

ポンド方式を用いた水質改善手法の検討 —唐津港を対象としたケース・スタディー—

STUDY ON A WATER RESTORATION BY USING THE POND METHOD -CASE STUDY ON KARATSU PORT-

押川英夫¹・小松利光²・牧野武人³

Hideo OSHIKAWA, Toshimitsu KOMATSU and Taketo MAKINO

¹正会員 工修 九州大学大学院助手 工学研究科海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科海洋システム工学専攻 (同上)

³正会員 運輸省第一港湾建設局 (〒951-8545 新潟市白山浦1-332)

Pollutant in a stagnant water area of a semi-enclosed bay has remained a serious water environmental problem. In order to activate tidal exchange, Komatsu et al. (1993) proposed a method, "Pond Method", which can surely create a one-way flow by operating two water gates with tide. In the Karatsu Port, located in the northern part of Kyushu Island, a waterfront development on the basis of excavation of a canal has been planned. In this paper, we try to apply the Pond Method and other water restoration methods to the Karatsu Port and investigate the effects of these methods by the numerical simulation. As a result of this research, it was made clear that the ratio of the residence time by Pond Method to one by the excavation of the canal is only 3.2% and that this method is extremely effective for the field of a very weak tidal current.

Key Words : Water Restoration , Pond Method , Tidal Exchange , Residence Time , Karatsu Port

1. 緒言

内湾や漁港のような閉鎖性海域に於ける水質汚染は依然として深刻な状況下にある。本論文で主な研究対象とした佐賀県唐津港も同様の問題を抱えており、特に唐津西港では水産加工工場から排出される汚水による水質の悪化が深刻な問題となっている。そのため、佐賀県や唐津市によって水質改善対策を含めたウォーターフロント開発¹⁾が計画されている(図-1参照)。これは東港と西港の間に運河(水路)を開削し(ここは昭和20年代からの埋め立てによって陸続きになったところである)、海水交換を活発にすることで西港の水質改善を図り、同時に運河を親水空間として市民に提供することを目的としたものである。しかし東港と西港の間の水位差・位相差が比較的小さいと考えられるため、両港をつなぐだけで西港の水質が改善されるとは考えにくく、場合によっては東港の良好な水質までも損なう可能性があることが懸念されている。

このような閉鎖性海域の水質を改善するために、これまで幾つかの方法が提案されている。最近小松ら^{2),3),4)}は非対称な小規模人工構造物を海底に沈設して潮汐残差流を創造・制御することにより、閉鎖性水域の海水交換を促進する技術を提案している。この方法によれば東西両港を結ぶ運河内に人工粗度を配

置ることによって、海水交換を促進することが可能となるはずである。しかし、人工粗度は潮汐残差流によって一方向流れを発生させるため、両海域の水位差が小さく運河内の流れが元々弱い唐津港では、その効果はあまり期待できない。小松ら⁵⁾はそのような場においても確実に一方向流を生成させ、閉鎖性水域の水質改善を図る手法としてポンド方式を提案しており、北九州の洞海湾においてその効果を数値的に検討している。しかしながら、洞海湾は1次元的な取り扱いが可能な程に細長い特殊な地形の湾であることから、ポンド方式の一般的な効果を評価するためには、更なる研究成果の蓄積が望まれている。

ポンド方式に類似した海水交換の促進方法の研究として村上らの研究⁶⁾が挙げられる。この方法はポンド方式と同様に潮汐による水位変動を利用して強制的に恒流を発生させようとするものである。彼らの行った鹿児島湾の模型実験では、桜島南東部の狭窄部に開削された水路内に水門を設置し、その操作により強制的に恒流を生じさせようとするものであった。ポンド方式との相違は、彼らの方法が1つの水門を用いるのに対し、ポンド方式では複数の水門を用いてその内部を貯水池としたり、近くに新たに貯水池を設置したりして、そこに貯留した水を積極的に活用して水質改善を図ろうとする点である。

