

油膜法による層流剥離線の経時変化の観察

Observation of Time-Varying Phenomena of Laminar Separation Line by Oil Film Method

小林 敏雄*・石原 智男*・瀬川 茂樹*・佐賀 徹雄*

Toshio KOBAYASHI, Tomo-o ISHIHARA, Shigeki SEGAWA and Tetsuo SAGA

1. ま え が き

流れを観察、測定する手段の一つに可視化技術がある。このうち油膜法は取扱いの簡便さのため古くから航空機翼表面近傍の流れなどの観察に利用されている。¹⁾この油膜法は主として流れの方向を可視化するものであるが、特に剥離線、再付着線、死水領域、渦領域などの判定に適している。

油膜パターンの生成機構については従来より幾つかの説明がなされている。たとえば、油中に散在する顔料の微粒子が物体表面に配列しパターンを生成するという説²⁾油中の顔料の集塊の後流として線状パターンが生成するという説³⁾油膜の不均一性によって生じる微小突起の後流に油膜が集まり筋状パターンを形成するという説⁴⁾表面の薄膜の横方向不安定性によって縞状パターンが形成されるという説⁵⁾などがあるが、いまだ定説となっていない。したがって、油膜パターン生成過程の微視的観察が必要とされている。

一方、実用面ではポンプとか流体継手などの流体機械内部の複雑な流れ場の観察に油膜法を適用することが多くなっている。⁶⁾⁷⁾油膜法適用時に注意を要する主な点は、適当な油膜材の選択と油膜パターン生成に要する必要か

つ十分な経過時間の推定である。しかし現状では、特に後者について具体的系統的資料に乏しいと思われる。

本研究では、油膜パターン生成機構に関する基礎的資料を与えること、油膜パターン生成に要する時間に関する実用的資料を与えることを目的として、層流剥離線領域の生成過程の詳細な観察、測定を行っている。

2. 実験装置と方法

一様流中に置かれた二次元単独円柱まわりの層流境界層の剥離領域近傍の油膜パターンの時間変化を種々の油膜材について系統的に観察、測定する。可視化用開放型水槽の概略図を図1に、諸元を表1に示す。水槽の両側

表-1 可視化用開放型水槽の諸元

全 長	5000 mm
最 大 幅	900 mm
試 験 部	400 mm ^φ × 400 mm ^φ × 2500 mm ^l
水 位	18 mm× 400 mm (可変)
流 速	2~500 mm/s (可変)
縮 流 比	水平方向: 0.44 鉛直方向: 0.74

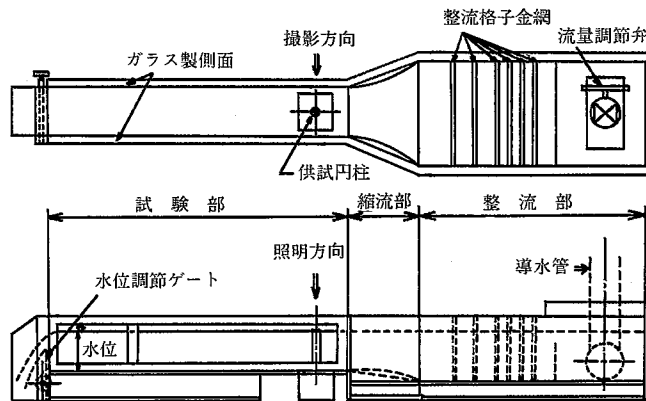


図-1 可視化用開放型水槽の概略図

* 東京大学生産技術研究所 第2部

表-2 供試油膜材

ケース	油膜材	着色材
1	軽油 (100 cc, ~3 cst)	カーボン粉末 (0.2 g), MDL (20 g)
2	"	カーボン粉末 (0.2 g), MDL (30 g)
3	"	カーボン粉末 (0.2 g), MDL (40 g)
4	"	光明丹 (6.0 g), MDL (20 g)
5	機械油 A (100 cc, 39.9 cst)	光明丹 (6.0 g), MDL (20 g)
6	機械油 B (100 cc, 8.0 cst)	カーボン粉末 (2.0 g)
7	機械油 C (100 cc, 21.4 cst)	"
8	機械油 D (100 cc, 39.9 cst)	"
9	機械油 E (100 cc, 60.7 cst)	"

