

# 利根川河口部の河床形状と洪水中の河床変動

## BED FORM AND BED VARIATION DURING FLOODS OF THE TONE RIVER MOUTH

岡村誠司<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・竹本隆之<sup>3</sup>

Seiji OKAMURA, Shoji FUKUOKA and Takayuki TAKEMOTO

<sup>1</sup>正会員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博士課程後期課程  
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>国土交通省 関東地方整備局 利根川下流河川事務所 計画課長 (〒287-8510 千葉県香取市佐原イ4149)

The objective of this paper is to demonstrate the temporal changes in water surface profiles and bed variations during floods of the Tone River mouth.

At first, sand waves are seen at the reach within 5.0km from the mouth of the Tone River by the observation of longitudinal bed form. Next, the large grain size sediment layer exists around the river mouth kept bed variation small at the neck of the mouth. These are the causes of the steep water surface profile at the reach within 5.0km from the mouth and the mild slope at the reach upstream of 5.0km. As a result, the bed variations during floods are small at the Tone River mouth.

In this paper, the resistance of sand waves of the Tone River mouth is estimated by the 2D numerical analysis of unsteady flow and bed variation based on the observed water surface profile.

**Key Words:** water surface profile, flood, bed variation, sand wave, 2D numerical analysis

### 1. 序論

河口は治水上の境界条件を与えることから、河口の水理現象の理解は特に重要である。一般に河口部は、海水位に比して洪水水位が十分高く水位差が大きくなるために、洪水中に河床が洗掘され、河積増大による流下能力の増大が起こる。このことから、河口部に堆積した土砂が大規模洪水時に洗掘され、どの程度流下能力が増大するかを把握することは重要である<sup>1),2)</sup>。

大きな潮位変動と河床変動を伴う河口域における洪水流の縦断水面形は時間的・空間的に変化する。そのため、河口域では中・上流域のように洪水痕跡水位やピーク流量を用いた定常流解析では、洪水流の挙動を十分把握できない<sup>1),3)</sup>。精度の高い洪水水位予測を行うためには、潮位の影響を受けて時間的に変化する縦断水面形と河床変動を一体的に解析し、時々刻々の観測縦断水面形を適切に説明する洪水流と河床変動解析が必要である<sup>3),4),5),6)</sup>。

また、縦断河床勾配の緩やかな河口域では、洪水中に小規模河床波が発生しやすく、河床波の抵抗が洪水流の水面形および流下能力に影響を及ぼす場合もある。石狩川河口部においては、洪水中の流れと河床形態の変化が観測され、河床波による抵抗の検討およびそれらを考慮した洪水流・河床変動解析が行われている<sup>2),7)</sup>。また潮位変動の大きな筑後川の河口付近においても河床波が確認

され、洪水流と河床変動の一体的解析がなされている<sup>6),8)</sup>。

本研究では、流下能力が不足し、その河積確保が課題となっている利根川河口域における洪水流の流下機構を把握し、流下能力を算定することを最終ゴールとして、まずは洪水中の縦断水面形の時間変化から河口部の河床形状と河床変動の実態を明らかにする。はじめに、平水時に測定された縦断河床形状より、小規模河床波の存在を示す。次に、利根川2007年9月洪水、2008年8月洪水における観測結果を用いて縦断水面形の時間変化、河床変動と河床材料の関係について検討する。最後に、観測縦断水面形の時間変化を解とする洪水流の非定常平面二次元解析と河床変動解析を一体的に行い、河床の抵抗と河床変動について明らかにする。

### 2. 平水時における利根川河口部の縦断河床形状

図-1には、利根川の河口から3.0km付近までの河道平面形状を示す。この付近は高水敷のない単断面河道であり、3.0kmより下流は銚子港および波崎港の導流堤に挟まれて川幅が狭くなり、0.0km付近で最も川幅が狭く、河道は湾曲して太平洋に接続する。

