

集中豪雨等による洪水発生形態の変化が河床抵抗及び治水安全度にもたらす影響と対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、赤堀良介、永多朋紀

【要旨】

出水時における河床形態の変遷は、河道内の流れに対する形状抵抗を大きく変動させ、水位の変動に大きな影響を与える。そのため、河床形態の変遷を把握することは河川防災上の観点から非常に重要である。特に近年、ゲリラ的集中豪雨により大規模な洪水災害が頻発しており、様々な流出パターンに応じた河床形態の変遷およびそれに伴う形状抵抗の変動を把握することが重要な課題となる。しかしながら、洪水時に河床の標高情報を空間的に把握することは困難を伴い、これまでの観測例では浮体や船体に取り付けた音響測深機による縦断的な1次元形状の把握などに限られていた。水面下の地形に対する面的計測法としては、マルチビームソナーを適用した高解像度の測量が普及しつつあるが、現状では有人による操船が一般的である上に観測機器が非常に高価であり、出水時における運用は安全面でもコスト面でも大きなリスクを伴う。本研究では、昨年度、市販の魚群探知機を応用し、小型の音響測深システムをラジコンボート上に構築することで、安価で低リスクの洪水時河床形態観測手法を提案するとともに、留萌川河口部の河床を対象にその有効性を確認した。今年度は、同河川を対象とし、本研究で提案した測深システムにより、春期の融雪出水期間と夏期および秋期出水期間の河床形態の変遷を追跡した。これにより、留萌川下流部を例として、融雪出水と夏期および秋期出水パターンがもたらす河床変動への影響を検討した。

キーワード：河床波、現地観測、音響測深システム、GPS、GIS

1. はじめに

出水時に発生する小規模河床形態は、河道内の流れに対する形状抵抗の支配的要因となり、水位の上昇に大きな影響を与える。そのため、河床形態の変遷を把握することは河川防災上の観点から非常に重要である。特に近年、ゲリラ的集中豪雨により大規模な洪水災害が頻発しており、様々な流出パターンに応じた河床形態の変遷およびそれに伴う形状抵抗の変動を把握することが重要な課題となる。

従来、河川防災上の重要な課題として出水時の河床形態の変遷を把握する試みが継続的に行われてきた¹⁾。近年ではマルチビームソナー等の高度な面的観測手法を用いた河床形態の検討例も見られるが²⁾、経済的、人的リスクへの対応が困難なことから、洪水時の適用には至っていない。著者らは、昨年度、市販の魚群探知機を応用した音響測深システムをRCボート上に構築することで、安価で低リスクの河床形態観測手法を提案しており、前報において留萌川河口部を対象に観測を行い、マルチビームソナーによる河床形状観測の結果と比較した上でその有効性

を確認している³⁾。今年度は昨年度と同様に留萌川を対象とし、提案した測深システムにより、春期の融雪出水期間と秋期出水期間の河床形態の変遷を追跡した。融雪期間に関しては流量が増加している期間に観測を実施しており、極端な高流速ではないものの、実際に出水の状態にある河川における観測に成功している。また秋期に関しては、出水の前後における観測を実施し、1出水イベントを挟んだ小規模河床形態の変遷を確認した。これらの結果により、融雪出水と夏期および秋期出水パターンがもたらす河床変動への影響を、留萌川下流部を例として検討した。

2. 調査領域および調査期間

調査対象河川は、北海道内の一級河川である留萌川である(図-1)。本研究での調査領域は、日本海に面した留萌川河口付近の留萌橋下流からKP-0.2の150mほどの区間とした(図-2)。この領域を含んだ河口部では、2011年4月より先行して留萌開発建設部によりマルチビーム測量が実施されており、非常

に詳細な河床形状観測結果が蓄積されつつある。また、濁度や水位といったデータの観測も留萌開発建設部により連続的に実施されており、本研究では筆者らの観測によるデータと合わせて利用した。図-2における砂面計および水位計データの観測は留萌開発建設部によるもの、濁度計データは寒地土木研究所によるものである。

