

有明海の海水交換の時間スケールに関する 数値実験的検討

朝位孝二 (社会建設工学科) 佐藤秀樹 (東亜建設工業)

Numerical Study on Time Scale of Water Exchange in the Ariake Sea

Koji ASAI (Department of Civil and Environmental Engineering)
Hideki SATO (TOA CORPORATION)

The Ariake Sea Japan is surrounded by Fukuoka, Kumamoto, Saga and Nagasaki prefecture, and has a huge tidal flat area with a very high productivity. Nowadays, the water environments in the Ariake Sea have been worsened by various factors such as the reclamation of the large tidal flat, a decrease in the tidal height of the outer sea, an increase of the mean water depth and so on. It is suspected that the embankment in the Isahaya bay is one of the main factors. The effect of the existence of the embankment in the Isahaya bay on the seawater exchange in the Ariake Sea is investigated numerically in this paper. The negative influence of the embankment in the Isahaya Bay on the water exchange can be recognized under the numerical conditions used here. However, its influence is not so much large quantitatively.

Key Words: *the Ariake Sea, water exchange, the embankment in the Isahaya Bay, numerical simulation*

1. はじめに

近年、有明海の潮流流速の減少、赤潮の大規模化・多発化などが社会問題となっている。特に諫早湾干拓事業に伴う潮受け堤防の影響を問題視する声は大きい。したがって様々な行政機関、研究機関がこの問題を多面的に取り組んでいる。

諫早湾の潮受け堤防の設置によって潮位振幅が減少し、その結果潮汐流も減少したことが農水省の観測¹⁾や様々な数値実験^{2), 3)}から明らかになっている。一方、外海の潮位振幅の減少や平均海面の上昇など外海的要因も指摘されている。したがって潮位振幅の減少に対する諫早湾潮受け堤防と外的要因の寄与率がどの程度なのかに関心が集まり、この種の研究成果が多く出されている^{4), 5), 6)}。統一的な見解が無いようであったが近年、藤原・経塚・濱田ら⁷⁾が精密な数値実験により、大浦での M_2 潮位振幅の

減少は潮受け堤防の影響が約 25%で外海的影響は 75%であるという結果を報告している。また潮受け堤防の M_2 潮位振幅への影響は場所によって異なることも指摘した。

潮受け堤防の潮汐に及ぼす影響は明らかになってきた。しかしながら、有明海の物理環境に与える物理的要因は地形形状、潮汐（または潮流）の他に、水温、気温、河川流入量、塩分濃度、風、日射など多岐にわたるため、物理的要因と有明海の物理環境の関係を明らかにすることは非常に困難である。さらに水質環境は流入栄養塩、低質の状態、物質循環や生態系の構造などが関与するため、これも議論が難しい。しかしながら、有明海の物理環境、水質環境の全容を把握する試みも行われており、特に九州大学大学院の小松らの学際的なグループが 2001年⁸⁾と 2003年⁹⁾に潮位、潮流、水温、塩分濃度、クロロフィルなどの一斉観測を行っている。堤ら¹⁰⁾は梅雨前線や秋雨前線による豪雨の後

の大流量の河川流入による塩淡水層の発達および大量の栄養塩の供給が大規模な赤潮の発生原因になっていることを指摘している。

さて、物理環境と水質環境の関係を考える上で重要なのは海水交換であろう。「潮受け堤防の建設により潮位振幅および潮流流速が減少したため海水交換能力が低下した。その結果、停滞水域の規模が大きくなり水質汚濁が進行し、さらに赤潮が多発した。」というシナリオは考えやすい。一方、柳・阿部¹¹⁾は1990年～2000年の塩分観測データと河川流量データを解析し、近年の潮位振幅の減少により鉛直混合が抑制され河口循環流が強くなり、海水交換は良くなっていると指摘している。しかしながら、潮位振幅の減少が海水交換に与える影響については未だ明快になっているとは言えないであろう。

本論文は潮受け堤防による諫早湾の海域面積の減少が有明海の物理環境に与える影響、特に海水交換に及ぼす影響を考察するものである。海域面積の減少の影響だけを抽出するために、開境界条件、河川流入量は一定にし、潮受け堤防の有無による海水交換能力の変化を検討することを試みた。

2. 解析手法

2-1 基礎方程式

基礎方程式は次に示す非圧縮性流体の連続の式、ブシネスク近似と静水圧近似を適用した運動方程式および水温、塩分濃度の保存則である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial z} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial z} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial z} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (6)$$

ここで、 u, v, w ：それぞれ x, y, z 軸方向の平均流速成分、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 ρ_a ：基準密度、 g ：重力加速度、 f ：コリオリ係数、 T ：水温、 S ：塩分濃度、 A_H ：水平方向の渦動粘性係数、 A_V ：鉛直方向の渦動粘性係数、 K_H ：水平方向の拡散係数、 K_V ：鉛直方向の拡散係数である。

座標軸は水平方向に x, y 軸をとり、鉛直上向きに z 軸をとる。また z 軸の原点は平均水面の位置にとっている。

数値計算は日本造船学会海洋環境研究委員会によって開発された3次元流動解析コードである MEC (Marine Environmental Committee) モデル¹²⁾を用いた。このコードはインターネット上で公開されている。

