

礁による流動環境に関する研究

中村 充*・上北 征男*・木村 晴保*
藤井 泰司**・大竹 臣哉***

1. はじめに

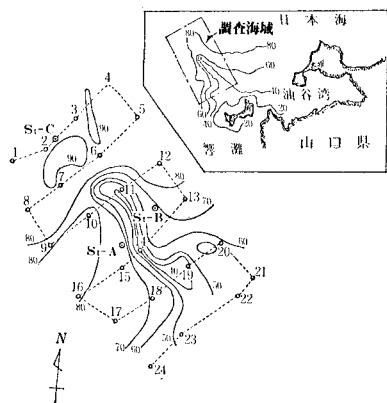
礁、海底半島、海山など大規模な海底起伏に伴って、反流域、湧昇流等が生じ流れの性状が地形に起因して変化する。また、これらの流れの変化は、水塊の混合を生じ、新しい水塊形成が行なわれる。このようにして生じた新しい水塊は、次の混合まで持続し、従来の流体力を主眼とした後流解析法とは異なった観点より解析する必要がある。

本報告は、礁など海底面突起による流れの構造変化によって生じる新水塊形成（環境流影と定義する）機構を解明することを目的として行なった山口県外海汐巻地区の現地調査の解析結果についてのべる。

2. 調査方法

図一に示す山口県汐巻礁（周辺の平均水深 $h=80$ m, 汐巻礁頂部水深約 30 m, 長さ、北西-南東方向約 4 km, 礁底部幅約 1 km）をとり囲む海域、6 km×10 km を調査海域と定め、以下に示す3項目について調査した。

図一に調査地点の位置を示す。なお、調査船は山口県外海水産試験場所属の黒潮丸（149.28 総トン）および若潮丸（33.0 総トン）を用いた。



図一 汐巻礁調査地点

* 正会員 農博 水産工学研究所水産土木工学部
** 山口県柳井水産事務所
*** 五洋建設(株)技術研究所

(1) 礁を挟む St. A, St. B および対照点 St. C における上層、下層水塊構造の長期観測

観測は、1979年7月12日～26日の15日間の流向、流速、水温、塩分の変化について5分毎に測定を行ない、磁気テープに記録した。使用機種は磁気テープ式流速計 (TS 製 MTCM-5A) を用いた。各々の観測位置での計器設置水深は、上層、下層、海底の順に St. A (26, 66, 76 m), St. B (21, 56, 66 m), St. C (20, 60, 85 m) である。

(2) 礁近辺 (St. 1～St. 24) 水温、塩分の鉛直分布観測

測定は1979年7月12日、13日および7月24日、25日の2回にわたり行なった。測点は図一の St. 1～24 である。使用機種は、磁気テープ式 STD (TS 製 STD-M3-D) を用いた。また、調査地点の確認は、調査船備え付けのデッカにより行なった。

(3) 魚群探知機による水塊断面構造の撮影

観測は、調査船備え付けの魚群探知機を使用して (2) の測定と並行して行ない、走行中および停船時について行なった。魚群探知機は周波数 14 kHz, 発振回数 113 回/min である。

3. 調査結果とその考察

(1) 流速観測結果について

図一に示す St. A, St. B, St. C の上・下層での5分ごと、15日間の流向・流速、塩分、水温の長期観測記録を用い、1時間平均値をプロットしたのが図二である。紙面の都合で St. B の大潮のみを示す。図中 [I] は流速の礁に直角成分（北東～南西流）、平行成分（北西～南東流）の時間的変化を、[II] は塩分、水温の時間的変化を示したものである。図三 (1), (2) は St. A, B 測点でのスペクトルを礁に直角、平行方向、上層・下層別に示したものである。図二から St. A, St. B 共、流れは礁に直角方向に卓越しており、平行方向の流れは小さい。このことは、図三 (1) と 図三 (2) を比較して流速のパワーレベルが礁平行成分に対し、礁直角成分が 3～10 倍大きいことからいえる。図三 (1), 図三 (2) のパワースペクトルから St. A

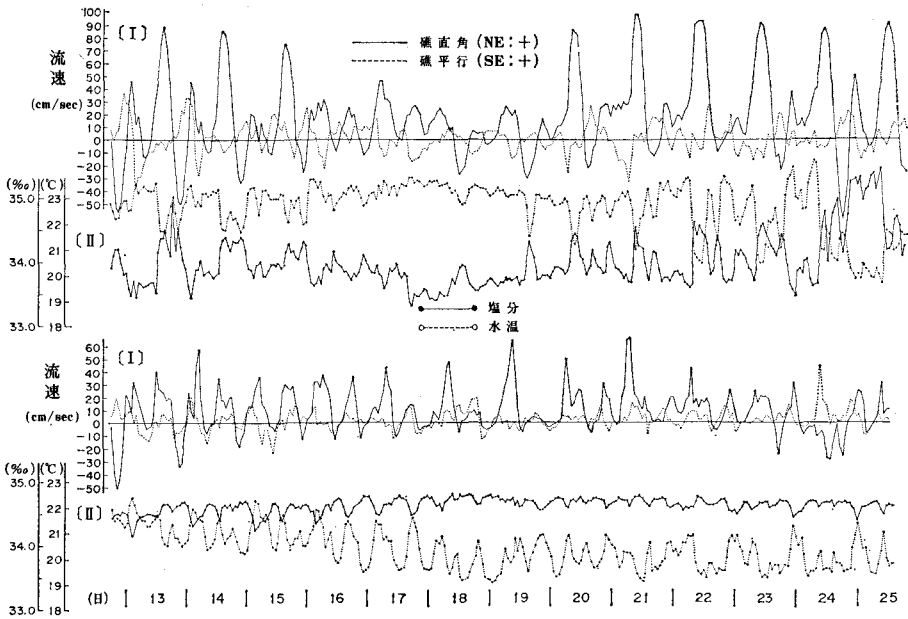
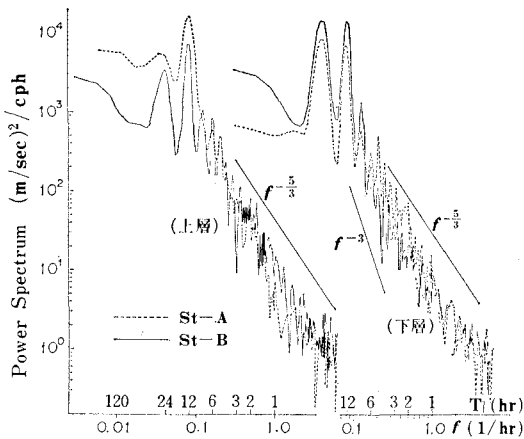
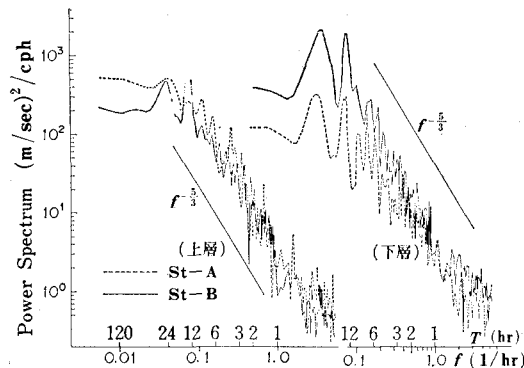


図-2 流向・流速・塩分・水温の連続観測記録例



(1) 礁直角方向



(2) 礁平行方向

図-3 流速のパワースペクトル

では上層の方が下層よりパワーレベルが高いが、礁を越えた St. B では下層の方が上層より高く、上層エネルギーが鉛直混合で下層に伝達されたと考えることができる。図-3 (1) で St. A は上・下層とも潮汐流をエネルギー源として $-5/3$ 乗則に従う慣性領域のエネルギーの移送があるのに対し、St. B の下層では -3 乗則に従う浮力領域が現われているのが特徴的である。このことは礁を越えることによる鉛直混合によって新しい密度の水塊を生じ、これが安定した成層流への移行過程でポテンシャルエネルギーに変かんされているためと見ることができる。図-2 にみる流れの特徴について大潮小潮の場合で見ると 図-4 のようである。上層流は St. A, St. B と同様の流況を示し、北東流が卓越するが下層では St. A, St. B すなわち礁の上下流で著しい変化を生じている。特に小潮時は St. A, St. B とともに礁に向かう流れが殆んど生じていない。これは下層の重い水塊は礁を越えることができず迂回するように流れるためであろう。このことは St. C 下層の流速記録が礁の端を廻る流れの影響を受けていることに符合する。

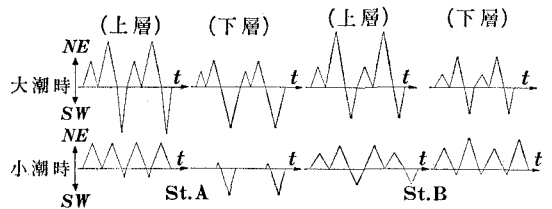


図-4 流況パターン

(2) 水温・塩分観測結果について

水温・塩分について時間的変化を図-2の〔Ⅱ〕曲線に示す。上層は、流速変化と対応しており、ピーク流速に達すると、水温・塩分共に変化し水塊の移動を生じていることがわかる。その後流速が弱まると、水温・塩分共に分布が復元する傾向を示し、混合による新水塊形成が伺われる。下層では、流れとの対応はあまり見られずに変動していることから、混合層となっていると考えられる。

St. 1~St. 24 における水温 (T)、塩分 (S) および σ_t ($\sigma_t = 1000 \times (\rho - 1)$, ρ : 密度) の鉛直分布を求めた。その一例を図-5に示す。観測時間中表層は北東流であり、図-1に見るように St. 11 は礁上、St. 12 は礁下流でこの σ_t の鉛直分布をみると、水深 10、20 m 層付近に逆転層が現われている。このような現象は、安定した流れでは存在し得ないから、上下水層が乱れによって混合過程にあることが判る。このことは後述の魚探記録にも現われている。礁を越える過程で混合が生じれば、礁の上下流における水塊の特性を水温・塩分図 T - S グラフで判別することができる。この例を図-6に示す。図-6の各点は、左より水深 5 m ほどの値であるから、上図から礁を越えることによって各層で水温・塩分の平

均化が行なわれ混合による水塊形成の様子が判る。下图の判断は明らかでないが、潮上側 30 m 水深以上の水が混合して潮下 10~15 m に集まり、潮下の下層には反流による底層水の巻き上げが起こっているようである。

(3) 魚群探知機による流況解析について

魚群探知機を用い水塊構造の様子を求めた。この例を写真-1~3に示す。この映像が密度成層あるいはプランクトン等による濁度成層なのか不明であるが、筆者らが入津港 (大分県) の静穏海域で行なった場合は、顕著な密度躍層、濁度躍層がありながら映像がなかったことを考えると、密度、濁度の異なる水塊が擾乱されている場合に起こるものと考えられそうである。写真-1は St. C 付近で漂流中の内部波の記録で、中央水深部付近に最大波高 14 m の波動がみられる。写真-3は St. 17 から St. 20 に向かう記録の一部であり、船上からの目視と対象して考察する。礁上は烈しく波立った流れであり、礁を越えた地点で潮目を伴う半径 100 m 程の滑面の海面が存在する。これは上昇流が海面に到って放射流となり、表面波がさえぎられて滑面を呈している。滑面海域のほぼ中央で停船し漂流すると隣近する降下流域 (こまかい波立ちと流れ藻泡等の集められている海面) に船は漂流する。このとき魚探には円弧状に降下流線様のものが記録されている。写真-2は逆に St. 20 から St. 17 に向かって流れを遡上したときの魚探記録で、上昇域海面、波立ち域を越えて上流側に成層流が礁を越流する様子が伺える。

