

京都大学防災研究所 正員 上野鉄男, 正員 宇民正

1. まえがき 河川の蛇行や河床波の発生・発達機構には流れの3次元的な機構が密接に関連していると考えられる。Klineらによる最近の流れの可視化実験は、大スケールの乱れは以前に考えられていたほど無秩序なものではなく、ある時間周期にわたって特有の形、大きさ、物流運動をしていることを示した。乱れがこのような coherent な構造をもつことをもとにして、Willmarthら(1967), Klineら(1967, 1975), 石原・余越(1970)および Laufer(1975)はセ・断乱流場のモデル化を試みた。一方、木下¹⁾は洪水時の河川の水面の航空写真から河流中には流下方向に軸をもつ並行したらせん流が存在し、これが普遍的な乱流構造の1つの現われであることを予測した。

本研究は、乱流現象の解明を上述のような河川工学上の実際問題の解明へと結合すべく、その第一歩としてセ・断乱流場の基礎的な物理モデルを提案しようとするものである。

2. 従来のモデルの検討およびモデル構成の基本的観点 図-2に示すKlineら²⁾(1967)によるモデルは他の多くの研究者のもの内容的に共通しており、最も普遍的であると言える。一方、Laufer³⁾は多くの研究者によってなされてきた乱流構造の観察を総括した結果、「大スケールの3次元的な渦度塊」が小スケールの渦度をひき上げながら壁面渦面上を回転している

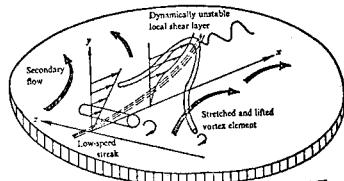


図-1

ということが本質的であるという結論に達し、乱流場の二重構造性を表現する試験的モデルを提案した。Klineらのモデルの重要な欠陥はLauferが指摘した乱れの二重構造性を十分に定式化できない点にある。さらに、Klineらはそのモデルの中で二次流の概念を導入しながら、その二次流の発生・発達の機構について説明していない。

従来二次流は平均流の概念に含まれていたと考えられ、実際、直線水路における二次流は、Prandtlによってその存在が指摘されて以来、多くの研究者によってその発生機構が論じられてきた。これらの研究者は二次流の発生機構を速度変動場に求めようとしている点とともに、二次流そのものは平均流の概念で扱っている点でも共通している。ところで、二次流の現象把握および解析法は必ずしも時間平均化された流れの特性に関したものに限られる必要はなく、ある一定の条件のもとで平均化された流れの特性に関するものと理解してもよいと考えられる。このように理解すると、上述の木下の指摘したらせん流さらにはKlineらが二次流と呼んでいる壁面から離れる流れは、いずれも二次流であり、同時に大スケール乱れの1つの現われであると思なせる。このこととLauferが指摘する乱れの二重構造性とを合わせ考えると、乱流構造は二次流を含む各種階級から成立していると考えるのが妥当なようである。

Klineらの提案したΠ型渦管モデルに代表される一連のモデルに共通する重要な特徴は、乱流現象を渦度の変形および集中拡散の概念に結合している点である。本研究においても、このような渦度の運動学と結合した各階級の乱流構造の運動、相互作用、エネルギーの受授、発展性、安定性などについて解明していくことが重要であると考えられる。

3. 乱流構造のモデルの構成 モデルの構成にあたり、流れの中に壁面に対して法線方向に流速分布があること、ならびに何らかの擾乱があることを前提とする。説明は層流から乱流への遷移状態での乱れの発生から始め、その状態からレイノルズ数を上げていって乱れが発達していく様子を述べる。その最終的に到達した状態が完全に発達した乱流中の乱れの発生・発達の機構であるとする。

壁面に対して法線方向の流速分布の存在にともなう渦度の存在の様子を図-2(a)のように敷きつめられた渦糸の形で簡単に表わすこととする。この渦糸群が何らかの擾乱のためにその一部が持ち上げられ、(b)図のように波状の変形が生じたとする。その結果、渦糸群の相互作用によってそれらの変形は増大させられ、さらにはその部分に渦糸の集中が生じて、(c)図で表わされるような状態となるであろうことが推察される。このような推察はRosenheadの研究による図-3に基づくものである。この図は、初め直線状に並んでいた渦糸に正弦状の微小な擾乱が与えられたとき、それらが各渦の相互作

