

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(4) 気候変動に係わるフィードバックプロセスの詳細なモデル化に関する研究

① 大気・陸面過程におけるフィードバック機構の評価

研究代表者 国立環境研究所 鶴野 伊津志

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部 大気物理研究室 沼口 敦, 菅田誠治
(委託先) 東京大学生産技術研究所 虫明功臣, 沖 大幹

平成 6 年度～平成 8 年度 合計予算額 11,7190 千円
(平成 8 年度予算額 3,890 千円)

[要旨] 大気-陸地表面-土壌層から構成される大気-陸面プロセスモデルを、理想化した 3 次元の大気大循環モデル(AGCM)に組み込んで、地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。この大気-陸面プロセスモデルをもとの地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。その結果、陸地表面の流出過程を適切に表現することが大気の水循環を考える上でも重要であることが示された。

また、現実に近い境界条件を与えた AGCM に大気-陸面プロセスモデルを適用した結果を、オビ川、ミシシッピ川などの大河川における流域水循環・水収支のデータと比較・検討した。その結果、陸地表面の流出過程を適切に表現することが大気の水循環を考える上でも重要であることが示された。また、大気流域水収支法で推定された陸水貯留量と AGCM で計算された土壌水分+積雪水量とで、その季節変化が良く対応していることが見出された。

更に、領域スケールモデルを用い GCM のサブグリッドスケールの 大気・陸面プロセス、特に、短波、長波それぞれの放射の雲との相互作用の役割の重要性について詳しく検討した。

[キーワード] 大気大循環モデル, 大気-陸面系水循環, 流出過程, 流域水循環
領域気象モデル

1. 序

大気-陸面プロセスモデルを、理想化した 3 次元の大気大循環モデル(AGCM)に組み込んで、地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。さらに、より現実に近い境界条件を与えた AGCM に大気-陸面プロセスモデルを適用した結果を、オビ川、ミシシッピ川などの大河川における流域水循環・水収支のデータと比較・検討し、大気-陸面間の様々なフィードバックプロセスの効果について検討した。

この大気-陸面プロセスモデルを、理想化した 3 次元の大気大循環モデル(AGCM)に組み込んで、地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。また、非一様な土地被覆や地形によって熱的に駆動される循環を 領域スケールモデルによりシミュレー

トし、その結果をもとに 大気大循環モデルのパラメタリゼーションを検討した。

2 大気大循環モデルにおける大気-陸面系水循環の流出過程に対する感度実験

現在まで多くの AGCM の流出過程には、圃場容量のみを主なパラメータに持つ簡単なモデルであるバケツモデル(Manabe, 1969)が用いられてきた。一方、水文学の立場からは現実的な流出現象に基づいた様々な流出モデルが提案されており、これらはより多くのパラメータを含み得る。ここで、このような現実的な流出モデルが大気-陸面系の水循環に及ぼす影響が、圃場容量が等価なバケツモデルのそれと有意に異なるのかどうかは明らかではない。

ここでは、AGCM による感度実験を行ない、大気-陸面の相互作用プロセスを注意深く解析することにより、流出プロセスの違いによって大気-陸面系の水循環に有意な違いが生じることを示す。

(1) モデルと実験条件

東大気候システム研究センターと国立環境研究所で開発している AGCM (CCSR / NIES AGCM 5.4) を、空間解像度 T21L20 (水平解像度は約 5.6° 四方に相当、鉛直 20 層) で使用した。陸面水文過程は基本的にはバケツモデルを用いた。ただし、グリッドが不飽和の場合の流出を陽に扱い、バケツの深さ W_{FC} は 30cm、蒸発抑制の効く上限の水分量は $0.375 W_{FC}$ とした。

流出プロセスとして、地表からの流出を想定した流出 SFC、地中からの排水流出を想定した流出 DRN の 2 タイプを考え、流出量を以下のように与えた。

$$\text{地表流出(SFC)} \quad R = P \cdot (W/W_{FC})$$

$$\text{地中流出(DRN)} \quad R = R_0 \cdot (W/W_{FC})^n$$

ただし R は流出量、 P は降水量(正確には降雨量と融雪量の和)、 W は土壌水分量である。飽和時の地中流出 R_0 、パラメータ n (~ 3) は定数である。

実験は、南北一様・東西波数 2 の仮想的な海陸分布を設定して、海面水温の典型的季節変化を与えた理想的境界条件のもとに以下の 3 つの実験を行なった。それぞれについて 4 年間の積分を行なった。

