

領域気候モデルにおける土壌水分と大気最下層 パラメータとの相互関係

— '推定' による土壌水分調節・初期値化 —

RELATIONSHIP BETWEEN SOIL MOISTURE AND NEAR-SURFACE
ATMOSPHERIC PARAMETERS IN A REGIONAL CLIMATE MODEL

鼎 信次郎¹・江守 正多²・沖 大幹³・虫明 功臣⁴

Shinjiro KANAE, Seita EMORI, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科, 日本学術振興会特別研究員 (〒106 港区六本木 7-22-1)

²博士(学術) 国立環境研究所大気圏環境部大気物理研究室

³正会員 博士(工学) NASA/GSFC, 日本学術振興会海外特別研究員

⁴正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所教授

In a regional climate model, it is difficult to determine the initial field of soil moisture. In this paper, we use a version of CSU-RAMS(Regional Atmospheric Modeling System) that has been modified at NIES(National Institute for Environmental Studies) as a regional climate model for Eastern Asia. A simple bucket model is implemented as a land surface hydrological scheme. Numerical simulations are carried out for the first two weeks in August 1994. The importance of soil moisture to near-surface atmospheric parameters(temperature and relative humidity) is examined, and local soil moisture adjustment for the near-surface atmospheric parameters using the method of 'soil moisture estimation' is tested. The 'soil moisture estimation' significantly improves the biases of the near-surface atmospheric parameters. As a consequence, the possibility of adequate determination of the initial soil moisture is suggested. In addition, it is found that the adequate precipitation rate may, in some cases, improve the soil moisture field without the 'soil moisture estimation'. These results should be validated against the water balance consideration in the future study.

Key Words : RAMS, regional climate model, land surface - atmosphere interaction
, soil moisture, land surface parameterization, bucket model

1. はじめに

温室効果気体の増加等に伴う気候変動時の水循環・水資源予測において、全球気候モデルを用いる方法では計算機資源の問題から現在のところ地域的な予測に十分な解像度を得ることは難しい。そこで、領域を限ることにより高い解像度を実現し、より細かな地形等を表現できる領域気候モデルは重要な研究手段の一つとなっておりつつある。しかし現在、領域気候モデルはいくつか改善すべき問題を抱えている。特に水文・水資源工学をはじめとする実用的な関心において、地表面過程およびそれが地表付近の大気に与える影響に関する問題は最も重要なものの一つであろう。例えば、土壌水分は地表付近の温度、湿度に大きな影響を与え、さらには降水量にまで影響を及ぼすことが知られている¹⁾。しかし、土壌水分の広域な観測値を得ることは現時点では困難であり、領域気候モデルに対して適切な土壌水分の初期値を与えることは難しい問題である。また、与えた土壌水分が水収支・水循環の点からも妥当であるかどうかは、いか

に検証するかも含めて難しい問題である。

そこで本論文では、日本を中心とする東アジアを対象領域とした領域気候モデルにおいて、まず、土壌水分がモデル最下層の大気に与える影響を検討した。次に大気最下層パラメータを用いて土壌水分を間接的に'推定'することを試み、領域大気モデルにおける適切な土壌水分設定の可能性を示した。最後に、以上の結果を踏まえて陸面モデルの新たな検証方法について議論した。

2. 領域気候モデルの概要

本研究で使用した領域気候モデルはコロラド州立大学で開発された RAMS(Regional Atmospheric Modeling System) Ver 3.b²⁾ を基本として、国立環境研究所において東アジア域領域気候モデルとしていくつかの変更点が加えられきたもの³⁾である。領域は東経 130 度北緯 35 度を中心とするポーラステレオ座標を用い、水平方向に 80km グリッドで 50×50 グリッド、鉛直方向には

