

八代海の潮汐・潮流特性に関する 数値シミュレーション

NUMERICAL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF TIDE AND TIDAL CURRENT IN THE YATSUSHIRO SEA

田井明¹・矢野真一郎²

Akira TAI and Shinichiro YANO

¹学生会員 工修 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)

²正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

Mercury dispersed in a coastal area and an ocean causes bioaccumulation in bodies of large fish and shellfish through the food chain. Dynamics of mercury in an actual sea are associated with physical, chemical, and biochemical processes. To develop the numerical model for mercury transport and fate, it is necessary to understand the physical mechanism of the mercury transport at least. In this research, we developed the depth-averaged numerical model of tide and tidal current in the Yatsushiro Sea with a highly resolved curve linear coordinate system. A few characteristics of tide, tidal currents, and transport process in the Yatsushiro Sea were investigated numerically. As a result of this research, it becomes clear that i) the M_2 tide in the Yatsushiro Sea is amplified by the Ariake Sea, but the Yatsushiro Sea have the opposite effect on the M_2 tide in the Ariake Sea, ii) the diurnal tidal currents is dominant rather than the semi-diurnal one in the sea area around the Minamata, and iii) the substances initially released into the Minamata Bay can spread over the whole area of the Yatsushiro Sea for one month.

Key Words : Depth-averaged model, Yatsushiro Sea, Minamata Bay, tide, tidal current

1. はじめに

沿岸域や海洋に放出された水銀は、微量であっても大型魚類や鯨などに生物濃縮するため、それらを摂取した人間への影響（特に妊婦が摂取した場合の胎児への影響）が懸念されている。海域に放出された水銀の動態については、移流や拡散などの物理的過程と同時に、メチル化などの有機化に関連する化学的過程や生化学的過程も考慮する必要がある。それらのメカニズムの全貌は明らかになっていない。著者らは、海域に残留する微量水銀の動態を把握し、将来的な拡散状況を予測するために、自然界のバックグラウンド濃度よりは高いが微量な水銀が底泥中に含有している熊本県水俣湾を対象に現地調査による研究を進めてきた¹⁾。

水俣湾が位置する八代海は、図-1に示すように5つの非常に狭い湾口（黒ノ瀬戸、長島海峡、本渡瀬戸、池島ノ瀬戸、三角ノ瀬戸）や数多くの島々をもつ複雑な地形条件の閉鎖性内湾である。また、我が国において有明海に次ぐ広大な干潟を有していること、さらに有明海と3つの瀬戸で接続している二

重閉鎖性内湾系であることなどから、複雑な流動が生じることが予想される。八代海の流動場に関する既往の研究としては、1973年に海上保安庁水路部により行なわれた大規模な現地調査結果²⁾が唯一の全体的な実測結果である。一方、村上ら³⁾や滝川ら⁴⁾により数値シミュレーションによる検討が行なわれているが、詳細な検討が不十分であり、流動の再現が十分にできている状況ではない。

そこで本研究では、水俣湾と八代海における微量水銀動態予測モデルの開発に向けて、最も基本的な情報となる八代海の流動場に関する知見を得ることを目的として、平面2次元モデルによる潮流シミュレーションを行ない、潮流と潮汐の特性を調べた。

