

京都大学防災研究所 正会員 澤井健二  
 〃 〃 〃 芦田和男  
 〃 大学院 学生員 加藤 均

まえがき 河川の抵抗や流砂あるいは流路変動の機構において、河床波の占める役割は大きく、従来その平衡状態を対象とした研究が数多くなされてきた。しかしながら、実河川の流量は絶えず変化しており、はたして時々刻々の水理量に対応した平衡状態の砂洲や砂堆が形成されているかどうかは疑問である。そこで本研究では、従来の研究をもとにどのような条件下でその状態の遷移が問題になるかについて考察を行うとともに、いくつかの流量を交互に反復させた実験を行い、その応答特性について考察する。

1. 河床波の発達に要する時間 Yalin<sup>1)</sup>によれば、平坦河床から砂堆が充分に発達するのに要する時間 $T$ の無次元量 $\Pi_T$  ( $\equiv T\sqrt{(P_s/\rho-1)gd^3} \tau_*^{3/2}/h^2$ )は、

$$\Pi_T = 31.5 \delta / \{ f(\delta) \cdot (\eta-1)^m \cdot \eta^n \} \quad \dots (1)$$

と表される。ここに、 $\eta \equiv \tau/\tau_c$ ,  $\delta \equiv \Delta/\lambda$ ,  $f(\delta) = 1 - 3.33\delta$ で、 $\Delta$ は波高、 $\lambda$ は波長を表している。ここで、 $\delta$ を $\eta$ と $h/d$ の関数として表し<sup>2)</sup>、 $m = 3/2$ ,  $n = 0$ ,  $\tau_{*c} = 0.05$ ,  $P_s/\rho = 2.65$ を代入すれば、図-1が得られる。この図によると、たとえば  $I = 1/500$ ,  $d = 1\text{mm}$ ,  $h = 15\text{cm}$  程度の場合には  $T \approx 1\text{hr}$ 、また  $I = 1/5000$ ,  $d = 0.3\text{mm}$ ,  $h = 1.5\text{m}$  の場合には  $T \approx 150\text{hr}$  となり、実験室規模では比較的早く平衡状態が得られるが、実河川規模では、平衡状態の形成に数日間も要することになる。また、従来の多くの研究によれば、河床波の波高は時間の平方根に比例して増大することが知られており、平衡状態の波高の半分程度に達するには、上記の時間の約1/4程度かかることになる。

式(1)の妥当性については検討の余地があるが、わが国の出水形態を考えれば、洪水の継続時間は、河床波の発達時間に比べてかなり短いものと思われる。

2. 河床波上の抵抗と流砂量 河床波形状と流れの抵抗の関係を表す式として、Yalinの理論式<sup>3)</sup>がある。

$$\frac{f'}{f} = \left(1 - \frac{8}{f} \frac{\Delta}{\lambda} \frac{\Delta}{h}\right) / \left(1 - \frac{\Delta}{\lambda} \cot\theta\right) \quad \dots (2) \quad \sqrt{\frac{\delta}{f'}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h}{d} \quad \dots (3)$$

著者らの実験によれば、河床波の変形過程においても、河床波形状ならびに流量・勾配・粒径を与えることによつて、上式から水深がかなり精度よく推定できることがわかった。たとえば、 $I = 1/500$ ,  $d = 1\text{mm}$ ,  $\delta = 950\text{cm}^2/\text{s}$  において、波高・波長がともに平衡状態の半分程度であるとする、水深は平衡状態の約8割程度となり、流砂量は平衡状態におけるものの約4倍になることが予想される。

3. 流量変化に伴う河床波の変形過程 河床波の変形過程には、大きく分けて、個々の波の発達・減衰と、隣接する波の合体ならびに新しい波の発生の過程があるが、実際にはそれらが複合して、きわめて複雑な変化の様相を呈する。従来の研究には、あるひとつの平衡状態から流量が急変した場合の変形過程について、詳細な検討を行ったものがあるが、さらに一般的には、任意の河床形状と任意の水理量を組み合わせた場合に、その変形速度がどのようなになるかといふ観点から、法則を見出ししていく必要があろう。この場合、任意の河床形状を表現する指標として、平均波長と平均波高の組をとれば、法則はたとえば次のような形をとるであろう。

$$\left(\frac{d\lambda}{dt}, \frac{d\Delta}{dt}\right) = f_n \left( \delta, I, d, \lambda, \Delta, P_s/\rho, \dots \right) \quad \dots (4)$$

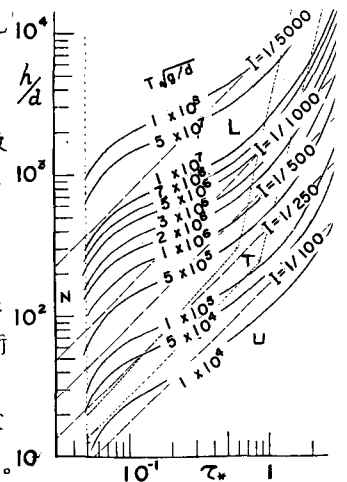


図-1 砂堆の発達時間  
 (破線は等勾配線、点線は領域を分界を表している。)

4. 河床波の変形過程に関する実験 河床波に関する実験においては、議論を明確にするために、流れをできるだけ等流状態に近く保つことが望まれる。これには、水位と給砂量の制御が必要であるが、本実験では、水路下流端に転倒堰を設けて通水中に水面勾配が変化しないように絶えず調節した。また、流砂は堰の底部を透過させ、サンドポンプで上流へ循環させている。水路は幅50cm、長さ20mで、中央の9mの区間について、水路中心線に沿って水位と河床位を測定した。個々の波の読み取りや、その平均化には為大の問題が残されているが、ここでは便宜上、上方への零交叉点間をもってひとつの波とみなし、その間の最高点と最低点の落差を波高としている。この読み取り法による平均波長と平均波高は、零交叉にかかわらず2mm以上の落差をもつ凹凸をすべて波とみなした場合の約1.2倍となっている。実験条件は、 $I=1/500$ ,  $1/250$ ,  $d_m=0.3$ ,  $1.0\text{ mm}$  であり、 $q=160\sim 950\text{ cm}^2/\text{s}$  の間の2~3の段階の流量を、種々の時間間隔で交互に反復させている。図-2は、測定結果の一例である。

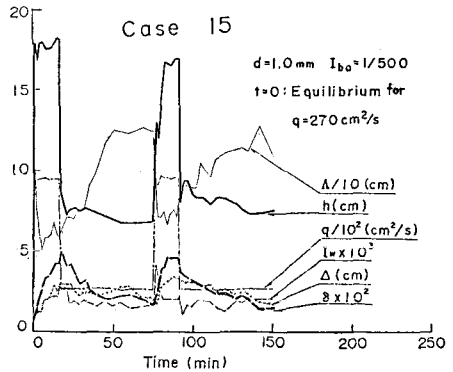


図-2 諸量の時間的変化 ( $I_w$ : 水面勾配)

図-3は、これらの測定結果から、各水理条件ごとに平均波長・平均波高面上でその動きを追跡した例であり、図中の数字はその変化速度を表している。次に、この図から読み取れる特徴を列挙する。

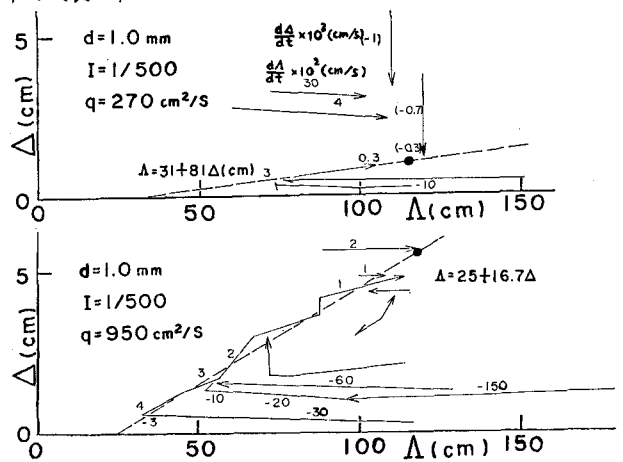


図-3 波長-波高平面上における変化経路

・各水理条件に対して、ひとつの平衡点(図中の●印)が存在し、それから離れた点はある経路をたどって平衡点へ向かう。

・河床波の変形過程には、各水理条件に合った、ひとつのとり易い $\Delta$ と $h$ の関係(図中の破線)があり、その右下の領域では、まず波長が減少してその線に近づいた後、その線に沿って平衡点に向かう。

・上に述べた線の左上の領域では、まず波長が増加した後、その線に沿って平衡点に近づくが、平衡波長に達した時の波高が平衡値よりも大きければ、平衡波長を保ちながら波高が減少し、平衡点に近づく。

・上に述べた各変化過程は、平衡点から離れているほどその変化速度が大きい。

このように、波長・波高平面上で河床波の変形過程を追跡すると、各領域ごとに変化のパターンが特徴づけられ、その機構を解明する上で大きな助けとなる。特に、各水理条件に対応した、ひとつのとり易い $\Delta$ と $h$ の関係があることは注目され、その意味と一般的な表示法について考察を進めたいと考えている。また、 $\Delta$ - $h$ 平面上での変化速度については、中川・辻本らの研究<sup>4)</sup>に見られるように、個々の波の発達・減衰と、河床波のもつ統計的な構造の両面から捉えていく必要があるように思われる。

あとがき 以上、河床波の変形過程を研究する意義とその接近法について述べ、平均波長と平均波高の変化に関する定性的な特徴を抽出した。今後さらに一般的な法則を見出し、進めたいと考えている。

参考文献 1) Yalin, M.S. and C.T. Bishop: On the Physical Modeling of Dunes, Proc. XVII Cong. IAHR, 1977.  
 2) Yalin, M.S. and E. Karahan: Steepness of Sedimentary Dunes, Proc. ASCE, HY4, 1979.  
 3) 水理委員会: 移動床流における河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210号, 1973.  
 4) 中川博次・辻本哲郎: 河床波の発達性に関する実験的考察, 京大防災研年報, 21号 B-2, 1978.