23 グリッド (最上層約 18.6km) と設定した。積分期間は 1994 年 8 月 1 日から 14 日間、大気の初期、境界条件は ECMWF の 12 時間おきの客観解析値 (2.5 度グリッド) を内挿して用いた。時間ステップは 150 秒とした。境界条件および大規模場とのナッジングに関しては、内部の物理過程を主に見るために、気温、湿度については流入条件のときだけ境界部分にナッジングをかけ、風速、気圧については、モデルの結果と ECMWF の客観解析値を共に 9 グリッド移動平均し平滑化した場どうしの差で時定数 3 時間でナッジングしている。モデルの主な変更点としては、CCSR/NIES GCM に用いられている詳細な放射コード⁴⁾が組み込まれていること、同 GCM の積雲対流スキームである簡易型 Arakawa-Schubert が組み込まれていること、熱と水分の輸送に関する粗度を運動量に関する粗度と比べて小さく算定していること⁵⁾などが挙げられる。降水スキームとしては上記の積雲対流と共に、大規模凝結を表現するために RAMS 標準の雲物理モデルを用いた。更に本研究においては、土壌水分の影響を明確にするために、陸面水文スキームとして簡単な深さ 15cm のバケツモデルを用いた。ただし、本研究のバケツモデルでは蒸発の計算の際、標準として気孔抵抗 $rc = 15(s/m)$ を空気力学的抵抗に加えている。

3. 数値実験の概要

本研究では 4 種類の数値実験を行なった。それらは順に、バケツモデル中の土壌水分を 12cm(/15cm) に固定したもの (以後 W120 と名付ける)、1.5cm に固定したもの (W015)、土壌水分の初期値を 9cm とし最初の 3 日間のみ土壌水分の'推定'を行ないその後固定したもの (3day-Est)、3day-Est と同じ土壌水分初期値だがその後'推定'も固定もせずそのまま土壌水分も時間積分したもの (No-Est) である。W120, W015 は、それぞれ土壌が一様に湿潤、乾燥である極端なケースを調べるために行った。土壌水分の'推定'に関しては 5 節に記述する。今回は数値実験により得られた結果のうち、モデル最下層 (地上約 48m) の気温と相対湿度、および土壌水分に注目した。

各数値実験の条件

実験名	土壌水分初期値	固定 or Not
W120	12cm	固定
W015	1.5cm	固定
3day-Est	9cm	'推定'後固定
No-Est	9cm	固定せず

4. W120,W015 による結果

4.1. 解析の条件, 手法

まず、本研究における解析の基準について述べる。モデルの最下層気温・湿度と比較するための基準値として、ECMWF の客観解析値をモデル最下層面に水平・鉛直内挿したものを用いた。ただし、この基準値は、必ずしも真値でないことを十分注意した上で、観測値をある程度利用した上で大規模場を整合的に表現していることを理由として選定した。時間スケールとしては月程度の平均状態の再現を念頭に置いているため、モデルの結果および基準値ともに全積分期間 (14 日間) の平均値に関して以下の議論を行なった。

モデル最下層気温・湿度とその基準値との比較に当たり、"しきい値"をもうけた。各グリッドにおけるモデルの結果と基準値との差が、気温に関しては 1 度以内、相対湿度に関しては 5 パーセント以内であれば、モデルの結果は基準値と十分近い値であると見なすことにした。一方、気温に関しては 1 度以上、相対湿度に関しては 5 パーセント以上の差異が存在すれば、モデルは基準値と比較して顕著なバイアスが存在すると見なすことにした。

4.2. 土壌水分が最下層気温・湿度に与える影響

この基準を元に土壌水分と最下層気温・湿度との関係について考えてみる。特に土壌水分を変化させることにより、最下層気温・湿度のバイアスを改善できるかどうか (この場合、基準値に近付けられるか) について考える。

