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 (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

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 水循環変動予測研究プログラム 高田久美子・田中克典・吉兼隆生・斉藤和之・川瀬宏明・高橋洋

<研究協力者> 公立大学法人首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 山島亮二 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

水循環変動予測研究プログラム 川瀬宏明

平成18~20年度合計予算額 33,784千円

(うち、平成20年度予算額 11,466千円)

※上記の合計予算額には、間接経費7,797千円を含む

[要旨]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、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、 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、1700~1850年の季節変化への 影響について調べたところ、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 ルの発生量が変化す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。

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。半乾燥地域の黄河潅漑域では、潅漑による地 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乗せした疑似温 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 測量を上乗せした実験では、GCMのモデルバイアスを大きく軽減することを示した。

[キーワード]気候モデル、植生改変、アジアモンスーン、雲解像モデル、降水メカニズム

## 1. はじめに

モンスーンは海洋と大陸の熱的な性質の差によって生じる季節風であり、陸面状態はモンスー ン活動を規定する重要な要因の一つである。ユーラシア大陸の南・東部はモンスーンアジアと呼 ばれ、この地域の気候はモンスーンの影響を強く受けている。一方で、この地域には地球人口の 約半数が集中しており、古くから農業等の開発が進められるなど、人間活動による土地利用状況・ 陸面状態の変化が著しい。土地被覆・植生改変が気候に与える影響については、GCMやRCM(領域 気候モデル)を用いた調査研究が多く発表されている。Fraedrich et al. (1999)<sup>1)</sup>は、土地被覆を 最大限に変化させた影響について調べており、GCMを用いて陸上を森林で覆った"Green planet"と すべて砂漠に設定した"Desert world"の実験を行って、森林による蒸発散の増加が地上気温を下げ、 降水量増加が対流圏中上層での大気温度を上昇させる結果を示した。

アジアモンスーン域全体を含むような大陸スケールでの植生改変の影響について調べた研究で は、全球気候モデル(GCM, General Circulation Model)を用いて、現在の植生分布と潜在植生分 布との違いから仮想的な植生変化のインパクトを調べた研究が多く、Feddema et al. (2005)<sup>2)</sup>など では地表面熱・水収支の変化を論じており、Chase et al. (2000)<sup>3)</sup>などでは大気循環への影響を論 じている。 Mabuchi et al. (2005)<sup>4)</sup>では熱帯アジア域の森林を裸地にした場合のインパクトを調 べた。歴史的な植生分布の変化を用いた研究として、Brovkin et al. (2006)<sup>5)</sup>では放射強制力の変 化を評価しているが、簡易気候モデルが用いられていた。このようにエネルギー・水循環への影 響に関する多くの研究の一方で、近年、有機エアロゾルの発生量が植生タイプによって変化する ことに着目して、土地被覆・植生改変による有機エアロゾル濃度が変化して気候に影響を及ぼす 可能性があることが指摘され始めている(Tsigaridis et al., 2006<sup>6)</sup>; Heald et al., 2008<sup>7)</sup>)。

一方、地域的な気候への影響について、熱帯域ではアマゾン川流域における森林伐採やアフリ カ・サヘル地域の砂漠化など熱帯地域での植生変化に伴う気候変化について衛星観測データを用 いた解析や数値モデルを用いた多くの研究が行われている(e.g., Pielke, 2002<sup>8)</sup>)。アジアモンス ーン地域では、1950年代以降に東南アジアにおいて森林伐採が大規模に行われており、洪水など の災害の増加が報告されている。気候に与える影響では、インドシナ半島において雨季の後半に あたる9月に降水量の長期減少トレンドが1950年以降確認されており、Kanae et al. (2001)<sup>9)</sup>は数 値実験結果から森林伐採が降水減少に大きく寄与していることを示唆した。森林伐採の影響につ いては、Kanae et al. (2001)<sup>9)</sup>で指摘されているように地表面潜熱フラックスの減少により降水量 が減少することを示唆した研究がある一方で、森林伐採地域で積雲対流が増加することを衛星デ ータ解析により示した研究(Cutrim et al., 1995<sup>10)</sup>)や、観測データの解析から同期間のインドシ ナ半島への台風・熱帯性低気圧の襲来数の減少が直接的な原因である可能性を提案した研究

(Takahashi and Yasunari, 2008<sup>11)</sup>) もある。乾燥地域では特に灌漑による大気への影響につい て多くの研究が行われており(e.g., Pielke, 2002<sup>8)</sup>)、数値実験から灌漑地域とその周辺の地表面 特性の違いから局地循環を形成して、雲分布の形成に影響を与えることが示されている。またSato et al. (2007)<sup>12)</sup>は、夏季の黄河灌漑地域での雲頻度分布について、灌漑地域の周辺部で高く、灌 漑地域上空で低くなる顕著なコントラストが形成されることを示した。

アジアモンスーン域の中国や韓国、日本では、梅雨前線に伴って多量の雨がもたらされる。こ

のため、地球温暖化などの気候変動が梅雨前線の降水帯(以下、梅雨降水帯)に及ぼす影響は、 水資源・水災害の両方の観点から注目される。Endo et al. (2005)<sup>13)</sup> は、中国揚子江流域で近年 夏季降水量が増加傾向にあることを指摘している。この原因として、Sen et al. (2004)<sup>14)</sup> がイ ンドシナ半島の森林伐採の影響を指摘する一方、Gong and Ho (2002)<sup>15)</sup> は、北太平洋の循環場 の変化が影響を及ぼしていると指摘している。また地球温暖化が何らかの影響を及ぼしている可 能性もある。

これらを踏まえて、本サブテーマでは、(1)AGCMによる過去の土地被覆・植生改変データを与え た数値実験から、土地被覆・植生改変が大陸スケールでのアジアモンスーンに及ぼす影響の定性 的・定量的な評価、及び、(2)領域気候モデルを用いてアジアモンスーン域の降水変動のメカニズ ム解明と、土地被覆・植生改変による地域的な影響の定性的・定量的な評価を行った。

2. 研究目的

(1) 全球気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

全球気候モデルによる研究では大規模循環の変化も含めた影響を評価することができる。ただ し水平解像度が100〜数100km程度であることから、特に大陸スケールでの土地被覆・植生改変に 伴う地表面熱・水収支の変化と、それに伴う水蒸気輸送や降水パターンへの影響に焦点を当てる。 これまでの植生改変の影響を調べた研究では仮想的な(極端な)植生変化を与えた感度実験によ るものが多いが、本研究では歴史的な植生変化データを用いて、過去の気候変動における植生改 変の影響を定量的に評価する。特にアジアモンスーンの活動度が最も大きい夏季の気候への影響 を詳しく解析するほか、季節進行への影響についても解析・考察を行う。これまで、植生改変の 気候への影響評価は、季節別に、項目別(地表面熱・水収支、力学的応答など)に行われてきた が、ここでは総合的な解釈を試みるものである。一方で、土地被覆・植生改変による有機エアロ ゾルの発生量の変化から、エアロゾルの気候変動への直接効果・間接効果に影響を及ぼす可能性 についても検討する。

(2)領域気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

領域モデルによる研究では高解像度での数値実験を行った場合には積雲モデルを用いずに降水 過程を直接計算することができ、地形性の局地循環や降水の変動メカニズムを含めて植生改変に よる影響について明らかにすることができる。

インドシナ半島については、モンスーン後期の降水量(特に9月)の、1950年以降における長期 的な減少傾向について、植生改変あるいは台風・熱帯性低気圧の襲来数との関係を指摘した先行 研究に基づき、その原因を調べる。また、土地被覆を変えた感度実験を行うことにより、森林伐 採を想定した地表面状態の変化が領域気候にどのような影響を及ぼすのかを、熱帯の基本的な降 水システムを再現可能な水平解像度5kmの領域気候モデルを用いて調査する。

