水面下を等速運動する柱状物体による碎波と気泡生成*

熊谷 一郎^{*1}, 村井 祐一^{*1}
田坂 裕司^{*1}, 中村 直哉^{*2}Breaking Wave and Bubble Generation by
a Two-Dimensional Body Moving Beneath an Air-Water InterfaceIchiro KUMAGAI^{*3}, Yuichi MURAI,
Yuji TASAKA and Naoya NAKAMURA^{*3} Faculty of Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8 Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

We have conducted laboratory experiments on air-bubble generation by a submerged two-dimensional body moving at a constant velocity U_0 in order to understand the fundamental flow physics of marine constructions such as pipe lines close to the air-water interface. Measurements of the free surface profile and visualization of the air bubbles yield the threshold and the regime diagrams of the bubble generation, which are described by cross-sectional shape of the cylinders, Reynolds number ($Re_d = U_0 d / \nu$, where d and ν are the vertical thickness of the cylinders and kinematic viscosity of the water, respectively), Froude number ($Fr_h = U_0 / (gh)^{1/2}$, where h is the depth of the cylinders), and normalized depth of the cylinder ($a = h/d$). For circular cylinders, as Re_d and Fr_h numbers increase, the surface deformation becomes substantial in the downstream of the cylinder and breaking wave with air entrainment occurs. The bubble generation by the breaking wave is also observed in the case of the elliptic cylinder although the condition of the bubble generation in the Re_d - Fr_h regime diagram is different from that observed in the case of the circular cylinder. In any cases of the cylinders, the ratio of the wave height to the wave length, which should be the physical criterion of the breaking wave with bubble generation, is about 0.1.

Key Words: Multi-Phase Flow, Wave, Bubble, Cylinder, Breaking Wave, Air-Water Interface

1. 緒 言

20世紀はじめに Bénard の実験⁽¹⁾によって観察された、いわゆる Kármán 渦列などの円柱を過ぎる流れに関する研究は、古典的な問題として昔から数多くの研究がなされている^{(2)~(4)}。一方、沿岸のパイプラインや海上に浮かぶ柱状構造物などに見られる自由境界近傍における円柱周りの流れ現象は、碎波が与える構造物への影響や碎波にともなう大気-海洋間の気体輸送などにおいて重要な問題であるが、流体実験・数値実験ともに研究例は比較的少なく、特に高 Froude 数、高 Reynolds 数領域における我々の知見は乏しい⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

また最近著者らは、海水面直下を運動する水中翼の背面にできる負圧効果を利用した船舶の摩擦抵抗低減技術のための空気導入装置⁽⁷⁾の最適化を行っている⁽⁸⁾が、その揚力係数の水深依存性⁽⁹⁾や碎波に伴う抵抗増加⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾など、様々な因子が複雑に絡み合っているた

めに現象の理解が難しく、自由界面の影響を受ける柱状物体まわりの流れに関する流体力学的な基礎研究が必要とされている。

そこで本研究では、単純な形状である2次元の円柱および楕円柱を水面下で曳航し、柱状物体の水深 h 、そして曳航速度 U_0 を系統的に変えた実験を行い、気液界面の形状と流れの振る舞いを調べたので、その結果を報告する。

2. 問題設定と無次元パラメータ

図1は、水面下を等速で運動する2次元物体(代表長さ d)の様子を表したものである。「柱状物体を過ぎ

Fig.1 Sketch of the flow around a cylinder moving beneath a free surface

* 原稿受付 2010年4月19日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8)。

^{*2} 准員, (株)アトックス (〒104-0041 東京都中央区新富2-3-4)。

E-mail: kumaton@eng.hokudai.ac.jp

る一様流」の振る舞いは一般に以下に定義する Reynolds 数によって整理されている。

$$\text{Reynolds 数: } Re_d = U_0 d / \nu \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで ν は水の動粘性係数である。本研究における問題設定は、この「柱状物体を過ぎる一様流」に自由界面を1つ加えただけの状況に相当するが、現象の記述には、この Re_d 数に加えて少なくとも以下の無次元数を考慮する必要があると考えられ、問題はかなり複雑になる。

$$\text{Froude 数: } Fr_h = U_0 / (gh)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{無次元水深: } a = h/d \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{動粘性係数比: } \gamma = \nu_{\text{air}} / \nu \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Weber 数: } We = \rho U_0^2 s / \sigma \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで h , ν_{air} , σ , s はそれぞれ、柱状物体の水深、空気動粘性係数、気液界面の表面張力とそれに関わる特徴的な長さスケール(気泡サイズあるいは界面の振幅程度)である。柱状物体が円柱でない場合にはさらに、柱状物体の形状(アスペクト比: l/d)や迎え角 θ も流れに影響を与える重要なパラメータとなる。

