

## No.4

## 水面と干渉する渦輪の観察

永田 拓、菅谷修士（岐阜大工）

## Observation of the Vortex Ring Interacting with Free Surface of Water

H. Nagata and S. Sugaya

Faculty of Engineering, Gifu University

Vortex structures of the vortex rings ejected parallel or perpendicular 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 surface vortices and interaction between the surface vortices and vortices in the water. Experiments were conducted under the two surface conditions i.e. a clean surface and a surface contaminated with surfactant droplets. 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.

Key Words: vortex ring, free surface of water, surfactants, vorticity, no-slip condition, flow visualization

## 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。本研究では、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した。

## 2 実験の装置と方法

## 2.1 装置の概略と実験条件

前報<sup>1)</sup>と同じ装置を用いて、渦輪発射ボックスと一定水位差のある小水槽を電磁バルブを介して繋ぎ、バルブを一定時間(0.7s)開放することによって渦輪を発射した。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： $Re=U_0 d/\nu=900$ ( $U_0$ : 噴出渦輪中心の速度,  $\nu$ : 動粘度)の層流渦輪、観察時間  $\tau=U_0 t/d=0$  から 80 である。

## 2.2 水面の流れの可視化方法

流れのトレーサとしてアルミ粉末等の微粒子や水溶性の色素を導入する従来の方法は、本実験には、最適な方法とは言えない。微粒子の散布は、微粒子の存在が水面の流れを妨げるばかりでなく、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が難しい。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、キンク状の銀細線(直径  $0.08\text{mm}$ )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、この銀細線を水面直下を水平に曳航し、

銀細線から溶出する白色の色素線が示す縞模様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水面直下の流れを可視化できる利点がある。

## 3 実験の結果と考察

## 3.1 水面渦とU字渦の生成

水面に平行発射された渦輪は、水面の影響を受けて、渦輪の水面に近い部分の進行が遅れ、渦輪は水面に斜め

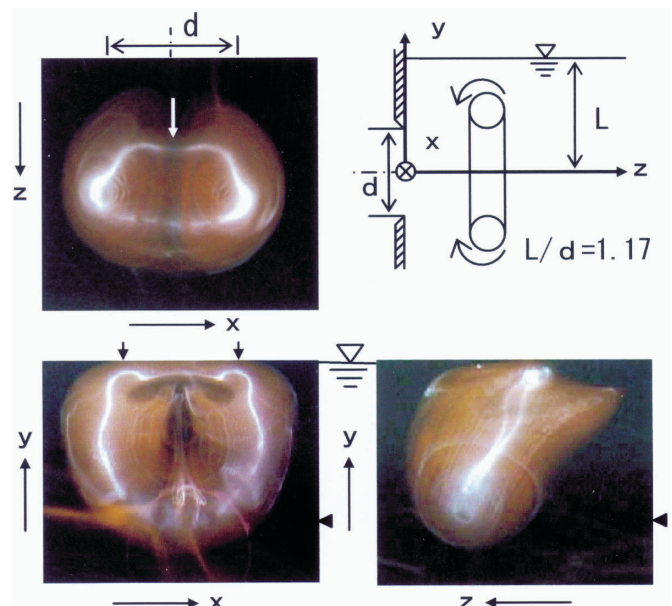


図1. 活性剤水面に斜め衝突した渦輪の外形の渦核の形状  $\tau=4.5$  ( $t=4.4\text{s}$ )  $\blacktriangleleft: y=0$

に衝突する。図1は、約0.5ccの表面活性剤を滴下した水面（500×600mm<sup>2</sup>）に、渦輪が初めて衝突した時の渦輪の3次元的な形状を3面図で示す。図の右上に座標系を示す。渦輪の外形と渦核を識別するために、渦輪の外形は発射口内の水を着色して可視化し、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ている<sup>2)</sup>。図1で、水面に近接した渦核は水面に平行となり(xy面図参照)、この部分(xz面図中白矢印)で途切れる兆候を示す。水面には、図1のxy面図中矢印で示す位置に、2つの水面渦が形成される。この矢印の間の水面に平行な渦核部分は、途切れ消滅する。そして、水面下の渦輪はこの水面渦に繋がるU字型の渦(U字渦と呼ぶ)に変形する。

図2に、この状況を、前報<sup>3)</sup>で導いたTaylor仮説3D画像(zを固定したxy面の流れを撮影した90枚のビデオ画像から合成したもの)で示す。図2 Iおよび図2 IIは、それぞれ表面活性剤滴下水面(活性剤水面と呼ぶ)の場合と、水面を固体壁で置き換えた場合を示す。図2の上の写真(a)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2の下の写真(b)は、渦核形状を示す。図中の上向き矢印は水面渦の位置を示し、図中の下向き矢印はU字渦の先端を示す。