一方、中国の内モンゴル自治区からモンゴルにかけては降水量が少なく、乾燥域が広がってい る。乾燥域では、土壌水分の変化によって大気最下層の水蒸気量や気温が大きく変化するため、 雲や雨の発生に影響を及ぼすと考えられる。内モンゴル自治区では、黄河に沿って灌漑農業が盛 んに行われており、巨大な灌漑域が存在する。たとえば、黄河中流域の河套灌区は、四国の半分 にも相当する広大な灌漑地域であり、黄河の河川水を利用することで小麦、ひまわり、米など様々 な農作物が作られている。Sato et al. (2007)<sup>16</sup> は衛星可視画像から、灌漑地域上空ではその周 辺域に比べて、気候学的に夏季の雲の出現頻度が小さいことを示しており、農作物の生育にとっ て重要な日射量にも影響を与えていると考えられる。また、植生(緑色)の多い場所に対応して地 表面温度の低い場所がみられることも示されており (Sato et al., 2007)<sup>16</sup>、このような土地特 性が局地的な対流活動に影響を与えている可能性も考えられる。そこで、本研究では雲解像の領 域気候モデルを用いて土壌水分と雲形成の関係を調べ、さらに灌漑域周辺での雲量分布形成のメ カニズムについて調査を行う。

温暖化に伴う気候変化の予測には、大循環モデル(GCM)がよく用いられるが、地域規模の気候 変化予測に関しては、解像度や再現性の問題から極めて困難である。地域規模の気候予測は、世 界各国のモデルの間で結果が異なることが多く、予測の不確実性が大きな問題となっている。こ こでは、領域気候モデルを用いた疑似温暖化ダウンスケール(Kimura and Kitoh, 2007)<sup>17)</sup>とい う手法を用いて、将来の温暖化に伴う梅雨前線の変化を評価する。疑似温暖化ダウンスケールは GCMによる温暖化予測結果のうち長期変化成分のみを領域気候モデルの境界値に取り入れたもの で、GCMでみられる現在気候再現のバイアスを除去した上で、温暖化に伴う長期変化成分による梅 雨前線の変動特性を評価することが可能になる。GCMの現在気候におけるバイアスを除去すること で、不確実性の軽減につながると考えられる。本研究では、まず疑似温暖化手法の梅雨降水帯へ の適用可能性を調べるため、過去に中国で観測された夏季降水量変化の再現を行う。その上で、 疑似温暖化手法を用いて将来の温暖化に伴う梅雨降水帯の変化、およびその不確実性を評価した。

現実の森林伐採による梅雨降水帯への影響を調査することは東アジアにおいて重要であるが、 森林伐採の設定方法やモデルバイアスを考慮した計算結果の評価は大変困難であると予想される。 一方でFraedrich et al., (1999)<sup>1)</sup> で行われたような仮想的な実験は現実場との比較が難しいが、 単純な実験設定を用いているため森林の効果を比較的明確に把握することが可能である。そこで 本研究では現実の森林伐採による影響を調査する前段階として、Fraedrich et al. (1999)<sup>1)</sup>を参考 にして簡単な実験設定を用いることにより森林が梅雨前線形成に与える影響の調査を行う。

3. 研究方法

(1) 全球気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

1) 中解像度実験による影響評価

全球気候モデル実験では、大気海洋結合モデル(MIROC3.2 (K-1 Model Developers, 2004)<sup>18)</sup>)の 大気部分(大気大循環モデル、AGCM)を用いて、過去の土地被覆・植生改変データ(Ramankutty and Foley, 1999<sup>19)</sup>; Hirabayashi et al., 2005<sup>20)</sup>)を与え、アジアモンスーンへの影響について調べる。 AGCMには陸面過程モデル(Takata et al., 2003)<sup>21)</sup>が組み込まれており、植生による光合成や熱・ 水収支が考慮されている。海面水温分布は現在の月別気候値(Talor et al. 2000)<sup>22)</sup>に固定した。

まず、過去300年の植生分布の変化から各年代で集中的に耕地化した地域を調査した上で、中解 像度(水平が約250km(T42)、鉛直20層)のAGCMに1700年、1850年、1992年の植生分布を与えた実験 を行った。実験結果については特に産業革命以前で温暖化やエアロゾル増加などの人間活動によ る影響が小さく、アジア域の主な耕地化の影響を受けている1700年植生実験(v10)と1850年植生実 験(v20)の差について、特にアジアモンスーンが最も活発な夏季の気候への影響を調べるとともに、 モンスーンの開始・終了期への影響を調べるために季節変動への影響について解析した。また、 陸面過程の高精度化のためにモデルの改良を行っている。

2) 高解像度実験による影響評価

中解像度での数値実験は長期積分が容易である一方で、降水のように小さなスケールでの分布 パターンを持つ物理量の変化や、熱・水収支などの地域的な変化の表現には限界がある。そこで、 降水分布や地域による変化の違いについてより詳細な調査をすることを目的として、高解像度(水 平が約100km(T106)、鉛直56層)での実験を行った。

3) 土地被覆・植生改変によるエアロゾル発生量への影響

植生改変と有機エアロゾルの複合効果によるアジアモンスーン域の気候への影響を調査するた めには、植生改変による有機エアロゾルの発生量変化を算定する必要がある。植生からの有機エ アロゾルの発生量は植生タイプと葉バイオマス量によって変化する。植生タイプの変化には過去 300年の植生変化データを適用することとした。葉バイオマス量変化については算定方法を調査し、 エアロゾル増加が顕著になる1850~1992年の葉バイオマス量の推移を推定した。

(2)領域気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

領域気候モデル実験では、領域モデルの一つであるWRF(Weather Research and Forecasting Model; Skamarock et al., 2005<sup>23)</sup>)を用い、耕地化によるインパクトについて調べた。WRFは圧縮 非静力学オイラー方程式系(運動方程式、熱力学方程式、連続方程式、気体の状態方程式)によっ て大気運動を計算する。大気物理過程としては放射、乱流輸送、陸面過程などを考慮し、積雲モ デルを用いずに雲物理過程(Hong and Lim, 2006)<sup>24)</sup>によって降水を計算した。陸面過程(Chen and Dudhia, 2001)<sup>25)</sup>では植生による蒸発散を考慮して地表面の熱・水収支を計算し、土壌温度や水分 量を予報している。

1) インドシナ半島の降水変動と植生改変の影響

インドシナ半島を対象とした数値実験では、水平解像度を5kmで9月1日〜30日の計算を行った。 Kanae et al (2001)<sup>9)</sup>では水平解像度が60kmのため積雲モデルが用いられており、局地循環の再現 できないと考えられる。本研究では水平解像度を5kmにして積雲モデルを用いない計算を行うこと により、降水プロセスや詳細な地形の効果を考慮した局地循環が再現できることが特徴である。

大気の外部境界条件には全球再解析データ(ECMWF(European centre for Medium-Range Weather Forecast)によるERA40を与え、海面水温分布は月平均値(ERSST(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature)を与えている。長期降水量変動の調査においては、1966年~1995年の30年間のデータを用いた。長期変動実験では、地表面改変の効果なしで、過去の変動が再現可能であるかを調べるために、30年間1992年の土地利用を用いた。大気状態及び、地表面の土壌水分、土 壌温度、SSTは、各年のものを用いた。Kanae et al (2001)<sup>9)</sup>で提案された、地表面改変の効果が 降水量の減少傾向に重要な役割を果たしている場合、過去の長期変動は再現されない。

植生改変のインパクトを調べる実験では 1998、1999、2000 年のデータを用いている。インドシ ナ半島の植生改変(主に森林伐採を想定)の領域気候への影響について、水平解像度 5km の領域 気候モデルによって、感度実験を行った。森林伐採域を図1の太い黒線で囲った領域に設定した。 過去の森林状態を想定した WET 実験では、TRF の植生分布を熱帯雨林に変更し、かつ、その熱帯 雨林での植生被覆率を 90%に設定した。植生被覆率は、WRF モデルに結合されている LSM の植生 の密度を示すパラメータである。さらに、森林域は、土壌が湿潤であるという想定から、TRF で の土壌体積含水率を 0.45[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]に設定し、実験期間中は変化しないものとした。同様に、現在よ りも、森林伐採が進んだ状態を想定し、DRY 実験を行った。DRY 実験では、植生分布は WET と同じ であるが、植生の被覆率を 20%に設定し、疎な熱帯雨林とした。また、土壌体積含水率を 0.20[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]に設定し、乾燥した条件を与え、積分期間中は固定値にした。地表面状態は、WET、 CTL、DRY の順に、土壌が湿潤で植生が多く茂っており、森林伐採が、ほとんど行われていない、 現在の状況まで進んだ、さらに伐採が進み乾燥化した、状況をそれぞれ想定した。 実験は、1998 年から 2000 年の 3 年間の 9 月のみを対象とし、各年の 8 月 27 日から実験を初め、 初めの 5 日間をスピンナップとし、9 月の 1 ヶ月間の実験を使用した。



図1 インドシナ半島の土地利用図。太線の中を森林伐採域と設定した.

