

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

Observation of bedforms in the downstream reach of Rumoi River
by using a brief acoustic bathymetric system

赤堀 良介¹・平井 康幸²・近藤 峰男³

Ryosuke AKAHORI, Yasuyuki HIRAI, Mineo KONDO

¹ 正会員 Ph.D. 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

³ 非会員 株式会社 シン技術コンサル 河川・砂防部 (〒 003-0021 札幌市白石区栄通 2 丁目 8-30)

In this study, a brief bathymetric system which was designed for observing bedform evolution under flood conditions was proposed. 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 proposed system is able to be built at a very low price comparing to existing systems employing other professional acoustic bathymetric instruments or multi-beam bathymetric systems. Also, the system is expected to improve the safety of observation of bedforms under flood conditions by using a radio control platform. The proposed system was applied to observe the river bed topography in Rumoi River in Hokkaido, Japan. The result shows that the bed topography observed by the proposed system is qualitatively accurate, and the results of the wavenumber analysis of the observed bed elevation along the downstream direction shows good agreement with that by using the existing multi-beam survey data.

Key Words : *acoustic bathymetry, bedform, GPS, GIS*

1. はじめに

小規模河床形態は流路の有する形状抵抗の支配的要因であり、洪水時にはその形態を大きく変遷させることが知られている¹⁾。このような河床形状の変遷に由来する形状抵抗の変化は、現地河川における水位の変動に大きく影響を与えることから、洪水時における河床形態の変遷を把握することは防災上の理由から非常に重要である。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大局的な河床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²⁾、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、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の検討を行った。

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-2/0 の 300m 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。また河道の平面形状は直線的であり、河床形態の変遷に関して蛇行などに由来する複雑な流れの影響を受けにくいと考えられる。このため観測結果の河床地形を検討するにあたり、対象領域が有する研究遂行上の利点として、十分に詳細な初期状態の把握が可能であること、流量やハイドロといった基本的水理量以外に考慮すべき項目が少ないことなどが挙げられる。

調査期間は 2011 年の 9 月 29 日から 12 月 28 日までであり、この間に大規模な出水が生じた場合に(20mm/h 程度の降雨を出動の目安とした)観測のための出動を行う予定であった。実際には期間中には大きな出水が無かったため、9 月初旬に発生した出水後の状況確認



図-1 留萌川河口部位置



図-2 留萌川河口付近における調査領域

のために、10月21日と12月8日の2回に渡り観測を行った。留萌橋下流近傍に設置したADCPによる流速分布は、上げ潮時、下げ潮時ともに0.75m/sを下回っており、流況としては、どちらの観測日も平水状態であった。このうち、12月8日の観測に関しては、直後の12月14日に留萌開発建設部によるマルチビーム測量が行われており、提案する河床形状観測手法の精度の確認が可能であった。

3. 観測手法

(1) 観測機器

本研究では寒地土木研究所所有のエアーボ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-3にシステ

ム構成の概要を示す。システムは、主に河床形状観測用の機器類、測深箇所を正確に把握する為の高精度GPS機器類、また図中に示されていないが流況観測のためのADCP機器類により構成されている。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）、後述する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。HDS-8自体にもGPS機能は接続されており（IKKI-RSおよび本体内部蔵GPS）単体での位置情報の取得は可能であるが、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高精度GPSとの併用を行った。本研究ではこの目的に叶うGPSとして、RTK-GPSシステムを用いた（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。なお、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。類似した魚群探知機を用いた観測システムは海岸地形測深での実例が存在するが³⁾、本研究ではラジコンボートという積載量に制限のあるプラットフォームを用いることから、提案システムはさらに簡便な構成を取った。またRCボートにプリズムを搭載し、トータルステーションによる追尾から位置測定を行う構成⁴⁾と比較しても、機器構成は簡略化されていると考えられる。

Structure Scanシステムは、非常に簡便なダウン-サイドルック型のイメージングスキャナであり、455/800kHzの振動子を用いて水面下の状況を連続的に可視化するものである。本研究では河床地形の定性的把握を目的として設置した。

図-4は、観測時のRCボートの状況を示した図である。前述のように、本研究ではボートの形状としてエアーボート型のものを用いた。同型の船体は動力部分が水中に存在しないため、浮遊物によるスクリューの破損などの影響を受けにくい。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、エアーボート型の船体を選定した^{5) 6)}。

