

可視化法による大スケール乱れに関する研究 (2)

—路床形態と大規模乱流構造との関連について—

宇 民 正・上野鉄男

STUDY ON THE STRUCTURE OF LARGE SCALE TURBULENCE BY FLOW VISUALIZING METHOD (2)

—On the Relation between Bed Forms
and Large Scale Structure of Turbulent Flow—

By *Tadashi* UTAMI and *Tetsuo* UENO

Synopsis

Experimental studies are made about large scale structure of turbulent open channel flow with the aim that the results can be applicable for the practical use in river hydraulics. Flow patterns containing eddies on water surfaces and ones in crosssections are visualized by the camera moving with equal velocity with the mean flow. Flow patterns containing low speed streaks and bursts near the channel bed are also observed. Artificial roughness elements are arranged on the channel bed in order to regulate the flow structure.

The results are used to compose the structural model of turbulent shear flow, by which development of secondary vortices to secondary flow, formation of surface eddies and boils, and occurrence of bursts, sweeps and low speed streaks are explained reasonably.

1. 概 説

乱流現象はわれわれに極めて身近な日常現象の中に見出され、それだけに乱流に関する研究も何10年もの永きにわたって積み重ねられてきた。それにもかかわらず、乱流の実態はいまだ正確に把握されるに到っていない。たとえば、その研究の基本にかかわる乱流の定義あるいは特性に関しても、ある研究者¹⁾は「乱流とは流体の不規則運動である」と定義し、その中で不規則運動という言葉、それが予知可能であるという意味で偶然運動とは区別して使っているし、一方別の研究者²⁾は、乱流の特徴の1つに偶然性をもつことを含める見解を表明している。乱流研究の上で、このように基本にかかわる所でいまだに見解上の矛盾があるということは、それぞれの研究者が研究対象としている「乱流」そのものがそのスケールや在り方において若干異なったものとなっているか、あるいは乱流理論の適用の目的の上での相異が乱流の特性あるいは定義の上の相異にまで反映したものと考えられる。すなわち、乱流研究は分野によりあるいは目的によりいまだ発展段階を異にしているといえそうである。そのことは同時に、乱流研究において、その目的と方法を明確にしておくことの重要性を示唆している。

本研究は、乱流研究を河床形態や河道形態といった河川工学上の実際問題に結びつけようという意図のも

とに、開水路の乱流構造を主として流れの可視化の手法を用いて解明しようとしたものである。

ところで、河川工学上の実際問題の解明を意図した乱流研究としては、石原・余越³⁾の先駆的研究がある。彼等は乱流の特性とその研究方法に関して次のように述べている。すなわち、「乱流においては、速度や圧力などが不規則に変動していて、これがまた乱流の本質の一つであると考えられているので、乱流の研究は理論的にも実験的にも統計的手法を駆使して行なわれるのが普通である。」しかし、「スケールの大きな乱れはある特定の幾何学的な構造をしていて、流れの場におけるその時間的、空間的配置は一定の規則に従っているものと考えられることができる。」このようなスケールの大きな乱流構造のもつ規則的特性の把握のために、流れの可視化の手法が有効に用いられることが Kline ら⁴⁾や Laufer⁵⁾によって示されている。また、洪水流の中にらせん流があることの指摘を含む木下⁶⁾の河床形態、河道形態に関する研究にも、洪水流の航空写真観測という可視化の手法が有効に用いられている。

著者らは前報において、これら先駆的研究者の現象把握とその方法を基礎とし大規模乱流構造のモデルを提示した⁷⁾。その中で、乱流構造の解明のためには2次流と大規模乱流構造の関連性を明らかにする必要がある、そのために木下の並列らせん流モデルが重要な位置を占めることを示した。そして、2次流も大規模乱流構造の1つの現われであり、乱流場は2次流を含む各種階級の渦から成立っていると考えた。そしてそれらの渦の運動を渦度の集中と変形という概念で説明した。

本研究においては、大スケールの乱流構造に関する実験的検討を一層深めた。すなわち、前報に示したモデルにおける第2次渦と2次流の関係、水面渦の発生と運動の機構、路床近傍で発生する低速渦とモデルとの関係などを、路床形態を各種変化させた流れを対象として、流れの可視化の手法を用いて明らかにした。さらにその過程でモデルの正当性を裏づけるとともに、モデルの内容を一層豊富なものとすることができた。とりわけ、第2次渦と2次流の区別を明確にし、それぞれが果している役割を明らかにすることができた。

2. 開水路流れの乱流構造に関する著者らによるモデル構成とその問題点

大規模乱流構造が coherent な特性をもつという指摘^{3),4),5)}をもとにして、著者ら⁷⁾は従来別の概念として扱われていた境界層内の大規模乱流構造と2次流との関係を明らかにし、両者の発生・発達を統一的に説明するモデルを提案した。その主要内容はつぎのとおりである。

2.1 モデル構成の基本的観点

ある程度以上のスケールをもつ乱流構造は特徴的な形態をもっており、それは以前に仮定されていたほど無秩序なものではない。このような乱流構造の特性を coherent な特性という表現で表示すると、それは具体的にはつぎの2つの内容をもつ。すなわち、第1に乱流構造は2次流を含む各種階級から成立っており、第2に、それらの各階級の乱流構造の運動と発達は渦度の集中・拡散および減衰といった運動学上の法則に支配されている。

2.2 著者らによる乱流構造モデル

開水路剪断流中には水路床のごく近傍に敷きつめられた水路横断方向に軸をもつ渦度ベクトル群が存在する。その状態を vortex sheet を構成する渦糸群という形に単純化して表示し、各渦糸を第1次渦と呼称する。流れの中の擾乱によってこれらの第1次渦の一部に変形が加えられると、第1次渦はそこで局所的に集中させられる。集中させられた第1次渦は Ω 型の渦管を構成する。この渦管は流れによって下流側へ引きのばされ、それとともにビオ・サバルの法則によって上方へもち上げられる。同時にこの渦管は第1次渦をまき込み発達して行く。このような発達した Ω 型の渦管を第2次渦と呼称する。第2次渦が十分に発達した段階では、第2次渦は流下方向を向き、互に並行した1対の渦を形成する。その渦の回転方向は互に逆である。この渦が形成する流下方向に軸をもつ1対の回転運動が2次流である。

2.3 乱流構造モデルの限界と問題点

著者らが既にした乱流構造モデルにはつぎのような限界あるいは問題点がある。

① 第1次渦，第2次渦および2次流の間の区別が不明確である。とりわけ，第2次渦と2次流の関係を明らかにする必要がある。

② 水面近傍の乱流構造，たとえば水面渦やボイルの生成と発達などについての説明が不十分である。

③ 水路床近傍での低速渦の水路横断方向の間隔が水深に比べて非常に小さくなることや低速渦が枝分かれしたり，途中で発生したりあるいは消滅したりすることが観察されている。隣り合う2次流の上昇流の部分で低速渦が発生するという考え方は上の事実と矛盾する。

④ エネルギーカスケード過程については，本モデルによると，平均流のもつエネルギーは2次流の作用によって第1次渦の生成に寄与し，次の段階では第1次渦が第2次渦に巻き込まれる形で，第1次渦のエネルギーが第2次渦に吸収され，2次流が形成される。エネルギーの逸散は主として2次流を構成する第1次渦の伸張の結果として起ると説明される。このような過程とコルモゴロフのエネルギーカスケード過程に関する仮定との間に矛盾する所がある。

⑤ 個々の渦の発展過程はかなり明らかになったが，各階級の渦の発展の時空間的な相互関係が不明確である。

これらの問題点のうち，①～③の問題点に関しては次の3.の実験的検討および4.のモデルの構成においてほぼ解決することができた。以上に列記した問題点のうち最も肝心なものは⑤であって，この問題点が解明されれば，乱流構造そのものが解明されたことになるといってもよいであろう。この問題点に関する本報告の寄与は，第1に，その解明のための方法論を3.1においてかなり明らかにすることができたこと，第2に4.のモデル構成においてモデルの内容を一層豊富なものにすることができたこと，である。

3. 大規模乱流構造に関する実験的検討

3.1 実験の方法

(1) 乱流構造把握の方法論

開水路乱流構造の複雑さについてはいまさらいうまでもない。しかし，その複雑な乱流構造についても，研究の目的と方法さえ明確にすれば，その実験的検討はかなり容易になることが予期される。そこで，本論では実験の目的と方法を次のように設定した。

