

インドシナ半島を対象とした全球気候モデルによる 地表面パラメータ変化が降水に与える影響に関する数値実験 — 単純化した森林伐採が降水に与える影響 —

IMPACT OF CHANGES IN LAND SURFACE PARAMETERS ON PRECIPITATION OVER INDOCHINA USING A GCM — SIMPLIFIED DEFORESTATION EFFECTS —

鼎 信次郎¹・沖 大幹²・虫明 功臣³

Shinjiro KANAE, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

¹正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³フェロー会員 工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

Simplified deforestation effects on the climate over Indochina is assessed using a GCM. In the simulation, a significant decrease in rainfall over Indochina is found in April and May (the beginning of the wet season) as a result of the simplified deforestation. On the contrary, no significant decrease is found in the time series of observed rainfall data in April and May. As the strong sensible heat calculated at forested land surface in Indochina in the dry season is supposed to be inadequate, additional two sets of numerical experiments are carried out with simple modifications to the land surface scheme. However, the decrease in rainfall is still found in the results of the numerical experiments. Change in Bowen ratio doesn't seem to play a major role within "land surface-rainfall relationship."

Key Words : GCM, deforestation, Southeast Asian monsoon, land surface-atmosphere interaction

1. はじめに

現在も世界の各地で熱帯林を中心として森林伐採が進行しており地球環境問題の焦点の一つであり続けている。森林伐採によって準一次元的な水文環境変化、例えば、蒸発散量の減少や土壌水分の減少による乾燥化、表層土壌の流出・悪化、水資源保持力の低下等が生じると言われている。同時に、森林伐採による地表面水文状態の変化がその地域の降水量に有意な変化を与える可能性があることが危惧されている。もし森林伐採により降水量が減少するならば、森林伐採→蒸発散量減少→降水量減少→地表面の乾燥と蒸発散量の減少(→植生の変化)→降水量のさらなる減少→.... という悪循環に落ち込むことさえ想像される。このような森林伐採が引き起こす地域の降水量の減少に関しては、数値モデルを用いた「もし将来森林が伐採されたら」という視点に基づいた数値実験が多くなされている。これら数値実験による研究は主としてアマゾンを対象としたもの¹⁾が多く、1) 蒸発散量の減少 2) 降水量の減少 3) 土壌水分の乾燥化 4) 水蒸気収束量の減少、という結論が得られていることが多い。しかし、定量的な

議論をするにはいまだ不十分であるのは仕方がないとしても、そもそも降水量や水蒸気収束量は減少するという研究結果だけでなく、一部には増加するとの結果もあり、不確定性が高い。

降水量の減少や水蒸気収束量の減少が現実に観測されていれば議論は簡単になるであろう。しかし、アマゾンの水循環に関しては分かっていないことが多いこともあり、降水量の減少といった顕著な観測結果は得られていない²⁾。そのため、気候モデルによるセンシティブティ研究のみになりがちである。

このような森林伐採等の地表面植生の変化が過去から現在までの現実の大規模な領域の降水・水循環に影響を与えたことを観測とモデルの両面から検証した例は世界でも数少なく、サヘル地方の1960年代後半より長期に渡る流量の減少の例³⁾、および、筆者らによるインドシナ半島のタイにおいて9月のみ降水量が減少していることが報告された例⁴⁾程度しか見当たらない。

タイでは図1に示すようにこの数十年間に森林が相当な勢いで破壊された。ただし、数十年間で大規模に森林が消滅した地域が存在する一方で、それらの領域でも降水量が現地機関によって観測され続けており、そ

