

半閉鎖性海域における副振動の挙動と有明海の潮汐の増幅

安 田 秀 一*

有明海の半日周期潮汐は、水質を保つ上で重要な役割を演じているが、近年はその振幅減少による水質悪化が危惧されている。本研究では、有明海北部の大浦の潮位を調和解析し、振幅分布や変動を調べ、さらに、有明海外部の長崎との比較による増幅率の経年変動も明らかにした。それによると、大浦の M2 潮の振幅は最近減少しているが、その原因は有明海以外にあり、増幅率はほとんど変化がないことが示された。また、有明海の大きな潮汐振幅は副振動(固有振動)に関わっていることから、副振動を他海域や過去のものと比較することによって、その振舞を調べた。副振動は複数のピークをもっており、そのピークは複合潮に共振して現れている。

1. はじめに

有明海北部海域の 2003 年夏季の観測結果から、潮位や DO などに約 8 時間 20 分周期の明瞭な変動が認められ、それが有明海の副振動に相当し潮汐増幅に関わっているのではないかと前報(安田ら, 2004)で報告した。有明海の潮汐についてはいくつかの報告があるが(宇野木, 2002; 灘岡ら, 2002; 塚本ら, 2002 など)、副振動の発生やそれに伴う潮汐の増幅について詳しく検討した研究報告はほとんど見当たらない。本研究では、有明海の半日周期潮汐の振幅変化を明らかにするには副振動の振舞を把握する必要があるとの観点から、まず単純な矩形湾における潮汐増幅の基本的な挙動を解析し、それに基づいて、JODC から公開されている有明海湾奥部の大浦と外側に位置する長崎の潮位データの調和解析によって、M2 潮成分などの半日周期成分の振幅や増幅率の経年変化を調べた。さらに潮汐増幅に関わる副振動の特性を明らかにするために、有明海およびその他の各海域の副振動の挙動を調べた。

2. 矩形湾内の潮汐増幅の解析

副振動と潮汐増幅率の基本的な関係を調べるために、矩形湾内の潮汐の挙動を解析した。矩形湾は海底が平坦で平均水深が h 、湾長が l 、湾幅は横断方向には潮位などの変化は無視できる程度に狭く、周期 T の潮汐が $x=0$ の湾口から進入するものとする(図-1)。

解析の複雑さをさけるために、潮汐による海面変動量 η は h に比べて十分に小さく非線形効果はないものとし、鉛直平均流 u と η を支配する運動方程式と連続式は、それぞれ次のような式で表されるものとする。

$$u_t = -g\eta_x - Ru \cdots (1), \quad \eta_t + (hu)_x = 0 \cdots (2)$$

ただし t は時間で添字 x , t はその微分を示す。また g と R はそれぞれ重力加速度と摩擦抵抗係数である。

湾口から進入する潮汐を $\eta_0 \cos \omega t$ とすると、潮流と潮位は $u(x, t) = U(x) \exp(i\omega t)$ と $\eta(x, t) = E(x) \exp(i\omega t)$ のようにおくことで、式(1)と式(2)はそれぞれ $i\omega U = -gE_x - RU$ と $i\omega E + hU_x = 0$ のようになり、ここで知りたい潮位変動は、 U を消去した次の方程式から得ることができる。

$$i\omega E - gh(R - i\omega)E_{xx}/(R^2 + \omega^2) = 0 \cdots (3)$$

境界条件は、 $E = \eta_0(x=0)$, $E_x = 0(x=l)$ で表すことができる。潮汐の振幅は E の絶対値で求められるが、潮汐の増幅率は、 E_l を湾奥部での振幅として、 E_l/η_0 で表している。なお、水平粘性率は解を複雑にし、さらにこのモデルでは効果的ではないことから(安田, 1983)ここでは省いている。

図-2 は湾長と増幅率の関係を、各無次元摩擦 (R/ω)

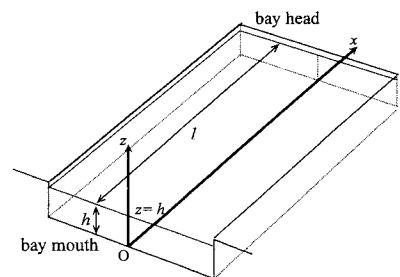


図-1 潮汐が進入する矩形モデル湾

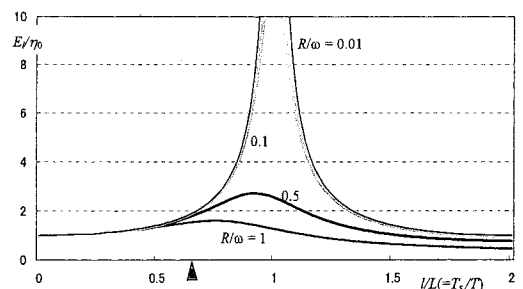


図-2 湾の無次元長による湾奥における潮汐の増幅率

毎に描いたものである。矩形湾の第1モードの固有振動周期 T_s は $4l/(gh)^{1/2}$ で表されるが、この値が潮汐周期 T に一致するときの湾長を L として、 l/L を横軸(T_s/T に相当)にしている。この図は、短い湾においては潮汐はほとんど増幅しないが、湾が長くなって固有振動が潮汐周期に近づくに従って増幅率が急激に大きくなることを示している。横軸の▲印は、前報で推測された有明海の固有振動周期(約8.3時間)とM2潮周期の比に相当し、このときの増幅率は、1.8~2.0程度であることを表している。

3. M₂潮やその他の半日周期成分の変化

調和解析に際しては、半日周期成分に限ってみても20個以上の潮汐成分があり、解析の分解能が悪い場合には、得られた調和常数には対象とした成分以外のものを含んでいる可能性もある。潮汐振幅のわずかな違いを議論する場合には、分解能をできるだけ高くして精度を上げる必要があり、さらに第4章では未知の副振動周期を調べるということもあって、本報告では、解析するデータ数に注意を払いながら(中野, 1940)、フーリエ解析を適用して調和解析した。

(1) 夏と冬の半日周期成分

1年分のデータの解析結果によると、大浦と長崎においては年周期のSa潮成分の振幅は19 cm から20 cm となったが、このことは冬と夏の平均潮位差が40 cm に達することを意味している。この平均潮位の違いは湾の平均水深に関わり、固有振動周期や半日周期成分の増幅率も冬と夏では異なるのではないかと推測させる。このことから、冬季は1月1日、また夏季は7月1日から、それぞれ87日分の長崎と大浦のデータを調和解析し、半日周期成分(代表的なM2潮、S2潮、N2潮)の冬季と夏季の増幅率(大浦と長崎の振幅の比)を比較した。

表-1には2002年のものを示す。それぞれの潮汐成分を見ると、期間が短いこともあってバラツキもあるが、増幅率はどの成分も一様に夏季の方がわずかに大きくなっている。平均潮位は夏季の方が約39 cm 高くなっていることも示されているが、単調な矩形湾では平均潮位の高くなる夏季には固有振動周期が短くなって増幅率は抑制されることになる。この相違は、実際の有明海は広大な干潟や多くの島の影響で地形が複雑で、固有振動に関

表-1 半日周期成分と平均潮位の冬と夏の比較 (2002年)

	M2	S2	N2	平均潮位
長崎 冬	80.3 cm	38.3 cm	20.6 cm	273.7 cm
長崎 夏	78.6 cm	33.9 cm	12.4 cm	312.9 cm
大浦 冬	146.3 cm	70.1 cm	35.7 cm	377.1 cm
大浦 夏	148.0 cm	63.2 cm	21.9 cm	416.1 cm
増幅率 冬	1.821	1.833	1.730	
増幅率 夏	1.883	1.864	1.774	

