

大気大循環モデルにおける 大気陸面過程相互作用の比較分析

COMPARING THE DEGREE OF LAND-ATMOSPHERE INTERACTION IN AN ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL

山田 朋人¹・鼎 信次郎²・沖 大幹³

Tomohito YAMADA, Shinjiro KANAE, and Taikan OKI

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³正会員 博士(工学) 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)

The extent of the coupling strength between the land and the atmosphere controls the behavior of the atmospheric processes. Precipitation is induced by the soil moisture variation. K02¹⁾ focused on the coupling strength between four AGCMs. It is mentioned that the coupling strength has much model dependence. The authors are participating the GLACE(Global Land-Atmosphere Coupling Experiment) which follows the K02 experiment. Before undertaking the GLACE experiment, it is conducted the K02 experiment to compare or evaluate our AGCM(CCSR/NIES) result with K02 results. As a result, the coupling strength on the precipitation process is much weaker than the latent heat flux. This is the same characteristics in three of four models in other K02 participants. Moreover, the coupling strength on the latent heat flux shows the relatively high value over the Central Eurasia or the North America.

Key Words : land surface-atmosphere interaction, precipitation, latent heat flux, GCM, GLACE

1. はじめに

気候変動は主に大気、陸面、海洋の3過程間のエネルギーの相互作用によって駆動されている。このうち陸面過程が如何にして降水生成に寄与しているのか、これは現在の気候研究に向けられた重要な課題である。陸面過程には土壌、植生等の多種多様な性質をもった要素が混在しており、それらの要素が振る舞う時間スケールは様々であるため大気過程に与える陸面過程の影響と言っても、それは主にどの要素によって引き起こされているのか言及しなければならない。例を挙げれば、地表面上やキャノピー上の水分は素早く蒸発し降水生成に影響を与えるため、これらの変化は大気過程に短期スケールで影響を及ぼす要素と言える。一方、大気過程の変化に長期スケールで影響を及ぼす陸面過程の要素は土壌深部の土壌水分量変化である²⁾とされている。また長期スケールにおいては初期値依存度が低いために大気側の初期値を詳細に計測、推定することよりも気候変化に長い履歴効果を与える陸面や海洋の要素を正確に把握しなければならない²⁾。結局のところ、陸面条件の詳細な把握によって数ヶ月程度の降水予測精度が向上するか否かということである。

これまで大気過程に与える陸面境界条件の影響に焦点を当てる必要性について述べた。ここで陸面境界条件が大気過程に与える影響、即ち大気陸面過程相互作用に関する既存の研究を紹介する。土壌水分の時定数を予め決めておき夏における大気陸面相互作用の持続性に着目した研究³⁾が成された。また土壌水分アノマリ(時間的・平均値からの差)は大気によってコントロールされていると、AGCM-Biosphere 結合モデルと簡略化された数値モデルを用いた研究によって述べられている⁴⁾⁵⁾。

気候予測等の数値計算を行う上で初期値境界値問題が存在する。一般に短期予測には初期値依存度が高い一方で、長期予測には境界値による依存度が高いと考えられている。この気候モデルにおける大気過程に対する陸面境界値の依存度に着目したのがKoster2002(以降、K02)である。K02の実験方法については2章で詳細に説明する。K02には4つの大気大循環モデル(以降、AGCM)が参加し、陸面境界条件が降水、蒸発過程に与える影響に関しモデル間の比較・検討が行われた。この研究により大気過程に与える陸面境界条件の影響度はモデル間に大きな差が存在することが分かった¹⁾。このK02を発展させた研究プロジェクトとしてGLACE⁶⁾

