

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世紀のアジアの水循環変動予測

HYDROLOGICAL PROJECTION UNDER THE GLOBAL WARMING IN ASIA
WITH A REGIONAL CLIMATE MODEL NESTED IN A GENERAL
CIRCULATION MODEL

大楽浩司¹・江守正多²・野沢徹³
Koji DAIRAKU, Seita EMORI and Toru NOZAWA

¹正会員 工博 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

²非会員 学術博 国立環境研究所 大気圏環境研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³非会員 理博 国立環境研究所 大気圏環境研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

We have developed a new regional climate model based on the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), and conducted present and future Asian regional climate simulations nested in the CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model (AGCM). The general simulated features of the AGCM and some regional phenomena such as orographic precipitation, which were not appeared in the outcome of the AGCM simulation, were successfully produced by the nested regional climate model. Annual mean precipitation, evapotranspiration and surface runoff are projected to increase in a lot of Asian regions. Those indicate faster and stronger hydrological cycles. There is growing apprehension that the risk of floods will increase under the global warming and the associated hydrological changes such as the intensification of convective precipitation in summer, the reduction of snow cover in winter, and earlier snow melting in spring.

Key Words: *Hydrological Future Projection, Global Warming, Regional Climate model, Dynamical Downscaling, Asia*

1. はじめに

近年、地球温暖化によって水循環はどのような影響を受けるのか、ということに対して人々の多大な関心が集まっており、人間生活、自然生態系にしばしば多大な影響を及ぼす、渇水・洪水・土砂災害・土壌浸食などに対して適切に水資源を管理するために、政策立案者から将来のリスクアセスメントがますます求められるようになっていく^{1), 2), 3), 4), 5)}。

非常に活発な大気・陸域間の熱・水循環に特徴づけられるアジアモンスーン地域には、世界の 60%を越す人口が集中している。この地域に居住する人々の活動の基盤としての水は、アジアモンスーンに伴う水循環に大きく依存している。アジアモンスーンは洪水・渇水を引き起こし、地域経済や人々の生活に大きな影響を及ぼす。それゆえ、人為起源の排出ガスによって引き起こされる地球温暖化がアジアの水循環へどのように影響を及ぼすのかについては、非常に重要な関心事であり、近い将来

の適応策・緩和策の指針を得るために、解析・予測を行うことが緊急に求められている。

現在、地球環境変動下の水循環予測は、主に全球気候モデルを用いて行われているけれども、現段階では地域スケールの水資源、農業生産活動などの影響評価のために用いることができる情報は非常に限られている。それは、全球気候モデルの空間解像度が粗いことや、不確実な物理過程を含むこと、検証データが限られていることなどに起因する。全球気候モデルによってグローバルに予測された気候変動の結果を、地域スケールの気候に適用して水循環の動態を明らかにし、水資源管理に役立てるには、ダウンスケールすることが必要となる。

現実の気候場における降水量と循環要素の統計的關係などをもとに、主に全球気候モデルの出力を用いてより細かい空間解像度の気候要素の予測値を求める統計的ダウンスケーリング手法に対して、本研究では、地域気候

モデルを用いて、全球気候モデルの結果を物理法則に基づいてダウンスケーリング（以後、力学的ダウンスケールと記す）することによって、水平解像度 60km でモンスーンアジア地域気候に対する地球環境変動の影響の研究を行う。特に、1) 全球気候モデルによる実験結果に地域気候モデルをネスティングして高解像度化を図る際の整合性の検証を行い、2) さらに現在気候、温暖化を仮定した将来気候における雲・降水過程、地表面での蒸発散、浸透、流出、積雪、融雪過程などの熱・水循環過程の定性的・定量的理解、予測を行った。

