

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
(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

安成哲三
中村健治
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 堀正岳、V. Prasanna

平成18～20年度合計予算額 50,306千円
(うち、平成20年度予算額 13,128千円)

※上記の合計予算額には、間接経費11,609千円を含む

[要旨] 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により、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、温室効果ガス増加およびエアロゾル増加を別々に評価したCGCM実験による降水量変化を比較した結果、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(P)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。

[キーワード] 気候モデル、温室効果ガス増加、エアロゾル変化、土地利用変化・植生改変、アジアモンスーン

1. はじめに

二酸化炭素などの温室効果ガスの増加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 2001年の報告(TAR)は、アジアモンスーン降水量の将来約100年の予測見解をまとめた結果、全体として降水量が増加しているが、モデル間の差は非常に大きい。また、地域ごとの降水量は、モデル間で非常に大きなばらつきがあり、地域ごとの予測には非常に大きな不確定性がある。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。一方、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、極めて弱い(安成、2005¹⁾など)。

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では、「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、2005年から開始されたCOPES(地球システムの統合的観測・予測計画)でも、重点的に推進されるべき最優先課題としている。さらに、モンスーンアジア地域では、最近の数十年、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、温室効果ガスの増加だけでなく、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アジアモンスーンが大きく影響を受ける可能性も、最近のモデルおよび観測研究で指摘され、STARTやIGBPではこの問題を重視している。この地域では、これまで、WCRP傘下のGAME(アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画)やABC(アジア地域褐色雲観測計画)、MAIRS(モンスーンアジア統合地域研究)等のプロジェクトにより、これらのアジアモンスーン変化に関連したプロセス研究の蓄積が進んできた。これらの研究成果を踏まえたモンスーン変化の実態解明と高度のモデリングにより、精度の高いアジアモンスーン変化の予測を行うことが、この地域の水資源、水災害の予測と対策にとっては非常に重要である。

アジア地域の人間活動の歴史は長く、最近の温室効果ガス増加だけでなく、工業活動、農業活動によるエアロゾル増加に加え、広大なモンスーンアジア地域における森林から耕地化に伴う植生・土地利用改変が、地表面の熱・水収支変化を通して、アジアモンスーン循環そのものにも影響している可能性が高い(e.g., Fu, 2003²⁾, Xue et al., 2004³⁾, Yasunari et al. 2006⁴⁾)。また、森林から耕地・草地などへの土地利用改変は、上記の熱・水収支変化への影響だけでなく、バイオマス量変化に伴ういくつかの種類のエアロゾル放出量の変化にも影響している可能性があり、その評価も必要である。それぞれの要素は、空間的にも歴史時間的にもその相対的な役割も異なっていると考えられ、それぞれの要素による影響を、いくつかの気候モデルでの再現実験結果を組み合わせる手法を通して、より高精度に評価することが重要である。

2. 研究目的

本サブテーマは、サブテーマ1から4の結果を相互に比較しつつ、統合的に分析することにより、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、その歴史的な時間変化も含めて、より定量的に評価することを目的とする。平成19年度は、以下の項目を重点的に進めた。

(1) サブテーマ1で得られた観測データにもとづく降水量変化と、サブテーマ2で出された過去数十年の大気および大気海洋結合GCM過去再現ランとの比較分析を行い、観測とGCM結果の差の系統的な分布とその原因の究明を、温室効果ガスの寄与とエアロゾル効果による寄与を分離する考察から試みた。19年度は特にインドモンスーンに伴う1951年から2003年の降水量変化の地理的分布特性を、サブテーマ2で得られた温室効果ガスおよびエアロゾル効果による降水量変化の分布特性と対応させて、考察を行った。

(2) 1700年以降の植生変化による気候・大気循環変化については、サブテーマ4によるGCM数値実験の結果をサブテーマ4グループと共同で比較分析し、植生・土地利用変化の効果が卓越する(産業革命以前の)1700-1850年についてのモンスーン変化の結果については、論文としてまとめ、受理された。過去のモンスーン変化における3つの人間活動要素の相対的重要性の評価についての予備的考察も行った。(詳細はサブテーマ4の報告を参照。)

(3) 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、2100年での降水量の時空間変化がどのような水収支変化を伴っているかを調べた。

