

海底構造物によって誘起される人工湧昇流の可視化実験

永松哲郎^{1*}、中村啓彦²、野元達美³、中尾 智¹

Flow Visualization of an Artificial Upwelling Induced by Various Shapes of Marine Structure Installed on the Seabed

Tetsuo Nagamatsu¹, Hirohiko Nakamura², Tatsumi Nomoto³, Satoshi Nakao¹

Keywords: Artificial upwelling, Flow visualization, Towing tank, V-shaped structure

Abstract

The upwelling current brings up nutrient-rich water from subsurface towards sea surface. If a plenty of nutrient are supplied into the euphotic zone, the primary productivity will be increased there by enhancement of photosynthesis. As a result of a food chain, the upwelling region becomes an area of higher fishery production. In order to generate the upwelling artificially, various shapes of marine structures installed on the seabed are studied so far. The present paper describes the results of flow visualization carried out for models of marine structures which generate upwelling effectively. The shapes of marine structure used in the experiments are a triangle cylinder like mountain range, a vertical wall, V-shaped structure and various combination of two V-shaped structures, such as X-shaped, W-shaped and so on. Flow visualization tests were carried out in a small towing tank whose dimensions are 4m long, 0.5m wide and 0.4m deep. The carriage runs on the bottom of the tank with constant speed by use of towing wire. The malachite green of basic dyes was used as a tracer. The height of models used is 3cm and the speed of carriage is 0.05m/s, and then Reynolds number was about 1350. It is found that if the subsurface current flows in one way direction, V-shaped structure induces the most effective upwelling. On the other hand, X-shaped structure generates upwelling effectively in all directions of current.

栄養塩を豊富に含む深層水を人為的に表層の有光層まで湧昇させることにより、植物プランクトンや海藻の増殖を図る海域肥沃化による水産生物の増殖が期待されている。長沼¹⁾は、現在の漁獲量は持続可能な漁獲の限界近くにまで達しており、漁獲量を増やすために人工的に深層水を湧昇させる海域肥沃化の研究開発がすすめられているがまだ小規模で、将来 100 億人の人口を養うためには、大規模化に叡智を結集すべき、と述べている。深層水の取水方法として、取水管を深海域まで配設してポンプで汲み上げる方式が多く研究され²⁻⁴⁾、国内に 15

か所以上の施設があるが、揚水量は日量数千トンで、最大級の沖縄久米島で 13000 トン/日である。一方、海底に築堤⁵⁾や衝立状の人工構造物⁶⁾を設置することにより、これらの構造物によって引き起こされる上昇流に伴って深層水が湧昇する人工湧昇流方式がある。これまで愛媛県宇和島沖、長崎県五島沖、鹿児島県阿久根沖などに、実証実験も含めて設置されている^{7,8)}。構造物設置前後の調査では、湧昇流により栄養塩や植物プランクトンの増加と漁獲量の増加が確認されており、構造物自身が漁礁と同じように魚類の集積効果があることも報告されて

¹ 鹿児島大学水産学部漁業工学分野 (The Division of Fisheries Engineering, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056, Japan)

² 鹿児島大学水産学部水産生物・海洋学分野 (The Division of Fisheries Biology and Oceanography, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056, Japan)

³ 鹿児島ドック鉄工株式会社 (Kagoshima Dock & Iron Works Co. Ltd., 2-2 Nanatsujima 2, Kagoshima, 891-0132, Japan)

* Corresponding Author, Email: nagamatu@fish.kagoshima-u.ac.j

いる⁹⁻¹¹⁾。これらの湧昇流量を正確に算定するのは非常に難しいが、日量3千万トン～8億トンと試算されている¹²⁾。人工湧昇流方式が取水管方式に比して湧昇流量は遙かに大きく、大規模化、という課題を解決するためには人工湧昇流方式が優れていることが分かる。また、取水管方式では揚水ポンプを稼働するための動力が必要になるのに対して、人工湧昇流方式では、海底に設置した後は動力もメンテナンスも不要である、という利点もある。