2. 数値モデルと数値実験

本研究では、全球気候モデルに地域気候モデルをネスティングして力学的ダウンスケーリングを行った。物理過程の違いによって生じる矛盾や非現実的な振る舞いを避けるためにも、両モデルの物理過程が整合的であることが望ましいという考えから、コロラド州立大学で開発された 3 次元非静水圧・圧縮モデル（RAMS: Regional Atmospheric Modeling System⁶⁾）に、親モデルである CCSR/NIES AGCM⁷⁾の主な物理過程を組み込んだ⁸⁾。NIES-RAMS に導入した物理過程は、Arakawa-Schubert 積雲対流スキーム、大規模凝結スキーム、放射スキーム、鉛直拡散、陸面過程モデル（MATSIRO: minimal advanced treatments of surface interaction and runoff⁹⁾）である。

全球気候モデルを境界条件として地域気候モデルによる数値実験を行うと、全球気候モデルのバイアスを地域気候モデルが引き継いだり、そのバイアスをより強める可能性がある。そこで、地域気候モデル自身のバイアスを評価するために、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の 15 年再解析値（ERA15）を境界条件として、NIES-RAMS による現在気候再現実験・検証を行った。また、水平解像度 T42（約 2.8 度グリッド）の CCSR/NIES AGCM の実験結果（6 時間毎）を境界条件として、NIES-RAMS による現在気候（1981-1990 年）と将来気候（2041-2050 年）の地域気候実験を行った。

NIES-RAMS の数値実験の計算領域は、図-1 に示される約 9,600×7,100km の領域で、60km の水平解像度である。現在気候実験の海面水温（SST）と海氷分布は UKMO の GISST¹⁰⁾を用いた。将来気候では、CO₂ 濃度を現在気候の 2 倍の 690ppm とし、エアロゾル、オゾンなどの化学物質の将来予測結果を与え、海面水温は T21 の大気海洋結合モデル（CGCM）実験から得られた季節変化を持つ温暖化パターンを GISST に加えたものを用いた。

