

江の川上流部における治水と環境の調和した 河道断面形に関する評価

EVALUATION OF RIVER CROSS-SECTION FOR HARMONIZATION BETWEEN FLOOD CONTROL AND RIVER ENVIRONMENT IN THE UPPER REACH OF GOUNOKAWA RIVER

大賀 祥一¹・森脇 孝洋²・榎井 芳樹³・福岡 捷二⁴
Yoshikazu OHGA, Takahiro MORIWAKI, Yoshiki MASUI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所（〒702-8001 岡山市中区沖元地先）
（前）国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所

²非会員 国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所（〒728-0011 広島県三次市西 6-2-1）

³非会員 国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所（〒728-0011 広島県三次市西 6-2-1）

⁴フェロー Ph. D 工博 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）

The recent increase in the riparian trees in the upstream reach of the Gonokawa River brought deterioration of the river environment by loss of gravel material and loss of water amenity. A project has been undertaken to restore the natural river environment by stabilizing gravel material in the river section in the Gonokawa River.

This paper describes a study of the dynamic stability of planned river section in the project site by applying the Fukuoka equation. The result of the study shows that the Fukuoka equation can express the relationships among characteristics of river cross-section, and dimensionless parameters such as river width, depth, or flow. In the natural restoration project, river cross-section was designed in consideration of the characteristics of stream regime. After the project implementation, it was considered that the river cross-section was approximately consistent with Fukuoka equation.

Key Words : *dimensionless channel width, Nature Restoration, Fukuoka's equation, river channel planning, harmonization of flood control and river environment*

1. はじめに

河川改修に向けた取り組みとして、河川整備基本方針や河川整備計画における計画・目標流量を安全に流下させるため、築堤、引堤及び河岸掘削等の河積確保対策や総合治水対策として、輪中堤や宅地嵩上げ等及び洪水調節施設としてダムや遊水池等の治水対策が取り組まれてきた。また、平成9年の河川法の改正により、従来の治水、利水とともに河川環境についても法的に位置づけられ、河川環境の整備と保全施策として、人々にうるおいとやすらぎを感じさせる豊かな自然と緑が織りなす良好な河川景観、清らかな水の流れの保全を図るとともに、多様な動植物の生息・生育・繁殖する豊かな自然環境を

次世代に引き継ぐための目標とその具体的な施策が設定されている。

しかしながら、河川の実状を俯瞰してみると、河道内の樹林化、その影響によるみお筋の固定化、洲の陸地化や瀬淵の減少など河川環境の劣化が顕在化していることが多い。

この中で近年、河川環境の保全対策として自然再生事業が各河川で取り組まれるようになった。本論文で論じるレキ河原の再生については、平均年最大流量規模の洪水を河道内かく乱の設計条件として、植生や土砂動態へのインパクトレスポンス関係を定量的に評価し、望ましい河道断面形状や平面形状の整備、及び整備後の河道内の植生や土砂動態の遷移状況をモニタリングし、新たな知見を河川管理に反映しながら順応的管理を行っている。

