

た。図 28 によると、日照時間は、3 月中旬から 4 月下旬は概ね平年並み～多く、5 月下旬から 7 月下旬は概ね平年より少ない～平年並み、8 月は概ね多かった。旬別階級区分によると、平均気温は、1 月上旬から 3 月下旬においては「平年並み～かなり高い」、4 月は「かなり低い～低い」、5 月上旬から 6 月下旬は「平年並み～かなり高い」、7 月は「かなり低い～平年並み」、8 月から 9 月中旬は「平年並み～かなり高い」で推移した。

## B) 水質

観測期間中の鹿児島湾中央における環境観測結果および栄養塩分析結果を図 29 に、湾奥の結果を図 30 に示す。湾中央において、水温は表層および 10 m 層でそれぞれ 16.9～29.2℃および 16.8～28.0℃の範囲で推移し、4 月は平年よりやや低かったが、5 月上旬から 8 月上旬にかけて概ね平年並みかやや高く、9 月下旬以降は概ね平年よりやや低めであった。塩分は、表層および 10 m 層でそれぞれ 24.6～34.5 および 30.7～34.4 の範囲で推移し、降雨や梅雨の影響で 5 月下旬から 9 月下旬にかけて概ね平年よりやや低めか低めであった。透明度は、2.6～14.8 m の範囲で推移し、調査期間を通して概ね平年よりやや低めか低めであった。溶存酸素濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 6.3～8.9 mg L<sup>-1</sup> および 5.9～8.1 mg L<sup>-1</sup> の範囲で推移し、調査期間を通して平年と同程度であった。DIN 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.1～2.0 μM および 0.2～2.3 μM の範囲で推移し、6 月上旬を除き、平年より低めであった。DIP 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ ND (<0.01μM) ～0.17 μM および ND～0.18 μM の範囲で推移し、10 月上旬を除き、概ね平年より低めであった。SiO<sub>2</sub> は、表層および 10 m 層でそれぞれ 2.7～36.8 μM および 1.9～28.8 μM の範囲で推移し、4 月上旬から 5 月上旬にかけては平年より低かったが、5 月下旬以降は概ね平年より高めであった。クロロフィル a 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.6～3.9 μg L<sup>-1</sup> および 0.6～5.0 μg L<sup>-1</sup> の範囲で推移し、6 月上旬、8 月上旬および 9 月下旬は平年より高く、10 月下旬以降はやや高めであった。また、他期間は概ね平年よりやや低めか低めであった。

湾奥において、水温は表層および 10 m 層でそれぞれ 17.2～28.6℃および 16.9～27.3℃の範囲で推移し、5 月上旬から 6 月上旬にかけては平年よりやや高かったが、7 月上旬以降は概ね平年並みかやや低めであった。塩分は、表層および 10 m 層でそれぞれ 21.3～33.5 および 29.3～33.8 の範囲で推移し、4 月上旬から 5 月上旬にかけては平年よりやや高めであったが、降雨の影響により、5 月下旬から 9 月下旬にかけては概ね平年よりやや低めか低めであった。透明度は、2.2～8.8 m の範囲で推移し、5 月下旬以降は、概ね平年よりやや低めであった。溶存酸素濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 6.3～9.5 mg L<sup>-1</sup> および 4.3～8.3 mg L<sup>-1</sup> の範囲で推移し、7 月下旬、9 月下旬および 11 月下旬は平年よりやや高く、4 月上旬、6 月下旬および 8 月上旬は平年よりやや低かった。DIN 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.2～2.9 μM および 0.2～3.8 μM の範囲で推移し、7 月下旬を除き、平年より低めであった。DIP 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.01～0.14 μM および 0.02～0.19 μM の範囲で推移し、7 月下旬を除き、平年より低めであった。SiO<sub>2</sub> は、表層および 10 m 層でそれぞれ 3.7～79.6 μM およ

び 3.7~33.6  $\mu\text{M}$  の範囲で推移し、4月上旬から5月下旬にかけては平年よりやや低めか低めであったが、6月上旬以降は概ね平年より高めであった。クロロフィル a 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.7~5.2  $\mu\text{g L}^{-1}$  および 0.7~6.7  $\mu\text{g L}^{-1}$  の範囲で推移し、5月下旬および6月上旬は平年より高く、他期間は概ね平年よりやや低めか低めであった。