2. 潮流シミュレーションについて

(1) 潮位・水温観測について

潮流シミュレーションを行うのに先立ち、精度検証データを得るために、八代海への海水の流出入を考える上で重要と考えられる4つの湾口（池島ノ瀬

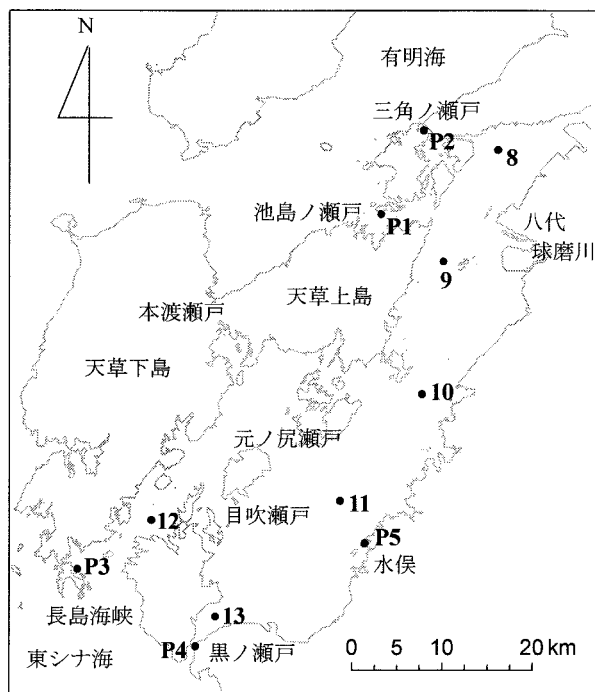


図-1 八代海周辺の地理と測点
(P1～P5：水位観測地点，
8～13：海上保安庁による潮流観測地点)

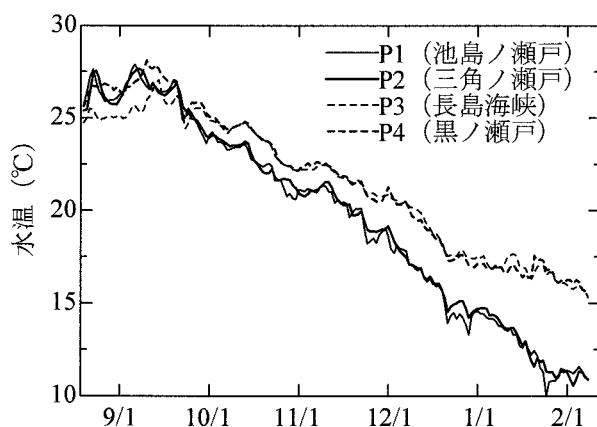


図-2 湾口における水温の変動

戸，三角ノ瀬戸，長島海峡，黒ノ瀬戸）で潮位・水温観測を行なった。2003年8月19日から2004年2月6日の期間に図-1に示すP1（平均水深3.6m），P2（同2.3m），P3（同2.7m），P4（同4.5m）においてメモリ式水深水温計（COMPACT-TD，アレック電子社製）を設置して連続観測を行なった。

図-2に観測期間中の日平均水温の変動を示す。9月頃は4地点ともほぼ同じ値となっていた。しかし冷却期になると，有明海との接続部に位置するP1，P2と，東シナ海との接続部に位置にするP3，P4とでは差が開いていき，2月頃にはその差が5℃以上になった。このような冬季における湾口と湾奥の水

