

無人ボート搭載型マルチビームソナーによる洪水時の河床波計測について

橋田 隆史・坂元 賢司・佐々木 智弘 (株式会社ハイドロシステム開発)
萬矢 敦啓・小関 博司 (国立研究開発法人 土木研究所)

1. はじめに

河川では出水規模に応じて川底に様々な河床形態が現れる。出水規模が中程度以上になると、河床形態は砂漣 (Ripple) から砂堆 (Dune) へと遷移し (図1参照)、これら小規模河床波と呼ばれる凹凸が発達することで流れの抵抗を増大させ、水位上昇をもたらす¹⁾。また、現状では出水規模と河床波の定量的な関係を把握することが困難であるため、河床波の存在は水位予測を困難にさせる要因となっている。これまで、水槽実験などによって河床波と水面波形、流速鉛直分布、流砂速度、掃流砂、などの関係について多くの報告があるが^{2) 3)}、実河川においてはこれを計測することが非常に困難であるため、実態は不明な点が多い。

本報では、洪水流量観測用の無人ボートに、小型軽量で高性能なマルチビームソナーとドップラー式流向流速計 (以下、ADCPと記述)

を同時に装着し、国内最大規模の実験水路である十勝川千代田実験水路において、準実河川規模での洪水観測を行った結果を報告する。なお、本報では砂漣と砂堆を合わせて河床波と表現し、区別する必要がある場合のみ個別に表現する。

2. マルチビームソナーの現状

近年におけるマルチビームソナーの技術革新は目覚ましく、Teledyne RESON では、2013年以降、設計製造を根本から刷新した SeaBat T シリーズ (T20-P、T50-P) をリリースしている (図2参照)。従来、マルチビームソナーの性能評価はビームの太さに目が行きがちであったが、ビームの太さはソナーサイズに依存する部分が

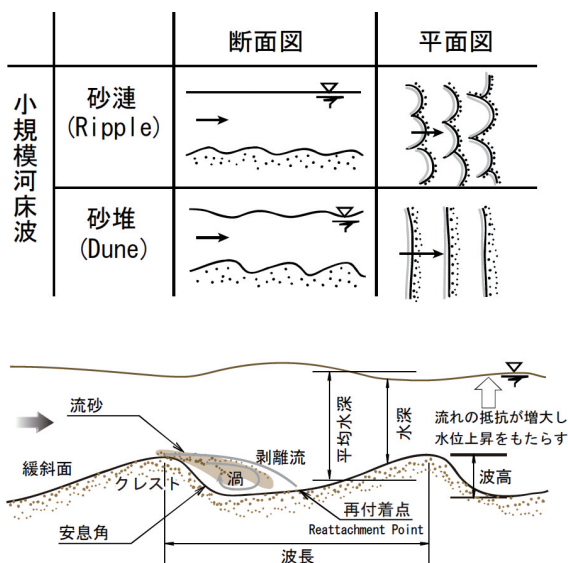


図1 出水時の河床の形態



	SeaBat T20-P	SeaBat T50-P
周波数	190~420kHz	
分解能	0.6cm(深度方向)	
ビーム幅 (横×縦)	1.0×1.0° (400kHz) 2.0×2.0° (200kHz)	0.5×1.0° (400kHz) 1.0×2.0° (200kHz)
ビーム数	10~512 (任意に設定可)	
スワ幅	140° / 165° (等間隔/等角度)	150° / 165° (等間隔/等角度)
直下最大 レンジ	550m (200kHz) 575m (200kHz:X-range 機能使用時)	475m (200kHz)
発信間隔	50Hz	
測深方式	クロスファンビーム方式(ビームフォーミング)	
サイズ	船上局	131×424×379mm (H×W×D)
	送波器	86.6×93.1×280.1mm (H×W×D)
	受波器	123×254×102mm
重量	船上局	14kg(空中)
	送波器	5.4kg/3.4kg (空中/水中)
	受波器	5.0kg/4.2kg (空中/水中)

図2 Teledyne RESON SeaBat 最新機種

大きいため、可搬性を重視すると限界がある。一方、測深精度および構造物の輪郭を捉える性能は、S/N 比、ビーム密度、検出アルゴリズムなどにも大きく依存するため、SeaBat T シリーズではこれらを大幅に改善した受波アレイと処理プロセッサを新規開発し、実用上の性能向上を果たした。

一方、基本性能が向上してきたことを受けて、ビームの太さはある程度犠牲にしつつも、高い測深性能と可搬性を備えた低価格な機種も登場してきた。旧 RESON 社が 2013 年、Teledyne Marine グループと経営統合して以降、コンパクトで低価格なマルチビームの製造販売にも関わっている。この様な背景で開発されたのが、Teledyne ODOM ブランドの MB シリーズ (MB1, MB2) である (図3参照)。

著者らは小型軽量で高精度なマルチビームソナー MB1 に着目し、これを活用して洪水時の河床形状を面的に計測するためのシステムを構築した。国内外において、マルチビームによる洪水時の面的な計測を、実河川に適用可能な

方式で実施した事例については、おそらく前例を見ることが出来ないであろう。

この様に低価格でスペックに劣る機種であっても、そのコンパクト性を活かして、従来機種では不可能であった計測方法を実現している点に本研究の新規性があり、マルチビームソナーの新たな活用方法の1つを提案するものである。

