

令和4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5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4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	3
① 有明海奥部	3
② 有明海熊本県海域	25
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) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発	
ア. 有明海及び周辺海域で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	39
イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	53
① 干潟浅海域を生育場とする有用魚介貝類の生活史に与える貧酸素水塊の 影響解明と軽減策討検	53
② 浅海域の貧酸素化に対する水産有用種の生存技術の開発	79
III. 検討会の開催	95

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
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 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 株式会社アイコック 水産研究・教育機構
2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発 ア. 有明海及び周辺海域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
3) 事業検討会の開催等	水産研究・教育機構

このように、本課題では、貧酸素水塊の発生メカニズム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平成30年度に開設した「貧酸素情報」サイトを継続利用しつつ、「貧酸素情報」を「貧酸素・水質情報」へ変更し、夏季から冬季にかけて収集した水温、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. 有明海及び周辺海域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) 事業検討会の開催等

本事業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4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、徳田 眞孝、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、中原啓太、野口浩介

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4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4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、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

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	DEFI	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。

DEFI：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・クロフィル・濁度計：JFE アドバンテック社

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 Aquadopp 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 30 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 1 日から 18 日までの筑後川からの淡水流入は小さく、瀬ノ下の日平均流量は最大 300 m³/s 程度だった（図 1-1-2）。しかしながら、7 月 19 日の流量は、7 月 18 日から 19 日の降水の影響で、1958 m³/s を記録した。その後は徐々に低下し、7 月 26 日から 7 月 31 日まで 100 m³/s 未満だった。8 月 1 日から 15 日までの筑後川からの淡水流入は小さく、日平均流量（瀬ノ下）は 100 m³/s 未満だった。降雨により 8 月 16 日から 19 日の筑後川流量は 200 m³/s を越え、18 日に 754 m³/s を記録した。また、21 日と 25 日には 400 m³/s 以上だった。台風 14 号の影響により 9 月 18 日から 19 日の筑後川流量は 500 m³/s を越え、19 日に 1613 m³/s を記録した。

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は、7 月 7 日から 8 日にかけて、短時間であるものの貧酸素状態（溶存酸素 3.0 mg/L 未満）になった（図 1-1-2）。9 日は高い状態に回復したが、それ以降は低下し、11 日には再び貧酸素状態が観測され、その後は断続的に貧酸素状態まで低下することがあった。15 日以降は、機器不調のため欠

測が多くなった。8月3日まで高い値であったが、その後急激に低下し、4日から7日まで断続的に貧酸素状態になった。また、12日から18日は短期的に貧酸素状態になることもあった。8月19日以降は概ね貧酸素状態だった。9月8日から11日まで高い値で推移したが、その後低下し、13日には貧酸素状態となった。貧酸素状態は18日まで継続したが、18日から19日に通過した台風14号の影響により、溶存酸素は上昇して貧酸素状態から回復し、9月下旬は高い値を示した。

沖合域の観測点 P6（沖神瀬西）の底層の溶存酸素は、7月1日から徐々に低下し、4日には貧酸素状態になり、15日まで貧酸素状態が継続した（図 1-1-2）。16日に一時的に貧酸素状態から回復したものの、再び貧酸素化し、17日まで貧酸素状態が継続した。18日に貧酸素状態から回復し、一時的に貧酸素状態が観測されたものの19日まで溶存酸素は高い値を示した。その後急激に溶存酸素は低下し、再び貧酸素状態になった。8月1日から2日まで一時的に 3.0 mg/L 以上の溶存酸素が観測されたが、3日からは貧酸素状態が継続し、4日からは溶存酸素が 1.0 mg/L を下回ることもあった。11日からは上昇傾向となり、13日に短期的に貧酸素状態から回復することもあった。16日から17日までは高い値を示したが、18日からは再び貧酸素状態が継続的に観測された。9月1日から3日まで貧酸素状態が継続的に観測された。6日には台風11号よる強い風の影響を受けて溶存酸素は大きく上昇し、17日に一時的に貧酸素状態が観測されたが、9月末まで高い値が継続した。

さらに沖合域の観測点 P1（大浦沖）でも、7月6日から断続的に貧酸素状態が観測され、9日から14日まで貧酸素状態が継続して観測された（図 1-1-2）。16日から23日にかけて溶存酸素は上昇傾向となり、その後は再び低下傾向に転じ、27日から貧酸素状態が継続的に観測された。8月1日から3日まで貧酸素状態が観測された。また、8月4日から6日までの短時間の回復を除くと、15日まで貧酸素状態が継続して観測された。9月1日は貧酸素状態が観測されたが、その後は高い状態が継続して観測された。

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7日および14日は、T13からP1にかけて貧酸素水塊が観測された（図 1-1-3）。7月20日には、浅い T13 では貧酸素状態から回復し、P6 を中心に貧酸素状態だった。7月28日には T2 を除く全領域で貧酸素状態が観測された。8月4日及び23日に観測点 T13 から P1 まで密度成層が形成されていた。8月11日は大潮期のため水深が浅い T2 から T13 では密度成層は弱まっていた。8月4日に T13 から P1 で貧酸素水塊が形成され、8月11日は水深が浅い T2 から T13 では密度成層が弱いため貧酸素水塊は形成されておらず、一方、P6 より深い定点で貧酸素水塊が形成されていた。23日には T2 から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊が観測された。9月25日に観測点 P6 から P1 まで弱い密度成層が形成されていたが、全定点で貧酸素水塊は観測されなかった。

干潟縁辺域と沖合域の予察判定結果を表 1-1-2 に示す。2022 年度は干潟縁辺域において予察があまり的中しなかった。的中率は 71%であり、2021 年度の結果と合わせると 53%という結果となった。一方沖合域はよく的中し、的中率は 85%であった。2021 年度の結果と合わせると 93%だった。強風による鉛直混合時期の予測が困難なことや干潟縁辺域は水平移流が大きく、DO の短期変動幅が大きいため予察が外れる傾向があった。

