

洪水予測手法 (DIEX-Flood) の改良と鬼怒川水位縦断分布解析への適用

東京理科大学大学院 学生会員 ○伊藤 毅彦

パシフィックコンサルタンツ株式会社 正会員 柏田 仁

東京理科大学 正会員 二瓶 泰雄, 片岡 智哉, 小野村 史穂

1. 序論

2018年西日本豪雨では、数日間にわたる記録的な豪雨により岡山県・広島県・愛媛県等を中心に洪水・土砂災害が発生し、平成最悪の人的被害となった。この豪雨は気候変動の影響を受けたものと認定され、今後も気候変動の進展に伴う豪雨災害の発生が益々懸念される。水害に対する重要なソフト対策の一つとして、河川における高密度の水位観測ネットワークの構築と高精度でロバストな洪水予測システムの開発・整備が挙げられる。前者に関しては安価な「危機管理型水位計」の導入が2017年に決まり、現在、全国的に設置されている。後者に関しては、粒子フィルタ¹⁾に基づく洪水予測システムが整備されつつあるが、多地点の水位データ同化を行うと計算負荷が大きいという課題に直面する。一方、著者らは、多地点水位観測値のデータ同化を容易に行うことが可能な洪水予測手法 (DIEX-Flood) を開発し、江戸川における洪水予測シミュレーションに適用し、その基本的な有効性を検証した²⁾。このDIEX-Floodを他の河川や洪水イベントへ適用したところ、水位のデータ同化に伴う流量計算値の不自然な増減や計算結果の不安定化・発散という事象が確認された。

本研究では、DIEX-Floodの計算コスト低下とロバスト性の大幅な向上を実現するために、本手法の改良を行う。また、改良したDIEX-Floodの妥当性を示すために、急・緩勾配区間を有する鬼怒川の水位縦断分布推定の長期連続解析を行うことを試みる。

2. 研究方法

(1) DIEX-Floodの改良

これまでのDIEX-Flood (従来法) における基礎方程式は、連続式 (式(1a)) と運動方程式 (式(1b))、データ同化用の式 (式(1c)) の3つから成る。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + F_a = 0 \quad (1b)$$

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

ここで x は主流方向、 η は水位、 Q は流量、 A は断面積、 R は径深、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数であり、付加項 F_a は水位観測値をデータ同化するために運動方程式中に加えられた項である。これらの式

の収束計算を行い、時々刻々の水位 η と流量 Q 、 F_a を求める。

従来法の数値計算上の不安定化の要因としては、
・計算水位が同化水位データに引きずられて大きく変化し、これに伴って流量も大きく増減してしまう。
・運動方程式の非定常項や移流項を考慮すると、数値的誤差が増幅し、収束性が低下する。

となることが判明した。そのため、DIEX-Floodの改良ポイント (改良法) としては、
・水位の同化計算結果を流量算出に反映させない。
・運動方程式から非定常項と移流項を除く拡散波法 (Diffusion wave) を用いる。

とする。そのため、データ同化時 (水位データの計測間隔、例えば60分間隔) と非データ同化時で計算を分けて実施する。まず、非データ同化時では、一般の不定流計算を以下の式で行う。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (2b)$$

ここで、 η_1 は非データ同化用の水位である。次に、データ同化時では、式(2)で得られた流量 Q を用いて、次式から、同化用水位 η_2 と付加項 F_a を算出する。

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + F_a = 0 \quad (3a)$$

$$F_a = -\frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (3b)$$

このように改良法では、非データ同化時の時々刻々の計算では一般の不定流計算を、データ同化時には不等流計算をそれぞれ行う。流量と同化水位を連成させないため、計算安定性が向上することに加え、データ同化に用いられる付加項を含む計算をデータ同化時のみに限定できるので、計算負荷を飛躍的に減らすことが可能となる。なお、式(3)により水位観測点で得られた F_a の内挿方法としては、①観測点間で一様に与える、②観測点間を線形補間する、の2つの内挿法を採用している。

(2) 改良法に基づく計算条件

計算対象は、鬼怒川の石井 (利根川合流地点から75.1km) から水海道 (同11.0km) までの約64kmとした。この区間内には、石井、川島 (同45.7km)、平方 (同37.3km)、鎌庭 (同27.4km)、水海道の5地点の水位観測所があり、データ同化を行った。計算対象期間

キーワード：洪水予測, DIEX-Flood, データ同化, 水位, 縦断分布, 鬼怒川

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)

は、①洪水集中解析（H27年9月，H14年7月，H10年9月），②長期連続解析（2015年1年間）の2種類とした。

3. 計算結果

(1)洪水集中解析における精度検証

3つの洪水イベント（H27年9月，H14年7月，H10年9月）において得られた痕跡水位を用いて，事前計算により得られた粗度係数 n の縦断分布を図-1に示す。ここでは，移動平均後の結果を表示する。なお，H27年に関しては，水海道から川島地点までの痕跡のみを入手できたため，算出された粗度係数もこの区間のみ示している。これより粗度係数 n は，流下方向に大きく変化すると共に，洪水イベントにより n が異なる様子が伺える。

得られた3種類の n を用いて，各洪水イベントの水位縦断分布計算を行った（計9ケース）。なお，H27年の n については，H14年洪水で得られた n を上流域（石井～川島区間）に与えた。計算水位の最大値と痕跡水位の誤差 RMS 値 Err を図-2に示す。これより Err はいずれのケースでも 1m 以下となっている。痕跡水位の計測誤差が最大 1m 程度であることを考慮すると，これらの計算精度は良好である。さらに，特筆すべきこととして，各洪水イベント（実時間で60時間）に対する CPU 時間は，従来法では約120分，改良法では約30分となり，改良法により計算負荷を約1/4に低減でき，これは実時間の1/120で計算できたことになる。

(2)長期連続解析

2015年1年間における水位縦断分布シミュレーションを実施し，得られた結果の一部として水位の時系列変化を図-3に示す。ここでは，利根川合流地点から75kmから10km毎の結果を表示する。これより，一部で不自然な結果が残っているが，改良法により長期連続的な水位縦断分布解析を実現できた。また，水位観測所地点における計算値と観測値の誤差の RMS 値 Err を図-4に示す。これより，全観測点において， Err は本計算上の収束条件としている 2.5cm 以下であり，長期連続解析に対する改良法の基本的な有効性が検証された。

4. 結論

本研究では，DIEX-Flood の改良を行い，計算負荷の低減とロバスト性の向上を図った。この改良法を用いて鬼怒川における既往3洪水の集中解析及び2015年1年間の長期連続解析を行い，本手法の妥当性を検討した。その結果，洪水時・平常時を問わず，縦断分布における水位が算出可能であり，本手法の基本的な有効性を示した。

参考文献

- 1) 立川ら，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.74，2018。
- 2) 柏田・二瓶，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.74，2018。

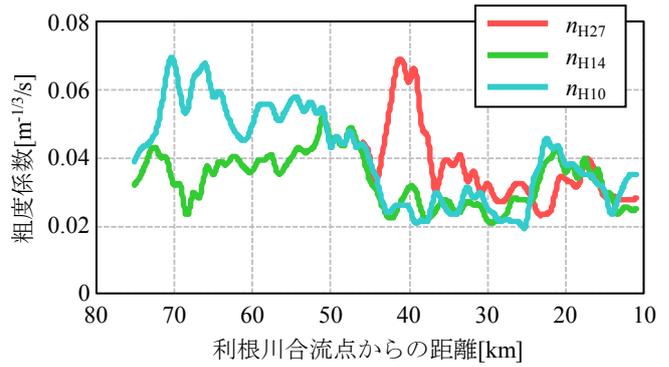


図-1 事前計算による粗度係数 n の縦断分布 (n の下付き文字は洪水の対象年に相当)

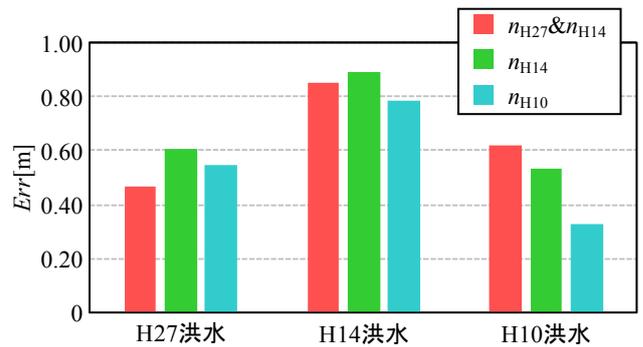


図-2 痕跡水位と計算水位最大値の誤差 RMS 値 Err

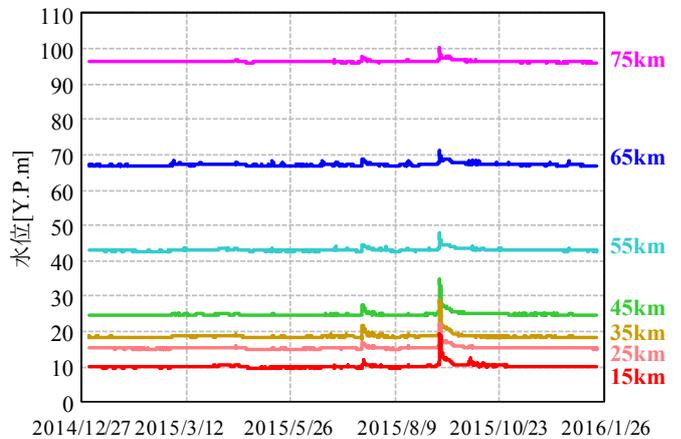


図-3 長期連続解析に基づく水位の時系列変化

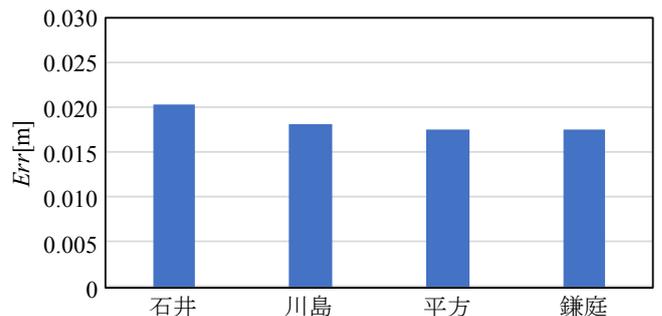


図-4 長期連続解析における水位計算誤差の RMS 値 Err