調査日は2011年の12月8日、2012年の5月2日、10月31日、11月16日の計4日である。留萌河口観測所における流量の変化を図-3に示し、観測日を破線で、融雪期以外の出水が見られた日を赤い矢印で強調した。なお、2011年の12月8日における観測の詳細は、既報に示したものである³⁾。期間中、2012年4月から5月初旬に掛けての融雪出水と、8月後半から11月初旬に掛けての散発的な夏期と秋期の出水が発生した。2012年に関しては、留萌川河口観測所に置けるピーク水位は、5月の融雪出水と夏期・秋期出水において同程度であったが、前者の発生継続期間が10日間前後であるのに対し、後者は2日間ほどであった。2011年12月の結果を結氷前の河床地形とし、そこから融雪出水を経た形状を2012年5月の2日に、夏期の出水を経た状況を10月31日に、さらに11月初旬の秋期の出水を経た形状を11月16日に観測した。また5月2日の融雪出水中の観測では、同じ測定条件のもと同日中に2回の観測を行い、出水期間中の河床変動状況の確認を行った。

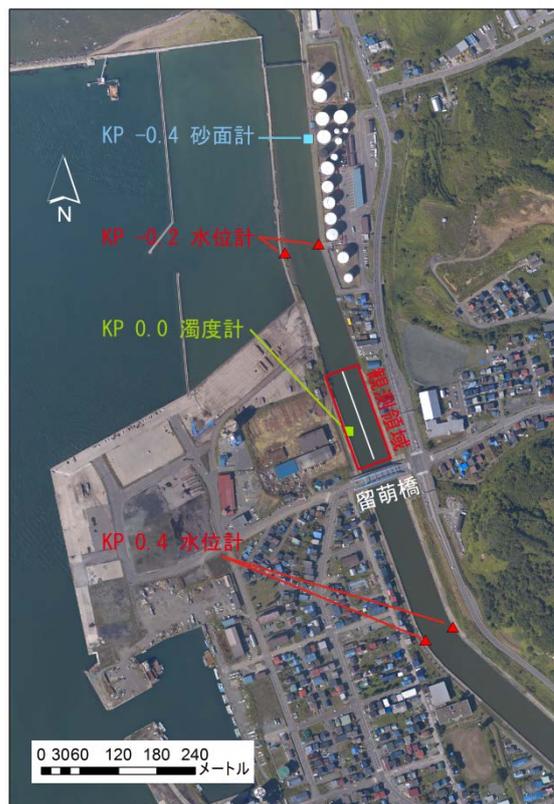


図-2 留萌川河口付近における調査領域. 赤枠部分が提案手法による観測領域を示す. また青点が砂面計設置箇所, 赤点が水位計設置箇所, 緑点が濁度計設置箇所を示す. なお, 砂面計と水位計データは留萌開発建設部による観測に基づき, 濁度計データは寒地土木研究所実施の観測データに基づく



図-1 留萌川河口部位置

3. 観測手法

3.1 観測機器

本研究では寒地土木研究所所有のエアポート型のラジコンボート上に魚群探知機を中心とした音響測深システムを構築し、河床形状の観測を行った。図-4にシステム構成の概要を示す³⁾。河床形状観測の機器構成は船内に設置された市販の魚群探知機（Lowrance 製 HDS-8）を中心としており、HDS-8の端子から、船底に取り付ける音響測深用発振器（50/200kHz スキマー型振動子）、簡易的な可視化ソナーの Structure Scan システム、観測情報記録用のデータロガー（ハイドロシステム製）が接続されている。データロガーには、観測中の測深データと GPS 時刻等が記録される。河床形状の空間的特徴を精度良く取得することを目的に、RTK-GPS システムを併用した（Nikon 製 Trimble5700）。RTK-GPS では、地上に設置した基地局とボート上に設置した移動局が