① 乱流構造の研究の目的を河川工学における実際問題の解明に結合するようにした。そうした場合，大規模乱流構造の解明が重要となって来る。

② 実河川のレイノルズ数はかなり大きなものであるが，大規模乱流構造の諸特性は実験室における，しかもかなり小さなレイノルズ数の実験でも把握できるであろうと考えた。

③ さらに，実河川の河床変動の状況から推測して，水路床に適当な粗度を人工的に配置することによって，流れを安定化させることができるのではないかと考えた。

上記のうち，第1および第2の点に関連して，次のような実験方法を採用した。すなわち，実験は，低レイノルズ数をもつ流れにおいて流れの可視化の方法を用いて行なった。低レイノルズ数の流れを用いた理由は，その状態での流れは比較的単純な構造を持ち，しかも，その流れの特性から高いレイノルズ数を持つ流れの大規模乱流構造の3次元的な特性をある程度類推することが可能であると考えたからであり，さらに，この場合には流れの可視化による方法も比較的有利に用いることができるからである。

また，第3の点については，木下⁹⁾の研究から多くの示唆をうけた。木下は，各種形状の凹凸が設けられた固定床水路における流れの水面の写真を比較検討した結果，らせん流（2次流）が最も安定的に形成されるのは，流下方向に並行した凹凸が設けられた水路床の場合と，流下方向に対して斜めに交錯している格子状の凹凸が設けられた水路床の場合とであることを見出した。ここでは，これらの成果を参考した結果，水路床に各種の人工粗度要素を配置し，各階級の渦運動の相互関係と安定性を，横断面内の流況特性，水路床

近傍の流況特性および水面渦の特性の実験的検討を通して解明してゆくこととした。

(2) 水面渦観察の方法と意義

開水路流れの水面に適当なトレーサーを浮かべ、その平均的な流下速度にほぼ等しい速度でカメラを移動しながら、水面での流線パターンを写真撮影するという方法はすでに1929年に Nikuradse⁹⁾によって、あるいはその後 Tietjens ら¹⁰⁾によって乱流観測の一法として用いられてきている。ここでは、ふたたび本方法を乱流観測に適用しようとする訳であるが、それは、モータードライブカメラによる連続撮影方法を本方法に適用することによって、本方法の優位性が新ためて認識されるに至ったからである。その優位性はつぎの2点にまとめられよう。すなわち、第1に、Kline らをはじめとして、最近の流れの可視化の手法を用いた乱流研究の進展により、大規模乱流構造が流下するにもなって変形してゆく過程にはかなり規則性があることが明らかになったが、本方法によれば、水面すなわち2次元場での流況の経時変化が把握できるわけだから、このような大規模乱流構造の coherent な特性の把握に対して本方法はまさにうってつけと考えられること。しかも、第2に、木下⁶⁾の研究からもうかがえるように、水面での流況の2次元的なパターンは流れの3次元的な構造の一つの反映であると考えられるので、本方法で得られた資料は流れの3次元的な乱流構造を解明する重要な手がかりとなることである。

(3) 横断面内の流況の実測方法

横断面内の流況の実測に用いた装置を **Photo. 1** に示す。台車にはカメラ、照明用スポットライト、トレーサー発生用電極、および反射鏡が搭載されており、しかも平均的な流速と等しい速度で台車は移動できるようにになっている。搭載された各装置の機能は次のとおりである。

トレーサー発生用電極——水路横断面内に、互に絶縁された2本の白金線を平行に張り、それらの間に10Hzのパルス状の直流電圧をかけた。このようにすることにより、陰極から発生する水素気泡と共に、陽極から発生する酸素気泡もトレーサーとして利用することができる。

照明用スポットライト——上記のようにして発生したトレーサーのうち、2本の電極を含む水路の横断面およびそのごく近傍にあるものだけを、水路の側方に設けられたスポットライトからの光をスリットを通してことによって照し出した。

反射鏡——このようにして照し出された横断面内の流況を、その横断面より約40cm下流側の流れの中に設置された鏡で上向きに反射させ、写真撮影が可能ないようにした。すなわち、鏡は水路床面に対して45°の傾きをもって台車にとりつけられている。鏡の下縁は水路床面すれすれになるように設置され、しかも上縁

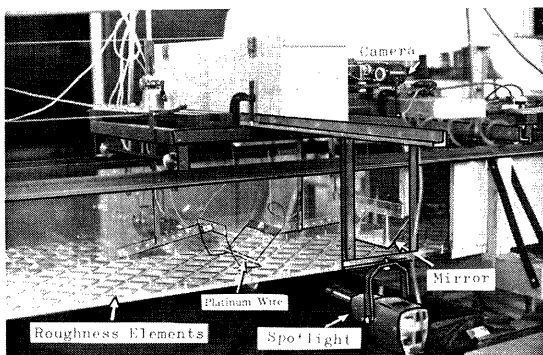


Photo. 1. Experimental facilities.

は水面より上にある。また鏡の長さは 20cm で、水路幅のちょうど半分である。したがって、鏡は流れの横断面のうちの半分のさえぎることになる訳であるが、鏡自体が平均流速とほぼ等しい速度で移動すること、および鏡と観測横断面との距離が約 40cm あることを考慮して、鏡が 2 次流に及ぼす影響は一応無視することとした。

(4) 実測方法と実験条件

実験は長さ 12m、幅 40cm、高さ 30cm の直線水路で行なわれたが、そのうち長さ 2.8m の計測部分は透明アクリライト樹脂で作られており、水路底面および側面からの流況観測および照明が可能のようにしてある。

実験に用いられた水路床形態は Fig. 1 に示されている 4 種であって、(a) は平坦路床、(b) は流下方向に断面 3mm×3mm の棧を 5cm 間隔で設置した水路床、(c) は水路横断方向に断面 3mm×3mm の棧を 10cm 間隔に設置した水路床、そして (d) は直径 2.6mm 長さ 11cm の針金をくの方形に直角に折り曲げて、その頂点どおしの間隔を流下方向にも横断方向にもともに 10cm として配列した水路床であり、それぞれ F 型路床、L 型路床、T 型路床および X 型路床と呼ぶこととする。これらの各種の人工粗度要素は、水路全長 12m のうちほぼ中央部の長さにして 4m の部分に設置されている。

水路床形態を上 4 種にわたって変化させ、それと大規模乱流構造との関連を、水面渦の観測および水路床面近傍の低速渦の観測を通して検討した。それらの実験では水理条件はつぎのように設定されている。すなわち、どの水路床形態においても、水路床勾配 1/500、流量 0.5l/sec とし、しかも計測区間での平均水深が 2.5cm となるようにした。そのために、下流端でのせき上げ状態を各水路床形態ごとにわずかに調整した。このときの断面平均流速は 5cm/sec、水面での流速は約 7cm/sec であり、断面平均流速と水深を用いたレイノルズ数は約 1000、フルード数は 0.1 となる。本項で用いた実験条件は Table 1 の 6 種であり、各実験条件で行なわれた実測の内容とあわせて示されている。

3.2 横断面内における流れパターンの特性

先に 3.1(3) で示した方法を用いて、水路横断面内の流況を写真観測した。その観測例を Photo. 2~4 に示す。

Table 1. Experimental conditions.

No. of Experiment	Discharge Q (l/sec)	Width B (cm)	Bed Slope	Water Depth H (cm)	Mean Velocity V_m (cm/sec)	Type of Channel Bed	Tracer		
							(a)	(b)	(c)
1	1.2	40	1/500	5.85	5.13	F	P		
2	0.82	"	"	3.80	5.39	F		HO	
3	0.50	"	"	2.50	5.00	F	A	HO	H
4	"	"	"	"	"	L	A		H
5	"	"	"	"	"	T	A		H
6	"	"	"	"	"	X	A	HO	H

Measurement (a); Flow pattern on water surface

(b); Flow pattern in transversal section

(c); Low speed streak lines

Tracer

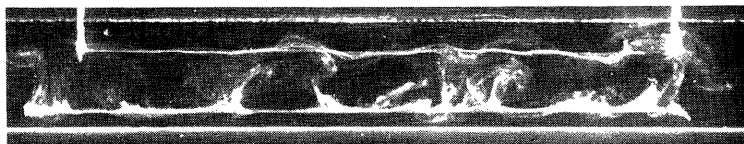
P ; Punch trash

H ; Hydrogen bubble

HO; Hydrogen bubble and oxygen bubble

A ; Air bubbles on water surface

3655



3656



3657



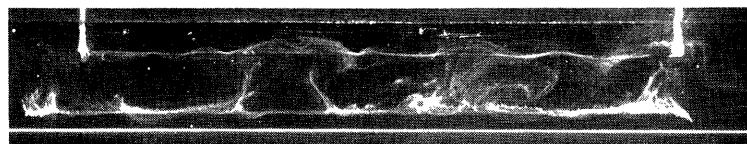
3658



3659



3660



— a_1 — — — a_2 — — — a_3 — — — a_4 — — —

(continued).

