A205 流体中で旋回運動する 円柱まわりの流れ

神奈川工科大学 石綿良三〇

神奈川工科大学 川口隆史

Flow around a Swinging Circular Cylinder in a Stationary Fluid

Ryozo ISHIWATA*, Takashi KAWAGUCHI*

It is known that manipulators of marine robots are oscillated by Karman-vortex shed from themselves when they move in a water. To analyze fundamentally this, flows around a circular cylinder turned round its end have been visualized by means of hydrogen-bubble method in this study.

The separation vortices generated in the neighborhood of the other end of cylinder were periodically shed from it. The vortex shedding made continuously progress toward the center of rotation, and vortex filaments like ox-horn were formed. They were not continued to the center of rotation but broken off in the middle of the cylinder. The locations of breakaway point were scattered in every vortex shedding. Therefore the shedding frequency was higher in outer region than in inner.

1. はじめに

近い将来、水中ロボット等の水中作業機械が軽量化、高速化されていくことが予測される。これに伴って、作業時にマニピュレータに作用する流体力が本体重量に比べ相対的に大きくなり、カルマン渦の発生によるマニピュレータの振動、あるいは位置決め制御に対する流体力の影響などの問題が生じてきた⁽¹⁾。本研究では特にカルマン渦による振動を対象とし、基礎研究として、マニピュレータを模擬した有限長円柱を水中でその一端を旋回中心として定常旋回させ、そのときの円柱まわりの流れを可視化した。この場合の流れは円柱軸方向の遠心流れを伴い、さらに周速が旋回半径に比例して変化するので完全な三次元流れとなる。仮に半径方向にストローハル数が一定と考えると、渦発生周波数は半径に比例して変わることになるが、実現象としてこのようなことは起こり得ないと考えられる。半径方向にある一定領域ごとに同一の周波数で渦が発生すると考える方が自然である。本研究では、このような流れの構造を明らかにすることを目的とした。

* Dept. of Mech. Systems Eng., Kanagawa Institute of Technology,
1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa 243-02.

2. 実験装置・方法

実験装置の概略をFig.1に示す。供試円柱（直径 $d = 30\text{mm}$ 、長さ $l = 300\text{mm}$ 、アスペクト比 $l/d = 10$ ）はステッピング・モータによって定常回転させられる。円柱駆動軸の途中にはトルク変換器とロータリ・エンコーダがあり、それぞれトルクと回転角が検出できるようになっている。水槽は $1200 \times 1200 \times 900\text{mm}^3$ であり、4方向に $710 \times 610\text{mm}^2$ の観測窓がついている。水は深さ 700mm とし、そのほぼ中央の水平面内で円柱を回転させた。照明は 500W の写真用アイランプ（デイライトカラー用）または 500W のビデオ用ライト（ハロゲンランプ）を用い、左右から当てた。照明光は円柱と直交するスリット光（幅 $20 \sim 30\text{mm}$ 程度）か、あるいは流れ場全体の照明とした。可視化法として水素気泡法を用い、Fig.2のように旋回円柱の近傍に円柱から $1 \sim 2\text{mm}$ の距離に電極線を張り、円柱とともに回転させた。撮影は水平方向からと上方からの2種類で、それぞれ写真撮影とビデオ撮影の両方を行った。なお、角速度は $\omega = 0.12 \sim 0.14\text{rad/s}$ ($1.14 \sim 1.32\text{rpm}$)、先端速度に基づくレイノルズ数は $Re = d l \omega / \nu = 760 \sim 1020$ の範囲である。

Fig.1 Schematic view of experimental apparatus
(unit: mm)

Fig.2 Test cylinder (unit: mm)

3. 実験結果

水平方向からの可視化写真の例をFig.3とFig.4に示す。いずれも、角速度 $\omega = 0.13\text{rad/s}$ の場合であり、Fig.3は先端付近 ($r/l \div 0.7$) だけをスリット光で照らしたものの、Fig.4は全体を照らしたものである。Fig.3ではカルマン渦が形成されていることが確認できる。Fig.4では形成されているカルマン渦が半径方向で重なり合って見え、カルマン渦は明確ではない。したがって発生するカルマン渦は二次元的ではないと考えられる。

Fig.3 Wake of swinging cylinder
($\omega = 0.13\text{rad/s}$, illuminated by slit lights)

このことは上方からの観測から明らかとなる。Fig. 5はこの流れを斜め上方から撮影した例である。円柱背後に形成されたはく離渦は円柱先端付近から離脱が始まり、渦糸状に連なって順に内周側へと伝わっている。先端付近の渦の離脱はほぼ周期的であり（先端付近のストローハル数は円柱まわりの二次元流れの場合と同程度）、カルマン渦の特徴が現れている。Fig. 6もやはり上方からの撮影例である。円柱から離脱した渦糸が3本見られる。渦の離脱は旋回中心付近まで伝わるのではなく、途中の半径位置で渦糸は切れて円柱から離れている。

