

標津川旧蛇行通水時の堰をともなう 分岐流量配分比に関する研究

BIFURCATED FLOW RATE TO THE OXBOW MEANDER CHANNEL
REGULATED BY A SMALL DAM IN THE SHIBETSU RIVER

長谷川和義¹・藤田将輝²・渡邊康玄³・桑村貴志⁴

Kazuyoshi HASEGAWA, Masaki FUJITA, Yasuharu WATANABE, Takashi KUWAMURA

¹正会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²学生員 北海道大学大学院 環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 (独)北海道開発土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 (独)北海道開発土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

A project of river channel restoration has been promoted in the Shibetsu River, that attempts to restore the natural meander channel remained as an oxbow lake by letting the river water run through. In this project, it is intended that water streams into both the restored meandering channel and the straightened current river course by a small dam constructed downstream of the bifurcation point. But there are few papers treating the relationship between bifurcated flow ratio and the height of a dam in such complex channel system. This study is devoted to investigate the regulation function of a dam for bifurcated flow rate into an oxbow channel. Theoretical solutions for the flow rate are derived from the momentum balance of the several control volume sections of the bifurcated area. The results are compared with observed data in model tests and in field survey at a study section of the Shibetsu River to show good agreement.

Key Words : river restoration, meander channel, bifurcated flow rate, momentum equation, model test, field observation

1. はじめに

標津川は北海道東部の摩周湖近傍を流れる, 流域面積 671km², 全長78kmの二級河川であり, 元来, 迂曲の連続する蛇行河川であった(図-1(a)). 昭和45年頃から氾濫対策として直線化が施され, 現在の姿となっている(図-1(b)). その結果, 地下水位が低下して水はけが良くなり, 豊かな牧草地が作りだされた. しかしその一方で河床勾配が急になったため流れが速くなり, 魚種が減少するといった変化が顕著に現れるようになった. 近年, 河川生態系の保全や自然河川の復元への要望が高まり, 直線化された標津川の蛇行を復元し, 川本来の姿を取り戻そうという試みが標津川の一部区間を対象に進められている¹⁾²⁾³⁾. 蛇行復元をはじめとする河川の自然復元計画は欧米において多くの実行例が存在しているが, これまで日本でこのような取り組みは行われておらず, 標津川の蛇行復元は全国初の大規模な自然復元のモデルケースとして, 重要な役割を持つものといえる. 本ケースでは三日月湖状に残った旧川蛇行部に通水をはかり蛇行復元を達成しようとしているが, その際, 現状の通水能力



図-1(a) 昭和22・27年の標津川の姿



図-1(b) 平成7年の標津川の姿

を保持するために現在の直線河道と旧川部に共に通水させるという手法が有力となっている. しかし, 小流量時に蛇行河道を流れ, 大流量時には両河道を流れるようにするためには, 分岐部に低堰を設ける必要があり, 水理的状态はかなり複雑である. このような流れに対する研究はほとんど見あたらない. 本研究は, 標津川蛇行復元

部における流量の本川・旧川配分比を堰の高さと関連付け、理論的な検討を行うとともに、模型実験及び現地試験の結果と比較し、その妥当性を判定するものである。

2. 理論解析

蛇行部では勾配が緩やかになるため、十分な量の水が流れこんでいなければ流入部が閉塞する恐れがある。本ケースでは旧川側の流れを保障するよう、分岐部下流に堰を設けているが、その効果は明らかにされていない。この節では本川と旧川の流量分岐のメカニズムを1次元運動量方程式により明らかにする。以下に計算に用いた基礎方程式を示す。

