

三角形断面を持つ棧近傍の三次元流れ

THREE DIMENSIONAL FLOW NEAR OBSTACLE WITH TRIANGULAR
CROSS SECTION

池田 駿介*・柴田 宏**

By Syunsuke IKEDA and Hiroshi SHIBATA

1. 序

近年、河床上の三次元流れが注目され、従来微量として無視されていた二次的な流れが河川の蛇行や弯曲部の河床形状、さらには直線部の水理現象（たとえば主流の流速分布や河床形状）のような移動床河川にみられる基本的な現象を支配していることが次第に明らかにされつつある。一方、海岸工学の分野では汀線に沿って一様にみえる海岸にも離岸流のような現象が存在し、地形がこのようなセル状の二次流によっても支配されていることが指摘されている。

河川の流れにおいても横断方向に一様な堰のような構造物上の流れは横断方向には一様とはならず、いわゆるストリーキングとよばれる流れの集中する地点がある間隔をおいて発生することが報告されている¹⁾。また、曲率を有する境界上の流れも三次元流れが存在することが知られており、これらについては Görtler²⁾ らによっていわゆる慣性不安定であることが明らかにされており、詳細な理論的研究がなされている。平坦な直線水路においても流れは横断方向には一様とはならず、縦渦とよばれる現象が発生する場合があることが知られている。Vanoni³⁾ は浮遊砂の実験において砂がリボン状に集中して流れる地点と疎な地点が交互に存在することを報告し、縦渦の存在を予想している。さらに平坦で直線的な移動床水路上の乱流では安定な縦渦が存在し、横断方向に峰と谷をもち、その波長が水深のほぼ2倍となるような河床形状が生じることが、Leliavsky⁴⁾、Wolman & Brush⁵⁾ によって報告され、わが国においてもこのような現象が存在することが木下^{6),7)} によって移動床実験水路、洪水時の河川において確認されている。またそれらに関する理論的研究も行われている⁸⁾。

以上のようなさまざまな縦渦はそれぞれその成因が異なるために統一的に取り扱うことはできず、個々の問題を取り上げて研究がなされねばならない。本論文では断面形状が三角形で水路横断方向に一様な棧をおき、その近傍の三次元流れの特性を明らかにしその成因についても考察を加えようとするものである。このような場の流れについてはすでに上野⁹⁾ によって研究がなされ、その水理的特性が示されているが、ここではさらに棧の形状等の実験条件を変化させ、砂漣に近い形状を有する棧についても三次元流れの特徴を調べようとするものである。

2. 実 験

(1) 実験概要

実験に用いた水路は長さ 8 m、幅 40 cm、高さ 30 cm の長方形断面を有する直線水路で側面はガラス張、底面は鉄板の上にジュラルミン板を張り平らに仕上げている。勾配は可変で 0~1/50 が可能である。流体としては水を用い、その循環は高水槽から整流水槽を通して水路に導いてあるので上流からの擾乱がほとんどなく、ここで扱っているような不安定現象の実験を行うのに適している。流量は水路から水槽へ落とした後に三角堰で測定した。水深については水深が大きくなるとレイノルズ数が増大し、かつ側壁の影響領域が大きくなるので 10 cm を越えないものとした。

棧のモデルとしては図—1 に示されている四種類の形状を採用し、鉄板を用いて作製した。なお、工作の都合上先端部の作製は困難で水路上に棧を置いた後に図中で破線で示されているように粘土で成形した。

三次元流れの可視化には過マンガン酸カリウムによる染料法を補助的手段として、おもに水素気泡法を用い、陰極としてなるべく流れを乱さないように 20 μ のタン

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科

** 竹中土木(株)

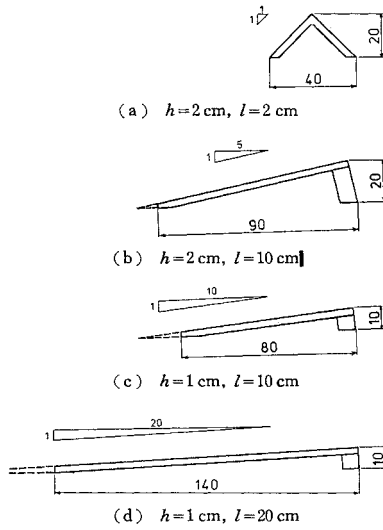
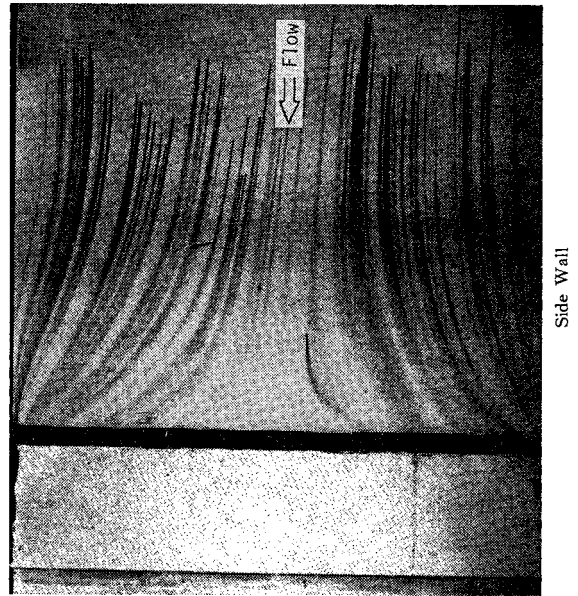


