

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

ANALYSIS OF CHANNEL BED VARIATION AND DISCHARGE HYDROGRAPH
BASED ON TIME-SERIES DATA OF WATER SURFACE PROFILES

川口 広司¹・藤堂 正樹²・福岡 捷二³

Hiroshi KAWAGUCHI, Masaki TODO and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 博(工) 佛教大学教育学部教育学科数学中1高1免課程(〒731-5133 広島県広島市佐伯区旭園10-8)

²正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部河川部長

(〒163-0730 東京都新宿区西新宿2丁目7番1号第一生命ビル)

³フェロー会員 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)

An analysis of bed variation during floods is needed for the computation of water levels in rivers with large temporal change of bed topography. Because water surface profiles and its temporal change are effected by longitudinal change in cross-section, roughness and bed variation in the river, flood discharge hydrograph and bed variation may be estimated by using observed water surface profiles and 2-D numerical analysis of unsteady flow and bed variation.

In this paper, time change in longitudinal bed height and discharge hydrograph is estimated by the 2D numerical flow and sediment load analyses based on time-series data of water surface profiles in unsteady flow in channel with movable bed. Issues for the application to the river bed variation of the proposed method are presented.

Key Words : *unsteady flow, water surface profiles, 2D numerical analysis, bed variation, steep channel, discharge hydrograph*

1. 研究背景・目的

洪水中にどの程度の河床変動が起こっているかを知ることが河川管理上重要である。しかし、河道の広い範囲で河床形状を測定する機器等を用いて洪水中の河床変動量を知ることは、現在のところ技術的にも経済的にも困難である。通常は、洪水前後の横断測量結果から河床の変動高を推定するが、洪水中の河床高の変化をどの程度の精度で表現し得ているかは定かではない。一方、洪水中の水面形の時間変化を測定することは容易であり、わが国の多くの河川(約30河川,平成20年現在)で水面形の観測データが集積されている。水面形の時間変化には、洪水中に起こっているさまざまな現象が含まれている¹⁾。福岡ら²⁾は、洪水流の観測水面形の時間変化を河川管理の基礎情報として生かすための調査研究を行っている。そのひとつの成果は、観測された洪水水面形の時間変化を解とするように非定常浅水流方程式を解くことによって、各河道地点の水理量、流量ハイドログラフを高い精度で算出できることであり、また、この方法により本川水位の影響を受ける支川からの合流量⁴⁾、派川

への分流量⁵⁾、遊水地への流入量⁶⁾、破堤氾濫流量ハイドログラフ⁷⁾等、従来十分な精度で解析が出来ず、河川管理上課題であった水理現象を評価することができることを示した。洪水中の河床変動の情報も水面形の時間変化の中に含まれている。この点に関連して、宇民・上野ら⁸⁾は、洪水時に河床に形成されている砂堆上の水面に現れている画像を分析し、洪水流の構造と砂堆の関係について興味ある結果を得ている。竹林ら⁹⁾は、河口砂州の存在下では、洪水ピーク流量が砂州に到達する前に上流でピーク水位に達するとの認識で、河口砂州上流域の水位変動特性を洪水の時系列特性と砂州高さに着目し数値シミュレーションにより検討している。船橋ら¹⁰⁾は、洪水中の斐伊川河口域では、河口水位と宍道湖水面位との差が大きくなり、大きな掃流力が作用するため、河口域での洪水中の河床低下量が大きくなり、河床変動量を考慮しないで実測水位を用いて水理量を計算すると大きな誤差を伴うことを示している。塚本ら¹¹⁾は洪水後に測量された河床形状を用い、洪水痕跡水位縦断形を満足する水面形計算を行なうと、河口水深が洪水中の河口水深に比して小さく計算され、射流状態の流れが河口に現れ

