夏季東アジアにおける海陸熱的コントラストと大気循環の将来変化

釜江陽一¹・渡部雅浩²・木本昌秀²・塩竈秀夫^{1,3}
 (1:国立環境研究所 2:東京大学 大気海洋研究所 3:University of Oxford)

1. はじめに

海陸の熱的コントラストは、季節的に反 転するモンスーン循環を始め、対流圏の力学 的・熱力学的構造を決定する要素の一つとし て挙げられる.気候モデルを用いた将来予測 実験では、地球温暖化時には海上と相対的に 陸上の気温上昇がより大きく、海陸の熱的コ ントラストが変化することが知られている (Manabe et al. 1991). このような傾向は、 近年の観測データのトレンドにも確認する ことができる(Sutton et al. 2007).

夏季東アジアは、ユーラシア大陸と海洋、 低緯度と中高緯度の影響を受け,複雑な気候 システムを形成している. 温暖化時の中高緯 度からの影響の観点では,海陸熱的コントラ ストの変化により, 極東域大陸上で相対的に 正の高度場偏差が形成されることが示され ている(Arai and Kimoto 2008). 夏季極東域 の高度場偏差は、オホーツク海高気圧や北日 本への北東気流の流入,梅雨前線の強度を通 して,夏季の東アジア気候を左右する要素の 一つとして挙げられる (例えばNakamura and Fukamachi 2004; Tachibana et al. 2004; Wakabayashi and Kawamura 2004; Hirota and Takahashi 2013). Kimoto (2005) は, 海面 水温 (SST) を変えずに大気中のCO2濃度の みを増加させた大気大循環モデル(AGCM) 実験の結果から、温暖化時の夏季東アジアに おける海陸コントラストの変化に、CO2増加 による直接効果が重要な役割を示す可能性 を指摘した.一方で、CO₂増加による直接的 な効果が夏季東アジアの気候変化をもたら すメカニズムについて, 複数のモデルによる 一貫性を含めた検討は行われていない.

近年,全球的な気温の上昇を介さない, 大気中のCO₂増加による直接的な効果が,将 来の気候変化において重要であることが指 摘されている. Bony et al. (2013)は大気中 CO₂増加の直接的な効果を特殊な実験によ り定量化し,熱帯大気循環の弱化による力学 的な降水量変化におけるCO₂直接効果の重 要性を示した. CO₂の増加は大気放射冷却の (a) \triangle SAT & \triangle Z500 4xCO₂ JJA



図 1. MIROC5 による CO₂4 倍増時の夏季 (JJA) における,単位全球平均地上気温上昇当たりの 変化. (a) 地上気温 (陰影,K K⁻¹), 300hPa 高度 場の帯状平均からの偏差 (等値線,m K⁻¹). (b) 300hPaと850hPaの層厚 (陰影,m K⁻¹), 500hPa 高度場の帯状平均からの偏差 (等値線,m K⁻¹), 850hPa 水平風 (m s⁻¹ K⁻¹).

弱化を通して熱帯大気循環と水循環を弱め, また大気安定度の変化や相対湿度の変化を 通して雲の鉛直プロファイル,大気上端の放 射バランスに影響する(例えばKamae and Watanabe 2012a, b).本研究では,CMIP5の 複数のモデルで行われた温暖化実験および 感度実験の結果を用いて,温暖化時の夏季東 アジアにおける海陸熱的コントラストの変



図 2. CMIP5 9 モデル平均による図 1b 青線上の断面図. (a) 気温 (K K⁻¹), (b) 高度場の帯状平均からの偏差 (m K⁻¹), (c) 断面と直交する水平風 (正は南西風, m s⁻¹ K⁻¹).

化,それに付随する循環場の変化と,そのメ カニズムについて調べた.

2. 方法

CMIP5マルチモデルデータより,感度実験の結果も揃う9モデルを使用する.温暖化 実験として1%漸増CO2実験の結果を使用し, CO2濃度が約4倍となる後半30年間(111~ 140年)平均の値を使用する.解析では夏季 平均(JJA)の変化量を使用する.なお,よ り現実的なシナリオを扱うRCP実験も,基本 的に同様の結果を示す(非図示).

CO₂増加とSST上昇の寄与を分離するため、AGCMを用いたAMIP実験(amip)とCO₂ 4倍増AMIP実験(amip4xCO2)、SST4K上昇 実験(amip+4K)の結果を使用する.結合モ デルによるCO₂4倍増時の変化は、基本的に CO₂の直接効果(amip4xCO2とamipの差)と、 SST上昇の効果(amip+4Kとamipの差)の合 成によって説明される.