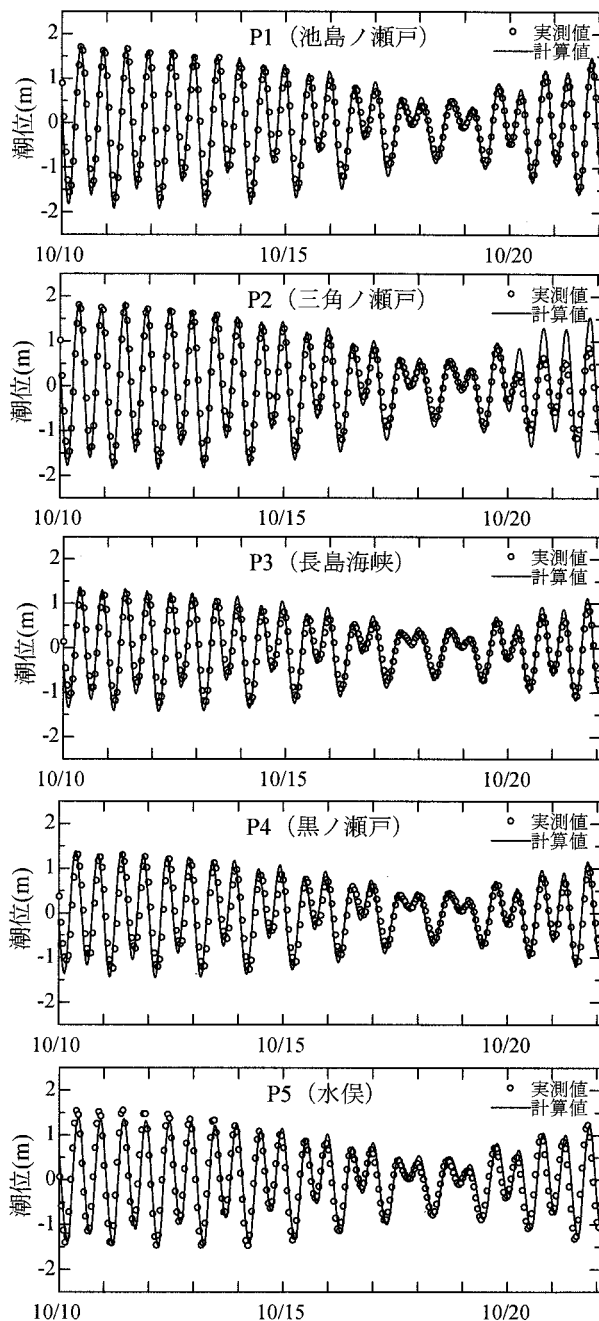


図-3 観測値と計算値の比較（潮位変動）

温差が生じる要因として，九州西岸を北上する暖流の影響⁴⁾と水深による冷却効果の違いが考えられる。

(2) 数値シミュレーションの概要

潮流の数値シミュレーションは，千葉・武本⁵⁾により開発され田井ら⁶⁾により改良された，干潟モデルを有する平面2次元モデルを用いて行なった。支配方程式は平面2次元の浅水方程式であり，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た。移流項の差分には河村桑原スキームを用いている。計算領域は，有明海と八代海の全域，および東

