

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560543

研究課題名（和文） 内湾型 ROFI における河川起源土砂の輸送機構の解明

研究課題名（英文） On the transport mechanism for riverine sediment in inner bay type of ROFI

研究代表者

矢野 真一郎 (YANO SHINICHIRO)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80274489

研究成果の概要（和文）：

有明海と八代海における淡水影響域 ROFI を対象として、河川から供給される淡水と土砂の挙動について、最新の観測機器を用いた現地観測と最新の3次元沿岸域流動数値モデルを用いた研究を実施した。現地観測結果より、筑後川からの河川プルームの動的特性、河川起源の土砂の輸送構造、などが、数値モデルより非線形潮汐の特性、河川起源の土砂輸送構造と非線形潮汐との関係、などが明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：

In-situ measurement applying up-to-date equipment and 3-dimensional hydrodynamic numerical modeling were conducted for Region of Freshwater Influence (ROFI) in Ariake Sea and Yatsushiro Sea. From the results of in-situ measurement the river plume dynamics and the riverine sediment transport structure were clarified. In addition, characteristics of the nonlinear tide and the riverine sediment transport and relationship between them were shown by the numerical model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：ROFI、淡水影響域、沿岸域、淡水プルーム、河川水

1. 研究開始当初の背景

一般的に、閉鎖性内湾などの沿岸域における有機汚濁の進行度や生態系の健全度などは、対象海域へ流入する有機物や栄養塩類、ならびに有害物質の量と海域内の水質浄化能力のバランスで決定されると考えられてきた。しかし、近年では陸域からの流出負荷制限のみでは海域の状態を健全に保つこと

ができないことが明らかにされている。すなわち、もう1つの負荷源として海底堆積物の存在が明確にされている。沿岸域の底質（ここでは、海底堆積物と区別して sediment quality という意味で用いる）は、河川水を通じて陸域から供給される土砂の海域での動態と、輸送途中ならびに海底への堆積後の化学的・生物的作用、ならびに堆積後の浸食、

圧密や底生生物による攪乱などの物理作用と間隙水の物理的・化学的動態などにより決定される。これらの各素過程について個別の研究と、それらを包括的に取り入れた数値モデルの開発が欧米を中心に進められている。我が国においても、近年この分野の重要性が沿岸域環境の研究者にも認知され物理作用の研究が進展し始めているものの、未だ十分な知見が得られていない。その原因として、現地における時空間的に大規模な土砂動態の観測が困難であること、河川の洪水時と平水時で輸送構造が変化するなど非定常性が強いこと、ならびに堆積学的な調査では時間スケールの小さい挙動は分からないこと、などが上げられる。

一方、河川から流入する淡水は、沿岸域での潮流や波浪による海水との混合過程を経ながら海域に拡がることになるが、海面における熱の交換による水温成層構造の発達に支配的な領域と塩淡成層構造の発達が支配的な領域では、流れやそれに伴う物質輸送の構造が異なるものと考えられている。そのことを Simpson(1997)は明確に示し、淡水の影響を強く受ける領域として ROFI(Region of Freshwater Influence)を定義した。現在、この概念は沿岸域の海洋物理学分野を中心に広く受け入れられ、世界中で研究対象になっている。また、河川水が広い海域に放出される場合にはコリオリ力が影響を与えるため、さらに複雑な流動パターンを示すことはよく知られている。さらに、我が国の3大湾や有明海、八代海などの大きなスケールの内湾域においては、閉鎖的な地形の影響、共振潮汐による強い潮流の影響、ならびに複数の大きい河川を起源とする淡水流入の相互影響なども併せて考えなければならない。このように大きな内湾に流入する場合については、Simpsonは内湾型 ROFI と別に分類して定義している。

これまで研究代表者は、我が国有数の空間スケールをもち、水環境や生態系について深刻な問題を抱えている有明海において現地観測を中心とした物理構造の研究を精力的に進めてきた。その中で、有明海の全体的な流動構造や、近年の潮汐と潮流の変化など多くの基本的な物理構造を明らかにしている。さらに、河川から海域へ流出する淡水塊をラグランジュ的に追跡し、洪水時と平水時において有明海に流入した河川水の輸送パターンに大きな違いがあることも H18~19 年度科研基盤研究 (C) の成果として初めて明らかにしている。これは、従来広く考えられてきた場としての河口域やエスチャリーとしてよりも、動的な状態をもつ ROFI として有明海を捉え直すことで、河川を通じて供給される陸域起源の物質の輸送構造をより明確にできる可能性を示唆している。つまり、

