

【2A-1201】CMIP5 マルチモデルデータを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究（H24～H26；累計予算額 138,349 千円）

高数 縁（東京大学）

1. 研究実施体制

- (1) アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の解明とその将来変化についての研究（東京大学）
- (2) アジア域気候とこれに関連する陸面・海面状態の将来変化の研究（国土交通省気象庁気象研究所）
- (3) ダウンスケーリング研究のための CMIP 5 マルチモデルにおけるアジアモンスーン気候再現性と将来変化の研究（筑波大学）
- (4) 熱帯域現象が東アジアの降水活動に与える影響の解明とその将来変化の研究（(独) 海洋研究開発機構）
- (5) 対流圏－成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究（(独) 海洋研究開発機構）

2. 研究開発目的

アジア域の降水現象およびそれに関わる地球全域の気候状態の将来変化について予測する際、人間社会への影響という観点において効果的な情報を抽出することが重要である。IPCC AR5 でも、アジア域の降水の将来変化についての詳細な情報は非常に不足している。そこで、本課題では、CMIP5 に集約された世界各国の複数の高性能気候モデルによる予測結果を詳細に分析することによって、日本を含むアジアの気候が温暖化に伴い今後どのように変化していくのかを示し、日常生活、文化活動、経済活動等において地球温暖化への適応策を考案するための支援を行うことを目的とする。その際、時間的に平均した気候分布のみならず、高低気圧や季節進行など、我々の日常生活に直接的な影響を及ぼす日々の変化をもたらす気象に注目し、さらにそのような気象の再現性の良し悪しをもたらす物理的な要因を調べる。各サブ課題は以下の項目に注目して解析を行う。

(1) 梅雨前線に伴う降水の特性とその季節進行、黒潮などの海面水温分布の変化に伴う降雨変化の再現性とその物理的要因を評価し、それに基づいて温暖化時の変化を議論する。東アジアの気候に遠隔影響をもたらす熱帯降水分布やユーラシア大陸上の降水分布の気候モデルバイアスの原因を調査し、将来変化を議論するのに不可欠な気候モデルの性能に関する提言を行う。(2) 日本の季節進行やアジア域気候および関連する海面陸面状態の将来変化について、高い気候再現性を持った予測結果を解析し予測の信頼度を高めるとともに、気候力学的メカニズムを分析することで科学的な理解を進める。(3) ダウンスケーリング研究に影響を与える夏季アジアモンスーンの再現性について統計的・力学的な比較を行う。また、地球温暖化時の寒候期の寒気吹き出し強度の変化について評価する。(4) 台風、熱帯季節内変動などの熱帯域の諸現象について、気候モデル再現性を調べ、将来変化を評価する。さらにテレコネクション等を通して熱帯域の対流活動が東アジアに及ぼす影響とその将来変化を評価する。(5) 観測データ、気候モデル実験、及び CMIP5 モデルの 20 世紀再現実験と将来予測実験のデータ解析を組み合わせて、対流圏－成層圏循環場の再現性の検証と将来予測に関する研究を行う。

3. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本課題「CMIP5 マルチモデルを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究」では、気候モデルの再現性に関して物理的解釈に重点を置いて研究を行った結果、3年間で Nature 論文を含む 33 本の査読付一流国際学術誌への掲載発表と、198 件の学会等の口頭発表を達成し、この分野における科学的理解の発展に大きく貢献したといえる。また、3 回の国際会議を主催して海外のエキスパートを招聘し、CMIP5 相互比較によるアジア気候の将来変化研究についての研究情報交換を行ったことも科学的意義が大きい。

(1) アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の解明とその将来変化についての研究

- a) 最新の衛星観測データと大規模気象場とを組み合わせた解析により、前線南北での降水の3次元構造の顕著な違いを世界で初めて明らかにし (Yokoyama et al. 2014)、初夏の日本付近の降水に関する理解を深めた点で科学的意義が大きい。
- b) 熱帯太平洋降水分布のダブル ITCZ と赤道域冷舌バイアスは、世界中の気候モデルに共通して見られる重要な問題として知られているが、本研究によって世界で初めて、前者は主に大気モデルの積雲対流パラメタリゼーションに起因し、後者は海洋モデル依存性が高いという、バイアス要因が明確分離にされた (Hirota and Takayabu, 2013) 点で科学的意義が大きい。さらにダブル ITCZ バイアスに関して、気候モデルによる感度実験も行い、物理プロセスの理解に基づいて具体的なモデルの改良方法も示した (Hirota et al. 2014) ことも科学的価値が高い。ユーラシア大陸上の降水バイアスも多くのモデルが共通して抱える問題であり、その発生メカニズムの解明は科学的価値が高い。
- c) 九州北部豪雨の解析と数値実験結果は、東シナ海の水温の顕著な季節性が水蒸気供給による大気的不安定化を通じて豪雨に本質的に寄与し得ることを初めて明確に示し、科学的意義が高く、Scientific Reports 誌掲載の成果論文 (Manda et al. 2014) として記者発表した。
- d) Okajima et al. 2014 は、従来否定されてきた中緯度海洋変動が大規模大気循環に及ぼす影響を初めて明確に示した点で科学的価値が高い。また、東方海上の海洋前線帯における水温の10年規模変動期変動が自然変動の揺らぎと解釈できたことは、北太平洋域の気候状態の将来変化予測に不確実性をもたらす新たな要因を見出した。
- e) Masunaga et al. (2015) は、全球大気モデルにおいても十分な水平解像度があり、水温前線を表現できる水温データを与えれば、日本の東方海上の複雑な水温分布の顕著で局所的な水温勾配が大気境界層のメソ構造や雲・降水系の形成に与える影響を表現できることを示し、科学的価値が高い。
- f) 夏季の北極海沿岸ストームトラックの研究 (Nishii et al. 2015) は、温暖化の著しい北極海域への熱・水蒸気の輸送の再現性に、IPCC クラスの気候モデルではかなりの過小評価と不確実性があることを指摘し、シベリア域の陸面・植生などの表現の改善の必要性を促す価値がある。

