

図 1-1-2. 沖神瀬西ブイの海上風(海面から3m)の風向・風速(3時間毎の10分平均値)、筑後川(瀬ノ下)の日平均流量、T13、P6及びP1の底層水温(海底面から0.2m)、塩分、溶存酸素、水深の時間変化

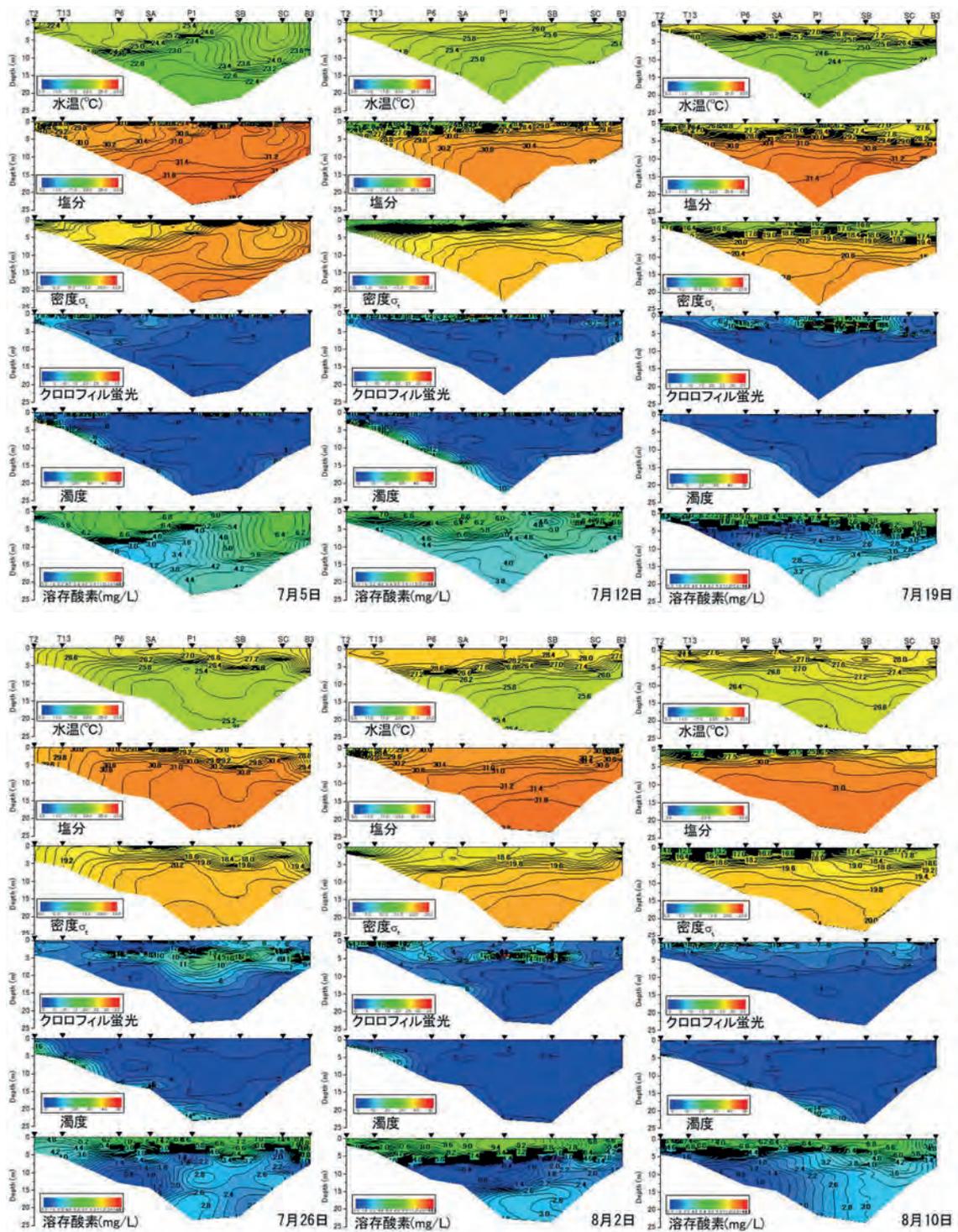


図 1-1-3. 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 (σ_t)、クロロフィル a、濁度、溶存酸素の時間変化