用によって時間の経過とともに図-3の(a)から(e)にかけて変形していく様子を示したものであり、その変形の仕方には渦系の集中と振幅の増大という2つの特徴づけが与えられている。このように変形が増幅され、しかも集中させられた一部の渦系群は束状になって図-2(a)に太く管状に描かれているようないわゆる馬蹄型渦を形成する。説明の便宜上、初めに仮定した渦系を α 1次渦と呼び、ここに形成された馬蹄型渦を α 2次渦と呼ぶ。この馬蹄型渦は各渦の相互作用によって上方へ持ち上げられるが、同時に上方ほど速い平均流速によっても変形を加えられ、下流側に向って傾けられ、同時に引伸ばされる。この α 2次渦により α 1次渦は(a)図に示すように巻き込まれ、吸収されて、 α 2次渦はますます大きなものへと発達しながら、下流側へ引伸ばされてゆく。 α 2次渦が十分に発達した段階では、 α 2次渦は流下方向を向き逆の回転方向を持って互に並行した一対の渦軸を形成する。この渦軸が形成する回転運動が α 2次流であると理解される。このように α 1次の渦は α 2次渦の形成に寄与した訳であるが、この α 1次渦はさらに新たに形成されては α 2次渦に巻き込まれてゆくという過程を繰り返し、 α 2次流を維持するものと考えられる。図-2(e)はこのようにして形成された α 1次渦および α 2次渦の位置関係を拡大して示したものであるが、図から、一対の α 2次渦によって挟まれた領域付近では α 1次渦によって生成される流速は上流向きであるため、流下方向流速は主流の平均流速より小さくなり、しかも α 2次渦のため上向きとなる。このような流速分布特性を(f)図に示すが、ここで低速かつ上向きの流速を有する領域はKlineらが指摘した低速渦に相当するものである。

以上のモデル構成においては、 α 2次渦が α 1次渦を次々に巻き込むというような単純化した記述をしたが、実際には、 α 1次渦がある程度変形させられて(c)図のように集中して束状になった状態で α 2次渦に巻き込まれることも考えられる。Klineらによる図-1はそのような状態を示しているものと考えられ、burstsが顕著に認められるのもこういった状態であろう。さらに、 α 2次渦はそれが完全に発達した状態では、一直線に水路の上流端から下流端まで連なっているかのような記述をしたが、実際には α 2次渦の安定性に関連してそれは時間的・空間的に変動することが予測される。

さらに、本モデルにおけるエネルギーカスケード過程について簡単にふれると、平均流のもつエネルギーは α 2次流の作用によって α 1次渦の生成に寄与し、次の段階では、 α 1次渦が α 2次渦に巻き込まれる形で、 α 1次渦のエネルギーが α 2次渦に吸収され、 α 2次流が形成される。したがって、エネルギーの逸散は主として α 2次流を構成する α 1次渦の伸張の結果として起っているものと考えられる。

4. おわりに 従来別の概念として扱われていた境界層内の大スケール乱れと α 2次流の関係を明らかにし、両者の発生・発達機構を統一的に説明できるモデルを構成し、提案した。このモデルは基本的な考え方を示した段階にあるので、さらに理論的・実験的な検討によってその内容が豊富なものとされなければならない。紙面の都合上、水素気泡を用いた流れの可視化法による実験的検討については講演時に述べる。

参考文献

- 1) 木下良作; 写真測量, Vol.6, No.1, 1967.
- 2) Kline, S.J. et al; Jour. Fluid Mech., Vol.30, 1967.
- 3) Laufer, J; Ann. Rev. Fl. Mech., Vol.7, 1975.

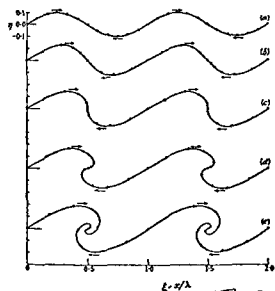


図-3

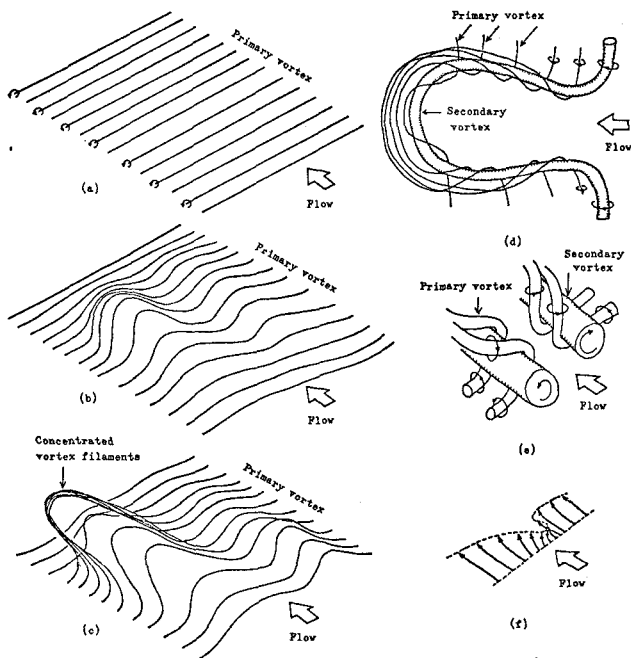


図-2