

水収支に基づく土壤水分推定値の精度評価

EVALUATION OF SIMULATED SOIL MOISTURE BASED ON WATER BUDGET

萬 和明¹・田中 賢治²・中北 英一³

Kazuaki YOROZU, Kenji TANAKA and Eiichi NAKAKITA

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒 615-8246 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所 水資源環境研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

Integration of one-way uncoupled SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy) land surface model has produced global soil moisture field under the framework of the 2nd Global Soil Wetness Project. Soil moisture estimation by SiBUC is evaluated against soil moisture observations derived from Global Soil Moisture Data Bank. Results show SiBUC reproduces reasonably inter-annual variability and seasonal cycle of soil moisture except a part of stations. Why are there the regional differences of the SiBUC's ability to estimate soil moisture? What are the essential factors for reproducing seasonal cycle soil moisture? To answer these questions, water balance components were analyzed. As a result, two typical regions were found: one region with high accuracy on soil moisture estimation is located where soil moisture has clear seasonal cycle because the seasonal cycle of precipitation is different from that of evapotranspiration, another region with low accuracy is located where precipitation are almost converted to evaporation.

Key Words : GSWP2, land surface scheme, global soil moisture data bank, soil moisture accuracy

1. 序論

土壤水分が、大気・地表面間のエネルギー・水収支を通して気候形成やその変動に寄与するため、季節スケールの気象予測精度向上には、土壤水分の把握が有効な手段であると指摘されている(例えば Koster et al.¹⁾)。そこで、観測値を元にした気象強制力を陸面過程モデルに与え、全球土壤水分量分布を推定する試み(GSWP: Global Soil Wetness Project²⁾)がなされている。GSWP の第 2 期では、15 の陸面過程モデルが参加し、基準実験と気象強制力などを変化させた様々な感度実験が実施されている。モデル出力値はアンサンブル的に扱われ、全球水・熱収支が推定されている³⁾。

GSWP2 に参加している陸面過程モデルのひとつが SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy)⁴⁾である。筆者らは、SiBUC を用いて全球土壤水分分布を推定しており⁵⁾、応用研究も実施している⁶⁾。

GSWP2 の土壤水分推定値は Guo and Dirmeyer⁷⁾(以降 GD06 とする)によって精度検証されている。GD06 では、推定値と観測値の相関係数などの統計量は州や国単位でまとめられ、領域中央値で評価されている。例えば、季節変化の再現精度はイリノイ州・アメリカとロシアで高く、中国とモンゴルでは高いとの結果が得られている。しかし、理由は明白でないが GD06 では SiBUC の推定値は対象とされておらず、土壤水分の推定精度に地域差が存在する理由について

も言及されていない。

以上の背景から、領域区分をより詳細な空間スケールに修正して GD06 の手法を適用した、GSWP2 の枠組みにおける SiBUC の土壤水分推定値の精度検証を、本論文の第一目的とする。また、土壤水分の推定精度に寄与する要素や条件を明らかにすることを第二目的として、水収支解析を実施する。土壤水分は気候特性によって挙動が異なるため、適切な領域区分による精度検証が望まれる。また、土壤水分推定研究の発展のためにも、土壤水分の精度の良し悪しを述べるにとどまらず、その原因に言及する意義は非常に大きい。

2. 陸面過程モデル SiBUC

SiBUC は SiB をベースに開発されてきた陸面過程モデルである。SiBUC が表現できる地表面構成要素は、複数の植生ばかりでなく、都市域や河川・湖沼等の水体にも及ぶ。従来の陸面過程モデルでは都市や水体は省略されてきたが、都市・水体の水・熱収支特性は植生地とは全く異なるため、水・熱収支へ与える影響が小さいとは言いきれない。そこで、陸面過程モデルの精度を向上させることを目的に、従来まで考えられてきた植生モデルに都市・水体の効果を加えたモザイクモデルとして開発されたのが SiBUC である。

図-1 に SiBUC の植生モデルにおける水収支概念図を示す。土壤は 3 層で表現され、各層の土壤水分量は

表-1 式 (1)-(3) と図-2 で使用されている変数

変数	定義	単位
W_i	i 層の土壌水分量	—
D_i	i 層の土層厚	m
θ_s	空隙率	—
ρ_w	水の密度	kg m^{-3}
E_s	地表面からの直接蒸発	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$E_{dc,i}$	蒸発散による土壌水分損失	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P_1	地表面からの降水の浸透	m s^{-1}
$Q_{i,i+1}$	土層間の流量	m s^{-1}
Q_3	最下層からの重力排水	m s^{-1}

