

令和2年度漁場環境改善推進事業のうち  
栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発

(3) 貧酸素水塊の予察技術、被害軽減手法の開発  
報 告 書

令和3年3月

国立研究開発法人水産研究・教育機構  
千葉県水産総合研究センター  
神奈川県水産技術センター  
福岡県水産海洋技術センター有明海研究所  
佐賀県有明水産振興センター  
長崎県総合水産試験場  
熊本県水産研究センター  
株式会社アイコック



## 目次

I. 本課題の目的および実施概要	1
II. 令和2年度成果報告	3
1) 貧酸素水塊の発生シナリオの構築と予察技術の開発	
ア. 有明海における貧酸素水塊のモニタリングと消長シナリオの構築	3
イ. 貧酸素水塊に関するデータの提供及び利活用の促進	33
2) 有明海における貧酸素水塊による漁業被害防止対策	
ア. 橘湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	45
イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	61
III. 検討会の開催	109



## I . 本課題の目的および実施概要



## 本課題の目的および実施概要

### 課題の目的

戦後の高度経済成長に伴い、多くの閉鎖性海域では海岸線の護岸化や埋め立てが進行するとともに、産業廃水や生活排水等の汚濁負荷が急激に増大した。汚濁負荷の増大による海域の富栄養化は、赤潮や貧酸素水塊の頻発などの形で表面化し、漁業生産や養殖生産に多大な被害をもたらした。これを契機に、汚濁負荷量の削減や海面の埋め立ての規制など、様々な環境保全対策が講じられてきたが、今なお、多くの閉鎖性海域では、貧酸素水塊の形成が解消されるまでには至っていない。

上述したように、貧酸素水塊がもたらす最も顕著な弊害は水産生物への被害であり、有用魚介類のへい死のみならず、餌料となる生物の生息にも多大な影響を及ぼす。そのため、貧酸素水塊の発生メカニズムや貧酸素水塊の発生が魚介類に及ぼす影響などを明らかにするとともに、漁業被害を軽減するための技術開発を推進する必要がある。

そこで、本課題では、貧酸素水塊の発生にともなう漁業被害が頻発している東京湾、有明海及びその周辺海域を対象に、国立研究開発法人水産研究・教育機構（以下、水産研究・教育機構と表記）が千葉県水産総合研究センター、神奈川県水産技術センター、福岡県水産海洋技術センター有明海研究所、佐賀県有明水産振興センター、長崎県総合水産試験場、熊本県水産研究センター及び株式会社アイコックと共同して、以下の調査研究を実施する（表1）。

表1. 本研究開発の課題構成

研究開発課題	研究開発の分担
<b>1) 貧酸素水塊の発生シナリオの構築と予察技術の開発</b> ア. 有明海における貧酸素水塊のモニタリングと消長シナリオの構築  イ. 貧酸素水塊に関するデータの提供及び利活用の促進	水産研究・教育機構 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所 佐賀県有明水産振興センター 熊本県水産研究センター  水産研究・教育機構 株式会社アイコック
<b>2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発</b> ア. 橘湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発  イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	長崎県総合水産試験場 水産研究・教育機構  千葉県水産総合研究センター 神奈川県水産技術センター 水産研究・教育機構
<b>3) 事業検討会の開催など</b>	水産研究・教育機構

このように、本課題では、貧酸素水塊の発生シナリオを明らかにするとともに、予察技術や被害軽減技術の開発を行うことで、貧酸素水塊の発生による漁業被害の軽減を図り、健全な沿岸・内湾生態系の保全に資することを目的とする。

## 課題の内容

### 1) 貧酸素水塊の発生シナリオの構築と予察技術の開発

#### ア. 有明海における貧酸素水塊のモニタリングと消長シナリオの構築

本課題では、水産研究・教育機構が福岡県水産海洋技術センター有明海研究所及び佐賀県有明水産振興センターと共同して、有明海奥部の観測定点において、水質の連続観測を実施するとともに、定期観測を実施する。また、熊本県水産研究センターが有明海中央部で定期観測を実施する。得られた観測データを基に、有明海における貧酸素水塊の消長シナリオの構築及び貧酸素水塊の発生予察手法の検討に資することとする。

#### イ. 貧酸素水塊に関するデータの提供及び利活用の促進

本課題では、有明海等で夏季に発生する貧酸素水塊の迅速な把握と予察及び貧酸素水塊による漁業被害の軽減に資するため、関係機関が観測する水温、塩分、溶存酸素等の水質鉛直観測データを収集してデータベース化するとともに、既存の「赤潮ネット（沿岸海域水質・赤潮観測情報）」の情報提供サイト内に新たに「貧酸素情報」サイトを開設し、収集した水温、塩分、溶存酸素等のデータを一般向けに広く迅速に提供する。

### 2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発

#### ア. 橘湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発

橘湾奥部の海底付近から発生する貧酸素水塊による漁業被害の軽減を図るため、夏季の橘湾奥部の貧酸素化の実態調査と漁業者への情報提供に取り組み、操業の効率化を図る。

#### イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発

東京湾の貧酸素水塊による漁業被害の防止を図るため、まず、有用魚介類の卵稚仔に貧酸素水塊が及ぼす影響の解明に取り組む。また、浅海域魚類の貧酸素化に対する動態解明（群集変化と移動に及ぼす影響解明）に取り組む。

### 3) 事業検討会の開催など

本課題を効率的に実施するとともに、成果等を取りまとめるため、海洋環境分野（特に貧酸素水塊）に精通した有識者2名の出席を得て、事業検討会を2回開催する。

## Ⅱ. 令和2年度成果報告



## 1) 貧酸素水塊の発生シナリオの構築と予察技術の開発

### ア. 有明海における貧酸素水塊のモニタリングと消長シナリオの構築

#### ①有明海奥部

水産研究・教育機構 水産技術研究所

徳永貴久、杉松宏一

福岡県水産海洋技術センター有明海研究所

古賀まりの、内藤 剛、藤井直幹

佐賀県有明水産振興センター

太田洋志、岩永卓也、森川太郎、三根崇幸

## 1. 全体計画

### (1) 目的

水産研究・教育機構が福岡県水産海洋技術センター有明海研究所及び佐賀県有明水産振興センターと共同して、有明海奥部の観測定点において、水質の連続観測を実施するとともに、定期観測を実施する。得られた観測データを基に、有明海における貧酸素水塊の消長シナリオの構築及び貧酸素水塊の発生予察手法の検討に資する。

## 2. 令和2年度計画および結果

### ア 有明海湾奥西部における貧酸素水塊の動態

#### (1) 目的

全体計画に同じ

#### (2) 試験等の方法

##### 1) 水質の連続観測

図 1-1-1 の赤丸で示す有明海の奥部の 3 定点において、令和 2 年 7 月から 9 月の間に自動観測機器等を用いた水質の連続観測を実施した。測点 T13（国営干拓沖）では表・底層、測点 P6（沖神瀬西）、測点 P1（大浦沖）では全層の水質データ（水温、塩分、クロロフィル蛍光、濁度、溶存酸素飽和度、流向・流速）を各々 10 分、30 分間隔で取得した（詳細は表 1-1-1 を参照）。また、測点 T13、P6、P1 では 30 分間隔でテレメトリーシステムによるリアルタイムデータ送信を行い、ホームページ「有明海水質連続観測」（<http://ariake-yatsushiro.jp/>）で情報を公表した。



図 1-1-1. 有明海奥部西側海域の観測点、観測定線の図

## 2) 水質の鉛直断面定期観測

前述1)の水質の連続観測と並行して、有明海奥部から諫早湾にかけての8点(図1-1-1)において、おおよそ1週間に1回の頻度で多項目水質計(JFEアドバンテック社製:AAQ-175W型)を用いて、表層から底層までの水温、塩分、クロロフィル蛍光、濁度、溶存酸素、水深等の鉛直観測を行うと共に、透明度を測定し、塩分、栄養塩、溶存酸素、クロロフィル色素、植物プランクトンの組成・細胞密度を測定するための採水を実施した。

表 1-1-1. 有明海奥部における連続観測機器と観測項目

観測点 番号	観測点名称	北緯		東経		水深 (m)	観測層	テレメトリー	機器名					連続観測項目								
		度	分	度	分				水深	水温・ 塩分	溶存 酸素	Chl・ 濁度	光量子	流向・ 流速	水深	水温	塩分	溶存 酸素	Chl	濁度	空中 光量子	流向・ 流速
T13	国営干拓沖 (鋼管323)	33	6.75	130	12.79	5	0.5m	有	-	ACTW-CAR	-	ACLW2-CAR	-	AEM-CAR	-	○	○	-	○	○	-	○
							海底上 0.2m	有	DEF1	ACTW-CAR	AROW2-CAR	ACLW2-CAR	-	AEM-CAR	△	○	○	○	○	○	○	-
P6	沖神瀬西	33	3.76	130	13.31	10	全層	有	AAQ	AAQ	AAQ	AAQ	ALW	ADCP	○	○	○	○	○	○	○	○
P1	大浦沖	33	0	130	14.5	20	全層	有	AAQ	AAQ	AAQ	AAQ	ALW	ADCP	○	○	○	○	○	○	○	○

