

人工粗度を用いた恒流の生成に関する研究

A study of generating residual current by using artificial roughness

栗谷 陽一*, 小松 利光**, 川崎 昌三***, 朝位 孝二****, 藤田 和夫*****

By Youichi AWAYA, Toshimitsu KOMATSU, Shozo KAWASAKI, Koji ASAI and Kazuo FUJITA

The reclamation of land for making an island in a bay close to a big city sometimes causes the water pollution in the rear area between the island and the coastal line because of the water stagnancy. It is effective to generate one - directional current (a residual current) around the artificial island to promote the water exchange .The concept that the change of roughness according to the direction of tidal current produces the one directional avaraged current has been introduced. In this study, the most effective figure and arrangement of artificial roughness were made clear by carrying out experiments.

key words : artificial roughness , residual current , water purification

1. はじめに

人口や社会機能の都市への集中に伴い、臨海部に位置する都市では従来より都市機能のアップを図り社会基盤をより一層整備・拡充するために、海岸線の埋め立てを行って土地を確保してきた。しかしながら、水辺の景観や生態系への配慮から水際線をそのまま残すことが望ましいということで、陸続きの埋め立てでなく少し沖合に人工島を造成しようという試みが行われるようになってきた。福岡市の博多湾に計画されているアイランドシティもそのひとつであるが、人工島背後地となる和白干潟は野鳥の宝庫となっているため、人工島造成後の水質の悪化が懸念されている。著者らはこれらの問題に対処するために、流れの向きに応じて粗度の大きさが異なる人工粗度を人工島周辺に設置することにより潮の干満を利用して人工島の周りに恒流を発生させ、海水の交換を活発化する方法を提案している。

例えば、図-1.1 に示すような人工島の周りの流れを考えると、上げ潮時に人工島両サイドから海水が流入し、下げ潮時には、ほぼ同程度の量の海水が両サイドから流出する。潮の干満に応じてこの運動を繰り返す。

* 正会員 工博 九州共立大学教授 工学部 土木工学

(〒 807 北九州市 八幡西区 自由が丘 1-8)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部 建設都市工学科

(〒 812 福岡市 東区 箱崎 6-10-1)

*** 学生員 九州大学大学院工学研究科水土木学専攻 修士課程 (同上)

**** 正会員 工修 九州大学助手 工学部 建設都市工学科 (同上)

***** 正会員 九州大学技官 工学部 建設都市工学科 (同上)

返すが、この往復流だけでは人工島背後の海水はほとんど交換されない。

一方、図-1.2のように人工島周辺に流れの向きに応じて抵抗差が生じるような人工粗度を設置した場合は、上げ潮時には抵抗の小さい側からの流入量が抵抗の大きい側の流入量に卓越

し、下げ潮時には抵抗の小さい側からの流出量が抵抗の大きい側からの流出量よりも大きくなる。従って一潮汐平均すると恒流が発生していることになる。

2.拡散 数値シミュレーション

両サイドで外海に接し、流れの向きによって粗度の大きさが異なる人工粗度を設置した一様断面形の湾曲水路(図-2.1)を考える。この水路部分が人工島の背後に相当するものとする。外海が潮汐運動を行い、水路中央部に拡散物質の流入がある場合に生ずる流れと物質拡散のシミュレーションを行って、流れの方向による粗度差が拡散物質の拡がりに及ぼす影響の程度を調べた。

2.1 基礎式

解析に用いた基礎式は、一次元の運動方程式、連続の式、拡散方程式である

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{B} - H\right) + gA I_f = 0$$

$$I_f = n^2 \left| \frac{Q}{A} \right| \left(\frac{Q}{A} \right) / R^{4/3}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (AUC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q'$$

