

課題名 A-0902 植生改変・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響

課題代表者名 安成哲三（名古屋大学地球水循環研究センター）

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 149,789千円（うち23年度 49,754千円）
 予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) エアロゾル変動のモデリングと気候影響評価（名古屋大学環境学研究所）
- (2) 植生改変によるエアロゾル変動の気候影響評価（（独）海洋研究開発機構）
- (3) アジアモンスーン地域における20世紀の気候変動・変化に関するデータ解析（首都大学東京）
- (4) 植生改変・エアロゾル変動によるアジア地域の気候変動・変化のフィンガープリント解析（名古屋大学地球水循環研究センター）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

大気中のエアロゾル変化や植生改変が気候変化に重要な影響を及ぼすことについてはすでに多数の研究がなされている。特にこれらのプロセスが、中国、インド、東南アジアなどアジア地域でのモンスーン気候へ大きく影響することが示されている(Bollasina.etal.,2011; Takata et al., 2009など)。

しかし、農耕活動が主たる起源とされる硝酸塩エアロゾルや2次有機炭素エアロゾル(SOA)については影響評価がまだ十分にされていない。硝酸塩エアロゾルは、その濃度への海塩粒子による影響も大きいことから、特に夏季モンスーンの大陸上で重要と考えられるが、生成過程のモデリングがこれまで不十分であった。

さらに植生改変が生物起源エアロゾルの変化を通して気候に影響を及ぼすことも指摘されている(Pielke et al., 2007など)が、そのプロセスを定量的に評価した研究は極めて少ない。この植生改変→エアロゾル変化のプロセスには2種類ある。地面の露出度(LAI(葉面積指数)に依る)や地表風速の変化(粗度に依る)に起因する土壌起源ダスト発生量の変化と、葉からの揮発性有機炭素(VOC)の発生量の変化である。前者は、SPRINTARS(Takemura et al., 2005)などのエアロゾル気候モデルですでに考慮されているが、後者については、産業革命以前から21世紀末までのVOC発生量変化を全球スケールで推定した研究がようやく始まったばかりである。植物起源の炭化水素類(VOCs)からSOAへの変換過程は、特にアジアモンスーン域での雲降水システム形成にも大きな役割を果たしている可能性があるが、これに関連した研究はまだなされていない。

本研究グループでは、硝酸塩エアロゾル生成モデルの開発に成功し(須藤 他, 2010)、植生改変→エアロゾル過程のモデル化も、大気化学モデルCHASER(Sudo et al., 2002)の活用により可能になっている。

2. 研究開発目的

代表者らによる平成18～20年度の推進費研究(B-061人間活動によるアジアモンスーン変化の定量的評価と予測に関する研究)では、19世紀から20世紀にかけての植生改変がアジアモンスーン気候の変化に影響を与えていたこと、また、20世紀以降は、温室効果ガス(GHG)増加とエアロゾル増加が、符号は反対だが、モンスーン気候に同程度に大きい影響を与えていることが強く示唆された。

本研究は、このB-061の研究成果を踏まえ、過去100年～150年のアジアモンスーン気候の変化が、人間活動による植生改変とエアロゾル変化およびその複合効果により、どの程度影響を受けたかを、定量的に評価することを目標としている。アジア地域では石炭燃焼起源による硫酸塩に加え、NO_x(農業・自動車起源)が増加傾向にあり、このNO_x起源の硝酸塩の気候影響の定量化はアジア域気候の将来予測を検討するうえでも大変重要である。さらに、この地域の植生(土地利用)変化がエアロゾル起源物質の地表面からの生成を通して大気エアロゾル量変化を引き起こし、気候に影響するという複合効

果の評価も重要である。本研究では、上記推進費研究（B-061）で開発された硝酸塩エアロゾル生成過程をも含めた新しいエアロゾルモデルを用いて、エアロゾルの気候影響を評価する。さらに、植生改変・エアロゾル複合効果（植生改変→VOCs→SOA生成過程）がアジア地域の気候変化に与える影響を、大気化学モデルCHASER、エアロゾルモデルSPRINTARSと大気大循環モデルの組み合わせにより、定量的に評価する。

これらの結果を、中国・東南アジア・南アジア地域を対象としてアーカイブされた高精度、長期間の気候データによる詳細な気候変化・変動の解析と組み合わせることにより、これらの効果がアジア地域のモンスーンを中心とする気候変化・変動にどの程度影響を与えたかのフィンガープリント解析を行う。これらの成果は、人間活動によるアジアの気候変化の対策に入れるべき広域大気汚染や土地利用の方策・政策指針への貢献も視野に入れている。

3. 研究開発の方法

(1) エアロゾル変動のモデリングと気候影響評価

本サブテーマ1では、全球化学・エアロゾル気候モデルを用い、過去の気候変化に対して、各種気候影響要因がどのように影響するか検討する。ここでは、これまで扱われてこなかった硝酸塩や二次有機エアロゾル（SOA）の変動の影響を新たに議論するため、まず、モデルの拡張・精緻化を行う。その後、観測を用いた詳細なモデル検証を実施し、各種要因の放射強制力の評価や気候の過去再現計算を実施し、気候変動要因についての新しい知見を得る。

(2) 植生改変によるエアロゾル変動の気候影響評価

本サブテーマ2では、MEGANモデル(Guenther et al., 2006)により、植生からのVOC放出速度を植生タイプ、気温、日射、CO₂濃度などから算定する。ここでは、産業革命以降の土地利用変化(Hurttt et al., 2006)に基づいて植生タイプの推移を与え、気温と日射はIPCC-AR5対応の20世紀再現実験を用いて、VOC放出速度の全球分布について産業革命以降の推移を算定し、経年変化の特徴と要因について解析する。

まず、VOC変化によるエアロゾル変動の気候影響を評価するに先立ち、本研究で用いる気候モデルMIROC-5のモンスーン再現性を確認する。MIROC-5により、VOC変化によるエアロゾル変動が気候に与える影響評価を、タイムスライス実験として行い、エアロゾルの直接効果による放射強制力や、雲降水システムを介した間接効果や、大気との相互作用を含めた降水変化との関係を調査する。また、推進費研究（B-061）で行った18世紀以降の土地利用変化データを与えた大気大循環モデルによる数値実験データを更に解析し、アジアモンスーン地域における土地利用変化がアジアモンスーンに与えた影響について更に詳細に検討する。

(3) アジアモンスーン地域における20世紀の気候変動・変化に関するデータ解析

本サブテーマ3ではまず、1901年以降の日本の気象官署における日降水量データを使用し、天候からみた「冬季」の長さを指標に、冬季東アジアモンスーンの長期変化を解明する。また、各年の寒候季(10月-4月)について冬型天候分布出現日数等の統計解析も行う。

広域的なアジアモンスーン地域における20世紀後半以降の気象要素（月平均気温、月降水量、月平均日照時間、月平均雲量）の長期変化傾向とその季節性、東南アジア諸国及び東アジア諸国の気象観測の月別データを中心に解析を行う。

(4) 植生改変・エアロゾル変動によるアジア地域の気候変動・変化のフィンガープリント解析

アジアモンスーンは季節変化が明瞭な現象であり、エアロゾルや植生改変によるアジアモンスーン降水量への影響なども、それぞれ特有の季節および地域の依存性をもって現れると推測される。本サブテーマ4では、衛星データが取得可能になった1979年から2008年における期間を対象として、アジアモンスーン地域の降水量の長期変動の月ごとのトレンド解析を行い、その季節性・地域性について考察する。さらに、観測データ解析から得られた降水量等のトレンドの空間分布と、温室効果ガス増加、エアロゾル変化を外力として気候モデル（大気海洋結合モデル MIROC）に別々に与えた数値実験で得られた同じ気候要素の変化の分布を比較解析し、観測データに見られたこれらの気候要素変化に、これらの人間活動起源の影響、どの程度、どのように効いているかを、定量的に評価する。

4. 結果及び考察

(1) エアロゾル変動のモデリングと気候影響評価

本サブテーマ1では、植生変動、エアロゾル変動、およびそれらの複合効果を表現可能なエアロゾル・気候モデルの開発・拡張を行ない、硫酸塩・硝酸塩、炭素性エアロゾルに着目し、各種エアロゾル変動をモデル化した。また、サブテーマ2と連携し、これらの気候影響を定量化した。まず、化学・気候モデル (CHASER) およびエアロゾル・気候モデル (SPRINTARS) を基本モデルとし、硝酸塩および植生起源のSOAの生成過程のシミュレーションを改良・拡張し、観測を用いた詳細な評価・検証を行った。また、本研究で着目する土地利用変化に伴うSOAの変動量について、IPCC第5次報告書に向けたモデル実験に用いられる土地利用変化シナリオに基づくデータを使用し、SOAの前駆気体である植物起源VOCs (BVOCs) の放出量変動の推定を行い、産業革命以前から現在までの土地利用変化に伴うSOAの変動量の再現計算を行った。この結果、特にアジア域では、土地利用変化により、テルペン類・イソプレンなどのBVOCsについて、顕著な減少傾向が計算され、SOAの減少が起こっていたことが示唆された。このSOAの減少が及ぼす直接効果の放射強制力を見積もったところ、最大で 3 W m^{-2} に達する強い加熱効果がアジア域に生じていることがわかり、炭素性の一次エアロゾル (BC+OC) による加熱に匹敵する重要性があることが確認された。さらに、その他のエアロゾル・大気組成変動の放射強制力を計算・整理した後、各種エアロゾル変動が過去の全球およびアジア域気候変動においてどのような役割をしていたかについて、感度実験を実施し、評価した。この結果、1950年以降、2000年までの硫酸塩の増加は特にアジア域で顕著であり、全球平均地上気温の上昇を大きく抑制していたことが示された。一方、1850-1950年までの土地利用変化に伴うSOAの減少は、アジア域や北米、ヨーロッパなどで、直接効果と雲・間接効果を通じて地上気温トレンドに顕著に影響していた可能性があることなどが本研究により指摘された。

(2) 植生改変によるエアロゾル変動の気候影響評価

本サブテーマ2では、まず用いる気候モデルのモンスーン変動のパフォーマンスを調べた。観測では、全球スケールのモンスーンと海面水温の年々変動を主成分分析すると相関係数は非常によく一致しており、エルニーニョ (ENSO) の変動とも対応していることが示された。この関係について全球気候モデル (GCM) における再現性を調べると、CMIP3のGCMよりもMIROC5でよく再現されていることが分かった。特に、MIROC5では熱帯中部太平洋の対流活動が強化し、Bjerknesフィードバックの再現性が向上して、ENSOの再現性が向上したと考えられる。

次に、1850年～2000年の耕地化、気温、日射の歴史的な変化を考慮して、植生からのVOC放出量変動を算定した結果、耕地化を考慮するとVOC放出量は減少するが、気温の上昇によって増大する効果も無視できないことが明らかになった。イソプレンは耕地化による減少効果の方が大きかったが、モノテルペンは気温上昇による増大効果の方が大きかった。地域別に植生タイプごとのイソプレンとモノテルペンの発生量変動の推移を詳細に調査した結果、イソプレンとモノテルペンの発生特性の違いによって、同じ耕地化に対して異なる推移を示すことがわかった。

VOC放出量の変化によるアジア域の気候への影響としては、BVOCの増大に伴うSOAの増大は春季に最大となった。それに伴って直接効果による冷却が見られたものの、その大きさは限定的であった。一方、気候システム内のフィードバックプロセスを通して局地的な水循環への影響が見られ、硫酸エアロゾルの増大 (減少) 地域で降水が減少 (増大) するという負の相関が確認された。また、エアロゾル変化に伴う日降水量の頻度や強度の変化について5～6月を対象に調べたところ、SOAが増大した場合に、強い降水イベントが増大して弱い降水イベントが減少することが明らかになった。

さらに、推進費 (B-061) での18世紀以降の土地利用変化データを与えた大気大循環モデルを用いた実験データを詳細に解析した結果、インドや中国における土地利用変化が、アジアの夏のモンスーンの開始を遅れさせたり、モンスーン期間の変化などを通して長期的な変化を引き起こす可能性を明らかにした。

(3) アジアモンスーン地域における20世紀の気候変動・変化に関するデータ解析

本サブテーマ3では、日本における20世紀前半以降の冬の天候および夏の強雨発生の長期変動を解析した結果、1901年～2009年の期間について、天候分布から定義した冬季の長さおよび寒候季 (10月～4月) における冬型天候分布出現日数の変動傾向に統計的に有意な減少傾向が見出され、東アジア冬季モンスーンが20世紀前半以降、長期的に弱体化しつつあることを示唆した。

東南アジア諸国、中国、台湾において、1961年から2000年までの40年間の月降水量と月平均気温のトレンドを、地点毎に計算して統計的有意性を検定し、その空間分布を各月ごとに解析した。その結果、月降水量については、冬季には東南アジアのミャンマーやタイ付近を中心として有意な降水量

の減少傾向が広域的に見られた。また、東アジア地域では、4月と9月において中国の内陸域を中心として広域的に降水量減少傾向がみられた。雲量については、タイを中心とするインドシナ半島内陸部で、夏季から秋季に有意な雲量減少傾向がみられた。一方、日照時間については、タイなどインドシナ半島内陸部において、全ての季節で有意な減少がみられた。気温変化については、2006年まで解析期間を延ばして解析し、夏季（6-9月）にベトナム北部、ミャンマー南部、フィリピンにおいて、気温の上昇傾向が示され、月平均雲量では反対に減少傾向が示された。一方で、7-8月に中国の華南地域周辺では、気温の寒冷化傾向が示された。この傾向は特に8月に明瞭にみられることが明らかとなった。また、華南地域の広い範囲で夏季平均日照時間の減少傾向が示された。冬季には華北高原地域周辺で月平均日照時間の減少傾向がみられた。

地域的な詳細な変化実態を解明するため、いくつかの国に関しては、さらに詳細な解析を実施した。マレーシアにおける1950年から1999年までの月平均日照時間にみられる長期変動傾向には、1950年代以降、8月の月平均日照時間にのみ有意水準95%で有意な減少傾向がみられた。フィリピンについて、全国19地点での平均降水量の長期変化傾向を解析した結果、夏季（6-9月）降水偏差では1910-1930年代と1950年代後半～1960年代前半にかけては正偏差が持続し、1970年代後半からは負偏差が持続していた。一方冬季（10月-1月）降水偏差には、特に1990年代後半から2000年にかけて100年スケールでみて顕著な正偏差がみられ、年々変動も大きくなっていった。また、降水の季節進行の長期変化傾向を経験直交（EOF）解析を用いて1911～2008年の夏季雨季入り時期の変化を解析した結果、1970年代後半から2000年にかけて夏季雨季入り時期が遅くなる傾向にあることが明らかになった。ベトナムにおいては、台風による降雨や強雨の発生について、20世紀後半には全般に増加傾向がみられた一方、1990年代半ばから変化傾向に変化が認められた。

（4）植生改変・エアロゾル変動によるアジア地域の気候変動・変化のフィンガープリント解析

本サブテーマ4では、降水量の長期変動傾向を季節性・地域性に着目して解析した結果、アジアモンスーンの遷移期である5月、6月に特に有為な変化傾向が確認されたが、盛夏期にあたる7月、8月には見られないという顕著な季節性が確認された。アジアモンスーン開始日の長期変動傾向は、ベンガル湾から南シナ海にかけてと北部西太平洋で10日以上オンセットが早くなっていることが確認された。このアジアモンスーンの季節推移の早期化が5月、6月の月平均降水量に影響を与えていると考察される。また、アジア大陸とインド洋における海陸の熱的コントラストには、5月に顕著な温暖化傾向、盛夏期に冷温化傾向を示す季節性が見られ、インド洋における海面水温の変動が季節に依らず同様な上昇傾向を示すことから、大陸上の加熱（冷却）に強く依存していることが確認された。つまり、南北の熱的コントラストの季節進行の早期化に伴い5月における大規模なモンスーン循環が強化され、モンスーンの開始が早まったと考えられる。一方、大気海洋結合モデル MIROCを用いた実験結果からは自然変動と人間活動の影響などすべての影響を考慮した実験（FULL）結果に、観測値と同様なモンスーン開始の早期化や、盛夏期における全般的な降水量の減少が弱い振幅ながらも再現された。特に、5月における南西モンスーン気流強化や、西太平洋モンスーン域の降水量の増加、中国南部での降水量の減少は、エアロゾル増加のみを与えた実験にも観測値とよく似た偏差パターンが確認され、エアロゾルの増減による地表面や大気での加熱（冷却）の効果が、モンスーンの長期変動に季節性をもたらしているものと推測された。

5. 本研究により得られた主な成果

（1）科学的意義

1) 本サブテーマ1では、各種エアロゾルの変動とその気候・アジアモンスーンへの影響について、科学的な解明が進められた。化学・エアロゾル気候モデルの枠組みにおいて、硝酸塩エアロゾル計算および植物起源の有機炭素エアロゾル計算について、精緻化が行われた。本研究では、過去のSOAの変動要因について、土地利用変化だけでなく、一次有機エアロゾル（POA）や大気化学場の変動の影響などを詳しく評価し、定量化した。これは、これまで議論が不十分であったSOAの変動過程を明らかにするものであり、エアロゾルの気候影響の理解にも大きく貢献する成果である。さらに、SOA変動も含め、各種エアロゾルの変動が及ぼす放射強制力や気候影響をモデル実験により定量化し、特にアジア域においては、硫酸塩・硝酸塩の増加、および土地利用変化に伴うSOA減少が、過去の雲・地上気温の変化および傾向に対して重要な影響を及ぼしていた可能性を指摘・提示した。本サブテーマ1の成果は、本課題のメインテーマの一つであるエアロゾルのアジアモンスーン変動への影響評価に向けて、重要な示唆を与えるものであり、アジアモンスーン変動の実質的な理解および全球的な気候影響に関する定

量的な理解・予測に大きく貢献する成果である。

2) 全球気候モデル(CGCM)におけるモンスーンの再現性はあまりよく調べられていなかった。本サブテーマ2ではまず、観測データおよび気候モデルの出力を用いて、全球モンスーンの解析を行うことにより、CGCMにおけるモンスーンの再現性を定量的に示すことができた。また、モンスーン再現性の向上が、Bjerknesフィードバックの再現性向上と関係していることを明らかにした。

次に、植生起源の揮発性有機炭素(BVOC)の発生量の推定の高度化を行った。BVOC推定には、植生タイプ、気温、日射等の要因が重要であることは認識されていたが、植生タイプの変化だけでなく、気温や日射の推移も考慮して、1850年～2000年の全球スケールでのBVOCの推移を算定した。さらに、150年間の推移における各要因の寄与率を定量的に初めて評価することにより、気温変化の影響は植生改変の影響と同程度に大きいことを示した。

BVOC変化による気候影響評価は、これまで放射強制力の算定にとどまっていたが、CGCMによる2組のタイムスライス実験を行うことにより、大気循環との相互作用や雲降水システムにおける間接効果も含めて、アジア域の気候影響を初めて示すことができた。ここでは、直接効果による放射強制力よりも、間接効果による硫酸エアロゾルの変化と降水量変化の負相関が見いだされた。また、日降水量の頻度や強度の統計的特徴を解析することにより、SOAが増大した場合に強い降水が増大することを定量的に示した。

3) 本サブテーマ3では、長期の観測データ解析により、冬季東アジアモンスーンが長期的に弱まる傾向が持続していることが解明された。一方、日本の夏の降雨特性やフィリピンの夏の雨季入り、ベトナムの台風による強雨などに関しては前世紀終盤に長期変化傾向が変化している事が明らかになり、地球温暖化の一方向的な進行とは異なる変化が生じていることが明らかになった。

4) 本サブテーマ4では、アジアモンスーン降水量長期変化の地域性・季節性の解析結果により、モンスーン降水量の長期変化は季節により大きく異なることが明らかになった。過去の研究で議論されてきた夏季平均(6月から9月)の長期変動傾向では見られない長期変化のシグナルの重要性を指摘した。特に、季節進行の遷移期、特に春季から盛夏期にかけて顕著な長期変化の傾向が現れることを初めて示した。アジアモンスーンの雨季の開始が近年早期化を示すという、長期変動傾向の季節依存性を提示した本研究結果は科学的にも大きな意義を持つといえる。また、人間活動起源の温室効果ガス増加やエアロゾル変化を与えた気候モデル数値実験の結果と比較することにより、特にエアロゾル変化による放射強制変化が、今回の解析で見られたモンスーンの長期変化に大きく関与している可能性を明らかにした。即ち、人間活動によるアジアモンスーン域の気候変化影響を理解する上で、変化の季節依存性という新たな着眼点を提唱し、今後の気候変動解析・議論に大きな影響を与えたといえる。

(2) 環境政策への貢献

エアロゾル変動の気候変動に対する重要性は、IPCC報告などでも強調されている。しかしながら、エアロゾルの変動過程は複雑であり、その気候影響の見積もりには未だ大きな不確定性が存在する。本研究では、植生変動に伴う有機炭素エアロゾルの変動や、窒素酸化物の変動による硝酸塩エアロゾル変動を含め、各種エアロゾル変動の複合的な気候影響を明らかにすることができた。これらの結果は、地球大気化学国際協同計画(IGAC)の国内委員会(日本学術会議・第3部)でも大きな課題となっている大気化学・エアロゾルと気候との相互作用研究に関する今後の見通しの検討にも大きく寄与している。今後、本研究で得られた成果を、学術論文としてまとめてゆくとともに、積極的に広報し、さらに、IPCC第5次評価報告書などへ貢献することなどを通して、環境政策への貢献に努める。

本研究でIPCCの第5次報告書において共通データとして提供された土地利用変化のデータを用いてVOC発生量の変化を推定し、気候への影響評価を行う基礎資料を得ることができた。また、BVOC発生量の推定において植生変化だけでなく、気温(変化)も重要な要素であることを示した。これらの結果により、国際的な気候予測研究での新たに考慮すべき要素を指摘した。

本研究で用いた気候モデルMIR0C5は、IPCCの第5次報告書で参照される温暖化予測実験に用いられている。モンスーン循環と降水、およびそれらのENSO変動との関係は、温暖化による気候変動予測においても重要な課題の1つであり、IPCCの第5次報告書に向けたMIR0C5による実験結果を用いてモンスーン変動の再現性について詳細な解析したことにより、今後のメカニズム解明を含めて、温暖化におけるモンスーン変動予測の道筋になると期待される。

人間活動のアジアモンスーン気候に与える影響は、温室効果ガス増加のみならず、植生改変の影響も含めたエアロゾル変化の影響も同等あるいはそれ以上に評価した対策を立てる必要が出てくると考えられる。エアロゾル変動の気候変動に対する重要性は、近年益々強調されているが、本研究の結果

もそのことを強く示唆している。特に、エアロゾル変動の気候影響に対して、夏季平均場への影響だけでなく、季節遷移期に大きなシグナルを発見した点は、これまでの気候変動研究においては実質的に無視されてきたエアロゾルなどの影響の季節依存性の考慮の必要性を強く指摘することになった。これらの人為影響による長期変化傾向における季節依存性は、気候・地球環境予測にとって画期的な前進となる可能性が高く、地球環境政策等にも大きく貢献する。貢献の具体的な道筋としては、本研究の成果はIPCC第5次報告書への貢献が期待されるほか、今後のアジアにおけるエアロゾル放出量規制や土地利用計画などにも、直接・間接的に大きく関係してくる可能性もある。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上发表

<査読付き論文>

- 1) Saito, S., I. Nagao, and H. Kanzawa, (2009): Characteristics of ambient C₂-C₁₁ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya. *Japan. Atmos. Environ.*, **43**, 29, 4384-4395. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.031.
- 2) Takahashi, H., T. Yoshikane, M. Hara, K. Takata, and T. Yasunari, (2010): High-resolution modelling of the potential impact of land-surface conditions on regional climate over Indochina associated with the diurnal precipitation cycle. *Int. J. Climatology*, **30**, 13, 2004-2020, doi:10.1002/joc.2119.
- 3) 須藤健悟, 高田久美子, 竹村俊彦, 神沢博, 安成哲三, (2010): 植生変化・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響の評価. *低温科学*, **68**, 129-136.
- 4) Yamashita, R. K. Takata, J. Mastumoto and T. Yasunari, (2011): Numerical study of the impacts of land use/cover changes between 1700 and 1850 on the seasonal hydroclimate in monsoon Asia. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **89A**, 291-298.
- 5) Takahashi, H. G., (2011): Long-term changes in rainfall and tropical cyclone activity over South and Southeast Asia. *Adv. Geosci.*, **30**, 17-22. doi:10.5194/adgeo-30-17-2011.
- 6) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari, (2011): Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs. *J. Climate*, **24**, 5604-5618.
- 7) Wang, B., J. Liu, H.-J. Kim, P. J. Webster, and S.-Y. Yim, (2011): Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008). *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-011-1266-z.
- 8) Hirano J., and J. Matsumoto, (2011): Secular and seasonal variations of winter monsoon weather patterns in Japan since early 20th century. *Int. J. Climatology*, **31**, DOI:10.1002/joc.2241.
- 9) Chen T. C., J. D. Tsay, M. C. Yen, and J. Matsumoto, (2012): Interannual variations of the late fall rainfall in Central Vietnam. *J. Climate*, **25**, 392-413.
- 10) Sudo, K. and Y. Ogihara, (2012): Global modeling of Secondary Organic Aerosol in a chemistry coupled climate model. *Eurozoru Kenkyu*, **27** (1), 51-61.
- 11) Nguyen-Thi H. A., J. Matsumoto, T. Ngo-Duc and N. Endo, (2012): A climatological study of tropical cyclone rainfall in Vietnam. *SOLA*, **8**, 41-44.
- 12) Kajikawa, Y., and B. Wang, (2012): Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset. *J. Climate*, **25**, 9, 3207-3218, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00207.1.
- 13) Kajikawa, Y., T. Yasunari, S. Yoshida, and H. Fujinami, (2012): Advanced Asian monsoon onset in recent decades. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L03803, 5 PP doi:10.1029/2011GL050540.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 須藤健悟, 高田久美子, 安成哲三 “アジア域における大気化学・エアロゾル・陸域植生結合場の変動とその気候影響”, 地球惑星連合大会, 幕張, 千葉, 2009.
- 2) 高田久美子, 斉藤和之, 山島亮二, 安成哲三 “1700年から1850年の耕地化が夏季のアジアモンスーンに与えた影響”, 地球惑星連合大会, 幕張, 千葉, 2009
- 3) 山島亮二, 松本淳, 高田久美子 “1700年から1850年の耕地化が東アジア域における土壌状態及び

水循環の季節変化に及ぼした影響” 地球惑星連合大会，幕張，千葉，2009

- 4) Yamashiha, R., J. Matsumoto and K. Takata “Impacts of historical land use changes between 1700 and 1850 on the onset and retreat of the Asian summer monsoon”, GEWEX/iLEAPS conference, Melbourne, 2009
- 5) Matsumoto, J. and J. Hirano “Long-term changes of winter season in Japan”, The 4th China-Japan-Korea Joint Conference on Geography, Guangzhou, China, 2009.
- 6) HIRANO, J. and J. MATSUMOTO “Long-term variations of the winter monsoon season in Japan”, Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting, Hyderabad, India, 2010.
- 7) 田中克典, Kim Hyung Jim, 齊藤和之, 高橋洋, 高田久美子 “1850-2005年のVOC(イソブレン・モノテルペン)放出のGlobal-Mapの作成”, 生物起源微量ガスワークショップ2010プログラム, 京都, 2010年11月15-16日.
- 8) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari “Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs” Proceedings of EGU General Assembly 2011, 13, EGU2011-2351, Vienna, Austria, April 3-8, 2011.
- 9) Tanaka, K. “Estimation of BVOC”, Proceedings of EGU General Assembly 2011, 13, EGU2011-2351, Vienna, Austria, April 3-8, 2011.
- 10) Takahashi, H. G., H-J. Kim, K. Tanaka, K. Takata, K. Saito, and T. Yasunari “Sensitivity study on the impacts of biogenic VOC on the Asian monsoon climate in dry and wet seasons using MIROC5”, 10th AeroCom Workshop, Fukuoka, Japan, October 3-6, 2011.
- 11) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari “Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs”, Proceedings of Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, p. 37, Busan, Korea, October 24-26, 2011.
- 12) 松本淳, 遠藤伸彦, 浜田純一, 久保田尚之, 赤坂郁美, 上米良秀行, 増田耕一, 山中大学, 森修一, 林泰一, 寺尾徹, 村田文絵, 木口雅司, 山根悠介, 財城真寿美, 平野淳平 “アジアモンスーン域における降水量・降雨特性の長期変動 (招待講演)”, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 幕張, 千葉, 2011.
- 13) 松本淳, 久保田尚之, 赤坂郁美, 遠藤伸彦, 浜田純一, 増田耕一, 財城真寿美, 山中大学, 森修一, 上米良秀行, 林泰一, 寺尾徹, 村田文絵, 木口雅司, 山根悠介, 平野淳平 “アジアモンスーン域における降水量の長期変動に関するデータとデータレスキュー(招待講演)”, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 幕張, 千葉, 2011.
- 14) MATSUMOTO, J. N. ENDO, T. HAYASHI, T. TERAO, M. MURATA, M. KIGUCHI, Y. YAMANE and A. HABIB “A Long-term Changes in Precipitation Extremes over Bangladesh”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.
- 15) AKASAKA, I., I. W. MORISHIMA, M. ZAIKI, H. KUBOTA, K. MASUDA, J. MATSUMOTO and E. O. CAYANAN “Long-term variability of rainfall characteristics in the Philippines since the 20th century”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.
- 16) NGUYEN-THI, H. A., J. MATSUMOTO and N. ENDO “Climatological study on the tropical cyclone rainfall in Vietnam”, The 6th Korea-China-Japan Joint Conference on Geography, November, Seoul, Korea, 2011.
- 17) Yasunari, T. “Time-space structure of precipitation trends (1979-2005) in Asian summer monsoon and its implication to the recent anthropogenic forcings (invited speech)”, Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, June 24, 2010.
- 18) Yasunari, T. “Integrated study of impact of anthropogenic forcings on Asian Monsoon Climate - Current Status -”, JST-MOST Joint workshop, Beijing, China, Oct.11, 2010.
- 19) Yasunari, T. “Long-term trend of Asian summer monsoon and its seasonality natural or anthropogenic? (invited speech)”, JSPS International Forum “Climate Changes in Monsoon Asia”, Bangkok, Thailand, 6-7 January 6-7, 2011.
- 20) Yasunari, T. “Long-term trend of Asian Hydro-Climature in the recent several decades natural or anthropogenic? (key note speech)” Science Council of Asia (SCA) Special Workshop “Water-related Disasters in Asia”, Ulaanbaatar, Mongolia, 4 July 2011

- 21) Yasunari, T. "Recent change of Asian summer monsoon onset and its possible relation to anthropogenic forcings", International Workshop on "Impact of Asian Megacity Development on Local to Global Climate Change" (2nd MOST-JST Project Meeting), Suzhou, China, Dec.21, 2011.
- 22) Kajikawa, Y., T. Yasunari, S. Yoshida and H. Fujinami "Long-term trends of Asian summer monsoon onset and precipitation during the recent several decades", AGU fall meeting, San Francisco, CA, USA, December 5-9, 2011.
- 23) Kanamori, H., and T. Yasunari "Difference of hydrological cycle between Islands and surrounding oceans over the Indonesian maritime continent", AGU fall meeting, San Francisco, CA, USA, December 5-9, 2011.
- 24) Takahashi, H. G., H-J. Kim, K. Tanaka, K. Takata, K. Saito, and T. Yasunari "Sensitivity study on the impacts of biogenic VOC on the Asian monsoon climate in dry and wet seasons using MIROC5", European Geosciences Union General Assembly 2012, Vienna, Austria, April 22-27, 2012.

7. 研究者略歴

課題代表者：安成哲三

1947年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、名古屋大学地球水循環研究センター特任教授

主要参画研究者

(1)：安成哲三 (同上)

(2)：神沢博

1953年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、理学博士、現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授

(3)：高田久美子

1963年生まれ、京都大学大学院理学研究科、博士(理学)、現在、(独)海洋研究開発機構主任研究員

(4)：松本淳

1957年生まれ、東京大学理学部卒業、東京大学理学部助手・講師・助教授、現在、首都大学東京都市環境科学研究科教授

A-0902 植生改変・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響

(1) エアロゾル変動のモデリングと気候影響評価

名古屋大学

大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

神沢 博・須藤 健悟

〈研究協力者〉 九州大学 応用力学研究所

竹村 俊彦

名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

井上 忠雄

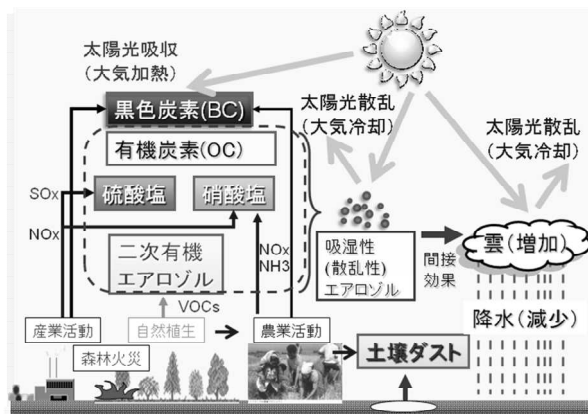
平成 21～23 年度累計予算額：38,832 千円（うち、平成 23 年度予算額：12,897 千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 本サブテーマ 1 では、植生変動、エアロゾル変動、およびそれらの複合効果を表現可能なエアロゾル・気候モデルの開発・拡張を行ない、硫酸塩・硝酸塩、炭素性エアロゾルに着目し、各種エアロゾル変動をモデル化する。また、サブテーマ 2 と連携し、これらの気候影響を定量化する。まず、化学・気候モデル (CHASER) およびエアロゾル・気候モデル (SPRINTARS) を基本モデルとし、硝酸塩および植生起源の二次有機エアロゾル (SOA) の生成過程のシミュレーションを改良・拡張し、観測を用いた詳細な評価・検証を行った。また、本研究で着目する土地利用変化に伴う SOA の変動量について、IPCC 第 5 次報告書に向けたモデル実験に用いられる土地利用変化シナリオに基づくデータを使用し、SOA の前駆気体である植物起源揮発性有機炭素 (BVOCs) の放出量変動の推定を行い、産業革命以前から現在までの土地利用変化に伴う SOA の変動量の再現計算を行った。この結果、特にアジア域では、土地利用変化により、テルペン類・イソプレンなどの BVOCs について、顕著な減少傾向が計算され、SOA の減少が起こっていたことが示唆された。この SOA の減少が及ぼす直接効果の放射強制力を見積もったところ、最大で 3 W m^{-2} に達する強い加熱効果がアジア域に生じていることがわかり、炭素性の一次エアロゾル (黒色炭素 (BC)+有機炭素 (OC)) による加熱に匹敵する重要性があることが確認された。さらに、その他のエアロゾル・大気組成変動の放射強制力を計算・整理した後、各種エアロゾル変動が過去の全球およびアジア域気候変動においてどのような役割をしていたかについて、感度実験を実施し、評価した。この結果、1950 年以降、2000 年までの硫酸塩の増加は特にアジア域で顕著であり、全球平均地上気温の上昇を大きく抑制していたことが示された。一方、1850-1950 年までの土地利用変化に伴う SOA の減少は、アジア域や北米、ヨーロッパなどで、直接効果と雲・間接効果を通じて地上気温トレンドに顕著に影響していた可能性があることなどが本研究により指摘された。

【キーワード】 エアロゾル、ブラックカーボン、有機エアロゾル、アジアモンスーン、土地利用変化

1. はじめに



図(1)-1 各種エアロゾルの発生と気候への影響。

や雲・降水過程の変調を引き起こし、負の放射強制力を生じさせ、地球冷却効果を及ぼすとされている (e.g., Hansen et al., 2001²⁾; Takemura et al., 2005³⁾)。

特に東アジア域での影響に注目した場合、これらのエアロゾルが夏季アジアモンスーンの挙動に影響を与える可能性が最近の研究により示唆されている。例えば、Ramanathan et al. (2005)⁴⁾ や Lau et al. (2006)⁵⁾ らのモデル研究が示すように、アジア域 (主にインド) から排出された BC および土壌ダストがチベット高原とその周辺上で特徴的な加熱パターンを形成し、この領域でのモンスーン循環・降水の時空間パターンに影響を与えている可能性がある。このようなエアロゾルのアジアモンスーンへの影響は梅雨前線の形成過程を通じて日本付近の降水場にも波及し得る。したがって、これらのエアロゾルの影響に関する定量的な理解が求められる。また、我々の研究グループによる研究成果として、アジア域気候に影響を及ぼすエアロゾル変動としては、上述のような硫酸塩や BC によるものだけでなく、農業を主たる起源とする硝酸塩エアロゾルや、農地化に伴う土地利用変化が及ぼす植物起源有機炭素エアロゾルの変動の重要性を指摘している (須藤他, 2010⁶⁾)。

本研究では、化学・エアロゾル気候モデル CHASER-SPRINTARS (Sudo et al., 2002a, b^{7,8)}; Sudo and Akimoto, 2007⁹⁾; Takemura et al., 2005³⁾) を基本モデルとして、各種エアロゾルのアジアモンスーンへの影響を精査する。この際、特に、上述のような硝酸塩エアロゾルや植物起源有機炭素エアロゾルなど、これまでの気候シミュレーションでは、ほとんど扱われてこなかった変動要因に着目したモデル再現計算を実施する。また、各エアロゾルの気候影響の定量的な評価結果について、長寿命温室効果気体 (LLGHGs) や植生変動の影響との対比を交えながら、総合的な解析を行い、整理する。