3. 実験方法

3.1 実験概要

計測実験は、平成 27 年 6 月 25 日および 7 月 6 日の 2 回、十勝川千代田実験水路にて実施した。当実験所は、帯広開発建設部によって運用されている国内最大規模の実物大河川実験施設である。大規模出水時の水理現象や破堤現象を研究するため、様々なセンサーや計測器が投入されて大規模な実験が実施されている。著者らはその一環として参加しており、洪水時の河床変動と流速や水面波形などの関係性を把握し、また掃流砂量の推定に関する理論を深めることを目的として観測を行った。

著者らの研究目的は河床波を面的に把握することが大前提となるため、小型マルチビームソナー (MB1) と ADCP による同時観測を行った。計測方法は、MB1 と ADCP を、洪水流量観測用の無人ボートに装着し、水路縦断方向に 30m の区間を移動させながら、約 2~3 分間隔で 2 時間にわたり連続的に計測を行った。観測イメージを図4に示す。



	MB1	MB2
周波数	170~220kHz	200~460kHz
分解能	3.6cm(深度方向)	2.0cm(深度方向)
ビーム幅	3.0(縦)×4.0° (横)	1.8×1.8°
ビーム数	10~512 (任意に設定可)	10~256 (任意に設定可)
スワス幅	10~120° (任意に設定可)	10~140° (任意に設定可)
直下最大レンジ	240m	200m
発信間隔	60Hz	
測深方式	クロスファンビーム方式(ビームフォーミング)	
サイズ	船上局	286.0×305.0×133.0mm (L×W×H)
	ソナー	267.0×152.0×146.0mm (L×W×H)
重量	船上局	5.8kg(空中)
	ソナー	10.2kg/4.3kg (空中/水中)

図3 Teledyne ODOM MB シリーズ

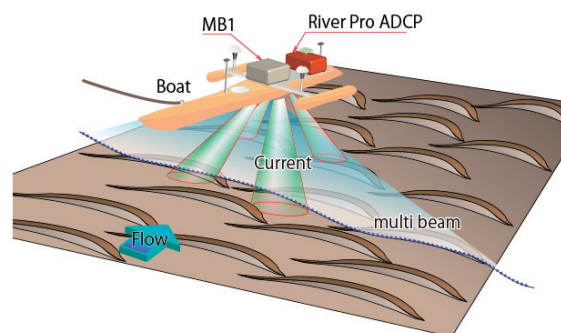


図4 観測イメージ図

3.2 無人ボート搭載型マルチビームソナーの概要

(1) 無人ボート（トリマラン型）

ADCP による洪水流量観測の際には橋上操作艇と呼ばれる無人ボートが用いられる。このボートを利用して、ADCP と MB1 を同時に計測出来るように改造し、本観測に用いた。橋上操作艇は耐用流速に応じて数タイプが考案されているが、本実験では、ペイロードを確保するために、土木研究所が所有している最も大型な全長 3m のトリマラン型ボート（本来の耐用流速 7.0m/s）を選定し、船尾に浮力を追加して用いた（図5参照）。

(2) マルチビームソナー MB1

マルチビームソナーは、Teledyne ODOM の MB1 を用いた（図3参照）。本機はビーム幅 $3 \times 4^\circ$ と国内で普及している機種に比べて見劣りするが、軽量コンパクトで高精度なため、海外では主に河川や浅場で用いられている。センサーのサイズは A4 ノート程度で水中重量は 4.3kg と、かろうじて橋上操作艇に搭載できるサイズである。モーションセンサーは Teledyne TSS の DMS-05 を、データ記録ソフトは Teledyne PDS の PDS を用いた。尚、上位機種の MB2 では、POS MV WaveMaster もしくは POS MV SurfMaster の IMU をセンサーに内蔵でき、かつ GNSS を船上局に内蔵できるため、より軽量コンパクトな構成となっている。

(3) ADCP

河床形状変化と流速分布の関係を把握するために、Teledyne RDInstruments 製リバープロ ADCP1200kHz（鉛直ビームは 600kHz）を用いて、流向流速の縦断分布を計測した。機器仕様を図6に示す。ADCP とは超音波のドップラー効果を応用した多層流向流速プロファイラーである。河川においては流量観測や流況を計測する計測機として利用されているが、ボトムトラック機能により横断測量に利用することも可能である。但し、垂直方向から 20 度の傾斜



図5 観測ボートの概要

RiverProADCP



周波数	傾ビーム 1200kHz 鉛直ビーム 600kHz
測定距離	0.12m～25m
層 厚	2cm～5m
層 数	15～30 層（最大 200 層）
測流範囲	最大±20m/s
流速精度	±0.25%または±2mm/sec
観測項目	流速(3 軸成分)、水温、機器方位
材 質	強化プラスチック
高 さ	193.4mm
直 径	165.1mm
空中重量	4.35kg

図6 ADCP の仕様

角で放射状に 4 本のビームを発射するため、河床波の測深データとしては空間解像度に劣ると考え、本研究では測深データに関してはマルチビームの計測結果を利用することとした。

(4) 無線通信装置

MB1 および ADCP のデータをリアルタイムに陸上へ無線伝送する必要があるため、無人ボートに無線通信装置を 2 基搭載し、MB1 と

ADCPそれぞれのデータをリアルタイムに陸上局へデータ転送させた。無線装置の性能としては通信距離 800m 以上のスペックを有しているが、マルチビームに関してはデータ容量が非常に大きいため、実際には通信距離 130m 程度が限界であった。