表1 計算条件

実験 SFC	流出 SFC を用いた GCM ラン
実験 DRN	流出 DRN を用いた GCM ラン
実験 S_D	実験 DRN の降水、可能蒸発を与えて、流出 SFC を用いて地表水収支のみを解いた

S_D と DRN の差は、流出スキームの違いが地表の水循環に与える直接の変化を、SFC と DRN の差は、大気のフィードバックを含んだトータルの変化を表す。

(2) 結果

実験結果として、流出量(図1)と蒸発量(図2)の緯度-時間分布を、SFC と DRN, S_D と DRN のそれぞれの差について示す。流出の扱いを DRN から SFC に変えた直接の影響としては、高緯度の融雪期で流出量が減少して(図-1.b) 蒸発量が増加し(図-2.b), また熱帯の雨季でも流出量の減少が見られる(図-1.b)。一方、大気フィードバックによる効果は、高緯度の融雪期で蒸発量の増加を抑える方向に働く(図-2.a)。これは、蒸発量の増加により地表温度が低下し、可能蒸発量が減少するためである。また、熱帯の雨季の流出量の減少は、大気フィードバックにより強められている(図-1.a,b)。

(3) 地表面水収支の式による考察

地表面の水収支は以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial W}{\partial T} = P - f(W)E_p - R \quad (1)$$

ここで、W は(蒸発に有効な)土壌水分、P は降水、 E_p は可能蒸発、 $f(W)$ は蒸発効率、R は

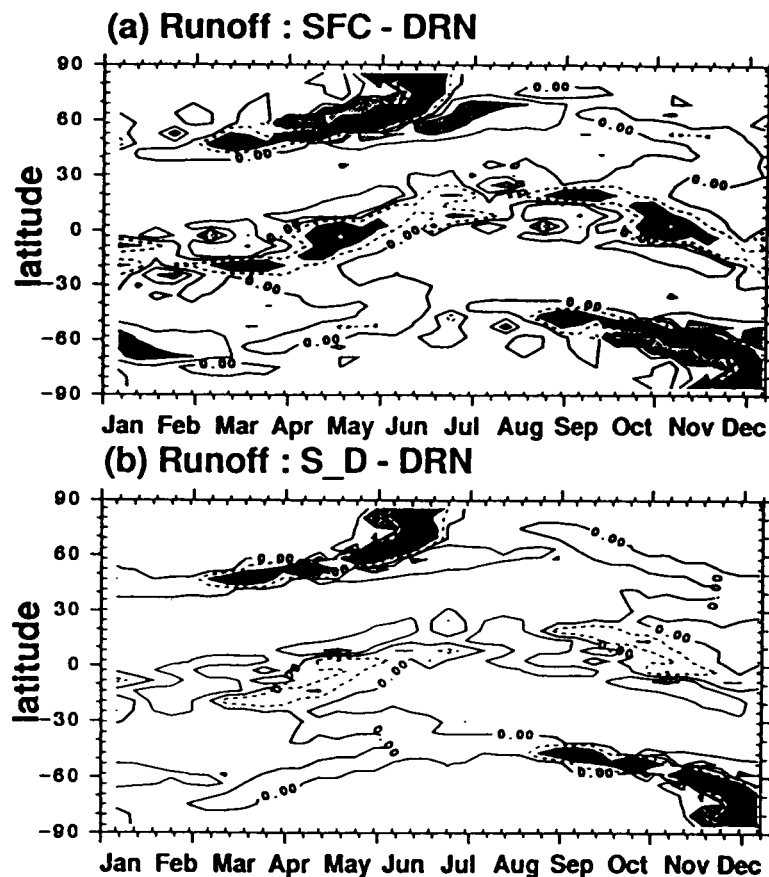


図1.a,b 流出量について、a がトータルの変化、b が地表水循環のみの直接的变化を表す。薄いハッチは 10mm/mon 以上、濃いハッチは -10mm/mon 以下の变化を表す。

