

京都大学 工学部 正員 岩垣雄一
 京都大学 工学部 正員 石田 啓
 京都大学 研究生 学生員 喜岡 渉

1. まえがき 定常流中に設置された円柱のまわりの流況と円柱の受ける流体力との相互関係については、従来、多数の研究が行われているが、波によって生じる円柱上の流れの剥離あるいは後流渦に関する研究は少ない。本研究では、波力の発生機構を明らかにするための一過程として、層流境界層の剥離の特性について、理論的に検討する。

2. 理 論 座標系を図-1に示すが、層流境界層内の円柱に沿う方向の水粒子速度を u とすれば、境界層の剥離点は、 $\partial u / \partial y|_{y=0} = 0$ を満たす点である。著者らはすでに、境界層近似を用いることにより、 u の第2近似解 $u_{2nd} = u_0 + \epsilon_1 u_1$ を誘導したが、これを用いると、剥離点は、

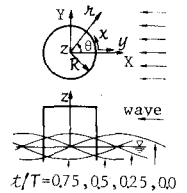


図-1. 座標系

$$\partial u_{2nd} / \partial y|_{y=0} = (\pi H / T) \cdot (k \sqrt{Re} / \sqrt{2}) \cdot (\partial u_0' / \partial \eta' + \epsilon_1 \cdot \partial u_1' / \partial \eta')|_{\eta=0} = 0, \quad (1)$$

を満足する点として求めることができる。ここに H は波高、 T は周期、 k は波数、 Re は波速 C 、動粘性係数 ν および k を用いた便宜的な Reynolds 数 ($Re = C / \nu k$)、 ϵ_1 は波形勾配のオーダーを示す微小量 ($\epsilon_1 = \pi H / L$) であり、また $\eta' = (k \sqrt{Re} / \sqrt{2}) y$ 、 $u_0' = u_0 / (\pi H / T)$ および $u_1' = u_1 / (\pi H / T)$ である。さらに $\partial u_0' / \partial \eta'|_{\eta=0}$ および $\partial u_1' / \partial \eta'|_{\eta=0}$ は、それぞれ

$$\partial u_0' / \partial \eta'|_{\eta=0} = (1 + i) U_0 e^{i\theta t}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial u_1' / \partial \eta'|_{\eta=0} = & \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 e^{i\theta t} + (1 - \frac{1}{2}) (1 - i) (U_0 \hat{u}_{0x} + \hat{w}_0 \hat{u}_{0z}) e^{2i\theta t} + (\frac{5}{2} - \frac{7\sqrt{2}}{4}) (1 - i) (U_0 \hat{w}_{0z} - \hat{w}_0 \hat{u}_{0z}) e^{2i\theta t} \\ & + \frac{1}{2} \{ (\hat{u}_0 \hat{u}_{0x} + \hat{u}_0 \hat{u}_{0z}) + (\hat{w}_0 \hat{u}_{0x} + \hat{w}_0 \hat{u}_{0z}) \} - \frac{1}{2} \{ (\hat{u}_0 \hat{u}_{0x} - \hat{u}_0 \hat{u}_{0z}) + (\hat{u}_0 \hat{w}_{0z} - \hat{u}_0 \hat{w}_{0z}) \}, \quad (3) \end{aligned}$$

のようになる。ここに ϵ_2 は境界層厚と円柱半径 R との比のオーダーを示す微小量 ($\epsilon_2 = \sqrt{\nu T / 2\pi} / R$) であり、 θ は角周波数である。なお、 U_0 および $\hat{w}_0$ は、それぞれ、円柱壁面上の x 方向および z 方向の円折波の水粒子速度を $\pi H / T$ で割って無次元化し、さらに時間項 $e^{i\theta t}$ を除いたものであるが、それらの右下添字は、添字に関して偏微分することを、また $\wedge$ および $\hat{}$ は、それぞれ実部および虚部を採ることを示す。

ところで、式(1)より、剥離点を陽の形に表示することは極めて困難であり、したがって、実際の剥離点の算出に際しては、角度 θ を順次 i ずつ変化させ、式(1)左辺の符号が変わる時の θ を求める方法を用いた。

3. 計算結果 境界層内 ($r/R = 1.02$ の点) の水粒子速度 u_{2nd} の時間変化を図-2(a), (b) に示すが、進行波の最大水粒子速度 U_m を用いた場合の Keulegan-Carpenter 数 ($[K.C.]_m = U_m \cdot T / 2R$) は、(a), (b) とともに 6 である。(a) は (b) に比べて、比較的短周期の波形勾配の大きい波の場合であるが、円柱中心位置が波の峯の位相となる $0 < t/T < 0.5$ では、 $\theta = 150^\circ$ における u は、 $t/T = 0.25$ 付近から負の値になり、円柱背面で剥離が発生していることがわかる。なお、 $0.5 < t/T < 1.0$ の谷の位相では、 $\theta = 30^\circ$ の u の値が正となり、円柱前面で剥離が発生する。また (a) と (b) を比較すれば、剥離の発生し始める位相は (b) の方が早いことがわかる。