3. 研究方法

サブテーマ1、サブテーマ2、サブテーマ4で出された観測値解析データ、モデル実験データを、空間パターン変化、時間変化を含め、いくつかの統計的手法などで解析し、温室効果ガス増加、エアロゾル変化、および植生・土地利用変化がアジアモンスーン気候に与える物理的過程と影響評価を行う。

4. 結果・考察

(1) 1900年以降における、人為起源の強制を入れた気候モデル再現実験結果と、詳細な観測データにもとづく比較分析

18-19年度は、大気海洋結合気候モデル(CGCM)と海面水温を与えた大気のみ気候モデル(AGCM)の過去再現実験結果と、陸上観測降水量変化との比較・解析を行った。その結果、インド付近や東アジア付近の変化トレンドを含め、CGCMの結果と比較的良く対応していることがわかった。そこで、CGCMの再現実験結果を、夏季(6-8月)モンスーン季を中心に、サブテーマ1グループによるより系統的な観測データのトレンド解析を参照しつつ、比較した。その結果、観測データのインド亜大陸での全般的な減少傾向(特に1960年以降)や、インドネシア地域での減少傾向は、エアロゾル増加のみによる変化傾向とのよい一致が見られた。熱帯インド洋から西太平洋域で観測データからの大気循環の年々変動パターンとして、15°N付近と赤道付近のあいだのダイポール型の変動(Pacific-Indo Dipole pattern: PID)パターンも、再現実験では現れており、より現実的な解釈ができそうな結果となっている。温室効果ガス増加だけのCGCM再現実験結果は、これらの地域ではむしろ顕著な増加傾向であり、観測データによるトレンド傾向を説明すること

はできない。しかし、観測データに見られる東アジアでの顕著な増加傾向は、再現実験結果では現れていないことや、エアロゾル強制のみの再現実験結果で顕著に現れているベンガル湾、南シナ海、フィリピン付近での増加傾向は、観測データでは明瞭には見えていないことなど、まだ問題点は残されている。

20年度は、サブ課題1がまとめたインド亜大陸にみられる北東部での増加トレンドとサブ課題2からのCGCMによる実験結果との比較・解析を行った。その結果、この増加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。この結果は、インドモンスーンの最近50年の変化に、温室効果ガス増加がより選択的に寄与していることによるとも解釈できるが、一方で、(3)で示すように、AOCGCMの水循環過程に対するモデル間の特性の違いも大きく、さらに検討を要する。

(2) 大気大循環モデル (GCM) による産業革命以前の耕地化進行によるモンスーン変化の実験

1700年前後から1850年前後までの百数十年の間に、アジアモンスーン地域のインド・中国における大規模な森林からの農耕地への変化がアジアモンスーン気候に与えた影響を、大気大循環モデルを用いた数値実験を行った。この数値実験では、1700年と1850年の（農耕地を含む）全球植生分布を与えて、各々1700年前後と1850年前後の平均的な気候を再現した。それらの実験結果を比較することによって、耕地化の影響を調べた。なお、海面水温・海氷等の条件は現在の値を与えてある。その結果、森林面積が大幅に減少した1850年前後のモンスーン降水量は、1700年前後の降水量に比べ、インド亜大陸で30%程度、中国南部で10数%程度減少した可能性を明らかにした。また、森林から農耕地に変化することにより、地表面の反射率（アルベード）の増加と表面粗度（凸凹度）の減少が、大気への蒸発散量と海洋からの水蒸気供給量を減少させたことが降水量減少を引き起こした原因であることも示した。

1700年から1850年前後は、アジアモンスーン地域における系統的な降水量観測が開始される以前であり、最近行われたヒマラヤでの氷河の氷コア分析結果（インド亜大陸でのモンスーン降水量が1700年代は1800年代より多かった）と矛盾しない結果になっている。また、この時期は、ヨーロッパの本格的な産業革命が開始される以前であり、温室効果ガス増加や工業化に伴う広域大気汚染（エアロゾル増加）のグローバルな気候への影響はない時期であり、また、太陽活動や火山活動など、地球規模の長期的な気候変化を引き起こす自然的要因も、特に示されていないことから、本研究で示された農耕地拡大によるアジアモンスーン気候変化が現実に18世紀から19世紀にかけて、起こった可能性は極めて高いと結論した。

（サブグループ4との共同研究。詳細は、サブグループ4報告の、(3) 全球気候モデルによる土地被覆・植生変化の影響評価 の項を参照。）

20年度には、その結果の一部を、米国科学アカデミー紀要に投稿し、産業革命以前にすでに人間活動がアジアモンスーンの変化に影響を与えた論文として高く評価され、受理された。

