

太田川デルタにおける河川流路網の 洪水流と河床変動に関する研究

FLOOD DISCHARGE HYDROGRAPHS AND BED VARIATION IN A NETWORKED RIVERS OF THE OTA RIVER DELTA

後藤岳久¹・福岡捷二²・田中里佳³

Takahisa GOTOH, Shoji FUKUOKA and Rika TANAKA

¹学生会員 修士(工学) 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学理工学部特任教授, 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³修士(工学) 国土交通省 中国地方整備局 河川部河川計画課長 前太田川河川事務所 調査設計第一課長
(〒730-8530 広島市中区八丁堀6-30)

A network of channels which consists of the Ota River floodway and five branched rivers is formed in the Ota river delta. To estimate flood discharge hydrographs and bed variations in each channel is important for proper river management. Therefore, we developed a numerical model for the flood flow and bed variation analysis using time series of observed water surface profiles with the networked rivers in the Ota river delta. As a result, the unsteady quasi-three dimensional analysis of flood flows and two dimensional analysis of bed variations using time series of observed water surface profiles is found to provide good results for the flood discharge distributions in the networked rivers in the Ota river delta.

Key Words : *network of channels, Ota river delta, time series of observed water surface profiles, flood discharge distributions, bed variation*

1. 序論

太田川は下流域においてデルタを形成し、太田川放水路と5つの市内派川(旧太田川、天満川、元安川、京橋川、猿猴川)に分派し、潮位変動の大きい広島湾に流入している。このような河口デルタ上の流路網を洪水流がどのように流下するかについて、それぞれの河道の流れと河床変動を明らかにし、本川・派川の洪水流量配分を把握することは河川管理上重要である。

これまで流路網における洪水流量配分については、一次元解析を用いた研究が多く行われている。例えば、伊藤¹⁾、岩佐ら²⁾が一次元定常流解析に基づき検討している。金本・常松らは河川流路網における洪水流の非定常一次元解析を構築し、太田川のデルタ河川に適用している³⁾。海外のデルタ河川については、デルタの発達に関する研究⁴⁾が多く、非定常二次元解析⁵⁾を用いて長期間にわたる河床の変動について研究されている。以上の研究では、複雑な河川流路網において水位等の観測点が少なく、流路網の流れを代表する水理量が観測されていないため、流路網における平均的な流れと河床変動を説明する解析方法になっているとは言い難い。福岡は、洪水時の水面形の時間変化には、洪水の非定常性、河道・河床形状、

河床変動、植生の挙動、分合流の影響等が積分された形で現れていること⁶⁾に注目し、観測水面形の時系列データを解として洪水流・河床変動解析を行うことにより、種々の条件に対して河道の抵抗分布、洪水時の流れと河床変動を評価し、洪水流量ハイドログラフ等河川管理に必要な諸量が得られることを示してきた。以下に洪水流量ハイドログラフ等の推算に関する福岡らの研究をレビューし、本研究の位置づけを示す。

福岡・渡邊らは、観測水面形時系列データを解とするように非定常平面二次元解析を行うことにより、任意の河道断面において洪水流量ハイドログラフ、洪水貯流量を合理的に算定する方法を提案し、測定された洪水流量ハイドログラフ等を説明できることを示した⁷⁾。福岡・永井らは、利根川・渡良瀬川の合流部を対象として本川・支川の流量ハイドログラフを推算し、合流点付近における貯留量を評価した⁸⁾。福岡・田端らは、利根川・江戸川分派点においてそれぞれの河川で観測した水面形時系列データを解とした非定常平面二次元解析を行い、利根川・江戸川の流量配分を求めている⁹⁾。安部・福岡らは、上記の解析法を常願寺川の破堤実験に適用することにより、破堤流量を求めている¹⁰⁾。福岡・昆らは遊水地のある河道区間の水面形を観測し、鶴見川遊水地の洪水調節効果を見積もっている¹¹⁾。内田・福岡らは、支川

