

三河湾東部、渥美湾における赤潮および貧酸素水塊形成に及ぼす 降雨に伴う河川水流入の影響

柘植朝太郎・大橋昭彦・山田智・岩田靖宏・石田基雄

Influence of river discharge with rain on the formation of the red tide and hypoxic water in the eastern Mikawa Bay (Atsumi Bay).

TSUGE Asataro^{*1}, OHASHI Akihiko^{*2}, YAMADA Satoshi^{*1}, IWATA Yasuhiro^{*1} and ISHIDA Motoo^{*1}

Abstract : We investigated the influence of the river discharge with rain on the distribution of chlorophyll *a* and nutrients at offshore area of Toyo River mouth in Atsumi Bay during summer season in 2009 and 2010. DIN and DSi concentrations increased in the northern part of Atsumi Bay where salinity was low, two days after the rain. Because of the increase of nutrients supply, chlorophyll *a* concentrations were increased by the phytoplankton bloom in the same area, so that nutrient concentrations were quickly decreased. Dissolved oxygen in the bottom layer was increased after the rain. This may be due to vertical mixture of waters induced by the wind that increased in the period of rain. Dissolved oxygen in the bottom layer quickly declined to the same level as that before rain in five days after the rain. It might be suggested that oxygen consumption rate was accelerated by the increase of mineralization of particulate organic matter derived from the phytoplankton bloom.

キーワード; 降雨, 三河湾, 流入負荷, 赤潮, 貧酸素水塊

典型的な閉鎖性内湾である伊勢・三河湾は、2001 年から窒素・リンの総量規制が実施されているが環境基準達成率は横ばいとなっている。¹⁾また、赤潮や貧酸素水塊は改善する傾向はみられず、²⁻³⁾特に三河湾東部では貧酸素水塊から発生する苦潮（青潮）が原因となるアサリの大量斃死が大きな問題となっている。⁴⁻⁵⁾

湾内への河川水の流入は、陸上由来の有機物を負荷するだけではなく、大量の栄養塩を供給することによって湾内の一次生産を活性化させる。⁶⁾広島湾や大阪湾等では降雨時には河川を通じて海域に多量の栄養物質が供給され、それに伴う赤潮も報告されている。⁷⁻¹⁰⁾また、降雨時の発生負荷は年間の総負荷量に対して T-N（全窒素）で 66%、T-P（全リン）で 77%に達するという報告もある。¹¹⁾これらのことから降雨は赤潮発生、それに伴う貧酸素水塊の形成と密接に関係があるといえるが、降雨時の海域への負荷流入、それに伴う赤潮・貧酸素化について詳細に調査した例はない。そこで本研究では、降雨による汚濁負荷の流入に伴う植物プランクトンの増殖と、それに伴

う底層の貧酸素化機構を明らかにすることを目的として観測を実施した。

方 法

調査は 2009, 2010 年 8-9 月の降雨時に、それぞれ降雨前と降雨後数日間隔で 3-4 回実施した。調査日は 2009 年においては 8 月 26 日、9 月 14 日及び 9 月 24 日、2010 年は、9 月 7 日、9 月 10 日、9 月 13 日及び 9 月 17 日とした。

図 1 に調査点および調査項目を示した。調査点は渥美湾奥部に 18 地点設定し、●地点では採水を表底層の 2 層で行い、栄養塩類（溶存態無機窒素:DIN, 溶存態無機リン:DIP, 溶存態シリカ(2010 年のみ):DSi）およびクロロフィル *a* 量も調査した。試水は表層においては採水バケツ、底層(海底直上 1m)においてはバンドーン型採水器を用いて採水した。水温、塩分、溶存酸素は多項目水質計(SeaBird 社, 19plus V2)を用いて測定した。DIN, DIP, DSi 及びクロロフィル *a* 量はガラス繊維ろ紙(Whatman GF/C)を用いて試水を吸引濾過後、栄養塩類は自動分析装置 AAC

*1 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

*2 愛知県東三河農林水産事務所水産課 (Fishery Division, HigashiMikawa Agriculture, Forestry and Fisheries Office, Aichi Prefectural Government, Toyohashi, Aichi 441-0021, Japan)

Figure 1 consists of four bar charts arranged in a 2x2 grid, showing daily calculated precipitation (mm) for two stations: 新城 (Xincheng) and 豊橋 (Fengqiao) in 2009 and 2010. The y-axis for all charts is '日積算降水量 (mm)' (Daily Accumulated Precipitation (mm)) ranging from 0 to 140. The x-axis shows dates from 8/1 to 10/1.

- 2009年 新城 (2009 Xincheng):** Shows several precipitation events, with the highest peak around 50 mm in late August. Arrows point to the ground, indicating precipitation.
- 2010年 新城 (2010 Xincheng):** Shows a much higher total precipitation, with a major peak exceeding 120 mm in late October. Arrows point to the sky, indicating no precipitation.
- 2009年 豊橋 (2009 Fengqiao):** Shows several precipitation events, with the highest peak around 50 mm in late August. Arrows point to the ground, indicating precipitation.
- 2010年 豊橋 (2010 Fengqiao):** Shows a much higher total precipitation, with a major peak around 80 mm in late October. Arrows point to the sky, indicating no precipitation.

＊矢印は観測日を示す

り、湾外との海水交換が小さい事が知られている。湾東奥部は埋め立てが進行し、豊川、汐川、梅田川、音羽川及び西田川などが流入しており、六条潟や汐川干潟などの干潟を有している。そのうち豊川が渥美湾における総流入水量の 51% を占める。豊川は、幹川流路延長 77 km、流域面積 724 km² を有する一級河川であり、27 本の支流を有する豊川水系を形成している。¹²⁾ 本流の水質は平成 21 年度の平均 BOD 値が 0.8 mg/L で全国有数の清浄な水質を保っており、感潮域を除けば環境基準 A 類型に属している。¹³⁾

渥美湾は三河湾東部を占める湾で、西は湾口の島しょ部、北は西三河地区や蒲郡市、南は渥美半島に囲まれてお

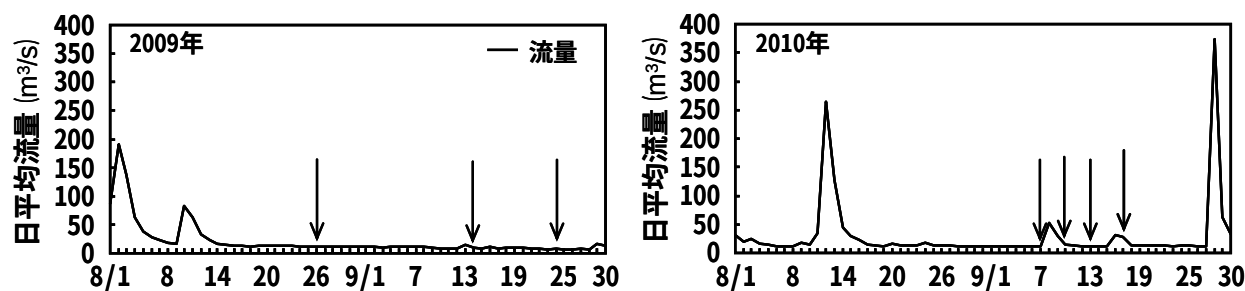


図3 2009年および2010年8～9月の豊川市当古における豊川の日平均流量

*矢印は観測日を示す

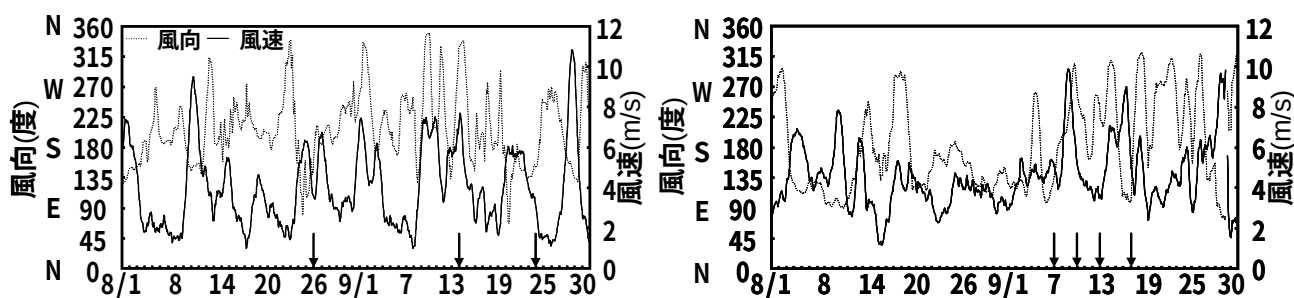


図4 2009年(左図)および2010年(右図) 8～9月の1号ブイにおける風向・風速

(毎正時における2分間のスカラー平均) *矢印は観測日を示す

結 果

(1)降雨量および豊川の流量の変動

2009年および2010年の8月から9月の豊川流域の上流に位置する新城市および下流に位置する豊橋市における降水量の変動を図2に示した。2009年の8月1日から8月11日までの期間には度々降雨があり8月10日に最大となる、豊橋市で46 mm、新城市で49.5 mmの降雨が観測された。そこから9月12日（豊橋市で12 mm、新城市で14.5 mm）まで降雨はなかった。その後は9月15日に降雨があり、9月末の3日間には豊橋市で49 mm、新城市で47.5 mmの降雨が観測された。

