

涸沼川における河床波観測及び解析

OBSERVATION AND ANALYSIS OF SAND WAVES FORMED IN HINUMA RIVER

高部一彦¹・人見寿²・坂野章³・山本浩一⁴

Kazuhiko TAKABE, Hisashi HITOMI, Akira SAKANO and Koichi YAMAMOTO

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

²正会員 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 国土技術政策総合研究所河川研究室 主任研究官 (同上)

⁴正会員 博 (工) 元国土技術政策総合研究所河川研究室 研究官^{*)} (同上)

^{*)}佐賀大学 有明海総合研究プロジェクト講師 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町一番地)

We observed sand waves with Rotating Side-Scan Sonar in Hinuma River during the floods. With the sonar data, we could obtain the data of longitudinal and transversal bed shapes. Analyzing the observed data, we could clarify the characteristics of sand wave such as its velocity, length and height. They showed the transformation process of the bed configuration. Using the sand wave data, we could get the distribution of the sediment discharge in the cross section.

Key Words : Sonar, Sand waves, Dunes, Transition, Flat bed, Transformation Process, Bed Material Load, Time-lag of response

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の測定は困難であり、新たな計測技術の開発が求められている。また、河床形態の遷移は流れの抵抗の変化を引き起こすため、洪水期間中においてこれを明らかにすることも重要である。そのためこれまで、土研式流砂量捕捉装置等による流砂量の測定や、ADCPとRTK-GPSの組み合わせ¹⁾、ラジコンボートや十字浮体に設置した音響測深器²⁾等により河床形状の測定がされてきた。しかし、河床形状の把握において、これらの観測方法は広域的な観測が可能であるが、砂堆の消長等を捉えるには空間的な精度が十分ではない。山本ら³⁾は、涸沼川において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 (以下ソナーと呼ぶ) を使い、洪水時に河床の縦断形状について観測し、縦断形状の経時的変化を明らかにした。そこで本研究では、同型ソナーを用いて河床波の横断方向の分布特性や掃流砂量の空間的分布について明らかにするために、定点における河床の連続観測を行った。また、観測データを用いて河床形態の遷移過程の把握と流砂量の横断方向分布を把握するとともに、一般的な流砂量式と比較した。

2. 観測施設及び涸沼川

観測地点は、一級河川那珂川水系涸沼川の28.1KPにある、河川研究室所有の「涸沼川洪水観測施設」⁴⁾である。この施設は、低水路を昇降可能な観測台を有し、洪水時においても水面近傍まで近づき観測が可能である。ソナーは、昇降台の左端から約2m (低水路左岸から約2.5m) の位置に設置した。観測地点の横断図とソナー設置位置の概略を図-1に示す。観測地点における河床材料粒度分布は図-2に示すように代表粒径 d_{50} は1.6mmである。

3. 観測方法及び解析方法

ソナーは写真-1に示すような、円筒状本体の先端に超音波を送受信するヘッド部があり、それが回転することにより河床形状をスキャンできるものである。スキャンに要する時間は1分程度であるため、厳密にはデータの同時性に欠けるが、河床波の移動速度と比較すると僅かであり、同一時点の空間データとして扱える。ソナーを水面と平行に設置することで河床の縦断形状を観測し、水面と垂直に設置することで平面形状を観測することが

