

No. 18

等加速度運動する円柱からの渦放出

戸田健二（都科技大院），稲澤歩，浅井雅人（首都大）

Vortex shedding from a circular cylinder
moving at a constant acceleration

K. Toda*, A. Inasawa** and M. Asai**

* Dept. of Aerospace Eng., Tokyo Metropolitan Institute of Technology

** Dept. of Aerospace Eng., Tokyo Metropolitan University

ABSTRACT

Vortex shedding from a circular cylinder moving at a constant acceleration is investigated experimentally. The cylinder installed in a linear-motor actuator system moves in the air at rest. The results show that the critical Reynolds number above which the self-sustained wake oscillation occurs due to the global instability of cylinder wake increases with the magnitude of the acceleration normalized by the cylinder diameter and the kinematic viscosity. It is also found that with increasing the acceleration, the Karman vortex street remains two-dimensional even at Reynolds numbers around 200 at which the vortex-dislocation does occur for the case of constant moving speed or steady oncoming flow.

Keywords : wake, Karman vortex street, accelerating circular-cylinder

1. はじめに

流れの中に物体が置かれたとき，広いレイノルズ数範囲にわたって後流中に極めて周期的ないわゆるカルマン渦列が現れる．とりわけ円柱後流については，カルマン渦列の周波数選択性や渦放出の臨界レイノルズ数さらに渦列構造のレイノルズ数による変化など，Nishioka & Sato^{1),2)}を初めとしてこれまでに多くの研究者により調べられている．Williamsonによる系統的な実験^{3),4)}および解説論文⁵⁾を参照すると，円柱後流はレイノルズ数と共に次のように変化する．まず，レイノルズ数が約50になると円柱後流におけるカルマン渦列が現れ， $Re = 180$ 程度までは二次元性を保つ．その後， $Re = 230$ 程度までは異なる2つのスパン方向周期性を持った三次元構造になるとともに，スパン方向に関する渦放出のタイミングがずれることに起因する渦列配置のずれ（vortex-dislocation）が出現する．

しかしながら，上記の観察はいずれも定常流れにおけるものであり，非定常運動する円柱後流に着目した研究は，円柱後流の発達やカルマン渦列の発生過程を調べる目的で瞬間的に加速させた実験^{6),7)}はあるものの，非定常性が後流構造自身に及ぼす影響を調べたものは筆者の知る限り見あたらない．自然界および工学上の多く流れが

非定常であることを考えると，非定常性の強さが後流を不安定に導く臨界レイノルズ数や周波数，渦列の構造にどのように影響与えるかは非常に興味深い．そこで本研究では，静止大気中を移動する走行装置に円柱を搭載することで加速および減速運動する円柱を実現し，後流中のカルマン渦列の諸特性が定常時と比べてどのように変化するかを調べた．

2. 実験装置および方法

実験は，4mの長さを有するリニアモーターアクチュエーター(THK-GLM20S)の走行部に図1に示すような円柱と計測装置で構成される測定部を搭載して行われた．測定部の移動速度はPCにより2m/s以下の範囲でプログラム制御されている．また，周囲からの外乱の侵入を防ぐために実験装置全体はアクリル板および木材合板で囲われている．モデルとして使用した円柱は真鍮製で，直径 $D = 3\text{mm}$ および 4mm ，スパン方向長は $L = 50D$ とし，厚さ3mm，幅30mm，高さ50mmのアルミニウム製の端板によりその断面中心が下面板から高さ45mmの位置に固定されている．下面板先端には剥離を抑える目的で鋭角前縁が取り付けられている．本実験での座標系は円柱スパン中央の断面中心を原点とし，流れ方向に x ，鉛直方向