図-1 実験に用いた棧の横断面形状
(単位: mm)

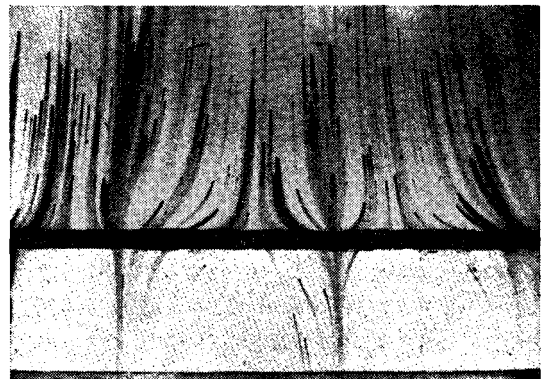
グステン線を用いた。タングステン線は水平に張る場合には 特別の場合を除いて棧の先端部高さ 1 cm の位置に張った。また、鉛直方向にも張り、三次元流れの構造を調べるのに用いた。熱線流速計のようなセンサーを流水中に置くと流れが影響を受け、特にここで調べているような不安定現象についてはその効果が大きいと考えられるので、直接測定することは避け、上記の染料や水素気泡を写真撮影して調べた。

(2) 流れの特徴

まず着色法で流れの様相を調べるとレイノルズ数が小さい間は底面付近の染料は棧の手前で側壁に向かって集まり側壁の近くを通過していく。レイノルズ数が大きくなるに従って側壁付近を通過するのみでなく、水路中央部でも染料が集中してくる地点が発生するようになる。また、レイノルズ数が同じでも水深の変化によって集中する本数が異なる(写真-1)。このような状態では染料は棧の手前からすでに集まる傾向を示し、棧の直前で急激に集まり数本の帯状となって棧上を通過する。この帯は横断方向への位置のゆっくりとした変化があるものの、その本数は時間的にほぼ一定しており、非定常性の強いいわゆる“bursting”とよばれる現象によって生ずる流れの集中とは異なるものである。すなわち一定した横方向の流れが存在し、染料を集める力となっていると考えてよいであろう。このように棧の上で流れが収束している地点では流れの連続条件を満足しなければならないために当然上昇流が引き起こされるはずであるが、この上昇流は底面付近の小さな運動量を上方に運ぶので、この地点では主流の流速は小さく



(a) $Re=1280, H=8.0\text{ cm}$



(b) $Re=1280, H=4.0\text{ cm}$

写真-1 水理条件の変化による波長の変化
($h=2\text{ cm}, l=10\text{ cm}$)

なるであろう。事実、染料と水素気泡法を同時に用いて実験してみると上述の現象が観察され、しかも上昇地点では集まってきた水素気泡は上昇するにつれ再び両側へ分れていき、ここで採用した四種類の棧上の流れでは常にセル状の縦渦が形成されていることが確認できた。

写真-2 は $h=2\text{ cm}, l=2\text{ cm}$ の棧上の流れを水素気泡法によって可視化したものであるが、気泡が上昇して棧を越えていく部分がほぼ等間隔に並び、その部分では主流の流速が小さくなっていることがわかる。この間隔が渦細胞の波長 λ に相当するものであり、本実験ではこの間隔の読み取りに際しては側壁の影響を考慮して側壁近傍 5 cm は除き、6 枚の写真をとってその平均を一つの水理条件に対する波長とした。

