

滑面平板上の薄層流の挙動について

神戸大学工学部 正員 神田 徹
 神戸大学大学院 学生員 〇小笠原俊明

1. まえがき

薄層流においてある水理条件の下で転波列が発生することは古くから知られており、その特性に関して従来多くの研究が行なわれている。石原、岩垣、岩佐¹⁾は数学的解析により転波列の水理特性を明らかにし、実験値とも対照させて満足すべき結果を得ている。また、Mayerによる転波列の発生限界に関する研究²⁾や、最近ではBrookによる転波列の流下に伴う成長を論じた研究³⁾等がある。これらの研究は流れが水路横断方向に一様ないわゆる二次元的な取扱いが可能な場合である。本研究は幅の広い水路における薄層流の挙動を実験的に調べたものであるが、水路には三次元性の波が観測された。この波は転波列の形成過程にあるものと考えることができ、波速および周期の不規則性、非定常性と峰線の平面形状の不規則性が認められた。本研究は従来明らかにされている転波列の諸特性を基にして、これらの三次元的要素をもつ転波列の特性を検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図-1のごとくである。水路は幅94 cm、長さ2 mのアクリル樹脂製であり、上流側水槽と水路の接続部には刃型堰を設けている。実験は勾配を5種類 ($\sin\theta = 0.048, 0.100, 0.201, 0.296, 0.373$) に変え、各勾配ごとに流量を5~7種とり図-1に示す二地点に設置したサーボ式水位計により波形を計測した。流量は水路下流端で集水した水量より求めた。

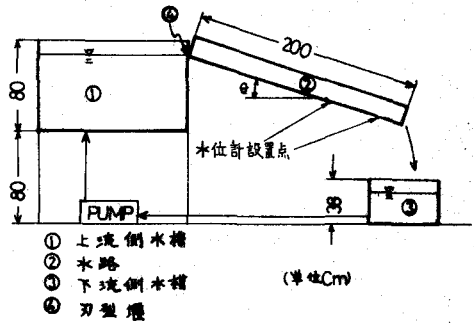


図-1 実験装置

3. 実験結果および考察

3-1 波の峰線の平面形状

流量と勾配で定まるある範囲では薄層流は波状を呈する。この波はその水理特性から見て、転波列が形成される過程にあると考えられるが、平面的にも、時間的(定点観測記録における)にも不規則性を有することが二次元水路で観測される通常の転波列と異なり最大の特徴である。波の峰線の平面形状は図-2の⑥のごとくであり、その特性は峰線が円弧をつないだ曲線のようになり、しかも峰線が水路横断方向に連続しなく、いわゆる切れ波になることである。この2つの特性は勾配が急に、流量が大きくなる程顕著に見られた。図-2は平板上で見られるこの様な転波列の形成過程を模式的に示したものである。まず①擾乱は水路幅方向に8 cm~15 cmの間隔で点状に発生する。(ここにいう擾乱とは転波と区別するために用いたもので、①~⑤の峰線をもつ波を指す。)②峰線は流下とともに左右にのびる。③峰線は上

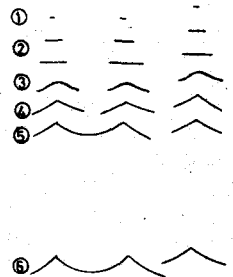


図-2 峰線の平面形状

流側に凸な山型の形状を示す。④山型の峰線が尖鋭化する。⑤隣りで同じ様に発生し流下してきた波の峰線と連結する。しかし全部の峰線が連結するわけではなく、連結しないで流下してゆく波もある。⑥個々の波はその波速が異なるため、波速の大きい波が波速の小さい波に追いついて一つの波となる。この追いつき現象はくり返される。このような過程を経て峰線が円弧をなす曲線のようなになり、しかもそれが不規則に切れた波が形成される。以上のように平板上では水路横断方向に不連続に擾乱が発生するとその影響が下流におよび、二次元転波列とは異った性状の波が現れる。この波がどのような定常状態に達するかは、本実験では調べられなかった。

