課題名 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

3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究

課題代表者名 高藪出(国土交通省気象庁気象研究所環境·応用気象研究部第2研究室)

研究実施期間 平成19~23年度

累計予算額 483,366千円(うち23年度98,400千円) 予算額は間接経費を含む

研究体制

- (1)複数の20kmモデルからのマルチモデルアンサンブル手法による20kmスケール気候シナリオの作成 (国土交通省気象庁気象研究所)
- (2)複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究

((独)防災科学技術研究所)

- (3)空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価 (筑波大学生命環境科学研究科)
- (4)20km地域気候モデルのバイアス特定と水資源評価のための統計的ダウンスケーリング (京都大学防災研究所)
- (5) 力学的手法と統計的手法を併用した農作物影響評価のためのダウンスケーリングの研究 ((独)農業環境技術研究所)
- (6) 水災害影響評価モデルのための統計的ダウンスケーリング手法の開発 (東京工業大学)
- (7)双方向ネストモデルを用いた力学的ダウンスケーリングの研究 (北海道大学大学院理学研究院)

I. 戦略課題S-5テーマ3の全体構成

本テーマは、大気海洋結合モデルによる将来予測結果と、その影響評価を研究している多くのユーザーの間に橋を架けることである。ここでは、そのために大きく次の3つのテーマに沿った計画を立てた。

- 1. 気候予測データを詳細化(ダウンスケール)する。
- 2. 詳細化した気候予測データの信頼性を確保する。
- 3. 詳細化した気候予測データをユーザーの要求に応じて加工する。

そのために、本テーマの参画各機関は図1に示すように緊密な連携を取りながら研究を進めた。まず、地球温暖化の主要な予測データである全球大気・海洋結合モデル(ここではMIROC-hiモデルとMIROC5モデルを用いた)の計算結果を、防災科研・筑波大・気象研の3機関がそれぞれ独自の地域気候モデルを用いて力学的にダウンスケールした。このさい、京大防災研はアメダスデータ等を基に都府県・北海道支庁別毎に月平均値でバイアス検知するシステムを開発し、それを各機関に配布することにより各モデルのデータの品質をそろえることに成功した。また、北大が開発した双方向ダウンスケールの結果との比較から、力学的ダウンスケールの妥当性も検討された。また、マルチモデルダウンスケールのシナリオを1つにまとめる手法についても検討が行われた。さらに、本テーマでは代表的なユーザーとして農業分野(農環研)・水利分野(東工大・京大防災研)・都市気候分野(筑波大・京大防災研・気象研)を選びそれぞれに最適な情報加工技術の提案を試みた。農業分野については米の収量モデルに最適な手法の開発に挑んだ。また、水利分野では、洪水・渇水の再現に最適な手法の開発に挑戦した。これらから、現在の力学的ダウンスケーリングの技術水準ではバイアス補正が有効であることが示された。都市域に関しては筑波大・防災研・気象研の3機関の都市モデルによる地域気候モデルの2次的なダウンスケールを実施し、都市域の地表面温度の変動が調べられた。

図1 本テーマの研究構成



Ⅱ. 本研究により得られた科学的成果

地域気候シナリオにおける課題解決の観点でのマルチモデルアンサンブル手法の適用や様々なダウンスケーリング技術の総合的手法開発を行った。マルチモデルシステムによるダウンスケーリングシステムの開発と国内適用、また都市モデル、統計的ダウンスケーリングといった様々なダウンスケーリング手法の統合化と国内への適用は初の試みであり、その科学的意義は大きい。

Ⅲ. 成果の環境政策への貢献

ダウンスケーリング技術の統合的手法開発により、不確実性の情報も含んだ詳細かつ信頼性の高い地域気候シナリオを提供するシステム構築が進んだ。将来予測実験のダウンスケーリングも始まり、地球温暖化の確度の高い地域ごとの影響評価や適応策検討に利用可能なデータの提供が可能となった。データは文部科学省のデータ統合・解析(DIAS)システムへの登録が進んでおり、S-8あるいは文部科学省気候変動イニシアチブ(RECCA)等を通じて政策決定への利用がなされると期待される。

IV. 研究概要

1. はじめに(研究背景等)

これまでの温暖化研究の進展により、地球が温暖化に直面していることはほぼ確実となり、具体的な対応が 社会的な要請となって来た。このプロジェクトはそのような研究の新しい局面に対応し、社会的な要請に積極的 に応えることを目的として認められたものである。

全球気候モデルから出力される気候予測結果と具体的な影響評価に求められる入力情報としての予測値の空間解像度と精度には、現在なお大きな開きがあることを認めざるをえない。本テーマは、地球温暖化予測と社会的影響評価の間にあって両者を結び、全球気候モデルによる温暖化予測情報から最大限の情報価値を引出して影響評価に渡す役割を担うものである。

2. 研究開発目的

気候モデルから影響評価に向けて最大限の情報を得るためには、予測結果のみならず予測精度の情報が必要になる。全球モデルに関しては、従来は単一のモデルで各種条件を取り換えて計算する、いわゆるアンサンブル手法が用いられてきたが、最近では、これらを発展させ、同程度の精度を有する多くのモデルの結果を総合して判断するいわゆるマルチモデルアンサンブルが着目されるようになってきた。我々はこの手法を地域気候モデルに適用し、予測結果の不確実性の定量化に臨みたいと考える。さらにここでは、個々のモデルのバイアスをシステマティックに評価し総合的に不確実性の低減を図る試みにも挑戦する。全球気候モデルの予測結果から詳細な情報を引き出す技術をダウンスケーリングと呼んでいるが、この方法としては大きく分けて、天気予報の技術の応用として発展してきた力学的な数値シミュレーション技術を駆使する「数値モデル」によるものと、影響評価技術の応用として発展してきた統計的手法を駆使する手法の2種類がある。これらは、これまで気候モデル毎あるいは影響評価の対象毎に個別に技術開発がなされてきた。各々、条件に応じた長所・短所が指摘されながら、具体的・定量的な特性を議論するには至っていない。本テーマでは個々の手法の特性を体系的に把握し、目的に応じて最大限の効果を得るダウンスケーリング技術の確立を図ることを目指している。また、上に掲げた様々な課題を成功させるためには、影響評価研究が必要とするデータの種類・精度要求が、モデル・ダウンスケーリング手法の改良にフィードバックする環境作りも必要となる。本プロジェクトに参画した7機関は密な連携を取りつつ本課題に挑む。

3. 研究開発の方法

(1) 複数の20kmモデルからのマルチモデルアンサンブル手 法による20kmスケール気 候シナリオの作 成

本サブ課題ではマルチモデルアンサンブル作成用のデータの作成を行った。また、都市気候のダウンスケーリングを実施した。更に、本テーマで計算された3機関の地域気候モデルの結果からシナリオを作るためにベイズ統計、パターンスケーリングのアプローチを行った。国際ワークショップを毎年実施し、これらの成果の世界の研究者へ向けての発信と情報交換を行った。

(2)複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究

本サブ課題では、日本域を対象としたダウンスケーリング実験を行い、東京大学などが共同開発した全球気候モデルと気象研究所の全球気候モデルによる気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の新シナリオ実験を行った。力学的ダウンスケーリング手法がもたらす付加価値やモデルの違いによって生じる結果の不確実性について、河川流域平均の気温・降水量や、海上風、台風の上陸数・強度・経路、積雪等を評価した。アジアを対象とした地域気候モデル相互比較国際ワークショップ(統合地域ダウンスケーリング計画東アジア版(CORDEX-East Asia)、アジアにおける地域気候モデル相互比較プロジェクト(RMIP))に参加し、成果の発信とアジアへの展開に向け情報交換を行った。

(3)空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価

S5-3の上位研究計画のマルチモデル・ダウンスケーリングでは、複数の領域気候モデルによるダウンスケールを実施し、領域気候モデルが持つバイアスによって生じる不確実性の評価を行う。また、都市キャノピーモデルを組み込んだ高解像度領域気候モデルを用いて、2070年代の首都圏の将来気候予測を実施する。さらには、温室効果ガスによる気候変化と都市化の影響を評価する。さらには、第5期結合モデル国際比較プロジェクト() CMIP5)に参加した大気海洋結合全球大気モデル(AO-GCM)による全球気候予測結果とテーマ4によって作成された現在の都市データと将来の都市データを高解像度領域気候モデルの入力データに用いて、都市シナリオを考慮した首都圏の将来気候予測を実施する。

(4)20km地域気候モデルのバイアス特定と水資源評価のための統計的ダウンスケーリング

アメダスデータを用いた都府県・北海道14支庁別にモデルの月別バイアス検出システムを構築し、地域気候モデルによるダウンスケールを実施した防災科研・筑波大・気象研に配布、モデルのチューニングに活用した。本システムを利用してバイアス補正システムを開発した。また、雲解像非静力学モデルに都市キャノピーの影響を考慮できる詳細な陸面過程モデルを導入した雲解像大気陸面結合モデル(CReSiBUC)を開発・改良した、気候変動の影響を調べることが可能なモデルを用いて、地域気候モデルの結果から解像度2kmへのダウンスケールを行った。

(5) 力学的手法と統計的手法を併用した農作物影響評価のためのダウンスケーリングの研究

まず、現在気候要素の累積分布関数を将来に適用し温暖化実験の出力値を補正する累積分布関数法 (CDF)、現在気候システムにおける大循環要素と気候要素との統計的関係を将来に拡張する多変量線形重回帰(MMLR)法等、様々な統計的ダウンスケーリング手法を開発・発展させる。次に本テーマで出力された地域気

候モデル(RCM)実験結果を用い、CDF法とMMLR法により、同じ境界条件である長期再解析データ(JRA-25)を用いた、複数の力学的ダウンスケーリング結果との相互比較を行う。また主にウェザージェネレータ(Weather Generator: WG)法を用いて、日本における地点・日別の気候シナリオを作成する。

(6) 水災害影響評価モデルのための統計的ダウンスケーリング手法の開発

本研究では、離散ウェーブレット解析を用いたバイアス補正手法を提案し、提案手法を含む種々のバイアス補正手法を、本テーマの3つの地域気候モデル(気象研究所NHRCM、防災科学技術研究所RAMS、筑波大学WRF)にそれぞれ適用し、得られた降水量データの性質を比較した。また、得られた複数の日降水量データに対して自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Maps)というパターン認識手法を適用し空間的なバイアス補正をおこなった。これらの補正手法が、日降水量の空間分布の再現性に与える影響を現在期間(1981-2000)を対象として評価した。

(7)双方向ネストモデルを用いた力学的ダウンスケーリングの研究

本課題では、双方向ネストモデルのセットアップを行い、寒冷域と熱帯域の気象現象のシミュレーションを行った。両地域で一方向ネスト実験(通常のダウンスケーリング実験)との比較などを行い、双方向化の影響を調べた。

4. 結果及び考察

(1)複数の20kmモデルからのマルチモデルアンサンブル手法による20kmスケール気候シナリオの作成

複数の地域気候モデルによるダウンスケーリングの特性について調査を行った。いずれのモデルでも月降水量の改善が顕著であった。また、モデル間で共通のバイアスがあり、これにはモデル解像度、物理プロセスのパラメタリゼーションの影響が大きいことが明らかになった。これら様々なモデルによるダウンスケーリングの結果はベイズ統計により1つのシナリオに、またパターンスケーリングの手法により幅を持ったシナリオとしてまとめることが可能であることが示された。都市モデルによるダウンスケーリングでは都市成長シナリオの影響が今後数10年間、無視できないことを示した。

(2)複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究

全球大気・海洋結合モデル出力、全球大気モデル出力、再解析データの各々を境界条件とした力学的ダウンスケールを行い、大規模循環場の系統誤差が力学的ダウンスケーリングの付加価値に及ぼす影響について検討した。その結果、力学的ダウンスケーリング手法を適用した場合、水平格子間隔の粗い全球気候モデルなどの境界条件を単純に空間内挿した場合に比べ、ダウンスケールされたデータの現在気候の再現精度が大きく改善されることが分かった。また、極端現象と台風経路の誤差について、3つの異なる地域気候モデルの出力結果を平均する(マルチモデルアンサンブルを行う)ことで、再現性が改善することが示された。

(3)空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価

第3期結合モデル国際比較プロジェクト (CMIP3)参加の、東大大気海洋研・国立環境研・地球環境フロンティア研究センターが共同開発した大気・海洋・陸面結合モデルであるMIROCモデルのMIROC3-hiresと第5期結合モデル国際比較プロジェクト (CMIP5)参加のMIROC5からのダウンスケール実験を行った結果、MIROC5を用いた結果の方がより大きな昇温傾向が認められた。首都圏における2070年代の夏季気温は、記録的な猛暑年となった2010年よりも高くなり、ほぼ毎日睡眠障害が発生すると示唆された。また、今後70年間の温暖化と都市化による気温上昇を比較すると、首都圏では前者の方が十分大きなことがわかった。MIROC5からのダウンスケール実験から得られた2050年代8月の首都圏の地上気温は1990年代現在に比べ約2~3℃上昇すると予測された。ただし、コンパクトシティー化によって、都心では10%程度度気温上昇を緩和できることがわかった。

(4)20km地域気候モデルのバイアス特定と水資源評価のための統計的ダウンスケーリング

完成したモデルバイアス検出システムは汎用的なソフトであり、様々なモデルにより異なる地図投映法にも柔軟に対応するため課題参加の各地域気候モデルのチューニングに効率的に用いられた。その結果、マルチモデル実験のデータの品質をそろえることに成功し、高品質のシナリオ構築に貢献した。本システムを応用して水利データのバイアス補正を行い、強雨の再現性向上を果たした。また、都市モデル実験を行い、熱帯夜(日最低気温25℃以上)及び猛暑日(日最高気温35℃上)の検証を行った。側面境界条件に比べて高い精度でそれぞれの日数の再現が出来ていることが確かめられた。

(5) 力学的手法と統計的手法を併用した農作物影響評価のためのダウンスケーリングの研究

開発・発展した主要な統計的ダウンスケーリング手法について同じ境界条件を用いた複数地域気候モデル (RCM) 出力との比較検証を行った結果、統計的ダウンスケーリング手法の推定誤差は、MMLR法では月単位でおおむねRCMと同程度、CDF法では日単位でも要素によってはRCMよりも推定誤差が小さくなることがわかった。なお絶対値で見た場合、本テーマのRCMは日射量を過大評価しているが、気温は観測値に近く高温バイアスは起こっていない。これらの情報は、本テーマのRCM研究グループ等に提供するとともに、日射量出力値については当面バイアス補正を行って影響評価に利用することになる。日本の気象官署・アメダス約900地点について、将来気候変化シナリオ(地点・日別気候変化シナリオデータセットELPIS-JP)を作成した。特筆すべきは、従来の気候シナリオに含まれていなかった農業気象関連要素(湿度・地上風速)についても、検証の上でデータセットに加えたこと、および気候の年々・季節変動の持つ不確実性を表現する50の統計的なアンサンブルを持つことである。

(6) 水災害影響評価モデルのための統計的ダウンスケーリング手法の開発

用いる地域気候モデルおよびバイアス補正手法の違いが降水量の将来変化の空間分布に与える影響は、平均値に比べて分散や降り続く大雨のような量では、より大きい傾向があった。本研究で提案した離散ウェーブレット解析を用いたバイアス補正手法は、平均値の補正精度は他の補正手法に比べて劣る地点がみられるものの、分散や5日合計降水量については比較的良好な補正精度を示していた。また、現在期間を対象として日降水量の空間分布の再現性を比較した所、バイアス補正によって日降水量の空間分布の再現性は向上するものの、用いる地域気候モデルおよび補正手法によって、得られた降水プロダクトの日降水量空間分布の出現頻度に差異があることが示された。

(7)双方向ネストモデルを用いた力学的ダウンスケーリングの研究

寒冷域実験の結果、北東アジアの亜総観規模の効果は太平洋上の総観規模の活動には影響を与えるが、より大きな惑星規模の循環場に変更をもたらすほどではないことが示された。熱帯域実験の結果は、太平洋上の亜熱帯高気圧の張り出しが、双方向ネストにより改善することが示された。これは日本の南での対流圏中上層の場が改善したためであることが確認された。双方向ネストモデルは地域気候の全世界の気候に対する影響や不確実性を評価するツールとしてのポテンシャルを有することが示された。

20km格子の複数の地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングによって、環境対策に関わる適応戦略の策定・検討に資するより精度の高いシナリオ提供に一定のめどが立った。また、ユーザーごとに最適なダウンスケーリング手法を構築する試みは、農業分野・水利分野・都市気候分野それぞれで進展を見せ、農業・水利分野ではバイアス補正が効果を発揮し、都市域では詳細なモデルによる2次的ダウンスケーリングが、特にアセスメント的な利用で効果を発揮することが示された。

5. 研究成果の主な発表状況

(1)主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Dairaku, K., S. Emori, T. Nozawa (2008): Impacts of global warming on hydrological cycles in the Asian Monsoon Region. Advances in Atmospheric Sciences, 25(6), 960-973.
- Inatsu, M., and M. Kimoto (2009): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. Monthly Weather Review, 137, 2851-2868.
- 3) 渋尾欣弘, 鼎信次郎 (2010): 大雨に着目した気候モデル日降水量出力のバイアス補正手法比較. 水工 学論文集, 54, 235-240.
- 4) Kanae, S., T. Homdee, Y. Iseri, Y. Shibuo and K. Pongput (2010): A review of bias correction methods for the assessment of climate change impacts on water resources in Thailand, Journal of research in engineering and technology. Faculty of Engineering, Kasetsart University, 7, 113-118.
- 5) 藤井嵩大,田中賢治,相馬一義,小尻利治(2011):都市気象を表現する力学的ダウンスケーリングに関する研究.土木学会水工学論文集,第55巻,355-400.
- 6) Iizumi, T., M. A. Semenov, M. Nishimori, Y. Ishigooka and T. Kuwagata (2011): ELPIS-JP: A dataset of local-scale daily climate change scenarios for Japan. Phil. Tran. Roy. Soc. Ser. A., 370, 1121-1139.
- 7) Aoyagi, T., N. Kayaba and N. Seino (2012): Numerical simulation of the surface air temperature change caused by increases of urban area, anthropogenic heat, and building aspect ratio in the Kanto-Koshin

- Area. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 11-31.
- 8) Ishizaki, N. N., H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K.Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2012): An attempt to estimate of probabilistic regional climate analogue in a warmer Japan. J. Meteor.Soc. Japan, 90B, 65-74.
- 9) Iizuka, S., K. Dairaku, W. Sasaki, S. Adachi, H. Kusaka, N. Ishizaki, and I. Takayabu (2012): Assessment of ocean surface winds and tropical cyclones around Japan by RCMs. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 91-102.
- 10) Kusaka, H., M. Hara and Y. Takane (2012): Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid incremet: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolis. J. Meteor. Soc. Japan., 90B, 47-64.
- 11) Yoshida, R., T. Iizumi and M. Nishimori (2012): Inter-model differences in the relationships between downward shortwave radiation and air temperatures derived from dynamical and statistical downscaling models. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 75-82.
- 12) Inatsu, M., Y. Satake, M. Kimoto, and N. Yasutom (2012): GCM bias of the Western Pacific summer monsoon and its correction by two-way nesting system. Journal of the Meteorological Society of Japan, 90B, 1-10.
- 13) Adachi, S. A., F, Kimura, H, Kusaka, T, Inoue, H, Ueda (2012): Comparison of the impact of global climate change and urbanization on summertime future climate in the Tokyo Metropolitan Area. J. Appl. Meteor. Climatol., (in printing).

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可) なし

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) Tanaka, K., K. Souma, T. Fujii and M. Yamauchi (2009): Dynamical downscaling of urban climate using CReSiBUC with inclusion of detailed land surface parameters. 2nd Lund Regional-scale Climate Modeling Workshop, Lund, Sweden, May 2009.
- 2) Shibuo, Y., and S. Kabae (2009): Evaluating bias corrected precipitation of a regional climate model over Japan. Abstract H21I-05, AGU Fall meeting 2009, San Francisco, U.S.A., December 2009.
- 3) 足立幸穂,木村富士男,日下博幸,植田宏昭,井上知栄 (2010): 2070年代における首都圏夏季の将来 都市気候予測.日本気象学会2010年度春季大会,代々木,2010年5月.
- 4) Aoyagi, T. and N. Seino (2010): Single-layer urban canopy scheme for the mesoscale model of JMA As an adaptation planning tool for the future urbanization -. Proc. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan. Tsukuba, Japan, June 2010.
- 5) Inatsu, M., M. Kimoto, and Y. Satake (2010): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. NHM International Workshop, Kyoto, September 2010.
- 6) K. Tanaka, J. Nakata, T. Kojiri (2010): Development of bias detection/correction system for seven surface meteorological elements. 2nd International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology, and Water Resources Management, Prague, Czech Republic, September 2010.
- 7) Inatsu, M., T. Yamada, T. Sato, K. Nakamura, M. Saito and A. Komatsu (2011): Development and application of comprehensive downscaling methods over Hokkaido. Workshop on the dynamical downscaling Tsukuba, 18 January 2011.
- 8) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., S. Iizuka, W. Sasaki, S. Yamaguchi (2011): Assessment of dynamical downscaling in Japan. WCRP Open Science Conference, Climate Research in Service to Society, Denver, USA, October 2011.
- 9) Iseri, Y., and S. Kanae (2011): Bias correction of daily precipitation output from regional climate model using discrete wavelet transform. Third International Workshop on Down Scaling, S2-6, Tsukuba, Japan, October 2011.
- 10) 西森基貴, 飯泉仁之直, 吉田龍平(2011): 日本域における同じ境界条件による統計的/カ学的ダウンスケーリング結果の比較.日本気象学会2011年度秋季大会,名古屋,2011年11月.
- 11) 飯泉仁之直, 横沢正幸, 西森基貴, 吉田龍平(2011): 日本の地点・日別気候データセットから得られた農業気候指標の将来変化. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.

- 12) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltran-Przekurat, S. Iizuka, W. Sasaki (2011): Assessment of add-value of dynamical downscaling in Japan. 2011 AGU Fall Meeting, San Francisco, December 2011.
- 13) 高薮出(2012): 地球温暖化予測の結果はどこまで細かく出来るのか. 第 56 回水工学講演会, アゲールシンポジウム「水工学における気候変動影響評価への礎」, 愛媛, 2012 年 3 月.
- 14) 日下博幸, 足立幸穂, 藤田恵子, 飯島奈津美, 井原智彦, 飯泉仁之直, 原政之, 山形与志樹 (2012): 首都圏の夏季気候の将来予測と健康影響評価. 日本地理学会 2012 年春季学術大会, 2012 年 3 月.

6. 研究者略歷

課題代表者:高藪出

1959 年生まれ、東京大学理学部卒業、理学博士、

現在、国土交通省気象庁気象研究所環境·応用気象研究部第 2 研究室室長

研究参画者

- (1): 高藪出 (同上)
- (2):大楽浩司

1975 年生まれ、東京大学農学部卒業、工学博士、現在、(独)防災科学技術研究所主任研究員

(3):日下博幸

1970 年生まれ、筑波大学第1学群卒業、博士(理学)、筑波大学大学院講師、現在、筑波大学大学院生命環境科学研究科准教授

(4):田中賢治

1969 年生まれ、京都大学工学部卒業、京都大学大学院工学研究科助手、 現在、京都大学防災研究所准教授

(5):西森基貴

1966 年生まれ、筑波大学第1学群卒業、筑波大学地球科学系助手、 現在、(独)農業環境技術研究所大気環境研究領域主任研究員

(6):鼎信次郎

1971 年生まれ、東京大学工学部卒業、総合地球科学研究所助教授、東京大学生産技術研究所准教授、現在、東京工業大学准教授

(7):稲津 將

1977 年生まれ、京都大学理学部中退、北海道大学大学院地球環境科学科博士後期課程修了現在、北海道大学大学院理学研究院准教授

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (1) 複数の20kmモデルからのマルチモデルアンサンブル手法による20kmスケール気候シナリオの 作成

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部 第2研究室 高藪出

予報研究部 第3研究室 大泉三津夫(H19 - H20) · 清野直子

 気候研究部
 第 2 研究室
 仲江川敏之(H21 - H23)

 気候研究部
 第 5 研究室
 石原幸司(H19 -H22)

環境·応用気象研究部 第2研究室 日谷道夫 (H23)·青柳暁典

第3研究室 栗原和夫·佐々木秀孝

村崎万代 (H19-H21) ・内山貴夫 (H19-H21) 花房瑞樹 (H22 - H23)・村田昭彦 (H22 - H23)

〈研究協力者〉

国土交通省気象庁気象研究所

(独)国立環境研究所

石﨑紀子・大泉三津夫

石崎安洋

平成19~23年度累計予算額:154,216千円 (うち、平成23年度予算額:29,801千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]本研究においては、影響評価研究者の要求する詳細な気候予測を実現するために全球モデルによる予測結果の地域気候モデルによるダウンスケーリングを試みる。その際に、モデル予測の不確実性を抑制するために、多数のモデルによるマルチモデルアンサンブルを行う。ここでは(i)気象研の地域気候モデルをアンサンブルメンバーの1つとして参加させ、マルチモデル実験の結果を用いて影響評価研究への応用に向けた研究に取り組んだ。また、(ii)都市域ダウンスケーリングのための都市気象モデルの積分を実施した。(i)では本プロジェクトに参画している3機関のモデルのダウンスケーリングの誤差を検証し、またベイズ統計的アプローチによるマルチモデルアンサンブルを実施して気候アナログを作成し、モデルの結果の不確実性について研究調査を行った。また、(ii)では気象研都市モデルを用いて都市成長シナリオの影響を調べる研究を行った。

[キーワード] マルチモデルアンサンブル、ダウンスケーリング、地域気候モデル、都市気象モデル、気候アナログ

1. はじめに

地球温暖化の影響評価・適応策の検討のため、地域的に詳細かつ信頼性の高い気候変化予測が強く求められるようになってきている。そのために本課題ではまず地域気候モデルのマルチモデ

ルアンサンブル手法を開発し、ばらつきの大きい現在の地域気候シナリオを1つにまとめる。さらに、影響評価研究のニーズをにらみつつダウンスケーリングに関する統合的手法を開発する。その中で都市域は都市キャノピーモデルによる2次ダウンスケーリングを行う。それらを総合的に取り扱うことによって、不確実性の情報も含んだ詳細かつ信頼性の高い予測情報を影響評価研究グループ(S-5-1、S-8等)に提供する。

2. 研究開発目的

ばらつきの大きい現在の20kmメッシュ気候シナリオを1つに纏めるために複数の地域気候モデル等の結果を用いたマルチモデルアンサンブル手法を開発し適用することを目指す。また、都市域には都市キャノピーモデルを適用することで、都市域の気候のダウンスケーリングを得ることを目指す。

3. 研究開発方法

(1) マルチ地域気候モデル実験によるダウンスケーリングの考察

本課題では防災科研のRAMSモデル (NRAMS)、筑波大のWRFモデル (TWRF) とRAMSモデル (TRAMS)、気象研のNHRCMモデルを用いて、20km格子のマルチ地域気候モデル実験を行った(このほか、既存のRCM20による実験結果も解析に使用した)(表(1)-1参照)。再解析データによる再現実験を行い、この結果を用いてマルチ地域気候モデル実験結果のアンサンブル手法についての手法開発を行った。

表(1)-1 本課題で使用した様々な地域気候モデルのスペック。NHRCM、NRAMS、TRAMS、TWRFは本課題で計算されたもの。

	NHRCM	NRAMS	TRAMS	TWRF	RCM20			
力学系	非静力等	静力学系						
水平格子間隔	20km							
格子数	171x161x40	128x144x27	130x140x30	130x140x31	181x181x36			
地表面	MJ-SiB	LEAF2+	BATS	Noah LSM	Q1-SVATS			
スキーム		GEMTM						
対流スキーム	K-F	K-F	A-S	K-F	A-S			
スペクトル	×	×	×	×	○ Kida et			
ナッジング					al.,1991			
A1bシナリオ	0	0	×	0	×			
のDS実験								
参考文献	Saito et al.	Pielke et al.	Adachi et al.	Skamarock et	Kurihara et			
	$2006^{1)}$	$1992^{2)}$	$2009^{3)}$	al. 2008 ⁴⁾	al. 2005 ⁵⁾			

(2) マルチ地域気候モデル実験から一つのシナリオを作る手法開発

また、マルチ地域気候モデル実験の多数のダウンスケーリングの結果から1つのシナリオを作成する手法についての研究を行った。各地域気候モデルの計算結果の信頼性を評価して重みをつけて平均を取るベイズ統計の手法を適用(BMA)し、単純相加平均(AEM)との比較を行った。

(3) 過去30年間の気温上昇再現実験と都市成長シナリオにもとづく近未来気候予測実験

都市気候モデルによる都市気候の再現及び将来予測においては、下部境界条件となる都市域の 広がりや排熱量の変化、ビル群形状の適切な設定及び推定が不可欠である。そこで関東地方を対象とし、2006年現在の人工排熱分布、1976年から2006年にかけての都市領域の拡大と建物の高層 化、に関する情報を収集し、これら地表面状態の変化による地上気温の上昇量を数値シミュレーションで再現し、アメダス等観測データとの比較を行った。さらに、テーマ4によって開発された 社会経済モデルによる将来の都市成長シナリオにもとづき、首都圏の近未来気候予測実験を実施 した。現在気候における「現状都市」シナリオの実験結果と、近未来気候における「現状都市」 「分散型都市」「集約型都市」の3つの都市シナリオを比較することにより、現在気候から近未来 までの地球温暖化による地上気温の変化と、都市発展による地上気温の変化の大小について議論 した。

(4) マルチ地域気候モデル実験による解の不確定性を含んだ情報の提供に向けて

マルチモデルによる力学的ダウンスケーリングの様々な結果をどのようにまとめていけばよいのか。ここでは、東大大気海洋研・国立環境研究所・地球環境フロンティア研究センターが共同開発した大気・海洋・陸面結合モデルであるMIROCモデルの100km格子版のA1Bシナリオ実験を3機関の20km格子地域気候モデルを用いてダウンスケーリングした結果をもとに評価をおこなった。計算には取り込んでいない第3期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP3)参加のほかの21の大気一海洋結合全球気候モデルの3シナリオの結果を全球温度上昇量データから統計的に簡便な方法(パターンスケーリング)で取り込むことにより全国の気候データを推計した。また、気候の年々変動の効果も、リサンプリングという手法で取り込んだ。いずれも近似的な手法ではあるがダウンスケーリング結果の持つ様々な不確実性を評価するために入れたものである。

ここでは日本の気候の将来を、気候アナログとパーセンタイル値を用いて示した。

4. 結果及び考察

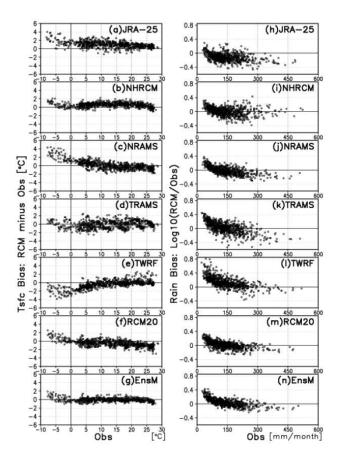
(1) マルチ地域気候モデル実験によるダウンスケーリングの考察

日本域の気候の再現性を5つのモデルの結果より評価した。いずれの地域気候モデルも地上気温と降水量の時空間変動を精度よく再現していた。長期再解析(JRA-25)で夏季・冬季ともに過小評価されていた降水は改善され、特に冬季の降水バイアスは減少した。他方、図(1)-1に見るように、実験に参加した地域気候モデルの多くに共通する結果として氷点下時の高温バイアス、少雨月の降水量の過大評価と多雨月の降水量の過小評価があることが確認された。

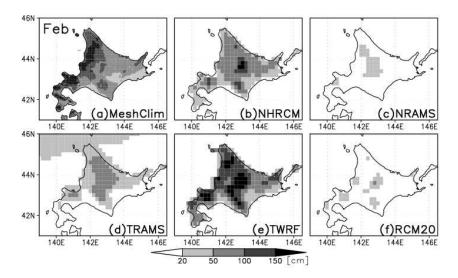
このうち、氷点下の気温の正バイアスは雪が関係していることが考えられる。図(1)-2は、北海道の2月の積雪深を比べたものである。総じてモデルの積雪深は観測値(メッシュ気候値)に比べ少ない。積雪が過小評価であるということはアルベドフィードバックにより高温バイアスをもたらす。この積雪過小の原因はモデルの解像度が足りず、北海道の詳細な山岳地形が表現されていないためであることが分かった。20km格子モデルでは大雪山系のみが表現されており、結果としてどのモデルでも北海道中央部に積雪域が集中している。この過小な積雪域の表現が、モデルの高温バイアスをもたらしていると考えられる。このように、各モデルに残る顕著な気温偏差については20km格子モデルの解像度不足が原因であることが示された。

また、降水量のバイアスは対流スキームのパラメータ設定によるところが大きい。これら5モデ

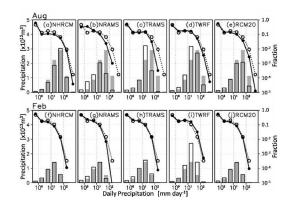
ルのうち、NHRCMはTWRFで用いられているK-F(カイン・フリッツスキーム)が移植されて使われている。ただし、NHRCMへ移植されたK-Fは、日本域の降水量で長期にわたるチューニングが行われてきた。両者の降水頻度パターンを図(1)-3で比べるとTWRFは強雨の降水頻度を過剰にカウントしていることがわかるが、NHRCMではそのようなことはない。このことは、降水スキームのパラメータセッティングが異なれば、同じ側面境界条件であっても降水量の再現性には大きな差がつくことを示している。



図(1)-1 各都府県別(北海道は14支庁別)の月平均モデル値のアメダス値に対する偏差あるいは比(縦軸)をアメダス値に対して記したもの。左が地上気温(偏差)で右が降水量(比の常用対数)。上段から、JRA-25再解析値、NHRCM、NRAMS、TRAMS、TWRF、RCM20で、最下段は5モデルの相加平均(AEM)。

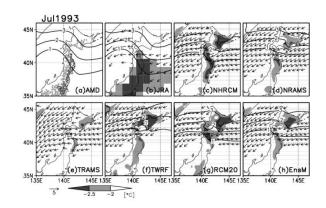


図(1)-2 北海道の2月の最深積雪。(a)メッシュ気候値(気象庁の作成による、国土数値情報の約1km格子(3次メッシュ)ごとに与えられる気候情報) 6 、(b)NHRCM、(c)NRAMS、(d)TRAMS、(e)TWRF、(f)RCM20。



図(1)-3モデルの降水確率分布 (黒丸・線) と降水量 (棒グラフ・枠) の、日本における高解像度 日雨量グリッドデータ (APHRO_JP) の観測値 (それぞれ、折れ線グラフの点線と棒グラフの灰色 域)との比較。上段が8月で下段が2月。(a,f) NHRCM、(b,g) NRAMS、(c,h) TRAMS、(d,i) TWRF、(e,j) RCM20。

地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングが最も効果を発揮するのは、外側境界のモデルでも表現できるような大規模場から総観場の現象によって誘導される流れが詳細な地形と干渉して生じるような現象である。ブロッキング高気圧であるオホーツク海高気圧によって誘導されるヤマセは、そのような例である。図(1)-4に1993年7月の強いヤマセが発生した月の各モデルの再現性を示すが、観測(a)のような太平洋側と日本海側のコントラストを各モデルは良く再現している。再解析データ(b)と比べても、地形の詳細化に伴い温度コントラストが詳細なスケールで再現されていることがわかる。



図(1)-4 1993年7月の地上気温と海面気圧の、20年平均からの偏差。(b)-(h)では、風速偏差 (>2m/s)が矢印で描かれている。(a)アメダス、(b) JRA-25、(c) MHRCM、(d) NRAMS、(e) TRAMS、(f) TWRF、(g) RCM20、(h) 5モデルの相加平均(AEM)。

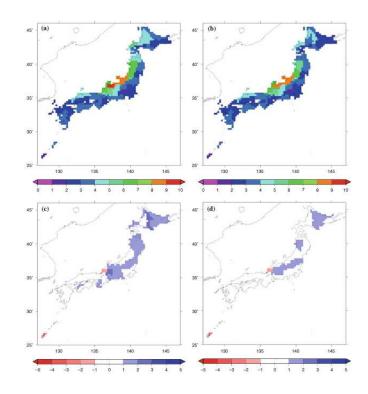
(2) マルチ地域気候モデル実験から1つのシナリオを作る手法開発

次に、マルチ地域気候モデル実験の多数のダウンスケーリングの結果から1つのシナリオを作成する手法についての研究を行った。各地域気候モデルの計算結果の信頼性を評価して重みをつけて平均を取るベイズ統計の手法を適用(BMA)し、重みづけをしない単純相加平均(AEM)との比較を行った。もともと再現性の高い地上気温に関してはAEM手法で個々のモデルの結果に対して成績が改善することが分かっているため、ここでは降水量データについての比較を行った。

表(1)-2:降水量の日本域60地域の空間相関係数、RMSE(mm/日)と60地域のバイアスの平均(mm/日)。JRA-25再解析データ、NHRCM、NRAMS、TWRFとそれら3つの結果のAEMとBMA。

	JRA-25	NHRCM	NRAMS	TWRF	AEM	BMA
相関係数 (夏季)	0.84	0. 78	0.84	0.81	0.86	0.91
RMSE (夏季)	2. 1	2. 3	1. 5	2.3	1.4	1. 1
相関係数(冬季)	0.86	0. 9	0. 91	0.84	0.91	0.95
RMSE(冬季)	1.4	0. 9	0. 9	2.7	1. 1	0.8

表(1)-5に側面境界に用いた再解析データ(JRA-25)、本課題で計算した3種類の地域気候モデル(NHRCM, NRAMS, TWRF)、それら3種類の実験結果のAEM、BMAそれぞれについて、県別・支庁別60地域ごとにアメダスデータと相関係数・平均2乗誤差(RMSE)の60地域平均を比較した結果をまとめてある。夏季、冬季ともにベイズ統計を適用して重みづけ平均を行ったBMAが最良の結果を得ている。AEMとBMAの冬季降水量をマップに落としたのが図(1)-5である。上段が絶対値、下段がアメダスデータに対するバイアス分布である。冬季モンスーンに伴う日本海側と太平洋側の降水コントラストはいずれのモデルでも弱めにしか表現されていないため、単純相加平均のAEMではバイアスが取り切れないが、BMAはそれに比べて改善がみられる。



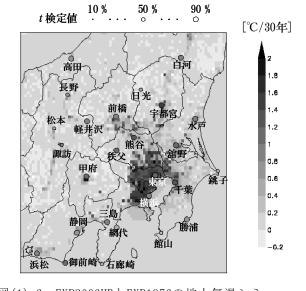
図(1)-5 冬季(DJF)降水量(mm/日)(上 段:コンターは0mm/日~10mm/日)とバ イアス(下段:コンターは-5mm/日~ +5mm/日)。左がAEMで右がBMA。

このように、ベイズ統計による統一シナリオの作成はバイアスを減少させるポテンシャルを持つことが示された。

(3) 過去30年間の気温上昇再現実験と都市成長シナリオにもとづく近未来気候予測実験

国土交通省の国土数値情報をもとに関東甲信越地方の土地利用の変化を概観すると、1976年から2006年にかけて、田・畑・山林の面積割合が減少し、建物用地や道路などの都市地表面が拡大していることがわかった。都市地表面は、首都圏の周囲や、鉄道・道路などの幹線に沿って広がっていた。他方、首都圏内部の東京23区内では、クーラーの普及による電力需要の増大(=人工的な排熱の増大)や、ビル群の高層化による放射収支・熱収支の変化、などが気温情報の大きな要因となりうる。これら情報を大気モデルの下部境界条件(地表面設定)として組み込むことで、過去30年間の都市化の影響の大きさを見積もった。

2006年時点の地表面状態を表現した実験 (EXP2006)では、地表面の土地利用状態を2006 年度版の国土数値情報から求め、妹尾ほか⁷⁾



図(1)-6 EXP2006HRとEXP1976の地上気温シミュレーションによる30年間温度上昇トレンドの図。 丸印は計算領域内にある気象官署の30年間のトレンドを表示(全世界の平均気温のトレンド $0.4470^\circ/30$ 年間を差し引いた値)。丸の大きさはt 検定による有意度の大きさを表す。

で推定された人工排熱分布を考慮した。都市気候モデルのビル群のアスペクト比は、東京都における地理情報システム(GIS) $^{8)}$ から求めた現実的な分布を与えた。ただし、東京都以外の都市では、ビルのアスペクト比(高さ:横幅)を3:4(東京都にあるビル群の平均値)と設定する。

他方、約30年前を模擬する実験(EXP1976)では、土地利用状態を1976年度版の国土数値情報を用いて設定する。30年前にはクーラーの普及率はほとんどないと仮定し、人工排熱は考慮しない。建物のアスペクト比は、1:4と仮定する。これは、1975年時点での東京都の平均的な容積率が、法定容積率の約33%程度(東京都 1976)⁸⁾しかなかったことから、現在の平均アスペクト比の3分の1としたものである。

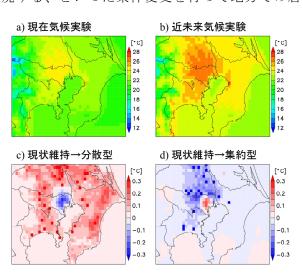
これらの下部境界条件の設定のもと、2006年の大気場(メソ解析データ)を側面境界として、7月~8月の2か月間の気象場再現実験をそれぞれ実施した。計算対象領域は関東甲信越地域である。その結果、図(1)-6に示すように、EXP2006では、都心を中心に、EXP1976に比べて夏季の平均気温が高く表現される結果が得られ、図中に丸印で示された気象官署の観測データから得られた30年間の気温上昇トレンドを概ね再現することができた⁹⁾。

この実験により、人工排熱の増加やビル群の高層化など、適切な地表面状態の設定によって過去の局地的な気候表現がより良く再現できることが示された。その一方で、将来の都市域の広がりや人口の集中度といった都市の成長シナリオが将来気候予測の上での不確定要因となり得ることを指摘する結果でもあった。

そこで、テーマ4で提案された近未来の都市シナリオを適用し、首都圏夏季の近未来気候予測実験を実施することとした。近未来都市シナリオとしては、現状維持(Observation)、分散型(Broad)、集約型(Compact)の3つが準備された。これらのシナリオは、2000年代の人口密度・建物密集度・交通量などを初期値とし、社会経済モデル中の法的拘束力を変化させて将来の人口や建物の集中・分散状態を予測計算したものである。分散型のシナリオでは、例えばガソリン価格を安く、高速料金を無料に、市街化調整区域の制限を撤廃する、といった条件変更を行って地方での居住

を促すことにより、社会経済モデル内で地方に 人口や建物が分散するような人・物の流れが表 現される。逆に集約型のシナリオでは、ガソリン価格や高速道路の料金を高くする、法的容積 率を大きくする、といった変更によって、各地の駅前に人口や建物が集中するような都市構造が構築され、結果としていわゆるコンパクトシティーが出来上がる、というものである。これらのシナリオをもとにして都市キャノピーモデルの各パラメータ(人工排熱分布、土地利用分布、建物縦横比、など)を設定し、気候モデルの下部境界条件として与えた。

大気の初期値・境界値はCMIP5版のMIROC5からダウンスケールした20kmの気象庁非静力学領域気候モデルNHRCM20の計算結果を用いて、都市キャノピースキームを組み込んだ4km格子



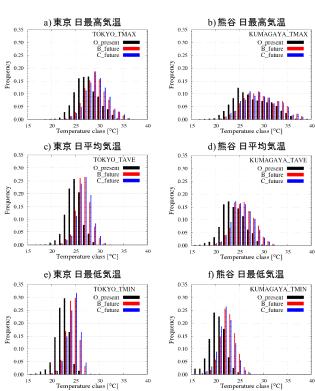
図(1)-7 MIROC5からのダウンスケーリングで計算された夏季平均気温分布(a,b)および近未来気候実験で都市シナリオを現状維持型から分散型(c)、集約型(d)に変化させた場合の平均気温の差分。

非静力学モデルで更なるダウンスケーリングを実施した。現在気候実験では1981年~2000年の20年間、近未来気候実験では2041年~2060年の20年間を計算対象期間とした。それぞれの年の6月25日の大気状態を初期値とし、8月31日までのおよそ2か月間の数値積分を行い、7月1日からの2か月間のデータを解析用のデータとして使用した。

図(1)-7a, bはそれぞれ現在気候実験(1981年~2000年)及び近未来気候実験(2041年~2060年)で計算された夏季(7月,8月)の平均気温分布である。いずれも、現状維持シナリオの地表面状態を下部境界条件として与えている。これらの差分から、現状と変わらぬ都市形態のままであると想定した場合、このモデルでは近未来までのおよそ60年間で領域平均気温が1.88±0.0026℃程度上昇するであろうことが示された。気温上昇量の標準偏差が0.16%と非常に小さく、大規模場温暖化の影響が領域内でほぼ均等に表現されていることがわかる。これに対し、近未来の都市形態として分散型の都市シナリオを適用した場合には、分散した居住地域間の移動に使われる人工排熱の増加や、もともと森林だった土地が人工被覆に取って代わられることで更に夏季の平均気温を領域全体で0.058±0.0027℃、人口増加の大きなところで最大1.1℃押し上げる可能性があることが示された(図(1)-7c)。他方、近未来気候下ではあるものの、都市の集約型シナリオを適用した場合には、人口が極度に集中する東京都心では気温が上昇(最大で0.22℃)するものの、領域全体と

