

— 速 報 —

## 外海を基準とした有明海の $M_2$ 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 \*

田井 明<sup>†</sup>・矢野 真一郎<sup>‡</sup>

### 要 旨

外海を基準とした有明海の  $M_2$  潮増幅率について検討を行なった。まず、 $M_2$  潮増幅率は外海の  $M_2$  潮振幅と負の相関関係にあり、月の昇交点運動による 18.6 年周期の  $M_2$  潮振幅の変動と逆位相で変動していることをケンドールの順位相関係数を用いて定量的に示した。これより、諫早湾潮受け堤防の締め切りによる増幅率への影響を調べるには、外海における振幅が等しい場合を比較する必要があることが分かった。その結果、外海の  $M_2$  潮振幅が大きい時は、湾口の口之津では締め切り後に  $M_2$  潮増幅率が大きくなっており、湾奥の大浦では締め切り前後での変化はほとんど見られなかった。一方、外海の  $M_2$  潮振幅が小さい時は、口之津では変化がほとんど無く、大浦では締め切り後に小さくなっていた。湾奥の三角では大浦と口之津の中間的な性質を示した。以上より、締め切りが有明海の潮汐に与えた影響は入射する潮汐波の大きさにより変化し、空間的にも特性が異なることが明らかとなった。

キーワード：有明海， $M_2$  潮，潮汐増幅，諫早湾潮受け堤防

### 1. はじめに

1997 年 4 月に諫早湾潮受け堤防の締め切りが行なわれ、2007 年で 10 年目を迎えた。その間、潮受け堤防の建設による潮汐・潮流の変化は、2000 年末から 2001 年にかけての冬季における大規模な養殖ノリの色落ちに代表される近年の“有明海異変”に対する主要因の一つとして調査研究の対象となってきた。

宇野木 (2003) 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を解析し、潮受け堤防締め切りにより湾口の口之津を基準とした湾奥の大浦

における潮汐の増幅率が減少していることを示した。また、藤原ら (2004) は、締め切りの影響は場所により異なり、 $M_2$  潮の振幅が湾口の口之津では増加、湾奥の大浦では減少していることを示した。影響に地域的ギャップが生じることについて、宇野木 (2005) は、「内部の地形変化の影響が場所的に逆のセンスで現れることは普通には起こり難く、……」と述べ、データ解析や数値解析の問題を指摘している。一方、安田 (2006) は、外海の長崎を基準とした大浦の  $M_2$  潮増幅率の変動を調べ、締め切りの影響がほとんど見られないという見解を示した。

以上のように、潮受け堤防の締め切りが有明海の  $M_2$  潮に与えた影響は、未だ研究者間で統一した見解が得られておらず、本誌においても議論が続けられている (宇野木, 2007; 安田, 2007)。ところで、安田 (2006) や田井ら (2006) は、外海を基準とした場合の有明海の

\* 2007 年 6 月 26 日 受領; 2007 年 12 月 8 日 受理  
著作権: 日本海洋学会, 2008

<sup>†</sup> 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻  
〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

主著者 e-mail address: suiri04@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>‡</sup> 九州大学大学院工学研究院環境都市部門  
〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

潮汐増幅率は外海の潮汐振幅に依存することを示していることから、この特性を考慮して堤防締め切りの影響を評価する必要があると考えられる。しかし、詳細な解析はこれまでにこなわれておらず、後述するように田井ら (2006) の解析では諫早堤防締め切り以外の地形改変の影響を除去できていない可能性がある。そこで、最新のデータを加えて詳細に再解析を行なった結果、外海を基準とした有明海内の  $M_2$  潮増幅率の変動特性、および締め切りの影響について、いくつかの知見を得たので報告する。