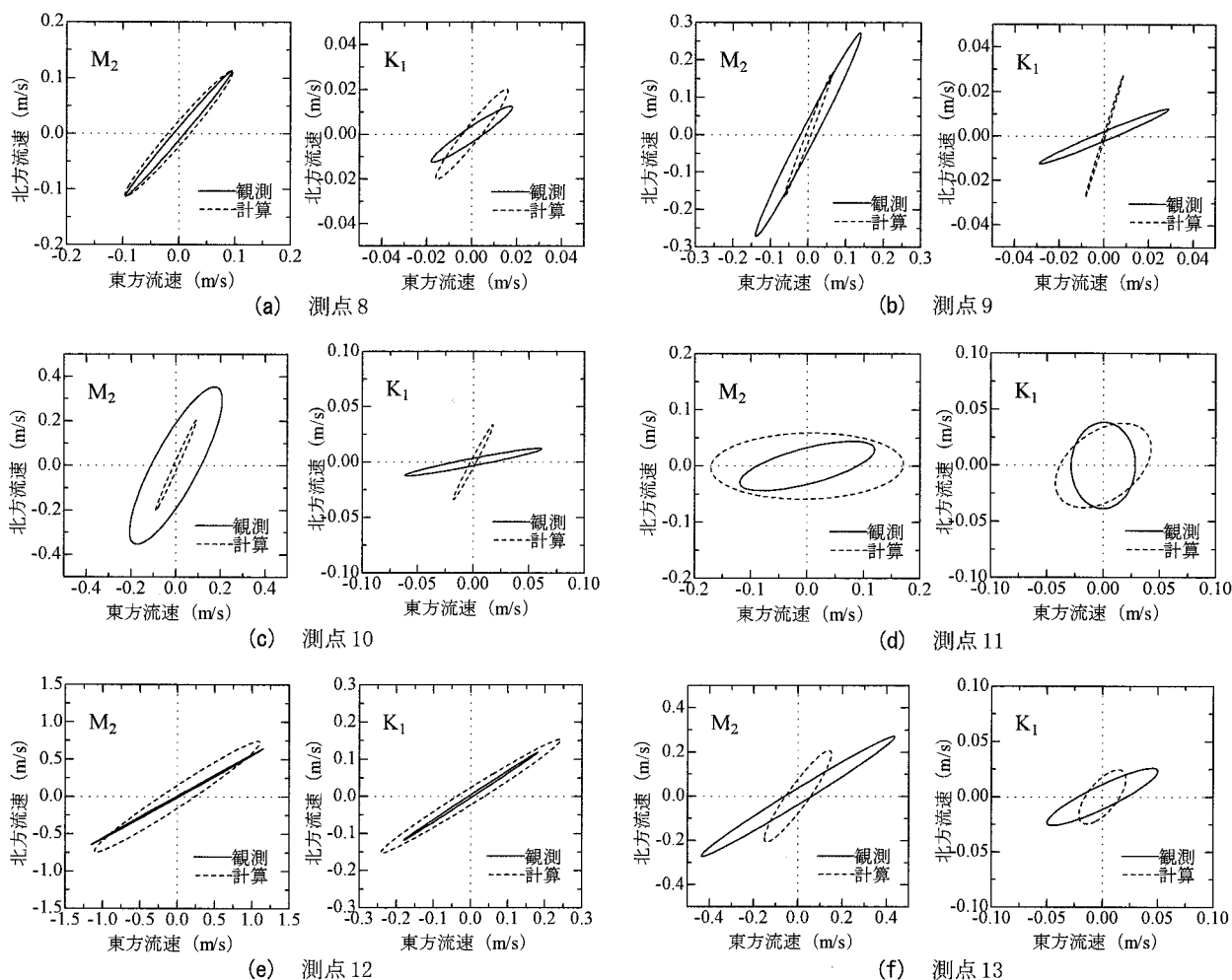


図-4 観測結果と計算結果の比較（潮流楕円）

シナ海の一部（湾口から約100km遠方まで）である。八代海は、前述したように複雑な海岸線を有している。よって、それにより生じる地形性渦流等を再現するために、八代海内の計算格子幅を既存の研究と比べて高解像度である約100～300mとしている。なお、本研究で考慮した4つの湾口部における湾口幅は、それぞれ黒ノ瀬戸：300m、長島海峡：3,000m、池島ノ瀬戸：1,800m、三角ノ瀬戸：250mである。

本研究では、湾口での水位観測の実施期間中である2003年10月を対象に潮流シミュレーションを行なった。東シナ海上の開境界では、枕崎の検潮所における実測潮位を与えたが、実際の開境界上での潮汐とは異なる。したがって、P1～P4およびP5（水俣湾検潮所）での潮位変動を正確に再現できるように、開境界上での潮汐の振幅のみを調整した。潮位変動の計算結果と実測値との比較を図-3に示す。地点や時期により若干のずれが生じており完全には再現できていないが、概ね良好に再現されていることから、この開境界条件を使用した計算結果により今後の検討を行った。

次に、海上保安庁の観測結果²⁾を利用して、潮流

の再現性を確認する。観測は、1973年8月下旬から9月中旬の期間中に15昼夜連続で、小野式自記流速計を用いて表層流（海面下3m）を対象に行なわれたものである。近年、八代海では高潮対策等により自然海岸が失われていること、また干潟面積も減少していること⁷⁾から、潮汐や潮流も地形変化に伴い経年変化していることが考えられる。そのため、現在の地形を対象に行なった計算結果との厳密な比較は行なえないと考えられる。しかし、八代海全域を対象とした流況の調査事例が他に無いため、流動の再現性を確認するためには、定性的になるがこの観測結果との比較を行なわざるを得ない。潮流の調和定数が求められている測点8～13（図-1）の6地点において、半日周期の M_2 潮（周期 $T=12.42$ hours）と日周期の K_1 潮（ $T=23.93$ hours）について潮流楕円の比較を行なった（図-4）。地点や分潮によって一致の度合いが異なるのが分かる。特に測点9、10、13では M_2 潮、 K_1 潮共に計算値が観測値に比べて小さくなっている。前述したとおり、両者は一致することが期待できないものであるが、その他の測点における潮流楕円の方向や大きさなどの傾向は一致してい

