

## インドシナ半島における森林伐採が降水に与える影響に関する研究

Deforestation impact on rainfall over the Indochina peninsula

鼎 信次郎\*・沖 大幹\*・虫 明 功 臣\*

Shinjiro KANAE, Taikan OKI, Katumi MUSIAKE

## 1. は じ め に

現在、著者らの研究室を始めとする日本・東南アジアのいくつかの研究室・機関において、GAME 熱帯地域研究（通称：GAME-T）<sup>1)</sup>が精力的に進められている。そもそも GAME とは、WCRP（世界気候研究計画）の重要な副計画である GEWEX（全地球エネルギー・水循環研究計画）の一翼を担うアジアを対象とした研究プロジェクトであり、GEWEX Asian Monsoon Experiment の略語として GAME と名付けられている。

東アジアの梅雨を含む夏のアジアモンスーンは、東アジア・東南アジアに住む者達に毎年恵みの雨をもたらす。その一方で、この雨が年々変動することにより、雨が多過ぎれば洪水、少なすぎれば渇水という災害を私たちにもたらす。また近年話題のエルニーニョ現象はアジアモンスーンの変動と密接に結び付いている可能性も高いと言われている。このようなアジアモンスーンの機構を解明し、気候シミュレーションの精度を上げることによって、アジアの水資源問題の解決に資することが GAME の主たる目的<sup>2)</sup>である。

GAME ではこの目的のためにアジアの熱帯域から寒帯域にかけて4つの対象地域が定められ、その各地域において集中観測を始めとした数々の研究が各研究機関において進められている。

冒頭で述べた GAME-T は上記の4地域研究の内の一つであり、タイ国を中心としたインドシナ半島を研究対象としている。この地域は降水量が豊富であるとのイメージがあるかもしれないが、一部山脈沿いの豪雨地帯を除き、年降水量は日本と同等かあるいはそれ以下である。熱帯地域にあるため蒸発量は日本以上であると考えられるので、水資源（降水量－蒸発量）は日本より少ない。一方で、人口集中域であり農業が主要産業であることもあって、水資源

に対する期待・要求は非常に高い。

GAME-T の主対象地域であるインドシナ半島中心部に位置するタイでは、東北部を中心としてこの数十年大規模な森林伐採（1961年：国土の53%が森林→1985年：29%）が進行しており、地域的な気候・水循環の変化、場合によっては悪化、が懸念されている。

「森林伐採が地域の気候に与える影響」に関する研究はこれまでも行われてきた。過去の研究によると、一般に森林伐採によって地表面からの蒸発量は減少する。このことは数値実験および観測結果の両面からほぼ確定的であるとされている。また、それに連れて降水量も減少するであろうと一数値実験の結果に基づいて一言われてもいる。しかしながら解明されていない点も多く、以下の二点が大きな問題として残されている。

●例えば Dickinson and Henderson-Sellers<sup>3)</sup>を始めとしたこれまでの「森林伐採が地域の気候に与える影響」に関する研究のほとんどは、数値気候モデルを用いた数値実験による研究である。逆に言えば、「実際に森林伐採された地域の気候がどのように変化したか」という現実の観測結果は、特に降水の変化に関しては、得られておらず、数値実験結果の検証はほとんどなされていない。

●多くの研究はアマゾンを対象とした研究であり、ごく一部にアフリカ・サヘルを対象とした研究がある。東南アジアを対象とした研究はほとんど存在しない。

それ故、すでに大規模に森林伐採が生じている上に長期かつある程度広域の観測降水量が存在するタイを対象地域とした研究によって、森林伐採と気候との関係についてこれまでになく新しい知見が得られる可能性がある。また、海洋のすぐ側に位置する東南アジアと、内陸性の強いアマゾンとでは森林伐採が地域的な気候に及ぼす影響も異なると考えられているため、その特徴の相違の抽出も研究目的の一つである。

