

Estimation of Root Zone Soil Moisture and Surface Fluxes Partitioning Using Near Surface Soil Moisture Measurements

By Jikang LI and Shafiqul ISLAM

In: *J. Hydrology*, **225**, 1-14 (2002)

演者：安形康 agata@iis.u-tokyo.ac.jp

0 . 要旨

地表観測データをもとにモデルの逆解法を通じて根層土壌水分を推定する手法の有効性を検討するのがこの論文の目的である。四層の土層を持つ LSM と FIFE のデータを用いて、「地表の土壌水分の深層土壌水分に対する感度は、地表フラックスに対する感度とは異なる」ということを見出した。従って、もし地表の土壌水分が（最小二乗法の観点から）よく合うように土壌水分プロファイルの初期値を設定した場合、かえって地表フラックスの推定がうまくいなくなる可能性がある。また、地表観測から土壌水分プロファイルを復元する方法の精度を検討した結果、この精度は地表の土壌水分の初期値に大きく依存することを見出した。たとえば、地表が湿潤な場合、リモートセンシングによって導き出した地表近傍土壌水分値をもって初期値とすれば、土壌水分プロファイルを充分復元できるものと推定された。一方、地表近傍がより乾燥している場合は、地表付近の土壌水分と深層の土壌水分の挙動が完全に異なるものとなっていることがあった。つまり、地表付近土壌水分に基づいた初期値設定では土壌水分プロファイルの推定に大きな誤差が入ることがある。

1 .Introduction

土壌水分定量化の重要性とそのリモートセンシングの現状:大気陸面相互作用の理解に、土壌水分のプロファイルを正しく測定・推定することの重要性 / 最近マイクロ波を用いた土壌水分リモートセンシング技術が発展していること

/ しかしそこでいう「土壌水分」は表層数 cm のものであること...と、いまや常識的な話題。

土壌水分プロファイルの推定: 単純な線型回帰法を用いたものから、逆問題を応用したものまで、ここ 20 年試されている。Kostov and Jackson (1993)に詳細なレビューがある。彼らの結論: 最良の方法は、リモセン土壌水分の proper integration and sequential assimilation とモデリングを組み合わせること。

もう一つの研究手法...深層土壌水分と大気下層の状態量を関係付けること(気温・湿度など)。ただしこの関係付けの正当性を検証するのは困難。

表層土壌水分と深層土壌水分: さらにもうひとつの研究手法...リモセンで得た地表面状態量(地表面温度など)をもちいて LSM から土壌水分プロファイルを逆推定。Calvet et al. (1998)が使った手法である。その結論: 「2 層の LSM を用いて土壌水分プロファイルを推定できる。それには十分なフォーシングデータと、数日間・数箇所地表土壌水分観測があれば充分」さらに「地表の土壌水分と深層土壌水分は高い相関。一方をもう一方の関数で表せる」

ところが、Capehart and Carlson(1997)は全く逆の結論。「表層土壌水分を用いて全層土壌水分を推定するのは無理。」

これは、乾燥過程では土壌水分の鉛直勾配が大きくなり、表層土壌水分と深層土壌水分の乖離 decoupling が起こるから。そして、表層土壌水分から全層土壌水分を推定した場合、地表フ

ラックスの分配もうまく再現されない。

表層土壌水分と深層土壌水分の関係，とくにその相関については，このように議論が絶えない状況である。Calvetらは相関が高いというし，Capehart and Carlsonは，そういう相関は，もしあるにしても，それ自体表層土壌水分状態に左右されるという

ただし，両者が完全に矛盾するわけではない。前者は0~50mm deepの土層，後者はもっと薄い土層の話をしているのである¹。

Decouplingの性質：decouplingをよく捉えたければ裸地を対象とするべきである。なぜなら，この現象は植生活動によって抑制され得るから²。ということは，一般的に言えばLAIに関係するということでもある。

地表フラックスの推定：従来の研究で充分解明されていないことがまだある。これは再現された土壌水分プロファイルを地表面フラックスのpartitioningに対応付けることがどれだけできるかという検討である。

本研究の目的：ISLSCP³ FIFE⁴のデータを用いて次の検討を行なう：[1]複数の湿潤過程・乾燥過程を対象にして表層土壌水分と深層土壌水分の関係を明らかにする [2]深層土壌水分の初期値を表層土壌水分量を元にして与えた場合の，地表フラックス分離に与える影響を検討

¹ 本文より：熱赤外リモセンの応用のため。

² 概念的に言えば，植生がなければ地表近傍のみがあつという間に乾くということ。

³ International Satellite Land Surface Climatology Project .
<http://www.gewex.com/islscp.html>