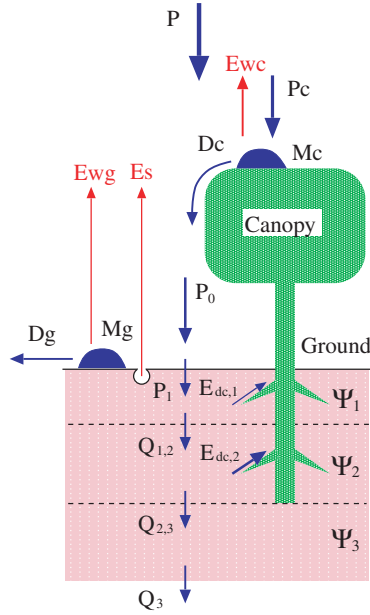


図-1 SiBUC の植生モデルにおける水収支概念図

Richards 式によって表現されている．式 (1)-(3) に土壌水分量の支配方程式を示し，また，同式と図-1 に使用されている変数の説明を表-1 に示す．

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left[P_1 - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} (E_s + E_{dc,1}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left[Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{E_{dc,2}}{\rho_w} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{2,3} - Q_3] \quad (3)$$

3. 全球土壌水分量

(1) 観測値

土壌水分観測値として広く知られているのが，Global Soil Moisture Data Bank (GSMDDB)⁸⁾の観測値である．GSMDDB には世界各地の土壌水分観測値が集められている．観測期間や観測頻度などはソース毎にまちまちである．本論文では，土壌水分量の観測期間が GSWP2 の対象年（1986-1995 年）と重なるイリノイ州・アメリカ，中国，インド，モンゴル，ロシアの 5 領域の観測

値を利用する．ロシアの観測点では春穀物と冬穀物の 2 種類が作付けされており，それぞれの土地利用で土壌水分が観測されているため，同じ観測点で 2 つの観測値が得られている．

(2) SiBUC による推定値

GSWP2 は様々な気象強制力を提供している．例えば，基準実験の降水量は，NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 再解析データの月降水量を GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) の月降水量と等しくなるよう補正し，さらに雨量計の補足率の補正を行っている²⁾．本論文では GSWP2 基準実験の外部境界条件を用いて，時間間隔 1 時間，全球陸域 1 度グリッド，1986-1995 年の 10 年間を対象とした SiBUC による数値計算を実施し，土壌水分を日単位で出力した．3 時間の気象外力を 1 時間間隔に，月単位の植生データを 1 日間隔にそれぞれ線形内挿して用い，標高・勾配・土壌特性パラメータは固定値を用いた．なお，地表面水分ゼロ・土壌水分 75% の初期条件で，1982 年 7 月から 1985 年末までのスピナップ計算を実施している．

(3) 月平均値・偏差成分時系列の算出

GSMDDB の土壌水分観測値は，領域毎に観測される深さが異なり，観測する土層の数も異なっている．イリノイでは 11 層・200cm，インドでは 6 層・60cm，他の領域では 100cm である．そこで，本論文ではインドのみ 60cm までの，他の領域では 100cm までの鉛直積算土壌水分量を対象とし，精度評価に用いる．

毎月の観測頻度もまた領域毎に異なっているが，1-3 回程度である．しかし，対象とする深度まで観測値が得られないなど，欠測期間が存在する．そこで，100cm（インドでは 60cm）までの値が得られたときの観測値のみを使用し，月平均値として解析に用いる．統計的に安定した結果を得るため 30ヶ月以上の観測値が得られた観測点を土壌水分の精度検証に用いた．各領域で検証に用いた観測点は，それぞれ，イリノイ・19 地点，中国・36 地点，インド・7 地点，モンゴル・27 地点，ロシア・春穀物 33 地点，冬穀物 43 地点である．図-2 に本論文で使用する GSMDDB の観測点の位置を示す．

