

# MRI-ESM2 の雲表現の改良の要因分析

川合秀明、行本誠史、神代剛、大島長、田中泰宙、吉村裕正、長澤亮二

## a). はじめに

気象研究所は、気候モデル MRI-CGCM3 (Yukimoto et al. 2012) を用いて CMIP5 に参加したが、このモデルは、雲表現に関して問題も多かった。その後の努力により、CMIP6 に参加予定である気候モデル MRI-ESM2 (Yukimoto et al. 2019) においては、雲表現やエアロゾル—雲相互作用に関わる多くの点が改善された (Kawai et al. 2019)。この結果、雲表現が大きく改善して雲量のバイアスが大きく軽減し、放射収支のバイアスもかなり小さなものとなり (図 1)、CMIP5 モデルの中ではトップクラスの放射収支の再現性を示すようになった (図 2)。大気海洋結合モデルを使い長期積分する必要がある気候シミュレーションにおいては、放射収支が適切であることは極めて重要である。MRI-ESM2 における雲に関連する改良には、以下のようなものが含まれる。

- (i). 新しい層積雲スキームの導入
- (ii). 雲微物理過程における改良
- (iii). 層積雲領域での浅い対流発生を抑止
- (iv). 鉛直高解像度化 (特に大気境界層付近)
- (v). 雲オーバーラップスキームの改良
- (vi). 放射計算の空間間引きの廃止
- (vii). 雲水及び雲氷数密度の予報方程式にあったバグ等の修正
- (viii). 各種エアロゾルのモード半径の適正化と微小な海洋性エアロゾルの考慮
- (ix). 雲氷落下スキーム・雲氷から雪への変換プロセスの改良

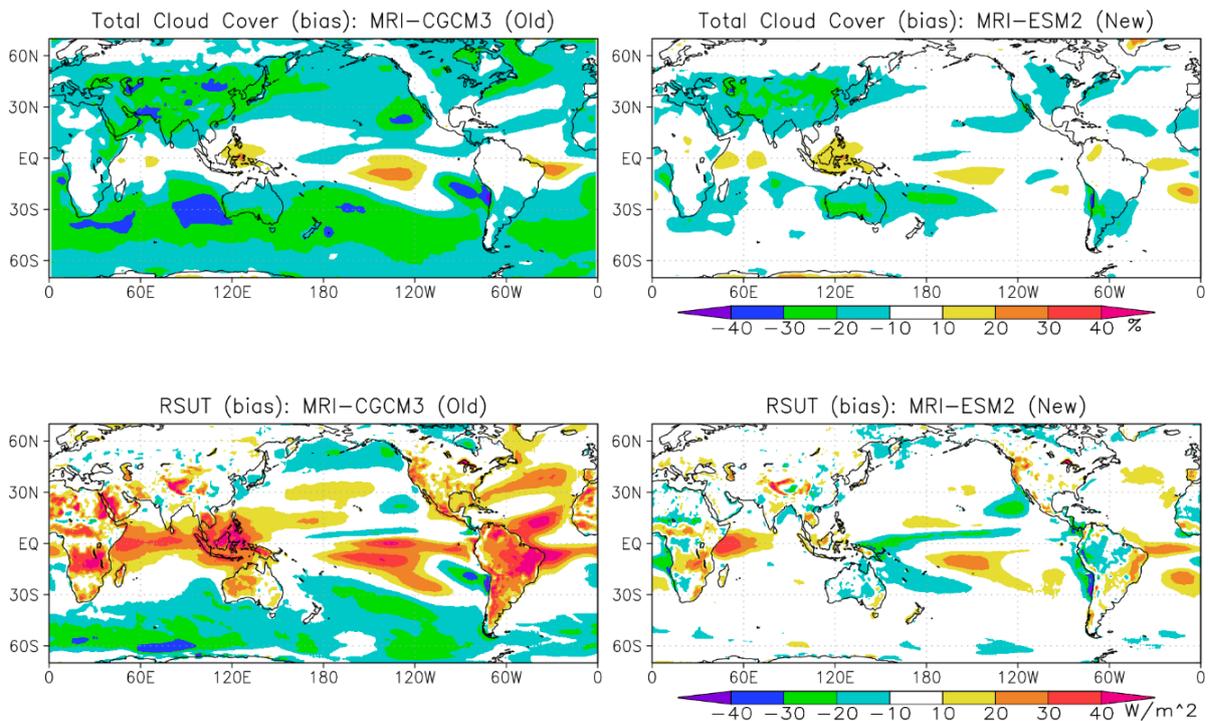


図 1 (上段) 全雲量のバイアス (検証に使用した観測データは ISCCP)、及び(下段) 大気上端上向き短波放射フラックスのバイアス (観測データは CERES-EBAF)。左列が MRI-CGCM3、右列が MRI-ESM2 の結果。モデル、及び ISCCP 観測データは 1986-2005 年、CERES-EBAF 観測データは 2001-2010 年の気候値。

