

## 有明海における潮汐・潮流減少の原因について

藤原, 考道

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻 | 三菱重工業株式会社長崎造船所

経塚, 雄策

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻流体環境理工学部門

濱田, 孝治

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻流体環境理工学部門

<https://doi.org/10.15017/16730>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 26 (2), pp.225-231, 2004-09. 九州大学大学院総合理工学府

バージョン :

権利関係 :

# 有明海における潮汐・潮流減少の原因について

藤原 考道\*1・経塚 雄策\*2・濱田 孝治\*2

(平成16年7月31日 受理)

## Decrease in Tide and Tidal Current in Ariake Bay

Takamichi FUJIWARA, Yusaku KYOZUKA and Takaharu HAMADA

†E-mail of corresponding author: [kyozuka@esst.kyushu-u.ac.jp](mailto:kyozuka@esst.kyushu-u.ac.jp)

There has been much discussion about the cause of the decrease in  $M_2$  tidal amplitude that has resulted from the reclamation of Isahaya Bay in Ariake Bay. As it has not been clarified yet, we tried to solve this problem using two approaches: (1) by analyzing observational data at tide stations near Ariake Bay and (2) by numerical calculations using a three-dimensional variable mesh model. Applying these two approaches to tidal amplitude at three stations in Ariake Bay from 1981 to 2001, it was shown that the 25% decrease in  $M_2$  tidal amplitude at Oura from 1981 to 2001 is caused by the Isahaya dike, and the remaining 75% decrease is caused by the attenuation of tide in the East-China Sea. This conclusion is verified by both approaches. Although the decrease of tidal amplitude in Ariake Bay responds linear to the external effects, the tidal amplitude changes caused by internal effects such as the Isahaya dike depend on the location; that is, there is a decrease at Oura, no change at Misumi and an increase at Kuchinotsu. This is explained by the change in the tidal oscillation pattern in Ariake Bay due to the reclamation of Isahaya Bay.

**Key words:** *Ariake Bay, tide and tidal current, Isahaya dike, MEC Ocean Model*

### 1. 緒 言

ここ数年、有明海の潮汐・潮流の変化が関心を集めてきた。宇野木(2002)は、有明海周辺の検潮所のデータを解析した結果、1988年頃から顕著となった有明海内部の $M_2$ 潮汐振幅減少の要因に対して、諫早湾干拓事業の影響が65%、外海の潮汐減少の影響が35%であると述べている。一方、塚本・柳(2002)は、移動境界を考慮した2次元潮汐モデルによって1985年と1999年の潮汐・潮流を計算し、大浦における $M_2$ 振幅の比較から諫早湾干拓事業の影響は10%~20%であると結論した。数値計算による検討例は灘岡・花田(2002)をはじめ他にも幾つかあるが、未だ一致した見解には達していない。

本研究では、有明海周辺検潮所における観測値と数値計算の両方で、1981年~2001年の有明海での $M_2$ 潮汐振幅減少の原因を定性的、定量的に明らかにした。また、潮流の変化についても考察した。

\*1 大気海洋環境システム学専攻修士課程  
(現 三菱重工株式会社社長崎造船所)

\*2 流体環境理工学部門

### 2. 潮 汐 観 測 値 の 解 析

#### 2.1 調 和 解 析

有明海周辺の8つの検潮所(Fig. 1)における1968年~2002年のデータについて369日間の毎時潮位記録を用いて、これを移動平均のように10日間ずつ解析期間をずらしながら最小自乗法により28分潮に対する調和解析を行った。諫早湾干拓事業による潮汐への影響をみるために有明海内部の検潮所として大浦、三角、口之津および有明海外部として阿久根、長崎、佐世保、福江、枕崎をとり、1981年と2001年のそれぞれ前後1年、計3年間の $M_2$ 潮汐振幅の平均値を求めTable 1に示す。Table 1では、81年と01年における $M_2$ 潮汐振幅の減少量と減少率(%)および平均水位の上昇量についても示す。

#### 2.2 実海域での $M_2$ 潮汐振幅

実海域での潮汐は月軌道の昇交点による18.6年周期の変動  $f$  の影響を受けて干満運動している。Fig.2は、 $M_2$ 潮汐に対する  $f$  の変化を示したものであり、 $f_{M_2}$