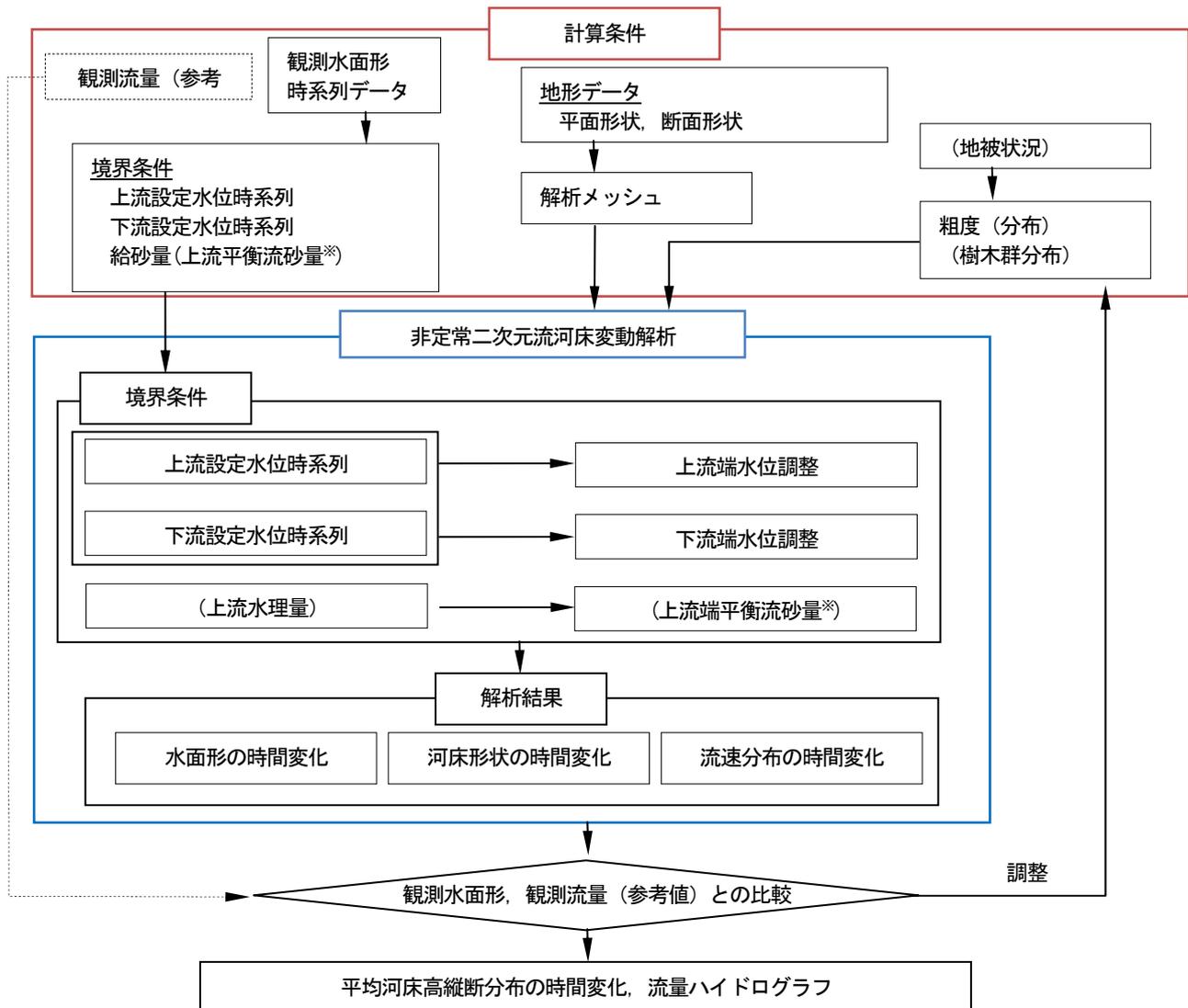


図-1 水面形時系列データに基づく河床変動解析フロー

るといふ不合理な結果となることを示し、実際には河口から海への水面勾配が大きくなり河口域に堆積していた土砂が侵食されて河床高が下がり、なめらかな常流状態の流れとなる場合が多いことを示している。このようなことから、河口域の河道計画では観測水面形の時系列データ等から洪水時の河床変動を推定し、流量、水位等の水理量を適切に算定することが求められている¹²⁾¹³⁾。

