

# 博多湾沿岸部における降雨に伴う栄養塩流入 及び貧酸素水塊発生に関する実態調査

山崎亜弓・益尾実希・小林斎哉

福岡市保健環境研究所環境科学課

## Survey of Inflow of Nutrients and Occurrence of Hypoxic Water Mass with Rainfall in Hakata Bay Coastal Area

Ayumi YAMASAKI, Miki MASUO and Masaya KOBAYASHI

Environmental Science Section, Fukuoka City Institute of Health and Environment

### 要約

博多湾沿岸部における貧酸素水塊発生の要因の一つと考えられている降雨に伴う栄養塩類(窒素, リン)の河川からの流入について, 平成30年度から令和元年度に河川からの流入負荷状況と沿岸部における動態調査, 及び沿岸部における降雨後の貧酸素水塊発生状況の実態調査を行った。

樋井川において栄養塩類の流入負荷量は, 降雨前に比べてT-Nが約5~16倍, T-Pが約12~27倍に増大していることが確認された。また沿岸部において, T-Nについては降雨後に増加することもあったが, T-Pについては明確な挙動は確認されなかった。沿岸部における降雨後の貧酸素水塊の発生状況は, 降雨に伴い鉛直方向の塩分差の形成や植物プランクトンの増殖が助長され, 貧酸素化しやすい状態となっていることが確認された。

**Key Words:** 栄養塩 nutrients, 貧酸素水塊 hypoxic water mass (hypoxia),  
物質循環 biogeochemical cycle, 底層溶存酸素量 DO in bottom layer

## 1 はじめに

閉鎖性の高い博多湾においては, 例年, 夏季に湾奥部や沿岸域等で貧酸素水塊 (DO=3.6 mg/L 以下の「貧酸素状態」にある水塊。)が発生し<sup>1)</sup>, 生物の生息・生育に影響を及ぼしている。さらに, 夏季の降雨による窒素, リンなどの栄養塩類供給量の増加に伴う赤潮発生等では有機物汚濁が助長され, これも貧酸素水塊発生の要因の一つとなっていると考えられている。しかし, これまでに降雨に伴う河川からの栄養塩類流入の実態を調査した事例は少ない<sup>2)</sup>。

これらの現状を踏まえ, 降雨に伴う栄養塩類(窒素, リン)の河川からの流入状況と沿岸部における動態について調査を行うとともに, 沿岸部における降雨後の貧酸素水塊発生状況等について調査を行った。

## 2 調査方法

### 2.1 降雨に伴う栄養塩類調査

#### 2.1.1 河川からの栄養塩類流入状況調査

##### 1) 調査地点

河川からの栄養塩類の流入状況について調べるため, 博多湾中部海域に流入する樋井川の4地点(上流から友泉亭橋, 田島橋, 草香江新橋, 旧今川橋)で負荷量調査を行った(図1)。樋井川は, 幹川流路延長12.9 km, 流域面積は29.1 km<sup>2</sup>の二級河川で, 流域の土地利用は平成18年で宅地65%, 山林32%, 農地3%となっている<sup>3)</sup>。BOD等に係る環境基準は樋井川全域がB類型に指定されている。各調査地点周辺の下水排除方式は, 友泉亭橋は分流式, 田島橋より下流は合流式(一部分流式)である。

##### 2) 調査項目及び調査日

調査項目は全窒素(T-N), 全りん(T-P)及び流量とし, 平成30年度のみ亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N), 硝酸性窒素(NO<sub>3</sub>-N), アンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N), リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)を測定した。栄養塩類の測定は, 平成30年度は流れ分析法(T-N: JIS K 0102 45.6, NO<sub>2</sub>-N: JIS K 0102 43.1.3, NO<sub>3</sub>-N: JIS K 0102 43.2.6, NH<sub>4</sub>-N: JIS K 0102 42.6, T-P: JIS K 0102 46.3.4, PO<sub>4</sub>-P: JIS K 0102 46.1.4), 令和

元年度は吸光光度法 (T-N : JIS K 0102 45.2 紫外線吸光光度法, T-P : JIS K 0102 46.3.1 ペルオキシ二硫酸カリウム分解法) で行った. 流量は現地にて測定した川幅及び水深から求めた断面積 (m<sup>2</sup>) に電磁流速計 (KENEK 社 LP2100) で測定した流速 (m/s) を乗じ算出した. 調査は, 晴天時は平成 30 年 11 月 16 日と令和元年 6 月 5 日, 降雨時は平成 30 年 7 月 3 日と令和元年 6 月 7 日に行った.

### 2.1.2 沿岸部における栄養塩類動態調査

#### 1) 調査地点

沿岸部における降雨後の栄養塩類の動態を調べるため, 樋井川河口域のなぎさ橋及び地行浜防波堤先の 2 地点において栄養塩類の動態調査を行った (図 1, 図 2).

#### 2) 調査項目及び調査日

調査項目は T-N 及び T-P とした. 栄養塩類の測定は前述の 2.1.1 の 2) と同様の方法で行った. 調査は, 平成 30 年 6 月 26 日~7 月 18 日のうちの 5 日間, 平成 30 年 9 月 7 日~9 月 14 日のうちの 3 日間, 令和元年 6 月 5 日~6 月 10 日のうちの 3 日間, 令和元年 9 月 19 日~9 月 25 日のうち 3 日間に行った.

### 2.2 沿岸部における降雨後の貧酸素調査

#### 1) 調査地点

沿岸部における降雨後の貧酸素水塊の発生状況等について調べるため, 地行浜海浜公園の東又は西防波堤の北側護岸において貧酸素調査を行った (図 2). 調査地点の水深は潮の干満の影響で調査日により変動するが, おおむね 3.5 m~5.0 m である.

#### 2) 調査項目及び調査日

多項目水質計 (Hydrolab 社 Datesonde5X) を海中に垂下させ, 溶存酸素 (DO), 水温, 塩分, クロロフィル a (Chl-a), pH 及び濁度を鉛直方向に観測した. 調査は前述の 2.1.2 の 2) と概ね同日及びその数日後に行った.