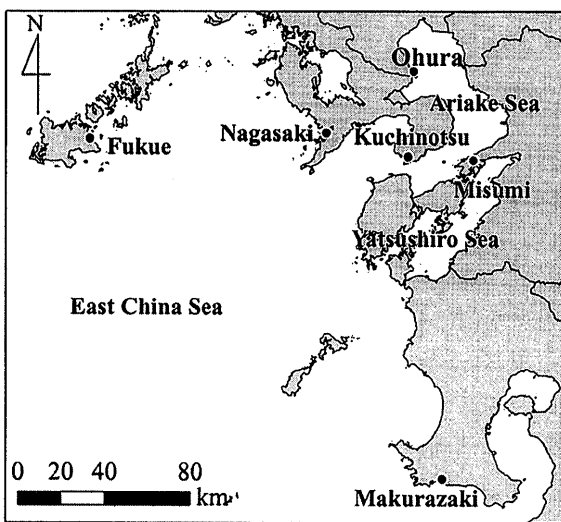


Fig. 1. Location of tide stations. Ohura, Misumi and Kuchinotsu are located in the inner part of Ariake Sea. Nagasaki and Makurazaki are located in the outer sea area.

## 2. 解析手法

解析には、日本海洋データセンターから公開されている毎時潮高データを用いた。有明海内については、湾奥の大浦、湾中央の三角、ならびに湾口の口之津、また外海については枕崎と長崎を選び、計 5 地点 (Fig. 1) について解析した。1969 年から 2005 年までの期間について、30 日ずつ解析期間をずらしながら 369 日分のデータを用いて最小自乗法による調和解析により 38 分潮に分解した。その際、各データに T.P. 補正を行なった。また、エラー データが二割以上ある期間は欠測と

して除外した。なお、18.6 年周期の月の昇交点運動による  $f$  値補正は行なっていない。また、外海の代表点に福江を選んだ解析も実施しているが、その結果は長崎と枕崎を対象に得た本報の結論と同様であったため、紙幅の都合上、結果は割愛する。

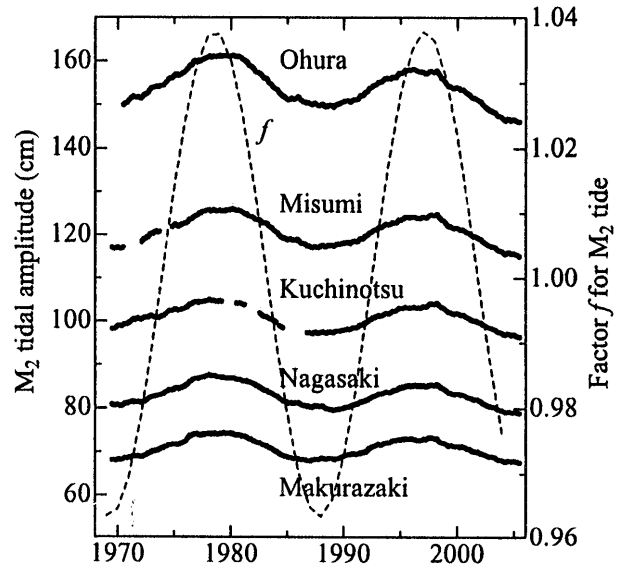


Fig. 2. Temporal variations of  $M_2$  tidal amplitude at Ohura, Misumi, Kuchinotsu, Nagasaki and Makurazaki, and the factor  $f$  for  $M_2$  component (broken line).

## 3. 解析結果

Fig. 2 に各検潮所における  $M_2$  潮振幅と  $M_2$  潮に対する  $f$  値の経時変化、Fig. 3 に枕崎、長崎に対する大浦、三角、口之津の  $M_2$  潮増幅率の経時変化を示す。外海に対する有明海内の増幅率の変動には  $M_2$  潮の振幅変動 (すなわち  $f$  値の変動) と逆位相となる周期的な変動がみられることが、安田 (2006) や田井ら (2006) により定性的に示されているが、定量的な評価は行なわれていない。そこで、この変動の特徴を定量的に評価するために、外海の  $M_2$  潮振幅および時間を対象に  $M_2$  潮増幅率についてケンドールの順位相関検定を行なった。時間を対象にした検定は、外海の  $M_2$  潮振幅変動の傾向 (増加期と減少期) を基準に、枕崎を基準としたものについては、I: 1969 年 6 月~1979 年 4 月、II: 1979 年

**Table 1.** Kendall  $\tau$  rank correlation coefficients of M<sub>2</sub> tidal amplification vs. M<sub>2</sub> tidal amplitude or time.

