

II-366 Kalman フィルターによる土壌水分量同化手法の開発のための基礎的研究

京都大学大学院 正員 ○ 田中賢治 大阪市 正員 中村忠則
 京都大学大学院 正員 椎葉充晴 京都大学防災研究所 正員 池淵周一

1. 諸言 土壌水分量は、地表面の各種フラックスを調整し、地表付近の大気場に大きな影響を与え、さらには降水にまで影響を及ぼすことが様々な研究によって示されている。土壌水分量が変動する時間スケールは非常に長いいため、土壌水分量の初期値を誤ると、長期間にわたり予報精度に影響を及ぼすことになる。ところが、土壌水分量の観測が行なわれている地点は限られており、また計測されているとしてもモデルで表現している格子スケールの平均量を観測しているわけではないので、数値予報において、土壌水分量の初期化が非常に重大な課題となっている。

地表付近の気温と湿度の予報誤差(モデルの計算値と観測値の差)の線形結合により土壌水分量を修正する手法(最適内挿法)が開発され、ECMWFとMeteo Franceの現業モデルで試験運用されている^[1]。最適内挿法は初期値を変えたモンテカルロシミュレーションにより予報誤差の共分散や標準偏差などの統計量をあらかじめ計算しておくものであるが、様々な地表面条件に応じた統計量を得るには膨大な計算量を要する。

そこで本研究では、陸面モデルの物理過程を直接的に取り込んだ形で土壌水分量を修正する手法を開発することを目的として、Kalmanのフィルタリング予測手法^[2]を陸面過程モデル(SiBUC)^[3]に応用する。

2. Kalman Filterの応用 Kalman Filterを数値予報モデルに導入して土壌水分を推定するためには、広域的に観測値が得られるものを観測ベクトルとして採用しなければならない。本研究では静止衛星の赤外画像から入手することを想定して、地表面温度(キャノピー温度(T_c), 地温(T_g))を観測ベクトル(y_k)とする。

本研究では、状態量(土壌水分, 温度)の予報方程式(非線形)を平均値回りにTaylor展開して線形化したものをシステムの状態方程式とするため、SiBUCモデルの物理過程が直接的に ϕ_k 行列(状態推移行列)に反映される。

$$x_{k+1} = f(x_k) = f(\bar{x}_k) + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\bar{x}_k} (x_k - \bar{x}_k) \quad (1)$$

$$= \phi_k x_k + B_k \quad (2)$$

本研究でのフィルタリング修正手順は以下の通りである。

1. 状態量の初期推定値・初期共分散を与える。
 $\hat{x}_{0|-1} = \hat{x}_0, P_{0|-1} = P_0, k = 0$
2. モデルで x_k の単純推定値($\hat{x}_{k|k-1} = [T_c, T_g, \dots]^T$), y_k の予測値($\hat{y}_{k|k-1} = [T_c, T_g]^T$)を計算する。
 $\hat{y}_{k|k-1} = H_k \hat{x}_{k|k-1} + \bar{w}_k$ ($\bar{w}_k$ は観測誤差)
3. 時刻 k の観測値ベクトル(y_k)を入し、カルマンゲイン(K_k)と x_k の最適推定値 $\hat{x}_{k|k}$ を求める。
 $K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$
 $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - \hat{y}_{k|k-1})$
4. 次のステップに備えて共分散行列($P_{k+1|k}$)を計算し、記憶しておく。
 $P_{k+1|k} = \phi_k (P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1}) \phi_k^T + Q_k$
5. $k+1$ をあらためて k とし、2に戻る。

3. 計算条件 SiBUCに気象データを与えて1次元でドライブし、土壌水分量と各物理量の関係を詳細に検討した結果、各種フラックスおよび状態量を支配するのは地面では相対湿度(f_h), キャノピーでは葉の水分ポテンシャル(ψ_{leaf})であることがわかった。Kalman Filterの性能を確かめる上で、状態量の真値が必要になる。そこで、湿潤状態から乾燥状態へ移行する境界点である $\psi_1 = \psi_{cl}$ (葉の気孔が閉じ始める時の水分ポテンシャル)となるような土壌水分場を初期値としてcontrol runを実行する。またcontrol runの地表面温度(T_c, T_g)の値にノイズをのせたものを観測ベクトルとする。

JSM-SiBUCに導入する前に、1次元でKalman Filterの性能をチェックしたところ、問題が現れたので、以下の制約を設けることにした。

- filteringによって乾燥側の水分量が湿潤側に修正され過ぎることを防ぐために、 W_1, W_2 に関しては、湿潤領域に入手前(W_{1cr}, W_{2cr})で待機させる(図1参照)。