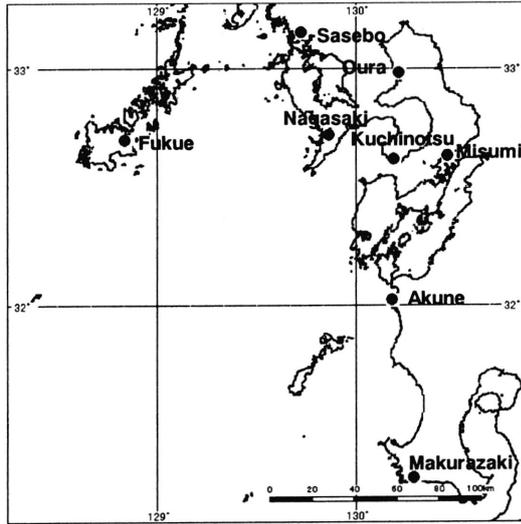


Fig. 1. Locations of tide gauge stations in and out of Ariake Bay.

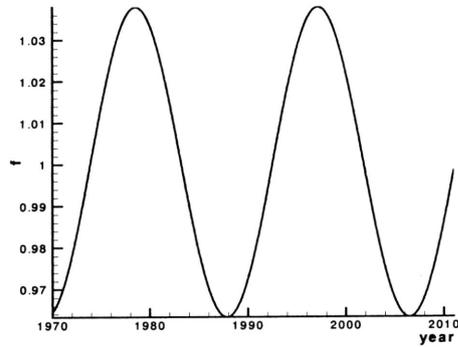
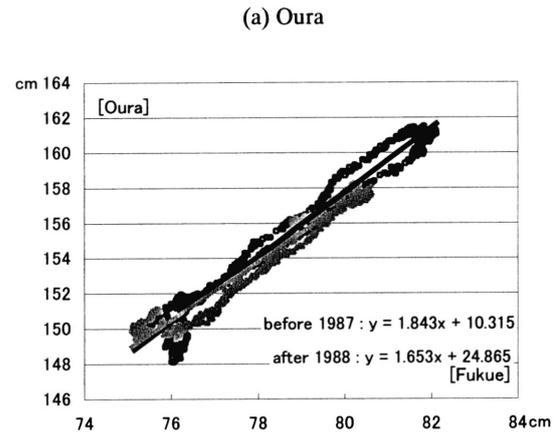


Fig. 2. Year-to-year variations of a factor  $f_{M_2}$  related to lunar nodical cycle (18.6 years) for  $M_2$  tidal constituent.

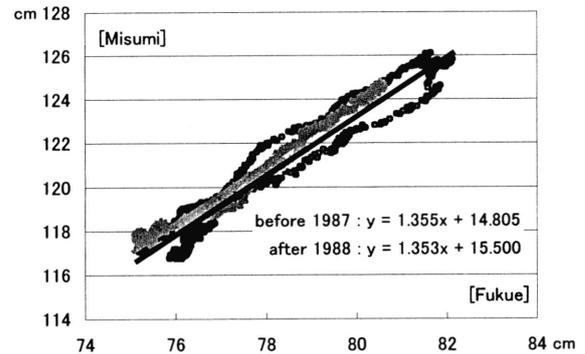
Table 1 Variations of  $M_2$  tidal amplitude and mean sea level at the stations in and out of Ariake Sea from 1981 to 2001.

	Ampli. in 1981 (cm)	Ampli. in 2001 (cm)	Decrease (cm)	Decrease ratio (%)	Sea level rise (cm)
Oura	156.1	150.9	5.2	3.3	9.1
Misumi	122.1	119.2	2.9	2.4	10.0
Kuchinotsu	101.3	99.7	1.6	1.6	8.0
Akune	80.3	79.3	1.0	1.3	5.5
Nagasaki	84.2	81.7	2.5	3.0	6.3
Sasebo	85.0	82.7	2.3	2.7	5.6
Fukue	78.8	76.8	2.0	2.5	5.4
Makurazaki	71.6	69.9	1.7	2.4	8.0