一方、取水管方式は水深が100～500mであるのに対して、既存の人工湧昇流方式の設置海域は水深が50～80mで比較的浅い海域に限定されている¹²⁾。これらの構造物の高さは10～15mである。有光層の深さを補償深度というが、これは海域により異なるが鹿児島湾では30～40m程度である。構造物によって誘起される湧昇流が到達する高さは構造物の高さに比例すると考えられるから、湧昇流が補償深度まで到達するために必要な構造物の高さが必要になってくるが、海底に巨大の構造物を設置する工事の技術的およびコスト的な課題を考慮すると、構造物高さに上限がある。したがって、より深い海域まで設置海域を広げる、あるいは水深は同じでも低い構造物でも湧昇効果がある（補償深度まで湧昇流が上昇する）ためには、構造物高さに対する湧昇流高さが大きくなる工夫が求められる。これまで様々な構造物形状についての実験的研究がされている¹³⁻¹⁵⁾。その中で、Asaedaが提示したV型構造物¹⁶⁾は形状が単純で、湧昇効果が高いことが示されている。更に高い湧昇効果を図るために海中カーテンを組み合わせたV型構造物についての研究もある¹⁷⁾。

高さが10数m、長さが100mの巨大な人工構造物を海底に設置することを考えると、構造物は簡単な形状であることが必須条件である。これまでに実海域に設置されているのは複列衝立型⁷⁾と三角形が基本断面の海底山脈⁵⁾でいずれも形状としては単純である。本研究ではV型構造物の組み合わせで、湧昇効果が高い構造物を見出すことを目的として、小型の曳航式水槽にて可視化実験を実施した。

可視化実験法

可視化実験の概念図をFig.1に示す。水槽の寸法は長さ×幅×深さ=4.0m×0.5m×0.4mで、側面と底面の観測窓は透明の塩化ビニール樹脂である。人工湧昇流はある速度の流れの中に設置された構造物によって生じる攪乱により発生しているが、実験では水槽底に移動台車を備え、この台車の上に構造物模型を置いて一定速度で

水槽底を走行することにより、構造物周りに相対的な流れを生じてさせている。すなわち、実際の海域では構造物は静止して水が流れているが、実験では静止した水中の中を模型が動いて、相対的に同じ流れをシミュレートしている。移動台車はFig.1に示すようにステンレスワイヤーで牽引され、移動速度はモーターによって制御される。移動速度の制御範囲は0.013～0.3 m/sである。移動台車の板厚は2mmで、移動台車と水槽底の間は1mmである。したがって、移動台車の上に置かれた構造物は水槽底より3mmの高さのギャップがあるが、実験結果の解析では移動台車の上面を高さ方向yの座標原点としている。

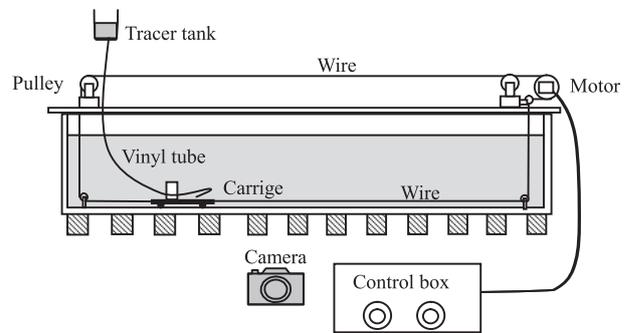


Fig.1 Schematic of experimental apparatus and arrangement

トレーサーは実験室天井から吊り下げたトレーサータンクから内径2mmのビニールチューブを通じて模型周りの所要の位置から流出する。トレーサーの流出速度は約0.15m/sである。移動台車と構造物模型およびトレーサーの流出位置の写真をFig.2に示す。台車の移動方向は手前側である。

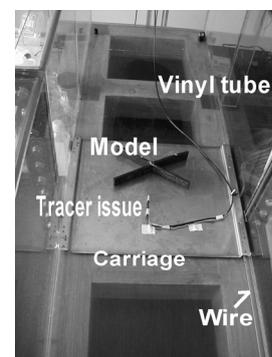


Fig.2 Carriage and arrangement of tracer issue

トレーサーとして、水中での拡散が比較的小さいとされる染料を3種類用意し、流速を0.18m/sとして、内径2mmの鉛管から染料溶液を流し、水中での見易さ、拡

散の度合いについて調べた。用いた染料はマラカイトグリーン、ローダミンB、ビスマークブロンである。トレーサーは300mlの水に1gの染料を溶かした濃度である。実験結果をFig.3～Fig.5に示す。ローダミンBは鮮明で見易いが、やや密度が大きい。マラカイトグリーンとビスマークブロンの密度は周囲流体とほぼ等しいが、トレーサーの見易さ、拡散の度合いを考慮するとマラカイトグリーンが秀れている。この結果より、本研究の可視化実験ではマラカイトグリーンをトレーサーとして使用することにしたが、時間の経過とともに多少とも拡散することは避けられないので、下流域でのトレーサーの可視化画像の解釈には留意が必要である。