(2) アジア域気候とこれに関連する陸面・海面状態の将来変化の研究

a) アジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱化（力学的効果）による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも水蒸気増加の効果が現れやすく、大きな降水増加が予測されていることがわかった。b) 東アジアにおける月平均降水量や極端降水量の再現性はCMIP5がCMIP3より精度が良く、また梅雨の北上傾向がより良く再現されている。世界の気候モデルによる東アジアの降水量再現性は確実に再現していることが判明した。c) 日本の南東海上での高気圧性変化はアリューシャン低気圧の南側を弱める方向に寄与するため、地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱体化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が示唆される。温暖化による熱帯対流圏の成層安定化が東アジアにおける冬の循環の変化に及ぼす影響については、Hori and Ueda (2006) などの先行研究が存在するものの、数は少なく、これまで理解があまり進んでいなかった。そのため、本研究が果たした科学的意義は大きいと考えられる。

(3) ダウンスケーリング研究のための CMIP 5 マルチモデルにおけるアジアモンスーン気候再現性と将来変化の研究

温暖化により、時期・季節によっては現在気候よりも大きな気温急低下が生じる可能性を示した。ただし、気温低下幅の将来変化はモデル間で大きくばらつき、季節平均などの大気循環場の現在気候再現性とは関連性を見いだすことは困難であった。すなわち、ダウンスケーリング研究で利用する全球モデル選択のためには、季節平均気象要素の再現性だけでなく、短周期変動の再現性も含め、複数の指標を総合した評価基準で選択する必要があることを示した。

(4) 熱帯域現象が東アジアの降水活動に与える影響の解明とその将来変化の研究

気候モデルによる再現が難しいとされてきた熱帯季節内変動現象に関し、再現性の評価により信頼性の高いモデルを抽出することで現象の解析を行い、不確実性の低い将来予測情報の抽出が可能となったことは、科学的意義が大きい。

(5) 対流圏－成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

地球温暖化の新たなシグナルが、成層圏の QBO という現象に既に現れていることを発見するとともに、大気微量成分を全球に運ぶ極めて重要な BDC の強化を観測データから世界で初めて立証し、気候モデル予測の正当性を示した点は、今後の温暖化予測研究にとっての科学的意義が大きく、Nature に掲載された (Kawatani and Hamilton, 2013)。この知見は、オゾン層将来予測モデルを用いたオゾン層回復時期・程度に関する知見に定量的な示唆を与える可能性もあり、今後のモデル予測精度の向上や、IPCC の科学的知見の収集にも貢献する。大きな放射強制力を持つ故に、気候変動に重要な役割を果たす成層圏水蒸気の年々変動について、その実態を示しメカニズムの解明をしたことや、中高緯度で成層圏から対流圏まで伸びる東西風の年々変動の再現性には成層圏を含む必要を示した科学的意義は大きい。また、新たな GTEM 解析法により、現実的な波動と平均場の相互作用について、理論的に予想された負の渦拡散の効果を初めて定量的に取り扱うことが出来るようになったことの科学的意義も大きい。