△ 10分間隔で測定・メモリに記録

○ 30分間隔で測定・値を送信

注：表中に略称で示した観測機器の名称及び機種は以下のとおり。

DEF1：小型メモリー式圧力計：JFEアドバンテック社製

ACTW-CAR：有線式水温・塩分計：JFEアドバンテック社製

AROW2-CAR：有線式溶存酸素計：JFEアドバンテック社製

ACLW2-CAR：有線式水温・クロロフィル・濁度計：JFEアドバンテック社製

AEM-CAR：有線式電磁流速計：JFEアドバンテック社製

ADCP：超音波式流向流速計：Nortek社 Aquadop profiler (大型自動観測ブイに装備)

AAQ：自動昇降型ワイパー付多項目水質計：JFEアドバンテック社製 (AAQ-175W)

ALW：空中光量子計：JFEアドバンテック社製 (ALW-CMP)

表中の△は10分間隔で観測し、メモリー保管されたデータを定期的に収集。

表中の○は30分間隔で観測、データを携帯電話通信により送信。

### (3) 結果および考察

#### 1) 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の消長

7月5日までの筑後川からの淡水流入は小さく、日平均流量は500 m<sup>3</sup>/s未満だった。しかし、大雨の影響により7月7日の筑後川(瀬の下)流量は5,000 m<sup>3</sup>/sを越えた(図1-1-2)。その後は徐々に低下し、7月31日は200 m<sup>3</sup>/s未満だった。8月1日からの筑後川からの淡水流入は少なく、日平均流量は170 m<sup>3</sup>/s未満だった。9月1日から30日までの筑後川の日平均流量は69.8~204.7 m<sup>3</sup>/sだった。9月中旬には秋雨前線の影響により一時的に筑後川の日平均流量は上昇した(図1-1-2)。

沖神瀬西の風速は、7月は中旬と下旬に一時的に10 m/sを越えたが、それ以外は強い風はほとんど吹かなかった。8月は中旬と下旬に一時的に10 m/sを越えた。9月は上旬の台風9号及び10号の通過により、一時的に10 m/sを越え、中旬や下旬にも秋雨前線の影響により強い風が吹いた(図1-1-2)。

有明海奥部の観測点T13(国営干拓沖)における底層の溶存酸素(飽和度)は、7月6日の大量の淡水流入後、9日に貧酸素状態(溶存酸素飽和度40%未満)になった。また、中旬

以降は溶存酸素飽和度 10%を下回ることもあった。7月6日の大量の淡水流入の影響により8月1日～8月3日までは貧酸素状態（溶存酸素飽和度 40%未満）になった。また、8月中旬に溶存酸素飽和度 10%を下回ることもあった。8月下旬は比較的高い状態で推移した。9月の底層の溶存酸素（飽和度）は、観測機器の不調により、9月1日～11日まで欠測となった。9月12日以降は、河川からの淡水供給が少なかったため、9月15日の数時間を除くと、貧酸素状態（溶存酸素飽和度 40%未満）は確認されなかった（図 1-1-2）。

沖合域の観測点 P6（沖神瀬西）の底層の溶存酸素は、7月1日から貧酸素状態が継続して観測された。7月6日に時化によって底層溶存酸素飽和度は一時的に増加したが、7月8日から再び減少に転じ、7月14日には10%を下回った。8月は、8月21日まで貧酸素状態が継続して観測された。8月21日及び22日の時化によって底層溶存酸素飽和度は一時的に貧酸素状態から回復したが、8月23日以降、再び減少に転じ、貧酸素状態となった。8月下旬から上昇傾向になり、9月2日の台風9号の通過によって貧酸素状態から回復した。9月5日に一時的に貧酸素状態になったものの、台風10号の影響により9月10日には60%程度に上昇した。その後、再び減少傾向に転じ、9月15日には一時的に貧酸素状態になった。9月下旬以降は60%～70%程度で推移した（図 1-1-2）

さらに沖合域の観測点 P1（大浦沖）でも、7月19日から29日まで貧酸素状態が継続して観測された（図 1-1-2）。また、8月1日～12日まで貧酸素状態が継続して観測され、8月17日～8月23日には断続的に貧酸素状態が観測された。P1における8月の底層溶存酸素飽和度の変動パターンは小潮から大潮にかけて底層溶存酸素飽和度は低下し、大潮から小潮にかけて上昇する傾向が見られた。9月は低下傾向にあり、短期的に貧酸素状態と回復を繰り返した。台風9号の影響により9月3日には高い値を示し、9月7日まで50～60%程度で推移した。その後は、自動観測機器の不具合及び海底に設置した計測機器の埋没により欠測となった。

定期観測による有明海奥部の水質の鉛直断面図からは、7月13日に強い密度成層が観測され、干潟縁辺部（浅海）から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊が形成された（図 1-1-3）。8月3日に強い密度成層が観測され、干潟縁辺部（浅海）から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊の形成が確認された。また、海水交換等によって時間経過とともに密度成層は弱くなる傾向が見られた。9月1日に強い密度成層が観測され、干潟縁辺部（浅海）から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊の形成が確認された。また、台風10号の影響により9月10日には貧酸素水塊は観測されなかったが、9月17日に再び沖合域で小規模ながら貧酸素水塊が観測された（図 1-1-3）。

## 2) 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の経年変動と物理的要因

有明海湾奥西部海域での貧酸素水塊は、物理的要因（密度成層の形成、潮流による鉛直混合等）及び生物・化学的要因（酸素消費）によって形成されることが明らかになっている（速水 2007）。一方、貧酸素水塊の経年変動と栄養塩負荷とを統計的に関係付ける研究は、しばしば経年変動の大部分を説明できないことが報告されている（Hagy et al. 2004、Murphy et al. 2011、Scully 2013, 2016）。ここでは、酸素消費速度が非常に大きいことを仮定して、物理的要因のうち、潮汐・潮流振幅とそれによる鉛直混合に着目して貧酸素水塊の経年変動要因について解析した。

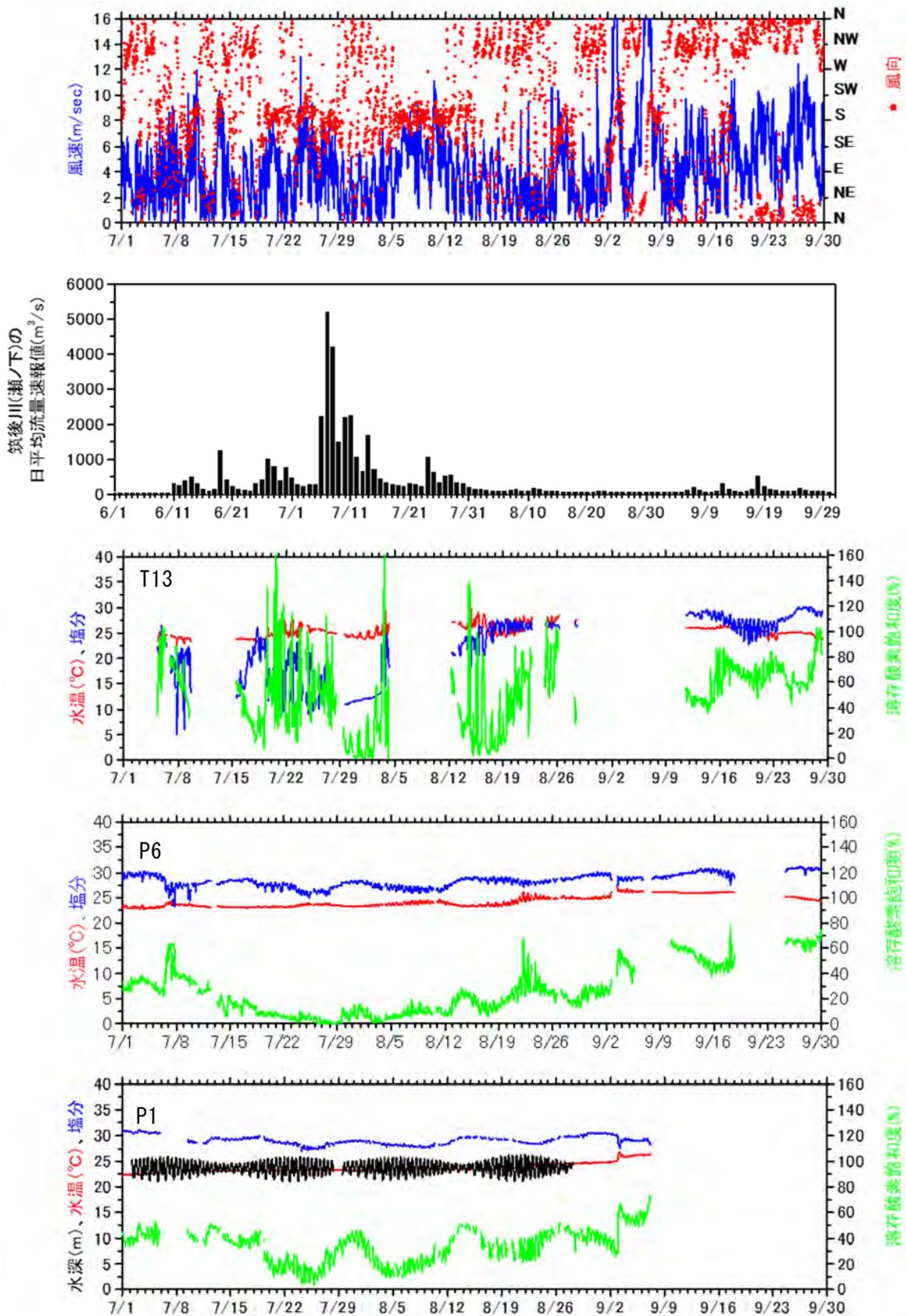


図 1-1-2. 沖神瀬西ブイの海上風(海面から 3m)の風向・風速(3 時間毎の 10 分平均値)、筑後川(瀬ノ下)の日平均流量、T13、P6 及び P1 の底層水温(海底面から 0.2m)、塩分、溶存酸素飽和度、水深の時間変化

