水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 10, No. 5 (1997) pp. 416-425

グローバルな河川流路網情報(TRIP)を利用した 年流量による地表面数値モデルの検証について

Validating Estimates of Land Surface Parameterizations by Annual Discharge using Total Runoff Integrating Pathways

沖 大幹*

Taikan OKI

西村照幸**

Teruyuki NISHIMURA

ポール・ディルマイヤー***

Paul Dirmeyer

(アメリカ航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター)

USRA NASA/Goddard Space Flight Center

(東京大学気候システム研究センター)

CCSR, University of Tokyo

(海洋陸面大気研究センター)

Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies

Land surface parameterizations (LSPs) are embedded in atmospheric numerical models and express the exchange of water and energy at the land surface. Under Global Soil Wetness Project (GSWP), the water balances in 1987 and 1988 were estimated by a few LSPs with common forcing data, such as precipitation and radiation. The estimates were validated by discharge data using the global river channel network, which was named Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). As a result, the LSPs were found to calculate annual water balance fairly well where the forcing precipitation was estimated from enough density of raingauge observations ($\geq 30/10^\circ\text{km}^2$).

Key words: Global River Channel Network, Soil Moisture, River Discharge, Global Precipitation

陸面数値モデル(LSP)は大気数値モデルなどに組み込まれて地表面での水とエネルギーの交換を表現している。全球土壌水分プロジェクト(GSWP)において、いつかのLSPにより1987年および1988年の水収支が、共通の降水量や放射強度に対して算定された。ここでは、全球1度グリッドメッシュで作成された河川流路網情報(TRIP)を利用し、河川流量データによってそれらLSPによる年水収支算定値を検証した。その結果、十分な降水観測(雨量計密度 ≥ 30 個/ 10°km^2)に基づいて入力降水量が算定されている領域ではLSPは適切に年流出高を算定していることがわかった。

キーワード：世界河川流路網、土壌水分、河川流量、グローバルな降水量

I. はじめに

渇水にともなう数ヶ月先の水資源量や、温暖化など地球環境変化にともなう水資源賦存量を予測す

るためには長期の気象・気候予測が必要である(沖, 1992)。そうした比較的長期の気象・気候予測のための大気数値モデルには、下部境界条件である海洋や陸地の表面状態が適切に与えられねばならない。そ

*アメリカ航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター、平成7年度日本学術振興会海外特別研究員
Taikan Oki, Code 913, NASA/Goddard Space Flight Center' Greenbelt, MD 20771, USA

**東京大学気候システム研究センター 〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

Teruyuki Nishimura, Center for Climate System Research, Univ. of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153, Japan

***Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies

4041 Powder Mill Road, Suite 302, Calverton, MD 20705-3106 USA

のため、大気大循環モデル(GCM)などには何らかの形で大気と地表面との間の水とエネルギーの交換を表現する数値モデルが組み込まれている。以下ではそれらをLSP(陸面数値モデル)と総称する。なお、これを含め、略語表記の一覧は末尾にまとめた。

LSPは、同じ太陽放射・大気条件に対しても、表層土壌水分の多寡によって地表面から大気への熱フラックスに占める顕熱と潜熱の割合が変化することを表現するのが主目的であり、Bucketモデル(Manabe, 1969)の様な簡単なモデルでも第一近似としては充分である。しかし、Bucketモデルでは植生過程や土壌種類の違いを陽に扱っていないため、陸上の細かいスケールの水収支や森林伐採が気候に及ぼす影響などのシミュレーションには適していない。これに対し、BATS(Dickinson, 1984)やSiB(Sellers *et al.*, 1986)以降の主要なLSPでは植生過程などが陽に表現されている。熱帯雨林の減少が気候に及ぼす影響の評価や地球温暖化の予測などにはそうした植生過程の適切なモデリングが必要なこともあって、現在では各GCMごとに様々なLSPが存在している。

それらのLSPが、しかるべく大気陸面相互作用を再現しているかどうかは、そのLSPを組み込んでいるGCM等による予測結果の信頼性に関わる問題である。これまでもFIFE(第一次ISLSCP野外観測)(Sellers *et al.*, 1992)などの観測値を用いたLSPの検証が行なわれているが、GCM用の検証としては不十分な点もあった。ひとつには、グローバルにはデータ取得が不可能なことがあげられる。さらに、集中観測で得られる蒸発量や土壌水分などは必ずしも広域を代表しているとは限らず、GCMスケールの大きなグリッド内では水文量や水文パラメータは不均一であると考えの方が自然であり、LSPの推定結果と観測値との比較においては常にそうした比較の妥当性に関する論争が解決されないままであった。

