A103

船舶抵抗低減のための気泡導入装置に関する研究 — 曳航円柱による気液界面の変形と気泡生成に関する可視化実験 —

熊谷 一郎[○] (北大), 中村 直哉 (北大), 村井 祐一 (北大)

田坂 裕司 (北大), 武田 靖 (北大)

A Towing-tank Experiment on Dynamics of Air Bubble Introducer for Drag Reduction of Ships — Flow Visualization of Air Entrainment and Bubble Formation by the Flow Past a Cylinder beneath a Free Surface —

Ichiro KUMAGAI, Naoya NAKAMURA, Yuichi MURAI,

Yuji TASAKA and Yasushi TAKEDA

ABSTRACT

We have conducted laboratory experiments on bubble formation by the flow past a circular cylinder beneath a free surface in order to understand the mechanism of the air bubble introducer for drag reduction of ship. At large Reynolds and Froude numbers, surface deformation becomes substantial in the downstream of the cylinder and wave breaking with air entrainment occurs. The regime diagram as a function of Re and Fr numbers shows a threshold of bubble formation, which helps to improve the air bubble introducer for drag reduction of ships.

Keywords : Drag reduction, Air bubble entrainment, Free surface, Circular-cylinder, Dynamics

1. 緒 論

気泡による船舶の正味の摩擦抵抗低減は、空気をいかに効率的に船底へ導入し微小気泡を発生させるかにかかっている。我々は船底に水中翼を装着した気泡導入装置を開発し、ほぼ大気圧のままそれらを実現することに成功した。しかしながら、気液界面直下を運動する物体によってその界面がどの程度変形し、どのように気体が液体中に取り込まれていくのかについては良くわかっていない。そこで我々は、最も簡単な形状の1つである円柱を気液界面直下において一定速度で運動させ、界面形状や気泡発生が、Reynolds数、Froude数、無次元深さによってどのように変化するか室内実験によって調べた。

2. 実験装置・方法およびパラメータ

2.1 実験装置・方法

実験装置の画像を Fig. 1a に示す。0.5×0.5×5 m (長さ) の水槽に深さ 0.35 m まで水道水を満たし、円柱 (直径 $d=20$ mm, 長さ 350 mm) を水面下 (深さ h) に沈めた。円柱は、その長軸を運動方向と直交させた状態にし、水槽と並行して設置された直動ステージにより一定速度 U_0 で水平方向に運動させ、円柱後方にできる気液界面の窪み量 (最大深さ w) を計測した (Fig. 1b)。実験の様子は、水槽脇に設置した高速度カメラ

(Photron 社製, 250 frames/sec, テレセントリックレンズ) を用いて撮影した。水槽下部からハロゲンランプのライトシートを照射し、水に混入させたトレーサの動きから流れ場を可視化した。また、気液界面からの気体の取り込みの様子を撮影するために、円柱とともに運動するデジタルカメラを円柱上部に設置した。

Fig.1 (a) Experimental setup, (b) close-up view of the flow around a circular cylinder.

2.2 実験パラメータ

境界のない流体中を一定速度 U_0 で運動する円柱周りの流れは古典的な問題として昔から数多くの研究がなされており、一般にその振る舞いは Re 数 ($Re(d) = U_0 d / \nu$) によって整理されている¹⁾。本研究のように、それに自由境界面が1つ増えた場合には、無次元深さ ($a = h/d$) や Fr 数 ($Fr(d) = (U_0^2 / g d)^{1/2}$, $Fr(h) = (U_0^2 / g h)^{1/2}$) といった無次元数を考慮する必要がある^{2,3)}。自由境界を含む円柱周りの流れに関する研究は比較的少なく^{2,3)}、特に高 Re 数・高 Fr 数領域における現象の理解はあまり進んでいない。そこで本実験では、 $2 \times 10^3 < Re(d) < 2 \times 10^4$, $0.14 < a < 2.41$, $0.21 < Fr(d) < 2.2$, $0.14 < Fr(h) < 5.85$ の広いパラメータ領域で実験を行った。

Fig.2 Spatio-temporal distribution of the air-water interface at the position of the high speed camera. (a) small Re and Fr , (b) large Re and Fr .

Fig.3 Maximum depression of the air-water interface (w) as a function of U_0 .

3. 実験結果

Fig. 2 は、高速度カメラで得られた画像の中央縦1列(幅 1 pix)を時系列で並べた図の例である。低 Re 数・低 Fr 数領域 (Fig. 2a) では気液界面の変形量が小さく、

空気が水中に巻き込まれることはなかった。しかしながら、高 Re 数・高 Fr 数領域 (Fig. 2b) では、円柱背後の波が高くなり過ぎて崩れる現象 (wave breaking) が起こった。その際、空気が水中に取り込まれ、気泡が生成された。Fig. 2b の画像中、明るく輝いている部分は、生成された気泡からの強い散乱光である。

Fig. 3 は、Fig. 2 を用いて円柱通過後の最大窪み量 (w) を計測した結果である。円柱の進行速度 U_0 が大きくなるにつれて最大窪み量 w が大きくなり、ある速度以上になると一定の値を取るようになる。円柱の上から撮影した画像によると、この遷移は波が崩れて気泡が生成され始める領域と一致しているようである。

Fig. 4 は、 $Re(d)$ と $Fr(h)$ を用いた気泡の生成条件に関する相図である。データ数が少ないものの、この図から気泡の生成領域と非生成領域の住み分けが確認できる。

Fig.4 Regime diagram of bubble formation by a cylinder moving beneath the air-water interface.

Open and closed symbols show non-existence and existence of bubble formation, respectively.

4. 結論

気液界面直下を水平方向に運動する円柱周りの流れと円柱背後の界面の最大変形量を調べるための流体実験を行った。 Re 数・ Fr 数が大きい場合、円柱背後の波が崩れ、それに伴って空気が水中に取り込まれ、気泡が生成される。気泡生成の境界は、 Re 数と Fr 数に依存する。

参考文献

- 1) Williamson, C.H.K.: Vortex dynamics in the cylinder wake, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 28 (1996) pp. 477-539.
- 2) Sheridan, J., Lin J.-C., and Rockwell, D.: Flow past a cylinder close to a free surface, *J. Fluid Mech.*, 330 (1997) pp. 1-30.
- 3) Reichl, P., Hourigan, K., and Thompson, M.C.: Flow past a cylinder close to a free surface, *J. Fluid Mech.*, 533 (2005) pp. 269-296.