(5) RTK-GNSS コンパス

マルチビームの測位システムとして、Hemisphere 社の RTK-GNSS コンパス VS330 を用いた。また、移動床においては ADCP のボトムトラックが流砂を捉えてしまうことによりトラッキング誤差が大きくなるため、移動観測のリファレンスとして JAVAD 社の RTK-GNSS (Delta) を用いた。尚、マルチビームと ADCP の測位システムは信号分岐ケーブルを製作することで一元化が可能となるが、今回はバックアップのために RTK-GNSS を 2 台搭載して観測を行った。

3.3 観測方法

各実験ケースはおよそ 6 時間程度かけて実施しており、縦断方向 30m ほどの区間を上下流方向に移動させながら、1 ケースにつき 2～3 分ピッチで、50～70 回の計測を行った。なお、本実験設備では水路を横断する構造物が仮設足場で強度に不安があるため、上下の曳航は測岸から重機を用いて行った。

観測データは無線で陸上局まで伝送させ、リアルタイムにデータを確認しながら観測を行っている。実験状況を図 7 に示す。

4. 観測結果

4.1 河床波の形状

本報では 2 回の実験のうち、最大流速が大きかった 6 月 25 日の結果について報告する。実験開始から約 90 分後に水位と流速がピークに達し、ピーク時の流速は 3.6m/s、縦断平均水位は 2.6m であった。実験中の水位を図 8 に示

す。観測は、水深が 1.2m を越えた時点で開始し、水深が 1.7m を切った時点で終了しており、トータルの観測時間は約 4 時間に及ぶ。

MB1 による河床波連続計測結果を図 9 に示す。水位の上昇期 (No.03～14) においては、河床波の形状が安定せず、砂漣状の形態を示している。水位がピークに達した No.15 付近から河床波は横断方向に直線的な形状となり、砂漣 (Ripple) から砂堆 (Dune) へと遷移した様子が確認できる。No.15 以降の河床波は、比較的安定した形状を維持したまま一定速度で下流方向へ移動しており、水位が低下するまでこの傾向は続く。No.38 付近を見ると、小さなコブが誕生しており、それが成長し