わる代表寸法が一律には決まらないことによるものと考えられる。

(2) 半日周期成分の経年変動

白道の傾斜変動に基づく f 値の周期が18.6年であることから(中野, 1940)、経年変化は、それよりも長い1981年から2003年までの23年間を調べた。それぞれの1年分の解析結果は、その年の1月1日から369日分のデータを用いている。

まず、大浦の2002年の潮位を解析して得られた半日周期周辺の振幅を、図-3にスペクトルのように表した。小さなドットが各周期における振幅である。これを見るとM2とS2に明瞭なピークがあるが、N2(周期12.658時間)は明瞭とは言えない。N2の分解能を上げるために、図-4には2000年1月1日から3年分(26568時間)の解析結果を描いた。ここではN2潮のピークもかなり明瞭に示されている。図中の記号は潮汐成分を示す。

図-5は、大浦と長崎におけるM2潮成分の振幅及びその比(増幅率)の経年変動である。大浦の1985年、1989年、1990年のデータは1ヶ月以上の連続した欠測があったために除外した。2001年の有明海北部海域の赤潮発生を機に、諫早湾の潮止め堰が有明海の潮汐を減少させたというマスコミ報道が盛んになされたが、大浦のみに注

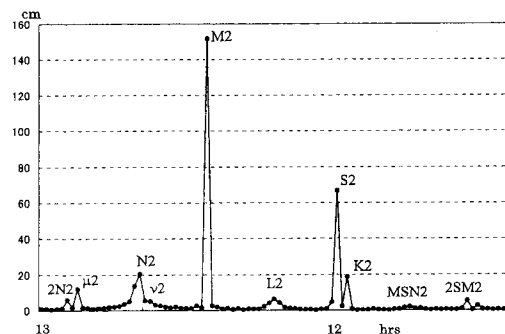


図-3 1年分(2002年)のデータの半日周期潮汐の振幅分布

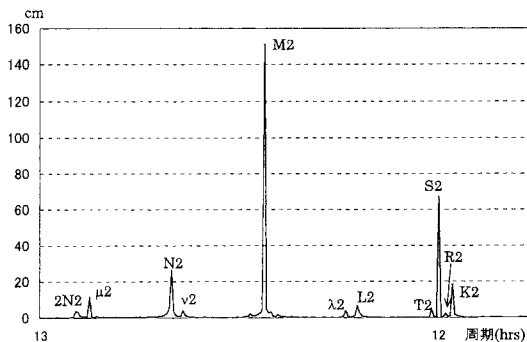


図-4 3年分のデータの半日周期潮汐の振幅分布

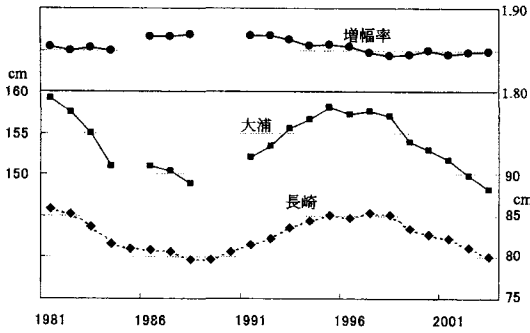


図-5 大浦と長崎におけるM2潮振幅と増幅率の経年変動

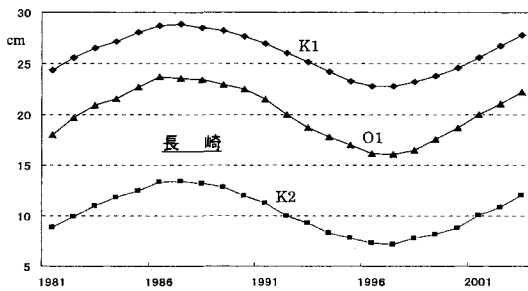


図-6 長崎におけるK1, O1, K2各潮汐振幅の経年変動

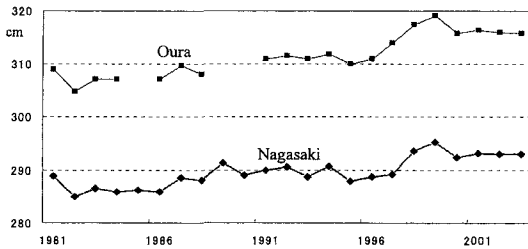


図-7 大浦と長崎における年平均潮位の経年変動

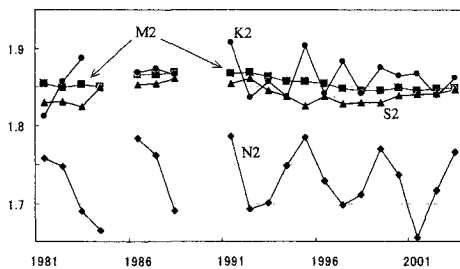


図-8 主要半日周期成分の増幅率

目すると確かに潮止め堰完成後にM2潮汐が減少した様子が窺える。しかしながらこの図を見ると、長崎も同時に減少しており、増幅率はほとんど変化がないことがわかる。全体的な変動は18.6年周期の f 値に基づくもので、その上にさらに別の変動も認められるが、これは図-7に示す平均潮位の変動に関わるものではないかと考えられる。また、増幅率は小さいながらも f 値によるものと逆位相に変動しているように見えるが、この原因は、振幅が大きくなったことによって非線形効果が潮汐の増幅を抑制したことによるのではないかと考えている。

図-6はO1, K1, K2の値の長崎における経年変動を示している。中野(1940)にも記されているように、これらはM2潮の変動とは逆位相になって、 f 値の影響をきれいに表しているといえる。

図-7には、長崎と大浦の年平均潮位の経年変動を描いた。これを見ると、宇野木(2002)や灘岡ら(2002)にも示されているように、平均潮位は変動を伴いながら徐々に上昇する傾向にあり、その変動は、両地点でよく対応している。上昇傾向は地球温暖化に伴う海面上昇を反映しているのかもしれないが、彼らが報告した後の2000年以降は上昇もやや抑えられているようにも見受けられる。海面上昇の原因については、対馬暖流の流量の影響なども推測され、より長期間のデータから判断する必要があると考えている。

図-8には主要な半日周期潮汐(M2, S2, N2, K2)の増幅率の経年変動を描いた。図-2の結果から判断すると、周期が短い潮汐成分ほど固有振動周期に近づいて増幅率が大きくなると考えられるが、この図には必ずしもその傾向は見受けられない。また、N2については周期的な変動すら認められる。これは図-3と図-4からわかるように、N2潮(周期12.658時間)の分解能によるもので、精度を上げるために2000年1月1日からの3年分のデータから増幅率を求めると1.734であった。ちなみに同じ3年分のデータによるM2, S2, K2の増幅率は、それぞれ、1.847, 1.840, 1.852であった。これらの増幅率が図-2から推測される傾向と一致しない理由は、干潟などに伴う潮汐現象の非線形性によるものと考えられるが、これについてはさらに詳細を検討する必要がある。

4. 副振動の解析

第2章の増幅率に関する解析結果や安田ら(2004)の観測結果から、有明海の固有振動周期は約8時間程度であると推測することができるが、図-9には、大浦における周期9時間から7時間の間の各周期毎の振幅を示した。潮止め堰などによる有明海の地形変化の影響も確認したいために、1983年と2002年の場合の両方を描いてい

る。これらを見ると、複数のスパイク状のピークがあるが、ここに現れるような通常の潮汐成分以外の振動成分をここでは「副振動」とする。図-5などの半日周期潮汐の増幅率に違いが認められなかったように、図-9の両グラフの間にも明瞭な相違は見られない。

より広い範囲の副振動の様子を見るために、図-10に周期10時間から3時間の範囲の振幅分布を描いた。各周期毎の振幅のピークは、M2潮成分の倍潮であるM3、M4、M5、M6各潮汐の周辺に見受けられ、さらにM7とM8潮の周辺にもピークを認めることはできるが前者の4成分に比較すると非常に小さい。以後これらの各グループをM3潮群のように群をつけて標記する。

比較のために、名古屋、広島、大阪の副振動と思われる振幅分布を図-11に描いた。名古屋の振幅分布は全体的に小さいながらも大浦の場合にかなり近く、伊勢湾の外部の舞阪のM2の振幅が31.09 cm、名古屋が64.17 cmで、この比率は2.064となり、有明海に近い増幅率を生み出していると思われる。広島や大阪にはM6潮群に大きな振幅がみられる。「広島湾東部に位置する音戸ノ瀬戸の潮流は、半日周期ではなく1日に6回流向が変わる」ことが地元の漁業者に知られているが、広島のM6潮周期の潮位変動が音戸ノ瀬戸にこのような流れを引き

起こしているものと考えられる。図-10と図-11から、有明海と伊勢湾ではM3潮群に主たる副振動が生成され、広島湾と大阪湾ではM6潮群を中心に副振動が生成されていると言える。

では、これらの図にみられるスパイク状のピークは何を表しているのだろうか？ 副振動と思われる振幅のピークを詳しくみるために、図-12に、大浦のM3潮群に注目して、この部分のみの振幅分布を描いた。M3潮周期(8.28039時間)は、369日(8856時間)では整数で分割できないが、その2倍のデータを用いることによってそれに近い周期に分割できることから、738日分のデータを解析結果に表した。これによってM3潮周期のところに明瞭なピークがあることが示された。その他のピークについても、潮汐との関係を調べるために、日周潮や半日周潮の各潮汐成分を用いて可能な複合潮を算出してみたが、各ピークは図中に示したような複合潮に相当するところに現れていることが分かった。図中には、振幅が0.3 cm以上のものに複合潮の記号を記入したが、記号の付け方は中野(1940)に従った。複合潮の周期のところに現れる振幅のピークは、M4潮群などの他のグループのところでも同様で、他の海域でも振幅のピークは複合潮に相当するところに現れている。

5. 考 察

単純なモデルの解析によると、固有振動周期が8時間

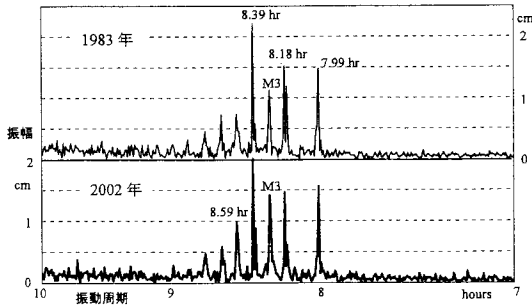


図-9 大浦の副振動と1983年と2002年の比較

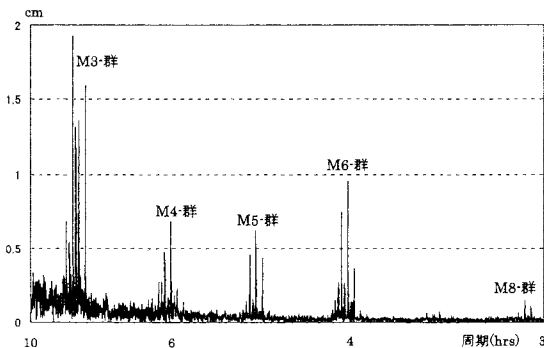


図-10 周期10時間から3時間の間に現れる大浦の副振動(2001年)

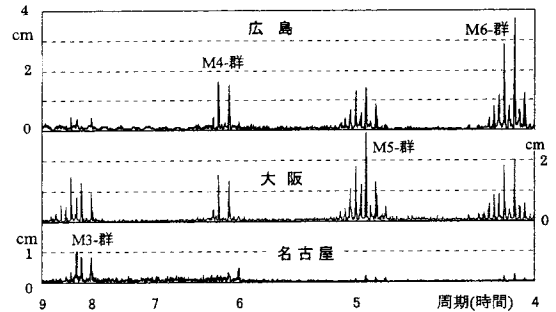


図-11 広島、大阪、名古屋の副振動(2002年)

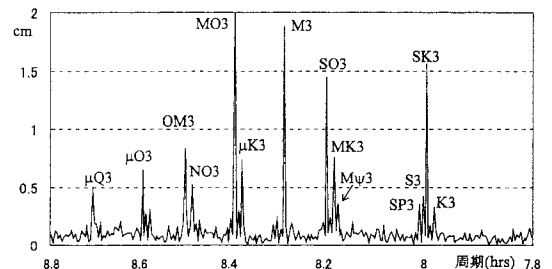


図-12 大浦のM3潮群の副振動(2001年~2002年)

の内湾においては、半日周期潮汐の湾奥での増幅率は約1.8~2.0程度になることが示されたが、これらの数値は前報(安田ら, 2004)で想定した有明海の有効サイズの場合とよく対応している。調和解析によると有明海にはこの周期8時間付近(M3潮群)に複数の明瞭なピークが現れたが、これは有明海の固有振動と複合潮が共振したことによって副振動として現れたものと考えられる。多くの複合潮と共振する理由は、振幅が大きく周期が長い半日周期の潮汐の中で固有振動が生じているためで有効水深が変化することによるのではないかと考えられる。有明海の場合は最大潮位差が5 m 以上になることからするとこの影響は大きいと思われる。

また、有明海の副振動の中にM4潮群やM6潮群も現れた理由は、有明海の地形が複雑で単一には定まらず、様々な固有振動の可能性を含み、それぞれの複合潮や倍潮と周期が一致したところでそれが現れたものと思われる。広島湾も同様と考えられ、さらに大阪の潮汐についても、大阪湾のみの場合や紀伊水道までも含んだ場合など様々な固有振動の可能性を含んでいるのではないかと考えている。

灘岡・花田(2002)は平均海面の上昇と潮汐振幅の減少について触れているが、最近20年間の平均潮位の上昇は10 cm 程度であり、第3章(1)の結果によると平均潮位が40 cm 近く異なっても潮汐振幅にはほとんど影響はないようで、このことから判断すると、最近の平均海面の上昇が有明海内部の潮汐振幅の減少に関わっているとは思われない。平均海面の変動は、外部海域における無潮位点など潮汐伝播の挙動には影響している可能性はあるかもしれないが、これについては外部海域での潮汐のシミュレーションなどで調べる必要がある。

6. おわりに

潮汐データを詳しく解析することによって、副振動に関するなどが新たに明らかになったが、諫早湾の潮止め堰が潮汐に与えた影響は確認できなかった。

JODCで管理されている信頼度の高い長期間の潮位データは測点が限られていることから、有明海の潮汐の増幅率は、ここでは大浦と長崎の振幅の比で定義した。解析解などによると(安田, 1983), 大浦の潮位は十分に湾奥部のものを代表してと考えられ、この比は有明海の潮汐の増幅率を表しているものと考えている。

謝辞: 本研究は、文科省科研費補助金(基盤研究(B)(2)15360268, 研究代表者: 松永信博)による研究の一環で行われたものである。潮位データはJODC(日本海洋データセンター)のものをインターネットを通して利用させていただいた。また、産総研中国センターの高杉由夫博士からは潮汐の解析に際して有益なコメントをいただいた。ここに関係各位に記して謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(2002): 有明海における潮汐と流れの変化, 海と空, 78-1, pp. 19-30.
- 塚本秀史・柳哲雄(2002): 有明海の潮汐・潮流, 海と空, 78-1, pp. 31-38.
- 中野猿人(1940): 潮汐学, 古今書院, 528 p.
- 灘岡和夫・花田岳(2002): 有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防縮切の影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 410-405.
- 安田秀一(1983): 境界層による潮汐残渣流系-方程式と湾長が任意の場合の解-, 中国工業技術試験所報告, 19, pp. 67-86.
- 安田秀一・松永信博・徳永貴久・阿部 淳・高島創太郎(2004): 有明海北部海域の夏季洪水期の物理的環境特性と溶存酸素の変動, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 911-915.