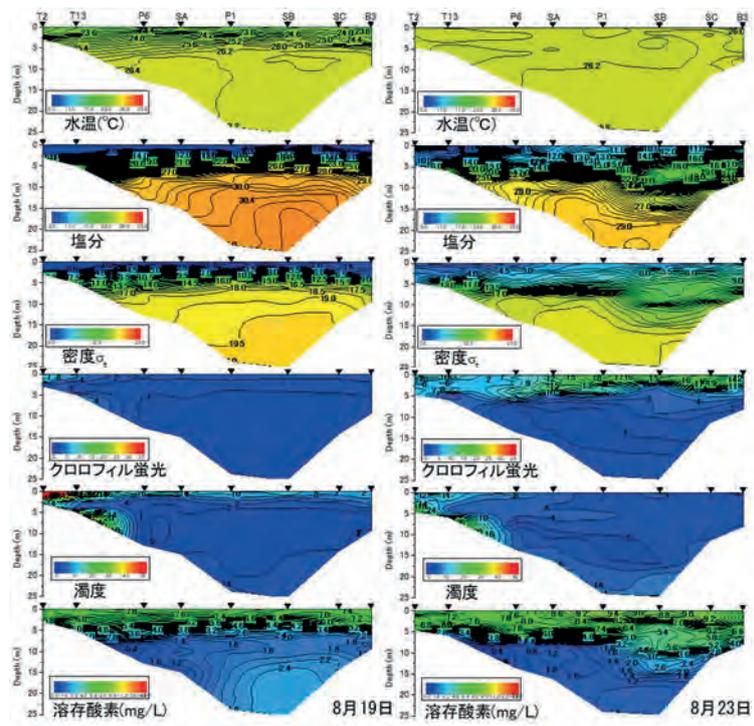


図 1-1-3. (続き). 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 (σ_t)、クロロフィル a、濁度、溶存酸素の時間変化

Simpson and Hunter (1974) は Irish 海の大陸棚上において、成層した領域と鉛直混合した領域の境界に明瞭なフロント構造が形成され、フロントの形成される場所はパラメータ H/U^3 (H :水深、 U :潮流振幅) によって決まっていることを明らかにし、このフロントを Tidal Front を名付けた。塚本・柳 (2002) は、潮流振幅変化が有明海の成層状態の変化に及ぼす影響を明らかにするために、 $\log_{10}(H/U^3)$ を評価しており、 $\log_{10}(H/U^3) > 2.5$ 以上の潮流振幅が小さく、成層が発達しやすい海域と貧酸素水塊発生海域が一致していることを明らかにしている。藤家ら (2015) は、2007 年 8 月のスカラー平均流から求めた $\log_{10}(H/U^3)$ の水平分布を示しており、湾奥西部海域で $\log_{10}(H/U^3) \geq 3.1$ の領域が広範囲に広がっていることを示している。ここで、有明海での観測は定点観測なので、 H = 一定を仮定すれば、成層した領域と鉛直混合した領域の境界は U^3 で規定される。つまり、 U^3 が大きければ、観測点は鉛直混合の領域に入る。逆に、 U^3 が小さければ、観測点は成層した領域に入る。ただし、解析期間中の残差流は一定と仮定した。図 1-1-4 に干潟縁辺域 (T13) における夏季 (7 月～9 月) の底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間と底層流速から評価した M_2 潮の潮流振幅の 3 乗との関係を示す。ただし 2021 年度は T13 では豪雨のため底層まで低塩分だった影響により、底層潮流楕円は時計回りになったと考えられ (図 1-1-2、図 1-1-3)、解析からは除外した。両者には相関関係が見られ、底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間の経年変動は、底層フロントの位置も重要であることが示唆される。すなわち、 M_2 潮の潮流振幅の 3 乗が大きければ、鉛直混合が大きく密度成層は形成しにくく、底層フロントは干潟縁辺域よりも沖に位置することを意味する。その結果、底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間は小さくなる。逆に、 M_2 潮の潮流振幅の 3 乗が小さければ、鉛直混合が小さく密度成層は形成しやすくなり、底層フロントは干潟縁辺域よりも岸に位置することを意味する。その結果、底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間は大きくなることが示唆される。本研究結果は上記の既存の知見と矛盾しない。

