

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

STUDY ON THE ABILITY TO INDUCE A UNIDIRECTIONAL FLOW
BY A PIPE WITH A FLANGE

橋本彰博¹・松下朋哉²・Rusdin Andi³・小松利光⁴
Akihiro HASHIMOTO, Tomoya MATSUSHITA, Rusdin ANDI,
Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工博 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)

²学生会員 九州大学大学院博士前期課程 (同上)

³学生会員 工修 九州大学大学院博士後期課程 (同上)

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)

One-Way Pipe, which has plural asymmetrical structures inside, can product residual currents in wave fields due to their directional resistance properties. However, it is not so easy to make such kind of pipe with small asymmetrical structures attached on inside wall of the pipe. So, a simple shape which is easy to be formed is required. In this study, new shapes of One-Way Pipe with a flange to the outlet of the pipe were proposed and the effect of the pipe shape on producing residual currents in a wave fields were experimentally investigated. Three basic types of flange, an oblique type, a vertical type and a combination of both type, were employed. As a result of this research, the proposed pipe formed with vertical flanges and the combination type can effectively generate residual currents and the flow construction near the pipe is shown clearly.

Key Words : One-way Pipe, residual currents, wave fields, wind turbine with a brimmed-diffuser, phase averaging velocity, turbulence

1. はじめに

近年, 閉鎖性沿岸海域における水質悪化が深刻な問題となっており, その対策として海水交換を促進させて水質改善を期待する透過性構造物, また碎波や渦制御型の防波堤の適用例などが数多く報告されている^{1), 2), 3), 4)}. これらは主に小規模な漁港などに適用され, 顕著な水質改善効果をあげている事例もあるが, 広大な水域の水質改善を行うのは難しく, 施工も大がかりで費用がかさむためその適用には限界があり, 入江や内湾といった地域では, 未だ有効な解決策がほとんどないのが実情である.

このような背景の下, 著者らはより有効な水質改善手法として, 波浪エネルギーを用いて一方向流れを生成する管路, "One-Way Pipe"を提案している. One-Way Pipeとは, 管内壁に非対称構造物を取り付けて方向抵抗特性を持たせた管路のことで, 往復流場において管内に波により発生する流速の割以上の一方向流れを管路内に創出できることが確認されている^{5), 6), 7)}. このOne-Way Pipeは平面地形や平面スケールに左右されない鉛直循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の活発化, 貧酸素水塊の除去等が可能となる.

本研究では, 新たに形状特性を持たせた管路を提案し, その一方向流生成能を既往のOne-Way Pipe (以下, 粗度型One-Way Pipeという)と比較検証した. 更に新たに提案した管路の中で最も単純な形状である"つば型One-Way Pipe"を対象に往復流場において管路内に一方向流を生成するメカニズムの解明を試みた.

