

方向抵抗特性を有する管路の 海水交換促進効果の検討

STUDY ON EFFECTS OF THE SPECIFIC PIPE WITH DIRECTIONAL RESISTANCE PROPERTIES ON SEAWATER EXCHANGE

朴童津¹・堤啓²・藤田和夫³・小松利光⁴

Donjin PARK, Kei TSUTSUMI, Kazuo FUJITA and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工修 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工修 国土交通省技官 北陸地方整備局 (〒921-8042 金沢市泉本町5-85)

³正会員 九州大学大学院技官 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

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)

The water in the pipe installed in a breakwater flows back and forth because of waves and a tidal current, so that if wall roughness with directional resistance properties is established in the pipe, the roughness behaves differently in response to the direction of flow. As a result, an one-way residual flow is produced and contamination in the port is swept away to the outer sea, and the water quality in the port is expected to be improved rapidly. In this paper, it was tried to make an one-way residual flow across the breakwater in the port by using a pipe with particular devised shape of wall roughness. At first, a square pipe with the Wall Roughness which has directional resistance properties was examined experimentally. Next, 2-dimensional numerical simulations were carried out to estimate the validity of this method in a model port. From these results, it becomes clear that this method can make an one-way residual flow and is quite efficient to improve the water quality in a semi-closed port.

Key Words : seawater exchange, directional resistance property, water purification, One-way pipe

1. 目的

港湾の多くは、静穏域を確保する目的から外海と防波堤によって遮られ、閉鎖性の強い水域となっている。そのため陸域から港内への流入水の水質が悪化して負荷量が増加すると、港内の富栄養化が進むことが大きな問題となっている。これに対し、これまでは発生源対策に力が注がれてきたが、近年は開口管を用いた透過式防波堤など、流動に着目した水質改善手法を適用するケースが多く見られるようになってきた^{1), 2), 3), 4)}。

著者らは、潮汐や波浪によって生じる開口管内の往復流に対し、流れの方向によって異なる抵抗を発揮する構造物（以後、粗度と呼ぶ）を図-1のように管壁に設置することで、管内に一周平均で港外から港内へ向かう一方向流れを形成し、港内の海水交換を促進させる手法を提案している⁵⁾。本論文では、その技術の実用化に向けた研究の成

果を報告する。まず、正方形断面の管の内壁に粗度を設けた管路の実験により、方向抵抗特性を有する管路（以後、One-way Pipe と呼ぶ）の基本水理特性を明らかにした。次に、模型湾や実海域を対象とした数値シミュレーションにより One-way Pipe の有効性について検討を行った。

2. 凸型粗度を有する正方形 One-way Pipe の抵抗特性に関する実験

以前行った開水路を用いた2次元の粗度実験の結果から、水路底面より窪んだ形の凹型粗度に比べ、水路壁面より突出した凸型粗度の方が流れの向きによる抵抗差が1オーダー近く大きいことが確認されている⁶⁾。そこで、流れの方向による抵抗差が大きい凸型粗度形状のうち、比較的形狀が単純な1/4円柱型粗度を正方形管内に設置し、その抵抗特性について調べた。

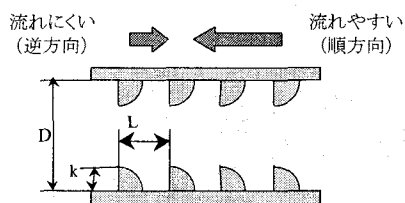


図-1 粗度の設置状況

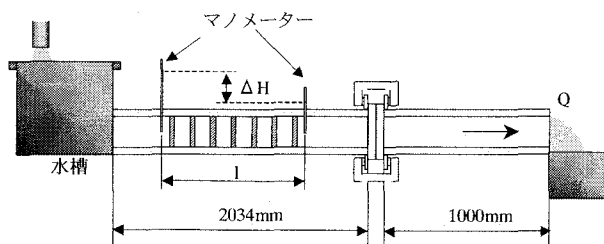


図-2 実験装置の概略

表-1 実験条件

粗度高さ k (mm)	L/k	粗度個数	損失水頭測定区間 (mm)
6	3	37	762
6	6	19	762
6	9	13	762
6	12	10	762
6	18	7	762
9	3	37	1143
9	6	19	1143
9	9	13	1143
9	12	10	1143
9	18	7	1143
12	3	37	1524
12	6	19	1524
12	9	13	1524
12	12	10	1524
12	18	7	1524
14	3	37	1778
14	6	19	1778
14	9	13	1778
14	12	10	1778
14	18	7	1778

