

複断面から船底形断面河道への改修による 洪水流況及び低水路河床高の変化

CHANGES IN FLOOD-FLOW DYNAMICS AND BED VARIATIONS BY REPAIR TO SHIP-BOTTOM-SHAPED CHANNELS FROM COMPOUND CHANNELS

笹木拓真¹・宮原幸嗣²・福岡捷二³

Takuma SASAKI, Koji MIYAHARA and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 博士課程前期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²国土交通省九州地方整備局 遠賀川河川事務所 調査課長 (〒822-0013 福岡県直方市溝掘1-1-1)

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Compound channels used in Japan have caused some problems on flood controls and river environments in recent years. One of the authors has emphasized that the ship-bottom-shaped channel is a desirable cross-section of rivers for both flood controls and river environments. The Ongagawa River changed channel cross-section to ship-bottom-shaped channels from compound channels in the view of river environments. However, there are almost no evidence yet whether ship-bottom-shaped channels are good or not for large floods from the viewpoint of discharge capacity of flood flows and formation of a stable channel bed. In this study, effects on flood controls and river environments in the Ongagawa River were investigated and clarified by comparing observed data and flood computation results. As the result, velocity distributions of flood flows and longitudinal bed variations decreased markedly in the ship-bottom-shaped channels.

Key Words : *flood flow, bed variation, ship-bottom-shaped channel, quasi-3D analysis, cross-section*

1. 序論

我が国の一般的な河道断面形状は複断面形である。複断面河道は洪水時には堤防付近の流速を低く抑えることで、堤防の安全性を高め、平水時には低水路流れの安定化、高水敷利用が可能となる河道である¹⁾。しかし今日の複断面河道では、主に土砂移動量の減少により低水路の河床低下や深掘れ、高水敷と低水路の比高差の増大、滞筋の固定化、高水敷の樹林化等の問題が発生している。さらに今後の気候変化による洪水の頻発化、洪水外力の増加等にも対応する治水と環境の両面から望ましい河道断面形が求められている。福岡は自然河川の横断面形は船底形が一般的であることに着目し、さらに札内川において洪水流量に対する縦横断的に安定した河道断面形について河幅と土砂移動の観点から検討し、治水と環境の調和した河道断面形は船底形断面であることを結論付け

ている²⁾³⁾。

遠賀川では、平成17年度に図-1に示す18.4km～20.2km区間で平常時の高水敷利用、河川景観の視点で、高水敷の緩傾斜化が実施された。図-2は改修前後に測られた19.6km地点と19.8km地点の横断測量結果を示しており、緩傾斜化された河道は船底形を成していることが分かる。この改修では、低水路際のコンクリート護岸は撤去され、水面と高水敷が滑らかにつながっている(写真-1)。また図-3は緩傾斜化された高水敷の等高線図を示している。19.2km～19.8kmの左岸側高水敷は、縦横断的に治水・上問題ない範囲でアンジュレーションを持たした設計がなされている。これらの改修は地域の学・官・民の協力の下で行われ、平水時の景観改善、高水敷利用者の増加等の面から評価を受け、2009年の土木学会デザイン賞を得ている⁴⁾。しかし、このような船底形河道が洪水時の流れ場や河床変動等にどのように応答するかについては検討が行われていず、船底形河道の計画、設計について

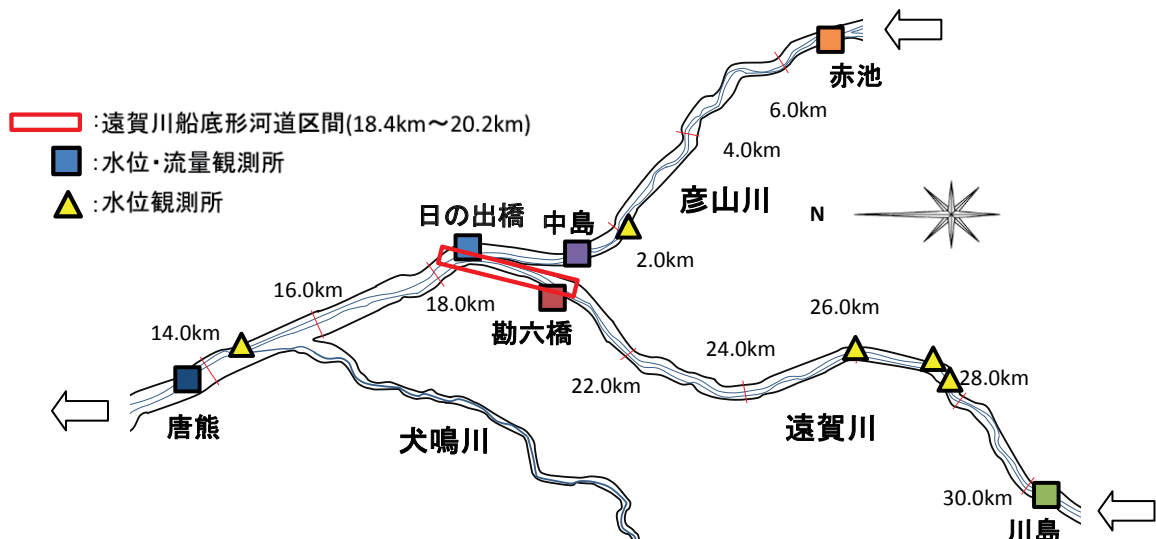


図-1 対象区間平面図



写真-1 遠賀川の船底形河道

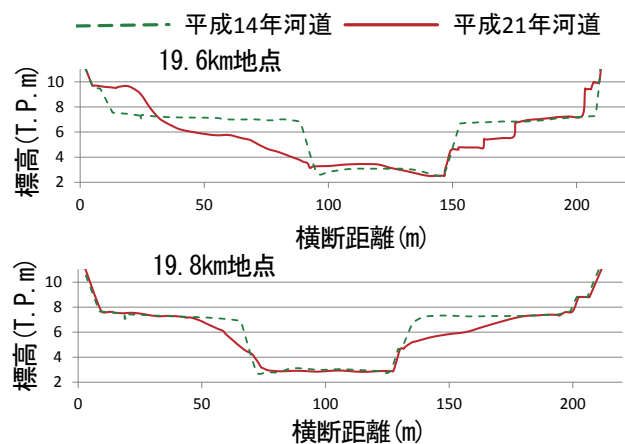


図-2 改修前後の横断測量結果

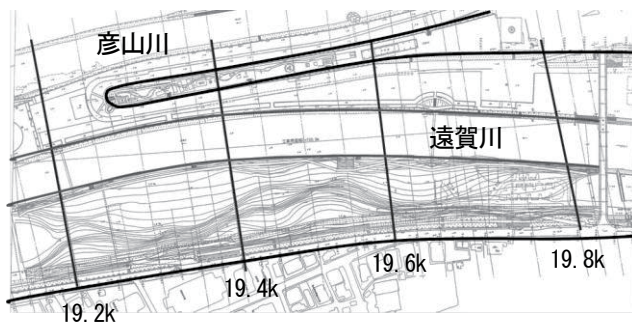


図-3 高水敷のアンジュレーション

の知識が乏しい。

これまで福岡は、観測水面形の時間変化には、河道形状・河床変動など、洪水時のあらゆる水理現象が現れることから、観測水面形を用いて非定常洪水流解析と河床変動解析を行うことで、多くの河川の洪水時の流況、河床変動を明らかにしてきた⁵⁾。本研究では、この手法を平成22年7月に遠賀川で発生した大洪水に適用することで、船底形河道における洪水時の流れ場、河床変動を明らかにする。また複断面形であった改修前の河道に対して洪水流・河床変動解析を実施し、両者の結果の比較を

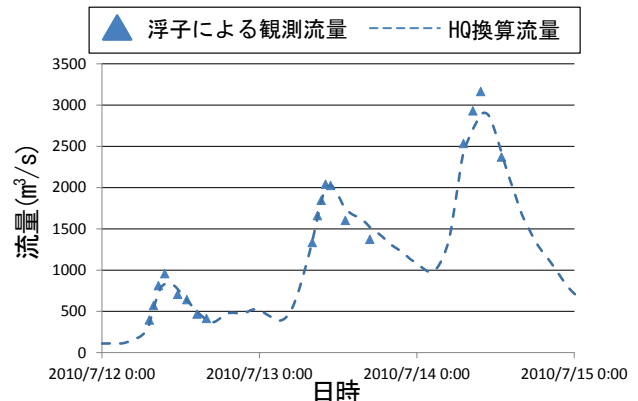


図-4 観測流量ハイドログラフ

行い、船底形河道の有効性について検討する。さらに、遠賀川の船底形断面形を福岡の無次元河道形成流量に対する無次元河幅の式⁶⁾に適用し、その断面形の有意性を示すとともに、福岡・山坂の流路の横断形状を表す式⁷⁾と比較し、船底形断面形の基準形について考察を行う。

