

CommonMP を用いた並列型流出予測システムの構築

京都大学大学院工学研究科	学生会員	藤田翔子
京都大学大学院工学研究科	正会員	立川康人
京都大学大学院工学研究科	正会員	市川 温
京都大学大学院工学研究科	正会員	萬 和明

1 はじめに 集中豪雨が小規模の河川流域で発生した場合、短時間で氾濫や鉄砲水が生じる危険性がある。急な氾濫による被害を低減するために、流量予測の精度向上が求められている。また、日常の流域管理にも精度の良い流量予測は有効である。本研究では、CommonMP と粒子フィルタを用い、高精度かつ実用性、汎用性の高い予測モデルを構築することを目指す。

CommonMP は流域全体を対象とした流出シミュレーションモデルのプラットフォームであり、GUI 環境で操作できるため、モデル作成、解析の実行が容易である。また、並列計算用のオプションが開発されたことにより、計算時間の大幅な短縮が可能となった。粒子フィルタはデータ同化手法の一つであり、フィルタ分布の形状を素直に粒子を用いて近似することにより、非線形・非ガウスの問題も自然かつ容易に扱うことができる。¹⁾ また、他のデータ同化手法に比べシンプルで、実装が容易という特徴を持つ。

本論文では、貯留関数法の流出モデルを要素とするプロジェクトを構築し、並列計算の実施および粒子フィルタを用いた双子実験を実施して流出モデルのパラメータを推定した結果を示す。

2 流出モデルと同化手法 流出モデルとして、集中型流出モデルである貯留関数法を使用した。貯留関数法は要素を組み合わせていく CommonMP との相性がよく、対象流域を変更した場合も要素のパラメータの値や組み換えを変更するだけでよいため汎用性が高い。データ同化手法として、粒子フィルタを使用した。

2.1 貯留関数法 本研究では、連続的な土壌の乾湿状況を考慮する有効降雨モデルおよび、一つの流域の土壌水を一つの貯留量で表現して流出量を算出する貯留関数法を用いた。有効降雨強度 r_e および対象流域の保水量 s_s は次式で求める。

$$r_e = \begin{cases} f_1 r(t - T_L) & (if \quad 0 \leq s_s(t) < \frac{R_{sg}}{1-f_1}) \\ r(t - T_L) & (if \quad \frac{R_{sg}}{1-f_1} \leq s_s(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{ds_s(t)}{dt} = (1 - f_1)r(t - T_L) - e(t) \quad (2)$$

ここで、 r : 流域平均の降雨強度、 t_0 : 計算開始時刻、 f_1 : 有効降雨に関するパラメータ、 T_L : 遅滞時間、 e : 蒸発散量である。

貯留関数法は以下の連続式、貯留高と流出高との関係式から構成される。

$$\frac{ds(t)}{dt} = r_e - q(t) \quad (3)$$

$$s(t) = kq(t)^p \quad (4)$$

ここで、 s : 貯留高、 q : 流出高、 r_e : 有効降雨強度、 p : パラメータである。総流出量 $Q(t)$ は、総直接流出高 $q(t)$ に流域面積 A を乗じた総直接流出量に基底流量 Q_b を加えて、 $Q(t) = Aq(t) + Q_b(t)$ とする。

2.2 粒子フィルタ 粒子フィルタは状態の確率密度分布を多数のサンプル（粒子）で近似するアンサンブル近似を用いたアルゴリズムの一つである。異なる状態量をモデル化した粒子を解析計算した後、観測値と比較し尤度を計算する。その後、復元抽出によって、観測への当てはまりが悪い粒子（尤度が小さい粒子）を破棄し、そのかわりに観測への当てはまりの良い粒子を複製して増やす。¹⁾ リサンプリング手法として、計算負荷が小さいドント方式を採用した。まず、尤度を次式で求める。

$$w_t^i = p(y_t | x_t^i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_t^i - y_t)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

