

# 3次元数値シミュレーションに基づく 大水深海域での湧昇流生成構造物の開発

DEVELOPMENT OF THE UPWELLING STRUCTURE IN DEEP SEA  
BASED ON THE 3-D NUMERICAL SIMULATION

木田英之<sup>1</sup>・井内国光<sup>2</sup>・中村孝幸<sup>3</sup>

Hideyuki KIDA, Kunimitsu INOUCHI and Takayuki NAKAMURA

<sup>1</sup>正会員 工修 新日鉄エンジニアリング(株) 若松工場 (〒808-0022 福岡県北九州市若松区大字安瀬64)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 愛媛大学准教授 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

<sup>3</sup>正会員 工博 愛媛大学准教授 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

In this study, the magnitude of upwelling and resultant convective and mixing zone about the upwelling structure have been examined by the 3-D numerical simulation method. The computation area about the upwelling structure was 2400 m long, 960 m wide and 200 m deep. The finite differential method was applied for the discretion. The marker layer of 14m thick was placed on the bottom in order to visualize the upwelling. We have adopted three different shapes of upwelling structure, such as I-shaped, V-shaped and X-shaped plates in the horizontal plane.

Based on the results on a series of numerical experiments, it has been revealed that the most effective structure is the V-shaped plate for generating the upwelling and resulting mixing in the 3-D flow field. It is also seen that the vortices are generated from both wing edges of the V-shaped structure. The analysis on the V-shaped structure with various heights and open width and angles was carried out for the most effective structure.

*Key Words : Upwelling, 3-D numerical simulation, artificial structure, deep sea*

## 1. はじめに

一般に海洋の表層は内湾や沿岸のごく近傍を除き、栄養塩類の供給不足であり、植物性プランクトンの増殖が抑えられている。しかし水深50m以深の層には栄養塩類が豊富に含まれていることが知られている。これらを湧昇させ、有光層まで到達させれば基礎生産力を大幅に高めることが出来る。従来、こうした鉛直循環流の作成法には、ポンプによる方法、気泡による方法など様々なものが考案されているが、その中で流れを構造物に衝突させる方法は自然のエネルギーをそのまま利用する方法であり、経済的であり大規模なものにも利用可能である<sup>1)</sup>。これまでに海域の生産力の増強を目的として、衝立構造の湧昇流構造物などが提案され、その有効性などが明らかにされているが、多くは水槽実験での再現であり、構造物幅に対して水路幅は比較的狭い。

本研究は、やはり人工構造物を海底に設置することで湧昇流を発生させ、海域の生産力の増強を図るものである。ただし、海域としては、大陸棚を想定した大水深海域とし、水路幅も比較的大きく取っている。ここでは、このような大水深海域においても経済的に建設可能で、しかも水面付近まで達するような湧昇流が生起できる効果的な人工底設構造物の

形状を模索し、その構造物周辺の3次元的な流れ特性について数値シミュレーションによって検討したものである。

## 2. 数値解析法

### (1) 数値モデル

本研究では、DHIで開発されたMIKE3を用いて数値計算を行い、湧昇流の挙動を考察した。今回の使用モデルではBoussinesq近似を採用し、静水圧近似は使用していない。また乱流モデルは $k-\epsilon$  2方程式乱流モデルを用い、この場合の各パラメータは一般に用いられている値を採用した。離散化には空間、時間とも差分法を採用した。図-1に計算に用いた水平方向のメッシュ分割法を示す。この解析ではNested Hydro-Dynamic moduleを用い、メッシュ間隔は構造物設置付近で水平方向に8m、鉛直方向に4m、構造物から離れたところでは、水平方向に24m、鉛直方向に4mである。

解析領域は長さ2400m、幅960m、水深200mの水路である。水路の中央部、 $x=500m$ 、 $y=480m$ を中心とする位置に以下に示す構造物を設置した場合の流況場について数値実験を行った。

