

小流域を対象とした貯留関数法を用いたリアルタイム水位 予測に関するシミュレーション

高椋 恵ⁱ, 関司 陽平ⁱⁱ, 小坂部 和也ⁱⁱⁱ

A Simulation Study of Real-Time Water Level Prediction Using the Storage Function Method in Small Watersheds

Kei TAKAMUKU, Yohei ZUSHI, Kazuya OSAKABE

当部では十数年に亘り都市型水害に関する受託解析に取り組んできた。また近年、気候変動による水害が頻発しており、水害に関する解析が必要とされている状況から、都市型水害解析ソフトウェア MC-FLOOD の開発を行ってきた。一方、観測技術や降雨予測の技術が発展することで、河川水位のリアルタイム予測が実施可能となっており、住民や防災活動を実施する組織にとって益々重要となると考えられる。そこで、リアルタイム予測を目的として、簡易な河川水位予測モデルを作成し、データ同化機能を追加してその推定状況を検討した。

(キーワード): 都市型水害, データ同化, リアルタイム予測, 貯留関数法, 河川水位予測

1 はじめに

当部では、これまで都市型水害に関する受託解析を十数年にわたり実施してきた。また近年、集中豪雨や短時間降雨による水害が頻発しており、益々、水害に関する解析が必要とされている状況から、受託解析の経験とノウハウをベースに都市型水害解析ソフトウェア MC-FLOOD の開発^{1,3)}を行ってきた。前報⁴⁾では、降雨をあらかじめ設定して水害を評価するだけでなく、疑似的な観測データと数値解析を組み合わせたリアルタイム予測に関する検討について報告を行った。ただし、検討に際して、データ同化について検討をしているものの、実際の観測データを用いた検討ではなかった。

本報では実用的なリアルタイム予測に向けて、実際の観測データを用いたパラメータ最適化やデータ同化について整理するとともに、簡便なモデルにより適用状況を報告する。

リアルタイム予測を実施するためには観測技術と数値解析技術（数値シミュレーション及びデータ同化技術）の組み合わせが重要である。当部でも観測技術およびデータ取得の必要から様々な検討を行っており、本報では実河川におけるリアルタイム予測を目的として、簡易な河川水位予測モデルの構築とデータ同化機能の検討を実施する。なお、対象流域の河道横断面を入手できなかったため、河道横断面を仮定した上で河川水位を推定しており、中小河川のようなデータが不十分な中での予測を想定している。

2 対象流域

対象流域は神奈川県に位置する金目川の上流域（秦野市）である。また、上流にはダム等の貯留施設がないため、人為的に流れが大きく変化することはない。

対象流域は図 1 に示すとおりである。金目川の支

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席シニアコンサルタント 技術士（建設部門）

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム コンサルタント 博士（理学）

ⁱⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 次長

流である水無川（富士見大橋地点を含む支川）が市街地を流れており、砂防区間である。

図 1 中に指示した地点は河川水位のデータを観測しており、黒のラインは観測地点における小流域を示している。図中の最下流端は中里橋である。神奈川県にて観測されているのは、九沢橋、根下橋、新常盤橋及び中里橋であり、秦野市にて観測されているのは、渋沢児童館横、堀田橋、富士見大橋、古堂橋、四山橋、小羽根橋及び宮開戸橋である。金目川上流の観測地点と各支川の系統図は図 2 に示すとおりである。各観測地点の流域面積及び土地利用状況は表 1 に示すとおりである。土地利用については、国土数値情報土地利用細分メッシュを用いた。なお、秦野市では総合防災情報⁹⁾を運用しており、このサイト上でリアルタイムの観測情報を配信し、広く住民に情報提供を実施している。本検討では最上流に位置する宮開戸橋及び渋沢児童館横の地点における流域を対象として検討する。2 地点とも最上流であるだけでなく、大規模貯留施設（例えば、ダムや遊水池）がないこと、一方、2 地点では土地利用の差（山地と都市域）があることから選定した。

