

方向抵抗差を有する管路の 振動流場における残差流生成特性

CHARACTERISTICS OF RESIDUAL CURRENTS PRODUCED BY A SPECIFIC PIPE
WITH DIRECTIONAL RESISTANCE PROPERTIES IN OSCILLATORY FLOW FIELDS

押川英夫¹・Rusdin ANDI²・橋本彰博³・小松利光⁴

Hideo OSHIKAWA, Rusdin ANDI, Akihiro HASHIMOTO and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博（工） 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

²Dr. of Eng., Lecturer, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Tadulako University (Kampus Bumi Tadulako Tondo, Palu 94118, Sulawesi Tengah, Indonesia)

³正会員 博（工） 九州大学学術研究員 工学研究院環境都市部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

⁴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 residual currents caused by a specific pipe which is called “One-Way Pipe” were investigated in oscillatory flow fields. A new type of “One-Way Pipe” which can be simply formed by attaching flanges on a straight pipe has asymmetric characteristics. According to the experimental and simulation results, this type of pipe is very effective in generating residual currents in the oscillatory flow fields. The ratio of the width of flow area, L_w , to the pipe diameter, D , can be used as a criterion to choose the effective pipe shape. This study indicates that the asymmetrical pipe with combination of inward and outward oblique flanges (Type-5) provides the largest magnitude of residual currents in a wide flow area ($L_w/D > 6$). However, the asymmetrical pipe with outside vertical flanges (Type-1) gives the largest magnitude of residual currents in the narrow flow area ($L_w/D < 6$).

Key Words : Asymmetrical pipe, flange, oscillatory flow field, residual current

1. はじめに

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水域では未だ有効な解決策は殆どないという状況である。

このような背景の下、小松ら^{5),6)}は流況制御ブロックと呼ばれる非対称形状の海底構造物を用いて、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手法を提案している。また、朴ら^{7),8)}は小松ら^{5),6)}の手法を応用して、管内壁に複数の非対称な突起を取り付

けたOne-Way Pipeという潮汐場を対象とした海水交換の促進手法を提案した。それに対して川野ら⁹⁾は、One-Way Pipeを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場に適用することを提案して、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出して海水交換・物質輸送を促進するOne-Way Pipeの新たな活用法の有効性を報告している。これらの手法により、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、貧酸素水塊の除去等が可能となることが期待されている。

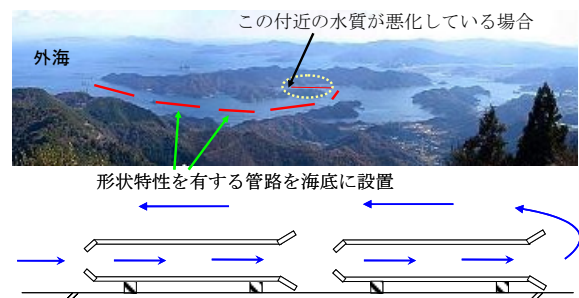


図-1 本手法のイメージ図

また最近、One-Way Pipeの研究開発の一環として、パイプの入口と出口のみに形状特性を持たせる（パイプ内部ではなく出入口の形状を非対称にする）ことで、波浪場においてパイプ内に効果的に一周平均的な一方向流れ（以後、残差流と呼ぶ）を発生させる改良型のOne-Way Pipe^{10), 11)}が提案されている（図-1参照）。Andi *et al.*¹⁰⁾は、十分に広い海域を想定した平面2次元の振動流場を対象にした数値シミュレーションに基づいて、改良型のOne-Way Pipeとして適切なパイプ形状を検討した。一方、橋本ら¹¹⁾は断面2次元的な波浪場における室内実験に基づいて、同様に改良型のOne-Way Pipeのための適切なパイプ形状を検討している。しかしながら、例えばパイプに取り付ける外向きフランジの効果的な位置に関して、Andi *et al.*¹⁰⁾は管路の末端、橋本ら¹¹⁾は末端からある程度離して設置すべきとの結果を得ており、適切なパイプ形状を決定するには更なる研究成果の蓄積が必要となっている。

