

諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響

田井 明¹・Mukhsan Putra HATTA²・矢野真一郎³
齋田倫範⁴・小松利光⁵

諫早湾潮受け堤防の締切りによる有明海の潮汐への影響を調べるために大浦, 口之津, 福江, 枕崎の潮位データについて調和解析を行なった。その結果, 有明海の増幅率は 18.6 年周期の M_2 潮の変動と逆位相で変動すること, ならびに, 締切りにより外海に対する大浦の潮汐振幅は減少, 口之津は増加したことが分かった。また, 数値シミュレーションにより潮流の変化を調べた結果, 島原半島沿いに集中して影響が現れること, 湾口の早崎瀬戸においても変化が生じること, 締切りの影響の精確な評価には M_2 潮以外の分潮の考慮も必要であることが示唆された。

1. はじめに

有明海は九州西部に位置し東シナ海と早崎瀬戸でつながる閉鎖性内湾であり, 日本一大きい干満差を持つ潮汐による日本一広大な 207 km²に及ぶ干潟面積を有している。また, 漁業が盛んであり, かつては“豊饒の海”とも呼ばれていた。しかし, 約 20 年前からタイラギやアサリの漁獲量が減少し続けており, 水環境は疲弊している。1997 年 4 月に潮受け堤防の締切りが行なわれた諫早湾干拓事業による潮汐・潮流の変化や干潟の減少が有明海の水環境をさらに悪化させた可能性が指摘されており, これまで原因究明のために多くの研究が行なわれてきた。

宇野木 (2003), 灘岡・花田 (2002), 塚本・柳 (2002) は, 有明海で最も支配的な分潮である M_2 潮に注目して実測潮位データの解析や潮流数値シミュレーションを行い, 諫早湾干拓事業により湾奥の大浦の潮汐が減少していることを示した。藤原ら (2003) は有明海湾口の口之津に注目して解析を行い, M_2 潮潮汐振幅は堤防により大浦で減少, 口之津では増加し, 堤防の影響が場所により異なることを示した。また, 千葉・武本 (2003) は堤防締切りの影響は潮汐振幅により変化し, 振幅が小さい小潮期ほど影響が顕著であるという振幅依存性を数値解析により示した。さらに安田 (2005) は, 有明海外部の長崎に対する大浦の M_2 潮の増幅率は堤防締切りによる影響をほとんど受けていないことを示した。このように潮汐についてだけでも多くの研究が行なわれているが, 潮受け堤防の影響についてまだ不明な点も多い。

また, 潮流は湾内の物質輸送を支配する現象であると共に, 潮汐の変化にも敏感に反応すると考えられる。有

明海的环境異変に与える影響は潮汐よりも潮流の変化の方が重要であるが, 締切り以前の潮流観測データは少なく堤防の影響評価は容易ではない。

そこで本研究では, 有明海の潮汐振幅がどのように変化したか, 外洋と湾内の増幅率の経年変化に特に注目して詳細に解析を行なった。また, 高い空間解像度を有する潮流シミュレーションにより締切りの潮流への影響について検討を行なった。

2. 解析の概要

(1) 実測潮位データの解析

解析には日本海洋データセンター (JODC) から公開されている大浦, 口之津, 福江, ならびに枕崎の毎時潮位データを用いた。各検潮所の位置を図-1 に示す。1968 年から 2004 年までのデータを 30 日ずつ解析期間をずらしながら, 369 日分のデータについて 38 分潮に対して最小自乗法による調和解析を行なった (中野, 1940)。その際, エラーデータが 1 割以上ある期間は欠測として扱った。福江を除く 3 地点の M_2 潮 (周期:

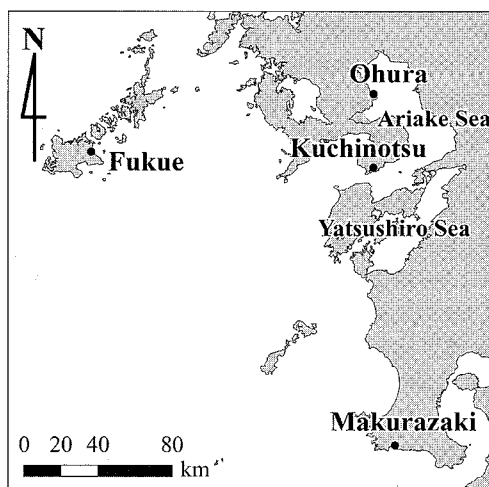


図-1 有明海と検潮所の位置

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
2 ME. 九州大学訪問研究員大学院工学研究院環境都市部門
3 正会員 博(工) 九州大学助教授大学院工学研究院環境都市部門
4 正会員 博(工) 九州大学学術研究員大学院工学研究院環境都市部門
5 フェロー 工博 九州大学教授大学院工学研究院環境都市部門

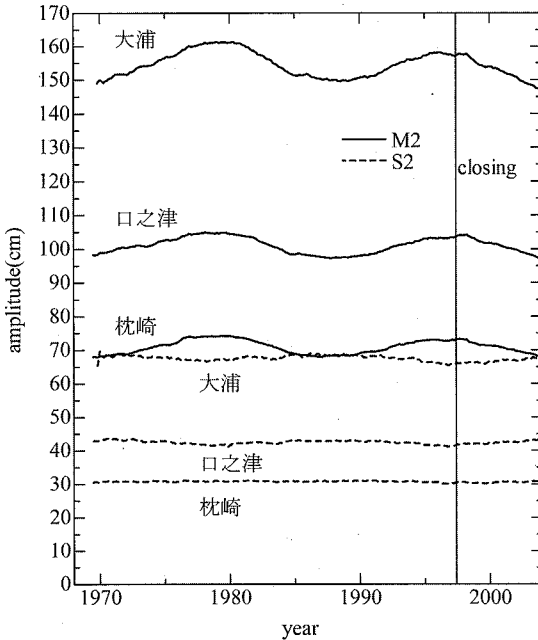


図-2 潮汐振幅の時間変動

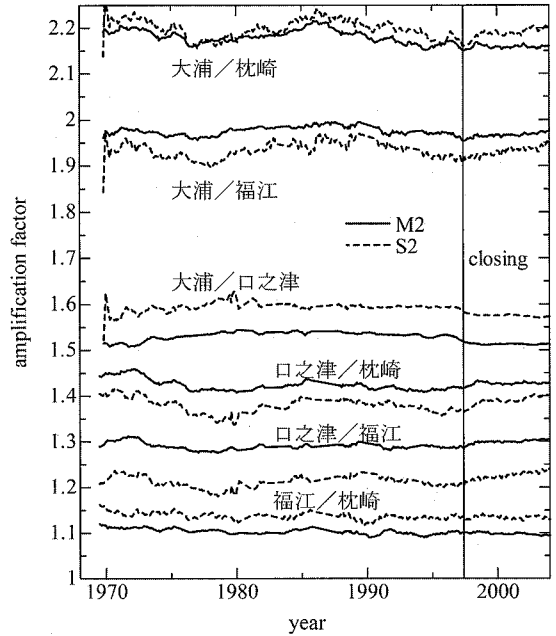


図-3 増幅率の時間変動

12.42 hour) と S_2 潮 (周期: 12.00 hour) の振幅の時間変動を図-2, 各地点間の増幅率の時間変動を図-3 にそれぞれ示す。図中の縦線 (closing) は堤防が締切られた1997年4月を示している。月の昇交点運動の影響は除去していないため、月から起潮力を受ける M_2 潮は18.6年周期の変動を示している。大浦や口之津の S_2 潮は、僅かながら M_2 潮と逆位相の変動を示した。本来、 S_2 潮は地球の自転による太陽から受ける起潮力の変化に起因する分潮であるので、一定値となるはずである。この傾向は、外海の枕崎や図示はしていないが福江では見られなかったことから、調和解析の精度的な問題とは考えにくい。したがって、有明海内部の要因により S_2 潮に影響が与えられている可能性が考えられる。

(2) 数値シミュレーションの概要

潮流シミュレーションは千葉・武本 (2003) によって開発された平面2次元モデルを用いて行った。支配方程式は平面2次元の浅水方程式で、これを一般曲線座標系を用いた有限差分法により離散化し、移流項の差分には河村桑原スキームを用いている。