2) 乾燥域での雲形成に関する研究

モンゴル域の研究においては、WRFのほかに、コロラド大学で開発された領域気候モデル RAMS(Regional Atmospheric Modeling System) (Peilke et al., 1992)<sup>26)</sup>を筑波大学陸域環境セ ンター (TERC) で改良されたTERC-RAMSも用いた。

まずモンゴル域を対象に、地表面が乾燥した状態と湿潤な状態の実験を行うことで、地表面状 態の違いが雲に及ぼす影響を調べた。水平解像度は5kmに設定し、2001年6月の計算を行った。一 方、黄河灌漑域を対象とした数値実験では、Sato et al (2007)<sup>16)</sup>で注目しているゴビ砂漠東部(105 ~110E、40~42N)を対象とし、水平解像度3kmで2005年7月末から8月上旬の計算を行った。灌漑 域はモデルの中で土壌水分を飽和近くまで増やすことによって表現し、対比実験として土壌水分 を周囲の乾燥域と同等の0.1程度とした実験を行った。これらの実験を比較することで、乾燥域の 中に存在する灌漑域が雲の形成に与える影響を調査した。

3) 中国域の過去の降水変動の再現と将来の降水変動予測実験

領域気候モデルは黄河灌漑域の実験と同様にWRF(Skamarock et al., 2005)<sup>23)</sup>を用いた。ここで は解像度が40kmと20kmの実験を行うため、雲物理過程(Hong and Lim, 2006)<sup>24)</sup>と積雲対流モデル (Kain and Fritsch, 1993)<sup>27)</sup>を併用して降水を計算した。領域モデルを用いて将来の気候をダウ ンスケールする方法としては疑似温暖化ダウンスケール手法を用いる(Sato et al., 2007<sup>12)</sup>、 Kimura and Kitoh, 2007<sup>17)</sup>)。この手法は、領域モデルの境界値として、現在の6 時間毎の客観 解析データに、現在と将来の気候差分を上乗せしたデータを用いることで、疑似的に将来の気候 を再現する手法である。客観解析データをそのまま境界値に用いた再現実験(CTL)と比較するこ とで、将来の地域規模の気候変化を調べることができる。実験設定の都合上、この手法を過去の 降水量変動の再現に適応する場合は疑似気候再現実験、GCMを用いて将来の降水量変動予測に適応 する場合は疑似温暖化実験と呼ぶ。

まず、過去に観測された梅雨降水帯の変化としては、Endo et al. (2005)<sup>13)</sup>で注目した1960年 代から1990年代にかけての中国の夏季降水の減少に注目する。1990年代の客観解析データに1990 年と1960年の気候差分を与えることで、1990年代の日々の変動成分をもったまま、気候値が1960 年代の疑似気候データを作り、領域モデルの境界値に与えて過去の気候の再現を行う。一方、将 来の予測においては、本プロジェクトで使用した全球気候モデルMIROCをはじめ、CMIP3 プロジェ クトで集められた複数の気候モデルの出力結果を気候差分の計算に用いた。ただし、Taylor (2001)<sup>28)</sup>を参考に、アジア域の気候場の再現性が特に良いモデルを7つ選別して用いている。現在 気候を1970年から1999年の平均、将来気候を2060年から2089年の平均として、現在気候と将来気 候の差から気候差分を求めた。この気候差分を1990年代の客観解析データに与えることで、疑似 的に将来気候データを作成した。ここでは、個々のGCMから求めた気候差分を用いた疑似温暖化実 験(PGW)と、7つのGCMの平均値(マルチモデル平均)から求めた気候差分を用いた疑似温暖化実 験(PGW-MME)を行った。

4)森林が梅雨前線形成に与える影響調査

領域気候モデルとしてWRF ARW-Core V2.2 (Skamarock et al. 2005)<sup>23)</sup>を使用した。Yoshikane et al. (2001)<sup>29)</sup>を参考にERA40を用いて1998年6月中旬の全球帯状平均場を初期および境界条件とした実験(ZM-STANDARD)を行い、循環場の再現性を評価した。続いて森林の蒸発散および遮断蒸発の影響のみを調査するため、人為的に土地利用が改変された領域で落葉広葉樹を99%の割合で与えた実験(ZM-FOREST)、全陸面を砂漠に変更し森林被覆率を0%にした実験(ZM-DESERT)を行った。計算領域は極域を除くほぼ全球で日射は6月15日を積算時間中固定した。格子間隔は50kmで、90日間計算を行い、後半の80日間の平均で評価した。降水過程に雲微物理過程とKF積雲対流スキームを併用した。

5) インドシナ半島への熱帯雨林モデルの適用性検討

インドシナ半島への熱帯雨林モデルの適用性を検討するために、WRFの陸域植生モデル (NoahLSM; Chen and Dudhia, 2001<sup>25)</sup>)で計算される水蒸気放出量の季節性おける再現性の検討を 行い、既往の研究報告と比較した。

4. 結果·考察

(1) 全球気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

1) 中解像度実験による影響評価

a 夏季モンスーンへの影響

AGCMの境界値データとして作成した1700~1992年の植生分布データ(Ramankutty and Foley, 1999<sup>19)</sup>; Hirabayashi et al., 2005<sup>20)</sup>)を解析して、各地域の耕地化がどの年代に集中して起こっ たかを調査した。アジア域ではインド亜大陸・中国東部・インドシナ半島が主な耕地化域である が、インド亜大陸では1700年代から継続的に耕地化が進行し、中国東部では1700~1800年にかけ て集中的に耕地化が起こった。インドシナ半島での植生改変は1950年以降に顕著であった。

温室効果気体やエアロゾルの増加が顕著になったのは1800年代後半以降であり(Forster et al., 2007<sup>30)</sup>)、植生分布データの前半期間(1700~1850年)における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。そこで、中解像度実験の1700~1850年を対象として、森林が耕地化す ると地表面粗度が減少する効果とアルベドが増大する効果について詳細な解析を行った。



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)と水蒸気収束(ベクトル、m/s)変化.c)a)
 に同じ,但しアルベド(影)と2m気温(コンター,K).d)a)に同じ,但し200hPaの高度場(影,m)
 と風速場(流線).太波線は高度場の変化が有意な領域(信頼限界95%).

表1 1700年実験と1850実験の6~8月平均の大気水収支項(mm/mon). インド亜大陸西岸(72-80°E, 17-25°N), 中国南東部(105-115°E, 20-27°N), 中国北東部(105-120°E, 27-37°N).

