

30. 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

EXAMINATIONS OF THE RECONSTRUCTION OF CURRENT CLIMATE BY USING
A NESTED REGIONAL CLIMATE MODEL TO PROJECT UNUSUAL WEATHER,
CLIMATE EXTREMES AND HEAVY RAINFALLS ON THE GLOBAL WARMING

西森 基貴*・木村富士男**・飯泉 仁之直*・横沢 正幸*

Motoki NISHIMORI, Fujio KIMURA, Toshichika IIZUMI, Masayuki YOKOZAWA

ABSTRACT; To investigate the possibility of projection of unusual weathers such as hot and cool summer or disaster of heavy rainfall under the global warming condition, we have examined the reconstructed probability of extreme summertime high and low temperatures and local-scale heavy rainfall by using a regional climate model (RCM), Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) modified in the Terrestrial Environmental Research Center (TERC). The TERC-RAMS is a nested RCM and has driven by a forcing general circulation field obtained from realistic re-analysis data or Global Climate Models. Preliminary experiments are intended to reconstruct mainly on daily rainfall amount and frequency, and daily maximum and minimum temperatures in Japan. The results showed that the TERC-RAMS could reconstruct the rainfall frequency in one month, but not project the absolute amount of heavy rainfall well. In addition, this model has a systematic bias for under-estimation of temperature. The model experiments have necessity to further development especially on radiation and surface soil/water conditions.

KEYWORDS; regional climate model, heavy rainfall, extreme high temperature, global warming, Japan

1. はじめに

2003年の欧州における熱波、2004年の日本における台風の相次ぐ上陸、そして2005年のアメリカ合衆国におけるハリケーン(カトリーナ)の被害などから、地球温暖化による異常気象の頻発に対する関心が高まっている。本年(2007年)2月に公表された気候変動に関する政府間パネル(International Panel on Climate Change: IPCC)第1作業部会の政策者向け要旨¹⁾においても、20世紀の後半からの暑い日(日本でいう真夏日・酷暑日)や暑い夜(同様に熱帯夜)の増加は人間活動による温室効果気体の増加が寄与している可能性が高く、将来それがさらに増加することはほぼ確実であると結論づけている。雨に関しても、現在までにも大雨と干ばつはともに増加しており、また将来さらに増す可能性がかなり高いとしている。その後の2007年4月にはIPCC第2作業部会の要旨²⁾も公表され、アジア・アフリカなどにおけるデルタ地域での洪水被害の増加と中緯度・乾燥熱帯地域での淡水資源の減少などが報告されている。我が国でも2004年に数多く襲来した台風による災害のほか、栃木・福島豪雨/高知豪雨(1998年)、東海豪雨(2000年)、新潟・福島豪雨/福井豪雨(2004年)など、台風が日本に直に接近していなくても起こる集中豪雨災害が頻発し、豪雨災害とその防災対策に対する関心が高まっている。いっぽう日本のコメ生産においては、すでに高温による作柄不良や品質低下が現に起こっており、今後ともその影響は大きくなると予想されている³⁾。このため地球温暖化時に極端な高温や災害をともなう集中豪雨などの極端な降水イベント、いわゆる「異常気象」がどのように変化するかを明らかにするのが緊急の課題である。

しかしながら温暖化予測に用いられる全球気候モデル(General Circulation Model または Global Climate Model: GCM)は、一般には空間解像度がまだ不十分な上に雲や水に関わる物理過程に問題が残る。この問題を解決する上で、

* (独)農業環境技術研究所大気環境研究領域 Division of Agro-Meteorology, National Institute for Agro-Environmental Sciences, Kan'nondai 3-1-3, Tsukuba, IBARAKI 305-8604, Japan. ** 筑波大学生命環境化学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Japan.