図-2.1 において時計回りの流れを順流、反時計回りの流れを逆流とし、流れの向きによって粗度係数を変化させる。水路両端に同一の境界条件として振幅0.57(m)、周期 T=12時間25分の余弦波

$$\zeta(t) = 0.57 \cos \left(\frac{2 \pi t}{T} \right) \quad (\text{m})$$

で水面形を与える。

拡散の計算には split-operator-approach を採用し、移流の計算は6-point スキームを用いた。尚、計算条件として潮流計算では、Δx=100(m)、Δt=1.0(s)、拡散計算では、Δx=100(m)、Δt=60.0(s)を用いた。定常状態に達したときの濃度の計算結果を図-2.2 に示す。

負荷流入条件が水路内で左右対称であるにもかかわらず、水路に時計回りの恒流が発生している

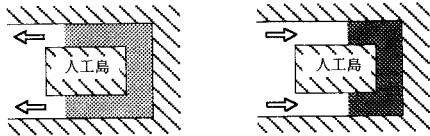


図-1.1

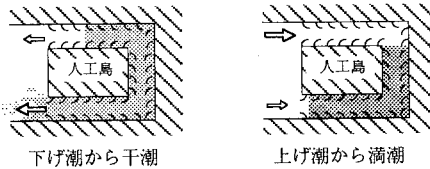


図-1.2

Q: 流量 (m³/s), A: 断面積 (m²/s)

B: 水路幅 (100.0 m)

If: 摩擦損失勾配, R: 径深 (m)

q: 淡水流入量 (1.4×10⁻⁴ m²/s)

H: 平均水深 (10.0 m)

C: 拡散物質濃度 (mg/l), U: 流速 (m/s)

DL: 分散係数 (0.1 m²/s)

q': 拡散物質流入量 (1.4×10⁻⁴ g/m s)

n: Manning の粗度係数

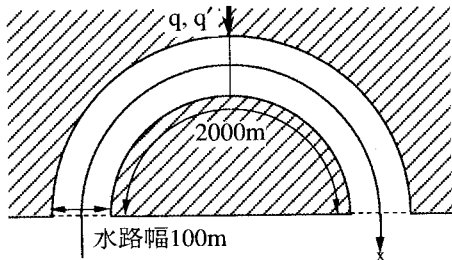


図-2.1 計算領域

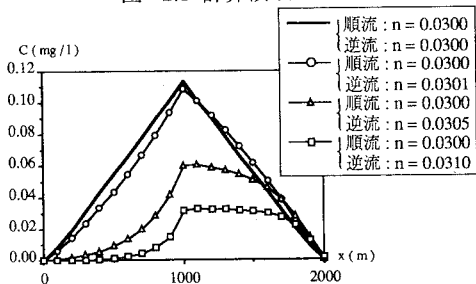


図-2.2 濃度分布

ため右半分の濃度は左半分の濃度よりも高い。水路の方向粗度差が大きければ大きいほどこの傾向は顕著にあらわれ、 $\Delta n=0.0005$ 程度でも十分有効性が認められる。これらの結果より流れの向きに応じて粗度の大きさが異なる人工粗度を水路に設置することは海水交換を活発化し、ひいては人工島背後地の水質改善のための有効な手段と成り得るものと思われる。

3. 粗度の形状及び配置に関する実験

- 有効な人工粗度の開発のために、以下の三通りの実験を行った。
- 実験 I：流れの向きを変えた場合に抵抗差が大きくなる粗度形状を求めるための実験。
- 実験 II：人工粗度を水路側壁に左右対称に複数個設置した場合に、効率良く粗度差が得られる粗度の大きさ、及び配列を求めるための実験。
- 実験 III：左右側壁に対称に取り付けた粗度の一方をシフトさせて非対称とした場合の抵抗の大きさの変化を調べる実験。

3.1 実験 I

実験は、図 - 3.1 に示すアクリル製長方形断面水路 (長さ 8 m, 幅 0.25 m, 水路勾配 1/1900) を用いて行い、水路の両側壁に左右対称になるように対の人工粗度を取り付けた。

実験に用いた人工粗度の形状は図-3.2 に示す 16 通りである。各人工粗度の上流側と下流側二点間の水頭差を倍率 10.25 の二液マノメータを用いて測定した。逆向き流れに対する実験は粗度の方向を逆にして取り付けて行った。