しては -0.021 ± 0.0019 °C、都市地表面から 植生地表面へ変化したグリッドで最大 -0.78°Cの夏季平均気温の変化が見られ、一 定の気温上昇緩和効果があることが明らか となった(図(1)-7d)。

図(1)-8は各都市シナリオ下で実施した 気候実験での、東京大手町及び熊谷のアメ ダス地点を内包するグリッドで評価した日 最高, 日平均及び日最低気温のヒストグラ ムを描画したものである。現在気候実験 (0_present)に対し、近未来気候実験 (B_future及びC_future)は全体的に2℃ほ ど高めの気温階級にシフトしていることが わかる。これは大規模気候場の温暖化によ るものであり、これによって日最大気温が 35℃を超える猛暑日や日最低気温が25℃を 超える熱帯夜の頻度が増えることが示唆さ れる。しかしながら、都市シナリオによっ ては、その頻度増加には幅がある。そして その影響は日最高気温に対しては限定的で あり、もっぱら日最低気温への影響が大き いことがわかる。首都圏の領域平均で見た 場合、集約型の都市の方が近未来の平均気 温の上昇を抑制できることは前述の通りで



図(1)-8 東京大手町及び熊谷の気象観測点に対応するグリッドにおける、日最高、日平均、及び日最低気温のヒストグラム。MIKROC5の現在気候データをもとに2000年代の土地利用状態を下部境界条件としてダウンスケールした結果(黒:0_present)及び、近未来気候データをもとに分散型都市シナリオ(赤:B_future)、集約型都市シナリオ(青:C_future)を下部境界条件として1ダウンスケールした結果。

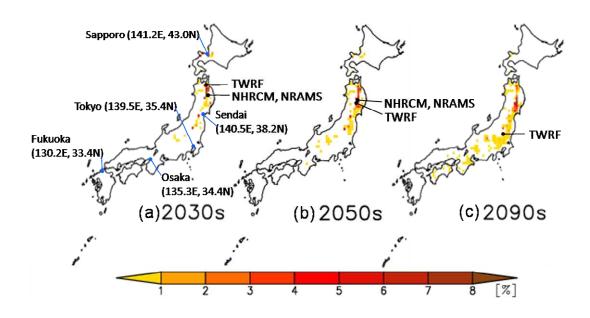
あるが、都心における日最低気温が25℃付近にベースアップすることを考えれば、一概に集約型都市の方が良いとは言いにくいことがこの図から示唆される。このように、将来気候予測において非常に局地的な影響を考慮する際には、将来の土地利用変化を想定したシナリオ設定も重要であることが今回の研究によって明らかとなった。

(4) マルチ地域気候モデル実験による解の不確定性を含んだ情報の提供に向けて

ここでは、ある地域の将来気候が現在気候のどの地域に類似するかという手法(気候アナログ) を駆使して将来の日本の様子に実感をもって迫ることを目指した。

気候アナログは、ここでは温度に関するパラメータと降水量に関するパラメータの組み合わせによって決定される。日本の気候を特徴づける冬季積雪量を考慮するため、1)気温の季節変化の一致度と2)降水量の季節変化パターンの一致度の2つの指標を満たす地域を現在地の気候アナログ地点と定義した。

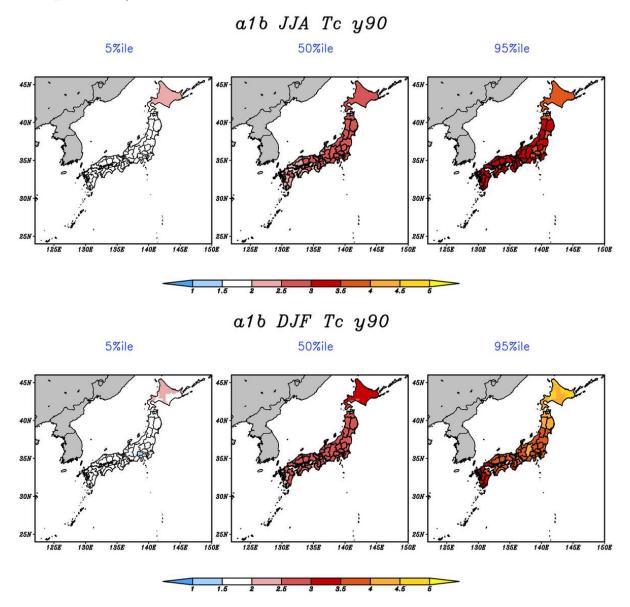
ここでは、MIROCモデル100km格子のA1Bシナリオ実験を3機関の20km格子地域気候モデルを用いてダウンスケーリングした結果をもとに評価をおこなった。計算には取り込んでいないCMIP3参加のほかの21の大気―海洋結合全球気候モデルの3シナリオの結果を全球温度上昇量データから統計的に簡便な方法 (パターンスケーリング)で取り込むことにより全国の気候データを推計した。また、気候の年々変動の効果も、リサンプリングという手法で取り込む。いずれも近似的な手法ではあるがダウンスケーリング結果の持つ様々な不確実性を評価するために入れた。図(1)-9は、気候アナログの手法を用いて将来の札幌が現在のどの地域の気候と類似になるのかを示したものである。将来の札幌は現在の青森→盛岡→仙台のような気候に変化していくことが示されている。また、気候の将来予測が空間的に大きく散らばることは温室効果ガス排出シナリオの違いと用いたモデルの違いが気候アナログの分布に大きく影響を及ぼすことを示している。



図(1)-9 札幌の将来気候のアナログの確率分布図。赤が濃いほど確率が高い。

気候アナログ算出のために用意した各気候シナリオ66,000ケースの温暖化予測のダウンスケーリングの結果から、今世紀末に至る県別の温度上昇量予測の少ない順に5%、50%、95%の値を示した(タイル値という)のが図(1)-10である。パターンスケーリング、ブートストラップといった手法を適用した複数の仮定に基づくデータではあるが、この図には、気候シナリオ・全球大気モデル(GCM)・地域気候モデル(RCM)それぞれの持っている不確定性がすべて入っている。この種のデータは、政策決定者が温暖化の適応策や緩和策を検討する際に予測の範囲を含めた有用な情報として活かされることが期待される。

このように本課題では主要な3地域気候モデルによるMIROCモデルによる実験のダウンスケーリング結果をそろえることが出来た。これを様々な影響評価研究で使えるようにデータと図化ソフトの整備を行った。



図(1)-10 A1Bシナリオによる今世紀末の日本各県の温度上昇。CMIP3実験の結果をパターンスケーリングで取り込んでいる。上段は夏季(JJA)、下段は冬季(DJF)。左から5%、50%、95%タイル値。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

地域気候シナリオにおける課題解決の観点でのマルチモデルアンサンブル手法の適用や様々な ダウンスケーリング技術の統合的手法開発を行った。マルチモデルシステムによるダウンスケー リングシステムの開発と国内適用、また都市モデルを初めとする様々なダウンスケーリング手法 の統合化と国内への適用は初の試みであり、その科学的意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

ダウンスケーリング技術の統合的手法開発により、不確実性の情報も含んだ詳細かつ信頼性の高い地域気候シナリオ提供のシステム構築が進んだ。将来予測実験のダウンスケーリングも行われ、地球温暖化の確度の高い地域ごとの影響評価や適応策検討に利用可能なデータの提供が可能となった。データは文部科学省のデータ統合・解析システム(DIAS)への登録が進んでおり、今後、環境省地球環境研究総合推進費S-8あるいは文部科学省気候変動イニシアチブ(RECCA)等を通じて政策決定への利用が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文(査読あり)〉

- 1) Sasaki, H. and K. Kurihara (2008): Relationship between precipitation and elevation in the present climate reproduced by the non-hydrostatic regional climatemodel. SOLA, Vol. 4, 109-112, doi:10.2151/sola. 2008-028.
- 2) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出 (2008): ベイズ的アプローチによる日本域における地球温暖 化に伴う地表気温上昇量の予測. 水工学論文集, 第53巻, 229-234。
- 3) Ishizaki, N. and I. Takayabu (2009): On the warming events over Toyama Plain by using NHRCM. SOLA, 5, 129-132.
- 4) Ishihara, K. (2010): Assessment for the 30-yr daily precipitation change due to global warming using regional frequency analysis, Hydrological Research Letters, Vol. 4, pp30-34.
- 5) Ishizaki, Y., T. Nakaegawa and I. Takayabu (2010): Comparison of three bayesian approaches to project surface air temperature changes over Japan due to global warming. SOLA, Vol. 6, 21-24.
- 6) 石崎安洋、仲江川敏之、高藪出(2011):地域気候マルチモデルアンサンブルを用いた日本域 における降水の再現性.水工論文集,56。
- 7) Aoyagi, T., and N. Seino (2011): A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. J. Appl.

- Meteor. Clim., 50, 1476-1496.
- 8) Aoyagi, T., and S. Takahashi (2012): Development of an urban multilayer radiation scheme and its application to the urban surface warming potential. Bound.-Layer Meteor., 142, 305-328.
- 9) Aoyagi, T., N. Kayaba and N. Seino (2012): Numerical simulation of the surface air temperature change caused by increases of urban area, anthropogenic heat, and building aspect ratio in the Kanto-Koshin Area. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 11-31 (2012)
- 10) Ishizaki, N. N., H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K. Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2012): An attempt to estimate of probabilistic regional climate analogue in a warmer Japan, J. Meteor.. Soc. Japan, 90B, 65-74.
- 11) Ishizaki, N. N., I. Takayabu, M. Oh'izumi, H. Sasaki, K. Dairaku, S. Iizuka, F. Kimura, H. Kusaka, S. A. Adachi, K. Kurihara, K. Murazakki, and K. Tanaka (2012): Improved performance of simulated Japanese climate with a multi-model ensemble. J. Meteor. Soc. Japan, 235-254.
- 12) Ishizaki, Y., T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2012): Validation of precipitation over Japan during 1985-2004 simulated by three regional climate models and two multi-model ensemble means. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-012-1304-5.

<査読付論文に準ずる成果発表> 特に記載すべき事項は無い。

〈その他誌上発表(査読なし)〉

- 1) 高藪出 大楽浩司(2008):天気、EU ENSEMBLES 第 4 回全体会合参加報告. 日本気象学会、Vol. 55 No. 11.
- 2) 大楽浩司,石崎紀子,金田幸恵,金丸秀樹,田中賢治,中野満寿男,芳村圭,高藪出(2010): 第2回国際ルンド地域気候モデリングワークショップ参加報告.天気,57,15-21.
- 3) 高藪出,金光正郎(2010):力学的ダウンスケーリングのレビュー.天気,57,435-448.
- 4) 高藪出(2010):地域気候モデルによる温暖化予測. 天気、57,546-550.
- 5) 仲江川敏之, 松枝未遠, 石崎安洋(2010): ENSEMBLES最終シンポジウム報告. 天気, 57, 681-689
- 6) 佐藤友徳、石崎紀子、石崎安洋、稲津將、岡田直資、仲江川敏之、高薮出、芳村圭、金光正郎(2011):第10回RSMに関する国際ワークショップ開催・参加報告. 天気、58、41-45.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Oh'izumi M. (2007): Interaction between newly formed snow cover and lower boundary layer in Kanto plains. IUGG XXIV General Assembly in Perugia, JMS028-137.
- 2) Takayabu, I. (2007): Introduction of the research project of multi-model ensembles and down-scaling methods for assessment of climate change around the Asian region, Supported by the Ministry of the Environment, Japan. EU ENSEMBLES 4GA Meeting in Prague.

- 3) 村崎万代 (2007): JRA-25を境界条件とした地域気候モデルを用いた過去の気候再現実験. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集P184.
- 4) 佐々木秀孝、高藪出、栗原和夫、内山貴雄 (2007): 非静力学地域気候モデルによる現在気候 再現実験 (その2). 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集P384.
- 5) 高藪出 (2007): RCMによるCGCMのダウンスケーリング-西方擾乱と一般場の関係について-. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集P185.
- 6) 青栁曉典、清野直子 (2007): JMANHM 用単層都市キャノピースキームの開発-都市域放射収支の評価-. 日本ヒートアイランド学会第2回全国大会、A-09.
- 7) 青柳曉典、清野直子(2007): JMANHM 用簡易都市キャノピーモデルの改良. 第9回 非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集、p46-47.
- 8) 青柳曉典、清野直子(2007): JMANHM 用単層都市キャノピースキームの改良と放射 収支に関する検討. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集D103.
- 9) 青柳曉典、清野直子、氏家将志 (2007): 単層都市キャノピースキームを用いたJMANHM による都市気象シミュレーションの試み. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿 集D104.
- 10) 石﨑紀子 (2007): モンスーンオンセット期の季節変化におけるインドシナ半島の役割. 日本 気象学会2007年度秋季大会講演予稿集P144.
- 11) 石原幸司 (2007): MRI-RCM20による温暖化予測結果に基づく不確実性の評価について. 日本 気象学会2007年度秋季大会講演予稿集P193.
- 12) 大泉三津夫 (2007): JMANHMによる関東平野の積雪再現実験-解像度の影響と下層大気の後方 流跡線の特性-. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集D109.
- 13) 高藪出 (2007): 推進費S-5-3「温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究」の概要. 水資源セミナー要旨集.
- 14) 石崎紀子、 高藪出 (2007): 地球温暖化影響評価に向けた力学的ダウンスケーリング手法確立への取り組み. 気候影響・利用研究会要旨集.
- 15) Murazaki, K., K. Kurihara, H. Sasaki, I. Takayabu and T. Uchiyama (2008): A regional climate simulation over Japan nested with JRA-25. Third conference on reanalysis.
- 16) 大泉三津夫,石﨑紀子,高藪出(2008):NHM 地域気候モデルの降積雪特性.日本気象学会2008 年度春季大会 A104.
- 17) 佐々木秀孝, 栗原和夫 (2008): 地域気候モデル検証用降水データについて. 日本気象学会 2008 年度春季大会 P326.
- 18) 石﨑紀子, 高藪出 (2008): JMA-NHM を用いた 2002 年 7 月の日本域における力学的ダウンスケーリングに伴う不確実性の評価. 日本気象学会 2008 年度春季大会 P329.
- 19) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出 (2008): ベイズ統計学を用いた将来の日本周辺域における 地表面気温の上昇量. 水文・水資源学会.
- 20) 青栁曉典, 清野直子 (2008): 都市パラメータが気象に与える影響度評価-メソ気象モデル JMANHM による感度実験-. 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会 A-03.
- 21) 青柳曉典, 清野直子 (2008): 都市パラメータが気象に与える影響度評価-メソ気象モデル JMANHM による感度実験-. 環境研究機関連絡会成果発表会.

- 22) 清野直子, 青柳曉典 (2008): 関東における強雨事例のシュミレーション- 都市キャノピースキーム導入のインパクト-. 日本気象学会 2008 年度秋季大会 B158.
- 23) 石原幸司 (2008): 地球温暖化に伴う確率降水量変化の都道府県別評価に向けて. 日本気象 学会 2008 年度秋季大会 C307.
- 24) 村崎万代, 栗原和夫, 佐々木秀孝, 内山貴雄, 高藪出 (2008): JRA-25 の 20 kmダウンスケーリングによる夏季降水量の変化. 日本気象学会 2008 年度秋季大会 P139.
- 25) 大泉三津夫,石崎紀子,高藪出 (2008):マルチモデルアンサンブル実験での地域気候モデルの降積雪特性. 日本気象学会 2008 年度秋季大会 P338.
- 26) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出 (2008): ベイズ的アプローチによる 21 世紀後半の日本の地表面気温上昇量. 日本気象学会 2008 年度秋季大会 P340.
- 27) 石﨑紀子, 高藪出 (2008): 日本域における強風を伴う昇温現象-2002 年事例解析-. 日本気象学会 2008 年度秋季大会, P360.
- 28) 高藪出 (2008): 地域気候モデルによる温暖化予測. 日本気象学会 2008 年度秋季大会 シンポジウム、仙台.
- 29) 青栁曉典, 清野直子 (2008): NHM 用単層都市キャノピースキームへのビル面潜熱輸送過程 の導入. 第10回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集, 55-56.
- 30) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出(2009): 第53回水工学講演会.
- 31) Takayabu, I. (2009): Overview of the research project of Multi-model ensembles and down-scaling methods for assessment of climate change impact, supported by MOE Japan. RCM2009, Lund, Sweden
- 32) Takayabu, I. (2009): Introduction of research project of multi-model ensembles and down-scaling methods for assessment of climate change impact, supported by MOE Japan. Fifth Japan-EU workshop on climate change research, Tokyo, Japan. 2009
- 33) Aoyagi, T. and N. Seino (2009): The Development of a Single Layer Urban Canopy Scheme for the Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Mesoscale Model. The 7th International Conference on Urban Climate. P3-8.
- 34) Seino, N. and T. Aoyagi (2009): Urban Influences on Precipitation in the Tokyo Area:
 Numerical Simulation on a Heavy Rainfall Event. The 7th International Conference on
 Urban Climate. P3-44.
- 35) Aoyagi, T. and N. Seino (2009): A sensitivity study on anthropogenic heat release and building / street aspect ratio using a mesoscale model in Tokyo Metropolitan area Japan.

 89th American Meteorological Society Annual Meeting (8th Symposium on Urban Environment).
- 36) Seino, N. and T. Aoyagi (2009): Simulations of urban heat island in Tokyo using an urban canopy model coupled with JMANHM. Second Mini-International Workshop on Downscaling.
- 37) Ishizaki, N. and I. Takayabu (2009): Climatological feature and heating mechanism of foehn phenomena over north of Central Mountain range in Japan by using non-hydrostatic RCM. 2nd Lund Regional-scale Climate Modeling Workshop. Sweden.
- 38) Nakaegawa, T. and I. Takayabu (2009): Review of the first stream of the research project

- of Multi-model ensembles and downscaling methods for assessment of climate change impact, supported by MoE Japan. ENSEMBLES final symposium. Exeter UK, 2009
- 39) Ishizaki, Y., T. Nakaegawa. and I. Takayabu (2009): Comparison of three Bayesian approaches to project surface air temperatures changes over Japan due to Global Warming. ENSEMBLES final symposium. Exeter UK.
- 40) 高藪出 (2009): 力学的ダウンスケーリング手法の紹介. 第1回農環研気候変動影響PRセミナー, つくば(農環研).
- 41) 青栁曉典, 清野直子 (2009): NHM用単層都市キャノピースキーム導入前後の地上気温検証. 第 11回非静力学モデルに関するワークショップ, 講演予稿集, H-2.
- 42) 石﨑紀子, 高藪出 (2009): NHRCMを用いたフェーン現象の熱量解析. 日本気象学会2009年度 春季大会P215.
- 43) 大泉三津夫 (2009): 地域気候モデルとしてのJMANHMの可変地表面被覆のインパクト. 日本気象学会2009年度春季大会P107.
- 44) 清野直子, 青柳曉典, 高橋俊二 (2009): 気象庁屋上における放射収支観測. 日本気象学会 2009年度春季大会 P118.
- 45) 石原幸司 (2009): 地球温暖化に伴う確率降水量変化の都道府県別評価. 水文・水資源学会 2009年度研究発表会、金沢.
- 46) 高藪出 (2009): 日本の気候はどこまで詳しく予測できるか. 一般公開シンポジウム「実感! 地球温暖化」. 東京(東京大学).
- 47) 石崎紀子, 高藪出, 金光正郎 (2009): 観測データの気候学的な地点代表性について. 日本気象学会2009年度秋季大会P366.
- 48) 青柳曉典, 清野直子 (2009): 人工排熱・建物構造・粗度長が都市域の地上気温に与える影響 について-単層都市キャノピースキームを導入したNHMによる感度実験-. 日本気象学会 2009年度秋季大会P162.
- 49) 青柳曉典, 高橋俊二 (2009): 格子状ブロック群の実効アルベド/実効射出率を考慮した放射 平衡温度. 日本気象学会2009年度秋季大会P329.
- 50) 大泉三津夫 (2009):マルチモデルアンサンブル実験での地域気候モデルの降積雪特性ーその 2. JRA25による長期積分-. 日本気象学会2009年度秋季大会B170
- 51) 清野直子, 青柳曉典 (2009): 東京における強雨事例のシミュレーション-2007年8月の事例 における都市の効果-. 日本気象学会2009年度秋季大会B301.
- 52) 石原幸司 (2009): 地球温暖化に伴う気温変化の正規性を利用した都道府県別評価. 日本気象 学会2009年度秋季大会P194.
- 53) 石原幸司 (2009): 地球温暖化に伴う確率降水量変化の都道府県別評価に向けて. 極端気象現象とその影響評価に関する研究集会、京都 (京都大学).
- 54) Ishizaki, N. and I. Takayabu (2010): Preliminary results of the intercomparison for RCMs over Japan. Workshop on dynamical downscaling over Japan.
- 55) Oh' izumi, M. (2010): Characteristics of simulated snow cover and surface heat budget in RCMs. Workshop on dynamical downscaling over Japan.
- 56) 高藪出 (2010): ブリッジとしての力学的ダウンスケーリング研究. S-4/5・革新プロ合同ワ

- ークショップ -影響評価研究での気候モデル出力の活かし方を考える-. 気候シナリオタスクグループ,東京(航空会館)
- 57) I. Takayabu (2010): Downscaling of Climate Projections in Japan 1st international workshop on economics of climate change and low carbon growth strategies in northeast Asia, (アジア開発銀行主催).
- 58) 高藪出,大楽浩司,木村富士男,田中賢治,西森基紀,鼎信次郎,稲津将,他 S-5-3 参画研究者一同(2010):温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究/第一期研究の紹介.日本気象学会2010年度春季大会B401.
- 59) 石﨑紀子, 高藪出, 大楽浩司, 飯塚聡, 木村富士男, 日下博幸, 足立幸穂, 栗原和夫, 村崎万代, 金光正郎, 芳村圭, Jens Hesselberg Christensen, Neil MacKeller, 田中賢治 (2010):日本域における領域気候モデルの再現性の相互比較. 日本気象学会 2010 年度春季大会 B404.
- 60) Takayabu, I. (2010): Introduction of S-5-3 project. Proc. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan.
- 61) Aoyagi, T. and N. Seino (2010): Single-layer urban canopy scheme for the mesoscale model of JMA As an adaptation planning tool for the future urbanization –. Proc. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan,.
- 62) Seino, N. and T. Aoyagi (2010): Urban Climate Research with a Mesoscale Model JMA-NHM. Proc. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan,.
- 63) 青柳曉典, 萱場瓦起, 清野直子 (2010): 土地利用変化に伴う都市域地上気温の上昇に関する 数値シミュレーション, 日本ヒートアイランド学会第5回全国大会.
- 64) Takayabu, I. (2010): Down-scaling system applied for representing local climate in Japan. 10th international RSM workshop.
- 65) Ishizaki, N., I. Takayabu and M. Kanamitsu (2010): Spatial correlation of the observation data and its application to validate the regional climate model. 10th international RSM workshop.
- 66) 大泉三津夫 (2010): マルチモデルアンサンブル実験での地域気候モデルの降積雪特性 その 3 HRCMの熱収支. 日本気象学会2010年度秋季大会(講演要旨集A204).
- 67) 石崎紀子, 高藪出, 金光正郎 (2010): モデルの空間解像度に応じた観測データと検証方法 について. 日本気象学会2010年度秋季大会(講演要旨集A207).
- 68) 石崎安洋, 仲江川敏之, 高藪出 (2010): 地域気候マルチモデルサンサンブルによる日本陸 上域の降水の再現性. 日本気象学会2010年度秋季大会(講演要旨集A208).
- 69) 高藪出 (2010): ダウンスケーリングプロジェクトにおけるデータの流れについて. 日本気象 学会2010年度秋季大会(講演要旨集A212).
- 70) 清野直子,青柳暁典,津口裕茂,加藤輝之(2010):東京における強雨事例のシミュレーション(2)-2010年7月5日の事例解析-.日本気象学会2010年度秋季大会(講演要旨集C355).
- 71) 青栁曉典, 萱場瓦起, 清野直子 (2010): 土地利用変化による夏季関東域の気候変化に関する 数値シミュレーション, 日本気象学会2010年秋季大会(講演要旨集P301).
- 72) 石崎紀子, 塩竈秀夫, 高橋潔, 江守正多, 大楽浩司, 日下博幸, 仲江川敏之, 高藪出 (2011):

- マルチ RCM による日本域に於ける力学的ダウンスケーリング. H22 年度 文科省革新プロー環境省推進費戦略課題 S-5/S-8 合同シンポジウム「AR5 の影響評価研究はこれで勝負」.
- 73) Aoyagi, T., N. Kayaba and N. Seino (2011): A simulation of climatic change on summer induced by land use modification from 1976 to 2006 over Tokyo metropolitan area, Japan. 23rd Conference on Climate Variability and Change.
- 74) I. Takayabu, and all the members of S-5-3 project (2011): Design of a downscaling project of climate projections in Japan. The second international MAHASRI/HyARC workshop on Asian monsoon and water cycle, Nha Trang, Viet Nam.
- 75) T. Aoyagi, S.A. Adachi, H. Kusaka, K. Tanaka and N. Seino (2011): Near-term Prediction of Urban Climate Based on Urban Growth Scenarios in the Tokyo Metropolitan Area. Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Busan, Korea, 2011
- 76) 石﨑紀子、大楽浩司、飯塚聡、足立幸穂、木村富士男、日下博幸、田中賢治、高薮出(2011): 20km格子マルチRCMによる温暖化時の日本の地域気候変動. 日本気象学会2011年春季大会 P304.
- 77) 高薮出、大楽浩司、日下博幸、田中賢治、西森基貴、鼎信次郎、稲津將 (2011):マルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究(S-5-3). 日本気象学会2012秋季大会A107
- 78) 青柳曉典、高橋俊二 (2011): 多層都市キャノピースキームの開発―多層放射モデル―. 日本 気象学会2011年秋季大会P109.
- 79) 清野直子、青栁曉典、大河原望、居島修、宮内正厚(2011): 東京における赤外放射観測. 日本気象学会2011年秋季大会P309.
- 80) 高薮出 (2012): 地球温暖化予測の結果はどこまで細かく出来るのか. 第56回水工学講演会、アゲールシンポジウム「水工学における気候変動影響評価への礎」、土木学会、愛媛.
- 81) H. Sasaki (2012): "Projection of Climate Change aroundJapanby a Non-hydrostatic Regional Climate Model" 5th International Workshop on KAKUSHIN Program, Hawaii, USA.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項は無い。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) ダウンスケーリングの国際ミニワークショップ(2008年2月21日、気象研究所)
- 2) 温暖化影響評価のためのダウンスケーリングに関する研究会 (2008年11月18日、仙台国際センター小会議室6)
- 3) ダウンスケーリングにおける国際ミニワークショップ (2009年1月20日-21日、気象研究所)
- 4) 「雪・検証データ・ダイナミカルダウンスケーリング」研究会 (2009 年 3 月 6 日、気象研究所)
- 5) 第1回ダウンスケーリング国際ワークショップ (2010年1月25-27日、つくば国際会議場、参加者70名)
- 6) 第2回ダウンスケーリング国際ワークショップ

(2011年1月18-20日、つくば国際会議場、参加者60名)

- 7) 第3回ダウンスケーリング国際ワークショップ (2011年10月18-20日、つくば国際会議場、参加者54名)
- 8) ダウンスケーリングに関する国際ミニミーティング (2012年3月28日、気象研究所)

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 1) NHKサイエンスZERO (2010年10月2日、異常気象の謎に迫る:高藪出)

(6) その他

1) 石﨑紀子、博士号(理学)、筑波大学、2010

"Evaluation and intercomparison of the skill for regional climate models over Japan"

8. 引用文献

- 1) Saito, K., F. Tsukasa, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic atmospheric model. Mon. Wea. Rev., 134, 1266-1298.
- 2) Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. W. Wesley, T. J. Lee, and J. H. Copeland, 1992: A comprehensivemeteorological modeling system-RAMS. Meteoror. Atmos. Phys., 49, 69-91.
- 3) Adachi, a. S., F. Kimura, and M. Tanaka. 2009: Reproducibility of past 20 years climate using dynamical downscaling method and future prediction of snow cover in winter. Terrestrial Environment Research Center Report, 10, 51-60.
- 4) 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. NCAR technical note, NCAR/TN-475+STR.
- 5) Kurihara, K., K. Ishihara, H. Sasaki, Y. Fukuyama, H. Saitou, I. Takayabu, K. Murazaki, Y. Sato, S. Yukimoto, and A. Noda, 2005: Projection of climatic change over Japan due to global warming by high-resolution regional climate model in MRI. SOLA, 1, 97-100.
- 6) 岡村敏夫、1987:メッシュ気候値-その作成、利用の現状と将来-、天気、34、157-174.
- 7) 妹尾泰史、神田学、木内豪、萩島理(2004):「潜熱割合を考慮した人工排熱字空間分布の推計と局地気象に対する影響.水工学論文集,48,169-174.
- 8) 東京都都市計画局(1977): 東京都都市計画概要1976年版, pp336.
- 9) Aoyagi, T., and N. Seino (2011): A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. J. Appl. Meteor. Clim., 50, 1476-1496.

- 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
- 3. 温暖化予測評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (2) 複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究
 - (独) 防災科学技術研究所

社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット 大楽浩司 観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット 飯塚聡

〈研究協力者〉

(独) 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

(独)海洋研究開発機構 地球環境変動領域

米国 コロラド大学

Adriana Beltrán-Przekurat (非営利法人) 損害保険料率算出機構 リスク業務室 土井央 (株)NTT環境エネルギー研究所 環境推進プロジェクト 杉山聡

山口悟

佐々木亘

Roger A. Pielke, Sr.

平成19~23年度累計予算額:64,903千円 (うち、平成23年度予算額:12,787千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブ課題では、地域気候モデルによって全球気候モデルによる将来気候シナリオを空間詳細化すると同時に、気象研究所、筑波大学、京都大学と協力してモデルの違いなどによって生じる不確実性について評価を行い、地域詳細気候シナリオとその不確実性についての情報を共に影響評価研究に提供することを目的としている。

様々なモデルの改良・感度実験を踏まえて、1)全球再解析データ (JRA25、ERA-Interim)を用いた過去の再現実験、2)東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した気候モデルで得られた20世紀再現実験、SRES A1Bシナリオ実験の結果を用いた1980-2000年および2080-2100年の長期積分、3)東京大学などが共同開発した最新の気候モデルによる現在気候再現実験結果、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の新シナリオ実験(代表的濃度シナリオ:4.5W/m²)の結果を用いた1980-2000年、2040-2060年、2080-2100年の長期積分を行った。4)東京大学などによる高解像度全球大気モデルの1979-1998年の現在気候再現実験、CO₆倍増実験の結果を用いた長期積分を実施した。

力学的ダウンスケーリング手法がもたらす付加価値(地形、土壌、土地利用・土地被覆、土壌水分などの下部境界条件に依存した小さな現象を解像し、予測精度を改善すること)やモデルの違いによって生じる結果の不確実性について、河川流域平均の気温・降水量や、海上風、台風の上陸数・強度・経路、積雪等を評価した。力学的ダウンスケーリング手法によって、水平格子間隔の粗い全球気候モデルなどの境界条件を空間内挿した結果に比べて、現在気候の再現精度を大きく改善した。また、3つの異なる地域気候モデルで再現された極端現象、台風の経路の誤差がマルチモデルアンサンブルを行うことによって改善した。

アジアを対象とした地域気候モデル相互比較国際ワークショップ (CORDEX-East Asia、RMIP)

に参加し、成果の発信とアジアへの展開に向け情報交換を行った。

[キーワード] 地域気候モデル、マルチモデルアンサンブル、シナリオ実験、付加価値、不確実性

1. はじめに

人間活動に起因する気候変動の影響は、生態系、淡水資源、食糧、産業、健康など広範囲の分野に及ぶ。緩和策を講じたとしても地球温暖化の影響は数世紀にわたって続くため、今後頻度が増加する可能性がある異常気象(極端な高温、集中豪雨、渇水)が海面上昇などと重複して発生した場合、これまでのハザード・リスク評価に基づく都市・地域計画では対処できなくなることが懸念される。そのため、異常気象に伴う水災害・農業被害の頻度や規模など気候変動影響の特性及び社会システムの脆弱性変化について分析・予測・評価を実施し、気候変動影響への適応策を検討することが急務となっている。

しかし、主に全球気候モデルを用いて作成される気候シナリオと影響評価研究で必要とされる情報の空間解像度には大きな違いがある。また、モデルの違いによる結果の不確実性も大きい。そこで、複数の地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリング手法を用いて、気候シナリオの空間詳細化を行うことによって、都道府県レベルでの防災・環境対策にかかわる適応戦略の策定・検討に資する科学的知見を提供することが必要である。

2. 研究開発目的

気候シナリオを空間詳細化(ダウンスケーリング)する手法として、統計的ダウンスケーリングと力学的ダウンスケーリングの2つの手法がある。前者の手法は、比較的シンプルで大きな計算機資源が不要であり、局所的(流域、ポイント)に最適化した情報を提供可能である。しかし、物理プロセスに基づかず、定常な気候状態を仮定するため、系統的変化や相互作用プロセスは考慮できず、変数間の物理的整合性が少ないことが問題点として挙げられる。後者の手法は、物理プロセスに基づくため、変数間に物理的整合性があり、物理的解釈が比較的容易である。しかし、大規模強制場の系統誤差や地域気候モデルの各種物理過程に使われている半経験的なパラメータ化に起因する比較的大きなバイアスが見られることが多く、また多大な計算資源を必要とする。

本サブ課題では、気象研究所、筑波大学、京都大学と協力し、地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリング手法を用いて全球気候モデルによる将来気候シナリオを空間詳細化し、影響評価研究に提供するために、不確実性についての知見も含む日本域20km格子の地域気候シナリオを作成することが目的である。そのために、力学的ダウンスケーリング手法による付加価値やモデルなどの違いによって生じる結果の不確実性の要因について検討を行うことも目的とする。

3. 研究開発方法

(1) 力学的ダウンスケーリング手法による付加価値

様々な感度実験を踏まえて改良した地域気候モデルを用いて、

1) 気象庁・電力中央研究所が作成した全球再解析データ (JRA25) と気象庁気候データ同化 システム (JCDAS) を用いた過去29年間の長期積分、ヨーロッパ中期予報センターが作成した全球 再解析データ (ERA-Interim) を用いた2002-2004年の積分を実施した。

- 2) 東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した高解像度気候モデル (MIROC-H) で得られた20世紀再現実験、IPCCの排出シナリオに関する特別報告のA1B排出シナリオ (SRES A1B) 実験の結果を用いた1980-2000年および2080-2100年のそれぞれ20年間の長期積分を実施した。
- 3) 東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した最新の高解像度気候モデル (MIROC5) による現在気候再現実験結果、IPCCの新シナリオ実験(代表的濃度シナリオ:4.5W/m²) の結果を用いた1980-2000年、2040-2060年、2080-2100年のそれぞれ20年間の長期積分を実施した。
- 4) 東京大学・国立環境研・海洋研究開発機構が共同で開発した高解像度全球大気モデルによる 1979-1998年の現在気候再現実験、CO₂倍増実験の結果を用いたそれぞれ20年間の長期積分を実施した。

一般に地域気候モデリング手法は、全球モデルの計算結果または客観解析データを用いて高解像度の地域気候モデルに初期条件と時間発展する側方境界条件(気温、風、湿度、気圧)、下部境界条件(海面水温、海氷)を与え駆動するものである。多くの場合この手法は一方向であり、駆動する全球モデルに対して地域気候モデルからのフィードバックはない。古気候から人為的気候変化研究まで気候分野の幅広い範囲で用いられており、現実の観測による制約の違いによって4つのタイプに分類される1)。

Type I:日々の気象予報

制約条件:現実に観測された初期・側方境界条件、海面水温(観測値)、地形など陸面の下 部境界条件、太陽放射、十分混合した温室効果ガス

● Type II:季節的な気象シミュレーション(再現実験) 制約条件:現実に観測された側方境界条件(解析値)、海面水温(観測値)、地形など陸面 の下部境界条件、太陽放射、十分混合した温室効果ガス

● TypeⅢ:季節予報

制約条件:全球大気モデルによる側方境界条件、海面水温(観測値)、地形など陸面の下部 境界条件、太陽放射、十分混合した温室効果ガス

● TypeIV: 気候予測

制約条件:全球気候モデルによる側方境界条件・海面水温、地形などの陸面の下部境界条件、 太陽放射、十分混合した温室効果ガス

Type I は、初期・境界条件に観測された情報が与えられ、力学的ダウンスケーリングは短期的な天気予報の基礎情報を提供する。Type II は、地域気候モデルは初期値を忘れているが、観測に基づく客観解析データによって駆動されるためType III と IV で可能な予測スキルの上限をテストすることができる。Type III では、観測された海面水温を下部境界条件とした全球大気モデルによって地域気候モデルが駆動される。Type IV では、全球気候モデルまたは生物圏や雪氷圏も結合した地球システムモデルによって地域気候モデルが駆動される。

Type I、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳでは、段階的に現実の観測による制約が少なくなるため、一般的に力学的 ダウンスケーリングによる予測スキルが小さくなる。

ここでは、力学的ダウンスケーリング手法による付加価値や大規模強制場の系統誤差による結果の不確実性について検討を行うことを目的として、1)、2)、4) の現在気候における長期積分結果を用いて、Type II、Type III、Type III、Type III、Type III、Type III

(2) 力学的ダウンスケーリングの不確実性についての検討

1) 複数の地域気候モデルの海上風と波浪の検証

地球温暖化に伴う海面上昇や強い台風の増加などの懸念、さらに世界的に沿岸域への人口の過密化が進む状況の中、沿岸域の堤防などの防災施設の設計基準の判断をする際、地球温暖化に伴う風や波浪などの統計的変化を見積もることが求められている。同時に、その情報はクリーンエネルギーである風力発電の設置計画にも有用な情報を与えることが期待される。

防災科学技術研究所(防災科研)、気象研究所、筑波大学において再解析データJRA25を用いて実施された複数の地域気候モデルで再現された海上風の精度を検証し、ダウンスケーリングすることにより得られる風の情報の有用性や不確実性について検討する。陸上で観測される風は周辺の建物影響を受けやすくデータの不均質性が著しいことが知られている。従って、アメダスの地上観測データと水平解像度が20kmである領域モデルの風とを直接比較すること適切とは言えない。そこで、近年の衛星データを利用して推定された海上風との比較を通じて、モデルで再現される風の検証を行う。また、海上風によって計算される沿岸波浪に関する付加価値について検討する。

2) 地域気候モデルによる台風の検証

3つの異なる地域気候モデルで再現された極端現象、台風の経路の再現性、マルチモデルアンサンブルによる付加価値について検討した。

また、東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した高解像度気候モデル (MIROC-H) で得られた20世紀再現実験 (20c3m)、SRES A1Bシナリオ実験の結果を用いた1980-2000年および2080-2100年のそれぞれ20年間の長期積分結果を用いて、台風の頻度、上陸数、強度について検討した。

3) 地域気候モデルと積雪変質モデル (SNOWPACK) を用いた積雪の検証

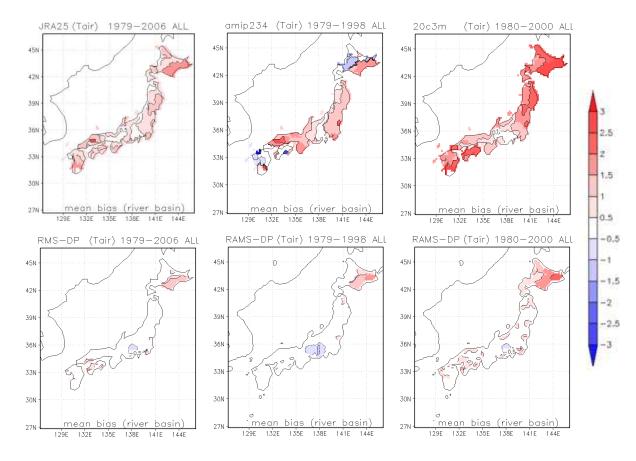
気候変動に伴う雪氷災害の形態の変化を予測するためには、気候変動モデルと雪氷災害予測モデル²⁾を組み合わせる必要がある。一方、気候変動モデル並びに雪氷災害発生予測モデルの予測には不確実性が伴う。そこで防災科研の地域気候モデルと雪氷災害予測モデルのコア部分を占める積雪変質モデル(SNOWPACk)を用い、モデルで再現される積雪の検証を行う。

検証に使用したモデルは、防災科研のRAMSである。一方積雪変質モデルはスイス雪・雪崩研究所が開発したSNOWPACK^{3),4),5)}を防災科研が日本の積雪に合うように改良したものである^{6),7),8),9)}。 SNOWPACKは、気象データ(気温、湿度、風向、風速、日射、下向き長波、降水量)を入力と、積雪内部の熱並びに物質移動を物理法則に則って解き、積雪の内部構造(積雪深、積雪重量、雪質、密度、雪温、含水率等)の時間変化を計算する一次元のモデルである。

4. 結果及び考察

(1) 力学的ダウンスケーリング手法による付加価値

図(2)-1と図(2)-2は、地域気候モデルの境界条件(JRA25/JCDAS、全球大気モデル、全球大気海洋結合モデル)及び、それぞれの境界条件で駆動した地域気候モデルで再現された地上気温および降水量のバイアスを、京大防災研で作成された解析プログラムを利用して主要78河川流域単位で比較したものである。現在気候の観測値はアメダスデータを利用している。境界条件のデータについては、20km格子に単純内挿を行った。2m気温については、標高のデータを用いて標高補正も行った。



図(2)-1 アメダスに対する下記各要素の、年平均2m気温のバイアス (差、単位はK)。主要78河川流域毎に評価して分布図を作成した。

左上図:20km格子に空間内挿したJRA25/JCDASの気温(1979-2006)

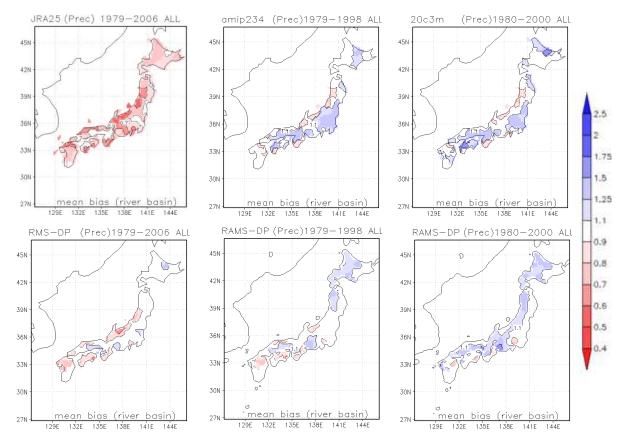
中上図:20km格子に空間内挿した全球大気モデルの2m気温 (1979-1998)

右上図:20km格子に空間内挿した全球大気海洋結合モデルの2m気温(1980-2000)

左下図: JRA25の再解析データを境界条件とした地域気候モデルの2m気温 (1979-2006): Type Ⅱ

中下図:全球大気モデルを境界条件とした地域気候モデルの2m気温 (1979-1998): TypeⅢ

右下図:全球大気海洋結合モデルを境界条件とした地域気候モデルの2m気温 (1980-2000): Type IV



図(2)-2 図(2)-1 と同じ。ただし、アメダスに対する各要素の、年平均降水量のバイアス(比)を主要78河川流域毎に評価したもの。

境界条件を単純空間内挿した年平均2m気温の再現スキルについては、Type II > Type II > Type IV となっており、現実の観測による制約が少なくなるに従って、境界条件の現在気候再現スキルが小さくなっている。Type III がType II と比べ、さほど再現スキルが悪くないのは、日本列島が海洋に囲まれており、観測された海面水温によってモデルが強制されていることが大きな要因だと考えられる。

一方、それぞれの境界条件を用いて地域気候モデルによりダウンスケーリングした結果の再現スキルは、境界条件の再現スキルと似た傾向が見られるものの、いずれの場合でも境界条件を単純空間内挿したものより、現在気候再現スキルが大きく向上(多くの河川流域において年平均気温のバイアスは0.5K以下)しており、地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリング手法によって付加価値が得られていることが示されている。

年平均降水量については、その再現スキルについて、現実の観測による制約が少なくなるに従って、境界条件の現在気候再現スキルが必ずしも小さくなっていなかった。これは、大規模循環場の系統誤差よりも降水に関する半経験的なパラメータ化に起因する不確実性が結果の再現スキルに及ぼす影響が大きいということを示唆している。

それぞれの境界条件を用いてダウンスケーリングした結果の再現スキル (図(2)-2の下図) は、境界条件を単純空間内挿したもの (図(2)-2の上図) より、現在気候再現スキルが向上 (多くの河

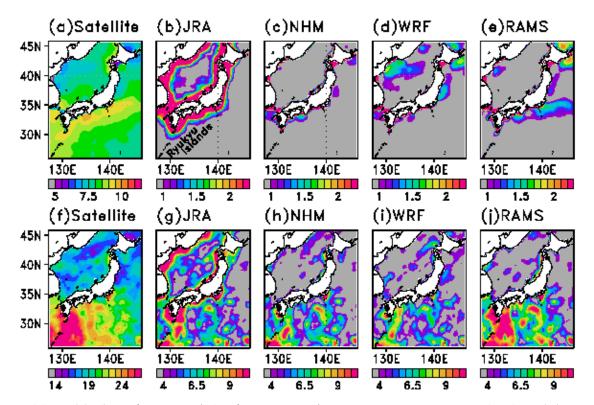
川流域において年平均降水量のバイアスは10%以下)しており、降水においても力学的ダウンスケーリング手法が付加価値を与えることが出来ていた。