一方で、大陸スケールの地表面の乾湿が1ヶ月や2ヶ月といった長期の気象予測やアジアモンスーンの強弱の年々変動に影響を持つことが、数値実験によって指摘されており、気候変動の調査研究のためにはグローバルな土壌水分情報の取得が強く望まれている。しかし、海面水温とは異なり、表層土壌水分のグローバルな観測データはいまだ未整備の状態である。

上述のグローバルなLSP検証と土壌水分分布推定との両者を目的として、ISLSCP(衛星による地表面気候推定の国際研究計画)ではGSWP(全球土壌水分分

布プロジェクト)が計画・運営されている(Dirmeyer, 1997)。

一般に、土壌水分分布の(季節変化の)観測推定手法としては次の5つが考えられる。a) 地上でのサンプル観測、b) 流域水収支、c) 大気—陸域水収支(沖ほか, 1995)、d) 衛星リモートセンシング、そしてe) LSPによる算定、である。これらのうち、b)やc)では、表層土壌水分以外に地下水帯や湖沼、河道内の貯留量を含んだ総陸水貯留量が算定される。e)には、さらにe-1) GCMでのシミュレーション、e-2) 4次元データ同化(4DDA)サイクル中での推定、そしてe-3) 必要となる観測値(降水量、放射量など)を外力としてLSPに与えるオフライン・シミュレーション、の3通りが考えられる。

GSWPでは、e-3)の手法でグローバルな土壌水分分布を算定する。これまでにも同様の手法が試みられてきている(Mintz and Walker, 1993)が、それらに比べるとGSWPには次の様な特徴がある。1) 用いられるLSPが植生過程などを含む最新のものであり、かつ共通の外力に対して複数のLSPが推定したグローバルな結果の相互比較がなされる。2) 全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格子というグローバルには充分細かい空間スケールである。3) 降水量、放射量、参照高度における気象要素などの外力データは日周期を表現できる時間単位で与えられる。結果については1ヶ月に3回、約10日(旬)平均値という細かな時間解像度で出力される。土壌水分量などの貯留量については瞬時値も出力される。4) 地上観測データ、衛星リモートセンシング推定値、大気—流域水収支法など独立した観測推定値によって検証が行なわれる。

GSWPの外力データにはISLSCP Initiative-1 CD-ROM(Meeson *et al.*, 1995)が用いられている。以下ではこのCD-ROMを*IIICD*と呼ぶことにする。*IIICD*には1987年と1988年について、LSPを用いた地表面での水とエネルギー収支算定に必要な気象要素が収められており、地表面粗度や植生指標などのLSP用の地表面パラメータも共通の海陸分類に基づく緯度経度1度グリッドデータとして与えられている(Sellers *et al.*, 1995)。時間分解能は形式的には6時間ごとである。ただし、グローバルに6時間ごとの観測がすべての気象要素についてあるわけではないので、参照高度の風速気温湿度などについてはヨーロッパ中期天気予報センター(ECMWF)の4DDAデータが利用されている。降水量については、アメリカ環境予測センター(NCEP)の再解析で得られた6時間ごとの値が、そ

の各月の集計値が世界降水気候プロジェクト (GPCP) が地上雨量計データから作成した観測月降水量と一致するように比例調整されて与えられている。

GSWPにおける相互比較や検証研究には日本からの参加者が深く関わっていて、実現可能な各種の検証が計画実行されてきた(高藪ほか, 1997)が、河川流量を用いた検証だけが不十分であった。その主な理由は、*IIICD*が作成された時点では観測流量がどの範囲の1度格子からの平均流出量であるかを把握して面的な情報として扱うことができなかったためである。その結果、*IIICD*では、他のすべての情報が1度格子の面的データなのに対し、河川流量だけは流量観測地点での点データとなっている。しかし、他の検証データの多くが基本的には観測地点周囲の狭い範囲のみを代表しているのに対し、河川流量は面的な平均流出量を代表していると考えられるので、LSPの再現精度検証のためには是非とも利用すべき情報である。

