

河床変動観測へのヘッド回転型サイドスキャンソナーの適用に関する研究

APPLICATION OF ROTATING SIDE-SCAN SONAR ON THE OBSERVATION OF RIVER BED

山本浩一¹・二村貴幸²・小川和彦³・坂野 章⁴・日下部隆昭⁴・末次忠司⁵

Koichi YAMAMOTO, Takayuki FUTAMURA, Kazuhiko OGAWA,
Akira SAKANO, Takaaki KUSAKABE and Tadashi SUETSUGI

¹正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所河川研究室 研究官(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

²正会員 元国土技術政策総合研究所河川研究室 研究官^{*}(同上)

³正会員 元国土技術政策総合研究所河川研究室 交流研究員^{**}(同上)

⁴正会員 国土技術政策総合研究所河川研究室 主任研究官(同上)

⁵正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室長(同上)

^{*}国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦導水工事事務所(〒300-0812 茨城県土浦市下高津2-1-3)

^{**}日本工営株式会社中央研究所(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

Rotating Side-Scan Sonar was applied on the observation of the streambed. We could get real-time longitudinal topography of the riverbed in the flood period in the Hinuma River, Japan. In the flood period, under the condition of water depth of 3m and $u^* = 13-15\text{cm/s}$, sandbanks of 0.050 - 0.2m high were moved to downstream at the speed of 1 - 10 m/hour. We observed that sandbanks were unsteady waves and their speeds were gradually changed. Sandbanks originated with small dips on the top of the sandbank, and they grew their heights with collisions of sandbanks themselves.

Key Words : Sonar, River bed, Acoustic survey, Sand bank, Flood

1. はじめに

流砂系一貫とした土砂管理が叫ばれる中で現地河川における洪水時の掃流砂量は測定が困難であり, 新たな計測技術の開発が求められている。また, 洪水時に生じる河床変動の実態を明らかにするためには現地河床の形状取得が必要となるが, 洪水時の実河川は濁流となるために水面下の形状の実測はADCPとRTK-GPSの組み合わせ¹⁾, ラジコンボートや十字浮体に艀装した音響測深器²⁾等により測定されてきた。これらの観測方法は広域的な観測が可能である長所を有するが, 小規模な砂堆の消長を捉え, また掃流砂量を推定する目的のためには鉛直精度が十分ではない。そこで海洋分野で用いられているヘッド回転型サイドスキャンソナー(Rotating Side-Scan Sonar, 以下RSSソナーと略する, 写真-1)を河床変動計測に適用した。

2. 研究方法

2.1 現地観測地点

観測地点は一級河川那珂川水系涸沼川28.1KPに

おける, 河川研究室所有の「涸沼川洪水観測施設」である(図-1)。この施設は河川低水路を跨いだ橋梁状の構造物から電動により昇降可能な観測台を有し, 洪水時の河川水面直上にて観測することが可能である(図-2)。この観測台にソナーを昇降する装置を作成・観測台に据え付けて洪水時にソナーを水面下に降ろし, 河床変動を観測した(図-3)。

2.2 使用機器

2.2.1 音響探査装置

本研究ではRSSソナー(Simrad-Mesotech製MS-1000)を用いて河床変動を観測した。本装置は回転可能なヘッドを有する音響探査装置であり, ヘッド回転面内での反射強度の空間分布をPC画面上に表示する装置である。(図-4)

超音波の周波数は675 kHz, パルス長は25 μs - 2500 μs の間で可変である。音波発射方向の分解能は19 mm(音速1500m/s, パルス長25 μs 時), 最小ステップ角は0.225°で360°の全周方向のスキャンが可能である。回転速度は本報告における5 mレンジ, 0.225°のステップ角で全周約188 sec.であるが, ステップ角

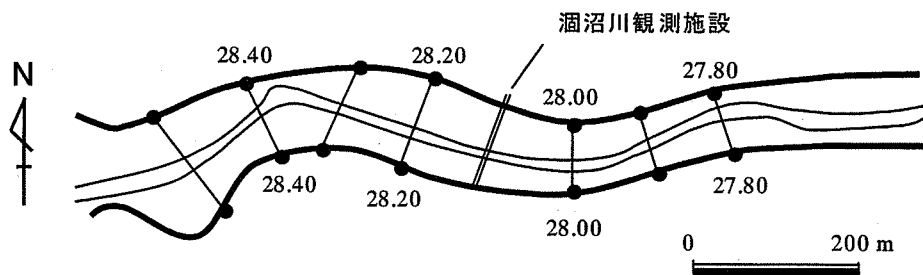


図-1 瀬沼川 28.1km 付近における平面図，数字は河口からの距離 (km)

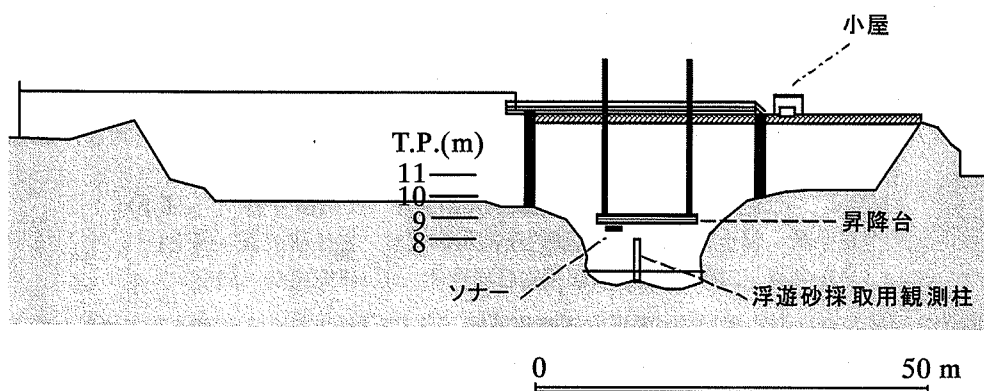


図-2 瀬沼川観測施設の横断図 (瀬沼川 28.1KP)

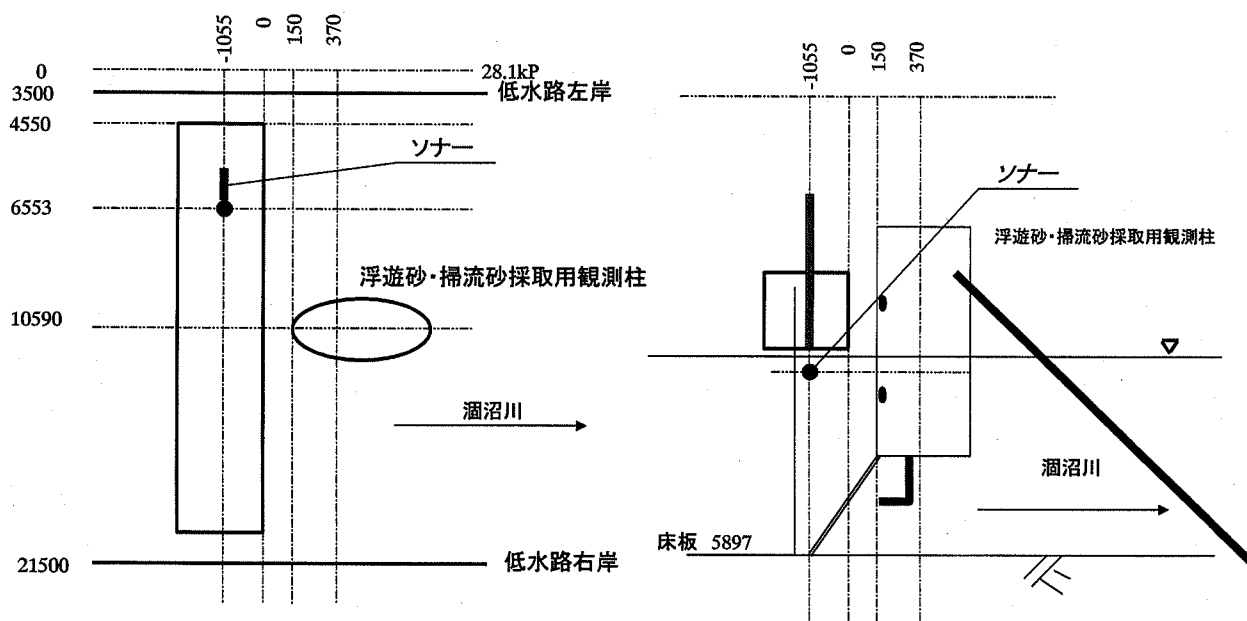


図-3 瀬沼川観測施設における RSS ソナー設置状況平面図 (左) と側面図 (右)