	インド亜大陸西岸		中国南東部		中国北東部	
	1700年	1850年	1700年	1850年	1700年	1850年
水蒸気収束量	146.1	77.3	139.8	108.3	22.5	33.3
蒸発散量	135.8	126.6	133.2	130.7	128.3	123.1
降水量	281.9	204.0	273.0	239.0	150.7	156.3

夏季のアジアモンスーンは対流圏下層でインドーインドシナ半島ー中国東部へと抜ける風系 (西風ー南西風)を形成する(図2a、流線)。下層風が海洋から陸上に吹き上がっている地域(インド 亜大陸西部、中国南東部)では、陸上で風が減速して水蒸気が収束して降水がもたらされるが、耕 地化によって地表面粗度が減少すると、風の減速が抑制されて水蒸気の収束が小さくなり、降水 が減少することが明らかになった(図2b)。さらにこれは、ヒマラヤの氷河コア解析データとイン ドの長期降水量観測データから推定された過去300年のインドのモンスーン降水量の変動(Duan et al., 2004<sup>31)</sup>)と比較して、定性的・定量的に一致することが明らかになった。

一方、耕地化によるアルベドの増大は植生改変が起こった地域とよく一致する(図2c)。アルベ ドが増大すると地上気温が低下することが期待されるが、そのような応答が見られるのは中国北 東部(揚子江以北)に限られることが明らかになった(図2c)。これは、インド亜大陸や中国南東部 でアルベドが増大した地域では、降水量すなわち雲量が増大したために地表への入社短波放射が 増大し、アルベドが増大した効果が相殺したと考えられる。これらの結果から、インド亜大陸西 部と中国南東部では粗度が減少した効果が顕著に現れ、中国北東部ではアルベドが増大した効果 が顕著に現れたことが明らかになった。これらの地域の大気水収支についてみると(表1)、インド 亜大陸西部と中国南東部では降水に対して水蒸気収束の占める割合が大きく、中国北東部では蒸 発散の占める割合が大きくなっていた。従って、前者は粗度の変化による風速の変化の影響が顕 著に現れ、後者はアルベドの変化による地表面熱収支の変化の影響が顕著に現れたものと考えら れる。これらの大気循環・降水・地表面熱水収支の変化の結果、夏季アジアモンスーンの特徴の 一つであるチベット高気圧が弱くなることが示された(図2d)。

b 季節変化への影響

夏季の降水量が減少したインド亜大陸と中国南東部において、年間を通した耕地化の影響について詳細に解析した。

図3より、インド亜大陸・中国南東部ともに、耕地化による風速の減少は年間を通じて顕著であ ること、降水量は年間を通して減少しているものの夏季の減少が顕著であること、地表付近の土 壌水分は年間を通して減少することが分かる。ただし、インド亜大陸では、雨季・乾季が明瞭な ため土壌水分の季節変化が大きく、耕地化による土壌水分の減少も大きいため、1850年実験での3 ~5月の土壌水分(体積含水率)は0.1以下になっていた。一方、中国南東部では降水量は緩やか な季節変化を示し、土壌水分は1850年実験でも比較的高い値を保っていた。

耕地化すると一般に、全蒸発散量は減少し、遮断蒸発と蒸散は減少、土壌蒸発は増大する。図4

に両地域での蒸発散量の季節別の変化を示したが、全蒸発散量ならびに遮断蒸発と蒸散の減少は 両地域のすべての季節に共通してみられたが、土壌蒸発についてはインド亜大陸で春季のみ減少 したことが明らかになった。これは、インド亜大陸の春季の土壌水分が著しく小さい値になった ため、乾燥による土壌蒸発抑制が大きく寄与したと考えられる。また、顕熱フラックスは春~夏 に増大、冬に減少する傾向が見られたが、インド亜大陸では春季に全蒸発散量の顕著な減少と関 連して、顕熱フラックスの増大も顕著であった。



図3 インド亜大陸(左列、72-80°E, 17-25°N)と中国南東部(右列、105-115°E, 20-27°N)で 領域平均した降水量(最上段、mm/day),地上風速(上段、m/s),地表付近の土壌水分量(下段, m/m),顕熱フラックス(最下段,W/m<sup>2</sup>)の月平均値の推移.○が1700年実験,●が1850年実験の 結果.



図4 インド亜大陸(上段、72-80°E, 17-25°N)と中国南東部(下段、105-115°E, 20-27°N)で 領域平均した季節別の蒸発散量(mm/day)の変化. 柱状図の下より土壌蒸発, 蒸散, 遮断蒸発. 左 側が1700年実験, 右側が1850年実験の結果.

さらに、耕地化によるモンスーン期の降水量変化について、半旬(5日)平均での推移を調べた ところ(図5)、インド亜大陸では雨季の開始が遅く、終了が早くなったことが明らかになった。 一方、中国南東部では雨季の開始/終了ともに早くなる傾向が認められた。これを、Wang and Ho (2002)<sup>32)</sup>の指標を用いて整理すると、インド亜大陸では雨季の開始が第32半旬から第33半旬に、 雨季の終了が第56半旬から第52半旬になったのに対し、中国南東部では雨季の開始が第28半旬か ら第27半旬に、雨季の終了が第48半旬から第46半旬になっていた。また、雨量の減少が最も大き くなるのは両地域とも雨季の期間である(インド亜大陸では第33~52半旬の147mm/day、中国南東 部では第21~46半順の103.6mm/day)が、減少率が最も大きくなるのは両地域とも雨季開始前のき かんであった(インド亜大陸では第1~32半旬の-32.6%、中国南東部では第1~26半旬の-23.8%)。

次に、アジアモンスーンへの広域的な影響を調べるために、Kawamura (1998)<sup>33)</sup>によるモンスー ンインデックスの年変化を図6に示す。両実験の差(1850年実験-1700年実験)が6月上旬と10月 上旬に大きな負の値を示しており、モンスーンの開始の遅れと終了の早まりを示唆している。



図5 インド亜大陸(上図)と中国南東部(下図)における半旬平均した降水量(mm/day)の年変 化.○が1700年実験,●が1850年実験の結果.



図6 Kawamura(1998)<sup>33)</sup>によるモンスーンインデックスの年変化. ○が1700年実験(左側の縦軸目 盛), ●が1850年実験(左側の縦軸目盛), □が1850年実験- 1700年実験(右側の縦軸目盛).

## 2) 高解像度実験による影響評価

中解像度実験で示された降水分布の変化を高解像度実験(水平T106、鉛直56層)で確認するため、 予備実験を行ったところ、現在の降水分布を高解像で得ることができるようになった(図7)。アジ アの主な地域(インド・華南・華中・インドシナ半島)で、中解像度実験と高解像度実験(コン トロール実験・半月遅れの海面水温で強制した実験)における地上気温と降水量の季節変化を見 たところ(図8,9)、解像度および海面水温のタイミングに則した一律的な変化は見られず、それ ぞれの地域あるいは項目によって、その変化の仕方は異なっていた.半月遅れの海面水温(SST) で強制した実験においても、結果の差がそれのみに起因するかどうかは明白でなく、モンスーン 活動に対する海陸熱コントラストと植生・陸面被覆の相対的な影響を定量的に考察するためにも、 今後の解析、調査が必要である.

陸面過程の高精度化のためのモデル改良では、土壌層上部の有機層の影響、空隙率の鉛直分布、 凍結土壌水分や氷点下での未凍結水の熱物理定数への影響について改良を行い、土壌温度プロフ ァイルの季節変化が改善されることを示した。



図7 T106での1992年の植生分布における降水量分布. 6~8月平均(左図)と12~2月平均(右図).



図8 インド(左上図), 華南(右上図), 華中(左下図)、インドシナ半島(右下図)の陸域で 面積平均した地上気温(℃)の月別気候値変化.○が中解像度実験,◇が高解像度コントロール 実験,□が高解像度SST半月遅れ実験の結果. 細実線が1700年, 細破線が1850年, 太実線が1992年. エラーバーは気候値を計算した期間の標準偏差を示す.



図9 図8に同じ. ただし降水量 (mm/month).

3) 土地被覆・植生改変によるエアロゾル発生量への影響

植生改変と有機エアロゾルの複合効果を調査するにあたって、エアロゾル増加が顕著になる 1850~1992年の有機エアロゾルの発生量を算定する。植生からの有機エアロゾルの発生量は植生 タイプと葉バイオマス量によって変化するため、1850~1992年の葉バイオマス量の推移を算定す る必要がある。葉バイオマス量の全休分布の算定方法について調査したところ、植生タイプごと の平均的な葉重量指数(LMA, Leaf Mass per Area)と葉面積指数(LAI, Leaf Area Index単位土地 面積あたりの葉の面積)から推定できることが分かった。LAIにはこれまでの植生改変実験で用い てきたデータから1850~1992年の期間を用いることとし、LMAには約2500カ所の地点データ (Wright et al., 2004<sup>34)</sup>)を用いて、葉バイオマス量を算定した(図10)。耕地化によって葉バイオ マス量は最大20~50%増減しており、これに植生タイプの変化を加味するとエアロゾル発生量の 変化は十分に大きくなることが予想される。



図10 LMAとLAIから推定された1850年7月(左図)と1992年7月(右図)の葉バイオマス量.