2. 研究開発目的

本サブテーマ 1 では、植生変動、エアロゾル変動、およびその複合効果を表現可能なエアロ

大気中の浮遊粒子 (エアロゾル粒子) は全球的な気候変動に関して重要な役割を演じていることが最近の研究で明らかになりつつある (e.g., IPCC, 2007¹⁾ すなわち IPCC 第 4 次報告書)。図(1)-1 に、その役割の概要を示す。人間活動 (工業・交通・農業など) に伴う黒色炭素 (煤; ブラックカーボン; BC) の排出量増加は、大気中の BC 濃度上昇をもたらして、顕著な正の放射強制力 ($\geq 0.5 \text{ W m}^{-2}$) を生じさせ、温暖化を加速させる。一方、二酸化硫黄 (SO₂) や炭化水素類の排出増加に伴う硫酸塩や有機炭素 (OC) などの吸湿性エアロゾルの大気中の濃度上昇は、太陽光反射

ゾル・気候モデルの開発・拡張を行ない、特に、硫酸塩・硝酸塩、および植生変動に伴う有機炭素性エアロゾルに着目し、各種エアロゾル変動をモデル化する。また、サブテーマ2と連携し、これらの気候影響を定量化し、過去から現在までの100年規模の気候変動およびモンスーン変動において、それぞれのエアロゾル変動がどのような役割を果たしているかについて、詳細に検討する。

3. 研究開発方法

本サブテーマ1では、全球化学・エアロゾル気候モデルを用い、過去の気候変化に対して、各種気候影響要因がどのように影響するかを検討する。ここでは、これまで扱われてこなかった硝酸塩や二次有機エアロゾル(SOA)の変動の影響を新たに議論するため、まず、モデルの拡張・精緻化を行う。その後、観測を用いた詳細なモデル検証を実施し、各種要因の放射強制力の評価や気候の過去再現計算を実施し、気候変動要因についての新しい知見を得る。以下に本研究の主要なプロセスについて概説する。

(1) エアロゾル気候モデルの構築・改良

本サブテーマ研究では、全球エアロゾル・気候モデル SPRINTARS (Takemura et al., 2002¹⁰⁾; 2005³⁾)、および全球化学・気候モデル CHASER (Sudo et al., 2002a, b^{7,8)}) を軸としたモデル研究を行う。本サブテーマでは、特に硝酸塩や植物性有機炭素エアロゾルの変動に着目する。これらのエアロゾルは大気化学過程との連携が強いため、エアロゾルと化学の同時計算のための気候モデル開発・改良を行った。また、人為起源有機炭素エアロゾルの計算の導入など、本モデルの有機エアロゾル計算過程のさらなる精緻化を行い、診断実験による詳細な評価を行った。以下に化学・エアロゾル結合モデルの概略と、改良・精緻化の作業方法・手順について記述する。

1) 化学モデルとエアロゾルモデルの概略

CHASER モデルおよび SPRINTARS モデルは、ともに東大・気候システム研究センター (CCSR: 現在、大気海洋研究所 AORI)、国立環境研究所 (NIES)、および海洋研究開発機構・地球環境変動領域 (JAMSTEC/RIGC:旧 FRGC) で開発されている CCSR/NIES/FRGC 気候モデル (MIROC) を土台としている。

CHASER モデルでは、化学反応に加え、大規模移流輸送、積雲対流による鉛直輸送、人為・自然起源地表排出 (エミッション)、雷による NO_x 生成、湿性/乾性沈着が考慮され、光化学過程では対流圏光化学の基本サイクル (O₃-NO_x-HO_x-CO-CH₄) と非メタン炭化水素 (NMHCs) の酸化反応、および不均一反応が考慮されている (表(1)-1)。CHASER モデルで計算されたオゾンや各オゾン前駆気体の分布は各観測値と整合的であり、オゾン生成・消滅過程の表現の妥当性が確認されている (Sudo et al., 2002b⁸⁾)。

一方、SPRINTARS モデルでは、硫酸塩 (SO₄²⁻)、黒色炭素・有機炭素 (BC・OC)、土壌ダスト、海塩の各種エアロゾルの全球分布をシミュレートし (表(1)-2)、これらの大気放射、雲・降水過程への影響を計算する。地表からのエミッション源に関しては、二酸化硫黄 (SO₂)・BC・OC の化石燃料燃焼 (工業・交通・発電など)、森林火災、農業、住宅 (暖房・調理等) からの排出が考慮されている。土壌ダストのエミッションは、気候モデルの陸域モデル中で風速、植生タイプ、葉

面積指数(LAI)、土壌水分などの関数として与えられる。

表(1)-1 全球化学・気候モデル CHASER の概略

基本モデル	CCSR/NIES/FRCGC GCM (5.7b/MIROC-4.0) : 気候モデル
空間解像度	水平 : T42 (2.8° x 2.8°), 鉛直 : 32 layers (地表~40 km)
輸送過程	グリッドスケール (flux-form semi-Lagrangian)+積雲対流, 鉛直拡散
化学過程	56 化学種, 142 化学反応 (気相, 液相, 不均一*) (1) O ₃ -HOx-NOx-CO-CH ₄ , (2) 非メタン炭化水素 (NMHCs) 酸化, (3) SO ₂ , DMS 酸化 (硫酸塩エアロゾルシミュレーション) *不均一反応は、N ₂ O ₅ , HO ₂ , RO ₂ ラジカルについて、雲粒子、硫酸エアロゾル、および海塩粒子表面上で考慮 (高度 20 km 以上の O ₃ , NO _y については衛星データなどで指定)
光解離定数	GCM 放射スキーム中の紫外光を用いオンラインで計算 ※放射スキーム中では化学過程で計算されたオゾン、メタン、硫酸エアロゾルの分布を使用。
エミッション (人為・自然)	産業・交通, 森林火災, 植生/土壌/海洋, 雷からの NO _x (NO _x , CO, CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆ , アセトン, イソプレン, テルペン, メタノール, SO ₂ , DMS, NH ₃)
乾性沈着 (Dry deposition)	地表面の植生タイプ、気温、太陽光入射、積雪などの関数 [Wesely, 1989]
湿性沈着 (Wet deposition)	Rain-out (in-cloud), wash-out (below-cloud), ice-sedimentation Reevaporation & reemission processes を考慮。

表(1)-2 全球エアロゾル・気候モデル SPRINTARS の概略

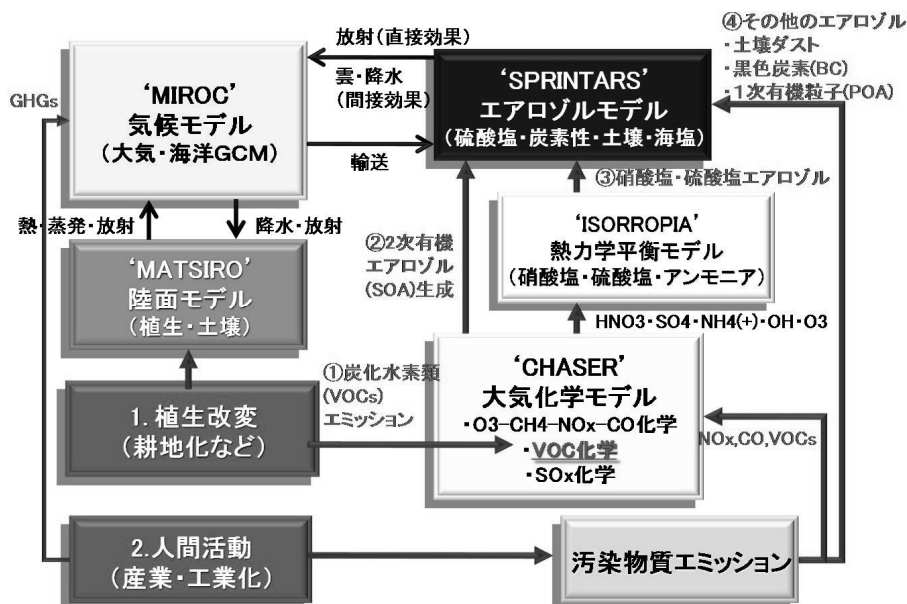
トレーサー	BC, OC, 硫酸塩、土壌ダスト、海塩、SO ₂ 、DMS
エミッション	BC/OC: バイオマスバーニング、化石燃料燃焼、生物燃料燃焼、農業 ※二次有機 OC 生成については、テルペンのエミッションから 単純化して考慮。 SO ₂ : 化石燃料燃焼、バイオマスバーニング、火山 DMS: 海洋プランクトン ダスト: GCM 陸域 (植生) モデル中で計算。 海塩: 地表風速の関数として計算。
大気輸送	フラックスフォーム・セミラグランジアン法、Arakawa-Schubert 積雲対流
硫黄化学	DMS + OH, SO ₂ + OH, S(IV) + {O ₃ /H ₂ O ₂ } ※、OH, O ₃ , H ₂ O ₂ : CHASER モデル (Sudo et al., 2002a ⁷⁾) による出力。
沈着(deposition)	(降水) 湿性沈着、(地表) 乾性沈着、重力降下

エアロゾルの気候・気象場への影響は、大気放射に対する直接効果 (加熱・冷却) と、雲・降水過程に対する間接効果 (雲核増加、雲粒子長寿命化による雲量増加に伴う冷却) に大別されるが、SPRINTARS モデルでは、これらについて、各種パラメタリゼーションを使用した表現を行う (表(1)-3)。

表(1)-3 SPRINTARS モデルにおけるエアロゾル直接・間接効果の取り扱い

<p>直接効果：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ GCM 放射スキームに結合。 ・ 屈折率：波長、各種エアロゾルの粒径分布、吸湿成長に応じて与える。 	<p>間接効果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 雲粒子数 N_c：エアロゾル粒子数、粒径分布、鉛直流、曲率・溶質効果を考慮。 ・ 雲粒有効半径 r： $r = k \left(\frac{3}{4\pi\rho_w} \frac{\rho l}{N_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \rho l: \text{雲水量}$ <ul style="list-style-type: none"> ・ 降水生成率： $P = -\frac{dl}{dt} = \frac{\alpha \rho l^2}{\beta + \gamma \frac{N_c}{\rho l}}$
---	---

本研究では、CHASER と SPRINTARS の両モデルを結合し、エアロゾルとオゾン化学の同時計算を可能にした。図(1)-2 に本研究で使用する化学・エアロゾル気候モデルの概略図を示す。硫酸塩の生成過程の計算は、SPRINTARS でも行うことが可能であるが、大気化学場と有機的に連携したシミュレーションを実施するため、基本的には CHASER の化学計算過程にて行う。本研究では、さらに、ISORROPIA サブモデル (Nenes et al., 1998¹¹⁾ ; Fountoukis et al., 2007¹²⁾) による硝酸塩シミュレーションの改良を行い、本モデル枠組みの精緻化を図った。また、本研究で行う過去再現シミュレーションは 100 年規模の計算対象期間を想定しており、効率的な計算が必要であるため、多量の計算コストを必要とする CHASER 化学モデルのオンラインでの実装は必ずしも妥当ではない。このため、MIROC-SPRINTARS のみの枠組みでもシミュレーションを行えるようなモデル構築・改変を行った。



図(1)-2 CCSR/NIES/FRCGC 気候モデルにおける、大気化学・エアロゾル計算の枠組み。

2) 有機エアロゾル計算の精緻化

上述の化学・エアロゾル結合モデルに、有機エアロゾルの生成計算を導入し、特に計算スキームの全面的な改良や、前駆体として考慮する揮発性有機炭素 (VOCs) の化学反応の種類拡大を実施し、人為起源の有機エアロゾルの考慮も行えるようにした。本研究では SOA の生成モデリングに 2-product model (Odom et al., 1996¹³⁾) を採用した。2-product model は、各 VOCs に対して酸化された VOCs (OVOCs) を 2 種の仮想的な OVOCs で代表させる方法で、パラメタの数が少なく計算が簡略であるのが特徴である。2-product model における各 VOC の酸化反応は以下のような式で表される。



ここで、 P_1 、 P_2 は OVOC、 α_1 、 α_2 はそれぞれ質量ベースの化学量論係数である。オキシダントは OH、 O_3 、 NO_3 を指す。上式の反応によって生成された OVOCs の粒子化のプロセスについては、分配係数という各 OVOCs により異なるパラメタを用いることで熱力学的に各相の濃度を計算することができる (Pankow 1994a, b^{14,15)})。分配係数 $K_{p,i}$ を用いると、ある OVOC i の各相の濃度は以下のような関係で表現される。

$$K_{p,i} = \frac{P_i}{G_i M_{om}} \quad (1.2)$$

ここで、 P_i は i の気相濃度、 G_i は i の粒子相濃度、 M_{om} は大気中の全有機エアロゾルの濃度である。この式は SOA の土台となる大気中の有機エアロゾルが多いほど、OVOCs の粒子相への移行が起りやすくなることを示している。また、 M_{om} は一次有機エアロゾル (POA) 及び SOA 濃度の合計を計算する必要があるため、(1.2) 式を解くには反復計算が必要になる。分配係数 $K_{p,i}$ は、以下の式で計算される (Pankow 1994a, b^{14,15)})。

$$K_{p,i} = \frac{f_{om} 760RT}{MW_{om} \zeta_i p_{L,i}^0 10^6} \quad (1.3)$$

ここで、 f_{om} は全エアロゾルに対する有機エアロゾルの質量比、 R は気体定数、 T は気温、 MW_{om} は有機エアロゾルの平均分子量、 ζ_i は i の活量係数、 $p_{L,i}^0$ は i の蒸気圧を示す。この式に対してクラウジウス-クラペイロンの式を適用すると、(1.3) 式は以下の式へと変形できる。

$$K_i^T = K_i^{T_{sc}} \frac{1}{\zeta_i} \frac{T}{T_{sc}} \exp \left[\frac{\Delta H_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{sc}} \right) \right] \quad (1.4)$$

ここで、 T_{sc} は基底温度、 ΔH_i は i の蒸発エンタルピーである。すなわち、ある基底温度の分配係数が分かれば (1.4) 式から各気温の分配係数を導きだすことができるようになる。本研究では、(1.4) 式を用いて各気温における分配係数 K_p の値を計算するが、簡略化のため、活量係数 $\zeta_i = 1$ 、蒸発エンタルピー $\Delta H_i = 79 \text{ kJ mol}^{-1}$ とし、先行研究 (Tsigaridis and Kanakidou, 2003¹⁶⁾) を元にした固定の値を用いる。なお、基底温度 $T_{sc} = 298 \text{ K}$ である。

本研究で考慮される VOCs については、植物起源 VOCs はモノテルペン・イソプレンの 2 種、人為起源 VOCs についてはベンゼン・トルエン・キシレンの 3 種である。VOCs のオキシダントとして働く物質は、モノテルペンは $\text{OH} \cdot \text{O}_3 \cdot \text{NO}_3$ 、イソプレンは $\text{OH} \cdot \text{NO}_3$ 、芳香族化合物は OH のみを考慮するものとする。なお、モノテルペンについては本来ならば α ピネン、 β ピネンなどそれぞれの化学特性を考慮してパラメタを設定すべきであるが、本研究においては代表値として α ピネンのパラメタを使用している。同様にキシレンについても異性体を考慮せず、*m*-キシレンの値を代表として用いる。また、SOA の生成に際して NO_x や湿度が与える影響や、液相で生成される SOA は本実験では考慮されない。

植生起源の SOA については、現状では観測データが不足しているため、シミュレーションの系統的な検証は困難であるが、南米における観測 (Artaxo et al., 2002¹⁷); Decesari et al., 2006¹⁸) や他のモデル研究 (Heald et al., 2008¹⁹) と矛盾しないシミュレーション結果を得ている。

(2) 二次有機エアロゾル (SOA) の変動要因の評価

本研究では、二次有機エアロゾルの過去から現在までの変動に関して、1) 人為起源 (土地利用変化による植物起源を含む) VOCs エミッションの増減、2) 大気化学場 (VOCs の酸化剤の分布) の変動、3) 一次有機エアロゾル (POA) エミッションの変化、の各影響を、感度実験によりそれぞれ分離して検討する (表 (1)-4)。

表 (1)-4 感度実験の設定

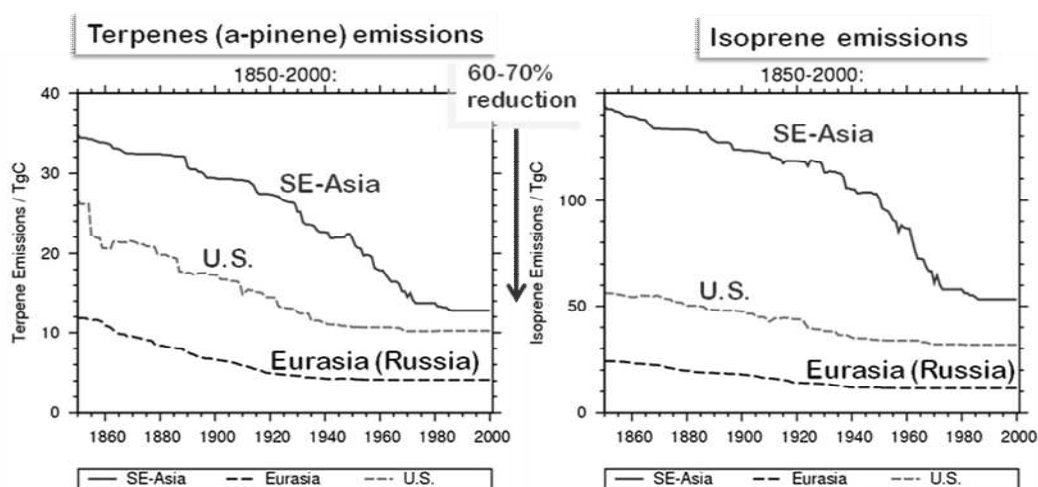
実験	VOCs エミッション	大気化学場	POA
S1	植物起源 (現在)	現在	現在
S2	植物起源 (現在)	現在	現在
	人為起源		
P1	植物起源 (現在)	産業革命前	現在
P2	植物起源 (現在)	産業革命前	産業革命前
P3	植物起源 (産業革命前)	産業革命前	産業革命前

以下に、VOCs エミッション、大気化学場、および POA について、それぞれの実験設定の詳細を記述する。

1) 人為・植物起源 VOCs エミッション

SOA の前駆体となる VOCs は、その起源別に植物起源 VOCs と人為起源 VOCs に分けて扱う。本研究で考慮する植物起源 VOCs はイソプレン (C_5H_8)、モノテルペン ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$) の二種である。これらのエミッションはどちらも GEIA (Global Emissions Inventory Activity: Guenther et al., 1995) インベントリのデータを利用して与える。一方で人為起源 VOCs は芳香族化合物であるベンゼン (C_6H_6)、トルエン (C_7H_8)、キシレン (C_8H_{10}) を考慮する。芳香族化合物のエミッションは人為起源エミッション・バイオマスバーニング起源エミッション共に RETRO (REanalysis of the TROpospheric chemical composition over the past 40 years: Schultz et al., 2005; 2008^{20, 21}) インベントリのデータ

を用いた。過去（産業革命以前）～現在のエミッション変動は、植物起源 VOCs については、Ramankutty and Foley (1999)²²⁾による土地利用変化データを基に、植生タイプの変更および、バイオマス量の減少による VOCs の発存量の変化を推定する（須藤他, 2010）⁶⁾。この方法で計算を行った過去の植生改変による VOCs エミッション変化を図(1)-3 に示す。主に、アジア域、北米、ヨーロッパ（ロシア）の各領域で顕著な VOCs 放出の減少が計算されており、とくにアジア域における 1980 年までの減少傾向が際立っている。テルペン類は高緯度の針葉樹林帯などからも夏季に放出されるため、北米やヨーロッパ付近でも比較的大きな減少傾向を示すが、イソプレンについては、放出源が熱帯域に集中しているため、アジア以外ではそれほど大きな減少は見積もられていない。



図(1)-3 過去（1850～2000年）の植生改変に伴う植生起源 VOCs の放出量の変化（東南アジア、北米、ロシア付近の各領域）。左はテルペン、右はイソプレンのエミッションを示す。

2) 大気化学場

VOCs はオキシダントである OH、 O_3 、 NO_3 によって酸化されることで SOA を生成する。従ってこれらオキシダントの分布すなわち大気化学場の変動も SOA 生成に影響すると考えられる。本研究では、現在の大気化学場における実験の他、産業革命以前の大気化学場を再現した実験を同時に行う。各オキシダントの量は前駆体となる物質のエミッション変化に付随して変動する。そのため、産業革命以前の大気化学場の再現には、EDGAR-HYDE 1.3 (Van Aardenne et al., 2001²³⁾) の過去エミッションインヴェントリで提供される C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 C_3H_8 、 CH_3COCH_3 、CO、 NO_x 、ONMV (other non methane VOC)、および SO_2 の各エミッションを用いる。また、一方で CH_4 の濃度はモデル実行時に各半球で一定の値を与えているため、現在の値と過去の値をそれぞれ設定して実験する。すなわち、過去の大気化学場の CH_4 濃度は北半球、南半球共に 0.7 ppmv、現在の大気化学場では北半球、南半球でそれぞれ 1.82 ppmv、1.71 ppmv を設定する。

3) 一次有機エアロゾル (POA) のエミッション

SOAの生成には一次粒子であるPOAを含めた有機エアロゾル(OA)全体の濃度も影響し、OAの量が増えるほどSOAは出来易くなる。そのため、POA量の変動もSOA生成に影響を与えていると考えられる。POAは主にBCと同様に森林や化石燃料の燃焼によって発生するため、そのエミッションはBCのエミッションにOC/BC比をかけることで表現される。本研究ではBCの森林火災起源エミッションはGFED2.0インベントリデータ、人為起源エミッションはTakemura et al. (2005)³⁾のデータを使用し、OC/BC比はソースごとに定義された値(Liousse et al. 1996²⁴⁾)をそれぞれ適用することで、POAのエミッションとする。また、産業革命以前から現在にかけてのPOA濃度の変化を見る場合は、OC/BC比を調整することで簡易的に濃度を変動させるものとする。産業革命以前のPOA濃度を再現する場合は、石油燃料起源のOC/BC比を0とし、他のソースについてはOC/BC比の10%の値を利用する。

(3) 各種変動要因の放射強制力評価

本研究では、IPCC第5次報告書(AR5)に向けて整備された化学・エアロゾル気候モデル(上述)とRCP(Representative Concentration Pathways)過去エミッションデータ(Lamarque et al. 2010²⁵⁾, etc.)を用いて、各種短寿命成分の変動とその放射強制力(RF)を詳しく評価した。各種成分について、1850~2000年の変動分を対象に、CHASER-SPRINTARSモデルによりRF評価実験を行った。エアロゾルやオゾン前駆気体の1850/2000年時のエミッションについては、IPCC-AR5のRCPシナリオ実験の一環で作成された過去エミッションデータ(Lamarque et al., 2010²⁵⁾など)を使用した(気象場は2001~2008年の8年間を対象とし、この間の平均RFを算出)。また、須藤他(2010)⁶⁾と同様に、土地利用変化による植物起源VOCsエミッションの変動とこれに伴うSOAの変動の影響もRFとして評価した。

(4) 過去の気候変動の再現計算

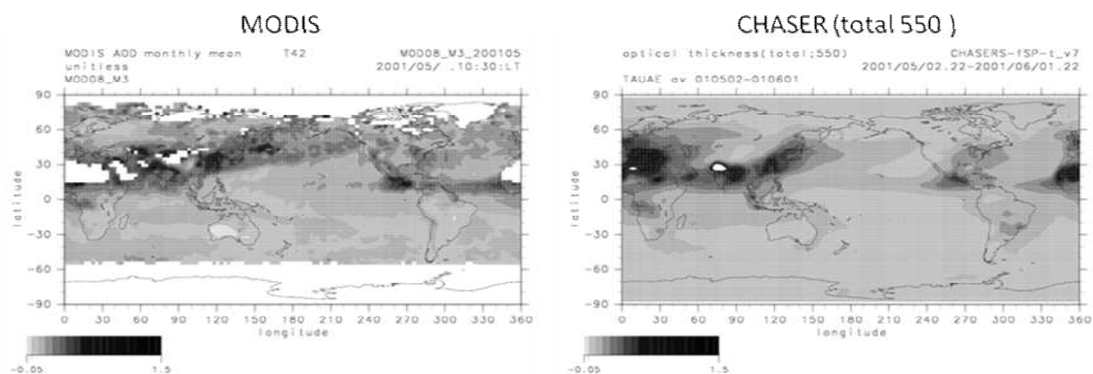
上述の化学・エアロゾル結合気候モデルを用い、過去気候再現計算を実施するための準備を行った。エミッションなどの境界値データの整備、および出力変数の選定などの作業を行うとともに、長期シミュレーションに向け、コードの高速化などのモデル調整も併せて実施した。また本モデルにより診断実験を実施し、その検証を行ったうえで、1850年から2005年を対象に、長期気候再現シミュレーションを行う。ここでは、土地利用変化によるSOA変化、および硫酸塩・硝酸塩など各種エアロゾル増加の気候影響の分離・定量化を重点的に行うため、次のようなシナリオ実験を設定した：すべてのエミッションについて経年変動を考慮する標準実験(Exp1)、テルペン・イソプレン放出を1850年値に固定した感度実験(Exp2)、硫酸塩の前駆気体放出を1960年値に固定した感度実験(Exp3)、硝酸塩の前駆気体放出を1960年値に固定した感度実験(Exp4)。

4. 結果及び考察

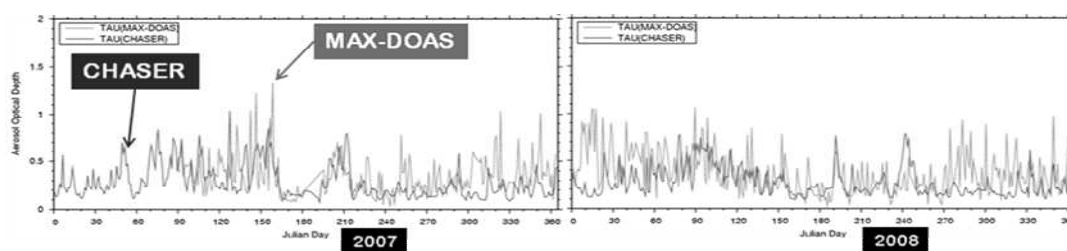
(1) 構築・改良されたエアロゾル気候モデルによるシミュレーションの診断実験と評価

ここでは、エアロゾル・化学気候モデルを用いた診断実験を行い、本研究で着目するエアロゾル関連光学パラメータ(光学的厚さや消散係数)などを対象に評価を行った。図(1)-4は、エアロゾル光学的厚さ(AOT)について、MODISによる衛星観測とモデル計算を比較した例である。観測に見られるアジア域やアフリカ域におけるピークパターンなどがモデルにより定量的にもよく再現されている。さらに、アジア域におけるエアロゾル光学パラメータ(光学的厚さおよび消散係数)

の評価として、JAMSTEC が実施している沖縄・辺戸岬における MAX-DOAS 観測も利用して比較・検討を行った（図(1)-5）。モデルの計算値は MAX-DOAS 観測と概ね整合的であり、春季については、モデルは MAX-DOAS 観測と同様に、2007 年の方が 2008 年よりも、光学的厚さが高く、日々変動の振幅も大きい。モデルで計算される各種エアロゾルの寄与を確認すると、硫酸塩 (SO_4^{2-}) の寄与が通年で最も大きく、炭素性エアロゾル (BC+OC) は春季に硫酸塩と同程度の寄与を見せていた。今回の計算では、植物起源の二次有機エアロゾル (SOA) について、テルペン類だけでなく、イソプレンからのエアロゾル生成も導入したため、これまでの結果に比べて、炭素性エアロゾルの寄与がやや増大した。また、ダストと硝酸塩 (NO_3^-) は光学的厚さの全体的な時間変動に対して大きく寄与することはないが、2007 年、2008 年ともに、通年、無視しえない寄与を持っていることが確認された。



図(1)-4 エアロゾル光学的厚さ (AOT) 分布。MODIS 衛星観測 (左) と CHASER モデル計算 (右)。2001 年 5 月を対象。

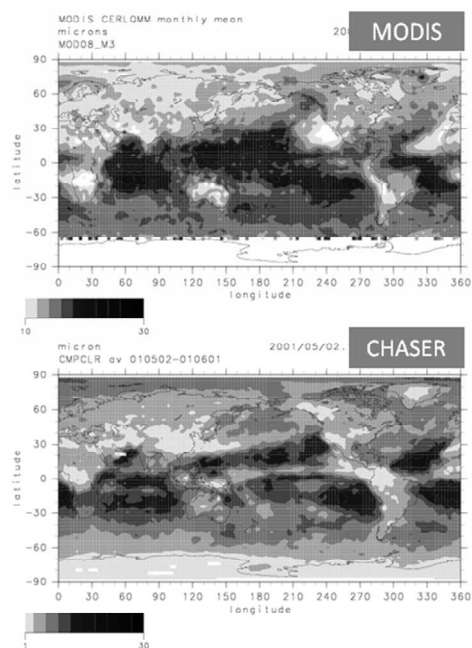


図(1)-5 沖縄・辺戸岬におけるエアロゾル光学的厚さの時系列 (2007-2008年)。MAX-DOAS観測とCHASERモデル計算。

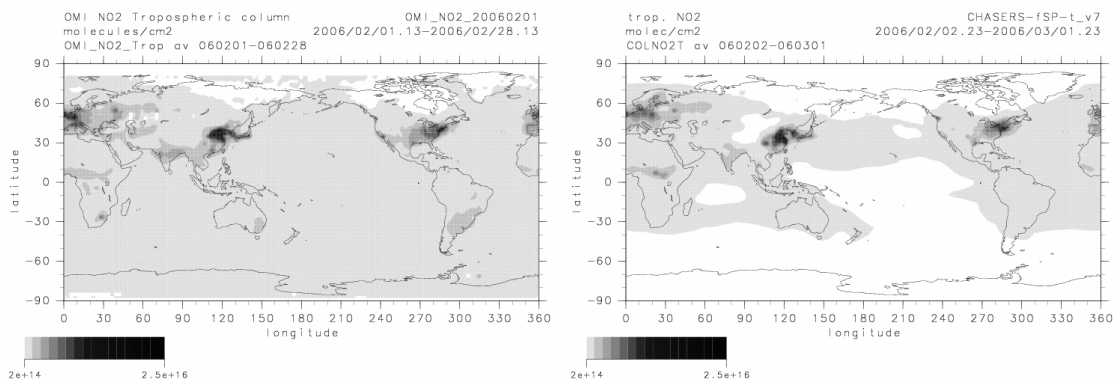
図(1)-5 に雲有効粒径の比較例を示す。エアロゾル分布を反映して、陸域で雲有効粒径が小さくなるなどの特徴がモデルでも定性的に再現されている。次に、硝酸塩エアロゾルの重要な前駆気体である二酸化窒素 (NO_2) についても評価を行った。図(1)-6 は、 NO_2 の対流圏カラム分布について、CHASER の計算結果を OMI 衛星観測データと比較して、評価した例である。衛星データに見られる欧州、中国、北米における NO_2 ピークがモデルにより良く再現されていることがわかる。

しかしながら、中国においては、20～30%の過小評価傾向が確認された。北アフリカにおいては、モデルは、衛星観測と同様に、NO₂ ピークを示しており、モデル中で森林火災エミッションが妥当に表現されていることがわかる。OMI の他に GOME 衛星観測データとも比較したところ、両衛星データともに、CHASER による NO₂ カラム分布は全球的には弱い過小評価傾向を持つことを示した。この他、オゾンや CO についても、GOME、OMI、TES、MOPITT 各衛星観測データによる全球分布と詳細な比較を行い、CHASER 化学計算は観測と定量的にも概ね整合的であることを確認した。

図(1)-8 は本研究で計算された地表における二次有機エアロゾル (SOA) および全有機エアロゾル (OA=POA+SOA) の濃度の観測との比較である。モデルの結果は、人為起源 VOCs の効果を含む実験によるものであるが、依然として顕著な SOA 過

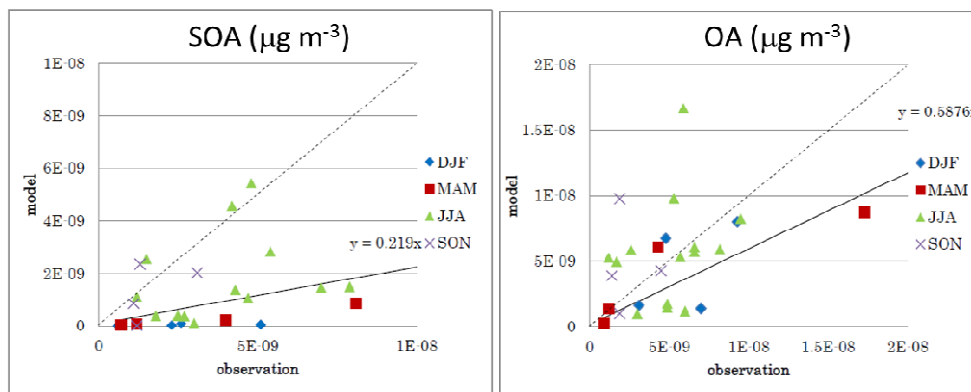


図(1)-6 雲有功粒径。MODIS 衛星観測 (上) と CHASER モデル (下)。2001 年 5 月。



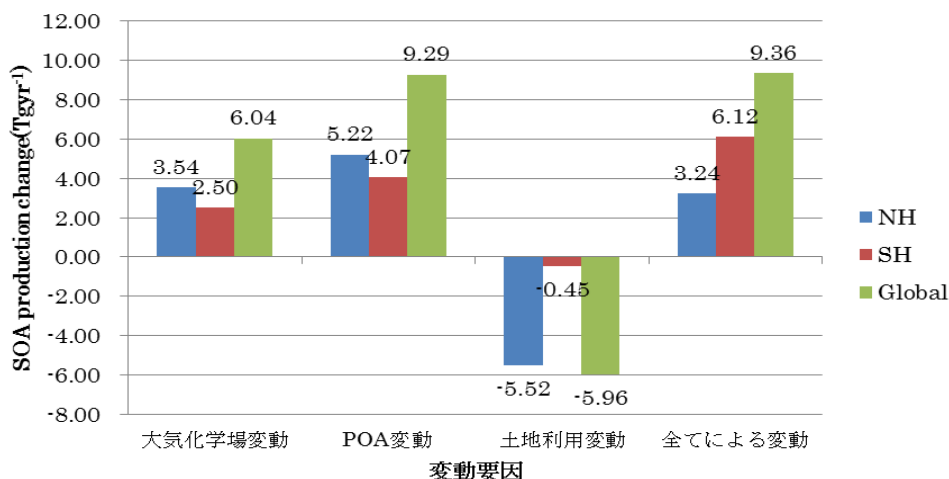
図(1)-7 NO₂ カラム分布。OMI 衛星観測 (左) と CHASER モデル計算 (右)。2006 年 2 月。

小評価傾向を通年的に示していることがわかる (相関係数は 0.23)。特に、北半球冬 (DJF)、春 (MAM) に観測されたデータに関しては過小評価の傾向が強い。一方で POA を含めた OA 全体のプロットでは、相関係数は 0.37 で同様にバラつきがあるものの、SOA のプロットとは逆に、データによっては過大評価になっているものも多い。SOA の過小評価については本実験で考慮されていない VOCs エミッションによる生成や他の生成過程の存在といった要因が考えられるが、POA のエミッションに関しても何らかの不確定性がある可能性が示唆されたといえる。



図(1)-8 地表 SOA および地表 OA に関する CHASER-SPRINTARS モデルと観測との比較。

(2) 二次有機エアロゾル (SOA) の変動要因の評価



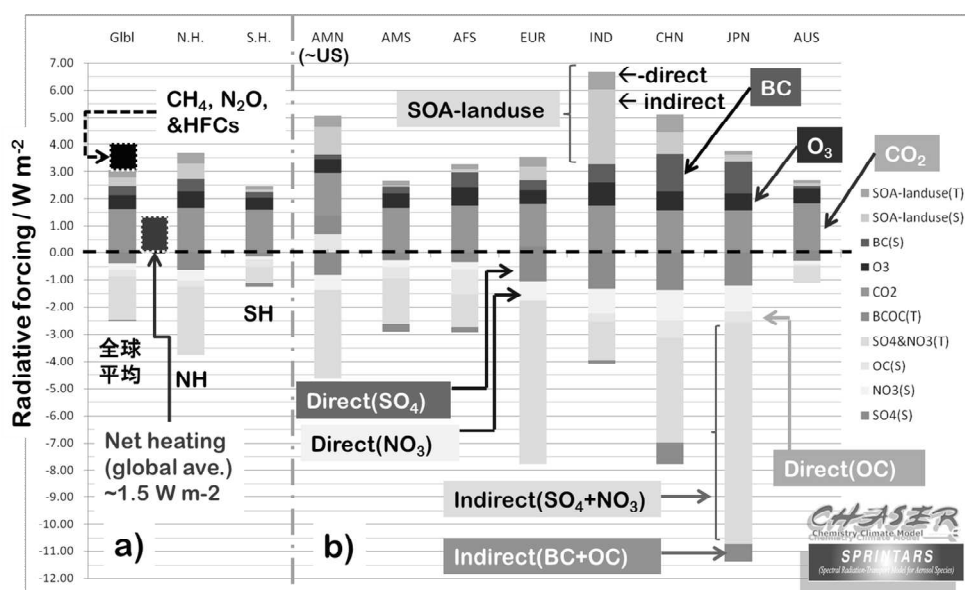
図(1)-9 各変動要因による、半球別 SOA 生成量 (Tg yr⁻¹) の変化量の比較。