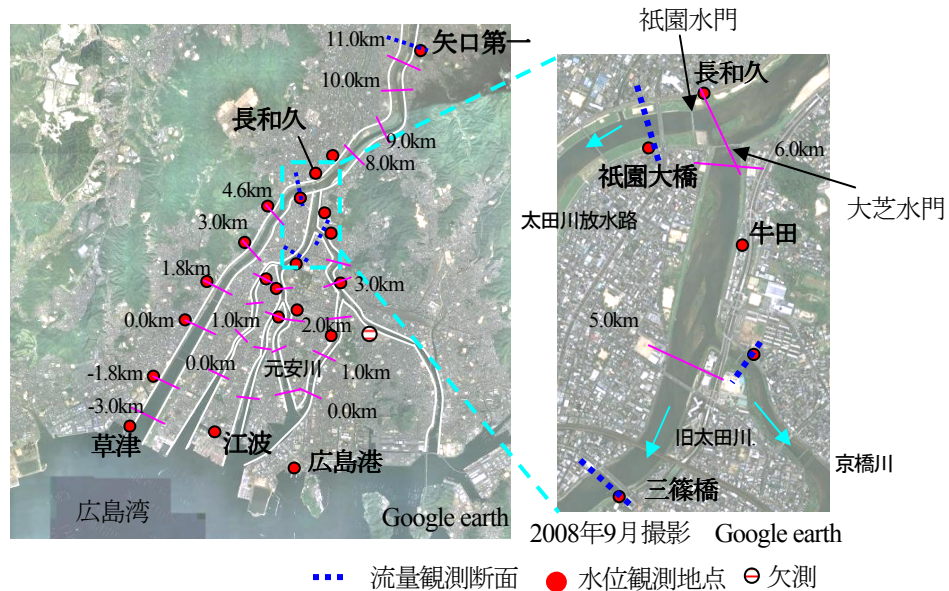


図-1 平成22年7月洪水における太田川デルタ河川の洪水観測体制

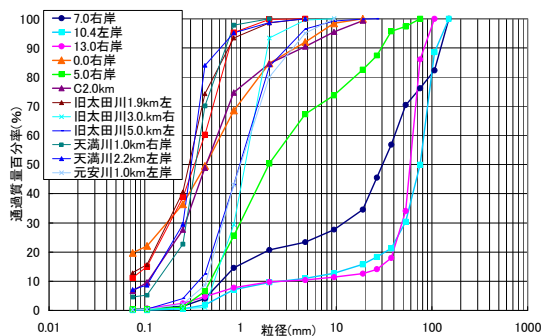


図-2 河床材料粒度分布

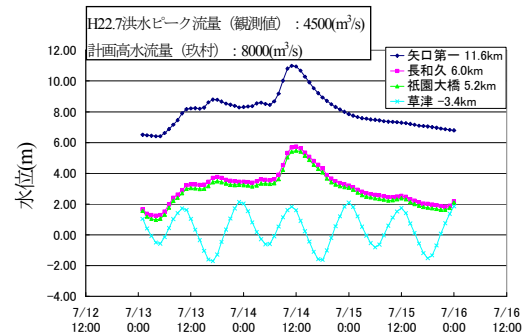


図-3 平成22年7月洪水水位ハイドログラフ

のデータが十分観測されていない河川上流域やポンプ排水などの横流入のある河川において、本川の観測水面形時系列データを用いた洪水解析法により支川流入流量やポンプ排水量ハイドログラフを推算している^{12) 13)}。以上に示したように、河道の水位を縦断的・時間的に観測し、それを解とした洪水解析を行うことにより、流入・流出などの複雑なシステムを有する河道において、任意地点の流量ハイドログラフを求めることを可能にできた。しかし、低平地における河川網川では、それぞれの河川における水位等の流れの状態が互いに影響しあう。このため、観測水面形時系列をどのような手順で再現し、流量配分を決定するか判断が必要である。

本研究の目的は、太田川デルタ河川網における観測水面形時系列データを解とした非定常準三次元洪水流・二次元河床変動解析法により、洪水時の流れと河床変動を評価し、各河川の洪水流量配分を算定する方法を確立する。そして、感潮域にある流路網全体を考慮にいたした河川計画の方法論を構築することである。

2. 太田川デルタ・平成22年7月洪水の観測体制

太田川デルタ河川網は、河口から6.0km付近より下流に形成され、太田川放水路と5つの市内派川（旧太田

川・京橋川・天満川・元安川・猿猴川）で構成されている（図-1）。それぞれの河川は、潮位変動が最大4mである広島湾に流入する。旧太田川と太田川放水路の分派点には、可動堰である祇園水門と固定堰と可動堰からなる大芝水門が設置されている。太田川および太田川放水路の0.0kmより上流は複断面河道、0.0kmより下流は単断面河道であり、0.0kmを境界に河道断面形が縦断的に変化する。一方、市内派川は単断面河道であり、分派点（6.2km）から1.0km付近までは川幅100~200m程度、川幅水深比が20程度であり、その下流では川幅は漸拡する河道特性を有する。