GSWPの様に一定の降水量 P を与えた場合、年水収支では、流出量 $R \approx P - E$ となるので、 R の検証は蒸発量 E の検証にもなる。 E よりも流出量 R の方が小さい年水収支がグローバルには普通なので、同じ絶対誤差に対しても R で比較の方が厳しい検証が可能となる。また、月や旬単位については総陸水貯留量 S の時間変化は $dS/dt = P - E - R$ と表されるので、 E と R とが検証されれば、間接的に総陸水貯留量 S の検証にもつながる。

流量データを年水収支の検証に用いる場合には流量観測地点に対する集水域を同定する必要があるし、月単位などについては格子間の流下を考慮する必要がある。このためには、GSWPに対応した1度格子でのグローバルな河川流路網が必要となる。Oki and Sud(1997)はそれを実現するためにグローバルな河川流路網(TRIP)を作成した。

本研究ではこのTRIPを利用し、*IIICD*に加えてさらに収集した流量データを用いてGSWPにおけるLSP算定年水収支の検証を行なった。II節にTRIPの概略について、III節には流量データの収集と取り扱いを紹介する。IV節では各LSPの算定年流量を観測値に基づいて検証した結果を示し、V節に本研究から得られた知見をまとめる。

II. グローバルな河川流路網

LSPによって面的に算定される流出量と観測河川

流量とを比較するためには、どの1度グリッドポイントがどの流量観測地点の集水域に属しているかを知必要がある。世界の主要河川流域を定義するテンプレートを作成し、グローバルな観測データやGCMによる算定結果を各河川内で最大集水面積を持つ流量観測地点の観測データと比較検証する様な研究は、 $2^\circ \times 2.5^\circ$ といった比較的荒い空間解像度で行なわれてきた(Russell and Miller, 1990)。これに対し、1度グリッドというGSWPの空間解像度では、各グリッドポイントに対して河道流下方向を定めて疑似流路網を作成することにより、主要な流量観測地点に対応する集水域を定めることも可能である。Oki and Sud(1997)は*IIICD*で陸地と認識されているすべての $1^\circ \times 1^\circ$ グリッドボックスに対して流下方向もしくは河口であるという属性を与えてグローバルな疑似河川流路網を作成した。この流路網および付帯した情報はTotal Runoff Integrating Pathways(TRIP)と名付けられている。Fig. 1にアジア領域についての例を示す。

TRIPは、数値標高モデル(DEM)情報に基づいて流下方向を定める自動アルゴリズムによる結果を第一次近似とし、印刷地図や河道ベクトルデータなどの地理情報を参照しながら手作業で修正して現実を反映するように設計された流量データ処理ツールである。TRIPにより流路網が定まると、河口地点ならびに流量観測地点の位置をTRIP上で同定することにより、各河川の流域面積あるいは流量観測地点に対する集水面積を自動的に算定できる。現時点でTRIPには世界の主な180の大河川と、300以上の主要流量観測地点が認識され、それらの総流域面積および総集水面積は南極を除く陸地の63%および46%を占めている。このTRIP上での流域面積もしくは集水面積は公称値と比較対照され、誤差はほぼ $\pm 20\%$ 以内に収まっていることが確認されている。

流路長についても公称値と比較され、TRIP上での流路長は公称値に比べて一般に短いことが見出されている。これは解像度やデータ形式の限界によって、TRIP上では細かい蛇行が表現されていないためだと推定される。TRIP上の流路長を現実の値(公称値)に変換するための蛇行比(Meandering Ratio; r_m)は、平均して1.4、流域面積 $500,000\text{km}^2$ 以上の大河川だと1.3程度となっている。

TRIPには主に2つの用途がある。まずラスターデータとして作成されている各種グローバルデータ(降水量, 流出量, 気温など)の集水域平均値を求めて観

Fig. 1 An example of TRIP for Asian region

測流量と比較することが可能となる。単なるテンプレートとは異なり、流量観測地点が同一河道上に複数存在する場合には、流域を複数のサブ流域にわけて、それぞれのサブ流域ごとに算定流出量と観測流量とを対照することも比較的容易である。また逆に、点観測である流出量を集水域の平均流出量としてグローバルにマッピングして表示することも可能となる。