以上述べたような棧の前面にみられる三次元流れの他

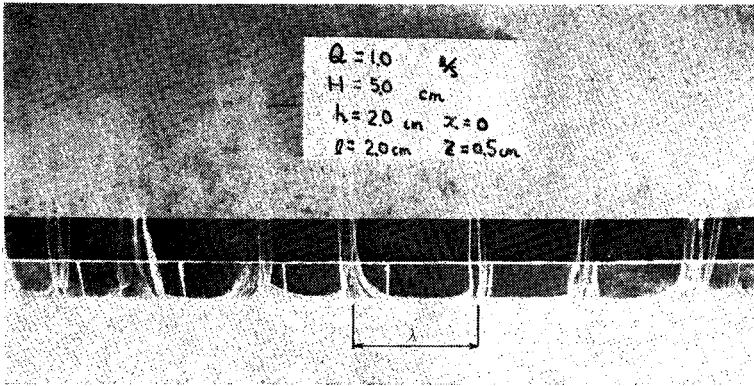


写真-2 可視化した棧近傍の流れ（水素気泡法）

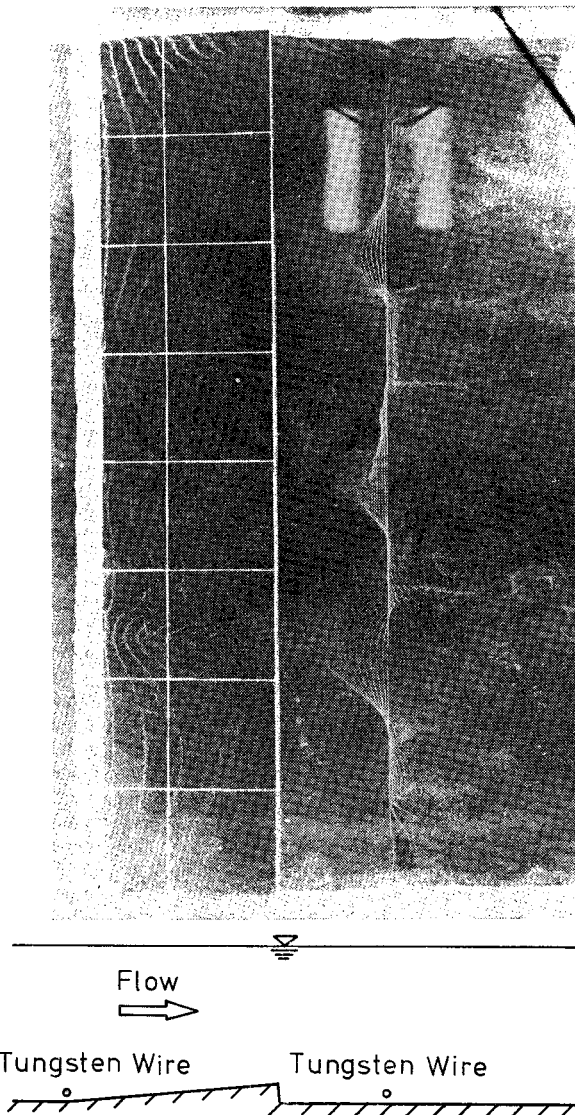


写真-3 棧の前面と背後の流れ（水素気泡法）
 $R_e = 2200$, $H = 7.5$ cm, 棧 $l = 10$ cm, $h = 1$ cm

に棧の背後にも三次元的な流れが発生する。写真-3は $h = 1$ cm, $l = 10$ cm の棧の先端と棧の後方 5 cm, 底面より 0.5 cm の位置にそれぞれ陰極線を張り棧後方の流れを可視化したものである。後流内では正流域と逆流域が交互に存在し、その内部の水の動きは複雑な様相を示しているが、後流域内での横断波長は棧前面の流れとほぼ同じ波長を有している。このように棧後方の三次元流れは Raudkivi¹⁰⁾ がいうように棧背後に発生する横断方向に一樣な渦糸が流下していくに従い三次元性を帯びていくのではなく、棧の前面にすでに発生している縦渦によって後流域の三次元流れも規定されることを示している。Hama¹¹⁾ らの実験によれば、段落ち背後の流れでは流れの流速が比較的小さい場合（10 cm/s 程度）では段落ち直後の後流部では渦糸は三次元的とならず、再付着点より下流で始めて三次元的な流れに発達していくことが確認されている。すなわち、このような流れでは段落ち部の上流では流線が床面に平行であるために流れは不安定とはならず、再付着点付近では流線が曲率をもつので流れが三次元的になったと考えられる。この事実によっても本実験でみられた後流域内の三次元流れは棧の前面において発達した三次元性に支配されているといえよう。

すでに述べたように棧の前面において染料が集中してくる地点では主流の速度が小さくなることが示されたが、図-2は棧の頂点でタングステン線を張り主流の鉛直方向の速度分布を調べたものである。染料が集中している地点では強い上昇流によって底面付近の小さな運動量のために速度分布がやせてい

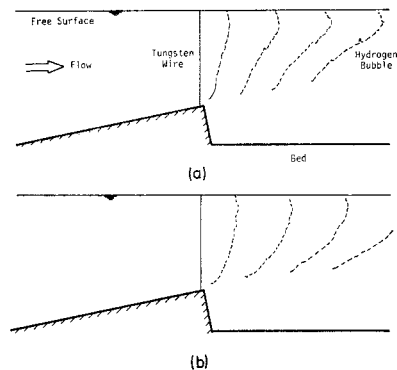
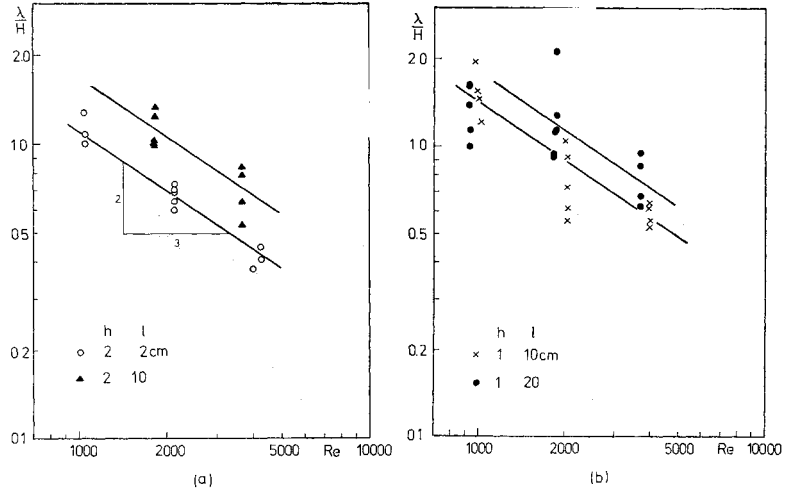


