

地球温暖化下での夏季アジアモンスーンの主要変動モード

安富奈津子・木本昌秀(東京大学気候システム研究センター)

1. はじめに

近年日本においては暑い夏と豪雨が頻繁に起こるが、このような現象は地球温暖化に関連するのではないかとマスコミを含め各所で指摘されている。本研究では、大気海洋結合モデルによる地球温暖化実験の結果を利用し、北半球夏季アジアモンスーン域において季節スケールではどのような変動モードが卓越するかを解析した。また、その構造を再解析データや現在気候の下で卓越する変動パターンと比較した。さらに、この変動モードが温暖化の下での長期的な変化傾向を解析し、その変動にかかわる要因を調べた。

2. モデルの概要

本研究で利用した大気海洋結合モデルは CCSR/NIES/FRCGC MIROC3.2 である。解像度は大気 T106L52 海洋 56 層で用いた。二酸化炭素濃度は 1901 年から 2000 年までは観測に基づいた 20 世紀再現実験、2001 年から 2100 年までは IPCC(2000)の SRES A1B シナリオ(経済発展優先)による排出予測に基づいた温暖化実験として積分を行った。データの解析には 1951 年から 2100 年までの JJA 月平均の水蒸気フラックス鉛直積分、200hPa 東西・南北風、OLR、海面水温、蒸発量を使用した。あわせて温暖化による海面水温変動の効果について比較検討するために、観測の海面水温を境界条件に与えて長期積分した結果(Time-slice 実験)も解析した。こちらは CCSR/NIES/FRCGC AGCM5.7 で解像度は結合モデルと同様

T106L56 で、解析に利用した期間は 1979 年から 2002 年である。

3. 夏季アジアモンスーン域の主要変動モードの抽出とその構造

アジアモンスーンの変動に関する研究は多数あるが、本研究では安富・木本(2004)に基づいて JJA 月平均の水蒸気フラックス鉛直積分の気候平均からの偏差を(40°E-180°, 20°S-40°N)の範囲で 2 変数 EOF 解析を行った第 1 モードを夏季アジアモンスーン域の主要変動モードと定義した。長期的な変動を除くため、線形トレンドも除去した。図 1 に再解析データ、温暖化実験結果、20 世紀再現実験結果からそれぞれ計算した水蒸気フラックス鉛直積分の EOF 第 1 モードの各変数に対する回帰をまとめて図示した。再解析データは、水蒸気フラックス、200hPa 風は NCEP 再解析、NOAA の OLR と Reynolds SST を利用した。解析期間 1979~2003 年である。

ここで得られたアジアモンスーン域の夏の主要変動モードは、この図からフィリピン付近に循環偏差をもち、ベンガル湾から亜熱帯北西太平洋にかけてとインド洋からインドネシア上の領域に OLR 偏差の活発・不活発がシーソー状に並んでいる。上層の 200hPa 風偏差ベクトルが OLR 偏差の負領域から正領域に向いていることから、この OLR 偏差が正負の領域では北東-南西方向の鉛直循環偏差が形成されていることがわかる。下層の循環偏差、OLR 偏差の南北シ