図-2には、2003年12月に船上から音響測深機を用いて測定された平水時の利根川河口部の縦断河床形状を示す。これは、船を河道横断方向に航行して一断面の河床形状

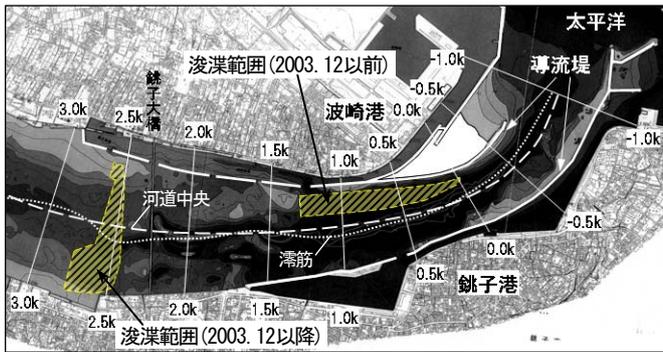


図-1 利根川河口部～3.0km付近の河道平面形状

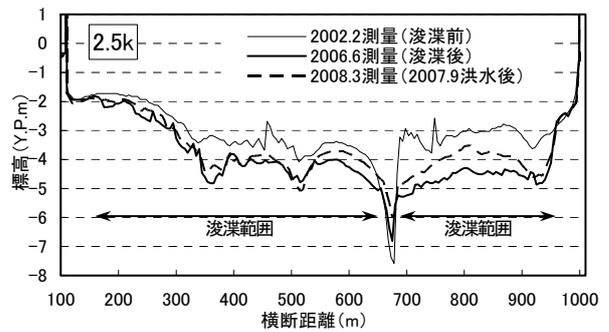


図-3 2.5km断面における浚渫前後の河道横断形状変化

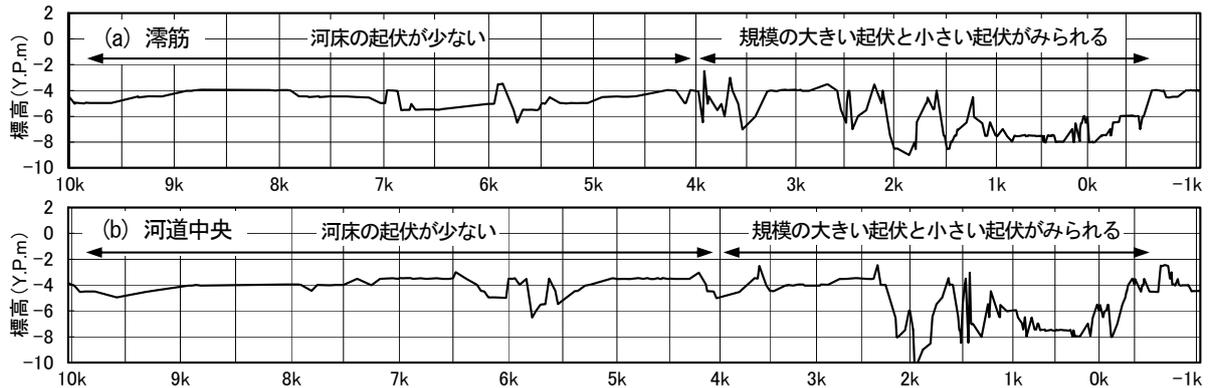


図-2 利根川河口部の縦断河床形状

を測定し、それを縦断方向に約50m間隔で繰り返すことにより平面的な河床形状を測定したもので、そのうちの図-1中に示す河道中央および遡筋線上の縦断河床形状を抽出したものである。

図-2より、4.0km～10km区間では河床の起伏が少ないのに対して、4.0km下流では河床の起伏が多く見られ、4.0kmの上流と下流で河床形状が大きく異なる。4.0kmより下流に存在する河床の起伏には、規模の大きい起伏(波長500m程度、波高3～4m程度)と規模の小さい起伏(波長50～100m、波高1.0m程度)の2種類が見られる。規模の小さい起伏については、この区間の洪水時水深は5～10mであるため、波長が水深の10倍程度、波高が水深の1/5～1/10程度であり、小規模河床波と考えられる。また、黒木らによる砂州の形成領域区分<sup>9)</sup>より、対象区間は単列砂州～複列砂州の領域に属し、中規模河床波と小規模河床波が共存すると考えられる。

このように、平水時に約50mの縦断間隔で測定された縦断河床形状から、利根川河口部には顕著な小規模河床波を確認することができた。

図-1中には、平成年代以降に河床浚渫された範囲を斜線で示す。2003年12月以前は主に0.0km～1.25km左岸において、それ以降は主に2.5km付近において、-5.0Y.P.mの高さまで平均深さ1.5m程度の浚渫が行われた。これらの浚渫は2003年12月時点の河床形状や、その後の洪水での河床変動に影響を与えた事が考えられる。図-3には2.5km断面における浚渫前後の河道横断形状の変化を示す。浚渫により2006年6月時点では河床高が-5.0Y.P.m程