図 1 調査地点

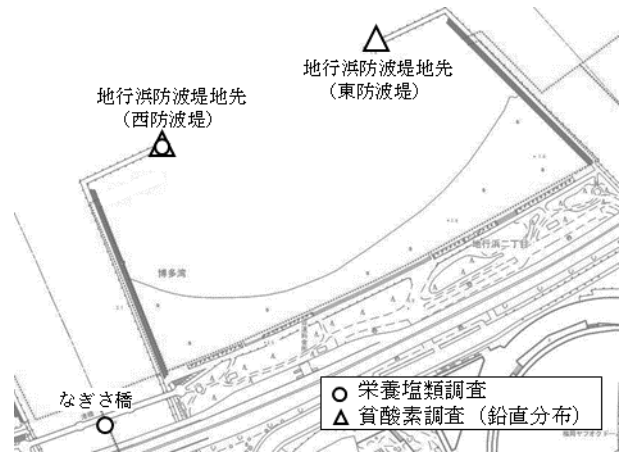


図 2 地行浜内の調査地点

## 3 結果及び考察

各調査日及び調査日前後の気象データ (気温, 降水量, 風速, 全天日射量) を図 3 に示す. 気象データは気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>) より引用した.

### 3.1 降雨に伴う栄養塩調査

#### 3.1.1 河川からの栄養塩類流入状況調査

各調査地点における栄養塩濃度の調査結果を図 4 及び図 5 に示す. 平成 30 年度の晴天時と降雨時のデータを比較すると, T-N に占める溶存性無機態窒素 (DIN) の割合は, 晴天時が平均 87%, 降雨時が平均 81%であった. 一方, T-P に占める PO<sub>4</sub>-P (DIP) の割合は晴天時が平均 78%, 降雨時が平均 33%と, 晴天時に比べ降雨時は低くなった. このことから, リンは降雨時には懸濁態としての流出が多い可能性があると考えられた.

各調査地点の調査日ごとの流量を表 1 に示す. 下流の旧今川橋や草香江新橋においては, 潮や風の影響で流量が測定不能となることがあったが, いずれの地点においても晴天時よりも降雨時の方が流量が大きくなった. 潮の影響が特に大きかった旧今川橋を除いた各調査地点の流量に栄養塩濃度を乗じて算出した負荷量を表 2 に示す. 晴天時の負荷量は T-N が 0.04~0.21 g/s, T-P が 0.002~0.004 g/s であり, 降雨時の負荷量は T-N が 0.57~2.98 g/s, T-P が 0.046~0.363 g/s であった. T-N 及び T-P ともに, 晴天時に比べて降雨時の負荷量は大きく, また, 下流にいくほど負荷量が大きくなる傾向がみられた. 令和元年 6 月 5 日と 6 月 7 日の値を地点ごとに比較すると, 降雨時の負荷量は晴天時に比べ T-N が約 5~16 倍, T-P が約 12~27 倍となった. 以上の結果から, 降雨に伴い, 河川における栄養塩類の負荷は増大していると考えられた. なお, 平成 24 年度に福岡市が行った流入負荷量調査

