

Observation of the Vortex Ring Ejected Parallel to a Free Surface of Water

○永田 拓 (岐阜大工) 菅谷 修士 (岐阜大工)

Hiroshi NAGATA, Syuji SUGAYA
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

Vortex structures of the vortex rings ejected parallel to a free surface of water were studied by means of flow visualization experiments. The emphasis is on the process of vortex deformation, induction of the flow on the free surface, evolution of secondary surface vortices and interaction between the primary vortex in the water and the surface vortices. Experiments were conducted under the two surface conditions i.e. a clean surface and a surface contaminated with surface-active agent. The electrolysis method by use of a fine silver wire as an anode was employed to visualize the flow beneath the free surface without contamination of the surface of water. The evolution of the vortex ring and the surface vortices were found to be sensitive to the condition of the surface of water.

1 はしがき

水面に平行に発射された渦輪が水面の影響を受けて、渦輪が変形し水面に流れを誘起する経過を、可視化実験によって明らかにした。表面張力が作用する界面現象は複雑で、渦輪と水面との干渉も、水面がクリーンな場合と表面活性剤滴下水面の場合とは異なる。本研究は、このような界面条件の差異に注目して、渦輪と水面の干渉状況を詳細に観察することにした。

2 実験の装置と方法

2.1 概略 前報¹⁾と同じ装置を用いて渦輪を発射した。実験条件は、渦輪発射オリフィス (直径 $d=30\text{mm}$) から水面までの無次元距離 $L/d=1.17$ 、レイノルズ数: $Re=Ud/\nu=900$ (U : 噴出速度, ν : 動粘度) である。図中の記号 Δ と $\blacktriangle$ は、それぞれ $x=0, y=0$ の位置、写真中の数値は渦輪発射後の時間を示す。

2.2 水面の流れの可視化方法 水面上の流れを可視化するために、水面にアルミ粉末等の微粒子を散布する方法や、水面直下に水溶性の色素を導入する方法が用いられる。

しかし、これらの方法は、本実験には、最適な方法とは言えない。微粒子の散布は、マランゴニー効果によって、水面に流れを誘起し微粒子を一様に分布させることは容易ではない。水溶性の色素の多くは、表面活性剤として機能する。そこで、本実験では、銀細線 (直径 0.08mm) を発色電極とする電解沈殿法を適用した。渦輪の発射直前に、水面直下に設置したキンク状の銀細線を掃引し、銀細線から溶出する白色の色素線によって流れを可視化した。この方法は、水面をクリーンな状態に保ったまま流れを可視化できる利点がある。

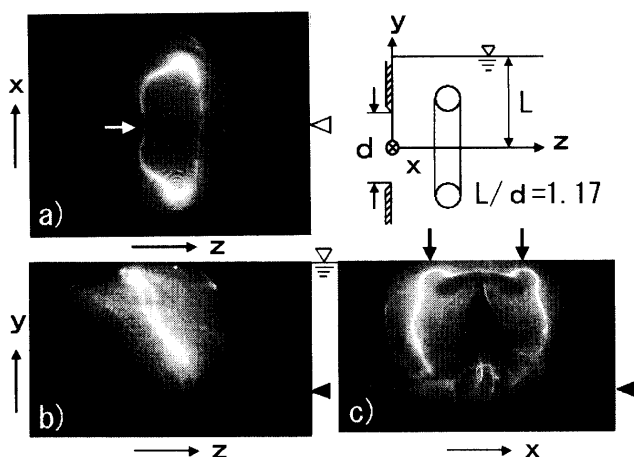


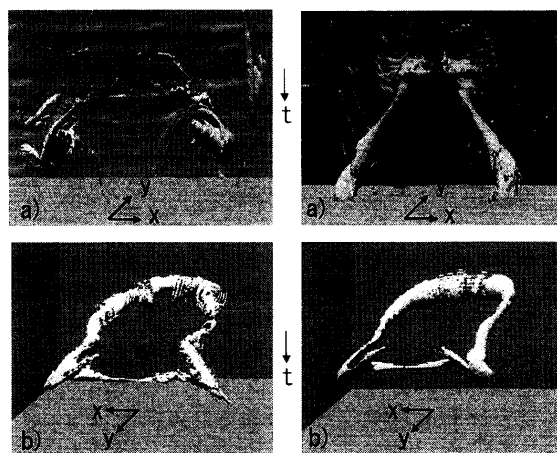
Fig. 1 Oblique vortex ring impinging upon a free surface contaminated with surfactants