度となっているが、その後2007年9月洪水後の2008年3月時点では0.5～1.0m河床が上昇し、河床の起伏は浚渫前よりなだらかになっている。このような平水時の河床形状が洪水時にどのように変化するかを知ることは、洪水流の流下能力を算定し、今後の河川改修をどのように進めるかを判断する上で重要である。

### 3. 2007年9月洪水における縦断水面形の時間変化と河床変動の実態

2007年9月の洪水において利根川河口部では詳細な水位縦断観測を中心とした大規模な洪水観測が行われた。以下に観測の概要を示し、洪水時の縦断水面形の時間変化と平水時からの河床変動の実態について検討する。

#### (1) 2007年9月洪水の観測縦断水面形と河床変動

図-4には利根川河口から30kmまでの水位・流量観測地点を示す。縦断方向に約1km～5km間隔で設置された水位観測所および簡易圧力式水位計により、洪水期間を通して縦断水面形の時間変化が観測された。河口から27.0km地点の小見川大橋では浮子による流量観測が行われ、5.0km地点ではADCP流速計を用いた流量観測および横断河床形状の測定が行われた。

図-5には観測水位ハイドログラフ、観測流量ハイドログラフを示し、図-6には観測縦断水面形の時間変化を洪水痕跡水位と重ねて示す。2007年9月洪水はピーク流量が約6000m<sup>3</sup>/sであり、洪水水位が計画高水位に迫る規模の洪水であった。図-5、図-6からわかるように洪水ピーク

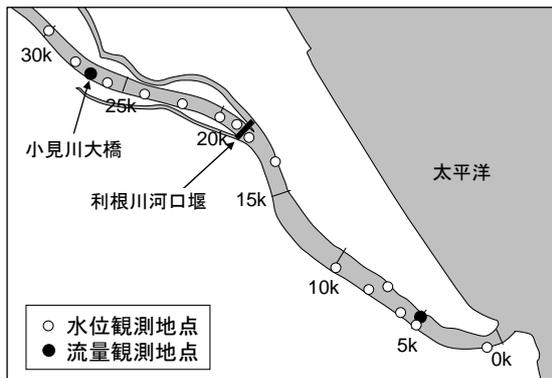


図-4 水位・流量観測地点位置図

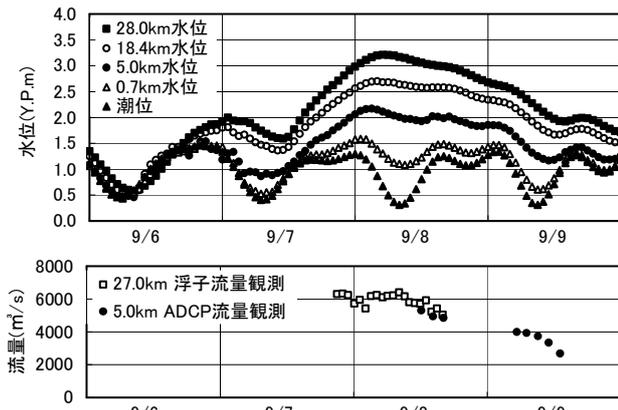


図-5 観測水位・観測流量ハイドログラフ

は干潮と重なっている。洪水ピーク時付近(9/8 6:00)の縦断水面形は5.0km下流で水面勾配が急となり、5.0km上流で緩やかとなっている。この特徴的な縦断水面形は洪水痕跡水位には表れていない。河口付近の痕跡水位は満潮時の洪水位を示しており、洪水ピーク時の水位縦断形とは一致しないためである。

図-7には、洪水前後における低水路の平均河床高・最深河床高の縦断形および平均河床高の変化量を示す。洪水前後で0.0km付近および14.0km~16.0km付近において平均河床高が0.3~0.5m低下しているものの、全体的に洪水前後での河床変動は小さい。また、図-8には5.0km断面においてADCP流速計を用いて観測された洪水ピーク時付近(9/8 12:00)の河道横断形状を、洪水前後の河道横断形状と重ねて示す。洪水ピーク時付近の河床高はほとんど洪水後の河床高と重なっている。

このように2007年9月洪水では、洪水ピークが干潮と重なり河口部で大きな水面勾配がついたにも関わらず大きな河床低下は生じなかった。一般に河口付近の河床材料は小さいため、大きな水面勾配(掃流力)が働くときには、河床洗掘が起こることが知られている。以下に、利根川河口域の河床変動が小さかった理由を検討する。

## (2) 河口付近の河道縮小部における河床材料と河床変動

図-9には、河口付近における表層河床材料の平面分布を示す。1.0kmより下流は1997年、1.5kmより上流は2005年に行われた河床材料調査結果である。図-10には、