ROFI—熱塩成層混成域—熱成層支配領域という動的な物理構造により湾内を時空間的にゾーニングし、水質・底質・生態系への物理構造と陸域起源物質の影響を再評価することで、これまで固定的(静的)に考えられてきたものを動的に表現することが可能になる。

2. 研究の目的

有明海に流入する河川のうち最大の(河川流入量の約 40%を占める)筑後川による ROFI (以後、筑後川 ROFI) を対象にして、ROFI 内での陸域起源土砂の輸送構造と分級過程を明らかにすることを目的に調査研究を行う。これにより、筑後川を通じて供給された陸域起源土砂が有明海において流入初期過程でどのような動態を示すかが明らかにされる。これは、問題になっている細粒化現象など長期的な土砂動態を推定する上での初期条件となる情報であるので、非常に重要と考えられる。

ROFI は河川からの淡水流入と海面からの熱フラックス(夏季:加熱, 冬季:冷却)による浮力加入と、潮汐(大潮~小潮)・波浪・風による物理的混合とのバランス、ならびに成層時には回転効果が加わり決定される(例えば、右図のように潮汐の強度と河川流量の大小で筑後川 ROFI の分布は大きく変わり、それに伴い土砂動態も大きく変化すると予想される)。ただし、予想される組み合わせ全てについて、現地調査のみから明らかにすることは現実的でないため、本研究ではそれらの物理過程を全て組み入れることのできる3次元数値モデルを併用する。

3. 研究の方法

(1) 現地観測について

オーブコム回線を使用した小型 GPS 付き漂流ブイに小型メモリー式塩分水温計を搭載して筑後川河口域から放流する。GPS による測位情報(時刻, 緯度・経度)はオーブコム回線を通じて常に確認でき、自動的に記録が可能となっているため移動経路とラグランジュ流を測定できる。また、塩分・水温計の記録より追跡する水塊の同一性を確認できる。これにより、筑後川から海域に流入し拡がっていく淡水塊のラグランジュ流の観測を正確に行うことができる。また、観測船で漂流ブイを追尾しながら、ADCP を用いた曳航観測による全層の流速分布観測を実施する。さらに、別の観測船により一定時間(15分~30分程度)毎に多項目水質計を用いて水温、塩分、濁度などの鉛直分布を測定する。これらにより、淡水塊が影響を受けるオイラー的な潮流場の構造と、その結果として生じる密度(塩分・水温)成層構造の変化を測定できる。

ホース先端に水深計を装備して観測船上から水深を確認しながら採水を可能にするポンプ式採水器を使用することで、多層からのサンプリングをスピーディーかつ正確に行うことを可能にしている。サンプルは観測終了後に研究室に持ち帰り、レーザー回折式粒度分布計などにより浮遊土砂の粒度特性と濃度の測定を行う。これにより、物理過程によるSS濃度変化、粒径別の土砂輸送特性、ならびにROFI内での分級過程を把握できる。

乱流微細構造観測プロファイラーによる鉛直方向の乱流拡散係数の鉛直分布測定を一定時間毎に実施する。この装置は、底面からの打ち上げ、もしくは水面からの自由落下により一定速度が保たれた状態で流速や塩分、水温などの乱流成分の鉛直構造を測定し、乱れのスペクトルから乱流エネルギーの粘性散逸率を算出し、最終的に鉛直乱流拡散係数を直接測定できる。希少な観測装置であり、この装置とラグランジュ的観測を組み合わせたROFIの現地観測は恐らく世界中でも存在しないと考えられる。

