

進行波運動による剥離の遅れに関する実験

種子田, 定俊
九州大学応用力学研究所 : 教授

友成, 義正
九州大学大学院学生, 工学部

<https://doi.org/10.15017/4743488>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 38, pp.37-45, 1972-08. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



進行波運動による剝離の遅れに関する実験[†]

種子田 定 俊*
友 成 義 正**

概 要

一様流の中に流れに直角におかれた円柱の表面が微小な進行波運動を行なう場合、剝離点の位置がどのように移動するかをレイノルズ数 4000~10000 の範囲でフロービジュアライゼーションにより測定した。実験結果の主なもの次は次の通りである。(1)進行波が一様流と同じ方向へ進む場合：剝離点は明瞭に後退する。一様流の速度を U 、波速を V とするとき V/U をゼロから少し高めると剝離点は急激に後退する。しかし、さらに V/U を高めると剝離点はかえって前進し、 $V/U \sim 1.5$ のとき後退する量は最小になる。 V/U をもっと大きくすると剝離点は再び後退する。 $0 < V/U < 1$ のとき剝離流は進行波と同じ周期で見事な渦巻を形成する。(2)進行波が一様流と逆の方向へ進む場合：流れは不安定になるが、 V/U を変えても平均の剝離点の位置はほとんど変化しない。

1. はじめに

進行波運動を行なう物体の表面に沿う流れは動物の運動に関連して最近急激に流体力学者の注目を集めつつある。Taylor (1951)¹⁾ 以来現在までに数多くの研究が行なわれているが大別すれば、(1)一様流の中で進行波運動を行なう物体の推力に関する研究^{2)~6)}、(2)壁が進行波運動を行なうパイプによる流体輸送に関する研究^{7)~9)} の 2 つに分類することができる。しかしながら、剝離を伴うずんぐりした物体の表面が微小な進行波運動を行なうとき剝離点がどのように変化するかについては全く研究が行なわれていない。ずんぐりした物体の剝離点の位置は抵抗と密接な関係を有するので、流体力学的にも実用的にも極めて重要な問題である。

本研究の目的は、表面の進行波運動がずんぐりした物体の剝離点におよぼす効果を実験的に測定することである。

2. 実験装置と方法

実験は試験水路で行なわれた。水路の幅は 40 cm、水深 33 cm、流速の範囲は 9~21 cm/s、流速の一様性は充分に良好である。試験用円柱は軸を水平にして水深の中央の高さにセットされた。図 1 は実験装置の略図を示す。自分自身の軸のまわりに回転できるように作られた円柱(直径 5 cm、長さ 34 cm)の表面に 12 本の細い針金(直径 1 mm)が軸に平行に等間隔(約 13 mm)で接着されている。その外

* 九州大学教授、応用力学研究所

** 九州大学工学部大学院生(応用力学博士課程)

† 日本物理学会で講演(昭和 47 年 4 月)

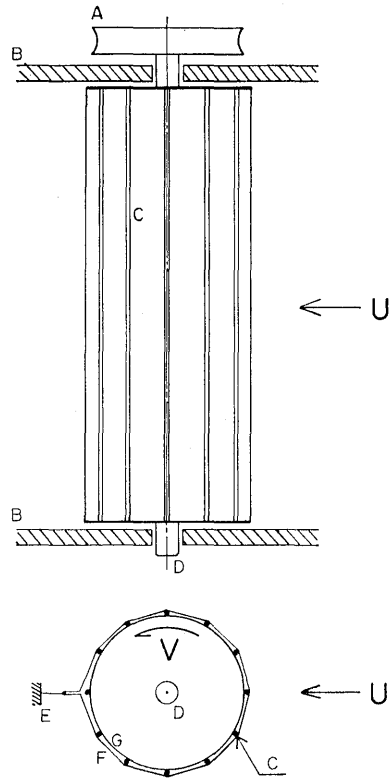


図 1 実 験 装 置

一様流 U に垂直な円柱の表面に、合計12本の針金を接着し、その外側をビニール薄膜で包んである。円柱は自身の軸まわりに回転可能であるが、ビニール薄膜は後部で外部に固定されているため動けない。ビニール薄膜の内面を針金でこすることにより、表面に円周方向に進む進行波（波速 V ）ができる。インクを流れの上流または下流に注入して、流れの状態を観察した。観察の視点は、円柱の回転軸上、または回転軸と流れとに垂直な線上（上方）の、二種の位置に在る。

A: プーリー, B: 端板 (380×250×10 mm), C: 針金 (円柱固定, 1 mmφ, 長さ 340 mm), D: 軸, E: ビニール膜固定材 (端板に連結), F: ビニール膜 (厚さ 0.1 mm), G: 回転円柱 (50 mmφ×340 mm).

