

# 3次元物体背後に発生する湧昇渦に関する研究

鈴木達雄\*・本田陽一\*\*

## 1. 緒言

海底の3次元突起物である天然礁は良い漁場となっている場合が多い。そこには単に漁獲対象生物が蛸集するだけでなく、天然礁周辺の流れや渦が生物の再生産などと密接に関係していると思われる。しかし、天然礁周辺の流れの構造は十分に把握されているとは言えない。礁の端部や凹凸で発生する剝離渦は、振動音を発生し魚介類の蛸集と関係していると思われる。また、礁周辺の流れはプランクトンの集積、水塊の混合、底質の多様化などに関係している。また、礁の後流域には強い上昇力を持つ渦（以下、湧昇渦と呼ぶ）の存在が示唆されており、この湧昇渦による栄養塩の有光層への補給は、生物生産に大きな影響を与えていると考えられる。

物体背後に発生する湧昇渦に関する研究は少ない。しかし、河川における河床の変化（宇民ら、1981）や堆積砂の下流への押し流し（田中ら、1991）、半球体、直立板などの物体周辺の流れ（Tamai ら、1987；山田ら、1991）などで、その存在が示唆されている。天然礁に近い形状の物体背後では、どのような条件で湧昇渦が発生し、その湧昇渦がどの程度底層の水を上層に持ち上げるかを研究したものは無かった。

本文では、3次元物体背後に発生する湧昇渦に焦点を絞り、構造物の形状と湧昇渦との関係、およびその特徴を明らかにするための実験一1、湧昇渦によって有光層に持ち上げられる栄養塩の濃度を定量化するための実験二2について述べる。なお、実験二2の定量化方法およびデータの一部は水産庁の補助事業費で（社）マリノフォーラム21 沿岸漁場造成技術開発研究会が実施したものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験には長さ50m、高さ1.5m、幅0.8mの回流水槽を使用した。実験前に水槽自体が特殊な流れの構造を持たないことを確認した。種々の流速の状況下で底層に

染料を流し、その染料の乱れの状況、特に染料の上層への移流・拡散のないことを確かめた。また、水槽底部の流れの境界層の厚さの違いが、物体周辺の流況に影響すると考えられるので、物体の60cm上流に4mmの整流格子を設置し、境界層厚を2cmとした。

### 2.2 想定する現象の規模と模型

実験では実海域で水深50mの海底において高さ（ $H$ ）、天端の延長（ $L$ ）、幅（ $W$ ）が各々10m、100m、40m程度の規模の礁を想定した。湧昇渦の評価指標として、湧昇渦の到達高さ（ $U_H$ ）と模型の高さ $H$ の比を考えた。さらに前述の幅80cmの回流水槽内で、極端な側壁の影響を受けないよう、基本的には1/200の3次元フルード模型とし、模型を極力水槽中央に設置した。

実海域での最多頻度流速を40cm/sと想定し、これを基準流速とした。したがって、1/200模型ではフルード則により水深を25cm、流速を2.8cm/sに設定した。実海域におけるレイノルズ数（ $Re$ ）は、礁の高さを代表長とすると $4.4 \times 10^6$ となるが、1/200模型では $1.6 \times 10^3$ となる。

実験一1で用いた模型は、基本的にアルミ板を加工し、表面の滑らかなものとした。実験一1に用いた模型の一部を表一1に示す。 $L_B$ は模型の底面長さ、 $A$ は模型の投影面積、 $V$ は模型の体積である。模型の高さ $H$ を水深の1/5の5cmに保ち、模型形状の種類として長方形板、台形板、マウンド型および、2つの円錐の間を円錐の75%の高さのマウンドでつなげたもの（以下、2連のマウンドと呼ぶ）の4種類を使用した。表一1に図示したように、天端の延長を $L$ として、斜面の勾配（ $\theta$ ）は全て1/2とした。

実験二2では、実海域で大規模な構造物が構築可能なものとして、マウンド型を選定し、表二2に示すように湧昇渦の発生しやすい形状を選定した。また、表面粗度を実構造物に近付けるため、中央粒径3mmの砂利を貼り付けた。