2-2 計算条件

島原湾は、湾口の早崎瀬戸から湾奥の住之江に至る全長約 90km の湾である (図-1 参照)。



図-1 計算領域

表-1 河川流入量

	本明川	六角川	嘉瀬川	筑後川	矢部川	菊池川	白川	緑川	塩田川
流量(m ³ /s)	1.05	2.56	10.21	56.97	8.65	22.69	20.34	25.08	5.11

表-2 計算パラメータ

水平方向差分間隔[m]	500
鉛直方向分割数	25
差分時間間隔[sec]	5
開境界潮位振幅[m]	0.74
コリオリパラメータ[rad/sec]	7.921×10^{-5}
海域水温基準値[C]	19.6
海域塩分基準値[psu]	34.2
河川水水温基準値[C]	16
河川水塩分基準値[psu]	0
海底摩擦係数	0.0026
水平方向渦動粘性係数[m ² /sec]	50
水温に関する水平方向乱流拡散係数[m ² /sec]	10
塩分に関する水平方向乱流拡散係数[m ² /sec]	10
鉛直方向渦動粘性係数[m ² /sec]	1.0×10^{-3}
水温に関する鉛直方向乱流拡散係数[m ² /sec]	1.0×10^{-5}
塩分に関する鉛直方向乱流拡散係数[m ² /sec]	1.0×10^{-5}
アルベド	0.091
海面の放射率	0.97
全天日射量[W/m ²]	104.31
降水量[mm/hr]	0.1174
風速[m/sec]	0
気温[C]	10.4

狭義の有明海は、島原湾のうち三池港より奥の海域を指すが、最近では島原湾そのものを有明海と呼ぶことが多いので、本論文においても島原湾全体を有明海と呼ぶこととする。計算対象領域は示す有明海、諫早湾、橘湾を含む領域である。八代海は計算領域に含めていない。開境界は樺島水道及び牛深間に設定した。

水平方向計算格子間隔は500mの一定間隔格子を用いた。鉛直方向は不等格子間隔で25分割し、水表面から5m, 1m, 1m, 1m, 1m, 1m, 1m, 2m, 2m, 2m, 2m, 3m, 3m, 4m, 4m, 5m, 5m, 10m, 10m, 10m, 10m, 10m, 10m, 10m, 10mと設定した。時間差分間隔は5secである。

河川流入量は有明海に注ぐ8本の一級河川と湾奥の二級河川である塩田川を考慮した。諫早湾締め切りに伴い調整池内に溜まった淡水を月に20回程度の割合で北部、南部排水門を開門することで排水しているが、排水門を閉じた状態を想定した為、締め切り後の本明川に関しては今回考慮していない。河川流量の対象年月日は近年有明海において赤潮が発生し海苔に被害が出始める10月11月の2ヶ月平均の流量を用いた。なお、年に関しては2001年を対象とし

ている。流量を表-1に示す。

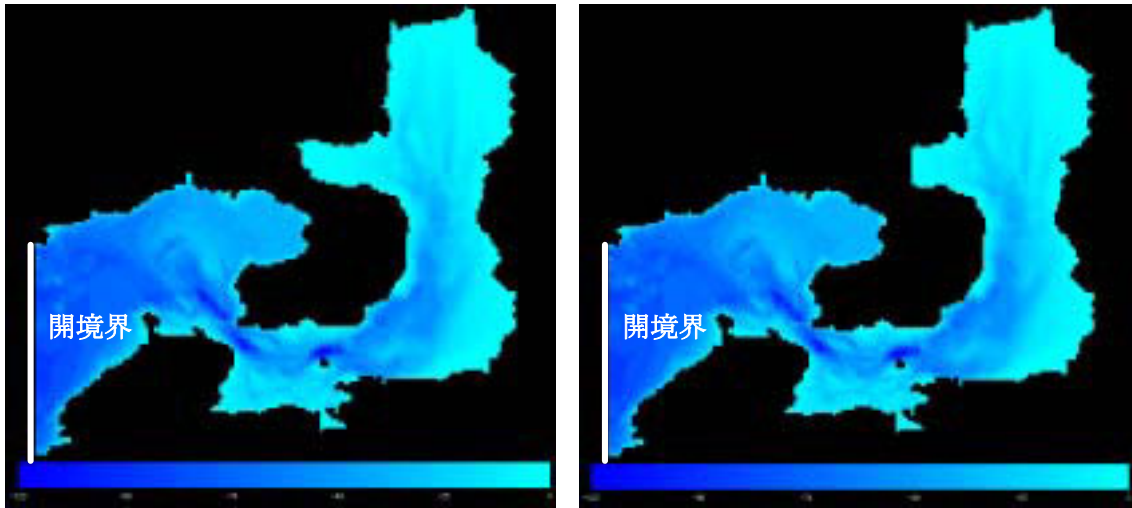
潮汐は各分潮の中で最も卓越している主太陰半日周期(M₂潮)だけを考慮した。開境界に与える潮位振幅は予備的数値実験から試行錯誤で求めた。その結果、最も海域内の実測値と整合性が良かった0.74mを採用した。

その他のMECモデルの使用にあたって必要とされるパラメータを含めて表-2に計算パラメータをまとめて示す。なお、表中の全天日射量、降水量、気温は2001年10月11月の平均を採用した。

本研究では諫早湾潮受け堤防の影響だけを検討するために、初期条件と境界条件を同一にして潮受け堤防が存在しない場合の計算と存在する場合の計算を行った。図-2に示すように締め切り前をCase-1、締め切り後をCase-2とした。Case-2においては潮受け堤防内を考慮しないため、そこは陸地とした。なお、本研究では干潟による汀線の移動は考慮していない。

