

一様流に垂直な円柱周りの流れの三次元性

松井辰彌（岐阜大）

Three dimensionality in the flow around a circular cylinder perpendicular to a uniform flow

T.Matsui

Gifu University

ABSTRACT

It is usually thought that the flow around a circular cylinder perpendicular to a uniform flow is a two dimensional flow. Usually we can observe that the axes of Karman vortices in the wake of a circular cylinder are not parallel to the axis of the circular cylinder, but the angle of the Karman vortices to the cylinder axis is about 15 degrees for Reynolds numbers less than one thousand. Also we can observe the axial flow in the central part of every Karman vortex. The boundary layer on a rotating circular cylinder in a uniform flow is composed of the inner layer of Taylor vortices and the outer layer of Görtler vortices, and the outer layer separates from the inner layer, resulting in forming the Karman vortex street.

Key Words: separation, Karman vortex street, Taylor vortex, Görtler vortex.

1. 序論

一様流に垂直に置かれた円柱を過ぎる流れは、一般に円柱の下流にカルマン渦列を形成する二次元的な流れとして取り扱われているが、円柱軸を含む一様流の面を上方から眺めた場合、カルマン渦列の各々の渦は互いに平行であるが、円柱軸に平行ではない。各々の渦の中心部分には円柱に近づく方向の流れがある。全体の流れは三次元的である。円柱が回転している場合、円柱表面に接した境界層の内層内にはテイラー渦が存在し、これに接した外層内にはゲルトラー渦が存在する。この流れも三次元的である。円柱を過ぎる流れは総て三次元的である。

2. 静止円柱を過ぎる流れ

(1) カルマン渦列と円柱との非平行性

奥出・大蔵の実験(1)において、風洞壁の境界層の円柱まわりの流れへの影響を少なくする目的で、flange を円柱の両端に近い位置に、流れに平行に取り付けた場合と、流れに対して角度をつけた場合との、円柱と同一面内の流れを図 1 に示す。parallel flange の場合、カルマン渦列の各々の渦は大体図中の渦 BC の部分に平行で、円柱に対する傾角は 15 度程度である。inclined flange の場合、カルマン渦列の各渦は円柱に殆ど平行である。flange をつけない一般の場合、カルマン渦列の各々の渦は

互いに平行であるが、円柱軸とは非平行である。

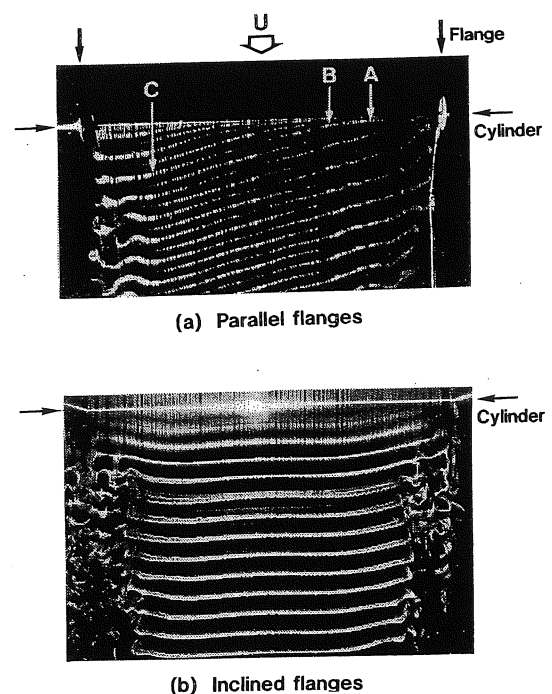


図 1 カルマン渦列の平面図

parallel flange の場合、図中の渦の C の部分は B

より早い時期に剥離渦が放出され、A の部分は今将に放出される場所である。渦中心の圧力は、粘性のため時間の経過に伴って上昇するので、A から B、C へと高くなる。図 2 は parallel flange の場合、この圧力勾配による渦中心部の渦軸方向の流れを示している。inclined flange の場合には渦は円柱に平行であるので、この流れは現れない。