は0.963~1.038程度で変化する。この影響によって、例えば大浦における実海域の潮汐振幅は10cm程度変動するが、この変化量はTable 1における大浦での



(b) Misumi



(c) Kuchinotsu

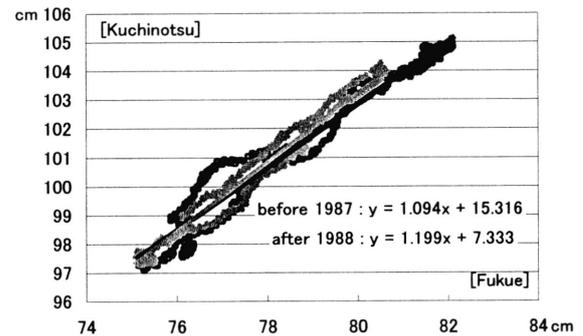


Fig. 3. Correlation of  $f_{M_2} \times H_{M_2}$  between Fukue and (a) Oura, (b) Misumi and (c) Kuchinotsu.

1981年から2001年間の潮汐振幅減少量5.2cmよりも大きいことに注意しなければならない。つまり、大浦における  $f_{M_2} \times H_{M_2}$  は、外海からの外的な影響と有明海内部の地形変化などの内的な影響による  $M_2$  潮汐振幅  $H_{M_2}$  減少量以上の変動を18.6年周期で遂げていることになる。武岡(2003)は、このことを指摘した。

そこで、本研究では外海の潮汐振幅変化の代表点として福江を選び、各検潮所との  $f_{M_2} \times H_{M_2}$  の相関を調べた(Fig. 3)。  $f_{M_2} \times H_{M_2}$  とする理由は、相関を調べる際に、  $f_{M_2}$  を含めるほうが観測値の変動幅が大き

くなり観測値に含まれる種々のノイズの影響を小さく出来るためである。ここでは、諫早干拓事業の影響をみるために、堤防建設工事が始まる以前の1987年までの観測値とそれ以降の観測値とに分けて解析を行った。結果は、両方ともほぼ線形とみなせるので、それぞれ最小自乗法によって近似直線を引いた。

Table 1において、福江では1981年から2001年にかけて  $H_{M_2}$  は2.0cm減少しているが、これは東シナ海全体の潮汐振幅減少と考えられる。この影響は、大浦ではどのようになるのだろうか。Fig. 3の近似直線によれば、大浦では1987年までの観測値からは3.9cmの減少に相当すると推算される。ところが、実際の大浦での減少は5.2cmであることから、大浦での  $M_2$  潮汐振幅減少の75% (=3.9cm/5.2cm) 程度が有明海外部要因、残り25% (=1.3cm/5.2cm) 程度が有明海内部要因であると推算される。なお、1988年以降の観測値からは3.5cmとなるが、この値は堤防工事中の過渡的な影響と完工後の影響を含んでいるので、参考値と考える。ただし、2つの近似直線の傾きは外海の潮汐振幅に対する大浦での増幅率を表しており、堤防締切り後の近似直線の傾きが小さくなっていることから大浦における増幅率が減少したということがわかる。

三角および口之津についても同様な解析を行い、その結果をTable 2に示す。三角では、近似直線から推定された潮汐振幅減少値と観測値は一致した。つまり、三角での観測値は有明海の外部影響によって100%説明でき、内部要因はゼロとみなせる。また、口之津については、潮汐振幅減少の推定値の方が観測値よりも大きくなっているため、内部要因によって潮汐振幅は増大したと解釈すべきであるということになる。

以上をまとめると、潮汐観測値に基づく有明海の潮汐振幅変化の内部要因は、場所によって異なっており、大浦では1.3cm (25%)の減少、三角では0、口之津では0.7cm (44%)の増大となっているという結論になる。

### 3. 数値シミュレーション概要と計算ケース

本研究では、日本造船学会海洋環境研究委員会(2003)に所属するグループによって開発され、インターネット上で公開されているMECモデルを用いた。移動境界を有するMECモデルのバリエーションメッシュモデル(3次元z座標レベル、静水圧近似、不等間隔格子)を使用してTable 2の結果と比較する。Fig. 4に計算領域と格子幅を示す。Iの領域は150mの等間隔格子、IIはVariable格子、IIIは500mの等間隔格子である。鉛直方向最下層のレベル設定については、Adcroft et al. (1997)のPartial Stepを導入し、早崎瀬戸で水平格子を150mにまで細かくし、かつ隣り合う格子の鉛直方向段差が