(1) 運動方程式および連続式

本研究では分岐部周辺を図-2のようにモデル化した。図中の破線で示す検査断面を設け、仮定した分離流線により領域①・領域②に分けてそれぞれに運動量方程式および連続式を立てた。この際、底面せん断力は重力の流下方向成分と釣り合うものと考えた。

a) ①領域

x方向成分運動量方程式

$$\begin{aligned} & \beta_b \rho r Q U_b \cos \theta - \beta_a \rho r Q U_a \\ & = \frac{1}{2} \rho g h_a^2 r B_a - \frac{1}{2} \rho g h_p^2 r B_a \end{aligned} \quad (1)$$

y方向成分運動量方程式

$$\begin{aligned} & \beta_b \rho r Q U_b \sin \theta \\ & = -\frac{1}{2} \rho g h_b^2 \frac{B_b}{\sin \theta} + \frac{1}{2} \rho g h_p^2 \frac{B_b}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

連続式

$$rQ = U_a h_a r B_a = U_b h_b B_b \quad (3)$$

マニング式による上流部等流水深

$$h_a = \left(\frac{n_a^2 Q^2}{B_a^2 I_a} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (4)$$

b) ②領域

x方向成分運動量方程式

$$\begin{aligned} & \beta_a \rho (1-r) Q U_a - \beta_a \rho (1-r) Q U_a \\ & = \frac{1}{2} \rho g h_a^2 (1-r) B_a + \frac{1}{2} \rho g h_p^2 r B_a - \frac{1}{2} \rho g h_d^2 B_a \end{aligned} \quad (5)$$

y方向成分運動量方程式

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{h_a + h_d}{2} \right)^2 \left(\frac{B_b}{\sin \theta} + l \right) \\ & - \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{h_p + h_d}{2} \right)^2 l - \frac{1}{2} \rho g h_p^2 \frac{B_b}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (6)$$

連続式

$$(1-r)Q = U_a h_a (1-r) B_a = U_d h_d B_a \quad (7)$$

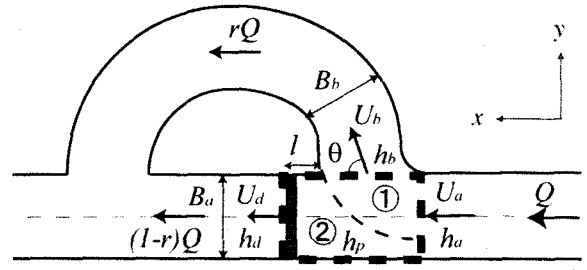


図-2 分岐部のモデル

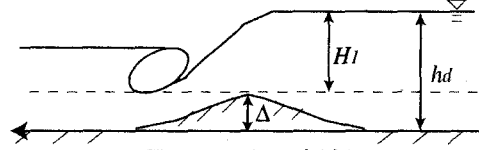


図-3 堰周辺の概念図

ここで、 Q : 総流量、 U_a : 分岐直前の本川流速、 U_b : 旧川流入部での流速、 U_d : 堰での流速、 h_a : 分岐直前の本川水深、 h_b : 旧川流入部での水深、 h_d : 堰での水深、 h_p : 分離流線上での水深、 r : 流量配分比、 B_a : 本川の川幅、 B_b : 旧川の川幅、 l : 旧川流入部左岸より堰までの距離、 θ : 本川と旧川の分岐角、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 I_a : 本川の河床勾配、 n_a : 本川の粗度係数、 β : 運動量補正係数(サフィックスは検査断面を表す) h_p については流線に沿って、また h_b については断面に沿ってその値が変化するものと考えられ、放物線による近似法も取りうるが、非常に煩雑な表現になる他、水深変化が僅かと考えられるため一定値として扱うことにした。ただし、実際には使用しないが、式(6)で本川左岸部の圧力評価には h_p と h_d の平均を用いた表現にしている。

(2) 完全越流条件と背水影響

以上、7つの基礎式を導いたが、この他に、堰による規定水深 h_d を明らかにしておく必要がある。図-3で比エネルギーを考えると式(8)が得られる。

$$E = H_1 + \frac{1}{2g} \left(\frac{(1-r)Q}{B_a H_1} \right)^2 = \frac{3}{2} h_{dc} \quad (8)$$