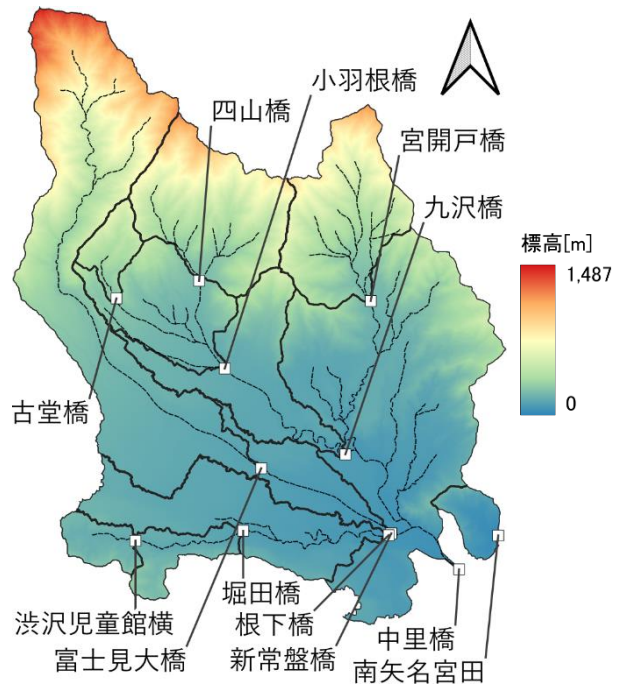


図 1 金目川上流域

3 観測データ

3.1 観測地点と項目

観測項目は、観測地点における河川水位および降雨量である。河川水位は非接触型の電波式水位計により、降雨量は転倒ます式雨量計により測定している。加えて、河川カメラによる画像も提供されている。なお、各データは 10 分間隔で測定している⁹⁾。

3.2 観測データ

秦野市により機器が設定されている地点では降雨量と観測水位が 2020 年から観測されている。なお、富士見大橋では 2024 年 9 月より観測機器が設置され、それ以降のデータが蓄積されている。

宮開戸橋及び渋沢児童館横の降雨量と河川水位の状況は図 3 に示すとおりである。2024 年 8 月下旬には大雨が発生しており、秦野市内でも浸水が発生している。

4 解析モデル

4.1 解析モデル概要

流出解析を行うためのモデルに対しては、いくつ

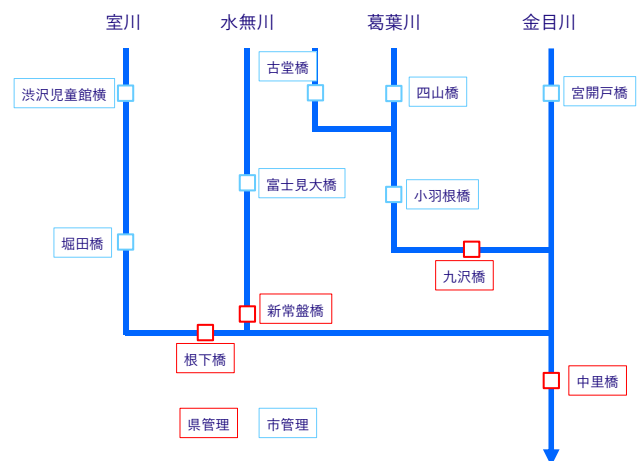


図 2 金目川上流域系統図

表 1 集水面積と土地利用割合

観測地点	集水面積 [km ²]	都市域[%]	水田・田畑[%]	山地[%]
宮開戸橋	5.518	2.9	4.4	92.7
九沢橋	15.491	25.0	17.4	57.6
古堂橋	1.125	2.4	13.2	84.4
根下橋	7.904	70.6	12.4	17.0
四山橋	5.933	1.2	4.4	94.4
渋沢児童館横	1.088	39.1	17.6	43.3
小羽根橋	10.915	10.7	18.9	70.4
新常盤橋	16.788	41.9	6.4	51.7
中里橋	61.504	36.1	14.7	49.2
富士見大橋	14.605	33.5	7.1	59.4
堀田橋	2.500	34.0	19.2	46.8