### 2.3 湧昇渦の評価方法（実験一1）

予備実験で物体周辺に粒状の固体染料を散布して、流況を調べるとともに、湧昇渦が模型の1m下流では十

\* 正会員 ハザマ 土木営業本部

\*\* 正会員 ハザマ 技術本部

表-1 模型形状例 (実験-1)

| 模 型    | H<br>(cm) | W<br>(cm) | L<br>(cm) | A<br>(cm <sup>2</sup> ) | V<br>(cm <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| マウンド   | 5         | 20        | 0         | 50                      | 524                     |
|        |           |           | 10        | 100                     | 1024                    |
|        |           |           | 15        | 125                     | 1274                    |
|        |           |           | 20        | 150                     | 1524                    |
|        |           |           | 25        | 175                     | 1774                    |
|        |           |           | 30        | 200                     | 2024                    |
| 2連マウンド | 5         | 20        | ∞         | 400                     | —                       |
|        |           |           | 20        | 128                     | 1222                    |
|        |           |           | 25        | 147                     | 1363                    |
|        |           |           | 30        | 166                     | 1504                    |
| 長方形板   | 5         | 0         | 10        | 50                      | 0                       |
|        |           |           | 15        | 75                      | 0                       |
|        |           |           | 20        | 100                     | 0                       |
|        |           |           | 25        | 125                     | 0                       |
|        |           |           | 30        | 150                     | 0                       |
|        |           |           | 35        | 175                     | 0                       |
| 台形板    | 5         | 0         | 0         | 50                      | 0                       |
|        |           |           | 5         | 75                      | 0                       |
|        |           |           | 10        | 100                     | 0                       |
|        |           |           | 15        | 125                     | 0                       |
|        |           |           | 20        | 150                     | 0                       |
|        |           |           | 25        | 175                     | 0                       |

表-2 マウンド模型 (実験-2)

| 模 型    | H<br>(cm) | W<br>(cm) | L<br>(cm) | L <sub>B</sub><br>(cm) | θ     | A<br>(cm <sup>2</sup> ) | V<br>(cm <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| マウンド-1 | 5         | 20        | 20        | 40                     | 1:2   | 150                     | 1524                    |
| マウンド-2 | 6         | 20        | 25        | 45                     | 1:1.7 | 210                     | 2128                    |
| マウンド-3 | 6         | 20        | 30        | 50                     | 1:1.7 | 240                     | 2428                    |
| 2連マウンド | 5         | 20        | 30        | 50                     | 1:2   | 166                     | 1504                    |

分に発達し、それ以降はあまり変化しないことを確かめ、観測位置を模型の1m下流とした。明らかに独立していると見なせる湧昇渦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、それぞれの平均値をとった。

模型の25cm上流、水槽底上5cmからノルズで染料を流し、染料の上昇を観察する。染料の比重、流出速度を一定にするため水槽の水温と染料の温度差を2°C以内に、また水槽と染料容器内の水位差を一定に管理した。

流速測定用のセンサー自体が流れの微細構造を破壊しないように、2成分(主流方向X, 主流に直交する鉛直方向Z)のレーザー・ドップラー流速計を用いた。流れの中心の鉛直断面における代表的な点で、各々150秒間、80Hzでサンプリングを行った。流速測定結果から渦の発生周期を求めるために主流、鉛直方向の流速の変動成分のパワースペクトルと自己相関係数を求めた。

#### 2.4 湧昇量の定量化方法 (実験-2)

湧昇量を定量化するために、下層水の指標として模型

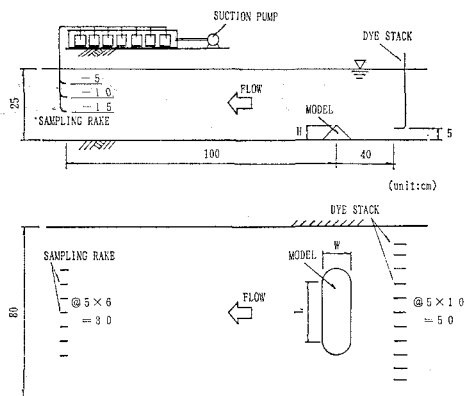


図-1 湧昇量の定量化実験配置図

上流側から染料を流出させ、その染料濃度を模型下流側で測定した。染料流出ノズルおよび採水ノズルは図-1のように配置した。染料には濃度の経時変化が少ないメチレンブルーを用いた。染料の濃度は500μg/cm<sup>3</sup>、流出量は107cm<sup>3</sup>/分とした。