3. 計算結果の妥当性

3-1 M₂潮潮位振幅の観測値との比較

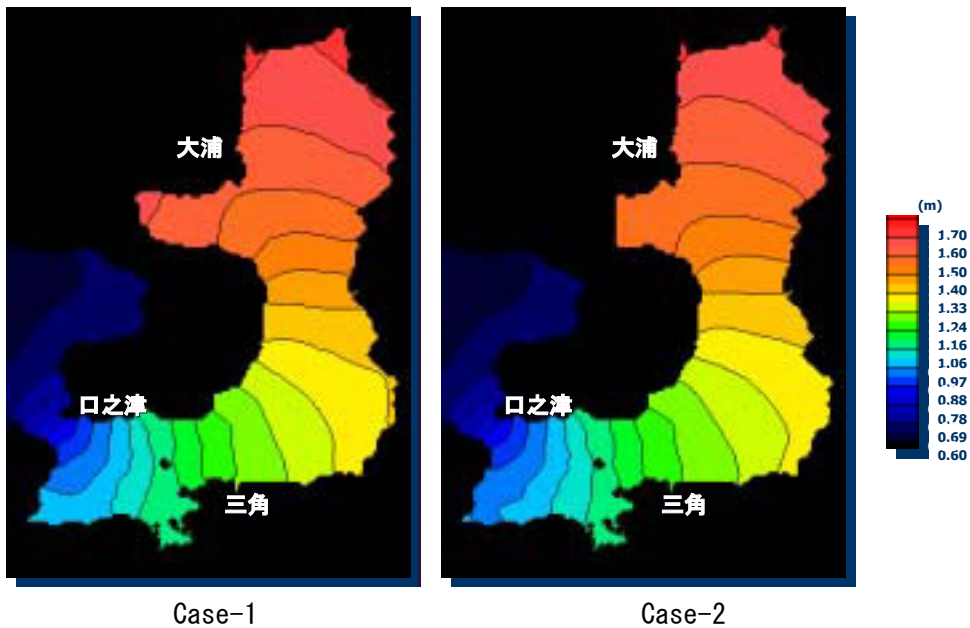


諫早湾締め切り堤防なし (Case-1) 諫早湾締め切り堤防あり (Case-2)

図-2 有明海の形状

表-3 M_2 潮振幅 (m) の比較

検潮所	Case-1		Case-2	
	観測値	計算値	観測値	計算値
口之津	1.01	0.99	0.99	0.99
三角	1.22	1.22	1.19	1.21
大浦	1.56	1.56	1.51	1.53



Case-1

Case-2

図-3 M_2 潮振幅の等値線図

計算結果の妥当性を検討するために、口之津、三角、大浦で観測された M_2 潮位振幅と計算値の比較を行う。潮受け堤防が存在しない地形における湾奥付近の大浦の 1981 年に観測された M_2 潮位振幅を目安として、まず Case-1 においてこの観測値に一致するように開境界の潮位振幅を設定した。次に潮受け堤防の影響のみを考慮できるように開境界条件を同じにして計算を行

い、2001 年の観測値と比較を行った。その結果を表-3 に示す。

Case-1 の大浦については、これに合うように開境界条件を決めたので、再現性は当然良い。三角においても再現性は良好である。湾口の口之津では 2cm 程度過小評価されている。いくつかの数値実験の結果、湾口で潮位振幅を合わせると湾奥で合わなくなり、湾奥で合わせると湾