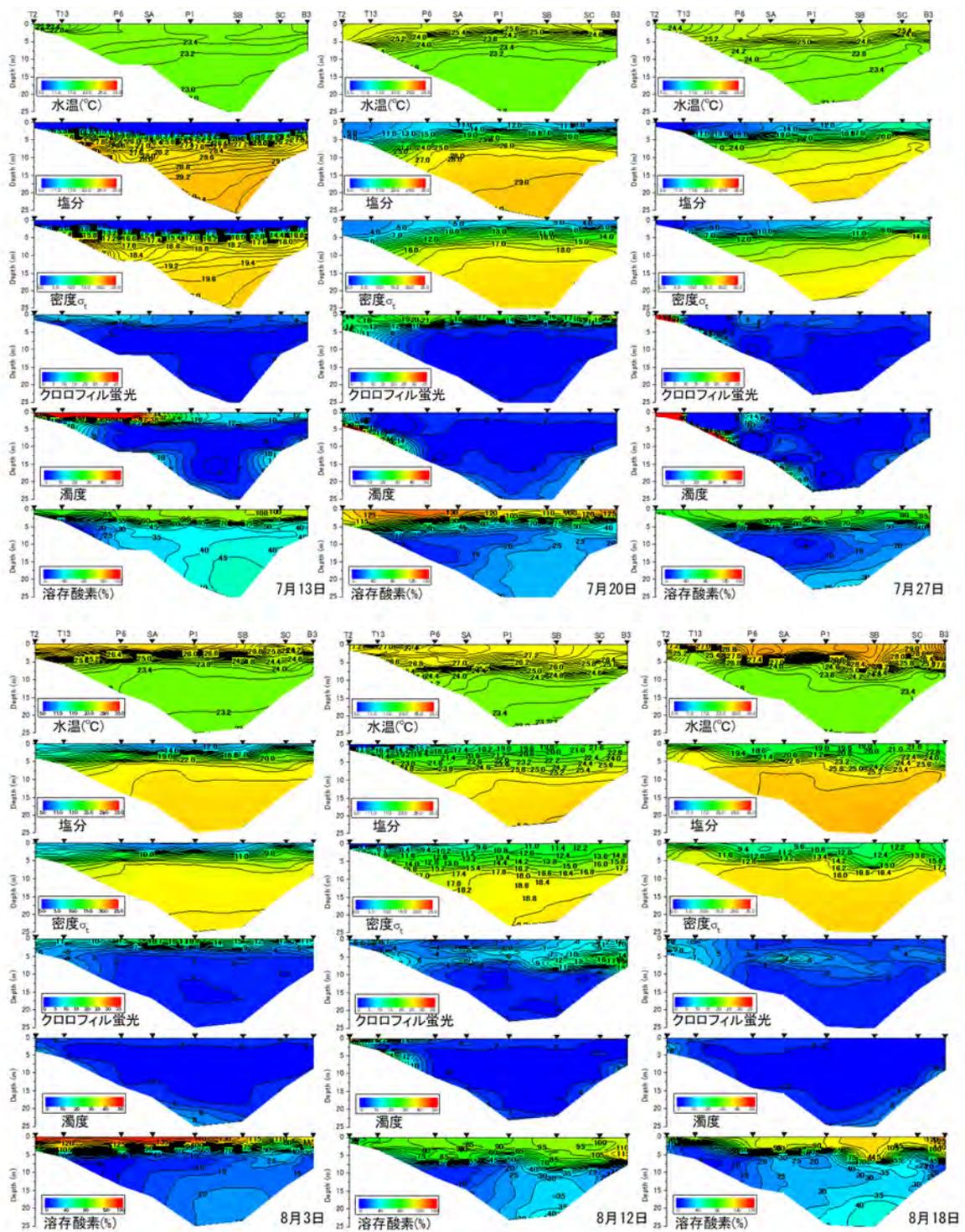


図 1-1-3. 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 ( $\sigma_t$ )、クロロフィル a、濁度、溶存酸素飽和度の時間変化

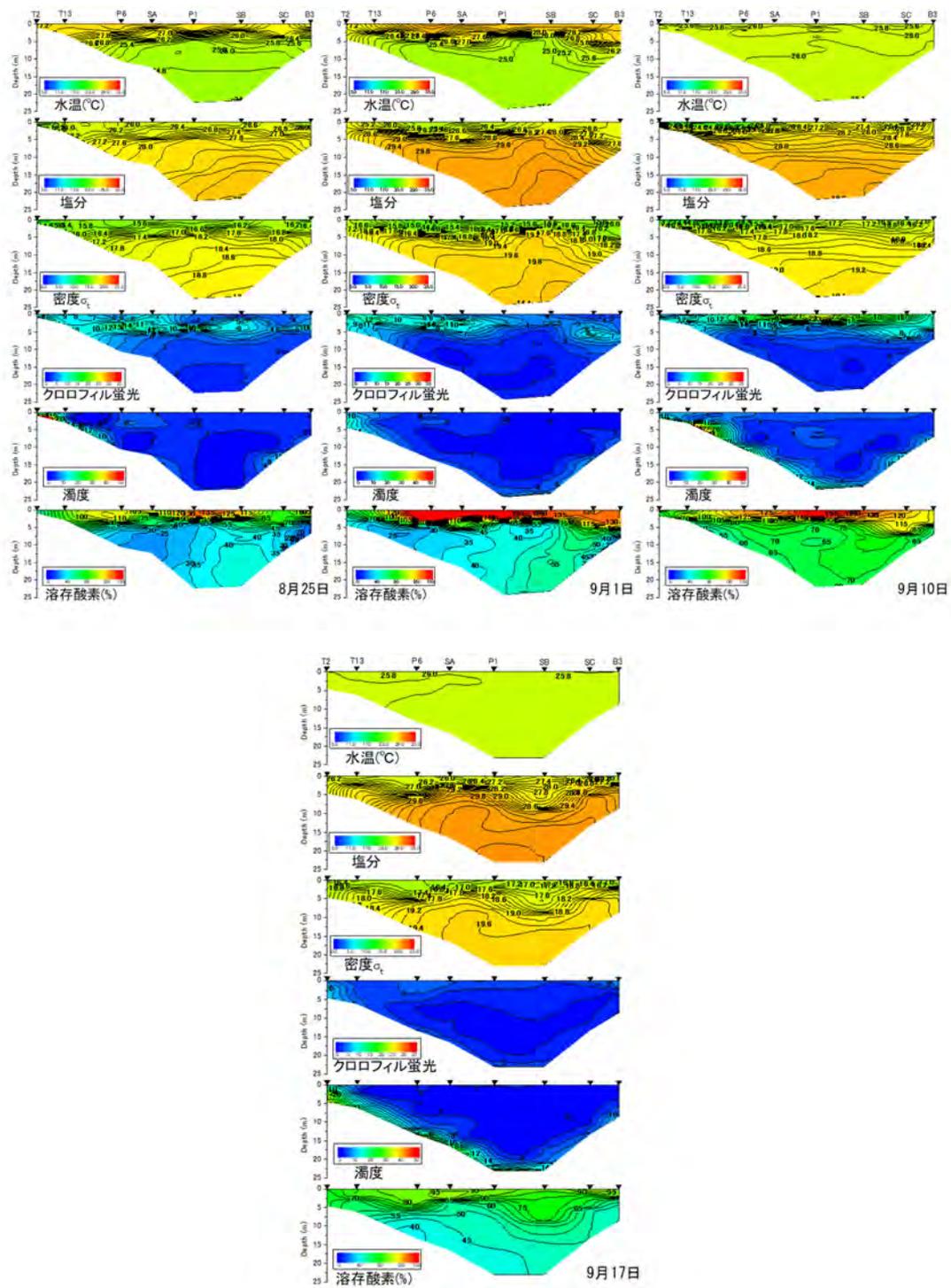


図 1-1-3. 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 ( $\sigma_t$ )、クロロフィル a、濁度、溶存酸素飽和度の時間変化

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 と名付けた。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 3mg/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。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。ただし、図 1-1-2 に示すように 2020 年度は T13 では底層溶存酸素の欠測が多く、評価できなかった。

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ず、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、2020 年度の底層では時計回りの  $M_2$  潮の潮流楕円となっており、評価からは除外した。底層の  $M_2$  潮の潮流楕円が時計回りになる理由として、7 月

上旬から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）。

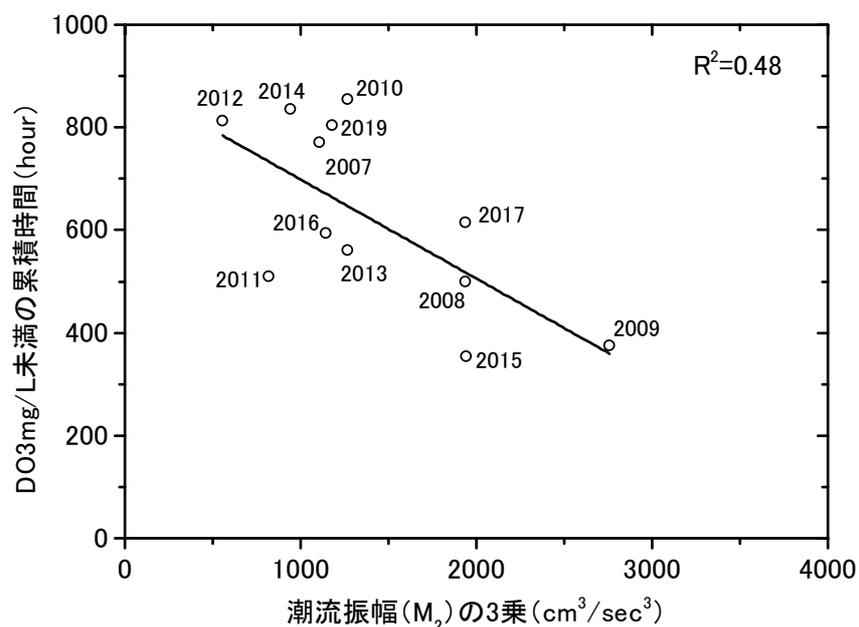


図 1-1-4. 干潟縁辺域(T13)における底層潮流振幅の 3 乗と 7 月～9 月における DO3 mg/L 未満の累積時間との関係

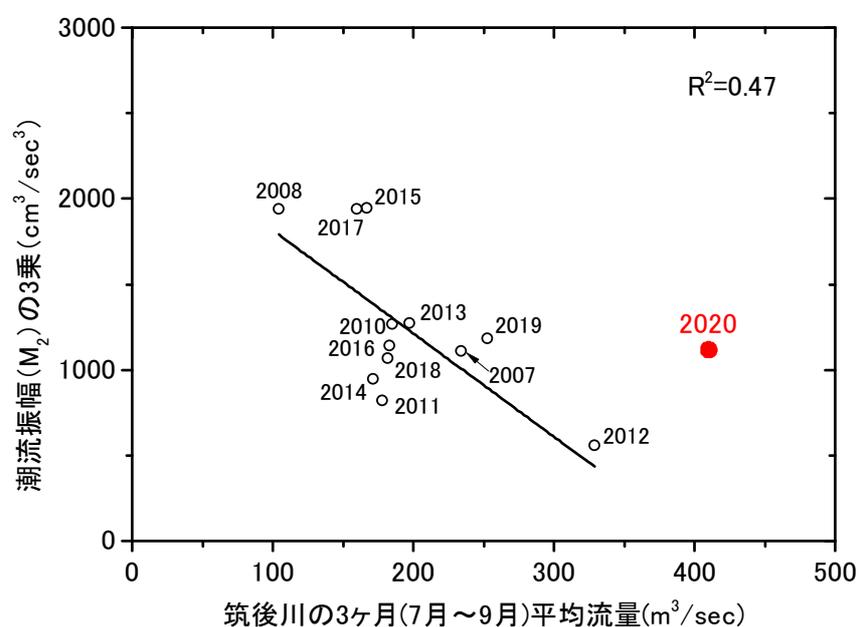


図 1-1-5. 筑後川における平均流量と干潟縁辺域(T13)における底層潮流振幅の 3 乗との関係

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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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）。しかしながら、潮汐振幅（大浦）と底層潮流振幅（P6）の経年変化はよく対応していた（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。