(1) 実験装置および方法

図-2 に実験装置の概略を示す。内壁に1/4 円柱型粗度を設置した一辺の長さが10cm、全長約300cmの正方形管を水槽底部に取り付け、水槽側から水を供給することによって管内に流れを形成した。管内の流れが定常になったのを確認した後、粗度設置区間の損失水頭 ΔH およびその時の流量 Q をマンノメーターおよび流量測定容器によってそれぞれ測定した。各実験 Case における粗度の設置状況は、粗度高さ k と設置間隔 L の関係によって表-1 のように変化した。実験における Reynolds 数は $3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ であった。ここで、図-1 中の流れやすい方向を順方向、流れにくい方向を逆方向と定義し、また k は粗度高さ、 L は設置間隔、 D は正方形断面の一辺の長さである。なお、一方向の流れに対する一連の測定を終え

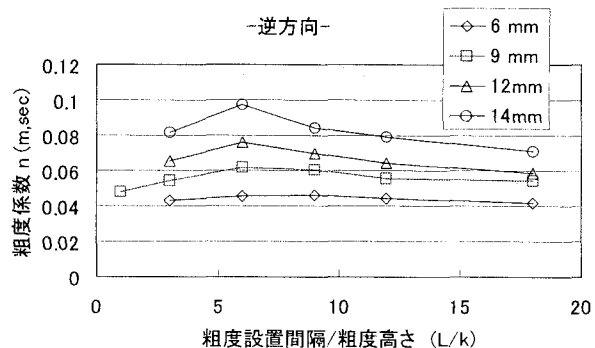
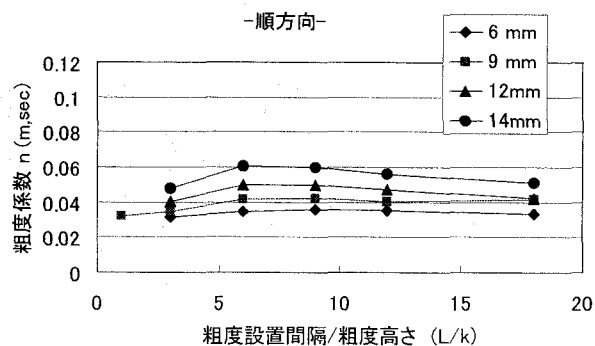


図-3 粗度係数と L/k の関係

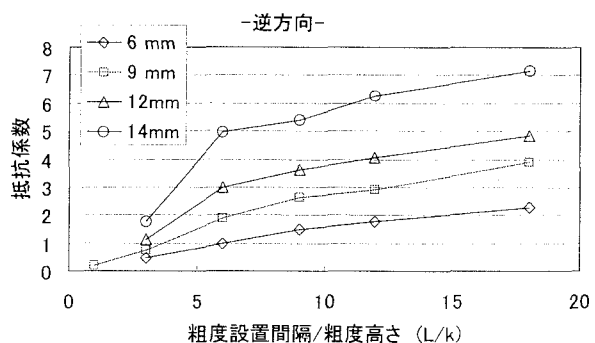
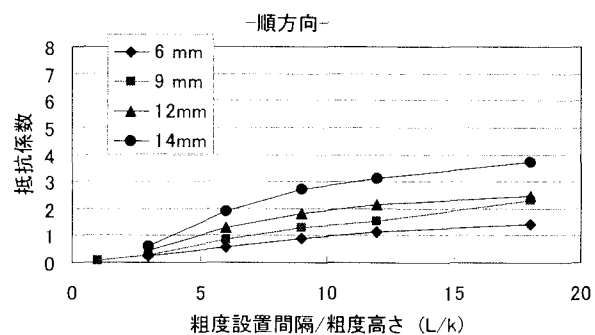