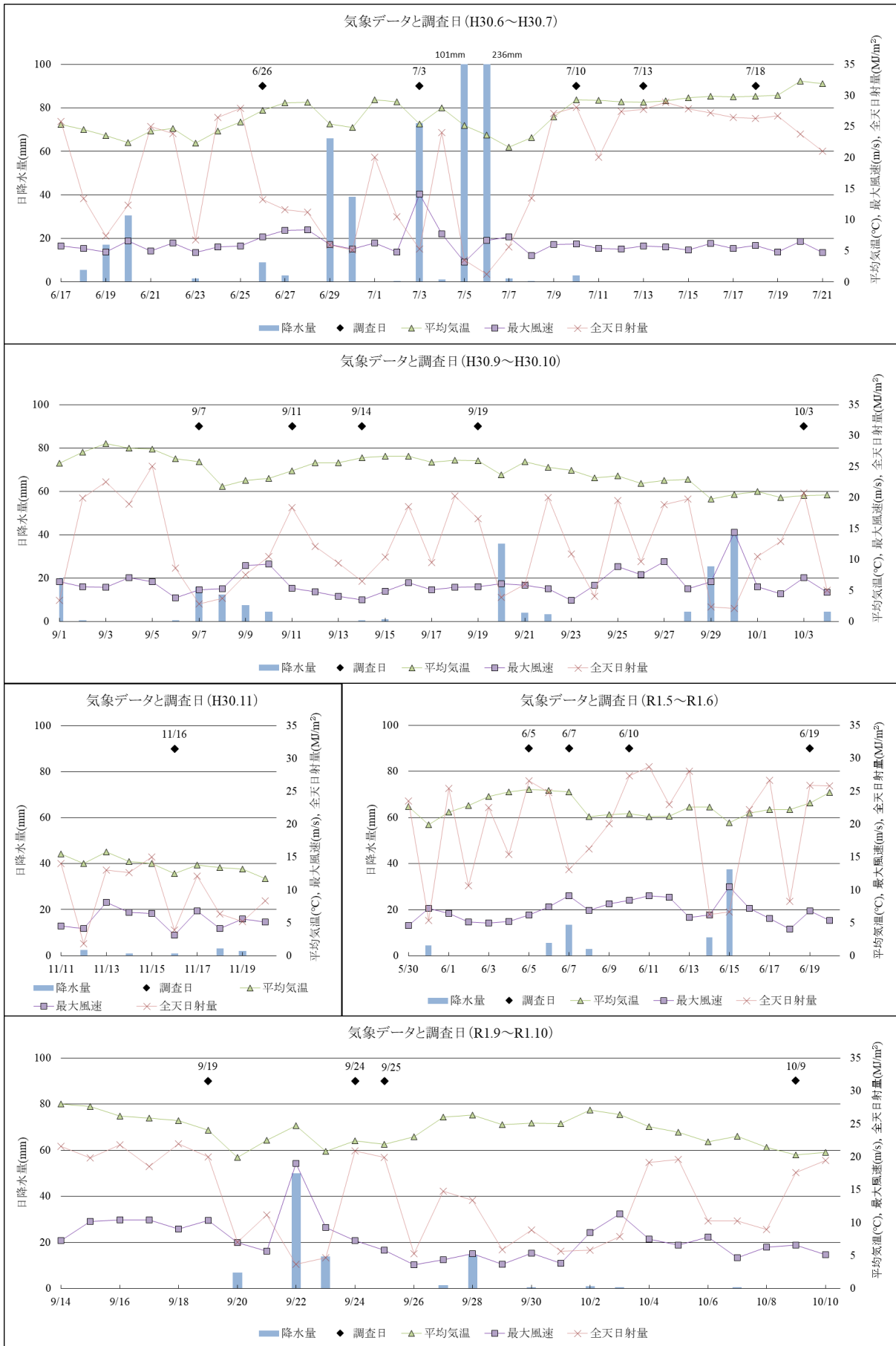


図3 気象データと調査日

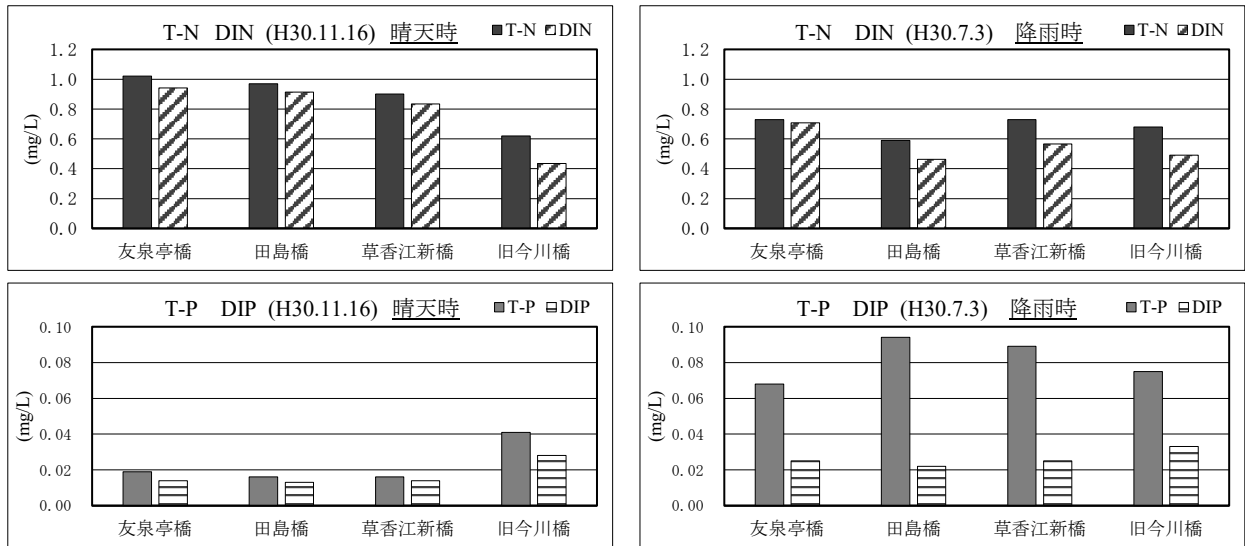


図4 栄養塩濃度の調査結果（平成30年度）

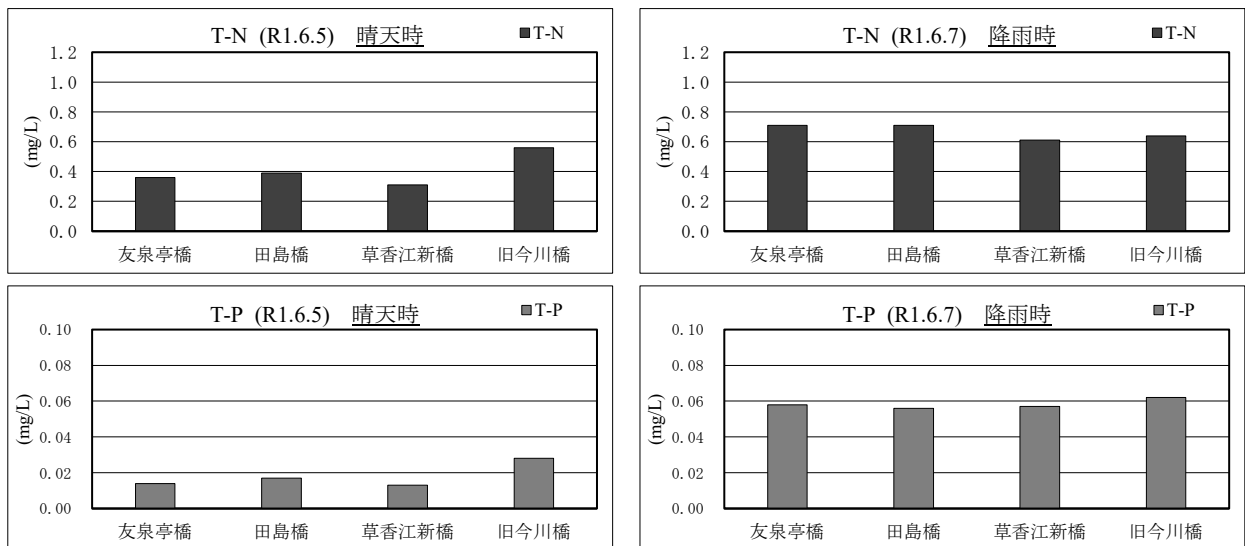


図5 栄養塩濃度の調査結果（令和元年度）

表1 各調査地点の流量

調査地点	流量(m <sup>3</sup> /s)			
	晴天時		降雨時	
	H30.11.16	R1.6.5	H30.7.3	R1.6.7
友泉亭橋	0.21	0.29	1.38	0.80
田島橋	0.21	0.11	3.70	0.96
草香江新橋	0.17	0.27	4.08	—
旧今川橋	—	9.90	27.08	16.70

表2 各調査地点の負荷量

調査地点	T-N負荷量 (g/s)				T-P負荷量 (g/s)			
	晴天時		降雨時		晴天時		降雨時	
	H30.11.16	R1.6.5	H30.7.3	R1.6.7	H30.11.16	R1.6.5	H30.7.3	R1.6.7
友泉亭橋	0.21	0.10	1.01	0.57	0.004	0.004	0.094	0.046
田島橋	0.20	0.04	2.18	0.68	0.003	0.002	0.348	0.054
草香江新橋	0.15	0.08	2.98	—	0.003	0.004	0.363	—

では、T-N が約 1.06 g/s、T-P が約 0.127 g/s となっており、今回の調査と概ね同等の結果であった<sup>2)</sup>。

### 3.1.2 沿岸部における栄養塩類動態調査

沿岸部における降雨後の T-N 及び T-P の推移を図 6 及び図 7 に示す。平成 30 年 6~7 月及び 9 月の調査では、降雨後に T-N が増加する様子が確認されたが、T-P については明確な増加は確認されなかった。令和元年 6 月及び 9 月の調査では、T-N、T-P ともに降雨に伴う明確な変

化は確認されなかった。T-N については、令和元年 6 月及び 9 月の調査時は、降雨前における T-N が高く、降雨の影響が表れなかった可能性が考えられた。T-P については、前述したとおり降雨時には懸濁態としての流出が多く、流速が緩やかになる河口から沿岸域では、懸濁態が沈降しやすく降雨の影響が表れにくくなる可能性が考えられた。

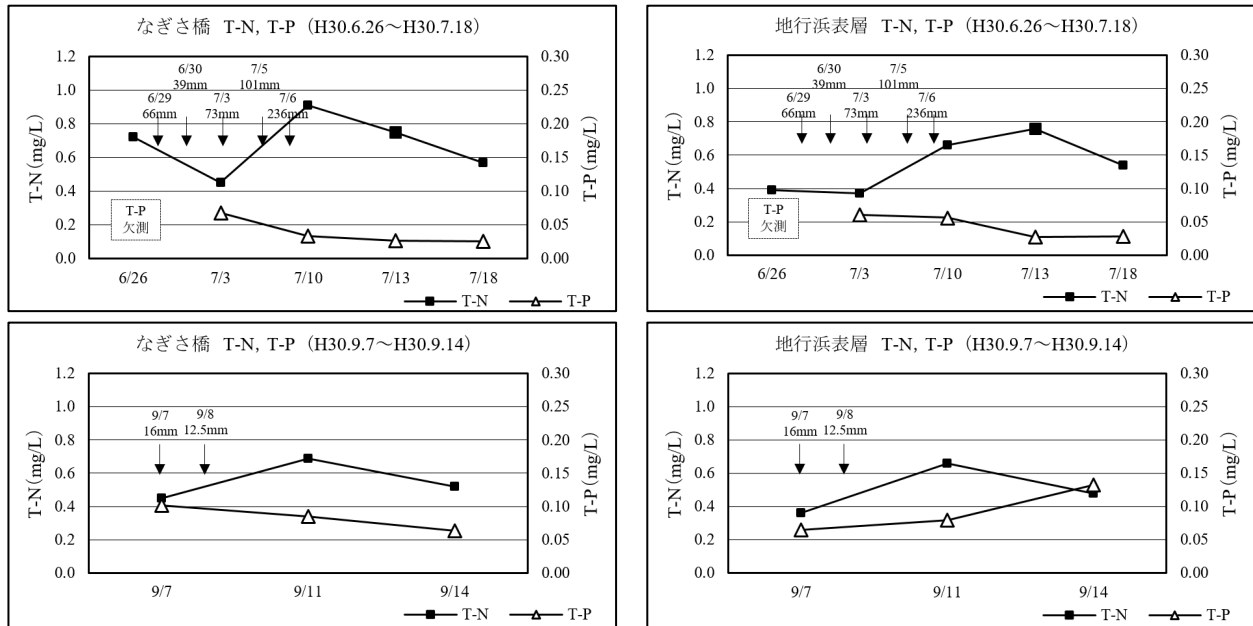


図 6 沿岸部における降雨後の栄養塩濃度の推移 (平成 30 年度)

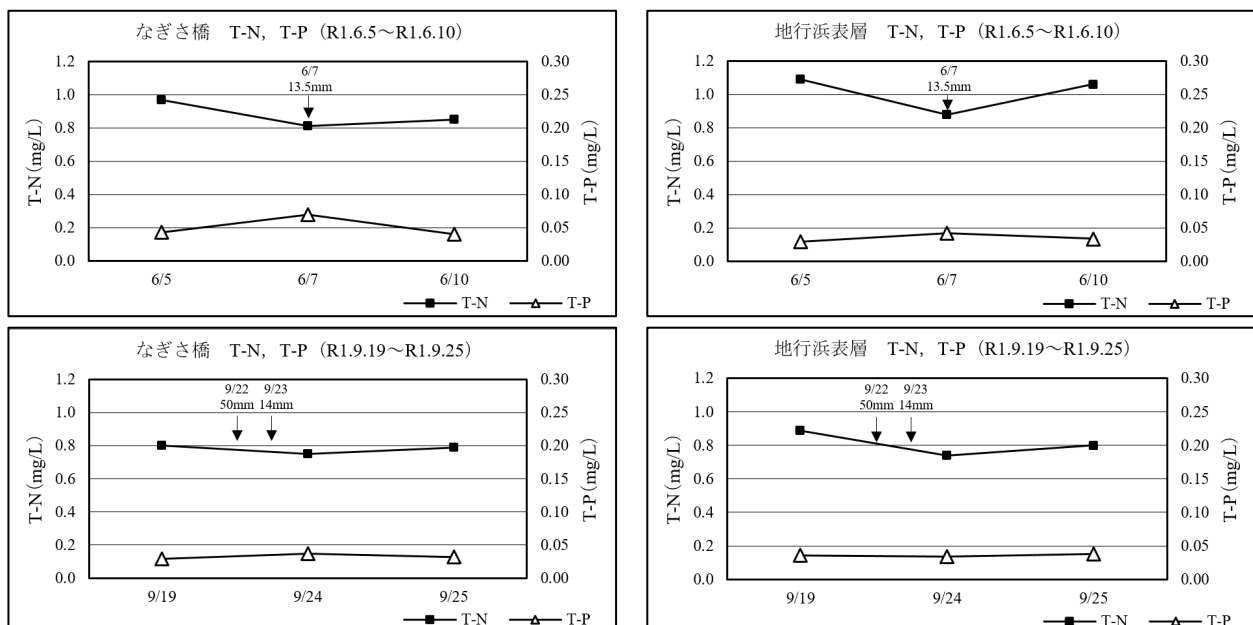


図 7 沿岸部における降雨後の栄養塩濃度の推移 (令和元年度)