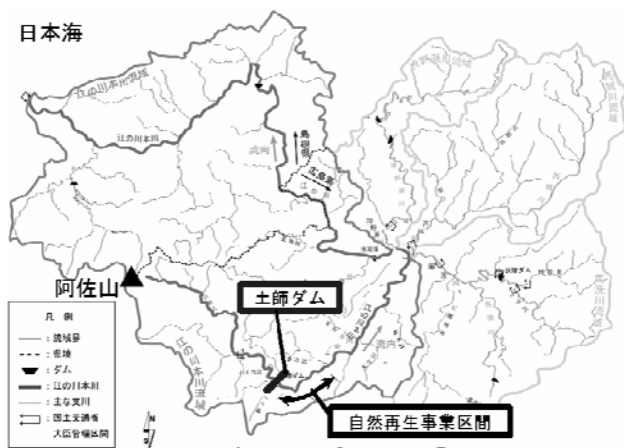


図-1 江の川流域の概要

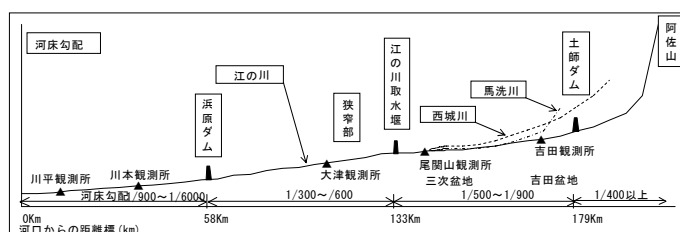


図-2 江の川の河床勾配

くものである。

本文では、江の川流域における河道特性を河川の無次元流量と無次元河幅、無次元水深の関数形で表す式¹⁾により、動的に安定した河道断面形について流域の視点より検討し、河川環境の保全対策として実施している江の川上流の自然再生事業について、治水対策と河川環境の保全対策が調和する河道断面形となす河幅（水面幅）及び水深について検討した。

2. 江の川の無次元川幅、無次元水深と無次元河道形成流量の関係

(1) 江の川流域の概要

図-1に示すように、江の川は、広島県山県郡北広島町阿佐山（標高1,218m）に水源を発生し、小支川を合わせながら北東に流れ、途中三次市において馬洗川、西城川、神野瀬川を三方より合流し、流路を西に転じて先行性の渓谷をつくって流れ、島根県的美郷町において大きく屈曲して西南に向かい、河口に近づくにしたがって徐々に流れを北に向け、江津市において日本海に注ぐ、幹川流路延長194km、流域面積3,900km²の一級河川である²⁾。次に江の川の河床勾配を図-2に示す。源流から江の川取水堰付近までの上流部にあたる本川や馬洗川流域では、三次盆地を中心とする山麓平坦地（標高150～200m）が形成され、河床勾配が1/500～1/900程度と緩やかである。また、江の川取水堰付近から浜原ダム付近までの中流部は、中国山地脊梁部（標高1,000～1,300m）を貫く唯一の典型的な先行型河川を形成し、河床勾配が1/300～1/600程度で、三段の階段状地形を示し、河床

表-1 江の川における水位流量観測所の現況断面諸量

観測所名	距離標 (km)	流域面積 A (km ²)	計画高水流量 Q (m ³ /s)	代表粒径 d _r (cm)	河床勾配 I	平均河床 H _A T. P. (m)
川平	9.1	3,807	10,600	4.90	1/950	-2.28
川本	36.3	3,229	9,700	5.35	1/870	16.47
大津	86.5	2,633	9,400	12.79	1/620	95.82
尾関山	139.0	1,981	7,600	5.35	1/870	148.83
吉田	167.1	400	1,200	5.96	1/570	194.78

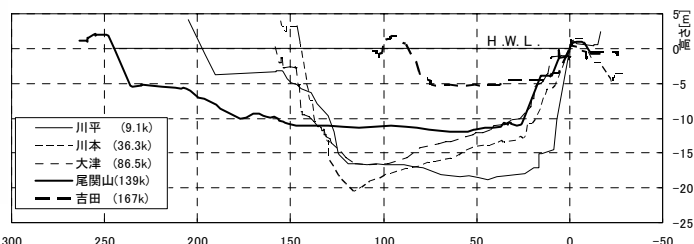


図-3 江の川の水水位流量観測所の現況河道横断面図

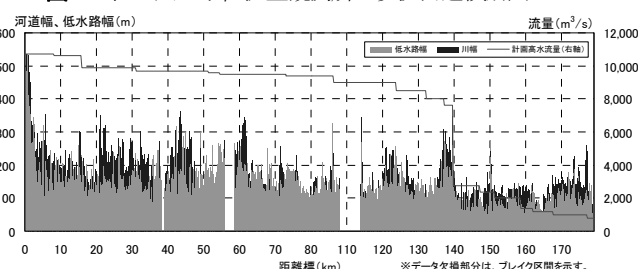


図-4 江の川の低水路幅と川幅

には巨石や岩が露頭している。さらに、浜原ダム付近から河口までの下流部は、河床勾配が1/900～1/6,000程度と緩くなるとともに川幅が広がり、河原を形成する。

表-1は、江の川対象区間における水位流量観測所地点の現況断面諸量を示す。ここで、河床材料の代表粒径 d_r として60%粒径 d_{60} を示している。

図-3及び図-4は、江の川における水位流量観測所の河道断面形と江の川の低水路幅と川幅を示す。江の川上流部において山麓平坦地を流下する吉田地点、三次盆地上で同規模の流域面積をもつ馬洗川、西城川が合流する尾関山地点、中流部において山間狭隘部を流下する大津地点、下流部において、階段状地形に築堤された川本地点、河口近くの山間狭隘部からなる川平地点について比較する。江の川において縦断的に設置されている各観測所の河道断面形では、流域面積や計画高水流量により河幅や水深が一義的に決まるものではなく、地形・流域特性及び河道縦断面形が河道断面形に影響していることがわかる。