3-2 擾乱発生点

目で確認できる擾乱発生点の水路の上流端からの距離 X を $R_x = U_x \sqrt{\nu}$ で無次元表示し、擾乱発生点より上流の流れの Re_0 数($Re_0 = U_0 h / \nu$)との関係を示したものが図-3である。ここに U_0 、 h は擾乱発生点上流の流れにおける断面平均流速、水深を表す。この図から擾乱発生点は勾配には関係せず、 Re_0 数によって規定されたことがわかる。図-3の実験値より R_x と Re_0 の関係は $R_x = 15.79 Re_0^{1.656}$ と近似できる。ここで水路上流端を原点として層流境界層が発達するものと仮定すれば、境界層の水面に到達するまでの距離 X の無次元量 $R_x = U_x \sqrt{\nu}$ は $R_x = 0.0815 Re_0^2$ となる。図の様は R_x と R_x' は X 方向にずれはするがほぼ平行であることから、層流境界層の発達が擾乱の発生に関係あることが推測される。ただし前述の水路横断方向に不連続な発生仕方とともに、如何なる機構により擾乱が発生するかは明らかでない。

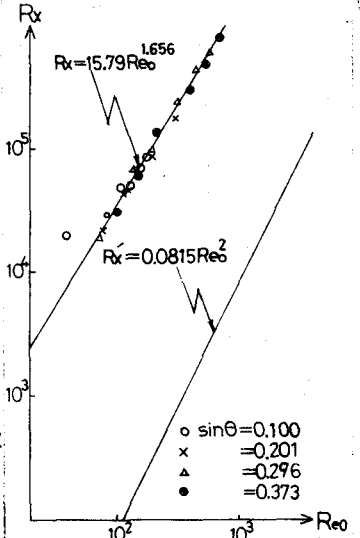


図-3 擾乱開始点の位置

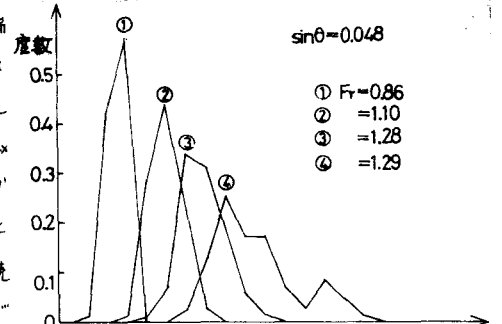


図-4 波速の波数分布

3-3 波速

(1) 波形記録における70個の波が波速の波数分布を求めた。その一例を示せば図-4の如くである。その分布形はほとんど正規分布に近いが、波速の大きい方にわずかに裾を長くひいた分布形である。

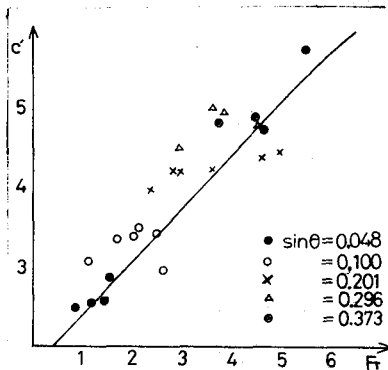


図-5 C' と Fr の関係

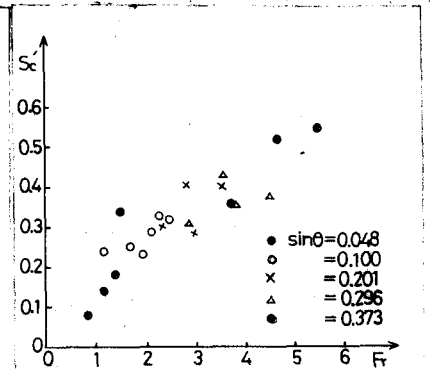


図-6 Sc' と Fr の関係

(2) 平均波速 C の無次元量 $C' = (1/g \theta \cos \theta)^{1/2} C$ (ここに θ は単位幅当りの流量を表す。)は Fr