地球シミュレータのような大規模な設備投資を必要としない一つの方法として、筆頭著者がここ数年来報告してきた、過去の気候系における大循環要素と降水量など気候要素との間の統計的関係を将来に適用し温暖化時のGCMの循環要素の変化から気候要素の変化値を計算する統計的ダウンスケーリング手法⁴⁾⁶⁾がある。しかしながらこの手法は線形的な統計関係を前提にしており、災害を引き起こすような集中豪雨や作物被害を引き起こす極端な高温/高夜温など短時間スケールの極値の再現にはなお改良の余地があった。

ここでGCMの出力を境界条件として対象領域周辺のみでの再計算を行う地域気候モデル(Regional Climate Model: RCM)実験では、それら極端な現象や極値の再現が期待され、小領域における気候変化予測を行うことが可能であるため、水文・水循環過程の解明やその変動予測⁶⁾⁷⁾、ならびに農業ほか水資源に関する影響評価に有用である⁸⁾⁹⁾。実際に気象庁ではこのRCMを用いて、各分野の研究者が共通に使用できる気候統一シナリオ¹⁰⁾を作成し、さまざまな温暖化影響評価に用いられている¹¹⁾。しかしながらこのモデルの境界条件として用いられている気象研究所GCMは大気海洋結合モデル¹²⁾で、そこで計算された現在気候は現実のカレンダーに即した年ではなくGCM内の仮想的なものであり、実際の異常気象が発生した年に対応しているわけではない。またその親GCMの温暖化予測結果はIPCC報告に用いられている他のGCMよりも将来の気温上昇幅が小さく¹⁰⁾、さらにこのシナリオでは農業影響評価に不可欠な日射量の値が提出されていないという問題がある。そこで我々は本稿において、すでに温暖化予測を行った実績のあるTERC-RAMS⁸⁾⁹⁾を用い、日本における異常気象の将来の予測可能性を探るために、実際の異常気象発生年を対象とした地域気候モデルによる気候再現の現状を示す。

2. TERC-RAMSの特徴と実験設定

TERC-RAMSとは、コロラド州立大学で開発されたRAMS (Regional Atmospheric Modeling System)¹³⁾を筑波大学陸域環境研究センター(Terrestrial Environmental Research Center: TERC)で改良したものである¹⁴⁾。このRAMSの特徴として、①大領域において粗い空間解像度で計算を行い、その中で特定の領域をより細かな解像度で再計算を行うネスティングという入れ子構造的な手法が可能で、約数kmまで空間を細分化できること、②数ヶ月以上の長期計算で温暖化予測が可能であること、③大陸スケールから都市気候のスケールまで汎用性が高いこと、などが挙げられる。RAMSは大気部分のみのモデルであるため、現在気候の計算では米国環境予測センターと米国大気海洋庁(NCEP/NCAR)の再解析データ¹⁵⁾を6時間ごとに境界条件としてモデルに与えている。モデルの計算積分期間は現在のところ、モデルの助走期間を考慮し、前月末3日～当月末までの約1ヶ月間としている。

本稿ではまず地域気候モデルによって異常気象を含む現在気候の大まかな再現性を見ることが目的であり、計算時間を節約する意味もあって多段ネスティングは用いていない。ここでの空間解像度は将来的な比較のために、気象庁が採用した日本域の標準的な解像度で、また前述の気候統一シナリオ¹⁰⁾でも用いられている20kmとした。そのため境界条件のNCEP/NCAR再解析データの緯度経度2.5°から、直接20kmに空間的なダウンスケーリングを行っていることになる。解析対象年は日本において顕著な暑夏であった1994年、および近年で顕著な豪雨災害があった1998、2000、2004年であり、それぞれ暖候期について各1ヶ月単位でのモデル実験を行った。なおモデル結果の検証には、主に農業環境技術研究所で作成したアメダスメッシュデータ¹⁶⁾の10km版を用いた。これは地域気候モデルの空間解像度が20kmの段階では、アメダス観測点そのものの値よりも、広域の空間的な比較に適していると考えたためである。

3. 豪雨災害をとまなう異常気象年の気候とその再現

2004年暖候期は、当初は梅雨前線が不活発であり、関東地方を中心に6月後半から7月前半にかけて記録的な高温が続いた。その後、前線活動は特に日本海側で活発化し新潟・福島豪雨と福井豪雨がによる災害が相次いで発生、さらに観測史上最多の10個の台風が日本に上陸し、全国各地に土砂災害や高潮などの被害をもたらした。このように2004年は過去の統計からも特異な「異常気象年」であったことから、この極端な年の気候が地域気候モデルでどのように再現できるかを明らかにすることは、温暖化時の異常気象予測に極めて有効である。そこで2004年に関しては、7～11月の5ヶ月間にわたって1ヶ月単位での気候再現を試みた。その中で図1には10月の実験で、台風23号により西日本から東海にかけての太平洋側で大きな災害の発生した10月19日～20日における日降水量分布を示す。この10月には9日にも台風22号が静岡県に上陸し関東地方で災害が発生するなど、一般に地域気候モデルで再現が難しい気象場であった。この2日間におけるモデル再現降水量は、高知県中央部において2日間合計で300mm以上の降水が見られるほか、紀伊半島から静岡県沿岸の太平洋側、および中国地方から岐阜県北部にかけて200mm程度の降水域が見ら