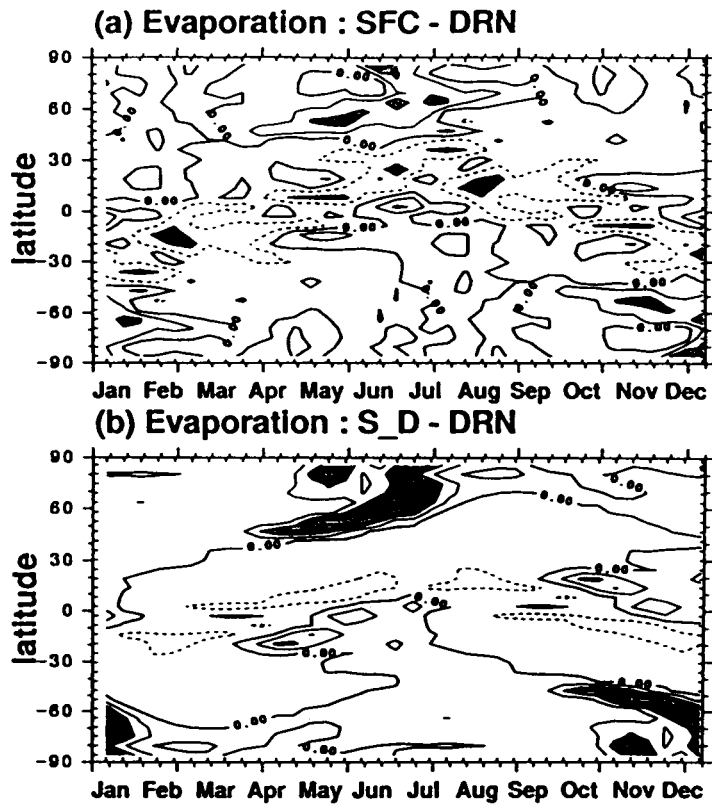


図2.a,b 図-1と同様で、蒸発量についての变化。

流出を表す。 $f(W)$ は十分湿潤な場合を除いて W の増加関数である。 Delworth and Manabe(1988) の説明によれば、 P はホワイトノイズ的な入力項と考えられ、 $-f(W) E_p$ がダンピング項として働く。 E_p が小さいほどダンピングが弱く、変動の時間スケールが長くなる。 R はバケツモデルにおいては P が E_p よりも平均的に小さければ重要でない。

図3に、(1)を線形化して求めた土壌水分アノマリの減衰時間スケールを流出 SFC と DRN のそれぞれの場合について示した。蒸発-降水のフィードバックを考慮に入れている。流出の違いにより特性が定性的に異なるのが判明した。

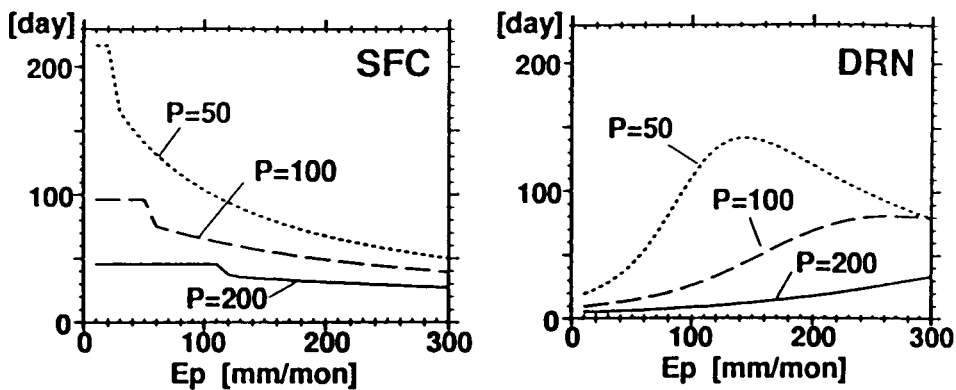


図3 地表面水収支の式から見積もった土壌水分アノマリの減衰時間スケール。降水量 P が毎月 50mm, 100mm, 200mm のそれぞれの場合について、可能蒸発量 E_p の関数として示した。

(4) 自然変動に関する解析と結果

GCM 実験で計算された土壌水分変動の時間スケールの目安として、土壌水分の1ヵ月ラグ自己相関を図4に示す。流出の扱いの異なる2つの実験で、土壌水分自己相関の時間空間的パターンに系統的な違いが見られた。

3. 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支の推定

気象・気候システムにおいて地表面水循環が重要な役割を持っていることが明らかになりつつあり、いかに適切に地表面水文過程を表現するかがAGCMによる水循環の予測精度に大きな影響を及ぼすことになる。ここでは、AGCMを用いた数値実験を行なって現実的な大気-陸面系の水循環を再現し、ヨーロッパ中期予報センターECMWFの4次元同化客観解析データ(1989-1992)などを用いた大気-流域水収支法による推定値(沖ほか、1995a)と気候学的に比較した(沖ほか、1995b)。

(1) モデルと実験条件

この研究では、東大気候システム研究センターと国立環境研究所で開発しているAGCMの旧version(CCSR/NIES AGCM 5.3.12a)を用いた。空間解像度をT21L20(水平解像度は約5.6°四方に相当、鉛直20層)とし、海面水温や地表面アルベド、海水厚さは気候値を与えて5年間積分した。