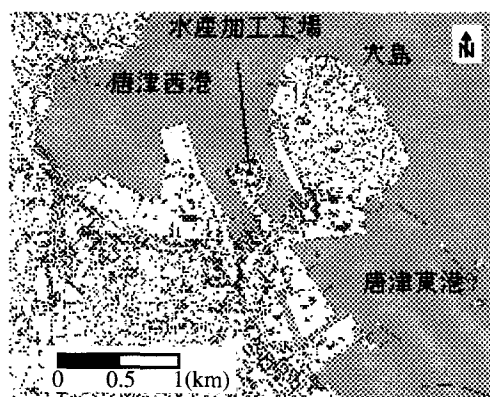


図-1 唐津港周辺地図

唐津港の場合港内水が汚染されている西港と水質の良好な東港が近接しており、また開発計画では両港が運河で結ばれることになっているため、ポンド方式が利用し易い計画となっている。そこで著者らはそのポンドを地下（地下深くというイメージではなく、単に地表面から見えない場所という程度の意味）に設置する“地下ポンド方式”として唐津港に適用することを提案したい。この場合はポンドの上の空間を公園等に自由に使えることになる。本研究は唐津港を具体的な対象海域とし、数値シミュレーションによって幾つかの水質改善手法との比較を通してポンド方式の水質改善効果を検討したものである。

2. 潮汐の現地観測

唐津港における水路開削時の水質改善効果を評価するため、また数値シミュレーションを行う際の資料とするため、唐津西港において潮汐の現地観測⁷⁾が行われた。観測は大潮（潮汐表⁸⁾によると1999年1月2日）を含むように1998年12月29日午前0時から1999年1月5日午前0時までの1週間に渡り、10分毎の水位が計測された。唐津西港と大島を挟んで隣りに位置する唐津東港には検潮所があり、そこでは定常的に連続観測が行われている。唐津東港および西港の観測地点（それぞれStn.-A, Stn.-B）は後述の数値シミュレーションのメッシュ図を兼ねた図-2に示されている。

観測結果の一例として大潮の日の約半日間の潮位の時系列を図-3に示す。但し、図中の潮位の値は唐津東港検潮所のD.L.上値⁹⁾に合わせてある。図-3から明らかなように唐津東港および西港の湾奥部では、潮位・位相ともに殆ど差は見られなかった。量的に更に詳しく検討するために西港観測期間において東西両港の潮位変動の相互相関を計算したが時間遅れは0であった。

3. 数値シミュレーションの概要

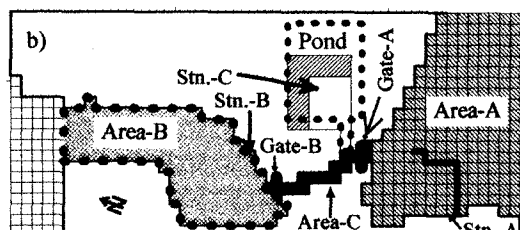
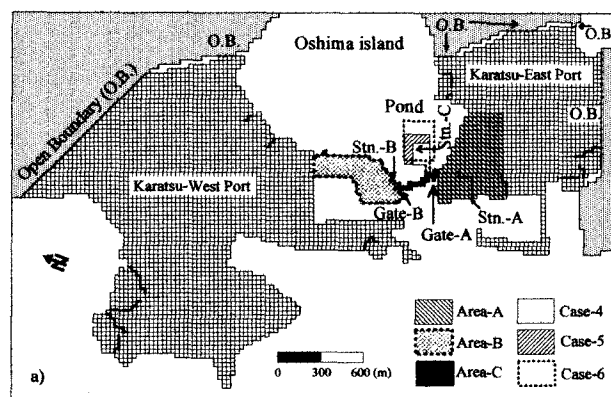


図-2 唐津港計算格子図（全体図a）、拡大図b）

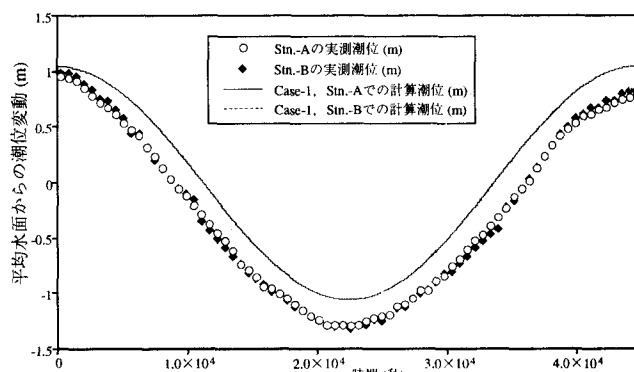


図-3 唐津港実測潮位の経時変化

(1) 検討されたケースの解説

本研究において検討されたケースを予め解説しておく。

[1] 現況(Case-1)