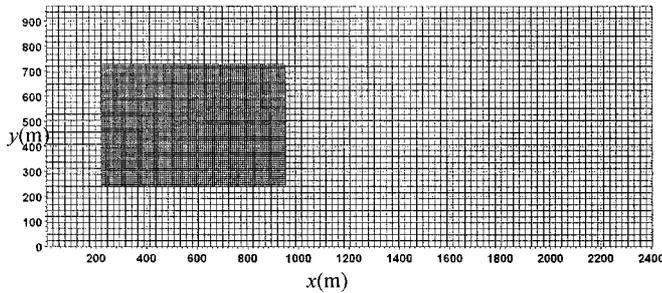


図-1 水平方向のメッシュ分割

## (2) 設置構造物の諸元

構造物の形状によって発生する湧昇流の規模は様々となる。この研究では以下に示すように3種類の湧昇流を発生させる構造物を想定し、数値計算を行った。

### I字型構造物(Type I)

長さ 150m, 高さ 30m のシンプルな構造物である。

### V字型構造物(Type V)

開口部の幅  $W=150\text{m}$ , 高さ 30m, 開口角度  $90^\circ$  を有するV字型構造物(Type V90)を主として解析したが、開口部の幅が 250m と大きい場合(Type V90), また高さが 15m, 60m の場合についても計算した。さらに開口部の角度が  $120^\circ$  と上述のものより大きい場合(Type V120), さらに  $60^\circ$  と小さい場合(Type V60)についても計算した。

### X字型構造物(Type X)

流れの上流側と下流側に対称の開口部を有するX字型構造物である。両開口部の幅は 150m, 高さ 30m である。図-2 にこれらの構造物の平面形状を、図-3 に Type I, Type V90, Type X の鳥瞰図を示す。

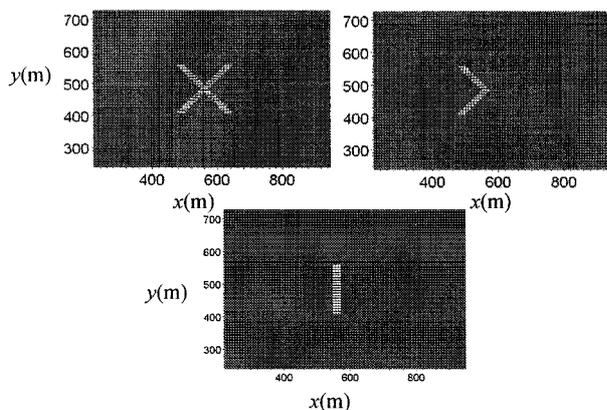


図-2 構造物の水平形状

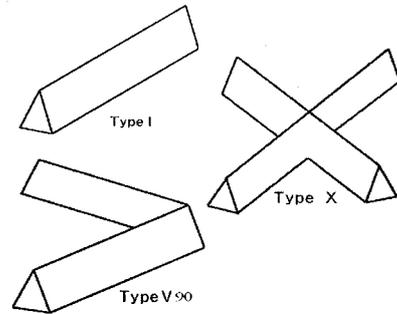


図-3 構造物の鳥瞰図

## (3) 可視化法

湧昇流の発生の状況を可視化するために水粒子と同じ動きをするトレーサー物質を海底付近に設置した。初期状態として、底面から厚さ14mの領域に無次元濃度1の物質を敷き詰め、左右の境界で同様の濃度値を解析時間中与えた。トレーサー物質の移動は移流項のみを考慮し、渦度拡散係数は0とした。この低層のトレーサー物質が巻き上がる様子から、湧昇流の規模が判断できる。

## (4) 境界条件および初期条件

構造物の左側境界が流入口であり、ここでは流速を指定した。右側境界の流出口では水位を指定し、解析期間中、一定水位を維持した。海底ではノンスリップ条件を設定し、海底摩擦を考慮して粗度長を 0.05m とした。側面はスリップ条件、上面は自由水面となっている。流入口での流速はほとんどの場合、時間的に変動のない一定値として解析したが、潮流を想定して正弦波的に変動をする場合も解析した。なお、今回は一定流速の結果のみを示す。採用した主流の流速は主に 0.3m/s であるが、0.5m/s と大きい場合、0.1m/s と小さい場合についても計算した。初期条件はすべての解析領域で流速が0の場合から出発するので、急激に流入口で流速を上げるとショック波が発生する。このことを避けるため、20分間はウォームアップ時間とし、線形的に流速を増加させた。