これまでの河床変動解析は、洪水後に測られた河床高を再現する解析が中心課題で、洪水時の時間変化との関係で、河床がどのように変化していくかについての検討はほとんど行われてこなかった。河口の問題に限らず河床変動の大きな河川では、洪水時の河床変動の推定は河川管理上の重要な課題である。洪水時の水面形には河床変化の情報が含まれており、水面形を用いた解析は河床変動を推定する有力な方法のひとつとなり得る。具体的には、観測水面形の時間変化を解とした平面二次元解析と河床変動解析から求まる河床高さの時間変化が、どの程度実現象を説明することが出来るかを検討し、洪水時の河床変動の新しい算定法に繋げるべきと考える。

本研究の目的は、実河川での洪水時の河床変動を合理

的に推定することを最終の目的として、まずは、藤堂ら¹⁴⁾によって行われた移動床実験結果である交互砂州の発達・消滅を伴う水面形と河床高の時系列データを用い、水面データを解とする非定常二次元流・河床変動解析から交互砂州の波形の変化過程、平均河床高の時間変化、流量ハイドログラフについて解析し、非定常流れ下の河床変動の解析法がどの程度実験結果を説明できるものであるかを明らかにする。

2. 水面形時系列データに基づく河床変動解析

非定常流下の交互砂州の変形過程の研究について、渡邊ら¹⁵⁾、桑村・渡邊¹⁶⁾、渡邊¹⁷⁾は、水路実験で詳細な検討を行い、実験と弱非線形解析により砂州の形成に及ぼす流れの履歴の影響を明らかにしている。藤堂ら¹⁴⁾¹⁸⁾は、先鋭なハイドログラフの流れが実験水路を下流した時、交互砂州の形成、消滅を伴う河床変動について実験と解析により検討している。

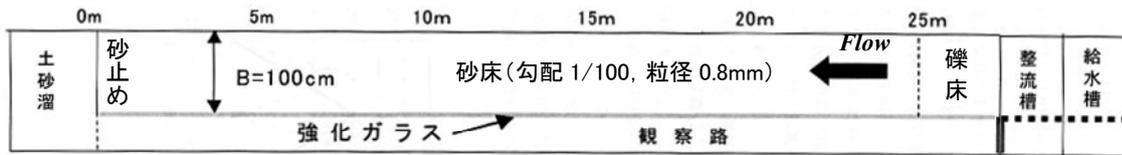


図-2 移動床直線水路 (平面図)