キーワード: カルマンフィルター, 土壌水分, 陸面過程, データ同化

連絡先: 〒606-8501 京都市左京区吉田本町・TEL:075-753-5096・FAX:075-753-4907

- 第3層土壌水分量 (W_3) は修正されずに取り残され、不自然になるため、 W_2 から ψ の線形プロファイルを仮定して W_3 を算定する。

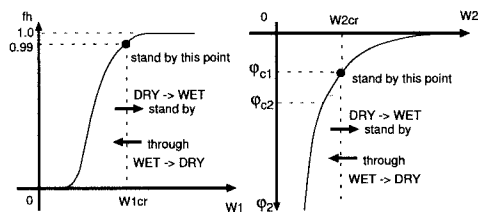


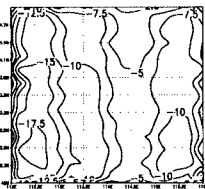
図1 土壌水分の特機点

JSM-SiBUC では、土壌水分の効果が現れやすい晴天弱風条件にある3領域（緯度 $45 \sim 47^\circ$ ，経度 $127 \sim 130^\circ$ / 緯度 $35 \sim 35.5^\circ$ ，経度 $133 \sim 136^\circ$ / 緯度 $42 \sim 45^\circ$ ，経度 $112 \sim 116^\circ$ ）の土壌水分の初期値のみを変化させた identical twin の数値計算を実行する。なお、計算期間は1997年7月19日00Zから96時間積分である。

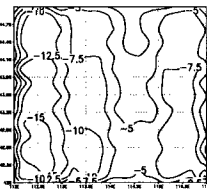
JSM88-SiBUC output (inich - ctl)

Diff Soil Moisture 2nd E112-116 N45-47

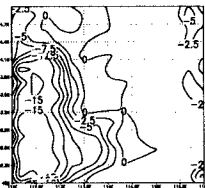
initial 7/19 9hr(JPT)



no filtering 7/23 9hr(JPT)



filtering 7/21 9hr(JPT)



filtering 7/23 9hr(JPT)

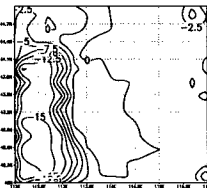


図2 W_2 の control-run との差 (空間分布)

4. 適用結果と考察 Filtering をかけた効果を見るために、 W_2 の control run との差をとったもの (空間分布) を図2に示す。4日目 (右下) でもまだ15%以上差が残っている部分があるものの、Filtering しない場合 (右上) と比べ全体的に良く修正されている (絶対値が小さい)。差が残っている部分でも、2日目 (左下) と4日目 (右下) を比較すれば、徐々に修正されていることがわかる。

また、各地点の W_1, W_2 の control run との差の経時変化を図3に示す。Filtering により乾燥地点 (上部) では真値 (control-run の値) に漸近していることがわかる。湿潤地点 (左下) でも収束速度は遅いが、徐々に真値に近付いている。なお、Filtering をしない場合の W_1 (実線) に周期性が見られるが、これは control run の W_1 が日変化するのに対して乾燥条件では W_1 はほとんど変化しないためである。図では示せないが、土壌水分が修正されることで、フラックスや下層大気場も真値に近くなる。

JSM-SiBUC output (Random Err.= 3degC)

Diff Soil Moisture (1st,2nd) 1997/7/19

no filtering filtering no filtering filtering

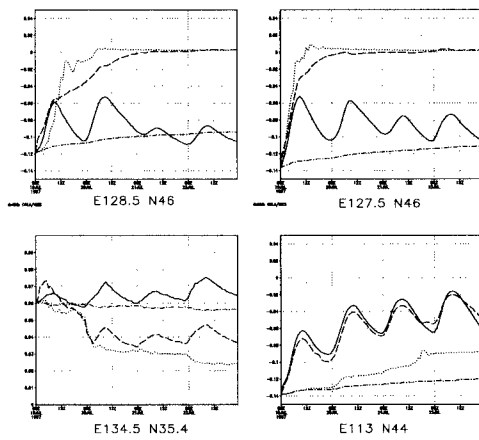


図3 W_1, W_2 の control-run との差 (経時変化)

5. 結語 本研究では、Kalman Filter を陸面過程モデル (SiBUC) に応用して土壌水分量を同化するシステムをテストした。control-run の出力値を観測ベクトルとして用いたが、今後は衛星データから推定された表面温度を用いて Filtering を実行し、より実用的なシステムを構築していきたい。また本システムを応用すれば、状態量だけでなく陸面パラメータの推定も可能になることが期待される。

参考文献

- [1] Herve Douville et al.: Sequential soil moisture analysis in the presence of initial and prescribed errors using the ECMWF single column model, Mon. Wea. Rev.(submitted)
- [2] Kalman, R.E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, J.Basic Eng., vol.82D, No.1, pp35-45, 1960.
- [3] 田中賢治・池淵周一: 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京大防災年報, 第37号, B-1, pp299-313, 1994.
- [4] 田中賢治他: SiBUC-JSM88 結合モデルのテストラン, 京大防災年報, 第41号, B-2, pp135-154, 1998.