バイアスが低温かつ低湿バイアス、または高温かつ高湿バイアスであるときは、陸面水文スキームの土壌水分を変化させたとしてもバイアスの改善を望むことはできず、放射によるエネルギー入力などに問題があると考えなければならない。一方、バイアスが低温かつ高湿バイアス、または高温かつ低湿バイアスであるときは、前者ならば土壌水分を減少させることによって、後者ならば土壌水分を増加させることによって大気へ与えるフラックスあるいはボーエン比を改善し、結果として気温・湿度のバイアスを改善することが可能であると考えられる。

この際、土壌水分を変化させるというのは、降水や蒸発、流出などの収支によらず強制的に土壌水分を変化させるという意味である。このようなことを行う理由は、現時点では大気のシミュレーションの改善をまず第一に考えているからである。すなわち、もし地表付近の大気にとって丁度都合の良いフラックスを与える土壌水分が存在しそれが判明すれば、土壌水分をその値に設定してしまえばよいと考えた。上で述べたバイアスの原因の一部は気候抵抗 rc の分布の不適切さに求めることも可能である。しかし、簡単のために本研究では $rc =$ 一様として土壌水分のみでバイアスの原因を説明でき

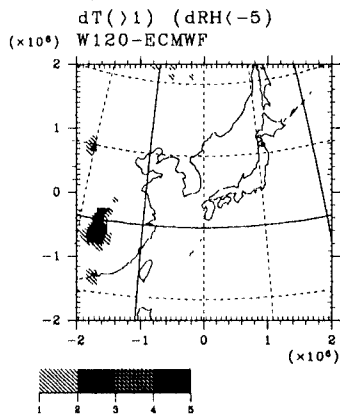


図-1 W120 における高温かつ低湿領域の気温の偏差
(モデル-ECMWF)

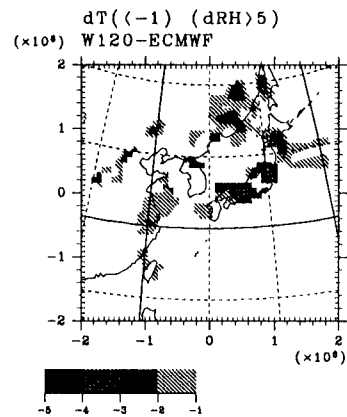


図-2 W120 における低温かつ高湿領域の気温の偏差
(モデル-ECMWF)

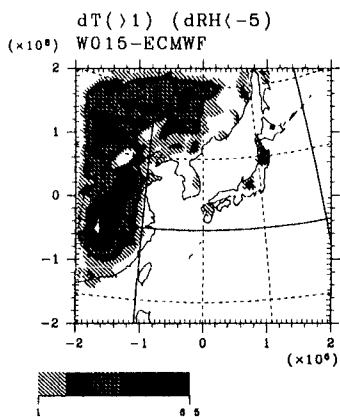


図-3 W015 における高温かつ低湿領域の気温の偏差
(モデル-ECMWF)

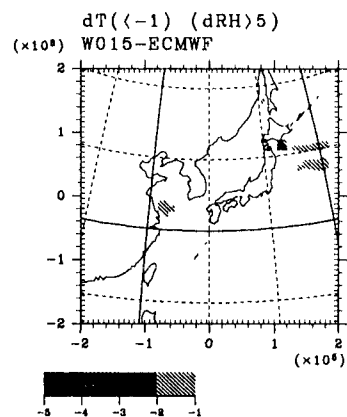


図-4 W015 における低温かつ高湿領域の気温の偏差
(モデル-ECMWF)

ると仮定した。

4.3. 最下層気温・湿度の結果

4.1 節および 4.2 節で述べたうち、低温かつ低湿バイアス、または高温かつ高湿バイアスの領域は、ほとんど存在しなかった。つまりバイアスがあれば、それは低温かつ高湿バイアス、または高温かつ低湿バイアスのどちらかであり、土壌水分による影響が大きいと推測される。図 1,2,3,4 に順に、W120, W015 各実験における高温・低湿領域および低温・高湿領域を示す。図はすべて気温に関してであり、例えば図 1 であれば、W120 における高温かつ低湿領域の、W120 と基準値との気温の差を示す。図 2 は W120 における低温かつ高湿領域の、W120 と基準値との気温の差を示す。