また、代表点 Stn.⑩における多項目水質計による各測定項目の4月上旬から11月下旬までのイソプレットを図 31 に示す。水温および塩分に注目すると、特に7月上旬から8月に強い成層が形成され、9月以降は徐々に衰退していった。さらに、栄養塩 (DIN, DIP) に注目すると、4月上旬から11月上旬の期間は表層から 10 m 層まで概ね貧栄養状態であった。

#### イ. 植物プランクトン

##### A) 赤潮発生状況および有害赤潮プランクトンの発生状況

2020年に鹿児島湾で発生した主な赤潮を図 32 に示す。7月2日から21日にかけて湾奥部東部で *Ceratium furca* が主体の *Ceratium* 属による赤潮 (最高細胞密度 5,580 cells  $\text{mL}^{-1}$ )、7月9日から21日にかけて湾奥部全域で *Dictyocha octonaria* と *Hermesinum adriaticum* による混合赤潮 (最高細胞密度 125 cells  $\text{mL}^{-1}$ , 825 cells  $\text{mL}^{-1}$ )、9月24日から10月13日にかけて湾奥部全域で *Gonyaulax polygramma* による赤潮 (最高細胞密度 4,000 cells  $\text{mL}^{-1}$ ) が発生した。鹿児島湾で特に警戒すべき *Chattonella marina* および *Heterosigma akashiwo* による赤潮は発生しなかった。Stn.②, ⑧, ⑩における両種の細胞密度の推移を図 33 に示す。通常検鏡では、*C. marina* は9月29日のみ確認され、最高 7 cells  $\text{mL}^{-1}$  (Stn.⑩ 表層) であった。他の調査地点では、10月13日に Stn.④の 10m 層で 1 cell  $\text{mL}^{-1}$  確認された。*H. akashiwo* は6月8日に、Stn.⑧の 10 m 層で 1 cell  $\text{mL}^{-1}$  確認されたのみであった。他の調査地点では、5月25日に Stn.⑦の表層で 1 cell  $\text{mL}^{-1}$  確認された。また、*Chattonella ovata* が8月11日に Stn.⑫の 10 m 層、9月29日に Stn. ⑩の 10 m 層でそれぞれ 1 cell  $\text{mL}^{-1}$  確認された。

##### B) プランクトン種組成

図 34~39 に植物プランクトンの組成変化を示す。

珪藻類は湾央部の Stn.②の表層では、7月3日に 631 cells  $\text{mL}^{-1}$ 、7月21日に 1,815 cells  $\text{mL}^{-1}$  確認され、他の期間は 500 cells  $\text{mL}^{-1}$  未満であった (図 36)。Stn.②の 10 m 層では、7月3日に 631 cells  $\text{mL}^{-1}$  確認され、他の期間は 400 cells  $\text{mL}^{-1}$  未満であった (図 37)。主な優占種は表層、10 m 層ともに、*Chaetoceros* spp. と *Bacteriastrum* spp. であった。湾奥部の Stn.⑧, ⑩の表層について、Stn.⑧は5月25日に 1,524 cells  $\text{mL}^{-1}$ 、7月21日に 945 cells  $\text{mL}^{-1}$ 、Stn.⑩は7月21日に 3,541 cells  $\text{mL}^{-1}$  確認され、それ以外は 200 cells  $\text{mL}^{-1}$  未満であった (図 36)。Stn.⑧, ⑩の 10 m 層について、両調査地点とも、最高細胞密度が確認されたのは、4月27日の 295 cells  $\text{mL}^{-1}$ 、240 cells  $\text{mL}^{-1}$  であり、それ以外は 100 cells  $\text{mL}^{-1}$  未満であった (図 37)。主な優占種は、表層においては *Rhizosolenia* spp., *Chaetoceros* spp., *Bacteriastrum* spp., 10 m 層においては *Skeletonema* spp. であった。

有害種について、100 cells  $\text{mL}^{-1}$  以上が確認されたのは、7月3日の Stn.⑧の 10 m 層 (100 cells

mL<sup>-1</sup>) および Stn.⑩の 10 m 層 (151 cells mL<sup>-1</sup>) のみで (図 35), 優占種は *Dictyocha* spp. および *Ceratium* spp. であった (図 39)。無害種では, *Prorocentrum* spp. が比較的多く出現し, 最高は 8 月 11 日に Stn.⑧の 10 m 層で確認された 90 cells mL<sup>-1</sup> であった。また, 9 月 29 日に, Stn.⑧の 10 m 層で *Gonyaulax* spp. が 133 cells mL<sup>-1</sup> 確認された (Stn.⑧10 m 層) (図 39)。