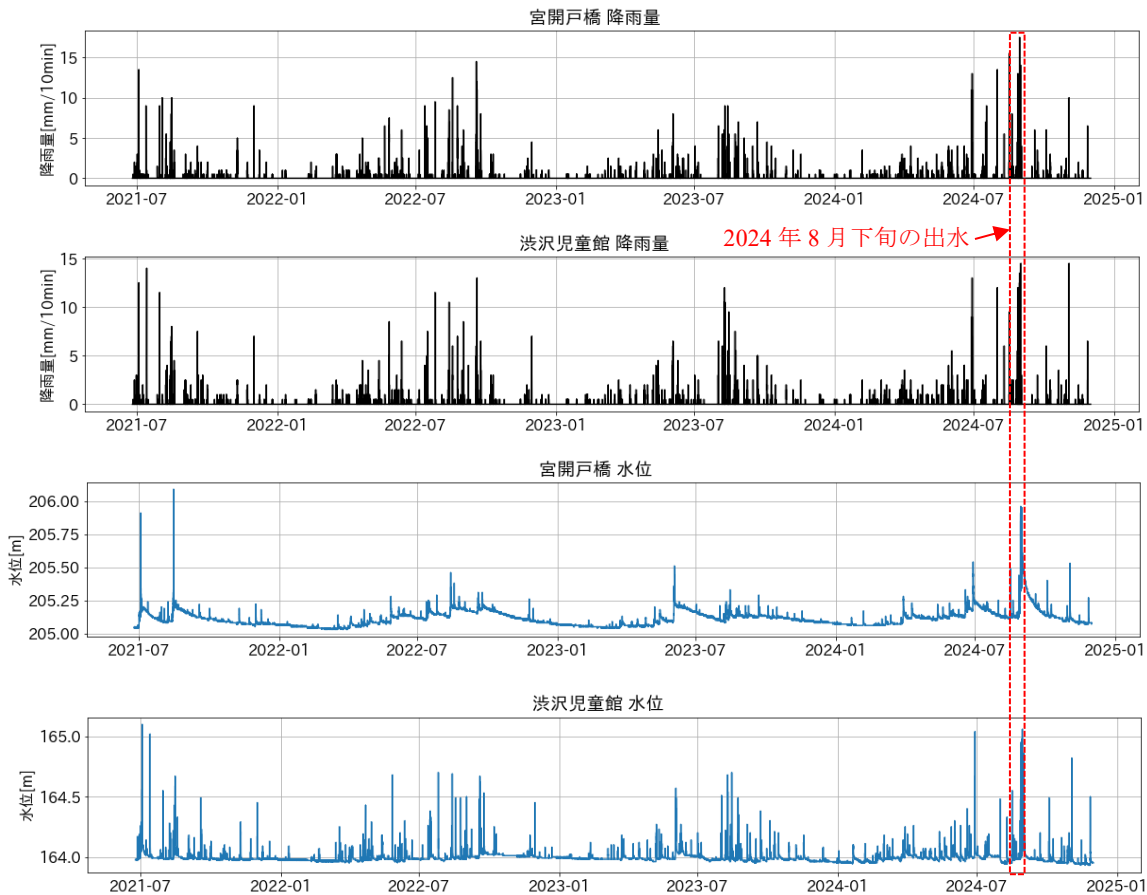


図 3 宮開戸橋と渋沢児童館横における降雨量と水位

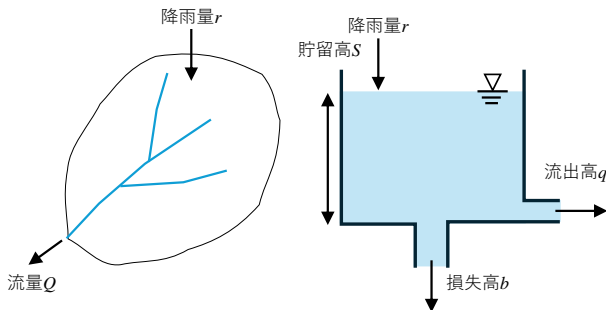


図 4 貯留関数法によるモデル化

かの視点で分類⁹⁾することができる。例えば、モデル構成の視点から分類すれば、単位図法に代表される応答モデル、貯留関数法やタンクモデルに代表される概念モデル、対象流域をグリッドに区切り、各グリッドで水の保存則と運動方程式を解く物理モデルに分類できる。また、空間的な構造の違いにおいて分類する場合、貯留関数法やタンクモデルに代表される集中型流出モデルと RRI⁷⁾に代表される分布型流出モデルに分類できる。なお、当社開発の MC-FLOOD については物理モデルかつ分布型流出モデルに分類される。

本検討では、観測データを用いたリアルタイム予測のうち、データ同化の検討に重きを置くために、設定すべきパラメータが多くなる MC-FLOOD を用いる事はせず、集中型流出モデルの 1 つである貯留関数法を用い、そのモデルに対してリアルタイムシミュレーションを適用するものとする。なお、貯留関数法は流域を 1 つの貯水池として見立てて、流域貯留量と直接流出量の関係から洪水流出現象を説明しようとする手法である。モデル化のイメージは図 4 に示すとおりである。

我が国において良く用いられる貯留関数法としては木村により開発されたモデルと星により開発されたモデルがある。本検討では星により開発された、基底流出高および損失高を考慮した貯留関数法を用いる。支配方程式は式(1)~(4)に示すとおりである。

$$\frac{dS}{dt} = r - q - b + q_0 \tag{1}$$

$$S = k_{11}q^{p_1} + k_{12}q^{p_2} \tag{2}$$

$$b = k_{13}q \tag{3}$$

$$q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \tag{4}$$

ここで、 t : 時間[hr], S : 貯留高[mm], r : 降雨量[mm・hr⁻¹], q : 流出高[mm・hr⁻¹], b : 損失高[mm・hr⁻¹], q_0 : 基底流出高[mm・hr⁻¹], q_B : 初期流出高[mm・hr⁻¹], k_{11} , k_{12} , k_{13} , p_1 , p_2 , λ : パラメータである. 流域を一つのタンクのように考え, 降雨量 r を与えることで, 式(1)に示される貯留高の連続式を計算する.

木村⁸⁾の貯留関数法ではなく式(1)~(4)で表現される星⁹⁾の貯留関数法を用いた理由は次のとおりである. 木村の貯留関数法では遅れ時間が直接パラメータになっているが, 星の貯留関数法は貯留高の表現に二価性を取り入れていること, また, 木村の貯留関数法は流出率や飽和降雨量を定めることで, 有効雨量を表現する必要があるが, 星の貯留関数法では, 支配方程式中の貯留高の保存式中の損失高で表現しており, 有効雨量そのものを考慮する必要がなく, 取り扱いやすいためである.

