15. オイル・フロー・パターンの生成機構

(油膜法による境界層底部の観察)

東北大速研 村井 等、庵原昭夫、奈良坂 力

Visual Investigation of Formation Process of Oil-Flow Pattern

[Visualization of Flow Pattern in Viscous Sublayer]

Hitoshi MURAI*, Akio IHARA*, Tutomu NARASAKA*

The formative process of the oil flow pattern in a fully developed turbulent boundary layer on a flat plate has been photographed by using a shadowgraph technique. Results have showed as follows.

At first, gradual risings of oil which looks like unstable waves appear on a plain oil film surface. Each rising moves downstream, increasing its height from a specimen surface, being more wavy and then constructs a "V" shapes. At the next stage, a oil spot appears at the downstream top of the "V" shape, where is highest part in oil thickness, and then oil flow out from the spot toward the stream-wise direction, constructing a short oil filament. At the last stage, by the combination of many short oil filaments, a long oil filament is formed. The phenomena described above resembles closely to "bursting" in a turbulent boundary layer.

1. 諸 言

物体表面の流れ方向を知るために、種々の顔料を混入した油を物体表面に塗布し、それによって流れのパターンを描かせようとする油膜法は古くから用いられてきた^(1,2)。そして、そのパターンの生成機構には古くから興味をもたれ、顔料を混入した油を物体表面に塗布し流れにさらすと、油は表面を流れ、最後にはなくなってしまうが、その運動は油中に含まれる顔料を物体表面に配列することによって流れのパターンが保存されると説明しているもの⁽³⁾、配列の理由として、油中に含まれる顔料の集塊の後流として線状になると説明しているもの^(4,5)、物体表面に存在する多くの微小突起、あるいは油膜が完全に均質でない場合には、その乾燥によって物体表面にできる微小な突起の後流に油膜が集まって筋となる

* Institute of High Speed Mechanics, Tōhoku University; 2-1-1 Katahira
Sendai 980, Japan

とするもの⁽⁶⁾などがある。しかしながら固形顔料を含まない油膜を用いても、表面を十分に滑らかに仕上げた平板をよぎる流れにおいても、油膜のパターンが得られることなどの事実は、これらの説と両立しない。一方、油膜の横方向の不安定によるものであらうと推論し、油膜が線状になるかどうかを決定する要因として、油膜の粘度と表面張力が重要であるとしているもの⁽⁷⁾もあるが、油膜の不安定の原因および油膜のパターンにまで発達する過程については十分な説明は与えていない。

よって本研究においては、透明なアクリル樹脂製の供試物体表面に油および顔料の含んだ油を塗布し、油膜が線状になる過程を写真撮影することによって、オイル・フローパターン形成の機構を実験的に明らかにしようとしたものである。また、上述の写真は使用した油膜の厚みが最大で $30\mu\text{m}$ であるために、油膜の動きは乱流境界層底部の挙動を示しているものと併せて考えられる。

Fig.1 Water tunnel

2. 実験用回流水槽および供試物体

実験は図1に示す密閉型回流水槽を用いて行った。測定部は幅 100mm 、高さ 400mm および長さ 800mm で、流れは $1/8$ に縮流されて測定部に入る。測定部両側壁および上下壁は透明なガラスで構成されている。写真撮影中の測定部一樣流速は測定部直前にある絞りの前後差圧から算出した。

 Fig.2 Contour of the test plate and its pressure distribution (by calculation): $\uparrow$ laminar separation point (by calculation)

供試物体の形状とその圧力分布ならびに層流剝離点を図2に示す。供試物体の幅および長さはそれぞれ 210mm 、 270mm である。素材は透明なアクリル樹脂で、その表面は油膜などに乱れを与えないように十分に研磨してある。図中の圧力分布および剝離点は文献⁽⁸⁾ならびに⁽⁹⁾によってそれぞれ算出したものである。供試物体は油および水の密度差による不安定の発生を防止するために、測定部流路中央に垂直に取り付けた。なお、前縁から 50mm の位置で境界層内の流速をレーザ流速計を用いて計測した結果、流速 3.5m/s 、水温 15°C において厚さ約 0.9mm の乱流境界層であった。

Fig.3 Kinematic viscosity of the oil

3. フローパターンの生成と写真撮影法

フローパターンを生成するために使用した油は商品名が injection pump oil として市販されている硬油で、その動粘度を図3に示す。パターンの生成は油のみを塗布した場合、および混入した顔料の役割を明らかにするために、体積比で1/6、1/50の割合で四三酸化鉛（光明丹）を混入した場合について行った。また、それぞれに対して油膜の厚みを変えた実験も行った。その際、塗布した油膜の厚みは塗布した油および混合物の体積を塗布した表面積で割ることによって求めた。実験は