2010年の8月1日から8月13日までの期間には度々降雨があり、8月11日、12日の2日間で、豊橋市で49.5 mm、新城市で79 mmの降雨が観測された。8月14日から8月24日までは新城市のみで降雨が観測された。そこから9月8日（豊橋市で8 mm、新城市で29.5 mm）まで降雨はなかった。その後は9月16日にまとまった降雨があり、9月末まで度々降雨が観測された。

2009年および2010年の8月から9月の当古（豊川市）における豊川の日平均流量を図3に示した。観測期間の豊川の日平均流量は降雨と連動しており、短期間に大きく変動した。2009年の流量は8月2日に最大の190 m^3/s となり、その後2日間で急激に減少したが、8月10日に急増し83 m^3/s に達した。それ以降は50 m^3/s 以下で推移した。観測日の前後は降雨がなかった為、10 m^3/s 程度で推移していたが、9月13日に15 m^3/s まで増加した。

2010年の豊川の日平均流量は8月12日に263 m^3/s に達し、その後2日間で50 m^3/s 以下まで急激に減少した。それ以降は降雨後調査の2日前の9月8日に53 m^3/s まで増加し、その後はしばらく50 m^3/s 以下で推移したが、9月28日に観測期間最大の374 m^3/s まで急増し、その後急激に減少した。

(2)風向および風速の変動

2009年および2010年の8月から9月にかけての自動観測ブイにおける風向および風速の変動(24時間移動平均)を図4に示した。風向は南方向が中心で度々西から北西に変わった。風速は1から11 m/s の間で推移した。2009年の観測日前後では9月9日から11日頃にかけて風が強まり、北西風が7 m/s 前後で吹いた。2010年の観測日周辺では、9月8日から9日にかけて7～10 m/s の強い風が吹いていた。風向は当初は南から南東であったが9月9日に入ると北西に転じた。また14日から16日にかけても風が強まり、7 m/s 前後で推移した。風向は当初は北西風が吹き15日頃からは南東に転じた。

(3)塩分の変動

図5に2009年および2010年の調査時の表層塩分の分布を示した。2009年の降雨前調査時は、北部ほど塩分が低い傾向がみられた。一方、2010年の降雨前調査時の塩分水平分布は、比較的均一な状態であった。降雨2日後調査時には2009、2010年ともに豊川河口の沖を中心に低塩分域がみられた。しかし、2009年は降雨前調査から2週間以上降雨がなかった影響で全体的に塩分は上昇していた。

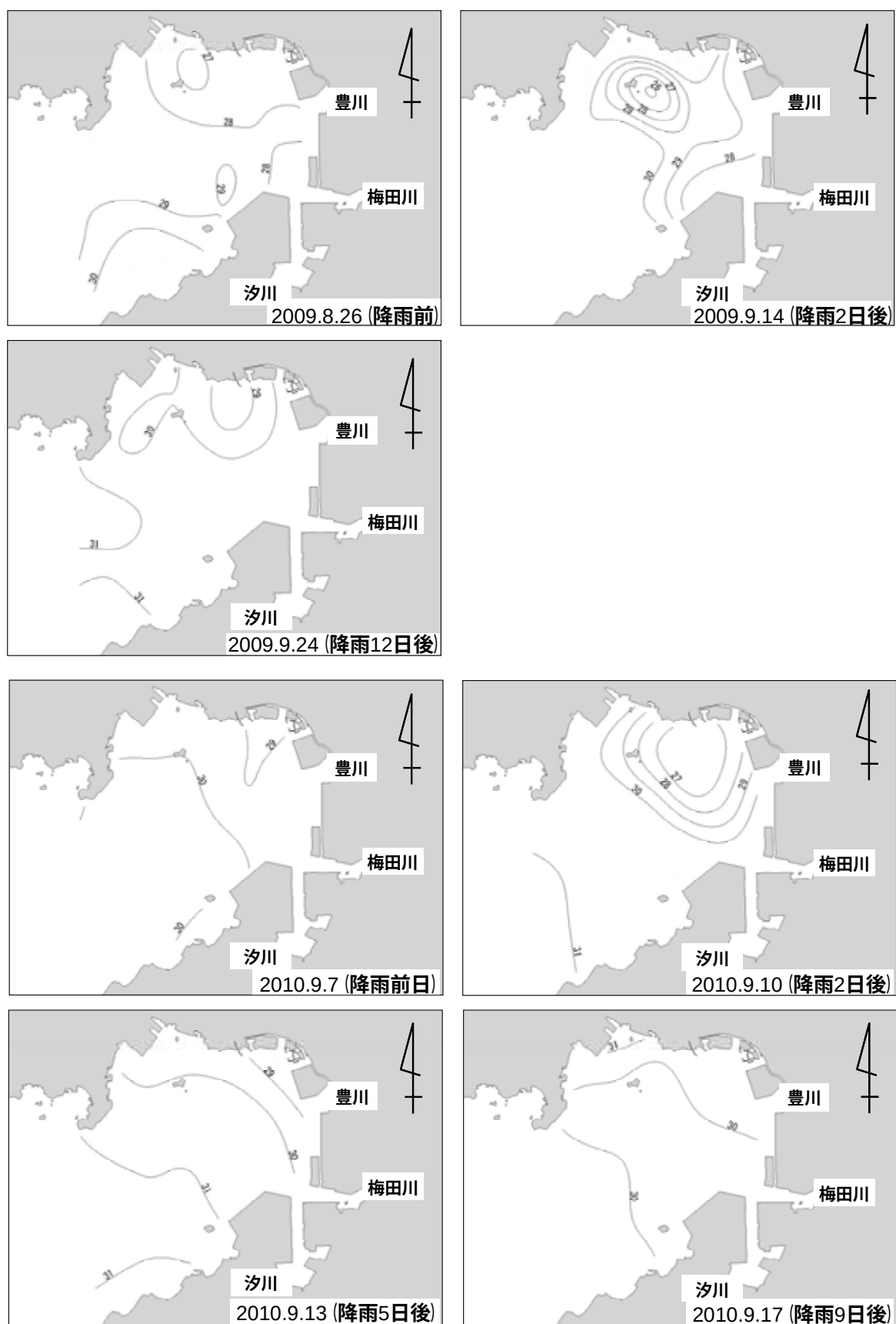


図5 2009年および2010年の調査時の表層塩分の分布

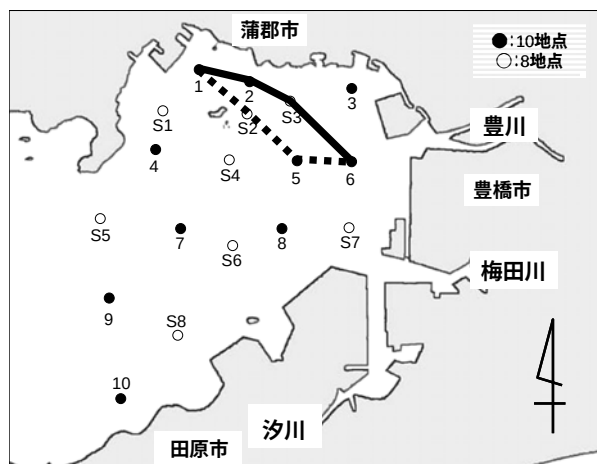


図6 鉛直分布の断面ライン (---:2009年 —:2010年)

それ以後は 2009,2010 年ともに短期間で局所的な低塩分域は消滅した。

図 6 に示した断面に沿って,2009 年および 2010 年の調査時の塩分鉛直分布を図 7 に示した。断面は表層塩分の低下が大きかった地点を通るように,2009 年は測点 1,S2,5,6 の 4 点,2010 年は測点 1,2,S3,6 の 4 点で作成した(図 6)。降雨前の塩分鉛直分布は 2009 年においては豊川の対岸側で塩分が低く表層から底層まで比較的均一な状態だった。また,豊川河口側では成層していた。2010 年においては全体的に成層していた。降雨 2 日後には 2009,2010 年ともに 2m 以浅で出水の影響が強く見られ,下層では成層も緩やかになっていた。2009 年の降雨 12 日後には,塩分が上昇し,比較的均一な状態となった。一方,2010 年においては降雨 5 日後には塩分が上昇し,降雨前の成層した状態に戻り,降雨 9 日後には,5 日後よりも更に塩分が上昇し,成層が強まった。