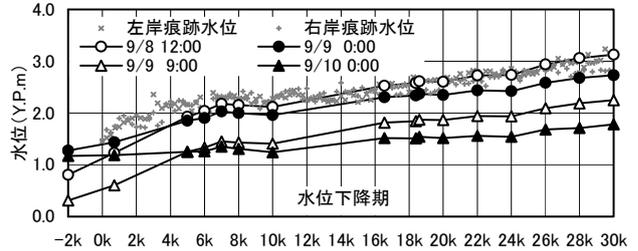
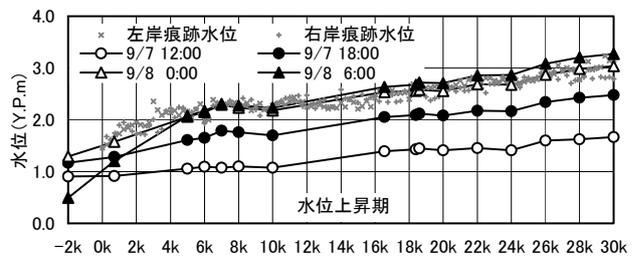


図-6 観測縦断水面形の時間変化

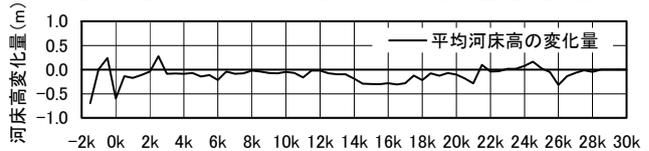
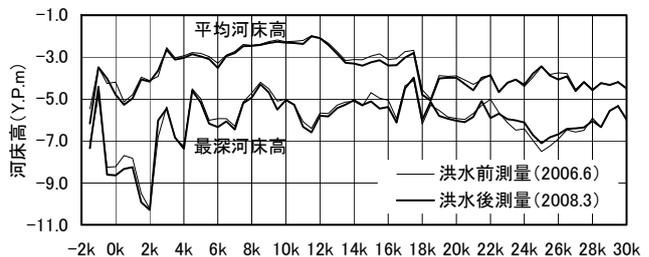


図-7 洪水前後の低水路平均・最深河床高縦断形および低水路平均河床高の変化量

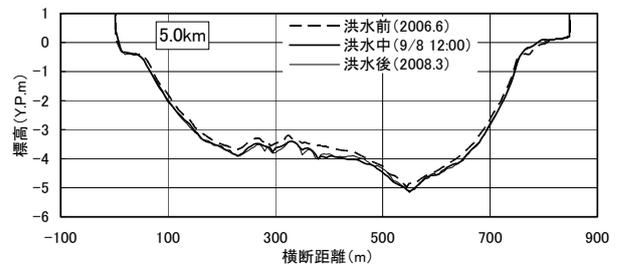


図-8 5.0km断面における洪水時の河道横断形状

-0.5km断面(図-9中のA-A'断面)および0.0km断面(図-9中のB-B'断面)について、左右岸で調査された深度方向の平均粒径の分布を洪水前後の河道横断形状と重ねて示す。図-11にはこれらの河床材料の粒度分布を示す。これらの図より、導流堤により川幅が狭くなる-1.0km~0.5km区間の湾曲外岸(右岸)から河道中央にかけて平均粒径1~10mm程度の砂礫が河床表層および深度方向に分布していることがわかる。

図-10より、0.0km断面,-0.5km断面とも湾曲外岸の右岸においては表層から下層まで平均粒径3mm程度の砂礫層であり、湾曲内岸の左岸においても下層には平均粒径2~3mm程度の砂礫が存在する。洪水前後の河床高を比較すると、湾曲内岸の左岸側では、0.0km断面で2~3m河床

