

一次元・平面二次元ハイブリッド型河川流モデルの構築

三菱重工業(株)

正会員 ○加藤 靖之

東京理科大学理工学部土木工学科

正会員 二瓶 泰雄

1. 序論

現在、計算機性能の格段の進歩やいくつかのシミュレーションモデルの公開等により、河川・水文分野においても数値シミュレーション技術は強力なツールとなっている。これらの数値シミュレーションの根幹をなす河道解析モデルとしては、一次元計算法や準二次元計算法、平面二次元計算法から三次元計算法まで幅広く存在する。一次元計算法や準二次元計算法は、計算負荷が大変小さく、河川整備基本方針や河川整備計画の策定に適用されている。しかしながら、複断面蛇行流路などの流況や物質輸送パターンの縦横断変化が顕著な領域への適用は難しい。一方、平面二次元計算は上述の問題を解決し、複雑な流れ場への適用に支障はない。しかしながら、計算負荷が大変大きいため、短期間・局所的な領域への適用に限られている。このようなことから、一次元計算法と平面二次元計算法の両者の長所を取り込んで、低計算負荷でかつ高い計算精度を有する河川流モデルの構築が不可欠である。そこで、一次元計算と同程度の計算負荷で、平面二次元計算と同程度の計算精度や適用性を有する一次元・平面二次元ハイブリッド型河川流モデルの構築を試みる。ここでは、本モデルを江戸川・洪水流シミュレーションに適用し、計算結果を現地観測結果と比較・検討する。さらに、一次元計算と平面二次元計算の計算時間間隔比を変化させて計算を行い、計算時間間隔比が本モデルの基本性能に及ぼす影響を検討する。

2. 本モデルの概要

(1) 基本的な考え方について

本モデルは、海水流動計算に用いられる三次元計算と平面二次元計算を併用するモードスプリット法を河川流計算にアレンジした二瓶ら¹⁾の基本アイデアをベースとする。具体的には、一次元計算と平面二次元計算を併用して、毎計算ステップでは一次元計算のみを行い、何回かに一回の割合で平面二次元計算を実施し、両計算結果を交換する。つまり、平面二次元計算法の計算時間間隔を CFL 条件に依存せず、一次元計算法の計算時間間隔よりも大幅に大きく設定できる。これによって、平面二次元計算の計算負荷を減らしつつ、精度を維持することが可能となる。

(2) 基礎方程式

a) 平面二次元場

上述の本モデルの基本的な考え方に基づいて、両計算法の基礎方程式系について記述する。まず、平面二次元計算法の平面座標系としては、複雑な河道の平面形状を適切に再現でき、多くの計算事例が存在する一般座標系 (ξ, η) を採用する。なお、 ξ 方向を流下 (s) 方向、 η 方向を s 方向に直交する n 方向となるように設定している。以下に連続式(式(1))、 ξ 方向の運動方程式(式(2))を示す²⁾。ここでは、 η 方向の運動方程式の記述は省略する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\eta_s}{J} \right] + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{HU}{J} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{HV}{J} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial \xi} + V \frac{\partial U}{\partial \eta} + \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \right) UU + 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right) UV + \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \right) VV \\ & = -g \left\{ \left(\xi_x^2 + \xi_y^2 \right) \frac{\partial \eta_s}{\partial \xi} + \left(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y \right) \frac{\partial \eta_s}{\partial \eta} \right\} + \left(\frac{C_f}{H} + \frac{a C_b}{2} \right) \frac{U}{J} \sqrt{(\eta_y U - \xi_y V)^2 + (-\eta_x U + \xi_x V)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 η_s は水位、 H は全水深 $(=h+\eta_s, h$:水深)、 U, V は ξ, η 方向流速、 J は一般座標系における座標変換のヤコビアン、 g は重力加速度、 C_f は底面摩擦係数 $(=gn_m^2/H^{1/3})$ 、 n_m は Manning の粗度係数、 a は植生密度パラメータ、 C_b は植生の抗力係数、 D^ξ は水平拡散項をそれぞれ表している。

b) 一次元場

本手法では、一次元計算法と平面二次元計算法のカップリングを主眼としているため、準二次元計算法ではなく、一次元計算法を採用する。以下に連続式(式(3))、運動方程式(式(4))を示す³⁾。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3) \quad \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial s} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial s} + \frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial s} + \frac{n_m^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + G_s = 0 \quad (4)$$

ここで、 Q は流量、 A は断面積、 $\hat{\eta}_s$ は横断平均水位、 R は径深、 G_s は平面二次元計算結果との間の補正項をそれ

キーワード：河川流計算、平面二次元計算、一次元計算、ハイブリッドモデル、洪水流

連絡先 : 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 TEL : 04-7124-1501 (内線 4031) FAX : 04-7123-9766

それぞれ表している。補正項 G_s は一般的な一次元計算法では考慮されていない水平拡散項や植生抵抗項の影響を含んだ形で平面二次元計算結果を一次元計算法に反映させるために導入した項である。具体的には、非定常項を除くすべての項に関して、平面二次元計算結果を横断平均し、それから一次元計算結果を引いたものである。

3. 本モデルの基本性能の検証

(1) 計算対象

計算対象領域は江戸川の46.0kpから39.0kpの全長7.0kmの区間とする。計算対象期間は2007年9月の台風9号による大出水のあった9月5日0:00~9月10日0:00とする。各計算パラメータは表1に示す通りである。計算の初期条件を適切に与えるために、上・下流端における境界条件を固定して、10時間分の助走計算を行った。上流端水位は、東金野井(左岸46.05kp)、下流端水位は、野田(左岸39.03kp)のテレメータ水位をそれぞれ与える。上流端流量については、ADCP(Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI製)やプライス流速計から得られた野田橋(39.2kp)近傍における流量と水位の関係からH-Q式を算出し、流達時間を考慮して位相をずらしたハイドログラフを与える。

(2) 計算結果

本論文での、計算時間間隔の設定としては、一次元計算の計算時間間隔は0.1s、平面二次元計算の計算時間間隔は0.1, 1, 5, 10sである。また、一次元計算と平面二次元計算の計算時間間隔の比1をCase-1, 10をCase-2, 50をCase-3, 100をCase-4とする。図1に各計算時間間隔比のCPU時間の計測結果を示す。これより、計算時間間隔比を大きくすればするほど、CPU時間が大きく減少し、計算負荷を軽減できている。本モデルの河川流再現性能を検証するために、図2に水深平均流速の横断分布、流量の観測結果と計算結果の比較図を示す。水深平均流速は水位ピーク時(2007/9/7 21:10)を代表例として示す。各Caseとも計算結果は低水路が過大評価、高水敷が過大評価となっていることが分かる。しかしながら、流速分布パターンは概ね一致しており、その精度はManningの粗度係数により変化することを考慮すると、容易に向上するため、十分な再現性を有していると考えられる。次に流量は各Caseとも計算結果は概ね一致していたため、Case-1を代表例として示す。これより、計算結果と観測結果は概ね一致しており、十分な再現性を有していることが分かる。計算時間間隔比が計算精度に及ぼす影響を検証するために、図3に流速誤差の時間変化を示す。ここで、流速誤差は計算時間間隔比1の計算結果を基準値とし、各Caseの各計算格子における水深平均流速の差の絶対値をその格子が含まれる横断面平均流速で無次元化した値を計算領域全体で平均化し、百分率で表したものである。これより、増水期の9/6 15:00に流速誤差が各Case共に最大となっていることが分かる。また、計算期間全体を通して、流速誤差はCase-2<Case-3<Case-4となっていることから、計算時間間隔比を大きくすればするほど計算精度も低下すると考えられる。また、増水期の高水敷が冠水した直後や減水期の高水敷が干上がった直後に一時的に誤差が増加すると考えられ、それ以外の期間ではCase-4でも流速誤差は小さく、計算精度は十分であると言える。以上より、本モデルの河川流再現精度や計算時間間隔比の計算精度に及ぼす影響を検証することができた。

参考文献：1) 二瓶ら：土木学会論文集, No.803/II-73, pp.115-131, 2005. 2) 安竹ら：河川技術論文集, Vol.10, pp.237-242, 2004. 3) 須賀・葛西：土木技術資料, Vol.24, No.4, pp.27-32, 1982.

表1 計算パラメータ

	一次元	平面二次元
Manningの粗度係数[m ^{-1/3} s]	0.026	0.026
縦断方向格子間隔[m]	69.9~121	43.4~132
横断方向格子間隔[m]	—	2.07~3.40
計算時間間隔[s]	0.1	0.1,1,5,10
計算時間間隔比	—	1,10,50,100

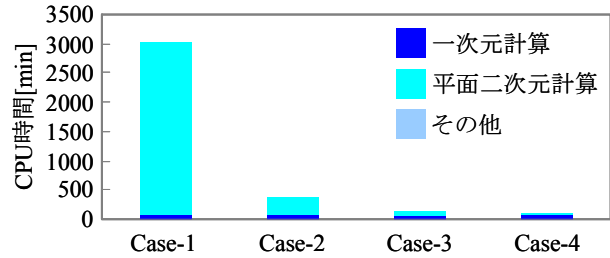
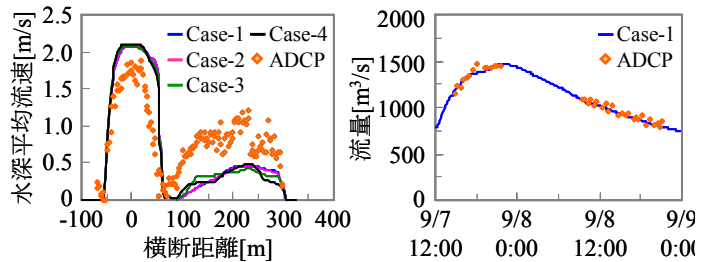


図1 CPU時間



(a) 水深平均流速の横断分布

(b) 流量

図2 観測値との比較(江戸川・野田橋39.2kp)

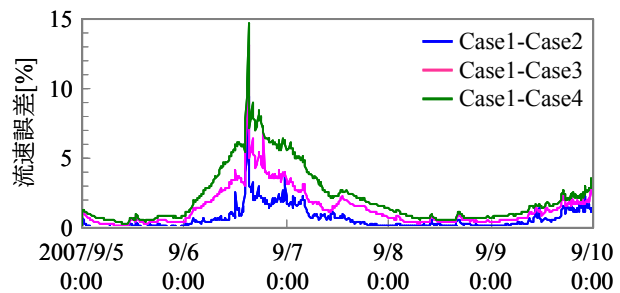


図3 流速誤差の時間変化