図-4 抵抗係数と L/k の関係

た後に管を逆向きに取り付けることによって、逆方向の流れに関する測定を行った。

(2) 壁面抵抗の特性値

測定結果を用いて、 $n = AR^{2/3} I^{1/2} / Q$ より Manning の粗度係数 n を算出した。ここで、 A : 正方形管断面積 $D^2 [m^2]$, R : 径深 $[m]$, I : 動水勾配, Q : 流量 $[m^3/sec]$ である。図-3 に L/k と粗度係数の関係を示す。

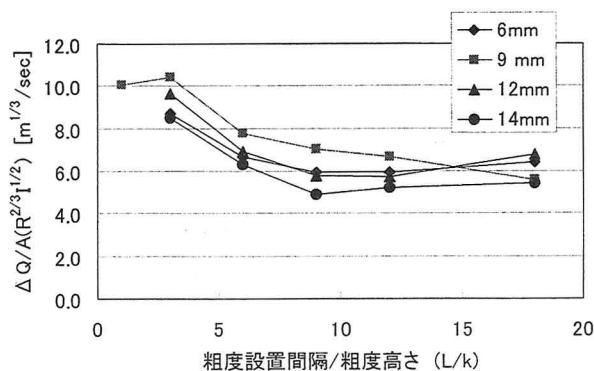


図-5 $\Delta Q/AR^{2/3}I^{1/2}$ と L/k の関係

順・逆方向ともに粗度高さ k が大きいほど粗度係数の値は大きいことが分かる。これは k が大きいほど管の断面積を減少させ、流れを阻害する効果が大きくなるためである。

L/k の違いによる粗度係数の変化を見ると、順方向の流れに対しては $L/k=6 \sim 9$ で、逆方向の流れに対しては $L/k=6$ 程度で粗度係数は最大値を持つことが分かる。群粗度の場合、粗度を密に設置し過ぎると粗度の相互干渉のためにその抵抗は減少し、逆に疎になり過ぎると抵抗の主な発生要因である粗度の密度が小さくなるため抵抗は同じく減少する。本実験結果において順方向と逆方向とで最大値を示す L/k が異なることから、1/4 円柱型粗度は順方向と逆方向とで正方形管内壁に設置した場合の群粗度としての性質に違いがあることが分かる。

また、管内に設置した粗度の抵抗を管路壁面のせん断応力に置き換えることによって、粗度の抵抗係数を、

$$C_d = \frac{8 D g R \Delta H}{N(D^2 - d^2)U^2} \quad (1)$$

より算出し、 L/k との関係性をまとめた (図-4)。ここで、 C_d ：粗度一枠の抵抗係数、 ΔH ：粗度設置区間における損失水頭、 N ：粗度の設置個数、 d ：粗度頂部での正方形管の一辺の長さ ($=D-2k$)、 U ：断面平均流速である。この結果より、 L/k が大きくなるにつれて抵抗係数がある値に漸近する形で増加する傾向が読み取れる。これは L/k が大きいと上流側に設置された粗度による流れの遮蔽効果が小さくなるため、抵抗係数の値は粗度が単体で管内に設置されたときに発揮する値へと漸近しているものと考えられる。

(3) One-way Pipe の海水交換促進効果に関する検討

One-way Pipe においては、流れの向きによって異なる抵抗を発揮し、往復流に対して一周平均でより強い一方向流れを形成することが重要である。従って、いくら抵抗差が大きくても抵抗の絶対値が大き

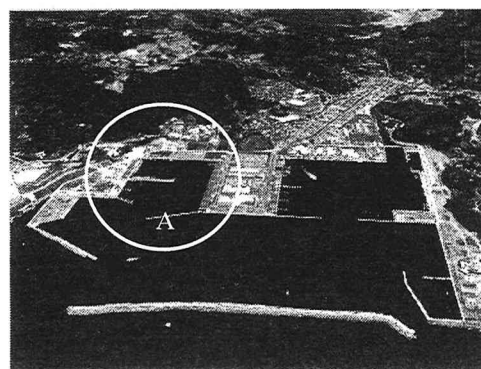


図-6 新長崎漁港

表-2 One-way Pipe の諸値

形状損失係数	入口 ζ_e	0.5
	出口 ζ_o	1
コンクリート壁面の粗度係数 n [m.sec]		0.012
矩形管の内径 D [m]		2
管路長さ L [m]		10
粗度高さ k [m]		0.2
粗度間隔 (L/k)		3
抵抗係数 C_d	順方向	0.302
	逆方向	0.741
粗度設置個数 N		16個