湧昇した染料の濃度は採水ノズルから採水した後、時間平均の濃度として測定した。採水には真空ポンプを使用し、採水ビンを入れた密閉容器内の空気を抜くことで多点から同時に採水した。採水時間は3分間とし、各ノズルからの採水量は約800ccであった。また、染料流出ノズルの上流側にも採水点を設け、その濃度を基準濃度として測定結果から差し引いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 実験-1

##### a) 物体周辺の流況

マウンド型模型を例に物体周辺の流況を図-2に示す。図から以下に示す①～④のような現象が見られる。①物体上流側水槽底面で主流と、前面の反流がぶつかり中心線上で流速が0になる点(以下、分流点と呼ぶ)、②物体下流側中心線上で水槽底面において流速が0になる点(以下、再付着点と呼ぶ)、③物体の左右両側を迂回した流れが再付着点の下流側中心線上で合流する点(以下、合流点と呼ぶ)、④物体周辺の剥離渦などである。

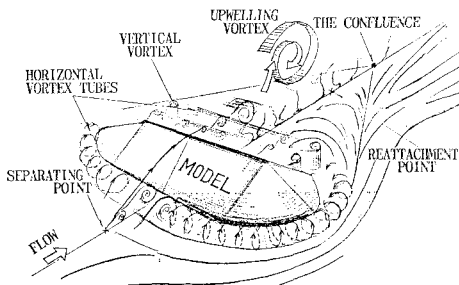


図-2 マウンド周辺流況模式図

## b) 3次元物体周辺の渦

## i) 前面反流域

物体周辺の流況を詳細に観察すると写真-1に示すように、物体の前面反流域に3列の水平渦管が見られる。この場合の物体は  $L=2H$  の長方形板で、主流は右から左、流速は  $2.8\text{ cm/s}$ 、 $Re$  数は  $1600$  である。マウンドの場合、直立板の物体に最も近い水平渦は、マウンドの存在によって邪魔されて形成されず、さらに上流側に1～2列の弱い水平渦管が見られる。

主流は前面反流域の外側を迂回して物体を越える。物体前面の反流域にできる水平渦管の位置はあまり経時変化しない。Tamai ら (1987) は半球形物体の前面の水平渦管について、 $Re$  数との関係を報告しており、 $Re=1500$  程度の場合には水平渦管の数が3列になるとしている。

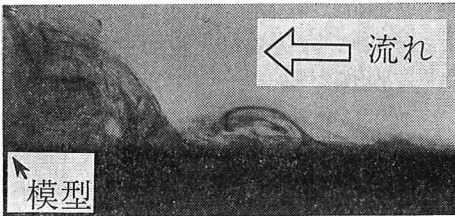


写真-1 模型前面の渦管

## ii) 剥離渦

物体の上流側で発生し、側面を螺旋運動しながら通過し、後流域に取り込まれる螺旋渦の他に、物体から剥離する渦が存在する。写真-2に示すように、マウンド型物体の天端から周期的に水平軸を持つ渦（以下、水平剥離渦と呼ぶ）が発生する。水平剥離渦は水平方向にある程度つながった管状の渦である。また、マウンド型物体の天端側面から、鉛直軸を持つ渦（以下、鉛直剥離渦と呼ぶ）が発生する。この鉛直剥離渦は物体の両端から周期的に発生し、鉛直方向に管状につながっている。