(4) DIN の変動

図 8 に 2009 年および 2010 年の調査時の表底層の DIN 分布を示した。降雨前の表層 DIN は両年とも少なく,全地点で $50 \mu\text{g/L}$ 以下だった。特に 2010 年は全点 $20 \mu\text{g/L}$ 以下だった。一方,底層 DIN は両年ともに表層と比較すると多く, $100 \mu\text{g/L}$ 以上の測点もみられた。降雨 2 日後の表層 DIN は両年とも,豊川河口沖で増加した。2009 年の増加は大きく,最大で $418 \mu\text{g/L}$ だったが,2010 年の増加は 2009 年に比べるとかなり少なく,最大で $53 \mu\text{g/L}$ だった。また,両年とも底層 DIN は一部を除いて減少した。それ以降の表層 DIN は 2010 年の降雨 9 日後調査時の北部海域の一部を除いて $50 \mu\text{g/L}$ 以下だった。一方,底層 DIN は降雨 2 日後よりも増加しており,2010 年調査では降雨後日数の経過とともに増加する傾向がみられた。

(5) DIP の変動

図 9 に 2009 年および 2010 年の調査時の表底層の DIP 分布を示した。DIP の変動は DIN とは異なり, 2009 年と 2010 年で傾向に大きな違いがあった。降雨前の表層 DIP は両年ともに少なく,2010 年の豊川河口近傍を除いて $13 \mu\text{g/L}$ 以下であった。一方,底層 DIP は両年ともに表層と比べると多いが,北部海域で少ない傾向がみられた。降雨 2 日後の表層 DIP は,2009 年は豊川河口沖で増加がみられたが,2010 年は降雨前と大きな差はなかった。底層 DIP は 2009 年の北部海域では増加したが,その他では減少していた。2009 年の降雨 12 日後の DIP は降雨 2 日後に大きく増加した海域で急激に減少しており,その他では降雨 2 日後とほぼ同等だった。一方,底層 DIP は降雨前よりも増加していた。2010 年の降雨 5 日後の表層 DIP は,降雨前や降雨 2 日後と大きな変化はなかった。底層 DIP は南部海域を中心として増加した。降雨 9 日後の DIP は,表底層ともに北部海域を中心に増加した。

(6) DSi の変動

図 10 に 2010 年の調査時の表底層の DSi 分布を示した。降雨前の表層 DSi は,全点で $60 \mu\text{g/L}$ 以上存在していた。また,底層 DSi は全地点で $250 \mu\text{g/L}$ 以上の濃度で存在し, $1000 \mu\text{g/L}$ を越える測点もあった。降雨 2 日後の表層 DSi は豊川河口に近い地点の表層で大幅に増加した。一方,底層 DSi は北部から中央部にかけて減少した。そして降雨 5 日後の表層 DSi は再び降雨前の水準に戻った。また,底層 DSi は北東部で低下した。降雨 9 日後の表層 DSi は北部を中心に増加した。底層 DSi は南部を除いて増加した。

(7) 各栄養塩類の元素比の変動

表 1 に調査期間の各栄養塩類の元素比を示した。2009 年の降雨前の表層の DIN:DIP 比は,北部海域でリンが枯渇しており,DIN:DIP 比が Redfield 比¹⁴⁻¹⁵⁾の 16 を上回ったが,南部海域では DIN が枯渇状態であり 16 未満だった。降雨 2 日後には陸水の影響が強い海域で DIN が増加し,DIN:DIP 比が 16 を上回っていた。降雨 12 日後には DIN が枯渇したため DIN:DIP 比が低下した。底層では,降雨前における北部海域の一部を除き DIN:DIP 比が 16 を下回った。2010 年の降雨前の表層の DIN:DIP 比は,DIN が枯渇しているため,ほとんどの測点で 16 を下回った。降雨 2 日後には陸水の影響が強い海域で DIN:DIP 比が 16 以上に上昇した。それ以後の降雨 5 日後や 12 日後には DIN が枯渇して降雨前同様,ほとんどの測点で DIN:DIP が 16 を下回った。底層においては全点で DIN:DIP が 16 を下回った。また,DSi については度々,DSi:DIP 比が Redfield 比の 16 を下回ったが,DSi:DIN 比が Redfield 比