鉛直混合にとって潮位差は第一義的なものではなく、潮流の方がより関連性が高い (松野・中田 2004)。また、潮位は空間代表性が高いものの、潮汐流を含む流れ場は潮位に比較して空間変化が大きいことが報告されている (松野・中田 2004)。つまり、観測する場所によっては潮汐振幅が大きくても、潮流振幅が大きくなるとは限らなく、潮流振幅が小さくなる場合もある。その原因の一つが密度成層の形成である。Souza and Simpson (1996) は、密度成層が形成され水柱の安定度が増すと鉛直渦粘性係数が減少し、鉛直方向への運動量の輸送が妨げられ、密度躍層より上では海底摩擦の影響があまり及ばなくなる。その結果、密度躍層より上では密度躍層が存在しない場合よりも強く、かつ鉛直方向にはほぼ一樣な流れが形成されることを指摘している。また、密度躍層の下では摩擦の影響をより受けた弱い流れが形成されることを明らかにしている。T13 における底層の M_2 潮の潮流振幅の 3 乗は筑後川平均流量と相関関係があり (図 1-1-5)、河川流量が多いほど底層 M_2 潮の潮流振幅の 3 乗は小さくなる傾向がある。また、徳永ら (2013) は筑後川流量の経年変化と密度成層強度の経年変化には正の相関があることを報告している。以上のことから、河川流量が大きい年は、密度成層の形成が顕著になることで底層の M_2 潮の潮流振幅が小さくなり、底層フロントが岸に位置する頻度が多くなり、底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間が長くなると思われる。つまり、河川からの淡水供給が干潟縁辺域の貧酸素化に重要な役割を果たすと考えられる。ただし、前述したように、2021 年度の底層では時計回りの M_2 潮

