

# 東南アジア熱帯山岳地域における降水観測と数値解析

## OBSERVATION AND NUMERICAL EXPERIMENTS OF PRECIPITATION IN A TROPICAL MOUNTAIN IN SOUTHEAST ASIA

大楽浩司<sup>1</sup>・江守正多<sup>2</sup>・沖大幹<sup>3</sup>  
Koji DAIRAKU, Seita EMORI and Taikan OKI

<sup>1</sup> 国立環境研究所 大気圏環境研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

<sup>2</sup> 地球フロンティア研究システム (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

<sup>3</sup> 総合地球環境学研究所 (〒602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町335)

Since 1997, rainfall has been measured by using tipping-bucket rain gauges in a mountainous area as a part of GAME-Tropics (the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Asian Monsoon Experiment (GAME)). Orographic precipitation tends to occur when easterly or southeasterly wind is predominated, wind speed is relatively strong (Average: 4.6m/s, S.D.: 2.1m/s), and the lifted condensation level is low. By investigating orographic precipitation using a regional atmospheric model under various atmospheric conditions, 1) comparatively strong monsoon westerly in the lower troposphere and complex terrain and 2) moist condition in the lower atmosphere including evapotranspiration from the wet ground are significant factors to the spatial pattern of precipitation in the mountainous region.

**Key Words:** Orographic Rainfall, Regional Atmospheric model, Tropical Mountain Region, GAME-Tropics

### 1. はじめに

グローバルな気候変動予測の信頼性を高め、それを地域的な水循環予測に応用するためには、条件の異なる様々な地域において、降水をはじめ様々な物理量の長期的な観測を行い、水循環過程の理解を深めていくことが必要である。

例えば、大気・陸域水循環が山岳の影響を強く受ける地域において、効果的な防災や水資源管理を行うためには、地域の特性に応じた密な観測網によるモニタリングを行い、山岳が降水の時空間分布へ及ぼす影響や、その過程を明らかにすることが必要である。

一般的に、降水量は標高が高くなるにつれて増加し、また、山岳の風下側には降水が少ない“雨陰”ができる。山岳における降水の時空間分布の変動は非常に大きい。降水観測点は、空間的に粗い密度で不規則に配置されている。特に降水観測点が少ない多くの山岳地域において、信頼性の高い降水分布情報を得るためや、降水リスク地図を作成するために、オレゴン、カリフォルニアなどの西アメリカやアルプス、日本などの各地で空間内挿手法について数多くの研究がなされてきた<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。また、地

形によって励起される雲・降水の気象学的・流体力学的なメカニズムや、地形性降水の統計的な特性についても、アメリカ東部のアパラチア山脈、地中海に面する山岳地域、カリフォルニア、ニュージーランドなどにおいて、多くの研究がなされている<sup>5), 6), 7), 8), 9), 10), 11)</sup>。

しかしながら、時空間変動の非常に大きい山岳における降水特性について研究するためには、高時間分解能の降水観測が空間的に密に行われる必要があるため、研究のほとんどは、気象観測網が整備された中緯度の先進国で行われている。熱帯・亜熱帯地域においては、先進諸国が位置する中緯度に比して降水観測は少なく、特に1時間もしくはそれ以上の高時間分解能の観測データは非常に限られており、観測データに基づき、その降水特性を研究した試みは非常に少ない<sup>12), 13), 14), 15)</sup>。さらに、アクセスの困難さや、地形による複雑な影響があるため<sup>2), 7)</sup>、標高の高い山岳地域での降雨観測や、その詳細な時空間分布を評価する試みは非常に少ない。

Shuinら<sup>16)</sup>は、レーダー雨量計による降水の空間分布情報と雨量計のデータを結びつけ、降水データの空間内挿を行う目的で、インドネシアMerapi山で5つの地上雨量計による観測値を用いて、降水の時空間スケールについ

て解析を行った。日本の富士山における降水特性との比較も行われており、Merapi山の降水は明瞭な日変化と季節変化があること、対流性の降水が卓越するため、降雨の時空間スケールが小さいことを報告している。

Murataら<sup>17)</sup>は、西スマトラのKototabang（標高865m）において、境界層レーダーとゾンデ、転倒マス雨量計による同時観測を1998年9月27日～10月7日の期間行い、大気下層の西風が弱い時に、局地循環による雲・降水システムが生じやすいことを報告している。

