

蛇行旧川の同時通水を伴う流路の流れと流量配分比

Experimental Study On Flow And Water Discharge Ratio
Between Meandering And Bypass Channel

北海道大学工学部	○学生員	佐野裕子 (Hiroko Sano)
北海道大学大学院	正員	長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
北海道開発土木研究所	正員	渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
北海道開発土木研究所	正員	佐藤耕治 (Koji Sato)

1. はじめに

蛇行復元を実施した例は世界的に増えているが、わが国では前例がなく、その実現にあたっては技術的検討とともに、功罪・損失、費用効果などについてよく調査することが必要である。特に、わが国における河川の特徴、急勾配で平野部が少ないこと、河状係数が非常に大きいことなどを踏まえた技術開発が重要である。

今回初の試みとして、標津川一部区間の旧川復元計画が検討されている。この計画は、現河道を廃棄して旧川を連続させ、流路を再蛇行化させる方法ではなく、現河道を基本低水路として残し、旧川を環境改善、生態系多様化を図る手段として利用する「旧川通水化」が有力視されている。この方式は、現存している旧川の入口と出口を現河道につなげた分岐合流水路によるものであるが、現時点では多くの技術上の問題が想定される。したがってこの方法において、機能が十分に発揮できる分岐・合流部の具体的な方式・形状を決めるために、室内実験や数値解析による検討が必要である。本論文は、室内実験で得られたデータをもとに、分岐合流部における、直線水路と蛇行水路の流量関係について調べようとするものである。

2. 標津川の河道特性

標津川は、北海道標津町に位置し(図-1)、ほぼ左支川のみを有する特徴的な川である。河口から程近い大草原橋で、支川である武佐川と標津川本川が合流している。地質資料によると、これらの流域の表層はほとんどが火山灰になっており、河谷の発達の様子から斜面侵食の容易なことがうかがえる。

昭和20年代以前の空中写真によると、標津川の状態は迂曲の連続であり、蛇曲—迂曲—短絡を繰り返したものと考えられる。自然状態のこのような河川では、流速が小さく水位が高く、中小の洪水でも容易に氾濫し土砂を氾濫原に堆積させていたものと考えられる。その後、昭和20年代に始まり40年代から50年代にかけて本格化な捷水路・掘削築堤事業が行われた。この結果、流速増加・水位低下、湿原乾燥化が図られた。一般に捷水路工を施すと、その上流河道で流速の増加とともに河床低下が起こり、下流河道で堆積が起こる。現在の標津川は全体で膨大な捷水路工を実施した結果、上流区間で河床が低下



図-1 標津川位置図

気味になっていると推定される。このような区間では河道の流砂輸送能力が著しく増加し、流砂過剰ではなくむしろ流下能力に対して不足している可能性がある。こうした状況は交互砂州の発達を抑制し、再蛇行化を弱める働きをしているものと考えられ、治水上は好都合の状況と言えるが、淵・瀬が減少し流砂が下流区間にまで一気に持って行かれる状態になっている可能性がある。一方、河口に近い勾配の緩くなる場所では急激な堆積に見舞われる可能性があり、そのような場所では複列砂州の発生、河道拡幅、河岸侵食の多発、流路不安定化が予想される。実際に2001年8月、現地にて調査を行った所、下流域において上記のような状況が見られた。こうした標津川の現状を検討した結果、先程述べた「旧川通水化」方式は、標津川蛇行復元計画において合理的であると考えられる。

3. 実験の内容

標津川のような蛇行旧川の通水を伴う流れの状態を知るために、既存の迂曲状実験水路の変曲点間を直線水路(捷水路)で結合した、図-2のような分岐・合流水路を用いた移動床実験を行った。使用した蛇行水路は水路中心線が

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{46.9\text{cm}} \cos \left\{ \frac{2\pi}{432\text{cm}} (s + 109.4\text{cm}) \right\} - \frac{1}{114.6\text{cm}} \sin \left\{ \frac{6\pi}{432\text{cm}} (s + 109.4\text{cm}) \right\}$$