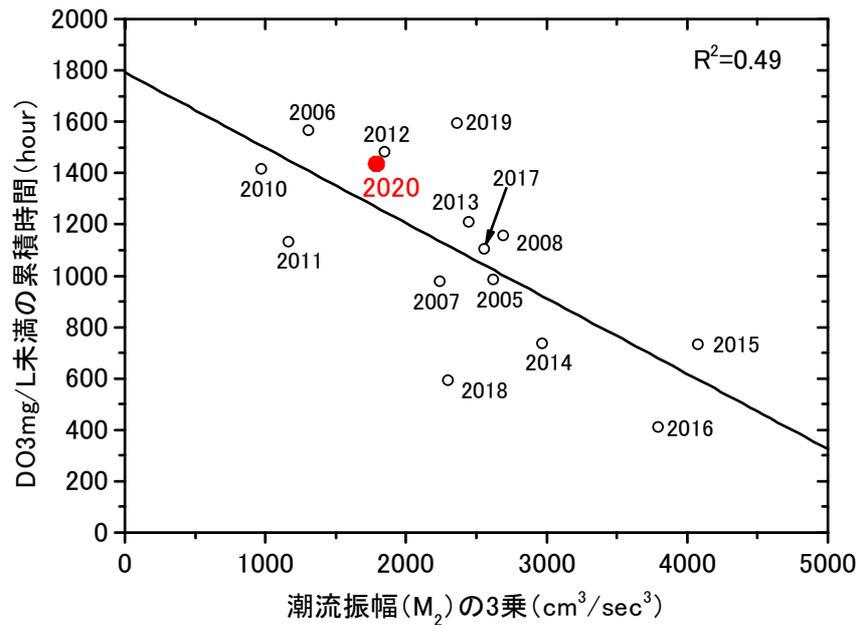


図 1-1-6. 沖合域(P6)における底層潮流振幅の3乗と7月～9月におけるDO3 mg/L未満の累積時間

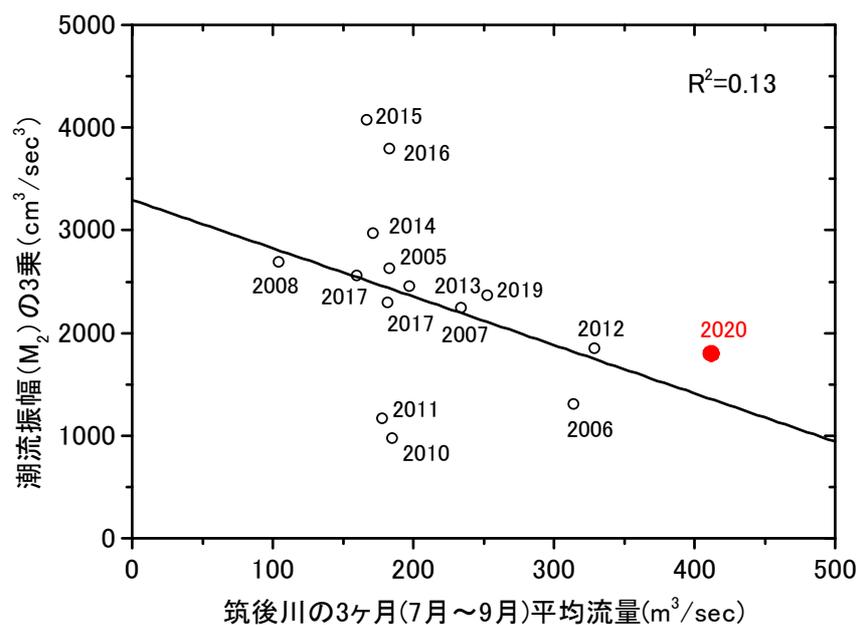


図 1-1-7. 筑後川の平均流量と沖合域(P6)における底層潮流振幅の3乗との関係

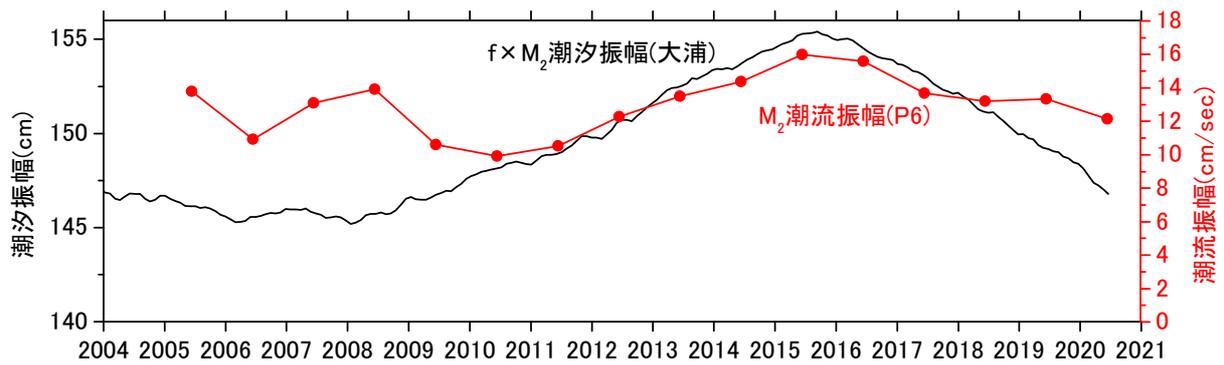


図 1-1-8. 潮汐振幅(大浦)と底層潮流振幅(P6)の経年変化

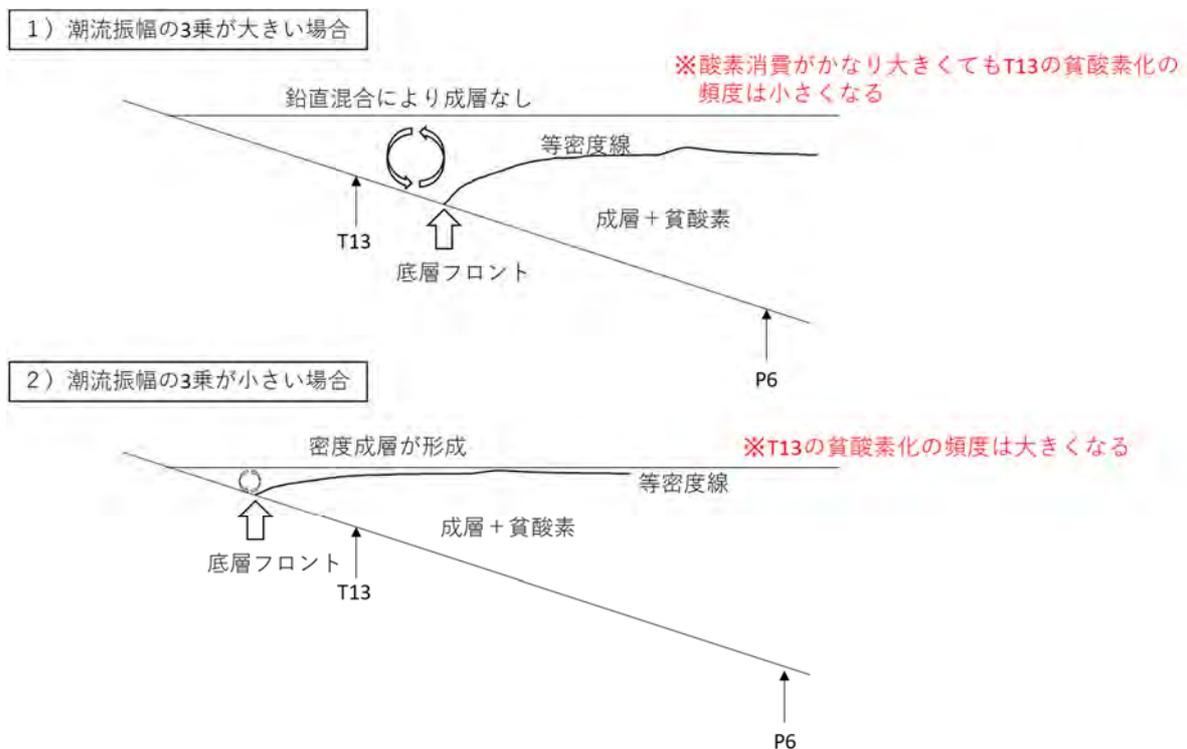


図 1-1-9. 底層フロントと密度成層・貧酸素との関係

#### 参考文献

- 速水祐一 (2007) : 有明海奥部の貧酸素水塊—形成機構と長期変動—, 月刊海洋, 39, pp. 22–28.
- Hagy, J. D., W. R. Boynton, C. W. Keefe, and K. V. Wood.: Hypoxia in Chesapeake Bay, 1950–2001: Long - term change in relation to nutrient loading and river flow. *Estuaries*, vol. 27, pp. 634–658, 2004.
- Murphy, R. R., W. M. Kemp, and W. P. Ball.: Long - term trends in Chesapeake Bay seasonal

- hypoxia, stratification, and nutrient loading. *Estuar. Coast.* vol. 34, pp. 1293-1309, 2011.
- Scully, M. E.: Physical controls on hypoxia in Chesapeake Bay: A numerical modeling study. *J. Geophys. Res.* Vol. 118, pp. 1239-1256, 2013.
- Scully, M. E.: The contribution of physical processes to inter - annual variations of hypoxia in Chesapeake Bay: A 30 - yr modeling study. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 61, pp. 2243-2260, 2016.
- Simpson, J.H. and J. R. Hunter: Fronts in the Irish Sea. *Nature*, vol. 250, pp. 404-406, 1974.
- 塚本秀史, 柳哲雄 : 有明海の潮汐・潮流, 海と空, 78, pp. 19-30, 2002.
- 藤家 亘, 井下 恭次, 白谷 栄作, 諫早湾および有明海奥部における成層度と底層水の挙動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , 2015, 71 巻, 2 号, p. I\_1237-I\_1242, 2015.
- 松野健, 中田英昭 : 有明海の流れ場を支配する物理過程, 沿岸海洋研究, vol. 42, pp. 11-17, 2004.
- A.J. Souza, J.H. Simpson: The modification of tidal ellipses by stratification in the Rhine ROFI, *Continental Shelf Research*, Vol. 16, Issue 8, pp. 997-1007, 1996.
- 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 DO 経年変動特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , 69 巻, 2 号, p. I\_1018-I\_1023, 2013
- 堤 英輔, 松野 健, 有明海諫早湾湾口付近における外部, 内部潮汐流およびそれに伴う乱流混合の観測, 海の研究, 23(2) 45-72, 2014.

## イ 有明海湾奥西部における主要植物プランクトンの出現動態

### (1) 試験等の方法

図 1-1-1 に示す鉛直断面定期観測定点における St.T2、T13、P6、P1 および B3 において、2020 年 7 月 13 日から 9 月 1 日にかけて週 1 回の頻度で、表層海水を採水して植物プランクトン細胞数を計数した。計数は、生海水 10~500  $\mu\text{L}$  中の植物プランクトン細胞数を生物顕微鏡で観測翌日に検鏡することで行った。

### (2) 結果

各定点における *Chattonella* 属の細胞密度の推移を図 1-1-10 に示す。*Chattonella* 属は、9 月 1 日の St.B3 で 2 cells/mL 確認されたのみで、その他のラフィド藻類は確認されなかった。

各定点における珪藻類の細胞密度の推移を図 1-1-11 に示す。珪藻類は、24~30,162 cells/mL の範囲で確認され、7 月 20 日、8 月 3 日、8 月 25 日および 9 月 1 日で 5000 cells/mL を超えるような高密度であった。特に 7 月 20 日では各定点で 21,240~30,162 cells/mL と極めて濃密であった。珪藻類が高密度で確認された観測における優占種は、*Skeletonema* 属もしくは *Chaetoceros* 属であり、8 月 25 日を除いて全ての定点で概ね一致していた。すなわち、7 月 20 日および 9 月 1 日では *Skeletonema* 属、8 月 3 日では *Chaetoceros* 属が全ての定点で優占しており、8 月 25 日では St.2 で *Skeletonema* 属、St.13 で *Chaetoceros* 属が優占していた。

各定点における渦鞭毛藻類の細胞密度の推移を図 1-1-12 に示す。渦鞭毛藻類は、0~410 cells/mL の範囲で確認され、8 月 12 日および 8 月 18 日の一部の定点における増加を除いて比較的低位で推移した。増加が確認された 8 月 12 日では St.P6 で *Gonyaulax* 属、8 月 18 日では St.T2 および T13 で *Ceratium furca* が増加していた。