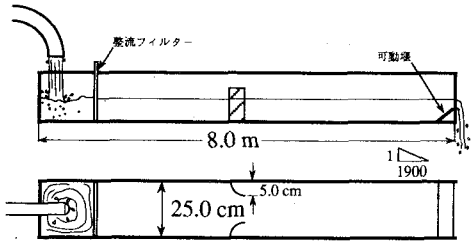


図 - 3.1 実験水路

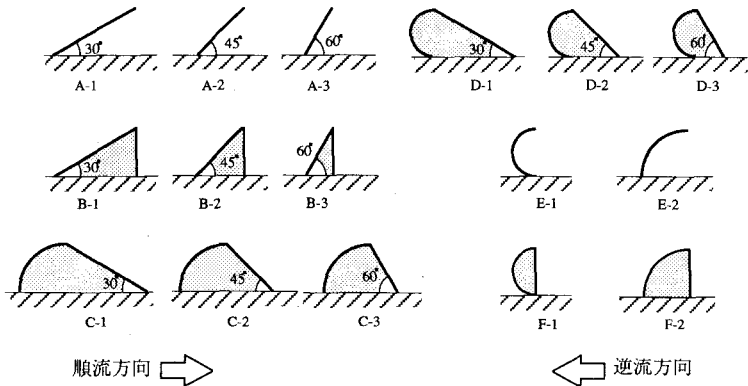


図 - 3.2 人工粗度の形状

実験条件は以下の通りである。

$$U = 0.05 \sim 0.254 \text{ (m/s)}$$

$$Re = \frac{U h}{\nu} = 2000 \sim 11100$$

U: 上流点の断面平均流速, h: 上流点の水深
 ν: 動粘性係数 ($0.012 \text{ cm}^2/\text{s}$)

図 - 3.3 に実験 I の結果を示す。これより粗度形状 E,F (1/2 円筒または 1/2 円柱、1/4 円筒または 1/4 円柱) が幅広いレイノルズ数の範囲で、流れの向きを変えた場合に抵抗差が効率よく得られる形状であることが分かった。

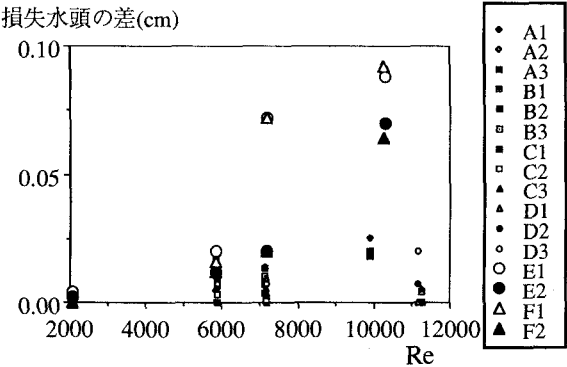


図 - 3.3 損失水頭の差と Re 数の関係

3.2 実験Ⅱ

実験水路は実験Ⅰで用いたものと同一である。人工粗度は粗度差の効率及び施工面も考慮して1/4円筒を用いることにする。この水路に図-3.4に示すように粗度を等間隔に左右対称になるように設置した。測定項目は、流量 Q 、水深 h 、エネルギー勾配 I_e である。これらをもとに Manning の粗度係数を算定した。

◎人工粗度の粗度係数 n_s の算出法

Einstein の断面積分割法を用いる。

$$n_s = \left\{ \frac{(B+2h)n^{3/2}}{2h} - \frac{(Bn_b^{3/2})}{2h} \right\}^{2/3}$$

$$n_b = 0.0127 (m^{-1/3} s)$$

k/B : (粗度の突出高)/(水路幅) … 粗度の相対的な大きさを表す無次元パラメータ

s/k : (粗度の設置間隔)/(粗度の突出高)
… 粗度の相対的な設置間隔を表す無次元パラメータ

実験Ⅱの結果を図-3.6、図-3.7に示す。1/4円筒粗度の場合、粗度係数は各 k/B で順流、逆流共に s/k に対してピーク値をもつ。これは、 s/k が小さい場合は粗度が相互に干渉し、 s/k が大きくなると抵抗の発生源が減少するので、共に粗度係数が低下するものと思われる。粗度の突出高に関しては、 k/B の増加により粗度係数も一様に増加し、粗度係数の差も増加する。