(2)領域気候モデルによる土地被覆・植生改変の影響評価

1) インドシナ半島の降水変動と植生改変の影響

a インドシナ半島の長期降水量変動再現実験

1966年から1995年までの長期再現実験を行った結果、過去の降水量変動が非常に良く再現された (図11)。過去の年々変動及び、長期変動は、Takahashi and Yasunari(2008)<sup>11)</sup>で示された、台 風活動が主要因である可能性が極めて高い。さらに図12で見られるように、観測データから、長 期的な現象は、インドシナ半島の内陸部が中心ではなく、ベトナムの北部を中心とした長期減少 傾向であることがわかる。この結果は、Takahashi and Yasunari(2008)<sup>11)</sup>と整合的でかつ、森林 伐採の効果なしで長期減少傾向が精度良く再現できた。これらの結果から、観測された長期変動 の主要な原因は、熱帯擾乱の変化によることが分かった。



図11 1966年から1995年までのインドシナ半島内陸部(101-105E,15-18N)で平均した9月の月降 水量の年々変動.黒色(灰色)の実線が、観測値(領域気候モデル)の年々変動.点線はぞれぞ れ,前半と後半の平均値.ただし,観測値は雨量計データによるため,10点の平均値.一方,数 値モデルは領域平均値.





図13 9月の降水量の変化(DRY-CTL). 1998年から2000年の3年間の9月の平均。灰色は、DRYの方 が降水量多いことを示す.



図14 左は現地時間19時の平均的な地上10mの風と温度の変化(DRY-CTL). 灰色はDRYの方が高温 であることを示す. 右は,現地時間1時の鉛直積分した水蒸気フラックスと可降水量の変化 (DRY-CTL). 灰色は,DRYの方が可降水量が多いことを示す.

b インドシナ半島の土地被覆・植生改変の領域気候への影響

CTL実験では、インドシナ半島の基本的な降水システムと考えられる、降水日変化が良く再現されていた。また、平均的な降水量分布についても、良く再現された。感度実験の結果、WET、CTL、 DRYと森林伐採(及び土壌の乾燥化)が進行するにつれて、森林伐採域の降水量は、増加することがわかった。図13は、DRYの3年平均の降水量分布からCTLのものを引き算したものである。ただし、 降水量の増加は、夜中に集中しているという特徴が見られた。インドシナ半島の内陸部(TRFと一 致)では、気候学的に夜中に集中して雨が降ることが知られており、感度実験による降水量の増 加は、気候学的に降水量が多い時間帯と一致していた。地表面状態の変化によって、TRF域とその 周辺での地表面付近の温度傾度が生じ、それによる局地循環によって、降水量が変化しているこ とが示唆された。具体的には、図14に示すように、昼間からの地表面の高温偏差が、夜間まで続 き、それに起因する循環により夜中に水蒸気量が増える(昼間はCTLの方が多い)。コラート高原 では、気候学的に降水は夜中に集中しているので、気候学的な降水極大時間と地表面改変による 水蒸気の変化のタイミングの一致によって、降水量が増加したと考えられる。この感度実験から、 インドシナ半島域の9月の条件下で森林伐採を行った場合、その伐採域で降水量が増加する可能性 が示唆された。この結果は、過去の粗い解像度のGCM及びRCMの結果とは矛盾するが、アマゾン域 などでの高解像度実験の結果とは整合的である(D'Almeida et al. 2007)<sup>35)</sup>。数値モデルの解像 度の違いによって、再現できる減少が異なり、結果が異なる可能性が高い。

2) 乾燥域での雲形成に関する研究

半乾燥域のモンゴルにおいて土壌水分を変化させた実験を行なった結果、平地では土壌水分が 少ないと浅い対流に伴う積雲が多く発生し、土壌水分が多いと積雲はほとんど発生しなかった。 ただ土壌水分が多い場合は、一旦対流が起こると、深い対流、つまり積乱雲に発達しやすいこと がわかった。それに対して、山岳部では土壌水分の変化によらず深い対流が発生した。

次に、土壌水分のコントラストが顕著なゴビ砂漠東部の黄河灌漑域を対象に雲の形成を調査し た。解析対象とした日は、衛星データから灌漑域には雲が発生しておらず、灌漑域の周囲に雲が 発生している(図15上段)。衛星観測データ(Sato et al, 2007)<sup>16)</sup>から推測した黄河灌漑域(図1a のハッチの領域)の体積含水率を0.4(飽和に対する割合は約80%)にした実験では、灌漑域の上空 で雲が発生しなかった(図15下段a)。これは、衛星が捉えた雲の分布(図15上段)と一致する。 一方、灌漑域に周囲と同様に乾燥した土壌を与えた場合には、灌漑域の上空にも雲が発生し、衛 星観測とは異なる結果が得られた(図15下段b)。灌漑域の鉛直風を調べたところ、湿潤な灌漑域 を仮定した実験では灌漑域で下降流、周囲で上昇量が卓越し、混合層高度も灌漑域で周囲よりも 低くなっていた。一方、湿潤な灌漑域を設定しない実験では、対象領域全域で上昇流が卓越し、 混合層高度も高くなっていた。つまり、湿潤な灌漑域では地表面温度が低下して弱い下降流が発 生、その結果、混合層高度が低下し雲の発生が抑制されたと考えられる。

さらに、湿潤な灌漑域を与えた実験の結果(図15下段a)を見ると、灌漑域と乾燥域の境目で雲 が発生しているのが分かる(C'1とC'2)。これは上段の衛星画像でも見られる。一方で、灌漑域を 与えない実験ではこのような雲は出現しなかった(図15下段b)。そこで、C'1に注目してこの雲の 形成メカニズムを詳しく調べた。図16はC'1と直交するように南西から北東に横切った鉛直断面図 である。灌漑域を与えた実験では、灌漑域と乾燥域との間で局地循環が起こっており、湿潤な空 気が灌漑域から乾燥域に向かって移動している様子がわかる(図16a)。また、境界付近では上昇 が発生しており、それに伴って湿潤な空気が上昇、図15aで見られるC'1はこの付近で発生していた。 一方、湿潤な灌漑域を設定しなかった実験では、このような局地循環は生じなかった(図16b)。 これらの結果から、湿潤な灌漑域は周囲の乾燥域との間で局地循環を発生させ、灌漑域の上空、 及び周囲の雲の形成に大きな影響を与えることがわかった。



Aqua MODIS Cloud (250m)2005.8.4 14:10LT

42°N

図15 上段:衛星Aquaで観測された雲の分布.下段:実験に用いた地形(コンター),土地利用(ハッチ),モデルで計算された雲(白).a)はハッチの領域が湿潤にした時の結果,b)は湿潤域を与えなかった実験の結果(Kawase et al. (2008)<sup>36)</sup>を一部改編).



図16 上段: C'1を横切った鉛直断面図. 図の左側が南西,右側が北東. 矢印が断面に沿った風と鉛 直風を示し,等値線が比湿を表す. a)は灌漑域を仮定した実験で,北東側に灌漑域が存在する. b) は灌漑域を仮定しない実験(Kawase et al. 2008<sup>36)</sup>を一部改編).

3) 中国域の過去の降水変動の再現と将来の降水変動予測実験

中国における地点降水データを用いて解析した1990年代と1960年代の6月積算降水量の差を図 17aに示す。梅雨前線に伴う降水が多い揚子江付近では、1960年代に比べ1990年代に降水量が増加 したことが分かる。つまり1990年代は揚子江の下流域では水災害が発生しやすい状況となってい る。揚子江流域の南側では、逆に1990年代に降水量の減少が見られる。図17bは客観解析データ ERA40を境界値に用いた再現実験の結果である。図3aと図3bを比べると、数値モデルによる再現実 験は観測された降水量の変化をよく再現していることがわかる。一方、図17cは疑似気候再現実験 によって得られた1960年代と1990年代の降水量の変化である。疑似気候再現実験でも図17a、bで みられる1960年代と1990年代の降水量のおおよその変化が再現できていることがわかる。このこ とは、梅雨前線降水帯の変化が、日々の降水プロセスの変化よりも、梅雨前線をとりまく大規模 な気候場の変化により決定されていることを示唆し、本手法の適応の妥当性を示している。



図17 1990年代と1960年代の6月の降水量変化. a)は観測, b)は再現実験, c)は疑似気候再現実験の結果. a)において丸印が1990年代に降水量が増加した地点,三角印が減少した地点を示す. b), c)において濃いシャイドが1990年代に降水量が増加した地域(Kawase et al, 2008<sup>37)</sup>を一部改編).

