

課題名	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		
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）		
研究期間	平成18-20年度	合計予算額	165,737千円（うち20年度 50,394千円） ※上記の合計予算額には、間接経費37,739千円を含む
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) アジアモンスーン降水量変化の広域・高精度解析（首都大学東京）</p> <p>(2) 気候モデル「地球温暖化」実験によるアジアモンスーン変化の評価（東京大学気候システム研究センター）</p> <p>(3) 気候モデル「エアロゾル増域」実験によるアジアモンスーン変化の評価（名古屋大学環境学研究科）</p> <p>(4) 気候モデル「土地被履・植生改変」実験によるアジアモンスーン変化の評価（独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター）</p> <p>(5) 人間活動によるアジアモンスーン変化の総合的解析（名古屋大学地球水循環研究センター）</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>温室効果ガス増加など人間活動による気候変化の予測とその影響評価・対策は、IPCCにおける主テーマであるが、日本を含むアジアの気候変化予測で最も重要かつ緊急の課題は、アジアモンスーンとその降水量がどう変化するかという問題である。IPCC 2007年の報告(FAR)は、アジアモンスーン降水量の将来約100年の予測見解として、全体として降水量は増加するとしているが、モデル間の差は非常に大きい。また、地域ごとの降水量予測も、非常に大きな不確実性がある。このように、アジアモンスーン降水量の予測に関しては、確たる科学的根拠のある結果が得られているとは、とてもいいがたい状況である。これは、アジアモンスーン変動に関与する大気・海洋・陸面間のフィードバック過程に、未解明の部分が多いことに因っている。いっぽう、過去の観測事実をみると、すでに温室効果ガス増加の効果が顕在化しているとも考えられる最近20-30年に限っても、モンスーン（降水量）の長期変化傾向には、地域ごとに大きな違いがあり、気候モデルの予測結果との整合性は、現在のところ、非常に弱い（安成、2005など）。</p> <p>世界の半数以上の人口が集中した地域での気候と水に関わる重要な問題として、WCRPでも、「地球温暖化」に伴うアジアモンスーン予測を、今後進めるべき最重要・緊急課題のひとつとして掲げている。さらに、モンスーンアジア地域では、18世紀以降、特に最近数十年、農業・工業活動が世界でも最も集約的・爆発的に進められており、温室効果ガス増加に加え、人為・自然起源のエアロゾル増加や、土地利用・植生の改変によって、過去も含めて、アジアモンスーンが大きく影響を受けていることも、最近の気候モデルおよび観測研究で指摘されている。詳細な観測データと最新の気候モデルを用いて、人間活動によるモンスーン変化の機構解明と今後の予測に貢献する研究を行うことは、この地域の水資源、水災害の予測と対策にとっても非常に重要な課題である。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究ではまず、人間活動がアジアモンスーン気候の変化に及ぼす可能性の高い3つの要素、即ち、全球的な温室効果ガス増加、アジア地域でのエアロゾル量変化、および土地被履・植生改変に伴うモンスーン降水量の長期的変化を、過去数十年（以上）のデータによる実態解明と高精度気候モデルによる数値実験により、大気・海洋系などの自然的原因による長周期変化成分との分離も含めて定量的に評価する。さらに、モデルのパフォーマンスを確認しつつ、上記の人間活動要素の将来変化シナリオにもとづき、単独および複合的な効果によるアジアモンスーン予測を、地域も考慮して、可能な範囲で行う。5つのサブテーマにおける目標は以下の通りである。サブテーマ5は、他の4つのテーマの結果を総合的に評価する、総括グループに対応する。</p> <p><u>サブテーマ1：アジアモンスーン降水量変化の広域・高精度解析</u></p> <p>過去数十年（以上）におけるアジア多地点降水量データなどにより、モンスーン降水量の長期変化を、季節、地域などの違いも考慮して、詳細に明らかにする。</p> <p><u>サブテーマ2：気候モデル「地球温暖化」実験によるアジアモンスーン変化の評価</u></p> <p>過去数十年（以上）の海面水温を与えた高精度GCMと、IPCC第4次報告書(FAR)へ向けて進められている高精度大気海洋結合GCMによる「温暖化予測」結果を、アジアモンスーンの水循環変化に</p>		