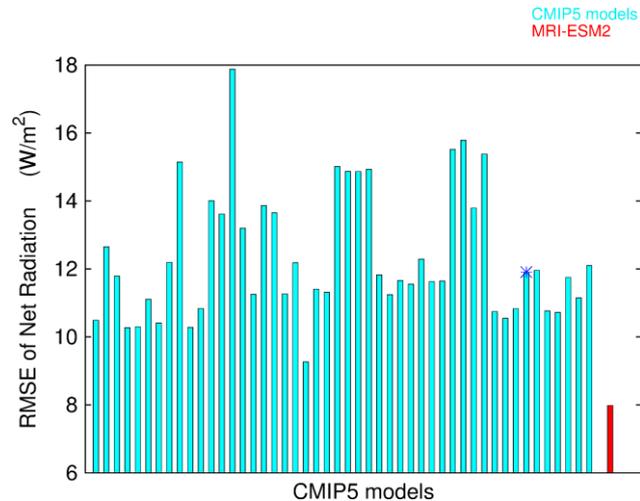


図2 大気上端上向き放射フラックス（短波+長波）の気候値の二乗平均平方根誤差（ $W/m^2$ 、検証に使用した観測データは CERES-EBAF）。水色が CMIP5 に参加した世界の様々なモデル、右端の赤色が新モデルである MRI-ESM2 の結果。青色の\*は、旧モデルである MRI-CGCM3 を示す。

しかし、最終的な高いパフォーマンスにこうした数多くの変更がどの程度ずつ寄与しているのかは明らかではなかった。ここでは、こうした変更が、モデル改良にどの程度ずつ寄与しているかを、最終版のモデルから一つ一つの改良を元に戻す実験を行うことにより定量的に明らかにすることにした (Kawai et al. 2019)。

#### b). 実験設定

それぞれの改良の効果を特定するため、できるだけ管理された環境で実験を行う必要がある。そのため、SST が変化するのを避ける目的で、観測された海面水温 (SST) を与える AMIP タイプの実験を行った。MRI-ESM2 から、それぞれの改良を一つずつ古いものに差し替えて実験を行った。行われた感度実験のリストを表1に示す。2000年から2010年まで積分を行い、2001年から2010年までの10年間分のデータを解析に使用した。

| 実験   | 項目番号   |
|--|--------|
| 標準実験 ( $\Delta t = 3600$ s, 1800 s [デフォルト], 900 s, 300 s)        |        |
| 古いバージョンの層積雲スキームを使用   | (i)    |
| WBF 効果の古い取り扱い  | (ii)   |
| 層積雲が発生する条件の下でも浅い積雲対流の発生を許す                                       | (iii)  |
| 同上 ただし、鉛直解像度を L48 に落とす   | (iv)   |
| 古いバージョンの雲オーバーラップスキームを使用  | (v)    |
| 放射計算を経度方向に2格子ずつまとめて計算  | (vi)   |
| 長波放射過程を1時間ごとに計算  | ----   |
| 海洋性雲凝結核の数密度を2倍しない  | (viii) |
| 古いバージョンの雲氷落下スキームを使用 ( $\Delta t = 3600$ s, 1800 s, 900 s, 300 s) | (ix)   |

表1 それぞれの改良の効果を特定するため、MRI-ESM2を使って行われた感度実験のリスト。右欄は、関連する本文中の項目番号。

### c). 各改良とそのインパクト

MRI-ESM2 では、雲量のバイアスが大きく軽減し、放射バイアスもかなり小さなものとなったが、とりわけ、南大洋で雲が少なく、雲による短波放射の反射が少ないバイアスが大きく改善された (図 1)。南大洋の雲は、世界の多くの気候モデルにおいても、再現が難しく過少なものが多く、そのために南大洋で短波放射の入射がかなり過大であるという欠陥があった。こうしたバイアスは、南大洋の海面水温の正バイアスを引き起こす。このバイアスは、MRI-CGCM3 でも深刻な問題であった。MRI-ESM2 ではこのバイアスの改善が特に顕著であるので、ここではその点に特に着目して改善の要因を定量的に分析することにした。