これらの観測を同時並行して実施することにより、筑後川ROFIにおける流動構造や土砂輸送構造と混合過程を包括的に測定できる。

(2) 数値シミュレーションについて

沿岸・河口域の3次元流動・水質・土砂輸送・地形変化モデルであるDelft3Dを用いた有明海・八代海の3次元流動・底泥輸送モデルの構築を行った。本モデルは、3次元の静水圧近似流動モデルに、鉛直 σ 座標系、水平直交線座標系、Sub-Gridモデル、 $k-\epsilon$ 乱流モデル、干潟モデル、波浪モデル(SWAN)、粘着性/非粘着性土砂輸送モデル、地形変化モデル、低次生態系モデル、などを自由に組み合わせ可能に設計されており、本研究で必要とされる性能は基本的に網羅している。

本モデルにより、河川流量・風などの境界条件を時系列的に与えるハインドキャスト計算を行い、現地観測で得られた筑後川ROFIを数値的に再現することを試みた。また、再現性が確認された後に、河川流量、潮汐、海面での熱フラックス、風、などの諸条件についての組み合わせについてケーススタディとしての数値実験を行い、ROFIの変化傾向を調べた。さらに、土砂輸送モデルにより陸域起源土砂のROFI内での輸送構造を調べた。

4. 研究成果

(1) 現地観測について

2009年6月9日に筑後川ROFI(淡水影響域)の評価に関するラグランジュ的観測を実施した。漂流ブイに小型メモリー式塩分水温計を搭載して筑後川河口付近の海域から放流し、GPSにより測位情報を自動的に記録し、移動経路とラグランジュ流を測定した。また、

塩分・水温計の記録より追跡する水塊の同一性も確認した。これにより、筑後川から海域に流入し広がっていく淡水塊のラグランジュ流を測定できた。また、観測船で漂流ブイを追跡しながら、ADCPを用いた曳航観測による全層の流速分布観測を実施した。さらに、別の観測船により一定時間毎に多項目水質計を用いて水温、塩分、濁度などの鉛直分布をした。これらにより、淡水塊が影響を受けるオイラー的な潮流場の構造と、その結果として生じる密度(塩分・水温)成層構造の変化を測定できた。加えて、鉛直混合過程の観測として、乱流微細構造観測プロファイラーによる鉛直方向の乱流エネルギー散逸率の鉛直分布測定を1時間毎に行った。これにより、鉛直乱流拡散係数の鉛直分布の時間変化を直接測定できた。

2010年12月12日に諫早湾内のROFI(淡水影響域)構造の評価に関する観測を実施した。多項目水質計で海洋構造(塩分、水温の鉛直分布)について、レーザー回折式粒度分布測定機器(LISST-100X)にて海水中の浮遊懸濁物(SS)について粒度分布の鉛直分布を測定した。これにより、河川水起源の濁質の特性を把握することができた。

2011年7月16日(中潮期)、ならびに12月4日(長潮)の両日に、筑後川から諫早湾へ結ぶライン上に5地点の観測点を設けて、超音波ドップラー流速計ADCP、レーザー回折式浮遊懸濁物粒度スペクトル測定装置LISST-100X、ならびに乱流微細構造プロファイラTurboMAPを併用した測定を行った。さらに、8月21日~22日(小潮)、10月2日~3日(中潮)、ならびに11月28日~29日(中潮)においては、北部有明海の中心に位置する観測地点において、25時間連続で前述の観測機器を併用した測定を行った。これらの観測より、主に筑後川を起源とする淡水と土砂について、出水(河川流量)、海洋構造(塩分・水温成層)、土砂濃度と粒度分布、ならびに流動・乱流などの物理構造との関係性を調べるためのデータを取得できた。

これらの観測結果は、数値シミュレーションの精度検証や、モデルパラメータのチューニングに使用できると期待される。

(2) 数値シミュレーションについて

本研究で開発した3次元数値モデルを適用して、有明海・八代海の潮流・微細土砂輸送シミュレーションを行った。その結果、有明海では非線形潮汐が強く、月の昇降点運動に起因する起潮力変化の影響を受けて、非線形潮汐の強さが変化することなどが明らかにされた。