MDL: 二硫化モリブデングリソ

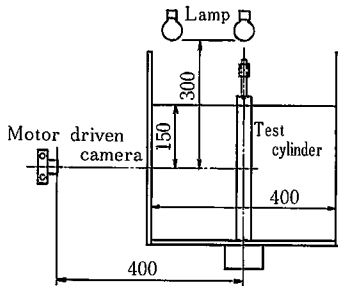


図-2 油膜パターン撮影方法

面はガラス製で、水位は調節ゲートによって、流速は流量調節弁によって設定される。本報における水位は 280 mm、流速範囲は 5~31 cm/s である。供試円柱は直径 30 mm および 50 mm のジュラルミン製で表面は白色に予め塗装されている。この円柱の表面に油膜材を一様に塗布した後に一様流中に静置し、表面に生じる油膜パターンの経時変化を撮影する。試験に用いた油膜材の種類を表 2 に、撮影方法を図 2 に示す。水槽の周辺を暗くした上で、写真用ライト (500 W×4) によって水槽上面および側面から照明し、標準レンズをもつモータ駆動カメラで水槽側面から撮影している。使用したフィルムの ASA 感度は 400、露光時間および絞りは主として 1/60 秒、f 8 である。

円柱表面の流れと円柱近傍の流れとの対応を考察するために、染料注入法によって剥離限界線の観察を行っている。図 3 に示すように、①供試円柱の後流中に注入管によって染料を注入する方法および②円柱の一部に 2 個

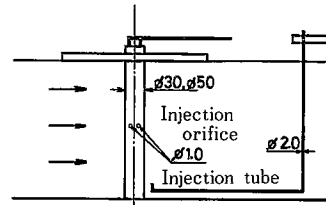


図-3 染料注入法の概略図

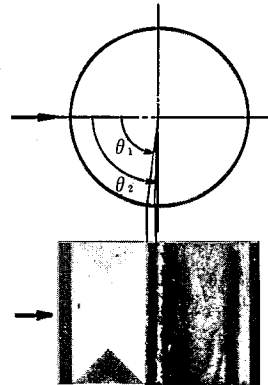


図-4 油膜パターンの典型的な例

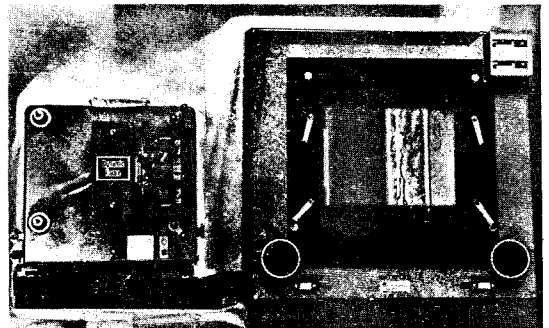


図-5 拡大投影解析装置図

の小孔を設け、そこから染料を噴出させる方法が併用されている。使用した染料はローダミン B (赤色) とウォーターブルー (青色) である。なお、後述するように、限界線は剥離領域の影響により周期的に変動する。したがって、モータ駆動カメラによる撮影に加えて 16 mm カメラの撮影による連続的観察も行っている。

3. 限界線の判定

円柱表面に生じる油膜パターンの典型的な例を図 4 に示す。図に示されるように剥離領域付近の油膜パターンには前方限界線と後方限界線とが現れる。³⁾ これら限界線の判定すなわち限界線の角度位置の決定は、図 4 のネガティブフィルムを図 5 に示す投影解析装置を用いて拡大投影し、別に用意された供試円柱と同形の較正円柱 (図

研究速報

6参照)の角度目盛と比較することによって行われる。本報での投影拡大率は25, ネガティブフィルムの撮影拡大率は0.16である。したがって、投影解析装置上では供試柱は4倍に拡大されていることになる。

円柱近傍の流れ、特に剥離点付近の流れは円柱背後からの離脱うずに伴い大きく変動する。この結果限界線の位置は変化する。このことを考慮し、染料注入法による限界線の角度位置の決定は、モータ駆動カメラによる連続撮影写真の読みの平均値を用いることにする。なお撮