2. 対象区間と対象洪水の概要

図-1は遠賀川の対象区間平面図と観測所の位置を示し

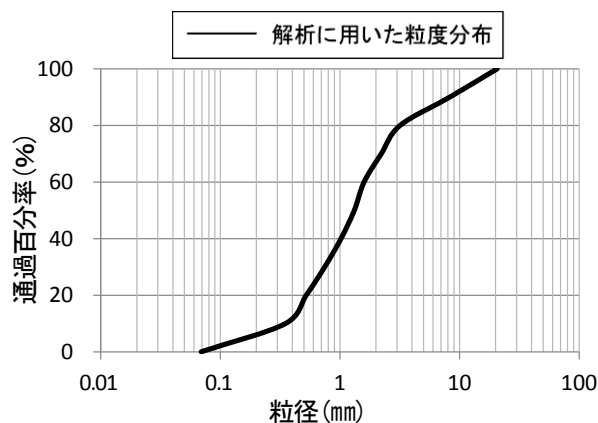


図-5 設定した粒度分布

ている。複断面河道から船底形河道への改修は、彦山川との合流部付近で行われている。

対象洪水は船底形河道へ改修した後に発生した平成22年7月洪水とした。この洪水時には、遠賀川で8地点、彦山川で3地点の合計11地点において水位が観測されている。また遠賀川の川島(30.5km)、勘六橋(19.8km)、日の出橋(18.7km)、唐熊(13.7km)、彦山川の赤池(7.2km)、中島(1.2km)では流量観測が行われている。なお、洪水後には痕跡水位が測られている。図-4は日の出橋(18.7km)の流量ハイドログラフを示す。洪水継続時間は約3日間と長期間にわたり、三山波形の特徴を有し、ピーク流量は約3000m³/sと大規模な洪水であった。

3. 検討方法

本研究では改修後の河道(平成21年河道)に対して平成22年7月洪水を対象とした観測水面形の時系列データを用いた洪水流・河床変動解析を実施し、船底形河道の評価を行う。また改修前河道(平成14年河道)には同じ洪水を外力条件として与え解析を実施する。

(1) 基礎方程式

本検討で対象とする船底形河道区間は、彦山川との合流部付近に位置しており、また対象区間内には湾曲部を含んでいる。そのため流れ場が複雑な三次元構造を有することから、洪水流解析には水深積分した渦度方程式を用いる内田、福岡の底面流速解析法⁸⁾を適用する。河床変動計算は混合粒径で行い、掃流砂と浮遊砂を考慮している。掃流力は、底面せん断力に重力の斜面方向成分を考慮した福岡・山坂の式を用い、粒径別及び平均粒径の限界掃流力はそれぞれ芦田・道上による修正Egiazaroff式、岩垣の式、掃流砂量は芦田・道上の式⁹⁾で計算する。浮遊砂については、浮上量を板倉・岸の式、沈降速度式にはRubey式、鉛直濃度分布にはLane-Kalinskeの式により評価し、平面二次元移流拡散方程式を解いている。河床変動量は流砂の連続式から求めている。

表-1 設定した粗度係数、樹木群透過係数

(a) 改修後河道(平成21年河道)

区間	粗度係数($s \cdot m^{-1/3}$)		樹木群透過係数(m/s)
	低水路	高水敷	
遠賀川	0.029	0.04~0.043	30~70
彦山川	0.029	0.04	30~70
合流部付近	0.033	0.04	25~70

(b) 改修前河道(平成14年河道)

区間	粗度係数($s \cdot m^{-1/3}$)		樹木群透過係数(m/s)
	低水路	高水敷	
遠賀川	0.029	0.04~0.043	30~70
彦山川	0.029	0.04	40~70
合流部付近	0.029	0.04	30~70

(2) 解析条件

a) 改修後河道(船底形河道)

