有明海・八代海における非線形潮汐の特性と その底質輸送への影響に関する数値実験

Numerical Experiments on Features of Nonlinear Tide and Its Influences on Sediment Transport in the Ariake Sea and the Yatsushiro Sea

矢野真一郎¹ · Johan C. Winterwerp² · 田井 明³ · 齋田倫範⁴

Shinichiro YANO, Johan C. WINTERWERP, Akira TAI and Tomonori SAITA

We conducted numerical experiments on nonlinear tide and fine sediment transport in the Ariake Sea and the Yatsushiro Sea by Delft3D model. As a result of the present research the followings are clarified: i) Amplitude of S2 tide correlates inversely with M2 tide; ii) Maximum velocity of nonlinear tidal current is around 20cm/s near bay mouth area of both bays; iii) In the case excluding tidal flat sedimentation is enhanced; and iv) Variation of nodal factor f for M2 tide can change erosion/sedimentation characteristics around mouth of Isahaya Bay.

1. はじめに

表-1に示す様に,有明海は我が国で最も大きな潮汐振幅をもつことで有名であり,その大きさゆえに広大な干 渇域をもつ.その面積は192km²であり,我が国の総干潟 面積の40%を占めるといわれている.有明海における近 年の環境異変が認識された後,膨大な研究が行われてき たが,それらのうち基本的な物理場である潮汐や潮流に ついても知見が集まっている.

それらの中で、藤原ら(2004)は、検潮所の潮汐デー タ解析と3次元数値シミュレーションから、諌早湾干拓 事業などの有明海内部の影響により、湾奥部(大浦)の 潮汐は減少したが湾口部(口之津)は増加したと報告し ている.田井ら(2006)は、検潮所データ解析と平面2 次元数値シミュレーションにより、外海(枕崎,福江) に対する潮汐増幅率が18.6年周期を持つ月の昇降点運動 の影響を表すファクターfの変動に対して逆位相で変化 すること、すなわち入力波である外海の潮汐の振幅に対 して湾内の潮汐増幅率が負の相関を持っていることを示 した.また、S2潮振幅がM2潮振幅(すなわちf)の変動 と逆位相の変化を示すことも報告している。安田(2006) も、検潮所データから外海(長崎)に対する潮汐増幅率 がfと逆位相で変化することを示し、その原因として海 底摩擦による非線形性の可能性を示唆した.さらに、田

| 1 | 正会員 | 博(工) | 九州大学准教授 大学院工学研究院環境 郑市部門 |
|---|-----|------|--|
| 2 | | 博(工) | デルフト工科大学准教授 土木工学・地 |
| 3 | 正会員 | 博(工) | 本件字 动 九州大学特任助教 大学院工学研究院環 |
| 4 | 正会員 | 博(工) | 境部印部门 鹿児島大学助教 大学院理工学研究科海 洋土木工学専攻 |

表-1 日本沿岸の潮汐振幅 [単位:cm]

| 地点 | M ₂ 潮 | S 2 潮 | 地点 | M ₂ 潮 | S ₂ 潮 |
|-----|------------------|--------------|-----|------------------|------------------|
| 住之江 | 172 | 75 | 函館 | 30 | 13 |
| 口之津 | 101 | 42 | 東 京 | 51 | 25 |
| 八 代 | 112 | 45 | 名古屋 | 65 | 31 |
| 牛深 | 85 | 36 | 大 阪 | 31 | 17 |
| | | | 広島 | 102 | 42 |

日本海洋学会沿岸海洋研究部会(1990)より抜粋

井ら(2008)は、検潮所データの詳細な解析から、外海 の潮汐振幅に対する潮汐増幅率の応答を定量的に示し、 諌早湾干拓の締切堤建設後にその応答特性が変化したこ とを明らかにした.これらのことは、有明海は潮汐の非 線形性がある程度強いことを意味していると考えられ る.前述の通り有明海は我が国では最も大きい潮汐を有 していることから、非線形潮汐の評価について我が国で 最も適した海域といえよう.

有明海に接続する八代海もまた潮汐が大きく(表-1), 2003~2004年の調査(木元,2006)によると,干潟面積 は46.9km²と有明海の1/4(すなわち,我が国の10%)程 度を有し,有明海と同様に我が国有数といえる.さらに, 八代海は外海域や有明海と非常に狭い海峡で接続されて いることから,潮汐の非線形性の存在が推測される.

そこで、本研究では数値モデルを用いて有明海や八代 海で発生していると考えられる非線形潮汐の基本特性を 調べた.さらに、現在の有明海における環境異変の原因 の一つが底質の細粒化(日本海洋学会、2005)であり、 八代海では微量水銀が含まれている水俣湾の底質が拡が っていることが確認されている(Tomiyasuら、2000)こ となどから、底質輸送構造へ非線形潮汐がどの程度影響 しているのかを数値実験的に調べた.



2. 非線形潮汐について

通常, 非線形潮汐は倍潮 (overtide) と複合潮 (compound tide) に分類されるが,前者は主要分潮であ る M_2 潮(角周波数: 28.984deg/hr)や S_2 潮(30deg/hr) が非線形効果により単独で高周波数に分離し,整数倍の 角周波数をもつ潮汐である.主な成分としては, M_4 潮 (57.968deg/hr)や M_6 潮(86.952deg/hr)などがある.一 方,後者については,異なる分潮が合成された結果生じ る潮汐であり,主要なものとして MS_4 潮(58.984deg/hr, M_2+S_2)がある.例えば英仏海峡では, M_4 潮の振幅が 30cm以上に達するなど無視できない大きさを持つ場合も ある(Pugh, 2004).

非線形潮汐の理論的な研究は、Le Provost (1991) によ るものがあり、主要な非線形潮汐成分について浅海流方 程式への摂動法の適用により起源を示している.例えば、 M_4 潮と MS_4 潮は浅海域の効果と空間的加速度の効果によ り、 M_6 潮は海底摩擦の影響であると示されている.

数値解析による研究は数多く存在しており, Daviesら (1997) は英仏海峡から北海に掛けての海域を3次元モデ ルで解析し, M₄潮の潮汐と潮流楕円のモデルパラメータ 依存性について調べている. Andersonら (2006) は, 同 じ海域について,人工衛星による潮位観測データを用い てM₄潮の空間分布を求めた. Tangら (2003) は,モデ ル湾において湾口の地形 (シルや半島の存在) による非 線形効果が入射する潮汐の振幅に対しどのような依存性 があるのかを平面2次元モデルで調べた. Shengら (2004) は,カナダのLunenburg湾で3次元モデルにより, M₄, M₆潮の生成メカニズムを調べている.

| 表-2 | 開境界両端地点 | 〔の主要4 | 成分の | 調和定数 |
|-----|---------|-------|-----|------|
|-----|---------|-------|-----|------|

| 地点/分潮 | 調整前* | | 調整後 | |
|--|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 阿久根 | 振幅[cm] | 遅角[°] | 振幅[cm] | 遅角[°] |
| $egin{array}{c} M_2 \ S_2 \ K_1 \end{array}$ | 79.7 34.9 25.4 | 221 247 206 | 71.7 31.4 22.9 | 211 229 209 |
| 0 ₁ | 19.7 | 185 下央「°] | 17.7 | 185 |
| | 振幅[cm] | 産用し」 | 振幅[cm] | 進用[] |
| M_2 | 86.0 | 229 | 86.0 | 219 |
| S_2 | 36.0 | 258 | 36.0 | 240 |
| \mathbf{K}_1 | 25.0 | 202 | 25.0 | 205 |
| O1 | 19.0 | 186 | 19.0 | 186 |

*海上保安庁(1983)

3. 解析方法の概要

(1) 数値モデルについて

本研究では,汎用沿岸域3D流動モデルであるDelft3D (Deltares, 2008)を適用し,有明海と八代海を結合したモ デルを作成した.図-1に本モデルの計算領域を示す.田 中ら(2002)は,両者を計算領域に含むことの重要性を 説明しており,有明海の潮汐の計算精度に影響のあるこ とを示している.

本モデルの主な特徴は、水平解像度が0.1°間隔 (Δx=250m程度)の直交座標系,鉛直方向にはσ座標系 (今回のバロトロピックな計算では、5層を適用)を適 用し、水平渦動粘性係数はSGSモデル、鉛直渦動粘性 係数はk-Eモデルで評価し、干潟モデル(干出-水没モ デル)を組み込んだことなどである.開境界は,鹿児島 県の阿久根と長崎県の樺島水道を結んだ線上で、両端の 調和定数をもとに、40分潮成分を与えた.なお、両端 の間は振幅と遅角を線形補間した. 開境界両端の既知の 調和定数は、それぞれ阿久根が1970年、樺島水道が 1891年の測定データから推定されており、現在の地形 条件では値は異なることが推測される. そこで, 湾内の 潮汐が実測値と合う様に主要4分潮(M₂, S₂, K₁, O₁) についてのみ両端の調和定数を調整した.表-2に、調整 前後の調和定数を示した.また,海底摩擦の評価には, Chezy 式を使用したが、Chezy 係数Cが未知のため、同 様にチューニングを行った. その結果, C=50m^{1/2}/sが最 適と判断された.

(2) 本モデルの計算精度について

計算精度については、まず潮汐について、対象海域内 の検潮所4地点(大浦,三角,口之津,水俣)の潮汐デ ータ,または2003年に著者らが独自に実施した八代海湾 口部3地点(天草,牛深,黒ノ瀬戸;図-1参照)におけ る潮汐観測のデータと比較した.その結果、7地点の RMS誤差は9~14cm程度であった.さらに、Daviesら (1997)により提唱されている次式で示される統計測度



| ケース | f値 | Chezy徐数[m ^{1/2} /s] | 十潟の有無 |
|---------|------------|------------------------------|-------|
| 1a | 1.0 | 50 | 有り |
| 2a | 1.038(最大値) | 50 | 有り |
| 3a | 0.963(最小値) | 50 | 有り |
| 1b | 1.0 | 60 | 有り |
| 1c | 1.0 | 40 | 有り |
| 1a-noTF | 1.0 | 50 | 無し |
| | | | |

H_sにより主要4分潮の計算精度を調べた.

ここで、nは観測地点数(=3:有明海の検潮所について 比較した)、 $HC=h_o \cos(g_o)-h_c \cos(g_c), HS=h_o \sin(g_o)-h_c \sin(g_c)$ で、 $h_o \geq g_o$ は測定値の振幅と遅角、 $h_c \geq g_c$ は計算値の振 幅と遅角である.計算の結果、 M_2 潮:6.8cm、 S_2 潮: 10.6cm、 K_1 潮:1.3cm、 O_1 潮:3.4cmという値を得た. 潮汐の計算結果の一例として、三角における2003年10 月後半の15日間についての計算値(実線)と観測値(丸 印)を図-2に示す.また、潮流については、小田巻ら (2003)が実施した有明海内の潮流観測結果と潮流楕円 で比較し、図-3に一例を示す通り良好な結果を得た.



4. 数値実験について

(1) 非線形潮汐の計算ケースについて

有明海の非線形潮汐の基本特性を調べるために,外力 としての潮汐を主要分潮のうちM₂潮とS₂潮のみを開境 界条件として与えた数値実験を行った.ここでは,**表-3** に示す6ケースについて実施した.ケース1a~3aは月の 昇交点運動に起因する18.6年周期の起潮力変動を表すf 値を変化させた系列であり,f値が取りうる最大値と最小 値による変化を見た.なお,このf値の影響は月の分潮 であるM₂潮にのみ作用するので,S₂潮は線形的であれば 変化しないはずである.ケース1a~1cは海底摩擦係数と して与えられたChezy係数を変化させた系列である.な お,Chezy係数は数値が大きいときに海底摩擦が小さく なることに注意が必要である.最後に,1aと1a-noTFは, 干潟域の有無による違いを調べる系列である.干潟を無 くしたケースでは,平均水深が5m以浅の海域を全て平 均水深5mに設定して計算を行っている.

(2) 非線形潮汐の計算結果

まず,図示しないが,ケース1a~3aの比較,すなわち

M₂潮の振幅が大きい場合と小さい場合の比較を行うと, 当然ながら有明海内の検潮所3地点では2a,1a,3aの順で M₂潮振幅が大きくなる.一方,S₂潮はそれとは逆に 3a,1a,2aの順で大きくなっており,田井ら(2006)が行 った実測潮汐データの解析結果と同様な傾向性が確認さ れた.また,ケース1a~1cの比較,すなわち海底摩擦の 影響比較によると,1aに対して海底摩擦が大きい1cは, 大浦でM₂潮,S₂潮ともに振幅が10cm程度小さくなり, 海底摩擦の小さい1bは5cm以上大きくなっていた.有明 海については,数cm精度の潮汐計算が求められている ことから,海底摩擦係数の評価は計算精度に大きく影響 すると言える.

次に、図-4、5に倍潮の M_4 潮と複合潮の M_3 潮につい て振幅の計算結果を示す.有明海内の検潮所がある口之 津、三角、ならびに大浦の値と開境界の両端に位置する 阿久根と樺島水道の値を示している.なお、これらの振 幅は、計算を開始して初期条件の影響が消え、安定した 後に15日間の計算結果からフーリエ変換して得られたも のである.いずれも有明海湾口の口之津で大きな値が得 られており、湾口の狭窄部における地形性渦が非線形潮 汐を生み出していることが分かる.前述の通りLe Provost により、これらの潮汐は空間的な加速度(すなわ ち、地形性渦の存在)が要因で発生すると理論的に示さ れており、この結果と一致する.また、干潟を無くした ケース 1a-noTF とその他の干潟有りのケースの比較より、 干潟域の存在が非線形潮汐を減衰させていることも確認 できる.

図-6にケース1aのM₄潮とM₆潮の潮流楕円の長軸長の 空間分布図を示すが、やはり、有明海湾口の早崎瀬戸、 八代海湾口の長島海峡と黒ノ瀬戸で著しい発生が確認さ れる.最大20cm/s近くまで流速が発生することを考える と、物質輸送への影響も小さくないと推測される.また、 M₄潮は干潟周辺の浅海域でも強いことが確認でき、Le Provostによる浅海域の存在がもう一つの要因であるとい う理論と一致した結果を示した.

(3) 底質輸送への影響について

前述のケースのうち,ケース1a~3aと1a-noTFの4ケ ースについて,底質輸送モデル(Deltares,2008)により 1ヶ月間(大潮-小潮周期の2倍)の計算を行い,堆積量 と浸食量の変化を調べた.初期条件として,計算領域全 体に一定厚さ(1m)の均質な底泥を敷き詰めた状態を設 定した.したがって,浸食厚は最大で1mまでとなる.

本数値実験は、底質の特性分布に基づく限界せん断応 力などの分布は考慮していないので、流れが変化したこ とによる底質の潜在的な浸食と堆積の傾向性がどう応答 するのかを調べたことになる.助走計算として10日間の 潮流計算を行い、流れ場に初期条件の影響が無くなった



図-6 M₄潮とM₆潮の潮流楕円長軸長分布 の計算結果(ケース1a,単位:m/s)



図-7 1ヶ月後の堆積/浸食厚分布の計算結果(左上:1a,右 上:1a-noTF,左下:2a,右下:3a,単位:m,正が堆 積,負が浸食)

後から,底質の再懸濁を可能にして,続けて1ヶ月間の 底質輸送を計算した.河川からの土砂供給は考慮してい ないので,底質が再懸濁し,潮流に乗って輸送され,沈 降し海底面に堆積するというプロセスのみが繰り返され ることになる.底質輸送に関するモデルパラメータにつ いては,既往の有明海における底質輸送に関する研究よ り,沈降速度:1.8mm/s,浸食パラメータ: 0.00033kg/m²/s,浸食に対する限界せん断応力:0.025Pa (以上,Nakagawa ら, 2008より),堆積に対する限界せん 断応力:1000Pa,干渉沈降の参照密度:1600kg/m³と設定 した. モデルの詳細については説明を省くが,干渉沈降 はRicharson-Zakiの経験式,堆積速度はKroneの式,浸食 速度はAriathurai-Partheniadesの式を使用している.

図-7に各ケースの1ヶ月後の堆積厚/浸食厚分布の計 算結果を示す.ケース1aより,潮流の大きい有明海湾口 から島原半島に沿った海域,八代海の長島海峡から八満 瀬戸を抜けて御所浦島までの海域,ならびに黒ノ瀬戸周 辺において主な浸食が見られている.一方,竹崎周辺の 諫早湾湾口,熊本の沖合,本渡周辺,有明海の外海であ る橘湾,八代海の南部海域,八代の沿岸が主な堆積域と いえる.

干潟を無くした場合(1a-noTF),干潟域の変化より現 況で堆積域であった場所において堆積が促進される傾向 が見られた. fの最大値(2a)と最小値(3a)の場合の比 較では、当然ながらM₂潮の減少により潮流流速も低減 するケース3aの方が、堆積傾向が強くなっている. 諫早 湾湾口海域での変化が大きいので、2006年に最小値を取 ったfが底質環境へ何らかの影響を与えた可能性が示唆 される. 主流である M₂潮やS₂潮の流速が元々大きい海 域では、線形成分と非線形成分の変化量が相対的に小さ いため底質輸送に与える影響があまり見られないが、主 流が小さい海域、すなわち堆積傾向を示していた海域で は、相対的に影響が顕著に表れたと考えられる.以上の ように、各ケース間で堆積・浸食傾向に違いが見られた が、今後、SS濃度、再懸濁fluxなどの周波数特性を調べ、 潮流の主要分潮と非線形分潮の寄与を確認する必要があ る. さらに、今回の検討では. 開境界条件として M2潮 とS,潮のみを与えたが、主要4分潮を与える場合と、実 際の多数の分潮を与えた場合についても検討を要すると 考えられる.

4.まとめ

本研究では、有明海.八代海における非線形潮汐の基本的な特性について数値実験により調べた.我が国で一、 二の潮汐が大きい海域である両海域では、数cm程度の 非線形潮汐と最大20cm/s程度の非線形潮汐の潮流成分が 確認された.また、18.6年周期で変化するf値や干潟の有 無が底質輸送に影響を与えることも確認できた.

謝辞:本研究は、(財) 鹿島学術振興財団による2006年 度派遣研究者派遣援助により実施された.ここに記し、 深甚なる感謝の意を表する.

参考文献

- 小田巻実・大庭幸広・柴田宣昭(2003): 有明海の潮流新旧比 較観測結果について,海洋情報部研究報告,第39号, pp.33-61.
- 海上保安庁(1983):日本沿岸潮汐調和定数表,172p.
- 木元克則 (2006):八代海におけるこの2-30年間の干潟とアマ モ場の変化,月刊海洋,第38巻,第2号,pp.142-147.
- 田井 明・Mukhsan P. Hatta ・矢野真一郎・斎田倫範・小松利 光 (2006): 諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に 与えた影響,海岸工学論文集,第53巻, pp. 331-335.
- 田井 明・矢野真一郎(2008):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.
- 田中昌宏・稲垣 聡・山木克則 (2002): 有明海の潮汐及び三 次元流動シミュレーション,海岸工学論文集,第49巻, pp.406-410.
- 日本海洋学会(2005):有明海の生態系再生をめざして,211p.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会(1990):続・日本全国沿岸海 洋誌(総説編・増補編), 839p.
- 藤原考道・経塚雄策・濱田孝治(2004):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.
- 安田秀一(2006):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周期との共振-, 海の研究,第15巻,第4号, pp. 319-334.
- Anderson, O.B., G.D. Egbert, S.Y. Erofeeva and R.D. Ray (2006): Mapping nonlinear shallow-water tides: a look at the past and future, Ocean Dynamics, Vol.56, pp. 416-429.
- Davies, A.M., A.C. Kwong and R.A. Flather (1997): Formulation of a variable-function three-dimensional model, with applications to the M2 and M4 tide on the North-West European Continental Shelf, Cont. Shelf Res., Vol. 17, No. 2, pp. 165-204.
- Deltares (2008): DELFT3D-FLOW, user manual, ver.3.14.
- Le Provost, C. (1991): Generation of overtides and compound tides, in Tidal Hydrodynamics (Parker, B.B. ed.), John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 269-295.
- Nakagawa, Y. and H. Yoshida (2008): Field observation and modeling of suspended fine sediment load in Ariake Bay, Japan, in Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005, Proc. of Marine Science, Vol.9 (Kusuda, T., H. Yamanishi, J. Spearman and J.Z. Gailani eds.), Elsevier, pp. 155-163.
- Pugh, D. (2004): Changing Sea Levels, Cambridge University Press, 265p.
- Sheng, J. and L. Wang (2004): Numerical study of tidal circulation and nonlinear dynamics in Lunenburg Bay, Nova Scotia, J. Geophysical Res., Vol.109, C10018, 16p.
- Tang, Y. M. and R. Grimshaw (2003): The effect of barriers on the tidal range in estuaries, Estuarine Coastal and Shelf Res., Vol.58, pp. 57-66.
- Tomiyasu, T., A. Nagano, N. Yonehara, H. Sakamoto, Rifardi, K. Oki and H. Akagi (2000): Mercury contaminant in the Yatsushiro Sea, south-western Japan : spatial variations of mercury in sediment, Sci. Total Environ., Vol. 257, pp. 121-132