図-2 (a) 染料の集中している部分
 (b) その他の部分
 における鉛直方向の速度分布

ることがわかる。また、反対に上昇流の生じていない地点では流速分布がふくらんでおり、このような縦渦の影響によって強い運動量交換が生じていることが示されている。

(3) 渦の波長について

実験結果は表一にまとめて掲げられているが、ここではこれらの実験結果を水量に対して整理を行ってみる。いま、ここで考えているような流れでは鉛直方向の速度分布を引き起こす流体の粘性と、棧が存在することによって生ずる圧力の不均衡を発生させる慣性力が重要な働きを演ずると考えられる。これらの無次元量はレイノルズ数であるからレイノルズ数 Re と波長と水深の比 λ/H について調べてみる。図一3 はそれぞれこれらの関係をプロットしたもの



図一3 λ/H と Re の関係

であるが、棧近傍の流れはレイノルズ数のみでなく、当然棧の形状によっても支配されるので、各形状についてその関係を調べると、

表一 実験値

Run No.	Length l(cm)	Hight h(cm)	Q l/s	H (cm)	U (cm/s)	Re	F_r	λ (cm)	Run No.	Length l(cm)	Hight h(cm)	Q l/s	H (cm)	U (cm/s)	Re	F_r	λ (cm)
1	2	2	0.51	4.0	3.2	1060	0.051	4.3	35	"	"	2.02	8.1	6.3	3960	0.071	4.5
2	"	"	0.51	5.1	2.5	1060	0.036	5.1	36	"	"	2.01	10.0	5.0	3950	0.051	5.3
3	"	"	0.52	6.1	2.1	1050	0.027	6.1	37	20	1	0.48	4.0	3.0	930	0.048	6.4
4	"	"	0.50	7.9	1.6	1050	0.018	10.2	38	"	"	0.49	4.9	2.5	940	0.036	7.9
5	"	"	1.01	4.1	6.2	2150	0.099	3.0	39	"	"	0.50	5.9	2.1	940	0.027	8.2
6	"	"	1.00	5.0	5.0	2140	0.071	3.5	40	"	"	0.50	8.0	1.6	940	0.018	9.0
7	"	"	0.99	5.9	4.2	2140	0.054	3.8	41	"	"	0.51	10.0	1.3	950	0.013	10.1
8	"	"	0.99	8.1	3.1	2140	0.034	4.9	42	"	"	1.00	3.0	8.3	1880	0.154	6.4
9	"	"	1.01	9.9	2.5	2150	0.025	6.7	43	"	"	1.02	4.1	6.2	1870	0.101	5.3
10	"	"	1.98	4.9	10.1	4180	0.143	—	44	"	"	1.01	5.0	5.0	1850	0.072	5.7
11	"	"	2.01	6.0	8.4	4220	0.108	2.7	45	"	"	0.99	6.0	4.1	1820	0.053	6.8
12	"	"	2.02	8.1	6.2	4230	0.071	3.3	46	"	"	0.99	8.0	3.1	1820	0.036	7.4
13	"	"	2.00	10.0	5.0	4200	0.051	3.6	47	"	"	1.00	10.1	2.5	1830	0.025	9.6
14	10	2	1.02	4.0	6.3	1830	0.102	5.0	48	"	"	2.00	5.0	10.0	3680	0.143	4.8
15	"	"	1.00	5.1	4.9	1820	0.070	5.2	49	"	"	2.01	6.0	8.4	3700	0.110	5.2
16	"	"	1.00	6.0	4.2	1820	0.054	5.9	50	"	"	2.01	8.1	6.3	3700	0.071	5.5
17	"	"	1.01	8.1	3.1	1830	0.035	8.1	51	"	"	2.00	10.0	5.0	3680	0.051	6.3
18	"	"	1.01	10.0	2.5	1830	0.025	13.4	52	flat bed		0.98	4.0	6.2	1900	0.098	4.3
19	"	"	2.00	5.0	10.0	3630	0.143	4.2	53	"	"	0.98	4.9	4.9	1900	0.071	4.6
20	"	"	2.01	6.1	8.3	3650	0.108	4.8	54	"	"	0.99	6.0	4.1	1920	0.054	5.5
21	"	"	2.00	8.0	6.3	3630	0.071	5.1	55	"	"	0.99	8.1	3.1	1920	0.034	6.8
22	"	"	1.99	10.0	5.0	3610	0.051	5.3	56	"	"	0.99	10.0	2.5	1920	0.025	7.2
23	10	1	0.48	4.9	2.5	960	0.036	9.6	57	"	"	1.51	5.0	7.5	2930	0.108	4.8
24	"	"	0.50	6.0	2.1	990	0.027	9.3	58	"	"	1.51	6.1	6.2	2930	0.082	4.9
25	"	"	0.51	8.0	1.6	1000	0.018	11.6	59	"	"	1.51	8.0	4.7	2930	0.053	5.4
26	"	"	0.52	10.1	1.3	1020	0.013	12.2	60	"	"	1.51	10.1	3.7	2930	0.038	5.5
27	"	"	0.98	4.0	6.2	2010	0.098	4.2	61	"	"	2.02	5.0	10.1	3870	0.145	4.3
28	"	"	0.99	5.0	5.0	2030	0.070	4.6	62	"	"	2.01	6.0	8.4	3850	0.110	5.2
29	"	"	1.02	6.1	4.2	2050	0.054	4.4	63	"	"	2.01	8.0	6.3	3850	0.072	5.6
30	"	"	1.01	8.1	3.1	2040	0.035	5.0	64	"	"	2.01	9.9	5.1	3850	0.052	5.3
31	"	"	1.00	9.9	2.5	2030	0.025	5.5	65	"	"	2.49	5.0	12.5	4650	0.179	4.4
32	"	"	2.01	4.0	12.6	3960	0.201	—	66	"	"	2.49	6.1	10.3	4650	0.136	5.3
33	"	"	2.00	5.0	10.0	3930	0.143	3.2	67	"	"	2.50	8.1	7.7	4670	0.087	5.5
34	"	"	2.03	6.1	8.4	3980	0.110	3.8	68	"	"	2.51	10.0	6.3	4690	0.063	5.2