ければ管内でのエネルギー損失が大きくなり、Pipe を通過する流量は減少するため、海水交換の促進を目的とする One-way Pipe としての効果は小さくなる。

順流と逆流とで動水勾配が等しい場合の流量差の無次元量

$$\Delta Q / AR^{2/3}I^{1/2} = \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \quad (2)$$

を一方向流れの生成能力を表す一つのパラメーターとして考えることができる。ここで、 n_1 ：順方向の粗度係数、 n_2 ：逆方向の粗度係数である。図-5 は式より算出された $\Delta Q/AR^{2/3}I^{1/2}$ の値と L/k との関係を示したものである。この図からいずれの粗度高さにおいても粗度設置間隔が狭いほど流量差が大きくなり、中でも $k=9\text{mm}$ のときに $\Delta Q/AR^{2/3}I^{1/2}$ の値は大きいことが分かる。今回得られた結果では $k=9\text{mm}$ 以外では $L/k=1$ についての結果がないので、いずれの粗度高さにおいても流量差が $L/k=3$ で最大値を持つと言いきれないがその傾向は $k=9\text{mm}$ に似ていると考えられる。従って、正方形管においては一辺の長さの一割程度の高さをもち粗度を $L/k=3$ 程度の間隔で管内に設置した場合に一方向流れの生成能力は最も大きいと推測できる。

3. 数値シミュレーションによる One-way Pipe の海水交換促進効果の検討

(1) 模型湾を対象とした数値実験

長崎県西彼杵半島に位置する新長崎漁港は、長大

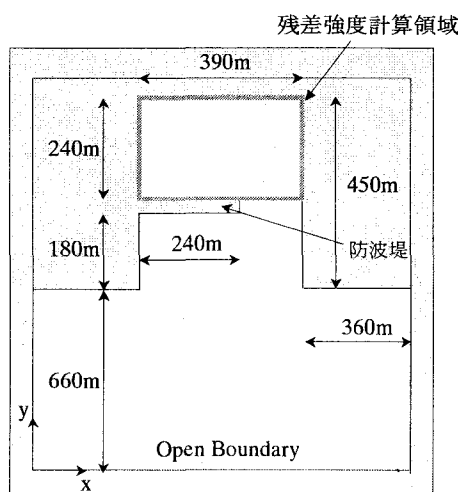


図-7 モデル湾の概略図

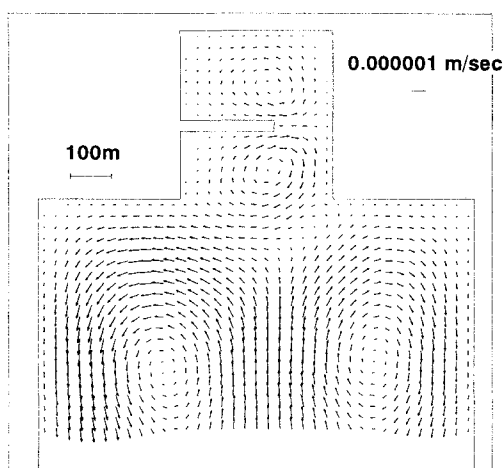


図-8 残差流：One-way Pipe なし (Case-0)

な防波堤に囲まれた典型的な閉鎖性港湾である（図-6）。特に、港奥のAの領域はその閉鎖性のために水質が悪化している。そこで領域Aとスケールが同じであり、水深が10mで一定としたモデル湾（図-7）において、潮汐流に対するOne-way Pipeの効果について数値計算による検討を行った。

計算はADI法による平面2次元潮流計算および拡散計算である。図-7の開境界でM₂分潮を与え、潮位変動振幅を25cm、渦動粘性係数を20m²/s、コリオリ係数を0、海底摩擦係数を0.0026とした。また、メッシュ間隔はΔx=Δy=30mとし、潮流計算に対してはΔt=1.0sec、拡散計算に対してはΔt=10secとした。One-way Pipeは、港内と港外を結ぶように防波堤内に設けられることを想定しており、計算においては潮位変動に伴う防波堤前後の水位差だけによって管内に海水が流入するものと仮定した。つまり、防波堤を挟んで港外側のメッシュ（添字1）と港内側のメッシュ（添字2）の水位差ΔH(=|H₁-H₂|)によってOne-way Pipeを通過する流量Qを、

