

有明海における漂流物追跡調査と高精度漂流予測シミュレーションモデルの開発

九州大学 ○山城 賢*
九州大学 井手 喜彦*

漂流物	漂流予測モデル	有明海
筑後川	GPS	現地観測

研究の目的

気候変動に伴う豪雨・台風の激甚化により増加する河川由来漂流物の被害を軽減するため、有明海における漂流実態を現地観測で把握し、不足している検証データを取得するとともに、漁業・航行・沿岸施設への影響低減と回収作業の効率化に資する実用的かつ高精度な漂流予測シミュレーションモデルを開発することを目的とする。

研究の内容

漂流物の現地観測

有明海における漂流物挙動の特性を把握するため、GPS を搭載したボトル型漂流物（GPS ボトル）を用いた現地観測を実施した。実際の漂流物は、植物片のように水面近くに浮かぶものから、流木のように一部が水面上に突出して風の影響を受けやすいものまで多様であるため、密度の異なる 3 種類の GPS ボトルを準備した。ボトル H は高密度で風の影響を受けにくい漂流物を、ボトル L は水面上への露出が大きく風の影響を受けやすい漂流物を模擬した。ボトル M はその中間である。観測は、筑後川の流量が増大した 2024 年 6 月 28 日、7 月 2 日、7 月 11 日の計 3 回実施した。放流地点は河口から約 6.63 km 上流の筑後川昇開橋とし、放流個数はそれぞれの放流日で 10 個、9 個、9 個である。また、気象庁 GPV から対象海域付近の風向・風速データを取得し、漂流経路との対応を確認した。

図 1 に放流日毎の GPS ボトルの漂流経路を示す。河川を流下した後、干潮時に形成される滞筋を通して有明海へ流出し、その後の挙動は気象・海象条件によって大きく異なった。6 月 28 日および 7 月 2 日に放流した GPS ボトルの多くは、河口付近または有明海北岸に漂着した。一方、7 月 11 日に放流したボトルでは、一部が長期間有明海内を漂流し、最終的に湾央西岸へ漂着した。また、6 月 28 日および 7 月 2 日に放流したボトルの多くは 3 日以内に漂着したのに対し、7 月 11 日に放流した一部のボトルは 8 日程度漂流した。さらに、一度沿岸へ漂着した後に再び海域へ流出する再漂流が全 28 個中 9 個で確認された。密度の異なるボトル間の比較では、風の影響を受けやすい軽いボトル M および L の方が、重いボトル H より広範囲に漂流する傾向が確認され、漂流物の浮き姿勢や水面上への露出量の違いが漂流経路に影響することが示唆された。



図 1 放流日毎の GPS ボトルの漂流経路

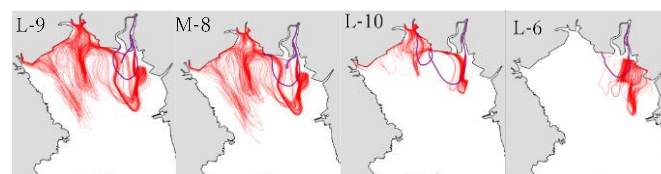


図 2 シミュレーションによる放流粒子経路（赤線）と GPS ボトルの観測経路（紫線）の比較

既存漂流予測モデルの検証と河川流量影響評価

現地観測結果を用いて漂流予測モデルの再現性を検証し、筑後川流量の変化が漂流挙動に及ぼす影響を数値実験により評価した。モデルには、FVCOM をベースに開発された非構格子漂流予測モデルを用いた。計算メッシュは有明海湾奥で高解像となるよう設定し、湾奥で最小 150 m、開境界付近で最大 3,000 m 程度とした。計算期間は 2024 年 6 月 26 日 0 時から 7 月 4 日 0 時までとし、開境界には推算潮位、気象外力には気象庁 GPV (MSM) の風・気圧データを用いた。また、主要河川については、観測所の水位データと H-Q 式に基づいて流量を推定し、集水面積比で補正した値を入力した。漂流物に作用する風応力も既往研究の式に基づいて算定し、粒子移動速度に加えた。

モデル検証では、観測で有明海へ流出した GPS ボトルを対象とし、L-9、M-8、L-10、L-6 の流出時刻に対応する時刻に粒子を放出した。各時刻で 100 個の粒子を計算し、観測と比較して、南下開始時刻、北上への転換位置、漂着位置、漂流範囲の一致度を確認した。図 2 にシミュレーションによる放流粒子と GPS ボトルの経路比較を示す。個々の軌跡を完全に一致させることは難しいものの、漂流物が存在し得る範囲や漂着位置は概ね予測できた。

続いて、筑後川流量のみを変化させた感度実験を行った。実際の流量を基準として 0.5 倍から 2.0 倍まで 0.25 刻みで変更し、計 7 ケースを計算した。また、粒子放出時刻は基本ケースと同じ 3 つの流出タイミングに対応させ、流量ピークとの時間関係による差異も確認した。さらに、ピーク直後満潮時の表層塩分分布を解析し、河川水塊の広がりや粒子軌跡との対応を調べた。

その結果、流量が大きいケースほど低塩分水塊が湾奥南部へ広く張り出し、その境界付近に粒子が分布した。放出直後に大きく南下した後に北上する粒子群では、最南地点や北上経路が流量条件によって明瞭に異なった。流量が大きいケースほど南下距離が長く、湾奥南部まで達する粒子が増加した一方、流量が小さいケースでは南下が限定的で、河口近傍に留まる粒子が多かった。また、流量ピーク時に流出した粒子群では、河川水の影響域に沿って南下し、2.0 倍ケースでは 1.0 倍ケースよりさらに南へ輸送されたのに対し、0.5 倍ケースでは南下がほとんど見られなかった。一方、流量ピーク後に流出した粒子群では、1.0 倍と 2.0 倍の差は前者ほど顕著ではなかった。このことから、漂流物の挙動は河川流量の大小だけでなく、海域への流出タイミングとの組合せによっても大きく変化することが明らかとなった。

波浪および力学過程を考慮した漂流モデルの高度化

既存の漂流モデルは漂流範囲を概ね再現できる一方、個別経路や浅海域での挙動再現には課題が残ることが示された。そこで、波浪による質量輸送と漂流物の慣性を考慮した漂流モデルの高度化を試みた。海象場の計算には、非構造格子海洋流動モデル ADCIRC と第三世代波浪推算モデル SWAN を用い、双方向結合により波と流れの相互作用を考慮した。外力条件として、気象庁 GPV データを空間補間した風場、TPX010.v2a による開境界潮位、主要 7 水系の河川流量を与えた。

粒子追跡には、流速と風による抗力項の線形和で粒子速度を表現する移流モデルと、流体抗力および風抗力を外力として運動方程式を解く力学モデルを用いた。後者では漂流物の慣性を考慮し、急激な流向・風向変化に粒子が瞬時に追従しない性質を表現した。さらに、ADCIRC-SWAN 結合計算で得られた波浪スペクトルからストークスドリフトを算出し、表層流速へ加えることで波による質量輸送も考慮した。これにより、ADCIRC 単独、ADCIRC-SWAN 結合、ストークスドリフト付加の各流動場について、移流モデルと力学モデルを組み合わせた 6 ケースを比較した。対象は 2024 年 6 月 28～29 日の筑後川からの漂流事例であり、粒子の初期投入位置は、実測ボトルが河口へ到達した 6 月 29 日 4 時 40 分の位置とした。

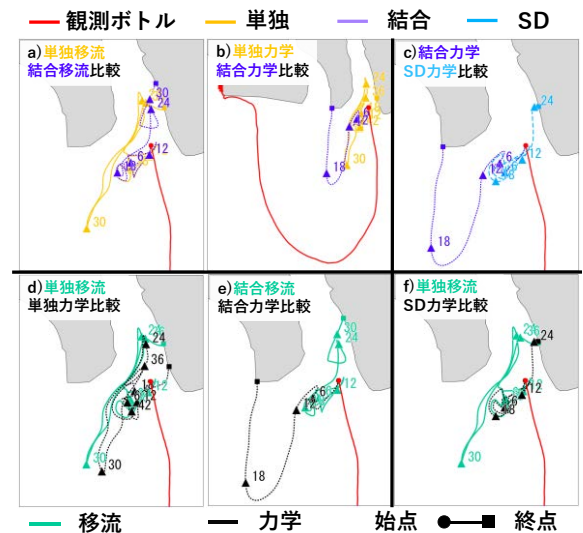


図 3 異なる流動・粒子追跡モデルでの粒子の軌跡

その結果、流動場だけでなく粒子追跡手法の違いによっても、漂流経路および漂着位置が大きく変化した。観測ボトルは放流後約 3 時間で顕著に南下しており、これは筑後川流量ピークに伴う南向き流れによる輸送であった可能性が高い。南向き流速の卓越自体はいずれのモデルでも再現されたが、移流モデルでは南下量が観測より小さく、多くの粒子が筑後川左岸へ漂着した。一方、結合力学モデルでは南下量が増大し、その後北上して早津江川方面へ漂着した。また、移流モデルと力学モデルの差は ADCIRC 単独では小さいが、ADCIRC-SWAN 結合では顕著であり、前者では粒子が筑後川を遡上するのに対し、後者では沖側へ離岸して早津江川方面へ移動するなど、経路が大きく異なった。

さらに、従来の単独移流モデルとストークスドリフト考慮の力学モデルを比較すると、漂着位置は概ね一致するものの、単独移流では粒子がより沖側へ離岸し、漂流期間および漂流距離が長くなる傾向が見られた。以上より、有明海における漂流物予測の高精度化には、河川流量、風、潮汐に加え、波浪や漂流物の力学特性まで考慮したモデル化が重要であることが示された。

まとめ

本研究では、GPS ボトル観測と数値シミュレーションを組み合わせることで、有明海における河川由来漂流物の漂流・漂着特性を把握した。その結果、漂流挙動は河川流量だけでなく、海域への流出タイミング、風、潮汐、波浪の影響を強く受けることが分かった。さらに、波浪による質量輸送と漂流物の慣性を考慮したモデルの有効性を示し、回収作業の効率化に資する高精度漂流予測技術の基礎を得た。