貯留関数法やタンクモデルは降雨を与えることで, 流出高を得ることが出来る. ただし, 本検討が対象とするのは, 河道横断面データや流量データがないような河川である. そのため, 河川水位を求めるようなモデルにする必要がある. そこで, 観測地点の河道横断面を矩形と想定し, 等流を仮定することで, 貯留関数によって求められる流出高から水位を求める.

4.2 離散化

式(1)(2)を離散化して降雨量に対する流出高を算出した上で水位を計算する. 式(5)(6)に示すとおりである.

$$x_1^n = x_1^{n-1} + \Delta t \cdot x_2^{n-1} \quad (5)$$

$$x_2^n = x_2^{n-1} + \Delta t \left[-\frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} x_1^{n-1} p_2^{-1} - \frac{1+k_{13}}{k_{12}} x_1^{n-1} p_2^{-1} + \frac{1}{k_{12}} (r + q_0) \right] \quad (6)$$

ここで, $x_1^n = q^{p_2}$, $x_2^n = \frac{d}{dt}(q^{p_2})$, Δt : 時間刻み幅[hr], 添え字 n は時間ステップである. なお, 上記の離散式の場合, x_1^n 及び x_2^n が更新されることから, 流出高は, $q = x_1^{n1/p_2}$ として算定する. 加えて, 得られる観測データは河川水位であるため, 流出高から河川水位へ変換する必要がある. そこで, 本検討では, 流域のうち上流域の河道を想定することから, 断面を矩形と仮定し, 等流公式を用いて水深に変換する. 貯留関数法により求められる流出高から流量を求めるには式(7)を用い, 等流公式による流量は式(8)を用いる. 両式を連立して水深を求める.

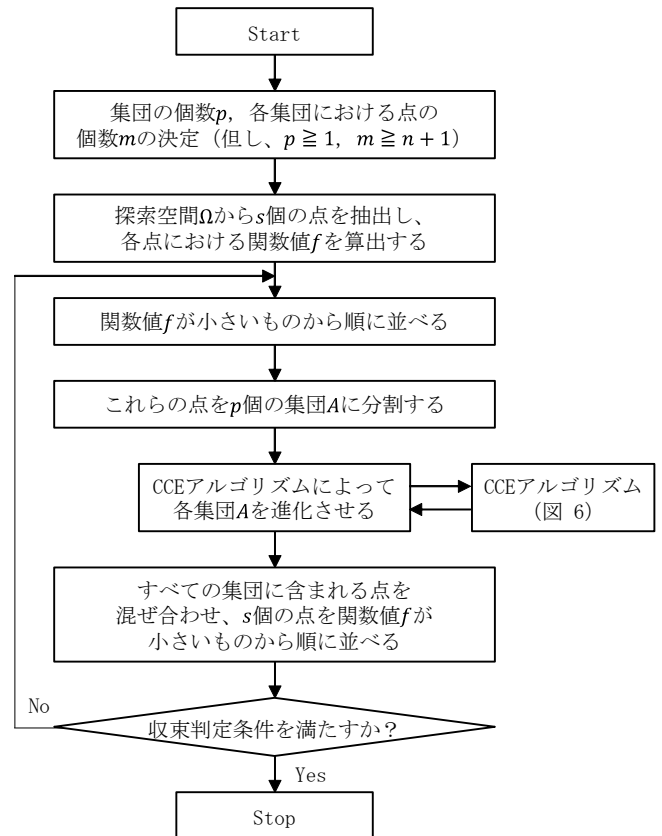


図 5 SCE-UA 法

$$Q = \frac{A_w q}{3.6} \quad (7)$$

$$Q = \frac{A_r}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (8)$$

ここで, Q : 流量[m³・s⁻¹], A_w : 流域面積[km²], q : 流出高[mm・hr⁻¹], A_r : 矩形の河道横断面における通水断面積[m²], n : 粗度係数[m^{-1/3}・s], R : 径深[m], I : 河床勾配[-]である. 河床勾配については周辺の地盤勾配をもとに設定する.

なお, 水位を算定するためには河床高が必要であるが, 河道横断面データはない為, 水位の観測結果から, 水位の最小値を下回るように設定した.