図-1は、平成22年7月洪水における観測体制を示している。本洪水では分派点の上下流に簡易水位計を多数設置し、分派点周辺の水面形の時間変化を観測した。浮子による流量観測は、矢口第一観測所、祇園大橋観測所、工兵橋観測所、三篠橋観測所において行った。旧太田川と太田川放水路、京橋川、天満川、元安川の分派点付近では、約50m間隔で洪水前後の詳細な河道横断測量を行った。図-2は、対象区間における河床材料粒度分布を示す。太田川放水路の河床材料は、主に砂で構成されている。市内派川の河床材料はみお筋部では砂であり、河岸沿いには粘性土が堆積している。旧太田川と太田川放水路の分派点より上流の河床材料は、石礫も含まれた粒度構成となっている。

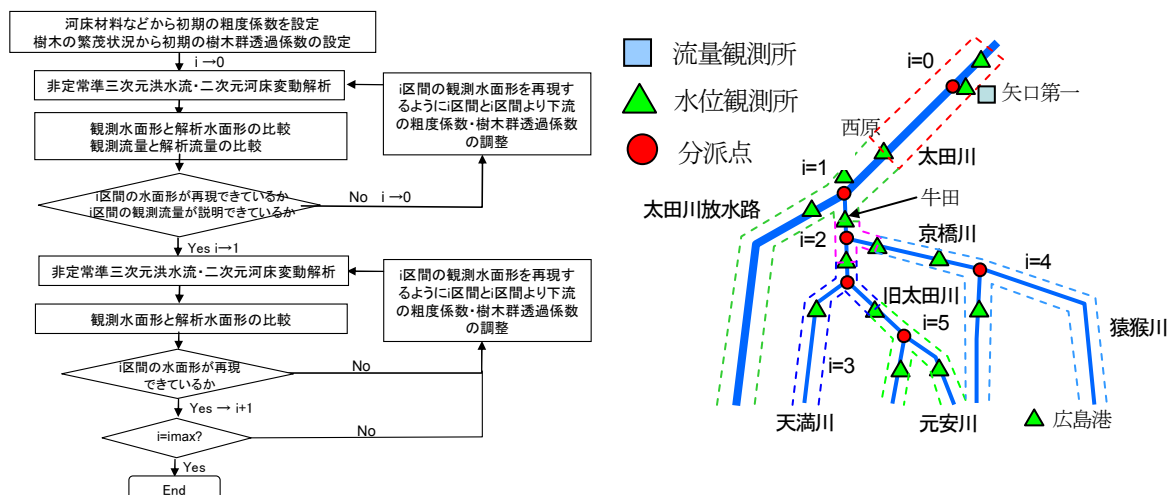


図-4 抵抗分布, 流量配分を決定するフローチャート

図-3は平成22年7月洪水における水位ハイドログラフを示す。本洪水のピーク流量は約4500(m³/s)であり、太田川では中規模洪水にあたる。図-3より、本洪水では、洪水ピーク発生時刻と潮位のピーク水位発生時刻がほぼ重なる洪水であった。

3. 太田川デルタ河川網の観測水面形時系列データを用いた洪水流・河床変動解析

(1) 太田川デルタ河川網の流量配分及び流れの抵抗分布の決定方法

洪水中の流れと河床変動を見積もるためには、観測水面形時系列データが必要である¹⁴⁾。観測水面形時系列データを解とした洪水流・河床変動解析は、洪水中的流れと河床変動を評価する有効な手法であることが示されている。例えば、鈴木・福岡ら¹⁵⁾、後藤・福岡ら¹⁶⁾、岡村・福岡ら¹⁷⁾は、それぞれの河川において時空間的に密に洪水時の水面形を観測し、観測水面形を解とした非定常準三次元洪水流・二次元河床変動解析により洪水中的流れと河床変動を説明した。低平地のデルタ河川は、複雑に分合流を繰り返す河川流路網を形成している。このような河川流路網では、それぞれの河川の水位等の流れの状態が互いに影響しあう。このため、観測水面形時系列データを解とした解析法を用いる場合、どの区間からどのような順番で流量配分を求めるのかを決める必要がある。本研究では、始めに上流端である矢口第一観測所の観測流量ハイドログラフが流入すると考える。次に、太田川放水路と旧太田川に分派点から下流に向かって流量配分を求めていく。流量配分を決定するためには、流れと河床変動を規定する抵抗分布を適切に評価することが重要になる。太田川デルタ河川網における河道の抵抗分布, 流量配分の決定方法を図-4のフローチャートに示す。本研究では、対象河川を分派点上下流の水位計をもとに5つの河道区間に分けて考え、水面形時系列データと上流端流量を既知量とし、各河川の流量ハイドログラフ・河道の抵抗分布(粗度係数・樹木群透過係数)・各