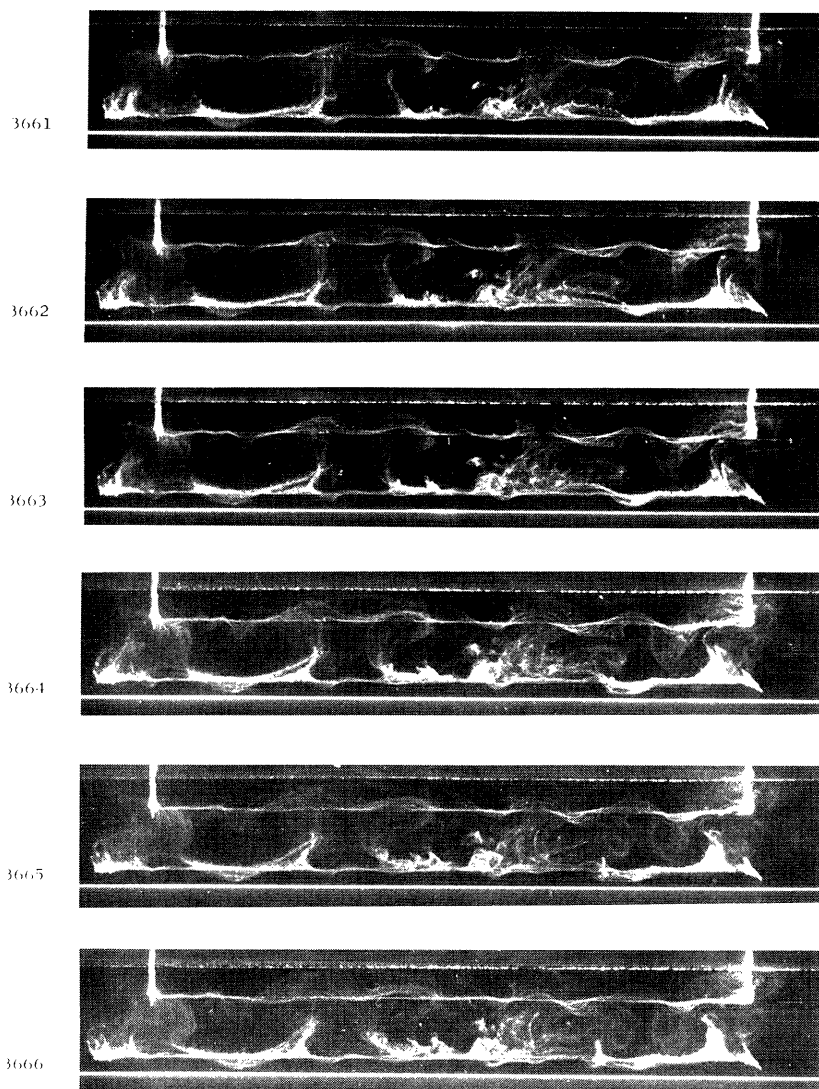


Photo. 2. Flow patterns in crosssections (Experimental condition of No. 2 in Table 1).

3551



3552



3553



3554



3555



3556



3557



3558



(continued).

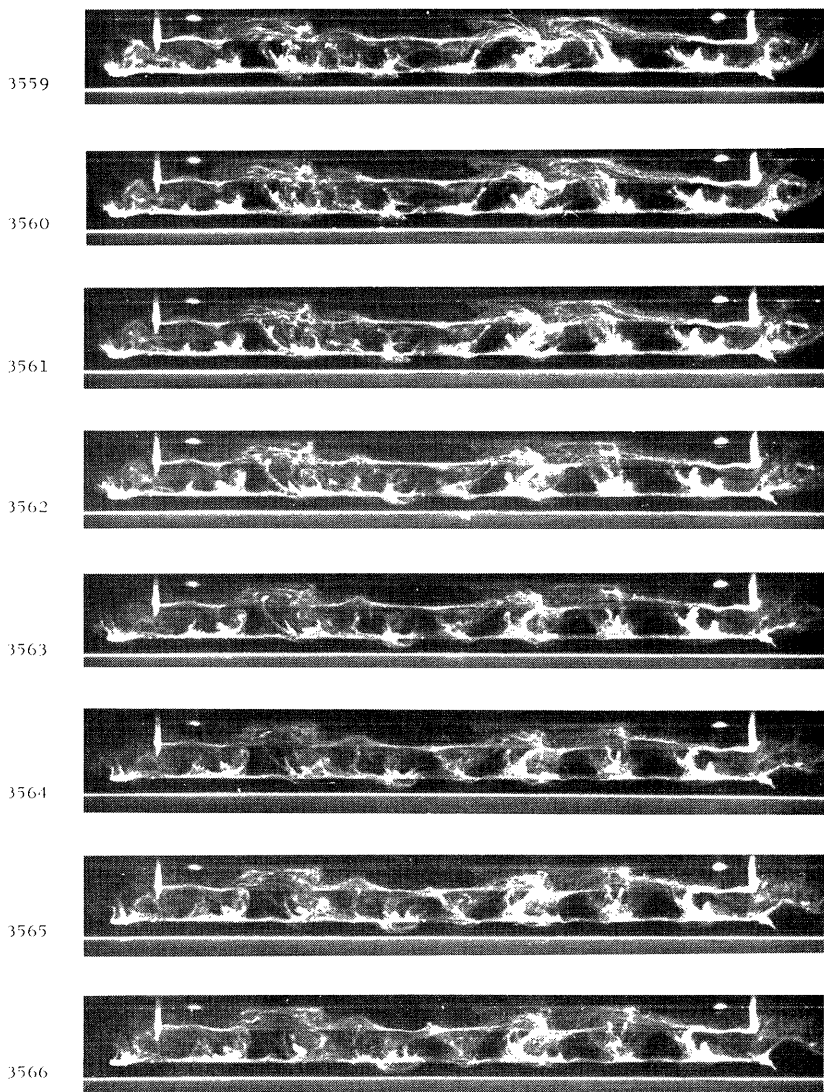


Photo. 3. Flow patterns in crosssections (Experimental condition of No. 3 in Table 1).

3348



3349



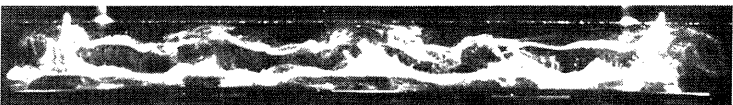
3350



3351



3352



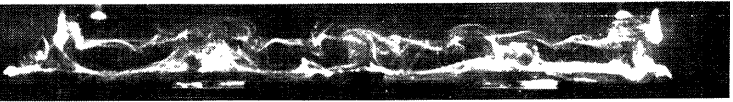
3353



3354



3355



C

(continued).

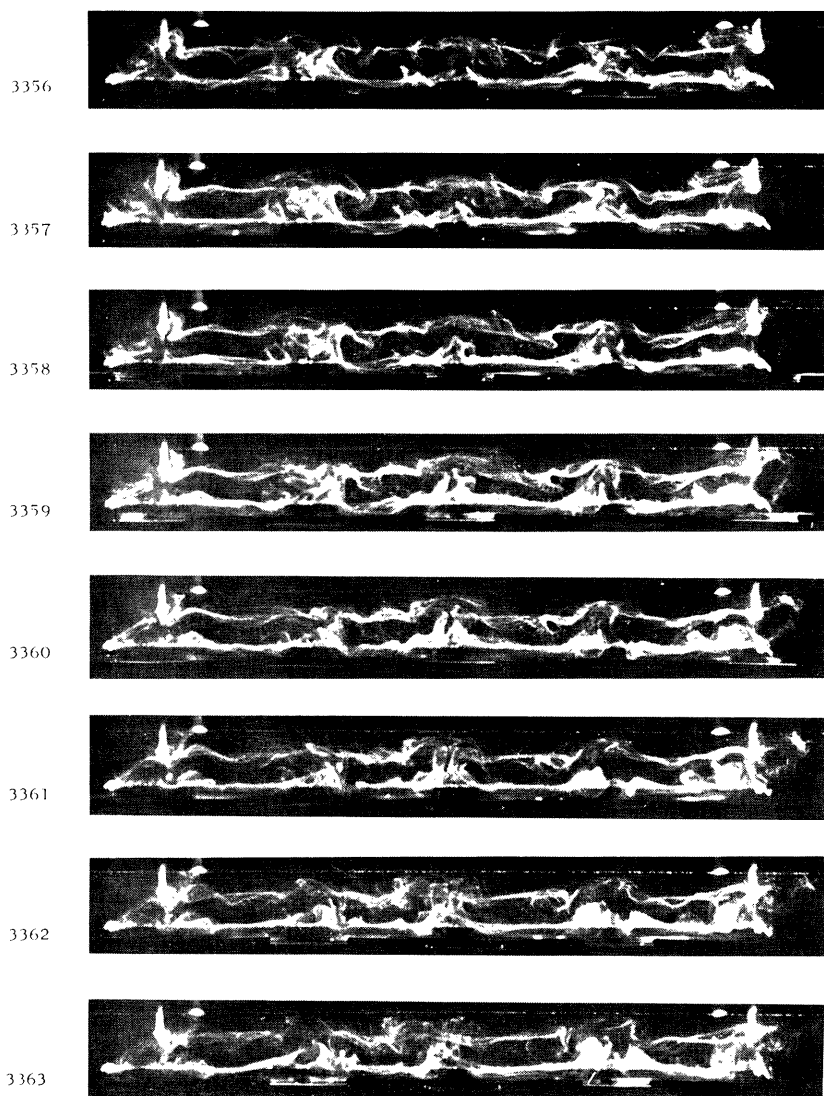


Photo. 4. Flow patterns in crosssections (Experimental condition of No. 6 in Table 1).

