

MIROC における雲の海面水温変化に対する応答の評価

出本 哲・渡部 雅浩・釜江 陽一(東京大学 大気海洋研究所)

1. はじめに

二酸化炭素(CO₂)濃度倍増時の全球平均地表気温(SAT)変化量として定義される平衡気候感度は、気候システムの特性を理解し、温暖化時の気候変化を議論するための重要な量である。しかし、全球気候モデル(GCM)において気候感度の推定値は大きくばらついており、その要因を探ることは重要な課題となっている(Andrews et al., 2012)。平衡気候感度は、CO₂ 濃度倍増によって系に加えられる放射強制力と、地表気温変化によって生じる気候フィードバックから決定される(Gregory et al., 2004)。気候フィードバックは複数のプロセスの重ね合わせで決まるが(Soden and Held, 2006)、亜熱帯海洋上の下降流域における下層雲の応答に強く依存する雲-短波放射フィードバックの不確実性が、モデル間の気候感度のばらつきに大きく寄与していることが知られている(Bony and Dufresne, 2005)。地表の温暖化に対して下層雲が増加するか減少するか自体、用いるモデルによって異なっており、そのメカニズムに関して統一的な結論は得られていない(Brient and Bony, 2012; Webb et al., 2006; Wyant et al., 2009)。

本研究の目的は、GCM の一部である大気大循環モデル (AGCM) を用いて海面水温 (SST) の昇温実験を行うことで、温暖化時の熱帯下層雲応答のメカニズムを理解することである。特に雲の速い応答について詳細に調

べるために、長期の気候実験に加えて、短期間のアンサンブル・ハインドキャスト実験における SST 昇温時の応答を解析した。また、AGCM における結果の解釈の妥当性を議論するために、鉛直一次元モデル (SCM) を開発し、様々な感度実験を行った。

2. 実験設定

大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構で共同開発された GCM である MIROC5 の大気部分(解像度 T85 鉛直 40 層)を用いて、2 種類の数値実験を行った。一つは AMIP 実験で、1979~2008 年の観測された SST および海氷被覆を与えた実験である。もう一つは Transpose AMIP II (TAMIP) 実験と呼ばれる、2008 年から 2009 年に設定された 64 の日時に対し、ECMWF 解析値を大気初期値として 10 日間気象予報モードで行った実験である。地表温度変化に対する雲の応答を調べるため、各々の設定で全球一様に SST を 4K 上昇させた実験を行った。AMIP の結果(昇温実験とコントロールの差、 Δ で表す)を 30 年平均したものを平衡応答とみなし、TAMIP の 3 時間ごとの応答を過渡応答とする。

SCM は MIROC5 AGCM と同一の物理スキームを実装しており、風の場合や温度及び水蒸気の水平移流項を外部強制として与える。鉛直移流や断熱加熱は、与えられた鉛直流をもとにモデル内部で計算する。外部強制は SCM 相互比較プロジェクトで亜熱帯下降流

域における若干理想化されたものを与えた。

3. 結果

AMIP における鉛直積算雲水量(LWP)の SST 昇温時の平衡応答は、中高緯度で一様に正である一方、低緯度では太平洋西部などの上昇流域で正、陸上や亜熱帯海洋上では負を示す(図 1a)。TAMIP の後半 5 日間の Δ LWP の 64 アンサンブル平均は、AMIP と比較して細部に違いは見られるものの、熱帯上昇流域での増加や下降流域での減少などの特徴を捉えている(図 1b)。 Δ LWP と雲短波放射強制(Δ SW_{cl}d)の変化との間には強い負の空間相関が見られ(図 1c)、特にペルー沖やカリフォルニア沖などの亜熱帯下降流域で正の雲-短波放射フィードバックを生じている。図 1b で定義した上昇流域と下降流域における TAMIP の Δ LWP の 10 日間の時系列を図 1d に示す。ともに最初の 2 日間程度は正であるのに対し、その後徐々に上昇流域では増加、下降流域では減少し、AMIP の平衡応答に近づいてゆく。10 日間で大気場が平衡化するわけではないが、下層雲の平衡応答が初期の過渡応答で既に見られることから、大気の速い過程が重要であることを示唆している。

下降流域における LWP の減少は、海上境界層(MBL)高度付近における雲量の減少に対応し、これはこの高度で相対湿度(RH)が低下したためである。RH を減少させるプロセスを調べるため、モデルから出力される温度(T)と水蒸気比湿(q)の tendency から計算され