## 3. 解析結果および考察

ここでは上述のそれぞれの構造物まわりの流況について、まず底質巻き上がりの可視化結果と流速ベクトルの計算結果を示し、次に、鉛直方向の濃度フラックス変動を算出し、構造物間の比較・検討を行う。

### (1) 底質巻き上がりの可視化結果と流速ベクトル

#### a) 構造物の形態の違いによる比較

Type I, Type V90, Type X の3種類を高さ  $H=30\text{m}$ , 流入流速  $u=0.3\text{m/s}$  という同じ条件で比較した。

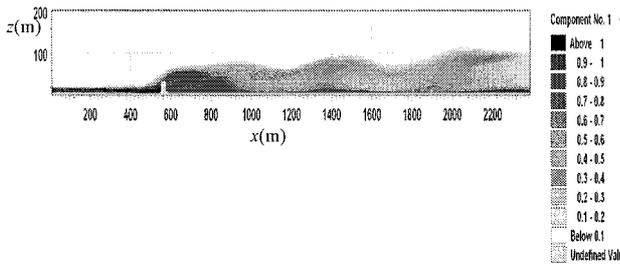


図-4 濃度分布 ; I字型 3時間後

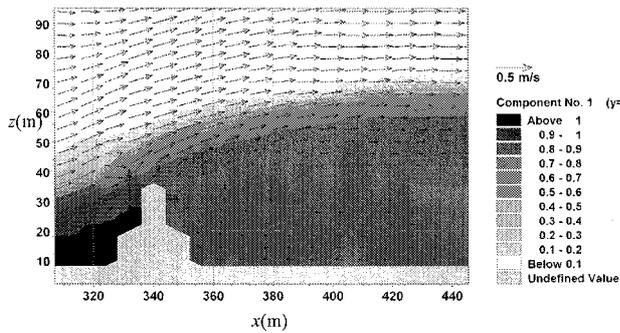


図-5 流速分布および濃度分布 ; I字型 3時間後

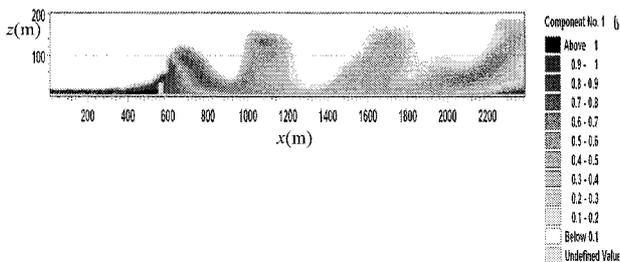


図-6 濃度分布 ; V字型 3時間後

図-4 に Type I の場合の 3 時間経過後の低層トレーサー物質の濃度分布を示す。上述のように、このトレーサー物質は水粒子と同じ物性を有し、海底上 14m で濃度が 1 から 0 に階段状に変化するよう与えているので、その分布の変化から巻き上がりの状態をみる事ができる。この図は  $x$  軸に平行な  $x$ - $z$  軸断面 ( $y=480\text{m}$ ) で切った鉛直断面図で示している。構造物の背後でトレーサー物質の多少の巻き上がりが起こり、波打っており、水深 100m 付近までは届いている。また、この Type I ではトレーサー物質の濃度の時間変動は小さかった。図-5 に同時刻の構造物背後の流速場を濃度分布とともに示す。背後で底面付近の流れが主流と逆向きとなり、構造物に沿って上向きの上昇流が生じているが、規模は小さいようである。

