

湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的研究

上北 征男*・浅岡 邦一**・森井 伸正***・大竹 臣哉***

1. はじめに

ペルー沖やカリフォルニア沖などに発生している吹送流に起因した湧昇流の規模は、空間的に $10^2 \sim 10^3$ km, 時間的に 10^6 sec (1週間程度) で上昇速度 10^{-3} cm/s 程度といわれている¹⁾。一方、リモートセンシング等の観測技術の発達によって、地形に起因した地形性湧昇流が、最近観測されるようになった²⁾。その規模は、 10^0 km, 10^5 sec, 上昇速度 10^{-1} cm/s 程度と見積られている。筆者らも、山口県汐巻礁で現地調査を行ない、潮流によって礁の下流側に三次元性の大規模渦が発生していることを観測した³⁾。同時に、現象の水理学的考察から、上昇速度のオーダーは 10^1 cm/s になることを報告した。

漁場の形成という観点からみると、上述の大規模な湧昇流と同様に、地形に起因して生じる湧昇流も好漁場を形成する一つの因子となっていることが従来から議論されてきた。最近、沿岸漁業振興として、この地形性湧昇流に関心が高まっている。

本研究は、潮流等の流れエネルギーを利用して湧昇流を発生させる小型でしかも単純な形状の構造物の開発を目的とし、水槽実験で構造物の形状特性を明らかにし、現地実験で、その有効性を検討したものである。

2. 水槽実験による構造物の開発

(1) 実験方法

実験に用いた水槽は、長 50 m 幅 60 cm 高 1.2 m の循環式水路で、流量を $0.6 \sim 7.2$ m³/min の範囲内で任意に設定できるポンプを有する。また、模型設置点の上流側 2 m および 4 m の位置に #1 mm 金網を設置し、流れを整流した。流速測定には、位相差方式の 3 次元超音波流速計を使用した。この流速計は、超音波振動子間隔 27 mm で、 $\pm 0.2 \sim 50$ cm/s の範囲で、 x, y, z の 3 成分の流速を同時に測定できる。

実験条件は、水深 $H=50$ cm, 平均流速 $U_m=7.1$ cm/

s, フルード数 $F_r=0.032$ で一定とした。その理由として、平均流速や乱れ強度の無次元量は、水深やレイノルズ数が変化しても普遍的であること⁴⁾、開水路中に置かれた物体の後流域の水理現象は、基本的にフルード則が成立することがあげられるためである。

(2) 構造物形状の決定

実験に用いた構造物を図-1 に示す。流速測定結果をもとに、乱れ強度、拡散係数を求めた。

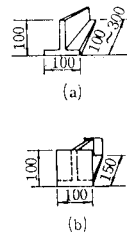


図-1 代表模型の形状寸法

これらの諸関数は、次式のように定義した。

乱れ強度 $\bar{q}$ は、

$$\bar{q} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$; x, y, z 成分乱れ強度 (r.m.s)

乱れ強度を x, z 方向に積分した値を総乱れ強度とよび、次のように定義した。

$$\Phi = \int_0^r \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\bar{q}}{U_*} \right) d\chi d\xi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Φ : 総乱れ強度

U_* : 底面摩擦速度

ξ, χ : 各々 $z/D, x/D$

D : 模型高

r : 遮へい率の逆数 (H/D), H : 水深

拡散係数は、Hay & Pasquill がオイラー流とラグランジュ流の自己相関関数分布は相似であるという仮説を用いて、次式のよう示している⁵⁾。

$$K_z = \beta \bar{w}_E^2 \int_0^\infty R_{Ew}(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

β は、オイラー流とラグランジュ流の自己相関関数を

* 正会員 農博 水産工学研究所

** 正会員 水産庁開発課

*** 正会員 五洋建設(株)技術研究所

関係づける無次元パラメータで、Busch の理論を適用すると、次式で表わされる。

$$\beta = 0.44 (U / \sqrt{\omega^3}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 K_z : 拡散係数の z 成分、 U : 局所平均流速、 $R_{Ew}(\tau)$; オイラー流の z 成分自己相関関数