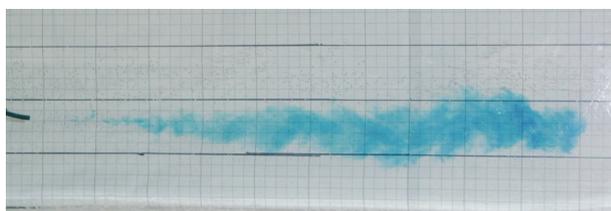


Fig.3 Malachite green

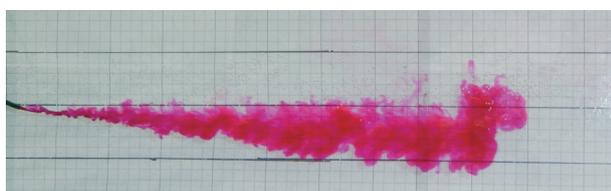


Fig.4 Rhodamine B

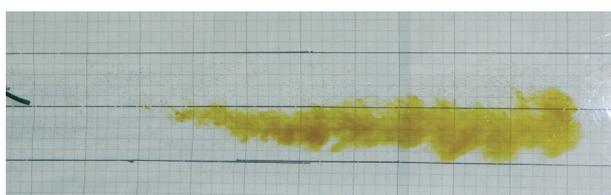


Fig.5 Bismarck brown

非圧縮性の等密度流（単一密度流）の実験の場合、相似則として考慮すべき主要な無次元パラメータはレイノルズ数とフルード数である。しかし、一般に実現象とレイノルズ数を一致させた模型実験はほとんど不可能であるから、模型実験の範囲でレイノルズ数を変化させて、その影響を調査し、要すれば必要な修正を施して実現象を予測する、という方法が採られる¹⁸⁾。人工湧昇流に関しては海底付近の流体現象であるから相似則としてはフルード数よりもレイノルズ数を重視すべきと考えられるが、これまでの研究では、フルード則に従った実験^{5,14)}

や相似則に言及せずに流速をいくつか変化させた実験^{6,15,16)}、レイノルズ数影響を調査したNagamatsu等¹⁹⁾の実験がある。調査した流速やレイノルズ数の範囲では、レイノルズ数の増加により湧昇流が高くなる傾向が若干みられるが、可視化実験で観察される湧昇流の上昇範囲に及ぼすレイノルズ数の影響は小さいといえる。

本実験が縮尺1/400の模型実験と想定したとき、潮流が1ノットと仮定すると、フルード数を一致させた模型実験の流速は0.026m/sである。そこで、本実験においても、上記のフルード則を満たす流速を含む、数種の流速について実験をし、結果に及ぼす流速の影響を調べた。その結果をFig.6に示す。構造物は後述するX型で、 h は構造物高さ、 x は構造物から下流に測った距離、 y は湧昇流の海底（移動台車の上面）からの高さである。流速による系統的な傾向はみられず、可視化実験の精度を考慮すると、流速による影響は少ないと判断し、トレーサーの拡散やレイノルズ数を考慮して、以下の実験では流速を $v=0.05\text{m/s}$ とした。

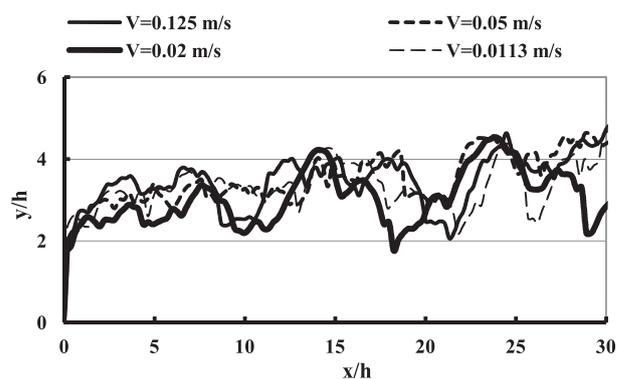


Fig.6 Effect of flow velocity on upwelling

可視化実験で観測された流れの様子はスチールカメラおよびビデオカメラで記録した。スチールカメラで撮影した静止画像はトリミングして、2値化画像を作り、これより湧昇流のプロファイルの上端高さ y を読み取った。Fig.7に湧昇流の可視化画像のトリミング例を、Fig.8に2値化画像例を示す。湧昇流の湧昇高さ y は移動台車の上面から上向きに、構造物を原点にして下流に x 座標をとって、 x 、 y を構造物高さ h で無次元化して、Fig.9のように図示する。



