

領域大気海洋結合モデルの不確実性の検証

森山 文晶¹・芳村 圭²・筆保 弘徳³

¹学生会員 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5丁目1-5)
E-mail:moriyama@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学准教授 生産技術研究所附属千葉実験所 (〒277-8574 千葉県柏市柏の葉5丁目1-5)
E-mail:kei@iis.u-tokyo.ac.jp

²非会員 横浜国立大学准教授 教育学部 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-2)
E-mail:fude@ynu.ac.jp

領域大気海洋結合モデル RSM-ROMS の不確実性検証を目的とし、CORDEX アジア域で力学的ダウンスケーリングシミュレーション実験を行った。RSM-ROMS による実験結果を領域大気モデル RSM による実験結果や観測、再解析データと比較した。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) RSM-ROMS の海面温度は観測データに対し低温傾向を持つが、相関係数 0.99 で、観測データの年々変動や季節変動を捉えた。またパワースペクトルは RSM より詳細な構造を示した。
- 2) RSM で現れた山間部の多雨傾向が RSM-ROMS で増加した一方で、海上降水量の誤差は減少した。
- 3) RSM-ROMS は水深 100m の海水温に 4°C 以上の低温傾向を持つが、海面温度と同様に季節変動を捉えた。RSM-ROMS の海水温の誤差は季節変動より大きく、不確実性を示唆した。
- 4) 熱帯域において RSM-ROMS で海面の正味熱フラックス誤差が改善されたが、中緯度域では誤差が増加した。

Key Words: dynamical downscaling simulation, regional climate model, atmosphere-ocean coupled model, RSM-ROMS

1. はじめに

全球モデルによる数値シミュレーションを用いた気候変動予測実験はこれまでに国内外を問わず盛んに行われている。しかし、地球全体を長期間にわたって計算するための計算資源は未だ十分でないため、水平解像度はかなり解像度の高いものでも 100km 程度である。このため、全球モデルによる気候変動予測実験で得られたデータでは、メソスケール以下の現象の影響評価研究に用いることができない。そこで全球モデルによる数値シミュレーションから得られた将来気候情報とメソスケール以下の現象の影響評価研究に必要な情報のギャップを埋めるため、現在広く用いられている方法が領域モデルを用いた力学的ダウンスケーリングシミュレーション (DDS) 手法である。これまでの DDS 手法を用いた影響評価研究では、領域モデルとして大気モデルが用いられてきた。大気モデルでは、全球モデルから得られた海面温度 (SST) データが計算領域の下端部分に与える境界条件として用いられており、領域モデルの解像度と SST の解像度のギャップが指摘されている¹⁾。この問題

を解決する方法の一つとして、大気と海洋が結合された領域モデルの利用が挙げられる²⁾。

大気と海洋が結合された領域モデルを用いた DDS 研究はこれまで全く実施されていないわけではない。過去の研究では、およそ 10 の領域大気海洋結合システムが開発されており³⁾、RSM-ROMS⁴⁾ もそのうちの一つである。RSM-ROMS はアメリカ西海岸に位置するカリフォルニア湾を対象に、再解析データ⁵⁾ や全球モデル出力気候データ⁶⁾ を用いた DDS 実験に用いられている。また、日本及び韓国域を対象に再解析データ³⁾ の DDS 実験に適用しているが、その他の地域では未だ用いられていない。そのため、各地域が持つ大気・海洋の気候的特性について、RSM-ROMS が観測データと比較してどの程度の精度を持つかは議論されていない。特に複数の領域モデルでの DDS 実験を、相互に評価・改善を行うために設定されている CORDEX アジア域⁵⁾⁶⁾ で RSM-ROMS を適用し、その精度を評価することは重要である。

本研究では、領域大気海洋結合モデル RSM-ROMS を用いた DDS 実験を行い、領域規模の大気海洋相互作用を含んだ気候情報による沿岸海洋生態系の影響評価研究

の実施を目指す。それに先駆けて、本論文では観測データや再解析データとモデルの出力値を比較し、領域大気海洋結合モデルの不確実性を検証することを目的として、RSM-ROMS を CORDEX アジア域に適用し、現在気候を対象に20年間の DDS 実験を行った。