本節では、SOA 変動要因として、大気化学場の変動 (VOCs 酸化剤の変動)、POA の変動、および土地利用変化のそれぞれに着目し、感度実験の結果を概説する。図(1)-9 は、各変動要因別に SOA 生成量の変動をまとめたグラフである。これを見ると、各変動要因による SOA 生成量の変動幅はやはり南半球より北半球で大きいことがよくわかる。また、全球規模では POA 変動の影響が大きいが、大気化学場の変動及び土地利用変化による VOCs エミッションの変動についても同程度の影響がある可能性が示された。3つ全ての要素を加味した変動においては、北半球では人為起源物質のエミッションが増加する一方で土地利用変化による植物起源 VOCs エミッションの減少が SOA 生成量の増加を抑制したために、総合すると南半球の方が SOA 生成量の増加が多くなった。また加えて、人為起源 VOCs の反応についても考慮した実験ケース S2 (現在の大気を想定) と産業革命以前の変動要素を全て考慮した実験 P3 (過去の大气を想定) の SOA 生成量を比較すると、全球の SOA 生成量は産業革命以前から現在にかけて 10.6 Tg yr⁻¹ 増加しており、現在の SOA 生成量は産業革

命以前の約 1.7 倍に増加していた。半球ごとに見ると北半球で 4.2 Tg yr^{-1} 、南半球で 6.4 Tg yr^{-1} の増加で、人為起源 VOCs の増加を考慮してもやはり南半球の方が生成量の増加が大きいという結果を得た。

(3) 各種変動要因の放射強制力評価

図(1)-10 に本研究で見積もられた各種放射強制力(RF)を示す。短寿命気候影響物質(SLCF)としては、 O_3 や BC による加熱がみられ、BC による加熱は中国やその下流の日本付近で特に大きい。一方、硫酸塩(SO_4^{2-})や硝酸塩(NO_3^-)などの吸湿性エアロゾルによる冷却も顕著であり、特に雲・間接効果による冷却の寄与が全球平均で 1 W m^{-2} 以上であり重要である。また、土地利用変化に伴う SOA の変動は特にインドなどのアジア域と北米で強い加熱効果を及ぼし、全球平均 RF への寄与も 0.5 W m^{-2} と大きいことが示された。



図(1)-10 CHASER-SPRINTARS モデルにより見積もられた SLCFs および LLGHGs の変動 (1850-2000 年) による放射強制力。エアロゾル等のエミッションには、RCP データ (Lamarque et al., 2010, etc.) を使用。(a) 全球・半球平均、(b) 各主要領域平均 (AMN:北米、AMS:南米、AFS:南アフリカ、EUR:欧州、IND:インド、CHN:中国域、JPN:日本、AUS:オーストラリア)。エアロゾルについては、直接効果 (direct) と間接効果 (indirect) を個別に示す。土地利用変化については、SOA の減少を伴うため、直接・間接効果ともに、正の強制力が計算されている (SOA-landuse:土地利用に起因する SOA)。

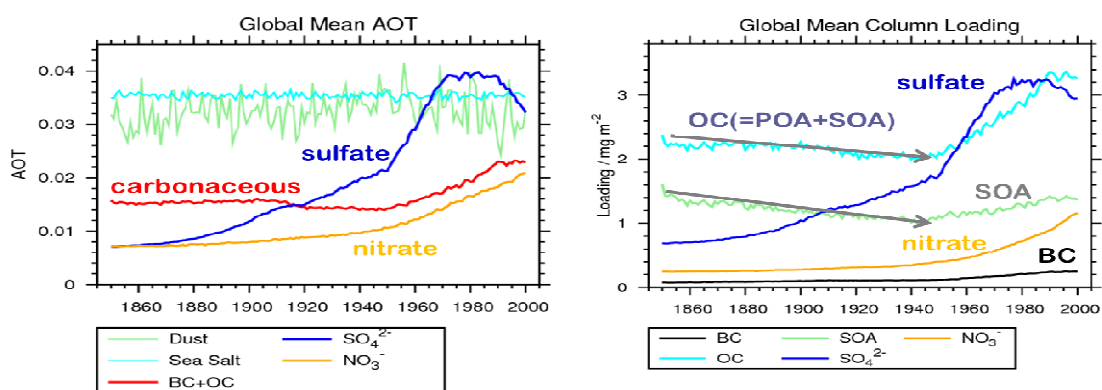
(4) 過去の気候変動の再現シミュレーション

ここでは、1850-2005 年の過去の気候変動について、各種エアロゾルや前駆物質のエミッションを変動させながら行った感度実験の結果について報告する。

1) 各種エアロゾル量の変動

図(1)-11 に過去再現シミュレーションにより計算された各種エアロゾルの全球平均の光学的厚さ (AOT) とカラム積算量の時系列変化を示す。1950 年以降の硫酸塩、および炭素性エアロゾルの

増加が大きく、硝酸塩の緩やかな増加傾向も計算されている。特に硫酸塩の1950～1990年の増加が顕著であり、AOT変動にも大きく寄与していることがわかる。1990年以降では、主に欧州での大気汚染防止に向けた排出規制により、前駆物質である二酸化硫黄(SO_2)の排出が減少したため、硫酸塩の寄与は急速に減衰している。本研究で特に着目する二次有機エアロゾル(SOA)については、1950年以降、他のエアロゾル種と同様に増加傾向を示すが、これは、上述のSOA変動要因の変化についての解析で示されたように、SOA生成を加速させる一次有機物(POA)の増加と、オゾン、OH、 NO_3 などの酸化剤の増加によるものである。一方で、1950年以前では、SOAは顕著に減少していることが計算されている。これは、農地化などの土地利用変化による前駆VOCs(イソプレン・テルペン類)の減少を反映したものである。このような1850年から1950年のSOA減少は、有機エアロゾルの全体量(POA+SOA)の変化傾向にも大きく影響しており、この時期の炭素性エアロゾル(BC+OC)の光学的厚さの傾向にも少なからず影響していることが分かる。

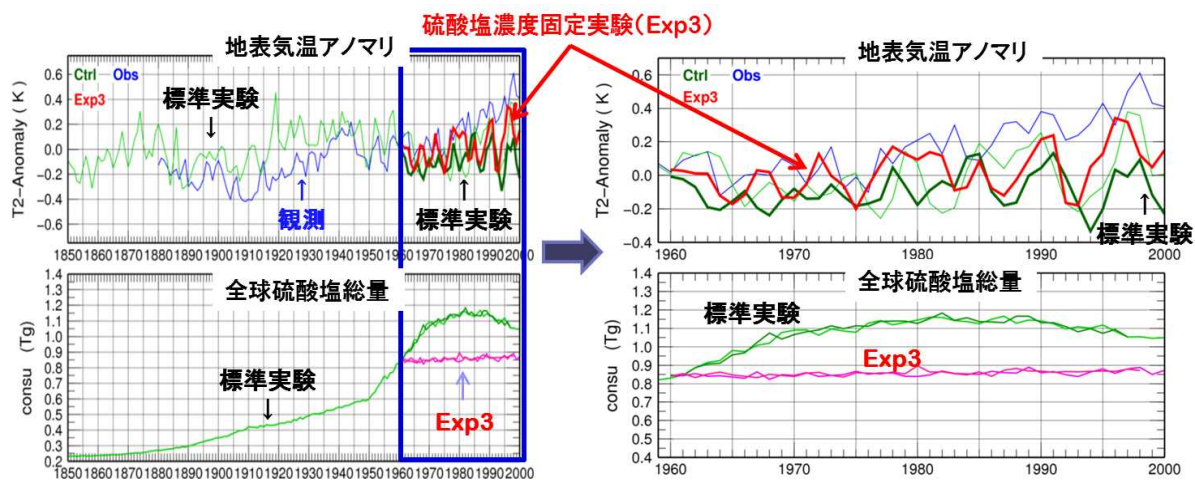


図(1)-11 過去再現シミュレーションにより計算された各種エアロゾルの全球平均の光学的厚さ(AOT)の時系列変化(左)と、全球平均鉛直カラム積算量(mg m^{-2}) (右)。左図は、硫酸塩(sulfate: SO_4^{2-})、硝酸塩(nitrate: NO_3^-)、黒色炭素(BC)+有機炭素(OC)、ダスト(dust)、海塩粒子(sea-salt)それぞれについて示す。右図では、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、BCの他、有機炭素(OC)について、全体量(POA+SOA)と二次有機エアロゾル(SOA)とに分けて示す。

2) 硫酸塩エアロゾル増加の影響

ここでは、主要なエアロゾル変動の効果として、20世紀中盤以降の急激な硫酸塩エアロゾル濃度の変動に着目した実験の結果について概説する。図(1)-12に、標準実験と感度実験により計算された全球平均地上気温のアノマリと硫酸塩エアロゾルの全球総量の時系列変化を示す。この感度実験では、1960年以降の SO_2 の排出量を1960年値に固定して計算を行っており、標準実験とこの感度実験の差により、1960年以降の硫酸塩エアロゾル増減の寄与を定量化することができる。硫酸塩の全球量としては、標準実験では、1980年代に $\sim 1.15 \text{ TgS}$ でピークとなるが、 SO_2 排出量を1960年に固定した実験では、OHなどの酸化剤の増加により若干変動するものの、 $\sim 0.85 \text{ TgS}$ 程度であり、約35%の違いが見られる。なお、標準実験における1960年以降の硫酸塩は、ヨーロッパでは大きく減少し、中国・インドを中心としたアジア域で顕著な増加となっており、図に見られる

硫酸塩の全球総量の増加は、専らアジア域での SO_2 の排出量増加を反映している。また、全球平均地上気温の変動をみると、1960 年以降の硫酸塩増加は、昇温傾向を顕著に抑制していることがわかる。しかしながら、本計算の標準実験は観測にみられる 1980 年以降の昇温傾向を過小評価していることに注意が必要である。今回の実験では、エアロゾル・雲間接効果による冷却を強めに計算するようなモデル設定であったため、硫酸塩やその他のエアロゾルの冷却効果を過大評価している可能性がある。さらに、実験アンサンブルも十分でないため、より現実的なシミュレーションのために、モデル設定の再調整を行った後、アンサンブル数を増加させて実験を実施する必要がある。

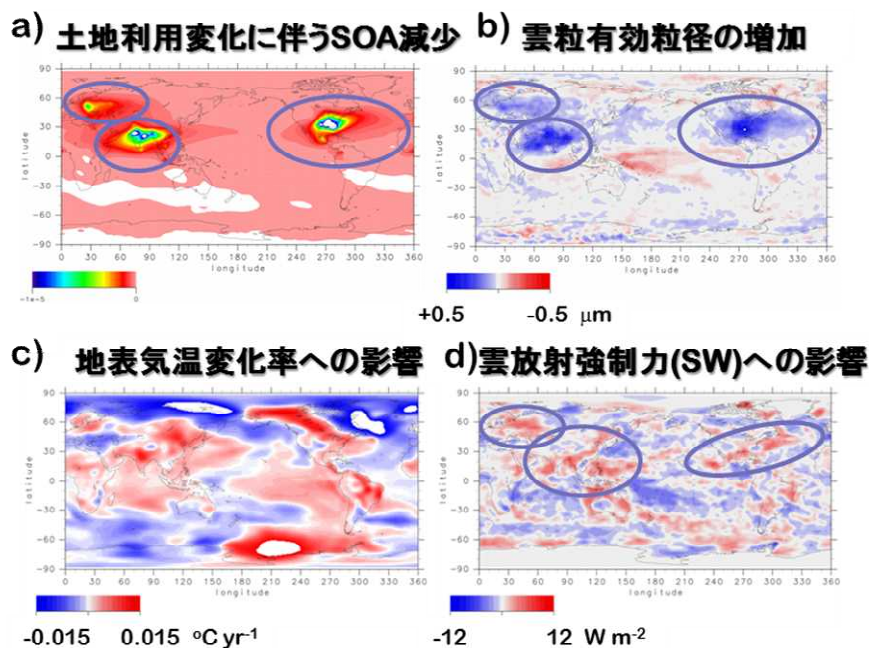


図(1)-12 全球平均地上気温のアノマリ（上）と硫酸塩エアロゾルの全球総量（下）の時系列変化。左図は1850-2000年まで、右図は1960年から2000年までをそれぞれ示す。実験結果は、標準実験（Ctrl = Exp1）と1960年以降の硫酸塩前駆気体（ SO_2 ）エミッションを固定した実験（Exp3）について示す。観測（Obs）はNOAAによる長期地上観測の全球平均の気温偏差。

3) 土地利用変化に伴うSOA変動の影響

感度実験（Exp2）では、森林が農地など他の土地利用に改変されなかった場合を仮定して、テルペンとイソプレンのエミッションを1850年に固定し、標準実験（Exp1）との比較から、土地利用改変が二次有機エアロゾルの生成変動を介して与える気候影響を見積もった。二次有機エアロゾル（SOA）は、テルペンやイソペンなどの植物起源揮発性有機化合物（BVOC）が大気中で化学過程を経て生成され、太陽放射の反射・散乱という直接効果、また雲凝結核としての間接効果を併せ持つので、SOAの減少は気候に対して正の影響（加熱効果）を持つと考えられる。標準実験と感度実験との差分から、アジア域においては、1850年から1950年の間ではインドからバングラデッシュに至る南西アジアにおいて、SOAの減少が顕著である。森林伐採によって1~2割SOAが減少していることがわかる（図(1)-13a；SOAの差分（コントロールラン - 感度実験）であり、寒色系ほど現実の大気ではSOAが減少したことを意味する）。また、SOAの減少にともなって、SOAの雲凝結核作用が減少するため、土地利用変化が大きいヨーロッパ周辺、アジア、北米において、

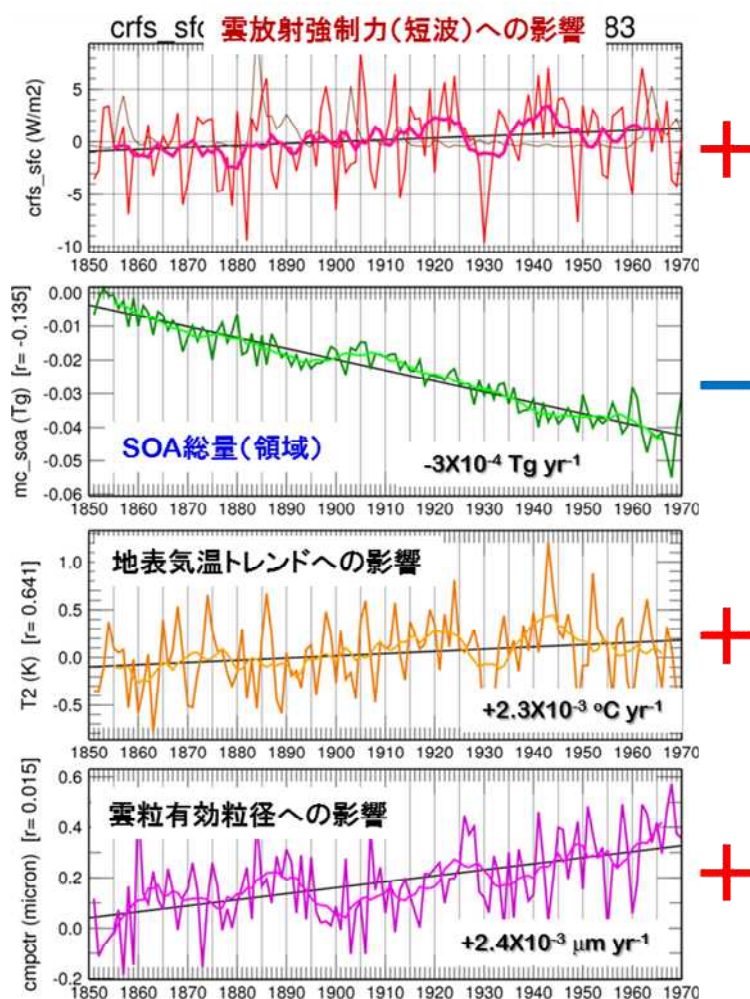
雲有効粒径の増大が確認される（図(1)-13b）。雲放射強制力（地上・短波）の差分については、[SOA の減少 → 雲粒有効半径の増大 → 雲の反射率の減少] といったプロセスを通して、SOA 減少の影響の大きい地域では雲放射強制力が増加する傾向にあることがわかる（図(1)-13d）。このような SOA 減少の雲間接効果を介した影響と直接効果の変動を合わせ、上述のような土地利用変化が顕著な地域では、全球平均地上気温は、おおむね正の変化（昇温）が見られる（図(1)-13c）。その他の地域にも気候フィードバックを通して影響を与えている可能性もある。



図(1)-13 土地利用変化に伴う SOA 変化とその雲・気温への影響（1940-1950 年について、標準実験と感度実験の年平均場の差分）。(a) SOA カラム量の減少、(b) 雲頂での雲有効粒径への影響、(c) 地上気温変化率への影響、(d) 雲放射強制力（短波）への影響。

また、特に SOA 変動とこれに伴う影響が大きいとみられる南アジア域（インド・バングラディシュ等）に着目し、雲変動や気温トレンドを検討した（図(1)-14）。SOA は土地利用変化により明確な減少傾向を示しており、これを反映して雲放射強制力に正の影響を与えている（SOA の雲・間接効果の減少による）。SOA 減少は地上気温傾向に対しては正の影響を与えており、上述の雲強制力への影響との相関も比較的高い。雲粒有効半径の傾向については、SOA の減少に明確に対応しており、1970 年にかけて増加している。

以上のように、本研究の実験から、土地利用変化に伴う SOA の減少は、1900～1960 年の昇温傾向に部分的に寄与していた可能性が示唆される。しかし、前述のように、今回の実験では、間接効果が比較的強く働くモデル設定であったため、SOA の変動影響についても過大評価している可能性もあり、さらに実験のアンサンブル数も十分であるとは言えない。今後は、より現実的な評価に向けて、モデル設定の見直しや追加実験を実施していく必要がある。



図(1)-14 南アジア域における、(上から)雲放射強制力(地上・短波)、SOA 領域総量、地上気温、水雲雲頂の雲粒有効半径に対する SOA 減少の影響(実験間差分)の時系列。なだらかな曲線は9年移動平均、黒の直線は線形回帰直線。下3枚の図の縦軸の[]の中のrはそれぞれの雲放射強制力との相関係数を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマ1では、各種エアロゾルの変動とその気候・アジアモンスーンへの影響について、科学的な解明が進められた。化学・エアロゾル気候モデルの枠組みにおいて、硝酸塩エアロゾル計算および植物起源の有機炭素エアロゾル計算について、精緻化が行われた。本研究では、過去の二次有機エアロゾル(SOA)の変動要因について、土地利用変化だけでなく、一次有機エアロゾル(POA)や大気化学場の変動の影響などを詳しく評価し、定量化した。これは、これまで議論が不十分であったSOAの変動過程を明らかにするものであり、エアロゾルの気候影響の理解にも大きく貢献する成果である。さらに、SOA変動も含め、各種エアロゾルの変動が及ぼす放射強制

力や気候影響をモデル実験により定量化し、特にアジア域においては、硫酸塩・硝酸塩の増加、および土地利用変化に伴う SOA 減少が、過去の雲・地上気温の変化および傾向に対して重要な影響を及ぼしていた可能性を指摘・提示した。本サブテーマ 1 の成果は、本課題のメインテーマの一つであるエアロゾルのアジアモンスーン変動への影響評価に向けて、重要な示唆を与えるものであり、アジアモンスーン変動の実質的な理解および全球的な気候影響に関する定量的な理解・予測に大きく貢献する成果である。

(2) 環境政策への貢献

地球大気化学国際協同計画 (IGAC) の国内委員会 (日本学術会議・第 3 部) において、大気化学・エアロゾルと気候との相互作用研究に関する今後の見通しの検討に寄与するとともに、立ち上げに貢献したワーキンググループでの活動を行った。今後、本研究で得られた成果を、学術論文としてまとめてゆくとともに、積極的に広報し、さらに、IPCC 第 5 次評価報告書などへ貢献することなどを通して、環境政策への貢献に努める。

6. 国際共同研究等の状況

本研究で用いている化学モデル CHASER およびエアロゾルモデル SPRINTARS を用いて、大気汚染の半球規模長距離輸送に関するプロジェクト (HTAP) に参加した (<http://aqm.jrc.it/HTAP/>)。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Saito, S., I. Nagao, and H. Kanzawa (2009): Characteristics of ambient C₂-C₁₁ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan. *Atmos. Environ.*, **43**, 4384-4395. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.031.
- 2) 須藤健悟, 高田久美子, 竹村俊彦, 神沢博, 安成哲三 (2010): 植生改変・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響の評価. *低温科学*, **68**, 129-136.
- 3) Sudo, K. and Y. Ogihara (2012): Global modeling of Secondary Organic Aerosol in a chemistry coupled climate model. *Eurozoru Kenkyu*, **27**, 51-61.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 神沢博 (2012): 地球温暖化の仕組み. 「二つの温暖化—地球温暖化とヒートアイランド—」 (甲斐憲次, 編著) の第 II 部, 第 2 章, 成山堂書店, 50-73. (2012 年 3 月 28 日刊行)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 須藤健悟, 高田久美子, 神沢博, 安成哲三: アジア域における大気化学・エアロゾル・陸域植

- 生結合場の変動とその気候影響，日本地球惑星科学連合 2009 年大会，千葉幕張メッセ（幕張国際会議場），2009 年 5 月 21 日．
- 2) 高瀬健太郎，須藤健悟：衛星観測・化学輸送モデルによる全球対流圏 CO の解析，日本気象学会 2009 年度春季大会，つくば国際会議場，2009 年 5 月 25 日．
 - 3) 関谷高志，須藤健悟：全球対流圏オゾン分布の変動要因：気象場の変動が及ぼす影響の解析，日本気象学会 2009 年度春季大会，つくば国際会議場，2009 年 5 月 25 日．
 - 4) 須藤健悟：対流圏光化学場の過去再現シミュレーション，第 14 回大気化学討論会，2009 年 11 月 21 日．
 - 5) 須藤健悟：対流圏オゾン・メタンの過去再現シミュレーション：初期結果，日本気象学会 2009 年度秋季大会，アクロス福岡，2009 年 11 月 26 日．
 - 6) 高瀬健太郎，須藤健悟：バイオマスバーニングが対流圏 CO の全球分布に与える影響に関する解析，日本気象学会 2009 年度秋季大会，アクロス福岡，2009 年 11 月 26 日．
 - 7) 詹博硯，須藤健悟：火山起源 SO₂ 及び SO₄ の輸送経路および化学変化過程の再現，日本気象学会 2009 年度秋季大会，アクロス福岡，2009 年 11 月 26 日．
 - 8) 関谷高志，須藤健悟：エルニーニョに伴う熱帯：亜熱帯対流圏オゾンの変動，日本気象学会 2009 年度秋季大会，アクロス福岡，2009 年 11 月 26 日．
 - 9) Sudo, K. K. Takata., T. Takemura, H. Kanzawa, and T. Yasunari: Aerosol changes associated with land use change in Asia and their impacts on climate, American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall Meeting, San Francisco, 15 December 2009.
 - 10) Sekiya, T. and K. Sudo: Meteorological impacts of El Niño on tropospheric ozone distribution during 1970–2006, American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall Meeting, San Francisco, 15 December 2009.
 - 11) Kanzawa, H., K. Sudo, K. Takata, T. Yasunari: Aerosol changes associated with land use change in Asia and their impacts on climate. Workshop on Development of Asian Mega-cities and Impacts on Regional Climate, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 21 January 2010.
 - 12) 須藤健悟：全球メタン濃度の過去再現シミュレーション：気候変動の影響．日本気象学会 2010 年度春季大会，国立オリンピック記念青少年総合センター，東京，2010 年 5 月 25 日．
 - 13) Sudo, K., K. Takata, H. Kanzawa, T. Takemura, T. Yasunari: Simulation of aerosol changes in Asia with a chemistry-aerosol coupled climate model. JP
 - 14) GU 2010 年度大会，Makuhari Chiba, Japan, 27 May 2010.
 - 15) Sudo, K.: Modeling the climate impacts of global air pollution and short-lived climate forcers. International Workshop on “Impact of Asian Megacity Development on Local to Global Climate Change” (1st MOST-JST Project Meeting), Beijing Foreign Expert Hotel, Beijing, China, 10–12 October 2010.
 - 16) Kanzawa, H., S. Saito, and I. Nagao: Non-methane hydrocarbons (NMHCs) in an urban atmosphere of Nagoya observed by a continuous measurement system. International Workshop on “Impact of Asian Megacity Development on Local to Global Climate Change” (1st MOST-JST Project Meeting), Beijing Foreign Expert Hotel, Beijing, China, 10–12

October 2010.

- 17) 須藤健悟, Patra Prabir, 伊藤昭彦: 化学気候モデルを用いた 1970-2008 年のメタン変動要因の解明, 大気化学討論会, 首都大学東京, 八王子, 2010 年 11 月 18 日.
- 18) Sudo, K.: Global air pollution and its interaction with climate. The 2nd Workshop on Climate and Environment between Nanjing University and Nagoya University, Nagoya University, 5-6 December 2010.
- 19) Sudo, K., P. Patra, A. Ito: Leveling-off of atmospheric methane caused by coupling of climate change and tropospheric chemistry. AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, 13-17 December 2010.
- 20) Sudo, K., T. Takemura, and H. Akimoto: Evaluating past changes in short-lived climate forcers and their climate impacts with a chemistry-aerosol coupled climate model, 3rd International Workshop on Atmospheric Modeling Research in East Asia, Chengdu, Sichuan Province, China, September 24-25, 2011.
- 21) Sudo, K., T. Takemura, and H. Akimoto: Evaluating past changes in atmospheric pollutants and their climate impacts with a chemistry-aerosol coupled climate model, The 8th International Conference on Acid Deposition, Acid Rain 2011, Beijing China, 16-18 June 2011.
- 22) Sudo, K., T. Takemura, and H. Akimoto: Modelling Short-Lived Climate Forcers: Climate Impacts and Interaction, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne Australia, 28 Jun-07 July 2011.
- 23) 清水俊成, 須藤健悟: 硫酸塩生成におけるダストの影響: 全球化学・エアロゾル輸送モデルの改良と検証, 日本気象学会 2011 年度秋季大会, 名古屋大学, 名古屋, 2011 年 11 月 16 日-18 日.
- 24) 須藤健悟, 竹村俊彦, 秋元肇: 化学・エアロゾル気候モデルを用いた短寿命気候影響物質 (SLCFs) の放射強制力と気候応答の評価, 第 17 回大気化学討論会, 京都大学宇治キャンパス, 京都, 2011 年 10 月 18 日-20 日.
- 25) Sudo, K., H. Endo, K. Hara, K. Osada, and T. Takemura: Simulating black carbon at Syowa station, Antarctic: long-range transport from various source regions, JPGU 2011 年度大会, Makuhari, Chiba, Japan, 23 May 2011.
- 26) 須藤健悟, 竹村俊彦, 秋元肇: 化学・エアロゾル気候モデルを用いた短寿命気候影響物質 (SLCFs) の放射強制力の評価, 日本気象学会 2011 年度春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2011 年 5 月 18 日-21 日.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 神沢博：コーヒー片手に温暖化を語ろうー長野で「気象サイエンスカフェ」． 話題提供者としての紹介およびインタビュー，信濃毎日新聞，2010年10月24日朝刊．

(6) その他

下記の一般向け講演を行った。

- 1) 真鍋淑郎・神沢博：科学的好奇心の先にあるもの．エコラボトーク（対談），環 KWAN（名古屋大学大学院環境学研究科発行），Vol. 17（2009 autumn），6-9．（2009年10月）
- 2) 神沢博：大気環境問題（1）：温暖化ガスの発生機構と温室効果．飛騨インタープリターアカデミー環境学科，特定非営利活動法人飛騨自然学園，高山，2010年5月30日．
- 3) 神沢博：地球温暖化問題の科学的理解の現状．長野地方気象台，長野，2010年10月22日．
- 4) 神沢博：なぜ地球は温暖化するのかー地球温暖化問題の科学的理解ー．（話題提供）気象サイエンスカフェ in 長野，日本気象学会中部支部・長野県気象予報士会・長野地方気象台共催，信州大学教育学部，長野，2010年10月23日．
- 5) 神沢博：大気環境問題（1）：温暖化ガスの発生機構と温室効果．飛騨インタープリターアカデミー環境学科，特定非営利活動法人飛騨自然学園，高山，2011年8月28日．

8. 引用文献

- 1) IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 996pp.
- 2) Hansen J, M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, and V. Oinas (2001): Trends of measured climate forcing agents. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **98**, 14778-14783, doi:10.1073/pnas.261553698.
- 3) Takemura T, T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, and T. Nakajima (2005): Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JD005029.
- 4) Ramanathan V., C. Chung, D. Kim, T. Bettge, L. Buja, JT. Kiehl, WM. Washington, Q. Fu, DR. Sikka, and M. Wild (2005): Atmospheric brown clouds: impact on South Asian climate and hydrologic cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **102**, 5326-5333, doi:10.1073/pnas.0500656102.
- 5) Lau K. M., M. K. Kim, and K. M. Kim (2006): Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau, *Clim. Dynam.*, doi:10.1007/s00382-006-0114-z.
- 6) 須藤健悟，高田久美子，竹村俊彦，神沢博，安成哲三（2010）：植生変化・エアロゾル複合効果がアジアの気候に及ぼす影響の評価，低温科学，**68**，129-136.
- 7) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto (2002a): CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD001113.
- 8) Sudo, K., M. Takahashi, and H. Akimoto (2002b): CHASER: A global chemical model of the

- troposphere 2. Model results and evaluation, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD001114.
- 9) Sudo, K., and H. Akimoto (2007): Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res.*, **112**, D12302, doi:10.1029/2006JD007992.
- 10) 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.*, **15**, 333-352.
- 11) Nenes, A, S.N. Pandis, and C. Pilinis (1998): ISORROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols, *Aquat. Geoch.*, **4**, 123-152.
- 12) Fountoukis, C. and A. Nenes (2007): ISORROPIA II: A computationally efficient aerosol thermodynamic equilibrium model for K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , H_2O Aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4639-4659.
- 13) Odum, J. R., T. Hoffmann, F. Bowman, D. Collins, R. C. Flagan, and J. H. Seinfeld (1996): Gas/Particle Partitioning and Secondary Organic Aerosol Yields, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 2580-2585.
- 14) Pankow, J. F. (1994a): An absorption model of gas/particle partitioning of organic compounds in the atmosphere, *Atmos. Environ.*, Volume 28, Issue 2, Pages 185-188.
- 15) Pankow, J. F. (1994b): An absorption model of the gas/aerosol partitioning involved in the formation of secondary organic aerosol, *Atmos. Environ.*, **28**, 189-193.
- 16) Tsigaridis, K. and M. Kanakidou (2003): Global modelling of secondary organic aerosol in the troposphere : a sensitivity analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 1849-1869.
- 17) Artaxo, P., J. V. Martins, M. A. Yamasoe, A. S. Procopio, T. M. Pauliquevis, M. O. Andreae, P. Guyon, L. V. Gatti, and A. M. C. Leal (2002): Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondonia, Amazonia, *J. Geophys. Res.*, **107**, 8081, doi:10.1029/2001JD000666.
- 18) Decesari, S. M., et al. (2006): Characterization of the organic composition of aerosols from Rondonia, Brazil, during the LBA-SMOCC 2002 experiment and its representation through model compounds, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 375-402.
- 19) Heald C. L., et al. (2008): Predicted change in global secondary organic aerosol concentrations in response to future climate, emissions, and land use change, *J. Geophys. Res.*, **113**, D05211, doi:10.1029/2007JD009092.
- 20) Schultz, M. G., T. Pulles, R. Brand, M. van het Bolscher, and S. B. Dalsoren (2005): A global data set of anthropogenic CO, NO_x, and NMVOC emissions for 1960-2000, in preparation.
- 21) Schultz, M. G., A. Heil, J. J. Hoelzemann, A. Spessa, K. Thonicke, J. G. Goldammer, A. C. Held, J. M. C. Pereira, and M. van het Bolscher (2008): Global wildland fire emissions from 1960 to 2000, *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB2002, doi:10.1029/2007GB003031

- 22) Ramankutty, N., and J.A. Foley (1999): Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochem. Cycles*, **13**, 997-1027.
- 23) Van Aardenne, J. A., F. J. Dentener, J. G. J. Olivier, C. G. M. Klein Goldewijk, and J. Lelieveld (2001): A High Resolution Dataset of Historical Anthropogenic Trace Gas Emissions for the Period 1890-1990. *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, 909-928.
- 24) Liousse, C. J.E. Penner, C. Chuang, J.J. Walton, H. Eddleman and H. Cachier (1996): A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols, *J. Geophys. Res.*, **101**, 411-19, 432.
- 25) Lamarque, J.F., et al. (2010): Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **10**, 4963-5019.

(2) 植生改変によるエアロゾル変動の気候影響評価

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム

全球水文気候過程研究チーム

高田 久美子・田中 克典・斉藤 和之・高橋 洋

<研究協力者>

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム

全球水文気候過程研究チーム

Kim Hyung Jin

平成21～23年度累計予算額：40,797千円（うち、平成23年度予算額：13,564千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 植生からの揮発性有機炭素(VOC)の発生速度について、1850～2000年の耕地化、気温、日射の歴史的な変化を考慮して算定した。その結果、耕地化を考慮すると植生起源VOCの発生速度は減少するが、気温の上昇によって増大する効果も無視できないことが明らかになった。イソプレンは耕地化による減少効果の方が大きかったが、モノテルペンは気温上昇による増大効果の方が大きかった。地域別に植生タイプごとのイソプレンとモノテルペンの発生速度の推移を詳細に調査し、イソプレンとモノテルペンの発生特性の違いによって、同じ耕地化に対して異なる推移を占めることが示された。こういった植生起源VOCの変化がアジアモンスーン域の気候に及ぼす影響を評価するために、まずモンスーンの変動特性と全球気候モデル(CGCM)による再現性を調査した。全球スケールでのモンスーンの年々変動はエルニーニョ(ENSO)と関係しており、その変動特性はこれまでのCGCMよりも本研究で用いるMIROC5でよく再現されていることが示された。MIROC5では熱帯中部太平洋の対流活動が強化し、大気と海洋の東西方向の相互作用によるBjerknesフィードバックがより現実的になって、ENSOの再現性が向上したと考えられる。植生起源VOCの発生速度の変化によるアジア域の気候への影響としては、VOCの増大に伴う2次有機エアロゾル(SOA)の増大は春季に最大となり、それに伴って直接効果による冷却が見られたものの、その大きさは限定的であった。一方、モデルの内部変動を通して局地的な水循環への影響が見られ、降水の減少(増大)域でと硫酸エアロゾルの増大(減少)という負の相関が確認された。また、エアロゾル変化に伴う日降水量の頻度や強度の変化について5～6月を対象に調べたところ、SOAが増大した場合に、強い降水イベントが増大して弱い降水イベントが減少することが明らかになった。

[キーワード] 土地被覆・植生変化、揮発性有機炭素、エアロゾル、アジアモンスーン、全球気候モデル

1. はじめに

産業革命以降、人口の急激な増加とともに、自然植生から農耕地への転換がアジア、ヨーロッパ、北米などで大規模に行われてきた(Ramankutty and Foley, 1999¹⁾)。耕地化等の土地被覆改変が気候に及ぼす影響について、これまで、植生が大気に及ぼす影響については、主に熱水収支

や炭素収支の観点から調べられており、全球気候モデルによる植生改変の影響については、植生タイプや葉量の変化が地表面の熱水収支を変えることによる影響が調べられてきた (e. g., Feddema et al., 2005²⁾)。歴史的な耕地化データを用いた全球モデルによる数値実験では、耕地化が著しいアジアモンスーン域で春季に地表面の乾燥化を引き起こし (Yamashima et al., 2011³⁾)、夏季のアジアモンスーンを弱めてインドや中国南東部の夏季降水量を減少させることが指摘されている (Takata et al., 2009⁴⁾)。

一方で、植物が揮発性有機炭素化合物 (VOC) 等の大気微量成分の吸収・放出にも寄与していることは、大気化学の分野で古くから知られていた。植生起源のVOCは、地球全体の放出量のうち約90%を占めているとされている (Kuhn et al., 2004⁵⁾)。VOCは反応性が高く、光化学反応により炭素数の大きいカルボン酸やケトンなどの高沸点化合物を生成し、大気中における2次有機炭素エアロゾル (SOA) 生成の主要な原因の1つと考えられている (竹川ら, 1999⁶⁾)。植生によるVOC放出速度は植生タイプと葉量、気温や日射 (光合成有効放射, PAR) 等に依存する (Guenther et al., 1995⁷⁾) ことが知られているが、産業革命以降、大規模な耕地化に加えて、年平均気温が地球規模で 0.61 ± 0.16 度上昇したことから、VOCの放出速度が地球規模で変化していたと考えられており

(Lathiere et al., 2005⁸⁾)、SOAの時空間分布にも影響を及ぼす可能性が指摘されている (Tsigaridis et al., 2006⁹⁾)。大気中のエアロゾルは放射強制力と雲降水システムを介して気候システムに大きな影響を持つことから、植生改変とそれに伴うエアロゾル変化が気候変動に大きな役割を果たす可能性があることが近年指摘されるようになった (Pielke et al., 2007¹⁰⁾)。そこで本研究では、植生タイプ、葉量、気温、日射を考慮して産業革命以降の植生によるVOCの放出速度の時空間分布の変化を推定し、その結果を用いて全球気候モデルを用いた数値実験を行うことにより、産業革命以降の植生からのVOC発生量の変化が、エアロゾルや雲降水システムの変化を通して気候に及ぼす影響について、特に雲降水システムの変動が顕著なアジアモンスーン域に重点を置いて、定量的に評価することを目指す。

歴史的に、モンスーンは各々の地域の季節風として地域特有の性質を持っているものと考えられ、地域特有の海陸配置や地形、また地域特有の気候フィードバック過程が発生・変動メカニズムにおいて支配的であると考えられてきた。そのことから、モンスーンの年々変動や数10年変動の研究は、地域的なスケールに着目して進められてきた。しかし、モンスーンの物理的な形成メカニズムは太陽放射の季節変化とそれに伴う海陸の熱的コントラストに対する強制応答であり、全球規模での基本的な変動システムの1つである。モンスーンは、気候システムの内部フィードバック過程であるエルニーニョ (ENSO) とともに年々変動の時間スケールで相互作用しており、ENSOとともに放射・力学・熱力学など多くのプロセスが関係している。従って、全球スケールでの総合的なシステムとして捉えるべきである。

近年、地域モンスーンの間での相互関係についても認識され始めているが、全球スケールで海陸にまたがるスケールでの研究はまだ無い。また、衛星観測が始まる1979年以前は、全球モンスーン (GM) 変動に関する知見は陸上に限られている。その結果、過去数10年間に限っても、全球スケールのモンスーン降水 (GMP) がどのように変化してきたか、まだ殆ど解明されていない。本研究で、モンスーン地域を総合した全球モンスーンの変動傾向について調べることにより、大きなスケールでの長期変動をもたらしている人為起源の影響や、ENSOなどの年々変動に対して、モンスーンシステム全体がどのように変化したかを明らかにすることを目指す。

植生改変によるVOC変化が気候に及ぼす影響を定量的に評価するためには、全球気候モデルを用いるが、モンスーンやENSOの活動度には陸面での熱水収支が重要な役割を持っていると言われており（e.g. Yasunari, 1987¹¹⁾）、積雪の年々変動はアジアモンスーンの年々変動と密接に関係しているとされている（Morinaga et al., 2000¹²⁾）。そこでは、融雪水の多寡による夏季の土壌水分の変動が海陸の温度コントラストに影響を及ぼしていると考えられている。また、アジアモンスーン域にはヒマラヤやチベット高原が含まれていて、土壌水分の凍結融解を含む土壌物理過程が下層大気に重要な影響を与えることも指摘されている（Saito et al., 2007¹³⁾）。そこで本研究では、積雪過程や土壌物理過程の改良・高度化を行いつつ、全球モデルによる気候影響評価の基礎となるモデルの気候再現性について、モンスーンを中心に観測データや他のモデル結果と比較して検証する。季節変化を高精度で再現できると気候変動を高精度で再現できるとされている（e.g., Slingo, 2003¹⁴⁾）ことから、季節変化によって駆動されているモンスーンの再現性や、内部変動であるENSOとモンスーンとの関係を検証することは、モデルの総合的な性能を示す上で有効な指標になると考えられる。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、耕地化による土地被覆・植生改変とそれに伴う揮発性有機炭素（VOC）を起源とするエアロゾル発生量の変化を考慮して、全球気候モデルによる過去の気候再現実験を行い、アジア域の過去数10～100年の降水量等の観測データとも比較しながら、アジア域の気候に対する植生改変とエアロゾルの複合効果を定量的に評価することを目的とする。VOCの中では、モノテルペン類が2次有機エアロゾル（以下、SOA）の生成に最も寄与する（Chung and Seinfeld, 2002¹⁵⁾）ほか、排出量が最も大きいイソプレンもSOA生成への寄与が見直されている（Claeys et al., 2004¹⁶⁾）。ここでは、イソプレンとモノテルペンを対象として、これらの地球規模の年間放出量が1850年から2000年の土地改変および気候変動によって、どのように変化したのかを算定し、耕地化が進んだ地域とそれ以外の地域での放出量推移の特徴についても調査する。また、それらのVOCから生成されるSOA量を求め、その結果を全球気候モデルによる数値実験の入力データとして利用できるようにする。

本研究で用いる全球気候モデルは、東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構で共同開発してきた全球気候モデルMIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)の最新版MIROC5(Watanabe et al., 2010¹⁷⁾)とする。その陸面過程の高度化においては、積雪や土壌の熱伝導過程とそれらに付随するパラメータ（特に土壌、積雪層に関する熱的・水的物性値）、及び土壌の凍結・融解に関わる土壌物理過程を改良し、地表面付近の水文気候環境の気候値や年々変動に与える影響を調査する。

VOC変化がアジア域の気候に及ぼす影響を調べるに先立って、モンスーンやENSOの変動特性を調査し、モデルによる再現性を検証する。ENSOがモンスーンの年々変動に及ぼす影響については、領域スケールで調べられてきたが、各地域のモンスーンを統合して解釈するGMの観点での解析が近年提唱されている（Wang and Ding, 2006¹⁸⁾；Wang and Ding, 2008¹⁹⁾）。さらに、Wang et al. (2011)²⁰⁾ではENSOと緊密に結びついたGMP（GMでの降水量）の年々変動を示唆している。また、より長い時間スケールの変動についても、GMPの年々変動と10年規模変動（または30年間のトレンド）の様相を明らかにすることは、（1）内部フィードバックプロセスがどの程度、全球スケールのモ

ンスーン変動を支配しているのか？ (2) 全球スケールのモンスーンに、最近数10年間で何らかのトレンドはあるのか？ もしあるなら何がそれをもたらしているのか？ (3) 北半球の夏季モンスーンと南半球の夏季モンスーンの変動度に違いはあるのか？ もしあるなら、何がそれをもたらしているのか？ (4) GMの変化は全球の降水量の変化にどのような役割を持っているのか？ といった科学的な疑問への示唆を得ることに繋がる。

ここでは、近年の全球解析データ (1979~2008年) を用いて、GMPの年々変動を調査するとともに、本研究で用いるMIROC5を全球観測データやIPCC第4次報告書(AR4)で用いられた全球気候モデル群(CMIP3)と比較しながら、モンスーン性の降水や循環場等を抽出し、気候値の再現性やモンスーンの年々変動とENSOによる海面水温(SST)変動との関係などを明らかにする。特に、AR4時のMIROC3では熱帯太平洋の平均状態は良く再現されているにもかかわらずENSOが非常に弱かったことが指摘されているが(Guilyardi et al., 2009²¹⁾)、MIROC5では年々ENSOの再現性が変動を含めて顕著に改善されたことが示されている(Watanabe et al., 2010¹⁷⁾)。このことはMIROC3とMIROC5では、ENSOとモンスーンの関係が本質的に異なることを示唆しているが、この点に留意して、Wang et al. (2011)²⁰⁾ による診断方法を用いてモンスーン性の降水と循環の再現性を評価する。

植物起源のVOCが気候変動に与える影響を評価するに当たって、植生によるVOC放出速度の推定スキームによる違いをまず調査する。これまでは1990年代のVOC放出速度の推定スキーム(e.g., Guenther et al., 1995⁷⁾) が用いられてきたが、今後は改定スキーム(Guenther et al., 2006²²⁾) が用いられるようになると予想される。これら2つの推定方法による違いが気候に及ぼす影響を定量的に評価することは、気候予測の信頼性向上に資すると考えられる。そこで、本研究では、植生によるVOC放出速度の2つの推定方法に基づいて、エアロゾルの3次元輸送モデル (SPRINTARS, Takemura et al., 2005²³⁾) を結合したMIROC5による数値実験を行う。そして、植生によるVOC放出速度の違いによって、特にモンスーンアジアでの地域的な降水変化に着目した影響評価を行う。

3. 研究開発方法

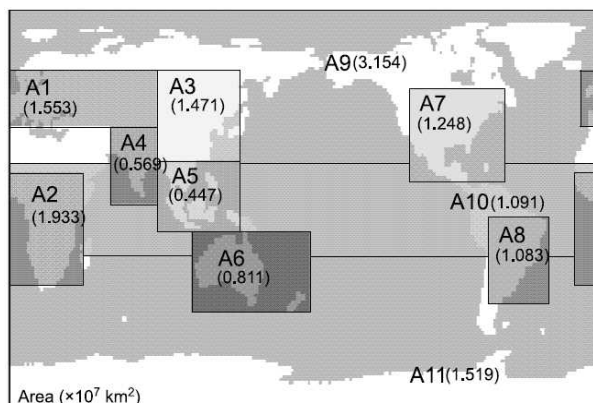
(1) 産業革命以降のVOC放出速度の全球分布の推移

イソプレンとモノテルペン類の放出速度の推定にはMEGAN (Model of Emission of Gases and Aerosols from Nature; Guenther et al., 2006²²⁾) を用い、IPCC第5次報告書用の数値実験に準じた土地利用等のデータを用いて、産業革命以降の推移を算定する。MEGANではモノテルペン類を8種と想定しており、それぞれの放出量を算定した後、総合した値をモノテルペン放出量としている。MEGANのVOC放出速度 (VOC) の推定式は

$$VOC = \varepsilon \cdot \lambda_{LAI} \cdot \lambda_{age} \cdot \lambda_L \cdot \lambda_T$$

で、 ε は標準状態でのVOCの放出速度、 λ_i は因子*i*による効果で、*LAI*は葉面積指数、*age*は葉齢、*L*は光環境、*T*は温度で、各々の効果 λ の積で表す。気候要素 (*L*, *T*) には、MIROC5 (Watanabe et al., 2010¹⁷⁾) による20世紀再現実験(20C3M; IPCC-AR5に提出)における1850~2005年の気温と地表面短波放射の月平均データを使用した。合わせて、20C3Mで用いている1850~2005年の自然植生と農耕地の被覆率データ (Hurtt et al., 2006²⁴⁾)、衛星観測(MODIS)による1~12月の自然植生と農耕地の葉面積指数 (LAI) の全球分布データ、自然植生の植生タイプの全球分布データ (Ramankutty and Foley (1999)¹⁾ をMIROC5用に調整) を用いて、各年各月のグリッドごとにVOCを算定した。水平解像度は20C3Mと同じ東西256点×南北128点(T85)で、約1.4° × 1.4° (約120km)となっている。イソ

プレンとモノテルペン類の放出速度はグリッド内の自然植生地と農耕地についてそれぞれ求められ、グリッドの面積や陸地の占める割合を考慮して1格子点当たりの放出速度を算出する。図(2)-1は、産業革命から現在までに耕地化が比較的進んだ地域(A1-8)とそれ以外の地域(A9-11)を示している。次章では全球平均、およびそれぞれの地域について年間放出量の推移の特徴について解析した。



図(2)-1 産業革命以降、耕地化が進んだ地域(A1-A8)とそれ以外の地域(A9-A11)。地域ごとにイソプレン・モノテルペンの年間放出量を集計した。括弧内の数値は面積($\times 10^7 \text{ km}^2$)を示す。

表(2)-1 植生タイプと単位面積あたりのイソプレンとモノテルペンの標準状態での放出速度(e)。イソプレンは $\text{mg m}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 、モノテルペンは $0.01 \text{ mg m}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。モノテルペンは8種の合計値。

INDEX	Surface type	標準状態での放出速度(e)	
		Isoprene	Monoterpene
-1	sea surface (mixed layer)	0	0
0	sea surface	0	0
1	continental ice	0	0
2	broadleaf evergreen forest	12.6	449.2
3	broadleaf deciduous forest & woodland	12.6	449.2
4	mixed coniferous & broadleaf deciduous forest & woodland	7.3	660.9
5	coniferous forest & woodland	2	872.6
6	high latitude deciduous forest & woodland	0.7	872.6
7	wooded C4 grassland	0.5	323.7
8	shrubs & bare ground	10.7	735.6
9	Tundra	0.5	323.7
10	Cultivation	0.5	323.7
11	Desert	0.09	323.7

植物タイプ毎のイソプレンとモノテルペン類の標準状態での放出速度(ϵ)は、それぞれ Guenther et al. (2006)²²⁾と Sakulyanontvittaya et al. (2008)²⁵⁾に従った(表(2)-1)。イソプレンの ϵ は低緯度帯に分布する常緑性・落葉性広葉樹林が最大で、耕地が極端に小さな最小値とな

る。一方、モノテルペン類は、8種の種別によって異なるが、概ね高緯度帯に分布する寒帯林や乾燥地域の灌木で高い値をとり、耕地で最小値となる。ただし、最高と最低の差はイソプレンほど極端ではない。

耕地化と気象要素の変化がイソプレンやモノテルペンの年間放出量の推移に与える影響を分離して評価するために、耕地被覆率は1850年のまま、1850～2005年の気候条件を与えてVOC放出速度を算定する(VOC_{fix})。これと、耕地被覆率の経年変化を考慮して算定したVOC放出速度(VOC_{all})との比(VOC_{fix}/VOC_{all})を取ることで、1850年を基準として耕地面積拡大の効果を算定する。気象要素の変化による影響は、 VOC_{fix} の1850年の値と年々の値の比($VOC_{fix}(yr)/VOC_{all}(1850)$)を取ることで同様に評価できる。また、日射と温度による影響は、光環境(L)と温度(T)による効果は関数 λ_i を用いて、1850年の値と年々の値の比($\lambda_L(yr)/\lambda_L(1850)$, $\lambda_T(yr)/\lambda_T(1850)$)によって評価した。

(2) 陸面過程の高度化

全球気候モデルMIROCの陸面過程(MATSIRO; Takata et al., 2004²⁶⁾)の高度化では、凍結・融解を含む土壌物理過程や積雪過程を改良する。土壌物理過程については、取得・収集した観測データに基づく土壌物性値の推定スキームの高度化や、1次元陸面モデルによる検証実験を行ったほか、スキームを高度化した時の大気へのインパクトについてGCMを用いた予備調査を行った。積雪過程については、モデル改良のための観測データを収集する。中緯度温帯域(日本付近)のみでなく、高緯度あるいは高標高での積雪の状況、即ち季節を通しての雪温プロファイルや積雪断面観測の調査結果を、収集または実地観測で取得し、モデル改良のための基礎データとする。

これまでのMATSIROでは、土壌全体の深さは4mまでで、土壌の熱力学的な凍結融解のみが導入されており、地中で凍結した氷の存在によって熱的な性質が影響を受けることや、土壌表層近くの有機層は考慮されていなかった。そこで、寒冷域(アラスカ等)や中緯度(日本国内)で行われた実地観測データを収集・取得し、1次元陸面モデルで計算された温度分布や水分分布と比較することによって土壌物性値を逆問題的に推定した。

表(2)-2 実験設定

実験	熱・水 parameterization	土壌層の 深さ	土壌有機層・熱	土壌有機層・水
C5s0	従来のもの	5層4 m	なし	なし
rCs0	凍結下の熱物性値	5層4m	なし	なし
R6s1	過程の改良、不凍	6層14m	あり	小
rCs1y	水の導入	12層100 m	あり	大

GCMを用いた高度化の大気への影響調査では、深い永久凍土層を直接表現できるような厚い土壌層を加えたり、土壌の熱伝導率・熱容量を算定する関数において気相・固相(氷)を考慮するようになりしたほか、不凍水や表層有機層の導入も試みた(表(1)-2)。有機層は植生分布に対応して、北方林(タイガ)の場合は地表から20-25cm、ツンドラの場合は5-8cmに対して熱伝導率を小さく、保水性を大きくした効果を調べた。実験は大気大循環モデル(AGCM)に現在の気候値(1980～2000年)の海面水温、海氷分布を与え、スピニアップとして150年オフライン積分後、大気を結合して

30～60年積分（土壌層深さによって異なる）し、最後の18年分を解析に用いた。

（3） モンスーンの変動特性と全球気候モデルによる再現性

伝統的には、GMの領域は卓越風向と風速が年間で反転することを基準に判定されてきた。その定義によると、モンスーン域は主に東半球の熱帯域が相当することになる。一方、最近の研究では降水の特徴（多雨な夏季と乾燥した冬季）からモンスーン域を判定するようになり、その結果、モンスーン域として、南アジア、東アジア、オーストラリア、南北アフリカ、南北アメリカといった地域が含まれるようになった。また、GMPの年々変動を調べる場合、伝統的には1～12月を基準に調べられてきた。しかし、GMPは4月に最小となり、NHSMによる7～8月とSHSMによる1～2月に2つの最大値がある。そこで本研究では、5月1日から翌年の4月30日までを「全球モンスーン年」として、年平均GMPの年々変動を解析する。この定義はGMだけでなく、ENSOの発達過程を抽出することにも適している。ENSOは、5月から始まって年末に向けて最大となり、翌年の北半球の春に収束することが多いからである。

本研究では2つの降水量データ、GPCP(Global Precipitation Climatology Project)とCMAP(Climate Prediction Center merged analysis of precipitation)を用いてGMの変動特性を解析する。気候値と年々変動の解析には、2つのデータセットの算術平均を用いたが、長期トレンドの解析には、GPCPのみを用いた。CMAPはサンゴ礁データに基づくキャリブレーションを導入しており、データの長期トレンドの精度が水平不均一性を含んでいる可能性がある（Yin et al., 2004²⁷⁾）ためである。循環場（風向・風速）データは、NCEP2(National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy reanalysis 2)とERA (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis)の算術平均を用いた。ERAは40年再解析データ(ERA-40)とInterim ERA(1989-2008)を統合したものである。GMPの気候値と全球モンスーンの循環場(GMC)の気候値の検証には、Wang et al. (2011)²⁰⁾ の診断方法を用いた。エルニーニョとGMPとの年々変動における関係の検証には、米国大気海洋局 (NOAA) の月平均の海面水温 (SST) データERSST (extended reconstructed SST) version 3の1970-1999年のデータを使用した。特異値分解 (SVD, singular value decomposition) を用いた最大共分散解析 (MCA, maximum covariance analysis) によって、GMPとSSTの重要な結合モードを抽出した。線形トレンドの有意性は2つの方法（トレンド-ノイズ比、Mann-Kendall rank法）を用いて検定している。

モデル間の比較をするために、CMIP3の結合モデル20世紀実験(20C3M)の1970～1999年の月平均の降水量、風速、SSTのデータを収集した。モデル出力は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ に線形補間で内挿した。ENSOに関連したGMの年々変動には、EOF(Empirical Orthogonal Function)解析とMCA解析を適用した。

（4） VOC発生量変化の気候影響評価

本研究で用いたMIROC5は、大気の水平解像度をT42、鉛直解像度を40層、海洋の水平解像度を 1° とした。エアロゾルの放射、輸送、沈着等はSPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species; Takemura et al., 2000²⁸⁾ ; 2002²⁹⁾ ; 2005²³⁾) をMIROC5に組み込んで大循環過程とオンラインで計算している。SPRINTARSでは黒色炭素(BC)、有機炭素(OC)、硝酸塩、土壌粒子、海塩粒子といった対流圏で主要なエアロゾル種や硝酸塩の前駆気体(硫黄酸化物(SO_x)、DMS)を考慮している。土壌粒子の発生は、地上10m風速、葉面積指数、土壌水分、積雪被覆率から、モデル

内で算定している。同様に、DMSと海塩粒子の発生量も、地表面での下向き放射と10m風速から簡単な推定式で算定している。一方、BC、OC、SOxはRCP-CCD(Representative Concentration Pathways Concentration Calculations and Data; <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/index.htm>)に基づいて与えているため、これらはB1実験とB2実験で同一になっている。気体である生物起源のVOCから粒子生成されるSOAについては、次のような設定で実験を行った。

ここでは、2組のタイムスライス実験を1700年、1850年、1950年、2000年の条件で行った(表(2)-3)。B1実験では、Guenther et al. (1995)⁷⁾によるGEIAデータ(Global Emissions Inventory Activities)の月平均VOC放出速度から算定したSOAを共通して与えた。一方、B2実験では、各々のタイムスライスの年代に対応して土地利用変化を考慮し(Hurttt et al., 2006²⁴⁾)、Guenther et al. (2006)²²⁾に基づいて推定した植生からのVOC放出速度(Tanaka et al., 2012³⁰⁾)から算定したSOAを与えた。Guenther et al. (2006²²⁾)では葉面積指数(LAI)、土壌水分、日射、気温の関数として植生からのVOC放出量を算定するが、気温と日射の値は、B1実験の値を用いた(Tanaka et al., 2012³⁰⁾)。表(2)-3のうち「⑤-①」と「⑥-②」がVOC放出速度の違いによる気候影響を表す。従って、これらの差から土地利用変化によるVOC発生量変化を推定することができる。簡単のため、これ以降②をCTL、⑥をEXPとする。

他の境界条件としては、Ramankutty and Foley (1999)¹⁾に基づく自然植生分布、MODISによるLAIを用いた。温室効果気体(CO₂, CH₄, N₂O)と対流圏オゾンの濃度はRCP-CCDの値を参照している。成層圏オゾン濃度の3次元分布は大気化学モデル(Sudo et al., 2002)³¹⁾で計算された値を用いた。太陽常数と火山によるエアロゾルには、各々Lean et al. (2005)³²⁾とSato et al. (1993)³³⁾を用いている。タイムスライス実験では、各々の年代の境界条件を与えて60年積分し、最初の20年は初期条件の影響を受けるため、後半40年を解析した。

表(2)-3 MIROC5による数値実験の条件

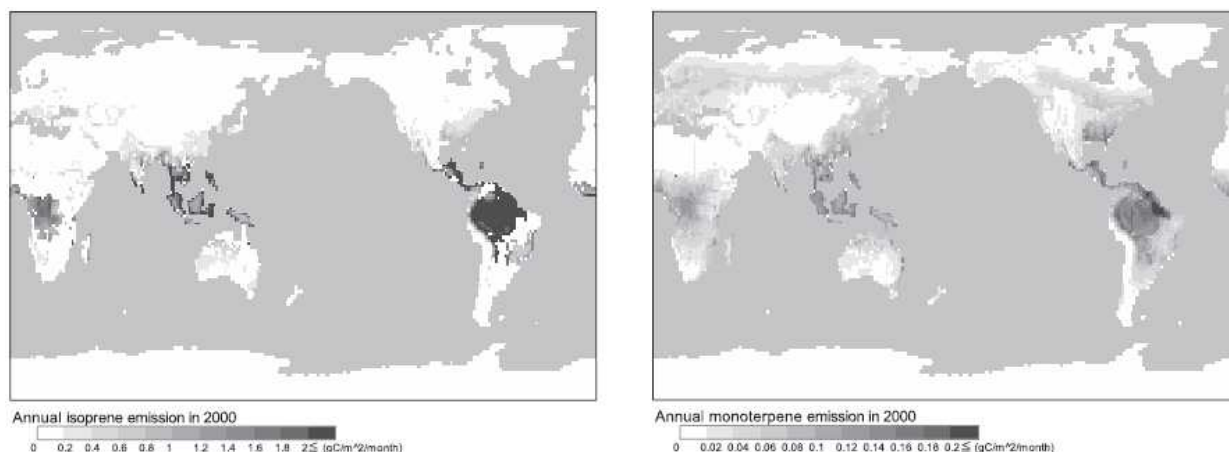
	VEG	LAI	VOC	Aerosols	GHGs	Oxides	Solar & Volcano
① B1-1700	1700	1700	1700		1850	1850	1850
② B1-1850	1850	1850	1850	Guenther et al. (1995)	1850	1850	1850
③ B1-1950	1950	1950	1950		1950	1950	1950
④ B1-2000	2000	2000	2000		2000	2000	2000
⑤ B2-1700	1700	1700	1700		1850	1850	1850
⑥ B2-1850	1850	1850	1850	Guenther et al. (2006)	1850	1850	1850
⑦ B2-1950	1950	1950	1950		1950	1950	1950
⑧ B2-1950	1950	1950	2000		1950	1950	1950

4. 結果及び考察

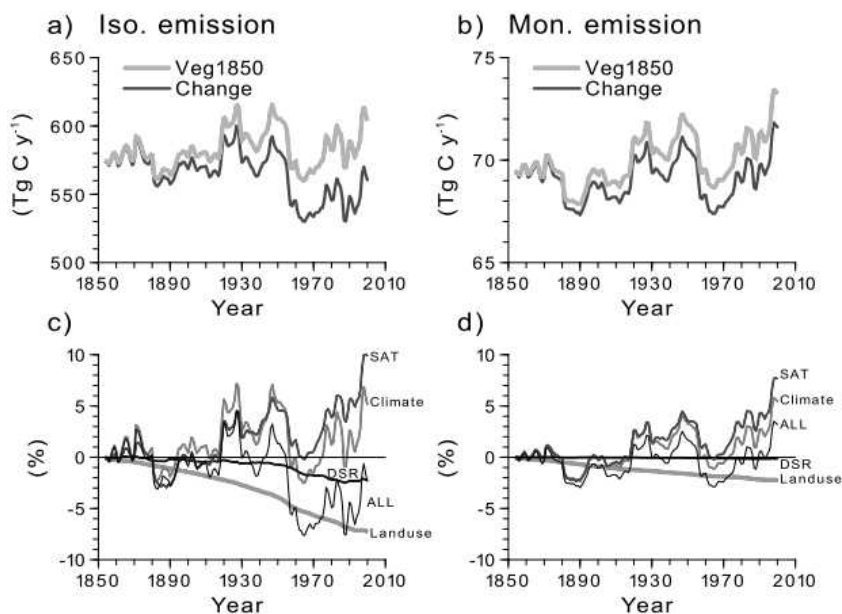
(1) 産業革命以降のVOC放出速度の全球分布の推移

図(2)-2に2000年のイソプレン(左図)とモノテルペン(右図)の年間放出量の分布を示す。イソプレンの生成・放出は低緯度帯に集中しており、主に熱帯雨林や周辺の広葉落葉林から放出している。一方、モノテルペンの生成・放出の分布は高緯度帯の寒帯林でも大きくなっている。高緯度帯でのモノテルペン生成・放出は夏季の3、4ヶ月に限定されるが、モノテルペンの活発な生成・放出を特徴とする植生が分布することで、地球規模の年間放出量にも影響する。低緯度帯に分布する植生はその生成・放出が比較的活発な特徴を持つが、年中の強い日射と高い温度によって生じる一定の放出によって、地球規模の年間放出量に影響を与える。

図(2)-3abは、産業革命以降のイソプレンとモノテルペンの年間放出速度の推移である。1990年代を対象にしたイソプレンとモノテルペンの年間放出量の推定値は、それぞれ410~601TgCyr⁻¹と33~480TgCyr⁻¹であり(Laothawornkitkul et al., 2009³⁴⁾)、本研究の1990年代の計算結果は、これらの範囲内にあった。1850年の値に比べて2000年の値が、イソプレンは減少し、モノテルペンは増加した。これはLathiere et al. (2005)⁸⁾の結果と一致する。この結果を、1850年の耕地分布のまま計算した値と比べると、イソプレン、モノテルペンともに、耕地面積の拡大を考慮した値のほうが小さくなっており、その差は徐々に拡大していた。1850年に対する2000年の比を取ると、耕地化によって、イソプレンの放出速度は約7%、モノテルペンは約2%の減少していた(図(2)-3cd)。

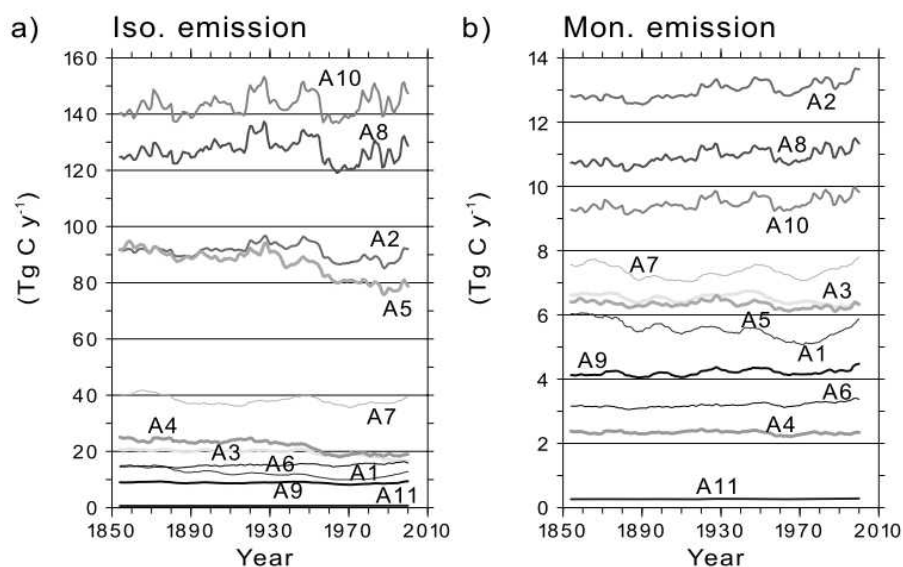


図(2)-2 2000年のイソプレン(左図)とモノテルペン(右図)の年間放出量の分布。

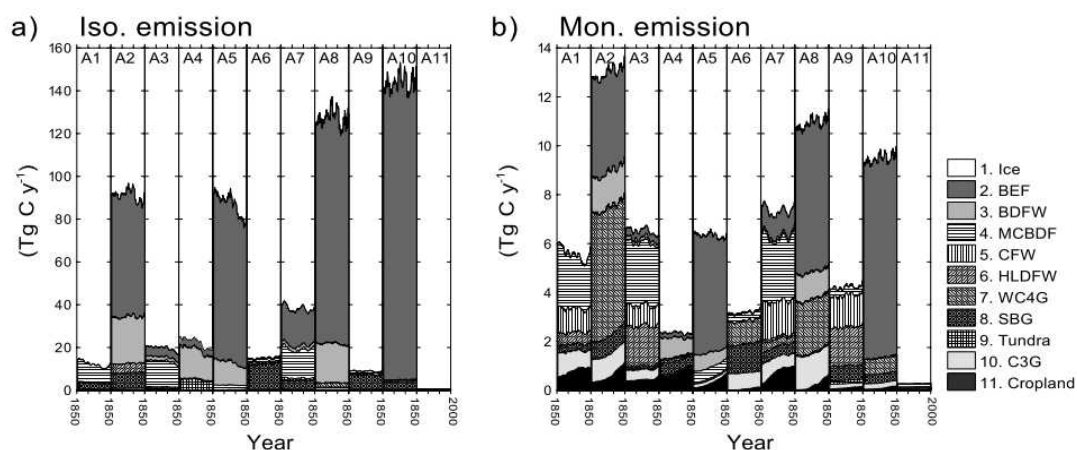


図(2)-3 1850年から2000年のイソプレン(a)とモノテルペン(b)の年間放出量(TgC yr^{-1})の推移。黒線は耕地化と気象要素の変化を考慮した結果、灰色線は耕地分布を1850年に固定した結果である。(c)(d)は1850年に対する放出速度の増減に及ぼす影響(%)で、温度(SAT)、日射(DSR)、気象要素(Climate; SAT+DSR)と耕地化(Landuse)を表す。(c)がイソプレン、(b)がモノテルペン。

気象要素の変化が植生からのVOC放出速度の推移に及ぼした影響を見ると(図(2)-3cd)、1850年から2000年の地表温度(SAT)の変化によって、イソプレンは約9%、モノテルペンは約7%の増加に寄与したと推定された。この結果は、産業革命以降、SATが徐々に高くなっていることと一致する。一方、日射量(DSR)は徐々に減少しており、イソプレンとモノテルペンの放出速度を減少させたと考えられる。1850年から2000年の減少率を見ると、その影響は気温変化よりも小さく、イソプレンで約2%、モノテルペンで極めて小さな減少となっていた。この原因は、8種のモノテルペンのうちオシメン以外は光に反応しないためである。これらを総合すると、1850年に対する2000年のイソプレンの年間放出量は、耕地拡大による減少効果が気象要素による増加効果を上回った結果、全体として減少していたことが分かる。一方、モノテルペンは、イソプレンと逆の理由によって、増加していたことが分かった。



図(2)-4 産業革命以降のイソプレン(a)とモノテルペン(b)のA1-A11における年間放出量の推定値。

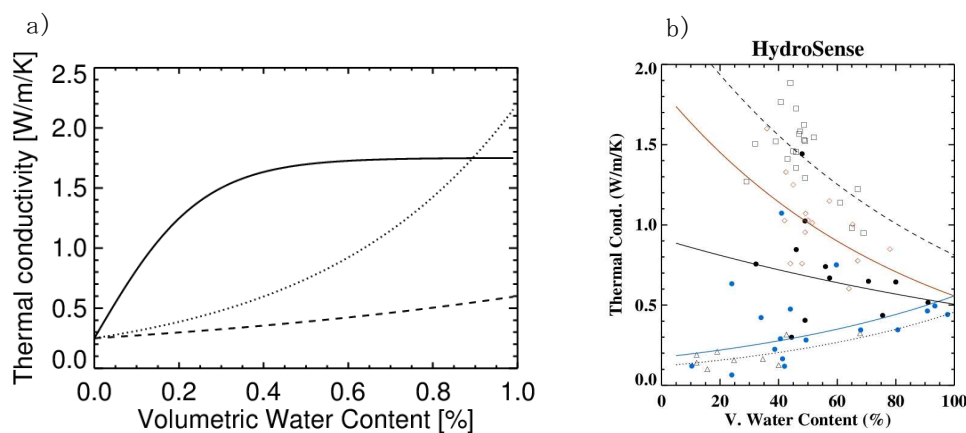


図(2)-5 地域A1-A11における1850年からの年間放出量の推移を植生タイプ毎に積み上げて示した。(a)がイソプレン、(b)がモノテルペン。

次に、地域による放出速度の推移の特徴について調べた。図(2)-4に地域A1-A11(図(2)-1)における1850年からのイソプレンとモノテルペンの年間放出量の推移を示す。イソプレンはA10(耕地化が進んでいない低緯度帯)、A8(南米)、A2(アフリカ)、A5(東南アジア)の順に放出量が高かった。A8は耕地化が進んでいるにもかかわらず、耕地化が進んでいないA10と似た推移となり、耕地化によるイソプレン放出の減少はあまりなかったことがわかる。A5では1850年から1880年頃にはA2と同規模の放出量が見積もられたが、1930年代から顕著に減少した。この減少が地球規模のイソプレン放出の減少に大きく寄与していたとわかる。このほか、A4における減少が比較的大きかった。一方、モノテルペンの年間放出量は、低緯度帯を含むA2、A8、A10の順に高く、いずれも1850年から似た推移となった。また、モノテルペンは高緯度帯を含むA7(北米)とA3(東アジア)も程度帯を含むA5などと同程度の大きな値が見積もられた。いずれの地域においても、A5のイソプレンのような顕著な減少はなかった。

イソプレンとモノテルペンの1850年からの年間放出量について、植生タイプごとの内訳を含めた各地域(A1-A11)での推移を見ると(図(2)-5ab)、イソプレンは熱帯常緑広葉樹(BEF)からの放出が大部分を占めるのに対し、モノテルペンは様々な植生タイプから放出することがわかる。また、耕作地(Cropland)はイソプレン放出にほとんど貢献しない一方、モノテルペン放出にはCroplandの拡大に伴う増加が見られる。その結果、耕地の拡大による自然植生からの放出量の減少が、モノテルペンでは部分的に相殺され、耕地拡大の効果はイソプレンにおいてより効果的であることが示された。図(2)-4でA5(東南アジア)のイソプレン年間放出量の顕著な減少を指摘したが、図(2)-5aを見るとBEFからのイソプレン放出量の減少が顕著であり、図(2)-5bでcroplandからのモノテルペン放出量の増加が見られることから、A5のイソプレン年間放出量の顕著な減少は、この地域でのBEFからCroplandへの転換によるものであったことが明らか示された。

(2) 陸面過程の高度化

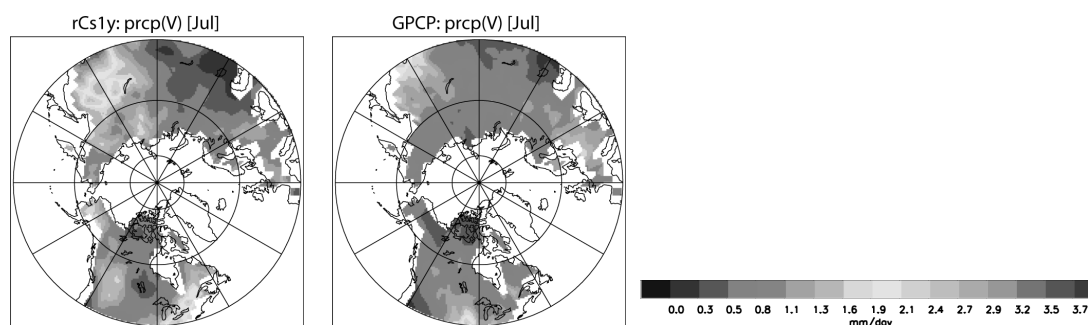


図(2)-6 (a) 全球気候モデルMIROCの陸面過程MATSIROで用いられている、土壌水分(Volumetric Water Content)と熱伝導率(Thermal conductivity)の関係。実線が従来の計算方法に従った場合。点線と破線が改良した計算方法で、点線が固相のみの場合を、破線が液相のみの場合を示す。氷点下の不凍水の存在を考慮する場合は容積比率に従って内分される。(b) アラスカにおける土壌水分(液相)と熱伝導率の観測値。挿入されている曲線は土壌層タイプごとの当てはめ曲線を示す(下から落葉層、有機層、A層、B層、C層)。

土壌層中の熱伝導率や熱容量といった熱的物性値の評価方法について、これまでの評価方法と実観測値に基づいた方法を比較した。これまでの評価方法では、凍結した土壌水分によって熱的な性質が影響を受けることが考慮されておらず、冬季の熱伝導率が過小評価されていた(図(2)-6a)。また、土壌表層近くの有機層は、大気との熱・水の交換の媒介領域として重要な意味を持つが、それが従来考慮されていなかった。それを反映するために、アラスカを含む寒冷域や、対照領域として中緯度(日本)内で行われた実地観測の結果を参照し、モデルで計算された温度分布や水分分布と比較することにより土壌物性値を逆問題的に推定した(図(2)-6b)。上記の改良により、夏季土壌の熱伝導率の過大評価を是正し、地表面下の熱・水状況の再現性が改善された。一方で、積雪の再現性不良による土壌の熱・水状況のバイアスが依然として残されているこ

とも明らかになった。今後、積雪についても観測データの収集・解析し、積雪過程の改良を行う必要があることがわかった。

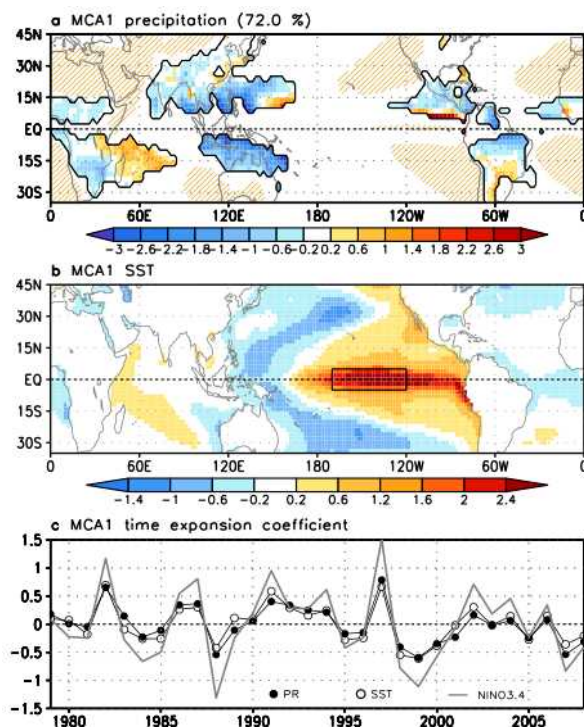
土壌物理過程の改良を取り入れたGCM実験では、特に高緯度域での季節性（年振幅や位相など）の再現性は全般的にようになった。また凍土物理の改善の影響は温帯や熱帯域で見られていることは、大気場のテレコネクションによりを通して影響が全球規模に伝播していることを示していると思われる。改善の効果は気温分布で特に顕著に見られた。降水分布については影響が見られたが、実験に用いたGCMが以前から持っていた高緯度域での多降水バイアスを減じる方向には働かなかった。土壌有機層の導入によって（特に夏季に）保水効果が増大して蒸発の増加し、それが高緯度内陸域での水リサイクリングによって一層の降水増加へ繋がったと思われる。蒸発（潜熱）の増加は、一方で顕熱の減少を通し夏季気温を抑え、夏季の高温バイアスの減少にも貢献しており、物性値の改変が悪方向にばかり作用したとは言いきれない。またモデル物理の改善は、気温場において冬の年々変動を大きくし、より現実に近くなることがしめされたが、高緯度域で降水の多い夏の降水場に対しての年々変動にはあまり影響がなかった（図(2)-7）。



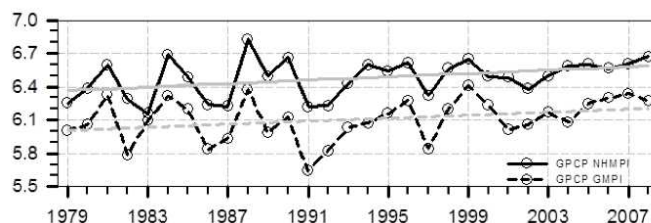
図(2)-7 7月降水量の年々変動分布。左はrCs1y条件のモデル出力。右はGPCP降水データの1979年～2008年の期間から計算したもの。

(3) モンスーンの変動特性と全球気候モデルによる再現性

図(2)-8aにGMP域を示す(黒線)。GMP域は、夏季の降水量が冬季よりも2mm/day大きく、夏季降水量が年間降水量の55%以上を占めているところである。ここで、夏季とは北半球では5-9月、南半球で11-3月とした。この閾値によって、モンスーン気候と隣接する乾燥域(夏季降水量が1mm/day以下、図(2)-8aのハッチ域)や熱帯性気候を区別する。MCA解析によると、様々なモンスーン域のGMPはENSOによって統合的に変動していることが明らかになった。あるモンスーン年から次のモンスーン年にかけて、広大な乾燥した貿易風や砂漠で隔てられた大部分の大陸のモンスーン域で、ENSOによって統合的に駆動されて変動しており、結合傾向は、北半球のほうが南半球よりも顕著であった。



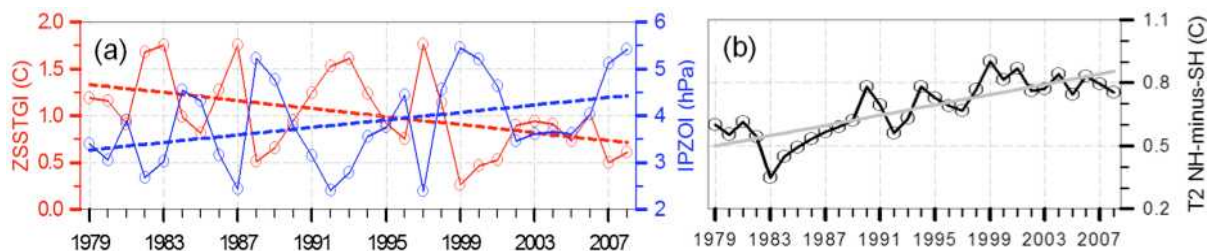
図(2)-8 (a)MCA解析によって抽出したGMP域(黒線)でのモンスーン年平均降水量の先行結合モード。全共分散の72%を占める。ハッチは乾燥域。(b) (a)に同じ。但し全球SST。(c)相関係数の時系列。実線は、Niño3.4域((b)の黒四角)でのSST偏差。



図(2)-9 NHSM降水量とGMPの1979-2008年(モンスーン年)の時系列とトレンド。

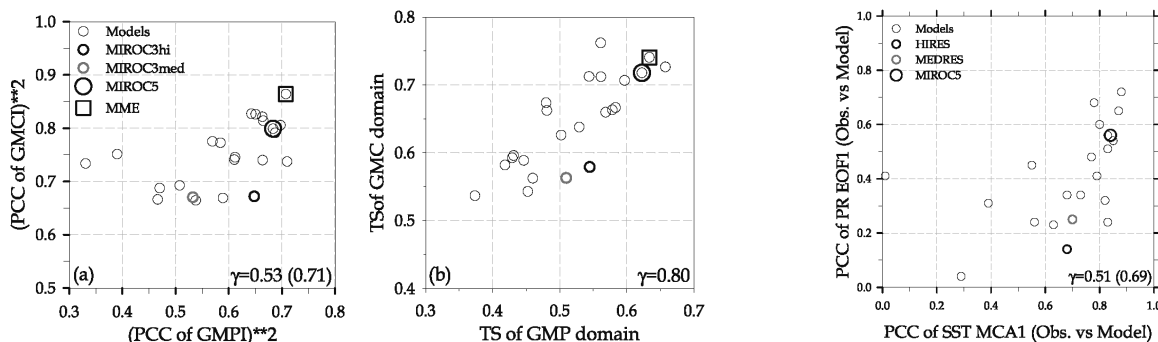
過去30年間のGMPの長期トレンドを見ると、増大傾向にあり、それは北半球夏季モンスーン(NHSM)の降水量の強化によるものであった(図(2)-9)。GMPの強化傾向は、主に太平洋の東西の温度コントラストが強化されたことに依っており、亜熱帯東部太平洋域での高気圧化とインド-西太平洋域の暖水域での低気圧化と連動している(図(2)-10a)。このメカニズムはNHSMと南半球夏季モンスーン(SHSM)の両方を強化する働きがある一方で、北半球(南半球)でのより強い(弱い)温暖化傾向のために南北半球間での熱コントラストを形成し(図(2)-10b)、NHSMを強化してSHSMを弱体化していた。CMIP3の将来予測結果で、大部分のモデルが温室効果ガスの増大に伴ういわゆるエルニーニョ的温暖化による東部太平洋の温度上昇を予想しているように、太平洋の東西方向の熱的コントラストの強化は自然変動の結果だと考えられる。一方で、将来の気温予測の結果において北半球で寄り強い温暖化傾向が顕著に見られることから、南北半球の熱コントラストの強化は人為起源の強制力の結果ではないかと考えられる。また、全球夏季モンスーンの強化によって熱帯気候の年変化が強化されるだけでなく、砂漠や貿易風との相互作用により、湿潤域がより湿

潤になり、乾燥域がより乾燥になる傾向も強化されることが明らかになった。



図(2)-10 (a) SSTの東西傾度(ZSSTGI、赤線で左スケール)とインド-太平洋振動指数(IPZOI、青線で右スケール)の年々変動(実線)とトレンド(破線)。ZSSTGIはSST (20S-20N, 160W-80W) - SST (40S-40N, 120E-160W)で算出。IPZOIは地表気圧の東西傾度 (SLP (40S-40N, 160W-110W) - SLP (20S-20N, 50E-150E)) で導出。(b) 2m気温の北半球(0-40N)と南半球(0-40S)の差の時系列。ERAとNCEP2の再解析データを使用。

次に、本研究で用いるMIROC5によるモンスーン変動の再現性について調べた。GM域の同定に用いる降水と850hPa風速場の年平均と季節変化の気候値はMIROC5のほうがMIROC3よりも良く再現されていた。その結果、MIROC5はMIROC3を含むCMIP3のCGCMよりもGMPや全球モンスーン循環(GMC)の強度や領域を良く再現していた(図(2)-11)。月平均のNiño 3インデックスを解析したところ、エルニーニョの振幅と周期はMIROC5のほうがMIROC3よりも良く再現されていた。但し、熱帯太平洋のSSTの非対称性によって間接的に診断されるENSO力学の非線形性の再現性は、MIROC5やMIROC3でもCMIP3のCGCMでもまだ十分ではない(図省略)。観測データのMCA解析で示されたGMPとENSOの年々変動の関係(図(2)-8)はCMIP3の結果でも顕著に見られており、その関係の再現性はMIROC5でMIROC3よりも向上した。



図(2)-12 観測-モデル間のPCCの

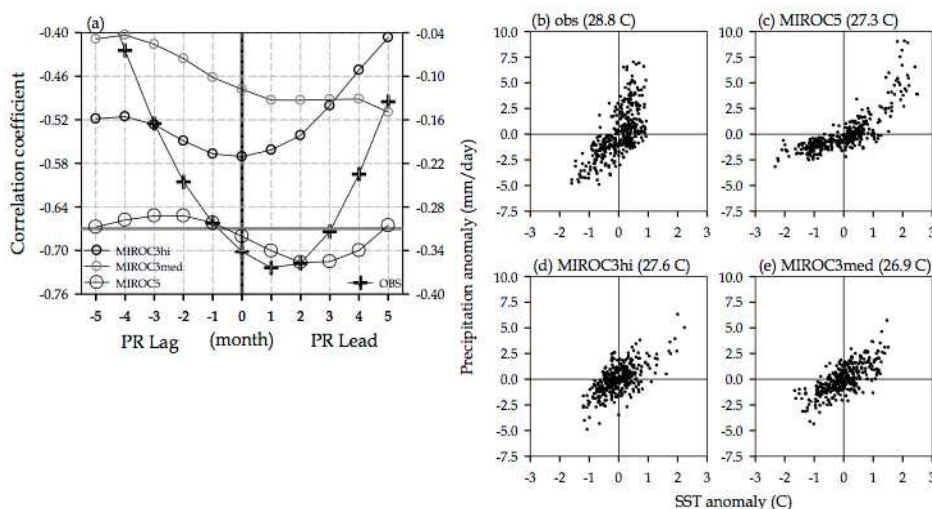
図(2)-11 (a) GMP指数の空間相関係数(PCC)の自乗(x軸)とGMC指数のPCCの自乗(y軸)。右上のプロットほど再現性がよい。(b) GMP域(x軸)とGMC域(y軸)の的中率(threat score)。右下の数値は各々の回帰係数。解析域は0°-360°E, 40°S-45°N。

関係。y軸はGMPのEOF第1成分、x軸は熱帯SSTのMCA第1成分。両者が線形な関係(回帰係数0.51)にあることから、GMPの信頼性は熱帯SSTの再現性に依存していることを示唆。

また、GMPのEOF第1成分の観測-モデル間の空間相関係数(PCC)と、熱帯SSTのMCA第1成分のGMPのEOF第1成分のPCCの関係を調べたところ、両者には回帰係数0.51で線形な関係が見られ、GMPの信頼性は熱帯SSTの再現性に大きく依存していることが明らかになった(図(2)-12)。そこで、MIROC5におけるエルニーニョ再現性向上に寄与したメカニズムについてさらに解析した。特に着目したのは太平洋のWalker循環である。熱帯では、熱帯太平洋の状態を制御し、エルニーニョの初期状態を強化するBjerknesフィードバックが重要なプロセスであるが、その発生だけでなく強化にも、Walker循環は重要な役割を持っているからである。観測データでは、Walker循環の気候値的な最大上昇域(115°-120°E, 5°S-5°N)で平均した降水量は、Niño 3インデックスと負相関があり、1~2ヶ月先行して極大値が見られる(図(2)-13a、+印)。また、熱帯中部太平洋(160°E-200°E, 5°S-5°N)でSSTの正偏差が見られた後、降水が強化される(図(2)-13b)。これらの結果から、エルニーニョはWalker循環の弱まりがきっかけになって発生し、一端形成されると、熱帯中部太平洋の対流活動によってBjerknesフィードバックが増幅されることを示唆している。

観測と比較すると、MIROC3の2つの解像度(MIROC3hiとMIROC3med、図(2)-13a、小さい○印)では、その正のフィードバック過程を再現していないことが分かった。相関係数がすべての先行/遅延期間で有意でなく(図(2)-13a)、SST偏差が2度まで上がっても強い対流は見られなかった(図(2)-13de)。一方MIROC5では、Bjerknesフィードバックが相応の役割を担っている様子が再現されている(図(2)-13a、大きい○印)。降水の減少によってWalker循環が抑制されるとエルニーニョが観測と同じような先行時間で励起されていた。さらに、SST偏差が2°C以上の領域で、強化された深い対流が見られた(図(2)-13c)。従って、MIROC5では、赤道中部太平洋での対流活動の強化による、より現実的なBjerknesフィードバックによって、エルニーニョの再現性が向上したと考えられる。

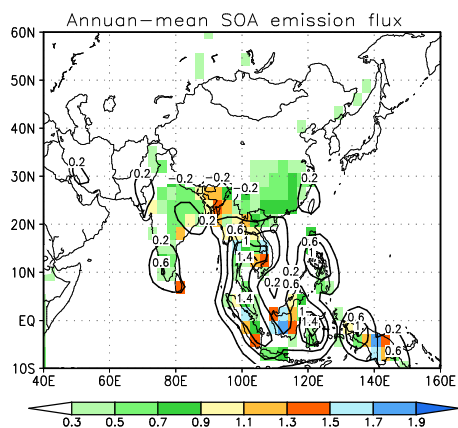
また、アジアモンスーンの長期変化が、地表面状態(土地利用、海面水温変化等)、エアロゾル、温室効果ガスなどの長期的な強制の変化に対し、異なる応答をする可能性を、サブテーマ3及び4と協力した観測データ解析から示されたが、1700年から1850年にかけてのインド・中国での(森林から農耕地への)顕著な地表面改変に対応して、モンスーンのオンセット時期に選択的に顕著な降水量変化の起こることが、GCM実験でも示された(Yamashima et al., 2011³⁾)。



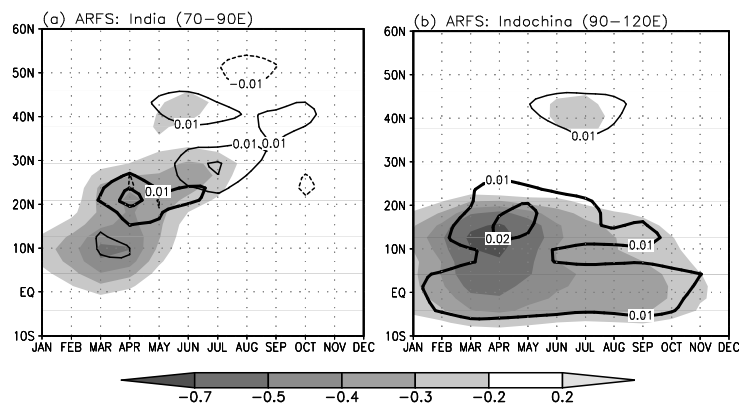
図(2)-13 Wakler循環の最大上昇域(115°-120°E, 5°S-5°N)での月平均降水量偏差と、月平均ニーニョ3インデックスとの先行-遅延相関係数。観測(+)のスケールは右y軸、MIROC(O)のスケールは左y軸。(b)-(e) 赤道中部太平洋における月平均SST偏差(x軸)と月平均降水量偏差(y軸)の散布図。(b)が観測、(c)がMIROC5、(d)がMIROC3hi、(e)MIROC3med。各図上部の括弧内の数値は、解析域で平均したSSTの気候値。

(4) VOC発生量変化の気候影響

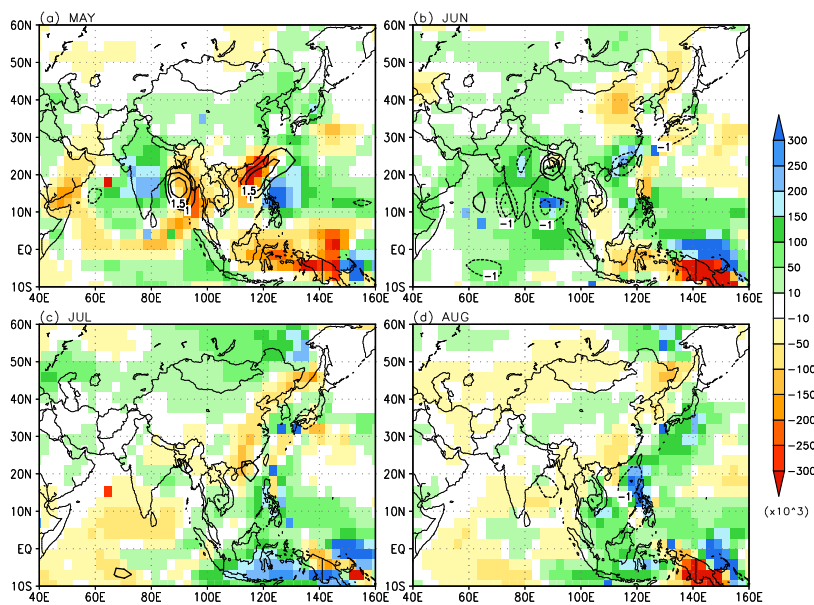
2つのVOC放出速度の推定方法によるSOAの差は、全体として南アジア・東南アジアなど植生のあ
る地域の大部分でEXPのほうがCTLよりも大きく、その増大幅はCTLでの熱帯林からの放出速度と同
程度だった(図(2)-14)。SOAの増大によってOCエアロゾルの光学的厚さ(AOD)がインド亜大陸
(IS)、海洋大陸(MC)東南アジア(SEA)の広い地域で増大し、増大幅は、4-5月に最大になった(図
(2)-15、太実線)。AODが増大すると日射の吸収が増大し、地表での下向き短波放射が減少する(図
(2)-15、影)。これはエアロゾルの直接効果であるが、広域での熱的な構造や大気循環を変えるほ
どの大きさではなかった。しかしながら、エアロゾルの放射強制力はモデルの内部変動を通して、
モデルの局地的な水循環の結果に影響を与えたと考えられる。図(2)-16に降水の差(EXP-CTL)と鉛
直積分した硫酸エアロゾルの差(EXP-CTL)を示す。これを見ると、5月にベンガル湾と中国南東部
の海上で降水が強化し、その領域で硫酸エアロゾルが大きく減少していた。一方、6月に海上で降
水が減少した領域では、硫酸エアロゾルが増大していた。このような硫酸エアロゾルと降水の負
の相関関係は、一般に、エアロゾルの増大によって雲水の凝結核が増大して降水が減少するとい
われていることと一致する。ここで、降水変動の主な部分は海上にあるのは、SPRINTARSではDMS
が主に海洋から放出されているためだと考えられる。同様の解析を他のエアロゾル種についても
行ったが、降水との明確な関係は見いだされなかった。



図(2)-14 2次有機エアロゾル(SOA)の年平均放出速度。色がCTL、コンターがEXP-CTL。単位は 10^{-11} kg/m²/s。



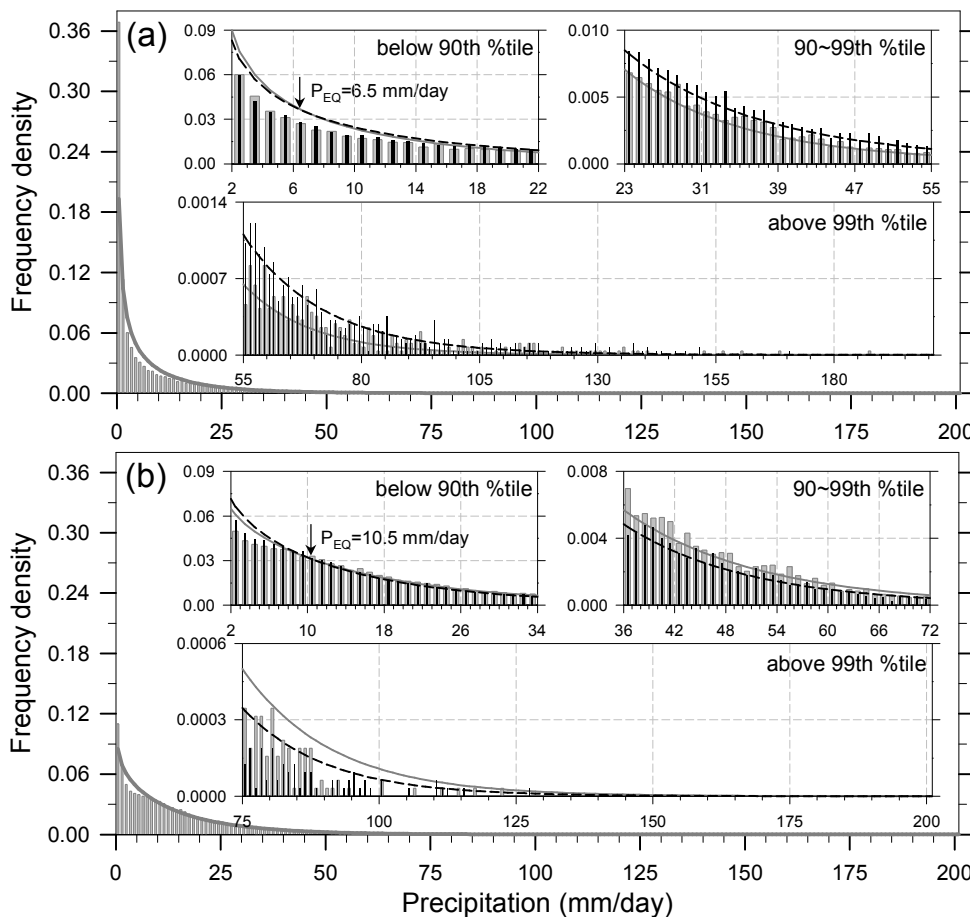
図(2)-15 地表面でのエアロゾルによる放射強制力(ARFS, W/m²)の時間-緯度断面。影がの差(EXP-CTL)、太実線が有機炭素の光学的厚さ(AOD)の差、細実線が土壌粒子のAODの差。(a)がインド亜大陸(70-90° E)、(b)がインドシナ半島(90-120° E)。



図(2)-16 5~8月の降水量(mm/day、等値線)の差(EXP-CTL)、と鉛直積分した硫酸エアロゾルの数密度(#/cm²、色)の差。コンターは0.5mm/day間隔で、 ± 1 mm/day以上の差について描いている。

領域スケールでは、特に5-6月に、いくつかの海洋上の領域でエアロゾルによる降水の変化が見られた。そういった変化に付随して、日降水量の頻度や強度にも変化が現れる可能性があると考え、日降水量の統計的な特徴について解析した。降水量は必ず正の値をとり、非対称な頻度分布を持っている。従って、ガンマ分布を適用して統計的な特徴を解析するのが適していることが、これまでの研究で知られている。そこで、40-160° E, 10° S-60° Nの海上域について、40年間の日降水量の頻度分布を調べた。ただし、月平均降水量の差が5月(6月)に+1(-1) mm/day 以上(以下)の格子点で、且つ降水のあった日(日降水量0.1 mm/day以上)のみを対象とする。(降水量が非常

に小さい場合、数値的な誤差や丸め誤差を除外するためである。) 頻度分布を求めた後、最尤法によってガンマ分布の形(係数)を求めた。



図(2)-17 40-160° E, 10° S-60° Nの海上での日降水量(mm/day)のヒストグラム。灰色がCTL、黒がEXP。降水なしは除いている。曲線は、ヒストグラムに対して最尤法で求めたガンマ分布。実線がCTL、破線がEXP。挿入図は90%以下、90~99%、99%以上の日降水量イベントの拡大図。閾値はCTL実験のガンマ分布CDFから決めた。(a)5月。降水量の差が+1 mm/day 以上の格子点が対象。(b) 6月。降水量の差が-1 mm/day 以下の格子点が対象。

図(2)-17に降水日の周波数密度のヒストグラムとそれに対応するガンマ分布を、CTLは灰色線、EXPは黒線で示す。ヒストグラムは双曲線のガンマ分布とよく一致していた。一致性をコルモゴロフ-スミルノフ検定で調べると、99%の信頼限界で有意と判定された。5月は、降水日の頻度と強度はEXPのほうがCTLよりも増加している(図(2)-17a)。その結果、標準以上および強い降水イベントの寄与は増大し、弱い降水や標準的な降水の寄与は減少していた。すなわち、90%以下の部分(図(2)-17a、左上の挿入図)の降水強度の頻度はEXPの方が小さく、90~99%(図(2)-17a、右上の挿入図)と99%以上(図(2)-17a、下の挿入図)の降水強度の頻度はEXPの方が大きかった。具体的には、EXPはCTLと比べて、降水日数が201日増加し、降水量が6.5mm/day以下(P_{Eq})の降水頻度が1754日減少した。合わせると、 P_{Eq} を上回る降水イベントが1955回、EXPで増加したことになる。興味深いこ

とには、90%以上の降水強度を持つ降水日数の増加は、全体の減少の60%に相当していた。極端に強い降水の全体の降水頻度の変化に対する顕著な寄与は、平均降水強度が小さくなる6月にも明らかに見られた。但し、6月の降水発生頻度の変化は5月と逆の様相を示している(図(2)-17b)。それでも、極端に強い降水イベントの変化は、降水頻度の変化全体の40%を占めていた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

植生起源の揮発性有機炭素(VOC)の発生速度の推定において、植生タイプ、気温、日射等の要因が重要であることは認識されていたが、植生タイプの変化だけでなく、気温や日射の推移も考慮して、1850~2000年の全球スケールでの植生起源VOCの推移を算定した。さらに、150年間の推移における各要因の寄与率を定量的に初めて評価することにより、気温変化の影響が植生改変の影響と同程度に大きいことを示した。

全球気候モデル(CGCM)による気候変動研究において、モンスーンの変化は重要な要素であるが、モンスーンは伝統的に領域スケールでの振る舞いが注目されてきたため、CGCMにおけるモンスーンの再現性はあまりよく調べられていなかった。そこで、全球モンスーンの解析方法を導入することにより、CGCMにおけるモンスーンの再現性を定量的に示すことができた。その結果、本研究で用いるMIROC5は、従来のCGCMよりもモンスーンとENSOの再現性が大きく改善していることを示した。さらに、モンスーン再現性の向上が、Bjerknesフィードバックの再現性向上と関係していることを明らかにした。

BVOC変化による気候影響評価は、これまで放射強制力の算定にとどまっていたが、CGCMによる2組のタイムスライス実験を行うことにより、大気循環との相互作用や雲降水システムにおける間接効果も含めて、アジア域の気候影響を初めて示すことができた。エアロゾル変化による直接効果の放射強制力はあまり大きくなかったものの、硫酸エアロゾルの変化と降水量変化の負相関が見いだされた。また、エアロゾルの変動が日降水量の頻度や強度について統計的に特徴を解析することにより、SOAが増大した場合に強い降水が増大することを定量的に示した。

(2) 環境政策への貢献

本サブテーマで用いた土地利用変化のデータはIPCCの第5次報告書において共通データとして提供されたもので、これを用いて植生によるVOC発生量の変化を推定し、気候への影響評価を行う基礎資料を得た。また、植生によるVOC発生量の推定において気温が重要な要素になることを示した。これらについて、国際的な気候予測研究の枠組みでも検討してもらえよう、研究成果の普及に努める。

本サブテーマで用いたMIROC5は、IPCCの第5次報告書の温暖化予測実験でも用いられている。モンスーン循環と降水、およびそれらのエルニーニョ変動との関係は、温暖化による気候変動予測においても重要な課題の1つであり、IPCCの第5次報告書に向けたMIROC5による実験結果を用いてモンスーン変動の再現性について詳細な解析したことにより、今後のメカニズム解明を含めて、温暖化におけるモンスーン変動予測の道筋になると期待される。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで用いたMIROC5は、21世紀気候変動予測革新プログラム（以下、革新プロ）で開発・改良されたモデルである。また、植生変化とそれによるエアロゾル変動の気候影響を評価する数値実験では、IPCCの第5次報告書（AR5）に向けた気候変動予測実験に準拠した諸条件で実験を行った。また環境省地球環境研究総合推進費戦略的課題S-5「地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究」（以下、推進費S5）ともワークショップ等を通じて随時情報交換を行っている。このように、革新プロ、IPCC AR5及び推進費S5と技術的な部分及び科学的な部分の両方で連携を取りながら推進しており、互いに知見を共有することによって、地球環境変動予測に総合的に資することを目指している

この他、大気-陸面間の熱・水交換における土壌物理過程の改良は、アラスカ大学フェアバンクス校の北極圏国際研究センター（International Arctic Research Center, IARC）と協力して進めている。また、本研究はモンスーンアジア水文気候研究計画（Monsoon Asia Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative, MAHASRI）が対象としている地域を含む土地被覆・植生変化の影響評価を行うことから、MAHASRIでの降水過程と地表面過程の相互作用の解明にも資するものである。また、平成19年度から進められているモンスーンアジア統合地域研究計画（Monsoon Asia Integrated Regional Study, MAIRS）が対象としている地域も含まれることから、国際会議等を通じて情報交換を行っている。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

< 論文（査読あり） >

- 1) Takahashi, H., T. Yoshikane, M. Hara, K. Takata, and T. Yasunari, (2010): High-resolution modelling of the potential impact of land-surface conditions on regional climate over Indochina associated with the diurnal precipitation cycle. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.2119.
- 2) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari, (2011): Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs. *J. Climate*, **24**, 5604-5618.
- 3) Takahashi, H. G. (2011): Long-term changes in rainfall and tropical cyclone activity over South and Southeast Asia, *Adv. Geosci.*, **30**, 17-22. doi:10.5194/adgeo-30-17-2011.
- 4) Yamashita, R. K. Takata, J. Mastumoto and T. Yasunari (2011): Numerical study of the impacts of land use/cover changes between 1700 and 1850 on the seasonal hydroclimate in monsoon Asia, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **89A**, 291-298.
- 5) Wang, B., J. Liu, H.-J. Kim, P. J. Webster, and S.-Y. Yim, 2011: Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008). *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-011-1266-z, published on-line.

<査読付論文に準ずる成果発表>（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可。）
特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>
特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 須藤健悟, 高田久美子, 安成哲三 “アジア域における大気化学・エアロゾル・陸域植生結合場の変動とその気候影響”, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉幕張メッセ（幕張国際会議場）, 2009年5月.
- 2) 高田久美子, 斉藤和之, 山島亮二, 安成哲三 “1700年から1850年の耕地化が夏季のアジアモンスーンに与えた影響”, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉幕張メッセ（幕張国際会議場）, 2009年5月.
- 3) 山島亮二, 松本淳, 高田久美子 “1700年から1850年の耕地化が東アジア域における土壌状態及び水循環の季節変化に及ぼした影響”, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉幕張メッセ（幕張国際会議場）, 2009年5月.
- 4) 山島亮二, 松本淳, 高田久美子 “1700年から1850年にかけて進行した耕地化がアジアモンスーンの開始・終了に及ぼした影響”, 日本気象学会2009年春季大会, つくば国際会議場, 2009年5月.
- 5) 斉藤和之, 山口悟, M. Lehning, and M. Shulski “雪の熱的物性値の気候別分布”, 雪氷研究大会(Poster), 2009年.
- 6) 斉藤和之 “全球気候モデルの熱物理過程表現に対する高緯度土壌熱・水変動の感度実験 - 気候値と年々変動-”, 雪氷研究大会(Poster), 2009年.
- 7) Saito, K. “Subsurface hydro-thermal regime and the atmospheric hydroclimate by a climate model” European Geosciences Union General Assembly 2009, Vienna, Austria, April 22, 2009. (Poster)
- 8) Saito, K. “The third Workshop on Arctic System Modeling”, Université du Quebec à Montreal, July 16-17, 2009. (Workshop participation)
- 9) Saito, K. “Subsurface freeze/thaw processes and near-surface hydroclimate by climate modeling”, MOCA-09, IAMAS-IAPS0-IACS Joint Assembly, Montreal, Canada, July 22, 2009. (Poster)
- 10) Matsumoto, J., R. Yamashiha and K. Takata ” Impacts of land use changes between 1700 and 1850 on monsoon seasonal changes”, 日中韓気象学会, つくば, 2009年
- 11) Matsumoto, J., R. Yamashiha and K. Takata “Impacts of Historical Land Use Changes between 1700 and 1850 on Water Cycle over Eurasia “GEWEX/iLEAPS conference, Melbourne, 2009.
- 12) Yamashiha, R., J. Matsumoto and K. Takata “Impacts of historical land use changes between 1700 and 1850 on the onset and retreat of the Asian summer monsoon”

GEWEX/iLEAPS conference, Melbourne, 2009

- 13) 齊藤和之, Trombotto Dario “南半球における過去と現在の凍土分布 GCM出力に基づいた推定と観測との比較”, 2010年度雪氷研究大会(ポスター), 仙台, 2010年9月.
- 14) 齊藤和之 “第四紀後期の永久凍土動態 日本列島での潜在的分布”, 2011年JpGU(ポスター), 幕張, 2011年5月.
- 15) Saito, K., S. Marchenko, D. Trombotto, N. Bigelow, V. Romanovsky, K. Yoshikawa, and J. Walsh “Past and present permafrost, distribution in the Northern and Southern Hemisphere: comparison of the GCM-based mapping with the observations”, The 18th International Quaternary Conference, Bern, Switzerland, July 24, 2011.
- 16) 齊藤和之 “第四紀後期の永久凍土動態 III 北東アジアと日本列島での潜在的分布”, 2010年度雪氷研究大会 (ポスター), 長岡, 2011年9月.
- 17) 田中克典, Kim Hyung Jim, 齊藤和之, 高橋洋, 高田久美子 “1850-2005年のVOC(イソプレン・モノテルペン)放出のGlobal-Mapの作成”, 生物起源微量ガスワークショップ2010プログラム, 京都, 2010年11月15-16日.
- 18) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari “Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs”, *Proceedings of EGU General Assembly 2011*, **13**, EGU2011-2351, April 3-8, Vienna, Austria.
- 19) Tanaka, K. “Estimation of BVOC”, *Proceedings of EGU General Assembly 2011*, **13**, EGU2011-2351, April 3-8, Vienna, Austria.
- 20) Takahashi, H. G., H-J. Kim, K. Tanaka, K. Takata, K. Saito, and T. Yasunari “Sensitivity study on the impacts of biogenic VOC on the Asian monsoon climate in dry and wet seasons using MIROC5”, European Geosciences Union General Assembly 2012, April 22-27, 2012, Vienna, Austria.
- 21) Takahashi, H. G., H-J. Kim, K. Tanaka, K. Takata, K. Saito, and T. Yasunari “Sensitivity study on the impacts of biogenic VOC on the Asian monsoon climate in dry and wet seasons using MIROC5”, 10th AeroCom Workshop, October 3-6, 2011, Fukuoka, Japan.
- 22) Kim, H.-J., K. Takata, B. Wang, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Yokohata, and T. Yasunari “Global monsoon, El Niño, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs”, *Proceedings of Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology*, p. 37, October 24-26, 2011, Busan, Korea.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Ramankutty, N., and J. A. Foley, (1999): Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochem. Cycles*, **13** (4), 997-1027.
- 2) Feddema et al., (2005): Feddema, J., K. Oleson, G. Bonan, L. Mearns, W. Washington, G. Meehl, D. Nychka, 2005. A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations. *Clim. Dyn.*, **25**, 581-609, DOI:10.1007/s00382-005-0038-z.
- 3) Yamashima, R., K. Takata, J. Matsumoto and T. Yasunari, (2011): Numerical Study of the Impacts of Land Use/Cover Changes Between 1700 and 1850 on the Seasonal Hydroclimate in Monsoon Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89A**, 291-298, DOI:10.2151/jmsj.2011-A19.
- 4) Takata, K., K. Saito, T. Yasunari, (2009): Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation. *PNAS*, **106**, 9586-9589.
- 5) Kuhn, U., et al., (2004): Seasonal differences in isoprene and light-dependent monoterpene emission by Amazonian tree species. *Glob. Change Biol.*, **10**, 663-682.
- 6) 竹川秀人, 唐澤正宣, 山崎哲, (1999): Organic Aerosol Fomation by Photochemical Reaction of n-Undecane. *エアロゾル科学・技術研究討論会*, **16**, 136-138
- 7) Guenther, A., et al., 1995: Global-model of natural volatile organic-compound emissions. *J. Geophys. Res.*, **100(D5)**, 8873-8892.
- 8) Lathiere J, Hauglustaine DA, De Noblet-Ducoudre N, Krinner G, Folberth GA., (2005): Past and future changes in biogenic volatile organic compound emissions simulated with a global dynamic vegetation model. *Geophysical Research Letters*, **32(20)**.
- 9) Tsigaridis K, Krol M, Dentener FJ, Balkanski Y, Lathiere J, Metzger S, Hauglustaine DA, Kanakidou M., (2006): Change in global aerosol composition since preindustrial times. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6:5143-5162.
- 10) Pielke et al., (2007): Pielke Sr, R. A., G. Marland, R. A. Betts, T.N. Chase, J.L. Eastman, J. O. Niles, D. S. Niyogi and S.W. Running, 2002: The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **360**, 1705-1719, doi: 10.1098/rsta.2002.1027
- 11) Yasunari, T., (1987): Global Structure of the El Nino/Southern Oscillation Part II. Time Evolution. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 81-102.
- 12) Morinaga, Y., K. Masuda, M. Nishimori T. Yasunari, (2000): Relationships between Eurasian snow cover and the Indian summer monsoon rainfall. *Proceedings of the*

International Conference on Climate Change and Variability, 293-298.

- 13) Saito, K., M. Kimoto, T. Zhang, K. Takata, and S. Emori (2007): Evaluating a high-resolution climate model: Simulated hydrothermal regimes in frozen ground regions and their change under the global warming scenario, *J. Geophys. Res.*, **112**, F02S11, doi:10.1029/2006JF000577.
- 14) Slingo, J. M., (2003): Overview Dynamical Theory ENSO-Monsoon Interactions Prediction. *Monsoon*, 1365-1370.
- 15) Chung SH, Seinfeld JH., (2002): Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res-Atmos.* **107(D19)**.
- 16) Claeys M, Graham B, Vas G, Wang W, Vermeylen R, Pashynska V, Cafmeyer J, Guyon P, Andreae MO, Artaxo P, Maenhaut W., (2004): Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. *Science*, **303**(5661):1173-1176.
- 17) Watanabe M, Suzuki T, O'ishi R, Komuro Y, Watanabe S, Emori S, Takemura T, Chikira M, Ogura T, Sekiguchi M, Takata K, Yamazaki D, Yokohata T, Nozawa T, Hasumi H, Tatebe H, Kimoto M., (2010): Improved Climate Simulation by MIROC5. Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Clim.*, **23**(23):6312-6335.
- 18) Wang, B. and Q. Ding, (2006): Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06711, doi:10.1029/2005GL025347.
- 19) Wang, B. and Q. Ding, (2008): Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics. *Dyn. Atmos. Ocean*, **44**, 165-183.
- 20) Wang, B., H.-J. Kim, K. Kikuchi, and A. Kitoh, (2011): Diagnostic metrics for evaluation of annual and diurnal cycles. *Clim. Dyn.*, **37**, 941-955.
- 21) Guilyardi, E., A. Wittenberg, A. Fedorov, M. Collins, C. Wang, A. Capotondi, G. J. van Oldenborgh, and T. Stockdale, (2009): Understanding El Niño in ocean-atmosphere general circulation models: Progress and challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 325-340.
- 22) Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron, (2006): Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3181-3210.
- 23) Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, (2005): Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- 24) Hurtt GC, Frohking S, Fearon MG, Moore B, Shevliakova E, Malyshev S, Pacala SW, Houghton RA. (2006): The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Glob. Change Biol.* **12**(7):1208-1229.
- 25) Sakulyanontvittaya T, Duhl T, Wiedinmyer C, Helmig D, Matsunaga S, Potosnak M, Milford J, Guenther A., (2008): Monoterpene and sesquiterpene emission estimates for the United States. *Environ. Sci. Technol.* **42**(5):1623-1629.

- 26) Takata, K., S. Emori, T. Watanabe, (2004): Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, **38**, 209-222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.
- 27) Yin, P., A. Gruber, and P. Arkin, (2004): Comparison of the GPCP and CMAP merged gauge-satellite monthly precipitation products for the period 1979-2001. *J. Hydrometeor.*, **5**, 1207-1222.
- 28) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, (2000): Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.
- 29) 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. Climate*, **15**, 333-352.
- 30) Tanaka, K., et al., (2012): Both cultivation and warming influence isoprene and monoterpenes emissions at regional and global scale from 1850-2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*, submitted.
- 31) Sudo, K. M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto, (2002): CHASER: A global chemical model of the troposphere: 1. Model description. *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4339, doi:10.1029/2001JD001113.
- 32) Lean, J., G. Rottman, J. Harder, and G. Kopp, (2005): SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability. *Sol. Phys.*, **230**, 27-53.
- 33) Sato, M., J. E. Hansen, M. P. McCormick, and J. B. Pollack, (1993): Stratospheric aerosol optical depth, 1850-1990. *J. Geophys. Res.*, **98**, 22 987-22 994.
- 34) Laothawornkitkul J, Taylor JE, Paul ND, Hewitt CN. (2009): Biogenic volatile organic compounds in the Earth system. *New Phytol.* **184**(1):276-276.

(3) アジアモンスーン地域における20世紀の気候変動・変化に関するデータ解析

首都大学東京都市環境科学研究科

松本 淳

<研究協力者>

首都大学東京都市環境科学研究科 赤坂郁美・平野淳平・山島亮二・瀬戸芳一・上村晃太郎・Hoang Anh Nguyen-Thi

平成21～23年度累計予算額：25,243千円（うち、平成23年度予算額：8,384千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 東南アジア諸国や、日本、中国などの東アジア地域を対象として、過去数十年から100年間程度の期間における日照時間・雲量・降水量などの気象データを収集し、アジア域における長期的な気候変化の実態を解明するとともに、気候モデルより算出される変化と比較することでモデル計算の妥当性を評価する材料を提供する目的で研究を行った。

日本について、1901年以降の気象官署における日降水量データを使用して、冬の期間および冬季における冬型天候分布の出現日数の長期変化を解析し、20世紀前半以降、冬の期間や冬型天候分布出現日数が統計的に有意に減少しており、冬季東アジアモンスーンが長期的に弱化していることが示唆された。また日降水量により夏季の降雨特性の長期的変化を解析した結果、20世紀を通じてみられた強雨に伴う降水量の増加傾向が、近年では逆に減少傾向に転じている地域が東北地方などにみられることが明らかとなった。

広域的なアジアモンスーン地域における20世紀後半以降の降水量、気温、日照時間、雲量の長期変化傾向とその季節性を、1961年から2000年または2006年までの期間でのトレンドを計算し、空間分布を明らかにした。降水量には冬季に東南アジアで、広域的な減少傾向がみられた。月平均気温には春季と夏季を中心として、中国大陸の四川盆地付近や華南で有意な気温低下傾向がみられた。雲量には、タイなどインドシナ半島内陸部で、夏季から秋季に有意な減少傾向がみられた。日照時間には、全ての季節でインドシナ半島内陸部において有意な減少傾向がみられた。また、タイ及びミャンマー南部とフィリピンでは夏季に月平均雲量及び月降水量の減少、月平均気温の上昇といった乾燥化に関連する長期的な傾向が20世紀後半以降に現れた。また、フィリピンにおける夏の雨季入りの長期変化や、ベトナムにおける強雨と台風活動との関係を明らかにし、20世紀終盤と21世紀初頭に異なる変化傾向がみられることを示した。

[キーワード] モンスーン、長期気候変動、降雨特性、雨季開始日

1. はじめに

本研究では、アジアモンスーン地域を対象として、20世紀前半以降の長期的な気象データを収集し、過去数十年から100年間程度の期間における降水や天候の長期変動にみられる季節性・地域性を詳細に解明するためにデータ解析を行った。

2. 研究開発目的

アジアモンスーン地域における過去の天候や降水量の変化について、季節性と地域性を詳細に解明することを目的として研究を進めた。各国の気象機関から収集した20世紀前半以降の日照時間や降水量のデータを使用して、アジア地域における広域的な降水量や天候の長期変動傾向の季節性・地域性を詳細に解明し、最終的には得られた結果を気候モデルより算出される変化と比較することによって、モデル計算の妥当性を評価する材料を提供する目的で研究を行った。

3. 研究開発方法

(1) 日本における20世紀前半以降の冬の天候および夏の強雨発生の長期変動の解明

1901年以降の日降水量データが得られる日本の気象官署における日降水量データを使用し、日本において天候からみた「冬季」の長さが、1901年から2009年までの期間に、どのように変化してきたのかを解明することを目的とした解析を行った。日降水量1 mm以上の日を各地点における降水日とし、日本海側地域にまとまった降水域が存在し、太平洋側地域に降水がみられない日の天候分布を「冬型天候分布」と定義した。その上で、各年について、第56半旬(10月3日－10月7日)から第24半旬(4月26日－4月30日)までの半旬毎に冬型天候分布の出現割合を求めた。半旬あたりの「冬型天候分布」出現割合が20%以上の期間を「冬季」と定義し、20世紀前半以降の冬季の長さに見られる長期変動について考察した。また、各年の寒候季(10－4月)について冬型天候分布出現日数を求め、出現日数のトレンドをMann-Kendall rank testによって検定した。

夏季については、1901－2010年の日単位での降雨特性の長期変化傾向とその地域性について解析した。各地点における6－9月の全対象期間における夏季総降水量に対する日降水量の階級別寄与率が20%ずつとなるように、降水強度を降水量の少ないほうからⅠからⅤの5階級に分け、年ごとに各階級の日降水量の寄与率の全期間からの偏差を算出し、降水特性指標($RCI=2 \times V + IV - (II + 2 \times I)$)を標準化した値を算出してその長期変化の地域的特徴を示した。

(2) モンスーンアジアの広域における降水量・雲量・気温・日照時間の長期変化傾向の解明

広域的なアジアモンスーン地域における20世紀後半以降の気象要素(月平均気温、月降水量、月平均日照時間、月平均雲量)の長期変化傾向とその季節性を明らかにするために、東南アジア諸国及び東アジア諸国の気象観測の月別データに加えて解析を行った。これらのデータを用いて1961年から2000年までの40年間における各気象要素のトレンドをMann-Kendall rank testによって調査し、その空間分布の特徴を明らかにした。また、2000年以降もデータが得られる地域に関しては、2006年まで解析期間を延ばして同様の解析を行った。

(3) モンスーンアジア各国における降水量・日照時間・雨季入りの長期変化傾向の解明

地域的により詳細な変化実態を解明するため、いくつかの国に関しては、さらに詳細な解析を実施した。1950年以降の月別日照時間のデータを入手できたマレーシアについては、1950年から1999年までの月平均日照時間にみられる長期変化傾向を月別に解明した。マレーシアの5地点の日照時間データにもとづいて、マレーシアにおける日照時間の平均値を年毎に算出した。その上で、Mann-Kendall rank testによるトレンド検定を行い、月毎に日照時間のトレンドの有意性について調べた。フィリピンについては20世紀前半の降水量データも使用して、1910－2010年夏

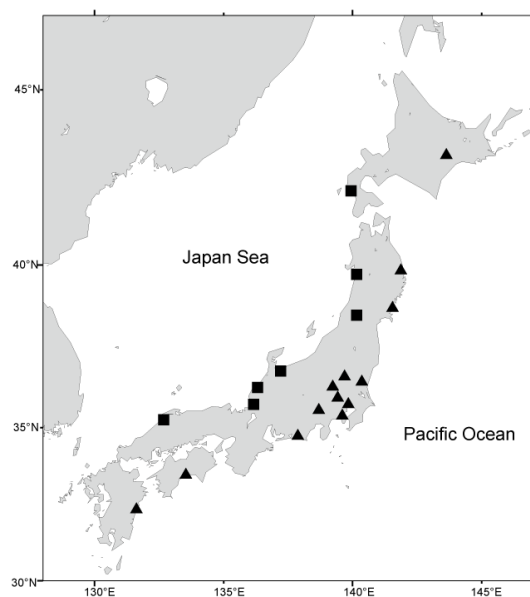
季（6－9月）及び冬季（10－1月）において、地点位置が20世紀の前後半であまり変わっていない19地点での平均降水量の長期変化傾向、および降水の全国的空間分布に基づく夏の雨季開始時期の長期変化を解析した。さらにベトナムにおいては、1961－2008年における台風に伴う豪雨発生の変化傾向について海岸部について解析した。バングラデシュにおいては、降水や降水強度の長期変化を1950年代以降について解析すると共に、ベトナムのハノイにおける20世紀全体での降水・降雨強度変化も解析した。

4. 結果及び考察

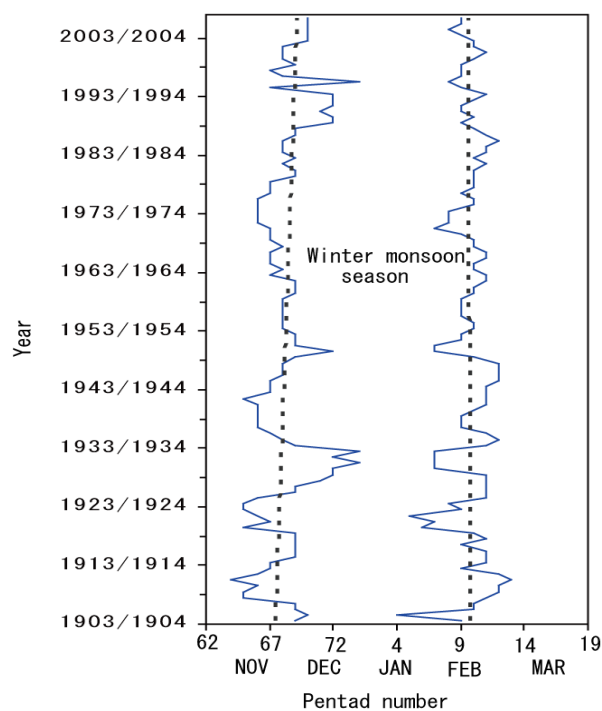
（1）日本における20世紀前半以降の冬の天候および夏の強雨発生の長期変動の解明

図(3)-1に示した20地点の日降水量データを使用して、「冬型天候分布」の出現割合から、1901－2009年の期間について、毎年の冬季の開始期日と終了期日を決定した結果の長期変動を図(3)-2に示した。冬季の長さの長期的な変化傾向を把握するために、Mann-Kendall rank testによるトレンド検定を行った結果、冬季の長さは20世紀前半以降、有意水準99%で有意に短期化する傾向があることが明らかになった。また、寒候季(10-4月)における「冬型天候分布」出現日数の変動傾向(図(3)-3)についても、Mann-Kendall rank testを用いて、トレンドの有意性について検定を行った結果、20世紀前半以降、「冬型天候分布」出現日数にも有意水準99%で有意な減少傾向がみられることが明らかになった。これらの結果は、東アジア冬季モンスーンが20世紀前半以降、長期的に弱化しつつあることを示唆していると考えられ、Matsumoto and Hirano (2009)¹⁾で国際学会にて発表し、Hirano and Matsumoto (2011)²⁾として国際誌に印刷・公表した。今後は、東アジア冬季モンスーンの長期的な弱化傾向が、地球温暖化や土地利用変化など人間活動と関係しているか、について明らかにしていく必要がある。

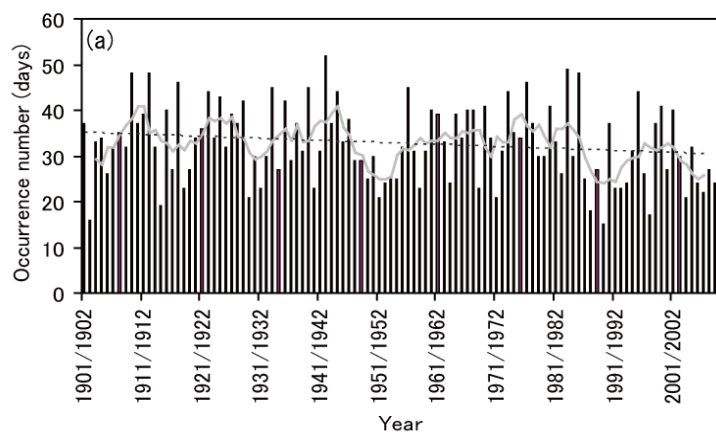
日本において、1901-2010年の夏季における日降水量を用いて降水特性指標RCIの変化を解析し、全期間を通じた傾向としては強雨による降水量が増加する傾向がみられるものの、近年は図(3)-4に示した東北日本（秋田・山形・宮古・石巻・福島、5地点の平均）や中部日本（長野・松本・飯田・伏木・高山、5地点の平均）などに強雨による降水量が減少する傾向に変化していることがわかった。



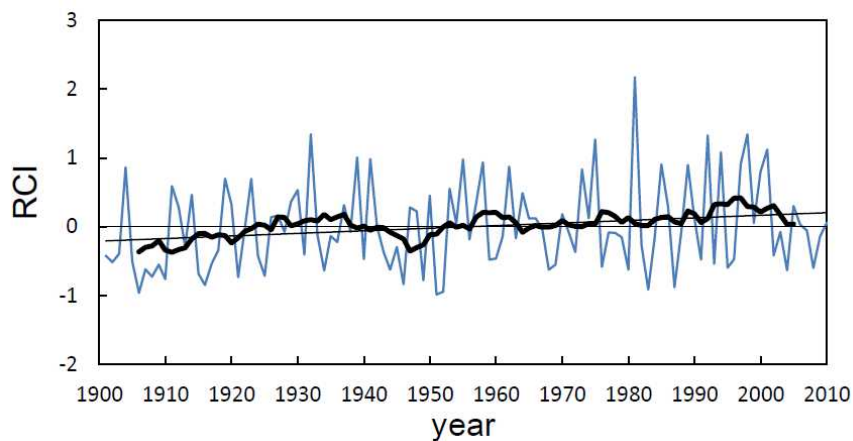
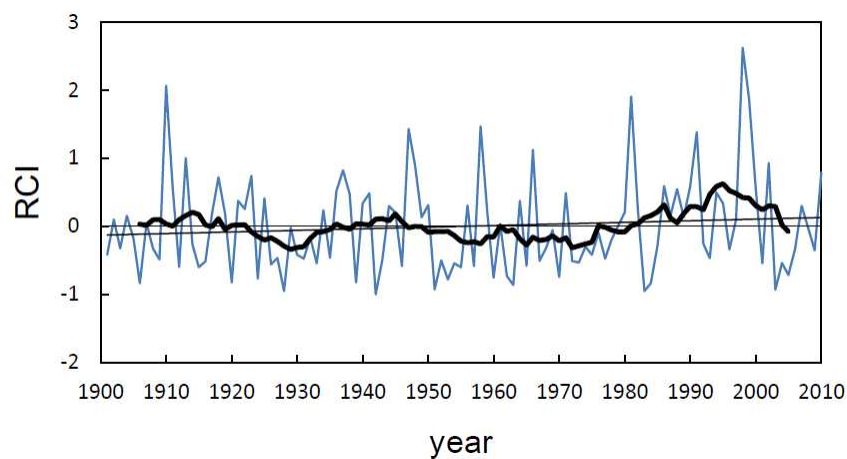
図(3)-1 「冬型天候分布」を抽出する際に日降水量データを使用した気象官署20地点。
日本海側に位置する地点を四角で、太平洋側に位置する地点を三角で示す。



図(3)-2 冬型天候分布の出現頻度から定義した2001-2009年の日本における冬季開始期日
と終了期日の長期変動(実線は各年の期日を、点線は変化傾向を示す)。横軸は11-3
月の半旬数 (pentad number) を示す。



図(3)-3 2001-2009年の寒候季(10-4月)における日本における冬型天候分布出現日数の長期変動。灰色実線は、出現日数の5年移動平均値を、破線は出現日数の変化傾向を示す。

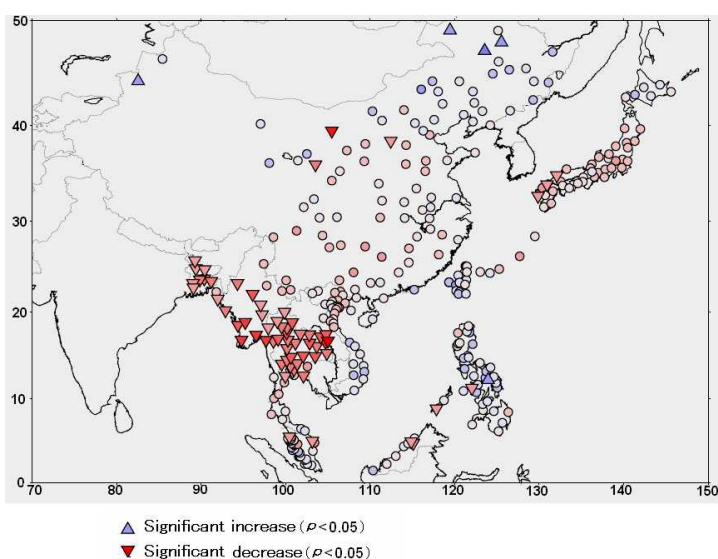


図(3)-4 2001-2010年の夏季(6-9月)における東北日本(上)と中部日本(下)の降雨特性指標RCIの長期変動。細実線は、全期間でのトレンドを、太実線は11年移動平均値を示す。

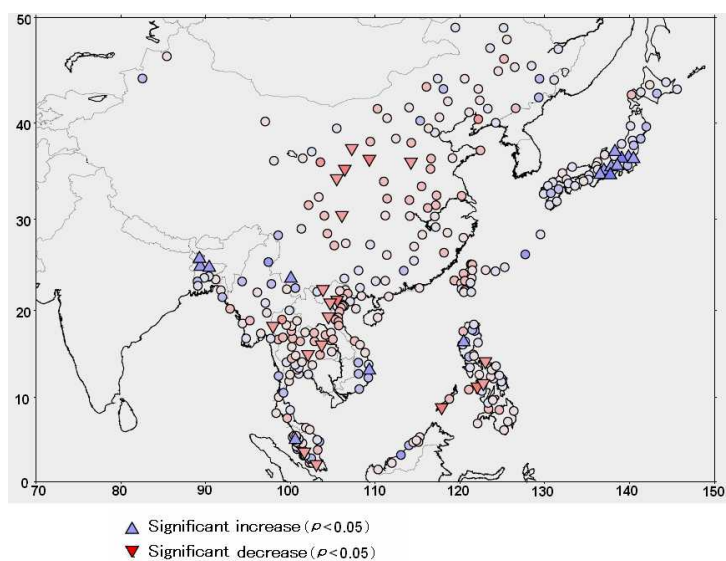
(2) モンスーンアジアの広域における降水量・雲量・気温・日照時間の長期変化傾向の解明

東南アジア諸国、中国、台湾、日本において、1961年から2000年までの40年間の月降水量と月平均気温のトレンドを、地点毎に計算してMann-Kendall rank testを用いて有意性を検定し、その空間分布を毎月ごとに明らかにした。また、東南アジア諸国については、月平均日照時間と月平均雲量についても同様に40年間のトレンドとその空間分布の様子を明らかにした。まず、月降水量については、冬季の12月(図(3)-5)、1月、2月に、東南アジアのミャンマーやタイ付近を中心として有意な降水量の減少傾向が広域的に見られることが明らかになった。また、東アジア地域では、4月と9月(図(3)-6)において中国の内陸域を中心として広域的に降水量減少傾向がみられた。雲量については、タイを中心とするインドシナ半島内陸部で、夏季から秋季に有意な雲量減少傾向がみられた(図(3)-7)。一方、日照時間については、タイなどインドシナ半島内陸部において、全ての季節で有意な減少がみられた。

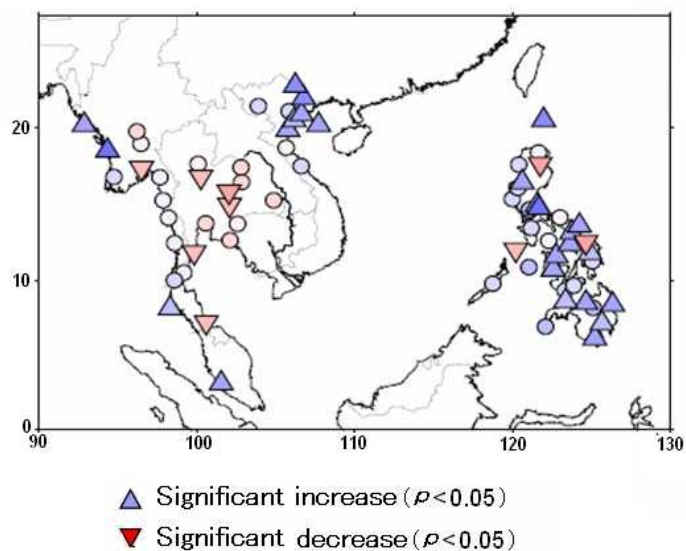
気温変化については、2006年まで解析期間を延ばして解析し、夏季(6-9月)にベトナム北部、ミャンマー南部、フィリピンにおいて、気温の上昇傾向が示され、月平均雲量では反対に減少傾向が示された。一方で、7-8月に中国の華南地域周辺では、気温の寒冷化傾向が示された。この傾向は特に8月に明瞭にみられることが明らかとなった(図(3)-8)。また華南地域の広い範囲で夏季平均日照時間の減少傾向が示された(図(3)-9)。冬季には華北高原地域周辺で月平均日照時間の減少傾向がみられた。



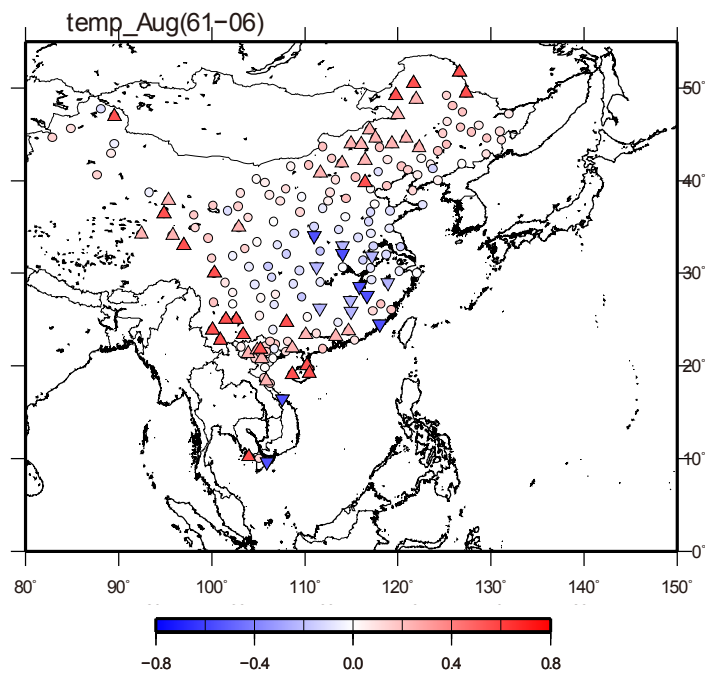
図(3)-5 アジアモンスーン地域における12月降水量のトレンド分布(1961-2000年)。上向き三角形は、増加傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示し、下向き三角形は、減少傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示す。



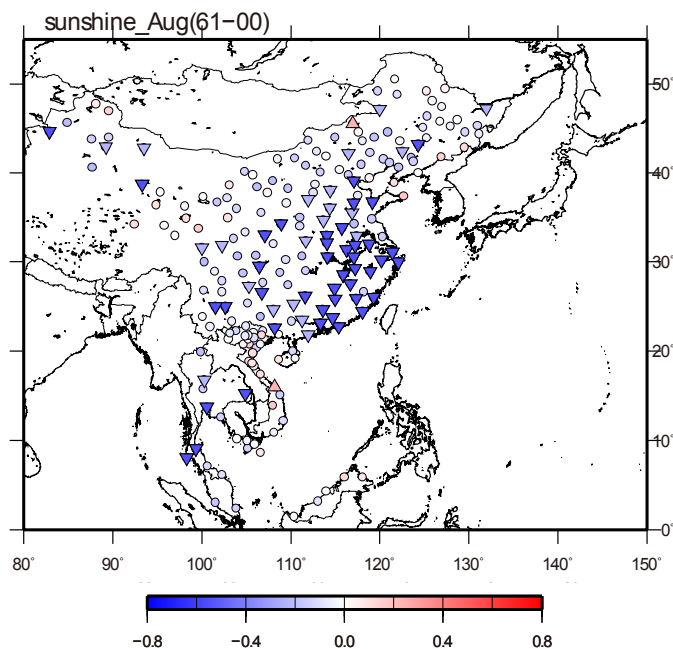
図(3)-6 アジアモンスーン地域における9月降水量のトレンド分布(1961-2000年)。上向き三角形は、増加傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示し、下向き三角形は、減少傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示す。



図(3)-7 東南アジアにおける9月平均雲量のトレンド分布(1961-2000年)。上向き三角形は、増加傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示し、下向き三角形は、減少傾向が有意($p < 0.05$)な地点を示す。



図(3)-8 アジアモンスーン地域における8月平均気温のトレンド分布(1961-2006年)。2006年までデータがある地点のみ表示。上向き三角形は気温上昇傾向、下向き三角形は気温低下傾向を示し、それぞれ統計的に有意($p < 0.05$)であることを示す。



図(3)-9 アジアモンスーン地域における8月平均日照時間のトレンド分布(1961-2000年)。上向き三角形は平均日照時間の増加傾向、下向き三角形は減少傾向を示し、それぞれ統計的に有意($p < 0.05$)であることを示す。

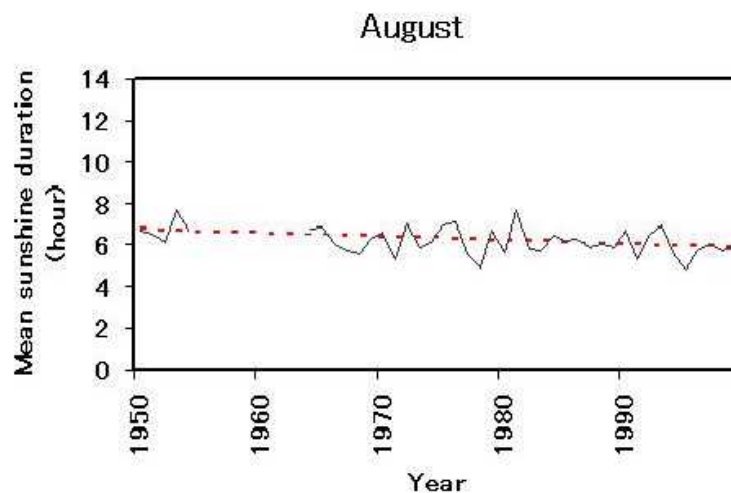
(3) モンスーンアジア各国における降水量・日照時間・雨季入りの長期変化傾向の解明

次に、地域的な詳細な変化実態を解明するため、いくつかの国に関しては、さらに詳細な解析を実施した。マレーシアにおける1950年から1999年までの月平均日照時間にみられる長期変動傾向についてMann-Kendall rank testを用いて、トレンドの有意性を検定した。その結果、1950年代以降、8月の月平均日照時間に有意水準95%で有意な減少傾向がみられた(図(3)-10)。8月以外の月については、統計的に有意な日照時間のトレンドはみられなかった。

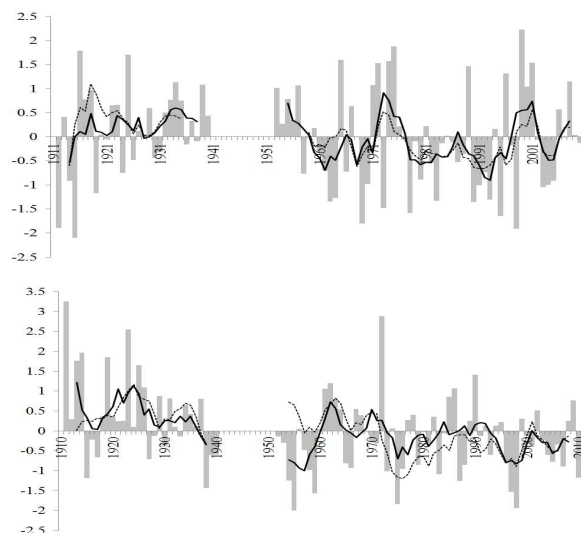
フィリピンについては20世紀前半の降水量データも使用して、1910-2010年夏季(6-9月)及び冬季(10-1月)において、地点位置が20世紀の前後半であまり変わっていない19地点での平均降水量の長期変化傾向を解析した(図(3)-11)。その結果、夏季降水偏差では1910-1930年代と1950年代後半~1960年代前半にかけては正偏差が持続し、1970年代後半からは負偏差が持続していた。一方冬季降水偏差には、特に1990年代後半から2000年にかけて100年スケールでみて顕著な正偏差がみられ、年々変動も大きくなっていった。また、降水の季節進行の長期変化傾向を調査するために、経験直交(EOF)解析を用いて1911-2008年の夏季雨季入り時期を定義した。その結果、1970年代後半から2000年にかけて夏季雨季入り時期が遅くなる傾向にあることが明らかになった。ただしこの傾向は、2000年以降は継続しておらず、20世紀の終盤に変化傾向が変わったことが明らかになった(図(3)-12)。これらの成果はAkasaka et al. (2011a, 2011b)^{3),4)}で国際会議にて発表し、Akasaka et al. (2012)⁵⁾として国際誌に投稿した。

ベトナムにおいては、中部ベトナムにおける1961-2008年における各地点から600km以内に接近した台風に伴う降雨(図(3)-13)および強雨の平均的な季節変化の地域特性とそれらのエル・ニーニョ年とラ・ニーニャ年での違いを解明し、Nguyen-Thi et al. (2012)⁶⁾として国際誌に印刷・公表した。また、降水量および降雨強度の変化について、中部ベトナムにおける1979-2009年の期間での強雨発生にはエル・ニーニョが強く関係している事を見出し(図(3)-14)、Chen et al. (2012)⁷⁾として国際誌に印刷・公表した。さらに近年の強雨化の一部は台風活動によるものであることを見出し(図(3)-15)、Nguyen-Thi et al. (2011a, 2011b)^{8),9)}として国際学会で発表した。ベトナムにおける台風による降雨や強雨の発生についても、20世紀後半には全般に増加傾向がみられた一方、1990年代半ばから変化傾向に変化が認められた。

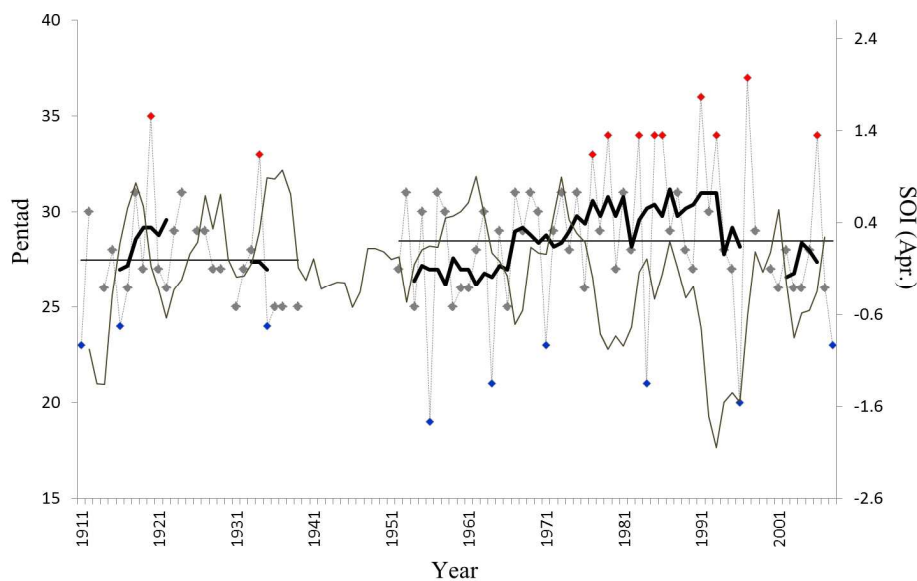
その他の地域における降水・降水強度の変化として、バングラデッシュの中部と東部では、1970年代後半以降、3月・4月を中心としてプレモンスーン季における降水量が増加していることを解明し、Matsumoto et al. (2011)¹⁰⁾として国際学会で発表した。北ベトナムのハノイにおける20世紀全体での豪雨の出現変化傾向を解析し、20世紀の後半に認められた降水強度の弱化傾向は、100年の時間スケールでは、はっきりせず、めだつた長期変動傾向は認められなかった。