もう一つのTRIPの利用法は流出量流下モデルへの適用である。大気数値モデルに組み込まれたLSPと流出量流下モデルとの組合せにはTable 1の様な各レベルが考えられる。気象予測を主眼としている場合にはLevel-1~0.5の取り扱いをしていることが多いが、大気海洋結合モデルの場合には水循環を閉じるため、Level 1の取り扱いをしているのが普通である。Level 2の取扱いは流出量流下モデルの開発とともに現在世界中で試みられているところであり、例えば東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所が共同で開発している

Table 1 Coupling Levels of River Routing Schemes with GCMs

Discharge	to where?	when?
Level -1	nowhere (disappear)	immediately
Level 0	everywhere	immediately
Level 0.5	nearest ocean grid	immediately
Level 1	designated river mouth	immediately
Level 2	designated river mouth	after routing
Level 3	+ interactions at downstream grid boxes	

GCMでは、鼎ほか(1995)の河道流下モデルが組み込まれた大気海洋河川結合モデルもすでに動いている。Level 3は今後の課題であるが、これによって真の大気海洋陸面河川結合モデルが達成されることが考えられる。Level 1-3を実現するためにはTRIPの様な流下河道網情報が必要であり、かつ位置と流域面積が現実を良く近似していることの確認はもちろん、蛇行比 r_M のような特性が明らかになっていることが重要だと考えられる。

III. 流量データの取得処理

IIICDに収められた流量観測129地点のうち、1987—88年の月観測流量がそろっているのはわずかに20地点に過ぎなかった。そこで、TRIP上で適切に認識できる206地点について世界流量データセンター(GRDC, 1992)に依頼してデータを取得した。さらに、ロシア科学アカデミー地理学研究所のA. Georgiadi氏から21地点分の旧ソビエト連邦の流量データを提供してもらった。これらを合わせて重複を避けると349地点あった。このうち、TRIP上で同じグリッドに入るものや、位置が不明なもの、観測期間が短か過ぎるもの、明らかにデータがおかしい地点などを除くと314地点となった。

日流量データは集計してすべて月流量データにまとめた。上下流の観測地点間の流量の一貫性や、時系列方向の一貫性など基本的なデータの性質検査を行なった後、LSPの算定流出高と比較可能にするため、単位換算を行なった。この際必要となる集水面積には公称値を用い、複数の流量観測地点が存在する場合にはサブ流域ごとの平均流出高を算定した。

このようにして得られた観測流出高データに含まれる誤差の主な要因としては、a) 観測時の誤差、とb) データ配布時の誤り、とが考えられる。観測時の誤差は、95%の確度で5%以内に収めることが可能であると言われている(WMO, 1994)が、現実には各地点ごとに異なるであろう。また、水位から換算している場合の変換式の誤差、観測が困難な洪水時のデータに含まれる誤差なども考えられる。データ配布時の誤りとしては計算機に入力する時の単純ミス以外に、単位換算の失敗や位どりの間違いなどがある。実際に、複数のデータソースからの流量が一致しなかったり、同じ地点の月流量と日流量との対応が完全ではない地点があったり、集水面積の公称値が周囲の地点やTRIP上の値に比べて不自然な地点があったりしたので、エラーが明らかなものは修正し、不明な地点については使用しないことにした。こうしたデータ吟味の結果、最終的に108地点の流量が1987—88年について利用可能となった。

下流よりも上流の流量の方が多い場合もあったが、それはアフリカのニジェール川、西アジアのインダス川、オーストラリアのマレー川など乾燥地域が主であり、自然的あるいは人為的に河道から周囲への河川水による灌漑が生じているものと思われる。河道から周囲へ供給された水は再び蒸発する機会を得

るが、現在の大気(海洋)陸面水循環数値モデルでは表現することができない。前節のLevel 3はこの過程を取り込むことが主目的である。

IV. 年流量による地表面モデルの検証

GSWPのLSPグループによる全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ グリッドでのエネルギーおよび水収支計算結果はCCSRに設けられた相互比較センター(ICC)に集められ、基本的な収支解析や相互比較を通じて、各LSPに対して適切な数値実験が行なわれたかどうかを検査された(西村, 佐藤, 1996)。いくつかのモデルについては外力の与え方などについて問題が見つかり、再実験が行なわれることになっている。なお、こうしたオフラインでのLSPの数値実験では、土壌水分や積雪など貯留量の初期値が問題となる(Dirmeyer, 1995)が、GSWPでは、1987年の外力を繰り返し与えて算定し、地表面から植生の根系による吸水が考慮されているLSP中の層までについてすべてのグリッドポイントの1月1日と12月31日との土壌水分の差が $\pm 5\%$ もしくは $\pm 5\text{ mm}$ 以内に収まるまで、という共通の条件が与えられている。