Barrosら<sup>18)</sup>は、ネパール中央の山岳地域において、新規設置した雨量計のデータを用いて、1999年のモンスーンの降雨特性を解析した結果を報告している。そこでは、4ヶ月間の平均降雨強度と平均降雨時間を解析した結果、標高が高い地点に比べ、標高が低い観測地点では、降雨強度が強く、降雨継続時間は短いという降雨特性が報告されている。

Kurajiら<sup>19)</sup>は、Dairakuら<sup>20)</sup>の考えを発展させ、Mae Chaem流域における標高と降雨強度と降雨継続時間の関係を、雨季と乾季、降雨の空間スケールの違いに着目して解析を行っている。その解析結果として、降雨の標高依存性は、主に比較的空間スケールの大きな降雨イベントによってもたらされていると結論づけている。

しかし、これらの熱帯山岳地域の研究において、その降水メカニズムは十分に明らかにされていない。

タイ国Mae Chaem流域では、GEWEX Asian Monsoon Experiment-Tropics (GAME-T) 観測研究の一環として、図-1のように1997年途中からタイ国山岳森林地帯、流域面積3853 km<sup>2</sup>のMae Chaem流域において、地上雨量計が15地点に設置され、高時間分解能の降水観測が行なわれている<sup>19), 20), 21)</sup>。

地上降水観測データを用いて解析を行った結果、降水強度ではなく、降水頻度と降雨継続時間が雨季の降水の明瞭な標高依存性をもたらししていることが明らかになった<sup>21)</sup>。また、雨季平均場における領域大気モデルを用いた数値シミュレーションにおいて、夕方に山岳で励起、発達する積雲対流活動と、雲の2層構造ができ、上層雲からの雨滴粒子が下層の積雲の水滴を集め、強化されるSeeder-Feederメカニズムが顕著に見られた<sup>22)</sup>。この数値実験結果は平均降水強度、頻度、降雨継続時間に関して、その地形との対応は現地観測結果と良い対応をみせ、数値シミュレーション中で示されたメカニズムの現実性が支持されている。

しかし、この数値シミュレーションは雨季平均場におけるものであり、変動する大気環境に対しての検討はなされていない。

本論文では、（１）地上降水観測データとGAME再解析データ<sup>23)</sup>を用いた解析を行い、（２）領域大気モデルを用いて、東南アジア熱帯山岳流域における降水メカニズムの検討を深める。

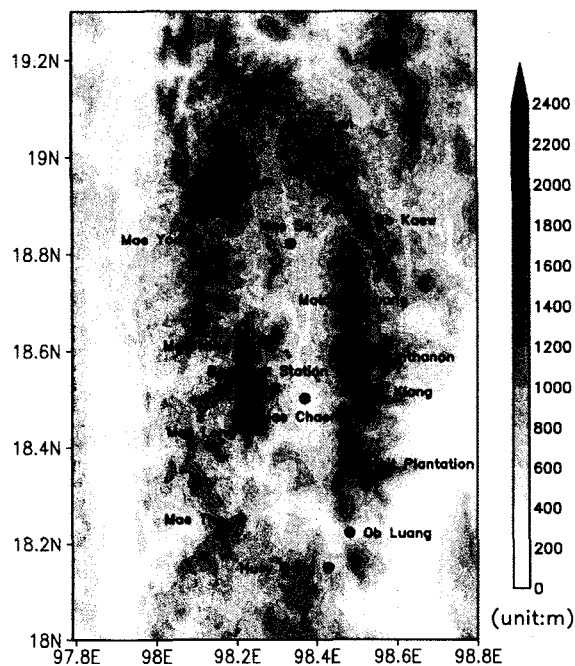


図-1 Mae Chaem 流域におけるGAME-T 降水観測

## 2. Mae Chaem流域の地形性降水とアジアモンスーンによる総観場の大気環境

Mae Chaem流域における降水特性とアジアモンスーンの関係を理解するために、山岳の影響を強く受けているMae Chaem流域の降水特性に、アジアモンスーンによる総観場の風がどのような影響を及ぼしているか、ということ解析した。