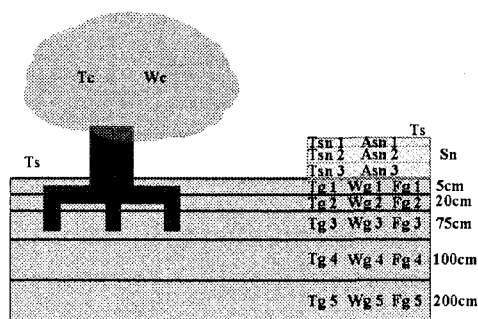


図-1 陸面過程パラメタリゼーション MATSIRO の構造

と呼ばれる大気陸面相互作用に関し複数の AGCM 間による比較研究プロジェクトが現在進行中である。著者らは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) により製作された AGCM (以降、CCSR/NIES) を用いて GLACE に参加している。GLACE の目的は 3 つに大別される。

- (i) K02 により大気過程に与える陸面境界条件の影響度はモデルの特性に依存していることがわかった。そこで GLACE の 1 つ目の目的は複数の気候モデルの有する大気過程への陸面境界条件の影響度に関する解釈に役立つ表の作成とした。K02 の参加モデルは 4 つであったが、GLACE では 15 を予定している。この目的は各気候モデルの示す気候変化、気候特性を分類し、その特性を評価・検証する上で重要となる。
- (ii) 2 つ目の目的は土壌のもつ '早い' と 'ゆっくりした' 土壌水分の貯留効果による大気過程への影響を分別することにある。これは先に挙げた地表面上や葉上からの蒸発という短期スケールの大気陸面相互作用と、土壌深部の土壌水分変化が大気過程に与える履歴効果の長い現象を分ける必要があるためである。
- (iii) 3 つ目の目的は大気境界層内の気温の変動に与える影響についても言及することにある。特に土壌深部の土壌水分変化が気温に及ぼす影響に着目するものである。

本研究では上記 3 つの目的のうち、1 つ目の目的である大気過程に与える陸面境界条件の影響度に関し、CCSR/NIES を用い、本研究で得られた結果と K02 に参加した 4 つの AGCM の結果とを比較・検討を行った。さらに K02 (1ヶ月積分) と GLACE (3ヶ月積分) における両実験結果を用い、様々な大気諸過程、特に降水過程に対する陸面境界条件の影響度の比較、並びに大気諸過程に対する陸面境界条件の影響度と時間スケールとの比較・検討を行った。

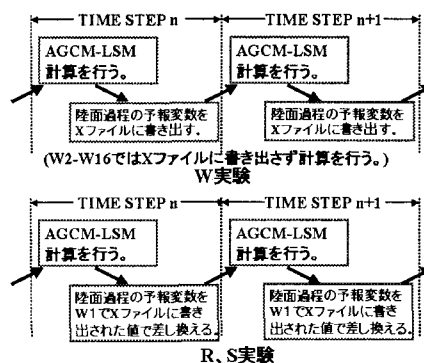


図-2 GLACE、K02 の実験方法 (上部: W 実験、下部: R,S 実験)

2. モデルと実験方法

(1) モデル

本研究で用いた気候モデルは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) により製作された AGCM の CCSR/NIES AGCM Version 5.6⁷⁾ である。陸面過程パラメタリゼーションは NIES によって製作された Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff (以降、MATSIRO)⁸⁾ を用いた。MATSIRO は主としてグリッドスケール 10 数 km 以上の大気モデルと結合して、1ヶ月から数 100 年の長期積分を行うような気候計算に用いられることを目的に設計されたものである。MATSIRO の構造は図 1 に示す通りであり、土壌は 5 層、積雪は積雪量により最大 3 層からなる。図中の英文字は MATSIRO の予報変数であり、土壌水分量 (Wg)、凍結土壌水分量 (Fg)、土壌温度 (Tg)、地表面温度 (Ts)、キャノピー温度 (Tc)、キャノピー上水分量 (Wc)、積雪量 (Sn)、積雪温度 (Tsn)、積雪アルベド (Asn) の計 9 種類である。

(2) データと実験期間

GLACE の実験期間は ENSO 等の気候変動の弱い 1994 年 6～8 月の 3ヶ月である。境界条件となる海面水温は上記期間の The Atmospheric Model Intercomparison Project 2 (以降、AMIP2) の月平均海面水温データを用いる。GLACE において評価・比較される大気過程の診断変数は日降水量、日蒸発量、大気最下層の日平均大気気温、日平均土壌湿度、大気最下層の日平均相対湿度、大気最上層の日平均長波放射量で計 6 変数である。