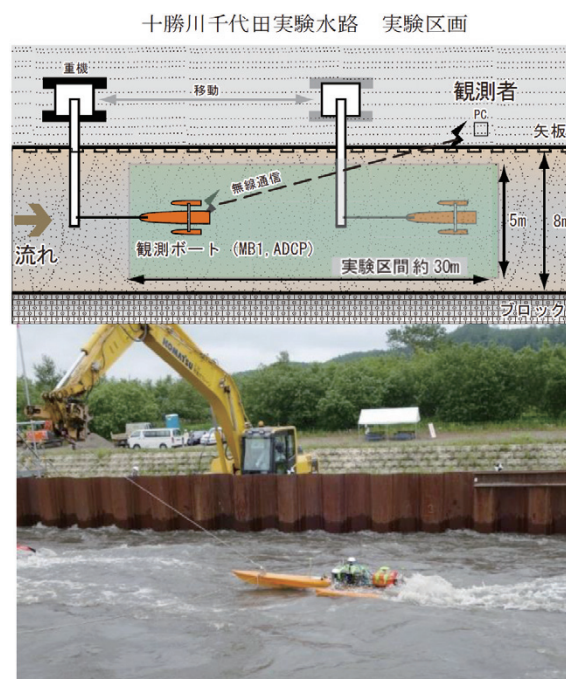


図7 河床波計測の実験状況

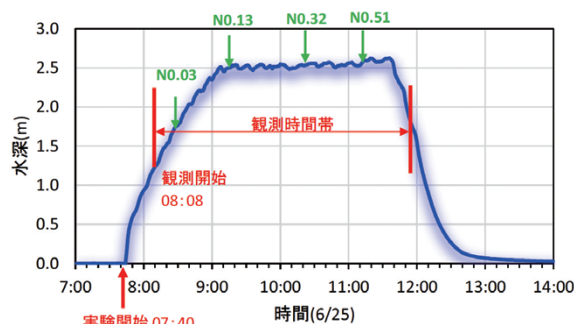


図8 実験中の水位変動

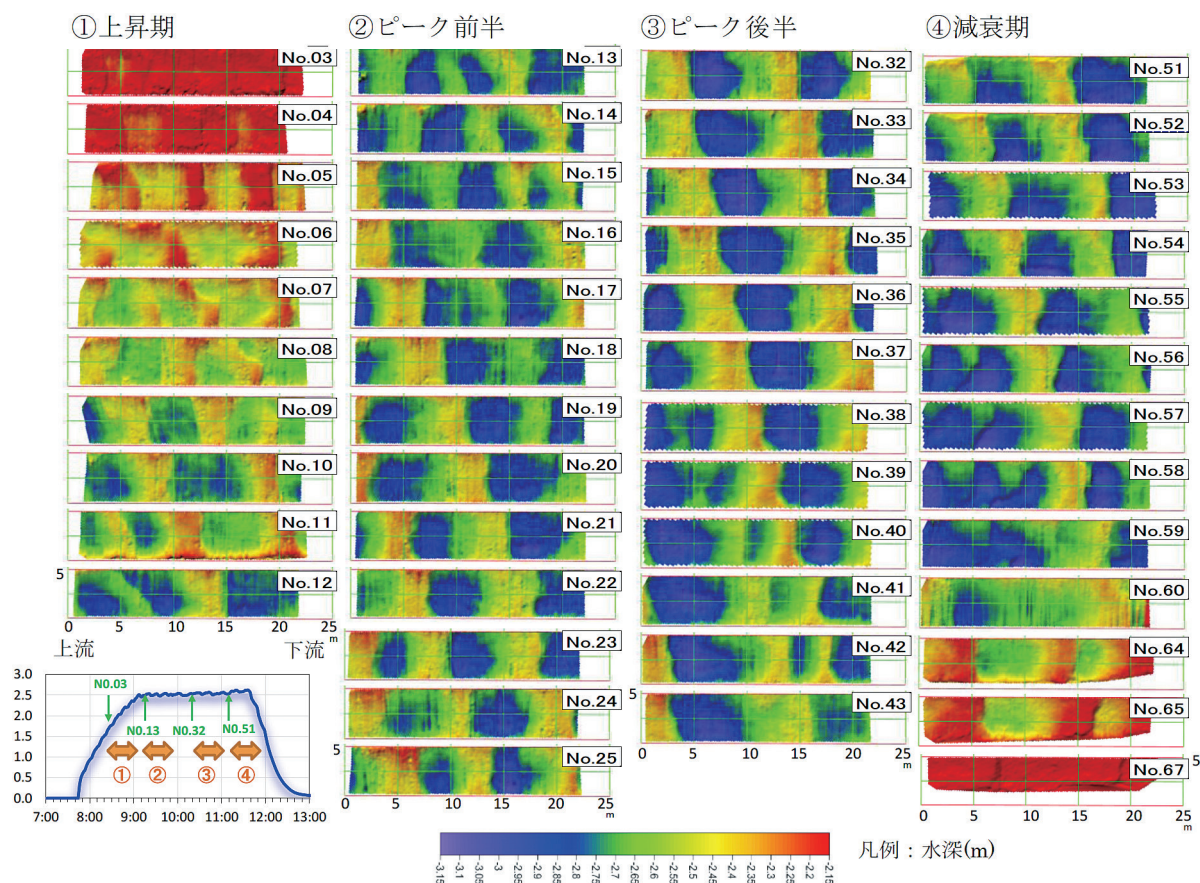


図9 マルチビームによる河床波連続計測結果

ながら下流側の河床波と合体する様子が見られた (No.43)。また、観測開始時は平坦河床からスタートしており、実験中は顕著な河床波が見られるものの、観測終了時は再び平坦河床に戻っていた。このことは、洪水前後での横断測量結果に大きな変化が見られない場合でも、洪水中には河床の状態が大きく変化している場合があることを示唆するものであり、著者等の経験でもこの様なケースは多い。

次に、河床波の縦断形状を図10に示した。縦断データは、マルチビーム測量の結果から中央付近の測線を切り出して比較した。実験中、最も河床波が大きくなったのはNo.32からNo.38付近であり、水位がピークに達してから60分ほど経過している。

No.32の河床波 (Dune) は、波長が11 m、波高が0.65 mであった。Duneの形成規模は水深依存とされており、平均波長が水深の約5

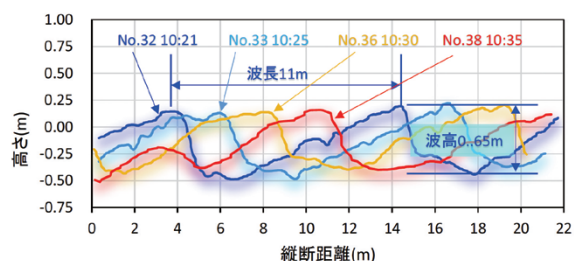


図10 河床波の縦断形状

倍程度、波高は水深の10～50%と報告されている⁴⁾。

本実験では波長が平均水深の約4倍前後、波高は25%前後であり、概ね理論値と一致しているが、波高が水深の10～50%という定義は幅が広い印象があり、実際には流速など他の要因も影響しているのでは無いかと考えられる。

4.2 河床波の移動速度

図9で示した平面図はおおよそ2～3分間隔で計測した結果であり、途中に数分間の中断など

もあるため、これを時系列比較するために、縦軸に観測経過時間、横軸に縦断距離をプロットし、河床波の時空間変化図を作成し、図 11 に示した。経過時間が 50 分を越えた辺りから斜め下に明確なスジ模様が見られる。この傾きから河床波の移動速度を試算した結果、前半の 4 ケース(実線)では 0.66m/分、それ以降(点線)は若干速度が低下し、0.57m/分となった。河床波の移動速度が低下し始めた時間帯は、図 10 に示す河床波が最も発達した時間帯と一致する。この時の水位と流速に大きな変化は見られないことから、河床波が大きくなることでその移動速度が低減することを示唆している。

4.3 河床波と流速分布の関係

次に、河床波と流速分布、および流砂速度について検証した。図 12 に、マルチビームによる平面コンタ図と ADCP による縦断流速分布図を示した。ADCP の流速値は GNSS リファレンスで計算した流向流速から流下方向成分を抽出している。なお、ADCP では河床付近に