風は、GAME再解析データVersion 1.1<sup>23)</sup>の1998年6月から10月までのデータを元に、風向・風速の領域平均を算定したものを元にした。GAME再解析データは特別観測のデータを同化しており、また、風は直接同化できる解析変数であるため、データの信頼性は高いと期待される。領域平均の取り方の違いによる感度を見るために、Mae Chaem流域上で1.5°×1°(北緯17.75°-19.25°、東経97.75°-98.75°)、2°×2°(北緯17.5°-19.5°、東経97.25°-99.25°)、2.5°×2.5°(北緯17.25°-19.75°、東経97°-99.5°)、5°×5°(北緯16°-21°、東経95.75°-100.75°)の4つの領域について、風向・風速の領域平均を算定した。

図-2にMae Chaem流域上850hPaにおける、1.5°×1°領域平均の風向・風速の散布図を示す。Mae Chaem流域では、降水の日周性が卓越し、午後に降水のピークがある<sup>20)</sup>ことから、12Z (19h Local time)のデータを用いた。

4つの領域それぞれについて、風向・風速の分布と、Mae Chaem流域で見られる地形性降水の関係を調べた。ここでは、地形性降水を示す指標として、日降水量と標高の回帰式の傾きを用いた。図-2において、黒丸は地形性の降水を示しており、丸の大きさが大きく、色が濃い

ほど、標高の高いところで降水量が多かったということを示している。白丸は、降水は観測されたが、地形性が強くなかった降水イベントであり、三角は降水が観測されなかったことを示している。図-2から、850hPaにおける $1.5^\circ \times 1^\circ$ 領域平均の風向が、西風もしくは南西風、風速が4.6m/s前後の場合に、地形性降水が生じやすいということが示唆される。また、地形性降水は風速が弱いときに、風向と強い結びつきが見られないようである。他3つの領域についても同様の傾向が見られた。

このことを統計的に確認するために、それぞれの領域において、風向・風速を地形性降水のイベントと、地形性が強くなかったグループに分け、その分散と平均値について、表-1に示すように統計検定をおこなった。

まず、風向( $\theta$ )と風速( $v$ )について、2グループ間の分散が等しいという帰無仮説について、等分散性の検定(F検定)を行った。 $5^\circ \times 5^\circ$ の風速は5%の有意水準で、それ以外は1%の有意水準で、2グループ間の風向・風速の分散が等しいという帰無仮説が棄却された。

次に風向と風速それぞれの平均値について、等分散性が棄却された2グループについて、平均値が等しいという帰無仮説を立て、ウェルチの検定を行った。 $1.5^\circ \times 1^\circ$ と $2^\circ \times 2^\circ$ の領域平均の風向は、5%の有意水準で帰無仮説を棄却したが、 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ と $5^\circ \times 5^\circ$ の領域平均の風向は、5%の有意水準でも、帰無仮説は棄却されなかった。風速に関しては、どのグリッドにおいても1%の有意水準で2グループ間の平均値が等しいという帰無仮説は棄却された。

つまり、領域平均の取り方によらず、地形性降雨グループの風向・風速のばらつきは、地形性でないグループのものとは統計的に異なっていた。 $1.5^\circ \times 1^\circ$ と $2^\circ \times 2^\circ$ の領域平均の場合、風向の平均値も統計的に異なっており、地形性降水は西風もしくは南西風の時に特に生じやすいということを示唆している。風速の平均値についても、地形性の降水は地形性でないグループに比べ、風速が比較的強い時(平均値4.6m/s)に起りやすいということが示された。

500hPaや200hPaの場合においても同様の解析をおこなったが、850hPaの場合とは異なり、統計的に有意な違いは見出せなかった。これらの統計検定の結果は、地形性降水はモンスーン循環、すなわち対流圏下層の西風に強い影響を受けている、ということを示唆している。

続いて、総観場の熱的大気環境と地形性降水の対応について解析する。Mae Chaem流域における地形性降水は、持ち上げ凝結高度(LCL)が低い程、また、可降水量が多いほど、生じやすく、降水量も多くなる傾向がみられた(図省略)。

図-3に、横軸を850hPaの領域平均風の東西成分、縦軸をLCLにして、図-2と同様に降水の地形性の強さで分類した図を示す。西風が比較的強く、LCLが900hPa前後まで低くなるときに地形性の顕著な降水が見られる。