側を薄いビニール膜で包み、膜は適当な張力を保つように後方の1箇所外部に固定されている。円柱を回転させると表面の針金の突起がビニール膜の内面をこすって移動するので、円周方向に沿って進行波が形成される。円柱の末端の影響を小さくするために、円柱は試験水路の幅いっぱい長くとり、軸の両端は2枚の平行な平板によって支えられている。円柱はプーリーを通じて外部の可変速度型電動機により駆動される。

流れの可視化はインクを細い注射針で注入することにより行なわれた。円柱後方に注入されたインクは剝離点の位置まで逆流するので、剝離点を容易に知ることができる。

3. 実験結果と考察

円柱の表面が微小な進行波運動を行なう場合の流れを支配する物理量は、 U , D , V , ν , d , λ および進行波の形状である. ここに U は一様流の速度, D は円柱直径, V は進行波の速度, ν は動粘性係数, d は波高, λ は波長である. 従って流れを支配する独立な無次元量は

$$\frac{UD}{\nu}, \frac{V}{U}, \frac{d}{D}, \frac{\lambda}{D}, \text{ 波形}$$

の5つである. 今回の実験では d/D , λ/D および波形を一定に保って, $UD/\nu=4000\sim 10000$ の範囲で V/U が円柱の剝離に及ぼす効果を測定した.

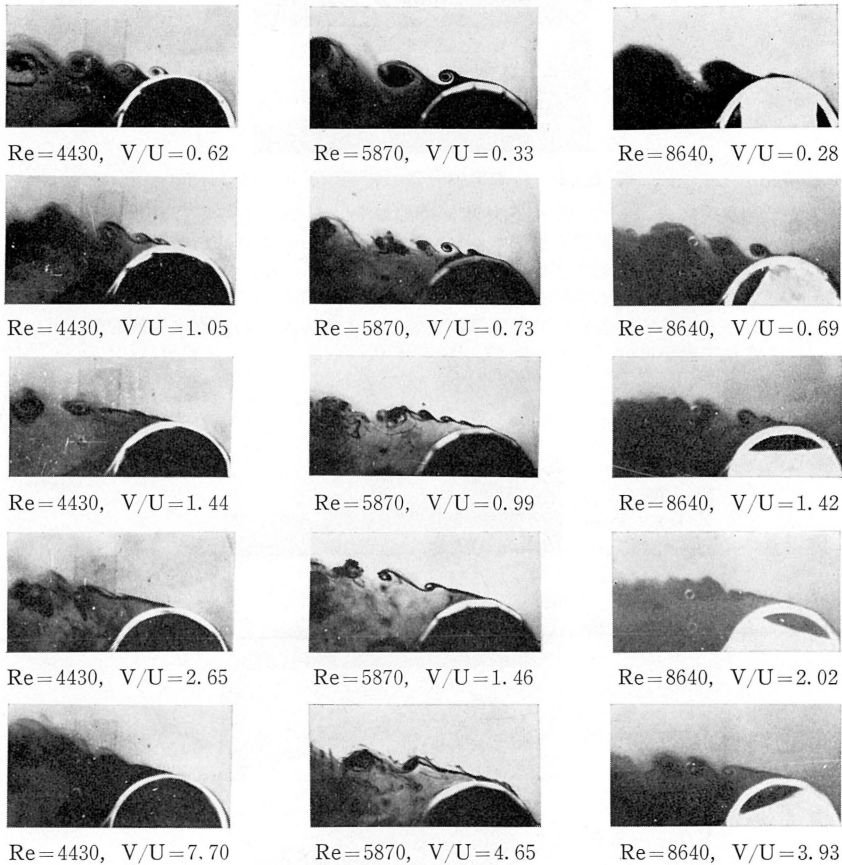


写真 1 剝離渦の状態 ($V/U > 0$)