これらの諸数値の構造物形状の違いによる結果を図-2 に示す。総乱れ強度 Φ は、長さが長くなるほど低下する傾向にあるが、全体的には構造物の長さによる乱流特性の違いは認められない。図-2 から、構造物の長さは高さと同程度でよいことがわかる。

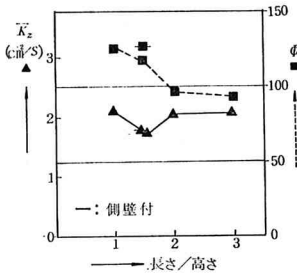


図-2 長さの違いによる乱流特性の相違

また、構造物に側壁をつけた場合の乱れ強度分布を、図-3 に示す。図-3-(2) の側壁をつけた場合の乱れ強度分布は、図-3-(1) のつけない場合に比較して、後流域に大きな乱れの発生することがわかった。このことは、図-2 に示したように、側壁付の方が拡散係数 K_z 、総乱れ強度 Φ とともに若干大きいことから伺われる。

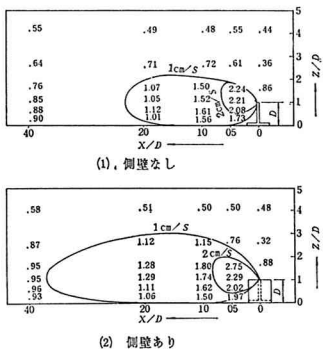


図-3 側壁の有無による乱れ強度分布の違い

さらに、構造物の高さは、図-4 に示す遮へい率 (D/H , D : 構造物高さ, H : 水深) に対する乱れ強度比 ($\bar{q}/U_*$) の違いから求めることができる。すなわち、図-4 より、表層 $Z/H=0.8$ における $\bar{q}/U_*$ は、遮へい率 D/H が 0.05 以下の場合にはほぼバックグランド値であ

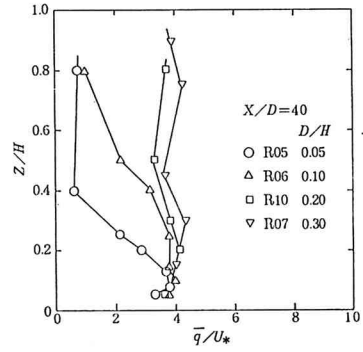


図-4 乱れ強度比 $\bar{q}/U_*$ の鉛直分布

るが、 $D/H \geq 0.2$ の場合、乱れ強度はバックグランド値の 4 倍程度大きく、乱れの表層への伝播が認められる。

以上より、構造物の基本的形状は、図-1 (b) に示した形状で、高さと同程度にし、特に高さを水深の 2 割程度にすれば、構造物の影響を表層まで伝播できることが明らかとなった。

(3) 構造物の配置

前項で考察した構造物の下流側に、さらに構造物を設置することで、顕著な上昇性の渦流が発生することを見出した。その状態を、写真-1 に示す。可視化は、下流側の構造物周辺にメチルブルーの結晶を散布し、溶出させることによって行なった。

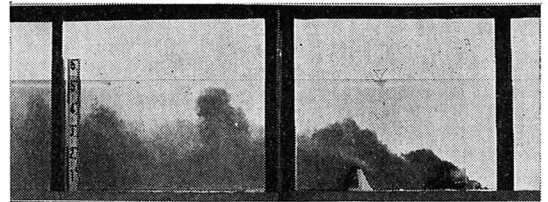


写真-1 湧昇流発生状況

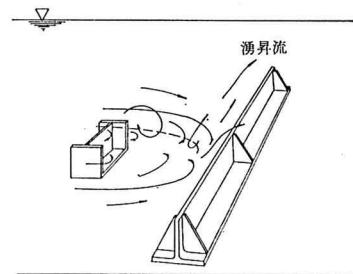
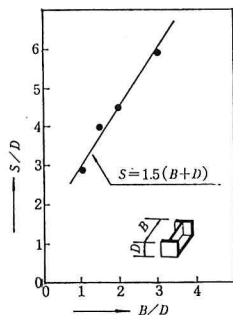


図-5 湧昇流発生メカニズム

この渦が発生する理由として、図-5 に示すような現象が考えられる。すなわち、上流側の構造物によって水平方向の渦と垂直方向の渦が発生し、その再付着点に構

図-6 再付着点距離 S の B/D による変化

造物を設置することで、発生した渦が上に持ち上げられ上昇性の渦となる。再付着点距離 S は、実験的に求められ、図-6 に示すように、上流側の構造物の長さ B と高さ D によって変化する。

3. 現地調査

(1) 調査方法

現地調査は、図-7 に示す青森県今別町高野崎から沖に張りだしている尾根を利用して、図-8 に示す高さ 4m (水深の約 1/6)、長さ 6m の構造物を水深 27m の位置に設置して行なった。その模式図を図-9 に示す。

調査は、構造物設置前に、St. B, St. C, St. Z の海底より 5m, 10~12m の 2 層、設置後は、St. A, St. B, St. C, St. Z の海底より 5m, 12m, 19m の 3 層において自記式流向流速計を用いて流向流速を測定した。

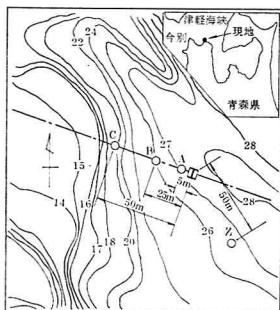


図-7 現地調査位置図

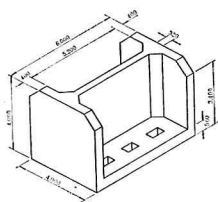


図-8 湧昇流発生構造物

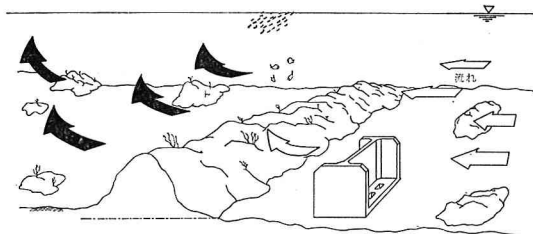


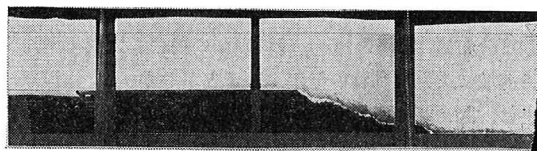
図-9 湧昇流発生模式図

また、この定点観測を補完するため電磁式流速計を用いて、構造物周辺 8 点の 3 層について流速を 7 分間/(回層) 測定した。なお、St. Z での観測は、構造物設置前後の流況特性を比較するため、および構造物の影響を受けない地点として設置前後の流況条件が同程度であることを見出すために行った。

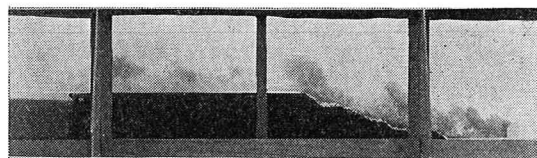
一方、現地を再現するために、縮尺 1/40 で前章の水槽を用いて水理実験を行なった。流速設定は、現地換算で 1m/s とした。

(2) 水槽実験結果

現地を再現した水槽実験の可視化写真を写真-2 に示す。写真より湧昇流の発生している状態が理解できる。



(a) 設置前



(b) 設置後

写真-2 湧昇流の発生状況

流速測定による乱れ強度分布を図-10 に示す。設置前後で乱れ強度分布の状態および大きさが大きく異なっている。現地の定点に相当する測点における流速の周波数特性を図-11 に示す。ピーク周波数だけを比較すると、施設設置前では、周波数の出現範囲が $0.03 \sim 0.3 H_z$ と広範囲であるが、設置後は $0.07 \sim 0.2 H_z$ と狭い。

(3) 定点観測における流れの乱れ特性

水平方向の乱れ成分の和 $\bar{q}(\bar{q} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2})$ を平均流速 U_z (St. Z における平均流速) で無次元化した相対乱れ

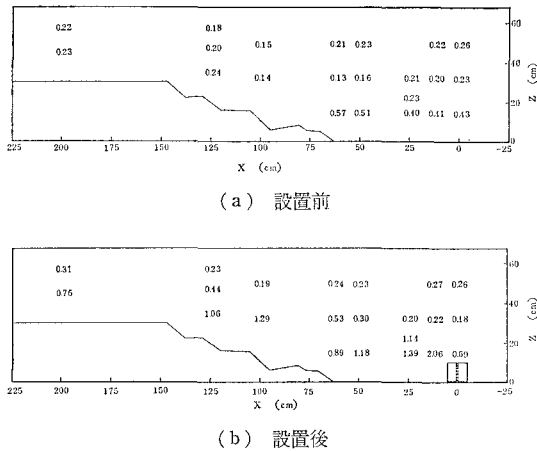


図-10 水槽実験における乱れ強度分布

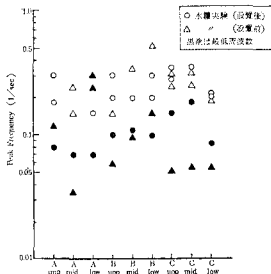


図-11 水槽実験における乱れの周波数特性

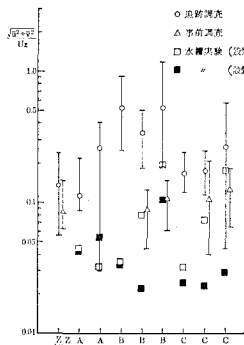


図-12 相対乱れ強度の比較

強度を図-12に示す。St. Zにおける乱れ強度から、施設設置前後で同様の流況条件であることがわかる。また、図中には、水槽実験値も併記した。

図-12から、設置前の乱れは、各点において同レベルである。一方、設置後は、St. A上層、St. C上・中層においてSt. Zと同レベルであるが、St. B上・中・下層およびC点の下層において、設置前に比して大きな値を示している。これは、水槽実験での現地の各点に相

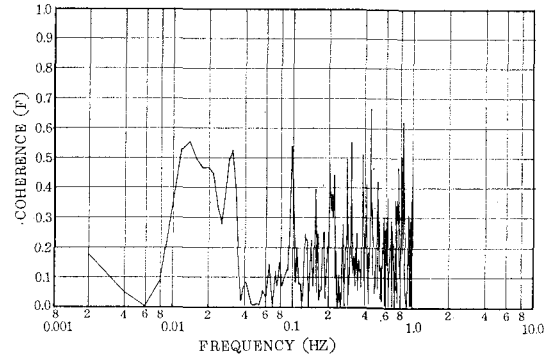


図-13 St. B-St. Cのコヒーレンス

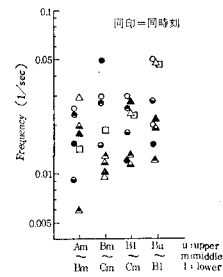


図-14 相互相関の高い周波数

当する位置で観測した乱れの傾向とよく一致している。

一方、乱れの周波数特性を求めるとSt. B上層の乱れは、0.02~0.03 Hzに集中し、他点では0.01~0.05 Hzに分散する。次に、各点の乱れのコヒーレンスを求めた。代表例を図-13に示す。図からわかるように0.015 Hzと0.03 Hzに高い相関が現われている。他の2点間における相関の強い周波数をプロットしたのが図-14である。

図から0.01~0.03 Hzに強い相関がみられ、特にSt. Bの中・下層でその傾向が強い。この周波数の乱れは、St. Bの中・下層の特徴で施設の設置によって発生したと考えられる。

(4) 構造物周辺の乱れ特性

図-15に、構造物周辺で発生している乱れの周波数特性を示す。現地では、測定位置全般にわたり、0.01~0.04 Hzの乱れが多く、定点観測とはほぼ一致している。特に海底より5 mの位置の乱れは、0.01~0.03 Hzの周波数が多く観測されている。