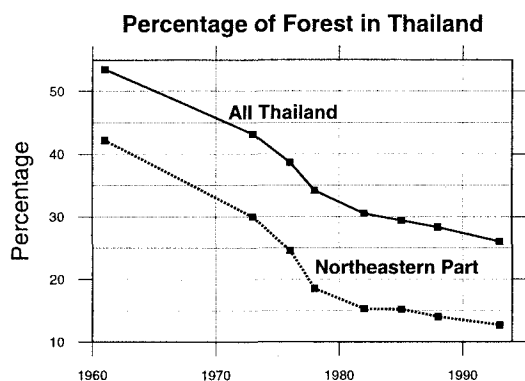


図-1 タイ全土および東北部における森林面積割合の時系列

の領域を対象として研究を行うことにより、過去の降水量の変動と気候モデルの結果とを比較し解釈することが可能になる。

筆者らはこれまでの研究により⁴⁾ タイの地表面被覆の変化と降水量の変化の関係について、観測降水量の分析と領域気候モデルによる数値実験を行い以下のような結果を得ている。1) 観測降水量の分析から、9月のみににおいて長期的な降水量の減少傾向が抽出された。その他の月に関しては顕著な傾向は見られなかった。2) 森林伐採による地表面変化をバケツモデルにおけるアルベドと粗度の相違であると表現し、領域気候モデルを用いた数値実験を行うことによって、9月の降水量の減少傾向を再現した。

このように領域気候モデルによって観測データより得られた9月の降水量の減少傾向を再現し、森林伐採の影響が降水量の減少としてすでに現実化している可能性を示唆したが、領域気候モデルを用いた数値実験には、1) 側面境界条件の存在により大規模な気候場が規定され収束・発散が大きく変化し得ない、2) 計算機負荷が大きいため年々の変動などを対象とした長期の数値実験を行うことが難しい、などのいくつかの弱点が存在する。一方、全球気候モデル(GCM)を用いた数値実験を行うことによって上記の弱点の克服が可能になると考えられる。

それ故本研究では、森林伐採が降水に与える影響を調べることを念頭に置き、インドシナ半島を対象とした地表面パラメータの変化が降水に与える影響に関する数値実験を、GCMを用いて行なった。そして、GCM数値実験による降水量の変化がどのようなものであるかを調べ、森林伐採の進行したこの数十年の観測降水量の変化傾向との比較を行った。最後に、GCM数値実験結果と観測値より得られた傾向との相違を解釈するための新たな数値実験を試みた。

2. 数値モデルの概要と数値実験設定

(1) 大気大循環モデル

本研究で使用したGCMは東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)が共同で開発しているCCSR/NIES AGCM⁵⁾ Ver.5.4であり、本研究に関係する主な物理過程として、1) Arakawa-Schubert型積雲対流降水スキーム⁶⁾ および大規模凝結による降水2) 地表面水収支スキームとしてバケツモデル⁷⁾を含んでいる。本研究で用いた水平解像度はT21であり、これは約5.6度のグリッドに対応する。鉛直方向はシグマ座標系20層と設定した。地表面過程は、水収支に関しては上記のように一様20cm深さのバケツモデルであり、熱と運動量交換の計算のためにアルベドと粗度をパラメータとして持つ。蒸発効率 β はバケツ内の土壌水分量によりほぼ線形に決定付けられ、アルベドと粗度は32種類の地表面タイプ毎に設定されている。以後の数値実験に関する分析においては、バケツモデルを用いたため、蒸発量という単語を蒸発散量と区別無く使用した。

森林伐採の降水に与える影響を念頭に置いた数値実験において、SiB⁸⁾等の植生モデルを用いる方法も考えられるが、本研究では、より簡易なモデルであるバケツモデルを用いた。その理由を以下に記す。1) 例えばLean and Rowntree⁹⁾によるアマゾン森林伐採実験を始めとした過去の森林伐採を対象とした数値実験は、複雑な地表面モデルを用いるかどうかに関わらず、森林伐採による気候の変化の原因を結局アルベドと粗度の変化のみに求めている。植生モデルを用いたが故の植生生理やパラメータ等にその原因を求めるものはほとんど見られない。2) 数値気候モデルおよびその地表面水文モデルに関しては、SiB等の植生モデルのように多くのパラメータを含み高度化・複雑化を目指す立場と、モデルやパラメタリゼーションはあくまでも現実の特性を抜き出して抽象化したものであり、むやみに複雑化せずに知識の整理されている範囲のものであるべき¹⁰⁾との二つの立場が存在し、どちらを用いた数値実験にも利点があると考えられている。3) バケツモデルのような簡易なモデルでも植生地の水収支は妥当に再現されている^{11),12)}。これらの理由より、第一次近似としては、森林伐採が降水に与える影響は主にアルベドと粗度の変化だけに起因すると仮定しても構わないと考えられ、それを最も簡単な形で陽に表現したバケツモデルによって森林伐採の影響を考察することは妥当性を失わないと考え、以下の数値実験を行った。

(2) 数値実験設定 (CRRT, PAST)