3. 結果

3.1 温暖化時の海陸熱的コントラストの変化

図1はMIROC5のCO₂4倍増時の地上気温 と高度場の変化を示す.MIROC5の結果は基 本的にマルチモデル平均と同様の傾向を示 す(非図示).陸上の気温上昇は海上と比較 して大きく,海陸の熱的コントラストが形成 されている.北半球中高緯度では,気温上昇 のピークが存在するユーラシア大陸・北米大 陸上で,正の高度場偏差が形成されている. 300hPaと850hPaの層厚の変化を,対流圏気温 の変化の指標として用いると,海上と比較し て大陸上で対流圏の昇温がより大きく,正の 高度場偏差と対応している.対流圏下層の水 平風偏差は,高度場の偏差を示す等値線に沿 っており,日本上空では北東風偏差が形成さ れている.

大陸から海上にかけての断面(図1b青線) の構造を調べると(図2),対流圏の気温は 海上と比較して陸上で上昇量が大きく,対流 圏全体を通して熱的コントラストが形成さ れている(図2a).なお,海上の対流圏上層 の昇温ピークは,亜熱帯海上の大気が湿潤断 熱的に昇温するためと考えられる.高度場の 偏差(図2b)は,気温の偏差に対応して,対 流圏に順圧的な高度場偏差が形成される.断 面を横切る水平風成分の偏差(図2c)は,高 度場偏差の等値線に沿うように,対流圏全体 で北東風偏差が形成されている.

3.2 SST上昇とCO2増加の寄与

現実的なシナリオを扱うRCP実験と, CO₂漸増実験の結果は同様の特徴を示して おり,モデルやシナリオに依存しない一貫し た変化であると言える.CO₂漸増実験におけ る変化のメカニズムを調べるため,AGCM実 験におけるCO₂増加・SST上昇の感度を比較 した.図3a,cが示すCO₂応答は,結合モデル の応答(図2a)と同様に対流圏全体を通して 海上と比較して陸上で昇温量が大きく,海陸 コントラストが生じていることがわかる.対 流圏上層に昇温のピークが存在しているの



図 3. (a, b) 図 1b, (c, d) 図 2a に同じ. ただし (a, c) amip4xCO2 と amip の差, (b, d) amip+4K と amip の差.

は、陸上での対流活発化による凝結熱加熱な どに起因すると考えられる.一方でSST上昇 時の変化(図3b,d)は、大陸上・海洋上とも に昇温するものの、特に対流圏中層から上層 にかけて海上の昇温量が大きく、海陸の熱的 コントラストは逆符号の応答を示している. ここで、海上、特に低緯度側で対流圏上層の 昇温が大きいのは、大気が湿潤断熱的に昇温 するためと考えられる.

このような対流圏の熱的コントラスト の応答に伴い,高度場のコントラストも,温 暖化時の変化にはCO2応答が大きく寄与し ており,SST上昇による変化はむしろ逆符号 を示す(図3c,d).以上のことから,温暖化 時の夏季海陸コントラストの変化には,CO2 増加による海陸の応答の差が重要であり, SST上昇は逆向きに働くことがわかった.

これらの関係をより一般的に理解する ために、AGCMによる感度実験と、RCP実験、 CO₂漸増実験、CO₂瞬時増加実験の結果を比 較した.それぞれの実験における全球平均地 上気温の上昇量(ほぼSSTの上昇量に対応す る)、放射強制力、そして夏季極東域の海陸 熱的コントラストを比較すると、コントラス トの変化は①全球平均地上気温の上昇によるコントラストの弱化,②放射強制力の増加 によるコントラストの強化,の二つの合成で よく近似できることがわかった(非図示). この結果は,現実的な将来予測実験の結果が, 理想的な感度実験から得られたそれぞれの 寄与の足し合わせとして理解できることを 示している.

3.3 海陸コントラストの変化の緯度依存性

地球温暖化時の陸上の昇温偏差 (Manabe et al. 1991) は, 海陸の熱慣性の違 いから説明されることが多い.一方で、長期 間の平衡応答でも,海上よりも陸上の昇温量 が大きくなることから,熱慣性以外にも要因 が存在すると考えられる.これまでに、地表 面特性の違い(土壌水分量の制限)による地 表面熱・水収支の違い(海上と違い,温暖化 時の陸上の潜熱フラックスの増加は制限さ れる)や、境界層内の温度減率の違いが指摘 されている (Joshi et al. 2013) . ロスビーの 変形半径が大きい低緯度では,自由大気の温 度は海上でも陸上でも一様に昇温する(非図 示).一方で,境界層内の温度減率は陸上で より大きいことから、地上気温は相対的に陸 上のほうが高くなる.このため,SST上昇時 の境界層内の気温上昇は,温室効果ガス濃度 を変えなくても、海上より陸上のほうが高く なる(非図示).このことから,近年の陸上 の気温上昇のほとんどは、SST上昇にその原 因を求めることができるとされてきた (例え ばCompo and Sardeshmukh 2009). しかしな がら,SST上昇時の海陸熱的コントラストは, 中高緯度では逆の応答を示している(非図 示).これは、ロスビーの変形半径の小さい 中高緯度では,巨大な陸塊上の自由大気へは, 海上の温度上昇の影響が及びにくいためで ある.以上のことから、これまでに温暖化時 の陸上昇温の要因として説明されてきたメ カニズムは,主に低緯度には適用可能である ものの, 極東域を始めとした中高緯度では, CO₂増加による直接的な加熱が不可欠であ ることがわかった.

