

河水路の鉛直最大乱子の構造

信州大学工学部 (正) 余越 正一郎  
 信州大学大学院 (学) 大坪 国順

1. まえがき

Prandtlによって提起された乱流境界層の概念は、その後多くの人々に受けつがれ、その構造の解明への努力がなされてきている。一時期、乱流統計理論や変分法を用いた解析が盛んに行なわれたが、その後行きづまってしまった。近年、その行きづまりの反省から、まず流れを正確に把握し、そこから物理的イメージをつかもうという考えが生まれてきた。河川のみさまざまな乱れ現象に対しても、その乱れを特徴づけるモデルを作り、それによって諸現象を説明する方法が有効だと思われる。その機構として現在われわれが考えている $\cap$ 形の渦管の概念図をFig. 1に示す。この渦管モデルによれば、河川で見られるいわゆるボイルの発生や物質輸送・拡散問題は多くの現象をよく説明できる。また従来の多くの研究者による乱流境界層の実験結果をもよく説明できる。これらのことから $\cap$ 形渦管の存在は確実だと思われる。われわれは $\cap$ 形渦管の定性的特性に興してはかばかりの知識を持っているが、それでも不明な点もまだ存在する。ここでは、そのうち渦管の発生機構について少し述べる。

2.  $\cap$ 形渦管の発生機構

$\cap$ 形渦管は最初、横断方向の渦度 $\omega$ を有するローラー状の渦管として発生する。渦管の発生機構は次のように考えられる。壁面の存在によって平均流がひずみ、そのひずみによる平均流の緊張を解除するために、ひずみのエネルギーが渦の運動エネルギーに変わる。この考え方の基本となる概念は層流不安定というものである。渦管発生の機構については次のような問題点がある。

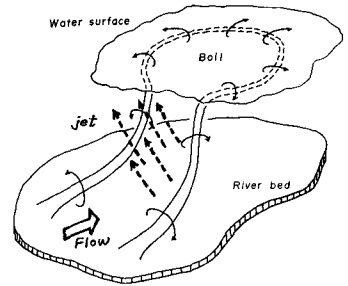


Fig. 1  $\cap$ 形渦管の構造<sup>1)</sup>

- 平均流がどれほどひずむと渦管が発生するのか。
- 渦管の発生は壁面からの高さ $h$ がいかほどで起こるか。
- 発生する渦管の強さ $E = \omega \cdot A$  ( $\omega$ : 渦管の断面積) はどれほどか。

これらの問題の解決にあたって次のように考えてみた。平均流のひずみエネルギーが渦の運動エネルギーに変わるのは流れのレイノルズ数 $Re = UH/\nu$  ( $U$ : 主流方向流速,  $H$ : 水深,  $\nu$ : 動粘性係数) が臨界レイノルズ数 $Re_c$ に達した時だと考える。 $Re_c$ の時の $U$ の分布形から $\omega = dU/dx$  (又: 鉛直方向) の分布が求まる。一方、ボイルの上昇水頭から換算される速度水頭によってビオ・サバールの法則より渦管の強さがわかる。よって発生する渦管の強さが求まる。この時、もし発生時の $\omega$ がわかれば渦管の半径 $r$ もわかり、 $Re_c$ の $dU/dx$ の分布形から発生位置 $h$ もわかる。つまり、 $h$ ,  $\omega$ ,  $r$ のうち少なくとも1つわかれば残りは全てわかる。その1つを求める問題が残されてはいるが、基本的にはこの考え方で上述の問題点は解決できるであろう。さらに深い他方面からの洞察も必要であろう。

### 3. $\Pi$ 形渦管の発生周期

渦管の発生機構の基本的な概念は上に述べたようなものであり、この考えに基づいて渦管の発生周期を求めてみる。 $\Pi$ 形渦管の発生機構はカルマン渦のそれと同種のものであると考えられる。実際、Hokkyo 他('70)はこれと同様な考えに基づいて乱流境界層内の渦の発生周期を与える式を求め、それがカルマン渦の発生周期を与える式と類似していることを示した。試みに、ストローハル数  $St = nD/U$  ( $n$ : 渦の発生周波数,  $D$ : 流れの代表寸法,  $U$ : 平均流速) をとってみる。 $\Pi$ 形渦管の縦スケールは水深  $H$  の10倍のオーダーであると考えている。よって渦管の通過時間  $T = 10H/U$ ,  $St = H/(UT) = 0.1$  となる。普通言われているカルマン渦の場合  $St = 0.2$  弱であることを考えるとそうわるくはない値である。また Kim 他('70)は流速変動の自己相関から最大乱子の発生周波数を求めている。これと境界層厚さから  $St$  を計算すると  $St = 0.18$  とか  $0.27$  という値が得られる。Velikanov('57)が用水路の横スケールから求めている  $St$  を、最大乱子に変換してみると  $St = 0.29$  とか  $0.28$  となる。また Morrison 他('71)がスペクトル解析から求めた粘性底層内の乱れの特徴的周波数を使って  $St = n\delta^*/U$  ( $\delta^*$ : 粘性底層厚) を計算すると、 $St = 0.11$  とか  $0.17$  の値をとる。これらのことを総合して考えると、渦管の発生周期はストローハル数で考えるのがよいと思われる。

### 4.

われわれは  $\Pi$ 形渦管の構造を明らかにするために観測を行っている。Fig. 2 に示すものは、水深約  $1\text{m}$ 、平均流速約  $1\text{m/s}$  の用水路における観測記録例である。水面下  $30\text{cm}$  と  $75\text{cm}$  の位置に設置した直径  $13\text{cm}$  の発電式プロベラ流速計で主流方向の流速変動を測定し、同時にボイルに起因する水面上昇を容量式水位計で測定したものである。図中の矢印①は Fig. 1 に描かれているボイルによる水面上昇を示し、矢印②、③は同じ図中に描かれているジェットによる流速の欠損を示している。また  $\Pi$ 形渦管が流れに対して Fig. 1 で示されているように傾いているため、水位上昇ののちに流速の欠損が起こってくることもこの記録例からわかる。くわしいことを知るにはいわゆる *conditional sampling* の手法が必要である。現在、現地観測に並行して、実験水路での流れの可視化による研究も行っている。

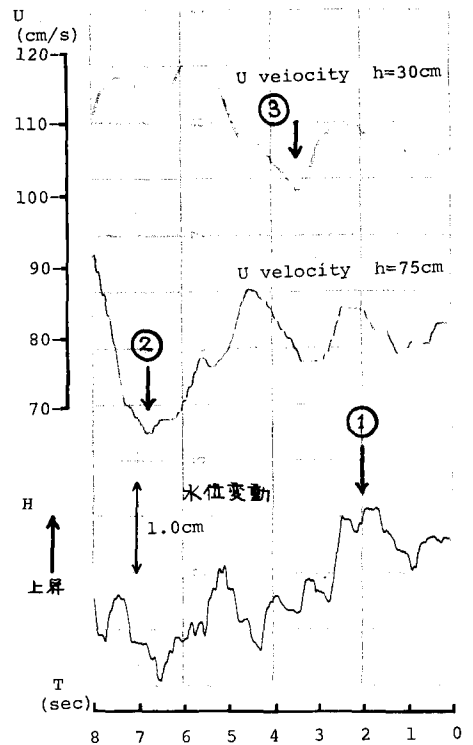


Fig. 2 観測記録の一例

### 参考文献

- 1) 石原・余越; 京大防災研年報, 12B, (昭44.3)