影間隔は0.227秒であり、円柱からのうずの離脱周期は流速が25 cm/sのとき約0.8秒である。これらの写真から求められた限界線の変動角度範囲は±1度である。

4. 可視化結果と考察

ケース2の油膜を用いて円柱表面上の層流剥離領域付近の油膜パターンの生成過程を写真撮影した結果を図7に示す。円柱前面よどみ点近傍の油膜は帯状領域となって残るが、それより少し後方の油膜は流れによってしだいに後方に移動する(図7-(a))。試験開始後約6分で前方限界線 θ_1 が現れる(図7-(b))。 θ_1 は時間の経過とともに後方に移動し油膜の層は円柱表面上の一部に凝集する(図7-(c))。さらに時間が経過すると剥離領域直後の逆流の影響を受け後方限界線 θ_2 が現れる(図7-(d))。この θ_2 はその後の時間経過とともにわずかに前方に移動し約20数分後には θ_1, θ_2 ともに一定の位置に落ち着く(図7-(e))。さらに時間が経過するとこの限界線は消滅する。しかし一定値に落ち着いたとみられる限界線は16mmフィルム撮影結果より詳細に観察するとうずの離脱に伴い前後に変動していることがわかる。変動周期は円柱後流のカルマン渦の周期と同期し、変動角度はこの油膜材の場合約±1度である。

供試円柱の一部に2個の小孔を設け、そこから染料を噴出させる方法で流れの剥離を可視化した例を図8に示す。小孔の位置は前方よどみ点より75度および105度である。この方法によって限界線 θ_2' が得られる。

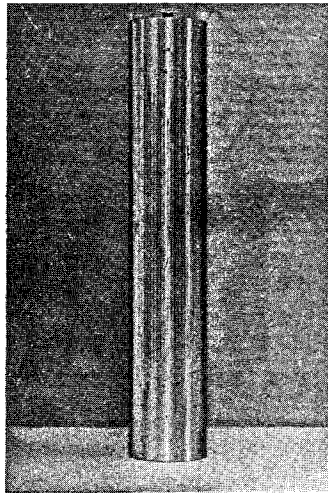


図-6 校正円柱

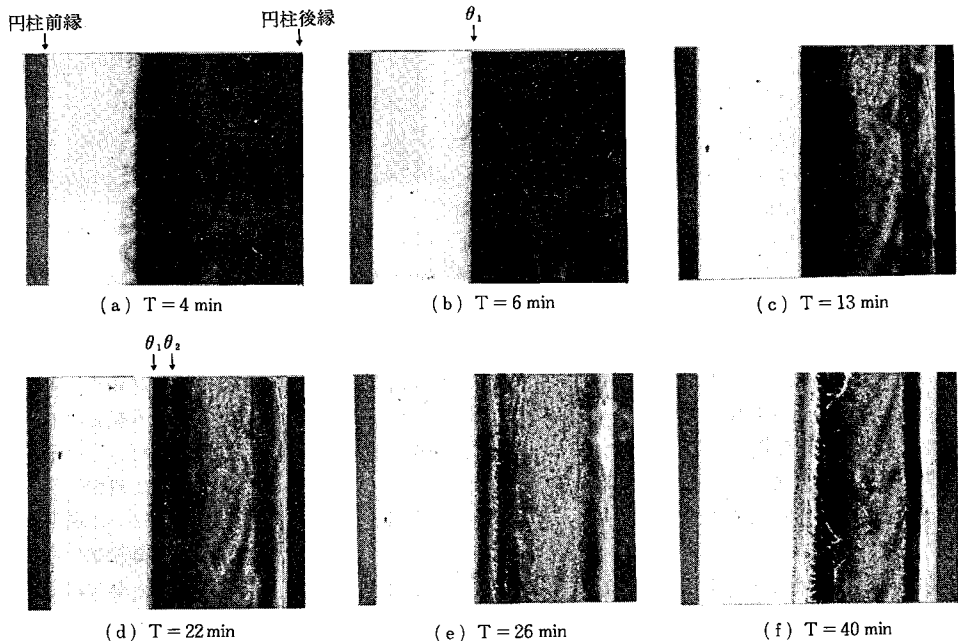


図-7 油膜パターンの生成過程例(ケース2, $d=50\text{mm}$ $Re=8.6 \times 10^3$)

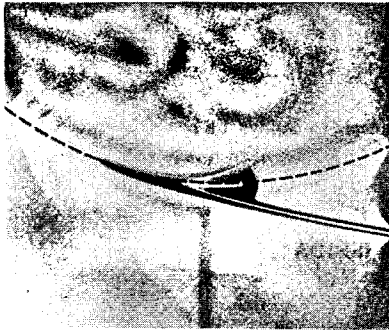


図-8 染料注入法による円柱剥離点近傍の流れの観察
($d=50\text{ mm}$, $Re=2.2 \times 10^3$)