次にこの疑似温暖化手法を用いて、将来の温暖化に伴う梅雨降水帯の予測を行った。図18は東 経90度から150度で平均した6月積算降水量(10年平均)の緯度分布を示す。再現実験で計算され た1990年代の降水量分布を見ると、北緯27.5度から30度付近(揚子江流域)に降水量のピークが みられる。一方、疑似温暖化実験の結果を見みると、個々のGCMの温暖化差分を用いたほとんどの 実験で降水量のピークが北緯25度から27.5度の間にみられる。つまり、降水の極大域が南に移っ たことを示唆している。また、マルチモデルアンサンブル平均を気候差分に与えた疑似温暖化実 験(PGW-MME)も、個々の実験と同様に北緯25度から27.5度に降水量のピークを示した。

降水量の絶対値や地域分布においては個々のGCMの予測に大きなばらつきがあったが、疑似温暖 化実験ではそのばらつきが軽減され、似たような予測結果が示された(図省略)。これは基準場 として現実的な客観解析データを用いたことで、GCMの持つ現在気候のバイアスを軽減したことに よると考えられる。この研究から、擬似温暖化実験が複数のGCM間でみられる大きなばらつきを大 幅に改善することができ、予測の不確実性の軽減に貢献することが示された。



図18 東経90度から150度で平均した10年平均6月積算降水量の緯度分布.太い点線が再現実験の結 果で1990年代の降水量を示す.黒丸印付きの太い実線がマルチモデルアンサンブル平均の気候差 分を与えた疑似温暖化実験の結果.細い実線が個々のGCMの気候差分を与えた疑似温暖化実験の結 果.白丸付きの太い実線は個々のGCMを用いた疑似温暖化実験の平均値(Kawase et al, 2009<sup>37)</sup>,を 一部改編).

4)森林が梅雨前線形成に与える影響調査

ZM-STANDARDとZM-FOREST、ZM-DEFORESTによる東アジアでの結果を図1a、1b、1cにそれぞれ示 す。ZM-STANDARDでは中国南部から日本にかけてNinomiya (2000)<sup>38)</sup> で示された梅雨前線帯と同じ 特徴をもつ降水帯が再現された(図19a)。

ZM-FORESTでは中国北部(華北平原)での降水の増加が顕著となり、水蒸気輸送帯も北方へ移動し 梅雨前線が北にシフトした。ZM-DESERTでは大陸上での降水の形成がほとんど見られなくなり梅雨 前線が不明瞭となった。これらの結果は植生を含む陸面状態の変化がモンスーンの形成に影響を 与える可能性を示唆している。

5) インドシナ半島への熱帯雨林モデルの適用性検討

インドシナ半島の熱帯季節林において、領域気候モデル(WRF)の陸域植生モデル(NoahLSM)で計 算された水蒸気放出量の季節性おける再現性について既往の研究報告と比較した。その結果、特 に乾季に蒸散量の違いが大きく、常緑林ではTanaka et al. (2004)<sup>39)</sup>などと比較して水蒸気放出量 が過小評価、落葉林ではTanaka et al. (2008)<sup>40)</sup>などと比較して過大評価されていることがわかっ た。従って、既往の研究で示されているような常緑林と落葉林(乾季落葉している植生を含む) の蒸発散量のコントラストがWRFの大気場に反映されていないといえる。このような蒸発散量のコ ントラストが大気場に与える影響を調べるためには、インドシナ半島の乾季の気象条件で常緑林 と落葉林の蒸発散量のコントラストを再現できる陸域植生モデルを結合し、WRFによる再現性の改 善を検討していく必要がある。



図1980日間平均降水量(影, mm/day)と水蒸気輸送量(ベクトル, kg/m/s). (a) ZM-STANDARD, (b) ZM-FOREST, (c) ZM-DESERT.

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

これまでの全球気候モデルによる研究では、仮想的で極端な植生改変を仮定した感度実験で影響の可能性を指摘するにとどまっていたが、本研究では歴史的な植生改変データを用いてアジア モンスーンへの実際のインパクトを評価し、観測的手法による研究と比較・検証することができ た。また、季節変化への影響に着目した解析を行うことによって、モンスーンの開始・終了時期 を変調させる可能性を指摘することができた。植生改変とエアロゾルの複合効果については、こ れまでに全球気候モデルによる研究例が無く、人為起源要因の新たなフィードバック過程の解明 につながると期待される。

領域気候モデルを用いたこれまで研究では、水平解像度が大きいために土地利用改変により駆 動される局地循環の再現が困難であったが、本研究では解像度を5km以下にすることで局地循環の 再現を可能にし、その効果を含めた上で議論を行っている。インドシナ半島での高解像度の長期 気候実験では、9月の降水長期減少トレンドが土地利用改変ではなく、台風などの熱帯性擾乱の影 響が大きいことを示した。半乾燥域については、高解像衛星データから黄河の灌漑域とその周辺 における気候的雲分布特性を示すとともに、高解像度の領域モデルによる感度実験から、その雲 分布特性が土地利用改変によって駆動される"land-use-induced circulation"により形成されて いることを解明した。"land-use-induced circulation"により形成されて いることを解明した。"land-use-induced circulation"について観測事例を基に数値実験を行って 存在を明らかにした数少ない成果として高く評価されている。また、全球気候モデルでは再現が 困難な梅雨降水帯について、低解像の領域気候モデルを用い、疑似温暖化手法を適用することに よって過去の変動特性を再現することが出来たほか、将来予測における不確実性が疑似温暖化手 法によるダウンスケーリングによって低減される可能性を示すことができた。

(2) 地球環境政策への貢献

土地被覆の変化が気候に及ぼす影響については、第5次IPCC報告書での重点的な課題の一つとな る予定であり、歴史的な植生改変が過去の気候変動に一定の影響を与えたことを示した本研究は、 その中で先駆的な研究成果になると期待される。この研究成果は米国科学アカデミー紀要に掲載 される予定であり、プレス発表を行って成果の広報・普及に努める。また、温暖化予測実験の研 究グループとの情報交換を活発に行って、国際的な研究推進や地球環境政策の立案に資するよう に努める。

領域気候モデルを用いた疑似温暖化手法が、過去の気候変動の再現や将来予測の力学的ダウン スケーリングにおいて、全球気候モデルの不確定性を低減する有効な手段であることが示された ことは、今後の地域的な影響評価の高精度化を大きく促進し、地域環境政策への大きな貢献にな ると期待される。また、高解像の領域気候モデルによって土地被覆・植生改変の影響が局地循環 と関連して雲分布や降水に影響を及ぼすことが示されたことから、雲解像モデルによるダウンス ケーリングの重要性について認識の普及に努める。

6. 引用文献

 Fraedrich, K., A. Kleidon, and F. Lunkei, (1999), A Green Planet versus a Desert World: Estimating the Effect of Vegetation Extremes on the Atmosphere. J. Clim., 12, 3156-3163.