図 2 において陰によって表現されている領域は、低温かつ高湿ということであり、土壌水分を減少させることによって改善可能な領域である。実際図 1,2 は W120 の結果であり、土壌水分を減少させることは可能である。主に、日本、ロシア沿岸部、中国の西安と北京を結んだ辺

りなどである。

図 3 において陰によって表現されている領域は、高温かつ低湿ということであり、土壌水分を増加させることによって改善可能な領域である。図 3,4 は W015 の結果であるため、土壌水分を増加させる方向は現実的であろう。主な領域は中国ほぼ全土と日本の一部である。

図 4 は陸上に陰によって表現された領域がないため問題はない。

問題は図 1 で陰によって表現された領域である。ほとんどは中国南部に存在する。この領域は W120 でもまだ高温かつ低湿ということである。しかし W120 においては蒸発効率 $\beta = 1$ であり、これ以上土壌水分を増加させても大気最下層を改善する効果はない。他に考えられる手段は気孔抵抗 rc を小さくすることであるが、図には示さないが $rc = 0$ とした場合でもこの領域の面積は小さくはなるものの高温かつ低湿バイアス領域として残った。したがって、この領域はモデルのボーエン比の調節によってはどうしても除去できない高温かつ低湿バイアスの残る領域である。この原因としては放射

などエネルギー入力のパイアスが考えられる。

以上より、大気最下層気温・湿度は、本研究における時間スケールにおいて、直下の土壌水分の影響を大きく受けており、土壌水分を適切に与える必要性および土壌水分を調節することによる大気最下層気温・湿度改善の可能性が本節の結論として挙げられる。

5. 土壌水分'推定'

5.1. 土壌水分'推定'の導入

前節の結果から、土壌水分を適当に調節することによって、最下層気温と湿度を改善できる可能性が示された。しかし、そのためには適当な土壌水分の分布を与えることが必要であり、一般にそれは困難である。その理由としては、観測が十分に存在しないこと、土壌水分がモデルに依存する量であり観測値を各モデルに合わせて解釈し直す必要があることなどが挙げられる。そこで、Bouttier et al が開発した土壌水分'推定'法⁶⁾⁷⁾(以下 Bo1993 とする)を非常に簡単な形で導入した。土壌水分'推定'法のエッセンスは、土壌水分のエラー(真値または観測値-モデルの予測値)は、最下層(参照レベル)における気温のエラーと相対湿度のエラーに比例するというものである。本論文中において土壌水分'推定'法とは、以下の数式を用いて強制的に土壌水分を大気モデルにとって望ましい方向へ調整することと定義する。

$$\delta W = W^a - W^f = \alpha(T^o - T^f) + \beta(RH^o - RH^f) \quad (1)$$

ここで、 W^a は'推定'された結果の土壌水分、 W^f はモデルの土壌水分予報値、 T^o, RH^o は気温と相対湿度の観測値、 T^f, RH^f は気温と相対湿度のモデル予報値、 α, β は適当な係数である。

Bo1993 ではモンテカルロ法を用いた感度実験により α, β を経験的かつ統計的に決定している。しかし、 α, β は時刻や土壌タイプを始めとする各種条件によって変化する値であるため、本研究に応じた値を決定するには Bo1993 と同様のことをする必要があり大変な労力を伴う。そこで今回は定性的な影響を見るために α, β に適当な一定値($\alpha = -2.0 \times 10^{-2}, \beta = 2.0 \times 10^{-1}$)を与えた。また、この方法では最下層気温・湿度の観測値が必要であるが、モデル最下層気温・湿度がある値に対して収束していくかどうかを評価することが目的であるため、観測値の代わりに基準値を用いた。