⁴ First ISLSCP Field Experiment. 1987-1989年にかけて米国 Kansas州 Manhattan 近くの Konza Prairie Natural Research Area に設定された 15km 四方の領域(39° 03'N, 96° 32'W)を対象に，気象・水文・土壌・生態などを対象に地上観測・リモセンを含む多種多様の観測が行われた。現在では，これらのデータが収められているデータセットを FIFE と呼ぶことがおおい。このデータセットを用いた研究例は多く，データ集めプロジェクトの成功例としてよく引き合いにだされる。

<http://www-eosdis.ornl.gov/daacpages/fife.html>

する。

2 A Brief Description of the Land Surface Model and Data

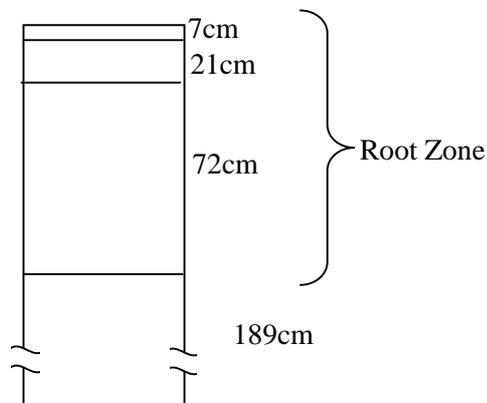
2.1 Description of the land surface model

地表面モデル：Viterbo and Beljaars(1995)のモデルを用いる。これは ECMWF で使い込まれてきたモデルである。土層は4層である。主な特徴は

- ・ 地表における熱フラックスと水フラックスは二つの偏微分方程式であらわされる。土層の厚さとその層分割数は，日内変動から季節変動までを適切に取り扱えるように設定されている。
- ・ 蒸発散は，wet canopy や地表貯留水からの蒸発/根を通した蒸散/地表からの土壌水分の蒸発の3成分からなる⁵
- ・ 土壌の物理的性質は，例によって例のごとく Clapp and Hornberger (1978)による

土層とその分割：土壌の熱・水の移動は古典的な拡散方程式による。上部境界は地表面の熱水収支を解いて得られた値，下部境界は熱水の移動ゼロとする。拡散係数は各層の地温や土壌水分の関数とする例の手法で求める。

土層は四層。それぞれ次のような厚さで計289cm。根があるのは上部3層(計1m)のみ。



⁵ わざわざ書くことか，これ？と思いながらレジメにも

大まかに言えば等比数列的に厚さが増えてゆく土層である。

フラックス算定：Richardson 数でなく Obukhov 長の関数として大気最下層と地表の間の抵抗を表すことにより，フラックスをパラメタライズした．熱フラックスに関する粗度長は水フラックスのそれと同じとした．蒸発散のパラメタリゼーションは Nilhan and Planton(1989)と Viterbo and Beljaars(1995)による．

各種パラメタについて，Table 1にまとめて示す．

2.2 Description of data and model validation

データ：前述のように FIFE⁶からもってきたデータ．サイト平均の値を用い，1987 年 5/27 ~ 10/15 を対象とする．

この期間中，LSM のドライブに必要なフォーシングは 30 分間隔（各時間間隔平均）で揃っている⁷．地表フラックスは渦相関法と Bowen 比法で 30 分間隔のものが得られている⁸．土壌水分は，表層土壌(0~5, 5~10cm)は重量測定，深層(20~200cm)は中性子水分計を用いて測られている⁹．

土壌水分観測値と LSM の検証：Fig.1に各層に相当する土壌水分観測値の変化を示した¹⁰．

書いてしまった(笑)

⁶ 植生や地形については後で出てくるが，tall grass で，moderate landform である．

⁷ http://www-eosdis.ornl.gov/FIFE/Groups/FIFE_Group11.html , http://www-eosdis.ornl.gov/FIFE/Groups/FIFE_Group12.html なお，reference height は 2m

⁸ http://www-eosdis.ornl.gov/FIFE/Groups/FIFE_Group10.html

⁹ http://www-eosdis.ornl.gov/FIFE/Groups/FIFE_Group08.html 0-5, 5-10., 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120., 140, 160, 180, 200cm のデータがある．これを LSM の層に換算したと思われるが，第二層は 5-10cm と 20cm の二つの値から計算したのか？

¹⁰ 日数が 100 日不足しかなく，これは 5/27 ~ 10/15 (つまり 141 日分) というキャプションと明らかに矛盾する．おそらくは，本研究で直接の対象とした 5/27 ~ 8/11(76 日間)を含む短い期間を書いていると思われる．

浅い層ほど変動が激しい．特に最下層は圃場容水量 field capacity 程度で落ち着いてしまっている．Li and Islam(1999)は FIFE データを用いて本研究で用いている LSM を検証している¹¹．それによると，1層2層の土壌水分はよく再現でき，それより深い層についてはやや underestimate だった．LE は相関係数 0.92 で再現できたが H は相関係数は 0.65 にしかなかった．Viterbo and Beljaars(1995)は，この LSM を FIFE のみならず Cabauw(オランダ)や ARME(アマゾン)についても検証している．またこの LSM は ECMWF において現在使用されているモデルである¹²．