不感帯が生じるため、対数則法で外挿補完した⁵⁾。

ADCP の流速を見ると、水面付近では 3.4 ～ 3.6m/s 程度で縦断方向に比較的均一であるが、河床付近は流速変化が顕著で、河床波の山の部分では底面付近で 2.0m/s 程度、谷の部分では底面付近で 0.5m/s 程度の流速であった。また、流速 2.5m/s を境界としたコンタラインをプロットすると(黒線)、赤線で模式化したように河床波と逆位相となる傾向を示した。これは、河床波の山頂部を越えた部分で剥離流が生じ、河床波の窪みの部分で渦が形成される事による副次的な境界面を表していると考えられる⁶⁾。

次に、ADCP で得られた流速の鉛直プロファイル縦断方向に配置し、河床波の縦断位置における違いを検証した(図 13 参照)。

河床波の谷の部分では流速鉛直プロファイルは対数則に則った大きなカーブを描き、河床位付近では流速は 20 ～ 30cm/s と小さくなる。河床波の山頂部付近になると流速鉛直プロファ

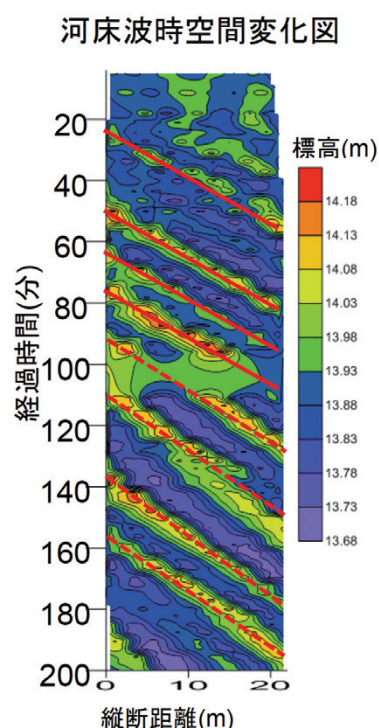


図11 河床波の時空間変化

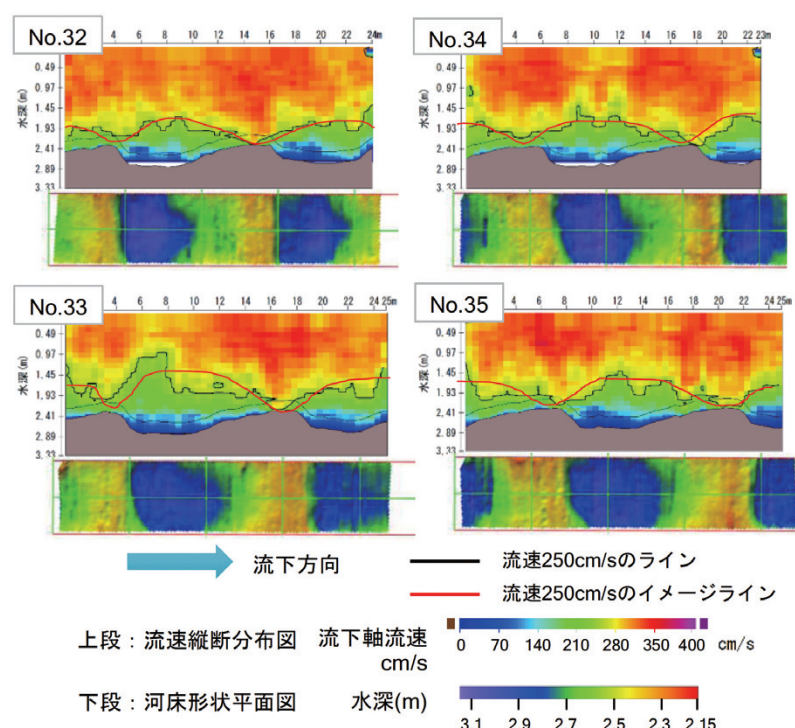


図12 河床波と流速分布の関係

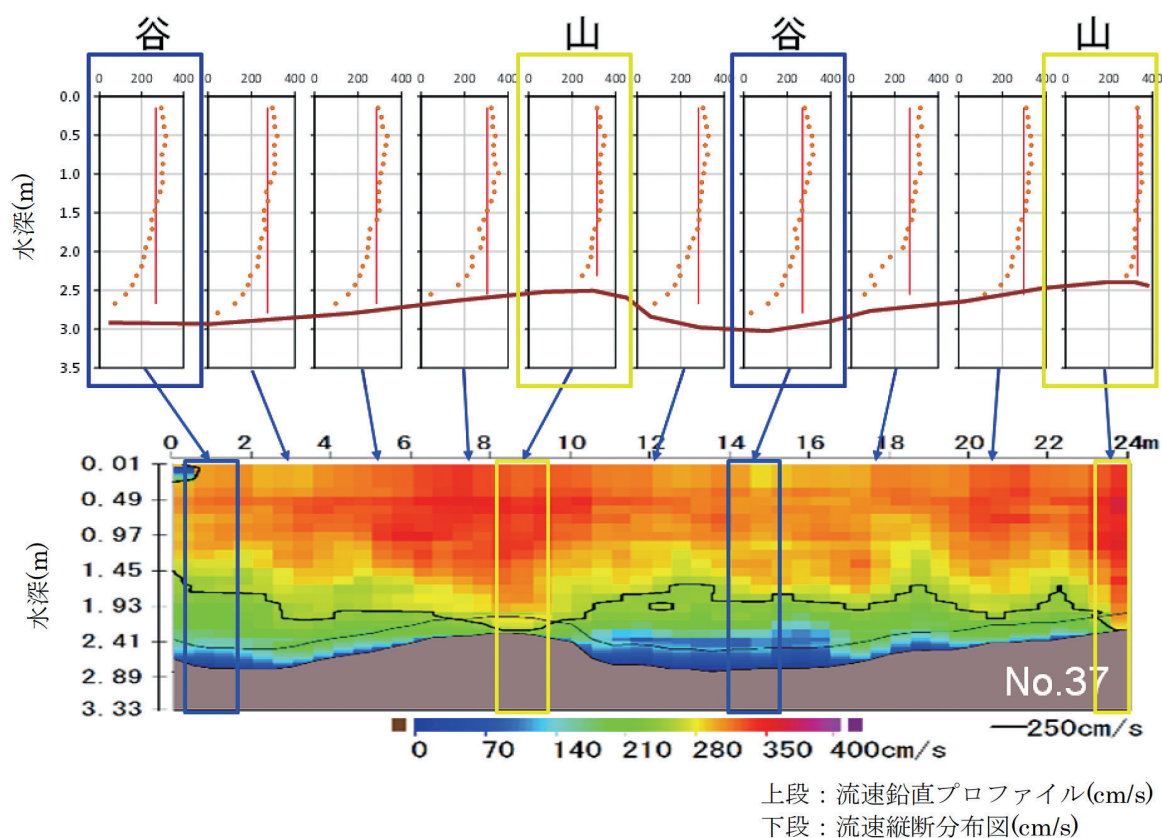


図13 河床波と流速鉛直プロファイルの関係

イルは直立傾向を示し、河床位付近の流速は 200 cm/s 以上と大きい。これが山頂部を越えると再び大きなカーブを描き、底面付近の流速は非常に小さくなる。この現象は、谷の部分では剥離流による渦が形成されることで説明できる。また、山頂部では十分に大きな掃流力を持っていることが示唆されるため、次に、ADCPによって計測された流砂速度の縦断分布との関係について検証した。

ADCP 観測ではボトムトラック機能と VRS-RTK-GNSS を組み合わせることにより、砂の移動速度（流砂速度）を検出することが出来るため⁷⁾、これを利用して縦断方向の流砂速度分布を求めた（図 14 参照）。

その結果、河床波のトップ付近では流砂速度が $100 \sim 120\text{ cm/s}$ 程度であった。また、河床波の谷部分では流砂速度が小さく、 $5 \sim 20\text{ cm/s}$ 程度であった。縦断方向の平均値を計算すると $53 \sim 56\text{ cm/s}$ となり、表面流速と比べると $14 \sim$

15% 程度であり、著者等が洪水観測の際に得た経験値にほぼ一致している。

河床波の移動は砂のサルテーション（躍動）が関与しているとされており、上流側斜面からトップ付近は速い流速にさらされるために砂粒子が飛散し、流速の遅くなる谷部分に溜まりながら全体が下流側へ移動していくというモデルが知られており⁸⁾、本観測でもこうした理論を裏付ける結果が得られた。

4.4 河床波と水面波形の関係

マルチビーム測量に用いた RTK-GNSS コンパスの標高データを利用し、水面の縦断波形と河床波の関係を検証した。図 14 は河床波と水面波形をプロットしたもので、水面波形は縦断方向に 5 データ（およそ 1 m ）の平均処理を行っており、河床波と比較しやすい様に縦方向に 3 倍拡大している。

図 15 を見ると、いずれのケースも水面波形

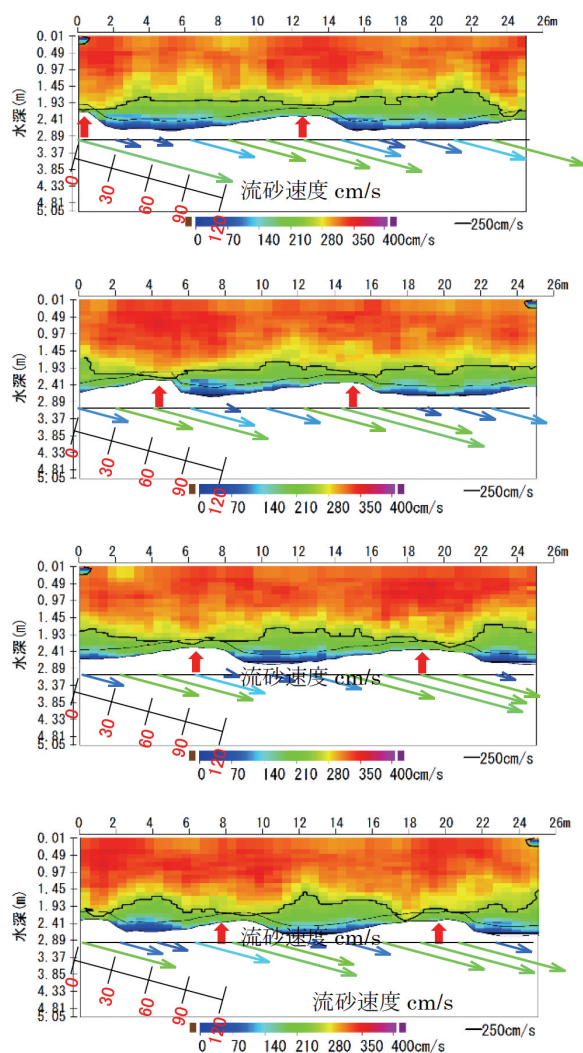


図14 河床波と流砂速度の関係

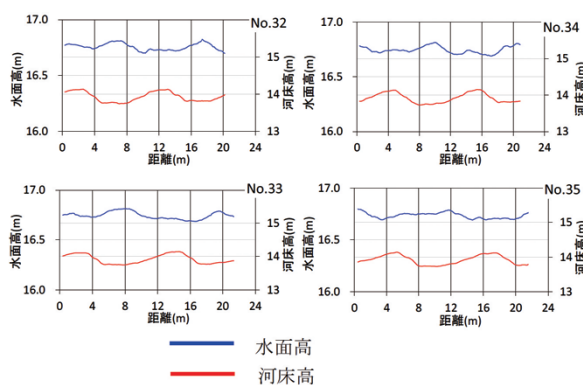


図15 河床波と水面波形の関係

と河床波はほぼ逆位相の関係であることが分かる。これは水槽実験などでも確認されていることであり、理論通りの結果であるものの、実河川規模の洪水観測において水面波形と河床波形との関係を示した実測データはほとんど無

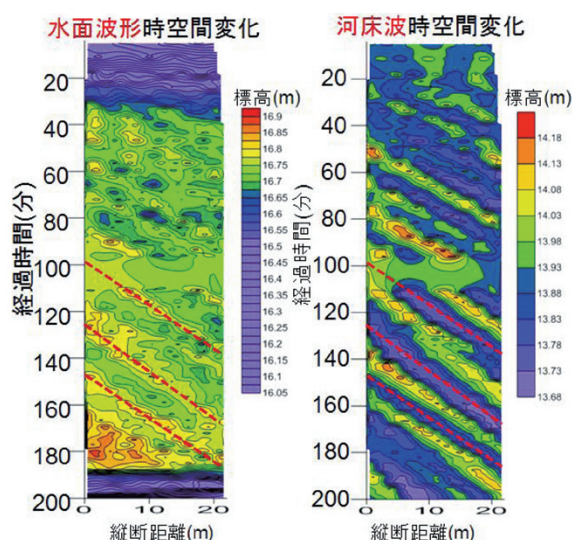


図16 水面波と河床波の移動速度

く、貴重な結果と言える。次に、水面波形の移動速度と、河床波の移動速度を比較した。水面波形の時空間変化をプロットし、斜め方向に生じるスジの傾きと位相を図 11 で示した河床波の時空間変化図と比較したところ、両者は完全に一致した(図 16 参照)。このことは、水面波形と河床波の移動速度は等しく、かつほぼ同じ位相で下流側に移動していることを示している。洪水時に河床形状を計測するのは大変な困難を伴うが、水面の計測は比較的容易であり、非接触による計測方法などもいくつか存在する。このため、洪水時に水面波形を計測することができれば、河床波の波長と移動速度が推定できる可能性がある。また水面波の計測は必ずしも縦断方向に計測する必要は無く、水位の定点観測によって水面波の波長と周期を計測するは可能と考えられる。

4.5 河床波と流速補正係数の関係

次に、河床波と流速補正係数の関係を検証した(図 17 参照)。流速補正係数とは、表面流速を計測した値を元に、鉛直平均流速を算出するための換算係数であり、国内では一般的に 0.85 が使われている。流速補正係数(緑線)は縦断方向に変化が大きく、1.0 (緑の直線)