SiBUC の土層厚はグリッド毎に異なるが，各グリッドは 100cm 以上の土層厚に設定された．そこで，表層から 100cm（インドでは 60cm）までに相当する土壌水分推定値を求め，月平均値を算出した．なお，この月平均値は，推定された日単位の値を一月分平均した「月平均値」ではなく，観測値が得られた日のモデル推定値のみを平均したものである．

水循環変動に強い年内変化が存在する領域では，土壌水分の時系列変動において一年を周期とする年内変化成分が支配的となるため，数ヶ月周期の季節変化の再現性を適切に評価することが困難になる．そこで，時系列変動における一年周期の年内変化成分を取り除いた，偏差成分の土壌水分時系列を新たに求め精度評価

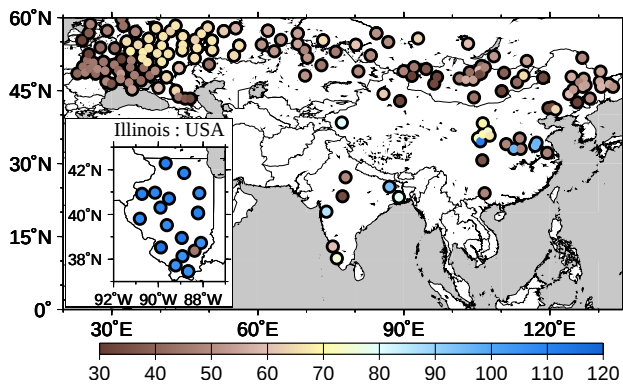


図-2 本論文で使用する Global Soil Moisture Data Bank の土壌水分量の観測点と月平均値が得られる月数.

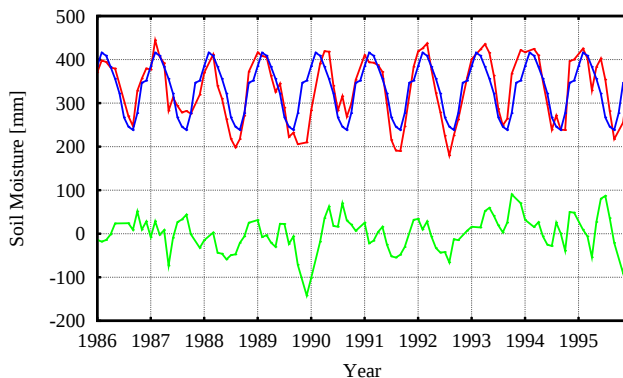


図-3 地点 (37.5°N, 89.5°W) における土壌水分観測値. 時系列はそれぞれ, 赤: 月平均時系列, 青: 平均的年内変化, 緑: 偏差時系列を示す.

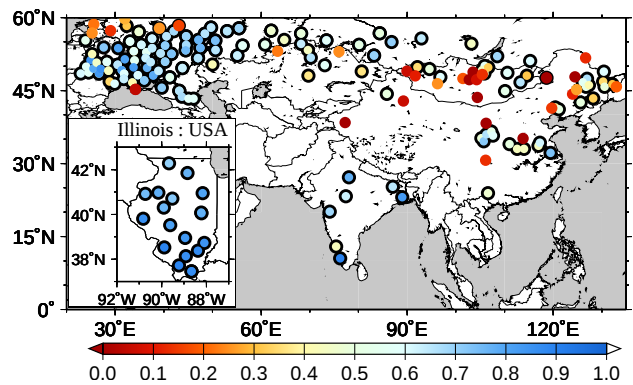
に用いる. 図-3 に, 地点 (37.5°N, 89.5°W) における土壌水分観測値の月平均時系列 (赤線), 平均年内変化 (青線), 偏差時系列 (緑線) を示す. 偏差成分の時系列は, 月平均時系列における各月毎の平均値の時系列を平均的年内変化とみなし, これを月平均時系列から引くことで求めた.