[2] 図-2中のArea-Cに水路を開削した場合、水路内の水深は（後述のポンド内も）全て5.2mである(Case-2)。

[3] 水路のほぼ両端をゲート（東港側をGate-A、西港側をGate-Bとする、位置は図-2参照）で仕切り、そのゲート間の水路部分をそのままポンドとしたものである（計算格子で11メッシュ）。唐津港の場合、ポンドと汚染が深刻化している西港湾奥部（Area-B）の容積比を求めると6.84%となる。ゲートの操作は2通りの方法を用いた。一つは開境界において余弦関数で与えられた M_2 潮の周期44700秒を2等分し、上げ潮時にGate-Aを開放（Gate-Bを閉鎖）してポンド内に東港の海水を導入し、下げ潮時にGate-Bを開放（Gate-Aを閉鎖）してポンド内の水を西港に送り込むものである（Case-3A）。もう一つはポンド

内に位相の遅れがある場合に備えて行われたもので、 M_2 潮の周期を4等分し、満潮時を中心とした1/4周期および干潮時を中心とした1/4周期を両ゲート閉鎖、最大上げ潮時を中心とした1/4周期をGate-Bを閉鎖、Gate-Aを開放、最大下げ潮時を中心とした1/4周期をGate-Bを開放、Gate-Aを閉鎖とした場合である (Case-3B)。今回の計算ではゲートの厚みはないものとし、ゲート操作は開境界の潮位変動に応じて瞬間的に行われるものとして計算している。

[4] Case-3のポンド (水路) の横にポンドの容量を増やすために更に矩形のポンド (貯水池) を設け (ポンドの位置は図-2参照)、ポンドの総容積をCase-3の3倍 (33メッシュ) とした場合である。唐津港の場合、水路の横に増設した貯水池は上部空間を別途利用できることから地下に建造することを提案しているが、地下貯水池と上部空間が開放された貯水池とでは計算上差異がないため、ここでは開放された貯水池として計算を行っている。この場合もCase-3と同様にゲートの操作を2通り行い、それぞれCase-4A、Case-4Bとした。

[5] Case-4と同様のポンド方式で、ポンドの総容積をCase-3の5倍 (55メッシュ) とした場合 (Case-5A、Case-5B)。

[6] Case-4と同様のポンド方式で、ポンドの総容積をCase-3の7倍 (77メッシュ) とした場合 (Case-6A、Case-6B)。

[7] 他の水質改善手法との比較のために、まず小松ら²⁾による人工底面粗度を用いた手法による検討を行った。底面粗度は開削された水路内 (Area-C) にのみ設置するとして、その働きは小松ら²⁾に倣い、流れが西港から東港に向かう際の海底摩擦係数を逆の場合の約2倍の0.0053とすることで評価した (Case-7)。

[8] 次に村上ら⁶⁾による手法の検討を行った。比較を容易にするため、水路形状、ゲートの位置、操作法はCase-3Aと同様にし、違いはCase-3Aの2つのゲートのうちの一つを常時開放したという点だけである。Case-8Aは東港側のGate-Aのみを用いたもので、Gate-Aを下げ潮時に閉鎖、上げ潮時に開放している。一方、Case-8Bは西港側のGate-Bのみを用いて、下げ潮時には開放、上げ潮時には閉鎖したものである。

[9] 最後にポンド内の位相の遅れを検討するため、最も遅れが大きいと考えられる場合として、Case-6と同地形でゲートを常時開放した場合 (即ち水路とポンドがあるだけ) の計算を行った (Case-9)。このケースは、水質改善効果はあまり期待できないため潮流計算のみ行った。

(2) 潮流・拡散シミュレーションの計算条件

唐津港に於ける水質改善策による効果を評価するために、以下の計算条件で平面2次元モデルによる潮流・拡散シミュレーションを行った。ケース間の比較を容易にするため、前述のような地形の変更、ゲート操作およびCase-7での人工底面粗度以外の計算条件は全て共通とした。