① Photo. 2

Table 1 の No. 2 の水理条件の下での写真である。カメラの移動速度は 5.6cm/sec で、撮影は 0.3sec に 1度の割合で行なわれた。各コマの上縁近くと下縁近くに見える水平な線はそれぞれ水面と水路床面であり、それらの中間に水平に張られた 2本の白金線から発生する水素気泡および酸素気泡が雲のように時間経過とともに流れに従って移動している様子がよくわかる。上方の白金線の支持棒が各コマの両側近くに白く写っているが、その間隔が 19.5cm である。

先ず、これらの連続写真を一見して、流下方向に軸をもつ回転運動があることが明瞭に認められる。2本の白金線から出た気泡群が上方へ移動しているか、下方へ移動しているかを調べることににより、また、上方あるいは下方へ移動する範囲、および移動の速さを調べることににより、この回転運動の大きさと回転速度がある程度わかる。たとえばフィルム番号3660の写真では、写真に示した $a_1 \sim a_4$ の範囲で強い上昇流があり、しかもこれら各範囲の中心どおしの間隔は平均的に水深の2倍に等しくなっている。このことは、対をなす2つのらせん流のスケールは水深の2倍にほぼ匹敵するという木下の指摘を裏づけている。ところで、この上昇流が発生している範囲は、先に $a_1 \sim a_4$ で例示したように、ほとんど水深に匹敵する程の大きさをもっていることが注目される。しかもその範囲内の流況を詳細に見てみると、 a_2 の範囲の流況が典型的に示しているように、上昇流はその範囲内で全面にわたって発生している訳ではなく、1つの範囲について2~3本の条線状の軌跡を示しながら発生している。しかもこれら各条線が水路床面と交わる所で低速渦が発生しているようである。さらに、これら条線の中には、完全に水面に達しないものも多くあることが認められる。このような水面に達しない条線の中には、時間の経過とともに水面に達するまで伸長してゆく過程にあるものや、時間が経過しても水面に達するには至らないものなどいろいろあるようである。これらの観察結果から次のことが指摘される。すなわち、横断面内で立上った条線は低速渦と1対1の対応を示しているが、それと2次流とは1対1の対応を示さず、むしろこれらの条線が何本か束ねられた状態で1対の2次流に対応している。

つぎに水面近くにはられた白金線から出る気泡の動きを観察してみよう。先に示した上昇流の発生範囲 $a_1 \sim a_4$ では、この白金線の周辺でも強い上昇流がある。そしてこれらの範囲の中間の位置では全般的に下降流が認められる。しかしそのような比較的大スケールでかつ強い上昇流と下降流の分布の他に、比較的小スケールでかつ弱い上昇流と下降流が同時に存在していることが認められる。

以上の事実を総合すると、二次流とは1つの軸のまわりの単純な回転運動ではなく、流下方向に卓越した成分をもついくつかの渦運動の総合がある程度の時間平均化操作を通して把握されたものといえる。そして、流下方向に卓越した成分をもついくつかの渦運動とは第2次渦のことであり、先に述べた上昇流中に認められる立上った条線や、それに対応して水路床近くに形成される低速渦はいずれもこの第2次渦によって発生するものと考えてよいであろう。木下¹¹⁾は、人工的に成型されたウロコ状河床上の流れの3次元的な機構を観察し、その結果を、「流下方向に軸をもつ、1つのウロコの長さに満たない程度の、円筒状のものが、幾つも並んで見える。これが縦軸の渦で、らせん流といっても、Fig. 2 のように間けつ的に、脈動的に舞上る、いくつもの小さい縦渦の、それらがさらに大きくらせん的に回転する流れのようであり、ミクロにみるにはなかなかわからない、複雑な流況があることが察せられる。」と述べているが、著者らが指摘した第2次渦と木下の縦軸の渦、そして著者らの2次流と木下のらせん流とは同じものと考えられるので、先に述べた著者らの現象認識は木下のそれと一致しているといえよう。

② Photo. 3

この写真は **Table 1** の No. 3 の水理条件の下での水路横断面内の流況を示している。カメラの移動速度は 5.6cm/sec で、撮影周期は 0.3sec である。先に示した **Photo. 2** に比べると、この流況の場合には安定した2次流の発生は認めにくい。す



Fig. 2. Secondary flow and small scale vortex motions after Kinoshita.

なわち、この写真の場合、強弱とりまぜた上昇流が水路床近くでかなり広範囲に分布しており、その内でも比較的強いものが水路横断方向に水深に匹敵する間隔をもって分布している。そしてこのような上昇流は、先の場合のように束状にまとまって2次流を形成することはないようである。ただ、写真でも示されている範囲では、比較的強い回転運動の発達を観察される。すなわち、この写真の流況においては、上昇流は比較的不規則的に発生しており、その一部は流下方向に軸をもつ水深に匹敵する規模の回転運動を形成するが、断面全体にわたって規則的に配列された2次流を形成するにはいたっていない。これに対して **Photo. 2** の水理条件では先に見たように比較的安定した配列の2次流が形成されている訳で、両者の差が何に基づくものであるかについては今後検討してゆく必要がある。

③ Photo. 4

この写真は、**Table 1** の No. 6 の水理条件の下での横断面内の流況を示しており、カメラの移動速度は 4.1cm/sec、撮影周期は 0.3sec である。先に述べたように、水路床に配列された人工粗度要素の格子点を流下方向に連ねた線の横断方向の間隔は 5cm であり、これは水深のちょうど2倍に相当する。したがって、木下の指摘に従えば、横断方向には人工粗度要素の配置どおりに2次流が配置されるはずであり、実際の通りに、格子点を流下方向に連ねた線上で上昇流が生じ、それにとまって安定した2次流が形成されていることが認められる。またたとえば写真で ϵ の矢印で示された所では、流下方向に軸をもつ回転運動が発達してゆく様子が明確に認められるが、これは第2次渦の1断面である。

さらにこの場合、人工粗度要素の配置の流下方向の変化に対応して、上昇流の発生が流下方向にも周期性をもっていることが認められる。すなわち、人工粗度要素の流下方向の間隔は 10cm であるから、カメラがその1間隔を通過する間に $10 \div 4.1 \div 0.3 = 8.1$ コマ撮影されることとなるわけであるが、水路床近くで発生した上昇流の1つの変動が時間の経過とともに上に向かって発達していき、最後にはその塊は散逸してしまうというサイクルが認められ、しかもこの1サイクルがほぼ8コマに対応していることが認められる。このような流下方向の現象変化のサイクルが、単に人工粗度要素の配置だけによるものか、さらに別の原因にも支配されているものかは、さらに検討を要する所である。

3.3 水路床近傍の流況特性

Photo. 5 は各種の水路床形態のもとでの水路床近傍の流況を水素気泡法によって捉えたものである。

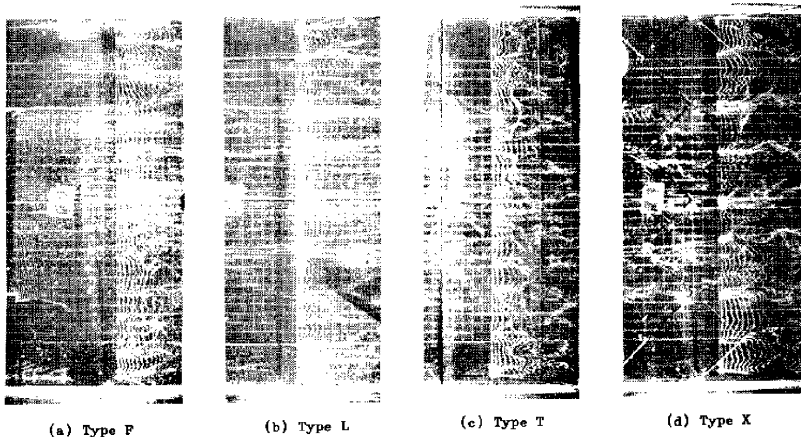


Photo. 5. Flow patterns near the channel beds of various types.