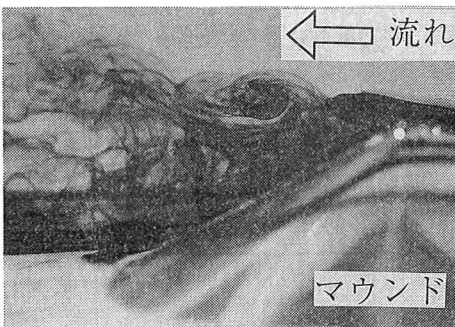


写真-2 マウンド天端の水平剥離渦

## c) 湧昇渦の性質

## i) 投影面積との関係

物体の高さ  $H$  を一定にして、流れに対する投影面積

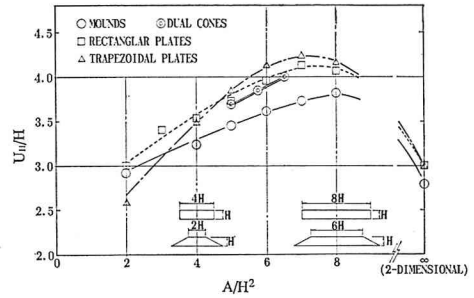


図-3 投影面積と湧昇渦高さの関係

を順次変化させ、前述の4種類の形状の物体の後流域で発生する湧昇渦の到達高さを図-3に示す。

投影面積と高さの2乗の比 ( $A/H^2$ ) が6～8の時に湧昇渦の到達高さは高くなり、平均値で物体の高さの4倍を越える。しかし、2次元模型では、直立板でもマウンド状の三角柱でも、側方からの回り込みによる鉛直剥離渦が無く、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。

物体の形状は、同じ投影断面積で比較すると、台形板、長方形板、マウンド型の順で強い湧昇渦を発生する。また、投影面積  $6H^2$  の場合マウンドの天端長  $L$  は  $4H$  だが2連マウンドでは約  $6H$  と大型になる。

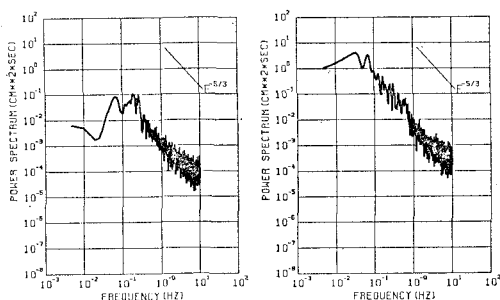
レイノルズ数の違いによって大きく現象が変わらないことを確認するために、 $1/150$  フルード模型でも比較実験を行った。流速が速くなるため、現象が可視化しにくくなるが、湧昇渦の発生状況、到達高さや物体の高さとの関係は、 $1/200$  の場合と同じ傾向であった。

## ii) 湧昇渦の発生機構

前面の反流域を螺旋運動で脱出した水塊は、物体の側方でも前面と同様な渦列の境界線の軌跡を水槽底面に残す。物体を通過した水塊は回転しながら物体背後の低圧な反流域に引き込まれる。反流域に取り込まれた渦がある程度大きくなると、間欠的に湧昇渦を放出する。この結果、反流域は縮小し圧力低下を生じ、また渦を捕捉する。これを繰り返す、間欠的に湧昇渦を発生させる。

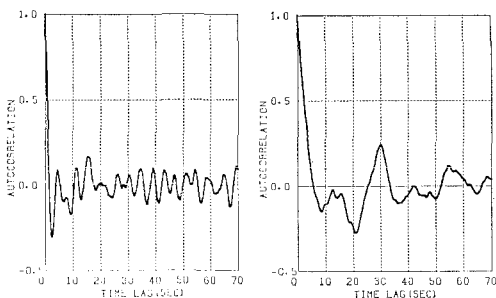
マウンド背後の鉛直流速変動成分のパワースペクトルと自己相関係数を図-4に示す。マウンドの天端から発生する水平剥離渦の発生周期 ((a), (c) 参照) は、再付着点付近における湧昇渦の発生周期 ((b), (d) 参照) の約  $1/4$  になっており、水平剥離渦などが4周期分程度、物体背後の反流域内で合体したと見なせる。

湧昇渦発生の原動力は、水平剥離渦、あるいは鉛直剥離渦単独ではない。それは、2次元模型では天端の水平剥離渦はできるが、鉛直剥離渦がないため湧昇渦が発生しないこと、円錐型模型では鉛直剥離渦はあるが、天端での水平剥離渦が発達せず、湧昇渦が大きくなりえないことから推測できる。



(a) パワースペクトル 水深 15 cm  
模型天端より 50 cm 下流

(b) パワースペクトル 水深 15 cm  
模型天端より 10 cm 下流



(c) 自己相関 水深 15 cm  
模型天端より 50 cm 下流

(d) 自己相関 水深 15 cm  
模型天端より 10 cm 下流

図-4 鉛直流速変動成分のパワースペクトルと自己相関 (マウンド-2)

再付着点付近で上昇し始めた湧昇渦は、合流点より下流でも、更に回転しながら 20H 程度下流まで上昇を続ける。湧昇渦はその上昇力と回転力で水槽底面に付着している染料を糸状に上方に吸い上げる。湧昇渦は、水槽底部で模型の側方から合流点にむけて集中する周辺の流れにより、さらに上方に押し上げられる。

反流域が大きいと、その中で蓄積されるエネルギーも大きく、湧昇渦の発生周期が長くなり湧昇渦が大きくなる。水槽の幅の制限で、側壁の影響が無視できなくなるため、投影面積が  $8H^2$  を超える実験はできなかった。しかし、投影面積が  $8H^2$  以上になると、次第に 2 次元模型に近くなる。そして、鉛直剝離渦の影響が相対的に小さくなり、物体の 3 次元性による渦の合体の効果が悪くなると推測できる。湧昇渦を効率良く発生させるためには、流れに対する投影面積が  $6H^2$  以上であることが望ましい。しかし、 $8H^2$  では既に若干湧昇渦の高さが低下する傾向がある。

### 3.2 実験-2

#### a) 湧昇による濃度分布

2 連マウンドの濃度測定結果を図-5 に示す。図中の丸印は採水点で 5 cm 間隔であり、等濃度線は略同心円状になる。ただし、この値は時間平均値であって、実際

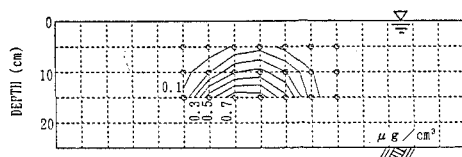


図-5 濃度分布 (2 連マウンド)

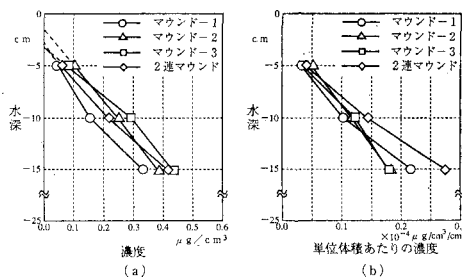


図-6 水平平均濃度分布

には染料濃度の濃い湧昇渦が間欠的に通過している。模型による湧昇量の違いをみるため、水平に設置した 7 点の採水点の平均値を図-6 (a) に示す。模型の体積が大きいほど染料の上昇量が多い。そこで、模型の単位体積当たりの効率を比較するために、模型の単位体積当たりの染料濃度を図-6 (b) に示す。この結果によると、2 連マウンド以外の形状では単位体積当たりの効率にあまり差が見られないのに対し、2 連マウンドは高さが 5 cm と低いにも係わらず、単位体積当たりの効率が良いことが分かる。

模型の向きを変化させ、流れを  $45^\circ$  斜めや横から当てた場合、湧昇量が大幅に低下した。これは、模型の投影面積が小さくなることよりも、流れが整流され剝離渦が発生しにくくなり、湧昇渦が発達しなくなることによると考えられる。また、流速を半分の  $1.4 \text{ cm/s}$  (実海域で  $20 \text{ cm/s}$ ) とすると底層の水はほとんど有光層まで到達しなくなる。

#### b) 湧昇量の定量化

測定結果から、底層の栄養塩が有光層に上昇する量を定量化し、その結果を表-3 に示す。ノズルから流出する染料が底層に一樣に分布したものと仮定すると、水路横断方向の単位時間単位幅当たりの染料流下量は  $16.2 \mu\text{g/s/cm}$  である。模型による湧昇の影響を受ける範囲を模型の底面の長さとし、その長さに単位時間単位

表-3 マウンドの湧昇量

| 模 型    | ①被影響染料<br>流下量<br>( $\mu\text{g/s}$ ) | ②湧昇量<br>( $\mu\text{g/s}$ ) | ③湧昇効率<br>②/① | ④単位面積あ<br>たり湧昇量<br>( $\mu\text{g/s/cm}^2$ ) |
|--------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------------------------|
| マウンド-1 | 648                                  | 164                         | 0.253        | 0.108                                       |
| マウンド-2 | 729                                  | 250                         | 0.343        | 0.117                                       |
| マウンド-3 | 810                                  | 261                         | 0.322        | 0.107                                       |
| 2連マウンド | 810                                  | 283                         | 0.349        | 0.188                                       |

幅当たりの染料流量をかけた値に影響を受ける染料流量①とする。濃度×湧昇面積×流速で得られる有光層を通過する染料の流量を湧昇量②とし、湧昇の効率を②/①とする。模型の単位体積当たりの湧昇量は④であり、2連マウンドの効率が良いことがこれからも確認できる。

#### 4. 結 論

本研究により、次のような結果を得た。

(1) 3次元物体の下流には、再付着点付近で強い上昇力を持つ湧昇渦が間欠的に発生する。湧昇渦の到達高さは物体形状の影響を受ける。

(2) 3次元物体では物体背後の反流域で水平剝離渦と鉛直剝離渦が合体し湧昇渦ができるが、2次元模型では鉛直剝離渦が無いため湧昇状況が全く異なる。

(3) 同一投影面積の長方形板、台形板、マウンドで比較すると台形板が大きな湧昇渦を発生する。どの形状とも強い湧昇渦を発生する投影面積は  $6\sim 8H^2$  である。

(4) 同一投影面積のマウンドにおいて、湧昇渦発生効率を比較すると2連マウンドは、普通マウンドより湧昇渦到達高さが高く発生周期が短いため優れている。

(5) 湧昇渦は水平渦と鉛直渦が後流域の負圧領域で捕捉され合体することにより生成される。合体した渦と負圧域のバランスが崩れ、湧昇渦が周期的に放出される。湧昇渦の到達高さ、発生周期は物体の再付着点距離と関係がある。

(6) 物体の前面にできた水平渦内で水粒子は、螺旋運動しながらほぼ物体高さと同じ渦直径を維持して物体側方を通過する。この螺旋渦は洗掘や堆積に関係する。その影響距離は構造物の高さ程度である。マウンドの場合この螺旋渦の強さは直立壁に比較して小さい。

(7) 下層水に染料を流し、模型下流側で流れを横切る鉛直断面の染料濃度を測定することにより、湧昇の状況を表すことができ、湧昇量を定量化することができた。

本文では可視化によって、物体の形状とその背後に発生する湧昇渦の関係を明らかにし、定量化の方法を提案した。このような湧昇渦の性質は天然礁においても同様と考えられる。一方、天然礁が理想的な形状と流れに対する方向を持つ確率は小さい。したがって、湧昇渦を効率的に発生させるためには、天然礁を部分的に改良し、実海域の卓越流向に対して理想的な形状になるような改良、あるいは新たな湧昇渦発生礁の造成が考えられる。本実験は密度成層の無い一様流で行ったが、実海域の条件に少しでも近づけるためには、著者らが2次元模型で行った(鈴木ら, 1988)ような、密度成層流を発生させた3次元模型による実験が必要である。

謝辞：前述の研究会の中村充座長ほか専門家、会員の皆様から貴重なご指導、助言を頂いたことを深く感謝する。

#### 参 考 文 献

- 宇民 正・上野鉄男 (1981): 河床波上の流れの三次元構造, 京大防災研究所年報, 第24号 (B-2), pp. 297-313.
- 鈴木達雄他 (1988): 湧昇流発生構造物の湧昇特性に関する研究, 間組研究年報, pp. 249-256.
- 田中規夫・金子哲也 (1991): 物体周りの組織渦を利用した浮遊砂の促進について, 水工学論文集, 第35巻, pp. 365-370.
- 山田英巳・大坂英雄 (1991): 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, 第11巻, Suppl. No. 2, pp. 161-164.
- Tamai, N., T. Asaeda and N. Tanaka (1987): Vortex structure around a hemispheric hump, Boundary-layer meteorology, Vol. 39, pp. 301-314.