$$\frac{\lambda}{H} \propto \left(\frac{UH}{\nu} \right)^{-2/3}$$

によって表現されることが知られる。けれどもその比例定数については若干異なり、棧の形状の影響も受けていることがわかる。

図-4 は λ/H とフルード数 F_r の関係を試みに調べたものである。この場合には λ/H と F_r の間にはなんら一定した関係は見い出せず、ここで取り扱っている縦渦がフルード数の支配を受けていないことは明らかである。

水路床上で発生する三次元性のために平担水路内の流れでも縦渦のようにみえる主流のひずみがみられることがある。図-5 はこのような平担床上で発生した三次元流れが棧上の三次元流れとどのような関係にあるかを調べるために λ とレイノルズ数の関係を調べたものであるが、平担床上の流れは λ の値はレイノルズ数および水深によらず一定値を有しており、また、レイノルズ数が 1000 程度になるとみられず 図-3 と比較して棧上の三次元流れとはその水理的特性が異なるものであることが知られる。

3. 棧上の三次元流れの成因について

前章において述べたように流れが非常に遅い場合には棧上の底部で染料が集中するのは側壁近傍のみであるが、水理条件を変えるに従い、棧の中央部付近でも染料の集中する地点が発生しはじめる。この現象は流れの遅い間は棧の存在による横断方向の動水圧の不均衡は中央部に比べて圧力の小さい側壁方向へ流れることによって解消されるが、流れが早くなり動水圧が大きくなると水路の中央部付近でも横断方向への圧力の均一性が

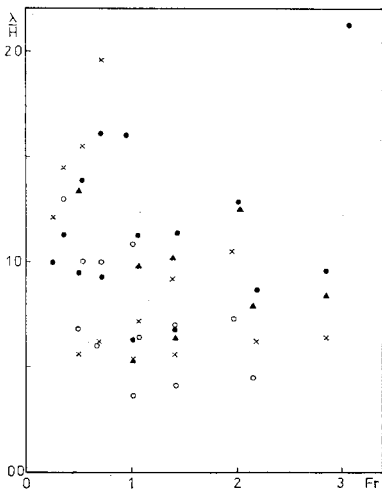


図-4 $\frac{\lambda}{H}$ と F_r の関係 (符号は 図-3 と同じ)