上記のパラメータの内、本研究では、 Re_d , Fr_h , a を系統的に変化させ、表1に示す広いパラメータ範囲

で実験を行った。2流体間の動粘性係数比 γ と We 数は、空気-水系を用いたため、実験を通して同条件であり、動粘性係数比は $\gamma \sim 17$ 、Weber 数は $s \sim 1 \text{ mm}$ の気泡サイズに対して $We \sim 14$ 程度である。

3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図2に示す。0.5×0.5×5 m の水槽に深さ 0.35 m まで水道水(あるいは塩水)を満たし、円柱(直径 $d=20 \text{ mm}$, 長さ $L=350 \text{ mm}$)あるいは楕円柱(長径 $l=50 \text{ mm}$, 短径 $d=10 \text{ mm}$, 長さ $L=400 \text{ mm}$)を水面下(水深 h)に沈めた。柱状物体は、その長軸を運動方向と直交させた状態(y 軸に平行)にし、水槽と平行して設置されたリニアサーボアクチュエータ(IAI 製 N15SS, 最大加速度 3 G, 最高速度 2.5 m/s)により一定速度 U_0 で水平方向(x 方向)に運動させた。

流体には、可視化のために、比重の異なる2種類のトレーサを混入した。1つは柱状物体周りの流れの可視化用で、水に近い密度を持つトレーサ(三菱化学ダイヤイオン HP20SS, 比重 1.01, 平均粒径 $\sim 90 \mu\text{m}$)を用いた。もう1つは水面形状の可視化用で、水よりも小さい比重をもったトレーサ(住友精化フロービーズ CL-2507, 比重 0.919, 平均粒径 $180 \mu\text{m}$)を用いた。

柱状物体の断面(x - z 断面)の流れ場を可視化するために、水槽中央部分の下部から柱状物体の進行方向と平行になるようにシート光(メタルハライドランプとシリンドリカルレンズを使用)を照射し、トレーサからの散乱光を水槽脇に設置した高速度撮影ビデオ

Table 1 Experimental parameters

Cross-section	circle	ellipse
aspect ratio (l/d)	1	5
$Re_d (\times 10^3)$	1.9 ~ 19.3	0.9 ~ 14.5
Fr_h	0.15 ~ 6.93	0.11 ~ 14.72
depth ratio ($a = h/d$)	0.1 ~ 7.75	0.1 ~ 7.5

Fig. 2 Experimental equipment (a) side view (b) front view

カメラ (Photron FASTCAM-MAX, テレセントリックレンズ使用) を用いて流れの様子を撮影した。高速度カメラの撮影速度は、実験条件に応じて 250~1 000 fps とした。

また同時に、気液界面の変形の様子を上から観察するために、デジタルカメラ (Casio EX-F1) を柱状物体の上部に設置した。このデジタルカメラのための照明として、水槽の一端にメタルハライドランプを設置し、拡散板を通して水槽全体を照明した。全体照明の光強度は、高速度撮影ビデオカメラ用のシート光強度に比べて十分小さくなるように調整した。

実験前に流体の温度と比重を計測し、波が十分収まるのを待った後に実験を開始した。リニアサーボアクチュエータによって柱状物体を目標速度まで加速し、等速運動している状態を高速度撮影カメラで撮影した。カメラから得られた画像情報から、気液界面の形状や柱状物体周りの流れの様子を調べた。

4. 実験結果および考察

4.1 円柱の場合

4.1.1 可視化画像の結果 図 3 に、 Re_d と無次元水深 a の変化 (実験では、円柱の曳航速度 U_0 および水深 h の変化) に伴う界面形状の様子を表した実験画像を示す。気液界面の形状は水面に浮いているトレーサーからの散乱光によって点の連なりとして読み取ることができる。各画像の背後に見えている水平な棒は、左の円柱を支えるアルミ支柱である。速度 U_0 の

増加 (あるいは Re_d の増加) とともに円柱背後の水面の変形量が大きくなり、2 次元的な界面の流れ (図 3 (d)) から 3 次元的な乱れ (図 3 (g)) になっていくことがわかる。図 3 (d), (e), (g) の円柱後流部分において明るく輝いている部分は、空気が水中に巻き込まれ、気泡が生成されている領域である。