本研究では、地形性流れを高精度に解析するために、計算領域は有明海と八代海の両方を考慮し、総格子数は 904×312 、格子幅は有明海灣口付近で約150 m、諫早湾内では約100 m と水平地形に関してはかなり高い解像度となっている。水深は、日本海洋データセンターの500 m 水深メッシュデータに、海図から読み取った浅海

表-1 計算条件

開境界で与える潮汐	2003年7月の福江の実測潮位, M_2 潮のみ、振幅: 0.2 m, 1.4 m
計算時間ステップ (s)	2.857
水平渦粘性係数 (m^2/s)	1.0
コリオリ係数 (s^{-1})	$1.454 \times 10^{-4} \sin \phi$ (ϕ : 緯度)

域のデータを加えて補間することにより作成した。その際、計算領域に9つある潮位基準面の補正を行っている。解析は、小松ら (2004) による大規模一斉観測「有明プロジェクト II」の行われた2003年7月を対象として、有明海灣口から150 km 離れた東シナ海上にある開境界に福江の実測潮位を与えた場合、 M_2 潮のみ (振幅0.2 m, もしくは1.4 m) を与えた場合の3ケースについて行なった。主な計算条件を表-1に示す。

本モデルによる M_2 潮潮汐振幅の増幅率と位相差の計算結果と観測値の比較を図-4に示す。 M_2 潮潮汐振幅の増幅率と位相差は良好に再現できていることが分かる。また、詳細は省略するが、小松ら (2004) によって得られた長崎県有明町と熊本県長洲町を結ぶラインに生じる非一様な流速分布や、齋田ら (2006) により観測された振動流境界層により島原半島沿いに生じる潮流の位相差も良好に再現できている。本モデルは有明海の潮汐や潮流を良好に再現しているといえる。

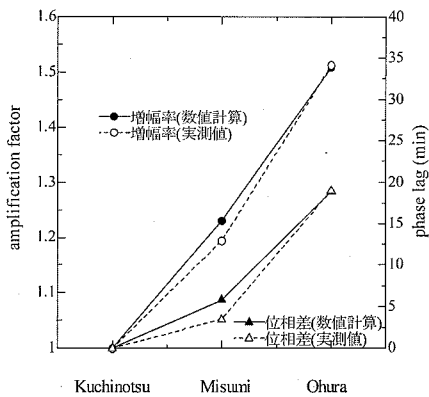


図-4 観測値と数値シミュレーション結果による M_2 潮の増幅率と位相差の比較 (口之津を基準として)

3. 解析結果と考察

(1) 潮汐について

図-2 より M_2 潮潮汐振幅は、月の昇交点運動の影響を表す係数 f が極大となり、 M_2 潮潮汐振幅の経年変化が極大となる 1980 年頃と 1997 年頃を比較すると、全地点で 1997 年の方が減少していることが分かる。特に大浦では約 3 cm の減少が生じていた。この傾向は、Ray (2006) が Maine 湾において約 100 年間の M_2 潮潮汐振幅の変動を解析した結果と一致しており、地球温暖化による海面上昇など地球規模の変動が原因であると考えられるが、今後の検討が必要である。

図-3 より、口之津に対する大浦、枕崎に対する福江を除き、増幅率には M_2 潮潮汐振幅の 18.6 年周期の変動と逆位相の変動が生じていることが分かる。これは、海底摩擦や湾口の早崎瀬戸が狭いことによるエネルギー損失などの非線形作用によるものと考えられる。口之津に対する大浦、枕崎に対する福江の増幅率がこの傾向を示さないことは、口之津の潮汐が有明海内部の現象に規定されることを示唆している。したがって、湾内の地形変化による湾内の応答の違いを評価する際、口之津を基準とすることは適当でないと考えられる。よって、本研究では外海である福江と枕崎を基準に評価を行なう。

S_2 潮の増幅率の時間変動は、 S_2 潮の振幅の変動ではなく振幅の大きい M_2 潮の変動と逆位相になった。図示しないが、 O_1 潮や K_1 潮の増幅率の変動も M_2 潮の変動と逆位相となった。これは、最も大きい振幅を持つ M_2 潮が現象の非線形性を引き起こす要因となっているためであると考えられる。