このICCに集められた流量データの年平均値と前節で述べた観測流量を用いて、各LSPによる1987年と1988年の年算定流出高を観測推定値と比較した結果の例を、GCIP(GEWEX大陸規模国際研究計画)領域であるミシシッピ川のヴィックスバーグおよびGAME-T(GEWEXアジアモンスーン観測研究計画の熱帯域における副計画)領域であるタイのチャオプラヤ川の名コンサワンについてFig. 2とFig. 3に示す。それぞれ横軸が1987年、縦軸が1988年の観測値に対する差(mm/y)を示し、LSPの略称はTable 2に示す通りである。各プロットがほぼ45度の線上に乗っているということは、各LSPにはバイアスがあり、それはあまり年によらないということを示している。

こうした散布図が108の流量観測地点それぞれについて作成されたが、Fig. 4の様に、観測値だけがモデル推定値とかけはなれている地点も散見された。特にこの例の場合、観測流量はIIICDで与えられている降水量よりも大きく、明らかに不整合である。この理由について前節で述べた観測推定値の誤差や、TRIPの誤差などについて検討した。しかし、大きな誤差を生みそうなものについては精度検査段階ですでに取り除いたはずである。地下水流去、人為的な河川水の利用や自然の灌漑による下流での蒸発などがLSPでは考慮されていないことは、現実と比べて

Fig. 2 Comparison of annual runoff at Vicksburg of the Mississippi river basin

Table 2 Abbreviations for the Plotting of LSPs

ARZ	アリゾナ大学	BATS (Dickinson, 1984)
CCS	CCSR	Bucket (Manabe, 1969)
CLI	NASA/GSFC	SSIB (Xue et al., 1991)
CNR	フランス気象局	ISBA (Mahfouf et al., 1995)
COL	海洋陸面大気研究所	SSIB (Xue et al., 1991)
CSU	コロラド州大学	SiB2 (Sellers et al., 1996)
HYD	NASA/GSFC	Mosaic (Koester and Suarez, 1992)
JMA	気象庁	SiB (佐藤, 1991)
MES	NASA/GSFC	PLACE (Wetzel and Boone, 1995)
Obs	観測値	

LSPによる流量算定を過大にするはずであるが、比較結果ではLSP推定値の方が観測値よりも概ね小さかった。年平均で比較する場合にも、厳密には河道流下による時間差を考慮する必要があるが、季節変化や気候区分による違いに比べると北半球冬季の流量の年々変動は大きくなく、本質的ではないと考えられる。

このような検討の結果、外力として各LSPに与えられた降水量 P の精度にばらつきがあることがわかった。GSWPで用いられたIIICDに含まれる P は、GPCPによって収集された地上雨量計観測データのみから空間的に内外挿して作成されていて、最新のGPCPの成果物とは違い衛星データや4DDA推定値との融合は行われていない。そのため、地域によって元になった実際の降水量観測密度が大きく異なっている。

Fig. 5にその影響を調べた結果を示す。横軸は9つのLSPの算定値の平均値と観測値との差(mm/y),

Fig. 3 Comparison of annual runoff at Nakhon Sawan of the Chao Phraya river basin

Fig. 4 Comparison of annual runoff at Hkamti of the Chindwin river basin

縦軸は外力 P を作成するのに用いられた各流量観測地点集水域内の雨量計密度(個数/10^4 km^2)である。外力 P 作成に利用された雨量計密度が大きくなればなるほど、LSPによる算定は総体として実際の観測値に良く合う様になっていることがわかる。各LSPごとに誤差の標準偏差(誤差分散の平方根)を示したのがFig. 6である。横軸に示した密度以上の雨量計データが外力 P の算定に利用された流域のみについて

Fig. 5 The relationship between the density of raingauges used to make the forcing precipitation and the mean bias error of LSPs