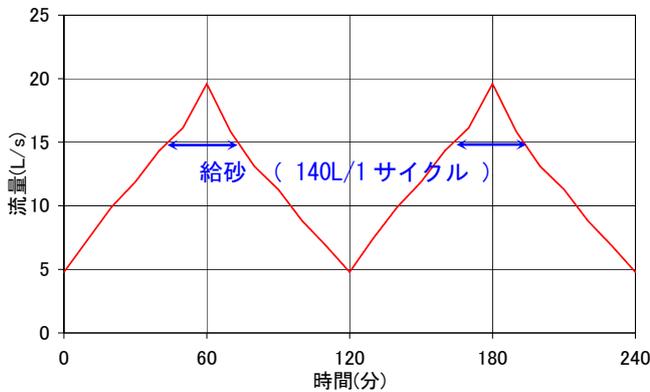


図-3 上流端流量ハイドログラフと給砂状況

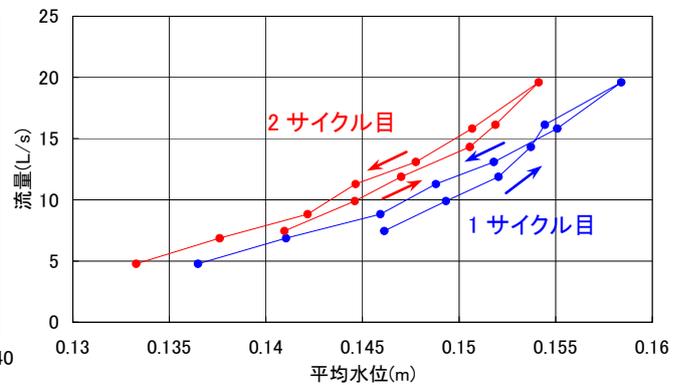


図-4 平均水位-流量曲線

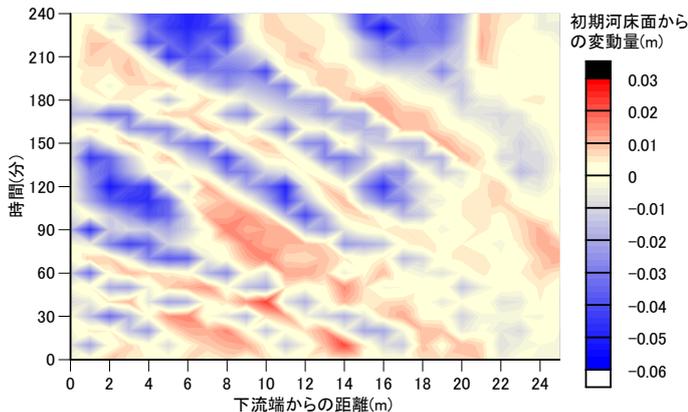


図-5 左岸河床高縦断分布の時間変化

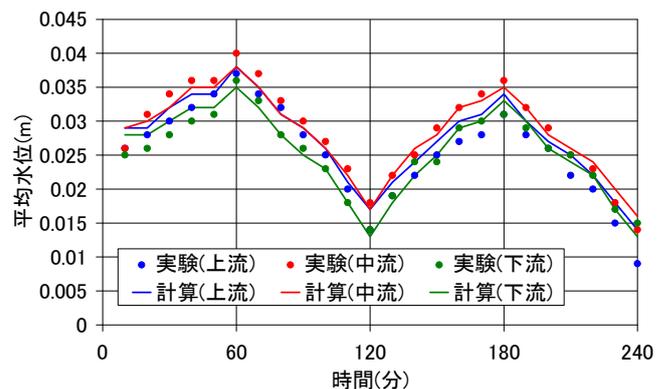


図-6 水路上・中・下流の平均水位ハイドログラフ

洪水時の流砂量が動的にほぼバランスしている河床変動の小さな緩流河川においては、洪水時の水面形の時間変化と非定常二次元流解析から、流量ハイドログラフ等が精度良く算出できることがわかっている²⁾。一方、流砂量が平衡状態に近く、河床変動が大きい河道では、洪水時の水面形は、河床面の時空間的な変化の影響を受けている。このため、観測水面形の時系列データとほぼ一致するように行った非定常浅水流・河床変動解析によって、流量ハイドログラフと共に河床形状の時間変化が流れと河床変動解析の精度内で推定できると考えられる。図-1に福岡・渡邊らの観測水面形による流量ハイドログラフの算定法²⁾を河床変動の推算を含めて拡張した解析フローを示す。解析上の境界条件(計算メッシュの上流端と下流端)は上下流端の観測点の水位ハイドログラフを再現するように与え、その他の観測点の水位ハイドログラフは抵抗分布の調整によって再現する²⁾。このとき、計算される流量ハイドログラフは全体的に流量の観測値

を表現するように留意する(著者らはこのような役割をもつ流量観測値を参考値と呼んでいる)²⁾。河床変動解析が必要となる場合、この抵抗分布の調整による河床せん断力の変化は、流れの抵抗を変化させるだけでなく、流砂量分布も変化させるため、河床形態を変化させることによる流れの抵抗の変化も生じさせる。このように、水面形から河床形状の時間変化を求める解析には複雑なシステムを有する。本論文では、抵抗係数は時間的に一定値を与える。解析手法の妥当性は、水面形について実験値を再現し、実験流量ハイドログラフの実験値を全体的に再現できる粗度係数を決定できるかどうかと、その時計算された河床形状が実験値をどの程度再現しているかにおいて議論される。なお、図中の()は現地河道の場合を示している。また、※で示した流砂に関する上流端境界条件は洪水時の計算においては河床高が変化しない断面から計算することになるが、本論文では、河床高の実験値となるように与えている。