Fig.4 Schematic view of the photographing method of oil filaments

水流中で行い、水温は11°C~15°Cの範囲であった。実験は供試物体に油を塗布し、つぎにそれを測定部に取り付け、水槽に水を充滿し、モータを起動し、回転数を上げ、測定部流速が所定の値に達した後で、写真撮影を開始するという手順を取ったが、流速が所定の値に達するためにはある時間が必要であったので、増速流の影響を少なくするために、フローパターンが形成し得る流速範囲の下限附近の流速で撮影を行った。写真撮影はモータドライブ付35mmカメラによった。光源はスリット光源を用いた。光源、供試物体およびカメラの幾何学的関係を図4に示す。各写真の時間位値はX接点からの出力を記録計

に収録しておくことによって求めた。油膜の撮影範囲は前縁から50mm~75mmであった。

4. 実験結果および考察

4.1 油のみの油膜の場合

図5はフローパターン形成の時間的な経移を示す一連の写真である。各写真右側の時間は主流が実験条件に示す流速に達した後の経過時間を示す。実験条件は主流速度3.5m/s、油のみを使用し、油膜の平均の厚みは11.0μmである。写真下部の寸法は前縁からの位置を示す。

No.1は流れにさす前の油膜表面の写真である。表面はほとんど平滑であることが認められる。主流が3.5m/sに達した後1.9秒後に平滑な油膜表面のスパン方向に若干の広がりを持つ突起が現われ始

Fig.5 Successive photographs of formative process of oil filaments
 $U_0=3.5\text{m/s}$, $T_w=15^\circ\text{C}$, $\delta=11\mu\text{m}$, oil alone

める(No.3)。それは時間と共に下流に移動しつつその数を増す。そして個々の突起は序々にスパン方向にその幅を広げる(No.4、5)。次いで隣り同士が結合し、スパン方向に連続する1本の油脈を形成する(No.6、7)。これらの油脈(以後不安定波と呼ぶ)は油膜表面の全域にわたって形成される。不安定波間の前後距離は本実験条件下では約0.26mmである。次いで、この不安定波はしだいに曲りくねったものとなる(No.7、8)。その波長 λ (No.7)は本実験条件下では約1.3mmである。ついで次第にその振幅を増し、下流側腹の部分がさらに盛り上り、V字形を形成する。次いでV字形下流側先端に油だまりが発生する。振幅が約0.5mmに達すると、油だまりの部分から油線となって油が下流側に流出し始める(No.8、9)。以上述べた不安定波の成長は表面全域で一様に起るものではないために、早期に成長したものから油が油線となって流出する。早期に流出した油線は下流側にある不安定波を乗り越えて、さらに下流側に進行する。油膜表面全域にわたって油線の流出が認められるようになると、不安定波の様相を程していた油脈はわん曲した糸状を程するようになる(No.10)。以上のようにして流出した油線は下流側にすでに存在している油線と合体する。合体する形態は上流側から流出した油線と下流側の油線とのスパン方向位置が一致する場合にはそのまま合体するが、位置がずれている場合には、上流側からの油線は近接する下流側の油線に引き込まれる。合体を完了した当初の油線は流れ方向に対して曲りくねっており、油線の間隔も不規則である(No.10、11、12)。油線の形成が進行するに従って、糸状を程した油脈はしだいに消失する(No.11)。形成された油線は当初、太さも一様ではなく、油線の間隔も不規則であるが、細いものは附近の太いものに吸収合体され、また向きを次第に主流方向に整える(No.12、13)。最後には主流方向を向いたほぼ等間隔の油線が形成される。本実験条件下では油線の最終的間隔 l (No.14)は約1.5mmであった。これは不安定波の波長とほぼ一致する。

以上述べた乱流境界層におけるオイル・フローパターンの形成の過程は、発達した乱流境界層における“バースト”の形成過程⁽¹⁰⁾と著しく類似している。相違は“バースト”の場合には、本実験の油だまりの部分に $\cap$ 字形のわん曲が生じ、それが引きちぎれて内層に飛びだすが、油膜の場合には強い粘性によって、その部分が油膜表面を伝わって下流側に流れる点にあると考えられる。写真中の縦方向矢印は一不安定波の移動を示したものである。成長に伴い移動速度が増大することが認められる。これは成長に伴い不安定波の高さが増大することを示していると考えられる。

以上述べたような不安定波に起因する油線の形成の外に、油膜表面の凹凸に起因して油線が流出するのも認められたが、その場合にも不安定波の発生を伴い、最終的な油線の

Fig.6 Wavelength, λ , of unstable waves and Distance, l , between oil filaments
 $\circ$ — λ , Δ — l , oil alone

間隔は不安定波の波長にほぼ一致した。

流速 3.5 m/s 、水温 15°C のもとで油膜の厚みを変えてパターンの撮影を行った結果、次のことが判明した。

(i) パターンが生ずるためには油膜の厚みに下限があり、上記した実験条件下では約 $3.5 \mu\text{m}$ であった。上限については、供試物体が垂直に取り付けてあるために、厚く均一な油膜を塗布することができず確認できなかったが、 $15 \mu\text{m}$ まではパターンの発生が確認された。

