

石狩川上流の河床低下対策に関する 大型模型実験による検証について

旭川開発建設部 治水課 ○田中 雅基
米元 光明
佐藤 貴弘

旭川市を貫流する石狩川上流域において、近年河床低下の進行による護岸機能の喪失や橋脚への影響が懸念されており、これまで複数の対策工の検討を行ってきた。現在、これら対策工の効果及び環境への影響などを確認するために、現地縮尺1/50模型による水理模型実験を実施している。本論文では、平成23年9月洪水の再現実験結果を基に模型の精度を検証するとともに、今後の実験計画を報告するものである。

キーワード：河床低下対策、水理模型実験

1. はじめに

近年、石狩川上流KPI57～166区間（図-1）では河床低下が進行しており、既設護岸の機能喪失や橋脚の安定性低下が懸念されている^{1)・2)}。さらに、当該区間では河床低下の進行に伴い河床砂礫が流失し、河床に岩盤が露出している箇所が確認されている（図-2）。当該区間を含む石狩川上流では平成21年～平成23年にかけて、サケの稚魚を放流しており、平成23年秋には数百尾のサケの遡上が確認されている³⁾。サケは産卵床に砂礫・石礫を利用するが、河床低下の進行に伴い、岩盤露出面積が増大するとサケ等の産卵適地が減少することも懸念される。

そのため、当該区間では河床低下を抑制し砂礫床河川を復元することが課題となっており、現在その対策手法について検討をおこなっているところである。

対策検討にあたり、岩盤洗掘メカニズムの解明が必要であったことから、当該区間の岩盤洗掘特性を確認するための実験がおこなわれた。実験結果は、松本ら^{1)・2)}、清家ら^{4)・5)}により報告されており、井上ら⁶⁾により岩盤上の限界掃流力および岩盤洗掘速度について取りまとめがおこなわれた。さらに、それら実験結果および岩盤洗掘に関する既往研究^{7)・8)・9)・10)}を踏まえ、岩盤洗掘を考慮可能な河床変動計算モデルを構築し¹¹⁾、現在、将来予測や適切な対策工を抽出するための検討をおこなっている。

河床変動計算結果から、今後も河床低下が進行し、KPI165付近の最深河床高が最大6m程度低下することやKPI160から上流側の河床低下が顕著であることなどが予測されている。また、対策工として、低水路拡幅および低水路拡幅時に発生する土砂を利用した岩盤被覆による



図-1 河床低下区間の位置



図-2 河床に岩盤が露出している様子KPI160付近

対策が効果的であることなどが確認されている。

河床変動計算では、今後の河床低下の進行程度を定量的に評価することができるものの、計算格子幅や現象のモデル化に限界があることなどから、計算結果だけでは評価することが困難な事象も存在する。本検討で構築し

てきた河床変動計算モデルでは、特に、構造物周辺の局所流や河床変動、永山新川合流による流況変化や河床変動、流量が少ない場合の流況や水みちなどを十分に評価することが困難と考えられる。

本検討では、より効果的かつ適切な河床低下対策の実施に向け、それら事象の把握を重要と考え、水理模型実験を用いて現象把握を行うこととした。水理模型実験は3年計画で実施することとしており、本年度はその1年目に当たる。本報告では、本年度製作した水理模型実験について紹介するとともに、平成23年9月洪水を対象に実施した水理模型検証実験の結果およびその結果から確認できた事項と来年度以降の課題を報告する。

2. 実験計画について

(1) 実験目的

水理模型実験では、河床変動計算では評価が困難な下記の事象に対する各対策工の効果等を評価することを目的とする。

- ① 各対策工を実施した場合に生じる局所現象とその影響（橋脚や各対策工の安全性など）
- ② 永山新川合流による流況および河床変動への影響
- ③ 各対策工の高水時（基本高水流量ハイドロ・整備目標流量ハイドロなど）の流況とその影響
- ④ 各対策工の低水時の流況とその影響

(2) 実験計画について

実験は、模型製作を含め、3年間で実施することを計画している。3年間の実験計画を表-1に示す。

今年度（平成24年度）は、模型設計・製作と模型の再現検証実験を実施した。検証実験では、平成23年9月洪水を対象として、水位および通水時前後の河床変動を適切に評価できる模型であることを確認する。