4. 土壌水分量の精度評価

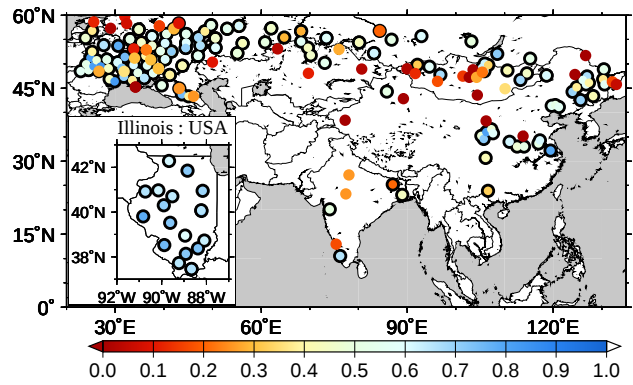
土壌水分のモデル推定値の精度評価のため, 2 種類の相関係数を算出した. ひとつは GSMDDB 観測値と SiBUC 推定値の月平均時系列間の相関係数である. もうひとつは観測値と推定値の偏差時系列間の相関係数である. これ以降, 前者を季節変化の相関, 後者を偏差同士の相関と呼ぶ. 本論文では, 季節変化を数ヶ月程度の時間スケールをもった時系列変化, 年内変化を一年周期の時系列変化の意味でそれぞれ用いる. また, 有意検定は, 帰無仮説を「相関係数が 0」とし, t 検定を用いて有意水準両側 5% で実施した. 相関が有意であっても相関が高いとは限らないが, 有意検定の結果を精度評価における客観的指標として用いる.

(1) 季節変化の相関

季節変化の相関係数の分布図が図-4 (a) である. 同図では, 土壌水分観測点における相関係数を円で示し



(a) 季節変化の相関係数



(b) 偏差同士の相関係数

図-4 GSMDDB 観測値と SiBUC 推定値の土壌水分の相関係数. 黒い外枠は統計的に有意な相関であることを示す.

ており, 外枠が黒い地点では, 統計的に有意な相関であったことを示している. イリノイ, インド, ロシアで相関係数が高く, それぞれの領域内でも, 全体的に高い値が分布していた. 一方, 中国とモンゴルでは相関係数は相対的に低くなった. モンゴルでは, 中央部に相関係数の低い領域がみてとれるが, 中国では, 相関係数の分布に空間的なまとまりはみてとれない. イリノイ, インド, ロシアではほとんどの観測点で相関が有意であった. 一方, 相関係数の低かった, 中国では 7 割弱, モンゴルでは 4 割強の観測点で相関が有意であった.

(2) 偏差同士の相関

偏差同士の相関係数の分布図が図-4 (b) である. 季節変化の相関が高かったイリノイ, ロシアでは, 偏差同士の相関も高い値であったが, インドでは逆に低くなった. 一方, 中国とモンゴルでは, 偏差同士の相関は季節変化の相関と同程度であり, 地点によっては相関係数が高くなった地点もある. イリノイでは全観測点で, ロシアでは 8 割程度, 中国では 8 割弱, モンゴルでは 6 割の観測点で相関が有意であった.

(3) 他の陸面過程モデルとの比較

GD06 は, インドを解析対象外としているが, 本論文と同一の手法で, GSWP2 土壌水分推定値の精度を検証している. GD06 によると, モデル毎に求めた季節変化の相関係数を領域中央値と比較すると, 各モデルに