上記GCMを用いインドシナ半島を解析対象とし

表-1 インドシナ半島に関連する地表面タイプ毎の粗度とアルベド

植生タイプ	粗度 (m)	アルベド
熱帯・亜熱帯林	1.9	0.11
耕地	0.09	0.19

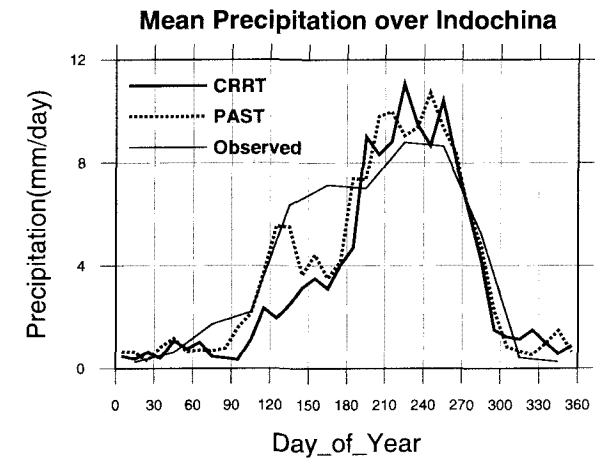


図-2 CRRT と PAST のインドシナ半島における降水量の季節変化. Observed は GPCP による観測値.

た数値実験を行なった。モデル領域内のインドシナ半島に相当する地域 (4 グリッドセル) は標準では耕地として分類されており、この標準の地表面タイプを用いた数値実験を CRRT と名付け、インドシナ半島のみ地表面タイプを熱帯林にした数値実験を PAST と名付けた。CRRT は現在の森林伐採がすでにされた状態にほぼ対応し、一方 PAST は過去の森林が存在したときの状態にほぼ対応すると仮定した。既に述べた理由より、CRRT と PAST ではインドシナ半島のアルベドと粗度のみを変更しその影響を調べた。変更されたパラメータの概要を表 1 に示す。これらのパラメータは衛星観測を元にしたグローバルデータセット¹³⁾ との対応を取った上で、インドシナ半島の森林と耕地を代表とするパラメータとして妥当であることを確認の上、使用した。数値実験は気候値の海面水温を境界条件とし、同じ初期値から 10 年間ずつ計算を行なった。以下ではその 2 年目から 10 年目の平均値について主に議論を行なう。分析には 10 日毎の平均値 (合計値) を用いた。一年は各月 30 日の合計 360 日と設定し、各月の 1-10 日を上旬、11-20 日を中旬、21-30 日を下旬と記す。

3. 数値実験と観測により得られた降水量の変化とその特徴

(1) 数値実験と観測により得られた降水量の変化

CRRT と PAST による降水量の顕著な相違は全球の中でも主にインドシナ半島に現れたため、本数値実

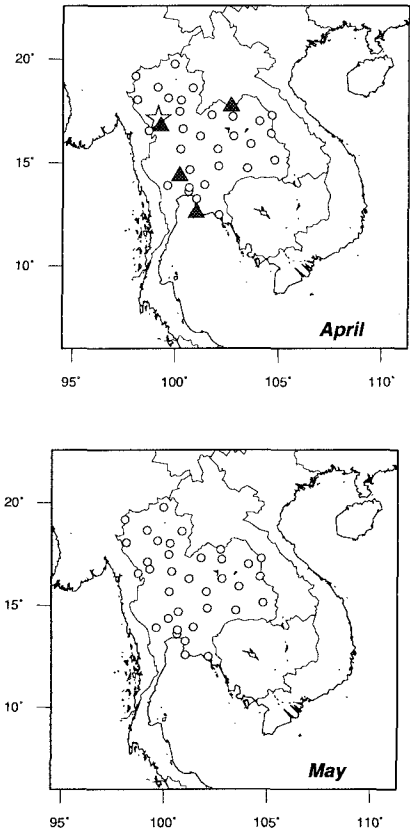


図-3 4 月 (上図)・5 月 (下図) における観測降水量の長期変化傾向. 星印は有意な増加を、三角印は有意な減少を、丸印は有意な変化がないことを示す.