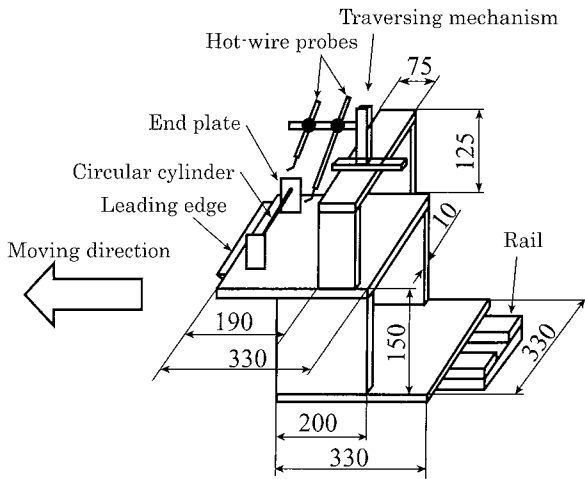


図1 測定部の概要.

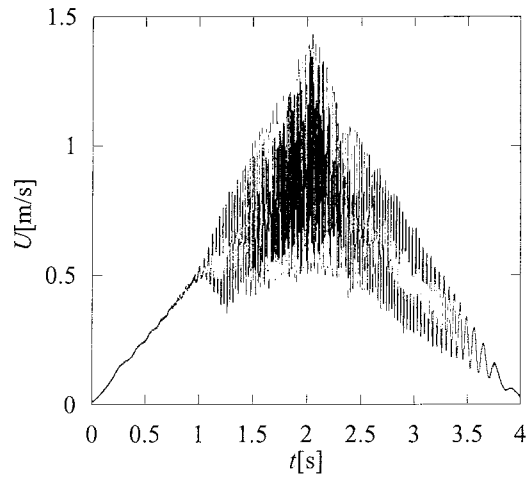


図2 後流速度波形の例 ($|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$, ($x/D=3$, $y/D=0.7$)).

に y , 円柱スパン方向に z である.

流れ場の測定には、I型熱線プローブを用いた。熱線の受感部は、直径 $5 \mu\text{m}$ 、長さ 1mm のタングステン線である。主流のモニタリングと円柱後流の計測を同時に行うために、2本のI型熱線プローブを用い、それらを x , y 方向にそれぞれ 45mm ずつ離し、 z 位置は一致させた状態でトラバース装置に取り付けてある。また、円柱後流中に発達するカルマン渦列の全体構造を把握するために、スモークワイヤ法による流れ場の可視化も行った。スモークワイヤは、熱線プローブと同様に走行装置に取り付けてあり、円柱と共に移動する。

3. 実験結果および考察

本研究では、円柱の非定常運動を「等加速度運動」に限定して実験を行った。すなわち、円柱は一定加速度で加速させられた後、同じ大きさの加速度で減速させられる。図2は加速度 $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$ で2秒間加速させた直後に減速させたときの円柱後流の速度波形である。運動開始 ($t = 0 \text{ s}$) から直線的に速度が増加し、 $t = 1 \text{ s}$ 付近から周期的な速度変動波形が始まっていることが分かる。これは、円柱後流に不安定波動が成長（ホップ分岐）することに対応しており、このような周期的な速度波形は円柱が停止する $t = 4 \text{ s}$ 付近まで見られる。

図3(a), (b)はそれぞれ加速度 $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$, $|a| = 1.53 \text{ m/s}^2$ で運動させた場合のレイノルズ数とストローハル数の変化を定常運動させた場合の結果と比較して示したものである。ここで、渦放出周波数を求めるにあたり、等加速度運動させた場合、渦放出周波数は時々刻々変化するのでFFT処理によるスペクトル解析は適していない。そこで、本研究では速度波形の極大値間の時刻差から周波数を算出した。無次元化に用いる代表速度は極大とな

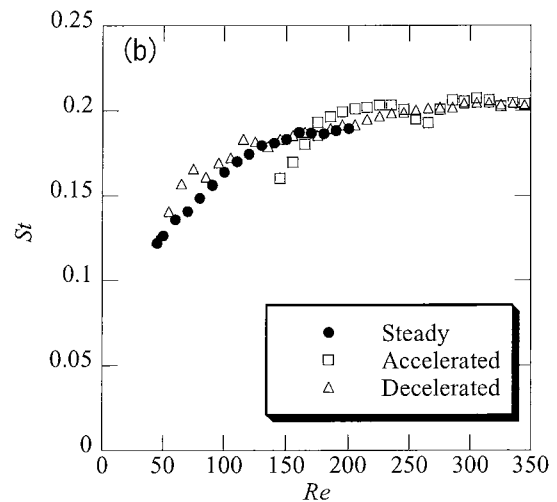
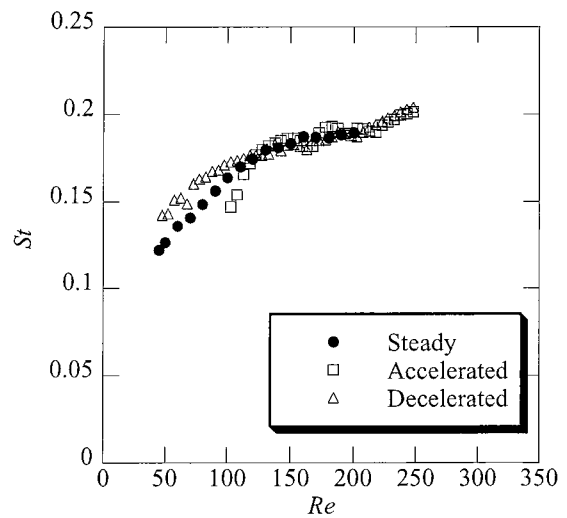


図3 レイノルズ数とストローハル数の関係 ($D = 3 \text{ mm}$) . (a) $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$, (b) $|a| = 1.53 \text{ m/s}^2$.

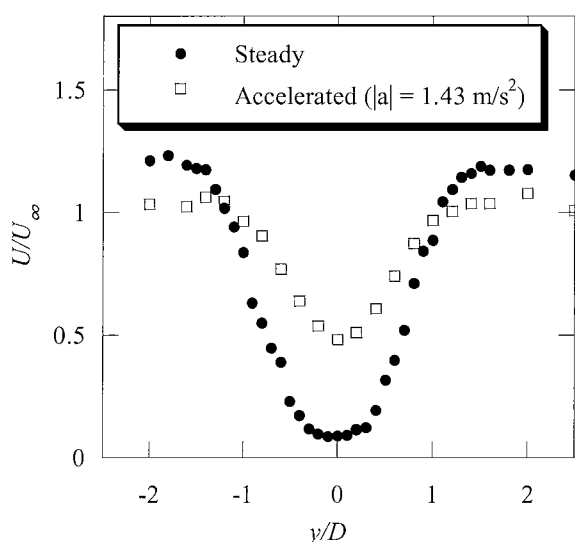


図4 後流速度分布の比較 ($D = 3 \text{ mm}$, $Re = 40$, $x/D = 2$, $|a| = 1.43 \text{ m/s}^2$)

る時刻における主流速度とし、周期的な速度変動波形が捉えられた最小のレイノルズ数を不安定性(全体不安定)開始の臨界レイノルズ数と定義している。図3で示されるプロットは各加速度において30回円柱を繰り返し走行させて得られた結果をあるレイノルズ数区間(5または10)ごとに平均したものである。

図3(a)で示される $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$ の場合、臨界レイノルズ数は $Re_c = 103$ まで上昇し、そのときのストローハル数は $St = 0.15$ である。これは、定常運動時の臨界レイノルズ数 $Re_c = 45$ の約2倍に相当し、ストローハル数は同じレイノルズ数(103)で定常運動させた場合の値(0.16)よりも少し小さい。加速度を $|a| = 1.53 \text{ m/s}^2$ と大きくすると、臨界レイノルズ数は $Re_c = 145$ に増加し、臨界時のストローハル数は $St = 0.16$ でほとんど変わらないがその後定常時の値まで急増する(図3b)。このように、加速度を大きくして非定常性を強くすると、渦放出開始直後のストローハル数が急激に増加することが分かった。一方、減速時はいずれの場合も $Re > 100$ では定常運動させた場合とよく一致しているが、 $Re < 100$ になると減速時の方が定常時よりも大きな値となっている。これは、 $Re > 100$ ではカルマン渦列が放出されており、その段階からレイノルズ数を下げても履歴効果、すなわちヒステリシスがあるためと考えられる。次に、加速により臨界レイノルズ数が増加する原因を探るために円柱後流の速度分布を計測した。図4は $|a| = 1.43 \text{ m/s}^2$ で加速運動させた場合の後流速度分布を定常の場合と比較したものである。結果はいずれの場合においても周期的な速度変動波形が後流中に現れない $Re = 40$ のものである。加速時には定常時と比べて後流幅が狭くなるとともに、 $y/D = 0$ に

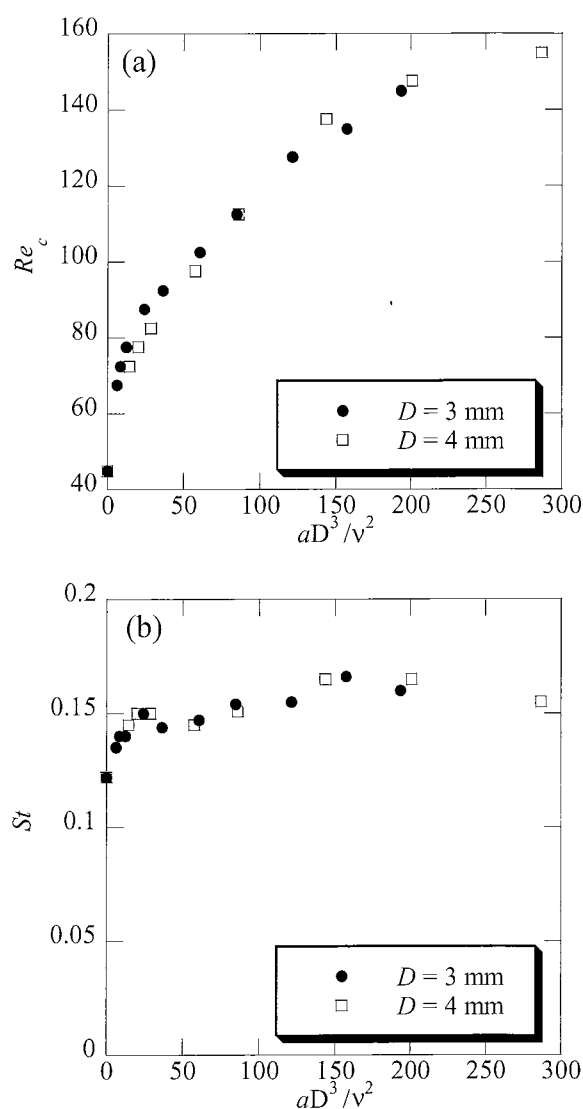


図5 無次元加速度と(a)臨界レイノルズ数および(b)臨界時のストローハル数の関係

における速度欠損量も小さく後流の発達が遅れている。従って、加速運動による円柱後流領域の発達の遅れが臨界レイノルズ数の増加をもたらしていると考えられる。

図5は、加速度の大きさと(a)臨界レイノルズ数および(b)臨界時のストローハル数の関係を異なる直径の円柱を用いて調べた結果である。加速度は、円柱直径および動粘性係数で無次元化してある。図5(a)のように、等速運動($a = 0 \text{ m/s}^2$)の場合、臨界レイノルズ数は約45であり、安定性理論⁹⁾から予測される臨界値46と良く一致する。円柱直径と動粘性係数により無次元化された加速度で整理することで臨界レイノルズ数が一致している。一方、図3でも述べたが、臨界時のストローハル数は無次元加速度の大きさによらずほぼ一定の値 $St = 0.15$ となっている(図5b)。以上のことから、加速度の増加に伴う非定常性の強さは臨界レイノルズ数には影響するものの、

