

MCMC 法および粒子フィルタ法を用いた河川濁度推定モデルの検討

岐阜大学大学院自然科学技術研究科	学生会員	○范 顔楊
岐阜大学工学部	学生会員	中澤 麗稀
(株)日水コン中央研究所	正会員	川口 智哉
岐阜大学工学部	正会員	篠田 成郎

1. はじめに

近年、豪雨に伴う水質事故発生が問題となっている。河川の濁質濃度が高くなった場合には、上水道原水取水が制限され、予め原水調整池に貯留しておいた濁質を含まない水を配水するが、この調整池の容量を適切に決めることが重要になる。また、取水制限の開始と終了を的確に予測することも大切となる。

本研究では、これらの実用的ニーズへの対応を可能とするため、高濁度河川水の発生現象をモデル化する。また、データ同化手法のMCMC（マルコフチェーン・モンテカルロ）法¹⁾と粒子フィルタ法²⁾による得られるモデルパラメータの持つ意味および両手法の意義を明らかにする。

2. 濁質流出現象のモデル化

本研究では、高濁度河川水が発生したA市を検討対象地域とする。一般に、河川濁度の時間変化は河川流量だけでは決まらず、流出ステージによって流量-濁度応答関係は変化する。そこで、林ら³⁾の研究と同様に、3つの流出成分（A：直接流出、B：中間流出、C：基底流出）に分け、次式のLQ式を用いる。

$$L = \alpha_A Q_A^{\beta_A} + \alpha_B Q_B^{\beta_B} + \alpha_C Q_C^{\beta_C} \dots \dots (1)$$

ここに、 Q_i および α_i 、 β_i ：第*i*流出成分（*i*: A, B, C）の流量およびパラメータである。なお、基底流出に伴う濁質流出は無視できると考えることにする³⁾。

3. 濁質流出モデルのパラメータ同定

式(1)における4つのパラメータ（ α_A 、 β_A 、 α_B 、 β_B ）は、観測結果とモデル推定結果との比較から同定される。試行錯誤的にパラメータを探索する方法もあるが、同定されたパラメータの尤もらしさを担保できることが望まれる。ここでは、代表的なデータ同化手法であるMCMC法と粒子フィルタ法それぞれを用いてパラメータを同定し、これらの得失について検討する。なお、データ同化手法では、大小様々な観測値と実測値

との比較が必要になるが、高濁度発生時しか観測データが得られていない。そこで、平水時の低濁度を仮の観測値として与えることにより、特異なパラメータ同定結果とならないようにする。

3.1 MCMC法による期間内平均パラメータの同定

MCMC法では解析対象期間内の観測値と乱数によって生成される様々なパラメータによる推定値から尤度を求める。図-1は生成パラメータの事後確率分布であり、この最頻値が同定値となる。これらの同定パラメータによる濁度推定結果を図-2に示す。この図には、観測流量、集中型降雨流出モデル⁴⁾による各流出成分の推定流量および観測濁度・仮濁度も併せて示してある。また、図中の丸数字は高濁度が発生した流出イベント番号を表し、赤色水平直線は高濁度発生に伴う取水制限判断濁度（200度）を示す。図-2(a)では推定濁度は高濁度の発生を再現できているように見えるが、図-2(b)では観測値との相違が認められる。MCMC法では解析対象期間全体に関する尤度からパラメータが同定

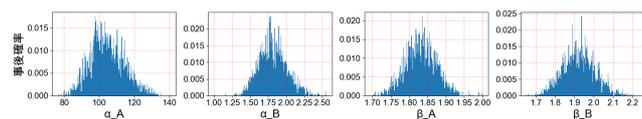
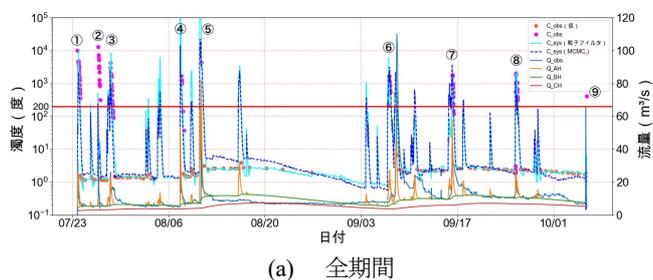
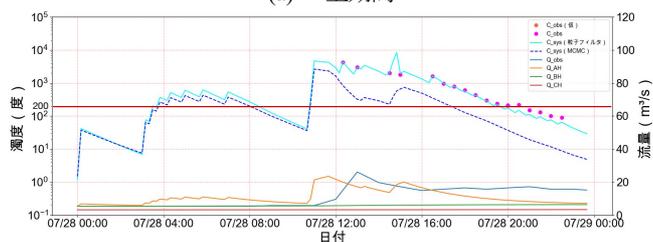