この'推定'手法を、客観解析値のある12時間ごとに、その時間の前後約20分ずつの間の各時間ステップに対して最初の3日間行なった。また、ここでは、土壌水分'推定'の効果を以降のシミュレーションに残し続けることを目的として、3日間の'推定'の後土壌水分を固定した(3day-Est)。その結果を図5,6に示す。

Bo1993⁷⁾では、初期土壌水分を大きく変化させても、このスキームを用いれば、約2日間のうちにある標準

的な土壌水分に近付くという結論が述べられているが、このスキームによって逆に気温や湿度がどのような影響を受けるのかについては記述されていないため、以下の考察は有意義である。

5.2. 土壌水分'推定'時の結果

図5は図3よりも、図6は図2よりも改善されるべきであるので、これらに関して比較を行なう。まず図5,3(高温、低湿バイアス図)においては、中国北部のバイアスが良くなっている。中国南部のバイアスは、蒸発効率=1のW120においてさえ除去できなかったバイアスであるためその部分は残っている。次に図6,2(低温、高温バイアス図)の比較においては、ロシア沿岸部と日本、中国の西安と北京を結んだ線上などでバイアスが改善されている。

3day-Estにおける計算開始3日後('推定'終了時)の土壌水分を図7に示す。この後、積分終了まで土壌水分はこの値で固定される。図から、3day-Estの土壌水分は初期水分量(全領域9cm)と比べて、各領域あるいはグリッドごとに大きな変動を持っており、大気下層のバイアスを打ち消す方向性を強く持っていることが分かる。例えば、中国南部北部のほとんどの領域では、大気最下層が高温かつ低湿バイアスを持っているため、それを打ち消すために土壌水分はほぼ飽和となり、逆に日本、ロシア沿岸、中国中部などでは低温かつ高温バイアスを打ち消すため土壌が乾燥している領域がモザイク状に存在する。大気バイアスが改善されない部分も一部に存在するが、それは4.3節最後で述べた地域や、あるいは、最初の3日間で'推定'された土壌水分がその後の期間の大気バイアスを改善する方向性を持たない(最初の3日の代表性の低い)領域などである。

6. No-Estによる結果

最後に、土壌水分初期値を9cm(/15cm)とし、その後土壌水分の固定を行わず普通に時間積分したとき(No-Est)の結果について述べる。図1,2などと同様のバイアスを図9,10に示す。

これらの図は、3day-Estの結果である図5,6と比較しても、ほぼ遜色のない結果となっている。ただし、中国北部やロシア沿岸などでは、'推定'を行なった3day-Estの方が結果が良い。つまり今回の条件では、バケツモデルをそのまま走らせてもある程度良い結果が出たということになる。No-Estにおける14日間平均土壌水分を図8に示す。3day-Estにおいて'推定'された結果である図7と比較すると、気温・湿度バイアスが似ている中国南部などは、同様の土壌水分を示している。一方、中国北部やロシア沿岸などのバイアスが3day-Estよりも大きかった地域では、土壌水分も異なっている。

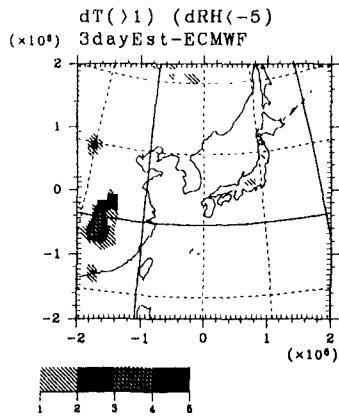


図-5 3day-Est における高温かつ低湿領域の気温の偏差 (モデル-ECMWF)

