壁面領域内乱流構造の可視化

徳山 高専 大成 博文 ◦ 佐賀 孝徳
山口大学 斎藤 隆

Flow visualization of turbulent structures
in the wall layer

Hirofumi OHNARI*, Takanori SAGA*, Takashi SAITOU**

It becomes widely known that there are low speed streaks and high speed streaks in the linear sublayer. Though low speed streaks is the origin of the bursting process, it is not clear how this pattern of low speed streaks is matched to the more random secondary motions. Until now, authors have visualized the attractive imbricate shape motion in the wall layer by flow visualization method named AMD and have investigated the relation between this pattern and bursting phenomenon. AMD flow visualization method is one of the mixing tracer method, this tracer is constituted of Aluminum dust, condensed milk, and dye water. One of the feature is the selection of the visualizing object by means of the regulation of the injecting liquid. In this paper low speed streaks in the linear sublayer is visualized and considered by means of the combination of flow visualization methods, e.g. AMD method, Alminium dust method, hydrogen bubble method.

1. はじめに

Bursting現象は、従来乱雑だと思われていた流体運動中に見い出された秩序運動のひとつであり、壁面領域内の乱流構造を構成する重要な現象として存在している。

Bursting現象の特徴は、一連の「組織性」と「乱雑性」を同時に合わせ持つ複雑な二重の流れ構造を有する点にあると言えるが、それらが乱流現象の本質に関することから、その形象の認識や秩序運動の構造の解明において今尚不明な点が多い¹⁾。なかでも、その重要な未解明点のひとつが、「横断方向構造」に関するものであり、本論は可視化法を用いてその解明を試みようとしたものである。

可視化法がBursting現象の解明に有益な方法であることは、Klineらを中心とするStanford大グループの一連の研究²⁾によって既に実証済みのことであるが、そこには可視化法適用上の重要な視点がいくつか確立されている。その第一は、当然のことながら対象とする流れ構造に適する手法を採用することにある。第二は、可視化法の適用限界を明確にする点である。第三は、いくつかの可視化法の同時併用を行う点であり、それぞれの特徴が同一流れ場で比較されることになる。

* Tokuyama Technical college, Tokuyama-city, Yamaguchi

** Faculty of Engineering, University of Yamaguchi, Ube-city, Yamaguchi

一方、著者らは、これまでに壁面領域内乱流構造の空間的な可視化法として、コンデンスミルク法を改良した一種の混合トレーサー法 (AMD法) を用いて、Bursting現象に関する従来の結果との比較を一部試みている。³⁾ 本論は、上述の視察を踏まえつつ、AMD法と従来の可視化法の結果をより詳細に検試しようとしたものである。

2. 可視化の方法と適用上の問題点

壁面領域内乱流構造の複雑性と高次性は、粘性底層、バッファー層、対数領域の一部という三様の流れ構造がいくつかの特徴ある挙動を示しながらも、時空間的に相互作用を繰り返している点に求められている。

このような流れに適用される可視化法も、より高次で、絶えず可視化の情報を豊富に供給できるものであることが望ましい。しかし、このような流れの条件に適格な可視化法を探り出すことは通常の場合難しく、その困難をある程度克服する方法として、同一の流れ構造内で可視化法自身を比較しながら可視化の情報を重畳化してゆくことが考えられる。著者らは、便宜上この方法を「比較可視化」と呼ぶが、その際に上述したklineらの視察が重要と言えるであろう。

本実験に用いた流れは滑面開水路であり、水路長10m、水路幅60cm、勾配1/500、可視化地点は上流より6m付近である。

比較可視化に用いた方法は、大別してAMD法、水素気泡法、蛍光粒子法、Dye wall slot法等であり、本論ではその一部を報告する。AMD法については、文献2)に詳しいが、その後の改良結果も含めて以下簡単に説明を行う。

AMD法とは、アルミ粉、コンデンスミルク、色素(アニリンブルー)の混合水溶液をトレーサーとして用いる方法であり、その特徴は個々のトレーサーとしての機能を引き出しつつ、結果的にはそれらの重ね合わせによって壁面近傍の乱流構造を立体的に、しかも流れ方向および横断方向に広範囲にわたって可視化できる点にある。このアルミ粉とコンデンスミルクを組み合わせて用いる方法は、既にTaneda(1968)⁴⁾によって試みられており、個々のトレーサーとしての機能も詳しく検討されている。

すなわち、アルミ粉は瞬間的な

Fig.1 Plan view of AMD imbricate shape
H=9.15cm, $U_m=5.72\text{cm/s}$, $U_* = 0.52\text{cm/s}$, $Re=4409$, $P=1.026$

流線の挙動による立体的表現を可能とし、乱流部分をより明示化し、一方でコンデンスミルクは流脈的表現を可能とし、渦糸の骨格を可視化するのみならず、その比重と粘性において拡散を防止したより安定した流体層も表現しうる。色素は濃淡の識別をより容易にする。

