

中央大学理工学部 正会員 林 泰造
中央大学大学院 学生員 尾崎 幸男
中央大学大学院 学生員 ○大西 光陽

1. はじめに

移動床河床における河床波の発生については従来から多くの研究が行われてきており、その成因はかなりの程度明らかになってきたと思われる。

本研究は、これまでの線型河床安定理論で河床波の発生を論ずる際用いられた解析モデルと局所流砂量の表示式について、分類と考察を行なってそれぞれの特徴を明らかにするとともに共通する基本的機構を求め著者等の河床波発生機構についての統一見解を示そうとしたものである。また、本研究では樁・青藤の非平衡流砂量式を用いて、流砂量が掃流力に対して多少遅れ距離の物理的内容を明らかにした。

2. 理論解析モデル

周知の通り、水流に関する解析モデルにはポテンシャル流モデルと剪断流モデルとがある。さらに剪断流モデルは、Reynolds 方程式を用いたものとその方程式を水深方向に平均化し水理学的に取り扱うモデルの二つに分けられる。ここで便宜上、前者を Reynolds モデル、後者を水理学モデルと呼ぶことにする。

いま、手もとにある文献の中から従来の理論解析的研究もとりまとめてみると表-1 のようになる。

表-1. 理論解析的研究

2次元河床波			3次元河床波
ポテンシャル流モデル	Kennedy (1963), Reynolds (1965), 林 (1969), 巨砂 (1971), 日野・石川 (1976)	Reynolds (1965), 林 (1969-1973), 荒木・岸・荒村 (1977)	
剪断流モデル	松梨 (1959, 1965), 樁・青藤 (1967), Gradowczyk (1968)	Hansen (1967), Callander (1969), 熊川 (1970), 樁・渡辺・定村 (1971), 林・尾崎 (1974-1977), Parker (1976)	
Reynolds モデル	Engelund (1970), Fredsøe (1974), 日野・宮永 (1975-1977)	Engelund-Skovgaard (1973), 林・尾崎 (1977)	

さて、ポテンシャル流モデルと剪断流モデルの大きな違いは何といっても shear (即ち粘性) の有無によるのである。剪断流モデルでは shear の存在のために変動量間には位相差が生じ基礎式に内在しているが、ポテンシャル流モデルにおいてはその名のとおり shear

がないため何らの位相差も生じない。剪断流モデルにおけるこの種の位相差、特に河床波に対して河床剪断力の持つ位相差は河床波の不安定性を決定する大きな要因となっている。この位相差に関して、最近、日野・宮永によって非常に興味ある研究が行われ、日野等はこの位相差の生ずることを Benjamin 機構と呼ぶことを提案した。以下著者等の日野等にならって Benjamin 機構と称することにする。

ここで、Benjamin 機構による河床波の安定性を図示すると図-1、図-2 のようになる。但し、掃流砂量は河床剪断力の2乗に比例すると考えた場合である。

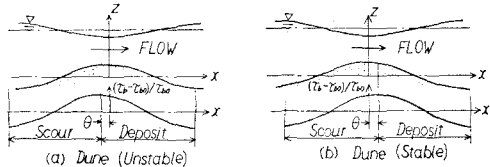


図-1 Benjamin 機構と砂運搬の安定性

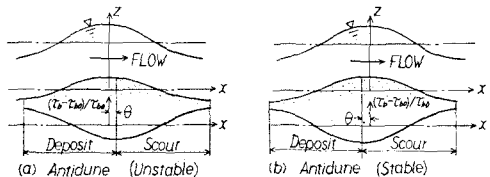


図-2 Benjamin 機構と反砂堆の安定性

一方、Zilker 等 (J.F.M. 1977) は、solid wavy wall 上の乱流の流速分布と wall shear stress の流下方向分布の詳細な測定を行ない、流れが non-separated flow の場合には、分布形は線型理論で十分近似できることを示した。すなわち明確に Benjamin 機構がみられる。