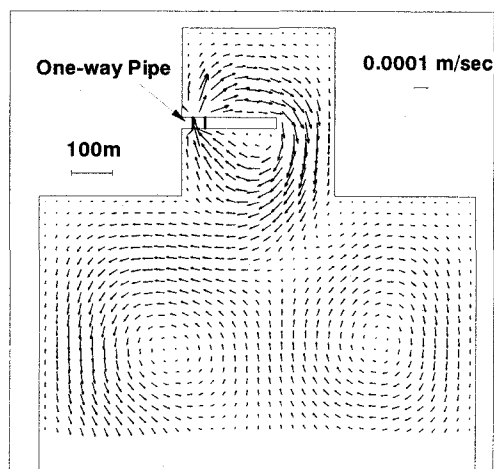


図-9 残差流：One-way Pipeあり (Case-3)

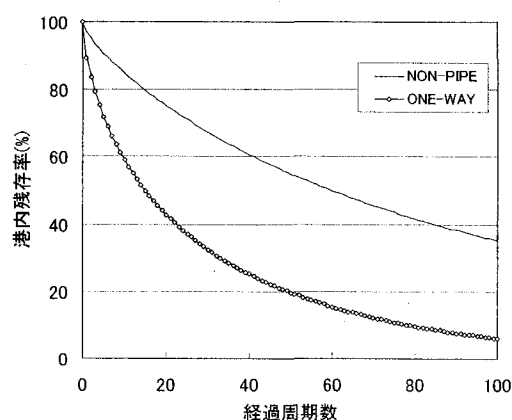


図-10 港内残存率の比較

$$Q = \frac{A\sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{\left\{ \xi_c + f_1 \frac{l}{D} + \frac{N(D^2 - d^2)C_d}{4DR} + \xi_o \right\}}}$$

により算出し、連続の式の中へ組み込んだ。ここで、 ξ_c : 管の入口損失係数、 ξ_o : 管の出口損失係数、 f_1 : 管路材料による摩擦損失係数、 l : One-way Pipeの長さ、 d : 粗度頂部での正方形の一辺の長さ(=D-2k)、 A : 正方形管の断面積、 C_d : 粗度一枠の抵抗係数、 N : 粗度の設置個数であり、それぞれ表-2に示す値を設定した。また、Pipeで結ばれているメッシュにおける運動量の変化は小さいと仮定して無視した。

まず、比較対象用としてOne-way Pipeを適用しないケースについて計算を行なったところ、残差流の大きさは極めて小さく、港内と港外でそれぞれ閉じた環流を形成していることがわかった（図-8）。次に、図-7中の防波堤の付け根から3メッシュ目にOne-way Pipeを1本組み込み、計算を行なった。図-9は残差流の計算結果を示したものであり、Pipeから流入した海水が港口から流出し、港外と港内を結ぶ大きな環流が形成されていることが見て取れる。また、港内に初期濃度として一様濃度

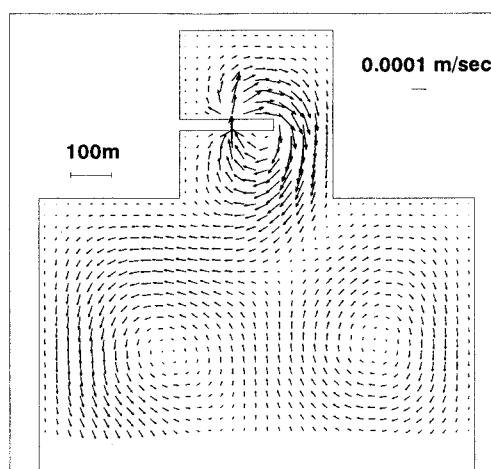


図-11 残差流：One-way Pipe あり (Case-6)

