温室効果ガス排出シナリオは Special Report on Emissions Scenarios (SRES)⁶⁾の A1B とすること、気候予測情報は Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3)⁷⁾の MIROC3.2hires, MRI-CGCM2.3.2, GFDL CM2.1, CSIRO MK3.0 の4モデルを利用することなどが、根拠とともに示されている。人口については2005年の国勢調査を基準とし、国立社会保障・人口問題研究所の中位推計⁸⁾を延長すること、土地利用については国土数値情報土地利用三次メッシュとし、加賀のモデル⁹⁾を利用して人口に合わせて土地利用を変化させることなどが規定されている。サンプルデータは規約に従って作成された日本全域を網羅する三次メッシュ（約1km×1km）の電子化された地図データであり、影響評価モデルを利用したコンピュータシミュレーションの入力データとして利用可能である。

花崎ほかの共通シナリオ⁴⁾は分野横断的な温暖化影響評価に有用だが、以下

の 3 つの問題があり、改訂することが望ましい。第一に、気候シナリオの元となる気候予測情報が 2007 年頃に公開完了した CMIP3 データに基づいていることである。2013 年に刊行予定の IPCC 第 5 次評価報告書の出版に向けて、気候モデルの研究コミュニティが最新の知見を取り込んだ気候予測情報を開発している。この情報は Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)¹⁰⁾データとして 2011 年以降公開され、2013 年 10 月時点で 40 以上のモデルの情報が得られるようになっている。よって、最新の気候モデルの知見を活用するため、CMIP5 データの利用が望ましい。なお、気候モデルの境界条件も温室効果ガス排出シナリオの SRES から放射強制力シナリオである Representative Concentration Pathways (RCP)¹¹⁾へと変わっている。第二に、気候シナリオの元となる気候予測情報が月単位の全球気候モデルによるもので、空間・時間解像度が粗いことである。花崎ほか⁴⁾が利用した CMIP3 データの全球気候モデルの空間解像度は 110～280km 程度であり、そこから直接 3 次メッシュ (1km×1km) へ線形内挿が行われたため、気候変化の地域差を十分に扱えない問題があった⁴⁾。また、CMIP3 データにおいては日単位で得られる情報が限られていたため、月単位のものを使わざるを得ず、最高気温や降水量など、日単位以下の変動が重要な情報を扱うことができなかった。これらの問題を解消するために、全球気候モデルの気候予測情報を境界条件にして領域気候モデルを利用して力学的ダウンスケールを行う方法がある。しかし、日本全体を対象にした力学的ダウンスケールの実施例は少なく、共通シナリオでの利用が困難であった。第三に、温室効果ガス排出・人口・土地利用シナリオがそれぞれ一つしかなかったことである。温室効果ガス排出は国際的な温暖化対策への取り組みを反映するが、将来にわたってどのように推移するかの予測は困難である。また、人口・土地利用は例えば将来の自然災害による被害を見積もるうえで重要であるが、不確実性も非常に大きいため、将来の人口推移が高めか低めか、居住が集中するか分散するかによっては、影響評価は異なったものになり得る。よって、これらのシナリオは複数用意することが必要である。

そこで本研究の目的は上記の点を考慮し、花崎ほか⁴⁾を全面的に改訂したシナリオを提案することとする。

2. 方法

2.1 CMIP5 への対応

2.1.1 データの入手方法

CMIP5 は 2013 年に刊行予定の IPCC 第 5 次評価報告書に向けて開発された全球気候モデルによる気候予測情報のデータベースである¹⁰⁾。放射強制力シナリオは RCP によるもので、放射強制力を 2100 年以降長期的に 2.6W/m^2 , 4.5W/m^2 , 6.0W/m^2 で安定化させるものと、2100 年時点で 8.5W/m^2 に達してその後も上昇するものの 4 種類である。2013 年 10 月時点で世界の約 40 以上の全球気候モデルが気候予測結果を提出し、CMIP5 のウェブサイトから公開されている (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>)。情報が提供されるのはモデル等による違いもあるが、1860 年から 2200 年までの月～3 時間単位情報であり、CMIP3 よりも期間が長くなり、時間解像度も向上している。空間解像度は 60～310km であり、CMIP3 よりも高くなっている場合が多い。

2.1.2 データ選択のポイント

CMIP5 が提供する気候予測情報は、放射強制力シナリオ（4 つ）と気候モデル（40 以上）の 160 通り以上の組み合わせがある。放射強制力シナリオの違いは、今後の世界の緩和策（温暖化防止に対する取り組み）の程度を示す。温暖化影響・適応評価においては、緩和策が非常に進むシナリオと、ほとんど進まないシナリオを対比しながら進めることが重要であり、排出シナリオの数は多いほうがよい。また、全く同じ排出シナリオを与えた場合でも、利用する全球気候モデルによって気候予測結果は異なるものになることが知られている¹²⁾。これは気候システムをモデル化する際の不確実性によるものである。よって、可能な限り多くのモデルを利用した解析が推奨されている¹²⁾。

上記の議論に基づけば、放射強制力シナリオと気候モデルの全ての組み合わせについて、影響・適応評価を行うのが望ましいことになる。しかし、複数分野の影響評価を多数の研究者が実施するにあたり、また、その結果を横断的にまとめて効果的に意思決定者に示すためには、シナリオ数が多すぎるとその実施が困難になる場合が多い。以下では、排出シナリオと気候モデルを選択するときの要点をまとめる。

2011 年末に南アフリカ・ダーバンで開催された第 17 回締約国会議（COP17）での合意を受け、気候変動枠組条約は全ての国に適用される 2020 年以降の新しい国際枠組み（以下「2020 年枠組み」）の 2015 年までの合意を目指しており、長期目標の検討は重要な課題である。RCP8.5 は排出量が最も大きく、産業革命前と比べて全球平均気温の上昇は 2100 年には 4°C 前後となる。現時点の緩和に