ところで、Benjamin 機構のみで河床波の安定性を調べると一般に表-2 のようにまとめられる。

表-2. 線型理論における Benjamin 機構と河床波

水理学モデル	2次元河床波	3次元河床波
	不安定化に寄与する	安定不安定領域が存在する
Reynolds モデル	不安定化に寄与する	同 上

但し、水理学モデルでは τ_b の u^2 , u : bulk vel. とおいた場合の結果を示した。

表-2 からわかるように、2次元河床波では水理学モデルと Reynolds モデルでは Benjamin 機構の果たす役割が逆となっている。このため、一見水理学モデルでは別の機構に不安定化の要因を、Reynolds モデルでは安定化の要因を求めるという実に不可思議な問題が生ずるようになる。しかし、これは表-2 の水理学モデルで、 τ_b の U^2 としたため Benjamin 機構が十分表現されていないことによるのであって本来は Reynolds モデルと同様の結果を与えなければならないものと考えられる。これに類似したことは実は、ポテンシャル流モデルの Kennedy と林の研究にのみみられることである。Kennedy は流速と流砂量との間に存在する遅れ距離 δ のみで河床波の発生を説明したが、林は Kennedy の δ は実情にそぐわない点があることから、 δ の他に“流砂量の非対称性”という概念をもち込んで、 $k\delta$ が非常に小さくてよいということを示した。 k は波数。両者の研究を比較すると、Kennedy の場合は δ が河床波の不安定性を左右する要因となっているが林の研究では河床波の不安定性をもたらすのは“流砂量の非対称”であって、林の δ は antidune の発生をもたらすとはいえず、むしろ安定化の作用に寄与する要素であって Kennedy の δ とは反対の性格を帯びている。また、日野・石川はポテンシャル流モデルを用い、非平衡流砂量式を河床波の発生に応用したが、antidune の発生のみしか説明づけられなかった。しかし、この流砂量の非平衡性は丁度林の δ に対応しており、水理学モデルの椿・斎藤の研究で流砂量の非平衡性が林の δ に対応しているといわれることを裏づけたことになる。

3. 局所流砂量と河床波の安定性

これまで用いられてきた局所流砂量の表示式を取りまとめると以下になる。

(a). 一般的河床変動計算の場合

$$\delta_B = \text{Func.}[\text{局所掃流力 or 局所有効掃流力}] \quad \text{--- (1)}$$

(b). 河床波の発生理論 (2次元について)

1). (2) の形式: 主として Benjamin 機構で河床波の発生を論じている研究では (1) 式が用いられている。

2). Kennedy の式: $\delta_B = \text{Func.}[U(x-\delta)]$ --- (2)
ここに、 U : 局所底面流速、 δ : 流速と流砂量との間に存在する遅れ距離。

3). 林の式: $\delta_B = [\text{非対称項}] \cdot \text{Func.}[U(x-\delta)]$ --- (3)

ここに、 δ : 遅れの距離 (Kennedy の S とは異なる)。

4). 非平衡流砂量式: 椿・斎藤は Einstein のモデルを用い、次の非平衡流砂量式を導いた。

$$E \partial \tau / \partial x = (\tau_e - \tau) / D \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 $\tau = \tau_B / \sqrt{(S-1)d^{3/2}}$, $E = \lambda_s d / (1 + \tau_e / A_s) D$, $\tau_e = \text{Func.}[\text{局所掃流力}]$: 平衡状態の流砂量関数、 d : 粒径、 D : 平均水深、 λ_s , A_s : const
さらに、椿等の研究では河床変動力 (即ち掃流力) に流速分布の非対称性の効果が考慮されている。

日野・石川も独自に非平衡流砂量式を求めたが、その式は椿等の (4) 式と同様の形である。

以上の局所流砂量式の中で河床波の発生に最も寄与する要因は、Benjamin 機構、Kennedy の S 、林の流砂量の非対称性、椿等の流速分布の非対称性であるが、これらはそれぞれ表現が違っていて必ず Benjmin 機構とみなしうるものである。なぜなら、流砂量の非対称性は掃流力の非対称性即ち Benjamin 機構の結果として出てくるものと考えられ、また流速分布の非対称性は Benjamin 機構とつながるからである。

ところで、流砂量の非平衡性と林の δ は、履歴の効果というほぼ同一の物理的説明が与えられ、両者は流砂量と掃流力との間の位相差を表わしており、河床波の安定化に寄与する要因となっている。

4. 流砂の掃流力に対する遅れ距離 δ 、物理的内容

δ の物理的内容を明らかにするため、椿等の (4) 式と $\tau_k \gg \tau_{kc}$ の場合の林・高羽の掃流砂量式 (1977) を用い、 $k\delta \ll 1$ と考えて δ を求めると次式を得た。

$$\delta / D = 100(d/D) / (1 + 0.258 \tau_{k0}^{3/2}) \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 $\tau_{k0} = DI_0 / [(S-1)d] = (V_2^2 / 5F^2 D) / [(S-1)d]$,

τ : 摩擦抵抗係数、 $F = U / \sqrt{gD}$: 水流の Froude 数。

5. ま す び

河床波の発生に関して最も重要な機構としては、二つあげられる。一つは Benjamin 機構であり、河床波の発生に最も寄与する機構である。他、一つは、流砂量と掃流力との間の位相差であり、この位相差は流砂量の非平衡性と表わすもので河床波の安定化に寄与する機構である。[付記: 著者等の得た結論は、日野教授による河床波の発生機構についての統一見解 (1975) とほぼ同一内容となったことをここに記す]