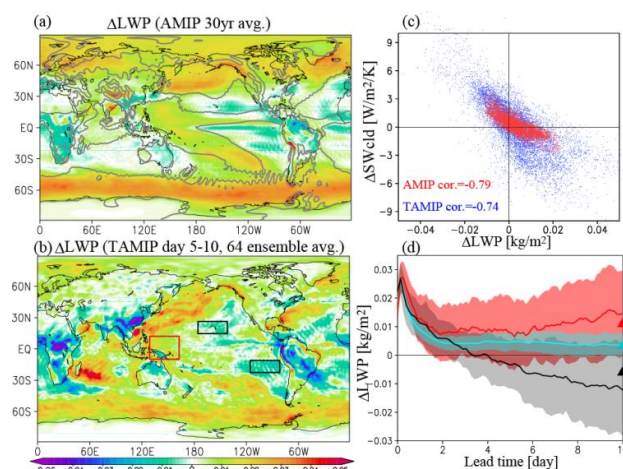


図 1 LWP (kg m^{-2})の SST 昇温に対する変化: (a) AMIP における平衡応答と(b)TAMIP における後半 5 日間のアンサンブル平均応答。(a)のコンターはコントロール実験における ω_{500} のゼロ線を表す。(c) Δ LWP と Δ SW_{cl}d の散布図(赤: AMIP、青: TAMIP)。数値は相関係数を示す。(d)熱帯海上及び(b)の赤、青のボックスでそれぞれ定義された上昇流域、下降流域における Δ LWP の領域平均の時間変化。三角形はそれぞれの領域での AMIP における平衡応答。陰影は 1 標準偏差を表す。

た RH tendency の SST 昇温時の変化を調べた(図 2)。対流圏下層の RH 低下は、主に積雲対流の変化によることが分かる。一方、SST 昇温に伴う海面蒸発量の増加によって活発化する乱流混合が境界層に水蒸気を供給し、RH を増加させるように働く。雲物理過程による正の tendency は、雲の生成が減少したことを反映している。また、雲の減少は放射冷却の減少を伴うため、放射による RH tendency は負の変化を示す。力学過程は大規模循環場や温度・水蒸気勾配の変化に伴う移流などを表すが、対流圏下層全体では寄

与は比較的小さい。従って、下層の ΔRH の符号は主に積雲対流による乾燥化と、乱流混合による湿潤化との間の競合関係で決まっていると考えられる。SST 昇温に対する温度プロファイル変化の 10 日間の時間発展を見ると、境界層の昇温は自由大気よりも速く生じていた。その結果、TAMIP の 10 日間において逆転層が弱化し、対流活動が活発化することで境界層の水蒸気をより自由大気に輸送していた。

AMIP における海面蒸発量の変化(ΔE)は、上昇流域で正であるのに対し下降流域では 0 に近い(図 3a)。TAMIP における ΔE は初期にはほぼ一様に正であったが、10 日目には AMIP と同様に下降流域で蒸発量の増加が抑制されている(図 3b)。バルク式を用いて、 ΔE を海面比湿差の変化による成分と海上風速の変化による成分に分解すると、前者は太平洋上一様に正であるが、後者は下降流域を含む太平洋中東部で負を示す(図 3c,d)。これは、温暖化時のウォーカー循環の弱化に付随する海上風速の減少が蒸発量増加を抑制し、下層雲の減少に寄与していることを意味している。

以上の結果をふまえて、SCM を用いてコントロール実験及び SST 昇温実験を行った。標準実験では AGCM と同様に、SST 昇温に対して下層雲が減少し、各物理過程の寄与も定性的に同じであった。これに対して、コントロール実験における逆転層強度や SST 昇温時の海上風速を変化させて感度実験を行ったとこ

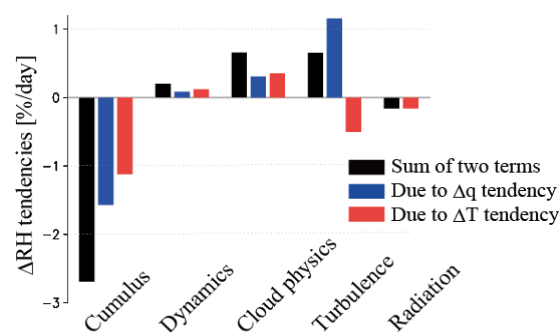


図 2 下降流域の対流圏下層 ($1 > \eta > 0.75$) において TAMIP5-10 日目で平均した RH tendency の SST 昇温に対する変化(黒)とそれに対する T (赤)、 q (青) tendency による寄与。