の設定に応じて回転速度は増減する。

RSS ソナーは専用アンプを経由して PC に直接データを保存する。反射強度の空間分布は直接 PC の表示面に表示されるのでリアルタイムの観測が可能である。

RSS ソナーは音響反射強度の閾値を定めることにより河床形状の取得が可能である。ただし音響強度は数値で表示されるのではなく、画像上の輝度として表示される。

2.2.2 RSS ソナーの鉛直精度

RSS ソナーは河床に対して必ずしも垂直に音波を発

射する訳ではないため、河床に対する角度が小さくなったときの鉛直精度の低下に注意しないといけない。RSS ソナーから発射された音波のメインローブは有限の角度 (1.7°) をもって発射されるので、広がった音波のうち河床となす角度が大きい音波が先に反射されることが原因である。RSS ソナーの音波の発射角度を ψ 、河床 (水平面) となす角 θ としたとき、RSS ソナーから R 離れた河床面の鉛直誤差は dh となる。すなわち dh だけ河床面が浮き上がって捉えられることになるので注意が必要である。(図-5) たとえば本

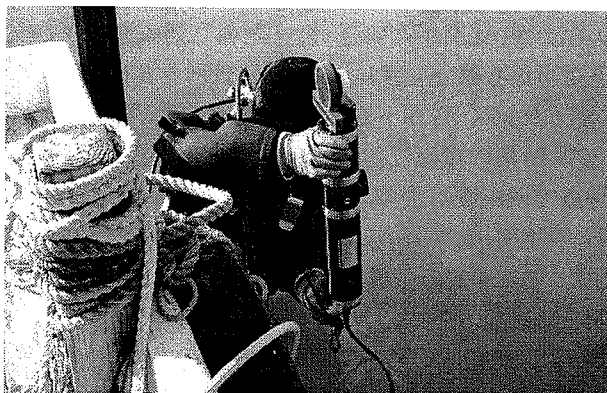


写真-1 ヘッド回転型サイドスキャンソナー
ソナーヘッド部(Simrad-Mesotech MS-1000)

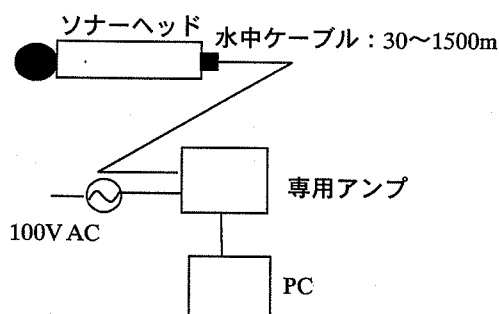


図-4 RSSソナーのシステム構成

装置を用いて $R=3\text{ m}$ のとき、河床に対して 45° の入射角で河床面を計測したとき $dh=4.2\text{ cm}$ となる。しかしながら河床面は必ずしも水平ではなく、かつ本研究では河床面の変動を捉えることを主目的としているので補正は行っていない。ただし本研究では河床に対する角度が 45° 以上の範囲を解析対象とした。

2.2.3 RSSソナーの設置状況

洪水中の河床変動を観測するためにはRSSソナーは構造物に固定されている必要があるが、本研究では前述の観測台に昇降可能な装置を製作・設置してRSSソナーを水没させた。全体の構造図は図-3に示したとおりである。RSSソナーの架台は酒沼川の左岸寄りに設置した。なお、本来であればRSSソナーは河川中央部に設置することが望ましいが、RSSソナーの水没に伴い観測台に過剰な流体力が加わり破損の恐れがあるため、河川横断面における流速の比較的遅い位置にRSSソナーを設置したためである。またRSSソナーの取り付け架台は回転可能であり、ソナーヘッドを 45° および 90° の方向に回転させることができる。すなわち縦断方向と斜め 45° 方向、横断方向の河床形状の取得が可能である。

2.3 観測時期

観測は2003年11月30日に上記観測施設にて行った。

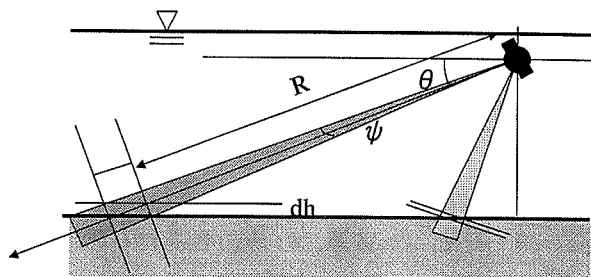


図-5 RSSソナーによる河床面の計測と鉛直誤差
(ψ : 発射角度, θ : 俯角, R : レンジ, dh : 鉛直誤差)

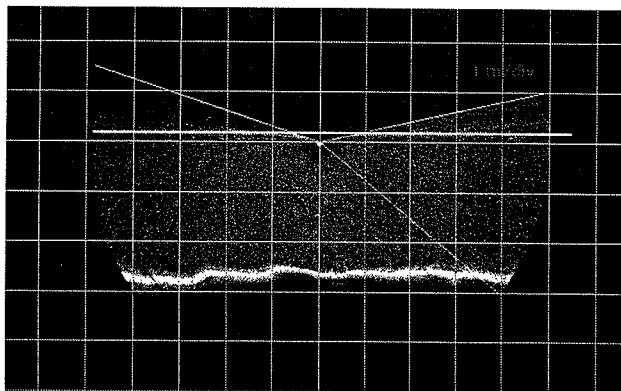


図-6 ソナーにより取得された河床の状況
(グリッド幅=1m, 2003年11月30日 酒沼川, 図の左側が下流)

当時は11月29日からの累計で70 mmの降雨があり(笠間地点), 酒沼川の水位は酒沼川観測施設(酒沼川28.1KP)においてピーク水位は9 m(水深3 m)まで上昇した。なおこのときの u^* は13~15 cm/sであった。

表-1 本観測で用いたRSSソナーの設定

測定	パルス	ステップ角	スキャン角	スキャン
レンジ	長	(degree)	(degree)	周期
(m)	(μs)			(s)
5	25	0.225	± 100	208

ピーク水位時から約5時間にわたり表1に示した設定で間欠的に河床形状データを取得した。ここでスキャン角は鉛直下向きを 0° とした。また、スキャン周期は首を振ったソナーヘッドが再び同じ方向から回転して同じ角度になる時間とした。

3. 観測結果

3.1 RSSソナーによる河床波観測結果

図-6にRSSソナーにより観測された河床の状況を示す。図中下部の白いラインが強い反射強度であることを示しており、河床を示している。俯角が小さくなる程河床のラインが見かけ上厚くな

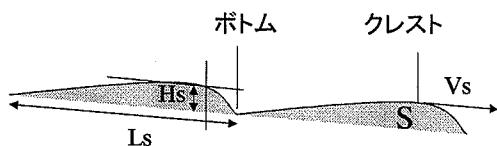


図-7 河床波に関する用語の定義について(H_s :波高, L_s :波長, V_s :波速, S :単位長あたり砂堆体積)

り、反射する領域が広くなることを示している。前述のように見かけ上河床が浮き上がる効果が現れている。底面近傍では音響反射の境界面がはっきりしないが、特に河床に対して斜めに入射した際に顕著になる傾向がある。底面付近を流動する浮遊砂の影響の可能性があるが現時点では不明である。

河床波の観測結果について述べるが、まず河床波に関する用語の定義を図-7に示した。図-8に2003年11月30日に澗沼川現地にてRSSソナーにより取得した河床形状の時系列変化を示す。横軸は時刻、縦軸は河川流下方向を示す。これは取得された縦断データを時間方向に並べたものである。濃淡が河床高に対応する。今回観測された河床波は L_s が1 m～5 m程度、 H_s が最大0.2 m程度の砂堆であった。図中における明る

い部分が、比高が高い部分、すなわち河床波のクレストに当たる部分を表し、暗い部分はボトムを表現している。クレスト、ボトムは共に一定速度で移動しておらず、時刻の経過に伴って一律に速度が減少し、ある時点で河床波は消滅(ボトムが消滅)することが分かる。現地河川では河床波の移動速度は一定ではなく、また、ある一定の生成消滅過程をたどっていることが明らかになった。

3.2 河床波の形状特性と河床波の非定常性

図-9に河床波の形状・速度を整理した。河床波の波長 L_s が長いほど、および波高 H_s が大であるほどクレストの移動速度は遅いことがわかる。また河床波の波長 L_s は波高 H_s にほぼ対応して長くなるので、結局のところ、砂堆の規模が大きいほど砂堆の移動速度が遅くなることを示している。また、水深が大であるほど規模が大きな砂堆が形成される傾向にあった。掃流砂量が一定の条件であれば砂堆が流下方向に移動するための砂の量が砂堆の規模に応じて大きくなり、移動速度が低下するのは自然であるといえる。

ところで、現地河床波の観測の結果、砂堆は一定の形状を保ちながら流下しているのではなく、単一の砂

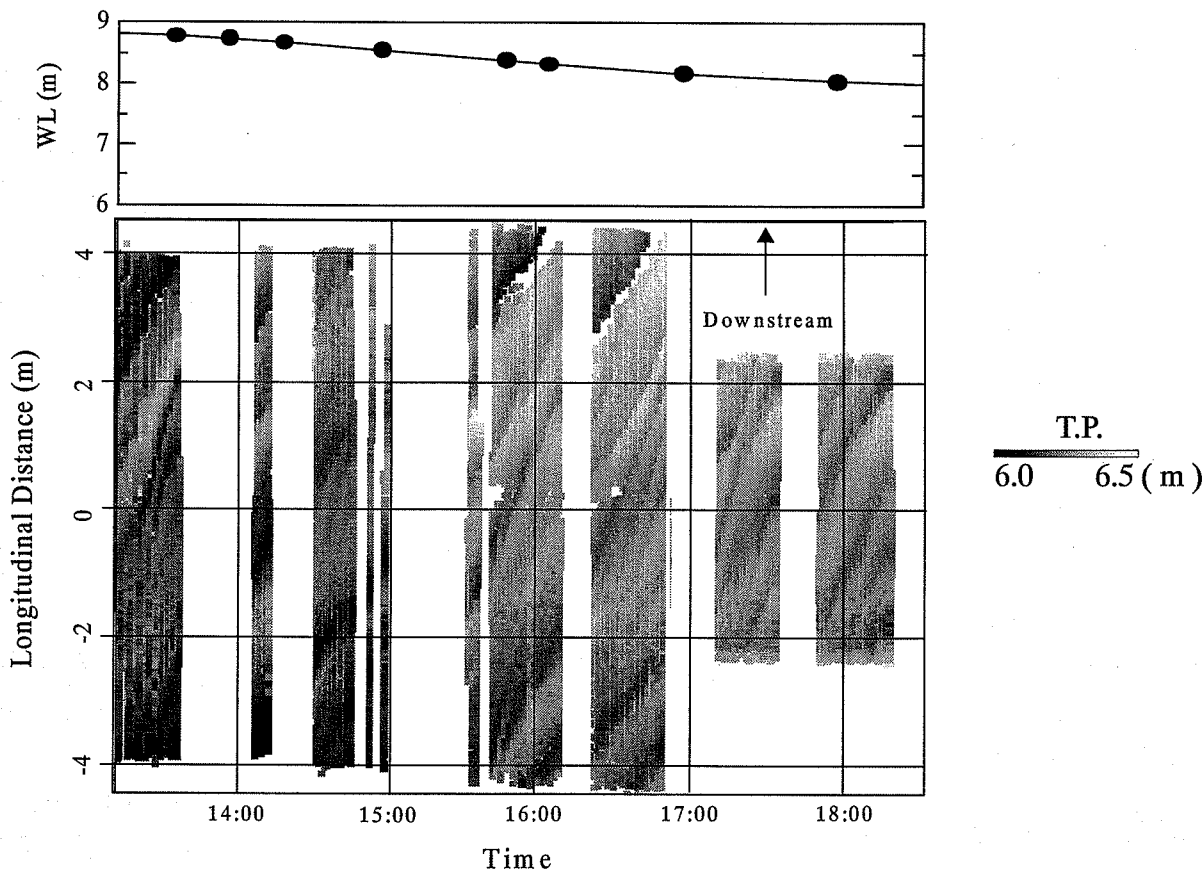
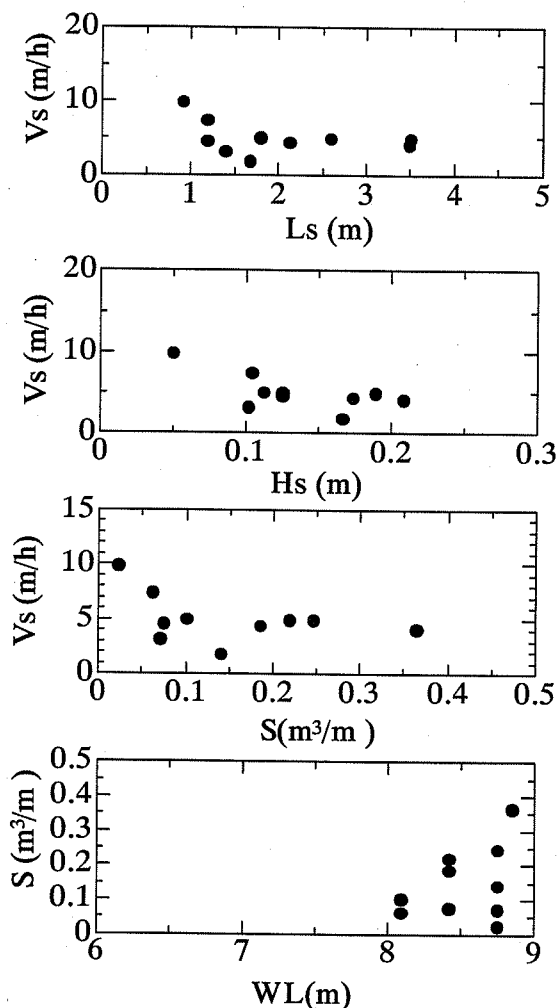
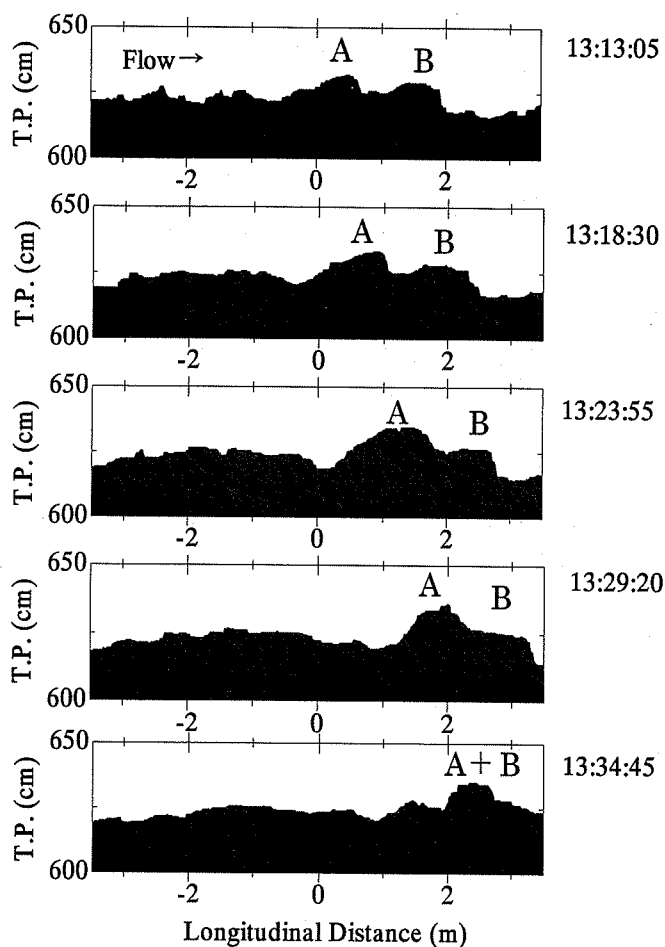


図-8 河川水位と縦断河床高の時系列変動
(澗沼川 28.1KP、2003年11月30日)



図－9 濁沼川における砂堆の形状に関するパラメータの関係 (L_s : 砂堆波長, V_s : クレスト速度, H_s : 砂堆波高, S : 単位長あたり砂堆体積, WL : 水位 (但し河床高 TP : 6m))



図－10 現地河川の河床における砂堆の合成例 (濁沼川 28.1KP、2003 年 11 月 30 日)

堆に注目すると、ある時刻にボトムが生成して H_s が次第に大きくなって成長し、ある一定の時間が経過すると H_s は小さくなって砂堆は消滅することが観測から判明した。

図－10 に前後の砂堆同士が重ね合わせられる例、図－11 に単一の砂堆が見かけ上消滅して縦断方向に波長が増加する例を示した。図－10 において 13:13:05 時点では 0.5 m 付近、1.8 m 付近の 2 箇所にクレストが存在している。クレスト A はクレスト B よりも速度が速く、次第に A が B に覆い被さるようにして合一している。この結果生じた砂堆 A+B の規模 ($H_s \cdot L_s/2$) は砂堆 A、B 単体の時点に比較して増加することになる。すなわち砂堆の成長は単一の砂堆の重なり合いによって生じることがある。この例では、上流側のクレストよりも比高の低いクレストが下流側に存在する場合はボトムに落ち込んだ掃流砂は速やかに下流

に搬送されるため砂堆は H_s を減ずることなく合一して、新たな、 H_s の大きな砂堆を生じること示している。

次に図－11 におけるボトム C とその直上流のクレストに注目する。14:30:30 時点では深いボトムが刻まれているがこのボトムは縦断方向の位置が変化することなくボトムの比高が時間的に増加している。また直上流のクレストに着目するとクレストの H_s は減少している。すなわちクレスト C から供給された掃流砂が一旦ボトムに落ち込んだあとボトムから抜け出せずに堆積したため直上流のクレストが見かけ上消滅したとみられる。この例では、あるクレストの直下流にクレストの規模を越えるボトムが存在する場合、上流側クレストから供給された土砂がボトムを埋めて上流側クレストと下流側クレストは縦断的に結合し、 L_s の大きな新たなクレストが生じること示している。同時に