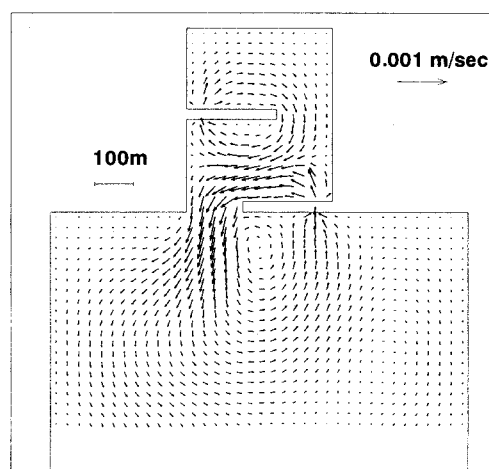


図-13 閉鎖度が強いモデル湾における残差流速
：One-way Pipe あり

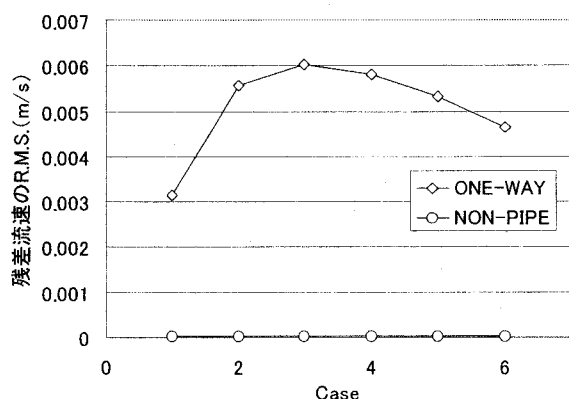


図-12 残差強度の比較

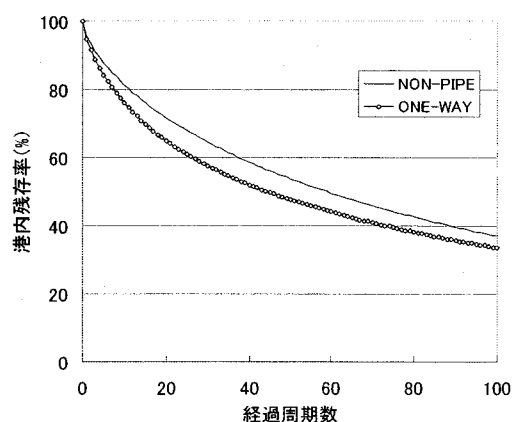


図-14 閉鎖度が強いモデル湾における
港内残存率の比較

($C=10.0$)の拡散物質を投入し、港内残存率を求めたところ、One-way Pipe を組み込んだ場合の方が残存率の低下速度が大幅に速くなることが確認された(図-10)。このときのOne-way Pipe 内の一潮汐平均流速は6.3cm/secであった。以上の結果より、One-way Pipe を防波堤内に組み込むことによって港内の海水交換を促進させることが示唆された。

実海域においてOne-way Pipe を設置する場合、設置位置によって環流の規模に違いが生じ、それが港内の海水交換に影響を及ぼすことが予想される。そこで、One-way Pipe を組み込む位置を変化させて計算を行い、Pipe の設置位置の違いによる海水交換の促進効果の変化について検討を行なった。計算は防波堤の付け根から1～6メッシュ目までのどれか一つにOne-way Pipe を1本組み込み(防波堤の付け根側からCase1～Case6とする)、それぞれに対して計算を行なった。また、港内の残差流速のRoot Mean Square(残差強度)を算出し、港内残差流の強さについて検討を行なった。図-11はCase6における残差流速パターンを示したものである。Case6と防波堤の付け根側にOne-way Pipe を組み込んだCase3の計算結果(図-9)を比較すると、Case6では湾奥部における残差流の生成規模が小さく、港口付近に偏つ

た環流が形成されていることが分かる。また、港内残差強度を比較した図-12から、管の設置位置により港内残差強度に違いが見られることから、実海域に適用する場合にはその設置位置について十分な検討が必要であることが分かる。

さらに、閉鎖度がより強い港湾における効果について検討を行うために、新長崎漁港を参考にして図-13のような模型湾を対象に数値実験を行った。このような構造の海域の場合、湾奥の海水交換のためには防波堤①を囲む時計回りの還流と防波堤②を囲む反時計回りの残差還流の生成が必要となる。防波堤①と②にOne-way Pipe を設置し、計算を行った。その結果を図-13に示す。2つの残差還流が生成されている。また、図-14に示すように拡散計算により湾奥における拡散物質の残存率を調べたところ、One-way Pipe を各々1本ずつ設けた場合の効果が確認された。