力学的ダウンスケーリングで気候シナリオの空間詳細化を行うことによって、都道府県レベルでの防災・環境対策にかかわる適応戦略の策定・検討に資するより精度の高い地域気候シナリオを提供できる一定の見通しを立てることができた。

(2) 力学的ダウンスケーリングの不確実性についての検討

1) 複数の地域気候モデルの海上風と波浪の検証

日本周辺に台風が多く来襲する夏季 (7月から9月) の海上風の再現性について検証した。図(2)-3 は、衛星データと再解析データを組み合わせたBlended Sea Wind (BSW) の夏季の平均海上風風速および各モデルで再現された風速の二乗誤差 (RMS) を示したものである (図(2)-3 a-e)。いずれのモデルにおいても、境界条件に用いた再解析データ (JRA) に見られる日本の沿岸域での系統的な誤差の減少に成功していることがわかる。これは、モデルの水平格子間隔を細かくすることにより、日本の複雑な海岸線などの表現が向上した結果であり、力学的ダウンスケーリングの有用性(付加価値)を示すものである。しかしながら、強風の極値の再現性の検証として99パーセンタイルの風速を見ると、いずれのモデルにおいても日本の南方海域で大きな誤差が見られる(図(2)-3 f-j)。



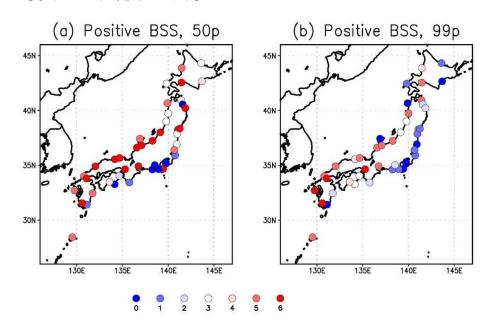
図(2)-3 (a) 衛星データと再解析データを組み合わせたBlended Sea Wind(BSW)の夏季の平均海上 風風速(1999-2004年)。各モデルで再現された風速の二乗誤差(RMS) ((b)JRA、(c)NHM、(d)WRF、 (e)RAMS)。(f)-(j)は(a)-(e)と同じ。ただし、99パーセンタイル値。単位はm/s。

図(2)-4は、各モデルの海上風で再現された有義波高に関して、正のBrier Skill Score (BSS) 10 をもつモデルの数を示したものである。日本沿岸の波高の検証にはナウファス (全国港湾海洋波浪情報網:NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbours) データを用いた。地域気候モデルを使用することによる付加価値の有無の評価には BSSを用いた。BSSは境界条件(JRA25)と地域気候モデルの観測値(NOWPHAS)に対する誤差分散の相対的な大きさで定義される。

$$BSS = 1 - \sigma_{RCM}^2 \sigma_{IRA}^{-2}$$

JRA25の誤差分散が小さい場合(JRA25が観測値に近い場合)、BSSは負となる。一方、領域気候モデルのNOWPHASに対する誤差分散が小さい場合(地域気候モデルが観測値に近い場合)は1に近づく。本研究では3つの異なる地域気候モデルに加え、それぞれのモデルに対して物理過程の設定やパラメータの調整の仕方が異なるバージョンによる計算結果も用いた(計6つ)。

日本海側では半数以上のモデル海上風によってBSSが増加している。すなわち、日本海側では地域気候モデルの海上風を用いることによる付加価値があり、モデル依存性はないことを示唆している。一方、太平洋側は日本海側に比べて、50パーセンタイル,99パーセンタイル値とも付加価値は明瞭ではない。関東の沿岸域ではどのモデル海上風を用いてもJRA-25よりも再現性が低い地点がいくつか見られる。この原因の1つとして、外洋で発生したうねりの再現性が考えられる。地域気候モデルの海上風は外洋(特に太平洋側)で再現性に問題があるため、外洋での誤差が沿岸でも現れている可能性がある。

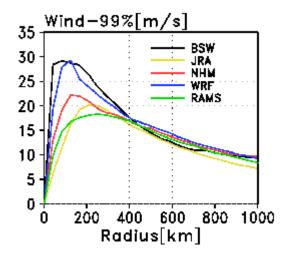


図(2)-4 各モデルの海上風で再現された有義波高に関して、正のBrier Skill Score (BSS)をもつモデルの数を示したもの。(a) 50パーセンタイル値。(b) 99パーセンタイル値。

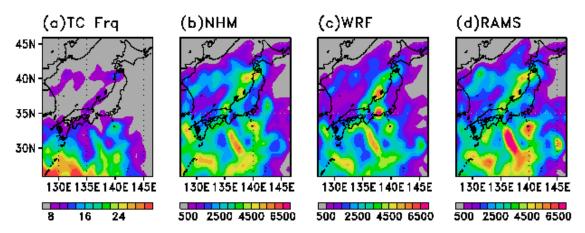
2) 地域気候モデルによる台風の検証

図(2)-3 f-jで示された、夏季の強風の極値(99パーセンタイルの風速)の日本南方海域におけ

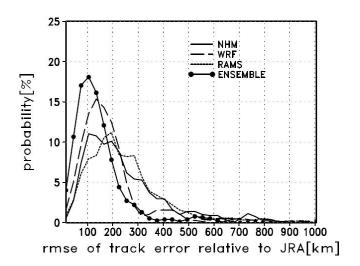
る大きな誤差は、主に台風に伴い生じていると考えられるため、モデルの台風の再現性について調べた。再現された台風の風速分布を見ると、気象研のNHMと防災科研のRAMSは過小評価をしていたが、筑波大のWRFは衛星データに近い風速分布を再現している(図(2)-5)。しかしながら、筑波大のWRFも99パーセンタイルの風速に他のモデルと同様の誤差が見られる(図(2)-3 i)。台風経路の誤差について見ると、いずれのモデルにおいても、99パーセンタイルの風速の誤差が大きい海域で、経路の誤差も比較的大きい(図(2)-6)。このことから、力学手ダウンスケーリングによって得られる台風に伴う極値風の情報には、モデルの解像度や物理過程に起因する風速の過小評価と同時に台風経路の誤差に起因した不確実性が含まれていると言える。モデル台風の経路の誤差は100~200km程度であった。この経路誤差がマルチモデルアンサンブルを行うことによって改善した(図(2)-7)。また、台風のサイズ毎に経路誤差の大きさを比較すると、小さいサイズの台風ほどモデルの経路誤差が多くなる傾向が見られた。但し、大きいサイズの台風においても藤原効果(2つの熱帯低気圧が接近した場合に、干渉して異なる経路をとる現象のこと)が働く場合には、大きな誤差が起こり得る傾向も見られた。



図(2)-5 台風の中心からの距離に対する海上風速99パーセンタイル値のプロファイル(1999-2004年)。 単位m/s。Blended Sea Wind(BSW):黒線、JRA25:黄線、NHM:赤線、WRF:青線、RAMS:緑線



図(2)-6(a) 台風発生の空間分布(1985-2004年)、(b) NHMの積算台風経路誤差の空間分布(単位km)、(c)(b)と同じ。だたしWRF、(d)(b)と同じ。ただしRAMS。



図(2)-7 3つの地域気候モデル (NHM、WRF、RAMS) で再現された台風経路の誤差とアンサンブル 平均。

東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した高解像度気候モデル (miroc3.2_hires) による20世紀再現実験、SRES A1Bシナリオ実験、その結果を用いた地域気候モデル (RAMS) による1980-2000年および2080-2100年の長期積分結果を用いて、台風の頻度、上陸数、強度について検討した。

気象庁の台風に関する解析データ(Best Trackデータ)および大気海洋結合モデル(miroc3.2_hires)における台風は、地域気候モデルの計算領域で発生もしくは領域内に進入した台風のみを対象とした。また、領域にわずかにかかる台風も存在するため、領域内で24時間以上存在した台風のみを対象とした。各データにおいて抽出した台風数およびその中で本土に上陸した台風数を表(2)-1に示す。

20C3Mと観測値を比較すると、MIROCとRAMSともに台風数の発生数は年間約2個少なく、MIROCとRAMSの差は小さい。台風の上陸数では、MIROCとRAMSで倍近い差が生じている。上陸判定条件において粗い格子間隔の1メッシュのずれの差が顕著に現れていると考えられる。

	台風数		上陸数		上陸割合[%]	
	1980-2000	2080-2100	1980-2000	2080-2100	1980-2000	2080-2100
Best Track	172 (8.19)	-	54 (2.57)	-	37	-
シナリオ	20C3M	A1B	20C3M	A1B	20C3M	A1B
MIROC	140 (6.67)	122 (6.10)	34 (1.62)	41 (2.05)	24	34
RAMS	137 (6.52)	116 (5.52)	71 (3.38)	68 (3.24)	52	59

表(2)-1 抽出された台風の数と上陸数およびその割合

※括弧内は年平均数

上陸の有無を問わず、全ての対象台風について台風として存在している期間内で最低値の中心 気圧の平均と分散、および上陸した台風の上陸時の中心気圧の平均と分散について、MIROCとRAMS の比較を行った(表(2)-2)。 観測値における中心気圧の平均は全期間で953.4hPa、上陸時では968.2hPaであり、MIROC、RAMSともに中心気圧の平均値は観測値に比べかなり大きい。しかし、全期間と上陸時を比較すると、MIROCは観測値とは逆に中心気圧が低下しているのに対して、RAMSでは上陸時の中心気圧が大きくなっている。中心気圧でみた場合、RAMSでは平均的には観測値ほど上陸時に台風の中心気圧が下がらないものの、上陸時に台風が減衰する傾向は定性的に再現している。

また、IPCCのSRES A1Bシナリオ実験と20C3Mを比較すると、MIROCは台風の数がやや減るが、上陸数が増加する。中心気圧の平均値は変化が見られないが、分散が大きくなる。RAMSでは台風の数はやや減るが、上陸数はほぼ変わらない。中心気圧の平均値は変化が見られないが、分散は大きくなる。

	全台	計風の全期	間内の最低	値	上陸台風の上陸時			
	MIROC		RAMS		MIROC		RAMS	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散
20C3M	999.5	96.0	981.9	80.9	992.7	83.2	992.8	51.9
A1B	999.5	110.7	982.1	120.6	992.0	115.7	991.9	65.0
変化 [%]	+0.0	+15.3	+0.0	+49.1	△0.1	+39.1	△0.1	+25.2

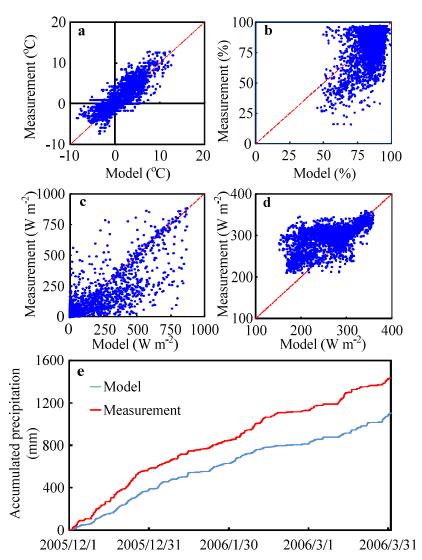
表(2)-2 中心気圧の平均および分散の比較

3) 地域気候モデルと積雪変質モデル (SNOWPACK) を用いた積雪の検証

対象年は、実際に雪氷災害が多発した2005/2006冬季¹¹⁾とした。この冬は全国的に雪が多く、気象庁から「平成18年豪雪」と任命された冬である。対象地域は、新潟県長岡市にある防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター (以下SIRC) (37°25'N;138°53';97 m a.s.1.)とした。SIRCでは、気象要素(気温、湿度、上下短波、上下長波、風向風速、降水量、積雪深、積雪重量)の測定のほか、冬期期間、週1回の積雪断面観測によって、詳細な積雪内部構造の観測を行っている。

RAMSで計算された気象要素がどれくらい実際の値を表しているかを評価するために、SIRCが含まれるRAMS内の格子(計算グリッド5km)における気象データ(1時間値)とSIRCで測定された気象データ(気温、湿度、日射、下向き長波、降水量)の比較を冬期間(12月 \sim 3月)について行った(図(2)-8)。以下に結果をまとめる。

- ・ 実測値に対する RAMS 内の気温の標準誤差は ± 1.9 $\mathbb C$ であり、誤差には傾向が見られなかった (図(2)-8 a)。
- ・ 実測に対する RAMS 内の湿度の標準誤差は $\pm 13.4\%$ であり、全体的にモデルの結果の方が湿度 は高めに出る傾向が見られた(図(2)-8b)。
- ・ 実測に対する RAMS 内の日射量の標準誤差は、 $\pm 106.2~W~m^{-2}$ であり、全体的にモデルの結果の方が、大きめに出る傾向が見られた(図(2)-8 c)。
- ・ 実測に対する RAMS 内の下向き長波量の標準誤差は、 $\pm 47.9~W~m^{-2}$ であり、全体的にモデルの方が、小さめに出る傾向が見られた(図(2)-8~d)。
- ・ 実測に対する RAMS 内の 2005/2006 年冬期の総降水量は、実際の冬期降水量の 77%程度しかなかった (図(2)-8 e)。



図(2)-8 実測された気象要素と地域気候モデル (RAMS) の計算結果との比較。a)2m気温、b) 相対湿度、c)日射量、d)下向き長波量、e)積算降水量

RAMS内では、陸面モデルによって積雪状態の計算を行っているが、RAMS内で計算された積雪深の変動は、実際の積雪深の変動と比べて量がかなり少ない上に、細かい積雪深の変動が全く再現されていなかった。従って、気候変動に伴う雪氷災害の形態の変化を議論するために、より詳細な積雪内部構造の計算が可能な積雪変質モデルを用いることが必要である。

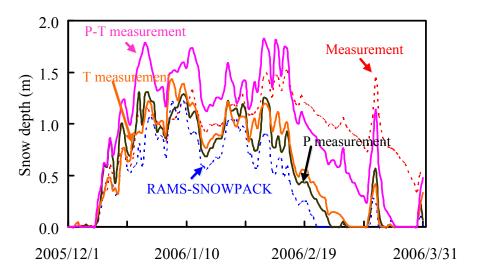
RAMSで計算された気象データを入力としたSNOWPACKの計算結果(RAMS-SNOWPACK)は、実測された積雪深と比較して、冬の前半においては似た変動を再現していた。一方、冬の後半においては、RAMSの計算結果を入力としたSNOWPACKの計算結果と実測値との間に大きな隔たりが見られた。実測では、3月末まで積雪が残っているのに対し、RAMS-SNOWPACKでは、2月中旬には積雪がなくなってしまっていた。RAMSの陸面モデルの積雪の取り扱いに、積雪深の計算結果が実測と合わない原因があることが示唆される。

RAMS-SNOWPACKの計算結果と実測値との違いが何に起因するかを調べるため、以下の条件で感度 実験を行った。

- ・RAMSの計算結果のうち降水量のみ実測値に変えて入力した場合 (P measurement)
- ・RAMSの計算結果のうち気温のみ実測値に変えて入力した場合 (T measurement)
- ・RAMSの計算結果のうち降水量と気温を実測値に変えて入力した場合 (P-T measurement)

図(2)-9は実測値と上記の条件下で計算を行った結果との比較である。気温、降水量を単独で実 測値に変えた場合では、積雪深の再現はそれほど改善しない。一方、気温並びに降水量を実測値 に変えた場合、実際の積雪深と比べ雪の消え方は早いけれども、RAMSの結果のみを入力データと した場合と比べて格段に、積雪深の変動の再現性が改善された。

以上のことから、RAMSを用いて積雪状況を精度よく再現する場合には、気温、降水量の両者の再現性を同時に改善する必要があることが示唆される。



図(2)-9 入力条件を変えたSNOWPACKの数値実験。

青線:RAMSの計算結果をSNOWPACKの入力とした場合

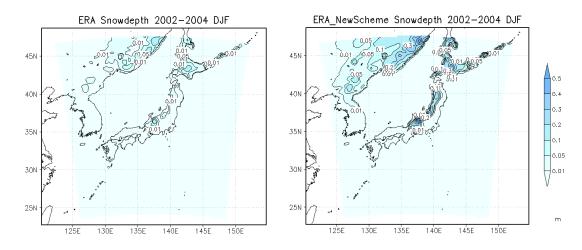
黒線:RAMSの計算結果のうち降水量のみ実測値に変えて入力した場合

橙線:RAMSの計算結果のうち気温のみ実測値に変えて入力した場合

桃色線:RAMSの計算結果のうち気温と降水量のみを実測値に変えて入力した場合

地域気候モデルで計算される積雪の再現精度を改善するには、関係する複数の変数について同時に改善する必要があり、容易ではない。検証の過程で、RAMSの陸面モデルの積雪の取り扱いに原因があることが示唆されたため、陸面モデルの積雪過程において、圧縮歪み速度が小さくなる(圧縮されにくくなる)ようにスキームの変更を行った。観測データと比べるとまだ過小評価であるものの、スキームの変更前と比べて冬季平均(2002-2004年)の積雪深が大幅に改善した(図(2)-10)。

今回は気候変動に伴う雪氷災害の変動を計算するうえで必要な積雪状況の再現性に関して、気候変動モデルの入力データの誤差がどのような影響を与えるかについて議論した。今回の結果から雪氷災害に直結する積雪状況の再現の難しさが浮き彫りとなった。モデルの改良を行うと共に、統計的な手法を取り入れること等を検討する必要がある。



図(2)-10 積雪スキーム改良前(左図)と改良後(右図)に計算された積雪深(2002-2004年冬季 平均)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

地域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリング手法による計算結果について、陸上の気温・降水量、海上風、台風等について検討を行い、力学的ダウンスケーリング手法が付加価値を与えたことが明瞭に示された。また、大規模強制場(客観解析、全球大気モデル、全球大気・海洋結合モデル)や地域気候モデルなどの違いによって生じる結果の不確実性について検討を行い、力学的ダウンスケーリング手法によって、水平格子間隔の粗い全球気候モデルなどの境界条件を空間内挿した結果に比べて、現在気候の再現精度を大きく改善できることを示した。また、3つの異なる地域気候モデルで再現された極端現象、台風の経路の誤差がマルチモデルアンサンブルを行うことによって改善した。都道府県レベルでの防災・環境対策にかかわる影響評価研究に地域気候シナリオを提供するための不確実性についての新たな知見を得ることができた。

(2) 環境政策への貢献

力学的ダウンスケーリングで気候シナリオの空間詳細化を行うことによって、都道府県レベルでの防災・環境対策にかかわる適応戦略の策定・検討に資する、より精度の高い地域気候シナリオを提供できる一定の見通しを立てることができた。

20km格子のモデルによる力学的なダウンスケーリングにより作成された現在気候再現実験や温暖化シナリオ実験の各種のデータは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の基幹要素システムであるデータ統合解析システム (DIAS) 上に提供した。これらのデータは、今後、水文・水資源、農業など様々な分野の影響評価研究で利用される予定であり、詳細な地域気候シナリオの提供が今後飛躍的に進む可能性がある。また、S5-1、S-8、気候変動適応イニシアチブ課題との連携や、平成20年度に発足した気候シナリオ利用タスクグループを通じ、成果の広報・普及、新たな研究課題への発展に努める。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで用いる地域気候モデルについては、米国コロラド大学のRoger A. Pielke, Sr. 教授の研究グループをパートナーとして、平成18年度から登録している共同研究プロジェクト「気候変動下における人間活動と生物地球化学過程が地域の水循環に及ぼす影響」(日本側コンタクトパーソン:大楽)による国際共同研究(日米地球環境リエゾン)を行っている。また、アジア太平洋地球変動研究ネットワーク(APN)による領域モデル相互比較プロジェクト(RMIP)に参加し、ドイツマックスプランク研究所や米国大気研究センター(NCAR)の全球気候モデルを用いて、アジア地域で複数モデルによるダウンスケーリングを行い、その相互比較を行っている。これに関連した国際会議を中国の北京、つくば、オーストラリアのメルボルン、韓国の済州島で行った。世界気候研究計画(WCRP)においてCoordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX)が計画・実施されており、RMIPはその共通の枠組みに位置づけて研究開発を進めている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Dairaku, K., S. Emori, and H. Higashi (2008): Potential changes in extreme events under global climate change. J. Disas. Res., 3, 1, 39-50.
- 2) Dairaku, K., S. Emori, and T. Nozawa (2008): Impacts of global warming on hydrological cycles in the Asian monsoon region. Adv. Atmos. Sci., 25, 6, 960-973.
- 3) Iizuka, S. and T. Matsuura (2008): ENSO and western north pacific tropical cyclone activity simulated in a CGCM. Clim. Dyn., 30, 815-830.
- 4) Iizuka, S. and T. Matsuura (2009): Relationship between ENSO and North Atlantic tropical cyclone frequency simulated in a CGCM. Hurricanes and Climate Change, Elsner, James B.; Jagger, Thomas H. (Eds.), Springer-Verlag, 323-338.
- 5) Iizuka, S. (2010): Simulations of wintertime precipitation in the vicinity of Japan: Sensitivity to fine-scale distributions of sea surface temperature. J. Geophys. Res., 115, D10107, doi:10.1029/2009JD012576.
- 6) Iizumi, T., M. Nishimori, K. Dairaku, S.A. Adachi, and M. Yokozawa (2011): Evaluation and intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present-day climate: strengths and weaknesses of dynamical and bias-correction-type statistical downscaling methods, J. Geophys. Res., 116, D01111, doi:10.1029/2010JD014513.
- 7) Ishizaki, N., H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K. Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2012): Probabilistic regional climate analogue in the warmer Japan, J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 65-74.
- 8) Iizuka, S., K. Dairaku, W. Sasaki, N.N. Ishizaki, S.A. Adachi, H. Kusaka, and I. Takayabu (2012): Assessment of ocean surface winds and tropical cyclones around Japan by RCMs, J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 91-102.

- 9) Ishizaki, N.N., I. Takayabu, M. Ooizumi, H. Sasaki, K. Dairaku, S. Iizuka, F. Kimura, H. Kusaka, S. A. Adachi, K. Kurihara, K. Murazaki, and K. Tanaka: Improved Performance of Simulated Japanese Climate with a multi-model ensemble, J. Meteor. Soc. Japan, 90, 235-254.
- 10) Pielke Sr., R.A., Wilby, R., Niyogi, D., Hossain, F., Dairuku, K., Adegoke, J., Kallos, G., Seastedt, T., Suding, K., Dealing with complexity and extreme events using a bottom-up, resource-based vulnerability perspective, Complexity and Extreme Events in Geoscience (in press)
- 11) Iizuka, S., and T. Matsuura: Analysis of tropical cyclone activity in the southern hemisphere using observation and CGCM simulation, Cyclones: Formation, Triggers and Control, Nova Science Publisher Inc. (in press)
- 12) Iizumi, T., I. Takayabu, K. Dairaku, H. Kusaka, M. Nishimori, G. Sakurai, N. N. Ishizaki, S. A. Adachi, and M. A. Semenov: Future change of daily precipitation indices in Japan: A stochastic weather generator-based bootstrap approach to provide probabilistic climate information. J. Geophys. Res. (accepted on 27th April 2012)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) S-5-3プロジェクトチーム (2007): S-5-3 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究, S-5-3ニューズレター, 1.
- 2) 大楽浩司 (2007): ENSEMBLESに参加して, S-5-3ニューズレター, 3.
- 3) 菅田誠治,日暮明子,早崎将光,竹村俊彦,中島映至,今須良一,Schutgens N. A. Johannes,神沢博,大楽浩司 (2008):地域大気モデルを用いた大気環境研究,国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報,平成18年度,15,17-22.
- 4) S-5-3プロジェクトチーム (2008): S-5-3 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究, S-5-3ニューズレター, 5.
- 5) S-5-3プロジェクトチーム (2008): S-5-3 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究, S-5-3ニューズレター (別冊), 5-1.
- 6) 高藪出,大楽浩司 (2008): EU ENSEMBLES 第4回全体会合参加報告,天気,55,11,907-910.
- 7) S-5プロジェクトチーム (2009):地球温暖化に係る政策支援と普及菖発のための気候変動シナリオに関する総含的研究, S-5パンフレット.
- 8) 大楽浩司,石崎紀子,金田幸恵,金丸秀樹,田中賢治,中野満寿男,吉村圭,高藪出(2010): 第2回国際ルンド地域気候モデリングワークショップ参加報告,天気,57,15-21.
- 9) Dairaku, K. (2010): Potential changes in hydrologic hazards under global climate change, Global Warming edited by Stuart Arthur Harris, In Tech, Publishing, ISBN 978-953-307-149-7.

(2)口頭発表(学会等)

1) 大楽浩司(2007): 洪水・渇水変動予測のための領域大気-陸域水文生態結合モデル開発, 防災 科学技術研究所 所内研究発表会, つくば.

- 2) Dairaku, K., A. Beltran-Przekurat, and R. A. Pielke, Sr. (2007): Development of an atmosphere-biosphere-river coupling regional climate model for dynamical downscaling, X X IV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics 2007, Perugia, Italy.
- 3) Dairaku, K. (2007): The role of orography and soil moisture in hydrological transitions associated with monsoon onset in Southeast Asia, XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics 2007, Perugia, Italy.
- 4) Dairaku, K., and S. Emori(2007):Dynamic and thermodynamic effects on the Asian summer monsoon under doubled atmospheric CO2, XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics 2007, Perugia, Italy.
- 5) Dairaku, K., and S. Emori(2007):Extreme events in Asian monsoon region under global warming, X X IV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics 2007, Perugia, Italy.
- 6) Sasaki, W., and T. Hibiya(2007):Interannual variability of summertime extreme significant wave heights in the western North Pacific, XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics 2007, Perugia, Italy.
- 7) 大楽浩司,江守正多(2007):高解像度全球気候モデルによる地球温暖化時の夏季アジアモンスーン極端現象の変化,水文・水資源学会2007年度研究発表会,名古屋.
- 8) 東博紀, 林誠二, 大楽浩司(2007):地球温暖化による長江流域の洪水リスクへの影響評価, 水 文・水資源学会2007年度研究発表会, 名古屋.
- 9) Dairaku, K. (2007): Role of land surface conditions on the monsoon onset in Southeast Asia, AOGS 4th annual meeting, Bangkok, Thailand.
- 10) 大楽浩司(2007):全球気候モデルによる地球温暖化時の夏季アジアモンスーン極端減少の変化, 農研機構農村工学研究所「水循環」プロ農工研グループ研究会, つくば.
- 11) Dairaku, K., A. Beltran-Przekurat, and R. A. Pielke, Sr. (2007): Development of an atmosphere-biosphere-river coupling regional climate model for dynamical downscaling, UJCC-NCAS summer school, Cambridge, England.
- 12) Dairaku, K., and S. Emori(2007): Dynamic and thermodynamic effects on the Asian summer monsoon under doubled Atmospheric CO2, UJCC-NCAS summer school, Cambridge, England.
- 13) Dairaku, K., A. Beltran-Przekurat, R. A. Pielke, Sr., W. Sasaki, and S. Iizuka(2007): Development of an atmosphere-biosphere-river coupling regional climate model for dynamical downscaling, The Fourth General Assembly of the EC Framework VI Project ENSEMBLES, Prague, Czech Republic.
- 14) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘,Roger A. Pielke, Sr., Adriana Beltran-Przekurat,中村雅紀,山口悟(2007):温暖化予測評価のためのマルチアンサンブルとダウンスケーリングの研究ー複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究ー,防災科学技術研究所 平成19年度 外部資金による研究の中間報告会,つくば.
- 15) 大楽浩司, 飯塚聡, 佐々木亘, R. A. Pielke, Sr., A. Beltran-Przekurat, 山口悟, 中村雅 紀(2007): 複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究, 環境研

究機関連絡会 第5回成果発表会, 東京.

- 16) W. Sasaki W., and T. Hibiya(2007):Interannual variability and predictability of summertime significant wave heights in the western North Pacific, 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazards, Hawaii, USA.
- 17) K. Dairaku K. (2008): Multi-model ensembles and downscaling for regional risk assessment of climate change, 2nd Workshop on Climate Risk Assessment, Yokohama, Japan.
- 18) 飯塚聡, 大楽浩司, 佐々木亘(2008):地域気候モデルで再現される海上風の検証, 日本海洋学会春季大会, 東京.
- 19) Sasaki, W., S. Iizuka, and K. Dairaku(2008): Toward future projections of wind and wave climate in the northwestern Pacific Ocean using three different regional climate models, International Symposium on the Effects of Climate Change on the World's Oceans, Gijon, Spain.
- 20) Sasaki, W., and T. Hibiya(2008):Interannual variability and recent increase in the summertime significant wave heights in the western North Pacific, International Symposium on the Effects of Climate Change on the World's Oceans, Gijon, Spain.
- 21) 飯塚聡, 大楽浩司, 佐々木亘(2008): 地域気候モデルで再現される海上風の検証, 日本気象学会春季大会, 横浜.
- 22) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘, Adriana Beltrán-Przekurat, Roger A. Pielke Sr. (2008):20km 地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングの研究,日本気象学会春季大会,横浜.
- 23) Dairaku, K. (2008): Regional climate simulation over Asia under global warming and introduction of multi-model ensembles and downscaling project in Japan, Workshop of Regional Climate Model Intercomparison Project (RMIP): Phase III, Beijing, China.
- 24) 大楽浩司, 飯塚聡, 佐々木亘, A. Beltrán-Przekurat, R.A. Pielke Sr. (2008): 地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングの現在気候再現性, 防災科学技術研究所 所内研究発表会, つくば.
- 25) 大楽浩司, 飯塚聡, 佐々木亘, A. Beltrán-Przekurat, R.A. Pielke Sr. (2008): 地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングの現在気候再現性, 水文・水資源学会, 東京.
- 26) 飯塚聡, 大楽浩司, 佐々木亘(2008): 地域気候モデルで再現される海上風の検証(2), 日本海洋学会秋季大会, 広島.
- 27) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘,R.A. Pielke, Sr., A. Beltrán-Przekurat,中村雅紀,山口悟 (2008):地域気候モデルの現在気候再現性-複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究-,環境省地球環境研究総合推進費S-5-3 meeting,つくば.
- 28) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘, R.A. Pielke, Sr., A. Beltrán-Przekurat,中村雅紀,山口悟 (2008):地域気候モデルの河川流域での現在気候再現性.温暖化影響評価のためのダウンスケーリングに関する研究会,仙台.
- 29) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘, R.A. Pielke, Sr., A. Beltrán-Przekurat,中村雅紀,山口悟 (2008):地域気候モデルの河川流域での現在気候再現性,日本気象学会秋季大会,仙台.
- 30) 大楽浩司,飯塚聡(2008):複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究,防災科学技術研究所外部資金による研究の中間報告会,つくば.

- 31) Iizuka, S., W. Sasaki, K. Dairaku, and T. Matsuura(2008): Impact of SST Resolution on climate simulation around Japan, AGU Fall meeting, Sun Francisco.
- 32) Dairaku, K., S. Iizuka, W. Sasaki, A. Beltrán-Przekurat, and R.A. Pielke Sr. (2008):
 Assessment of dynamical downscaling in Japan using an atmosphere-biosphere-river
 coupling regional climate model, AGU Fall meeting, Sun Francisco.
- 33) 大楽浩司, 飯塚聡, 佐々木亘, R.A. Pielke, Sr., and A. Beltrán-Przekurat (2009): 地域気 候モデルによる力学的ダウンスケーリングの現状と課題, 第3回沼口敦さん記念シンポジウム, 柏.
- 34) 飯塚聡, 大楽浩司, 佐々木亘(2009): 地域気候モデルで再現される海上風の検討3,日本海洋 学会春季大会,東京.
- 35) Iizuka, S., K. Dairaku, and W. Sasaki(2009):Impact of SST resolution on climate simulation around Japan, MOCA, Canada.
- 36) Iizuka, S., K. Dairaku, and W. Sasaki(2009): Simulation of wintertime precipitation in the vicinity of Japan, AGU Fall meeting, Sun Francisco.
- 37) Sasaki, W., K. Dairaku, and S. Iizuka(2009): Toward the assessment of the global warming effects on Japan coasts using regional wave model, MOCA, Canada.
- 38) Sasaki, W., K. Dairaku, and S. Iizuka(2009): Toward the assessment of the global warming impact on waves around Japan coast using regional atmospheric model and wave model, AOGS, Singapore.
- 39) Sasaki, W., K. Dairaku, and S. Iizuka(2009):Impact of dynamical downscaling of surface winds on the surface wave around Japan, AGU Fall meeting, Sun Francisco.
- 40) Dairaku, K., S. Iizuka, W. Sasaki, R.A. Pielke Sr., and A. Beltran-Przekurat(2009): Assessment of dynamical downscaling in Japan using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), AGU Fall meeting, Sun Francisco.
- 41) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltran-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki(2009): Assessment of dynamical downscaling in Japan using the Regioanl Atmospheric Modeling System (RAMS), 2nd International Lund RCM Workshop, Lund.
- 42) Dairaku, K. (2010): Assessment of dynamical downscaling in Japan, Workshop on Dynamical Downscaling on Japan, Tsukuba.
- 43) Dairaku, K. (2010): Assessment of dynamical downscaling in Japan and preliminary experiments for intercomparison in Asia, Building Asian Climate Change Scenarios by Multi-Regional Climate Models Ensemble: The First Project Workshop, Tsukuba.
- 44) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki (2010) :Assessment of dynamical downscaling in Japan, Annual Student Research Symposium: Water in a Changing Climate, Boulder.
- 45) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki (2010) :Assessment of dynamical downscaling in Japan using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), CIRES Science Rendezvous, Boulder.
- 46) 高藪出,大楽浩司,木村富士男,田中賢治,西森基貴,鼎信次郎,稲津将,他S-5-3参画研究者一同

- (2010):「温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究」 第1期研究の紹介,日本気象学会2010年度春季大会,つくば.
- 47) 石崎紀子, 高藪出, 大楽浩司, 飯塚聡, 木村富士男, 日下博幸, 足立幸穂, 栗原和夫, 村崎万代, 金光正郎, 芳村圭, Jens Hesselbjerg Christensen, Neil MacKellar, 田中 賢治(2010): 日本域における領域気候モデルの再現性の相互比較, 日本気象学会2010年度春季大会, つくば.
- 48) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki(2010): Assessment of dynamical downscaling in Japan using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei.
- 49) Sasaki, W., K. Dairaku, and S. Iizuka(2010): Impact of dynamical downscaling of near-surface marine winds on the prediction of surface waves around Japan, Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei.
- 50) Iizuka, S. (2010): Sensitivity of winter rainfall simulation around Japan to a fine scale SST, Asia Oceania Geosciences Society, Hyderabad.
- 51) 飯塚聡 (2010): 黒潮続流域での冬季海面水温と降水量の年々変動,日本海洋学会秋季大会,網走市.
- 52) 大楽浩司(2010): 複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究, 第127回研究談話会,長岡.
- 53) 大楽浩司(2010): 高解像度気候変動シナリオを用いた大都市圏の風水害脆弱性評価に基づく適 応に関する研究, 第127回研究談話会, 長岡.
- 54) 大楽浩司, 飯塚聡(2010): 複数の20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリング の研究, 防災科研外部資金報告会, つくば.
- 55) Iizuka, S. (2010): Impact of a fine scale SST over the Kuroshio extension region to wintertime rainfall, AGU 2010 Fall Meeting, Sun Francisco.
- 56) Dairaku, K. (2011): Assessment of add-value of dynamical downscaling in Japan & vulnerability and adaptation to climate change in water hazard assessed using regional climate scenarios in the Tokyo region, International Workshop on downscaling, Tsukuba.
- 57) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki (2011): Assessment of dynamical downscaling in Japan using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), the 25th Conference on Hydrology, AMS 91st Annual Meeting, Seattle.
- 58) Dairaku K., R.A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, and S5-3 Research
 Team(2011): Assessment of add-value of dynamical downscaling over East Asia, Building
 Asian Climate Change Scenarios by Multi-Regional Climate Models Ensemble: The Third
 Regional Model Intercomparison Project Workshop, Melbourne.
- 59) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., I. Takayabu, and S5-3 Research Team(2011):Can regional climate modeling add value for climate change adaptation?, The second international conference on sustainability science in Asia(ICSS-ASIA), Hanoi.
- 60) 飯塚聡(2011):日本周辺の海面水温が大気に及ぼす影響,日本海洋学会春季大会,柏.
- 61) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr. S5-3 Research Team, and RECCA research Team(2011):

 Assessment of add-value of dynamical downscaling over East Asia, The International

- Workshop on CORDEX-East Asia, Jeju.
- 62) 飯塚聡(2011):日本周辺の海面水温が大気に及ぼす影響2,日本海洋学会2011年秋季大会,福岡.
- 63) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., S. Iizuka, W. Sasaki, S. Yamaguchi (2011): Assessment of add-value of dynamical downscaling in Japan, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 64) Iizuka, S. and K. Dairaku(2011): Assessment of possible biases in RCM simulations around Japan, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 65) Yamaghchi, S., H. Motoyoshi, and K. Dairaku(2011):Investigation of combining the regional climate model with the numerical snow cover model, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 66) Sasaki, W., S. Iizuka, and K. Dairaku(2011): Capability of regional climate models to simulate coastal winds and waves around Japan, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 67) Tsunematsu, N., and K. Dairaku(2011): Pre-experiments on regional climate change in the Tokyo metropolitan area, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 68) Hirano J., and K. Dairaku(2011):Flood risk in Tokyo metropolitan area, The Third International Workshop on Downscaling, Tsukuba.
- 69) Dairaku, K., R.A. Pielke Sr., S. Iizuka, W. Sasaki, and S. Yamaguchi (2011): Assessment of dynamical downscaling in Japan, WCRP Open Science Conference, C27-W99B, Denver.
- 70) Dairaku, K., and RECCA-Tokyo Research Team(2011): Dynamical downscaling and socio-economic land use scenarios for regional scale adaptation to climate change in Tokyo metropolitan area, WCRP Open Science Conference, C10-M25B, Denver.
- 71) 飯塚聡(2011): 黒潮続流域での冬季海面水温と降水量の年々変動,日本気象学会2011年秋季大会,名古屋.
- 72) Dairaku, K., R. A. Pielke Sr., A. Beltrán-Przekurat, S. Iizuka, and W. Sasaki(2011): Assessment of add-value of dynamical downscaling in Japan, AGU 2011 Fall Meeting, Sun Francisco.
- 73) Tsunematsu, N., and K. Dairaku(2011): Model experiments on climate change in the Tokyo metropolitan area using regional climate scenarios, AGU 2011 Fall Meeting, Sun Francisco.
- 74) Hirano J., and K. Dairaku(2011): Flood risk in Tokyo metropolitan area for climate change adaptation, AGU 2011 Fall Meeting, Sun Francisco.
- 75) Iizuka, S., and K. Dairaku, and W. Sasaki(2011): Assessment of ocean surface winds and tropical cyclones around Japan by RCMs, AGU 2011 Fall Meeting, Sun Francisco.
- 76) 大楽浩司, 平野淳平, 常松展充, 山形与志樹, 中道久美子, 瀬谷創(2012): 高解像度気候変動シナリオを用いた大都市圏の風水害脆弱性評価, TXテクノロジー・ショーケースinつくば2012, つくば
- 77) Iizuka, S. (2012):Impact of a fine scale SST over the Kuroshio extension region to

- wintertime rainfall, 2012 Ocean Science Meeting, Salt Lake City.
- 78) Dairaku, K., S. Iizuka, W. Sasaki, R.A. Pielke Sr. (2012): Assessment of add-value of dynamical downscaling over East Asia -Current status & progress-, The Third Regional Model Intercomparison Project Workshop, Jeju.
- 79) 飯塚聡, 川村隆一(2012): 冬季黒潮続流域での海面水温と大気への影響, 日本海洋学会2012 年春季大会, つくば.
- 80) Dairaku, K. (2012): Vulnerability and adaptation to climate change using regional climate scenarios and add-value of dynamical downscaling over East Asia, Mini International meeting related with the downsclaing projects, Tukuba.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

- 1) 大楽浩司,飯塚聡,佐々木亘,R.A. Pielke,Sr.・A. Beltrán-Przekurat,中村雅紀,山口悟 (2007):温暖化予測評価のためのマルチアンサンブルとダウンスケーリングの研究-複数の 20km地域気候モデルの実行による力学的ダウンスケーリングの研究-」,セミナー,損害保険 料率算出機構.
- 2) Dairaku K. (2008):Introduction of multi-model ensembles and downscaling for regional risk assessment of climate change, Center on Global Change Seminar, Duke University, USA.
- 3) Iizuka S. (2008): A high-resolution coupled modeling study of the relation between ENSO and Western North Pacific TC activity, Seminar, APCC, Korea.
- 4) Meeting in Colorado State University, Fort Collins, 2008
- 5) Second Mini-International Workshop on Downscaling, Tsukuba, 2009
- 6) Colorado University ATOC Seminar, Boulder, 2009
- 7) NASA Goddard Space Flight Center GMAO Seminar, Maryland, 2009
- 8) The University of Maryland UMD Seminar, Maryland, 2009
- 9) 領域気候モデルによる高解像度気候変化シナリオの影響評価利用促進セミナー, つくば, 2009
- 10) The second International Workshop on Dynamical Downscaling on Japan, Tsukuba, 2010
- 11) Building Asian Climate Change Scenarios by Multi-Regional Climate Models Ensemble: The First Project Workshop, Tsukuba, 2010
- 12) Dr. Mirza C. Raza (2010): Impact of Cloud Microphysics Data Assimilation System (CMDAS) over the ocean for the improvement of short term precipitation prediction by integrating the satellite data set, NIED.
- 13) The Second International Workshop on Dynamical Downscaling on Japan, Tsukuba, 2011
- 14) The Third International Workshop on Dynamical Downscaling on Japan, Tsukuba, 2011
- 15) Mini International meeting related with the downscaling projects, Tsukuba, 2012

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Castro, C.L., R.A. Pielke Sr., and G. Leoncini (2005): Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). J. Geophys. Res. Atmospheres, 110(D5), D05108, doi:10.1029/2004JD004721.
- 2) Nakai, S. T. Sato, A. Sato, H. Hirashima, M. Nemoto, H. Motoyoshi, K. Iwamoto, R. Misumi, I. Kamiishi, T. Kobayashi, K. Kosugi, S. Yamaguchi, O. Abe, M. Ishizaka. (2012): A snow disaster forcasting system (SDFS) constructed from field observations and laboratory experiments. Cold Reg. Sci. Technol. 70, 53-61.
- 3) Bartelt, P. B. and M. Lehning (2002): A physical SNOWPACK model for avalanche warning: Part I. Numerical model. Cold Reg. Sci. Technol. **35**, 123-145.
- 4) Lehning, M., P. B. Bartelt, B. Brown, C. Fierz, P. Satyawali (2002a): A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow Microstructure. Cold Reg. Sci. Technol. 35, 147-167.
- 5) Lehning, M., P. B. Bartelt, B. Brown, C. Fierz (2002b): A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III. Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. Cold Reg. Sci. Technol. **35**, 169-184.
- 6) Yamaguchi, S. A. Sato, M. Lehning (2004): Application of the numerical snowpack model (SNOWPACK) to the wet snow region in Japan. Ann. Glaciol. **38**. 266-272.
- 7) Hirashima, H., K. Nishimura, E. Baba, A. Hachikubo, M. Lehning (2004): SNOWPACK model simulations for snow in Hokkaido, Japan. Ann. Glaciol. **38**. 123-129.
- 8) Hirashima, H., K. Nishimura, S. Yamaghchi, A. Sato, M. Lehning (2008): Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model. Cold Reg. Sci. Technol. 51, 191-203.
- 9) Hirashima, H., S. Yamaguchi, A. Sato, M. Lehning (2010): Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of water retention curve. Cold Reg. Sci. Technol. **64**, 94-103.
- 10) von Storch, H. and F. Zwiers (1999): Statistical analysis in climate research, Cambridge University Press.
- 11) 佐藤篤司 (2007): 平成18年豪雪災害, 自然災害の事典, 432-438.

