

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760398

研究課題名(和文) 沿岸浅海域における高精度海洋環境シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of high accuracy simulator in coastal ocean

研究代表者

田井 明 (Akira, TAI)

九州大学・高等研究院・助教

研究者番号：20585921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸域の高精度数値シミュレータの開発を実施した。まず、境界条件となる潮汐の全球的な長期変化について海面上昇等との関連を明らかにした。次に、対象とする有明海において長期連続流速観測を実施し、シミュレータのバリデーションに必要なデータを取得した。粒子法を用いた沿岸域流動場の数値シミュレーションの前段階として広範囲での自由表面流れを近似するのに用いられる浅水方程式を基礎方程式とした粒子法の性能・精度の基礎的検討を実施し、水深ではなく水位を基にSPH補間することにより、地形が急変した場合にも潮汐の共振現象を再現することを可能にした。

研究成果の概要(英文)：I carried out development of high accuracy simulator in coastal ocean. First, I considered about tidal amplitude used for open boundary. Measurement data analysis showed that rapid sea level rise and decrease in M2 tide amplitude were generated at observatories facing the East China Sea around 1998. I observed the current velocity at more than one spot in a conspicuous Isahaya Bay of water quality deterioration at summer and winter of 2013 for the purpose of explication of properties of tidal current. The solution for the shallow water equations using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method is useful and attractive. But the SPH method has serious instability problem and error because there are quite few studies about improvement and effectiveness analysis. So in this study, I improved the SPH method based on the shallow water equations and evaluated practical applicability to the coastal ocean.

研究分野：環境水理学

キーワード：数値シミュレーション 潮汐 長期変化 粒子法

### 1. 研究開始当初の背景

現在、我が国の沿岸海域の水環境は健全な状態とは言えない。沿岸海域を再生していくためには高精度に水環境をシミュレート可能なツールが必要不可欠である。しかし、干潟の干出・水没や密度成層が生じるような浅海域における物理現象を高精度に再現可能なシミュレータは存在していない。また、これまでもシミュレータによる同様の取り組みは行われてきたと考えられるが、多くの場合、有効な再生策の立案・施行までのツールとして有効利用されていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

以上のように、沿岸浅海域の海洋環境を高精度にシミュレートするためには、外洋の影響を含む潮汐・潮流現象、干潟の干出・冠水、密度成層、風波の影響を考慮する必要がある。しかし、各現象の高精度なモデルおよびそれらを統合した水環境シミュレータは現在のところ存在していない。そこで、本研究では各現象について現地観測を通してモデリングし、それらを統合した沿岸浅海域の高精度海洋環境シミュレータの開発を行うことを目的とする。一方で、現在までも有明海を対象とした数値シミュレーションは数多く行われているが、沿岸海洋の再生に向けた取り組みに有効利用されているとは言い難い。また、水産学関係の大学や研究所でも有明海の環境再生に向けた取り組みは行われているが、有効な再生方策は未だ提案されていない。この原因として、沿岸海洋の水環境を考える上で本研究で対象とするような物理的な側面と魚類などの生物学的な側面が切っても切り離せない関係であるにも関わらず、バラバラに取り組みが行われていることも大きな要因である。さらに、再生策の立案・施行の当事者（漁民、地元行政）はシミュレーションなどの専門知識を有していないため、その結果から合意形成が困難であることも原因のひとつであると考えられる。よって、本研究では、シミュレータを開発する上で生物学等の他分野の研究者が求めているものを考慮することや、専門知識を有しない市民に対してシミュレータで予測可能な事やその限界の説明や予測結果の示し方を検討することで、幅広い分野で利用される水環境シミュレータの開発を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 浅海域での現地観測

有明海の浅海域を対象に現地観測を実施する。観測項目はモデリングに必要な、流速（超音波ドップラー流速計）、水位（圧力式水位計）、乱流エネルギー散逸率（乱流微細構造観測プロファイラー）、波高・波向（超音波式波高計）、塩分・水温・濁度・溶存酸素濃度（多項目水質計）である。観測時期は密度成層や貧酸素化が生じやすい夏季を対