### 3.2 沿岸部における降雨後の貧酸素調査

各調査期間中の各項目鉛直分布の経時変化を図 8~11

に示す. なお, DO については, 濃度 3.6mg/L 以下の貧酸素状態<sup>1)</sup> について, 観測範囲を各図に示した.

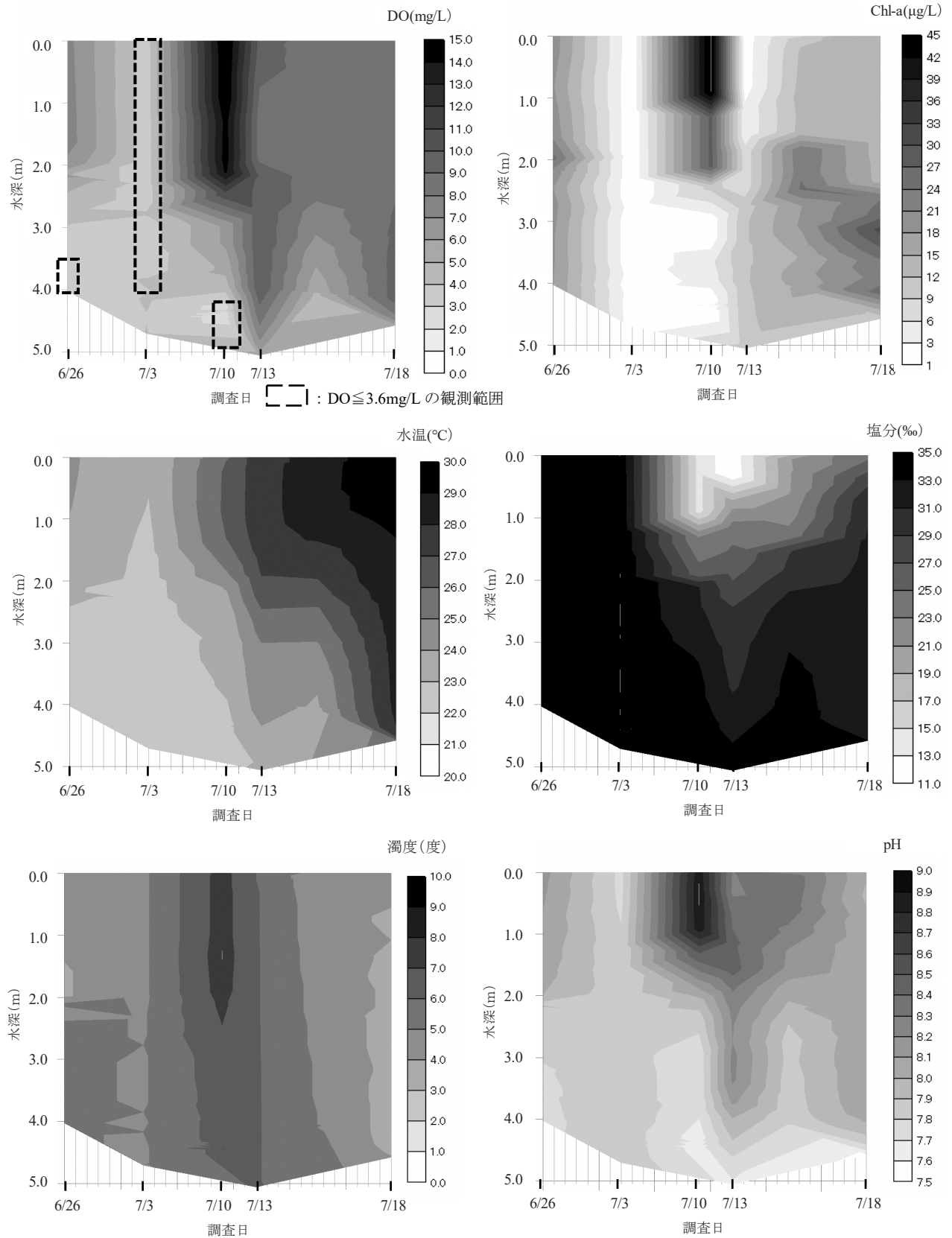


図 8 各項目鉛直分布の経時変化 (平成 30 年 6 月 26 日~7 月 18 日)