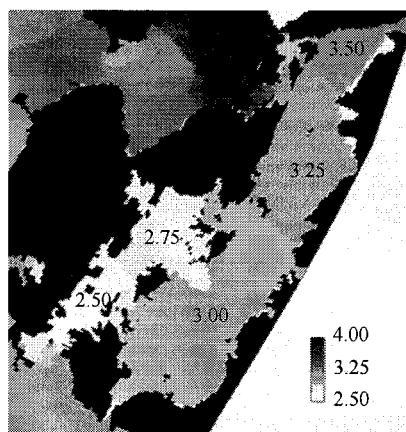


図-5 大潮期の平均潮差 (m)

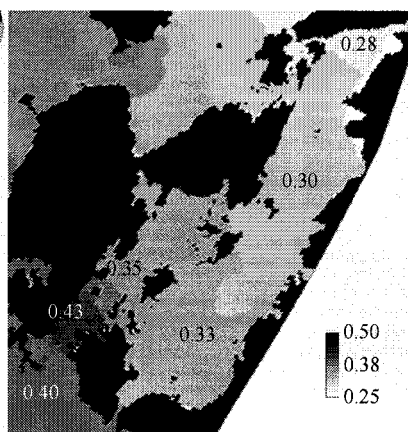


図-6 潮汐のF値の分布

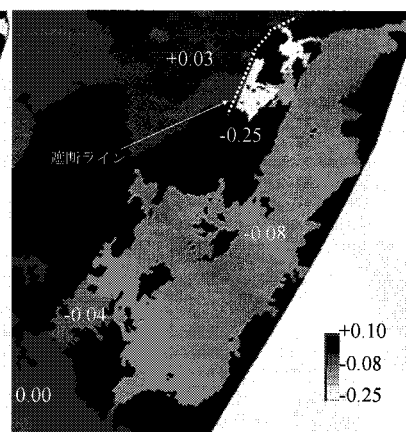


図-7 有明海との接続部を遮断した場合の M_2 潮振幅の増加量 (m)

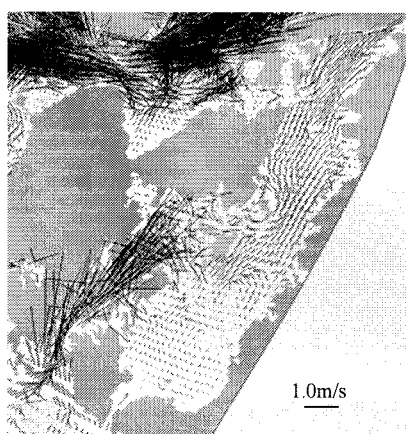


図-8 潮流楕円の長軸の分布 (M_2 潮)

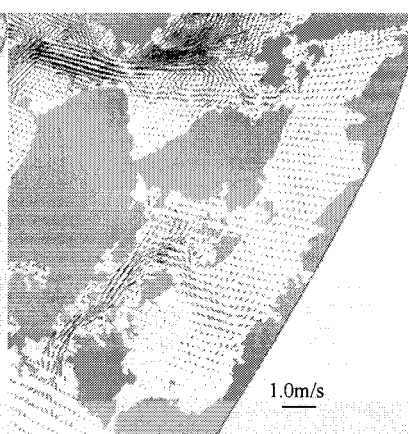


図-9 潮流楕円の長軸の分布 (K_1 潮)

