

# 有明海の潮汐・潮流の長期的な変化と その要因について

九州大学高等研究院 助教 田井 明

## 1. はじめに

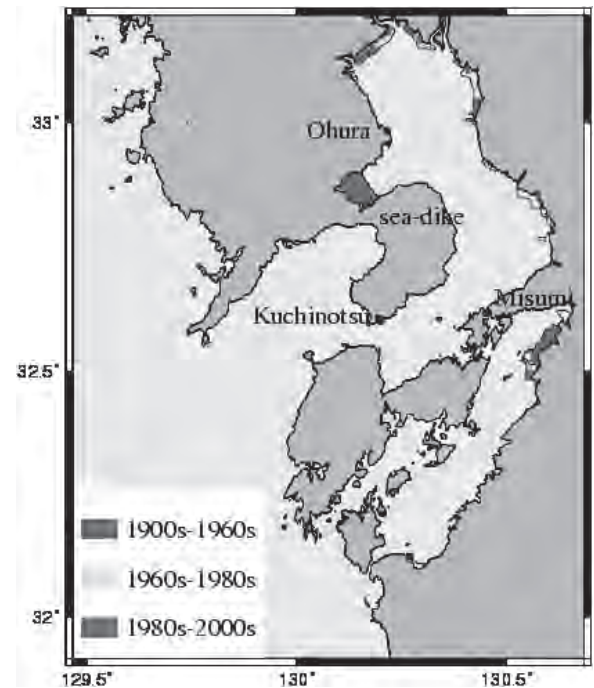
閉鎖性海域である有明海、八代海、博多湾などでは農地造成、都市開発、港湾整備のために干拓・埋め立てによる海岸線的人為的な改変が行われてきた(図1)。このような海岸線の改変は湾内の潮汐や潮流を変化させる。さらに、その変化はそれらの大きさを弱化させる場合が多い。潮汐や潮流が変化(弱化)すると、海域内の物質輸送、外海との海水交換、鉛直混合などに影響を与え、その変化は水環境にも大きな影響を与える。

一方で、詳細は後で述べるが、閉鎖性海域の潮汐や潮流に影響を与える要因は、干拓・埋め立て以外にも複数考えられる。よって、それぞれの要因による潮汐や潮流に与える影響を定量的に明らかにすることは、閉鎖性海域の水環境の保全にとって重要な知見となる。本研究では、九州の閉鎖性海域である有明海の長期的な潮汐・潮流の変化・変動要因について解析を行ったので、その結果を報告する。

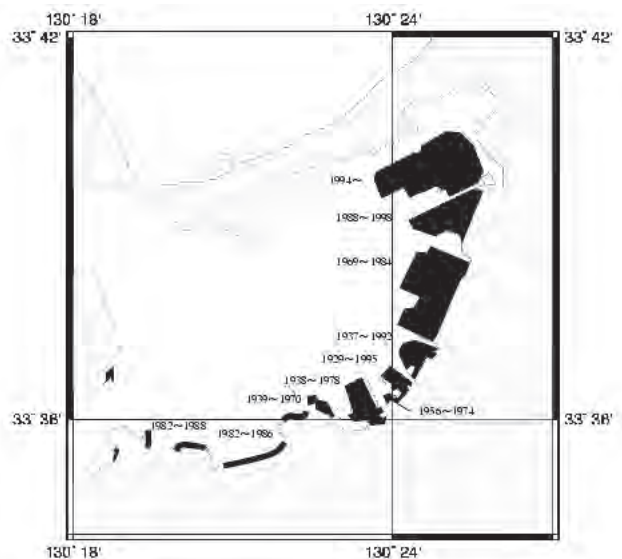
## 2. 干拓による潮汐・潮流の変化の基礎

有明海では日本一の潮差が生じ、それに伴う大きな潮流流速や広大な干潟の存在は、この海域の高い生産性に深く関わっていると考えられる。有明海で大きな潮差が生じる主な理由は、東京湾や伊勢湾など他の内湾に比べて湾の固有周期が大きく、半日周期の潮汐が増幅されやすいためである。ここで、湾の固有周期  $T$  は湾の奥行き  $l$  と平均水深  $h$  から以下の式を用いて近似的に計算することができる。

