

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

AN INVESTIGATION OF MONSOON RAINFALL OVER A TROPICAL MOUNTAIN IN SOUTHEAST ASIA USING REGIONAL CLIMATE MODEL

大楽浩司¹・江守正多²・沖大幹³・虫明功臣⁴

Koji DAIRAKU, Seita EMORI, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

² 地球フロンティア研究システム 地球変動研究所 (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

³ 総合地球環境学研究所助教授 (〒602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町335)
東京大学(併任)助教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴ 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

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)). The fact that a larger amount of rainfall was recorded at a high altitude was attributed to duration and frequency rather than intensity. After investigating orographic precipitation using a regional climate model, the duration and frequency of rainfall at high altitudes were found to be caused by two mechanisms: 1) convective clouds over mountains are activated in the evening, and 2) stratus formed by radiative cooling or heating at the tops of clouds and low-level orographically triggered convective clouds cause a seeder-feeder mechanism. The results of a numerical simulation were quite consistent with the measurements acquired from the tipping-bucket rainfall gauges.

Key Words: Orographic Rainfall, Rainfall intensity-duration-frequency relationships, Regional Climate model, Tropical Mountain Region, GAME-Tropics

1. はじめに

人間生活、自然生態系にしばしば多大な影響を及ぼす、渇水・洪水・土砂災害・土壌浸食などに対して適切に水資源を管理するために、政策立案者から将来のリスクアセスメントがますます求められるようになってきている¹⁾。降雨の時空間分布を把握することは、水資源の管理において重要なものと考えられ、特に極値分布や、統計的空間内挿手法について、これまで多くの研究がなされてきた^{2), 3), 4), 5)}。さらに、降雨の時空間分布は、現在の気候の状態を反映し、気候変動を明らかにする上でも非常に重要な指標となる⁶⁾。現在全球規模の気候研究が進展しつつあるが、グローバルに予測された気候変動の結果を、地域スケールの気候に適用し、水資源管理に役立てるには、降水の時空間変動の理解が不可欠である。

大気循環は、地形や、植生、土壌水分など地表面状態によって大きな影響を受ける。特に、大気循環へ山岳が及ぼす効果は、経済的にも大きな影響を持つ。山岳に

よって励起・強化された大雨が、流域を分ける山の尾根のどちら側で降るかということは、水力発電を行っている流域で重要である。また、農業・林業は降水パターン、洪水、強風によって影響を受け、山地崩壊などによって輸送が邪魔される⁷⁾。大気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。

Global Precipitation Climatology Centre (GPCC[®]) のような全球降水データセットの作成に用いられる地上降水観測点は約6,700地点あるが、その空間分布は不均一であり、ほとんどは中・高緯度の先進国に位置している⁸⁾。熱帯・亜熱帯地域では降水の観測点は少なく、その多くは標高の低い市街地にあり、標高の高い山岳地域での地上降水観測はほとんどない。さらに、1時間、もしくはそれ以上の高時間分解能の降水データは非常に限られている。熱帯・亜熱帯地域の特に山岳地域において

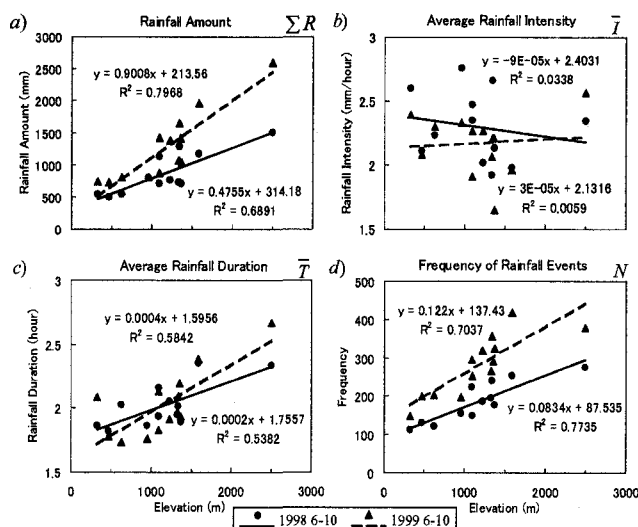


図-2 1998年、1999年の6月から10月における総降水量、平均降水強度、平均降雨継続時間、降雨頻度と標高の関係

10月の期間のデータを用いて、Mae Chaem 流域の各降水観測地点において、(5)式を用いて、平均降雨強度、平均降雨時間、頻度を算出し、それぞれを標高との関係において示したものである。