象とし、一潮汐間（約 12 時間）実施する。異なった潮流の大きさ（大潮・小潮）や波浪状況の場合のデータを取得するために夏季に数回実施する。

#### (2) 全球的な潮汐振幅の変化・変動分布特性とその要因の検討

沿岸海域は外海の潮汐振幅が強制的な境界条件となって潮汐振幅が生じるため、外海の潮汐振幅の変化・変動は沿岸海域の潮汐振幅に多大な影響をもたらすと考えられる。

しかし、潮汐振幅の長期変化・変動のグローバルな分布特性を解析した研究は行われていない。Cherniawsky et al. (2010) は、衛星観測データを用いて 18.6 年周期変動のグローバルな分布を求めているが、衛星観測のデータ自体は 20 年に満たないため結論の信頼性に疑問が残る。そこで、本研究では、以下に示す 60 年間以上のデータが入手可能な潮汐観測所のデータを調和解析し、グローバルな潮汐振幅の変化・変動分布特性を調べる。

#### (3) 干潟の干出・冠水と波浪影響の高精度なモデリング

干潟の干出・冠水モデルに関してはいくつか提案されているが、干潟縁辺部での水位・流速の実測値によりその精度が検証された例は少ない。また、冠水→干出、干出→冠水時の水温・塩分やその他の物質収支の保存性に関しては検討されていない。よって、(1) で取得したデータを用いて物質収支まで再現可能な新たな干潟モデルの開発を行う。

### 4. 研究成果

環境の悪化が顕著な有明海において、その原因の解明と解決のために多くの調査・研究が行われてきた。しかし、物質輸送ならびに循環構造を考える上で重要な流動構造に関しては、観測データの量や研究者間での共有に関する取り組みは不足しており、不明な点が多いのが現状である。以上のような現状を踏まえて、本研究グループでは、水質悪化が特に顕著な諫早湾に注目し、流速データセットの構築と流動構造の解明を目的として、2013 年度夏季ならびに冬季に流速の多点連続観測を実施した。流速観測は、図 1 に示す諫早湾の 4 地点 (B3, B4, B5, B6) で表 1 に示す諸元で実施した。夏季と冬季で使用機材や設置方法は完全に一致させている。

まず、諫早湾での潮流成分による流動構造を把握するために、観測の流速データを調和分解して描いた B3 の M2 潮潮流楕円を図 2 に示す。なお、潮位変動に対応して  $\sigma$  座標的にデータを整理し、底層、底面から 1/4 水深層、1/2 水深層、3/4 水深層、表層の 5 層の結果を示している。これより、夏季において楕円の大きさは、底層から表層に向けて大きくなり、長軸方向は反時計周りに回転していた。一方で、冬季においては、底層から表層までほぼ一様な大きさ・方向となっていた。なお、この傾向は全地点で同一であった。この違い

が生じる理由は、夏季は密度成層の形成によりエクマン摩擦深度（柳ら，1983）が夏季では小さく、冬季では大きいためであると考えられる。



図1 観測場所

数値流体シミュレーションにおいて粒子法は、(1)基礎方程式に対流項が存在しないため、対流項による数値拡散が生じない、(2)メッシュに依存しないため、大変形を生じる現象や複雑形状を有する問題に有利である、ことなど格子法を用いる有限差分法、有限体積法、有限要素法などが永年抱えてきた問題を著しく改善可能であると考えられている（越塚，2005）。沿岸域の流動場においても、上記の特性を生かすことで、潮汐による干潟の干出・冠水現象、高潮や津波による陸域への浸水現象などに特別なモデルを必要とせずに数値シミュレーションが可能であることが予想される。しかし、その一方で、実際に応用の試みが盛んになってからの歴史が浅く、格子法では多くの蓄積がある経験則が十分に体系化されておらず、粒子法を用いる際のカーネル関数やスキームの選択などは感覚的にまたは試行錯誤により行われているのが実情である（浦川・多田，2013）。そこで、本研究では粒子法を用いた沿岸域流動場の数値シミュレーションの前段階として広範囲での自由表面流れを近似するのに用いられる浅水方程式を基礎方程式とした粒子

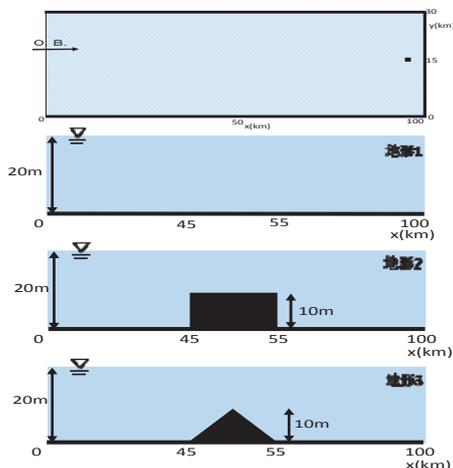


図2 計算領域

法の性能・精度の基礎的検討を実施した。

本研究では沿岸域の重要な現象のひとつである潮汐の増幅現象を対象にSWE-SPHの性能・精度の検証を行った。検証には図2に示す奥行き100km、幅30kmの領域の左端を開境界、その他を閉境界とした矩形湾を用いた。全ケースで水位20mの静止状態から計算をスタートし、振幅1.0m、周期12時間の潮汐波を左端開境界に与え、平滑化距離や地形の解像度などは同条件とした。

まず、時間幅、安定化スキーム、粒子の初期配置間隔による計算結果の違いを検証するために6ケースの計算を行った。この結果より、全ての計算ケースで満潮時に不適切な振動が生じているが、同じような計算結果が得られ、単純な地形では潮汐の共振現象を良好に再現することが出来た。各ケースを比較すると分散誤差は、時間刻みを小さくし、安定化スキームはLax-Friedrich fluxを用い、粒子の初期粒子配置間隔を小さくするほど振動が小さくなり安定することが分かる。次に、地形が変化する場合の計算結果の違いを検証するために3ケースの計算を行った。この結果、満潮時に振動が生じているが、定性的には同じ変化傾向を示していることから一定の精度を持って計算されていることが分かる。一方、図2の一番下のような海底地形が急変する場合は湾奥まで波が伝播しなかった。海底地形が急変する場合は、SPH補完した時に修正前では初期段階で段変化近傍の水位が一定に保たれていないことが分かった。海底が急変すると水深も急変してしまうため、水深をSPH補完する際に段変化直前の水深は段変化直後の水深の影響により低下する。一方で、段変化直後の水深は段変化直前の水深の影響により増加する。これが湾奥まで波が伝播しなかった要因だと考えられる。そこで、水位は常に連続であることに注目して、水深ではなく水位を基にSPH補間を行った。その結果、水深ではなく水位を基にSPH補間することにより、地形が急変した場合にも潮汐の共振現象を再現することを可能にした。

内湾の潮汐を考える際に外洋潮汐の知見を得ることは非常に重要であるが、近年上昇している平均海面の上昇との関連などに関する検討はあまり行われていない。そこで、本研究では、国内外の約200か所の外洋に面した験潮所における実測データ解析と統計解析を行った。

日本国内は日本海洋データセンターのホームページより入手した39か所の験潮所の潮位データを対象にした。次に、入手したデータを取付水準点とT.P.の高低差の測量結果に基づいて補正し、地殻変動の影響を除去した。補正データを最小二乗法を用いた調和解析により、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主要38分潮に分解した。海外の験潮所は、ハワイ大学海面

センターより潮汐データを入手した。験潮所は潮汐データが少なくとも 1990 年から 2000 年を含むように選択した結果、167 か所となった。データ期間は験潮所毎に異なり、開始年の平均値が 1951.1 年、終了年は 2011.7 年、期間長は 60.6 年であった。入手したデータを最小二乗法を用いた調和解析により 90 日ずつ解析期間をずらしながら 369 日のデータを用いて主要 60 分潮に分解した。ここで、日本国内の分解分潮数が海外に比べて少なくなっているが、国内の複数点で 60 分潮を用いて分解した結果と比較したところ結果に大きな影響はなく、比較には問題がないことを確認している。

MSL と主要な半日周期分潮 (M2 潮, S2 潮, K2 潮, N2 潮) に関する長期的な変動を知ることを目的として、線形回帰分析とノンパラメトリック検定である Mann-Kendall 検定を行った。なお、解析結果として有意な値 (有意水準 5%) を得られなかった験潮所の値は 0 とした。対象期間は、データのある全期間を対象にしたものと、対象期間を揃える解析を行うために、北アメリカ大陸東岸での M2 潮振幅の長期変化傾向が 1980 年代に変化したことを考慮して 1985 年以降の期間のみを対象にしたものの 2 パターンとした。

まず、全体的な傾向を調べるために、Mann-Kendall 検定の結果による海外の験潮所における各分潮の増減割合の全期間を対象にした結果と 1985 年以降を対象にした結果に対する考察を行った。これより、MSL は両期間共に 75% 以上の験潮所で増加傾向を示していることが分かる。これは、平均海面が全球的に上昇しているという既往の結果と整合している。M2 潮は、両期間共に 60% 前後の験潮所で統計的に有意な変化傾向が生じているが、増加と減少は混在する結果となった。S2 潮は、M2 潮と同様な傾向となった。また、M2 潮、S2 潮ともに全期間を対象にしたほうが有意な変化傾向と判定された験潮所の数が多いことが分かる。K2 潮、N2 潮は、両期間共に 60% 前後の験潮所で統計的に有意な変化傾向が生じていなかった。これは、調和解析の精度に比べて K2 潮、N2 潮の値や変化が小さいためであると考えられる。

国内の験潮所では西日本を中心に M2 潮は減少傾向でほぼ一致していたが、海外の験潮所は増加と減少が混在しており、全球的に一致した傾向では変化していないことが分かった。よって、空間分布で示されたように、西日本や北アメリカ大陸西岸など空間スケールがある程度小さい海域では同一の傾向になりやすいことから、海域毎の何らかのメカニズムで増減が生じていると考えられる。変化のメカニズムとしては、(1) 潮汐ポテンシャルの変化、(2) 水深の変化、(3) 内部潮汐の変化、(4) 観測方法・技術の変化などが主に考えられる。(1) に関しては、以下の理由で可能性は低いと考えている。半日周期潮汐振幅の長期変化は類似した変

化傾向を有していると考えられる。これは、共振などによる増幅特性がほぼ同じであることが理由として考えられ、半日周期潮汐の長期変化のメカニズムは海洋の力学構造の変化 (2), (3) もしくは (4) であることが示唆される。(2) 水深変化の要因として近年の気候変動による海面上昇が考えられる。しかし、本研究で MSL は増加傾向、半日周期潮汐は減少傾向が優勢であった東シナ海沿岸では、数値実験により海面上昇が生じると M2 潮が増加傾向を示すことが分かっていることから、MSL の変化のみでは説明できない可能性が高い。(3) 内部潮汐に関しては、いくつかの地点では潮汐の長期変化に影響したことが示されており (cite {17}), 本研究で得られた変化傾向を説明できる可能性がある。(4) 観測方法・技術の変化に関しては、多くの観測機関で検潮器の種類などが更新されていることから注意を要するが、現時点で検証は不十分である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

1. 小森田 智大, 梅原 亮, 田井明, 高橋 徹, 折田 亮, 堤 裕昭, 諫早湾調整池からの高濁度排水が諫早湾内の短期的なアンモニア態窒素の挙動に与える影響, 水環境学会誌, 38, 3, 75-80, 2015, 査読有。
2. 橋本彰博, 川井一輝, 田井明, 2010 年奄美豪雨の氾濫解析と氾濫発生要因の検討, 土木学会論文集 B 1 (水工学), 71, 4, I\_1453-I\_1458, 2015, 査読有。
3. 金相曄, 多田彰秀, 田井明, 八百山工祐, 鈴木誠二, 2013 年度夏季の諫早湾北部海域における淡水流入の挙動について, 土木学会論文集 B 1 (水工学), 71, 4, I\_667-I\_672, 2015, 査読有。
4. Akira Umehara, Tomohiro Komorita, Akira TAI, Tohru Takahashi, Ryo Orita, Hiroaki Tsutsumi, Short-term dynamics of cyanobacterial toxins (microcystins) following a discharge from a coastal reservoir in Isahaya Bay, Japan, Marine Pollution Bulletin, 92, 73-79, 2015, 査読有。
5. 田井明, 田中香, 有明海の物理環境に関する漁業者を対象としたヒアリング結果と科学的知見の比較, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 70, 2, 1014-1019, 2014, 査読有。
6. Akira TAI, Kaori TANAKA, Secular Changes in the Tidal Amplitude and Influence of Sea-Level Rise in the East China Sea, Journal of Disaster Research, 9, 1, 48-54, 2014, 査読有。
7. 小森田智大, 梅原亮, 田井明, 高橋 徹, 堤裕昭, 諫早湾調整池から排水された高濁度水の湾内における短期的な挙動の解明, 海の研究, 23, 1, 1-12, 2014, 査読有。

8. Akira TAI, Kaori TANAKA, Tomonori SAITA, Secular Change of Semidiurnal Tide in The Ariake Sea, Japan, Proc. of Global Congress on ICM, 1198-1207, 2013, 査読有.