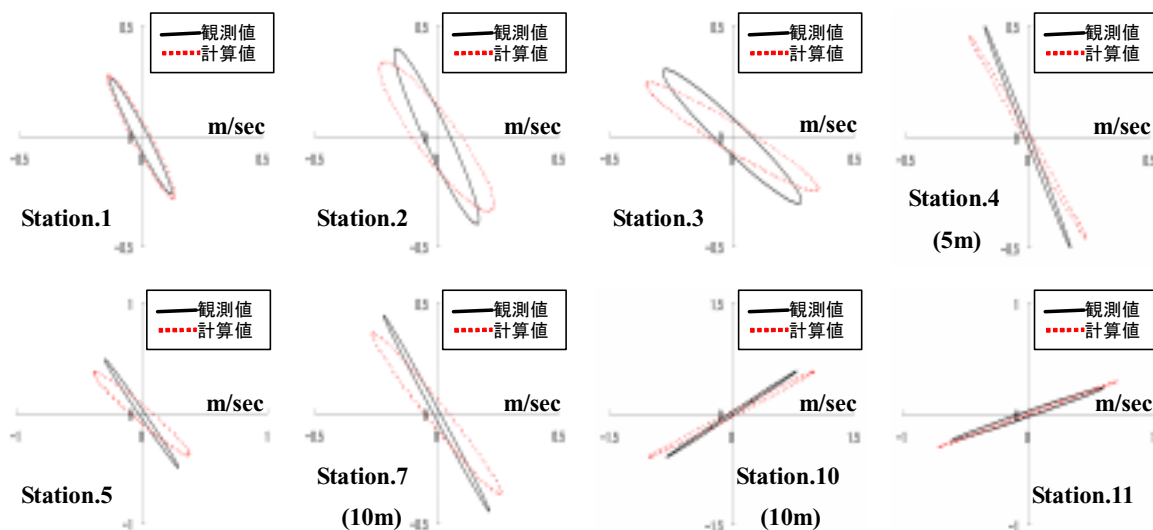


図-4 M2 潮潮流楕円の観測値と計算値 (Case-2) の比較

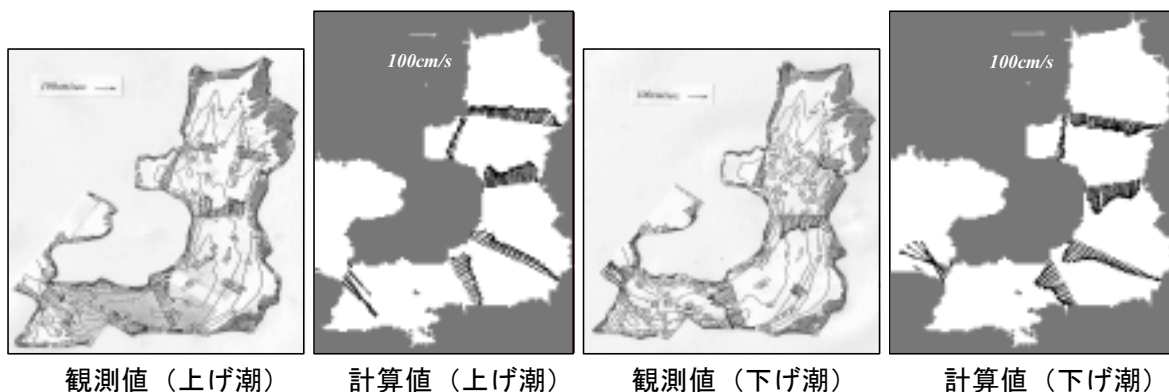


図-5 表層近傍の流速ベクトルの観測値と計算値 (Case-2) の比較
観測値の図面は文献 8) から抜粋

口で会わなくなることが分かった。また、藤原ら⁷⁾も詳細な計算格子で有明海の流動計算を行っているが、彼らの計算においても湾内全体で潮位振幅が観測値に一致しているわけではない。有明海全体で潮位振幅を合値させることは困難である。

次に締め切り後の潮位振幅について考察する。Case-2 の計算値は潮受け堤防の影響で大浦、三角の潮位振幅が減少している。実際の潮位振幅の減少は潮受け堤防だけでなく平均海面の上昇や外海的要因の影響も含んでいる。これら影響を本計算では取り入れていないので定量的には観測値と合っていない。

図-3 に M₂ 潮振幅の等値線を示す。潮受け堤防の影響に伴い特に諫早湾以北の湾奥では潮位振幅が減少傾向になる事がわかる。

4-3 潮汐流の観測値との比較

計算結果の妥当性のもう一つの検討材料とし

て、M₂ 潮潮流楕円を考える。比較の対象となる観測結果¹³⁾は海上保安庁水路部により 2001 年 5 月に図-1 に示す Station1~Station12 の水深 3m において計測された値を用いた。2001 年は締め切り後であるので Case-2 の計算結果と比較を行う。その結果の一部を図-4 に示す。観測と厳密に一致していない箇所もあるが、全く異なる傾向を示しているわけではなく、概ね観測値と一致していると判断して良いであろう。

次に、流況に関して観測値と計算値の比較を行う。2001 年 10 月 16 日に行われた有明プロジェクトにおいて観測された表層近傍の流速ベクトル⁸⁾と Case-2 の計算結果の比較を図-5 に示す。計算値は M₂ 潮だけで駆動される流れであるが、上げ潮時・下げ潮時共に良好な一致を示している。有明海では M₂ 潮が卓越していることが分かる。特に島原半島に沿う強い流れが再現できている。

本数値計算による潮流の再現性も比較的良好

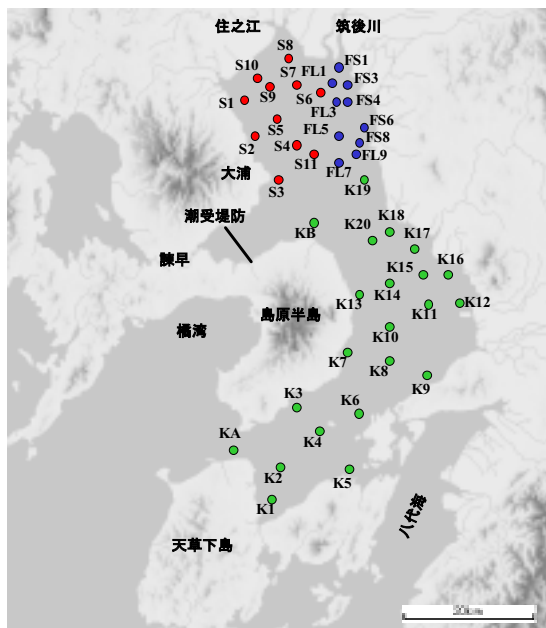


図-6 塩分観測地点

であることが分かる。

4-3 塩分濃度の観測値との比較

この節では密度場の再現性について検討する。図-6 に示す福岡、佐賀、熊本の海域における計 43 地点で観測された表層と底層の塩分濃度を計算値と比較する。観測値は 1997 年から 2001 年までの 10 月、11 月の平均値である。計算値は諫早湾締め切り後の Case-2 の結果を用いた。図-7、図-8 はそれぞれ表層、底層における観測値と計算値の塩分の比較を示したものである。これらの図から概ね観測値の 5 年平均と傾向性は一致している。