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (3) 空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価

筑波大学 生命環境系

日下 博幸

(独)海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

木村 富士男 (平成19~21年)

〈研究協力者〉

筑波大学 生命環境系

足立 幸穂 鈴木パーカー 明日香

(独)海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

木村 富士男(平成22~23年) 吉兼 隆生・原 政之

平成19~23年度累計予算額:74,138千円 (うち、平成23年度予算額:16,329千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のために、本研究では、都市の気候特性に配慮し た空間解像度の高いダウンスケール手法を実用化し、都市に居住する人々が実感できるような気 候変化シナリオを提供する。具体的には、領域モデルWRFとTERC-RAMSを利用して、日本域を対象 とした空間解像度20kmと、首都圏を対象とした解像度3-4kmのダウンスケール実験を行う。 日本域を対象としたマルチ全球気候モデル(GCM)からのダウンスケール実験では、空間詳細な気候 分布が表現されダウンスケールのメリットが再確認された一方で、降水に対するGCMの不確実性が 大きいことがわかった。首都圏を対象とした第3期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP3)のマ ルチGCMからのダウンスケール実験は、都市キャノピーモデルを領域気候モデルに組み込み、都市 を厳密に再現している点において、世界的に見ても先駆的な取り組みと言える。この実験の結果、 排出に関する特別報告書(SRES) A1bシナリオ下のまま温暖化が進行した場合、2070年代になると 標準的な夏でも記録的な猛暑年となった2010年と同程度に暑くなり、三大都市圏ではほぼ毎日睡 眠障害が発生する可能性があることがわかった。この今後70年間の気温上昇に対する影響として は、これまでとは逆に都市化よりも温暖化の方が大きくなることがわかった。加えて、CMIP5のGCM からのダウンスケール実験も実施した。この実験は、将来の複数の都市シナリオを考慮している 点で、世界初の本格的かつ詳細な都市気候将来予測実験と位置づけられる。実験の結果、首都圏 における2050年代の8月平均気温は現在に比べて2~3℃上昇する可能性があるとわかった。しかし、 人々が郊外に住む社会を目指すシナリオ(分散シナリオ)を採用した場合は、たとえ人間活動を 現状に保ったとしても都心近郊の広い範囲で気温を0.2℃程度さらに上昇させ、その値は最大で 0.5℃に達しうることがわかった。一方、人々が都心に集まるシナリオ(集約シナリオ)は、人間

活動を抑制しなくても郊外の気温上昇を0.2℃程度緩和させる効果を持つことがわかった。

[キーワード] 地球温暖化、力学的ダウンスケーリング、都市気候、将来都市シナリオ、MIROC5

1. はじめに

世界の人口の約半数が都市とその周辺域に居住している。日本の場合は、人口の約半数が東京・大阪・名古屋の三大都市圏で生活している。近年、都市域では、地球温暖化とヒートアイランド現象によって、熱中症患者数・睡眠障害発生数・電力消費量が増大しており、社会的な問題となっている。地球温暖化による気温上昇が継続する場合、これらの問題がより大きくなると懸念されている。本研究では、都市の気候特性に配慮した空間解像度の高いダウンスケール手法を実用化し、都市に居住する人々が実感できるような気候変化シナリオを提供することを目指す。

2. 研究開発目的

都市の気候特性に配慮した空間解像度の高いダウンスケール手法を実用化し、都市に居住する人々が実感できるような気候変化シナリオの提供を目指す。この目的を遂行するために、コロラド州立大学で開発され本学で改良された領域気候モデルTERC-RAMSや米国大気研究センターが中心となって開発し本学で改良されたWRFを用いて、1)日本域を対象とした空間解像度の粗いダウンスケール実験、および2)都市域を対象とした高解像度のダウンスケール実験を実施する。日本域を対象とした研究では、全球客観解析データを用いたダウンスケール実験によって現在気候の再現性を確認した上で、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次報告書で用いられた第3期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)および第5次報告書に向けて行われている第5期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)で提供される全球気候モデル(GCM)からのダウンスケール実験を行う。この実験では2つの温暖化シナリオを用いることにより、シナリオによる不確実性を把握することを目的とする。

都市域を対象としたダウンスケール実験においても、CMIP3およびCMIP5のGCMからのダウンスケール実験を行う。ただし、都市住民の暑熱障害が深刻となる夏季のみを対象にする。この実験では、1)異なる複数のGCMの予測データを領域気候モデルの境界値として利用することによってGCMの不確実性に起因する都市気候予測の不確実性を把握する、2)複数の将来の都市シナリオに基づく世界初の本格的な都市気候予測実験を行う、3)一般市民になじみやすい評価指標を用いることで、温暖化に関わる政策支援や普及啓発への貢献にも取り組む。

3. 研究開発方法

(1) マルチモデル・ダウンスケーリングのための日本域20km解像度ダウンスケール

テーマ3の上位研究計画のマルチモデル・ダウンスケーリングでは、複数の領域気候モデルによるダウンスケールを実施し、領域気候モデルが持つバイアスによって生じる不確実性の評価を行う。

はじめに、空間解像度20kmの領域モデルTERC-RAMSとWRFを用いてダウンスケール実験を行った場合、どの程度現在気候を再現できるか検証する。この実験では、初期値・境界値として長期再解析データJRA25/JCDASを用いる。また、1985年から2004年までの20年間を再現実験の対象期間と

する。実験結果を京大防災研究所(サブテーマ(4))から提供された評価ツールに入力し、観測に対するそれぞれのモデルバイアスの把握と誤差の特性を調査する。

次に、空間解像度20kmの領域気候モデルWRFを用いて、3つのGCMからダウンスケール実験を行う。用いるGCMは、1)東京大学/国立環境研究所/海洋開発研究機構が共同開発したCMIP3用の全球高解像度気候モデルMIROC3-hires (SRES A1Bシナリオ)、2) CMIP5用に開発されたMIROC5 (RCP4.5シナリオ)、3)気象研究所で開発された全球気候モデルMRI-CGCM3.2 (RCP4.5シナリオ)である。現在気候として1981年から2000年の20年間、将来気候として2081年から2100年の20年間を対象とする。本研究で実施する上記全ての実験では、解析対象期間、計算領域、水平格子間隔を他の2つのサブグループ(気象研、防災科研)の実験とほぼ統一して行っている。

(2) マルチGCMからの力学的ダウンスケーリングによる日本の三大都市圏の将来気候予測

都市キャノピーモデル(Kusaka et al. 2001)¹⁾を組み込んだ空間分解能3kmの領域気候モデルWRFを用いて、日本の3大都市圏(東京・名古屋・大阪都市圏)を対象とした2000年代および2070年代8月の気候予測を行う。将来予測では、力学的ダウンスケールの一つである擬似温暖化手法(Kimura and Kitoh, 2007)²⁾を用いる。擬似温暖化手法とは、現在気候(NCEP-FNL)にGCMで計算された将来気候差分を上乗せしたデータをWRFの境界値に使用する手法である。将来の気候変化差分はGCMによって大きく異なる。そこで本研究では、SRES Albシナリオ下における気候感度の異なる3つのGCM (MIROC3. 2-Medres, MRI-CGCM2. 3. 2a, CSIRO-Mk3. 0) から得られる予測値を使用して、3つのダウンスケール実験を実施する。結果を評価する際には、通常の気候要素に加え、熱中症発生可能時間や睡眠障害発生日数など、一般市民にも分かりやすい指標も用いる。

(3) マルチGCMと簡易将来発展シナリオを用いた今後70年間の温暖化と都市化の影響比較

都市キャノピーモデル(Kusaka et al. 2001)¹⁾を組み込んだ高解像度領域気候モデル TERC-RAMSを用いて、2070年代の首都圏の将来気候を対象に、温室効果ガスによる気候変化と 都市化の影響を評価する。将来の都市化の影響を見積もるために、2070年頃の都市データを 用意する。ここでは「将来の都市面積及び建物高さは、土地利用データが手に入る1987年と 1997年の間の10年間の増加分の1/2の増加割合で、2070年ごろまで増加しつづける」と仮定したシナリオを用いる。一方、2070年頃の温暖化による昇温量を見積もるため、領域気候モデルTERC-RAMSに擬似温暖化手法を適用したダウンスケーリングによって将来気候予測を行う。 擬似温暖化手法に必要な現在気候データにはJRA25/JCDASを用いる。将来の気候変化差分は GCMによって大きく異なるので、この実験では、首都圏の夏季の気候を支配する太平洋高気圧の再現性が比較的よい5つのGCMの気候変化予測とその平均値(Multi)を使用する。使用する GCMは、BCCR-BMM2.0(ノルウェー・ビヤークネス気候研究センター開発)、CSIRO-Mk3.0(オーストラリア連邦科学産業研究機構開発)、GFDL-CM2.1(アメリカ海洋大気庁開発)、INGV-SXG(ヨーロッパ中期気象予報センター開発)、MRI-CGCM2.3.2a(気象研究所開発)の5つである。

(4) 将来の都市シナリオを考慮した首都圏の夏季気候予測実験

本実験では、テーマ4の山形与志樹氏(国立環境研究所)らのグループによって作成された現在 の都市データ(土地利用・人工排熱・建物形状データ等)、および将来の都市データを用いて、 首都圏を対象に温暖化と都市化の影響を評価する。これまでの実験との相違点としては1) 現在の人口・社会経済活動を仮定しているが、将来、ヒートアイランドの視点から都市形態が変化した場合の土地利用を考慮した、2) 直接ダウンスケール手法を用いている、3) 親モデルとして CMIP3のGCMではなく、CMIP5のGCMの1つであるMIROC5を用いていることの3点が挙げられる。ダウンスケール実験では、都市キャノピーモデルを組み込んだ空間解像度4kmの領域気候モデルWRFを用いる。対象期間は1990-2000年と2050-2060年の各8月とする。前述したように、この実験では直接ダウンスケール手法(GCM出力値をそのままWRFの境界値として使用する)を用い、現在気候は第5次評価報告書(AR5)の20世紀再現シミュレーション結果、将来気候はAR5のRCP4.5シナリオを用いている。将来の都市気候予測では、テーマ4で作成された3つの都市シナリオ(現状維持・分散・集約シナリオ)を考慮することにより、温暖化分の気温上昇に対して都市効果が地上気温に及ぼす影響がどの程度あるか評価する。なお、集約シナリオとは人々が都心に住むコンパクトシティー型の都市を目指すシナリオであり、分散シナリオとは人々が郊外に住む社会を目指すシナリオである。

4. 結果及び考察

(1) マルチモデル・ダウンスケーリングのための日本域20km解像度ダウンスケール

はじめに、領域気候モデルTERC-RAMSとWRFの精度検証を目的として、全球客観解析データ JRA/JCDASを境界値に用いたダウンスケール実験を実施した。その結果、TERC-RAMSでは冬季に低 温傾向、夏季に高温傾向を持つが多くの地域でバイアスは 1° C以内となること、降水は四国九州沖縄で夏季に顕著な降水量過少のバイアスがあり、観測に比べて1/2程度になることがわかった。一方、WRFの場合、冬季の北海道東北を中心とした低温バイアスと夏季の関東における高温バイアスを除き、広い範囲で気温のバイアスは 0.5° C以内となることがわかった。また、降水量は年間を通して過大評価し、特に冬季の東北北海道で2倍程度になることがわかった。

次に、JRA/JCDASで精度検証をした領域気候モデルWRFを用いて、CMIP3のGCMの1つであるMIROC3-hires、およびCMIP5のGCMの1つであるMIROC5の現在気候実験の再現性の確認を目的に、これらを境界値に与えたダウンスケール実験を行った。MIROC5からダウンスケールされた気温は、北海道で冬季に1℃以上の過大評価、西日本で年間を通して過小評価となった。MIROC5からダウンスケールされた降水は、年間を通して過大評価しており、特に冬季の北海道では、実際の降水量の2倍となった。ダウンスケールされた気温は、GCMのバイアスを強く引き継ぐのに対し、降水に関しては領域気候モデルの影響を強く受けていることが示唆された。なお、別途実施した全球気候モデルMRI-CGCM3.2からのダウンスケール実験結果においては、親モデルであるMRI-CGCM3.2に梅雨前線が明瞭に再現されていないなどの情報を引きつぎ、ダウンスケール実験結果の夏季の降水量は大きく過小評価されていた。

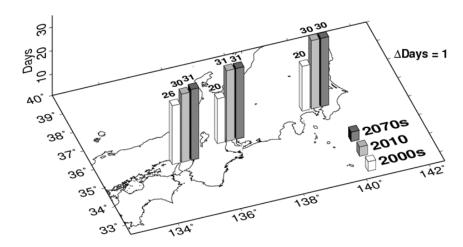
最後に、WRFを用いて、日本域の将来気候予測を目的に、CMIP3のMIROC3-hiresとCMIP5のMIROC5からのダウンスケール実験を行った。現在気候の再現結果から得られた夏季の地上気温分布に関しては両者の間に大きな相違は認められなかったが、将来偏差では、親モデルとしてMIROC5を用いた場合の昇温が顕著であり、MIROC3の場合と比較すると日本付近の気温は平均して0.8℃高くなると予測された。冬季の将来予測にでも、同様にMIROC5を用いた場合の方が顕著な昇温傾向が見られた。降水の将来偏差については、気温同様に、MIROC3とMIROC5を用いた場合で大きな違いが

認められた。MIROC3を用いた実験では日本周辺全域において夏季の降水量が増すと予測されているのに対し、MIROC5を用いた実験では関東以西の太平洋側では減少、東北及び日本海側では増加になると予測された。

(2) マルチGCMからの力学的ダウンスケーリングによる日本の三大都市圏の将来気候予測

本研究では、都市キャノピーモデルを導入した水平格子間隔3kmのWRFモデルを用いて、東京・大阪・名古屋都市圏を対象とした都市気候の現在気候再現実験(2000年代)および将来予測実験(2070年代)を実施した。はじめに、WRFモデルの再現性を検証した。WRFモデルは、観測された8月平均気温の空間分布をよく再現した。解析領域全域でのバイアスは-1.2°Cで、二乗平均誤差は2.7°Cであった。東京、名古屋、大阪におけるバイアスはそれぞれ、-0.6°C、-0.1°C、-0.4°Cであった。WRFモデルは、月平均気温分布だけでなく、気温の日変化も良好に再現した。

次に、都市気候の将来予測実験を実施した。その結果、東京、大阪、名古屋における2070年代の8月平均気温は、2000年代現在よりも約2.3℃高くなると予測された。3つのアンサンブルメンバー間の予測の幅は0.4℃あるものの、上記の結果は2070年代になると記録的な猛暑年となった2010年の8月平均気温よりも高くなることを意味している。また、2070年代の8月になると、2010年の8月のように、ほぼ毎日睡眠障害が発生する可能性があることが示唆された(図(3)-1)。本研究では、ダウンスケール実験から得た結果を用いて湿球黒球温度(WBGT)の予測も実施した。その結果、屋外で激しい運動を中止すべき時間が2000年代の8月では日中の30%であるのに対して、2070年代になるとその時間は63%に増加する可能性があると示唆された。3つのアンサンブルメンバーの予測の幅は13%であった。最後に、ヒートアイランド強度(UHII)を推定した。東京の8月平均UHIIは1.5℃であり、今後70年間の全球規模の気候変化の影響と同程度であることがわかった。

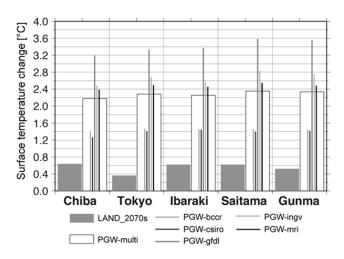


図(3)-1 ダウンスケール 実験によって予測された 睡眠困難発生可能日数(深 夜0時の気温が26℃を下回 らない日数)。左棒から 2000年代8月、2010年8月、 2070年代8月における日数。 ΔDays=1は、境界値に用い た3つのGCMの違いによる 結果の差を意味する。

(3) マルチGCMと簡易将来発展シナリオを用いた今後70年間の温暖化と都市化の影響の比較

都市キャノピーモデルを組み込んだ高解像度領域気候モデルTERC-RAMSを用いて、2070年代の首都圏の将来気候を対象に、温室効果ガスによる気候変化と都市化の影響を評価した。関東地方における今後70年間の温暖化による気温上昇は、境界値に用いるGCMによって最大で2^{\circ} 程度異なるものの、平均で約2.2 \circ と予測された(図(3)-2)。一方、2070年代までの今後

70年間の都市化による気温上昇は約0.6℃であった。この昇温量は全球規模の気候変化による昇温量よりもずっと小さいが、都心における過去から将来までの都市化による昇温量、すなわち2070年代8月のヒートアイランド強度は約2℃で、将来の温暖化の大きさ2.2℃と同程度と計算された。このことは、東京のような発展した都市域では、ヒートアイランドの緩和が将来の温暖化の適応策となりうることを示唆している。

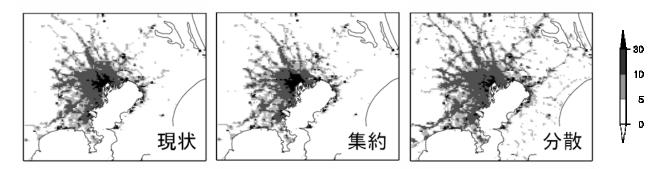


図(3)-2 1990年代と2070年代の8月平均気温の差(2070年代-2000年代).灰色棒は将来の都市化による昇温量、白色棒は大規模場の気候変化による昇温量(5つのGCMの予測結果の平均値を用いたダウンスケール実験の結果)、細棒は個々のGCMからのダウンスケール実験(左からBCCR, CSIR030,GFDL21,INGV,MRIからのダウンスケール実験)によって見積もられた温暖化による昇温量を意味する。

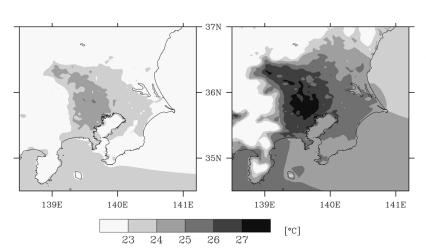
(4) 将来の都市シナリオを考慮した首都圏の夏季気候予測実験

将来の都市気候は、全球的な気候変動だけではなく、将来の都市のあり方にも依存するため、 将来の都市シナリオを設定しなくてはならない。本研究では、ダウンスケール実験において、CMIP5 のGCMの1つであるMIROC5による予測結果とテーマ4土地利用予測チームが作成した将来の都市シ ナリオ(土地利用・人工排熱・建物形状など、図(3)-3)を用いることによって、これまでにない 新たな都市気候予測を実施した。

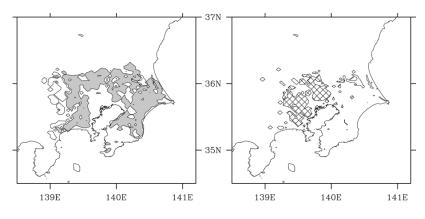
MIROC5からのダウンスケール実験から得られた2050年代8月の首都圏の地上気温は、どの都市シナリオを用いた場合でも、1990年代現在に比べ約2~3℃上昇すると予測された(図(3)-4)。図(3)-5から、将来、コンパクトシティー化が進むと、都心に近い住宅地の気温上昇量がわずかに緩和されること、人々が郊外に住む自動者依存型社会になると都心を除く南関東全域で気温が0.2℃程度上昇することが分かる。場所によっては、最大で0.5℃の上昇が認められた。これらの結果は、将来の都市計画によって、温暖化による気温上昇を部分的に助長または抑制できることを示唆している。今回設定した集約型・分散型シナリオでは、総人口および総エネルギー消費量を現状維持させた。都市再配置に加えて、省エネ策や緑化政策などの環境政策を導入することにより、都市の温暖化をさらに緩和できると期待できる。



図(3)-3 人工排熱(W/m^2)分布. 左は集約型都市シナリオ、右は分散型シナリオを採用した場合の8月平均値。



図(3)-4 CMIP5-GCMの1つである MIROC5からのダウンスケール実 験の結果。左図は1990年代現在の 8月平均気温、右図は2050年代 (RCP4.5シナリオ)の8月平均気温。



図(3)-5 将来の気温予測に対する都市シナリオの効果(現状維持シナリオ採用時からの偏差). 左図は分散型シナリオ採用時、右図は集約型シナリオ採用時。灰色のシェードは0.2℃の正偏差、格子シェード-0.2℃の負偏差を意味する。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

日本域を対象としたマルチGCMを採用したダウンスケール実験では、空間詳細な気候分布が表現されダウンスケールのメリットが再確認された一方で、GCMによる不確実性が浮き彫りとなった。

特に降水は気温と比べて不確実性が大きいことがわかった。都市圏を対象としたCMIP3のGCMからのダウンスケール実験は、都市キャノピーモデルを領域気候モデルに組み込み、都市を厳密に再現している点において、世界的に見ても先駆的な取り組みを行ったと言える。このような長所を生かした将来の都市化と温暖化の比較実験は、大都市における今後の気温上昇がこれまでとは逆に温暖化の影響の方が大きくなることを示した点において、大変意義が高いと思われる。CMIP5のGCMからのダウンスケール実験では、3種類の異なる将来の都市シナリオを利用した。これは、世界初の本格的かつ詳細な都市気候将来予測実験と位置づけられる。この実験から、2050年代の8月の平均気温は現在に比べて2~3℃上昇するという結果を得た。しかし、都市シナリオによって気温上昇に差があり、分散型シナリオは、たとえ人間活動を現状維持に保ったとしても都心近郊の広い範囲で温暖化を0.2℃程度さらに増大させること、その値は最大で0.5℃に達しうることがわかった。一方、集約型シナリオは、人間活動を抑制しなくても首都圏を中心に温暖化を0.2℃程度緩和させる効果を持つことがわかった。これまでの温暖化研究では都市効果はあまり考慮されてこなかったが、本研究の様々な結果は、温暖化予測に都市効果を含める必要性を示しており、科学的意義は高かったと思われる。

(2) 環境政策への貢献

次期IPCC用に開発されたMIROC5からのダウンスケール実験の結果は、温暖化影響評価グループを通じて、間接的に、環境政策に貢献できると期待される。また、都市シナリオを用いたダウンスケール実験の結果は、地球温暖化の適応策としての視点を持って都市計画を策定することに意味があることを示すことができた。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Inoue, T., and F. Kimura (2007): Numerical experiments on fair-weather clouds forming over the urban area in northern Tokyo. SOLA, 3, 125-128.
- 2) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura, and T. Yasunari (2008):
 Downscaling of the climatic change in the rainband in East Asia by a pseudo climate simulation method. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 4, 073-076. (2008)
- 3) 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. HRL, 2, 61-64.
- 4) Kusaka, H. (2008): Recent progress on urban climate study in Japan. Geograph. Rev. Japan, 81, 361-374.
- 5) Kawase, H. T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailkun, 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., 114, D24110, doi:10.1029/2009JD011803.
- 6) 日下博幸,羽入拓朗,縄田恵子,古橋奈々,横山仁(2010):東京で観測された局地豪雨の実態調査:2002年8月2日および2004年8月10日の事例の比較解析. 日本ヒートアイランド学会論文集,5,1-10.
- 7) 秋本祐子,日下博幸(2010):入力データおよび地表面パラメータの変化に対する領域気象 モデルWRFの感度実験-夏季晴天日の関東平野を対象として-.地理学評論,83(3),324-340.
- 8) Ikeda, R., and H. Kusaka (2010): Proposing the simplification of the multilayer urban canopy model: Intercomparison study of four models. J. Appl. Meteor. Climatol., 49, 902-919.
- 9) Fujita, M., F. Kimura, and M. Yoshizaki (2010): Morning precipitation peak over the Strait of Malacca under a calm condition. Mon. Wea. Rev., doi:10.1175/2009MWR3068.1.
- 10) Kusaka, H., T. Takata, and Y. Takane (2010): Reproducibility of regional climate in central Japan using the 4-km resolution WRF model. SOLA, 6, 113-116.
- 11) 日下博幸,羽入拓郎,縄田恵子 (2010): GPS可降水量に着目した局地豪雨の事例解析-2000 年7月4日に東京で観測された事例-.地理学評論,83(5),479-492.
- 12) 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. 気候影響・利用研究会会報,28,5-13.
- 13) 原政之,日下博幸,木村富士男,若月泰孝 (2010):気候変動が首都圏の都市気候に及ぼす影響-冬季を対象として-.ながれ,29(5),353-361.
- 14) 井原智彦, 日下博幸, 原政之, 松橋隆治, 吉田好邦 (2011): 問題比較型影響評価手法を用いた都市気温上昇に伴う軽度の健康影響の推定. 日本建築学会環境系論文集, 76(662), 459-467.
- 15) Takane, Y. and H. Kusaka (2011): Formation mechanism of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: considerations of dynamic foehn and foehn-like wind. J. Appl. Meteor. Climatol., 50(9), 1827-1841.
- 16) Iizumi, T., M. Nishimori, K. Dairaku, S. A. Adachi, and M. Yokozawa (2011): Evaluation and intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present day climate: Strengths and weaknesses of dynamical and bias correction type statistical downscaling methods. J. Geophys. Res., 116, D01111, doi:10.1029/2010JD014513.
- 17) Iizuka, S., K. Dairaku, W. Sasaki, S. A. Adacghi, H. Kusaka, N. Ishizaki, and I. Takayabu (2012): Assessment of ocean surface winds and tropical cyclones around Japan by RCMs. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 91-102.
- 18) Ishizaki, N. N., H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K. Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2012): An attempt to estimate of probabilistic regional climate analogue in a warmer Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 65-74.
- 19) Ishizkai, N. N., I. Takayabu, M. Oh'izumi, H. Sasaki, K. Dairaku, S. Iizuka, F. Kimura, H. Kusaka, S. A. Adachi, K. Kurihara, K. Murazaki, and K. Tanaka (2012): Improved

- performance of simulated Japanese climate with a multi-model ensemble. J. Meteor. Soc. Japan, 90, 235-254.
- 20) Kusaka, H., M. Hara, and Y. Takane (2012): Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid incremet: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolies. J. Meteor. Soc. Japan., 90B, 47-63.
- 21) Kusaka, H., F. Chen, M. Tewari, J. Dudhia, D. O. Gill, M. G. O. Duda, W. Wang, and Y. Miya (2012): Numerical Simulation of Urban Heat Island Effect by the WRF Model with 4-km Grid Increment: An Inter Comparison Study between the Urban Canopy Model and Slab Model. J. Meteor. Soc. Japan., 90B, 33-45.
- 22) Adachi, S. A., F. Kimura, and H. Kusaka (2012): Comparison of the Imapact of Global Climate Change and Urbanization on Summertime Future Climate in the Tokyo Metropolitan Area. J. Appl. Meteor. Climatol., in press. (2012)

<査読付論文に準ずる成果発表> 特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 日下博幸 (2008):都市気候モデリング研究の取り組みと今後の課題. 天気, 55, 227-240.
- 2) 日下博幸 (2009):領域気象モデルWRFについて. ながれ, 28, 3-12.
- 3) S. A. Adachi, F. Kimura and M. Tanaka (2009): Reproducibility of past 20 years climate using dynamical downscaling method and future prediction of snow cover in winter. 陸 域環境研究センター報告, 10, 51-60.
- 4) 日下博幸 (2010): ヒートアイランド気象学事始め(第4回). 日本ヒートアイランド学会誌, 5, 38-40.
- 5) 日下博幸 (2012):都市の熱汚染.計算工学、17(1), 3-6.
- 6) 神田学編(2012):第9章 都市気象の単層モデルと領域気象モデル(執筆担当:日下博幸). 気象研究ノート第224号 都市の気象と気候、日本気象学会、221-231.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 日下博幸,足立幸穂,木村富士男,原政之,羽入拓郎(2008):領域気候モデルを用いた将来 の都市気候予測.日本地理学会2008年春季学術大会.
- 2) 木村富士男,足立幸穂,片岡久美,日下博幸(2008):日本気象学会2008年度春季大会.① 2070年代における首都圏の夏の気温予測の試み.
- 3) 日下博幸,羽入拓郎,原政之,木村富士男,片岡久美,足立幸穂(2008):地球温暖化時のヒートアイランド(猛暑)予測研究と都市降水シミュレーション研究の現状と課題.日本気象学会2008年度春季大会.
- 4) 日下博幸(2008):都市キャノピー層の科学-マクロスケールから、日本建築学会シンポジウム.

- 5) 日下博幸, 秋本祐子 (2008): 2007年8月16日多治見猛暑の数値シミュレーション. 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会.
- 6) 髙根雄也,日下博幸,原政之,足立幸穂,木村富士男(2008):熊谷猛暑の形成メカニズムー 2007 年8 月16 日の事例解析-.日本ヒートアイランド学会第3回全国大会.
- 7) 髙根雄也,日下博幸,原政之,足立幸穂,木村富士男(2008):熊谷猛暑の形成メカニズムー2007年8月16日の事例解析-.日本地理学会2008年秋季学術大会.
- 8) 足立幸穂,木村富士男,日下博幸(2008):関東都市域を対象としたダウンスケール〜過去の 気候の再現〜.温暖化影響評価のためのダウンスケーリングに関する研究会.
- 9) 髙根雄也,日下博幸,原政之,秋本祐子,木村富士男,足立幸穂(2008):2007 年8 月16 日 に発生した熊谷猛暑の形成メカニズム-WRFモデルを用いた熱収支解析-.日本気象学会2008 年度秋季大会.
- 10) 足立幸穂,木村富士男,日下博幸(2008):関東域における過去30年間の気温変化傾向の要因分析.日本気象学会2008年度秋季大会.
- 11) 木村富士男 (2008): アジアにおける降水帯の再現とメカニズムの考察. 日本気象学会2008年 度秋季大会シンポジウム: 地域の詳細な気象と気候の再現をめざして-ダイナミックダウン スケール技術の高度利用-.
- 12) 木村富士男,日下博幸,足立幸穂 (2009):都市域における地球温暖化のダウンスケール.RCM による気候予測情報の利用促進のための研究者会合.
- 13) 足立幸穂,木村富士男(2009):近年の関東域における高温化傾向の要因分析.気候影響利用研究会.
- 14) 足立幸穂, 木村富士男, 日下博幸(2009):第3回沼口敦さん記念シンポジウム.
- 15) 日下博幸,縄田恵子,木村富士男,羽入拓郎 (2009):近年の関東域における高温化傾向の要因分析と課題.日本地理学会2009年春季学術大会.
 - ① 都市が降水に及ぼす影響に関する数値実験.
- 16) 日下博幸,縄田恵子,羽入拓郎,宮由可子,木村富士男(2009):都市が降水に及ぼす影響ー 評価手法に関する現状と課題-.日本気象学会2009年度春季大会.
- 17) 足立幸穂,木村富士男 (2009):東アジアにおける低気圧活動の経年変化.日本気象学会2009 年度春季大会.
- 18) Kusaka, H., F. Chen, M. Tewari, M. Duda, J. Dudhia, Y. Miya and Y. Akimoto (2009): Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: Model intercomparison study. 7th International Conference for Urban Climate, Yokohama, Japan.
- 19) Kusaka, H., F. Kimura, K. Nawata, T. Hanyu and Y. Miya (2009): The chink in the armor: questioning the reliability of conventional sensitivity experiments in determing urban effects on precipitation patterns. 7th International Conference for Urban Climate, Yokohama, Japan.
- 20) Ikeda, R., and H. Kusaka (2009): Development of the simple multi-layer urban canopy models. 7th International Conference for Urban Climate, Yokohama, Japan.
- 21) Kimura, F., and S. Adachi (2009): Dynamical downscaling of global climate change for urbanizing Kanto Plain. 7th International Conference for Urban Climate, Yokohama,

Japan.

- 22) Adachi, S., and F. Kimura (2009): Numerical studies on temperature change and urbanization in recent 30 years in Kanto Plain. 7th International Conference for Urban Climate, Yokohama, Japan.
- 23) 池田亮作,日下博幸(2009):多層都市キャノピーモデルの簡略化手法の提案.日本ヒートアイランド学会第4回全国大会.
- 24) 日下博幸,縄田恵子,木村富士男,宮由可子,秋本祐子(2009):都市が降水に及ぼす影響ー気候シミュレーション手法を用いた感度実験ー.日本ヒートアイランド学会第4回全国大会.
- 25) 秋本祐子, 日下博幸 (2009): 土地利用データと大気データの変更が領域気象モデルWRFに与えるインパクト. 日本地理学会2009年秋季学術大会.
- 26) Ohya, M., and H. Kusaka (2009): Sensitivity of the WRF microphysics to the snowfall Simulation in the coastal area of Japan sea. Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan.
- 27) Akimoto, Y., and H. Kusaka (2009): Sensitivity of WRF model to input-datasets and surface parameters for heat island. Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan.
- 28) Kusaka, H., F. Chen, M. Tewari, M. Duda, J. Dudhia, Y. Miya and Y. Akimoto (2009): Performance of the WRF model as a high resolution urban climate model. Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan.
- 29) 秋本祐子, 日下博幸 (2009): 土地利用データと大気データの変更が領域気象モデルWRFに与えるインパクト. 日本気象学会2009年度秋季大会.
- 30) 秋本祐子, 日下博幸(2009):日本で発生する霧の気候学的研究.日本気象学会2009年度秋季大会.
- 31) 足立幸穂,木村富士男 (2009):ダウンスケール手法を用いた関東域における将来都市気候予測. TXテクノロジー・ショーケース.
- 32) 秋本祐子, 日下博幸 (2010):日本で発生する霧の気候学的特性.日本地理学会2010年春季学術大会.
- 33) 日下博幸,高田智行,原政之(2010):三大都市圏を対象とした夏季気候の将来予測.日本地理学会2010年春季学術大会.
- 34) 髙根雄也,日下博幸(2010):関東平野内陸域における夏季高温現象の実態調査と形成メカニズムの解明.日本地理学会2010年春季学術大会.
- 35) 髙根雄也,日下博幸(2010):関東平野内陸域における夏季高温現象の統計解析.日本気象学会2010年度春季大会.
- 36) 宮由可子, 日下博幸 (2010):日本の三大都市における過去20 年間の猛暑の実態調査.日本 気象学会2010年度春季大会.
- 37) 縄田恵子,日下博幸,木村富士男 (2010): WRF を用いた首都圏の降水シミュレーションー都 市の降水へのインパクト調査ー.日本気象学会2010年度春季大会.
- 38) 髙根雄也,日下博幸(2010):関東平野内陸域における夏季高温現象の数値実験.日本気象学会2010年度春季大会.

- 39) 足立幸穂, 木村富士男, 日下博幸, 植田宏昭, 井上知栄 (2010): 2070 年代における首都圏 夏季の将来都市気候予測. 日本気象学会2010年度春季大会.
- 40) 池田亮作,日下博幸,飯塚悟,朴泰祐 (2010):複雑地形・都市を対象とした並列LES モデル の開発.日本気象学会2010年度春季大会.
- 41) 日下博幸,高田智行,原政之,足立幸穂 (2010):三大都市圏を対象とした夏季気候の再現計算と将来予測.日本気象学会2010年度春季大会.
- 42) 木村富士男,足立幸穂,小松恭子(2010):晴天日の非断熱過熱による山岳風下における昇温効果.日本気象学会2010年度春季大会.
- 43) Adachi, S. A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue and H. Ueda (2010): Comparison of Impacts between Global Climate Change and Urbanization on Future Urban Climate in Tokyo Metropolitan Area. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan.
- 44) Akimoto Y., and H. Kusaka (2010): Sensitivity of WRF model to input-datasets and surface parameters for heat island simulation. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan.
- 45) Takane, Y., and H. Kusaka (2010): Formation mechanisms of the extremely high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan.
- 46) Hara, M., H. Kusaka, F. Kimura and Y. Wakazuki (2010): Projection of change in urban heat island intensity of Tokyo metropolitan area during winter. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan.
- 47) Kusaka, H., R. Ikeda, T. Takata, M. Hara, S. A. Adachi, F. Chen, M. Tewari and J. Dudhia (2010): Developing multi-layer and single-layer urban canopy models and urban climate simulation by WRF with UCM. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan.
- 48) 日下博幸,縄田恵子(2010):首都圏における都市と降水の関係-領域気候モデルWRFを用いたアンサンブル気候実験-.日本ヒートアイランド学会第5回全国大会.
- 49) 髙根雄也,日下博幸(2010):日本の首都圏で日最高気温40.9℃を記録した極端な猛暑の形成 メカニズム.日本ヒートアイランド学会第5回全国大会.
- 50) Hara, M., H. Kusaka, F. Kimura and Y. Wakazuki (2010): Projection of change in urban heat island intensity of Tokyo metropolitan area during winter. 9th Symposium on the Urban Environment, Keystone, America.
- 51) Takane, Y., and H. Kusaka (2010): Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9 deg. C observed in the Tokyo metropolitan area. First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Kyoto, Japan.
- 52) Kusaka, H, K. Nawata and F. Kimura (2010): Determining urban effects on precipitation patterns utilizing ensemble climate experiment approach. First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Kyoto, Japan.
- 53) 日下博幸, 縄田恵子 (2010): 都市が降水に及ぼす影響調査-アンサンブル感度実験-. 日本

- 地理学会2010年秋季学術大会.
- 54) 縄田恵子, 日下博幸 (2010): WRFを用いた首都圏の降水シミュレーションー都市の降水へのインパクト調査-. 日本気象学会2010年度秋季大会.
- 55) 日下博幸,足立幸穂,高田智行,髙根雄也,原政之,木村富士男(2010):三大都市圏を対象とした夏季気候の再現計算と将来予測(その2) GCMアンサンブルデータを用いた疑似温暖化実験.日本気象学会2010年度秋季大会.
- 56) 木村富士男,足立幸穂,小松恭子(2010):晴天日における局所的高温現象の再現.日本気象学会2010年度秋季大会.
- 57) Adachi, S. A., F. Kimura, H. Kusaka and M. Hara (2010): Projection of summer climate on Tokyo metropolitan area using pseudo global warming method. American Geophysical Union 2010 Fall meeting, San Francisco, USA.
- 58) Kimura, F., X. Ma and M. Hara (2010): Downscaling of snow depth and river discharge in Japan by the Pseudo-Global-Warming Method. American Geophysical Union 2010 Fall meeting, San Francisco, USA.
- 59) 日下博幸,縄田恵子 (2011):降水に対する都市効果の検証-アンサンブル気候実験-. 日本 気象学会2011年度春季大会.
- 60) 石崎紀子, 高藪出, 大楽浩司, 飯塚聡, 足立幸穂, 木村富士男, 日下博幸, 田中賢治 (2011): 20km格子マルチRCMによる温暖化時の日本の地域気候変動. 日本気象学会2011年度春季大会.
- 61) 上野正博, 日下博幸, 足立幸穂, 原政之 (2011): 関東地方における過去30 年間の気候変化 シミュレーション. 日本気象学会2011年度春季大会.
- 62) Ishizaki, N., H. Shiogama, K. Takahashi, S. Emori, K. Dairaku, H. Kusaka, T. Nakaegawa and I. Takayabu (2011): Probabilistic Regional Climate Analogue in the Warmer Japan. Third international workshop on down-scaling, Tsukuba, Japan.
- 63) Kusaka, H., M. Hara and Y. Takane (2011): Urban climate projection in summer in the 2070s by the WRF model with 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and impact assessment to heat stress. Third international workshop on down-scaling, Tsukuba, Japan.
- 64) Aoyagi, T., S. A. Adachi, H. Kusaka, K. Tanaka, and N. Seino (2011): Near-term prediction of urban climate based on urban growth scenarios in the Tokyo metropolitan area. Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Busan, Korea.
- 65) 高藪出,大楽浩司,日下博幸,田中賢治,西森基貴,鼎信次郎,稲津將(2011):マルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究(S-5-3).日本気象学会201年度秋季大会.
- 66) 日下博幸,足立幸穂,藤田恵子,飯島奈津美,井原智彦,飯泉仁之直,原政之,山形与志樹(2012):首都圏の夏季気候の将来予測と健康影響評価.日本地理学会2012年春季学術大会 S1405. 2012年3月.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

1) International workshop on urban climate projection for better adaptation plan (より良い適応策のための都市気候予測に関する国際ワークショップ) (2010年6月2-3日、筑波大学 総合研究棟A公開講義室、参加者90名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 産経新聞・新華社ほか7社(2008年3月4日)(提供元:共同通信社)
- 2) Inter FM「GREEN STATION」2010年7月24日、首都圏夏季における過去の気温上昇の要因、及び2070年代の夏季の都市気候予測の成果について15分ほど紹介)
- 3) 記者会見(2011年7月21日14時~15時、筑波大学計算科学研究センター会議室B)

発表者:日下博幸、髙根雄也、内容:下記の研究について紹介

Y. Takane and H. Kusaka: J. Appl. Meteor. Climatol., 50(9), 1827-1841. (2011)

"Formation mechanism of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: considerations of dynamic foehn and foehn-like wind."

記者会見後、以下9社に掲載

- a. サンスポ (2011年7月21日、SANSPO. COM (Web版))
- b. 日本経済新聞(2011年7月21日、Web刊)
- c. 時事通信(2011年7月21日、Web版)
- d. 茨城新聞(2011年7月22日、朝刊、全国版、社会面21頁)
- e. 朝日新聞(2011年7月22日、朝刊、全国版、社会面38頁)
- f. 東京新聞(2011年7月22日、夕刊、Web版)
- g. 日本経済新聞(2011年7月22日、朝刊、全国版、社会面38頁)
- h. 毎日新聞(2011年7月22日、Web版)
- i.朝日新聞(2011年7月23日、Web版)

(6) その他

1) 髙根雄也、日下博幸、原政之、足立幸穂、木村富士男:日本ヒートアイランド学会最優秀論 文発表賞 (2008)「熊谷猛暑の形成メカニズム-2007年8月16日の事例解析」

8. 引用文献

- 1) H. Kusaka, H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura (2001): A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. Bound.-Layer Meteor., 101, 329-358.
- 2) F. Kimura, and A. Kitoh (2007): Downscaling by pseudo global warming method. The Final Report of the ICCAP, Research Institute for Humanity and Na-ture, Kyoto, Japan.