図2(a)に見られるように、渦輪の界面衝突時には、界面が活性剤水面の場合と固体壁の場合の渦核形状に顕著な差異は認められない。これは、前報<sup>2)</sup>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、活性剤水面でも、固体壁の「滑りなし」の条件が近似的に満たされるためであると考えられる。

しかし、図2(b)の2枚の写真に見られるように、両者の界面近傍の流れは同じではない。固体壁の場合は「滑りなし」の条件が厳密に満たされ、固体壁面近傍では渦度ベクトルは壁面に平行となる。これに対して、活性剤水面の場合は、水面に垂直な渦度成分が集積して水面渦が形成される。したがって、界面衝突時の渦核形状が同様(図2(a))でも、両者の界面近傍の流れ(図2(b))は、異なるはずである。

### 3.2 水面渦の生成と渦度流束

本実験のように水面の曲率がゼロの場合には、水面に平行な渦度成分 $\omega$ と水面速度 $w$ との関係は、水面がクリンな場合、次の渦度流束方程式<sup>4)</sup>

$$v \partial_y \omega = - \partial_t w \quad (1)$$

で近似できる<sup>5)</sup>。つまり、粘性によって水面を横断(拡散)する渦度流束は水面流の加減速と釣り合う。この式によれば、水面に近接した水面に平行な渦核が水面流の局所的な加速を促し水面渦を形成する。

渦輪が活性剤水面に斜め衝突し、水面渦が形成され、水面に平行な渦度成分を持つ渦核が消滅し水面下にU字渦が形成される前術の観察結果は、この式と良く対応している。

固体壁面に近接する渦核が消滅する機構は、上述の水面の場合とは異なる。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、壁面に近接する渦輪と逆向きに回転する渦度を固体壁面で生成する。この逆向きの渦度が壁面に平行な渦核を消滅させると考えられる。界面近傍の流れをこのように考えると、界面に衝突直後の渦輪の変形状況も、活性剤水面の場合と固体壁の場合の流れとは異なる可能性がある。しかし、上述の観察結果では、両者の渦輪の変形状況に顕著な差異は認められない。この要因として、活性剤水面の界面状態が固体壁と水面の2つの特性を持つこと、界面に斜め衝突する渦輪の界面との干渉領域が渦輪の上端部分に限られ、短時間で渦輪がU字渦輪に変化することなどが考えられる。

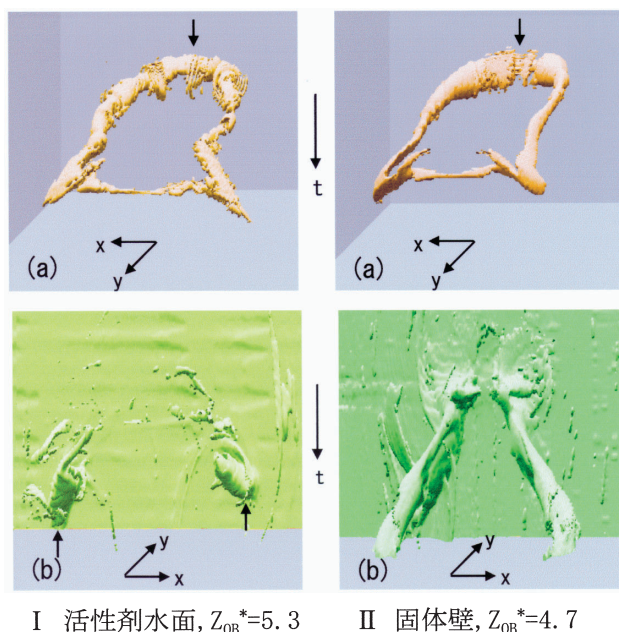


図2. 界面に斜め衝突した渦輪の水面下の形状(a)と水面近傍の流れ(b)のTaylor仮説画像

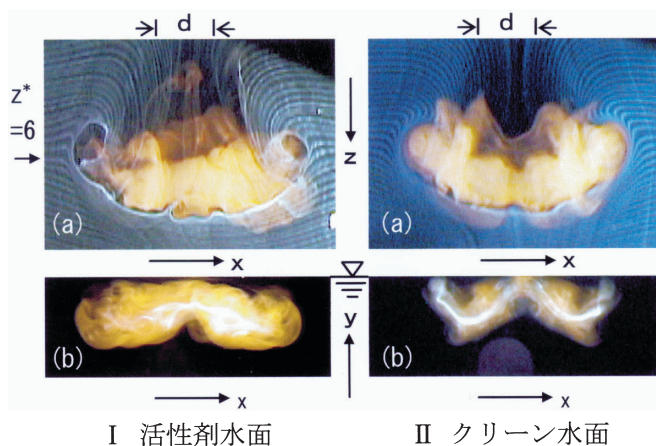


図3. 水面渦形成時のU字渦の形状( $\tau = 7.2$ )