Table 2. Estimated outer and inner effect of decay of  $M_2$  tidal amplitude at the stations in of Ariake Sea based on data of observations. (▲ denotes negative sign)

	-1987 (cm)	1988- (cm)	Actual decay (cm)	Inner effect (cm)	Outer effect (%)	Effect by dike
Oura	▲3.9	▲3.5	▲5.2	▲1.3	75	decrease
Misumi	▲2.9	▲2.8	▲2.9	▲0.0	100	non
Kuchinotsu	▲2.3	▲2.5	▲1.6	+0.7	144	increase

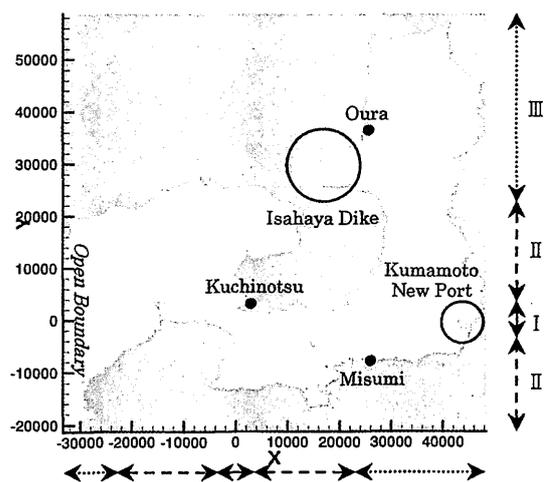


Fig. 4. Calculation area and mesh system. Area I: Constant (150m) Area II: Variable (150 - 500m) Area 3: Constant (500m)

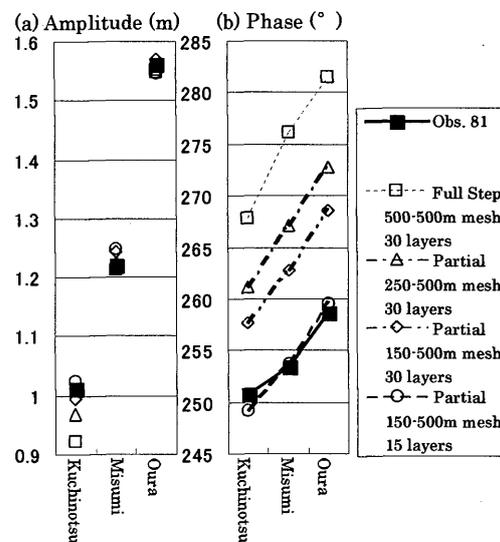


Fig. 5. Preliminary calculation results by several meshes and observed  $M_2$  tidal amplitude (a) and phase (b) at stations in Ariake Sea in 1981.

なるべく2層以上開かないようにすることで、湾内全域の振幅・位相両方をかなり高精度に再現することに成功した。なお、Partial Stepとは、海底地形をなるべく

**Table 3.** Calculation cases and amplitude at open boundary.

Case	Topography and sea level	Ampli. at open boundary [North-South] (m)
1	1981	0.87-0.845
2	Case 1 + Isahaya dike	0.87-0.845
3	Case 1 + Kumamoto new port	0.87-0.845
4	Case 1 + Sea level rise (10cm)	0.87-0.845
5	1981	0.845-0.82
6	2001	0.845-0.82

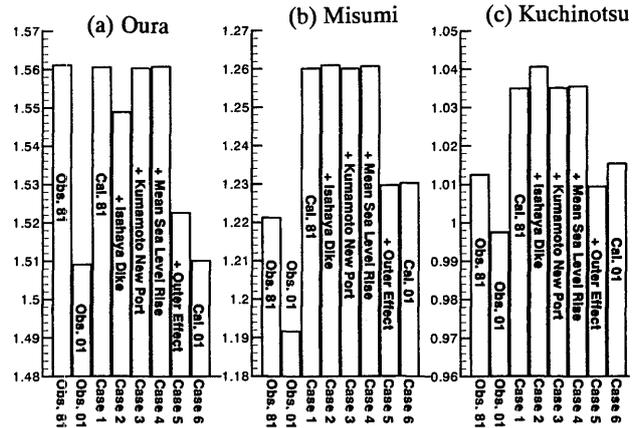
く忠実に表現するために最下層の層厚を海底地形に合わせて可変とする技法である。Fig. 5は、最終的に満足しうる結果を得るまでに行った予備計算結果をまとめたものであるが、特に位相差の変化からPartial Step, 早崎瀬戸での格子幅, 鉛直方向層数のいずれもが重要であることが分かる。