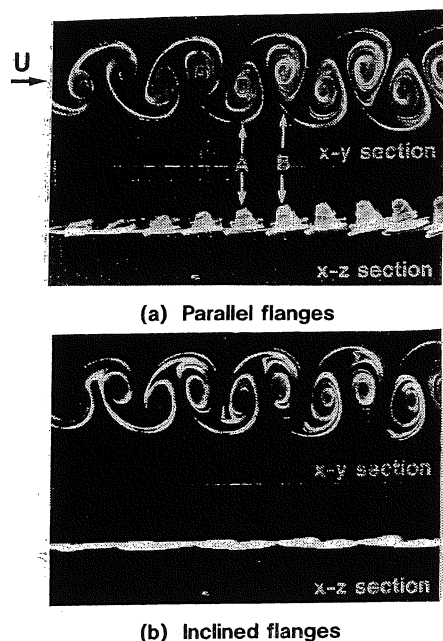


図 2 カルマン渦列の渦軸内の流れ

カルマン渦列の渦と円柱との非平行性の原因については、円柱表面の境界層の剥離と、剥離の結果生ずる剥離渦の放出とについて考察しなければならない。剥離の条件、 $\partial U / \partial y = 0$ at $y = 0$ 、は円柱の一つの母線に沿って同時に起こると思われるので、剥離がカルマン渦の円柱との非平行性の原因になるとは考え難い。然し、境界層内の流れの乱れが剥離に影響するならば、剥離の条件についても考え直さねばならない。剥離渦の放出が円柱表面のある位置で最初に起こったとすれば、その渦放出が円柱に沿って軸方向に伝播するであろう。その伝播速度と剥離渦が下流へ流される速度との比が渦の円柱に対する傾斜角を決めることになる。渦放出の条件は明らかでない。

(2) カルマン渦列の再配列

カルマン渦列は下流に行くにつれて渦の配列に変化が起こり、やがて安定な第 2 次の渦列が形成される。この原因について、第 1 次の渦列内の渦の合体によるという説と伴流の平均速度分布の安定性を満たすように再配列するという説とがある。後者の場合流れは二次元流であるとしている。飛行機の両翼端から出る翼端渦は、循環の大きさは同じで方向が反対である一対の直線渦列をなし

ている。Crow (2) は実機 B-47 の一対の翼端渦の 15 秒毎の変化を撮影した。図 3 にその写真を縮小して示す。2 本の対称な直線渦は相互干渉のため始めは対称な波状を呈するが、最後には渦輪の連鎖となる。カルマン渦列は、翼端渦のような直線渦対の列であるとも見ることが出来る。カルマン渦列の再配列の問題も、二次元流の安定問題としてではなく、このような直線渦対の安定問題として考えるべきであろう。

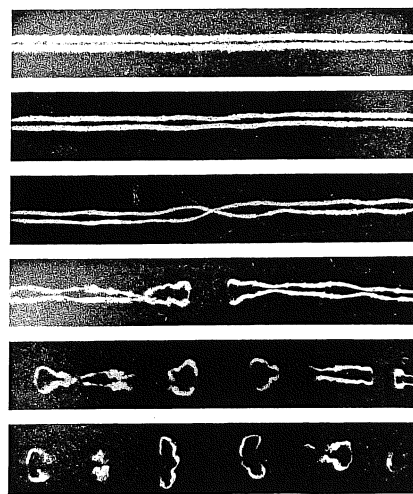


図 3 翼端渦の相互干渉

(3) R_{cr} 付近での円柱軸方向の周期性
円柱の抵抗係数がレイノルズ数の増加と共に急激に減少する臨界レイノルズ数 R_{cr} 付近から、円柱周りの流れに軸方向の周期性が現れてくる。その波長は円柱直径の 2 倍程度である。この周期性の原因は、前方淀み点付近の流線の曲率によって発生するゲルトラー渦に関連するものと思われる。

3. 回転円柱を過ぎる流れ

(1) 円柱表面の境界層の二重構造

水槽内の一様流の水平面内で流れに垂直に置かれた回転円柱の伴流を、上流で円柱軸に平行に設置された白金線から流出する水素気泡で可視化すると図 4 (3) が得られた。水素気泡は円柱の回転と同方向の流れの中にある。円柱直径 $d = 10$ mm, 一様流速度 $U = 2.78$ cm/sec, $Re = 214$, 円柱表面の回転速度 $U_p/U = 2.4$ 。

可視化された流れは、流れ方向と同時に円柱軸方向にも顕著な周期性を示している。流れは三次元的である。流れ方向の周期性はカルマン渦列によるものではないと思われるので、円柱軸に垂直な面内の流れを可視化した結果を図 5 に示す。こ

の結果から流れ方向の周期性はカルマン渦列に依るものであると思われる。これは当然の結果で

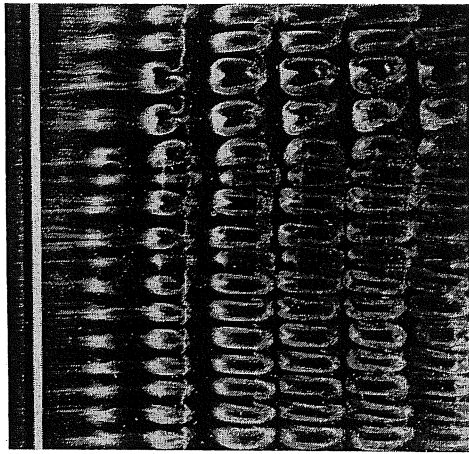
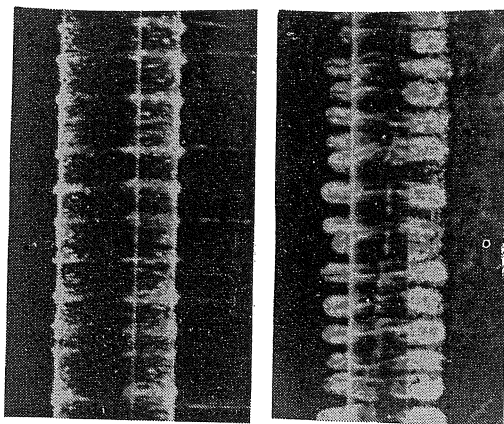


図4 一様流中の回転円柱の伴流



図5 回転円柱のカルマン渦列

あるとしても、円柱軸方向の周期性の原因は何か。カルマン渦列の渦が円柱軸方向に周期的であるということは、その元である剥離渦に周期性があるのではないか、円柱表面の境界層に周期性があるのではないか。この考えで回転円柱の表面近くに白金線を置いて可視化した結果を図6（a）に示す。 $U = 3.10 \text{ cm/s}$, $Re = 238$, $U_p/U = 2.2$.



(a) 流水中

(b) 静水中

図6 回転円柱表面の流れ

図中に、円柱表面に巻き付いた多数の渦が見られる。これらの渦はテイラー渦ではないかと思うられるので、静水中で円柱を突然回転させて、回転開始直後の流れを図6（b）に示す。円柱表面の境界層厚さで作ったにテイラー数がある値を超えると、テイラー渦が形成されると思われる。巻き付いている渦輪の円柱軸方向の波長は(a)も(b)も良く似ている。従って回転円柱の表面の境界層の、円柱に接する内層内にはテイラー渦が形成されていると思われる。

一様流中の静止円柱の前方淀み点近傍の流れには、Colak-Antic and Hassler（4）の実験に依れば、ゲルトラー渦が発生している。回転円柱の場合には、円柱表面に接する内層は円柱と共に回転していて、その中にテイラー渦が存在するが、これに接する外層が静止円柱の場合の境界層に対応すると思われるので、この外層内にゲルトラー渦が発生する可能性が考えられる。

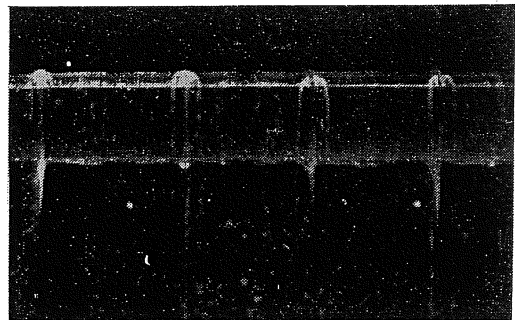


図7 回転円柱境界層外層の流れ

図7の流れを見ると、円柱軸方向の波長は円柱直径の2倍に近い。また円柱の上流側では一対の渦を形成しているが下流側では渦がみられなくて、真っ直ぐ下流へ流れ去っている。この円柱の上流側に現れた渦は、Colak-Antic and Hassler が淀み点付近で観察したゲルトラー渦と同じであるが、ここでは減衰によって残存したもののみであらうと思われる。減衰のために回転円柱の下流側では渦が見られない。