3 実験の結果と考察

3.1 表面活性剤滴下水面との干渉 図1は、約0.5ccの表面活性剤を滴下した水面 ($500 \times 600\text{mm}^2$) に、渦輪が衝突した時の渦輪の変形状況を3面図で示している。図の右上に座標系を示す。渦核と渦輪の外形を識別するために、渦核は、渦輪発射オリフィス内壁から溶出する白色の色素によって可視化し、渦輪の外形は、発射口内の水を着色して可視化している²⁾。図1で、渦核は水面に沿うように変形し (xy面図参照)、水面に近接した部分 (xz面図中矢印) で途切れる兆候を示す。この後この渦核部分は完全に途切れ、水面には、図1のxy面図中矢印で示す位置に、2つの渦巻きが形成される。そして、水面下の渦核はこの渦巻きに繋ぎ替わる。

この状況を、図2に、前報³⁾で導いたTaylor仮説3D画像で示す。図2(I)に、表面活性剤滴下水面 (以後、活性剤水面と呼ぶ) の場合を示し、図2(II)は界面が固体壁の場合である。図2a)は、水面および壁面近傍からの色素の巻き込み状況を示し、図2b)は、渦核形状を示す。この図から、渦輪の界面衝突時までの流れは、界面が活性剤水面の場合も固体壁の場合もほとんど同じであることが分かる。

図3に、この後の渦輪と活性剤水面との干渉の経過を示す。図3の写真a)~d)は、水面下の渦構造 (xy面図) を示し、写真e), f)は、水面を上方から見た写真である。白色の色素線が水面の流れを示し、黄色は、水面下の渦輪の外形を示す。図3a)では、前掲の図1で水面から遠い渦輪の渦領域が水面



I: Contaminated free surface II: Solid surface
 $z_0/d = 5.3$ $z_0/d = 4.7$
a) Surface flow b) Vortex core

Fig. 2 Taylor-hypothesis 3D images of oblique vortex ring

近くに引き寄せられ、渦輪外形は複雑に変形する。その後の図3b)では、水面下の渦構造はやや整形され、渦核は、水面上に誘起される2つの渦巻きに繋がっている。さらに時間が経過すると、図3のc)とe)、d)とf)に見られるように、水面上の2つの渦巻きが、U字型に整形された水面下の渦核の真上に位置するようになり、その後、図3d)、f)の状態から渦形状の変化はほとんど無く、渦は減衰する。

以上のような活性剤水面と渦輪の干渉の経過は、後述の「クリーンな水面との干渉」と「固体壁との干渉」の言わば中間的な状況を示す。これは、前報²⁾の水面に垂直に衝突する渦輪の観察で明らかにしたように、活性剤が覆い尽くした水面では、「滑りなし」の条件が近似的に満たされるためである。「滑りなし」の条件は、界面で渦輪と逆向きの渦度を生成する。固体壁の場合は、「滑りなし」の条件が厳密に満たされるので、活性剤水面の場合よりも、より強い渦度が壁面で生成される。そのため、壁面に衝突した後の渦輪は波状変形⁴⁾を伴う複雑な渦構造を示し、活性剤水面の場合のような渦輪のU字型整形は無く崩壊する。クリーンな水面の場合は、「滑りなし」の条件はほとんど満たされないため、水面と渦輪との干渉は、固体壁の場合とは著しく異なると考えられる。

3.2 クリーンな水面との干渉 図4は、渦輪が水面に衝突後、渦輪が変形する時間経過を示す。写真は、xy面を観察面としている。衝突後、図4a)の単純なU字型の渦から、写真b)及びc)のように渦輪の外形はやや複雑に変形するが、水面下の渦核は水面に形成される2つの渦巻きに繋がっており、前掲の活性剤水面の場合とほぼ同様である。これ以降は、活性剤水面の場合に比して、クリーンな場合の渦形態は、「V字型」から「U字型」、さらに「V字型」へと著しく変化し、変化も長く続き渦の減衰は遅い。

図5は、渦輪がクリーンな水面に衝突後の水面上の流れの時間経過を示す。水面の渦巻きの強さは、活性剤水面上よりも強く、渦巻きの移流速度も大きい。さらに、2つの渦巻きのx間隔が急激に増大する。上述の水面下の渦の形態は、こ

のような水面上の渦巻きの形態と密接に対応している。

4 結 言

1. 水面上に平行に発射された渦輪が水面に衝突し、衝突部分の渦核が途切れ、水面上に流れを誘起し2つの渦巻きを形成する。水面下の渦核は水面の渦巻きに繋がるU字型の渦に変形する。この経過は水面の表面状態に依存する。
2. 上記の経過は、「クリーンな水面」と「活性剤水面」の場合で異なり、クリーンな水面の場合は、活性剤水面の場合に比して、水面上および水面下のいずれの渦も減衰が遅く、渦核形状の変化が大きく、より長く持続する。
3. 水面のクリーンな状態を保って、水面直下の流れを可視化する方法として、銀細線を発色電極とする電解沈殿法が有効である。