(ii) 上記の厚みの範囲では厚みによって、パターンの形成の過程は基本的には変化はなかった。

(iii) 不安定波（油脈）の波長 λ および油線の間隔 l と油膜の厚み δ との関係を図 6 に示す。 λ と l はほぼ一致し δ と共に増大する。

4.2 油に顔料を混入した油膜の場合

油に顔料を混入した場合のパターンの形成過程を図 7、8 および 9 に示す。顔料は四三化鉛で混入率は体積比で $1/50$ および $1/6$ のである。混入率が $1/6$ の場合（図 8）にはパターンが他の場合と異なり黒く写し出されているが、これはパターン部分に顔料が集中し、透過光をシャ断するために行ったものと考えられる。

これら 3 組の写真に見られるように、パターンの形成過程は油のみの場合と基本には同じである。しかしながら、図 9 に見られるように油膜の厚みが大きい場合には顔料の集塊の後流に不安定波の発生を伴わずに油線が形成される場合もあることも見い出された。さらに同一の厚みおよび流速のもとで混入比を増大すると

(i) 発生する不安定波の波長 λ は短くなる。しかもスパン方向に 1 本の油脈としては拡がらず千切れた状態になり、最終的に形成される油線の間隔 l も不規則になる。

(ii) 油膜表面の凹凸の数が増大するためにそれに起因して形成される油線の数も増大するなどの相違も見い出された。図 10 は混入率が $1/50$ の場合の不安定波の波長 λ および油線の間隔 l と油膜厚み δ との関係を示す。油のみの場合と同じように δ

Fig.7 Successive photographs of formative process of oil filaments
 $U_0=4.1 \text{ m/s}$, $T_w=11.5^\circ\text{C}$, $\delta=10 \mu\text{m}$
Volume ration of lead oxide to oil, 1:50

Fig.8 Successive photographs of formative process of oil filaments
 $U_0=4.1 \text{ m/s}$, $T_w=11.7^\circ\text{C}$, $\delta=10 \mu\text{m}$
Volume ratio of lead oxide to oil, 1:6

と共に増大することが認められる。

以上の結果から乱流境界層におけるパターンの形成に果す顔料の役割はそれが混入されることによって母体である油の物性値(例えば密度、粘度、表面張力)を変えるというような補助的なものであると考えられる。

参考文献

1. P. R. Earnshaw and J. A. Lowford, Low-Speed Wind -Tunnel Experiments on a Series of Sharp Edged Delta Wings, Rep & Mem., Aero. Res. Council, No.3424, (1946).
2. J. Black, A Note on the Vortex Patterns in the boundary Layer Flow of a Swept-Back Wings, J. Roy. Aeron. Soc., 56-393 (1952) pp.279-285.
3. A. B. Haines and C. W. Rhodes, Test in the Royal Aircraft Establishment 10-ftx, 7-ft High Speed Tunnel on Three Wings with 50 deg. Sweep back and 7.5percent Thick Sections, Rep. & Mem. Aeron. Res.Council, No.3043, (1954).
4. R. J. Stallker, A Note on the China-film Technique for Boundary Layer Indication, J. Roy. Aero. Soc., 60 (1956), pp.543
5. C. Arakawa, T. Ujino and T. Tagori, Fundamental Experiments of oil Filmes on a Rotating Disk (in Japanese), 7th Symposium on Flow Visualization, (1978), pp.85-90
6. I. M. Hall and E. W. W. Torgers, Part I, The flow pattern on a Tapered Sweptback Wing at Mach Numbers between 0.6 and 1.6, Part II, Experiment with a Tapered Sweptback Wing of Warren 12 Planform at Mach Number between 0.6 and 1.6, Rep. & Mem. Aeron. Council, No.3271, (1960).
7. 妹尾泰利、流れの観察における諸問題、機械の研究、23-1(1971), pp.261-267.
8. H. Murai and S. Maruyama, Theoretical Investigation of the Aerodynamics of Double Membrane Sailing Airfoil Section, J. of Aircraft, 17-5(1980), pp.294-299.
9. T. Cebeci and P. Bradshaw, Momentum Transfer in Boundary Layers, 1st ed., McGraw-Hill, (1977), pp.235-280.
10. J. O. Hinze, Turbulence second edition, McGraw-Hill (1975), pp.586-770.

Fig.9 Successive photographs of formative process of oil filaments
 $U_0=4.0\text{m/s}$, $T_w=12.0^\circ\text{C}$, $\delta=30\mu\text{m}$
 Volume ratio of lead oxide to oil, 1:50

Fig.10 Wave length, λ , of unstable waves and Distance, ℓ , between oil filaments
 C— λ , Δ — ℓ ,
 Volume ratio of lead oxide to oil, 1:50