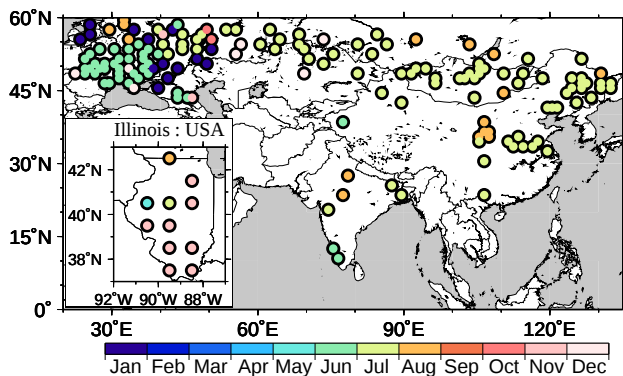


図-5 GSWP2 基準実験の降水量が最大となる月

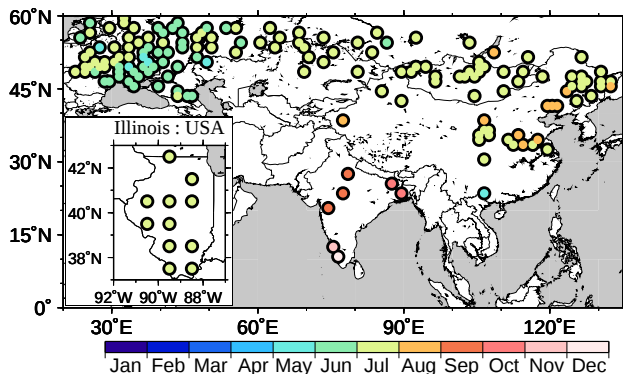


図-6 SiBUC による蒸発散推定値が最大となる月

よる値は、イリノイ: 0.8-0.9, 中国: 0.4-0.5, モンゴル: 0.2-0.4, ロシア: 0.6-0.7 の範囲に分布する. SiBUC による値はそれぞれ, 0.82, 0.43, 0.32, 0.65 であり, この範囲に該当する. また, 偏差同士の相関係数も同様の結果が得られた. 領域中央値での比較になるが, 中国やモンゴルでは SiBUC だけでなく他のモデルの推定精度も良くない. つまり, 中国やモンゴルで土壌水分の推定精度が良くないのは SiBUC 固有の問題ではなく, 乾燥・半乾燥地域での陸面過程モデルによる土壌水分推定プロセスや, 降水量の精度が十分でないなど GSWP2 共通で使用している外部境界条件に何らかの原因がある, と考えられる.

(4) 推定精度の分布が生じる原因

では, 土壌水分の推定精度にモデル間で共通の地域分布が生じるのはなぜだろうか. 1987-88 年を対象にした GSWP1 の結果を元に, 土壌水分の推定精度に寄与する要素が報告されている.

Oki et al.⁹⁾ は, GSWP1 の結果から, 河川流量を用いて地表面状態量の推定精度を検証しており, モデルに外力として与えられた雨量計の密度が高ければ, モデルの推定精度も高くなることを示している. GSWP2 の外力として使用した雨量計の密度は, アメリカやヨーロッパで 2 度格子内に 2 地点以上と高いが, 季節変化の相関が高かったインドやロシアでは, 2 度格子内に 0.5 地点以下と低く, 季節変化の相関が低かったモンゴルや中国と同程度である²⁾. このことから, 雨量計の密度が低い領域でも土壌水分の推定精度が高い領域が存在

し, 降水量の精度のみで土壌水分の推定精度が決定されるのではないと考えられる.

また, Entin et al.¹⁰⁾ は, GSMDDB 観測値と GSWP1 の土壌水分推定値を比較し, 夏季モンスーンによってモンゴルと中国では夏季に降水がもたらされ, 降水と蒸発散の年内変化の位相, 特にそれらのピーク時期が等しくなるため, 観測値, 推定値ともに土壌水分の年内変化量がほかの領域に比べ小さくなると指摘している. そのため, 土壌水分の入出力である降水や蒸発散などの誤差に対して, 土壌水分の応答が相対的に大きくなり, 土壌水分推定精度を低下させる一因となると考えられる. GD06 は, GSWP2 推定値を解析した結果, 同様にモンゴルと中国では土壌水分の再現精度が悪く, 土壌水分の季節変化を再現することが課題であると述べている⁷⁾. SiBUC に与えた降水量と, 推定された蒸発散量が最大となる月をそれぞれ図-5, 図-6 に示す. モンゴルと中国では降水と蒸発散のピークは 7-8 月であり, 両者の年内変化のピーク時期は等しかった. 1986-95 年における GSMDDB 観測値の平均的な年内変化の振幅は, イリノイ: 99mm, 中国: 45mm, インド: 91mm, モンゴル: 33mm, ロシア: 69mm であり, Entin et al. の解析と同様の結果であった.

つまり, グリッド雨量の精度と土壌水分の年内変化量が, 土壌水分の推定精度に寄与する要素であることが確認された. しかし, ロシアやインドでは, 雨量計の密度は高くないが, 推定精度が高いことが確認されている. また, 土壌水分の年内変化量が小さくても, モデルが適切に水収支を算定できれば, 推定精度が高くなるはずである. そこで, 土壌水分の推定精度を向上させるために必要となる要素や条件が何か, 水収支解析によって, より詳細に検討していく.