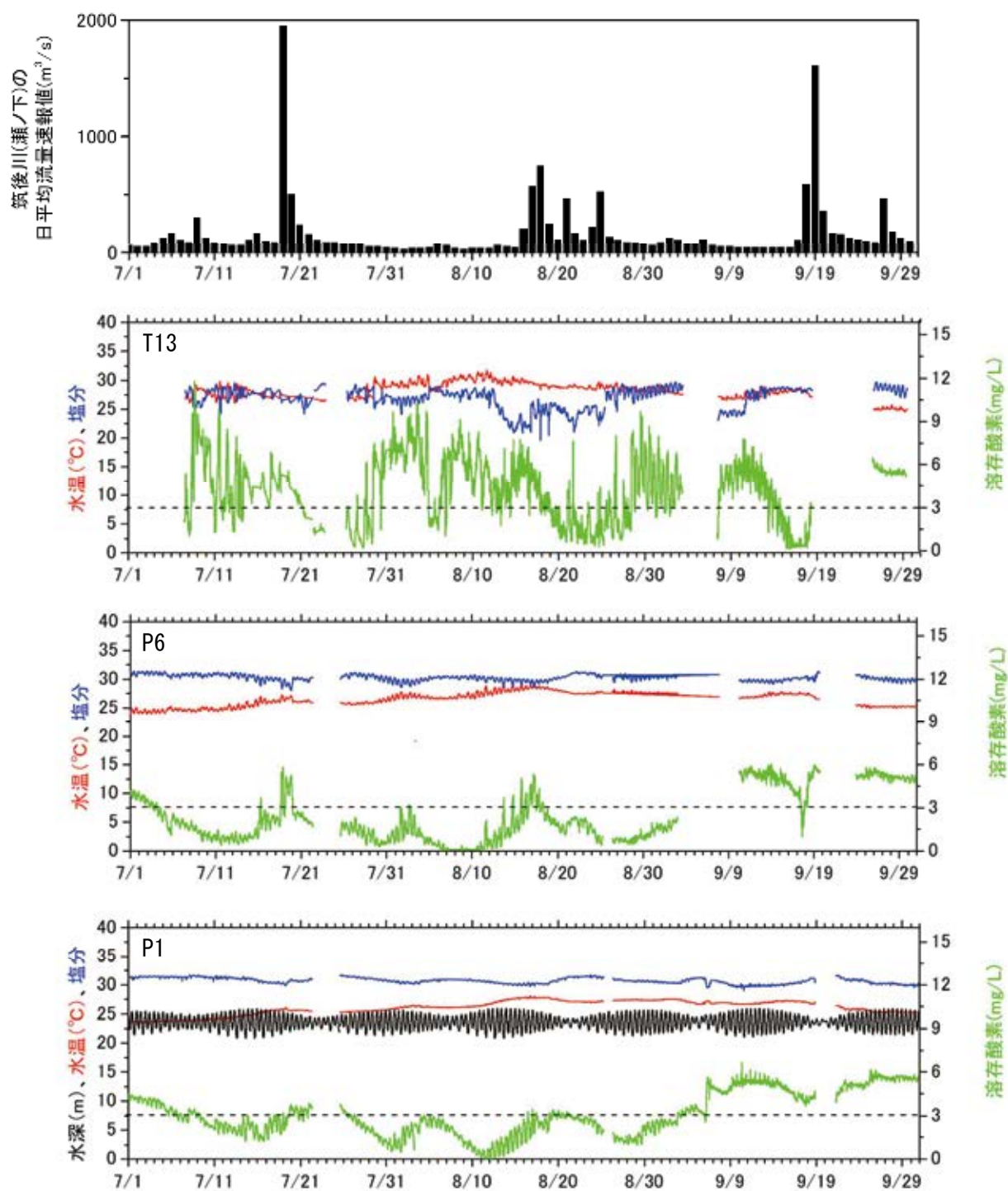


図 1-1-2. 筑後川(瀬ノ下)の日平均流量、T13、P6 及び P1 の底層水温(海底面から 0.2m)、塩分、溶存酸素、水深の時間変化

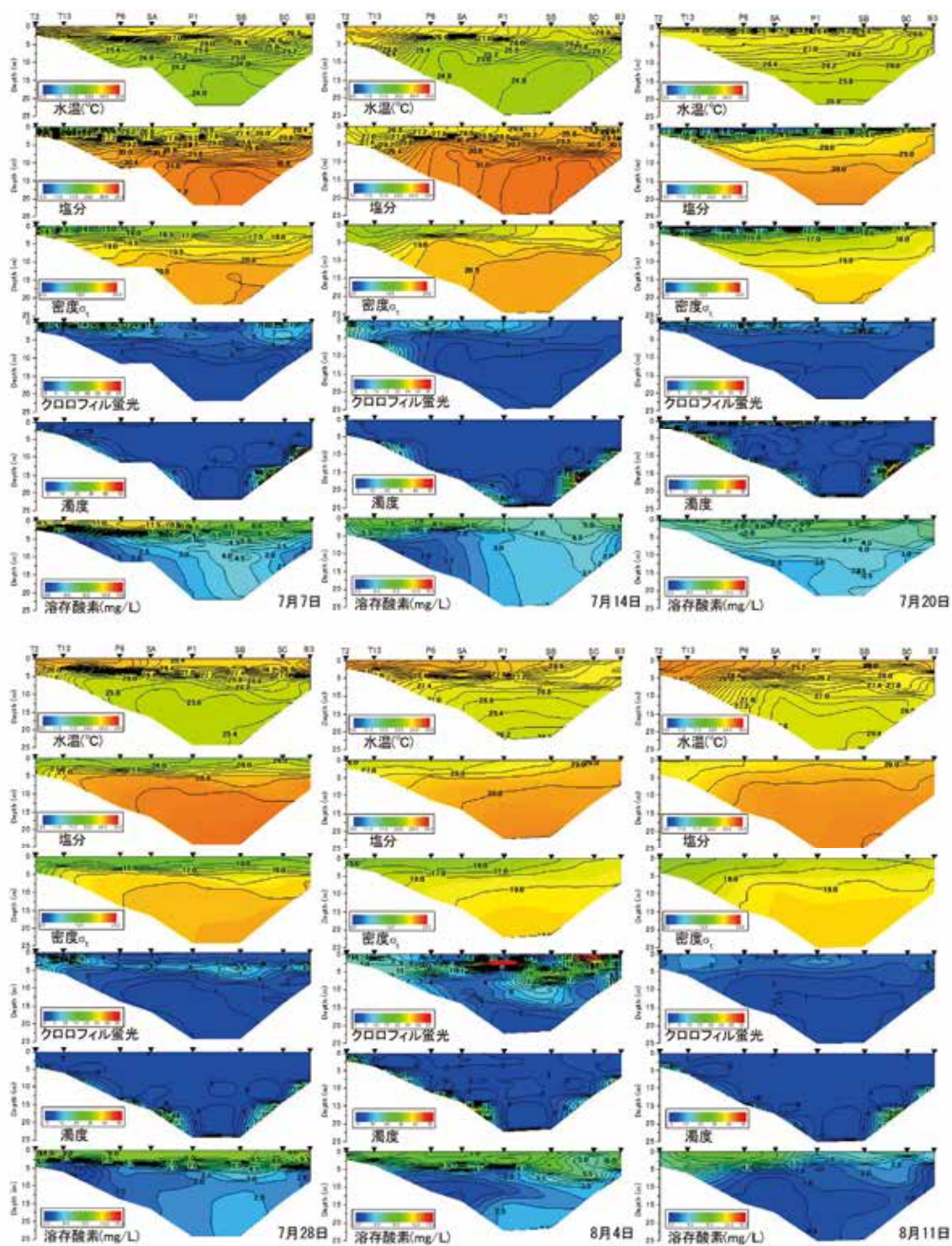


図 1-1-3. 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 (σ_t)、クロロフィル a、濁度、溶存酸素の時間変化

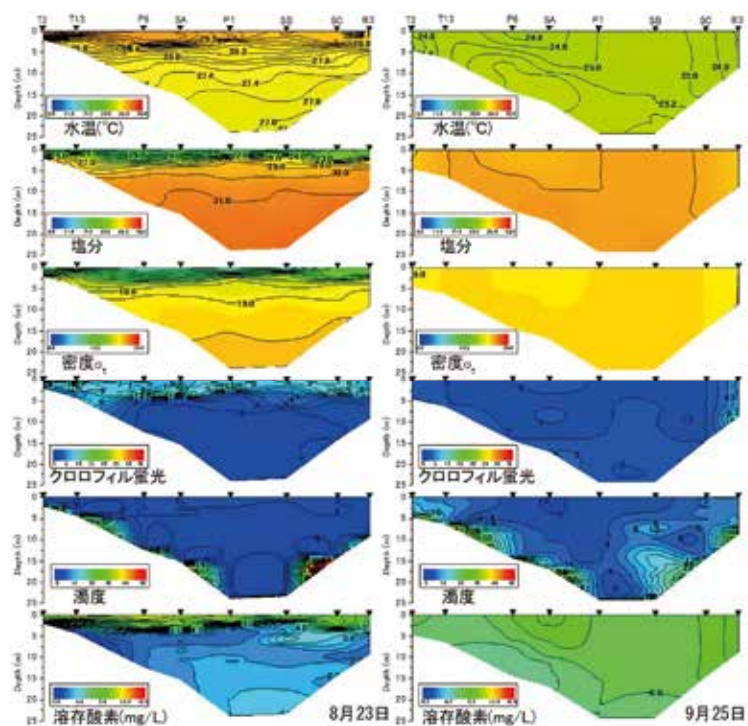


図 1-1-3 (続き). 観測定線 (T2~B3) における水温、塩分、密度 (σ_t)、クロロフィル a、濁度、溶存酸素の時間変化

表 1-1-2. 有明海奥部西側海域における貧酸素化の予察結果

予察日	予察文	結果	判定
7月11日	T2、T13(干潟縁辺域)では次の大潮期には鉛直混合が大きくなり、底層フロントは見かけ上沖へ移動するため、底層は貧酸素状態から回復すると思われます。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平移流による酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態は継続する可能性があります。	T2(干潟縁辺域)は強い潮流により、密度成層はほとんど形成されておらず、底層溶存酸素は高い値を示しました。 P6～P1(沖合域)は密度成層が形成しており、底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): ○ 沖合域(P6): ○
7月19日	T2、T13(干潟縁辺域)では次の小潮期には鉛直混合が小さくなり、底層フロントは見かけ上岸へ移動するため、底層は貧酸素化すると思われますが、7/18からまとまった降雨があるため、河川流量が大きくなれば、底層まで低塩分になり、貧酸素化しない可能性もあります。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平移流による酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態は継続する可能性があります。	T2、T13(干潟縁辺域)は淡水流入により、密度成層形成されたものの、18日の強風の影響により底層溶存酸素は高い値を示しました。 P6～P1(沖合域)は密度成層が形成されており、底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): ○ 沖合域(P6): ○
7月21日	T2、T13(干潟縁辺域)では、次の大潮期には鉛直混合が大きくなることや、淡水流入の影響が底層にまで及ぶと思われるため、底層溶存酸素は高い値を示すことが予想されます。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平方向の酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態が継続する可能性があります。	T2(干潟縁辺域)は鉛直混合により密度成層は解消しました。底層フロントはT13周辺にあることが推察され、それより沖側で貧酸素水塊が形成されました。 P6～P1(沖合域)は密度成層が形成されており、底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): × 沖合域(P6): ○
7月29日	T2、T13(干潟縁辺域)では、台風5号の影響が小さい場合、次の小潮期には鉛直混合が小さくなり、底層フロントが岸側へ見かけ上移動するため、貧酸素化することが予想されます。 P6(沖合域)では台風5号による時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平方向の酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態が継続する可能性があります。	T2、T13(干潟縁辺域)は非常に弱い密度成層が形成されました。底層フロントはT2～T13にあることが推察され、それより沖側で貧酸素水塊が形成されました。 P6～P1(沖合域)も弱い密度成層が形成されており、底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): ○ 沖合域(P6): ○
8月8日	T2～T13(干潟縁辺域)では、次の大潮期には鉛直混合が大きくなり、底層フロントが沖側へ見かけ上移動するため、底層溶存酸素濃度は高いことが予想されます。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平方向の酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態が継続する可能性があります。	T2、T13(干潟縁辺域)は密度成層が解消しました。底層フロントはT13～P6にあることが推察され、それより沖側で貧酸素水塊が形成されていました。 P6～P1(沖合域)は弱い密度成層が形成されており、底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): × 沖合域(P6): ○
8月12日	T2～T13(干潟縁辺域)では、次の小潮期には鉛直混合が小さくなり、底層フロントが岸側へ見かけ上移動するため、底層溶存酸素濃度は低くなることが予想されます。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平方向の酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態が継続する可能性があります。	T2、T13(干潟縁辺域)は密度成層が形成されています。底層フロントはT2より岸側にあることが推察され、底層フロントより沖側で貧酸素水塊が形成されていました。 P6～P1(沖合域)も密度成層が形成されており、P6底層は貧酸素状態(飽和度40%未満)でした。	干潟縁辺域(T13): ○ 沖合域(P6): ○
8月25日	T2～T13(干潟縁辺域)では、次の大潮期には鉛直混合が大きくなり、底層フロントが沖側へ見かけ上移動するため、底層溶存酸素は高くなることが予想されます。 P6(沖合域)では時化による鉛直方向の酸素供給や、さらに沖合からの水平方向の酸素供給が不十分であれば、貧酸素状態が継続する可能性があります。	干潟縁辺域(T2～T13)では等密度線で立っており、鉛直混合により密度成層強度は小さく、底層溶存酸素は高い値でした。 沖合域(P6～P1)は弱い密度成層が形成されていましたが底層溶存酸素濃度は高い値を示していました。	干潟縁辺域(T13): ○ 沖合域(P6): ×