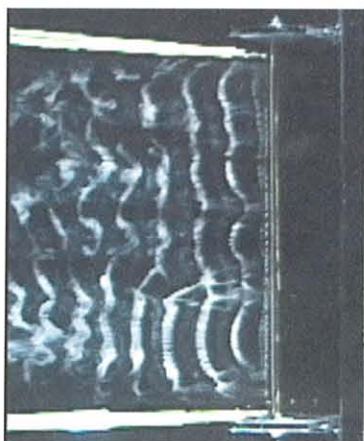


図6 渦構造の可視化の様子（等速運動時， $Re = 200$ ）

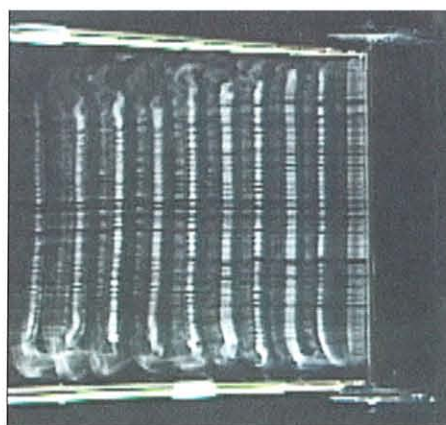


図7 渦構造の可視化の様子（加速運動時， $|a|=1.43 \text{ m/s}^2$ ， $Re = 200$ ）

臨界時のストローハル数にはほとんど影響しないように見える。

次に、加速運動がカルマン渦列の空間構造に及ぼす影響について可視化実験の結果を基に説明する。図6は $Re = 200$ で等速度運動させた場合の可視化結果である。 $Re = 200$ の定常運動時においては、円柱近傍から渦列の3次元化が起こり、図中央よりやや下方で渦列の配置がスパン方向にずれているいわゆるvortex-dislocationが観察できる。図7は $|a| = 1.43 \text{ m/s}^2$ で加減速させた場合について、 $Re=200$ まで速度が増加したときの可視化写真である。加速して $Re = 200$ に到達した時に見られる渦構造は円柱の軸と平行で、下流に至るまできれいな2次元性を維持している。このような2次元性の維持（3次元化の抑制）は加速度がより小さな $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$ の場合においても観察された。一方、 $|a| = 0.48 \text{ m/s}^2$ で $Re = 200$ から減速させた場合、 $Re = 150$ になったとき図6同様の渦列の3次元化が見られたものの、 $|a| = 1.43 \text{ m/s}^2$ においては、円柱が停止する直前まで2次元的な渦構造が維持された。

4. まとめ

等加速度運動する円柱からの渦放出について実験的に調べた結果をまとめると以下のようなになる。

1. 円柱を加速させることで後流の発達が遅れ、その結果臨界レイノルズ数が大きくなる。
2. 臨界時のストローハル数は加速度の大きさにはほとんど依存しないが、非定常性が強くなるとストローハル数の急激な増加が起こる。
3. 加速度と臨界レイノルズ数の関係は、加速度を円柱直径と動粘性係数で無次元化することで整理される。
4. 加速および強く減速させることで後流中に存在する渦構造の3次元化が抑制される。

参考文献

- 1) Nishioka M. and Sato H.: J. Fluid Mech., **65**, (1974), pp.97-112.
- 2) Nishioka M. and Sato H.: J. Fluid Mech., **89**, (1978), pp.49-60.
- 3) Williamson C. H. K.: J. Fluid Mech., **206**, (1989), pp.579-627.
- 4) Williamson C. H. K.: J. Fluid Mech., **243**, (1992), pp.393-441.
- 5) Williamson C. H. K.: Annu. Rev Fluid Mech., **28**, (1996), pp.477-539.
- 6) Bouard R. and Coutanceau M.: J. Fluid Mech., **101**, (1980), pp. 583-607.
- 7) Jeon D. and Gharib M.: J. Fluid Mech., **519**, (2004), pp.161-181.
- 8) Jackson C. P.: J. Fluid Mech., **182**, (1987), pp. 23-45.