

波浪場における 方向抵抗差を有する管路の残差流特性

CHARACTERISTICS OF WAVE-INDUCED RESIDUAL CURRENTS IN THE *ONE-WAY PIPE*

川野立¹・Mukhsan Putra HATTA²・藤田和夫³・松田如水⁴・押川英夫⁵・小松利光⁶
Tatsuru KAWANO, Mukhsan Putra HATTA, Kazuo FUJITA, Jyosui MATSUDA, Hideo OSHIKAWA and
Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 修(工) NTT ネオメイト関西 大阪北支店 (〒533-0021 大阪市東淀川区下新庄6-7-26)

²学生員 ME. 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻博士後期課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 九州大学大学院技官 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)九州本社 (〒819-0007 福岡市西区愛宕南1-1-7)

⁵正会員 博(工) 九州大学大学院助手 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

Characteristics of wave-induced residual currents caused by a specific pipe which is called “One-Way Pipe” were experimentally investigated. Komatsu *et al.* proposed a water purification method using ‘One-Way Pipe’, which has plural asymmetrical structures inside and can produce residual currents in tide and wave fields due to their directional resistance properties. Firstly, characteristics of wave-induced residual currents by a single One-Way Pipe were investigated. Secondly, those by two sequent pipes were done. In addition, the velocities of residual currents due to the single pipe were evaluated by using a fundamental equation for the pipe. As a result of comparison, it has become clear that ‘One-Way Pipe’ can activate to exchange seawater in wave fields and that wave-induced residual currents can be evaluated theoretically.

Key Words : One-Way Pipe, seawater exchange, wave fields, residual currents

1. 緒言

近年、閉鎖性沿岸域において水質の悪化が深刻な問題となっており、この対策として海水交換による水質改善手法である透過性構造物^{1),2)}、鉛直循環流誘起堤体³⁾や渦流制御型防波堤⁴⁾などの検討例が報告されている。これらは比較的小規模な漁港などへの適用が見込まれ、場合によっては有効な解決手段となることが期待される。しかしながら、従来から検討されているこれらの方法では広大な水域の水質改善を行うのは困難であり、施工も大がかりで費用がかさむということからその適用には限界がある。また入江や内湾といった狭隘な地域では未だ有効な解決策は殆どないという状況である。

そこで本研究では、管内壁に非対称構造物を取り付けて抵抗に方向特性を持たせた管路（以下 One-Way Pipe という）による水質改善技術^{5),6)}を応用して、特に狭隘な水域に適した海水交換促進

技術を検討する。流況制御ブロックを用いた類似の手法⁷⁾では、潮汐場において平面的な潮汐残差環流を創出して海水交換を促進するのに対し、本手法では平面地形や平面スケールに左右されない鉛直残差環流を創成して海水交換・物質輸送を行うため、従来は困難であった狭隘な入江奥部や内湾においても海水交換や物質輸送、貧酸素水塊の

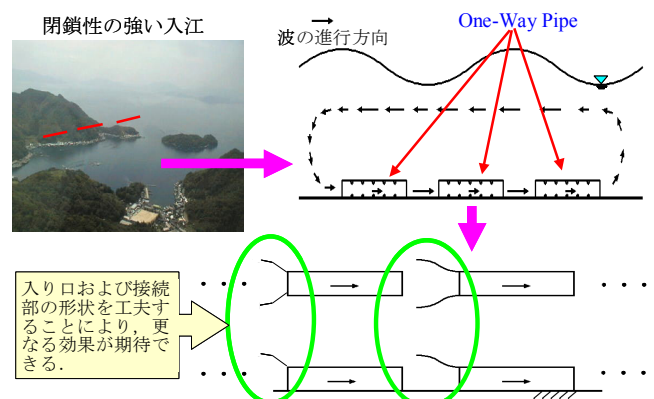


図-1 One-Way Pipeの概要

除去等が可能となる(図-1). One-Way Pipe は従来、潮汐場を主な検討対象にしてきたが^{5), 6)}, 本研究ではより効率的な海水交換や物質輸送、貧酸素水塊の除去等を実現するため、潮汐による往復流と同時に実海域に存在する波浪による往復流を対象とする. もちろん波に起因する往復流が起動力となるため、波長の1/2以下の水深の浅海域・沿岸域における使用が対象となる. 本論文では、One-Way Pipe の波浪場における有効性を実験的に検証すると共に、その水質改善効果の評価を目指して、本手法の基礎となる波浪残差流量(波により生じる管内流量の一周期平均値)を定量的に評価することを試みる.

2. 単一のOne-Way Pipe による波浪残差流の生成特性

(1) 実験装置および方法

実験には図-2に示す全長1600cm、幅25cmの二次元吸収式造波水槽を用いた. 造波装置から700cmの水路床上にOne-Way Pipe 一本を設置して、パイプ手前5cmの地点(幅方向には中央)で超音波ドップラー流速計(ADV)を用いて鉛直方向の流速分布を測定した. One-Way Pipe は内径10×10cm、長さ50cmの亚克力製矩形管で、内側に波の進行方向に粗差が生成されるように、粗度高さ $k=0.9\text{cm}$ の1/4円柱型粗差を取り付けたものである(図-2上図参照). このときの入射波は、静水深 $h=30\text{cm}$ 、波高 $H=5\text{cm}$ に固定して周期 T を変化させている.

まず、波浪場にパイプを置いた場合の管内往復流の生成特性を調べるために、粗度無しのplainパイプを置いて波の周期 T を0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6sec. と変化させて実験を行った. また、粗度の設置間隔を変化させたときの残差流生成特性を調べるために、粗度間隔 s (図-2上図参照)と粗度高さ k の比 s/k を1, 2, 3, 4, 5, 6, 10と変化させて実験を行った.

ここで、残差流生成効果を評価するための諸量を定義しておく. まず、残差流速値はサンプリング周波数20Hzで波の50周期分の水平方向流速の時間平均値とする. また流速振幅は、この50周期間の流速データの振幅のピーク値を平均した値とする. 最後に単位幅残差流量 q は、パイプ内径高さに相当する水深区間の残差流速分布をその区間で積分した値とする.

(2) 実験結果および考察

図-3に粗度無しパイプの場合における各水深での50波平均の流速振幅を周期毎に示す. パイプ内

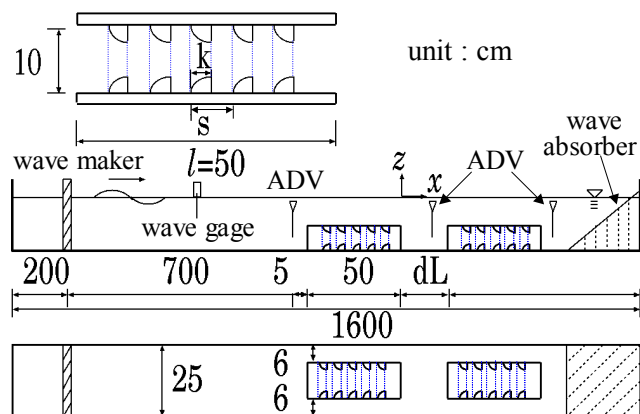


図-2 実験装置概略(右の二本目のpipeは3章で使用)

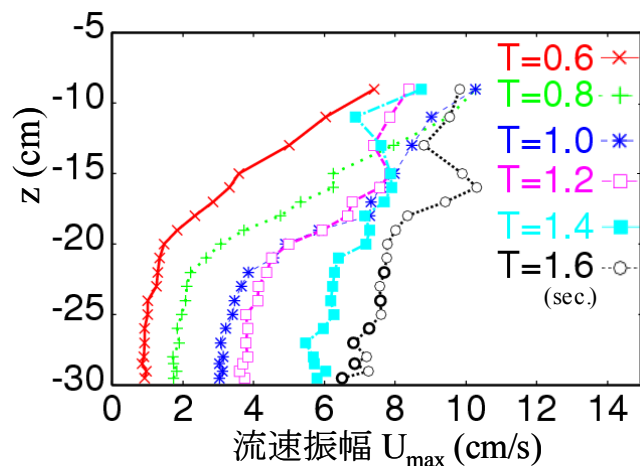


図-3 流速振幅の鉛直分布(粗度なしのパイプの場合)

径区間の $z = -28.5\text{cm} \sim -18.5\text{cm}$ では、小さな勾配はあるものの流速振幅はかなり一様化されていることが確認できる. これより、管内流速振幅としてこの区間の流速振幅を平均して用いることは妥当と考えられる. この管内流速振幅 U_{max} は、周期の増加にともないほぼ線形的に増加していた.

図-4に $T=1.2\text{sec.}$ の場合の残差流速の鉛直分布を粗度間隔 s 毎に示す. パイプ内径区間では、粗度がないplainの場合と s/k が2以上の場合とでは流速値が大きく異なっており、粗度の効果(残差流生成能力)により正の残差流が生成されていることが確認され、残差流速はパイプ位置でほぼ一様な値を持っていることがわかる. 粗度間隔が粗度高に比して狭い場合に残差流が負となることは、3次元構造物である1/4球型粗度を直接水路床に取り付けた状態で波浪場において残差流を計測した押川ら⁸⁾の実験結果と一致している. これは連続した粗度が接近しすぎることにより本来の流体抵抗特性が発揮できなくなるためである. またパイプより上方の領域では、パイプ後方から循環してきた負方向の残差流が確認できる. なお、こ

の図では正と負の残差流の収支がとれていないが、これはパイプ両側にも水路壁との間に空間があり、そこにも循環流があるためである。

粗度なしの場合の $U_{\max}$ とパイプ内径 $d = 10\text{cm}$ の積で残差流量 q を除して無次元化した量を縦軸、波長 L とパイプ長さ l の比 L/l を横軸としたものを図-5に示す。これより $L/l=2$ において、 $q/(dU_{\max})$ が粗度間隔に因らず小さくなっており、残差流の生成能力が小さいことがわかる。これは、パイプ長がおおよそ波の半波長に相当するため、パイプ入口付近と出口付近での流速が常に逆位相となり、互いに打ち消し合ってしまうためである。 L/l が大きくなって入口と出口での流速の位相が近付いてくると、 $q/(dU_{\max})$ は増加し、一定値に漸近して行く。従って、 L/l は3.5以上が必要である。なお、波の入射角とパイプの向きに角度 θ の偏りがある場合は、 $L/(l \cos \theta)$ が3.5以上であれば良い。またこの図から、 $s/k=2$ 以上であれば s/k の違いによる残差流の生成能力に顕著な差は見られず、その中でも $s/k=2 \sim 5$ 程度の範囲で残差流は最大値をとることがわかる。これは、(潮汐による長周期の往復流を意図した) 定常流実験の場合の朴ら⁶⁾の研究成果における最適値 $s/k=3$ を含んでいる。

3. 複数のOne-Way Pipeによる波浪残差流の生成特性

(1) 実験装置および方法

これまでの結果により、One-Way Pipeを往復流場に設置すると、その方向抵抗特性により残差流が生成され、海底面に設置した場合には残差流の鉛直循環を創出できることが確認された。この考えを拡張すれば、海底面上に適当な間隔でOne-Way Pipeを連続して設置することにより、平面地形や平面スケールに左右されない任意の長さの残差流の鉛直循環を構築できることが期待される。そこでこれらのための基礎研究として、二本のOne-Way Pipeを連続して底面に設置した場合の残差流の生成特性について実験的に検討を行った。

実験には図-2に示された二次元造波水槽を用いた。造波装置から700cmの地点に dL だけ間隔を空けてOne-Way Pipeを二本設置し、この dL を1, 3, 5, 10, 15, 30cmと変化させて実験を行った。さらに、パイプ間で残差流が連続していることを確認するため、実験条件の中で連続した残差流の生成が最も困難と考えられる $dL = 30\text{cm}$ の場合について、パイプ間の残差流速パターンを空間的に測定した。One-Way Pipeは2章と同一のもの ($s/k=3$) を二本作製して用いた。波浪の条件は水深 $h =$

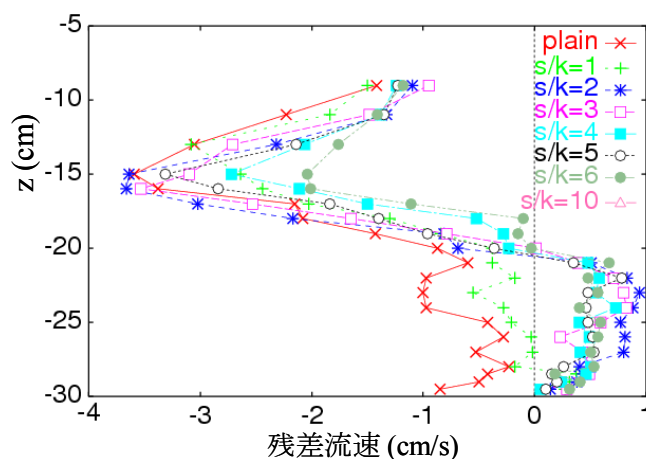


図-4 残差流速の鉛直分布 ($T=1.2\text{sec.}$)

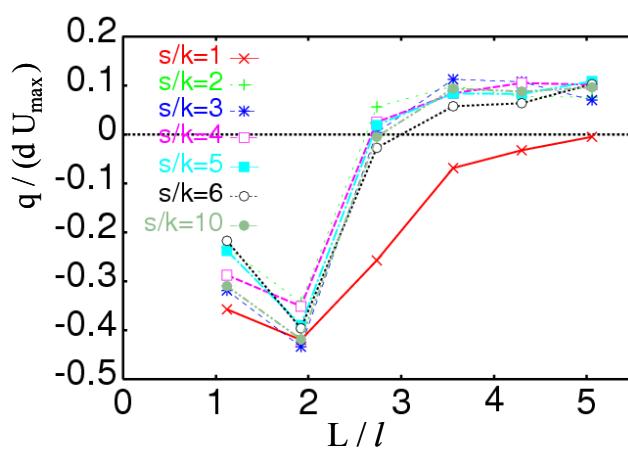


図-5 $q/(dU_{\max})$ と L/l の関係

30cm, 波高 $H = 5\text{cm}$, 周期 $T = 1.2\text{sec.}$ (波長 $L=180\text{cm}$) に固定されている。

dL の違いによる残差流の変化を検討するための実験では、各 dL に対して一本目のパイプ前面、二本目のパイプ前面、二本目のパイプ後面の各々から5cm離れた地点(幅方向には中央)において、底面から1~20cmまで1cm間隔で、サンプリング周波数20Hzで波の50周期間(60秒)に渡り各点の流速を計測した。残差流の連続性を確認するための $dL=30\text{cm}$ の実験では、一本目のパイプ後端を $x = 0$ として $x = 5, 10, 15, 20, 25\text{cm}$ 地点の鉛直線上で同様の計測を行った。

(2) 実験結果および考察

図-6~8に一本目のパイプ前面、二本目のパイプ前面、二本目のパイプ後面における残差流の鉛直分布を示す。二本目の前面では、流速計のセンサー形状からくる制約により dL がある程度広くないと計測不能なため系列数が少ない。まず、いずれの図からもパイプ位置付近に正の残差流が生成

されていることが確認できる．また，前後にパイプがあることで二本目のパイプでは単一の場合と較べて2倍程度強い残差流が生成されている．これは実用上有利であり，かつ興味深い．

$dL = 30\text{cm}$ の場合のパイプ間の残差流パターンを図-9に示す．これより，一本目のパイプ後方の残差流が徐々に弱くなりながら二本目のパイプまで連続して続いていることが確認され，二本のパイプ間に正味の流体輸送が存在することが分かる．さらに，パイプ上方には後方から循環してきた残差流が存在し，この残差流もパイプ間で連続している．またパイプ間での残差流は， $x > 10\text{cm}$ において底面付近から上方へいくにつれて弱くなっているが，底面近傍では x 方向にほぼ一定の大きさの残差流が二本目のパイプまで連続している．なお，図-1に示すようにパイプの入口をラップ状もしくはベルマウス状とすることにより，入口損失を小さく抑えることで方向抵抗差を更に強化できるだけでなく，二つのパイプを渡って流れる残差流の連続性がより滑らかに実現できることが期待される．