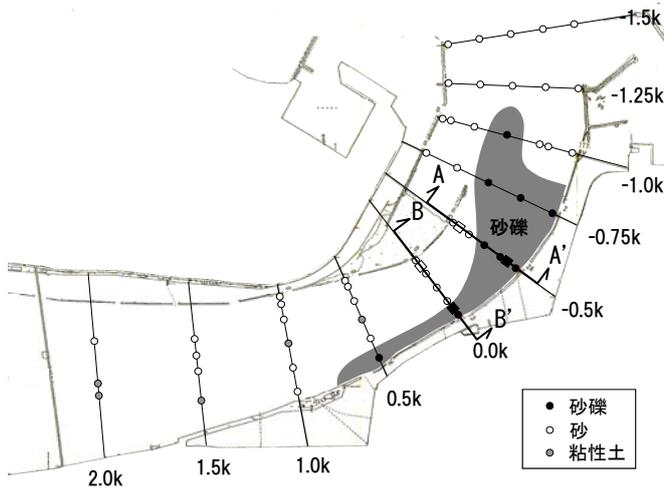


図-9 河口付近における表層河床材料の平面分布

が低下し、-0.5km断面で約1m河床が上昇している。これは、最も川幅が狭く掃流力の大きい0.0km断面において砂礫層の表面に堆積していた砂が掃流され、水裏となる-0.5km断面の湾曲内岸で堆積が生じたと考えられる。一方、右岸側に着目すると、掃流力の大きくなる河道縮小部の湾曲外岸であるにも関わらず、河床高はほとんど低下せず、右岸側の高い河床形状が維持されている。これは、砂礫層の存在によると考えられる。観測された縦断面水面形を用いて洪水ピーク時における平均粒径3~10mmの砂礫に対する無次元掃流力 $\tau_*$ を概算した結果、 $\tau_* = 0.04 \sim 0.12$ となり移動限界無次元掃流力( $\tau_* = 0.05$ )より若干大きい程度であった。

以上より、河口付近の河道縮小部の河床には砂礫層が分布しており、洪水時の河床高変化は河床表面の砂層の移動が主である。そのため、洪水時にも河積はほとんど増大せず、この場所がボトルネックとなって、図-6に示した1.0km~5.0kmでの水位上昇の一因となるとともに、河口付近とその上流での河床変動を抑制している。

#### 4. 非定常洪水流解析による2007年9月洪水、2008年8月洪水の河床変動、河床抵抗の検討

##### (1) 解析方法

非定常洪水流河床変動解析により2007年9月洪水、2008年8月洪水の観測縦断面水面形の時間変化と河床変動の再現、および河床抵抗の評価を行う。

解析手法は、福岡らによる観測縦断面水面形の時間変化を解とする洪水流と河床変動の一体解析法<sup>5)6)</sup>である。解析モデルには、湾曲による二次流の影響を考慮するため、内田・福岡による水平方向の渦度方程式を用いて流速の鉛直分布を算定する準三次元非定常流解析法<sup>10)</sup>を一般座標系に拡張した解析モデル<sup>11)</sup>を用いた。河床変動については、一般座標系における平面二次元河床変動解析モデル<sup>3)</sup>を用いた。河床材料粒度分布は図-11より設定した。

解析範囲は利根川河口から30kmまでとし、上流端境界条件は28km地点における観測水位時系列を与え、下

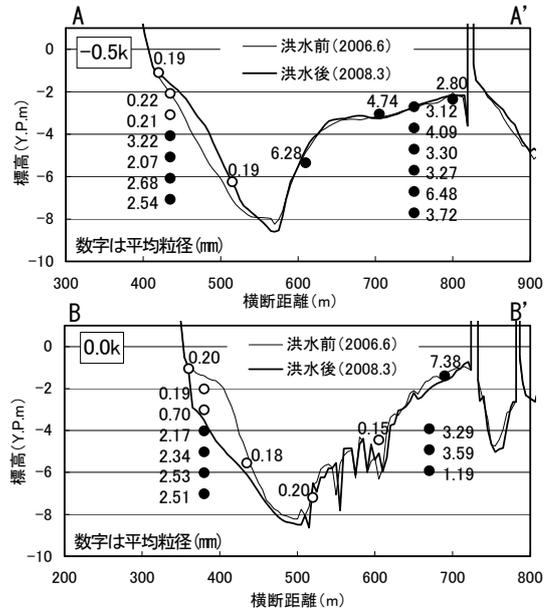


図-10 -0.5km断面、0.0km断面の河床材料深度分布

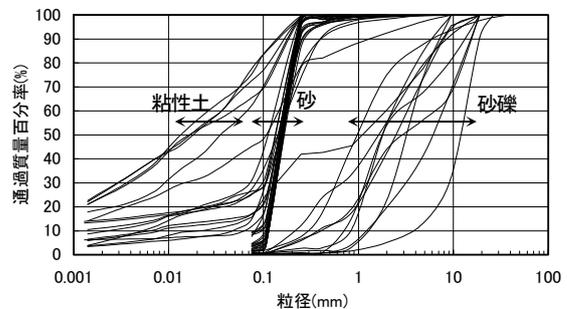


図-11 河口付近における河床材料の粒度分布

流端境界条件は河口沖4.0kmに銚子検潮所の天文潮位を与えた。解析メッシュは縦断面方向に約100m間隔、横断面方向に30~60m間隔で分割した。図-12に河口付近の解析メッシュを示す。初期河床高は洪水前の2006年6月に測量された河床高を与えている。これは、2.で示したように2.5km付近では2003年12月以降の河床浚渫の影響を受けている。また、構造物の影響として、導流堤形状と導流堤開口部での流出入、および架替工事が行われていた銚子大橋の仮設工による水位上昇を考慮している。

なお、利根川河口部の塩水楔はピーク流量 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水でフラッシュされる<sup>12)</sup>。海域での塩水の影響は考えられるが、水位の堰上げが特に問題となる河道縮小部での影響はほとんどないと考えられるため、ここでは塩水の影響を考慮していない。

##### (2) 解析結果

最初に解析(Case1)として、粒径の小さい河口部で一般的に用いられる平坦河床を想定した低水路粗度係数 $n=0.015$ を、解析区間全体に与えて解析を行った。

図-14(a)に、解析(Case1)の縦断面水面形の時間変化を観測結果と比較して示す。水面勾配の緩やかな洪水初期には、解析縦断面水面形は観測縦断面水面形と概ね一致する。しかし、洪水ピーク付近(9/8 6:00)の縦断面水面形に着目

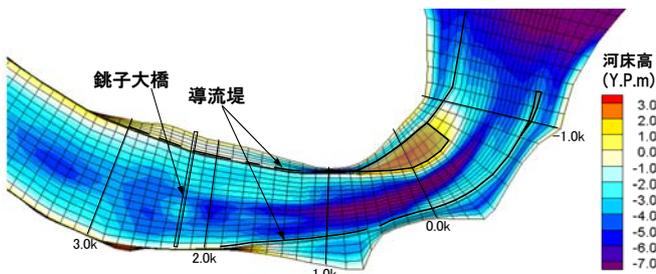


図-12 河口付近の解析メッシュ

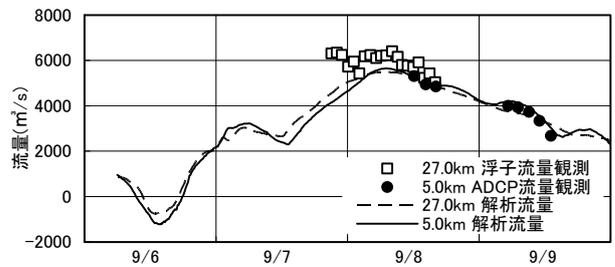


図-13 解析Case2と実測の流量ハイドログラフの比較

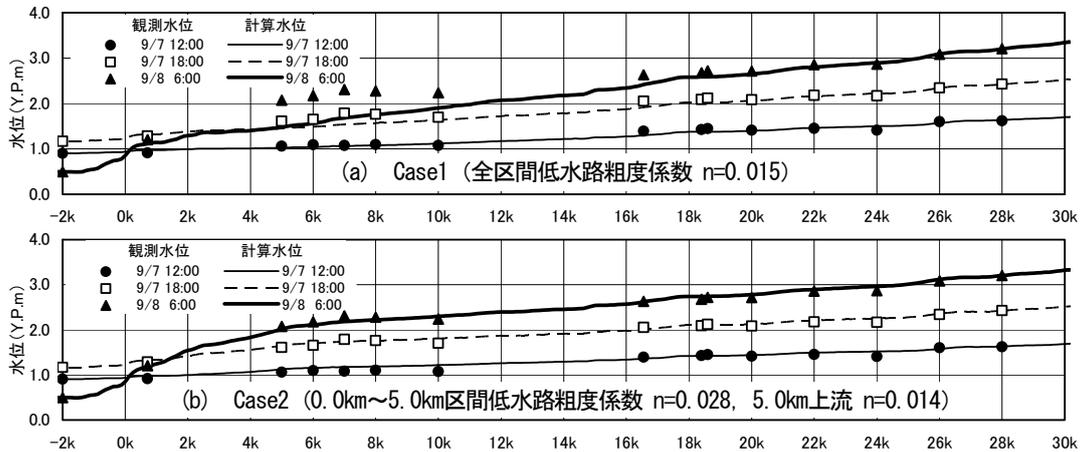


図-14 解析と観測の縦断水面形の時間変化

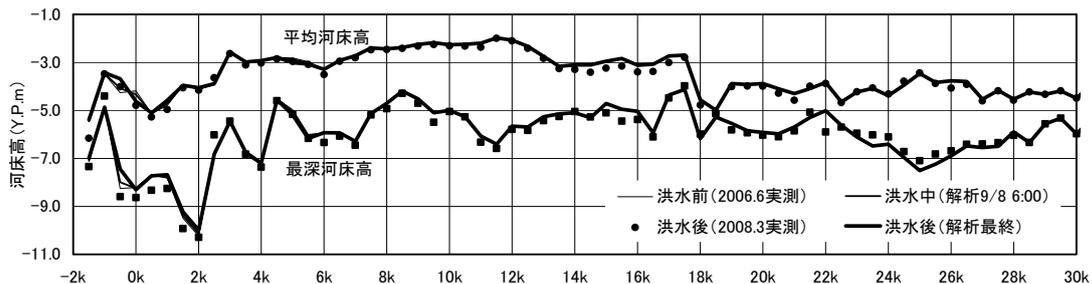


図-15 平均河床高・最深河床高縦断形の時間変化の解析値(Case2)と実測値の比較

すると、導流堤による河道縮小の影響で-1.0kmから1.0kmにかけて約0.7mもの大きな水位上昇が生じているものの、さらに1.0kmから5.0kmにかけて大きく水位が上昇する観測縦断水面形と比べて解析水位は5.0km地点で0.6m程度低く、観測縦断水面形を再現できていない。

