

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

灘 岡 和 夫*・花 田 岳**

1997 年の諫早湾締め切りは、有明海全体の潮汐運動を減少させ、浮泥の減少など水質を変化させてノリの不作を引き起こした可能性があるものとして重要視されている。その原因として、諫早湾締め切りだけでなく外海潮汐振幅の減少や平均水位上昇の影響が指摘されてきているが、定量的な検討は十分に行われていない。本研究では、各要因に関して定量的に評価するため、既存データ解析と数値シミュレーションを行った。既存データ解析は一般的に公開されている潮汐データを用い、30 年間にわたる調和解析を行った。また、数値シミュレーションでは外洋側の潮汐も含めた広域的な計算を行い、各要因の寄与度を定量的に表すことを試みた。

1. はじめに

有明海における昨年冬季のノリ不作問題は、社会的関心がもともと高かった 1997 年 4 月の諫早湾潮受け堤防締め切りに関して、有明海の生態環境への具体的な影響の現れの可能性がある事象として大いに注目されることとなった。その後、潮受け堤防締め切りの影響がいろいろな観点から具体的に論じられるようになり、現地調査も様々な機関によって精力的に行われつつある。中でも、日本海洋学会は、2001 年 3 月にいち早く「有明海環境悪化機構究明と環境回復に関する提言」を発表している(日本海洋学会海洋環境問題委員会, 2001)。そこでは、重要な論点の一つとして、近年の有明海での潮汐振幅の減少が注目されている。これは、もともと有明海では、基本的な特徴として大きな潮汐の干満差があり、それに伴う潮流の大きな攪拌作用が底泥の巻き上げ・拡散や溶存酸素の底層への供給など重要な役割を演じているが、潮汐振幅が減少することによってそのような効果が弱められ、ひいては赤潮発生抑制効果が減少しノリの色落ちに結びついた可能性がある、という議論である。そして、その前提となるデータとして、1980 年以降有明海の特に湾奥部で干満差が減少する傾向にあるとする佐藤・田北(2000)が引用されている。

有明海での大潮差では、湾口部で約 3 m、湾南部で約 3.5 m、湾奥部で約 4.9 m に達する(気象庁, 1974)。潮汐成分のうち最も大きなものは M_2 分潮で、次いで S_2 分潮が大きい。主要日周潮($K_1 + O_1$)と主要半日周潮($S_2 + M_2$)で見ると、湾奥部では、前者が後者の約 5 倍になっており、圧倒的に半日周潮が卓越している(気象庁, 1974)。有明海で大きな潮差が現れるのは、我が国の他の湾域に比べて有明海の固有振動周期(約 8 時間)が比較的半日周期に近いことから、半日周期の外洋潮汐が湾内に入ったときに湾内水が共鳴しやすくなるため、といわ

れている(例えば、井上, 1985)。上記の日本海洋学会の提言では、有明海での近年の沿岸域の埋め立てや諫早湾の潮受け堤による締め切りが有明海の海域面積を減少させ、それが有明海の固有振動周期を短くすることから、強制振動周期である半日周期からはずれる側になって潮汐振幅が減少してきている、ということを強く示唆している。これは、宇野木・小西(1998)が、1960 年代以降の東京湾、伊勢湾、大阪湾での潮汐データを解析し、沿岸域の埋め立てによって湾内海水面積が減少したことが潮流振幅の減少をもたらしたことを示すとともに、そのことが湾内の富栄養化を強めるように作用したことを示唆した議論に沿うものである。

この、日本海洋学会の緊急提言以降、有明海の物理環境については、近年の潮汐振幅の減少傾向に多くの研究者が着目することとなった。まず、2001 年 5 月に沿岸環境関連学会連絡協議会の主催で開催された第 3 回ジョイントシンポジウム「有明海の環境・漁業を考える」において、磯部(2001a)は、有明海外においても同じように近年潮汐振幅が減少していることから、有明海内の海水面積の減少のみに潮汐振幅の減少原因を求めるには無理があることを指摘した。つづいて 2000 年 8 月に行われた、やはり沿岸環境関連学会連絡協議会の主催によるワークショップ「有明海の物理環境について」では、潮汐データの分析結果がいくつか報告されるとともに、潮汐に関する数値シミュレーションの実例ならびにその問題点などが集中的に議論された(沿岸環境関連学会連絡協議会, 2001)。特に、宇野木は上記の磯部の指摘を受けて、有明海内の潮汐振幅減少を、有明海内の海水面積減少に起因する部分と外海の潮汐振幅の減少に起因する部分に分けて検討し、前者が全体の 7 割以上を占めると報告している。また、このワークショップでは、近年、平均水位が上昇傾向にあり、そのことも潮汐振幅減少の要因の一つになっている可能性が指摘された。

有明海の潮汐振幅減少に関する議論はその後も続き、磯部(2001b)や宇野木(2001)、満・柳(2001)、滝川・田淵(2002)らがより詳細な検討結果を報告している。

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
** 修(工) (株)野村総合研究所

これに対して、灘岡 (2002) は、それまでの議論で、潮汐振幅減少要因の設定の仕方 (議論の仕方) が研究者によってまちまちであることによる混乱があることから、既往の議論を整理し、以下のように分類している。

要因①：有明海内の海水面積の減少

諫早湾潮受け堤防、その他の埋立・干拓、港湾建設等により有明海の海水面積が減少した結果、有明海の共振が弱まり有明海内部の潮汐振幅が減少する。

要因②：平均水位の上昇

有明海内の平均水位上昇により有明海の共振が弱まることにより有明海内部の潮汐振幅が減少する。

要因③：外洋潮汐振幅の減少

広域的な平均水位上昇により東シナ海全体の共振が弱まることを主因として外洋の潮汐振幅が減少する。

(②と③はともに平均水位の上昇に関連するものであるが、有明海内部での潮汐振幅減少を論じる際には、外洋の平均水位上昇に関連する外洋潮汐振幅の減少は有明海への入力レベルの変化、有明海内の平均水位の上昇は有明海というローカルな応答系の変化と見ることが出来るから、要因②と③は明確に区別した方が理解しやすい。)

そして、これらの潮汐振幅減少要因に関して既往の報告例を比較・整理するとともに、潮汐数値シミュレーションを行った結果を示し、それから、潮受け堤防締切りの影響 (要因①の一部) が全体の 26~39%，平均水位上昇と外洋潮汐振幅減少の両者 (要因②と要因③) が 61%~74% (平均水位上昇 (要因②) のみの影響は微小) と算出されたことを報告している。ただし、この計算結果は、水深データなど、用いたデータの精度の問題や外洋側の境界条件の与え方などにまだ改良の余地があり、上記の各要因の定量的な評価という面では、まだ不十分なところを有している。

そこで、本研究では、まず、既存の潮汐データについて行った調和解析の結果から、潮汐振幅の変動実態そのものについてあらためて概観した後、上記のようにその変動の原因として関与する可能性がある平均水位についても潮汐記録から計算した結果を示し、両者の関連性について見てみる。その後で、外洋側の境界条件の与え方を改良することにより、より精度の高い数値シミュレーションを行い、上記の 3 要因に関する議論に関してより信頼性の高い検討を行うことを試みた結果について示す。

2. 潮汐データ解析による潮汐振幅・平均水位変化傾向

JODC (Japan Oceanographic Data Center) で公開されている東シナ海を含む有明海周辺の水位データを過去 30 年にわたり調和解析を行い、主要 4 分潮と平均水位の