図-6 に Type V90 の場合の 3 時間経過後の低層トレーサー物質の巻き上がりを示す。Type I の場合に

比べて、構造物の背後でトレーサー物質の大きな巻き上がりが見られ、大きく波打っており、水深 30m 付近まで届いている。またこの巻き上がりは周期的であり、その周期は 30 分程度である。図-7 に構造物背後の流速場を示す。背後で上向き大きな上昇流が生じ、その流れによって低層トレーサー物質が運ばれる様子が見て取れる。

図-8 に Type X の場合の 3 時間経過後の低層トレーサー物質の巻き上がりを示す。主流の流速は 0.3m/s である。Type V90 に比べて上がり方が少なく、Type I とほぼ同程度の巻き上がりしか見られない。

以上、3者の比較ではV字型構造物が最も巻き上がり大きい。図-9にV字型構造物の場合における、この構造物から下流方向に400m下った $x=840\text{m}$ の位置での $y$ - $z$ 軸断面における流速分布を示す。ほぼ左右対称の一对の大きな渦がみられ、低層トレーサー物質を大きく巻き上げているのが見て取れる。

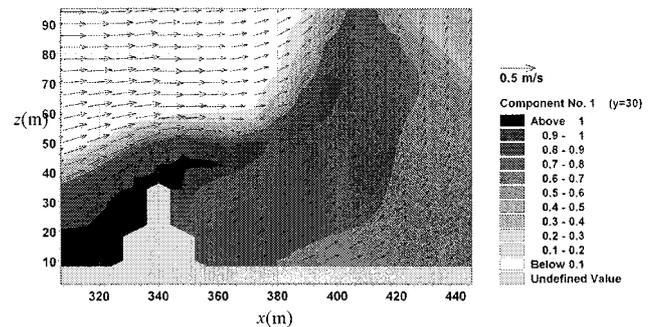


図-7 流速分布および濃度分布 ; V字型 3時間後

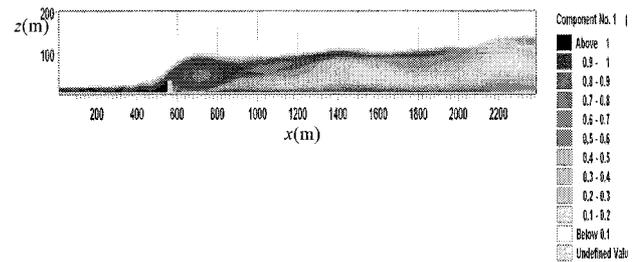


図-8 濃度分布 ; X字型 3時間後

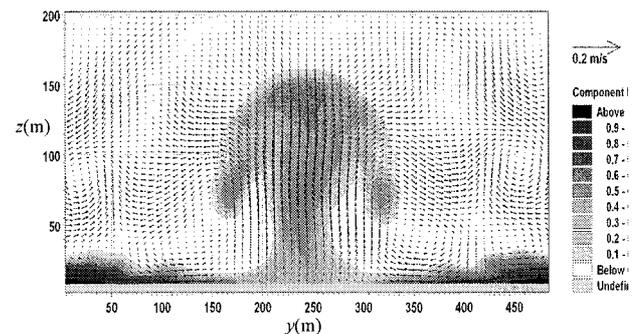


図-9 流速分布および濃度分布 ; V字型 W=150m

V字型構造物では構造物の後流域の剥離領域内に発生する収束上昇流が生じ、また剥離領域内から放出される馬蹄形状の組織渦の自己誘導速度の両者の効果が作用して大きな巻き上がりを示すことが指摘されている<sup>1), 2), 3), 4)</sup>が、現地スケールの大水深においても確かめられた。なお、X字型構造物で巻き上がりが少ないのは、馬蹄形状の組織渦がV字型ほど良く成長しないためである。

#### b) V字型構造物における高さ、開口幅・角度の違いによる比較

構造物の形態の違いによる比較で一番大きな巻き上がりが見られたV字型構造物の中で高さ、開口幅・角度等の違いによる比較を行った。

構造物の高さの違いは低層トレーサー物質の巻き上がりの大きさに顕著に表れ、図-10 に示すように構造物の高さが60mと2倍の高さの場合には、低層トレーサー物質が表層にまで届いている。図-11に開口部の幅がW=250mと大きい場合の解析結果を示す。図-6のW=150mのものに比べて巻き上がりは大きくなっている。開口角度の違いでは開口角度60°はTypeV90(開口角度90°)と同程度の上昇を示したが、開口角度120°ではあまり上がらなかった。

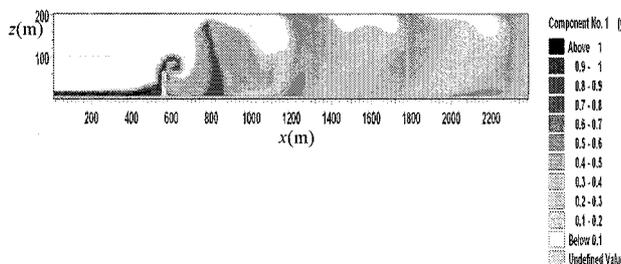


図-10 濃度分布 ; V字型 h=60m 3時間後

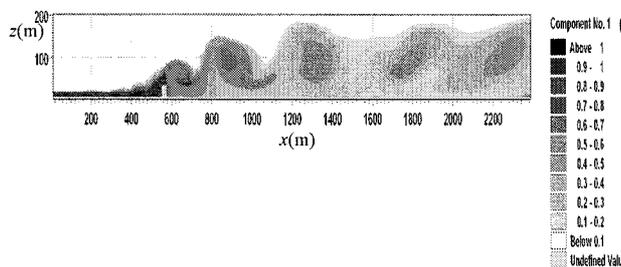


図-11 濃度分布 ; V字型 W=250m 3時間後

図-12 および図-13 に TypeV90 において、主流の流速値を  $u=0.1\text{m/s}$ ,  $0.5\text{m/s}$  と変化させた場合の3時間経過後の低層トレーサー物質の巻き上がりを示す。流速が  $0.3\text{m/s}$  の場合のものに比べて  $0.1\text{m/s}$  と流速が小さい場合でも、同様の巻き上がりが起こっている。また、流速が  $0.5\text{m/s}$  と大きい場合でも  $0.3\text{m/s}$  の場合のものと同じくは変わらない。なお、 $u=0.1\text{m/s}$  の場合は主流の流速が小さいので、濃度

分布が周期性は示すが、ほぼ定常状態となるまでの時間は長い。

#### (2) 鉛直方向の濃度フラックス変動

定量的に各構造物の低層トレーサー物質の巻き上げ効果を比較するために、図-14に各Type(Type I, TypeV90, TypeX, TypeVW90, TypeV60, TypeV120)における鉛直方向の濃度フラックスを、図-15にTypeV90において主流の流速値を  $0.1\text{m/s}$ ,  $0.3\text{m/s}$ ,  $0.5\text{m/s}$  とした場合の鉛直方向の濃度フラックスを、図-16にTypeV90において構造物の高さを15m, 30m, 60mとした場合の鉛直方向の濃度フラックスを示す。検査断面は高さが  $z=-100\text{m}$  で、水平面は  $x=240\text{m}$  から  $1200\text{m}$ ,  $y=240\text{m}$  から  $720\text{m}$  の面積  $460800\text{m}^2$  の領域である。