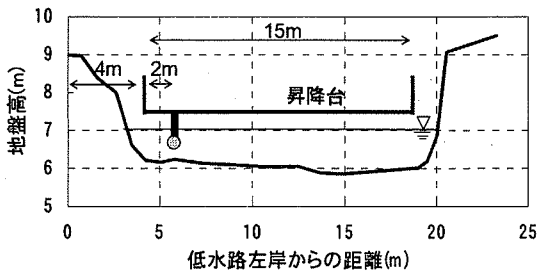


図-1 観測地点の横断形状とソナーの設置箇所

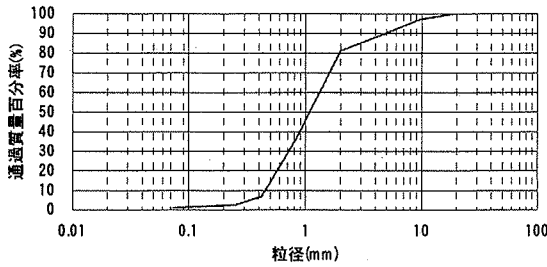


図-2 観測地点の粒度分布

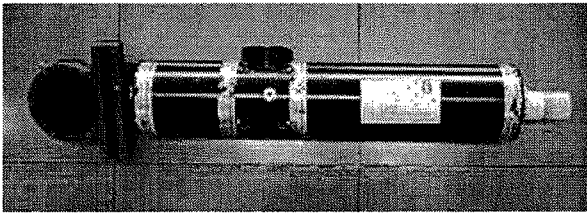


写真-1 ソナー

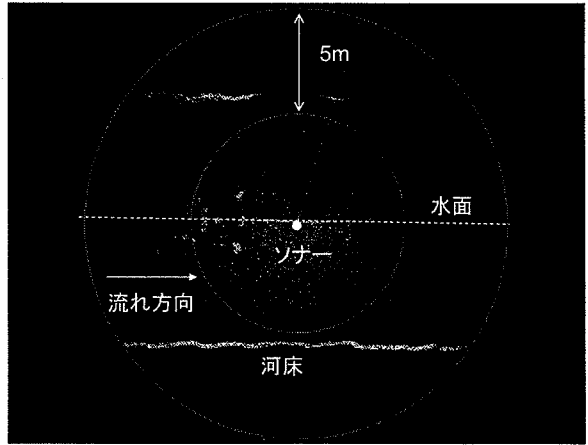


図-3 縦断方向のソナーデータ例

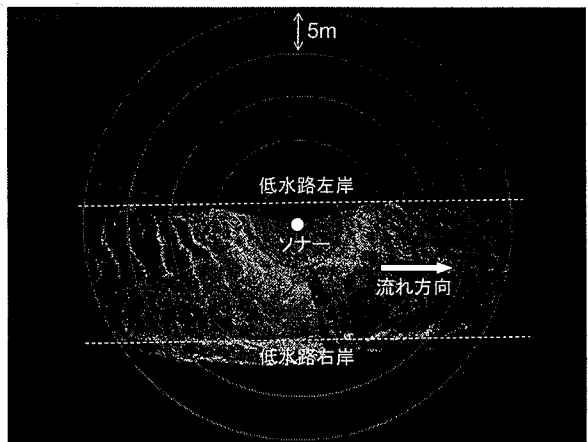


図-4 平面方向のソナーデータ例

できる。つまり、縦断形状と平面形状のデータを組み合わせることによって、河床波の波速、波長、波高の平面分布を把握することが可能である。

縦断方向の観測データ及び平面方向の観測データを図-3、図-4に示す。図-4で河道内に線状に現れているのが河床波のクレスト部（頂部）にあたる。図-4に示すように平面方向の観測データにおいて、ソナーより下流側の河床波は、はっきりと現れないため解析の対象外とした。

解析方法を次に示す。まず、各時刻で観測した縦断方向データを2次元の座標系に変換する。次に座標系に変換したデータを使い、図-5に示すように河床波の波速、波長、波高を定義し、(1)式によりそれぞれ求める。

$$Vs = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{ndt}, \quad Ls = \frac{\sum_{i=1}^n Ls_i}{n}, \quad Hs = \frac{\sum_{i=1}^n Hs_i}{n} \quad (1)$$

ここで、 Vs ：波速、 Ls ：波長、 Hs ：波高、 n ：総河床波数、 dt ：観測時間間隔である。次に、平面方向のデータからも縦断方向の数測線について同様に求める

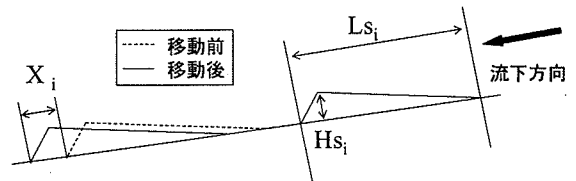


図-5 波速、波長、波高の定義

が、波高については縦断方向データの波長と波高の関係を使い求めることとした。また、解析結果に用いる観測中の τ_* は(2)式により求めた。 τ_* は、横断方向で異なると考えられるが、ここでは簡単のため断面平均の値を用いた。

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

ここに、 h ：ソナー位置の水深(m)、 I_b ：河床縦断勾配(=1/1200)、 s ：砂の水中比重(=1.65)、 d ：ソナー位置の代表粒径(=1.6mm)である。