このように、流域内の地形・流域特性の異なる河道断面形について、河道形成流量、河床勾配、河床材料特性等の物流量から規定される無次元量で比較検討することにより、流域一貫の河道計画や治水と環境の両立した河道計画の立案において重要な指標となる。このため、以下に無次元化した流量と河幅、水深の関係により検討を進める。

(2) 江の川の無次元量川幅、無次元水深と無次元河道形成流量の関係

最初に、式(1)、式(2)に示す河道の無次元川幅、無次

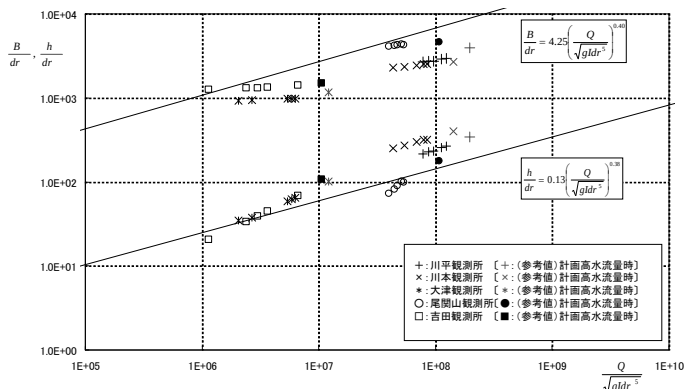


図-5 江の川現況断面における実績洪水時の無次元量の関係

元水深と無次元河道形成流量の関係を、江の川の各水位流量観測所の流量観測データにより検討する。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.40} \quad (1)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここで、 B ：川幅、 d_r ：代表粒径、 Q ：流量、 g ：重力加速度、 I ：勾配、右辺関数形 $Q/\sqrt{g} d_r^5$ ：無次元流量

以下では、式(1)、式(2)を「福岡の式」¹⁾³⁾と呼ぶ。

この動的に安定した自然河川で成立する無次元河幅、無次元水深と無次元流量の関係で表現される福岡の式と現況河道における実績洪水流量時の関係をみることで、現況河道断面形の評価を試みる。

図-5は、各水位流量観測所の流量観測による実測水位を基に現況断面より水面幅、水深を算定し、浮子による平均流速結果より流量を得た。これから、無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深の関係を示したものである。対象洪水は、近年に発生した最大洪水を対象として、平成18年7月19日洪水では、川平・川本観測所の最大流量観測結果として最大流量（ $Q_{\max}=6,714$ ， $5,843\text{m}^3/\text{s}$ ），及び平成22年7月14日洪水では、大津・尾関山・吉田観測所の同結果としての最大流量（ $Q_{\max}=4,610$ ， $3,750$ ， $752\text{m}^3/\text{s}$ ）であり、計画高水流量に対して、概ね50～60%相当の洪水であった。ここでは、無次元計画高水流量（無次元河道形成流量）よりも十分低い流量が対象であるために、「無次元川幅」の代わりに「無次元水面幅」が検討対象となる¹⁾。

計画高水流量に満たない各流量において、無次元流量と無次元水面幅の関係では、船底形断面河道を有する尾関山地点では概ね一定増加となり、単断面河道である吉田地点では、概ね一定値となる。また、両者とも福岡の式に対して交差する変化を示した。このことから、現状法線から規定される河幅については、無次元河道形成流量に対して若干狭い設定といえる。また、無次元流量と無次元水深の関係では、尾関山・吉田地点とも福岡の式に対して小さい側に位置し概ね一定増加を示しながら、

