

砂面および水面の測定による掃流砂量の測定法

北海道大学工学部 正 員 岸 力
 " " " ○板 倉 忠 興
 " " " 森 明 巨
 " " " 黒 木 幹 男

緒 言 掃流砂量を求めるために理論的又は実験的に導かれた流砂量式がいくつか提案されている。一方、実際に流砂量を測定するには多くの困難が伴い、特に実際河川においては実測の資料が少なく、これらの流砂量式の適合性について十分に検討することは困難である。河川における流砂の現象の解析をより深く進めるためには、理論的解析と相まって、流砂量の測定方法を開発することも重要な課題であろう。本文は、ある固定した点における河床面又は水面の時間的変動の実測記録に基づいて、間接的に掃流砂量を知る方法について検討を行なったものである。

1. 河床波の直接測定による方法

固定した測点における河床面の時間的変動の記録が与えられた場合に掃流砂量を算定する方法である。図-1のように河床上を砂堆が移動する場合、流砂の連続式は(1)式となる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここに、 x : 流下距離、 y : 河床高
 λ : 砂の空隙率、 t : 時間
 q_B : 単位時間、単位幅当りの流砂量(実容積)

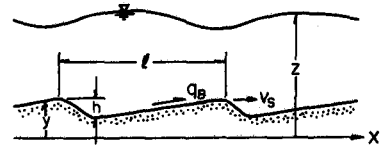


図-1 砂堆の移動

砂堆がその形を変えずに一定の速度で流下し、さらに砂堆の谷間では流砂量がないと仮定して(1)式の積分を行なうと(2)式を得る。

$$q_B = (1-\lambda) V_s \frac{1}{T} \int_0^T h dt \quad (2)$$

ここに、 V_s : 砂堆の移動速度、 h : 谷からの砂堆の高さ、 T : 時間

V_s および h が河床の時間的変動記録から定められるならば、(2)式によって流砂量を知ることができる。ただし、河床に発生する砂堆は一般に規則的ではなく、また定常ではないので、河床の変動記録を統計的に処理することとした。

(1) 砂堆の高さ

縦断方向に並んだ二測点における時間的な河床変動の記録の例を図-2に示した。図-2から明らかなように、砂堆は規則的な形を保っていることはなく、そのために砂堆の谷から谷までの通過時間 T_i も一定ではない。したがって(2)式中の h に関する積分を行なう場合に、砂堆の高さの基準点および T_i の決定の仕方によって、この平均高さも種々の値をとることになる。

図-2の資料から自己相関関数を求めたものが図-3である。図-3のコレログラムを見ると、河床の時

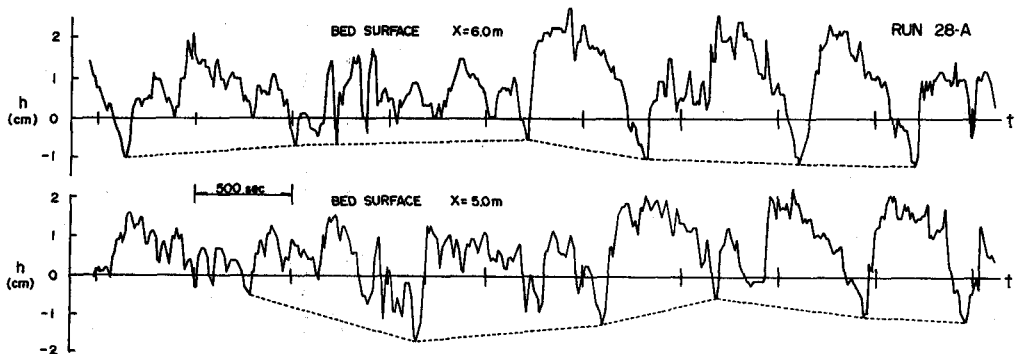


図-2 時間的河床変動記録

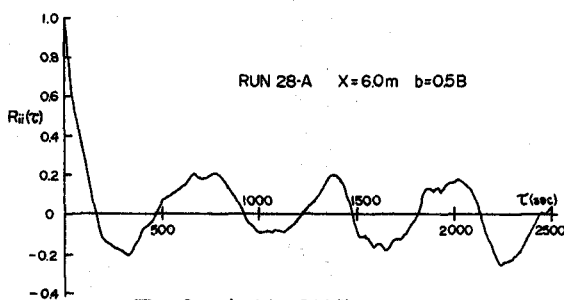


図-3 自己相関係数

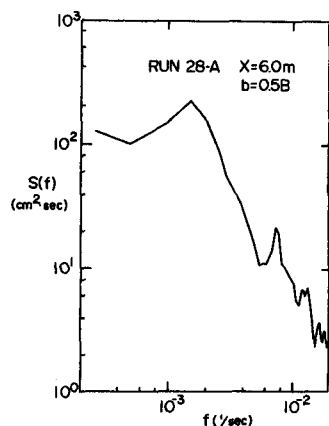


図-4 時間スペクトル密度

間の変動には明らかに周期性が認められる。しかし、現象の性質上これからただちに卓越周期を判別することは困難である。図-4は同じ記録のパワースペクトル密度関数であり、明らかな卓越周期が認められる。