9. Akira TAI, Tomonori Saita, SHINICHIRO YANO, Toshimitsu Komatsu, Spatio-Temporal Variations of Turbulent Energy Dissipation Rate during Stratification Period in Ariake Bay, Japan, Proceedings of 2013 IAHR World Congress, A11779, 2013, 査読有.

10. Sha Lou, Akihide Tada, TAI Akira, SHINICHIRO YANO, Seiji Suzuki, Shuguang Liu, Numerical Simulation of Salinity and Temperature Distributions in Summer under Assessment of Runoff and Heat Fluxes in the Yatsushiro Sea, Japan, Proceedings of 2013 IAHR World Congress, A10818, 2013, 査読有.

11. 田井明, 田中香, 齋田倫範, 沿岸海洋における水温成層下の乱流エネルギー散逸率の測定, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69, 2, I\_1216-I\_1221, 2013, 査読有.

12. 徳永貴久, 田井明, 木元克則, 有明海湾奥西部の干潟縁辺域における D0 経年変動特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69, 2, I\_1018-I\_1023, 2013, 査読有.

13. 田井明, 小松利光, 諫早湾奥からの物質輸送過程と有明海異変に関する考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, I\_1375-I\_1380, 2013, 査読有.

14. Sha LOU, Akihide TADA, Akira TAI, Shinichiro YANO, Seiji SUZUKI and Shuguang LIU, Numerical Simulation of Salinity Distributions in the Yatsushiro Sea By POM Combined with Watershed Model for B-Class River Basin, Proc. of International Seaans in Conference on Coastal Engineering, JSCE, Vol. 3, pp. 6-10, 2012, 査読有.

15. 矢野真一郎, 田井明, 久野彰大, 松山明人, 矢野康平, 多田彰秀, Herawaty RIOGILANG, 水俣湾における浮遊懸濁物の粒度分布特性について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, I\_961-I\_965, 2012, 査読有.

16. 宮里 聡一, 清野 聡子, 田井明, 波田安徳, 細井 尉佐義, 対馬沿岸における海洋保護区の設定手法の基礎的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 68, 2, p. I\_534-I\_539, 2012, 査読有.

17. 田井明, 齋田 倫範, 米倉 瑠里子, 扇塚 修平, 清野 聡子, 博多湾の海岸線改変による潮汐・潮流と底質輸送への影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 68, 2, p. I\_744-I\_749, 2012, 査読有.

[学会発表] (計10件)

1. 田井明, 潮流の連続観測とデータ解析, 平成26年度有明海地域共同観測プロジェクト

ト (COMPAS) 成果報告シンポジウム, 2015. 03. 28.

2. 田井明, 有明海の湾長減少による潮汐応答特性に関する考察, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会, 2015. 03. 07.

3. 田井明, 齋田倫範, 有明海における潮汐・潮流の変化に関する研究の現状と展望, 2014年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム, 2014. 09. 13.

4. 田井明, 長瀬碧, 諫早湾潮受け堤防締め切りによる M2 潮潮汐振幅の変化のメカニズム, 2014年度日本海洋学会春季大会, 2014. 03. 27.

5. 田井明, 矢野真一郎, 小松 利光, 久野彰大, 北川洋平, 多田彰秀, 夏季成層期の諫早湾口における潮流の連続観測, 平成25年度土木学会西部支部研究発表会, 2014. 03. 08.

6. 田井明, 田中香, 東シナ海周辺の M2 潮潮汐の変化に関して, 第23回九州・山口地区海岸工学者の集い, 2013. 09. 01.

7. 田井明, 田中香, 海面上昇による東シナ海周辺の M2 潮潮汐の変化に関する数値実験, 2013年度日本海洋学会春季大会, 2013. 03. 24.

8. 田井明, 田中香, 齋田倫範, 進藤祐介, 松竹渉, 水温成層が卓越する沿岸域での乱流エネルギー散逸率の実測について, 平成24年度土木学会西部支部研究発表会, 2013. 03. 09.

9. 田井明, 長瀬碧, 非線形作用が潮汐振幅へ及ぼす影響についての考察, 第22回九州・山口地区海岸工学者の集い, 2012. 09.

10. 田井明, 有明海の潮汐・潮流の長期変化と諫早湾干拓事業の関係, 土木学会水工学委員会環境水理部会, 2012. 05.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田井明 (Akira TAI)

九州大学・高等研究院・助教

研究者番号：20585921

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：