- (i). MRI-ESM2 では、旧来の層積雲スキーム (Kawai and Inoue 2006) に代えて、新しい層積雲スキーム (Kawai 2013, Kawai et al. 2017) を導入した。この新しいスキームでは、雲頂エントレインメントの起こりやすさを考慮した下層雲の新しい安定度指標 (ECTEI) を利用して雲頂の乱流混合の大きさを決定する。その結果、南大洋や亜熱帯大陸西岸の下層雲量が増加し、大気上端上向き短波放射フラックスが増加したことにより (図 3)、放射バイアスは著しく改善した。

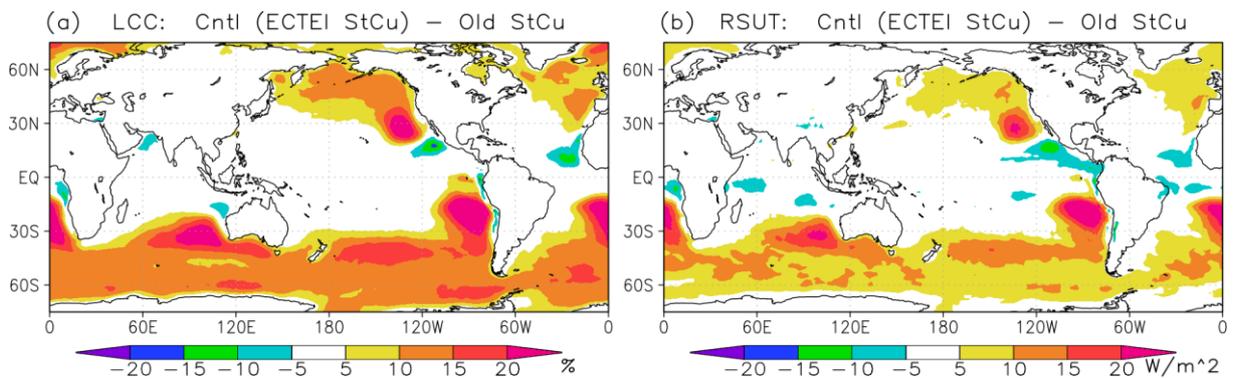


図 3 新しい層積雲スキームを導入したインパクト。(a)下層雲量(%), (b)大気上端上向き短波放射フラックス( $W/m^2$ )。図は、新しい層積雲スキームが導入されている MRI-ESM2 標準モデルの結果から層積雲スキームを古いバージョンのものに差し替えた結果を引いた値を示している。

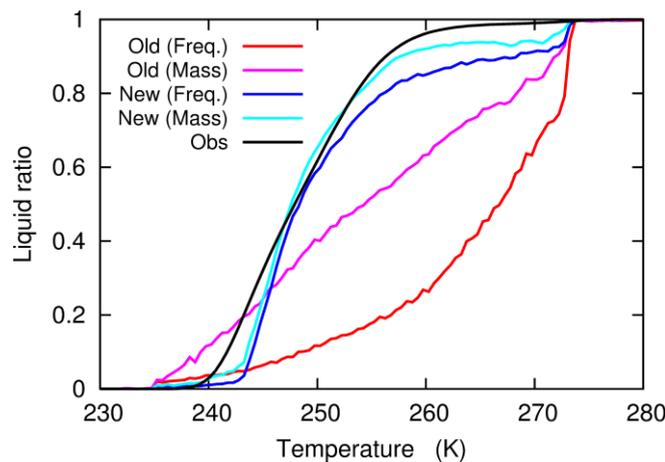


図 4 雲水・雲氷量に対する過冷却水の割合の温度依存性。古いバージョン (赤とピンク線) と新しいバージョン (青と水色線) の WBF 効果の取り扱いの結果。重み付きの割合 (ピンクと水色線) と頻度割合 (赤と青線)。黒線は Hu et al. (2010) による観測値。