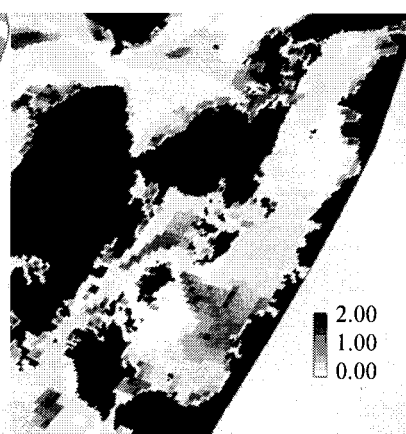


図-10 潮流のF値の分布

ることから潮流の特性評価には耐えられると考えた。よって、本モデルを用いた八代海における潮汐・潮流場の検討は可能と考え、以下にいくつかの検討を行なった結果について示す。

3. 解析結果と考察

(1) 八代海の潮汐・潮流について

まず、潮汐特性について述べる。図-5に大潮期の平均的な潮差 (M_2 潮と S_2 潮 ($T=12.00$ hours) の振幅和の2倍) の分布を示す。八代海では、半日周潮である M_2 潮や S_2 潮の振幅が大きく、続いて日周潮である K_1 潮や O_1 潮 ($T=25.82$ hours) が卓越している。瀬戸や海峡部周辺を除き、湾内ではほぼ同時に水面変動が生じており、潮汐は定在波の性質が強い。長島海峡を湾口とすると基本振動周期は6.4時間となり、半日周期の増幅率が1.45となるという見積もりが行なわれている⁸⁾。今回の計算結果では、湾口の振幅が1.25m、湾奥が1.75mであり、増幅率は1.40となり良く一致していた。

日潮不等の程度を表す指標として、式(1)で定義

される F 値が一般的に利用されている⁹⁾。

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (1)$$

ここで、 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 は調和分解によって得られる各分潮の振幅である。 $F < 0.25$ で半日周潮型、 $F = 0.25 \sim 1.25$ で混合潮型、 $F > 1.25$ で日周潮型と分類される。図-6に F 値の分布を示すが、八代海の潮汐は全域で混合潮型に分類されることが分かる。

八代海は湾奥が有明海と接続している二重閉鎖性内湾であるため、潮汐・潮流の数値計算を行なう際に有明海との相互作用を考慮する必要があると指摘されている¹⁰⁾。そこで、有明海が八代海の潮汐に与える影響を検討するために、図-7に示すように池島ノ瀬戸と三角ノ瀬戸で海水の流動を遮断した計算を行なった。同図に海峡遮断時の M_2 潮振幅の増加量分布を示す。八代海では全域で負値となり、有明海では正值となり、田中ら¹⁰⁾の数値解析による検討と同様な傾向を示した。有明海の基本振動周期は7.8時間と見積もられている⁸⁾ことから、基本振動周期が6.4時間である八代海では有明海が半日周潮を増