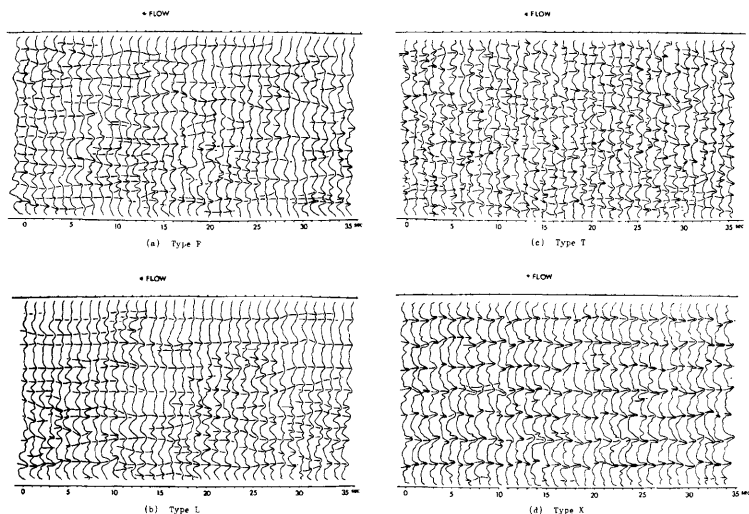


Fig. 3. Arrangement of low speed streaks on various types of bed forms.

(a), (b), (c) および (d) はそれぞれ F 型, L 型, T 型, および X 型の水路床形態を与えた場合の写真の 1 例で, その水理条件はそれぞれ Table 1 の No. 3~No. 6 に相当する。水素気泡発生用白金線は水路床面から 0.5cm の高さで水路横断方向に水平に設置されており, 水素気泡は 10Hz のパルス状に発生している。いずれの水路床形態の場合にも流下方向流速が水路横断方向に変化していることが共通して認められ, それは, 水路横断方向にある間隔をおいて水素気泡列に顕著なくびれが存在することによって特徴づけられている。この水素気泡列のくびれている部分は low speed streaks あるいは低速縞と呼ばれているものに相当し⁴⁾, そこでは上昇流が存在する。また, くびれの度合がとくにきつくと, 水素気泡の線が重なっているような部分はパーストに相当すると考えられ, T 型路床および X 型路床の場合に多く見られる。また, Photo. 5 から L 型路床および X 型路床の場合にほぼ路床形態に対応した位置で低速縞あるいはパーストが発生していることが認められる。

以上のような低速縞およびパーストの発生状況の観察から大規模乱流模造がどのようになっているかを明らかにし, ひいてはそれと水路床形態との関連性を明らかにすることが本実験の目的である。

Fig. 3 は上と同じ水理条件のもとで, 流況を 1 秒毎に連続写真撮影したときの流速分布の模様をずらして並べたものであり, (a), (b), (c) および (d) はそれぞれ F 型, L 型, T 型および X 型の水路床形態のもとでの実験結果である。図で横方向に延びたすじは各写真に現われた低速縞を結んだものであり, それらの中には部分的にはパーストも含まれている。

まず, 平坦路床の場合について検討する。Fig. 3(a) において低速縞の配置には長く続くものや短時間に消滅するものがあり, また隣り合う低速縞が非常に接近したものがある。このような現象は, 低速縞は第 2 次渦によって形成され, その第 2 次渦は平坦路床の場合には比較的不規則的に発生するという先の 3.2 での現象認識結果から容易に理解されうる。すなわち, 前報の Fig. 8 に示されるように低速縞は 1 対の第 2 次渦によって生成される訳だから, 第 2 次渦が不規則的に生成されるような水理条件の下では低速縞も不規

則的に配置され、しかもその消長もはげしくなるのである。実際、**Fig. 3(a)**では低速渦の配置は不規則で、この図から2次流の配置を予測することが困難のように見える。しかしこの図には比較的長く続いている低速渦も同時に存在しており、それらの間隔がほぼ水深の2倍に相当することが注目される。これらの長い低速渦は2次流と対応したものと考えられる。

L型路床の場合には、棧間隔は木下のらせん流モデルと一致するように水深の2倍に等しくなるように設定されている。この場合には、**Photo. 5(b)**および**Fig. 3(b)**から、棧の中間部分で低速渦が発生する頻度が比較的小さいことが認められる。したがってほとんどの第2次渦は棧の部分で比較的整然と形成され、それにとまって2次流も比較的安定していると考えられる。

T型路床の場合には、**Photo. 5(c)**および**Fig. 3(c)**から、第2次渦の発生は非常に不規則であることが認められる。しかしそれにもかかわらず、**Fig. 3(c)**において低速渦が横断方向にかなり変動しながらも殆んど途切れることなく流下方向に連なっていることは注目される。このことは、一度第2次渦が発生すると、その直下流に第2次渦が発生しやすい条件ができることを示唆している。その結果、流下方向にいくつかの第2次渦が連なって発生し、それが一つの連なった低速渦を形成することになると考えられる。

X型路床の場合の低速渦の様子は**Photo. 5(d)**および**Fig. 3(d)**に示されている。これらから、水路床の人工粗度要素の格子点を流下方向に連ねる線上で低速渦が現われていることがはっきりと認められ、これにとまって規則的で安定した2次流が存在すると考えられる。

以上の検討から、第2次渦の発生の仕方あるいはその配置が流れの全体的な機構を決定する上で重要な役割を果たしており、その第2次渦の発生の仕方あるいは配置は水路床の形態によって規定されることが明らかになった。この事実は、移動床上の流れの構造やその抵抗特性あるいは河床形態の形成過程を解明してゆく上で重要な指針を与えるものと考えられる。

以上の検討から、第2次渦と2次流との区別と相互関連性も明らかになり、それによって開水路の大規模乱流構造のモデルの内容を豊富にすることができた。その内容は次のとおりである。すなわち、第2次渦はその寿命時間に達するまでの間に流下方向に引伸ばされる。これらの第2次渦は同時に、相互に干渉しあいながら全体としては流下方向に軸をもつ水深規模の回転運動を形成する。それが2次流である。したがって、スケールについては、2次流は水深方向および横断方向に水深程度の広がりを持ち、流下方向には水深に比して十分大きいものに対して、第2次渦は水深方向および横断方向には水深に比して十分小さく、流下方向には水深程度の大きさを持つ。また、渦軸の方向については、2次流は水路床と平行であるのに対して、第2次渦は水路床に対して一定の傾きを持つ。そして、つぎつぎと発生する第2次渦の運動が、既に形成されて存在していた2次流の運動と矛盾しないような関係にある場合に、2次流は安定化する。一方第2次渦は一見したところ平坦路床上などでは不規則的に発生しているようであるが、一たん発生するとその下流側で新たな第2次渦が発生しやすくなるとか、2次流の配列状態によって逆に第2次渦が発生しやすくなる位置ができるなどといったように、その発生機構には規則的な面と不規則的な面とがあるようであり、そのことが、人工粗度要素を適切に配置すれば第2次渦ひいては2次流をある程度規定することができる一つの理由であるとも考えられる。

3.4 水面観察に基づく大規模乱流構造の検討

水面における流れの様子は当然流れの内部構造を反映したものと考えられるが、前報⁷⁾においては、水面で観察される渦運動と提案されたモデルにおける各階級の渦運動との関係が明らかにされていない。この点を補足するため、ここでは前報で示した平坦路床上の流れの水面渦に関する実験結果について検討を深める。同時に、各種の形態の水路床上の流れに関する実験を新たに行ない、水面渦とモデルとの関係を明らかにし、ひいては大規模乱流構造に関するモデルの確立を図る。

(1) 水面渦の幾何学的特性

Photo. 6および**Fig. 4**はそれぞれ**Table 1**のNo.3~6の水理条件のもとでの移動カメラによる

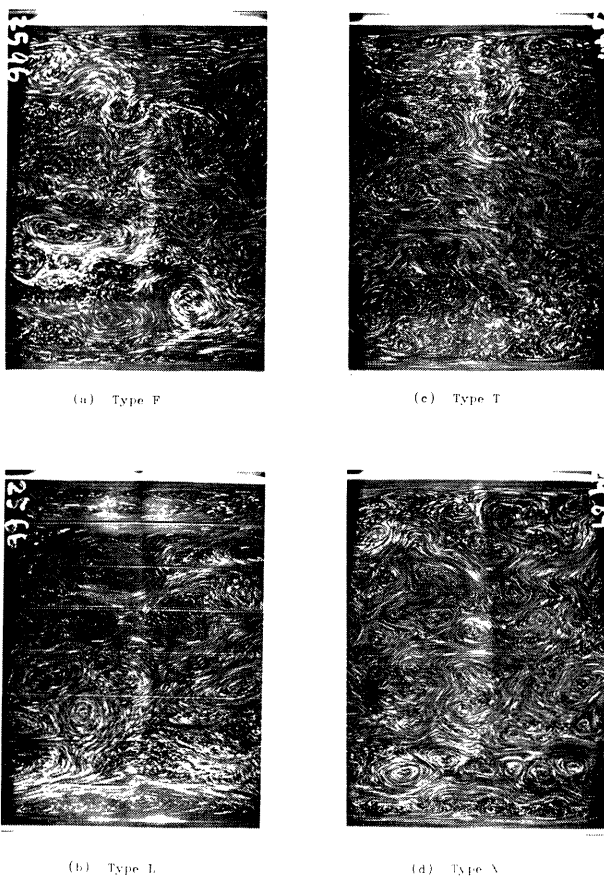


Photo. 6. Flow patterns on the surfaces of flows over various types of bed forms.