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (4) 20km地域気候モデルのバイアス特定と水資源評価のための統計的ダウンスケーリング

京都大学防災研究所

水資源環境研究センター

田中賢治·小尻利治

〈研究協力者〉

京都大学防災研究所 水資源環境研究センター

小原佳洋子・中田淳子

平成19~23年度累計予算額:65,529千円 (うち、平成23年度予算額:13,394千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 各機関から提供を受けた20km地域気候モデルの長期計算結果を用いて、さらにモデル開 発者からの要望を取り入れながら、各モデル出力値に含まれるバイアス情報を効率的に検出・補 正するシステムの開発、改良を重ねた。2008年9月にモデルバイアス検出ツールを各モデル開発者 に配布し、モデル開発段階でのモデル出力のチェックに役立てた。降水量、気温に加え、日射量、 長波放射、風速、水蒸気圧、気圧の合計7つの地上気象要素を対象としている。開発当初よりでき るだけ汎用的なシステムとなるように心掛けていたが、実際、本システムはモデル出力のバージ ョンとともに変更された格子数や投影法の変化に簡単に対応できた。個々のグリッド毎ではなく、 水系別あるいは都道府県別といった領域単位でモデル評価を行うこととした。バイアス検出では 各気象要素の月平均値のみならず頻度分布を算出し、各階級別にモデルバイアスを算定する。バ イアス補正では、領域別の月平均値をできるだけ観測値と一致させることに留意しつつ、各階級 別に補正係数を調整するアルゴリズムを開発し、90パーセンタイル値や99パーセンタイル値など の極値の統計量の再現性を高めることに成功した。本研究で用いられている20km地域気候モデル に残るバイアスの特定のために、雲解像非静力学モデルCReSSに都市キャノピーの影響を考慮でき る詳細な陸面過程モデルSiBUCを導入したCReSiBUCを改良して気候変動の影響を調べる事が可能 な超高解像度(2km)のモデルを構築した。メソ客観解析データを側面境界条件として関東地方を 対象に2003年から2008年の夏季に於ける長期計算を行い、熱帯夜(日最低気温25℃以上)及び真 夏日(日最高気温30℃以上)の再現性を検証し、開発したモデルが将来の都市気候予測のための 長期計算に耐えうる精度を有していることを確認した。

[キーワード] 20km地域気候モデル、バイアス検出・補正、頻度分布、都市キャノピーモデル

1. はじめに

近年の気候モデルの発展は目覚ましいものがあるが、それにも増して、気候予測情報の利用者側の求める解像度や精度も高まり、モデルが実現できる精度と利用者側の求める精度の間には依然ギャップが存在する。本研究では気象研究所(気象研)、防災科学研究所(防災科研)、筑波

大学の各機関から提供される20km地域気候モデル (RCM) 出力値に含まれる各気象要素の月平均値 や月別の頻度分布に関するバイアス情報を同一の基準で効率的に検出・補正する手法の開発を行う。バイアス補正システムを運用する際、補正量はできるだけ小さい方が望ましい。そこで、都市や陸面状態を詳細に表現し、また解像度を上げることで、どこまでバイアスを小さく抑えることができるのかについて検討する。

2. 研究開発目的

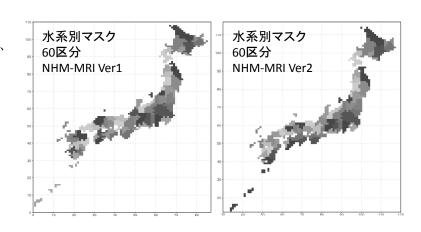
テーマ3の枠組みでは、気象研、防災科研、筑波大の各機関のRCMは解像度がいずれも20kmであるが、投影法の関係で、必ずしも格子点中心座標が一致しない。また、今後さまざまなモデル出力結果を評価する場合や、モデル格子数や格子位置が変更された場合にも迅速にモデル評価が行えるようにするために、できるだけ汎用的なモデルバイアス検出・補正システムを構築することを目的とする。

陸面の状態を詳細に考慮できる大気陸面結合モデルCReSiBUCを用いて、解像度10kmのメソ領域客観解析データ(MANAL)から解像度2kmへのダウンスケーリングを行う。解析対象の気象要素としては、都市気候において最も重要な気温について評価を行う。また、対象領域を都市域の代表である関東地方、計算期間は夏場(7月と8月)である。モデル出力と観測値の比較を行うことで、現状のモデルが特に日最高気温や日最低気温などの気温の極値の再現性をどの程度持つのかを評価する。

3. 研究開発方法

(1) 水系別マスク、都道府県別マスクデータの作成

流域・非集水域メッシュデータ (W07_52M)の県別の水系コード情報、北海道の支庁コード情報から、各RCMのモデル格子で表現した水系別マスク、都道府県別(北海道は支庁別)マスクを計算する。水系コードは一級河川を含む単一水系域(001~199)、主要二級河川を含む単一水系域(201~499)、複合水系域(501~949)、流出口のない水系域(951~999)で区分されているが、201以降のコードについては隣接する(あるいは



図(4)-1 気象研NHMの水系別マスク(左: Ver1、右: Ver2)

再近隣の)一級水系に集約する。各RCMの解像度は同じであるが、図法の違い、基準経度の違いにより、格子中心位置が少しずれ、その結果、各モデル格子がどの水系(県)に分類されるかが微妙に異なる。できるだけ汎用性を持たせるため、基本的にモデル格子中心座標の情報のみからこれらマスクデータを作成できるシステムを構築した。

マスクデータ作成プログラムの最初のバージョンでは複数のRCMのマスクを同時に作成してい

たが、これを各モデル個別の処理とした。同時に処理する場合の利点としては、モデルが異なっても評価すべき流域数が統一されている点が挙げられるが、個々のモデル評価が他のモデルの構成に依存している(一部のモデルの格子数等に変更があれば、マスクを作り直さなくてはならない)という点は、特にモデル開発段階では好ましくない。そこで、各モデルのマスクを作成する場合に、そのモデル自身の情報だけを利用するようにコードを組み替えた。

都道府県別マスクは46都府県と北海道の14支庁を加えて60区分で固定されているが、水系別マスクについては、小さな流域がいくつか集約されて作成される。このため、1つの区分に含まれる格子数の下限値(パラメータ imin)を変えることで分割数を調整できるが、ここでは、水系別マスクの区分数が都道府県別マスクの区分数にできるだけ近くなるように調整した。このように、水系マスクについては、パラメータの設定の仕方により流域の区分数(言い換えれば、小さな流域がどの流域に集約されるか)が変わる。最初のバージョンでは結果的にどの流域が残ったかという情報がbasinareaMODEL.txtに出力されているだけだったが、どの流域がどの流域に集約されたかという情報を流域名や流域面積とともにtable-riverMODEL.txtとして出力することにした。これまで手作業で編集していた水系テーブルを自動生成することで、利便性が格段に増したと言える。表(4)-1は気象研NHMのVer.1に関する水系テーブル(table-riverNHM-MRI.txt)の一部分を抜き出したものである。これによると、渚滑川は天塩川に湧別川は常呂川に集約されている。

表(4)-1 水系テーブルの一部(気象研NHM Verl)。左端の数字は集約後の水系コード。英語名の左の数字は集約前の水系コード。日本語名に続く2つの数字はそれぞれ河川長(km)と集水面積(km²)

1	1 Teshio	天塩川	256	5590	2 Shokotsu	渚滑川	84	1240
2	4 Tokoro	常呂川	120	1930	3 Yubetsu	湧別川	87	1480
3	5 Abashiri	網走川	115	1380				
4	7 Ishikari	石狩川	268 1	4330	6 Rumoi	留萌川	44	270
5	8 Shiribetsu	尻別川	126	1640				

(2) モデル格子と観測点情報との対応付け並びに観測データの並べ替え

地域気象観測システム(アメダス)観測点の位置情報、各RCMのモデル格子中心座標情報から、検証データの存在する各観測点がどのモデル格子に対応するかを決定する。また1つのモデル格子に対応する観測点が複数存在する場合には、(欠測ではない)有効データに関して平均値を算出し、モデル値と対応させるべき観測値を1つ用意する。各モデル格子に対応する観測点を探索するのではなく、各観測点に対応するモデル格子を探索するため、観測点の配置状況によってはどの観測点とも対応しない格子が出てくることになる。本研究では県別あるいは水系別といったある領域単位でモデルバイアスは評価されるため、評価対象にならなかった格子のバイアス情報は同一領域内の他の格子から算定されたバイアス情報と同様であると仮定することでバイアス補正を行う。なお、気温に関しては、モデル標高と観測点標高の差の分を補正する(観測値をモデル標高気温に補正する)。最後に、モデルバイアスを評価する単位(都道府県別、水系別)毎に各観測値を並べ替え、1次元配列に格納する。なお、モデル格子数や解析対象年、流域の区分数などのパラメータ文を外部ファイル(VDIM. txt)として取り込む形にすることにより、全てのモデルに対応できる共通のコードとして整備できた。

(3) RCM出力の並べ替え

モデルバイアスを評価する単位(都道府県別、水系別)毎に各RCM出力(地上2次元場)各格子点の値を並べ替え、1次元配列に格納する。これにより、各モデル出力のフォーマットが統一されるとともに、海上の値など、評価対象外の情報を落とせる(約10分の1になる)。モデルにより出力ファイル名や出力フォーマットなどが異なるため、コードを完全に統一することはできないが、外部ファイルから取り込むパラメータ文(VDIM. txt)をstnmatch.fで使用するものと共通化することで、利便性を向上させている。

(4) モデルバイアスの検出

それぞれのモデル格子におけるモデル値と観測値が、共に欠測でない時のデータのみを扱い、これらを各月ごと各領域別に解析対象年分のデータを集計し、降水量については観測値との比を、気温については観測値との差をバイアスとして算定する。最初のバージョンでは降水量と気温で別のコード(それぞれbiaspdfprec.f、biaspdftair.f)が用意されていたが、処理すべき変数に応じたif文を追加することで、コードを共通化した。また、ユーザーが変更すべきパラメータ文を外部ファイル(PARAM.txt)として取り込む形にすることにより、全てのモデルに対応できる共通のコードとして整備できた。なお、モデル開発段階にあっては、特定の年や特定の月だけをチェックする必要があるとのことから、開始年(syear)、終了年(eyear)、開始月(smon)、終了月(emon)により任意に設定できるようにした。

(5) 頻度分布を考慮したモデルバイアスの補正

簡易な補正法として、まずは月平均値や標準偏差を合わせるということがよくなされる。本研究ではさらに極値(頻度分布の両側の裾野部)の再現性を高めるべく、各階級別に補正係数を調整する手法の開発に着手した。頻度分布を考慮した補正法では、月平均値バイアスを解消する平均の補正係数をまず各階級に一律に適用し、頻度分布がどのように修正されるかをあらかじめ求めておく(仮補正)。次に、各階級の補正係数をある割合で変化させた場合、その前後の階級の頻度分布がどのように変化するかをあらかじめ算定しておき、月平均値を保存させるという制約条件のもと各階級の補正係数を様々に変化させ、頻度分布のピーク位置や極値の再現性の高い組み合わせを順次探索していくというものである。

1) 最適比率の設定

最適比率(optimal ratio)は、仮最適比率(provisional optimal ratio)を微調整したものであり、この仮最適比率とは、全階級に対して一律な値である固定比(fixed ratio)と、各階級によって異なる値である変動比(variable ratio)により構成されている。これらの関係を図で表したものが図(4)-2である。固定比は月平均値を観測値に近づけるための比率であり、変動比は階級頻度分布を観測値に近づけるための比率である。固定比は、月平均値バイアスを解消するものであるので、降水量(比)の場合はその逆数(観測値の平均月降水量/モデル値の平均月降水量)、気温(差)の場合は符号を逆にしたもの(観測値の月平均気温ーモデル値の月平均気温)となる。降水量(比)の場合の変動比(α)は、固定比(w0)に対して-0.90倍から0.90倍まで変化させるように設定する。

 $\alpha = 0.15 \text{ w0} \times i \qquad (i = -6 \sim 6)$

気温(差)の場合は0.5K単位で-3Kから3Kまでの範囲で設定する。

$$\alpha = 0.5 \times i$$
 ($i=-6 \sim 6$)

2) 本補正の判断基準

本補正によるモデルバイアス改善度の指標として、以下の値を用いる。

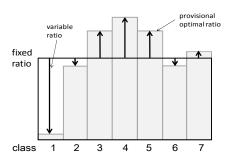
$$d \operatorname{var} = \sum_{i=1}^{8} (m \operatorname{var}_{i} - o \operatorname{var}_{i}) a_{i}$$
 (1)

以後、この値dvarを補正誤差と呼ぶこととする。補正誤差は、,各階級別の降水量(気温)に重み a_i をかけた上での、モデル値と観測値の階級別合計量の差であり、0に近づくほど、その補正の精度が高まっていることを示す。頻度分布の裾野部分(降雨強度が強い階級)の階級の補正に重点を置き、補正誤差算定における重み (a_i) を次のように設定することで、極値の再現回数の差が小さくなるようにした。

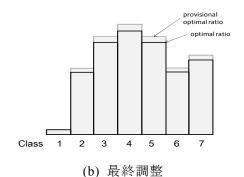
 a_i = $clev_i$ ($clev_i$ >1) a_i =1 ($clev_i$ ≤1) 気温についても同様に設定すると、かえって頻度分布のピーク階級がずれてしまう場合が出てくるので、気温については全ての階級で a_i =1とした。

3) 各変動比による変化量

記述を簡便にするために、降水量のみに関して記す。 モデル値に関して、変動比を変化させることにより、本 補正後のモデル値がどの階級に移り、元の階級の合計降



(a) 固定比と変動比



図(4)-2 最適比率の概念図

水量と移動先の階級の合計降水量にどのような変化をもたらすかを1つの単位操作とする。モデル値に、簡易補正と本補正をそれぞれ行うことにより、本補正後の階級が簡易補正後の階級と等しければ単位操作1を、等しくなければ単位操作2を行う。単位操作の式は、以下に示す。

単位操作1

$$store(j,ic0,ic1) = \sum \{c(j) \cdot prc\}$$
 (2)

単位操作2

$$store(j,ic0,ic1) = \sum \{(-f) \cdot prc\}$$
(3)

$$store(j,ic0,ic2) = \sum \{ (c(j) + f) \cdot prc \}$$
 (4)

ただし、

j: 変動比の数、ic0: 元のモデル値が属する階級、ic1: 簡易補正後に属する階級、ic2: 本補正後に属する階級、c(j): j番目の変動比、f: 固定比、prc: モデル値の1時間降水量、store(j,ic0,ic1): j番目の変動比によって、階級ic0から階級ic1へ移動した量store(j,ic0,ic2): j番目の変動比によって、階級ic0から階級ic2へ移動した量

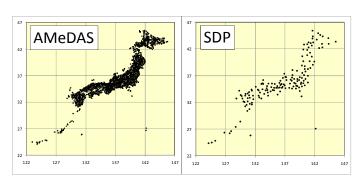
- 4) 補正誤差最小化のためのアルゴリズム
- (a) 最初に、簡易補正後のモデル値について各階級の合計降水量を求め、それらを式(1)のmvarに 代入したものを、補正誤差の初期値と定める。元のモデル値でなく、簡易補正後のモデル値 に関するモデルバイアスを初期値として求めるのは、簡易補正によって平均月降水量が観測

値とほぼ等しい値になっているからである。

- (b) store(j, k, 1)を、移動先の階級1毎に足し合わせて、これをdifとする。このdif(各変動比による移動先の階級ごとの合計降水量変化)を、式(1)で用いたmvar(各階級の合計降水量)に各々加えていき、式(1)によって再び補正誤差(dvar)を算出する。
- (c) store(j, k, 1)を元の階級k毎に足し合わせて、その和をdel(k)(各変動比による元の階級ごとの合計降水量変化)とする。さらに、このdel(k)を全ての階級で足し合わせたものをds(各変動比による元の階級毎の合計降水量変化の和)とする。
- (d) (b)で算出した補正誤差が初期値よりも小さくなっており、かつ, (c)で導出した dsが全階級合計降水量の5パーセント未満である時に、この補正誤差を新たな補正誤差として、それ以降の他の補正誤差と比較する対象にする。
- (e) (b)から(d)の繰り返しによって、最も補正誤差が小さくなった時に、その補正誤差を導き出した各階級の変動比を最適な変動比の組み合わせとし、これらの最適な変動比と固定比を足し合わせたものを、各階級の仮最適比率とする。
- (f) 最後に、この比率をかけたモデル値の平均月降水量と観測値の平均月降水量の比をとり、微調整として、その逆比をアルゴリズムで導き出した仮最適比率にかけることで本補正の最適 比率とする。

(6) バイアス評価要素の拡張

評価要素を追加するために、検証用 データとして、155地点の気象官署 (SDP) データを追加した。時別値の収 録項目は、現地気圧、海面気圧、気温、 蒸気圧、相対湿度、風向、風速、雲量、 現在天気、露点温度、日照時間、全天 日射量、降水量である。ただし、全項 目を155地点で観測している訳ではな く、例えば全天日射量が観測されてい



図(4)-3 アメダス気象官署の観測点位置

るのは約4割の66地点である。図(4)-3に示すように、アメダスの観測点数(約1400地点)に比べてSDPは155地点と少なく、そのまま用いるだけでは20km解像度の地域気候モデルで評価可能な格子点数が限られてしまう。そこで、数多くの観測点でのデータが存在する日照時間の情報を全天日射量(下向き短波放射)および大気放射量(下向き長波放射量)に変換することで、放射量に関する検証情報を増やすことにした。

放射量の算定には位置情報、日時に加え、日照時間、気温、露点温度が必要である¹⁾。すなわち、アメダスの4要素観測点において不足している露点温度を用意すれば、これらの観測点において放射量を推定することができる。

 $SWdown = \{A \ (N/N_0) + B \} SOtop$ $LWdown = \{1 - (1 - C) D \} Tair^4$ $C = 0.74 + 0.19 wtop + 0.07 wtop^2 (wtopは露点温度の関数)$ $D = 0.826 (N/N_0)^3 - 1.234 (N/N_0)^2 + 1.135 (N/N_0) + 0.298$

ただし、N: 日照時間、 N_o : 可照時間、SOtop: 大気上端における下向き短波放射ここで、日照時間の定義によると日射量が $120W/m^2$ 以上の値をとる時間であるので、可照時間の計算では、SOtopが $120W/m^2$ 以上の値をとる時間とした。回帰係数AおよびBは、放射量と全天日射量の双方を観測しているSDP観測点において同定した(1年間に300日以上の観測がある地点のみ)。各年毎、各地点毎に同定された日照時間と全天日射量の関係式の係数は多少ばらつく。これは観測に使用している日照計の種類にも依存するが、同定結果が年によっても変化する。各気象官署並びに各アメダス地点においてどの型の日照計が用いられているかの情報が利用できないこと、また観測年毎の回帰係数の平均値は概ね同じ値を示すことから、今回はこの各年毎の回帰係数の長期間平均値(A=0. 4617803、B=0. 2492907)を用いて、各アメダス地点ならびに放射観測のないSDP地点における日射量を算定した。

さて、アメダス地点における露点温度を空間内挿で算定する方法はいくつか考えられるが、本研究においては、各SDP地点における相対湿度の値を空間内挿し、アメダス地点の相対湿度を求め、次にその地点における気温の値から、水蒸気圧並びに露点温度を算定した。気圧に関しては、海面気圧として空間内挿をしてから、標高補正を行うことで、各アメダス観測点での値とする。このように、本来アメダス地点で観測されていない水蒸気圧や放射量を空間内挿や変換式を用いて推定したものを「疑似観測値」と呼ぶことにする。疑似観測値を加えることで、バイアス評価が可能な要素は、降水量(Prec)、気温(Tair)、短波放射(SWdown)、長波放射(LWdown)、水蒸気圧(Eair)、風速(wind)、地上気圧(psfc)の7要素に拡張されたことになる。

(7) バイアス補正による極値の再現性向上に関する検討

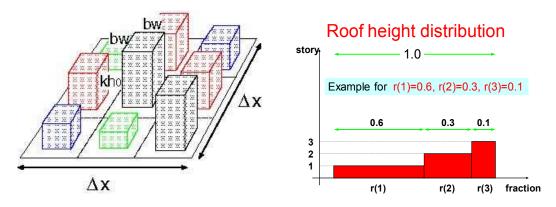
プロジェクト前半に開発に着手してきた極値(頻度分布の両側の裾野部)の再現性を高める調整アルゴリズムの一部を改良し、処理速度を大幅に改善した。本補正手法では、モデル出力値(1時間値)の頻度分布が改善するように各階級別に補正係数を調整する。ある種の統計量に変換した後に、その統計量を補正するのではなく、1時間毎の全出力値に対して補正を施す。本手法を適用することで、99パーセンタイル値などの極値の統計量が格段に改善されることが多くのケースについて確認されている。プロジェクト後半には、こういった1時間値の補正の結果、もう少し長い時間スケール(1日や10日)の統計量も改善されるか否かについて検討した。

(8) 都市キャノピーモデルによる力学的ダウンスケーリング

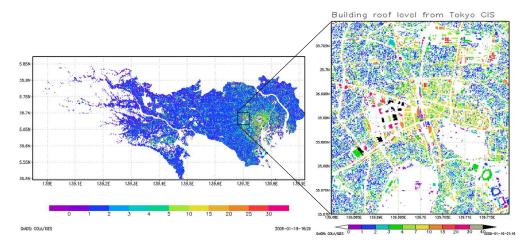
1)使用するモデルの概要

本研究で使用する数値モデルは、Moteki et al. $^{2)}$ により開発されたCReSiBUCに改良を加えたものである。CReSS $^{3)}$ は、雲スケールからメソスケールの現象を高精度でシミュレーションすることを目的として開発された雲解像の非静力学数値気象モデルであり、詳細な雲物理学過程が組み込まれている。SiBUC $^{4)}$ は植生、水体、都市の各サブモデルから構成され、気象モデルの1グリッド内に存在する各土地利用の面積割合で加重平均して地表面フラックスを計算するモザイクモデルであり、植生モデルについてはSiB $^{5)}$ を基にして水田モデルを加えるなどの改良がなされたものを使用している。都市を構成する建物に起因する地表面の不規則性は都市キャニオンの概念に基づいて考慮されている。1つのモデル格子内で同一の階数の建物を集約し、その階数iの構成割合i0分を都市域の幾何学的な情報として、直接的に取り込むことができる。図i10~i14はi180。3階の建

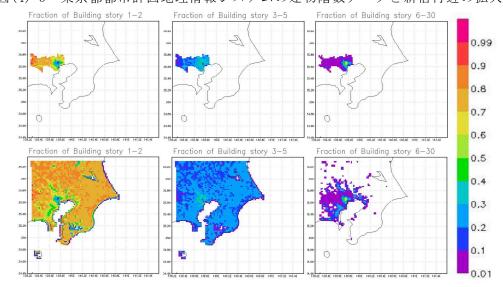
物の構成割合がそれぞれ6割、3割、1割の場合を示している。



図(4)-4 1つの格子内の建物屋根面高度分布



図(4)-5 東京都都市計画地理情報システムの建物階数データと新宿付近の拡大図



図(4)-6 左:低層(1-2)、中:中層(3-5)、右:高層(6-)建物の割合。 上図は東京都のみ。下図は回帰式で補完された値を加えたもの。

SiBUCでは地表面状態を詳細に表現するために数多くのパラメータを必要とする。このため、モ

デル計算前のパラメータ処理過程が複雑で、Moteki et al. $^{2)}$ のCReSiBUCはCReSSの単CPU版への結合から始めたが、大規模な並列計算機で効率よく実行できるように設計されているCReSSの利点を活かすべく、パラメータ処理過程を再整理し、並列計算版に対応した。また、土壌水分の初期値について、分布型の情報を取り込めるように改良した。

2) 境界条件および各種パラメータ

計算領域は東経140.4°、北緯35.4°を中心とした200km×200kmの範囲であり、空間解像度は2kmとした。大気状態量の初期値および側面境界条件には気象庁のメソ領域客観解析データ(MANAL)を使用した。MANALは空間解像度10km、6時間間隔の格子点データである。

土地利用面積率、植生タイプの情報としては国土数値情報(KS-202)(空間分解能約100m)における15 分類の土地利用を7つのカテゴリー(草地、森林、水田、畑地、裸地、都市域、水面)に再分類したデータセットを使用する。土壌タイプの情報としては、全球の陸面パラメータのデータベースであるECOCLIMAP(空間分解能約1km)を使用し、砂、粘土の構成比に基づいて11種(sand、sandy loam等)に再分類したデータセットを使用する。海面温度(SST)については衛星観測プロダクトであるNOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder SST data ver. 5およびAqua/NASA MODIS SST data(空間解像度4km)の1ヶ月平均値を用いた。緑地におけるキャノピーカバー率や葉面積指数(LAI)を推定するために、SPOT VEGETATIONの10日間合成正規化植生指標(NDVI)プロダクトに雲の影響を取り除くためのノイズ除去を施したデータセットを使用した。

東京都都市計画地理情報システムから提供を受けた建物階数情報を図(4)-5に示す(赤:25~30階、黄:10~15階、青:2階、白:建物なし)。新宿付近の5km四方の拡大図に示される通り、このデータは個々の建物を解像できる情報である。この情報が各モデル格子の屋根面高度分布r(i)に変換される。ここで、屋根面高度分布は建物面積の総量に対する各高さの建物面積の割合と定義され、屋根面高度分布の総和は1となる。屋根面高度分布は、深さの異なるキャニオンに関する天空率や建物断面積といった他のパラメータを計算するための鍵となる情報である。ただし、この大変優れた地理情報システム情報の範囲は東京都に限られていて、関東地方の計算をする上ではごく一部の領域にすぎない。そこで、都市面積率が高いほど高層建物の比率が高くなると仮定し、低層(1-2階)建物、中層(3-5階)、高層建物(6階以上)の割合、最高階数を都市面積率により回帰した。図(4)-6に示す通り、正確なデータが存在する東京都と、推定値により補完された周辺部との境界がわからない程度に推定ができている。なお、詳細な建物階数情報から推計された人工排熱量の時空間分布 6 も導入されている。

日本では降水レーダーやアメダスによる地上観測網など、非常に高密度な気象観測が行われている。これらの気象観測情報を境界条件とし、陸面過程モデルSiBUCのオフライン計算を実行することで、日本各地の日々の地表面状態を推定するシステムでを開発しており、土壌水分量や地表面温度の分布情報を初期値として活用する。これにより、年ごとの土壌水分量を計算し、7月1日時点での豊水年・渇水年の違いを考慮した。長期計算において、衛星観測による植生情報の効果を反映するために、ひと夏(7月~8月)を6期に分け、計算を行った。この際、SiBUC側における各期の状態量(土壌水分や温度等)の最終出力値を次の計算の初期値に受け継ぎ、長期計算を実行した。

3) モデルの評価方法

MANALは解像度が10kmで、3時・9時・15時・21時(JST)の解析値である。MANALは大気境界条件として用いた格子点値であるが、現業の気象モデルの最も高解像度の出力値としての比較も可能である。解像度10kmのMANALから2kmにダウンスケーリングしたCReSiBUC出力との比較をすることで、力学的ダウンスケーリングによる付加価値を評価する。観測地点としては東京(大手町)、練馬、横浜のアメダスを用いた。MANALでは、それぞれの観測地点を含むメッシュの地表面気温を用いた。観測値としてはアメダスの1時間毎の気温を用いた。MANALプロダクトのうち、3時及び15時(JST)の2つの時刻について、ひと夏毎に解析を行った。

CReSiBUCによる力学的ダウンスケーリングの効果には、解像度を上げることによる効果と都市キャノピーモデル等による物理過程改善の効果の2つが含まれるが、それぞれの効果を確認するために、地表面過程の取り扱いが単純化されているCReSSそのものによるダウンスケーリングも一部実施した。すなわち、元の境界条件であるMANALとCReSiBUC出力を比較することで、両者を合わせた効果を、一方、CReSS出力とCReSiBUC出力を比較することで、陸面過程の詳細な表現の効果を見ることができる。なお、モデル性能は、相関係数とRMSEにより評価する。

4. 結果及び考察

表 (4) -2に示されるように、JRA25/JCDAS再解析値を側面境界に用いた3機関、4地域気候モデルの結果を対象にバイアス検証システムを動かした。さらに、文科省革新プロジェクト「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」で計算されたAGCM20kmの結果 $^{8)}$ も比較に用いた。

機関	力学フレーム	ハ゛ーシ゛ョン	モデル名	計算期間
気象研	NHM	2	NHMMRI2	20年(1985-2004)
防災科研	RAMS	1	RAMSDP1	29年(1979-2007)
筑波大	RAMS	1	RAMSTU1	20年(1985-2004)
筑波大	WRF	1	WRF-TU1	20年(1985-2004)
気象研 (革新)	AGCM	_	GCM20km	25年(1979-2003)*

表(4)-2 バイアス評価に使用した5モデル。

(1) 月平均値のバイアス

図(4)-7 から図(4)-9 は月平均値のバイアスを横軸に月、縦軸に都道府県の各区分番号(60 区分)として描いたものであり、それぞれ、降水量、気温、日射量に関するものである。それぞれの図に5枚のパネルが含まれているが、上段左から GCM20km、NHMMRI2、RAMSDP1、下段左から RAMSTU1、WRF-TU1 である。

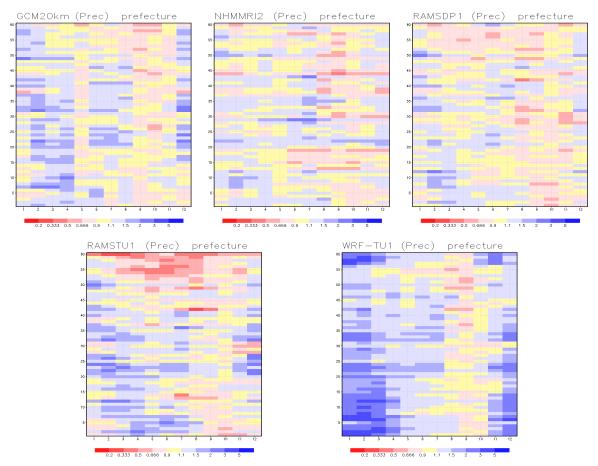
1) 降水量のバイアス

降水量が過大なエリアには青い色が、過少なエリアには赤い色がつけられている。なお、黄色 いエリアはモデル出力が観測値に対して $\pm 10\%$ 以内に収まっている場所である。図(4)-7 より、RAMSTU1 は夏季に九州で乾燥バイアスがやや強いものの、WRF-TU1 以外の3つのモデルの降水量バイアスは比較的似た傾向にあると言える。WRF-TU1 では特に冬季に湿潤バイアスが強くなる傾向 がある。

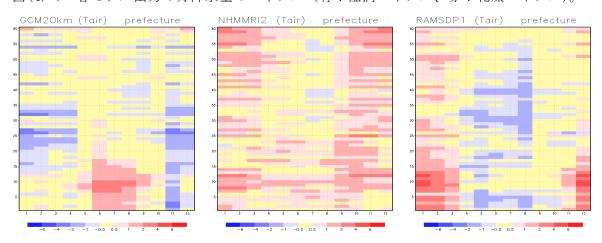
^{*)} 革新プログラムは全球大気モデルであり、再解析データは境界値に用いていない。

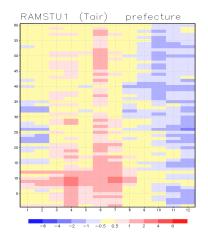
2) 気温のバイアス

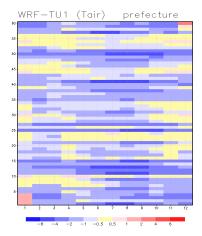
気温については、高温バイアスのエリアには赤い色が、低温バイアスのエリアには青い色がつけられている。なお、黄色いエリアはモデル出力が観測値に対して $\pm 0.5 K$ 以内に収まっている場所である。図(4)-8 より、気温バイアスは 4 つのモデルのいずれも異なる傾向を示す。NHMMRI2 では全般的に高温バイアス、RAMSDP1 では冬季に高温、夏季に低温バイアス、RAMSTU1 では冬季に低温、夏季に高温バイアス、WRF-TU1 では全般的に低温バイアスとなっている。



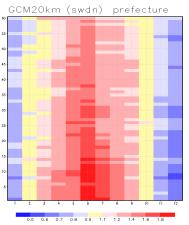
図(4)-7 各モデル出力の月降水量のバイアス (青:湿潤バイアス、赤:乾燥バイアス)。

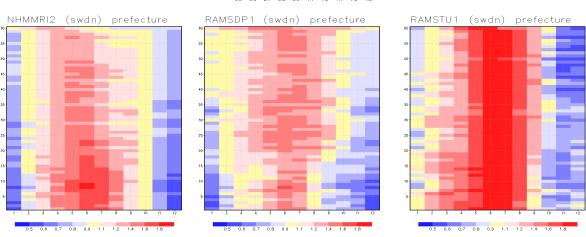


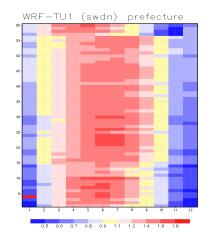




図(4)-8 各モデル出力の月平均気温のバイアス(青:低温バイアス、赤:高温バイアス)。

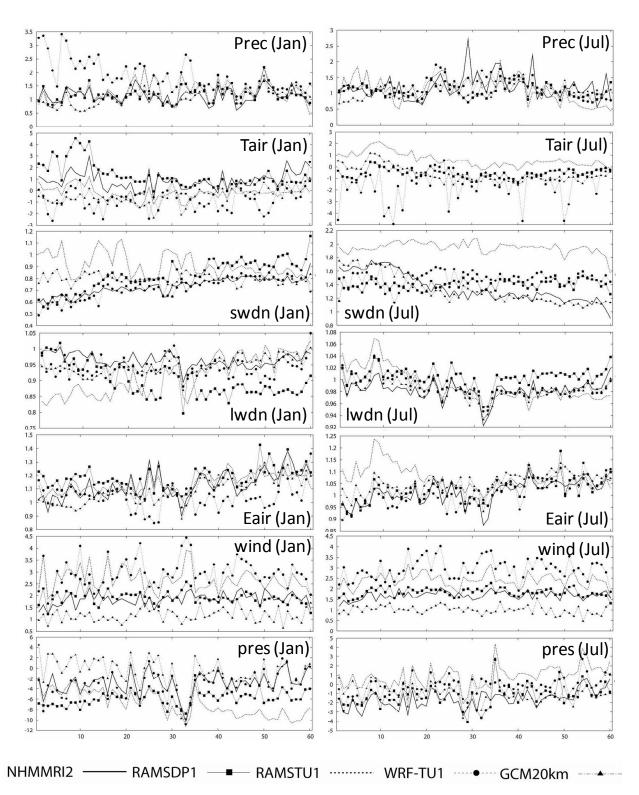






図(4)-9 各モデル出力の月平均日射量のバイアス(青:過小バイアス、赤:過大バイアス)。 3)日射量のバイアス

日射量が過大なエリアには赤い色が、過少なエリアには青い色がつけられている。なお、黄色 いエリアはモデル出力が観測値に対して±10%以内に収まっている場所である。短波放射ではいずれのモデルでも夏季にモデル出力が過大評価する傾向があるが、北の方でより過大傾向が強くなる GCM20km、NHMMRI2 などと、南の方でより過大傾向が強くなる RAMSDP1 といったように、モデル固有のバイアスの癖を確認することができる。

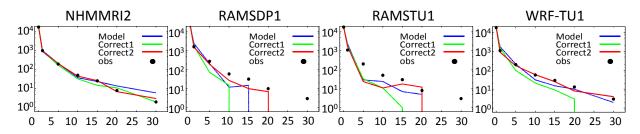


図(4)-10 都道府県別の各モデル出力の月平均値バイアスの比較(左:1月、右:7月) 横軸:都道府県番号(#1:北海道、#60沖縄)、縦軸:モデルバイアス((a)、(c)、(d)、(e)、(f)は 比、(b)[K]、(g)[hPa]は差)。降水量(Prec)、気温(Tair)、短波放射(swdn)、長波放射(lwdn)、水 蒸気圧(Eair)、風速(wind)、地上気圧(pres)

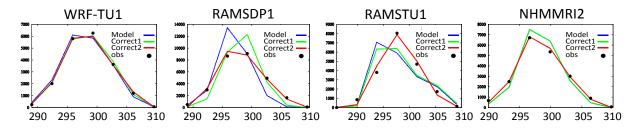
4) バイアスのモデル間比較

以上のように多種類の気象要素に関して、各モデル出力のバイアスの月別、場所別の特徴を容易に判定できるようになったが、モデル間のバイアス傾向の共通点や違いを見るのにはこのような表示方法だけでは不十分である。特定の月に関して、横軸に都道府県の各区分番号、縦軸に各気象要素の月平均値のバイアスとして5つのモデルのバイアスの空間分布を1枚のパネルに同時に表示したものが図(4)-10である。1月の降水量はWRF-TU1のみ他のモデルと全く異なる傾向を示している。7月の降水量では、特定の地域についてNHMMRI2のみ、特に大きなバイアスを持つ。1月の気温では全体的にモデル間のばらつきが大きく、7月の気温では特定の地域でWRF-TU1で極端な低温バイアスが見られる。短波放射ではバイアス傾向に明確な南北差が見られること、RAMSTU1は他のモデルと大きく違う傾向を持つこと等がわかる。

ここで、気象要素間でのバイアスの特徴を見てみる。図(4)-7 において湿潤バイアスに青色、 乾燥バイアスに赤色が、図(4)-8 において低温バイアスに青色、高温バイアスに赤色が使われて いる。各モデルにおいて降水量が多い(少ない)と気温が低く(高く)なるという傾向があれば、 両図の赤色と青色の出現パターンが類似すべきであるが、両図からはそのような傾向を見て取れ ない。すなわち、降水量のバイアスの現れ方と気温のバイアスの現れ方に一貫性が見られない。 このことは、各気象要素間の整合性を加味した形でバイアス補正をすることが困難であることを 示唆している。



図(4)-11 各モデル出力の東京都の7月の降水の頻度分布並びにバイアス補正結果(青線:モデル 出力値、緑線:月平均値による補正値、赤線:頻度分布を考慮した補正値、黒点:観測値)

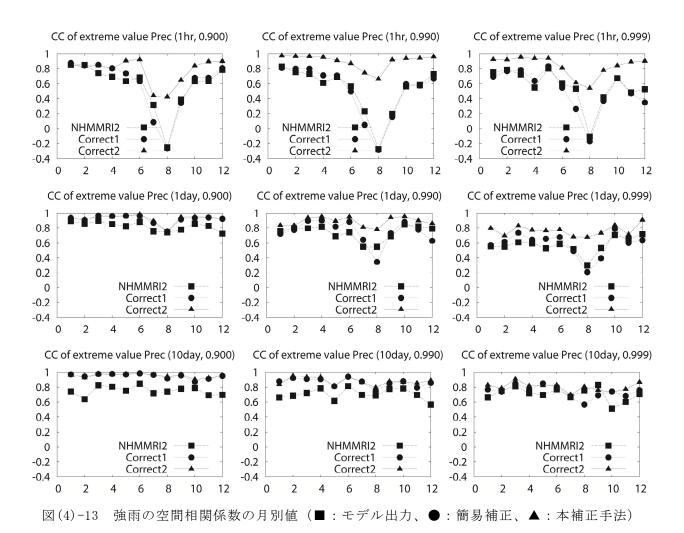


図(4)-12 各モデル出力の東京都の8月の気温の頻度分布並びにバイアス補正結果(青線:モデル 出力値、緑線:月平均値による補正値、赤線:頻度分布を考慮した補正値、黒点:観測値)

(2) 頻度分布を考慮したモデルバイアスの補正

各モデル出力について、エリア別、月別に頻度分布の再現性が評価され、またその頻度分布を考慮したバイアス補正が適用された。例として東京都の7月の降水に関するものを図(4)-11に、また東京都の8月の気温に関するものを図(4)-12に示す。黒点は観測値、緑線はモデル出力、赤線は頻度分布を考慮した補正法を適用した結果であり、簡易な補正として月平均バイアスで補正をかけた結果も青線で示されている。NHMMRI2の降水強度については元のモデル出力でかなり良い結果

が得られているが、補正を施すことにより、さらに頻度分布の再現性が改善されている。WRF-TUIでは強雨の頻度がやや不足しているものの補正により十分に改善されている。RAMSTUIとRAMSDPIではモデル出力において強雨の頻度がかなり少なくなっており、補正を施しても十分な精度が得られていない。東京都については、平均気温の再現性が良く、簡易補正を施しても頻度分布に変化があまり見られないが、頻度分布を考慮したバイアス補正法を適用することで、気温の頻度分布がほぼ完璧に修正されている。なお、ここで示した例は、こういった地域別のモデル出力の特徴の議論が可能となる情報を本バイアス検出・補正システムが提供できることを示すために用いたものであって、各モデル出力の代表的な特徴を示すエリアを選んだものではないことに留意されたい。

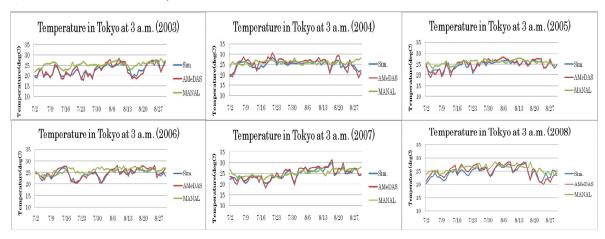


(3) 極値の再現性について

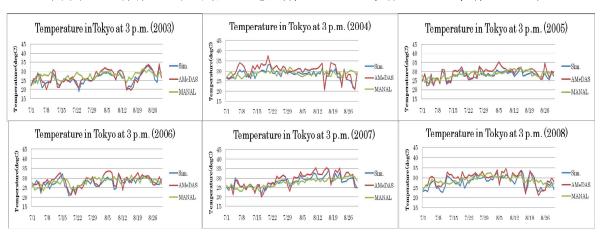
各モデル出力値およびその補正値について、エリア別、月別に90パーセンタイル値(上位10%)や99パーセンタイル値(上位1%)などの極値を求め、月別に全エリアの値の観測値との相関係数やRMSEなどの統計量を算定した。例として、NHMMRI2に関して、それぞれ降水強度の90、99、99.9パーセンタイル値(上位10、1、0.1%)の月別の相関係数を図(4)-13上段に示す。 ■はモデル出力値、 \blacksquare は月平均値による補正値(correct1)、 \blacksquare は頻度分布を考慮した補正値(correct2)である。

モデル出力値において夏季に相関係数が極端に低くなっている。これは、強い降水強度の発生する場所の空間パターンがあまり再現されていないことを意味する。月平均値による単純な補正 (●)では、このような極値の再現性はほとんど改善されないが、本補正手法(▲)では、大幅に改善されている。以上のように、本研究で開発したバイアス補正手法により、モデル出力では再現しにくい極値を改善することが可能である。しかしながら、モデル出力そのものの性質によっては改善効果が限定的となる。

一方、このように時別値の補正を施すことで、日値や10日値の統計量も改善されるのかを調べたところ、図(4)-13中段に見られるように、99、99.9パーセンタイル値において、日値の統計量が大幅に改善されていることが確認できるが、10日値においては簡易補正と本手法では改善効果に大差がないことがわかる。



図(4)-14 東京の3時の気温の比較(青: CReSiBUC、赤: AMeDAS、緑: MANAL)



図(4)-15 東京の15時の気温の比較(青: CReSiBUC、赤: AMeDAS、緑: MANAL)

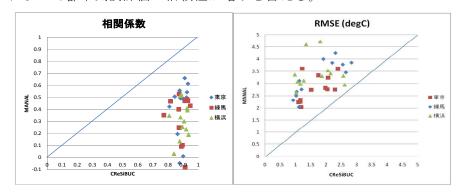
(4) 都市キャノピーモデルによるダウンスケーリングの効果

1) MANALとCReSiBUCの比較

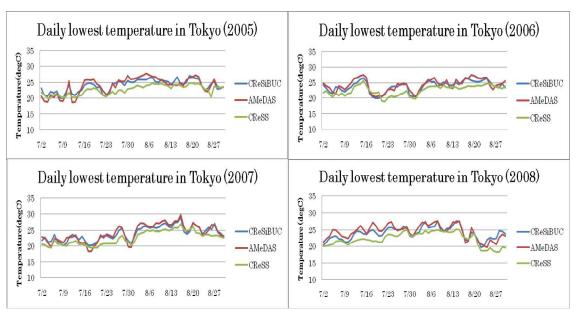
練馬や横浜についてもほぼ同じ傾向を示しているため、紙面の都合上、グラフは東京に関するものだけを示す。図(4)-14、図(4)-15はそれぞれ東京における3時と15時の解析結果の比較である。3時のCReSiBUC気温とアメダス気温はいずれの年も似通った結果となっている。一方MANALでは日々変動を追うには至っていない様子がわかる。MANALの解像度は10kmで、CReSiBUC気温の解像度

は2kmであることから、メッシュを2km間隔に落とすことで、点としてのアメダス観測値との挙動を示していることから、2kmで十分にそのメッシュの地点特性を表していると言え、力学的ダウンスケーリングの効果が大きく出たと考えられる。

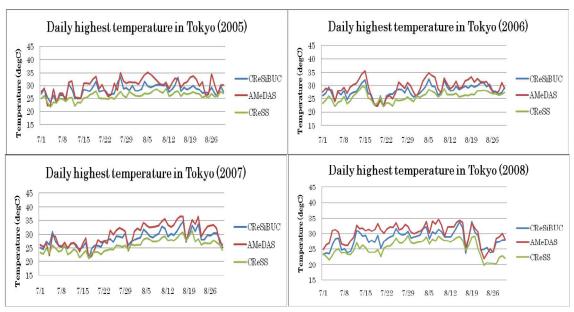
図(4)-16は東京、練馬、横浜の3地点における、各年(2003~2008)の3時と15時の相関係数とRMSEを、横軸をCReSiBUC、縦軸をMANALとしてまとめてプロットしたものである。CReSiBUCの相関係数は各都市でいずれの年も概ね0.8以上を示しているが、MANALの相関係数は $-0.1\sim0.6$ と安定しておらず、気温変動の幅が小さい年において相関が大きく落ち込む場合がある。またRMSEについては、境界条件であるMANALの誤差の影響を引きずるとはいえ、いずれの場合もCReSiBUCの方がRMSE値が小さくなっていることがわかる。境界条件として用いたMANALに比べてCReSiBUC気温の相関やRMSEが大幅に改善されたことから、CReSiBUCによるダウンスケーリングには確かに付加価値があり、これによって都市気候評価の信頼性が増すと言える。



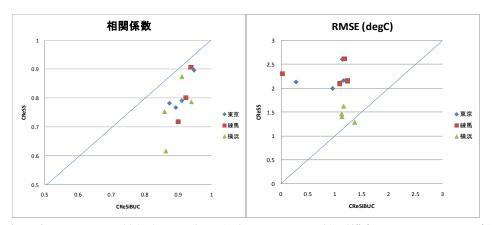
図(4)-16 各地点における相関係数とRMSEの比較(横軸:CReSiBUC、縦軸:MANAL)



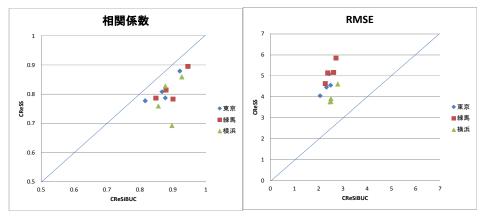
図(4)-17 東京の日最低気温の比較(青:CReSiBUC、赤:AMeDAS、緑:CReSS)



図(4)-18 東京の日最高気温の比較(青:CReSiBUC、赤:AMeDAS、緑:CReSS)



図(4)-19 各地点における日最低気温の相関係数とRMSEの比較(横軸: CReSiBUC、縦軸: CReSS)



図(4)-20 各地点における日最高気温の相関係数とRMSEの比較(横軸: CReSiBUC、縦軸: CReSS)

2) CReSSとCReSiBUCの比較

MANALは6時間ごとの値であり、日最高気温、日最低気温の評価はできなかったが、ここではCReSS

とCReSiBUCの1時間毎の出力値、アメダスの1時間毎の観測値を用いることで、厳密な意味では違うものの、日最高気温、日最低気温に近い値を評価する。日最低(最高)気温の評価には、アメダスの1時間毎データから1日で最も低い(高い)値を観測値の日最低(最高)気温とした。また、地表面状態の記述が簡易なCReSS単体を同条件で2005年から2008年で計算して得たCReSS気温と、地表面状態を詳細に考慮できるCReSiBUC気温とを比較することで、地表面を詳細に考慮することにより、どの程度付加価値が得られるかを検証する。CReSS気温、CReSiBUC気温とも1時間毎の出力値であり、1日で最も低い(高い)値を日最低(最高)気温とする。

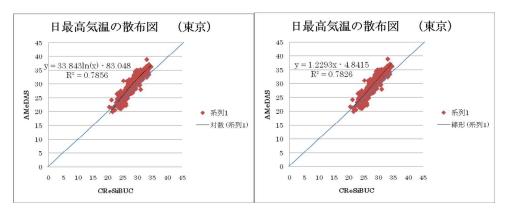
図(4)-17は東京における日最低気温の解析結果である。各地点とも、CReSiBUC気温はアメダス気温をよく表現できている。一方、CReSS地表面気温は、アメダス気温の形状を比較的よく表しているが、最低気温の絶対値が小さめに出る傾向にある。これは都市キャノピー構造を考慮しない平板モデルの一般的特徴である。図(4)-18は東京における日最高気温の解析結果である。CReSiBUC出力値はアメダスの日最高気温の変動をよく表していることが分かる。また、アメダス気温が35℃付近と、特に暑くなる日については、CReSiBUC気温がやや低めになるという傾向も認められる。一方、CReSSではアメダス気温の日最高気温の変動はまずまず表せているが、値の絶対値が観測値を全体的に大きく下回っている様子が分かる。