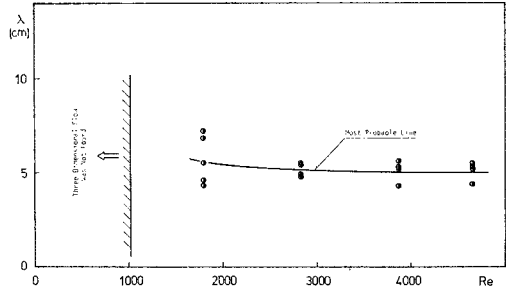


図-5 平担路床上の三次元流れ

保てなくなり、不安定性によって棧中央部付近でも流れの集中が起こったために生じたためであると考えられる。このような現象は流線の曲りによる慣性不安定によるもので、これらについては同様な現象として Taylor 渦, Görtler 渦等がよく知られている。ここでは曲率を有する床面上を流れる Görtler 渦との関連性について調べてみる。この縦渦は Görtler²⁾, Smith¹²⁾ らによって詳しい理論研究がなされており、図-6 に示されているように、縦渦の横断方向の波長に対して安定・不安定図が得られている。その結果によれば、境界層の運動量厚さ θ 、基準長さを θ にとったレイノルズ数 R_θ 、および流線の曲率半径 r によって渦の大きさが一義的に決定されることが知られ、さらにその安定・不安定図は主流の速度分布にはほとんど影響されないことも明らかにされている。同図で β は渦の強さの増幅速度に関する指数であるが、 $\beta > 0$ のとき渦が発達していくことは周知のとおりである。理論的には $\beta > 0$ の不安定領域であればさまざまな波数の渦が発達しうるわけであるが、実際には与えられた水理条件の下でもっとも発達速度が大きく、不安定性の強い波数の渦が選択的に発達する。すなわち、グラフ上で $\beta\theta R_\theta = \text{一定}$ の曲線において横軸に

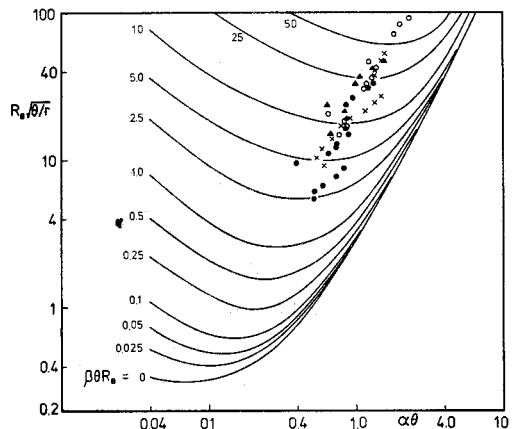


図-6 Görtler 渦の安定・不安定曲線と実験値のプロット (理論曲線は A.M.O. Smith による)

平行な直線と接する点（最下点）を結んだ線上で渦が発達しやすいものと思われる。その線は Smith の不安定曲線上では次式で与えられる。

$$\alpha\theta = 0.2(R_0\sqrt{\theta/r})^{1/2} : 0.5 < R_0\sqrt{\theta/r} < 100 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 α は波数である。波長 λ を用いると、

$$\frac{\lambda}{\theta} = 10\pi(R_0\sqrt{\theta/r})^{-1/2} \dots\dots\dots(2)$$

で表わされる。同様に Görtler は次式を提案している。

$$\frac{\lambda}{r} = 50\left(\frac{U_0 r}{\nu}\right)^{-2/3} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 U_0 は境界層外縁の流速、 ν は動粘性係数である。式 (2) と式 (3) は一見異なるようにみえるが、式 (3) は θ を用いて書き直すと、

$$\frac{\lambda}{\theta} = 50(R_0\sqrt{\theta/r})^{-2/3} \dots\dots\dots(4)$$

となり、 $R_0\sqrt{\theta/r} > 5$ では両式に大差はなく、実用上はどちらの式を用いてもさしつかえない。

以上の理論式は曲率半径が一定の、しかも境界層の外部では一定の流速をもつ流れに対するものであり、ここで取り扱っているような流線の曲率半径が底面と水面で異なり、しかも流下方向へ変化するような流れにまで厳密に適用しうるものではないであろう。しかし、運動量厚さや流線の曲率半径をどのように考えるかという問題点を残しつつもこのような縦渦の基本的な発生機構に関しては差異がないと思われ、したがって、Görtler らによる理論を実験結果と比較、検討する。

まず、運動量厚さ θ を求めるために速度分布を調べるとレイノルズ数、 UH/ν が 2500 を越えると乱れが大きくなり、層流の場合の速度分布は成立せず、乱流の場合の速度分布となった。したがって、本実験では上述のレイノルズ数以内の場合が多いので、放物線速度分布を用いると、

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^H \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left\{1 - \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right)\right\} dz \\ &= \frac{2}{15} H \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

となる*。ここに、 H は水深である。

曲率半径 r についてはどの位置の流線の曲率が流れの不安定性を決定するのか明らかではなく、また、ここで考えているような流れを理論的に解析することはきわめて困難である。棧の前面で集中してきた水素気泡はその地点で上昇し水面に達する前に横断方向へ再びわかれていきセルを構成していることが観測されることから、水

面の形状が棧の影響をほとんど受けないようなゆるやかな流れでは流線の曲率はほぼ棧の形状で決定されていると思われる。したがって、曲率の定義式から dz/dx は小さいとすると、曲率半径は、

$$\begin{aligned} r &= \frac{\left\{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right\}^{3/2}}{\frac{d^2z}{dx^2}} \approx \frac{1}{\frac{d^2z}{dx^2}} \dots\dots\dots(6) \\ &\propto \frac{l^2}{h} \end{aligned}$$