潮流計算は図-2に示す計算対象水域において、メッシュ間隔30m (この数値は開削予定の水路幅と一致)、時間格子間隔0.5秒、開境界における潮位振幅を潮汐表⁸⁾から読み取った大潮時の平均値1.05m、周期12時間25分、渦動粘性係数 $10.0\text{m}^2/\text{s}$ 、海底摩擦係数0.0026、コリオリ係数を $8.02 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ として計算を行った。渦動粘性係数、海底摩擦係数の値は、以前に唐津港の調査⁹⁾の一貫として行われている数値計算で用いられた値と同じものを採用した。

拡散計算は潮流計算と同じ計算メッシュにおいて、初期時刻に現在汚染が深刻な西港の港内全域 (Area-B) に保存性の汚染物質を一樣濃度で瞬間発生させた場合について、120周期 (約2ヵ月) 間行われた。時間格子間隔は12.5秒、分散係数はElderによって得られた $5.93u_*h$ を用いた。ここに h は水深、 u_* は摩擦速度である。

4. 計算結果とその考察

数値シミュレーションによる現況の流れの再現性を評価するには詳細な実測結果等が必要であるが、唐津港における実測データは限られており詳細な検討は不可能であった。しかし数少ない実測結果⁹⁾を基にした流向・流速の比較、前述の図-3の潮位変動の実測および計算結果の比較等から判断して、ほぼ妥当な計算結果が得られたものと思われる。

潮流計算の結果の例として、ここでは潮汐残差流の計算結果 (Case-1, 2, 3A, 7, 8A, 8B) の西港近郊の拡大図を図-4に示す。Case-1, 2, 7を比較すると、水路内に東港から西港に向かう非常に弱い 0.01mm/s 程度の残差流がみられる点を除くと、現況と水路開削時および人工底面粗度を用いた場合との間には殆ど差異は見られず、全体的に残差流は非常に小さい (これは潮流自体が小さいためであり、西港の港内では最大下げ潮時の潮流最大値でも 2.0cm/s 程度である)。またこれら3つの図に共通して見られる点として、西港湾奥部は比較的細長くなっているために、残差流の大きさとしては小さいが港内にMulti-cell構造 (小松ら⁴⁾) の3つの環流が生じていることが分かる。潮流の大きさが極端に小さかったため、本研究では更なる人工底面粗度の検討は試みなかったが、Multi-