(3) 実験方法

GLACE の科学的課題は大気諸過程に与える陸面境界条件の影響度の解明、即ち陸面状態が詳細にわかっていたら大気過程の予測精度は高まるのかということである。GLACE の実験方法は前実験である K02 と概ね同じであるが、異なる点は GLACE が 6～8 月の 3ヶ月

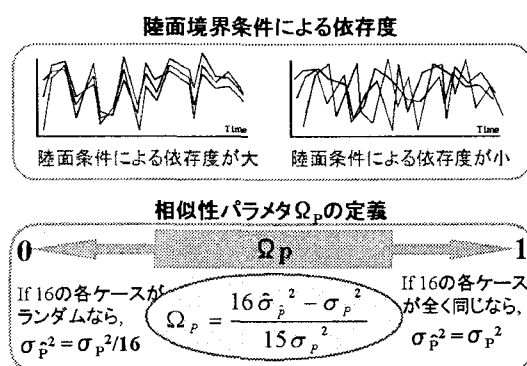


図-3 陸面境界条件による依存度 (上図) と時系列変化の相似性パラメタ (下図)

月に対して、K02 では7月の1ヶ月である。また K02 では日単位ではなく、3日合計値を用いている点である。実験内容は3つに大別され、各実験あたり16個の大気、陸面過程の初期値を用いたアンサンブル計算を行う。初期値作成にはまずモデルをそのまま走らせる、いわゆるコントロールランを行い、毎年6月1日に出力される初期値データを16(個)年分作成する。これにより得られた16個の初期値を用いて3つのアンサンブル実験(W,R,S)を行うものとする。

a) 実験 W

最初の実験ではコントロールランを行う。この実験名は K02 にならって実験 Write(以降、実験 W とする)。また16個の初期値を用いたアンサンブル実験を16回行うので、それぞれ W1-W16 とする)。実験 W では図2の上部に示す通り1回目の計算 W1 においてのみタイムステップごとに陸面過程から出力される全ての予報変数を全グリッドに関し書き出す。これらの予報変数とは図1に存在する計9種類の予報変数であり、残りの実験において陸面境界条件の真値、言い換えればあたかも観測値が存在するものとして与えられる。実験 W の残り15回の計算(W2-W16)では W1 のような陸面境界条件の真値の作成は行わず、コントロールランを行う。

b) 実験 R

実験 Read(以降、実験 R)では実験 W と同様に16個の大気、陸面過程の初期値を用いたアンサンブル計算(R1-R16)を行う。実験方法は図2に示す通り、W1でタイムステップごとに書き出した各時刻の陸面境界条件の予報変数で絶えず差し換える。これは全ての陸面境界値に真値が存在すると仮定した場合を意味するものである。即ち16アンサンブルの各診断変数が示す時系列変化のばらつきは陸面境界値による影響を含まない初期値と、それに起因する内部変動による違いを示す。

c) 実験 S

実験 S では土壌深部である上から2~5層目のみの土壌水分量データを実験 R と同様にタイムステップご

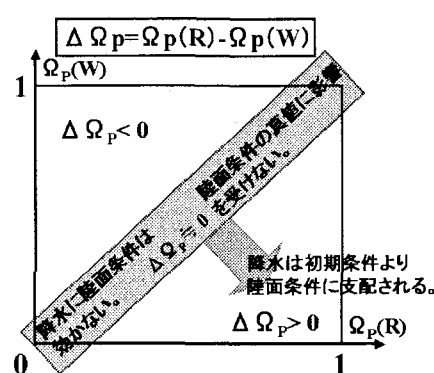


図-4 降水過程への陸面境界条件の影響度

とに陸面境界条件の予報変数を W1 で書き出した同じ時刻の値で差し換える。この実験は GLACE の目的の2つ目、3つ目に挙げた履歴効果の長い土壌深部の水分量が気象過程に与える影響に着目したものである。現在実験 S に関しては実験中であるため、本研究では扱っていない。