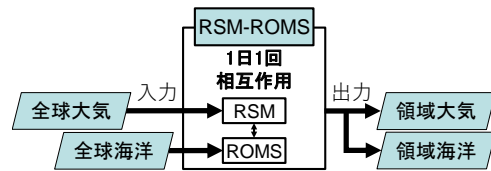


図-1 領域大気海洋結合モデル RSM-ROMS の概要図。

2. 研究手法

(1) 実験設定

領域大気海洋結合モデル RSM-ROMS の概要を図-1 に示す。RSM-ROMS では、大気モデル RSM⁷⁾ と海洋モデル ROMS⁸⁾ にそれぞれ全球の境界条件が与えられて時間積分していく。RSM と ROMS は24時間ごとに海面を通して相互に影響を及ぼす。計算結果は領域大気と領域海洋に分かれて RSM-ROMS から出力される。また、モデルの設定は表-1 の通りである。モデルの計算領域の側方部分に与える境界条件には全球再解析データを用い、大気の側方境界条件には NCEP Reanalysis 2⁹⁾ を、海洋の側方境界条件には NCAR SODA 2.2.4¹⁰⁾ を使用した。RSM の空間解像度は水平 50km、鉛直 28 層、時間ステップは 120 秒で、冬のみ 90 秒となっている。ROMS の空間解像度は水平 50km、鉛直 30 層、時間ステップは 600 秒である。実験期間は、1986 年から 2005 年まで 20 年間とした。海洋モデル結合の影響を比較するため、RSM-ROMS の大気モデル RSM をコントロール実験に使用した。今後は RSM による実験を CTRL 実験、RSM-ROMS による実験を CPL 実験と表記する。CPL 実験ではモデルによって 1 日毎に SST が計算されるが、CTRL 実験では下部境界条件として水平解像度が全球 1 度、時間解像度が 1 日毎の NCEP/NOAA OISST AVHRR daily data¹¹⁾ (ただし、週平均値を時間内挿したもの) が入力されている。また計算領域は図-2 に示す領域 (20S-55N; 67E-171E) であり、解析には側方境界条件による不自然な影響の強い領域を避けた内側の領域 (17S-53N; 71E-167E) を使用した。

(2) モデル不確実性の検証に使用したデータ

モデルの不確実性の検証には 4 変数 5 種類のデータセットを用いた。SST の検証には NCEP/NOAA による衛星、船舶、海上ブイ観測を統合し、最適内層した SST データセットである AVHRR の全球水平解像度 0.25 度、時間解像度 1 日のデータセットを用いた。CTRL 実験の下部境界条件として用いた全球解像度 1 度の AVHRR よりも高解像度のデータセットで、こちらは時間内挿されたものではない。海上の降水量の検証には NASA/GSFC による雨量計での地上観測と衛星観測を統合した全球解像度 2.5 度の降水データセットである GPCP¹²⁾ を用いた。地上の降水量に対しては、GPCP に用いられる地上観測デー

表-1 モデルの設定。

設定	大気モデル RSM	海洋モデル ROMS
初期・境界条件	NCEP R2 (250km/daily)	NCAR SODA (50km/monthly)
モデル解像度	水平 50km, 鉛直 28 層, dt=120s (90s)	水平 50km, 鉛直 30 層, dt=600s
静力・非静力	静力	非静力
物理過程	RAS, SLINGO, non-local PBL	MY 2.5level, K-profile

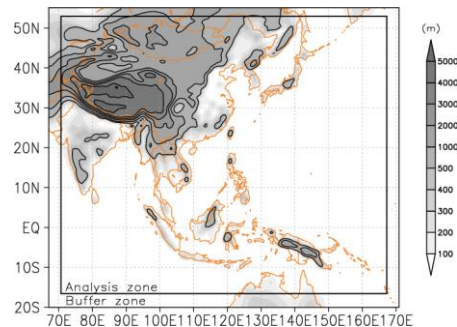


図-2 モデル計算領域。シェードはモデルの地形を表す。四角形の外はバッファ域で内側を解析域としている。

タで、解像度が全球 0.5 度と GPCP と比べて高解像になっている GPCC¹³⁾ を用いた。海水温 (SWT) の検証データとして、海洋モデルの境界条件として用いた NCAR による全球解像度 0.5 度の海洋再解析データである SODA を用いた。OAFLUX (<http://oafux.whoi.edu>) は NOAA によって設立された WHOI OAF flux project による、衛星観測と 3 つの地表気象データを解析して作成された大気-海洋間のフラックスデータセットで、海面における下向きの正味熱フラックスを検証するのに用いた。