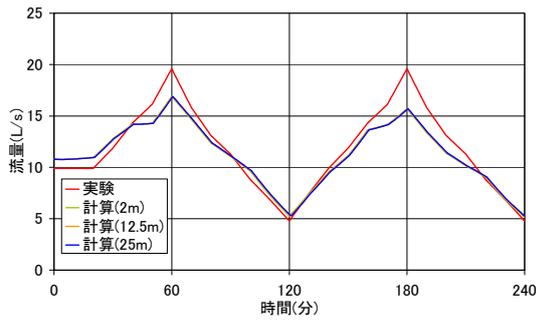


図-7 流量ハイドログラフ

本研究では、流れの基礎方程式には、デカルト座標系における非定常二次元浅水流方程式を用いた。河床変動計算は従来の慣用的方法を用いた。流速と水深評価点はスタガードに配置した。流砂量式には芦田・道上式¹⁹⁾、河床横断勾配による流砂量は長谷川の式²⁰⁾により求めた。底面流速は、Engelundの式 ($N_*=7$)²¹⁾を応用した西本らの方法²²⁾により求めた。

3. 非定常移動床実験¹⁾の概要及び計算条件

(1) 実験方法・条件及び結果

対象とする藤堂らの実験¹⁴⁾の概要を以下に示す。移動床実験水路は、図-2に示すように、水路延長25m、幅1m、河床勾配1/100であり、左岸はガラス張りとなっている。水路上流におけるバルブ制御型流量計により、図-3に示すようなピーク流量20L/s、最小流量5L/s、通水時間120分のほぼ三角波形の流量ハイドログラフが2サイクル与えられた。また、通水40～80分後と160～200分後には上流端で各合計140L(=6.0×10⁵m³/s)の給砂が行われている。河床材料は、 $d=0.8\text{mm}$ 、比重2.65の一樣砂である。流量ハイドログラフの1サイクル毎の下流端の流砂量が計測された。

通水初期の河床には波長6m程度の交互砂州が発生していた。水位と河床高の縦断分布の時間変化は、左岸側壁ガラス面に沿って縦断1m間隔、10分毎に同時計測された。また、同条件の実験を再度行い、通水しながら移動する砂州の最深河床位置を含む断面において、水位と河床高の横断分布を計測した。水位・河床高の縦断分布の時間変化は強化ガラス面に貼り付けたスケールにより詳細に求められている。

図-4に水路全体の平均水位と流量の関係を示す。固定床実験や河床変動の大きくない緩流河川の場合⁴⁵⁾とは異なり、同じ水位に対して増水期より減水期の方が流量が大きくなる。これは、水路における平均河床の著しい低下のためである。図-5は左岸際の河床高の縦断分布の時間変化である。赤色で示す砂州の峰から峰までを砂州の波長と定義すると、砂州の波長は増水期に大きくなり、

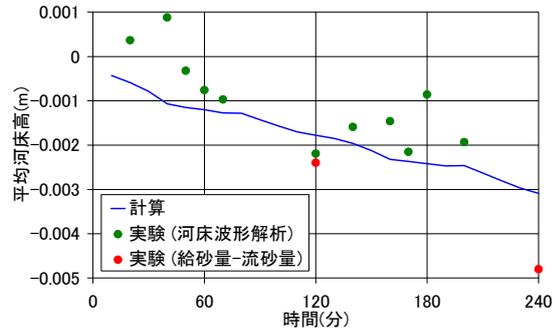


図-8 平均河床高時間変化

1サイクル目より2サイクル目のほうが大きくなっていることがわかる。一方、減水期には深掘れが進行している。これは滞筋に流れが集中するためである。

(2) 計算条件

計算条件は、前述の移動床水路に対して、 x 軸を流下方向、 y 軸を横断方向として $dx=12.5\text{cm}$ 、 $dy=5\text{cm}$ 、 $dt=0.02$ 秒とした。 $dx=12.5\text{cm}$ は水路延長200分割、砂州波長48～96分割にあたる。

上下流の流砂量がバランスしていないことによる河床変動量の時間変化を評価するため計算領域は実験水路と同じ長さとし、砂州発生のための擾乱として、上流端から50cmの右岸側岸に1メッシュの凸部を設けている。実験の通水10分後の砂州形状と同等となるまで、計算上の予備通水を行い、初期条件の同期を行った。