$$T = \frac{4l}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$



(a) 有明海・八代海



(b) 博多湾

図1 海岸線の改変の様子

式中の  $g$  は重力加速度である。この式は水深が一般的な矩形湾の理論式であり、メリアン式と呼ばれる。現実の湾の形状を厳密に考慮しているわけではないが湾の特性を示す式としてよく用いられる。この式から有明海では湾奥部の干拓が進み湾の奥行きが短くなると固有周期が短くなり、潮汐の増幅作用も小さくなると考えられる。潮流も、潮汐が小さくなれば小さくなるが、干拓による潮流の減少は潮汐の減少による影響分よりも大きい。その理由は、次に述べるように湾内の潮流流速は入退潮量で決定されるからである。干拓による潮流の減少について説明するために、図2に示すような水深が一般的な矩形湾を考える。図2の下側は湾の平面図、上側は湾軸方向の断面図である。今、湾の幅を1とすれば、干潮位と満潮位の差とその断面から湾奥までの距離との積は、上げ潮時と下げ潮時に断面を通過する海水の総量になる。これを入退潮量  $Q$  と呼ぶ(図2上側のハッチ部分)。この入退潮量  $Q$  が断面を通過するのにかかる時間  $t$  は潮汐の周期  $T$  に依存するため、湾の面積などによらずある一定の値( $t=T/2$ )となる。よって、潮流の上げ潮、下げ潮期間の平均流速  $v$  は断面積を  $A$  とすると、

$$v = \frac{Q}{At} = \frac{2Q}{AT} \quad (2)$$

となる。ここでは、簡単のために上げ潮、下げ潮期間の平均流速  $v$  を示しているが、この流速の干拓による変化と本来の潮汐周期で変化する流速の変化は

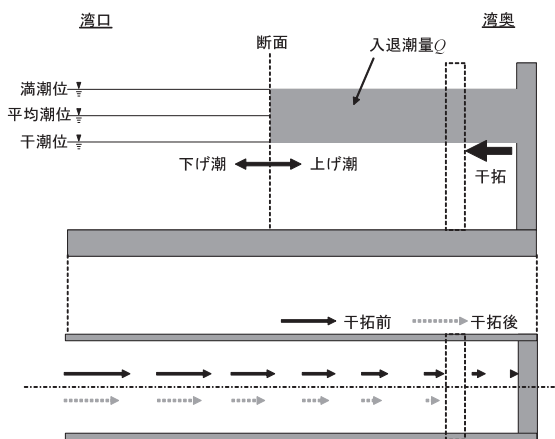


図2 矩形湾における潮流の発生メカニズムと干拓の影響(上側:湾軸方向断面図, 下側:平面図)

定性的には同一である。この式から分かるように流速  $v$  は、入退潮量  $Q$  に比例し、断面積に反比例する。また、図2のように、干拓が行われた場合、潮汐振幅が一定であっても入退潮量  $Q$  が減少するため、流速の減少が生じる。その減少量  $\Delta v$  は、入退潮量の減少量  $\Delta Q$  により、

$$\Delta v = \frac{\Delta Q}{At} \quad (3)$$

と示され、湾内であれば、干拓からの距離によらず、その断面積によってその大きさが決定される。よって、湾奥の干拓は遠く離れた湾口の流速にも影響をもたらす。なお、減少率は、式(2)と式(3)の比、すなわち、もともとの入退潮量  $Q$  と入退潮量の減少量  $\Delta Q$  の比で決まるため、湾奥ほど大きくなる。よって、干拓の前面では100%の減少率、流速が0となる。

### 3. 有明海における潮汐・潮流の長期変化

#### 3.1 潮汐・潮流の変化要因

有明海の潮汐・潮流の長期的な変化について検討する。有明海では、2000年冬季の大規模な養殖ノリの色落ち、二枚貝の漁獲量の減少、赤潮や貧酸素水塊の発生など近年その水環境が悪化していると考えられる。そのなかで、1997年4月に潮受け堤防の締め切りが行われた諫早湾干拓事業による潮汐・潮流の変化がその主要因として取沙汰されてきた。しかし、有明海では先に述べたように諫早湾干拓事業以前にも多くの干拓が行われていることに加え、その他にも潮汐・潮流を変化させる要因があることから、諫早湾干拓事業がその中で相対的にどの程度有明海の潮汐・潮流に影響を与えたものか検討しなければ、将来の有明海再生に向けて冷静な議論に支障をきたす。そこで、本研究では表1に示す要因についてデータ解析や数値シミュレーションにより定量評価を行った。要因1～4は諫早湾干拓事業以前と諫早湾干拓事業による干拓の影響による潮汐・潮流の変化であり、その基礎は前述したとおりである。要因5は、月の昇交点運動による起潮力自体の変化であり、18.6年周期で変動する。要因6は有明海に入射する外海の潮汐の変化である。なお、本報における有明