円柱前端近くにインクを注入して, 円柱の回転軸上から剝離渦を観察した. 流れはいずれも右から左に向い, 進行波は反時計方向に進む. 写真の3つの列は, 各々異なる3種の Re に対応し, 同一列では下に行く程 V/U の値が大きい. いずれの列においても, 三段目までは剝離渦は明瞭であるが, 四, 五段目では認められない. 即ち, $V/U \approx 1.5$ 前後が, 剝離渦に関しての状態の別れ目であることを示している.

V : 波速, U : 一様流速, Re : UD/ν 但し, D は円柱直径, ν は動粘性係数.

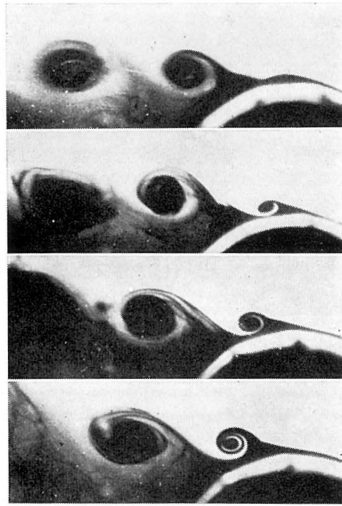
写真 2 剝離渦発達の様子 ($V/U > 0$)

写真1における V/U が低い時の剝離渦を、時間を追って観察した場合の、渦の発達状況を説明するための写真である。流れは右から左、進行波は反時計方向に進む。波型1つが通る毎に、渦1つがはき出される。 $V/U > 0$ での剝離渦は、皆このパターンで発生している。なお、流れがこのようにきわめて非定常性が強いにも拘らず、剝離線は比較的安定して動かない。 $V/U=0.33$, $Re=5870$.

$Re=5870$,
 $V/U=-0.62$



$Re=4430$,
 $V/U=-0.63$



$Re=8640$,
 $V/U=-0.61$



$Re=4430$,
 $V/U=-3.50$

写真 3 逆回転 ($V/U < 0$)での剝離

一樣流 U と波速 V とが互に逆、即ち円柱が時計方向に回転する場合には、順方向のような統一的なパターンが無い。 $-1 < V/U < 0$ の範囲では、渦の在る場合 (上から 3 枚目) と、無い場合 (上から 1, 2 枚目) とがあり、また時間的に渦発生が不安定であることが認められた。 $V/U < -2$ では、順方向の場合との差異が、あまり認められない (一番下の写真)。

3.1. 剝離流の振舞

剝離流の振舞を見るために前方よどみ点付近からインクを注入し、円柱の軸方向から観察した。

まず、進行波の進行方向が一樣流と同じである場合、波速が一樣流の速度よりも小さいとき ($V/U < 1$) 進行波の山が1個通り過ぎる毎に見事な渦巻が1個づつ剝離点から吐き出される。しかし V/U が1よりも増大すると渦巻の発生は次第に弱くなり、 $V/U > 2$ ではもはや渦巻を認めることができなくなる。写真1は3つの異なるレイノルズ数について、それぞれ V/U の値を変化させたときの剝離流の振舞を示す。写真2は $V/U < 1$ のときに形成される見事な渦の拡大写真である。なお、この場合の渦巻の2次元性は非常に良い。この渦巻は層流剝離層が進行波によって周期的攪乱を受ける結果、流体力学的不安定性により発生するものと思われる。

次に進行波の進行方向が一樣流と逆である場合には、流れの状態は非常に不安定である。規則的な流れと不規則な流れとが時間的に交替する(写真3)。

3.2. 剝離点の位置

円柱後方にインクを注入し、それが逆流して円柱表面上に付着する有様を水路上方から観察した。イ

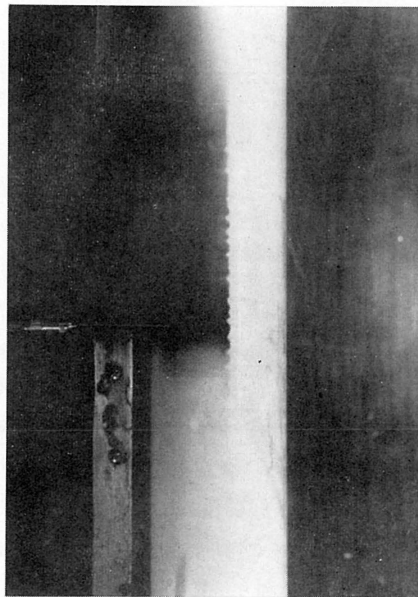


写真4 剝離線(例)