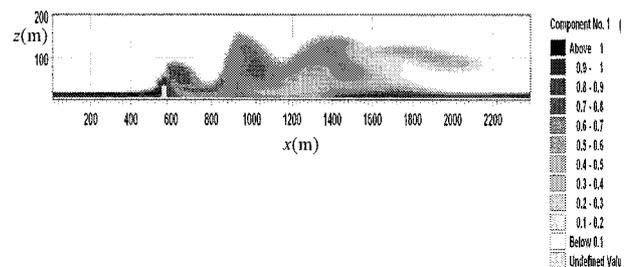


図-12 濃度分布 ; V字型  $u=0.1\text{m/s}$  5時間後

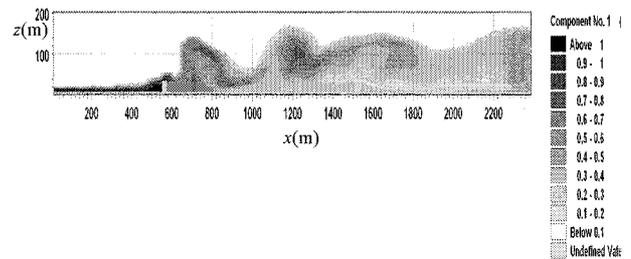


図-13 濃度分布 ; V字型  $u=0.5\text{m/s}$  3時間後

#### 構造物の形態の違い

各Typeにおける鉛直方向の濃度フラックスを比較すると(図-14), 各Typeとも濃度フラックスは一定ではなく変動を示す。Type I と Type X は Type V に比べて、濃度フラックスの値が非常に小さいことがわかる。

#### 開口部の角度の違い

同じV字型構造物において開口部の角度の違いによる巻き上げ効果の相違をみると(図-14), 角度が60°(TypeV60)および120°(TypeV120)のものに比べ90°(TypeV90)の場合が巻き上げ効果の大きいことがわかる。

#### 開口幅の違い

TypeV90(開口幅:150m)とTypeVW90(開口幅:250m)を比べると(図-14)TypeV90は変動が大きい。一方、TypeVW90はあまり変動がなく、比較的コンスタントに低層トレーサー物質を巻き上げていることがわかる。

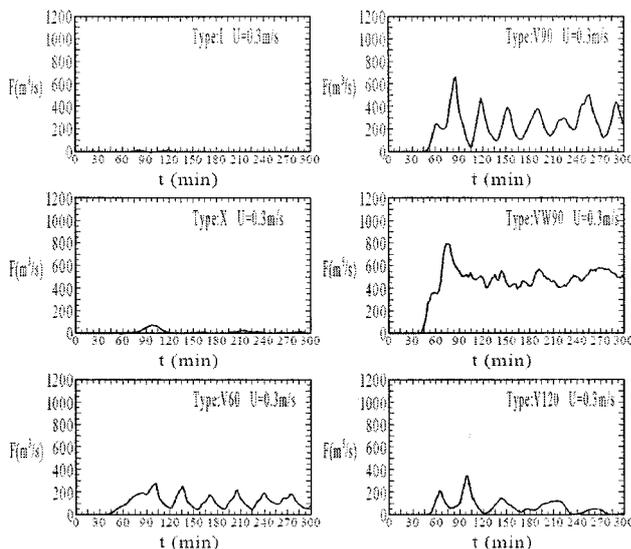


図-14 各Typeにおける鉛直方向の濃度フラックス経時変化

### 主流の流速の違い

Type V90において主流の流速値を0.1m/s, 0.3m/s, 0.5m/sとした場合の鉛直方向の濃度フラックスの違いを比較すると(図-15), 主流の流速が大きいと濃度フラックスは大きくなり, また変動の周期も短くなっている。

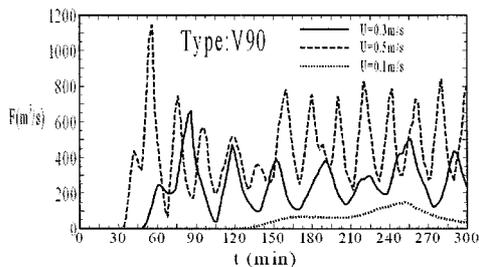


図-15 Type V90における種々の主流流速による鉛直方向の濃度フラックス経時変化

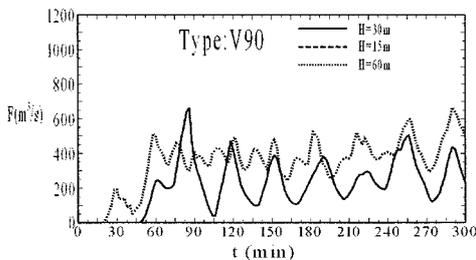


図-16 Type V90における種々の構造物高さによる鉛直方向の濃度フラックス経時変化

### 構造物の高さの違い

Type V90において構造物の大きさを15m, 30m, 60mとした場合の鉛直方向の濃度フラックスの違い

を比較すると(図-16), 構造物の高さが15mと低い場合にはほとんどフラックスが生じていない. 60mの場合は30mと比べて平均のフラックスは大きい, 変動幅は逆に小さい。

### 主流に対する設置角度の違い

これまでの解析では構造物は主流の流れの向きに対して直角に設置してあるが, その設置角度による濃度フラックスの違いを比較した. 図-17に構造物の主流に対する設置角度を0°, 5°, 10°とした場合の鉛直方向の濃度フラックスを示す. また図-18に設置角10°の平面形状を示す. 設置角度が5°傾いている場合には傾いていない場合(0°)と比べて, 少し巻き上がりが小さくはなっている. 濃度フラックスの平均値は傾いていない場合の80%であり, 減少はそれほどでもない. しかし10°傾いている場合には巻き上げ効果が急激に減少し, 濃度フラックスの平均値は26%であった. また210min以降は0に近い値となっている。

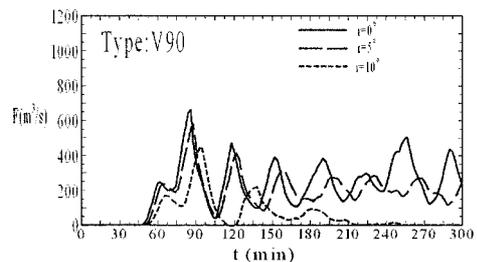


図-17 Type V90における種々の設置角度による鉛直方向の濃度フラックス経時変化

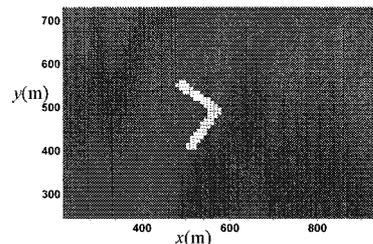


図-18 設置角10°のV字型構造物の水平形状

### (3) 成層場での予備実験

この研究では主に実験室で過去に行われた結果が大水深でも成り立つかについて数値解析により検討した. したがって密度変化は考慮していない. しかし, 自然界で夏季に温度および塩分成分層が発達し, 鉛直混合を妨げる大きな要因となっている. ここでは予備実験として試験的に行った成層場での結果を簡単に示し, 本格的な解析と考察は次回の課題としたい。

解析では上述の流れ場と濃度場の解析に温度場と塩分場を解くモジュールを加えた. 温度場の初期条件は水面で20°, 海底で18°とし, 内部は線形で変化させた. また塩分場の初期条件は水面で34.3PSU,

海底で34.7PSUとし、同様に内部は線形に変化させた。左右の境界条件については温度場、塩分場とも初期条件と同様の濃度値を解析時間中与えた。

図-19 および図-20 に Type I と Type V の 3 時間経過後の低層トレーサー物質の巻き上がりの状態と温度場を示す。上段が濃度、下段が温度である。Type I に比べ Type V の方が巻き上がりが大きい、上述の一樣場の場合に比べて巻き上がりが制限され、温度場では内部波が見られる。

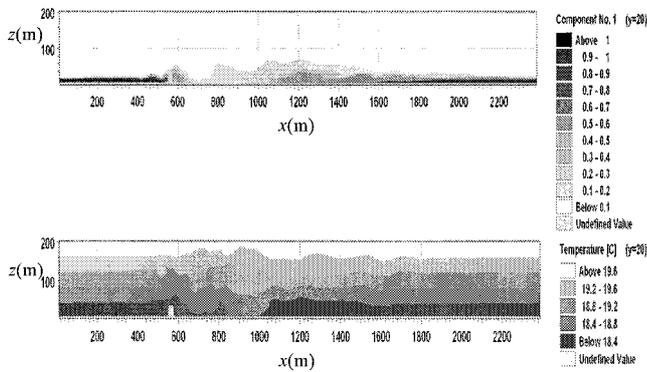


図-19 濃度分布と温度分布；I字型 3時間後

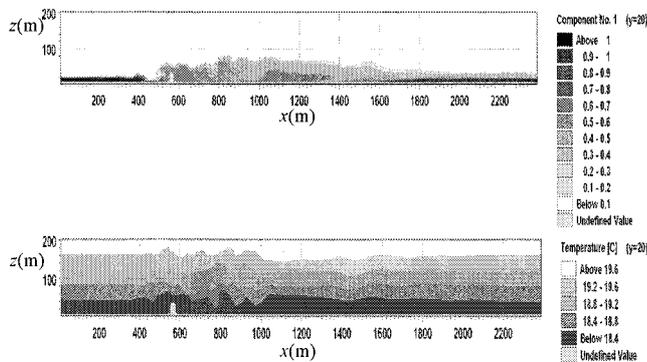


図-20 濃度分布と温度分布；V字型 3時間後

#### 4. おわりに

本研究は、どのようにすれば大水深の海底に設置した人工構造物から湧昇流をより効果的に発生させることができるかについて、様々な構造物や流況を想定して、 $k-\epsilon$  方程式乱流モデルを用いた非定常の3次元数値シミュレーションにより検討してきた。この際、低層にトレーサー物質を置き、流況を可視化することで構造物の有効性などを判定した。得られた結果は次のようである。

まず、今回の研究の中で使用した構造物、I字

型、V字型、X字型の中ではV字型構造物が一番水面に近いところまで低層トレーサー物質を巻き上げており、検査断面における鉛直方向の濃度フラックスも他のものと比べて明らかに大きい。また開口部の角度の違いでは60°と90°は同程度の低層トレーサー物質の巻き上がりを示しているが、検査断面における鉛直方向の濃度フラックスを比べてみると90°が一番巻き上げ効果が大きいことがわかった。したがって、これまでの水槽実験で示されているように、開口角度90°のV字型構造物が大水深の現地においても、湧昇流生成に効果的である。

V字型構造物の開口部の幅の違いについては、流況の可視化による結果では、際だった違いを示さないが、鉛直方向の濃度フラックスを調べると、幅の広い方は比較的コンスタントに低層トレーサー物質を巻き上げていることがわかった。また、構造物の高さの違い(15m, 30m, 60m)では、高くするにつれ、低層トレーサー物質の巻き上がりが大きくなっている。鉛直方向の濃度フラックスも高さ60mは30mのと比べて平均の濃度フラックスが大きく、変動幅も小さい。したがって構造物の大きさは、幅も高さも大きいほうが湧昇流の生成に効果的であることがわかった。

設置場所での流速の違い(0.1m/s, 0.3m/s, 0.5 m/s)については、流況の可視化による結果では、際だった違いを示さないが、鉛直方向の濃度フラックスを比較すると、流速が大きいほうが濃度フラックスが大きく、さらに変動の周期も短くなっており、平均して濃度が高くなっている。また構造物の主流方向よりの設置角度の違い(0°, 5°, 10°)では、鉛直方向の濃度フラックスを比較すると角度が5°の場合には垂直な場合と比べて濃度フラックスの平均値が80%くらいになる。しかし角度が10°になると濃度フラックスの平均値は、20%程度と極端に小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 浅枝 隆, 其阿弥善嗣, 吉田一男: V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率, 海洋開発論文集, 7巻, pp.387-392, 1991.
- 2) 浅枝 隆, 中井正則, 玉井信行, 堀川清司: V字形構造物による上昇流, 土木学会論文集, 423/II-14号, pp.83-90, 1990.
- 3) 池田駿介, 武若 聡, 二瓶泰雄, 秋山信義: 各種構造物による湧昇流の発生に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 39巻, pp.896-900, 1992.
- 4) 有田正光: V字型構造物による上昇流の可視化, 可視化情報, Vol.18, pp.40-45, 1998.