前節と同様に東京、練馬、横浜の3地点における、各年(2005~2008)の日最低気温の相関係数とRMSEを、横軸をCReSiBUC、縦軸をCReSSとしてまとめてプロットしたものを図(4)-19に示す。各地点とも、CReSiBUCの相関係数がCReSSの相関係数を全ての年で上回っており、さらに相関係数は0.9前後と相関の強い関係になった。また、東京、練馬に関してはCReSiBUC気温のRMSEが1.0℃前後となっており、絶対値として精度よく表現されていることがわかる。横浜では、2007年に関しては、CReSSのRMSE値がわずかに小さくなっているものの、相関係数はCReSiBUC気温の方がCReSS気温より大きく、横浜においても全ての年でCReSiBUCの精度が高いと言える。

日最高気温に関して同様にまとめてプロットしたものを図(4)-20に示す。各地点とも、全ての年でCReSiBUC気温の相関の方が強く出ている。また、RMSEは各地点ともCReSS気温はアメダス気温よりも4~6℃程度の低温バイアスがある。CReSiBUCではこの低温バイアスが2~3℃に改善されている。陸面過程モデルの都市サブモデルで表現される都市域のフラックス計算などの効果が気温の出力の精度向上に寄与していると考えられる。

3) 気候値評価

一般的に、1日の最高気温が30℃以上の日は真夏日、夜間の最低気温が25℃以上の日は熱帯夜と呼ばれている。熱帯夜日数・真夏日日数を正確に評価することは、夏場の冷夏・猛暑の評価に繋がるとともに、防災にも繋がり非常に重要である。前節では日最低気温、日最高気温の解析を行った。日最低気温に関しては、強い相関があり、絶対値としても評価可能であるという結果になった。日最高気温に関しては、強い相関はあるが、絶対値は観測値よりやや低めとなる傾向にあることがわかった。以上を踏まえ、日最低気温はCReSiBUC気温をそのまま用い、日最高気温はCReSiBUC気温を補正することで、正確に真夏日及び熱帯夜の日数を評価できるかどうかを検討する。



図(4)-21 東京における日最高気温の散布図と近似式

図(4)-21は東京における日最高気温の散布図である。補正に用いる近似式としては対数近似と線形近似を行った。比較すると、対数近似の決定係数R²がやや大きくなった。日最高気温の解析で、極値が高温になるときに観測値との差異が大きくなることから、対数近似の方が適切であると考えられる。他の観測地点(練馬、横浜)においても、対数近似を用いて、日最高気温を補正した。

表(4)-3は東京、練馬、横浜における真夏日日数の解析結果である。また、表(4)-4は3地点の熱帯夜の日数の解析結果である。各地点とも6年間の中で2004年の真夏日日数・熱帯夜日数ともに最も多くなっていて、2004年が猛暑であったことが推測される。一方、2003年の真夏日日数・熱帯夜日数は6年間で最少となっていて、2003年は過ごしやすい夏であったと推測される。CReSiBUC気温に関しても、3地点とも真夏日日数、熱帯夜日数の最多はいずれも2004年と、2004年の猛暑ぶりをシミュレーションで表現できている。また、3地点ともに真夏日日数、熱帯夜日数の最少は2003年となっていて、こちらもシミュレーションで過ごしやすい夏であったことが表現できた。その他の年についても、CReSiBUC気温とAMeDAS気温の傾向は似ており、現行のモデルでも少し補正をすれば、真夏日日数・熱帯夜日数といった指標での評価が十分可能であると言える。

真夏日の日数		2003	2004	2005	2006	2007	2008
東京	CReSiBUC	16	42	31	27	31	37
	AMeDAS	20	45	38	26	31	42
練馬	CReSiBUC	16	41	30	25	29	41
	AMeDAS	22	49	41	32	35	43
横浜	CReSiBUC	21	44	39	32	35	33
	AMeDAS	16	41	29	25	31	36

表(4)-3 各地点のひと夏毎の真夏日の合計日数の比較

表(4)-4 各地点のひと夏毎の熱帯夜の合計日数の比較

熱帯	夜の数	2003	2004	2005	2006	2007	2008
東京	CReSiBUC	11	31	21	19	22	19
	AMeDAS	11	41	27	20	26	28
練馬	CReSiBUC	12	31	22	22	26	19
	AMeDAS	6	27	20	17	23	21
横浜	CReSiBUC	12	32	24	21	26	23
	AMeDAS	7	31	20	14	23	24

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

格子数や格子中心位置の異なる様々な気候モデル出力値について、各気象要素の月平均値や月別の頻度分布に関するバイアス情報を同一の基準で効率的に検出・補正する手法を開発した。データコピーの時間を除き、実作業1時間以内で、モデルバイアスの検出が可能であるため、本システムはモデル出力値の利用者側のみならず、モデル開発者側にも有益なツールとなりうる。モデルバイアスの現れ方がモデルにより異なるということのみならず、そのバイアスの特徴が気象要素間で一貫性が必ずしもない(要素間の相関がない)ということが判明した。降水量、気温に加え、日射量、長波放射、風速、水蒸気圧、気圧の合計7つの地上気象要素を対象としているため、より多くの影響評価研究分野への情報提供が可能になった。

地表面の大気に及ぼす影響を詳細に考慮できる陸面過程モデルを導入して、力学的ダウンスケーリングを実施し、気温の再現性を評価した。大気側の境界条件として用いたMANALは、現行で最も解像度の高い気象庁のメソ領域気象モデル出力であり、さらに地上観測網や高層観測などの観測値によって補正された現在利用できる最も精度の良い高解像度3次元データである。MANALや地表面が簡易な表現であるCReSSの気温と比べて、CReSiBUC気温の方が全ての年で相関が改善され、精度の向上が認められた。都市域では地表面状態を詳細に考慮することは、気温の評価をする上で重要であると示唆される。現行のモデルでも気温の評価は十分に可能で、気温に関する将来気候の投影及びその評価についても期待できる。

(2) 環境政策への貢献

都道府県別あるいは水系別にモデル出力値の特徴やその補正法を開発したことにより、今後各自治体や河川事務所毎に、将来の気候変化に対する対応策を多面的に検討するための基礎情報を提供することが可能になった。

都市内の詳細な建物分布や人工排熱量分布を考慮できるモデルを開発できたので、今後は、想定される都市計画のいくつかのシナリオを組み込んだ将来気候評価やそれぞれの都市計画が気候影響緩和にどの程度役立つかといったことの検討が可能になるであろう。

6. 国際共同研究等の状況

アラル海流域の水資源の保全、Rashid Kulmatov, National University of Uzbekistan, Uzbekistan, JSPS外国人研究者招聘(2009年4月29日~6月26日)において、共同研究計画を作成。テーマ3で開発したダウンスケーリング手法やバイアス補正法を適用し、アラル海流域全体にわたる詳細かつ高精度な水・エネルギー収支解析を実施し、同地域の水資源を将来にわたり利用、管理、保全する上で現地の研究者や水管理者が必要とする支援情報を提供する。Kristina Toderich 教授(ICBA, ICARDA)、Bakhriddin Nishonov博士(Uzhydromet)等現地研究者との共同研究ネットワークが拡がりつつある。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Mori, E., T. Kojiri, K. Tanaka and T. Hamaguchi (2009): Impact assessment of climate change considering reservoir operation and water resources circumstances. Proc. of 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, pp.757-764.
- 2) Kojiri, T. (2010): Climate change impacts on water resources studies in Japan, CURRENT SCIENCE, Vol. 98(8), pp. 1038-1046.
- 3) 藤井嵩大・田中賢治・相馬一義・小尻利治 (2011): 都市気象を表現する力学的ダウンスケーリングに関する研究, 土木学会水工学論文集, 第55巻, pp. 355-360.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 田中賢治, 萩澤佑樹, 佐久間良一, 小尻利治 (2008): 気候モデルのバイアス検出と補正, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 723-736.
- 2) Tanaka, K., K. Souma, T. Fujii and M. Yamauchi (2009): Dynamical downscaling of urban climate using CReSiBUC with inclusion of detailed land surface parameters. Proc. of the 2nd Lund Regional-scale Climate Modelling Workshop. pp. 285-287.
- 3) Tanaka, K., K Souma, T Fujii and M Yamauchi (2009): Inclusion of Detailed Land Surface Parameters for Meso-scale Urban Climate Simulation. Proc. of the World City Water Forum 2009. SS-E2-6.
- 4) 田中賢治, 相馬一義, 藤井嵩大, 山内 誠 (2009): メソ数値気象モデルによる力学的ダウンスケーリングにおける土壌水分の効果. 2009土壌水分ワークショップ論文集, pp. 118-122.
- 5) 田中賢治, 相馬一義, 藤井嵩大 (2009): メソスケール都市気象シミュレーションのための詳細な陸面パラメータの導入. 第11回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集, H4.
- 6) 田中賢治,中田淳子,小尻利治(2010)(印刷中): 気候モデルのバイアス検出・補正システムの開発.京都大学防災研究所年報,第53号.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Tanaka, K., and K. Yorozu (2007): Selecting the best meteorological forcing dataset for each river basin. AGU Fall Meeting, San Fransisco, USA.
- 2) 田中賢治,藤井嵩大,山内誠,相馬一義,小尻利治(2008): CReSiBUCによる都市気候の力学的ダウンスケーリング,平成20年度京都大学防災研究所研究発表講演会,2008年2月25日.
- 3) 田中賢治, 萩澤佑樹, 佐久間良一, 小尻利治 (2008): 気候モデルのバイアス検出と補正. 京都大学防災研究所研究発表講演会.
- 4) 田中賢治, 萩澤佑樹, 小尻利治 (2008): RCM出力の頻度分布を考慮したバイアス補正, 水文・ 水資源学会2008年度研究発表会要旨集, pp. 90-91.
- 5) Tanaka, K., Yuuki Hagizawa, and Toshiharu Kojiri (2008): Bias correction of RCM output considering frequency distribution, 4th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW), S4-14, Nov. 4.
- 6) Tanaka, K. (2009): Development of the tool for detection and correction of RCM output, Second Mini-International WS on Downscaling, Jan 20, 2009.
- 7) 田中賢治・相馬一義・藤井嵩大・山内誠 (2009): メソ数値気象モデルによる力学的ダウンス ケーリングにおける土壌水分の効果, 2009土壌水分ワークショップ, 2009年3月28日.

- 8) Tanaka, K.,, Kazuyoshi Souma, Takahiro Fujii, Makoto Yamauchi (2009): Dynamical downscaling of urban climate using CReSiBUC with inclusion of detailed land surface parameters, 2nd Lund Regional-scale Climate Modelling Workshop: 21st Century Challenges in Regional-scale Climate Modelling, 8 May 2009.
- 9) Tanaka, K., K. Souma, T. Fujii and M. Yamauchi (2009): Dynamical downscaling of urban climate using CReSiBUC with inclusion of detailed land surface parameters. 2nd Lund Regional-scale Climate Modelling Workshop. 2009.5.8.
- 10) 藤井嵩大,田中賢治,小尻利治(2009):都市気象を表現する力学的ダウンスケーリングに関する研究.平成21年度土木学会関西支部年次学術講演会,2009.5.23.
- 11) 藤井嵩大,田中賢治,小尻利治(2009):都市気象を表現する力学的ダウンスケーリングに関する研究.水文・水資源学会2009年度研究発表会,2009.8.20.
- 12) Tanaka, K.,, Kazuyoshi Souma, Takahiro Fujii (2009): Dynamical downscaling of urban climate around Tokyo using CReSiBUC, 6th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, 24-28 Aug 2009.
- 13) Tanaka, K., K. Souma and T. Fujii (2009): Dynamical downscaling of urban climate around Tokyo using CReSiBUC. 2009 Joint GEWEX/iLEAPS Conference. G5-4, 2009.8.27
- 14) 田中賢治, 相馬一義, 藤井嵩大 (2009): メソスケール都市気象シミュレーションのための詳細な陸面パラメータの導入. 第11回非静力学モデルに関するワークショップ, 2009.9.25.
- 15) 田中賢治,小尻利治,中北英一 (2009): 陸面過程モデルによる近未来および21世紀末における気候変動の地表面水・熱収支への影響評価.極端気象現象とその気候変動による影響評価に関するシンポジウム, 2009.11.5.
- 16) 中田淳子,田中賢治,小尻利治(2009): 20km解像度地域気候モデル出力のバイアス補正に関する研究.日本気象学会2009年度秋季大会,2009.11.27.(ポスター発表)
- 17) Tanaka, K. (2009): Bias detection and correction of GCM output for climate change impact assessment study. 19th IHP Training Course. 2009.12.9.
- 18) 田中賢治(2010): 地上気象7要素のバイアス検出・補正システムについて, S-4/5・革新プロ合同ワークショップ「影響評価研究での気候モデル出力の活かし方を考える」. 2010.1.18, 東京.
- 19) Tanaka, K. (2010): Bias detection and correction system for seven surface meteolological elements. International Workshop on dynamical downscaling over Japan. 2010.1.26.
- 20) 田中賢治,中田淳子,小尻利治(2010): 気候モデルのバイアス検出・補正システムの開発. 京都大学防災研究所平成21年度研究発表講演会,2010.2.23.
- 21) Tanaka, K., T.Kojiri, E.Nakakita (2010): Assessing the Impacts of Climate Change on the Water Resources in Japan, 5th International Conference on Water Resources and Environment Research.
- 22) Nakata, J., K. Tanaka, T. Kojiri (2010): Bias detection and correction system considering frequency distribution, 5th International Conference on Water Resources and Environment Research.
- 23) K. Tanaka, J. Nakata, T. Kojiri (2010): Development of bias detection/correction system

for seven surface meteorological elements, 2nd International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology, and Water Resources Management.

- 24) J. Nakata, K. Tanaka, T. Kojiri, I. Tamagawa, T. Watanabe, T. Satomura (2010): Examination and estimation of heat exchange and effect of climate change on a cool temperate deciduous broad leaved forest using multi-layered canopy model, 2nd International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology, and Water Resources Management.
- 25) Kojiri, T., Y.Sato (2010): Comparison of water environment variations in river basin due to global warming, WCRP-UNESCO (GEWEX/CLIVAR/IHP) Workshop on metrics and methodologies of estimation of extreme climate events.
- 26) 田中賢治, 小尻利治, 中北英一 (2011): 超高解像度GCMを用いた気候変動の日本の水資源への影響評価, 平成22年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2011.2.23

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) International Workshop on Global Warming Issues from Meteorology, Hydrology and Water Resources Aspects (2008年3月18日、京都大学生存圈研究所 HW525 参加者20名)
- 2) International Symposium on Hydrology, Hydraulics and Water Resources Aspects on Global Water Issues for 30th Anniversary of Water Resources Research Center (2008年11月20日、京都ガーデンパレス、参加者80名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 近藤純正,中村亘,山崎剛 (1991): 日射量および下向き大気放射量の推定,天気,38,pp.41-48.
- 2) Moteki, Q., Y. Ito, K. Yorozu, K. Souma, A. Sakakibara, K. Tsuboki, T. Kato, K. Tanaka, and S. Ikebuchi (2005): Estimation for effects of existence of urban on development of cumulonimbus clouds using atmosphere-land coupled model of CReSiBUC, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 48 C, pp. 197-208.
- 3) Tsuboki, K. and A. Sakakibara (2002): Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, High Performance Computing, Springer, pp. 243-259.
- 4) Tanaka, K. (2004): Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable

- to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto Univ., 292pp.
- 5) Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A. (1986): A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, J. Atmos. Sci., 43, pp. 505-531.
- 6) 妹尾泰史,神田学,木内豪,萩島理 (2004):潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計 と都市局地気象に対する影響,土木学会水工学論文集,第 48 巻,pp. 169-174.
- 7) 相馬一義,田中賢治,中北英一,池淵周一 (2006):夏季の山地域における対流性降水に土壌 水分量の違いが与える影響,土木学会水工学論文集,第50巻,pp.517-522.
- 8) 文部科学省研究開発局 (2010): 21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来 の極端現象の変化予測に関する研究」, 平成21年度研究成果報告書, 198pp.

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (5) 力学的手法と統計的手法を併用した農作物影響評価のためのダウンスケーリングの研究
 - (独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域 西森基貴

〈研究協力者〉

(独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域

飯泉仁之直 (平成19~23年度)

横沢正幸(平成20年度)

吉田龍平(平成23年度)

筑波大学 生命環境科学研究科

岡田将誌(平成20年度)

村上雅則(平成23年度)・宇野史睦(平成23年度)

平成19~23年度累計予算額: 60,018千円 (うち、平成23年度予算額:12,909千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブ課題では、(1)様々な統計的ダウンスケール手法の開発と発展、(2)地域気候モデル出力の特性と統計的ダウンスケーリング結果との比較、および(3)気候シナリオデータセットの作成と農業気候指標を用いた将来変化の不確実性、という大きく分けて3つの研究を行った。累積密度分布関数や多変量線形重回帰法等の(1)で開発・発展した主要な統計的ダウンスケーリング(SD)手法については、(2)において本テーマにおける同じ境界条件を用いた複数の地域気候モデル(RCM)出力との比較検証を行い、適切なダウンスケール手法についての検討を行った。その結果(3)において、主にウェザージェネレータ(Weather Generator: WG)法を用い、日本の気象官署・アメダス約900地点の将来気候変化シナリオ(地点・目別気候変化シナリオデータセットELPIS-JP)を作成した。このELPIS-JPで特筆すべきは、従来の気候シナリオに含まれていなかった農業気象関連要素である湿度と地上風速についても、検証の上でデータセットに加えたこと、および気候の年々変動の持つ不確実性を表現する50の統計的なアンサンブルメンバーを持つことである。

[キーワード] 温暖化、気候シナリオ、農業影響、統計的ダウンスケール、日射量

1. はじめに

(1) 気候モデル出力の問題点

全球気候モデル(General Circulation Model: GCM)は、地域的な温暖化影響評価のためには空間解像度や精度の面でいまだ不十分であった。この問題を解決する1つの手段として、GCMの出力を境界条件として対象領域周辺のみの再計算を行う力学的ダウンスケール(Dynamical Down-Scaling: DD)手法すなわち地域気候モデル(Regional Climate Model: RCM)実験がある。本サブ課題では、地上気温(TM)・降水量(PR)のみならず、農業影響評価のために重要な全天日射量(以

下、単に日射量またはSR)、湿度(RH)、地上風速(WS)も扱う必要がある。しかしながらSR以下の要素については,気候モデル研究ではTMやPRと比べて重視されておらず、多量の計算機資源を必要としない統計的ダウンスケーリング(Statistical Downscaling: SD)手法の開発が望まれていた。特にSRは検証が不十分で、同時に出力されるPRや雲量との整合性がない場合もあった。

(2) 温暖化影響評価のための気候モデルの精度

地球温暖化に対する農業影響評価は、気候モデルの出力値をダウンスケールして作物生育モデル等に適用するが、気候要素の観測値と比較してGCM等の出力値には系統的な誤差(バイアス)がある。また気候シナリオのダウンスケーリング研究では、気候モデルの空間解像度やデータの目標精度は気候モデル側だけでは決めることができず、また影響評価側からの具体的要求がないと精度向上の目安がない。そのため、提供された気候要素が影響側では精度不足で使えない等の問題点があった。こうした背景から、気候モデリング研究者は気候モデルの改良によるバイアス軽減に努める一方、ダウンスケーリング研究者は、気候モデル出力値に観測気候データを同化することでバイアス補正作業をも担っている。しかしながら、いずれにとっても影響評価側が要求する気候データの精度水準を把握することが重要である。

(3) 過去の気候シナリオにおける問題点

気象庁は、日本における温暖化影響を統一的に評価するための標準として高解像度の気候変化シナリオを作成・配布した(気象庁、2005) $^{1)}$ 。これは、気候変動に関する政府間パネル(International Panel on Climate Change: IPCC)第3次報告書に提出された気象研究所GCMによる、排出シナリオに関する特別報告書(Special Report on Emission Scenarios: SRES)の多元化社会 (A2)シナリオに基づく温暖化予測結果を、同機関のRCMの境界条件とし、水平格子間隔約20km(以下、RCM20と表記)に力学的にダウンスケールしたものである。しかしながらこのRCM20には、農業分野の気候変化・温暖化影響を評価するうえで重要な日射量が出力されていない、という問題点があった。

2. 研究開発目的

(1) 様々な統計的ダウンスケーリング手法の開発と発展

SD手法として、気候モデルの非出力要素を、出力要素との経験的な関係を用いて推定する手法、現在気候要素の累積分布関数を将来に適用し温暖化実験の出力値を補正するCDF法、現在気候システムにおける大循環要素と気候要素との統計的関係を将来に拡張する多変量線形重回帰(Multivariate Multiple Linear Regression: MMLR)法等、様々なSD手法を開発し、また発展させる。

(2) 地域気候モデル出力の特性と統計的ダウンスケーリング結果との比較

本テーマで出力されたRCM実験結果を用い、CDF法とMMLR法の2つのSD手法により、同じ境界条件である日本長期再解析プロジェクト(JRA-25)再解析データを用いた、複数のDD結果との相互比較を行う。

(3) 気候シナリオデータセットの作成と農業気候指標を用いた将来変化の不確実性

温暖化影響の精緻な評価と気候モデル研究のさらなる発展のために、広域水稲生育モデルを用

いてGCM等のバイアスが影響モデルの推定値に及ぼす影響を解析し、気候モデルが出力するデータの精度、特に影響モデルから見たバイアス許容範囲について数値の一例を提示する。そして最終的には、(1)および(2)の知見も併せて日本における地点・日別気候シナリオデータセットを作成するほか、農業気候要素の将来変化について、その不確実性を評価する。

3. 研究開発方法

(1) 様々な統計的ダウンスケーリング手法の開発と発展

- 1) 日射量推定のためのSD手法
- a. 地点気象観測値を用いた日射量の推定とRCM出力に対する補間

この目的のために新たに構築したSD手法の特徴は、SRの季節変化成分と日変動成分とを分割して推定する点にある。気象官署の日データを用いて、SRの季節変化成分は,大気上端のSRと可降水量、混濁係数、およびアルベドの関数とし(近藤,1994) $^{2)}$ 、日変動成分は気温日較差(Diurnal Temperature Change: DTR)と日平均相対湿度(Relative Humidity: RH)の関数とした。DTRとRH,および日射量Hが季節変動成分(\underline{X})と日変動成分(X')からなるとし、季節変動成分は任意の日数(ここでは51日)の移動平均,日変動成分(X'i, $i=1,2,\cdots$ n)は生データと移動平均との差とした。なお時間方向の欠測は、直近の過去4年間の平均値で代替している。

DTR'i とH'i、およびRH'iとH'i について、それぞれ線形回帰モデルを月別($j=1,\cdots,12$)に構築し、各月・各地点でDTRとRHのどちらを採用するかはその線形回帰モデルの相関係数の絶対値の大小で決定した。そして任意の期間(ここでは1ヶ月)においてH'iが最大となる日の日射量は晴天日の日射量Hfとほぼ一致するため、日射量定義式Hi=H+H'からH=Hf-H'を得る。各月について $H'*=\max[H'](i=1,\cdots,m)$ 、で定義されるH'*を求めれば近似的な日射量の季節変動成分Hjが求まり、最終的に地上の全天日射量HはHi=Hj+H'iによって推定される。

b. 全球再解析データを用いた日射量の補完手法

ここで説明変数として使用した地上気象要素はDTR、RH、露点温度より推定した可降水量、および海面更正地上気圧(SLP)である。また被説明変数である日射量は、それぞれ異なるデータソースから以下のように推定値または観測値を得た。すなわち:

- i. 全球再解析データの補正値 (DTR・RH・可降水量・SLP) を説明変数とする経験的複合式から の推定値
- ii. 全球再解析データの下向き短波放射の補正値
- iii. 観測された日照時間を説明変数とする経験式による推定値
- ix. 短期間の1地点における日射量の観測値

である。入力データは経験式では観測値、経験的複合式では再解析データの補正値で、日照時間 以外の各気象要素の補正式は、再解析データ加重平均値を説明変数、観測値を被説明変数とする 一次式とした。

全球再解析データとして米国環境予測センター/大気海洋庁(NCEP-R1)、欧州中期気象予報センター(ERA-40)、およびJRA-25のものを用い、領域平均の精度はある程度高いとの前提から、研究対象地域のベトナム・メコンデルタ域で平均し、再解析間で、加重係数をここでの推定パラメータの1つとして更に加重平均した。なお日照時間その他の気象要素の観測値は、ベトナム気象局観測所点から1979~2006年について、Global Summary of the Dayから、日照時間を除くものを

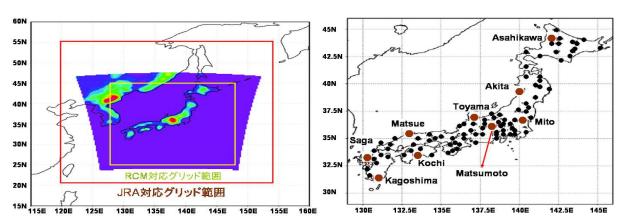
 $1978 \sim 2007$ 年について、さらにクーロン稲研究所 (CLRRI) との共同観測データから、日射量観測値を $2006 \sim 2007$ 年の14ヶ月間について、それぞれ得た。

上記の経験式と経験的複合式、補正式のパラメータ値の事後分布はベイズ推定のアルゴリズムの一種であるマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)によって得た。MCMCは対象とする系全体の最適化を図ることが可能で、ここでは3種類の日射量推定値が概ね一致するパラメータの事後分布を推定した。較正期間を1979~1990年の12年間、検証期間を1991~2001年の11年間とし、日別値および月別値を対象として補正精度を評価した。そして上記全球再解析データを用い、日最高気温(TX)・日最低気温(TN)・TM、日積算PR、日積算SR、RH、地上風速およびSLPの8要素を推定対象とした。評価に際しては、検証期間11年間の日別観測値と補正値との間の決定係数および2乗平均平方根誤差(RMSE)を用いた。

- 2) CDFを用いたバイアス補正方法
 - ここで用いたCDFを用いるバイアス補正法は、以下の通りである。
- a. 観測値と対象モデル現在値を日付順に並べ、観測値が欠測の場合は当該日のモデル値を除く。
- b. 観測値とモデル現在値をそれぞれ昇順で並べ替え、おのおの経験的なCDFを構築する。
- c. 観測値から同順位のモデル現在値を差し引き、差分(モデル誤差)を得る。
- d. 補正したモデル現在値を日付順に並べ替える。 このCDF法では、観測現在値のCDFと補正したモデル現在値のそれとが完全に一致する。

3) 多変量重回帰(MMLR)法

西森・鬼頭 $(2002)^3$ およびNishimori and Kitoh $(2006)^4$ の方法を拡張し、東アジア域の循環場(図(5)-1左)と日本の気象官署128地点(図(5)-1右の \bullet)の気候要素との正準相関解析(CCA)を行う。次に、得られた循環場の時間変動係数より地上気象要素を推定する。ここで解析期間は、おおむね全データ対象期間を2分し、検証期間をハインドキャストまたはフォアキャスト期間として取る。説明変数としての使用要素はSLP、850hPa高度東西風(U850)、南北風(V850)ならびに比湿(Q850)、および700hPa高度の気温(T700)である。気温については、大気層の一定範囲をカバーする観点から他の要素よりも上層の値を用いている。この5要素を用いて、従属変数として



図(5)-1 (左) MMLR-SDにおける説明変数として用いる大気循環要素の範囲で、黄枠の範囲では制度が不十分であることから、本サブテーマでは主に赤枠の範囲を取った。(右)日本におけるダウンスケール対象地点。大気循環要素の範囲は広域(左図□)または本テーマでのRCM計算領域(左図□)とした。また、右図地点のうち●は、図(5)-9で示す推定誤差の比較を行った地点である。

Tm、SRおよび日積算降水量(Pr)を推定する。説明変数および従属変数それぞれに、まず主成分分析を適用した後にCCAを行う。ここで循環場と気候場の関係を表すために用いられる特異値分解解析でなくCCAを用いた理由は、本SDの特色である重回帰分析を用いた気象要素の再現に、各空間パターン成分の時間的独立性が必須のためである。

(2) 地域気候モデル出力の特性と統計的ダウンスケーリング結果との比較

1) CDF補正法によるDDとSDの相互比較

この手法による相互比較の模式図を、図(5)-2に示す。DDはJRA-25を境界条件として駆動された3機関の4つのRCMの時別出力値を、日別値と月別値に集計して比較に使用した。気象官署152地点に該当するRCMのSRは、最近隣の4格子点値の距離逆数加重平均値とした。次にSDでは、1995~2004年を学習期間としてJRA-25の日別値にCDF法を適用し、1985~1994年において、先に得られたCDFを用いて気象官署152地点における日別値を推定し、この後に1985~1994年を学習期間として1995~2004年をダウンスケーリングした。DDとの相互比較に当たっては、推定した日別値、およびそれを集計した月別値を使用した。比較方法としては、まずJRA-25と4つのRCMおよびSDとの比較を、次には、RCM出力にさらにSDを適用したものと、SDのみとの結果の比較を行う。またこれら4RCMと1SDについて、共通対象期間を1985~2004年とした比較を行った。

- 2) 多変量線形重回帰 (MMLR) 法を加えたDDとSDの相互比較
 - 1) での比較にMMLR法を加え、地点毎にRMSEを用いた現在気候再現性の比較を行った。

(3) 気候シナリオデータセットの作成と農業気候指標を用いた将来変化の不確実性

1) GCM等に要求する精度の提示

水稲生育モデルとして、農業環境技術研究所で開発された広域作物モデルPRYSBI(Process -based Regional -scale rice Yield Simulator with Bayesian Inference)を使用した。このモデルは同種の先行モデルSIMRIW(Horie et al., 1995) 51 と同じ構造だが、対象領域が都道府県単位のスケールに広域化されているのが特徴である。加えてベイズの定理に基づいて推定したパラメータの事後分布から、パラメータをサンプリングしつつ目的変数の確率密度関数(PDF)を推定するため、単年の時系列気候データから当該地域の出穂日および収量PDFを得ることができる。この特性を利用し本研究では、まずコントロール実験としてアメダスメッシュデータ(清野,1993) 61 の平年値を入力した。またGCMの出力を夏季平均TMと暖候期平均SRを対象に、それぞれ補正なし、TMのみ補正、SRのみ補正、両者補正で入力しそのモデルバイアスに応じた推定収量を得た。さらにサンプルの少なさを補うためバイアスを想定した気候改変実験として、コントロール実験で使用した気候値に仮想的なバイアスを加えた改変気候データを作成し、それぞれ対応する出穂日と収量のPDFを推定した。すなわち夏季平均TMには、平年値に-2で~+6でと1で刻みの9レベルを、暖候期SRには-20%~+15%まで5%刻みで8レベルの仮想バイアスを与えた計216サンプル(9TM×8SR×3地域)を用いた。

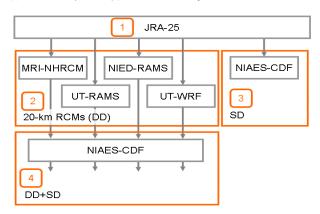
2)日本における地点・日別気候シナリオデータセット(ELPIS-JP)の作成

代表的なウェザージェネレータ(WG)法であるLARS-WG (Semenov, et al., 1998) 7 を用い、第3 期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP3)から得られた全球・月別データはCRUデータ (Mitchell and Jones, 2005) 8 のベースライン(1981-2000年)を用いてバイアスを補正した。日別観測気象データには農業環境技術研究所で整備され、アメダス地点における日射量・相対湿度が推定されて

いるMeteoCropDB(Kuwagata et al., 2011) 9 を用いた。そのうえでWGに月別値を入力し、気象要素間の統計的な関係性を保持した日別値を生成した。なお、月内変動(日別値の標準偏差)はベースラインと同じとした。またここで用いたWGでは、風速のみ他の気象要素と独立と仮定されている。作成した気候変化シナリオは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の排出シナリオに関する特別報告書(SRES)が示す3種類の排出シナリオ(A1B・B1・A2)に基づく、7カ国・10GCMによる気候変化予測を含む(表(5)-1)。

3) 農業気候指標を用いた将来変化の不確実性

気候変化に伴う欧州の農業気候環境の変化を描写するために開発された指標(Trnka et al., 2011)¹⁰⁾を参考に、主に日本の水稲を対象とした農業気候指標を提案し、ELPIS-JPデータセットの日別気象データから計算した。当該指標の計算にあたっては、作物の気候条件に対する応答が生育段階で大きく異なることから、1)でも用いた広域作物モデルPRYSBIを用いて指標計算に必要な生育段階を推定した。PRYSBIでは、パラメータ値の不確実性が、ベイズ逆解析から得られた事後確率分布として明示されており、この事後分布に従うパラメータ値をランダムに発生させることで、生育の不確実性を考慮することが可能である。本研究では、10組の異なるパラメータセットを農業気候指標の計算に考慮した。



No	GCM	Run	20C3M	A1B	B1	A2
1	BCCR	1	0	0	0	0
2	CGCM-T47	5	0	0	\circ	0
3	CGCM-T63	1	0	0	\circ	
4	FGOALS	3	0	0	\circ	
5	GISS	2	0	0	\circ	
6	INM	1	0	0	\circ	0
7	IPSL	1	0	0	\circ	0
8	MIROC-H	1	0	0	\circ	
9	MIROC-M	3	0	0	\circ	\circ
10	MRI	5		0_	0	0

図 (5)-2 **CDF**法を用いた**SD/DD**相互比較実験 表 (5)-1 データセットの作成に用いた排出シ の設定の模式図 ナリオと**GCM**

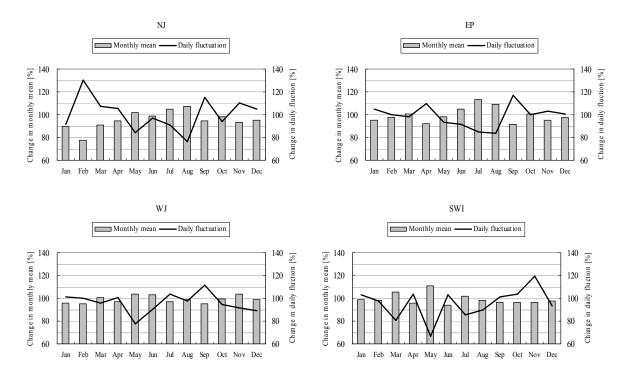
4. 結果及び考察

(1) 様々な統計的ダウンスケーリング手法の開発と発展

- 1) 日射量推定のためのSD手法
- a. 地点気象観測値を用いた日射量の推定とRCM出力に対する補間

SD手法の検証にはデータ期間が短い場合でも有効なクロスバリデーション法を、また推定精度の評価には、SR観測値と推定値との間の相関係数とRMSEを用いた。その結果、本研究で開発した日射量補間SD手法は、月平均値と日変動量の統計値、および地域性的差異の推定に高精度を示した。ただ本手法で得られた月平均値は観測値に比べやや過大で、その傾向は特に日本海側(北日本と西日本)の寒候期と南西諸島で強い。また本手法は日変動量の季節変化は精度良く再現しているが、日変動量は観測値に比べて1961~1968年の偶数年における全国平均で1.3 MJ/m²・day小さくなった。最終的に本手法をRCM20に適用し、温暖化によるSRの変化を推定した結果、SDは北日本・東日本では暖候期に増加、寒候期には減少し、特に東日本で10%以上とその増減が大きい(図





図(5)-3 日本4地域(NJ:北日本日本海側、EP:東日本太平洋側、WJ:西日本日本海側、SWI: 南西諸島)における将来の日射量変化。棒グラフは2081~2100年の平均値の、現在気候1981 ~2000年平均値に対する比(左軸)で、折れ線グラフはその月中の日変動量(右軸)を表す。

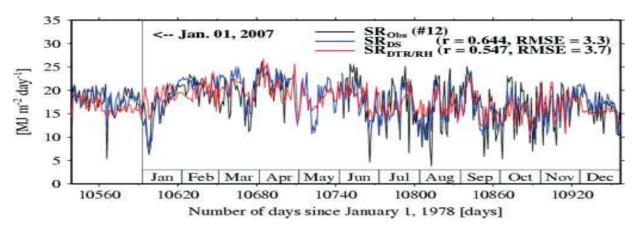
b. 全球再解析データを用いた日射量の補完手法

MCMCによって得られた3つの全球再解析データに関する加重パラメータ値は、日最高・最低・ 平均地上気温とSLPについてはERA40が最も重みが大きく、露点温度、相対湿度および可降水量に ついてはJRA-25が最も重みが大きくなった。またNCEP-R1は他の2つに比べて、いずれの要素でも 重みが小さかった。また推定されたSDは、日照時間を説明変数とする経験式と再解析データの補 正値でやや日変動が小さくなる傾向を示した。さらに経験的複合式では他の2つの推定値に比べて 日射量を過小評価しており、日変動が大きい傾向を示した。

ここで図(5)-4 (左)にはCLRRIにおけるSRの観測値(SR_{obs})、開発した全球再解析データ補完によるSDの推定値(SR_{DS})ならびにDTR/RHモデルによる推定値($SR_{DTR/RH}$)との、2006年11月~2007年12月の時系列比較を示す。この結果から、再解析値が利用可能な期間内では時間方向の補完が可能なことが示唆された。なお、複数の再解析値が確保できない期間についてはさらなる検討が必要である。ここでPrに関しては統計モデルの変更が必要であること、さらにベトナム水文・気象データセンターの日照時間データに系統的な測定誤差がある可能性が高いことが明らかとなったものの、上記の結果からSDにより各要素の日別値を比較的良く推定でき、またその推定値は準観測値として影響評価に提供することが可能となった。

2) CDFを用いたバイアス補正方法

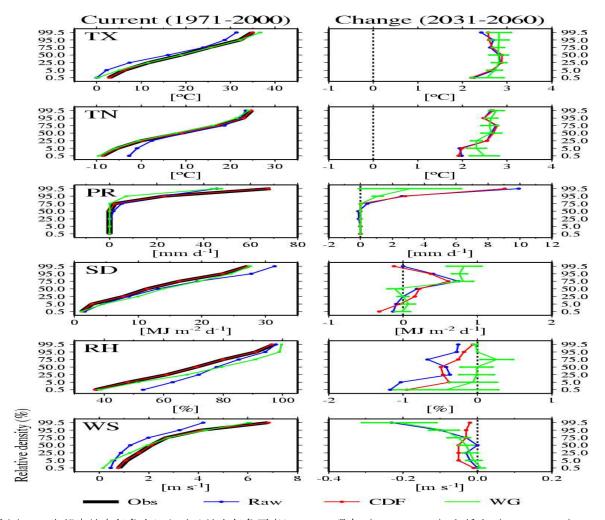
日本の気象官署15地点と中国の11観測点を対象に解析を行い、いずれの要素でもCDF補正の効果



図(5)-4 (左) ベトナム・メコンデルタ域CLRRIにおける観測値(SR_{obs}) と開発した全球再解析データ補完推定値(SR_{DS})、およびDTR/RHモデル推定値($SR_{DTR/RH}$)との、2006年11月~2007年12月の時系列の比較。

が確認され、本手法は親モデル(全球再解析またはGCM)に依存しない補正手法であることが示された。これは、親モデルの日別値から構築したCDFにおいてそのパーセンタイルに対する誤差の大きさは年代によって変化しない、という仮定に大きな問題がないことを裏付けている。ここで、補正によって月別値はTM・TX・TNとSLPではRMSEが小さくなり、また日変動は補正なしでも再現精度が高く、さらに補正による変化はほとんどない。またSD、RHおよびWSでは変動の再現性が向上し、RMSEも小さくなる傾向にあった。なお降水量では、日変動の再現性が向上してRMSEが高くなる場合と、日変動の再現性が低下してRMSEが小さくなる場合とがある。また補正によって日別値は、TM・TX・TNと地上気圧に関してはRMSEが小さくなるほか、補正によって変動の再現精度がわずかに低下する場合がある。さらにSR、RHおよびWSでは変動の再現性が向上し、RMSEも月別値と同様に小さくなる。ここで降水量では、変動の再現性が低下しRMSEが大きくなるとともにスキルスコアは大きく向上する。つまり、CDF補正による再現精度の向上は月別値と同様に日別値でも見られるが、要素によって補正効果の現れ方が異なることが示された。

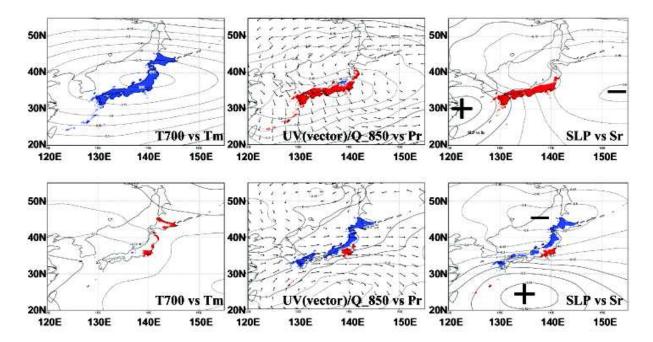
実際の地点気候シナリオの作成にあたっては、各要素について2種類の方法で作成した日別値からCDFを構築し、各パーセンタイル値の将来変化を計算した(図(5)-5)。また参考のため各気象官署における観測値と、地球シミュレータ上で開発されてきた大気・海洋・陸面結合大循環モデル(MIROC)から出力された未加工値も記載したが、MIROC未加工値のCDFは観測値と異なりTXには低温傾向、TNの低温側極値には高温傾向が見られ、また日PR極値が観測より少なく弱い雨の頻度が多い。また日射量には過大、相対湿度には乾燥日での加湿、地上風速には過小の傾向が見られる。一方、いずれの要素でもCDF補正法やWGから得られた日別値のCDFは観測値のそれと概ね一致し、SDによる翻訳精度は良好である。ただしWGでは日降水量の極値が観測より少ないことに加え、相対湿度にやや加湿、弱い風速の頻度が多いという傾向がある。



図(5)-5 宇都宮地方気象台における地上気象要素について現在(1971~2000) と将来(2031~2060) の日 データから作成したCDFパーセンタイル値。日最高気温(TX)、日最低気温(TN)、日降水量(PR)、日積 算日射量(SD)、相対湿度(RH)および地上風速(WS)の6要素についてそれぞれ、観測値、MIROC3.2-HIRES の直接出力値、CDF-SD(CDF)、およびWXGEN法によるSD(WG)の4手法による結果を併記。

3) 多変量重回帰(MMLR)法

図(5)-6にはJRA-25とアメダス気象データの正準相関解析(CCA)で得られた日本の循環場の変動のうち、特徴的な第1成分(CCA-1)および第4成分(CCA-4)の空間パターンを示す。まずCCA-1は冬季に卓越し、西高東低で冬型寒気が強い循環場パターンを示す。この場合、北日本および日本海側地域では降水または降雪となり、一方で太平洋側は寒い好天となる。次にCCA-4は梅雨末期に卓越し北太平洋高気圧が西に偏る循環場パターンで、関東と北日本太平洋側で高温となる一方、日本海側には湿舌による降水が見られる。ここでSRは関東地方を除いて全国的に少なく、2009年の夏に類似した循環場および天候のパターンである。この後、GCM等の温暖化実験で得られた循環要素をCCAの成分の形に変換し重回帰式に入力すれば、温暖化後の気候変化量が定まる。



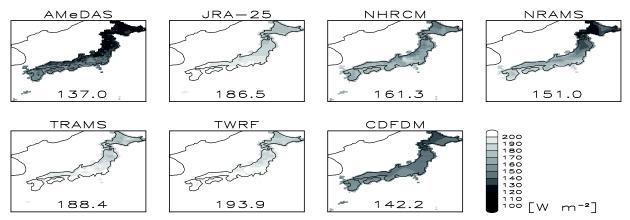
図(5)-6 CCA解析で得られた東アジア循環場の変動と日本の天候の関連において特徴的な(上) 第1成分(CCA-1) および(下) 第4成分(CCA-4) の空間パターン。 それぞれ左から、T700とTM, UVQ850とPRおよびSLPとSRの関係のみを示す。日本域における淡(濃)色域は、TMとSRでは正(負)偏差、降水量では負(正)偏差を、それぞれ表す。

(2)地域気候モデル出力の特性と統計的ダウンスケーリング結果との比較

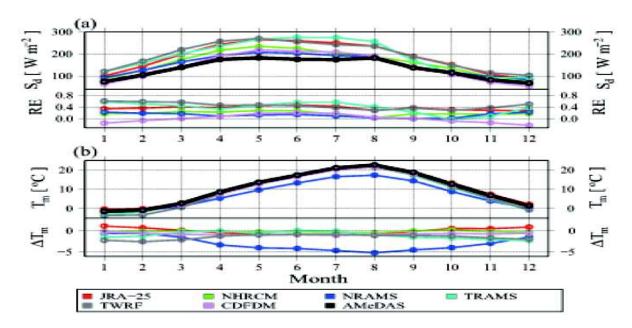
1) CDF法を用いたSDとDDの比較

このCDF手法による現在気候再現性の具体例として、本手法、4つのRCM、JRA-25再解析データおよび観測値(アメダス日照時間変換日射量)について、現在気候の20年(1985-2004)平均値における空間分布の比較および陸域平均日射量の比較を行った結果、まず全てのRCMはSRを3~4割も過大評価していることがわかった(図(5)-7)。またTMとSRに関する季節変化傾向の比較(図(5)-8)から、RCMの多くはSRの季節変化は再現しているものの、量的にはやはり過大評価する傾向にあり、絶対値の観点からはCDF-SD法が観測値と比較的に良い対応を示すことが明らかとなった。SRの過大評価から推定される高温バイアスが起こっておらず、気温は観測値に近いというアンバランスをRCMグループに伝えたほか、当面はRCMの誤差補正を行って影響評価に利用する。