水面渦の撮影結果およびそれを図化したものである。これらにおいて、(a), (b), (c) および (d) はそれぞれ F 型, L 型, T 型および X 型の路床形態に対応するものである。実験において、カメラの移動速度は水面での流速にほぼ等しい約 7cm/sec であり、カメラの開放時間は 1 秒である。これらからつぎのことがわかる。

① 水面渦の配置は X 型路床の場合が最も規則的で、同方向に回転する渦が流下方向に比較的整然と並んでおり、T 型路床の場合が最も不規則的である。

② 平垣路床の場合の水面渦の配置は X 型路床の場合と T 型路床の場合のものとの中間的な性質を示し、この場合にも流れがある程度の規則性をもつことを示している。

③ Fig. 3 において、第 2 次渦の発生の著しいことが認められている T 型路床および X 型路床の場

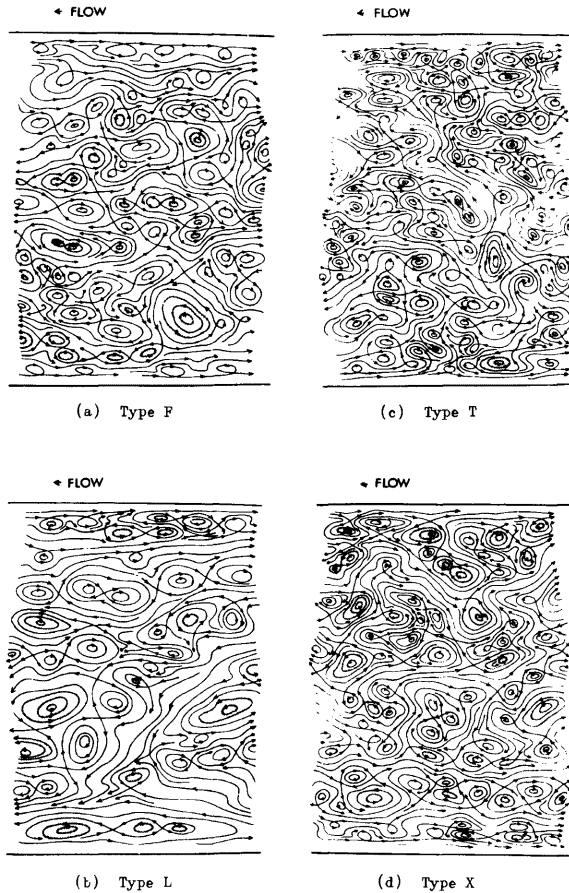


Fig. 4. Flow patterns on the surface of flows over various types of bed forms.

合には、水面渦の発生も多く、第2次渦の発生が少ない L 型路床においては水面渦も少なく、そのスケールが大きなものとなっている。

④ 水面渦の回転速度の最大値は $1\sim 2\text{cm/sec}$ に達しており、これは、同じ水理条件の流れの横断面写真 Photo. 2~4 から読み取られた第2次渦の回転速度とほぼ等しい。

以上の検討結果から、水面渦の発生機構は第2次渦の発生状況と何らかの対応を持っていることが推論される。

(2) 水面渦と開水路乱流の立体構造との関係

以上の検討および前報での水面渦に関する実験的検討を総合すると、水面渦と開水路乱流の立体構造との

関係については Fig. 5 のような模式図が得られる。すなわち、図で *b*, *c*, *d* および *e* で示されているように、流下方向に連なった渦の列が4本認められる。ただし本図で、水路側壁面近くが空白となっているのは、そこではカメラの移動速度と平均的な表面流速との差が大きくなって流況が明確に捉えられなかったためである。また、渦の回転方向は、同一列の上では同方向、隣り合う列の上では反対方向となっている。したがって、この場合には *b* 列と *c* 列の間にはさまれた領域および *d* 列と *e* 列にはさまれた領域では流下方向流速は相対的に遅くっており、一方、*c* 列と *d* 列の間にはさまれた領域では流下方向流速は相対的に速くなっている。これらの事実から考えると、2次流は図に示されるように発生しているものと考えるのが妥当であろう。すなわち、*b* 列

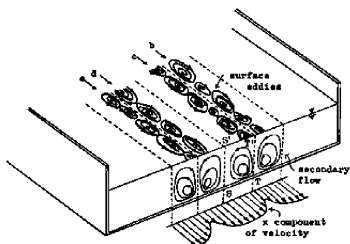


Fig. 5. Conceptual picture showing the spacial relation between surface eddies and the large scale structure of turbulent flow.

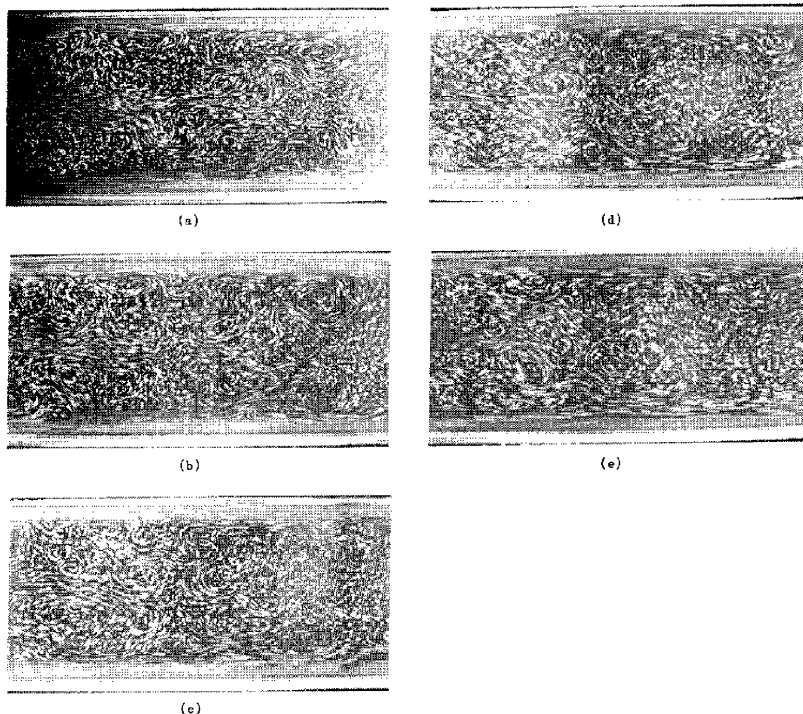


Photo. 7. Variation of flow patterns on water surfaces. Photographs are taken by the camera moving with equal velocity with mean flow.