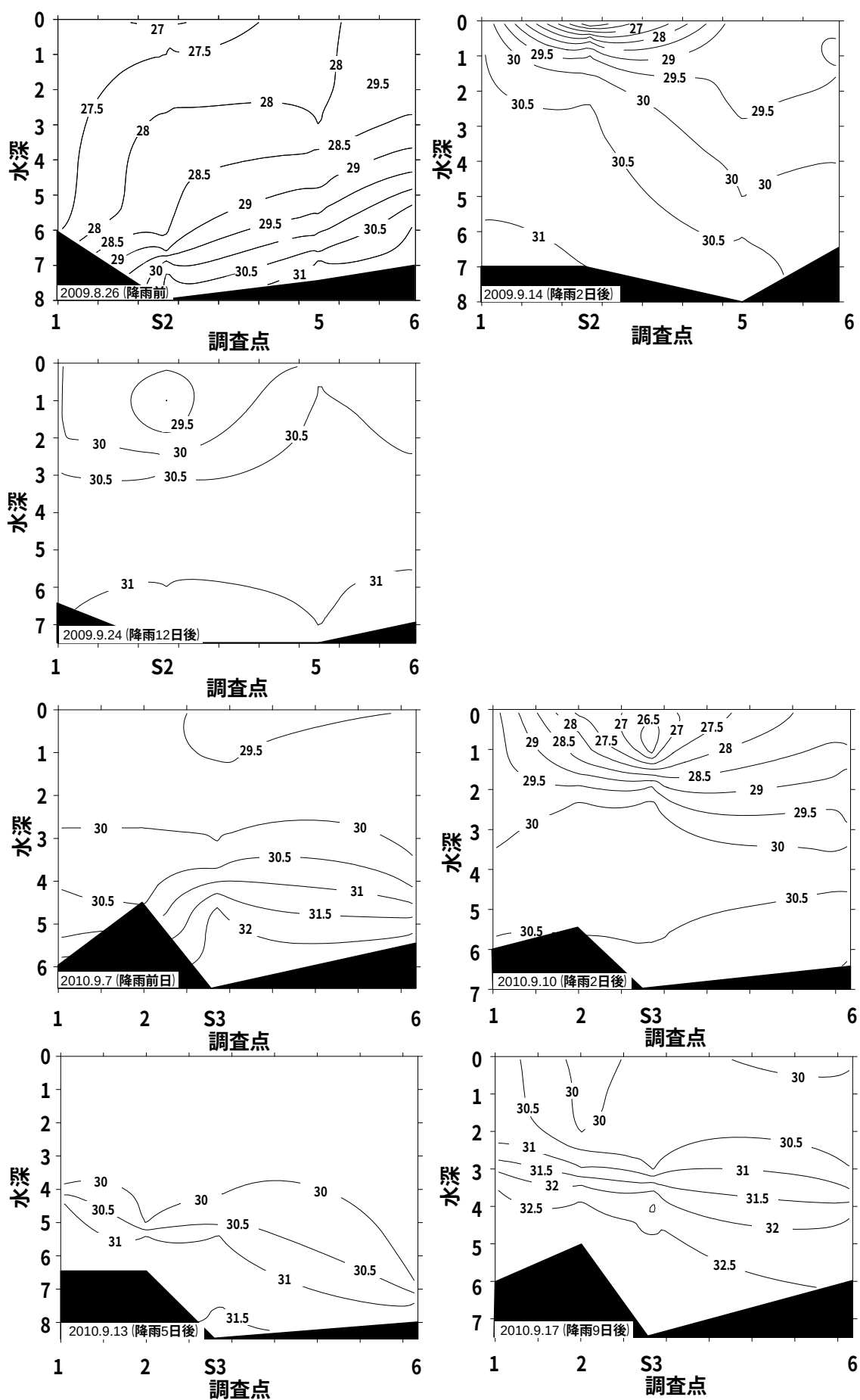


図7 2009年および2010年の調査時の塩分鉛直分布

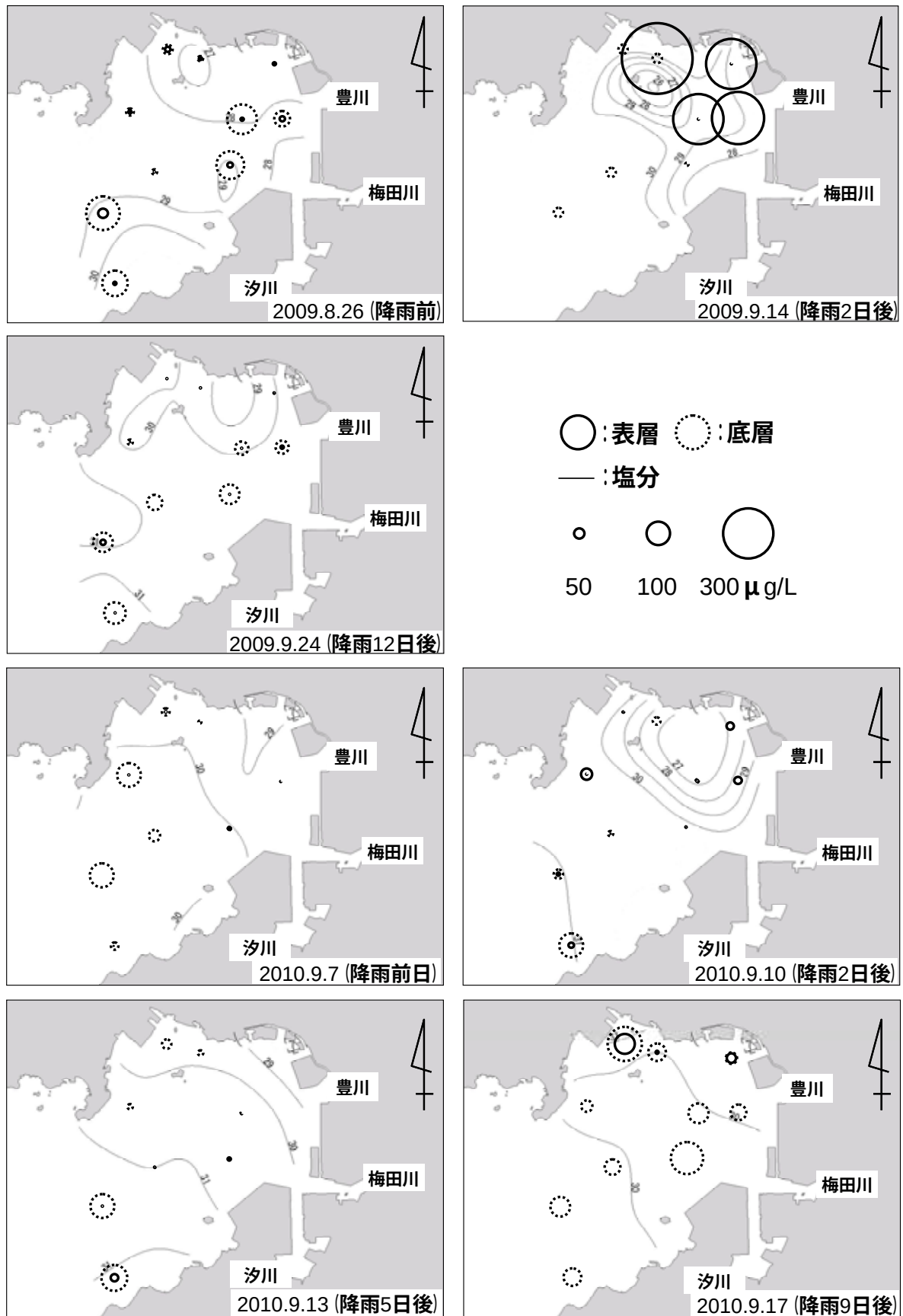


図8 2009年および2010年の調査時の表層塩分と表底層のDIN分布

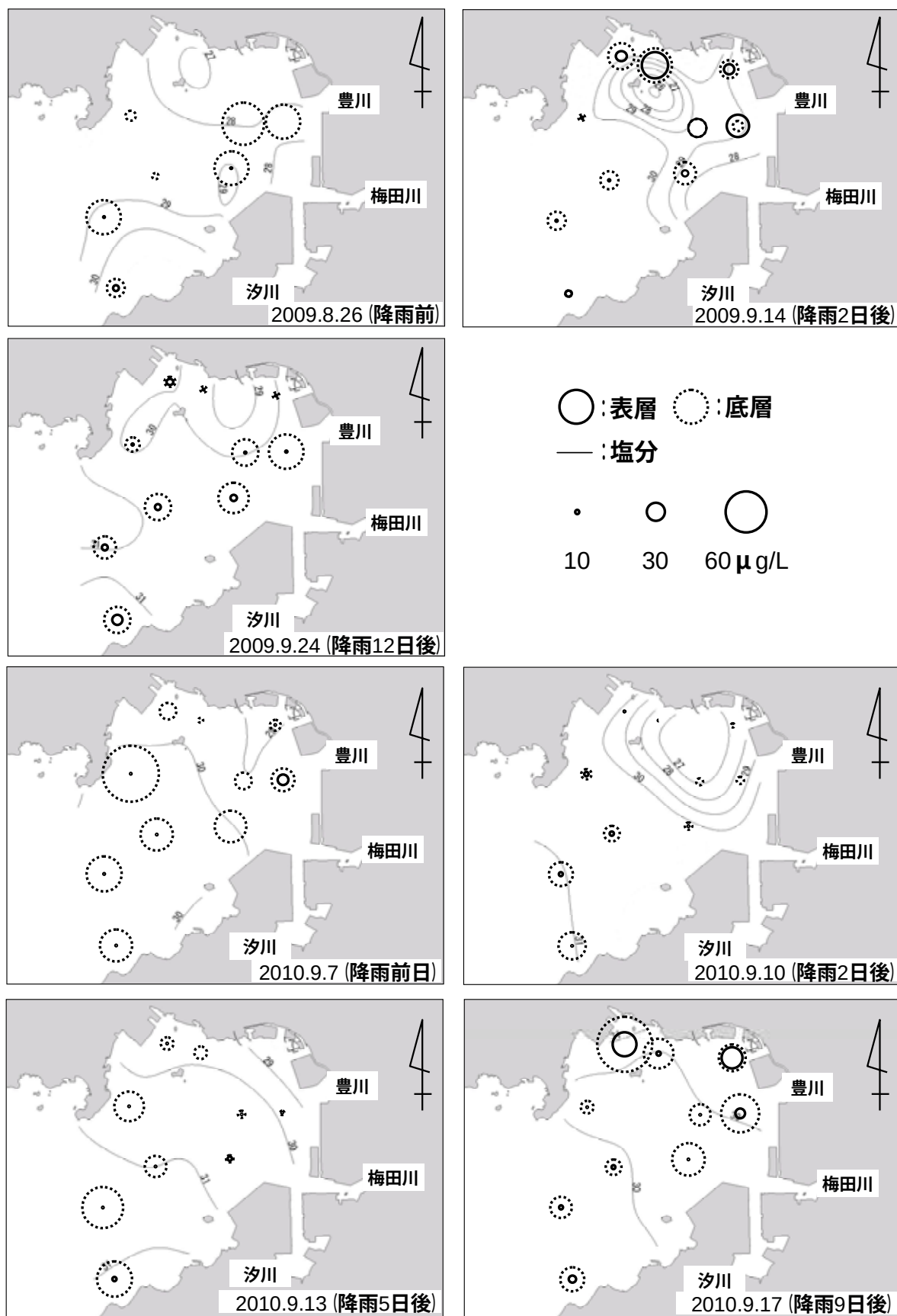


図9 2009年および2010年の調査時の表層塩分と表底層のDIP分布

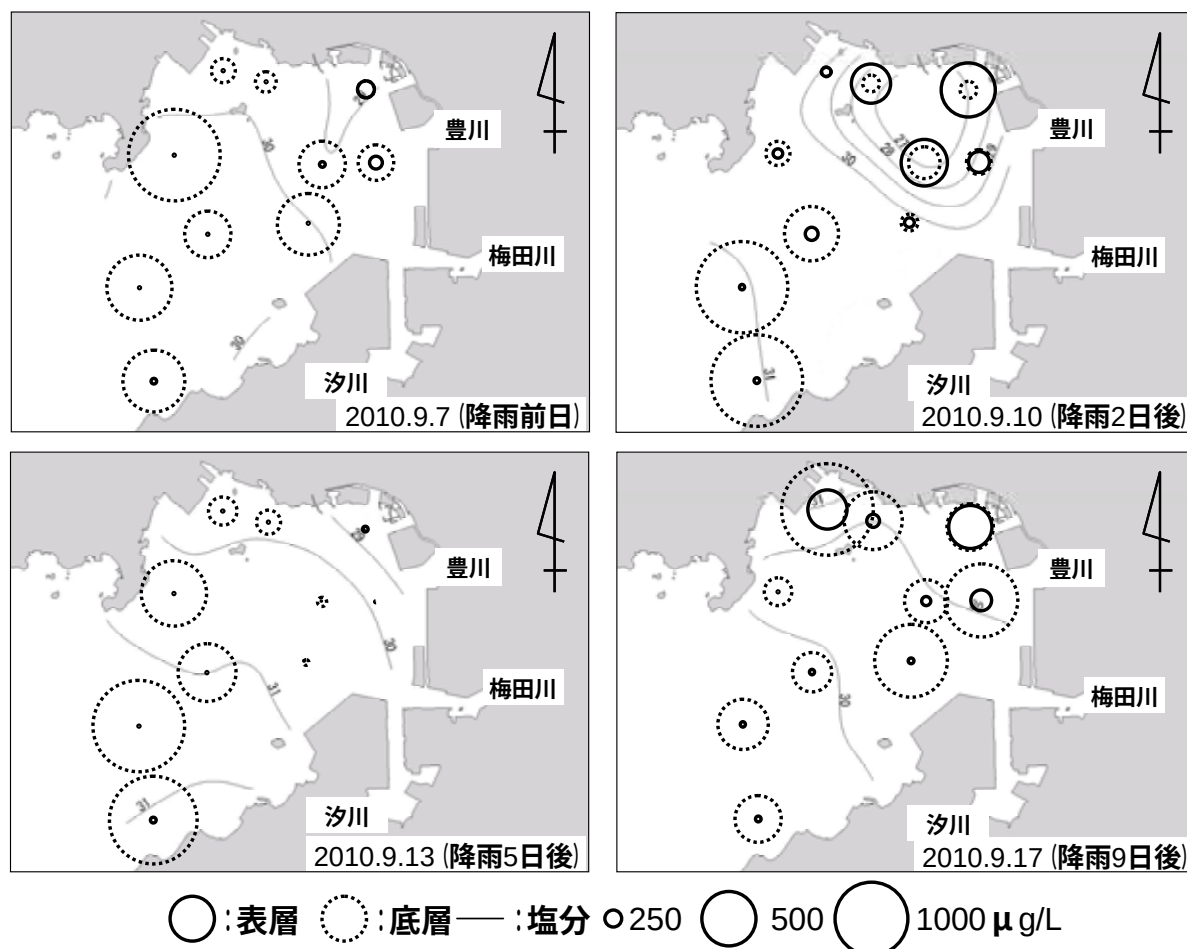


図10 2010年の調査時の表層塩分と表底層のDSi分布

の1未満になることはなかった。

(8)植物プランクトンの増減

図11に2009年および2010年の調査時の表底層のクロロフィル a 分布を示した。また、赤潮については明確な基準はないが、本県においてはクロロフィル a が 30 mg/m^3 を越えた場合は赤潮としている。降雨前の表層クロロフィル a は両年ともに北部海域で高かった。また、底層クロロフィル a も表層とほぼ同じ傾向であった。降雨2日後には、両年ともに豊川河口沖で増加しており、特に2010年は最高 46 mg/m^3 まで増加し、*Leptocylindrus danicus*や*Pseudo-nitzschia* spp.を主体とした珪藻類による赤潮が確認された。また、底層クロロフィル a も表層とほぼ同じ傾向であった。2009年においては降雨12日後に河口近傍でクロロフィル a 濃度が更に増加し、その海域では*Chaetoceros* spp.