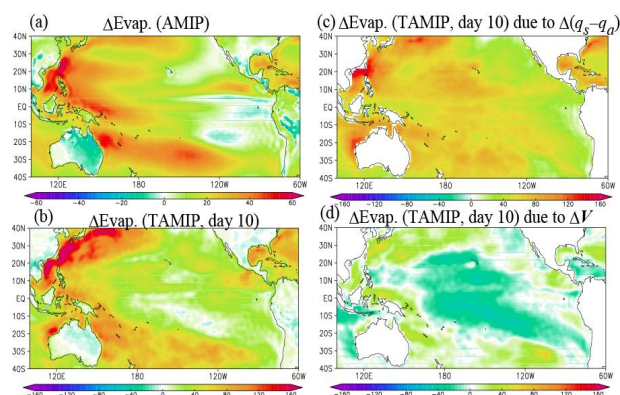


図 3 (a)AMIP、(b) TAMIP の 10 日目における太平洋上の $\Delta E(W m^{-2})$ の分布、(c)-(d) (b)に対する、海面比湿差の変化及び海上風速変化の寄与。

ろ、コントロール実験で逆転層が強く、SST 昇温に対して海上風速が変化しないか強くなる場合には、積雲対流による境界層の乾燥化が働かず、海面蒸発量の増加によって下層雲が増加することがわかった。この結果は、AGCM における下層雲の応答メカニズムと整合的であった。

4. まとめ

大気 CO₂ 濃度増加に対する亜熱帯下層雲の応答メカニズムを理解するため、MIROC5 AGCM を用いた長期の気候実験 (AMIP)、短期間のアンサンブル・ハインドキャスト実験 (TAMIP)、SCM を用いた理想化実験を行い、SST 昇温に対する雲の応答を解析した。AMIP 実験では熱帯下降流域の下層雲は減少し、正の雲-短波放射フィードバックを示すが、TAMIP における 10 日間の積分でもアンサンブル平均で同様の結果が現れる。TAMIP 実験結果の解析から、境界層の相対湿度が下がることで下層雲が減少していることがわかった。この 10 日間の間に、SST 昇温に対して MBL が自由大気より速く昇温することによって逆転層が弱化し、対流活動が活発化することによって MBL の水蒸気が自由大気に輸送され、相対湿度が低下する。SST 昇温に伴う海面蒸発量の増加は相対湿度を増加させるように働くが、ウォーカー循環の弱化に伴う海上風速の減少によってこの効果は抑制される。すなわち、熱帯海上の下降流域における下層雲量変化の符号は、対流活動による MBL の乾燥化と海面蒸発量増加に伴う乱流混合による湿潤化との競合関係によって決定されることが考えられ、これらのプロセスが GCM 間の下層雲応答のばらつきを説明する上で重要であることが示唆された。

参考文献

Andrews, T., Gregory, J., Webb, M. and Taylor, K., 2012. Forcing, feedbacks and climate

sensitivity in CMIP5 coupled atmosphere-ocean climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL051607.

Bony, S. and Dufresne, J., 2005. Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(20), doi:10.1029/2005GL023851.

Brient, F. and Bony, S., 2012. Interpretation of the positive low-cloud feedback predicted by a climate model under global warming. *Clim. Dyn.*, **1-17**, doi:10.1007/s00382-011-1279-7.

Gregory, J., Ingram, W., Palmer, M., Jones, G., Stott, P., Thorpe, R., Lowe, J., Johns, T. and Williams, K., 2004. A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(3), doi:10.1029/2003GL018747.

Soden, B.J. and Held, I.M., 2006. An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean-Atmosphere Models. *J. Clim.*, **19**(14): 3354-3360, doi:10.1175/JCLI3799.1.

Webb, M. et al., 2006. On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensembles. *Clim. Dyn.*, **27**(1): 17-38, doi:10.1007/s00382-006-0111-2.

Wyant, M., Bretherton, C. and Blossey, P., 2009. Subtropical Low Cloud Response to a Warmer Climate in a Superparameterized Climate Model. Part I: Regime Sorting and Physical Mechanisms. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **1**, doi:10.3894/JAMES.2009.1.7.