験は意味を持つとみなし、以下に分析を行なった。インドシナ半島における CRRT と PAST それぞれの降水量の季節変化および GPCP¹⁴⁾ による観測降水量 (1988-95 年の平均) を図 2 に示す。4 月から 5 月にかけての雨季の開始期に CRRT と PAST に顕著な差が生じている。CRRT (インドシナは耕地) は PAST (インドシナは森林) と比較して降水量が顕著に減少している。一方図 2 において、6 月上旬以降、雨季の中盤・後半では CRRT と PAST に降水量の顕著な違いは見られない。すなわち、観測値にみられる 9 月の顕著な降水量の減少傾向を本数値実験では再現するに至らなかった。

過去の筆者らによる報告⁴⁾ では 9 月以外に顕著な観測降水量の増減はみられないとしているが、4 月と 5 月を個別に対象とした分析が欠けていたため、ここで、本数値実験で生じた 4 月から 5 月における降水量の減少が、現実の観測された降水量の変化として現れているかどうか改めて検証を行なった。利用した観測降水量データは、1951 年から 1994 年まで (一部 1950 年代途中から) のタイ気象局による日降水量データを月降水量に集計したものである。この月降水量を各観測地点毎に 4 月および 5 月のそれぞれに関して、ノンパラメトリック検定の一つである Mann-Kendall rank test を

92.5%の信頼度で行ない、長期的な増加あるいは減少傾向があるかどうかを判定した。その結果を図3に示す。タイ全体としては、4月5月ともに顕著な増加傾向あるいは減少傾向は存在しないといえる。つまり森林伐採等を原因とした降水量の変化は本手法からは抽出できなかった。

これらの結果は「観測データの分析」と「領域気候モデルによる数値実験の結果」の両方に9月の降水量の減少傾向が現れた過去の筆者らの報告⁴⁾とは様相が大きく異なる。そのため次節以降において、「雨季の始めにおいて観測降水量の顕著な変化傾向がみられない一方で、CRRTとPASTでは雨季の始めの降水量に差が生じたのはなぜであるか」について考察を加える。

(2) 降水量変化の特徴と原因の推測

CRRTとPASTとの数値実験設定の違いはインドシナ半島のアルベドと粗度のみであり、このアルベドと粗度の変化が地表面熱収支に変化をもたらし、結果として降水量に変化をもたらしした可能性が考えられる。故に、インドシナ半島におけるCRRTとPASTの地表面熱収支の相違の分析を行なった。図4にCRRTおよびPASTのインドシナ半島における地表面からの潜熱と顕熱の季節変化を示す。図4に見られる特徴は以下のようである。乾季、特に1月-4月上旬においてPAST(森林)の方がCRRTよりも顕熱が大きい。一方潜熱はCRRTとPASTともに小さくほぼ同じ値である。これらの原因として、乾季は土壤水分がほぼゼロに近いぐらいまで乾燥しており、そのため潜熱は小さく顕熱は大きくなること、インドシナにおいてアルベドの小さいPAST(森林)の方が太陽エネルギーをより多く吸収すること、が考えられる。土壤が非常に乾燥しており潜熱には強い抑制がかかるためCRRTとPASTとで差が非常に小さく、アルベドの相違に起因する地表吸収エネルギーの差は顕熱の差となって現れるのであろう。4月上旬あるいは中旬に降水量が増加し始めると、土壤の湿潤化に伴って顕熱が減少し潜熱が増加する。また、数値実験において顕著な相違が現れた4月途中から5月について、大気下層(850hPa)と大気上層(300hPa)の風向・風速の特徴についてまとめたものが表2である。

図2,4および表2から以下のような特徴を抽出した。

- 3月から4月始めにおいて、より顕熱の強いPASTにおいてCRRTより先に対流性の降水が生じていることから、地表面からの強い顕熱によりインドシナ半島では対流性の雨が周辺地域よりも先に励起されている可能性が考えられる。
- 上層風と下層風の両方を伴ったアジア全体を覆う大規模モンスーン循環が成立する5月下旬以降は、地表面変化の降水量変化に与える影響は小さ