や*Leptocylindrus danicus*を主体とした赤潮が確認された。また、底層クロロフィル a は全体的に減少した。2010年においては降雨5日後の表層クロロフィル a は、降雨2日後に増加した海域で減少した。底層クロロフィル a は北部海域の一部を除いて降雨前、2日後と同程度であった。そして降雨9日後の表層クロロフィ

ル a は、豊川河口域近傍で高い傾向を示した。底層クロロフィル a は全体的に減少した。

(9)底層溶存酸素の変動

図12に2009年および2010年の調査時の底層溶存酸素の分布を示した。溶存酸素飽和度30未満の海域を貧酸素水塊と定義すると、どちらの年も降雨2日後に貧酸素水塊が縮小した。また、2009年は降雨12日後、2010年は降雨5日後にはほぼ降雨前と同様の状態に戻った。2010年の降雨9日後には、湾の北部から東部沿岸に沿うように形成されていた。

考 察

降雨前の表層DIN、DIPは2009、2010年ともに降雨が2週間ほどなかった影響により少なかったが(図8,9)、クロロフィル a 濃度は北部海域で 10 mg/m^3 以上あった(図11)。従って、北部海域においては、降雨前においても何らかの形で栄養塩類が供給され、植物プランクトン現存量が維持されていたと考えられる。北部海域は水深が浅いところが多く、風や潮汐の影響を受けやすいと考えられる。加えて、底層の栄養塩も南部に比べ少ない。これらのことから平時から風などで引き起こされる湧昇や鉛直混合によ