- 2) Feddema, J., A. Oleson, G. Bonan, L. Mearns, W. Washington, G. Meehl and D. Nychka, (2005), A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncerntainty in present-day land cover representations. Clim. Dyn. 25, 581-609.
- Chase, T. N., R.A. Pielke Sr., T.G.F. Kittel, R.R. Nemani and S.W. Running, (2000), Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. Clim. Dyn., 16, 93-105.
- Mabuchi, K., Y. Sato and H. Kida, (2005), Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region. Part I: Case of the Northern hemisphere summer. J. Clim. 18, 410-428.
- 5) Brovkin, V., M. Claussen, E. Driesschaert, T. Fichefet, D. Kicklighter, M.F. Loutre, H.D. Matthews, N. Ramankutty, M. Schaeffer and A. Sokolov, (2006), Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. Clim. Dyn., 26, 587-600.
- 6) Tsigaridisl, K., M. Krol, F.J. Dentener, Y. Balkanski, J. Lathi`ere, S. Metzger, D.A. Hauglustaine, and M. Kanakidou, (2006), Change in global aerosol composition since preindustrial times. Atmos. Chem. Phys., 6, 5143-5162.
- 7) Heald, C.L., D.K. Henze, L.W. Horowitz, J. Feddema, J.-F. Lamarque, A. Guenther, P.G. Hess, F. Vitt, J.H. Seinfeld, A.H. Goldstein and I. Fung, (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.
- 8) 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 climatic-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 360, 1705-1719.
- 9) Kanae, S., T. Oki and K. Musiake, (2001), Impact of Deforestation on Regional Precipitation over the Indochina Peninsula. Journal of Hydrometeor 2, 51-70.
- Cutrima, E., D.W. Martin, and R. Rabin, (1995), Enhancement of Cumulus Clouds over Deforested Lands in Amazonia. Bull. American Meteorol. Soc., 76, 1801-1805.
- Takahashi H. G, and T. Yasunari, (2008), Decreasing trend in rainfall over Indochina during the late summer monsoon: Impact of tropical cyclones. J. Meteorol. Soc. Japan, 86, 429-438, doi:10.2151/jmsj.86.429.
- 12) Sato, T., F. Kimura, and A. Kitoh, (2007), Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. J. Hydrol., 333, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- 13) Endo, N., B. Ailikun and T. Yasunari, (2005), Changes in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China. J. Meteorol. Soc. Japan, 83, 621-631.
- 14) Sen, O.L., Y. Wang and B. Wang, (2004), Impact of Indochina Deforestation on the East

Asian Summer Monsoon. J. Clim., 17, 1366-1380.

- 15) Gong, D., and C. Ho, (2002), Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s, Geophys. Res. Lett., 29, 1436, doi:10.1029/2001GL014523.
- 16) Sato, T., F. Kimura and A. Hasegawa, 2007, Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. J. Geophys. Res., 112, D24109, doi:10.1029/2006JD008129.
- Kimura, F., and A. Kitoh, (2007), Downscaling by Pseudo Global Warming Method, The Final Report of ICCAP, 43-46.
- K-1 model developers, (2004), K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Tech. Rep. No. 1, eds. Hasumi, H. and S. Emori, Center for Climate System Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, JAPAN, pp1-34.
- 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.
- 20) Hirabayashi, Y., S. Kanae, I. Struthers and T. Oki, (2005), A 100-year (1901-2000) global retrospective estimation of the terrestrial water cycle. J. Geophys. Res., 110, D19101, doi:10.1029/2004JD005492.
- 21) Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, (2003), Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. Global Planetary Change, 38, 209-222.
- 22) Taylor, K.E., D. Williamson and F. Zwiers, (2000), The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations, PCMDI Report, No. 60 (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California), pp1-25.
- 23) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, (2005), A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, pp100.
- 24) Hong, S.-Y. and J.-O. J. Lim, (2006), The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). J. Korean Meteorol. Soc., 42, 129-151.
- 25) Chen, F. and J. Dudhia, (2001), Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. Mon. Wea. Rev., 569-585.
- 26) Peilke, R. A., et al., (1992), A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91.
- 27) Kain, J. S., and J. M. Fritsch, (1993), Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, Amer. Meteor. Soc., K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., 246 pp.
- 28) Taylor, K.E., (2001), Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, J. Geophys. Res., 106, 7183-7192.
- 29) Yoshikane, T., F. Kimura and S. Emori, (2001), Numerical Study on the Baiu Front Genesis by Heating Contrast between Land and Ocean. J. Meteorol. Soc. Japan, 79, 671-686.

- 30) Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, (2007), Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA), pp129-234.
- 31) Duan, K., T. Yao and L.G. Thompson, (2004), Low-frequency of southern Asian monsoon variability using a 295-year record from the Dasuopu ice core in the central Himalayas. Geophys. Res. Lett., 31, L16209, doi:10.1029/2004GL020015.
- Wang, B., and L. Ho, (2002), Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon. J. Clim..
   15, 386-398.
- 33) Kawamura, R. (1998), A Possible Mechanism of the Asian Summer Monsoon-ENSO Coupling. J. Meteorol. Soc. Japan. 76, 1009-1027.
- 34) Wright, I.J., P.B. Reich, M. Westoby, D.D. Ackerly, Z. Baruch, F. Bongers, J. Cavender-Bares, T. Chapin, J.H.C. Cornelissen, M. Diemer, J. Flexas, E. Garnier, P.K. Groom, J. Gulias, K. Hikosaka, B.B. Lamont, T. Lee, W. Lee, C. Lusk, J.J. Midgley, M.-L. Navas, U. Niinemets, J. Oleksyn, N. Osada, H. Poorter, P. Poot, L. Prior, V.I. Pyankov, C. Roumet, S.C. Thomas, M.G. Tjoelker, E.J. Veneklaas and R. Villar, (2004), The worldwide leaf economics spectrum. Nature, 428, 821-827.
- 35) D'Almeida C., C. Vorosmarty, G. Hurtt, J. Marengo, S. Dingman, B. Keim, (2007), The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. International J. Climatol. 27, 633-647.
- 36) 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.
- 37) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura, and T. Yasunari, (2008), Downscaling of the Climatic Change in the Rainband in East Asia by a Pseudo Climate Simulation Method. SOLA, 4, 73-76.
- 38) Ninomiya, K., (2000), Large- and Meso-. ALPHA. -scale Characteristics of Meiyu/Baiu Front Associated with Intense Rainfalls in 1-10 July 1991. J. Meteorol. Soc. Japan, 78, 141-157.
- 39) Tanaka, K., H. Takizawa, T Kume, J. Xu, C Tantasirin and M. Suzuki, (2004), Impact of rooting depth and soil hydraulic properties on the transpiration peak of an evergreen forest in northern Thailand in the late dry season, J. Geophys. Res., 109(D18), doi:10.1029/2004JD004865.
- 40) Tanaka, N., T. Kume, N. Yoshifuji, K. Tanaka, H. Takizawa, K. Shiraki, C. Tantasirin,
  N. Tangtham, M. Suzuki, (2008), A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions. Agricul. Forest Meteorol., 148, 807-819.

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)の土地被覆・植生改変のインパクトを主として 担っており、高解像の領域モデルによる局地循環や雲生成過程の解明はMAHASRIの対流雲・地表 面・境界層の相互作用の解明にも資するものである。

黄河灌漑域での植生改変のインパクトに関する研究は、「人・自然・地球共生プロジェクト」 の「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」や、総 合地球環境学研究所の黄河プロジェクト「近年の黄河の急激な水循環変化とその意味するもの」 (平成15~19年度)で得られた、黄河域の水循環に関する知見を活用して推進している。また、平 成19年度からSTARTのプロジェクトとして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)の乾燥域における土地被覆変化のインパクト に関する研究プロジェクトとも情報交換を行っている。

AGCMによる研究は、IPCCの第5次報告書(AR5)に向けた気候変動の解明・予測研究とも連携を取 りながら推進している。陸面モデルの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。

## 8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 〈論文(査読あり)〉
- Saito, K., 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"
- 2) Kawase, H., 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"

- 3) Saito, K.: 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"
- 4) Saito, K.: 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"
- 5) Kawase, H., 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"
- 6) Takahashi, H.G. 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"

- 7) Takahashi, H.G., 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"
- 8) Takata, K., 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)
- 9) Tanaka, K., 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)

