

平板乱流境界層の組織構造について

小 橋 安次郎*

On the Organized Motions of a Turbulent Boundary Layer

Yasujiro KOBASHI
Hokkaido University

ABSTRACT

The organized structure, which is defined by the vortex core in which distributed vortices are contained, builds up the outer layer of the boundary layer, and gives rise to burst structures near the wall. In study the problem why the coherent structures appear quite seldom is more stressed than now to detect them either by visualization or direct numerical simulation studies.

Key Words: turbulent boundary layer, outer layer, inner layer, organized structure, vortex and vortex core, burst structure .

1. 組織構造と渦

乱流境界層中の組織構造を解明するための手掛りとして組織構造を渦として扱うことにする。なお、ここで言う渦は「渦度が集中して分布する領域（渦核）」であって、外部の循環流の領域は含まないものとする。また、渦が組織構造として認められるためには再現性がなければならないから、孤立した渦ではなく渦列または渦列群であるとする。

2. 外層の組織構造

境界層の大半を占める外層は伴流域とも呼ばれており、流体の種類やレイノルズ数に対して無関係であるが、外縁境界面が湾曲してこれを通過して流入する外部の流体は直ちに乱流化するという特徴があり、このため乱流と非乱流が交互に観測される間欠領域を持っている。間欠領域は一見不規則に出現するように見えるが、Kovasznayら(1970)¹⁾は条件抽出の手法を開発し、これを用いて間欠領域が外層内に拡がる渦によって作り出されることを見出した。さらに一条と小橋(1982)²⁾はバースト信号を参照した条件抽出により、この渦の影響が壁面近くまで伸びていて内層の組織構造と強い相関を持つことを見だしている。

以下、外層の組織構造が渦であるとしてその性質および

流れ場について検討する。なお、実際の渦は歪んだり千切れたりして3次元構造を持つと思われる、渦が流れと壁との間にあってローラの役割を果たしているとすれば、平均的には2次元的な横渦構造であると考えて差し支えないであろう。

a) 渦列構造と誘導速度

図1 aに示すような2組の渦列を考える。渦列1はKovasznayらの見いだしたものと同じで、境界層厚さに等しい大きさを持っている。渦列2は内層構造との関係を考慮して導入するが、これに相当する渦の存在はAntoniaら(1993)³⁾の測定でも認められる。

簡単のため渦はランキンの円形渦とするが、渦列による誘導速度場は壁面に対称の位置にイメージ渦を置くことにより容易に求められる。

渦列1：境界層の厚さを δ 、渦核の半径 R_{01} とすると渦中心の位置は $\delta/2=R_{01}$ にある。渦核の周速度を U_{p1} とするとき渦の強さ(循環)は $-\Gamma_1=U_{p1}R_{01}$ で与えられるが、渦の移動速度 U_{t1} と一様流 U_0 との差 ΔU_1 はイメージ渦の誘導速度に等しく、また渦の成長に伴う角運動量の増加は境界層厚さの増加に伴う主流の角運動量損失に等しいから

$$\Delta U = U_0 - U_t \approx U_p/2 \quad (1)$$

$$\delta \Delta U U_0 d\delta = 2\pi R_0 U_p^2 dR_0 \quad (2)$$

とおくことが出来、これから

$$U_p = U_0/\pi \approx 0.3 U_0, \quad \Delta U \approx 0.15 U_0, \quad U_t \approx 0.85 U_0$$

* 北海道工業大学名誉教授

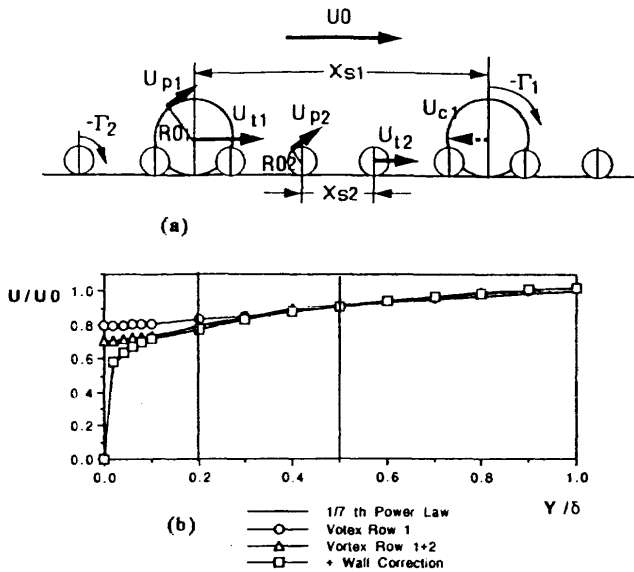


図1 境界層速度分布

などの関係が得られる。

渦の間隔は渦列の安定問題として扱うべきであるが、今のところはっきりした決め手が見つからないので Corrsin⁴⁾ の測定結果を用いて

$$T^* = T U_0 / \delta = X_s / \delta = 2.5 \quad (3)$$

とおく。

$U_0=1, U_{t1}=0.85, U_{p1}=0.3U_0, R_{01}=0.5, X_{s1}=5R_{01}$ として得られた速度分布は図1bにおいて—○—で示す通りで $y \geq 2/3\delta$ の範囲で1/7乗法則と良い一致を示す。

渦列2：渦列2の強さや配列については十分な資料がないので渦核の半径 R_{02} 、従って渦中心位置を $y/\delta=0.2$ とおき、この位置での速度が1/7乗則に一致するよう循環の強さを決める。また配列の間隔についてはバーストの無次元周期が大規模構造の2倍 ($T_2^*=5$) であるという実験事実を基に

$$U_{p2}=0.12, R_{02}=0.2, X_{s2}=1.25R_{01} \approx 3.12R_{02}$$

とおくことによって $y \geq 0.1\delta$ でかなり良い一致が得られる(図2b—△—)。勿論、粘性を考慮していないので壁面での滑りは免れない。

c) 外層の乱れ

ランキン渦モデルでは渦核の内部には渦度が均一に分布していて平均的な回転流れは存在するが、速度変動はなく、したがって渦核によって境界層の乱れは生じないと言える。

Klebanoff (1955)⁵⁾ は乱流境界層の乱れの80%が壁面近くの内層で作られることを見いだしているが、残りの部分は外部の流体が境界層外縁の速度の不連続面(スーパー・レイヤー)を通して流入する際に作り出されると思われる(Corrsin(1954), Reynolds(1972)⁶⁾)。いずれの場合も強い剪断と粘性の影響を受けており、同じような乱れの生成機構を持つものと思われる(内層の組織構造参照)。

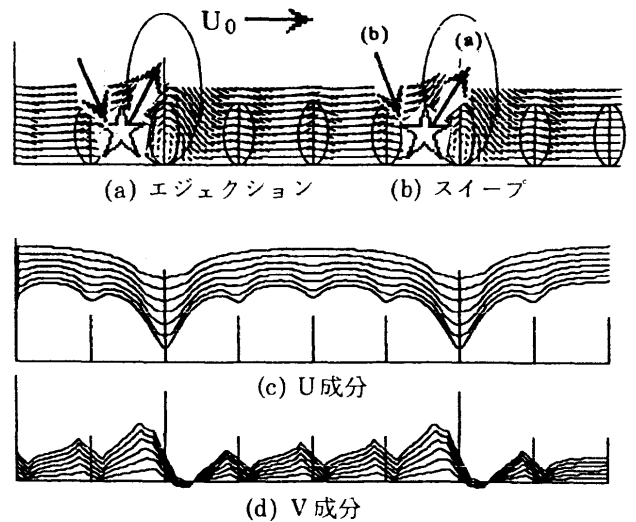


図2 渦列によって誘起される壁面近傍速度とバースト

3. 内層の組織構造

a) ゲルトラー渦とバースト構造

Klineら(1967)⁷⁾ は水素気泡を用いて壁面近くの内層内(緩和層)にバーストと呼ばれる現象が存在し、これが壁面での乱れの生成の原因であることを見いだした。更に、CorinoとBrookkey(1969)⁸⁾ は微粒子を使った可視化実験によってバーストが低速の流体が吹き上げるエジェクション過程と高速の流体が吹き下ろすスイープ過程との組になって現れる現象であることを明かにした。最近では抵抗軽減という目的もあってバーストについて多くの研究が行なわれているが、その大半はバーストの挙動に関するものであって、その発生機構を調べたものは殆ど無い。Kobashiら(1983)⁹⁾ は壁面の圧力変動を参照した相関測定においてバーストが外層の渦構造に対して強い相関をもつことから、外層渦によってバーストが引き起こされることを予見したが、最近になってMyoseとBlackwelder(1994)¹⁰⁾ が人為的に作られた渦によって凹曲面上に発達するゲルトラー渦が崩壊する過程を追跡し、バーストと外層構造の関係を調べて、縦渦構造が外層渦のつくる速度場の加速域で急激に崩壊したのち乱流に移行することを確認している。この場合ゲルトラー渦はそれ自身および人為的に導入された大規模渦の誘導速度によって上昇するが、加速域に入ると渦対間にできる低速縮の部分の速度分布が不安定化して振動するため渦対構造は千切れて乱れに変わり(エジェクション)、その後高速流体が進入して安定な速度分布が回復される(スイープ)。Blackwelderらの研究はゲルトラー渦の発生については触れていないが、外層の大規模構造が誘起する壁面での波状の速度分布が原因であることは間違いないと思われる。ただ、バーストの発生周期が大規模構造の周期の2倍であると言う実験事実に対しては外層構造を形成す

る2組の渦列の移動速度の差による干渉速度場が原因とするのが妥当であろう。

本研究で用いた渦列モデル(図2)では壁面の周期的速度変動によってゲルトラー渦が発生し(a)の状態ではバーストが始まり(エジェクション), (b)の状態では終了(スweep)すると思われる。

c) 速度分布

内層の速度分布は、壁面での運動量損失を表す摩擦速度 U_τ とこれが分子拡散によって輸送される距離 ν/U_τ によって与えられ、粘性底層では直線分布、慣性底層では対数分布となることは良く知られている。ただ、粘性底層と慣性底層がほぼ2次元的であるのに対して中間の緩衝域にはゲルトラー型の縦渦が現れるため低速および高速の縞が出来て極めて複雑な3次元構造をしている。従ってこの部分の速度分布を議論するためにはゲルトラー渦とその崩壊を考慮する必要があるが、これについては殆ど明かにされていないので、ここでは簡単のため内層全域を

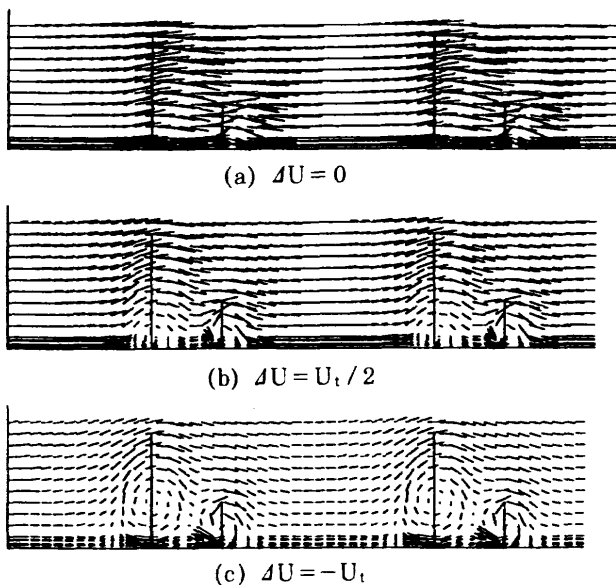
$$U(y)/U_\tau = 1 - \{A1 \text{Exp}(-B1yU_\tau/\nu) + A2 \text{Exp}(-B2yU_\tau/\nu)\} \quad (4)$$

で表すことにする(図1b-□-)。ただし $A1, A2, B1, B2$ は U_τ を含む定数である。

なお、ゲルトラー渦の崩壊によって外層内に渦対塊が放出され乱れを作るが、これによって外層の速度分布が影響を受けないのは渦対塊が正負等量の渦から出来ていて循環を持たないためであろう。

5. 結 び

平板乱流境界層の外層の組織構造が渦列であること、およびこれによって壁面でのバースト構造が誘起されることを明かにした。なお、本研究に対して幾つかの質疑があっ



付図1 渦パターンに及ぼす平均流の影響

たので応答の概略を付記する。

1) 組織構造を渦であるとした根拠: 速度勾配を持った流れの中で実質部分の運動を伴いながら普遍的形を保ち得る構造は渦だけであること、逆に渦によって速度場が決定されることによる。

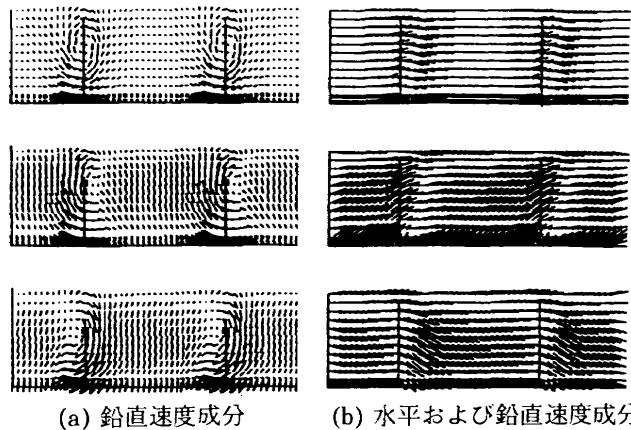
2) 可視化実験や数値シミュレーションでは外層内の渦構造が殆ど認められない理由:

i 主流の影響

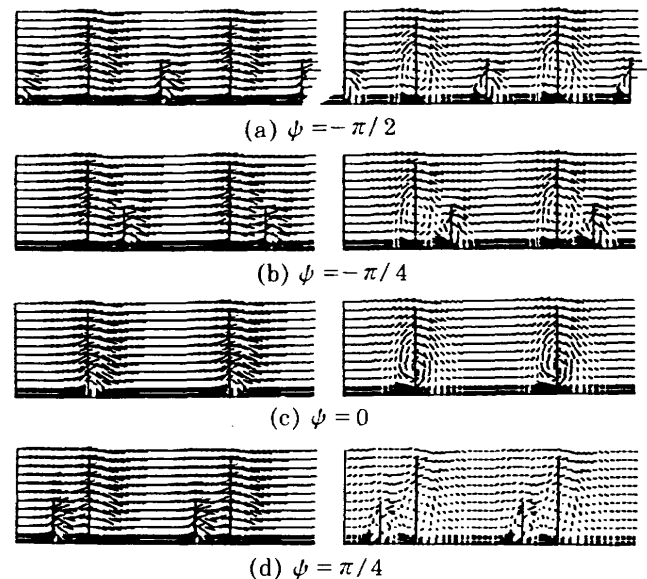
主流は構造を乱すものではないが、構造の流れ方向成分に重畳するため渦とは異なった波状パターンを示す(付図1)。正しい渦構造を得るためには渦の移動速度による補正が必要である。このことは熱線風速計を使った流速測定においても同じである(Antoniaら)。

ii 外乱の影響

外層中には内層から伸びたと思われる縦渦が存在していて一種の外乱となっている。こうした縦渦の重畳によって2次元渦のパターンは著しく損なわれる(付



付図2 渦パターンに及ぼす外乱の影響



付図3 渦列パターンの周期的変化 (移動速度の補正なし<左>, あり<右>)

図2)が、平均速度分布への影響は無い。

iii 渦列の干渉

2組以上の渦列が存在する場合には移動速度に差があるため構造が周期的に変化するように見える(付図3)。この場合もそれぞれの渦列の移動速度を使って補正する必要がある。

- 3) 経過時間の問題：煙や水素気泡を使った可視化実験では粒子は流れによって運ばれるから、流脈線図やタイムライン線図のようなラグランジュ的処理を行う場合には夫々が発達するための十分な時間経過が必要である(付図4参照)。一部に言われているように『新しい煙のパターンだけが組織構造を表す』とする考えは間違いであると言わざるを得ない。

文 献

- 1) Kovasznay, L.S.G., Kibens, V., Blackwelder, R.F. J. Fluid. Mech 41, 283-325 (1970)
- 2) 一條真古人, 小橋安次郎, ながれ1-4, 350-359 (1982)
- 3) Klogstad, P-A, Antonia, R.A., Browne, L.W.B., Experiments in Fluids 15, 231-239 (1993)
- 4) Corrsin, S., Kistler, A.L., NACA Tech. Note No. 3138 (1954)
- 5) Klebanoff, P.S., NACA Tech. Rep. No.1247 (1955)
- 6) Reynolds, W.C., J. Fluid Mech. 54, 481-488 (1972)
- 7) Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A., Runtstadler, P.W., J. Fluid Mech. 30, 741-773 (1967)
- 8) Corino, E.R., Brodkey, R.S., J. Fluid Mech. 37, 1-39 (1969)
- 9) Kobashi, Y., Komoda, H. Ichijo, M. *Turbulence and Phenomena (Kyoto)*, 74-84 (1983)
- 10) Myose, R.Y., Blackwelder, R.F., J. Fluid Mech. 259, 345-373 (1994)



(a) 流脈線図



(b) タイムライン図

付図4 経過時間によるパターンの変化