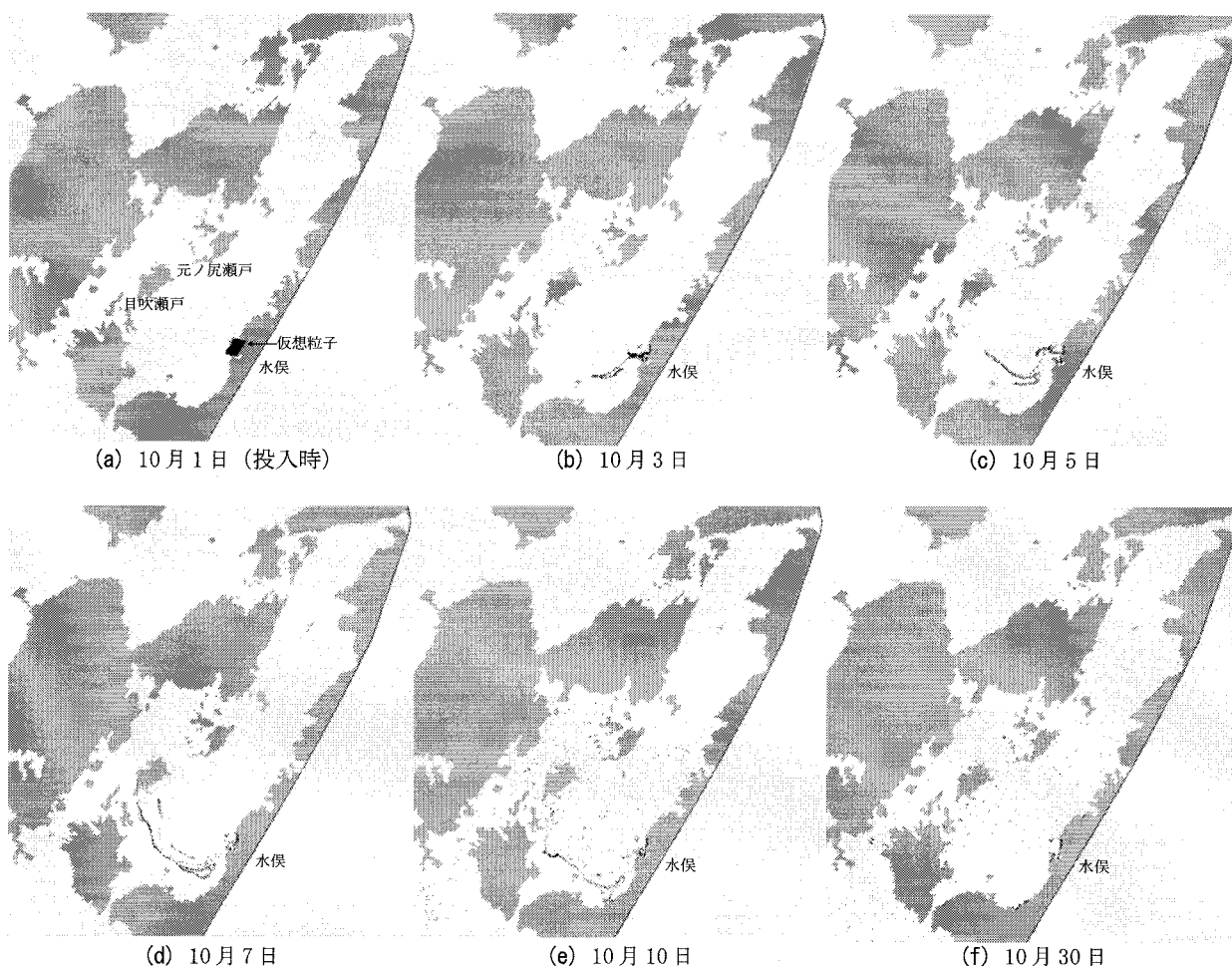


図-11 粒子追跡計算により得られた粒子の分布

幅させ、有明海に対して八代海は逆の影響を与えたと考えられる。また、その変化量は M_2 潮振幅について湾中央部で10%程度(湾中央部の M_2 潮振幅は現況で0.8~1.0m程度)とかなり大きく、八代海における潮汐のシミュレーションを精度良く行なうには、有明海を考慮することが必要であることが示唆された。

次に、潮流特性について述べる。潮流の計算結果より得られた調和定数から計算した M_2 潮、 K_1 潮の潮流楕円長軸の分布をそれぞれ図-8、9に示す。潮流楕円の長軸は、長さがその分潮の潮流流速の最大値、方向が卓越流向を表している。 M_2 潮の長軸長は長島海峡で最大となり、元ノ尻瀬戸から湾奥へ向かう海域で比較的大きな値となった。一方、水俣沖から黒ノ瀬戸にかけての海域は、北部に比べて潮流は微弱であると言える。水俣湾沖では K_1 潮が相対的に大きく、式(1)より潮流の F 値分布を求めると(図-10)、この海域は1.25より大きくなり、潮流に関しては日周期の変動が卓越している。これは、海上保安庁の観測結果²⁾でも示されており、八代海の潮流による物質輸送を解析する際、 M_2 潮のみを対象とした検討では不十分であることが示唆される。