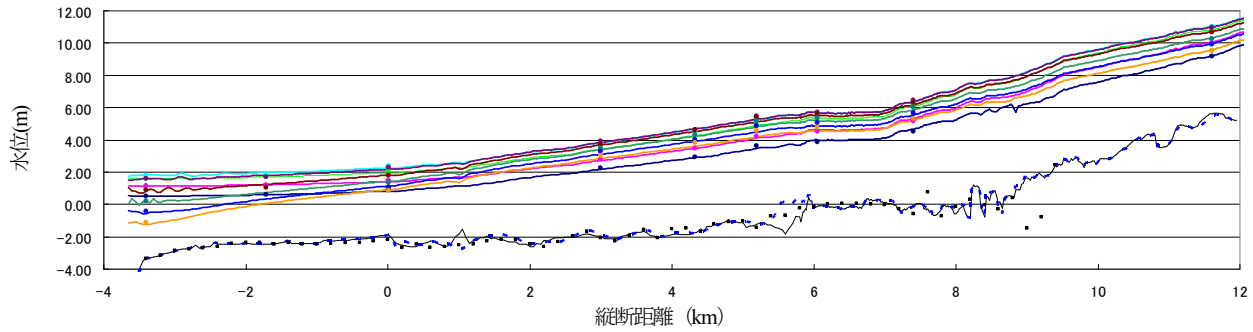
表-1 粗度係数, 樹木群透過係数

粗度係数(m-1/3・s)					
太田川, 太田川放水路		旧太田川		天満川	
12.4~5.8km	低水路 高水敷	0.03 0.035	6.2~2.2km 2.2~(-1.6km)	0.025 0.022	3.6~(-2.4km) 0.03
5.8~2.0km	低水路 高水敷	0.028 0.035	京橋川	2.6~(-2.4km)	0.022
2.0~(-3.4km)	低水路 高水敷	0.022 0.035	5.2~2.4km 2.4~(-0.8km)	0.033 0.02	猿猴川 2.6km~(-3.1km) 0.035
樹木群透過係数 (m/s)					
太田川		旧太田川			
8.0~9.6km	右岸	40	6.2~5.0km	80	
10.4~10.8km	右岸	50			
10.8~11.4km	右岸	40			
8.0~8.8km	左岸	50			
9.6~10.6km	左岸	50			

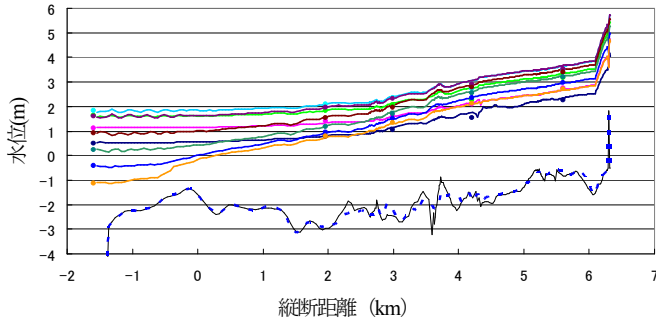
時刻の河床高を求める。初めに河道の抵抗分布は、初期値として河床材料・河床形態・樹木繁茂状況から適当な分布を設定する。そして、既知量である観測水面形時系列・観測流量・洪水後の河床形状を説明するように河道の抵抗分布を決定し、各河川の流量配分・各時刻の河床高を求める。粗度係数・樹木群透過係数の決定には、河床材料・河床形態・樹木繁茂状況と整合性がとれる値を採用する。以下に具体的な流量配分の決定方法を示す。

(i=0) 区間では水面形時系列と上流端流量を既知とし、(i=0)区間の観測水面形・観測流量を説明するように粗度係数・樹木群透過係数を決定する。その際、(i=0)区間より下流の粗度係数・樹木群透過係数を、(i=0)区間の下流端水位である西原観測所の水位と一致するように調整する。(i=1)の区間においても、水面形時系列と上流端流量が既知とし、(i=1)区間の粗度係数・樹木群透過係数を(i=1)区間の観測水面形時系列を再現するように決定する。(i=1)区間より下流の粗度係数は、(i=1)区間の下流端水位である牛田観測所の水位と一致するように調整する。流れの抵抗分布を決定は、河床材料・河床形態・樹木繁茂状況との関係に整合性がつき、平均的な洪水前後の河床変動を説明できる値を採用する。そして、(i=1)区間と(i=0)区間の観測水面形時系列を再現し、平均的な河床変動を説明できたとき、(i=1)区間の流量配分が求まる。