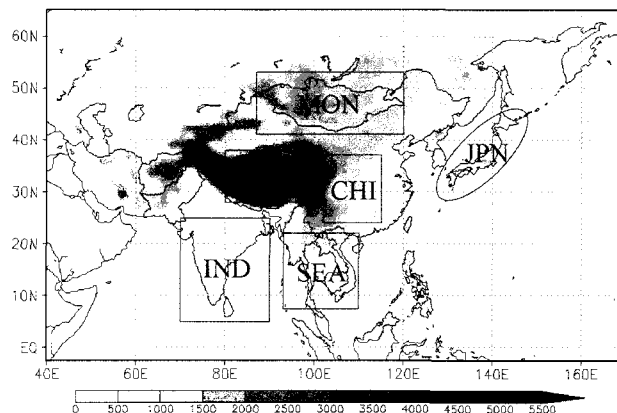


図-1 数値実験の計算領域。図中の実線の四角・楕円で囲まれた範囲は数値実験結果を陸上で空間平均した領域。

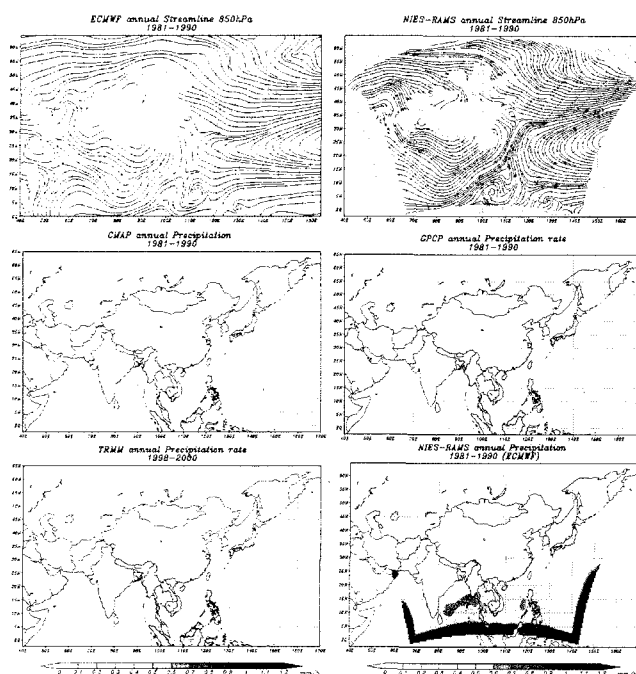


図-2 観測値と数値実験結果。左上はERA15、右上はRCMの流線。左中、右中、左下はそれぞれCMAP、GPCP、TRMM。右下はRCMの降水。

3. 数値実験結果

(I) ERA15を用いた現在気候再現実験と検証

ヨーロッパ中期予報センターの再解析値（ERA15）を境界条件とした、NIES-RAMS による 1981-1990 年の現在気候再現実験結果は、再解析値に見られるモンスーン循環、亜熱帯高気圧、偏西風の特徴をよく再現できており、高度場も比較的良好に再現できていた（図-2）。ただし、ERA15 に比べ、NIES-RAMS では高度場が全体的に高くなる正のバイアスが見られた。降水分布については、多くの地域気候モデルで見られるように、計算領域の側方境界付近において非現実的な降水が生じていた

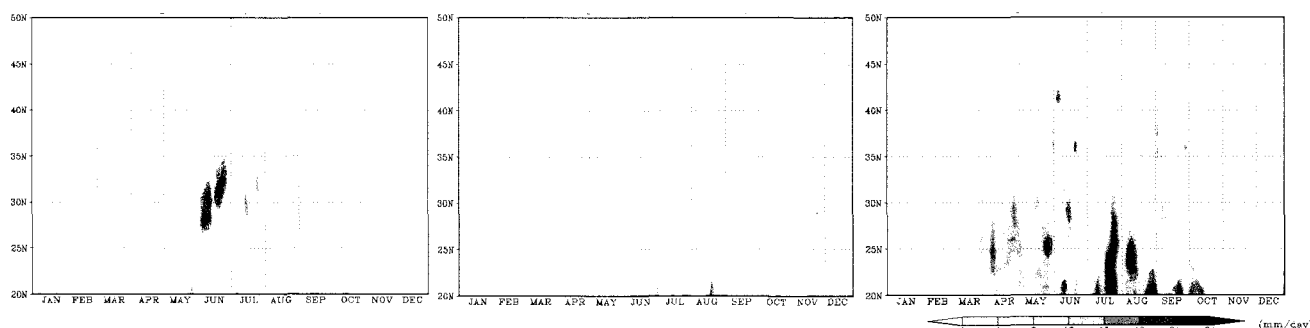


図-3 東経130度、北緯20度から50度における観測と数値モデルの降水の緯度－時間断面。上図はGPCP-1ddの1997年から2003年の平均。中の図と下の図は、それぞれGCMとRCMの計算結果を1981年から1990年の10年間平均したもの。

が、フィリピンから日本に伸びる降水帯や、西太平洋やベンガル湾上の強い降水域などの降水分布を比較的良好に捉えることができていた。また、解像度の粗い CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)¹¹⁾や、Global Precipitation Climatology Project (GPCP)¹²⁾では見られないが、TRMM で見られるインド西岸やチベットの南斜面における地形性降水もモデルで比較的良好に捉えることに成功していた(図-2)。

降水の観測値はデータセットによるばらつきもあるけれども、総じてモデルは熱帯海洋上で降水を過大評価気味であった。また、中国の東部においても比較的良好な降水が生じていた。これは、NIES-RAMS のバイアスであり、他の変数についても検討した結果、現段階の NIES-RAMS には高温バイアス(1-4 度)があり、対流圏下層の低い気圧(4-8hPa)によって収束が生じ、水蒸気が増加し、降水過多をもたらしている。過大な降水は大気中で潜熱を解放することによって気温を上昇させ、その結果大気層の厚みが厚くなり、高温・低気圧バイアスが生じていた。