れる(図1)。アメダスメッシュによる実際の日降水量では四国東南部のほか、九州南東部および三重県中部など太平洋側の南東斜面において広範囲に、2日間で300mm以上のまとまった降水が見られる(図2)。本モデルは太平洋側の四国・紀伊半島・静岡県沿岸の降水域を集中的に捉えており(図1)、気候モデルとしては妥当な評価を与えられると考えるが、九州東部や岐阜県北部の降水域は再現できていないことが不十分な点である。

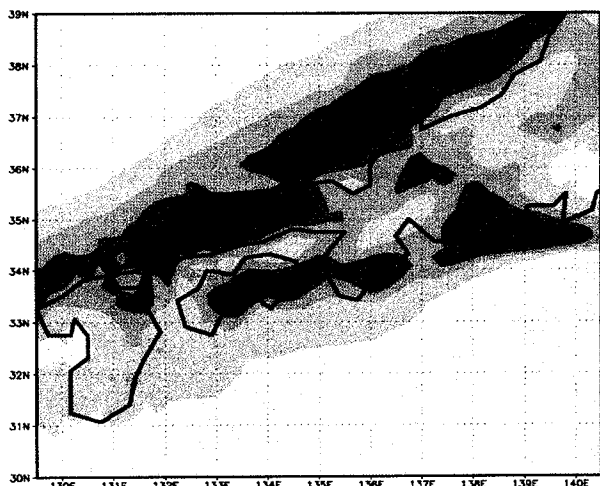


図1 TERC-RAMSによる2004年10月実験の東～西日本における同月19～20日の2日間降水量分布(mm)

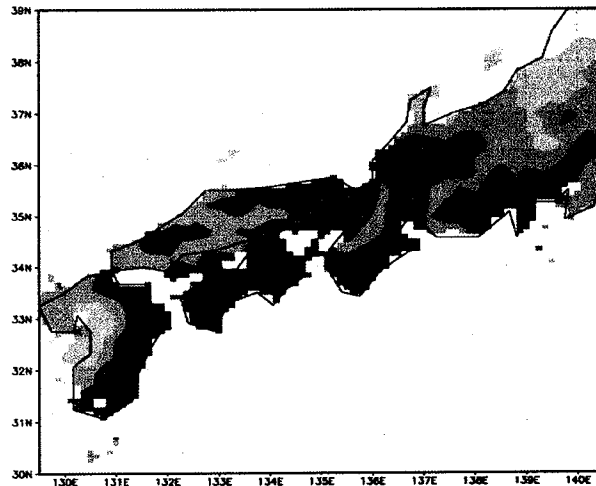


図2 図1と同じ。ただしアメダスメッシュによる同じ2日間の降水量分布

ところで現高知県香美市の繁藤地区は、1972年7月に起きた駅北斜面の山崩れによる繁藤災害など、四国でも有数の多降水地点である。実際この台風時にも2日間で300mm以上の降水があった(図2)が、TERC-RAMSによる10月1ヶ月間の降水変化を見ると、まず台風23号による降水は2日間合計ではおおむね図4に示す観測相当値と一致している。また観測ではこの月には台風23号によるもののほかに、計4回の降水イベントがあった(図4)。モデル再現実験では、まずこの計5回の降水イベントは再現していること、および台風23号以外のイベントの降水量は、観測推定