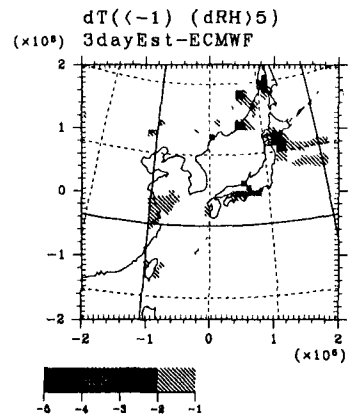


図-6 3day-Est における低温かつ高湿領域の気温の偏差 (モデル-ECMWF)

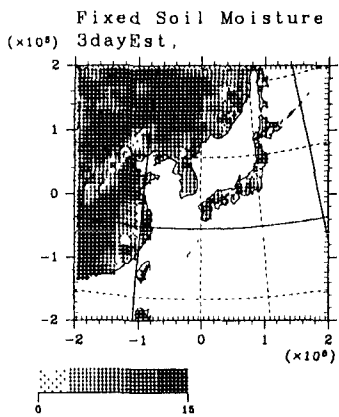


図-7 3day-Est における 3 日目からの固定された土壌水分 ('推定' された結果)

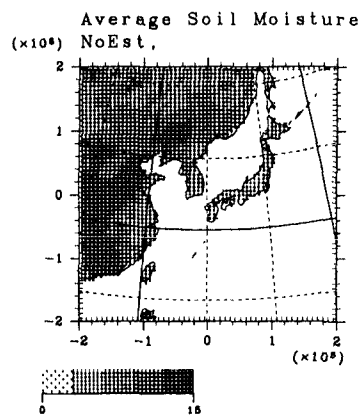


図-8 No-Est における平均土壌水分. 土壌水分固定および '推定' は行なっていない.

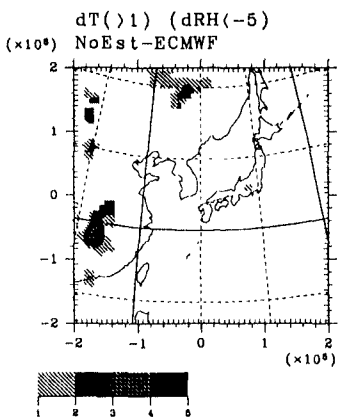


図-9 No-Est における高温かつ低湿領域の気温の偏差 (モデル-ECMWF)

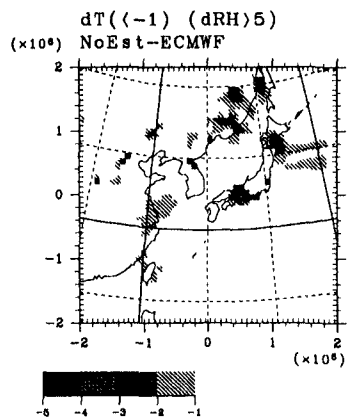


図-10 No-Est における低温かつ高湿領域の気温の偏差 (モデル-ECMWF)

No-Est において、土壌水分が 3day-Est に近付き、気温・湿度バイアスが 3day-Est と同様の方向で改善された領域 (領域 A とする、例えば中国南部) は、バケツモデルの自然なフィードバックにより改善されたと言って

よいだろうか。まず、今回用いた '推定' による大気最下層気温・湿度改善の方法を確認する。例えば、高温かつ低湿バイアスの領域は、土壌水分を強制的に増加させ固定し、結果として蒸発を増加させ顕熱を減少させることに

よってバイアスを改善した。一方, No-Est で用いた普通のバケツモデルの振舞いを考えると, 高温かつ低湿バイアスがあった場合, バイアスがない場合と比べて可能蒸発量が大きくなるため, 蒸発量は大きくなり, バイアスがない場合よりも土壤水分は小さくなるのが期待される。つまり, 以上の蒸発を鍵としたメカニズムでは領域 A での土壤水分の増加によるバイアスの改善を説明できない。