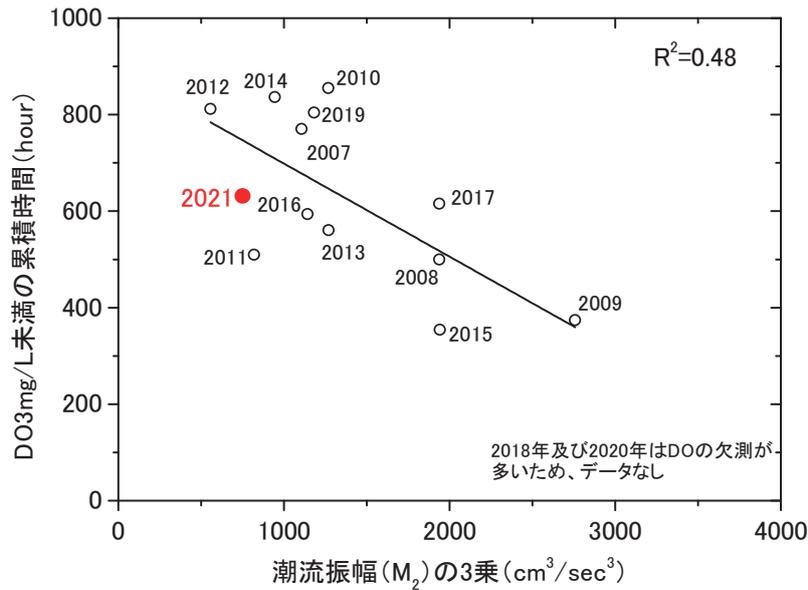


図 1-1-4. 干潟縁辺域(T13) における底層潮流振幅の 3 乗と 7 月～9 月における DO3 mg/L 未満の累積時間との関係

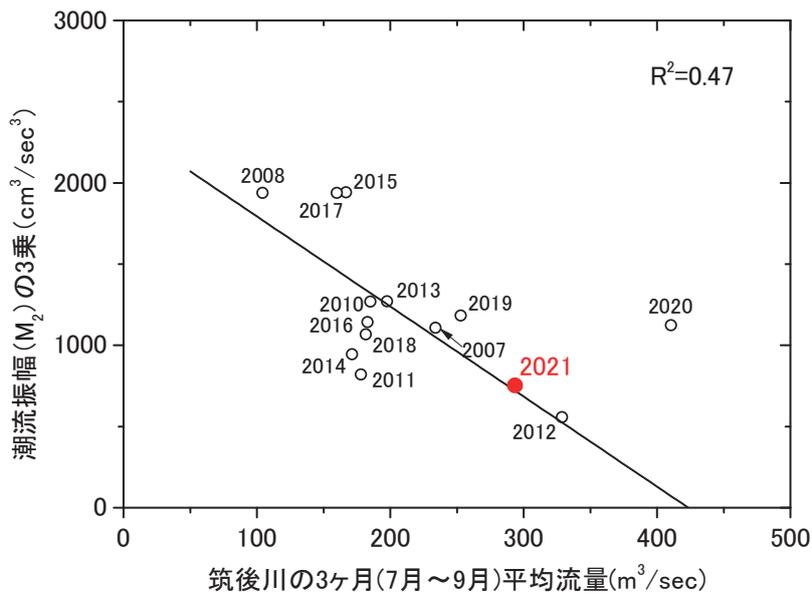


図 1-1-5. 筑後川における平均流量と干潟縁辺域(T13)における底層潮流振幅の 3 乗との関係

の潮流楕円となっており、解析からは除外した。底層の M_2 潮の潮流楕円が時計回りになる理由として、8 月中旬の出水等によって底層まで低塩分化したためと考えられる (図 1-1-2、図 1-1-3)。また、底層溶存酸素の変動は、河川からの淡水供給、干潟縁辺域における密度成層の形成、潮流振幅の変化 (徳永ら 2013) 等が影響しており、貧酸素化のプロセスは完全に説明できないため、今後定量的な評価に関する調査研究が必要である。

一方、沖合域 (P6) でも、底層溶存酸素濃度 3 mg/L 未満の累積時間と底層流速から評価した M_2 潮の潮流振幅の 3 乗との間には関係性が見られた (図 1-1-6)。しかしながら、 M_2 潮の潮流振幅の 3 乗は筑後川平均流量と相関関係が見られなかった (図 1-1-7)。一方、月の昇降点運動の影響を考慮した大浦の潮汐振幅と底層潮流振幅 (P6) の経年変化は概ね対

応関係が見られた (図 1-1-8)。これらの結果から、沖合域での貧酸素化の経年変動は、河川からの淡水供給が干潟縁辺域の貧酸素化に重要な役割を果たすプロセスとは異なり、潮汐混合力の変動が強く影響した鉛直一次元プロセスが重要であることが示唆される (図 1-1-9)。堤・松野 (2014) は、諫早湾口においては小潮期中層の乱流エネルギーは海底境界層内の 4 割程度であり、大潮期では 1 割程度であることを現地観測で明らかにしている。したがって、密度成層や貧酸素水塊の経年変動には外部潮汐による鉛直混合が重要であることを示唆しており、本研究の結果とは矛盾しない。ただし、内部潮汐による中層の鉛直混合も重要であると考えられるため、今後内部潮汐と貧酸素水塊との関係を定量的に検討する必要があると思われる。また、3%程度の潮汐振幅変動に対して潮流振幅は 20%程度変動しており (図 1-1-8)、この差の要因についても今後明らかにする必要がある。

