

流水中に鉛直に固定されたパイプ内に誘発される流れ

木村晴保*・平松大介**

1. はじめに

霧吹き の例からも分かるように、流れの中にパイプを立てると、パイプ内に流れが誘発される。この現象の水産面への応用には、湾にパイプを立てることによって、潮汐流を利用して湾内水の鉛直混合を促進し、夏季底層の食酸素化を抑制したり、あるいはまた、浮魚礁と組み合わせることによって、深層水を揚水し、表層水の基礎生産力を高めること、などが考えられる。

この場合、どの程度の流れがパイプ内に誘発されるのか、また、その大きさが何に支配されるのか、など不明な点が多い。ここでは、これらの点を実験により明らかにする。

2. 実験

水路は観測部前面がガラス張りの循環水路で、水路断面の高さと幅がそれぞれ 60×70 cm、水深 50 cm のとき、流速 50 cm/s までの流れを起すことができる。

水路底には図-1 に示すように、縦×横×高さが $22 \times 11 \times 6$ cm の角型ブロックを並べ、その上にパイプを通す直径 3.6 cm の穴をあけた縦×横×厚さが $40 \times 50 \times 0.5$ cm のアクリル板を乗せ、止水部を設けた。そしてパイプ下端の水路流速がゼロとみなし得るようパイプを図のように支持棒でもって鉛直に固定した。

パイプ下端は水底上 2.5 cm、水路水深は 53.5 cm とした。

水路流速 u は、パイプ上端に近い高さの所を流れる浮遊物が水平距離 30 cm 流下するに要した時間を測定し換算した。パイプ内流速 v は、パイプ下端より 5 cm 上に取り付けた注射針より色素を注出し、色素がパイプ上端に達するまでの時間を計測し求めた。

実験したパイプは表-1 に示す P1~P9 の 9 種の透明なアクリルパイプである。ここに、 D , d , l はそれぞれパイプの外径、内径及び長さである。また、 Re は水路流速の実験範囲を示すレイノルズ数である。

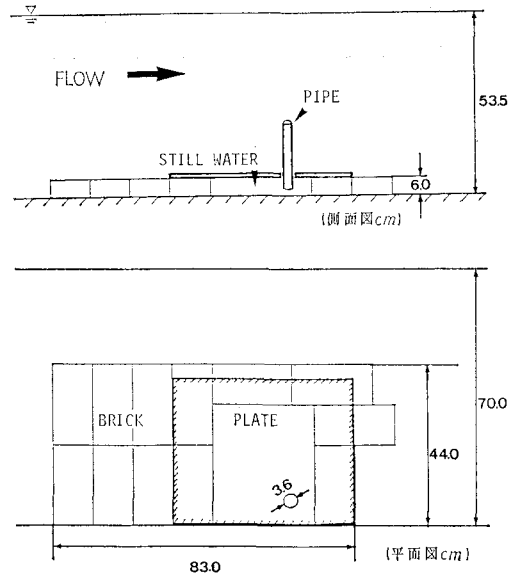


図-1 止水部と固定パイプの関係

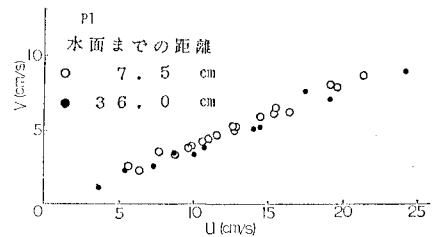


図-2 パイプ内流速に及ぼす水面の影響

3. 結果と考察

(1) 水面の影響

パイプ P1 を用い、水路水深を変えることによって、パイプ上端から水面までの距離を変え、水路流速とパイプ内流速の関係を調べた。

水深が浅くなってパイプ上端の水深が 1 cm 程度になると、水面がパイプ上端の流れに影響してパイプ内に誘発される流速は小さくなった。しかし、パイプ上端の水深が 7.5 cm 以上になると図-2 のように、水深の差による