Suh and Lee¹³⁾はNCAR RegCM2を用いてアジアの夏季についてシミュレーションを行い、気温においては中国北部とモンゴルで2度から4度程度の正負のバイアスがあり、陸上では過大、南海上では負の降水のバイアスを報告している。また、一般的に、観測値を境界条件として与えた地域気候モデルは、 10^5km^2 から 10^6km^2 の領域平均の気温が2度以下、降水量は50%以下の誤差があると報告されている¹⁴⁾(c.f. 今回の計算領域は約 $6.8 \times 10^7\text{km}^2$)。これらの報告されたバイアスと直接的な比較はできないが、NIES-RAMSは調整・改良の必要はあるものの、そのバイアスが他のモデルの結果に比べて著しく大きいということではなかった。

(2) CCSR/NIES AGCMを初期・境界条件とした現在気候実験と将来気候実験

CCSR/NIES AGCM による現在気候・将来気候のタイム

スライス実験結果を NIES-RAMS の初期・境界条件として与え、それぞれ1年間スピニングアップし、その後10年間ずつ積分を行い、地球温暖化時におけるアジアの水循環変動を検討した。

梅雨前線、熱帯低気圧に関係するフィリピンから東シナ海、日本にかけての降水帯や、GCM では不明瞭なインド西岸やチベットの南斜面における地形性降雨などの地域的な降水の空間分布の改善が見られる¹⁵⁾。図-3 は東経 130 度における北緯 20 度から 50 度における降水の観測値 (GPCP-1dd)¹⁶⁾の 1997-2003 年平均、GCM と RCM は 1981-1990 年平均の降水の緯度－時間断面を示す。図-3 の左図に見られるように、5 月から 7 月に梅雨に関連した強い降水帯の北上が顕著に見られる。図-3 の中の図の GCM ではこの季節進行を十分に捉えることが出来ていない。一方、図-3 の右図に示される RCM では、GCM の計算結果を境界条件として与えたにもかかわらず、降水の季節進行を改善し、再現することに成功している。

しかし、観測値を境界条件とした与えた計算結果で見られた NIES-RAMS のバイアスによって、GCM の熱帯域における強めの降水がさらに強化され、また、中国東部においては過大な降水域が生じてしまっていた。このバイアスの特徴は、将来気候実験においても変わらなかった。

次に、このモデルで予測された温暖化時のアジア域における年平均の循環場などの主な変化について述べる。温暖化した結果、本研究で用いたGCMでは海面水温が El Niño に似た応答を示し、活発な対流域が東へシフトし、ウォーカー循環が変調し、西太平洋域で下降流が強まり、降水の減少が予測される(図-4 (a), (b))。また、モンスーン循環が強まっているとは必ずしも言えないけれども、温暖化による水蒸気量の増加によって水蒸気フラックスは増加し、インド西岸、チベット南側の地形性降水の強まりが見られる。西太平洋域における高気圧性の循環場の強まりにより、フィリピン諸島から東シナ海にかけて水蒸気フラックスの増加が見られ、日本周辺で降水量が増加することが予測される(図-4 (b))。将来気候

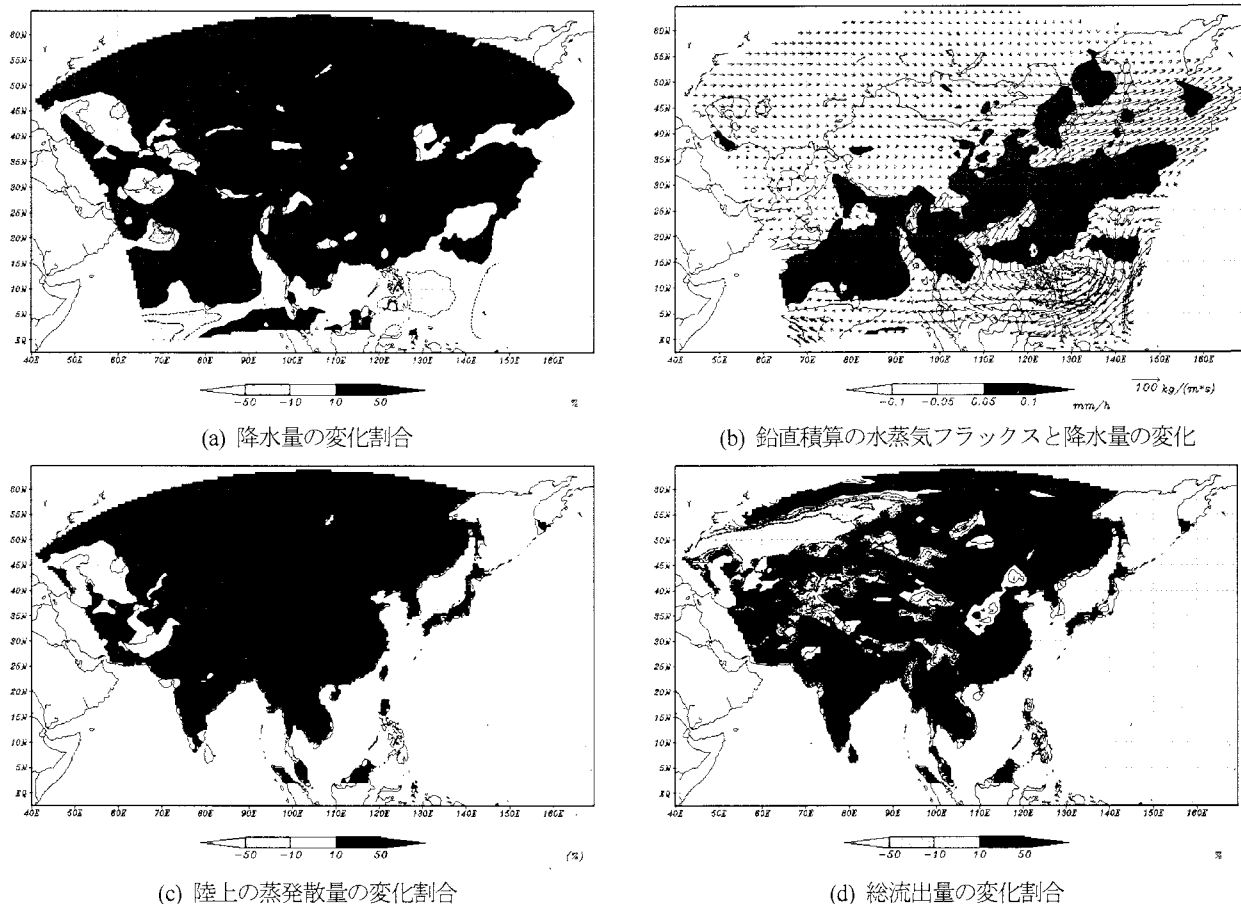


図-4 温暖化時の水循環の変化。(a)、(c)、(d)は、2041-2050年の10年平均の1981-1990年の10年平均に対する変化率。(b)は将来気候と現在気候の差。

において、人為起源の温室効果気体の増加によって生じる対流エネルギーの増加と、気温の上昇に伴う蒸発散量の増加（図-4 (c)）、大気中水蒸気の急激な増加（クラウド・クラペイロンの式）によって、降水が増え（図-4 (a)、(b)）、水循環が活発化し、アジアの多くの地域において年平均流出量が増加することが予測される（図-4 (d)）。

(3) アジアの水循環の季節変化への温暖化の影響

温暖化は平均値だけを変化させるだけではなく、10年変動や季節変化、極値現象などにも大きな変化をもたらす。ここでは、特に地域の水資源にとって重要だと考えられる雲・降水過程、地表面での蒸発散、浸透、流出、積雪、融雪過程などの熱・水循環過程に対する温暖化の影響の解析を行う。

6つの地域（IND: India、SEA: Southeast Asia、TIB: Tibet、CHI: China、MON: Mongolia、JPN: Japan）を選び、解析を行った（図-1）。解析に用いた変数は、図-1に示されるそれぞれの領域の陸上で空間平均した。ここでは、東南アジア（SEA）とチベット（TIB）の2地域について示す。

東南アジアでは、雨季の降水の約半分は大規模凝結スキームによって生じている。雨季開始前の乾季には、積雲対流による降水が卓越する。乾季から雨季への遷移期においては、降水が土壌水分を増加させ、土壌が飽和するにつれて流出が急激に増加する。

温暖化時には、地表近くの気温が上昇し、比湿も増加することが予測される。6、7月は西太平洋における高気圧性のアノマリの強まりによってモンスーン循環が弱まり、降水が減少するが、乾季から雨季、雨季から乾季にかけての遷移期には降水が増加することが予測される（図-5 上）。これは、温暖化による積雪面積の減少と中・高緯度の陸域でのより強い昇温、それによる海陸の熱的コントラストの強化によるモンスーン循環の強まり、雨季の長期化、また大気中に含まれる水蒸気の増加によるものと考えられる。乾季は積雲対流が増加して雲量が減少し、地面に入ってくる下向き正味短波放射が増加し、代わりに下向き正味長波放射が減少する（図-5 中）。その結果、正味放射量が増加し、潜熱が増加する。乾季には降水の増加が小さく、蒸発の増加によって土壌水分は減少することが予測される（図-5

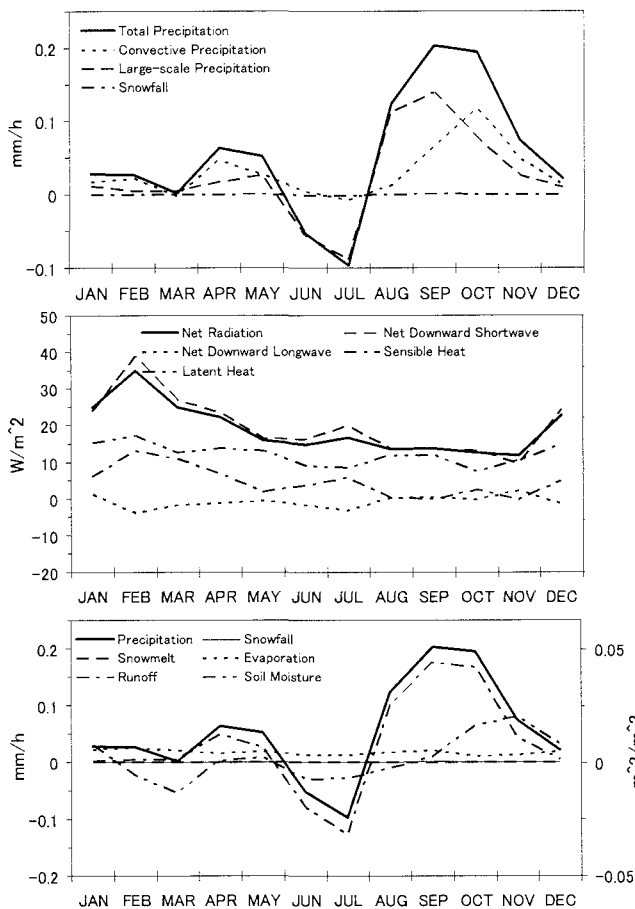


図-5 東南アジアの水循環の季節変化に対する温暖化の影響。図は各月ごとの2041-2050年の10年平均と1981-1990年の10年平均の差。上図は降水の変化、中の図は熱フラックスの変化、下の図は水フラックスの変化。

下)。乾季から雨季、雨季から乾季への季節の遷移期には降水、流出共に増加することが予測されるが、6、7月は降水、土壌水分、流出共に減少することが予測され、乾季・雨季のコントラストが弱まる可能性が示唆される。また、積雲対流の強まりに伴う洪水の増加も懸念される。