d) 大気過程への陸面境界条件の影響評価方法

上記3つの実験 W、R、S によって得られた診断変数の日平均値を用いて大気過程への陸面境界条件の影響度を評価する。以下は日降水量を例に説明する。まず2種類の時系列変化を作成する。1つは式(1)の通り、各実験における16アンサンブルの日降水量時系列変化の同じ時間ごとの平均値をとり1つの時系列変化 $\hat{P}$ (1×日数分のデータ)を得る。式中の i は16アンサンブル数を、 n は各アンサンブル計算におけるタイムステップを示す。もう1つは16アンサンブルの日降水量時系列変化を1つに連ねた時系列変化 P (16アンサンブル×日数分のデータ)をつくる。そして $\hat{P}$ 、 P とともに分散 $\sigma_{\hat{P}}^2$ と σ_P^2 を求め、これらを用いて式(2)に示す時系列変化の相似性パラメタ Ω_P を全グリッドに関し算出する。

$$\hat{P}_{ni} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} P_{ni} \quad (1)$$

$$\Omega_P = \frac{16\sigma_{\hat{P}}^2 - \sigma_P^2}{15\sigma_P^2} \quad (2)$$

もし16個全ての初期値が同じ値であれば図3に示す通り P の時系列変化は全く同じとなり、 $\sigma_{\hat{P}}^2$ と σ_P^2 は同じ値を示し、 Ω_P は1となる。一方、16アンサンブルの時系列変化がランダムであれば $\sigma_{\hat{P}}^2$ は約 $\sigma_P^2/16$ となり、 Ω_P は約0を示す。 Ω_P が完全に0となるには無限のアンサンブル数と同じく無限の長さの時系列変化を必要とする。図4は $\Omega_P(R)$ と $\Omega_P(W)$ との関係から降水過程に対する陸面境界条件の影響度 ($\Delta\Omega_P = \Omega_P(R) - \Omega_P(W)$) の意味を示す。この図では $\Delta\Omega_P$ が大きくなるほど降水は初期条件よりも陸面境界条件によって支配されることを説明している。一方 $\Delta\Omega_P = 0$ のとき $\Delta\Omega_P$ が示す意味合いは一樣とはならない。 $\Omega_P(R)$ と $\Omega_P(W)$ がとも

