

平成31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2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. 平成31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利活用の促進	43
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. 橘湾における貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	55
イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発	73
III. 検討会の開催	103

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
2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発 ア. 橘湾におけ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) 事業検討会の開催など	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. 橘湾におけ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. 平成31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 有明海奥部海域

水産研究・教育機構 西海区水産研究所

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

内藤 剛、石津まりの、藤井直幹

佐賀県有明水産振興センター

太田洋志、吉武愛子、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. 平成31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、令和元年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。

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



図 1-1-1. 有明海奥部西側海域の観測点、観測線の配置

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：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、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、懸濁態有機炭素、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. 有明海奥部西側海域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 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）有明海奥部西側海域における貧酸素水塊の消長

7月20日までの筑後川からの淡水流入は小さく、日平均流量は400 m³/s 未満だった（図1-1-2）。しかしながら、大雨の影響により7月21日の筑後川（瀬の下）流量は1,700 m³/s を越えた。その後は徐々に低下し、7月28日以降は100 m³/s 未満だった。8月中旬までの筑後川からの淡水流入は小さく、日平均流量は400 m³/s 未満だった（図1-1-2）。しかしながら、8月下旬の大雨の影響により8月28日の筑後川（瀬の下）流量は3,000 m³/s を越えた。その後は徐々に低下し、8月31日は400 m³/s 未満だった。9月上旬以降の筑後川からの淡水流入は小さく、日平均流量は300 m³/s 未満だった（図1-1-2）。

沖神瀬西の風速は、7月下旬の大雨時に一時的に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（図1-1-2）。沖神瀬西の風速は、8月上旬と中旬に一時的に10 m/s を越えたが、それ以外は10 m/s を越える強い風はほとんど吹かなかった（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、潮汐に伴う増減は見られるものの、7月1日から基本的に低下傾向にあり、7月21日の大量の淡水流入後、22日に貧酸素状態（溶存酸素飽和度40%未満）になった（図1-1-2）。また、25日以降は溶存酸素飽和度10%を下回った。8月上旬は時間変動が大きいものの、貧酸素状態

だった（図 1-1-2）。その後、大潮期に上昇し小潮期に低下する傾向を繰り返した。また、小潮期には溶存酸素飽和度が 10%を下回った。9 月上旬は 8 月下旬の大雨の影響により間欠的に貧酸素状態が観測された（図 1-1-2）。その後、9 月 11 日からは徐々に底層の溶存酸素濃度は上昇した。

沖合域の観測点 P6（沖神瀬西）の底層の溶存酸素は、7 月 1 日以降低下傾向にあり（図 1-1-2）、7 月 13 日から貧酸素状態が継続して観測された。7 月 20 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、再び減少に転じ、7 月 30 日には 10%を下回った。8 月上旬は貧酸素状態だった（図 1-1-2）。8 月 6 日の時化によって貧酸素状態は一時的に解消したが、溶存酸素飽和度は減少に転じ、8 月 8 日には再び貧酸素状態になった。8 月 15 日の強風により貧酸素状態は解消されたが、その後再び減少に転じ、8 月 23 日以降、貧酸素状態で推移した。9 月上旬は貧酸素状態だった（図 1-1-2）。9 月中旬には徐々に底層の溶存酸素濃度は上昇し、9 月 17 日以降は貧酸素状態が解消した。9 月 17 日以降、底層の溶存酸素濃度は高い状態で推移した。

さらに沖合域の観測点 P1（大浦沖）でも、7 月 30 日から貧酸素状態が継続して観測された（図 1-1-2）。8 月は、間欠的に貧酸素状態が観測された。9 月は、長時間に及ぶ貧酸素状態はほとんど観測されず、数時間から数日程度の貧酸素状態が 9 月上旬から中旬にかけて観測された。

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 月下旬の淡水の流入による強い密度成層が観測され、7 月 30 日には干潟縁辺部（浅海）から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊が観測された（図 1-1-3）。8 月は継続的に強い密度成層が観測され、8 月 12 日には干潟縁辺部（T13）から沖合にかけての広い範囲で貧酸素水塊の形成が観測された（図 1-1-3）。8 月 21 日には貧酸素水塊は観測されなかったが、大雨後の 8 月 29 日には再び広い範囲で貧酸素水塊の形成が観測された。9 月 9 日も、8 月下旬の大雨の影響による強い密度成層が観測され、広い範囲で貧酸素水塊の形成が観測された（図 1-1-3）。

2) 有明海奥部西側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、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。

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。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様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。

一方、沖合域 (P6) でも、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)。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。

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), 2013, 69 巻, 2 号, p. I_1018-I_1023
- 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.