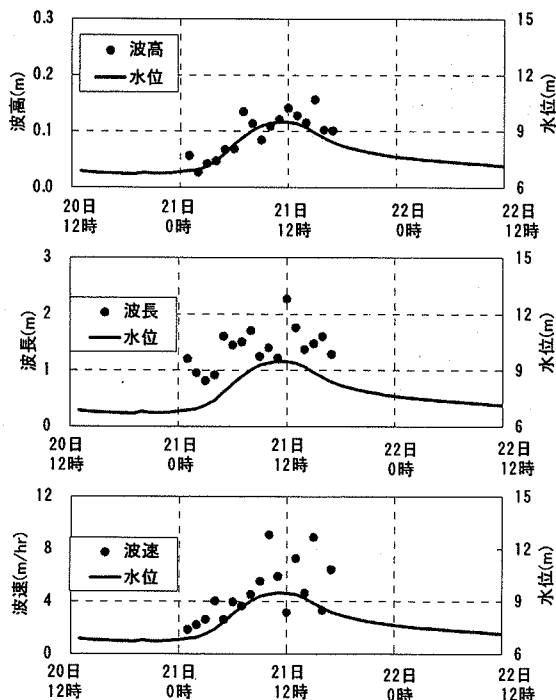


図-6 河床波特性の時間的変化 (台風2号)

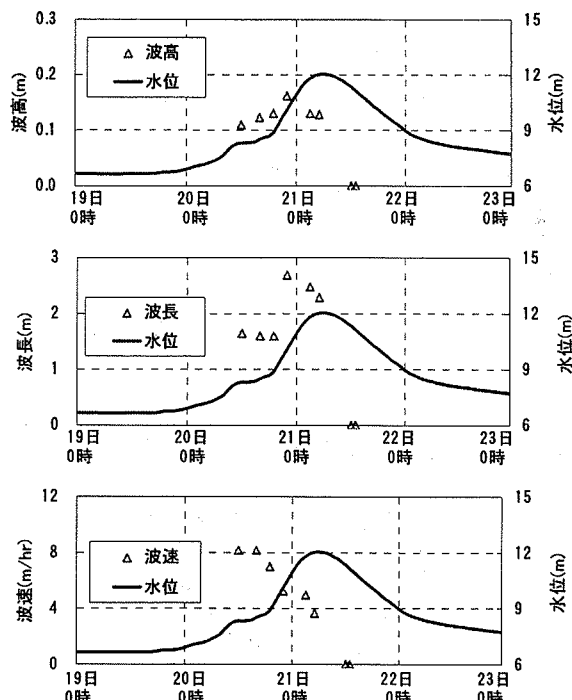


図-7 河床波特性の時間的変化 (台風23号)

4. 解析結果

(1) 縦断方向データ

観測を行った各洪水は2004年5月及び同年10月に発生した台風2号と台風23号である。各洪水における、時系列データを図-6、図-7に示す。台風2号のデータでは、水位ハイドロの時間変化に伴い河床波の波高、波速、波長も変化している。一方、台風23号のデータでは、河床波の波高、波長、波速のピークは、水位ピークよりも早い時期になっている。図-8に τ_* と各河床波の特性変化を示す。この図から、 τ_* が1.0付近以下では τ_* の増加に伴い、波高、波長、波速ともに増加傾向にあるが、 τ_* が1.0付近以上では、波速は減少し、波高と波長は横ばい傾向となることが分かる。山本の研究⁵⁾を参考(図-9)に、 τ_* と河床形態の関係を調べてみると、 τ_* が1.5前後で、河床波が砂堆から遷移河床となることが予測されている。また、芦田・道上による河床形態の領域区分と観測データの比較を図-10に示す。本観測データを芦田・道上の領域区分で区別した場合、 τ_* が1.0前後で遷移領域となる。以上のことから、瀬沼川においては、 τ_* が1.0~1.5付近で遷移河床となることが考えられ、そのため、縦断方向の観測データも、 $\tau_*=1.0$ 付近で河床波の特性が変化していると考えられる。

τ_* の最大値が1.0程度の台風2号においては、平坦河床データは見られなかった。台風23号においては、平

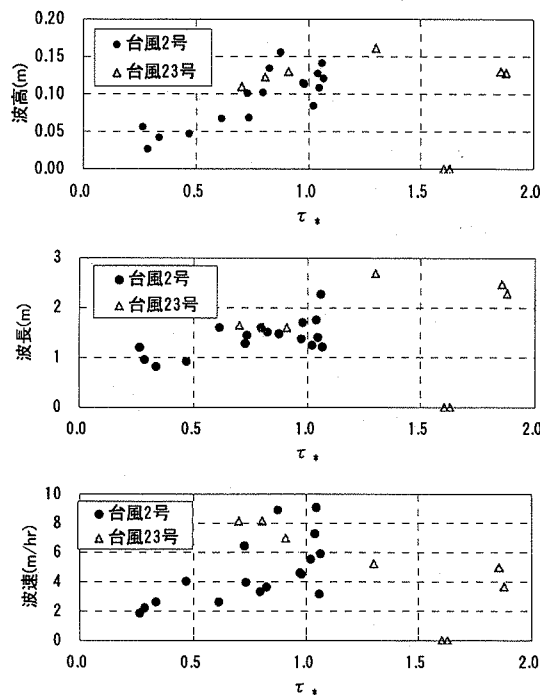


図-8 τ_* による河床波特性の遷移

坦河床と考えられる τ_* が1.9程度においても河床波が確認でき、その後の減水期の τ_* が1.6付近において河床波の存在しないデータ(平坦河床)が存在していた。このことから、河床波は水理量に直接対応しているのではなく、水理量に対して時間的な遅れをとまって河床形態が変化し、履歴性を生じるとみられる。

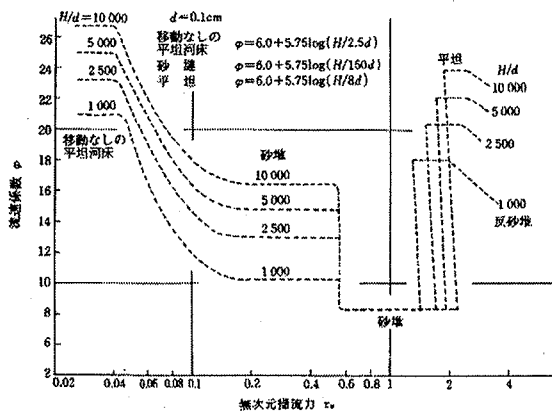


図-9 山本による流れの抵抗と河床形態の関係

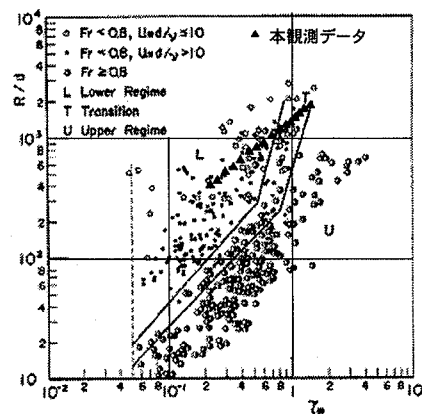


図-10 小規模河床形態の領域区分 (芦田・道上)⁶⁾

(2) 平面方向データ

平面方向データの解析方法は、河岸方向と平行に引いた測線（縦断方向測線と平行）において、ソナーのある測線を0m測線、ソナーから右岸に向かって、2m、4m、6m離れた測線をそれぞれ、2m、4m、6m測線とする。各測線に対するデータは、縦断データの解析と同じく、その測線上にある河床波の平均的な量を求めた。そのため、0m測線のデータは、縦断方向データと同じ測线上的データを意味する。各測線ごとの解析結果を図-11に示す。平面データにおいても、縦断データと同様に減水期において、 τ_* が1.5近傍で平坦河床であるデータが観測された。また、図-11から測線によらず波長は τ_* に比例して増加していくが、波速は、 τ_* が0.8より大きくなると、横ばいまたは減少傾向となっている。このように、前述の縦断方向のデータとほぼ同一の傾向が確認され、縦断方向及び平面方向データを組み合わせて解析することは妥当であると考えた。次に、同じ τ_* で比較すると、波速、波長ともに、河道中央部に向かうほど（0m→6m測線）大きくなることが分かる。これらは、流速の横断分布に対応していると考えられる。鉛直方向の平均流速 v を Manning式を用いて(3)式で表せば τ_* は(4)式となる。(4)式