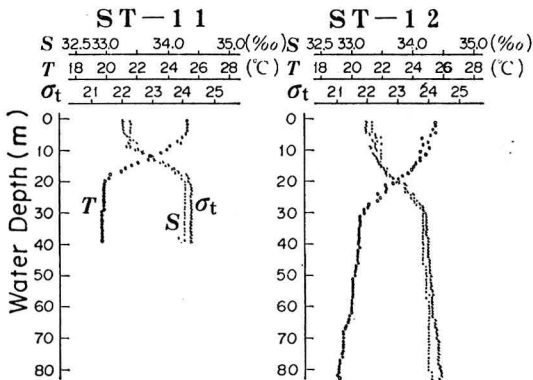


図-5 礁上・下流の S , T , σ_t の鉛直分布図例

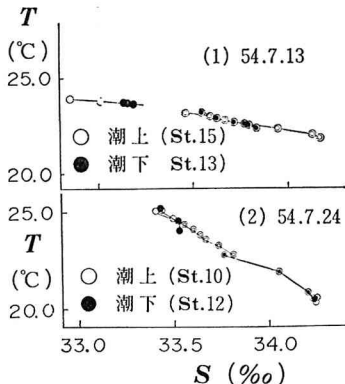


図-6 礁上・下流の T - S 図例

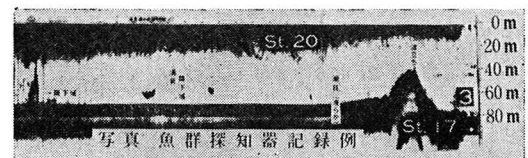
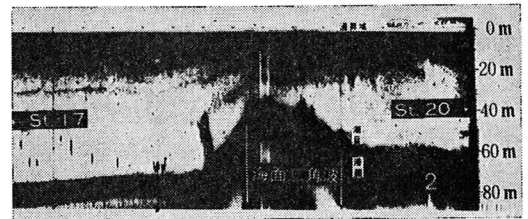
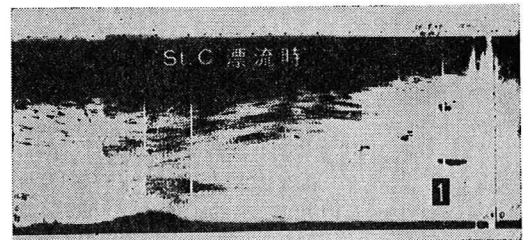


写真-1, 2, 3 魚群探知機記録例

4. 現象の要約と理論的考察

以上に述べた観測結果とその考察から、次の知見を要約することができる。

- ① 礁の潮目での上昇降下流域は不規則に生じるのではなく、流況によって地形的に固定した場所に生じ、平均流向を軸とする渦を生じる。またカルマン渦のように後流中に流去することはない。
- ② 密度成層流が地形的混合を受けた後流場のエネルギーベクトルは、浮力領域のエネルギー輸送を生じ、新密度成層流へ移行することによる乱れエネルギーのポテンシャルエネルギーへの変換が現われる。
- ③ 慣性領域のエネルギーベクトルは $-5/3$ 乗則に従うが、流軸方向では $3 \sim 10$ 倍のエネルギーレベルがあり、異方性乱流である。
- ④ 礁下での流れは σ_t の上下逆転現象から礁上の密度流は混合過程にある。
- ⑤ 底層流は流速の遅いとき礁を越えることができず、礁の裾を迂回する。

以上の現象認識に立っていえることは、① 従来のように物の背後の流れをレイノルズ応力という不規則量として統計的に扱うよりも、物によって生じる平均流の変化による圧力場の変化として確定論的に扱うことが必要である。② 礁による水塊混合は全層完全混合とはならないので新しい成層流へエネルギー輸送が起る、などである。

この現象の運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon_x \nabla^2 u + 2\omega v \sin \varphi \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \varepsilon_z \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに、 (u, v, w) は (x, y, z) 方向の平均流速成分、 g は重力加速度、 p は圧力、 ρ は海水密度、 ε_i は渦動粘性係数、 ω は地球の自転角速度 ($2\pi/24 \text{ hr} = 7.3 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$)、 φ は緯度を表す。

質量保存則は、海水を非圧縮性流体と考えると、

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

式(1)の各項のオーダーを検討する。軸を 図一1 に示すようにとると、 $x=500 \text{ m}$ 、 $y=3000 \text{ m}$ 、 $z=80 \text{ m}$ 、 $t=T=12 \text{ hr}=4.3 \times 10^4 \text{ sec}$ のスケールで、 $\rho=1021 \sim 1025 \text{ kg/m}^3$ 、 $u=0 \sim 1 \text{ m/sec}$ 、 $v=0 \sim 0.3 \text{ m/sec}$ の現象が生じている。なお、 $\sin \varphi=0.57$ 、 w は直接観測されていないが、式(3)を用いて、

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\therefore w \approx 0.15 \text{ m/sec}$$

の流速が生じていると考えられる。

これらのスケールを用いて式(1)、式(2)の各項のオーダーを検討すると、コリオリ項、粘性項および非定条項は省略されることが判かる。

式(2)は $4\rho \approx 0 \sim 4$ (MKS 単位系) であり、 x, y, z, t, u, v, w に前記の値を用いれば、第1項、第3項は無視できる。結局、

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} \dots\dots\dots (5)$$

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

が基礎方程式となる。いま 写真—2 の記録などから、礁上流から礁上までの流れはポテンシャル流線に近いので、各水深層毎の流線について式(4)、(5)のエネルギー積分を行なえば

$$q^2/2g + H = E \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $q^2 = u^2 + w^2$ 、 $H = p/\rho g + z$ 、 E : 比エネルギー。

この流線は、平均流の流線であり、礁をこえ、烈しい擾乱を受けるまで成立つと考えられ、礁をこえる時に縮流を受け、こえた後では流速の yz 断面における分布が、礁の地形の影響によって変化し、速度水頭の変化は動水圧分布に変化を与える結果となり、圧力の高い方から低い方への流れが誘起されて、3次元の渦が発生する。

すなわち、式(8)を y で微分すると

$$\frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{1}{2g} \frac{\partial q^2}{\partial y} \dots\dots\dots (9)$$

y 方向の動水圧水頭差 δH は、 yz 方向に新たな流れ v' を起させることになる。

$$\delta H = \int_a^b \frac{\partial H}{\partial y} dy = -\frac{1}{2g} \int_a^b \frac{\partial q^2}{\partial y} dy = -\frac{v'^2}{2g} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、積分範囲 (a, b) は後流の自由流線での境界層幅。

以上から、 yz 断面に発生する流速 v' は

$$v' = \sqrt{q_b^2 - q_a^2} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

この流れは、地形によって起された平均流の流速分布によって作られたものであるから、地形に固定した渦である。

また、 $gd\rho/dz \ll \delta H$ である場合は、鉛直方向にも同様の展開が可能で、

$$w' = \sqrt{q_b^2 - q_a^2} \dots\dots\dots (12)$$

が導びかれ、 $v' \approx w'$ が成り立つ。ただし (a, b) は xz 面での境界層幅を表わす。式(12)による値は、ほぼ上昇降下流速と同じオーダーの値が得られることが確かめられる。

5. あとがき

沿岸の中規模地形(数 km)の礁によって起される後流について興味ある事実を観測したのでここに報告する。今回は沿岸海況の実態を把握する目的で行なったもので、ほぼその現象を知ることができた。今年も引き続き観測を実施して実態を明らかにする。なお、成層流の

安定は Richardson 数で議論されるが、St. A では安定した成層であるが、礁の直上では混合が開始していることから限界 Ri 数の検討もできそうである。礁下流の上昇降下流の発生は礁による圧力場の変動として捉えられそうである。これによる混合強度と新水塊の形成については今後の問題である。終りに御協力頂いた山口県外海水試安村場長、黒潮丸・若潮丸両船長ほか乗組員の皆さんに厚く御礼申し上げる。なお、本研究は科学技術庁の総合研究「海域制御技術」の開発研究の一環として行なわれたものであり、同検討委員会委員、海洋科学技術センターに謝意を表する。