図-3に、剥離点の時間変化の一例を示すが、主流速度の方向および大きさは波の位相により変化するため、剥

離脱は、 z/h の増加とともに、峯の位相では $\theta = 180^\circ$ 方向から $\theta = 0^\circ$ 方向へと移動し、谷の位相ではその逆となる。特に、K.C.数が小さい場合には、剥離脱は短時間に急変するが、こういった剥離現象は非定常境界層特有のものであり、境界層内の水粒子速度の位相が主流速度の位相よりも早く進むことがその発生原因である。一方K.C.数が大きくなると、 $t/T = 0.25$ 前後では、剥離脱の時間変化はゆるやかになり、定常流の剥離に近づくものと考えられる。

図-4は、aからfの6種類の波について、剥離脱の鉛直方向の変化を示すが、計算条件は、次元量で示すと、例えば水深 $h = 40\text{ cm}$ 、 $R = 1.5\text{ cm}$ 、 $\nu = 1.112 \times 10^{-2}\text{ cm}^2/\text{sec}$ とすれば、周期 T は、aからfまで順に、0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 secとなる。なお、それぞれの波高は、 $z/h = -0.125$ における $[K.C.]_m$ が6となるように選定し、また位相は $t/T = 0.25$ とした。図より短周期の波では、水面近くにおいてのみ剥離が発生するが、波が長周期になると、剥離脱は鉛直方向にほとんど変化しないことがわかる。これらの剥離脱の鉛直方向の変化特性は、水粒子速度の鉛直方向の変化特性に基因することはいうまでもない。

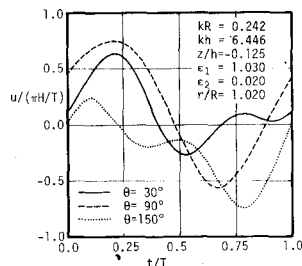
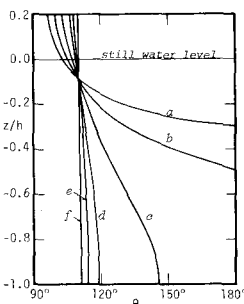
図-5は、 kR をパラメータとし、K.C.数と剥離脱との関係を示したものであるが、 $kR \geq 0.01$ の範囲内では、K.C.数が2より小さいと剥離は発生しない。しかし、K.C.数が増加するにつれ、剥離脱は $\theta = 180^\circ$ から 90° の方向へ移行し、各 kR の値ごとに、一定の剥離脱に漸近する。さらに、K.C.数が同じ場合には、 kR が小さいほど剥離角は小さくなる。ところで、この計算に用いたReynolds数の値は、 10^4 であるが、Reynolds数のみを10から 10^6 の範囲内で変化させても剥離脱の変化はほとんど見られず、また kh を0.1から5.0の範囲内で変化させた場合にも、同様に剥離脱は変化しなかった。

4. 結 語 主流の場合波動の場合には、円柱上に発達する層流境界層の剥離脱は、位相とともに変化すると同時に、鉛直方向にも変化し、その変化特性は、主としてK.C.数と kR の値に支配され、Reynolds数にはほとんど支配されないことがわかった。しかし定常流の場合の剥離脱は、境界層近似を用いた理論では、Reynolds数に無関係に定まるが、実験ではある程度Reynolds数により変化することを考えれば、波の場合の剥離脱についても、実験によりK.C.数あるいはReynolds数と剥離脱との関係を調べる必要がある。実験によるこうした理論の妥当性の検討については、海洋工学講演会において発表する予定である。

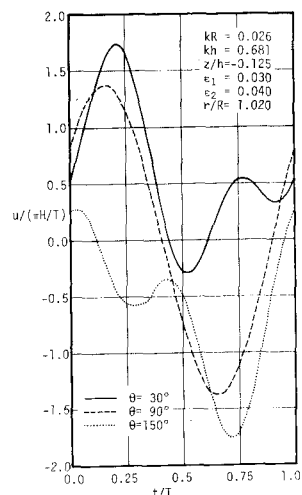
参考文献

- 1) 岩垣雄一・石田 啓: 波動により円柱上に発達する3次元層流境界層について、第21回海洋工学講演会論文集、pp. 1~6, 1974.

図-4 剥離脱の鉛直方向変化



(a)



(b)

図-2 U_{2nd} の時間変化

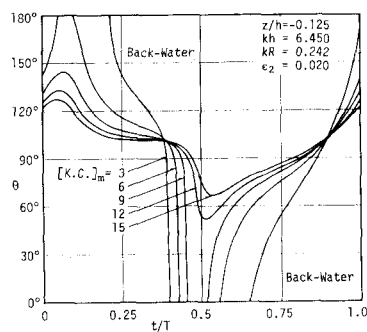


図-3 剥離脱の時間変化

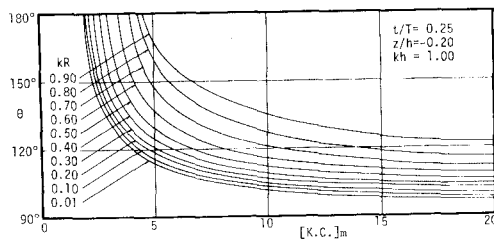


図-5 K.C.数による剥離脱の変化