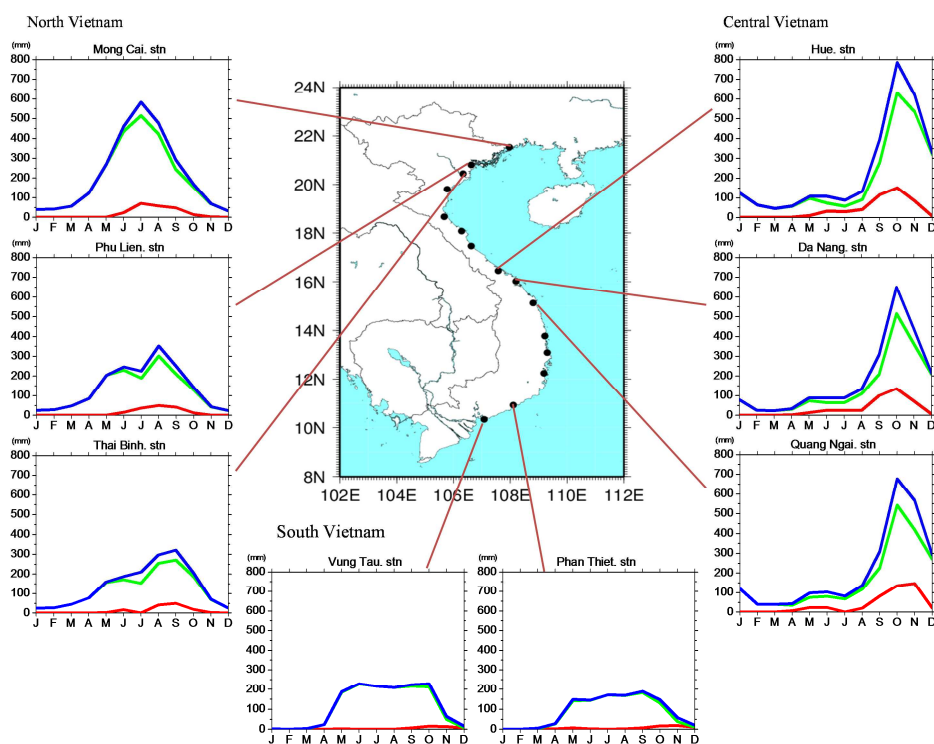
図(3)-10 マレーシアにおける8月の月平均日照時間の長期変動。実線は日照時間を、破線は変化傾向を表す。



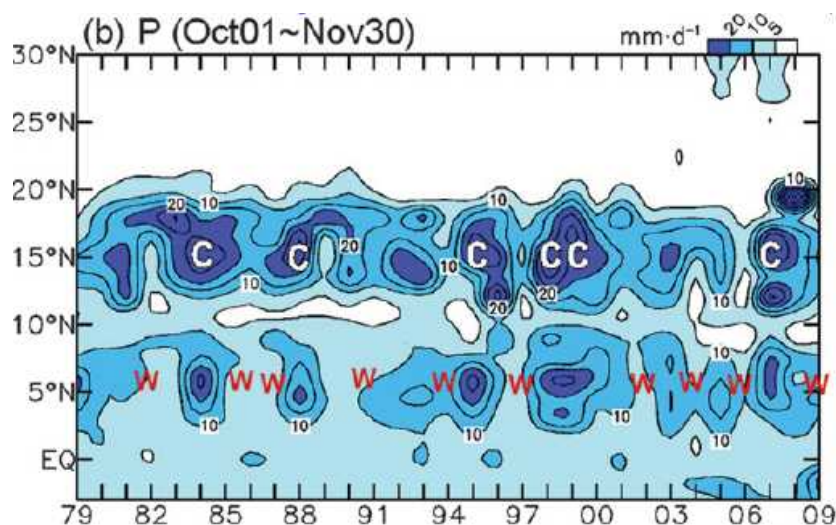
図(3)-11 夏季(上)及び冬季(下)のフィリピンにおける標準化した降水量偏差と降水日数偏差の経年変化。棒グラフは降水量偏差を、実線は降水量偏差の5年移動平均を、破線は季節降水日数偏差の5年移動平均を示す。



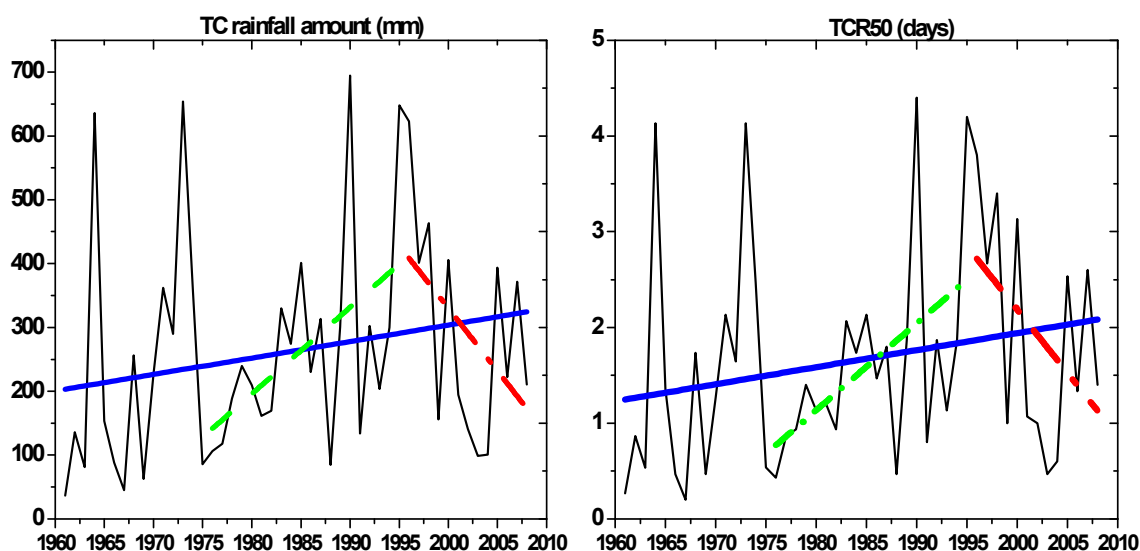
図(3)-12 フィリピンにおける1911-2008年（1940-1951年を除く）夏の雨季入りの長期変動。
 水平な線は1911-39年、1952-2008年の平均開始日。赤点と青点は遅い開始年と早い開始年を示す。太実線は開始日の5年移動平均を、細実線は4月の南方振動数（SOI）を示す。



図(3)-13 ベトナム海岸部における月平均降水量（青線）とそのうち台風による降水量（赤線）と台風以外の原因による降水量（緑線）の年変化。



図(3)-14 ベトナム海岸に沿った10・11月の降水量の年々変動とエル・ニーニョ/南方振動(ENSO)との関係の長期変化。(C:ラ・ニーニャ年、W:エル・ニーニョ年)



図(3)-15 ベトナム海岸に沿った15地点で平均した1961-2008年の期間における台風による降水量(左)と台風による日降水量50mm以上の大雨の発生日数の長期変化(右)。青線は全期間でのトレンドを、緑破線は1976-95年、赤破線は1996-2008年における傾向線をそれぞれ示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

20世紀前半における東アジア冬季モンスーンの変化は、これまでほとんど明らかにされていなかった。これは、従来の研究の多くが20世紀後半以降の再解析データ等にもとづいた解析を行っていたためである。本研究では、1901年以降の均質な日降水量データを用いて日本における冬の

天候の長期変動について解析を行ったことによって、20世紀前半を含む100年スケールでの冬季の天候の変化の様子を解明することができ、20世紀前半以降、東アジア冬季モンスーンが長期的に弱まりつつあることを示唆する結果を得た。今後、東アジア冬季モンスーンの弱化傾向についてその原因を明らかにすることが課題として残されている。日本の夏季における降水特性に関しては、100年スケールでは、強雨による降水量が増加傾向にある地域が多かった一方、20世紀終盤から逆に減少傾向に転じている地域が東北地方や中部地方の日本海側などに認められ、降雨強度は一方的に強くなってはいないことを示した。

東南アジアと中国については、従来の研究には使用されていなかった気温、降水量、日照時間、雲量などの気象データを新たに入手して、各気象要素の長期変動傾向の特徴を月別に検討した。その結果、降水量については、冬季にタイやミャンマー付近において降水量減少傾向がみられることや、4月や9月に中国大陸で広域的な降水量減少がみられることが明らかになった。気温については、春季と夏季を中心として、中国大陸の華南や四川盆地付近に有意な寒冷化傾向を示す地域が存在することを明らかにした。さらに、日照時間については、インドシナ半島内陸域で、ほぼ全ての月で日照時間の減少傾向がみられることが明らかになった。タイ及びミャンマー南部とフィリピンでは夏季に月平均雲量及び月降水量の減少、月平均気温の上昇といった乾燥化に関連する長期的な傾向が20世紀後半以降に現れていることが明らかとなった。

1950年以降の長期的な日照時間のデータが得られたマレーシアについては、日照時間の長期変動傾向の特徴を月別に検討した。その結果、日照時間の長期変動傾向にみられる季節的な違いを明らかにすることが可能になり、長期的な日照時間の減少傾向が8月にのみ認められることを指摘した。フィリピンにおける夏の雨季については、20世紀の後半25年ほどの期間では、雨季入りの時期が遅くなる傾向がみられたのに対し、20世紀終盤以降は早まる傾向へと変化していた。ベトナムにおける台風による降雨や強雨の発生についても、20世紀後半には全般に増加傾向がみられた一方、1990年代半ばから変化傾向に変化が認められた。

日本における強雨の長期的変化のほか、フィリピンにおける夏の雨季入り時期の変化や、ベトナムにおける台風による強雨などに、2000年以降、20世紀終盤に見られた長期変化とは逆の変化が生じている事が明らかとなり、地球温暖化の一方的進行とは必ずしも同期したものではないことが示唆された。

今後は、各気象要素の広域的な変化の要因を検討するため、降水量や気温、日照時間、雲量などの変化と、大気循環場の変化との関係について解析を進める必要がある。また、本サブテーマの解析結果をモデルにより算出される各気象要素の変化と比較し、広域的な気温や降水量、天候などの変化がエアロゾル濃度の変動や土地利用変化等の人間活動と関係するのか、について検討していく必要がある。

(2) 環境政策への貢献

アジアモンスーン地域では、天候の季節変化が大きいいため、植生改変やエアロゾル濃度の変動が気候に及ぼす影響の程度も季節によって異なると考えられる。今後、本研究によって明らかにされた季節毎の日照時間や降水の変動傾向を気候モデルより算出される変化と比較することによって、植生改変とエアロゾル変化およびその複合効果が実際の気候変動にどのような影響を与えているのかを定量的に評価することが必要である。これまでのデータ収集と解析によって、モデ

ル計算結果と比較するための基礎的な資料・知見を提供することが可能となった。また、気候の将来予測の不確実性を少なくするためにも、長期的な気候データの解析が、モデル検証のためにもきわめて重要である事が示された。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画としては、世界気候研究計画(WCRP)全球エネルギー・水循環観測計画全球(GEWEX)モンスーンアジア水文気候研究計画(MAHASRI)および、地球システム科学パートナーシップ(ESSP)モンスーンアジア総合地域研究(MAIRS)と連携した研究として、アジアモンスーン各国からのデータ提供を受け、共同研究を実施した。具体的なカウンターパートとしては、下記の人たちがあげられる。

Prof. Congbin Fu、Dr. Ailikun、Prof. Jianping Li、Prof. Guoxiong Wu (以上、中国科学院大気物理学研究所)、Prof. Bin Wang (アメリカ合衆国ハワイ大学気象学教室)、Dr. Nguyen Thi Tan Thanh、Dr. Nguyen Van Tue (以上、ベトナム水文気象局)、Dr. Nguyen Van Thang、Dr. Trung Duc Tri (以上、ベトナム水文気象環境学研究所)、Dr. Somchai Baimoung (タイ気象局)、Dr. Prisco Nilo、Dr. Nathaniel Servando (以上、フィリピン宇宙気象局)、Dr. Fadli Syamsudin (インドネシア科学技術庁)、Dr. Yap Sen Kok (マレーシア気象局)

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Hirano, J. and J. Matsumoto, (2011): Secular and seasonal variations of winter monsoon weather patterns in Japan since early 20th century. *International Journal of Climatology*, **31**, DOI:10.1002/joc.2241.
- 2) Chen, T. C., J.D. Tsay, M.C. Yen and J. Matsumoto, (2012): Interannual variations of the late fall rainfall in Central Vietnam. *Journal of Climate*, **25**, 392-413.
- 3) Nguyen-Thi, H.A., J. Matsumoto, T. Ngo-Duc and N. Endo (2012): A climatological study of tropical cyclone rainfall in Vietnam. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **8**, 41-44.

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 平井幸弘, 青木賢人編 (2009): 温暖化と自然災害ー世界の六つの現場から, 第2章 バングラデシュにおける洪水とサイクロン (執筆担当: 松本 淳・浅田晴久・林 泰一), 日本地理学会災害対応委員会/古今書院、35-57.
- 2) Hoque, R., J. Matsumoto and J. Hirano (2011): Climatological characteristics of monsoon seasonal transitions over Bangladesh. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan*

University, 46, 31-41.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 平野淳平, 松本淳 “日本における20世紀前半以降の冬の長さの長期変動”, 2009年日本地理学会秋季学術大会, 琉球大学, 2009年10月24日～27日.
- 2) Matsumoto, J. and J. Hirano: The 4th China-Japan-Korea Joint Conference on Geography, Guangzhou, China, 2009 “Long-term changes of winter season in Japan” .
- 3) 平野淳平, 松本淳 “関東地方における20世紀前半以降の冬季降水頻度の季節変化と経年変化” 2010年日本地理学会春季学術大会, 法政大学, 2010年3月27日～29日.
- 4) 松本淳, 財城真寿美, 久保田尚之, 濱田純一, 平野淳平 “アジアモンスーン域の気象観測データレスキュー” 日本地球惑星科学連合2010年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2010年5月24日～28日.
- 5) Hirano, J. and J. Matsumoto “Long-term variations of the winter monsoon season in Japan”, Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting, Hyderabad, India, 2010.
- 6) 松本淳, 赤坂郁美, 久保田尚之, 遠藤伸彦, 高橋洋, 平野淳平, 財城真寿美 “アジアにおける気候資料のデータレスキューとモンスーンの長期変化”, 2010年日本地理学会秋季学術大会, 名古屋大学, 2010年10月2日～4日.
- 7) 平野淳平, 松本淳 “中国における降水量の季節進行と長期変化” 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都テルサ (京都市), 2010年10月27日～29日.
- 8) 平野淳平, 松本淳 “アジアモンスーン地域における降水量の長期変化傾向とその季節性”, 第6回南アジアの自然環境と人間活動に関する研究集会, 京都大学防災研究所, 2011年2月20日.
- 9) 松本淳, Hoque, R., 平野淳平 “バングラデシュにおけるモンスーンの季節推移”, 第6回南アジアの自然環境と人間活動に関する研究集会, 京都大学防災研究所, 2011年2月20日.
- 10) 松本淳, 遠藤伸彦, 浜田純一, 久保田尚之, 赤坂郁美, 上米良秀行, 増田耕一, 山中大学, 森修一, 林泰一, 寺尾徹, 村田文絵, 木口雅司, 山根悠介, 財城真寿美, 平野淳平 “アジアモンスーン域における降水量・降雨特性の長期変動” (招待講演) 日本地球惑星科学連合2011年大会, 幕張メッセ国際会議場、2012年5月20日～25日.
- 11) 松本淳, 久保田尚之, 赤坂郁美, 遠藤伸彦, 浜田純一, 増田耕一, 財城真寿美, 山中大学, 森修一, 上米良秀行, 林泰一, 寺尾徹, 村田文絵, 木口雅司, 山根悠介, 平野淳平 “アジアモンスーン域における降水量の長期変動に関するデータとデータレスキュー” (招待講演) 日本地球惑星科学連合2011年大会, 幕張末世国際会議場, 2012年5月20日～25日.
- 12) Matsumoto, J., S.Y. Ogino, N. Endo, P.M. Wu, H. Kubota, M. Hattori, H. Kamimera, K. Masuda, V.T. Nguyen and E.O. Cayan “Northeast monsoon in Southeast Asia”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.
- 13) Matsumoto, J., N. Endo, T. Hayashi, T. Terao, F. Murata, M. Kiguchi, Y. Yamane and A. Habib “A Long-term Changes in Precipitation Extremes over Bangladesh”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.

- 14) Akasaka, I., I. W. Morishima, M. Zaiki, H. Kubota, K. Masuda, J. Matsumoto and E. O. Cayan “Long-term variability of rainfall characteristics in the Philippines since the 20th century”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.
- 15) Endo, N., H. Kamimera, K. Masuda and J. Matsumoto “Inter-annual variation of heavy rainfall events in central Vietnam and its relationship to El Nino/La Nina”, The Second International MAHASRI/HyARC Workshop on Asian Monsoon and Water Cycle, Nha Trang, Vietnam, 2011.
- 16) Nguyen-Thi, H. A., J. Matsumoto and N. Endo “Characteristics of tropical cyclone rainfall in Vietnam”, The Second International MAHASRI/HyARC Workshop on Asian Monsoon and Water Cycle, Nha Trang, Vietnam, 2011.
- 17) 遠藤伸彦, 上米良秀幸, 増田耕一, 松本淳 “中部ベトナムにおける秋季降水量の経年変化について”, 日本地理学会秋季学術大会, 大分大学, 2011年9月23日～26日.
- 18) 平野淳平, 松本淳 “北部ベトナムにおける冬季の日照時間の年々変動”, 日本地理学会秋季学術大会, , 大分大学, 2011年9月23日～26日.
- 19) Nguyen-Thi, H.A. and J. Matsumoto “The contribution of tropical cyclone rainfall in Vietnam and its relation to ENSO”, The 3rd International Workshop on Climate Downscaling, Tsukuba, Japan, 2011.
- 20) Kubota, H., B. Wang, J. Matsumoto, E. Ginn and E. O. Cayan “Asian Monsoon Years(2007-2012): Interdecadal rainfall variability associated with typhoon and monsoon over the western north Pacific”, WCRP Open Science Conference, Denver, CO USA, 2011.
- 21) Akasaka, I., J. Matsumoto, W. Morishima, H. Kubota, T. Mikami and E. O. Cayan “Asian Monsoon Year (2007-2012): Long-term changes in summer rainy season onset in the Philippines and its relation to the atmospheric circulation and SST patterns in the tropical Pacific”, WCRP Open Science Conference, Denver, CO USA, 2011.
- 22) Nguyen-Thi, H.A., J. Matsumoto and N. ENdo “Climatological study on the tropical cyclone rainfall in Vietnam”, The 6th Korea-China-Japan Joint Conference on Geography, November, Seoul, Korea, 2011.
- 23) 久保田尚之, J.C.L. Chan, 松本淳, E.W.L.Ginn “過去100年間の西部北太平洋域の台風経路の変化”, 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋大学, 2011年11月16日-18日.
- 24) Matsumoto, J. “Was there any effect from urbanization on the long-term changes of heavy rainfall in Japan?”, International Workshop on “Impact of Asian Megacity Development on Local to Global Climate Change”, Suzhou, China, 2011.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) MAHASRI国内研究集会・植生気候相互作用ワークショップ 2010年3月23日・24日 東京

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

8. 引用文献

- 1) Matsumoto, J. and J. Htrano “Long-term changes of winter season in Japan”, The 4th China-Japan-Korea Joint Conference on Geography, Guangzhou, China, 2009.
- 2) Hirano, J. and J. Matsumoto, (2011): Secular and seasonal variations of winter monsoon weather patterns in Japan since early 20th century. *International Journal of Climatology*, **31**, DOI:10.1002/joc.2241.
- 3) Akasaka, I., W. Morishima, M. Zaiki, H. Kubota, K. Masuda, J. Matsumoto and E.O. Cayan “Long-term variability of rainfall characteristics in the Philippines since the 20th century”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011a.
- 4) Akasaka, I., J. Matsumoto, W. Morishima, H. Kubota, T. Mikami and E.O. Cayan “Asian Monsoon Year (2007-2012): Long-term changes in summer rainy season onset in the Philippines and its relation to the atmospheric circulation and SST patterns in the tropical Pacific”, WCRP Open Science Conference, Denver, CO USA, 2011b.
- 5) Akasaka, I., H. Kubota, K. Masuda and J. Matsumoto, (2012): Long-term changes in the onset of the summer rainy season in the Philippines from 1911 to 2008. *Climatic Change Letters*, submitted.
- 6) Nguyen-Thi, H.A., J. Matsumoto, T. Ngo-Duc and N. Endo, (2012): A climatological study of tropical cyclone rainfall in Vietnam. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **8**, 41-44.
- 7) Chen, T.C., J.D. Tsay, M.C.Yen and J. Matsumoto, (2012): Interannual variations of the late fall rainfall in Central Vietnam. *Journal of Climate*, **25**, 392-413.
- 8) Nguyen-Thi, H.A., J. Matsumoto and N. Endo “Characteristics of tropical cyclone rainfall in Vietnam”, The Second International MAHASRI/HyARC Workshop on Asian Monsoon and Water Cycle, Nha Trang, Vietnam, 2011.
- 9) Nguyen-Thi, H.A., and J. Matsumoto “The contribution of tropical cyclone rainfall in Vietnam and its relation to ENSO”, The 3rd International Workshop on Climate Downscaling, Tsukuba, Japan, 2011.
- 10) Matsumoto, J., N. Endo, T. Hayashi, T. Terao, F. Murata, M. Kiguchi, Y. Yamane and A. Habib “A Long-term Changes in Precipitation Extremes over Bangladesh”, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, Melbourne, Australia, 2011.

- 11) Yamashima, R., K. Takata, J. Matsumoto and T. Yasunari, (2011): Numerical study of the impacts of land use/cover changes between 1700 and 1850 on the seasonal hydroclimate in monsoon Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **89A**, 291-298.

(4) 植生改変・エアロゾル変動によるアジア地域の気候変動・変化のフィンガープリント解析

名古屋大学

地球水循環研究センター

安成 哲三・藤波 初木

〈研究協力者〉 名古屋大学地球水循環研究センター

梶川 義幸・金森 大成

平成21～23年度累計予算額：44,917千円（うち、平成23年度予算額：14,909千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】本研究課題のサブテーマ4では、客観解析データを含めたアジアモンスーン地域の広域・長期間の気象観測データを利用し、降水量の長期変動傾向を季節性・地域性に着目して解析した。その結果、アジアモンスーンの遷移期である5月、6月に特に有為な変化傾向が確認されたが、盛夏期にあたる7月、8月には見られないと言う顕著な季節性が確認された。アジアモンスーン全域に渡ってモンスーンの開始日を解析した結果、ベンガル湾から南シナ海にかけてと北部西太平洋で10日以上オンセットが早くなっていることが確認された。このアジアモンスーンの季節推移（モンスーンオンセットの早期化が5月、6月の月平均値に影響を与えていると考察される。また、アジア大陸とインド洋における海陸の熱的コントラストの長期変動傾向にも5月に顕著な温暖化傾向を持ち、盛夏期に冷温化傾向を示す季節性が見られた。インド洋における海面水温の変動が季節に依らず同様な上昇傾向を示すことから、海陸の熱的コントラストは大陸上の加熱（冷却）に強く依存していることが確認された。つまり、南北の熱的コントラストの季節進行が早くなっていることに伴い5月における大規模なモンスーン循環が強化され、モンスーンの開始が早まったと考えられる。

大気海洋結合モデル MIROCを用いた実験結果からは、全ての自然起源・人為起源の影響を与えた実験に、観測値と同様なモンスーン開始期の早まりや、盛夏期における全般的な降水量の減少が弱い振幅ながらも再現された。特に、5月におけるソマリジェットの強化や、西太平洋モンスーン域の降水量の増加、中国南部での降水量の減少は、エアロゾル増加のみを与えた実験にも観測値とよく似た偏差パターンが確認され、海面水温の変動傾向に季節性がほとんど見られないことから、地表面や大気でのエアロゾルの増減による加熱（冷却）の効果が、モンスーンの長期変動に季節性をもたらしているものと推測された。

【キーワード】アジアモンスーン、長期変動傾向・オンセット、温室効果ガス、エアロゾル

1. はじめに

顕著に進行しつつある温室効果ガスや人為起源エアロゾルの増加など、人間活動が気候に与える影響は、その社会的影響を鑑みても近年益々重要な課題となっている（Santer et al., 1995¹⁾, Ramanathan et al., 2001²⁾, Menon, 2002³⁾）。特に日本を含むアジアの気候変動に関しては、アジアモンスーンの変動に着目した実態の把握・解明が必要となる。代表者らによる先行の推進費（B-062）では、20世紀に入ってから温室効果ガス増加とエアロゾル増加は、アジアモンスーン降水量変化に、ほぼ同じ程度に影響している可能性が、エアロゾル過程を組み込んだ大気大循環

モデル (GCM) 実験によって示唆された (Arai et al., SOLA 2010, in revision⁴⁾)。さらに、エアロゾルの増加以外にも森林破壊や農耕地拡大に代表される土地利用 (地表表面状態) の長期変化がアジアモンスーン域の降水量変動をもたらす可能性が示唆されている (Takata et al. 2009⁵⁾)。また、森林破壊に伴う植生改変によって起こりうる二次有機エアロゾルの減少など、アジアモンスーン気候への影響を考慮しなくてはならないプロセスが他にも存在する。これらの植生改変・エアロゾルのアジアモンスーンへの影響は、エアロゾル過程を組み込んだ大循環モデルによる数値実験を通し、個々のプロセスの評価が行われる必要がある。モデルによる数値実験の結果を解釈し評価する為には、高精度の観測データを用いた、現在に至る長期変動傾向の実態把握もまた必要不可欠である。観測事実に基づいたモデル実験結果との相互比較 (フィンガープリント解析) を通じて植生改変・エアロゾル変動によるアジア域の気候変動の評価は、地球環境予測・地球環境政策当にも大きな貢献が期待される。

2. 研究開発目的

本研究課題のサブテーマ4では、(1) 客観解析データを含めたアジアモンスーン地域の広域・長期間の気象観測データが利用可能な20世紀 (後半) 以降について、降水量、気温、大気循環場などの観測データを統計的に解析することにより、長期的な気候変動の時空間特性を抽出し、(2) 得られた気候変化の時空間特性を、モデル出力結果とフィンガープリント解析などを用いて対比することにより、観測されたアジアモンスーンの変化が、アジアモンスーン域における植生改変・エアロゾル変化 (増加) ・温室効果ガスの変化 (増加) および、それらの複合効果とどのように関係しているのかを解明する。特に本サブテーマでは、大きな季節変化を意味するアジアモンスーン域が主要な解析対象領域である為、空間的・季節的な依存性に特に着目して研究を行う。また、降水量や大気循環場のデータに関しては、複数のデータセットを用いることにより、統計的に得られた長期変動傾向の妥当性をも確認することを目的とする。

3. 研究開発方法

アジアモンスーンは季節変化が明瞭な現象である。それとともに、自然、人為起源のエアロゾルにも生成と分布には強い季節依存性が観測されている。したがって、これら放射強制を介したエアロゾルの変動によるアジアモンスーン降水量への影響なども、それぞれ特有の季節および地域の依存性をもって現れると推測される。その為、長期的な気候変動を理解する上では変動の季節依存性に着目する必要がある。本サブ課題では、始めに、モデル出力結果との相互比較に先駆け、衛星データが取得可能になった1979年から2008年における期間を対象として、アジアモンスーン地域の降水量の長期変動の月ごとのトレンド解析を行い、その季節性・地域性について考察した。また、降水量の長期変動傾向と関連する水蒸気場、大気循環場および海面水温 (SST) 変動の解析を行った。観測データの不足による不確実性を軽減し、より顕著な長期変動傾向を探るため、4つの異なる格子点降水量データ: CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP; Xie and Arkin 1997⁶⁾)、Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Huffman et al. 1997⁷⁾)、APHRODITE (Yatagai et al. 2009⁸⁾)、University of Delaware Precipitation (Legates and Willmott 1990⁹⁾) を用いて長期変動傾向の抽出を行い、データ間の相互比較を行った。また、大気循環場や水蒸気量のデータには、降水量データと同様に以下の4つの異なる再解析データ: NCEP/NCAR reanalysis

(Kalnay et al. 1996¹⁰)、NCEP/DOE reanalysis 2 (Kanamitsu et al. 2002¹¹)、ERA-40 re-analysis project (Uppala et al. 2005¹²)、JRA25 reanalysis (Onogi et al. 2007¹³) を用い、長期変動傾向を解析し、データ間の相互比較を行った。また、上記のデータに interpolated outgoing longwave radiation (OLR) data (Liebmann and Smith 1996¹⁴)、Hadley Center sea surface temperature (SST) dataset (Rayner, 2003¹⁵)、台風の経路のデータ (International Best Track Archive for Climate Stewardship: IBTrACS, Knapp et al. 2010¹⁶) を交え、長期変動が顕著であったアジアモンスーンオンセットの変動プロセスについてもデータ解析及び考察を行った。長期トレンドの検定には、Mann-Kendall (マン・ケンドール) 検定法を用いた。

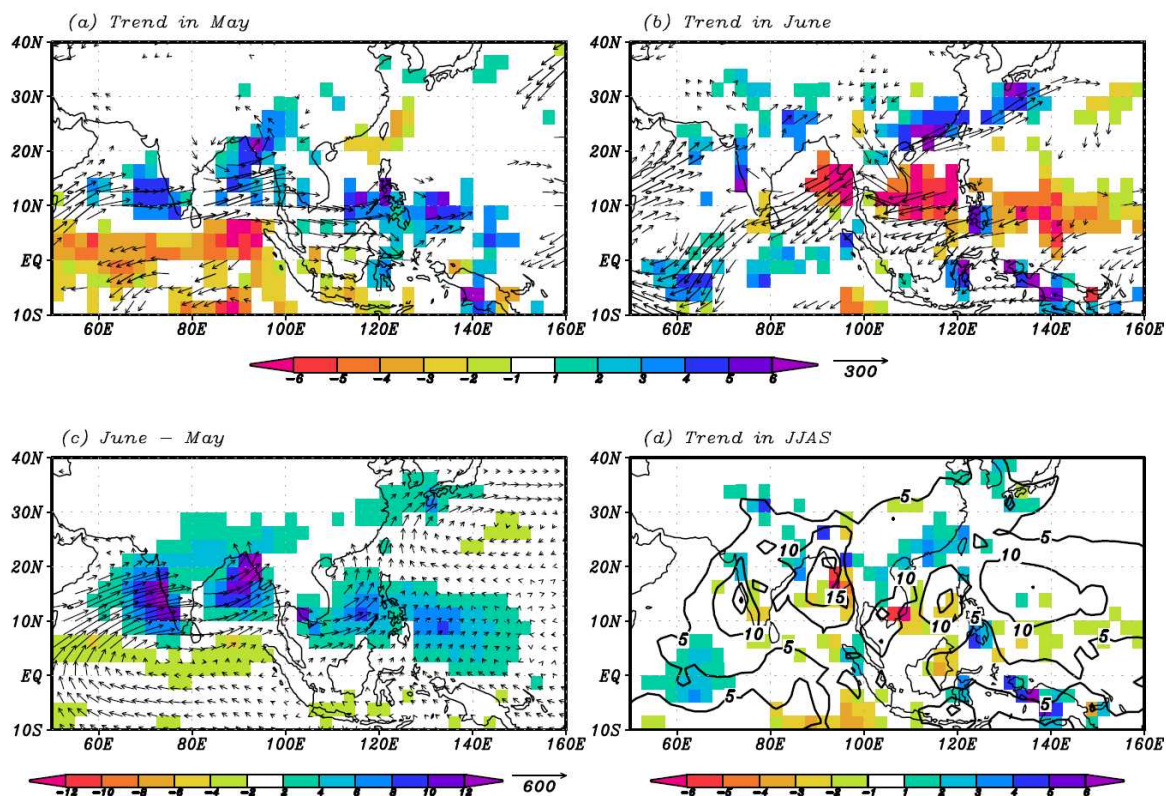
観測データの解析の他に、観測値事実として得られた結果とモデルによる数値実験の結果を比較する為、本サブテーマでは、大気海洋結合モデル MIROC (Hasumi and Emori 2004¹⁷)、木本 2006¹⁸) を用いた数値実験結果を使用した。MIROC には、外部強制として、自然起源要因 (太陽活動や火山噴火による変動など)、及び人為起源要因 (温室効果ガスやエアロゾル、成層圏・対流圏オゾンなど) が含まれている。エアロゾルの気候への効果は直接効果と間接効果が考慮されている。モデルの解像度は大気部分で水平約280km、鉛直20層、海洋部分で150km、鉛直44層である。本サブテーマでは、主に FULL (全強制を与えた実験)、GHGS (温室効果気体増加のみ与えた実験)、ARSL (人為起源エアロゾル増加のみ与えた実験) の結果を用いた。各実験は初期値の異なる4メンバーから構成されており、アンサンブル平均値を解析に使用した。観測データを用いた解析に準じて1979-2008年における線形トレンドを計算し、モンスーンの季節性を考慮した上で、5月、6-8月、9月以降でトレンドの空間パターンを比較した。

4. 結果及び考察

始めに、衛星データの取得が可能になって以降、1979年から現在 (2008年) までの降水量長期変動について、最近の全球スケール降水量データ (CMAP) を用いて月別の降水量のトレンド解析を行った。その結果、降水量の長期変化傾向は同じ季節内でも各月で大きく異なり、従来の研究における季節平均降水量の長期変化傾向と必ずしも一致していないことが示された。特に、5月の降水量はアラビア海、ベンガル湾、南シナ海、西太平洋において、過去30年間で4-6 mm/day 増加していることがわかった (図(4)-1a)。これは気候値のおよそ50%に相当する増加量である。また、また赤道インド洋、特にスマトラ沖を中心として降水量の減少傾向が見られる。このことは対流活動の中心域が北に移動していることを示唆する。鉛直積算した水蒸気フラックス (NCEP/DOE reanalysis2) の長期トレンドは、降水量トレンドに対して総合的で、顕著な西風偏差が、北緯10度を中心に北部インド洋全域から海洋性大陸にかけて卓越し、赤道から南半球側では東風偏差が卓越している。

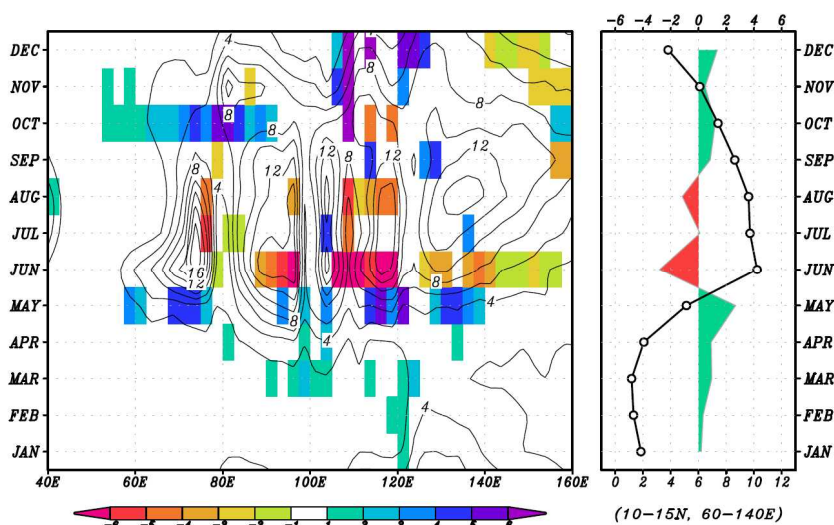
興味深いことに6月の降水量トレンドは5月の降水量トレンドと大きく異なっている (図(4)-1b)。6月のトレンドは5月の傾向と反転するように、ベンガル湾、南シナ海、西太平洋にかけて降水量の減少傾向が見られる。水蒸気フラックスは、海洋性大陸から中部南部インド洋にかけての広い領域で東風偏差が卓越している。更に興味深い点は、中国南部から日本の南にかけて降水量の増加傾向が見られる点である。これは降水帯の北への移動を示し、5月の長期変化傾向を考慮すると、降水を伴った対流活動の北進、つまり春期から盛夏期に向かう季節進行が近年早くなっていることを示唆している。実際、1979年から2008年までの気候値を用いた5月から6月にかけての季節進