図-2b は、一雨当たりの平均降雨強度と標高の関係を示している。1998年、1999年とも、平均降雨強度と、標高の間に明瞭な関係は見られなかった。すなわち、標高が高くなるにつれて、平均降雨強度が強くなる、あるいは弱くなる、という傾向は見られなかった。

図-2c は、一雨当たりの平均降雨継続時間と標高の関係である。平均降雨継続時間は、1998、1999年とも標高が高くなるほど長くなる傾向が見られる。

図-2d に示される降雨頻度と標高との関係から、標高が高くなるに従い降雨頻度が顕著に増加する関係があることがわかる。標高が低い観測地点に比べ、標高が高い観測地点は、回数にして3倍もの降水イベントが観測された。また、1999年は1998年に比べ、全ての観測地点で約2倍の降水イベントが観測された。

以上の結果は、これまでに得られた研究結果^{11), 12), 13)}を支持しており、Mae Chaem 流域における降雨イベントは、標高の高いところで生じやすく、一雨当たりの降雨継続時間も長い傾向があるが、平均降雨強度に関しては標高の高低とは明瞭な関係がないことが示された。また、1998年だけでなく、1999年も同様の傾向が見られ、1998年と1999年の降水量の大きな違いは、主に頻度と降雨時間によってもたらされていることが明らかになった。

3. 領域気候モデル

Mae Chaem 流域の降水特性は、山岳の影響を強く受けている。このような地域において、効果的水資源計画・管理を行うためには、山岳が降水の時空間分布へ及ぼす

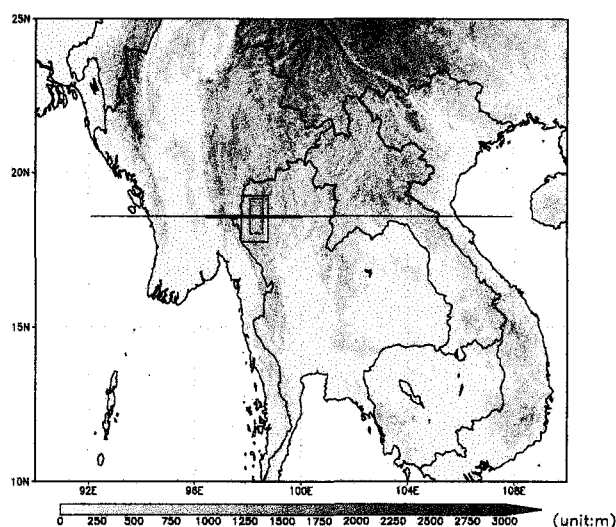


図-3 領域気候モデルによる計算領域。破線の四角で囲まれた領域はMae Chaem流域に相当し、その周囲の実線の領域は、GAME再解析データをモデルの初期条件として用いるために、領域平均した領域を示す。細い実線はGrid-1、太い実線はネスティングされた計算領域、Grid-2を示す。

影響の程度や、その過程を明らかにすることが必要である。そこで、Mae Chaem流域における降水観測・解析結果から得られた結果をもたらし降水過程を明らかにするために、領域気候モデルを用いて検討した。

領域気候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)¹⁵⁾を用いた。このモデルは、土壌水分との大気-陸面相互作用^{16), 17)}や、花粉の飛散シミュレーション¹⁸⁾の研究にも応用されている。

(1) 数値計算条件

本研究では、2次元非静水圧・圧縮モデルを用いた。雲降水過程は、バルク雲微物理過程、放射過程は、雲微物理過程と対応した2ストリーム放射過程¹⁹⁾、陸面過程はLEAF-2²⁰⁾、標高はGTOPO30、土地利用情報は衛星データ (NOAA-AVHRR) に基づきUSGSによって作成されたもの、海面水温は月毎の気候値を用いた。

計算断面は、海上も含めた総観場の影響を反映させるために、Mae Chaem 流域を中心とするGrid-2 (水平解像度800m、格子数502、401.6km) をGrid-1 (水平解像度4km、格子数420、1680km) にネスティングし、相互に計算結果を反映させ (2-way nesting)、計算を行った。鉛直座標系は地形に沿う σ_z 座標であり、Grid-1、Grid-2の両方とも、格子数は60、高度約22.3kmで、鉛直グリッドは最下層30m から最大500mまでストレッチさせた。

シミュレーションの初期条件には、GAME再解析データ Version 1.1²¹⁾ (0.5度グリッド、鉛直17層、6時間毎) の1998年6月から8月までの雨季のデータを、図-3の実線の四角で囲まれた領域に示されるMae Chaem流域の周囲、 $1.5^\circ \times 1^\circ$ (北緯 $17.75^\circ - 19.25^\circ$ 、東経 $97.75^\circ -$

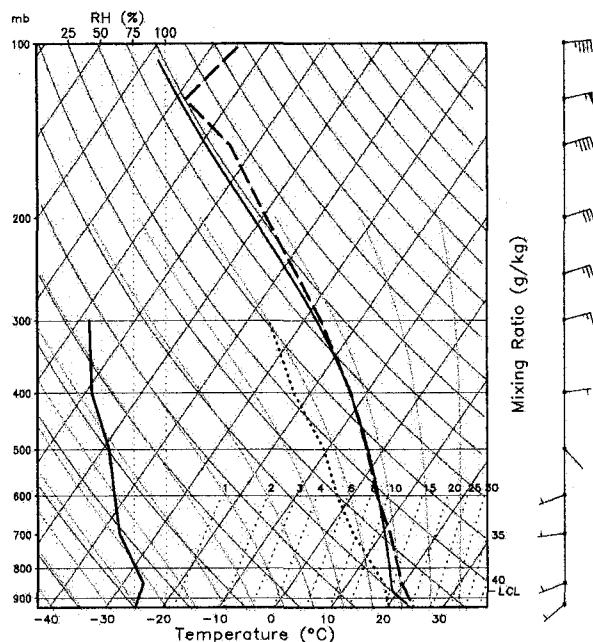


図-4 GAME再解析データVersion 1.1の1998年6月から8月までの雨季のデータを $1.5^\circ \times 1^\circ$ (北緯 $17.75^\circ - 19.25^\circ$ 、東経 $97.75^\circ - 98.75^\circ$)で領域平均・時間平均して作成したモデルの初期条件。破線が気温を示し、点線が、露点温度。実線(右)が地表の空気塊を大気上層まで持ち上げた時の気温プロファイル、実線(左)が相対湿度を示し、矢羽根は風向・風速のプロファイルを示す。

98.75°)で気温、相対湿度、風速を領域平均・時間平均したものを用いた。シミュレーションの初期値に用いた大気プロファイルを図-4に示す。作成された初期値は、大気下層で湿潤、下層西風、上層東風というインドシナ半島上における雨季の気候状態を表現している。風速の南北成分は、東西成分に比べ非常に小さいので、この数値実験では、東西成分のみを考えることにする。また、持ち上げ凝結高度(LCL)も 877.2hPa と非常に低く、力学的な強制上昇があれば、大気下層で凝結しやすい状態である。

側方境界条件は、境界に直交する風速成分に対して、内部重力波の反射を抑えるように、放射境界条件²²⁾を用いた。その他のすべての変数については、流入部分は、空間的一次微分がゼロ、流出部分は2次微分がゼロになるように設定し、計算領域内部の値から外挿した。

以上の条件で5日間のシミュレーションを行った。

(3) シミュレーション結果

シミュレーションの結果について、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日目までの計算結果を示す。図-5はネスティングされたGrid-2の地表降水強度の時間変化を示す。山岳地域で降雨が励起・強化され、降雨域が東へ移動していく、という現象の繰り返しが見られ、図-5に示されるような

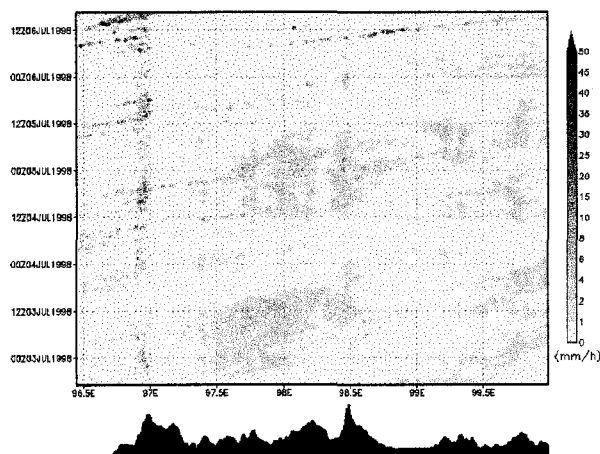


図-5 Grid-2の計算2日目から5日目の地表降水強度

地表降水強度の分布がもたらされた。

図-6はGrid-2の1日目を除いた4日間の積算降水量を示す。山岳に対応して、降水量が多く降っていることが分かる。

図-7にGrid-2の2日目から5日目までの地表降水強度 0.5mm/h 以上の降水について、降雨時間を積算したものを示す。図-6と同様に山岳の標高が高くなることに対応して降雨時間が長くなっている。

図-8に、図-6で示された積算降雨量を図-7の総降雨時間で除した平均降雨強度を示す。平均降雨強度に関しては、地形による明瞭な違いは見られなかった。

以上の結果は、5日間の数値実験の結果であり、Mae Chaem流域という限られた領域に設置され、1998年、1999年のそれぞれ5ヶ月間の地上雨量計による観測データを用いて得られた統計的解析結果とは、定量的には直接比較することはできない。しかし、Mae Chaem流域における降雨イベントが、標高の高いところで生じやすく、また、降雨継続時間が長い傾向があるが、降雨強度の大きさに関して標高とは独立な関係である、ということについて、シミュレーションの結果は、解析結果と定性的に非常によく一致している。

この現象には、モデル中で主に2つの降水メカニズムが見られた。一つは上空に雲がない場合に、湿った空気塊が強い日射による地表面加熱により日中から夕方に熱的に不安定になる。それが下層の西風によって山岳風上側において力学的に持ち上げられ、積雲が励起される。励起された積雲は東へ移動し、山岳の風下側で跳水現象²³⁾と熱的局地循環による谷風によって積乱雲に発達し、東へ移動していくというメカニズムであった。このメカニズムは、Satomura²⁴⁾による研究結果と定性的に一致している。ただし、山岳の標高が高いためか、風上山麓から風下山麓への冷気塊の侵入は見られなかった。

2つ目のメカニズムは、Seeder-Feeder²⁵⁾による山頂付近における降水の強化である。夕方に励起された対流雲の残りが、上空 $5, 6\text{km}$ のところで、雲頂における放射