3.3 実験Ⅲ

パラメーター k/B 、 s/k を固定し、左右対称になるように粗度を水路側壁に取り付けた。次に、一方を、もう一方の粗度に対して距離 Δs だけ移動させ(図-3.8)そのときの粗度及び粗度差を調べた。

粗度の評価方法はManningの式より

$$n = \frac{R^{2/3} I_e^{1/2}}{U}$$

として、水路断面全体の粗度係数に置き換えて評価した。

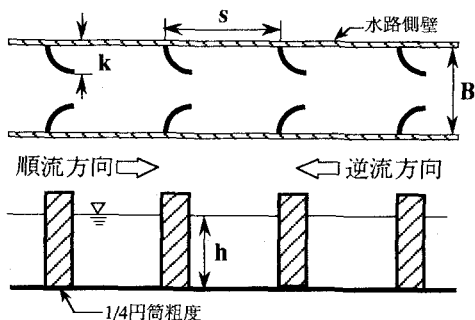


図-3.4 粗度の配置

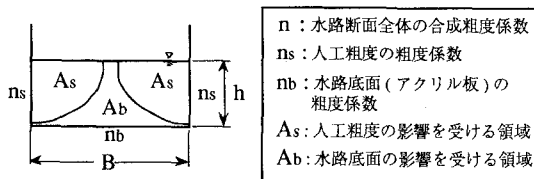


図-3.5

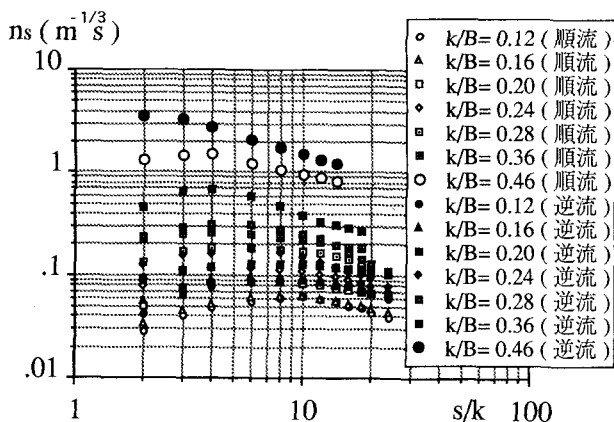


図-3.6 人工粗度の粗度係数(順流と逆流)

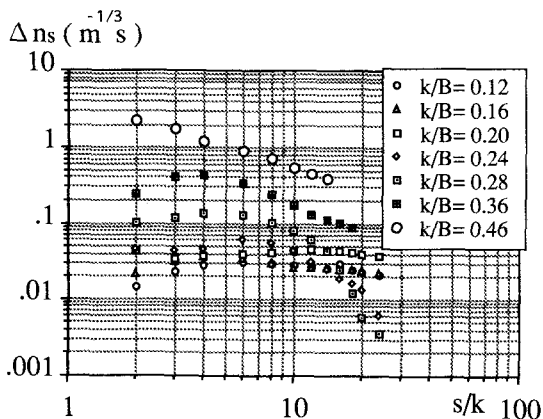


図-3.7 逆流と順流の粗度係数差

結果を図-3.9.1～図-3.10.3に示す。

k/B が0.16、0.24、0.36と大きくなるにしたがって粗度をシフトさせる効果が表れ、粗度係数の値が低下してくる。これは、 k/B が小さい場合は粗度の影響が水路壁面付近に限定されるが、 k/B が大きくなるにしたがって両側壁に取り付けられた粗度が互いに干渉し始めるためと思われる。また、左右側壁の粗度が非対称となった場合に粗度係数の値が小さくなる原因は、左右対称の場合に較べて縮流効果が小さくなり、その結果エネルギー損失が減少するためと思われる。