こうして形成されたU字渦は、この後の水面渦の発達と共に渦形状が大きく変化する。この時間経過は、次節で述べるように、界面状態によって著しく異なる。界面における「滑り無し」条件に注目して、活性剤水面を、固体壁と水面の特性を共有する、言わば固体壁と水面がクリーン水面の中間的な界面と考えて、活性剤水面とクリーン水面の場合の比較実験を行った。

### 3.3 水面渦の発達とU字渦の形状変化

上述のように最初に形成されるU字渦の先端は水面渦に先行するので、後述するように、U字渦は自らの誘導速度で水面に近づき再び水面と干渉する。この時間経過をクリーン水面の場合と活性剤水面の場合を対比して図3と図4に示す。流れは、次の色素が示す流脈模様により可視化している。水面渦の詳細：キンク銀細線から溶出する色素線群、U字渦の渦核形状：渦輪発射口内壁から溶出する色素（白色）、この内壁表面がU字渦を構成する渦度の発生源であるからである。U字渦の外形：渦輪発射ボックス内の水の着色色素（黄色）である。

図3は、U字渦と水面の再干渉の初期状況を示す。図3(a)は水面を上から見た写真を示し、図3(b)は水中のxy面の流れを示す。これらの写真に見られるように、活性剤水面とクリーン水面のいずれの場合も、U字渦の中央部分が水面に近づき（写真(b))、新たに「2次水面渦」が形成される兆候（写真(a))が見られる。

図4は、前掲の図3の後に続く流れの時間経過を示す。写真は、水面上方から、水面渦とU字渦の渦核形状を撮影したものである。写真中の数値は無次元時間 $\tau$ を表す。

まず、U字渦の渦核の形状に注目すると、活性剤水面の場合の方がクリーン水面の場合に比して、著しく複雑な形状を示す。この様相は、前述の図3の写真でも認められ、活性剤水面の場合には、U字渦に巻き付く縦渦も存在する。これは、活性剤水面で近似的に成立する「滑り無し」条件による渦度の生成が、水面に近接する渦核構造を複雑化するものと考えられる。

### 3.4 2次水面渦の生成

両水面の2次水面渦の生成経過を図4に示す。クリーン水面の場合（図4Ⅱ参照）は、最初に形成される水面渦の回転方向と逆向きの一対の2次水面渦が形成されることが分かる。この場合のU字渦は中央部分が水面に近づきW字型に変形（図3Ⅱ(b)参照）する。そして、この中央の水面に接近した渦核近傍の水面に2次水面渦が形成される。この場合も最初に生成した水面渦（一次水面渦と呼ぶ）の場合と同様に、式(1)が示唆するように、水面に接近した渦核周辺の水面に平行な渦度成分が消滅し、これに対応した水面流の局所的加速が2次水面渦を生成するものと考えられる。しかし、図4Ⅱの写真が示すように、一次水面渦の場合とは違って、2水面渦の生成によるU字渦の渦核の分断は無いように見える。

活性剤水面の場合は、図4Ⅰに示すように、最初

は、4個の2次水面渦が形成され、時間の経過と共にクリーン水面の場合とは逆向きに回転する1対の2次水面渦が存続する（図中矢印参照）。このような複雑な2次渦が形成されるのは、2次水面渦を誘起するU字渦が、クリーン水面の場合とは異なり、U字渦に巻き付く縦渦も存在する複雑な渦構造であることに対応している。

上述のクリーン水面と活性剤水面における2次水面渦のそれぞれの形成機構は、Sarpkayaの区分<sup>6)</sup>のA-TypeおよびB-Typeに相当する。