次に，残差流の大きさを評価するために，パイプ位置の水深区間における単位幅の残差流量 q を図-6～8から算出し，さらにパイプが位置する水深区間での平均の流速振幅 U_m^* とパイプ径 d の積で除して無次元化した $q/(U_m^*d)$ を求め，残差流の生成能力の指標とした． $q/(U_m^*d)$ と dL/L との関係を図-10に示す．図中には単一のパイプの残差流生成能力‘single’を併せて示す．まず，一本目前面では， dL/L が極端に小さな場合，残差流の生成が小さく負となることがわかる． $dL/L = 1/35$ 程度になると $q/(U_m^*d)$ は正の極大値を持ち，その後一旦減少に転じ，最終的には‘single’に漸近している．二本目のパイプ前面はデータが少ないため十分な比較が出来ないが，二本目の後面同様，‘single’と比較して大きくなっている．

以上のことから，連続した強い残差流の生成という点では， $dL/L = 1/35$ 程度が最適であると考えられる．しかしながら， $dL/L = 1/6$ 程度までパイプの設置間隔を拡げても，残差流の生成能力，連続性が極端に損なわれることはない．

4．One-Way Pipe の残差流量の評価

(1) 計算方法

One-Way Pipe による海水の輸送量を定量的に見積もることは，海水交換，物質輸送，貧酸素水塊の除去などの水質改善効果を事前に予測する上で非常に重要である．ここでは，波による圧力変動