本研究では、まずタイの観測降水量の長期変動傾向を分

\*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

析し、その特徴と森林伐採との関係について考察を行った。次に気候モデルを用いた数値実験によりその検証を試みた。

2. 観測降水量の長期変動傾向

GAME-Tの一環として、タイにおける1951年から1994年までの各気象観測地点における日観測降水量をタイ気象局(TMD)より提供していただいた。これを月降水量の形にまとめたものを分析の基本とした。各観測地点毎に各月別に1951-1994(地点により観測開始年は異なり得る)の降水量を時系列化し、線型回帰(例えば図1)を行った。

その後、得られた回帰直線が50年間で平均値の10%以上増加している場合を増加傾向にあると定義し10%以上減少している場合を減少傾向にあると定義した。それ以外は変化無しとした。この結果の地理的空間分布および回帰直線の傾きを、各月別に調べた結果、タイの雨季の最盛期である9月(図3)に顕著な傾向が見られた。同じく雨季の最盛期である8月(図2)との対比を通してその傾向はよりはっきりと特徴づけられる。

その特徴とは以下のようなものである。タイにおける雨季は南西季節風がもたらし例年5月の途中に始まり10月に終了するが、現段階では9月以外の月に関しては降水量の長期変動傾向に関して顕著な特徴を抽出し得ない。しかし9月においては、タイのほぼ全土において減少傾向が現れる。しかもその減少量はトレンドで表現すると50年で50(mm/month)前後から100(mm/month)程度までといった大きなものである。一方8月においては、タイ東北部の特に国境付近、言い換えれば山岳の麓の観測地点数地点で強い増加傾向がみられる。