本研究では、有明海の潮汐・潮流変化の原因として、農水省「有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会」において指摘され、定性的な議論はなされたが定量的には未検討なもののうち、今回の数値計算によって検討可能なものを対象とした。1981年の有明海を基準(Case 1)とし、諫早湾干拓事業(締め切り海域面積約3,550ha)を考慮する場合をCase 2, 熊本新港事業(埋め立て面積約40ha)をCase 3, 10cmの平均水位上昇をCase 4, 外海(開境界)での潮汐振幅減少をCase 5として個別に考慮した場合と、2001年におけるCase 2からCase 5までを考慮した場合をCase 6として計算を行った。それらの計算ケースをTable 3に示す。1981年の開境界における潮汐振幅の値は、Case 1の大浦で81年の観測値と一致するように、2001年の値は、潮汐観測値の解析結果から得られたように、諫早堤防がなければ大浦で3.9cm減少するようにCase 5で定めた。位相については、明治年間のものではあるが潮汐調和定数表(海上保安庁, 1992)より、北側で樺島水道(位相229度), 南側で崎津(位相224度)の値から補間した。

**4. 計算結果および観測値との比較検討**

Fig. 6およびTable 4は大浦, 三角, 口之津におけるM<sub>2</sub>潮汐振幅の観測値と各ケースにおける計算値との比較を図と表で示す。Fig. 6の図中左から1981年観測値, 2001年観測値, Case 1~Case 6の計算値である。

まず、Table 4において、大浦の結果を見る。Case 6の2001年観測値(150.9cm)と計算値(151.0cm)を比べると誤差は1mmであり、非常に良い精度で一致していることがわかる。なお、前述したが本研究では2001年



**Fig. 6.** Calculated and observed M<sub>2</sub> tidal amplitude at (a) Oura, (b) Misumi and (c) Kuchinotsu.

**Table 4** Calculated and observed M<sub>2</sub> tidal amplitude at (a) Oura, (b) Misumi and (c) Kuchinotsu. (▲ denotes negative sign)

(a) Oura

Cal. case No.	1	2	3	4	5	6
Cal. (cm)	156.1	154.9	156.0	156.1	152.2	151.0
Cal. variation (cm)	-	▲1.2	▲0.1	0	▲3.9	▲5.1
ratio (%)	-	24%	2%	0%	76%	-
Obs. (cm)	156.1	-	-	-	-	150.9
Obs. variation (cm)	-	-	-	-	*▲3.9	▲5.2

\*estimated value from analysis of Obs.

(b) Misumi

Cal. case No.	1	2	3	4	5	6
Cal. (cm)	126.0	126.1	126.0	126.1	123.0	123.0
Cal. variation (cm)	-	0.1	0	0.1	▲3.0	▲3.0
ratio (%)	-	-3%	0%	-3%	100%	-
Obs. (cm)	122.1	-	-	-	-	119.2
Obs. variation (cm)	-	-	-	-	*▲2.9	▲2.9

\* estimated value from analysis of Obs.

(c) Kuchinotsu

Cal. case No.	1	2	3	4	5	6
Cal. (cm)	103.4	104.0	103.4	103.5	100.9	101.5
Cal. variation (cm)	-	0.6	0	0.1	▲2.5	▲1.9
ratio (%)	-	-32%	0%	-5%	132%	-
Obs. (cm)	101.3	-	-	-	-	99.7
Obs. variation (cm)	-	-	-	-	*▲2.3	▲1.6

\* estimated value from analysis of Obs.