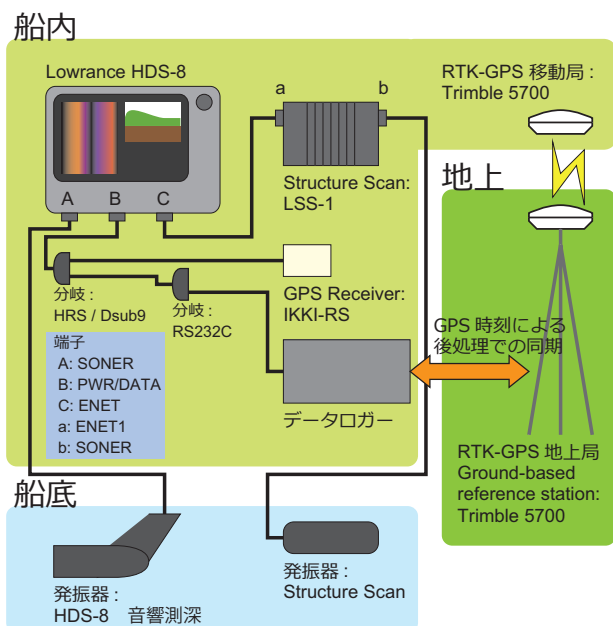


図-3 河床形状観測システム構成概略図

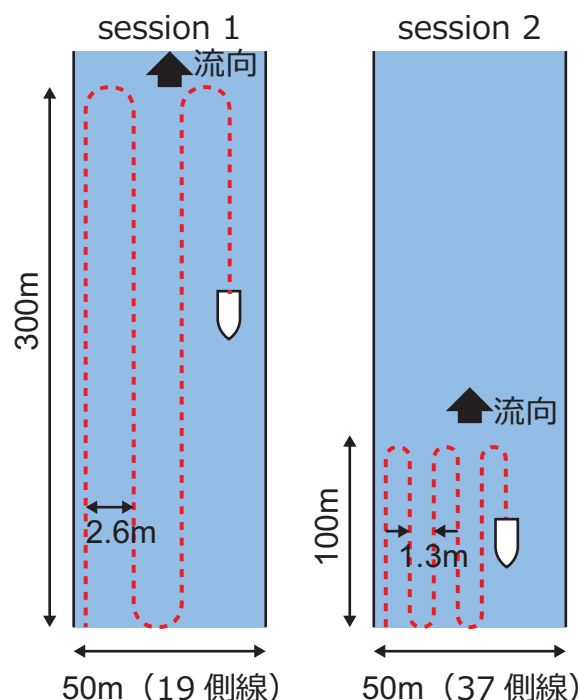


図-5 RC ボートによる走査の模式図

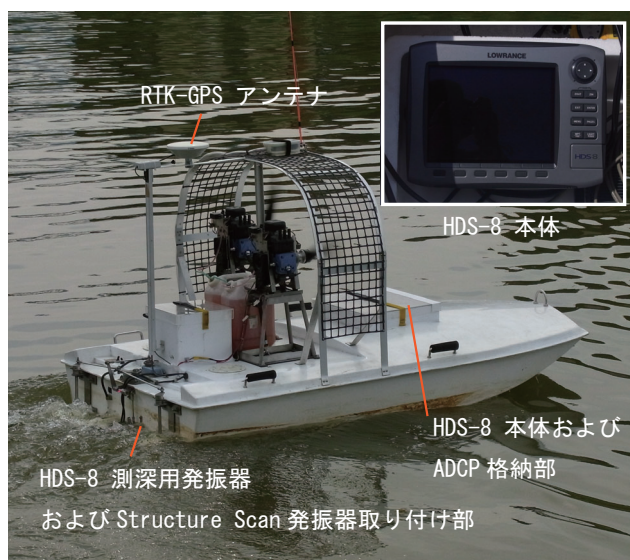


図-4 観測時の RC ボートの様子

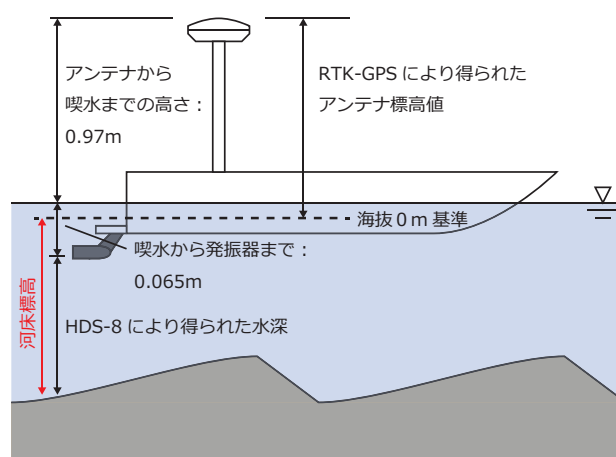


図-6 標高の算出

(2) 観測手順

HDS-8 に搭載された測深システムは基本的にシングルビームとして測深情報の取得を行うため、単純に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次元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、走査時の測線の粗密による観測結果の精度差を検討するため、1回の出動で2回の異なる走査方法を試みた。図-5は走査設定の違いによる測線の粗密差を示したものである。1回目の観測では（第1セッションとする）、縦断方向には観測領域全域（流下方向に300m）を網羅するが、側線の横断方向の数は比較的少なく、粗い測線の密度となっている。

一方で2回目の観測（第2セッションとする）では、縦断方向の距離は設定された調査領域の3分の1程度に抑制するものの、横断方向の測線数は1セット目の2倍程度とし、空間的な解像度を高めた。測定に要する時間は、どちらの場合も1時間から2時間程度であった。

このように走査的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（図-6）。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ーデータ（行と列で整理された格子