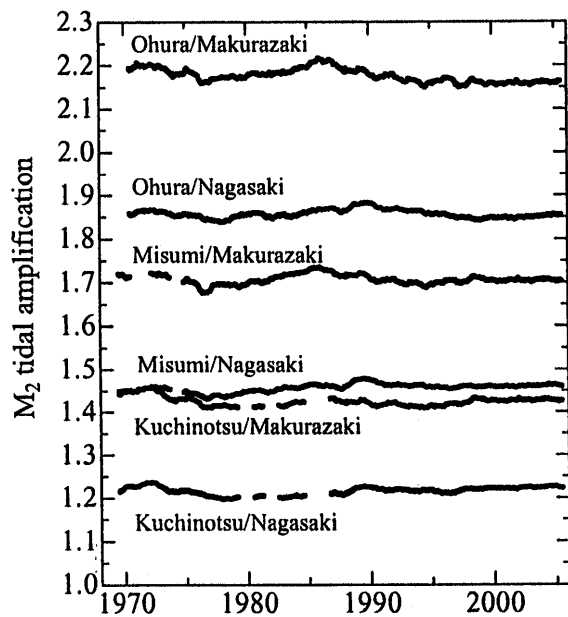
Inner part of Ariake Sea	Outer part of Ariake Sea	Tidal amplitude all	Time			
			I	II	III	IV
Ohura	Makurazaki	-0.258	-0.579	0.835	-0.661	0.123 <sup>a</sup>
	Nagasaki	-0.393	-0.699	0.636	-0.855	0.687
Misumi	Makurazaki	-0.511	-0.562	0.840	-0.546	-0.130 <sup>b</sup>
	Nagasaki	-0.549	-0.576	0.703	-0.825	0.465
Kuchinotsu	Makurazaki	-0.421	-0.649	0.846	-0.509	0.045 <sup>c</sup>
	Nagasaki	-0.503	-0.667	0.761	-0.756	0.625

Period : (Makurazaki) all : June 1969–June 2005, I : June 1969–Apr. 1979, II : May 1979–Jan. 1987,  
III : Feb. 1987–Oct. 1996, IV : Oct. 1997–June 2005,

(Nagasaki) all : June 1969–June 2005, I : June 1969–Jan. 1978, II : Feb. 1978–Jan. 1989,