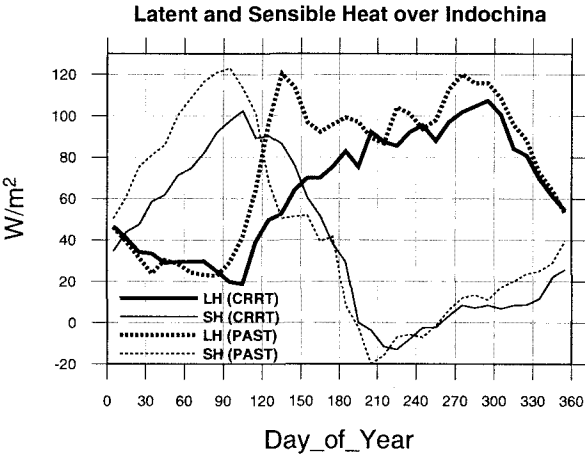


図-4 CRRTとPASTのインドシナ半島における潜熱と顕熱の季節変化

くなると思われ、CRRTとPASTとの降水量には大きな差は生じていない。

4. インドシナ半島の地表面を更に変更した数値実験 (PAST- β , PAST-40)

前節までに得られた結果は以下のようであった。1) CRRTとPASTとの2数値実験を行なったところ、4月から5月にかけて、森林伐採を想定した地表面パラメータ変更が原因とみられる降水量の減少が得られた。2) 4月と5月の観測降水量の長期変化傾向を分析したところ、この数十年の間に有意に減少しているという結果は得られなかった。3) 数値実験における4,5月の降水量の差(CRRT-PAST)には、乾季の顕熱の差が関係している可能性が考えられた。

しかし、乾季に森林において強い顕熱が生じているという数値実験による結果は、必ずしも最近の観測結果と一致しない。Suzuki¹⁵⁾はタイの山地森林における地表面熱収支の季節変化を観測しているが、それによると、森林は乾季も雨季と同程度の潜熱を蒸発散という形で放出している、という結果が得られている。蒸発散に用いる水分は地中深くから根によって吸い上げられているのではないかと推測されている。すなわち、乾季の森林において顕熱が大きく潜熱は非常に小さい、というPASTによる結果は上記のSuzukiの説によると不適切である。

これを、もう一つの単純なパラメータの変更によって改善することはできないかと考え、以下のような設定の数値実験を行なった。インドシナのアルベド・粗度はPASTと同じ(森林)であるが、乾季にも潜熱があまり小さくならないように1) インドシナの蒸発効率 β の最低値を0.2としたPAST- β (乾季の β はCRRT, PAST

表-2 4月下旬から5月のCRRTとPASTにおけるインドシナの風の場の特徴

	4月下旬	5月上旬	5月中旬	5月下旬
Day of Year	111-120日	121-130日	131-140日	141-150日
下層風	Indochinaに モンスーン風の 原型がかかる	これ以降 モンスーン風が はっきりする		
上層風	中緯度偏西風 がIndochina 上空で消える	遷移期	遷移期	モンスーン風 を形成し はじめる