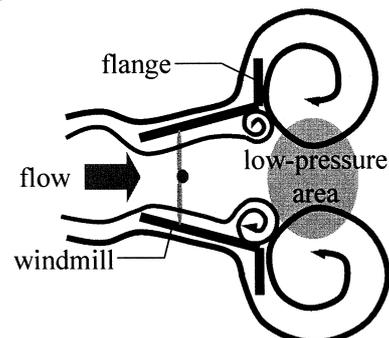


図-1 風レンズの原理

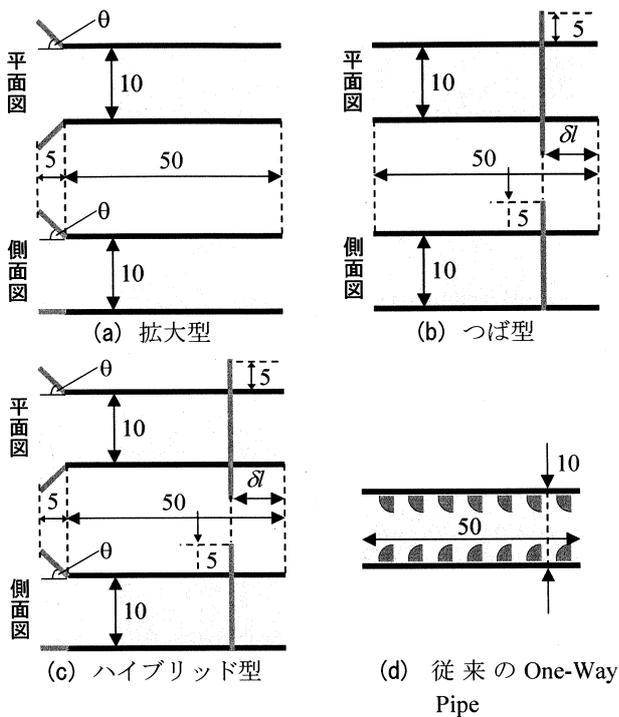


図-2 新たに提案された管路および従来のOne-Way Pipe

2. 実験概要

(1) 新たに提案する管路

まず、今回新たに提案する2種類の管路について説明する。まず一つめは管路入口部に拡大管を設置し、入口・出口の損失係数の流れの方向による差を利用して管路内に一方向流を生成するもの、もう一つは風レンズ⁸⁾の原理を応用し、管路の出口に“つば”を設置したものである。ここで風レンズとは風力発電のために開発された、風エネルギーを集中させて発電量を飛躍的に増加させるために、流体力学的性質を利用して風を集めるシステムを持った中空構造体で、構造体後方に設置されたつばにより渦が発生して出口付近に低圧部が生じ、流体が流れ込むのを促進するというシステムである(図-1参照)。

本研究が対象とするのは波浪によって生じる往復流場である。風レンズは順方向(図-1中の右向きで定義)では集風効果があるが、逆方向の流れに対してはつばが入口抵抗を増加させる方向に働くのではないかと推察される。従ってOne-Way Pipeにつばを設置することで順方向では流速の加速効果が、逆方向の流れに対してはつばが入口抵抗として働き、結果として往復流場において平均的には一方向流れが生成されることが期待される。そこでこの風レンズの原理を応用して管路出口につばを付けた新たな管路を提案し、その一方向流生成能を検証する。

管路は内径10×10cm、長さ50cmの亚克力製矩形管で入口に拡大管を設置した拡大型(図-2中(a)、以後拡大管型One-Way Pipeとする)、出口から δl

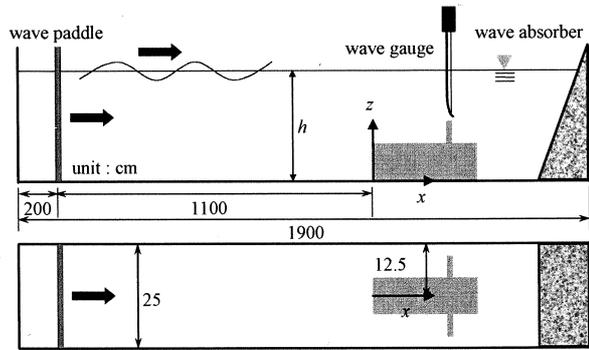


図-3 二次元吸収式造波水槽

の距離に高さ $\delta h=5\text{cm}$ のつばを設置したつば型(図-2中(b)、以後つば型One-Way Pipeとする)、および両方を組み合わせたハイブリッド型(図-2中(c)、以後ハイブリッド型One-Way Pipeとする)の3タイプの管路を作成し、粗度高さ0.9cmの1/4円柱型の非対称構造物(粗度)を1.8cm間隔でとりつけたもの(図-2中(d)、以後粗度型One-Way Pipeとする)との比較を行った。