円柱後方から後流中にインクを注入し、波速 V を変化させて、剝離線を観察した。カメラは、一樣流 U 及び回転円柱軸に垂直な、鉛直上方約1mの点に在る。剝離線と考えられるインクの端は、写真のようにある程度の波うちがあるが、これはモデル表面の三次元性(製作上の不均一性)に起因するものと考えられ、一応その平均位置を剝離位置とし、この位置を円柱前端からの角度に換算して整理したものが図2である。なお、写真の剝離線は V/U または Re を変えてもほぼ同一のパターンを取るが、その際、非定常性(剝離線の前後揺れなど)が比較的小さいことが認められた。

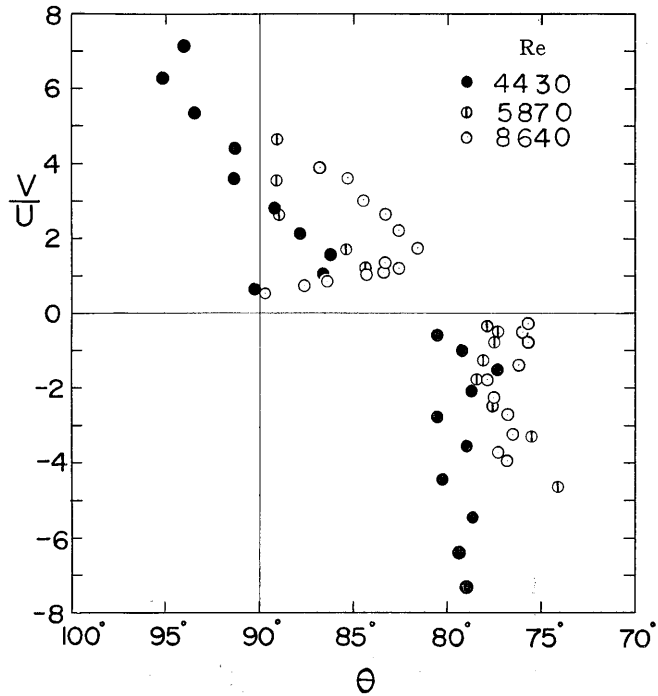


図 2 剝離位置

求め方は写真4を参照。 V/U に対して単純な関係ではなく、特に、 $0 < V/U < 2$ の範囲で複雑に変化する。

θ : 円柱最前端から剝離位置までの中心角, V : 波速, U : 一様流速,
 Re : UD/ν 但し, D は円柱直径, ν は動粘性係数。

ンクは剝離点の位置まで逆流するのでインクの前縁が剝離の位置を示すものと考えられる(写真4)。図2は剝離点の位置 θ と V/U の関係を示す。ここで注目すべきことは、進行波が存在する場合インクで観察する限りにおいては1サイクルの間中剝離点がほとんど動かないことである。一方進行波がない場合 ($V/U=0$) には常に波の山の位置から剝離するので、山の位置によって剝離点の位置が変わる(写真5)。本実験では山の位置を次々と変えてその平均の剝離点の位置を求め、それをもって $V/U=0$ のときの剝離点の位置とした。図3に示される通り、 $V/U=0$ のときの剝離点はレイノルズ数によって異なる。今、 $V/U=0$ のときの剝離点からの変化量 $\Delta\theta$ を V/U に対してプロットすれば図4が得られる。この図からわかるように実験点はほとんど1本の曲線上に集り、進行波が剝離点におよぼす効果は少なくとも本実験のレイノルズ数の範囲ではレイノルズ数に無関係であることを示している。図4の曲線が示す通り、進行波が一様流と同じ方向に進む場合には剝離点は常に後退し、しかも後退する角度は V/U によって複雑に変化する。 V/U をゼロから高めてゆくと最初剝離点は大きく後退し、次に前進する。 $V/U \sim 1.5$ で最も前進し、さらに V/U を高めると再び大きく後退する。このように剝離点は、波速によってはげしく変化する。一般に進行波の波速がその外側の流れの速度よりも大きい小さいか