3. 観測・再解析データとの比較

(1) SST

a) 20 年平均 SST

AVHRR 観測と CPL 実験, CTRL 実験の 1986 年から

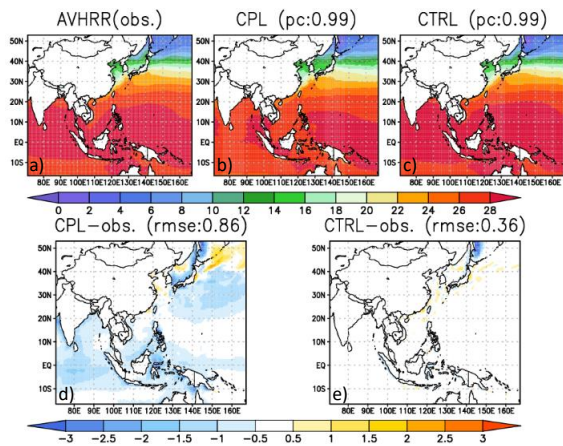


図-3 1986年から2005年の平均海面温度. a) 観測, b) CPL実験, c) CTRL実験, d) CPL実験と観測の差, e) CTRL実験と観測の差. 数字はb), c)では観測の相関係数を示し, d), e)ではRMSEを示す.

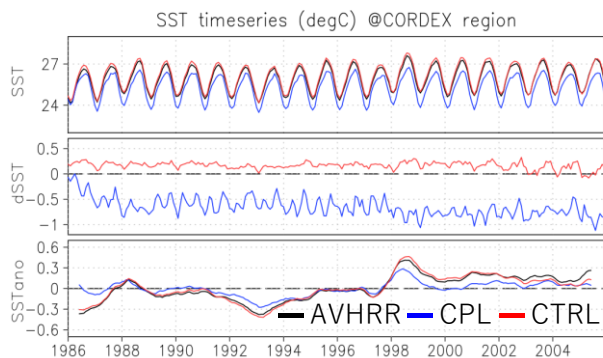


図-4 領域平均海面温度の時間変動 (上段), 観測とモデルの差 (中段), 平年値(1986-2005年)と差 (下段). 黒線は観測, 青線はCPL実験, 赤線はCTRL実験を表す.

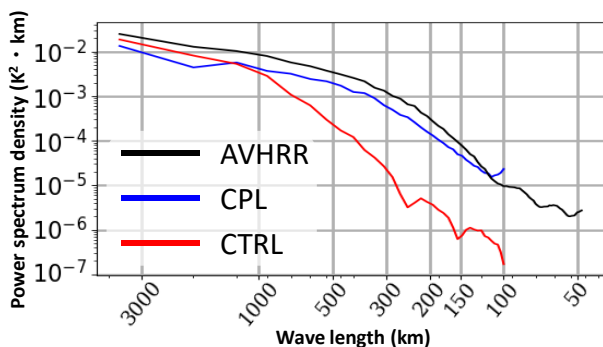


図-5 日本南海上における海面温度のスペクトル強度. 黒線はAVHRR観測, 青線はCPL実験, 赤線はCTRL実験の結果. 1986年から2005年までの20年平均.

2005年までの20年間の平均SSTと、モデルと観測の差を図-3に示す。b)とd)から、CPL実験で計算された

SSTはAVHRR観測と比べて、空間分布の相関係数は0.99と非常に強い相関を示し、RMSEは 0.86°C であった。また、オホーツク海など一部を除く領域全体でCPL実験のSSTは低温バイアスを示していた。結合モデルにおけるSSTの低温バイアスはRSM-ROMSを日本及び韓国域で適応した研究³⁾や、結合モデルFROALS¹⁴⁾を用いて夏季モンスーンに関する性能評価を、本研究と同様にCORDEXアジア域で行った研究¹⁵⁾でも指摘されている。