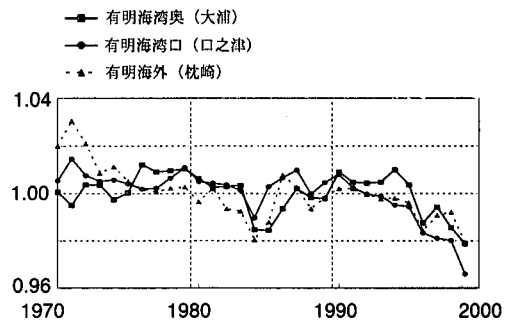


図-1 M_2 分潮振幅の 30 年平均値に対する比の経年変化

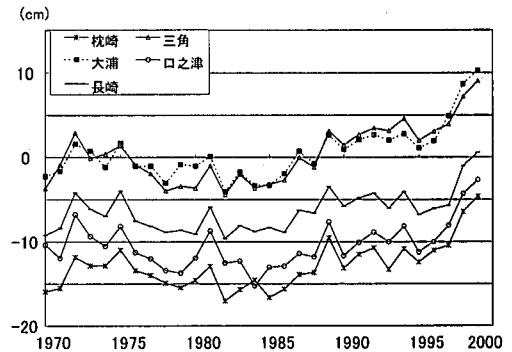


図-2 平均水位の経年変化

値を得た。

図-1 は、各地点での M_2 分潮の、1970 年以降 30 年間の平均値に対する比について、その経年変化を示したものである。これから、これまでも指摘されているように、特に 1990 年以降、潮汐振幅が減少傾向にあることがわかる。また、そのような減少傾向は、有明海湾奥部 (大浦) や湾口部 (口之津) だけでなく、有明海外 (枕崎) でも同様に生じていることがわかる。また、図-2 は、図中に示す地点における平均水位の経年変化を示したものであるが、これから、1985 年以降平均水位が上昇傾向にあることがわかる。先述の 2001 年 8 月のワークショップ (沿岸環境関連学会連絡協議会, 2001) での議論や、磯部 (2001b) は、平均水位の上昇と有明海の潮汐振幅の減少との関係について指摘しているが、図-1 と 2 を具体的に見比べると、平均水位の上昇傾向は、潮汐振幅の減少傾向が確認される 1990 年よりも数年以上前から確認できることから、少なくとも上記の結果だけから両者の間の因果関係を論じることには無理がある。

そこで、以下に、潮汐数値シミュレーションによって、上記の点も含めた、より定量的な検討を行った結果について述べる。

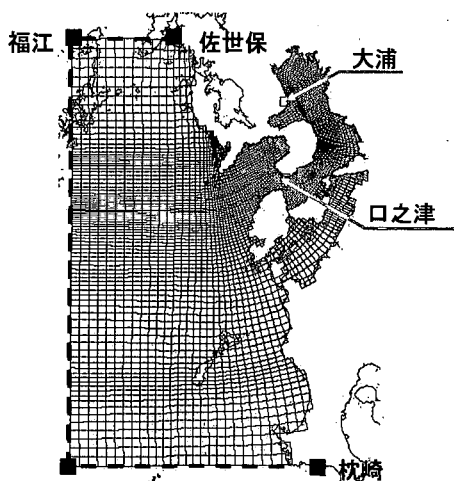


図-3 計算領域

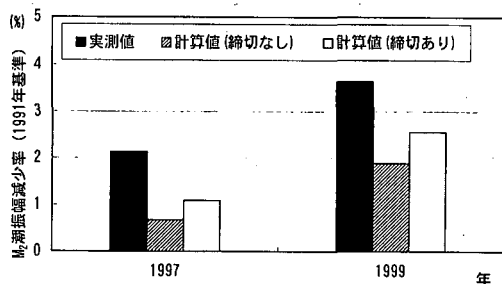
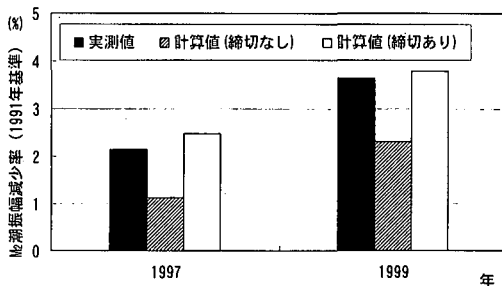
3. 数値計算の方法ならびに結果

(1) 潮汐計算の方法

潮汐数値シミュレーションの基本的な部分は灘岡(2002;以下「前報」)とほぼ同様で、干潟部の干出現象を考慮した平面2次元流動計算(曲線座標系)であり、 σ -座標系による3次元流動計算コードを平面2次元の形で用いて計算を行っている。

計算ケースは、前報と同様、過去30年間の潮汐変動を調べるため、1974年、1980年、1984年、1991年、1995年、1997年、1999年とした。特に、1997年と1999年については潮受け堤防締め切りの有無の影響を検討した。

先に述べたワークショップでの議論(沿岸環境関連学会連絡協議会, 2001)で、計算領域を十分大きく取らないと有明海の共振現象が過大評価されることが指摘されている。実際、有明海灣口部付近に開境界を設定して予備的な計算を行ったところ、計算領域の大きさに起因する共振を起こし湾内での増幅率が実測値よりも大きくなった。そこで、図-3に示すように、東シナ海を一部に含む大規模領域での計算を行った。この場合に数値計算上問題になるのは、外洋側の3辺の開境界での境界条件の与え方である。前報では、九州西岸沖海域での潮汐の伝播方向がほぼ南北であったため、西側の南北境界をスリップ壁とし、東西方向に位相を一定として計算を行った。これに対して、本論文では、図-3中に示す4地点のうち、検潮記録が存在する3地点(佐世保、福江、枕崎)に関してはそれぞれの潮汐データの調和解析結果を与え、データのない南西角地点においては国立天文台潮汐予測システムの計算結果を参考に与えることにより、外洋での潮汐の伝播方向や振幅の再現を良好に行えるように改良した。また、前報に比べて外洋部での水深データ

図-4 有明海灣奥(大浦)における M_2 分潮減少率の計算結果(前報)図-5 有明海灣奥(大浦)における M_2 分潮減少率の計算結果(本論文)

の与え方の精度を上げた。

(2) 潮汐振幅減少の再現計算結果

図-4、図-5は、それぞれ、1997年の締め切り後ならびに1999年での M_2 分潮振幅の1991年の値に対する比で見た減少率を示したもので、実測値と計算値(「締め切り」に対応)、そして締め切り堤の有無の効果を見るために行った「締め切りなし」の計算値を並べて示したものである。これからまず、前報の結果では、実測値に対して計算値の一致度は十分ではなく、計算値がいずれの年もかなり小さめになっているのに対し、本論文での値は良好な一致を示していることがわかる。このことから、有明海という閉鎖性の強い海域についての計算であっても、外洋側の開境界での適切な境界条件設定が、計算精度上大変重要になることがわかる。

(3) 潮汐振幅減少要因の定量的評価

つぎに、潮汐振幅減少要因として考えられる、先述の3つの要因に関して検討してみた。すなわち、①有明海内の海水面積の減少、②平均水位の上昇、③外洋潮汐振幅の減少の3要因に関して、それぞれの寄与割合について具体的に検討した。その結果を見ると、①有明海内の海水面積の減少と③外洋潮汐振幅の減少の寄与が大きく、②平均水位の上昇の寄与は、前報と同様、かなり小さかった。そして、ここで注目している①有明海内の海水面積の減少については40~50%の寄与があることが

わかった。したがって、残る50~60%が③外洋潮汐振幅の減少による寄与ということになる。したがって、前報よりも外洋潮汐振幅の減少による寄与は少なくなっているが、それでも3要因の中で最大の寄与割合となっている。

(4) 潮流に関する計算結果

つぎに、ここでの数値シミュレーション結果から、有明海内の潮流の計算結果を示す。

図-6は、諫早湾の潮受け堤防の締め切り前後の下げ潮時の流速の差を示したものである。これから、諫早湾口の北側で流速が増加し、逆に湾内から島原半島側に沿った広い領域で流速が減少していることがわかる。この特徴は実測の結果と一致している(宇野木, 2001)。なお、流速の減少が最も顕著なのは潮受け堤防近傍であるが、このことの意味については後で触れる。

つぎに、有明海内の物質輸送を考える上で重要になる潮汐残差流の計算結果を図-7に示す。これから、湾口部

周辺で、いくつかの渦パターンが現れており、島原半島沿岸に沿っても小さな渦パターンが現れていることがわかる。これらは、いずれも地形性の残差流パターンと考えられる。

図-8(a), (b)は、潮受け堤による締め切り前後の潮汐残差流パターンを比較したものである。図-6で示した、諫早湾内及び近傍での潮流強度の減少に伴って、潮汐残差流も諫早湾で顕著な差が見られ、特に湾の北側での差が目立っている。これは、前報でも述べたように、諫早湾内でのキャビティーフローが潮受け堤の締め切りによって特性が大きく変化したためと考えられる。

4. おわりに

本論文では、有明海の物理環境の議論で最近注目を集めている近年の潮汐振幅減少に関して、その要因をより定量的に明らかにするべく、外洋の広い領域を計算領域に取り込んだ潮汐数値シミュレーションを行った結果を

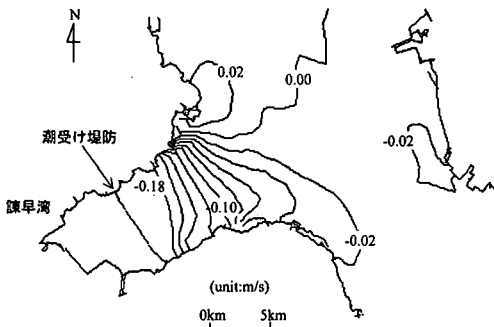


図-6 下げ潮時の流速強度に関する締め切り前後の差

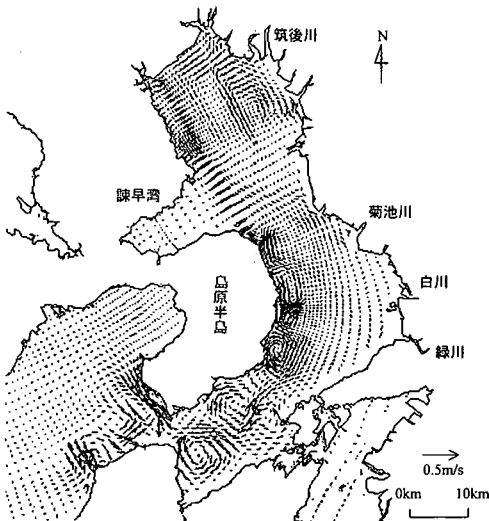


図-7 潮汐残差流の計算結果

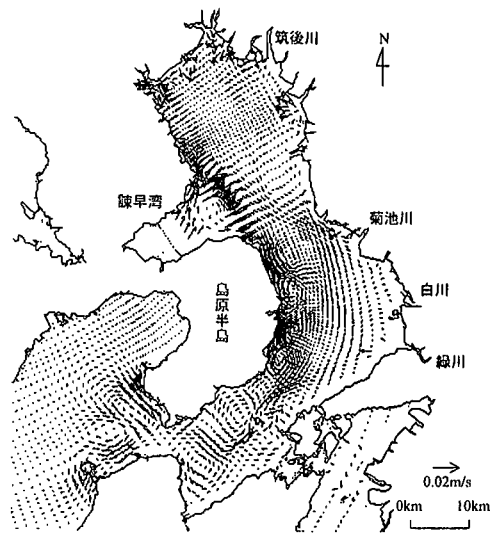


図-8(a) 締め切り前後の潮汐残差流の差

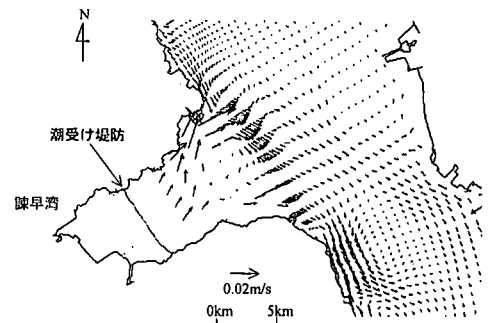
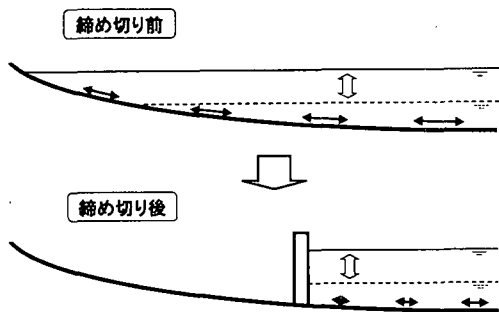


図-8(b) 締め切り前後の潮汐残差流の差 (拡大図)



図—9 干潟前面での構造物設置による潮流振幅レベルの現象に関する模式図

示した。その結果、想定される3つの要因のうち、外洋潮汐振幅の減少の寄与が最も大きく、ついで、有明海内の海水面積の減少による寄与が大きいことが示された。平均水位の上昇の寄与はごくわずかであった。また、これらの数値計算を通じて、外洋側での開境界での境界条件を適切に与えることが計算精度上重要になることが明らかとなった。

なお、前報(灘岡, 2002)でも指摘したが、有明海の潮汐現象を、有明海の全体的な潮汐振幅の減少という観点だけから議論するのは、問題のポイントを見誤る危険性があることに注意する必要がある。というのも、原理的には、有明海内の潮汐振幅がたとえ変化しなくても、締め切り堤防近傍では必ず潮流流速変動振幅が大きく変化することになるからである。それは、図—9に模式的に示しているように、干潟前面に潮受け堤防のような構造物を設置すると、そこが、潮汐波動に対して腹の位置になり、腹の位置近くでは流速変動振幅はゼロに近くなることから、流速振幅レベルは必ず大きく減少することになるからである。(実際の現象は構造物に沿う方向の運動モードも持っていて複雑であるが、諫早湾のようにある程度奥まった湾域内での堤防による締め切りでは、上記のような構造が概略成立すると考えられる。)

そして、このような流速振幅レベルが大きく変化する場所が水質・生態環境から見て重要な領域であれば、や

はり、諫早湾締め切りは潮流流速の変化を通じて重大な影響を与えることになる。例えば、深刻なノリ養殖被害を与えた昨年冬季の有明海での大規模な赤潮発生に関して、人工衛星画像データの解析から、赤潮の発生が諫早湾付近から始まっていることを示した石坂ら(2001)の報告は、その可能性が十分あることを示唆している。したがって、今後は、有明海全体の潮汐現象の評価と、諫早湾周辺の潮流変化の評価ということの両面から検討を進めていく必要がある。

参 考 文 献

- 石坂丞二・北浦康仙・田島清史・田中昭彦(2001): 有明海の生物光学的特性について, 九州沖縄地区合同シンポジウム「有明海の海洋環境」, p. 9.
- 磯部雅彦(2001a): 有明海の調査と評価の現状, 第3回ジョイントシンポジウム「有明海の環境・漁業を考える」資料集, 沿岸環境関連学会連絡協議会, pp. 25-30.
- 磯部雅彦(2001b): 有明海における水環境の現状, 水環境学会誌, Vol. 24, No. 10, pp. 659-664.
- 井上尚文(1985): 日本全国沿岸海洋誌; 第21章有明海 II 物理, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, pp. 831-845.
- 宇野木早苗・小西達男(1998): 埋め立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響, 海の研究, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
- 宇野木早苗(2001): 有明海における水位と流れの変化, 九州沖縄地区合同シンポジウム「有明海の海洋環境」, pp. 1-2.
- 沿岸環境関連学会連絡協議会(2001): 第1回ワークショップ「有明海物理環境について」(<http://www.wv.mei.titech.ac.jp/coast-env/index.html>)
- 海上保安庁水路部(1974): 有明海, 八代海海象調査報告書, p. 39.
- 気象庁(1974): 有明海・八代海海象調査報告書.
- 佐藤正典・田北 徹(2000): 有明海の生き物たち—第1章 有明海の生物相と環境, 海游舎, pp. 10-36.
- 滝川 清・田淵幹修(2002): 有明海の潮汐変動特性について, 第51回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 19-22.
- 灘岡和夫(2002): 有明海の潮汐・流動・水質変化と諫早湾締め切りの影響, 第51回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 27-30.
- 日本海洋学会海洋環境問題委員会(2001): 有明海環境悪化機構究明と環境回復のための討論の視点, 6 pp.
- 瀧 塩太・柳 哲雄(2001): 有明海の潮汐・潮流, 九州沖縄地区合同シンポジウム「有明海の海洋環境」, p. 4.