と c 列の中間および d 列と e 列の中間にはそれぞれ上昇流があり、そこでの流下方向流速は相対的に遅くなっていると考えられる。

ところで、先の横断面内の流況に関する検討および水路床近傍の流れの検討からも明らかにされたように、対をなす 2 次流の中央部の上昇流は、第 2 次渦の発生と発達に伴うものであり、しかも、水面渦の中心付近では渦度が大きくなっていることも前報で確かめられている。これらの事実を合わせ考えると、水面渦は第 2 次渦が水面に達した所で発生していると考えるのが妥当のようである。

（３）水面渦の運動学的特性

上記のように、水面渦は第 2 次渦の運動を反映したものと考えられるので、水面渦の運動を検討することによって第 2 次渦の運動の特性をある程度把握できると考えられる。ところで、第 2 次渦は開水路流れの乱流構造を決定する上で重要な役割を果たすものであることは先に述べた通りである。したがって、ここでは水面渦の発生・発達の様子を検討することにより、次項で述べる乱流構造のモデルの構成に寄与することとする。

Table 1 の No. 1 の水理条件での流れの水面パターンの撮影結果を Photo. 7 に示す。なお、この実験結果の一部はすでに前報に示され、検討も加えられているが、改めてその場合の実験条件を示すと次の通

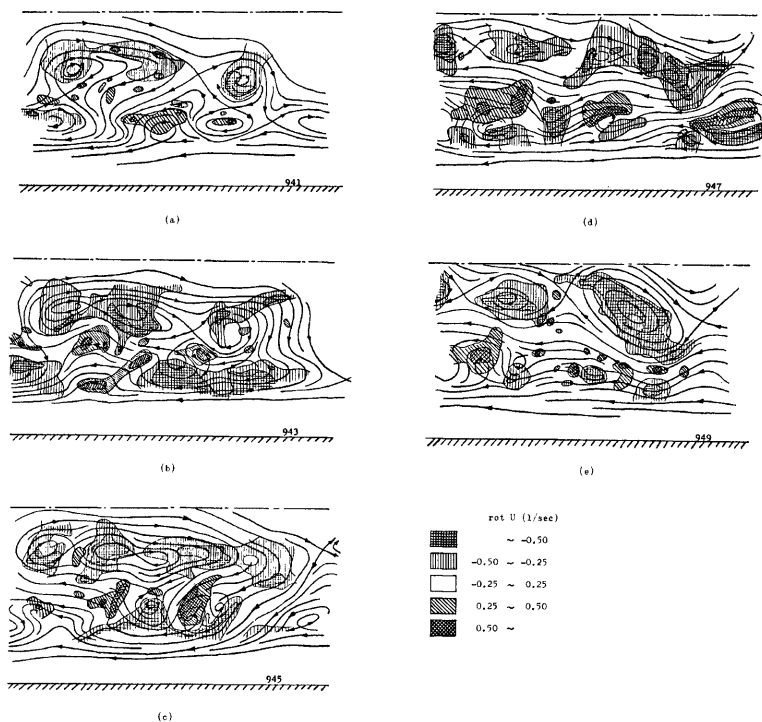


Fig. 6. Time variation of flow patterns and vorticity distributions on water surface.

りである。水面における平均的な流速は 7.1 cm/sec であり、カメラの移動速度もこれと同じである。また、シャッターの開放時間は 2 sec であり、撮影周期は 3 sec である。Photo. 7 においては、得られた水面パターンを、それらのうちから1つおきに取出して示したので、各コマ毎の周期は 6 sec ということになる。また、水面パターンの撮影結果の各コマの左下半分について、それらから計算された水面における渦度の分布と、水面における流線の概念図とをあわせて Fig. 6 に示した。

これらの写真および図から、水面渦の2次元的な配置と運動は渦度の分布と密接な関連をもっていることが認められる。まず、水面渦の2次元的な配置と渦度の分布との関連については次のことが指摘される。

① スケールの大きな渦がある所および曲率の大きな流線がある所ほど渦度の絶対値も大きくなっている。

② 同一渦列の上では渦度の符号は同じく、隣り合う渦列の間で渦度の符号は逆となっている。

③ 渦のほぼ中心付近に渦度の極大値あるいは極小値が発生している。

次に、水面渦の運動と渦度分布との関連に着目して Fig. 6 を見てみると、水面渦の運動あるいは消長には、渦度の集中、拡散および減衰という過程と対応した一種の輪廻があるといえそうである。その状況をもう少し詳しく説明すると次のようである。すなわち、第1段階では、渦度が局所的に集中した領域が跳び石状あるいは帯状に分布する。その段階での流線の模様は、スケールの大きい顕著な渦運動を形成するには至らず、いくつかの小さな渦を連ねた形（たとえば Fig. 6(d) の右上方部分）あるいは曲率の大きな流線の集合した形（たとえば (a) の中程上方部分）になっている。第2段階では、渦度の高い跳び石状の領域あるいは帯状の領域が弧状に変形する。このとき、閉じた流線が生じ、水面渦が形成される（たとえば (a) の左右上方部分、(b) の中央上方部分）。第3段階では、水面における渦度の集中領域は2次元的な塊状となり、同時にその集中領域のスケールも大きくなる。それに対応して、水面の渦運動のスケールも大きくなり、かつ強いものとなる（たとえば (c) の中央上方部分、(e) の右上方部分）。そして最後の段階では、集中させられた渦度が拡散あるいは減衰し、渦運動も弱く、小スケールのものとなる。

以上の過程中で「跳び石状の集中された渦度領域」というのが個々の第2次渦に対応していると考えられる。したがって、以上の観察から、ただ1つの第2次渦がただ1つの水面渦を形成する場合もあるが、一般には第2次渦どうしが互に干渉し合っており、その作用の総合の結果として水面渦が形成されていると見る方が妥当と考えられる。また、木下²⁾は、実河川の水面パターンの把握のためにボイルの列と収斂線の配置の観測という方法を用いたが、実験水路での水面パターンの検討においては水面渦の観察といった方法も有用であることを以上の結果は示している。

4. 開水路流れの3次元的な乱流構造

前報において提示したモデルと、上記の実験結果を総合することにより、開水路流れの3次元的な乱流構造のモデルとして Fig. 7 を提案する。以下の説明は本モデルにそくして行なう。

4.1 ボイルと水面渦の形成

第1次渦の集中によって発生した第2次渦の Π 型の部分は平均流によって下流側へおし流されると同時にビオ・サバールの法則によって上方へもち上げられるので、全体としては水路床とはある傾きをもって伸長させられることになる。開水路流れにおけるこのような Π 型渦管の運動については石原・余越³⁾の考察がある。彼等は、Fig. 8 に示されるように、「ボイルは Π 型渦管が伸張して、その頭部が水面領域にまで達したときに生ずるものである。 Π 型渦管の頭部が水面領域に達すると、斜め上向き（上流向き）の誘導ジェットがまず水面を上昇させるが、水面は渦管の運動に対しては固定壁とほぼ同様な効果を与え、 Π 型渦管の頭部は急速に放射状に広がる。すなわち、渦管の急激な伸張と、渦度の急激な増大をもたらす。この現象は Π 型渦管の寿命時間のあいだ継続する。」と言っており、事実、実際現象がよく説明できる。ただ、ボイルの寿命時間が Π 型渦管の寿命時間にほぼ等しいという理解に立つと、先に述べた水面渦の形成を説明することが

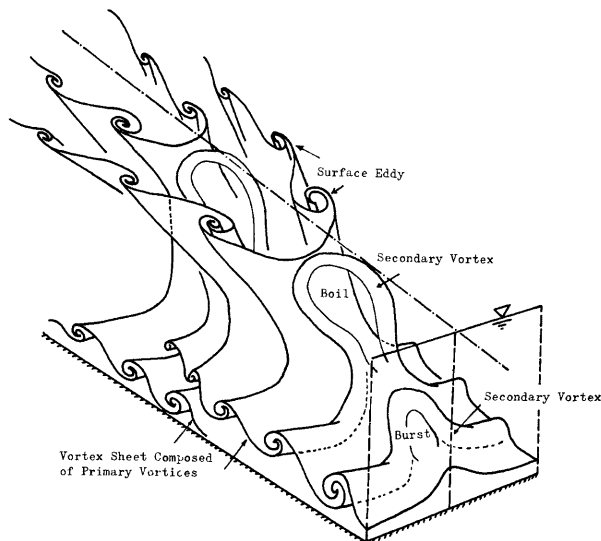


Fig. 7. Three-dimensional structural model of turbulent shear flow with free surface.

困難となる。そこで、著者らはつぎのように考えた。すなわち、余越らの説明通りボイルの形成と共に Π 型渦管は急激に伸張させられるが、そのことは同時に渦管の伸張した部分すなわち水面にごく接近している部分での渦度の減衰をもたらす。その結果、 Π 型渦管はその頭部を切り取られた形となり、その残りの部分が水面渦を形成するのである。このように、第1次渦の集中、 Π 型渦管の形成・伸張、ボイルの発生、 Π 型渦管の切断、水面渦の発生というサイクルが次々にくり返されるものと考えられる。ただし、この過程で渦管どおしの相互干渉があり、それらの渦管の総合作用の結果として水面渦が形成されるということは前に述べたとおりである。

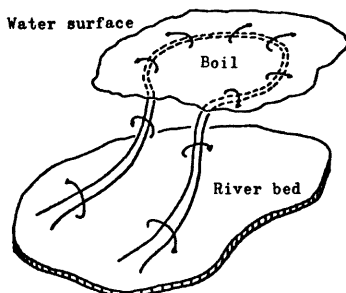


Fig. 8. Boil produced by the top part of the elongated vortex tube after Ishihara and Yokosi.

