有明海および八代海における半日周期潮汐の 長期変化について

LONG-TERM CHANGE OF SEMIDIURNAL TIDE IN THE ARIAKE SEA AND THE YATSUSHIRO SEA

田井明¹・酒井公大²・齋田倫範³・橋本彰博³・矢野真一郎⁴・多田彰秀⁵・小松利光⁶
Akira TAI, Kodai SAKAI, Tomonori SAITA, Akihiro HASHIMOTO, Shinichiro YANO,
Akihide TADA and Toshimitsu KOMATSU

1学生会員 修(工)九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻・日本学術振興会特別研究員 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

²長崎県五島振興局上五島支所建設部(〒 857-4211 長崎県南松浦郡新上五島町 2507-6) ³正会員 博(工)九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門(〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地) ⁴正会員 博(工)九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門(同上)

⁵正会員 博 (工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁶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(〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

There are a lot of tidal flats in the Ariake Sea and the Yatsushiro Sea. The area has been reduced by large reclamation since the beginning of twentieth century. Changes in the coastal line could have made the eigen-oscillation period of the bays short, which might decrease amplification of tidal amplitude in an inner bay. We tried to clarify the effect using two approaches: (1) harmonic analysis of observational water level data at Misumi and (2) numerical experiments using a three-dimensional Princeton Ocean Model (POM). As a results of this study, it was clarified that a decrease of outer sea tidal amplitude was the most influential factor in long-term changes of the M_2 tidal amplitude and the M_2 tidal amplitude in 2000s was the smallest value over the past 80 years.

Key Words: Ariake Sea, Yatsushiro Sea, semidiurnal tidal amplitude, POM, harmonic analysis

1. はじめに

九州西部に位置する有明海および八代海(図-1)では,排水不良の改善や農業振興のため古くから干拓が進められ,表-1に示すように海表面積が減少してきた.1997年4月に延長7.05kmの潮受け堤防により有明海の奥部に位置する諫早湾の約3分の1を締め切り,2007年に完工した諫早湾干拓事業もこのような干拓事業のひとつである.このような干拓による地形の変化は両海域の潮汐・潮流に大きな影響を及ぼすと考えられ,特に諫早湾干拓事業と近年の漁業被害との関連が指摘されて以降,多くの研究が実施されている.

表-1 有明海・八代海の海表面積の変化 (km² , 海図および旧版地図 ¹⁾ より算出)

	有明海	八代海
1900 年代	1677	1017
1960 年代	1636	991
1980 年代	1583	970
2000 年代	1545	970

潮汐変化は,過去から現在に至るまでの検潮所のデー タを利用して最も影響の大きい M₂ 潮の変動を中心に検 討されてきた. 宇野木2) は, 近年の潮汐の減少を諫早 湾干拓事業や熊本新港建設等の有明海内の地形変化に よるもの(内部効果),外海の潮汐減少によるもの(外 部効果),平均海面の上昇による水深増加に起因するも の(水深効果)に分けて影響を見積もり,内部効果が約 50%, 外部効果が約40%, 水深効果が10%以下になる ことを示した.また,数値シミュレーションによる検 討例としては, 灘岡・花田3)が,内部効果が40~50%, 外部効果が50~60%,水深効果はかなり小さいとする 見解を示している.一方,塚本・柳4)は,干拓事業に よる地形変化の寄与は 10~20% であるとした. また, 湾 内の潮汐増幅率に関して,安田5)は潮汐の増幅率の基 準を外海に設定すると湾内の増幅率が潮受け堤防締め 切り前後で変化していないこと,田井・矢野のは,潮 受け堤防締め切りによる潮汐の変化が18.6年周期の月 の昇交点運動により時空間的に変動していることをそ れぞれ示した.このように,諫早湾干拓事業の影響を 解析する際に,外海の潮汐変動の取り扱いの違いによ り同一の潮汐データを解析しているにも拘らず統一し た見解が得られていない.また,諫早湾干拓事業以前

に実施された干拓についても有明海を疲弊させた要因とも考えられるものの,詳細な検討は行われていない.なお,貴重な例として Manda and Matsuoka⁷⁾ が数値シミュレーションによって 1940 年代からの潮流の変化を解析したものがあるが,潮汐振幅に関しては十分な考察がなされていない.