図-1 MCMC法によるパラメータ事後確率分布



(a) 全期間



(b) 特定の期間（高濁度イベント③）

図-2 観測流量、流出成分ごとの推定流量、観測濁度および推定濁度の比較

されるため、期間内平均としてのパラメータと解釈できる。このため、調整池容量を決める場合など、特定の流出現象に着目する必要がないときには有効となるであろう。

3.2 粒子フィルタ法によるパラメータの逐次同定

粒子フィルタ法は時間ステップごとにパラメータを粒子として多数生成することにより尤度を求め、パラメータを逐次同定する方法である。図-3はこうした同定パラメータの時間変化をMCMC法による同定結果と併せて示したものである。また、逐次同定パラメータを用いた濁度の逐次推定結果を図-2に示す。パラメータを時間的に変化させることにより、MCMC法に比べて観測値への追従性が良くなっている。このため、粒子フィルタ法は取水制限のタイミングをリアルタイムに決定する上で有効な手法になると期待される。

4. パラメータ時間変化特性の考察

モデルパラメータが時間的に変化することを濁質流出メカニズムから考察する。降雨浸透・流出時の水分移動速度が大きいほど濁質生産・流出量が増えるため、こうした関係を規定するパラメータが式(1)や一般的なLQ式における β と理解できる。また、水分移動に伴って移動する濁質成分の存在割合がパラメータ α に対応する。図-2および図-3では、イベント①から②のピーク直前にかけて、 α_A と α_B はほぼ一定の小さな値を維持し、移動対象の濁質成分は一定状態と考えられる。この間の濁度変動は地表面付近での水分移動速度に関係する β_A に支配されており、いわゆるファーストフラッシュが現れている。これにより下層に移動した濁質成分がイベント②において流出する様子が α_B と β_B の急増として現れる。さらに、これらのイベントによって動きやすくなった濁質成分が増えるため、イベント③では α_A が急増する。イベント④でも同様な濁質流出が生起するが、高濁度発生までの期間が長く、B層での濁質の動きが緩慢となるため、 α_B や β_B の変化は小さい。同様にイベント⑥でも前回のフラッシュから時間が経過して移動可能濁質成分が減少するため、各パラメータの変動はそれほど大きくない。なお、粒子フィルタ法ではデータの無い期間では最後の同定パラメータが維持されるため、イベント⑥から⑦の間ではイベント⑥でのパラメータが用いられることにより、イベント⑦にてパラメータの急減としてデータ同化が実現

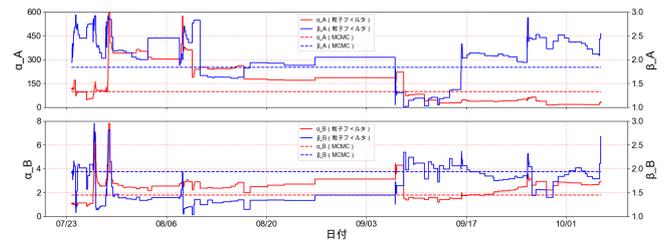


図-3 同定されたパラメータの時間変化

されている。さらに、イベント⑦や⑧では、イベント②と同様に、新たな濁質移動可能成分の発生・移動によって各パラメータ値が急減する傾向を示している。

このように、各パラメータの時間変化は濁質流出のメカニズムに対応しており、粒子フィルタ法により濁質流出の各ステージを判別できると示唆される。一方、MCMC法による同定パラメータ値は粒子フィルタ法による同定値の期間内平均にほぼ一致しているため、濁質流出の平均的特性を表現していると解釈できる。

5. おわりに

本稿では、流出成分ごとのLQ式にデータ同化手法を適用することにより、モデルパラメータを客観的に同定できることを示した。MCMC法により得られるパラメータは解析対象期間全体を表現するため、調整池容量の決定などに応用できると考えられる。一方、粒子フィルタ法から求められるパラメータは濁質流出イベントに対応できるため、流出成分ごとの濁質流出への寄与を考察する際に有用となる。また、これによる逐次推定濁度は観測濁度とよく一致しており、濁度の時間変化をリアルタイム推定する際に有用な手法となり得る。例えば、取水制限のタイミングを予測する上で有効となることが期待される。今後は、別の流域を研究対象にし、データ同化手法の汎用性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Olle Haggstrom (著) / 野間口謙太郎 (訳) : やさしいMCMC入門, 共立出版, 2017.
- 2) 樋口知之: 予測にいかす統計モデリングの基本, 講談社, 2014.
- 3) 林浩平, 范顔楊, Vivien Wanda Rahma, 川口智哉, 篠田成郎: データ同化手法を用いた高濁度河川水の発生予測に関する検討, 令和元年度中部支部土木学会研究発表会講演概要集, 2020.
- 4) Y. Matsui, S. Itoshiro, M. Buma, T. Matsushita, K. Hosogoe, A. Yuasa, S. Shinoda, and T. Inoue: Predicting pesticide concentrations in river water with a hydrologically calibrated basin-scale runoff model, Water Science and Technology, 45(9), 141-148, 2002.