以上のように計算結果の妥当性を検証する目的で潮位振幅、潮流楕円、流況、塩分濃度について観測値と計算値の比較を行った。定量的・定性的に一致していない箇所もあるが、総体的には計算結果は妥当性があると判断できる。

数値モデルに実現象を規定するパラメータを厳密に考慮することは当然不可能であり実現象との完全な合致は困難さがある。また本研究では潮受け堤防の影響の素過程を考察するものなので、この計算条件で議論を進めていくことにする。

4. 解析結果と考察

4-1 流速の減少

この節では締め切りに伴う流速の変化について

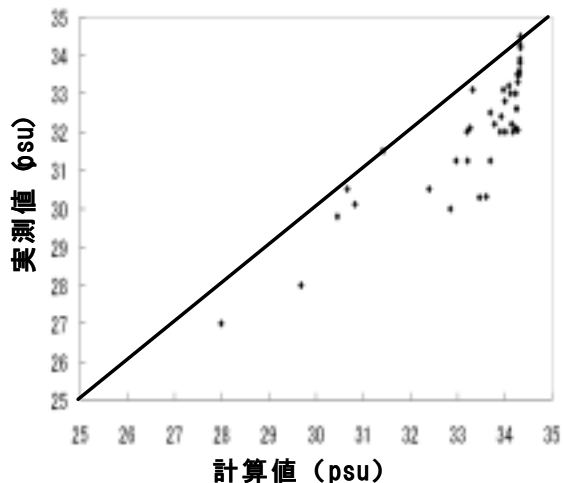


図-7 表層の塩分濃度

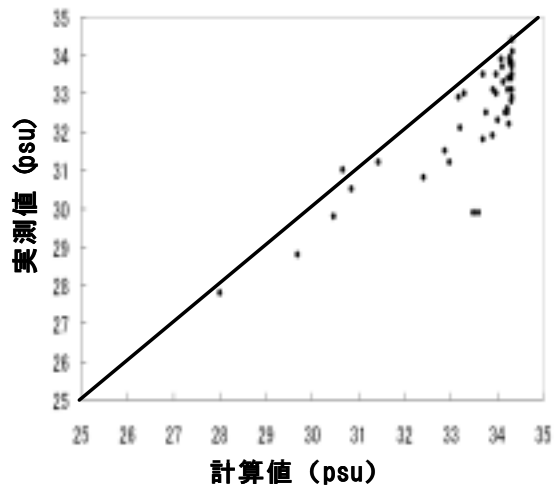


図-8 底層の塩分濃度

て検討する。西ノ首ら¹⁴⁾は島原町沖 2km 付近において表層付近の流速が諫早湾締め切り後、約 21~27%減少していることを報告している。そこで図-1 に示す島原町沖約 2km の地点に当たる P.a における 1 潮汐間の流速時系列が締め切り前後でどのように変化しているのかを調べた。図-9 に 1 潮汐間の流速の時系列を示す。また P.a 点のみならず St.1~St.12 においても同様の検討を行った。代表例として St.1, St.6, St.12 での結果も図-9 に示している。なお、図-9 は流速の絶対を示したもので流速の大きさだけを議論する。

図-9 の (a)は P.a の表層を示している。この地点では締め切りに伴う最大流速の減少率は 9%程度である。西ノ首らの結果と定量的に大きく異なるが、これは数値計算では M₂ 潮だけを考慮していること、外海の潮位振幅の減少や平均海面上昇を考慮していないためと思われるが、

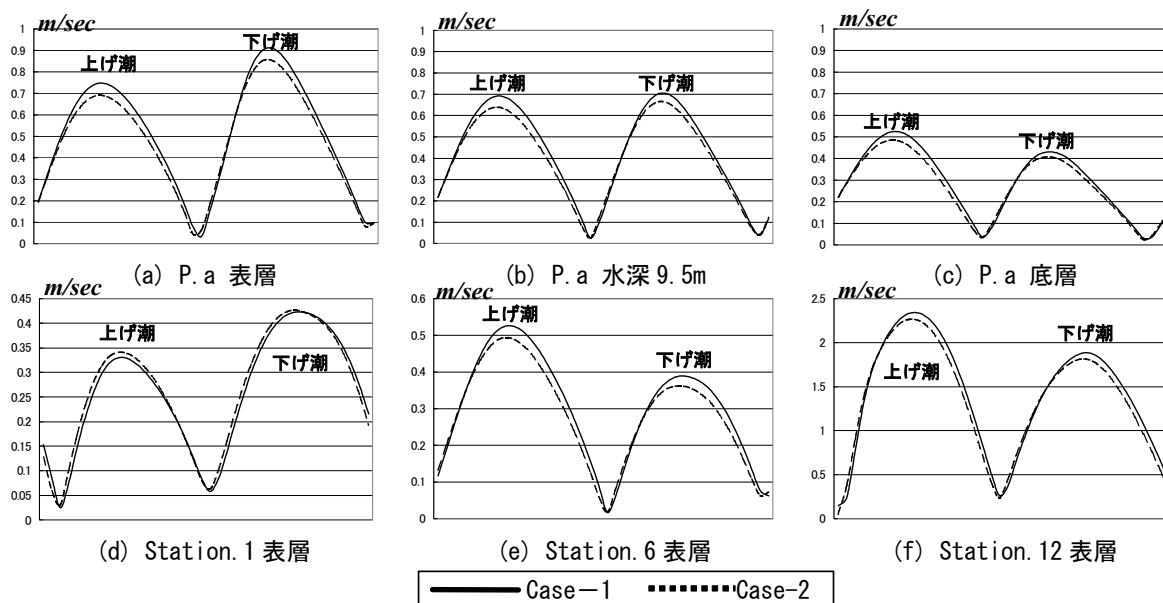


図-9 流速の1潮汐間時系列

その他にも計算上考慮していない現象が含まれていることも考えられる。いずれにせよ、この地点の流速は締め切り堤の影響により減少したことは明らかである。

St.1では若干ながら締め切り後に全層で流速が増加していた。その他の地点では締め切り後に全層で最大流速が減少していたが、その減少割合は諫早湾付近で9%程度、湾央付近(St.6)で6.5%程度、湾口付近(St.12)では3.5%程度であった。

最大流速の増加が見られる場所も一部には存在するものの、潮受け堤防設置にともなう有明海の地形変化の影響による最大流速の減少が広い範囲でまた全水深にわたって確認された。ただし、本計算条件の下での減少率は定量的にはあまり大きくはない。

4-2 海水交換能力

潮受け堤防による地形変化が海水交換にどのような影響するのかを検討するために、粒子移動計算による海水交換能力の評価を行った。仮想粒子の配置位置は停滞性水域になりやすい湾奥に着目し図-10の(a)に示すように設定した。粒子配置数は1セル当り16個とし、水平・鉛直方向に配置し合計で40320個である。この計算条件をRUN1とする。また有明海全体の海水交換能力を検討するために図-11の(a)示すように湾口の口之津付近を境界として有明海全体に粒子を配置した。粒子配置数は1セル当り4個と

し、水平・鉛直方向に配置し合計でCase-1は56797個、Case-2は56629個である。この計算条件をRUN2とする。RUN1, RUN2ともに、流動場が安定した時点で仮想粒子を満潮時に放出し、放出後60潮汐間計算を行った。

RUN1における粒子の挙動を図-10に示す。上段はCase-1、下段はCase-2の結果である。粒子挙動の可視化では潮受堤防の有無による違いはほとんど判別できない。次に粒子の軌跡を考察する。潮受堤防の有無に関わらず湾奥に投入された仮想粒子の大半は潮流によって諫早湾北部を通過し、一旦諫早湾内に運ばれ湾内から諫早湾口南部に沿いながら島原半島の東岸沿いに排出されている。諫早湾は有明海の湾奥部と湾央部の水の入れ替えを行う海水交換のポンプ的役割を果たしており、諫早湾口南部から島原半島の東岸沿いに形成される速い流れがポンプ役として大きく寄与しているとの見解がある¹⁵⁾。本研究においても諫早湾のポンプ的機能を確認することができた。ただし、締め切り堤が、諫早湾のポンプとしての機能を弱めたかどうかは後で議論する。

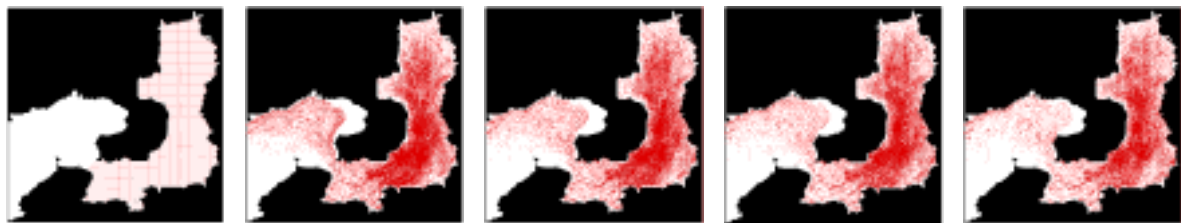
次にRUN2の場合の粒子挙動を図-11に示す。この場合においても潮受堤防の有無による違いは明確には現れなかったため図-11にはCase-2の結果だけを示している。橋湾を経由して排出されている様子がわかる。

定量的に海水交換能力を評価するために式(1)を用いて残留率 R を算出した。



(a) 初期条件 (b) 10 潮汐後 (c) 15 潮汐後 (d) 20 潮汐後 (e) 30 潮汐後

図-10 粒子の挙動 (RUN1, 上段 : Case-1, 下段 : Case-2)



(a) 初期条件 (b) 10 潮汐後 (c) 15 潮汐後 (d) 20 潮汐後 (e) 30 潮汐後

図-11 粒子の挙動 (RUN2)

$$R(\%) = \frac{\text{初期配置領域に残留する粒子数}}{\text{初期配置粒子数}} \times 100 \quad (1)$$

残留率が低いほど海水交換は良いことを意味する。RUN1の結果を図-12に、RUN2の結果を図-13に示す。両図とも縦軸は残留率を示し、横軸は潮汐を示す。

RUN1では10潮汐から50潮汐間で若干Case-2のグラフがCase-1のそれよりも高い値を示す。つまり潮受け堤防の影響によりわずかではあるが海水交換能力が低下していることを示している。またRUN2においても同様に若干ながらCase-2のグラフがCase-1のそれよりも高い値を示している。本数値実験の計算条件下では微小ではあるが潮受け堤防の影響で海水交換能力が低下することが分かった。

4-3 潮汐残差流エネルギー

潮受堤防の影響で流速の変化が発生している事を確認したが、この影響で湾の性質を示す潮汐残差流(潮流の一潮汐平均流)が変化していることが示唆される。また、潮汐残差流エネルギーは海水交換能力に密接な関係がある¹⁶⁾。そこで、諫早湾近傍の表層におけるCase-1と

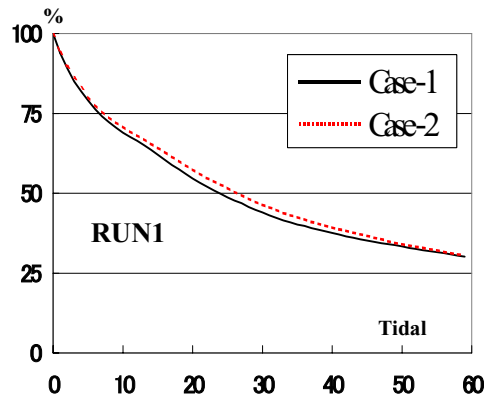


図-12 粒子の残留率 (RUN1)

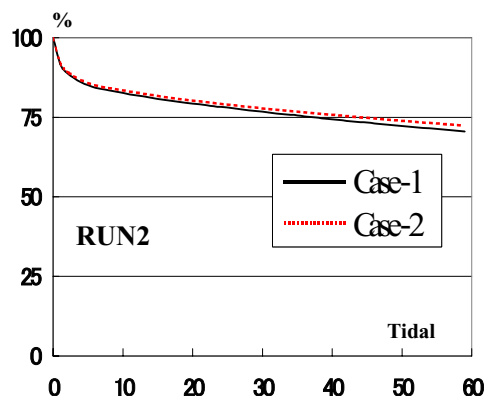


図-13 粒子の残留率 (RUN2)

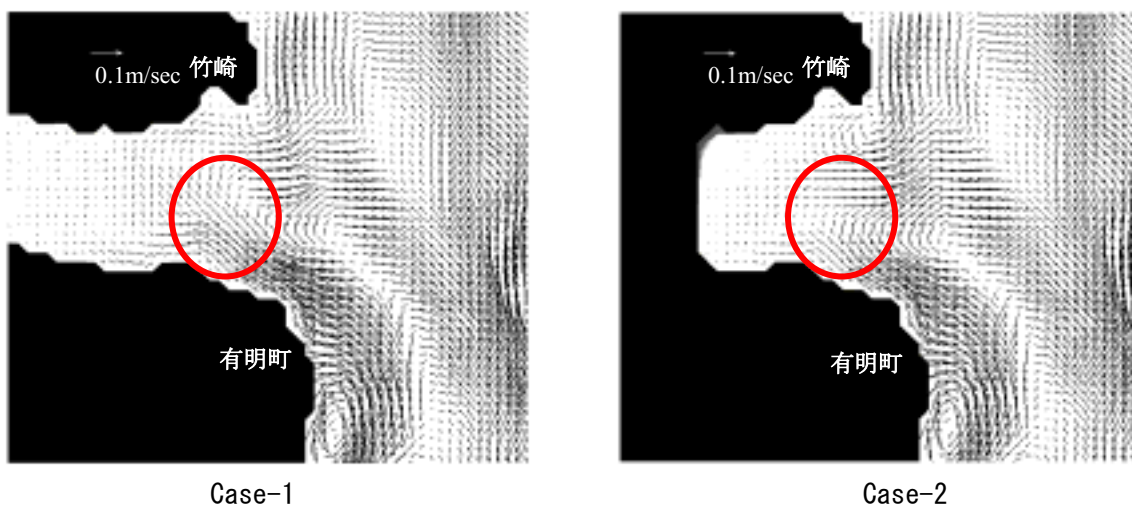


図-14 諫早湾近傍における表層の潮汐残差流

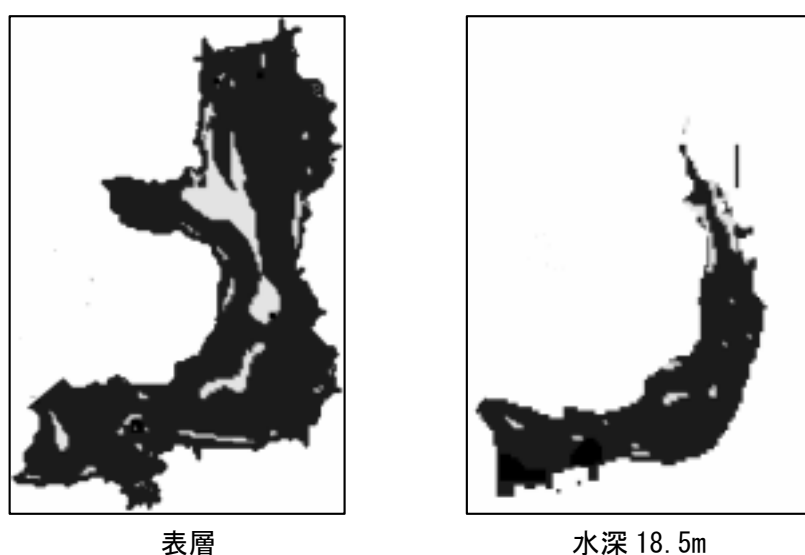


図-15 潮汐残差エネルギーの比較

Case-2 の潮汐残差流の比較検討を行う。潮汐残差流のベクトル図を図-14 に示す。堤防の設置により竹崎近傍で時計回りの還流が若干強化されている。これは諫早湾湾口北部から流入する海水が残差還流に乗って再び湾港北部に戻ってしまう現象が強化され、海水交換には正の貢献をしていない可能性がある。また図中の赤丸内の残差流ベクトルに着目すると、Case-1 では諫早湾口中央付近の南下する残差流が存在しているが、Case-2 では減少もしくは消滅している。諫早湾のポンプ的機能が衰弱している可能性が示唆される。