5. 水収支解析

本章では, 水収支に着目し土壌水分の推定精度を決定する要因を探っていく. 水収支として, 降水, 蒸発散, 表面流出, 基底流出, 積雪水等量の変化, 土壌水分の変化を考える. 図-7 に, 代表的な地点での 10 年平均した水収支の季節変化を示す. 蒸発散はさらにその起源から, 根層の蒸散損失 (蒸散), 土壌表層からの蒸発 (表層蒸発) に区別する. 以下, SiBUC で推定した水収支を軸に, 土壌水分の精度について議論していく.

(1) イリノイ

イリノイでは, 降水は 11 月に, 蒸発散は 6 月に最大になる傾向であった (図-7 (a)). 土壌水分は冬季に降水を貯え夏季に蒸発・蒸散として放出すると推定され, 観測値の年内変化の位相とよく一致している. 流出や積雪が少なく水収支に対する蒸発散の割合が高かった. また, 蒸発散の半分近くを蒸散が占めるため, 蒸発散のピーク時期は表層蒸発だけに依存せず, 蒸散の効果も加わっている.

SiBUC では, 土壌水分の減少は蒸発・蒸散により生じており, 蒸発散の時間変化は日射や LAI などの気象

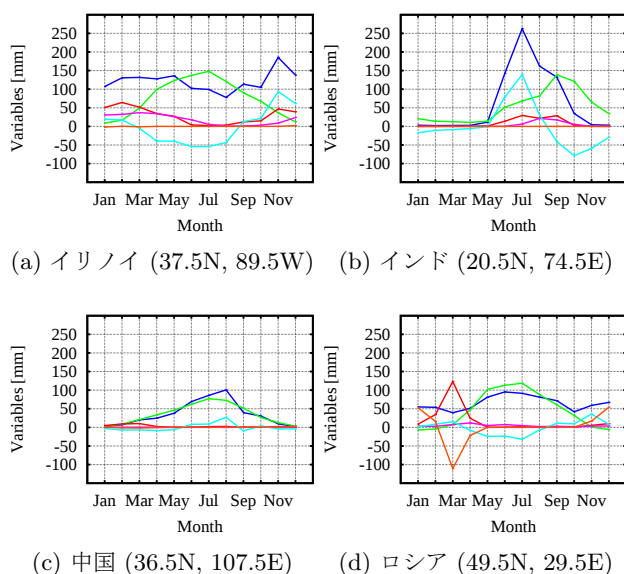


図-7 10 年平均水収支季節変化の SiBUC 推定値。直線はそれぞれ、青：降水，緑：蒸発散，赤：表面流出，紫：基底流出，水：土壤水分変化，橙：積雪水等量変化を表す。

外力や植生パラメータによって決定される。気象外力作成に使用される観測点密度が高いことや、衛星観測から得られた植生パラメータを SiBUC に与えることから、蒸発・蒸散を決定する外部境界条件の精度は高く、土壤水分の減少を的確に捉えられたと考えられる。また、年間を通して降水がもたらされる気候のため、秋季に蒸発散が減少するとともに土壤水分が増加する現象を、SiBUC で精度良く表現できたと考えられる。

(2) インド

6-10 月が雨季にあたり、降水は雨季に集中し 6-8 月に最大であり、蒸発散は 9 月に最大となった(図-7 (b))。土壤水分は雨季の初期に増加し、雨季終盤に表層蒸発により減少すると推定され、観測値の年内変化の位相と概ね一致する。また、土壤が飽和に近づく雨季の中頃に最大に、東部や中央北部では表面流出が、南部では基底流出が算出された。

インドでは、土壤水分の年内変化の増減時期は雨季に依存する。特に土壤水分の増加は雨季初期の降水に依存するため、モンスーンオンセットの再現性が非常に重要である。土壤水分は短期間に急激に増加・減少するため、SiBUC でその季節変化を捉えやすく、季節変化の相関が高かったと考えられる。偏差同士の相関が低い原因としては、雨季開始(終了)時の土壤水分増加(減少)時期のずれ、乾季における土壤水分変動を表現できていないことが挙げられる。これらは、気象外力である降水の精度向上による改善が期待される。