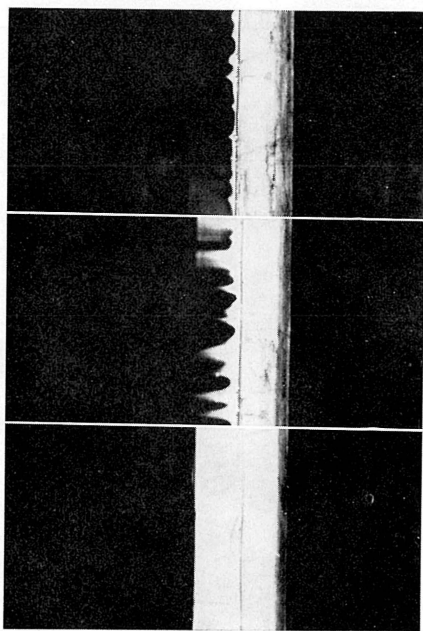
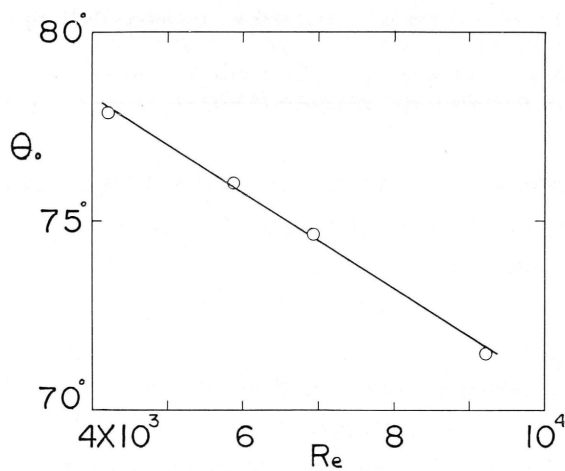


写真5 進行波停止での剝離

進行波を停止した場合の剝離位置には許容範囲があり、その範囲に在る針金位置から剝離が起きる。写真は、針金が許容範囲の端近くに在るときの様子を示したものである。上から順にわずかず針金位置をずらした状態であり、インクが一つ後の針金位置に移るのがわかる。このことから、中段の状態にあるときの二本の隣り合う針金が、許容範囲の端になることがわかる。即ち、静止での剝離はこの二本の針金の間で起きる。そこで、そのちょうどまん中の位置をもって、静止での剝離位置とした。