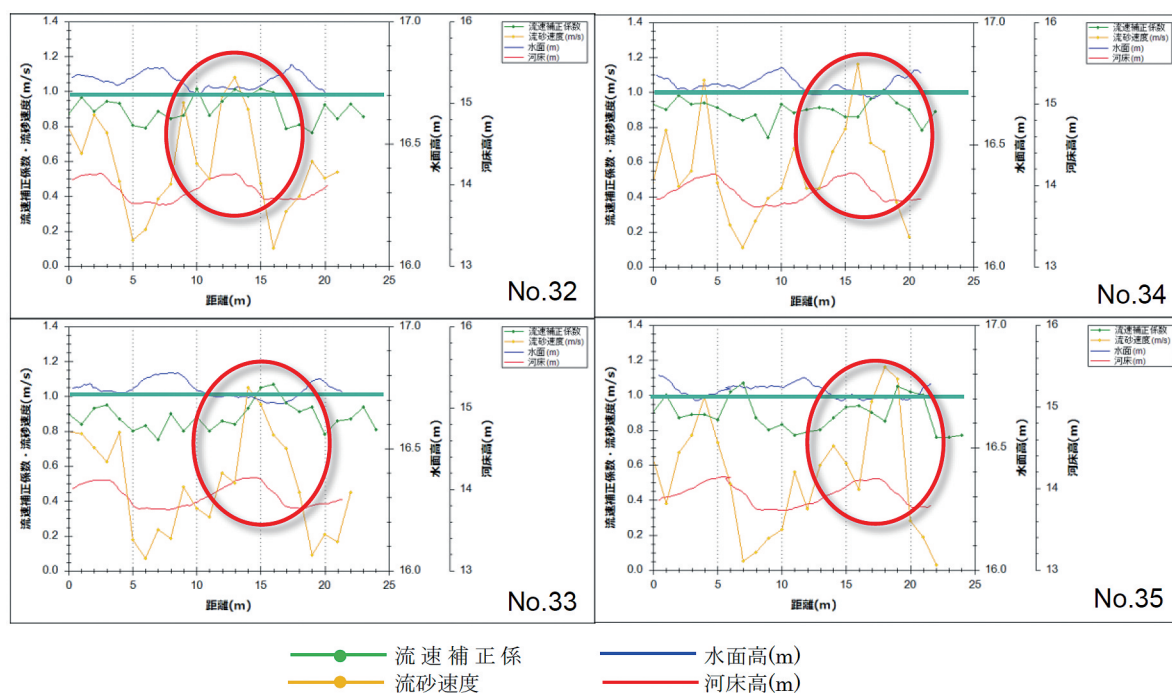


図17 河床波と、水面波形・流砂速度・流速補正係数の関係

を越えるケースが散見された(図中赤丸囲い)。流速補正係数が1.0を越える条件を見てみると、河床波のトップ付近であること、水面波の谷部にあたること、流砂速度が非常に速いこと、などが良い再現性をもって出現していることが見て取れる。流速補正係数が1.0を越えるということは、表面流速よりも鉛直平均値の方が大きくなることを意味しており、これは図13で示した流速鉛直プロファイルが河床波のトップ付近では直立傾向を示していることと一致している。

なお、流速補正係数を縦断方向に平均すると、0.86から0.88の範囲となり、これは国内で経験的に知られている範囲(0.85～0.9)と一致している。

5. まとめ

小規模河床波は流れの抵抗を生じさせ、河川水位の上昇要因となるため、その実態を把握することは河川管理のうえで重要な課題とされてきた。しかしその観測には多大な困難が伴うため、従来は小規模な実験水路や数値解析などに依らざるを得なかった。近年では測深器に

よる定点観測やADCPによる横断観測の事例が多く見られるようになってきたが、面的に連続計測した事例はほとんど見られない。そこで本研究では、洪水観測用の橋上操作艇を改良してマルチビームとADCPの同時観測システムを開発し、実河川スケールの河床波現象の観測に成功した。観測の結果、河床波の形状、サイズ、移動速度が詳細に計測できたことに加え、河床波の挙動を支配する流速や流砂速度、水面波形など様々な水理データとの関連性についても貴重なデータを得ることが出来た。この観測技術は、河川工学分野の研究に大きな進展をもたらすものと期待できる。

また、このような観測には軽量コンパクトなマルチビームが不可欠である。Teledyne ODOMのMB1はビーム幅が広い($3 \times 4^\circ$)ものの、水深が浅ければ十分な精度を確保できるうえ、無人ボートに搭載して無線でデータ転送できるというメリットもある。また、後継機種としてビーム幅 $1.8 \times 1.8^\circ$ のMB2も開発されており、今後河川分野での活用が大いに期待できる。

6. 謝辞

本研究成果は、帯広開発建設部による「平成 27 年度千代田実験水路現地実験」による成果の一部である。橋上操作艇の改造に際しては、(株)水文環境の井上氏に協力を頂いた。各機関の関係者の皆様に、感謝の意を表す。

■参考文献

- 1) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度、土木学会論文報告集 第 210 号・1973 年 2 月
- 2) 芦田和男、澤井健二：河床波の変形過程における実験的研究、京大防災研年報、第 23 号 B-2、1980。
- 3) 福岡捷二、奥津一夫、山坂昌成：急勾配移動床流れにおける河床波の形状、伝播特性：土木学会論文報告集、第 323 号・1982 年 7 月
- 4) 泉典洋、中里遙介、活発な浮遊砂輸送を伴う小規模河床波：北海道大学大学院工学研究科 <http://www.ric.or.jp/profile/works/kiyou/h2101.pdf>
- 5) 中川博次、辻本哲郎、村上正吾、水橋雄太郎：河床波状の流砂量分布について、土木学会 第 28 回水理講演会論文集 1984 年 2 月
- 6) 萬矢敦啓、岡田将治、江島敬三、菅野裕也、深見和彦：ADCP を用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法、水工学論文集 第 54 巻 2010 年 2 月
- 7) 岡田将治、竹内慈永、和泉征良、萬矢敦啓、橘田隆史：ADCP と RTK-GPS 搭載橋上操作艇を用いた定点・曳航観測から得られた水深平均流速、摩擦速度および掃流砂速度の考察、土木学会河川技術論文集 第 19 巻 2013 年 6 月

- 8) 三輪浩、大同淳之：河床波前縁部での流砂の挙動に関する検討、土木学会関西支部年次学術講演会平成元年

■執筆者

橘田 隆史 (きつだ たかし)

株式会社ハイドロシステム開発
大阪本社

Teledyne Marine グループの

ADCP やマルチビーム国内販売代理店

t-kitsuda@hydro-sys.com



(共著者)

坂元 賢司 (さかもと けんじ)

株式会社ハイドロシステム開発 大阪本社
ke-sakamoto@hydro-sys.com

佐々木 智弘 (ささき とむひろ)

株式会社ハイドロシステム開発 東京支店
t-sasaki@hydro-sys.com

萬矢 敦啓 (よろずや あつひろ)

国立研究開発法人 土木研究所
水工研究グループ 水文チーム
yorozuya@pwri.go.jp

小関 博司 (こせき ひろし)

国立研究開発法人 土木研究所
水災害・リスクマネジメント国際センター
h-koseki@pwri.go.jp