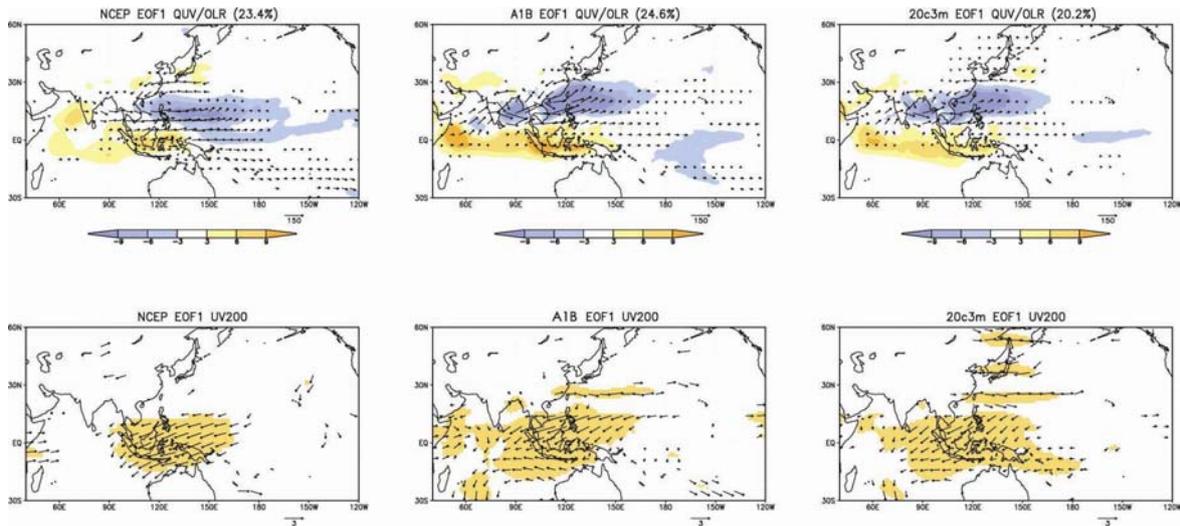


図 1: 夏季(JJA)月平均水蒸気フラックス鉛直積分の EOF 第 1 モードに対する(上段)水蒸気フラックス鉛直積分偏差(矢印)、OLR 偏差(色)(下段)200hPa 風偏差のそれぞれ回帰係数。左列から順に再解析データ、結合モデルによる温暖化実験、20 世紀再現実験。有意水準 95%で有意ベクトルのみ表記

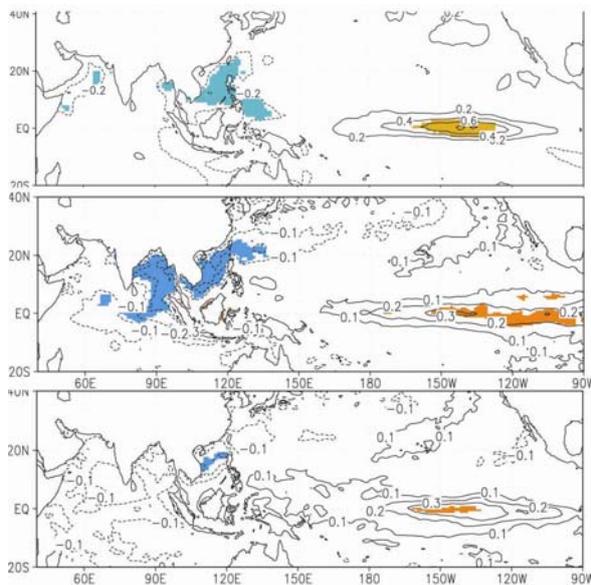


図 2: 上段からそれぞれ再解析データ、20 世紀再現実験、温暖化実験の水蒸気フラックス鉛直積分 EOF 第 1 モードに対する JJA 平均の海面水温偏差の回帰係数。有意水準 95%で有意な回帰に対して着色

ーソーと鉛直循環偏差は再解析データ、温暖

化実験、20 世紀再現実験のいずれにおいても主要な変動として抽出することができるパターンであることがわかった。

次に主要変動モードと海面水温変動との関係を示した。図 2 は JJA 平均の海面水温変動偏差の再解析データ、20 世紀再現実験、温暖化実験の水蒸気フラックス EOF 第 1 モードに対する回帰である。南シナ海からフィリピン海にかけての海面水温が低下し赤道に沿って東部太平洋で上昇しているのが共通して 3 つの図に見られる特徴である。負の海面水温偏差になっているにもかかわらず、フィリピン付近では対流活動は活発である。これは下層で低気圧性の循環偏差が形成され、気候平均場で卓越する西風を加速するため、海面からの蒸発が促進されて海面水温が下降するというしくみが成り立っているためである。図は示さないが、再解析データ、20 世紀再現実験ともに、主要変動モードに対応してインド洋、フィリピン海付近で

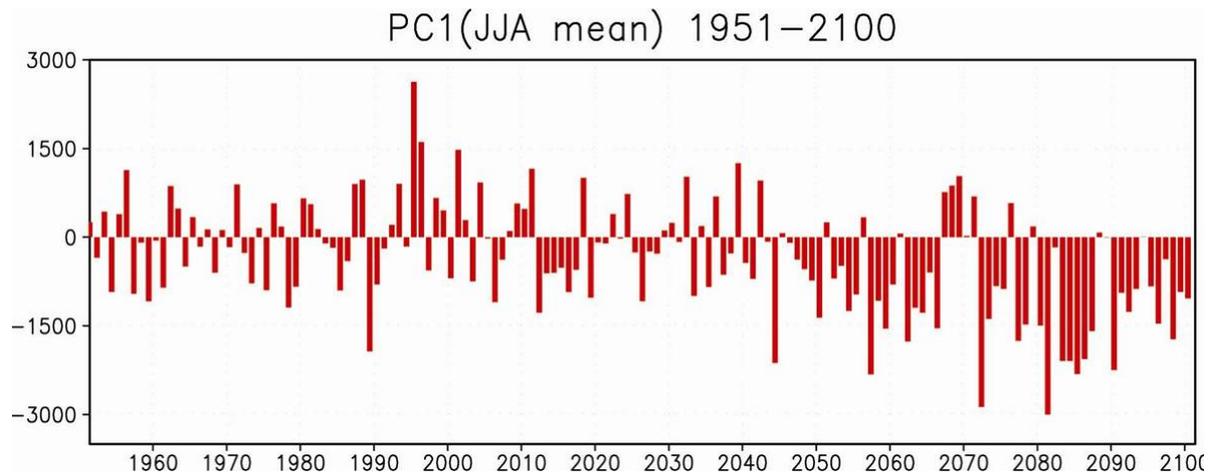


図 3 : 20 世紀再現実験の水蒸気フラックス鉛直積分 JJA 月平均 EOF 固有ベクトルに対して 1951 年から 2100 年までの水蒸気フラックス鉛直積分を射影させたときの時系列。図は季節平均(JJA)して示している。

蒸発が盛んになっている。一方、温暖化実験では海面水温との有意な関係が見られる海域は少ないこともわかった。

大気海洋結合モデルで再現された夏季アジアモンスーン域の主要変動モードは、再解析データから得られた主要変動モードと同じ水平・鉛直方向の構造をしていることが確認できた。また、長期変動と気候平均を除いた季節～年々スケールの主要変動モードは地球温暖化の環境にあっても現在気候とほぼ同じ構造を持つこともわかった。

4. 温暖化下における夏季アジアモンスーン域主要変動の長期変化傾向

温暖化の下でも季節～年々スケールという比較的短い時間スケールでは現在気候と同じ変動モードが卓越することがわかったが、この変動モードが長期的にはどのような変化傾向をとるのかということも、将来のアジア域の夏の気候変化を予測するためには非常に重要である。ここでは温暖化下での夏季アジアモンスーン域の主要変動モードの長期変化傾向を解析し、その長期傾向をもた

らす要因について考えてみたい。

図 3 に示した時系列は、20 世紀再現実験の EOF 第 1 モードとして得られた固有ベクトルに対して 2001 年以降の温暖化実験で得られた JJA 月平均水蒸気フラックスを射影させて得たものである。気候平均(1979 年～95 年)は除去し、線形トレンド除去の操作は行わない。その結果、2040 年代以降に負の値が持続的に続くという特徴的な傾向が現れた。これは図 1 で示したパターンの反対符号の傾向が長期間にわたって卓越するということになる。すなわち、フィリピン～北西太平洋で高気圧性循環偏差が卓越し、対流活動が不活発になり、インド洋～インドネシアでは対流活動が活発になるということになる。

温暖化が進行するとこのような傾向が見られるようになるのかということで、図 4(上図)に北半球夏季(JJA)の将来気候－現在気候の水蒸気フラックスと降水量を示した。気候平均はそれぞれ積分期間の後ろ 30 年(1971/2071～2000/2100)の平均である。この図からわかるように、赤道付近では全体的に

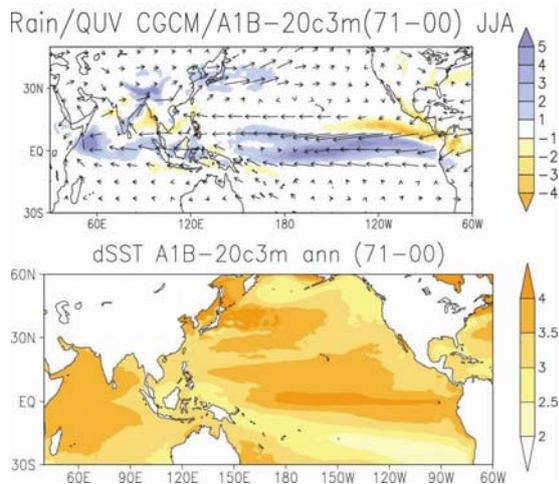


図 4: 大気海洋結合モデルで予測した地球温暖化時の将来気候(2071 年~2100 年)平均と現在気候(1971 年~2000 年)の差の(上図)夏の降水量と水蒸気フラックス鉛直積分(下図)年平均海面水温

