

現存植生分布と潜在植生分布を用いた 大気大循環数値実験

NUMERICAL STUDY USING AN ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION
MODEL WITH AN ACTUAL OR A POTENTIAL VEGETATION DISTRIBUTION

熊倉俊郎¹、田村真紀子²、木本昌秀³

Toshiro KUMAKURA, Makiko TAMURA, Masahide KIMOTO

¹正会員 理修 長岡技術科学大学環境・建設系助手 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²工学 長岡技術科学大学大学院環境システム工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

³Ph.D. 東京大学気候システム研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)

Interactions between the atmosphere and the biosphere are important for climate studies. We investigate changes of an atmospheric condition as a result of changing vegetation distribution using an atmospheric general circulation model. Two types of vegetation distribution become available recently. The first is an actual vegetation distribution, which was obtained from remote-sensing data (Kajiura et al.). The second is a potential vegetation distribution, which was obtained by natural vegetation models (Box et al.) that estimate vegetation type based on local climatological conditions. Two boundary conditions are prepared based on these distributions and each numerical simulation is conducted. It is found that the difference in vegetation has significant impact on the simulated climate. While regions covered with more amount of vegetation mainly tend to have more precipitation, several regions become dry climate in spite of abundance in vegetation. It is suspected out that the model's deficiency in representing moisture transport by transient weather systems could be a reason for such discrepancy.

Key Words : *land-atmosphere interaction, vegetation, AGCM, climate change*

1. はじめに

大気陸面相互作用の研究では、植生という生物圏を交えて議論されなければ、地表面からの各種フラックスの算定や気候が陸面に及ぼす影響を正しく扱うことはできない。現状では気候変化に伴う植物の成長や植生種の占める領域の変化などを正しく扱うことは難しい。しかしながら近年は衛星計測技術の発展に伴い地表面の様々な量が計測されるようになり、極軌道衛星の利用により全球分布も得ることが可能となってきた。Normalized Difference Vegetation Indexと呼ばれる植生を表す指標も全球に亘って得られるようになってきた。植生に対する理解も深まる一方で、地表面近傍の大気気象要素の観測も長期間蓄積されてきており、それらの気象要素の気候値から、短期の気象ストレスや人間が及ぼすストレスのない状態でその場所に本来あるべき潜在的な植生種の推定が行われるようになってきた。これら、独立に導出された現存植生分布と潜在植生分布を比較してみると、

乾燥域の広さの違い、熱帯雨林の広さの違いが明瞭に現われている。人間活動は気候を左右していると言われていたが、地球温暖化の評価を行なう数値実験において植生変化の影響はまだ十分に考慮されていない。本研究では人間活動によるストレスを含む植生分布と含まない分布を使用した大気大循環モデル(AGCM)による数値実験を比較することにより、植生分布の相違が気候に与える影響の評価を行うことを試みる。

2. 植生分布と数値実験の境界条件

(1) 現存植生分布

本研究で用いた現存植生分布はTateishi and Kajiura¹⁾による。1987年の週間集計NOAA GVI(Global Vegetation Index) データから12ヶ月毎の月平均NDVI データセットを作成し、年間の変動傾向を統計的にクラスター化することによって植生種として分類したものである。水域を除いて13種類に分類され、極域を除いた

