

剝離渦の Spin Down による底層水の吸い込み現象

糸洸長敬*・大竹臣哉**・中村 充***・鈴木泰典****

1. はじめに

沿岸域環境は今日、漁業生産性の向上、生態系環境の立場から開発や保全、mitigation の対象として着目され重要性が増大している。岬は特色ある海岸環境であり、岬先端で剝離した渦の存在は好漁場形成の一要因と考えられている。一方、海岸保全のために人工岬の検討などもなされるようになった。岬を回る流れが岬先端で剝離する現象について、糸洸ら (1992, 93) は剝離渦の循環定数は岬の長さや流速に関係すること、また剝離渦の発生周期は循環定数と岬先端における流速に関係があることを報告している。しかし、岬によって生じる剝離渦の水力構造に関する知見は少ないのが現状である。本研究では岬先端で剝離する渦の形成機構、剝離渦の流下に伴う spin down によって生じる湧昇流やその流速などについて理論的検討および実験による検証を行い、岬の後流域の海水流動特性を明らかにすることを目的にした。

2. 実験による現象考察

糸洸ら (1992, 93) は小型水路の一樣流中に岬に見立てたアクリル製板を設置し、岬の後流部付近の流動を注入流脈法 (メチレンブルー溶液をノズルを通して上流から流し、上中層の流れを観察する)、注入タイムライン法 (底面にメチレンブルー粉末をまいて、底層の流れを観察する) 及びアルミ粉末懸濁法 (アルミ粉末を流し、スリット状のレーザー光で後流域の渦の挙動を観察する) などの可視化法を駆使した実験を行ない、現象を注意深く観察した。図-1 はその模式図である。図中、 l は岬の長さ、 L は岬後流域制御板までの距離を表し、実線矢印は上中層の流れ、破線は底層流れ、一点鎖線を剝離渦列線を表す。これによると、底層流れは、すべて剝離渦列線に吸い込まれ、上中層の流れと大きく異なった流れとなる。また、剝離渦は流下とともに渦径を増大している。このことは、底層流は渦に流れ込み渦内で湧昇が生じていることを示すものである。そこで、この現象を「剝離

渦が流下するにつれ渦径が増大し、渦の全エネルギーが減少する。渦のスピンダウンによって生じる余剰のエネルギーが渦径の増大をまかなう湧昇に用いられる」と解釈し、理論的考察を試みる。

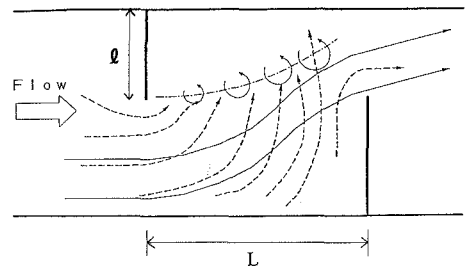


図-1 可視化による岬後流付近の模式図

3. 理論的考察

岬先端から発生する剝離渦は、岬に沿って流れる流程の中で岬沿いに発達する境界層内の渦が先端で剝離すると考えられる。図-2 に示すように岬沿いに発達する境界層厚さ δ は、岬の長さや流速に近似的に比例するとすれば、岬の長さを l として、

$$\delta = Kl \dots \dots \dots (1)$$

ここに K は比例定数である。 K を実験的に求めたのち、理論的考察を行うことにする。

渦は、図-2 における岬先端から剝離し、先端 O からある距離で最小径の渦を形成する。最小径の循環の強さ Γ は OAB 面の循環で示すことができ、

$$\Gamma = \int_{OAB} U_t ds \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ds は OAB に沿った線素、 U_t は OAB に沿った接線流速で、 AB 間は $U_t = U$ とすれば

$$\Gamma = \pi \delta U / 2 \dots \dots \dots (3)$$

剝離後の渦は循環が保存される非粘性の渦として以降の

* 正会員 農博 東京水産大学助教授 海洋生産学科
 ** 正会員 水修 福井県立大学助手 海洋生物資源学科
 *** 正会員 農博 福井県立大学教授 海洋生物資源学科
 **** 水修 芙蓉海洋開発株式会社

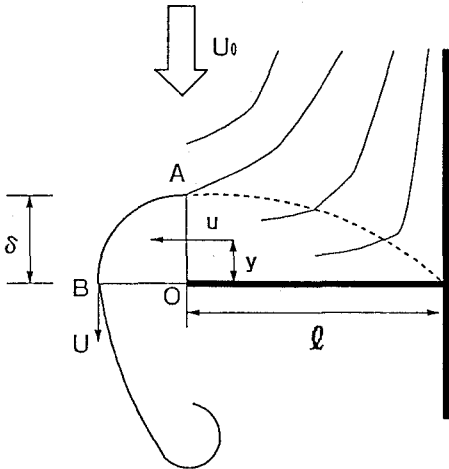


図-2 記号の定義

理論を展開する。

(1) 剝離渦の発生周期

図-2で、弧ABに沿う流体粒子のOに対する回転角速度を ω_p とすれば、剝離渦の発生周期 T は弧ABが4分円弧であることを考慮して、

$$2\pi/T = 4\omega_p \dots\dots\dots (4)$$

また、 $\delta\omega_p = U$ であることから

$$T = \pi\delta/2U = \Gamma/U^2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。

(2) 底層水の湧昇速度

剝離渦は流下とともに渦径を増大しスピンドウンする。このときの現象を定式化する。

渦の半径を a とし、円周上の循環を Γ とすれば、

$$\Gamma = \Omega_a \pi a^2 = \text{const.} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Ω_a は内の渦度である。 ω を渦内の回転角速度とすると、 $\Omega_a = 2\omega$ であるから

$$\omega = \Gamma/(2\pi a^2) \dots\dots\dots (7)$$

半径 a の渦のエネルギーを求めるために、渦内の半径 r における渦の回転角速度 v を

$$r \leq a \text{ のとき } v = \Gamma r/(2\pi a^2), \dots\dots\dots (8)$$

また、渦外の半径 r における速度は、 Γ が保存されることから

$$r \geq a \text{ で、 } v = \Gamma/(2\pi r), \dots\dots\dots (9)$$

とおく。

このとき渦の持つ全エネルギー E_a は、

$$E_a = \rho/2 \cdot \int_0^\infty 2\pi r h v^2 dr$$

ここに、 ρ 、 h はそれぞれ水の密度、水深(厳密には底層境界層厚さを差し引いた水深)である。

渦径が a から da だけ変化したときのエネルギーの変化 dE は、

$$\begin{aligned} dE &= \pi h \rho \left[\int_0^{a+da} r v^2 dr + \int_{a+da}^\infty r v^2 dr \right. \\ &\quad \left. - \int_0^a r v^2 dr - \int_a^\infty r v^2 dr \right] \\ &= -\frac{\rho h \Gamma^2}{4\pi a} da \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

すなわち、渦径が da だけ増大すると全エネルギーは、 $\rho h \Gamma^2/(4\pi a)$ だけ減少する。このスピンドウンによって生じる余剰エネルギーが渦径の増大をまかなう湧昇に用いられるとすると、半径 a 、幅 da の円筒の湧昇エネルギー dE_u は、 w を湧昇速度とすると

$$dE_u = \rho \pi a h w^2 da \dots\dots\dots (11)$$

となる。

したがって、式(10)と式(11)から

$$w = \Gamma/(2\pi a) \dots\dots\dots (12)$$

となる。この w について実測し検討した。

湧昇流量に関しては次のように見積もることができる。 πa^2 内の湧昇流量 q は

$$q = \int_0^a 2\pi r w_r dr = \Gamma a \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 w_r は半径 r のときの湧昇速度である。また、剝離後の時間を t とすると

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{\Gamma}{2\pi h} \\ \therefore a &= \frac{\Gamma}{2\pi h} t \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $t=0$ では渦は形成されず、若干流下して初めて a_0 の渦ができる。渦1個当たりの湧昇流量 q は、 t を岬先端で渦が剝離後の経過時間とすると、

$$q = \Gamma^2 t/(2\pi h)$$

剝離線上の渦の個数を N 個とすると、全湧昇流量 Q は、式(5)を考慮して、

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=1}^N q_i = \frac{\Gamma^2}{2\pi h} \sum_{i=1}^N i T \\ &= \frac{N(N+1)\Gamma^2}{4\pi h U^2} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