4.1.2 円柱背後の窪み量と碎波 曳航柱状物体の背後に発生する負圧の大きさは、気液界面の窪み量に反映されることが期待される。ここでは、実験画像で得られた気液界面のプロファイルから最大窪み量 w の計測を試みる。

本実験では、 U_0 が大きくなると生成された波の波長 λ が長くなるために (図 3 (g)~(i)), 1 枚の画像から最大窪み量 w を直接計測することができなくなる。そこで、高速度カメラで得られた各フレームの中央縦 1 列 (幅 1 pix) を時系列で並べた時空間マップ (鉛直 z 軸-時間 t 軸) を作成した (図 4)。図 4 (a) は Re_d が小さい場合で、(b) が Re_d の大きい場合である。波の振幅は図 4 (b) の方が大きく、明るく輝いている部分で気泡が生成している。もし、等速運動する円柱によって生成された波の形状に時間依存性がなければ、図 4 の時間軸は水平空間軸に置き換えて見ることができる。

図 5 (a) は、円柱とともに運動するデジタルカメラ (円柱上部から撮影) によって得られた高速度領域 (高 Re_d 領域) における円柱背後の界面の乱れの様子である。図 5 (b) は同条件の実験で得られた時空間画像を

Fig. 3 Snapshots of circular cylinders ($d=20$ mm) at different condition

Fig. 4 Spatio-temporal distribution of the air-water interface at the position of the high speed camera (z - t image). The water depth ratio of the circular cylinders is $a=2.4$. (a) smaller Re_d ($=11\,000$) and Fr_h ($=0.70$), (b) larger Re_d ($=15\,000$) and Fr_h ($=0.99$)

Fig. 5 Breaking wave with bubble formation. (a) top view: the broken line indicates the front line of bubble generation, (b) side view: a z - x image converted from a spatio-temporal slice (z - t image) of the high-speed video images

用いて、時間スケールを図5(a)の水平空間スケールに換算したものである。これらは、 Re_d が大きい場合の実験結果であるが、円柱背後の窪み(図5(a)の破線)よりも下流側の波の前面が崩れる碎波(breaking wave)によって空気が水中に取り込まれ、気泡が生成されていることがわかる(図5(a)の破線右側の円形構造は碎波に伴って生じた気泡)。

Fig. 6 A three-color RGB (Red-Green-Blue) image constructed from three images of the spatio-temporal slice at different position

図6は、異なる計測点(3箇所)で作成した時系列マップをRGBのフィルタを用いて重ね合わせた図である。時間依存がなければ、 $R+G+B$ が重なって白色となる。図6から、気泡生成がない場合(図6(a))には、界面形状の時間依存性はほとんど見られないが、気泡の生成など3次元的な界面の乱れが生じている場合には(図6(b))、後方の波において時間依存が生じていることがわかる。ただし最初の波の窪み量 w (灰色の矢印が計測点)については、気泡生成の有無にかかわらず一致(本実験条件の範囲では円柱背後の波の振幅の変動幅は $\pm 2.4\%$ 以内)、 w の時間変動はないものとみなせる。

気液界面の変形量が小さい場合には、窪み量 w は Bernoulli の式に従い

$$w = U_0^2 / 2g \dots \dots \dots (6)$$

となることが予測される。図7は、図4の時空間マップ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。図7中、中空の記号は碎波による気泡生成が観察されなかった場合で、中実の記号は碎波に伴う気泡生成が観察された場合である。図7中の破線は式(6)を表したものであるが、 w が小さく(U_0 が小さく)碎波が生じていない場合には、実験結果と式(6)は良く一致していることがわかる。しかしながら、円柱の速度 U_0 が大きくなり碎波が生じた場合には、式(6)の曲線からはずれ、窪み量 w はある一定の値に漸近する傾向が見られる。碎波が生じている領域では、3次元的な乱れがあるために、 w の計測結果がやや不規則な分布をとるが、深さ h が小さいほど w が大きくなっていく傾向がある。

4・1・3 気泡生成の相図 実験で得られた画像から、碎波による気泡生成の領域を Re_d , Fr_h , 無次元水深 a を用いて表した相図が図8である。碎波に伴う気泡生成は Fr_h , a にも依存するが、特に Re_d に大きく依存し、高 Re_d 領域において気泡の生成が起こる。

4・2 楕円柱の場合

4・2・1 可視化画像の結果 図9は、楕円柱(迎え

Fig. 7 Water surface depression w by a moving cylinder as a function of U_0 at different water depth h . Open and closed symbols denote non-existence and existence of breaking wave with bubble generation, respectively. The broken line represents a theoretical curve according to the Eq.(6), where the gravity acceleration $g=9.8$ m/s²