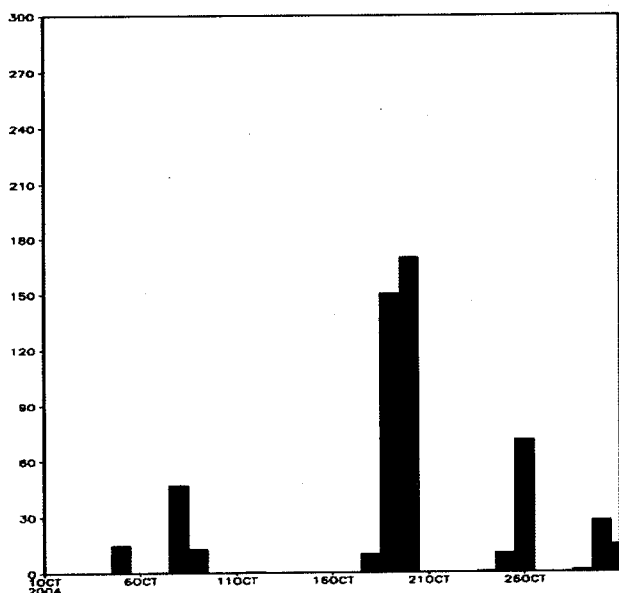


図3 図1と同じTERC-RAMSの2004年10月実験による繁藤(高知県香美市)付近に相当するモデルグリッドの日降水量(mm)の変化

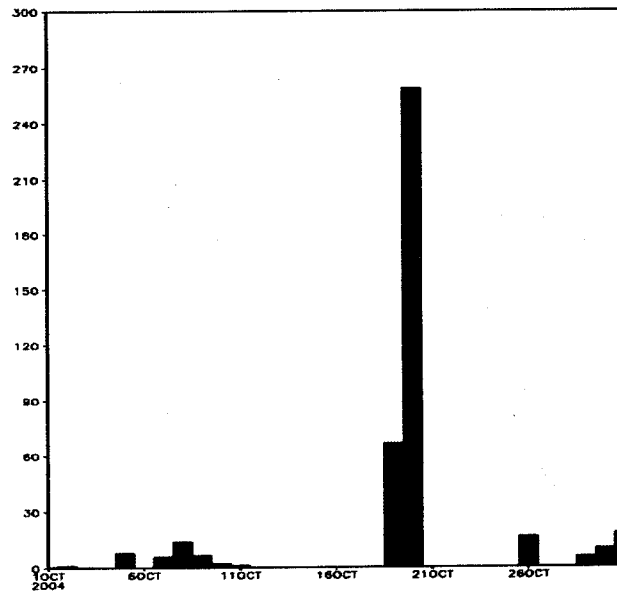


図4 図3に同じ。ただし繁藤付近に相当するアメダスメッシュデータによる日降水量(mm)の変化

値よりもむしろ多くなっていることがわかる(図3)。本モデルの降水量は、まだ豪雨時には一般に過小評価する傾向があるが、山間部においてはこのように弱い降水イベントを過大評価する場合もある。

次に、同様に豪雨災害が頻発した1998年の再現結果について述べる。この年の暖候期は気象庁の長期予報に反して冷夏・冷害となり、数多くの小台風が日本近海で発生して日本に接近し、さらに関連して、8月末の栃木・福島豪雨と9月の高知豪雨など各地で豪雨災害が頻発した。8月の栃木・福島豪雨は、8月25日から関東から北海道付近に停滞した前線に対し台風9804号からの湿った空気が継続的に流入し、東日本に記録的な豪雨をもたらしたものである。那須のアメダス観測では、8月26日-31日の総降水量が1253mmであった¹⁷⁾。図5には、TERC-RAMSを1998年8月の1ヶ月間駆動したうち8月29日における日降水量分布を示す。これと観測結果(図6)を比較すると、観測では郡山を中心に福島県東部で日降水量120mm以上の降水域が見られるのに対し、モデルでは山形県南部を中心に同様の降水域が見られる。つまり本モデルによる再現結果では、集中豪雨の起こる範囲が北西側にずれているという問題があるが、もともと過小評価しがちな集中豪雨時の降水量をおおむね再現することは可能であった。