4. まとめ

地球温暖化時の進行に伴い,夏季極東域 では,海上と相対的に陸上の昇温量が大きく



図4. 温暖化時の夏季極東域の海陸コントラスト と対応する循環場の変化を表す模式図.

なる.この海陸熱的コントラストは、順圧的 な高度場のコントラストを通して、東アジア の循環場を変化させ、北日本に北東気流をも たらすような偏差パターンが形成される(図 4).これらはモデル間で一貫性の高い変化 として確認される.

同じマルチモデルを用いた感度実験に より,海陸コントラストの変化にはCO₂増加 による陸面の直接的な加熱効果が不可欠で あり,SST上昇はむしろ逆符号の寄与を示す ことがわかった.温暖化時の気候システムの 変化には,一般的にSSTの上昇量や空間的な パターンの影響が重要である一方で,中高緯 度の変化パターンにおいては,CO₂増加によ る放射強制力がローカルな非断熱加熱を通 して果たす役割が大きいことが示された.

以上の結果は、これまで考えられてきた 以上に、CO₂を始めとした温室効果ガス濃度 の上昇による直接的な効果が、温暖化時の気 候システム変化において重要であることを 示している.また、仮に気候工学的な温暖化 抑制策として太陽放射管理を行っても、この 海陸熱的コントラストは解消されず、また CO₂除去によってはこのコントラストが効 果的に解消されることを示唆している.気候 工学的手法をとったときの気候システムへ の影響はまだ未解明な部分が多く、今後も潜 在的な影響の調査を進める必要がある.

謝辞:本研究は文部科学省気候変動リスク情 報創生プログラムの支援を受けた. 参考文献

- Arai, M., and M. Kimoto, 2008: Simulated interannual variation in summertime atmospheric circulation associated with the East Asian monsoon. *Climate Dyn.*, **31**, 435–447.
- Bony, S., G. Bellon, D. Klocke, S. Sherwood, S. Fermepin, and S. Denvil, 2013: Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation. *Nature Geosci.*, 6, 447–451.
 Compo, G. P., and P. D. Sardeshmukh, 2009:
- Compo, G. P., and P. D. Sardeshmukh, 2009: Oceanic influences on recent continental warming. *Climate Dyn.*, **32**, 333–342.
 Hirota, N., and M. Takahashi, 2012: A tripolar
- Hirota, N., and M. Takahashi, 2012: A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon. *Climate Dyn.*, **39**, 2219– 2238.
- Joshi, M. M., F. H. Lambert, and M. J. Webb, 2013: An explanation for the difference between twentieth and twenty-first century land-sea warming ratio in climate models. *Climate Dyn.*, 41, 1853–1869.
 Kamae, Y., and M. Watanabe, 2012a:
- Kamae, Y., and M. Watanabe, 2012a: Tropospheric adjustment to increasing CO₂: its timescale and the role of land-sea contrast. *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-012-1555-1.
- Kamae, Y., and M. Watanabe, 2012b: On the robustness of tropospheric adjustment in CMIP5 models. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23808, doi:10.1029/2012GL054275.
 Kimoto, M., 2005: Simulated change of the East
- Kimoto, M., 2005: Simulated change of the East Asian circulation under the global warming Scenario. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16701, doi:10.1029/2005GL023383.
 Manabe, S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman, and K.
- Manabe, S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman, and K. Bryan, 1991: Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: Annual mean response. J. Climate, 4, 785–818.
 Nakamura, H., and T. Fukamachi, 2004:
- Nakamura, H., and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1213–1234.
 Sutton, R. T., B.-W. Dong, and J. M. Gregory,
- Sutton, R. T., B.-W. Dong, and J. M. Gregory, 2007: Land–sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02701, doi: 10.1029/2006GL028164.
- Tachibana, Y., T. Iwamoto, M. Ogi, and Y. Watanabe, 2004: Abnormal meridional temperature gradient and its relation to the Okhotsk high. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 1399–1415.
- Wakabayashi, S., and R. Kawamura, 2004: Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 1577–1588.