#### C) 濃縮検鏡による有害種の検出

*Chattonella* spp. の水中越冬細胞の有無, 栄養細胞の早期発見およびそれらと赤潮発生との関係を明らかにすることを目的とした濃縮検鏡の結果を図 40 に示す。*Chattonella* spp. は Stn.③, ⑩ともに 4 月から 7 月上旬にかけては確認されず, 7 月下旬に初認され (Stn.③: 0.08 cells mL<sup>-1</sup>, Stn.⑩: 0.011 cells mL<sup>-1</sup>), 9 月 29 日に最高細胞密度となった (Stn.③: 0.091 cells mL<sup>-1</sup>, Stn.⑩: 1.251 cells mL<sup>-1</sup>)。Stn.③は 7 月から 12 月まで毎月確認されたが, Stn.⑩は 7 月, 9 月, 11 月にのみ確認された。1 月については, 20,000 倍まで濃縮したが, 確認されなかった。

2015 年以降の濃縮検鏡の結果を図 41 に示す。過去 6 年では, 2015 年から 2017 年は, 湾奥部の Stn.⑩で, 2018 年から 2020 年は湾中央部の Stn.③で, より高い頻度で検出される傾向が見られた。1 月から 3 月にかけて栄養細胞が確認されたのは, Stn.③では 2018 年 9 月および 2019 年 3 月, Stn.⑩では 2018 年 1 月と 2020 年 3 月であった。一方で, 5~7 月に *Chattonella* spp. による赤潮が発生したのは 2015 年のみであり (図 46), 2016 年以降は発生していない。上限の濃縮倍率が, 2015 年は 1,000 倍, 2016 年は 4,000 倍, 2017 年~2018 年は 10,000 倍, 2019 年~2020 年は 20,000 倍と年によって異なるため, 単純には比較できないが, 過去 6 年間では赤潮発生の事例が少ないこともあり, 冬期の栄養細胞の有無と 5 月~7 月の赤潮発生の関係性は, 現在のところ不明である。

#### ウ. *H. akashiwo* および *Chattonella* 赤潮の非発生要因

鹿児島湾における *H. akashiwo* の最高細胞密度と被害金額の推移を図 42 に, 各年における *H. akashiwo* 赤潮の発生時期を図 43 に示す。2015 年から 2019 年は 5 年連続で赤潮が発生しており, 2017 年から 2019 年は 3 年連続で 3 月に赤潮が発生している。2015 年以降の水温, DIN, DIP 濃度の推移を図 44 に示す。これによると, 2020 年は 1 月から 3 月上旬にかけての水温が, 過去 5 年と比較して高く, DIN は他年と比べて少なかった。また, 湾奥部における冬場の珪藻類は, 他の時期と比べて少ないことがこれまでの調査でわかっているが, 2020 年は, 赤潮が長期化した 2018 年や 2019 年よりも珪藻類が多かった (1~3 月の鹿児島湾奥部の珪藻類: 2017 年: 1~271 cells mL<sup>-1</sup>, 2018 年: 1~5 cells mL<sup>-1</sup>, 2019 年: 2~25 cells mL<sup>-1</sup>, 2020 年: 1~122 cells mL<sup>-1</sup>)。これらのことから, 2017~2019 年は豊富な栄養塩を利用して, *H. akashiwo* が優占して赤潮化したことが, 2020 年は水温が高く, 珪藻類などの競合種が増殖し, *H. akashiwo* の増殖が抑制されたことが非発生要因の一つと考えられた。

次に, 鹿児島湾における *Chattonella* spp. の最高細胞密度と被害金額の推移を図 45 に, *Chattonella* spp. による赤潮の発生状況を図 46 に示す。また, 鹿児島湾における水温, 塩分と *Chattonella* spp. との関係を図 47 に示す。図 47 によると, 水温は 20~26°C, 塩分は 22~34 の範