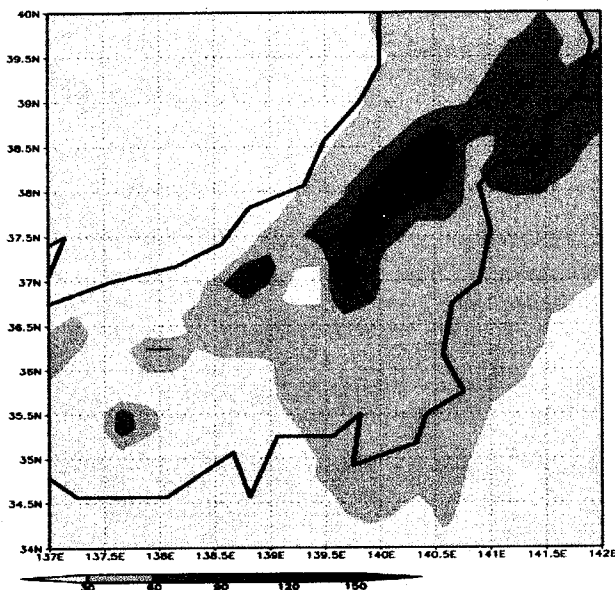


図5 図1に同じ。ただし1998年8月実験における同月29日の東日本における日降水量分布(mm)。

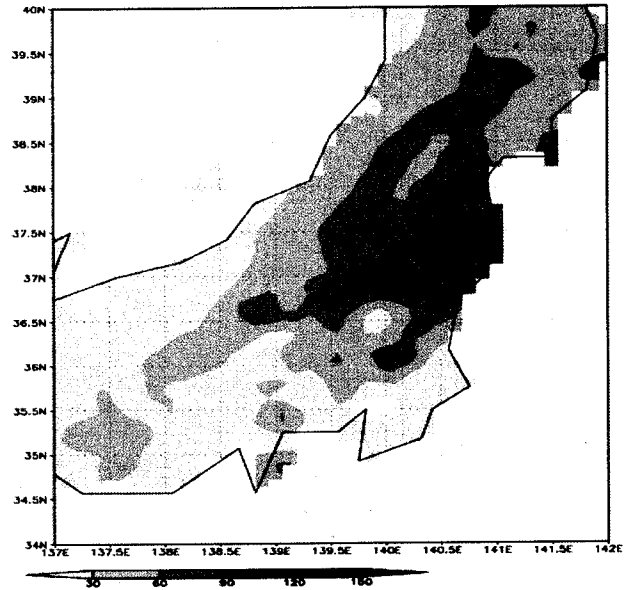


図6 図5に同じ。ただし同日のアメダスメッシュによる日降水量分布(mm)

さらに2000年において東海豪雨の発生した9月を対象に、同様の実験を行った。この豪雨の特徴は9月11~12日に名古屋を中心とする東海地方で24時間に500mmを越す降水があり、家屋の浸水被害のほか、道路の損壊や停電による、大都市の経済活動に打撃を受けたことなどである¹⁸⁾。東海道新幹線の運行停止により、多数の乗客が24時間近く車内に閉じこめられたことも、新しい型の災害として報道された。TERC-RAMSによる9月の1ヶ月間にわたる気候再現実験は、この月の名古屋地方気象台相当域における5回の降水イベントをほぼ忠実に再現しているが、実際の豪雨のあった9月11日の日降水量は55mmにとどまっており(図7)、本モデルによる現在気候再現実験は降水頻度(日数)という面では有用であるが、降水強度(量)という面ではまだ不完全なものである。