Fig.7 Image of upwelling induced by a marine structure model



Fig.8 Binarized image of upwelling flow and coordinate system

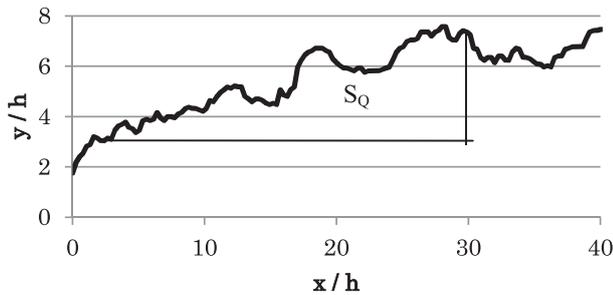


Fig.9 Profile and volume index of upwelling

湧昇流量を推定するためには、厳密には湧昇流が発生している各位置での上昇流速が必要であるが、本研究では流速を計測していないので、湧昇流量の代わりに、一つの目安として可視化した湧昇流の側面積を用いることにした。湧昇流が海域の植物プランクトンの増殖に有効に作用するためには有光層（補償深度）まで上昇する必要がある。今、水深が60～70mで補償深度が30～40mの海域を想定し、構造物高さを10～12mと仮定すると、湧昇流が補償深度に達する目安を構造物高さの3倍と考えると、 $y/h > 3$ が有効な湧昇流と仮定する。更に、湧昇流は下流にいくほど湧昇流に含まれている栄養塩の濃度は薄まって、ある濃度以下になるとプランクトンの活性化に有効に作用しなくなると考えられる。したがって、有効な下流の範囲があると考えられるが具体的なデータがないこと、また可視化実験では下流に行くほどトレーサーの拡散が広がって、計測誤差が大きくなることから、ここでは $x/h=30$ までを有効範囲と設定して、Fig.9に示す点線と湧昇流高さ y/h で囲まれる側面積を湧昇流量指標 S_Q と定義して、湧昇流量の評価指標とした。

次に、実験に用いた構造物模型について述べる。基本的な構造物形状として、2等辺三角形断面をもつ三角柱の山型（Mount）の模型2種類と平板状の構造物を海底に垂直に設置した衝立型（Wall）を供試した。山型の一つは頂角が 90° で、これを山型（90）と記述する。もう一つは頂角が 135° で、海底山脈と称して実海域に設置している構造物¹¹⁾に類似の形状で、山型（135）と記述する。模型の寸法は以下のとおりで、模型の写真をそれ

ぞれFig.10～Fig.12に示す。また、実海域への設置例はないが、比較的単純な形状で湧昇効果が高いV型構造物¹⁶⁾の模型の写真をFig.13に示す。図中の矢印は流れの方向を示している。これらの模型寸法を下記に記す。



Fig.10 Model of Mount(90) type

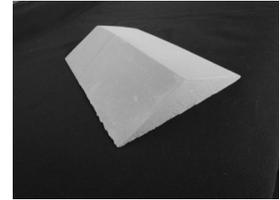


Fig.11 Model of Mount(135) type



Fig.12 Model of Wall type

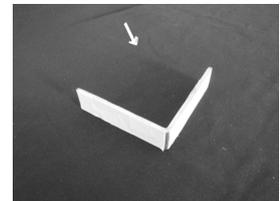


Fig.13 Model of V type

山型（90）：高さ×底辺長×長さ×頂角＝22mm×44mm×200mm× 90°

山型（135）：高さ×底辺長×長さ×頂角＝32.5mm×156mm×245mm× 135°

衝立型：高さ×厚さ×長さ＝30mm×4mm×200mm

V型：高さ×厚さ×辺長×頂角＝30mm×4mm×120mm× 90°

上記の構造物模型の実験結果から、V型構造物は高い湧昇流を発生するが流向に対する依存性が高く、実海域への適応性に劣ることが分かったので、これを改善するためにV型構造物のいろいろな組み合わせについて調査した。供試した構造物模型は以下の5種で、模型の写真をFig.14～18に示す。