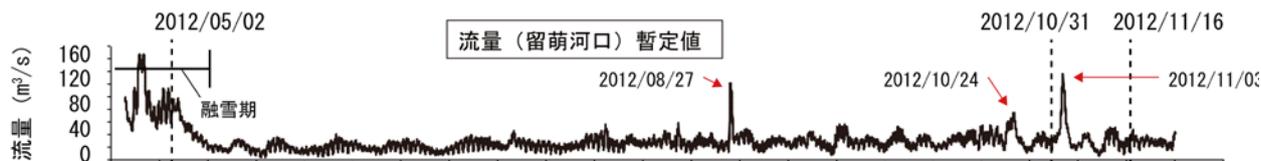


図-3 留萌河口観測所における調査期間中の流量（暫定値）. 破線は観測を行った日，赤い矢印は出水が見られた日を示す

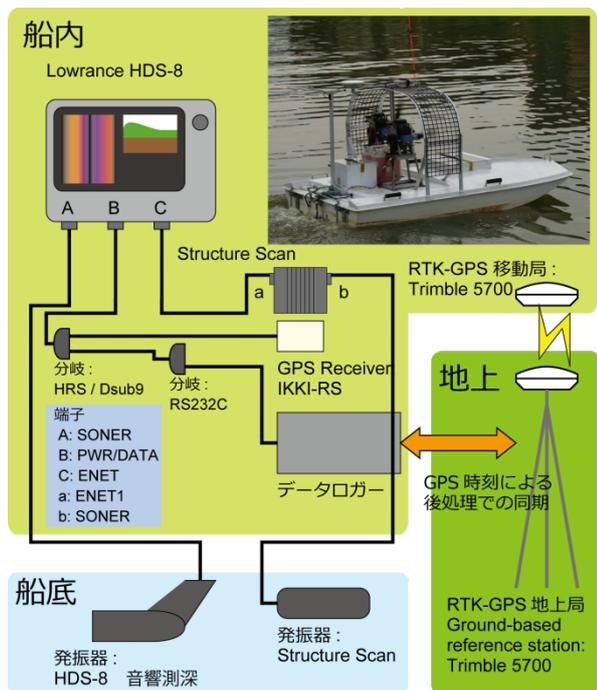


図-4 河床形状観測システム構成概略図

通信を行うことで、移動局の基準局に対する相対的な位置情報を精度良く取得する。その際に、既知の位置情報を有する地点を基準点とすることで（本研究では留萌川左岸 KP0.2 の距離標を基準点とした）、取得した相対位置からボートの絶対的な位置情報を得るものである。本システムでは HDS-8 を中心とした測深システムと RTK-GPS システムは直接的な接続を行ってはいないが、後処理の際にデータロガーに蓄積された HDS-8 の測深情報と RTK-GPS 側の位置情報を両者の GPS 時刻によって同期を取ることによって、測深結果に正確な位置情報を付与している。また本研究では出水時の状況下で安全かつ高速な観測を可能とすることを目的としてシステムの構築を行ったため、エアボート型の船体を選定した^{4),5)}。

3. 2 観測手順

HDS-8 に搭載された測深システムはシングルビームとして測深情報の取得を行うため、直線上にボー

トを移動させて観測を行った場合には水深情報が 1 次的に並んだ結果しか得られない。このため、本研究では RC ボートを複数回縦断方向に往復させることで、走査的に深度情報を取得し、面的な河床形状の把握を試みた。この際、縦断方向の距離は 150m 程度とし、横断方向の測線数は 37 本程度とした。