(2) 水俣湾からの物質の移流拡散過程の検討

最後に、水俣湾から八代海へ放出される物質の移流拡散過程を検討するために、オイラー・ラグランジュ法による粒子追跡計算⁹⁾を行なった。ここでは、10月1日の満潮時に水俣湾内に4800個の仮想粒子を投入し、一ヶ月間にわたる解析を行なった。粒子の分布について、時間経過を図-11に示す。

まず、水俣湾からの放出直後は、仮想粒子は南西に輸送されていく(同(b),(c))。一週間後には目吹瀬戸や元ノ尻瀬戸付近に到達する(同(d))。目吹瀬戸や元ノ尻瀬戸に到達すると、強い潮流により湾中央部から長島海峡にかけての南部八代海全域に短時間で拡がる(同(e))。また、東シナ海への流出も始まっている。一ヶ月後には、仮想粒子は八代海全域に分布している(同(f))。以上より、水俣湾に放出された物質は、対岸の目吹瀬戸や元ノ尻瀬戸付近へ到達した後、強い潮流により一ヶ月程度で八代海全域へ拡散されることが分かった。

4. まとめ

八代海の複雑な海岸地形を再現した高解像度の平面2次元モデルを用いて、八代海の潮汐・潮流特性に関する数値解析を行なった。主要な結論は以下の通りである。

- (1) 4つの湾口において、冬季の冷却期は有明海側に比べ東シナ海側は約5℃水温が高く、暖流の影響が示唆された。
- (2) 八代海の M_2 潮振幅は、有明海の影響を受けて増加しており、逆に有明海では八代海の影響により減少している。その影響は、湾中部で M_2 潮振幅の10%程度とかなり大きい。
- (3) 水俣沖の海域では、日周期の潮流が卓越しており、物質輸送を検討する際には、 M_2 潮のみを対象とした解析では不十分である。
- (4) 水俣湾に放出された物質は一ヶ月程度で八代海全域に輸送される。

今後、本研究で開発した数値モデルおよび、得られた八代海の潮汐・潮流特性の基礎的知見を用いて微量残留水銀の輸送モデルの開発を行なっていく。なお、本研究は有明海や東シナ海を含めた大領域を対象としたため平面2次元モデルを用いた。底質に吸着した水銀の輸送を解析する際には、流れやSSの3次元分布が発生するので、本研究で得られた情報に基づいた境界条件の設定などを行ない、八代海と水俣湾の3次元モデルを構築していく必要がある。

謝辞：本研究で用いた水俣湾の潮位データは熊本県土木部河川課より提供して頂きました。また、竹中土木の大淵義剛氏（当時、九州大学大学院）には、

データ整理全般にわたり、多大なるご支援を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 矢野真一郎, 田井明, 大淵義剛, 多田彰秀, 松山明人, Rudi, R. : 水俣湾湾口におけるSS輸送の現地観測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp951-955.
- 2) 海上保安庁水路部: 有明海, 八代海海象調査報告書, p. 39, 1974.
- 3) 村上啓介, 上久保祐志, 古松琢美, 上原功: 3次元流動モデルによる八代海の潮流特性の解析, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 1031-1036, 2004.
- 4) 滝川清, 田中健路, 森英次, 渡辺枢, 外村隆臣, 青山千春: 八代海の環境変動の要因分析に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 916-920, 2004.
- 5) 千葉賢, 武本行正: 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, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 376-380.
- 6) 田井明, Hatta, M. P., 矢野真一郎, 齋田倫範, 小松利光: 諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 331-335, 2006.
- 7) 環境省: 有明海・八代海総合調査評価委員会報告書, p. 85, 2006.
- 8) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会: 続・日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, p. 839, 1990.
- 9) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, p. 672, 1993.
- 10) 田中昌宏, 稲垣聡, 山木克則: 有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 406-410, 2002.