(3) 中国・モンゴル

中国・モンゴルでは、降水は 5-9 月にもたらされそのピークは 7 月である。蒸発散のピークも 7-8 月であったため、土壤水分の入力量である降水と蒸発散の差が

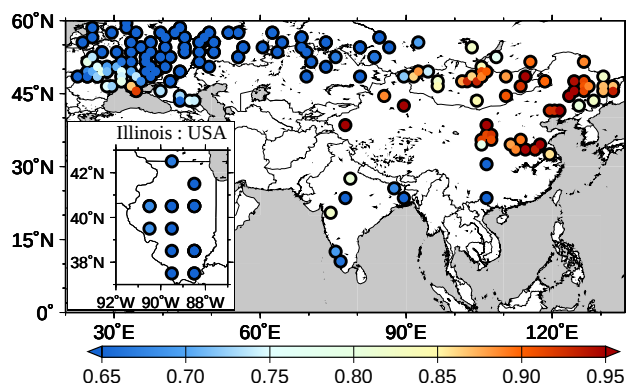


図-8 GSWP2 基準実験の降水量に対する SiBUC による蒸発散推定値の割合

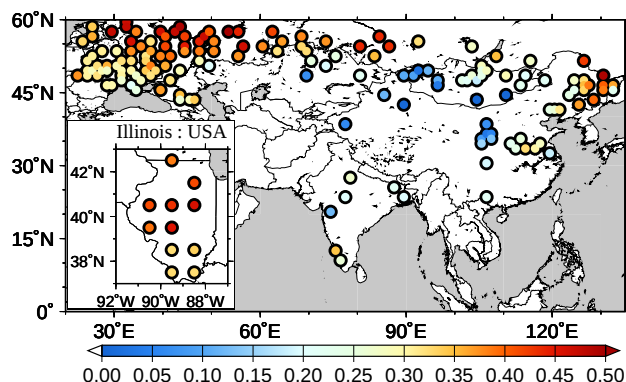


図-9 SiBUC によって推定された蒸発散に対する蒸散の割合

一年を通して小さく、特徴的な土壤水分の年内変化は認められなかった。

沿岸部では、土壤水分は 4, 5 月と 9 月におもに蒸発散として放出し、夏季に水分を貯えたと推定された。

中央部では、年間を通じて降水量と蒸発散量が釣り合う結果となった。また、年降水量が 600mm 程度と少なく、蒸発散のほとんどが表層蒸発として消費されていた(図-7 (c))。

南部では、年降水量が 1000mm 前後と比較的多雨地域である。基底流出が大きく、蒸発散と同程度算出されていた。

西部では、年降水量が 100mm 程度と少なく、降水は表層で蒸発し、土壤水分はほとんど季節変化しなかった。

東北部では、冬季の積雪が春季に流出し、ごく一部が土壤に浸透していた。土壤水分は、4-5 月と 8 月に蒸発散として放出し、6-7 月に降水を貯えたと推定された。

モンゴルでは、年降水量が 500mm 以下と少なく、その 8 割以上が蒸発散として消費された。

以上まとめると、Entin et al.¹⁰⁾ が指摘するように、降水と蒸発散の年内変化の位相は等しくなっていた。降水量と蒸発散量の関係を見てみると、年降水量に対して年蒸発散量が 9 割以上であった(図-8)。また、蒸発散に占める蒸散の割合は、他の領域に比べ小さくなっていた(図-9)。これは、蒸発散は蒸発によって決定され、日射などの気象外力に依存し、イリノイのように植生パラメータが寄与する割合が小さいことを意味する。

したがって、土壌水分の季節変化をモデルで精度良く表現するためには、降水と蒸発散の偏差成分に十分な精度が要求され、気象外力である降水や日射などの偏差成分の精度を確認する必要がある。さらに、降水が少ない地点・流出が多い地点・融雪が算出された地点では、土壌表層・深層への浸透、融雪について、モデルパラメータを含むモデル表現について、より詳細な検討が必要である。

(4) ロシア

年間を通して降水はもたらされるが、降水と蒸発散のピークはともに6、7月で、両者の年内変化の位相は一致する傾向にあった(図-7(d))。推定された土壌水分は、9月以降の降水と3、4月の融雪により貯えられ、5-8月に蒸発散として放出されており、概ね良い精度で土壌水分の年内変化の位相を再現できている。