(2) 実験方法

実験には図-3に示す全長1900cm、幅25cmの二次元吸収式造波水槽を用いた。造波装置から1100cmの地点に管路を設置し、管内の中心断面において管内上壁面から1cmの地点より水深方向に1cm間隔でレーザー流速計(LDV)を用いて、水平方向流速を測定した。本実験では管路内に生成される一方向流れを評価するため、測定された管路内の水平方向流速100周期分のデータを時間平均することにより、波一周期の平均流速(以下、残差流速と呼ぶ)を算出した。残差流速は波の進行方向を正とし、波の進行方向に残差流が生成されるように管路を設定した。拡大型およびつば型の管路の入口加工角 θ 、つばの位置 δl を変化させて管路内に生成される一方向流れの大きさを検討した。

3. 形状の違いによる一方向流生成能の検討

(1) 実験方法

本章では今回新たに提案したOne-Way Pipe(図-2)により生成される残差流速を従来の粗度型One-Way Pipeと比較し、形状の違いによる一方向流生成能を検討する。水深 $h=30.0\text{cm}$ 、波の周期 $T=1.2\text{sec}$ 、波高 $H=5.0\text{cm}$ に固定し、表-1に示す条件の下で実験を行った。

(2) 実験結果および考察

拡大型One-Way Pipeの残差流速の鉛直分布を粗度型One-Way Pipeおよび何も設置しないただの管路(plain)の結果と合わせて図-4に示す。図中の縦軸19.5cm~27.5cmの区間が管路内を表す。図-4を見る

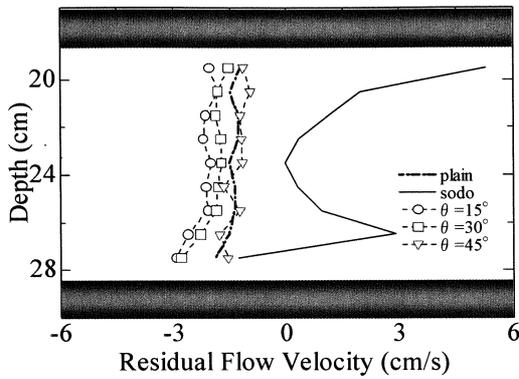


図-4 残差流速鉛直分布 (拡大型)

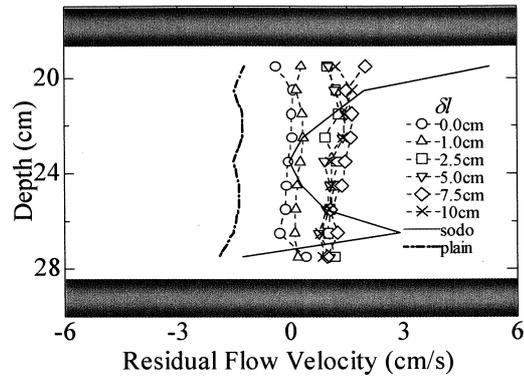


図-5 残差流速鉛直分布 (つば型)

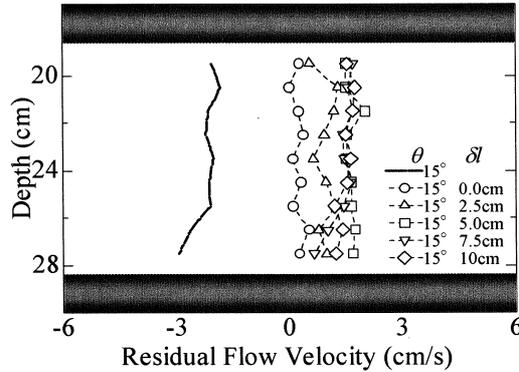


図-6 残差流速鉛直分布 (ハイブリッド型 $\theta=15^\circ$)