このように得られた水深の情報を、RTK-GPS によって得られた水平方向と水位の情報で処理することで、河床の標高を平面的に取得した。ここで河床標高は、「RTK-GPS から得られた GPS アンテナ標高値 - (HDS-8 による測深結果 + 喫水から発振器までの距離 + GPS アンテナから喫水までの高さ)」となる。次に、GIS ソフトウェア (ESRI 社 ArcGIS10) に含まれる空間情報処理の機能を用いて観測点間を補間することでラスタデータを作成し、河床形状のコンター図を作画した。なお、この際に静水域における予備観測の結果から、提案する測深システムによる標高の絶対値として、得られた結果に対して 22cm のマイナス方向の補正を行ったものを用いた。

4. 観測結果

4. 1 河床形状

留萌開発建設部によるマルチビーム測量と本研究で提案するシステムによる観測の結果を比較するため、双方の 2011 年 12 月の観測と 2012 年 5 月の観測結果からその間の河床変動量を計算し、コンター図としたものを、それぞれ図-5 と図-6 に示す。マルチビーム観測は 2011 年 12 月 14 日と 2012 年 5 月 21 日-25 日における観測結果の差分であるのに対し、提案するシステムの結果は 2011 年 12 月 8 日と 2012 年 5 月 2 日における観測結果の差分である事から、両者の期間が異なり正確な比較は行えないものの、図-5 と図-6 の比較からは、堆積および洗掘の傾向の空間的分布が、両者で一致している事がわかる。以上より提案手法の有効性が確認されたとし、上記手法による河床変動観測結果を観測期間にわたり検討

