

**1. 序** 壁面に沿う乱流の内層には、低速ストリーク、縦渦構造、バースティング等と呼ばれる秩序構造が存在し、これが乱流エネルギーの生成に大きく寄与していることが知られている。また、この様な構造と乱流熱伝達との関係も明らかにされつつある。一方、過去20年間の多くの研究にもかかわらず、内層の構造と外層にみられる大規模な構造との関わりについては未解明の部分が多い。これまでの研究では、平板境界層、円管内流れ、二次元チャンネル流などについて、外乱を与えないように十分注意して流れを発達させたいうで測定が行われている。この様な理想的に発達させた流れにおいては、壁乱流の内層と外層あるいは中心部流とが自然な自由度を持って関わり合っており、かつ両者共に構造に未解明の部分を残しているために、互いの構造の関わり合いの因果関係あるいは各々の構造の自律性について、この様な実験で得られる結果だけから考察を進めるには限界があろう。著者らは、既報<sup>(1),(2)</sup>において、壁乱流の主として内層側に着目し、その境界条件としての外部流を外層の深層部にわたって人為的に大きく変えるとき、内層の構造がどの様に影響されまた反応するかを調べることによって、内層のいわゆる秩序構造の物理機構に迫ることを企てた。具体的には、相対運動を行う平板と干渉板列との間の流れにおいて、平板上に発達する壁乱流の内層構造に及ぼす干渉板列先端による干渉の影響を調べた。干渉板列先端と平板との無次元距離 $h^+$ 、干渉板列の流れ方向の無次元ピッチ $p^+$ とが空間的干渉の程度を表わすと考え、系統的な流速測定の結果より流れの状態を層流的・遷移・完全な乱流の3種類に分けて $h^+ - p^+$ 平面上に流動様式マップとして整理した(図1)。この結果、壁乱流の内層構造が非常に強固で自律的な構造を持つとの展望を得た。本報においては、この様な空間的干渉を受ける壁乱流の内層における秩序構造の挙動を流れの可視化によって明らかにし、上述の結果を補足する。

**2. 実験装置及び実験方法** 図2, 3には、流れの可視化のための実験装置測定部のスケッチを示す。図2は干渉板列が走行する場合(Fシリーズ<sup>(1)</sup>)であり、図3はすきま $h$ に対してピッチ $p$ を大きくするために平板の方を走行させる場合(Pシリーズ<sup>(2)</sup>)である。実験装置の測定部以外の部分は、それぞれ対応する流速測定の場合

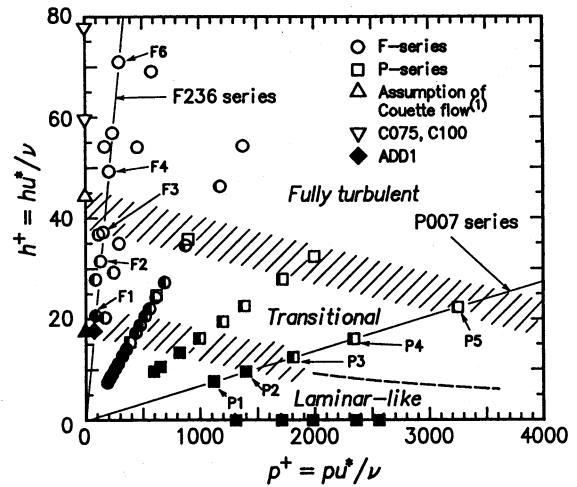


図1  $h^+ - p^+$ 平面における流動様式マップ  
(F1=F236:1, ..., F6=F236:6, P1=P007:1, ..., P5=P007:5は本報で可視化された実験点)

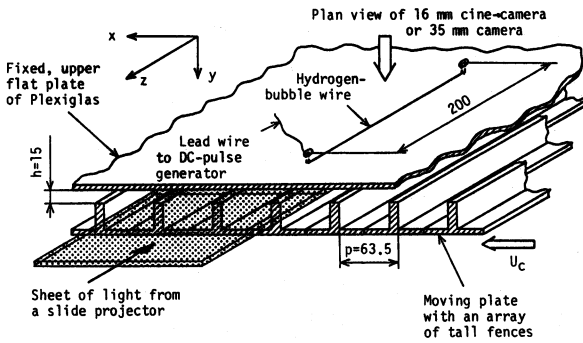


図2 流れの可視化用測定部の概要 (Fシリーズ)