4. 地球温暖化を視野に入れた暑夏年の再現

1994年は、その前年の冷夏・冷害年から一転した記録的な暑夏として知られている¹⁹⁾。地球温暖化により、さ

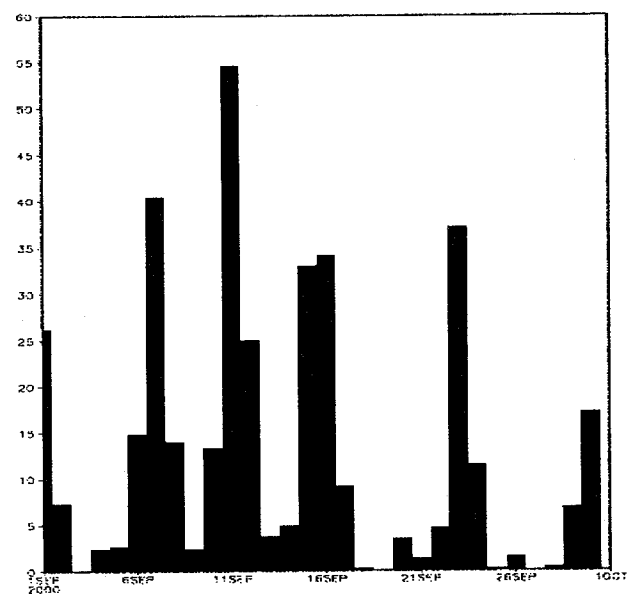


図7 図3に同じ。ただし2000年9月実験における名古屋に相当するグリッドの日降水量(mm)の変化

らなる高温が予想されており、このような極端な高温を地域気候モデルで再現できるか、信頼性のある温暖化予測のポイントである。図8には、1994年7月実験における宮古に相当するグリッドの日平均・最高・最低気温の変化を示す。これと図9に示すアメダス値を比較すると、日々の気温変化の傾向は比較的良く捉えられているものの、モデル出力が観測値に比べて最低気温が高く最高気温が低い、つまり気温の日較差が小さくなっていることがわかる。TERC-RAMSによる気候再現において、低温バイアスは大きな問題点である⁹⁾。一つの原因としては、本実験では空間解像度が20kmであるため、地形に応じたローカールスケールの気温分布が詳細に表現できていないことが挙げられる。また放射および土壌水分のパラメータを調節し、従前のものよりも低温バイアスは幾分改善されているものの、地球温暖化による極端な高温を予測するためには、現状再現がまだ不十分であり、MOS(Model Output Statistics)などの併用も含めて今後の課題である。

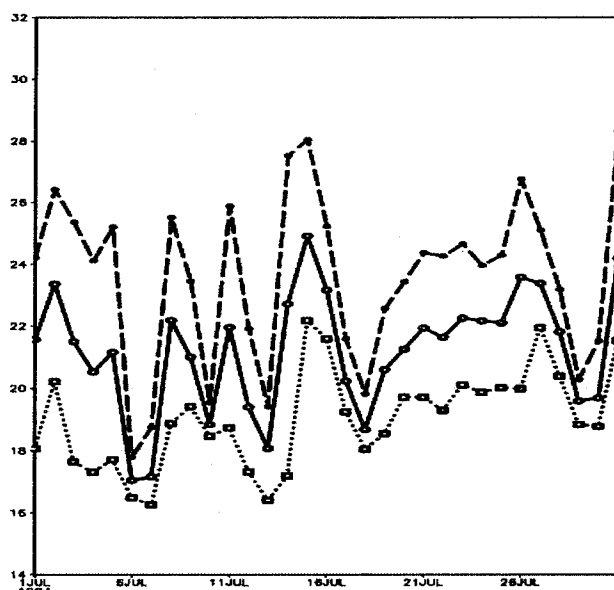


図8 TERC-RAMSの1994年7月実験による宮古付近に相当するグリッドの日平均(○実線)・最高(●破線)・最低(□点線)気温(°C)の月内変化

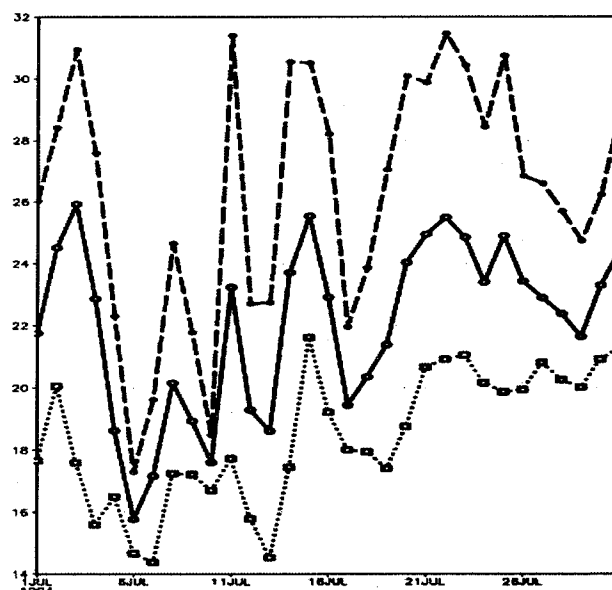


図9 図8に同じ。ただしアメダスメッシュデータによる宮古付近に相当するグリッドのもの

5. まとめと考察

本研究では、温暖化予測に関して先行研究例のある地域気候モデルTERC-RAMSを用い、日本において集中豪雨や気温の極値など異常気象の気候学的な再現を試みた。その結果、2004年10月の台風23号による西日本の降水域をおおむね再現した。また1998年8月の栃木・福島豪雨については、集中豪雨帯に系統的なずれが見られるものの豪雨の量としては比較的妥当な値を得た。さらに2000年の東海豪雨に関しては、豪雨自体の再現は成功していないものの、1ヶ月中の降水イベント数は再現しており、降水頻度という面ではまだ予測可能性のある結果となっている。降水に関するより精緻な気候再現のために、今後は積雲対流スキームの改良を検討しているところである。