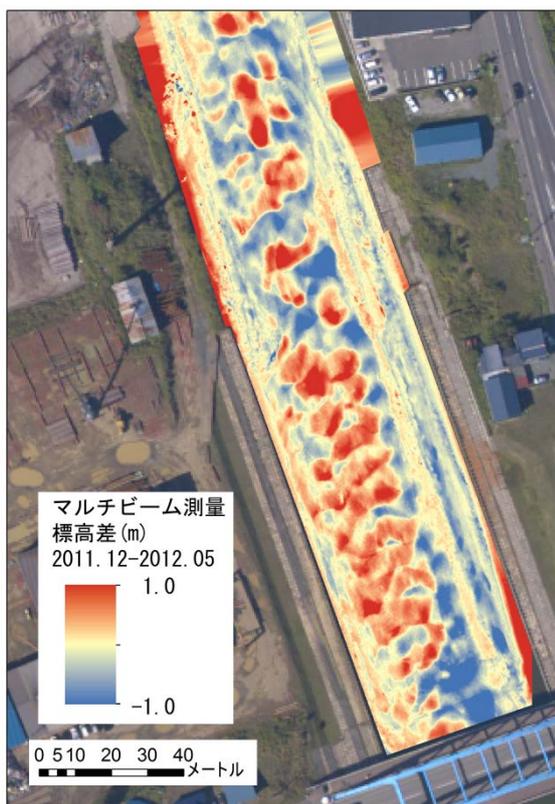


図-5 留萌開発建設部によるマルチビーム測量により得られた2012年5月と2011年12月の河床標高の差をコンター図で示したもの

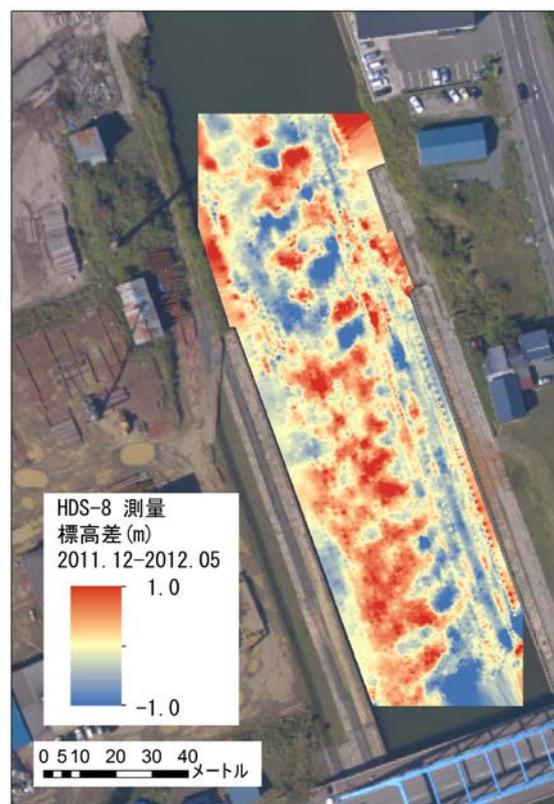


図-6 HDS-8 を用いた本提案手法により得られた2012年5月と2011年12月の河床標高の差をコンター図で示したもの

する。図-2 に示した観測領域内の直線に沿って河床標高を抽出したものが図-7 である。また図-8 から図-11 は先に示した手法で得られた標高情報を用いて、GIS 上で陰影図を作成した結果である。河床波の波長や波高が、定性的に表現されている。またこれらの図から見た変遷としては、まず2011年12月の時点での河床波が一番視認しやすく、波長も長く波高による陰影も明瞭である。2012年5月の融雪期間に関しては、河床波の空間的スケールは前年12月のものより若干小さくなっているように見受けられるが、5月2日午前と午後の観測結果の比較から、この河床形態が下流方向に移動している状況が観察される(図-7)、河床材料の輸送が活発に行われている状況である事が確認出来る。一方、2012年8月27日や10月24日前後の夏期、秋期の出水を経た10月31日の観測結果では、河床波による陰影がほとんど見られない状況となっており、何らかの理由によりこの間に河床が平坦化した状況が推測される。この傾向は、11月3日前後の出水を経た11月16日の観測結果においても同様であり、これら夏期と秋期の出水が河床波の発達をもたらさなかったと推察される。

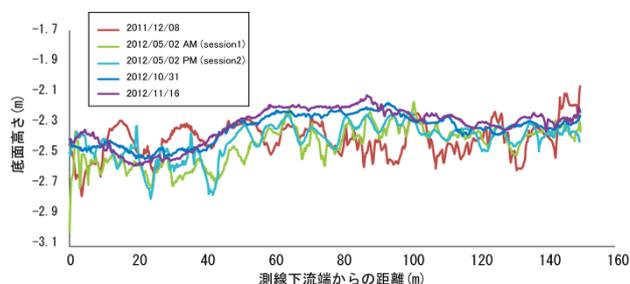


図-7 調査領域中央部での河床高の変遷

4. 1 出水パターンによる河床形態の変遷

このような河床波の変遷に関しその要因を探るため、連続観測された砂面高、水位、濁度のデータを基に検討を行う。用いたデータは、前述の観測点に示したものであり(図-2)、KP-0.4 右岸の砂面計、KP-0.2 および KP0.4 の左右岸に計4箇所設置された水位計、KP0.0 付近の左岸に設置された濁度計によって観測された時系列データである。図-12 はこれらデータから整理された各種の水理量を時系列として示したものとなる。上から、留萌河口観測所における流量の暫定値(図-3)、上記水位計の各時刻での