4.2 第2次渦と2次流

以上の説明からも明らかなように第2次渦は上記の1つのサイクルの中でも次々と変形してゆくことがわかる。したがって、 Π 型渦管、ボイルを形成する渦管の脚部、水面渦を形成する渦管はいずれも第2次渦の1つの現われであり、しかも後者程水路床面に対する傾きが一般に小さくなる。このような第2次渦の存在の仕方を、水路横断面内の投影図の形で表現すると Fig. 9 のようになる。ところで先にも述べたように、上記のようなサイクルが次々に繰り返されながら平均流とともに流下する訳だから、水路での1横断面を考えると、そこには各サイクルにおける各段階の第2次渦の断面がいくつか接近して存在することがありうる。このような第2次渦の束が、全体として Fig. 9 の TT' 断面およびその近

傍で上昇流をひきおこし、SS' 断面およびその近傍で下降流をひきおこす訳で、それが2次流であると理解される。

上の説明において、第2次渦の発達はいくつかの変形段階からなるサイクルを形成すると述べた。ところで、いかなる流況においても上記の各段階が尽されるとは考えられない。たとえば、大河川で顕著に観察されるボイルも、実験室での小規模の水路ではその存在を確認することは困難である。また、層流から乱流への遷移状態にある流れの内部機構も型渦管モデルで説明されているが、この流況は上記の1サイクルの内の最初の段階の現象だけが発生していると理解される。このように考えると上の記述をつぎのように理解するならば、それはかなり普遍的に流況を表現しているものとなる。すなわち、遷移状態の流れでは各サイクル中の第1段階だけが表われた状況でサイクルがくり返されており、乱流が発達してゆくにつれて各サイクルのうちの高次の段階までもが発生し、それらがやはりサイクルをくり返しているのである。

4.3 低速渦、バーストおよびスweepの発生

低速渦は第2次渦を構成している対をなす2つの渦管のうちの水路床面に近い部分によってひきおこされていると考えられる。そこでは、前報の Fig. 8(e) に示されているように、第2次渦によって上向きの流れが生成され、同時に第2次渦に巻き込まれた第1次渦によって上流側を向く流れが生成されている。このように考えるならば、低速渦どうしが接近したり、合流したりする現象や、低速渦が途中で発生したり、分岐したり、消滅したりする現象も理解される。また、バーストは第2次渦どうしの何らかの相互作用によって低速渦の一部に局所的に強く強い上流向きかつ上向きの流れが発生する現象であると考えられる。

これに対して、スweepでは高速かつ下向きの流れが発生するとされているが、本モデルにおいてこのような流れは主として2次流の下降する部分、すなわち Fig. 5 の SS' 断面の周辺部分で発生していると考えられる。なぜならば、そこでは当然下降流が顕著であり、同時に流下方向流速の水路横断方向の分布はその図に示されているようになって、SS' 断面の周辺での流下方向流速も大きな値をもつこととなるからである。

4.4 水路床形態と大規模乱流構造との関連

X 型および V 型粗度要素上の流れについての実験において、粗度要素の先端付近から第2次渦が次々と発生していることが認められた。その様子はたとえば Photo. 4 に示されている。また木下のウロコ状路床での実験においても縦渦が各ウロコ片からはくりして発生してゆく様子が観察されており、この縦渦は著者らのいう第2次渦と同じものと考えられる。これらの実験事実を総合すると、水路床の凹凸は、その形と配置が適切であれば、第2次渦の発生位置を固定させるといえよう。すなわち、1つ1つの凹凸を起点として先に示した第2次渦の1サイクルが始まっており、また空間的には各サイクルが各凹凸に対応してくり返されていると考えられる。したがって、各凹凸のまわりの流れをミクロに見ると、それは第2次渦の発生に対応して準周期的な性格を示すと考えられる。

大規模乱流構造は各種階級から成立っており、その中でも第2次渦の存在の仕方には「段階」と「サイクル」とがあること、さらに場合によってはバーストも引おこされることが先に明らかにされている。一方水路床形態についても小はリップルから大は砂洲にいたるまでの各種がある。大規模乱流構造のどの階級のどのような存在の仕方が水路床形態のどの種類のものに対応するものであるかという問題に対して、上の叙述はリップル上の流れあるいはうろこ状砂州上の流れの乱流構造を示唆しているにすぎない。この問題に関する一般論は今後の検討課題とする。

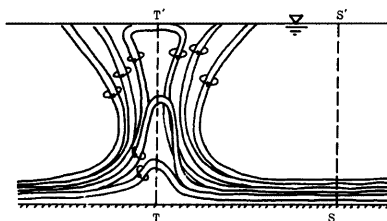


Fig. 9. Longitudinal view of the developing process of secondary vortices.

4.5 Kline らのモデルと本モデルの比較検討

次に、Kline らによって提案されたモデル^{4),12)}および彼等の大規模乱流構造の把握と著者らのモデルとの関連を明らかにしよう。

両者の間の最も重要な共通点は、大規模乱流構造がもつ規則的な特性を重視していること、およびそれぞれのモデルの中で第2次渦あるいは Ω 型渦管が重要な位置を占めていることである。一方、両者の間には重要な相違点が、規則的な運動の内容およびそれがどのようにして形成されたかに関して存在している。すなわち、Kline らは層流底層内の運動が非常に規則的であることを指摘し、その事との関連のもとに低速渦が持ち上げられてバースト現象が起る過程やその発生周期にも規則性が含まれると指摘した。一方、彼らは境界層内の対数領域などの壁面から離れた場所においては、低速渦はからまりあい、またバースト現象はほとんどとした状態で終るというように、運動の不規則性を強調している。これに対して著者らは、開水路流れを検討の対象としており、そのような流れでは、水深によってその規模が規定されている2次流によって、大規模乱流構造全体にも規則性がもたらされていると見ている。Kline らのモデルでもバーストの発生が2次流と関連づけて説明されているが、この2次流の発生機構については説明されておらず、ましてその規則的側面についてもふれられていない。

5. 結 語

大スケールの乱流構造には一定の規則性があることに着目して開水路流れの3次元的な乱流構造をいろいろな側面から観察した。すなわち、Lagrange 的あるいは Euler 的な方法を用いて、横断面内の流況、水路床面近くの低速渦、および水面渦などを写真観測した。次にこれらの結果を総合することにより、流れの3次元的な乱流構造を説明するモデルをあらためて提示した。すなわち、著者らが前報で提示したモデルは開水路乱流の発生機構の解明に重点を置いたものであったので、本研究では開水路乱流の発生・発達過程も含めて乱流場を総合的に説明できるようにそのモデルを発展させたわけである。本モデルにおいては、とりわけ、各階級の渦運動の区別とそれぞれが果たしている役割が明確にされた。同時に、Kline ら、石原・余越、および木下の大スケール乱流構造に関する現象認識と本モデルとの比較検討もなされた。

なお、本研究を進めるにあたって木下良作博士の研究から多くの示唆をうけた。同氏の御厚意に謝意を表する次第である。また、有益な助言をいただいた今本博健教授に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 巽友正：統計流体力学 I，科学，Vol. 38，No. 3，1968，pp. 114-119.
- 2) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1974，pp. 204-205.
- 3) 石原安雄，余越正一郎：河川の乱流構造に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第13号 B，1970，pp. 323-331.
- 4) Kline, S.J., W.C. Reynolds, F.A. Schraub and P.W. Runstadler: The Structure of Turbulent Boundary Layer, Jour. Fluid Mech., Vol. 30, 1967, pp. 741-773.
- 5) Laufer, J.: New Trends in Experimental Turbulence Research, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 7, 1975, pp. 307-326.
- 6) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6，No. 1，1967，pp. 1-17.
- 7) 宇民正，上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号 B，1976，pp. 267-288.
- 8) 木下良作，遠藤義幸，石坂晋：洪水流の写真判読——らせん流の実験的研究——，日本写真測量学会研究発表会講演概要集，1976.
- 9) Nikuradse, J.: Kinematographische Aufnahme einer Turbulenten Strömung, ZAMM 9, 1929,

- pp. 495-496.
- 10) Prandtl, L. and O. Tietjens: Fundamentals of Hydro- and Aeromechanics, Vol. 2, McGraw-Hill, 1934.
 - 11) 木下良作：並列らせん流に関する実験的研究，河道形状と洪水流に関する 検討業務報告書，北海道開発局石狩川開発建設部，1977.
 - 12) Offen, G.R. and S.J. Kline: A Proposed Model of the Bursting Process in Turbulent Boundary Layers, Jour. Fluid Mech., Vol. 70, 1975, pp. 209-228.