数の変化に対して図-5のようになる。図中の実線は石原、岩垣、岩佐¹⁾による転波列の理論波速を示すもので、実験値はほぼ理論値に近い値を示している。ここにFr数は $Fr = \sqrt{\tan \theta R_{00}/g}$ により求めたものである。(iii)波速の標準偏差の無次元量 S_c とFr数の関係は図-6のごとくである。(iv)波速の変動係数は $Fr > 2$ の場合に約8%程度の値をとることが認められた。

3-4 周期

(i)周期の度数分布は上流側と下流側水位計により得られた各々70個の波について求めた。図-7はその一例である。上流側と下流側の分布形を比較すると、両者の分布形はあまり変化はない。また上流側の分布形における周期の小さい部分を周期の大きい部分に移動することによって下流側周期となることかわかる。(ii)平均周期Tの無次元量 $T' = \{(\frac{g \cos \theta}{R_{00}})^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{g} \cdot \tan \theta\}$ はFr数に対して図-8の様な関係がある。図中の実線は転波列の理論周期¹⁾を示すものである。同一Fr数に対して上方にある点が下流側における T' であり、下方の点が上流側 T' である。この図から下流側周期は上流側周期より一様に増加していることが認められた。これは波速がほぼ理論値に近い値であることから、追いつき現象によって下流側での周期が増

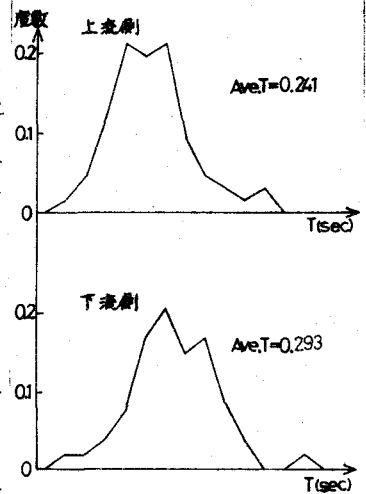


図-7 周期の度数分布

すたためと考えられ、(ii)の分布形のこころも転波列の形成過程における周期の増加は主に追いつき現象によるものであるといふことができた。(iii)周期の標準偏差 S_T と R_{00} 数の間には図-9の関係がある、しかもその関係は上流

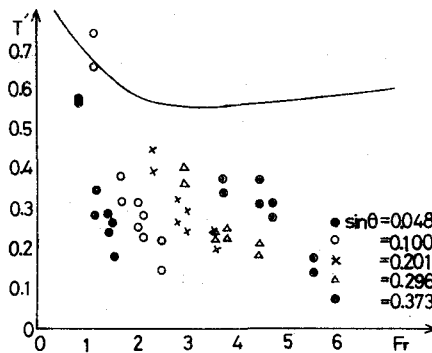


図-8 T' とFrの関係

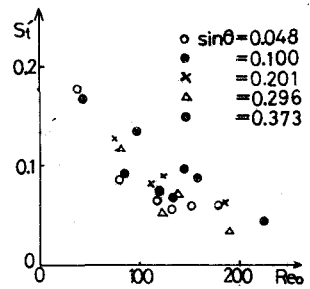


図-9 S_T と R_{00} の関係

側と下流側で変化は認められな。 (iv)周期の変動係数は上、下流側とも約30%の値をとる。

4 あとがき

実験の結果、擾乱発生の問題についてはわずかの推論にとどまったが、今後層流境界層の発達完全に起すような水路で実験を行いその結果を検討する必要があると思われた。また本文では転波列の形成過程における波の統計的性質について述べたが、今後個々の波についてその特性を明らかにしたい。本研究にあたり有益な助言をいただいた神戸大学工学部麓源亮教授に謝意を表します。

- 1) "急斜面上の層流における転波列の理論" 石原・岩垣・岩佐 土木学会論文集第19号
- 2) "Roll wave and slug flow in inclined open channel" P.G. Mayer. ASCE HY7 1959
- 3) "Development of roll wave trains in open channel" R.R. Brock ASCE HY7 1969