3 Methodology

乾燥湿潤サイクルの抽出：Fig.1 から，土壌が乾燥するステージ・湿潤化するステージが明瞭に分けられる．そこで，次の概念を定義する：

- full-cycle：wet な表層土壌が乾燥しはじめてから，次の降雨で湿潤化し表層土壌水分が極大になる or 元に戻るまで．あるいはその逆．
- half-cycle：上記の乾燥プロセスないし湿潤プロセスの一方のみを含むサイクル

後者は乾燥過程ないし湿潤過程しか含まないのに対して前者は乾燥過程とそれに引き続く湿潤過程が両方入る．Fig.1 からこれを抽出すると，

- full-cycle：5/27-6/25(J.D.¹³147 ~ 176)
6/25-8/11(J.D.176 ~ 223)
6/15-7/29(J.D.166 ~ 210)

¹¹ 本研究のデータを用いてとは特定していないが，FIFE のデータ量はそれほど多くないので，多分同じ，もしくは平均化プロセスがちょっと異なるだけのものだろう．

¹² だから信頼できるといいたいのだろうか．

¹³ Julian Day. Fig.1 参照．Fig.1 で左端が 5/27，最初の大きな谷が 6/15，10 日あとの大きなピークが 6/25，スパイク状に下がるのが 7/9，次の大きな谷が 7/29，最後の大きな山が 8/11 と思われる．Fig.1 にサイクルも書いておけばよいのに．

最初の二つは乾燥過程 湿潤過程，最後は湿潤過程 乾燥過程というサイクル

- half-cycle: 5/27-6/15(J.D. 147 ~ 166)
6/15 ~ 6/25(J.D.166 ~ 176)
6/25 ~ 7/9 (J.D.176 ~ 190)

1,3 番目は乾燥過程，2 番目は湿潤過程．

こうして，さまざまな乾燥湿潤条件を得ることができた．今後の解析は，すべてこの cycle 単位の計算を行う．

次に，表層土壌水分（これはリモセンで測れうる）から土壌水分プロファイルモデルの最適化を通じて推定することができるかどうか検討するための実験を行う．

実験設定：まず記号の定義： D_1, D_2, D_3, D_4 ：各土層の厚さ（前出）， W_g, W_2, W_3, W_4 ：各土層の土壌水分．

各サイクルについて... W_g の初期値は観測値を与える．そして W_2, W_3 ，つまり根層土壌水分の初期値を0.15（この土壤の場合，シオレ点）から0.45(飽和含水量)まで0.05刻みで同時に変えて，サイクル期間のLSM実験を行ない，結果を観測値と比較する．結果はNRMSE¹⁴で比較する．

なお， W_4 は常に圃場容水量で一定とする．

4 Result

4.1 Relationship between the soil moisture profile and surface soil moisture and fluxes

Fig.2 ~ Fig.5 に結果を示す．各ラインが各サイクルに相当する．横軸が W_2, W_3 の初期値，縦軸がNRMSEで，小さいほど推定誤差が小さい．逆に言えばNRMSEを最小にする横軸の値が， W_2, W_3 の初期値として適当であったことを示す．Fig.2 = S.M._{surf}，Fig.3 = IE，Fig.4 = H，Fig.5 = S.M._{RZ}である．

表層土壌水分：Fig.2 参照．NRMSEは， W_2, W_3 の初期値($(W_2)_0, (W_3)_0$)にたいする依存性が大きい．また，この初期値と，サイクル開始時の観測表層土壌水分量の乖離が激しいほど，NRMSEが大きくなる傾向がある¹⁵．

NRMSEはfull-cycle(Fig.2 上図)のほうがhalf-cycle(下図)より小さくなる傾向がある．しかしながら全体的に，湿潤乾燥状態やサイクルの長さを問わず，初期値=0.30程度(ほぼ圃場容水量)のところでNRMSEが最小になるような傾向が見られる¹⁶．

潜熱フラックス：Fig.3が潜熱の結果 $(W_2)_0, (W_3)_0$ が圃場容水量程度のところまでNRMSEが順調に下がってゆくが，それ以上になっても変化しない．

顕熱フラックス：Fig.4が顕熱の結果．潜熱フラックスの場合とは異なり， $(W_2)_0, (W_3)_0$ が0.30を越えてもまだNRMSEは下がりつづける傾向が残る¹⁷．