平成25年度は、各対策工の効果を局所現象を含めて評価する。長期間を対象とした各対策工の効果および影響等を評価するため、平均年最大流量を一定時間以上通水することを予定している。また、永山新川の合流が流況および河床変動に及ぼす影響についても確認をおこなう。影響確認では、石狩川本川と永山新川の流量比に着目する。

平成26年度は、大規模出水時における各対策工の安全性について確認をおこなう。基本高水流量ハイドロや整備目標流量ハイドロ下における各対策工の効果および影響等について確認をおこなう。また、流量が少ない時の河床状況の確認をおこない、魚類等への影響についても確認する。

表-1 模型実験の3年計画

| 年度 | 主な検討事項 | 実験ケース（案） |
|--------|--------------------------|----------------------------|
| 平成24年度 | 模型の再現検証 | 平成23年9月洪水再現検証実験 |
| 平成25年度 | 各対策工の効果を合流点の影響を含めて検討 | 対策工効果確認実験 永山新川影響確認実験 |
| 平成26年度 | 各対策工の安全性及び小流量時の流況、水みちの検討 | 大規模洪水影響確認実験 小流量河床流況確認実験 |

表-2 模型縮尺条件

| 項目 | 条件 | 模型設定値 |
|-----------------------|---|----------------------|
| 水深 | 水の粘性の影響が及ばない最小水深3.0cm以上を確保 | 代表粒径が動き出す水深は3.2cm |
| 河床材料代表粒径 | リップルが発生しない代表粒径が0.6mm以上を確保 | 実験砂の代表粒径は1.18mm |
| 粒子レイノルズ数 [*] | リップルが発生しない粒子レイノルズ数($Re^*=U_*d/\nu$)が20以上を確保 | 代表粒径が動き出す Re^* は39 |

※ Re^* は粒子レイノルズ数、 U_* は摩擦速度($=\sqrt{gRI}$)、 g は重力加速度、 R は径深、 I はエネルギー勾配、 d は河床材料の代表粒径、 ν ($=0.01\text{cm}^2/\text{s}$) は水の動粘性係数



図-3 水理模型施設の写真（右側が上流）

3. 模型施設について

(1) 模型施設と模型縮尺について

水理模型実験施設は、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所が所有する石狩水理実験場で製作した。模型はその縮尺により、可能な限り現地状況と異なる事象が生じない条件⁽²⁾として現地縮尺1/50で設計・製作した（表-2）。図-3に実験施設の写真を示す。

(2) 模型形状

模型形状は、平成23年横断測量データに基づき製作した。また、現地状況から高水敷上の侵食がほぼないこと、また、河床に岩盤が露出している区間があることを考慮し、高水敷と岩盤箇所をモルタルで製作し、その上に砂礫で低水路河床形状を製作した。なお、岩盤高さは平成

19年の河道内ボーリング調査結果を利用し設定した（図4）。

a) 対象区間

実験では、各対策工の効果等を評価することを目的としている。そのため、河床変動計算で将来河床低下が顕著に進行すると予測される区間（KP160.4～KP165.0）を実験対象区間とした。また、上流端および下流端の境界条件の影響を抑制するため、対象区間の上流側および下流側に助走区間を設けた。実験施設の上流端は、現地砂州1蛇行波長以上かつ川幅の6倍程度を目安とし、現地で河床の経年変化が少ないKP167.0地点を選定した。実験施設の下流端は、水位調節器による堰上げ・低下背水の影響が及ばないように、川幅の5倍程度を確保することを目安とし、KP157.0地点とした。

b) 河床形状の製作

初期河床整形では、実験目的に応じて現地河床横断面をもとに横断面形状を縮尺した各測線地点横断板を作製し、正確な高さに設置した。横断線と横断線の間は、横断板の間で変化点を正しく連結して河床形状を再現したのち、横断板を抜き取って実験をおこなった。河床整形には河床材料を良く混合し、湿潤状態で均一に締め固め、同一の初期条件となるよう配慮した。

c) 河道内工作物について

実験対象区間とした現地には、永山床止工および複数の橋脚が設置されている（図-1）。それら人工工作物の影響を考慮した実験を実施するため、模型河道内に永山床止工（図-5）および橋脚（図-6）の模型を設置した。

(3) 模型特性と岩盤洗掘抑制効果の評価に対する考え方

現地では岩盤洗掘により河床低下が進行しているものの、模型では岩盤層をモルタルで製作しているため岩盤洗掘が生じない。そのため、各対策工の岩盤洗掘抑制効果については、岩盤露出面積の増減により評価することとした。

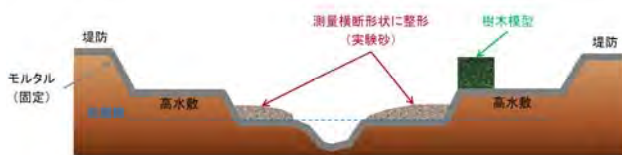


図4 模型横断面イメージ



図5 永山床止工の模型の写真（上側が上流）

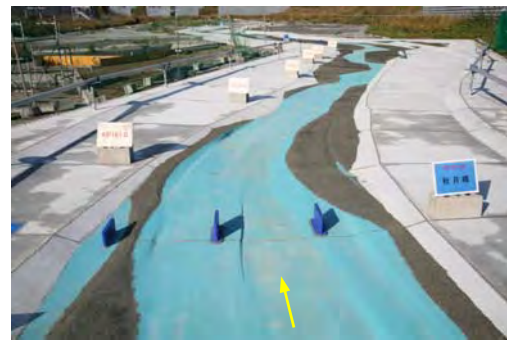


図6 秋月橋の橋脚模型の写真（下側が上流）

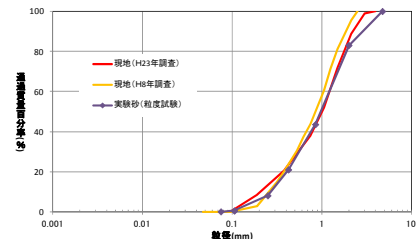


図7 実験で使用した河床材料の粒径加積曲線（現地粒径は1/50に縮小）

4. 検証実験について

(1) 概要

本検討で製作した模型による河床変化等の再現精度を確認するため、平成21年9月から平成23年9月の期間を対象とした検証実験をおこなった。

水位再現検証では、実験で永山水位流量観測所に相当する場所で水位の時間変化を計測し、その値を実際に永山水位流量観測所で計測された値と比較した。

河床変化の再現検証では、実験通水後に河床形状を2.0m（現地で100m）間隔で計測し、その値と平成23年9月洪水後の横断測量データを用いて、縦断形（平均河床高と最深河床高の初期河床高からの変化高）および横断形の比較をおこなった。さらに、通水前後の露岩面積と場所を比較し考察をおこなった。

(2) 実験条件

初期河床形状は、平成21年9月の横断測量データを基に製作した。

河床材料は、扇状地河川の粒径存在範囲が広いこと、小粒径のものは、河床変化にあまり関係しないことを考慮し¹³⁾、平成8年および平成23年の河床材料調査結果をもとに図-7のように与えた。

対象期間（平成21年9月～平成23年9月）の永山水位流量観測所の実績流量を用いて実験流量を設定した。模型縮尺に応じて、時間スケールも縮尺（約17倍）されるものの、すべての実績流量を対象とした実験を実施するためには104日以上を通水が必要であり、現実的には困難である。

一方、本実験では河床変化の予測精度を確認することを目的としており、河床形状が変化するような流量は限定することができると考えられる。そこで本実験では、当該区間の代表粒径（1.18mm）の無次元掃流力が0.05以上となる流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ 以上を対象として実験をおこなうこととした。実験に用いた流量条件は図-8に示す通り平成22年5月の融雪洪水と平成23年9月洪水を対象に流量ハイドログラフを設定した。

上流端からの給砂量は、各流量に応じた等流状態を仮定した水深および代表粒径から均一粒径として芦田・道上の掃流砂量式から単位時間当りの流砂量を求め、計量カップなどを用いて給砂した。

(3) 実験結果と考察

a) 水位の再現性

永山水位流量観測所（KP163.9）の実測と実験水位の時間変化を図-9に示す。これによると実験開始から洪水のピーク付近までは実測とよく一致している。しかし洪水減水期において実測よりも1cm程度（現地で50cm）低いまま推移している。これは現地の永山水位流量観測所（KP163.9）右岸側の砂州部には植生が繁茂し洪水後でもほとんど移動していないが、実験ではこの砂州が洪水ピーク時にフラッシュされて低水路幅が約0.4m拡がったことで実験の水位が低くなったものである。

b) 河床変化の再現性

平成21年9月測量時に低水路内に岩盤が露出していな

いKP164.0より上流区間を砂礫区間、下流区間を露岩区間と定義して河床変化について考察する。

初期値（平成21年9月）からの変化高を整理した平均河床高（図-10）及び最深河床高（図-11）の縦断図をみると、砂礫区間の実験結果と実測は概ね同様な変動傾向を示している。

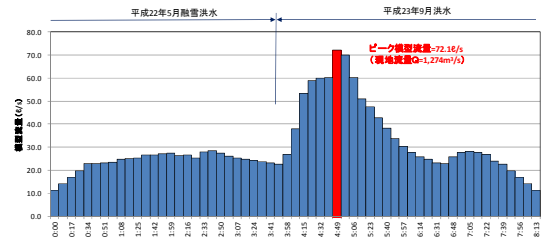


図-8 実験で利用した流量条件

(平成21年9月～平成23年9月の $400\text{m}^3/\text{s}$ 以上の実績流量に相当)

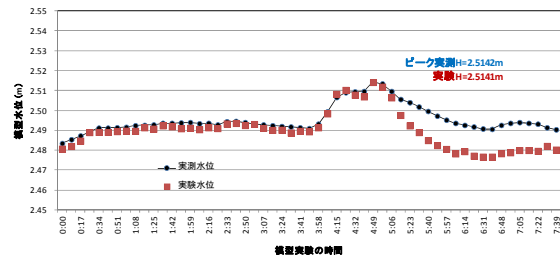


図-9 永山水位流量観測所の実測水位と実験結果水位の比較

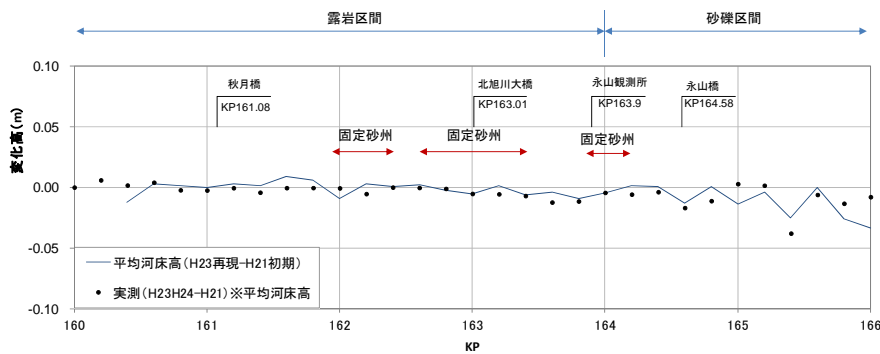


図-10 平均河床高の変化高の縦断図（実測との比較）

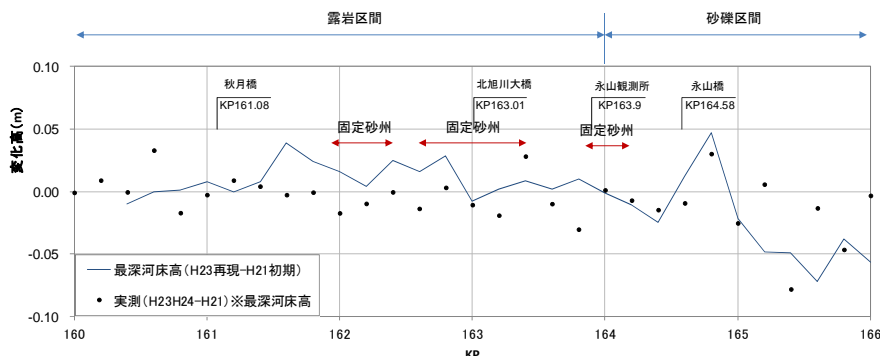


図-11 最深河床高の変化高の縦断図（実測との比較）

砂礫区間に当るKP164.4の実験結果を実測と比較して河床横断面図に示す(図-12)。これによると平成23年9月洪水後測量の河床形状をほぼ再現している。

一方、露岩区間に当たるKP163.4の河床横断面図(図-13)をみると、実験では右側岸にある砂州が左岸側に移動し露岩部(最深河床高付近)に堆積している。同様な現象が現地で固定砂州が形成されている地点で確認できる。最深河床高が実測と実験で一致していない(図-11)のはこのためである。現地の河床横断面形状の変遷(図-14)をみると平成18年以降は露岩区間にある砂州は樹林化によって固定されほとんど変化していないことから、実験条件として砂州の固定化を考慮する必要がある。

c) 露岩面積と岩盤洗掘

現地では岩盤洗掘により河床低下が進行しているものの、模型では岩盤層にあたる部分をモルタルで製作しているため岩盤洗掘が生じない。このため実験結果からモルタル層が露出した場合には岩盤洗掘が生じる可能性がある」と評価している。

KP160.0から165.0までの区間の露岩面積を実験前後で比較してみると(図-15、図-16)、初期の状態では約74.9m²であったものが実験後には約60.6m²に減少した。この面積の変化を1km毎に整理するとKP164.0からKP165.0までの砂礫区間では実験後に露岩面積が増加しており、岩盤洗掘が生じるものと判断される。

一方、KP164.0より下流の露岩区間では実験後に露岩面積が減少している。これは本来動かない樹林化した砂州を固定化していないためである。

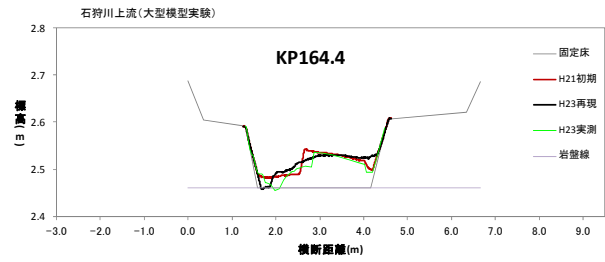


図-12 実験結果の河床横断面図 (KP164.4)

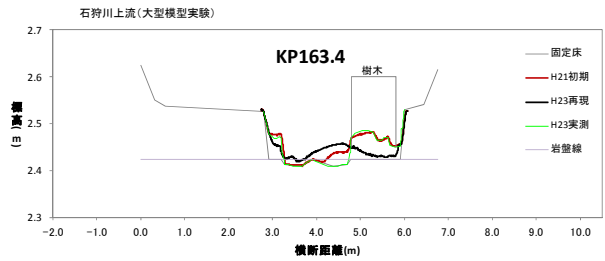


図-13 実験結果の河床横断面図 (KP163.4)

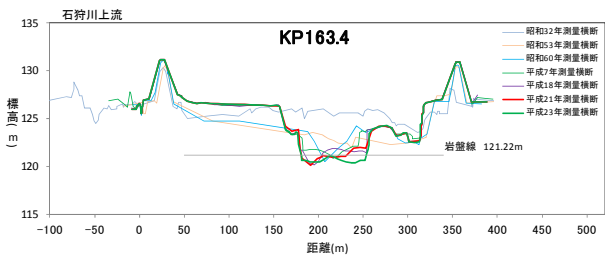


図-14 石狩川(KP163.4)河床横断面形状の変遷

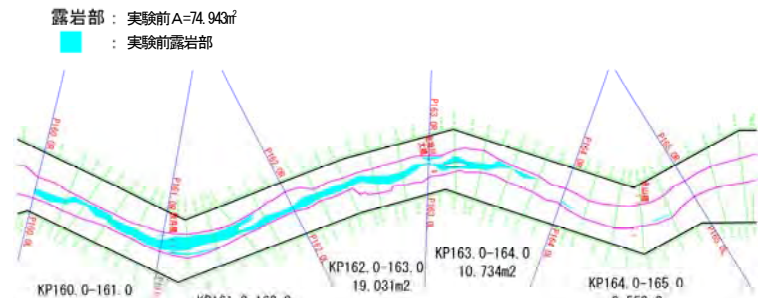


図-15 実験前の露岩面積と河床状況の写真 (KP163.6付近)

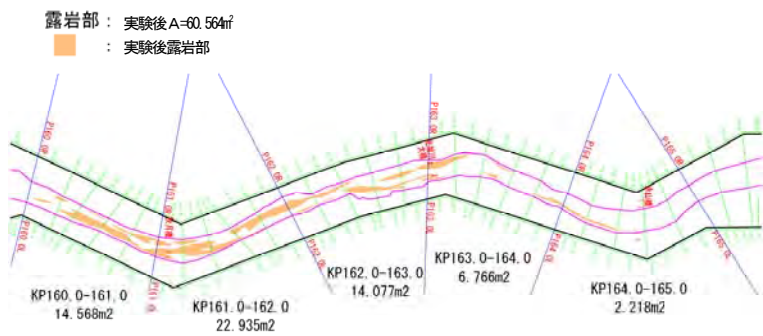


図-16 実験後の露岩面積と河床状況の写真 (KP163.6付近)



5. まとめ

本検討では、今年度製作した現地縮尺1/50の大型模型実験施設を用いて平成23年9月洪水を含む再現実験結果をもとに模型実験の精度を検証した。

その結果、永山水位流量観測所（KP163.9）の水位は洪水の立ち上がりからピークまでは実測を良く再現できることを、また、KP164.0より上流の砂礫区間では河床変化の傾向を概ね再現できることを確認できた。

しかしながら、洪水減水期の水位や露岩区間の河床変化状況は現況を再現するまでには至っていない。これは現地でも問題になっている樹林化による固定砂州が水理量や河床変動に対して影響している結果である。これに対して河道内樹木の繁茂状況を平面図や空中写真などから把握し、経年的に変化していない砂州部を固定床として取り扱うことで模型実験の再現性が向上するものと期待できる。

本年度の実験結果を踏まえ、次年度以降は、この大型模型実験により河床変動計算では評価が困難な事象に対する各対策工（低水路拡幅や岩盤被覆など）による効果などを確認する予定である。しかし大型の模型実験では、実験に要する期間や予算などの制約から、あらゆる条件での実験は困難である。岩盤洗掘を考慮できる河床変動計算モデルを併用して、各対策工の効果の予測および適切な選定をおこなっていく予定である。

参考文献

- 1) 松本勝治, 田代隆志, 根本深: 石狩川上流における河床低下について, 第52回(平成20年度)北海道開発技術研究発表会.
- 2) 松本勝治, 森田共胤, 根本深: 石狩川上流における河床低下について, 第53回(平成21年度)北海道開発技術研究発表会.
- 3) 有賀誠, 山田直佳, 伊藤洋満, 有賀望, 宮下和士: 石狩川上流におけるサケ *Oncorhynchus keta* の自然産卵 一大規模放流個体群回帰前の実態一, 旭川市博物科学館研究報告第4号, 2012年3月30日発行
- 4) 清家拓哉, 渡邊康玄, 井上卓也: 軟岩河床の洗掘機構の解明, 平成21年度 土木学会北海道支部 論文報告集第66号.
- 5) 清家拓哉, 渡邊康玄, 井上卓也: 軟岩河床における洗掘機構に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 137-142, 2010.
- 6) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳: 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, 河川技術論文集, 第17巻, pp. 77-82, 2011.
- 7) 小松佑輔, 渡邊康玄, 泉典洋, 竹林洋史: モルタルで擬似した軟岩の流砂の衝突による洗掘, 河川技術論文集, 第17巻, pp. 167-172, 2011.
- 8) 大澤亮介, 渡邊康玄, 鯉目淑範: 混合砂礫の衝突による軟岩の洗掘機構, 土木学会北海道支部論文報告集, 第68号, B-48, 2012.
- 9) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 清水康行, 木村一郎: 流砂の摩耗作用による岩盤侵食に関する実験的検討と数値シミュレーション, 水工学論文集, 第55巻, pp. 751-756, 2011.
- 10) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 清水康行, 井上卓也: 河床における岩盤上の流砂の集中度合に関する実験的検討と数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 68, No. 4, I_949-I_954, 2012.
- 11) 井上卓也, 渡邊康玄, 齋藤大作, 根本深, 松本勝治, 江崎國夫, 濱木道大: 軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発, 河川技術論文集, 第15巻, pp. 321-326, 2009.
- 12) 須賀堯三編著: 水理模型実験, 山海堂, pp. 78-82, 1990.
- 13) 財団法人国土技術研究センター編: 河道計画検討の手引き, 山海堂, pp. 57-60, 2002.