の開境界における潮汐振幅としては、Table 3に示した値を用いている。

各要因の占める割合は、計算された減少量5.1 cmに対して諫早堤防24%、熊本新港0.1%、平均水位上昇0%、外海要因76%である。この結果は潮汐観測値から求めたTable 2と比較するとほぼ完全に一致する。

次に、三角については、1981年の観測値(122.1cm)と計算値(126.0cm)を比較すると3.9cm、2001年については3.8cm共に計算値の方が大きくなった。これは、1981年の開境界における潮汐振幅の値を大浦での観測値に合うように定めたことによる計算誤差であり、その原因としては三角検潮所が八代海と通じる瀬戸に面しているにもかかわらず八代海を考慮しなかったためなどが考えられる。ただし、1981年と2001年の差をとって求めた潮汐振幅減少量については、観測値(2.9cm)と計算値(3.0cm)の誤差が0.1cmであることから、内的小および外的要因による潮汐特性の変化は精度よく再現できていると思われる。各要因の占める割合を見ると、外海要因100%である。これもまたTable 2とほぼ完全に一致する。

さらに、口之津については、1981年の観測値(101.3cm)と計算値(103.4cm)を比較すると2.1cm、2001年については1.8cm共に計算値の方が大きい。この原因も三角の場合と同様、本モデルの数値誤差と考えられる。ただし、1981年と2001年の潮汐振幅減少量の誤差は0.3cmであり大浦・三角と同様に満足すべき精度であると思われる。各要因の割合は、計算された減少量1.9cmに対して諫早堤防-32%、熊本新港0%、平均水位上昇-5%、外海要因132%である。つまり口之津においては、諫早堤防などの影響で潮汐振幅は増大したが、その増加量以上に外海での潮汐振幅減少の影響が大きかったということになる。これもまたTable 2とほぼ一致する。

以上の結果を明確にするために、Fig. 7に各要因による潮汐振幅の減少率の分布図を示す。単位は%であり、基準は1981年(Case 1)の格子点ごとの計算値である。諫早堤防の影響については、三角付近から北側では諫早堤防に近いほど潮汐振幅減少率は大きく、逆に早崎瀬戸付近では増加しているが、早崎瀬戸の外ではほぼ変化なしとなっている(Fig. 7(a))。一方、外海の潮汐振幅減少の影響については、有明海内の振幅は、全域で一様に約2.6%減少している(Fig. 7(b))。それらを単純に重ね合わせた結果は、厳密に計算した結果Fig. 7(c)とほぼ一致しており、たいへん興味深い。これらの結果から、潮受け堤防による諫早湾の締切りは、有明海における潮汐振動パターンの変化となって影響し、早崎瀬戸付近では潮汐振幅の増加、三角では変化なし、三角より北部では減少となったものと解釈できる。