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

有明海奥部西部海域での貧酸素水塊は、物理的要因（密度成層の形成等）及び化学・生物的要因（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）。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、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。

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 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。ただし 2022 年度はデータ取得率が 82.9%であったため、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 3mg/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 3mg/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 3mg/L 未満の累積時間は大きくなることが示唆される。本課題の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 3mg/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、2022 年度はデータ取得率が 82.9%であったため、解析からは除外した。

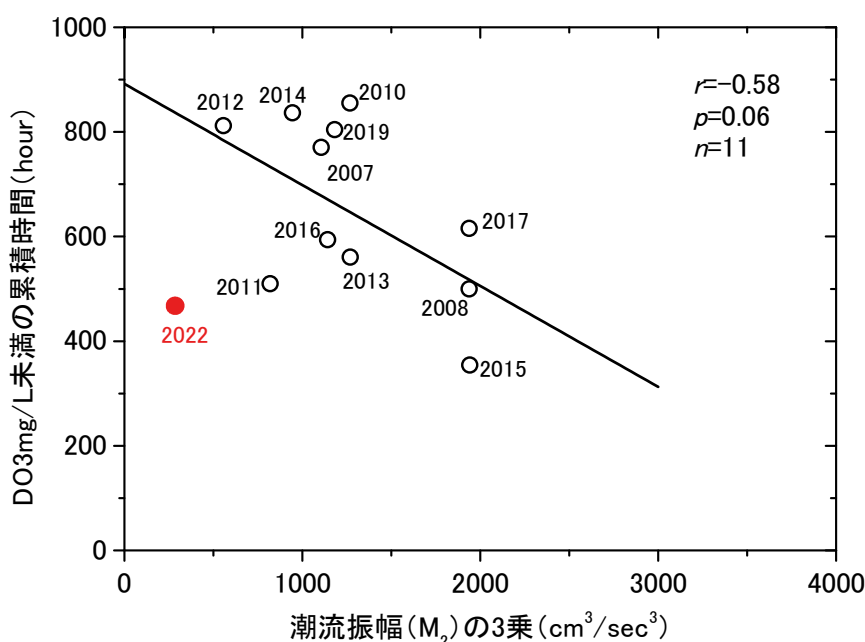


図 1-1-4. 干潟縁辺域(T13)における底層潮流振幅の3乗と7月～9月における $\text{DO}3\text{mg/L}$ 未満の累積時間との関係

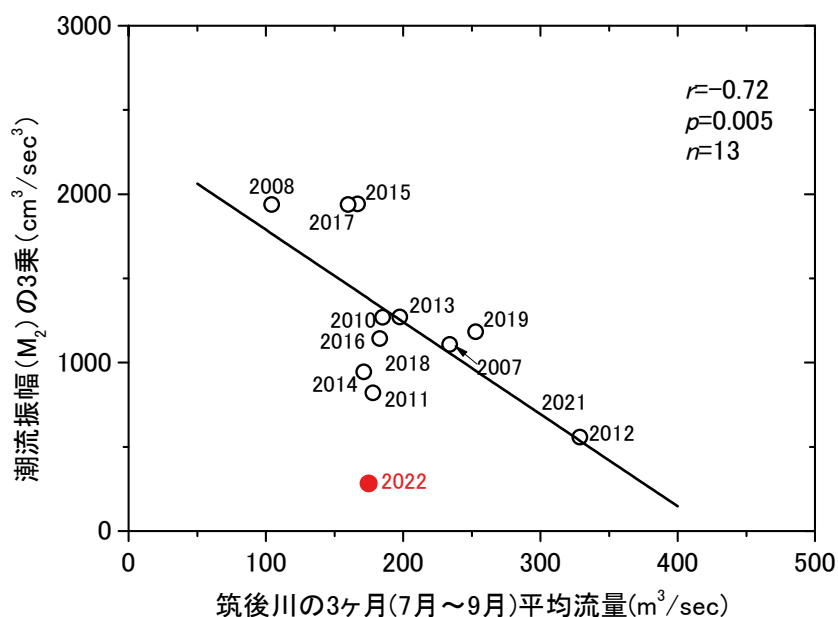


図 1-1-5. 筑後川における平均流量と干潟縁辺域(T13)における底層潮流振幅の3乗との関係

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

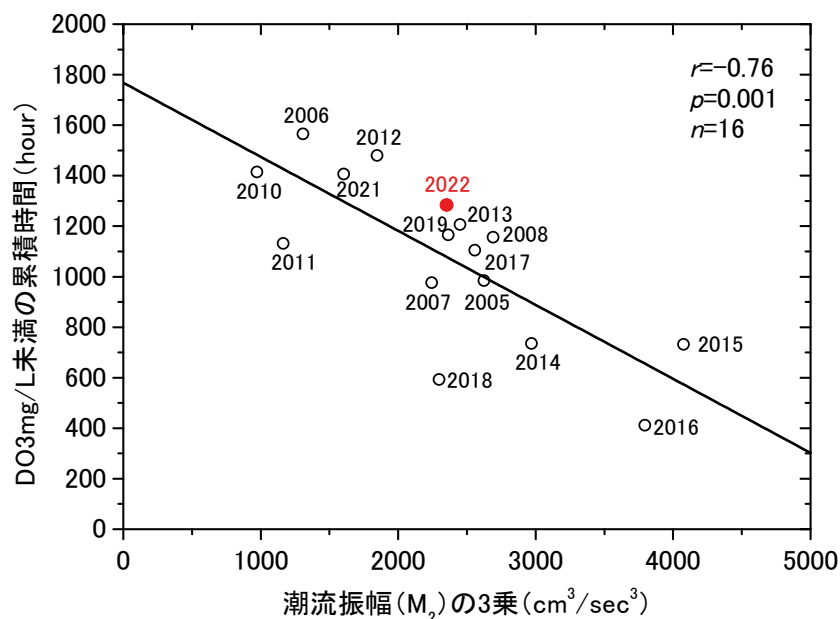


図 1-1-6. 沖合域(P6) における底層潮流振幅の 3 乗と 7 月～9 月における DO3mg/L 未満の累積時間

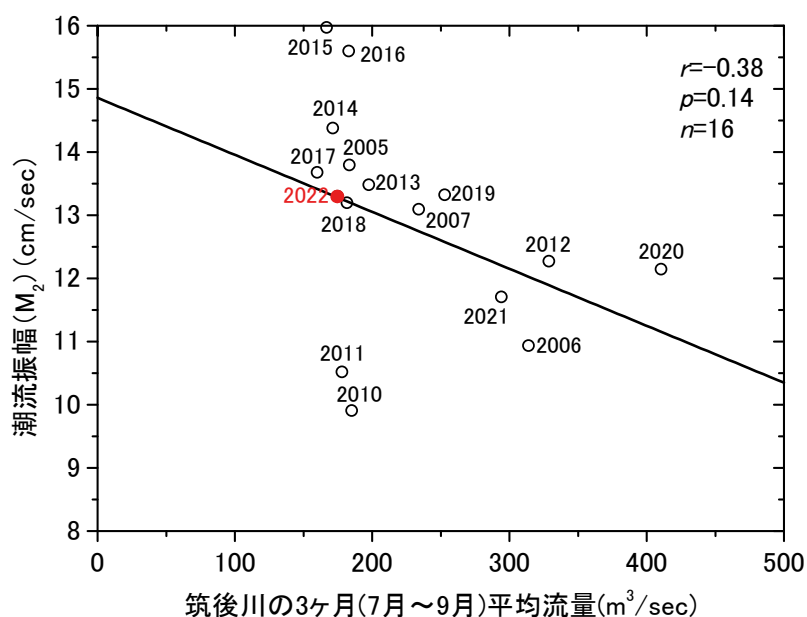


図 1-1-7. 筑後川の平均流量と沖合域(P6)における底層潮流振幅の 3 乗との関係

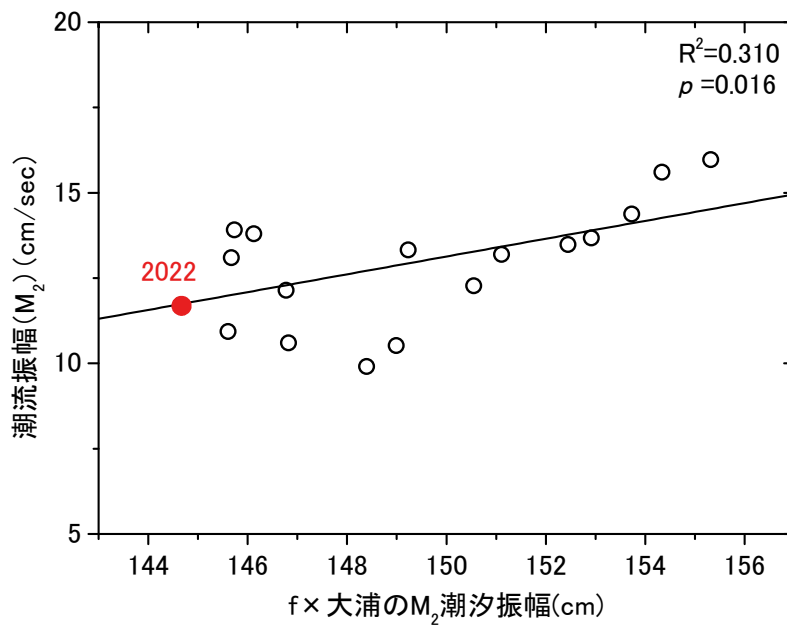


図 1-1-8. 潮汐振幅(大浦)と底層潮流振幅(P6)の経年変化