以上のような問題を明らかにするためには、これま での干拓による変遷を含むより長期間の潮汐データを 解析し、その結果に基づいて検討を行うことが必要で あると考えられる.しかし,有明海周辺の主な験潮所 は1960年代以降に観測が開始されていること(大浦: 1962年, 口之津: 1968年, 長崎: 1960年, 福江: 1964 年など)に加え,電子化されて容易に利用可能な潮汐 データの多くは1960年代以降であることが多いことか ら,長期間の潮汐データの入手が困難であり,これまで に具体的な検討は行われていない. そこで, 本研究で は有明海・八代海内で最も古くから潮汐データが存在 している熊本県三角験潮所(1931年観測開始)のデー 夕解析と 1900 年代, 1960 年代, 1980 年代および 2000 年代の4パターンの海岸線を用いた数値シミュレーショ ンを実施し,有明海・八代海の半日周期潮汐の長期変 化とその要因について調べた.

2. 潮汐データの解析

(1) 解析方法

本研究では,有明海・八代海で最も大きな振幅を有する M_2 潮(周期:12.42 時間)と次に大きな S_2 潮(周期:12.00 時間)の二つの半日周期潮汐を対象とした.実測データとして,図-1に示した三角験潮所(1931年6月~2007年12月)および長崎県厳原験潮所(1949年1月~2007年12月)の潮位データを用いた.

三角で観測された 1960 年までのデータは,熊本地方 気象台に保管されている紙ベースの潮汐観測原簿を手 作業で電子化したものを,1961年以降は日本海洋デー タセンター⁸⁾ のホームページからダウンロードしたも のを用いた.まず369日分のデータを用いて最小二乗法 により 60 分潮に対して調和解析を行ったところ, 1940 年代ごろは前後と比べて明らかに不自然な結果となっ た.これは,正常なデータであれば図-2のような変動 を示すのに対し,1940年代のデータには図-3に示すよ うな基準面が変動していると思われるものが多くあっ たためである.したがって, M_2 潮に関しては,この影 響を小さくするために分解期間を29日間として主要10 分潮 $(M_2, S_2, K_1, O_1, Q_1, P_1, N_2, K_2, M_4, MS_4)$ に分解し, さらに季節変化を除去するために1年平均 の操作をかけることで1年毎の値を算出した.また,29 日間の中で欠測データがあるものは結果から除外して いる.そのため,欠測のあった月は前後年の同月デー タの平均値を用いて1年平均を求めた.S₂潮に関して は,29日分のデータでは K2潮(周期:11.97時間)など

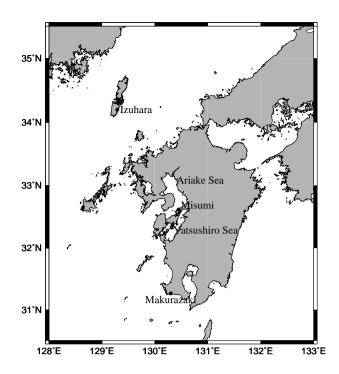


図-1 有明海・八代海の周辺の地理と験潮所の位置

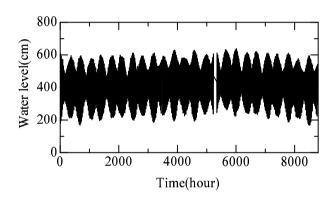


図-2 正常なデータの例(1960年)(一部欠測を含む)

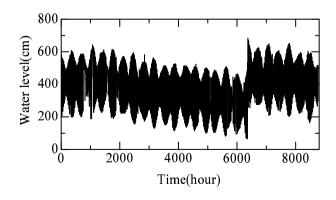


図-3 異常なデータの例 (1945年)

の影響により精度を保てないので,369日分のデータを用いた調和解析の結果を用いるとともに,1割以上の欠測データが含まれている解析期間は結果から除外した. 厳原のデータ⁸⁾は,三角のようなデータ不良が少な