次に、河川起源の淡水の挙動を再現する流動シミュレーションを行った。その結果、2006年に実施された筑後川の出水時にお

る淡水の挙動について現地観測から得られた挙動を概ね再現することに成功した。

最後に、開発された有明海-八代海結合3次元流動モデルに、粘土・シルト分などの粘着性堆積物の浸食(再懸濁)・再堆積過程を組み込んだ輸送モデルを結合させたモデルを使用して、河川起源土砂の輸送状況や底泥が再懸濁して輸送され再堆積する過程についてシミュレーションを行った。沈降速度の評価には水中の浮遊懸濁物濃度の上昇による干渉沈降も考慮されたモデルを組み込んだ。その結果、潮汐条件(18.6年周期のM2潮変動など)により潮汐の非線形性が浸食・堆積域を変化させることなどが明らかとなった。

これらの結果は、これまで我が国の沿岸域における物理過程の研究において、あまり進展していなかったROFIに関する知見を充実させることに貢献した。また、2013年末に予定されている諫早湾干拓事業の潮受け堤防の排水門についての長期開門調査に対する予備的な観測データも与えたことになる。今後、本研究を継続し(2012年度より科研基盤研究(B)として継続中)、有明海の再生に向けた方法の検討に利用できる基礎データの提供と、再生策の提案、ならびにその効果の検証などにおいて寄与していく予定である。

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14件)

- ① Saita, T., Yano, S., Tai, A. and Komatsu, T.(2009): Field Observations on Behavior of Freshwater from the Chikugo River in Ariake Bay, Japan, Proc. of 33rd Congress IAHR, 5636-5643, CD-ROM.
- ② Yano, S., Winterwerp, J.H., de Boer, G., Saita, T. and Tai, A.(2009): Numerical Simulation of Nonlinear Barotropic Tide in Ariake Bay and Yatsushiro Bay, Japan, Proc. 3rd Int. Conf. on Estuaries & Coasts, 159-166.
- ③ 田井明, 酒井公大, 齋田倫範, 橋本彰博, 矢野真一郎, 多田彰秀, 小松利光(2010): 有明海および八代海における半日周期潮汐の長期変化について, 水工学論文集, 54, 1537-1542.
- ④ 矢野真一郎, Winterwerp, J.C., 田井明, 齋田倫範(2010): 有明海・八代海における非線形潮汐の特性とその底質輸送への影響に関する数値実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66(1), 341-345.
- ⑤ 矢野真一郎, 多田彰秀, 田井明, 矢野康平, 井村一樹, 藤原竜二(2010): 水俣湾における高頻度な水銀採水調査による微量水銀輸送量の測定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66(1), 961-965.
- ⑥ 矢野真一郎, 扇塚修平, 齋田倫範, 田井明, 小松利光(2010): 大規模一斉観測結果に基づく有明海の淡水影響域の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66(1), 356-360.
- ⑦ 田井明, 志岐慎介, 齋田倫範, 矢野真一郎, 小松利光(2010): 夏季成層期の有明海における乱流エネルギー散逸率の時間変動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66(1), 331-335.
- ⑧ Matsuyama, A., Eguchi, T., Sonoda, I., Tada, A., Yano, S., Tai, A., Marumoto, K., Tomiyasu, T. and Akagi, H. (2011): Mercury Speciation in the Water of Minamata Bay, Japan, Water, Air and Soil Pollution, 218, 399-412.
- ⑨ 田井明, 矢野真一郎, 扇塚修平, 齋田倫範, 小松利光(2011): 閉鎖性内湾における半日周潮の振幅増幅率の変動特性, 土木学会論文集 B3 (海洋工学), 67(4), I_352-I_357.
- ⑩ 田井明, 矢野真一郎, 多田彰秀, 上久保祐志, 矢野康平, 齋田倫範, 橋本彰博, 石原拓也(2011): 八代海における夏季の低塩分水塊の挙動ならびに過去の海岸線の変化による物理場の変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67(2), I_341-I_345.
- ⑪ YANO, S., TAI, A., HISAE, A., TANABE, T. and MIYAGAWA, T. (2011): RIVER RUN-OFF ANALYSIS USING RADAR AMEDAS COMPOSITE PRECIPITATION IN THE RIVER BASIN IN ARIAKE BAY, JAPAN, Proc. Int. Sympo. on Earth Science and Technology 2011, 301-304
- ⑫ 矢野真一郎, 田井明, 矢野康平, 松山明人, 藤原竜二, 多田彰秀, 園田育子, Herawaty Riogilang(2012): 水俣湾における海水中の水銀の形態と輸送に関する現地調査, 土木学会論文集 B1 (水工学), 68(4), I_1567-I_1572.
- ⑬ Yano, S., Tai, A., Riogilang, H., Yano, K., Matsuyama, A., Fujiwara, R., Tada, A. and Sonoda, I.(2012): In-Situ Measurement of Mercury Transport in the Sea Water of Minamata Bay, Proc. Inte. Sympo. on Earth Science and Technology 2012, 527-532.
- ⑭ 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(2012): 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), 68(2), I_961-