1 関するすべての約束と誓約が実施されたとしても、20%の確率で同上昇が2100
2 年までに4℃を超える¹³⁾。このため、気温上昇が4℃を超える世界における影
3 響に着目した研究が行われ、2013年には世界銀行より報告書が出版されている
4 ¹³⁾。次にRCP2.6は排出量が最も小さく、全球平均気温の上昇が長期的におお
5 よそ2℃以内に収まる。第16回気候変動枠組条約締約国会議(COP16)での合
6 意では、2℃目標の妥当性について2013年から2015年の間に再検討を実施する
7 ことになっている。RCP4.5とRCP6.0はこれらの中間にある。RCP4.5とRCP6.0
8 は気候変化の他に、エネルギー構成や技術進歩に関する将来想定も中庸で、
9 RCP8.5と2.6に比べて将来社会を検討しやすいという点で重要である。

10 気候モデルを選択するにあたっては、過去の気候の再現性は重要である。全
11 球規模の循環といったグローバルな気候の再現性に加え、例えば梅雨前線のよ
12 うに、日本の気候と風土を考える上では欠くことのできないローカルな気象現
13 象の再現性も必要となる。気候モデルにおける気候や気象現象の再現性を数値
14 化したものをメトリクスという。CMIP5でも多数のメトリクスが分析されてお
15 り¹⁴⁾、メトリクス(数値)の高いモデルを選択することが可能である。しかし
16 ながら、特にローカルな気象現象は評価する対象ごとにモデルの優劣が異なり、
17 総合的に甲乙をつけにくいことが問題である。また、過去の気候の再現性の高
18 さが、必ずしも将来変化の信頼性を保証しないという議論もある¹⁵⁾。

19 2.1.3 データの選択

20 排出シナリオについては上記の議論に基づき、また上限と下限を抑える必要
21 があることから、RCP8.5とRCP2.6を選択する。また、後述する力学的ダウ
22 スケールの入手可能性からRCP4.5も選択する。

23 気候モデルについては、日本の研究機関が開発したMIROC5¹⁶⁾と
24 MRI-CGCM3.0¹⁷⁾をまず選択した。現在、これらのモデルを利用して日本を含む
25 アジアの気候やモンスーン、梅雨前線等の再現性や将来変化の研究が実施され
26 ており^{18~19)}、今後さらに多くの知見や情報が得られる見込みがあるからであ
27 る。

28 これ以外に2つのモデルを選択した。選択の方法は基本的に花崎ほか⁴⁾と同
29 様である。花崎ほか⁴⁾はCMIP3の気候モデルの評価を行ったGleckler et al.²⁰⁾
30 に従い、20世紀の気候の再現性の高い上位50%のモデルを抽出し、その中から
31 日本付近の気温や降水量のモデル間のばらつきの幅を捉えるべく、4つのモデ
32 ルを選択した。本稿ではCMIP5の42の気候モデルについてGleckler et al.²⁰⁾と

同様の評価を行った Flato and Marotzke²¹⁾を利用し、13 項目あるメトリクスの単
純平均が中央値を超えた 22 のモデルを選択した。ただし、このうち 5 つのモデル
に関しては 2013 年 10 月時点で RCP8.5 の気候予測情報が得られなかったの
で除外した。これらに MIROC5 と MRI-CGCM3.0 を加えた 19 のモデルについて、
日本周辺の年平均気温と降水量の 20 年移動平均の変化を図 1 と図 2 のように用
意した。グレーで示されている範囲が、19 モデルのばらつきの幅ということが
できる。ここで、MRI-CGCM3.0 は気温に関しては幅の下限付近、降水に関し
ては幅の中央やや下位付近を推移することが分かる。一方 MIROC5 はそれぞれ
幅の下位 1/3、中央やや上位付近を推移している。ここで、19 モデル間の気温
のばらつきを捉えるため、気温が幅の上限と上位 1/3 付近を推移する GFDL
CM3²²⁾ と HadGEM2-ES²³⁾ を選択した。この 4 モデルの選択（太線）により、
19 モデルの気温のばらつきの幅（図 1 のグレーの範囲）が捉えられたことが確
認できる。降水の幅に関してもこれらの 4 モデルにより 2060 年以降はおおむね
捉えられた（図 2）。ただし、2000-2030 年に関しては幅の上部（図 2 の緑線よ
り上にあるおもに 3 モデルのふるまい）が、2030-2060 年に関しては幅の下部
（同じく青線より下のおもに 3 モデルのふるまい）が捉えきれていないこと
には注意が必要である。なお、降水のばらつきをより広く捉えられる別の 2 つの
モデルがあったが、それらは気温上昇が MIROC5 と MRI-CGCM3.0 と非常に似
ており、気温のばらつきを捉えられなくなるため、選択対象から外した。