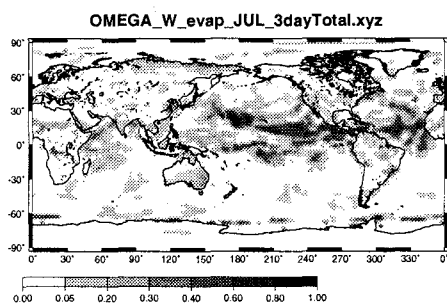


図-5 蒸発過程における相似性パラメタ

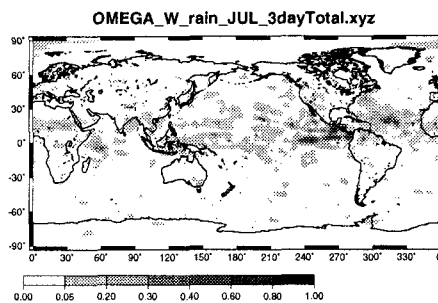


図-7 降水過程における相似性パラメタ

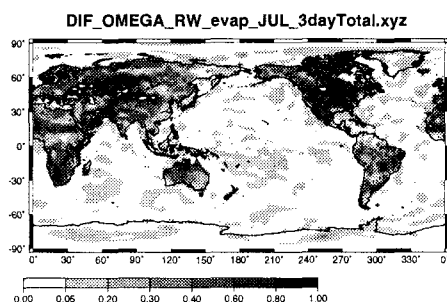


図-6 蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度

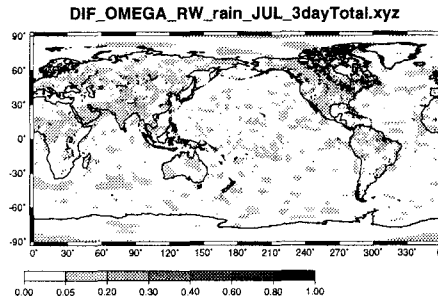


図-8 降水過程に対する陸面境界条件の影響度

に1のときは陸面境界条件の真値の有無に関わらず降水は陸面境界条件の影響を強く受けることを意味するが、 $\Omega_P(R)$ と $\Omega_P(W)$ がともに0のとき、降水は実現象、もしくはモデルの特性として陸面境界条件に影響を受けないことを示す。

3. 実験結果

実験で得られた7月のデータを用い、K02と同様の実験を行った結果を(1)~(4)を示す。またK02では日データでなく、3日合計値を用いているため、本研究でもそれに習った。

(1) 蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度

図5は1994年の7月のひと月においてコントロールランである実験Wを行ったときの $\Omega_E(W)$ である。図中の色が濃い地域ほど初期値、陸面境界値による影響度が低いことを意味する。図から初期値、陸面境界値による影響度は太平洋中央部から大西洋上の低緯度において低い。また陸域で示される値はどの地域でもほぼ一様に低く、つまり陸域の影響度は一様に高いことがわかる。図6は蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度を示す。図から中緯度帯に属するユーラシア中央部、北アメリカ大陸全般にかけて $\Delta\Omega_E$ が0.6~1.0と高い値を示すことがわかる。一方アマゾン、東南アジア、中央アフリカといった低緯度多雨地域では陸面境界条件の影響が一様に低い。この傾向はK02に参加したAGCMのThe Hadley Centre Met Office AGCM(以降、HadAM3)でもみられた。HadAM3では $\Delta\Omega_E$ の高い地域はユーラシア大陸中央部、北アメリカ大陸中低緯度、アフリカ大陸中緯度にみられる。一方で、アマ

ゾン、インド、東南アジア、熱帯アフリカ、北アメリカの多くの地域では $\Delta\Omega_P$ は低い値を示している。K02によると、この原因はひとつは植生による蒸発の抑制によるものが考えられる。

他のモデルの示す結果を紹介する。NASA Seasonal-to-Interannual Prediction Project(以降、NSIPP)ではユーラシア大陸東側、アフリカ大陸中央部、北アメリカ大陸中緯度地域で $\Delta\Omega_E$ は約0.6以上の高い値の一方で中央アジアでは0.05以下の低い値を示している。The National Center for Atmospheric Research(NCAR) Community Climate Model version 3 coupled to the Biosphere Atmosphere Transfer Scheme(以降、CCM3/BATS)では中国北部からモンゴルにかけてのアジア東部、北アメリカ大陸中緯度、アフリカ大陸の北半球中低緯度地域等に $\Delta\Omega_E$ の高い値を示している。The Centre for Ocean-Land-Atmosphere Studies(以降、COLA)では両半球ともに中緯度地帯に $\Delta\Omega_E$ の高い地域がみられるが、東南アジア、アマゾン、アフリカ大陸赤道付近といった多雨地域では低い値である。図9の上図は本研究で用いたCCSR/NIESとK02に参加した4つのモデルにおける $\Omega_E(R)$ の陸域平均値を示す。図中の棒グラフに示した黒い部分は $\Omega_E(W)$ を、白い部分は $\Omega_E(R) - \Omega_E(W)$ であり、その和が $\Omega_E(R)$ となる。図から本研究で用いたCCSR/NIESを含む5つ全てのモデルは $\Delta\Omega_E$ 、 $\Omega_E(R)$ いずれに関しても同程度の値であることがわかる。