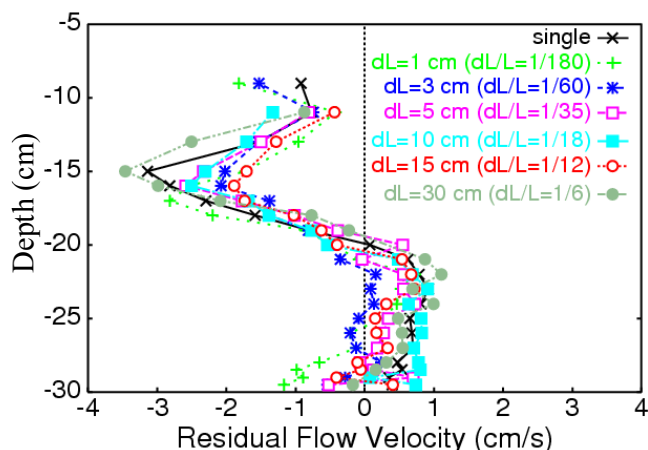


図-6 残差流速の鉛直分布（一本目の前面）

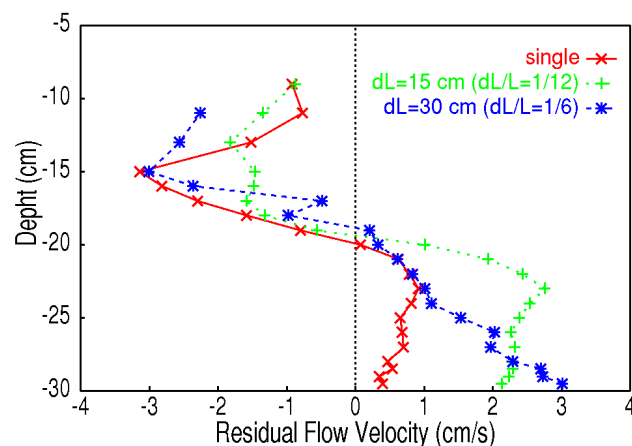


図-7 残差流速の鉛直分布（二本目の前面）

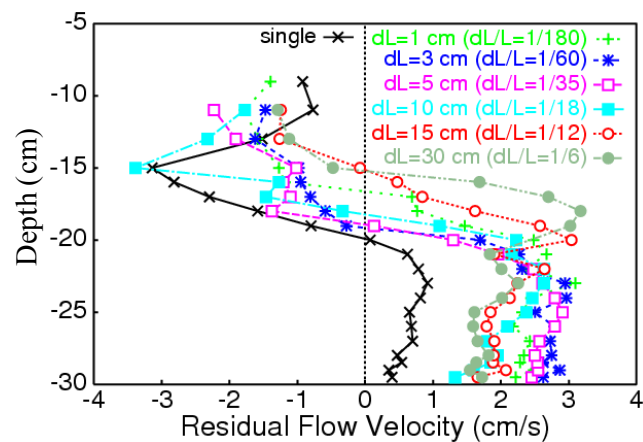


図-8 残差流速の鉛直分布（二本目の後面）

を管路の基礎式に与え，摩擦損失係数を流れの方向によって変化させる計算によって残差流量を予測する．

One-Way Pipe の単位幅残差流量 q は管路の基礎式である式(1)を用いて計算した．圧力項には波によって生じる圧力差を与え，管内平均流速 u をRunge - Kutta法により求め，波の一周期間平均し

て求めた残差流速を u_r とし、管径 d を乗じることにより $q = du_r$ とした。

$$I \frac{du}{dt} + \zeta \frac{u|u|}{2} - \frac{\Delta p}{\rho} = 0 \quad (1)$$

ここに、 ρ ：流体密度、 p ：長さ l の管両端の圧力差、 $\zeta = \zeta_e + \zeta_o + f l/d$ ：損失係数、 $\zeta_e (= 0.5)$ ：入口損失係数、 $\zeta_o (= 1.0)$ ：出口損失係数、 f ：摩擦損失係数である。One-Way Pipe には、管内を流れる流体に及ぼす抵抗力が流れの向きによって異なるという基本特性があるので、この性質を流れの方向によって f を変化させることで表現した。以後、図-2 に示す座標系で、 u が正のときは $f=f_p$ 、負のときは $f=f_m$ とする。また、式(1)において p を正確に与えられれば理想的であるが、今回は簡便な近似として微小振幅波理論により求められる圧力を用いて管内の流速を計算した。また、実際の管路には高さがあるため、計算に使用する p は底面 $z = -h$ から $z = -(h-d)$ まで積分して平均化した、パイプ断面区間の平均圧力の差である式(2)を用いた。

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho g H \frac{\sinh(kd)}{kd \cosh(kh)} \{ \cos(\omega t) - \cos(\omega t - kl) \} \quad (2)$$

ここに、 k ：波数、 ω ：角周波数である。

(2) 計算結果

紙面の都合上図等は割愛するが、実験により求められた q は、 T によらず $z = -26\text{cm}$ 地点（底面から管径の4割の高さ）の u_r と非常に相関が高く、この地点の残差流速と、管径から粗度の高さを引いた $d^* = d - 2k$ を用いれば、 $q = d^* u_r$ の関係で精度よく評価できることがわかった。従って、この水深での流速および残差流速をうまく再現できれば、One-Way Pipe の単位幅残差流量 q を計算できることになる。従って、この地点の u を精度よく求めることが新たな目標となる。

実験により得られた位相平均流速波形と、朴らの定常流の実験結果⁶⁾を参考にして求めた $f_p=0.3$ 、 $f_m=0.8$ を用いて式(1)から計算した結果の一例を図-11に示す。これより、この計算では実験値を再現できていないことがわかる。これは用いられた f が定常流の場合の値であることが主な原因と考えられる。押川ら⁹⁾の結果からも明らかのように、短周期往復流場では定常流場とは異なり慣性力の効果を見逃すことができないことから、 f の値に定常流の値をそのまま使えないものと考えられる。

次に、簡便さを考慮して慣性力の効果を含めた

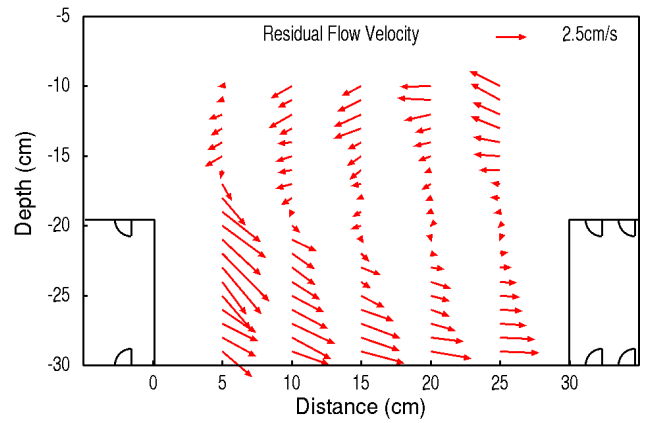


図-9 パイプ間での残差流速の空間分布

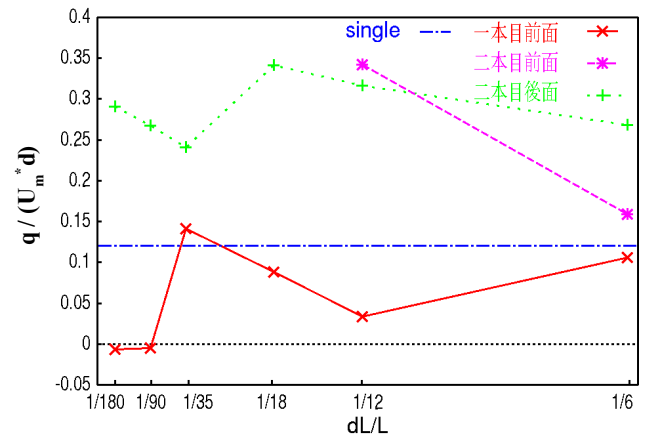


図-10 $q/(U_m \cdot d)$ と dL/L の関係

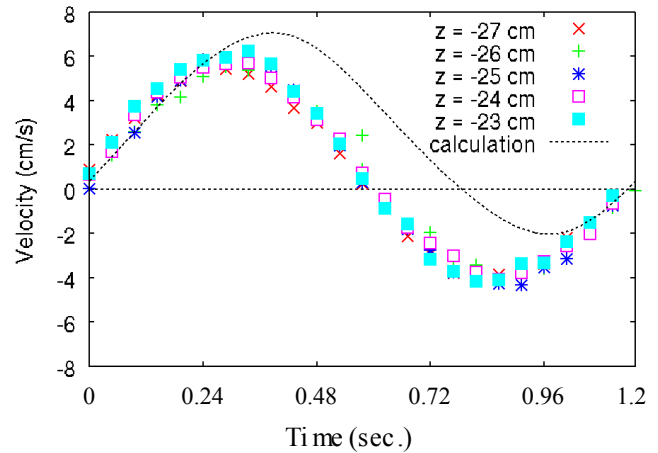


図-11 流速 u の計算値と実験値 ($T=1.2\text{sec.}$)

f を求めることにして fitting を行った。この結果 $f_p=0.3$ とした場合、 $f_m=0.32$ となった。図-12、13 に、この f_p 、 f_m を用いて計算した結果を示す。これらの結果は実験値とよく一致している。しかし、周期が大きくなるにつれて誤差が大きくなる傾向がある。特に、流速がゼロになる $T/2$ (図-13 では横

軸の0.9sec.に相当)付近でのずれが大きく、残差流量を計算する場合には無視できない誤差となる。このTが大きな場合の流速波形は、基本周期の三角関数だけでは表現出来ないこと、一般に式(1)の形の微分方程式が倍周期の解をあまり持たないことを併せ考えると、式(2)で与えた圧力変動に問題があると言える。実際、実験でも長周期の波の非線型性が確認されているので、この補正を行えばさらに正確な結果を得ることが出来るものと考えられる。

5. 結論

朴, 小松らが提案したOne-Way Pipeの波浪場への適用を検討した。得られた知見をまとめると以下になる。

(1) 波浪場においてもOne-Way Pipeを用いて残差流を生成できることが確認された。また残差流の生成には、波長とパイプ長の比 L/l が密接に関係しており、 $L/l=2$ でパイプ長が波の半波長の場合にはその残差流生成能力は低い。 L/l は3.5以上が必要となっている。さらに、最適な粗度間隔は $s/k = 2 \sim 5$ 程度の値となる。

(2) 波浪場において、二本のOne-Way Pipeにより連続した残差流の鉛直循環が構成されることが確認された。パイプ間隔 dL/L は $1/35$ 程度で連続した残差流の生成能力が最大になり、また単一のパイプ程度の効果を期待するのであれば、 $dL/L=1/6$ 程度まで広げること可能である。

(3) 波浪場においてOne-Way Pipeが生成する残差流量を式(1)で計算すれば、精度よく評価できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は丸栄コンクリート工業(株)の援助のもとに行われた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 森田修二, 出口一郎: スロープを有する透過性防波堤に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1101-1105, 1999.
- 2) 本田秀樹, 塩崎禎郎, 堀内博, 森本悟司: 海水交換型防波堤の現地導水量計測, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.353-358, 2004.
- 3) 重松孝昌, 池田憲造, 小田一紀, 小池敏也, 延廣玲子, 遠藤徹, 藤田孝, 戸川進: 密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1206-1210, 2003.

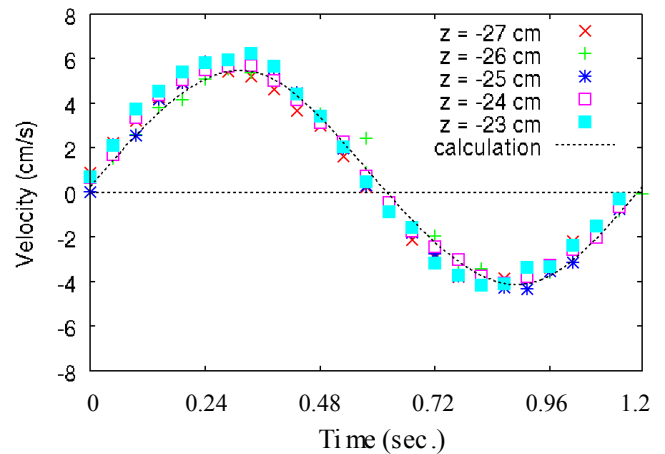


図-12 流速uの計算値と実験値 (T=1.2sec.)

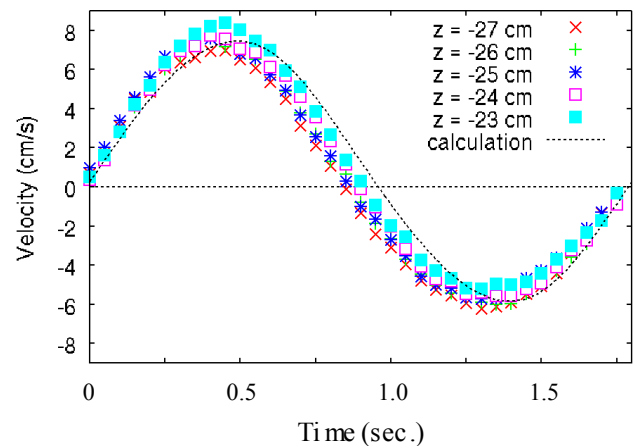


図-13 流速uの計算値と実験値 (T=1.8sec.)

- 4) 中村孝幸, 大村智宏, 大井邦昭: 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.806-810, 2003.
- 5) 朴童津, 堤啓, 佐々木亨, 小松利光: 方向抵抗特性を有する2次元粗度に関する実験的研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.463-468, 2002.
- 6) 朴童津, 堤啓, 藤田和夫, 小松利光: 方向抵抗特性を有する管路の海水交換促進効果の検討, 水工学論文集, 第47巻, pp.859-864, 2003.
- 7) 小松利光, 小橋乃子, 田嶋健太郎, 藤田和夫, 安達貴浩, 矢野真一郎, 末松吉生, 甲斐一洋: 底面粗度を用いた海域の水質改善技術の実用化へのアプローチ, 水工学論文集, 第44巻, pp.957-962, 2000.
- 8) 押川英夫, 柴多哲郎, 小松利光: 非対称没水構造物による波浪残差流生成特性, 水工学論文集, 第48巻, pp.1255-1260, 2004.
- 9) 押川英夫, 小松利光, 柴多哲郎, 深田剛教: 振動流場における非対称没水構造物の方向抵抗特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.805-810, 2003.

(2005.9.30受付)