

アジアモンスーン域の夏季降水変動パターンに対するエアロゾルの影響

荒井美紀(東大 CCSR), 宮坂貴文(東大理),
野沢徹, 永島達也(国立環境研), 木本昌秀(東大 CCSR)

1. はじめに

アジアモンスーン域の夏季降水に対する、長期間に渡る人間活動の影響評価については、これまで主に温室効果気体増加による温暖化に焦点が当てられてきた。一方で、アジア域での工業発展に伴い、エアロゾル排出量が近年増加し、観測や数値モデル実験により、エアロゾルのアジアモンスーンへの影響に関して多くの議論が行われてきている (Menon et al. 2002; Lau and Kim 2006 など)。一般に、エアロゾルは温室効果気体と比較して存続時間が短いため、より放出源付近へのローカルな影響が懸念される。しかしながら、エアロゾルの気候への効果のモデルへの取り入れ方は研究によりまちまちであり、結果もモデルに大きく依存しているため、単純な比較は難しい。エアロゾルの気候への影響として、直接効果(短波放射をエアロゾルが吸収・反射することによる影響)と間接効果(エアロゾルが雲を形成することによる影響)とが知られているが、これらの効果を気候モデルにどのように取り込むかという問題もある。本研究では、これらエアロゾルの気候影響も考慮された大気海洋結合モデルを用いて、アジアモンスーン域の夏季降水量の長期変化に対する人間活動の影響を定量的に評価することを目的として解析を行った。

2. モデル

CCSR/NIES/FRCGC の大気海洋結合モデル MIROC3.2 を用いて国立環境研究所において行った実験を比較検討した。これらの

実験は、20 世紀中の観測に基づいたエアロゾル量及び温室効果気体、オゾン量などの歴史的变化を強制源として入れている。またエアロゾルの気候への直接・間接効果も取り入れてある (Takemura et al. 2002)。要因特定のために解析した主な実験は、全強制実験 (FULL)、人為起源強制実験 (ANTH)、温室効果気体増加実験 (GHGS)、エアロゾル増加実験 (ARSL) の 4 種類である。各アンサンブル実験ともメンバー数は 4 とした。全積分期間 1850-2000 年のうち、1901-2000 年の 20 世紀 100 年間について調べた。またこれとは別に、強制を 1850 年の時点に固定して行った実験 (CTL) 3600 年分も比較のために用いた。

3. 夏季降水のトレンド

まず、降水の 20 世紀 100 年間の降水及び風の場の線形トレンドを観測 (CRU) と比較した。全強制実験の降水トレンド(図 1a)では、赤道域東インド洋-西太平洋にかけての降水減少と、亜熱帯域西太平洋での降水増加となる南北シーソー構造が顕著に見られる。このシーソー構造は、下層にフィリピン北部を中心として西太平洋に広がる低気圧性の循環偏差を伴う。観測は地上のみになるが、図 1b より、赤道域西太平洋域に降水増加、その北側の亜熱帯域で降水減少と全強制実験とは反対符号のトレンドを持っていることが分かる。大気海洋結合モデルで再現された降水トレンドに見られた南北シーソー構造は、20 世紀中の観測された SST を下部境界条件として与えた大気大循環モデル

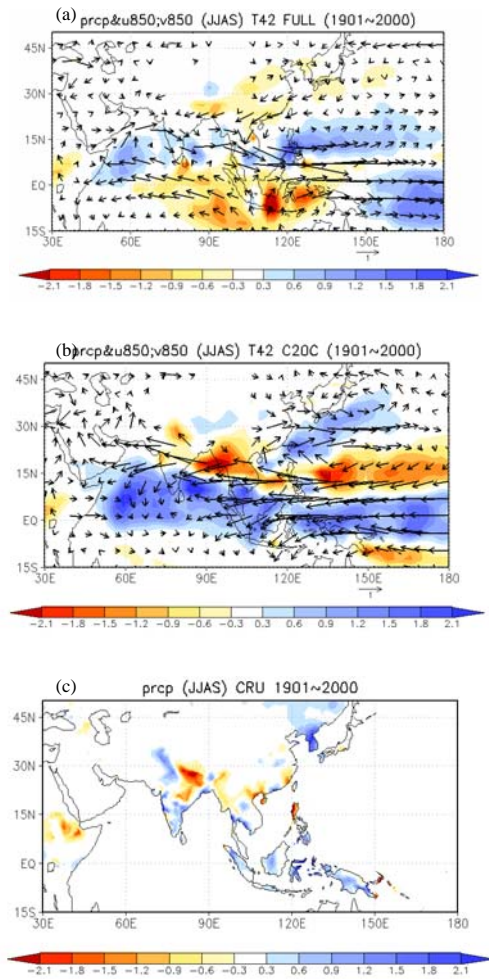


図2 20世紀再現実験(a)、AGCM実験(b)、CRU(c)による100年間のトレンド。降水量(カラー)と850hPaの風の場。

の結果のトレンド(図1c)とも逆符号となっており、SSTの再現性に問題があると考えられる。そこで、大気海洋結合モデルと観測のSSTの100年間のトレンドを比較したところ、観測と大気海洋結合モデルとの違いは主に熱帯-亜熱帯インド洋から西太平洋にかけてと、北西太平洋域に顕著に見られた。