て、それぞれLSPによる推定値と観測年流量との誤差を計算して示している。いずれのLSPでも最低雨量計密度が大きくなるにつれて誤差分散が小さくなって推定精度が向上しているが、30地点/10⁴km²程度以上の雨量計データがあればほぼ変わらなくなる。逆に、これより小さい雨量計密度に基づいて作成されたPには誤差が大きいため、いずれのLSPに与えても、現実とはかけはなれた流量が算定されやすくなっている。

Xie *et al.* (1996)は2.5°×2.5°グリッドボックスの降水量推定に対して各グリッドに5個以上の雨量計があれば信頼できるだろう、と述べている。中緯度(35度)付近で緯度経度1度グリッドは約10,000km²なので、Xie *et al.* (1996)の値は約80個/10⁴km²に相当する。一方、WMO(1994)によると、自記雨量計観測密度の最低推奨値は、極域や乾燥地域でも10個/10⁴km²、海岸などで111個/10⁴km²、山岳部では400個/10⁴km²となっている。今回得られた30個/10⁴km²という最小必要密度がこれらに比べると小さめなのは、複数グリッドボックスにまたがる河川流域平均、しかも降水量直接ではなくLSPを介して流量で年平均値の誤差を評価しているためだと考えられる。すなわち、30個/10⁴km²という値は適切なLSPを用いて大規模な河川の年流域水収支を推定する際に必要な最低限の雨量計密度であると理解すべきである。

Fig. 6 Criteria of the minimum rain gauge density and the standard deviation error of LSPs

Fig. 7 Criteria of the minimum rain gauge density and the bias error of LSPs

Fig. 6では誤差分散を指標として各LSPの精度を相互に比較することが可能(小さいほど良い)であるが、別の指標として、バイアス誤差をやはり最低流域内雨量計密度の関数として示したのがFig. 7である。全体としてLSPは河川流量を小さめに推定していて、SiB2だけが過大過ぎみであることがわかる。通常誤差評価に用いられる平方平均自乗誤差(root mean square error)はそれぞれのLSPに対するFig. 6とFig. 7の値の自乗和の平方根に相当する。なお、各LSPに対しては常に精度向上のための改良が続けられており、これらの比較結果は1997年2月時点のものであることを改めて指摘しておく。

全般にLSP推定値が実測流量に比べて小さくなっている理由としては、Legates and Willmott(1990)が指摘している様に、雨量計観測には主に冬季に風の影響で小さめに観測されるバイアスがあるため、

外力 P 全体が現実の値よりも小さくなっている可能性も考えられる。SSiBやBATSによる算定結果では、最低流域内雨量計密度30個/10°km²以上についてバイアス誤差がほぼなく、年流量算定は良好であることがわかる。ただし、BATSはFig. 6で見る通り誤差分散が他に比べて大きくなっている。

V. おわりに

河川流量は水収支の面的平均値に関する独立した情報を提供する。したがって、河川流量は数値モデルの検証にも用いることができるし、水収支研究に用いることもできる。しかし、グローバルスケールについては、例え流量データがあっても、どの範囲の平均流出高を代表しているかという情報が欠けていたため、これまで河川流量がグローバルスケールで用いられることはあまりなかった。

本報告では、Oki and Sud(1997)が作成し、Total Runoff Integrating Pathways(TRIP)と名付けられたグローバルな河川流路網を利用して、Global Soil Wetness Project(GSWP)においていくつかの陸面数値モデル(LSP)によって算定された流量を検証した。TRIPの様な地理情報を用いることによって、流量データを他の気象・気候データとグローバルスケールで比較検討することが可能になり、数値モデル等で得られる水収支算定値の検証が可能であると示されたこと自体にも意義がある。

綿密な精度検証の結果、外力としてLSPに与えら

れた降水量 P を作成する時に利用した雨量計の数密度(個/10°km²)が30未満の場合、どのLSPの推定流量も観測値との間に大きなばらつきを生じていることがわかった。これは、逆に言うと、 P や放射強制力などの外力が適切に与えられれば、最新のLSPは年流出量、ひいては年蒸発量を適切に算定可能であるということである。さらに言えば、精度の良いLSPと流量観測値を用いると、観測推定された降水量データの精度について独立な検証が可能であるということにもなる。GEWEX(全地球エネルギー・水循環観測計画)やGAME(GEWEXアジアモンスーン観測研究計画)では、気象要素と実際のフラックスを野外で測定してLSPの改良をする、という従前のアプローチが計画されている。しかし、せっかく世界の様々な大河川流域に対して観測研究を行なうのであるから、1次元的なフラックス観測研究(Fig. 8左)に加えて、流域単位で水循環と水収支を考え、流量を検証データとして水循環過程全体の観測およびモデル化の向上を目指すアプローチ(Fig. 8右)も考慮する価値があるだろう。