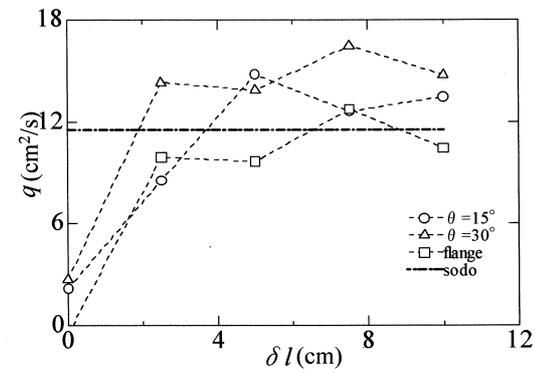


図-7 δl と q の関係

と、全てのケースにおいて負の残差流速が生成されている。しかしながら、 θ が大きくなると負の残差流速は小さくなる傾向にある。次につば型One-Way Pipeの結果を見ると(図-5)、 $\delta l=0\text{cm}$ を除いた全てのケースにおいて正の残差流速が生成されていることが確認できる。ハイブリッド型の結果について、 $\theta=15^\circ$ の時の残差流速の鉛直分布を $\theta=15^\circ$ の拡大型の結果と合わせて図-6に示す。すべての δl に対して正の残差流速が生成されている。そのほかのケースでは、 $\theta=30^\circ$ の場合には $\theta=15^\circ$ と同様の結果が得られたが、 $\theta=45^\circ$ の場合は δl に関係なく、残差流速は負の値となった。

正の残差流速が生成されたつば型およびハイブリッド型One-Way Pipeについて、その流体輸送能力を比較するため、管路内の残差流速を水深方向に積分することにより算出された単位幅残差流量 q (cm^2/s)とつばの位置 δl の関係を、粗度型One-Way Pipeの残差流量と合わせて図-7に示す。つば型One-Way Pipeは粗度型とほぼ同程度の残差流量が生成されており、 $\delta l=7.5\text{cm}$ の時には粗度型よりも大きな残差流量が生成されている。次にハイブリッド型はほぼどのケースにおいても粗度型およびつば型より大きな残差流量 q が生成されている。特に $\theta=30^\circ$ 、 $\delta l=7.5\text{cm}$ の場合に q は最大値 $16.5(\text{cm}^2/\text{s})$ となり、粗度型One-Way Pipeの1.5倍と今回実験したケースの中で最大のものとなった。

以上の結果より、管路出口につばを設置することで管路内に正の残差流速を生成することができ、

表-1 実験条件(1)

周期 T (sec)	1.2
波高 H (cm)	5
水深 h (cm)	30
管路長 l (cm)	50
入口加工角 θ	$15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
つば高さ δh (cm)	5
つば位置 δl (cm)	5~10

その流体輸送能力は従来の粗度型One-Way Pipeとほぼ同等であることが明らかとなった。また、入口に拡大管を設置するだけでは正の残差流速を生成することが出来なかったが、つばと拡大管を組み合わせることで正の残差流速を生成することができ、その流体輸送能力は従来の粗度型One-Way Pipeよりも大きくなることが明らかとなった。

4. 一方向流生成のメカニズム

3章において、つば型One-Way Pipeは管路出口につばを設置しただけの極めて単純な構造でありながら、往復流場において十分な一方向流を生成することが確認された。そこで本章では、つば型One-Way Pipeのつば近傍の流れ特性を明らかにし、往復流場において管路内に一方向流を生成するメカニズムを明らかにする。

(1) 実験方法

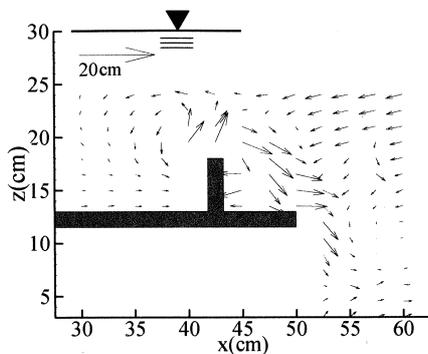
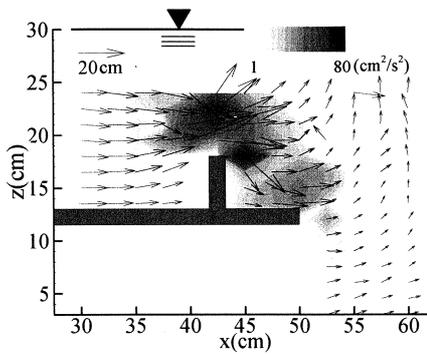
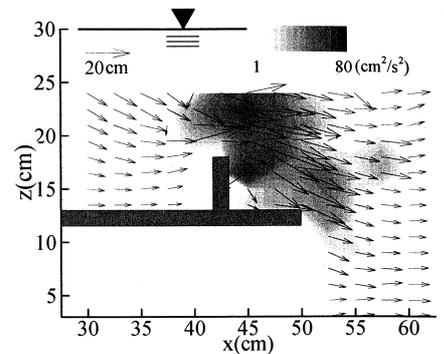