海湾奥部とは大浦沖以北のことを指し諫早湾および以南の海域は含まない。

### 3.2 潮汐の長期変化(要因1, 2, 5, 6)

有明海・八代海の半日周期潮汐の長期変化とその

要因について調べるために、有明海・八代海内で最も古くから潮汐データが存在している熊本県三角験潮所（1931年観測開始）のデータ解析、および1900年代、1960年代、1980年代、2000年代の4パターンの海岸線を用いた数値シミュレーションを

表1 潮流の変化要因

要因1	諫早湾干拓事業以前の湾奥部の干拓による潮汐の減少
要因2	諫早湾干拓事業による潮汐の減少
要因3	諫早湾干拓事業以前の湾奥部の干拓による入退潮量の減少
要因4	諫早湾干拓事業による入退潮量の減少
要因5	18.6年周期の月の昇交点運動による潮汐の変動
要因6	外海の潮汐の変化

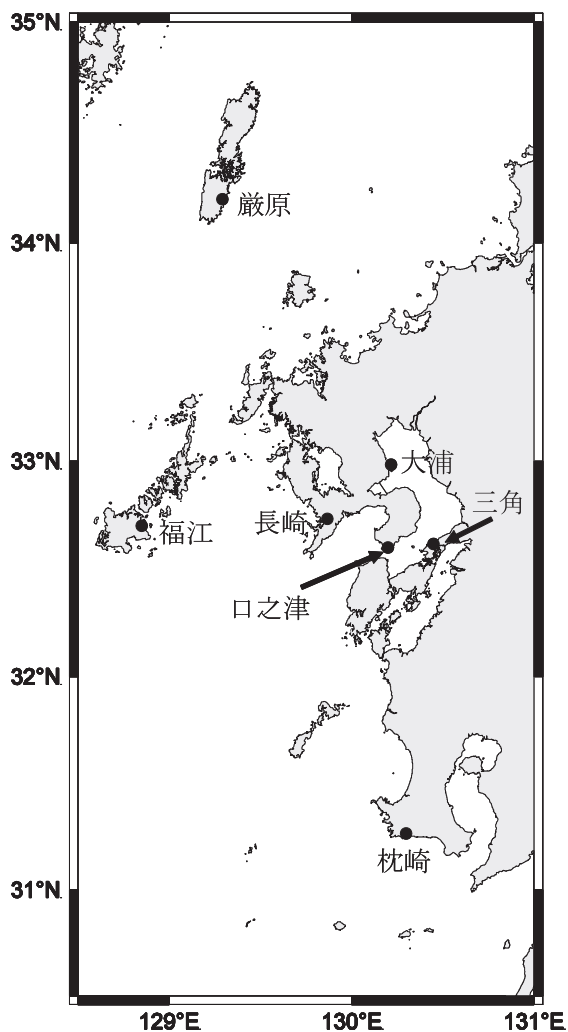


図3 有明海周辺の験潮所の位置

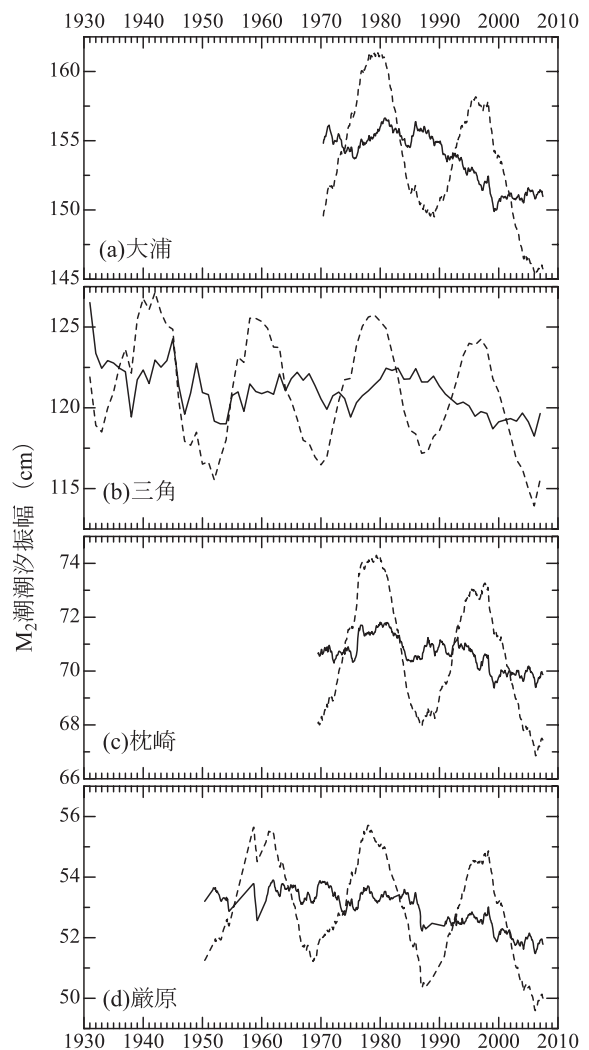


図4  $M_2$ 潮振幅  $a_{M_2}$ の経年変化, 実線:振幅, 破線: $f_{M_2} \times a_{M_2}^{(2)}$

実施した。

三角の1960年までのデータは熊本地方気象台に保管されている紙ベースの潮汐観測原簿を電子化したもの、1961年以降は日本海洋データセンターのホームページからダウンロードしたものを用いた。調和解析の結果を図3に示す有明海湾奥の大浦、外海の験潮所として厳原、枕崎の結果と併せて図4に示す。全ての験潮所で1997年ごろに生じる $f_{M_2} \times a_{M_2}$ 変動の極大値が過去の極大値の中で最も小さくなっていることが分かる。それに伴い $a_{M_2}$ も近年が最も小さい値となっている。

数値シミュレーションにはPrinceton Ocean Model (POM)を用いた。ここで、1980年代は2000年代(現在)から諫早湾干拓事業による海岸線の変化のみを除いたものである。全てのケースで南部開境界に0.75mの $M_2$ 潮を与えて計算を行った。大浦、三角、口之津の $M_2$ 潮振幅についての年代毎の計算結果を表2に示す。1900年代から2000年代にかけて、口之津に対する大浦および三角の振幅比は一貫して減少している。