

複列衝立構造物による人工湧昇流

大竹 臣哉*・糸 洸 長 敬**・中 村 充***

1. は し が き

いわゆる 200 海里の定着と水産資源の供給の必要性から沿岸域の漁場整備が盛んに行われている。海外からも、沿岸域開発の環境保全対策技術としてわが国の漁場造成技術が注目されている。この漁場造成技術の一つとして、湧昇流発生海域の高い生産性に着目して、人工湧昇流発生構造物の開発が最近多くみられる。筆者の一人も人工湧昇流の発生方法として海底に設置した複列衝立型構造物を提案してきた。

これらの構造物による湧昇流の発生機構については、主として、流れの可視化実験から理解が深められてきた。例えば緒方ら（1991）は大規模カルマン渦の発生に起因するとし、鈴木（1992）は3次元性渦の発生に、また池田ら（1992）、浅枝ら（1990）は河川に見られる馬蹄形渦の誘導速度に起因するとしている。しかし、これらの研究は発生機構の理論的解析、湧昇流量の定量化には十分な議論が進んでいない。

そこで本研究では、一様流中に設置された複列衝立型構造物による、湧昇流の発生機構と発生流量について定

量的な解析を理論と実験で行った。

2. 実験方法

実験に用いた水槽を図-1に示す。用いた衝立構造物は高さ D 、幅 B （ $2D$ ）の単純な長方形で、これを2枚上下流間に設置した。実験条件は、構造物の幅 B 、高さ D 、水深 h 、間隔 L 、および流速 U の5条件とした。

実験は、上流側構造物上端に塗布した染料の拡散によって流れを可視化し、染料が下流側構造物を越える際に間欠的に見られる上昇流をVTR、カメラで撮影し、発生周期、上昇高さを測定した。

実験条件、結果を表-1に示す。

3. 実験による現象の考察

図-2に可視化された湧昇流の発生写真を示す。染料による流れの可視化から衝立構造物による湧昇流の発生は、以下のような現象として考えることができた。

図-3は、構造物前・後流域の状況を模式的に表した。

- ① 上流側構造物前面に境界層が発達し、剥離時に渦管が形成される。
- ② 上流側構造物によって形成される反流後流域は、①の渦管列による閉曲面を構成する。
- ③ 渦管列の発達流下で後流域内の水は吸い出され、後流域は圧力低下が生じる。
- ④ この圧力低下がある大きになると、後流域閉曲面は上流側構造物直後で破れ、低下圧力は回復し、後流

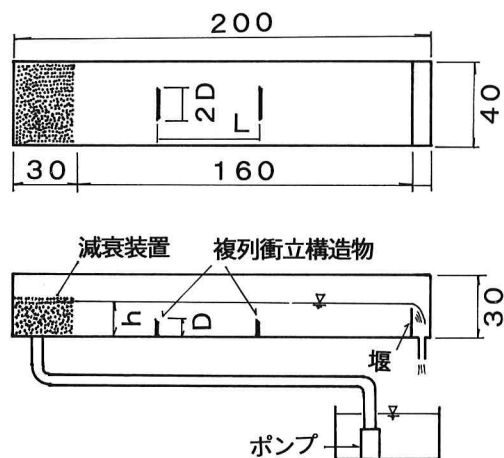


図-1 実験装置（単位 cm）

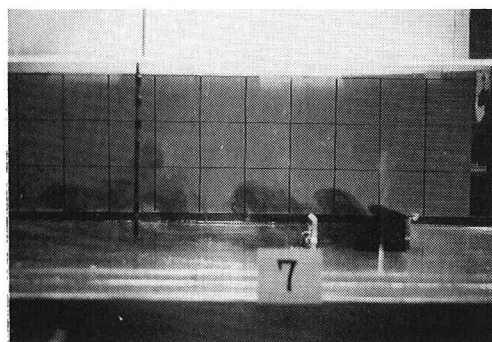


図-2 湧昇流の発生状況（流れは右から左）

* 正会員 福井県立大学助手 海洋生物資源学科
 ** 正会員 農博 東京水産大学助教授 海洋生産学科
 *** 正会員 農博 福井県立大学教授 海洋生物資源学科

実験 NO.	流速 U_0 cm/s	流速 U^*	構造物高さ D cm	水深 h cm	構造物間隔 L cm	実験結果	
						湧昇高さ H cm	周期 T_s
1	1.1	1.37	3	15	9	5.5	14.1
2	1.1	1.65	5	15	15	9.0	15.3
3	1.1	2.2	7.5	15	22.5	12.5	13.9
4	1.4	1.75	3	15	9	7.0	7.9
5	1.4	2.1	5	15	15	9.5	9.6
6	1.4	2.8	7.5	15	22.5	14.0	10.1
7	2.0	2.5	3	15	9	7.0	5.5
8	2.0	3.0	5	15	15	14.0	6.9
9	2.0	4.0	7.5	15	22.5	14.0	6.3
10	2.4	3.45	3	10	9	8.0	4.4
11	2.7	3.86	3	10	9	8.5	4.1
12	2.9	4.15	3	10	9	10.0	4.6
13	1.4	2.1	5	15	10	9.0	13.1
14	1.4	2.1	5	15	20	10.0	8.8
15	1.4	2.1	5	15	25	11.0	10.6
16	2.0	3.0	5	15	10	14.0	3.7
17	2.0	3.0	5	15	20	14.0	7.3
18	2.0	3.0	5	15	25	14.0	7.1
19	2.0	2.5	3	15	6	7.0	5.2
20	2.0	2.5	3	15	12	8.0	5.7
21	2.0	2.5	3	15	15	8.0	6.5

A schematic diagram of a curved boundary layer. A curved surface is shown on the right, with a boundary layer developing from a point O on the left. The boundary layer thickness is denoted by δ . The velocity profile at a point A is shown with velocity U . The angle of attack is δ_a . The coordinate system (x, y) is indicated, with x along the surface and y perpendicular to it.

すなわち、渦径が増大することによって、エネルギーを失う。式(4)中のエネルギーは粘性逸散なし(Γ が保存)として得られる値であり、このエネルギーが底層境界層からの流れの取り込みに用いられると考えられる。渦管への取り込み流速を w とすれば、消費エネルギー dE_w は

(1) 渦管の性質

$$dE_w = 2\pi a(da) \rho w^2 / 2 = \pi a \rho h w^2 da \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

式(4)(5)から

$$w = \Gamma / (2\pi a) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

Γ は、図-3 に示すように平板に沿った流れの境界層内の渦が、先端Oで剝離して、自由渦となるとして式(7)が得られる。

$$\Gamma = \oint_{OAB} U ds = U \pi \delta_0 / 2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 δ_0 ；Oにおける境界層厚さ。

いま、 δ の値に、境界層内流速 u の分布が $1/7$ 剰則であるとし、 $1/7$ 剰則のもとでの Nikuradse の関係、および渦動粘性係数 ν に混合距離理論を用いれば、

$$\left. \begin{aligned} u &= U(y/\delta)^{1/7} \\ \delta/x &= 0.37/\text{Re}^{1/5}, \quad \text{Re} = Ux/\nu \\ \nu &= \delta^2(\partial u/\partial y)_{y=\delta} = \delta U/7 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

から、

$$\delta = Kx, \quad \delta_0 = KD \quad \dots\dots\dots (9)$$

K は、速度分布に関する係数で式(8)の分布では、

$$K = (0.37^5/7)^{1/4} = 0.18$$

である。(糸列ら, 1992)

式(9)を式(7)に用いて、

$$\Gamma = \pi KDU/2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

(2) 平板後流域の圧力低下と湧昇高さ

考察②③の定式化を行う。渦管への吸い込み速度の最大値は、式(6)で a が最小値 a_0 、すなわち剝離直後の渦である。この渦径は、図-3 の OAB の循環 Γ が円形になることから

$$a_0 = \delta_0/4 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\therefore w_{\max} = 2\Gamma/(\pi KD) \quad \dots\dots\dots (12)$$

後流域内の圧力低下 Δh は吸引の速度水頭に等しい。

$$\Delta h = w_{\max}^2/(2g), \quad \Delta p = \rho g \Delta h \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 Δh ；エネルギー低下水頭、 Δp ；低下圧力強度。

式(12)を式(13)に代入して、

$$\Delta h = \frac{2}{g} \left(\frac{\Gamma}{\pi KD} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

を得る。

衝立平板による湧昇高さ H は、式(14)に示す圧力低下エネルギーの総量に関係すると考えられる。2枚の衝立平板間の距離を L とすれば、反流域容積 V は BDL に関する量である。 L が十分に大 ($L > 5.4D$) となれば2枚の板の相互干渉は少なくなる。(瀬戸ら, 1991)

すなわち、

$$V = \alpha_1 BDL \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 α_1 ；比例定数、 B ；平板の幅

複列衝立板による湧昇流量を V_u とし、この湧昇に要するエネルギーが後流域圧力低下エネルギーの開放によって生じると考えると、

$$\rho V_u g H = \alpha_2 (\rho g \Delta h V) \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。

ここに、 H ；底面からの湧昇高さ。

V_u は間欠的湧昇の形が相似であることから、 H を代表長さとして、

$$V_u = \alpha_3 H^2 B \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。

よって、式(15)～(17)から

$$\frac{\Delta h}{H} = \alpha \frac{H^2}{D \cdot L} \quad \dots\dots\dots (18)$$

の関係が成り立つ。

H について解けば、

$$H = \alpha^{-1/3} (\Delta h \cdot DL)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式(19)を無次元表示して

$$\frac{H}{h} = \alpha^{-1/3} \left(\frac{\Delta h}{h} \cdot \frac{DL}{h^2} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 h ；水深。

(3) 湧昇流発生周期

湧昇流は間欠的に発生する。考察④によるこの発生周期を解析する。

反流後流域閉曲面内の圧力低下は、渦管による吸い出しの速度に比例し、後流域の容積 V に反比例すると考えることができる。この値がある限界圧力低下 Δp_c 以下になると、閉曲面は破れ圧力は回復し、湧昇流が起こるとして、

$$\Delta p \propto w \pi a^2 t n / V$$

右辺分子は、閉曲面をつくる n 個の渦管の両端の底面か

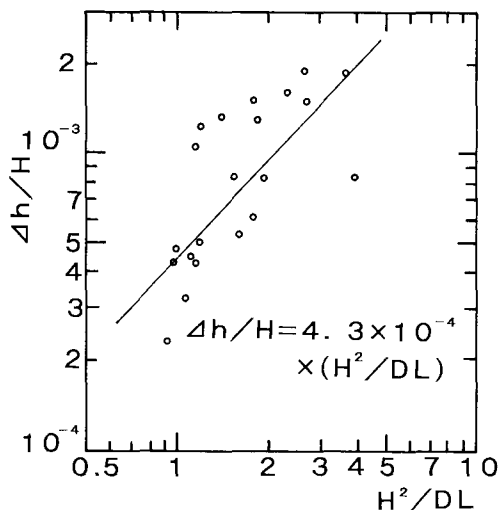


図-4 圧力低下水頭、後流域容積及び湧昇高さの関係

ら、 t 時間に閉曲面内の水を吸い出す量である。

$t = T$ で Δp が限界値 $\Delta p_c = C$ になると閉曲面は破れるから、

$$\beta_1 w a^2 T / V = C$$

$$\therefore T = \frac{VC}{\beta_1 w a^2}$$

この式に式(9)～(15)を代入して

$$T = \beta \frac{BL}{DU} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 β_1, β ; 比例定数である。

5. 実験による理論の検証

表-1 に示す実験結果を理論式にしたがって整理する。湧昇に用いられるエネルギーは後流域圧力低下エネルギーが後流域閉曲面の破れによって解放されるエネルギーに比例する、として得られた式(18)の関係の実験値を図-4 に示す。実験値にややばらつきがあるが、ほぼ式(18)の関係を満足している。図中の直線は、単純比例するとして45°の勾配線となっている。

この図から式(18)の係数 α は、 4.3×10^{-4} であり

$$\frac{\Delta h}{H} = 4.3 \times 10^{-4} \frac{H^2}{D \cdot L} \quad \dots\dots\dots (22)$$

を得る。

$\alpha = 4.3 \times 10^{-4}$ として式(19)は、

$$H = 13.2 (\Delta h DL)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式(20)は、

$$H/h = 13.2 (\Delta h DL)^{1/3} / h \quad \dots\dots\dots (24)$$

であり、これらの式と実験値を比較したものが、図-5、図-6 であり、これらの関係式はよく実験値と一致していることがわかる。

したがって、湧昇高さ H は、式(24) から求めることができる。

湧昇流発生周期 T は、式(21)で整理する。結果は図-7 である。ばらつきはあるもののほぼ式(21)の傾向を示

しており、これから係数 β を求めれば、式(21)は式(25)を得る。

$$T = 0.7 \frac{BL}{DU} \quad \dots\dots\dots (25)$$

6. おわりに

本研究は、一様流中に設置された複列型の衝立板によって発生する湧昇流について、その発生機構を考察し、現象の定量化を試みたものである。可視化の実験から3章で述べた①～⑦のように現象を理解し、湧昇高さ H 、間欠的湧昇周期 T を定式化した。

定式化の過程で、湧昇高さ H は、湧昇に要するエネルギーが後流域に蓄えられた圧力低下エネルギーに比例するとして式(18)を導いたが、図-4 における実験値では1次の比例関係よりややずれている。

周期 T も後流域閉曲面内の圧力低下は渦管による吸い出し量に比例し、後流域容積に反比例するとして式(21)

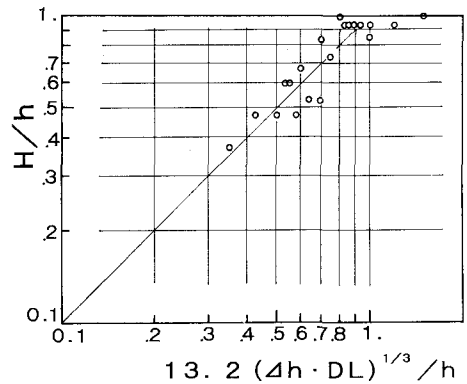


図-6 無次元湧昇高さの理論と実験値の比較

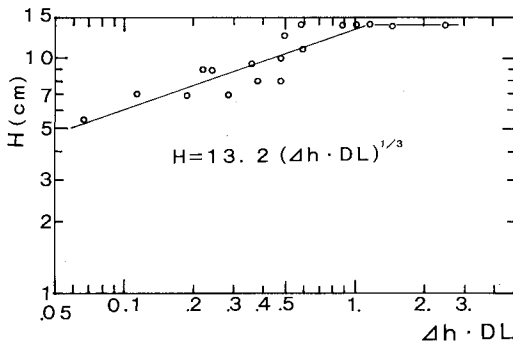


図-5 湧昇流高さの理論値と実験値

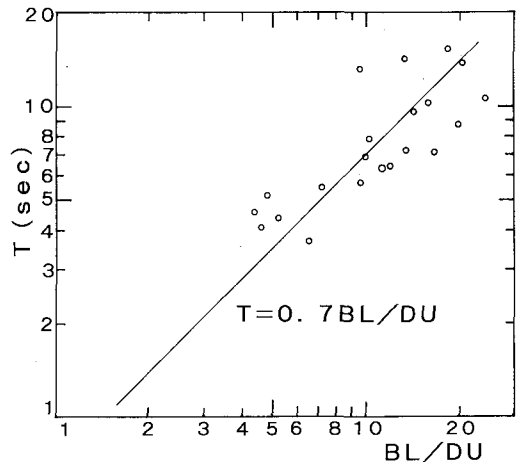


図-7 湧昇流発生周期の理論値と実験値

を導いたが、図-7に示す実験値の傾向は、やはり1次の比例反比例の関係からややずれている。今後さらに現象を詳細に考察し、理論精度をあげる必要がある。また、比例定数を実験から定めたが、この理論的導出も必要である。さらに、本実験では淀み点から剝離点までの境界層長さを一様とするために板幅 B を高さの2倍としたが、一般化のためには、任意の板幅についても検証する必要がある。

参 考 文 献

- 浅枝 隆・中井正則・玉井信行・堀川清司 (1990): V字型構造物による上昇流, 土木学会論文集, 423 (II-14), pp. 83-90.
- 緒方源信・長井利彰・山田賢司・梶田 剛 (1991): 人工湧昇流発生装置に関する研究—人工構造物の設計について—, 西部造船会会報, 82, pp. 141-154.
- 瀬戸雅文・糸刈長敬・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.
- 池田俊介・武若 聡・二瓶泰雄・秋山信義 (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, 第39巻, pp. 896-900.
- 糸刈長敬・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, 平成4年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 85-86.
- 鈴木達雄 (1992): 3次元物体背後の湧昇渦に関する研究, 水産工学, 29巻, 1号, pp. 23-30.