

開水路流れにおける壁面領域の乱流構造について

山口大学 正員 斎藤 隆
徳山高等 〃 大 茂 博文
徳山高等 〃 〃 佐賀 孝 徳

1. まえがき

開水路流れにおける乱流構造に関する研究はこれまでに数多くなされてきているが、それらは主として開水路流れの鉛直乱流場における二次流に注目したものが多く、壁面近傍の乱流構造の詳細について言及が行なわれるようになったのは最近のことである。¹⁾とくに、それらは粘性底層外縁付近でのエネルギーの大量発生をもたらすいわゆる Burst 現象に関するものが中心となっており、いくつかの Burst 現象に関する構造的解明がなされてきている。その第一は、Burst 自身が一連の組織的運動を行なう点であり、第二は Burst 現象が三次元的挙動を示すこと、第三は Burst 現象が他の組織的乱流運動とともに構成せられている等が明確に示されたことである。しかし、依然として不明な点も多く、① Burst の発生因、② Burst の空間構造（とくに横断方向）、③ Burst と組織的乱流運動の相互作用の詳細（とくに開水路流れにおいては二次流と Burst 現象との相互連関）等があげられる。

本研究は、開水路流れにおける壁面近傍における乱流構造についてこの解明を試みようとしたものであり、とくに従来あまり言及されていない横断方向の空間構造について新しい可視化法（AMD 法とよぶ。）を提示するとともにその結果を用いて考察を行ない、同時に従来の結果との比較検討を行なったものである。

2. 実験方法および実験条件

〔AMD 法〕AMD 法とは、可視化法のなかでもトレーサー法に属するものと言えるが、AMD とはアルミ粉、コンデンスミルク、染料（アニリンブルー）の混合液のことであり、その混合液の比重は約 1.05 程度にしている。この可視化法の特徴は、流れの空間的挙動がより立体的に把握できる点にあると言え、コンデンスミルクの水溶液が流線的な表現を示す一方で、アルミ粉がその立体化に貢献し、染料が立体化の濃淡を識別する役目をそれぞれ負っているといえる。AMD 液は Fig. 1 に示すように壁面近傍に細管を通して注出せられ、壁面近傍での薄い膜の出現とともに横断方向の不均一な挙動が目撃可能となる。壁面近傍の乱流構造について横断方向に注目して可視化を試みたのは Turbulent spot に関する Cantwell⁴⁾の研究があるが、そこではアルミ粉法によって行なわれている。

実験に使用した水路は両面アクリル製であり、水路長 10 m、水路幅 60 cm、水深 15 cm のものである。実験条件を Table. 1 に示す。

3. 壁面近傍における AMD の鱗形状特性

Photo. 1 は AMD 法による壁面領域付近に形成された流況の可視化写真である。特徴は、各種の規模の鱗形状が空間的に存在していることである。鱗片の白く写っているのが隆起した部分であり、相対的に黒く見えるのが AMD 液の薄くなった部分であり、それぞれ、低速域および高速域の流れの部分的反映と思われる。これらの鱗形状のパターンは、全体的に横断方向幅に対して流下方向長さが約二倍程度であり、一度形成されると

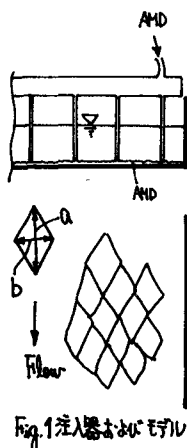


Table. 1
実験条件

CASE	Re	$\frac{U_m H}{\nu}$	U_m cm/s	H cm	U_* cm/s
A	1738	212	3.94	5.77	0.48
B	2178	126	6.58	4.33	0.38
C 1	2713	150	8.33	4.26	0.46
C 2	2755	717	3.96	9.10	1.03
C 3	3633	240	9.28	5.12	0.61
C 4	3629	347	6.80	6.98	0.65
D 1	3752	299	5.9	6.36	0.47
D 2	3752	454	4.3	8.73	0.52
D 3	1706	120	5.1	3.32	0.36
E 1	2604	568	4.46	5.84	0.92
E 2	2603	369	5.71	4.56	0.81
E 3	2603	253	10.21	2.55	0.99
F	2317	285	3.9	5.94	0.48
G 1	2786	643	7.1	5.14	1.25
G 2	2816	160	7.22	5.11	0.41
G 3	4210	150	10.92	5.05	0.39

比較的安定した状態で流下し、その過程で一度発生したものが発達して消滅し、再び発生するといった周期的サイクルを繰り返しているようである。これは、一連の Burst 現象との定性的類似点を有しているとも思われる。

4. 従来の研究との比較

これまでにAMD法によるいくつかの特徴を示してきたが、結論的にはAMD法による壁面近傍による鱗形状が乱流構造の何を可視化したのであるのか、そして、それらがどのように乱流構造として構成されるかという点が明確化される必要がある。従来の結果を踏まえて、若干の検討を行う。