したがって領域 A でのバイアスの改善において重要な水文要素は降水であることがわかる。例えば, 高温かつ低湿バイアスの領域に蒸発を上回る降水があることによって土壤水分が増加すれば, 高温かつ低湿バイアスは結果として'推定'されたときと同様に改善されていく。この例が中国南部であり, 図は省略するが, 実際この領域の No-Est における土壤水分の増加は降水に対応している。逆にバイアスが改善されない領域は, モデルの中で計算された降水が, 地表面および大気最下層にとって適切ではない領域といえる。

7. 結論および今後の課題

本研究により領域気候モデル大気最下層の気温と相対湿度は, その直下の陸面の土壤水分に大きく影響されることが分かった。そして, その土壤水分をローカルに調整することによって, 大気最下層の気温と相対湿度を望ましい方向に導くことが可能であることが示された。また, 土壤水分を調整しなくとも結果的に望ましい土壤水分が得られる場合もあるが, それは陸面モデルの自然なフィードバックによるものではなく, むしろモデルの降水量に大きく依存することが示された。領域気候モデルの土壤水分の与え方, 特に初期状態の与え方は, 適当な値を与えることがどれほど重要であるか, その値をどのように与えることが可能か, の2点について議論されるが, 本研究はそれらの2点について重要な結果を示したといえる。

今後, 本研究の手法で得られた, 大気最下層に与えるフラックスを基準としてローカルに調整された土壤水分とそれによって生じる水文要素の分布 (例えば, 流出, 蒸発) が, 果たして現実的な水文循環を表現しているかどうかの評価が必要である。つまり降水や流量などの観測値を利用することによる, これらの妥当性の評価が次の課題である。逆に, フラックスを基準として調整された土壤水分から生じる各水文要素が妥当であれば, その陸面モデルは優秀なモデルであるとの評価も可能になるであろう。

すなわち今回の'推定'では, いわば

土壤水分 (W) $\Rightarrow$ 蒸発 (E), ボーエン比 $\Rightarrow$ 最下層気温・湿度 (T, RH)

という関係を逆にたどることにより土壤水分を求めた。しかし一方, 水収支の要請により

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E - R \quad (2)$$

として求められる W も存在し, こちら側から求められた W が'推定'による W と一致するかどうかの評価が今後の課題である。

謝辞 :

本研究は平成9年度文部省科学研究費特別研究員奨励研究費 (東京大学大学院: 鼎信次郎) ならびに日本学術振興会 未来開拓研究推進事業「環境負荷の影響評価と軽減」(代表: 東京大学生産技術研究所: 虫明功臣) の助成を受けて行なわれました。また国立環境研究所大気物理研究室の各研究員の協力を得ました。ここに記して深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) F.Giorgi, L.O.Mearns, C.Shields, and L.Mayer: A Regional Model Study of the Importance of Local versus Remote Controls of the 1988 Drought and the 1993 Flood over the Central United States, *J. Climate*, Vol.9, pp.1150-1162, 1996
- 2) Pielke, R.A., 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
- 3) 江守正多, 鶴野伊津志: CSU-RAMS による東アジア領域の気候再現実験 (その1), 気象学会 1997 年秋季大会予稿集, pp.91, 1997
- 4) Nakajima, T., 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*, Ed. T.Matsuno, I-3, pp.104-123, 1995
- 5) Uno, I., X-M.Cai, D.G.Steyn, and S.Emori: A simple extension of the Louis method for rough surface layer modelling, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.76, pp.395-409, 1995
- 6) F.Bouttier, J.-F.Mahfouf, and J.Noilhan: Sequential Assimilation of Soil Moisture from Atmospheric Low-Level Parameters. Part 1, *J. Appl. Meteor.*, Vol.32, pp.1335-pp.1351, 1993
- 7) F.Bouttier, J.-F.Mahfouf, and J.Noilhan: Sequential Assimilation of Soil Moisture from Atmospheric Low-Level Parameters. Part 2, *J. Appl. Meteor.*, Vol.32, pp.1352-pp.1364, 1993

(1997. 9. 30 受付)