### 3.5 水面渦とU字渦の渦中心の時間変化

複雑な渦構造を持つ渦領域の渦中心を、可視化画像から特定することは原理的に困難である。ここでは、3次元な渦構造の時間変化の概略を知るために、水面渦とU字渦の渦中心をあえて特定し測定した。図5は、これらの渦中心位置と無次元経過時間 $\tau = U_0 t / d$ との関係を示す。測定した渦中心は、図6の座標で、 $X = 0$ 面上のU字渦の位置 $Y_v, L_{sv}$ 、および水面渦（含2次水面渦）の渦中

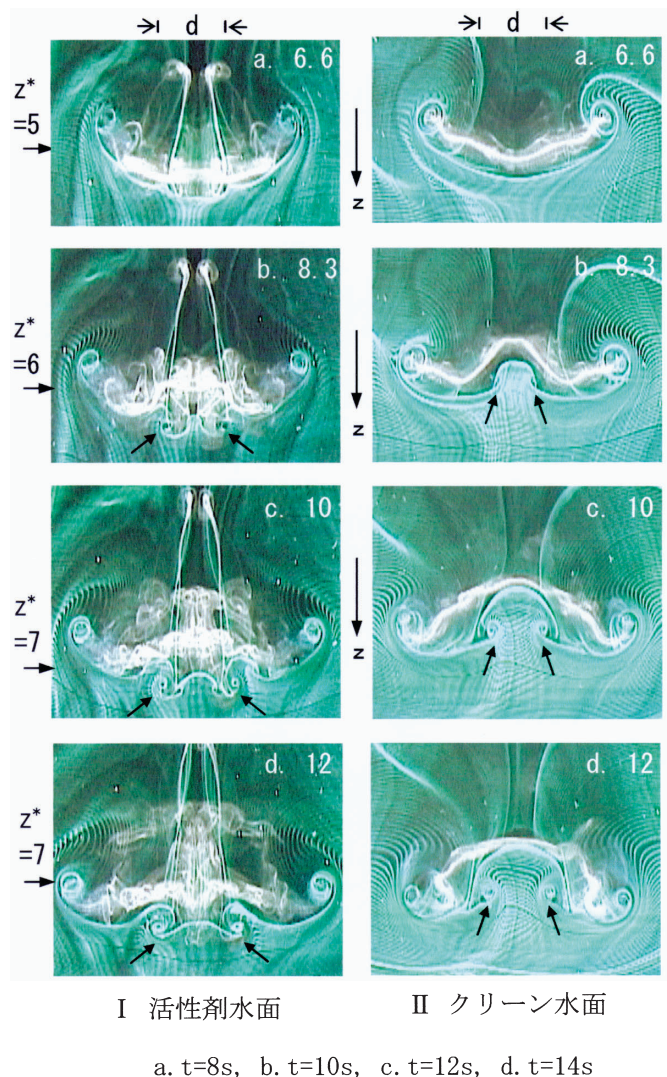


図4. 水面渦とU字渦の時間変化(Top view)

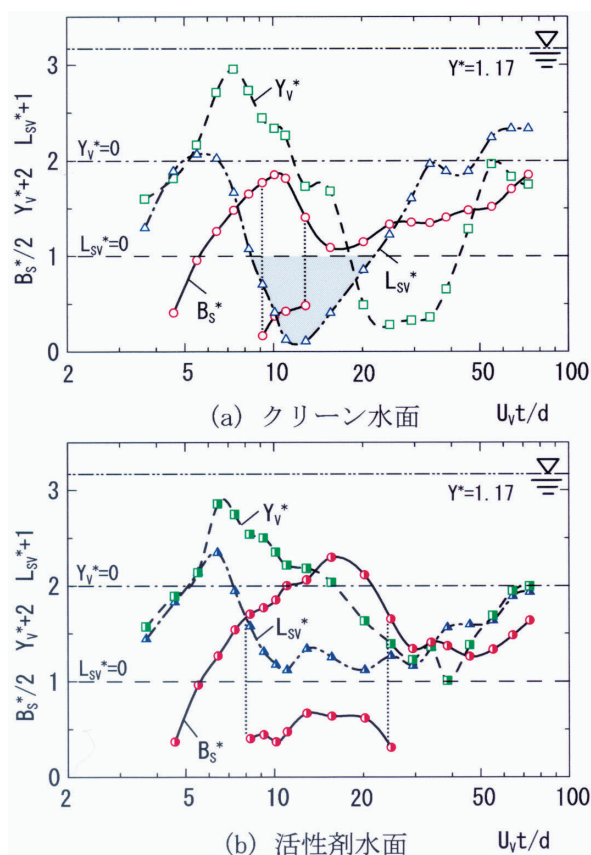
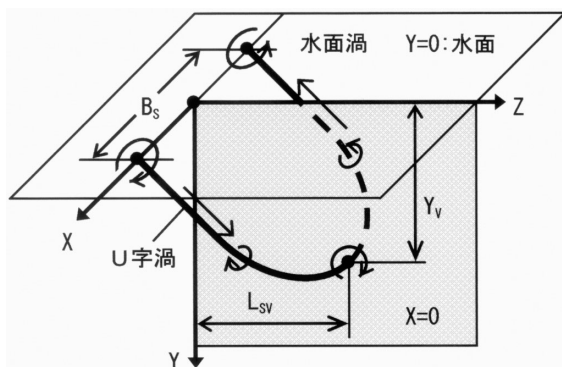
図5. 水面渦とU字渦の渦中心の移動 ( $Re=650$ )