図-9 残差流速の空間分布



(a) $\pi/2$



(b) $3\pi/4$

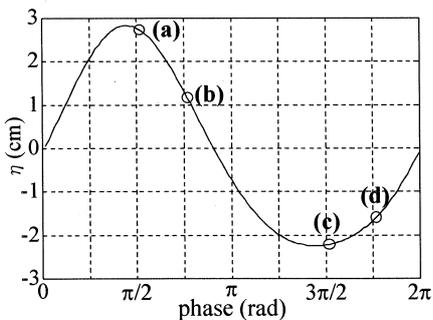
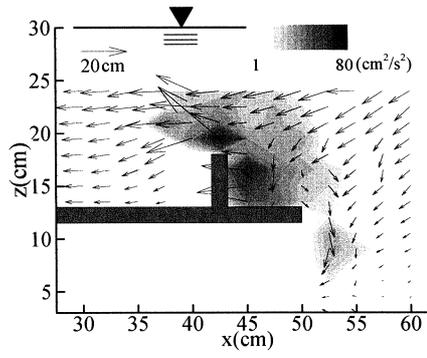
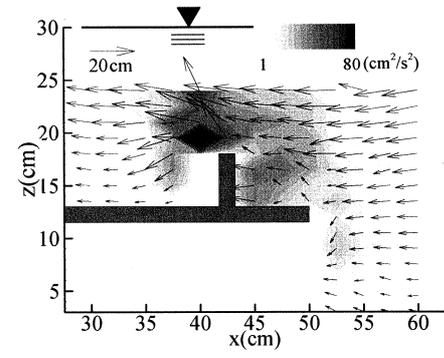


図-10 つば上部における水位変化
($x=42.5\text{cm}$)



(c) $3\pi/2$



(d) $7\pi/4$

図-11 つば近傍の位相平均流速ベクトルと乱れ強度 $\langle u'u' \rangle$ の空間分布

表-1に示す実験条件の中で最も大きな残差流量が得られた $\delta l=7.5\text{cm}$, $\delta h=5\text{cm}$ のつば型One-Way Pipe (図-2)に、波高 $H=5\text{cm}$, 周期 $T=1.2\text{sec}$ (波長 $L=180\text{cm}$)の規則波を作用させ、超音波流速計を用いてつば近傍の流速を測定した。測定された流速データを100波分のデータでアンサンブル平均することにより位相平均流速 $\langle u \rangle$ を求め、測定値と $\langle u \rangle$ の差を乱れ成分として乱れ強度 $\langle u'u' \rangle$ を算出した。

(2) 実験結果および考察

a) 平均流速の空間分布

図-9に波の一周期平均流速 (以下、残差流速という) 分布を示す。この結果から、つば後部に渦が形成されており、管路出口付近に正の残差流が生成されていることが確認できる。従って短周期往復流場である波浪場においても、風レンズと同様に順流時につば後方において剥離渦が発生し、その結果低圧部を形成して流れが加速される。一方、逆流時にはつばが突き出し管路として作用して入口損失を増大させ、結果として管路内に正の残差流速が生成されると推察される。

b) つば近傍流速の空間分布

つば後方および管路出口に見られる正の残差流速の生成メカニズムを考察するために、各位相における位相平均流速および乱れ強度の空間分布を調べた。

つばの位置($x=42.5\text{cm}$)において測定された水位波形を図-10に、また、特徴的な流動が見られた位相 (図-10中(a),(b),(c),(d))の位相平均流速ベクト