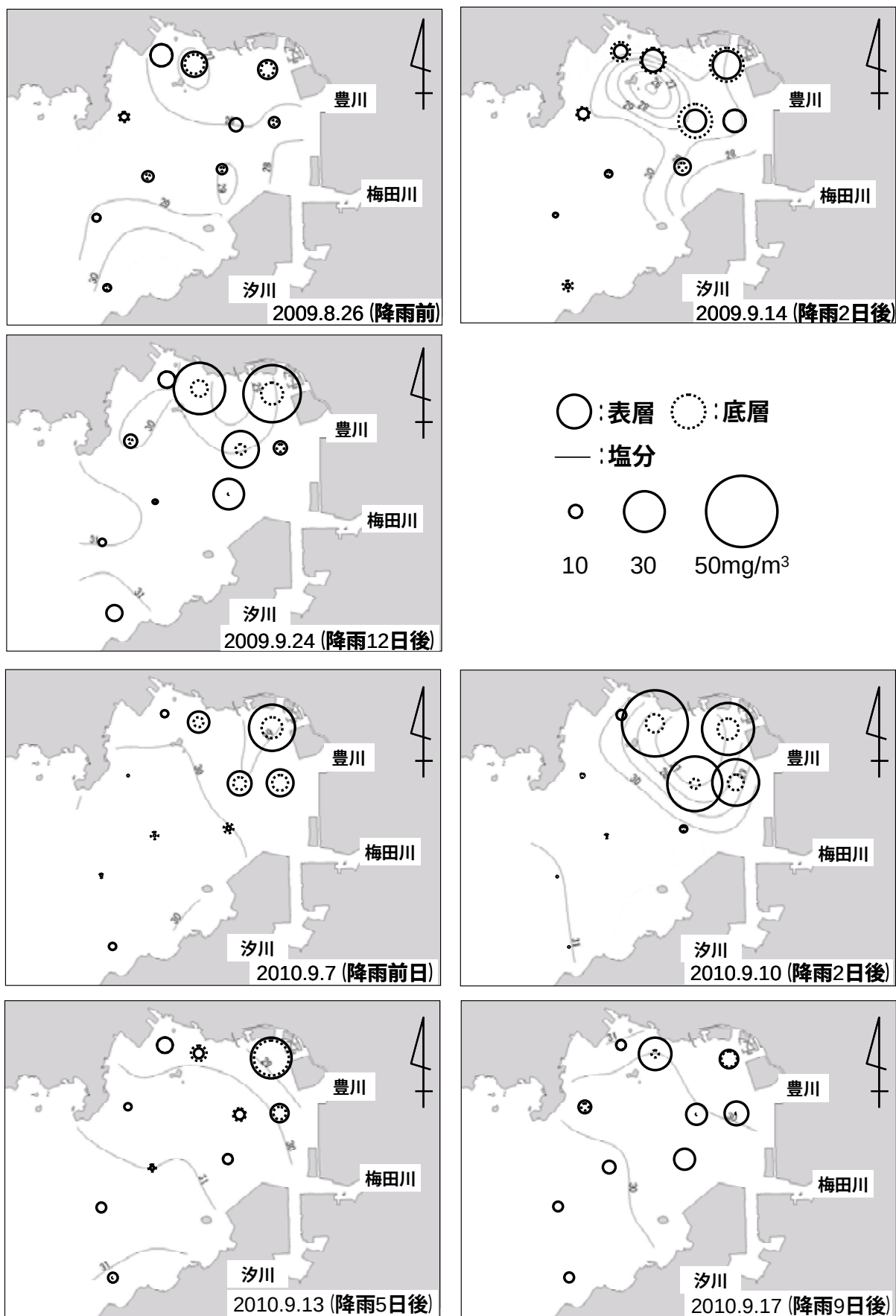


図11 2009年および2010年の調査時の表層塩分と表底層のクロロフィルa分布

表1 各観測時の栄養塩類の元素比 (モル比) * 灰色はDIN:DIP比が16以上

2009/8/26(降雨前)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	∞	392.56	155.63	20.63	35.52	286.10	6.16	8.12	13.15	3.19
	底層	65.69	25.98	13.40	4.18	4.35	3.31	3.82	5.37	6.50	8.26
2009/9/14(降雨2日後)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	1.05	22.73	31.40	1.02	22.00	19.57	0.67	0.22	0.01	0.80
	底層	3.32	2.69	1.05	1.06	1.22	0.22	4.51	1.96	4.52	0.96
2009/9/24(降雨12日後)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	0.52	5.32	2.04	4.11	0.17	2.91	1.37	3.16	0.45	2.42
	底層	1.59	0.87	2.43	5.25	5.34	4.83	6.54	7.06	9.47	8.33
2010/9/7(降雨前)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	15.16	17.14	0.61	2.82	13.32	0.69	2.99	12.31	1.01	5.09
	底層	3.51	4.23	0.22	2.80	0.04	0.93	2.81	0.84	4.63	1.91
DSi/DIN	表層	1.64	5.32	59.71	4.31	7.55	17.85	5.24	2.27	15.45	4.14
	底層	4.15	7.44	70.40	5.48	658.09	14.70	5.12	22.10	3.86	9.18
DSi/DIP	表層	24.83	91.11	36.14	12.15	100.54	12.26	15.67	28.00	15.61	21.08
	底層	14.57	31.44	15.49	15.30	23.69	13.60	14.40	18.62	17.88	17.53
2010/9/10(降雨2日後)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	4.71	10.46	64.92	13.18	40.30	41.67	3.16	5.58	4.72	9.85
	底層	4.44	11.57	0.77	1.48	3.33	0.70	2.58	1.63	2.81	6.07
DSi/DIN	表層	4.76	41.25	6.48	1.12	10.73	2.66	4.60	3.31	2.65	1.10
	底層	4.45	2.33	31.77	10.78	6.77	26.98	9.09	7.90	8.71	3.84
DSi/DIP	表層	22.46	431.55	420.54	14.75	432.31	110.70	14.53	18.50	12.50	10.85
	底層	19.77	26.94	24.57	15.93	22.57	18.89	23.47	12.84	24.45	23.31
2010/9/13(降雨5日後)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	0.15	45.02	3.59	0.70	2.78	2.25	4.86	5.19	4.11	8.94
	底層	4.79	2.74	1.99	1.59	2.96	0.74	0.79	0.56	4.17	4.80
DSi/DIN	表層	137.48	3.53	43.96	18.55	4.86	4.35	2.33	2.12	2.86	1.27
	底層	4.36	6.40	23.48	13.48	4.64	11.96	31.03	21.18	5.53	4.92
DSi/DIP	表層	20.04	158.84	157.82	12.94	13.53	9.81	11.36	11.00	11.74	11.32
	底層	20.89	17.50	46.77	21.50	13.73	8.85	24.50	11.93	23.07	23.60
2010/9/17(降雨9日後)		北部						南部			
測点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN/DIP	表層	5.04	4.19	3.31	0.68	0.37	0.22	1.27	0.08	0.04	0.17
	底層	4.30	3.89	3.10	5.98	6.21	3.02	6.22	6.26	5.80	5.31
DSi/DIN	表層	3.25	5.26	5.98	17.49	60.61	94.16	10.75	188.96	289.79	61.21
	底層	4.07	5.08	5.89	3.48	3.50	6.54	3.90	3.47	3.99	3.98
DSi/DIP	表層	16.36	22.01	19.78	11.98	22.40	21.08	13.65	14.18	11.17	10.62
	底層	17.54	19.79	18.24	20.80	21.72	19.75	24.29	21.72	23.14	21.15

って表層へと栄養塩類が供給されている可能性がある。また、北部海域には豊川や中小河川が多く存在し、平時でも南部に比べ塩分が低い傾向があり、豊川や中小河川からの栄養塩供給の影響も考えられた。いずれにしても北部海域において植物プランクトン現存量が高く維持されているということは、降雨に伴う急激な栄養塩類の流入増大によって短時間で赤潮が引き起こされる要因となっていると考えられる。

2009,2010 年両年の降雨前後の塩分分布、栄養塩分布、クロロフィル *a* 分布から、豊川からの出水の影響は河口に近い渥美湾北部で顕著であった(図 8-11)。また、流軸か

らやや北側にずれた位置で塩分が低下した。これはコリオリの力によるものと推測される。

両年ともに底層の貧酸素水塊は降雨 2 日後に縮小した(図 12)。2009 年は降雨前後の調査間隔が広く、各項目の短期的な変化をとらえていないが、2010 年は 2-4 日間隔で調査が行われたため、降雨前後の短期間の変化をとらえることができた。ここでは 2010 年の変化について推定する。降雨後の貧酸素水塊の縮小については水塊の動きや鉛直混合の影響が考えられる。塩分鉛直分布によると降雨 2 日後の塩分は 2 m 以浅に極小がみられたが、底層でも低下していた(図 7)。愛知県水産試験場所有の自動観測ブイ

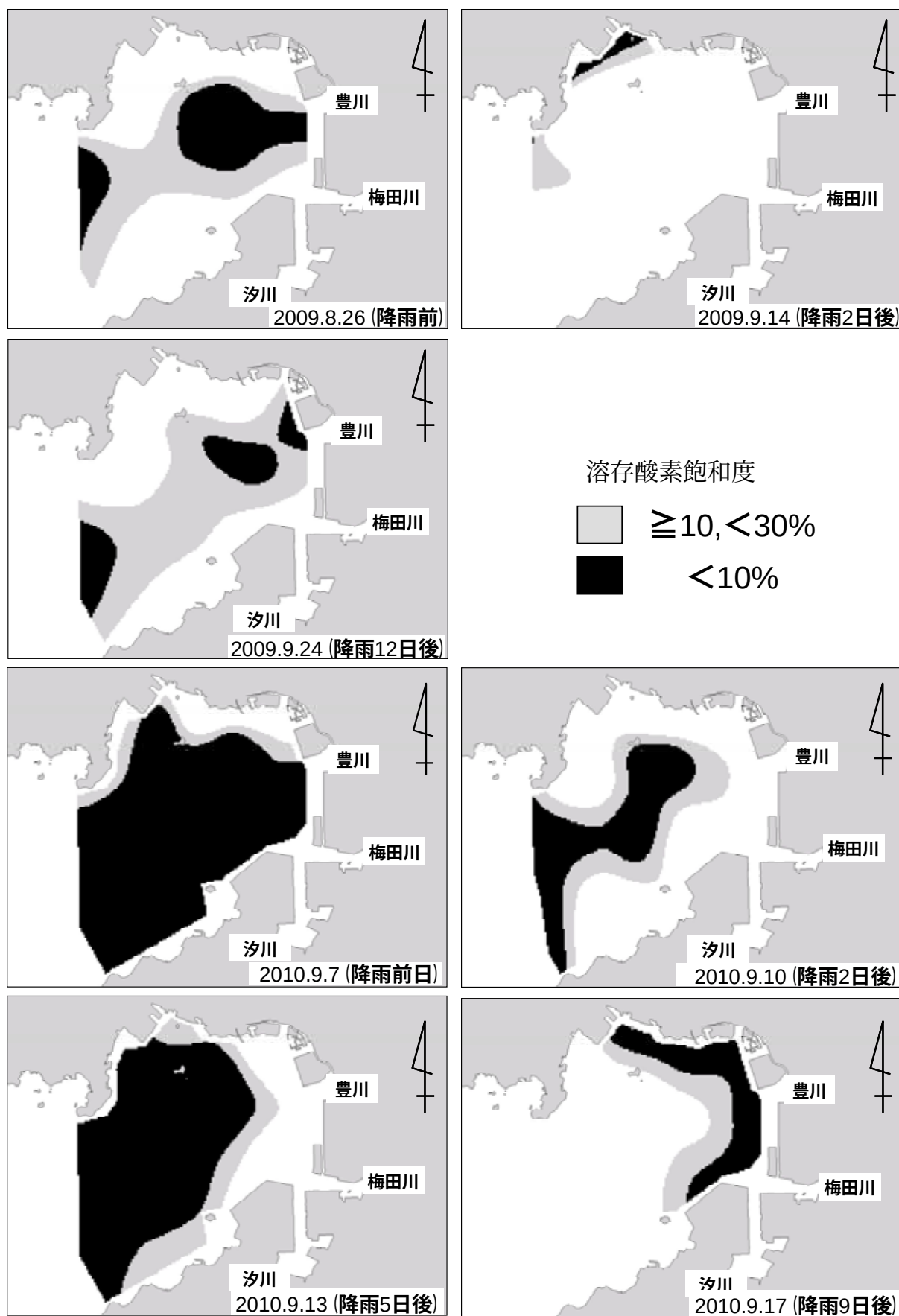


図12 2009年および2010年の調査時の底層溶存酸素の分布

(図 1, 測点 7)によると 2010 年は降雨日の 9 月 8 日から 9 日にかけて北西風が 7~10 m/s で吹いていた。また、渥美湾においては夏季に北西風が吹くと北部海域において苦潮が発生しやすいことが知られており、実際に 2010 年は降雨後の 9 月 13 日から 14 日にかけてと 17 日に渥美湾北部で苦潮発生が報告されている。²⁾したがって、降雨前調査から降雨後調査が実施されるまでの期間に、前線がもたらす北西風によって北部海域において苦潮が発生し、底層での塩分低下および貧酸素水塊の縮小が生じたと考えられた。