式(8)より

$$\begin{aligned} h_d &= \Delta + H_1 \\ &= \Delta + \frac{45}{38} \sqrt{\frac{1}{g} \left\{ \frac{(1-r)Q}{B_a} \right\}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし式(9)を導くに当たっては完全越流を仮定しており、そのため完全越流が起こる条件式である式(10)を満たしている必要がある⁴⁾。

$$\frac{\Delta}{h_d} \geq \frac{1}{2} F_d^2 - \frac{3}{2} F_d^{\frac{2}{3}} + 1 \quad (10)$$

E : 比エネルギー、 H_1 : 堰頂上から水面までの距離、

h_{dc} : 限界水深、 Δ : 平均河床位からの堰高、 F_d : 堰直前でのフルード数

一方、分岐流路水深 h_b に関しては合流点水位からの背

水影響を考慮する必要がある。蛇行長が十分に大きい場合には蛇行河道の勾配に従う等流水深に等しいものと仮定しても大きな違いはないであろう。すなわち、

$$h_b = \left(\frac{n_b^2 r^2 Q^2}{B_b^2 I_b} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (11)$$

とみなすことにする。

ただし、 I_b ：旧川の河床勾配、 n_b ：旧川の粗度係数

以上によって基礎式が9本存在することになるが、未知数に対して条件過剰となる。横断方向の運動を議論する必要がないのでここでは式(2)、(6)を用いない。

(3) 流量配分比 r の数値計算

ここで r に着目すると、式(1)より

$$h_p = h_a \sqrt{1 - 2F_a^2 \left\{ \beta_b \frac{B_a}{B_b} \frac{h_a}{h_b} r \cos \theta - \beta_a \right\}} \quad (12)$$

式(5)より

$$\begin{aligned} & (1-r)h_a^2 + rh_p^2 - h_d^2 \\ & = 2F_a^2 h_a^2 (1-r) \left\{ \beta_d \frac{h_a}{h_d} (1-r) - \beta_a \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

F_a ：分岐直前のフルード数、 h_c ：分岐前の流量に対応する限界水深

式(4)(9)(11)(12)(13)より数値計算によって r を求めることができる。ただし、以下においては $B_a=B_b=37.25$ 、 $I_a=1/800$ 、 $I_b=1/2000$ 、 $n_a=n_b=0.0469$ 、 $\theta=80^\circ$ 、 $\beta=1$ とした。

3. 理論結果の検討

(1) r と Δ/h_a の関係

堰の高さにより本川と旧川の流量配分比がどのように変化するのを見るために、縦軸に配分比 r 、横軸に堰高 Δ と分岐直前水深 h_a の比をとり、分岐直前のフルード数 F_a をパラメータに描いたグラフが図-4である。図からは Δ/h_a の増加に伴い配分比 r が増加し、やがて1に漸近していくことが伺える。これは堰が分岐直前水深よりもある程度大きければ、堰を越流する流量は小さくなり主として旧川を流れる事を意味しており、実際の現象で生じるで結果と一致している。また堰高の割合が小さくなると流れの多くは堰を越流し、旧川を流れる割合が減少することを示している。

一方、流量配分比に対するフルード数の影響は、 Δ/h_a が小さい領域ではそれが大きく、 Δ/h_a が大きい領域は逆になっていることがわかる。フルード数が大きい場合では、堰が低くても旧川側に水が流れるものと予想され、逆に堰がある程度の高さをもっている、その流量配分比をあまり大きくできないことが予想される。堰高の影響はフルード数の小さいときに大きく、フルード数の大きいときに小さくなるものといえる。

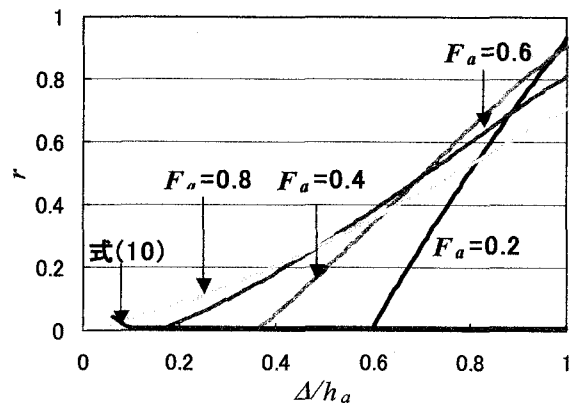


図-4 r - Δ/h_a 曲線

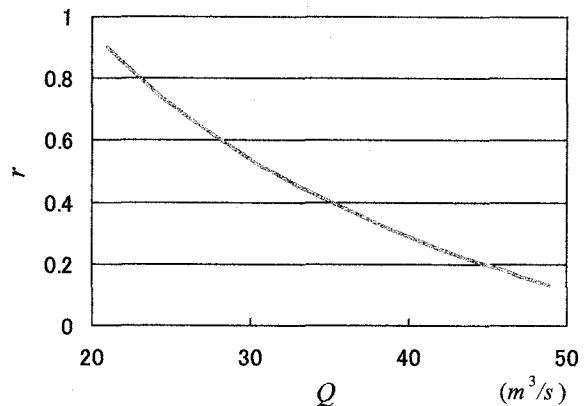


図-5 流量と流量配分比の関係

また、本理論では堰で完全越流が生じることを仮定しており、図中に式(10)を用いた理論の成立限界を示す曲線を併記してある。この線との交点よりも Δ/h_a の小さい領域では完全越流は起こりえず、このような領域では不完全越流を考慮した理論が必要となる。

(2) r と Q の関係

流量以外の条件を固定し、ある流量が流れた場合の流量配分比を数値計算により求め、図示したものが図-5である。図からは流量の増加に伴い、その配分比が減少していく傾向にあることがわかる。これは流量が大きい場合、 h_a が大きくなり、結果として Δ/h_a が小さくなって配分比が小さくなるためであり、先の r - Δ/h_a 図から得られる知見と一致している。

(3) 本川と旧川の分岐角度

本川と旧川の分岐角が流量配分比に及ぼす影響を検討する。他の条件を固定し、分岐角 θ のみ変化させた場合の r - Δ/h_a 曲線が図-6である。図からは θ が小さくなるにつれて r が大きくなっていくことがわかる。角度を0に近づけたとき旧川を流れる水の量は最大になるものと考えられるが、蛇行復元に当たっては単純に多くの水が流ればよいというわけではなく、適切な流量配分比を選定し、それにあわせて分岐角を調整する必要がある。

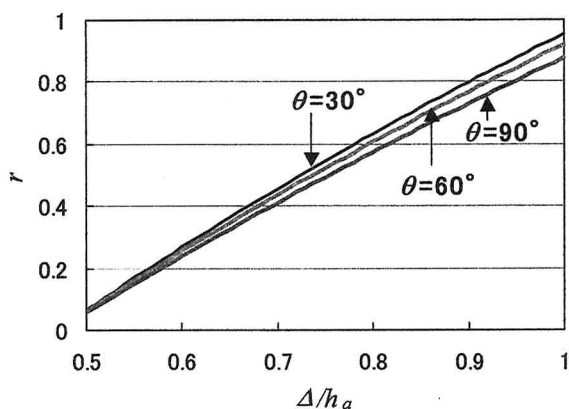


図-6 旧川・本川分岐角の影響

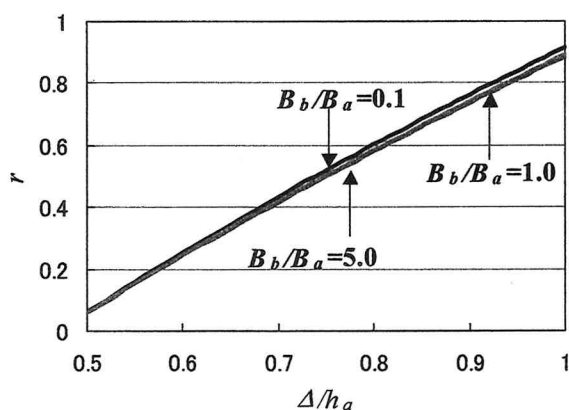


図-7 旧川・本川幅の影響

(4) r と B_b/B_a の関係

図-7は他の条件を固定して B_b/B_a のみ変化させて得られた r 曲線である。図からは B_b/B_a が減少するにつれてわずかに増加していく傾向がうかがえるが、 r にほとんど変化が現れない。これは現実の場合とは矛盾するものであり、本モデルの問題であろう。ただし、多くのケースで $B_b/B_a \approx 1$ と想定されるので実用に障害はないと考えられる。