で表される幅22cmの矩形断面水路である。ただし、 r は水路中心線の局所的曲率半径、 s は水路中心線に沿って

表-1 実験条件

ケース	平面形状	流量 (cm ³ /s)	河床勾配	初期河床形状
1	全蛇行	847	1/200	平坦河床
2	全蛇行直線	847	1/200 (直線部)	ケース 1 通水後の河床形状
3	全蛇行直線	1694	1/200 (直線部)	ケース 1 通水後の河床形状

測った距離である。蛇行水路と直線水路の分岐および流入角は、それぞれ 90°、72° ほどである。水路の全体は傾斜架台上に上記蛇行水路を 5 波長連ねて変曲部を直線水路で結んだものになっている。表-1 は 3 つの実験ケースについての条件を示している。ケース 1 の実験は、図-2 の A、B、C 地点の直線水路の入口部と出口部を隔壁で仕切り、蛇行水路のみ通水した。この状態で一旦停水し、隔壁を外して直線水路にも通水し得るようにして、ケース 2 とケース 3 の実験を行った。河床勾配は、直線部のみ 1/200 とし、蛇行部の勾配は直線部との合流区間で合うように調整してある。本論文では、主にケース 2、ケース 3 について取り上げている。

4. 実験結果

ケース 1 実験後の河床状態は、蛇行曲率の大きい地点の外岸側が掘れていて、その部分に水の流れが集中していた。断面平均流速に関しては、上流側から下流側へ大きく変化することはなかった。

ケース 2 の実験における図-3 は、上流側 2 蛇行の水面付近での流速ベクトル図を示すものである。また、図-4 は図-2、A 地点の合流部付近における横断面図を示している。(a) は流入部付近の直線水路の横断面図、(b) は流出部付近の直線水路の横断面図、(c) は流入部付近の蛇行水路の横断面図、(d) は流出部付近の蛇行水路の横断面図を表している。これらの図より、蛇行水路は直線水路に比して流水断面積が小さく、兩岸とも河床が掘れていた。また、半波長 110cm 程度の交互砂州が直線・蛇行水路において発生していた。ケース 3 の実験は、流量がケース 2 の二倍であったことから、蛇行水路にもある程度水が流れるようになっていたが、直線水路との流量配分比で見た場合、ケース 2 の結果とあまり差がないものとなった。