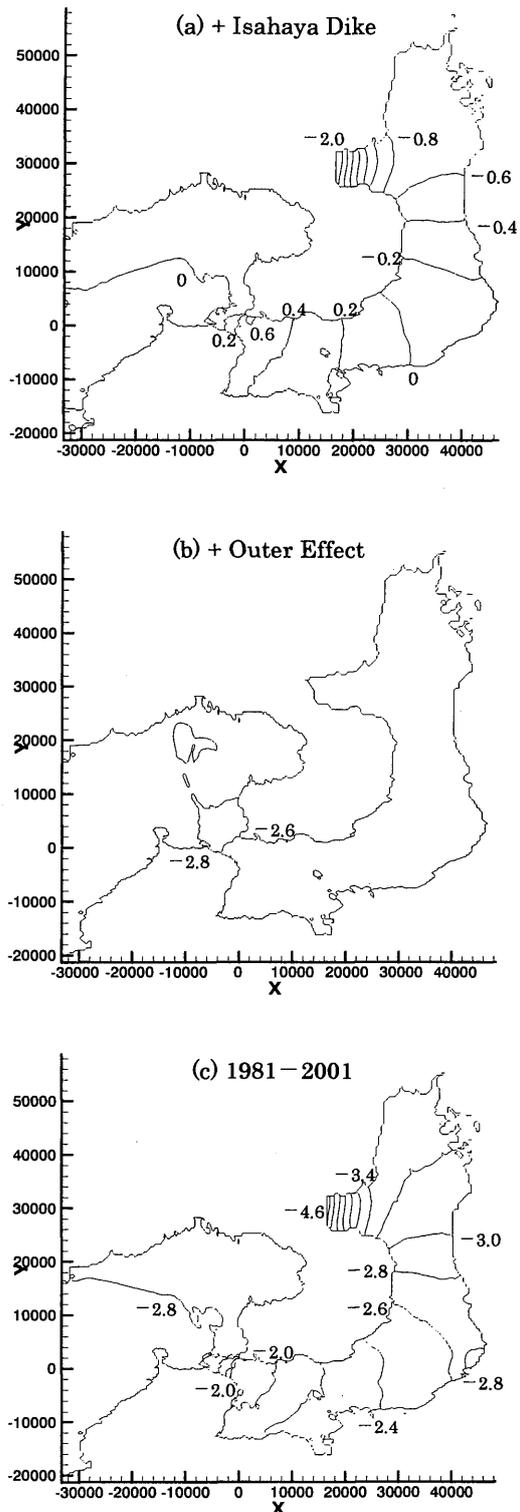


Fig. 7. Distribution of decreasing ratio in  $M_2$  tidal amplitude: (a) due to Isahaya dike and (b) due to Change of  $M_2$  tidal amplitude in the East-China Sea; (c) change from 1981 to 2001.

Fig. 8は1981、2001年の観測値と計算値(Case 1, Case 6)の位相の比較である。塚本・柳(2002)の計算結果は、大浦で最大7度程度の位相誤差が生じており、

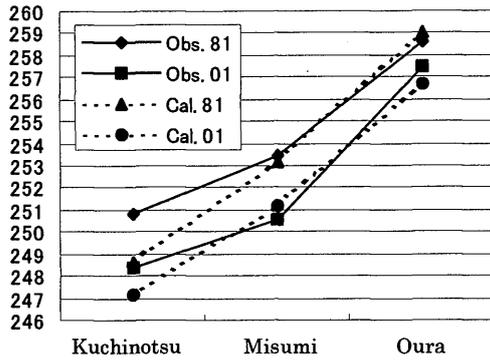


Fig. 8. Calculated and observed  $M_2$  tidal phase at Kuchinotsu, Misumi and Oura, both in 1981 and 2001.

このことが最終的な結果に少なからず影響したと思われる。本研究のモデルでは、大浦・多比良・三角では1981年、2001年共に誤差 $1^\circ$ 以内、口之津においても $2^\circ$ 程度であり、潮汐振幅はもちろん、位相および地形などの変化による湾内の潮汐特性の変化までも正しく再現できているといえる。

これらの結果より、宇野木(2002)の解析は口之津での観測値を基準にして行われたが、口之津は有明海内部の地形変化による影響を強く受けており、基準点としては適当ではなかったことになる。その結果、諫早湾干拓事業による影響を過大に見積もったと言える。

次に、環境問題との関連では潮流に対する影響がより重要である。Fig. 9は各要因による $M_2$ 潮流振幅の減少率の分布図である。基準は1981年(Case 1)の格子点ごとの計算値である。諫早堤防の影響は、諫早湾内25%以上、湾中央で5%程度、湾奥でほとんど変化なしとなった(Fig. 9(a))。一方外海の影響は湾内全域ほぼ一律で2.9%である(Fig. 9(b))。これは、開境界での振幅減少率と一致する。そして、それらを重ね合わせた結果は、厳密に計算したFig. 9(c)とほぼ一致しており、興味深い。結局、1981年~2001年における有明海の潮流の変化については、湾奥東部においては6%、湾奥西部では4%、湾中央では8%程度減少したことになる。

実海域の潮流については、武岡(2003)の指摘のように  $f$  の影響が重要となる。有明海の潮流は、Fig. 9(b)の結果のように外海の潮汐振幅にほぼ線形に変化することから、 $f$  の効果によって最大3.7%程増減することになるが、諫早堤防および外海の潮汐振幅減少によって潮流が4%以上減少した海域については、既に  $f$  の変動以上の減少が生じていることになる。Fig. 2からわかるように1999年以降  $f$  は減少を続けており、加えて内的小よび外的な要因により有明海の潮流は、ここ数十年で最も流速が弱まっている状況であることがうかがえる。また、2006年~2007年には  $f$  は最小値を