であり、また N は渦列線の長さを渦の間隔 S で割って

$$N = \sqrt{l^2 + L^2}/S, \quad S = UT < 2a, \quad L \leq 6l \dots (16)$$

で示される。ただし渦列線の長さは l および L を用いて直線で近似している。渦径 $2a$ が S よりも大きくなると、渦は相互干渉し渦の合成が生じる。また、 L は $5.4l$ 大きくなると後流域の大きさは収束し、 $5.4l$ より大きくなると(瀬戸ら, 1991)。流速 U なる流れの中に突出した長さ l なる岬によって生じる渦列によって式(15)の量だけ底層水が湧昇することになる。本稿では湧昇流量についての実験による検討を行わず、式(12)の湧昇速度について行うことにする。

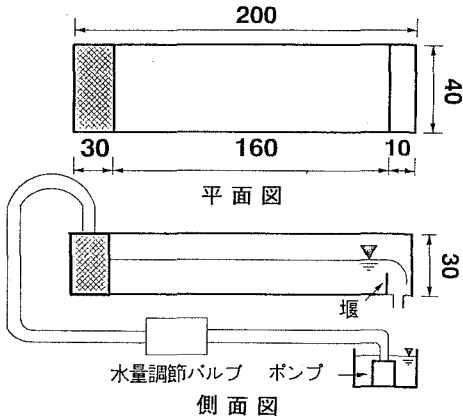


図-3 実験装置

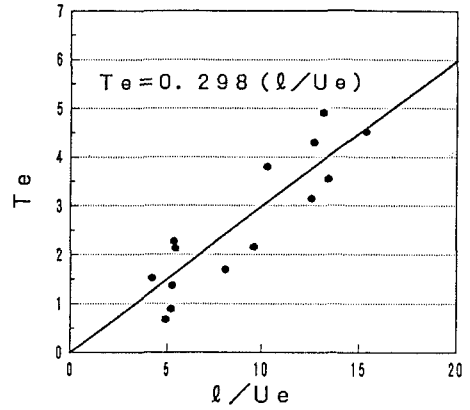


図-4 発生周期と l/U_e (水深 10 cm)

4. 実験

実験水槽は長さ 2 m, 幅 40 cm, 高さ 30 cm のアクリル製である (図-3)。上流側からポンプ (0-200 ㍈/分) を使って螺旋繊維状物質の整流装置を通して流水させ、水深 h を約 10 cm あるいは約 15 cm とするように下流側に堰を設けた。長方形アクリル板を岬にみため、先端から剝離する渦を染料 (ウオーターブルー) で可視化することにより渦の発生周期、湧昇速度を測定した。上流側の一様速度を 0.5~2.0 cm/sec とし、各流速について岬の長さ (アクリル板の長さ) を 15 cm から 30 cm まで 5 cm 間隔で 4 段階に変えた。実験ケースは合計 23 ケースであった。

渦の発生周期の測定は、アクリル板先端から剝離した渦を水槽上方よりビデオ録画し、画像解析装置で読みとった。湧昇速度は最小径の剝離渦が通過する付近の底面に予め染料を塗布しておき、形成された渦によって底面から染料が上昇するときの上昇高さや時間を側方より録画した記録を解析し測定した。したがって、ここでの湧昇速度とは厳密な最大速度ではなく、平均的な最大速度を意味している。また、循環定数 Γ の直接測定は困難であったので、岬にみためたアクリル板の延長線上の岬先端より 1.5 cm, 深さ 2 cm での流速を微流速計で測定し、これを剝離時の境界層外縁流速 U_e として代表させ、理論式に基づいて Γ を求めた。

5. 実験との比較

(1) 渦の発生周期

渦の発生周期は、式 (1), (5) から

$$T = \pi K l / 2U \dots\dots\dots (17)$$

となる。測定周期 T_e と実測流速 U_e とから T_e と l/U_e の関係を水深毎に作図したのが図-4 および図-5 で、両水

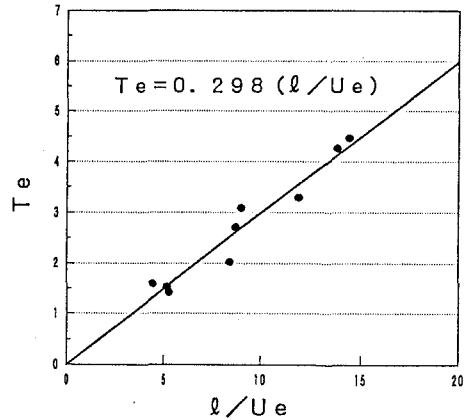


図-5 発生周期と l/U_e (水深 15 cm)

深の場合を同時にプロットしたのが図-6 である。少々ばらつきはあるが、水深に関係なく T_e と l/U_e はほぼ比例関係にあると見てよい。このことは、境界層厚さが岬の長さなどに比例するとおいた式 (1) の妥当性を保証するものといえよう。

そこで、流速分布に関する 1/7 乗則を仮定して、式 (1) の比例定数 K について以下に考察する。

図-2 において、境界層内流速を u , 境界層外縁流速を U とすると、近似的に

$$u = U(y/\delta)^{1/7} \dots\dots\dots (18)$$

で表される。Nikuradse は、この 1/7 乗則とよばれる流速分布のもとでの境界層厚さ δ を

$$\frac{\delta}{l} = \frac{0.37}{Re^{1/5}}, \quad Re = Ul/\epsilon \dots\dots\dots (19)$$

で示した (本間, 1975)。ここに、 l : 岬の長さ, ϵ : 渦動粘性係数。

渦動粘性係数 ϵ は、運動量輸送理論における混合距離

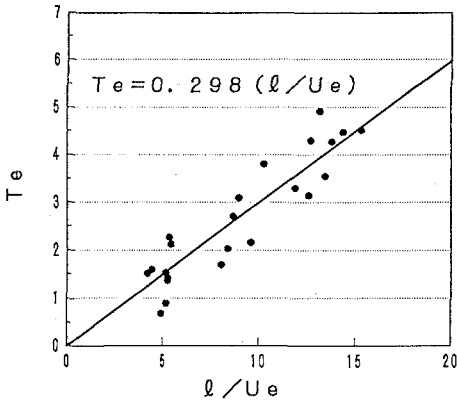


図-6 発生周期と l/U_e (水深 10 cm, 15 cm)

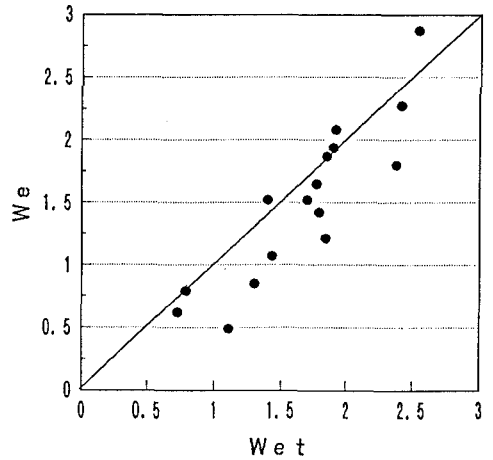


図-7 理論値と実験値の比較

理論を用い、式(18)を用いれば、

$$\varepsilon = \delta^2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{1}{7} \delta U \dots\dots\dots (20)$$

したがって、式(19)より

$$\delta = (0.37^5/7)^{1/4} = 0.18l \dots\dots\dots (21)$$

となり、境界層厚み δ は岬の長さ l に比例し、比例定数 K は 0.18 の値をとることが示される。 K の実験値を図-4より求めると、 $K = 0.298/(\pi/2) = 0.19$ となり、理論値に極めて近い値であることがわかる。図中の実験値は水深が約 10 cm および 15 cm の場合のものを含んでおり、理論的仮定が妥当であることを示すものである。

(2) 湧昇速度

湧昇流速の測定は K の値を求めた 23 ケースの内、上流側の一様初期流速が小さいため剥離渦の循環定数 Γ が小さくなり卓越した湧昇現象が現れずかつ湧昇速度の計測が困難なものを除外して、合計 16 ケースで行った。理論湧昇速度 w_{et} を計算するためには式(12)中の循環定数 Γ と渦径 a が予め定まっていなければならない。 Γ は式(13)と(5)から求めることができる。但し、 K の値は理論値 0.18 を、境界層外縁流速としては、 K 値の算出に用いた実測の U_e を使った。

渦径 a については、最小渦径 a_0 の面積が図-2 における 4 分円の面積に等しいとして、 $a_0 = Kl/2$ とした。したがって理論湧昇速度 w_{et} は最大速度を意味する。

図-7 に、実測した最大湧昇速度 w_e と理論最大湧昇速度 w_{et} との関係を示す。理論湧昇速度の方が若干大きい傾向があるが、ほぼ 45 度の直線に沿っており湧昇速度は式(12)で示すことができることがわかる。

5. 終わりに

岬を回る流れについて、岬先端から剥離する渦の発生周期やその spin down による湧昇流速についての著者ら理論を実験によって検証し、ほぼ満足すべき結果を得た。

主要な結論は次のようである。

- 1) 現象の観察から、剥離渦は岬に沿って流れる流れの中で岬沿いに発達する境界層内の渦が先端で剥離することによって発生し、剥離渦は流下にとまない spin down し、底層境界層内の水を suck up する。
- 2) 岬沿いに発達する境界層の厚さ δ は、流速分布に関する 1/7 乗則や、運動量輸送理論における Prandtl の混合距離理論を用いることによって、岬の長さ l に比例することが理論的に導かれ、比例定数 K は 0.18 となる。実験的に求めた K は 0.19 ではほぼ理論値に等しい。
- 3) 剥離渦の循環 Γ は非粘性のパロトロピー流体の運動における Kelvin の循環定理によって一定に保存されるから $\Gamma = \pi \delta U/2$ となる (記号は図-2 参照)。
- 4) 渦が岬先端で剥離するとき、図-2 の記号を使い A 点の水粒子が δ を半径とする円周にそって流速 U で流れ、B 点に達したときに OAB 内の水塊が岬先端から剥離すると考え、発生周期 T と最小渦の径 a_0 は、
$$T = \Gamma/U^2, \quad a_0 = \delta/2 = Kl/2$$
 で表される。
- 5) 剥離渦は底層境界層の外側では Kelvin の循環定理によって、循環は保存され一定値を取り、流下するにつれ spin down し渦系は増大する。spin down に伴い渦の持つ全エネルギーは減少する。その減少エネルギー dE は、渦径を a 、渦径の増大量を da 、水深を h (厳密には底層境界層厚さを差し引いた水深)、密度を ρ とすると、 $-(\rho h \Gamma^2/4\pi a)$ で表される。これが渦径の増大をまかなう湧昇に用いられるとすると、湧昇に必要なエネルギーは $(\rho n a h w^2 da)$ となるから、湧昇速度 w は $w = \Gamma/2\pi a$ となる。
- 6) 理論湧昇速度 w_e の計算には境界層外縁流速に上で用いた実測の U_e を使い、 K の値は理論値 0.18 を用い

て Γ を求め、理論最大湧昇速度 w_{et} を算出した。理論湧昇速度の方が若干大きい傾向があるが、ほぼ 45 度の直線に沿っており湧昇速度は式(12)で示すことができる。

参 考 文 献

糸洩長敬・向井雅志・瀬戸雅文・中村 充・大竹臣哉 (1992): 岬を回る流れにおける海水混合に関する研究, 水産工学会学術

講演会論文集, pp. 85-86.

糸洩長敬・大竹臣哉・中村 充・向井雅志 (1993): 岬による剥離渦の形成とその Spin Down による湧昇流, 水産工学, 30 巻, 2号, pp. 113-118.

瀬戸雅文・糸洩長敬・中村 充・田北博司 (1991): 平板の背後に形成される後流域より発生する質量力, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 666-670.

本間 仁 (1975): 水理学, pp. 76-91.