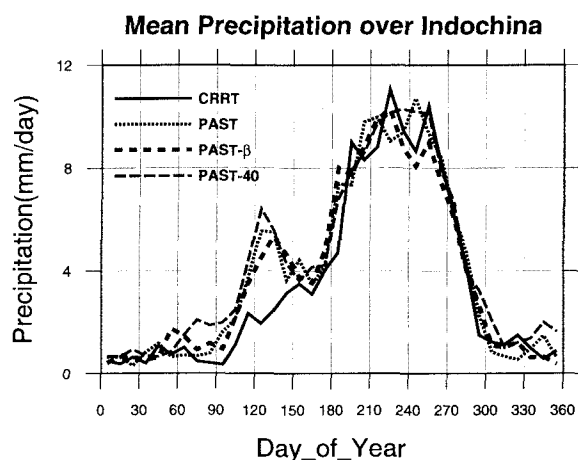


図-5 CRRT, PAST, PAST-β, PAST-40 のインドシナ半島における降水量の季節変化

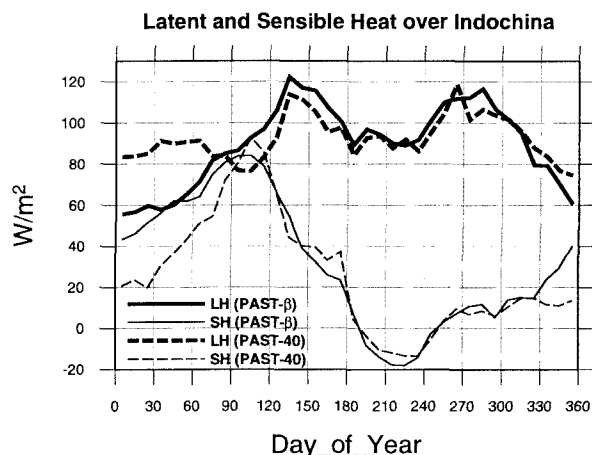


図-6 PAST-β, PAST-40 のインドシナ半島における潜熱と顕熱の季節変化

ともに標準では0.2を大きく下回る) 2) インドシナのバケツ深さを40cmとしたPAST-40、の二種類である。

もし乾季の強い顕熱がPASTの4月5月における降水量の多さの原因であるならば、PAST-β, PAST-40ともにPASTと比べて地表面からの潜熱が増加し顕熱が減少する傾向にあるはずなので、PAST-β, PAST-40の4月5月の降水量はPASTより減少しCRRTへ近づくはずである。

PAST-β, PAST-40により得られた降水量の季節変化を図5に、地表面からの潜熱・顕熱の季節変化を図6に示す。降水量に関しては上記の予想とは異なり、PAST-β, PAST-40ともにCRRTとは類似せずPASTと非常に類似した結果を得た。ただし地表面熱収支に関しては想定通りであり、図6と図4の比較より、PAST-β, PAST-40の乾季における地表面からの顕熱はPASTとの比較において減少し、一方で潜熱は増加している。それにも関わらず降水量には予想通りの変化が生じなかった。つまり、CRRTとPASTとの比較より見出された「強い顕熱がインドシナ半島において対流性の雨を周辺地域より先に励起している可能性が考えられ、より顕熱の強いPASTにおいて、より多くの降水量が雨季の始めに見られる」という可能性は否定され得る。

では、PAST, PAST-β, PAST-40がCRRTよりも

雨季の始めに降水量が多いのはなぜであろうか。

単に量的に蒸発量の差が降水量の差を作りだしているわけではない。それは、例えば、PASTとPAST-βの蒸発量が大きく異なるのに降水量がほぼ同じであることから推測可能である。CRRTとPASTに関して降水量の差のピーク(図2より5月上旬)が蒸発量(潜熱)の差のピーク(図4より5月中旬)より早いことも、降水量の差→土壌水分の差→蒸発量の差という順に偏差が偏差を作り出す形で伝達し、「蒸発量の差→降水量の差」ではないことを支持する。降水量の差のピーク頃(5月上旬から中旬)において降水量の差は蒸発量の差よりも大きいことも、「蒸発量の差→降水量の差」だけでは説明できないことを支持する。

この雨季の始めの降水はモデル中ではほとんどが対流性のものである。本研究で用いた積雲対流スキームでは、対流性降水の生起や強さは相当温位(or湿潤静的エネルギー)の鉛直方向安定性によって決定される。地表付近の相当温位(or湿潤静的エネルギー)は潜熱と顕熱の合計の多寡には直接影響を受けるが、そのボーエン比(顕熱/潜熱)あるいは顕熱だけの多寡には直接影響を受けない¹⁶⁾。すなわちPAST, PAST-β, PAST-40のインドシナは森林であると設定されているためCRRTと比較してアルベドが小さく吸収する太陽エネルギーが大きい。それゆえ、図4, 6に見られるように潜熱と

顕熱の和は PAST, PAST- β , PAST-40 の方が CRRT より大きい。これが森林があると仮定した数値実験において、より多い降水量が雨季の始めに計算される理由であろう。ただし、以上の解釈は絶対的なものでは有り得ず、異なった物理過程等を持つ GCM では異なった現象・メカニズムが生じ得る。

5. まとめと今後の課題

インドシナ半島の森林伐採を想定して、アルベドと粗度の変化が降水に与える影響に関する数値実験を GCM を用いて行ない、雨季の始めの降水量が CRRT の方が少なく PAST の方が多いという結果を得た。一方、本研究および過去の研究の観測降水量の解析からは、9 月に降水量が減少しており雨季の始めには降水量が増減していないことが示されている。つまり、数値実験結果と観測値の解析結果とは一致を見なかった。さらに地表面パラメータを変更した数値実験 PAST- β と PAST-40 を行なったが、数値実験結果と観測値の解析による結果との相違は縮まらなかった。つまり、9 月に減少傾向が見られその他の時期には変化が見られないという、タイにおけるこの数十年の観測降水量の変化の傾向は、森林伐採をアルベドと粗度等のみの変化であると簡易に表現した本数値実験では再現し得なかった。