観測値が得られた4-10月の期間のみではあるが、蒸発散によって減少していくという土壌水分の年内変化が明瞭である。蒸発散に占める蒸散の割合が高く、蒸発を決定する気象外力と降水の精度が十分であれば、SiBUCで蒸発散を精度良く推定でき、土壌水分の季節変化を適切に表現できると考えられる。東部と北西部で季節変化の相関が高くないが、その原因は、東部では4-10月の降水をほぼ蒸発散として消費しており、土壌水分の季節変化を十分に再現できなかったと考えられ、北西部では融雪量が非常に多い地域であり、積雪量や融雪の土壌浸透の扱いに問題があると考えられる。

6. 結論

本論文では、GSWP2の基準実験において陸面過程モデルSiBUCによって推定された土壌水分を、GSMDDBの観測値と比較し、相関係数によって推定精度を検証した。その結果、イリノイ州・アメリカ、インド、ロシアで季節変化の相関が良く、イリノイ、ロシアで偏差同士の相関が良かった。

土壌水分推定値の精度を決定する要因を探るため、水収支解析を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。1) 土壌水分に明確な年内変化がある領域では季節変化の相関が高い(イリノイ、インド、ロシア)。2) 降水と蒸発散の年内変化の位相が等しい領域で、降水に占める蒸発散の割合が高ければ季節変化の相関は低い(南部除く中国、モンゴル)。

さらに、前者では、降水や蒸発散の偏差成分の精度が高ければ、偏差同士の相関も高くなると推測される(イリノイ、ロシア)。また、後者では、蒸発散に占める蒸散の割合が小さければ蒸発が支配的となり、土壌水分の推定精度は気象外力の精度に依存する(中国: 中央部・西部、モンゴル)。逆に、蒸発散に占める蒸散の割合が大きければ蒸散の効果が高まり、土壌水分の推定精度は気象外力や植生パラメータの精度に依存する(中国: 沿岸部・東北部)。

陸面過程モデルによる土壌水分の推定精度を決定する要因としては、その入力値である気象強制力や土壌・

植生パラメータの精度が重要であるが、さらに、土壌水分に十分な年内変化が存在するか、降水と蒸発散の差が十分あるか、が重要となることが示された。

なお、本論文では、流出や積雪の影響について深く議論していない。また、本論文におけるモデル推定値は1度格子の空間的広がりを持った平均値であり、地点データである観測値と必ずしも一致するわけではない。モデルが真に理にかなった挙動を示しているかは、地点データを外部境界条件に用いた、その地点のモデル推定値と観測値とを比較する必要がある。以上2点が今後の課題である。

参考文献

- 1) Koster, R.D., P.A. Dirmeyer, et al.: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *Science*, Vol.305, pp.1138-1140, 2004.
- 2) Dirmeyer, P.A., X.Gao, and T.Oki: The second global soil wetness project (GSWP-2) science and implementation plan, IGPO Publication Series No.37, 2002.
- 3) Dirmeyer, P.A., X.Gao, M.Zhao, Z.Guo, T.Oki, and N.Hanasaki: The Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2): Multi-model analysis and implications for our perception of the land surface, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol.87, pp.1381-1397, 2006.
- 4) Tanaka, K.: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto University, 2004.
- 5) Yorozu, K., K. Tanaka, and S. Ikebuchi: Creating a global 1-degree dataset of crop type and cropping calendar through the time series analysis of NDVI for GSWP2 simulation considering irrigation effect, *Proc. of 85th AMS Annual Meeting*, 19th conference of Hydrology, 6.8, 2005 (CD-ROM)
- 6) 萬和明, 田中賢治, 池淵周一: 全球灌漑要求水量と降水量の相関分析, *水工学論文集*, 第50巻, pp.535-540, 2006.
- 7) Guo, Z., and P. A. Dirmeyer: Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 1. Intermodel comparison, *J. Geophys. Res.*, Vol.111, D22S02, doi:10.1029/2006JD007233, 2006.
- 8) Robock, A., K.Y. Vinnikov, G. Srinivasan, J.K. Entin, S.E. Hollinger, N.A. Speranskaya, S. Liu, and A. Namkhai: The Global Soil Moisture Data Bank, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol.81, pp.1281-1299, 2000.
- 9) Oki, T., T. Nishimura and P.A. Dirmeyer: Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.77, pp.235-255, 1999.
- 10) Entin, J. K., A. Robock, K. Y. Vinnikov, V. Zabelin, S. Liu, and A. Namkhai: Evaluation of Global Soil Wetness Project soil moisture simulations, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.77, pp.183-198, 1999.