行(図(4)-1c)と、5月の長期トレンドが非常に類似している。つまり、近年における5月の降水量パターンが、過去(20年から30年前)の6月のパターンに近づいている事を示し、長期変化傾向として季節進行の早まりが示唆されている。



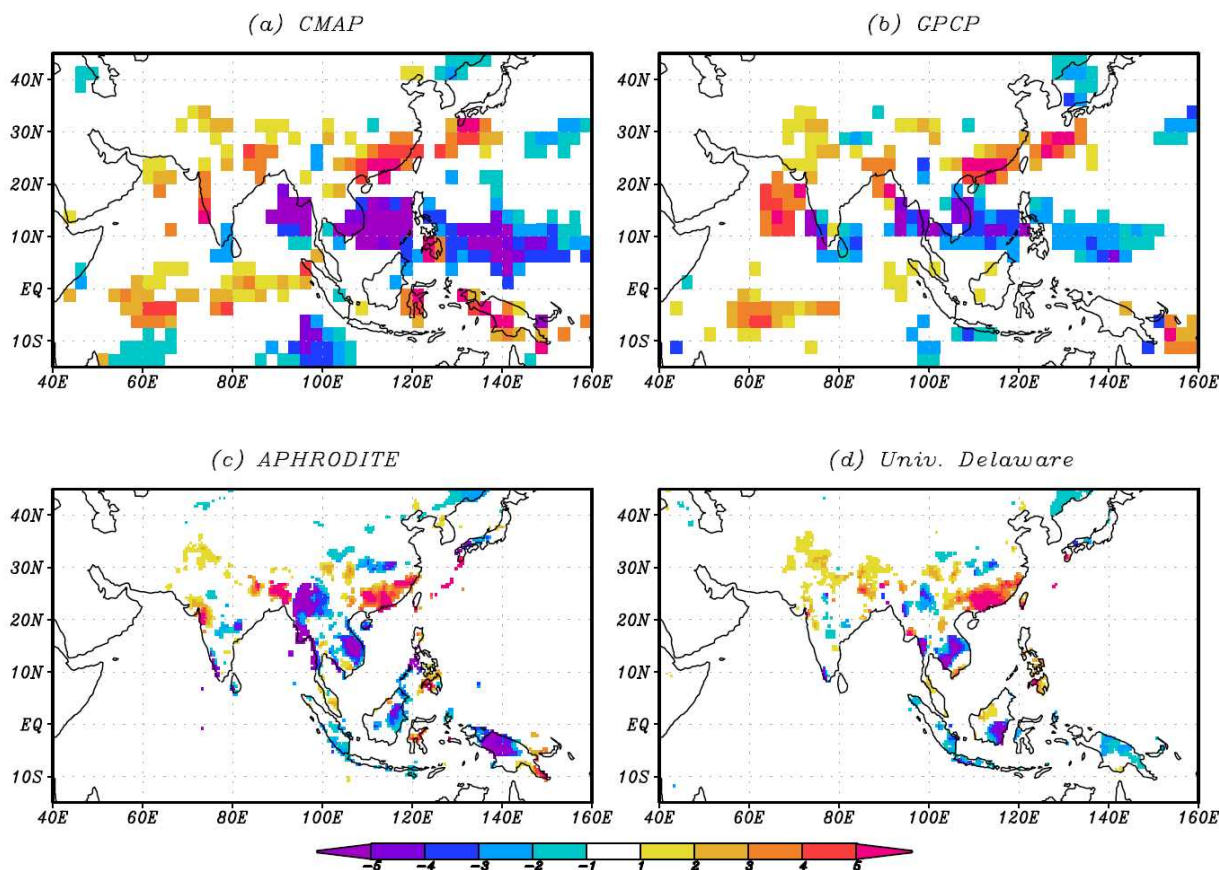
図(4)-1 a) 5月における降水量(CMAP: 陰影: 単位: mm/day)と鉛直積算した水蒸気フラックス(NCEP DOE: ベクトル: 単位: kg/m/s)の線形トレンド。マン・ケン ドール検定で95%有意な箇所のみ陰影。トレンドは30年間(1979 -2008年)の変化を示す。b) a) と同じ、ただし6月の線形トレンド。c) 気候値を用いた降水量と水蒸気フラックスの5月と6月の差。d) 6月から9月平均降水量の線形トレンド(陰影)と気候値(等値線)。

一方、6月の降水量トレンドは夏季平均(6月から9月)降水量の長期傾向とよく似た傾向にある(図(4)-1d)。このことは、6月の降水量変動が夏季降水量変動に対して大きな寄与をもたらしていることを示している。また、北緯10度から15度平均の降水量トレンドの季節依存性を見ると、5月6月の顕著な降水量トレンドに対して、気候学的には年間を通じて最も降水量が多いモンスーン最盛期から後期にあたる7月8月9月の降水量トレンドは有意ではないことがわかる(図(4)-2)。実際、夏季平均を5月から9月と定義すると、5月と6月の偏差が打ち消しあうことにより、北緯10度から15度付近の降水量トレンドは有意ではなくなる(図省略)。これらの事実から、アジアモンスーン域における降水量トレンドは、季節進行の遷移期、特に春期から盛夏期にかけて最も卓越していることがわかった。



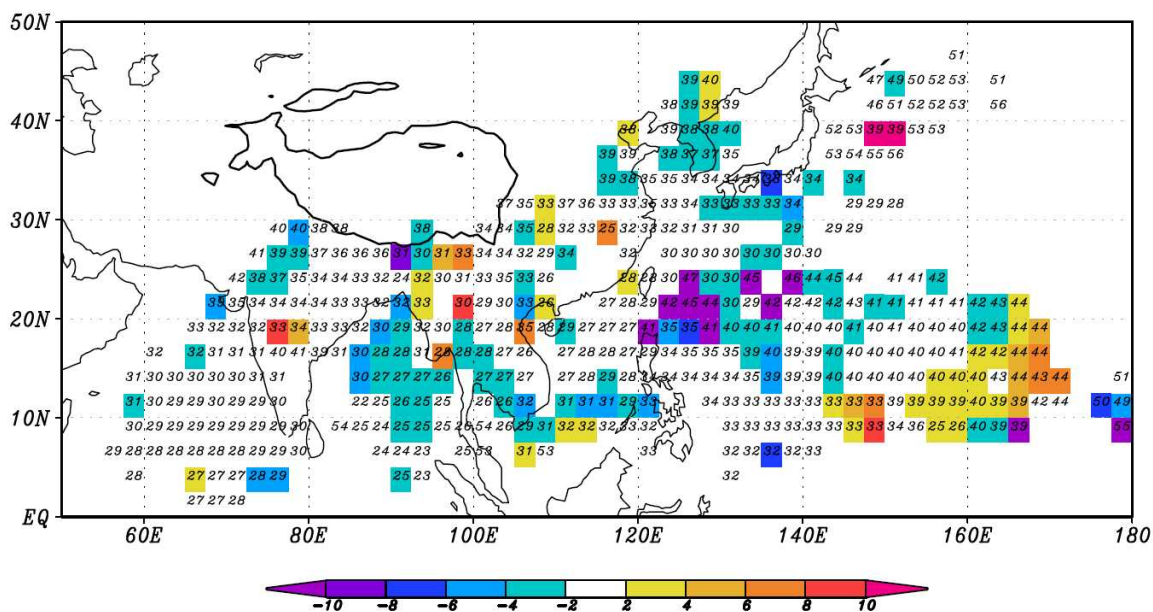
図(4)-2 左) 北緯10度から15度における降水量(CMAP: 陰影: 単位: mm/day)の線形トレンドの経度時間断面図。マン・ケンドール検定で95%有意な箇所のみ陰影。トレンドは30年間(1979年-2008年)の変化を示す。等値線は気候値を示す。右) 北緯10度から15度、東経60度から140度で平均した、降水量の線形トレンドと気候値の時系列。

前項で述べた5月、6月に見られる特徴的な降水量の長期変化傾向、特に中国大陸南部・インドシナ半島・フィリピン諸島の降水量の変化傾向は、異なる4種類の降水量データ全てにおいて見られ、その有意性が確認された。特に5月に見られる、西ガーツ山脈西側やフィリピン諸島での降水量の増加傾向や、6月に見られる、中国南東部の降水量の増加トレンドは顕著であり有意性が高いと考察される(図(4)-3)。一方、赤道以南のスマトラ島、ボルネオ島、ニューギニア島、インドシナ半島の一部(ミャンマーなど)では、地点降水量のみを元に作成されたデータと衛星データを組み合わせたデータとの間に差が見られた。大気循環場や水蒸気フラックスにおける長期変化傾向においても、東南アジア・東アジアモンスーン域では再解析データ間において顕著な差は確認されなかったが、南インド洋やアラビア半島・アラビア海上では、データによって統計的に有意な結果が得られない月や、変化傾向の異なる月が多く見られた。これらの領域については、今後モデル出力結果と対比させて長期変化傾向を議論する場合には、注意する必要があると考えられる。



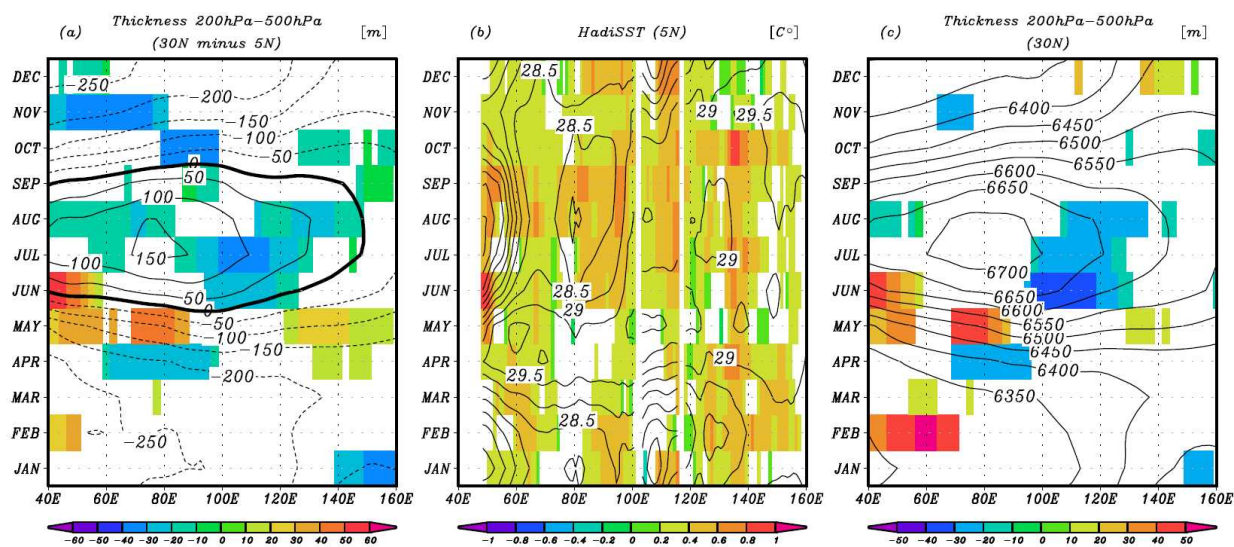
図(4)-3 4つの異なるデータセットを用いて計算された6月における降水量のトレンド。単位はmm/day/30year。赤色系が増加傾向、青色系が減少傾向を示す。

季節進行の早期化に焦点を当て、5日平均値の降水量データを用い、Wang and LinHo (2002)¹⁹⁾の定義に従ってモンスーンのオンセット(開始)半旬(1月平均値を引いた半旬降水量が最初に5 mm day⁻¹を超える半旬)を求め、1979 -1993年平均から、1994 -2008年平均を減じることで、その長期変化傾向を調べた(図(4)-4)。その結果、ベンガル湾から南シナ海にかけてと北部西太平洋で、10日以上オンセットが早くなっていることも確認された。ただし、同じモンスーン域でも、アラビア海域ではあまり顕著な変化は見られず、東経150度より東側の太平洋での海洋性モンスーンのオンセットは10日以上遅くなる傾向があった。アジアモンスーンのオンセットが全般的に早くなる傾向は、降水を伴う対流活動域の北上が早くなる季節進行を示していると考えられ、結果的に5月、6月の平均降水量の長期変動に現れていると考察される。



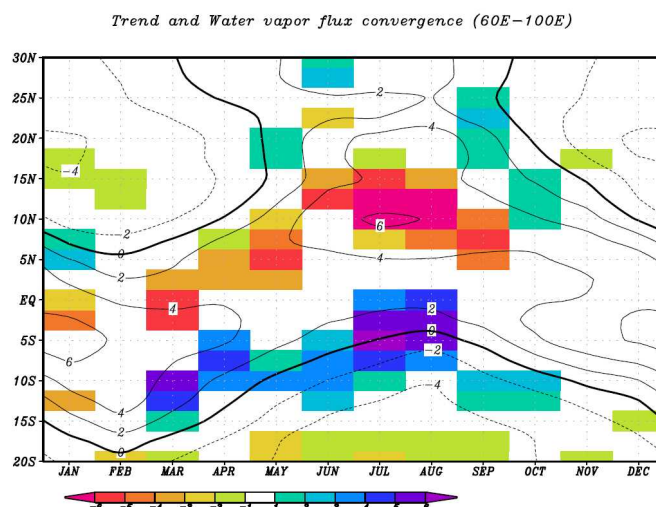
図(4)-4 Wang and Linho (2002)の定義に従い、CMAP降水量データを用いて、1979年から1993年平均値を元に計算されたモンスーンオンセットの半月値(数字)。1994年から2008年平均値と1979年から1993年平均値との差(陰影)。

アジアモンスーンの季節推移(モンスーンオンセット)の早期化について、その変動要因を明らかにするために、更なる解析と考察を行った。図(4)-5aに200-500hPa層厚を指標とした、海陸のコントラスト(北緯30度から北緯5度の値を減じた値)の長期トレンドを示す。気候学的に5月の下旬に逆転する海陸の熱的コントラスト(図中実線)の長期変化傾向は、有為な正のトレンドがアジアモンスーン域、特にチベット高原南麓で5月に顕著である。これは大陸上の高温化を示唆し、海陸の熱的コントラストの逆転を早めている。また、オンセット後の6月7月には海陸のコントラストが、特に中国大陸上で弱くなる傾向にある。この中国大陸上における冷温偏差は Yu et al. (2004)²⁰⁾の研究結果とも一致し、モンスーンの季節進行の早まりと、盛夏期におけるモンスーンの弱まりと整合的である。一方、海面水温についても長期変動傾向を調べた結果、西部赤道インド洋を中心に近年上昇していることがわかり、この上昇傾向は季節に依らず同様であることがわかった(図(4)-5b)。つまり、モンスーンの季節進行に大きな影響を及ぼす海陸の熱的コントラストの長期変化傾向は、大陸上の加熱に強く依存していることが確認された(図(4)-5b、図(4)-5c)。南北の熱的コントラストの季節進行が早くなっていることに伴い5月における大規模なモンスーン循環が強化され、モンスーンの開始が早まったと考えられる。ヒマラヤ山脈南麓に見られる高温トレンドについては、他の研究結果ではエアロゾルの寄与が示唆されており(Lau and Kim, 2006²¹⁾; Lau et al. 2006²²⁾; Gautam et al. 2009²³⁾)、特に興味深い点である。



図(4)-5 a) 層厚(200hPa-500hPa)の南北差(30°N-5°N)の気候値と線形トレンド(単位: m)。マン・ケンドール検定で95%有意な箇所のみ陰影。トレンドは30年間で(1979年-2008年)の変化を示す。b) 5°Nにおける海面水温の気候値とトレンド(単位: °C)、c) 30°Nにおける層厚の気候値とトレンド(単位: m)。

降水量変動に強く寄与する水蒸気フラックスの長期変化傾向についても考察した。水蒸気フラックス収束は、気候値的には、熱帯収束帯の北上に伴い北緯10度から20度の地域に強い収束帯を形成する。この地域の水蒸気フラックスが過去30年間では発散傾向にあることが明らかとなり、全体的な降水量減少と対応していることがわかった(図(4)-6)。一方赤道インド洋上では、水蒸気フラックスが偏差として収束傾向にあることがわかった。これは、東部赤道インド洋の海面水温の上昇傾向と密接に関係があると考えられる。これに伴い、北緯10度から北緯20度の収束域で上昇し、赤道の南で下降するローカルな南北循環(モンスーン循環)が弱化し、上昇域が南偏していること、およびこの傾向は、北半球夏季(6-9月)においても持続していることも確認された。(これらの結果は Kajikawa et al., 2012²⁴) にまとめられている。)

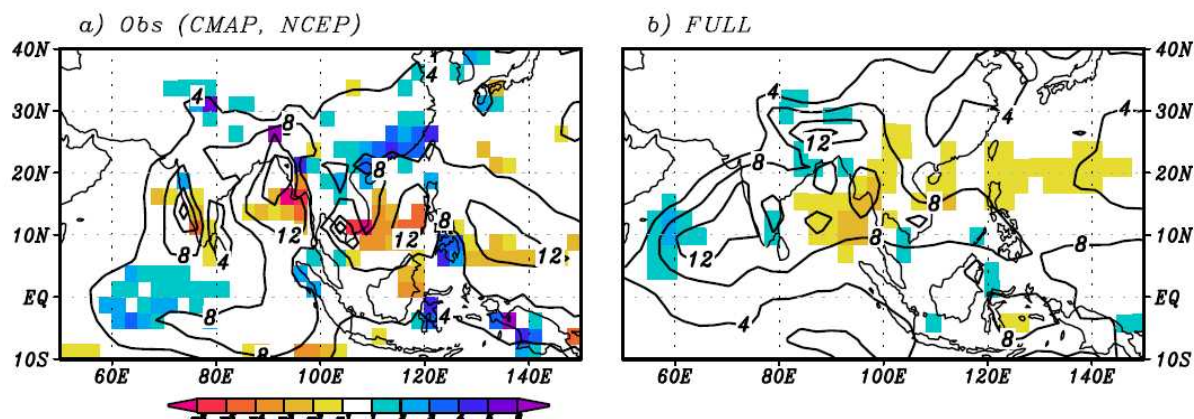


図(4)-6 東経60度から100度における鉛直積算した水蒸気フラックス収束の線形トレンド（陰影）と気候値（コンター）の経度時間断面図。マン・ケンドール検定で95%有意な箇所のみ陰影。トレンドは30年間（1979年-2008年）の変化を示す。

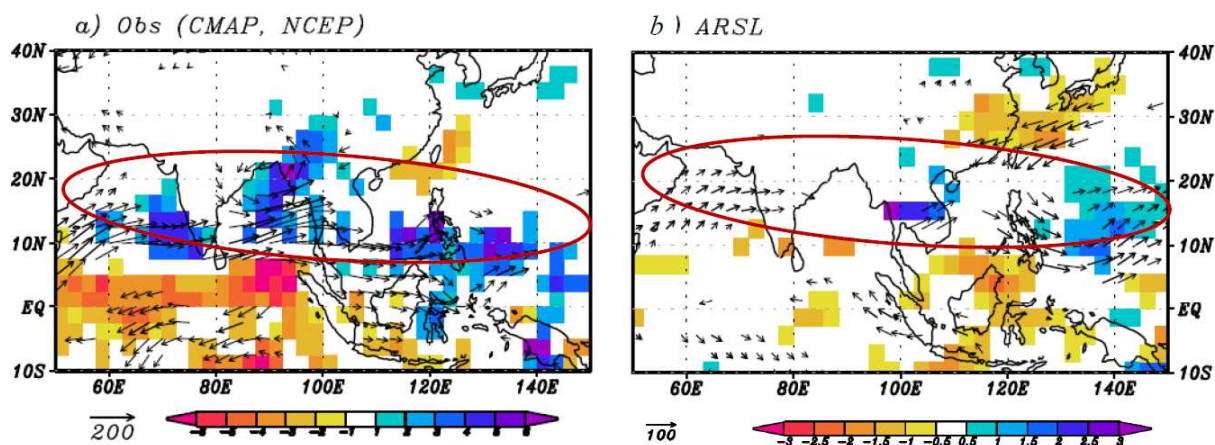
本サブテーマでは上記以外に、顕著な降水量の長期変動傾向が確認された南シナ海モンスーン域に焦点を絞り、大気循環場や外向き長波放射量（OLR）の日平均値を用いることにより、モンスーンのオンセットが早まる傾向について更なるメカニズムの解析を行った。その結果、最近15年間における南シナ海モンスーンのオンセットの早まりには、海陸の熱的コントラストの長期変動傾向や、南シナ海近辺における温度上昇よりも、中西部赤道太平洋から南シナ海へ北西進する季節内変動や相関規模の擾乱、台風に代表される擾乱が大きな役割を果たしていることが示唆された。この示唆を裏付けるように、1994年から2008年では、1979年から1993年に比べて、4月から5月の西太平洋モンスーン域における季節内変動が活発化しており、同時に南シナ海やフィリピン海を通過する台風発生頻度の増加が確認された。前項でも触れた、中西部熱帯太平洋域における海面水温の上昇が、季節内変動や台風等に代表される擾乱の活発化に寄与しているものと推測された（Kajikawa and Wang 2012²⁴⁾）。

大気海洋結合モデル MIROCを用い、全強制を与えた実験（FULL）の結果では、5月における東南アジアや西太平洋において、モンスーン開始期の早まりを示唆するような降水量の増加が見られ、6月から8月の盛夏期における全般的な降水量の減少や、降水量の減少トレンドの南北に降水量の増加トレンドが見られる、特徴的な南北のコントラストを含めた空間構造が、弱い振幅ながらも再現された（図(4)-7）。これらの変動には、基本的に、エアロゾル増加による直接・間接効果が大きく作用していると考えられ、特に5月におけるソマリジェットの強化や、インドシナ半島を含めた西太平洋モンスーン域の降水量の増加、中国南部での降水量の減少は、エアロゾル増加のみを与えた実験（ARSL）にも観測値とよく似た偏差パターンが確認された（図(4)-8）。また、6月から8月平均場でも、ARSL 実験結果に、観測値と似た南北にコントラストのある空間パターンが確認された。このことから、エアロゾルの変動が、モンスーンの長期変動傾向の季節依存性に大きな寄与をしていることが示唆される。一方、観測値で見られたインド洋・西太平洋の海面水温

上昇には、温室効果ガスの増加による加熱が、エアロゾルの増加による冷却効果を上回っていることが確認された（図省略）。観測値と同様にモデル実験内でも、海面水温の変動傾向に季節性がほとんど見られないことから、地表面や大気でのエアロゾルの増減による加熱（冷却）の効果が、モンスーンの長期変動に季節性をもたらしているものと推測された。



図(4)-7 a) CMAPから計算された夏季（6月8月）平均の降水量トレンド（陰影）と気候値（コンター）。b) 全強制を与えた実験（FULL）結果を用いて計算された、夏季（6月から8月）における降水量のトレンドと気候値。単位は mm/day。



図(4)-8 a) CMAPとNCEP/DOE reanalysis2 データから計算された5月における、降水量と水蒸気フラックスのトレンド。単位や陰影は図1と同じ。b) 人為起源エアロゾル増加のみを与えた実験（ARSL）結果を用いて計算された、5月における降水量と水蒸気フラックスのトレンド。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

今回のアジアモンスーン降水量長期変化の地域性・季節性の解析結果は、人為起源にしる、自然起源にしる、持続的な強制に対し、モンスーン降水量の長期変化は季節により大きく異なることが明らかになった。本サブテーマでは、過去の研究で議論されてきた夏季平均（6月から9月）の長期変動傾向に対して、季節進行の遷移期、特に春季から盛夏期にかけて大きな変動傾向が現れることを初めて示した。アジアモンスーンの雨季の開始が近年早期化していることは科学的にも意味のあることである。これは、持続するような海面水温偏差に対しても、温室効果ガスの増加やエアロゾル変化に対しても、季節的に大きく異なる平均気候場のために、モンスーン地域の大気の応答も大きく異なることを示す。季節依存性の重要性を示した本研究結果は科学的にも大きな意義を持つと言える。これらの結果は、本研究課題のみならず、今後、地表面変化、温室効果ガス増加やエアロゾル変化も含めた人間活動による強制によるアジアモンスーン域の気候変動を理解する上で、季節遷移期という新たな着眼点を提唱し、今後の気候変動解析・議論に大きな影響を与えたといえる。

（2）環境政策への貢献

人間活動のアジアモンスーン気候に与える影響は、温室効果ガス増加のみならず、植生変化の影響も含めたエアロゾル変化の影響も同等あるいはそれ以上に評価した対策を立てる必要が出てくると考えられる。エアロゾル変動の気候変動に対する重要性は、近年益々強調されている（e.g., IPCC, 2007）²⁶⁾ が、本研究の結果もそのことを強く示唆している。しかしながら、エアロゾルの変動過程は複雑であり、その気候影響の見積もりには未だ大きな不確定性が存在する。特に夏季平均場での議論が続いてきた、エアロゾル変動の気候影響に対して、季節遷移期に大きなシグナルを発見した点は、これまでの気候変動研究においては実質的に無視されてきた視点である。これら長期変動傾向における季節依存性は、気候・地球環境予測にとって画期的な前進となる可能性が高く、地球環境政策等にも大きく貢献する。貢献の具体的な道筋としては、本研究の成果はIPCC第5次報告書への貢献が期待されるほか、今後のアジアにおけるエアロゾル放出量規制や土地利用計画などにも、直接・間接的に大きく関係してくる可能性もある。

6. 国際共同研究等の状況

アジア地域で進められているESSP（Earth System Science Partnership）傘下のMAIRS（Monsoon Asia Integrated Regional Studies）では、本研究の目標とするエアロゾル、植生変化（土地利用変化）およびその複合効果がモンスーンアジアに与える影響の評価を、ひとつの大きな目的としており、MAIRSへの日本からの直接的で大きな貢献となっている。また、WCRP傘下のGEWEX/MAHASRI（Monsoon Asia Hydro-Atmospheric Science and Prediction Research Initiative）の一環の成果となっている。さらに、WCRP/IGBPのcross cuttingプログラムであるAC&C

（Atmospheric Chemistry and Climate）プロジェクトのアジア地域での重要な成果である。特に、アジア地域の中でも、中国の各種エアロゾルの放出量は大変大きく、アジアモンスーンに与える影響も特に大きいと考えられる。このため、本研究代表者は、中国科学院のFu Congbin教授と連携・協力して、日中二国間を基本とする「気候変動」に関する戦略的国際科学技術協力推進事業も進めており、本研究の結果は、この事業への大きな貢献ともなっている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Takahashi, H. G., Yoshikane, T., Hara, M., Takata, K. and Yasunari, T., (2010) : High-resolution modelling of the potential impact of land-surface conditions on regional climate over Indochina associated with the diurnal precipitation cycle, *Int. J. Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2119.
- 2) Takahashi, H. G., H. Fujinami, T. Yasunari and J. Matsumoto, (2010) : Diurnal rainfall pattern observed by TRMM-PR around the Indochina Peninsula, *J. Geophys. Res.* **115**, D07109, doi:10.1029/2009JD012155.
- 3) Yamashima, R. K. Takata, J. Mastumoto and T. Yasunari, (2011) : Numerical study of the impacts of land use/cover changes 1 between 1700 and 1850 on the seasonal hydroclimate in monsoon Asia. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **89A**, 291-298.
- 4) Kajikawa, Y., and B. Wang, (2012) : Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset. *J. Climate.*, **25**, No.9, 3207-3218, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00207.1.
- 5) Kajikawa, Y., T. Yasunari, S. Yoshida, and H. Fujinami, (2012) : Advanced Asian monsoon onset in recent decades. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL050540

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 安成哲三, 2009 : 私の意見「孫やひ孫が生きる時代の環境を考えよう」, 月刊なごや, No. 325, p. 14
- 2) 安成哲三, 2009 : 学術会議だより～地球・人間圏科学の新たな展開を期して～JGR 日本地球惑星科学連合ニュースレターVol.5 No. 3
- 3) 安成哲三, 2009 : 基調講演「地球環境におけるアジアの生態気候系の重要性—ユーラシア大陸における気候・生態系相互作用とその変化—」, 「楢山人間学研究」第4号p7-p26

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Yasunari, T., S. Yoshida and H. Fujinami “Drastic seasonal changes of long-term precipitation trends from pre-monsoon to monsoon season in Asia during the past 45 years (1961-2005)”, American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall meeting, San Francisco, 15 December 2009.
- 2) Yasunari, T. “Integrated study on anthropogenic impacts on Asian monsoon climate”, MAIRS-Mega city workshop on development of Asian Mega-cities and Impacts on regional climate, Academia sinica, Taipei, Taiwan, 21 Jan. 2010.
- 3) Yasunari, T., “Recent progress in Nagoya University on studies of large-scale biosphere-climate interaction”, Nanjing University-Nagoya University Joint Symposium on Climate and Environment in Asia. Nanjing, Feb.28, 2010.
- 4) Kajikawa, Y., and B. Wang “Decadal change of the South China Sea summer monsoon onset, 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology”, American Meteorological

- Society, Tucson, Arizona, USA, May 10-14, 2010.
- 5) Kajikawa, Y. “Long-term variability of Asian monsoon rainfall and its seasonality”
JST_MOST, International Workshop on, Impact of Asian megacity development on local
to global climate change, Beijing, China, October 10-12, 2010.
 - 6) 梶川義幸, 安成哲三, 吉田周平, 藤波初木 “広域アジアモンスーンの長期変化傾向とその季節
性”, 2010年日本気象学会秋季大会, 京都, 2010年10月27日～29日.
 - 7) Kajikawa, Y., and B. Wang “Decadal change of the South China Sea summer monsoon onset” ,
JSPS international Forum “Climatic Changes in Monsoon Asia” , Bangkok, Thailand,
January 6-7, 2011.
 - 8) Yasunari, T., Y. Kajikawa, S. Yoshida and H. Fujinami “Long-term trends of Asian summer
monsoon and its seasonality during the recent several decades” , JSPS international
Forum “Climatic Changes in Monsoon Asia” , Bangkok, Thailand, January 6-7, 2011.
 - 9) Yasunari, T., Y. Kajikawa, S. Yoshida and H. Fujinami “Long-term trend of Asian
Hydro-Climatic in the recent several decades -natural or anthropogenic?- “, Science
Council of Asia Special workshop “Water-related Disasters in Asia”, Ulaanbaatar,
Mongolia, July 4, 2011.
 - 10) Yasunari, T., Y. Kajikawa and H. Kanamori “Trend of Mongolian Climate in the recent
decades and its implication” , The 11th Science Council of Asia Conference, Ulaanbaatar,
Mongolia, July 5-6, 2011. (Invited)
 - 11) Kajikawa, Y., and B. Wang “Decadal change of the South China Sea summer monsoon onset,
WCRP Open Science Conference” , Climate Research in Service to Society, Denver, CO,
USA, October 24-28, 2011.
 - 12) Yasunari, T., Y. Kajikawa, S. Yoshida and H. Fujinami “Long-term trends of Asian summer
monsoon onset and precipitation during the recent several decades” , WCRP Open Science
Conference, Climate Research in Service to Society, Denver, CO, USA, October 24-28,
2011
 - 13) 梶川義幸, Bin Wang ” 南シナ海モンスーンのオンセットの10 年規模変動” , 日本気象学会
2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月16日-18日.
 - 14) Kajikawa, Y., T. Yasunari, S. Yoshida and H. Fujinami “Long-term trends of Asian summer
monsoon onset and precipitation during the recent several decades” , AGU fall meeting,
San Francisco, CA, USA, December 5-9, 2011.
 - 15) Kanamori, H., and T. Yasunari “Difference of hydrological cycle between Islands and
surrounding oceans over the Indonesian maritime continent” , AGU fall meeting, San
Francisco, CA, USA, December 5-9, 2011.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Santer, B.D. et al. (1995) : Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dyn*, **12**, 77-100.
- 2) Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld (2001): Atmosphere - Aerosols, climate, and the hydrological cycle, *Science*, **294**, 2119-2124.
- 3) Menon, S. (2002): Climate effects of black carbon aerosols in China and India, *Science*, **297**, 2250-2253.
- 4) Arai, M., Miyasaka T., Nozawa T., Nagashima, T. and Kimoto, M. (2010) : Effects of aerosol and greenhouse gasses on the summertime 2 Asian monsoon rainfall trend in the 20th century. *SOLA*, in revision.
- 5) Takata, K., Saitoh, K. and Yasunari, T. (2009) : Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by pre-industrial cultivation. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, USA, doi:10.1073/pnas.0807346106
- 6) Xie, P. P., and P. A. Arkin (1997) : Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- 7) Huffman, G. J., and Coauthors (1997) : The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 5-20.
- 8) Yatagai, A., O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto, M. I. Nodzu, and A. Hamada (2009) : A 44-Year Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges, *Sola*, **5**, 137-140, doi: 10.2151/sola.2009-035.
- 9) Legates, D. R., and C. J. Willmott (1990) : Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation, *Int. J. Climatol.*, **10**, 111-127.
- 10) Kalnay, E., and Coauthors (1996) : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- 11) Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter (2002) : Ncep-Doe Amip-Ii Reanalysis (R-2) , *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643, 10.1175/Bams-83-11-1631.
- 12) Uppala, S. M., and Coauthors (2005) : The ERA-40 re-analysis, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012, doi: 10.1256/qj.04.176.

- 13) Onogi, K., and Coauthors (2007) : The JRA-25 reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 14) Liebmann, B., and C. A. Smith, (1996) : Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- 15) Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V., Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, (2003): Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and nightmarine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi:10.1029/2002jd002670.
- 16) Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, (2010): The International Best Track Archive for Climate Stewardship (Ibtracs) Unifying Tropical Cyclone Data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 362-.
- 17) Hasumi, H. and Emori, S.: K-1 coupled model (MIROC) description, K-1 technical report 1, Tech. rep., Center for Climate System Research, University of Tokyo, 2004.
- 18) 木本昌秀, (2006): スーパーコンピュータを用いた気候システムの研究. スーパーコンピューティングニュース, Vol.8, No. Special Issue 1, 27-37.
- 19) Wang, B., and LinHo (2002): Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon, *J. Climate*, **15**, 386-398.
- 20) Yu, R. C., B. Wang, and T. J. Zhou (2004): Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22212, doi:10.1029/2004GL021270
- 21) 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.
- 22) Lau, K. M., M. K. Kim, and K. M. Kim (2006): Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau, *Climate Dyn.*, **26**, 855-864, doi:10.1007/s00382-006-0114-z.
- 23) Gautam, R., N. C. Hsu, K.-M. Lau, S.-C. Tsay, and M. Kafatos (2009); Enhanced pre-monsoon warming over the Himalayan-Gangetic region from 1979 to 2007, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07704, doi:10.1029/2009GL037641..
- 24) Kajikawa, Y., and B. Wang, (2012) : Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset. *J. Climate.*, **25**, 3207-3218, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00207.1.
- 25) Kajikawa, Y., T. Yasunari, S. Yoshida, and H. Fujinami, (2012) : Advanced Asian monsoon onset in recent decades. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL050540
- 26) IPCC (2007) : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 996pp.

Integrated Impact of Vegetation and Aerosol Changes on Asian Monsoon Climate

Principal Investigator: Tetsuzo YASUNARI

Institution: Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

Furo-cho chikusa-ku Nagoya Japan

Tel:+81-052-789-3465 Fax:+81-052-789-3436

E-mail: yasunari@hyarc.nagoya-u.ac.jp

Cooperated by: Nagoya University, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
Tokyo Metropolitan University.

[Abstract]

Key Words: Asian monsoon change, Aerosol change, Vegetation change, VOCs, Chemistry climate model

To assess the roles of aerosols in the past/present changes in Asian monsoon climate, changes of individual aerosol components and their radiative forcings were examined using the climate model(MIROC) coupled with the aerosol model SPRINTARS and the chemistry model CHASER. The model simulations for the period from the pre-industrial time to the present suggested that Secondary Organic Aerosols (SOA) decreased until the middle of the 20th century owing mainly to decrease in biogenic Volatile Organic Carbons (VOCs) through land use change (especially in Asia), which possibly contributed to the warming trend in the former half of the 20th century. On the other hand, increases in nitrate as well as sulfate caused radiative cooling effects in the latter half of the 20th century in Asia.

The time-slice experiments using the MIROC-5 model were conducted to assess climate change due to the SOA changes. The direct effects were not significant, but precipitation over the ocean changed with the negative relation to the changes in sulphate aerosols, suggesting the indirect effects including feedbacks with the atmospheric and hydrologic circulations.

By using station-based long-term meteorological data, a significant weakening trend of the East Asian winter monsoon was noticed since 1900. The overall weakening trend of the winter and summer monsoon in the Indochina Peninsula were also detected for the period 1961-2000.

By using objectively analyzed precipitation and atmospheric circulation data for the recent three decades (1979-2008), significant intra-seasonal differences of the long-term trend of the Asian summer monsoon were elucidated. The monsoon onset over south/southeast Asia have become earlier in the recent three decades, reflecting the increasing (decreasing) trend of rainfall in May (June). Analysis of the climate model simulation data by MIROC-3 suggested that the change in anthropogenic aerosol forcing is likely to have induced increasing trend of rainfall in May. It was also suggested that the impact of aerosol forcing on the Asian monsoon change is

relatively large even compared to that of the greenhouse gases, but with strong intra-seasonal dependency. These model results are compatible with the observed trends of Asian monsoon.

アジア地域に適用してアジアモンスーン気候への影響を調べる