潮受け堤防による M_2 潮の増幅率の変化を調べるために、図-5、6 に枕崎と福江に対する大浦と口之津の増幅率について、それぞれ枕崎と福江の M_2 潮振幅別に整理したものを示す。締切り前を黒丸、締切り後を白丸で示

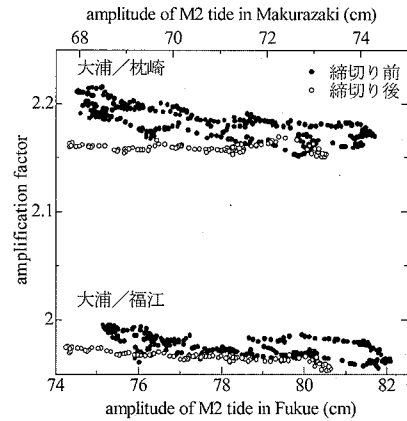


図-5 福江と枕崎の M_2 潮振幅別の福江と枕崎に対する大浦の増幅率

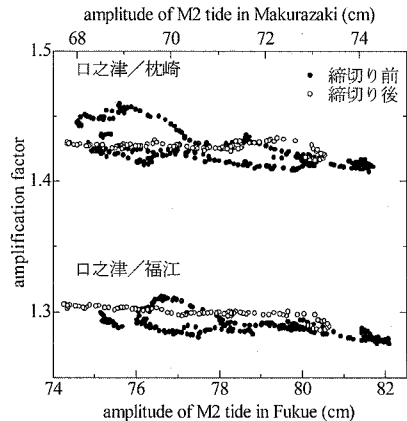


図-6 福江と枕崎の M_2 潮振幅別の福江と枕崎に対する口之津の増幅率

している。図-5、6 ともに右下がりとなっており、入力波である外海 (福江と枕崎) の振幅が大きいほど前述した非線形作用により増幅率が小さくなっていることが分かる。大浦の締切り後の増幅率は締切り前と比較して小さくなる傾向があることから、外海に対する大浦の増幅率は、締切りにより減少したといえる。一方、口之津では増幅率は締切り後の方が大きくなる傾向が見られた。図示しないが、大浦と口之津における S_2 潮の傾向は M_2 潮と同様で、 S_2 潮の外海に対する増幅率は大浦では減少、口之津では増加となった。

有明海を矩形湾とみなした場合、固有振動周期 T_1 は

$$T_1 = \frac{4L}{\sqrt{gh}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

となり、最湾奥の増幅率 R_0 は、

$$R_0 = \left\{ \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_1}{T_*} \right) \right\}^{-1} \quad \dots \dots \dots (2)$$

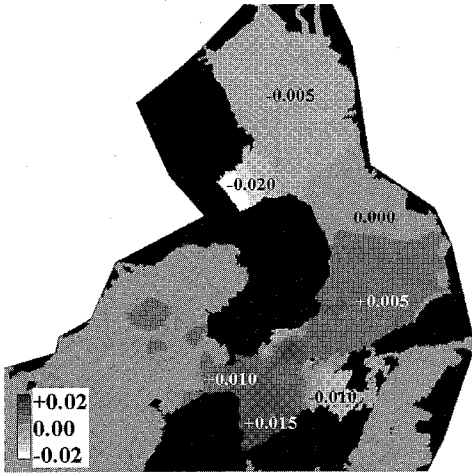


図-7 M_2 潮潮汐振幅の変化量の分布
(単位: m, 開境界条件: 2003年7月の実測潮位)

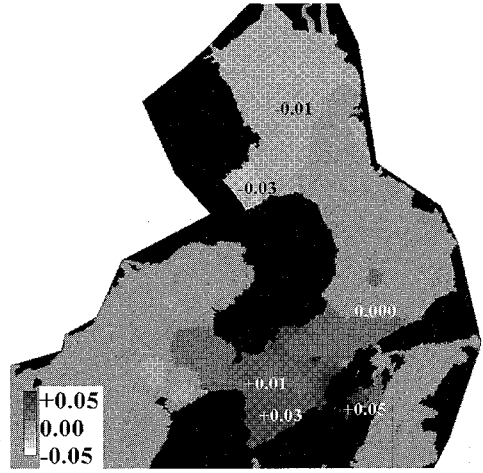


図-9 M_2 潮潮汐振幅の変化量の分布
(単位: m, 開境界条件: M_2 潮, 振幅 1.4m)