(2) 降水過程に対する陸面境界条件の影響度

図7は図5と同様の実験を降水過程に対して行った結果である。この降水過程に対する初期値、陸面境界

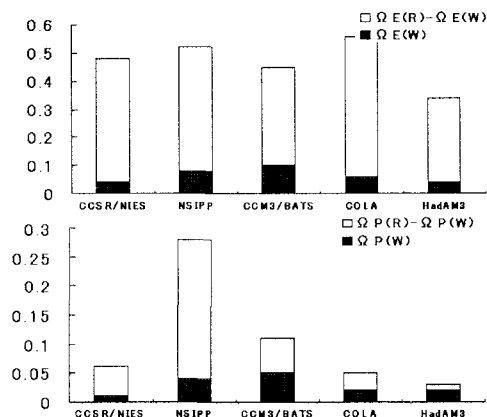


図-9 降水、蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度に関するモデル間の比較、(CCSR/NIES 以外の値は K02 より参照)

値による影響度は図5に示した蒸発過程に対して全般に低い値である。図8は $\Delta\Omega_P$ の全球分布を示す。図から降水過程に対する陸面境界条件が相対的に高い地域はユーラシア大陸の全域、北アメリカ大陸全域、中央アフリカにみられ、その値は殆んどの地域で0.05~0.2の間にある。 $\Delta\Omega_P$ に関しては6の蒸発過程における結果と比較すると極めて低い値である。

ここで K02 に参加した4つの AGCM を用いた同様の実験結果を紹介する。4つのモデルのうち最も陸面境界条件による影響度が高い値を示すが NSIPP である。このモデルで特に $\Delta\Omega_P$ が高い値を示すのがユーラシア大陸、北アメリカ大陸のともに高緯度地帯、アマゾン、アフリカ大陸低緯度地帯と東南アジアである。COLA と CCM3/BATS モデルの分布は似通っていて、双方とも殆んどの陸域で0.2以下の低い値を示している。一方、HadAM3 では降水過程への陸面境界条件の影響度は低く、殆んどの陸域で $\Delta\Omega_P$ は0.05以下の値である。以上から降水過程に対する陸面境界条件の影響度に関してはCCSR/NIESはCOLAとCCM3/BATSに比較的類似した傾向を有していることがわかる。図9の下図は降水過程に関し $\Omega_P(R)$ の陸域平均値をモデルごとに示す。 $\Omega_P(W)$ は5つのモデルは約0.01~0.05である。一方 $\Delta\Omega_P$ に関してはNSIPPは約0.25と大きな値であるのに対して、他の4つのモデルの示す値は約0.01~0.06と極めて大きな違いが存在する。 $\Omega_P(R)$ に関しCCSR/NIESはCOLAと同程度の値を示している。この2つのモデルの示す気候特性を比較することで、気候特性と降水過程に対する陸面境界条件の影響度との関係に焦点を当てた研究が行えるであろう。

(3) E/P と大気過程に対する陸面境界条件の影響度との関係

図10は陸域における7月の総降水量に対する同月の総蒸発量の比率(乾燥指数)と $\Delta\Omega$ の緯度方向東西平均値との関係を示す。図中の丸印は降水量、三角印は蒸発

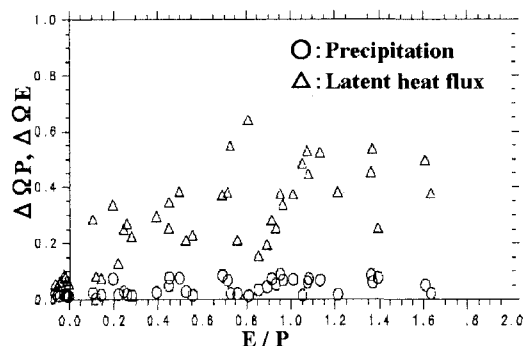


図-10 降水、蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度と陸面の乾燥指数との関係 (三角印:蒸発過程、丸印:降水過程)

量である。横軸で $E/P \geq 1$ の地域は相対的に乾燥した地域、逆に $E/P \leq 1$ の地域は相対的に湿った地域であることを意味する。図から蒸発過程に関しては、 E/P が約0~0.5の範囲で、 E/P の大きさと $\Delta\Omega_E$ に概ね正の相関がみられるが、 E/P がそれ以上になると相関はみられない。つまり陸面がある程度湿った状態では、乾燥に向かうほど蒸発過程に与える陸面境界条件の影響度は大きい。一方、 E/P がそれ以上の値になると、蒸発過程に対する陸面、特に土壌水分の変動による影響がある限界に達したものと考えられる。これはCCM3/BATSとCOLAにおいても同様の傾向がみられている。

次に降水過程に関しては $\Delta\Omega_P$ は E/P に明瞭な相関関係はみられず、低い値を示す。これは陸面の真値を与えることによる降水量予測精度の変化は陸面の乾燥、湿润状態とは強い関係があるものではなく、むしろ初期値もしくは大気過程の振る舞いと強く依存しているものと考えられる。これに対してCCM3/BATSとCOLAでは E/P の値の減少に伴い $\Delta\Omega_P$ も減少を示す。一方NSIPPとHadAM3ではそのような傾向は明瞭に見いだされない。その原因としてはNSIPPとHadAM3には E/P に小さな値が存在しないことが考えられる。またHadAM3に関してはキャノピーによる蒸発過程の遮断効果もその原因として考えられる¹⁾。

(4) 大気諸過程ごとの陸面境界条件の影響度比較

図11は大気過程に対する陸面境界条件の影響度である $\Delta\Omega$ の陸域上での全球平均値を示す。図中の左から土壌5層での平均値、大気最下層の気温、地表面温度、蒸発、大気最下層の比湿、大気最上層の長波放射量、降水量に関し示す。また上記の各変数に関し、GLACEで扱われる6~8月の3ヶ月(Gとする。)とK02で扱われた7月のひと月(Kとする。)においてそれぞれ図化した。まず7月のひと月に関してみると、全ての変数において $\Omega(W)$ は0.1以下である。これに対して陸面に真値を与えると、大気過程の予測精度は陸面に近い変数ほど大きな上昇を示す。 $\Omega_{wg}(R)$ が1となるのは土壌水分自体を真値として与えているためである。 Ω_{Ts} 、

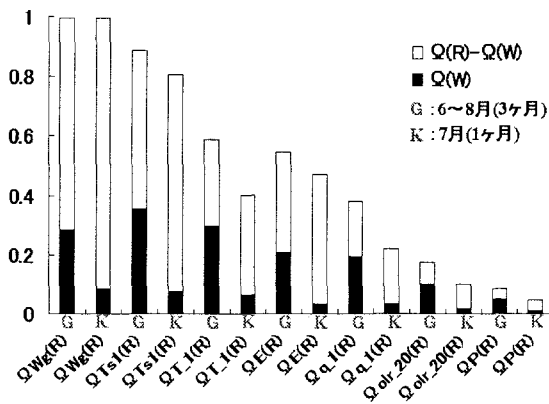


図-11 大気諸過程に対する陸面境界条件の影響度

Ω_{Tz1} 、 Ω_E 等陸面境界値に近い変数はいずれも陸面境界条件を与えることにより予測精度は大きく高まる。一方大気最上層からの長波放射($\Omega_{olr_{z20}}$)や特に降水(Ω_P)は陸面に観測値が存在しても他の変数と比較すると予測精度は大きく上昇しないことがわかる。これは降水が大気過程によりつくられる変数であるため、陸面境界条件が直接的に影響を与えないことを意味する。一方蒸発過程は大気と陸面の相互作用によって生じるものである。図中の $\Omega_E(R)$ から陸面に真値が存在すれば約0.04から約0.45まで蒸発過程の予測精度は上昇する。これは陸面起源による蒸発過程の最大精度である。従ってこの $\Omega_E(R)$ から $\Omega_P(R)$ を引いた差が大気諸過程を含む相互作用による予測精度の減少となる。