(3) IPCC-AR4 AOGCMモデルによる21世紀予測実験におけるインドモンスーン降水量と大気水収支変化の解析

IPCC-AR4に参加した8つの大気海洋結合気候モデル(AOGCM)の21世紀予測実験結果を、インドモンスーン地域の水文気候要素について比較解析を行った。その結果、図1に示すように、どのモデルにおいても降水量(P)は増加しているが、20世紀の再現実験がすべてのモデル実験において蒸発量(E)が水蒸気収束量(C)よりも多くなっているのに対し、21世紀予測実験では、3つのモデルでは(C)の増加が(E)よりも顕著であるが、5つのモデルでは(E)の増加も大きいことが示された。

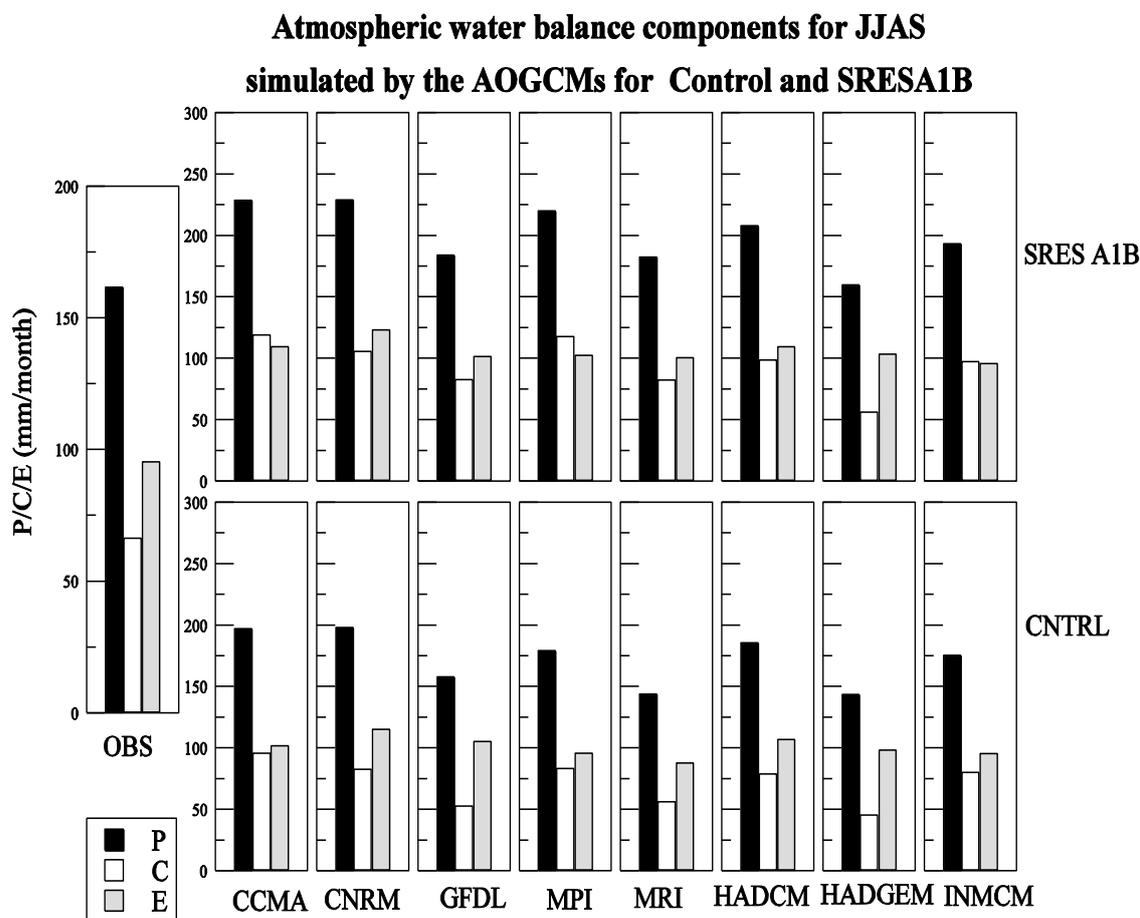


図1： SRES A1Bシナリオによる8つのモデルの大気水収支変化。(上) 2100年 (下) コントロール実験(2000年)における夏季(JJA)降水量(P)、水蒸気収束量(C)と蒸発散量(E)。