チベットでは、降水の大部分は大規模凝結スキームによって生じており、冬季には降水のほとんどは雪である。積雲対流による降水は夏季のみにみられる。融雪は初夏にピークがあり、土壌水分の増加をもたらす、その期間は流出量が降水を上回る。土壌水分が飽和するにつれて、夏季から秋にかけて流出、潜熱が増加する。

温暖化時には、東南アジア同様、地表近くの気温が上昇し、比湿も増加することが予測される。融雪は早まり、春季に流出と土壌水分が増加する（図-6 下）。夏季には積雲対流活動が活発化し（図-6 上）、雲量が減少し、地面に入ってくる下向きの正味短波放射が増加し、代わりに下向きの正味長波放射が減少する（図-6 中）。正味放射量が増加するため、潜熱が一年を通して増加し、

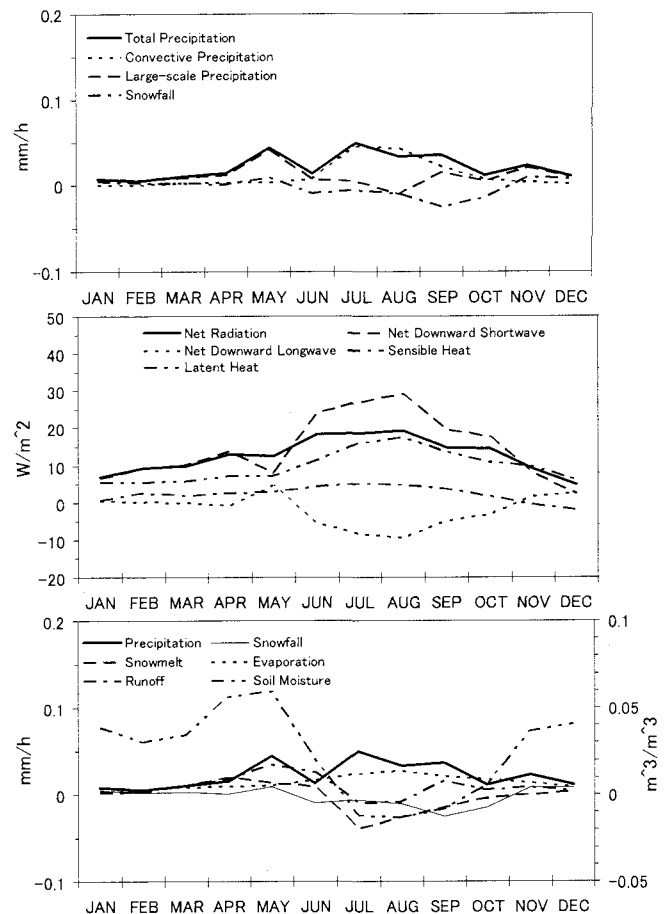


図-6 図-5と同じ（ただし、チベット地域における水循環の変化）。

特に夏季に蒸発が増加することが予測される。秋季には、温暖化のため降雪量が減少するが、その減少を上回る降雨の増加が予測される。降雪量が減少するため、増加した降雨は直接土壌へ涵養される。積雪が減少し、融雪の時期が早まり、春先の流出が増え、また夏季に蒸発量が増加することから、夏季には土壌水分、流出量の減少が予測される（図-6下）。これらの変化は、積雪による降水の貯留効果を弱め、流出の季節変化に影響を及ぼし、また、夏季における農業生産活動へ悪影響を及ぼす可能性が懸念される。

4. まとめ

全球気候モデルの物理過程を導入した地域気候モデルを用いて力学的ダウンスケーリングを行い、モンスーンアジア地域における水循環の将来予測を行った。地域気候モデルは、平均的な気候場については親モデルにほぼ忠実に従い、かつ全球気候モデルでは明瞭に表現できない海陸のコントラストや、山岳地域やその周辺地域、地形性降雨などのメソスケール現象を改善することができた。