と表現できるであろう。ここに、 $z(x)$ は一つの流線の方程式であり、 l は棧の流れ方向の長さ、 h はその高さである。また、境界層外の流速 U_0 については層流の場合の流速分布を用いて、

$$U_0 = \frac{3}{2} U \dots\dots\dots(7)$$

とする。ただし、 U は平均流速である。式 (5)~(7) を式 (2) または (4) に代入すれば縦渦の波長と水理量の関係を得ることができる。ここでは Görtler の式 (4) を用いると、

$$\frac{\lambda}{H} = c \left(\frac{UH}{\nu} \sqrt{\frac{hH}{l^2}}\right)^{-2/3} \dots\dots\dots(8)$$

を得る。ここで、先に述べたように c は流線の曲率半径を定義する場合に導入された未知の係数である。図-7 はそれぞれの棧についてこの関係式に従って実験値をプロットしたものであるが、それぞれ、実線で示されるような直線関係が存在し、しかも原点を通っていることがわかる。このことは上述の関係が各棧ごとに満足されることを示している。しかし、 c を比例定数とすると、 c は各棧ごとに異なっており、しかも、その並んでいる順序は棧の長さ l と高さ h の比によって決定されており、 h/l が大きいほど、縦渦の波長 λ が小さくなっていることが知られる。したがって、式 (6) のような表現では流れの代表的な曲率半径を一意的に表現しえないことがわかる。そこで比例定数 c を、

$$c = c \left(\frac{h}{l}\right)$$

とおき、図-7 の各勾配から算定される c の値と $\frac{h}{l}$ の関係をプロットしたのが 図-8 である。これから、

$$c = 170 \left(\frac{h}{l}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

が得られる。式 (9) を式 (8) に代入し、再整理すると、

$$\frac{\lambda}{H} = 170 \left(\frac{UH}{\nu}\right)^{-2/3} \left(\frac{h}{H}\right)^{1/6} \left(\frac{l}{H}\right)^{1/6} \dots\dots(10)$$

となり、 λ は棧の形状の弱い関数となり、ほぼ H と UH/ν によって決定されることがわかる。図-9 は式 (10) の関係を用いて実験値を整理したものである。ところで Görtler の理論式 (4) に $\theta = \frac{2}{15} H$ および $U_0 =$

* 乱流の場合、たとえば 1/7 乗則を採用すれば、

$$\theta = \frac{7}{72} H$$

となり、式 (5) と大差はない。

$\frac{3}{2}U$ の関係を代入し整理すれば、

$$\frac{\lambda}{H} \approx 38.2 \left(\frac{UH}{\nu} \right)^{-2/3} \left(\frac{r}{H} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (11)$$

となる。式 (11) を式 (10) と比較すると曲率半径 r の値が得られ、

$$r = 88(hl)^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

となる。式 (12) によって流線の曲率半径 r を求めることができるが、この計算された曲率半径が妥当な値であるかどうかをチェックしておく必要がある。図-10 は式 (7) から計算される曲率半径を用いて棧によって影