(2) 実海域を対象とした数値実験

新長崎漁港全域を対象とした数値実験は、潮位変動振幅を49cm、コリオリ係数を $8.3 \times 10^{-5} s^{-1}$

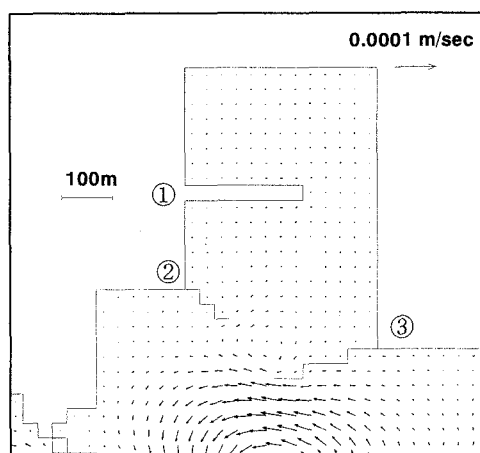


図-15 残差流速：One-way Pipe なし

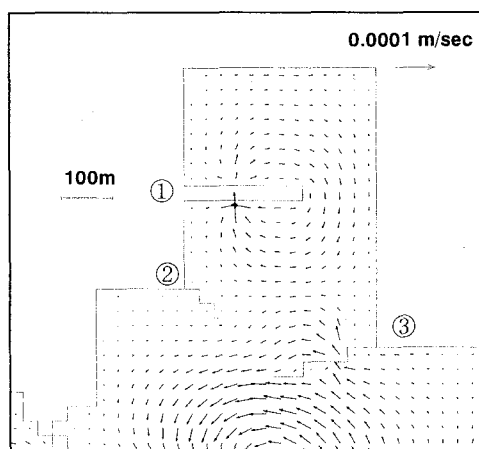


図-16 残差流速：One-way Pipe あり

¹、水深を実際の水深、その他はモデル湾の計算における値と同じ値を用いて行なった。図-15, 16はOne-way Pipeの有無による残差流の違いを、図-6中の領域Aを拡大して示したものである。図-16においては防波堤①の付け根から4メッシュ目と、防波堤③の付け根から3メッシュ目にOne-way Pipeを組み込んだ。One-way Pipeを組み込んでいない図-15では領域Aにおいてほとんど残差流が生成されていないのに対し、組み込んだ図-16においては防波堤①を跨ぐ時計回りの環流と、防波堤③を跨ぐ反時計回りの環流が形成されており、これらが港口付近で合流し、港外へと流出していることが確認できる。その結果、湾奥部と外海との海水交換が可能となり、水質改善が進むことが期待できる。

4. 結論

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 正方形管内に1/4円柱型粗度を設置したOne-

way Pipeを用いて実験を行った結果、順流と逆流とで動水勾配が同じ往復流に対して、管路内壁の一辺の長さの1割程度の高さを持つ粗度を $L/k=3$ 程度の間隔で設置したときに一方向流れの生成能力がもっとも大きい。

2) 平面2次元の潮流計算を行った結果、One-way Pipeを用いることによって港内に一方向流れを創造することができ、One-way Pipeは海水交換の促進に対して有効であることが明らかになった。

3) One-way Pipeは、防波堤での設置位置によってその効果が異なってくるため、実海域へ適用する際には十分な検討が必要である。またOne-way Pipeの組み合わせにより閉鎖性が強い海域における海水交換効果も期待できる。

今回は潮位変動のみを駆動力としたが、実際は波も往復流を生成するため波の効果もおおいに期待できる。また、One-way Pipeの入口をベルマウス型などの入口損失の少ない形状に、出口を防波堤から突き出させて逆流時の入口損失を大きくしてやることにより、順・逆流時の抵抗差をより大きくすることも可能であることから、実際に本Pipeを適用した場合はより大きな効果が期待できるものと思われる。

追記：本研究は丸栄コンクリート工業(株)との共同研究として行われたものである。

参考文献

- 1) 山本 潤・武内智行・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
- 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
- 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
- 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
- 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，2002年2月，第46巻，pp. 463-468
- 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，2000年3月，第44巻，pp. 957-962

(2002. 9. 30受付)