III : Feb. 1989–Oct. 1996, IV : Oct. 1997–June 2005

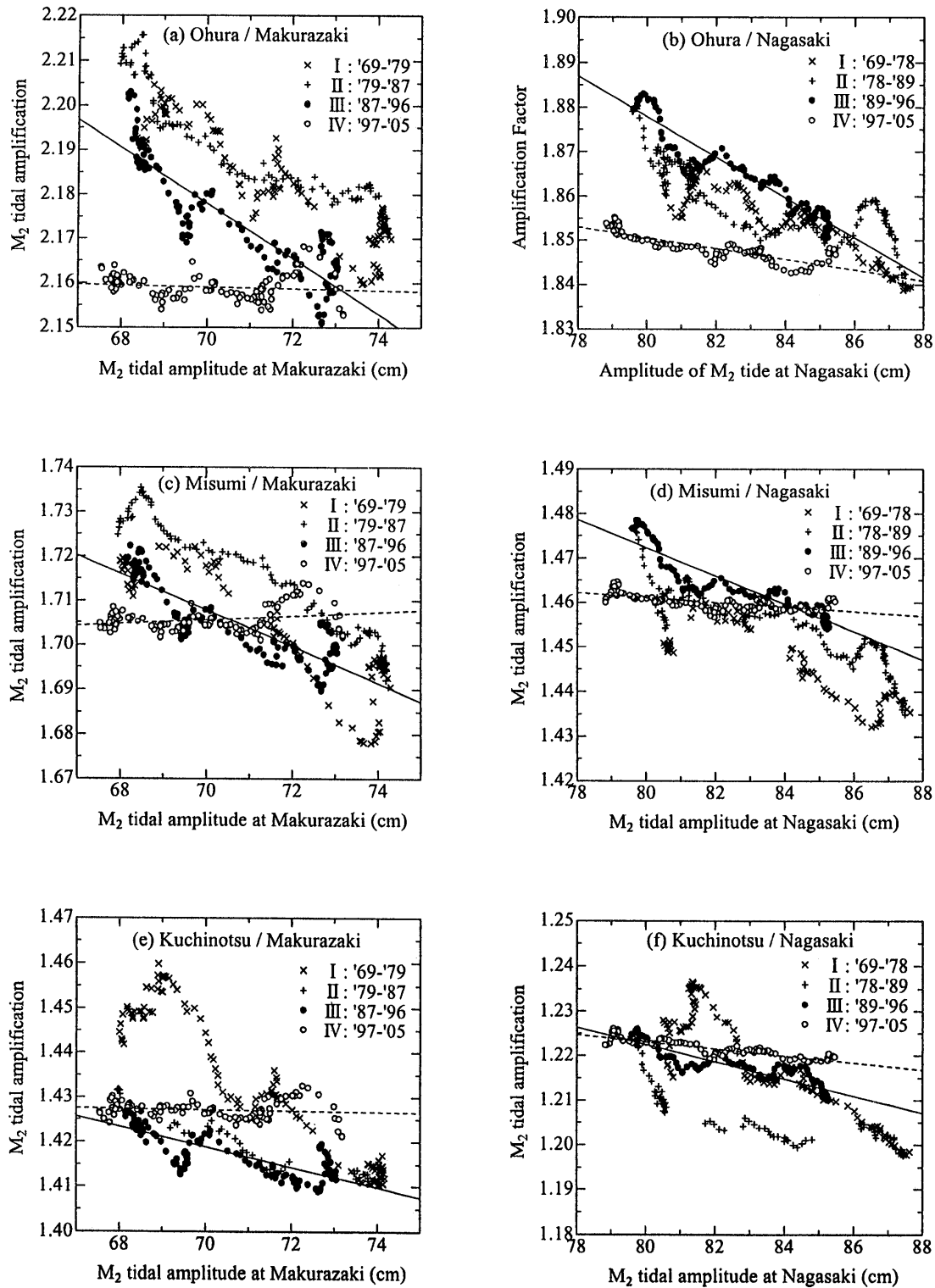
*p*-value : <sup>a</sup>*p* = 0.078, <sup>b</sup>*p* = 0.064, <sup>c</sup>*p* = 0.52, others *p* < 0.0001



**Fig. 3.** Temporal variations of the amplification of M<sub>2</sub> tidal component, defined as the ratio of the amplitudes at Ohura, Misumi or Kuchinotsu to that at Makurazaki or Nagasaki.

5月～1987年1月, III : 1987年2月～1996年10月,  
IV : 1997年10月～2005年6月, 長崎を基準としたものでは, I : 1969年6月～1978年1月, II : 1978年2月

～1989年1月, III : 1989年2月～1996年10月, IV : 1997年10月～2005年6月, とそれぞれ四つの期間に分けて行なった。ここで, 年月は解析期間(369日)の中央となる日が含まれる時期を示している。また, 期間 III と期間 IV は堤防締め切りの時期(1997年4月)を解析期間に含まないように設定した。さらに長崎と枕崎で期間が異なるのは, 原因は不明であるが M<sub>2</sub> 潮振幅の変動のピークが両地点で異なっていたためである。検定結果を Table 1 に示す。まず, 外海の M<sub>2</sub> 潮振幅を対象にした順位相関係数  $\tau$  は, 全ケースで有意に負となり, 外海から入射する潮汐が大きくなると有明海の共振が減少することが示された。次に, 時間を対象にした場合は, 有意でなかった (*p* > 0.05) 枕崎を基準とした IV の期間を除き, M<sub>2</sub> 潮振幅の増加期では負, 減少期では正となった。すなわち, M<sub>2</sub> 潮が増加するにつれて増幅率は減少していき, 逆の場合は増加していくことが示された。これらの原因としては, 海底摩擦や最も狭くなる湾口の早崎瀬戸で生じる地形性渦流によるエネルギー損失等の非線形効果が考えられる。以上より, 外海を基準とした有明海内の潮汐増幅率は外海の潮汐振幅に依存し, 有明海について潮汐増幅率の時間変化を評価する際には, この特性を考慮した解析を行なう必要があるといえる。



**Fig. 4.** Relationship between  $M_2$  tidal amplitude and its amplification for four periods. Open circle indicates data after closing of Isahaya Sea-Dike. The solid line indicates regression line for ●. The broken line indicates regression line for ○.

最後に、Fig. 4に外海を基準とした有明海内の  $M_2$  潮増幅率を外海の  $M_2$  潮振幅に対してプロットした結果を、上述の検討と同様に四つの期間に分けて示す。ケンドールの順位相関係数からも予想されるように、全体的に右下がりの傾向があることが分かる。

#### 4. 考 察

諫早湾の潮受け堤防締め切りが有明海の共振潮汐に与えた影響を評価するために、本報告で用いた外海を基準とした有明海内の  $M_2$  潮増幅率の意味と、それを変化させる要因について考察する。

締め切りの影響を議論する場合、同一の潮汐条件、すなわち同一の起潮力に対する潮汐の振幅変化を比較するのが自然である。後述するように外海に対する湾口(口之津)の  $M_2$  潮増幅率は締め切り前後で異なっている。このことは、口之津の潮汐は湾内の影響を受けているため有明海へ入射する潮汐を代表していないことを示している。

潮受け堤防以外に有明海の潮汐増幅に影響する要因として、(1)月の18.6年周期の昇交点運動による起潮力の変動、(2)平均水位の上昇、(3)その他の人為的地形改変、が考えられる。この内、(2)平均水位上昇の影響については、灘岡・花田(2002)や安田(2006)に示されるようになりに小さいと考えられる。(3)その他の人為的地形改変について、増幅率を変化させる可能性がある湾奥部における主な干拓事業は1980年までに終了している。また、湾奥部におけるその他の改変としては、六角川河口堰が1983年、筑後大堰が1984年にそれぞれ完成している(有明海再生機構, 2007)。よって、1985年以降については潮汐増幅率の変動の主要因が、諫早湾干拓事業と(1)月の昇交点運動による起潮力の変動に限定できるとであろう。田井ら(2006)の解析では、全解析期間が締め切り前と後にしか分類されておらず、影響が大きいと考えられる(3)その他の人為的地形改変の影響が除去されていないため、それらを除去した再解析が必要であると考えられる。

そこで本報では、Fig. 4について前述のI~IVの4期間から後半の二つの期間をそれぞれ締め切り前(III, 黒丸)と締め切り後(IV, 白丸)として  $M_2$  潮増幅率の

比較を行なった。変動の傾向を調べるために、締め切り前後に対する回帰直線をそれぞれ実線と破線で示している。

まず、枕崎や長崎の  $M_2$  潮振幅が期間中で最大となる時は、大浦では締め切り前後で明瞭な差が見られないのに対し、口之津では締め切り後が大きかった。一方、枕崎や長崎の  $M_2$  潮振幅が最小となる時は、大浦では締め切り後に小さくなったのに対し、口之津ではほぼ等しかった。また、三角における締め切り前後の差は、大浦と口之津の中間的な特性を有しており、外海の振幅変化により増幅率が小さくなる時期と大きくなる時期が存在していることが分かった。回帰直線の傾きは、締め切り後がすべて緩やかになっており、堤防締め切りが有明海内の非線形効果を抑制したことが推察される。また、空間的に離れ外海域に広く分布している枕崎と長崎に対して同様の結果が得られたことから、これらは宇野木(2007)が指摘した有明海とは無関係な要因によるものではなく、有明海の内部的な要因、すなわち締め切りの影響であると考えられる。

#### 5. 結 論

以下に本研究により得られた結論を述べる。

(1) 外海を基準とした有明海内の  $M_2$  潮増幅率は、外海の  $M_2$  潮振幅、もしくは月の昇交点運動による18.6年周期の  $M_2$  潮振幅の変動と逆位相で変動していることが定量的に示された。

(2) 潮受け堤防の締め切りが外海を基準とした有明海内の  $M_2$  潮増幅率に与えた影響は、起潮力の大きさにより変化する。起潮力が大きい時は、湾奥で影響が小さいが、湾口では影響は大きく、締め切りにより増幅率が増加していた。逆に、起潮力が小さい時は、湾奥で影響が大きく、締め切りにより減少したが、湾口では影響は小さかった。

(3) 外海潮位に対する増幅率の変動の比較より、諫早堤防締め切りには、有明海内の非線形効果を抑えた可能性があることが推察された。

以上、潮受け堤防の締め切りによる有明海の潮汐への影響について議論してきたが、その変化は月の昇交点運動による変動より小さく(解析期間中の大浦の  $M_2$

潮振幅は 146 cm~161 cm の範囲で、変化量は 10 cm 以上だったが、Fig. 4 (a) 中で枕崎の振幅が 68 cm の時、期間 III と IV の間での増幅率の差を 0.04 とみなすと堤防による変化は約 3 cm となる)、近年の有明海異変に関する直接の原因とは考えにくい。これまでに、多くの研究者が述べているように、有明海の環境変化への影響は潮汐よりも潮流の変化のほうが重要であると考えられる(武岡, 2003; 宇野木, 2003; 安田, 2007)。しかし、潮受け堤防締め切り前の潮流の観測データは非常に少なく、潮流の変化を議論するには数値シミュレーションに頼らざるを得ないのが現状である。数値シミュレーションは、使用したモデルや境界条件等によっても結果が異なり、観測値を用いた精度確認が必要不可欠である。その際に本報告で得られた潮汐変動に関する知見が一助になることを期待している。

#### 謝 辞

本研究で用いた潮位データは、日本海洋データセンター(JODC; <http://www.jodc.go.jp>) より公開されているものである。査読者には解析結果の意義に関して貴重なコメントを頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 C (課題番号: 18560500, 研究代表者: 矢野 真一郎) の援助のもとに行われた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

#### References

- 有明海再生機構 (2007): 平成 18 年度漁業者ヒアリング調査結果報告書, 84 pp.
- 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, **12**, 307-313.
- 宇野木 早苗 (2007): 諫早堤防が有明海の潮汐に及ぼす影響に関する二つの見解に対するコメント. 海の研究, **16**, 253-255.
- 田井 明, Mukhan Putra Hatta, 矢野 真一郎, 齋田 倫範, 小松 利光 (2006): 諫早湾湾奥の締め切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響. 海岸工学論文集, **53**, 331-335.
- 武岡 英隆 (2003): 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.
- 灘岡 和夫, 花田 岳 (2002): 有明海における潮汐振幅減少の要因の解明と諫早堤防締め切りの影響. 海岸工学論文集, **49**, 401-405.
- 藤原 考道, 経塚 雄策, 濱田 考治 (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, **13**, 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振動との共振 —. 海の研究, **15**, 319-334.
- 安田 秀一 (2007): 有明海の潮汐に及ぼす諫早堤防の影響について — コメントへの回答と回答者からのコメント. 海の研究, **16**, 257-260.

## Variation of $M_2$ Tidal Amplification in the Ariake Sea based on Outer Sea Tide, and Influence of the Isahaya Sea-Dyke

Akira Tai \* and Shinichiro Yano †

### Abstract

The present work is intended to declare the variation of  $M_2$  tidal amplification of the inner Ariake Sea to the outer sea area by using the harmonic analysis of tidal data for the period from 1969 to 2005. Firstly, a negative Kendall's rank correlation between the  $M_2$  tidal amplification and the  $M_2$  tidal amplitude at the outer sea is found. The amplification shows "in opposite phase" of temporal variation with the  $M_2$  tidal amplitude related to the 18.6 years lunar nodical cycle. Thus, to examine the influences of the Isahaya Sea-Dike (ISD) on the tidal amplification in the Ariake Sea, it is necessary to compare them under same conditions of the tidal amplitude. As a result of analysis considering it, we found that the  $M_2$  tidal amplification at Kuchinotsu after construction of the ISD was larger than that before it in the case of large  $M_2$  tidal amplitude. In addition, no remarkable change of the  $M_2$  tidal amplification at Ohura was found. On the other hand, in the case of small  $M_2$  tidal amplitude the  $M_2$  tidal amplification at Ohura became large and that at Kuchinotsu showed no significant change after the ISD construction. The results indicate that the influence of the ISD on the tide in the Ariake Sea shows a spatiotemporal variation.

**Key words:** Ariake Sea, Isahaya Sea dike,  $M_2$  tide, tidal amplification

(Corresponding author's e-mail address: suiri04@civil.kyushu-u.ac.jp)

(Received 26 June 2007; accepted 8 December 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

---

\* Department of Marine System Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

† Department of Urban and Environmental Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan