

京都大学工学部	学生員	○粟津浩介
京都大学大学院工学研究科	正員	萬 和明
京都大学大学院工学研究科	正員	Kim Sunmin
京都大学大学院工学研究科	正員	立川康人
京都大学大学院工学研究科	正員	椎葉充晴

1 序論 水循環において、植物や地表面からの蒸発散は非常に重要な要素であり、より精度の高い蒸発散量推定のためには、蒸発特性を表すパラメータを時系列も含めて考慮に入れたパラメータ設定が必要だと考えられる。パラメータ設定において有効な手法の一つにデータ同化手法が挙げられる。平滑化手法へも容易に拡張可能な汎用性の高いデータ同化手法として、粒子フィルタがある¹⁾。

そこで本研究では、蒸発散量推定に広く用いられるバルク式において、蒸発効率 β の時間変化の推定を目的として、粒子フィルタによる平滑化手法を用いたシミュレーションを行う。シミュレーションにより推定された蒸発効率 β が土壌水分や地表面温度とどのような関連があるか、また、その関連性がどのように時間変化するかについて分析する。

2 モデルの概要 蒸発散推定の方法として様々な方法がある。その中でもバルク式は地表面温度を必要とするが、気温などの情報が一高度だけでよい。そこで本研究では、地表面温度の推定に強制復元法を用い、バルク式と連立してシミュレーションを行う。

2.1 バルク式 本研究で用いたのは次のバルク式の潜熱輸送量を求める式である。

$$\lambda E = \lambda \rho \beta C_H (q_s(T_s) - q) u \quad (1)$$

ここで、 E は水蒸気輸送量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 T_s は地表面温度 (K)、 u は高度 z における水平風速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、 q は高度 z における比湿 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $q_s(T_s)$ は地表面での飽和比湿 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 λ は水の気化熱 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) である。

2.2 地表面温度の推定式 地表面温度の推定には強制復元法²⁾を用いた。

$$c_g \frac{dT_s}{dt} = R_n - H - \lambda E - \omega c_g (T_s - T_d) \quad (2)$$

$$\sqrt{365} c_g \frac{dT_d}{dt} = R_n - H - \lambda E \quad (3)$$

ここで、 T_d は土層全体の平均温度 (K)、 R_n は純放射量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、 H は顕熱輸送量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、 λE は潜熱輸送量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、 ω は T_s の周期を表す角周波数 (s^{-1})、 c_g は土層の有効熱容量 ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) である。

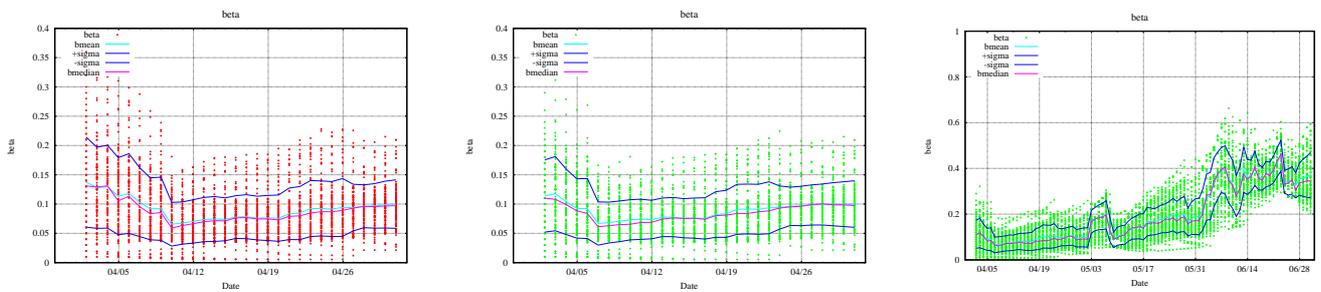
3 粒子フィルタ

3.1 粒子フィルタの概要 粒子フィルタは非線形・非ガウス型の状態空間モデルのフィルタリングに用いることができる。アルゴリズムが簡単なためプログラムへの実装が容易である。このフィルタリング方法は、確率分布を独立な実現値と見なせる多数のサンプル (粒子フィルタではこれを「粒子」と呼ぶ) で近似し、それぞれの粒子がモデルに従ってどのように変化するかをシミュレートすることにより、予測分布の計算を実現する。そして、フィルタリングの段階ではそれぞれの粒子の「尤度」を重みとしてリサンプリング (復元抽出) することにより、フィルタの分布を近似する粒子を求める。

3.2 モデル式への適用 本研究ではバルク式 ((1)式) における蒸発効率 β に着目して、 β の分布を多数の粒子で表現しシミュレーションを行う。蒸発散量推定には(1)式を用い、(1)式における T_s の推定には(2)式をそれぞれ用いる。つまり、状態量は β_t であり、観測値として得られるのは潜熱輸送量 λE である。

実際の手順はつぎのようになる。

1. 粒子 $\beta_0^{(i)}$ に初期分布として一様な分布を与える。
2. それぞれの粒子について、強制復元法から推定した地表面温度と比湿・風速・気圧の観測データを(1)式に代入して潜熱輸送量を求める。
3. 2.の計算を $\Delta t = 1800\text{sec}$ として1日分繰り返す。
4. 推定された潜熱輸送量を一日分足し合わせて、観測された一日分の潜熱輸送量と比較して尤度を求める。尤度関数には正規分布を用いた。
5. 各粒子の重み $w_t^{(i)}$ を尤度より求める。



(a) フィルタリング時の2003年4月の蒸発効率 β の時間変化 (b) 平滑化手法による2003年4月の蒸発効率 β の時間変化 (c) 平滑化手法による2003年4月～6月の蒸発効率 β の時間変化

図1 蒸発効率 β の推定結果、赤点・緑点はそれぞれ β の分布、水色線が蒸発効率 β の平均値、紫線が蒸発効率 β の中央値、青線が蒸発効率 β の平均値±標準偏差をそれぞれ示す。

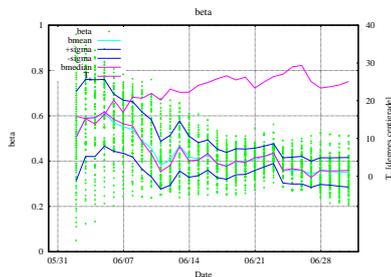


図2 2003年6月の蒸発効率 β の推定結果と地表温度(桃色線)。

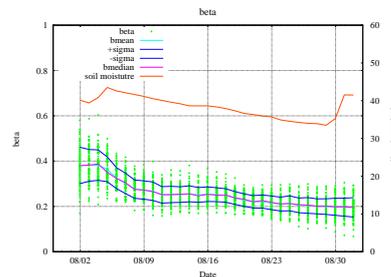


図3 2003年8月の蒸発効率 β の推定結果と土壌水分量(オレンジ色線)。

6. 5.の重みに比例した確率で $\beta_t^{(i)}$ をリサンプリングする。
7. 正規分布に従うノイズ r_t を蒸発効率 β に加える。ここで r_t の平均は0で分散は β_{t-1} の1/10である。
8. 2.~7.を繰り返す。

平滑化を行う場合は手順6.を次のように変更する。

- 6-S. 5.の重みに比例した確率で $\beta_{t-L}^{(i)}, \dots, \beta_t^{(i)}$ をリサンプリングする。

ここで L は粒子を保存する期間の長さである。 L は大きくしすぎるとかえって分布の形を損なうため、本研究では $L=3$ とする。なお、平滑化による効果を分析するため、フィルタリングと平滑化の2つの手法を用いて蒸発効率 β を推定する。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーションの概要 本研究のシミュレーションには、CEOP (Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project) で公開されているアメリカのBondville地点の気象データを用いる。シミュレーションの期間は、2003年4月から8月までである。

4.2 シミュレーション結果 2003年4月の計算結果(図1(a)、図1(b))から、蒸発効率 β は短い期間でも緩やかではあるが変化していることがわかる。フィルタリング時の結果(図1(a))と比較すると平滑化を行うこと(図1(b))により β の分布のばらつきが小さくなっていることがわかる。また、3ヶ月の計算期間でも β の分布を推定できている(図1(c))。蒸発効率 β の時間変化は地表温度(図2)や土壌水分量(図3)と似たような変化をすることがわかる。

5 結論 粒子フィルタによる平滑化手法とバルク式・強制復元法を用いて蒸発効率 β の時間変化を推定した。推定された蒸発効率 β の時間変化は土壌水分や地表温度と関連性が見られた。これらの関連性を明らかにするには、さらに詳細な分析が必要である。

参考文献

- 1) 北川源一郎: モンテカルロフィルタおよび平滑化について, 統計数理, 第44巻, 第1号, pp.31-41, 1996.
- 2) Bhmralker, C. N.: Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model, *J. Appl. Meteorol.*, Vol.14, pp. 1246-1258 1975.