一方、口之津の振幅は一貫して増加していた。そのため、大浦では振幅比の減少率が3.8%なのに対し、振幅の減少率は1.8%にとどまっていた。また、三角と大浦における1900年代以降の振幅変化の約5割は1980年代までに、残りの約5割は諫早湾干拓事業で生じていることが分かる(大浦で46%:54%、三角で43%:57%)。実測データでは三角において1930年代から2000年代にかけて(122.7cm → 119.2cm, 各年代の平均値)3cm以上の減少が生じているのに対し、海岸線の変化のみを考慮した数値シミュレーションでは0.7cmの減少(119.1cm → 118.4cm)と大きく異なった。これは、実測データに見られる減少の大半が外海での $M_2$ 潮

表2 数値シミュレーションによる各年代の $M_2$ 潮振幅の比較(カッコ内は口之津に対する増幅率)

年代	口之津	三角	大浦
1900s	98.6	119.1(1.208)	154.9(1.572)
1960s	99.6	119.1(1.196)	154.9(1.555)
1980s	100.1	118.7(1.186)	153.6(1.534)
2000s	100.5	118.4(1.178)	152.1(1.513)

振幅の減少など、海岸線の変化以外の影響で生じていることを示している。

### 3.3 諫早湾干拓事業による潮汐の減少(要因2)

諫早湾干拓事業による潮汐の変化は、湾口の口之津に対する湾奥の大浦の増幅率の変化を中心に研究が進められてきた<sup>1)</sup>。一方、千葉・武本<sup>2)</sup>や藤原ら<sup>3)</sup>は、諫早湾干拓事業により口之津の潮汐振幅は増加していることを明らかにした。これは、口之津を基準とした増幅率の単純な比較では締め切りの影響の定量的な評価は困難であることを示している(例えば、湾奥の潮汐振幅が変化していなくても、湾口の振幅が増加していれば、増幅率は減少することになる)。そのため、諫早湾干拓事業の潮汐への影響を適切に評価するためには、外海を基準とした増幅率の変化を比較する必要がある。その際、安田<sup>4)</sup>により、外海を基準とした場合の有明海の増幅率は外海の潮汐振幅に依存することが示されているため、この特性を考慮して堤防締め切りの影響を評価する。

図5に外海を基準とした有明海内の $M_2$ 潮増幅率を、月の昇交点運動による18.6年周期変動の増減期別に4つの期間に分けて、枕崎の $f_{M_2} \times a_{M_2}$ に対してプロットした結果を示す<sup>5)</sup>。このうち、後半の2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う。変動の傾向を調べるために、締め切り前後に対する $M_2$ 潮増幅率の回帰直線をそれぞれ実線と破線で示している。まず、枕崎の $M_2$ 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 $M_2$ 潮増幅率に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 $M_2$ 潮増幅率が小さくなったのに対し、口之津ではほぼ等しかった。また、回帰直線の傾きは、締め切り後が両地点で共に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。以上より、諫早湾干拓事業が潮汐に与えた影響は、外海の潮汐波の振幅の大きさにより変化し、時空間的に特性が異なることが明らかとなった。

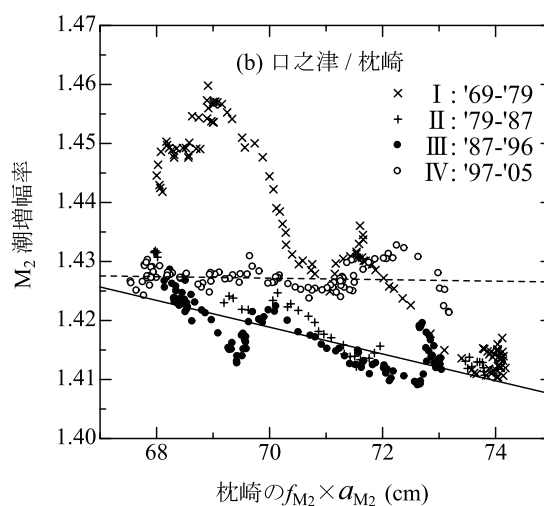
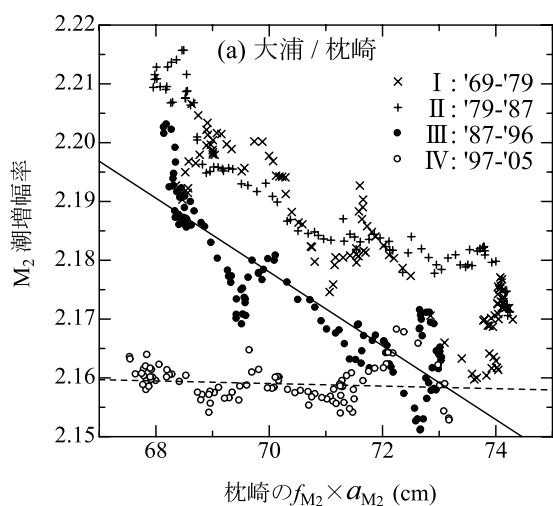


図5 枕崎の $f_{M_2} \times a_{M_2}$ 別の有明海内の増幅率<sup>5)</sup>

### 3.4 諫早湾干拓事業，湾奥部の干拓による入退潮量の減少(要因3,4)

農林水産省<sup>6)</sup>や西ノ首ら<sup>7)</sup>は，諫早湾干拓事業により，諫早湾内や島原半島沿いの潮流が減少することを示している。しかし，有明海湾奥部の潮流の近年の変化，特に諫早湾干拓事業により受けた影響に関しては現地観測データが少なく十分な検討が行われてこなかった。ここでは，まず，貴重な現地観測データを解析した結果として田井ら<sup>8)</sup>および山口ら<sup>9)</sup>の研究を紹介する。

田井らは，佐賀県有明水産振興センターが有明海大浦沖の地点で1989年冬季と1999年冬季に取得した流速データを解析した。その結果，1989年に比べて1999年は $M_2$ 潮の潮汐振幅は4.5%増加していたが潮流流速は3.5%減少しており，湾奥部の潮流は潮受け堤防の締め切り前後の期間で変化している事を示した。山口らは，佐賀大学有明海海象観測塔で取得された流速データを解析した。その結果，潮流流速に有意な変化傾向は検出されず，この地点の流速に対して諫早湾潮受堤防建設や18.6年周期の月の昇交点運動の影響は少ないことを示した。さらに冬季はノリ養殖による潮流への影響が大きいことを示した。また，田井ら，山口らの結果は双方ともに締め切り前後の期間で流向の変化が確認されている。

次に数値シミュレーションにより海岸線の変化による潮流の変化および成層強度の変化について検討した。

図6(a), (b)に1900年代から1980年代，1980年代から2000年代の $M_2$ 潮流速の変化の分布，図7(a), (b), (c)に $\log(h/u^3)$ の分布を示す。 $\log(h/u^3)$ は，Simpson and Hunter<sup>10)</sup>により提唱された成層海域と混合海域を分けるパラメータであり， $h$ は水深， $u$ は流速である。これらの図より，湾奥部の海域の潮流に対しては諫早湾干拓事業に比べて湾奥の干拓の影響が大きいことが分かる。また，数値シミュレーション結果からは諫早湾干拓事業の影響は海域により差があり，湾奥部への影響はほとんど検出できないことが分かる。これは前述した山口らの結果と符号している。