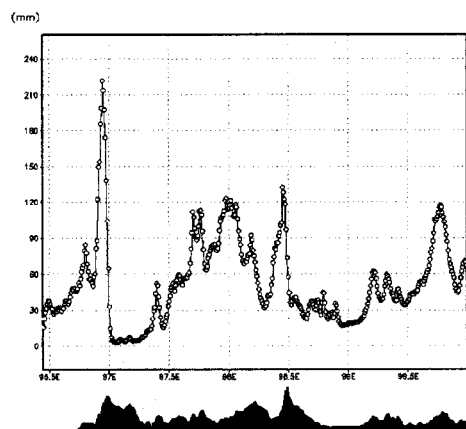


図-6 Grid-2 の2日目から5日目の積算地表降水量

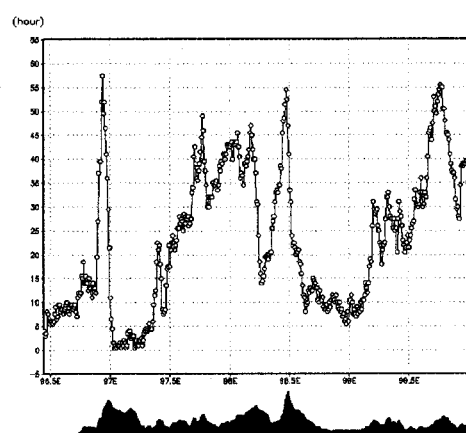


図-7 Grid-2 の2日目から5日目の積算地表降水時間

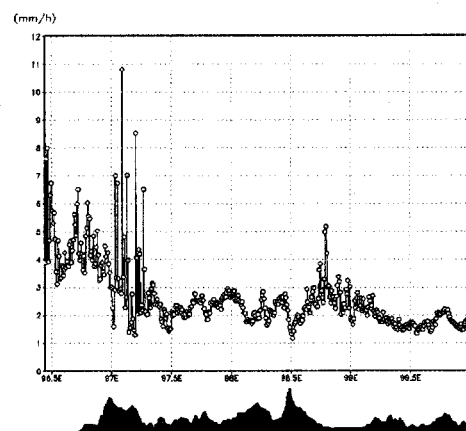


図-8 Grid-2 の2日目から5日目の平均降水強度

冷却により不安定化し、層雲として発達する。また、上空2, 3km のところでは、湿った空気塊が、モンスーンの下層の西風と山岳によって力学的な強制上昇を受け、積雲が励起・維持される。これによって大気の上空に雲の2層構造ができる。夜間の強い放射冷却、あるいは日中の強い放射加熱によって、上空の層雲で積雲対流が励起され、その雨滴粒子が大気下層に達する際、山岳上で発

達した下層の積雲の水滴を集め、強化され、地表に達する。

また、下層の積雲の雲底高度が2km 前後のため、標高が2000m 前後の山岳では常に雲がかかっている頻度が多く、その状態が比較的長い時間継続する。上層・下層の雲もモンスーンの西風によって徐々に東へ運ばれて行き、上空が晴れたタイ西部では、また1つ目のメカニズムにより積雲対流活動が励起される。

4. 結論

結論は、以下の通りである。

- 1) 雨季を通じての降水量に明瞭な標高依存性が見られた。Mae Chaem 流域における降雨イベントは、標高の高いところで生じやすく、また、降雨継続時間が長い傾向があるが、降雨強度の大きさに関しては、標高と独立な関係にあることが観測データの解析により示された。
- 2) 領域気候モデルを用いて数値実験を行った結果、a) 上空に雲がない場合に、主に風上側のタイ西部の山岳地域において夕方に積雲が励起され、それが風下側で跳水現象と熱的局地循環による強い収束によって、積乱雲に発達して東へ移動していくメカニズムと、b) 上空5, 6km のところで、雲頂における放射冷却・放射加熱により発達した層雲と、湿った空気塊が下層の西風と山岳によって力学的強制上昇を受け、上空2, 3km にできる積雲により、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、のアンサンブルの結果、山岳域で降水の頻度が多く、時間が長く降り続く傾向が見られた。

以上の解析結果から、アジアモンスーンの影響下にある東南アジア熱帯山岳地域において、降水頻度と降雨時間が雨季の降水の明瞭な標高依存性をもたらしていることが明らかになり、領域気候モデルを用いたシミュレーションの結果は、解析結果と定性的に非常によく一致しており、その降水特性がどのような降水メカニズムによってもたらされているのかについて、東南アジア熱帯山岳地域における大気-陸面水循環過程の一端を明らかにすることができた。