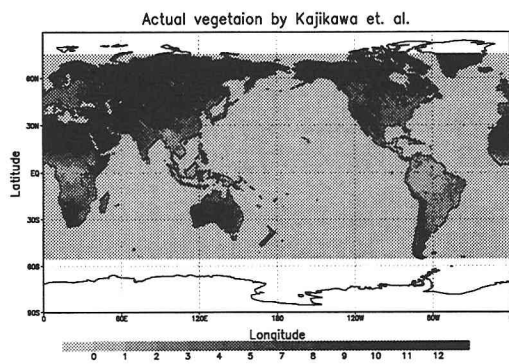


図1 Kajiwaraらによる現存植生分布。網がけの数値は図中に示した。

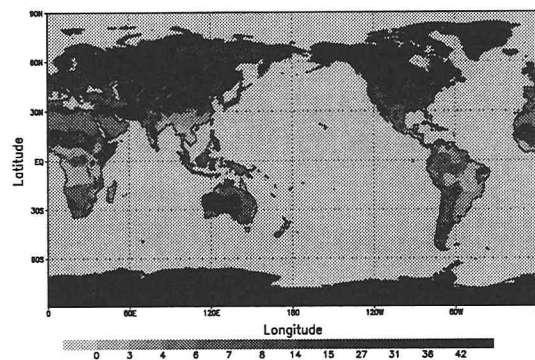


図2 Boxらによる潜在植生分布。網がけの数値は図中に示した。

表1 現存植生分布に使われている植生種別と年平均粗度(m)とアルベド

#	type of vegetation	roughness	albedo
0	water	0.0001	0.07
1	tropical rain forest	2	0.11
2	savanna	0.5	0.17
3	cold deciduous forest without evergreen	1.5	0.18
4	cold deciduous forest with evergreen	1.6	0.18
5	monsoon forest	0.75	0.15
6	savanna or grassland	0.3	0.16
7	grassland	0.2	0.25
8	Mediterranean scrub	0.75	0.12
9	evergreen needle leaf forest	1.7	0.15
10	cold deciduous woodland	1	0.17
11	scrub or steppe or semi-desert	0.3	0.28
13	desert	0.02	0.3

全球を緯度経度一定8.6°のグリッドサイズで求めている。分布図を図1に示す。分類番号、分類種別、年平均粗度、年平均アルベドは表1に示す。粗度、アルベドの導出については、2.(3)に記す。

(2) 潜在植生分布

潜在植生分布はBox²⁾により作成された分布を用いる。Walter and Lieth(1960-1967)、Willmott et al.(1981)、NCDC(National Climatic Data Center)による長期に亘る3000地点の月別気温、降水量データとWalter and Lieth(1960-1967)、Muller(1982)による900地点の最低気温データに基づき、植生種を生息可能な気候と合わせることより決定し、更に似た植生のグループ化などを経て地表面を14種に分類したものである。全球を緯度経度一定30°のグリッドサイズで求めている。分布図を図2に示す。分類番号、分類種別名、年平均粗度、年平均アルベドは表2に示す。粗度、アルベドの導出については、2.(3)に記す。

(3) 境界条件の作成

2種類の植生分布図と数値実験に使われている格子

表2 潜在植生分布に使われている植生種別と年平均粗度(m)とアルベド

#	type of vegetation	roughness	albedo
0	water	0.0001	0.07
8	tropical rain forest	2	0.11
3	raingreen/semi-evergreen forests /woodlands	1.9	0.11
4	evergreen broad-leaved forests, summergreen broad-leaved forests and woods	1.9	0.11
36	needle-leaved evergreen forests/woods	1.7	0.15
14	summergreen needle-leaved (larch) forests/woods	1.5	0.18
10	subhumid woodlands/scrub	1.5	0.18
7	shrublands (seasonal /evergreen)	0.3	0.28
15	grasslands	0.2	0.25
31	tropical alpine vegetation	2	0.11
42	tundra and related krummholz/dwarf-scrub	0.3	0.17
27	semi-desert scrub	0.04	0.2
6	desert (extreme)	0.02	0.3
63	ice desert	0.02	0.75

間隔は全て異なる。また、植生分布図間には分類種別の相違がある。数値実験に使われる解像度に合わせるために、モデルグリッド(縦横約5.6度)中に含まれる植生種中で最も多くの面積を占める植生を選び、リサンプリングを行った。数値実験の境界条件となる物理量のうち植生の相違から生まれる量を地表面アルベドと粗度と考える。しかし両植生分布では、植生種とそれらの物理量の対応に関する規定はない。そこで、Matthews³⁾により分類された32種の植生分類と、月別アルベドや年平均粗度との間の対応表を使用することとした。両植生分布の植生種分類とMatthewsの分類は一致しておらず、かつ、Matthewsの分類は細目に亘るため、複数種の選択が可能である。そこで、それぞれの分類種に近い分類を植生名称から類推することにより一対一にMatthewsの分類を対応させた。それにより分類種を表す植生番号の分布を作り直し、そこから月毎のアルベド分布と年間の代表的粗度分布を作成し、大気大循環数値実験の境界値とした。