そこで、河床変動の記録上で、時間スペクトル密度が最大となる時間間隔にできるだけ近い時間間隔の谷と谷を直線で結び、これを基準線としてこれから上方の部分に対して(2)式の積分を行なう。図-2中の破線はこの状態を示している。ただしこの場合、図-4の例のように時間スペクトル密度が最大となる周波数よりも高い周波数で二次的極大値が出現することがある。これは砂堆の三次元的特性の影響によるものと考えられる。したがってこのような場合の基準線の決定に際しては、二次的な極大値をとる時間間隔をも考慮に入れることとした。

(2) 砂堆の移動速度

砂堆の移動速度の算定には、二つの測点における河床変動記録の相互相関関数を利用する。図-5に同じ記録の相互相関係数を示す。

すなわち(3)式のように、二測点間の距離 L を河床変動の相互相関が最大となるずらし時間 $\tau_{\max}$ で除した値を移動速度と考えた。

$$V_s = L / \tau_{\max} \quad (3)$$

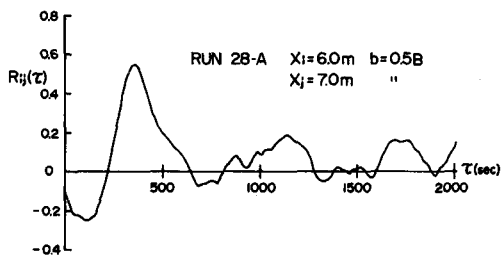


図-5 相互相関係数

なお、(3)式による V_s は河床波全体の平均の移動速度であるが、移動速度に対する周波数の影響は次のようである。

二測点間の変動記録の位相差を φ として(4)式により到達時間 T_a を求め、一例を図-6に示した。

$$T_a = (\varphi + 2n\pi) / 2\pi f \quad (4)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

図-6中の破線は $\tau_{\max}$ であり、適当な n の値をとると、到達時間は周波数によらず一定と考えて良いようである。

(3) 結果の検討

以上に述べた方法によって(2)式中の砂堆の高さおよび移動速度を定め、実験による検証を行なった。

実験には幅1m、長さ20mの実験水路を用い、水路中心線上に0.5~1mの間隔で設置した二つの測点において河床高の時間的な変動を観測した。読取の間隔は5~10秒である。水路の上流端には給砂装置があり、流砂量とほぼ等しい量の砂を供給している。採砂は貯水槽内で行ない殆んど全量を捕捉している。使用した砂は比重 $\rho_s = 2.66$ 、 $d_{50} = 0.23 \sim 0.62$ mm、空隙率 $\lambda = 0.37$ の川砂である。

図-7は実測値と計算値を比較したものである。

図のように前述の方法によって河床波の時間変動記録から算出した掃流砂量の値は実測値の+50%~-50%の範囲となっている。

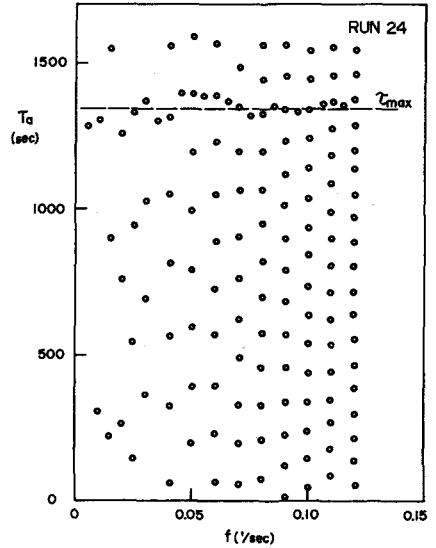


図-6 周波数と到達時間との関係

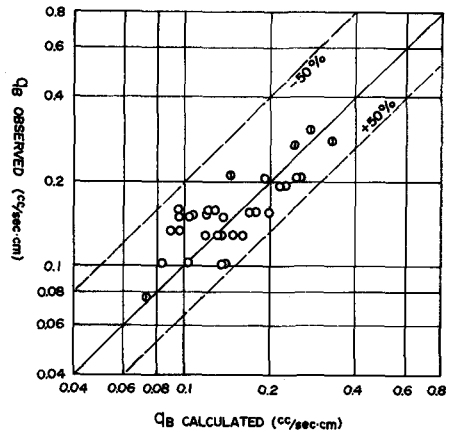


図-7 実測値と計算値との比較

2. 水面の測定による方法

著者らは開水路内のある固定した点において時間的な河床の変動と水面の変動の同時観測を行ない、それらの間に強い相関関係が存在することを確認している。このことを利用して、水面の変動から河床の変動を推定することができれば、前章と同様の手段によって掃流砂量の算定が可能であろう。前章の河床波の直接測定による方法と比較して、水面の時間変動の記録を得ることは、実際の測定技術の面からも非常に容易であり有効な手段と考えられる。

本章では、一つの観測点における水面変動の記録が与えられた場合について考察を行なう。すなわち、この種の時間変動記録から掃流砂量を算定する方法のうちでは、前章の方法がもっとも直接的かつ多くの情報量を利用しているものであり、精度としてはその上限に相当するものであろう。他方、以下に述べる方法は、より間接的かつ少ない情報量に基づいているものであり、この方法ではどの程度まで前述の精度の上限に近づき得るかにについて検討を試みたものである。

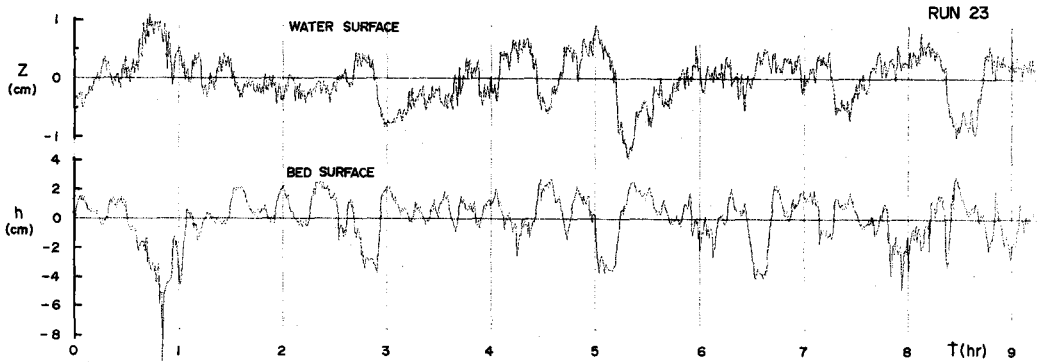


図-8 水面および河床の時間変動記録

(1) 河床の変動と水面の変動との関係

図-8は固定した同一の測点における時間的河床の変動 h と水面の変動 z の一例である。

図-9はこれらの記録のパワースペクトルをそれぞれの分散 σ_h^2 及び σ_z^2 で正規化して示したものである。図のように両者は、特に低周波の領域で良く一致して居り、両者の変動特性も同一と考えられる。

なお、河床変動と水面変動との位相差を求めた結果では、 $f < 7 \sim 8$ cycle/hr の低周波領域では π となって居り、このことは図-8の変動記録からも確認することができる。

図-10は河床と水面の変動のそれぞれの標準偏差の間の関係を示したものである。図のように流れのフルード数 F ($F = U / \sqrt{gH}$, ここに、 U : 断面平均流速、 H : 平均水深) との間に良い相関関係が見られる。図-10中の直線は(5)式である。

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_h} = \frac{F}{1 - F^2} \quad (5)$$

(2) 掃流砂量の算定

今、固定した測点における水面の時間的変動記録が与えられたとして、次のように掃流砂量の算定を行なう。

- 1) 水面の変動記録からその標準偏差 σ_z を算出する。
- 2) 流れのフルード数から(5)式によって河床変動の標準偏差 σ_h を算出する。
- 3) 水面変動の記録に前章(1)の方法を適用して基準線より上方の部分の平均高さを算定する。又は、河床の変動

