

# 数値河川流モデルと多地点水位のデータ同化に基づく流量ハイドログラフ逆推定手法の開発

東京理科大学大学院 学生会員 ○伊藤毅彦, 太田皓陽

東京理科大学 正会員 二瓶泰雄

## 1. 背景と目的

複数の支川を有する河道網において、河川流シミュレーションや洪水予測を行うためには、本川及び各支川の上流端に境界条件として流量を付与することが一般的である。しかし、流量観測地点の不足や  $H-Q$  式、流出解析に伴う誤差などが原因で、正確に流量データを与えることは容易ではないことが多い。一方、通常水位計に加えて危機管理型水位計の設置が進んだことにより、水位観測データは空間的に密に得られるようになった。これらの多地点水位データに基づいて流量の時間変化を推定する水理解析法<sup>1)</sup>やこれを応用した支川流入量を推定する手法<sup>2)</sup>が提案されているが、自動での逐次計算は困難としている。また、アジョイント法<sup>3-5)</sup>や粒子フィルタ<sup>6)</sup>などのデータ同化手法を用いて、河道の粗度係数や流量を推定・同化する検討もなされているが、前者は時間逆方向の収束計算を伴うため、後者はアンサンブル計算を行うため、計算負荷が大きいことが課題である。本研究では、多地点観測水位データを低計算負荷で同化しつつ、得られる水面形を満たす水収支解析を用いた流量逆推定・同化手法を構築することを試みる。ここでは、一次元不定流モデルを基礎式としたモデル構成とする。また、本手法を開水路流れに適用し、本手法の有効性を検証した。

## 2. 本手法の概要

(1) **基本的枠組み**：本手法の基本的枠組みは、**図-1** に示すように、①多地点における観測水位データ同化と、②多数の水位観測地点を含む範囲（ボックスモデル）における水収支より流量データを逆推定・同化、の2つから構成される。本手法では、基本的には一次元場の連続式（式(1)）と運動方程式（式(2)）を基礎式とし、①では、運動方程式を用いて水位データを同化し（式(3)）、計算格子毎の水位縦断分布を算定する。一方、②では、計算領域を1つもしくは複数のボックスと捉え（**図-1** 中赤枠）、ボックス内にて流入量と流出量の差が貯留量変化率と等しいという水収支（ボックスモデル、式(4)）から未知の流量を逆推定・同化する。このボックスモデル導入のメリットは、ボックス内に多地点の観測水位があるため、水位変化から得られる貯留量変化率  $dV/dt$  を精度良く算定でき、かつ、その  $dV/dt$  を用いるがゆえに未知流量の算定精度も高くなるものと考えられる。

(2) **基礎方程式系**：本手法における基礎式は、次の連続式・運動方程式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(n^2 + n_{fa}^2) Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $t$  は時間、 $x$  は主流方向、 $A$  は断面積、 $R$  は径深、 $Q$  は流量、 $q$  は横流入出量、 $g$  は重力加速度、 $\eta$  は水位、 $n$  はマンニングの粗度係数、 $n_{fa}$  は同化用粗度係数である。①の多地点水位データ同化では、この同化用粗度係数  $n_{fa}$  について、水位観測点毎の観測水位と運動方程式から得られる次式より算出する。

$$n_{fa} = -\frac{A^2 R^{4/3}}{Q |Q|} \left( \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - n^2 \quad (3)$$

次に②の流量逆推定・同化では、以下に示す対象ボックスにおける水収支式を用いる。

$$Q_{in} + q_{in} - Q_{out} = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