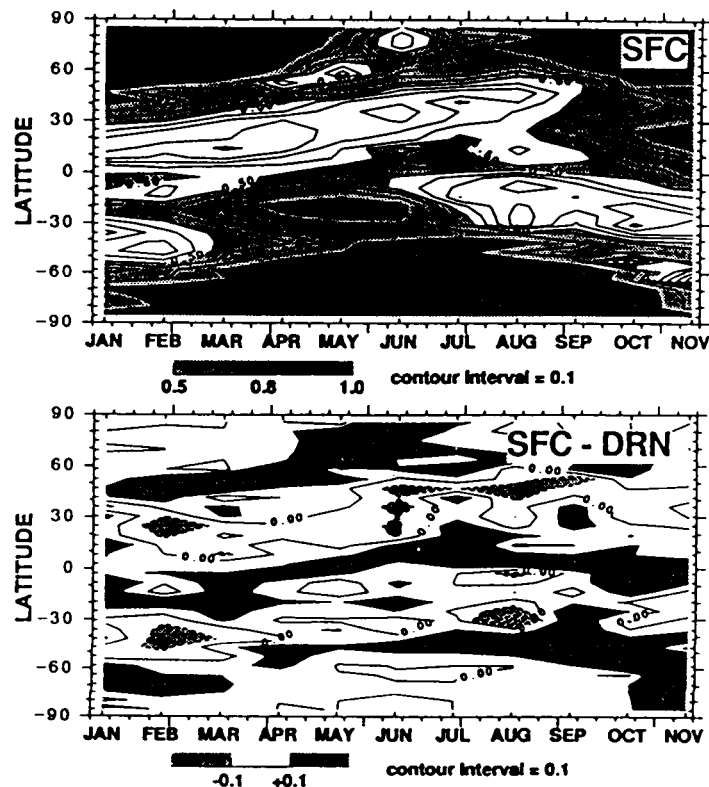


図4 GCM 実験結果から得られた土壌水分の1ヵ月ラグ自己相関。東西平均の緯度-時間分布。上は流出がSFCの場合、下は流出がSFCの場合とDRNの場合の差。それぞれ10年間の積分から作成した。

(2) 結果

例として、オビ川流域における水文量の季節変化を示す。大気-流域水収支法で得られた結果が図5である。大気-流域水収支法では陸水貯留量は相対値しか算定できないので、便宜上最小値を0としている。一方、AGCMによる結果を示したのが図6である。ちょうど積雪水量の値程度 AGCM で計算された量の方がやや大きい。陸水貯留量の季節変化は大気-流域水収支法で推定された値と極めて良く一致している。また、どちらの結果でも雪解けから夏にかけて降水量よりも蒸発量の方が多くなっている特徴が合致している。こうした良い対応は ミシシッピ川や ザイール川などでも同様であった。

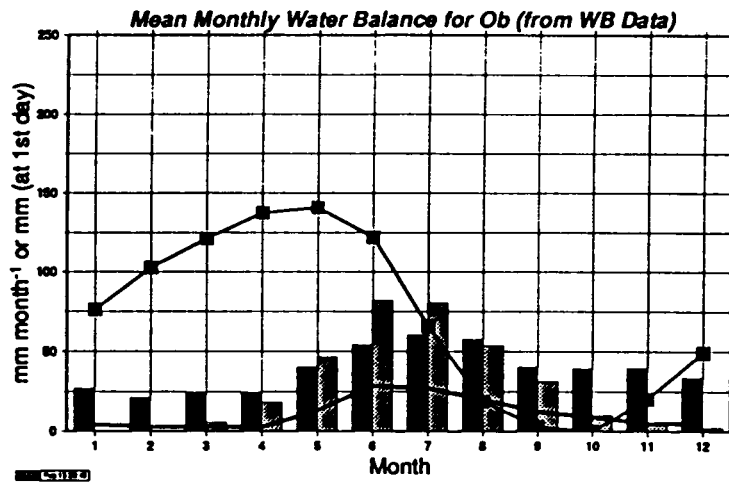


図5 観測値に基づいて算定されたオビ川流域の水収支の季節変化。左側の濃い色の棒が降水量、右側の薄い色の棒が蒸発量、マークのない太い実線が流出量、そして■でマークされた線が陸水総貯留量を示す。

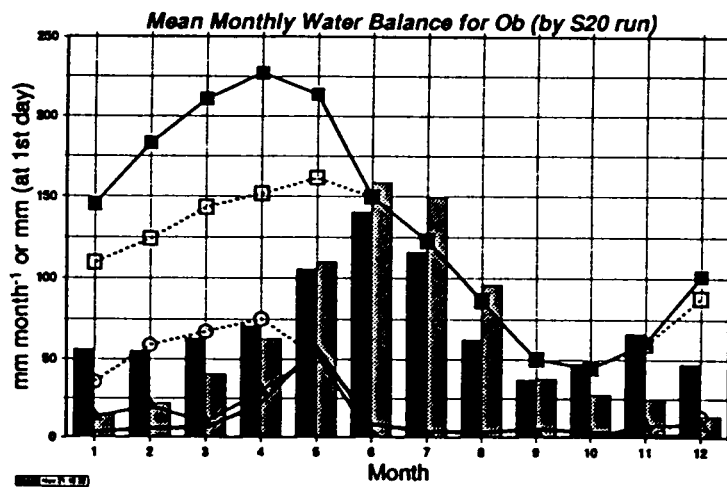


図6 AGCM によって計算されたオビ川流域の水収支の季節変化。□のついた破線が土壌水分貯留量、○のついた破線が積雪水量、そして△のついた実線が融雪量を示す。その他は図5と同じ。

4 領域モデルを用いた 乱流-放射-雲-地表面 相互作用の解析

非一様な土地被覆や地形によって熱的に駆動される循環を 領域スケールモデルによりシミュレートし、その結果をもとに 大気大循環モデルのパラメタリゼーションを検討した。特に、平坦な内陸上の(海陸風や地形の影響によらない)対流現象や、乱流、放射、雲および地表面の相互作用は、領域スケールの現象が大規模場に与える 影響を論じる上で今後重要な課題となると考えられる。このため、これらの過程を詳細に扱うことができる領域モデルを用いて、その相互作用の特性を理解するための実験を行った。

(1) モデルと実験

コロラド州立大学で開発された領域大気モデリングシステム (CSU-RAMS; Pielke et al., 1992)を用いた。モデルは圧縮性非静力学方程式系からなり、雲・降水の微物理過程コード(Kessler, 1969)、雲の効果の入った放射コード(Chen and Cotton, 1983) などが使用できる。乱流スキームは Mellor and Yamada(1982)のレベル 2.5、地表スキームは Tremback and Kessler(1985)の植生入り 10層モデル を用いた。計算領域は東西 100km、鉛直 10km の 2次元領域とし、格子間隔は水平には一様に 500m(200 グリッド)、鉛直には上層で 500m、下層ほど細かくとり最下層で 15mとした(40層)。

各実験ケースは FIFE で観測された 7月の温度・湿度プロファイルを 水平一様な初期値とし、午前 6時から 2日間計算した。風の初期値は水平・鉛直一様に 2m/s の西風を与えた。ここでは表 2 の 3 ケースの結果を解析した。

表 2 計算条件の設定

Case	Cloud	Cloud-Radiation Interaction	
	Micro Physics	Long wave	Short wave
MLS	○	○	○
ML	○	○	×
MS	○	×	○

(2) 結果と考察

全てのケースにおいて、1日目の午前 11 時ころ強い対流が起こり、高度 2-4km に雲が形成された。長波、短波とも雲を考慮する ケース(MLS, 図 7 a)では、雲により地表への短波放射が遮られ、地表の対流活動は休止する。一方、雲への短波加熱および長波冷却(雲上層)により雲内部で 対流活動が活発に起こるため雲は成長し、2日目も曇天が継続した。一方、長波のみ雲を考慮するケース(ML, 図 7 b)では、短波放射が地表へ届くため地表の対流活動は 2日間とも活発であった。雲上層での長波冷却により雲内部でも対流活動が起こり、雲は成長し、かつ境界層の成長により雲底は押し上げられている。短波のみ雲を考慮するケース(MS, 図 7c)でも地表の対流活動は休止する。雲内部での対流は昼間の短波加熱時に限られ、またこのとき加熱により 雲の消滅が起こる。このため、2日目には 30km ほどの晴れ間の領域が現れた。

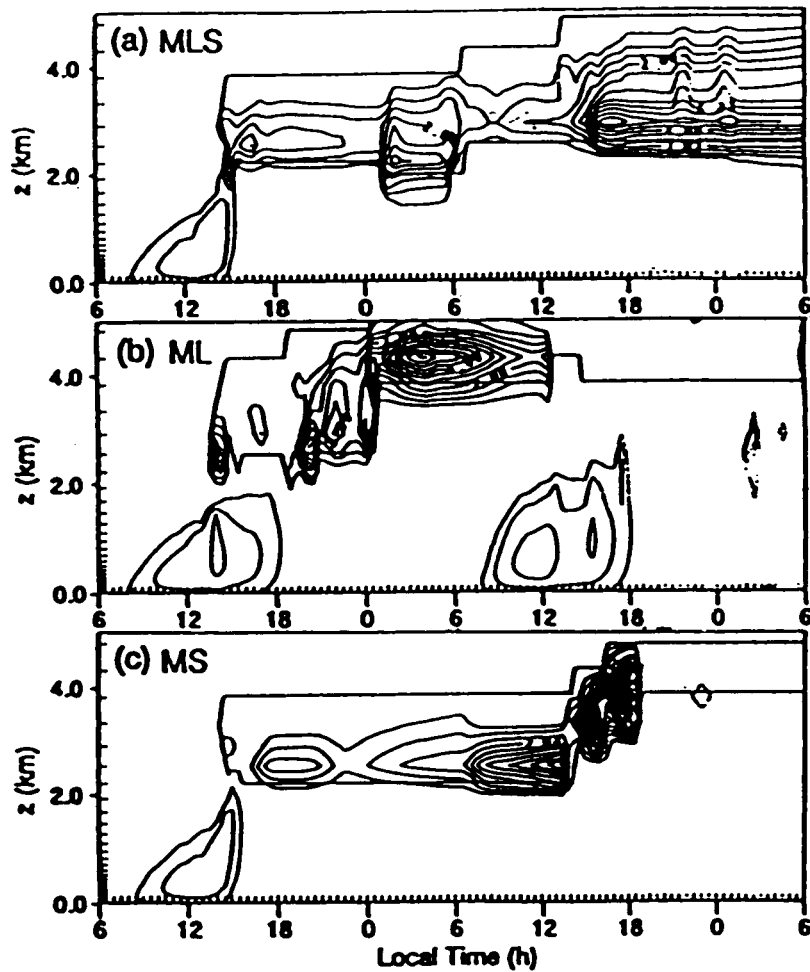


図7 東西平均した乱流エネルギーの高度-時間断面. コンター間隔は $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$. 太線は雲の存在領域(東西平均の雲水量が $1.0 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$ 以上).

これらの結果から、短波、長波それぞれの放射の雲との相互作用の役割の重要性が明確に示され、結果は初期値に大きく依存することが判明した。今後は、1ヵ月程度の長い時間スケールの相互作用を調べるために、気候値的なプロファイルを用いた長時間のシミュレーションを継続してGCMのサブグリッドスケールの現象が大規模場に与える影響の研究を継続する必要がある。

5 領域モデル実験における積雲対流と陸面過程の相互作用

大気陸面水循環の解明において、降水過程が陸面過程とどのように相互作用するかを調べることは重要な課題である。Anthes(1984)は、乾燥した土壌と湿潤な植生帯を交互に配置することによって、主に局地循環の効果により、対流性降雨が増加する可能性を示唆した。Yan and Anthes(1988), Chen and Avissar(1994)は、雲の微物理過程を含み個々の積雲対流を解像する領域モデルを用いた数値計算を行ない、これを支持する結果を得た。彼らの計算は、土壌湿潤度の水平分布を与えて、それに対する積雲対流の応答を1日程度の時間で調べるものであった。本研究では、彼らと類似の領域モデルを用いて数十日間の積分を行ない、土壌水分と積雲対流の間の自然に形成される相互作用を調べた。

(1) モデルと実験

コロラド州立大学で開発された領域大気モデリングシステム (CSU-RAMS; Pielke et al., 1992) を圧縮性非静力学系で用いた。雲・降水の微物理過程コード、レベル 2.5 乱流スキームを使用し、長期間の積分に耐えるために気候計算に用いられる放射コードを RAMS に接続して使用した。土壌温度は 11 層の熱伝導、土壌水分は 1 層の水収支で計算し、蒸発量はバケツモデルと同様に見積もった。系の水分量を保存するために流出過程は省略した。

計算領域は東西 500km (格子間隔 2km)、鉛直 30km (40 層) の 2 次元領域とした。側方境界は周期境界条件とし、1.0 m/s の西風を背景風として一様に与えた。すなわち、系は水平方向に閉じており、大規模または壮観スケールの擾乱を無視している点で理想化されている。日射は緯度 40°、4 月 1 日の条件で与えた。数十日間の積分で系の準平衡状態を求めたのち、それを水平に平均したものを初期条件に 60 日間の積分を行なった。

(2) 結果と考察

図 8 に地表温度と土壌水分の分布の時間変化の例を示す。個々の積雲対流は 20km 程度の限られた領域で降水をもたらすため、土壌水分量の分布には降水の履歴を反映した強いコントラストが生じる。しばらく降水が無く乾燥した領域では蒸発が抑制され、日中の地表温度が大きく上昇する。地表温度のコントラストは日中に海陸風的な局地循環を誘起し、乾燥域に上昇流、湿潤域に下降流をもたらす (図 9)。多くの場合、積雲対流はこの上昇流によって午後に引き起こされ、乾燥域に降水をもたらす。すなわち、

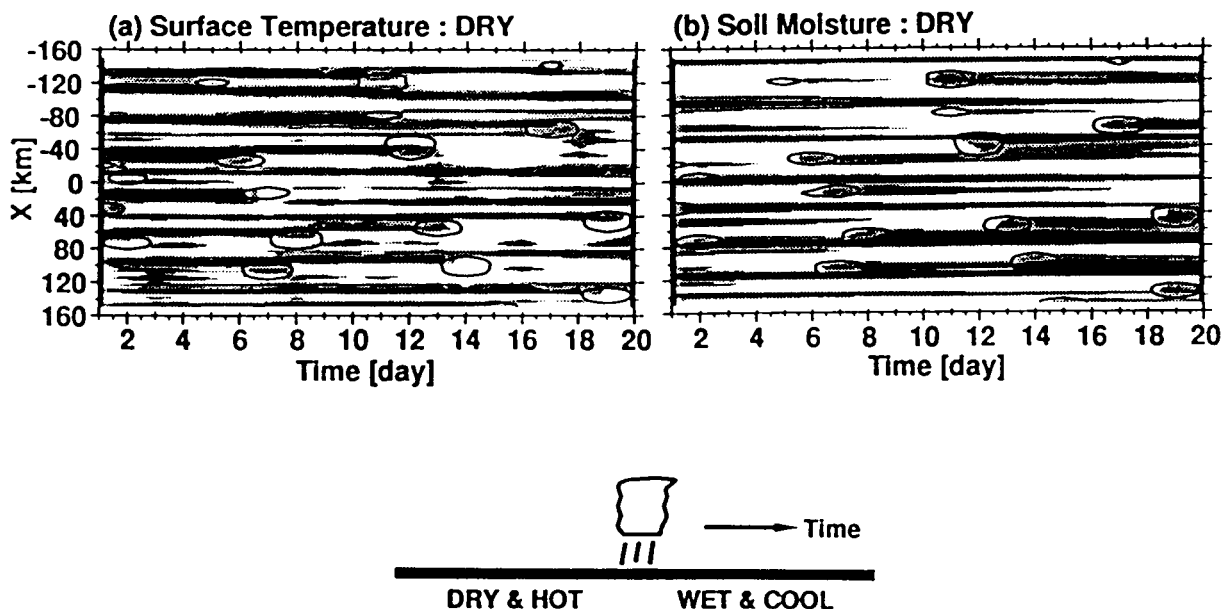


図 8 日平均した (a) 地表温度、(b) 土壌水分の分布の時間変化。濃くハッチしたところほど (a)では高温、(b)では湿潤の領域。コンターは 10mm/day の降水で、積雲対流イベントを表す。

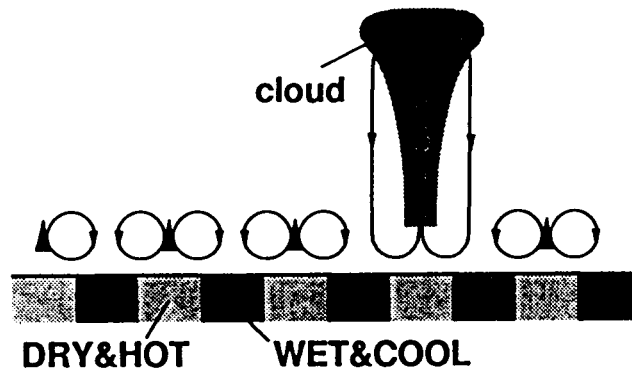


図9 陸面過程に起因する熱的局地循環により積雲対流が誘起される様子の模式図。

湿潤域では降水は抑制されるが、蒸発により徐々に乾燥化し、周囲より乾燥してくるとやがて降水がもたらされ再び湿潤化する。これが水平方向のコントラストを維持しながら繰り返される。このように、熱的局地循環を通じて、陸上の積雲対流活動と陸面過程が強く結びつく可能性が示唆された。