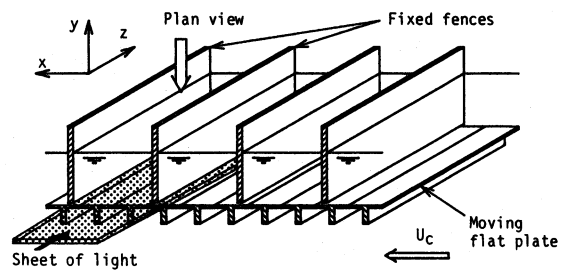


図3 流れの可視化用測定部の概要 (Pシリーズ)

合と同じである。F、Pの両シリーズにおいて、 $h$ と $p$ を一定としてレイノルズ数を変化させる一連の実験について、主にアルミ粉懸濁法によって内層構造の可視化を試みた。水槽中の約600 $\mu$ の水に約4gのアルミ粉を懸濁させて、スパン方向から壁面近傍に薄いシート状の光を入射し、水槽上部から観察する。映像は、35mmのスチルカメラ、16mmの映画あるいはビデオカメラで記録した。アルミ粉懸濁法によれば、乱れの瞬時の空間的構造を把握できることが期待できるが、この手法による壁乱流の内層構造の可視化に関しては前例がほとんどなく、参照データとしての単純クェット流についても実験を行うことによって可視化手法自体の検討を行った。単純クェット流は、図2の静止平板と図3の走行平板を組み合わせて実現し、実験条件をFシリーズの場合と同様に熱膜流速計による測定によって決定した<sup>(3)</sup>。

**3. アルミ粉懸濁法による内層構造の可視化** 壁乱流の内層で壁面の極近傍(0~15 $\nu/u^*$ 程度)をスパン方向から照明すると、流れ方向に長い明暗の縞模様が観察される<sup>(3)</sup>。

図4には、単純クェット流の場合に両スパン方向から赤と緑の2色の光で照明して可視化するとともに、壁面近傍の陰極線から水素気泡を発生させた場合の写真のスケッチ(Plan view)を示す。ここで、図中のEnd viewは、水素気泡を下流から観察した場合の想像図である。鱗片状のアルミ粉がEnd viewの縦渦成分の流面に沿って存在する傾向を持つとすれば、照明の反射による明るい縦縞は図4のPlan viewのように低速ストリークとほぼ一対一に対応して観察されるはずであり、実際の観察結果はこれとよく一致する。この明るい縦縞は、縦渦構造によって低速の流体が壁面から離れる流れの成分と対応していると考え、以降これを縦渦ストリークと呼ぶ<sup>(3)</sup>。図5

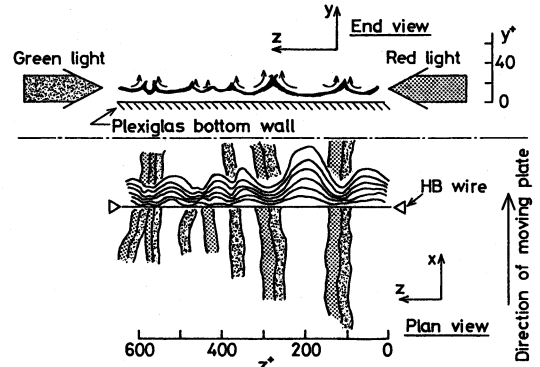


図4 2色の照明による可視化と縦渦構造の概念図 (Plan viewはアクリルの壁面を透して観察; End viewはy方向に引き伸ばされている)