給砂量は、上流境界条件に実験値を与えると上流端付近の河床形状が実験を再現できなかったため、上流端の計算河床高の時間変化が実験値とほぼ一致するように与えた。

計測された水面形全体を再現し、流量ハイドログラフが概ね実験値と一致するように、上下流端の水位境界条件と粗度係数 ($n=0.026$) を設定した。

4. 実験・数値計算結果の考察

図-6は、上流端から0～5m、6～19m、20～25mを上流・中流・下流区間として各区間の平均水位ハイドログラフを示したものである。ここで、平均水位は初期河床高を基準としている。下流区間では、下流端の支配断面による低下背水のため、中流区間と比べて平均水位ハイドログラフは若干低くなっている。また、上流端からの給砂が十分でなく、上流区間では特に2サイクル目において河床低下に伴い水位が低下している。解析結果は計測された水面形を概ね再現していることが確認できる。

図-7は、河床変動の時間変化を含む流量ハイドログラフの実験値と計算値の比較を示している。計算における各断面の流量ハイドログラフは縦断方向にほとんど変化

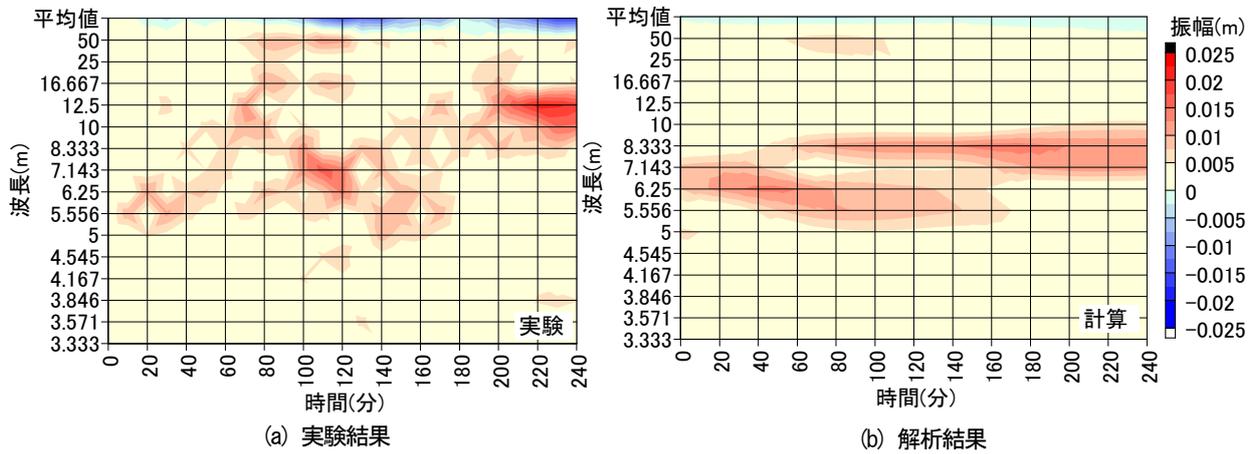


図-9 砂州波長・振幅の比較

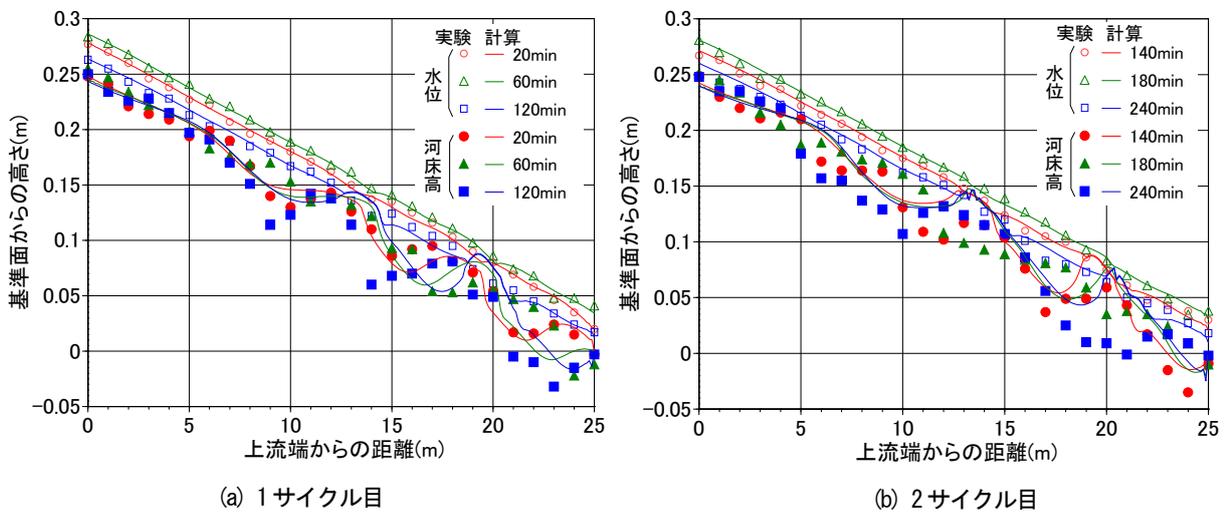


図-10 水位・河床高縦断分布の比較

せず、先鋭な流量ヒドログラフが下流に伝わっている。計算流量ヒドログラフのピークは実験と比べるとやや小さい。これは、実験流量ヒドログラフは、水路の越流堰(図-2の給水槽)で計測されたものであるため、流量ヒドログラフは整流槽で減衰していたためと考えられる。このため、本論文では計算においては、河床変動量を含む実験の先鋭な流量ヒドログラフを概ね再現できていると考え、以下河床変動の解析結果について議論する。図-8は、実験の河床高分布及び上流給砂量と1サイクル毎に下流端で計測された流砂量から評価した平均河床高の時間変化の実験結果と、計算結果を示している。河床高の測定点が少ないために実験の平均河床高はばらばらであるが、上流端の給砂量と下流端の流砂量の差から求まる平均河床高と計算結果を比べると、計算結果の全体的な河床低下量は実験と比べると小さい。後述するように、計算の砂州の移動速度が実験に比べて小さいことから、本解析では実験に比べて流砂量が小さめに見積もられていると考えられる。