ルの空間分布を乱れ強度の空間分布とあわせて図-11に示す。

図-11(a)はつばの位置を波の峰が通過した時のものである。流速は全体的に正の値を示しており、特につば上部に大きな正の流速が確認できる。また、管路出口にも正の流速が確認され、位相が(a)から(b)へと進むにつれて、流速が大きくなっていることが見てとれる。一方、(c)は波の谷がつばの位置を通過している時であり、流速は全体的に負となる。つば上部で流速が大きくなるのは(a)と同様であるが、管路前方の流速は小さい。位相が(c)から(d)へと進むにつれて負の方向の流れは大きくなるものの、その変化は小さく、(a)~(b)間に管路より流出する流れと比較して、(c)~(d)間に管路に流入する流れは小さいことが分かる。

c) 乱れ強度の空間分布

乱れ強度 $\langle u'u' \rangle$ の大きい領域はつばから管路出口近傍にかけて分布しており、特につば近傍において剥離渦の形成による乱れが大きいことが分かる。また $\langle u'u' \rangle$ は流速が正の時 (波峰通過時)につば上部および後方で大きな値をとり、その後流速が負に転じて (波谷通過時) その分布状況に大きな変化は見られない。波峰通過時、つば後方には δl だけしか管路の上面が無く、流体は制限されることなく管路後方に向かって流れることができるのに対して、波谷通過時は、つば前方の管路上面およびつばにより流れが制限され、流体はつば上方かもしくは管路

表-2 実験条件(2)

H/L	$\delta l/d$	$\delta h/d$
0.028	0.00	0.1, 0.2, 0.3 0.4, 0.5
	0.25	
	0.50	
	0.75	
	1.00	
0.006~0.040	0.00	0.5
	0.25	
	0.50	
	0.75	
	1.00	
	1.40	
	1.85	

出口に向かって流れる。その結果、管路出口近傍では位相に関係なく流速勾配が大きくなり、乱れが生成されると考えられる。

以上の考察を踏まえると、乱れ強度の分布は渦の分布と考えると差し支えないことから、波峰通過時に管路出口近傍に渦が生成された結果、低圧部が形成されて、管路内の流体が低圧部に流れ込む。一方、波谷通過時はつばが流れに対して障害物となり、管路内に向かう流速成分は小さくなり、結果として管路内に正の残差流が生成されると理解できる。

5. 最適形状と残差流量

3章において、つば型One-Way Pipeおよびハイブリッド型One-Way Pipeが従来の粗度型One-Way Pipeと同様あるいはそれ以上の残差流量を生み出すことが明らかとなった。実用的な側面を考慮すると、製品としては出来る限りシンプルな形状が望まれる。そこで、本章では最もシンプルな形状でかつ一方向流生成能が高いつば型One-Way Pipeを取り上げ、様々な波の条件の下で効果的に残差流量を生み出すことの出来るつばの高さ δh および設置位置 δl について検討を行った。実験条件を表-2に示す。