* 正会員 農博 高知大教授 農学部栽培漁業学科

** 高知大学農学部栽培漁業学科学士

表-1 実験範囲

パイプ	D (cm)	d (cm)	l (cm)	D/d	l/d	$Re=Du/\nu$
P 1	2.015	1.555	15.0	1.296	9.646	723. ~ 4995.
P 2	2.030	1.565	27.3	1.297	17.444	568. ~ 4289.
P 3	2.010	1.576	40.0	1.280	25.478	1021. ~ 6214.
P 4	1.520	1.070	15.1	1.421	14.112	414. ~ 2886.
P 5	1.525	1.075	40.4	1.419	37.581	849. ~ 3310.
P 6	1.115	0.660	15.2	1.689	23.030	650. ~ 2244.
P 7	1.120	0.650	40.0	1.723	61.538	381. ~ 2625.
P 8	3.090	2.145	15.0	1.441	6.993	1239. ~ 7416.
P 9	3.100	2.160	40.4	1.435	18.704	1413. ~ 8531.

相違は認められなかった。それゆえ水路水深を 53.5 cm と一定にして、パイプ上端から水面までの距離を 10.6 ~ 36.0 cm の範囲で実施した今回の実験では、パイプ内に誘発される流速に及ぼす水面の影響は考えられない。

(2) 止水部アクリル板の穴の影響

パイプ穴とパイプ間に生じる間隙が止水部の水圧に影響し、ひいてはパイプ内の流速に影響することが心配された。そこで、パイプ P 3, P 8, P 9 を用いて、間隙を塞いだ場合と塞がなかった場合について実験した。図-3 は結果の一部であるが、その他の結果についても同様、両者には有意な差は認められなかった。

(3) $v \sim u$ の関係

図-4 は、水路流速 u によって誘発されたパイプ内の流速 v について、パイプ長 l をパラメーターとして、

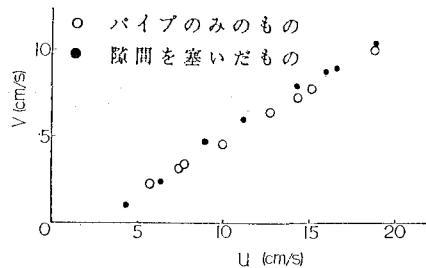


図-3 止水部アクリル板の穴とパイプ間の間隙の有無によるパイプ内の流速 v の影響

パイプの外径 D 毎に、 u を横軸に v を縦軸に取り図示したものである。

実験値にはバラツキは見られるものの、いずれの場合も u が大きな範囲では、 $u \sim v$ 間には直線関係式

$$v = au + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

が認められる。

a, b は $D=1.1$ cm については、 l の違いによる差は見られない。しかし、 $D=1.5, 2.0, 3.1$ cm のように外径が大きくなると、 a は l の長いものほど大きい。 b は $D=1.1, 1.5$ cm では負値、 $D=2.0, 3.1$ cm ではゼロとみなし得る。

いずれのパイプも u が大きくなると、水路流速 u に対するパイプ内流速 v の比 v/u は、パイプの諸量 D, d, l のみで表わされることが示唆される。特に、 $D=1.5, 2.0, 3.1$ cm のように、パイプ長 l が長いものほど、パイプ内流速 v が大きくなる現象は、式 (5) で示

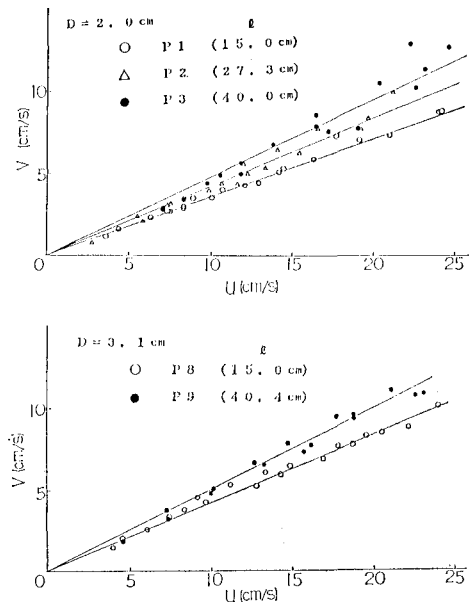
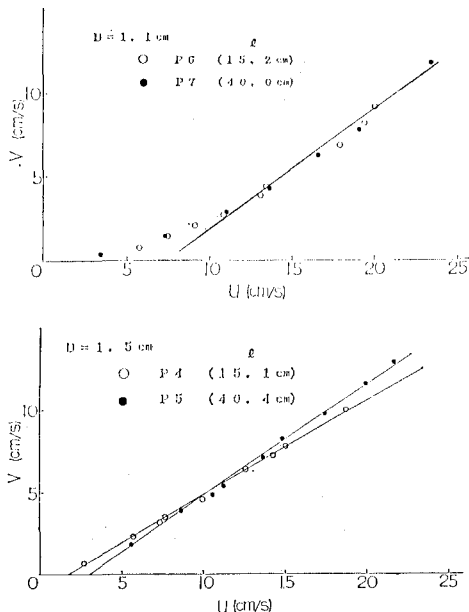
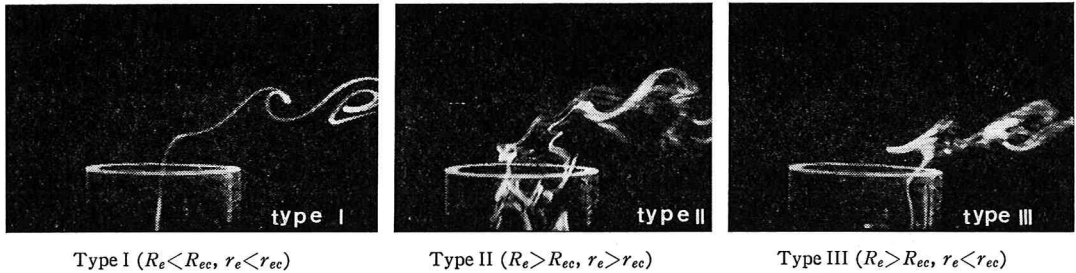


図-4 水路流速 u とパイプ内流速 v の関係



図—5 水平流によってパイプ内に誘発される流れのタイプ

すような、管の壁面摩擦では説明することのできない興味ある現象である。

(4) 流れの誘発タイプと誘発機構

水路流速によってパイプ内に誘発されるタイプは、パイプ上端での流れとパイプ内の流れがそれぞれ層流が乱流かによって、図—5 のタイプに大別できる。ここに、 R_e, r_e は水の動粘性係数 ν を用いて

$$\left. \begin{aligned} R_e &= uD/\nu \\ r_e &= vd/\nu \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるレイノルズ数で、 R_e はパイプ上端での流れ特性を、 r_e はパイプ内の流れ特性を表わす。 R_{ec} はパイプ上端での流れが、 r_{ec} はパイプ内の流れがそれぞれ層流から乱流となる限界レイノルズ数である。つまり、

- タイプ I: パイプ上端、パイプ内とも層流
- タイプ II: パイプ上端、パイプ内とも乱流
- タイプ III: パイプ上端は乱流、パイプ内は層流で、タイプ I と II の遷移領域

である。パイプ内で乱流、パイプ上端で層流となるタイプは今回の実験で存在しない。

周知のように、円形パイプの限界レイノルズ数は2000程度である。この値はパイプが十分に長く、どんなに大きな乱れを与えても、流水中に減衰してやがては層流状態となる上限の値である。

今回のパイプは直裁断面で流入時乱りが発生し易く、パイプ長も十分に長いとは言えないこともあって、パイプ内の限界レイノルズ数 r_{ec} は 2000 以下であった。

パイプ内に流れが誘発される機構は、粘性に起因する連行現象と、パイプ上端での圧力低下に起因する吸い出し現象とが考えられ、タイプ I は連行現象が、タイプ II は吸い出し現象が支配的である。

例えば、タイプ II ではパイプ上端での圧力低下 Δp は、流体の密度 ρ 、比例定数 k として

$$\Delta p = \rho k u^2 / 2 \dots\dots\dots (3)$$

で与えられ、これによって誘発されるパイプ内の流速 v は、パイプの流出、流入損失係数 f_0, f_l 及び壁面摩擦損失係数 f_L を用いて

$$\Delta p = \rho \left(f_0 + f_l + f_L \frac{l}{d} \right) \frac{v^2}{2} \dots\dots\dots (4)$$

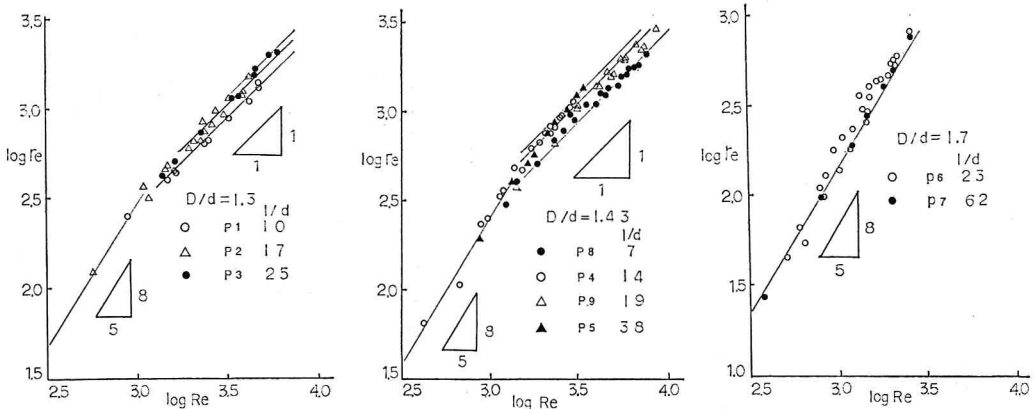
で与えられる。 v/u は

$$\frac{v}{u} = \left\{ k \left(f_0 + f_l + f_L \frac{l}{d} \right) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

で表わされ、水路流速には関係なく、パイプの特性量 $D/d, l/d$ のみの関数であることが予測される。

(5) $\log r_e \sim \log R_e$ の関係

式 (1) の関係を更に普遍化するため、図—4 の結果を R_e と r_e で整理し、 l/d をパラメータとして D/d 毎



図—6 $\log r_e$ と $\log R_e$ の関係

に両対数紙にプロットした。結果は図-6で、図中実線で示したように、 $\log r_e$ と $\log R_e$ の間には次なる直線式が認められる。

$$\log r_e = \alpha \log R_e + \log \beta \quad \cdots \cdots (6)$$

ただし、 α 、 β は R_e がある値 R'_{ec} を境として大きく小さいかによって異なる。

$R_e < R'_{ec}$ では、 α は $1/d$ 、 D/d に関係なく $8/5$ 、 β は図-7に示す D/d のみの関数 β' で表わされる。

$R_e > R'_{ec}$ では、 α は 1 、 β は図-8に示す $1/d$ 、 D/d の関数 β で表わされる。そして、式(6)は次式で整理される。

$$\left. \begin{aligned} R_e < R'_{ec} \text{ で } \frac{v}{u} &= \beta' \frac{D}{d} R_e^{0.6} \\ R_e > R'_{ec} \text{ で } \frac{v}{u} &= \beta \frac{D}{d} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (7)$$

ここに R'_{ec} は式(7)の第1式と第2式の交点として求める R_e で

$$R'_{ec} = (\beta/\beta')^{1/0.6} \quad \cdots \cdots (8)$$

で与える。そして、 $R_e = R'_{ec}$ での r_e は $r'_{ec} = \beta R'_{ec}$ で、 v/u は $\beta D/d$ で与えられる。

表-2は図-7、8の β' 、 β を用い、上記 R'_{ec} 、 r'_{ec} 及び v/u を求めたものである。

式(7)の第1式はタイプIの流れに、第2式はタイプIIの流れに対応して、 R'_{ec} 、 r'_{ec} はそれぞれ R_{ec} 、 r_{ec} に相当するものと思われるが、表-2で見ると r'_{ec} は一般によく知られている管路の限界レイノルズ数2000に比べて著しく小さい。これは前でも指摘したように、パイプの両端が直裁断面で下端で乱れが発生し易く、また l/d が十分に大きくないために、発生した乱れが消滅しないうちにパイプ上端から放出されるためである。そしてこのことはまた、 r'_{ec} が、 l/d が大きなほど大きくなっていることとも符合する。

図-8からも分かるように、 D/d が変らなければ、 l/d が大きなものほど β は大きく、 v/u も大きい。大きくなる程度は l/d の増大につれて減少して、 l/d が40程度で一定値に漸近することが伺われる。また、 D/d が大きなものほど β 、 v/u は大きい。

D/d が大きくなると v/u が大きくなるのは、パイプ

表-2 図-7、8の β' 、 β から推算した R'_{ec} 、 r'_{ec} 及び v/u

D/d	l/d	β	β'	R'_{ec}	r'_{ec}	v/u
1.29	10	0.28	0.0047	910	250	0.36
	17	0.34		1260	430	0.44
	25	0.37		1450	540	0.48
1.43	7	0.28	0.0042	1100	310	0.40
	16	0.36		1670	600	0.51
	38	0.41		2070	850	0.59

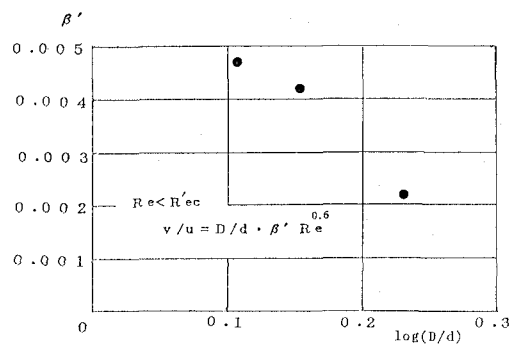


図-7 β' と $\log(D/d)$ との関係

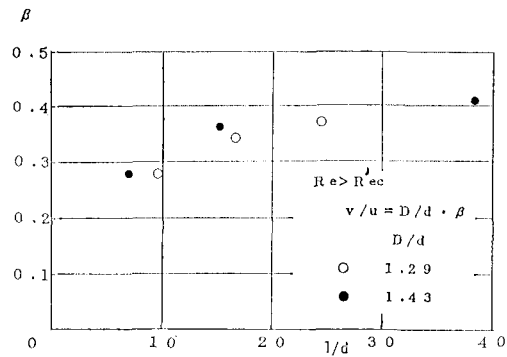


図-8 β と D/d 、 l/d の関係

下端の形状変化に伴う流入損失係数 f_I の減少によるためとか²⁾、あるいはまたパイプ上端での、パイプ内水の吸い出し面積に対する圧力の低下する面積の比が大きくなることによるためとか、などが式(5)から推察される。しかしながら、 l/d が大きくなると、なぜ v/u が大きくなるかについては、式(5)の壁面摩擦では説明することはできない。