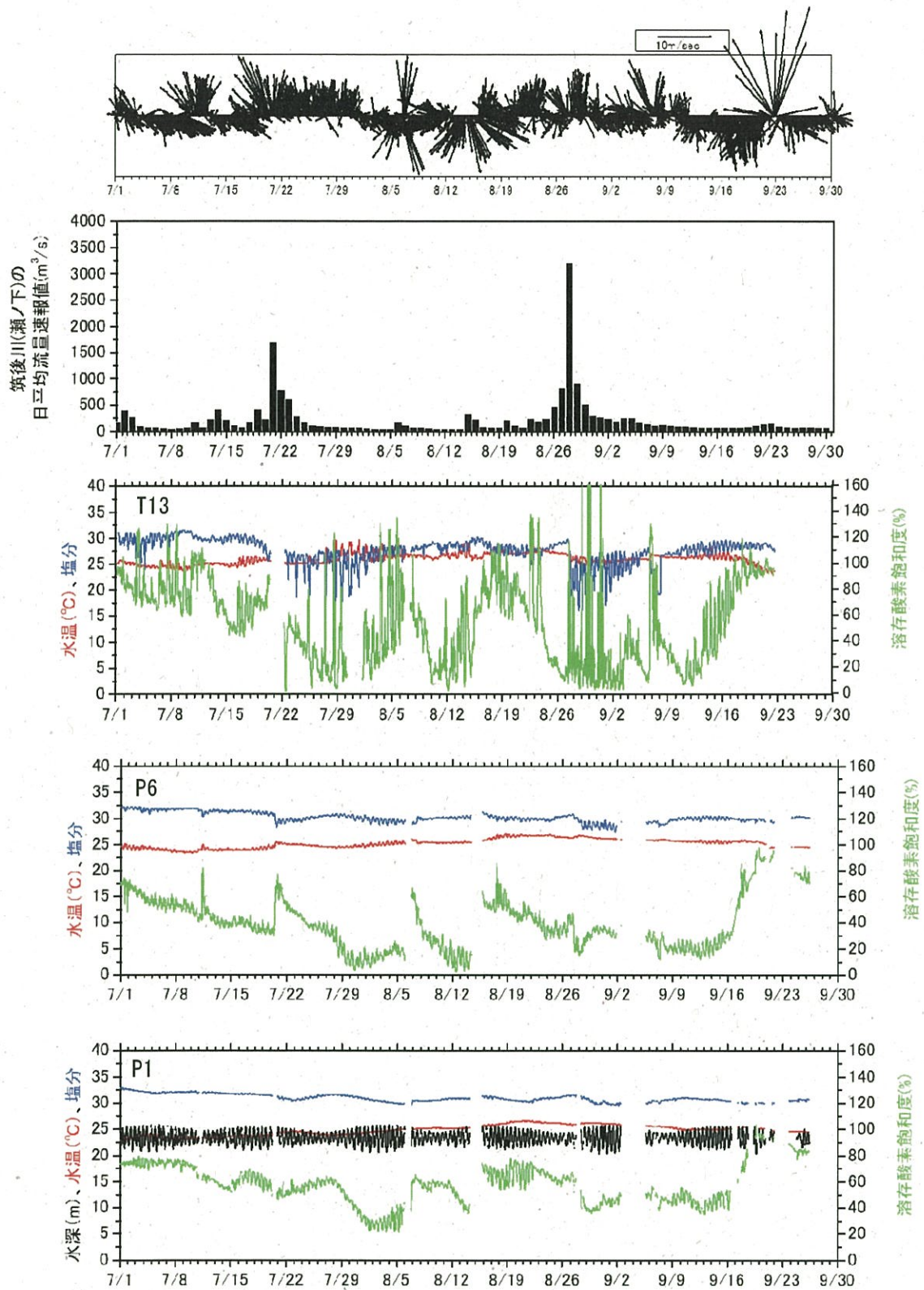


図 1-1-2. 沖神瀬西ブイの海上風(海面から 3m)の風向・風速(3 時間毎の 10 分平均値)、筑後川(瀬ノ下)の日平均流量、T13、P6 および P1 の底層水温(海底面から 0.2m)、塩分、溶存酸素飽和度、水深の時間変化。