降水量が増加し、フィリピン付近では減少している。またベンガル湾からフィリピン付近では水蒸気フラックスが高気圧性の循環偏差を形成しており、図 1 で示された下層の循環偏差と対流活動偏差のパターンとは反対の特徴を示している。このとき日本南岸では水蒸気フラックス偏差が西から東に向くことになり、6~7 月にかけて梅雨前線を強化する役割を果たすことになる。地球温暖化時、夏季に日本では長梅雨になるという予測は Kusunoki et al. (2006)でも指摘されている。

5. 海面水温変動と主要変動モード

主要変動モードが長期的に負の偏差パターンをとるようになる要因を考察していく上で最も検討する必要があると考えられるのが温暖化時の海面水温の長期トレンドである。図 2 からわかるように、主要変動モードと海面水温変動との間に有意な同時相関がみられる南シナ海~フィリピン海の海面

水温低下は大気から海洋への作用が要因であると考えられる。しかしながら熱帯海洋は熱容量が大きく、その長期的な変動が夏の気候変動に大きな影響を与える可能性は高い。温暖化時の海面水温の変動を示した上で、主要変動モードの形成と関連する海域を Time-slice 実験の結果から検討してみることにする。

図 4(下図)に将来気候—現在気候の海面水温の変化量(年平均)を示した。ほとんどすべての海域で海面水温が上昇していることがわかる。熱帯に関してはインドネシア周辺の暖水域で上昇度が低く、日付変更線から東の赤道に沿って上昇度が高い。赤道に沿って海面水温の東西傾度が低くなり、エルニーニョ的な傾向になっている。このエルニーニョ的傾向が主要変動モードが負パターンをとるといふ長期傾向と関わってくるだろうか？

まずは再解析データ、20 世紀再現実験の主要変動モードはともに赤道東部太平洋の海面水温変動と正の有意な相関をもっていることが図 1 の下段からわかる。これはエルニーニョ的長期傾向が負パターンと関連するという仮定とは矛盾する。また温暖化実験との回帰(図 1 下段右)では海面水温変動と有意な相関があまりみられない。

それでは海面水温変動と主要変動モードは関連を持たないのかということそうではな

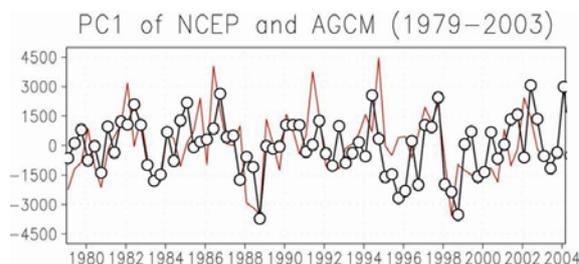
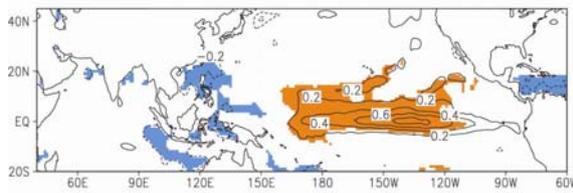


図 5: 再解析データ(黒丸と実線)と Time-slice 実験(赤実線)の水蒸気フラックス EOF 第 1 モード時系列。

い。図 5 は再解析データと Time-slice 実験
EOF1(amip) regSST(JJA)



EOF1(amip) regSST(DJF)

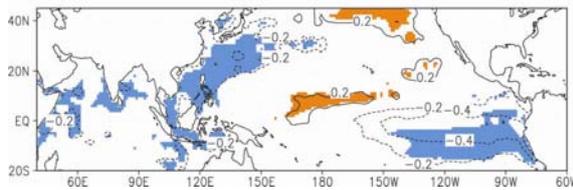


図 6: Time-slice 実験の水蒸気フラックス EOF 第 1 モードに対する海面水温の回帰。(上図)JJA 平均(下図)前冬(DJF)平均。有意水準 95%で有意な回帰に色。