角 $\theta=0^\circ$) による実験で得られた画像である。この実験では、界面形状(図9中、白い点の連なり)を捉えるために斜め下から見上げる形で撮影されている。楕円柱の場合も円柱で見られたような碎波による気泡生成が生じた(図9(d)~(f))。しかしながら、その発生量は円柱の場合に比べて小さく、しかもある限られた条件でのみ観察された。

4・2・2 気泡生成の相図 円柱の場合と同様、 Re_d , Fr_h , 無次元水深 a を変えて実験を行い、碎波に伴う気泡の生成に関する相図を作成した(図10)。円柱の場合には U_0 (あるいは Re_d) が十分大きくなると

Fig. 8 Regime diagram for bubble generation by a circular cylinder moving beneath an air-water interface at a constant speed

Fig. 9 Snapshots of elliptic cylinders ($d=10$ mm) at different condition (Oblique view from below)

Fig. 10 Regime diagram for bubble generation by an elliptic cylinder moving beneath an air-water interface

碎波にともなう気泡生成が起こっていたが、楕円柱の場合にはある Re_d 数領域 ($\sim 4\,000 < Re_d < 6\,000$) に限られることが明らかになった。

4.3 碎波の条件 曳航する柱状物体背後の界面の変形量が大きくなると、碎波に伴う水中への空気の連行 (entrainment) が生じ、気泡が生成される。水面波の物理学や海洋工学の分野では、波の安定性や碎波の条件を考える際、波形勾配 (= 波高 η / 波長 λ) を重要な指標としている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。本実験の問題設定は海の波とは異なるものの、波の形状安定性という観点では同様の整理の仕方が有効であると考え、波形勾配の測定を行った。なお、本実験における波長 λ と波高 η は図 1 のように定義する。

図 11 は、時空間画像から円柱 (図 11(a)) および楕円柱 (図 11(b)) の気液界面のプロファイルを Re_d (速度 U_0) を変えて計測した結果である。図 11 中の左下の楕円は、曳航された円柱と楕円柱の位置である (図の縦軸と横軸のスケールが異なるために、円柱の場合 (図 11(a)) においても、描画上、縦長の楕円になってしまうことに注意されたい)。なお、水深 h の大きさは、円柱が 21.9 mm、楕円柱 25 mm で、さほど変わらない。図 11 中、中実の記号 (波底と波峰の 2 箇所) で示されている波形のプロファイルは、碎波に伴う気泡の生成が観察された場合の実験結果である。

まず円柱の場合 (図 11(a)) であるが、円柱の上を過ぎる流れは円柱に沿って流れようとするため、速度 U_0 の増加 (Re_d の増加) とともに円柱背後の窪み量 w の増加が見られる。波長 λ も速度 U_0 の増加とともに長くなるが、窪み量 w の増加率の方が大きい。図 11(a) は瞬時データの計測であるため、高 Re_d 数領域の波形勾配に不規則さがあるが (図 6)、概ね窪み下

Fig. 11 Surface profile for (a) circular cylinders and (b) elliptic cylinders at different Re_d . The profiles with solid symbols denote that wave breaking with bubble generation was observed in the experiments. The elliptic circle shows the position of the circular cylinder and the elliptic cylinder

流側の波の斜面 (2 つの中実の記号で挟まれた領域) の勾配が Re_d の増加とともに大きくなっていく。

一方、楕円柱の場合 (図 11(b)) には、円柱の場合と同様、速度 U_0 増加 (図中 Re_d の増加) とともに窪み量 w が増し、波の斜面の勾配が大きくなっていく ($Re_d = 4\,300, 5\,000$)。しかしながら、波長 λ の増加率が円柱の場合よりも大きいため、大きな Re_d 数 ($Re_d = 7\,700$) で勾配が緩やかになる。

これらの計測結果から、波形勾配 (η/λ) を求めたものが図 12 である。図 12(a), (b) はそれぞれ円柱および楕円柱の実験結果で、図中の中実の記号は碎波に伴う気泡生成が起こった場合、中空の記号が気泡が生成されなかった場合である。図 12 から、 Re_d の増加とともに波形勾配が大きくなっていくことがわかる。高 Re_d 側では 3 次元の界面の乱れが生じるため、瞬時データの計測には不規則な分布が見られるものの、

Fig. 12 Ratio of the wave height η to the wave length λ for (a) circular cylinders and (b) elliptic cylinders. Open and closed symbols denote non-existence and existence of bubble formation, respectively