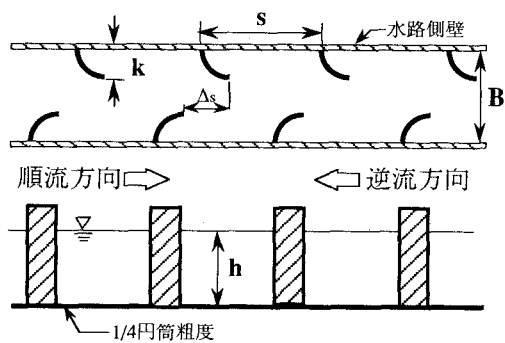


図-3.8

各 k/B において $s/k=2$ の場合と $s/k=4, 8$ の場合とを比較すると、 $s/k=2$ の場合は非対称の効果が小さい。これは $s/k=2$ のときは粗度近傍の流れが同じ列の粗度同士で完全な干渉流れとなっているため、シフトさせる効果が現れ難くなっているためと思われる。

ただし、いずれにしても粗度をシフトさせる効果はそれ程顕著ではない。

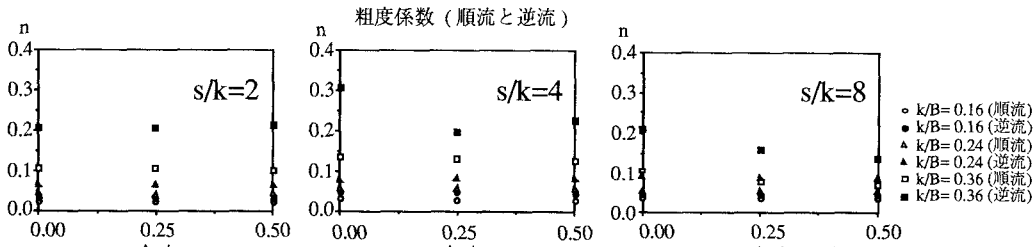


図-3.9.1

図-3.9.2

図-3.9.3

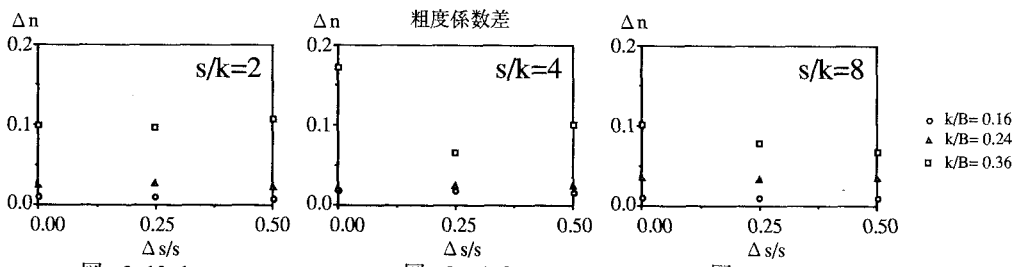


図-3.10.1

図-3.10.2

図-3.10.3

4. 実験結果の考察

流速が大きく、かつ効果的な恒流を発生させるためには、単に順流と逆流の粗度差が大きければよいというわけではなく、同じ粗度差に対しては順流時の粗度係数の値が小さいほうが有利である。そこで、実験IIより求めた各配列での粗度差の効果を、逆流の粗度係数 n_{sb} と順流の粗度係数 n_{sf} の差と順流の粗度係数の比である