(1) 低速縮間隔と鱗形状

Burst の横断方向間隔と関係深い低速縮間隔は、Kline²⁾によ、 $\lambda_* = \lambda u_*' / \nu \approx 100$ 程度の値になることが明らかにされているが、開水路流れにおいても $\lambda_* \approx 100$ とされている¹⁾。Fig. 2 は λ_* と λ を比べたものであり、従来と同様の結果が本実験結果からも言える。Fig. 3 は、鱗形状の横断方向幅および流下方向長さを $R_* (= \frac{U_H}{u_*'})$ に対して示したものである。与えられた実験条件内では $Q_* (= \frac{U_H}{u_*'})$ および $b_* (= \frac{U_H}{u_*'})$ は R_* に関係なく一定の値を示し、 b_* は壁面領域での λ_* とよい一致を示し、非常に興味深い。

(2) 低速縮間隔の経時変化

水素気泡法による低速縮間隔の経時変化の軌跡を求める手法は、これまで開水路二次流の挙動の解明に有効であったが、同様な方法で壁面近傍の挙動を観察すると横断方向にかなり激しく変化していることがわかり、それらの経時変化の様子を続けると、二次流とはかなり小さいスケールでの低速縮間隔が存在し、低速縮の「継ぎかえ」現象がかなり頻繁に起きていることがわかる。(Fig. 4) これも定性的には鱗形状と類似する。

(3) 流速変動計測と鱗形状可視化の同時併用

アロペラ流速計(アロペラ径: 3mm)による流速変動の計測とAMD法による可視化による同時併用により、流速変動と鱗形状との対応を検討し、鱗片の先端部、中央部、後端部での流速変動特性が、ejection → sweep → ejection といった一連の Burst 現象に矛盾しないことが明らかとなった。

5. まとめ

まず、Colas⁵⁾のレーザーによる結果とも定性的に類似する。Burst 現象の横断方向特性の解明を念頭にAMD法による鱗形状特性について若干の検討を述べてきたが、AMD法自体にもいくつかの検証されねばならない問題点を有している(参考文献1) 宇田他、京大工学研年報(1977)、2) Offenhe, J.F.M. 70(1975)

本研究の結果、従来の大規模乱流構造とはかなりスケール的に異なる壁面領域固有の三次元的乱流構造が存在することが明らかとなった。3) 中川、流動学講演会(1980) 4) Cantwell 他、J.F.M. 87 (1977) (1975) 5) Colas 他, Turbulent mixing in nonreactive and reactive flow

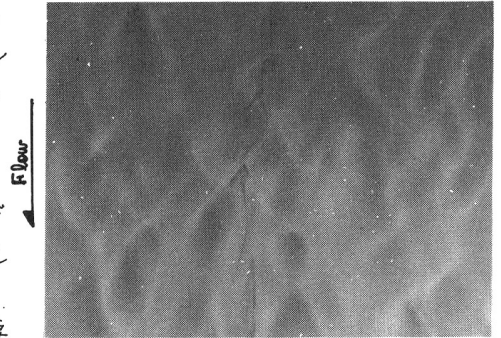


Photo. 1 AMD法による鱗形状

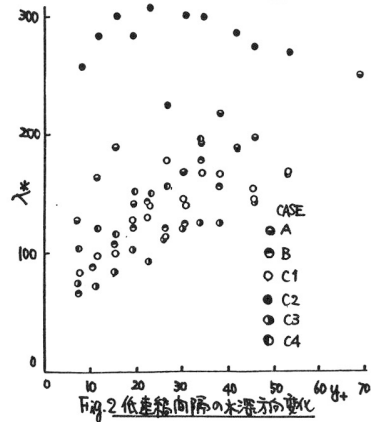


Fig. 2 低速縮間隔の本流方向の変化

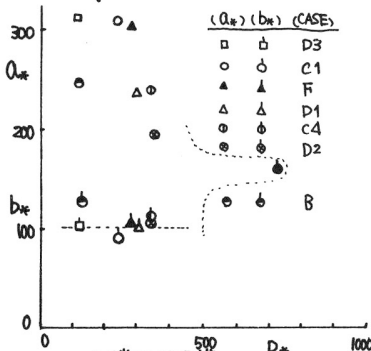


Fig. 3 鱗形状規模

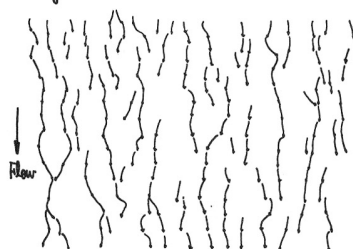


Fig. 4 低速縮の経時軌跡(CASE C1, $U_* = 20$)