3次元物体周辺流況の可視化に関する研究*

鈴木 達雄**

A Study on Flow Visualization around Three-Dimensional Obstacle

Tatsuo SUZUKI

ABSTRACT

To study the flow structure around the reef, water flume experiment was carried out. The following results were obtained by flow visualization.

1. Granular dye scattering method is very useful to visualize the flow patterns and fine vortices around a three-dimensional obstacle under $Re \doteq 1600$.
2. The length between an obstacle and its reattachment point of the flow varies with the shape of the obstacle.
3. An obstacle whose length is between 6 and 8 times of its height generates strong upwelling vortex behind the circlet zone. The height of upwelling vortex is more than 4 times of the height of the obstacle.

1. 緒言

水産工学の分野では、人工的な構造物を海底に設置し、自然の流れにより深層の海水に豊富に含まれる栄養塩を、太陽光の届く表層付近まで持ち上げる人工湧昇流発生の研究が行われている。栄養塩は植物プランクトンの光合成を活性化し、増殖を促すことにより漁場の生産性を向上する。このような観点から、3次元物体背後に発生する強い上昇力を持つ合体渦（以下、湧昇渦と呼ぶ）が注目されている。湧昇渦の性質は物体の形状、およびその周辺の流況と密接な関係がある。この関係を解明するために3次元物体周辺の流況を可視化し詳細に調べる必要がある。

3次元物体周辺の流況を調べるために、粒状の固体染料を物体周辺の水槽底面に散布し写真撮影

を行う方法（以下、粒状染料散布法と呼ぶ）を開発し、種々の物体周辺の流況を可視化し、物体形状と周辺流況の関係を求めた。水槽実験では実験装置の規模の制約や、現象を単純化して研究するために3次元現象を2次元に置き換えて実験することがしばしばある。しかし、物体が2次元の場合と3次元の場合とでは、渦の発生や合体の機構が異なるため、渦の合体が想定されるような現象の研究に2次元模型を用いるのは問題があった。

本文では粒状染料散布法により、3次元模型周辺の流れや各種渦を可視化し、物体の形状と流況の関係、また、水槽の側壁が物体周辺の流況に与える影響を明らかにした。

2. 可視化方法

2.1 実験装置

本実験ではすべて、長さ 50 m、高さ 1.5 m、幅 0.8 m の回流水槽を使用した。実験の目的が物体周辺の微細な流況の可視化にあるので、実験前に

*原稿受付 1992年11月2日

**正会員 ハザマ土木営業本部

模型を置かない状態で水槽内の流れが一樣流であることを確認した。種々の流速下で水槽底上 5 cm の位置から、水槽内の水と同じ比重に調整した染料を流し、染料の上層への移流・拡散のないことを確認した。

水槽底部における流れの境界層の厚さの違いは、物体周辺の流況に影響するので、底面の抵抗を減らすため水槽底面にアクリル板を敷いた。また、模型の上流 60 cm の位置に整流格子を設置し、水槽底部の境界層厚をおよそ 2 cm とすることができた。また、幅 0.8 m の水槽を使用するという条件のもとで、水槽側壁の影響を考慮して 1/200 フールド模型を考えた。

2.2 実験方法

2.2.1 想定する現象と模型

想定する現象として水深 50 m の実海域に、高さ $H=10$ m、長さ $L=100$ m、幅 $W=50$ m 程度の規模の 3次元物体を考えた。実海域の最多流速を 40 cm/s と想定した。1/200 のフルード模型とし、水槽では 2.8 cm/s を基準流速とした。したがって、代表長を模型の高さの 5 cm とするとレイノルズ数 (Re) は 1.6×10^3 となる。