(5) 時間スケールでみる陸面境界条件の影響度比較

次に7月のひと月のみを計算した場合(図11のK)と6~8月の3ヶ月計算した場合(図11のG)における大気諸過程に対する陸面境界条件の影響度を比較する。全ての大気諸過程において $\Delta\Omega$ は長期間計算を行ったGの方が小さな値を示す。一方で、 $\Omega(W)$ は全ての大気諸過程においてGの方が一様に大きな値である。これは長期間時間積分を行うほど初期値依存度が減少し、大気諸過程の予測精度が向上されるからである。また、陸面境界条件に真値を与えた後である $\Omega(R)$ に関しても、全ての大気諸過程において長期間時間積分を行ったGの方が大きな値を示す。この $\Omega(R)$ は陸面過程の状態が完全に把握されているとした場合の大気過程の予測精度を示すものである。土壌水分以外の全ての大気諸過程において、この $\Omega(R)$ の増加量は $\Omega(W)$ の増加量と比較して一様に小さい。従っての $\Omega(R)$ と $\Omega(W)$ の差である陸面境界条件による影響度 $\Delta\Omega$ は長期間時間積分を行ったGの方が小さくなるのである。一般に短期スケールでは初期値が重要であり、一方で長期スケールでは境界値が重要であると言われるが、以上のことにより短期間の時間積分で長期間と同程度の予測精度を求めるには、境界条件のより精緻な把握が必要とされることがわかる。

4. まとめ

著者らは大気陸面相互作用に関し複数のAGCMにおける比較実験(GLACE)に参加している。本研究ではGLACEに先立って行われた実験(K02)に参加した4つのAGCMの結果と本研究におけるCCSR/NIESを用いた結果との比較検討を行った結果、以下のことがわかった。CCSR/NIESの示す降水過程に対する陸面境界条件の影響度($\Delta\Omega_P$)は蒸発過程に対する陸面境界条件の影響度($\Delta\Omega_E$)と比較して極めて小さいものであった。これと同様の傾向をもつ結果がK02に参加した4つのモデル中3つのモデルにおいて示されている。

また $\Delta\Omega_E$ ではとりわけユーラシア・北アメリカの中央部といった大陸内陸部で一様に高い値を示した。これは大陸内部ほど陸面過程の振る舞いにより大気過程が決まる傾向にあることを示すものと考えられる。今後は本研究で得られた $\Delta\Omega_E$ 、 $\Delta\Omega_P$ の地域分布をもたらしした要因を、植生分布や気候区、さらには他の大気諸過程のとの関係を精査しつつ研究を進めていく予定である。

謝辞： 本研究は総合地球環境学研究所プロジェクト『地球規模の水循環変動ならびに世界の水問題の実態と将来展望』ならびに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)の成果の一部である。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) R. Koster and J. Suarez. Comparing the degree of land atmosphere interaction in four atmospheric general circulation models. *Amer Meteor Soc*, Vol. 3, pp. 363-375, 2002.
- 2) R. Koster and J. Suarez. Soil moisture memory in climate models. *J. Hydro Meteor*, Vol. 2, pp. 558-570, 2001.
- 3) R. Koster and J. Suarez. The influence of land surface moisture retention on precipitation statistics. *J. Climate*, Vol. 9, pp. 2551-2567, 1996.
- 4) Y. Liu and R. Avissar. A study of persistence in the land atmosphere system using a general circulation model and observations. *J. Climate*, Vol. 12, pp. 2139-2153, 1999.
- 5) Y. Liu and R. Avissar. A study of persistence in the land atmosphere with a fourth order analytical model. *J. Climate*, Vol. 12, pp. 2154-2168, 1999.
- 6) R. Koster. *GLACE(Global Land-Atmosphere Coupling Experiment)*. <http://glace.gsfc.nasa.gov/glace.pdf>.
- 7) A. Numaguti, M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi. Study on the climate system and mass transport by a climate model. *CGER's supercomputer monograph report, National Institute for Environmental Research, Environment Agency of Japan (Eds.)*, Vol. 3, , 1997.
- 8) K. Takata, S. Emori, and T. Watanabe. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, pp. 209-222, 2003.