人為起源の温室効果気体の増加によって温暖化が予

測される将来気候において、本研究で用いた地域気候モデルで予測された、低緯度地域に比べ高緯度地域における地表気温の高い上昇、大気中の水蒸気量の増加、モンスーンによる降水の増加、蒸発量の増加、積雪の減少は IPCC に報告されている多くの GCM の実験結果と一致している¹⁴⁾。また、東南アジア、チベットにおいて予測された、夏季における乾燥傾向、冬季における湿潤傾向は Wetherand と Manabe¹⁷⁾による北アメリカ、ヨーロッパ南部を対象にした解析結果と同じ傾向を示している。本研究の結果から、温暖化時に水循環が活発化し、アジアの多くの地域において流出量が増加することが予測される。また、地域によって洪水・渇水、農業生産への影響が懸念される。

本研究は、力学的ダウンスケーリング手法の有効性、将来性を示した。また、メソスケールの現象が重要となるより詳細な地形などの効果を反映した予測や、グリッドベースの詳細な影響評価を行っていく際にも非常に大きく貢献することが期待できる。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術振興調整費プロジェクト「21世紀のアジアの水資源変動予測」（代表：鬼頭昭雄 気象研究所室長）、環境省地球環境研究総合推進費「地球温暖化の総合解析を目指した気候モデルと影響・対策評価モデルの統合に関する研究（IR-3）」（代表：神沢 博 名古屋大学教授）の一部として行われました。

参考文献

- 1) IPCC: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. and White, K. S. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2001.
- 2) Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J. and Lammers, R. B.: Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth, *Science*, Vol.289, pp.284-288, 2000.
- 3) Palmer, T. N. and Räisänen, J.: Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, Vol.415, pp.512-514, 2002.
- 4) Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A. and Delworth, T. L.: Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, Vol.415, pp.514-517, 2002.
- 5) Still, C. J., Foster, P. N. and Schneider, S. H.: Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests, *Nature*, Vol.398, pp.608-610, 1999.
- 6) Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H.: A comprehensive meteorological modeling - RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol.49, pp.69-91, 1992.
- 7) Numaguti, A., Takahashi, M., Nakajima, T. and Sumi, A.: Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model, *CGER's Supercomputer Monograph Report*, Vol.3, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, pp.1-48, 1997.
- 8) Emori, S., Nozawa, T., Numaguti, A. and Uno, I.: Importance of Cumulus Parameterization for Precipitation Simulation over East Asia in June, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.79, pp.939-947, 2001.
- 9) Takata, K., Emori, S. and Watanabe, T.: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global and Planetary Change*, Vol.38, pp.209-222, 2003.
- 10) Rayner, N. A., Horton, E. B., Parker, D. E., Folland, C. K. and Hackett, R. B.: Version 2.2 of the global sea ice and sea surface temperature data set, 1903-1994, *CRTN*, Vol.44, Available from Hadley Center, Meteorological Office, Bracknell, UK., 1996.
- 11) Xie, P. and Arkin, P. A.: Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.78, pp.2539-2558, 1997.
- 12) Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B. and Schneider, U.: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.78, pp.5-20, 1997.
- 13) Suh, M. -S. and Lee, D. -K.: Impacts of land use/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate cases using RegCM2, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, D02108, doi: 10.1029/2003JD003681, 2004.
- 14) IPCC: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A. eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2001.
- 15) Dairaku, K., Emori, S., Nozawa, T., Yamazaki, N., Hara, M., Kawase, H.: Regional climate simulation over Asia under the global warming nested in the CCSR/NIES AGCM, *Proceedings of the 2nd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference*, Vol.2, pp.756-764, 2004.
- 16) Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., Bolvin, D. T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B. and Susskind, J.: Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations, *J. Hydrometeor.*, Vol.2, pp.36-50, 2001.
- 17) Wetherald, R. T. and Manabe, S.: Detectability of Summer Dryness Caused by Greenhouse Warming, *Climatic Change*, Vol.43, pp.495-511, 1999.

(2004. 9. 30 受付)