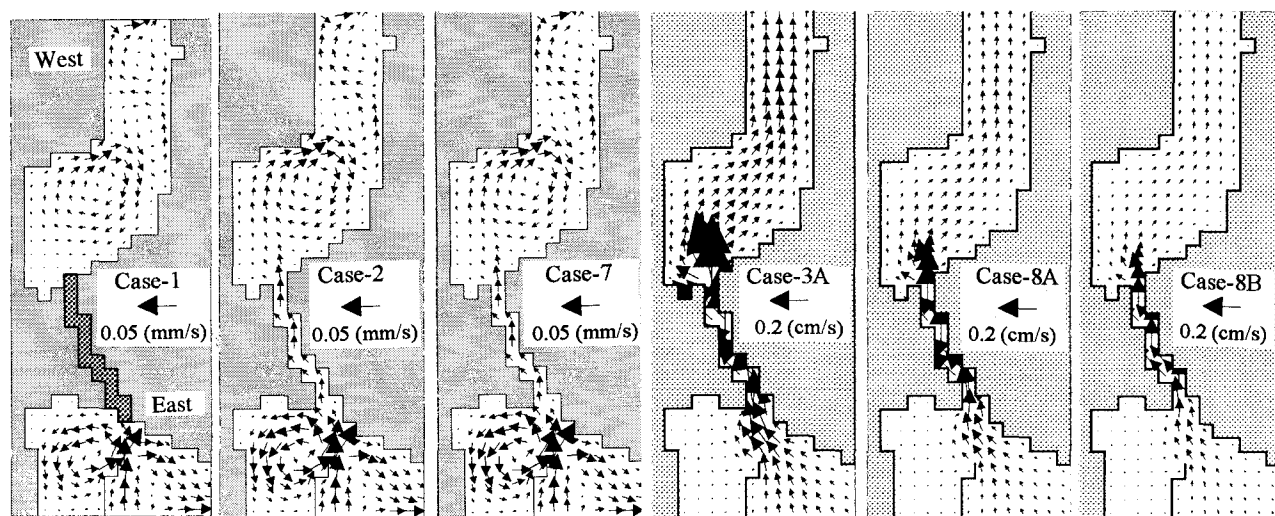


図-4 唐津港港内付近の潮汐残差流計算結果（左からCase-1, 2, 7, 3A, 8A, 8B）

表-1 ケース毎の平均滞留時間

Case No.	1	2	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B	7	8A	8B
τ_r (day)	568	434	13.7	18.8	5.30	7.25	3.51	4.85	2.70	3.81	441	21.4	31.4

cell構造の残差流が現れる場合に効果的とされる偏流型粗度（小松ら³⁾）等を併用すれば、少なくとも現在のCase-7以上には強い残差流が生成され、海水交換に寄与できるものと思われる。一方、Case-3A, 8A, 8Bの水路内および港内の残差流は著しく強化されており、ゲート操作により環流も消滅し、東港から西港へ向かう強い一方向流が生成されている。これより、ゲート操作を用いて強制的に一方向流を生成させる工法は、流れが非常に弱い唐津港でも海水交換を促進する有力な手法となることが分かる。

各ケースについて拡散物質の西港湾奥部（Area-B）での残留率の経時変化を図-5に示す。縦軸は西港湾内水の初期濃度 C_0 で正規化された平均濃度 $R(t)$ （ $\equiv C(t)/C_0$ ）である。ここで $C(t)$ はArea-Bでの平均濃度である。図-5からもポンド方式の有効性は明らかであるが、その効果をより定量的に評価するため、濃度の計算結果から西港湾奥部の平均滞留時間⁶⁾（ $\equiv \tau_r$ ）を算出した。 τ_r の算出には以下の式(1)を用いたが、拡散計算の最終周期（=120）が終了しても $R(t) > 0.02$ の場合には式(2)の残余関数⁶⁾を図-5にfittingして係数を求めて同定し、それを半無限区間数値積分することにより算出している。ここで t は経過時間、 Δt は1周期、 α , p は係数である。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} R(t) dt \approx \sum_0^{120} R(t) \Delta t \quad (1)$$

$$R(t) = \exp(-\alpha t^p) \quad (2)$$

表-1にケース毎の平均滞留時間を示す。水路開削

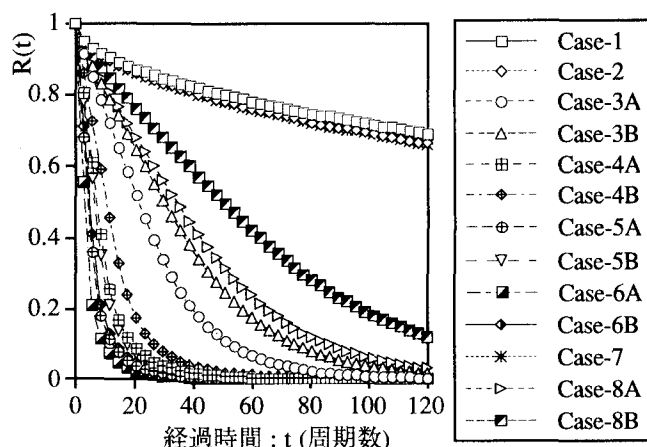


図-5 唐津西港湾奥部の汚染物質残留率の経時変化

による τ_r の低減幅は23.6%とそれ程大きくはなく、潮位の現地観測および潮汐残差流の計算結果等を併せて考えても、水路開削による水質改善効果はあまり望めないことが分かった。

Case-2とCase-7の滞留時間を比べると1.6%（7日）程度Case-2の方が短くなっており、この結果では人工底面粗度を用いた方が海水交換能力が低くなるという結果が出ているが、これはfittingによって求められた残余関数の精度の低さに起因しており、実際には図-4の潮汐残差流の結果からも推測されるようにそれらの効果には殆ど差はないものと考えられる。