深層土壌水分量：Fig.5が結果．Fig.2と似ていることが分かる．顕熱フラックスと深層（根層）の土壌水分量の強い相関が示唆される．

これらをまとめて...：どのように深層土壌水分をイニシャライズすると最良の結果が得られるか？という答えは，求めようとする変量によって異なる．

たとえば，表層土壌水分量を最もよく再現するように深層土壌水分量の初期値を設定する

¹⁵ 本文より：5/27-6/25 (Fig.2 上図の実線)，5/27-6/15(下図の実線，いずれも湿潤からスタート)のサイクルでは， $(W_g)_0=0.420$ だった．これに対して， $(W_2)_0=(W_3)_0=0.15$ の 때가NRMSEが最大になった．一方，6/15-7/29(上図破線)と6/15-25(下図破線．ともに乾燥からスタート)では， $(W_g)_0=0.186$ であり， $(W_2)_0=(W_3)_0=0.45$ のときにNRMSEが最大になった

¹⁶ NRMSEが極小となる $(W_2)_0, (W_3)_0$ の値も， $(W_g)_0$ に左右されるように見えるがそのことは書いていない．

¹⁷ 深層土壌水分をOverestimateしたほうがフラックス算定結果がよくなる！この原因は後に考察される．

¹⁴ MRSEを観測値の で割ったもの

と、その設定が地表フラックスの最良の推定を与えるとは限らないのである。これが従来言われてきた decoupling の原因の一つかもしれない。

なお、深層土壌水分を適切に調整することによってフラックスを推定するのは、FIFE サイトについては密な植生の存在のためにややこしい問題をはらんでいる。LSM 実験の結果、E の 90% は根層からの水の吸引によることが分かっている。つまり LSM における根の分布の設定も影響する。これはのちに議論する。

4.2 Effects of soil moisture profile initialization based on remotely sensed soil moisture

前節より、LSM から土壌水分プロファイルを逆推定する方法は簡単でないことが分かった... しかしながらもう少し検討をつづける。

前節より、乾燥湿潤条件にかかわらず、深層土壌水分を 0.30 に初期化すると土壌水分プロファイルの推定誤差が最も小さくなる傾向が読み取れる。この NRMSE をもっと小さく出来ないだろうか。

ここで、表層土壌水分の観測値 W_g (の時系列) を衛星から得られた表層土壌水分観測値であると仮定する¹⁸。そして次の条件で実験を行う：

各サイクルに対して...

- ・ 実験 1 : 各層の W_0 は圃場含水量
- ・ 実験 2 : 各層の W_0 は W_g 観測値で与える¹⁹

実験 1 は、要するに前節で最善とされた手法である。

結果を Fig.6 に示す。一つ一つのプロットは各

サイクル²⁰、横軸は実験 1 の NRMSE、縦軸は実験 2 の NRMSE で、各点は予報変数である。1:1 の線より点が右下に来ているということは、実験 2 のほうが推定精度がいいことをあらわす。

さて、結果が良かったのは？

答えは cycle1,2,3,4。つまり最初が湿潤だったサイクルである。Cycles5,6 では土壌全部の層の土壌水分初期値を W_g で与えている。ここからスタートすると decoupling の効果がでてくるため成績がよくなる。

Table2²¹は各サイクルの各実験について、土壌カラム全層の土壌水分を示したものである。Cycles1-4 (湿潤から始まるサイクル) では W_g で初期化したほうが過大評価・FC で初期化したほうが過小評価を与え、Cycles5,6 (乾燥から始まるサイクル) では逆。ここから、「土壌水分プロファイルを過大評価したほうがフラックスをよりよく推定できるのでは？」という疑問が湧く。

その原因は、LSM の根の分布にあるかもしれない。現時点で、根の各層における分布割合 R_1, R_2, R_3 はいずれも 0.33 となっている²²。これは FIFE の grassland には適合しないかもしれない。R が D に比例すると考えて $R_1=0.07, R_2=0.217, R_3=0.72$ と設定すると、これまで RMSE が IE について 25.21、H について 50.89 (単位 W/m^2) だったのが、それぞれ 15.98、23.27 になった。

¹⁸ 本文より：数 km スケールの代表的表層土壌水分とあらわすリモセンデータと、ポイント観測の表層土壌水分とではスケールギャップがある。しかし、Sellers et al.(1997) は、低起伏の草原ならばこれらのスケールギャップは存在しないことを見出している。
.....「湿潤変動帯では成り立たない議論だ」と虫明先生の声が聞こえてきそうである(笑)

¹⁹ (W_g)₀ から (W_2)₀ と (W_3)₀ を推定するのではないのである！

²⁰ cycle1,2 の日付が本文と違っている。また、各サイクルの湿潤 - 乾燥過程を図の順番で書くと

＼
＼
／

となる(こういうことは図に書いておけばいいのに...)

²¹ 本文では「Table1」となっている...

²² 根の 1/3 が第一層、1/3 が第二層、1/3 が第三層にあるということ。