### 3.5 考察

以上の結果より有明海湾奥部における潮流および成層強度に強く影響する要因について考察する。解析期間中の大浦の $M_2$ 潮振幅は146cm～161cmの範囲で，変化量は10cm以上だった。枕崎の振幅が68cmの時（図5によると，この時に諫早干拓の影響が最も顕著に現れる），図5で期間IIIとIVの増幅率の差は約0.04であった。この場合，堤防による振幅の変化は約3cmと見積もることが出来る。したがって，諫早湾干拓事業による潮汐の減少（要因2）は月の昇交点運動による変動（要因5）より小さいことが分かる。同様に，湾奥部の干拓による潮汐の減少（要因1；表2）も月の昇交点運動による変動（要因5）より小さいということが分かる。また，図4

から明らかのように外海の潮汐の減少（要因6）も月の昇交点運動による変動より小さい。そこで、月の昇交点運動による変動の成層強度および流速への影響を示すために、数値シミュレーションより求めた  $f$  の極大期と極小期における流速の変化と  $\log(h/u^3)$  の分布を図6(c)、図7(d)、(e)に示す。これを、干

拓の影響によるものと比較すると、月の昇交点運動による成層強度や流速への影響は、湾奥部において諫早湾干拓事業による影響よりも大きいことが分かる。次に、有明海湾奥部および諫早湾干拓事業による成層強度や流速への影響を評価すると、成層強度は、諫早湾干拓事業による干拓に比べて、湾奥部に

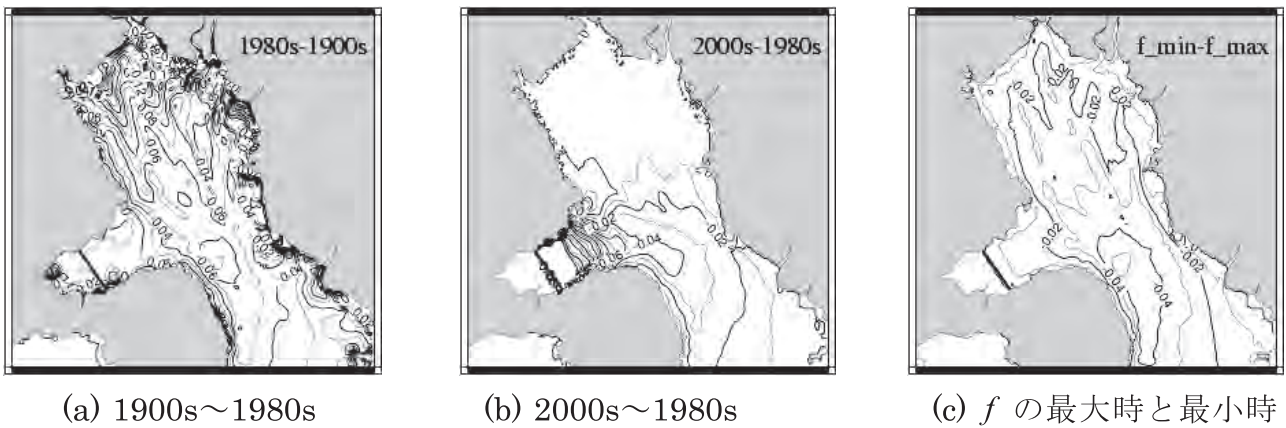


図6 数値シミュレーションによる流速変化の分布(m/s)

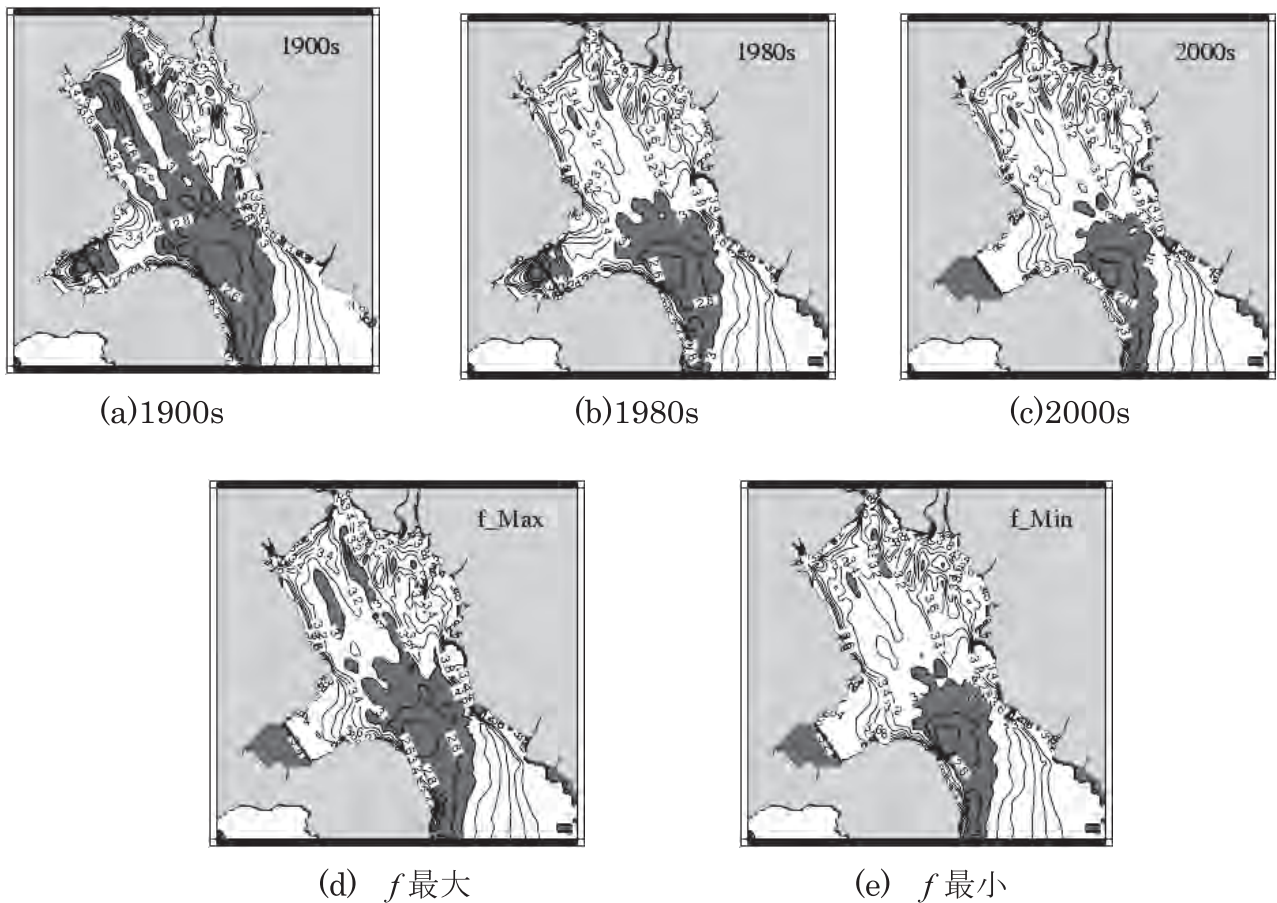


図7 数値シミュレーションによる $\log(h/u^3)$ の分布

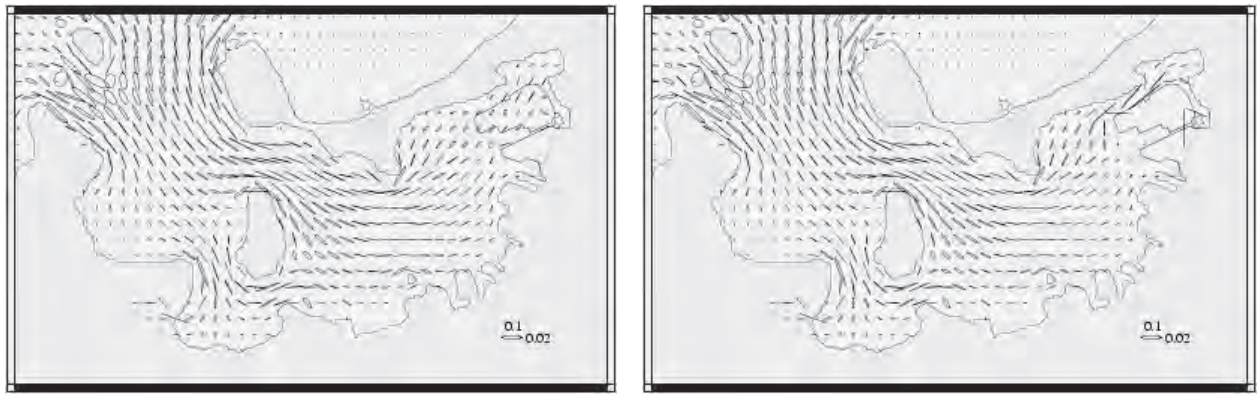


図8 アイランドシティ建設前後における潮流楕円の変化(左図:建設前, 右図:建設後)

おける干拓によってより広い範囲で流速が大きく減少し、成層化しやすい環境となったことが分かる。

以上のように、湾奥部の干拓による入退潮量の減少および月の昇交点運動による変動は諫早湾干拓事業よりも潮流および成層強度に与える影響が大きいことが分かった。近年、有明海において発生する貧酸素水塊の大規模化に関するシナリオのひとつとして、次のことが指摘されている。すなわち、諫早湾干拓事業によって潮流が減少し、密度成層が強化され、その結果、酸素の鉛直輸送量が減少したため、貧酸素化しやすくなったというものである<sup>11)</sup>。有明海湾奥部における貧酸素水塊の大規模化に関してこのシナリオがもし当てはまるとすると、湾奥の成層強度の変動に強く影響したと考えられる湾奥部の干拓および月の昇交点運動による影響が明瞭に観測されるはずである。しかしながら、現在そのような研究成果は報告されていない。さらに本研究によると、諫早湾干拓事業による有明海湾奥部の  $\log(h/u^3)$  や流速分布に変化はほとんど検出されなかった。したがって、有明海湾奥部において、上記のシナリオが実際に生じた可能性は低いと考えられる。一方で、諫早湾内では諫早湾干拓事業により上記のようなシナリオが成立している可能性がある。今後の有明海の水環境の改善策では、このような海域毎の異変発生メカニズムの違いを考えて立案・実施を行う必要がある。

最後に、図8に博多湾内の潮流流速に与えたアイランドシティ建設の影響を示す。アイランドシティ

付近で流速の増減速や流向の変化が生じていることが分かる。このように、湾奥の干拓による潮流の変化は有明海に限らず生じていることが分かる。

#### 4. おわりに

本研究では、有明海の潮汐・潮流の長期変化に影響を与える要因についてデータ解析と数値シミュレーションにより定量的な評価を行った。その結果、諫早湾干拓事業による成層強度に与える影響は、湾奥部の干拓および月の昇交点運動によるものに比べ、小さいことを示した。諫早湾干拓事業が貧酸素化に影響を与えたとすれば、このような単純な図式ではなく、より複雑なメカニズムを経て影響を与えていると考えられる。したがって、今後も継続して調査研究が行なわれることが望まれる。

#### 参考文献

- 1) 宇野木早苗：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，pp.307-313，2003.
- 2) 千葉賢，武本行正：諫早湾潮受け堤防の影響評価のための潮位観測値の分析と流況数値解析，四日市大学環境情報論集，第5巻1・2号合併号，pp.39-70，2002.
- 3) 藤原考道，経塚雄策，濱田考治：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，pp.403-411，2004.
- 4) 安田秀一：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一複合潮の振舞いと固有振動との共振一, 海の研究, 第 15 巻, pp.319-334, 2006.
- 5) 田井明, 矢野真一郎: 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, pp.205-211, 2008.
- 6) 農林水産省: 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会資料, 2001.
- 7) 西ノ首英之, 小松利光, 矢野真一郎, 齋田倫範: 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, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.336-340, 2004.
- 8) 田井明, 齋田倫範, 矢野真一郎, 川村嘉広, 野口敏春, 小松利光: 有明海湾奥における近年の潮流の変化と残差流の変動特性海岸工学論文集, 土木学会, 55, pp.371-375, 2008.
- 9) 山口創一, 濱田孝治, 速水祐一, 瀬口昌洋, 大串浩一郎: 有明海奥部筑後川河口沖における流れの季節および経年変動, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.436-439, 2009.
- 10) Simpson, J.H., J.R. Hunter: Fronts in the Irish Sea, Nature, Vol.250, pp.404-406, 1976.
- 11) 宇野木早苗・佐々木克之: 有明海異変の発生システムについて, 海の研究, 第 16 巻, 第 4 号, pp. 319-328, 2007.



### ムツゴロウ

【環境省絶滅危惧 I B 類】

有明海・八代海に生息。背鰭を立て威嚇する雄の姿がよくみられる。