すなわち、FIFEのような小規模スケールの観測研究(Fig. 8左)では、LSPへの外力には P や放射量の観測値が直接用いられ、蒸発散量 E や土壌水分などの算定結果はやはりそれぞれの観測値と直接比較される。したがって厳密なLSPの検証・校正が可能となるが、一方で衛星リモートセンシングによる地表面水文量推定アルゴリズム開発とLSPとは直接結び付

Fig. 8 The illustration of the two kinds of LSP validation studies

かない。また、小規模スケールの観測値との比較が、より大規模のグリッドサイズを持つGCMなどに用いられるLSPの検証として適切かどうか、という問題もある。

これに対してGSWPの様な大陸スケールの研究 (Fig. 8右) では、 P や放射量などの外力自体も、すべてが信頼のおける観測に基づくわけではなくなる。LSPによる算定結果と流量の様な面的代表性を持つ観測値との比較は、LSPのみならず、 P や放射量などの広域推定手法についても改善の余地を指摘することになる。この場合、LSP単体での検証・校正としては厳密ではなくなるが、 P や放射量、参照高度での地表面気象要素などを広域に推定する手法の改善がはかれ、LSPのみならずエネルギーと水の循環全体に関するより高い精度の知見をもたらすことにつながる事が期待される。

今後は、LSP推定値に対して河道流下モデル (Scheme for TRIP; STRIP) を適用し、月単位以下の細かい時間スケールでの観測流量との比較検討や、グローバルな水循環における河川流出過程の季節変化などについて、より詳しく研究を進める必要があるだろう。

謝辞：貴重な流量データを提供して下さいった Global Runoff Data Centreに感謝致します。また、流量データの一部は滋賀県立大学の太田哲夫先生を通じてロシア科学アカデミー地理学研究所のA. Georgiadi氏から提供していただきました。研究の推進にあたり、NASA/GSFCのY.C. Sud博士、W. K.-M. Lau博士、R.D. Koster博士そしてD. Mocko氏には貴重な議論をしていただきました。東京都立大学の松山洋さんには原稿に対して丁寧な御意見をいただきました。本研究の一部には、日産学術研究助成金「陸域地表層水分のグローバルマッピングと気候システムの解明」(代表：長岡技術科学大学、小池俊雄)および文部省科学研究費補助金基盤研究(A)「全地球表層水分マッピングプロジェクト」(代表：長岡技術科学大学、小池俊雄)の援助をいただきました。また、本研究は第一筆者が平成7年度日本学術振興会海外特別研究員としてNASA/GSFCに派遣され、Visiting Scientistとして滞在している際に行なわれました。ここに記して甚大なる感謝の意を表します。

Appendix 略語一覧

4DDA	Four-Dimensional (4D) Data Assimilation
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
CCSR	Center for Climate System Research, Univ. of Tokyo
DEM	Digital Elevation Model
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
FIFE	First ISLSCP Field Experiment
GAME	GEWEX Asian Monsoon Experiment
GAME-T	GAME Tropics
GCIP	GEWEX Continental-Scale International Project
GCM	General Circulation Model
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GRDC	Global Runoff Data Centre
GSFC	Goddard Space Flight Center (NASA)
GSWP	Global Soil Wetness Project
ICC	Inter-Comparison Center
ISLSCP	International Satellite Land Surface Climatology Project
LSP	Land Surface Parameterization
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
SiB	Simple Biosphere Model
STRIP	Scheme for Total Runoff Integrating Pathways
TRIP	Total Runoff Integrating Pathways