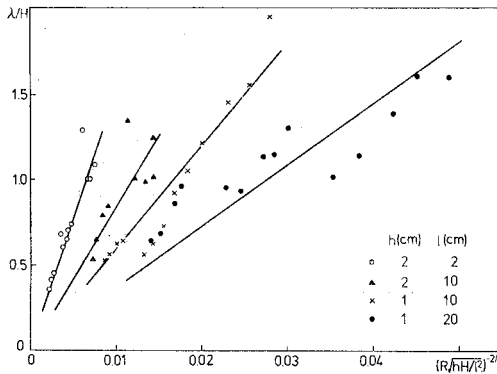


図-7 縦渦の波長と水理量および棧の形状の関係

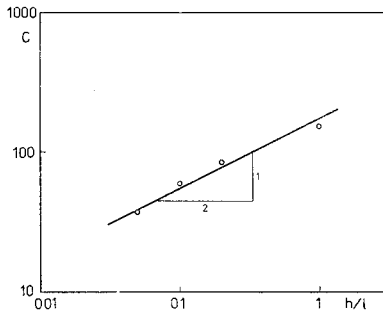


図-8 c と h/l の関係

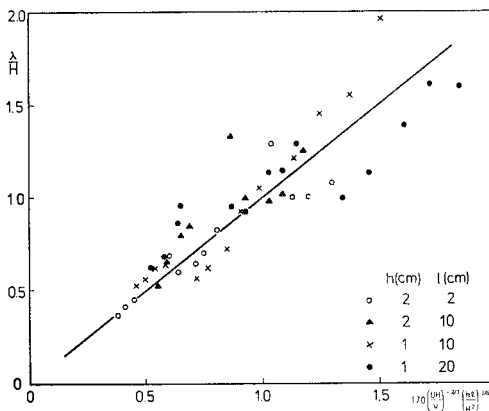


図-9 式 (10) の検討

響されていない上流での流線の高さを 2 cm と選んで (表-1 によってもわかるように実験の大部分の水深は 4~10 cm である) 流線を描いてみたものであるが、全体として棧の形状にほぼ適合しており、半径の見積りが極端に大きすぎたりあるいは小さすぎたりすることはないことが知られる。もし曲率半径がここでの計算値より数倍大きいか、あるいは小さく見積られたとすると流線はまったく棧の形状にフィットせず、奇妙な流線形状となる。したがって、ここで見積られた曲率半径の値はほぼ妥当なものであり、しかも曲率半径が縦渦の波長に及ぼす影響はその 1/3 乗であることから曲率半径の小さな

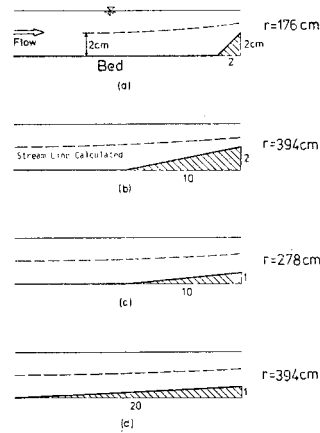


図-10 流線の曲率

な見積りの差は渦の波長の測定誤差の範囲内であってここで取り扱っている現象では曲率半径の見積りはこの程度の精度で使用に耐えうると考えられる。

図-6 は波長の測定値のちらばりが妥当であるかどうかを調べるために安定・不安定図に実験値をプロットしたものであるが、もっともちらばりの大きいことが予想される $h/l=1/20$ の棧 (黒丸印) についてもちらばりは妥当な値の範囲内にあることが知られる。

以上のように、この実験でみられた棧上の縦渦は Görtler 渦との対応性がよくその理論で説明が可能であるが、曲率半径をどのようにとるか等の点でさらに厳密な議論を必要とすると思われる。けれども、これらの理論的取り扱いが曲率が一定であるような流れにおいてさえもきわめて複雑であり、本論文では基本的な性質を明らかにすることに止め、詳細については今後の課題とした。

4. 結 語

本研究は横断方向に一樣な棧近傍の流れについて取り扱い、二次元的な形状を有する場合にも流れは三次元的になることが実験的に示された。また、棧背後の流れも三次元的で正流域と逆流域が交互に存在し、その横断方向の波長は棧前面の縦渦の波長によってほぼ支配されていることが明らかとなった。

このような棧前面に発生する縦渦は平担路床上に発生

する三次元流れとは異なるもので、稜の存在によって生み出される慣性不安定によるものである。この縦渦はいわゆる Görtler 渦と対比され、その水理的な特徴は Görtler の理論によって矛盾なく説明でき、いわゆる乱流現象とは異なることが明らかとなった。けれどもこれらを完全に証明するにはより詳細な理論研究が要求されるが、きわめて困難な問題であり、今後の課題であらう。

最後に、実験に際して有益な助言をいただいた中村広昭助手、実験に手を煩した大室利之技官に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Levi, E. : Longitudinal Streakings in Liquids Currents, Journal of Hydraulic Research, Vol. 3, No. 2, 1965.
- 2) Görtler, H. : Instabilität laminarer Grenzschichten an Konkaven Wänden gegenüber gewissen dreidimensionalen Störungen, ZAMM, Bd. 21, Nr. 4, 1941.
- 3) Vanoni, V.A. : Transportation of Suspended Sediment By Water, Trans. of ASCE, Vol. 111, 1946.
- 4) Leliavsky, S. : An Introduction to fluvial Hydraulics, London, Constable, 1955.
- 5) Wolman, M.G. and Brush, L.M. : Factors Controlling the Size and Shape of Stream Channels in Coarse Noncohesive Sands, Geological Survey Professional Paper, 282 G, 1961.
- 6) 木下良作 : 航空写真による洪水流の解析—その乱流構造と表面の流れ方の特性について—, 写真測量, Vol. 6, No. 1, 1967.
- 7) 木下良作 : 航空写真による洪水時の流況測定, 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, 1968.
- 8) Ikeda, S. and H. Kikkawa : Secondary Circulation in Straight Channels, Technical Report, Dept. of Foundation Engineering, Saitama University, Vol. 6, 1976.
- 9) 上野鉄男 : 波状路床上の流れの三次元的特性について, 京大防災研究所年報, 第 18 号 B, 1975.
- 10) Raudkivi, A.J. : Loose Boundary Hydraulics, Pergamon, 1976.
- 11) Hama, F.R., J.D. Long and J.C. Hegarty : On Transition from Laminar to Turbulent Flow, Journal of Applied Physics, Vol. 28, No. 4, 1957.
- 12) Smith, A.M.O. : On the Growth of Taylor Görtler Vortices along Highly Concave Walls, Quart. Appl. Math., 13, 1955.

(1977.7.1・受付)