さらにもうひとつの特徴は、この方法の壁面領域内乱流構造への適用上のものである。その第一は、壁面近傍へのトレーサー

Fig.2 Plan view of AMD imbricate shape
 $H=8.6\text{cm}$, $U_m=16.09\text{cm/s}$, $U_*=1.83\text{cm/s}$, $Re=13823$, $\rho=1.27$

注入量を微妙に調節する事によって可視化面（あるいは層）を選択することが可能な点であり、粘性底層からバッファー層までの流体層の特徴をある程度とり出すことができるようである。第二は、トレーサーの比重を変化させることによってかなりの流れ条件の範囲に適用が可能な点である。これらは、流れの個々の条件に最適なトレーサーとその注入方法が存在していることを示唆するものであり、この条件から極端にけずれるとより注入量が多い場合および比重が大きい場合の両方において二相流的流況を人工的に形成させる危険性が生じてくる。著者らは、より安全側の目安として、AMD液が剥がれて壁面が露出している場合を採用している。

典型的なAMD鱗形状をFig. 1に、その高レイノルズ数下のものをFig. 2に示す。両者の基本的形状特性が同様であることが明らかである。

3. 壁面領域内乱流構造の組織性

(1) AMD鱗形状の特徴およびBursting現象との比較

Fig. 1に示すように、AMD鱗形状の基本構造はその立体的挙動にあり、黒く映った高速流体の浸入による掘れ込みおよび路床壁面の露出部分と、白く映った低速部に相当する隆起した部分とによって構成されている。トレーサーの立体化の効果に加えて、この两部分のコントラストが立体化をさらに増幅させている。また、このAMD鱗形状の連続写真および撮写テレビカメラの映像から、この形状自身が発生・発達し、そして消滅するというひとつの歴史的サイクルを示すことが明らかであり、さらには近隣の鱗形状同志の相互作用が存在していることも明らかとなっている。これらの特徴を考慮するならば、AMD鱗形状の規則的なパターンとその変化した不規則なパターンのそれぞれが共存していることがよく説明できると言えよう。このAMD鱗形状の秩序性は非常に安定して次から次に発生し、強制擾乱を与えてもその擾乱塊の流下とともにすぐに回復して再び安定して出現する。

そこで、これらの特徴を踏まえながら、従来のBursting現象に関する理解との

比較を以下のように試みる。

(a) AMD 鱗形状の横幅は、粘性底層内低速縞幅 $\lambda_z = 100\lambda_{*}^{3)}$ に等しい。また、流下方向長さ $R_*(=U_*H/\nu)$ に比例して増加する。(H:水深, U_* :摩擦速度, ν :動粘性係数)

(b) 鱗形状の流れ方向通過周期は、内部変数表示および外部変数表示の両方において従来の burst 周期とほぼ一致する。 $(U_{max}T/\nu) = 1.5 \sim 3.0$, U_{max} :最大流速, T:通過周期)

(c) 水素気泡膜法を用いても鱗形状に類似した形状が得られる。また streaks 構造にも類似性が見られる。

(d) AMD 鱗形状の相互作用はせいぜい 2~3 個の範囲にしか及ばず、kline らの oscillation 現象観察結果と一致する。

(2) 粘性底層内の streak 構造

粘性底層内の流れ構造の最も顕著な特徴は、蓄積過程としての low speed streak がかなり安定して出現することである。Fig. 3(a)~(c)にその streak 構造を示す。それぞれ可視化の手法が異なるがいずれにしても streak が明瞭に可視化されており、その横幅は $\lambda_z = 100\lambda_{*}$ に一致する。ところが強度は弱いがかかなり小さい streak line も存在しており、それらが 20~30% 程度の値を示している。おそらく、kline らが言う lift-up 現象の準備段階で粘性底層内に形成される streak 構造と思われる。lift-up 現象は Fig. 3(b)により明らかに可視化されていると思われるが、その横幅間隔は、kim らの²⁾観察結果とも一致する。この水素気泡膜法は従来のタウムライン法に比べて streaks の挙動をより明瞭に可視化しやすい特徴を有する。Fig. 3(a)からは streak の縦長 λ_z が、 $\lambda_z = 100\lambda_{*}$ の約 10 倍程度の値を示していることがわかる。

4. まとめ AMD 鱗形の挙動は、従来の Bursting 現象の理解といずれも矛盾しない特徴を示す。比較可視化により粘性底層内の streak 構造のスケール則について言及した。壁面領域内乱流構造の横断方向構造は、粘性底層内で比較的規則的であり、バッファー層ではかなりの不均一性を有すると言えよう。

参考文献 1) 佐藤: ながれ (1982), 2) kline 他: JFM (1967, 1971, 1974), AFOSR (1978)

3) 大成, 佐賀, 齊藤: 水理講演会論文集 (1982), 4) TANEDA: J. Phy. Soc. Japan (1965)

(a) by AMD method

(b) by hydrogen bubble method

(c) by aluminum dust method

0 10cm

Fig. 3 Plan view of low speed streaks
H=6.56cm, $U_m=5.56\text{cm/s}$, $U_* = 0.52\text{cm/s}$, $Re=3593$