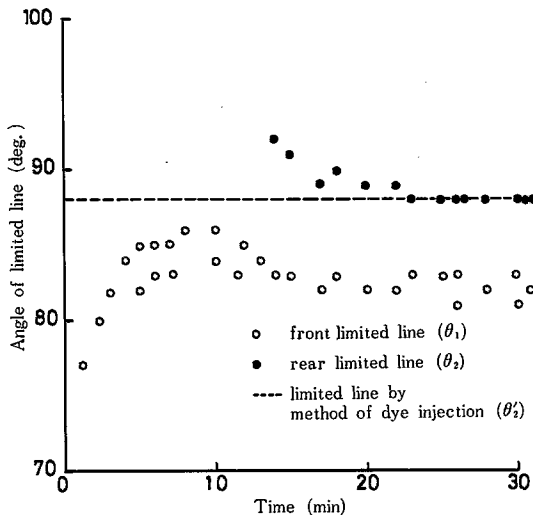


図-9 前方および後方限界線の経時変化
(ケース2, $Re=9.1 \times 10^3$)

ケース2の場合の油膜法による両限界線 θ_1, θ_2 の位置(平均値)の時間による変化を図9に示す。図中の破線は染料注入法による限界線 θ_2' である。図より θ_1 と θ_2 とが一致しないこと、 θ_1, θ_2 が一定になるまでにはある適当な時間 T_R が必要であること、さらに時間が経過すると θ_1, θ_2 とともに観察不可能となることがわかる。また、限界線 θ_2 は T_R 時間経過したときの θ_2' と一致することが示されている。これらの傾向は他のケースの油膜材においてもみられる。時間 T_R は油膜材の種類、流速および円柱径によって異なる。

ケース6, 7, 8, 9における時間 T_R と粘度の関係を図10に示す。図は供試円柱径、流速、カーボン量が同じ場合、時間 T_R は油膜材の粘度の増加とともに増大すること、 θ_1, θ_2 が一定位置に保たれ、いずれかが消滅するまでの継続時間 T_H も油膜材の粘度の増加とともに増大することを示している。

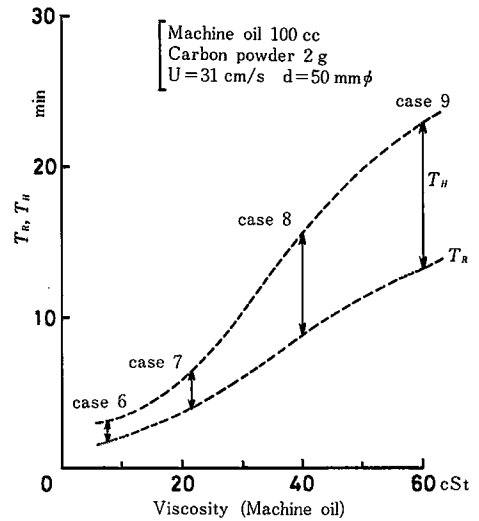


図-10 前方および後方限界線と油膜材粘度
($Re=1.44 \times 10^4$)

5. 結 論

円柱表面の層流剥離による限界線の経時変化を油膜法により詳細に観察した結果次のことが明らかになった。

1. 油膜には前方限界線と後方限界線が存在する。
2. それらは時間の経過とともに移動し、平衡状態に達するまでには適当な時間 T_R を要する。この時間 T_R は油膜の種類によって定まる。
3. 前方限界線と後方限界線は平衡状態においても時間的に変動している。
4. 染料注入法による限界線は油膜法による後方限界線と一致する。

したがって、油膜法によって複雑な流れ場の観察を行う際には、観察時間の設定と結果の解釈とに十分な注意を払う必要がある。(1980年11月21日受理)

参 考 文 献

- 1) P. B. Earnshaw & J. A. Lawford, Rep. and Mem., Aeron. Res. Council, No. 3424 (1946)
- 2) A. B. Haines & C. W. Rhodes, *ibid.* No. 3043 (1954)
- 3) R. J. Stallker, J. Aeron. Sci., 24-7 (1957)
- 4) 妹尾泰利, 機械の研究, 23-1 (1971)
- 5) I. M. Hall & E. W. E. Rogers, Rep. and Mem., Aeron. Res. Council, No. 3271 (1960)
- 6) 村井等, 日本機械学会誌, 70-587 (1967)
- 7) 石原智男, 古屋七郎, 森恒, 日本機械学会講演論文集 (1968)
- 8) T. Ishihara, T. Kobayashi & M. Iwanaga, Intern. Symp. on Flow Visualization, Proc. (1980)