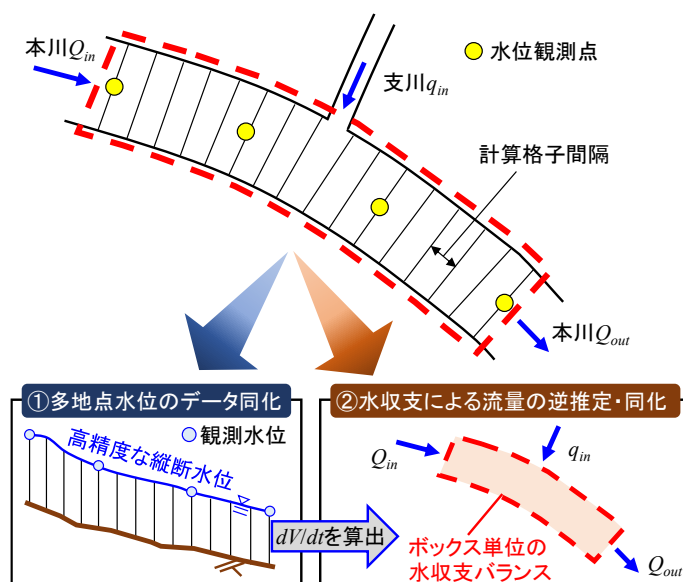


図-1 本手法の基本的枠組み

ここでは流入量（本川  $Q_{in}$  や支川  $q_{in}$ ）と流出量（下流端  $Q_{out}$ ）の差が貯留量変化率  $dV/dt$  と等しいとしている。後述のテスト計算では、計算領域全体を一つのボックスとし、本川上流端流量  $Q_{in}$  を境界条件として既知で与える。本

キーワード：データ同化、数値河川流モデル、多地点水位、流量、逆推定

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学 5 号館 3 階水理研究室 TEL：04-7124-1501（内線 4069）

川下流端流量  $Q_{out}$  は式(1), (2)より算出し, 結果的に未知量となる支川の横流入量  $q_{in}$  を式(4)より算出(逆推定)する. 詳細な計算フローは省略する.

3. 開水路流れへの適用

(1) 計算条件

本手法の基本的有効性を検証するためのテスト計算として, 本手法を一樣開水路流れに適用した. 設定した開水路は, 図-2 に示す台形断面であり, 全長 10km, 河床勾配 1/1000 であり, 上流端から 5km 地点に支川からの横流入がある流れ場である. この開水路において, 図-3 に示す上流端流量  $Q_{in}$  と支川横流入量  $q_{in}$  を与えた一次元不定流解析を行った (格子解像度 50m, 時間間隔 10s). 得られた水位解析結果を本手法のデータ同化用に用いると共に, 本手法の精度検証用としても水位・流量データを用いた.

本手法では, 上流端流量  $Q_{in}$  を境界条件で与え, 横流入量  $q_{in}$  を逆推定対象とした. 計算ケースは表-1 に示すように, 水位データの同化間隔を 50m (Case1) と 1000m (Case2) の 2 ケースとし, それに合わせて同化時間間隔も変えた. 前者は計算格子・時間間隔と同じ, 後者は実河川の水位観測間隔の一例として設定し, 観測地点間隔の影響も調べる.

(2) 計算結果

本手法により得られた  $Q_{out}$ ,  $q_{in}$ ,  $dV/dt$  の計算結果を図-4 に示す. ここで,  $Q_{out}$  は河道から流出する量として負の値で表示する. また, Case2 では同化時間間隔 (=600s) に合わせた  $q_{in}$ ,  $dV/dt$  の平均値を示す. これより, Case1 では  $q_{in}$  の解析値と検証計算用データ (図未掲載) との差は 5 m<sup>3</sup>/s 未満であり, これに伴い  $Q_{out}$ ,  $dV/dt$  の誤差もほぼ生じない結果となった. 一方, Case2 では,  $q_{in}$  が急増した直後の  $t=10\sim20$  分では誤差が 30.4 [m<sup>3</sup>/s] となったが, その後は検証用データとほぼ一致している. 以上のことから, 本手法による  $q_{in}$  の推定値は, 水位データの同化距離間隔の影響を受けるものの, その影響は限定的であり, 本手法の  $q_{in}$  推定結果は概ね良好であることが示された.

次に, 本手法により得られた流量縦断分布の時間変化を図-5 に示す. ここでは, 流量変化の大きい  $t=10\sim60$  分の計算結果を示している. Case1 では検証用データ (図未掲載) と概ねと一致した. 一方, Case2 では上述した  $t=10\sim20$  分の  $q_{in}$  の誤差により,  $t=20$  分の流量縦断分布は Case1 と Case2 で全体的に乖離が見られる. しかし, その他の期間は Case1 と Case2 で概ね一致しており, データ同化の距離間隔・時間間隔が粗くても良好な精度で流量縦断計算がなされることが示唆された.