図-8 2011年12月8日における本提案手法で観測された河床形状を示す陰影図

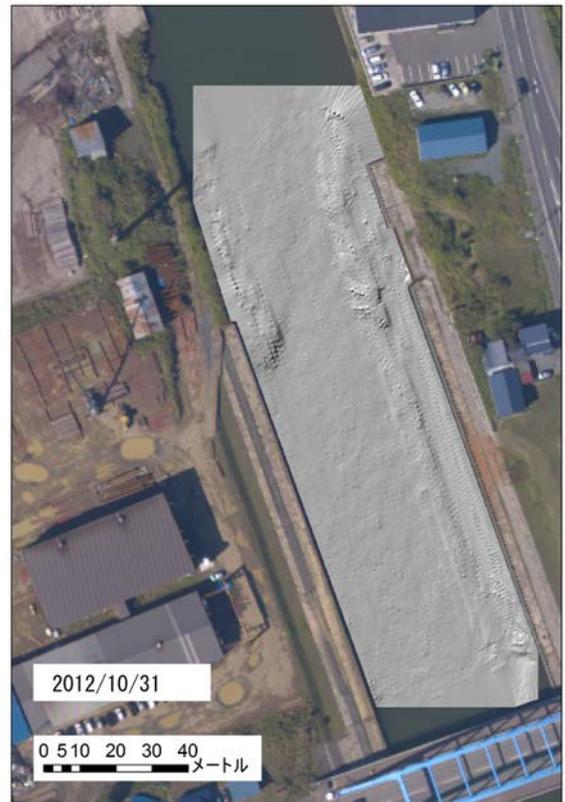


図-10 2012年10月31日における本提案手法で観測された河床形状を示す陰影図



図-9 2012年5月2日午後における本提案手法で観測された河床形状を示す陰影図



図-11 2012年11月16日における本提案手法で観測された河床形状を示す陰影図

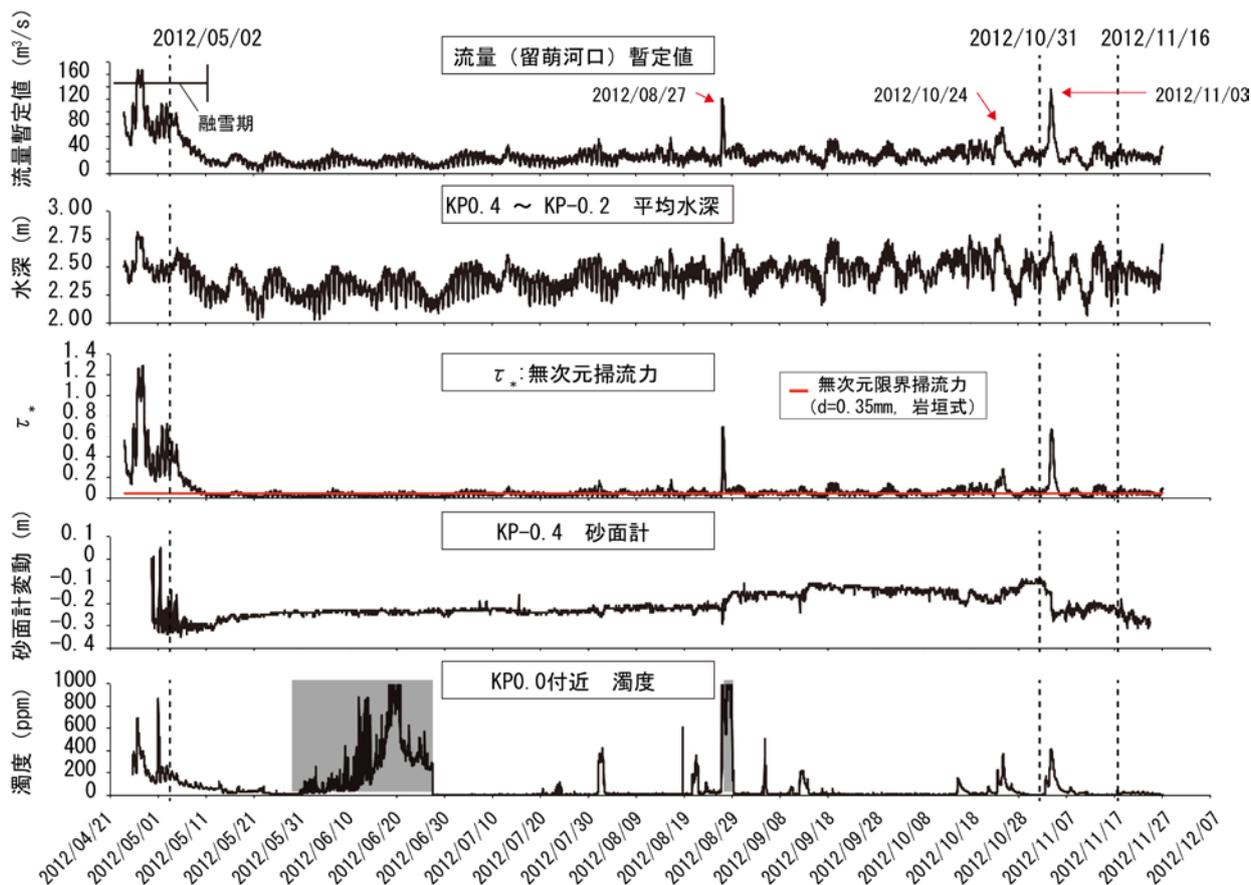


図-12 観測領域における流量，水深，無次元掃流力，砂面計計測値，濁度の変遷。流量は暫定値，水深は KP0.4 から KP0.2 の 4 点の平均値，無次元掃流力は本研究での算定値，砂面計は KP-0.4 での観測値，濁度は KP0.0 での観測値である。

平均から得られた観測領域の平均水深、平均粒径を 0.35mm とした場合の無次元掃流力、砂面計の観測値、濁度計の観測値である。ここで、無次元掃流力を算出する際の手順であるが、まず KP-0.2 および KP0.4 の左右岸に設置された 4 点の水位計の値を時刻ごとに平均する。次に GIS により算出した提案手法の河床標高の平均値をそこから減算し、観測領域内での平均的な水深を時系列として得る (図-12 内 2 段目)。次に河幅を 50m とし、図-12 内 1 段目の暫定流量を河幅と平均水深で除すことで平均流速 (V) を算出し、マンニングの粗度係数 (n) を 0.025 と仮定する事で、式(1)から観測領域の平均的なエネルギー勾配 (I_e) の時系列変化を求める。最後に、粒径を河口部における既往観測値の平均から $d=0.35\text{mm}$ と仮定し、式(2)から無次元掃流力を算出した。ここで R は径深、 h は水深、 s は砂の水中比重 (1.65) とする。図-12 中 3 段目の無次元掃流力の図中には、岩垣式より得た粒径 0.35mm に対する無次