一様流中の回転円柱に付着して回転している境界層内層にはテイラー渦が発生し、内層に接した外層の前方淀み点付近にはゲルトラー渦が発生する。この渦は流れが前方淀み点から遠ざかるに伴って減衰する。それは流線の曲率半径が増加し、遠心力が減少し、曲率中心から遠ざかると速度が増加するからである。

（2）一様流中の回転円柱の伴流

図4に示した一様流中の回転円柱の伴流のパターンが、円柱の直後で出来始める様子を図8に示す。円柱直後に水素気泡発生 of 白金線がある。この白

金線から発生した水素気泡の流れが、交互に反対方向であることから、円柱境界層内層のテイラー

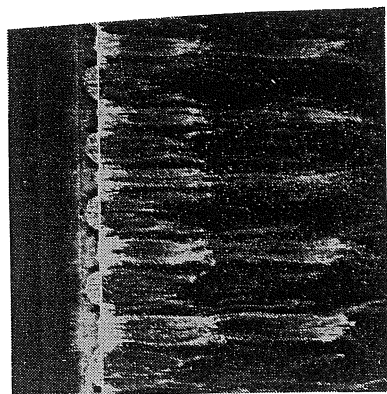


図8 回転円柱直後の流れ

渦の存在が推察される。この図8から図4の円柱軸方向の周期性は境界層内層のテイラー渦によることが分かる。またこの内層から剥離した剥離剪断層が形成する剥離渦にはテイラー渦を持つ内層の一部分も逆流して取り込まれていると考えなければならない。

ここには固体表面からの流れの剥離ではなくて、流体からの流れの剥離の問題がある。流線上のある点で流れが左右に分岐するためには、その点で流れは、一旦、速度=0 とならなければならない。従ってこの場合、所謂剥離点は、円柱上流側の淀み点と同様に、淀み点でもある。

個体壁の場合、剥離した流れと壁面に沿うて逆流する流れとに依って剥離渦が形成されるのと同様に、分離した流れと内層に接して逆流する流れとに依って渦が形成され、この渦が放出されてカルマン渦列を形成するのである。



図9 剥離渦

水槽の流れの中に円柱を鉛直に立てて、上から見下ろしたとき時計方向に回転させて、円柱の直ぐ下流の上方から見た円柱下流付近の流れの写真を図9に示す。上述の剥離渦が回転円柱の右側に細長く見えている。円柱の直後に見える白い小突起は、円柱の反対側の剥離渦であらうと思われる。右側の剥離渦は円柱に付着しないで離れているのが見られる。又、静止円柱の剥離渦は循環値も大きさも近似的に左右同じであるので、それらの渦が放出されて下流に安定なカルマン渦列を形成するが、回転円柱の両側の剥離渦は、循環値も形状も同じとは思われないので、安定なカルマン渦列の形成は困難であらうと思われ、図4に見られる様な安定な流れ場が形成される理由が不明である。

4. 結論

一様流に垂直な円柱を過ぎる流れにおいて、伴流内のカルマン渦列の各々の渦は円柱に平行ではなくて、ある程度の傾き角を持つ。これは剥離渦の放出が円柱軸に沿って同時でないためである。その原因は明らかでない。

回転円柱の場合は、円柱表面の境界層は内層と外層とから成る二重構造で、内層にはテイラー渦が発生して伴流内の回転軸方向の周期性の原因となる。外層の前方淀み点近傍にゲルトラー渦が発生するが、間もなく減衰する。外層は内層から剥離して剥離渦を作り、これを放出してカルマン渦列を形成する。この剥離渦にはテイラー渦を持つ内層の一部も含まれていて、カルマン渦列の渦軸方向の周期性の原因をなす。

一様流に垂直な二次元物体を過ぎる流れも、速度の擾乱により渦が発生したり、発生した渦の放出が左右されたりして、流れ場全体が三次元化する可能性がある。

参考文献

- 1) 奥出・大蔵: 日本航空宇宙学会誌、第44巻、第505号、(1996)、pp.105~111.
- 2) N.Van Dyke: An Album of Fluid Motion, (1982) p.69.
- 3) T.Matsui: Proc.of Euromech.90, (1977), VI.b.
- 4) Colak-Antic, P. and Hassler, H.: DEVLN Nachrichten, (1971), Heft 5, pp.184-186.