4.3 パラメータ最適化

式(1)および(2)のうち, 設定すべきパラメータは k_{11} , k_{12} , k_{13} , p_1 , p_2 , λ であるが, 本検討では基底流出高については考慮せず, $k_{11} \sim p_2$ の 5 つのパラメータを求める. 各パラメータは星⁹⁾により, 流域の物理量(流域面積や平均雨量強度等)と結びつけられているが, これらは 1 時間間隔のデータを前提として導かれていることに加え, 平均雨量強度は一連の降雨

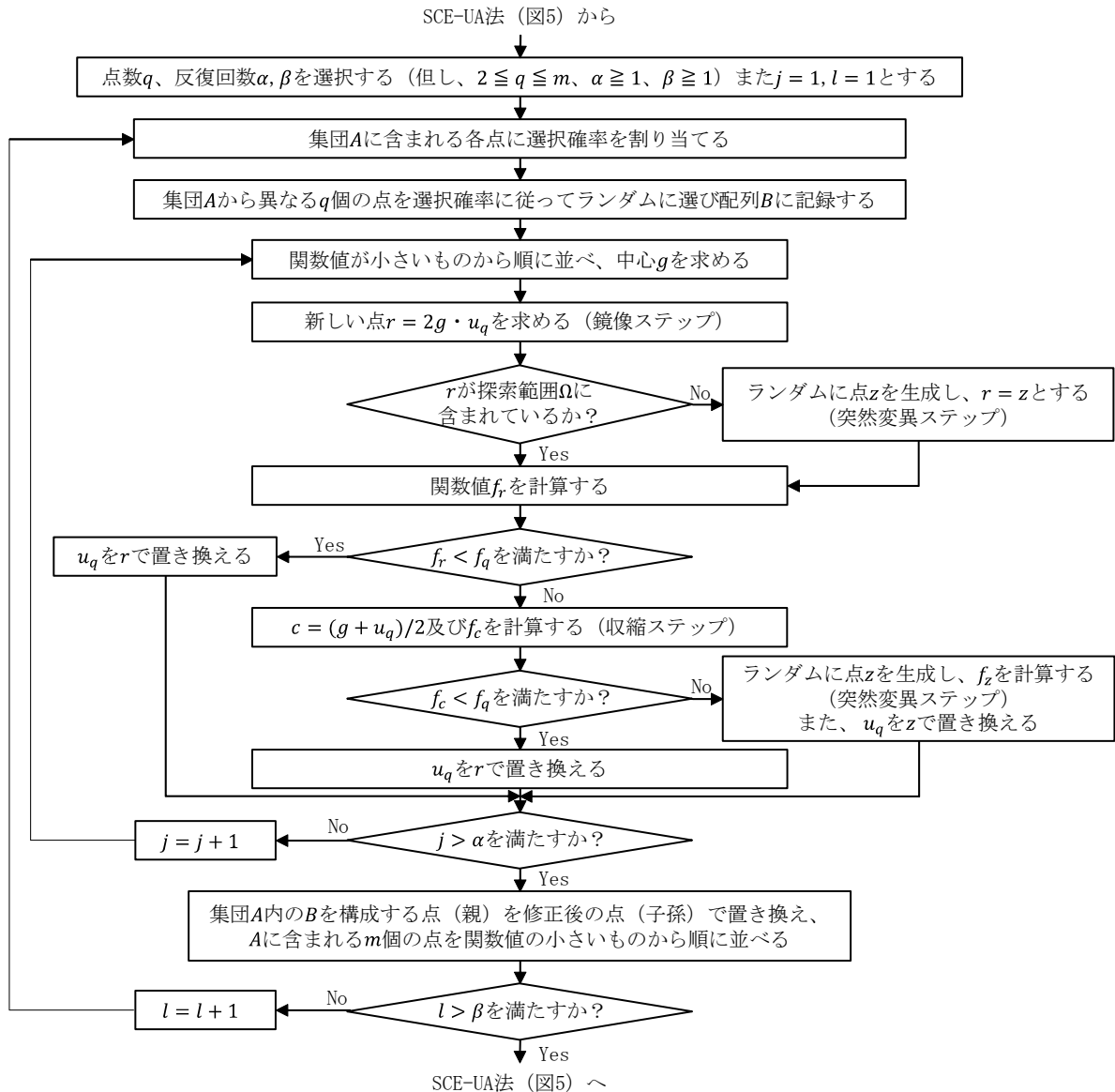


図 6 CCE アルゴリズム

に対して定められるものであり、リアルタイムシミュレーションで用いるパラメータには適さない。また、観測データが 10 分間隔であることに加え、小流域であることから、星⁹⁾により導出されたパラメータ算定手法は用いず、観測データに適合するようなパラメータを探索する。パラメータの推定に当たっては流出解析のパラメータ推定での実績がある SCE-UA 法(Shuffled Complex Evolution method University of Arizona)^{10,11)}を用いる。SCE-UA 法はタンクモデルや貯留関数法におけるパラメータの最適化において有用な手法として利用されている。

パラメータの最適化としては他にも様々な手法があるが、SCE-UA 法は大域的探索法であり、遺伝的アルゴリズムに類似した手法を用いて局所的な最

適解に陥ることを避けることができ、パラメータ数が多くても最適化の事例が多い。SCE-UA 法によるパラメータの最適化の手続きは図 5¹¹⁾及び図 6¹¹⁾に示すとおりである。ここで、 n :最適化するパラメータの数、 p :集団の数、 m :各集団における個体の数、 q :親個体の数、 α , β :反復回数である。全体のアルゴリズムのうち、一部は CCE (Competitive Complex Evolution) アルゴリズムである。最適化(最小化)する関数 f は河川水位の平均二乗誤差とする。