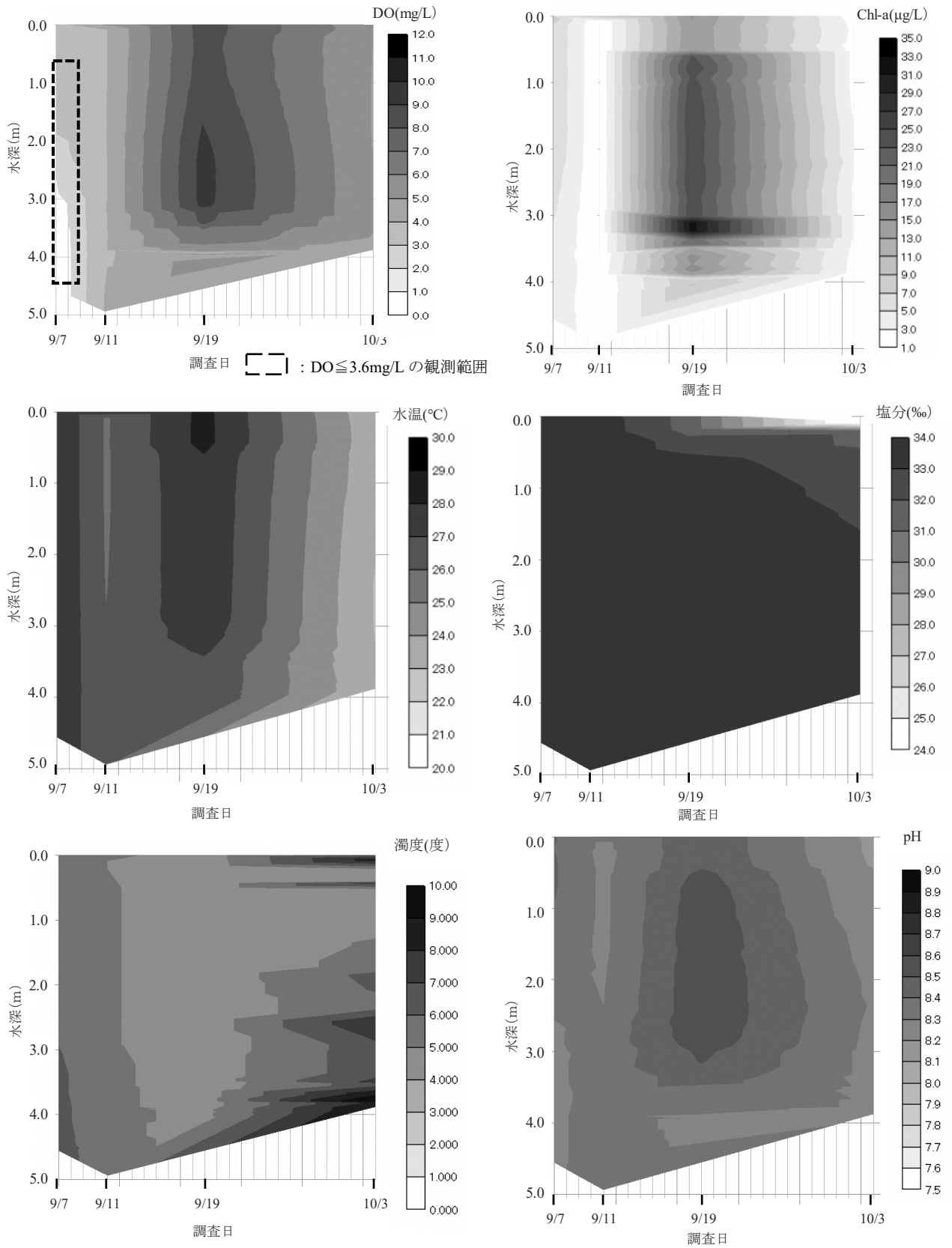


図9 各項目鉛直分布の経時変化 (平成30年9月7日~10月3日)

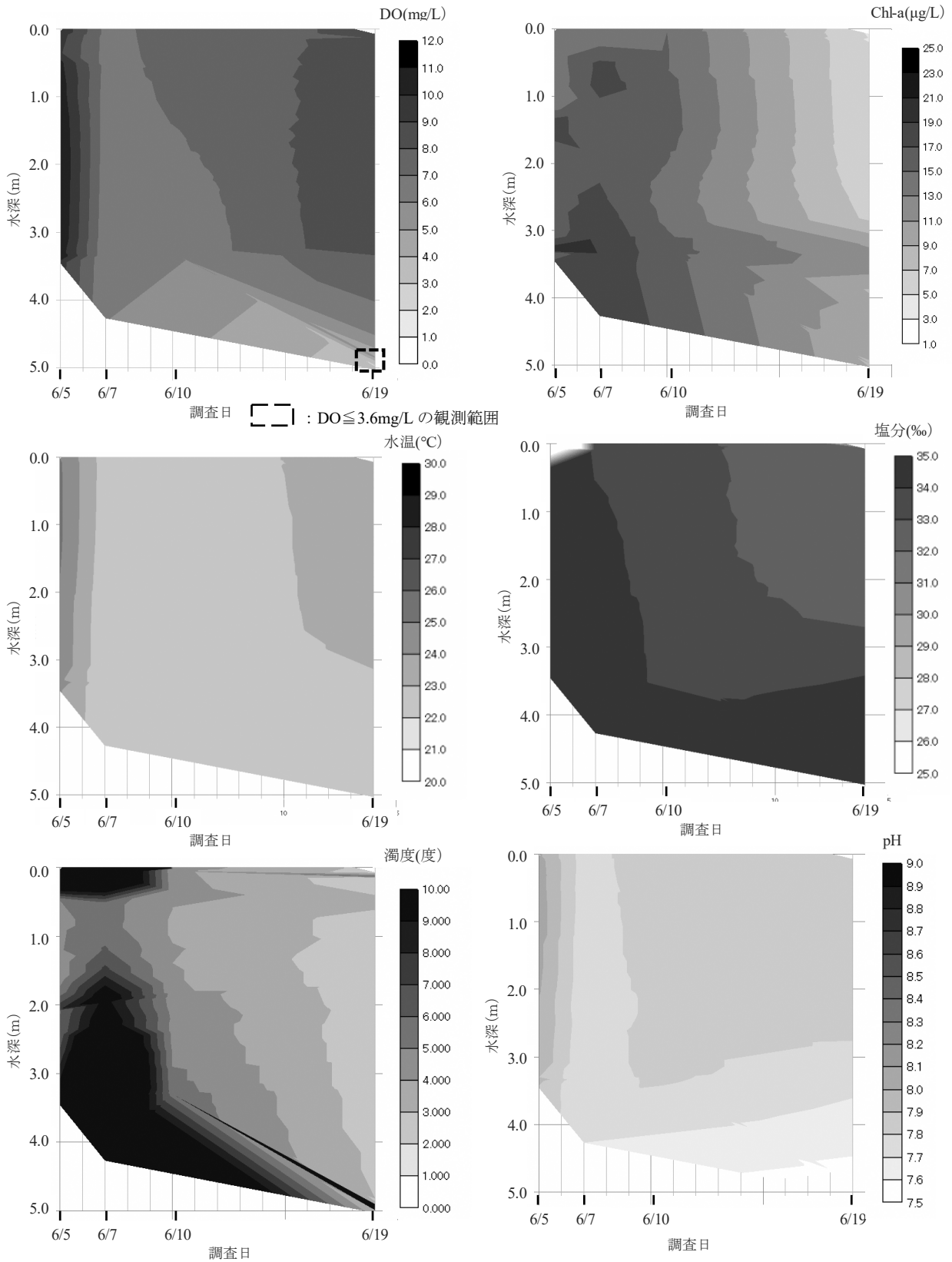


図 10 各項目鉛直分布の経時変化 (令和元年 6 月 5 日~6 月 19 日)