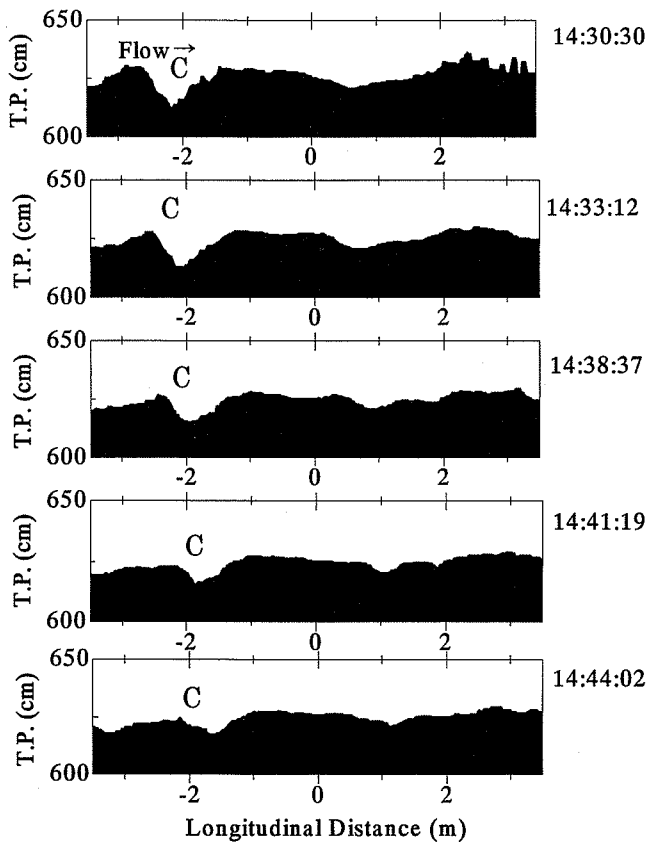


図-11 現地河川の河床における砂堆の消滅例
(澗沼川 28.1KP, 2003 年 11 月 30 日)

注目していたボトムおよびクレストは見かけ上判別できなくなる。以上をまとめると現地河床の砂堆の成長過程は以下のようにまとめられる。

I. ボトムの発生

波長の長い砂堆の不特定多数の地点にボトムが生成する。同時にボトム-ボトム間の比高の高い部分としてクレストが定義される。このときの L_s は比較的小さい。たとえば図-8において16:30時点における縦断方向0 m付近に存在する $L_s=2.5\text{m}$ 程度の砂堆上に多数のボトムが発生しているのが確認できる。ただし多数のボトムの形成機構については明らかではない。

II. クレストの重ね合わせによる砂堆高さの成長

発生時の L_s は一定ではなく、 V_s は L_s に反比例して減少するから多数のクレストが様々な速度で下流に進行することになる。このため縦断方向の砂堆に速度差が生じるためにクレストの重ね合わせが起り次第に H_s を増加させてゆく。

III. ボトムの埋没による砂堆波長の成長

砂堆の移動過程で下流側に、より規模の大きな砂堆が存在するとその砂堆よりも V_s が大きいために下流側の砂堆と合成しようとするが、もともと下流側のク

レストの比高が上流側のクレストよりも高いと両者の間に存在するボトムが埋没する傾向にあるから、結局上流側のクレストと下流側のクレストが縦断的に結合して新たな、 L_s の大きな砂堆が生じることになる。同時に上流側のクレストはみかけ上消滅するといえる。

3. 3 RSSソナーから求められた掃流砂量

砂堆の単位長あたりの体積とその移動速度から求められた掃流砂量 q_B は $0.5\sim 1.5$ (平均 0.94) ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$)であった。 q_B と過去に掃流砂採取により得られた平均粒径 d_m ($=0.6\text{cm}$)から求められた $q_B/u*d_m=0.05\sim 0.16$ であった。一方芦田・道上式(河床波あり)からは $q_B/u*d_m=0.1\sim 0.2$ が予想されたので、概ね対応しているといえる。

4. まとめ

詳細な河床変動の状況をモニタリングするために音響観測機器の一種であるRSSソナーを河床変動の観測に適用し、現地河川の河床変動を時間的に連続的に観測し、砂堆の生成から消滅までを詳細に捉えることができた。

RSSソナーは河道内の一点に固定することができれば揺動補正や波浪の補正は必要が無いために一測線の縦断変化のみながら、従来よりも時空間的に高密度に河床変動を捉えることが可能となった。RSSソナーをH鋼に固定するなどの方法によれば様々な現地の河床変動計測に適用することが可能であると考えられる。また、設置方向によっては横断方向の河床変化を観測することも可能であり、数基のソナーを組み合わせれば立体的な観測が可能となる。

現地河川での砂堆および河床波のダイナミックな挙動については未解明な部分が多く、引き続き現地における様々な水理量において観測を行なう予定である。

謝辞

河川研究室の諸氏には観測に際して貴重な助言を得た。また、住友海洋開発(株)進藤氏にはサイドスキャンソナーに関して様々な助言を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)喜沢一史他;洪水時の河床波計測技術について,土木学会第56回年次学術講演会講演集, II -095, 2001.10
- 2)上野鉄男;洪水時の乱流構造の非定常特性に関する研究,平成7,8年度科学研究費成果報告書,1999

(2004. 4. 7受付)