4.4 アンサンブルカルマンフィルタ

データ同化手法は、代表的なものとしてカルマンフィルタや 4 次元変分法があるが、既存のプログラムを活かしやすく、気象分野での利用実績もあるア

ンサンブルカルマンフィルタ¹²⁻¹⁶⁾を採用する。アンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同化の手続きは次のとおりである。

状態ベクトルを \mathbf{x} 、観測ベクトルを \mathbf{y} とするとシステムモデルと観測モデルは次のように表現できる。

$$\mathbf{x}_t = f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_t = h(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{w}_t) \quad (10)$$

ここで、 f : システムモデル、 h : 観測モデル、 \mathbf{v}_t : システムノイズ、 \mathbf{w}_t : 観測ノイズである。貯留関数法を用いた場合、式(1)及び式(2)の右辺に相当する一期先予測は次の式で求める。

$$\mathbf{x}_{t|t-1}^n = f(\mathbf{x}_{t-1|t-1}^n, \mathbf{v}_t) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_{t|t-1}^n \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_{t|t-1} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\mathbf{x}_{t|t-1}^n - \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1})(\mathbf{x}_{t|t-1}^n - \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1})^T \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{t|t-1}^n$: アンサンブルメンバーの一期先予測の状態ベクトル、 $\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1}$: アンサンブル平均、 N : アンサンブルメンバー数、 $\hat{\mathbf{V}}_{t|t-1}$: 分散共分散行列である。観測データが得られた場合のフィルタリングは観測行列 \mathbf{H}_t を用いて式(14)及び式(15)で求める。

$$\hat{\mathbf{K}}_t = \hat{\mathbf{V}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T (\mathbf{H}_t \hat{\mathbf{V}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (14)$$

$$\mathbf{x}_{t|t}^n = \mathbf{x}_{t|t-1}^n + \hat{\mathbf{K}}_t (\mathbf{y}_t^n - \mathbf{H}_t^T \mathbf{x}_{t|t-1}^n) \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{K}}_t$: カルマンゲイン、 \mathbf{H}_t : 観測行列、 \mathbf{R}_t : 観測誤差共分散行列、 \mathbf{y}_t^n : 観測ベクトル、添字の T 及び -1 はそれぞれ転置及び逆行列である。観測データが得られるまでは、式(11)、式(12)及び式(13)により予測を行い、観測データが得られた場合に式(14)及び式(15)によりフィルタリングを行う。

なお、本検討は河川水位予測及び観測データによるフィルタリングに主眼を置いているため、平滑化については実施しない。

5 データ同化

5.1 パラメータ最適化

対象流域として、表 1 に示すもののうち、宮開戸橋及び渋沢児童館横を対象とする。

データ同化を図る前に、あらかじめパラメータの

表 2 パラメータ推定

パラメータ	最小値	最大値	宮開戸橋	渋沢児童館横
k_{11}	1	100	96.786	90.463
k_{12}	1	100	78.674	58.339
k_{13}	0.1	5	0.245	0.143
p_1	0.1	1	0.986	0.280
p_2	0.1	1	0.863	0.170
n	0.01	0.07	0.043	0.044

最適化を実施する。パラメータ最適化の対象は、貯留関数法のパラメータである $k_{11} \sim p_2$ の 5 個に加え、流出地点での断面(矩形)における粗度係数とする。前述の SCE-UA 法における集団の数等については、Duan¹⁰⁾に従い、 n : 最適化するパラメータの数 (=6)、 p : 集団の数 (=20)、 m : 各集団における個体の数 ($2n+1=13$)、 q : 親個体の数 ($n+1=7$)、 $\alpha(=1)$ 、 $\beta(=1)$: 反復回数として設定する。

2024 年の出水を対象として、SCE-UA 法を用いたパラメータを最適化した結果は表 2 に示すとおりである。推定に当たっては、最小値及び最大値を設定する必要がある、同表に示す範囲で平均二乗誤差が最小となるパラメータを推定した。推定範囲については高崎ら¹⁷⁾の検討を参考に設定した。同パラメータはアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化を始める際の初期値として用いる。

5.2 アンサンブルカルマンフィルタの適用

解析対象は金目川流域のうち、宮開戸橋及び渋沢児童館横の上流域として、貯留関数法を適用し、データ同化を図る。

状態ベクトル \mathbf{x}_t は次式のとおりとする。

$$\mathbf{x}_t = (x_1, x_2, k_{11}, k_{12}, k_{13}, p_1, p_2, n, wl, q)^T \quad (16)$$