本手法が対象とする波浪場においては、水面の非線形効果により、非対称構造物が無くても水面形および流速波形が若干歪み非対称となる。本研究では、特にパイプの形状による非対称性のみに着目するため、完全対称な正弦波を造ることが容易な振動流場を対象に、室内実験および数値シミュレーションに基づいて本手法の効果と適切なOne-Way Pipe形状について検討した。なお、流れの場が限定された振動流場は、管路内に発生する残差流に対する補償流が実際の波浪場と比較してより発生し易い流れ場となる。しかしながら、補償流は副次的な流れであるため、振動流場において内部に強い残差流が発生する管路であれば、自由度が高い波浪場においてもほぼ同様に管路内残差流が発生するものと考えている。

2. 領域が制限された水域を対象とした室内実験

(1) 実験方法および実験条件

実験には図-2に示すピストン駆動式矩形U字管型振動流水路(装置全体の高さ120cm×長さ300cm×奥行き30cm)を用いた。水路下部の水平部分の中央に、5mmの厚さの薄いアクリル板を幅一杯(30cm)に設置することで、One-Way Pipeが設置された二次元振動流場を再現した。なお、用いたOne-Way Pipeはパイプ内部の高さ $D=8.0\text{cm}$ 、振動方向の全長 $l=44.0\text{cm}$ である。この状況は、鉛直あるいは水平方向に領域が制限された水域にOne-Way Pipeが設置された状況に相当しており、水路部の高さ（後述の計算領域の z 方向の幅 L_w に相当）は $3.75D$ である。

流速の測定にはレーザードップラー式流速計(LDV)を用い、奥行き方向の中央断面、振動(x)方向はパイプの中間において、One-Way Pipe内外の x 方向流速 u の時系列データを取得した。上向きを正とする鉛直方向の測定位置は、パイプ内部の中心を $z=0$ として $z=0, \pm 1.0, \pm 2.0, \pm 3.0$,

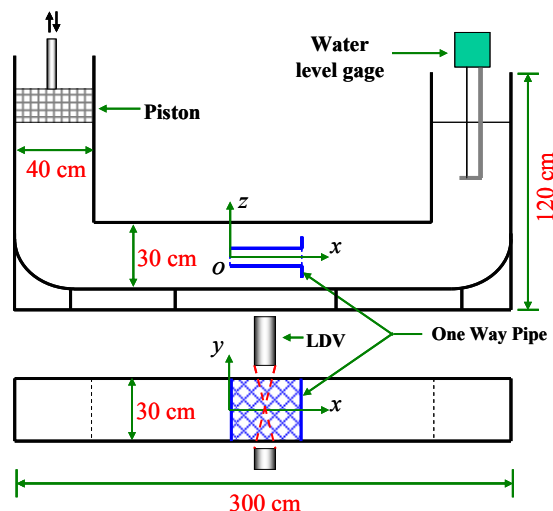


図-2 実験装置の概略（上：側面図，下：上面図）

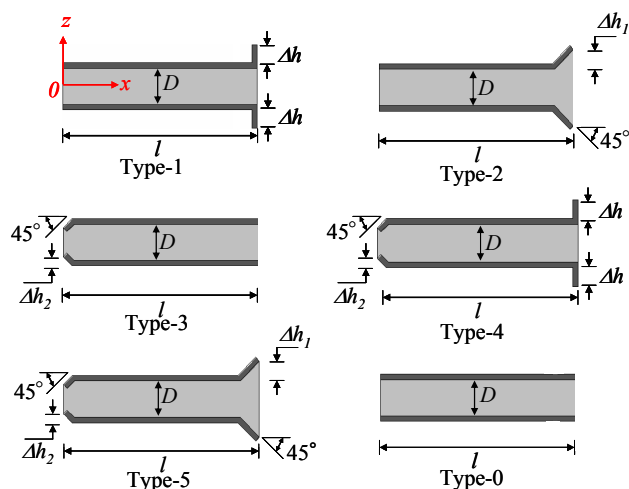


図-3 検討されたOne-Way Pipeの形状

表-1 実験条件（後述の数値計算でも共通）

Flow Conditions	a (cm)	T (sec)	U_0 (cm/s)	KC	Re
FC-1	6.67	3.35	12.5	0.95	10000
FC-2	10.7	5.36	12.5	1.52	10000
FC-3	13.3	6.70	12.5	1.90	10000
FC-4	10.7	2.68	25.0	1.52	20000
FC-5	13.3	3.35	25.0	1.90	20000