図-9は、水路全体における砂州の波長と波高の時間変

化を評価するために、実験と計算の左岸際の河床高縦断分布をフーリエ解析により評価したものである。1サイクル目の増水期に6m前後の交互砂州が発達し、1サイクル目の減水期から2サイクル目増水期にそれより長い波長が混在し、2サイクル目の減水期では長い波長の砂州のみとなる状況が実験・解析とも表れている。水面形の変化は、交互砂州の波形の変化による水路河床面の形状抵抗の変化の影響も含んでいるため、水面形の時間変化を追随するように流れと河床変動を計算すれば、このような砂州などの特徴的な河床形状の時間変化特性をある程度説明できるようになると考えられる。図-10は流量ヒドログラフの各サイクルにおける増水期、ピーク付近、減水期にあたる時間に左岸で計測された水位・河床高縦断分布である。交互砂州の波高を平均河床高に対する峰部とその直上流の谷部の差と考えると、波高は上流からの距離が10m以下で小さく、10m以上で大きくなっている。計算結果は、このような砂州の波高の縦断的变化と水面に対する砂州の峰部の高さは実験結果と概ね一致している。一方、水面に対する砂州の谷部の高さ

(深掘れ部の洗掘深)と砂州の移動速度についてはいずれも実験結果よりも小さい。これらはより局所的な現象であり、河床付近の流速や流砂量の評価法によって決まるため、流れと河床変動解析モデルの精度に依存すると考えられる。今後は多くの実河川における洪水流と河床変動に適用し、上述の実験水路で見られた課題がどの程度重要であるかを明らかにする必要がある。

6. 結論と今後の課題

移動床直線水路に2サイクルの流量ハイドログラフを与え発生・変形する交互砂州の非定常実験について、観測された水面形時系列データに基づく非定常二次元流・河床変動解析を行い、形状特性の時間変化、流量ハイドログラフ、平均河床高の時間変化を評価し、以下の結論を得た。