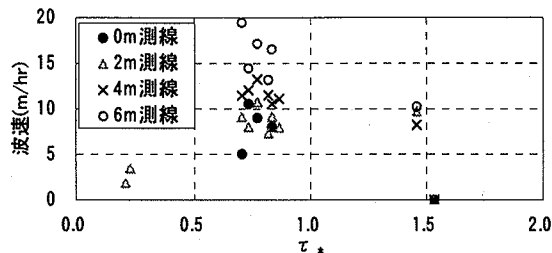
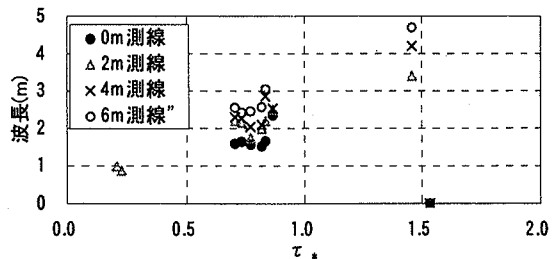


図-11 各測線での河床波特性

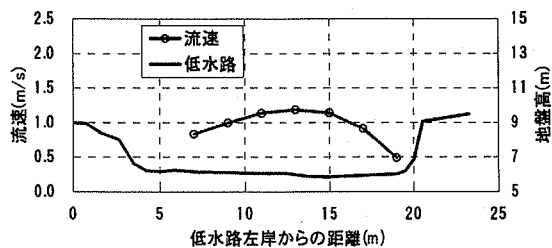


図-12 流速分布 (2004年10月6日洪水, $h=1.2$ m時)

から τ_* は、流速及び水深に依存することが分かるが、観測地点での水深は横断的に変化が小さく、一定と見なせば、 τ_* は特に流速に大きく影響されると言える。

$$v = \frac{\sqrt{I_e}}{n} h^{2/3} \quad (3)$$

$$\tau_* = \frac{n^2 v^2}{s d h^{1/3}} \quad (4)$$

ここで、 I_e はエネルギー勾配、 v は流速、 n は粗度係数である。このことから、観測地点における、河床波の波長、波速の横断的な分布は、流速の横断分布により生じていると考えられる。参考として、2004年10月6日の洪水時に計測した流速分布を図-12に示す。

(3) 河床形態の遷移

縦断方向及び平面方向データの解析結果から、涸沼川における河床形態の遷移は次のように考えられる。増水期においては、 $\tau_* \leq 1.0$ で砂堆、 $1.0 \leq \tau_*$ で遷移河床、減水期においては、 $1.5 \leq \tau_* \leq 1.6$ で平坦河床となる。台風23号による洪水時の河床形態の遷移を図-13に示す。ここで、 $\tau_* \leq 1.0$ のLower Regime領域において、河床形

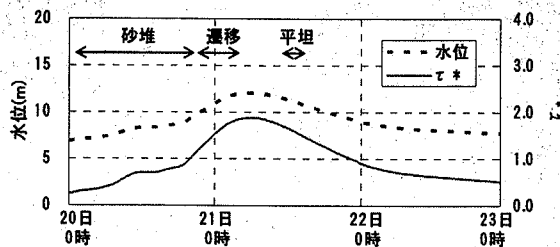


図-13 台風23号による洪水時の河床形態の推移

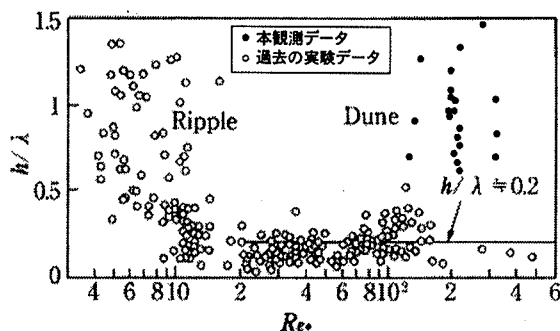


図-14 水深波長比と粒子Reynolds数の関係⁹⁾

態が砂堆であるかの確認をする。一般的に砂堆の波長は水深の5倍程度とされている⁷⁾。一方、砂漣として考えた場合、波長は粒径の300～1500倍、波高は波長の0.03～0.06倍程度とされている。観測データによる波長は、水深の0.4～1.5倍で、粒径の500～1500倍、波高は波長の0.03～0.10となっており、砂堆よりも砂漣の特性に近い。また、本観測と過去の実験により得られた、水深波長比と粒子Reynolds数の関係を図-14に示す。粒子Reynolds数は次の(5)式で表せる。

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (5)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 ν は水の動粘性係数($=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)である。図-14から、酒沼川において河床形態は、砂漣とはならず、酒沼川におけるLower Regime領域の河床形態は砂堆と考えられる。観測された河床波の波長が短い理由は、河床波がある水理量において平衡状態まで発達するには、ある程度の時間を有する⁹⁾が、洪水時のような非定常下においては、十分に発達できないまま、次の水理量に支配されていくため、実験結果による波長より小さい値となっている。このことは、水理量に対する河床波の応答遅れが生じていると考えられる。また、観測地点においては、低水路幅が狭く、低水路左岸側は竹林となっており、これらの河岸植生による抵抗や渦の影響を低水路全体で受けやすく、必ずしも、見かけの水理量に対応した河床波形状となっていないと考えられる。

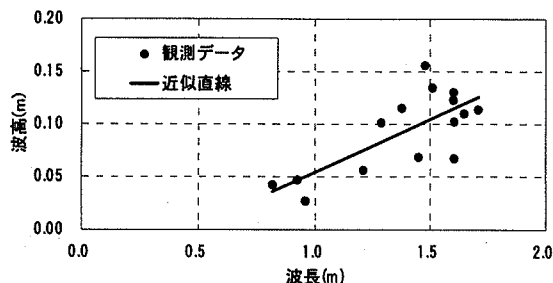


図-15 砂堆時の波長と波高の関係 ($\tau_* \leq 1.0$)

5. 流砂量の算定

(1) 流砂量の算定範囲と算定方法

これまでの考察により、酒沼川においては、 $\tau_* \leq 1.0$ において、河床形態が砂堆であることが分かった。河床形態が砂堆時においては、砂堆の移動速度により流砂量が求められる。以下の方法で流砂量を算定した。

砂堆の観測データから波高及び波速を求め、(6)式を使い流砂量を算定した。

$$q_s = \frac{H_s V_s}{2} (1 - \lambda) \quad (6)$$

ここに、 q_s :単位幅あたりの流砂量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 λ :空隙率($=0.4$)である。(6)式を使うに当たり、平面データにおいては、波高が求められないため、流砂量が求められない。砂堆の特性は、波高と波長は比例することとして¹⁰⁾、砂堆時における縦断データの波長と波高の関係が、平面データと同一とし、平面データの砂堆の波高を求めた。2洪水の砂堆時における縦断データの波高と波長の関係を図-15に示す。この図から求めた波高と波長の関係を(7)式に示す。

$$H_s = 0.1L_s - 0.046 \quad (7)$$

(2) 実験データとの比較

観測による縦断データ及び平面データから算出した無次元流砂量と、芦田・道上式による無次元流砂量の比較を行った。図-16に観測データから求めた流砂量を示す。この図から、流心部のデータ(測線No6)の流砂量は、実験データとも概ね一致しているが、左岸に近づくほど、小さい値となっていることが分かる。この原因は、 τ_* を測線ごとに評価していないためと考えられる。

(3) 流砂量ベクトル図

台風23号増水期のある時刻($\tau_* = 0.8$)における平面データを使って作成した流砂量の平面分布図を図-17に示す。また、図-17に示したデータを元に横断面内の流

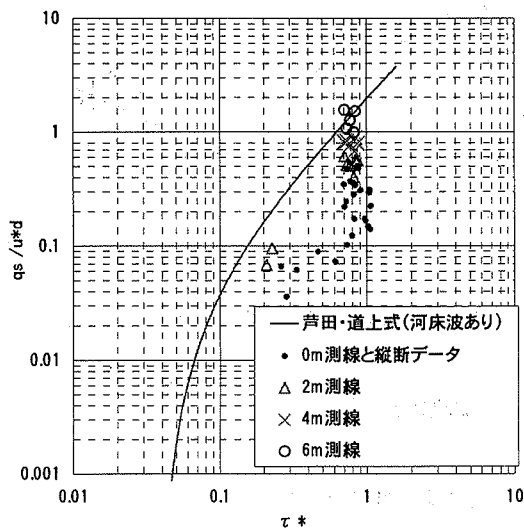


図-16 芦田・道上式と観測データの流砂量比較

砂量の分布を調べた。その結果を図-18に示す。これらの図から概ね、流心部に近いほど流砂量が多くなることが分かる。また、河岸近傍（左岸から5m）と水路中央部（左岸から12m）では、1オーダー近く流砂量の差が生じていることが分かる。これらのことから、川幅が狭く、河岸植生による抵抗を受けるような河道内においては、河岸による摩擦抵抗が流速だけでなく流砂量の横断分布にも大きく影響することが考えられる。

6. まとめと今後の課題

実河川における洪水時の河床波観測例は極めて少なく、特に河床形態の遷移過程を捉えた観測例は皆無に等しい。その理由として、通常の音響探査装置では河床形状を把握するためには超音波の発射角が広い（7度前後）ことや、音響探査装置を平面的に移動するための浮体の移動範囲や浮体の位置把握に精度上の限界があったことが挙げられる。本研究では、河道の一点に固定して機械的にヘッドを回転させて河床形状を取得する特殊なソナー（発射角1.7度）を用いることによりこの問題を解決し、河床の鉛直2次元形状や河床の特徴的な地形の平面2次元分布を把握することができた。また、これらを時系列的に把握することによって流砂量の空間分布を把握した。本研究により、横断面内における流砂量は分布を持つことが分かったため、今後は横断方向の流砂の粒度分布特性や水理条件を把握して解析する予定である。また、遷移河床および反砂堆が生じる場合は河床形状の変化として流砂量を把握することができないため、掃流砂を連続的に採取することが必要になる。今後は現地における掃

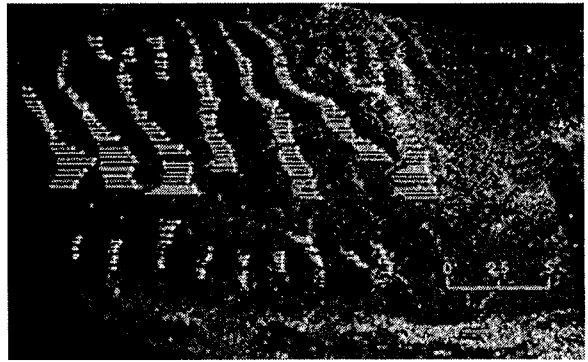


図-17 無次元流砂量の平面分布図

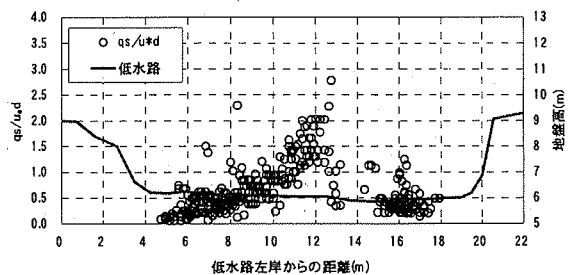


図-18 横断方向の流砂量分布 ($\tau_* = 0.8$)

流砂採取手法の開発と組み合わせにより精度の高い観測手法を確立して実河道における掃流砂の実態把握を目指す予定である。

参考文献

- 1) 喜沢一史：洪水時の河床波計測技術について，土木学会第56回年次講演会講演集，II-095，2001.10.
- 2) 上野鉄男：洪水時の乱流構造の非定常性に関する研究，平成7,8年度科学研究費成果報告書，1999.
- 3) 山本浩一他：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，河川技術論文集第10巻，pp. 297-302. 2004. 6.
- 4) 山本晃一他：酒沼川洪水観測所レポート[1]，土木研究所資料2895号，1990.
- 5) 山本晃一他：河川における土砂の移動機構に関する研究ノート，土木研究所資料第1416号，1978.
- 6) 水理委員会研究小委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会論文集，第345号，土木学会，pp. 41-52, 1984.
- 7) 土木学会編：水理公式集，平成11年版，土木学会，p. 183, 1999
- 8) 水理委員会研究小委員会：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，土木学会，pp. 85-91, 1973.
- 9) 上野鉄男：三次元計測による河床波の発達過程の検討，第31回水理講演会論文集，pp. 653-658, 1987. 2.
- 10) 上野鉄男，宇民正：砂漣と砂堆の発達過程に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第318号，pp. 75-84, 1982.

(2005. 4. 7 受付)