状データ)を作成し、河床形状のコンター図を作画した。なお、2011年12月8日の観測でHDS-8により得られた標高値を、同年12月14日に留萌開発建設部により行われたマルチビーム測量の結果と比較した場合に、全体にHDS-8による結果が30cmほど高い標高値を示した(この間に大規模な出水は生じていない)。両者ともに高精度なGPSにより絶対的な標高値を算出しているが、基準点として用いた標高が、本研究での測深システムの場合は左岸KP0.2の距離標によるもの、マルチビーム測量の場合は電子基準点によるものと、差異が存在する。現在のところその他複数の要因を含め、これらの差異が標高値の差を生じるという明確な因果関係を得ていない。本研究では、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便宜的に30cmのマイナス方向の補正を行ったものをを用いた。

4. 観測結果

(1) 河床形状

観測結果の概要に関して12月8日に行われた観測の第2セッション(横断方向の側線数が第1セッションより多い)の結果を示す。図-7はHDS-8により測定された標高値のプロットに対して、GISソフトウェアを用いて逆距離加重: Inverse Distance Weighted (IDW) 法を適用することで補間を行い、作成されたラスターデータ(メッシュサイズ: 0.2m)上に河床標高コンターを作画したものである。同様に、図-8は、ラスターデータとしてあらかじめ処理された12月14日のマルチビーム測量結果(メッシュサイズ: 0.2m)に対してGISソフトにより河床標高コンターを作画したものである。両者の差に関する二乗平均平方根の値は河道内の低水路部で $x_{RMS} = 0.078$ となった。また図-9は図-7に示された標高値を基に、GIS上で陰影図を作成した結果であり、図-10は図-8のラスターデータから陰影図を作画したものである。それぞれの結果をHDS-8によるものとマルチビーム測量によるもので比較を行うと、元のデータが有する空間的な測定間隔の違いから(HDS-8: 流下方向に1.9m程度×横断方向に1.3m程度、マルチビーム: 0.2m格子)、その詳細さ、明瞭さに関してマルチビームによる結果が優れていることが確認出来る。一方で、情報量に劣るHDS-8による観測においても、河床波と見られる地形の位置や傾向に関して十分に判読可能な結果を示していることが確認出来る。

(2) スペクトル解析による検討

留萌橋から流下方向に150mほどの仮想的な縦断測線を取り、12月8日のHDS-8による観測結果(2セッ

ション分)を補間して得た0.2mメッシュのラスターデータの各点、および12月14日のマルチビーム測量に対する0.2mメッシュのラスターデータの各点の結果から、測線近傍の点を抽出した。これらの抽出点の位置と標高を1次元的に並べることで、河床標高の1次元プロフィールを作成した。このデータに対して、横軸に測線最上流点からの距離を取り、縦軸に標高値を取ってプロットしたものが、図-11である。同様に留萌橋から80mほど下流の地点で仮想的な横断測線を取り、各ラスターデータの点から側線近傍の点における位置と標高を1次元データとして抽出した。こちらのデータに対して、横軸に左岸からの距離を取り、縦軸に標高値を取ってプロットしたものが、図-12である。HDS-8による測量では補間されたラスターデータの格子幅は0.2mではあるが、元となるデータの縦断方向のピッチは1.9m程度であり、マルチビーム測量の結果が0.2m幅で解像されていることと比較すると、補間されたデータの情報が少ないことは明らかである。しかしながら縦断的な標高プロフィールに関して図-11に示された範囲では、HDS-8による第1セッションの結果も、第2セッションの結果も、マルチビーム測量の結果から得られた標高に十分に追従していることが分かる。一方で図-12で示した横断方向の標高プロフィールに関しては、当然ながら空間解像度の違い(図-5中の測線間隔)が分布の精度に現れており、マルチビーム測量の結果が示す地形上のピークを、HDS-8による観測結果はどちらのセッション結果も十分に捉えられていない。

このような標高プロフィールの特性に関して定量的な評価を行うために、フーリエ変換によるスペクトル解析を試みた。解析の対象となった入力値は図-11と図-12に示されたものである。解析には、表計算ソフト(MS Excel)の高速フーリエ変換を用いた。図-11に対する結果を図-13に、図-12に対する結果を図-14に、それぞれ示す。図-13の結果からは、HDS-8の示す縦断方向の標高分布に対するスペクトルが、第1セッションの場合も第2セッションの場合も、マルチビーム測量の結果に対するものと良く一致しており、HDS-8による観測結果の波数情報が正確であることを示していると考えられる。一方で図-14に示す横断方向の標高分布に対するスペクトルに関しては、第2セッションから第1セッションへと空間的な解像度が低下するのに応じて、マルチビーム測量の結果に対するスペクトルから逸脱していくことが確認された。この結果から、河床形状の変化が縦断方向に卓越する状況下では、HDS-8による観測結果を元とした定量的検討は有効な結果を示し得るが、横断方向の形状変化に対して同様の手法を用いた場合、現状の走査手法では現象の特性を十分に反映できない可能性が示された。

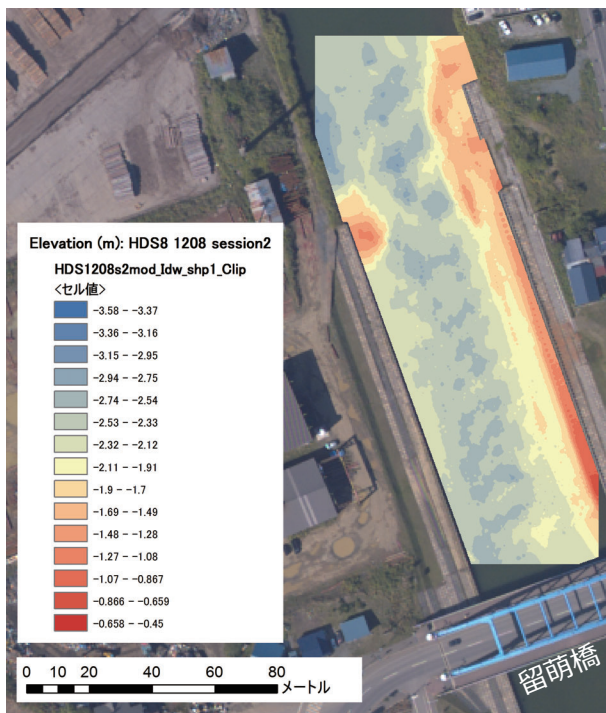


図-7 HDS-8 による観測結果（2011 年 12 月 8 日第 2 セッション：測線が横断方向に密に分布）を基に IDW 法を用いて補間することで得られた河床標高コンター

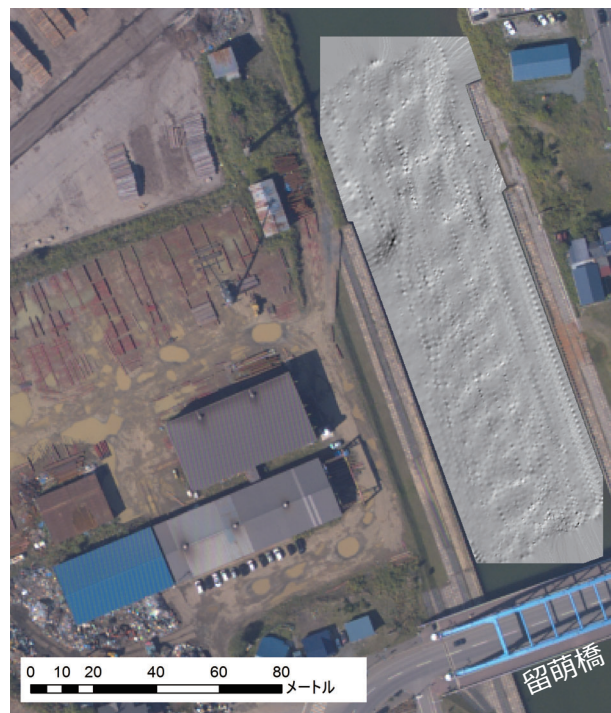


図-9 HDS-8 による観測結果（2011 年 12 月 8 日第 2 セッション：測線が横断方向に密に分布）を基に IDW 法を用いて補間することで得られた標高値に対する陰影図

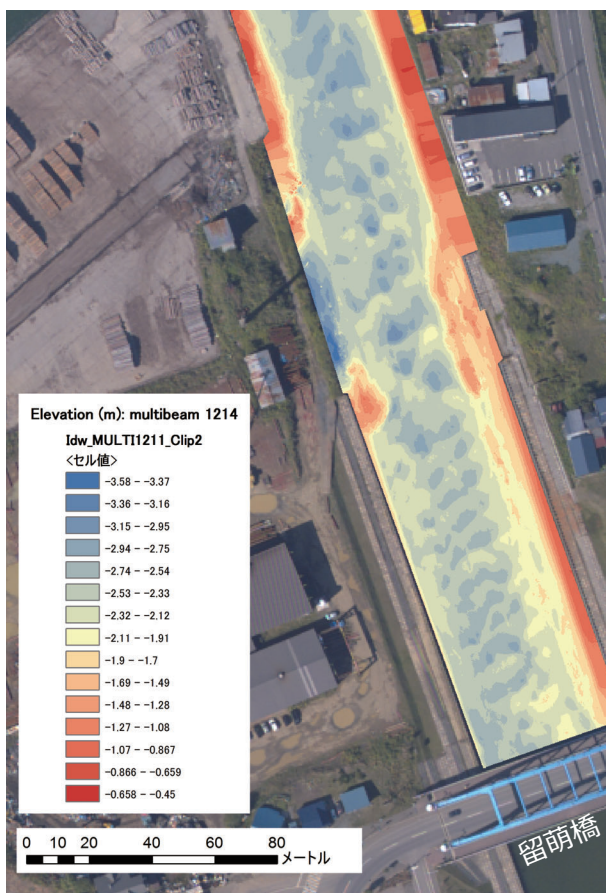


図-8 留萌開発建設部によるマルチビーム測量観測結果（2011 年 12 月 14 日）に対する河床標高コンター



図-10 留萌開発建設部によるマルチビーム測量観測結果（2011 年 12 月 14 日）の標高値に対する陰影図

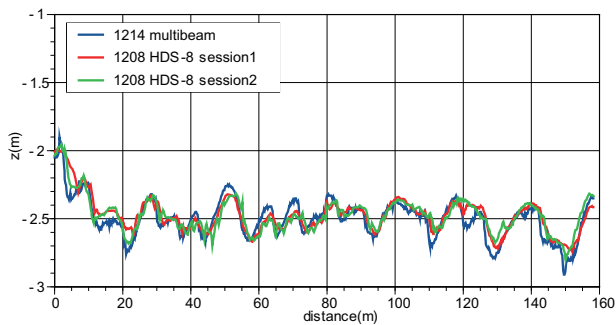


図-11 留萌橋下流から約 150m 区間における水路中央部河床標高の縦断方向分布

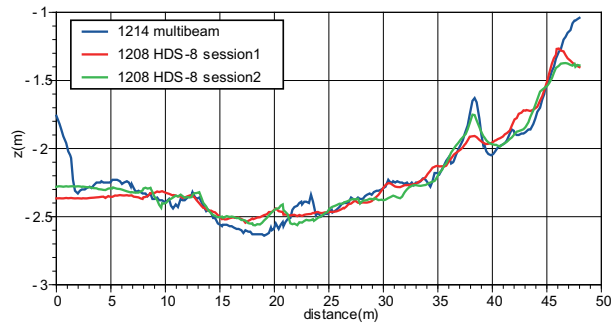


図-12 留萌橋から 80m 下流での河床標高の横断方向分布

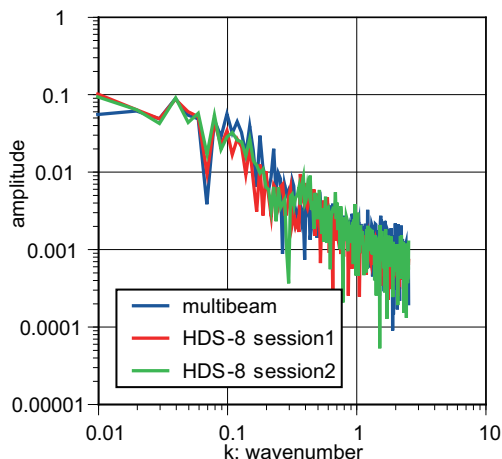


図-13 図-11 の河床標高縦断方向分布に対する FFT によるスペクトル解析結果

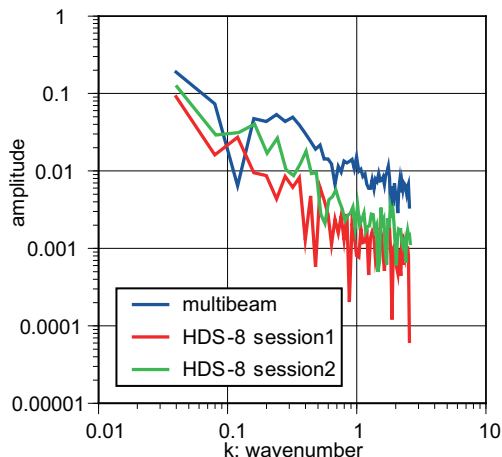


図-14 図-12 の河床標高横断方向分布に対する FFT によるスペクトル解析結果

5. まとめ

本研究では、市販の魚群探知機を応用した小型の音響測深システムをラジコンボート上に構築し、通常の音響測深装置やマルチビーム測量機器と比較して大幅に安価で、かつ低リスクの洪水時河床形状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実際の観測を行った。観測では、水深情報に GIS による補間を行うことで河床標高のラスターデータを得た。提案した小型音響測深システムが示した河床形状は、マルチビーム測量により得られた特性を定性的に良く示していることが確認された。また、FFT によるスペクトル解析を行ったところ、縦断方向の解析結果に対しては、提案するシステムの示した傾向がマルチビーム測量の結果に対し良く一致することが確認された。一方で横断方向の結果に対しては、観測時の横断方向の空間的解像度が低下するほど、解析結果がマルチビーム測量による結果から逸脱していくことが確認された。

本研究の目的は出水時の河床形状の変遷を面的に把握することであるが、本研究での調査では、出水時の観測を行うことが出来なかった。今後は、界面変動が激しく濁度が高い状態である出水時に上記手法を用いることで、その適用性に関して考察を進めていく予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、国土交通省北海道開発局留萌開発建設部よりマルチビーム測量に関する貴重なデータを提供頂いた。記して感謝の意を表する。

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 River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.1987-460, 2011.
- 3) 畑中勝守，和田雅昭，上瀧 實，増田 稔，土池 政司：魚群探知機情報を活用した低コスト海底地形測深システムの開発，土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部，60 巻，pp. 4-261，2005.
- 4) 道上正規，小田明道，檜谷 治：実河川における河床波の測定法に関する研究，河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，3 巻，pp. 43-50，1997.
- 5) 木下良作：洪水河床音響調査用 RC エアボートの開発，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.

(2012. 4.5 受付)