ところで近年において地域気象・気候モデルの発展はめざましく、例えばWRF(Weather Research and Forecast model)²⁰⁾²¹⁾といった、より高解像度でより複雑な物理過程を持つ領域気象モデルを用いた集中豪雨の再現が行われている。再現対象を一つのイベントとしての集中豪雨に絞った場合には、確かに短時間積分に力を発揮するこの種のモデルを用いた方が、豪雨の再現性自体は向上すると思われる。しかしながら本研究では、地球温暖化という長期の気候変化の中での集中豪雨や極端な高温という極値現象、という位置づけでの研究を行っているため、あくまで1ヶ月以上の長期積分が可能なRAMSを用いていることは強調しておかねばならない。またこの実験においては気温の出力値に系統的な低温バイアスがあり、地球温暖化を視野に入れた高温極値の再現とその予測には、課題が多く残されていることも明らかとなった。この点に関しては、今後とも放射のほか土壌質や土壌水分の取り扱いを中心に改良を進めていく。しかしながらどのように計算機資源が発達し気候モデルが改良されようとも、地域気候モデルにおける気候再現・予測の限界点は存在するため、前述のMOSなど統計的処理/補正が欠かせないことは記しておく。

謝辞：本研究は、環境省地球環境研究総合推進費S4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」（研究代表者：三村信男茨城大学教授）中の課題2(3)-1[気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究]（分担代表者：横沢正幸）、および同推進費S5「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」（研究代表者：住明正東京大学教授）中の課題3(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]（分担代表者：西森基貴）の中で行われた。

参考文献

- 1) IPCC (2007a): Climate change 2007: The scientific basis. Summary for policymakers. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.
- 2) IPCC (2007b): Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. <http://www.ipcc.ch/SPM6avr07.pdf>.
- 3) 西森基貴・横沢正幸(2001)：気候変動・異常気象による日本の水稲単収変動の地域的变化。地球環境, 6(2), 149-158.
- 4) 西森基貴・鬼頭昭雄(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.
- 5) 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*, Mar. 10-12, in CD-ROM, 2006.
- 6) 大楽浩司・江守正多・野沢徹(2005)：全球気候モデルにネスティングした地域気候モデルによる21世紀のアジアの水資源変動予測。水工学論文集, 49, 397-402.
- 7) Sato, T., F. Kimura and A. Kitoh (2006): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*, 333, 144-154.
- 8) Kimura, F. (2005): Regional climate change in Turkey estimated by RSM pseudo warming run. *Proceedings of the International Workshop for the Research Project on the Impact of Climate change on Agricultural Production System in Arid Areas (ICCAP)*, Kyoto, Japan, 17-18.
- 9) Iizumi, T., Y. Hayashi and F. Kimura (2007): Influence on rice production in Japan from cool and hot summers after global warming. *J. Agric. Meteorol.*, 63, 11-23.
- 10) 気象庁(2005)：地球温暖化予測情報第6巻。58p.
- 11) 和田一範・石井琢哉・櫻井康博(2007)：地球温暖化に伴う四国地方の洪水リスク評価に関する考察。水工学論文集, 51, 433-438.
- 12) 気象庁(2003)：地球温暖化予測情報第5巻。71p.
- 13) Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lynos, L. D. Grasso, M. E. Nicolls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee and J. H. Copeland (1992): A comprehensive meteorological modeling - RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- 14) Yoshikane, F. and F. Kimura (2004): Formation mechanism of the simulated SPCZ and Baiu front using a regional climate model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 60, 2612-2632.
- 15) Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- 16) 清野裕(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.
- 17) 牛山素行(2004)：1998年8月26日～31日に栃木・福島県で発生した豪雨災害の特徴。自然災害科学, 17, 237-244.
- 18) 水文・水資源学会東海豪雨災害調査委員会(2001)：2000年9月東海豪雨災害の実態と教訓。水文・水資源学会誌, 14, 411-432.
- 19) 西森基貴(1997)：日本における夏期気温変動と1993・94年の冷夏・暑夏。気象研究ノート, (189), 199-216.
- 20) Kusaka, H., A. Crook, J. C. Knievel and J. Dudhia (2005): Sensitivity of the WRF model to advection and diffusion schemes for simulation of heavy rainfall along the Baiu front. *SOLA*, 1, 177-180.
- 21) Kusaka, H., A. Crook, J. Dudhia and K. Wada (2005): Comparison of the WRF and MM5 models for simulation of heavy rainfall along the Baiu front. *SOLA*, 1, 197-200.