測定された水面形の時間変化を解とする非定常二次元流・河床変動解析は、流量ハイドログラフとともに交互砂州の河床の峰部の高さや波長の縦断変化を概ね把握することができる。しかし、本検討結果の範囲では、解析結果は実験結果に比べて砂州の深掘れ部の深さや移動速度を小さめに見積もられる。解析対象に用いた交互砂州の実験値は、先鋭な洪水ハイドログラフの下で形成、変形されており、時空間的に測定することの難しい河床データの測定精度とともに、このような流れの下で用いられた流砂モデルの適用性についての議論も必要と考えている。

現地河道の河床変動に対しては、まずは、洪水期間中に時間的に変化する断面平均河床高の縦断変化とそのときの流量ハイドログラフを必要な精度で求め得ることが基本的に重要と考える。本解析法により、水面形の時間変化が計測されていれば、これを解とする非定常二次元流・河床変動解析から流量ハイドログラフと共に河床高の平均的な挙動を推定できると考えられるが、今後多くの河川で検討し、算定精度を上げるとともに、実河川の河床変動解析についても用いた方法の適用限界を明確にしていくことが必要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：招待論文，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。
- 2) 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，土木学会論文集，第761号/II-67，pp.45-56，2004。
- 3) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 4) 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月洪水を例として—，水工学論文集，第49巻(1)，pp.625-630，2005。
- 5) 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。
- 6) 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—，土木学会論文集，pp. 2007。
- 7) Fukuoka,S., Abe,T., and Tsukamoto,Y., Calculation method of inundation discharge hydrograph from the temporal changes in water surface profile due to levee breach, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol. VIII, 2008.
- 8) 宇民正，上野鉄男，招待論文，写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，No.503/II-29，pp.1-17，1994。
- 9) 竹林洋史，江頭進治，金梅生，佐々木忠志，洪水時における河口砂州上流域の水位変動特性，応用力学論文集，Vol. 9，pp.997-1006，2006。
- 10) 船橋昇治，渡辺茂，福岡捷二：斐伊川河口部における水位上昇の原因とその発生メカニズムに関する考察，水工学論文集，第51巻，pp.1003-1008，2007。
- 11) 塚本洋祐，川口広司，福岡捷二：洪水流による常願寺川河口の河床変動高，第61回土木学会年次学術講演会講演概要集，II-163，pp.321-322，2006。
- 12) 川口広司，福岡捷二，安部友則：常願寺川河口部における洪水中河床変動量の推算と河口部計画の改善策，河川技術論文集第12巻，pp.79-84，2006。
- 13) 福岡捷二，特別講演，河川整備基本方針から見えてくる技術課題，第16回河川講習会（東京，大阪），（社）建設コンサルタント協会，2007。
- 14) 藤堂正樹，福岡捷二：先鋭な洪水ハイドログラフの流下に伴う水位と砂州河床高の時間変化特性，水工学論文集，第48巻，pp.1015-1020，2004。
- 15) 渡邊康玄，佐藤耕治，大山史晃：非定常の下での砂州形成実験，水工学論文集，第46巻，pp.725-730，2002。
- 16) 桑村貴志，渡邊康玄：幅広水路における非定常流下での砂州形成実験，水工学論文集，第47巻，pp.725-730，2003。
- 17) 渡邊康玄：モード干渉を考慮した砂州のモード減少過程，水工学論文集，第50巻，pp.967-972，2006。
- 18) 藤堂正樹，福岡捷二，浜口憲一郎：断面の急変する急流河川に先鋭な流量ハイドログラフが流下した場合の水理現象，河川技術論文集，Vol9，pp.219-224，2003。
- 19) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第266号，pp.59-69，1972。
- 20) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食式に関する研究，土木学会論文報告集，第316号，pp.37-50，1981。
- 21) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, *Journal of hydraulics division, Proc. of ASCE*, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 22) 西本直史，清水康行，青木敬三，流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算，土木学会論文集，No.456/II-21，pp.11-20，1992。

(2008. 9. 30受付)