これらより、前述の結果と併せ検討すると、0.01~0.03 Hzにピークを持つ乱れが構造物によって発生したと考えられる。

水槽実験および現地実験における乱れの周波数特性からストローハル数 St を求めると以下ようになる。

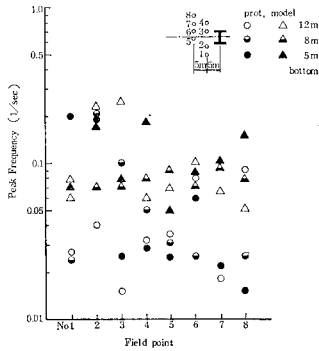


図-15 構造物周辺の乱れの周波数特性

すなわち、水槽実験では、構造物の代表長さ 15 cm, 乱れの周波数 $0.07 \sim 0.2$ Hz, および平均流速 7.1 cm/s であるから, $S_t = 0.13 \sim 0.37$ となる。

一方、現地においては、構造物の代表長さ 6 m, 乱れの周波数 $0.01 \sim 0.03$ Hz, および平均流速 50 cm/s より, $S_t = 0.12 \sim 0.36$ となる。

このことから、現地と水槽実験で生じている乱流現象は同質のものであることが伺われる。

以上の考察から、現地で生じている現象は、水槽実験で説明可能であると推論でき、構造物設置による影響範囲が水槽実験で 4 m まで達していることを考慮すると、現地では 160 m 下流域まで影響すると判断された。

4. ま と め

(1) 水槽実験によって、構造物に起因した湧昇流とは周期性を持つ上昇性の大規模渦であることが確認された。

(2) 湧昇流を効果的に発生させる構造物は、上流側に長さの短い逆T型構造物、下流側に長い逆T型構造物を設置する二段方式が有効であると判断された。また、上流側の構造物には、側壁をつけることで水平渦が増幅され、湧昇流の発生を促進し、乱れ強度も大きくなる。

(3) 湧昇流を表層まで到達させるためには、構造物の高さは水深の2割程度で必要かつ十分であると考えられる。

(4) 現地実験では、下流側に設置する長尺の逆T型構造物の代用に海底起伏を利用したが、結果的に同様の効

果が認められた。

(5) 現地実験における構造物設置前後の流れへの影響は、乱れ強度で説明できる。設置前では、いずれの測点でも同程度の乱れ強度であるのに対し、設置後では、下流側の中、下層にその増幅がみられた。このことは、水槽実験でも確認され、構造物の有無で下流側に乱れ強度の違いが現われている。

(6) 現地で発生している乱れの周波数特性は、 $0.01 \sim 0.03$ Hz であった。一方、水槽実験では、 $0.07 \sim 0.2$ Hz の乱れが生じていた。

これらよりストローハル数を求めると、現地と水槽とではほぼ同値の、 $0.12 \sim 0.36$ が得られた。すなわち、現地で発生している乱流現象は、水槽のそれと同質のものであると考えられる。

5. あとがき

今回の実験で、湧昇流発生構造物の実現上工学的観点から可能性を見出すことができた。しかし、現地実験は規模が小さく、その影響範囲も明確に見出すことができなかった。今後の課題として、調査方法の確立をまずあげることができる。また、湧昇流の効果を明らかにすることも必要である。

最後に、現地実験は国土庁国土総合開発事業調整費「磯焼け地域沿岸漁場開発計画調査」の一環として行なったものであることを付記する。また、現地調査に際しては、全国沿岸漁業振興開発協会、並びに青森県増殖水産試験場の協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 吉田耕造: 沿岸湧昇, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 11, No. 2, pp. 127~142, 1974. 2.
- 2) たとえば, 高橋・市村・中村・松生・安岡・宮崎: 速隔計測による伊豆大島沖の渦湧昇流の計測II, 冬季の性状, 日本国土海洋総合学術診断技術報告集, pp. 34~47, 1981.
- 3) 中村・上北・木村・藤井・大竹: 礁による流動環境に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 522~526, 1980.
- 4) 上北・中村・渡・森井・大竹・統: 湧昇流発生構造物の開発に関する実験的研究, 第10回海洋開発シンポジウム論文集, 土木学会, pp. 142~147, 1985. 6.
- 5) Hay, J. S. and F. Pasquill: Diffusion from a continuous source in relation the spectrum and scale of turbulence, Advances in Geophysics, Vol. 6, pp. 345~365, 1959.