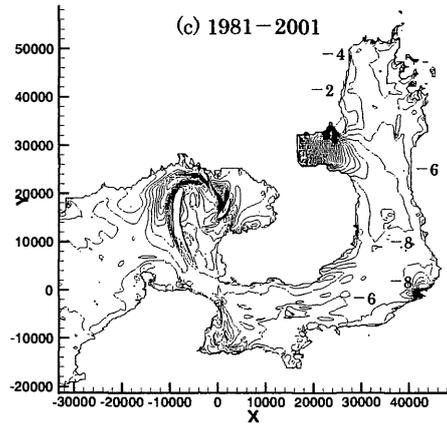
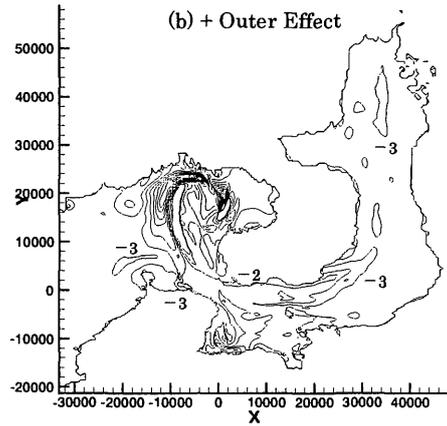
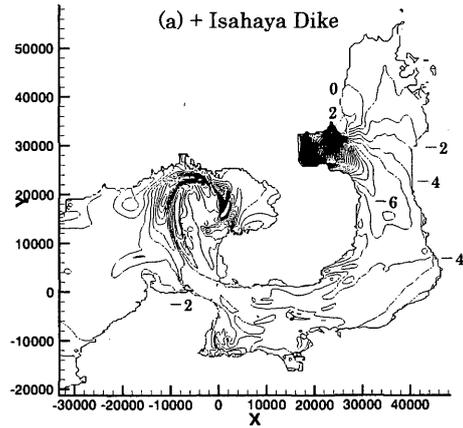


Fig. 9. Distribution of decreasing ratio in  $M_2$  tidal current amplitude: (a) due to Isahaya dike and (b) due to change of  $M_2$  tidal amplitude in the East-China Sea; (c) change from 1981 to 2001.

とることになるので、今後さらに流速が弱くなることになり、注意が必要である。

### 5. 結 言

1981年~2001年の有明海での $M_2$ 潮流振幅減少について、観測値と数値計算の両方から、内的小よび外的な要因を定量的に評価した。おもな結論は以下の通りである。

- 1981年～2001年の大浦でのM<sub>2</sub>潮汐振幅減少5.2cmに対して、諫早湾干拓事業による影響は約25%である。残りの75%については、東シナ海の潮汐振幅減少に起因し、熊本新港事業および平均水位上昇の影響は無視する。
- 諫早湾干拓事業によるM<sub>2</sub>潮汐振幅への影響は場所により異なっており、大浦では減少、三角では変化なし、口之津では増加した。
- 有明海のM<sub>2</sub>潮流は、干拓事業と外海の潮汐振幅減少の影響によってほぼ全域で減少したが、諫早湾から有明海中央部では  $f$  による変動幅以上の影響を受けている。また、 $f$  の影響で2006年～2007年まで、さらに弱くなることが予想されるので注意が必要である。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり九州大学大学院総合理工学府博士課程の山口創一氏（研究当時、日本科学技術振興機構研究員）にはモデル全般について、また、九州大学応用力学研究所の広瀬直毅助教授からは Partial Step に関して貴重な助言を頂きました。両氏のご協力に対し、謝意を表します。なお、潮汐観測デ

ータについては、「日本海洋データセンター」(JODC) からオンラインでの提供を受けたことを記して感謝いたします。

### 参 考 文 献

- 1) 宇野木 早苗：有明海における潮汐と流れの変化－諫早湾干拓事業の影響を中心にして－。海と空, 78, 19-30, (2002).
- 2) 塚本 秀史・柳 哲夫：有明海の潮汐・潮流。海と空, 78, 31-38, (2002).
- 3) 難岡 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, 401-405, (2002).
- 4) Adcroft, A., C. Hill, and J. Marshall : Representation of Topography by Shaved Cells in a Height Coordinate Ocean Model. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2293-2315, (1997).
- 5) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表, (1992).
- 6) 武岡 英隆：有明海における M<sub>2</sub> 潮汐の変化に関する議論へのコメント。沿岸海洋研究, 41, 61-64, (2003).
- 7) 日本造船学会海洋環境研究委員会：MEC Ocean Model オペレーションマニュアル, Version 1.1, (2003). (あるいは URL: <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/> において一般公開されている)