物体の形状と辺周の流況の関係を調べるために種々の形状の模型を使用した。模型はアルミ板を加工した表面の滑らかなものを用いた。Table 1 は使用した模型の一部で、高さを水深の 1/5 に固定して、投影面積を変化させた場合の流況を調べることを目的としており、模型形状を長方形板、台形板、マウンド、および二つの円錐の間を、円錐の高さの 75% の高さのマウンドで繋げたもの(以下、2連マウンドと呼ぶ)の 4 種類とし、天端の長さを L とし、斜面の勾配はすべて 1/2 とした。

2.2.2 粒状染料散布法

可視化は水槽内に模型を設置し、流れが安定した状態で水槽上方より、粒状の固体染料(ウォーター・ブルーなど)を物体周辺の所要場所に散布し、適当な時間間隔で水槽上部定点より写真撮影することで行った。水槽底面に落下し付着した固体染料は溶けて、その付着点における流向、流速に応じて水槽底面に染料の跡を残す。水槽底面のアクリル板に書かれた 5 mm メッシュ上に残された軌跡から底面における流れの形状を読み取る。

Table 1 Models used in the flume.

	Model	H (cm)	W (cm)	L (cm)
Mound		5	20	0
				10
				15
				20
				25
				30
Dual cones		5	20	20
				25
				30
Rectangular plate		5	0	10
				15
				20
				25
				30
				35
Trapezoidal plate		5	0	10
				15
				20
				25
				30
				35

同時に水槽側面から、模型周辺で発生するさまざまな渦を観察することができる。

本文に掲載した写真は、すべて ASA 100 のフィルムを使用し、一般の自動露出カメラで撮影し、現像したものである。撮影距離は上部からの平面写真は約 1.5 m、側面からの微細渦の撮影は 30~50 cm で、照明は水槽上部から 500 W の白熱電球 4 灯を使用した。

2.2.3 湧昇渦の観察方法

物体背後の湧昇渦は、物体の下流 1 m までで充分発達し、それ以降はあまり変化しないことから、観測位置を物体の 1 m 下流の断面とした。粒状染料散布法により溶け出した染料により可視化された、明らかに独立したと見なせる湧昇渦を観察する。湧昇渦 10 個程度について、渦の到達高さ、通過時刻を同時に計測し、それぞれ平均して

湧昇渦の高さおよび発生周期を求めた。

3. 結果と考察

3.1 物体周辺の渦

3.1.1 前面反流域

粒状染料散布法によると、物体周辺に各種の微細な渦が観察できる。**Photo 1** は物体の上流側の反流域に形成される3列の水平渦管を示している。この写真の模型は $L=2H$ の長方形直立板で、流向は右から左、流速は 2.8 cm/s 、 Re 数は1600である。隣合う2列の渦管の接点では、流向が逆になるので水槽底面での流速は低減し、染料が滞留した跡が残される (**Photo 8** 参照)。物体がマウンド形状の場合では上流側に1~2列の弱い水平渦管が見られる。

3.1.2 剥離渦

物体の天端では **Photo 2** に示すような水平軸を持った剥離渦 (以下、水平剥離渦と呼ぶ) が見られる。この水平剥離渦は周期的に発生し、管状に繋がり、ある程度の長さを持つが、天端の長さが長くなると分断される。天端が尖らず、水平面

Photo 1 Side view of three vortices in front of the rectangular plate.

Photo 2 Side view of horizontal vortices shedding from the top of the mound.

を持つ場合は、水平剥離渦には水平面上の上流と下流に2種類のものができる。

物体の側端では **Photo 3** に示すような鉛直軸を持った剥離渦 (以下、鉛直剥離渦と呼ぶ) が見られる。この鉛直剥離渦も周期的に発生し、ある程度の長さを持った管状の渦である。この写真はマウンドの側端部から発生する鉛直剥離渦を示している。

3.1.3 湧昇渦

典型的な湧昇渦は **Photo 4** に示すように、周期的に発生し、一つ一つが独立している。湧昇渦は再付着点付近で発生し次第に発達する。再付着点付近の水槽底では **Photo 5** に示すように、水槽底面に付着した染料が、糸状に上方に引き上げられる現象が見られる。

前述の各種渦の観察結果を総合すると湧昇渦の発生機構は、マウンドを例に図示すると **Fig.1** のようになる。上流側の水面渦管は、物体の側方で

Photo 3 Top view of vertical vortices shedding from the edge of the mound.