6. まとめ

大気-陸地表面-土壌層から構成される大気-陸面プロセスモデルを、理想化した3次元の大気大循環モデル(AGCM)に組み込んで、地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。この大気-陸面プロセスモデルをもとの地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。その結果、陸地表面の流出過程を適切に表現することが大気の水循環を考える上でも重要であることが示された。同時に、地表面の変化に対する大気を通したフィードバックプロセスのいくつかが明らかになり、大気-陸面系の水循環を考える場合にこれらのフィードバックプロセスの重要性が示唆された。

また、現実に近い境界条件を与えたAGCMに大気-陸面プロセスモデルを適用した結果を、オビ川、ミシシッピ川などの大河川における流域水循環・水収支のデータと比較・検討した。その結果、陸地表面の流出過程を適切に表現することが大気の水循環を考える上でも重要であることが示された。また、大気流域水収支法で推定された陸水貯留量とAGCMで計算された土壌水分+積雪水量とで、その季節変化が良く対応していることが見出された。この様に、全く性質の異なる手法に基づいて算定された結果が近い値を示すということは、これらの推定結果の信頼性の高さを示していると考えらる。

更に、大気-陸面間のフィードバックプロセスを詳しく調べるために領域スケールモデルを用いGCMのサブグリッドスケールの大気・陸面プロセス、特に、短波、長波それぞれの放射の雲との相互作用の役割の重要性について詳しく検討した。

7 参考文献

Anthes, R., 1984: Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions, *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 541--554

- Chen, F. and Avissar, R., 1994: Impact of land-surface moisture variability on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models, *J. Appl. Meteor.*, 33, 1382-1401
- Delworth, T. and S. Manabe, 1988: The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate, *J. Climate*, 1, 523-547
- Manabe, S., 1969 : Climate and the ocean circulation, I. The atmospheric circulation and hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 739-774.
- 沖大幹, 虫明功臣, 松山洋, 増田耕一, 1995a : 大気水収支と地球規模の水循環. 土木学会論文集, II-32, 13-27.
- 沖大幹, 虫明功臣, 江守正多, 沼口敦, 1995b : 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支推定. 水工学論文集, 39, 103-108.
- Pielke, R.A., W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, M.E. Nicholis, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland, 1992 : A comprehensive meteorological modeling system -- RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- Yan, H. and Anthes, R., 1988: The effect of variations in surface moisture on mesoscale circulations, *Mon. Wea. Rev.*, 116, 192-208

8 研究発表の状況

(論文発表)

- 光本茂記, 江守正多, 阿部 寛治, 1994 : 土壌モデルの地中下端境界条件が地表面における長時間の熱および水分交換過程に及ぼす影響-1次元大気境界層-陸面モデルを用いた感度分析-, 日本水文・水資源学会誌, 第7巻4号.
- 沖大幹, 虫明功臣, 松山洋, 増田耕一, 1995a : 大気水収支と地球規模の水循環. 土木学会論文集, II-32, 13-27.
- 沖大幹, 虫明功臣, 江守正多, 沼口敦, 1995b : 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支推定. 水工学論文集, 39, 103-108.
- Uno, I., Cai, X.-M., Steyn, D.G. and Emori, S.: A simple extension of Louis method for rough surface layer modeling. *Boundary-Layer Meteorol.* 76, 395-409, 1995.
- S. Emori, K. Abe, A. Numaguti and S. Mitsumoto 1996 : Sensitivity of Simulated Water Cycle to Runoff Process with Atmospheric Feedback, *J. Met. Soc. Japan*, 74, 815-832.

(口頭発表)

- 江守正多, 沼口敦, 光本茂記 : GCM の流出過程の違いがグローバルな水循環に及ぼす影響, 日本気象学会 94 年秋期大会.
- 江守正多, 沼口敦, 光本茂記 : GCM における大気-陸面系水循環の流出プロセスに対する感度, 日本気象学会 95 年春期大会.
- 沖大幹, 虫明 功臣, 江守正多, 沼口敦 : 大気-流域水収支法および大気大循環モデルによる陸水貯留量季節変化の推定, 日本気象学会 95 年春期大会.
- 江守正多, 沼口敦, 光本茂記 : 広域の流出特性が土壌水分の自然変動に及ぼす影響, 日本気象学会 95 年秋期大会.
- 江守正多, 鶴野伊津志 : 領域モデルを用いた 乱流-放射-雲-地表面 相互作用の予備的解析, 日本気象学会 96 年春期大会.