の主要変動モードの時系列を示したものである。双方の時系列は相関係数 0.42 で、有意水準 95%で有意である。図は省略するが Time-slice 実験の EOF 第 1 モードも循環偏差と OLR の南北シーソー構造が現れていた。また、図 4 の再解析データと Time-slice 実験の主要変動モードの時系列は 1983、88、97、98、2002 年のピークが一致している。Time-slice 実験では観測の海面水温変動を境界条件に与えているので、海面水温変動は主要変動モード形成の要因のひとつであるといえる。そして、時系列のピークが一致している年に関しては、特に海面水温変動がパターン形成に大きな役割を果たしていると考えられる。それでは具体的にどの海域の変動と関連が強いかを調べてみる。Time-slice 実験の主要変動モードに対する海面水温変動の回帰係数を図 6 に示した。上図が同時相関(JJA)、下図が前年冬(DJF)の海面水温と

のラグ相関である。赤道東部太平洋の日付変更線付近から 120°W 付近まで広い海域で有意な正の同時相関があらわれており、エルニーニョ的な海面水温分布に対して主要変動モードの正パターンが形成されやすいということを示している。これは再解析データや大気海洋結合モデルから得られた結果とは符合するが、温暖化時の長期傾向とはやはり矛盾する。一方、下図の前年冬との関係では、南米付近の熱帯東部太平洋で負相関がみられる。図 5 の時系列で再解析データと Time-slice 実験の主要変動モードのピークが一致した年は顕著なエルニーニョ/ラニーニャが起こった翌夏でもあり、この点では温暖化時の長期傾向と矛盾しない結果が得られた。ただし再解析データ、大気海洋結合モデルともに主要変動モードと冬季海面水温変動との間に有意なラグ相関はほとんどみられなかった。

6. まとめと今後の課題

大気海洋結合モデルを用いて地球温暖化時に夏季アジアモンスーン域でどのような変動が卓越するか、またその変動が長期的にはどのような傾向をとるのかを調べた。気候値と線形トレンドを除去した場合、20 世紀再現実験、温暖化実験ともにフィリピン付近に循環偏差、亜熱帯西部太平洋とインド洋～インドネシアに OLR のシーソー構造を持つパターンが主要変動モードとして抽出された。再解析データ、観測の海面水温変動を大気大循環モデルに与えた Time-slice 実験でも同じ構造を持つパターンが卓越することが確認できた。

温暖化したときの長期的な傾向をみたときには、この主要変動モードのフィリピン付近で高気圧性の循環偏差が形成されるパタ

ーンが 2040 年代以降に顕著に現れやすくなることがわかった。これは温暖化時と現在気候の夏の気候平均の差分からも確認された。この循環偏差パターンが形成されると日本付近では梅雨期の降雨が増える傾向になる。

温暖化時に海面水温はエルニーニョ的に上昇する。再解析データ、結合モデル、Time-slice 実験のいずれも夏季の海面水温がエルニーニョ的であるときには低気圧性の循環偏差が形成されやすいという、予測される長期傾向とは矛盾した結果が得られた。

現在のところ大気海洋結合モデルではエルニーニョ・ラニーニャの振幅が小さいなど、海洋の再現性に未成熟な点がみられる。温暖化したときの海面水温の変動予測についても世界の各モデルで一致した結論は得られていない。したがって、本研究で指摘した変動パターンが温暖化時に現れやすくなるのが海面水温変動の強制であると考えするにはまだ議論の余地がある。しかしながら、Time-slice 実験では冬季の赤道東部太平洋の海面水温変動と主要変動モードは温暖化予測と矛盾なく対応しており、大規模なエルニーニョ／ラニーニャの翌夏にパターンが形成されやすくなる可能性は示された。

参考文献

Imada, Y. and M. Kimoto, 2006: Improvement of thermocline structure that affect ENSO performance in a Coupled GCM, *SOLA*, **2**, 164-167

IPCC, 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*, Nakicenovic, N. and R. Swart (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 612 pp. Climate Change K-1 model developers, 2004: K-1 coupled GCM (MIROC) description. (Hasumi, H.,

and S. Emori, eds.) K-1 Technical Report, **1**, 34pp. (available from the Center for Climate System Research, University of Tokyo)

Kimoto, M. 2005: Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16701, doi:10.1029/2005GRL023383

Kusunoki, S., J. Yoshimura, H. Yoshimura, A. Noda, K. Oouchi and R. Mizuta, 2006: Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 581-611

安富奈津子・木本昌秀, 2004: 夏季アジアモンスーン域の主要変動モード, *グロースベクター*, **42**, 19-31