また、数値実験による結果からは、雨季の始めにおいて、森林伐採によるボーエン比の変化や顕熱のみの強さの変化と降水量の変化とは明確な関係を持たず、顕熱と潜熱の和の変化の方が重要であることが推測された。これは Charney ら¹⁷⁾による古典的な説(森林伐採→アルベド増加→大気中のエネルギー減少→上昇流・対流活動の減少)が、数値実験中のある季節のみにおいて現れたと考えられる。

謝辞： 本研究は日本学術振興会 未来開拓研究推進事業『環境負荷の影響評価と軽減』(代表:東京大学、虫明功臣)の成果の一部である。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) A. Henderson-Sellers and V. Gornitz. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Clim. Change*, Vol. 6, pp. 231-258, 1984.
- 2) P.-S. Chu, Z.-P. Yu, and S. Hasternath. Detecting climate change concurrent with deforestation in the Amazon basin: which way has it gone? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 75, pp. 579-583, 1994.
- 3) 沖大幹, 虫明功臣, Y. Xue. グローバルな河川流路網情報 (TRIP) を用いた 1980 年代アフリカサヘルにおける干魃の GCM 実験. 水文水資源学会発表要旨集, pp. 100-101, 1998.
- 4) S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake. GAME-Tropics studies on deforestation effects in Indochina. *GEWEX News*, Vol. 9, No. 2, pp. 1,4,12, 1999.
- 5) A. Numaguti, S. Sugata, M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi. Study on the climate system and mass transport by a climate model. CGER's supercomputer monograph report, 1997. National Institute for Environmental Studies, Environment Agency of Japan(Eds.), 3.
- 6) A. Arakawa and W. H. Schubert. Interactions of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. part I. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, pp. 671-701, 1974.
- 7) S. Manabe. Climate and the ocean circulation, I. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 97, pp. 739-774, 1969.
- 8) P. J. Sellers, Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher. A simple biosphere model(sib) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 43, pp. 505-531, 1986.
- 9) J. Lean and P. R. Rowntree. Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics. *J. Climate*, Vol. 10, pp. 1216-1235, 1997.
- 10) 真鍋淑郎. 大気・海洋・陸面結合モデルによる気候長期変動の研究. 気象力学から気候力学へ, 気象研究ノート, No. 186, pp. 115-130. 日本気象学会, 1996.
- 11) A. Robock, K. Y. Vinnikov, , and C. A. Schlosser. Use of midlatitude soil moisture and meteorological observations to validate soil moisture simulations with biosphere and bucket models. *J. Climate*, Vol. 8, pp. 15-35, 1995.
- 12) P. A. Dirmeyer, A. J. Dolman, and N. Sato. The pilot phase of the global soil wetness project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 80(5), pp. 851-878, 1999.
- 13) P. J. Sellers, B. W. Meeson, J. Closs, J. Collatz, F. Corprew, D. Dazlich, F. G. Hall, Y. Kerr, R. Koster, S. Los, K. Mitchell, J. McManus, D. Myers, K.-J. Sun, and P. Try. *ISLSCP Initiative I - Global Data Sets for Land-Atmosphere Models, 1987-1988*. CD-ROM by NASA, 1995.
- 14) G. J. Huffman, R. F. Adler, P. A. Arkin, A. Chang, R. Ferraro, A. Gruber, J. Janowiak, R. J. Joyce, A. McNab, B. Rudolf, U. Schneider, and P. Xie. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Data Set. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 78, pp. 5-20, 1997.
- 15) M. Suzuki. One dimensional heat and water flux monitoring and modeling in hill evergreen forest. In *Proceedings '99 Workshop on GAME-Tropics in Thailand*, No. 18 in GAME Publications, available from I.I.S., University of Tokyo, 1999. National sub-Committee for GAME-Tropics in Thailand and Japan Sub-Committee for GAME-Tropics.
- 16) A. K. Betts, J. H. Ball, A. C. M. Beljaars, M. J. Miller, and P. A. Viterbo. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, pp. 7209-7225, 1996.
- 17) J. G. Charney, W. J. Quirk, S. H. Chow, and J. Kornfeld. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34, pp. 1366-1385, 1977.

(1999. 9. 30 受付)