3. 全球数値モデルの概要

東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)が共同作成したCCSR/NIES AGCMを使用した。基本的な枠組みはNumaguti⁴⁾、物理過程の詳細はNumaguti et al.⁵⁾、放射過程の詳細はNakajima et al.⁶⁾による。地表面過程の流出過程はKondo⁷⁾の新バケツモデルを採用しており、バケツの深さは植生状態に関係なく0.2mとしている。また、降雪、融雪は考慮されている。湿潤対流調節にはArakawa-Schubertスキームを使用している。本実験ではT21(全球を64×32のグリッドに分割することに相当)の水平解像度、20層の鉛直解像度により実験を行った。初期条件には等温静止大気を用い、境界条件にはアルベド、粗度として前述の植生分布毎の分布を、他に海面温度と海水分布の気候値を与えた。また、土壌水分量は予報変数とした。

4. 数値実験

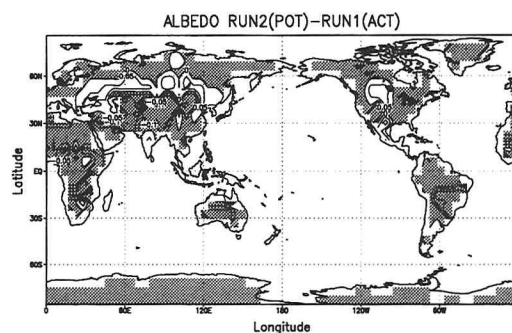
いずれの実験も11モデル年間実験し、地表面過程が季節サイクルに落ち着いた2年目から10年間の月別平均値を用いた。いずれの10年平均場も2年目から6年目の5年平均場とほぼ同様の結果であった。主たる実験は2ケースで、RUN1(ACT):現存植生分布を用いて導出した境界条件を使った実験と、RUN2(POT):潜在植生分布を用いて導出した境界条件を使った実験である。図3に両者の相違点である年平均アルベドと粗度のRUN1とRUN2の差の分布を示す。主たる実験の結果から、他の実験をさらに3ケース行ったが、それは次章で示す。

5. 結果

(1) 全球的な傾向

従来の植生生育地域の区分には気温や降水量の月平均気候値の極値などが使用され、植生と気候の関連を示すのに適していると考えられる。そこで図4に最暖月の気温分布のACTとPOTの差を、図5に最多雨月の降水量の差を示す。POTのアルベドがACTよりも大きく評価された領域で高温、粗度が大きく評価された領域が多雨な傾向が見える。ここでは、植生の繁茂の度合を表わす粗度と降水量の関係を見るために、全陸域の平均値差を引いたPOTとACTの粗度差と最多雨月降水量差の関係を図6に示す。散布の内訳は、粗度差0mに陸地グリッドの約5割が含まれ、第1, 3象限に約3割、他が約2割である。粗度差が1m以上のグリッドでは多雨、-1m以下のグリッドでは少雨の方向にシフトしている。全体でも同様な傾向が見られ、これは植生がより繁茂した領域では全陸地平均と比較して相対的に多雨になったことを示しており、降水量と植生の相互関係として妥当な応答結果と言える。第

(a)



(b)

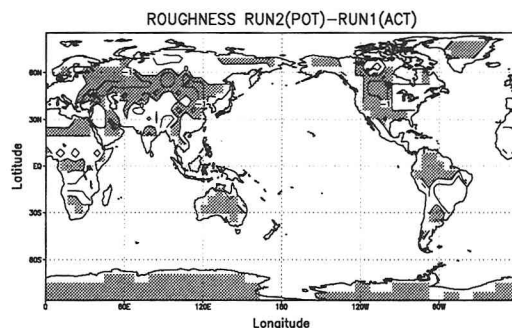


図3 RUN1(ACT)とRUN2(POT)の差。(a)は年平均アルベドで等値線は0.05毎、(b)は年の年平均の代表的粗度(単位はm)で等値線は1毎に引いている。負の領域は網がけした。

