

大河津分水路の流れ場と河床変動の特性

水工学研究室 磯部 将吾
指導教官 細山田 得三

1. はじめに

大河津分水は信濃川の河口(新潟市)から約 55km で新潟県のほぼ中央に位置し、信濃川が日本海に最も近づく地点の大河津から寺泊海岸までの全長約 10km の人口的な河川である。

越後平野は低湿地帯で水害多発地域であり、1600 年から 1899 年までの洪水被害は過去 300 年間で 74 回と記録され、約 4 年に 1 回は大被害を受けていることになる。これらの被害を無くすために、増水した信濃川の水の一部を日本海へ流し、越後平野に安定した水を供給するために大河津分水路が建設された。また、平水時においては一定流量を信濃川本川に流すことを目的として大河津分水路への流れを抑制するための可動堰が建設されている。これらの難工事は明治後期から大正にかけて実施され、大正 11 年に通水している。その後、急激な河床低下が発生し、昭和 2 年の自在堰陥没、昭和 6 年に復旧工事が完成し、その後、80 年間稼働した。現在は平成 23 年に新たな可動堰が完成し運転されている。

大河津分水路は建設時河口部の掘削量の低減を図るため、通常の河川とは異なり、分流点での川幅 720m に対し、河口付近では 180m と河口部に向かうに従って川幅が狭くなっている。川幅が狭い分、洪水を流すために河口部の狭い川幅の部分を急勾配にすることで流速を高めることで必要な流量を確保するという設計により建設された。そのため、洪水時には水流に勢いがつき、河床が洗掘されている。洗掘の対策工として床留・床固等の施設が建設されたが、通水から約 90 年経過したため床止工周辺の河川侵食が顕著になるなどの対策工の老朽化が問題となっている。

2. 研究の目的

人工の河川である大河津分水路が持つ流れと河床変動の特性を理解するために、河川流と土砂の輸送及びそれに伴う地形変化についての数値実験を行い、河床低下の特性の把握を行った。大河津分水路の本川である信濃川は豪雪地帯を通過する河川であり、その融雪に伴う出水も治水上の観点では無視することは出来ない。信濃川の一般的なハイドログラフを参照すれば、夏季から秋季(梅雨と台風)の鋭いピークの他に 3 月末～5 月末程度の融雪期にも大きな出水が確認できる。本研究では、洪水期(6~9 月)と融雪期(4 月~6 月)それぞれにおける河床変動の特性について、新可動堰の図面を参考にして作成した河床標高をもとに、新可動堰竣工後の大河津分水路内の流れ場と河床変動の特性について検討する。

2. 数値解析モデル

本研究では、平成 23 年度の大河津分水路横断測量結果を用い 2 次元解析を行う。本研究では実河川断面を一般曲線座標系における 2 次元空間に配置し、その断面間に格子を生成することにより補間し、詳細な数値解析を行う。実河川断面データとして国交省北陸地整信濃川河川事務所によって取得された横断測量データ(LH データ)を 2 次元空間に配置し、それをもとに地形標高値を詳細な格子点にさらに配置する。その計算手法としては、横断測量結果を、はじめに直交座標系(x,y)としてコンピュータ上で読み込み、次に一般曲線座標系(ζ, η)に変換する。直交座標系から一般座標系に変換することにより、任意形状(境界形状に沿って)計算格子を設定することが可能となる。以下に解析に用いた直交座標系(x,y)における基礎方程式を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} \\ = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \end{aligned} \quad (3)$$

ただし,

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (7)$$

h :水深, t :時間, u : x 方向の流速, v は y 方向の流速, g 重力加速度, H :水位, τ_x : x 方向の河床せん断力, τ_y : y 方向の河床せん断力, C_f :河床せん断係数, v_t :渦動粘性係数, である. 式(1)が連続式, 式(2), (3)がそれぞれ直交座標における (x, y) それぞれの運動方程式である. 次にこれを一般座標系 (ζ, η) に変換すると以下の式となる.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{hu^\zeta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\zeta}{\partial t} + u^\zeta \frac{\partial u^\zeta}{\partial \zeta} + u^\eta \frac{\partial u^\zeta}{\partial \eta} + a_1 u^\zeta u^\zeta + a_2 u^\zeta u^\eta + a_3 u^\eta u^\eta \\ = -g \left[(\zeta_x^2 + \zeta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \zeta} + (\zeta_x \eta_x + \zeta_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] + D^\zeta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \zeta} + u^\zeta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + a_1 u^\zeta u^\zeta + a_2 u^\zeta u^\eta + a_3 u^\eta u^\eta \\ = -g \left[(\zeta_x \eta_x + \zeta_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \zeta} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] + D^\eta \end{aligned} \quad (10)$$

ただし,

$$\begin{aligned} a_1 = \zeta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} + \zeta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \zeta^2}, \quad a_2 = 2 \left(\zeta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta \partial \eta} + \zeta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \zeta \partial \eta} \right), \\ a_3 = \zeta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \zeta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}, \quad a_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \zeta^2} \\ a_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \zeta \partial \eta} \right), \quad a_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$D^\zeta =$

$$\left(\zeta_x \frac{\partial}{\partial \zeta} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\zeta_x \frac{\partial u^\zeta}{\partial \zeta} + \eta_x \frac{\partial u^\zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\zeta_y \frac{\partial}{\partial \zeta} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\zeta_y \frac{\partial u^\zeta}{\partial \zeta} + \eta_y \frac{\partial u^\zeta}{\partial \eta} \right) \right] \quad (12)$$

$D^\eta =$

$$\left(\zeta_x \frac{\partial}{\partial \zeta} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\zeta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \zeta} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\zeta_y \frac{\partial}{\partial \zeta} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\zeta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \zeta} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] \quad (13)$$

$$\zeta_x = \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \zeta_y = \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (14)$$

$$u^\zeta = \zeta_x u + \zeta_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad (15)$$

式(8)は連続式, 式(10)は未知変数を式(15)で示した速度ベクトル成分 (反変速度成分) とし, 直交デカルト座標での運動方程式が一般座標系に変換されたものである.

また, 掃流砂量式にはこれまで広く使われてきた芦田・道上の式を用いている.

$$q_b = 17 \tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (16)$$

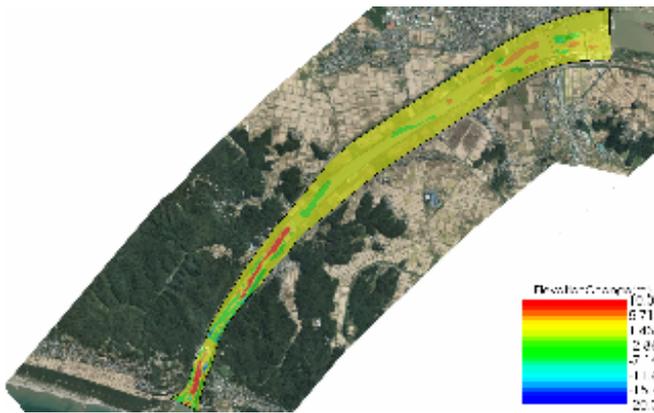


図 1(A) 平成 23 年 洪水期解析結果(解析 7 日目)

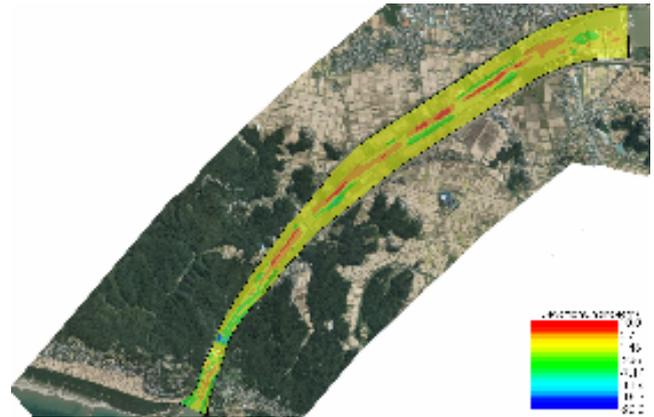


図 1(B) 平成 23 年 融雪期解析結果(解析 50 日目)

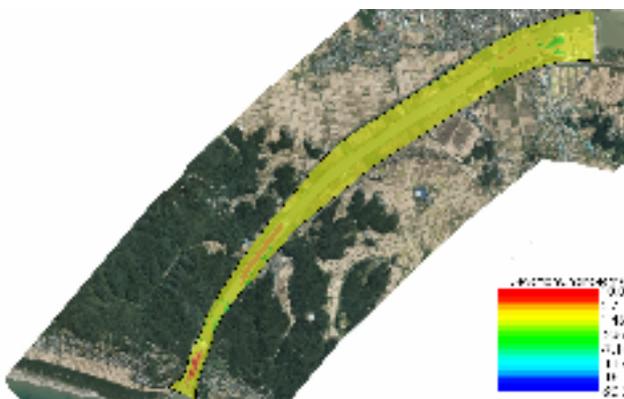


図 2(A) 平成 19 年 洪水期解析結果(解析 7 日目)

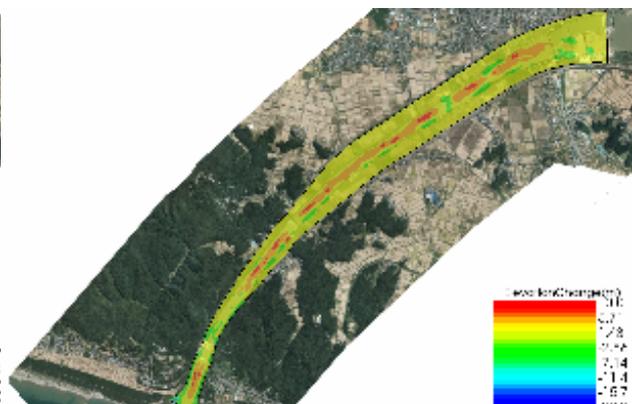


図 2(B) 平成 19 年 融雪期解析結果(解析 50 日目)

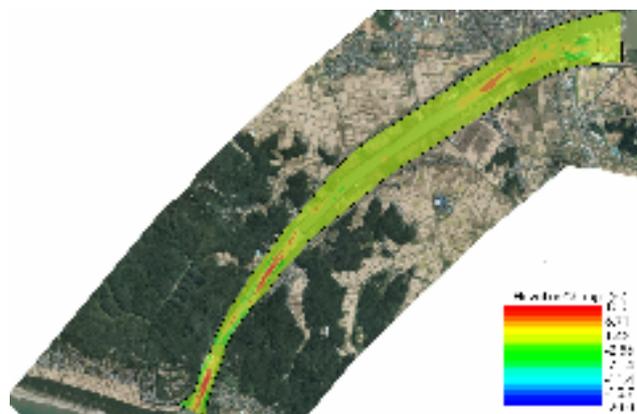


図 3(A) 平成 17 年 洪水期解析結果(解析 7 日目)

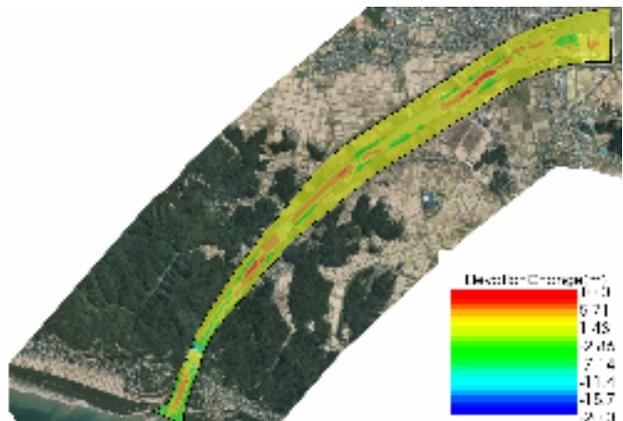


図 3(B) 平成 17 年 洪水期解析結果(解析 50 日目)

エネルギー勾配はマンニングの式で評価するものとし、マンニングの粗度係数は $n=0.030$ ($m^{-1/3}/sec$) とした。また移流項の取り扱いを高精度化するために、差分には CIP 法を用いている。

4. 計算条件

本研究では大河津分水路の実地形データを大河津河川改修資料を元に、新可動堰竣工後のデータを作成し、流量観測データ（渡部）については平成 17 年～平成 23 年間の洪水期(6~9 月)、融雪

期(4月~6月)からそれぞれ1週間、50日を境界条件として与えた。

5. 計算結果

図1~3には、それぞれ、平成23年、19年、17年の洪水期(図中(A))および融雪期(B)の地形変化の代表例を示している。ただし、地形変化量(計算開始時点の初期条件からの差分)は、それぞれの年のLHデータを基準に作成されたものであり、それぞれの出水の直前の地形標高を初期条件として計算されたものではないことに注意を要する。また、ここに示した標高の分布の時間は、平成23年の地形データを基準とし、新可動堰竣工後を想定した地形データである。

平成23年の洪水期と融雪期それぞれにおいて、流量の増加に伴い、河床上昇が発生している箇所と河床低下が発生している箇所のコントラストがかなり大きいことが分かる。洪水期と融雪期、それぞれ共に1年を通して前者の時期で河床の一部低下および一部上昇をすることを招くが、洪水期においては河床全体を下降させることが分かる。

6. まとめ

大河津分水路における実地形データ、流量観測データを用いての大河津分水路の流れ場、河床変化の特性を2次元的に表現する事が出来た。洪水期と融雪期、それぞれ共に1年を通して前者の時期で河床の一部低下、その中でも特に、河道中心部の上昇を招くが洪水期においては河床全体を下降させることが分かった。これは各断面における実測値と比較し、概ね再現できていると言える。

3. 今後の課題

本研究では一年の中で限られた期間のみの解析を行ったが、今後はより長期間の解析を行う必要

がある。本研究では河床変動のみについて検討を行っているが、検証の段階で種々の水理量について計算を行っている。ただし、実測値として存在しているのが水位や河床データのみであるため今回は河床変動量の変化のみにスポットを当て研究を行った。今後は今回の結果を元に、それら水理量についても検証を行う必要がある。また子何回の研究では本川である信濃川からの流入土砂について検討をしていない。これについても同様に検討をする必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省北陸地方整備局信濃川河川事務所(常山所長)において大河津分水路に関係した数多くの職員の方に特にデータ貸与に関して献身的かつ多大なご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局 信濃川河川事務所：大河津分水路一橋も人々の暮らしを見守る一，2011。
- 2) 建設省信濃川河川事務所「大河津分水完工60周年記念事業の記録」社団法人 北陸建設弘済会，1991。
- 3) 登藤雄平，細山田得三：大河津分水路の可動形状の長期的変化とその対策工の評価，長岡技術科学大学修士論文，2013。
- 4) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，水工学論文集，第47巻，pp.643-648，2003年2月。
- 5) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第206号，pp.59-69，1972。
- 6) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21。1956。