Photo 4 Side view of typical upwelling vortices generate from the mound.

Photo 5 Side view of dye lifted by upwelling vortices.

も水槽底面に渦管の境界線の軌跡を残し、螺旋運動をしながら物体背後の低圧力の反流域に入る。同様に、水平剥離渦、鉛直剥離渦も物体背後の反流域の影響を受ける。水平剥離渦は後から発生す

る水平剥離渦を取り込んで大きくなる。反流域に取り込まれた各種渦が合体し、ある程度大きくなると周期的に湧昇渦を放出する。反流域は呼吸するように振動し湧昇渦を発生して縮小し、また渦を取り込んで大きくなる過程を繰り返す。

Table 1 に示した模型について、物体の形状と 1 m 下流で観察される湧昇渦の平均高さ (U_H) の関係を求め Fig. 2 に示した。投影面積 A と高さ H の 2 乗の比が 6 ~ 8 の時、湧昇渦の到達高さは物体の高さの 4 倍以上に上昇する。しかし、2 次元模型ではどの形状の物体でも側方からの回り込みによる鉛直剥離渦が発生せず、水平剥離渦との合体が起こらないため、周期的な湧昇渦は発生しない。

3.2 物体周辺の流況

3.2.1 形状の違いによる差

粒状染料散布法による物体周辺の底面流況は、Photo 6 ~ 9 に示すように、物体形状によって異なる。Photo 6 は平面 30 cm 角、高さ 5 cm の直方体が辺に対して 45° の角度から流れを受けた場合の流況である。この現象は Hunt¹⁾ によって紹介されているが、写真の状況を図解すると Fig. 3 のようになる。

直方体の天端において、流れに対して約 30° 方向に螺旋渦ができる他、物体前面にも反流域に螺旋渦ができている状況が観察される。Photo 7 は直径 30 cm, $H: 5$ cm の円柱、Photo 8 は $L: 10$ cm, $H: 5$ cm の長方形直立板、Photo 9 は $L: 25$ cm, $H: 5$ cm のマウンドの流況である。

粒状染料散布法で、物体上流側の中心線上の水槽底面において流速が 0 になる点 (以下、分流点と呼ぶ)、物体下流側の中心線上の水槽底面で水平流速が 0 になる点 (以下、再付着点と呼ぶ)、再付着点より下流で

Fig. 1 Schematic of flow structures around three-dimensional mound.

A : Projected area of the model, U_H : Mean height of upwelling vortex, H : Height of the model.

Fig. 2 Height of upwelling vortex varied with the projected area of the model and shape of the model.

Photo 6 Top view of the flow patterns around a rectangular box.

Photo 8 Top view of patterns around a rectangular plate. ($L=2H$)

Photo 7 Top view of the flow patterns around a cylinder.

Photo 9 Top view of patterns around a mound. ($L=5H$)

Fig. 3 Schematic of flow structures surrounding a rectangular box.

物体を左右に迂回した流れが中心線上で合流する点（以下、合流点と呼ぶ）、および物体を左右に迂回する水槽底面での流れの様子などが分かる。

$H: 5\text{ cm}$ の長方形直立板の L を変化させて、分流点、再付着点、合流点を求めると Fig. 4 のようになる。 L が長くなるに従って、各点は物体から遠ざかる。2次元模型では再付着点は $10H$ 下流となる²⁾。同様にこれらの関係を長方形板、台形板、マウンド、および2連マウンドでまとめると Fig. 5 のようになる。

また、 $H: 5\text{ cm}$ 、 $L: 30\text{ cm}$ のマウンドについ

D_r : Distance between model and reattachment point, D_s : Distance between model and separating point, A : Projected area of the model, H : Height of the model, L : Length of the model.