圃で主に発生している。*Chattonella* spp.による赤潮が発生しやすい5~7月の環境について、2020年の湾奥部の水温および塩分は概ね至適環境であり、DIN濃度は7月下旬には半飽和定数を大きく上回ったもののそれ以前は概ね少ない状況であり、DIP濃度は期間を通して欠乏状態であった(図30)(半飽和定数:硝酸塩は1.0 μM, リン酸塩は0.11 μM, Nakamura et al.1988)。競合種である珪藻類は5月の下旬にStn.⑧で、7月の下旬にStn.②, ⑧, ⑪で900 cells mL<sup>-1</sup>を超える細胞が確認されたが、それ以外は少なかった(図36)。これらのことから、5~7月において、水温および塩分は増殖至適範囲にあったが、栄養塩、特にDIPが不足していたことにより、*Chattonella* spp.による赤潮は発生しなかったと考えられた。

## ②既存データ等を用いた解析

1977年以降の5, 6月の鹿児島湾奥部の水温, 塩分, DIN, DIPの推移を図48, 49に示す。水温については、回帰直線で見ると、5月, 6月とも低下傾向にあると思われたが、t検定では、有意ではないと判定された。塩分については、5月は表層, 10m層とも、6月は10m層について有意に上昇していた。DINについては、5月は表層, 10m層とも、6月は10m層について有意に減少していた。DIPについては5月, 6月とも表層, 10m層について概ね横ばいであった。

鹿児島湾では1977年以降、*Chattonella* spp.による赤潮により1億円以上の被害が3回発生しているが、2004年以降は1億円以上の被害は発生していない(図45)。また、近年においては、2019年の10月に最高22 cells mL<sup>-1</sup>と低密度の増殖が確認されたのみで、従来からの赤潮発生時期である5~7月には2016年以降、発生していない。今回、1978年以降のデータを整理したことで、5, 6月のDINの長期的な減少傾向を確認した。減少傾向の要因は不明だが、DINが減少していることが、近年、*Chattonella* spp.による赤潮の発生が少ない要因になっている可能性が考えられた。

次に、鹿児島湾における*Chattonella* spp.による赤潮の発生予察について、9月の底層水温と12月の全天日射量の平均値の組み合わせによる予察手法を、2019年度本事業で作成した。これを用いて2020年は赤潮発生年と予測したが、実際には赤潮は発生せず、予測は的中しなかった(図50)。本手法は予測精度が69%と低いため、他の手法の検討や、今回確認された環境の長期的変動を踏まえて、今後、予察手法を改良していく必要がある。

## 引用文献

Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW, Strickland JD. Fluorometric determination of chlorophyll. ICES J. Mar. Sci. 1965; 30: 3-15.

北辻さほ, 紫加田知幸, 鬼塚剛, 青木一弘. 八代海における赤潮発生メカニズムの解析. 平成29年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」

報告書. 九州海域赤潮・貧酸素共同研究機関, 東京. 2018; 32-41.

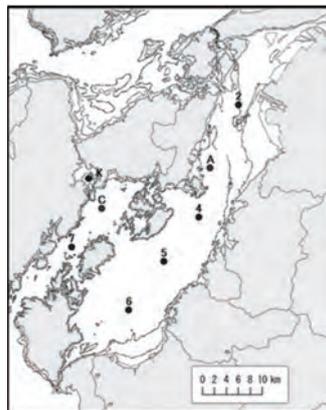
Nakamura Y, Takashima J, Watanabe M. Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua* in the Seto Inland Sea, Japan Part 1. Growth bioassay of the seawater and dependence of growth rate on nutrient concentrations. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 1988; **44**: 113-124.

Onitsuka G, Aoki K, Shimizu M. Meteorological conditions preceding *Chattonella* bloom events in the Yatsushiro Sea, Japan, and possible links with the East Asian monsoon. *Fish. Sci.* 2015; **81**: 123-130.

紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 中野善, 岡村和麿, 向井宏比古, 松谷久雄, 山下博和, 高杉朋孝, 宮田翔也, 森島義明, 西広海, 石田幸生, 古川新平, 浦啓介, 上野翼, 西山佳孝. 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発⑥イ. 八代海・鹿児島湾海域. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書. 赤潮共同研究機関, 東京. 2019; 179-224.

紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 中野善, 杉松宏一, 岡村和麿, 向井宏比古, 松谷久雄, 山下博和, 高杉朋孝, 宮田翔也, 吉満敏, 立元伸幸, 古川新平, 浦啓介, 西山佳孝. 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発カ②. 八代海・鹿児島湾海域. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書. 赤潮共同研究機関, 東京. 2020; 200-252.

植松光夫, 南川雅男, 有田英之, 角皆静男. 海水中の懸濁粒子量の測定法. 北海道大学水産学部研究彙報 1978 ; **29**: 164-172.



調査定点			
Stn	定点名	緯度	経度
2	大築島北	32.506666	130.495000
4	田浦沖	32.336666	130.421667
5	津奈木沖	32.270000	130.358333
6	米ノ津沖	32.196666	130.295000
7	獅子島西	32.293333	130.195000
A	姫戸ブイ	32.411388	130.442777
C	大多尾	32.351666	130.249166
K	楠浦	32.393433	130.227700

図 1. 調査定点.



鹿児島湾調査定点(緯度経度)					
Stn.	緯度	経度	Stn.	緯度	経度
①	31° 31.0'	130° 34.0'	⑦	31° 42.4'	130° 42.4'
②	31° 31.2'	130° 37.7'	⑧	31° 40.0'	130° 41.8'
③	31° 31.8'	130° 41.0'	⑨	31° 38.2'	130° 41.3'
④	31° 36.1'	130° 35.5'	⑩	31° 34.2'	130° 44.4'
⑤	31° 38.8'	130° 37.2'	⑪	31° 37.1'	130° 46.5'
⑥	31° 41.6'	130° 38.9'	⑫	31° 39.7'	130° 48.0'

図 2. 鹿児島湾における調査定点.

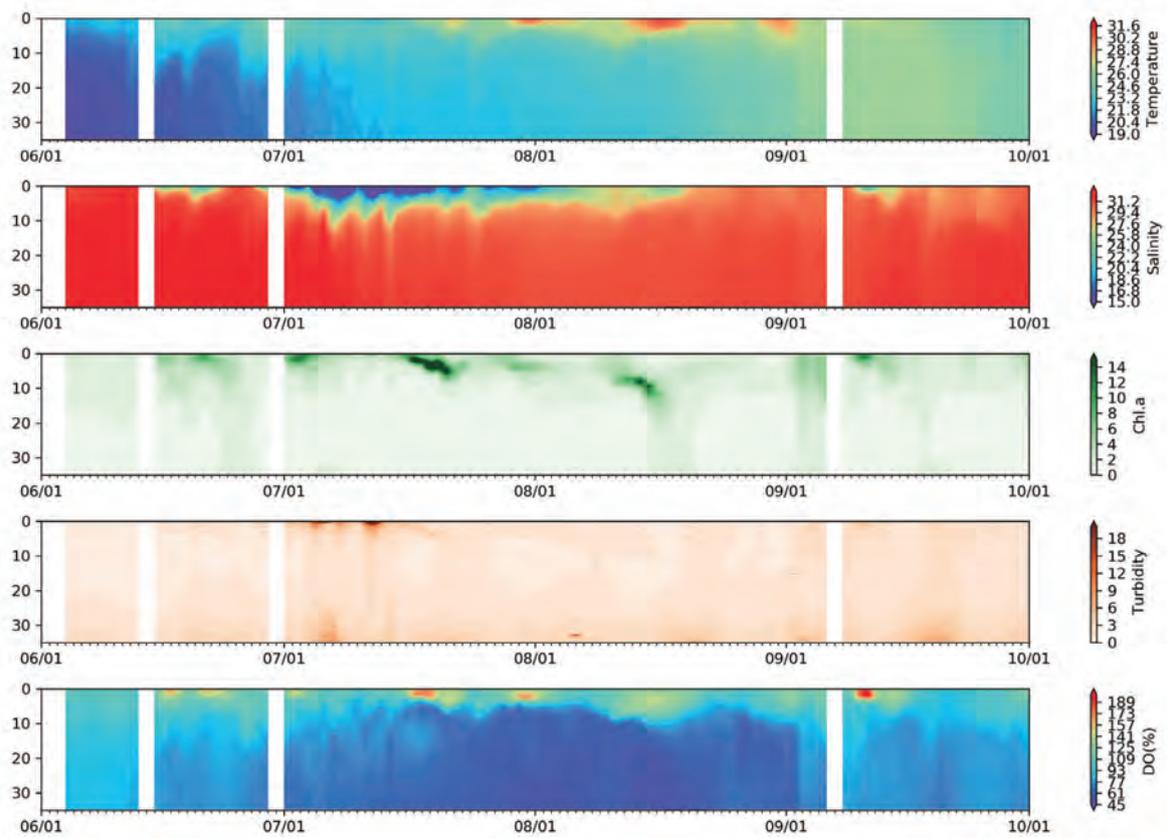


図3. 大型観測ブイ (Stn. A) における水温, 塩分, クロロフィル a 濃度の鉛直プロファイルの経時変化.