引用文献

- Dickinson, R.E. (1984) : Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. in Hansen, J.E. and T. Takahashi eds., *Climate Processes and Climate Sensitivity*, 58-72, Amer. Geophys. Union.
- Dirmeyer, P.A. (1995) : Meeting on problems in initializing soil wetness. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**, 2234-2240.
- Dirmeyer, P.A. (1997) : The Global Soil Wetness Project. *GEWEX News*, **7**, in press.
- GRDC (1992) : Second Workshop on the Global Runoff Data Centre. Report 1, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Federal Institute of Hydrology, Germany, pp. 96.
- 鼎信次郎・西尾 健・沖 大幹・虫明功臣 (1995) : AGCM一流路網モデルによる世界の大河川の流出ハイドログラフ。水工学論文集, **39**, 97-102.
- Koster, R.D. and M.J. Suarez (1992) : Modeling the land surface boundary in climate models as a composite of independent vegetation stands. *J. Geophys. Res.*, **97**, 2697-2715.
- Legates, D.R. and C. Willmott (1990) : Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation. *Intl. J. Climatol.*,

- 10, 111-127.
- Mahfouf, J.-F., J. Noilhan, H. Giordani and M. Deque (1995) : The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. *J. Climate*, 8, 2039-2057.
- Manabe, S. (1969) : Climate and the ocean circulation, I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 739-774.
- Meeson, B.W., F.E. Corprew, J.M.P. McManus, D.M. Myers, J.W. Closs, K.-J. Sun, D.J. Sunday and P.J. Sellers (1995) : ISLSCP Initiative I—Global Data Sets for Land-Atmosphere Models, 1987-1988., Published on CD-ROM by NASA (USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_001-USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_005).
- Mintz, Y. and G.K. Walker (1993) : Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature. *J. Appl. Meteor.*, 32, 1305-1334.
- 西村照幸・佐藤信夫(1996) : 全球土壌水分分布について. *グロースペクター*, 34, 31-43.
- Oki, T. and Y.C. Sud (1997) : Design of the global river channel network for Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *Earth Interactions*, 1, submitted.
- 沖 大幹(1992) : 水文・水資源学のための気象予測概論. 気象予測とその水文・水資源学への応用, 1-28, 水文・水資源学会.
- 沖 大幹・虫明功臣・松山 洋・増田耕一(1995) : 大気水収支と地球規模の水循環. 土木学会論文集, No. 521/II-32, 13-27.
- Russell, G.L. and J.R. Miller (1990) : Global river runoff calculated from a global atmospheric general circulation model. *J. Hydrol.*, 117, 241-254.
- 佐藤信夫(1991) : 新用語解説(25)SiB. 天気, 38, 202.
- Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud and A. Dalcher (1986) : A Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.
- Sellers, P.J., F.G. Hall, G. Asrar, D.E. Strebel and R.E. Murphy (1992) : An overview of the first international satellite land surface climatology project (ISLSCP) field experiment (FIFE). *J. Geophys. Res.*, 97, 18345-18371.
- Sellers, P.J., B.W. Meeson, J. Closs, J. Collatz, F. Corprew, D. Dazlich, F.G. Hall, Y. Kerr, R. Koster, S. Los, K. Mitchell, J. McManus, D. Myers, K.-J. Sun and P. Try (1995) : An Overview of the ISLSCP Initiative I—Global Data Sets., On : ISLSCP Initiative I—Global Data Sets for Land-Atmosphere Models, 1987-1988, Volume 1-5. Published on CD-ROM by NASA. USA_NASA_GDAAC_ISLSCP_001. Overview. doc.
- Sellers, P.J., D.A. Randall, G.J. Collatz, J.A. Berry, C.B. Field, D.A. Dazlich, C. Zhang, G.D. Collelo and L. Bounoua (1996) : A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I : Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705.
- 高薮出・馬淵和雄・立川康人・松山 洋(1997) : 陸面・海洋一大気相互作用研究会「陸面モデルと流出モデル」の報告. 天気, 44, 423-431.
- Wetzel, P.J. and A. Boone (1995) : Parameterization for land-atmosphere-cloud exchange (PLACE) : Documentation and testing of a detailed process model of the partly cloudy boundary layer over heterogeneous land. *J. Climate*, 8, 1810-1837.
- WMO (1994) : *Guide to hydrological practices*. WMO-No. 168, World Meteorological Organization, pp. 735.
- Xie, P., B. Rudolf, U. Schneider and P.A. Arkin (1996) : Gauge-based monthly analysis of global land precipitation from 1971 to 1994. *J. Geophys. Res.*, 101, 19023-19034.
- Xue Y., P.J. Sellers, J.L. Kinter III and J. Shukla (1991) : A simplified biosphere model for global climate studies. *J. Climate*, 4, 345-364.

(受付: 1997年4月14日, 受理: 1997年5月26日)