<その他誌上発表(査読なし)>

- Ma, X. and H. Kawase: Arid Environments and Wind Erosion, Antonio Fernandez-Bernal and Mauricio Alberto De La Rosa edits, Nova Publishers (2009)
   "Effect of Irrigation on Runoff and Local Cloud Systems in the Yellow River Basin" (in press)
- 2) 高田久美子・斉藤和之・山島亮二・安成哲三,2009: GCMによる気候感度実験における土壌 水分と地表面熱・水収支,土壌水分ワークショップ論文集(2009)
- (2) 口頭発表(学会)
- 1) 斉藤和之,2006: 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 1次元モデルでの評価-.2006年度日本雪氷学会全国大会,秋田,2006年11月
- Tanaka K, Yoshifuji N, Tanaka N, Tantasirin C, Suzuki M, 2006: Simulation of growing season length of a deciduous forest in a dry tropical area. 2006 AGU Fall Meeting, 11-15 December, 2006, San Francisco, CA, USA.
- Saito, K., 2006: Cold-region Subsurface Hydro-thermal Sensitivity of physical terrestrial scheme in global climate model: Idealized off-line evaluation, Fall Meeting of the American Geophysical Union, Dec. 12, 2006, San Francisco, CA, USA.
- 4) Saito, K., 2007: Sensitivity of arctic subsurface hydroclimate to physical terrestrial representation in global climate model The Thrid WGNE Workshop, 12-16 February, 2007, San Francisco, CA, USA.
- 5) 川瀬宏明,木村富士男,2007:半乾燥域のモンゴルにおいて夏季の積雲対流活動に土壌水分 と地形が及ぼす影響,日本気象学会2007年度春季大会,東京,2007年5月13~16日

6) Kawase, H. and T. Yoshikane, 2007: Impact of Irrigation Area on Cloud Appearance around the Yellow River in China. 8th Annual WRF User's Workshop, 11-15 June 2007, Boulder, CO,

USA.

- 7) Saito, K., M. Kimoto, T. Zhang, K. Takata, and S. Emori, 2007: Arctic subsurface hydroclimate simulated by a high-resolution global climate model, 24th General Assembly of the International Geodesy and Geophysical Union, July 11, 2007, Perugia, Italy.
- 8) Yasunari, T., K. Takata, K. Saito, H. Takahashi, Y. Kosaka, 2007, Impact of land cover/land use changes since 1700 on changes in Asian monsoon system. AOGS 4th Annual Meeting, 30 July to 4 August, 2007, Bangkok, Thailand.
- 9) Kawase, H. and T. Yoshikane, 2007: Impact of Irrigation Area on Cloud Appearance around the Yellow River in China. International Workshop on Semi-Arid Land Surface-Atmosphere Interaction, 9-13 August, 2007, Lanzhou, China.
- 10) 川瀬宏明, 吉兼隆生, 原政之, 佐藤友徳, 木村富士男, 2007: 半乾燥域に存在する潅漑が 雲の発生に及ぼす影響. 第9回非静力学モデルに関するワークショップ, 京都, 2007年9月
- 11) 斉藤和之,2007:全休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-1次元モデルでの評価 その2-.2007年度日本雪氷学会全国大会,富山,2007年9月
- 12)川瀬宏明,吉兼隆生,原政之,佐藤友徳,大澤慎吾,木村富士男,2007:黄河の大規模灌 漑が夏季の積雲の発生に及ぼす影響.日本気象学会2007年度秋季大会,札幌,2007年10月14 日~16日
- 13)高田久美子,斉藤和之,小坂洋介,安成哲三,2007:耕地化がアジアモンスーンに与えた 影響の評価~産業革命以前(1700-1850年)の変化~.日本気象学会2007年秋季大会,札幌, 2007年10月
- 14) 川瀬宏明, 2007: 黄河流域の河套灌漑域が夏季の雲の発生に及ぼす影響. 平成19年度総合 地球環境学研究所黄河プロジェクト国内黄河研究会,石川県加賀市, 2007年10月
- 15) Saito, K., 2007: Region Subsurface Hydro-thermal Sensitivity of Physical Land Scheme in Global Climate Model: Idealized Off-Line Evaluation. 2007 American Geophysical Union Fall Meeting. December, 2007, San Francisco, USA.
- 16) 川瀬宏明, 2008: Predictability of the Baiu/Mei-yu rain-band simulated by Pseudo Global Warming method. S5-3 Mini International Workshop, February, 2008, Tsukuba, Ibaraki.
- 17) 川瀬宏明,吉兼隆生,原政之,Ailikun,木村富士男,安成哲三,2008: 疑似気候再現/疑 似温暖化手法を用いた中国揚子江流域における過去の降水変動の再現とその将来評価.日本 気象学会2008年春季大会,横浜,2008年5月
- 18) Kawase. H., T. Yoshikane, M. Hara, T. Sato, S. Ohsawa, and F. Kimura, 2008: Observed and simulated cloud around the Hetao Irrigation District in China. The 9th WRF Users' Workshop, 23-27 June, 2008, Boulder, CO, USA.
- 19) Saito, K., 2008: Refinement of physical land scheme for cold-region subsurface hydro-thermal processes and its impact on high-latitude hydroclimate, The 9th International Conference on Permafrost, July 1, 2008, Fairbanks, AK, USA.
- 20) 高橋 洋, 吉兼 隆生, 原 政之, 安成 哲三, 2008: 高解像度領域気候モデルによるインド シナ半島の9月の長期降水減少の研究.水文・水資源学会2008年度研究発表会, 東京, 2008年 8月

- 21) 斉藤和之,2008: 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-大気結合モデルでの評価-.2008年度雪氷研究大会、東京、2008年9月
- 22) Saito, K., 2008: Impact of subsurface hydro-thermal representations on the atmospheric hydroclimate (Poster), First International Symposium on Arctic Research, Kagaku Miraikan, November 4, 2008, Tokyo, Japan
- 23) 川瀬宏明,吉兼隆生,原政之,木村富士男,2008: CMIP3マルチモデルアンサンブルを用いた疑似温暖化ダウンスケールー梅雨降水帯の将来予測の不確実性の評価-.日本気象学会2008年度秋季大会,仙台,2008年11月19日-21日
- 24) 斉藤和之、2008: 全球気候モデルにおける 凍土過程・凍土分布の現状と改良. Symposium on Permafrost monitoring and variations, 札幌, 2008年11月
- 25)高田久美子,山島亮二,2008年:産業革命以前(1700~1850年)の耕地化がアジアモンスーンに及ぼした影響. 統合的陸域研究連絡会(日本気象学会2008年秋季大会),仙台、2008年11月
- 26) 山島亮二,松本淳,高田久美子,2008年:歴史的な土地利用の変化が大気場に及ぼした影響.日本気象学会2008年秋季大会,仙台,2008年11月
- 27) 吉兼隆生, 原政之, 川瀬宏明, 木村富士男, 2008: 領域気候モデルを用いた森林の梅雨前 線形成に与える影響調査. 日本気象学会2008年秋季大会, 仙台, 2008年11月
- 28) 高田久美子,斉藤和之,山島亮二,安成哲三,2009:GCMによる気候感度実験における土壌 水分と地表面熱・水収支.土壌水分ワークショップ,東京,2009年3月
- 29) Saito, K., 2009: Subsurface hydro-thermal regime and the atmospheric hydroclimate by a climate model, European Geosciences Union General Assembly 2009, April 22, 2009, Vienna, Austria.
- 30)山島亮二,松本淳,高田久美子,2009:1700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,2009年5 月
- 31) Matsumoto, J., R. Yamashiha and K. Takata, 2009: 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5月
- 32) 須藤健悟,高田久美子,安成哲三,2009年: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年5月
- 33) 山島亮二,松本淳,高田久美子,2009:1700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年5月
- 34) 高田久美子,斉藤和之,山島亮二,安成哲三,2009:1700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年5月
- 35) Matsumoto, J., R. Yamashiha and K. Takata, 2009: Impacts of Historical Land Use Changes between 1700 and 1850 on Water Cycle over Eurasia, GEWEX/iLEAPS conference, August, 2009, Melborne.
- 36) Yamashiha, R., J. Matsumoto and K. Takata, 2009: Impacts of historical land use changes between 1700 and 1850 on the onset and retreat of the Asian summer monsoon. GEWEX/iLEAPS conference, August, 2009, Melborne.

(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
- 成果の記者発表(2009年5月予定):誌上発表<論文(査読あり)>(8) Takata et al., PNAS について。
- (6) その他

なし。