2象限に含まれるグリッドは全球に疎らに分布しているが、第4象限に含まれるグリッドは、疎らな分布はあるものの中央アジアからチベット、北シベリア、北アメリカ五大湖周辺に分布している(図は示していない)。これらは植物が繁茂する傾向で、かつ最多雨月降水量が減少した領域と言える。これらの領域は年間降水量が全球的に見て特に豊富な領域ではなく、降水量が減れば植生も少なくなる傾向を持つと考えられ、植生変化と実験の気候変化が非整合である。そこでこの応答の妥当性を検討する。水循環の変動は、陸面状態変化による変動と移流などによる大気との相互作用による変動の2つの要因が考えられる。それぞれ独立ではないが、まず前者の陸面状態変化の影響を調べるため、問題の領域の一つである中央アジア近傍の陸面状態を変えて降水量の変動を見る。

(2) 陸面状態の寄与

次の3ケースの実験を行った。一つは、図4に見られる高温化により、局地的な土壌水分量が保持されず降水量が減る可能性を考えた実験である。高温化はアルベドの減少に伴うと考えられ、境界条件のアルベドを変更した実験(以下RUN3(POTa)と呼ぶ)を行なった。植生分類と物理量を対応させる際の自由度の範囲内で最もアルベドの大きい植生種を選ぶことにより、中央アジア近傍を代表する潜在植生分布の半砂漠雑木を、Matthewsの短い草地から乾燥低木地に変更した。これより該当グリッドでは年平均アルベドが0.1、粗度は0.28m増加している。他