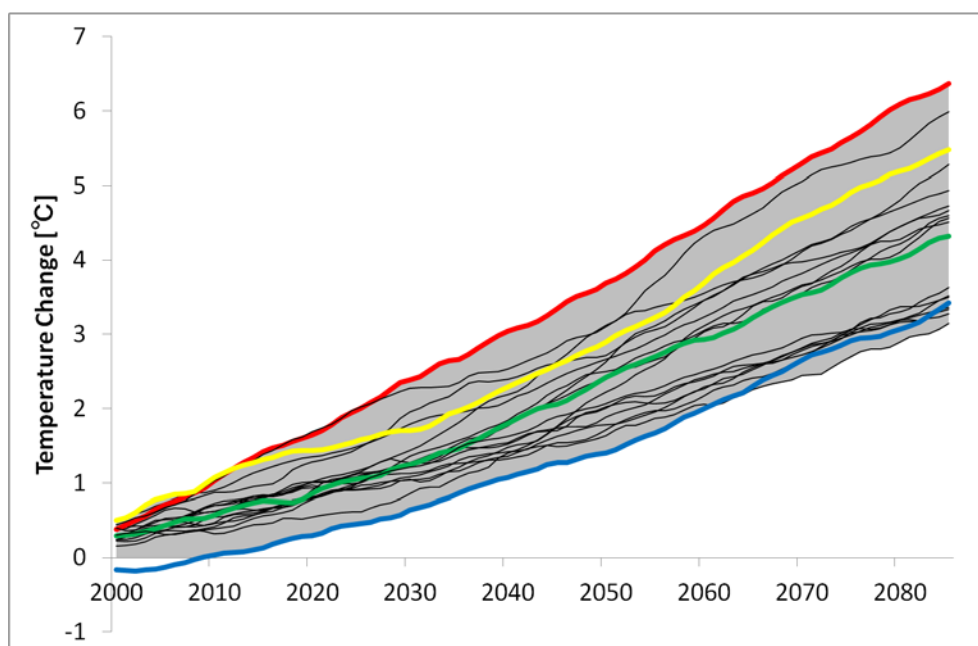


図 1 日本付近の気温変化量の 20 年移動平均の推移。赤は GFDL CM3, 黄色は HadGEM2-ES, 緑は MIROC5, 青は MRI-CGCM3, 他の細線は残りの 15 の全球気候モデルの結果である。グレーの範囲が全 19 モデルのばらつきを表す。

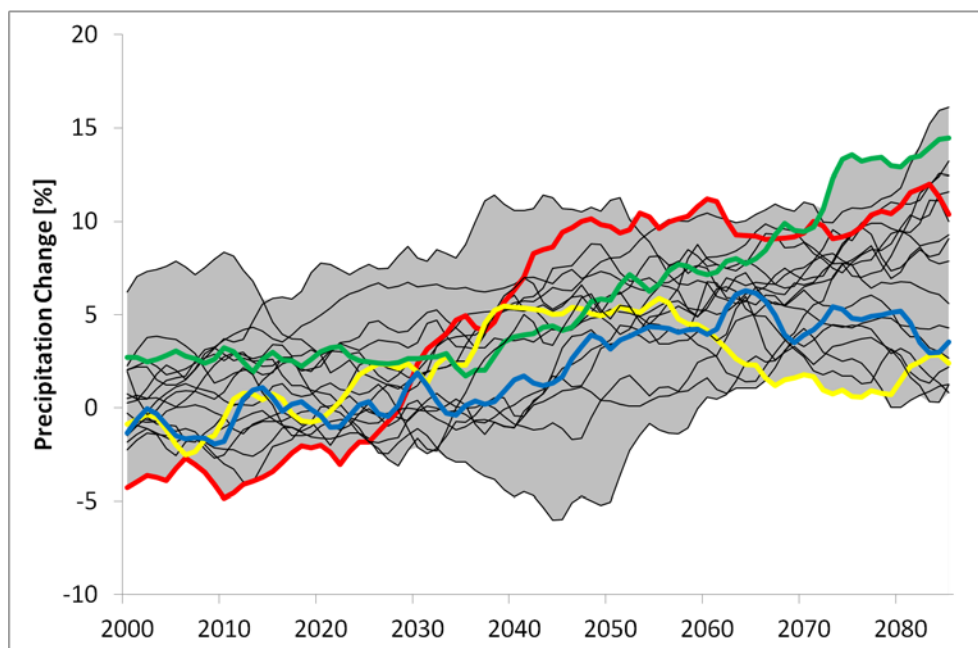


図 2 日本付近の降水量変化率の 20 年移動平均の推移。赤は GFDL CM3, 黄色は HadGEM2-ES, 緑は MIROC5, 青は MRI-CGCM3, 他の細線は残りの 15 の全球気候モデルの結果である。グレーの範囲が全 19 モデルのばらつきを表す。

2.2 高解像度化への対応

2.2.1 データの入手可能性

地球温暖化の予測とその影響評価は世界中で行われている。全球ではなく特定の地域を対象とした研究において、全球気候モデルの結果を直接利用しているケースは減りつつあり、多くは領域気候モデルを利用した力学的ダウンスケールの結果を利用している。北米においては North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP) プロジェクトが実施されており、SRES A2 排出シナリオ、過去 (1971-2000) と将来 (2041-2070) の 2 期間についてメキシコからカナダを含む北米全域を対象にした力学的ダウンスケールが行われている。利用されている領域気候モデルは 5 つで、それぞれ 2 つずつの全球気

候モデルの気候予測情報を境界条件としている²⁴⁾。ヨーロッパにおいては、EU-Ensemble プロジェクトにおいて、21 世紀末まで対象期間として、4 つの排出シナリオ、7 つの全球気候モデルの気候予測情報を境界条件として、複数の地域気候モデルを用いて、ヨーロッパ全域を対象にした力学的ダウンスケールが実施された²⁵⁾。

日本においても、日本全域を対象にした力学的ダウンスケールは実施されてきた。ただし、境界条件として使われた全球気候モデル、排出シナリオは上述のプロジェクトと比べて限定的で、マルチシナリオ・マルチモデル影響評価を実施するうえで困難がある。環境省地球環境推進費(S-5)地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究プロジェクトにおいて、WRF、NHRCM、RAMS の 3 つの領域気候モデルを利用した日本域の力学的ダウンスケールが行われた²⁶⁾。ただし、領域気候モデルの相互比較に力点が置かれており、境界条件として利用されたのは SRES A1B 排出シナリオ、MIROC3.2hires 全球気候モデル、期間は 2081-2100 年のみであった²⁶⁾。その後、同じ領域気候モデルを利用して MIROC5 全球気候モデルを境界条件とした力学的ダウンスケールも実施されたが、排出シナリオは RCP4.5 へと変更され、やはり全球気候モデルのみを変えるマルチモデル実験の実施は行われていない。なお CMIP3 を境界条件とし、日本全体を対象としないものについては多数の事例があり、例えば気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)プロジェクトでは、日本各地で力学的ダウンスケールとそれに基づく詳細な影響評価が研究されている (<http://www.mext-isacc.jp/>)。