元限界掃流力を赤い実線で示した。また図-12 中 5 段目の濁度の結果に関しては、濁度計に藻類が付着した事による異常値と推測される部分に関しては、グレーの網かけを行っている。

$$I_e = \left(\frac{Vn}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\tau_* = \frac{hI_e}{sd} \quad (2)$$

図-12 より、観測領域において粒径 0.35mm の土砂に対する無次元掃流力が明瞭に限界掃流力を超えているのが、4月から5月の融雪期、8月27日周辺、10月24日周辺、11月3日周辺に限られ、そのうち長期間継続的に掃流力が維持されているのが融雪期のみであることがわかる。図-12 中 4 段目の KP-0.4 における砂面計の計測値との比較を行うと、砂面計がある程度の振幅を有して大きく変動している時機

が融雪期に限られることが確認され、これらの結果から留萌川河口における 2012 年の河床波の発達が発達期に限られ、これは限界掃流力を超える状態が長期間維持された状況下で発生した事が推測される。上記の推測は、図-8 から図-11、および図-7 により既に示された結果とも傾向が一致することから、砂面計設置位置 (KP-0.4) と提案手法による観測領域 (KP0.0 周辺) では多少位置的に異なるものの、観測期間中の河床変動の傾向は、共通していたと考えられる。また、砂面計と濁度計の結果を比較すると、夏期と秋期の小規模な出水時に濁度が比較的高い時機が継続し、その際に砂面計が示す標高値が階段状に変動している状況が観察される。濁度の上昇が細粒土砂の活発な移動を示していると考え、この時機の河床の表面を形成している土砂に細粒分が多く含まれる事が推測され、図-10 と図-11 に示された河床の平坦化が、細粒土砂の沈降により生じていたと推察される。