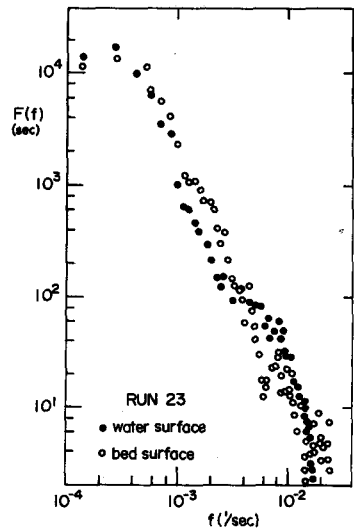


図-9 時間スペクトル密度

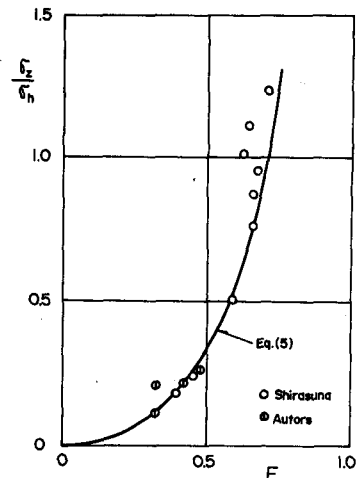


図-10 標準偏差とフルード数との関係

に適当な周期関数（正弦波、三角波など）を仮定し、河床波の平均高さを算出する。

- 4) 水面変動の記録が縦断方向にある距離だけ隔った二点で得られている場合は、両者の相互相関関数から前章(2)の方法によって移動速度を算出する。
- 5) 変動の記録が一点のみで与えられている場合は、パワースペクトルを算出して変動の卓越周期を求める。ただし、この卓越周期を移動速度に換算する際には、河床波の波長に関するもう一つの情報が必要であり、例えば実験式などが必要である。
- 6) 又は、直接移動速度の実験式を利用する。
- 7) 以上の結果から(2)式によって掃流砂量を算定する。

(3) 結果の検討

以上の方法によって掃流砂量の算定を行ない、実験水路における実測値と比較した結果を図-11に示した。

ただし、便宜上すべての計算値は河床波の平均高さを求める前節3)の段階で正弦波を仮定し、標準偏差の $\sqrt{2}$ 倍とした。

白砂の資料および×印は、前節5)の段階で波長に対して $\ell = 5H$ の関係を用いたものである。白砂の場合は実測の波長と $5H$ の関係がほぼ充されているが、著者らの実測の波長は非常に大きく、図-11中の相違はこのことによるものであろう。①印は×印と同一の記録に対し前節4)の方法（ただし、河床-河床）を適用したものである。△印は移動速度に(6)式を適用した結果を示している。

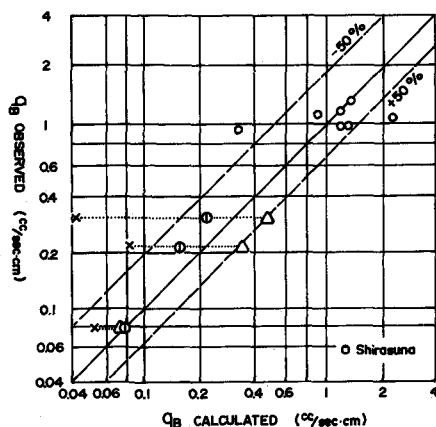


図-11 実測値と計算値との比較

$$V_s = 0.00788 \frac{U^4}{H^{1.25} g^{1.5} d^{0.25}} \quad (6)$$

Kudryashov
(d : 粒径)

すなわち、本章の方法を用いても、河床波の波長に関する取扱いが適切に行なわれれば、前章の河床面の直接測定による方法の精度に充分近づけ得ることが解る。

あ と が き

最初に述べたように、本文は現在特に実際河川における流砂量の実測値が少ないことから、できるだけ簡単な方法によってその資料を得ようとするひとつの試みについて述べたものである。方法の検証に用いた資料はすべて実験水路のものであり、適用範囲の検討なども充分とは言えないが、水面の時間的変動記録を知れば掃流砂量を推定する可能性があることは示されたであろう。なお、本方法は限られた河床形態の場合以外には適用できないことは当然である。

本研究は文部省科学研究（総合A）の一部であり、計算には北大型計算機センターを使用した。

参 考 文 献

- 1) 板倉・藍・穴吹：掃流流砂量の測定に関する研究、第24回土木学会年講、1969。
- 2) 岸・森・黒木：移動床流れにおける河床形態と乱れの相互依存性、第28回土木学会年講、1973。
- 3) 森・岸・佐々木：移動床流れにおける流速変動の特性と砂面・水面との相互関係、第29回年講、1974。
- 4) 白砂孝夫：流れと河床波の相互作用についての二・三の考察、電力中研報告、№72003、1972。
- 5) Korchokha, Yu. M.: Investigation of the Dune Movement of Sediments on the Polomet River, Soviet Hydrology Selected Papers, No.6, 1968。