(6) 実験値との比較

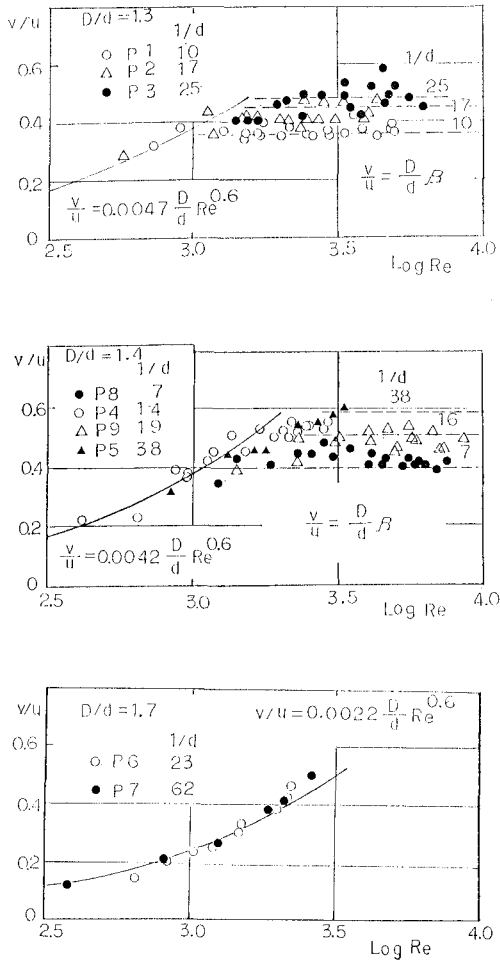
図-9は式(7)と実験値を比較するため、 v/u を縦軸、 $\log R_e$ を横軸に取り図示した。

式(7)の第1式は図中実線で、第2式で破線で示した。実験値は相当にバラツキはみられるものの、水路流速 u が小さくて、 $R_e < R'_{ec}$ では D/d が同一のとき、 v/u は l/d に関係なく R_e の関数で表わされ、 u が大きくなって、 $R_e > R'_{ec}$ となると、 v/u は R_e に関係なく、 l/d の大きなものほど大きくなっている。これらの特性は式(7)の特性と良く一致している。

そして、 $R_e > R'_{ec}$ では、 v/u は l/d 、 D/d の関数で、今回の実験範囲 $l/d=7\sim 38$ 、 $D/d=1.3\sim 1.4$ では $v/u=0.4\sim 0.6$ であった。

4. 結 論

水平流の中にパイプを鉛直に固定したとき、パイプは解



図—9 実験値と式 (7) の比較

プ内にどの程度の大きさの流れが誘発されるのか、またその大きさが何に関係するのかについて実験した。実験

析を簡明にするため、パイプ下端の水平流はゼロとみなし得る条件 (図—1) で行なった。

主な結果は次の通りである。

1) パイプ内の流れの誘発タイプは次の 3 タイプに大別できる (図—5)。

タイプ I: パイプ内、パイプ上端とも層流

タイプ II: パイプ内、パイプ上端とも乱流

タイプ III: パイプ内は層流、パイプ上端は乱流で、タイプ I と II の遷移領域

ただしパイプ内が乱流となる限界レイノルズ数は周知の値 2000 に比べて著しく小さく、最大でも 800 程度であった。

2) 水路流速 u に対するパイプ内の流速 v の比 v/u は

タイプ I: $v/u = \beta' R_e^{0.6} D/d$

タイプ II: $v/u = \beta D/d$

で表わされる。ここに、 D はパイプの外径、 d は内径、 $Re = Du/\nu$ で、 ν は水の動粘性係数、 β' は D/d の減少関数 (図—7)、 β は D/d 、 l/d の増加関数 (図—8) で、 l はパイプ長である。

特に、タイプ II の v/u が l/d の増加関数で表わされるなどは、管の壁面摩擦では説明することのできない興味ある現象である。

3) v/u は、タイプ II のとき $D/d = 1.3 \sim 1.4$ 、 $l/d = 7 \sim 38$ の範囲で、 $0.4 \sim 0.6$ と大きく、潮汐流による湾内水の鉛直混合の促進とか、魚礁と組み合わせて底層水の揚水といった水産面への応用が十分期待できる。

参 考 文 献

- 1) Steven Vogel: Life in moving fluids—The physical biology of flow, Princeton University press, pp. 54~55, 1983.
- 2) 本間 仁・米元卓介・米屋秀三: 水理学入門, 森北出版, p. 83, 1980.