には、単純クェット流について可視化された縦渦ストリークのスパン方向の間隔の確率密度分布を水素気泡法で可視化された低速ストリークの場合と比較して示す。これらの分布形は互によく一致するとともに、二次元チャネル流での観察結果<sup>(4)</sup>ともよく合い、低速ストリークと縦渦ストリークがよく対応することが再確認される。図6には、縦渦ストリークの流れ方向の長さスケールの確率密度分布を示す。単純クェット流の場合(C075, C100)の長さスケールの平均は、およそ300~400 $\nu/u^*$ となる。

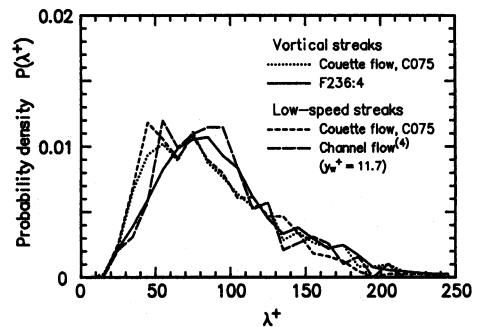


図5 縦渦ストリーク及び低速ストリークのスパン方向間隔

**4. 規則的な空間的干渉を受ける壁乱流(Fシリーズ)** 干渉板列の流れ方向の無次元ピッチ $p^*$ が内層の秩序構造の長さスケールと比べて小さく、秩序構造が徐々に干渉板列先端の干渉を受ける場合(Fシリーズ)の代表として、 $h=15\text{mm}$ 、 $p=63.5\text{mm}$ として干渉板列の走行速度 $U_c$ を変化させたF236シリーズ(図1参照)を取り上げる。図7には観察された縦渦ストリークのスパン方向間隔の確率密度分布を示す。流速測定によって完全な乱流と判定されたF236:4とF236:6(それぞれ図1のF4とF6)は互によく一致する。また、図5中にはF236:4の場合の分布が加えてあり、これが単純クェット流の場合ともよく一致することが分かる。さらに、流れ方向の長さスケールの分布(図6)や流れ方向の進行速度の確率密度分布も単純クェット流の場合

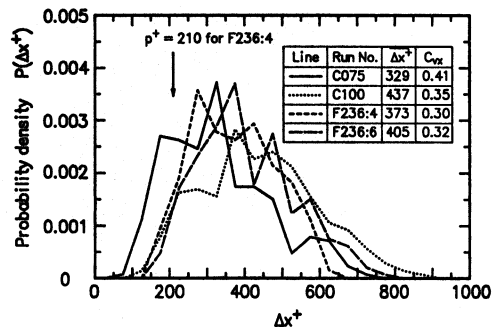


図6 縦渦ストリークの流れ方向の長さスケール

とほぼ変わらず、走行干渉板列の先端が壁面から  $y^+ \approx 50$  の位置を次々と通過することによって空間的な干渉を受ける場合 (F236:4) にも、発達した乱流クエット流の場合と同様な縦渦構造が維持されていることが実証された。

図1の遷移域にあたるF236:3の場合も図7の分布は完全な乱流の場合とほぼ一致する。一方、 $h^+$ が小さいF236:2とF236:1の場合には、完全な乱流の場合と明確に異なり、縦渦ストリークが間欠的に観察されるとともに無次元のスパン方向間隔が全般に小さくなる。この理由は、時間平均の摩擦速度が間欠的な乱流部での局所的な摩擦速度より小さいためと考えられる。さらに、F236:1の場合よりも $h^+$ を小さくした追加実験ADD1 ( $h^+ = 18$ ) の場合には明暗の縞模様はまったく観察できず流れは完全に層流と考えられる。