6.0, 7.5cmである。なお、 $z=6.0, 7.5\text{cm}$ はパイプ外となっている。また、図-2の右上に示すように水位変動を容量式波高計により計測している。サンプリング周波数は流速、水位変動ともに100Hzとし、計測時間は振動流（ピストン）の周期 T に応じて100周期分以上とした。

実験は図-3に示された5種類の非対称なパイプのそれぞれについて、表-1に示す条件で計測を行った。ここでは、 $\Delta h = \Delta h_1 = 4.0\text{cm}$ 、 $\Delta h_2 = 1.6\text{cm}$ である。なお、比較のために形状特性の無いType-0のパイプを用いた実験も行っている。 Re 数 $\{ \equiv U_0 D / \nu, U_0$ は断面平均流速の振幅、 $\nu (=0.01\text{cm}^2/\text{s})$ は水の動粘性係数 $\}$ を10000および20000に固定し、 KC 数 $(\equiv U_0 T / l)$ を変えて行われた。表中の a はピストンの振幅であるが、図-2から分かるように矩形水槽の両サイドと矩形パイプのある中央部では流路部の管径が異なるため（奥行き方向は同じ）、本研究では実際

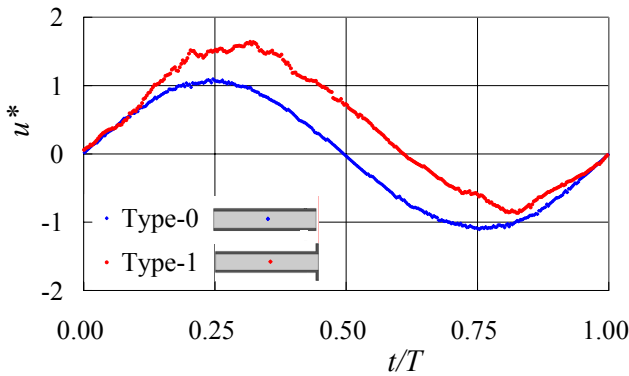


図-4 パイプ内x方向流速の時系列 (FC-1, $z=0$)

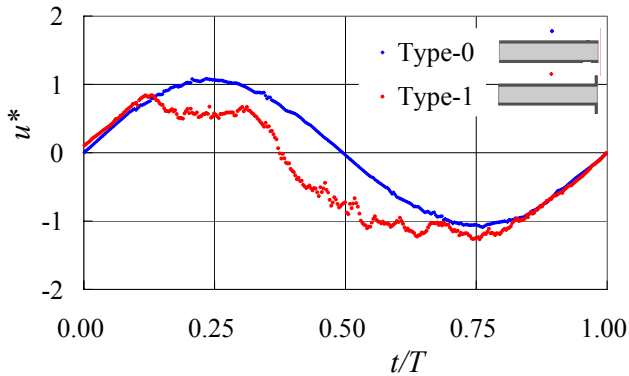


図-5 パイプ外x方向流速の時系列 (FC-1, $z=6.0\text{cm}$)

のピストンおよび波高計による水位変動の振幅を4/3倍している。これは水槽両サイドの管径を30cmに置き換えることに相当する。

(2) 実験結果および考察

実験により得られた流速波形の例として、FC-1の条件におけるType-0およびType-1のパイプ内の中央($z=0$)における流速の時系列を図-4、パイプ外における同様の結果を図-5に示す。なお両図において、横軸は振動流の周期 T で正規化した無次元時間 t/T 、縦軸は断面平均流速の振幅 U_0 で正規化した無次元流速 $u^*(\equiv u/U_0)$ である。これよりパイプ内の図-4では、対称なType-0の流速はほぼ完全な正弦波であるのに対し、非対称なType-1の流速は $t/T=0.1\sim 0.85$ の位相において正の方向にシフトしている。これらの時系列の一周期平均が残差流に相当することから、Type-1では期待した向きの一方向流れがパイプ内に発生していることが理解される。一方、パイプの外の図-5において、対称なType-0の流速は図-4とほぼ同一の正弦波となっているが、Type-1の流速は $t/T=0.15\sim 0.8$ の位相において負の方向にシフトしている。これは、ピストン式の振動流では、管路内に発生した一方向流れに対する補償流が管路の外に必然的に発生するためである。

残差流の実験結果の例として、図-6にFC-1の条件における u^* を時間平均して求めた各タイプの無次元残差流速 u_r^* のパイプ内分布を示す。これより、非対称な形状特性を有する全てのTypeのパイプ内に顕著な残差流が発生していることが分かる。最も大きな残差流が生成されてい

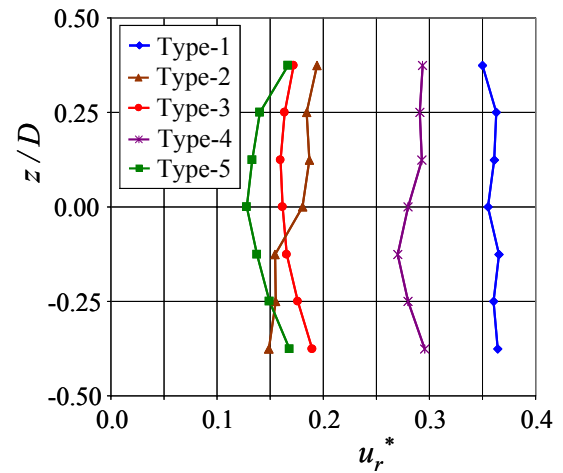


図-6 実験結果に基づくパイプ内の残差流速分布 (FC-1)

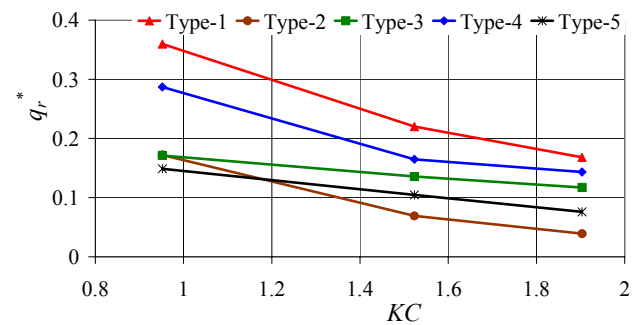


図-7 パイプ内残差流量 q_r^* のKC数依存性 ($Re=10000$)

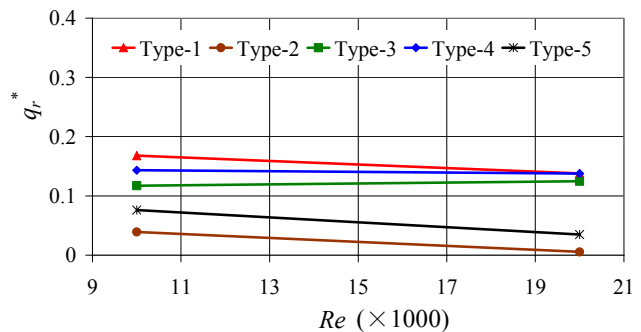


図-8 パイプ内残差流量 q_r^* の Re 数依存性 ($KC=1.90$)

るのはType-1であり、続いてType-4 (Type-1と内向きフランジType-3がハイブリッドされたもの) による残差流が大きい。

パイプ形状に起因する残差流の水利条件への依存性を評価するために、パイプ内の u_r^* を積分することで無次元パイプ内残差流量 q_r^* を求めた。結果の例として、 $Re=10000$ の場合におけるKC数への依存性を図-7に、 $KC=1.90$ の場合における Re 数への依存性を図-8に示す。これより、全てのOne-Way Pipeでパイプ内に正の残差流量が発生していることが分かる。図-7よりKC数の減少に伴って q_r^* は大きくなっており、これは短周期往復流場に設置された非対称構造物周りの流れに関する従来の研究成果^{12),13)}と符合している。また、図-8に示した Re 数への依存性については、その変化が僅かであるとともに明確な傾向が見られないため、広範囲な Re 数に対して更なる検討が必要なものと思われる。

3. 二次元振動流場における数値解析

(1) 数値解析手法について

数値計算には、2次元モデルではあるが最近精力的に波浪場への適用が試みられているCADMAS-SURF^{[14), 15), 16)}を若干改良して用いた。したがって、基礎式は非圧縮性流体の連続式とレイノルズ方程式および k - ε 型の乱流モデルである。

(2) 狭隘な振動流場を対象とした数値解析

最初に室内実験および本研究で用いた数値モデルの精度を検証するため、ほぼ同一の計算条件を与えることで2章の室内実験の再現計算を行った。但し、計算時間を短縮するために、水槽の水平部分のみの300cm（横断方向は30cm）を計算領域とした。不等間隔直交格子を用いており、振動方向の格子数は196、横断方向は126である。例としてType-5のパイプ付近を拡大した計算格子を図-9に示す。乱流モデルには、標準型の k - ε モデルに加えて、Craft *et al.*^{[17)}によるストレイン・パラメータとローテーション・パラメータを考慮した改良型の k - ε モデルを用いた。

境界条件に関しては、上下の固定境界で流速はslip条件、圧力 p はノイマン条件とした。左右両端の開境界は押川ら^{[18)}に倣い、 u と p に対して鉛直二次元の振動流場の解析解^{[19)}を上下対称に与えた（但し、横断方向流速は0）。パイプ表面については、速度に対数則、圧力にはノイマン条件を与えた。 k と ε に関しては、パイプ表面にのみ壁関数法を用い、その他ではノイマン条件とした。その他の詳細については、Andi *et al.*^{[10), 20)}を参照されたい。

結果の例として、図-6とほぼ同一の水理条件における改良型の k - ε モデルを用いた場合のパイプ内の x 方向残差流速の鉛直分布を図-10に示す。これより、パイプ内の残差流の分布形状はやや異なっているものの、形状の違いに伴う残差流速の大きさの順序と絶対値は図-6と図-10でほぼ一致している。なお、予め全てのパイプ形状に対して乱流モデルのみ異なる計算を行ったところ、標準型の k - ε モデルを用いた残差流の計算結果と比較して、改良型の k - ε モデルを用いた計算結果の方が全体的にみて若干実験結果に近かったことから、ここでは改良型の k - ε モデルの結果を示している。分布形状が異なる理由としては、実験結果の不確実性に加えて、実験が発達した乱流にはなっていないのに対し、数値計算には k - ε 型乱流モデルを用いており高レイノルズ数場に相当していること、往復流場の数値計算における適切な（流速、圧力や乱流特性量に対する）境界条件の設定の困難さなどが挙げられる。これらの点を考慮すると、残差流を指標として適切なパイプ形状を検討する本研究の目的内では、ここで得られた実験結果および数値計算結果が比較的精度の良いものであり、適切なパイプ形状の検討に利用で

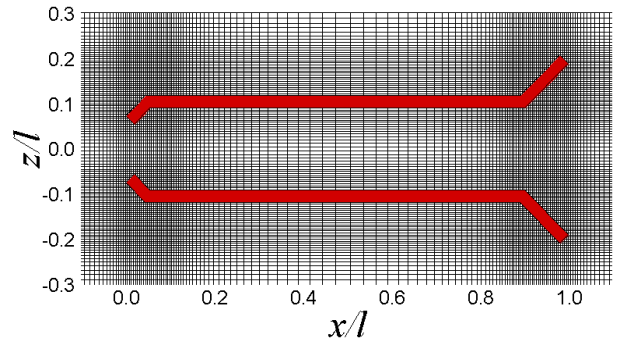


図-9 パイプ付近の計算格子の拡大図 (Type-5)

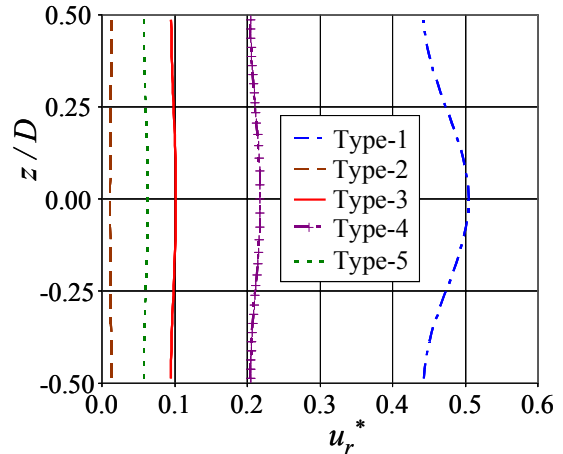


図-10 実験スケールの数値計算結果によるパイプ内の無次元残差流速分布 (FC-1)

きるものと考えられる。

以上より、狭い水域にOne-Way Pipeを設置する場合、数値計算結果からもType-1が最も効果的であり、次いでType-4が適切ということが確認された。

(3) 広い水域における数値解析

Andi *et al.*^{[10)}は、領域の影響を受けない程度に十分に広い振動流場（パイプ長 $l=55.0\text{cm}$ 、パイプ径 $D=10.0\text{cm}$ において、 $13.0l \times 6.4l$ の計算領域）を対象に同様な形状のOne-Way Pipeのパイプ内残差流速分布・残差流量を評価することで適切なパイプ形状を検討している。但し、ここでは図-3中の $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 5.0\text{cm}$ 、 $\Delta h_3 = 2.0\text{cm}$ である。なお、領域が広いことから左右の開境界には振動流境界層を考慮しない通常の正弦波を与えており、また、前節の再現計算で乱流モデルの違いによる残差流の計算結果の差異が顕著では無かったことから、計算効率も考慮して以降の数値計算では標準型の k - ε モデルを用いている。

Andi *et al.*^{[10)}の研究成果に追加計算を行った上で得られた、水理条件が比較的近い図-3と同様な形状のOne-Way Pipe内の残差流速分布を図-11に示す。これより広大な水域を対象とする図-11の計算結果によれば、最も効果的な形状はハイブリッド型のType-5 (Type-2+Type-3)、次はハイブリッド型のType-4で、狭隘な水域を対象とした前章の実験 (図-6) および再現計算 (図-10) で最も

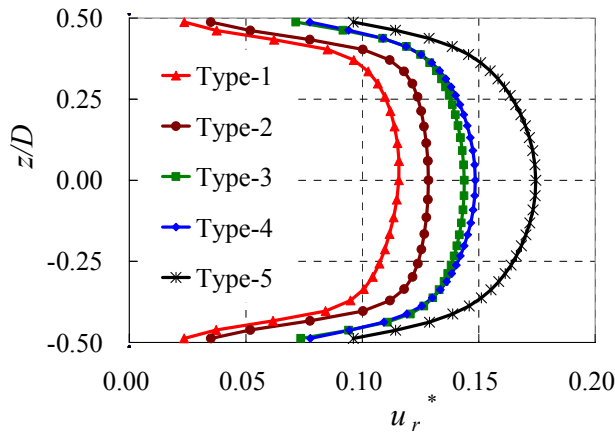


図-11 大領域の数値計算結果によるパイプ内の残差流速分布 ($KC=0.91, Re=27000$)

効率的とされたType-1は最も非効率という結果になった。なお、狭域の計算（および実験）と広域の計算とでは Re 数がやや違うものの、図-8の議論から理解されるように、この程度の Re 数の違いは結果にそれ程影響していないものと判断される。

(4) 水域の広さの影響について

前節で述べた結果の差異の要因を明らかにするため、FC-1の水理条件において横断方向の計算領域の広さのみをパイプ径 D の4.18倍（図-10とほぼ同じ）から35.3倍（図-11と同じ）まで適宜変えた数値実験を行った。その他の計算条件は(2)節で行った狭域の計算と同様である。

結果の例として、狭域の計算および実験で最も効率的だったType-1のパイプ内残差流速の分布を図-12に、広域の計算で最も効率的だったType-5のパイプ内残差流速の分布を図-13に示す。これよりType-1では、領域の減少に伴い著しくパイプ内残差流速が大きくなるのに対し、Type-5では領域によるパイプ内残差流速の変化が極端に小さく、特に $L_W \geq 6.22D$ ではパイプ内残差流速が L_W と独立になることが分かった。

水域の広さに応じて効率的なパイプ形状が異なることが明らかになったため、その効果を評価することを試みた。横軸を無次元水域幅 (L_W/D)、縦軸をパイプ内残差流量 q_r^* 、パラメータをパイプ形状として図-14を示す。これより $L_W/D < 6$ でType-1、 $L_W/D > 6$ でType-5の q_r^* が最も大きくなることが分かった。全体的にはType-1のみ傾向が異なっており、他の3つのパイプでは L_W/D の変化に対して q_r^* はほぼ一定となっている。それら3つは共通して内向きフランジを有していることから、水域が狭い場合 ($L_W/D < 6$ 程度) 内向きフランジは適切でない。換言すると、内向きフランジは本来、パイプ内にかなりの周囲水を引き込む能力を有しているが、水域が狭い場合には引き込むべき水の量が制限されていることから、狭い口がむしろ邪魔をしてその効果が十分に発揮できず、 q_r^* が小さくなるものと判断される。

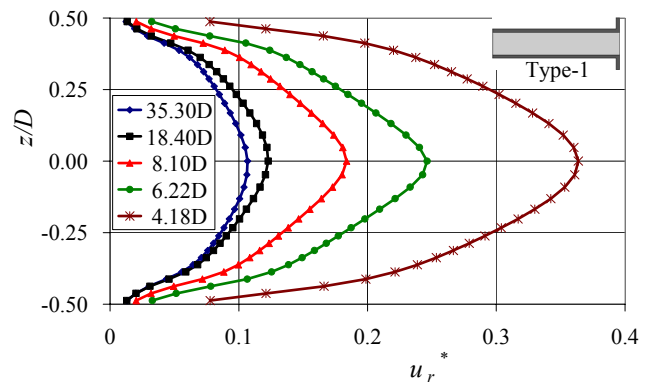


図-12 領域毎のパイプ内の残差流速分布 (Type-1, FC-1)

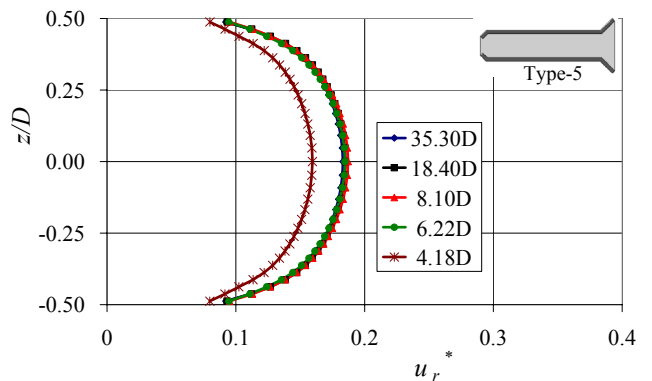


図-13 領域毎のパイプ内の残差流速分布 (Type-5, FC-1)

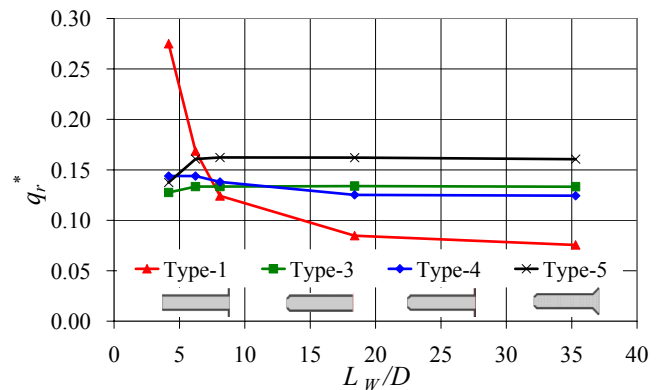


図-14 Type毎の無次元水域幅とパイプ内残差流量の関係 (FC-1)

(5) 内向きフランジの適切な大きさについて

前節で内向きフランジの重要性が明らかになったものの、Andi *et al.*¹⁰⁾も含めて従来の研究では、内向きフランジの大きさを示す閉塞率 ($R_D \equiv 2\Delta h_2/D$) は $R_D=0.4$ に固定されていた。そこで適切な閉塞率を評価するために、内向きフランジのみを有するType-3で $D=10\text{cm}$ 、角度を 45° に固定して、フランジ高さ Δh_2 の違いによる残差流生成効果の違いを(3)節と同様な広域の数値解析に基づいて比較した。横軸を R_D 、縦軸を q_r^* としたFC-1の条件における計算結果を図-15に示す。厳密には計算条件にも依存するものと考えられるが、最適な閉塞率は $R_D=0.3$ 程度であることが分かった。

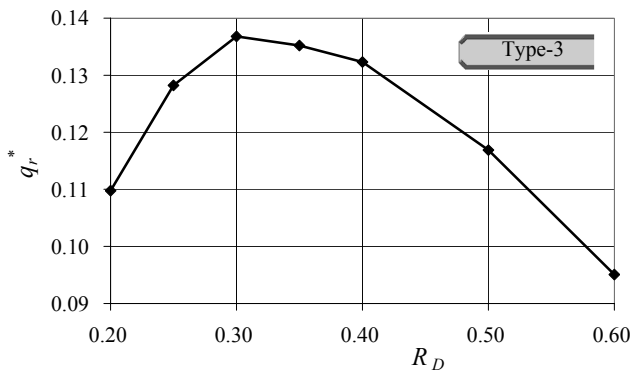


図-15 内向きフランジの大きさ R_D と q_r^* の関係 (FC-1)

4. おわりに

本研究では、比較的狭い短周期往復流場において効率的に一方向流れを創成するために、効果的なOne-Way Pipeの形状と適用方法を検討した。その結果、水域の広さに応じて効率的なパイプ形状が異なることが明らかになった。すなわち、パイプ径 D に対する水域幅 L_W の割合(L_W/D)が6程度より大きい場合にはType-5(内向きと外向き傾斜フランジのハイブリッド型)が効果的であることが分かった。一方、 $L_W/D < 6$ 程度の狭隘な水域にOne-Way Pipeを設置する場合、Type-3の内向きフランジは流路を狭くするために流入を制限すること等から、Type-1の形状が効果的となることが判明した。さらに、適切な内向きフランジの大きさを検討したところ、パイプ径 D に対する内向きフランジ高さ Δh_2 の割合を意味する閉塞率($2\Delta h_2/D$)は0.3程度が適切であることが分かった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号：20246083)の援助のもとに実施された。また実験を行うにあたり、九州大学大学院工学府技術補佐員の藤田和夫氏ならびに九州大学大学院生の松下朋哉氏に多大なる援助を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

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.
- 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) 小松利光, 矢野真一郎, 小橋乃子, 鞠承淇, 藤田和夫: 流れ

の方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開発, 水工学論文集, 第41巻, pp.705-710, 1997.

- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 川野立, Mukhsan Putra HATTA, 藤田和夫, 松田如水, 押川英夫, 小松利光: 波浪場における方向抵抗差を有する管路の残差流特性, 水工学論文集, 第50巻, pp.1435-1440, 2006.
- 10) Andi R., Oshikawa, H., Hashimoto A. and Komatsu, T.: Residual Currents around Asymmetrical Pipes in Oscillatory Flow Fields, *Advances in Hydro-Science and Engineering*, Vol.8, pp.2323-2332 (CD-ROM), 2008.
- 11) 橋本彰博, 松下朋哉, Andi Rusdin, 小松利光: 形状特性を有した管路の波動場における一方向流生成特性の検討, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.741-746, 2009.
- 12) 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.
- 13) 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, No.2, pp.1255-1260, 2004.
- 14) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 榊山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣勤, 秋山実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究 -VOF法基本プログラムの作成-, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.321-326, 1999.
- 15) (財)沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 296p., 2001.
- 16) (財)沿岸開発技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 306p., 2008.
- 17) Craft, T.J., Launder, B.E., and Suga, K.: Extending the applicability of eddy viscosity models through the use of deformation invariants and non-linear elements, *Proc. 5th Int. Symposium Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, pp.125-132, 1993.
- 18) 押川英夫, 小松利光: 振動流場における非対称没水構造物周りの流動解析, 水工学論文集, 第50巻, pp.817-822, 2006.
- 19) Lamb S.H.: *Hydrodynamics*, 6th Edition, CAMBRIDGE, pp.622-623, 1932.
- 20) Andi, R., Oshikawa, H., Hashimoto, A. and Komatsu, T.: Numerical Simulations of Oscillatory Flows around a Submerged Asymmetrical Structure, *Proc. of 5th International Symposium on Earth Science and Technology*, pp.189-196, 2007.

(2009. 9. 30受付)