そこで解析(Case2)では、観測縦断水面形の時間変化を再現できる低水路粗度係数の値を求めた。その結果、図-14(b)に示すように0.0km~5.0km区間の低水路粗度係数を $n=0.028$ 、5.0km~30.0km区間は $n=0.014$ とすることで、観測縦断水面形の時間変化を再現することができた。

図-15には解析(Case2)による洪水全期間計算後の河床高を実績洪水後河床高と比較して示す。解析においても実績と同様に全体的な河床変動量は小さい。川幅の狭い0.0kmで平均河床高が0.5m程度低下し-0.5kmで堆積する傾向は一致する。図-13に示すように解析(Case2)より得られた流量ハイドログラフは観測結果と概ね一致する。

次に、図-16に示す洪水規模の異なる2008年8月洪水(ピーク流量 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 程度)に対しても、解析(Case2)と同様の粗度分布を与え、同様の解析を行った。その結果、

図-17に示すように解析縦断水面形は観測縦断水面形の時間変化を概ね再現できている。

以上より、利根川河口部では、平坦河床を想定した低水路粗度係数を与えた場合には、洪水時の5.0km下流の急な水面勾配を説明することができず、0.0km~5.0km区間には粗度係数 $n=0.028$ に相当する大きな河床抵抗が働いていることがわかった。岸・黒木の水路実験結果を基にした実験式<sup>2),7)</sup>では、2007年9月洪水ピーク時の水理条件下で砂堆河床のとき粗度係数は $n=0.045$ と大きな値となる。この違いは、水路実験に比して利根川の河道スケール(水深粒径比)が大きいことや、縦横断の河床状況が一樣でないこと等によると考えられる。

この大きな河床抵抗を引き起こしている小規模河床波は平時、2007年9月洪水、2008年8月洪水時ともにほぼ同じ形状で存在しており、いつ、どのような条件で発生したものか、わかっていない。

今後、河口域では流下能力確保のため河床掘削や導流堤の撤去が計画されている。これらの改修工事との関係で河床波の存在をどのように扱うべきかについて、さら

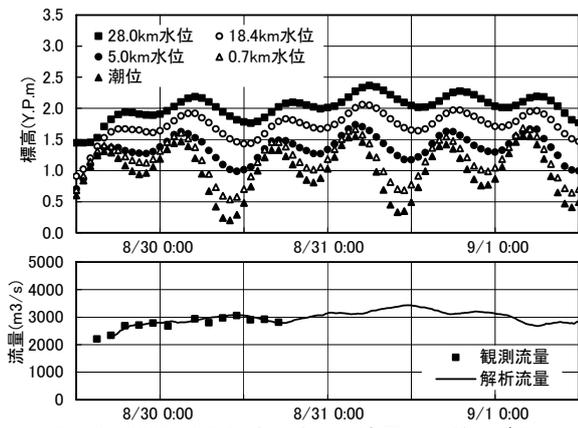


図-16 2008年8月洪水の水位・流量ハイドログラフ

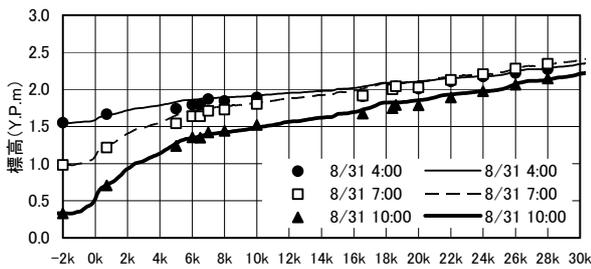


図-17 観測と解析の縦断面水面形の時間変化

に十分検討されなければならない。

## 5. 結論と今後の課題

本研究では、河積確保が課題となっている利根川河口域を対象に、洪水時の縦断面水面形の時間変化および河床変動の実態を明らかにすることを目的として、平水時の縦断面河床形状調査結果、2007年9月洪水観測結果の分析を中心とした検討を行った。以下に得られた主な結論と今後の課題を示す。

- (1) 平水時に約50mの縦断間隔で測定された縦断河床形状より、利根川河口部において小規模河床波とみられる大きな河床の起伏を確認することができた。今後は、より詳細な縦断河床形状の観測、および洪水時の河床形態の実態把握を行い、河床波の存在をどのように改修計画に考慮すべきかを検討する。
- (2) 2007年9月洪水において1km~5km間隔で行われた詳細な縦断面水面形の観測結果より、洪水ピークが干潮と重なり、5.0km下流で水面勾配が急となり、5.0km上流で緩やかとなる特徴的な縦断面水面形が確認できた。河口域において洪水流量ピーク時が満潮時と大きくずれる場合には、洪水痕跡水位には満潮時の洪水水位が記録されることになり、河口の痕跡水位の解釈には十分注意が必要である。この課題を解決するには、河口域に水位計を一定間隔で設置することが必要である。
- (3) 2007年9月洪水において利根川河口域では、全体的に洪水前後の河床変動は小さい。河口付近の河道縮小部の河床には砂礫層が分布しており、洪水時の河床高変化は河床表面の砂層の移動が主である。この場所がボトル

ネックとなり、さらに河床波が抵抗となることにより、利根川河口部における洪水時の河床変動が抑制されるとともに5.0km上流で水面勾配が緩くなる。

(4) 観測縦断面水面形の時間変化を解とする非定常洪水流河床変動解析より、0.0km~5.0km区間では粗度係数  $n=0.028$  に相当する河床抵抗が働いていることがわかった。これは河床波の抵抗と考えられ、規模の小さい2008年8月洪水においても同様の抵抗分布となっている。

2007年9月洪水のように洪水水位が計画高水位に迫る規模の洪水において、河床形態が平坦河床へと遷移せず河床波による大きな抵抗が働いたことは重要であり、より大きな計画規模の洪水時に河床形態および河床抵抗がどのように変化するか把握することが治水に重要となる。河口部に強固な河床波が存在する状況において、流下能力増大のために、どのような改修方式が望ましいか今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二：巻頭言河川整備基本方針の策定を終えて、河川，No.749，pp.3-6，2008。
- 2) 岸力(代表研究者)：昭和56年8月北海道豪雨災害に関する調査研究，昭和56年度科学研究費補助金(自然災害特別研究(1))研究成果報告書，1982。
- 3) 福岡捷二：洪水流の水利と河道の設計法，森北出版，2005。
- 4) 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.1-6，2006。
- 5) 川口広司，藤堂正樹，福岡捷二：水面形時系列データに基づく交互砂州平均河床高の時間変化及び流量ハイドログラフの解析，水工学論文集，第53巻，pp.751-756，2009。
- 6) Kenta Suzuki, Shoji Fukuoka and Kazumi Matsuo：Bed Material Structure and Sand Transport by Flood Flows in the Estuary of the Chikugo River，*Proceedings of the third International Conference on Estuaries and Coasts*，Vol.1，pp.101-108，2009。
- 7) 清水康行，板倉忠興，岸力，黒木幹男：昭和56年8月洪水における石狩川下流部の河床変動について，水理講演会論文集，第30巻，pp.487-492，1986。
- 8) 入江靖，石川博基，前田昭浩，山口広喜，坂本哲治，福岡捷二，渡邊明英：筑後川感潮域における洪水流と土砂移動，河川技術論文集，第15巻，pp.297-302，2009。
- 9) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984。
- 10) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第53巻，pp.1081-1086，2009。
- 11) 岡村誠司，内田龍彦，福岡捷二：一般座標系における渦度方程式を用いた準三次元流解析，第36回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，II-1，2009。
- 12) 鈴木伴征，若岡圭子，石川忠晴：利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について，水工学論文集，第42巻，pp.769-774，1998。

(2009. 9. 30受付)