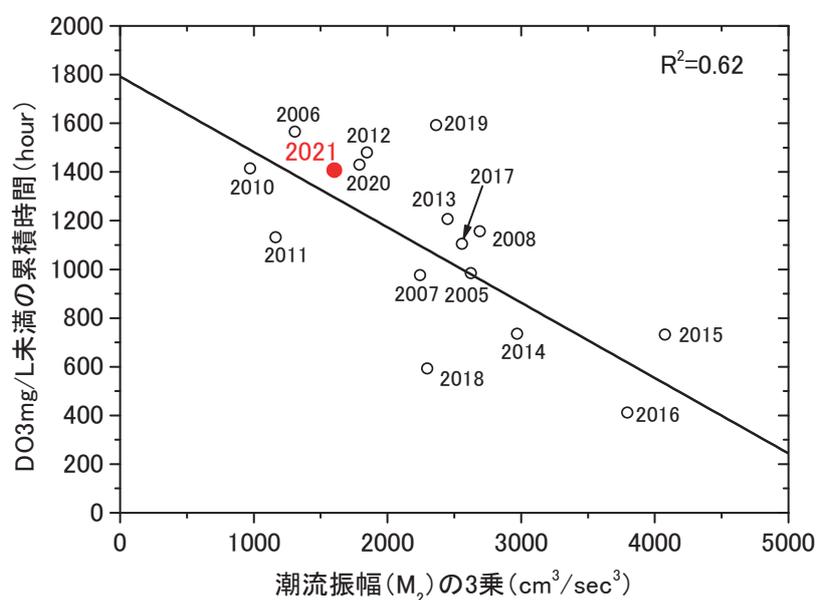


図 1-1-6. 沖合域 (P6) における底層潮流振幅の 3 乗と 7 月～9 月における DO3mg/L 未満の累積時間

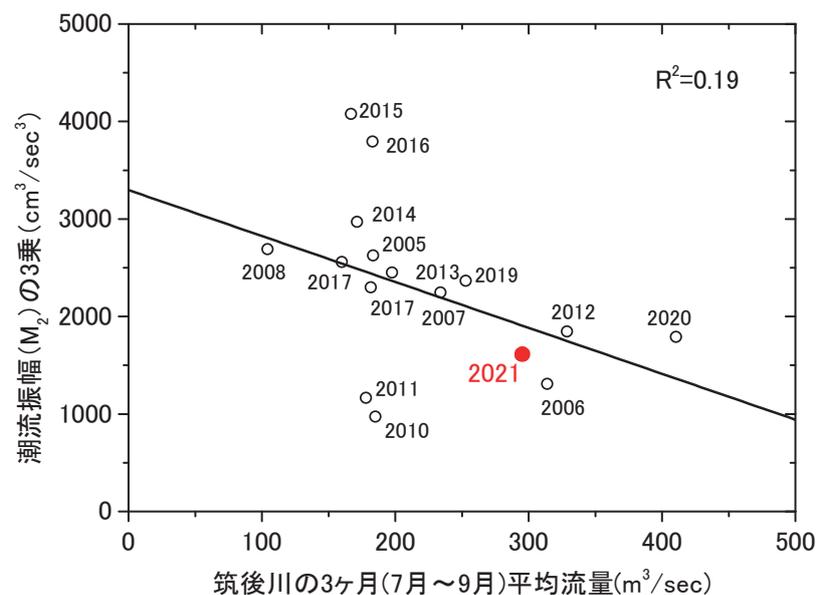


図 1-1-7. 筑後川の平均流量と沖合域 (P6) における底層潮流振幅の 3 乗との関係