(2) 環境政策への貢献（研究者による記載）

<行政が既に活用した成果>

- 1) 気象庁は、サブ課題 2 の成果を「異常気象レポート 2014」（2015 年 3 月発行）に引用した。
- 2) 2013 年に発行された IPCC AR5 には、本課題メンバーによる学術論文 17 本（同グループによる推進費先行課題 S-5-2 の成果で本課題に継続している）が引用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- (1) アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の解明とその将来変化についての研究
 - a) 梅雨の雨の特徴は、数百 km 幅の降雨帯の中で顕著な南北差をもち、前線の南側では激しい積乱雲の雨が多い。ジェット気流などが気候変動に伴い僅かに南北移動すると、豪雨頻度など日本域の雨の様相に急激な変化をもたらす可能性を示唆するもので、防災面における温暖化対策策定の際に重要な知見を与えることが見込まれる。
 - b) 本研究の同著者によるダブル ITCZ の要因についての論文の第一報（先行推進費）は将来予測のための気候モデルの重要な改良策を指摘し、IPCC AR5 に引用された。今回はその物理的意味をより明確にした点で、気候モデル改良への指摘にさらに活用されることが見込まれる。
 - c) 九州北部豪雨の再現・感度実験は、浅い東シナ海の水温の顕著な季節性の寄与を初めて明確化し、今世紀半ば以降は東シナ海水温の顕著な上昇によって、将来こうした規模の豪雨が 6 月末にも起こり得る可能性を示唆し、かつ 7 月ならば現在よりも 30% もの降水量増加が見込まれる可能性を示唆するもので、今後の防災・環境政策に役立つ重要な知見を与える。
 - d) 日本東方海上などの海洋前線帯の水温偏差は海洋循環の変動により形成・維持されるため、中高緯度では例外的に大気へ熱力学的強制を及ぼし得る。今回の大気大循環モデル実験の結果は季節予報の精度向上にも寄与し得る成果である。この研究成果の論文は IPCC AR5 でも引用されている。
 - e) 一般市民向け小冊子「暑いだけじゃない地球温暖化 2：世界の気候モデルが予測する東アジアと日本の雨」は、本課題で発行された査読つき学術論文の成果から、地球温暖化に伴う身近な気象の変化についてのわかりやすい話題を選び、内容を噛み砕いて編集したものであり、国民に地球温暖化の効果を実感してもらうための活用が役立つと考えられる。

(2) アジア域気候とこれに関連する陸面・海面状態の将来変化の研究

本研究で得られた地球温暖化に伴う気候の変化についての情報は、より具体的に国民や関係機関に伝えられることにより、日本社会の様々な分野での影響評価研究に基づく適応策の検討に貢献できる。

具体的には、a) 日本を含むアジア域では世界各地域に比べて地球温暖化による大きな降水増加が予測されるため、大雨に対する備えと水の有効利用が必要であること、b) 地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱体化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が理論的に明確になったこと、c) 日本付近では大気循環の変化に伴う海面水位変化が大きく、世界平均海面水位の将来変化値による議論のみでは不十分であること、d) 世界の気候モデルの降水量再現性は着実に向上しているが、日本を含むアジアでは観測との絶対比較ではまだまだ不十分であり、陸面温度や海面水温の将来変化に伴う降水量変化の不確実性も認められることから、今後も気候モデルの開発とこれを用いた温暖化予測研究が望まれること、である。

(3) ダウンスケーリング研究のための CMIP5 マルチモデルにおけるアジアモンスーン気候再現性と将来変化の研究

寒気吹き出し時の気温低下幅が、東アジアの初春期で特に強くなることを初めて示した。初春期の気温低下幅の強化は、単に気象要素の短周期変動性の変化にとどまらない。東アジアにおいては、a) 黄砂の発生・輸送動態の変調をもたらす、b) 温暖化した気候に適応した品種の農作物に対する低温障害を引き起こす、などの影響が考えられる。この知見はアジア域全体での温暖化適応策の多国間協議の場において特に重要な知見となると期待される。

(4) 熱帯域現象が東アジアの降水活動に与える影響の解明とその将来変化の研究

熱帯インド洋から中部太平洋で発達する大規模な雲群 (MJO: マッデン・ジュリアン振動) の発達は、日本を含む東アジア域における低気圧活動に大きく影響している。将来気候においては熱帯 MJO による中緯度への影響が強化するであろうことが示唆された。日本付近の将来気候変動予測においては、熱帯域現象の再現性や予測精度を向上させることが重要であるという知見を示している。

また、気候モデルにおける将来気候実験では、台風発生に好都合な環境場であるフィリピン沖のモンスーン低圧帯が東に伸張し、台風の主要発生域が東方へ拡大又は移動し、日本域への台風接近数が減少する可能性があることが示唆された。この成果は、IPCC AR5 への貢献論文として地球温暖化関連政策に資するとともに、我が国における防災・環境政策にも重要な示唆を与える知見である。

(5) 対流圏-成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

地球温暖化による成層圏循環の応答を初めて観測から実証し Nature 誌に発表した。これは、政策者が地球温暖化の事実の下に政策を行うことをサポートする重要な証拠となる。更に温暖化影響の正確な把握には成層圏現象を正しく表現できる気候モデルの利用が必要不可欠なことを示した。これはオゾンホール回復のための政策にも重要である。

4. 委員の指摘及び提言概要

CMIP5 マルチモデルデータや最新の各種観測データなどを詳細に解析することにより気候モデルの再現性の評価・検討を行い、信頼性の高い気候の将来変化の傾向を検討した。日本を含むアジアの気候に関わる諸現象の解明を進めるとともに、地球温暖化に伴う変化について多くの新たな知見を得ており、成果の科学的意義は大きい。また、温暖化への対応を検討する上で有益な情報を与えており、今後の環境政策への活用と波及効果が期待できる。特にサブテーマ (1) と (2) では適応策の立案に寄与する成果を多く挙げている。学術誌への原著論文掲載、学会等での口頭発表から公開イベントによる発表にいたるまでの対外的情報発信も充実している。

5. 評点

総合評点： A