また他の要素についてもこの手法によりそれぞれ観測値との比較を行った場合、月平均気温では、DDのバイアスは境界条件であるJRA-25のそれに比べ、おおむね小さかった。一方、月降水量では、DDのバイアスはJRA-25のそれよりも常に小さい。つまり降水の多い月における精度の改善が、いずれのRCMでも見られる。ここで月平均気温と月降水量では、SDの再現精度はDDと同程度か、やや良い場合が多い。またRCM出力値にさらに本SDを組み合わせると、どのRCMにおいても、RCM単独の場合よりも再現精度は向上する。気温および降水量に関する極端指標についても同様の解析を行ったが、いくつかのRCMと本SDではおおむねその空間分布を再現している。



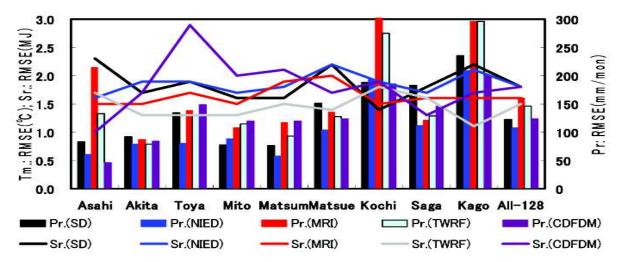
図(5)-7 本サブテーマで計算されたRCMとSDによる20年(1985~2004年)平均の下向き短波放射量の分布およびアメダス日照時間補正値(左上)との比較。各図の数値は領域平均値である。



図(5)-8 JRA-25, 複数のRCM (NHRCM, NRAMS, TRAMS, TWRF) および統計モデルCDFDMから得られた現在気候の再現性評価図。(a) SR、(b) TMの季節変化(各図の上側)と,各々のアメダス値に対するSRの相対誤差および気温差(各図の下側)をそれぞれ示す。

2) 多変量線形重回帰 (MMLR) 法によるDDとSDの相互比較

図(5)-9には、得られた地上気候要素について月平均し、夏季(6~8月)において観測値に対する平方根平均二乗誤差(RMSE)を求め、RCMの同様の解析と比較して示したものである。これによるとSDを適用した日射量は、RCMをバイアス補正した値よりもさらに誤差が小さいことから、月単位の値ではMMLR-SDも有効であることがわかる。一方、降水量についてのSDによる誤差は、夏季ではやはりRCMには及ばないものの、冬季ではRCMよりも良い場合もある(図略)。ここで留意すべきは、各RCMの降水量にはもともとバイアス補正はしていないことである。また各RCMによる降水特性の違いを考慮する必要があるなど、上記1)でのCDF法による比較結果も含め、この段階では単にSDとRCMの優劣をつけるものではない。



図(5)-9 MMLR法によるSD、および本テーマの 3 RCMによる、それぞれ観測値に対する推定誤差RMSE の地点間比較。回帰式作成と独立した検証期間 (1995~2007年) における夏季降水量 (棒グラフ)、日射量 (折れ線グラフ) を示す。地点うち略されているものは、Asahi; 旭川、Toya; 富山、Matsum; 松本、Kago; 鹿児島であり、またAll-128は解析全128地点での平均を示す。

(3) 気候シナリオデータセットの作成と農業気候指標を用いた将来変化の不確実性

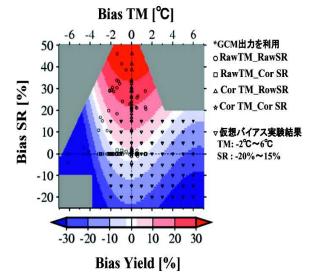
1) GCM等に要求する精度の提示

図(5)-10は、夏季平均TMと暖候期SRのバイアスが与えられた場合の、地域平均したコメ推定収量平年比の分布である。白色域は20年平均した推定収量のバイアスが統計値に比べて62.5%以内と、

過去の収量変動傾向から妥当とした範囲であるが、その範囲は狭く、収量を再現できる気候バイアスの範囲は小さいと考えられる。この範囲内には、a.夏季平均TMと暖候期SRのバイアスがともに小さい場合と、b.TMのバイアスにかかわらず暖候期SRの過大評価のために収量バイアスが小さい場合がある。収量モデルが正確だと仮定した場合、この2ケースは同等でない。それゆえ夏季平均TMでは±0.6℃、暖候期SRでは±3%が、それぞれ許容バイアス範囲となる。またに夏季平均TMと暖候期SRでこの許容範囲に収まるGCMは、解析に用いた11モデルの内4つであった。

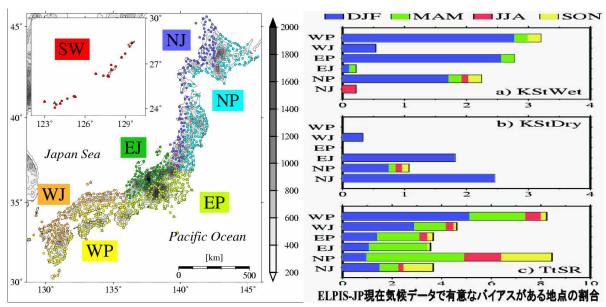
2) 日本における地点・日別気候シナリオデータセット(ELPIS-JP)の作成

CMIP-3データセットの内、A1BとB1では最大で23予測、A2では16予測を含むこれらの予測に基づく7気象要素(日最高・最低・平均気温、降水量、日射量、相対湿度、風速)の日別値が、



図(5)-10 GCM出力の夏季平均TMと暖候期 SRのバイアスを考慮して推定した日本地域 平均(北・東・西日本)水稲収量の平年収 量に対するバイアス(%)の分布。カラー域 は20年平均収量に対する推定誤差(%)で、灰 色域は計算外。ドットは人工的に与えたバ イアスを入力した結果。

図(5)-11(左)に示す820地点において利用可能である。作成した気候変化シナリオは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC)の排出シナリオに関する特別報告書 (SRES)が示す3種類の排出シナリオ (A1B・B1・A2)に基づく、7カ国の10GCMによる気候変化予測を含む (表(5)-1)。ここで、コルモゴロフーミルノフ検定 (K-S test)を用いて本データセットにおける現在気候に有意なバイアスが見られる地点を検出した結果、図(5)-11(右)に示すように冬季太平洋側の連続降水日数 (a)と日本海側の連続無降水日数 (b)に有意差、つまり再現性の問題が残るほか、日射量についても冬季・春季の再現性には留意する必要があることがわかった。



図(5)-11 (左) ELPIS-JPデータに含まれるアメダス(〇) および気象官署(\blacktriangle) 地点で、略語はそれぞれ北日本(N)、東日本(E)ならびに西日本(W)に対するJ(日本海側)ならびにP(太平洋側)および南西諸島(SW)である。(右) ELPIS-JPでK-S testの結果により現在気候が再現されていないと判断された割合で、a) 連続降水日数、b) 連続無降水日数、および c) 日射量。

また本シナリオの利用上の注意点としては、作成にWGを使用したため、日別値の地点間変動は独立である。したがって長期間の統計値に加工しない限り空間分布を議論することは難しく、メッシュデータに加工する場合にも、単一メンバーの日別値でなく多くのメンバーを用いた統計加工値を空間内挿する必要がある。また本シナリオは要素間の関係性には統計的妥当性があるが、大気力学的な妥当性には重点が置かれていないため、水収支などの物理的な整合性が要求される解析では注意して使用する必要がある。さらに50のアンサンブルメンバーを持つとは言え、不確実性解析においてはより統計的な意味を持たせるために、リサンプリング法等の併用を推奨する。3)農業気候指標を用いた将来変化の不確実性

計算された農業気候指標の例として、札幌における水稲出穂期前後の最高気温を図(5)-12 に示す。出穂期前後で平均した日最高気温には5 $^{\circ}$ С以上の予測幅があるが、今後コメ生産の主力と予想される北海道では、より気温が上がりやすい SRES 排出シナリオのもとでさえ今世紀末に33 $^{\circ}$ という高温ストレスに達する可能性は0.5%という低い確率にとどまる。一方、現在の米どころ新潟県や首都近郊の農業県茨城など東日本以西では、この高温ストレスに達する可能性はかなり高

くなることが予想される (図略)。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

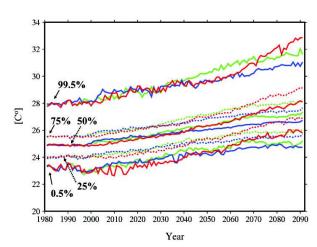
日本における地点・日別気候シナリオデータセット(ELPIS-JP)の作成においては、温暖化予測における不確実性の内、排出シナリオ、全球気候モデル(GCM)の相違、および気候の年々・季節変動による不確実性を考慮できることが特徴である。また本シナリオの作成に当たっては、これまで気候シナリオとして作成されていなかった農業気象関連要素である湿度と地上風速についても、検証の上でダウンスケーリング可能となったことが特筆される。

(2) 環境政策への貢献

本課題において開発したELPIS-JPシナリオは、 既に農林水産省気候変動対応プロジェクトなら びに文部科学省気候変動適応研究推進プログラ ム等のほか、米国National Science Foundationにお ける海外における日本研究でも用いられている 等、その利用は急速に拡がっている。

6. 国際共同研究等の状況

CMIP-3における複数GCMおよび本テーマにおける複数RCMに基づいたWG法による日本の地点・日別気候変化シナリオの作成に係る国際共同研究、Dr. M. Semenov(Rothamsted Research, UK)、平成22年度に駐日英国大使館から渡航費用補助による相互訪問と研究打合せを行い、平成23年度に気候変化シナリオについての共著論文(下記(1)の14))を作成した。



図(5)-12 ELPIS-JPで得られた札幌における水 稲開花期間平均の日最高気温の時系列。それ ぞれSRESシナリオ別を表す3色(赤色がA2, 緑色がA1B,青色がB1)からなる5組の線は, 気温が低い方からそれぞれ0.5%,25%,50%, 75%,99.5%の確率でそれ以下の気温が出現す るパーセンタイル値を示す。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文(査読あり)>

- 1) Iizumi, T. M. Nishimori and M. Yokozawa (2008): Combined equations for estimating global solar radiation: Projection of radiation field over Japan under global warming condition by statistical downscaling. J. Agric. Meteorol., 64, 9-23.
- 2) 西森基貴(2008):地球温暖化の地域総合的な影響評価への取り組みー高知県における豪雨災害と農業生産の視点からー. 四万十・流域圏学会誌,8(1),23-28.
- 3) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2009): Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. Agric. Forest Met., 149, 333-348.

- 4) Okada, M., T. Iizumi, M. Nishimori and M. Yokozawa (2009): Mesh climate change data of Japan Ver. 2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2J. Agric. Meteorol., 65, 97-109.
- 5) 西森基貴,桑形恒男,石郷岡康史,村上雅則(2009):都市化の影響を考慮した近年の日本に おける気温変化傾向とその地域的・季節的な特性について.農業気象,65,221-227.
- 6) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2009): Development of impact functions on regional paddy rice yield in Japan for integrated impact assessment models. J. Agric. Meteorol., 65, 179-190.
- 7) 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. Met. & Clim., 49, 574-591.
- 8) Iizumi, T., K. Ishida, M. Yokozawa and M. Nishimori (2010): Potential productivity of local paddy rice yield variation using a crop model with local areal information. Agricultural Information Research, 19, 36-42.
- 9) 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.
- 10) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2010): Probabilistic evaluation of climate change impacts on paddy rice productivity in Japan. Climatic Change, doi: 10.1007/s10584-010-9990-7.
- 11) Iizumi, T., M. Nishimori, M. Yokozawa, A. Kotera and N. D. Khang (2011): Statistical downscaling with Bayesian inference: Estimating global solar radiation from reanalysis and limited observed data. Int. J. Clim., doi: 10.1002/joc.2281.
- 12) Iizumi, T., M. Nishimori, K. Dairaku, S. A. Adachi and M. Yokozawa (2011): Evaluation and intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present-day climate: strengths and weaknesses of dynamical and bias-correction-type statistical downscaling methods. J. Geophys. Res., 116, D01111, doi:10.1029/2010JD014513.
- 13) 村上雅則,桑形恒男,石郷岡康史,西森基貴(2011):農耕地モニタリング地点の選定とその 気温変化傾向に関する地域的な特性.生物と気象,11,41-50.
- 14) Iizumi, T., M. A. Semenov, M. Nishimori, Y. Ishigooka and T. Kuwagata (2011): ELPIS-JP: A dataset of local-scale daily climate change scenarios for Japan. Phil. Tran. Roy. Soc. Ser. A., 370, 1121-1139.
- 15) Iizumi, T. and M. Nishimori (2011): Improvements to statistical climate downscaling simulations by incorporating the APHRO_JP Advanced Gridded Daily Precipitation Dataset. Global Environmental Research, 15, 101-108.
- 16) Yoshida, R., T. Iizumi and M. Nishimori (2012): Inter-model differences in the relationships between downward shortwave radiation and air temperatures derived from dynamical and statistical downscaling models. J. Met. Soc. Japan, 90B, 75-82.
- 17) Iizumi, T., M. Nishimori and F. Uno (2012): Climate downscaling as a source of uncertainty in projecting local climate change impacts. J. Met. Soc. Japan, 90B, 83-90.

18) Uno, F., T. Iizumi and M. Nishimori (2012): Time trends and variations in mean and accumulated solar radiation for the ripening period of paddy rice in Kyushu for 1979-2007.

J. Agric. Meteorol., 68, 69-76.

〈その他誌上発表(査読なし)〉

- 1) 西森基貴,木村富士男,飯泉仁之直,横沢正幸(2007):地球温暖化にともなう異常気象・集中豪雨などの気候学的な予測のための地域気候モデルによる現在気候再現実験.第15回地球環境シンポジウム講演論文集,177-182.
- 2) 西森基貴,長谷川利拡,桑形恒男,石郷岡康史,眞崎良光,飯泉仁之直,村上雅則(2009): 2009年夏季の低日照と水稲作況の低下-中四国地域の事例を含めて-.中国四国の農業気象,(22),68-69.
- 3) 西森基貴(2010):地球規模気候変動(温暖化)と流域圏.四万十・流域圏学会誌,9(2),35-38.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 飯泉仁之直,横沢正幸,西森基貴(2007):マルコフ連鎖モンテカルロ法による広域水稲収量 モデルのパラメータ推定.農業環境工学関連学会2007年合同大会,府中,2007年9月.
- 2) 西森基貴,飯泉仁之直 (2007):温暖化影響評価のためのGCM出力循環場からの日射量推定手 法の開発-GCMのバイアス補正と統計的ダウンスケーリングー.日本気象学会2007年度秋季大 会,札幌, 2007年10月.
- 3) 飯泉仁之直,西森基貴,横沢正幸(2007):温暖化による日射環境変化推定に用いる統計的ダウンスケーリング手法の構築.日本気象学会2007年度秋季大会,札幌,2007年10月.
- 4) 西森基貴,飯泉仁之直(2007):温暖化影響評価のための統計的ダウンスケーリング.気候影響・利用研究会シンポジウム「地球温暖化による東アジアの気候変化の研究へむけて」,つくば,2007年11月.
- 5) 西森基貴 (2007): 気候モデルによる温暖化予測とそのダウンスケーリング. 第28回農業環境 シンポジウム,東京,2007年12月.
- 6) 岡田将誌,飯泉仁之直,西森基貴,横沢正幸(2008):気候変化が日本へ及ぼす影響:SRES排出シナリオに基づく気候変化メッシュデータ.日本農業気象学会2008年度全国大会,下関,2008年3月.
- 7) 飯泉仁之直,西森基貴,横沢正幸 (2008):気候モデルバイアスに対する影響評価モデルの感度分析.日本農業気象学会2008年度全国大会,下関,2008年3月.
- 8) Nishimori, M. and T. Iizumi (2008): Estimation of future regional-scale solar radiation change in Japan by using a statistical downscaling method. International Symposium on Agricultural Meteorology, Shimonoseki, Japan, March 2008.
- 9) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2008): Impact Function of Prefectural-scale Paddy Rice Yield in Japan for the Asia-Pacific Integrated Model. International Symposium on Agricultural Meteorology, Shimonoseki, Japan, March 2008.
- 10) 西森基貴, 横沢正幸, 飯泉仁之直, 木村富士男 (2008):地球温暖化の地域総合的な影響評価 への取り組み-高知県における気象災害と農業生産の視点から-. 四万十・流域圏学会第8回

- 学術研究発表, 土佐山田, 2008年5月.
- 11) 西森基貴,桑形恒男,石郷岡康史,村上雅則 (2008):都市化影響や周辺土地利用とその変化 を考慮した日本の農耕地を代表できる気象観測点の選定.2008年日本地理学会秋季学術大会, 盛岡,2008年10月.
- 12) 西森基貴, 飯泉仁之直 (2008): 温暖化農業影響評価のための日射量推定-RCMと統計手法を 併用したダウンスケーリングー. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 13) 飯泉仁之直, 西森基貴, 横沢正幸, 小寺昭彦, N. D. Khang (2008):ベイズ推定と統計的ダウンスケーリングを併用したベトナム・メコンデルタ域の全天日射量の推定. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 14) 飯泉仁之直,横沢正幸,西森基貴,林陽生,木村富士男(2008):観測及び領域気候モデルの時別データを用いた地域スケールでの水稲共済金額の推定.日本気象学会2008年度秋季大会,仙台,2008年11月.
- 15) Iizumi, T., M. Nishimori, M. Yokozawa, A. Kotera and N. D. Khang (2008): Estimation of daily global solar radiation in Vietnamese Mekong Delta area: a combinational application of statistical downscaling method and Bayesian inference. The AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2008.
- 16) Nishimori, M. and T. Iizumi (2009): A statistical downscaling for regional-scale solar radiation change over Japan by using both global reanalysis meteorological datasets and the outputs of multi-regional climate models. International Symposium on Agricultural Meteorology, Koriyama, Japan, March 2009.
- 17) Iizumi, T., M. Nishimori, M. Yokozawa, A. Kotera and N. D. Khang (2009): Estimation of daily global solar radiation in Vietnamese mekong Delta area: a combinational application of statistical downscaling method and Bayesian inference. International Symposium on Agricultural Meteorology, Koriyama, Japan, March 2009
- 18) Yokozawa, M., T. Iizumi, M. Nishimori, Y. Hijioka, K. Takahashi and H. Harasawa (2009): Assessing climate change impacts on rice production in Japan under stabilization levels of atmospheric GHG concentration. International Symposium on Agricultural Meteorology, Koriyama, Japan, March 2009.
- 19) 西森基貴,桑形恒男,石郷岡康史,村上雅則 (2009):気象観測点周辺における土地利用とその変化を考慮した近年の高知県および四国地方における気温変化傾向.四万十・流域圏学会第9回学術研究発表会,南国,2009年5月.
- 20) 西森基貴, 飯泉仁之直 (2009):全球再解析データおよび地域気候モデルの出力を用いた統計 的ダウンスケーリングによる地域温暖化シナリオ作成.水文・水資源学会2009年度研究発表 会,金沢,2009年8月.
- 21) 飯泉仁之直,西森基貴,澤野真治,横沢正幸(2009):累積密度分布に基づいた気候モデル日別データの補正.農業環境工学関連学会2009年合同大会,東京,2009年9月.
- 22) 西森基貴,桑形恒男,石郷岡康史,村上雅則 (2009): 気象観測点周辺における土地利用とその変化を考慮した近年の日本各地域における気温変化傾向日本地理学会2009年秋季大会,沖縄西原,2009年10月.

- 23) Nishimori, M. and T. Iizumi. (2009): A statistical downscaling for regional-scale solar radiation change over Japan by using global reanalysis meteorological datasets. The Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan, November 2009.
- 24) Iizumi., T., M. Nishimori and M. Yokozawa (2009): Diagnosis of climate-model bias in summer temperature and warm season insolation for simulating regional paddy rice yield in Japan. The Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan, November 2009.
- 25) 西森基貴, 飯泉仁之直 (2009): 再解析データを用いた統計的/力学的ダウンスケーリング結果の相互比較. 日本気象学会2009年度秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 26) 飯泉仁之直,西森基貴(2009):3機関RCMと統計的ダウンスケーリングとの比較:現在気候の月平均気温・月降水量.日本気象学会2009年度秋季大会,福岡,2009年11月.
- 27) Nishimori, M. (2010): Regional climate change scenario for global warming impact studies on agricultural production in Japan and other Asian region. Workshop on Natural Resources and Livelihoods in Rural Asia: Bridging the Gap for Global Sustainability, Cochin, India, January 2010.
- 28) Iizumi, T. and M. Nishimori (2010): A comparison of dynamical and statistical downscaling methods participated in the S-5-3. 3rd Mini-International Workshop on Downscaling, Tsukuba, Japan, January 2010.
- 29) Nishimori, M. and T. Iizumi. (2010): Preliminary validation for statistical downscaled surface climate elements compared with dynamical downscaled data over Japan. Workshop on Dynamical Downscaling, Tsukuba, Japan, January 2010.
- 30) 西森基貴,長谷川利拡,桑形恒男,石郷岡康史,眞崎良光,飯泉仁之直,村上雅則(2010): 2009年水稲作況低下と夏季の天候およびその長期的変動.日本農業気象学会2010年度全国大会,名古屋,2010年3月.
- 31) 西森基貴,横沢正幸,小寺昭彦,飯泉仁之直,澤野真治,岡田将誌,石郷岡康史,岡本勝男, 桑形恒男,長谷川利拡,鳥谷均(2010):温暖化の食料生産影響と風土・環境保全-日本・ア ジアにおける事例と展望,日本地球惑星科学連合,千葉,2010年5月.
- 32) Iizumi, T., M. Nishimori and M. Yokozawa (2010): Expected enhancement of statistical downscaling method induced by a use of gridded daily precipitation dataset. Japan Geoscience Union, Chiba, Japan, May 2010.
- 33) 西森基貴 (2010): 地球温暖化の予測とその影響・適応研究のはざまで-気温上昇への都市の 影響・温暖化予測情報のダウンスケーリングとコメ生産-. 四万十・流域圏学会第10回学術 研究発表会, 高知, 2010年5月.
- 34) Iizumi, T., M. Yokozawa and M. Nishimori (2010): Modeling interannual variation of crop productivity: Towards global crop forecasting. 2010 International Climate Change Adaptation Conference, Gold Coast, Australia, June 2010.
- 35) Nishimori, M. and T. Iizumi (2010): Comparison of statistical and dynamical downscaling methods: precipitation and solar radiation over Japan. WATER2010 symposium, Quebec,

- Canada, July 2010.
- 36) 西森基貴, 飯泉仁之直 (2010):同じ境界条件による統計的/力学的ダウンスケーリング結果 の日本域における推定誤差検証.日本気象学会2010年度秋季大会,京都,2010年10月.
- 37) 飯泉仁之直,西森基貴(2010):統計的ダウンスケーリングによる地点・日別気候変化シナリオデータセット.日本気象学会2010年度秋季大会,京都,2010年10月.
- 38) Iizumi, T., M. Yokozawa, G. Sakurai and M. Nishimori (2010): Simulating large-scale cropyield by using perturbed-parameter ensemble method. AGU Fall Meeting. San Francisco, USA, 2010.
- 39) Nishimori, M. and T. Iizumi (2011): MMLR-SD for multi-surface climate elements over Japan by using the general circulation field from GCMs and RCMs. Workshop on Dynamical Downscaling over Japan. Tsukuba, Japan, January 2011.
- 40) Iizumi, T. and M. Nishimori (2011): Intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present-day and future: Dynamical and bias-correction-type statistical downscaling methods. Workshop on dynamical downscaling over Japan. Tsukuba, Japan, January 2011.
- 41) 西森基貴 (2011): 地形の複雑な高知県における統計的ダウンスケーリング手法MMLRの適用. 日本農業気象学会2011年全国大会, 鹿児島, 2011年3月.
- 42) Iizumi, T. and M. Nishimori (2011): A comparison of dynamical and statistical downscaling methods: Daily precipitation indices over Japan in present-day climate. International Symposium on Agricultural Meteorology, Kagoshima, Japan, March 2011.
- 43) 西森基貴 (2011): 多変量線形重回帰ダウンスケーリングの適用と地域気候モデルとの結果比較. 水文・水資源学会2011年度研究発表会,京都,2011年8月.
- 44) 吉田龍平, 西森基貴, 飯泉仁之直 (2011): 力学的ダウンスケール手法と統計を用いた下向き 短波放射量の比較-4力学モデルと1統計モデル-. 水文・水資源学会2011年度研究発表会, 京都, 2011年8月.
- 45) Nishimori, M., T. Iizumi and R. Yoshida (2011): Comparison of the current climate reproducibilities of statistical and dynamical downscaling methods. Third International Workshop on Climate Downscaling, Tsukuba, Japan, October 2011.
- 46) Iizumi, T., M. A. Semenov, M. Nishimori, Y. Ishigooka and T. Kuwagata (2011): ELPIS-JP: A dataset of local-scale daily climate change scenarios for Japan Third International Workshop on Climate Downscaling, Tsukuba, Japan., October 2011.
- 47) Yoshida, R., T. Iizumi and M. Nishimori (2011): Inter-model differences in the relationships between downward shortwave radiation and air temperature derived from dynamical and statistical downscaling models. Third International Workshop on Climate Downscaling, Tsukuba, Japan, October 2011.
- 48) 西森基貴,飯泉仁之直,吉田龍平(2011):日本域における同じ境界条件による統計的/力学的ダウンスケーリング結果の比較.日本気象学会2011年度秋季大会,名古屋,2011年11月.
- 49) 飯泉仁之直, 横沢正幸, 西森基貴, 吉田龍平 (2011): 日本の地点・日別気候データセットから得られた農業気候指標の将来変化. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.

- 50) 吉田龍平, 飯泉仁之直, 西森基貴 (2011): 力学モデルと統計モデルによる現在気候における 下向き短波放射量と気温の相互比較日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 51) Yoshida, R., T. Iizumi and M. Nishimori (2011): Intercomparison of downward shortwave radiation and surface air temperatures derived from dynamical and statistical downscaling method. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San-Francisco, USA, December 2011.
- 52) Iizumi, T., M. Yokozawa, G. Sakurai and M. Nishimori (2011): Climate and management contributions to recent trends in U.S. maize yield derived from a large-area crop model and data assimilation. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San-Francisco, USA, December 2011.
- 53) 吉田龍平,西森基貴,飯泉仁之直,大澤剛士(2012):近年の耕作放棄地拡大が気温場に与える影響-四国を例として-.日本農業気象学会2012年度全国大会,堺,2012年3月.
- 54) 飯泉仁之直,横沢正幸,西森基貴,吉田龍平(2012):日本の地点・日別気候変化シナリオ データおよび農業気候指標の将来変化.日本農業気象学会2012年度全国大会,堺,2012年3月.
- 55) 西森基貴(2012):農業気象分野における温暖化研究と地方連携に向けた成果の発信.日本 農業気象学会公開シンポジウム「地域からの脱温暖化とエネルギー転換の将来ビジョン」, 堺,2012年3月.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 飯泉仁之直: どうなるどうする温暖化座談会, 日経エコロジー, 2009年4月号, 日本経済新聞社

(6) その他

- 1) 飯泉仁之直. 2008年度農業環境技術研究所若手研究者奨励賞「気候シナリオのダウンスケー リングと地球温暖化による農作物の影響評価への適用」. 2008年11月28日授与.
- 2) 飯泉仁之直.「ASEANにおける気候利用のためのトレーニングワークショップ」にマレーシア気象局および日本国気象庁の要請により講師として派遣. 2009年10月5日~9日.
- 3) 飯泉仁之直.「Global Partnership Fund: UK-Japan Collaboration Development Awards: Crop Modelling」により英国Leeds大学に派遣. 2010年11月3日~10日.

8. 引用文献

- 1) 気象庁(2005): 『地球温暖化予測情報第6巻』. 58p.
- 2) 近藤純正編(1994):『水環境の気象学』. 朝倉書店. 350p.

- 3) 西森・鬼頭(2002):統計的ダウンスケーリング手法による温暖化時の夏季東アジア域の降水量予測.第6回水資源に関するシンポジウム論文集,489-494.
- 4) Nishimori, M. and A. Kitoh (2006): Estimation of future regional-scale heavy rainfall change over Japan and East Asia under the global climate change by using the statistical downscaling method. Proceedings of the International Symposium on Disaster Management, 10-12 Mar. 2006, Kochi, Japan, p.8 (in CD-ROM).
- 5) Horie, T. et al. (1995): The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In: Matthews P. B. et al. eds., Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. CAB International, Wallingford, UK, 51-66.
- 6) 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,48,379-383.
- 7) Semenov, M. A. et al. (1998): Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, Clim. Res., 10, 95-107.
- 8) Mitchell, T. D. and P. D. Jones (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. Int. J. Climatol., 25, 693-712.
- 9) Kuwagata, T. et al. (2011): MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. J. Agric. Meteorol., 67, 297-306.
- 10) Trnka, M. et al. (2011): Agroclimatic conditions in Europe under climate change. Global Change Biology, 17, 2298-2318.

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (6) 水災害影響評価モデルのための統計的ダウンスケーリング手法の開発

東京工業大学

鼎 信次郎

〈研究協力者〉

東京工業大学

井芹 慶彦・渋尾 欣弘・Sun Fubao

平成19~23年度累計予算額 55,282千円 (うち、平成23年度予算額 10,941千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 将来の水災害評価を行うための有望な手段の1つとして、河川の流量や土壌の水分等を計 算できる数値モデル(水文モデルや陸面モデル)の入力値として、気候モデルが予測した将来の 気温や降水量を用いるという方法がある。しかし、気候モデルの出力は影響評価に用いる水文・ 陸面モデルの入力として用いるには時間・空間解像度が十分ではないと同時に、実際の降水量や 気温と比べて系統的な誤差(バイアス)が含まれている。従って、水災害の影響評価を行うため にダウンスケーリングを行う際には、ダウンスケーリングされたデータを陸面モデルの入力とし て用いることができるように、その誤差を補正することは重要である。そこで本サブテーマでは 水災害の影響評価に強く関わる、気候モデルの降水量出力に特に着目し、モデル出力の系統的誤 差を補正する新たな補正手法の提案や、各種補正手法による補正結果の比較等を行った。その結 果、バイアス補正手法および用いる気候モデルの相違は、降水量の将来変化傾向に無視できない 影響を与え得ることが示された。特に、平均値と比べて、分散や降り続く大雨(5日合計降水量)の 将来変化は、用いる地域気候モデルおよびバイアス補正手法の違いによる影響をより強く受け得 ることが明らかになった。また、本研究では降水量の変動を幾つかの時間スケール別に分解し、 その変動の時間スケール毎に変動の強さのバイアスを補正する手法を提案することで、降水量の 時間的変動特性という新たな観点から降水量のバイアス補正を行った。更に、バイアス補正によ って日降水量の空間分布の再現性が向上するものの、用いる地域気候モデルおよび補正手法によ って、得られた降水量データの日降水量の空間分布の発生頻度は、各バイアス補正手法およびモ デル間で必ずしも一致するわけではないことが示唆された。

[キーワード] 統計的ダウンスケーリング、統計的バイアス補正、大雨、空間分布、離散ウェーブレット解析

1. はじめに

地球温暖化が引き起こしうる問題の1つとして、水循環の変化が指摘されている。水循環の変化 は洪水や渇水の発生の変化といった形で社会に大きな影響を及ぼし得る。将来の陸上の水循環変 化を予測するための有効な手段として、気候モデルが予測した将来の降水量や気温などを、河川 の流量や土壌の水分などを計算できる影響評価モデル(陸面モデルや水文モデル)へ入力するという方法がある。しかし、国内の流域や自治体などを対象とするには、気候モデルの出力は時間・空間解像度が必ずしも十分とはいえず、また、全球気候モデルの出力のみならず、地域気候モデルの出力も時間・空間解像度が必ずしも十分とはいえないことがある。そのため、気候モデル出力の時間・空間解像度を統計的手法によって細かくする技法(統計的ダウンスケーリング)が影響評価を行う際にはしばしば用いられる(Wilbey et al., 2004^{11} ; Fowler et al., 2007^{21} ; 飯泉ら、 2010^{31})。このとき、統計的ダウンスケーリングの一部として、バイアス補正とよばれる技法が使われることが多くある(Wood et al., 2004^{41} ; Ines and Hansen, 2006^{51} ; Leander and Buishand, 2007^{61} ; Piani et al., 2010^{71} ; Terink et al., 2010^{81} ; 渋尾・鼎, 2010^{91})。バイアス補正は、気候モデルから出力される将来変化の情報を影響評価モデルへと入力する際に、対象地域における気候モデルの出力と観測データとの間にある系統的な差を適切に埋める統計的技法である。本サブテーマでは、水災害の影響評価に強く関わる、気候モデルの降水量出力に特に着目し、各種バイアス補正手法の比較や新たな手法の提案などを行った。

全球気候モデル(GCM)や地域気候モデル(RCM)出力そのものに対して統計的なバイアス補正が行 われた場合、変数間の物理的整合性は元々保たれていたモデル出力に対して、確率分布や基本統 計量計量が補正されることが期待できる。しかし、これら手法の多くは、モデル出力の時間的な 変動特性については補正されない。即ち、既存のバイアス補正手法は、モデル出力時系列の時間 的な変動特性を補正することを本来の目的としたものではない。しかし、例えば少雨や大雨の持 続性は、渇水災害や豪雨災害の発生にも関連し得るので、水文分野の影響評価研究を行う上では、 降水量時系列の時間的変動のバイアスは除去されることが望ましいと言える。また、Haerter et al. (2010)10)では、気候モデル出力の異なる時間スケール変動を補正することの重要性について議論 している。したがって、こういった時間的な変動特性についてもある程度補正された将来シナリ オを利用することも、水災害評価を行う上では重要であると言える。一方、観測された降水量の 時間的な変動特性については、これまで様々な研究が行われており、時間的に局在化した変動特 性を解析する有効な解析手法として、ウェーブレット解析がしばしば用いられている (Kumar, 1997) 110。それらの研究では、対象とした降水量時系列中で、どの時間スケールの変動が卓越する かといった点についてウェーブレット解析を用いて評価がなされている。このように、ウェーブ レット解析は降水量の時間的変動特性の抽出に有効であると考えられる。また、Johnson et al. (2011)¹²⁾では、ウェーブレット解析をGCMの低周波変動の評価に適用している。そこで本研究では、 降水量の時間的な変動特性を補正するための新たなバイアス補正手法として、離散ウェーブレッ ト変換を用いたバイアス補正手法を提案した。

2. 研究開発目的

日降水量の極値は河川計画の計画規模の策定などにも利用されるため、水文分野で将来の降水量シナリオが利用される場合には、日降水量極値の不確実性を評価することは重要である。そこで本研究の目的としてまず、異なるバイアス補正手法を地域気候モデル出力の日降水量に適用し、バイアス補正が影響評価に用いる降水量データに与える影響を明らかにし、バイアス補正方法に由来する水災害影響評価の不確実性を低減することがある。具体的には平均や分散といった基本統計量、持続した大雨に着目して、バイアス補正がこれらの諸量に与える影響を調べる。

なお、日降水量が降雨流出モデルの入力として用いられる際には、降水量の空間分布は地表の表面被覆や地形条件を介して、流出特性に大きな影響を与えうる。したがって、バイアス補正手法の違いが降水量の空間分布に与える影響を明らかにすることは、バイアス補正されたデータを水文分野で用いる際には重要であると考えられる。そこで本研究では、パターン認識手法を用いて、モデル出力降水量やバイアス補正された降水量データの降水量の空間分布再現性を、パターン認識手法を用いて評価した。

また、将来予測に不確実性を生じさせる要因は複数あるが、バイアス補正手法の選択のみならず、将来予測に用いる気候モデルに伴う不確実性の程度を見積もることも、水災害評価を行う上で重要であると考えられる。そこで本研究では、3つのRCMに対して種々のバイアス補正手法を適用することで、用いた気候モデルや適用したバイアス補正手法が、得られた降水量データに与える影響を調べることも目的とする。

以上に加え、大雨の持続特性は土砂災害などの水災害の発生と関係があるため、大雨の時間的な変動特性の再現性がある程度保証された降水量データを用いることは、水災害影響評価を行う上で重要である。そこで、変動の時間スケールに着目したバイアス補正を行う手段として、離散ウェーブレット解析を用いた日降水量のバイアス補正手法を提案して日本域の地域気候モデル出力日降水量に適用し、他のバイアス補正手法で得られた降水量データとその性質を比較した。

3. 研究方法

本研究ではまず、種々のバイアス補正手法を、地域気候モデル(RCM20)出力の日降水量に適用し、大雨の将来変化を比較する。またここでは、地点レベルでバイアス補正手法が将来の大雨に与える影響にも特に着目する。

次に、本研究で提案する離散ウェーブレット解析を用いた補正手法を含む、種々のバイアス補正手法を、テーマ3プロジェクトの3つのRCM(気象研究所NHRCM、防災科学研究所RAMS、筑波大学WRF)にそれぞれ適用し、得られた降水量プロダクトの性質の比較を行う。また、得られた日降水量プロダクトに対してパターン認識手法を適用し、用いた気候モデルや適用したバイアス補正手法が、降水量プロダクトの日降水量の空間分布の再現性に与える影響を評価する。また、3つの地域気候モデルに、提案する補正手法を含む種々のバイアス補正手法を適用することで、マルチ地域気候モデルと複数バイアス補正手法の計算を行い、地域気候モデルとバイアス補正手法に起因する不確実性を見積もり、水災害影響評価を行う際の判断材料となり得る情報を提供する。

(1) 本研究で行った比較

本研究ではまず、RCM20出力降水量に対して種々のバイアス補正手法を適用し、その補正結果を、特に確率降水量に着目して比較する。また、地点雨量に着目し、手法の相違が地点レベルでの評価に与える影響を調べる。

次に、3つのRCM出力の日降水量に対して、本研究で提案する離散ウェーブレット解析を用いたバイアス補正手法を含む、種々のバイアス補正手法を適用する。得られた降水量プロダクトを観測値と比較して各バイアス補正手法の性質を調べるとともに、モデルの違いやバイアス補正手法の相違が将来予測に与える影響を調べる。得られた降水量プロダクトを自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Maps)というパターン認識手法に入力し、現在期間における日降水量の空間分布

の再現性を観測値の空間分布と比較する。

(2) 用いたバイアス補正手法

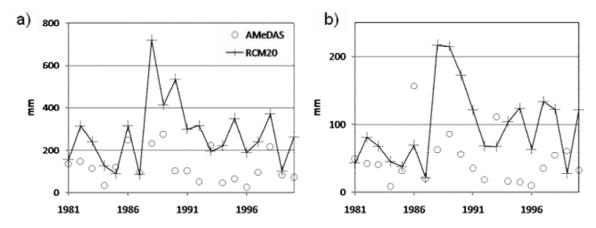
本研究では、既存研究で見られる複数のバイアス補正手法に加え、本研究で提案する離散ウェ ーブレットを利用したバイアス補正手法を用いた。本研究では既存のバイアス補正手法としては、 1) 領域気候モデルと観測値の月平均降水量の比を用いる方法 (Shavalova et al., 2003)¹³⁾、2) 正規分布に当てはめる方法、3)気候モデル出力と観測値の累積分布関数を用いてバイアス補正 を行う方法 (Ines and Hansen、2006⁵⁾; Piani et al., 2009⁷⁾; Li et al., 2010¹⁴⁾)、4)日降 水量に対して各日毎に補正係数を定める方法 (Harrold et al., 2005¹⁵⁾; Kiem et al., 2008¹⁶⁾; 渋 尾・鼎,2010%)を用いた。なお以降、これら既存のバイアス補正方法をそれぞれ順に、1)月平 均値の比型、2)CDF-月降水量補正型、3)CDF-日降水量補正型、4)Daily scaling型と呼ぶこ とにする。1)の月平均値の比による補正を行う場合は、基準期間におけるモデル出力と観測値 の各月毎の月平均降水量の比を計算し、その比を対応する月の日降水量にかけることで、モデル 出力の月平均値が観測の月平均値と一致するように補正する。2)、3)の累積分布関数(CDF) を用いる方法では、モデル出力の確率分布が観測値の確率分布へと置き換えられる。2) CDF-月 降水量補正型では、この確率分布の置き換えを月降水量を対象に行い、3)CDF-日降水量補正型 では、日降水量単位で確率分布を置き換える。なお、CDF手法では、CDFとして経験分布関数を用 いる場合と理論分布に当てはめる場合があるが、理論分布に当てはめる場合は分布のパラメータ の推定方法などについて不確実性が生じる。そこで本研究では、CDF手法については経験分布関数 を用いる方法を採用している。4)の各日降水量毎に係数を定める方法 (Daily scaling手法)で はまず、基準期間における観測日データとモデル日データをそれぞれ降順に並べ、同順位の日デ ータの比を求めることで、各日毎のスケーリング係数を定めた。そのスケーリング係数を、降順 に並べたバイアス補正対象期間の対応する順位の日降水量にかけることで補正された日降水量を 得た。

本研究で提案する離散ウェーブレット変換を利用したバイアス補正手法では、モデル出力の日降水量時系列(実際は他の変数でもよい)の各時間スケール毎の変動エネルギーが、観測値の対応する時間スケールの変動エネルギーと一致するように補正を行う。この方法ではまず、現在期間(バイアス補正の基準期間)におけるモデル出力時系列と観測時系列それぞれに対して、レベルjの離散ウェーブレット展開を行う。そして、モデル出力時系列と観測時系列の展開係数それぞれに対して、各スケール毎のエネルギーを計算し、その比をバイアス補正の係数とみなしてバイアス補正を行う。

4. 結果及び考察

(1) RCM20に対する月総降水量と最大降水量によるバイアスの検出

図(6)-1aにアメダスとバイアス未補正のRCM20(直出力)の8月降水量、図(6)-1bに同8月の最大日降水量の推移を示す。ここで気候モデルは推測される境界条件のもと現在の気候を再現するものであり、特定の日時を再現するものではないことに注意されたい。検出されたバイアスは、較正期間のアメダスの20年平均降水量が約123mmであるのに対し、RCM20の同平均降水量は約273mmであり、倍以上の開きを示している。将来予測の経年変化については2031-2050年期間で約288mm、



図(6)-1 地点グリッドデータ(下妻)における、a)アメダスとRCM20直出力の8月の総降水量。

2081-2100年期間で293mmと、少量の増加を見せ、降水強度が強い月も増加の傾向を示している。 日降水量の月最大値について比較して見ると、グラフからも見られるように、互いの総降水量が 拮抗している年において、必ずアメダスの最大日降水量の方が大きいことから、少なくとも当該 地点データでは、RCMの強い雨は観測値と比較して弱い傾向がみられる。

1) バイアス補正後、月平均降水量の比較

次に、3. (2) で述べた 1) -4) の4通りのバイアス補正処理を施した降水量について、その総量の比較・検証を行う。 1981-2000年、2031-2050年、2081-2100年の各期間における8月の総降水量の平均値を比較してみると、バイアス補正処理により、各手法とも観測値の平均値(約123mm)より数パーセントの範囲に収まってはいるものの、変化の傾向についてはばらつきがみられ、バイアス補正前のRCM20直出力と同様に、一貫して降水量の増加を示したものは、1) 平均値の比型と 4) Daily scaling型である。

2) 10年確率降水量によるバイアス補正性能評価

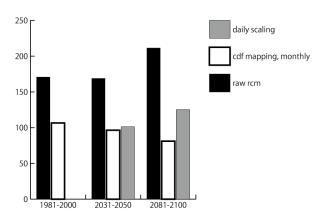
図(6)-2には、3. (2)で示したうち、3つのバイアス補正手法(月平均値の比型、CDF-月降水量補正型、Daily scaling型)によって補正された、下妻地点における8月の日降水量の、再現期間10年の確率降水量の比較を示す。まず、RCM出力にバイアス補正を行わなかった場合の確率降水量についてであるが、1981-2000年期間と比べ、2031-2050年期間でほぼ横這い、2081-2100年期間で、24%の増加を示している(図(6)-2 raw rcm)。この確率降水量の変化について、各バイアス補正手法ではどのような特徴があるのか、その違いを以下に比較する。まず、2)月平均補正型(図(6)-2 CDF mapping monthly)はRCM直出力と比べ、大きくずれる結果となった。これは、月降水量から日降水量への時間方向解像度分解を行う際、無作為に抽出された年の降水頻度に従うため、例えばそれが降水日数の多い年の場合、相対的に降水強度が弱まってしまう(逆に降水頻度の少ない年が抽出された場合は、必然的に降水強度が上がる)という、適用した手法特有の性質によるものと考えられる。対照的に、4) Daily scaling型(図(6)-2 Daily scaling)は、全ての補正手法の中で、最も高い確率降水量の値を示した。これは、RCM出力の変化の比が、対応する観測値の各