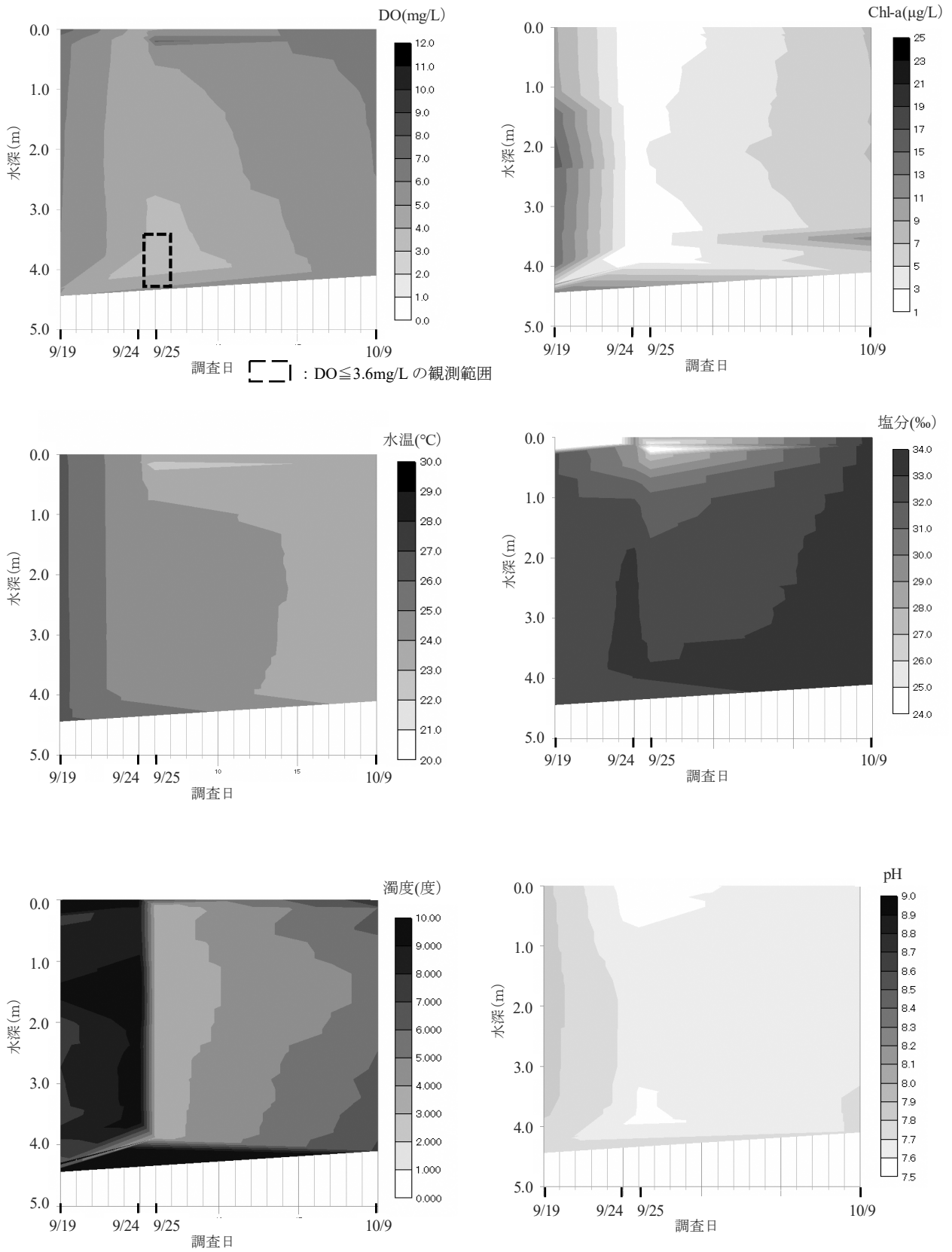


図 11 各項目鉛直分布の経時変化 (令和元年 9 月 19 日～10 月 9 日)

平成30年6月26日から7月18日の調査期間中, 7月5日及び6日の2日間合計降水量が337mmの大雨を記録している。DOについては, 6月26日において水深3.6m以深で3.6mg/L以下の貧酸素状態であり, 7月3日には表層から3.7m付近まで貧酸素状態となっていた。大雨から4日後の7月10日には, 表層から3.0m付近までは植物プランクトンの増殖により過飽和状態となっていたが, 4.4m以深では貧酸素状態となっていることが確認された。これは大雨の影響により水深1.0~2.0m付近に強い塩分躍層が形成されたことにより, 水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた。その後, 表層と底層の塩分差は7月18日まで継続し, 貧酸素状態は確認されなかったものの, 表層に比べると底層付近ではDOがやや低くなる状況が続いた(図8)。

平成30年9月7日から10月3日の調査期間中, 9月7日から10日にかけて40.5mm, 9月20日から22日にかけて43.5mm, 9月28日から30日にかけて70mmの雨が降っている。DOについては, 9月7日調査時には水深0.7m以深で貧酸素状態, 9月11日調査時には表層付近までDOは過飽和状態であるが, 底層直上では3.9mg/Lと低めの値を示した。これは, 9月19日調査前の1週間平均気温が25℃を超える日が続いたことにより表層水が温められて底層との水温差が生じ, それに伴う密度差の影響で水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた(図9)。