**5. 流れ方向のピッチが大きい場合 (Pシリーズ)** 流れ方向のピッチ  $p^+$  が大きい場合の代表として、 $h = 1.1$  mm,  $p = 160$  mmとして平板の走行速度  $U$  を変えた場合 (P007シリーズ) についてアルミ粉懸濁法による可視化を試みた。この場合には粘性長さスケールが小さく、個々の縦渦ストリークが明確に識別できる程度までシート状の照明の無次元厚さを薄くすることが困難であったため、測定部の一組の干渉板間全域に対する定性的な検討にとどめた。最もレイノルズ数の低いP007:1では、干渉板間での循環流にともなう乱れ<sup>(5)</sup>と考えられる干渉板列のピッチのオーダの明暗模様が観察されたが、縦渦ストリークは認められず、壁面近傍の流れは層流的であると考えられる。P007:2の場合にはコンペアチェーンの一連に伴い間欠的に縦渦ストリークが観察された。これは、平板要素に高さのばらつきがあるために、干渉板列先端とのすきまが大きくなったときに乱流となるためであり、流速測定の場合とよく符合する。図8(a)は、P007:2において縦渦ストリークが観察されたときの写真である。縦渦ストリークは干渉板の下流でやや唐突に現われる。この場合の縦渦ストリークのスパン方向間隔は粘性スケールで無次元化すると、十分に発達した乱流の場合よりもやや小さい。P007:3 (図8(b)) よりもレイノルズ数が大きくなると、常に縦渦ストリークが観察される。図8(b)より、上流の干渉板から下流の干渉板までの間に内層構造が発達する様子が見て取れる。

**6. 結論** 空間的干渉を受ける壁乱流の内層の秩序構造の可視化結果は、 $h^+ - p^+$  平面での流速測定による流動様式の判別結果と全般によく一致した。壁乱流の内層構造は、(結果的に) 壁面の剪断応力が与えられて、一旦成立してしまえば、その実体をなす秩序構造が占める高さ方向の空間 ( $45\nu/u^*$ ) が侵されない限り、外層の変化の影響をほとんど受けない強固な自律的機構を持つものであるとの結論が再確認された。

**参考文献** (1)丸山・田中, 機論, 52-476, B(1986), 1642; または, Maruyama, S. & Tanaka, H., J. Fluid Mech., 177 (1987), 485. (2)丸山・田中, 機論, 53-491, B(1987), 1962. (3)Maruyama, S. & Tanaka, H., Proc. 2nd Int. Symp. Transport Phenomena "Turbulent Flows," Tokyo, (1987), 61. (4)入谷・笠木・平田, 機論, 51-470, B(1985), 3092. (5)Koseff, J.R. & Street, R.L., Trans. ASME: J. Fluids Engng., 106-4 (1984), 390-398.

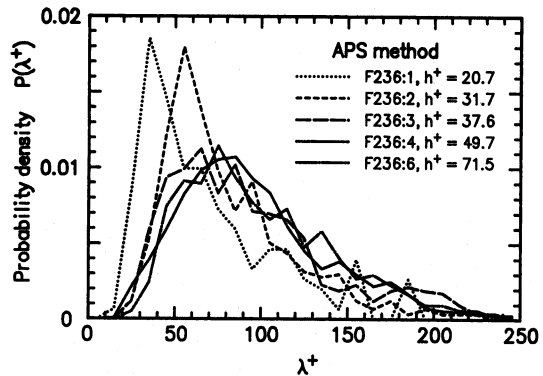


図7 縦渦ストリークのスパン方向間隔 (Fシリーズ)

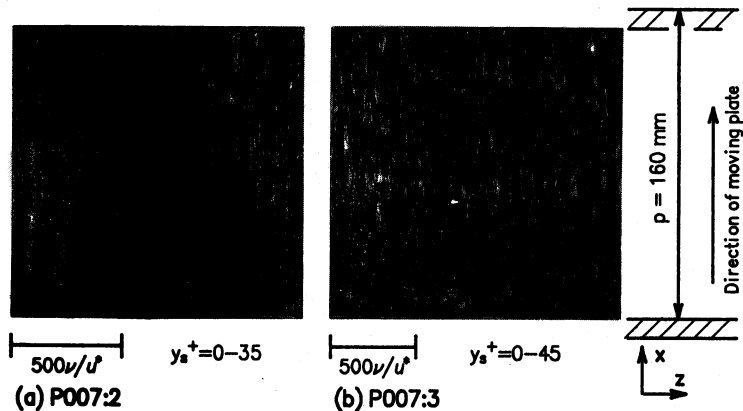


図8 アルミ粉懸濁法による流れの可視化 (Pシリーズ)