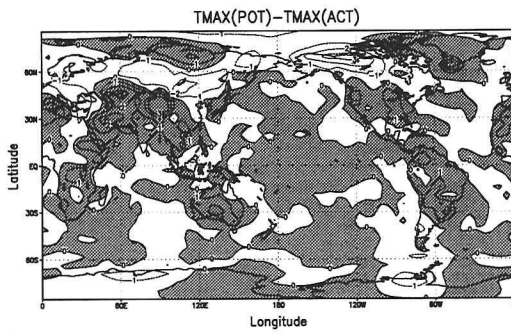


図4 最暖月の月平均気温の差 (RUN2(POT)-RUN1(ACT))。単位はKで1K毎に等値線を引き、正の領域に網がけをしている。

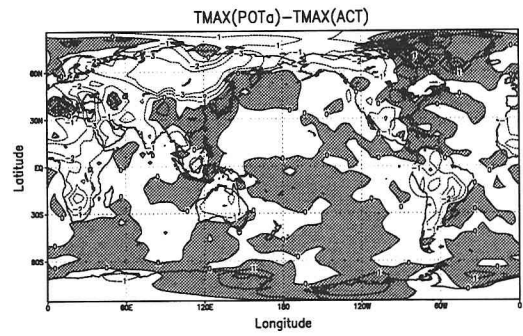


図7 最暖月(a)の月平均気温の差 (RUN3(POTa)-RUN1(ACT))。単位はKで1K毎に等値線を引き、正の領域に網がけをしている。

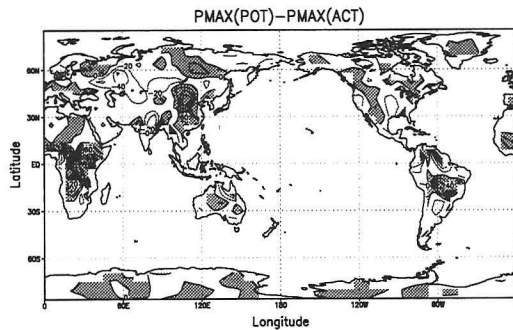


図5 最多雨月の月間降水量の差 (RUN2(POT)-RUN1(ACT))。20mm毎に等値線を引き、正の領域には網がけをしている。

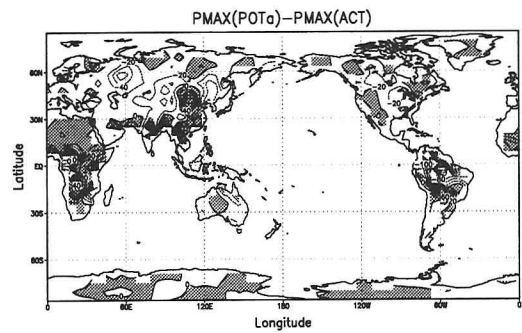


図8 最多雨月(a)の月間降水量の差 (RUN3(POTa)-RUN1(ACT))。(a)は20mm毎、(b)は5mm毎に等値線を引き、正の領域には網がけをしている。

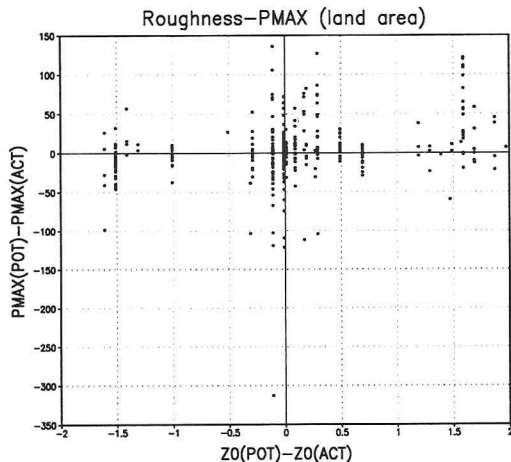


図6 陸面におけるRUN2とRUN1の粗度差とRUN2, RUN1の最多雨月降水量差の散布図。粗度の単位はm、降水量の単位はmm/month。いずれもRUN2の値からRUN1の値を引いたもの。

の2ケースは、水循環を活性化させる目的の実験で、一つは土壌水分の蒸発効率を変更した実験、もう一つは初期のバケツの深さを1mとして土壌から大気への水の供給を十分にし、2年間で0.2mまで浅くした実験である。図7、図8にPOTaの実験結果を示す。中央アジア近傍の気温は低くなったが、降水の変化がほとんどないことがわかる。他の2ケースの実験は、気温、降水量の両極値ともPOTの結果と全球的にはほぼ同様の分布となった(図は示していない)。従って本モデルでは、中央アジア領域の

陸面状態の変化は降水量減少に多く寄与していない可能性が高い。その場合ACT、POT間の分布の相違が重要と考えられるため、中央アジア近傍での大気の流れと土壌水分量の変化から大気との相互作用による寄与を検討する。

(3) 大気との相互作用による寄与

図9に中央アジア付近の年平均土壌水分量のACTとPOTとの差を示す。POTでは北緯40度以北で土壌水分量、降水量の減少が見られる。アラル海東部(a)では現存植生分布は短い草地で、潜在植生分布は長い密な草地である。北緯40度以南の中央アジア(b)では現存植生は砂漠または短い草地、潜在植生は草地であるが、双方の実験ともに乾燥化しており、土壌水分量の差も降水量の差も小さい。中央アジア近傍ではPOTの地表付近の気温がACTより高い傾向があること、またPOTでは降水量が減り、より乾燥化していることを考え、エネルギー収支を見るために領域(b)を、大気と陸域の水の挙動を見るために領域(a)を選んだ。まず、領域(b)について、図10に、北緯30度から40度、東経60度から80度のACT、POT、POTaの平均地表面フラックスを示す。領域平均の年平均アルベドはACTが0.29、POTが0.18、POTaが0.23である。図からエネルギー収支は粗度、アルベドの相違により変化しており、主に顕熱フラックスと長波放射収支の変化で短波放射収支の違いを調整している。潜熱フラックスは長波放射収支や顕熱の年間変動幅の1/2程度かそれ以下であり、