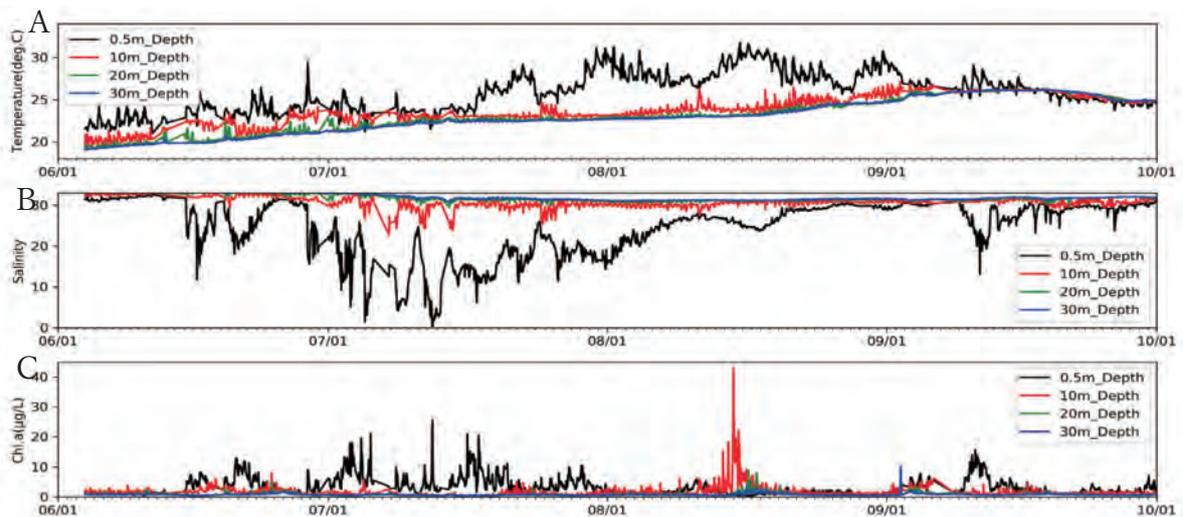


図4. 大型観測ブイ (Stn. A) の各深度層における水温 (A), 塩分 (B), クロロフィル a 濃度 (C) の経時変化.