順位に適用されるため、降水強度の増減がある場合は必然的に保証されるためである。

図(6)-3a、bに、現在-100年後間の、8月日降水量による10年確率降水量の変化の割合の空間分布を表す。図(6)-3で見られるように、月降水量補正型はDaily Scaling型と比べ、相対的に変化が小さいが、先に述べた無作為抽出の影響により、常にこの関係が成り立つとは限らない。さらに、これら変化は適用するバイアス補正手法によって異なる。また、Daily Scaling型の特徴として空間分布においても、確率降水量の変化がRCM20直出力のそれと類似した結果となった。

(2)種々のバイアス補正手法の3つのRCM 日降水量出力への適用

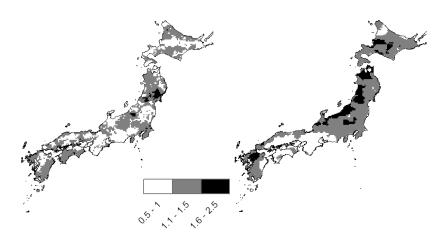
ここでは、3つの地域気候モデルに対して、 提案するバイアス補正手法を含む種々のバイアス補正を行った結果について述べる。



図(6)-2 バイアス補正前のRCM出力(raw rcm) と, Daily scaling手法、月平均補正型(cdf-月降水量型)手法によるバイアス補正後での、8月における日降水量の10年確率降水量による比較。Daily scaling型では将来予測値のみが補正されるため、1981-2000年期間においては欠損となる。

地域気候モデルとして、気象研究所NHRCM(Non-Hydrostatic Regional Climate Model)、防災科学技術研究所RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)、筑波大学WRF(Weather Research and Forecasting System)の3つの気候モデルを用いた。これ地域気候モデルの時間降水量出力から、各モデルの日降水量データを作成した。なお、地域気候の出力領域は日本とその周辺を覆っており、それらモデル出力の1981-2000年、2081-2100年をバイアス補正の対象期間とした。

また、バイアス補正に用いる観測日降水量データとして、日本域高解像度日降水量グリッドデータ(APHRO-JP)を用いた。APHRO-JPは0.05度×0.05度格子で日本全域を覆っており、解析には



図(6)-3 a) 月降水量補正型とb) Daily Scalingによるバイアス補正後の、10年確率日降水量の1981-2000年期間から2081-2100年期間への変化。

1981-2000年のデータを用いた。なお、APHRO-JPの格子点と3つの気候モデルの格子点は異なる。したがって、マルチ気候モデルのバイアス補正を行う際には、NHRCM出力とAPHRO-JPの格子点が一致するように、APHRO-JPの 0.05° × 0.05° 格子上に対して、その格子点の周辺4点のNHRCM日降水量出力を逆距離荷重法で空間内挿することで、 0.05° × 0.05° 格子点上のNHRCM出力データを作成した。マルチ地域気候モデルのバイアス補正を行う際には、この 0.05° × 0.05° 上に空間内挿された地域気候モデル出力に対してバイアス補正を行っている。なおバイアス補正は離散ウェーブレットを用いたバイアス補正手法を除き、各手法とも各月別に各格子点毎に行った。なお、離散ウェーブレットによるバイアス補正手法以外の手法としては、3. (2) で述べたバイアス補正手法の内、1) 月平均値の比型、3) CDF-日降水量補正型、4) Daily scalingの計3つのバイアス補正手法を用いた。

バイアス補正の基準期間は、NHRCMおよびAPHRO-JPがともにデータの存在する1981-2000年とし、バイアス補正の期間の違いに起因する補正結果の誤差を避けるため、バイアス補正の評価期間も同じく1981-2000年とした。このよう補正期間を定めることで、バイアス補正結果の違いは、手法の相違にのみ起因するものとして解釈でき、提案するバイアス補正手法の特性をより明確に検証できる。また、将来期間としては2081-2100年を対象とした。まず初めに、降水量データの現在期間(1981-2000年)における夏季平均降水量の平均値、分散、年最大5日合計降水量の平年値を観測降水量と比較した。次に、降水量データの将来期間(2081-2100年)における平均値、分散、年最大5日合計降水量の平年値を観測降水量と比較した。更に、現在期間における観測降水量および作詞した降水量プロダクトに対してパターン認識手法を適用し、各降水量データの日降水量空間分布パターンの再現性を検討した。

1) 現在期間(1981-2000)の降水量プロダクトと観測値の夏季降水量との比較

まず、現在期間における降水量プロダクトと観測降水量の夏季平均日降水量(6月から8月を夏季とする)の差を調べたところ、RCM直出力にはモデル間で夏季平均日降水量の空間分布に相違があるものの、バイアス補正を行うことで夏季平均日降水量は観測とほぼ一致していた。一方、離散ウェーブレットによる補正を行った場合は、観測の夏季平均日降水量と比べてバイアスが残る傾向があるものの、モデル直出力と比べると平均値が改善されていた。

次に、現在期間における降水量データと観測降水量の夏季平均日降水量とで分散の比を調べたところ、夏季平均日降水量の分散は、観測に近い値へと補正されてはいるが、分散のバイアスの空間分布はモデル間でやや異なる傾向があった。更に、現在期間における降水量プロダクトと観測降水量の年最大5日合計降水量の平年値の比を調べた。その結果、年最大5日合計降水量の平年値は、どの手法も比較的よく補正されていたが、月平均値の比を用いた場合は、やや大きなバイアスが残る地点が見受けられた。

2) 将来期間(2081-2100)の降水量データと観測値の夏季降水量との比較

図(6)-4には、将来期間における降水量データと観測降水量の夏季平均降水量の差を示す。現在期間では、バイアス補正されたモデル間では夏季平均降水量にあまり相違は見られなかったものの、将来期間では各モデル間およびバイアス補正手法間で平均値の空間分布の差異が現在期間より大きなっており、バイアス補正手法または用いるモデルによる不確実性が、将来期間では現在

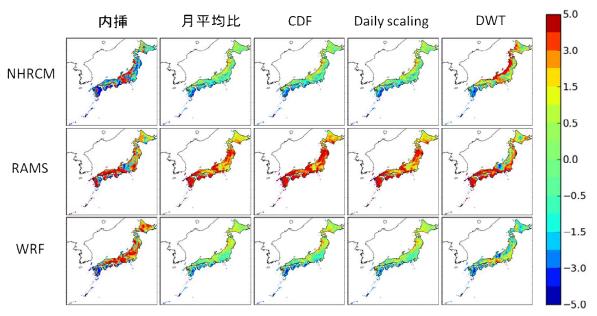
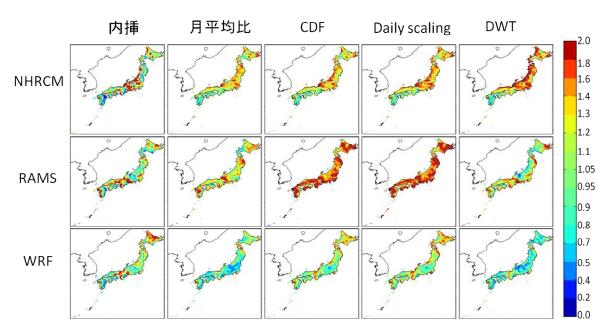


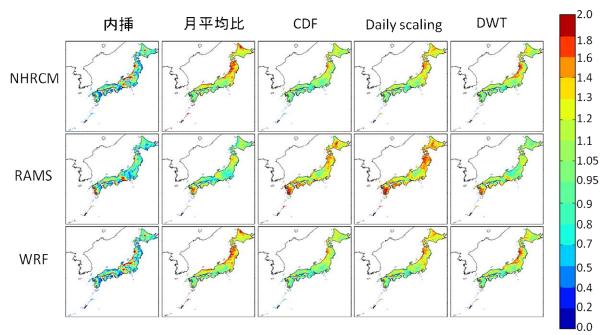
図 (6) -4 モデル (将来期間: 2081-2100年) と観測 (現在期間: 1981-2000年) との夏季平均日降水量の差



図(6)-5 モデル(将来期間:2081-2100年)と観測(現在期間:1981-2000年)との夏季平均日 降水量の分散の比

期間と比べてより大きくなっている可能性が示唆される。

図(6)-5には、将来期間における降水量データと観測降水量の夏季平均降水量の分散の比を示す。図(6)-5より、平均値の場合と同様に、地域気候モデルおよびバイアス補正手法の違いの影響が、現在期間より将来期間では大きく出ていることが分かる。また、平均値については将来期間についてもバイアス補正手法の相違が与える影響は比較的小さいようであったが、分散の空間分布はバイアス補正手法の相違の影響が平均値に比べて大きい傾向がある。

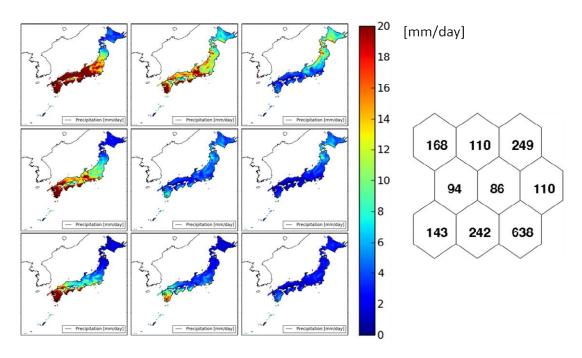


図(6)-6 モデル (将来期:間2081-2100年) と観測 (現在期間:1981-2000年) との年 最大5日合計降水量の平年値の比

図(6)-6には、将来期間における降水量データと観測降水量の年最大5日合計降水量の平年値の比を示す。図(6)-6より、分散の場合と同様に、将来期間については、年最大5日合計降水量の平年値のモデルおよびバイアス補正手法間の相違が大きくなっていることが分かる。今回の解析結果からは、将来変化に関してCDFとDaily scaling手法は比較的似た傾向を示していた。従って、複数のバイアス補正手法を日降水量に対して適用する際の一つの方法としては、CDFまたはDaily scaling手法のいずれかに加えて、補正精度は劣るものの簡便に用いることができる月平均値の比による補正方法を用い、更に5日合計降水量のような持続特性を持つ量の評価が必要になる場合には、離散ウェーブレットによる補正方法を更に補正手法として検討するという方法が考えられる。

3) 現在期間(1981-2000)の降水量プロダクトと観測値の夏季降水量の空間分布の比較

観測値、各3つの気候モデル出力を空間内挿した日降水量(バイアス補正なし)、各3つの気候モデルにそれぞれ4つのバイアス補正手法を適用して得た日降水量、の16計通りの日降水量データセットそれぞれについて、対象領域のデータを0.2°間隔で抽出し、1981-2000年の20年間における夏季(6月、7月、8月の計92日)を対象として、日本の日降水量分布を表すデータを作成した。即ち、92日×20年間×16セット=29440個の入力データ(各入力は1076次元)を作成し、それらをマップサイズ3×3の自己組織化マップに入力し、日降水量の空間分布パターンを抽出した。抽出した9つの空間パターンと、各パターンの観測データにおける20年間での発生日数を、それぞれ図(6)-7の左図および右図に示す。また、内挿モデル出力、4つのバイアス補正手法データのそれぞれについて、各パターンに分類された日数の観測値との差を図(6)-8に示す。図(6)-7より、例えばマップ左上には、中日本~西日本にかけて強い雨となっており、梅雨と関連した降水分布が抽出されていると考えられる。また、マップ右下のパターンは最も観測値での発生頻度が高く、日



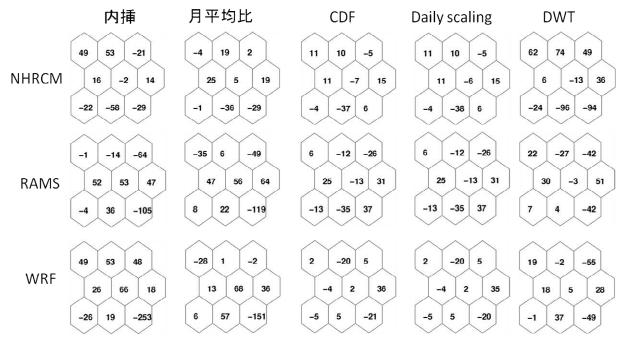
図(6)-7 (左図) 抽出した夏季日降水量の空間分布パターンおよび、(右図) 観測日降水量における各パターンの発生回数(日)

本全国的にほぼ無降雨(または非常に少雨)のパターンとなっている。また、図(6)-7に示されているマップ右下の空間パターンと、図(6)-8の第1列の3つの各図の右下のセルの発生頻度を見ると、モデル出力を内挿して得た降水量データは、全国的に無降雨(または非常に少雨)の発生頻度が観測に比べて低いというバイアスがあることが分かる。また、バイアス補正を行うことで、各パターンの発生日数の観測との差が小さくなる傾向があり、バイアス補正を行うことで、夏季日降水量の空間分布の再現性が向上することが分かる。また、提案した離散ウェーブレット手法も基本的には、RCM内挿と比べて空間分布を向上させる傾向があることが確認された。しかし、提案手法を含むどの補正手法を用いた場合でも、観測と発生日数が完全に一致しているわけではなく、空間分布のバイアスがある程度は残っていることに留意する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

国内外を問わず文献上にみられる主要なバイアス補正手法を、初めて実際に日本域に適用し、各補正手法の適用性を示した。また、各種手法によりバイアス補正された日降水量について比較を行った結果、月降水量のみを考慮すれば観測値と比較して相応しい補正結果と判別されるかもしれないが、10年に1度に相当する大雨を比較した場合で、手法間で無視できない差が生じることが確認された。市町村単位のような精緻な空間情報が要求されるなか、文献において主要なバイアス補正を盲目的に適用することにより、便宜的に気候変動による外力を提供することは可能である。しかしながら正確な影響評価が要求とされるからこそ、バイアス補正という過程は蔑ろにされるべきではなく、対象とする影響評価ごとに適切なバイアス補正手法が必要であると言える。



図(6)-8 抽出した夏季日降水量の空間分布パターンの観測日降水量との発生日数の差(モデルでの発生日数ー観測の発生日数)。各行は第1行からそれぞれNHRCM、RAMS、WRFを表しており、各列は左から順に内挿(バイアス補正なし)、月平均値の比、CDF、daily scaling, DWT手法で補正して得た降水量データをそれぞれ示している。

また、複数のバイアス補正手法を複数の気候モデル用いることで、気候モデルとバイアス補正 手法に起因する不確実性を検討出来た。その結果、分散や降り続く大雨のような量に関しては、 用いる地域気候モデルおよびバイアス補正手法の違いによって、将来変化の空間分布が異なる傾 向にあることがわかった。これにより、バイアス補正手法および用いる気候モデルの違いによる 将来変化の幅を定量的に調べたことで、将来変化を議論する際には、単一のモデルやバイアス補 正手法ではなく、それらを組み合わせて利用することが望ましいことが明確になった。また、本 研究では降水量の変動を幾つかの時間スケール別に分解し、その変動の時間スケール毎に変動の 強さのバイアスを補正する手法を提案することで、降水量の時間的変動特性という新たな観点か ら降水量のバイアス補正を行った。

(2) 環境政策への貢献

用いるバイアス補正手法によって、異なった統計的性質が降水量データに付与される場合があること(広義には不確実性とも言える)を明らかにしたことは、気候モデル実験から影響評価研究へ向けて不確実性を考慮した外力データを提供する上での貢献と言える。本研究の成果は、土木学会の水工学論文集に投稿され、発表も行われているが、今後は国土交通省や土木事務所と意見交換を行っていくことが、間接的ではあっても地球環境政策への寄与となるはずである。また、本研究でモデルとバイアス補正手法の選択が影響評価に用いる降水量データに与える影響を定量的に調べたことで、影響評価を目的とした降水量データを利用して得た結果を基に環境政策を立案する際に、その結果にどの程度の不確実性があるかについての支援的情報を提供することがで

きる。このような形で、環境政策立案の際の不確実性を低減することに資することが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

特に記載すべき事項はない

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 渋尾欣弘、鼎信次郎 (2010): 大雨に着目した気候モデル日降水量出力のバイアス補正手法 比較. 水工学論文集,54,235-240.
- 2) 新田友子, 鼎信次郎, 沖大幹 (2010): 流量確率指数を用いた地球温暖化に伴う日本域洪水 リスク変化の推定. 水工学論文集, 54, 451-456.
- 3) Kanae, S., T. Homdee, Y. Iseri, Y. Shibuo, and K. Pongput (2010): A review of bias correction methods for the assessment of climate change impacts on water resources in Thailand, Journal of research in engineering and technology, Faculty of engineering, Kasetsart University, 7, 113-118.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 鼎信次郎 (2007): 地球温暖化による洪水・渇水の変化, 自然共生シンポジウム, 岐阜県自然 共生工法研究会, 岐阜, 2007年11月
- 2) 鼎信次郎 (2007): 地球温暖化による世界の水資源の変化, くらしと技術の建設フェア, 四国 建設広報協議会, 松山, 2007年11月
- 3) 鼎信次郎 (2007): 水文分野への応用のための降水量の統計的ダウンスケーリングについて, 京都大学防災研究所 水資源セミナー・第1回アジア太平洋水サミットオープンイベント 地 球規模データのダウンスケーリングと流域水資源環境の解析,京都,2007年11月
- 4) Sun, F., S. Kanae, D. Yang, and T. Oki (2008): Hydrological cycle implications of global warming and dimming: Budyko's couple water-energy perspective, 水文・水資源学会2008年度総会・研究発表会, 目黒区, 2008年8月
- 5) Hirabayahi, Y., S. Kanae, K. Moriya, K. Masuda, and P. Doll (2008): Development and assessment of a 59-year (1948-2006) global 0.5-degree near-surface atmospheric data, AGU Fall meeting 2008, San Francisco, USA, December 2008.
- 6) Kanae, S., S. Seto, K. Yoshimura, and T. Oki (2008): Yesterday's Japan: A system of flood

- risk estimation over Japan with remote-sensing precipitation data, AGU Fall Meeting 2008, San Francisco, USA, December 2008.
- 7) 渋尾欣弘, 鼎信次郎 (2009): 地球温暖化の水資源への影響・アラル盆地事例研究. 水文・水 資源学会2009年度総会・研究発表会,金沢,2009年8月.
- 8) Shibuo, Y., and S. Kanae (2009): Evaluating bias corrected precipitation of a regional climate model over Japan, Abstract H21I-05, AGU Fall meeting 2009, San Francisco, U.S.A., December 2009.
- 9) Iseri, Y., K. Jinno, K. Nishiyama and A. Kawamura (2010): Long term analysis of precipitation distribution patterns in Japan using a nonlinear classification method, Hydrology delivers Earth System Science to Society, pp. 24, (Poster), Tokyo, Japan, June 2010.
- 10) Iseri, Y., K. Nishiyama, K. Jinno, A. Kawamura and S. Kanae (2010): Statistical analysis on the relationship between global climate indicators and spatial distribution patterns of monthly precipitation in Japan, The Fifth APHW conference "Hydrological Regime and Water Resources in the Context of Climate Change", Hanoi, Vietnam, November 2010.
- 11) Iseri, Y., S. Kanae and Y. Shibuo (2011): Bias correction of precipitation with considering spatial structure of precipitation, International Workshop on Down Scaling, US18-09, Tsukuba, Japan, January 2011.
- 12) 井芹慶彦, 鼎信次郎, 渋尾欣弘 (2011): バイアス補正された気候モデル日降水量出力の空間分布および極値の再現性について,日本地球惑星科学連合 2011 年大会, ACG032-07, 幕張, 2011 年 5 月.
- 13) Iseri, Y. and S. Kanae (2011): Bias correction of daily precipitation output from regional climate model using discrete wavelet transform, Third International Workshop on Down Scaling, S2-6, Tsukuba, Japan, October 2011.
- 14) Iseri, Y. and S. Kakae (2012): Bias correction of precipitation output from climate model for evaluation of water disasters, Mini International meeting related with the downscaling projects, Tsukuba, Japan, March 2012.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Wilby R.L., S.P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, L.O. Mearns (2004): Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27. [www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf.3]
- 2) Fowler H.J., S. Blenkinsop, and C. Tebaldi (2007): Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, International Journal of Climatology, 27, 1547-1578.
- 3) 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(2),131-143.
- 4) Wood, A.W., L.R. Leung, V. Sridhar, and D.P. Lettenmaier (2004): Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change, 62, 189-216.
- 5) Ines, A. V. M., and J. W. Hansen (2006): Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. Agricaltural and Forest Meteorology, 138, 44-53., doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.009.
- 6) Leander, R., and T.A. Buishand (2007): Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows, Journal of Hydrology, 332, 487-496.
- 7) Piani, C., J.O. Haerter, and E. Coppola (2009), Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, Theoretical and Applied Climatology, 1-2, 187-192., 10.1007/s00704-009-0134-9
- 8) Terink W., R.T.W.L. Hurkmans, P.J.J.F. Torfs and R. Uijlenhoet (2010): Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, Hydrology and earth system sciences, 14, 687-703.
- 9) 渋尾欣弘, 鼎信次郎 (2010): 大雨に着目した気候モデル日降水量出力のバイアス補正手法比較, 水工学論文集, 第54巻, 235-240.
- 10) Haerter, J.O., S. Hagemann, C. Moseley, and C. Piani (2010): Climate model bias correction and the role of timescales, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 1065-1079., doi:10.5194/hess-15-1065-2011
- 11) Kumar, P. (1997): Wavelet analysis for geophysical applications, Reviews of Geophysics, 35(4), 385-412., doi:10.1029/97RG00427
- 12) Johnson, F., S. Westra, A. Sharma, and J. Pitman (2011): An assessment of GCM skill in simulating persistence across multiple time scales, Journal of Climate, 24(14), 3609-3623.
- 13) Shabalova M. V., W. P. A. van Deursen and T. A. Buishand (2003): Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model,

- Climate research, 23, 233-246.
- 14) Li H., J. Sheffield and E.R. Wood (2010): Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovermental panel on climate change AR4 models using equidistant quantile matching, Journal of Geophysical Research, 115, D10101, doi:10.1029/2009JD012882.
- 15) Harrold, T.I., F.H.S. Chiew, and L. Siriwardena (2005): A method for estimating climate change impacts on mean and extreme rainfall and runoff. In MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, Zerger A, Argent RM (eds), Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne, 497-504, CDROM (ISBNO-9758400-2-9), Australia 497-504.
- 16) Kiem A. S., H. Ishidaira, H. P. Hapuarachchi, M. C. Zhou, Y. Hirabayashi, and K. Takeuchi (2008): Future hydroclimatology of the Mekong River basin simulated using the high-resolution Japan Meteorological Agency (JMA) AGCM. Hydrological Process, 22(9), 1382-1394., DOI: 10.1002/hyp.6947.

- 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
- 3. 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究
- (7) 双方向ネストモデルを用いた力学的ダウンスケーリングの研究

北海道大学

大学院理学研究院自然史科学部門

稲津 將

平成19~23年度累計予算額:9,280千円 (うち、平成23年度予算額:2,239千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケールの研究の中では、双方向ネスティングモデルは新しい試みである。200kmメッシュ程度の全球気候モデルの結果があった場合、従来のダウンスケールではこの200kmメッシュを元に、領域モデルを使ってある領域だけ40kmメッシュ程度のデータを作り出す。双方向ネスティングでは、全球気候モデルにこの領域モデルの情報を返すことによって、高解像度全球気候モデルの予測結果の分析や、さらにそれが領域モデルへフィードバックするプロセスを、容易に研究することが可能になる。平成19年度、双方向ネストモデル計算によりその性能を確かめた。平成20年度、日本を含む北東アジアについて双方向ネスト実験を行い、北東アジア付近において卓越するが200kmメッシュ程度の全球気候モデルでは表現できない小規模渦の影響について調べた。その影響は北東アジアから太平洋における総観擾乱活動度へ影響を及ぼすものの全球へは影響を及ぼさないことがわかった。平成21年度はさらにこの研究を進めて小規模山岳の影響を調べ、これが全球規模の大気波動に影響を及ぼしうることがわかった。この2点について論文としてまとめた。また、双方向ネストモデル出力の診断に応用する目的で、温帯低気圧を追跡する新手法を開発し、別途、論文としてまとめた。

[キーワード] 大気マルチスケールインタラクション、双方向ネスティング、ダウンスケーリング、大気海洋結合モデル、領域気候モデル

1. はじめに

気候シミュレーションは、近年、急速に高解像度化か進められている。これは地域スケールにおける気候変動情報が、われわれにとって身近な近未来情報として期待されていることに応じたものであるが、その実現のためには地球シミュレータから次世代コンピュータ「京」へと超大規模計算を可能にする計算機の開発が必要である。たとえば、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次報告書でもっとも高解像度の気候モデルは東京大学気候システム研究センター (CCSR)、国立環境研究所 (NIES)、海洋開発研究機構 (JAMSTEC) 地球環境フロンティア研究センター (FRCGC) で共同開発されたMIROCであった (K-1 model developers, 2004)。さらに、東京大学CCSRとJAMSTEC/FRCGCで共同開発されたNICAMでは、3.5kmメッシュサイズの全球雲解像モデル計算を可能にしている 10 。このような高解像度気候モデルの出現により、例えば地球温暖化を含む気候変動に対する地域的な影響を、不確定性はあるにせよ、詳しく表現することが可能となった。

このように気候モデルは高解像度化の趨勢の中にありながら、そのような高解像度気候モデルの長期間の積分は、残念ながら上述のような世界最大級の計算機によってしか実現することができない。したがって、どこの地域の高解像度化が何の現象の改善に寄与したかは、同程度の性能の計算機によって、別途実験を行うより他ないのである。しかし、そのような計算は通常、基準となる実験と同程度の計算コストを費やすので、そのような単一の研究目的のための計算は計算資源の有効利用の観点から実現することが稀である。

そこで、サブテーマ(7)担当者が別予算で新型モデルである双方向ネスティングモデルを開発した。このモデルでは既存の200kmメッシュの気候モデルと、40kmメッシュ程度の領域モデルの両方を同時に計算し、相互のモデル間でデータのやり取りを行う。テーマ3の他のサブテーマを含むこれまでの気候モデルと領域モデルを用いた研究では、気候モデルの結果を境界条件として領域モデルを計算する一方向にネストの方法が用いられてきた。この新型モデルの特色は領域モデルと大循環モデルが双方向に情報を交換しながら計算を行うことから、双方向ネストと呼ばれる

手法を適用したことになる。また、双方向ネストモデルは部分高解像度化気候モデルと言うこともできる。当然、全球高解像度計算よりはるかに安価な計算コストとなる。この双方向ネストモデルはいまだ気候計算としては世界で数例あるのみであり、フルペーパーによる記述はこの新型モデルのみである。²⁾³⁾

Surface Height (Fine) 60N-50N-40N-30N-80E 100E 120E 140E 160E 180 160W 図 (7)-1 寒冷域気象現象シミュレーシ

図(7)-1 寒冷域気象現象シミュレーション実験におけるネスト領域と山岳地

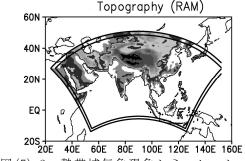
2. 研究開発目的

前述のとおり、双方向ネストシステムは、別途、

獲得している文部科学省・科学研究費若手(B)18740297「大気海洋結合モデルと領域気候モデルとの双方向ネスティングの実現」(平成18年度~20年度)と科学研究費若手(B)21740335「新型気候モデルを用いた中緯度海洋前線の大気マルチスケールへの影響」(平成21年度~23年度)の中で、本サブテーマと並行的に開発した。本サブ課題の目的は、この双方向ネスティングシステムを用いて、寒冷域の気象現象と熱帯域の気象現象の具体的な一例をシミュレートし、双方向ネス

ト効果がダウンスケーリング研究にどのように活かされるかを検討することである。

寒冷域の気象現象は温帯低気圧に代表される。北 半球冬季、北東アジアにおける温帯低気圧は、さま ざまなスケールの現象の統合であり、当然、天気図 よりも小さなスケールが大なり小なりシミュレー ションに影響を与えるものと予想される。そこで、 天気図スケールより一回り小さい現象の解像がど のように総観および惑星規模の気候に影響を及ぼ すかという問題について調べた。



図(7)-2 熱帯域気象現象シミュレーション実験におけるネスト領域と山岳地

熱帯域の気象現象の中ではモンスーンは特徴的な現象の1つである。北半球夏季、東南アジアに おけるモンスーン低気圧のシミュレーションには、当然、積雲対流などの小スケール現象の統合 が重要であることがわかっている。このような現象が領域モデルで解像され、アップスケールへ 情報が伝達することで、どのような影響を及ぼすかという問題を調べた。

3. 研究開発方法

(1) 双方向ネストモデル開発支援

別経費で開発した双方向ネスティングシステムINCLは、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、ならびに(独)海洋開発研究機構の共同開発の大気海洋結合大循環モデルMIROCと、気象庁および気象研究所の共同開発の領域大気モデルJMA/MRI NHMの同時結合シミュレーション・システムである。本サブ課題では北海道大学の情報基盤センターにおける大型計算機SR11000を用いて開発を側面支援する実験を行った。1つの実験は大気海洋結合モデルと領域モデルを使った寒冷域気象現象の双方向ネスト・シミュレーションであり、もう1つの実験は大気大循環モデルと領域モデルを使った熱帯域気象現象の双方向ネスト・シミュレーションである。

(2) 寒冷域気象現象のシミュレーション

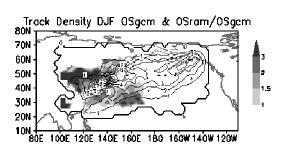
寒冷域気象現象のシミュレーションでは、北東アジア域の小規模渦の与える効果と、同地域の 小規模山岳の与える効果を分けて調べた。

前者を調べるために、双方向ネスト・シミュレーションのオフライン実験とインタラクティブ 実験という2つの実験を10冬分の時間積分を行った。オフライン実験とは、大循環モデルの情報を 用いて領域モデルを計算するが、領域モデルの情報を大循環モデルへ戻すことはない。これは力 学的ダウンスケーリングを1回の計算で自動的に行うことと等価である。インタラクティブ実験と は、大循環モデルの予報変数の時間増分を領域モデルのそれと折半した値に置換する領域モデル 強制実験といえる。領域モデルは東アジアから北西太平洋を含む領域(東経100°から180°、北緯 20°から60°を概ね含む)についてネストした(図(7)-1)。両実験とも領域モデルに与える地表 面条件は大循環モデルに与えるそれと同一のものである。

また、後者を調べるために、領域モデル内の山 岳が高解像のF実験と低解像のS実験を、オフラ イン実験とインタラクティブ実験それぞれにつ いて行った。領域モデルの範囲および積分期間は 前者と同様である。

(3) 熱帯域気象現象のシミュレーション

熱帯域気象現象のシミュレーションでは、双方 向ネスティングシステムによる夏季アジアモン スーンの再現性を調べた。寒冷域気象現象のシミュレーション同様に、オフライン実験とインタラクティブ実験を行った。前者と後者の両方に対し



図(7)-3 オフライン実験における1冬あたりの低気圧数 (等値線は1間隔)。陰影はインタラクティブ実験とオンライン実験の低気圧密度の比である(陰影の度合いは図右の通り)。

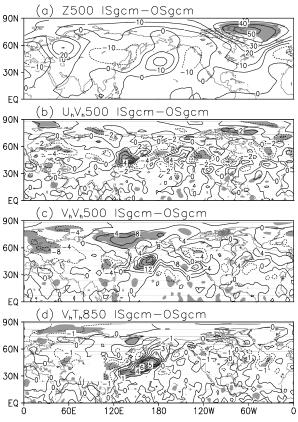
て、1997年5月15日から10月11日までの海面水温をハインドキャストで与える大気大循環モデル相互比較プロジェクト (AMIP) 型実験を 5 つのアンサンブル (初期値を変えた実験) で行った。ネスト領域は熱帯西太平洋域である (図(7)-2)。

4. 結果及び考察

(1) 寒冷域気象現象シミュレーション

図(7)-3はオフライン実験とインタラクティブ実験の低気圧軌跡密度4)の違いである。オフライン実験では、日本の北を通過する温帯低気圧が強調され、日本の南を通過する軌跡は過小評価ぎみである。それに対して、インタラクティブ実験では観測のように日本の北と日本の南の両方を通過する軌跡が再現されている。これは明らかに領域モデルで表現された亜総観規模渦が温帯低気圧に成長して、気候モデルに情報が救い上げられた結果であると考えられる。

領域モデル内の総観規模渦活動の強化の情報はインタラクティブ実験では大循環モデルに反映されていた。しかし、渦の運動量輸送の強化が作り出した太平洋上に高気圧偏差は弱く有意ではなかった(図(7)-4)。このように北東アジアの亜総観規模渦の効果は、太平洋上の総観規模渦活動には大いに影響を与えたが、惑星規模の循環を励起するほどのものではないということがわかった。オフラインF実験と同S実験の領域モデル出力の差は、北東アジアの亜総観規模山岳に対する領域内部の大気応答を示す(図(7)-5a)。図(7)-5aには



図(7)-4 インタラクティブ実験とオフライン実験の時間平均値の差。(a) 500hPa面における等圧面高度。(b) 500hPa面における総観擾乱に伴う運動量フラックス。(c) 500hPa面における総観擾乱に伴う熱フラックス。統計的に有意な差がある領域には陰影をつけた。

日本付近に低気圧性の大気応答が見られる。これは極東地域の亜総観規模山岳が気候値の北西季節風を効果的に遮ることが理由として考えられる。インタラクティブF実験と同S実験の大循環モデル出力の差は、北東アジアの亜総観規模山岳に対する全球規模の大気応答を示す(図(7)-5b)。インタラクティブ実験では領域モデル内の亜総観規模山岳強制の効果により全球規模のジオポテンシャル高度パターンを励起した。総観擾乱応答は平均場に追随していた(図略)。これは領域内部のみの総観擾乱に影響を与え、全球には拡がらない亜総観規模擾乱の効果とは対照的であった。

(2) 熱帯域気象シミュレーション

図(7)-6は、夏季アジアモンスーンに関する研究におけるオフライン実験、インタラクティブ実験、および長期再解析(JRA25)の1997年夏季のアジア域の気候値である。オフライン実験では太平洋高気圧のアジア域への張り出しが弱く、日本の南に明らかなモンスーン低気圧の侵入というバイアスが認められる。一方、インタラクティブ実験では現実のように日本の南まで太平洋高気

圧の張り出しがある。この要因を分析すると、日本の南の領域での対流圏中上層の気温の季節変動がオフライン実験で大いにずれていることがわかった(図略)。一方、偶然か必然かはともかくとして領域モデルはMIROCの境界条件を用いて力学的ダウンスケーリングしているにも関わらず、

このずれは小さい。従って、MIROCのバイアスが大きく領域モデルのバイアスが小さいこの性質が、インタラクティブ実験でバイアスを小さくするのに貢献したものと考えられる。本研究ではさらに熱帯低気圧の挙動についても、バイアスが低減したことを示した。

(3) まとめ

本研究により、双方向ネストシステムが冬季の中高 緯度と夏季の低緯度の両方の例で成功することが示 された。このことで同システムの全球汎用性が保証さ れたことになり、今後のスケール間相互作用の問題に 利用する価値があるものになったと考える。

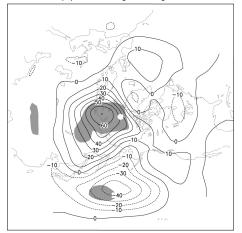
5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

中緯度における小規模温帯低気圧や小規模山岳が 気候にどのように影響を及ぼすか、という問題は、そ の合理的な解決方法が双方向ネストモデルの利用に 限定されるうえ、科学的にも非常に興味深い問題とい える。本研究の結果は、小規模渦は大循環には影響を 及ぼさないが、小規模山岳は大循環に影響する、とい う興味深いものであった。双方向ネスティングモデル

(a) U5920 OFram-OSram 60N50N40N30N20N-

(b) Z500 IFgcm-ISgcm



図(7)-5 (a) オフラインF実験と同S 実験における5920 mの東西風の気候 値の差(等値線間隔1m/s; 影付は差 が有意な領域)。(b) インタラクティ ブF実験と同S実験における500 hPa のジオポテンシャル高度の気候値の 差(等値線間隔10m; 影付は差が有意 な領域)。

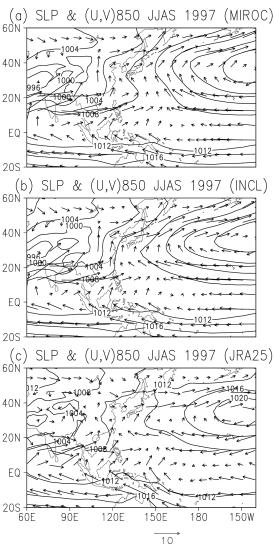
によってでしか調べにくいテーマについて具体的な結果を示したことで、双方向ネスティングモ デルの威力と可能性を具体的に示した。これは科学的に大変有意義な結果であると考える。

(2)環境政策への貢献

地球温暖化気候における双方向ネスティングモデル実験を行うことが可能となった。これにより、異なる気候場での領域全球間のフィードバックを見積もることが出来、従来型とは異なる温暖化評価が可能となる。また、領域モデルを使ったマルチモデルアンサンブルでも、全球モデルとの間にフィードバックがあるものとないものとの間の差を示すことで、別種ではあるが有益な予測の誤差情報を与えることが出来る。サブテーマ(7)の研究として行っていないが、今後の想定研究としてこれらをあげておきたい。

6. 国際共同研究等の状況

文部科学省グローバルCOEプログラム「統合フィ ールド環境科学の教育拠点形成」と本研究課題との共 催により平成22年8月9日から8月13日まで第10回RSM に関する国際ワークショップが開催された。この国際 ワークショップは米国カリフォルニア大学サンディ エゴ校スクリプス海洋研究所の金光正郎博士の主催 で、地域気候モデルの普及・啓発を目的として世界各 地を開催地としてきており、10回目となる今大会は北 海道大学で行われた。ワークショップは前半3日間の 研究発表と後半2日間のトレーニングコースで構成さ れており、研究発表として9カ国の参加者から31件の 講演があった。トレーニングコースでは、スクリプス 海洋研究所を中心に開発されているRSM(Regional Spectral Model) のインストールと実行方法の実習が 企画され、芳村 圭博士 (東京大学) およびLiqiang Sun博士(Columbia University)の2名の講師が、お よそ30名の参加者に対して講義と指導を行った。日本、 米国の他、中国、韓国、インド、パキスタン、バング ラデシュ、ベネズエラ、ケニアからの参加者があり、 開発途上国への技術交流の目的で、環境省環境研究総 合推進費から開発途上国の一部の参加者を招聘した。 本ワークショップは、気候変動に対する地域単位の適 応性の向上に非常に大きな役割を果たしており、本研 究課題に対する日本のイニシアチブを確保すること が国内外に広く示された。



図(7)-6 アジア域における海面気圧 (等値線間隔2 hPa)と850 hPa面の水平 風(10 m/sの基準を図下に配置)。(a) MIROC4.0-AGCMのAMIP実験の結果。(b) INCLのAMIP実験の結果。(c) JRA25再 解析データ。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Inatsu, M., and M. Kimoto (2009): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. Monthly Weather Review, 137, 2851-2868.
- 2) Inatsu, M. (2009): The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. Atmospheric Science Letters, 10, 267-272.
- 3) Takatama, K., S. Minobe, M. Inatsu, and J. R. Small (2012): Diagnostics for near-surface wind convergence/divergence response to the Gulf Stream in a regional atmospheric model.

- Atmospheric Science Letters, 13, 16-21.
- 4) Inatsu, M., Y. Satake, M. Kimoto, and N. Yasutomi (2012): GCM bias of the Western Pacific summer monsoon and its correction by two-way nesting system. Journal of the Meteorological Society of Japan, 90B, 1-10.
- 5) Inatsu, M., and K. Terakura (2012): Wintertime extratropical cyclone frequency around Japan. Climate Dynamics, in press.
- 6) Sasaki, Y. N., S. Minobe, T. Asai, and M. Inatsu (2012): Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the early summer (Baiu) rain. Journal of Climate, in press.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 稲津將,木本昌秀,佐竹祐哉(2010):双方向ネスト実験はGCMバイアスを低減できるか? -1997年夏の例、細氷,56,37-38.
- 2) 佐藤友徳,石﨑紀子,石崎安洋,稲津將,岡田直資,仲江川敏之,高薮出,芳村圭,金光正郎 (2011):第10回RSMに関する国際ワークショップ開催・参加報告.天気,58,41-45.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Inatsu, M., S. Amada, and Y. Satake (2010): The neighbor enclosed area tracking algorithm and its application to cyclone merger in the midlatitudes. European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, May 2010.
- 2) Inatsu, M., and M. Kimoto (2010): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, May 2010.
- 3) 佐竹祐哉, 稲津 將, 見延庄士郎 (2010): 隣接閉領域トラッキングによる台風トラック. 日本気象学会2010年度春季大会, 東京, 2010年5月.
- 4) 高藪出,大楽浩司,木村富士男,田中賢治,西森基貴,鼎信次郎,稲津將,他S-5-3参画研究者一同(2010):「温暖化影響評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究」第1期研究の紹介.日本気象学会2010年度春季大会,東京,2010年5月.
- 5) 稲津將, 木本昌秀, 佐竹祐哉 (2010): 双方向ネスト実験はGCM バイアスを低減できるか? -1997年夏の例. 日本気象学会北海道支部2010年度第1回研究発表会, 札幌, 2010年6月.
- 6) 稲津將, 木本昌秀, 佐竹祐哉 (2010): 双方向ネスト実験はGCM バイアスを低減できるか? -1997年夏の例. 日本流体力学会2010年会, 札幌, 2010年9月.
- 7) Inatsu, M., M. Kimoto, and Y. Satake (2010): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. NHM International Workshop, Kyoto, September 2010.
- 8) 稲津將, 木本昌秀, 佐竹祐哉 (2010): 双方向ネスト実験はGCM バイアスを低減できるか? -1997年夏の例. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 9) 佐竹祐哉,稲津將(2011):隣接閉領域トラッキングによる台風トラック,平成22年度京都大 学防災研究所共同研究集会「台風研究会」,京都,2011年1月.
- 10) Inatsu, M., T. Yamada, T. Sato, K. Nakamura, M. Saito and A. Komatsu (2011): Development

and application of comprehensive downscaling methods over Hokkaido. Workshop on the dynamical downscaling. Tsukuba, January 2011.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4)シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Satoh, M., H. Tomita, H. Miura, S. Iga, and T. Nasuno (2005): Development of a global cloud resolving model -- a multi-scale structure of tropical convections --. J. Earth Simulator, 3, 11-19
- 2) Inatsu, M., and M. Kimoto (2009): A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. Mon. Wea. Rev., 137, 2851-2868.
- 3) Inatsu, M., Y. Satake, M. Kimoto, and N. Yasutomi (2012): GCM bias of the Western Pacific summer monsoon and its correction by two-way nesting system. J. Meteor. Soc. Japan, 90B, 1-10.
- 4) Inatsu, M. (2009): The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. Atmos. Sci. Lett., 10, 267-272.

Research Project of Multi-model Ensembles and Down-scaling Methods for Assessment of Climate Change Impact

Principal Investigator: Izuru TAKAYABU

Institution: Meteorological Research Institute

Nagamine1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan Tel: +81-29-853-8617 Fax: +81-29-855-7240

E-mail: <u>takayabu@mri-jma.go.jp</u>

Cooperated by: National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention, University of Tsukuba, Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, Tokyo Institute of Technology, National Institute for Agro-Environmental Sciences, Hokkaido University

[Abstract]

Key Words: Multi-model ensembles, Dynamical downscaling, Statistical downscaling, Urban canopy scheme, Regional climate model

Global warming research has shifted from a phase of prediction to a phase of utilization through the IPCC Fourth Assessment Report. As the report makes clear, global warming is one of the major issues to be resolved in the world. Now, we are struggling with how to utilize outputs of global warming simulations for impact studies because there is still a large gap between the outputs of global simulations and regional high—resolution impact studies. We aim to overcome such an issue in this project and S-5-3 tries to fill in the gap between them in order to derive much information from outputs of global models and to hand it to the impact studies. To achieve the goal, we have done the following things.

Three organizations (NIED: National Research Institute for Earth sciences and Disaster prevention, University of Tsukuba and MRI: Meteorological Research Institute) integrated their 20km resolutions regional climate models (RCM) by using JRA-25 re-analysis data, MIROC-hi and MIROC5 future projection data as the boundary forcing, and the results are verified by using the observation data. At Hokkaido University, a two-way nesting model has been successfully applied around the Japan area, and the influence of the local topography has been analyzed. Also we have done some evaluation of estimating the effect of doing multi model ensemble experiment for the downscaling. Here we compare the three 20km models downscaling results, find the effect of using Baysian approach to get the ensemble results, and estimate the uncertainty coming from scenario, GCM and RCM.

The grid size of 20km is still insufficient if we apply the result to the impact study model. Thus, we have secondary downscaled the data to 2-4km grid interval, by using urban canopy models (University of Tsukuba, DPRI: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, MRI) to

prepare downscaling data fit for the impact studies of the metropolitan area. Here, we get the scenarios of the urbanization from S-5-4, and try to integrate the models by using these scenarios. For the rural area, we apply a statistical downscaling method, which includes the bias correction and produces the applicable data. We have done some statistical downscaling fit for both agricultural (NIAES: National Institute for Agro-Environmental Sciences) and hydrological usage (University of Tokyo Technology, DPRI). These efforts will make the dynamical downscaled data usable for the impact study.