参考文献

1) 福岡ら, 土木学会論文集, 2004. 2) 内田ら, 土木学会論文集 B1(水工学), 2011. 3) 吉田・石川, 土木学会論文集 B1(水工学), 2012. 4) 渡邊ら, 河川技術論文集, 2017. 5) 西口ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.1, pp.30-41, 2020. 6) Tsuchiya, S. and Kawasaki, M., J. Disaster Res., 2019.

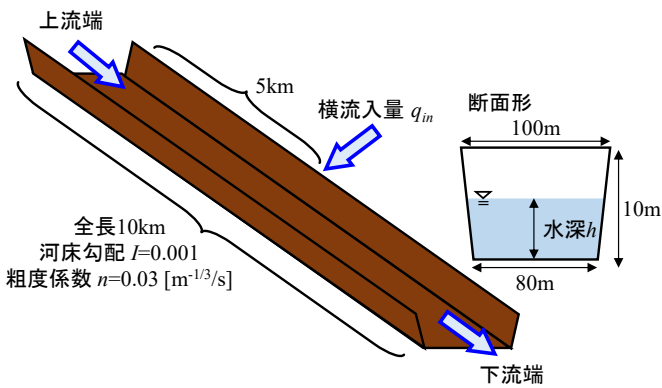


図-2 テスト計算の設定条件 (一樣開水路流れ)

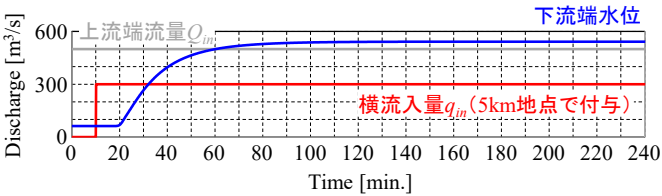


図-3 境界条件の  $Q_{in}$ ,  $\eta_{down}$ ,  $q_{in}$  の時間変動

| 表-1 本手法の計算条件 |                            |            |               |
|--------------|----------------------------|------------|---------------|
| 計算ケース        | 境界条件                       | 同化距離間隔 [m] | 同化時間間隔 [sec.] |
| Case1        | $Q_{in} \cdot \eta_{down}$ | 50         | 10            |
| Case2        | $Q_{in} \cdot \eta_{down}$ | 1000       | 600           |

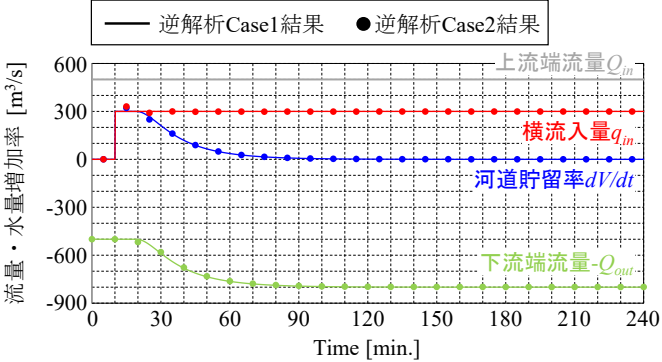


図-3 本手法によるボックス内水収支解析結果

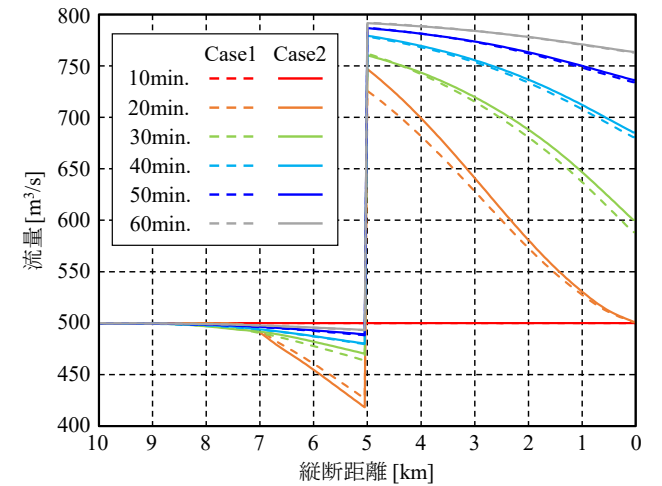


図-4 本手法による流量縦断分布解析結果