ビデオ撮影と直接観察からさらに以下のことが明らかとなった。半径方向の遠心流れは、内周側（ $r/l < 0.5$ ）では比較的速度が大きく、先端付近（ $r/l \approx 1$ ）では遠心流れはそれほど顕著ではない。先端部では円柱背後への三次元的な流れの回り込みと渦の離脱を繰り返しているようである。

4. 渦離脱のモデル

以上の可視化結果から、流れの構造を表す簡単なモデルを考えた。仮定は次の通りである。①各半径位置で円柱背後に形成されるはく離渦の成長速度 $d\Gamma/dt$ はその位置における周速 $r\omega$ に比例する。②はく離渦の循環 Γ がある一定値 Γ_s 以上になったときその点から渦の離脱が始まる。 Γ_s の値は二次元流れの場合にストローハル数が0.20になるように定め、アスペクト比の関数となる。③ある点で渦の離脱が起こったとき、その近傍の点に離脱が伝わるか、渦糸が途切れるかは近傍の点の循環がある一定値 $a \cdot \Gamma_s$ （定数 a は、 $0 < a < 1$ であり、パラメータとして指定する）より大きいのか、小さいかで判断する。 $\Gamma \geq a \cdot \Gamma_s$ のとき離脱が伝わり、 $\Gamma < a \cdot \Gamma_s$ の

Fig. 4 Wake of swinging cylinder
($\omega = 0.13 \text{ rad/s}$, illuminated over all)

Fig. 5 Vortex shedding from cylinder
($\omega = 0.13 \text{ rad/s}$, clockwise rotation)

Fig. 6 Vortex shedding from cylinder
($\omega = 0.14 \text{ rad/s}$, counterclockwise rotation)

とき離脱は終わり、そこで渦糸が途切れる。④離脱の伝播速度 V_s は半径方向に一定とし、角速度 ω に比例する。 $V_s/\ell\omega$ の値はパラメータとして指定する。⑤渦の離脱が起こった直後、その点の循環はゼロになる。⑥回転方向の異なる渦どうしの干渉はなく、それぞれ独立に成長、離脱する。また、離脱した渦の干渉もないものとする。⑦離脱した渦は周速 $k r \omega$ (定数 k は、 $0 \leq k < 1$ とし、パラメー

タとして指定する) の強制渦状に運動する。⑧半径流 V_r は、 $V_r/\ell\omega = c r^* \cdot (1 - r^*) (1/2)^{r^*}$ と仮定する。 c は定数 (パラメータとして指定)、 $r^* = r/\ell$ である。

以上の仮定の下に、渦発生のシミュレーションを行った一例を Fig. 7 に示す。各パラメータは図中に示した通りである。記号 $\circ$ と $\bullet$ はそれぞれ回転方向が逆の渦を表し、記号の大きさはその渦の循環の大きさに対応している。図中の左側は横軸に無次元半径 r^* 、上段に無次元半径速度、下段に渦発生頻度を表している。外周ほどはく離渦の成長が速いため、ほとんどの場合、外周から渦の離脱が始まり、それが内周へと伝わっていくという可視化結果に一致している。外周では規則的に離脱が起こっているが、その渦糸が途切れる半径位置は毎回異なっている。Fig. 7 の例を見ると、外周側の渦発生頻度の約半分の頻度で渦が発生している領域がある。つまり、内周でははく離渦の成長が遅いため、外周からの離脱がおよそ 2 回につき 1 回の割合で伝わる領域が存在することを表している。この規則性までは実験的に確認できていないが、離脱が到達する半径位置が毎回異なり、結果として外周ほど渦発生の頻度が高く (平均ストローハル数が大きく) なることは本モデルで説明できる。本モデルはその妥当性やパラメータの決め方など実験的に検証すべきことがあるが、はく離渦の離脱の形態を定性的に表せるものとする。

5. まとめ

定常旋回する円柱からはく離渦はほぼ規則的に外周から離脱を始め、順に内周へと伝わっていく。このとき離脱が終わる半径位置は毎回異なり、結果的に外周ほど渦発生の頻度が高くなることがわかった。本研究は平成元年度文部省科学研究費奨励研究の補助を受け、ここに謝意を表する。

文献 (1) 石綿、川口、機械学会講演概要集、No. 880-4 (1988)、p7.

Fig. 7 Simulation of vortex shedding

($\ell/d=10$, $k=0.1$, $a=0.5$, $V_s/\ell\omega=0.5$, $V_{rmax}/\ell\omega=0.1$)