遠賀川の上流端の境界条件は川島(30.5km)、彦山川は赤池(7.2km)で観測された水位ハイドログラフをそれぞれ与え、下流端の境界条件は唐熊(13.7km)の水位ハイドログラフを与えている。

初期地形は平成21年に行われた200m間隔の横断測量結果を基に作成し、平水時の航空写真を参考として合流部付近の背割堤、導流堤の位置と標高を出来る限り再現し解析に用いた。また図-3に示す高水敷の地形は、50m間隔の横断測量結果を用いている。粗度係数、樹木群透過係数は河川環境情報図を参考にしながら、水面形の時間変化を再現出来るように設定している。最終的に設定した粗度係数及び樹木群透過係数を表-1(a)に示す。図-5は設定した混合粒径の河床材料粒度分布を示している。これは対象区間内で数キロ間隔に実施された平成14年河床材料調査結果の値を平均したものであり、解析区間全体に同じ粒度分布を設定している。

b) 改修前河道(複断面河道)

上流端の境界条件は、改修後河道に実施した解析から得られた川島(30.5km)、赤池(7.2km)の流量ハイドログラフを用いている。下流端の境界条件は唐熊(13.7km)の横断面が改修前と改修後で大きく変わっていない為、平成22年洪水時の観測水位ハイドログラフを用いている。

初期地形は平成14年の横断測量結果を用いて、改修後河道と同様の方法で合流部付近の地形を作成している。粗度係数及び樹木群透過係数は、表-1(b)に示す数値を与えており、これは改修前の河道で発生した平成15年洪水を対象に観測水面形の時間変化を用いた再現計算により決定したものである。粒度分布は改修後河道と同じ条件を設定している。

4. 解析結果と考察

(1) 改修後河道(船底形河道)の再現計算

図-6は遠賀川の水面形の解析結果と観測水位、痕跡水

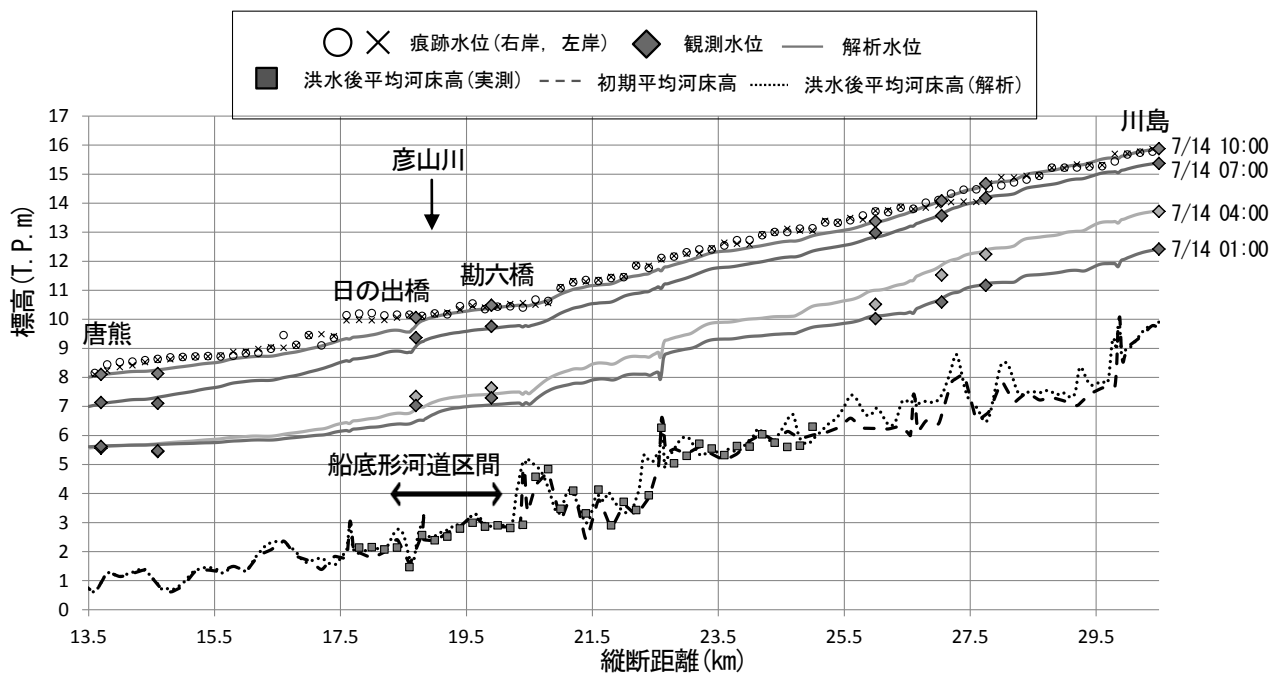


図-6 遠賀川の水位縦断形、平均河床高の解析値と観測値の比較

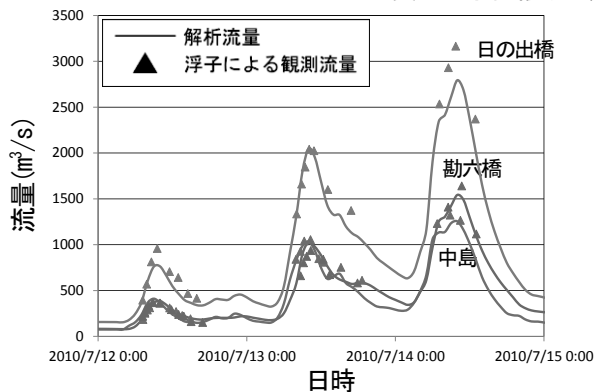


図-7 解析流量と観測流量の比較

位の比較を示す。解析水面形は、日の出橋付近で観測水位に比べ若干小さくなっているが、解析結果は観測水位と痕跡水位を捉えている。日の出橋(18.7km)での再現性が低い理由は、水位観測所が橋脚付近に在り、その影響を受けていると考えている。また図-6の破線で示す船底形河道を含む区間の低水路の平均河床高と、四角のプロットで示す実測の洪水後平均河床高と比較すると大きな変化はなく、解析でも大きな変化は起きていないことが見て取れる。

遠賀川の日の出橋(18.7km)、勘六橋(19.8km)と彦山川の中島(1.2km)における、解析流量ハイドログラフと浮子による観測流量ハイドログラフの比較を図-7に示す。日の出橋(18.7km)でのピーク付近の解析流量が観測値よりも小さく計算されているが、勘六橋(19.8km)、中島(1.2km)の解析値は観測値を概ね表現できている。

図-8(a), (b), (c)は洪水時の船底形河道と彦山川の複断面河道の水際線の時間変化を水深コンター図で示している。平坦な高水敷を有する彦山川の複断面河道では、06:00から08:00にかけて水面幅が急激に広がっている。それに対し船底形河道では、徐々に水面幅が拡大し、高

水敷上につくられたアンジュレーションにより洪水時の水際線が水位により多様に変化している。このような水深の場所的な変化は、洪水時に小魚の避難場所を提供することも考えられる。

(2)改修前と改修後河道の洪水流と河床変動の比較

図-9は、19.6km地点及び19.8km地点のピーク時における横断面内の主流速分布を示す。船底形河道では高水敷と低水路の境界付近の流速横断勾配が、複断面河道と比べ緩やかになる。このため高水敷と低水路の流速差に起因する大規模平面渦の発生が抑制され、高水敷と低水路間での流れの混合が小さくなり、断面内の抵抗が減少することが考えられる¹⁾。また船底形河道では、断面全体を使って洪水が流れるため、低水路内への流れの集中が減じられている。さらに、船底形河道と複断面河道での堤防付近の流速は、同程度になっていることが分かる。

図-10はピーク時の河積の縦断図を示しており、19.6km～20.2kmで河積が増大している。そのため断面全体の流速が小さくなり、深掘れを防ぐこと等が期待できる。他の区間の河積は改修前と比べほとんど変化しない。

図-11(a), (b)は洪水終了後の低水路内における河床変動量コンター図の比較を示す。船底形河道では改修前の複断面河道と比べ変動域は小さく、その変動量も小さくなっている。図-12は掃流砂量の縦断分布の比較を示す。複断面河道にはピーク時に縦断的な変化が現われるが、船底形河道ではどの時間帯でも縦断的な変化がほとんど無い。そのため河床変動量が減少したと考えられる。

次に無次元流量・無次元河幅・水深の関係から見た船底形河道への改修の評価を行う。福岡は無次元河道形成流量に対し無次元河幅と無次元水深の関係が式(1)、(2)(福岡の式)を満たすとき、治水上、環境上望ましい河

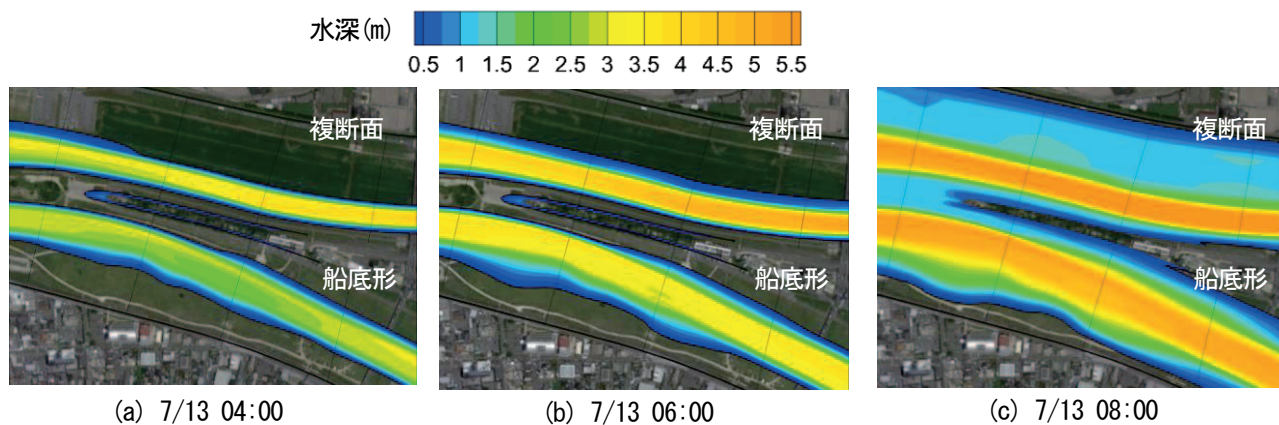


図-8 洪水時の水際線(解析結果)

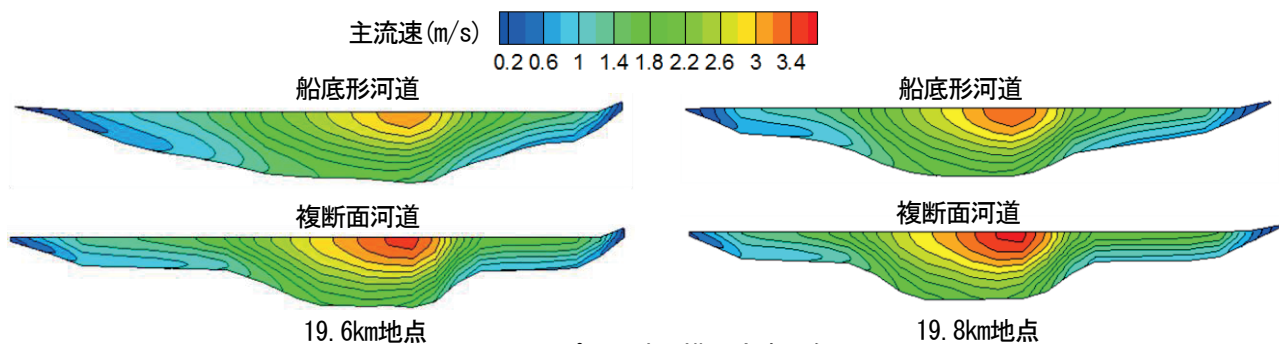


図-9 ピーク時の横断流速分布

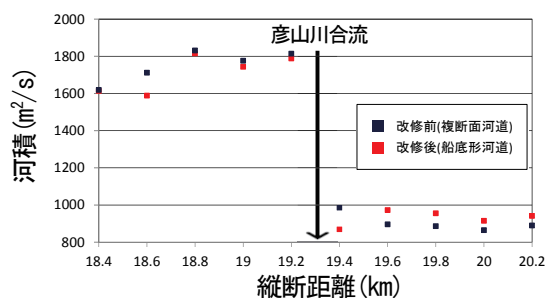


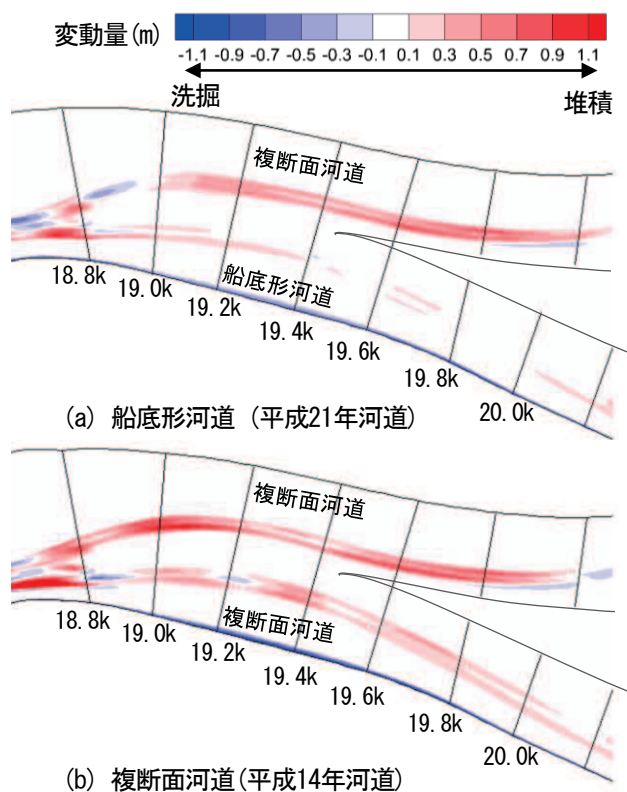
図-10 ピーク時の河積縦断面図

道断面であるとの考えを示している⁶⁾。

$$2.80 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5} \right)^{0.40} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5} \right)^{0.40} \quad (1) \quad \frac{h}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここに Q ：河道形成流量， B ：水面幅， h ：断面平均水深， I ：エネルギー勾配， d_r ：代表粒径(= d_{60})， g ：重力加速度である。図-13は図-2に示した遠賀川の19.6km，19.8km断面における改修前後の無次元流量と無次元河幅・水深関係の時間変化を示す。望ましい河道断面は，無次元流量が増大(減少)していくときに無次元河幅が福岡の式の範囲内で，式に沿って平行に移動することである。このとき流量の増大(減少)に対する河積の増加(減少)の結果，流れ場は急変せず，流速や水深が安定的に増大(減少)していくことを意味している。改修後の船底形河道では，無次元流量の増加に伴って無次元河幅も平均曲線式と平行に近い形で増加し，望ましい河道断面に改修されたことが分かる。

5. 船底形河道横断面形の無次元表示



(b) 複断面河道(平成14年河道)

図-11 河床変動量コンター図(洪水終了後)

前章までの検討より，複断面河道から船底形河道への改修は洪水時の好ましい流況の出現や河床変動量の減少をもたらし，また景観的に見て多様な水際線や高水敷の多様な流速場の創出等，治水上，環境上の改善が示された。他河川において船底形河道への改修にあたっては，

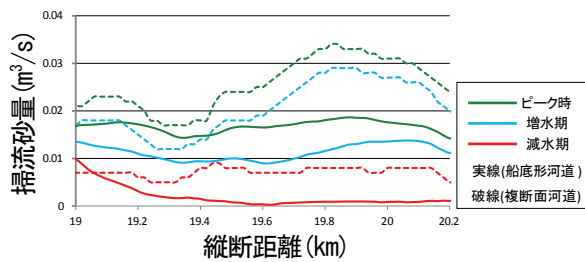


図-12 掃流砂量の縦断分布

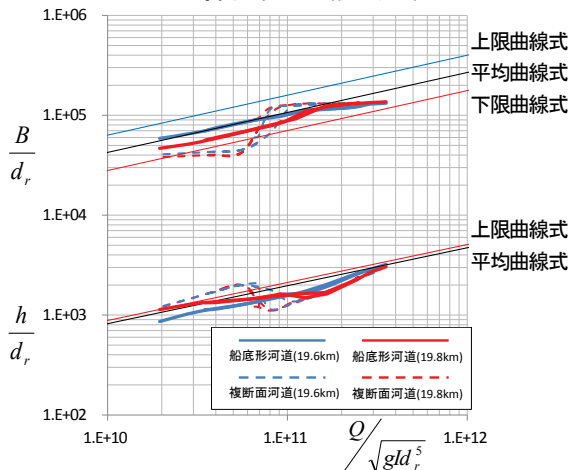


図-13 無次元流量-無次元河幅・水深の関係

河川ごとの特徴を十分考えて検討しなければならない。検討方法の一つは、札内川で行われた河床変動解析と福岡の式を組合せた河道の断面形の設計法³⁾がある。しかし船底形断面形の目安として基本的な断面形があることは望ましい。

福岡・山坂⁷⁾は縦横断的に安定な流路の横断形状を式(3)で表現している。

$$\frac{h}{H} = 1 - \left\{ \exp\left(-\frac{b-y}{D}\right) + \exp\left(-\frac{b+y}{D}\right) - \exp\left(-\frac{2b}{D}\right) \right\} \quad (3)$$

ここに h ：水深、 b ：水面幅、 H 、 D は流水断面積、水際の横断勾配角を与えることで決定される。式(3)を遠賀川の船底形断面と重ね合わせたものを図-14に示す。水際の横断勾配を実測の横断勾配を与えることで、船底形断面形を式(3)で概ね表せており、船底形河道の設計を検討する際に、式(3)が一つの基準形として用いることが可能である。しかし、河川が大きく湾曲していたり、蛇行する場合の船底形断面形については、さらに検討が必要である。また、今回は一つの大洪水について検討を行ったが、今後は長期間にわたって船底形河道が維持されるのか、特に、土砂の堆積などによって問題が生じないのか等が検討課題となる。

6. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 遠賀川の船底形河道では、改修前の複断面河道に比して流速横断勾配が緩やかになり、抵抗が減少

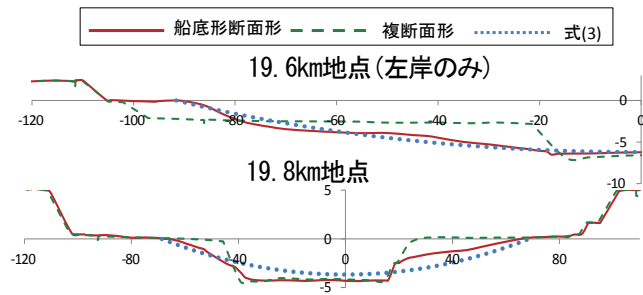


図-14 断面形状の比較

し、洪水流を断面全体で流すようになることを示し、洪水時の流況が改善されることを示した。また洪水時の水際線の変化が、景観的に好ましいことが示された。

- 2) 船底形河道では掃流砂量の縦断分布の縦断的な変化が小さくなり、その結果河床変動量は改修前の複断面河道と比べ小さくなり、安定な河道になっていることが明らかになった。
- 3) 福岡の無次元河道形成流量-無次元河幅・水深の関係式を用いた検討から、船底形河道は式(1)、(2)を満たす望ましい断面形であることを示した。
- 4) 遠賀川の船底形河道は福岡・山坂の流路横断形状を表す式で概ね表現されており、今後の船底形河道設計の基準として用いることが出来る。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 福岡捷二：招待論文，温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて—，土木学会論文集F，vol.66，No.4，pp.471-489，2010。
- 3) 福岡捷二：札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦横断形状に関する研究，北海道河川財団研究所紀要(XIV)，pp. 123-164，2013。
- 4) 樋口明彦，田浦扶充子，高尾忠志，佐藤直之，岡本良平：遠賀川直方地区緩傾斜スロープ高水敷における来場者行動特性，景観・デザイン研究論文集，vol.3，pp.83-94，2007。
- 5) 福岡捷二：河道設計の基本は何か—水面形の時系列観測値と洪水流-土砂流を組み合わせた河道水理システムとその見える化，河川技術論文集，Vol17，pp. 83-88，2011。
- 6) 福岡捷二，坂口達哉：無次元流量に対する無次元河幅・水深のとり範囲と整備途上河川への適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，I_1423-1428，2012。
- 7) 福岡捷二，山坂昌成：なめらかな横断形状をもつ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析，土木学会論文集，第351号/II-2，pp. 87-96，1984。
- 8) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析，土木学会論文集B1，Vol67，No.1，pp16-29，2011。
- 9) 水理公式集[平成11年度版]：土木学会水理委員会，丸善，1999

(2014. 4. 3受付)