以上より、2012 年の留萌川下流域における河床形態の変遷に関し、4 月から 5 月に掛けての融雪期には限界掃流力を超える掃流力が長期間継続し、その間に小規模河床形態すなわち河床波の発達が見られたことが観察された。一方で夏期と秋期の散発的な出水時には河床波を発達させるほどの掃流力の継続が見られず、細粒分のみが輸送され、それら粒子が沈降する事で河床が平坦化していったと推測される。

5. まとめ

本研究では、昨年度提案した小型の音響測深システムを留萌川河口部の河床を対象に適用し、2012年の河床形状の変遷に関して観測を行った。提案されたシステムは市販の魚群探知機、RCボート、RTK-GPSを組み合わせたものであり、比較的安価な構成で安全な観測が可能である。本研究では、このシステムを融雪期の出水期間中、および夏期、秋期の出水前後での観測に適用した。観測結果より、融雪期の出水において河床波の発達が観察され、夏期と秋期の散発的な出水を経て河床が平坦化していく状況が確認された。留萌開発建設部による水位や流量、砂面計の時系列データから掃流力と河床の変遷を推定すると、限界掃流力を超えた掃流力が継続的に作用した状況は融雪期のみと推測され、この間に河床波が発達している状況が確認された。また、2012年における夏期と秋期の出水では、上昇した掃流力が比較的短時間で収束することが確認された。このため、河床波は十分に発達せず、浮遊

砂として移動しやすい細粒分のみが活発に輸送され、これらが河床に沈降する事で平坦化を促した事が推測された。

本テーマの目的は、ゲリラ的集中豪雨等の大規模な洪水災害をも想定した様々な流出パターンに応じた河床形態の変遷およびそれに伴う形状抵抗の変動を把握することであり、本研究では、極端な高速流下ではないものの、ある程度の出水期の観測に成功しており、留萌川河口部における本年度の出水パターンを例として河床形態の変遷を捉える事が出来た。しかしながら、本年度はそれほど大きな出水が生じなかったため、今後は更に大きな出水時の河床形態の変遷を観測し、その特性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 木下良作：洪水時の砂床形態の変化，水理講演会論文集，第33巻，pp. 439-444，1989.
- 2) Akahori, R., Shimizu, Y.: Bedforms in the Kushiro River: wavenumber analysis of a high-resolution DEM obtained from a multi-beam survey, *Proceedings of the 7th IAHR Symposium on Rive, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.987-460, 2011.
- 3) 赤堀良介，平井康幸，近藤峰男：小型音響測深システムによる留萌川下流部河床形状の観測調査，河川技術論文集，第18巻，pp. 137-142，2012.
- 4) 木下良作：洪水河床音響調査用RC エアーボートの開発，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，1巻，pp. 215-220，1993.
- 6) 金高州吾，井出康郎，渡邊康玄：豊平川小規模出水時における河床波を用いた掃流砂観測，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，pp. 95-96，1995.

A STUDY ON TRANSFORMATION OF FLOOD CHARACTERISTICS RAISED BY CONCENTRATED DOWNPOUR

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : 2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi , AKAHORI Ryosuke ,
NAGATA Tomonori

Abstract : In this study, a brief bathymetric system, which was designed for observing under water topography, was applied to observe bedform evolution over three seasons (spring to fall) of 2012 near the river mouth of Rumoi River. The system consists of a RTK-GPS system and a commercially available fish finder, and it was installed on a radio-control air boat. The result shows that dunes were actively developed during the snow melting season of 2012. In contrast, bedform of Rumoi River changed to be flat during summer and fall seasons even though several high water events occurred during these seasons. According to estimated values of non-dimensional shear stress and observed values of turbidity in the target region , dunes were developed under the condition, in which the bottom shear stress continuously exceeded the critical shear stress, and not sufficiently formed when the duration time of the high water events were relatively short.

Key words : Bedform, Acoustic bathymetry, Field observation, GPS, GIS