降雨 2 日後の表層においては、塩分低下域で栄養塩類が増加したが、降雨 5 日後以降の調査結果では表層の栄養塩類がほぼ枯渇していた。このことから河川水とともに供給された栄養塩類は、植物プランクトンの多寡によって異なるものの、比較的短期間で減少することが明らかになった。

海域における植物プランクトンの制限栄養塩は窒素である場合が多いとされる。¹⁶⁻¹⁹⁾本研究においては、降雨 2 日後を除いて多くの測点において DIN 濃度が低く、元素比を Redfield 比と比較するとリンやシリカに対して窒素が少なかった。このことから夏季の渥美湾においては主に窒素によって植物プランクトンの増殖が制限されていると考えられた。2009 年時の調査では、降雨 2 日後には塩分低下域で DIN が大幅に増加していたが、2010 年時にはわずかな増加がみられる程度であった。その要因としては、2010 年の降雨前調査時の DIN が全地点において 20 μ g/L 以下と枯渇状態であり、強い窒素制限になっていた所へ N:P 比の高い河川水が流入したため、元々 2009 年よりも多かった植物プランクトンに急速に吸収されてしまったことが考えられた。また、2010 年において降雨 2 日後に塩分低下が顕著であった北部海域においては、クロロフィル *a* 濃度が増加した一方、リンが枯渇しており DIN:DIP 比が Redfield 比よりも高くなっていた。Fisher *et al.*²⁰⁾ はチェサピーク湾ではダムからの陸水放流が少ない夏季においては窒素が植物プランクトンの制限栄養塩であるが、雪解けによりダムからの放流が多い春には湾内の DIN 濃度が上昇し、それに伴う植物プランクトンの増加により窒素制限からリン制限にシフトすることを報告している。本研究においては塩分低下域で N:P 比が上昇した。豊川下流(吉田大橋)の 2010 年度における栄養塩類の平均濃度¹⁾は DIN が 75.7 μ M、DIP が 1.2 μ M である。ここから算出された DIN:DIP 比は 63 で Redfield 比の 16 (モル比)を大幅に上回っている。このことから降雨前には長期間雨が降らないことや海水の成層によって窒素制限下におかれていた植物プランクトン群集が、降雨に伴う

Redfield 比 16 を大きく上回る陸水の流入によって増殖し、リンを活発に吸収した結果、N:P 比が上昇したと考えられた。このパターンは雪解けと降雨というイベントの違いはあるが、チェサピーク湾で捉えられた窒素からリンへの制限栄養塩のシフトと同様であると考えられる。

2010 年には DSi も測定した。DSi は珪藻類において必須の栄養塩であり、²¹⁻²²⁾河川上流域において岩石の風化作用により溶出し、地下水を通じた土壌からの流出を経て河川から海域へと供給されている。また、海底堆積物からの DSi の再生産速度は DIN や DIP に比べて遅く、²³⁻²⁴⁾供給に関しては河川への依存性が高い。²⁵⁾近年、流域開発による DSi 濃度および DSi:DIN 比の低下が世界各地で報告されており、²⁶⁾その結果として珪藻から鞭毛藻などへの卓越種の変化、さらに高次生態系への影響が懸念されている。²⁷⁾日本においては土壌の質や降水量の多さから DSi 濃度は高く、²⁸⁾DSi の溶解度が低下し、降水量も少なくなる冬季を除けばシリカ欠損はおきにくいと考えられる。しかし、三河湾においても冬季には珪藻類が優占する限界濃度とされる 2 μ M (約 56 μ g/L) を下回ることがある。²⁹⁻³⁰⁾また、三河湾に流入する大河川の 1 つである矢作川下流の DSi:DIN 比は 0.74~4.3 の間で変化し、平均では 2.3 であったとされている。³¹⁾本研究結果では DSi 濃度は DIN と比較すると観測期間を通じて多く、常に DSi:DIN 比は 1 以上だった。DIP に対しては DSi:DIP 比が 16 を下回るケースもあったが、DSi 濃度が 56 μ g/L を下回ったのは赤潮発生後である降雨 5 日後の豊川河口沖のみであった。これらのことから、DSi が DIN と比べて豊富に存在していたため、降雨後は珪藻類の赤潮が発生したと考えられた。

2010 年の調査結果によると、降雨 2 日後には表層塩分が低下し、塩分低下域では栄養塩、クロロフィル *a* の増加がみられた。そして降雨 5 日後には塩分分布、栄養塩分布、クロロフィル *a* 分布は降雨前とほぼ同じ状態へと戻っていた。また、降雨 2 日後に減少し、5 日後にはまだ増加していなかった底層の栄養塩が降雨 9 日後には増加していた。特に、降雨 2 日後に植物プランクトンが増加した豊川河口沖を中心として DIN、DIP ともに増加していた。このことから降雨後わずか 2 日前後でプランクトンが急増し、赤潮となり 5 日後には枯死し、9 日目には無機化に至ったことが示唆された。

本研究においては降雨に伴う出水による栄養塩の供給、プランクトンの増殖、底層の貧酸素化現象をとらえることができた。これを他の海域と比較すると、広島湾の事例では降雨直後に河川水流入による塩分低下に伴って栄養塩類が大幅に増加し、その後は激減した。また、クロロフィ

ル a は降雨前には 13 mg/m^3 だったが、降雨直後には減少し 5 mg/m^3 となり、集中降雨から 10 日後に大幅に増加して 65 mg/m^3 となり赤潮が発生していた。⁷⁾伊勢湾の事例でも、降雨直後の栄養塩類の増加とクロロフィル a の減少がみられ、出水後 1 週間で植物プランクトンのブルームが起こり栄養塩類の枯渇が確認された。⁶⁾本研究の結果では、栄養塩類の増減や植物プランクトンのブルームに関しては前述の例とほぼ同様であったが、降雨直後のクロロフィル a の減少はみられなかった。杉本ら⁶⁾は塩分低下域とクロロフィル a の減少域がよく一致していることや、河口近傍での塩分とクロロフィル a の間に高い正の相関があることから、河川の影響が特に強い海域では、植物プランクトンの増減が捕食や増殖速度等に伴う生物学的な要因よりも、移流・拡散に伴う物理的な要因によって支配されている可能性を指摘している。本研究の調査時の降水量は 10~30 mm 程度であり塩分低下域でも塩分は 25 以上であった。一方、広島湾の例では降水量が調査前に 337 mm 降雨があり塩分が 10 以下まで低下していた。また、伊勢湾の例では出水後観測の直前 1 週間に降水量は 101 mm あり、塩分は 15 以下まで低下していた。これらのことから、本研究の場合は降水量が少なかったため河川水の流入量も前述の 2 例と比べると少ないため、移流・拡散よりも植物プランクトンの増加を含め、水域内での循環がより強く反映されたのではないかと考えられた。

今回の渥美湾調査では降雨 2 日後に 2009 年、2010 年ともに貧酸素水塊が縮小したが、その後再び拡大した。縮小については水塊の動きや鉛直混合の影響が考えられるが、拡大については表層でのクロロフィル a の増減や底層での DIN、DIP の増加からみて有機物の分解による底層での酸素消費がより強く反映されたとみられる。2010 年の測点 1 を例に挙げると降雨 2 日後には溶存酸素飽和度 68%(4.4 mg/L)まで回復し、降雨 5 日後には再び 12.1%(0.8 mg/L)まで減少した。つまり 3 日間で 3.6 mg/L 減少したことになり、日換算すれば 1.2 mg/L/d で減少したことになる。鈴木ら³²⁾は三河湾沿岸域において DO 濃度の連続観測を行い、DO 濃度の急激な減少を捉え、その時の見かけの酸素消費速度を 0.59 mg/L/d であると計算している。また、笥・藤原³³⁾はシミュレーションにより伊勢湾底層水の 6 月、9 月の酸素消費速度をそれぞれ平均 0.11 mg/L/d、0.08 mg/L/d と計算している。今回得られた酸素消費量の 1.2 mg/L/d は三河湾の過去の例の 2 倍、伊勢湾の例の 10 倍以上である。酸素消費速度は水温と正の相関があると言われており、³⁴⁻³⁵⁾これはバクテリアの活性が高くなり有機物分解活性、すなわち消費速度が大きくなるためと考えられている。渥美湾は伊勢湾に比して浅く底層水温も高

い。さらに和久ら³⁶⁾は、三河湾における浚渫窪地での観測により、膨大な有機物の沈降フラックスがもたらされることによって酸素消費速度が著しく増加することを報告している。測点 1 は降雨直後に赤潮が発生していた測点にも近く、赤潮が波及していた可能性があり、その場合表層で生産された大量の有機物粒子が底層に沈降、堆積し酸素消費速度を増加させたと考えられる。以上のことから、夏季の渥美湾の底層では、水温の高さと有機物供給の多さにより酸素消費速度が速く、貧酸素水塊形成がすみやかに進むことが示唆された。本研究海域は 1970 年代の大規模な埋め立てにより 1200 ha の干潟・浅場が消失した海域であり³⁷⁾、干潟・浅場の底生生物群集による懸濁物除去機能の喪失が、底層への有機物供給増大に大きく影響していると考えられる。

本研究では降雨に伴う出水による栄養塩の供給、プランクトンの増殖、底層の貧酸素化現象を時系列的にとらえることができた。今後は、生態系シミュレーションを用いて、降雨に伴う出水の影響をプランクトン増殖・沈降・底層での無機化・貧酸素水塊の形成の速度等について詳細に解析していく必要がある。

要 約

降雨による河川水流入に伴う栄養塩供給、植物プランクトンの増殖とそれに伴う底層の貧酸素化機構を明らかにすることを目的として降雨前後に観測を実施した。降雨による豊川からの出水の影響は平面的にみると豊川河口沖で、鉛直構造からみれば、2 m 以浅で強くみられたが、底層でも攪乱が生じていた。また、降雨からわずか 2 日で栄養塩類が急速に消費され、赤潮が発生し、降雨 5 日後には貧酸素水塊が形成された。降雨 9 日後には底層での栄養塩の増加がみられ、降雨後増加した植物プランクトンが 7 日間で枯死・沈降しバクテリアによって無機化されることが示唆された。

謝 辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費(B-0908)の支援により実施された。豊川の河川流量データは国土交通省豊川河川事務所に提供いただいた。ここに記して、謝意を表する。

文 献

- 1) 環境省 (2010) 平成 21 年度公共用水域水質測定結果、1-29.
- 2) 愛知県 (2011) 平成 22 年 伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況.

- 3) 黒田伸郎・藤田弘一 (2006) 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較. 愛知水試研報, 12, 5-12.
- 4) 愛知県水産試験場 (1995) 平成 6 年夏季におけるアサリの大量へい死について. 愛知県, 21.
- 5) 武田和也・石田基雄 (2003) 土砂採取に伴う浚渫窪地における顕著な貧酸素化現象について. 愛知水試研報, 10, 7-14.
- 6) 杉本亮・笠井亮秀・山尾理・藤原建紀・木村琢磨 (2004) 伊勢湾における河川流量の変動に伴う懸濁態有機物の変化. 水産海洋研究, 68(3), 142-150.
- 7) 李英植・清木徹・向井徹雄・瀧本和人・岡田光正 (1996) 広島湾におけるマイクロ, ナノおよびピコ植物プランクトンの季節変動. 水環境学会誌, 19-5, 405-411.
- 8) 吉田陽一・小玉一哉・酒井康彦・辻野耕実・中島昌紀・山本圭吾・堀豊・西川哲也・宮原一隆・長井敏 (1998) 大阪湾および播磨灘におけるギムノディニウムの高密度発生と水質, 気象要因との関係. 日水誌, 64(6), 1006-1012.
- 9) 宮本政秀・吉田雄一・河邊博・松山幸彦・高山晴義 (2002) 1995 年に羊角湾で発生した渦鞭毛藻 *Gyrodinium* sp. の赤潮: 発生期の環境特性と養殖魚への影響. 日水誌, 68-2, 157-163.
- 10) 竹ノ内健太・多田彰秀・中村武弘・森英二郎 (2008) 2007年夏季の諫早湾湾口部における塩分とクロロフィル *a* の動態について, 海岸工学論文集, pp.1011-1015.
- 11) 橋本敏子・井澤博文・中富文雄 (1990) 太田川における降雨時の流出汚濁負荷. 全国公害研会誌, 15, 17-23.
- 12) 国土開発調査会 (2006) 河川便覧 平成 18 年版.
- 13) 環境省 (2009) 平成 21 年全国一級河川の水質現況 (速報版). 29.
- 14) Redfield, A.C.; Ketchum, B.H.; Richards, F.A. (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water, in: Hill, M.N. (Ed.) (1963). *The sea*, Vol. 2, Interscience, New York, 26-77
- 15) Brzezinski, M.A. (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: Interspecific variability and the effect of some environmental variables, *J. Phycol.*, 21, 347-357.
- 16) Graneli, E. (1987) Nutrient limitation of phytoplankton biomass in a brackish water bay highly influenced by river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25, 555-565.
- 17) Hecky, R.E. and Kilham, P. (1988) Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography*, 33, 796-822.
- 18) Mahoney, J.B. (1989) Algal assay of relative abundance of phytoplankton nutrients in northeast United States coastal and shelf waters. *Water Research*, 23, 603-615.
- 19) 李英植・山田崇央・清木徹・向井徹雄・瀧本和人・岡田光正 (1996) 広島湾における植物プランクトンの増殖に対する集中降雨に伴う陸水の影響. 水環境学会誌, 19-12, 995-1003.
- 20) Fisher, T.R., Peele, E.R., Ammerman, J.W. and Harding, L. (1992) Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, 82, 51-63.
- 21) 角皆静男 (1979) 植物プランクトン組成を決定する 1 因子としての溶存ケイ素. 北大水産彙報, 30(4), 314-322.
- 22) Tsunogai, S. and Watanabe, Y. (1983) Role of dissolved silicate in the occurrence of a phytoplankton bloom. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 39, 231-239.
- 23) Officer, C.B. and Ryther, J.H. (1980) The possible importance of silicon in marine eutrophication. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, 3, 83-91.
- 24) Conley, D.J. and Johnston, R.W. (1995) Biogeochemistry of N, P and Si in Baltic Sea sediments: response to a simulated deposition of a spring diatom bloom. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, 122, 265-276.
- 25) Tréguer, P. Nelson, D.M., Van Bennekom, A.J., Demaster, D.J., Leynaert, A. and Quéguiner, B. (1995) The silica balance in the world ocean: a re-estimate. *Science*, 268, 375-379.
- 26) 原島省 (2000) シリカ欠損に関する地球環境問題 -SCOPE, IGBP/LOICZ 共催ワークショップ開かれる-, 地球環境センターニュース, 10(7), 8-16.
- 27) Humborg, C., Conley, D.J., Rahm, L., Wulff, F., Cociaus, A., and Ittekkot, V. (2000) Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio*, 29, 45-50.
- 28) 小林純 (1960) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究, 48, 63-106.
- 29) 土屋晴彦・宮本淳司 (1987) 三河湾における鞭毛藻赤潮の発生と消滅. 昭和 60 年赤潮調査報告書, 愛知県水産試験場, 147.
- 30) 愛知県水産試験場 (2011) 平成 22 年度 水産試験場業務報告, 106-107.
- 31) 児玉真史・田中勝久・澤田知希・都築基・山本有司・柳澤豊重 (2006) 矢作川下流における DSi:DIN 比の変動要因. 水環境学会誌, 29-2, 93-99.
- 32) 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正 (1998) 底

層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及ぼす影響. 海の研究, 7(4), 233-236.

33) 笈茂穂・藤原建紀 (2007) 伊勢湾の栄養塩動態：非保存的变化の季節変動. 海の研究, 16(6), 437-453.

34) Chapra, S.C. (1997) *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, 425-455.

35) 李洪源・松永信博 (2010) 諫早湾底泥の酸素消費速度. 土木学会論文集 B, 66(4), 335-343.

36) 和久光靖・橋口晴穂・栗田貴代・金子健司・宮向智興・青山裕晃・向井良吉・石田基雄・鈴木輝明 (2011) 三河湾の浚渫窪地における粒子状物質の特異的な集積機構. 海の研究, 20(1), 1-17.

37) Suzuki, T. (2004) Large-scale restoration of tidal flats and shallows to suppress the development of oxygen deficient water masses in Mikawa bay. *Bull.Fish.Res.Agen.*, 1, 111-121.