図6. 水面渦とU字渦の位置関係

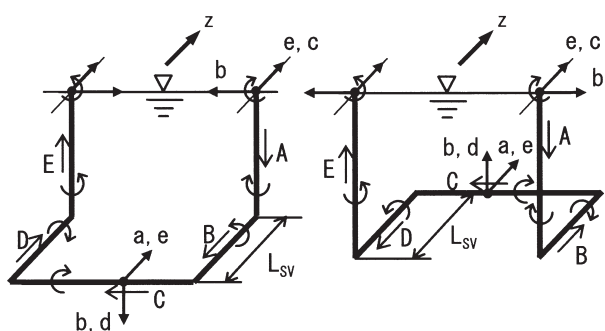
(a) 「水面渦」先行:  $L_{sv} < 0$  (b) 「U字渦」先行:  $L_{sv} > 0$ 

図7. U字渦の自己誘導速度様式図

心間の距離:  $B_s$ である。上付記号「\*」は発射口直径  $d$  による無次元化を示す。

水面渦に繋がるU字渦の運動は、定性的に、U字渦を図7に示す直線渦糸で置き換えた場合の誘導速度に従うと考えられる。図中の矢印は、Biot-Savartの法則によって渦糸のそれぞれの部分(記号A,B・E)が誘導する速度の方向(記号a,b・e)を示す。この図に示すように、U字渦の運動( $B_s, Y_v$ の時間変化)は、 $L_{sv}$ の正負(U字渦と水面渦の前後関係)によって大きく異なる。 $L_{sv}$ が正の場合には、U字渦は水面に近づき水面渦の間隔は広くなる。 $L_{sv}$ が負の場合には、この逆になる。

図5に戻って、クリーン水面の場合(図(a))と活性剤水面の場合(図(b))の測定結果を対比すると、両者には次のような相異がある。まず、2次水面渦の存続期間は、活性剤水面の方が長い。そして、水面渦がU字渦に先行する $L_{sv}$ が負になる期間が、クリーン水面の場合には存在する(図中網掛け)が、活性剤水面の場合には無い。大きく変動する $L_{sv}$ に対応して、クリーン水面のU字渦の深さ $Y_v$ の変動幅は活性剤水面の場合よりも大きい。

これらの相異は、活性剤水面の場合よりクリーン水面の場合の方が、水面がより自由に動くためより強い水面渦が生成され、水面渦がU字渦に先行する期間: $L_{sv}$ が負の期間が存在することが要因となっている。

#### 4 結 言

1. 水面に平行に発射された渦輪は、まず水面に近い渦領域が水面に衝突する。そして、水面に一对の水面渦を生成し、渦輪の上部は消滅し水中にU字渦が形成される。この経過は、式(1)が示唆する水面渦の生成機構と良く対応している。
2. 初めて生成されるU字渦の形状は、渦輪が衝突する水面を固体壁に置き換えても、顕著な差異は認められない。この後の水面渦とU字渦の時間発展は、クリーン水面の場合と活性剤滴下水面の場合で著しく異なる。この差異は、クリーン水面では満たされない「滑り無し」の条件が、活性剤滴下水面では近似的に満たされることに起因する。
3. 活性剤滴下水面では、U字渦の渦形状はより複雑となり、これに対応して水面渦もより複雑な渦構造を示す。また、クリーン水面では水面渦が動き易く、水面渦がU字渦に先行する期間が生じる。この期間の有無が両者のU字渦の変形と移動状況に差異をもたらす。

#### 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) E. P. Rood: *J. Fluids Eng.*, 116 (1994), 91-94
- 5) M. Gharib: *Appl. Mech. Rev.* 47 (1994), 157-162
- 6) T. Sarpkaya: *Ann. Rev. Fluid Mech.* 28(1996), 83-128