2.2.2 データ選択のポイント

温暖化影響評価において、温暖化の進行（緩和策の程度）と影響の関係は重要であり、緩和策の目標を検討するためには、複数の安定化シナリオを用いて実施すること（マルチシナリオ）は必須である。また、全球気候モデルの温室効果ガス濃度上昇に対する応答のばらつきが極めて大きいため、マルチモデル以外は論文として受け付けられにくい。しかし上述の通り、日本全体をカバーしたマルチシナリオ・マルチモデルの力学的ダウンスケールによる気候予測情報は実施されていない。一方、影響評価研究者が自ら領域気候モデルを利用した力学的ダウンスケールを行うことは非常に困難である。日本は南北に細長いため、日本全域を対象とする長期間の力学的ダウンスケールは、解像度にもよるが、相当な計算機リソースを必要とする。また亜寒帯から亜熱帯まで、低平

地から盆地・山岳域まで、多様な気候帯や地形を含み、パラメータの調整や計算結果の検証にも多大な手数を必要とする。よって、上述のすでに実施されたダウンスケール結果を工夫して利用するのが現実的である。

2.2.3 データの選択

上述した通り、RCP4.5 放射強制力シナリオ下の MIROC5 全球気候モデルを境界条件として WRF、NHRCM、RAMS の 3 つの領域気候モデルを利用した力学的ダウンスケールが 2081-2100 年について実施されている。このうち WRF は現在、配布と公開が進んでおり²⁷⁾、今後も地域ごとの力学的ダウンスケールなどに広く利用されていくことが考えられたため、WRF を選択した。ここで、境界条件は MIROC5 モデルによる RCP4.5 シナリオのみであるが、2.1 節で述べた CMIP5 の全球気候モデルを直接利用する方法にも含まれており、これらを組み合わせることにより、マルチモデル・マルチシナリオを実現することが可能である。

2.3 バイアス補正方法

2.3.1 利用可能な方法

気候モデルは気温や降水量といった気象変数の時間変化や地理分布を記述する能力は高いものの、気象変数の絶対値については系統的な誤差（バイアス）を持つ場合が多い。気候予測情報を影響評価モデルの入力データとするにあたりバイアスを取り除く処理を行うが、これをバイアス補正と呼ぶ。気候予測情報から除くべきバイアスは、影響評価モデルや影響評価の対象によって様々である。例えば、Iizumi et al.²⁸⁾では、日本の広域水稻モデルを例に気候モデルのバイアスとシミュレートされた収量のバイアスとの関係を解析している。ただし、花崎ほか⁴⁾と同様に規約に基づいたサンプルデータを作成・配布する際に一つ選択する必要があるため、検討した結果を述べる。

花崎ほか⁴⁾のサンプルデータ作成において利用されたのがスケーリング法と呼ばれる手法である。これは以下のように表せる。

$$C_{y,m}^{fut} = O_{y,m}^{bas} + (\overline{M}_m^{fut} - \overline{M}_m^{bas}) \quad (1)$$

$$C_{y,m}^{fut} = O_{y,m}^{bas} \times (\overline{M}_m^{fut} / \overline{M}_m^{bas}) \quad (2)$$

ここで、 $C_{y,m}^{fut}$ はバイアス補正実施後の気象要素（気温や降水量など）、 $O_{y,m}^{bas}$ は観

測の気象要素、 $\overline{M}_m^{fut}$ と $\overline{M}_m^{bas}$ はそれぞれ全球気候モデル出力の将来期間と基準期間の月平均値である。この操作により、温暖化による月単位の平均的な変化分が基準期間の観測の時系列データに上乘せされる。この方法は実施が容易なことに加え、基準期間と将来期間の差異が単純で、解析もしやすい。反面、時系列が過去のままで振幅や変動の変化が扱えない問題や、観測値がたまたま 100 年に 1 度といった極端な現象が含まれていても一律に変化分を足したり掛けたるため、リスクを過大評価する問題などがある。

このほかにもバイアスを補正する方法は多くある。代表的なものは、気候モデルの気温や降水量の頻度分布を観測のそれと一致させる、Quantile mapping と総称される方法である。Piani et al.²⁹⁾ は基準期間において気候モデルの基準期間の累積分布関数 (Cumulative Distribution Function; CDF) を観測の CDF に変換する変換関数 (Transfer function) を作成し、これを気候モデルの将来期間の CDF に適用することでバイアス補正を実施した。Hempel et al.³⁰⁾ は Piani et al.²⁹⁾ の方法を改良し、気候モデルの現在期間と将来期間の月平均値の変化情報を保存できるようにした。Watanabe et al.³¹⁾ はさらに標準偏差の変化情報も保存しつつ、CDF を変換するバイアス補正方法を提案した。このほかに Weather generator を使う方法もある²⁶⁾。ただし、Weather generator は 1 地点ごとに気象条件を生成するため、気象場の空間的な連続性・整合性が求められる河川流量の温暖化影響評価などには不向きである。