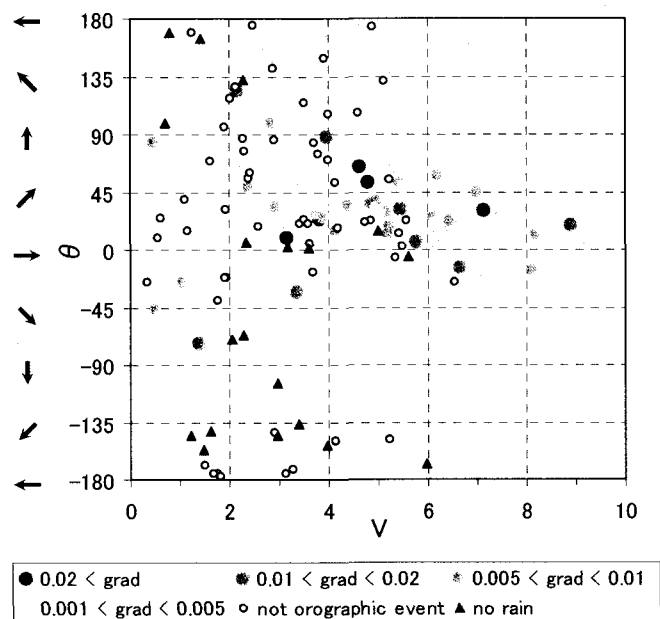


図-2 Mae Chaem流域における地形性降水とGAME再解析の850hPaの $1.5^\circ \times 1^\circ$ 領域平均風の関係

表-1 地形性降水のグループと、それ以外のイベントのグループ間のMae Chaem流域上における領域平均850hPaの風向・風速の等分散性と平均値の差の統計検定

|                              | variance |       | average  |       |
|------------------------------|----------|-------|----------|-------|
|                              | $\theta$ | $ v $ | $\theta$ | $ v $ |
| $1^\circ \times 1.5^\circ$   | **       | **    | *        | **    |
| $2^\circ \times 2^\circ$     | **       | **    | *        | **    |
| $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ | **       | **    |          | **    |
| $5^\circ \times 5^\circ$     | **       | *     |          | **    |

\*\* Significance level 1% \* Significance level 5%

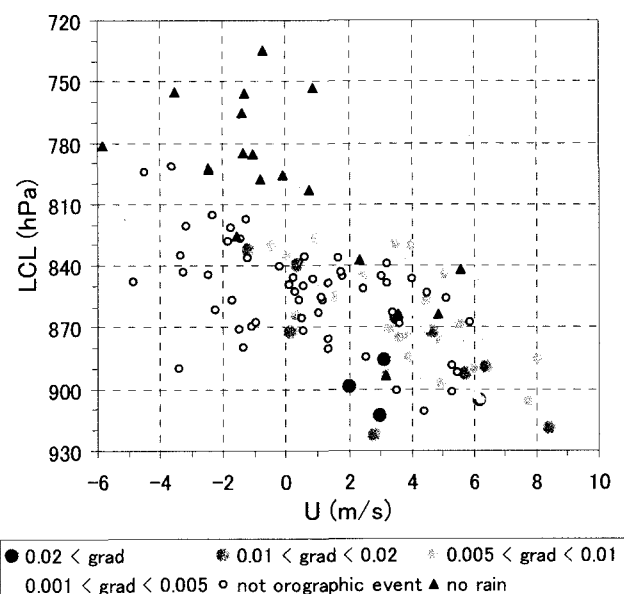


図-3 Mae Chaem流域における地形性降雨とGAME再解析の850hPaの $1.5^\circ \times 1^\circ$ 領域平均東西風速、持ち上げ凝結高度(LCL)の関係

### 3. 領域大気モデルによる解析

2において、大気下層の風と熱力学的条件がMae Chaem流域の地形性降水と明瞭な関係があることが示された。ここでは、領域大気モデルを用いて条件を変えた数値実験を行い、大気下層の風や湿度などが山岳地域の降水過程へ及ぼす影響について検討する。領域大気モデルはコロラド州立大学で開発されたRegional Atmospheric Modeling System (RAMS Ver.4.3.0)<sup>24)</sup>を用いた。

#### (1) 数値実験設定

数値実験は、大楽ら<sup>22)</sup>で行った数値計算設定を標準実験 (CTL) として、表-2、図-4に示されるように初期条件を設定した。

WINZERO、WINHALF、WINDOUBLEは、図-4上に示されるように、それぞれ、大気下層（地表から500hPaまで）の風速をゼロ、CTLの半分、2倍とし、大気上層はCTLと同じ風速プロファイルを用いた実験である。

図-4下に示されるように、DRYHIGHは大気中層から上層（600hPaから150hPa）の相対湿度を25%し、それ以外はCTLと同じ条件に設定し、DRYLOWは大気下層（地表から700hPa）の相対湿度を30%に設定し、それ以外はCTLと同じ条件に設定した実験である。

DRYSMは、土壌の飽和度を35%とし（CTLでは85%に設定）、乾燥した土壌水分状態に設定した実験である。他の条件はCTLと同じである。

NOMNTは地形を平坦にした実験である。

#### (2) 数値実験結果

DRYHIGHを除き、どの実験もその後の大気プロファイルが初期条件から大きく変化することなく、準平衡状態を保っていた。DRYHIGHの場合は、積雲対流によって大気下層の湿潤な空気が大気上層に運ばれ、3日目、4日目には大気上層も湿潤化し、CTLのプロファイルとあまり変わらなくなった。

数値実験結果について、初期値が複雑地形の境界条件と十分馴染むまでの1日目を除き、2日目から5日目までのMae Chaem流域（東経98.1～98.6度の領域）における地表積算降水量の計算結果を、力学的条件の違いを見るグループ1（CTL、WINZERO、WINHALF、WINDOUBLE、NOMNT）と大気・陸面の湿潤度の効果を見るグループ2（CTL、DRYHIGH、DRYLOW、DRYSM）に分けて示す。

図-5に示されるように、大気下層の風速の変化は降水の空間分布に大きな影響を及ぼしている。CTLとWINDOUBLEの積算降水量分布は非常によく一致している。ただし、積算降水量のピークについては、CTLでは山岳の頂上より風上斜面側によるのに対し、WINDOUBLEでは山頂付近である。

CTL、WINHALF、WINZEROと大気下層の風速を弱くするほど地表積算降水量の地形との対応が不明瞭になっている。WINZEROとWINHALF実験では、積雲ま

表-2 数値実験設定

|           | Wind speed in lower atmosphere | Moisture condition | Soil moisture | Mountain |
|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------|----------|
| CTL       | ×1                             | WET                | WET           | YES      |
| WINZERO   | ×0                             | WET                | WET           | YES      |
| WINHALF   | ×0.5                           | WET                | WET           | YES      |
| WINDOUBLE | ×2                             | WET                | WET           | YES      |
| DRYHIGH   | ×1                             | Upper DRY          | WET           | YES      |
| DRYLOW    | ×1                             | Lower DRY          | WET           | YES      |
| DRYSM     | ×1                             | WET                | DRY           | YES      |
| NOMNT     | ×1                             | WET                | WET           | NO       |

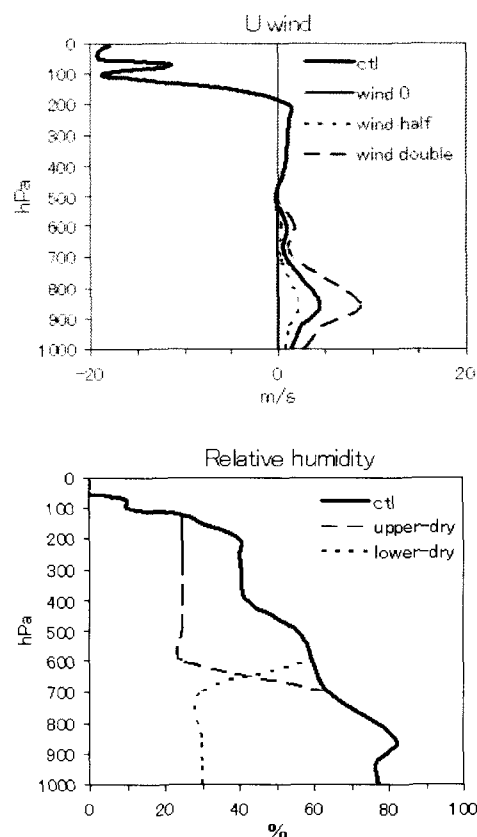


図-4 数値実験において設定した風・相対湿度のプロファイル。太線がCTLで与えた大気プロファイル（GAME再解析の1998年JJA平均）。上側の図は東西風の鉛直プロファイルを示す。実線、点線、破線はそれぞれ実験WINZERO、WINHALF、WINDOUBLEで設定した大気下層の風速プロファイル。下側の図は相対湿度の鉛直プロファイルを示す。点線、破線はそれぞれDRYLOW、DRYHIGHの相対湿度のプロファイル。