Fig.14 Model of X type

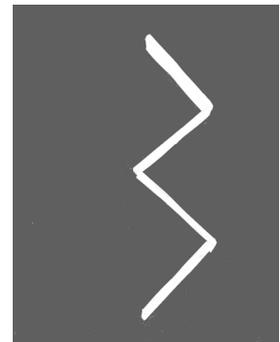


Fig.15 Model of W type

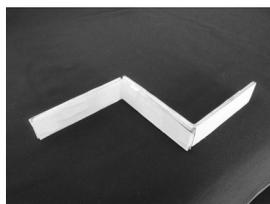


Fig.16 Model of N type

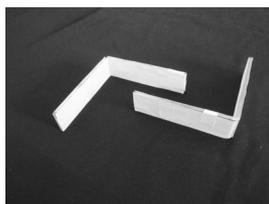


Fig.17 Model of Staggered V type

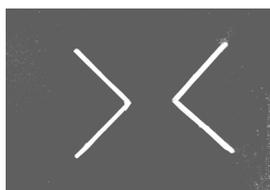


Fig.18 Model of Separated V type

X型： 2個のV型の頂角を接して、互いに逆向き並べて、X字の形にしたもの。

W型： 2個のV型を横に並べて、W字の形にしたもの。

N型： 2個のV型のうち、一つを逆さまにして1辺が互いに接するように並べて、N字の形にしたもの。

千鳥V型： N型を構成する一つのV型を他方から少し離して、千鳥状に配置したもの。

分離V型： 2個のV型を互いに逆向きにし、間隔を設けて配置したもの。間隔は構造物高さの4倍である。

いずれの構造物も流れが、構造物が開いている方向から流入している場合を流向 0° と定義する。

実験結果

可視化実験は全て台車の移動速度（以下流速と記す）が 0.05 m/s で行った。山型（90）と山型（135）によって誘起される湧昇流はFig.19とFig.20に示すように、構造物の下流で間欠的な渦の上昇がみられる⁹⁾。頂角が鋭角な構造物の方がこの様子はより明瞭に観察される。このような間歇的な渦の上昇は衝立型でも観察された¹⁰⁾。一方、V型の場合は、Fig.21に示すように、短い周期で構造物から剥離渦が発生しているため、湧昇流は下流に向かって連続的に上昇している様子が観察される。



Fig.19 Image of upwelling induced by Mount(90) type structure

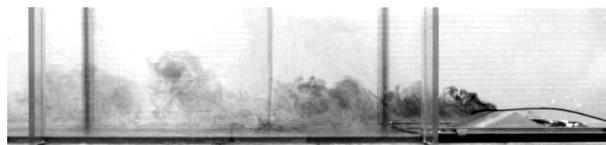


Fig.20 Image of upwelling induced by Mount(135) type structure



Fig.21 Image of upwelling induced by V type structure

可視化実験の画像から読み取った山型（90）と山型（135）及び衝立型による湧昇流のプロファイルをFig.22に比較して示す。これらの画像は周期的な剥離渦が発生する非定常な流場のある瞬間の映像であるから、プロファイル自体の細かい変化の再現性はなく、全体的な、また平均的な特徴を捉えるのに利用できる。山型（90）と山型（135）を比較すると、三角形の頂角が小さい山型（90）の方が山谷の変化が大きく、平均的には高い湧昇流となっている。衝立型による湧昇流は、構造物の直後しばらくは低い状態であるが、 $x/h=15$ 付近から間欠的な上昇渦が明瞭になっている。山型も衝立型も流れに対して直角方向に長い構造物であるから、構造物の端部付近を除くと2次元な剥離流れとなっているから、周期性の強い渦が発生しているものと考えられる。

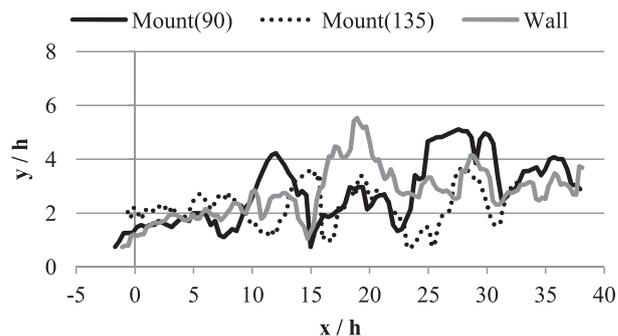


Fig.22 Comparison of upwelling profile among Mounts and Wall type structures

次にV型構造物と山型構造物による湧昇流の比較をFig.23に示す。V型の湧昇流は山型に比べてプロファイルの凹凸が小さく、全体に高くなっている。すなわち、湧昇効果としては優れていることが分かる。ところで、このような構造物を設置する海域の流れは一方向ではなく、一般には 360° のあらゆる方向に変化するが、ある一定の方向に卓越した流速をもつ往復流となっている海