ここで、 y_t : 観測値、 x_t^i : 各粒子の計算予測値、 σ : 観測誤差と関連した標準偏差である。正規化した重みは、上記の尤度から次のように計算する。

$$W_t^i = \frac{w_t^i}{\sum_{j=1}^N w_t^j} \quad (6)$$

ここで、 w_t^i : 各時刻 t の粒子 i の尤度、 W_t^i : 正規化した重みである。

キーワード CommonMP、粒子フィルタ、並列計算、実時間流量予測

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂CクラスターC1棟

リサンプリングの個数は次式で求める。

$$d_j^{(i)} = \frac{w_j^{(i)}}{m_j^{(i)} + 1} \quad (7)$$

$m_j^{(i)}$ は、最初 0 個として、粒子 i に j 回目までに抽出された個数の総和である。 $j = 1, 2, \dots, N$ の順に $d_j^{(i)}$ が最大となる粒子に対して、配分数 $m_j^{(i)}$ を一つ増やす。これを粒子の総数回分繰り返せば復元抽出が完了する。

3 CommonMP を用いた並列計算システムの構築

並列計算用モデルでは、1つのプロジェクトを基に作成した異なるパラメータの値を持つプロジェクトを並列で計算することを目標とする。双子実験用モデルでは、粒子フィルタを用いて、有効降雨強度を示すパラメータを最適化する。ただし、正解値は既知とし、モデルが適切に最適化できているかを確認することを目的とする。

本研究では CommonMP ver1.4 を用いた。CommonMP は無料で利用できるアプリケーションであり、最初から準備されている基本的な要素モデルを用いて GUI 環境でモデルを作成できるため、モデルの作成が容易であり、実用的である。本研究では、次のタイムステップに状態量を引き継げるように、基本的な貯留関数法の流出モデルに土壌の保水量と貯水量を入出力できる機能を追加した流出モデルを用いた。

3.1 並列計算用モデル まず、CommonMP の GUI 環境で、降雨情報を入力する要素、貯留関数法を用いて流出量を算出する要素および結果を出力する要素の 3 つの要素からなるプロジェクトを作成した。次に、構造定義ファイルの書き出しという機能を用いて、構造定義ファイル、動作設定ファイル、プロジェクト計算制御ファイルを書き出した。構造定義ファイルは各要素および要素のつながりの情報を示したもので、これに記載されている要素のパラメータの値を変更することで、パラメータの値や出力のファイル名が異なるケースを生成した。1つの基礎となるプロジェクトから、パラメータの値が異なる 15 個のケースを生成し、解析計算を並列で行った。並列計算を行う際は各ケースで異なるログを使用する必要があり、動作設定ファイルから使用するログを指示する。また、計算の指示は -p オプションを利用し、C# で書いたプログラムから Paralell.for の機能を用いて行った。

3.2 粒子フィルタを用いた双子実験用モデル 並列計算用モデルと粒子フィルタを組み合わせる双子実験を実施した。具体的には以下の通りである。1) $k = 65$ として 1 つのプロジェクトを動作させ、流量を計算する。その結果を観測値とする。2) $k = 35 \sim 100$ まで、 k の値が異なる 15 個のプロジェクトを構造定義ファイルを修正することで自動的に生成し、並列計算する。3) 1) で計算した流出量を観測値として 2) で算出した予測値に対して粒子フィルタを適用する。尤度の高い粒子はドント方式に基づきリサンプリングされる。標準偏差は観測流量の 1/10 の値とし、リサンプリングの際は、元のパラメータの値に $-3 \sim +3$ からランダムに選んだ整数を加えた。4) これを繰り返し行い最終時点での k の値を調べる。

4 計算結果と考察 並列計算は問題なく行うことができた。これにより、処理能力の高いコンピュータを用いれば、大幅に計算時間を短縮できる。また、双子実験においても正解の値に近い k の値および流出量を算出することができた。

各タイムステップにおいて、並列計算後に計算された予測値を集計する必要があるが、この計算は CommonMP 内部で行われているものであり、C# のプログラムからは直接的に終了時を把握できなかった。ファイルの存在を確認しようとすると、ファイルの確認と CommonMP からのファイルの出力のタイミングが重なり、ファイルが作成されないというトラブルが頻発した。これに対しては、出力のファイルの個数を確認して、個数が不十分な場合は再度計算を指示することで対応した。

5 まとめ CommonMP の -p オプションを用いて、並列計算の実施および粒子フィルタを用いた同化計算ができることが分かった。今後の課題として、複数の流出モデルから構成される複雑なプロジェクトを対象とした場合に、どのパラメータや状態量を不確かと考えて粒子フィルタを適用するかを検討する必要がある。また、今回の並列計算はデータ並列計算で行ったが、タスク並列による処理も可能であり、並列手法による比較も検討してみたい。

参考文献

- 樋口知之: データ同化入門, pp.101-104, 朝倉書店, 2011.