- (ii). MRI-CGCM3 では、南大洋などにおいて、CALIPSO 衛星観測に比べて、氷相の雲が過剰で過冷却水滴の雲はかなり少なかった。新モデルでは、雲微物理過程における Wegener-Bergeron-Findeisen (WBF) 効果の取り扱いの改良等により、過冷却水滴の割合が大きくなり、衛星観測と近くなった (図 4)。液体の雲水と固体の雲水では、液体の雲水の方が粒が小さく、同じ雲水・雲氷量であれば雲が光学的に厚くなるため、この変更により、南大洋の短波放射の反射が大きくなっている (図 5)。
- (iii). ペルー沖の下層雲の鉛直構造は、MRI-CGCM3 では不自然に不連続的なものとなっていたが、層積雲の発生する場所では浅い積雲対流を立たせないようにしたことにより、この構造は大きく改善した。また、南大洋においても、浅い積雲対流が立つと下層雲の層が不自然に下方に押しつけられて歪んだ構造になっていたが、浅い積雲が抑制されることでその構造がより自然なものとなり、下層雲量も増加した。
- (iv). MRI-CGCM3 では鉛直解像度が粗かったために下層雲の厚みは過大で、そのため下層雲の光学的厚さも過大傾向にあった。新モデルでは鉛直層数を 48 層から 80 層に増強し、特に対流圏下層での鉛直解像度も相当程度上がったため、下層雲の厚さがより適切に表現されるようになった。
- (v). 短波放射過程で使用される雲オーバーラップスキームとして Nagasawa (2012) の PICA を採用した。このスキームは、雲が従来のもより重なりやすいオーバーラップスキームであり、この導入の結果、熱帯の対流域などで過剰であった短波放射の反射が大きく減少し、バイアスがかなり軽減された。
- (vi). MRI-CGCM3 では、計算時間の節約のため、放射計算は経度方向に 2 格子ずつまとめて行っていたが、この方法をやめ、放射計算を全ての格子で計算することとした。この結果、放射過程による放射冷却が雲のある場所で起こるようになるなど整合性が高まり、南大洋などで雲が増加した。
- (vii). 以前のモデルに内在していたバグ修正を行った。特に、雲水及び雲氷数密度の予報方程式にあったバグを修正したことにより、極端に大きすぎる下層雲の雲粒数密度の問題が解決した。
- (viii). 有機炭素や黒色炭素等のエアロゾルのモード半径等を最近の観測的知見に基づいて修正した結果、雲水・雲氷の数密度も適切なものとなった。また、現在のエアロゾルモデルの構成では微小な海洋性エアロゾルが考慮されていないが、これを簡易的に考慮するため、観測的知見に基づき、雲凝結核数を 2 倍するという扱いを採用した。これは海上の雲の数密度を増加させ、雲の光学的厚さを増やすのに寄与する。
- (ix). 旧モデルにおいては、雲氷の落下スキームにおいて非物理的な計算方法となってしまう部分があったため、Kawai (2005) に基づいて、この取り扱いを改良した。この結果、MRI-CGCM3 にあった雲氷量の大きなタイムステップ依存性が相当程度緩和した。

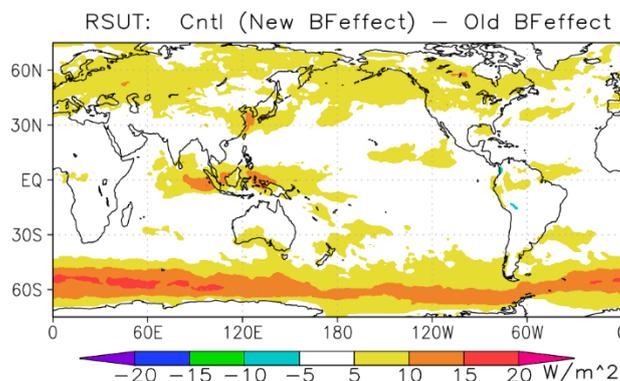


図 5 大気上端上向き短波放射フラックス( $W/m^2$ )への新しい WBF 効果の取り扱いを導入したインパクト。図は、新しい WBF 効果の取り扱いが導入されている MRI-ESM2 標準モデルの結果から WBF 効果の取り扱いを古いバージョンのものに差し替えた結果を引いた値を示している。

#### d). 各改良のインパクトの比較

上述の様々な改良が、放射のバイアスを軽減するのにどの程度ずつ寄与しているかを示したのが図6である。図を見ると、層積雲スキームの改良により、南大洋では下層雲量が増加し、それに伴って、短波放射の雲による反射も増加していることがわかる。また、層積雲領域で浅い対流の発生を抑止する扱いによっても、南大洋で下層雲量が増加し、それにより短波放射の反射も増えていることがわかる。放射スキームを全ての格子で計算するようにしたことも下層雲量を若干増加させ、短波放射の反射を増やしている。一方で、雲微物理過程の改良により過冷却水の割合が増加した効果は、下層雲量は増やさないが、短波放射の反射は増加させて南大洋の短波放射の反射の過少バイアスを軽減するのに寄与している。微小な海洋性エアロゾルを考慮するため、雲凝結核数を2倍にする扱いも同様に下層雲量には効かないが短波放射の反射を増やしていることがわかる。雲微物理過程の改良、及び、微小な海洋性エアロゾルの考慮は、雲の光学的厚さを増加させているためである。一方で、雲オーバーラップスキームの改良は、下層雲量には影響しないが、熱帯の短波放射の反射を大きく減少させている。