次に、全強制実験、人為起源強制実験、自然起源強制実験の20世紀中の夏季モンスーンの降水トレンドをそれぞれ計算し、与える影響の大きさを比較した(図2)。人為起源強制実験の降水及び下層の風のトレンド(b)

は、全強制実験のそれ(a)と酷似しており、振幅も同程度であること、自然起源強制実験のトレンドは最大の領域でも振幅が人為起源実験の1/5程度と小さいことから、20世紀中の降水トレンドは人為起源強制がほぼ決めていることが分かった。さらに人為起源強制のうち、要因を温室効果気体増加、人為起源エアロゾル増加、オゾン変化と切り分けて行った実験を比較した結果、降水トレンドに与える影響が大きかったのは、温室効果増加(図3a)とエアロゾル増加(図3b)によるものであり、その振幅はほぼ同程度であった。また、両者の空間パターンに着目すると、西部太平洋及び東インド洋熱帯域とフィリピンを中心とする西部太平洋亜熱帯域とで逆符号の傾向を持つ南北シーソーを持っている。この南北シーソー構造は、温室効果気体増加実験では赤道域で降水の増加、亜熱帯域で降水の減少を示し、エアロゾル増加実験ではその逆符号を取る。すなわち、この二つの効果は相殺する傾向にあることが分かった。

この熱帯域から亜熱帯域にかけての降水の南北シーソー構造は、自然変動においても

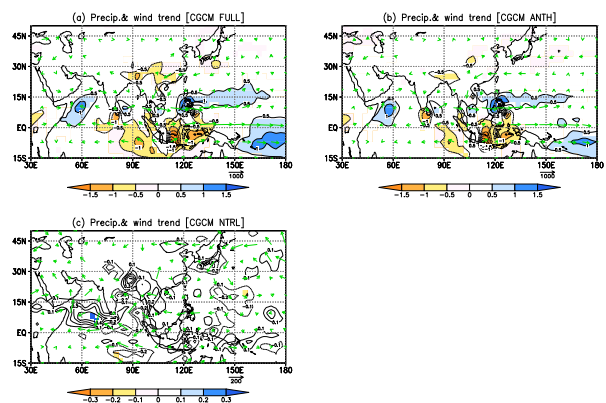


図2 20世紀再現実験による100年間のトレンド。降水量(カラー)と850hPa風の場(ベクトル)。(a)全強制実験FULL、(b)人為起源強制ANTH、(c)自然起源強制NTRL。

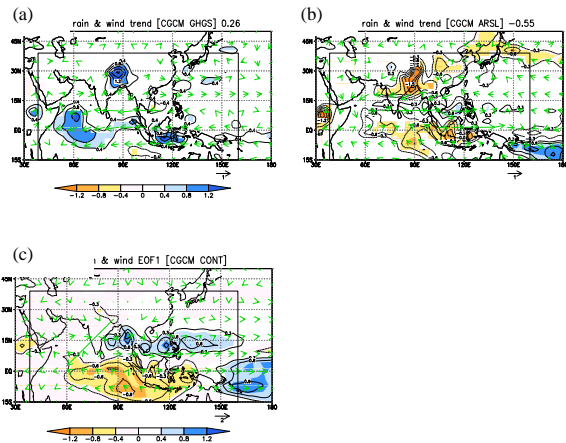


図3 20世紀再現実験による100年間のトレンド。降水量(カラー)と850hPa風の場(ベクトル)。(a)温室効果気体増加実験GHGS、(b)エアロゾル増加実験ARSL)。(c)コントロールランCTLのEOF第一主成分(PC1)に回帰した降水

現れる。図3cに、強制を1850年時点に固定して長期間積分したコントロールラン3600年間の降水に対し、EOF解析を行った結果を示した。この自然変動において最も卓越するモードに伴う水平パターンは、20世紀中の降水トレンドのそれとよく似た特徴を持っている。こうしたアジアモンスーン域の降水の南北シーソー構造は、観測やSSTを固定して与えたAGCMの出力結果からも得られることが分かっている(安富・木本2006)。すなわち、これらの外部強制への応答パターンはモンスーンの自然変動を変調する形で現れている。一方で、エアロゾル増加に伴う海面水温の変化を通して現れる側面もある。