(1) 無次元残差流量 q_*

管路内に生成される一方向流の生成能力を定量評価するために、本章では式(1)で表される無次元残差流量 q_* を導入する。

$$q_* = \frac{qT}{dH} \quad (1)$$

ここで、 q は残差流速を鉛直方向に積分して算出される単位幅残差流量、 d は管径、 H は波の波高、 T は波の周期である。

(2) 周期 T と残差流量

まず、最適な管路長 l を決定するためにつばの高

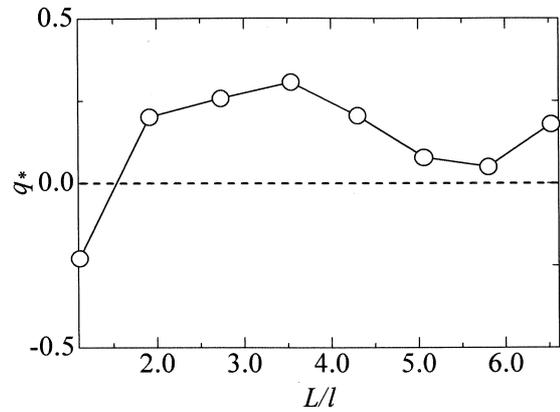


図-12 L/l と q_* の関係

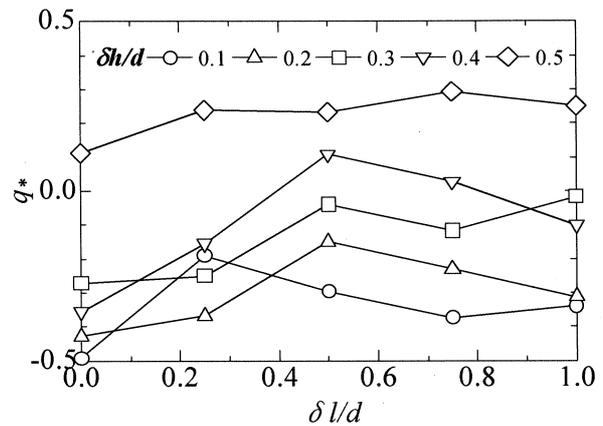


図-13 $\delta l/d$ と q_* の関係(1)

さ δh および設置位置 δl を固定し、表-2に示すように波の周期を0.6s~2.0sと変化させて管路内の水平流速を測定した。

無次元残差流量 q_* を縦軸に、波の波長 L と管路長 l の比 L/l を横軸にとったグラフを図-12に示す。 $L/l = 1.1$ 以外のすべて L/l の値において q_* は正の値をとり、特に $L/l = 3.5$ (周期 $T = 1.2$ sec) のとき q_* は最大値をとる。この結果は、粗度型One-Way Pipeに対して行った同様の実験結果⁷⁾と一致する。粗度型One-Way Pipeの場合、 $L/l = 2$ となるときに管路の入口付近と出口付近の流速が常に逆位相となって互いに打ち消しあうため、管路内の残差流の生成能力が小さくなっていったが、つば型One-Way Pipeにおいてはそのような傾向は見られない。しかしながら、 $L/l = 3.5$ より大きくなると q_* は減少し始め、 $L/l = 5 \sim 6$ 付近で最小値をとっている。以上の結果より、最適な管路長は $L/l = 2 \sim 3.5$ の条件を満たす必要がある。なお、波の入射角に対して管路が α° 傾いている場合には、 $L/(l \cos \alpha) = 2 \sim 3.5$ とすればよい。

(3) つば高さ δh 、つば設置位置 δl と残差流量

つばの位置 δl およびつばの高さ δh を変化させた場合の残差流量の特性を調べた。まず、 H/L が一定の条件下で $\delta h/d$ 、 $\delta l/d$ をそれぞれ変化させ、 $\delta h/d$ 、 $\delta l/d$ と q_* の関係を検討した。図-13は $\delta l/d$ と q_* の関係を $\delta h/d$ をパラメータとして示したグラフである。この

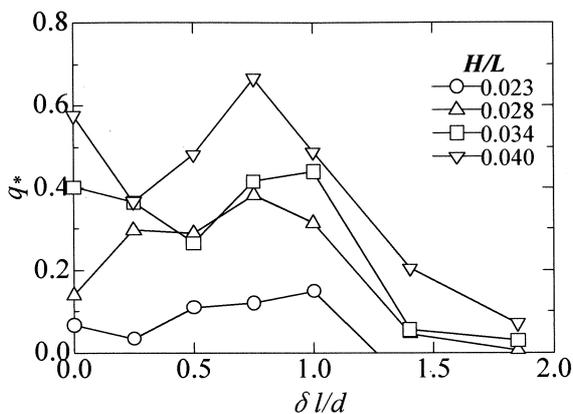


図-14 $\delta l/d$ と q_* の関係(2)