2.3.2 方法の選択

サンプルデータを作る際の日単位の気候シナリオのバイアス補正を検討する。日単位の全球気候モデルの出力データをバイアス補正する際に、スケーリング法の問題は顕著となる。Quantile mapping は有効な方法であるが、CDF 等を近似する分布関数の当てはまりが悪い場合に、異常な補正結果をもたらすことがある。加えて、現在気候データから作成した変換関数を将来気候データに適用した場合、何らかの仮定を置いて、分布関数の裾を外挿せざるを得ないが、その際に異常値などの問題が発生しやすい。そこで、これらの中間的な方法である飯泉ほかによる累積分布関数法を使うことにした³²⁾。この累積分布関数法は、Quantile mapping と概念は似ているが、気候モデルのバイアス量は気象変数の値の分布関数上の位置 (パーセンタイル値) に依存し、その関係は現在気候でも将来気候でも変わらないとの仮定を置く。Quantile mapping では気象変数の値によって補正量が決まるが、累積分布関数法では気象変数のパーセンタイル

値で補正量が決まる。この違いにより、累積分布関数法では分布関数の裾の外挿が不要となる。累積分布関数法の計算手順は、時系列データを昇順に並び替えた経験的な CDF を基準期間の気候モデルと観測について作成し、関数に近似・変換することなく、その差分を直接将来期間の気候モデルに足すという方法である。累積分布関数法でバイアス補正を巡る全ての問題が解決するわけではないが、補正結果が安定し、複数の気象変数に対し単一の手法が適用できるため、実用上便利だという長所がある。

2.4 人口・土地利用の不確実性への対応

我が国の人口の予測は国立社会保障・人口問題研究所（社人研）によって行われてきた。今回利用したのは 2008 年に発行されたもので、2010 年から 2035 年までを 5 年刻みで、市区町村単位で示されている³³⁾。ここで、物理モデルを使った影響評価を実施するにあたり、基準期間の緯度経度直交のメッシュ単位人口をもとに、市区町村単位人口の予測と整合するようにメッシュ人口を推計した。基準期間の人口情報としては 2005 年の国勢調査に基づく日本の男女別年齢 5 歳階級別人口を 3 次メッシュで示したものを利用した。

将来期間は 2010-2035 年と 2040-2100 年の 2 期間に分けて作成した。まず 2010-2035 年については、2000 年～2005 年の 5 年間の人口変化率をもとに人口分布の偏在化（集約化）・均一化（分散化）傾向を考慮してメッシュ人口を推計する有賀・松橋の手法³⁴⁾を適用し、(A)偏在化シナリオ・(B)変化なしシナリオ・(C)均一化シナリオ（ともに死亡中位・出生中位）による 3 次メッシュ人口を作成した。その後、社人研の複数の将来推計から「(1)死亡中位・出生中位」・(2)「死亡低位・出生高位」・「(3)死亡高位・出生低位」を利用し、上記 3 次メッシュ人口を補正した。これにより、9 通りのシナリオを作成した。

次に 2040-2100 年については、社人研の推計が 2035 年で終わっているため、この延長を行った。死亡率・出生率・移動率に関する上記 3 シナリオの 2035 年の都道府県別推計値・市町村別推計値を初期値として、有賀・松橋で検討・採用した延長手法³⁴⁾を適用し、2040～2100 年の 5 年おきに上記 3 シナリオを用意した。さらに、2035 年までと同様の補正処理により、(A)偏在化シナリオ・(B)変化なしシナリオ・(C)均一化シナリオについて 3 次メッシュ人口を作成した。これにより、やはり 9 通りのシナリオを作成した。

最後に加賀による人口を説明変数とした簡易土地利用モデル⁹⁾を利用して、9 つの人口シナリオに対応した土地利用シナリオを作成した。基準年（2006 年）

のデータは国土数値情報土地利用 3 次メッシュデータを利用した。土地利用は 11 区分（森林，田，その他の農用地，荒地，建物用地，幹線交通用地，その他用地，河川及び湖沼，海浜，海水面，ゴルフ場）である。

3. シナリオ

これまでの議論と方法に基づき、新たな共通シナリオを開発した。共通シナリオは大きく、気温や降水などの気候シナリオと、人口・土地利用シナリオに分類される。便宜上、花崎ほかのシナリオ⁴⁾を第 1 版、本稿のそれを第 2 版と呼ぶ。なお、気候シナリオは第 2 版および第 2 版補遺の 2 つに分かれる。これらをあらかじめ表 1 にまとめておく。

表 1 第 1 版，第 2 版，第 2 版補遺の関係

	第 1 版	第 2 版	第 2 版補遺
気候予測情報	CMIP3	CMIP5	CMIP5
排出シナリオ	SRES A1B	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	RCP4.5
気候モデル	MIROC3.2hires MRI-CGCM2.3.2 GFDL CM2.1 CSIRO MK3.0	MIROC5 MRI-CGCM3 GFDL CM3 HadGEM2-ES	MIROC5
ダウンスケー ル (DS)	線形内挿	線形内挿	WRF で力学的 DS，そ の後線形内挿
現在期間	1981-2000	1981-2000	1981-2000
将来期間	2031-2050 2081-2100	2031-2050 2081-2100	2081-2100
時間解像度	月	月	日
バイアス補正	スケーリング法	スケーリング法	累積分布関数法

3.1 基本情報

空間領域および期間に関しては第1版と同様とする。すなわち、空間領域は日本全域とし、告示143号に基づく標準地域メッシュ³⁵⁾の範囲のうち、南鳥島と沖ノ鳥島を除いた北緯24度から46度まで、統計122度から149度までを対象領域とする。空間解像度は後述する人口・土地利用シナリオとの整合性から、3次メッシュ（第3次地域区画）を基準とし、緯度間隔30秒、経度間隔45秒（約1km×1kmに相当）とする。

期間は1981-2000年を基準期間とし、2031-2050年と2081-2100年を影響評価対象期間とする。後者は力学的ダウンスケールを用いた気候予測情報の入手可能な期間にも合わせている。

3.2 気候シナリオ第2版

3.2.1 規約

気候シナリオ第2版が規定するのは、現在気候データ、温室効果ガス排出シナリオ、気候モデルの3つである。空間内挿方法、バイアス補正方法、時間解像度は利用者側で決定する。なお、本研究では、次節に示す空間内挿方法、バイアス補正方法を利用した月単位と日単位のサンプルデータを作成した。

現在気候データは、農業環境研究所の作成した「アメダスメッシュ化データ」とする³⁶⁾。将来の温室効果ガス排出シナリオにはRCP2.6, RCP4.5, RCP8.5の3つを用いる。全球気候モデルはCMIP5に参加した全球気候モデルのうちMIROC5、MRI-CGCM3.0、GFDL CM3、HadGEM2-ESの4つとする。

3.2.2 サンプルデータ

第2版の規約に従い、影響評価モデルに入力可能な一つの時系列気候シナリオを作成した。気象要素は日最高気温、日最低気温、平均気温、降水量の4変数である。全球気候モデルの元解像度から3次メッシュ（約1km×1km）まで線形内挿し、月単位の出力をスケーリング法（式(1-2)）でバイアス補正した。

3.3 気候シナリオ第2版補遺

3.3.1 規約

MIROC5 全球気候モデルによる RCP4.5 放射強制力シナリオ下の 2081-2100 年の気候予測情報を境界条件にした領域気候モデル WRF による力学的ダウンスケールを利用する。これは文字通り、全球気候モデルのみを利用した第2版の一部を領域気候モデルを利用したもので置き換えるための補助的な気候シナリオである。

3.3.2 サンプルデータ

WRF の気候予測情報は日単位、空間解像度は 20km である。これをまず、線形内挿することにより、3 次メッシュに変換した。次に累積分布関数法³²⁾を利用してバイアス補正を行った。気象要素は日最高気温、日最低気温、平均気温、降水量の 4 変数である。

このほかに、簡易手法による対照データも一つ作成した。全球気候モデル MIROC5 は、月単位の他に、日単位データも公開されている。まず、第 2 版サンプルデータ作成時と同様に空間的に線形内挿することにより、これを 3 次メッシュに変換した。その後、累積分布関数法でバイアス補正を行った。つまり、第 2 版補遺のサンプルデータとの違いは、力学的ダウンスケールの有無のみである。第 2 版と第 2 版補遺、さらにこの対照データを比較することにより、力学的ダウンスケールが影響評価に及ぼす効果を調査することができる。

3.4 人口・土地利用シナリオ

3.4.1 規約

人口の基準年は 2005 年とし、国勢調査データを利用する。土地利用の基準年は 2006 年とし、国土数値情報土地利用 3 次メッシュデータを利用する。人口の将来シナリオに関しては、2-4 節に示したように、市町村別の人口変化想定として「(1)死亡中位・出生中位」・「(2)「死亡低位・出生高位」・「(3)死亡高位・出生低位」の 3 想定、各市町村内の空間分布変化に関する想定として(A)偏在化シナリオ・(B)変化なしシナリオ・(C)均一化シナリオの 3 想定、その結果として両者の組み合わせによる 9 つのケースでの 3 次メッシュ人口を用いる。また、土地利用に関しては、上述の 9 つの人口シナリオに対応した 3 次メッシュ土地利用シナリオを用いる。

3.4.2 サンプルデータ

上記規約に従い、影響評価モデルに入力可能な 3 次メッシュ人口シナリオ(性別・年齢階層別)ならびに 3 次メッシュ土地利用シナリオ(11 区分)を、2005 年～2100 年の期間について 5 年おきに作成した。

3.5 優先順位

以上を踏まえてシナリオの組み合わせを考えると、気候モデル(MIROC5, MRI-CGCM3.0, GFDL CM3, HadGEM2-ES)、放射強制力シナリオ(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)、人口・土地利用シナリオ(人口 3 通り×空間分布 3 通り)、期間(2031-50 / 2081-00)の $4 \times 3 \times 9 \times 2 = 216$ 通りとなり、相当な数となる。そ

ここで、これまでの議論を踏まえ、以下のように優先順位を提案する。

まず期間であるが、2031-2050 年と 2081-2100 年では社会経済の見通しの想定を行いやすい前者を優先とするが、両方とも実施することが望ましい。次に人口・土地利用は空間分布変化なしの中位推計を最優先とし、続いて同高位、同低位推計、空間分布変化ありの順とする。放射強制力シナリオは最も温暖化が進んでしまった場合（悲観）の想定を得るため RCP8.5 を最優先とし、次に最もよく温暖化を食い止められた場合（楽観）あるいは緩和策の最大限の効果を見積もるために RCP2.6、最後に領域気候モデルとの連携が行える RCP4.5 の順とする。気候シナリオは MIROC5, MRI-CGCM3.0, GFDL CM3, HadGEM2-ES の順とする。これらを踏まえると優先順位は表 2 のようになる。

表 2 優先順位の日安

優先		組み合わせ	備考
第 1	人口中/高/低, 2 期間 RCP8.5, MIROC	6 通り	人口・土地利用の不確実性の検討。
第 2	人口中/高/低, 2 期間 RCP4.5/2.6, MIROC	+ 12 通り	長期安定化目標（複数の放射強制力シナリオ）の検討。
第 3	人口中/高/低, 2 期間 RCP8.5, MRI/GFDL/HadGEM2	+ 18 通り	気候モデル不確実性の検討。
第 4	人口中/高/低, 2 期間 RCP2.6, MRI/ GFDL/HadGEM2	+ 18 通り	RCP2.6 放射強制力シナリオ下による検討の網羅。
第 5	人口中/高/低, 2 期間 RCP4.5, MRI/ GFDL/HadGEM2	+ 18 通り	RCP4.5 放射強制力シナリオ下による検討の網羅。
第 6	人口残り 6, 2 期間 RCP4.5, MRI/ GFDL/HadGEM2	+ 144 通り	全人口シナリオ下による検討の網羅。