また、赤道インド洋上での(P)が増加しているモデル(MPI, HADGEMなど)では、(C)の増加に依っていること、陸上(北西インド、北東インド)での(P)が増加しているモデル(CCMA, GFDL, MRI, HADCMなど)では、(E)の増加が卓越している、というモデルの特性の違いが明瞭に示された。興味深いのは、2つのモデル(MRI, HADCM)では半乾燥地域の北西インドで(P)が増加しているのに対し、2つのモデル(GFDL, MPI)では、湿潤な北東インドで(P)が増加し、その場合は(E)よりも(C)の増加が(P)の増加に寄与しているという対照的な違いがモデル降水量変

化の特性として現れていることである。

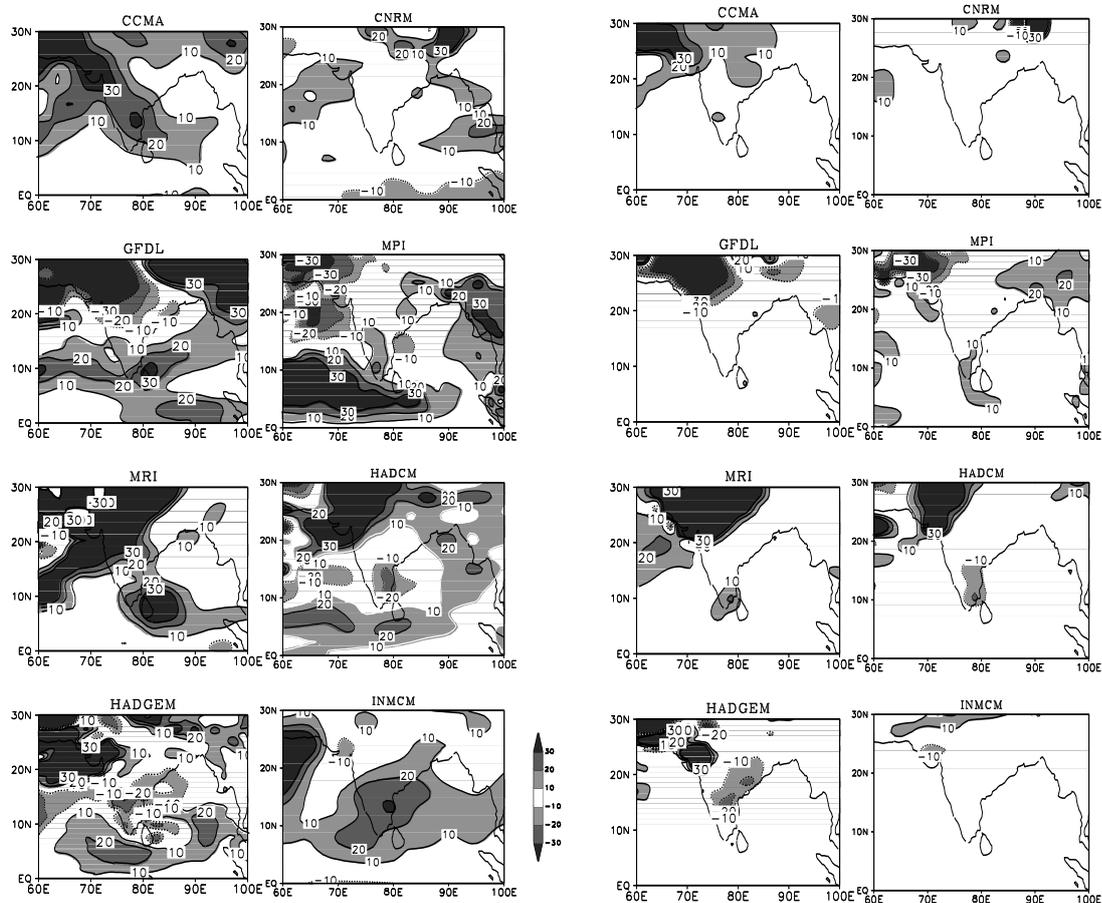


図2：8つのモデルによりSRES A1Bシナリオに基づいて予測された2100年の（左）降水量変化率（2100年の降水量から2000年の降水量を引いて2000年の降水量で割った変化を百分率で示した分布と（右）蒸発量変化率

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

1700年以降の実際の耕地面積率変化に基づく過去の植生分布を用いてAGCMによる数値実験を行い、特に産業革命以前でのアジアモンスーン地域での森林破壊（農耕地化）が、アジアモンスーン循環を弱めることを示した研究成果は科学的オリジナリティーが高く評価されており、18年度に引き続き、19年度は Asia Oceania Geosciences society (AOGS)（アジア・大洋州地球科学会合同会議）や21st Pacific Science Congress（第21回太平洋学術会議）でも、基調講演の指名を受けた。20年度には、MAIRS (Monsoon Asia Integrated Regional Studies)主催のInternational Workshop on Anthropogenic Impacts on Asian Monsoonで招待講演を行った。また、世界的にインパクトの大きい米国科学アカデミー紀要(IFは10前後)に受理され、プレス発表も近々行う予定で準備がされている (Takata et al., 2008)⁵⁾。

最近50～100年間の夏季モンスーン降水量変化は、観測データからはかなり複雑な地域的な違い

を示し、解釈が難しかったが、大気海洋結合GCMによる温室効果ガスとエアロゾル増加の効果を区別して行った20世紀再現実験結果とつぎ合わせると、エアロゾル増加による降水量変化が、温室効果ガス増加の影響よりも、アジアモンスーン地域全体に顕著に現れている可能性が強く示唆された。このことは、非常に新しい指摘であり、IPCC第5次報告にも大きな影響を与えるはずである。現在、アジア地域でとくに重要とされる硝酸塩エアロゾル変化の効果も入れ込んだ化学・エアロゾルGCMがサブテーマ3のグループにより、ほぼ完成されており、これを用いることにより、より精度の高い再現および予測実験が可能となった。

(2) 地球環境政策への貢献

今回の予備的な結果は、温室効果ガス増加に加え、エアロゾル増加、および広域での土地利用・植生変化が、(低緯度、中・高緯度、湿潤域か乾燥域かなどの)地域性や季節性によって、モンスーン循環と水循環(降水量)の変化に、非常に大きく影響することを示唆しており、今後、アジア地域で特に問題になっているこれら3つの人間活動による影響評価を、単体ではなく、複合効果として進めていく必要性を、マスコミ等への公表も含め、積極的に広報・普及させることに努めたい。また、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の第5次報告書への貢献をめざしつつ、アジアモンスーン地域での気候変動・変化の解明・予測研究の国際的な推進を行う。

6. 引用文献

- 1) 安成哲三 (2005), 「地球温暖化」はアジアモンスーンをどう変えるか?, 科学, 75(10), 1150-1154.
- 2) Fu, C. B. (2003), Potential impacts of human-induced land cover change on East Asian monsoon, *Global and Planetary Change*, 37, 219-229.
- 3) Xue, Y. K. et al. (2004) Role of land surface processes in monsoon development. East Asia and West Africa, *J. Geophys. Res.*, 103, D03105, doi:10.1029/2003JD003556.
- 4) Yasunari T., K. Saito and K. Takada (2006), Relative roles of large-scale orography and land surface processes on global hydro-climate. Part I, Revisit to role of Land-Atmosphere Interaction on Asian Monsoon System, *J. Hydrometeorol*, 7, 626-641.
- 5) Takata, K., K. Saito and T. Yasunari (2009), Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation, *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, in press.

7. 国際共同研究等の状況

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)における、人間活動がアジアモンスーンとその水循環変化に与える影響評価を中心的に担っているほか、WCRP, IGBP, IHDP, DIVERSITASが共同で進めているESSP(Earth System Study Partnership)傘下のMAIRS (Monsoon Asia Integrated Regional Studies)に大きく貢献するプロジェクトとして位置づけられ、2008年4月のMAIRS国際会議などでも、今回の成果の発表を行った。また、IPCCによる第5次報告書(AR5)に向けた気候変動の解明・予測研究への大きな貢献を目指している。また、WCRP-JSC(合同科学委員会)で進め

られているMonsoon-Crosscut Initiativeでも、人間活動がモンスーンに与える影響の研究活動の大きな成果として、この推進費の研究が大きく貢献している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 1) Takata, K., K. Saito and T. Yasunari: Proc. Nat. Acad. Sci., in press (2009).
“Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation”