ここで、 x_1, x_2 : $x_1=q^2$, $x_2=dx_1/dt$, $k_{11}, k_{12}, k_{13}, p_1, p_2$: 貯留関数法のパラメータ、 n : マニングの粗度係数 [$m^{-1/3} \cdot s$]、 wl : 河川水位[m]、 q : 流出高 [$mm \cdot hr^{-1}$] である。

観測によって得られる河川水位については、貯留関数法から直接求められるものではないが、前述のとおり、断面を矩形、流れを等流と仮定することで流量(流出高)及びその他パラメータ(幅、河床高、河床勾配)から求めることが出来るため、水位 wl と流量(流出高 q)を加えた拡大状態ベクトルとする。

5.3 状態推定量結果

近年で一番大きい出水があった 2024 年 8 月下旬の

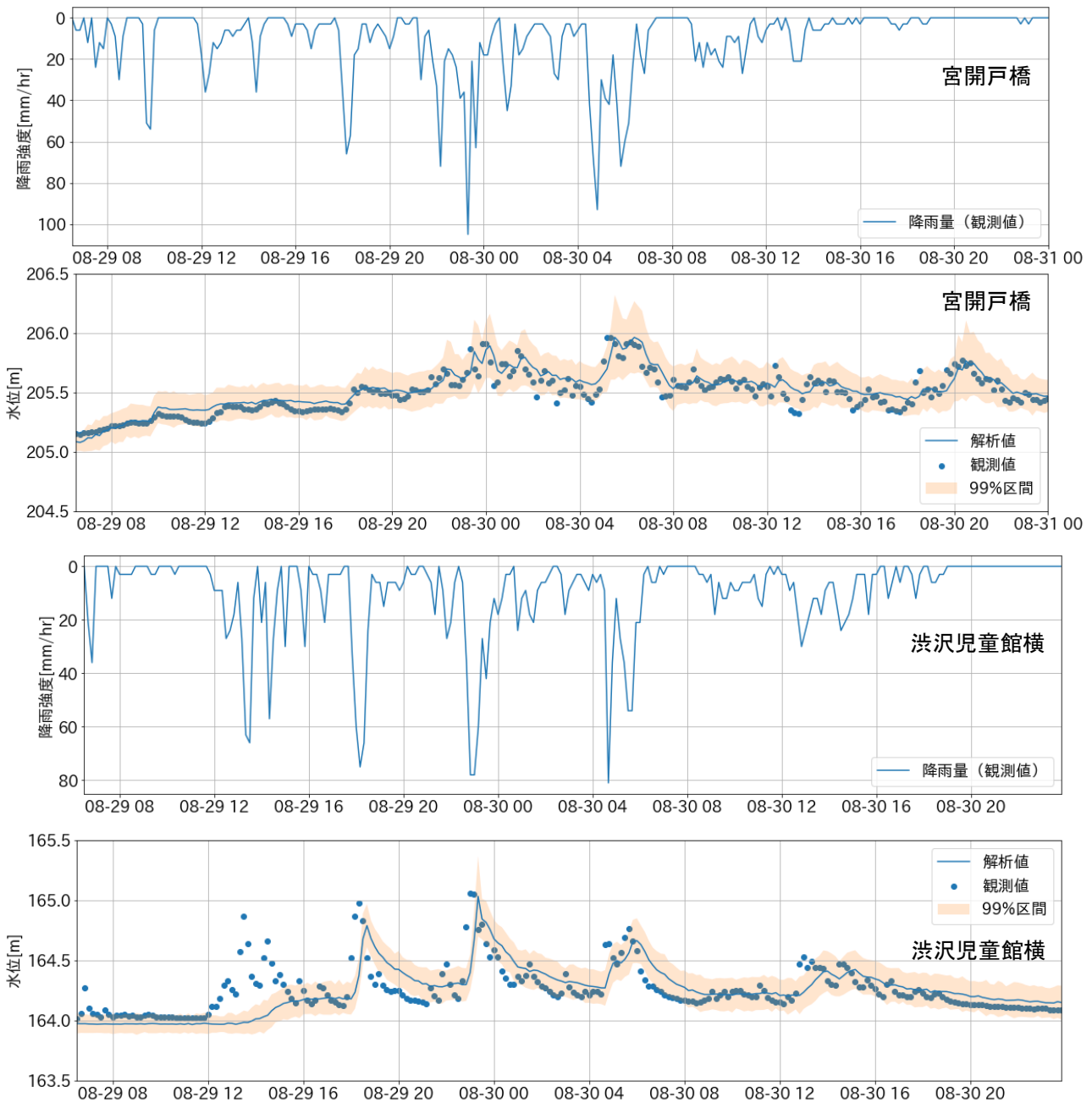


図 7 河川水位の状態推定 (1,2 段目 : 宮開戸橋, 3,4 段目 : 渋沢児童館横)