人口中/高/低：空間分布は変化なしを利用

4. 結論

日本の物理的な温暖化影響評価を実施するうえで、多分野の研究者が横断的に利用できる気候と人口・土地利用シナリオの構築を行った。気候シナリオは第2版と第2版補遺に大別され、前者は4つの気候モデル、3つの放射強制力シナリオ、2つの期間、後者はそれぞれ1つずつからなる。前者は月単位で、後者は日単位で日本全体をカバーする3次メッシュのサンプルデータを入手可能である。人口・土地利用シナリオは人口と空間分布の異なる9シナリオからなり、同じく3次メッシュのデータが入手可能である。

本稿による検討により、花崎ほか⁴⁾の共通シナリオのうち、4つの問題が解決した。第1に、気候予測情報がCMIP3からCMIP5へと更新された。これにより、最新の気候モデルの利用が可能になった。第2に、3つの放射強制力シナリオを利用したいいわゆるマルチシナリオの影響評価が可能になった。第3に、1つの気候モデル、1つの放射強制力シナリオ、1つの期間に限られるが、領域気候モデルを利用した気候予測情報が加わった。第4に、人口の総数とその空間分布が異なる9つの人口・土地利用シナリオが利用可能になった。

今後の課題は大きく3つある。第1に、本稿では力学的ダウンスケールに基づく気候シナリオを提供するため、第2版補遺を提案したが、境界条件として利用する気候モデルと放射強制力シナリオの数が1つに限られるという問題が残った。この問題の解決には、第2版補遺の手法を、第2版の4つの気候モデルと3つの放射強制力シナリオに適用することが必要である。さらにバイアス補正に関しては、温暖化による年・月平均値の変化だけでなく（スケーリング法で考慮できる唯一の情報）、分布関数（累積分布関数法で追加的に考慮できる情報）や標準偏差、振幅、トレンドも活かせるバイアス補正^{30~31)}の実施も必要である。このためには、大量の計算を実施するための計算機資源と、領域気候モデルや高度なバイアス補正を実施するための専門家の確保が必要である。第2に、本稿では花崎ほか⁴⁾と同様に全球のメトリクスを利用して全球気候モデルの選択を行っており、全球規模の再現性は担保できたものの、日本の気候・気象現象の再現性の高いモデルが選択できたか不明である。この問題の解決には全球・領域気候モデルの解析の専門家とのさらなる協働が欠かせない。第3に、本稿では人口と人口のみを説明変数とするモデルを用いた土地利用シナリオを構築したが、日本の社会・経済の変化を示す包括的なシナリオとはなっていない。この問題の解決には、産業、エネルギー、経済に関する専門家も交え

た社会経済シナリオ開発のチームの編成が必要である。世界の社会経済シナリオである Shared Socioeconomic Pathways³⁷⁾との連携についても考慮が必要である。

謝辞

本研究は環境省環境研究総合推進費（S-8）の支援により実施された。

文献

- 1) IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976pp.
- 2) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム (2008) 地球温暖化「日本への影響」 — 最新の科学的知見 —. http://web.nies.go.jp/s4_impact/pdf/20080815report.pdf, (accessed 2013-10-30).
- 3) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム (2009) 地球温暖化「日本への影響」 — 長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価 —. http://web.nies.go.jp/s4_impact/pdf/20090612.pdf, (accessed 2013-10-30).
- 4) 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.
- 5) Piontek, F., et al. (2013) Multisectoral climate impacts in a warming world. P. Natl. Acad. Sci. USA, in press.
- 6) Nakicenovic, N. and R. Swart (2000) Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 612pp.
- 7) Meehl, G.A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer and K.E. Taylor (2007) The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. B. Am. Meteorol. Soc., 88, 1383-1394.
- 8) 国立社会保障・人口問題研究所 (2007), 日本の都道府県別将来推計人口（平成 19 年 5 月推計）. 国立社会保障・人口問題研究所. 217pp.
- 9) 加賀昭和 (2007) 流域圏自然環境の多元的機能の劣化診断手法と健全性回

復施策の効果評価のための統合モデルの開発．環境技術開発等推進事業
（自然共生型流域圏・都市再生技術研究）研究開発成果報告書．293pp.

- 10) Taylor, K.E., R.J. Stouffer and G.A. Meehl (2012) An overview of cmip5 and the experiment design, B. Am. Meteorol. Soc., 93, 485-498.
- 11) van Vuuren, D., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. Smith and S. Rose (2011) The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change, 109, 5-31.
- 12) Knutti, R., G. Abramowitz, M. Collins, V. Eyring, P.J. Gleckler, B. Hewitson and L. Mearns (2010) Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. 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.
- 13) Schellnhuber, H.J., et al. (2013) Turn down the heat: climate extremes, regional impacts, and the case for resilience - full report. World Bank, Washington DC. 84pp.
- 14) Sillmann, J., V.V. Kharin, X. Zhang, F.W. Zwiers and D. Bronaugh (2013) Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. J. Geophys. Res., 118, 1716-1733.
- 15) Knutti, R. (2008) Should we believe model predictions of future climate change?, Philos. T. Roy. Soc. A, 366, 4647-4664.
- 16) Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe and M. Kimoto (2010) Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity, J. Climate 23, 6312-6335.
- 17) Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T.Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose and A. Kitoh (2012) A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 - Model Description and Basic Performance - , J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II 90A, 23-64.