b) SSTの時間変動

図-4上段はAVHRR観測とCPL実験、CTRL実験の領域平均した海面温度の時間変動を、中段はCPL実験、CTRL実験とAVHRR観測の差を、下段はAVHRR観測、CPL実験、CTRL実験それぞれの平年値(1986年から2005年までの平均値)との差を表す。ただし、下段のみ1年移動平均である。上段から、CPL実験は夏と冬にAVHRR観測とのバイアスが大きくなる傾向はあるが、海面温度の季節変動を捉えていたことが分かった。また中段から、CPL実験では実験期間中は常に低温バイアスを持っており、20年平均すると -0.7°C だった。さらにCPL実験の低温バイアスは計算開始から大きくなり続けるが、2年後の1988年ごろでバイアスの増加が止まっていることが分かった。このことから、CORDEXアジア域でのCPL実験のSSTのスピナップ期間は約2年と分かる。また、CTRL実験ではCPL実験と比べると小さいが、高温バイアスを持っており、20年平均すると 0.2°C のバイアスがあった。下段から、平年値との差で見ると、CPL実験のSSTは、1992年から95年ごろに平年よりも下がり、1996年から97年ごろは横ばいで、1998年からは平年を上回っていた。これはAVHRR観測や、CTRL実験と同様の傾向であり、CPL実験が年々変動の傾向を捉えていることが分かった。ただし、ピークの大きさはAVHRR観測やCTRL実験より小さく、年々変動に対する感度は弱かった。

CPL実験のSSTが低温バイアスを持っているのは、CTRL実験では下部境界条件として与えられたSSTが大気下端に影響を与えるだけであるのに対して、CPL実験では海面を通して大気下端と海洋上端の間で行われているフラックスの交換を陽に扱うため、海上風によるSSTを押し下げる効果が過剰に表れたものと考えられ、結合モデルのSSTを通じたフラックス交換の不確実性を示唆している。

c) SSTのスペクトル強度

図-5は日本の南海上の領域(29.5N-30.4N; 132.5E-170.9E)における1986年から2005年までの20年間の平均SSTスペクトル強度を表す。CTRL実験では波長が1000km程より短い波のスペクトル強度が急激に減少しているのに対し、CPL実験はCTRL実験と比べて高い強度を示していた。また、CPL実験の傾きは観測結果と似ており、

CPL 実験の SST が観測と物理的な類似性を持つことが示唆された。これらのことから、CPL 実験では CTRL 実験では見られない波長の短いスケールの温度分布構造の存在が示された。

CTRL 実験では CPL 実験で計算されたような波長の短いメソスケール構造を持たない SST が DDS 実験に用いられているため、海洋からのメソスケールの影響を考慮した DDS 実験はできない。一方で CPL 実験では、より現実に即した時空間スケールの温度分布構造を持った SST を用いて DDS 実験を行うことができる。そのため、これまで影響評価研究に利用されてきた大気のみモデルを利用した研究では行うことができなかった、波長の短い大気海洋相互作用の情報を含んだ DDS 実験を行うことができると示唆された。

(2) 日降水量

図-6 と図-7 は図-3 と同様に 20 年間の平均日降水量で、それぞれ GPCP 観測と GPCC 観測の結果である。

海上の比較には GPCP 観測 (図-6) を用いる。b), c) の結果から CPL 実験と CTRL 実験の GPCP 観測との空間分布の相関係数はそれぞれ 0.74 と 0.67 であり、CTRL 実験と比べて CPL 実験でより相関がみられた。さらに、c) に見られる CTRL 実験でのインド洋東部の過剰な降水帯が b) の CPL 実験では抑えられていた。また d), e) から、CPL 実験と、CTRL 実験の両方に太平洋上で多雨バイアス、海岸域で少雨バイアスという構造が見られたが、CPL 実験では少雨バイアスがより過剰に表れていた。RMSE を比較すると CPL 実験では 1.4mm/day、CTRL 実験では 1.7mm/day であり改善が見られた。

陸上の比較には GPCC 観測 (図-7) を用いた。b) と c) の結果から、CPL 実験と CTRL 実験の GPCC 観測との空間分布の相関係数はそれぞれ 0.59 と 0.62 であり、陸上では CTRL 実験の方が強い相関を示した。また、d), e) の結果から、CPL 実験、CTRL 実験ともに GPCC 観測と比べてニューギニア島で顕著なバイアスが見られた。a) の GPCC 観測ではニューギニア島の中央と西側アラフラ海に面する地域に降水のピークが見られるが、b) の CPL 実験と c) の CTRL 実験では共にニューギニア島の 2 つの山岳域にピークが表れており、逆に山岳域付近の地域ではほとんど降水が見られなかった。同様のことはスマトラ島やセレベス島など他の島嶼部でも見られた。山岳域では多雨バイアス、周辺で少雨バイアスという構造は、CPL 実験、CTRL 実験ともに見られたことから、共通の大気モデルである RSM がもつ不確実性を示唆している。ただし、CPL 実験の方がバイアスは大きく、RMSE は CPL 実験では 2.8mm/day、CTRL 実験では 2.4mm/day となった。これは、大気モデル RSM がもつ不確実性が、海洋モデル ROMS を結合したことによって