焦点をあてて総合的に解析し、モンスーン変化予測における問題点の解明を行う。

サブテーマ3：気候モデル「エアロゾル増減」実験によるアジアモンスーン変化の評価

過去数十年(以上)のエアロゾルの排出データを与えたGCMによるシミュレーション結果により、エアロゾルの増減によるアジアモンスーン変化を、観測データと比較して評価する。

サブテーマ4：気候モデル「土地被覆・植生改変」実験によるアジアモンスーン変化の評価

特に中国(東アジア)と東南アジアを中心とした過去の土地被覆・植生変化データを与えた、GCMおよび領域気候モデルによるシミュレーション結果により、土地被覆・植生改変によるモンスーン変化を、過去数十年(以上)の観測データと比較して評価する。

サブテーマ5：気候モデルと観測データ解析による人間活動によるアジアモンスーン変化の統合的解析

サブテーマ1から4の結果を総合して、各種の人間活動要素(温室効果ガス増加、エアロゾル変化、土地被覆・植生変化)が、モンスーン降水量変化へ与える影響の相対的な役割を、過去の変化と、シナリオにもとづく将来予測も含め、定性的定量的に評価する。

これら5つのサブグループを基本とした、課題全体の研究の流れを図1に示す。

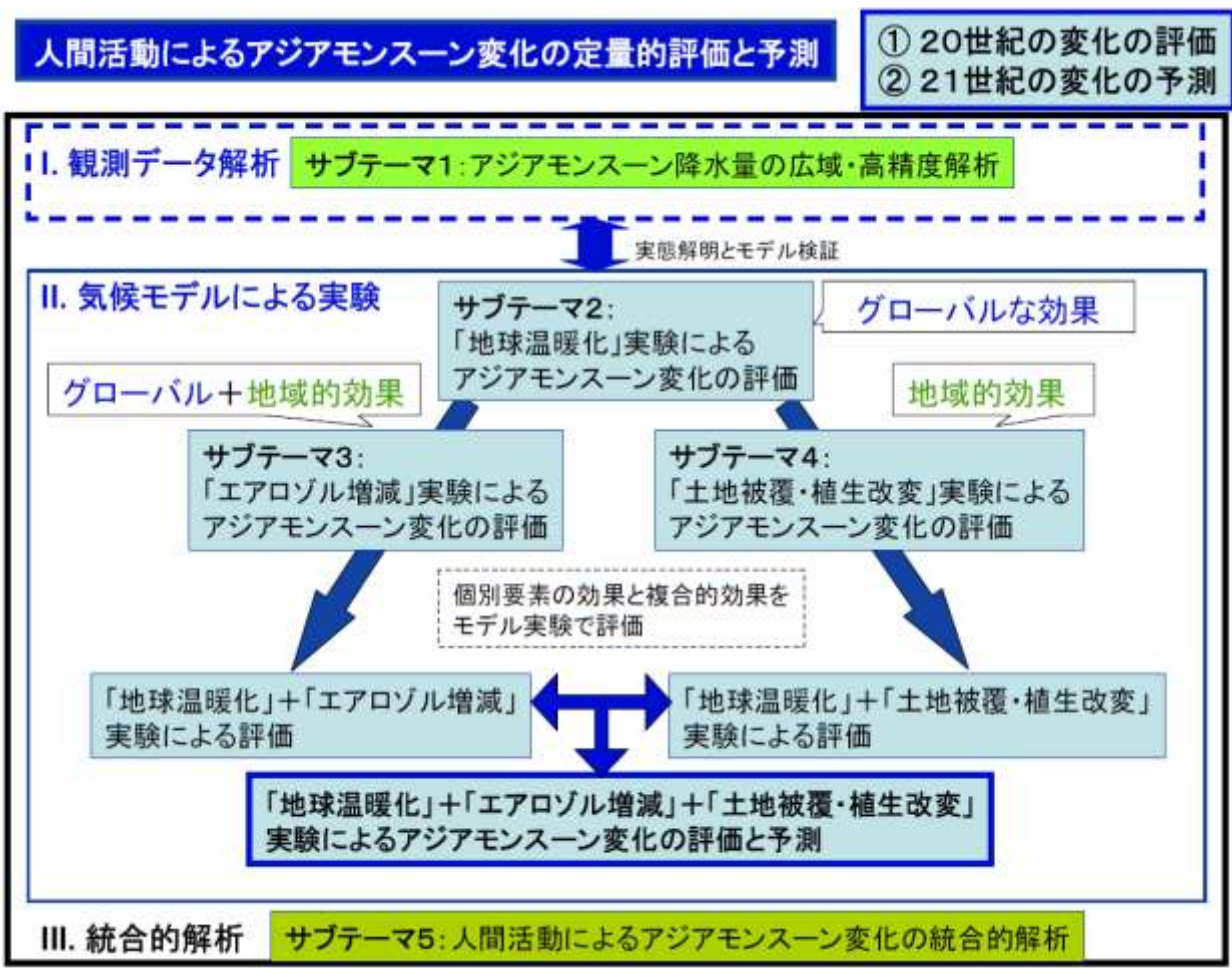


図1：「人間活動によるアジアモンスーン変化の定量的評価と予測」の5つのサブテーマを基本とした全体の研究の流れ

3. 研究の方法及び結果

(1) アジアモンスーン降水量変化の広域・高精度解析

複数の陸上域での降水量のグリッドデータセットを用いて、過去の観測データによるアジアモンスーン地域での前世紀における降水量の長期変動傾向を調査し、長期の降水変化傾向のデータセット間での相違、地域や季節性について明らかにした。独自に収集したデータから新たな降水量グリッドデータも作成し、既存のデータとの比較も行った。データセット間での違いは中国やインドでは小さく、東南アジアやバングラデシュで大きく、これらの地域における長期変化の研究には注意が必要であることがわかった。