次に潮汐残差エネルギーについて考察する。潮汐残差流エネルギーは次式で求める。

$$E_R(x, y, z) = \frac{u_R^2 + v_R^2 + w_R^2}{2} \quad (2)$$

ここで u_R , v_R , w_R はそれぞれ x , y , z 方向の残

差流成分である。

締め切りによる潮汐残差流エネルギーの増減を求めるため、Case-1 と Case-2 の潮汐残差流エネルギーの差を計算した。その結果を図-15 に示す。海域内の灰色が潮受け堤防の影響で残差エネルギーが増加した領域で、黒が減少した領域である。この結果諫早湾口北部などは増加しているが、諫早湾湾奥、島原半島東岸沿いなど有明海の海水交換に重要な領域がいずれも減少している。これは水深方向にも同様であった。

全体的には潮汐残差流エネルギーは減少しているが、部分的にはそれが増加している領域がある。筑後川からの流水とエネルギー増加領域に何らかの関係があるようではあったが詳細は議論していない。これについては今後の課題としたい。

5. おわりに

本研究は諫早湾締め切りによる諫早湾の海域面積の減少の影響だけに着目し、それが有明海の海水交換能力に及ぼす影響を数値実験的に検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) 諫早湾の海域面積の減少により有明海湾奥部で潮位振幅が減少している。また多くの海域で最大潮流流速は減少しているが、その減少率は最大で9%程度である。
- (2) 海域面積の減少により海水交換能力は減少している。しかしながら定量的には大きくはない。
- (3) 諫早湾のポンプ的機能は衰弱している可能性がある。
- (4) 潮汐残差エネルギーは、一部増加も認められるが、全体的には減少している。

本計算条件下では、諫早湾締め切りの海水交換能力への負の影響は認められる。しかしながら、その影響は定量的には微小である。

本研究は有明海の環境に及ぼす要因の一つである一面で検討したにすぎない。1章で述べたように有明海の環境に対する要因は多岐で因果関係は複雑である。今後の研究の更なる進展が望まれる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究A「有明海の流れ構造の解明と蘇生・再生のための調査研究」(研究代表者:小松利光, 課題番号:14205075)の援助を受けた。ここに記し深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) http://www.maff.go.jp/soshiki/nouson_sinko_u/isa_haya/
- 2) 滝川清, 田淵幹修: 有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1061-1065, 2002
- 3) 千葉賢, 武本行正: 諫早湾潮受け堤防に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.376-380, 2003
- 4) 灘岡和夫, 花田岳: 有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防締め切りの影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.401-405, 2002

- 5) 塚本秀史, 柳哲雄: 有明海の潮汐・潮流, 海と空, 第78巻, 第1号, pp.31-37, 2002
- 6) 宇野木早苗: 有明海の潮汐と潮流はなぜ減少したか, 海の研究, 第12巻, 第1号, pp.85-96, 2003
- 7) 藤原考道, 経塚雄策, 濱田孝治: 有明海における潮汐・潮流減少の原因について, 海の研究, 第13巻, 第4号, pp.403-411, 2004
- 8) 有明プロジェクト研究チーム: 有明プロジェクト中間報告書(その1), 2002
- 9) 小松利光, 矢野真一郎, 齋田倫範, 松永信博, 鶴崎賢一, 徳永貴久, 押川英夫, 濱田孝治, 橋本彰博, 武田誠, 朝位孝二, 大串浩一郎, 多田彰秀, 西田修三, 千葉賢, 中村武弘, 堤裕昭, 西ノ首英之: 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.341-345, 2004
- 10) 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利光: 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係, 海の研究, 第12巻, 第3号, pp.291-305, 2003
- 11) 柳哲雄, 阿部良平: 有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動, 海の研究, 第12巻, 第3号, pp.269-275, 2003
- 12) <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>
- 13) Minoru Odamaki, Yukihiko Ooniwa, Noriaki Shibata: Comparative tidal current observation in Ariake Bay with the previous result, *Report of hydrographic and oceanographic researches*, No.39, pp.33-39, 2003
- 14) 西ノ首英之, 小松利光, 矢野真一郎, 齋田倫範: 諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.336-340, 2004
- 15) 小松利光: 有明海において海水交換ポンプの役割を果たす諫早湾, 第8回ジョイント・シンポジウム 諫早湾締め切りが有明海環境に及ぼす影響の検討要旨集, pp.30-47, 2002
- 16) 朝位孝二, 山崎宗広, 宮脇周作, 羽田野袈裟義: 潮汐残差流が内湾の海水交換に及ぼす影響, 水工学論文集, 第41巻, pp.1081-1086, 2001

(平成17年8月31日受理)