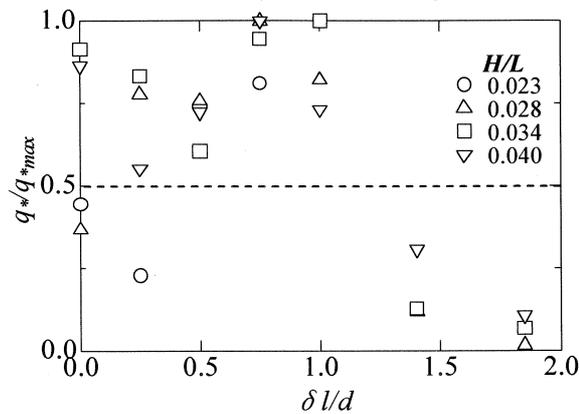


図-15 $\delta l/d$ と q_*/q_{*max} の関係

結果を見ると、 q_* は $\delta h/d$ の増加に伴って大きくなっているが、 $0.3 \geq \delta h/d$ ではどの $\delta l/d$ に対しても負の値となっており、管路内に正の残差流量を生成するためには $\delta h/d$ は少なくとも0.4以上でなければならないことが分かる。また、 q_* は $\delta l/d$ の増加に伴い増加し、最大値をとった後減少する傾向が見られる。

以上の結果を考慮して、次に $\delta h/d=0.5$ に固定し H/L をパラメータにして q_* と $\delta l/d$ の関係を調べた。実験結果を図-14に示す。なお、グラフには q_* が正の値をとったケースのみを載せている。この結果から、 q_* は $\delta l/d$ の増加に伴い増加し、最大値をとってその後減少すること、更に H/L が大きくなるほど q_* は大きくなることが分かる。そこで、 q_* を各 H/L の最大値 q_{*max} で規格化して結果を整理したグラフを図-15に示す。この結果から、 $0.023 \leq H/L \leq 0.040$ の範囲において最大の q_* を得るためには $0.5 < \delta l/d \leq 1.0$ とすればよいことが明らかとなった。

5. まとめ

- (1) 管路出口につばを設置することで管路内に正の残差流速を生成することが出来、その流体輸送能力は従来の粗度型 One-Way Pipe とほぼ同等であることが明らかとなった。更につばと拡大管を組み合わせることでより大きな正の残差流速を生成することが出来ることが明らかとなった。
- (2) 往復流場につば型 One-Way Pipe を設置した場合、つば近傍、および後方には発達した乱れが発生し、その空間分布は位相が変わっても大きく変化しない。
- (3) つば後方において剥離渦が発生し、その結果低圧部を形成して流れが加速される。一方、逆流時にはつばが抵抗体として作用して流れを妨げ、管に流入する流速が減少する結果として管路内に正の残差流速が生成される。
- (4) つば型 One-Way Pipe に関して、最適な管路長は $L/l=2 \sim 3.5$ の条件を満たす必要がある。また、

$L/l=3.5$ に固定した場合、 $0.023 \leq H/L \leq 0.040$ の範囲において最大の q_* を得るためには $0.4 < \delta h/d$, $0.5 < \delta l/d \leq 1.0$ とすればよい事が明らかとなった。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究補助金（基盤研究（A）「沿岸海域環境改善に関する総合的研究」，研究代表者：小松利光）の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本潤，武内智之，中山哲蔵，田畑真一，池田正信：志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査，海岸工学論文集，第41巻，pp.1096-1100，1996。
- 2) 下迫健一郎，近藤充隆，藤堂ひろみ，福井正幸，高橋重雄：越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性，海岸工学論文集，第46巻，pp.1096-1100，1999。
- 3) 森田修二，出口一郎：スロープ水路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。
- 4) 西守男雄，日比野忠史，鶴谷広一，石原弘一：実海域における下部透過型防波堤の海水交換特性，海岸工学論文集，第46巻，pp.1081-1085，1999。
- 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) 川野立，Mukhasan 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。
- 8) 鳥谷隆，大屋裕二，深町信尊，渡辺公彦：中空構造体による集風効果，ながれ，22，pp.337-323，2003。