図3aとbに示した降水トレンドは、さらに、東アジア域から北西太平洋にかけての中緯度域で、温室効果気体増加実験では湿潤傾向、エアロゾル増加実験では乾燥傾向を示していた。そこで、SSTに対しても各実験結果の100年間のトレンドを計算した結果、

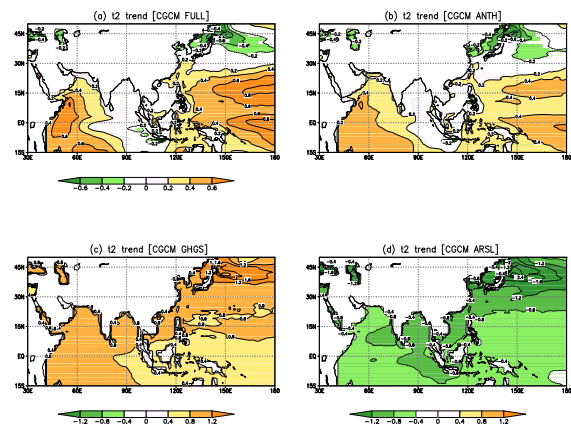


図4 20世紀再現実験による100年間のトレンド、SST。(a)全強制実験FULL、(b)人為起源強制実験、(c)温室効果気体増加実験、(d)人為起源エアロゾル増加実験ARSL。

全強制実験・人為起源強制実験では熱帯・亜熱帯域に顕著なシグナルがあるのに対し、温室効果気体実験及びエアロゾル増加実験では、熱帯・亜熱帯域より北西太平洋域にそれぞれ強い温暖化・寒冷化傾向が見られる。また、温室効果気体実験及びエアロゾル増加実験に見られた熱帯・亜熱帯域のSSTトレンドは、降水パターンの傾向と矛盾しない。

一方、中緯度域のSSTのエアロゾル増加実験に現れる寒冷化は、大気的光学的厚さの増加から起きている。この下層の寒冷化は大気の静的安定度の増加傾向をもたらす(図5b)。すなわち、その領域での降水を減らすことになる。降水の減少に伴い、その領域での雲は維持されるため、下層の寒冷化が保たれると考えることが出来る。温室効果気体増加実験におけるSST増大はこれとは反対のプロセスを辿る(図5a)。北西太平洋中緯度域ではこのような正のフィードバックが働くことにより、顕著な降水トレンドを生じると考えられる。

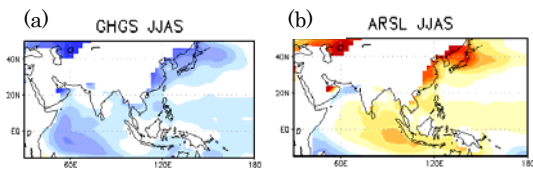


図5 20世紀再現実験による100年間のトレンド、安定度(925hPaと500hPaとの相当温位の差)。(a) 温室効果気体増加実験、(b) 人為起源エアロゾル増加実験。

4. まとめ

アジアモンスーンの降水の長期変化を、大気海洋結合モデルを用いて再現し、変動の要因についての解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 20世紀中の降水トレンドは主に温室効果気体とエアロゾルの増加によって規定される。
- ・ アジアモンスーン域の降水トレンドに対する温室効果気体の効果エアロゾルの効果はほぼ同等で、相殺する傾向にある。
- ・ 降水の外部強制に対する応答は、1) localなSSTの変化によるもの(East Asia)と、2) モンスーンの熱帯-亜熱帯に存在する自然変動を変調するものとが共存している。

今後は、こうした内部変動の変調の機構を明らかにするとともに、エアロゾルの種類によるアジアモンスーンへの影響の現れ方の違いなども調べ、より定量的な議論を行う予定である。

謝辞

この研究は、環境省の地球環境研究総合推進費(B-61)の支援により行われたものです。

参考文献

- Lau, K.-M. and K.-M. Kim (2006) Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation. *Geophys. Res. Lett.* 33, L21810, doi: 10.1029/2006GL027546
- Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko, and Y. Luo (2002) Climate effects of black carbon aerosols in China and India, *Science*, 297, 2250-2253
- Takemura T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne (2002): Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *J. Clim.*, 1, 333-352.
- 安富奈津子・木本昌秀(2006): 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, 平成18年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, 165-170