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、神戸大学大学院自然科学研

究科山中大学教授、タイ国灌漑局 (RID) の Thada Sukhapunnaphan 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」(No. 11201202 代表：虫明功臣)、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。また、有益なコメントを下された3人の匿名査読者にも感謝します。

参考文献

- 1) Schnur, R.: The investment forecast, *Nature*, Vol.415, pp.483-484, 2002.
- 2) Smith, J. A.: Precipitation, *Handbook of Hydrology*, Maidment, D. R. editor-in-chief, McGraw-Hill Inc., New York, pp.83-130, 1992.
- 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) Phillips, D. L., Dolph, J. and Marks, D.: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain, *Agr. For. Meteor.*, Vol.58, pp.119-141, 1992.
- 5) 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.
- 6) Oki, T. and Musiak, K.: Seasonal Change of the Diurnal Cycle of Precipitation over Japan and Malaysia, *J. Appl. Meteor.*, Vol.33 No. 12, pp.1445-1463, 1994.
- 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) Rudolf, B., Hauschild, H., Rueth, W. and Schneider, U.: Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements, *NATO ASI Series*, Vol.126, pp.173-186, 1994.
- 9) Xie, P. and Arkin, P. A.: Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates and Numerical Model Outputs, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.78, pp.2539-2558, 1997.
- 10) 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.
- 11) Dairaku, K., Kuraji, K., Suzuki, M., Tangtham, N., Jirasuktaveekul, W. and Punyatrong, 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.
- 12) 大柴 浩司, 江守 正多, 沖 大幹, 虫明 功臣: 東南アジア熱帯山岳における地形性降雨, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, pp. 507-512, 2002.
- 13) Kuraji, K., Punyatrong, 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.
- 14) 鈴木喜晴, 中北英一, 池淵周一: 標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性の解明, 水工学論文集, Vol. 45, pp. 301-306, 2001.
- 15) 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.
- 16) Emori, S.: The interaction of cumulus convection with soil moisture distribution: An idealized simulation, *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.8873-8884, 1998.
- 17) Kanae, S., Oki, T. and Musiak, K.: Impact of Deforestation on Regional Precipitation over the Indochina Peninsula, *J. Hydrometeor.*, Vol.2, No.1, pp.51-70, 2001.
- 18) 神田 学, 張 翔雲, 鶴野 伊津志, 川島 茂人, 高橋 裕一, 平野 元久: 地域気象モデルによる花粉飛散の数値シミュレーション, 天気, Vol. 49, pp. 267-277, 2002.
- 19) Harrington, J. Y., Reisin, T., Cotton, W. R. and Kreidenweis, S. M.: Cloud resolving simulations of Arctic stratus. Part II: Transition-season clouds, *Atmos. Res.*, Vol.51, pp.45-75, 1999.
- 20) Walko, R. L., Band, L. E., Baron, J., Kittel, T. G. F., Lammers, R., Lee, T. J., Ojima, D., Pielke, R. A., Taylor, C., Tague, C., Tremback, C. J. and Vidale, P. L.: Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling, *J. Appl. Meteor.*, Vol.39 No. 6, pp.931-944, 2000.
- 21) 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.
- 22) Klemp, J. B. and Wilhelmson, R. B.: The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics, *J. Atmos. Sci.*, Vol.35, pp.1070-1096, 1978.
- 23) Durran, D. R.: Another Look at Downslope Windstorms. Part I: The Development of Analogs to Supercritical Flow in an Infinitely Deep, Continuously Stratified Fluid, *J. Atmos. Sci.*, Vol.43, pp.2527-2543, 1986.
- 24) Satomura, T.: Diurnal variation of precipitation over the Indo-China Peninsula: Two-dimensional numerical simulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.78, pp.461-475, 2000.
- 25) Smith, R. B.: The influence of mountains on the atmosphere, *Adv. Geophys.*, Vol.21, pp.87-230, 1977.

(2002. 9. 30受付)