- 18) Ogata, T., H. Ueda, T. Inoue, M. Hayasaki, A. Yoshida, S. Watanabe, M. Kira, M. Ooshiro, and A. Kumai (2013) Projected future changes in the Asian Monsoon: A comparison of CMIP3 and CMIP5 model results, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Submitted.
- 19) Sperber, K.R., H. Annamalai, I.S. Kang, A. Kitoh, A. Moise, A. Turner, B. Wang, and T. Zhou (2013) The Asian summer monsoon: an intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century, *Clim. Dyn.*, 41, 2711-2744.
- 20) Gleckler, P.J., K.E. Taylor and C. Doutriaux (2008) Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.*, 113, D06104.
- 21) Flato, G. and J. Marotzke (2013) Evaluation of Climate Models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, pp. 205.
- 22) Donner, L.J., B.L. Wyman, R.S. Hemler, L.W. Horowitz, Y. Ming, M. Zhao, J.-C. Golaz, P. Ginoux, S.J. Lin, M.D. Schwarzkopf, J. Austin, G. Alaka, W.F. Cooke, T.L. Delworth, S.M. Freidenreich, C.T. Gordon, S.M. Griffies, I.M. Held, W.J. Hurlin, S.A. Klein, T.R. Knutson, A.R. Langenhorst, H.-C. Lee, Y. Lin, B.I. Magi, S.L. Malyshev, P.C.D. Milly, V. Naik, M.J. Nath, R. Pincus, J.J. Ploshay, V. Ramaswamy, C.J. Seman, E. Shevliakova, J.J. Sirutis, W.F. Stern, R.J. Stouffer, R.J. Wilson, M. Winton, A.T. Wittenberg and F. Zeng (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.
- 23) Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, P. Halloran, T. Hinton, J. Hughes, C.D. Jones, M. Joshi, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, S. Sitch, I. Totterdell, A. Wiltshire and S. Woodward (2011) Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.* 4, 1051-1075.
- 24) Mearns, L.O., W.J. Gutowski, R. Jones, L.-Y. Leung, S. McGinnis, A.M.B. Nunes and Y. Qian (2009) A regional climate change assessment program for North America. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 90, 311-312.
- 25) van der Linden, P. and J.F.B. Mitchell (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 160pp.

- 26) Iizumi, T., I. Takayabu, K. Dairaku, H. Kusaka, M. Nishimori, G. Sakurai, N.N. Ishizaki, S.A. Adachi and M.A. Semenov (2012) Future change of daily precipitation indices in Japan: A stochastic weather generator-based bootstrap approach to provide probabilistic climate information. *J. Geophys. Res.*, 117, D11114.
- 27) Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the Advanced Research WRF Version 3, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA. 113pp.
- 28) Iizumi, T, M. Nishimori and M. Yokozawa (2010) Diagnostics of climate model biases in summer temperature and warm season insolation for the simulation of regional paddy rice yield in Japan. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 49, 574-591.
- 29) Piani, C., G.P. Weedon, M. Best, S.M. Gomes, P. Viterbo, S. Hagemann and J.O. Haerter (2010) Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J. Hydrol.*, 395, 199-215.
- 30) Hempel, S., K. Frieler, L. Warszawski, J. Schewe and F. Piontek (2013) A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth Syst. Dynam.*, 4, 219-236.
- 31) Watanabe, S., S. Kanae, S. Seto, P.J.F. Yeh, Y. Hirabayashi and T. Oki (2012) Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models. *J. Geophys. Res.*, 117, D23114.
- 32) 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.
- 33) 国立社会保障・人口問題研究所 (2008) 日本の市区町村別将来推計人口（平成 20 年 12 月推計）. 国立社会保障・人口問題研究所. 174pp.
- 34) 有賀敏典・松橋啓介 (2012) 地域内人口分布の偏在化・均一化シナリオ構築手法の開発国勢調査 3 次メッシュデータを用いて. *都市計画論文集*, 47, 745-750.
- 35) 行政管理庁 (1973) 統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード. 昭和 48 年 7 月 12 日行政管理庁告示 143 号.

- 1 36) 清野 豁 (1993) アメダスデータのメッシュ化について. 農業気象, 48,
2 379-383.
- 3 37) Kriegler, E., B.C. O'Neill, S. Hallegatte, T. Kram, R.J. Lempert, R.H. Moss and
4 T. Wilbanks (2012) The need for and use of socio-economic scenarios for climate
5 change analysis: A new approach based on shared socio-economic pathways.
6 Global Environ. Chang. 22, 807-822.
7

**Climate, Population, and Land Use Scenarios for Climate Change Impact and
Adaptation Assessments in Japan (Second Edition)**

Naota HANASAKI *, Kiyoshi TAKAHASHI *, Yasuaki HIJIOKA *,
Hiroyuki KUSAKA **, Toshichika IIZUMI ***, Toshinori ARIGA *,
Keisuke MATSUHASHI *, Nobuo MIMURA ****

* National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba,
Ibaraki 305-8506, Japan

** Center for Computational Physics, Tsukuba University, 1-1-1 Tennodai,
Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

*** National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai,
Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan

**** Center for Water Environment Studies, Ibaraki University, 4-12-1
Nakanarusawacho, Hitachi, Ibaraki 316-8511 Japan

Abstract

The extent of climate change effects ranges widely. For comprehensive assessment of the impact of climate change and formulation of adaptation policy, implementation of interdisciplinary research is needed under a common future assumption (hereafter common scenario). In this paper, a common scenario for Japan is proposed using the latest climate and population projection. We used the climate projection of four climate models and three radiative forcing scenarios of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). We utilized the results of dynamical downscaling using a regional climate model which is consistent with the global scenarios after applying bias-correction techniques. We developed nine population projection scenarios taking into account not only the total numbers but also its spatial distribution of it. We proposed land use scenarios compatible with these population projections. By conducting multi-sectoral research on climate change impact and adaptation, the entire picture of the impact of climate change on Japan will be revealed.

1 **Key words:** Global environment, Climate change