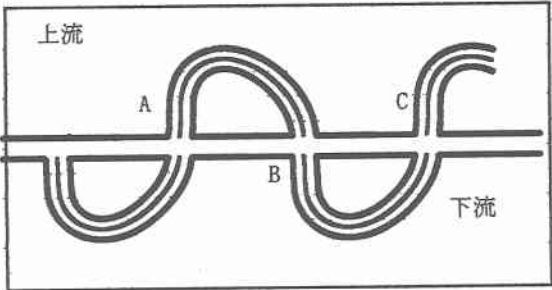


図-2 実験水路形状

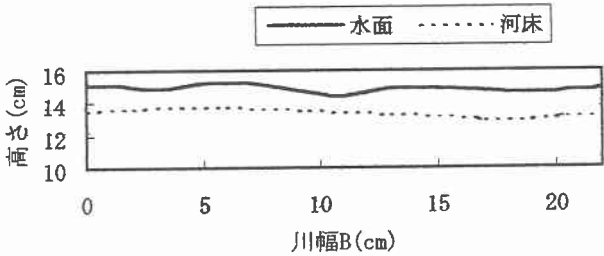


図-4(a) 流入部直線水路横断面図

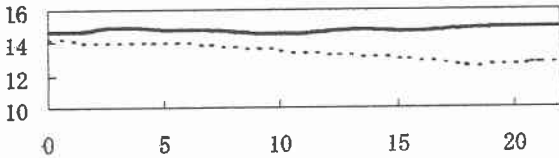


図-4(b) 流出部直線水路横断面図

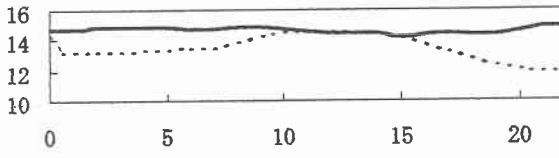


図-4(c) 流入部蛇行水路横断面図

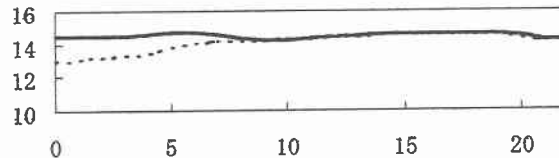


図-4(d) 流出部蛇行水路横断面図

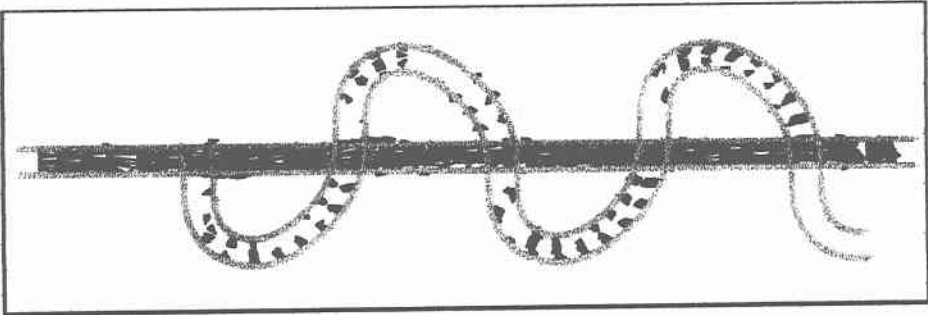


図-3 流速ベクトル図

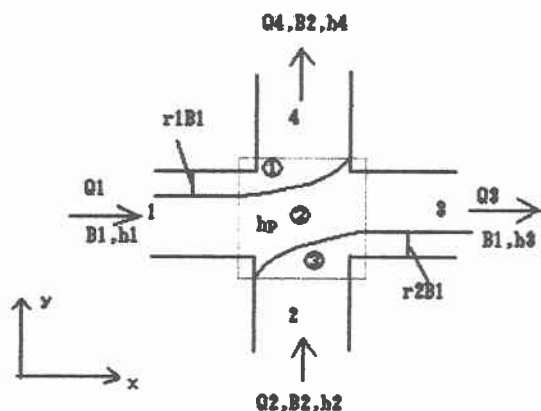


図-5 検査断面図

5. 十字形分合流の解析

図-5 のように直線水路と蛇行水路の合流部を十字形と仮定する。Q: 流量 (cm³/s), B: 水路幅 (cm), h: 水深 (cm), h_p : 合流部の平均水深 (cm), β : 運動量補正係数とし、直線水路 1 から蛇行水路 2 へ流れる流量の比率を r_1 , 蛇行水路 2 から直線水路 3 へ流れる流量の比率を r_2 とする。検査断面を 3 つに分けて、それぞれについて運動方程式と連続式を立てると以下ようになる。

①-x 方向

$$\beta_{1x} \rho Q_4 \frac{Q_4}{\eta_1 B_1 h_p} - \beta_{1x} \rho Q_1 \frac{\eta_1 Q_1}{\eta_1 B_1 h_1} = \frac{1}{2} \rho g h_1^2 \eta_1 B_1 - \frac{1}{2} \rho g h_p^2 \eta_1 B_1 \quad (1)$$

①-y 方向

$$\beta_{1y} \rho Q_4 \frac{Q_4}{B_2 h_4} - 0 = \frac{1}{2} \rho g h_p^2 B_2 - \frac{1}{2} \rho g h_4^2 B_2 \quad (2)$$

①-連続式

$$\eta_1 Q_1 = Q_4 \quad (3)$$

③-x 方向

$$\beta_{3x} \rho Q_2 \frac{r_2 Q_3}{r_2 B_1 h_3} - \beta_{3x} \rho Q_2 \frac{Q_2}{r_2 B_1 h_p} = \frac{1}{2} \rho g h_p^2 r_2 B_1 - \frac{1}{2} \rho g h_3^2 r_2 B_1 \quad (4)$$

③-y 方向

$$0 - \beta_{3y} \rho Q_2 \frac{Q_2}{B_2 h_2} = \frac{1}{2} \rho g h_2^2 B_2 - \frac{1}{2} \rho g h_p^2 B_2 \quad (5)$$

③-連続式

$$Q_2 = r_2 Q_3 \quad (6)$$

次に、図-2 の AB 間の蛇行水路と直線水路の流れについて、次のように考える。これらの流れは常流であり、水路長がある程度長ければ、摩擦勾配と河床勾配が balan

スするものと見てよいので、等流近似が成り立つ。したがって、 Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 に対応する等流水深は、Manning の式から

$$h_1 = \left(\frac{n_1 Q_1}{B_1 I_s^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (7)$$

$$h_2 = \left(\frac{n_2 Q_2}{B_2 I_m^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

$$h_3 = \left(\frac{n_3 Q_3}{B_1 I_s^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} = \left(\frac{n_3 Q_2}{r_2 B_1 I_s^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (9)$$

$$h_4 = \left(\frac{n_4 Q_4}{B_2 I_m^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} = \left(\frac{r_1 n_4 Q_1}{B_2 I_m^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (10)$$

ただし、 n : 粗度, I_m : 蛇行勾配, I_s : 直線勾配。

と求められる。前記の式にこれら水深を代入し、 r_1 , r_2 に関する方程式を導くと、ベキ関数方程式となる。これらに対し、2 次までの 2 項展開近似を行い、 r_1 , r_2 を解くと以下の式を得る。ただし、 β を 1 とみなし、水路幅 B はすべて等しいものとしている。

$$\eta_1 = \frac{Q_4}{Q_1} = \frac{n_1}{n_4} \sqrt{\frac{I_m}{I_s}} F(\phi_1, \psi_1) \quad (11)$$

$$\eta_2 = \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{\frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{I_m}{I_s}} F(\phi_2, \psi_2)}{1 + \left\{ \frac{n_1}{n_2} F(\phi_2, \psi_2) - \frac{n_1}{n_4} F(\phi_1, \psi_1) \right\} \sqrt{\frac{I_m}{I_s}}} \quad (12)$$

ただし、

$$F(\phi, \psi) = 1 + 5 \left(\frac{7}{6\phi + 14} - 1 \right) \times \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{2(\psi - 1)}{6\phi + 7} + \frac{14\psi + 7}{(6\phi + 7)^2}} \right\} \quad (13)$$

$$\phi = \frac{1}{2F_1^2} \left(\frac{n_i}{n_1} \right)^2 \frac{I_s}{I_m} \quad i=2, 4 \quad (14)$$

$$\psi_i = \frac{\left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right)^2}{8F_1^2} \left(\frac{n_i}{n_1} \right)^2 \frac{I_s}{I_m} \quad (15)$$

$$F_1 = \frac{\left(\frac{Q_1}{B_1 h_1}\right)}{\sqrt{g h_1}} \quad (16)$$

ここに、 $F_1:Q_1$ におけるフルード数、 $\bar{h}_1$:合流部までの直線水路における平均水深(cm).

ただし、 r_2 において今回の場合は

$$Q_3 = Q_1$$

と置き換えることができるとし、

$$r_2' = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{Im}{Is}} F(\phi_2, \psi_2) \quad (17)$$

と定める.

これにより、 r_1 、 r_2' の値が理論的に求まる.

図-6(a)は、 r_1 の式に含まれている、 n_4/n_1 の値をいくつか与え、それらの理論曲線を描き、実測値との比較をしたグラフである. 図-6(b)は、 r_2' について上記と同様に求めたグラフである. ただし実測値については、ケース2とケース3の実験について調べたものである.

6. 考察

図-6(a)、(b)における理論曲線は、接近流のフルード数 F_1 の増加とともに分岐流量が単調増加し、蛇行水路の

粗度が直線水路の粗度より大きくなるにつれて、蛇行部には水が流れにくくなり、逆に蛇行水路の粗度が直線水路の粗度より小さくなるにつれて、蛇行部には水が流れ易くなることを示している. 今回行った移動床の実験では、局所的流れの影響を受けて複雑な河床洗掘が生じており、それらがさらに流れの状態を複雑化させているために、理論式との単純な比較は難しい. しかし、ケースによって主流路と蛇行流路の粗度比にかなりの違いがあることは明らかであり、図-6の結果はその影響を最も強く受けて流量配分比が決まっていることを示唆しているようである.

7. まとめ

理論計算において、直線水路と蛇行水路の合流部を十字形に仮定し、流量を $Q_3=Q_1$ とおいたことで、結果の式を簡潔にまとめることができた. これは、実際に実験で利用した水路に当てはめても関連性があると考えられる. また今回の実験は、初期河床が平坦河床ではなかったもので、平坦河床で実験を行った場合と比較してみる必要があると考えられる.

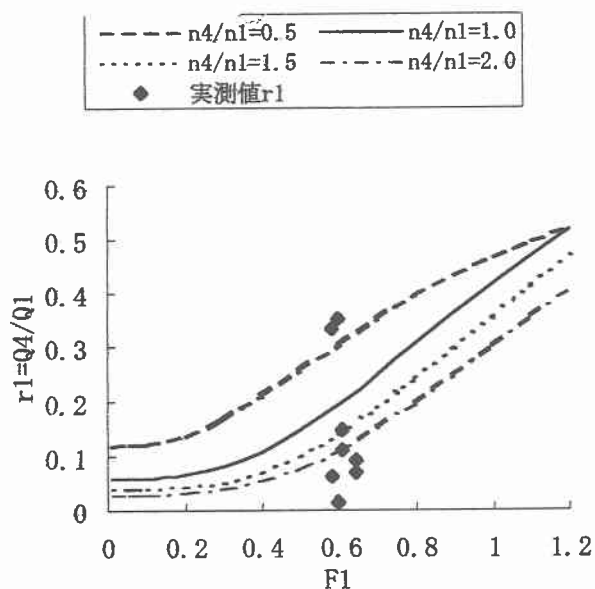


図-6(a) 分岐流量の比率(r_1)

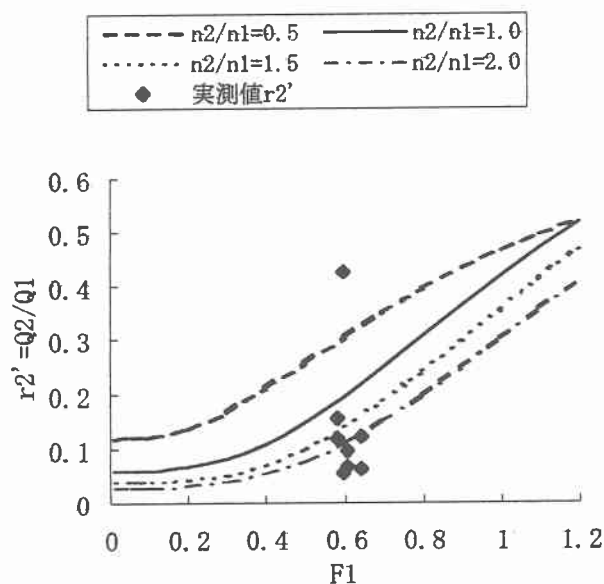


図-6(b) 分岐流量の比率(r_2')