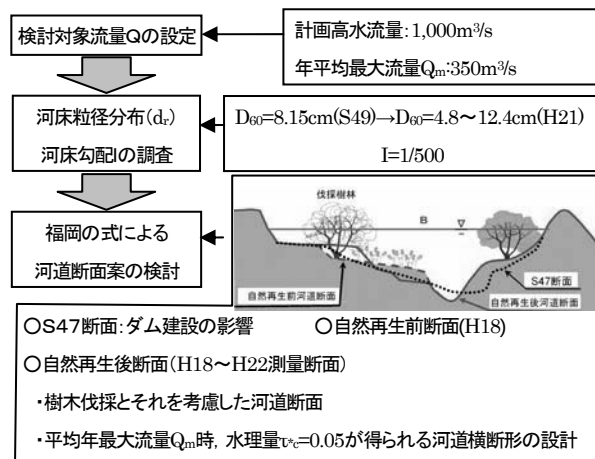


図-6 検討条件

交差する変化を示した。このことから、無次元河道形成流量に対して、若干狭い河幅により大きな水深をもつよう変化している。江の川中・下流部の大津・川本・川平地点については、各地点とも、無次元水面幅と無次元流量の関係で、福岡の式よりも小さい側に位置し、無次元水深と無次元流量の関係では、反対に大きい側に位置している。これは、当該区間の河道断面形を規定するものは、兩岸の山付けが制約条件となり水面幅は固定され、水深は、流量に対応し水位上昇することから、水面幅は小さくかつ水深は大きくなる傾向を示した。福岡の式は、沖積地河道について成立する式であり、山間部では、河道幅が広がらないためにこのような結果になる。

3. 江の川上流自然再生区間における無次元川幅、無次元水深と無次元河道形成流量の関係

(1) 江の川上流自然再生事業の概要

昭和40年代、オキナグサ、カワラハハコ等が河原に多数生育し、イカルチドリが生息していた頃のレキ河原環境の再生を目的としている。その際に設計やモニタリング調査を通じ、順応的な設計・維持管理を行っている。

(2) 設計条件

各種治水事業の進捗、河道内樹木・植生管理及び地域社会の利用形態の変化によって、当時の河川形態と比べ、洪水時に河床が変動（かく乱）する「川のダイナミズム」が低下したことが樹林化の進行した原因であり、最も大きな要因は「洪水時の掃流力低下」と推定される。

図-6により、以下の条件を満たすように河道断面形について水理解析により検討する。

- ①みお筋の固定化、樹林化している河道について、設計外力（平均年最大流量）時の水理量（無次元掃流力 τ^* ：0.05～0.06）を目安に断面を設定する。
- ②自然再生区間について、樹木伐採、砂州切下げ及び中水敷盛土を実施する。ただし、上下流バランスを考慮して切盛を等河積とすることを原則とする。

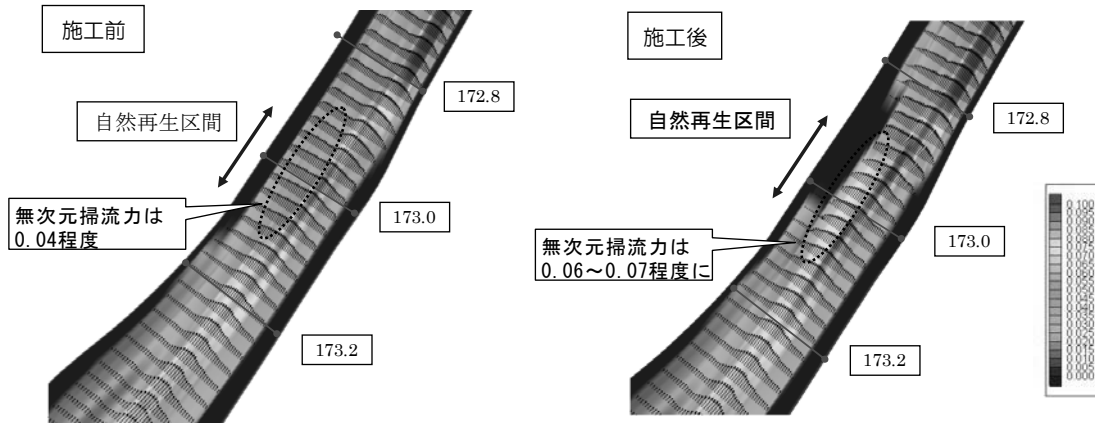


図-7 施工前後の平面二次元解析による無次元掃流力分布図(173.0k地点)

③平均年最大流量（2～3年に1回程度）による河床のかく乱で、レキ河原の再生及び維持していくような断面とする。

(3) 水理解析モデルの構築

レキ河原の再生に向けた低水路掘削と中水敷盛土等の河道断面形の設定に向け、平面二次元流解析による自然再生実施前後の流れの検討を行った。解析条件は、表-2に示す。河床の解析地形は固定床とした。

【連続式】

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

【運動方程式】

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(-\overline{u'^2}h) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{u'v'}h) \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(-\overline{u'v'}h) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{v'^2}h) \quad (5)$$

ここで、 t ：時間、 (x, y) ：空間座標、 (u, v) x, y 方向の水深平均流速、 (M, N) x, y 方向の流量フラックス、 g ：重力加速度、 h ：水深、 ρ ：水の密度、 z_s ：基準面からの水位、 (τ_{bx}, τ_{by}) ： $x-y$ 座標系の底面せん断応力の成分、 $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$ ： $x-y$ 座標系の水深平均レイノルズ応力

(4) 江の川上流自然再生区間における水理諸量による河道断面形の評価

本評価について当該地点(173.0k地点)は、利水施設(固定堰)の直下流に位置し、かつ、河道が直線化している平面形状を示す。このため、みお筋部では深掘れし、陸地部では樹林化が進行するなど、治水上、流下能力の低下がみられた。また、河川環境においても植生の単一化による劣化が進行し、治水と環境の両面から課題のある箇所でもあった。図-7及び図-8に示すとおり、平均年最大流量(Q_m :350m³/s)時に無次元掃流力 $\tau_* \geq 0.05$ が確保される河道低水路横断とするため、施工性から切下げ部の勾配を1/100とし、高さを変えながら、無次元掃流力 τ_* が満足される河道断面形を設定した。ここで、

表-2 解析条件

対象流量	平均年最大流量：350m ³ /s（当該区間）
解析対象区間	下流端：169.8kp(直線区間) 上流端：176.4kp(直線区間) 解析区間延長：6.6km
解析地形	(1)H21年測量結果 (2)H21年測量結果に自然再生事業後の計画地形を追加(172.90k～173.05k)
境界条件	距離標169.8km断面のH-Q式より流量変化に応じて設定
解析メッシュ分割	低水路：高水敷を区分せずにメッシュ分割 縦断方向メッシュ：25m 横断方向メッシュ：50分割(概ね2.5m間隔)
低水路粗度係数・高水敷粗度係数	整備計画河道において設定されている粗度係数 低水路：逆算+推定粗度 高水敷：地盤状態と水位から算出
樹木群の諸元・分布	樹木群は粗度として評価 平面分布：航空写真と河道計画において設定して範囲

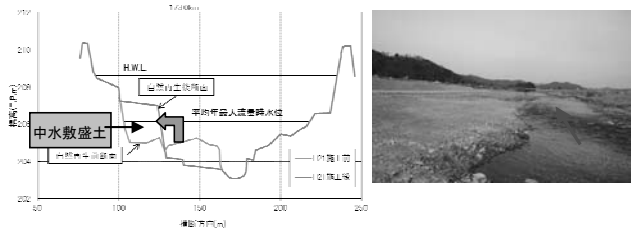


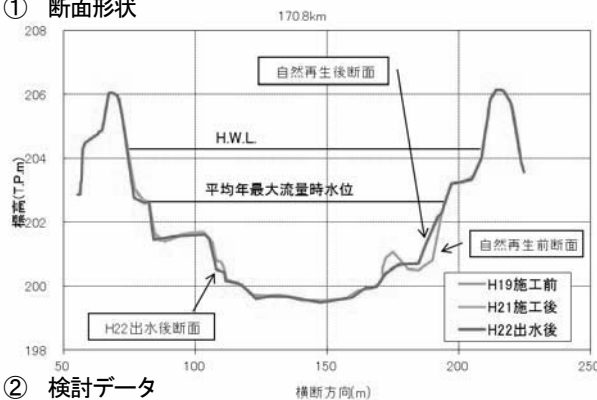
図-8 自然再生施工断面図と現地施工状況写真(173.0k地点)