域は多い。山型や衝立型の場合は卓越した流れ方向に対して構造物を直角に配置すれば、往復流に対して同じ湧昇流を発生するが、V型は前後非対称となるので、逆向きの流れ (inverse direction) になったときの実験を行った。その結果も Fig.23 に示しているが、湧昇流は低い。

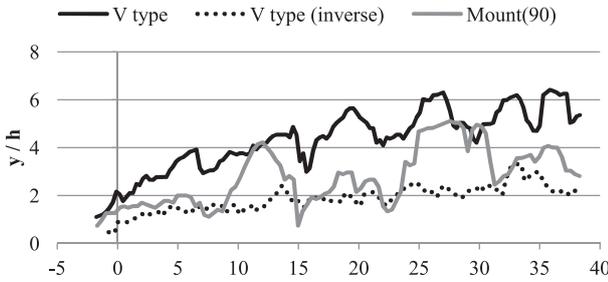


Fig.23 Comparison of upwelling profile between V and Mount type structures

V型構造物の開いた方向からの流れ (ordinary direction) の場合、構造物周りの流れの構造をモデル化すると Fig.24 のように考えられる。V型の横幅 (span) の内側にある流れは頂角の方に導き集められ、それが構造物を乗り越えるときに大きな剥離渦が形成される。その渦は下流で馬蹄形状の渦となる¹⁶⁾。これを x_0 断面で見ると一対の外回りの渦になっている¹⁹⁾。この渦は、互いの誘導速度により次第に上昇する特性をもっている。一方、逆向きの流れの場合は、Fig.25 に示すように、流れが構造物に近づくと、多くは構造物に沿って外側に導かれ、一部のみが構造物を超えて渦を形成する。この渦は下流では Fig.24 の場合とは逆向きの渦で、 x_0 断面では内回りの渦になり、互いに下向きの誘導速度を生じ、渦は下降する特性を有するので、高い湧昇流は生じない。

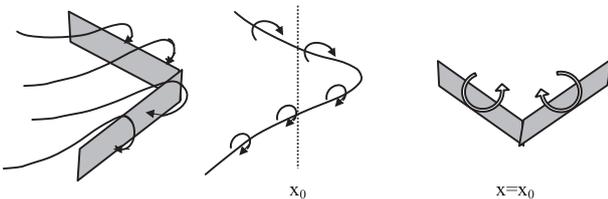


Fig.24 Illustration of flow pattern around V-type structure in ordinary flow direction

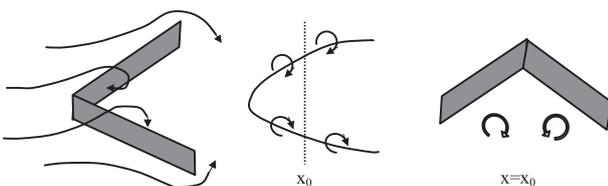


Fig.25 Illustration of flow pattern around V type structure in inverse flow direction

このときのV型、X型、W型による湧昇流のプロフィールを Fig.26 に比較している。いずれのプロフィールにも山谷がみられ、周期的な渦が発生していることが分かる。しかし、山型や衝立型のような強い間欠性はない。全体的には、V型の湧昇流が最も高く上昇しており、次にW型、X型の順になっているが、両者の差は小さい。V型に比べてW型やX型の湧昇流がやや低くなっているのは、構造物の一部から Fig.25 に示すような内回りの渦が部分的に発生しているため、渦の上昇をいくらか抑制しているのではないかと推測される。

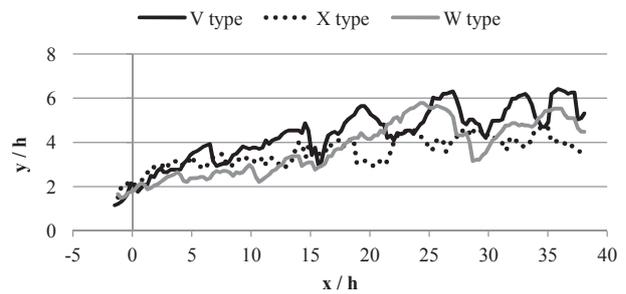


Fig.26 Comparison of upwelling profile among V, X and W type structures

つぎに、N型、千鳥V型、分離V型による湧昇流のプロフィールを Fig.27 に示す。いずれもプロフィールに山谷があり、基本的な渦の発生機構はV型と同じである。構造物の近く ($x/h < 15$) では分離V型の湧昇流が若干高く、次にN型となっているが、構造物から離れた下流になると、これら3種の構造物の差は小さい。分離V型の2つのV型構造物の間隔をさらに広げれば、誘起される流場は単独のV型に近づき、湧昇流が高くなると推測される。