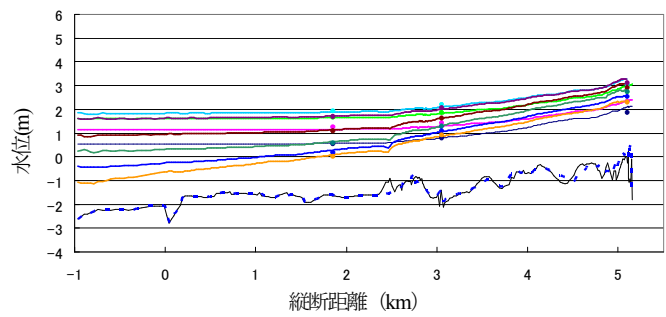
以上の過程を上流から下流に向かって行うことで観測水面形時系列・平均的な河床変動を説明し、各河川の洪水流量ハイドログラフを求める。



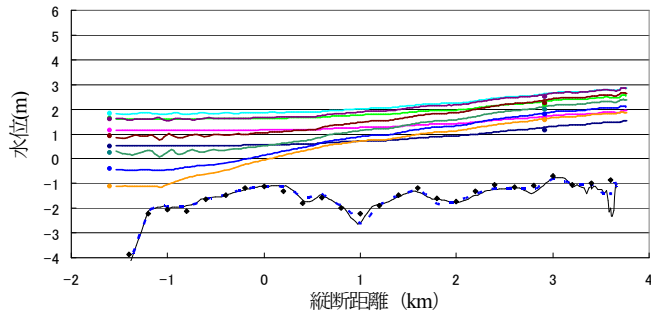
(a) 太田川—太田川放水路の水面形の解析結果と観測結果



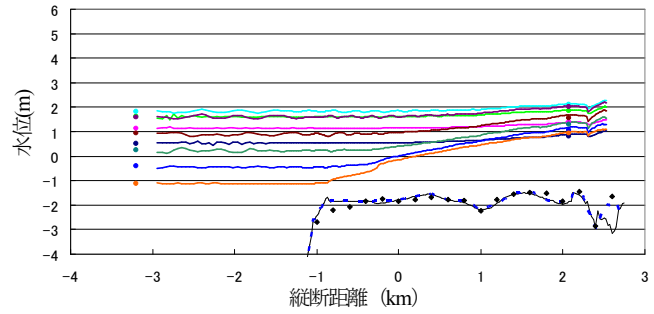
(b) 旧太田川の水面形の解析結果と観測結果



(c) 京橋川の水面形の解析結果と観測結果



(d) 天満川の水面形の解析結果と観測結果



(e) 元安川の水面形の解析結果と観測結果



図-5 観測水面形と解析水面形の比較

(2) 支配方程式と解析条件

本研究では、分派点を含む河道区間の洪水時の河床変動を評価するため、観測水面形時系列データを解とした非定常準三次元洪水流・二次元河床変動解析を用いた。本解析法は流速鉛直分布を三次式で仮定し、渦度方程式と浅水流方程式を解くことにより、底面の流れを評価している¹⁸⁾。旧太田川と太田川放水路の分派点および市内派川には比較的河幅が狭く、径間長の短い橋が架かっている。そこで、洪水水位に及ぼす橋脚の影響を式(1)で考慮した。

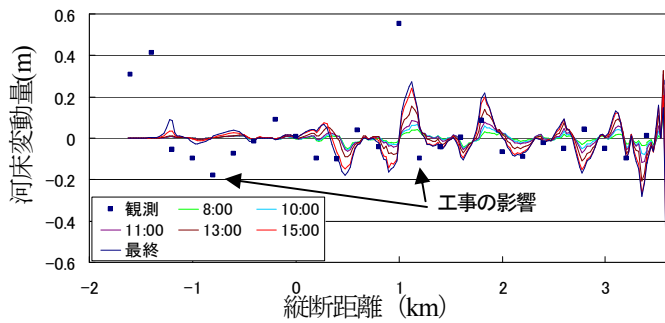
$$(F_{\xi}, F_{\eta}) = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{A}{J} \sqrt{u^2 + v^2} (\tilde{U}, \tilde{V}) \quad (1)$$

F_{ξ}, F_{η} : 外力項, C_D : 抗力係数 (=1.0), A : 橋脚の投影面積, J : ヤコビアンである。二次元河床変動解析の基礎式は、流砂の連続式、粒径別連続式¹⁹⁾、芦田・道上による粒径別平衡流砂量式¹⁹⁾を用いた。粒径別の限界掃流力は、芦田・道上によって修正されたEgiazaroffの式¹⁹⁾を用いた。解析格子はそれぞれの河川ごとに作成し、分

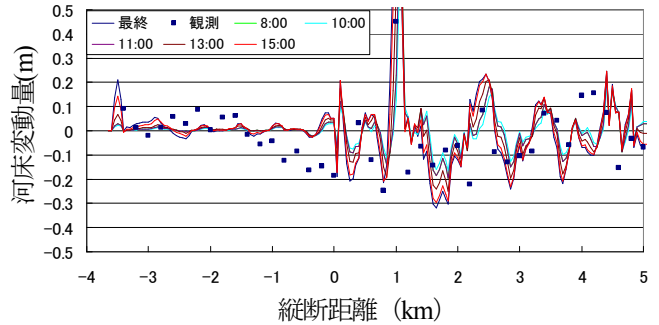
派点において本川・派川のメッシュを2メッシュ重ね、本川・派川の水位・流速・河床高を受け渡している。上流境界条件は矢口第一観測所の観測水位時系列データ、下流境界条件は広島港の潮位時系列データを与えた。

4. 解析結果

表-1は観測水面形時系列を再現した粗度係数および樹木群透過係数を示し、図-5は水面形時系列および平均河床高の解析結果と観測結果の比較を示す。洪水後の平均河床高の実測値は、洪水後に定期横断測量が行われた太田川放水路、天満川、元安川について示している。水面形の解析結果は、洪水の立ち上がり付近で観測結果とやや差が生じているものの、洪水ピークから減水期にかけて本川と各派川の観測水面形を説明できていた。14:00以降では、潮位低下により0.0km付近より下流で水面勾配が急になっている。特に、1.0km付近で川幅が狭く

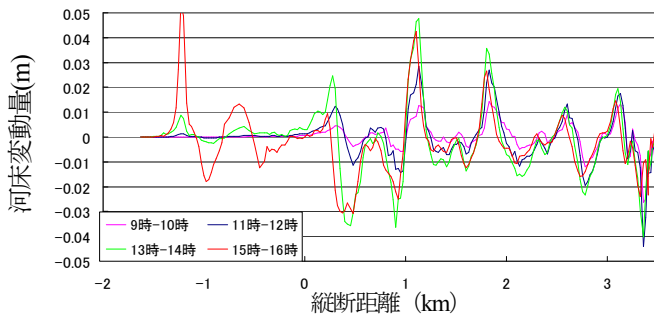


(a) 天満川における平均河床高の変化

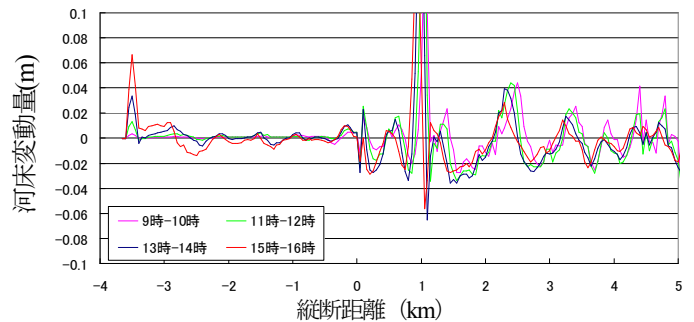


(b) 太田川放水路における平均河床高の変化

図-6 平均河床高の変化の解析結果と観測結果の比較



(a) 天満川における各時間帯の平均河床高の変化



(b) 太田川放水路における各時間帯の平均河床高の変化

図-7 解析より得られた各時間帯の平均河床高の変化

なっている元安川、天満川と旧太田川（図-1）は、0.0km付近で他の派川よりも水面形が急勾配になっていることが分かる。表-1に示す粗度係数の値は、粒径から判断すると大きい粗度係数になっている。これは、解析格子サイズでは捉えられない河床波などの微地形の影響が粗度係数に含まれているものと考えられる。太田川における樹木群透過係数は、大規模な樹木倒伏が生じた既往最大洪水の検討で用いた値²⁰⁾を使用した。旧太田川の樹木群は太田川の樹木群に比べて疎に繁茂しており、太田川よりも樹木群の抵抗が小さくなっている。

図-6は、平均河床高の変動量の解析結果と観測結果を示し、図-7は、解析より得られた平均河床高の各時間帯の変動量を示している。図は、洪水後の実測河床高が測られ、比較的河床変動量が大きかった太田川放水路と天満川について示している。実測と解析結果より、平成22年7月洪水における太田川デルタの河床変動は、平均的に20cm程度である。0.0kmより上流では、解析結果は実測の河床上昇と河床低下の位置関係や河床変動量の傾向をほぼ説明できている。太田川放水路の1.0km付近（図-1）には、内岸側に砂州が形成されており、砂州下流で顕著な土砂堆積が生じるため、河床変動量が大きくなっている。0.0kmより下流では洗掘・堆積量が実測よりも少なく計算されている。0.0km付近より下流は河道断面が変化しており、また河床材料は、D60が0.4-0.6mm程度と細かい砂であるため、浮遊砂の河床変動に対する影響を考慮した検討が必要であり、これは今後の課題である。図-6、図-7より、分派点から1.0km付近までは洪水の上昇期から洪水ピーク発生時刻付近（図-3）の河床変動量が大きくなっている。一方、洪水減水期の潮位低下

のため、0.0km付近より下流では、洪水ピーク発生時刻（図-3）よりも水面形が急勾配になる時間帯で河床変動量が大きくなっている。従って、感潮域における流れ場と河床変動を把握するためには、水面形の時間変化を観測し、観測水面形を解とした洪水流・河床変動解析を行うことが特に重要である。

図-8は、各河川の洪水流量ハイドログラフと各分派点における分派率を示している。分派率は、全流量に対する派川流量の比で表している。太田川放水路と旧太田川、旧太田川と京橋川の分派点については、分派点の上下流で観測した実測流量も示している。解析結果は、観測水面形の時間変化と洪水前後の平均的な河床変動を説明できていることから、得られた各河川の流量ハイドログラフは妥当な値と考えられる。各河川に分派率は異なるものの、いずれの河川も洪水時の分派率はほぼ一定であると言ってもよい。このように観測水面形時系列データを解として非定常準三次元洪水流・二次元河床変動解析を行うことにより太田川デルタ河川網における洪水流量ハイドログラフが明らかとなった。これまで、一次元的な解析手法に頼っていた複雑な河道網を有する太田川の管理にとって、本解析法は適切な河道計画、太田川デルタ河川網の管理に重要で有効な手段を与えるものと思われる。

5. 結論

本研究では、太田川デルタ河川網の洪水流と河床変動、洪水流量配分について検討した。以下に本研究の主な結論を示す。

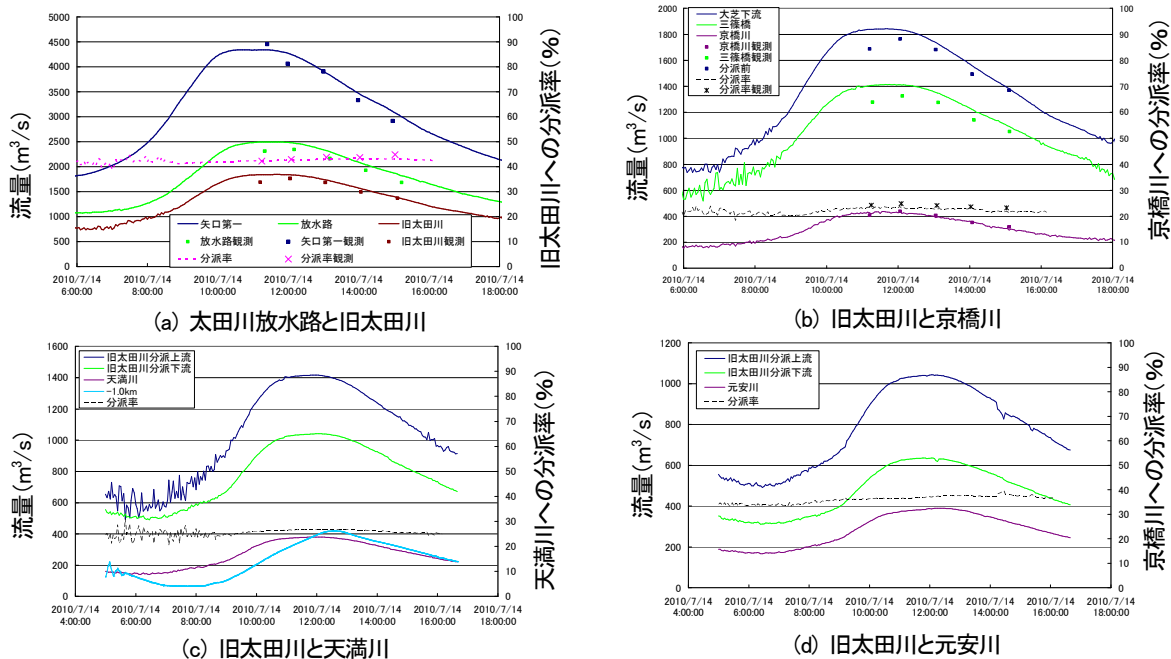


図-8 各分派点における洪水流量配分

- 1) 観測水面形時系列データを用いた非定常準三次元洪水流・二次元河床変動解析により、低平地の河川流路網を有する河道における洪水流と河床変動を説明し、太田川デルタ河川網の洪水流量配分を明らかにした。本解析法は、太田川デルタ河川網の河道計画・河川管理に有効な手段を与える。
- 2) 太田川デルタ河川では潮位変動の影響を強く受けるため、河床高の変動値は、洪水流量ハイドログラフだけでなく水面形の時間変化と密接に関係する。このため、潮位変動の影響を受ける河道区間の洪水流と河床変動計算のためには、観測水面形時系列データを解とした本解析法が特に重要であることを示した。

参考文献

- 1) 伊藤秀夫：低平地河川網の定常流に関する研究，土木学会論文誌，No.181，pp.35-41，1970。
- 2) 岩佐義朗，綾 史郎，山本正幸：ネットワーク状水路の水理解析，京大防災研究所年報，第19号B，pp.201-219，1976。
- 3) 金本 満，常松芳昭，金丸昭治：開水路網における洪水流の数値解析法の比較，水工学論文集，第36巻，pp.323-330，1992。
- 4) Hui Fan, Haijun Huang, Thomas Q. Zeng, Kairong Wang：River Mouth Bar Formation, Aggradation and Channel Migration in the Modern Huanghe (Yellow) River Delta, China, Geomorphology, 74, pp. 124-136, 2006。
- 5) Ayub Ali, A. E. Mynett, Mir Hammadul Azam：Sediment Dynamics in the Meghna Estuary, Bangladesh A Model Study, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, 133, pp.255-263, 2007。
- 6) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻，pp.1-6, 2005。
- 7) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文誌，No.761/ II-67，pp.45-56，2004。
- 8) 福岡捷二，永井慎也，佐藤宏明：河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ、貯留量の評価 利根川・渡良瀬川の平成13年9月を例として，水工学論文集，49巻，pp.625-630，

2005。

- 9) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間 聡，牛腸 宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，第50巻，pp.1165-1171，2006。
- 10) 安部友則，福岡捷二，塚本洋祐：破堤による氾濫流量ハイドログラフ計算法の構築と河川への適用方法の研究，土木学会論文誌B，Vol.65，No.3，pp.166-178，2009。
- 11) 福岡捷二，昆 敏之，岡村誠司：鶴見川多目的遊水地の洪水調節効果の評価—河道の水面形の時間変化を考慮した非定常二次元解析法の適用—，土木学会論文誌 B，Vol.63，No.3，pp.238-248，2007。
- 12) 内田龍彦，福岡捷二，工藤美紀男：河川上流域における本川・支川流量ハイドログラフの合理的推定法，河川技術論文集，第15巻，pp.309-314，2009。
- 13) 内田龍彦，福岡捷二，濱邊竜一：多地点からの横流入がある河道システムにおける本川水位観測データを用いた洪水流解析法とその活用，水工学論文集，第55巻，pp.1081-1086，2011。
- 14) 福岡捷二：河道設計のための基本は何か—水面形時系列観測値と洪水流・土砂流の解析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，第17巻，pp.83-88，2011。
- 15) 鈴木健太，島元尚徳，久保世紀，福岡捷二：筑後川感潮域の洪水時の河床変動解析，水工学論文集，第55巻，pp.877-882，2011。
- 16) 後藤岳久，福岡捷二，阿部徹：太田川放水路と旧太田川への洪水流量配分及び感潮域の河床変動，水工学論文集，第54巻，pp.757-762，2010。
- 17) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：洪水流の縦断水面形変化と準三次元流解析法を用いた石狩川河口部の洪水時の河床変動解析，河川技術論文集，第16巻，pp.125-130，2010。
- 18) 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，土木学会論文誌 B1，Vol. 67, No. 1，pp.16-29，2011。
- 19) 水理公式集：土木学会水理委員会，丸善，1999。
- 20) 後藤 岳久，福岡捷二，兒子 真也，中須賀 淳：複断面蛇行河川における洪水流による樹木群の倒伏・破壊機構と樹木管理への活用，土木学会論文誌B，Vol. 66，No. 1，pp.47-65，2010。

(2011.9.30受付)