$$\alpha \equiv \frac{n_{sb} - n_{sf}}{n_{sf}}$$

で評価することにする。

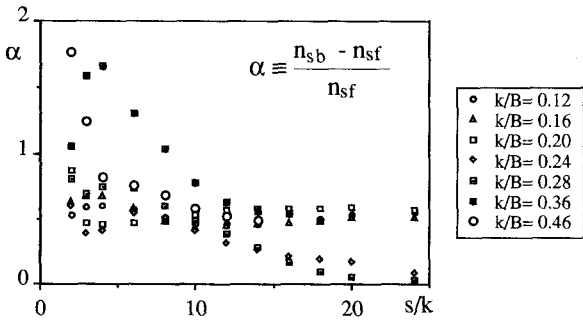


図-4.1 粗度係数差

k/B をパラメーターとして、 s/k に対してプロットしたものを図-4.1に示す。

また s/k 、 k/B に対して α を等値線図で表わしたものが図-4.2である。この図より α は $k/B = 0.35 \sim 0.4$ 、 $s/k = 1 \sim 4$ あたりで最大値をとり、 $k/B = 0.15 \sim 0.2$ 、 $s/k = 1 \sim 4$ の領域にも極大値が存在することが分かる。要求される粗度差に対し、これらの図から s 及び k を決定することができる。

5. 原型スケールへの適用

実験で求めた人工粗度を実物大の構造物として実際に適用する場合の粗度係数は以下のようにして求める。Manning の粗度係数と摩擦損失係数 f の関係は

$$f = \frac{8 g n^2}{R^{1/3}} \quad (1)$$

で与えられる。

流れは模型、原型共に十分乱れているので幾何学的条件 (k/B , s/k) が同一であれば両者の摩擦損失係数は一致するものと思われる。従って

$$f_m = f_p \quad (2)$$

式(1)(2)より次式が得られる。

$$\frac{n_m}{R_m^{1/6}} = \frac{n_p}{R_p^{1/6}} \quad (3)$$

ここで添え字の p, m はそれぞれ原型、模型を表す。式(3)より

$$n_p = n_m \left(\frac{R_p}{R_m} \right)^{1/6} \quad (4)$$

となり、模型と原型の粗度係数が関係付けられる。

6. おわりに

本研究で、1/4 円筒粗度が流れの方向の違いから効率的に粗度差を生むことが明らかとなった。勿論、すべての粗度形状を網羅して調べた訳ではないので1/4 円筒粗度がベストであるとは言いきれないが、その形状がシンプルであることや施工性を考えるとベストに近いものであろうと考えられる。

シミュレーションなどから現場に必要なとされる粗度係数差が与えられれば本研究の結果から粗度の寸法や間隔を求めることができる。片側の粗度をシフトさせて非対称とした場合からは対称の場合と比べて大きな差異は見られなかった。

最後に本研究の遂行にあたり種々助言をいただいた九州大学 中村 由行 助教授に深甚なる謝意を表します。

参考文献

(1) 足立 昭平：人工粗度の実験的研究．土木学会論文集，第 104 号，pp. 33 ～ pp. 44，1964.

(2) 川崎 昌三・他 4 名：1/4 円筒粗度を用いた一方向流れの発生に関する基礎的研究，平成 5 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 382 ～ pp. 383，1994.

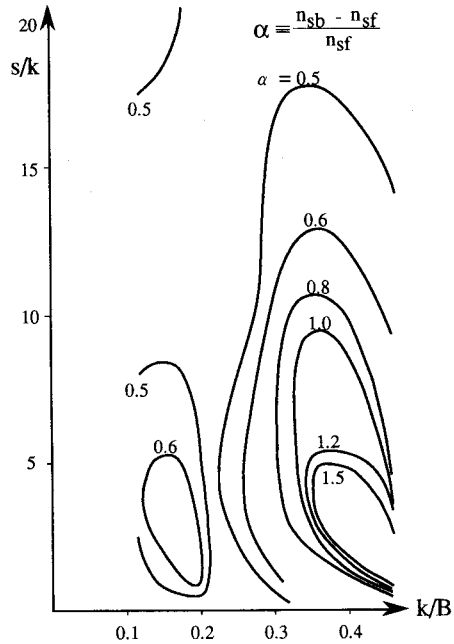


図-4.2 無次元粗度係数差