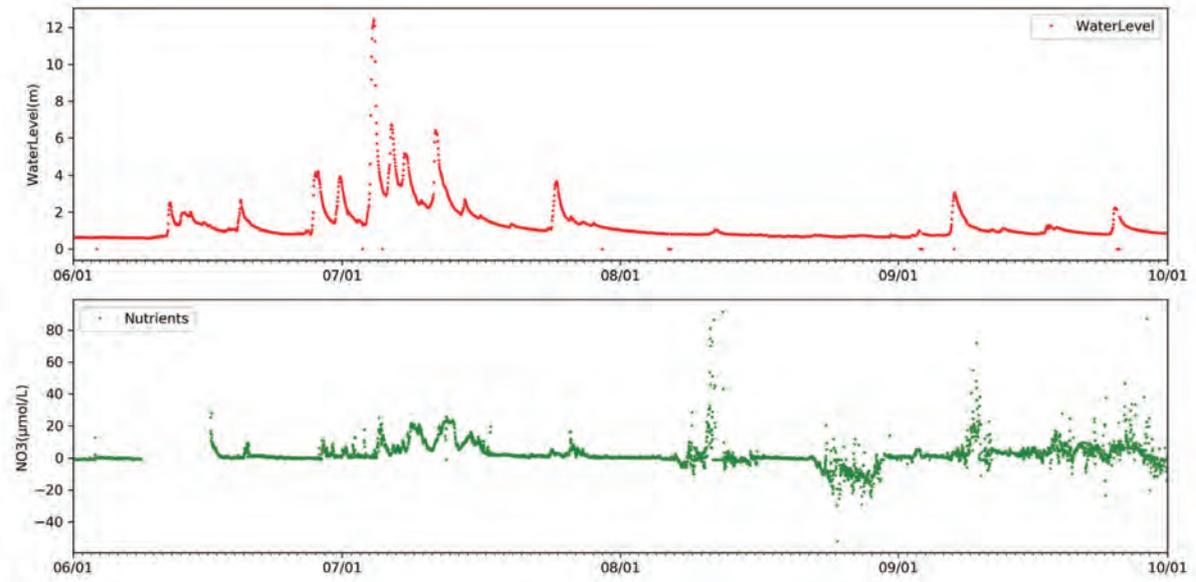


図 5. 大型観測ブイ (Stn. A) における硝酸塩濃度 (上段) と球磨川河口 (横石) における水位 (下段) の経時変化.

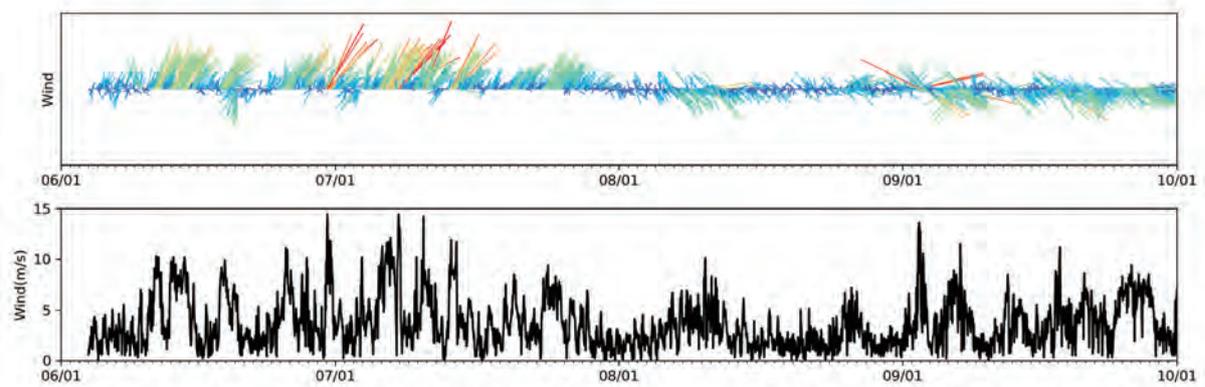


図 6. 大型観測ブイ (Stn. A) における風向風速の経時変化. 上段は暖色ほど風速が大きいことを示す.

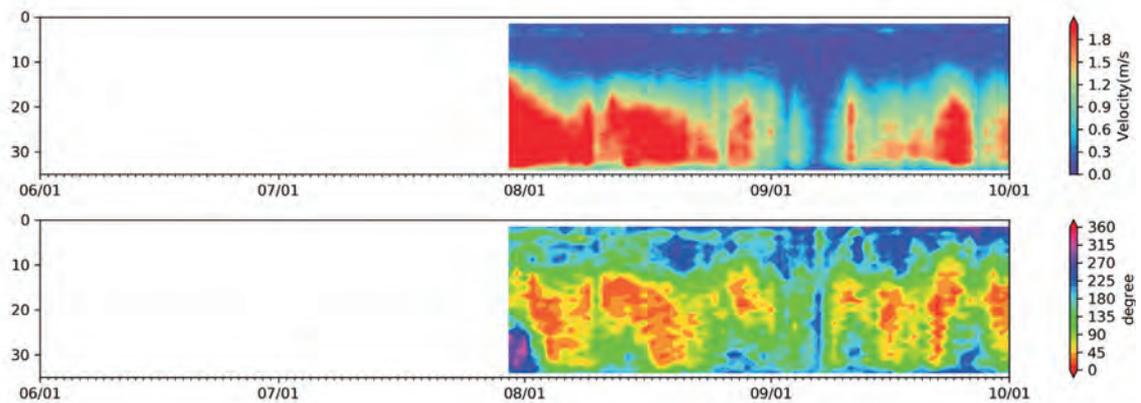


図 7. 大型観測ブイ (Stn. A) における流向流速の経時変化.