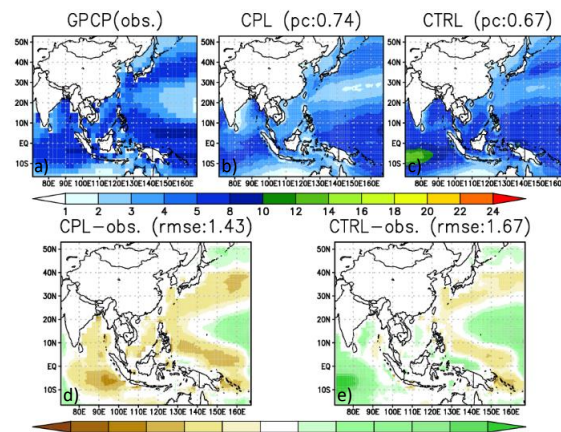


図-6 図-3 と同様。ただし日降水量 (GPCP) の結果。陸上の降水量はマスクアウトしている。

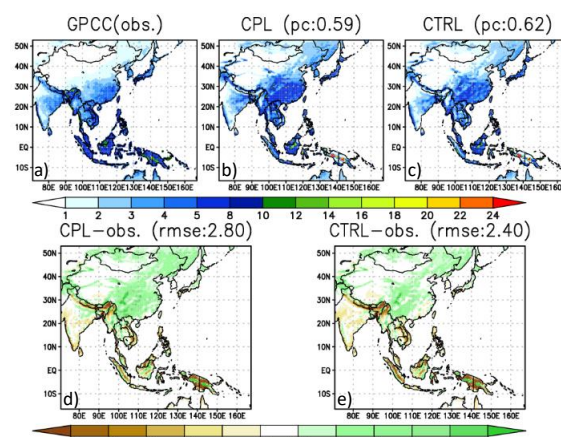


図-7 図-3 と同様。ただし日降水量 (GPCC) の結果。b) から e) は海上の降水量はマスクアウトしている。

より大きくなった結果だと考えられる。また、チベット地方などユーラシア大陸の山岳域上でも多雨バイアスが見られた。

(3) SWT

a) SWT の時間変動

図-8 上段は SODA 再解析と CPL 実験の水深 5m から 300m までの空間平均した SWT の時間変動を、下段は SODA 再解析と CPL 実験の SWT の差を示す。上段から、SODA 再解析と比較して CPL 実験の SWT では低温バイアスはあるが、季節変動を捉えていることが分かった。また下段から、CPL 実験の計算開始から約 3 年間は低温バイアスが強くなり続けるが、3 年後の 1989 年ごろでバイアスの増加が止まっていた。このことから、本研究における CPL 実験の海洋モデル ROMS のスピナップ期間は約 3 年と分かった。SWT の低温バイアスは 20 年平均で -1.8°C だったが、上段の結果から SWT の季節変動の大きさは 1°C 未満であることが分かり、バイアスの大き