次にゲートを用いることによる効果を検討する。まずCase-3Aの τ_r はCase-2のそれと比較するとわずかに3.2%となっており、ポンド方式の海水交換能力が水路開削だけの場合のその30倍以上にも及んでいることが分かる。また8Aおよび8BをCase-3Aと比較すると、 τ_r の値はそれぞれ3Aのその1.6, 2.3倍となっ

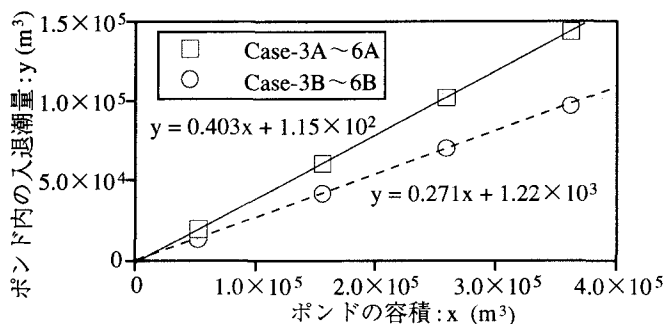


図-6 ポンドの容積と入退潮量の関係

ている。本ポンド方式ではゲートの数が2倍になっていることから、村上ら⁹⁾の提案している工法とポンド方式はそれらの効果がゲート数にほぼ比例するものとなっている。

ポンド方式の海水交換能力は実際にはポンド内の入退潮量によって決まるが、入退潮量には位相の遅れや潮位変動の減衰等も関係しており、その厳密な算定には数値計算が必要である。実際にポンド方式の適用計画を検討する際には入退潮量の代わりに簡単にポンドの容積で代用できると好都合である。そこでポンドの容積と入退潮量の関係を調べてみる。ここではStn.-C (図-2参照) の最大および最小潮位時のポンド内の海水体積の差を入退潮量と定義して、ポンドの容積との関係を示したものが図-6である。図中には直線の近似式を併せて表示してある。これよりポンドの容積と入退潮量はほぼ比例することが分かる。これは今回の条件下ではポンド内の位相の遅れや潮位変動の減衰は大局的には無視できることを意味する。従って本研究でも、入退潮量ではなくポンドの容積で代用して考察を進めることとする。

西港湾奥部に対するポンドの容積の比と平均滞留時間の関係を図-7に示す。図中には計算結果の近似曲線も併せて表示してある。これより滞留時間は容積比のおよそ1乗で減少することが分かる。また、西港の海水交換促進の面から比較すると、Case-3A~6Aの方がCase-3B~6Bよりも優れている。

次に水質が良好な東港および開削水路内 (Area-A, C) へ西港から流出した汚染物質量の初期発生量に対する割合 ($\equiv E(t)$) を図-8に示す。但し、Area-Aより外海側の濃度は極端に低いため、 $E(t)$ は水路内および東港全域の汚染物質量を代表していると考えても支障はない。図中には、Case-2,7では全周期の計算結果、それ以外では25周期以降の計算結果に対して求められた近似曲線を併せて記入している。まず水路は開削するがゲート操作を行わないCase-2,7の場合には、東港への流出量はほぼ経過時間のべき乗則に従って増加している。但、本計算では初期時刻以外には汚染物質の発生はないため、経過時間が長くなるといずれば $E(t)$ の曲線は減少傾向に向かうはずであ

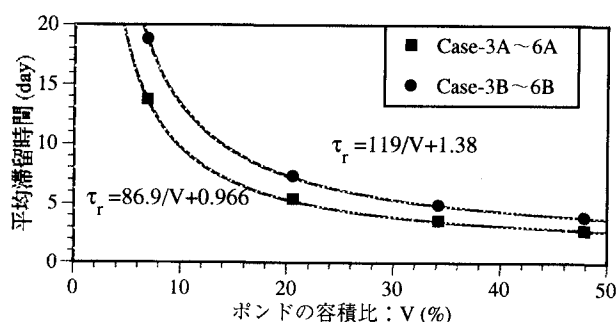


図-7 ポンドの容積比と滞留時間の関係

る。次にゲート操作を施した場合 (図-8中のCase-2,7以外) には、初期に西港からの急激な汚濁の侵入により汚染物質の流出量はしばらく変動した後、経過時間のほぼ指数乗に従って減少していくことが分かる (但し、村上らの工法はポンド方式より指数乗則からのズレが大きい)。従って、ポンド方式および村上ら⁹⁾の方法は汚染物質の流出の抑制という面でも極めて有効な工法であることが分かる。

ここで位相の遅れについて、もう一度検討してみる。最大のポンド容積をもつことから位相の遅れが最も大きくなるとされるCase-6A, 6Bおよび比較のためにCase-9の潮位変動の時系列を図-9に示す。これより開境界の潮位とStn.-AおよびStn.-Bの潮位との間には常時遅れは殆どないが、ポンド内とポンド外の間の下げ潮時の位相はCase-6A, 6Bでは約820秒の遅れで、Case-9では約300秒の遅れであることが分かる。即ち、下げ潮時の位相の遅れに対してはポンドの設置よりもゲート操作の影響の方が大きくなっている。一方、上げ潮時にはCase-6A, 6B, 9のStn.-Cの各々の潮位は重なっており、ゲート操作による遅れはみられない。ポンド方式において干潮時刻が遅れ、上げ潮時の潮位の立ち上がりが急になる (従って満潮時刻はあまり変わらない) という点は、河口域の潮位変動⁹⁾と似た傾向となっている。この点を踏まえてCase-6Aと6Bの違いを考察してみる。Case-6Aと6Bの比較 (Case-3~5も同様) の検討は本来、満潮時にポンド内潮位に位相の遅れが生じた場合、西港からポンド内へ汚染水の逆流が起きることを危惧して行われたものであった。しかしながらCase-6Aでは、満潮時の遅れが殆どなくまたその付近の潮位の時間変化が極端に小さいために、その時間帯での流入は殆どない。一方、Case-6Bでは上げ潮時にゲートAが閉鎖される際 (図-9の39112.5秒)、ポンド内は若干水位が低いところで閉鎖され、その後下げ潮時にゲートBが開放される際に (図-9の5587.5秒)、その時刻に生じている潮位差によってポンド内に西港の汚染水が流入している。図-7で示されたように、西港の海水交換促進という面で明らかにCase-6AはCase-6Bより優れているが、東港への汚染水の流出の抑制という

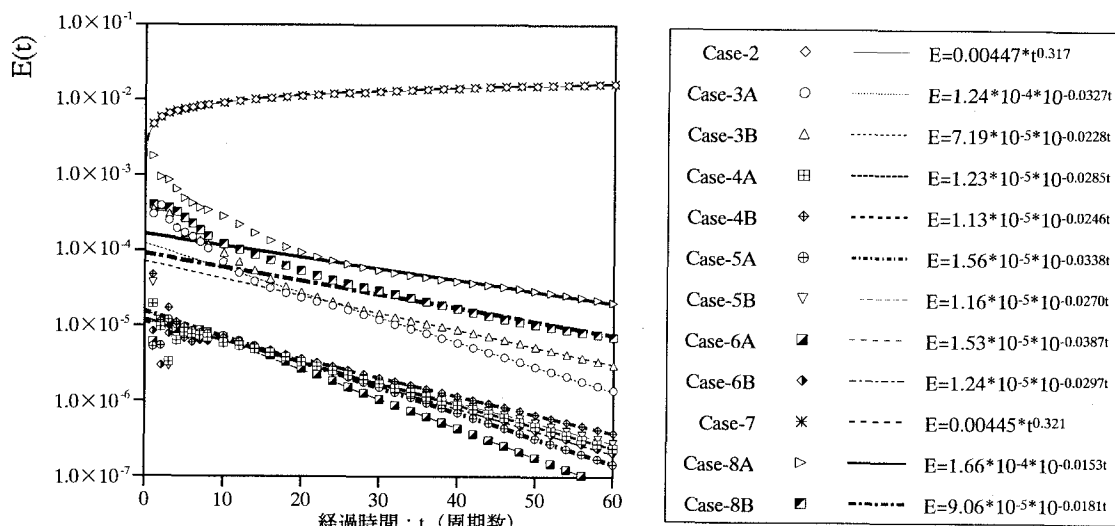


図-8 開削水路内および唐津東港への汚染物質流出率の経時変化

面でもCase-6Aの方がCase-6Bより優れている (Case-3~5も同様)。

最後にCase-8Aと8Bを比較する。西港内の汚染物質の低減という面ではCase-8AのR(120)はCase-8Bのその26%となっており、Case-8Aの方がはるかに優れていることが分かる (これは図-4中で残差流の強さがCase-8Aの方がCase-8Bよりも強いことに対応している)。一方、東港への汚染物質の流出の抑制という面では、Case-8BのE(120)はCase-8Aのその31%であり、Case-8Bが優っていることになる。

5. 結論

本研究では水路開削を伴うウォーターフロント開発が計画されている唐津港において、ポンド方式を用いた水質改善手法の効果を数値シミュレーションを中心として検討した。本研究によって得られた知見をまとめると以下のようである。

- 1) 流れが弱く、また東西両港の水位差・位相差が殆ど生じない唐津港では、東港と西港の間に水路を開削するだけでは大きな水質改善効果は期待できない。
- 2) 唐津港においては、計画されている開削水路両端部に2つのゲートを設けてその中をポンドとして利用するだけでも、西港内の汚染物質の滞留時間を水路開削だけの時の30分の1以下にすることが可能である。
- 3) ポンド方式は潮汐の干満差を利用して、一方向に強制的に導水を行うため、水を送る側の水域の良好な水質を保全するという観点からも非常に優れている。

謝辞：本研究を行うにあたって運輸省第四港湾建設局唐津港湾工事事務所の方々に多大な御協力を頂い

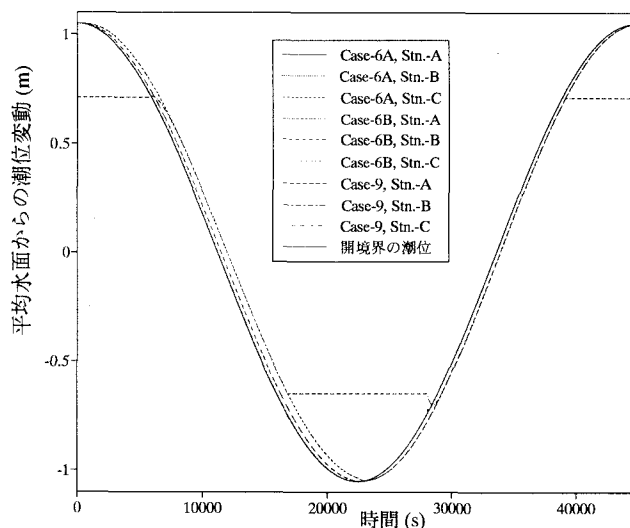


図-9 潮位変動の時系列 (Case-6A, 6B, 9)

た。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐賀県, (株)エコー: 唐津港ウォーターフロント整備構想調査 海水交換効果検討調査 報告書, 1994.
- 2) 小松利光ら: 方向性を持つ底面粗度を用いた潮汐残差流の創造と制御, 水工学論文集, Vol.41, pp.323-328, 1997.
- 3) 小松利光ら: 流れを偏向させる働きをもつ偏流型粗度を用いた潮汐残差流の創造, 水工学論文集, Vol.42, pp.577-582, 1998.
- 4) 小松利光ら: 細長い内湾において潮汐残差流が物質輸送に果たす役割, 水工学論文集, Vol.42, pp.589-594, 1998.
- 5) 小松利光ら: 洞海湾の水質環境改善策と予測シミュレーション, 水工学論文集, Vol.37, pp.277-284, 1993.
- 6) 村上和夫ら: 強制循環流による海水交換の促進について, 第29回水理講演会論文集, pp.341-346, 1985.
- 7) 第四港湾建設局唐津港湾工事事務所他: 唐津港潮汐観測観測成果簿, 1999.
- 8) 海上保安庁, 平成11年 潮汐表 第1巻, 467号, pp.224-226, 1998.
- 9) 例えば, 宇野木早苗著: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.126-129, 1993.

(1999.9.30受付)