降水量の長期変化傾向としては、夏のモンスーン季にチベット高原南東部やバングラデシュ・長江流域に有意な増加傾向が認められた。降水量の変化傾向として、インド周辺での春季と夏季に顕著な変化がみられたため、インドにおいて降水の季節変化および長期変化傾向の地域性について詳細な解析を行なった。長期変化の原因となる大気循環の変化として、夏についてはアラビア海での西風ジェットの弱まりが、春については季節内変動の変化が主要な原因として考えられた。フィリピンでは、これまで使われていなかった前世紀前半の日降水量データを本研究の実施中に発見し、新たなデータセットを作成し、降水量・降水日数・雨季入りの時期・台風襲来数などの長期変化についての詳細な解析を行った。夏の雨季入りが近年遅くなる傾向があると共に、年による変動がきわめて大きくなっていること、台風の上陸数には20世紀を通じて数十年スケールでの長期変動が卓越し、顕著な長期変化傾向は認められないことがわかった。台風の長期変化傾向については、地域による違いも大きいことがわかった。

(2) 気候モデル「地球温暖化」実験によるアジアモンスーン変化の評価

上記の気候モデルを用いて20世紀再現実験を行い、その結果をもとに人為起源要因の夏季アジアモンスーンの長期変化に及ぼす影響を見積もった。外部強制を全て考慮に入れた実験結果では、20世紀中100年間の線形トレンドにおいて、赤道西太平洋域－東インド洋には乾燥傾向、亜熱帯西太平洋域では湿潤傾向を持つ空間構造が見られた。強制を各要素別にした実験より、20世紀中のモンスーン域の降水変化は人為起源要因でほぼ説明できることがわかった。また、人為起源要因の中ではエアロゾルの効果と温室効果気体の効果が特に大きく、この2つは反対符号を持つ。

また、観測された海面水温を与えて同期間行った実験結果の降水トレンドは、大気海洋結合モデルのそれとは逆の傾向を持ち、観測結果と一致していた。このことにより、大気海洋結合モデルではエアロゾルの効果を大きく見積もっていたことが分かる。温室効果気体の濃度が増加し人為起源エアロゾルの放出が抑制される今世紀中盤の予測結果では、温室効果気体の効果がエアロゾルのそれと比較して大きくなる。

(3) 気候モデル「エアロゾル増減」実験によるアジアモンスーン変化の評価

各種エアロゾルのアジアモンスーンへの影響を明らかにするために、化学・エアロゾル気候モデルを構築して、数値モデル実験を行い、以下のような成果を得た。1) 全球を対象としたエアロゾル気候モデルSPRINTARS内で扱われているエアロゾル・雲生成過程に関するスキーム整備を行った。また、エアロゾルおよびエアロゾル源気体の地表エミッションデータベースを、既存のものを基に、東アジア域の精緻化を中心に、整備した。2) 今後はアジア域で硫酸塩よりも硝酸塩の増加が見込まれることから、SPRINTARSにエアロゾル熱力学平衡モジュールを組み込み、化学気候モデルCHASERの活用により硝酸塩(NO_3^-)のシミュレーションを新たに導入して、化学・エアロゾル気候モデルを構築し、診断計算を行って、モデル中の硝酸塩シミュレーションの妥当性を確認した。その結果、特にインド周辺において、アンモニウム濃度が高いために高濃度の硝酸塩が、放射・雲/降水過程への影響として、硫酸塩(SO_4^{2-})に匹敵する可能性があることを明らかにした。3) 水溶性のエアロゾルとしては、硫酸塩、硝酸塩の他に、有機炭素エアロゾルがある。そのうち、陸域植生から放出された炭化水素類が大気中で酸化されて生じる二次有機エアロゾル(SOA)は、森林から農地への転換などの土地利用変化に伴う植生種別変化や葉バイオマス変化などにより、大きく変化すると考えられる。アジア域でのこのSOA変化が、アジアモンスーンにどのように影響するかについて数値モデル実験を行うため、サブテーマ4と連携し、植生からのSOAエミッションデータを作成した。4) 土地利用変化などに伴う硝酸塩およびSOAの各エアロゾルの変化の気候影響を明らかにするため、過去(産業革命前)および現在の気候を再現する数値モデル実験を実施し、それぞれのエアロゾルの放射強制力を見積もった。この結果、特にインド・バングラデシュを中心とした南アジア域においては、硝酸塩増加による強い冷却効果(-1 W m^{-2})とSOA減少による強い加熱効果($+0.5$ から $+1 \text{ W m}^{-2}$)とが起こることを明らかにした。

(4) 気候モデル「土地被覆・植生改変」実験によるアジアモンスーン変化の研究

土地被覆・植生改変がアジアモンスーンに及ぼす影響について、歴史的な植生分布データを与えた大気大循環モデルによる中解像度実験を行い、人為起源の気候変動要因が主に植生改変だったと考えられる1700～1850年の変化について調べたところ（図2a）、インド亜大陸西岸と中国南東部では耕地化によって粗度が減少する効果が顕著に現れて夏季降水量が減少することが示され（図2b）、インド亜大陸西岸の降水量減少はヒマラヤの氷河コア解析によるインドのモンスーン降水量の長期変動と定性的・定量的に一致することが明らかになった。また、季節変化への影響について調べたところ、1700年頃に対して1850年頃はインド亜大陸で春季の地表面の乾燥化が明らかになり、モンスーンの開始が遅れて終了が早まっていた可能性が示唆された。一方、植生改変によって有機エアロゾルの発生量が増える複合効果について調べるために、有機エアロゾル発生量の算定資料となる葉バイオマス量の推移を歴史的植生分布変化に基づいて推定した。

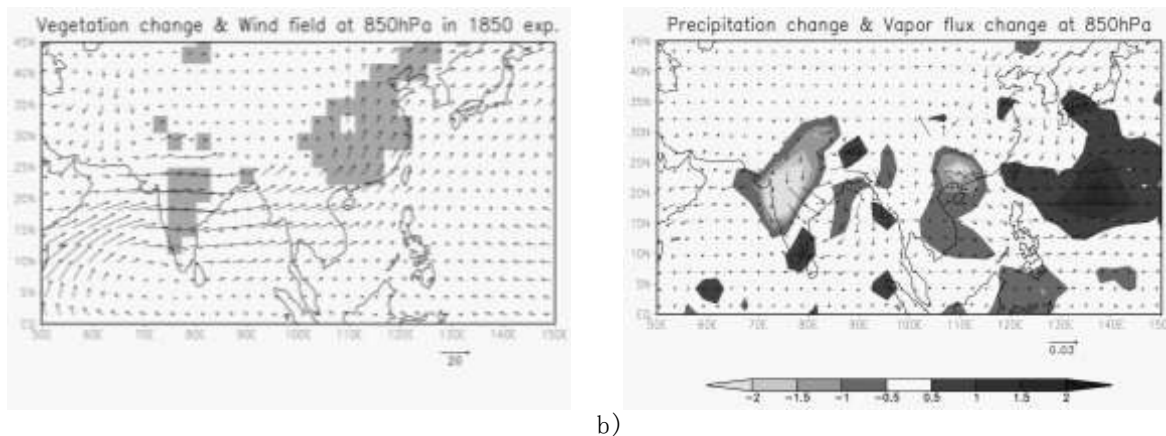


図2 a) 1850年実験850hPaの6～8月平均の風速場(ベクトル)と1700～1850年の植生改変域(影)。b) 1700年～1850年の6～8月平均の降水量(影、 mm day^{-1})と水蒸気収束(ベクトル、 m/s)変化。

高解像の領域気候モデルを用いて降水と局地循環の変化を含めた植生改変の影響を調べたところ、インドシナ半島では耕地化による地表加熱の増大は降水量の増大をもたらすことが示され、過去30年間の9月の降水量の減少傾向は、植生が変化しなくても大規模な大気場の長期変動を与えることによって説明できることが明らかになった。半乾燥地域の黄河灌漑域では、灌漑による地表面温度の低下によって水平温度勾配に起因する局地循環が形成され、高解像衛星データで示された特徴的な雲分布をもたらすことを明らかにした。一方、梅雨降水帯への影響について広域を対象とした領域気候モデルによる植生改変実験を行い、水蒸気輸送域や陸上降水帯が顕著に変化することを示した。また、再解析データによる大規模循環場の過去の変動量を上乘せした疑似温暖化実験を行って梅雨降水帯の過去の長期変動を再現できることを示し、GCMによる将来の変化予測を上乘せした実験では、GCMのモデルバイアスを大きく軽減することを示した。

(5) 気候モデルと観測データ解析による人間活動によるアジアモンスーン変化の統合的解析

サブグループ1の大気海洋結合気候モデル(CGCM)による20世紀再現実験結果(T42版)を、サブグループ2による過去100年および50年におけるアジアモンスーン地域の観測降水量変化と詳細に比較した。その結果、過去50年間(1951-2000年)の観測降水量変化の解析は、南アジアと東アジアのモンスーン前半(6-7月)を中心に弱いながら増加傾向と、対照的に西南アジア、アラビア、北東アフリカの乾燥地域の顕著な降水量減少が見られ、対応する大規模な熱帯東西モンスーン循環の強化が示唆された。これらの観測降水量変化と温室効果ガス増加とエアロゾル増加を別々に評価したCGCM実験と比較した結果、温室効果ガス増加とエアロゾル増加のいずれもが、すでに20世紀のモンスーン変化に大きな影響を与えている可能性が示唆された。さらに、インド亜大陸にみられる北東部での増加傾向のトレンドは、温室効果ガスのみによるCGCMの結果とよく対応し、南西部の減少傾向トレンドは、それほど顕著ではないが、エアロゾル効果のみを考慮したCGCMの結果と比較的対応していることが明らかになった。

温室効果ガス増加の影響が無視できる産業革命以前の1700～1850年については、大気大循環モデル(AGCM)による数値実験により、植生改変(森林破壊)のモンスーン気候への影響を、サブグループ4と共同で行い、インドと中国南部域で特に顕著な変化傾向を見出したが、その詳細な熱・水収支変化から、植生改変の効果のダイナミクスを考察し、論文として出版した。

また、IPCC-AR4に参加した8つの大気海洋結合モデルの21世紀予測実験の結果を、インドモンスーンの大気水収支変化に着目して解析した結果、どのモデルにおいても降水量は増加しているが、

その空間分布は、陸上・海上で大きく異なり、増加に寄与する蒸発量と水蒸気収束量の割合も、モデルにより大きく異なることがわかった。

4. 考察

(1) 過去50年(100年)の夏季アジアモンスーン降水量変化は、東アジア、南アジアの一部に増加傾向と減少傾向が見られるが、モンスーン地域全体としての長期傾向は、必ずしも明瞭でないことがわかった。

(2) この観測結果は、IPCC-AR4などで予測されている今後100年の全般的な増加傾向が、すでに現れているとする見方を必ずしも支持しない。

(3) ただし、CGCMによる温室効果ガスとエアロゾル増加の効果を、個別に評価した実験および両方を含めた実験からは、温室効果ガスによる増加傾向強化と、エアロゾル増加による減少傾向強化が、20世紀には、ほぼ拮抗しているために、観測値の変化傾向は、全体として顕著ではないとの解釈もできることが強く示唆される。アジアモンスーン変化に関しては、エアロゾル変化の影響は、かなり大きいと判断できそうである。

(4) 1700年以降、約300年間の土地被覆・植生変化がアジアモンスーンを含む熱帯循環、水文気候に与える影響をAGCMで評価した結果は、夏季、熱帯域での植生変化に対する応答が、その他の季節と(中高緯度)地域での変化に対する応答に比べ、非常に大きいことがわかり、植生改変の地域と広がり的重要性であることが示唆された。

(5) 特に、インドモンスーンの1700年代(以前)は、森林の存在により、現在よりもモンスーンは強く、モンスーンの開始も早く、終了も遅かったことが示された。

(6) 1900年代後半に顕著であった東南アジアの局地的な植生改変の影響は、より広域の大気循環の状態、地形の存在と地表面の湿り(乾き)具合で、大きく変わる特性があり、より高精度、高解像のモデルによる評価が必要である。

(7) エアロゾル効果で、これまで考慮されていなかった土地利用変化などに伴う硝酸塩およびSO₄の影響は、特にインド・バングラデシュを中心とした南アジア域において大きいことが分かり、今後はこれらの効果も組み込んだより高度のエアロゾル・化学気候モデルによる検証が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究で問題にした人間活動要素は、アジアモンスーンの降水量および大気循環の長期変化に対し、いずれも、異なったかたちで、大きく寄与する要素であることがわかった。特に、

1) 温室効果ガス増加は、海面水温変化を通じた水蒸気量の増加により、特に海洋上と地形効果の大きい陸域で降水量増加に寄与する

2) エアロゾル増加は、直接効果による放射収支への変化、間接効果による雲量と雲構造への変化を通して、陸域での降水量減少に寄与する

3) これらの人為活動要素に対するアジアモンスーン循環の変化には、この地域の固有の変動パターンの振幅や極性変化というかたちで現れやすい

4) これらの人為活動のモンスーン降水量変化への影響の特性を調べる上で、地表面熱・水収支と大気の水収支水蒸気輸送・収束の変化の解析は重要であることがわかった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究で取り上げた3つの人間活動要因によるアジアモンスーンの長期変化は、大気・海洋系変化や太陽エネルギー変化などの自然要因に比べても、かなり大きな要因であることが、明確に分かってきた。特に、まだ不確定性は大きいものの、20世紀後半での変化については、温室効果ガスの効果に比べても、エアロゾル変化の効果が、海洋大陸域を含めたアジアモンスーン降水量の変化に対し大きいことが強く示唆された。特に温室効果ガスの効果とエアロゾル変化の効果は、大気・海洋・陸面相互作用とリンクして、この地域の自然変動モードの特性を変えるといふかたちで現われることも明らかになった。また、地域的・局地的な降水量変化には、土地被覆・植生変化の効果も重要であることが示されている。これらの人間活動要因は、アジアモンスーン地域で場所と季節により、影響の現われ方と大きさがかなり異なることも示された。いずれにせよ、今後のアジアにおける地球環境政策には、温室効果ガスだけでなく、エアロゾル変化や土地被覆・植生変化に関係する要素の長期モニターや、変化への規制措置などを進めるための基礎的な情報提供として、本研究は大きく貢献できるものと考えられる。

6. 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教授

主要参画研究者

(1) : 松本淳

1957生まれ、東京大学理学部卒業、現在、首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授

(2) : 高藪縁

1959生まれ、東京大学理学系研究科修士課程卒業、現在、東京大学気候システム研究センター教授

(3) : 神沢博

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

(4) : 高田久美子

1963生まれ、筑波大学自然学類/京都大学大学院理学研究科卒業、現在、(独)海洋研究開発機構地球環境変動領域主任研究員

(5) : 安成哲三 (課題代表者に同じ)

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) Yasunari, T., (2007), Role of Land Atmosphere Interaction on Asian Monsoon Climate, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 85, 55-75
- 2) 遠藤伸彦・松本淳・山本奈美・福島あずさ・赤坂郁美：地学雑誌, 116, 6, 824-835, (2007), “世界における降水量と降水特性の長期変化”
- 3) Arai, M., and M. Kimoto, (2007), Simulated interannual variation in summertime atmospheric circulation associated with the East Asian monsoon. *Climate Dyn.*, doi 10.1007/s00382-007-0317-y.
- 4) K. Saito, M. Kimoto, T. Tingjun, K. Takata, and S. Emori: *J. Geophys. Res.*, 112, F02S11, doi:10.1029/2006JF000577 (2007), “Change in hydro-thermal regimes in frozen ground regions under global warming scenario simulated by a high-resolution climate model.
- 5) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Sato, and S. Osawa (2008), Impact of extensive irrigation on the formation of cumulus clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01806, doi:10.1029/2007GL032435.
- 6) H. Kawase, T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Sato, and S. Osawa: *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01806, doi:10.1029/2007GL032435 (2008), “Impact of extensive irrigation on the formation of cumulus clouds”
- 7) K. Saito: *J. Geophys. Res.* 113, D21106, doi:10.1029/2008JD009880 (2008), “Arctic Land Hydro-thermal Sensitivity under Warming: Idealized Off-Line Evaluation of Physical Terrestrial Scheme in Global Climate Model”
- 8) K. Saito: *Proc. 9th International Conference on Permafrost*, 1555-1560 (2008), “Refinement of Physical Land Scheme for Cold-region Subsurface Hydro-thermal Processes and its Impact on Global Hydro-climate”
- 9) H. Kawase, T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura, and T. Yasunari: *SOLA*, 4, 73-76 (2008), “Downscaling of the Climatic Change in the Rainband in East Asia by a Pseudo Climate Simulation Method”
- 10) H.G. Takahashi and T. Yasunari: *J. Meteorol. Soc. Japan*, 86, 429-438, doi:10.2151/jmsj.86.429 (2008), “Decreasing Trend in Rainfall over Indochina during the Late Summer Monsoon: Impact of Tropical Cyclones”
- 11) H.G. Takahashi, T. Yoshikane, M. Hara, and T. Yasunari: *Atmospheric Science Letters*, 10, 14-18, doi:10.1002/asl.2032008 (2008), “High-resolution regional climate simulations of the long-term decrease in September rainfall over Indochina, ”

- 12) Saito, S., I. Nagao, and H. Kanzawa (2009): Characteristics of ambient C2-C11 non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan. *Atmos. Environ.*, 43, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.031, in press, 2009.
- 13) K. Takata, K. Saito, T. Yasunari: *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America* (2009), "Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by pre-industrial cultivation" (in press)
- 14) K. Tanaka, N. Yoshifuji, N. Tanaka, K. Shiraki, C. Tantasirin, M. Suzuki: *Ecological Modelling* (2009), "Water budget and the consequent duration of canopy carbon gain in a teak plantation in a dry tropical region: Analysis using a soil-plant-air continuum multilayer model" (in press)