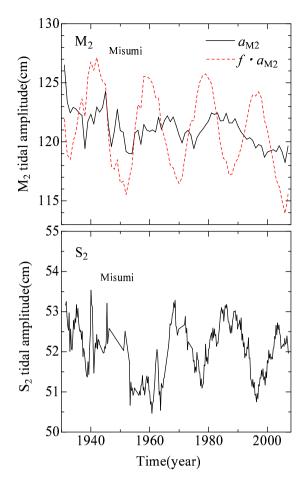


図-4 三角における M2 潮および S2 潮の潮汐振幅

かったため,369日分のデータを用いて30日ずつ解析期間をずらしながら60分潮に対して調和解析を行った. さらに,三角の S_2 潮の場合と同様に1割以上の欠測データが含まれている解析期間は結果から除外した.

(2) 解析結果

解析により得られた三角と厳原の M_2 潮振幅 a_{M_2} および S_2 潮振幅 a_{S_2} の時間変化をそれぞれ図-4 と図-5 に示す.実線は月の 18.6 年周期の昇交点運動の影響を示す f 値を除去したもの (a_{M_2}) , 破線は除去していないものである $(f\cdot a_{M_2})$. また,図-6 には比較のために枕崎および北大西洋に面するカナダのハリファクス験潮所の M_2 潮振幅の時間変化を示した.ハリファクスの結果のうち $f\cdot a_{M_2}$ の結果(破線)は $Ray^{9)}$ より引用し, a_{M_2} の結果(実線)は $f\cdot a_{M_2}$ の結果より求めたものである.

全ての験潮所で 1997 年ごろに生じる $f\cdot a_{\rm M_2}$ の変動 の極大値が過去の極大値の中で最も小さくなっていることが分かる.それに伴い $a_{\rm M_2}$ も近年が最も小さい値となっている.また,三角の $a_{\rm S_2}$ の変化は $f\cdot a_{\rm M_2}$ の変化と逆位相となっていることが分かる.一方,厳原の $a_{\rm S_2}$ は三角のような $f\cdot a_{\rm M_2}$ に対応した変化は見られず期間全体では減少傾向である.

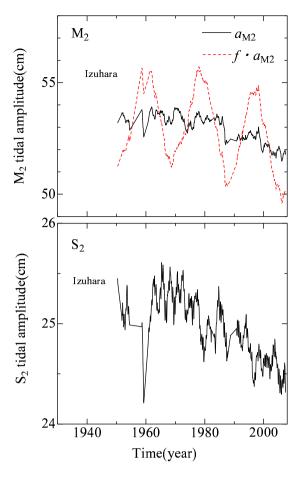


図-5 厳原における M₂ 潮および S₂ 潮の潮汐振幅

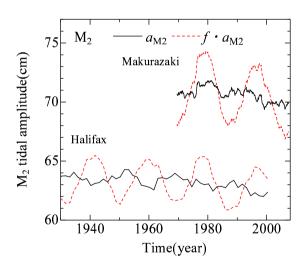


図-6 枕崎およびハリファクスにおける M_2 潮の潮汐振幅 (ハリファクスの結果は $Ray^{9)}$ より引用)

3. 数値シミュレーションによる解析

(1) 解析方法

数値シミュレーションには海洋の研究で広く用いられている Princeton Ocean Model (POM)を用いた $^{10)}$. 計算領域は図-7に示した領域であり、水平計算格子サイズは一辺 10 秒(東西方向:約 250m,南北方向:約

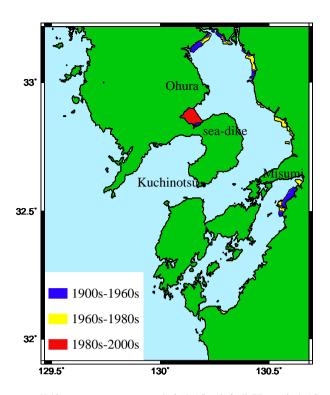


図-7 数値シミュレーションの解析領域と各年代間の干拓領域

310m),格子数は438×468×10とした.干潟の干出・ 冠水計算は,内山のモデル11)を護岸位置より内陸側が 冠水しないように改良したものを組み込んだ.水深は, 海図の水深を9つの潮位基準面により平均水深に変換 して用いた.干潟域の水深は,護岸前面の平均水深を 0m と考え,海図上の0m 地点から護岸までの間を直線 補間することによって与えた.解析地形は,1900年代, 1960年代, 1980年代および 2000年代の4つの年代の ものを作成した(図-7).海岸線は国土地理院1)が配 布している旧版地図を用いて作成した.ここで,1980 年代は2000年代(現在)から諫早湾干拓事業による海 岸線の変化のみを除いたものである.また,1900年代, 1960年代の水深は現在のものを用いており,水深デー タのない過去の干拓地に関しては干潟であったと考え, 前述の方法により水深を設定している.全てのケース で南側開境界に $0.75 \mathrm{m}$ の M_2 潮を与えて計算を行った . なお,西側および北側開境界は放射境界12)としている.

(2) 解析結果

まず,数値シミュレーションの再現精度を検証する.検証は,諫早湾潮受け堤防建設前後である1980年代と2000年代の結果を実測値と比較することで行う.実測値は日本海洋データセンターにより公開されている実測データ⁸⁾を調和解析し,諫早湾潮受け堤防締め切り前として1991年から1996年,締め切り後の1998年から2003年のそれぞれ平均値を求めた.結果を表-2に示す.今回は湾奥の海岸線の変化に対する潮汐応答特性の変化の再現精度を検証するために,特に湾口の口之津との振幅比(増幅率)に注目した.その結果,大浦

表-2 数値シミュレーションと観測値の締め切り前後の M₂ 潮振幅の比較(括弧内はロク津に対する増幅率)

潮受け堤防	口之津	三角	大浦				
締め切り							
前	100.1	118.7	153.6				
		(1.186)	(1.534)				
後	100.5	118.4	152.1				
		(1.178)	(1.513)				
前	100.2	121.7	153.4				
		(1.214)	(1.531)				
後	99.7	120.3	150.8				
		(1.207)	(1.513)				
	締め切り 前 後 前	締め切り 前 100.1 後 100.5 前 100.2	締め切り 前 100.1 118.7 (1.186) 後 100.5 118.4 (1.178) 前 100.2 121.7 (1.214) 後 99.7 120.3				

表-3 数値シミュレーションによる各年代の M₂ 潮振幅の比較 (括弧内は口之津に対する増幅率)

年代	口之津	三角	大浦
1900s	98.6	119.1(1.208)	154.9(1.572)
1960s	99.6	119.1(1.196)	154.9(1.555)
1980s	100.1	118.7(1.186)	153.6(1.534)
2000s	100.5	118.4(1.178)	152.1(1.513)

および三角の口之津に対する振幅比およびその変化が高精度に再現されていることが分かった.また,藤原ら ¹³⁾ および田井・矢野 ⁶⁾ によって示された湾口部の口之津における振幅の増加も再現されており,本モデルは以降の検討を行うのに十分な精度を有していることが確認された.

次に,大浦,三角,口之津の M_2 潮振幅についての各年代毎の計算結果を表-3に示す。1900年代から 2000年代にかけて,口之津に対する大浦および三角の振幅比は一貫して減少している。一方,口之津の振幅は一貫して増加していた。そのため,大浦では振幅比の減少率が 3.8%であるのに対し,振幅の減少率は 1.8%にとどまっていた。また,三角と大浦における 1900年代以降の振幅変化の約 5割は 1980年代までに,残りの約 5割は諫早湾干拓事業で生じていることが分かる(大浦で 46%:54%,三角で 57%:43%)。

 M_2 潮振幅の各年代間の空間的な変化を調べるために 1900 年代から 1960 年代の変化を図-8 , 1960 年代から 1980 年代の変化を図-9 , 1980 年代から 2000 年代の変化を図-10 , 1900 年代から 2000 年代の変化を図-11 に それぞれ示す.全ての年代間でその領域に違いはあるが有明海では湾奥で減少し湾口で増加していることが分かる.八代海では有明海と同様に湾奥部(北部)で減少,湾口部(南部)で増加傾向にあるが,有明海に 比べると大きな変化は生じていない.

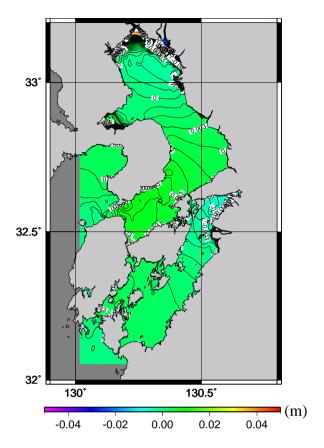


図-8 1900 年代から 1960 年代の M2 潮潮汐振幅の変化

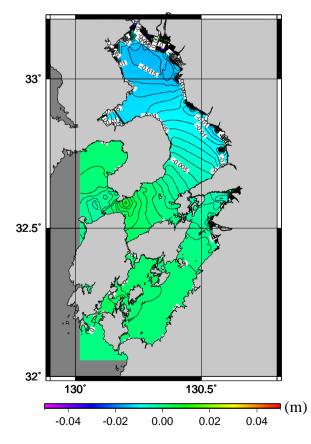


図-9 1960 年代から 1980 年代の M₂ 潮潮汐振幅の変化

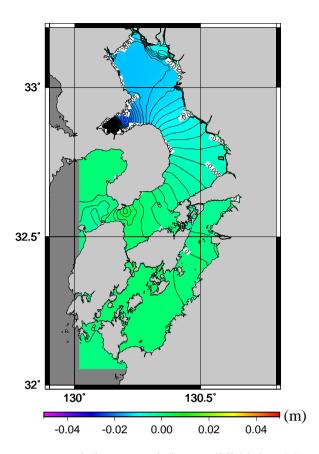


図-10 1980 年代から 2000 年代の M₂ 潮潮汐振幅の変化

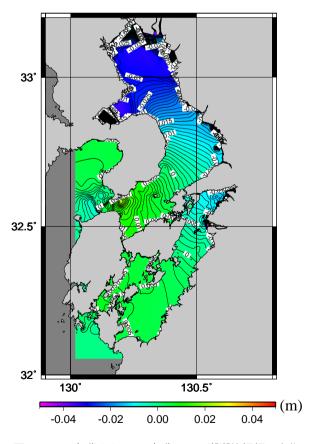


図-11 1900 年代から 2000 年代の M₂ 潮潮汐振幅の変化

4. 考察

まず,2000年代前半は18.6年周期の変動を考慮しても過去80年間で最も小さい M_2 潮振幅が生じていたことが分かった.さらに,湾内では S_2 潮振幅が M_2 潮振幅と逆位相で変化するために,小潮時(振幅: M_2 潮- S_2 潮)には特に小さな振幅が生じていたと考えられる.なお, S_2 潮振幅のこのような特性はカナダのファンディ湾でも報告されており,その原因は海底摩擦による M_2 潮潮流の非線形作用だと考えられている 14 .

長期的変化に関して実測データでは,三角において 1930 年代から 2000 年代にかけて (122.7cm 119.2cm,各年代の平均値) 3cm 以上の減少が生じているのに対し,海岸線の変化のみを考慮した数値シミュレーションでは 0.7cm の減少 (119.1cm 118.4cm)と大きく異なった.これは,実測データに見られる減少の大半が外海での M_2 潮振幅の減少などの内湾の海岸線の変化以外の影響で生じていることを示している.外海での M_2 潮振幅の減少傾向は,本論文で示した全地点で同様の傾向が得られたことから世界的な規模で生じている可能性がある.

大浦における 1980 年以降の減少に対する諫早湾干拓事業の影響は,1980 年代から 2000 年代にかけての実測値の減少量が約 $5 \, \mathrm{cm}$ であること 2),および数値シミュレーションによって得られた減少量 $1.5 \, \mathrm{cm}$ から約 30% と見積もられる.諫早湾干拓事業の影響は外海の潮汐振幅の大きさに依存して変化するため 6),この値は開境界に与える振幅の大きさにより変動すると考えられる.近年の大浦の M_2 潮潮汐振幅の 18.6 年周期の変動幅は約 $158 \, \mathrm{cm} \sim 145 \, \mathrm{cm}$ であり 6),本解析での締め切り後の結果は $152.1 \, \mathrm{cm}$ であったことから,この 30% という値は 18.6 年間の平均的な影響を示していると言える.

数値シミュレーションより過去の海岸線の変化は湾の増幅率を減少させてきたことが示された(表-3).しかし,藤原ら ¹³⁾ および田井・矢野 ⁶⁾ が諫早湾干拓事業の影響として示した,M₂ 潮振幅は湾口で増加,湾奥で減少するという現象は,過去の干拓による海岸線の変化に対しても同様に生じており,結果として湾内の潮汐振幅に対する増幅率減少の影響は軽減されている.

5. おわりに

本研究の結果,以下のような知見を得た.

- ・近年の有明海・八代海では 1930 年以降で最も M_2 潮振幅が小さいことが分かった .
- ・ S_2 潮振幅は有明海・八代海内では M_2 潮振幅と逆位相で変化すること,外海(厳原)では減少傾向であることが示された.
- ・1900年以降実施されてきた干拓の影響により,湾奥の潮汐振幅は減少,湾口では増加してきたことが分かった。また,諫早湾干拓事業以前の干拓による影響と諫

早湾干拓事業による影響は同程度であった.

・過去 80 年間に生じた M_2 潮振幅の減少の大部分は干拓などの海岸線の変化ではなく,外海の M_2 潮振幅の減少であることが示された.

謝辞:本研究を実施するにあたり,宮崎康平氏(当時,長崎大学大学院),石原拓也氏と井村一樹氏(長崎大学大学院),石川泰助氏(当時,九州大学大学院),沖田翔吾氏(当時,九州大学工学部)には多大なるご協力を頂きました.加えて,佐賀大学の速水祐一先生および濱田孝治先生には研究について有益なアドバイスを頂きました.ここに深甚なる謝意を表します.また,潮汐データをweb上に公開されている日本海洋データセンターおよび長年にわたりデータを取得し保管されてきた気象庁の関係者の方々に心より感謝致します.最後に,本研究の遂行に際し科学研究費補助金「特別研究員奨励費」の援助を受けたことを付記する.

参考文献

- 1) 国土地理院: http://tide.gsi.go.jp/furnish.html
- 宇野木早苗: 有明海の潮汐減少の原因に関する観測データの再解析結果,海の研究,第12巻,第3号,pp.307-313,2003.
- 3) 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.
- 4) 塚本秀史・柳哲雄:有明海の潮汐・潮流,空と海,第78 巻,第1号,pp.31-38,2002.
- 5) 安田秀一: 内湾における副振動の発生と有明海の潮汐増幅について 複合潮の振舞いと固有振動との共振,海の研究,第15巻,第4号,pp.403-411,2006.
- 6) 田井明・矢野真一郎:外海を基準とした有明海のM₂ 潮 増幅率の変動特性と諫早湾潮受け堤防建設による影響, 海の研究,第17巻,第3号,pp.205-211,2008.
- 7) Manda, A. and K. Matsuoka: Changes in Tidal Currents in the Ariake Sound Due to Reclamation, Estuaries and Coasts, 29(4), pp.645-652, 2006.
- 8) 日本海洋データセンター: http://www.jodc.go.jp
- Ray, R.D.: Secular changes of the M2 tide in the Gulf of Maine, Continental Shelf Research, Vol.26, pp.422-427, 2006
- 10) Princeton 大学 Princeton Ocean Model 公式ページ: http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/
- 11) 内山雄介:海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 座標海洋流動モデルへの適用,海岸工学論文集,第51巻,pp.351-355,2004.
- 12) Orlanski, I.: A simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flows, Journal of Computational physics, Vol.21, pp.251-269, 1976.
- 13) 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.
- 14) Gabriel Godin and Guillermo Gutierrez: Non-linear effects in the tide of the Bay of Fundy, Continental Shelf Research, Vol.5, pp.379-402, 1986.

(2009.9.30 受付)