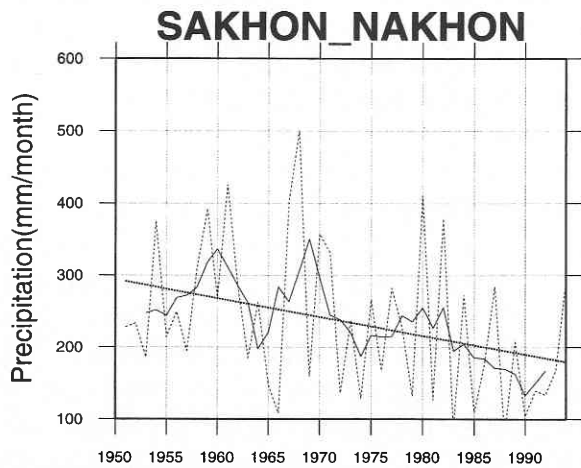


図1 Sakhon Nakhon(タイ東北部の観測地点)における9月の月降水量の経年変化。細破線が各年の値、実線が5年移動平均、太破線がトレンドを示す。

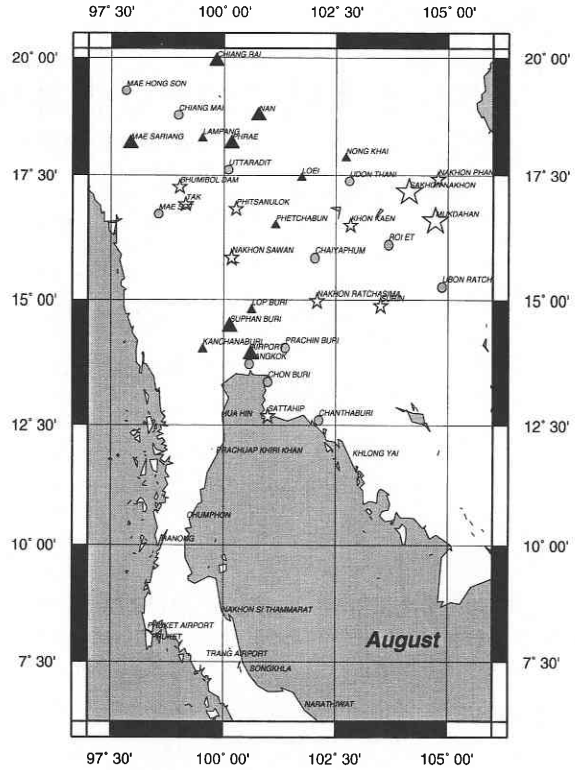


図2 タイにおける8月の観測月降水量の長期トレンドの空間分布：星印が増加傾向の地点、丸印が変化無しの地点、三角印が減少傾向の地点

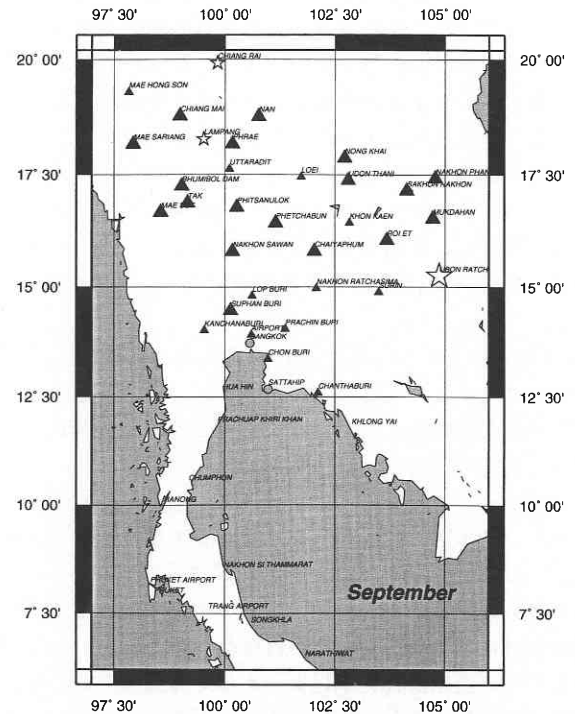


図3 タイにおける9月の観測月降水量の長期トレンドの空間分布。印の意味は前図と同様。このように全体的に減少傾向が見られるのは9月のみである。

### 3. 気候学的大規模場と降水量減少傾向の関係

図-4にNCEP再解析値から作成したタイ上空850 hPa面における風速の季節変化を示す。850 hPa面は上空約1500 mであり、そこにおける気象要素は大気下層の代表として頻繁に用いられる。

モンスーンを雨季・乾季であると定義すればタイの9月は雨季、しかも最盛期的一部分であるが、図-4から読み取れるように季節風としてのモンスーンは8月までであり、9月は季節風の交代期である。そしてこの雨季の盛りではあるが同時に季節風が弱まった時期である9月のみに前述の降水量の長期減少傾向が現出しているのである。そこで、この地域ではこの数十年間に渡り森林伐採が進行していることを踏まえ、以下のような推察を行った。

8月は大気下層ではモンスーン西風が強いが、9月になると強いモンスーン西風の影響はタイの平野部には及んでいない。降水の季節としては9月はモンスーン最盛期であるが、風の季節としてはモンスーンが終了しつつある時期である。8月までは季節風によって豊富な水蒸気がタイ陸上に供給され得るためタイ（インドシナ半島）は海洋性の陸地としての性質を持つと考えられる。一方で、9月は雨季をもたらす季節風が弱まるため地表面からの蒸発や熱的影響がより直接的にその地域の降水に影響を与えているのではないかと考えられる。つまり9月の降水の生成に地表面水文過程が重要な役割を果たしている可能性が高く、ここ数十年の大規模森林伐採が原因となって9月の降水量減少傾向が生じたと考えられる。

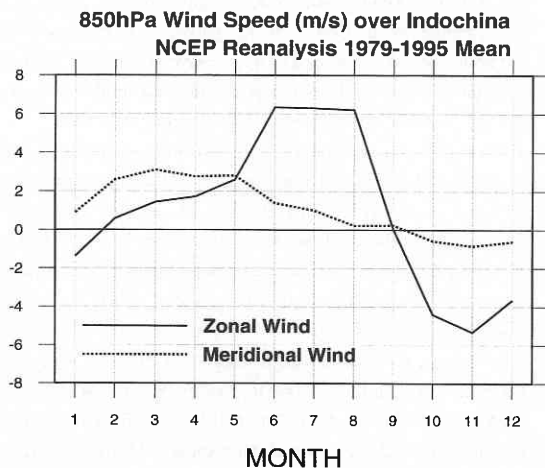


図4 タイ上空850 hPaにおける西風（実線）および南風（点線）の風速 (m/s)

### 4. 数値実験による検証

次に、上記推察を検証するために、8月と9月の対比という形で地域気候モデル（表-1）を用いた数値実験を行った。用いた地域気候モデルはコロラド州立大学が開発した3次元数値気象モデルCSU-RAMS<sup>4)</sup>を基本としたものであり、加えてCCSR/NIES GCMにおいて使用されている放射スキーム<sup>5)</sup>及びArakawa-Schubert型積雲対流スキーム<sup>6)</sup>が導入されたものである。このモデルは全地球を対象としたグローバルモデルではなく、側面境界条件が必要な領域モデルである。

数値実験の設定等は表-2に示す通りである。これらに基づき2種類の数値実験を行った。一つめは、現在の地表面植生タイプを設定したものでありCNTLと名付ける。CNTLではタイ東北部（森林伐採域）は草地（森林伐採後）である。もう一つは、タイ東北部を森林化（アルベドと粗度を変更し、土壌水分を飽和に固定）したものでありAFORと名付ける。CNTLは現在の、AFORは以前を想定した数値実験である。CNTL・AFORどちらの数値実験に関しても、8月のシミュレーションと9月のシミュレーションをそれぞれ別に行い、また8・9月どちらに関しても1992, 93, 94年の初期・境界条件を用いたシミュレーションをそれぞれ別に行った。つまり計6通りの数値実験を行った。

本数値実験では短期間の時間積分の中で森林伐採の特徴を表現するため、地表面モデルとして敢えて複雑な植生モデルを用いず非常に簡単なモデルを用いた。具体的にはバケツモデルの土壌水分を固定した形式であり、地表面パラメータとして粗度、アルベド、土壌水分（固定）のみを持つ。森林・草地などの植生タイプ毎の粗度、アルベドの値はグローバルデータセット<sup>7)</sup>に基づいて設定した。また、CNTLとAFORとにおいて地表面パラメータを変更したモデルの中の領域を以下の文中では「森林伐採域」と記述する。

表1 地域気候モデルの仕様

基本方程式	non-hydrostatic primitive equations
鉛直座標系	Terrain-following; $\sigma$ system
鉛直拡散	Mellor and Yamada level 2.5
降水	Arakawa-Schubert scheme
	Bulk cloud microphysics
放射	Two-stream, k-distribution
境界層	Louis scheme
地表フラックス	Bulk Method

表2 数値実験の設定

初期・境界条件	1992-94年: 8/1-25, 9/6-30: NCEP再解析値
グリッド	水平 60km (50×50); 鉛直 25層
領域内部 Nudging	風速等 時定数 2日; 温度・湿度 時定数 20日
降水スキーム	大規模凝結(雲微物理モデル); 積雲対流(Arakawa-Schubert型)
地表面特性	アルベド, 粗度, 土壌水分のみで表現(バケツモデルの土壌水分を固定した形式)
土壌水分	GSWPのバケツモデルによる結果で数値実験中固定

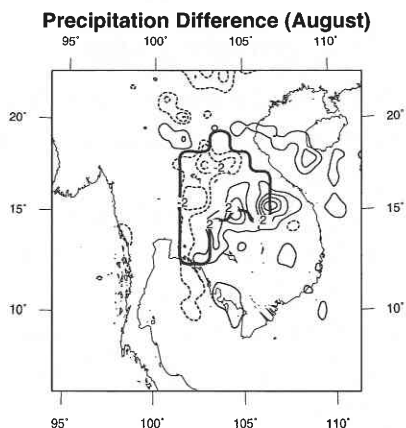


図5 数値実験による8月の降水量の差 (CNTL-AFOR). コンター間隔は1 (mm/day). タイ東北部に森林伐採域 (太線内).

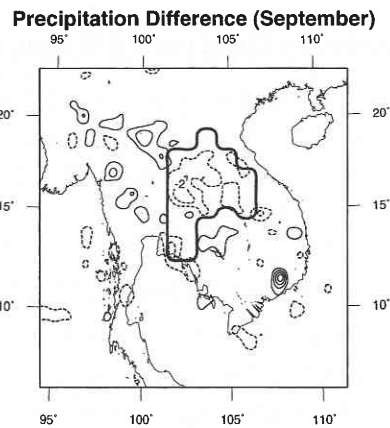


図6 数値実験による9月の降水量の差 (CNTL-AFOR). 他は図5と同様. 森林伐採域内で降水量が減少している.

2種類の数値実験 (CNTLとAFOR) によって計算された降水量の差 (CNTL-AFOR) (図-5, 6) の空間分布等について検討した結果, 以下のような結果が得られた.

- 8月は森林伐採域内あるいはすぐ周辺に降水量の増加した領域もあれば減少した領域もあった. 森林伐採域の西半分が減少領域, 東側 (山岳の麓) が増加領域であった. これは大気下層の西風が, 粗度の減少により, CNTLにおいてAFORよりも強化されたことにより, 大気下層の水蒸気が西から東へと輸送されたことが原因だと考えられる.
- 8月の森林伐採域では, 鉛直一次元的な蒸発量の増減と降水量の増減の関係, 顕熱と降水量の関係は存在しなかった.
- 9月は森林伐採域内では蒸発量・降水量ともに減少しており, 蒸発量の減少が降水量の減少と結びつくというように鉛直一次元的に解釈可能であると考えられる. ただし降水の減少量の方が蒸発の減少量より大きい. また顕熱の増減は降水量の増減とは対応していなかった.
- 上記のように9月は森林伐採により降水量の減少が生じ, 一方8月は森林伐採により必ずしも降水量の減少が生じるわけではなかった.

## 5. ま と め

インドシナ半島 (タイ) を対象として1951-94年の観測降水量の増加減少傾向を月別に分析し, 9月のみ降水量が長期的な減少傾向にあることを見出した. これは森林伐採が原因であると考え, なぜ9月のみ森林伐採が降水量を減少させるのかについて, アジアモンスーンと結び付けた推察を行った. 最後に, 地域気候モデルを用いた数値実験によって上記推察と良く対応する数値実験結果を得た.

## 謝 辞

数値モデルの使用, 放射スキーム・積雲対流スキームの利用にあたり, 東大気候システム研究センター (CCSR) の住明正教授, 中島映至教授, 沼口敦助教授, 国立環境研究所 (NIES) の江守正多博士に感謝いたします. CSU-RAMSはGAME研究の一環として東大CCSRにライセンスされているものを用いました.

(1999年4月5日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 虫明功臣. GAME観測計画I: 湿潤熱帯モンスーン地域. 水文・水資源学会誌, Vol. 7(6), pp. 583-586, 1994.
- 2) 安成哲三. GAME強化観測期間 (IOP) を迎えて. 天気, Vol. 45(7), pp. 501-514, 1998.
- 3) R. E. Dickinson and A. Henderson-Sellers. Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterizations. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 114, pp. 439-462, 1988.
- 4) R. A. Pielke, W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee, and J. H. Copeland. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. Meteor. Atmos. Phys., Vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 5) T. Nakajima, M. Tsukamoto, Y. Tsushima, and A. Numaguti. Modelling of the radiative process in a AGCM. Climate System Dynamics and Modelling, Reports of A New Program for Creative Basic Research Studies, Vol. I-3, pp. 104-123, 1995.
- 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) 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.