たは500hPa高度付近にできる層状雲が西から東に運ばれず、CTLに比べ層状性の雲が同じ所に長時間留まって降水活動を続けた。その結果、地形による降水分布の差が不明瞭になり、全体的に降水量が増加した。

地形を平坦にしたNOMNT実験では、その積算降水量分布は他の結果とは大きく異なっていて、ほぼ空間的に一様である。NOMNT実験において、大気下層で生じた雲は、下層の風と地形による力学的影響を受けないため、それ自身ではほとんど地表に降水をもたらさない。地表の降水分布は、中層雲における放射過程によって生じる

対流活動によってほぼ規定される。このため、積分すると空間的にはほぼ様な降水分布となっている。

以上に述べた力学的条件の違いによるこれらの降水特性の違いは、降水の空間分布特性に対する下層の風と地形による力学的効果の重要性を示唆している。すなわち、大気下層の風速が非常に弱い、または地形の起伏がないことによって層状雲が卓越し、風と地形による力学的効果が働かず、下層の湿った空気塊を凝結高度（LCL）まで持ち上げ、積雲を形成する作用が弱まる。また同時に、山岳の風下側で下降流により空気塊が断熱加熱され、雲・降水活動が抑制される効果も小さくなる。大気下層において対流雲を持続的に形成する（あるいは抑制する）作用が弱まると、地表降水分布は主に放射過程で形成される中層雲、その中層雲における対流活動によって規定され、地形と降水分布の対応は不明瞭になってくる。

次に、熱帯における非常に湿潤な大気・陸面状態が降水特性にどの程度影響を持つかについて検討を行う。降水過程への湿潤度の効果を検討するために、CTL、DRYHIGH、DRYLOW、DRYSMの結果を図-6に示す。

他の実験結果と比べ、DRYLOWの降水の少なさは非常に顕著である。また、この解析領域において土壌水分を乾燥化させたことは降水量の減少となって表れている（DRYSM）。一方、大気上層を乾燥させたDRYHIGHでは、CTLよりも降水量が増えている。これは、大気上層を乾燥させた初期条件のため、計算2日目において大気中層で層状雲が形成されず、Mae Chaem流域上で積雲対流が生起し、大きく組織化したためである。また、積雲対流活動によって、湿潤な大気下層から水蒸気が大気中層・上層に輸送され、大気全体を湿潤化し、計算3日目以降はCTLと同様に層状性の雲が形成され、活発な降水活動が行われた。

以上に述べた湿潤条件を変えた数値実験は、下層の湿った水蒸気が降水活動に大きな影響を及ぼしていることを示唆している。本研究の湿潤条件を変えた感度実験においては、力学的条件はCTLと変わらないため、雲・降水が生起するために十分な水蒸気が供給されれば、CTLとほぼ変わらないメカニズムで降水が生起した。

#### 4. 結論

結論は、以下の通りである。

- 1) 総観場の大気環境と地形性降水との対応について解析を行い、Mae Chaem流域における降水は、大気下層の西風が比較的強い状態にあり、また持ち上げ凝結高度（LCL）が低い程、可降水量が多いほど、生起しやすく、地形性降水が顕著になる傾向がみられた。
- 2) 領域大気モデルを用いて条件を変えた感度実験を行い、Mae Chaem流域において観測された降水特性を矛盾無く説明する標準実験で見られた降水メカニズムには、大気下層の風と山岳による力学的効果、地表面か

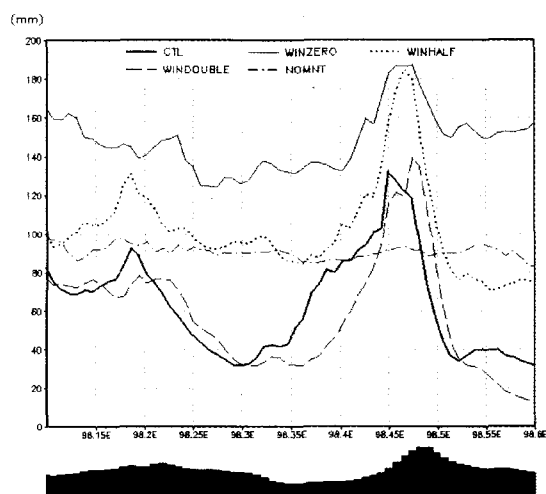


図-5 実験グループ1のMae Chaem流域（東経98.1～98.6度の領域）における計算2日目から5日目の地表積算降水量。太実線、実線、点線、破線、一点鎖線はそれぞれ実験CTL、WINZERO、WINHALF、WINDOUBLE、NOMNT。

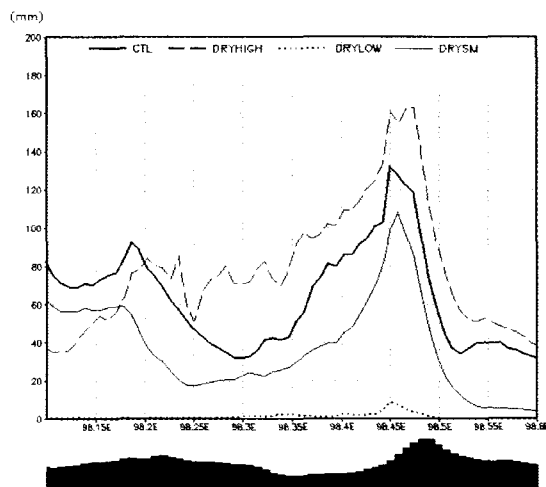


図-6 実験グループ2のMae Chaem流域（東経98.1～98.6度の領域）における計算2日目から5日目の地表積算降水量。太実線、実線、点線、破線はそれぞれ実験CTL、DRYSM、DRYHIGH、DRYLOW。

らの蒸発散も含む大気下層の非常に湿潤な水蒸気が重要な要素であること、また、大気下層の風速や湿度の変化が、山岳地域の降水の空間分布に大きな影響を及ぼすことが分かった。

謝辞：本研究はGEWEX/GAME 研究の一環として行われ、GAME-Tropics研究の一つとして実施されました。タイ国Mae Chaem流域における降水観測は、東京大学大学院農学生命科学研究科の鈴木雅一教授、蔵治光一郎講師、タイ国森林局（RFD）、タイ国カセサート大学の協力によって行われました。研究を進めるにあたり、東京大学大学院理学系研究科の松本淳助教授、京都大学大学

院理学研究科の里村雄彦助教授、タイ国灌漑局(RID)の Thada Sukhaphunnaphan氏には非常に有益な議論をして頂きました。また、地上降水データの整理に当たっては東京大学生産技術研究所安形康博士研究員が作成し公開している、雨量計ロガー記録を任意の時間当たりの降水量データに変換するプログラムを利用しました。

本研究は、文部省科学研究費「東南アジアモンスーン地域の水文環境の変動と水資源への影響」(代表：虫明功臣)、JST/CREST「人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」(代表：沖大幹)、科学研究費補助金(特別研究員奨励費)などの助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Phillips, D. L., Dolph J. and Marks, D.: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain, *Agric For Meteorol.*, Vol.58, pp.119-141, 1992.
- 2) 山田 正, 日比野 忠史, 荒木 隆, 中津川 誠: 山地流域での降雨特性に関する統計的解析, 土木学会論文集, No.527/II-33, pp.1-13, 1995.
- 3) Weisse, A. K. and Bois, Ph.: Topographic Effects on Statistical Characteristics of Heavy Rainfall and Mapping in the French Alps, *J. Appl. Meteor.*, Vol.40, No.4, pp.720-740, 2001.
- 4) Kyriakidis, P. C., Kim, J. and Miller, N. L.: Geostatistical Mapping of Precipitation from Rain Gauge Data Using Atmospheric and Terrain Characteristics, *J. Appl. Meteor.*, Vol.40, pp.1855-1877, 2001.
- 5) Smith, R. B.: Current Status of ALPES Research in the United States, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.67, pp.310-318, 1986.
- 6) Stow, D., Bradley, S. and Gray, W.: A Preliminary Investigation of Orographic Rainfall Enhancement over Low Hills near Auckland New Zealand, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.69, pp.489-495, 1991.
- 7) Wratt, D. S., Ridley, R. N., Sinclair, M. R., Larsen, H., Thompson, S. M., Henderson, R., Austin, G. L., Bradley, S. G., Auer, A., Sturman, A. P., Owens, I., Fitzharris, B., Ryan, B. F. and Gayet, J. -F.: The New Zealand Southern Alps Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.77 No.4, pp.683-692, 1996.
- 8) Barros, A. P. and Kuligowski, R. J.: Orographic Effects during a Severe Wintertime Rainstorm in the Appalachian Mountains, *Mon. Weath. Rev.*, Vol.126, pp.2648-2672, 1998.
- 9) Purdy, J. C., Harris, D., Austin, G. L., Seed, A. W. and Gray, W.: A case study of orographic rainfall processes incorporating multiscaling characterization techniques, *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.7837-7845, 2001.
- 10) Miniscloux, F., Creutin, J. D. and Anquetin, S.: Geostatistical Analysis of Orographic Rainbands, *J. Appl. Meteor.* Vol.40, pp.1835-1854, 2001.
- 11) Neiman, P. J., Ralph, F. M., White, A. B., Kingsmill, D. E. and Persson, P. O. G.: The Statistical Relationship between Upslope Flow and Rainfall in California's Coastal Mountains: Observations

- during CALJET, *Mon. Weath. Rev.*, Vol.130, pp.1468-1492, 2002.
- 12) Ramege, C. S.: Diurnal Variation of Summer Rainfall of Malaya, *J. Tropical Geogr.*, Vol.19, pp.62-68, 1964.
- 13) Thauvin, V. and Lebel, T.: EPSAT-NIGER study of rainfall over the Sahel at small time steps using a dense network of recording raingauges, *Hydrol. Process*, Vol.5, pp.251-260, 1991.
- 14) 益倉 克成, 吉谷 純一, 山邊 満: タイの降雨特性, 土木技術資料, Vol.34, pp.83-88, 1992.
- 15) Oki, T. and Musiake, K.: Seasonal Change of the Diurnal Cycle of Precipitation over Japan and Malaysia, *J. Appl. Meteor.*, Vol.33, pp.1445-1463, 1994.
- 16) Shuin, Y., Shibano, H., Suzuki, M. and Ohta, T.: Temporal and Spatial Characteristics of Rainfall on the Southwest Slope of Mt. Merapi, in Indonesia, *J. Jpn. Soc. Ero. Con. Eng.*, Vol.48, Special Issue, pp.3-12, 1996.
- 17) Murata, F., Yamanaka, M. D., Fujiwara, M., Ogino, S. -Y., Hashiguchi, H., Fukao, S., Kudsy, M., Sribimawati, T., Harjono, S. W. B. and Kelana, E.: Relationship between Wind and Precipitation Observed with a UHF Radar, GPS Rawinsondes and Surface Meteorological Instruments at Kototabang, West Sumatera during September-October 1998, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.80, pp.347-360, 2002.
- 18) Barros, A. P., Joshi, M., Putkonen, J. and Burbank, D. W.: A study of the 1999 monsoon rainfall in a mountainous region in central Nepal using TRMM products and rain gauge observations, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.27, pp.3683-3686, 2000.
- 19) Kuraji, K., Punyatrang, K. and Suzuki, M.: Altitudinal increase in rainfall in Mae Chaem watershed, Thailand, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.79 No.1B, pp.353-363, 2001.
- 20) Dairaku, K., Kuraji, K., Suzuki, M., Tangtham, N., Jirasuktavekul, W. and Punyatrang, K.: The effect of Rainfall Duration and Intensity on Orographic Rainfall Enhancement in a Mountainous Area: A Case Study in the Mae Chaem Watershed, Thailand, *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, Vol.13 No.1, pp.57-68, 2000.
- 21) Dairaku, K., Emori, S., Oki, T.: Rainfall amount-intensity-duration-frequency relationships over a tropical mountain in Southeast Asia (Revised November 2003)
- 22) 大楽浩司, 江守正多, 沖大幹, 虫明功臣: 領域気候モデルを用いた東南アジア熱帯山岳地域における降水特性の解析, 水工学論文集, Vol.47, pp.79-84, 2003.
- 23) 谷田貝 亜紀代, 山崎 信雄, 釜堀 弘隆, 高橋 清利, 植田 宏昭, 青梨 和正, 隈 健一, 竹内 義明, 多田 英夫: GAME再解析について, 水文・水資源学会誌, Vol.13 No.6, pp.486-495, 2000.
- 24) Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H.: A comprehensive meteorological modeling - RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol.49, pp. 69-91, 1992.

(2003. 9. 30受付)