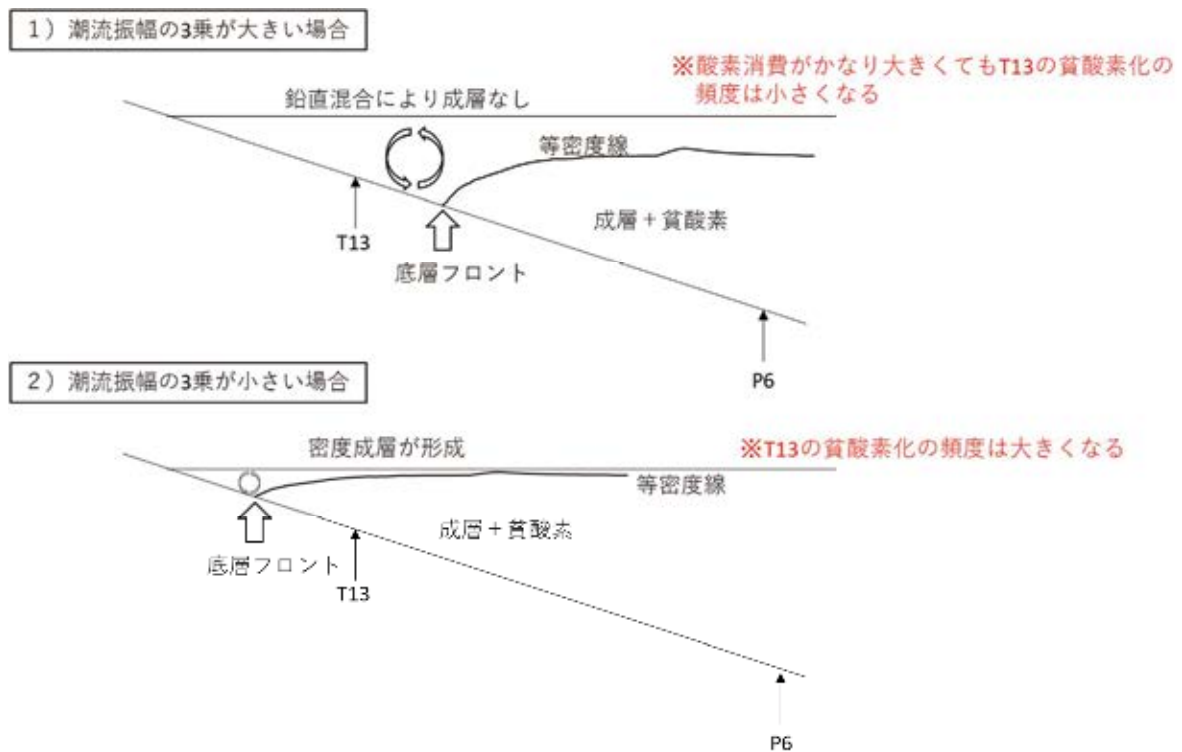


図 1-1-9. 底層フロントと密度成層・貧酸素との関係

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の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。

予察技術を高度化するために、沖合域 P6 の DO 低下速度について見積もった。DO 低下速度は、密度界面を通した DO 供給の影響も含まれており、見かけ上の酸素消費速度を表す。各年の底層 DO 濃度の変動を用いて、直線回帰している期間を特定した。なお、解析は 2005 年から 2022 年とした。数時間スケールの変動は無視し、酸素消費速度の鉛直分布は一樣と仮定した。次に同一水塊を仮定するために、直線回帰の期間中の塩分変動が 1 以内の期間を抽出した。さらに、算出した DO 低下速度の経年変動を元に、貧酸素化時間スケールを見積もった。Fennel and Testa (2018)は初期 DO 濃度と DO 低下速度を用いて貧酸素化時間スケール T を以下の式で定義した。

$$T \text{ (day)} = \frac{\text{初期DO濃度 (mg/L)}}{\text{DO低下速度 (mg/L/day)}} \quad (1)$$

式(1)では貧酸素状態になるまでの時間スケールは算出されないため、本課題では水温 25℃、塩分 30、DO 飽和度 100%の DO 濃度 6.95 mg/L を初期 DO とし、3.0 mg/L に低下するまでの時間を以下の式で算出した。

$$T \text{ (day)} = \frac{\text{初期DO濃度 (mg/L)} - 3.0 \text{ (mg/L)}}{\text{DO低下速度 (mg/L/day)}} \quad (2)$$

算出された DO 低下速度の経年変動を図 1-1-10 に示す。DO 低下速度は、単調な増加・減少傾向は示さず、0.15～0.93 mg/L/day（平均 0.52 mg/L/day）の値を示した。これらの値は、現場実験の酸素消費速度と同定度の値だった（児玉ら 2009、徳永ら 2016）。この DO 低下速度は今後の予察の高度化に役に立つ可能性があるものの、初期 DO 濃度と DO 低下速度の間には相関関係が見られないので今後は酸素消費の内容を詳細に調べる必要がある。貧酸素化時間スケールの平均値は 9.4day であった（図 1-1-11）。この値は、大潮から次ぎの大潮の日数よりも短く、密度成層が強く、潮汐・潮流等による鉛直混合が貧酸素化時間スケール（＝9.4day）以上にわたって密度成層を破壊できない場合には、貧酸素水塊が形成してしまうことを意味している。ただし、今回の今回の解析では、初期 DO 濃度を飽和 DO 濃度としており、現場では初期 DO は変動する。したがって算出された貧酸素化時間スケールよりも小さいスケールで貧酸素状態になることに注意が必要である。