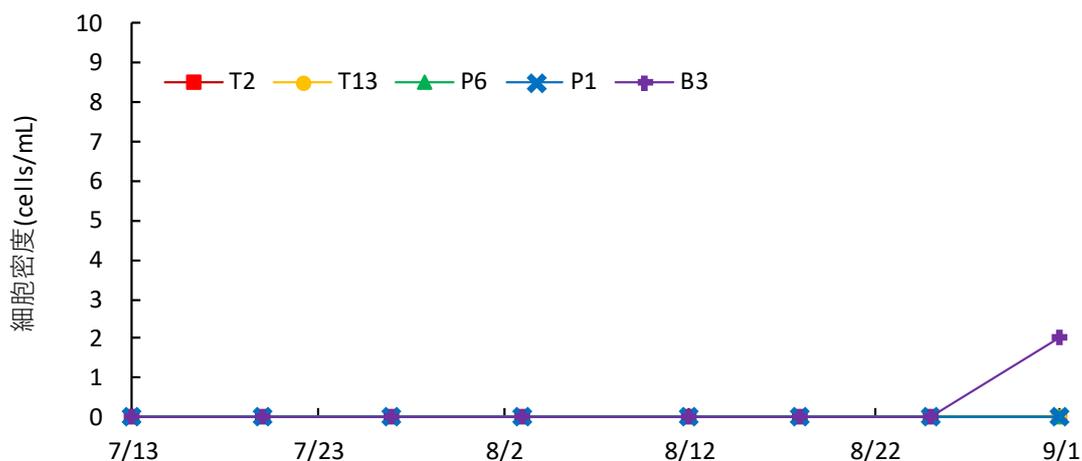


図 1-1-10. 各定点における *Chattonella* 属の細胞密度の推移

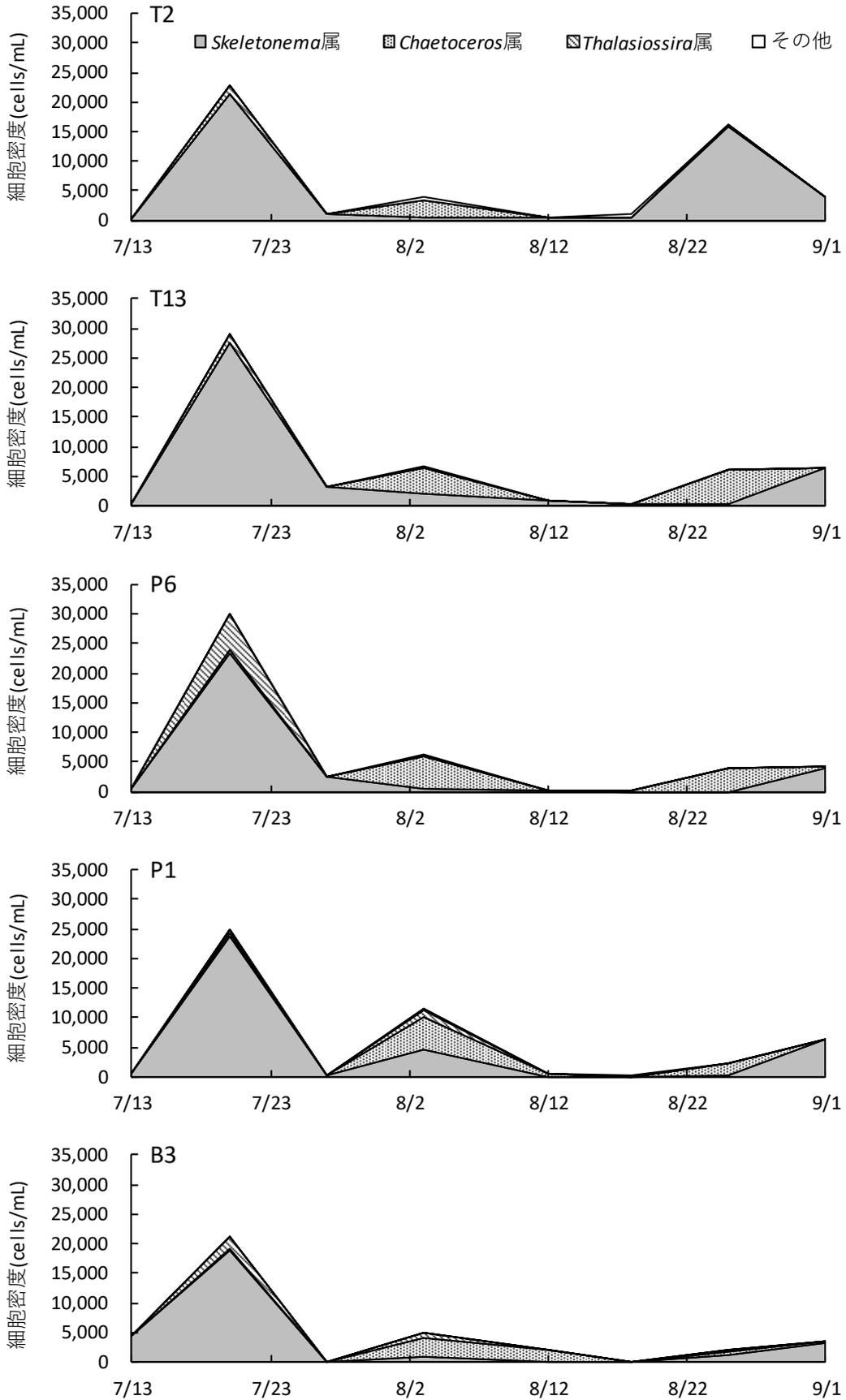


図 1-1-11. 各定点における珪藻類の細胞密度の推移

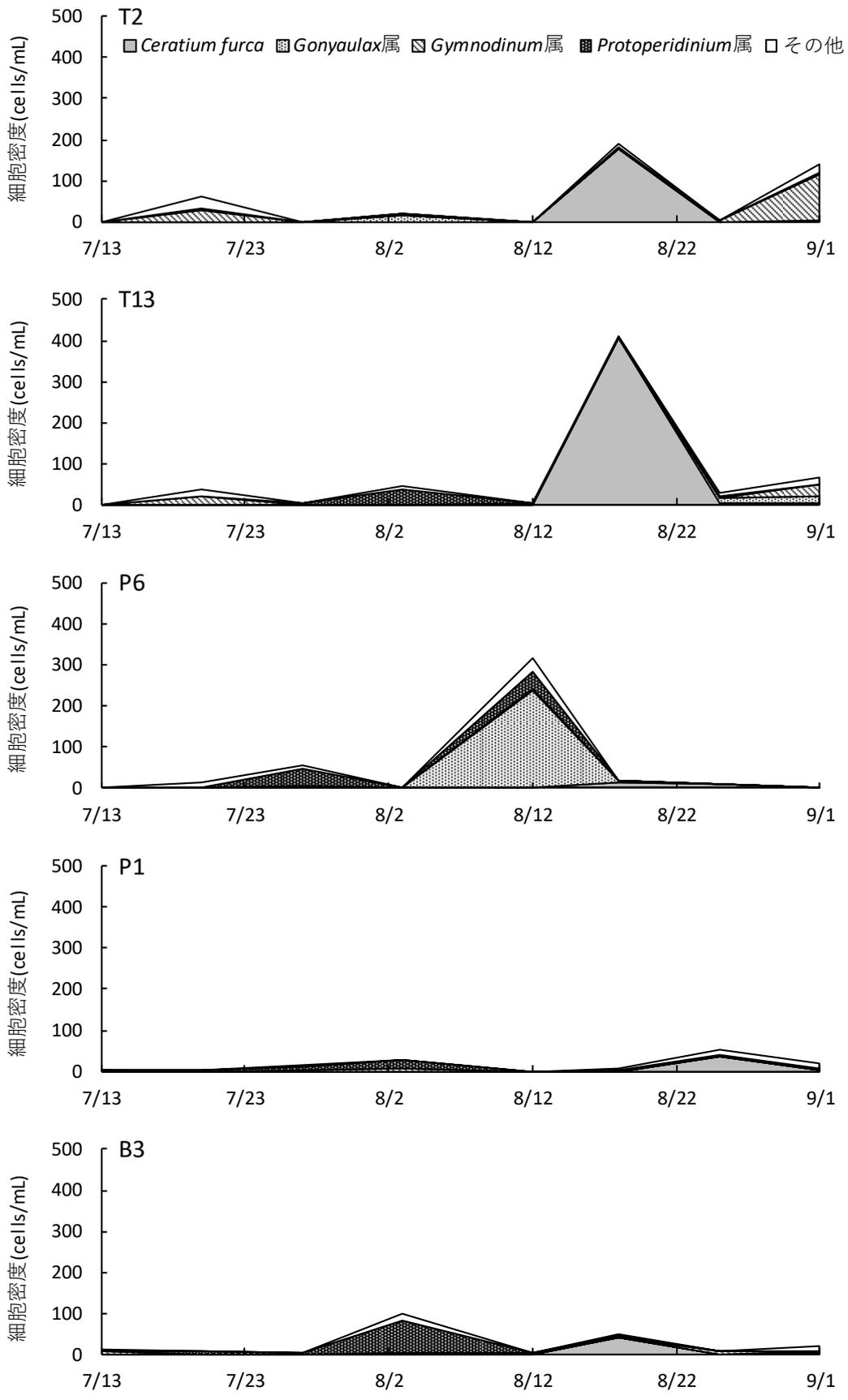


図 1-1-12. 各定点における渦鞭毛藻類の細胞密度の推移

## ウ 有明海湾奥西部における栄養塩動態

### (1) 試験等の方法

図 1-1-1 に示す観測定線上の観測点 T2、T13、P6、P1、B3 の各層（観測点 T2 は 0 m 層、B-1 m 層、観測点 T13 は 0 m 層、2m 層、B-1 m 層）で採取した海水について、海洋観測指針に準拠した空気分節方式を用いて、溶存態無機窒素（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素）、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素の濃度を以下の方法で測定した。

- ・硝酸態窒素：銅・カドミウム還元－ナフチルエチレンジアミン吸光光度法
- ・亜硝酸態窒素：ナフチルエチレンジアミン吸光光度法
- ・アンモニア態窒素：インドフェノール青吸光光度法
- ・リン酸態リン：モリブデン青吸光光度法
- ・ケイ酸態ケイ素：シリカモリブデン青吸光光度法

### (2) 結果及び考察

#### 1) 溶存無機態窒素

調査期間における溶存態無機態窒素濃度（以下、DIN と記す。）の推移を図 1-1-13 に示す。

観測点 T2 では 0、B-1 m 層がほぼ同調していたが、観測点 T13、P6、P1、B3 では 0、2 m 層と 5、B-1 m 層が異なる挙動を示した。

観測点 T2 の 0、B-1 m 層、観測点 T13、P6、P1、B3 の 0、2 m 層では、7月 13 日には豊富であった DIN が、7月 20 日に一度減少し、7月 27 日に再び増加したものの、8月 3 日には減少した。その後、観測点 T2 の 0、B-1 m 層、観測点 T13、P6、P1 の 0、2 m 層では、8月 12 日に再び増加したが、8月 18 日には減少した。観測点 T2 の 0、B-1 m 層では 8月 25 日に再び増加したが、9月 1 日には減少した。観測点 T13、P6、P1 の 0、2 m 層では、8月 18 日以降ほぼ横ばいで推移した。観測点 B3 の 0、2 m 層では、8月 3 日以降ほぼ横ばいで推移した。

観測点 T13 の B-1 m 層、観測点 P6、P1、B3 の 5、B-1 m 層では、多少の増減を繰り返しながら、ゆるやかに減少した。

#### 2) リン酸態リン

調査期間におけるリン酸態リン濃度（以下、 $\text{PO}_4\text{-P}$  と記す。）の推移を図 1-1-14 に示す。リン酸態リン濃度は、DIN と概ね同調して増減した。

#### 3) ケイ酸態ケイ素

調査期間におけるケイ酸態ケイ素濃度（以下、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$  と記す。）の推移を図 1-1-15 に示す。7月から 8月前半まで増減を繰り返しながら推移し、観測点 T13 の 0、2、B-1 m 層、観測点 P6 の 0 m 層、観測点 P1 の 0、2 m 層で 7月 27 日（最大値 207.55  $\mu\text{M}$ ）、観測点 B3 の 0 m 層で 8月 3 日（169.41  $\mu\text{M}$ ）、観測点 T2 の 0、B-1 m 層、T13、P6 の 0 m 層で 8月 12 日（最大値 199.58  $\mu\text{M}$ ）、に高い値を示した。

8月後半以降、観測点 T2 の 0、B-1 m 層、観測点 B3 の 5 m 層では 8月 25 日に増加し、その後減少した。観測点 T13、P6、P1 の全層、観測点 B3 の 0、2、B-1 m 層では、横ばいから減少傾向であった。

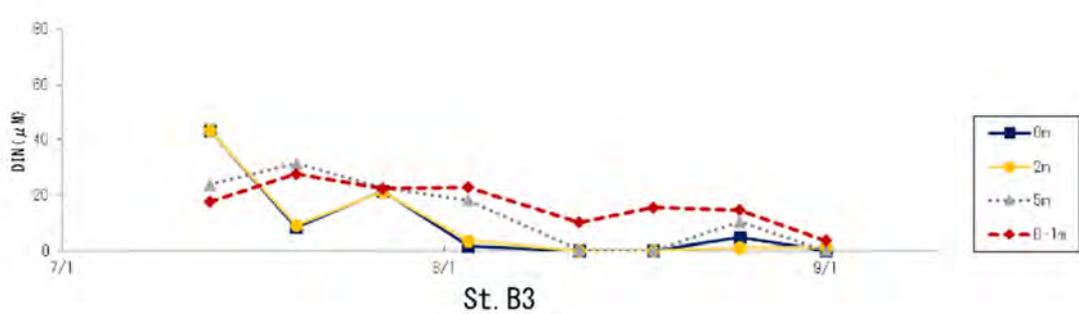
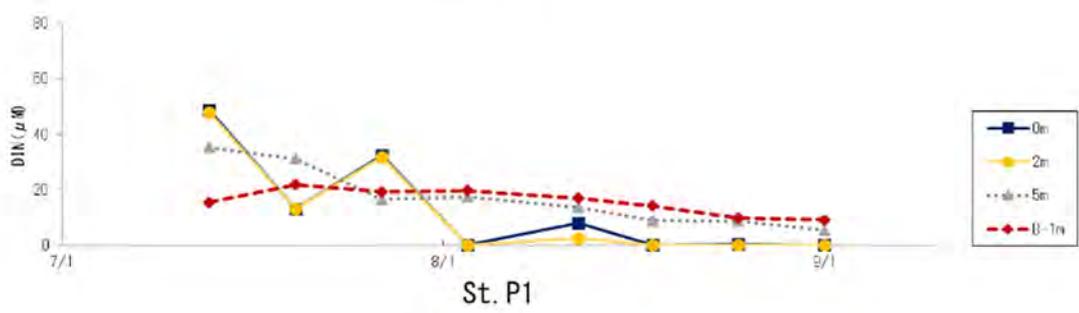
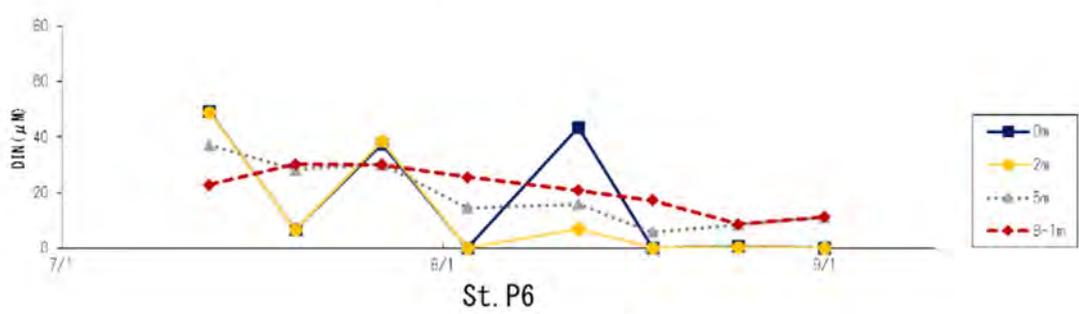
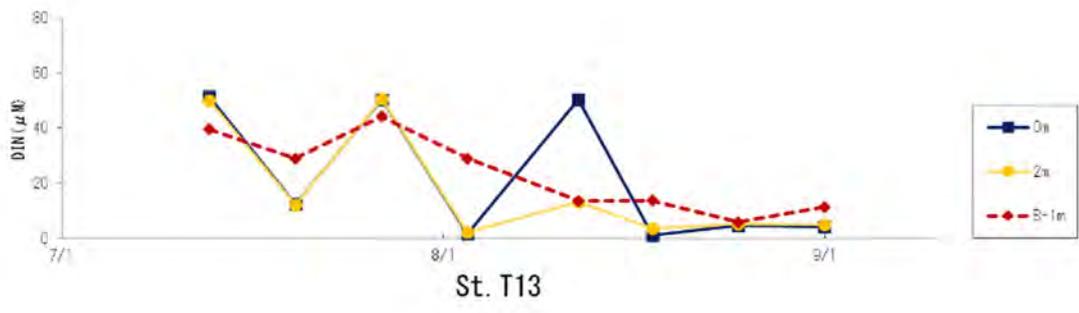
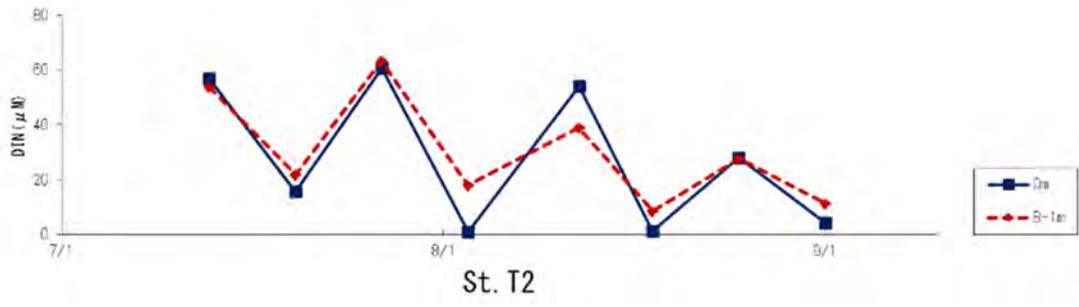


図 1-1-13. 有明海湾奥西部海域における溶存態無機窒素の経時変化

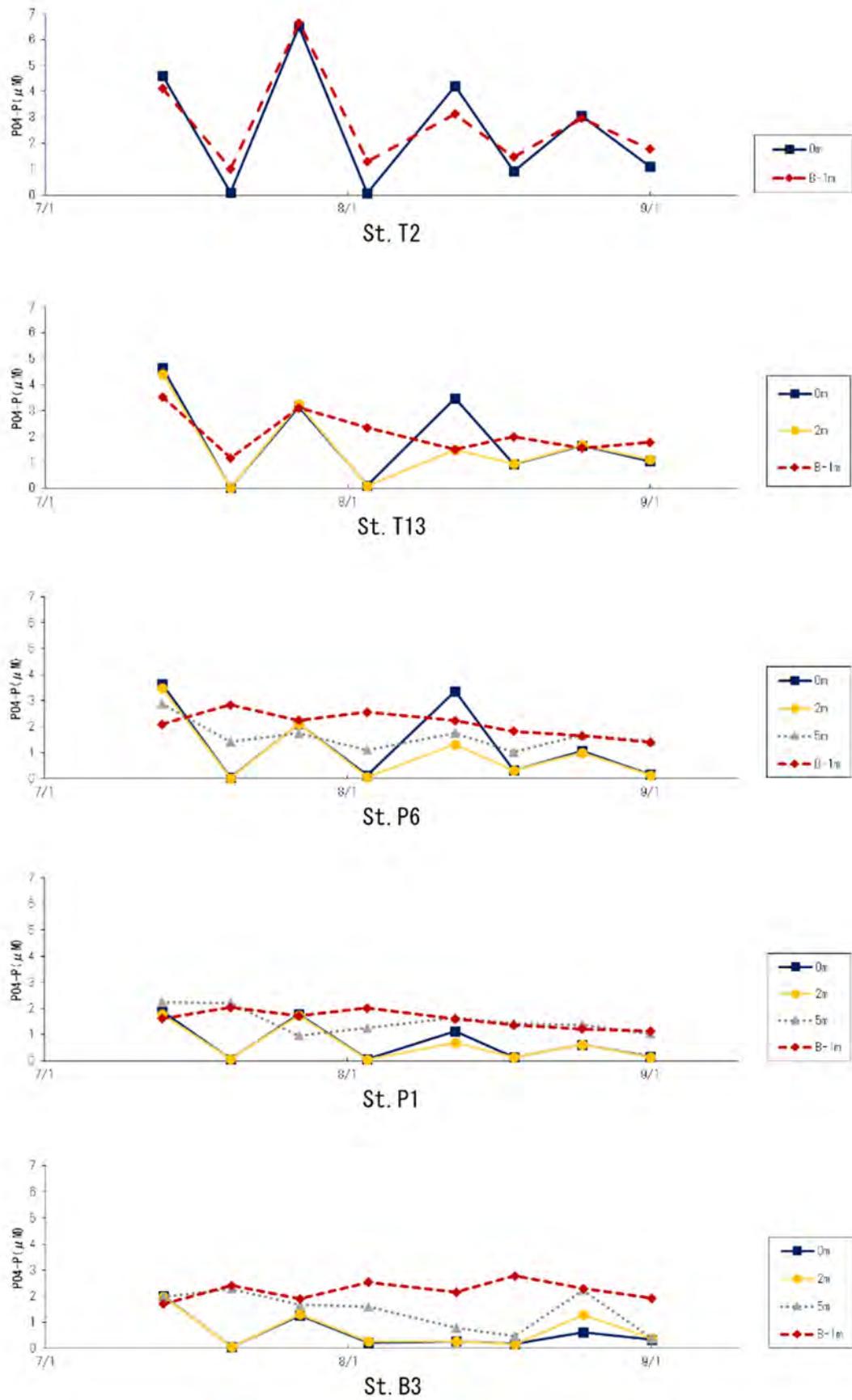
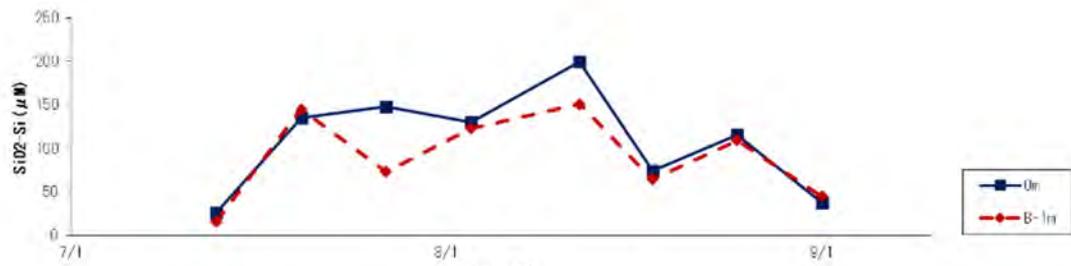
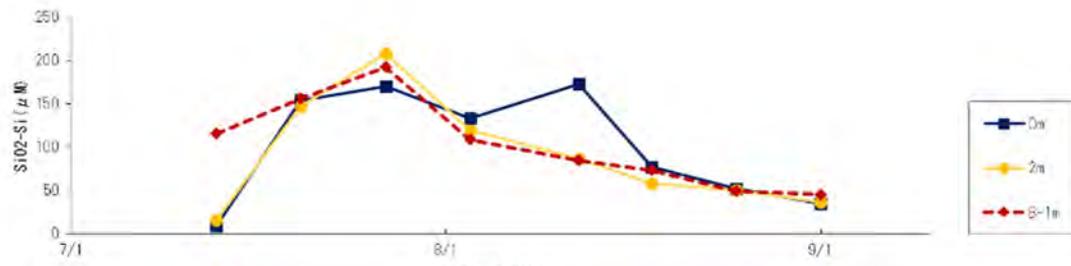


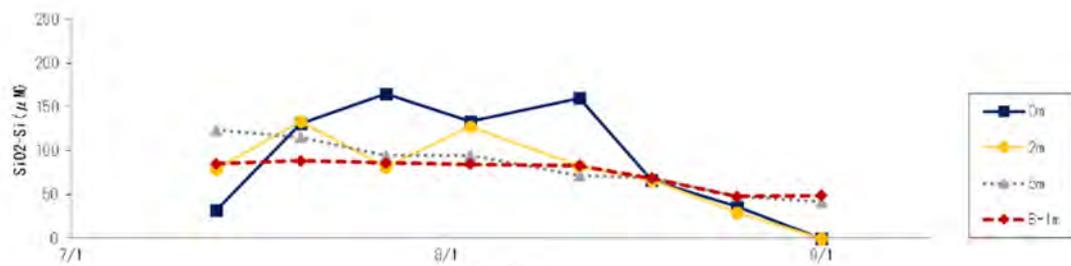
図 1-1-14. 有明海灣奥西部海域におけるリン酸態リンの経時変化



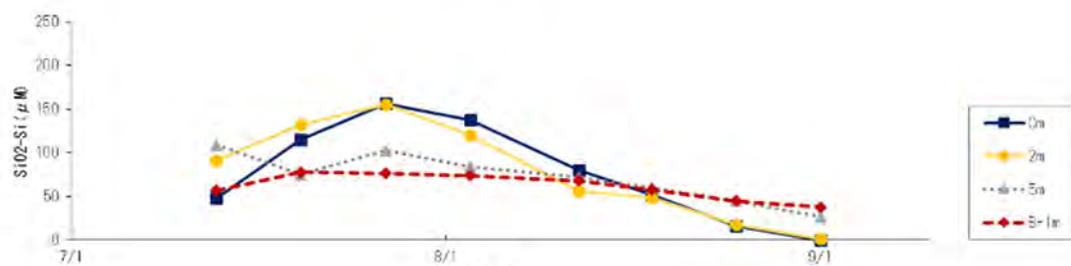
St. T2



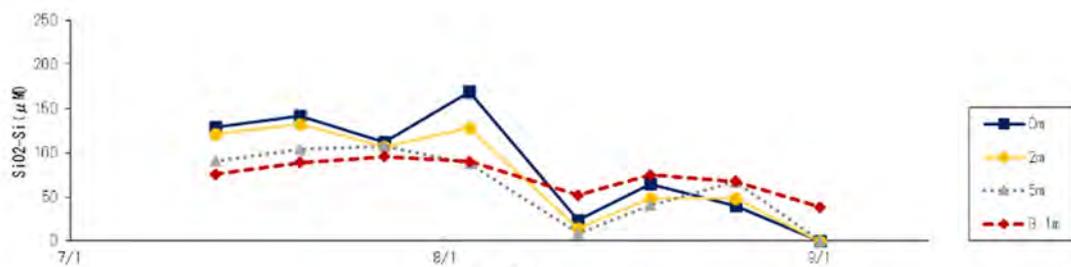
St. T13



St. P6



St. P1



St. B3

図 1-1-15. 有明海湾奥西部海域におけるケイ酸態ケイ素の経時変化

## エ 赤潮発生と貧酸素水塊の形成との関係

海域の多大な酸素消費は、底層における貧酸素水塊の形成に重要な役割を果たす (Jessen et al. 2017、Fennel and Testa 2019)。海域の酸素消費は、化学的酸素消費及び生物学的酸素消費に分けられ、化学的酸素消費は還元物質等の酸化が含まれ、生物学的酸素消費は有機物分解、植物プランクトンの呼吸及び硝化等が含まれる (Wang 1980、徳永ら 2016)。しかしながら、植物プランクトンの呼吸についてはほとんど注意が払われていないのが現状である。現地観測結果と室内培養実験により、鞭毛藻の呼吸による酸素消費速度を推定し、既往研究との比較から、鞭毛藻の日周鉛直移動と夜間の底層での呼吸が懸濁物及び堆積物による酸素消費とともに貧酸素化に寄与する可能性を示すために酸素消費実験を行った。

### (1) 実験概要

*Chattonella antiqua* の呼吸による酸素消費速度を算出するために室内培養実験を行った。ろ過した海水 (25.7°C、塩分 33) 及び室内培養した *C. antiqua* を 100 mL 容 DO 瓶に収容し、暗条件下で水温 25.7°C~23.2°C で約 23 時間室内培養した (n=5)。実験開始時と終了時の DO 濃度は DO 計 (ARO-PR、JFE Advantech Co., Ltd.) で計測された。実験開始時と終了時の DO 濃度の差及びリファレンス (ろ過海水のみ) の DO 濃度低下、培養時間から *C. antiqua* の呼吸による酸素消費速度を算出した。さらに、終了時のそれぞれの DO 瓶中の *C. antiqua* 細胞密度を算出した (n=5)。*C. antiqua* の計数は光学顕微鏡 (Nikon E400) 下で 3 回行われた。*C. antiqua* の呼吸による酸素消費速度を *C. antiqua* 細胞密度で除することにより 1 細胞当たりの呼吸速度を算出した。

*C. antiqua* 細胞密度とクロロフィル蛍光との関係を明らかにするために、孔径 0.1 µm でろ過した海水を黒色バケツに入れ、細胞密度と CTD によるクロロフィル蛍光を計測した。CTD (AAQ-RINKO、JFE Advantech Co. Ltd.) による水温、塩分、クロロフィル蛍光を計測した。黒色バケツを用いた理由は、バケツによる反射光を極力抑制して値を安定化させるためである。クロロフィル蛍光値を 0~70 までの 9 段階に変化させた。*C. antiqua* の細胞密度の計測は各密度において 3 回ずつ行った。クロロフィル蛍光の計測は 0.1 秒毎に行い、20 秒以上取得したデータを平均した。

### (2) 結果及び考察

各 DO 瓶内の酸素消費速度は、0.099~0.230 mg/L/hour を示し、細胞密度は 540~590 cells/mL (平均 560 cells/mL) であった。*C. antiqua* 1 cell 当たりの平均呼吸速度は、 $0.26 \times 10^{-6}$  mg/cell/hour であった。この値は、令和元年度に行われた *Akashiwo sanguinea* 1 cell 当たりの平均呼吸速度  $0.45 \times 10^{-6}$  mg/cell/hour よりも小さかった。

図 1-1-16 にクロロフィル蛍光と *Chattonella antiqua* 細胞密度の関係を示す。両者には明瞭な線形関係が見られた。したがって、*C. antiqua* の赤潮が発生した場合、クロロフィル蛍光の鉛直分布を連続観測すれば、*C. antiqua* 細胞密度の日周鉛直移動を詳細に観測することが可能となると思われる。

2020 年夏季は有明海では *C. antiqua* の大規模な赤潮が発生しなかったが (図 1-1-17)、将来 *C. antiqua* の赤潮が発生した場合、本研究結果を用いて *C. antiqua* の日周鉛直移動が貧酸素水塊の形成に及ぼす影響を評価することができると思われる。