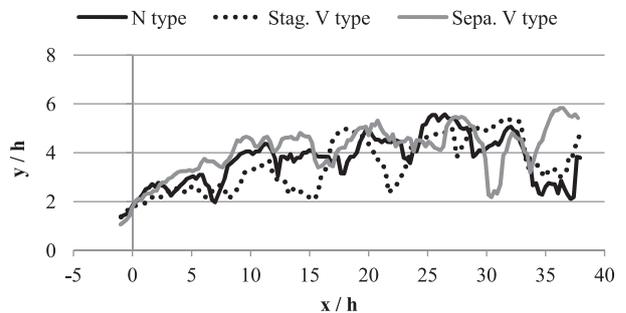


Fig.27 Comparison of upwelling profile among N, Staggered V and Separate V type structures

構造物形状の違いによる湧昇流量の比較をする近似的な指標 (volume index of upwelling) として、プロフィールの側面積 S_q の比較を Fig.28 に示す。V型が最も大き

く、次に分離V型、次にX型、W型、N型、千鳥V型が同等で、次に頂角が90°の山型と衝立型が同等で、頂角135°の山型が最も小さい。Sqにより、湧昇流量の定量的な評価はできないが、構造物の違いによる湧昇流量の多寡は評価できる。

以上は構造物に対する流向が0°の場合であるが、V型以外は流向が180°の場合も0°と同じ湧昇流が生じるので、卓越した往復流の海域、すなわち潮流楕円が極めて扁平な海域では分離V型やX型などのV型の組み合わせた構造物が有効である。しかし、多くの海域では、潮流楕円は膨らんだ形になっているので、流速の違いはあるがあらゆる方向の流れがある。そこで、これらの構造物によって誘起される湧昇流に及ぼす流向の影響を把握するために、流向が45°と90°についての可視化実験を行った。山型や衝立型は、流向が90°の場合には当然のことながら湧昇流は生じない。湧昇流量の指標SqをFig.29に比較して示す。山型や衝立型は、流向45°では湧昇流は生じるが高く上昇しないので、Sqはほとんどゼロに近い。あらゆる方向からの流れに対して最も有効なのはX型である。

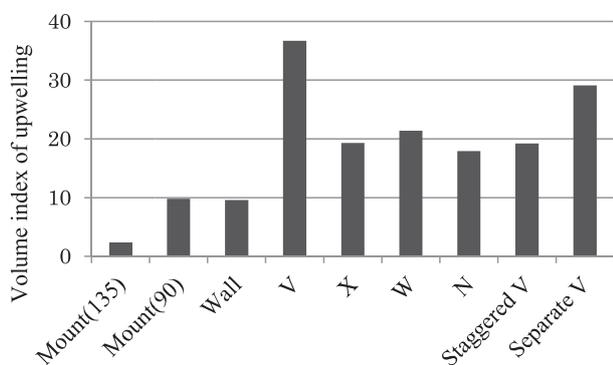


Fig.28 Comparison of volume index of upwelling for various types of structure

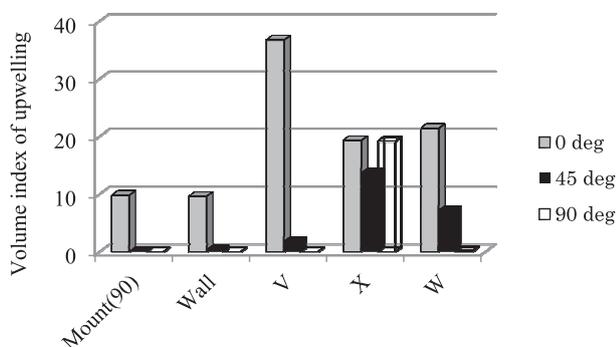


Fig.29 Effect of flow directions on volume index of upwelling

これまでの構造物の前方からの流れが構造物を乗り越えて生じる湧昇流を観察しているが、構造物の下流側の

流れを調べるために、トレーサーを構造物の下流側に流して可視化した。その1例としてV型構造物の結果をFig.30に示す。下流側でも、海底から湧昇流が湧き上がっていることが分かる。構造物によって生じた渦が竜巻のように海底の水を巻きあげながら下流に流れている。このような流れはX型など、V型を組み合わせた構造物でも生じている。山型や衝立型でも生じているが、V型などに比べると間欠性が強い。このように、海底に設置した構造物によって、構造物前方から流れてきた深層水だけでなく、下流側の深層水も湧昇することになる。

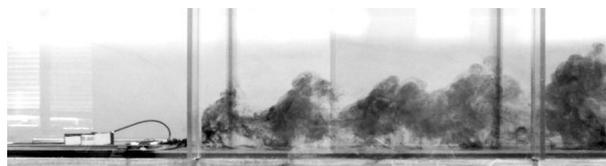


Fig.30 Image of upwelling generated behind V type structure

人工的に湧昇流を発生させるための構造物を設置する海域は水深や栄養塩の垂直分布、透明度、流向流速、海底地形などを調査して、その海域に適した構造物形状や大きさを設計しなければならない。本研究の結果はそのための検討資料になりうると考える。なお、実際の海は春から秋にかけて、鉛直方向に水温変化が生じ、密度成層が形成される。本研究は等密度流の実験であるが、密度成層における湧昇流の可視化実験についても実施中で、近く結果を発表の予定である。また、このような湧昇流装置の設置が海域に及ぼす環境影響について、負の側面も含めて検討する必要がある²⁰⁾。

謝 辞

本研究は鹿児島大学と鹿児島ドック鉄工㈱の共同研究として実施したものである。研究の遂行にあたって、水産学部長 野呂忠秀教授をはじめ、漁業工学分野、水産生物・海洋学分野および工学部海洋土木工学科の先生方からの有益なご助言やご指導とご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 長沼 毅 (2006). 深層水「湧昇」、海を耕す! . 集英社新書, pp.169-172.
- (2) R.A. Neve et.al. (1976). Enhancement of Primary Productivity by Artificial Upwelling. Marine Science Communications, 2 (2): 109-124.
- (3) 木谷浩三、長田宏 (1989). 人工湧昇システム. 月刊海洋, 21: 612-617.

- (4) 大内一之 他 (1998). 密度流拡散装置の研究開発. 日本造船学会論文集, 183: 281-289.
- (5) 鈴木達雄、本田陽一 (1992). 3次元物体背後に発生する湧昇渦に関する研究. 海岸工学論文集, 39: 902-905.
- (6) 大竹臣哉 他 (1995). 複列衝立構造物による湧昇流の発生機構. 水産工学, 31 (3): 181-187.
- (7) マリノフォーラム 21 (1992). 平成3年度人工湧昇流発生技術パイロット事業報告書.
- (8) 鈴木達雄 (2000). 築堤式構造物による海域肥沃化構想. 月刊海洋, 32 (7): 454-458.
- (9) 柳哲雄、中嶋昌紀 (1990). 人工湧昇流構造物による海況変化. 水産海洋研究, 54 (1): 1-8.
- (10) 今村均、他 (1995). 人工湧昇流発生漁場造成の研究. 海岸工学論文集, 42: 1131-1135.
- (11) 鈴木達雄 (2004). 人工海底山脈による海洋での食糧増産の可能性. 日本海洋工学会, 第30回海洋工学パネル「これからの水産と沿岸環境」: 59-66.
- (12) 藤田大介、高橋正征 (2006). 海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—. 成山堂書店, pp.28-31.
- (13) 中村順平 (1989). 無指向性人工湧昇流発生構造物の研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州): 1155-1156.
- (14) 緒方源信 他 (1990). 地形性湧昇流の研究. 西部造船会会報, 81: 363-374.
- (15) 池田駿介 他 (1992). 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: 869-900.
- (16) Takashi Asaeda (1989). Rising Current Produced by a V-shaped Obstruction. Research Rep. of Dept. Found. Eng. & Const. Eng., Saitama Univ., 19: 47-58.
- (17) Tetsuo Nagamatsu and Naofumi Shima (2006). Experimental Study on Artificial Upwelling Device Combined V-Shaped Structure with Flexible Underwater Curtain. Mem. Fav. Fish. Kagoshima Univ., 55: 27-35.
- (18) 副島俊二 (1993). 実船の水深性能推定法. 船体周りの流れと船型開発に関するシンポジウム, 日本造船学会: 57-96
- (19) Tetsuo Nagamatsu, Naruhito Nakagama and Masako Nishikita (2005). Consideration on Scale Effect of Vortical Flow Induced by Artificial Upwelling Structure. Journal of Ocean Science and Technology, 2(1): 1-8.
- (20) 吉本治樹、多部田茂、白田慶一郎 (2019). 海底マウンドによる人工湧昇流技術の包括的環境影響評価. 日本船舶海洋工学会論文集, 11: 221-227.