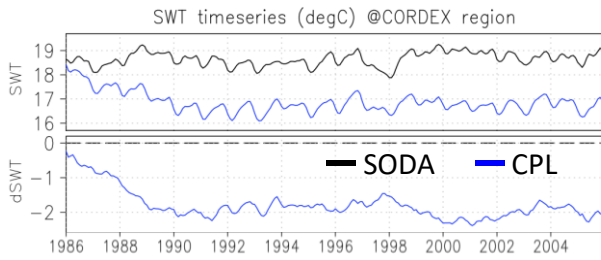


図-8 空間平均海水温の時間変動（上段）と再解析とモデルの差（下段）．黒線は観測，青線はCPL実験を表す．

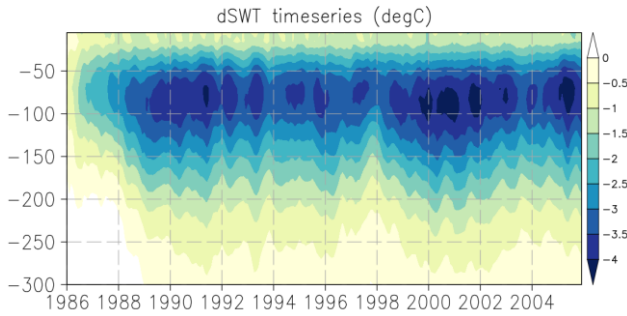


図-9 CPL 実験と再解析の領域平均海水温の差の時間-深度断面図．縦軸が水深 (m) ，横軸が時間．

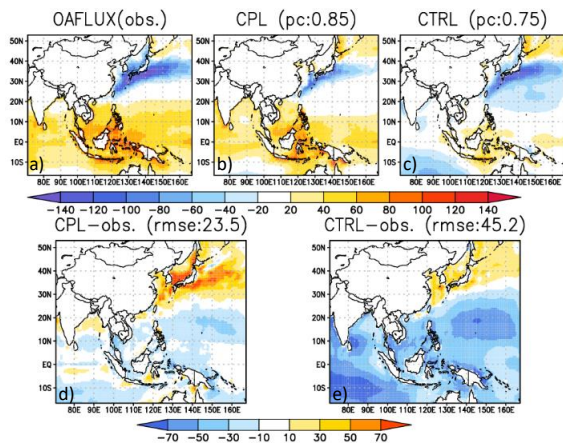


図-10 図-3と同様．ただし下向き正味熱フラックスの結果．

さが季節変動の大きさよりも強く出ており，海洋モデルROMSのもつ不確実性を示唆している．

b) SWT の差の時間-深度断面図

CPL 実験の領域平均 SWT と SODA 再解析の差の時間-深度断面図を図-9 に示す．この図から，表層から 300m までは全層で低温バイアスがあることが分かった．また低温バイアスは水深が増すにつれて大きくなり，水深が約 100m より深いところでは再度小さくなっていった．CPL 実験の SWT の SODA 再解析に対する低温バイアスは最大で 4°C 以上だった．水深 100m 付近で CPL 実験にどんな誤差が生じているのか，SWT 以外にもさらなる解析が必要である．

(4) 海面における下向き正味熱フラックス

図-10 は図-3 と同様に，20年間の海面における平均下向き正味熱フラックスの結果を示す．c) では，a) で見られるような熱帯域での海面へのエネルギー流入がほとんど見られないのに対して，b) では海面にエネルギーが流入しているのが見られた．また OAFUX 観測との相関係数は CPL 実験で 0.85，CTRL 実験で 0.75 であった．d) と e) を比較してみても，CTRL 実験では RMSE が 45.2W/m²であるのに対して，CPL 実験では 23.5W/m²と，下向き正味熱フラックスのバイアスは減少しており，全体に海上での誤差が小さくなっていることが分かった．また CPL 実験では図-6 で南海上の過剰な降水帯が見られた領域で誤差が減少していた．

大気-海洋間の正味の熱フラックスの 20年平均の誤差が CPL 実験で改善されたことは，海洋モデルを結合することで大気と海洋間の相互作用がより確からしく再現されるようになったことを示唆している．しかし反対に，中緯度帯の日本周辺域などでは海面から大気へのエネルギー流入の誤差が増大しており，海洋モデルを結合したことによる不確実性の増加を示唆している．

4. まとめ

領域規模の大気海洋相互作用を含んだ影響評価研究を行うため，領域大気海洋結合モデル RSM-ROMS を用いて，CORDEX アジア域を対象に 20年間の力学的ダウンスケールシミュレーション実験を実施し，観測データや再解析データと比較することで RSM-ROMS の不確実性を検証した．

SST について，CPL 実験は低温バイアスをもつが，20年平均の空間分布で観測と相関係数 0.99 と非常に高く，また時間変動を見ると季節変動と年々変動を捉えていた．ただし，年々変動に対する感度は低かった．日本の南海上における SST のパワースペクトルを見ると，波長の短い波のパワースペクトルが CPL 実験では CTRL 実験よりも大きく，メソスケールの温度分布構造が示唆された．日降水量では，海上では海洋モデルを結合したことによる改善が見られたが，陸上の降水量では，大気モデル RSM 自体が持つ山岳域での多雨バイアスが海洋モデル ROMS を結合することで増大する傾向にあり，不確実性の増大が示唆された．SWT は SST と同様に季節変動をとらえていたが，表層から水深 100m 程度まで次第にバイアスが大きくなり，ピークでは 4°C 以上の低温バイアスがあった．この SWT のバイアスの大きさは季節変動の大きさよりも大きく，海洋モデルのもつ不確実性を示唆している．海面における下向き正味熱フラックスでは CPL 実験では CTRL 実験と比べて 20年平均の誤差

が軽減されており、大気と海洋間の相互作用がより確からしく再現されるようになったことを示唆していた。特に亜熱帯・熱帯域で改善が見られたが、中緯度帯では逆に海面から大気へのエネルギー流入の減少バイアスがより大きくなっていった。

今後は海面におけるフラックスの解析を進め、海洋モデルを結合したことで誤差が大きくなってしまった他の変数にどのように影響するか確認したいと考えている。

謝辞：本研究は、気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けたのちに、統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けています。その他、科学研究費補助金15KK0199及び16H06291、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-12及び2-1503)の支援を受けています。

参考文献

- 1) Li, H., M. Kanamitsu, and S.-Y. Hong: California reanalysis downscaling at 10 km using an ocean-atmosphere coupled regional model system, *J. Geophys. Res.*, 117, 289 D12118, 2012.
- 2) Hong and Kanamitsu: Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 50, 83-104, 2014.
- 3) Ham, S., K. Yoshimura, and H. Li: Historical dynamical downscaling for east asia with the atmosphere and ocean coupled regional model, *J. Meteor. Soc. Japan.*, 94, 199-208, 2016.
- 4) Li, H., and V. Misra: Thirty-two-year ocean-atmosphere coupled downscaling of global reanalysis over the Intra-American Seas, *Clim. Dyn.*, 43, 2471-2489, 2014.
- 5) Giorgi F., C. Jones, and G. Asrar: Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bull.*, 58, 175-183, 2009.
- 6) Jones C, F. Giorgi, and G. Asrar: The coordinated regional downscaling experiment: CORDEX an international downscaling link to CMIP, *CLIVAR Exch* 16(2), 34-40, 2011.
- 7) Juang, H.-M. H., and M. Kanamitsu: The NMC nested regional spectral model, *Mon. Weather Rev.*, 122, 3-26, 1994.
- 8) Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams: The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modell.*, 9, 347-404, 2005.
- 9) Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Wollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1631-1643, 2002.
- 10) Carton, J.A. and B. Giese: A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA), *Mon. Weath. Rev.*, 136, 2999-3017, 2008.
- 11) Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax: Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature, *J. Clim.*, 20, 5474-5496, 2007.
- 12) Huffman, G. J. R. F. Adler, D. T. Bolvin, and G. Gu: Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17808, 2009.
- 13) Schneider, U., A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, M. Ziese: GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data, 2011.
- 14) Zou, L., Z. Tianjun: Can a regional ocean atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the western North Pacific summer monsoon?, *J. Clim.*, 26, 2353-2367, 2013.
- 15) Zou, L., Z. Tianjun: A regional ocean-atmosphere coupled model developed for CORDEX East Asia: assessment of Asian summer monsoon simulation, *Clim. Dyn.*, 47, 3627-3640, 2016.

(2017.9.29 受付)

A VALIDATION OF REGIONAL ATMOSPHERE-OCEAN COUPLING MODEL

Fumiaki MORIYAMA, Kei YOSHIMURA, Hironori FUDEYASU

We conducted dynamical downscaling simulations for 20 years over the Asian CORDEX domain to validate uncertainty of RSM-ROMS, a regional atmosphere and ocean coupled climate model. We compared some surface quantities simulated by RSM-ROMS with observation data sets or simulated result by RSM, a regional atmosphere climate model. The results are summarized as follows.

- 1) The coupled model had some systematic negative bias for observed sea surface temperature (SST), but the correlation coefficient was over 0.99 and the model reasonably captured the interannual and seasonal variations. In addition, power spectrum suggested a detailed SST structure.
- 2) The ocean coupling increased a tendency to overestimate precipitation over the mountainous area. On the other hand, the coupled model more accurately reproduced precipitation over the oceans.
- 3) Although there was cool bias of sea water temperature (SWT) more than 4 degrees Celsius at 100m depth, the coupled model captured interannual variations of SWT as similar as those of SST. This SWT bias is larger than seasonal variations, and it indicates there is uncertainty in the coupled model.
- 4) Net heat flux was improved in the coupled model, especially in subtropical and tropical areas but got worse in middle latitude areas.