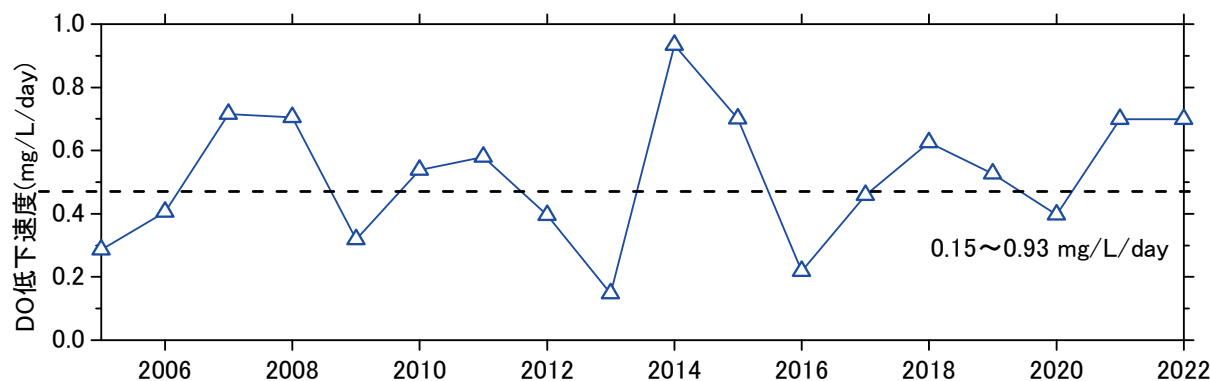


図 1-1-10. DO 低下速度の経年変動

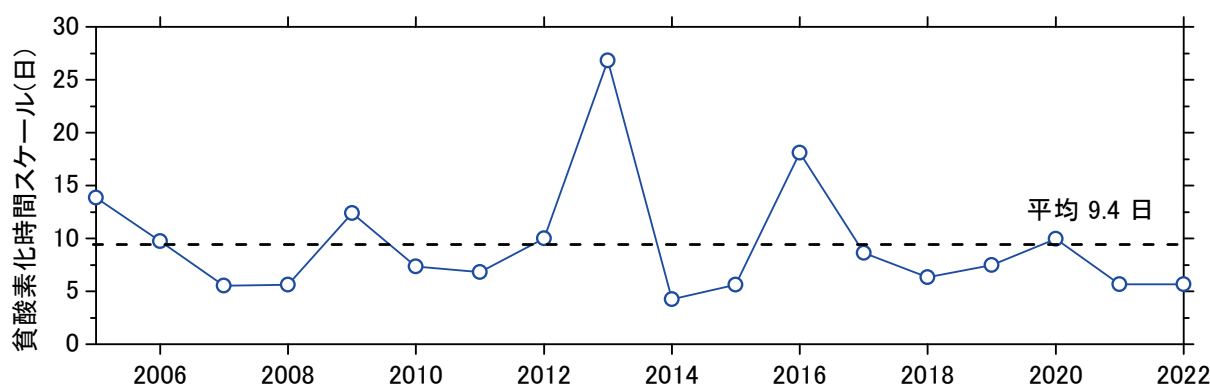


図 1-1-11. 貧酸素化時間スケールの経年変動

3. 5年間のまとめ

これまで貧酸素水塊の経年変動要因は、物理的要因として密度成層強度で説明されてきたが、これは、浮力のみに着目しており (Boicourt 1992、Murphy et al. 2011、Stanley and Nixon 1992)、混合力の変動、特に潮流については考慮されてこなかった。5年間の貧酸素モニタリングと過去のデータを用いた物理的な要因の視点から解析を行い、潮流振幅と貧酸素水塊との関係を明らかにした。また、潮流振幅の経年変動要因については、干潟縁辺域では河川からの淡水流入、沖合域では、潮汐振幅との関係が明らかになった。この結果は、学術的価値のみならず、貧酸素水塊の予察に役に立つ知見だと思われる。ただし、貧酸素水塊の経年変動要因は、物理的な要因のみならず、生物・化学的要因も影響するため、今後、物理的要因の解析を行いつつ、生物・化学的要因のモニタリング、特に酸素消費を引き起こす要因の寄与をモニタリングすることが必要だと思われる。

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.
- Fennel K, Testa JM.: Biogeochemical Controls on Coastal Hypoxia. *Ann Rev Mar Sci.*, Vol. 11, pp. 105-130, 2019.
- 児玉真史, 徳永貴久, 木元克則, 柴原芳一 : 夏季の有明海奥部における基礎生産速度と有機懸濁物質の分解特性, 土木学会論文集, Vol. B2-65, No.1, pp. 1006-1010, 2009.
- 徳永貴久, 速水祐一, 木元克則 : 有明海奥部の 2 定点における底層水の生物学的 3 s の消費と化学的酸素消費, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No.1, pp. 12-21, 2016.
- Boicourt, W.C.: Influences of circulation processes on dissolved oxygen in the Chesapeake Bay. In *Oxygen dynamics in the Chesapeake Bay: A synthesis of recent research*, ed. D.E. Smith et al., 7–59. College Park: Maryland Sea Grant Publication, 1992.
- Stanley D. and Nixon S. W.: Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico River estuary, *Estuaries*, Vol. 15, pp. 270-281, 1992.

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 に示す観測定点における定点 T2、T13、P6、P1 および B3 において、2022 年 7 月 7 日から 8 月 23 日にかけての週 1 回と 9 月 25 日に、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、観測翌日に生海水 0.01~0.5 mL 中の植物プランクトン細胞数を生物顕微鏡で検鏡することで行った。また、2018~2022 年度にかけて各定点で観測された *Chattonella* 属、珪藻類および渦鞭毛藻類の 7 月上旬~9 月下旬までの各旬で確認された最高細胞密度を比較することで、各種プランクトンの出現の傾向を調べた。

(2) 結果および考察

2022 年度に観測された各定点における *Chattonella* 属の細胞密度の推移を図 1-1-12 に示す。*Chattonella* 属は、7 月上旬と 8 月上旬の 2 回にわたってブルームを形成した。それぞれのブルームにおける最高細胞密度は、最初のブルームが P6 で確認された 1,240 cells/mL、2 回目のブルームが T13 で確認された 458 cells/mL といずれも高密度であった。ブルームを形成した後の減少要因は、最初のブルームについては、7 月 20 日に表層塩分が全域で急激に低下しており(図 1-1-3)、低塩分水塊が表層に移流したことで減少したと推測される。2 回目のブルームについては、後述する珪藻類が広範囲で増加していたことから、競合種が増加したことで減少したものと考えられる。

各定点における珪藻類の細胞密度の推移を図 1-1-13 に示す。珪藻類は、2~6,324 cells/mL の範囲で確認された。細胞密度は、ほとんどの観測において概ね 1,000 cells/mL 以下であったが、8 月 4 日の T2、8 月 23 日の T13、P1 および P6、9 月 25 日の B3 では 3,238~6,324 cells/mL と比較的高密度であった。この比較的高密度で確認された観測における優占種はいずれも *Skeletonema* 属であった(データ未記載)。

各定点における渦鞭毛藻類の細胞密度の推移を図 1-1-14 に示す。渦鞭毛藻類は、0~558 cells/mL の範囲で確認された。細胞密度はほとんどの観測で概ね 100 cells/mL 以下であったが、7 月 7 日の P6、7 月 14 日の T2、T13 および P6、7 月 20 日の T13、8 月 4 日の P1、8 月 11 日の P6 では、146~558 cells/mL と比較的高密度であった。この比較的高密度で確認された観測における優占種は、7 月 7 日の P6 で *Gyrodinium* 属、7 月 14 日の T2、T13 および 7 月 20 日の T13 で *Heterocapsa* 属、7 月 14 日の P6 で *Cochlodinium* 属、8 月 4 日の P1 で *Ceratium furca*、8 月 11 日の P6 で *Gymnodinium* 属であった(データ未記載)。

2018~2022 年度にかけて各定点で観測された *Chattonella* 属、珪藻類および渦鞭毛藻類の 7 月上旬~9 月下旬までの各旬で確認された最高細胞密度をそれぞれ図 1-1-15、1-1-16 および 1-1-17 に示す。*Chattonella* 属は 2018、2021 および 2022 年度の 7 月上旬から 8 月中旬までの期間に 100 cells/mL を超える高密度での出現が確認された。この高密度での出現が確認された定点は、2018 および 2021 年度では全ての定点であった一方で、2022 年度では P6 より湾奥側の定点のみであったことから、*Chattonella* 属が全域で高密度化する場合と湾奥側のみで高密度化する場合があることが示された。

珪藻類は、全ての定点で 7 月上旬から 9 月下旬までのいずれかの時期に 5,000 cells/mL を超える高密度での出現が確認された。この高密度での出現は、2018 および 2019 年度では

T2 および T13 で確認されることが多かった一方で、2020 年度では P6 および P1 で、2021 および 2022 年度では P1 および B3 で確認されることが多かった。

渦鞭毛藻類は、全ての定点で7月上旬から9月下旬までのいずれかの時期に 100 cells/mL を超える細胞密度が確認された。その頻度としては、T2、T13 および P6 で多く、B3 で少ない傾向であった。

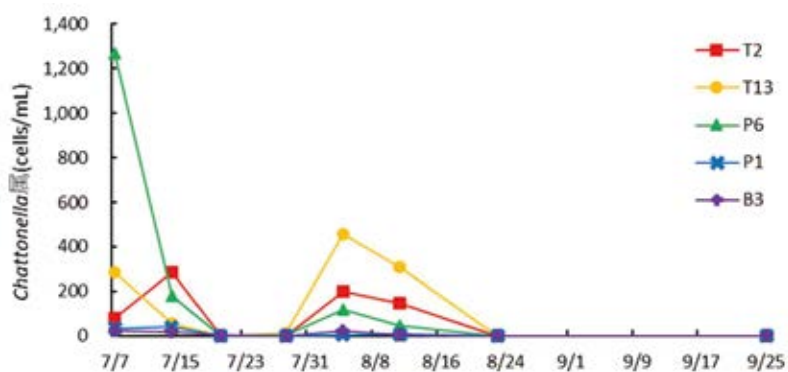


図 1-1-12. 各定点における *Chattonella* 属の細胞密度の推移

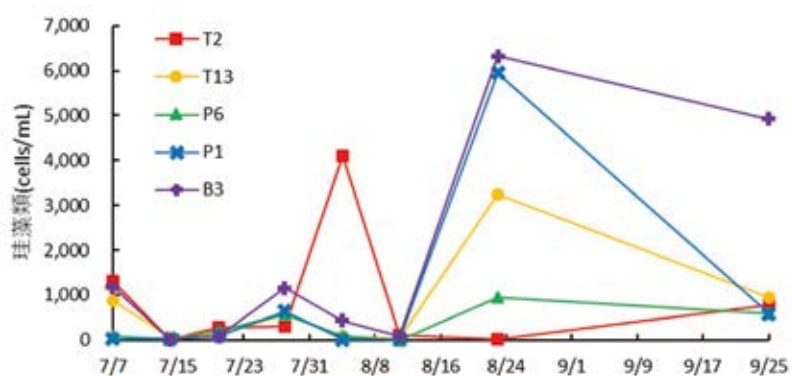


図 1-1-13. 各定点における珪藻類の細胞密度の推移

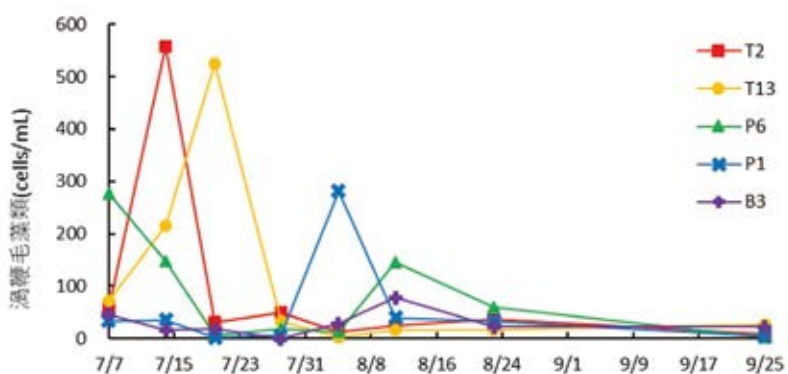


図 1-1-14. 各定点における渦鞭毛藻類の細胞密度の推移

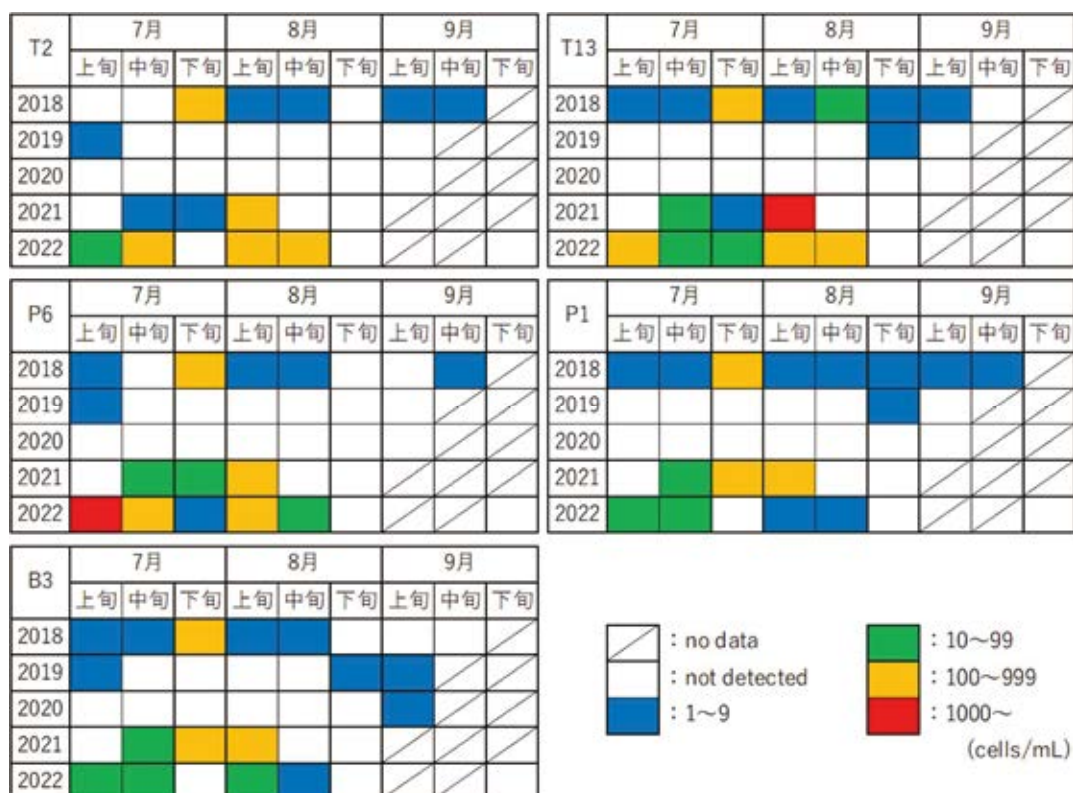


図 1-1-15. 2018~2022 年度の各定点における *Chattonella* 属の旬別出現状況

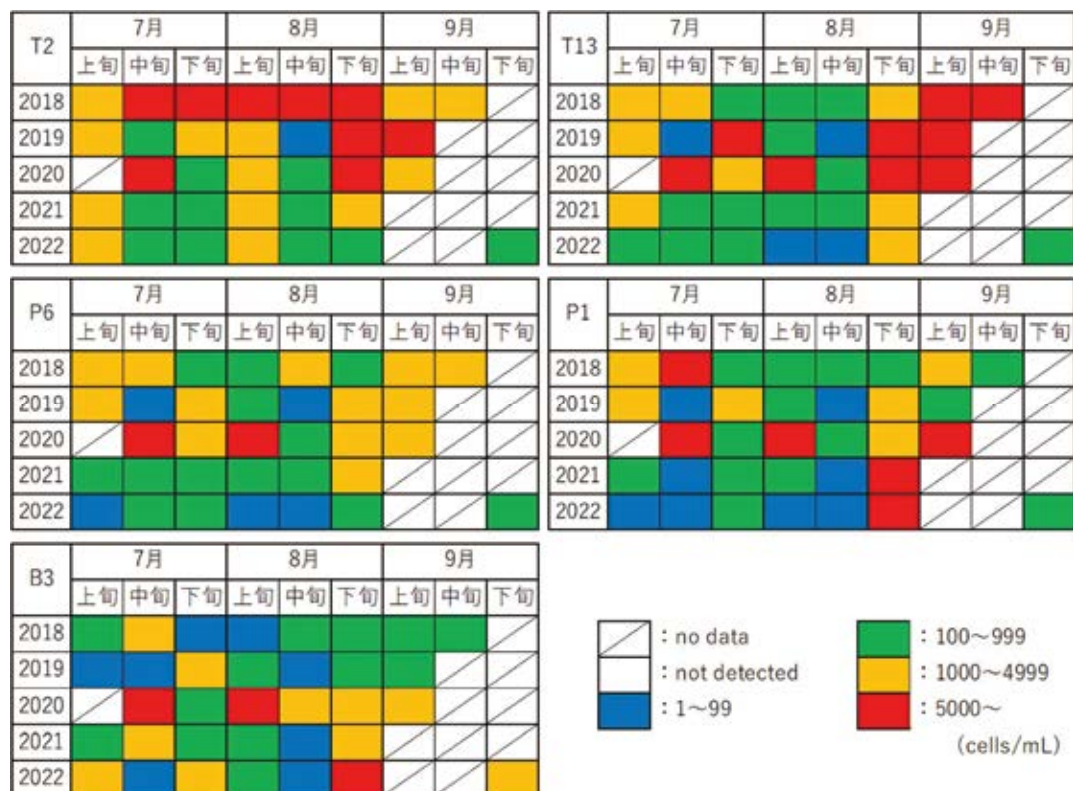


図 1-1-16. 2018~2022 年度の各定点における珪藻類の旬別出現状況

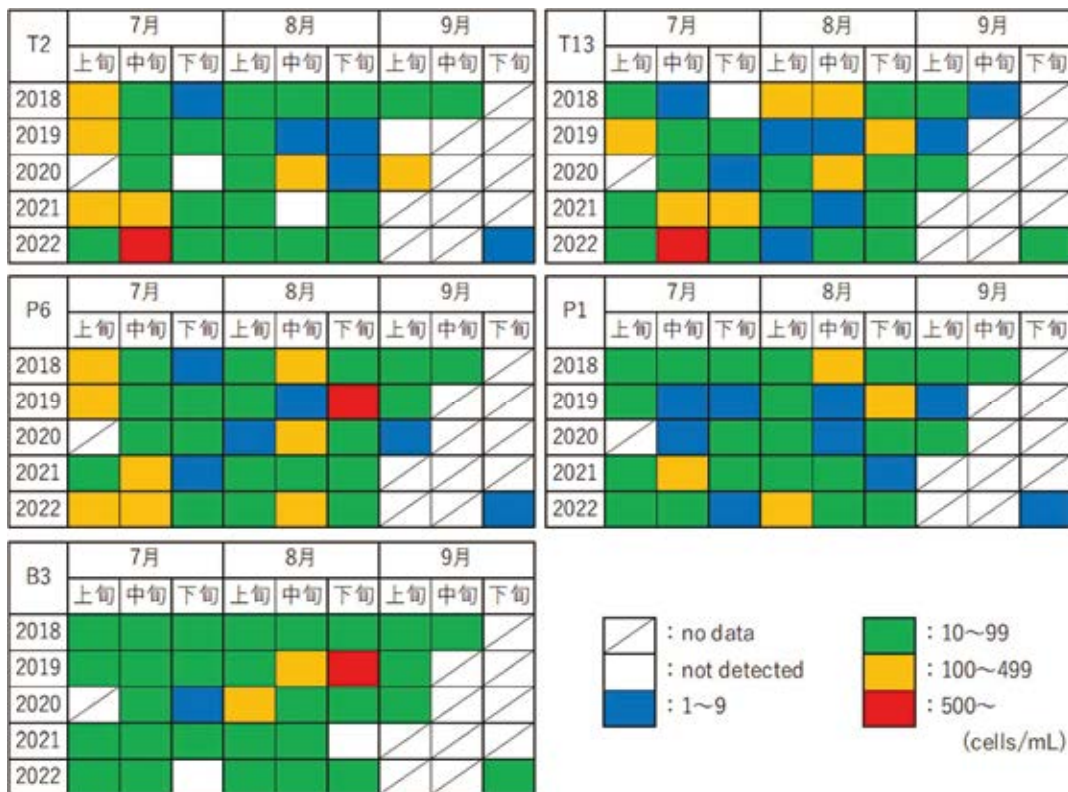


図 1-1-17. 2018～2022 年度の各定点における渦鞭毛藻類の旬別出現状況

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、2 m 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) 溶存態無機窒素

調査期間における溶存態無機窒素濃度（以下、DIN と記す。）の推移を図 1-1-18 に示す。T2 の全層、T13 の 0、B-1 層、P6 の 0、2 m 層、P1 の 0、2 m 層はほぼ同じ挙動を示した。これらは 7/7 にはほとんどの点で $2\text{ }\mu\text{M}$ 以上の値を示したが、7/14 には全ての点で $2\text{ }\mu\text{M}$ 未満の低い値を示し、7/20 には全ての点で急増して $27\text{ }\mu\text{M}$ 以上の高い値を示したものの、7/28～8/11 にはほとんどの点で $2\text{ }\mu\text{M}$ 未満の低い値で推移した。その後ほとんどの点では 8/23 に微増、9/25 には更に増加した。T13 の 2 m 層もこれらとほぼ同じ挙動であったが、7/20 の急増と 8/23 の微増が見られず、7/14～8/23 の間 $2\text{ }\mu\text{M}$ 未満の低い値で推移した。B3 の 0、2 m 層も、7/14 と 7/28～8/11 に栄養塩が低い値を示したことは共通しているが、7/20 の増加の幅は以上の層に対し小さく、8/23 に増加が見られた。

P6 の B-1 m 層、P1 の B-1 m 層、B3 の B-1 m 層は異なる挙動を示した。これらの層はほぼ同じ挙動を示し、7/7～7/28 に横ばいから微増で推移したが、8/4 に減少し 0 台の低い値を示した。その後 9/25 にかけて再び横ばいから微増で推移した。

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 1-1-19 に示す。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、 $0.0\sim 4.7\text{ }\mu\text{M}$ の範囲で概ね DIN と同調して増減した。

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 1-1-20 に示す。

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ は期間を通して概ね $40\sim 60\text{ }\mu\text{M}$ の範囲で推移したが、7/20 の T2 の 0、B-1 m 層、T13 の 0、B-1 m 層、P6 の 0、2 m 層、8/23 の T2 の 0、B-1 m 層、T13 の 0、2 m 層では、 $80\text{ }\mu\text{M}$ 以上の高い値を示した。

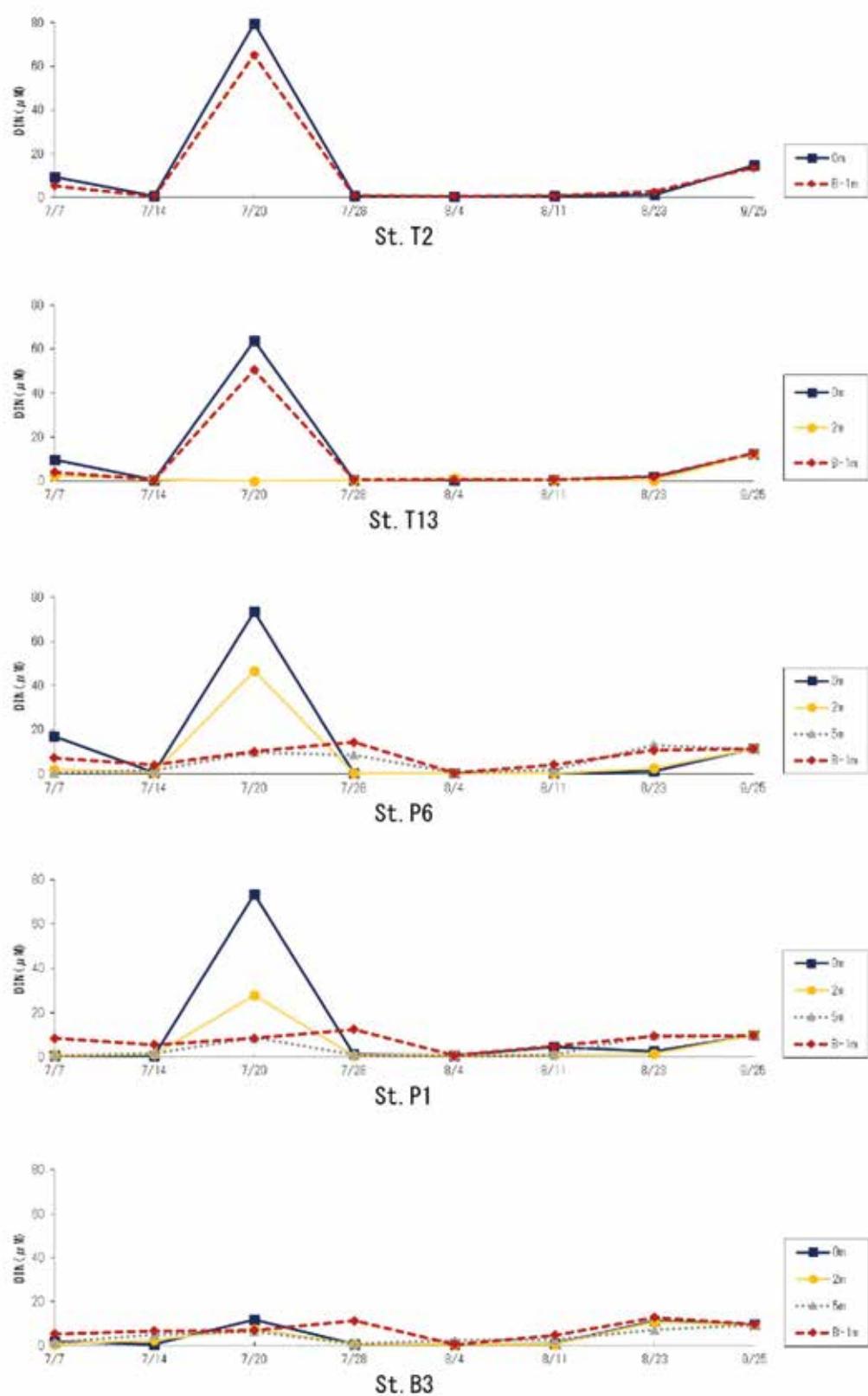


図 1-1-18. 有明海奥部西側海域における溶存態無機窒素の経時変化

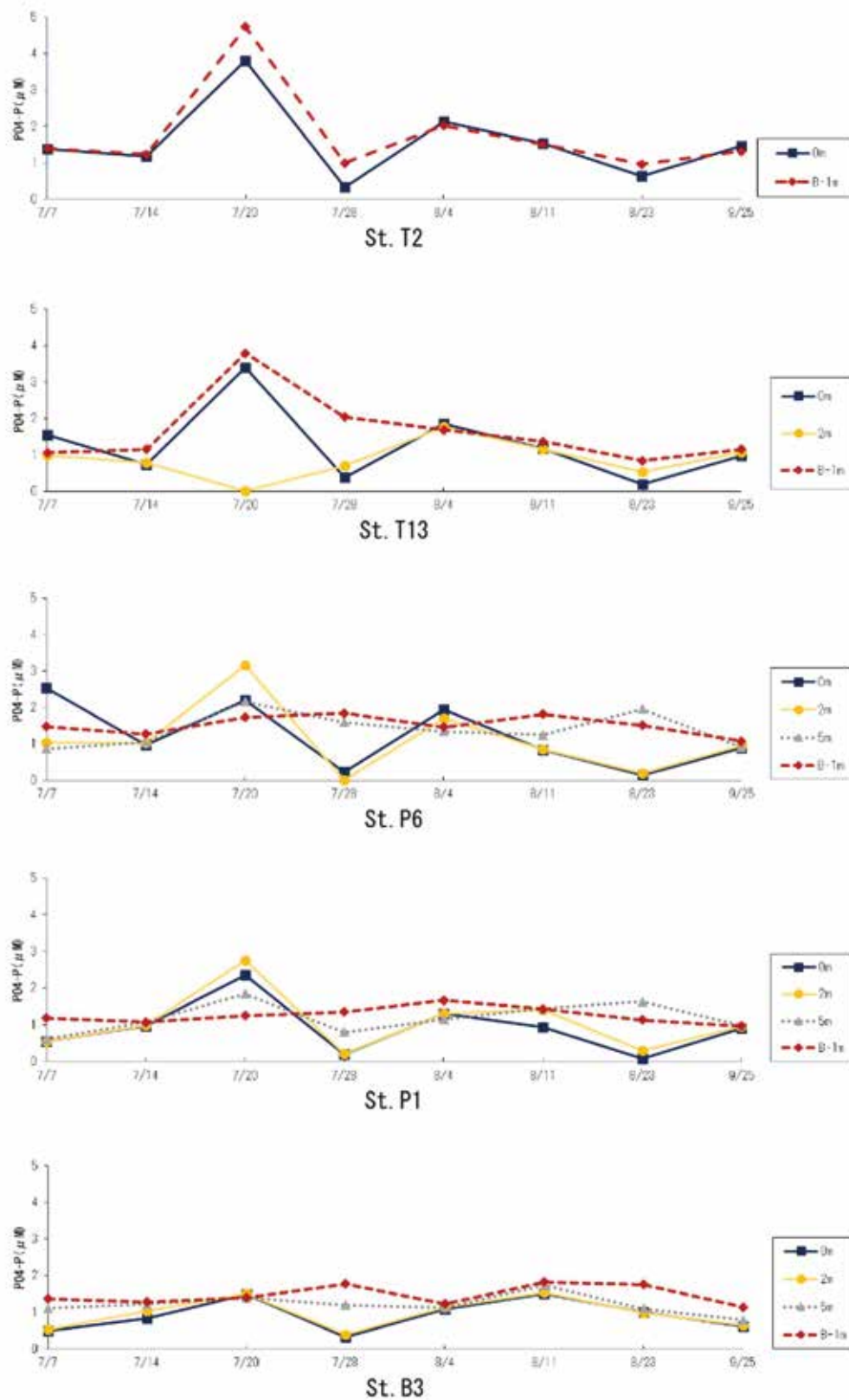


図 1-1-19. 有明海奥部西側海域におけるリン酸態リンの経時変化

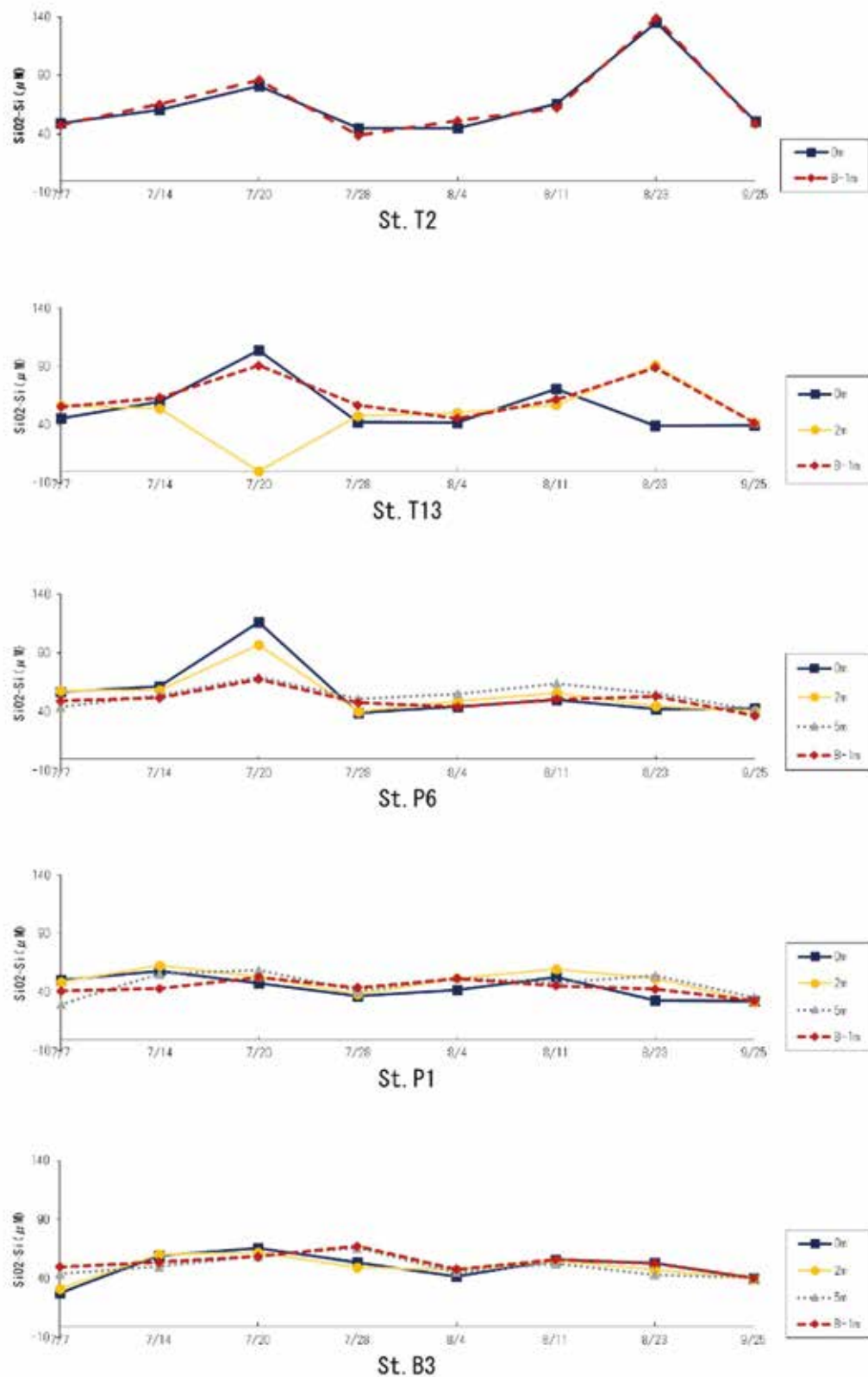


図 1-1-20. 有明海奥部西側海域におけるケイ酸態ケイ素の経時変化

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

②有明海熊本県海域

熊本県水産研究センター 浅海干潟研究部

上原 美咲・向井 宏比古・安藤 典幸

1. 全体計画

(1) 目的

有明海熊本県海域において、その環境特性を把握し、閉鎖性海域における貧酸素水塊等による漁業被害の軽減に必要な知見を得る。

2. 令和4年度計画及び結果

(1) 目的

全体計画に同じ

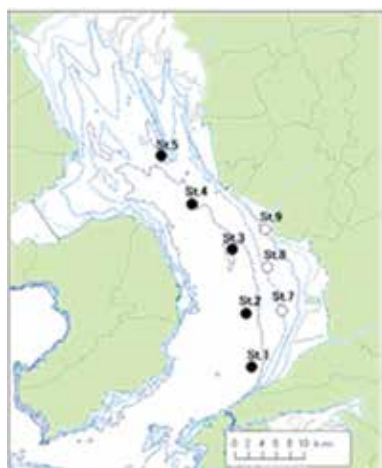
(2) 試験等の方法

図 1-1-21 に示す有明海熊本県海域の 8 測点において令和 4 年 7 月から 9 月の間に隔週の間隔で定期観測を実施した。

調査地点：宇土市網田沖から荒尾市沖（沖合点）5 点、熊本港地先から玉名市岱明町地先（沿岸点）3 点

調査頻度：隔週（7 月から 9 月 計 6 回）

調査項目：多項目水質計（JFE アドバンテック社製 AAQ176 型）を用いて、表層から底層までの水温・塩分・クロロフィル蛍光値・濁度・溶存酸素等の鉛直観測を行った。また、原則として表層・中層・底層から栄養塩（溶存態無機窒素・溶存態無機リン・溶存態ケイ素）・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行った。また、解析には調査をとおして取得したデータ及び気象庁が公開しているアメダスデータ（熊本市）、国土交通省が公開している河川の水位データを使用した。



調査点	北緯	東経
1	32 度 40.802 分	130 度 29.360 分
2	32 度 45.002 分	130 度 28.860 分
3	32 度 49.974 分	130 度 27.670 分
4	32 度 53.492 分	130 度 23.950 分
5	32 度 57.300 分	130 度 21.161 分
7	32 度 45.202 分	130 度 32.160 分
8	32 度 48.601 分	130 度 30.860 分
9	32 度 51.503 分	130 度 30.668 分

図 1-1-21. 調査地点図