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Yasunari, T., 2007: Multi-scale interaction of monsoon clouds systems and scientific foci of the AMY/IMY, Asian Monsoon Year (AMY08) Beijing International Workshop, 23-25, January, 2007, Beijing, China
- 2) Yasunari, T., 2007: An introduction to CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)at HyARC, Nagoya University as a powerful tool for multi-scale cloud/precipitation system study in the Asian monsoon region, Asian Monsoon Year (AMY08) Beijing International Workshop, 23-25, January, 2007, Beijing, China
- 3) Yasunari, T., 2007: Global Change, Asian Monsoon, and Extreme Weather and Climate, 21st Pacific Science Congress, 12-18, June, 2007, Okinawa
- 4) Yasunari, T., 2007: Impact of Land Cover/land Use Changes Since 1700 on Changes in Asian Monsoon System, AOGS 2007 4th Annual meeting, 30, July-2, August, 2007, Bangkok, Thailand
- 5) Yasunari, T. 2008: The International Monsoon Study (IMS), The Asian Monsoon Year (AMY), The Monsoon Asia Integrated Regional Study(MAIRS), 20th Session of the Scientific Group(SSG) of Global Energy and Water Cycle Experiment(GEWEX), 4-11, February, 2008, Buenos Aires, Argentina
- 6) Yasunari, T., 2008: Impact of Land Cover/Use Change in China and Indian in 18-19th Century on Asian Monsoon, International Workshop on Anthropogenic Impacts on Asian Monsoon, 20-24, April, 2008, Nanjing, China (Invited)
- 7) 安成 哲三, 2008: キックオフ記念講演「新しい地球学としての地球生命圏研究」、地球生命圏研究機構 (SELIS)キックオフ式典と記念講演会、2008年6月3日、名古屋大学（基調講演）
- 8) 安成 哲三, 2008: 地球温暖化でアジアの気候はどうなる?、第15回名古屋大学理学懇話会 地球温暖化に挑む、2008年6月21日、名古屋大学
- 9) Yasunari, T., 2008: discussions : Role of Land Surface process, WMO Fourth International Workshop on Monsoon (IWM-IV), 20-25, October, 2008, Beijing, China (Chairman)
- 10) 安成 哲三, 2008: 「地球温暖化に伴うアジアの気候変動」、土木学会中部支部70周年記念ミニシンポジウム 地球温暖化への適応策～水循環の視点から～、2008年10月31日、名古屋大学

(基調講演)

- 11) 安成 哲三, 2008: スペシャルセッション「GAMEからMAHASRIへ～モンスーン研究の進展と今後～」今, アジアモンスーンで何が問題か?, 日本気象学会秋季大会、2008年11月19日-21日、仙台国際センター (招待講演)
- 12) 安成 哲三, 2008: 「地球環境におけるアジアの気候・生態系の重要性」、第17回梶山フォーラム・第4回梶山人間学研究センター合同シンポジウム 地球環境問題への視点と提言に向けて-生態系保全に人間のできること-, 2008年11月22日、梶山女学園大学 (基調講演)
- 13) 安成 哲三, 2008: 植生を介した水循環と地球気候システム、第8回公開講演会「水と地球環境」主催: 名古屋大学地球水循環研究センター、2008年12月20日、名古屋大学 (招待講演)
- 14) Yasunari, T., 2009: WCRP Cross Cuts Monsoons, 21st Session of the Scientific Steering Group(SSG) of the Global Energy and Water Cycle Experiment(GEWEX), 19-24, January 2009, California, USA
- 15) Yasunari, T., 2009: Toward Understanding the Dynamics of Continental to Global Scale Eco- Climate System, First SELIS International Workshop Eco-Climate Dynamics in Eurasia/ Monsoon Asia, 26-27, January, 2009, Nagoya University (基調講演)
- 16) Yasunari, T., 2009: Role of Diurnal Cycle of Convection and Precipitation System in modulating the MJO over the Maritime Continent, 2nd MAHASRI/HyARC Workshop, 9-11, March, 2009, Da Nang, Vietnam (Invited)
- 17) 安成 哲三, 2009: 環境学の新たな展開(1)、シンポジウム 環境学の新たな展開-科学・政策・市民社会をつなぐ- New Development of environmental Studies-Integrate Science, Policy and Civil Society-, 2009年3月12日、名古屋大学

(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)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

2009年6月、P N A S 論文公表に際して、プレス発表を行った。(毎日新聞、日本経済新聞に掲載された。)

(6) その他

なし