図3 $V=0$ (進行波停止) での剝離位置

剝離位置の求め方は写真5を参照。円柱最前端から測って、剝離位置までの角度を θ_0 とする。Re に対してリニアな依存をしていることがわかった。

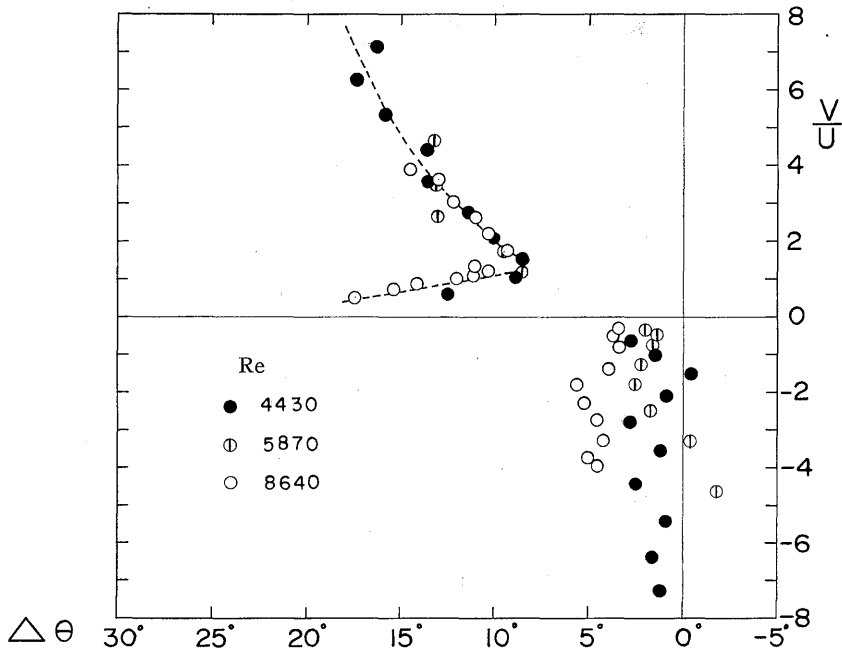


図 4 静止での剝離位置からのずれ

各 Re における θ_0 の値 (図 3) が, その Re に対する規準であると考えると, θ の値 (図 2) を修正して, 新に

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0$$

を定義できる. この量で図 2 を整理すれば, 各 Re に対応するだけの平行移動が生じる結果, 本図のように, $V/U > 0$ で, ほぼ 1 つの曲線に乗ることがわかった. 次の三つの特徴が見られる. (1) $V/U \approx 1.5$ の付近に, 1 つのピークがある, これは写真 1 での剝離渦の状態が変化する領域に対応している. (2) $V/U \approx 0$ 付近では, 波速 V が小さいにも拘らず, 剝離点は大きな後退を示すこと, この理由は不明である.

(3) $V/U < 0$ の場合には, 比較的变化が少ないこと.

によって流れの性質は質的に変る. しかるに剝離点の近くの主流の速度は一樣流の速度の 2 倍に近いので, $V/U \sim 1.5$ は波速がその外側の主流の速度と等しいことに相当する. このことから θ が $V/U \sim 1.5$ で異常を示す理由が理解できる.

4. む す び

一樣流の中におかれた円柱の表面が微小な進行波運動を行なう場合に, 剝離点がどのような影響を受けるかをフロービジュアルゼーションにより観察した.

その結果, 進行波が一樣流と同じ方向に進む場合には剝離点が常に後退すること, 後退の度合は波速によって著しく異なること, 波速と外部の流速とが等しい付近で異常が認められることなどが判明した. また進行波が一樣流と逆の方向に進むときは流れは不安定を示し, 規則的な流れと不規則な流れとが時

間的に交替すること、剝離点は平均してほとんど移動しないことなどが明らかになった。

今回の実験では主として波速に着目して流れの変化を調べた。今後はレイノルズ数、波高、波長、波形の効果について実験を進める予定である。

謝 辞

実験の一部を担当していただいた高田三郎氏、原稿を浄書して下さった岡世以子嬢に感謝します。なお、本研究は、文部省科学研究費によって行なわれたものである。

文 献

- 1) Tayler, G. I., Analysis of the swimming of long and narrow animals, Proc. Roy. Soc. A 214 (1952) pp 158-183.
- 2) Lighthill, M. J., Note on the swimming of slender fish, J. F. M. 9 (1960) pp 305-317.
- 3) Wu, T. Yao-Tsu, Swimming of a waving plate, J. F. M. 10 (1960) pp 321-344.
- 4) Siekmann, J., Theoretical studies of sea animal locomotion, Ingen.-Arch. 32 (1963) pp 40-50.
- 5) Kelley, H. R., Rentz, A. W. and Siekmann, J., Experimental studies on the motion of a flexible hydrofoil, J. F. M. 19 (1964) pp 30-48.
- 6) Fung, Y. C. and Yih, C. S., Peristaltic Transport, Trans. ASME, J. Appl. Mech. 35 (1968) pp 669-675.
- 7) Yin, F. C. P. and Fung, Y. C., Comparison of theory and experiment in peristaltic transport, J. F. M. 47 (1971) part 1 pp 93-112.
- 8) Burns, J. C. and Parkes, T., Peristaltic motion, J. F. M. 29 (1970) part 4 PP 731-743.
- 9) Weinberg, S. L., Eckstein, E. C. and Shapiro, A. H., An experimental study of peristaltic pumping, J. F. M. 49 (1971) part 3 pp 461-479.

(昭和47年5月31日 受理)