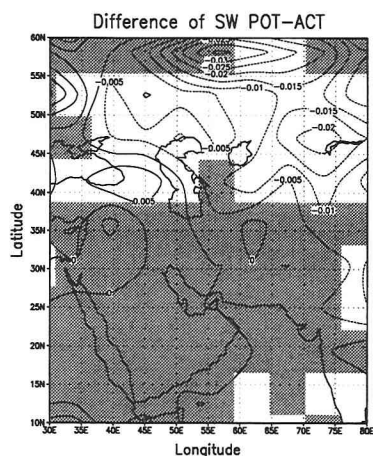


図9 中央アジア近傍での年平均土壌水分量の差 (RUN2 (POT)-RUN1 (ACT))。0.005m毎に等値線を引き、網がけはRUN2の方が降水量が多い領域を示す。

RUN間の差も小さく、エネルギー収支変化に占める潜熱フラックスの役割は小さい。図11にNCEP/NCARのよる大気再解析データ⁸⁾とACTから求めた年平均水蒸気フラックスと北緯35度での年平均降水量経度分布を示す。数値実験では月以下の時間スケールの擾乱による水蒸気フラックスが小さく見積もられ、降水が起きにくくなっており、十分な土壌水分を得ることができず、地表面潜熱フラックスの役割が過小評価されたと考えられる。次に領域(a)について、東経60度から80度までの領域を平均した緯度-時間の図を図12に示す。POTの図の北緯45度付近で5月に土壌水分減少を示している。また、POTは降水量が年を通してACTより少なく、降水量と蒸発量の差P-Eでは蒸発量が11月から5月まで多く、乾燥化傾向と一致している。また、水蒸気フラックスの平均場は、POTは5月までは収束傾向が弱く、擾乱からの寄与も2月から4月にかけて発散傾向が強く、これらが降水量の減少と地表面蒸発量の増加と一致している。この降水量の減少が図5に現われたと考えられる。図12の右にはPOTa-ACTの結果を示す。5. (1)の結果ではPOTaはPOTとほぼ同様の最多雨月降水量を示したが、5月の土壌はPOTよりも乾燥化していない。4月の擾乱からの寄与による発散傾向の強まりとそれに伴うP-Eの負の期間はPOTaにもPOTと同様だが、北緯45度付近で3月から5月にかけて擾乱からの寄与の発散傾向の弱まりが見られ、それに伴う降水量の増加で、5月の地表面の乾燥化を押えている。

6. 結論

現存植生分布と潜在植生分布から導出した粗度、アルベドを境界条件に用いた二つの実験の結果に差異が現われた。全球的には、植生が繁茂する傾向に変化した領域では降水量が増し、繁茂しない傾向の領域では降水量が減る傾向がある。繁茂したが降水量が減る傾向の領域が

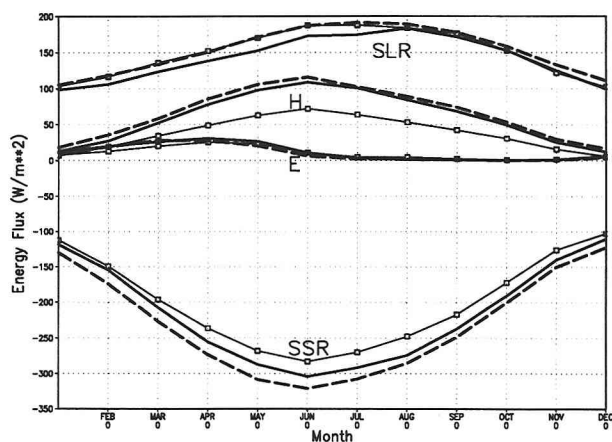


図10 北緯30度から40度、東経60度から80度の領域での平均地表面フラックス。SSRは短波放射収支、Eは潜熱フラックス、Hは顕熱フラックス、SLRは長波放射収支。空き四角付きの細実線がRUN1、太破線がRUN2、太実線がRUN3の結果。

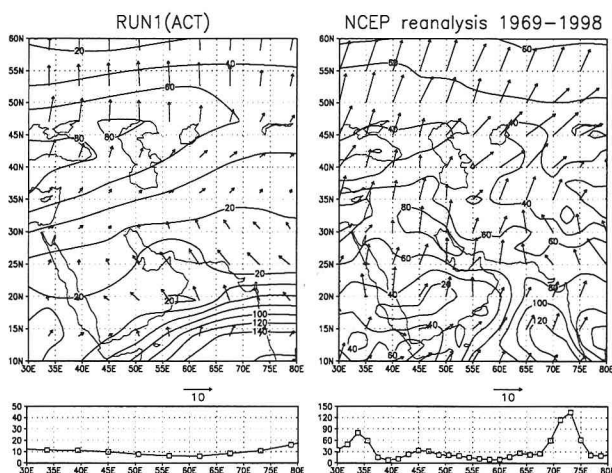


図11 上図は年平均水蒸気フラックスの大きさを等値線で示し、擾乱による年平均水蒸気フラックスを矢羽で示した。単位はW/m/s。下図は北緯35度の年平均降水量で、単位はW/m²。左はRUN1 (ACT)の結果を示し、右はNCEP再解析データの30年平均値を示した。

中央アジアからチベット、シベリア北部、五大湖周辺に分布している。これらの領域は降水量が特に豊富ではないことから、潜在植生分布の実験では現存植生の実験よりも少雨となった結果は、現存植生より潜在植生がより繁っている状態と整合していないと考えられる。中央アジア近傍での解析から、降水量の減少傾向は当領域の局地的な陸面状態の変動よりも、大気による水蒸気輸送の季節変化過程に因ることがわかった。特に春先の降水量が、引き続き季節の土壌水分量を左右する。モデルでは月以下の時間スケールの擾乱による水蒸気輸送を過小評価する傾向があり、これが植生変化に対するモデルの応答を歪めている可能性がある。より現実的な水収支を実現するモデルでの再検証が必要と考える。

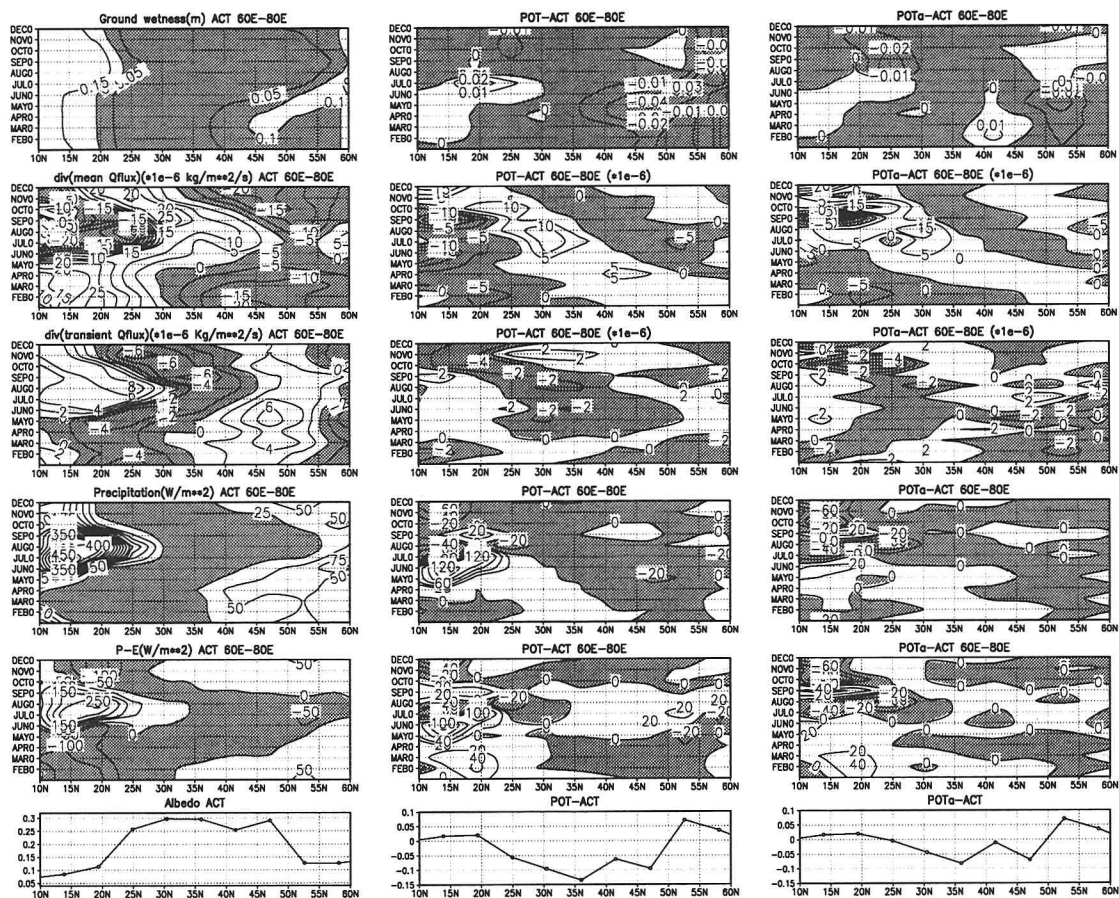


図12 上から土壌水分量、平均水蒸気フラックスの発散、擾乱の水蒸気フラックスの発散、降水量、降水量と蒸発量の差、アルベドを示す。左はRUN1 (ACT)、中央はRUN2 (POT) - RUN1 (ACT)、右はRUN3 (POTa) - RUN1 (ACT)の値を示す。いずれも北緯60度から80度までの平均値で、横軸は月、縦軸は緯度。それぞれの値は図中に示されており、等値線はそれぞれの図毎に等間隔である。RUN1では土壌水分は0.1以下、降水量は25以下、その他は中央と右の図も含め、いずれも負の領域に網がけした。

謝辞：本研究は文部省科学研究費特定領域研究『衛星計測』の補助を受けた。植生データの提供を受けた千葉大学環境リモートセンシング研究センターの本多嘉明助教授、有益な助言を頂いた住明正教授、データと助言を頂いた東京大学気候システム研究センターの沈学順助手に謝意を表す。

参考文献

- 1) Tateishi, Ry. and K. Kajiwara: Global Land Cover Classification by Phenological Method Using NOAA GVI Data, *The Asian-Pacific Remote Sensing Journal.*, Vol.4, No.1, 1991.
- 2) Box, E. O.: Global Potential Natural Vegetation: Dynamic Benchmark in the Era of Disruption., *Proceedings of the 8th Toyota Conference*, 1994.
- 3) Matthews, E.: Vegetation, Land-Use and Seasonal Albedo Data Sets: Documentation of Archived Data Tape, *NASA Technical Memorandum 86107*, 1984.
- 4) Numaguti, A.: Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones: Significance of the distribution of evaporation., *J. Atmos. Sci.*, **50**, pp.1874-1877, 1993.
- 5) Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, A. Sumi: Development

of an atmospheric general circulation model., *Reports of a new program for creative basic research studies. Studies of global environment change with special reference to Asia and Pacific regions*, **I-3**, pp.1-27., 1995.

- 6) Nakajima, T., M. Tsukamoto, Y. Tsusima and A. Numaguti: Modeling of the radiative process in a AGCM., *Reports of a new program for creative basic research studies. Studies of global environment change with special reference to Asia and Pacific regions*, **I-3**, pp.104-123., 1995.
- 7) Kondo, J.: A new bucket model for predicting water content in the surface soil layer, *J. Japan Soc. Hydrol & Water Resour.*, **6**, pp.344-349., 1993.
- 8) Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne, and Dennis Joseph: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the AMS*, **77**, pp.437-471, 1996

(1999.9.30受付)