円柱・楕円柱ともに、波形勾配がおおよそ 0.1 程度を超えると碎波が生じることが明らかになった。この値は、海の波の碎波の場合⁽¹³⁾や水中翼による碎波の場合⁽¹¹⁾と同様な結果であり、波形勾配が碎波発生条件を決める良い指標となっていることがわかる。また楕円柱の場合には、 Re_d が約 6 000 を超えると、波長の増加率が大きくなることで波形勾配が急激に減少し碎波が起こらなくなるが、円柱の場合には、少なくとも今回の実験範囲においては碎波の Re_d 数上限が見られなかった。

今回、 Re_d 数、 Fr_h 数、無次元深さ a の広いパラメータ領域をカバーする実験によって、碎波に伴う空気の連行と気泡の生成条件を決めることができた。今後の課題としては、本研究で示した気泡発生相図に関して、例えば波形勾配(=波高 η /波長 λ)の閾値がどのような物理によって支配されているのかを理解するこ

とが挙げられる。特に、柱状物体から放出される渦と自由界面との相互作用の結果、柱状物体背後の負圧の大きさ(波高)や波長にどのような影響を与えるのか考慮する必要がある。今後我々は、PIV 等の流れ解析等を行いながら、これらの問題に取り組む予定である。

5. 結 言

気液界面直下を水平方向に等速運動する 2 次元物体(円柱および楕円柱)による流れについて、特に気液界面の振る舞いを調べるための流体実験を行った。柱状物体後流側の界面の窪み量 w は曳航速度 U_0 の増加とともに大きくなる。界面の変形量が小さい場合には、窪み量 w は Bernoulli の式で良く記述されたが、界面の変形量が大きくなると、碎波による空気の連行が生じ、最大窪み量 w は Bernoulli の式では説明できず、水面からの深さ h に依存してある一定の値に漸近していくことが明らかになった。碎波に伴う気泡の生成条件について、 Re_d 数、 Fr_h 数、無次元深さ a の依存性を実験によって調べ、円柱および楕円柱に関する相図を作成した。円柱・楕円柱ともに波形勾配(波長に対する波高の比)が約 0.1 よりも大きくなった場合に碎波が生じ、海洋で観察される波の碎波条件と整合的な結果が得られた。

謝 辞

本研究は NEDO 産業技術開発助成(08 B 36002)による支援を受けて実施された。

文 献

- (1) Bénard, H., Formation de Centres de Giration à l'arrière d'un Obstacle en Mouvement, *Comptes Rendus Académie des Sciences*, Vol. 147 (1908), pp. 839-842.
- (2) Williamson, C. H. K., Vortex Dynamics in the Cylinder Wake, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 28 (1996), pp. 477-539.
- (3) Zdravkovich, M. M., *Flow around circular cylinders*, Vol. 1: fundamentals, (1997), p. 692, Oxford University Press.
- (4) Scarano, F. and Poelma, C., Three-Dimensional Vorticity Patterns of Cylinder Wakes, *Experiments in Fluids*, Vol. 47 (2009), pp. 69-83.
- (5) Sheridan, J., Lin J.-C. and Rockwell, D., Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 330 (1997), pp. 1-30.
- (6) Reichl, P., Hourigan, K. and Thompson, M. C., Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 533 (2005), pp. 269-296.
- (7) Murai, Y. and Takahashi, Y., Frictional Drag Reduction Ship, Patent Number, 4070385 (2008).
- (8) Murai, Y., Kumagai, I., Tasaka, Y., Takeda, Y. and Takahashi, Y., Hydrofoil Type of Bubble Generator

- for Marine Drag Reduction, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 483-485.
- (9) Hough, G. H. and Moran, J. P., Froude Number Effects on Two-Dimensional Hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 13, No. 1 (1969), pp. 53-60.
- (10) Duncan, J. H., An Experimental Investigation of Breaking Waves Produced by a Towed Hydrofoil, *Proceedings of the Royal Society of London*, A 377 (1981), pp. 331-348.
- (11) Duncan, J. H., The Breaking Wave and Non-Breaking Wave Resistance of a Two-Dimensional Hydrofoil, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 126 (1983), pp. 507-520.
- (12) Babanin, A. V., Breaking of Ocean Surface Waves, *Acta Physica Slovaca*, Vol. 56, No. 4 (2010), pp. 305-535.
- (13) Toffoli, A., Babanin, A., Onorato, M. and Waseda, T., Maximum Steepness of Oceanic Waves: Field and Laboratory Experiments, *Geophysical Research Letters*, Vol. 37 (2010), L 05603, doi: 10.1029/2009 GL 041771.