Fig. 4 Flow patterns varied with projected area of model. (Rectangular plate)

て、流れに対する方向を変えた場合の周辺流況は Fig. 6 のようになる。この図から、構造物の方向と流れが直交していると再付着点は物体から最も遠く、合流点は明瞭だが、物体が傾くと流況が左右非対称となり再付着点は物体に近づく。 90° まで傾くと流れは整流され、反流域は小さくなり、湧昇渦は発生しなくなる。Photo 6, 7 のように天端に平面を持つ形状の模型では、一度上流端部で剝離渦した渦が平面上で再付着する。物体の側

Two-dimensional model has the longest D_r and D_s . D_r : Distance between model and reattachment point, D_s : Distance between model and separating point, A : Projected area of the model, H : Height of the model, L : Length of the model.

Fig. 5 Relationship between D_r , D_s and A/H^2 .

Fig. 6 Flow patterns varied with incline of the model.

Fig. 7 Flow patterns varied with the distance between model and side wall.

面でも同様に剝離した渦が再付着し、物体周辺の流れは整流される。このように流れが整流される形状では、物体背後で湧昇渦が発達しない。

強い湧昇渦を発生させる物体の形状として天端の長さ L が物体の高さ H の 6～8 倍程度であるのが良く、このような条件では、湧昇渦の平均到達高さは物体の高さの 4～5 倍に達する。しかし、2次元模型では渦の合体が起こらないため湧昇渦は発生しない。

3.2.2 水槽側壁の影響

3次元物体周辺の流況を考える場合、水槽の側壁の影響を考える必要がある。Fig. 7 は天端長

さ $2H$ の直立板を水槽（幅 $=16H$ ）の中央から、順次側壁に近づけた場合の直立板周辺の流況の変化を示したものである。物体を中心線から少し外しただけで、水槽底面の染料による軌跡の形状が非対称になり、すでに側壁の影響を受けている。このような微妙な流況の変化を流速計で求めるのはかなりの労力を要するが、粒状染料散布法では簡単に平面的な底面流況の変化を知ることができる。天端長さ $4H$ の直立板でも流れの迂回状況は同様な形状になる。

4. 結論

1. 粒状染料散布法はレイノルズ数1600程度において、3次元物体周辺の流況や、微細な渦の可視化方法として有効である。特に前面の水平渦、物体表面の微細渦、螺旋渦、湧昇渦などの可視化に有効である。

2. 2次元物体と3次元物体では背後の渦の合体の機構がまったく異なるため、3次元現象を2次元模型に置き換えて実験するのは問題がある。

3. 物体の投影面積と再付着点、分流点の距離は物体の高さ H と延長 L の比によって変化する。

4. 物体背後に発生する湧昇渦は投影断面形状や流れ方向の断面形状によって異なるが、延長 L が高さ H の 6～8 倍の時強くなり、物体の高さの 4 倍以上に上昇する。

参考文献

- 1) Hunt, J. G. R.: The effect of single buildings and structures, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A, 269, (1971), 457-467.
- 2) 鶴谷, 他 3 名: 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性, 港湾技研報告, 26 (2), (1987), 127-169.
- 3) 坂本・羽二生: 層流境界層の中にある垂直平板後方に形成されるアーチ形渦, 日本機械学会論文集 (B 編) 52 巻 473 号 (1986), 290-297.
- 4) Tamai, N., Asaeda, T., Tanaka, N.: Vortex Structures around a Hemispheric Hump, Boundary-Layer Meteorology, 39, (1987), 301-314.
- 5) 山田・大坂: 三次元突起からの放出渦による平面壁近傍流れの変化, 可視化情報, 11-Suppl. 2 (1991), 161-164.