- 文 献** 1) 永田、成田、他、ながれ、18 別冊(1999), 261
 2) 永田、橋本、ながれ、19 別冊(1999), 439
 3) 永田、中山、他、可視化情報、18(1998), 79 CD-ROM
 4) Widnal, S.E. et al, *J. Fluid Mech.*, 66(1974), 35

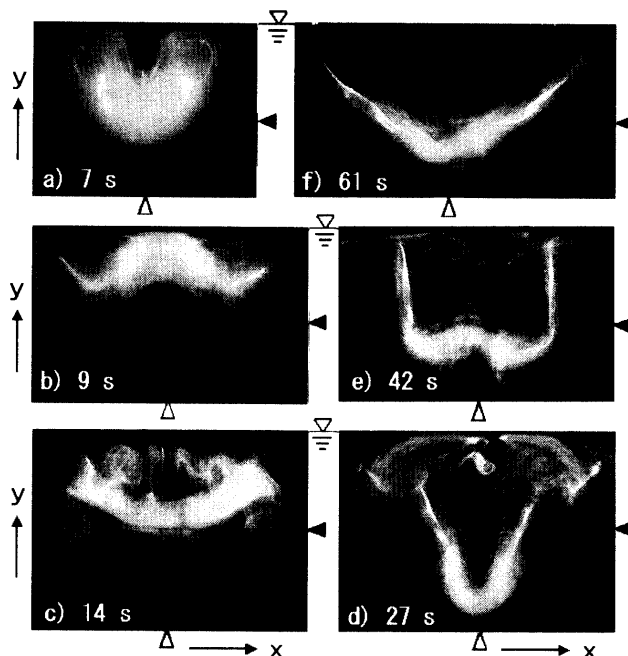


Fig. 4 Evolution of vortex ring reconnecting with vortices formed on a clean surface (front view)

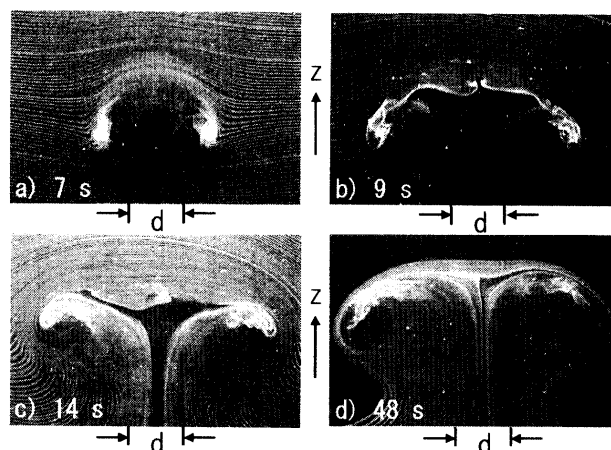


Fig. 5 Flow evolution beneath a clean surface impinging the oblique vortex ring

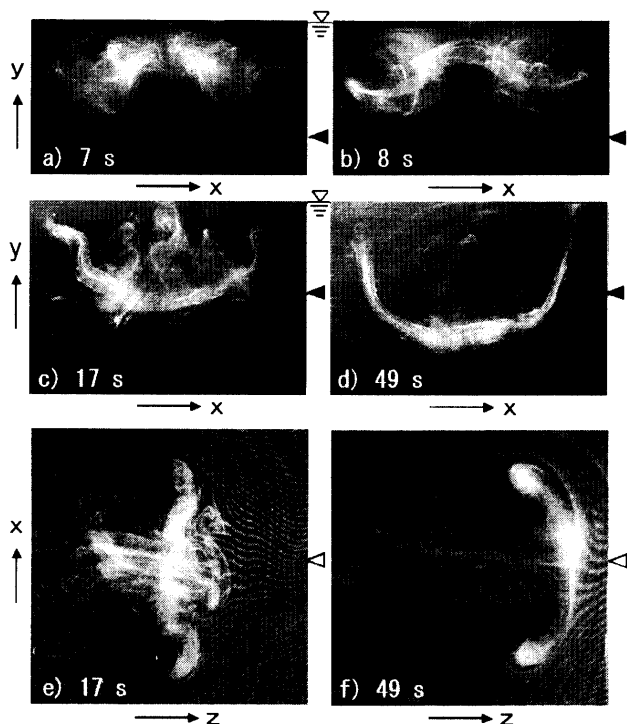


Fig. 3 Oblique vortex ring reconnecting with vortices formed at a free surface contaminated with surfactants