令和元年6月5日から6月19日の調査期間中, DOについては, 6月5日調査時は植物プランクトン増殖の影響

により過飽和状態となっており, 6月7日調査時と10日調査時には貧酸素状態は確認されなかった。6月19日には底層直上でのみ貧酸素状態が確認された。これは, 6月14日から15日にかけての45.5mmの降雨に伴い生じた鉛直方向の塩分差により水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた(図10)。

令和元年9月19日から10月9日の調査期間中, DOについては, 貧酸素状態は9月25日調査時の底層直上でのみ確認され, それ以外では確認されなかった。9月20日から23日にかけて71mm雨が降っており, これに伴い生じた鉛直方向の塩分差により水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた(図11)。

なお, 平成30年7月3日及び9月7日に表層付近まで貧酸素状態が確認されたことに関し, 他都市では, 沿岸部において離岸風の連吹に伴い沿岸の表層水が離岸し, それとともに貧酸素状態の底層水塊が湧昇する現象が確認されている<sup>4~5)</sup>。そこで調査日前後の風向きを調べたところ, 図12の風配図に示すとおり, 平成30年6月26日から7月4日, 及び平成30年9月1日から9月9日にかけては南寄りの風が多かった。また, 地行浜から約1.2kmの距離にある博多湾中部海域の公共用水域常時監視点(補助地点)C-9において, 平成30年6月25日, 8月25日及び9月7日に底層の貧酸素水塊が確認されている<sup>6)</sup>。平成30年6月26日から7月4日, 及び平成30年9月1日から9月9日にかけての離岸方向の風に伴い博多湾中部海域で発生していた貧酸素水塊が湧昇し, 7月3日調査時及び9月7日調査時に表層付近が貧酸素状態となった可能性も推察されるが, その挙動については明確には分らなかった。

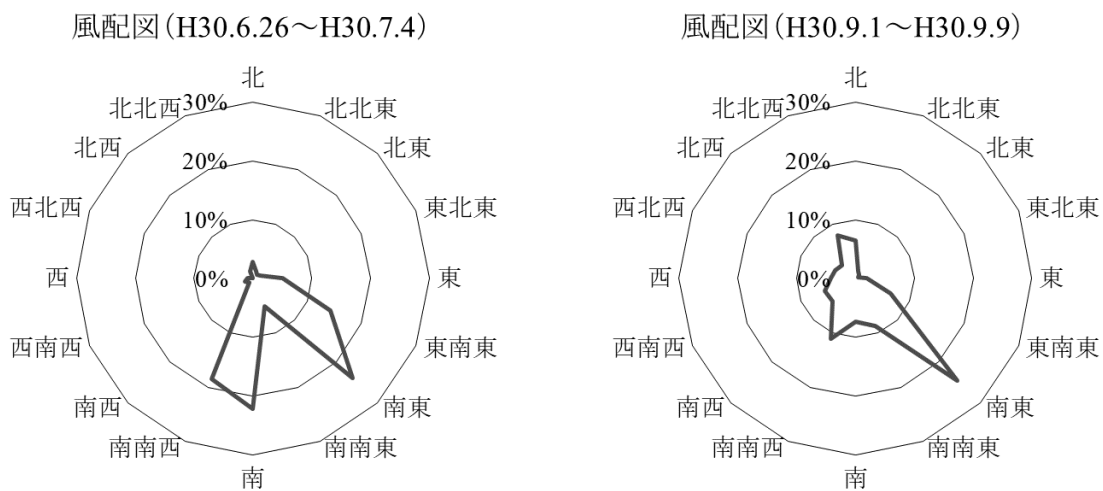


図12 福岡における風配図(左:平成30年6月26日~7月4日,右:平成30年9月1日~9月9日)

以上の調査により、降雨後に底層付近で貧酸素状態となっている様子が確認されたが、これは降雨に伴う淡水流入で表層と底層の塩分差が形成され水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた。また、降雨後に気温と全天日射量が高い日が続いた後においては植物プランクトンが増殖する様子も確認され、降雨に伴い貧酸素化しやすい状態となっていることが確認された。貧酸素水塊の形成過程についてより明らかにするためには、連続的に DO データを取得し、貧酸素水塊形成と気象条件等との関連について調査する必要があると思われる。

#### 4 まとめ

降雨に伴う栄養塩類の河川からの流入状況と沿岸部における動態、及び沿岸部における降雨後の貧酸素水塊発生状況の実態調査を行った。

樋井川における降雨に伴う栄養塩類の流入状況については、晴天時に比べ降雨時の負荷量は T-N が約 5~16 倍、T-P が約 12~27 倍となった。また、流出形態については、リンは多くが懸濁態として流出していると推察された。沿岸部において降雨後の栄養塩類の動態については、T-N は降雨後に増加する様子も確認されたが、T-P は明確な挙動は確認されなかった。

沿岸部における降雨後の各水質項目の鉛直分布の動態を確認したところ、降雨後に底層付近で貧酸素状態とな

っている様子が確認された。これは降雨に伴う淡水流入により表層と底層の塩分差が形成され水塊の鉛直混合が進まなかったことが要因として考えられた。また、降雨後に気温と全天日射量が高い日が続いた後においては植物プランクトンが増殖する様子も確認された。これらの降雨に伴う鉛直方向の塩分差の形成や植物プランクトンの増殖等により、貧酸素化しやすい状態となっていることが確認された。より詳細に貧酸素水塊形成の過程について知見を得るため、沿岸部において底層 DO の連続測定を行い、貧酸素水塊形成と気象条件等との関連について調査をする必要があると思われる。

#### 文献

- 1) 福岡市環境局：博多湾環境保全計画（第二次），平成 28 年 9 月
- 2) 福岡市環境局：平成 24 年度博多湾流域の河川流量・負荷量調査業務委託
- 3) 福岡県：樋井川水系河川整備計画，平成 26 年 5 月
- 4) 風呂田利夫：東京湾における青潮の発生，水質汚濁研究，10，470~474
- 5) 藤原隆一，他：観測結果からみた大阪湾で発生した青潮の特性，土木学会論文集 B2（海岸工学），66，1016~1020
- 6) 福岡市環境局：平成 30 年度博多湾環境保全計画に係るモニタリング業務（貧酸素水調査）委託