切下げ部において、施工前後の無次元掃流力 τ_* が、0.04から0.05～0.07程度に向上しており、切下げ部のかく乱が期待できる。

(5) 福岡の式の適用

江の川上流部における吉田地区自然再生区間の検討断面は、河道断面形の異なる代表的な3断面として、船底型断面河道(170.8k地点)、単断面河道(173.0k地点)、複断面河道(175.6k地点)とした。対象流量は、当該区間の計画高水流量1,000m³/sに対し、6ケース(100, 200, 400, 600, 800, 1,000m³/s)とし、準二次元不等流計算により、各ケースの計算水位をもとに水面幅及び水深を算定する。また、平成22年7月の実績洪水について、痕跡水位をもとに、同様に示す。そこで、施工前後及び洪水直後の河道断面形について、河道の無次元水面幅、無次元水深と無次元流量の関係を福岡の式より考察した。また、平成22年7月洪水による河道断面形の変化及び代表

① 断面形状



② 検討データ

	dr[mm]	B[m]	h[m]	Q[m3/s]	1/I
自然再生前	42.2	74.4~120.1	1.2~3.6	100~1000	500
自然再生後	42.2	65.4~128.7	1.2~3.8	100~1000	500
H22出水後	50.3	65.4~128.7	1.2~3.8	100~1000	500
洪水ピーク時	50.3	125.6	3.0	678	500

③ 無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

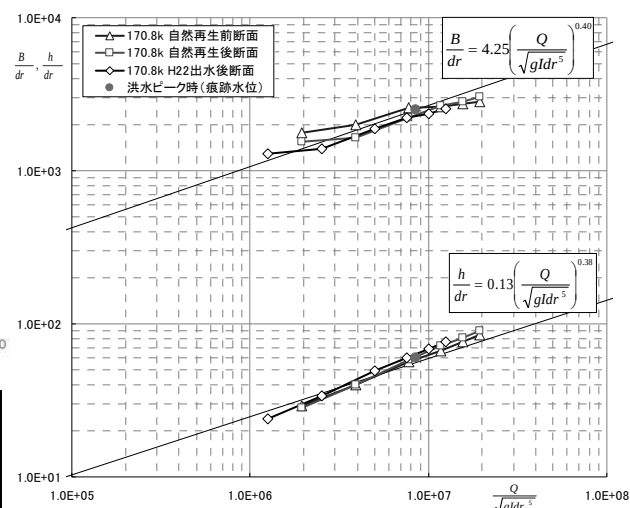
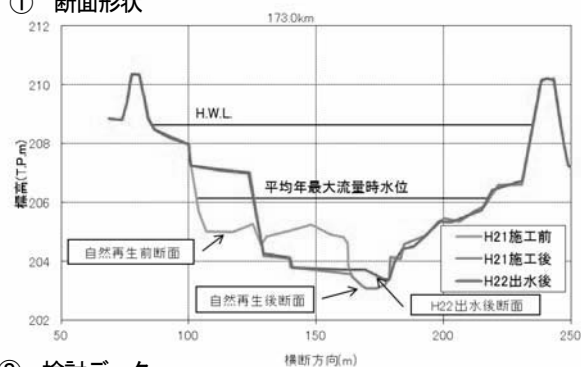


図-9 検討断面(170.8k地点)の河道横断形の変化と無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

① 断面形状



② 検討データ

	dr[mm]	B[m]	h[m]	Q[m3/s]	1/I
自然再生前	42.2	94.4~132.1	2.3~4.4	100~1000	500
自然再生後	42.2	59.8~132.3	1.7~4.4	100~1000	500
H22出水後	54.4	59.8~132.3	1.7~4.4	100~1000	500
洪水ピーク時	54.4	107.2	3.5	678	500

③ 無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

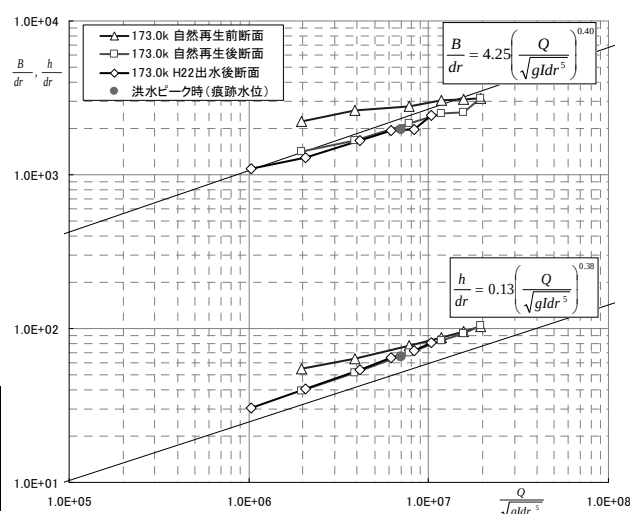
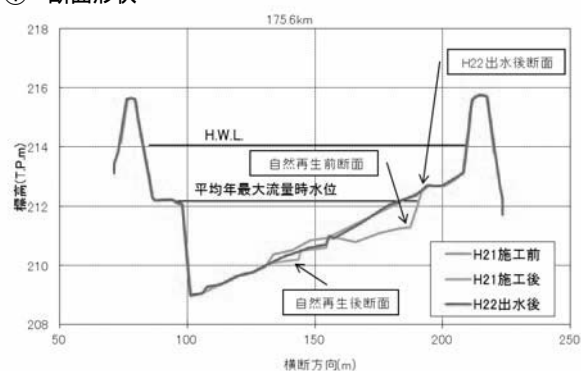


図-10 検討断面(173.0k地点)の河道横断形の変化と無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

① 断面形状



② 検討データ

	dr[mm]	B[m]	h[m]	Q[m3/s]	1/I
自然再生前	42.2	74.9~124.7	2.1~4.5	100~1000	500
自然再生後	42.2	54.4~125.1	1.9~4.6	100~1000	500
H22出水後	123.8	55.4~125.1	1.9~4.6	100~1000	500
洪水ピーク時	123.8	116.8	3.9	678	500

③ 無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

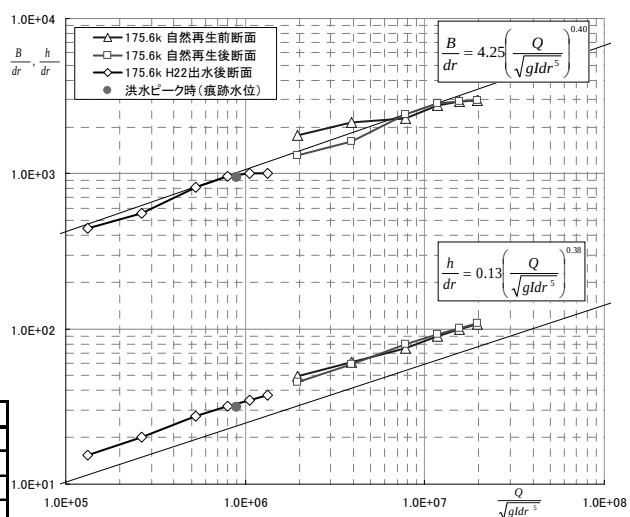


図-11 検討断面(175.6k地点)の河道横断形の変化と無次元流量と無次元水面幅，無次元水深の関係

粒径の遷移の結果についても評価する。

図-9は、170.8k地点の船底型断面を有する河道断面形を示す。自然再生実施後と洪水後の河道断面形に顕著な差は見られなかった。また、無次元流量と無次元水面幅、無次元水深の関係では、河床材料が42.2mmから50.3mmに遷移したため、無次元川幅、無次元水深及び無次元流量とも小さくなる傾向がみられるが、概ね福岡の式の線上で変化している。

図-10は、前述したみお筋の低下及び陸地化が著しい173.0k地点の単断面河道の河道断面形を示す。ここでは、砂州の切下げ及び中水敷盛土の設置による河道断面形の整形について、無次元流量と無次元水面幅の関係でみると、自然再生実施前では福岡の式と比べ緩やかな変化に対し、自然再生実施後では、福岡の式とほぼ近似する変化がみられた。また、洪水後の河道断面形では、みお筋部に堆積がみられ、人為的な砂州の切下げ及び中水敷盛土の設定より、単断面河道から船底型断面河道に安定的に遷移していることがわかる。

図-11は、水辺の楽校として高水敷整備された175.6k地点の複断面を有する河道断面形を示す。同様に河道断面形の整形について、無次元流量と無次元水面幅の関係でみると、自然再生実施後の低水路内の整形により、高水敷高未満では、無次元水面幅に差がみられるが、高水敷高以上では、同じ断面形を示すため同様の複断面河道の変化を示す。また、自然再生実施前後とも、その変化は、概ね福岡の式の勾配に近似している。また、洪水後には切下げ部にレキが堆積したため、洪水前後の代表粒径が42.2mmから123.8mmに遷移した。この結果より、自然再生実施前後と比べ、洪水後では、無次元流量が1/10程度小さくなったが、無次元水面幅との関係は、福岡の式上で変化している。

以上の3断面の自然再生実施前後及び洪水後の河道断面形の変化に関して、無次元水面幅と無次元流量の関係では、実施前後において、自然河川で成立する福岡の式に近似していく結果を示している。また、洪水の外力により、物理量である河床材料が遷移しても、福岡の式上で変化しており、安定した河道断面形といえる。

これまで自然再生事業の設計にあたっては、河道断面形及び平面形について、洪水外力が作用する無次元掃流力の水理量に基づいて検討し、河床のかく乱作用が粒径の細かい土砂を流亡させ、レキ河原が維持されていくというシナリオを考えていた。この点については、施工後2,3年経過時点ではあるが、レキ河原が洪水の外力により形状を変えながらも、切下げ基盤面にレキが堆積し維持されていることから一定の効果は得ている。ただし、今回の洪水を受け、施工後のレキ河原の現地状況を見ると、切下げ部において、設計河床高以上にレキを含む土砂が堆積していること、深掘れしているみお筋部では、粒径の比較的大きなレキが浮き石状に堆積していることから、設計では、安定的な河道断面形やレキ河原の維持

を狙いとして実施したが、当該箇所の水理量だけでなく、洪水外力による土砂の流出や再堆積等、土砂動態の定量的な評価も必要であることがわかった。

4. あとがき

本文では、河道特性の異なる江の川本川の河道断面形について、福岡の式により、無次元川幅、無次元水深と無次元流量の関係について考察し、流域の広域的視点から河道断面形の河道特性について評価した。

また、河川環境の保全対策で実施した江の川上流の吉田地区自然再生事業について、施工前後及び平成22年洪水直後の河道断面形の変化や河床材料の遷移特性より、安定した河道横断面形の評価について論じた。以下に主な結論を述べる。

- 1) 江の川上流部は、山麓平坦地や盆地を流下する有堤区間であり、河道断面形の特徴として、無次元河幅と無次元流量の関係では、単断面よりも船底型断面で福岡の式との相関性が高く、河道形成流量（計画高水流量）までの幅広い範囲で安定な河道断面形となる。中・下流部は、山間狭窄部の河道断面形から河幅が制約条件となり、無次元流量に対して、無次元河幅は狭く、無次元水深は深い傾向を示す。
- 2) 吉田地区自然再生事業区間については、福岡の式より、樹木伐採、砂州の切下げ、中水敷設置などの断面整形により、安定した河道横断面形について定量的な評価ができた。
- 3) 平成22年7月出水では、流量観測、洪水痕跡調査、河床材料調査、樹木調査等の調査結果より、無次元水面幅、無次元水深と無次元流量の関係を福岡の式より、安定した河道横断面形について評価が可能となった。また、今後、無次元河道形成流量における物理量、水理量の応答を把握することも必要であり、流量観測や河床材料調査等、物理量及び河道断面形を継続的に調査していくことや土砂動態による河床変動や植生の侵入などの河道内の遷移状況をモニタリングしていくことが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方ー治水と環境の調和した他自然川づくりの普遍化にむけて、土木学会論文集、第66巻、pp.471-489,2010
- 2) 国土交通省河川局：江の川水系河川整備基本方針、http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/go_uno_index.html, 2007
- 3) 浅野文典、福岡捷二：沖積河川における安定な川幅・水深ー治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方、水工学論文集、第54巻、pp. 1021-1026, 2010.

(2011. 5. 19 受付)