降雨イベント（継続して降雨が観測された一連の期間）を対象として、河川水位を推定した結果は図 7 に示すとおりである。

観測結果（図 7 中の点データ）から、宮開戸橋は山地が大半を占めており、降雨が緩やかに流出していることがわかる。一方、渋沢児童館横は都市域も多く、宮開戸橋と比較して降雨がすぐさま流出し、水位の下がり具合も早いことがわかる。

アンサンブルカルマンフィルタを用いて推定した状態量（図 7 中の線データ）を見ると、宮開戸橋は

99%区間内に観測結果がほぼ含まれており、水位の推定は出来ていると判断される。一方、渋沢児童館横の 99%区間から、観測値が外れている箇所も多く、宮開戸橋と比較して推定精度が低い。特に 8 月 29 日 12 時～16 時の降雨では水位上昇を再現できておらず、都市域での降雨発生から短期間で流出を再現できていない。ただし、河川水位のピークやその傾向は推定できていると推察される。状態量推定や予測精度向上に向けては河道横断面データや流量観測を行うことが重要であるものの、河川上流域のようなデー

タが不十分な状況でも、水位と降雨量を測定することで、河川水位予測の可能性が示された。

6 おわりに

都市型水害の実用的なリアルタイム予測に向けて、実流域を対象として貯留関数法とデータ同化に関する検討を行った。以下にまとめを示す。

- 金目川上流域を対象として、降雨量及び河川水位の観測を行った。
- 最上流に位置し、かつ大規模貯留施設がない2つの小流域を対象として貯留関数法によるモデル構築を行った。
- 貯留関数法のパラメータ推定には SCE-UA 法を用いて行った。
- アンサンブルカルマンフィルタを用いて状態量の推定を行った。
- 状態量の推定結果から、山地が多く占める流域の方が、都市域と比較して推定精度が高いと判断される。都市域は一般に降雨から流出までが早く、本検討の設定では降り始めをうまく推定できなかった。MC-FLOOD を用いれば、都市域や山地などの特徴を物理モデルに基づいて詳細に設定できることから、改善の可能性はある。

概念モデルである貯留関数法では比較的少ないパラメータで降雨量と流出高を関係づけることが出来るが、流域の変化や対策を講じた場合の評価が難しい。一方、当部では、物理モデルによる推定を目指し、MC-FLOOD の開発を実施している。物理モデルであれば、流域の変化や対策評価のための予測も可能である。今後は、本検討で取り扱ったデータ同化手法を含め、MC-FLOOD によるリアルタイム予測を実施する予定である。

謝辞：観測データについては、秦野市にご提供いただいた。記して謝意を示す。

引用文献

- 1) 高橋昌伸, 溝内秀男, 眞鍋尚: 都市型水害解析の現状と展望, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, 第1巻(2021)39-44.
- 2) 公益財団法人日本下水道新技術機構: 下水道施設の耐水化計画および対策立案に関する手引き(2021)337-359.
- 3) 高椋恵, 眞鍋尚, 溝内秀男: 都市型水害解析ソフトウェアの開発とその基礎的検証, 計算工学講演会論文集, 第28巻(2023).
- 4) 高椋恵, 眞鍋尚: 都市型水害予測モデル MC-FLOOD を用いた水害予測のリアルタイムシミュレーションに向けて, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, 第3巻(2024)16-23.
- 5) 秦野市 総合防災情報 URL: https://iot.trimsccloud.net/hadano_bosai/deploy/html/index.htm (参照 2025-05-30).
- 6) 椎葉充晴, 立川康人, 市川温: 水文学・水工計画学, 京都大学学術出版会(2013).
- 7) RRI Model ダウンロードサイト: 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センターホームページ, https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index_j.html (参照 2025-5-31).
- 8) 木村俊晃: 貯留関数による洪水流出追跡法, 建設省土木研究所(1961).
- 9) (財)北海道河川防災研究センター・研究所: 実践流出解析ゼミ, 講義テキスト編(2006).
- 10) Duan, Q., Sorooshin, S. and Gupta, V. K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol.28, No.4(1992)1015-1031.
- 11) 杉原ら: SCE-UA 法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生基準線の設定, 土木学会論文集 F(安全問題), 第67巻(2011)1-13.
- 12) 大林茂, 三坂孝志, 加藤博司, 菊池亮太: データ同化流体科学 波動現象のデジタルツイン, (共立出版, 2021).
- 13) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮: データ同化入門—次世代のシミュレーション技術—, (朝倉書店, 2011).
- 14) 片山徹: 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店(2011).
- 15) 中野慎也: 統計学 One Point 26 データ同化, (共立出版, 2024).
- 16) 日本気象学会: 気象研究ノート 気象学におけるデータ同化, 第217号(2008).
- 17) 高崎忠勝, 川村明, 天口英雄: 二価関数による貯留関数法を用いた都市小流域の洪水流出特性, 水文・水資源学会総会・研究発表会, 第19回(2006).