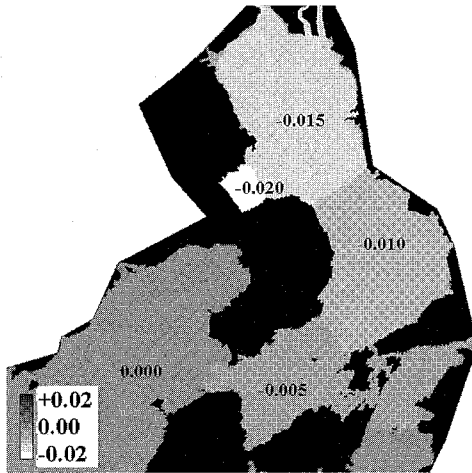


図-8 M_2 潮潮汐振幅の変化量の分布
(単位: m, 開境界条件: M_2 潮, 振幅 0.2m)

となる。ここで、 L は湾の長さ、 g は重力加速度、 h は水深、 T は潮汐の周期である。有明海の固有振動周期は早崎瀬戸を湾口と考えると約8時間と見積もられ、潮受け堤防により湾の長さが短くなることで湾内全域で M_2 潮や S_2 潮の増幅率は減少することが予想される。しかし、非常に狭い早崎瀬戸でのみ有明海は東シナ海と接続していることより、強い潮流が生じて非線形作用が増大することで、単純な矩形湾での理論が成立しないと考えられる。

この非線形作用の影響を検討するために、開境界に福江の実潮位 (M_2 潮振幅は 0.75 m)、 M_2 潮のみ (振幅 0.2 m と 1.4 m) を与えた場合の3ケースについて潮流シミュレーションを行ない、堤防締切りの有無について比較した。各ケースについて M_2 潮潮汐振幅の堤防締切りに

よる変化量の空間分布を図-7, 8, 9 に示す。なお実測潮位を与えたケースでは、計算結果を調和解析して算出している。どのケースでも湾奥部では振幅は減少し、潮汐が小さいほど減少率大きいことが分かる。最も非線形作用が小さいと考えられる振幅 0.2 m の場合は、湾口から湾奥へと減少量が増加した。一方、振幅 1.4 m の場合は、0.2 m の場合と大きく異なっており、湾口の口之津では締切り後のほうが潮汐振幅は増加する結果となった。このことは、堤防締切りの影響が外力の大きさによる非線形作用の違いにより変化することを示唆している。

(2) 潮流について

2003 年 7 月の実測潮位データを用いた潮流数値シミュレーションにより、堤防による潮流楕円長軸長の変化を検討した。 M_2 潮、 S_2 潮の潮流楕円について長軸長変化量の空間分布を図-10, 11 にそれぞれに示す。長軸長の減少量は、第一義的には締切りによって失われた海域へ元来流入していた海水の入退潮量が、その海域をどの程度通過していたのかを表現している。締切りの影響を直接受ける諫早湾内では、 M_2 潮、 S_2 潮共に大幅な減速となっている。また、諫早湾湾口南部から島原半島に沿って大きな減速が生じていることが分かる。これは締切りにより減少した入退潮量が島原半島沿岸を集中して通過していたことを示している。島原半島沿岸に生じる強い潮流や流動構造は、小松ら (2004) により、その移流分散効果が有明海の物質輸送に重要な役割を果たすことが指摘されている。したがって、この減速は有明海の物質輸送へも影響を与えたと考えられる。

早崎瀬戸周辺では、増減速が帯状に生じ、 S_2 潮の変化は M_2 潮の変化と同等である。締切りによる有明海への

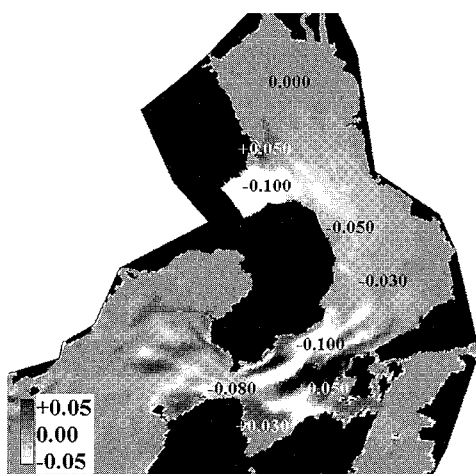


図-10 M_2 潮潮流楕円長軸長の変化量の分布
(単位: m/s, 開境界条件: 2003年7月の実測潮位)

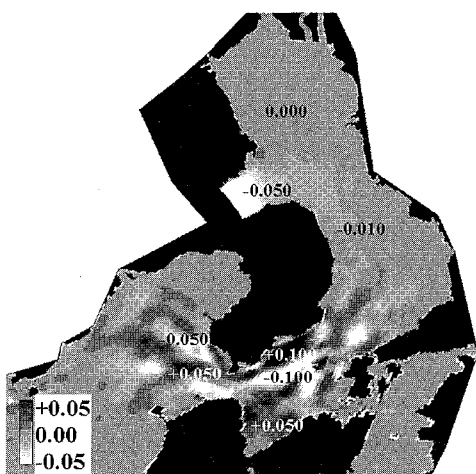


図-11 S_2 潮潮流楕円長軸長の変化量の分布
(単位: m/s, 開境界条件: 2003年7月の実測潮位)

入退潮量の変化は、湾口の早崎瀬戸周辺においても流動構造を変化させることが分かる。この海域では強い潮流が、海岸地形の影響で剥離渦となるため逆流域が生じる。剥離渦による逆流の強さは主流に比例すると考えられるため、主流が減速すれば逆流域の主流方向流速は相対的に増速し、逆に主流が増速すれば減速することになるため、帯状に増速と減速が生じたと考えられる。

4. ま と め

実測潮位データ解析と数値シミュレーションにより、諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響について検討した結果、以下の点が明らかとなった。

(1) 有明海の潮汐の増幅率は、月の昇交点運動による

18.6 年周期の M_2 潮振幅変動と逆位相になる。

(2) 外海に対する有明海の増幅率は堤防締切り前後で比較した結果、湾奥の大浦では減少、湾口の口之津では増加していた。

(3) 潮流シミュレーションの結果から、潮汐の大きさにより締切りの影響は異なり、早崎瀬戸での潮流の非線形性の影響が示唆された。

(4) 潮流シミュレーションにより潮流の変化を検討したところ、締切りの影響は諫早湾湾口南部から島原半島沿岸に集中して生じることが明らかとなった。また、締切りは湾口の早崎瀬戸においても流動を変化させることが分かった。

(5) 締切りにより S_2 潮も M_2 潮と同等の変化を生じ、締切りの影響に関する精確な評価には M_2 潮以外の分潮も考慮する必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり、四日市大学環境情報学部千葉賢教授には数値シミュレーションに関して多大なるご支援ご助力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (2003)：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。
- 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・朝佐孝二・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 (2004)：北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測，海工論文集，第 51 巻，pp. 341-345。
- 齋田倫範・矢野真一郎・田井明・橋本泰尚・藤田和夫・小松利光 (2006)：島原半島北部沿岸における流動構造の現地観測，水工論文集，第 50 巻，pp. 1447-1452。
- 千葉賢・武本行正 (2003)：諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究，海工論文集，第 50 巻，pp. 376-380。
- 塚本秀史・柳哲雄 (2002)：有明海の潮汐・潮流，空と海，第 78 巻，第 1 号，pp. 31-38。
- 中野猿人 (1940)：潮汐學，古今書院，528 p。
- 瀧岡和夫・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締め切りの影響，海工論文集，第 49 巻，pp. 401-405。
- 西ノ首英之・小松利光・矢野真一郎・齋田倫範 (2004)：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，海工論文集，第 51 巻，pp. 336-340。
- 日本海洋データセンター：http://www.jodc.go.jp, 2006/5/1
- 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 (2005)：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，海工論文集，第 52 巻，pp. 191-195。
- Ray, R.D. (2006)：Secular changes of the M_2 tide in the Gulf of Maine, Continental Shelf Research, Vol. 26, pp. 422-427。