4. 模型実験⁵⁾の結果

(1) 実験装置・実験条件

実験で用いた模型は歪なしで現地の1/125スケールで作成されている(図-8)。分岐部下流に高さ6mmの刃型堰を設置し、固定床試験によりいくつかの流量に対応する流量配分比を測定するとともに、移動床実験をおこない、砂の堆積傾向を調査した。また、水路勾配は固定床の場合は1/800、移動床の場合は1/200である。なお、実験ケースを表-1、表-3に示す。

(2) 固定床実験

a) 実験条件

固定床実験の実験条件はフルード相似に従い表-1の通りに定められた。



図-8 実験装置

表-1 固定床実験の実験条件

ケース名	使用水路	堰	流量
RUN1	直線・蛇行	堰高6mm	0.231(l/s)
RUN2			1.000(l/s)
RUN3			2.485(l/s)

表-2 固定床実験の実験結果

ケース名	総流量	本川流量	旧川流量	配分比
RUN1	0.231(l/s)	0.155(l/s)	0.076(l/s)	0.33
RUN2	1.000(l/s)	0.652(l/s)	0.348(l/s)	0.35
RUN3	2.485(l/s)	2.026(l/s)	0.459(l/s)	0.18

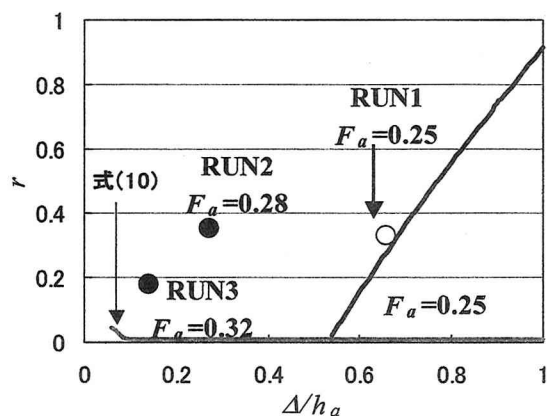


図-9 理論値との比較

b) 固定床実験の結果

固定床実験の結果、得られた流量配分比は表-2のとおりである。また、これらの結果を先の理論値と比較したものが図-9である。実験値に対応するフルード数を用いて r - Δ/h_a 曲線を描き実測値をプロットしている。図中の○は完全越流条件を満たしていることを、●は満たしていないことを示している。本実験の結果得られたデータでは、2つのケースが完全越流条件をみたしておらず、理論との比較ができないものの、RUN1については理論値と実験値がよく一致している。

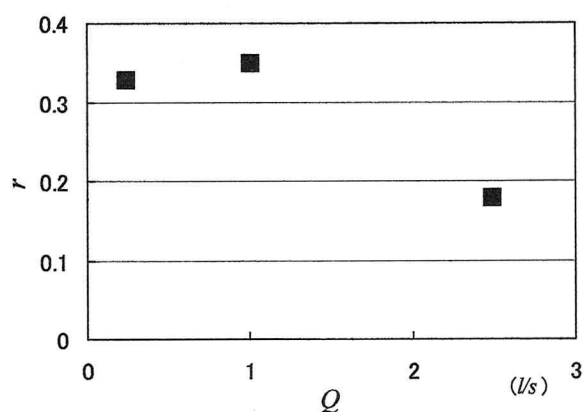


図-10 流量と流量配分比との関係

いずれにせよ、実験値の数が少なく、今後更なるデータ収集が望まれる。

図-10は流量と流量配分比との関係を示したもので流量配分比が流量の増加に伴い減少していく様子が見て取れる。この性質は先の数値計算により得られた図-5の結果と一致しているものの、2つの実験値が完全越流条件を満たしていないため、理論と結びつけて論ずることは難しいといえる。

(3) 移動床実験

a) 実験条件

移動床実験は無次元掃流力と砂州発生領域を一致させるように条件を変え24ケースの実験がおこなわれた。したがってフルード相似は成立していない。ここでは特に現地に近い条件を想定している表-3に示す4パターンの方に着目するものとする。この実験に先立ち、直線部のみに通水をおこない交互砂州を発生させており、表-3中の砂州位置とは分岐部で砂州が本川の左岸・右岸いずれに位置しているかを示している。

b) 移動床実験の結果

移動床実験の結果、得られた各ケースについての水深コンター図を図-11に示す。いずれのケースにおいても初めは旧川部の流量が大きいが、旧川流入部に砂が堆積し、閉塞するという結果に終わっている。このうち、B11・B12のケースがB21・B22よりも旧川の堆積域が大きくなっている。これはB11・B12のケースは流量が大きいため掃流力が強く、閉塞するのに時間がかかったのに対し、B21・B22のケースは流量が小さく比較的短時間で旧川流入部が閉塞してしまったためと考えられる。このことは、平均的にある程度の流量が流れていなければ、旧川が直ちに閉塞してしまう可能性があることを示唆しており、現地試験においても注意をうながすものである。砂州位置の影響についてはB11(左岸付)とB12(右岸付)、B21(左岸付)とB22(右岸付)、いずれのケースを見ても砂州が本川の左岸側に位置している場合の方が旧川の堆積領域は広くなっており、旧川に流れが入り込みやすいことがわかる。

表-3 移動床実験の実験条件

ケース名	使用水路	堰	流量	砂州位置
B11	直線・蛇行	堰高6mm	夏期 2.39(l/s)	左
B12				右
B21			融雪 0.65(l/s)	左
B22				右

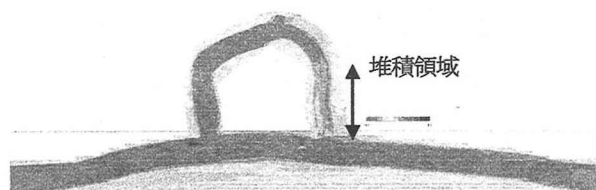


図-11(a) B11コンター図

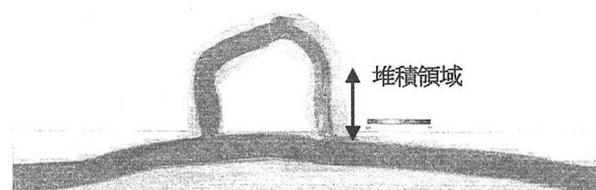


図-11(b) B12コンター図

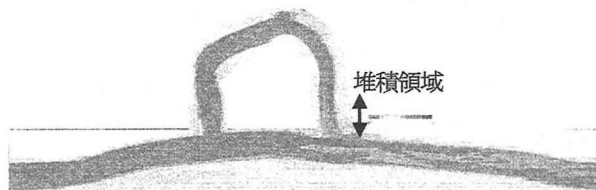


図-11(c) B21コンター図



図-11(d) B22コンター図

5. 現地通水試験⁶⁾

(1) 現地通水試験の概要

2002年3月から標津川一部区間において、三日月湖状に残っていた旧川を本川につなぐことで蛇行を復元させ、通水試験が行われている(図-12)。平水時には主として蛇行部である旧川を流れるよう、本川の分岐部下流で落差1mの透過性の堰が設置されている。

現地通水試験を見る限り、旧川側に十分な量の水が流れており、懸念された旧川流入部の閉塞は起こりそうに無い状況であった。航空写真からは本川に交互砂州の発生していることが確認できるが、分岐部では明瞭でなく、左右交互の順からは砂州が本川左岸側に位置しているものと考えられた。そのため、旧川流入部においては



図-12 現地試験の様子

水深が大きいと推定され、旧川に相当量の水が流れている原因のひとつであると考えられる。今後、現地において砂州が移動し、本川右側に位置するようになれば、旧川流入部は閉塞しやすくなることが予想される。

(2) 流量観測

現地で得られた本川部(分岐前)と旧川部の流量を表-4に示す。これらの観測値を理論と比較したものが図-13である。同図より4月19日の観測データが理論と良く一致していることがわかる。3月19日については Δ/h_a が2以上と非常に大きい領域にある。 $F_a=0.25$ 曲線は完全越流条件を満たしながら、 $\Delta/h_a=1.04$ で1に近づく。この限界よりも大きい領域では $r=1$ となる。流れが堰を越えない条件式は式(14)によって表され⁹⁾、図-13中に破線で示される。

$$\frac{\Delta}{h_a} \geq \frac{1}{2} F_a^2 + 1 \quad (14)$$

これより大きい領域では r は1になる。

現地データも1に近い値をとっており、ほぼ全流量が旧川側に流れている。完全に1とならないのは堰が透過性であるためであり、低水時に植生が浸入しないように考慮された処置である。

6. まとめ

- (1) 1次元の運動量方程式により、堰をともなう分岐部での流量配分比の性質を明らかにした。これによると、配分比 r は Δ (堰高)/ h_a (上流水深)の比の増加と共に増加し、また上流部フルード数によって変化する。
- (2) 固定床実験における流量配分比は、完全越流条件をみたす場合に、モデル理論とよく一致した。また、現地通水試験の結果もモデル理論値に近い値を示した。したがって、本モデルによる解析結果をもとに現地における状態の推定が可能である。

表-4 観測流量

調査月日	流量 (m ³ /s)		配分比
	本川	旧川	
3月19日	6.98	6.90	0.99
4月19日	44.22	26.10	0.59

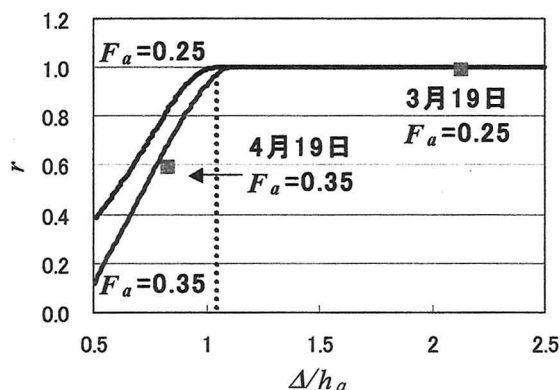


図-13 理論曲線との比較

- (3) しかし、本理論で r を推定する場合、 F_a が小さい領域では r - Δ/h_a 曲線の勾配が大きく、わずかな h_a の変化により r の値が大きく異なる結果を得る。そのため、 h_a は特に精確に見積もる必要がある。ここでは等流水深で近似しているが、不等流計算など、より精度の高い手法を用いることが望ましい。
- (4) 移動床実験では、いずれの実験条件においても旧川分岐部が閉塞した。しかし、これらの実験はフルード則を満たしておらず、そのまま結果をあてはめることはできない。配分流量が減少した場合には現地においてもこのような事態が起こる可能性は高く、徴候が明らかになった場合には何らかの対策を講じる必要がある。

参考文献

- 1) 標津川技術検討委員会：第1回 標津川技術検討委員会資料 2001
- 2) 標津川技術検討委員会：第2回 標津川技術検討委員会資料 2001
- 3) 標津川技術検討委員会：第3回 標津川技術検討委員会資料 2002
- 4) 池内正幸, 山田正, 村上良宏：溪流を模擬した開水路流れの水面形遷移と抵抗則に関する研究, 第30回水理講演会論文集, pp. 73~78, 1986
- 5) 北海道開発土木研究所, 株式会社水工リサーチ：平成13年度施工蛇行復元部における砂州の影響実験検討業務 報告書 2001
- 6) 鈴木優一, 渡邊康玄, 長谷川和義, 森明巨, 空閑健：標津川蛇行復元における2way河道の通水直後の変化, 第47回水工学論文集, 2003

(2002. 9. 30受付)