MRI-CGCM3 から MRI-ESM2 への更新により、南大洋や大陸西岸の層積雲域の短波放射の反射の過少バイアス、熱帯の過剰な短波放射のバイアスが大きく減少したが(図1、図6)、これらは、ある特定の改良のみによるものではなく、上に述べたような数多くの改良により達成された改善であると言える。

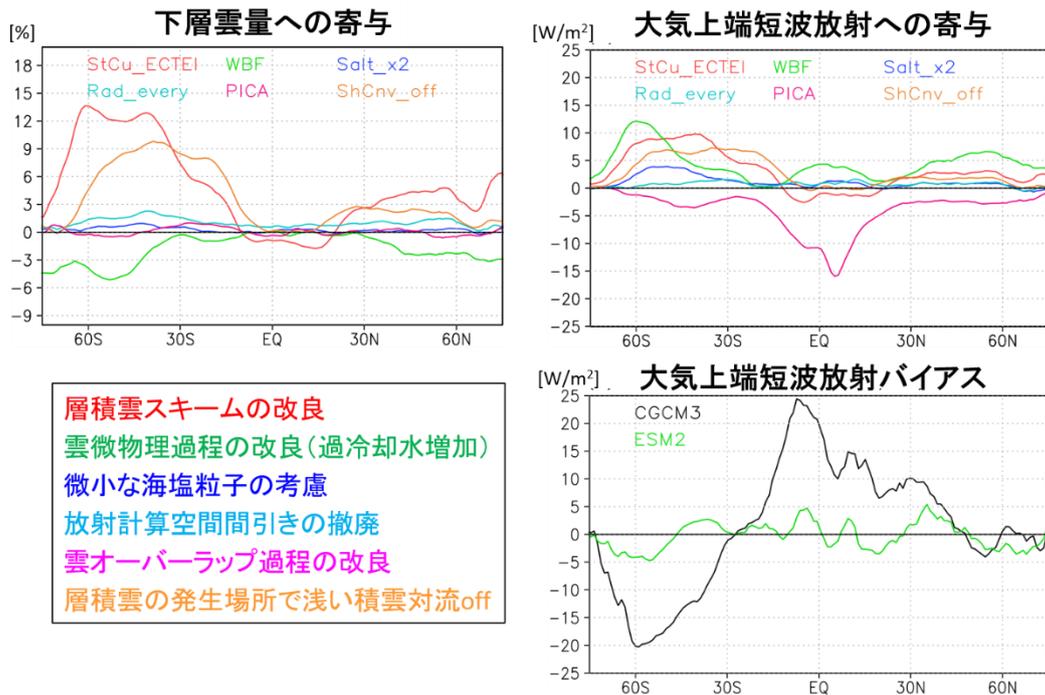


図6 (左上) モデルの各プロセスの変更による下層雲量へのインパクト。(右上) 各変更による大気上端短波放射へのインパクト (上向きが正)。(右下) 大気上端短波放射の旧モデルのバイアス (黒線) と新モデルのバイアス (緑線)。

#### 参考文献

Hu, Y., S. Rodier, K. M. Xu, W. Sun, J. Huang, B. Lin, P. Zhai, and D. Josset, 2010: Occurrence, liquid water content, and fraction of supercooled water clouds from combined CALIOP/IIR/MODIS measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, 1–13.

- Kawai, H., 2005: Improvement of a Cloud Ice Fall Scheme in GCM. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **35**, 4.11-4.12.
- Kawai, H., and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17-20.
- Kawai, H., 2013: Improvement of a Stratocumulus Scheme for Mid-latitude Marine Low Clouds. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **43**, 4.03-4.04.
- Kawai, H., T. Koshiro, and M. J. Webb, 2017: Interpretation of Factors Controlling Low Cloud Cover and Low Cloud Feedback Using a Unified Predictive Index. *J. Climate*, **30**, 9119-9131.
- Kawai, H., S. Yukimoto, T. Koshiro, N. Oshima, T. Tanaka, H. Yoshimura, and R. Nagasawa, 2019: Significant Improvement of Cloud Representation in Global Climate Model MRI-ESM2. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 2875-2897.
- Nagasawa, R., 2012: The Problem of Cloud Overlap in the Radiation Process of JMA's Global NWP Model. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **42**, 4.15-4.16.
- Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 –Model description and basic performance–. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 23-64.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931-965.