〔学会発表〕(計 22 件)

- ① 志岐慎介(2009.9.3): 有明海島原半島沿岸における鉛直微細構造観測, 日本流体力学会年会 2009, 東洋大学(東京都).
- ② 扇塚修平(2010.3.6): 有明海における淡水影響域(ROFI)についての現地観測結果による検討, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ③ 矢野康平(2010.3.6): 水俣湾における微量残留水銀動態解明のための底質輸送構造観測について, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ④ 田井明(2010.3.6): 有明海における夏季小潮期の乱流エネルギー散逸率の時空間変動, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ⑤ 矢野真一郎(2010.3.6): 有明海における非線形潮汐の数値モデルによる検討, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ⑥ 志岐慎介 (2010.3.6): 密度成層場における乱流エネルギー散逸率の現地観測, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ⑦ 河野広幸 (2010.3.6): 河川流量の与え方が海域流動モデルへもたらす影響に関する有明海流域モデルによる検討, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 崇城大学(熊本市).
- ⑧ 田井明 (2010.3.26): 密度躍層における乱流エネルギー散逸率の推定について, 2010 年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学(東京都).
- ⑨ 矢野康平 (2010.9.3): 水俣湾における微量残留水銀輸送構造に関する現地観測, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 北海道大学(札幌市).
- ⑩ 扇塚修平 (2010.9.3): 有明海における淡水影響域(ROFI)の評価法に関する一考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 北海道大学(札幌市).
- ⑪ 矢野康平(2011.3.5): 水俣湾内における浮遊懸濁物の粒度分布特性に関する現地観測, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 九州工業大学(北九州市).
- ⑫ 扇塚修平(2011.3.5): 諫早湾における浮遊懸濁物の粒度分布に関する現地調査について, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 九州工業大学(北九州市).
- ⑬ 久江彰 (2011.3.5): 有明海全流域を対象とした流域水循環モデルにおけるレーダー・アメダス解析雨量データの活用による計算精度に関する一検討, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 九州工業大学(北九州市).
- ⑭ Yano, S., (2011.7.25): In-site Measurement for Transport of Trace Mercury by Highly-Frequent Water Sampling in Minamata Bay, 10th Int. Conf. on Mercury as a Global Pollutant, Halifax, Canada.
- ⑮ 久野彰大(2012.3.3): 有明海・八代海結合数値モデルによる河川プルームの再現性の検討, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 鹿児島大学(鹿児島市).
- ⑯ 扇塚修平 (2012.3.3): 有明海における浮遊懸濁物粒度分布の変化特性に関する現地調査, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 鹿児島大学(鹿児島市).
- ⑰ 矢野康平 (2012.3.3): 水俣湾における 2010 年夏季の微量残留水銀の動態, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 鹿児島大学(鹿児島市).
- ⑱ 久江彰 (2012.3.3): 有明海全流域を対象とした分布型流出モデルへ適用する雨量データの影響評価, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 鹿児島大学(鹿児島市).
- ⑲ 久野彰大 (2012.9.6): 水俣湾における浮遊懸濁物の粒度分布特性に関する現地観測, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 名古屋大学(名古屋市).
- ⑳ 久野彰大(2013.3.9): 水俣湾における底質粒度分布の特性について, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会, 熊本大学 (熊本市) .
- ㉑ 川瀬颯人(2013.3.9): 水俣湾における懸濁物の粒径分布と水銀濃度に関する現地観測, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会, 熊本大学 (熊本市) .
- ㉒ 西村圭右 (2013.3.9): 有明海におけるバロクリニック構造の長期変動検討のための数値シミュレーション, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会, 熊本大学 (熊本市) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 真一郎 (YANO SHINICHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：80274489

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし