

有明海佐賀県海域における *Chattonella* 赤潮および貧酸素水塊の動態と各種環境要因との関係 (2009-2011)

松原 賢・首藤俊雄

Relationships between Dynamics of *Chattonella* Red Tides and Hypoxias and Environmental Factors in the Ariake Sea off Saga Prefecture (2009-2011)

Tadashi MATSUBARA and Toshio SHUTO

To examine the relationships between dynamics of *Chattonella* red tides and hypoxias and environmental factors in the Ariake Sea off Saga Prefecture, we investigated the dynamics of phytoplankton, dissolved oxygen, water temperature, salinity and nutrients and also obtained meteorological data for Saga City from Meteorological Agency during June to September from 2009 to 2011. We found that : 1) In the year 2009 and 2010 which *Chattonella* red tide occurred, densities of diatoms were low during mid-June to early July that was the period considered to be early growth stage of *Chattonella* spp. ; 2) North wind, dense diatoms and heavy weather such as heavy rain fall and typhoon contributed to the decline of *Chattonella* red tide ; 3) Hypoxias caused by water column stratification induced by the flood did not decay even in the spring tide unless vertical mixing was induced by north wind or typhoon ; 4) Hypoxias had developed after the termination of red tides of raphidophyte such as *Chattonella* spp. and *Heterosigma akashiwo*.

はじめに

有害プランクトンの *Chattonella* 属による赤潮 (以降, *Chattonella* 赤潮) は, 日本国内では 1969 年に広島湾で初めて確認された¹⁾。1987 年頃までは *Chattonella* 赤潮の主たる発生海域は瀬戸内海沿岸であり, 魚類養殖を中心に多大な被害を引き起こした。特に 1972 年の播磨灘で発生した *Chattonella* 赤潮は 1,428 万尾もの養殖ハマチをへい死させ, 約 71 億円に上る空前の漁業被害を与えた¹⁾。1980 年代後半以降, 有明海や八代海でも *Chattonella* 赤潮が頻発するようになり, 有明海佐賀県海域では天然魚介類を中心に漁業被害を引き起こしている^{2,3)}。また, *Chattonella* 赤潮は有明海において貧酸素水塊を引き起こす有機物の供給源となっていることが指摘されている⁴⁾。貧酸素水塊は, 水塊における有機物の分解に伴う酸素消費が溶存酸素の移流等による酸素供給を上回ることによって発生する。貧酸素の定義は定まっていないが, 一般的に溶存酸素が 2~3 mg/L (飽和度では 30~40%) 以下で生物の生息が困難になるので, この程度以下が貧酸素と呼ばれる⁵⁾。貧酸素水塊は東京湾, 伊勢湾, 三河湾, 大阪湾など国内の多くの内湾でも発生し

ており, 底生性の水産資源に悪影響を及ぼすことなどから, 1970 年代から 1980 年代にかけて各地で問題となり始めた^{6,7)}。一方, 有明海は潮汐による鉛直混合が大きく, 貧酸素水塊が発生しない海として知られていた⁵⁾。有明海佐賀県海域で貧酸素水塊が頻発するようになった時期は定かではないが, 1980 年代以降⁶⁾や 1997 年以降⁸⁾とする報告がある。2000 年代半ば以降は重点的な調査が行われるようになり⁹⁾, 毎年のように貧酸素水塊の発生が確認されている。

Chattonella 赤潮および貧酸素水塊が発生した海域では深刻な漁業被害が生じる可能性があり, 被害防止のためにはそれらの発生状況を詳細に把握することが重要である。有明海佐賀県海域では 2009 年以降, 有用二枚貝であるサルボウの漁場を中心に, 夏季に広域な海況調査を実施している。本稿では 2009 年から 2011 年における *Chattonella* 赤潮および貧酸素水塊の動態とその他の環境要因との関係について報告する。

方 法

2009 年から 2011 年における 6 月から 9 月の期間, Fig. 1 に示す有明海佐賀県海域における 18 定点 (St. a, b, c

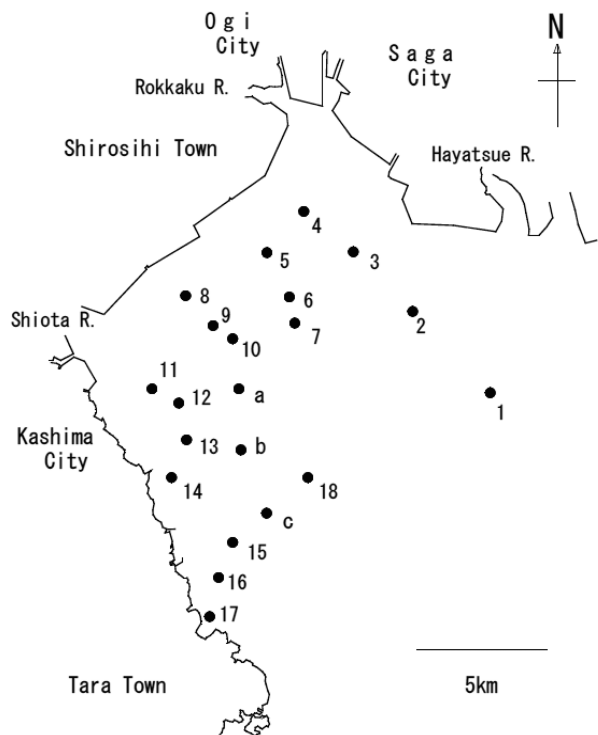


Fig. 1 Location of the sampling stations in Ariake Sea off Saga Prefecture.

は底層 DO の臨時調査定点, 2011 年のみ実施) で, 原則として週に 1 回 (9 月は月に 1 回), 昼間満潮前後 2 時間の間に調査を行った。採水層は表層および底層 (海底上 1m) とし, 表層はポリバケツで, 底層は採水器 (離合社, リゴ B 号透明採水器) で採水した。

調査項目は植物プランクトン組成 (St. 1, 2, 3, 5, 8, 12, 15, 17, 18 の 9 点の表層のみ), DO (溶存酸素飽和度), 水温, 塩分, DIN (溶存態無機窒素), $PO_4\text{-P}$ (リン酸態リン), $SiO_2\text{-Si}$ (ケイ酸態ケイ素) とした。植物プランクトン組成は試水 500 μ l 中の組成および細胞数を界線スライドグラス (松浪硝子工業会部式会社, S6117) を用いて正立顕微鏡下 (Nikon 社, ECLIPSE E600) で検鏡した。本稿では, *Chattonella* 属 (*C. antiqua* + *C. marina*), *Chattonella* 属と同じく有害ラフィド藻である *Heterosigma akashiwo*, *Chattonella* 属の競合生物である珪藻類について整理した。DO はウインクラー法により測定した。水温は調査船上で採水後すぐに水銀温度計により測定し, 塩分は実験室で桌上塩分計 (鶴見精機社, Digital Salinometer E-202) を用いて測定した。各種栄養塩類はオートアナライザー (BL TEC, QuAAtro 2-HR) により測定した。また, 気象庁気象統計情報ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>) の佐賀気象台の気象データも解析に用いた。

結 果

1. *Chattonella* 赤潮の発生経過

Fig. 2-1, 2 に 2009 年および 2010 年の *Chattonella* 属の水平分布の経時変化を示す。ここでは, 臨時調査等, 本調査とは別の調査で得られたデータも併せて示す。

2009 年, *Chattonella* 属は 6 月 23 日に St. 5, 17 以外の定点で 1~2 cells/ml の細胞密度で初認された。その後, 7 月 14 日までは 1~21 cells/ml と低密度であったが, 7 月 22 日には全域で 145~2,550 cells/ml と増加しており, St. 1, 3, 15, 17 の海域を中心に広域で赤潮が確認された。翌日の 7 月 23 日まで広域で赤潮が確認されたが, 7 月 27 日には赤潮は局所的になり, St. 1, 2 を除くほぼ全域で細胞は確認されなかった。7 月 29 日には再度全域で 6~3,000 cells/ml で細胞が確認されたものの, 赤潮は St. 1 と 18 の間の海域でのみ確認された。その後, 赤潮は 8 月 13 日まで継続したが, 主に St. 15 以南の海域にとどまる局所的なものであった。この一度目の赤潮の終息後, 8 月 18 日から 8 月 27 日までは 1~38 cells/ml と低密度であったが, 9 月 4 日には St. 2 付近の海域で 1,155 cells/ml (0.5 m 層) と二度目の赤潮が局所的ではあるが確認され, 9 月 13 日 (Fig. 2-1 には未記載) まで継続した。2009 年の *Chattonella* 赤潮の最高細胞密度は一度目の赤潮における 3,880 cells/ml であった (8 月 11 日, St. 12 付近のみの調査のため Fig. 2-1 には未記載)。

2010 年, *Chattonella* 属は 6 月 11 日に太良町沖合で 0.003 cells/ml で初認された (1 定点かつ濃縮試料による調査のため, Fig. 2-2 には未記載)。その後, 6 月中は細胞が確認されなかったが, 7 月 2 日に有明海佐賀県海域の中央部で *Chattonella* 属と渦鞭毛藻類 *Prorocentrum triestinum* との混合赤潮が確認された (*P. triestinum* 主体, *Chattonella* 属は 8~370 cells/ml)。7 月 5 日には *Chattonella* 属は全域で 4~6,200 cells/ml と増加しており, 広域で赤潮が確認された。その後, 7 月 13 日まで広域で赤潮が確認されたが, 7 月 16 日には全域で細胞は確認されなかった。一度目の赤潮終息後, 7 月 20 日から 8 月 5 日にかけて徐々に細胞の増加が確認され, 8 月 10 日には全域で 6~1,080 cells/ml と二度目の赤潮が確認されたが, 8 月 13 日には終息した。2010 年の *Chattonella* 赤潮の最高細胞密度は一度目の赤潮における 6,200 cells/ml であった (7 月 5 日, St. 5 の南の海域)。

2011 年は *Chattonella* 赤潮が発生しなかった。6 月から 8 月までは細胞がまったく確認されなかったが, 9 月

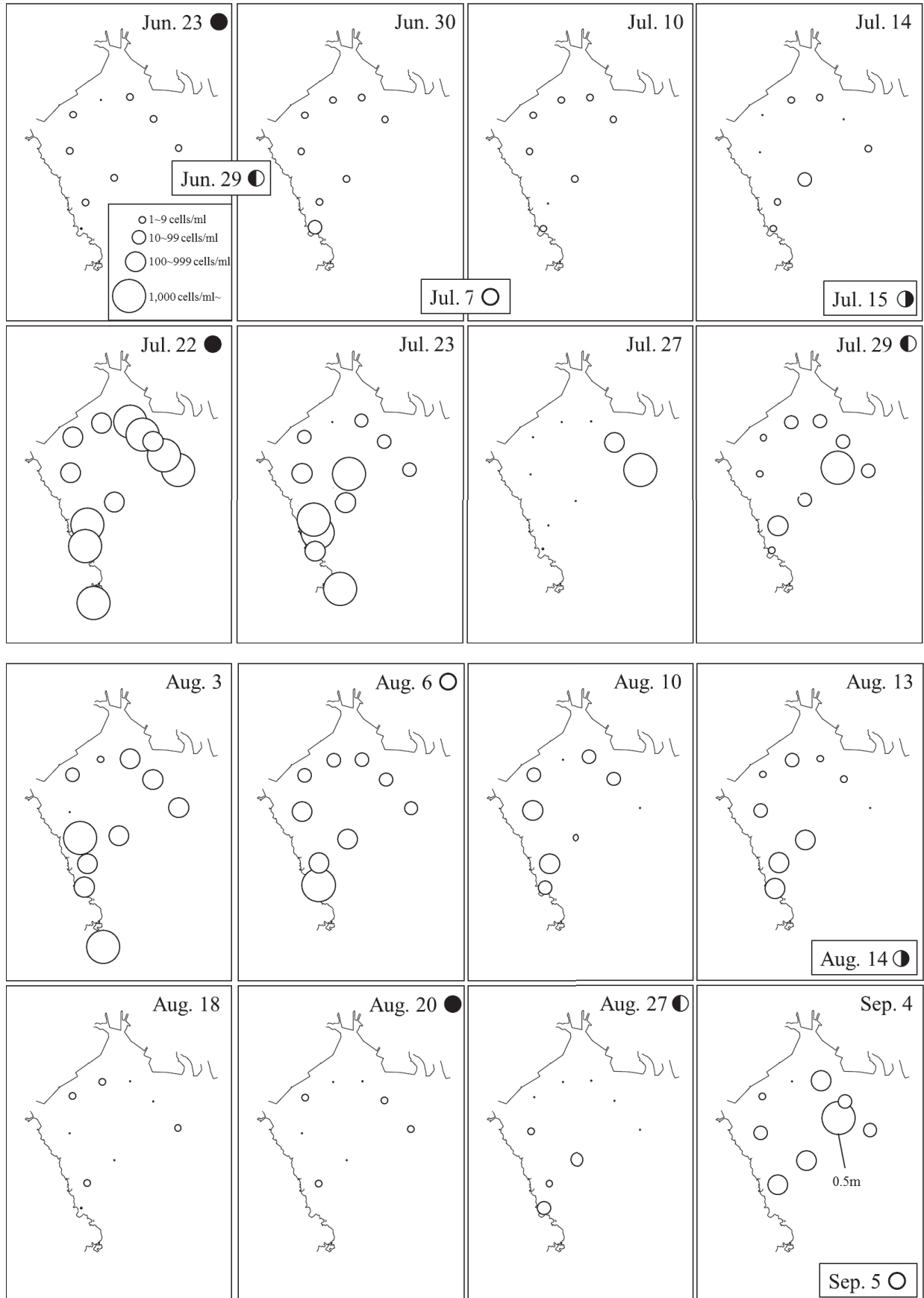


Fig. 2-1 Changes in the horizontal distribution of vegetative cells of *Chattonella* spp. in 2009. Figures of “new and full moon” and “half-moon” beside the date indicate the “spring tide” and “neap tide” respectively.

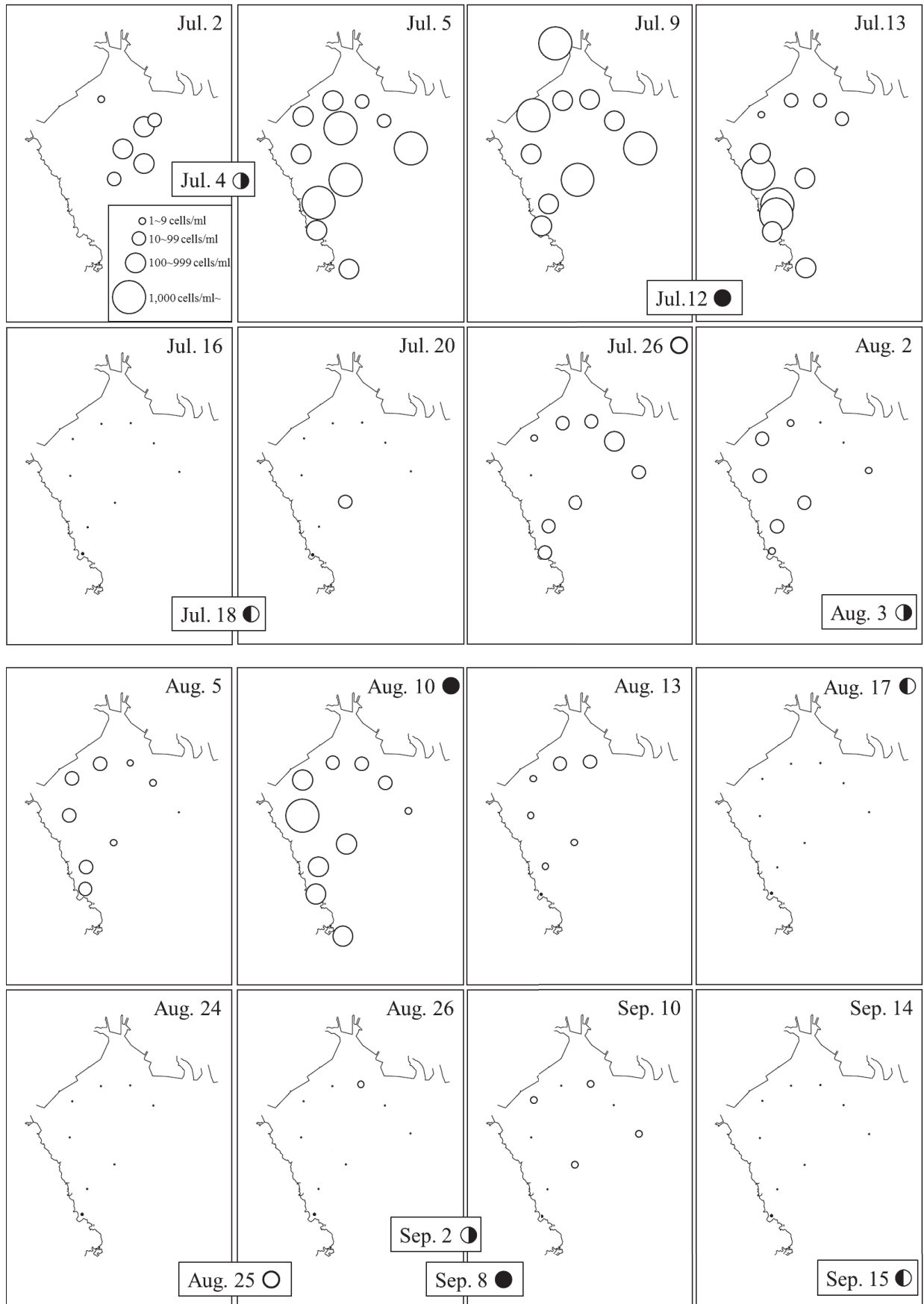


Fig. 2-2 Changes in the horizontal distribution of vegetative cells of *Chattonella* spp. in 2010. Figures of “new and full moon” and “half-moon” beside the date indicate the “spring tide” and “neap tide” respectively.

Table 1 Record of *Chattonella* red tides in the Ariake Sea off Saga Prefecture

Year	Red tide period	Species	Maximum cell density (cells mL ⁻¹)	Damage to fisheries
1984	Aug. 25-Aug. 26	<i>C. antiqua</i>	430	-
1988	Aug. 22-Aug. 25	<i>C. antiqua</i>	3,990	-
1989	Jul. 13, Aug. 17	<i>C. antiqua</i>	2,780	occurrence
1990	Jul. 30-Aug. 12	<i>C. antiqua</i>	9,700	occurrence
1992	Aug. 10-Sep. 11	<i>C. antiqua</i>	8,000	occurrence
1994	Aug. 3-Aug. 14	<i>C. antiqua</i>	542	-
1996	Aug. 10-Aug. 22	<i>C. antiqua</i>	9,180	-
1998	Jul. 16-Aug. 6	<i>C. antiqua</i>	20,700	occurrence
1999	Aug. 30-Sep. 10	<i>C. antiqua</i>	4,420	occurrence
2000	Aug. 7-Aug. 29	<i>C. antiqua</i>	14,570	occurrence
2003	Sep. 3-Sep. 12	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	7,530	-
2004	Aug. 9-Aug. 23	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	9,190	occurrence
2007	Aug. 1-Aug. 16, Aug. 20-Aug. 26	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	18,000	occurrence
2008	Jul. 29-Aug. 20	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	9,300	occurrence
2009	Jul. 22-Aug. 13, Sep. 4-Sep. 13	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	3,880	-
2010	Jul. 2-Jul. 15, Aug. 10-Aug. 12	<i>C. antiqua</i> & <i>C. marina</i>	6,200	-

下旬から11月上旬にかけて実施した別の調査では0.2~7 cells/mlの範囲で確認された。

Table 1に2011年までの有明海佐賀県海域における*Chattonella*赤潮の発生状況を示す。2009年および2010年ともに*Chattonella*赤潮による漁業被害は発生しなかった。2010年の赤潮は2009年までの赤潮と異なり、有明海佐賀県海域では初めて7月上旬という早期に発生した。

2. 貧酸素水塊の発生経過

Fig. 3-1~3に2009年から2011年の底層DOの水平分布の経時変化を示す。本稿ではDOが40%未満の場合を貧酸素とする。

2009年、底層DOは7月23日にSt. 9, 10, 15, 18の海域を中心に低下し、St. 10では16.5%と貧酸素水塊が初認された。その後、7月29日まで貧酸素水塊が確認されたが、8月6日には貧酸素水塊は解消しており、8月13日までの底層DOは全域で53.3~86.3%であった。しかし、8月18日には再度底層DOが低下し、St. 9~13および15で27.8~38.0%と二度目の貧酸素水塊が広域で確認された。その後、8月27日には貧酸素水塊は解消していた。2009年の底層DOの最低値は一度目の貧酸素水塊発生時の16.5%であった(7月23日, St. 10)。

2010年、底層DOは7月5日にSt. 9, 10, 13, 15, 16, 18の海域を中心に低下しており、St. 9, 13, 15, 16では28.2~33.6%と貧酸素水塊が初認された。その後、8月

10日まで長期にわたり貧酸素水塊が維持されていた(別調査による確認, Fig. 3-2には未記載)。特に7月26日の貧酸素水塊は全18定点のうち11定点で確認される大規模なものであった。8月13日には貧酸素水塊は解消しており、8月17日までの底層DOは全域で49.3~131.1%であったが、8月26日にはSt. 15, 17, 18で28.7~31.2%と二度目の貧酸素水塊が確認された。その後、9月1日には貧酸素水塊は解消していた(Fig. 3-2には未記載)。2010年の底層DOの最低値は一度目の貧酸素水塊発生時の5.5%であった(7月26日, St. 13)。

2011年、底層DOは7月5日にはSt. 9, 10, 13, 15, 18の海域を中心に低下しており、St. 15および18では39.8%および34.3%と貧酸素水塊が初認された。その後、7月15日にはSt. 6, 7, 9, 10, 12, 13, 18で13.3~36.3%と貧酸素水塊の範囲が拡大したが、7月21日には貧酸素水塊は解消していた。その後、7月29日から8月5日までの底層DOは全域で49.7~102.4%であったが8月12日には二度目の貧酸素水塊が確認され、8月31日にはSt. 10, 12~15, 17, 18で32.0~39.5%と広範囲で貧酸素水塊が確認された。その後、9月6日には貧酸素水塊は解消していた(別調査による確認, Fig. 3-3には未記載)。2011年の底層DOの最低値は一度目の貧酸素水塊発生時の13.3%であった(7月15日, St. 13)。

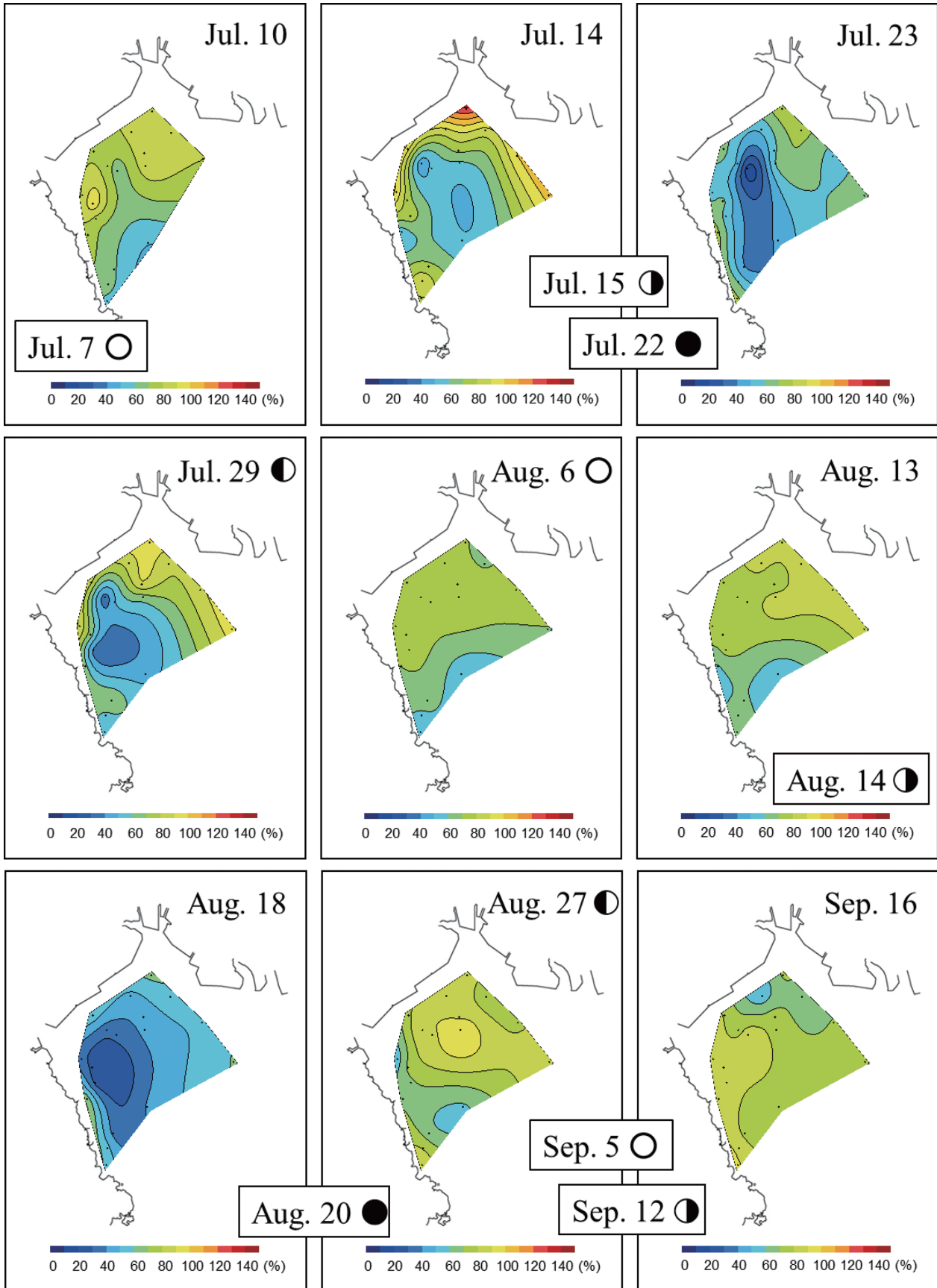


Fig. 3-1 Changes in the horizontal distribution of dissolved oxygen at a depth of 1 m above the bottom in 2009. Figures of “new and full moon” and “half-moon” beside the date indicate the “spring tide” and “neap tide” respectively.

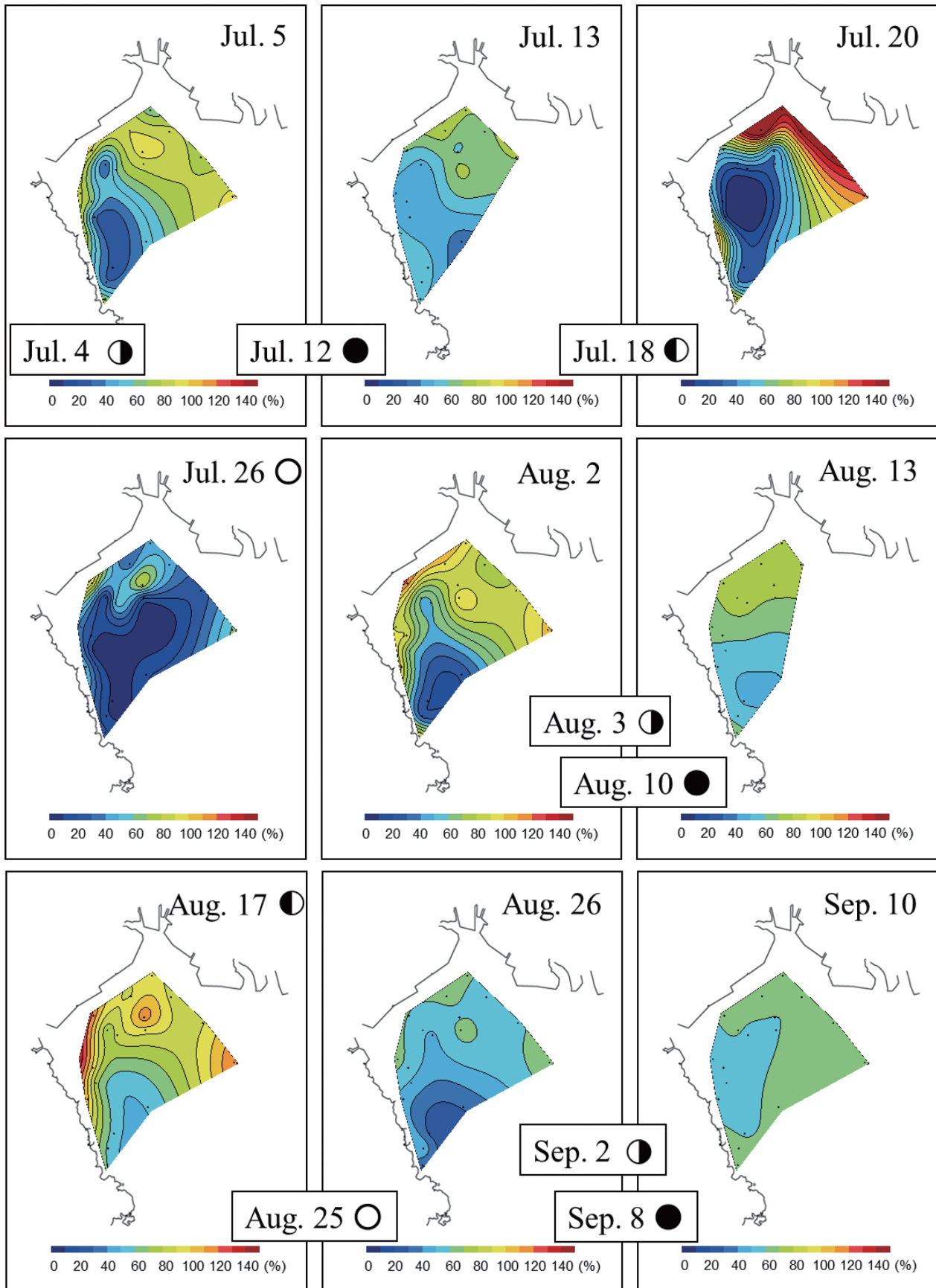


Fig. 3-2 Changes in the horizontal distribution of dissolved oxygen at a depth of 1 m above the bottom in 2010. Figures of “new and full moon” and “half-moon” beside the date indicate the “spring tide” and “neap tide” respectively.

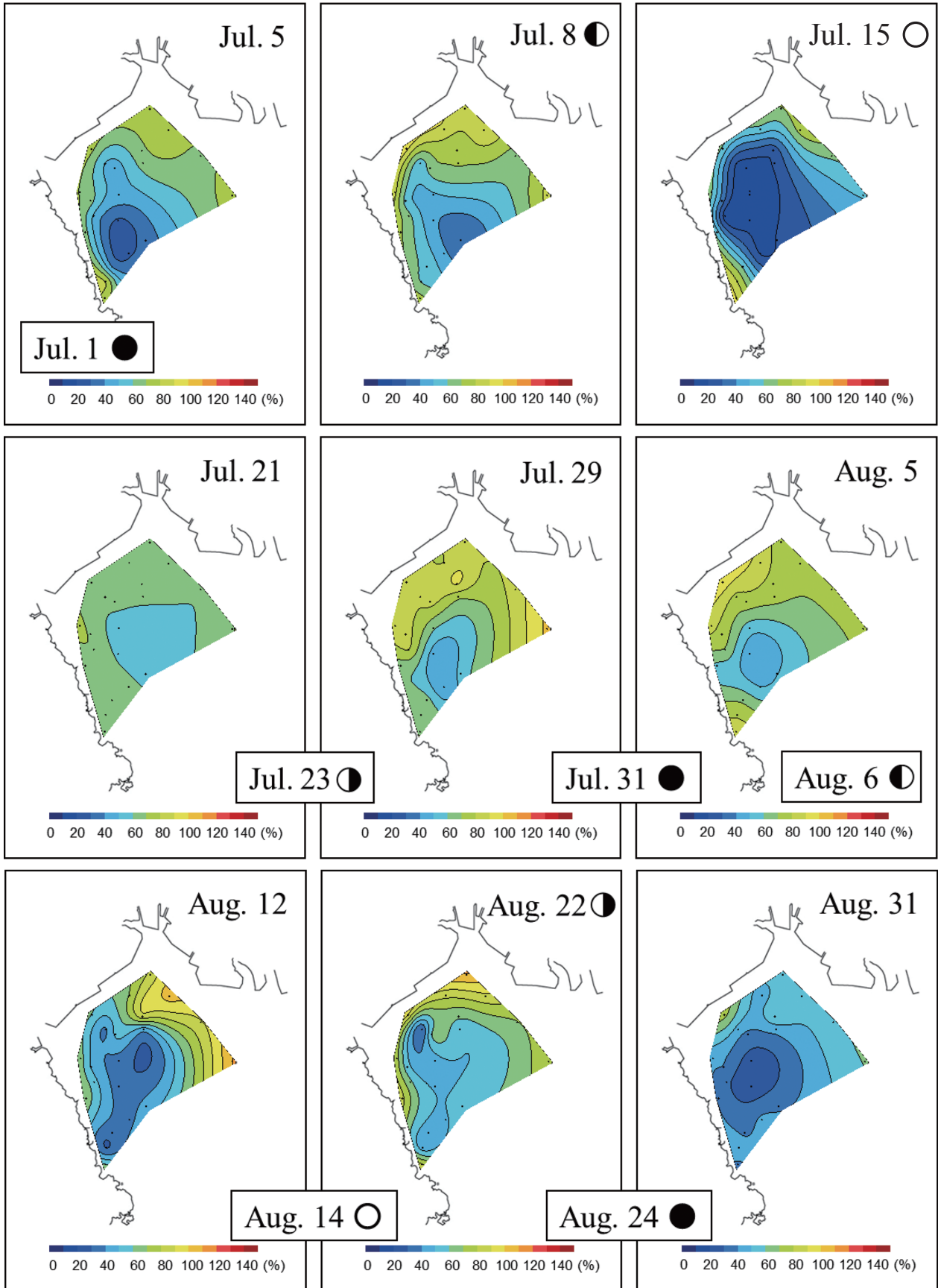


Fig. 3-3 Changes in the horizontal distribution of dissolved oxygen at a depth of 1 m above the bottom in 2011. Figures of “new and full moon” and “half-moon” beside the date indicate the “spring tide” and “neap tide” respectively.

3. その他の環境要因の変動

Fig. 4-1~3に2009年から2011年の植物プランクトン (*Chattonella* 属, *H. akashiwo*, 珪藻類の9点平均値), 水質 (DO, 水温, 塩分, DIN, PO₄-P, SiO₂-Si の18点平均値), 気象 (佐賀市の降水量および全日射量) の変動を示す。また, Fig. 5-1~3に佐賀市における最多風向の変動を示す。2009年9月4日と2010年8月10日のデータは別調査によるものであり, 全項目 St. 1, 2, 3,

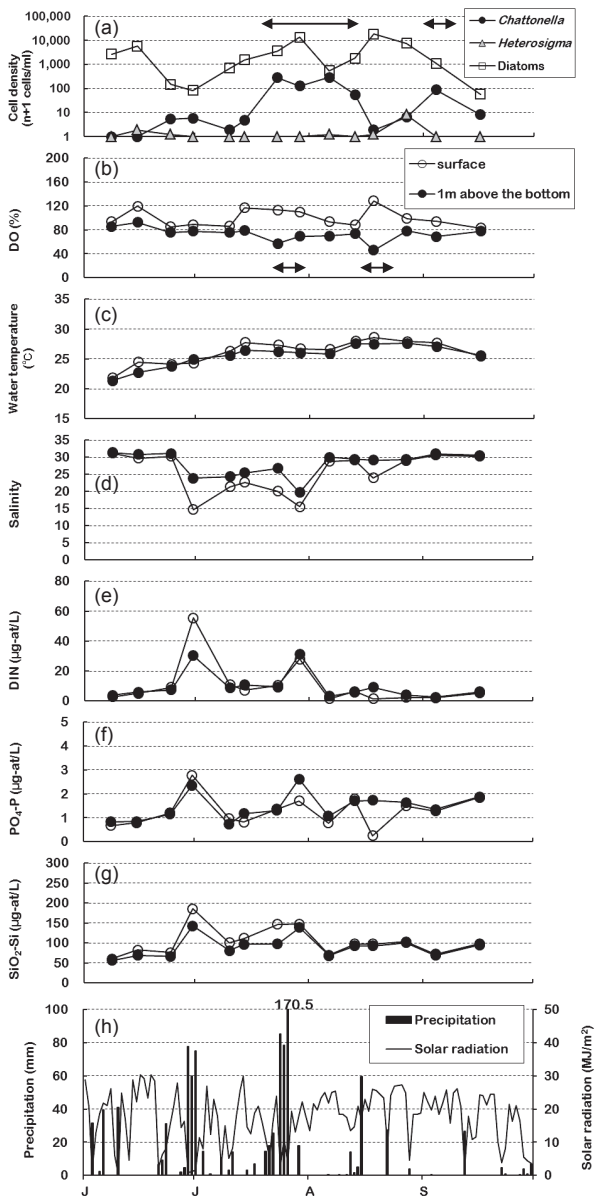


Fig. 4-1 Temporal changes in vegetative cells of *Chattonella* spp., *Heterosigma akashiwo* and diatoms in surface water (a), DO (b), water temperature (c), salinity (d), DIN (e), PO₄-P (f), SiO₂-Si (g) and precipitation and solar radiation at Saga city (h) in 2009. Data of (a) and (b) - (g) were averaged for 9 and 18 sampling stations respectively. Double headed arrow indicates the period of *Chattonella* red tide (a) and hypoxia (b).

5, 8, 12, 15, 17, 18 の9点平均値である。

2009年の *Chattonella* 赤潮と貧酸素水塊の発生時期を Fig. 4-1 (a) および Fig. 4-1 (b) に両矢印で示す。Fig. 2-1 および Fig. 3-1 で示すように, 2009年は *Chattonella* 赤潮と貧酸素水塊ともに二度確認された。珪藻類は6月15日, 7月29日, 8月18日, 8月27日に5,734~18,348 cells/ml と高密度であった。一方, 6月24日, 6月30日, 7月10日, 8月6日, 9月16日には57~690 cells/ml と

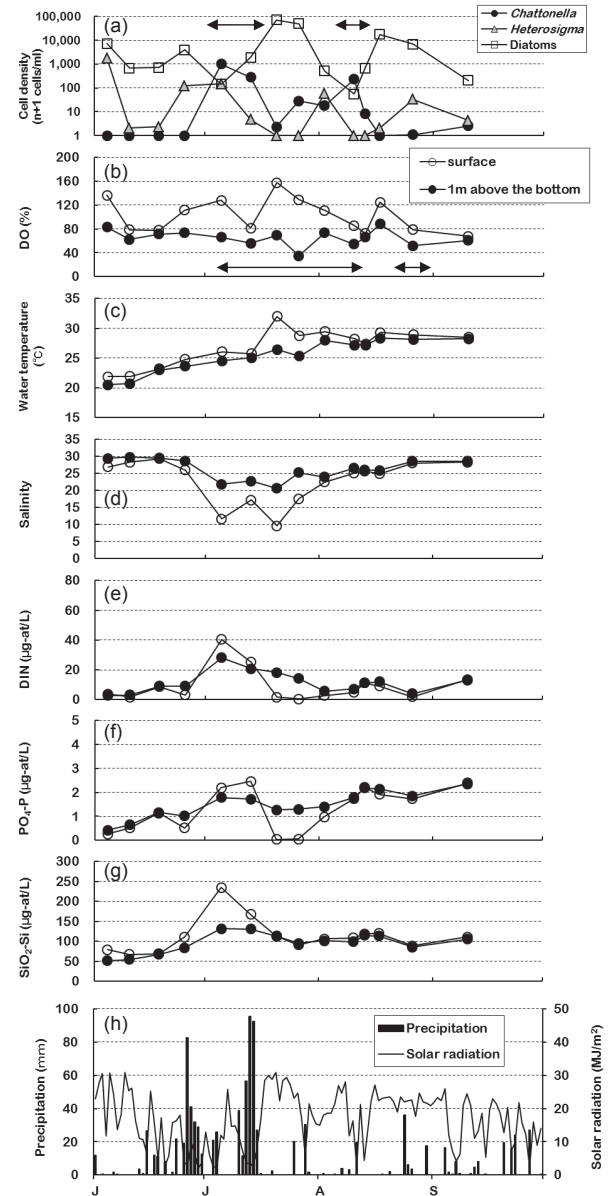


Fig. 4-2 Temporal changes in vegetative cells of *Chattonella* spp., *Heterosigma akashiwo* and diatoms in surface water (a), DO (b), water temperature (c), salinity (d), DIN (e), PO₄-P (f), SiO₂-Si (g) and precipitation and solar radiation at Saga city (h) in 2010. Data of (a) and (b) - (g) were averaged for 9 and 18 sampling stations respectively. Double headed arrow indicates the period of *Chattonella* red tide (a) and hypoxia (b).

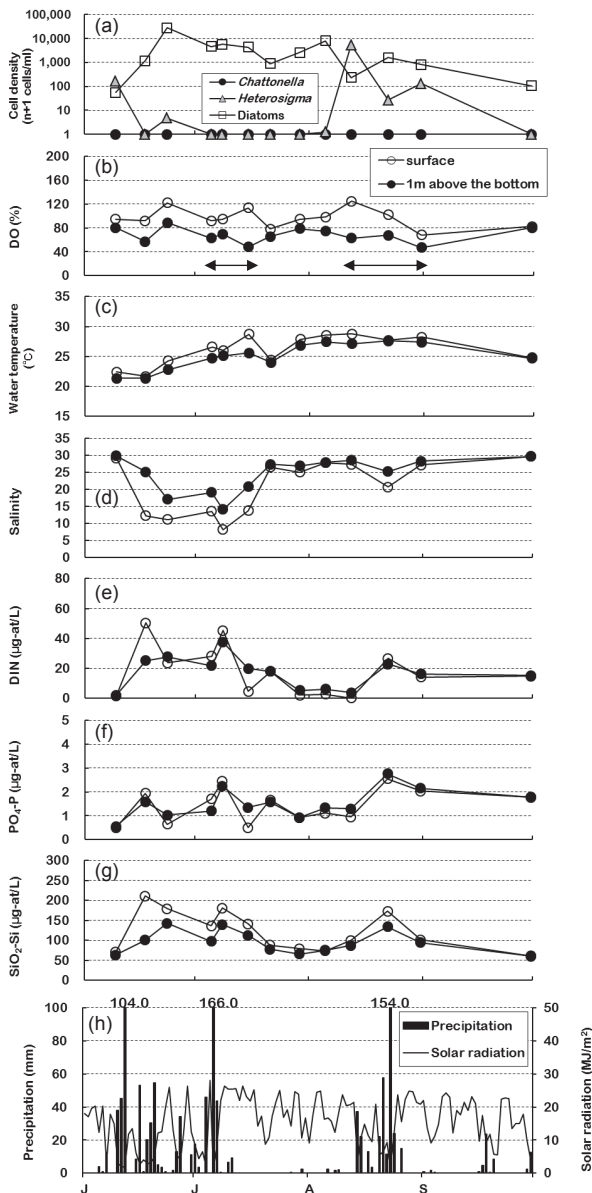


Fig. 4-3 Temporal changes in vegetative cells of *Chattonella* spp., *Heterosigma akashiwo* and diatoms in surface water (a), DO (b), water temperature (c), salinity (d), DIN (e), $PO_4\text{-P}$ (f), $SiO_2\text{-Si}$ (g) and precipitation and solar radiation at Saga city (h) in 2011. Data of (a) and (b) - (g) were averaged for 9 and 18 sampling stations respectively. Double headed arrow indicates the period of hypoxia (b).

低密度であった。2009年は *H. akashiwo* の目立った増加は確認されなかった。水温は表層および底層でそれぞれ $21.9\text{--}28.6^\circ\text{C}$ および $21.3\text{--}27.6^\circ\text{C}$ であり、8月まで上昇傾向であった。塩分は降雨の影響を受け、6月30日から7月29日までの期間、表層および底層でそれぞれ $14.8\text{--}22.7$ および $19.7\text{--}26.8$ と低下し、表底層の塩分差から成層の形成が確認された。各種栄養塩類はまとま

た降雨時もしくは降雨後に上昇した。一度目の *Chattonella* 赤潮発生前の6月23日から7月21日までの最多風向をみると南よりの風が多かったが、一度目の *Chattonella* 赤潮が確認された7月22日以降の最多風向は北よりの風が多い傾向が確認された。

2010年の *Chattonella* 赤潮と貧酸素水塊の発生時期を Fig. 4-2 (a) および Fig. 4-2 (b) に両矢印で示す。Fig. 2-2 および Fig. 3-2 で示すように、2010年も *Chattonella* 赤潮と貧酸素水塊ともに二度確認された。珪藻類は6月4日、7月20日、7月26日、8月17日、8月26日に $6,954\text{--}71,622$ cells/ml と高密度であった。一方、6月10日、6月18日、7月5日、8月2日、8月10日、8月13日、9月10日には $54\text{--}719$ cells/ml と低密度であった。*H. akashiwo* は6月4日に $1,812$ cells/ml と比較的高密度であった。水温は表層および底層でそれぞれ $21.9\text{--}32.0^\circ\text{C}$ および $20.5\text{--}28.3^\circ\text{C}$ であり、7月20日には表底層の水温差が 5°C 以上となった。塩分は降雨の影響を受け、7月5日から7月26日までの期間、表層および底層でそれぞれ $9.7\text{--}17.6$ および $20.7\text{--}25.3$ と低下し、表底層の塩分差から成層の形成が確認された。各種栄養塩類はまとまった降雨後に上昇した。一度目の *Chattonella* 赤潮発生前の6月4日から7月1日と、一度目の *Chattonella* 赤潮が確認された7月2日から7月15日までの最多風向をみると、南よりの風が多い傾向であった。一方、二度目の *Chattonella* 赤潮発生前の7月16日から8月9日までの最多風向は東よりの風が多い傾向であった。なお、8月11日には台風4号が九州の西側を北上し、南よりの強風が連吹した。

2011年は *Chattonella* 赤潮が発生しなかった。2011年の貧酸素水塊の発生時期を Fig. 4-3 (b) に両矢印で示す。2011年も貧酸素水塊は二度確認された。珪藻類は6月23日、7月8日、8月5日に $5,668\text{--}27,889$ cells/ml と高密度であった。一方、6月9日、7月21日、8月12日、8月31日、9月30日には $55\text{--}888$ cells/ml と低密度であった。*H. akashiwo* は8月12日に $5,371$ cells/ml と赤潮状態であった。水温は表層および底層でそれぞれ $21.7\text{--}28.8^\circ\text{C}$ および $21.3\text{--}27.6^\circ\text{C}$ の範囲であった。塩分は降雨の影響を受け、6月17日から7月15日までの期間、表層および底層でそれぞれ $8.3\text{--}13.8$ および $14.2\text{--}25.2$ と低下し、表底層の塩分差から成層の形成が確認された。各種栄養塩類はまとまった降雨後に上昇した。一度目の貧酸素水塊発生前の6月9日から7月4日と、一度目の貧酸素水塊が確認された7月5日から7月15日までの最多風向をみると、南よりの風が多い傾向で

あった。一方、二度目の貧酸素水塊発生前の7月16日から8月11日までと、二度目の貧酸素水塊発生中の8月12日から8月31日までの最多風向は南および東よりの風が多い傾向であった。なお、7月19日には台風6号が九州の東側を北上し、北よりの強風が連吹した。

考 察

1. *Chattonella* 赤潮と各種環境要因

今井¹⁾はシストから発芽した *Chattonella* 属の初期個体群が増加する期間の環境条件、特に競合生物である珪藻類の状態が *Chattonella* 赤潮の発生・非発生を決定づけると指摘している。*Chattonella* 属のシストの発芽は22℃および25℃で最も活発になり¹⁰⁾、栄養細胞の増殖は25℃で最大となるが、25℃を上回るといずれも低下する^{10,11)}。つまり、底層水温が22℃となった時から表層の水温が25℃である時までが、*Chattonella* 属のシストの発芽およびその後の栄養細胞の増殖が最も効率的に行われ、水柱の初期個体群の増加に重要な期間であると考えられる。2009年から2011年までの3カ年の水温の変動をみると、そのような期間はいずれの年も6月中旬から7月上旬が該当した (Fig. 4-1 (c), Fig. 4-2 (c), Fig. 4-3 (c))。そこで、3カ年の6月中旬から7月上旬の珪藻類の変動をみると、*Chattonella* 赤潮の発生年である2009年および2010年は珪藻類が低密度であることが多く、赤潮非発生年である2011年は高密度であることが確認された (Fig. 4-1 (a), Fig. 4-2 (a), Fig. 4-3 (a))。以上のことから、有明海佐賀県海域では6月中旬から7月上旬における珪藻類の多寡が *Chattonella* 属の初期個体群の動態に影響し、*Chattonella* 赤潮の発生・非発生を左右しうることが示唆された。松原ら³⁾は佐賀市の5月下旬の平均全天日射量、7月上旬の合計降水量および全天日射量を独立変数とした判別関数により、約90%の確率で *Chattonella* 赤潮の発生・非発生が予察できることを報告した。今後、6月中旬から7月上旬における珪藻類の細胞密度等のデータを解析に加えることで、予察精度の向上が期待される。

2009年および2010年の *Chattonella* 赤潮は広域での発生は短期間であり、概して局所的な発生にとどまった。松原ら²⁾は2007年の観測結果から、有明海佐賀県海域における *Chattonella* 属の増殖に好適な条件として、成層の形成、好天、小潮、南風を挙げている。このうち、2009年および2010年の一度目の *Chattonella* 赤潮発生前から発生時の条件をみると、成層の形成および南風が合致

していたことから (Fig. 4-1 (d), Fig. 4-2 (d), Fig. 5-1 (a), Fig. 5-2 (a), (b)), これら二つの条件が赤潮の形成には特に重要であると考えられた。一方、上記の逆の条件である鉛直混合、荒天、大潮、北風、さらに増殖競合種である珪藻類の繁茂は *Chattonella* 属の増殖に不適な条件であると考えられる。2009年の一度目の *Chattonella* 赤潮は7月27日以降局所化した。この要因としては7月22日以降の北よりの風による鉛直混合やそれに伴う沖側との海水交換による *Chattonella* 属の散逸、7月24日から7月26日にかけての大雨に伴う出水による物理的な散逸や低塩分ショックによる細胞の減耗が考えられた (Fig. 5-1 (b), (c), (d), Fig. 4-1 (d), (h))。また、7月29日に珪藻類が増殖していたことも要因の一つと考えられた (Fig. 4-1 (a))。二度目の *Chattonella* 赤潮は9月4日に確認されたが局所的なものであり、この要因としては北よりの風が考えられた。2010年は6月11日に *Chattonella* 属が低密度で初認された後、6月18日、6月25日には細胞が確認されなかったが、7月2日に一度目の *Chattonella* 赤潮が発生した。本調査では表層のみ検鏡のため、赤潮発生前は表層より下の層に分布していた *Chattonella* 属を確認できなかった可能性がある。一度目の *Chattonella* 赤潮は7月13日までは広域で発生していたが、7月16日には全域で細胞が確認されなくなった。この要因としては7月13日および7月14日における大雨が考えられた (Fig. 4-2 (h))。二度目の *Chattonella* 赤潮は8月10日に確認されたが、8月13日には終息した。この要因は8月11日に九州に接近した台風4号の攪乱による散逸であると考えられた。以上のことから、北風、高密度の珪藻類、大雨や台風などの荒天が *Chattonella* 赤潮の規模を縮小させることが確認された。2010年の *Chattonella* 赤潮が7月上旬という早期に発生した要因は現段階では不明である。

2011年は *Chattonella* 属が9月下旬まで全く検出されなかった。2011年の7月中旬以降の珪藻類の変動をみると、8月中旬に大きく細胞密度が低下したが、ここでは *H. akashiwo* が高密度に増加していた (Fig. 4-3 (a))。2011年は *Chattonella* 属が発芽後の初期増殖期 (6月中旬~7月上旬) に珪藻類との競合に敗れ、その後も増殖するための隙間が、全くと言ってよいほどなかった年であったと考えられた。

2. 貧酸素水塊と各種環境要因

一般に温帯域の内湾では夏季を中心に成層が強まり、鉛直的な酸素輸送が妨げられると底層水は貧酸素化し易

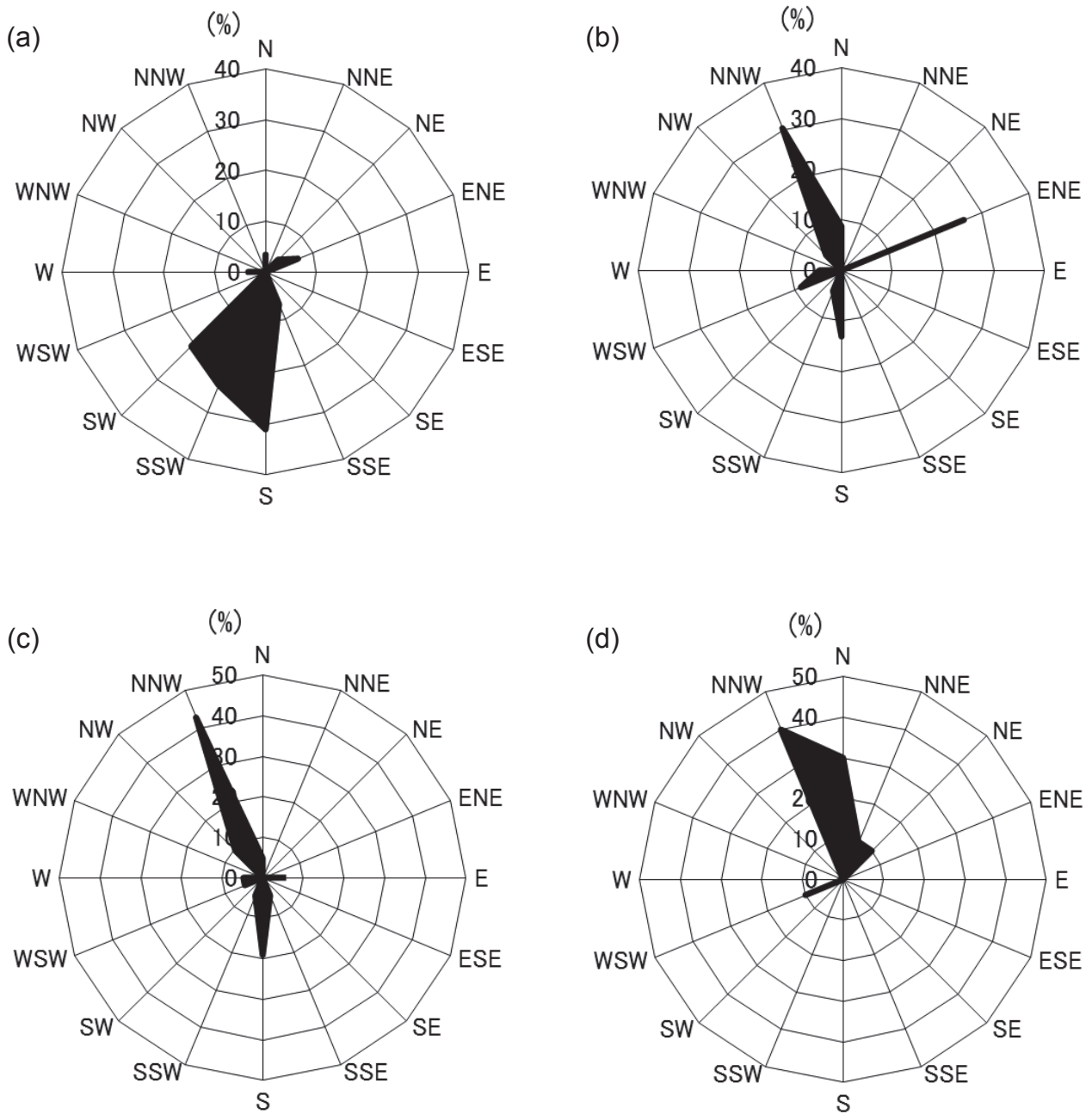


Fig. 5-1 Frequency of wind direction at Saga city before 1st *Chattonella* red tide (Jun. 23-Jul. 21) (a), during 1st *Chattonella* red tide (Jul. 22-Aug. 13) (b), before 2nd *Chattonella* red tide (Aug. 14-Sep. 3) (c) and during 2nd *Chattonella* red tide (Sep. 4-Sep. 13) (d) in 2009.

くなる⁶⁾。2009年から2011年までの3カ年の貧酸素水塊の発生も2010年の二度目の貧酸素水塊を除き、いずれも成層形成時であった (Fig. 4-1 (d), Fig. 4-2 (d), Fig. 4-3 (d))。速水⁶⁾は有明海で貧酸素水塊をもたらす成層形成の要因として、降雨に伴う河川水の出水と、底層密度流に伴う沖合からの高塩分水の貫入を挙げている。このうち、前者による成層が形成されている場合は、潮汐混合が強い大潮期であっても貧酸素水塊は解消しにくいとしている。2009年の一度目の貧酸素水塊は大潮期の7

月23日に確認され、次の大潮期の8月6日には解消していた。二度目の貧酸素水塊は中潮期の8月18日に確認され、続く小潮期の8月27日には解消していた。2009年の二度目の貧酸素水塊はいずれも出水による成層形成に伴うものであったが、このように短期間で解消された。この要因としては7月22以降、北よりの風により鉛直混合が促進されたためであると考えられた (Fig. 5-1 (b), (c), (d))。2010年の一度目の貧酸素水塊も出水に伴うものであった。7月5日の小潮期に貧酸素水塊が確

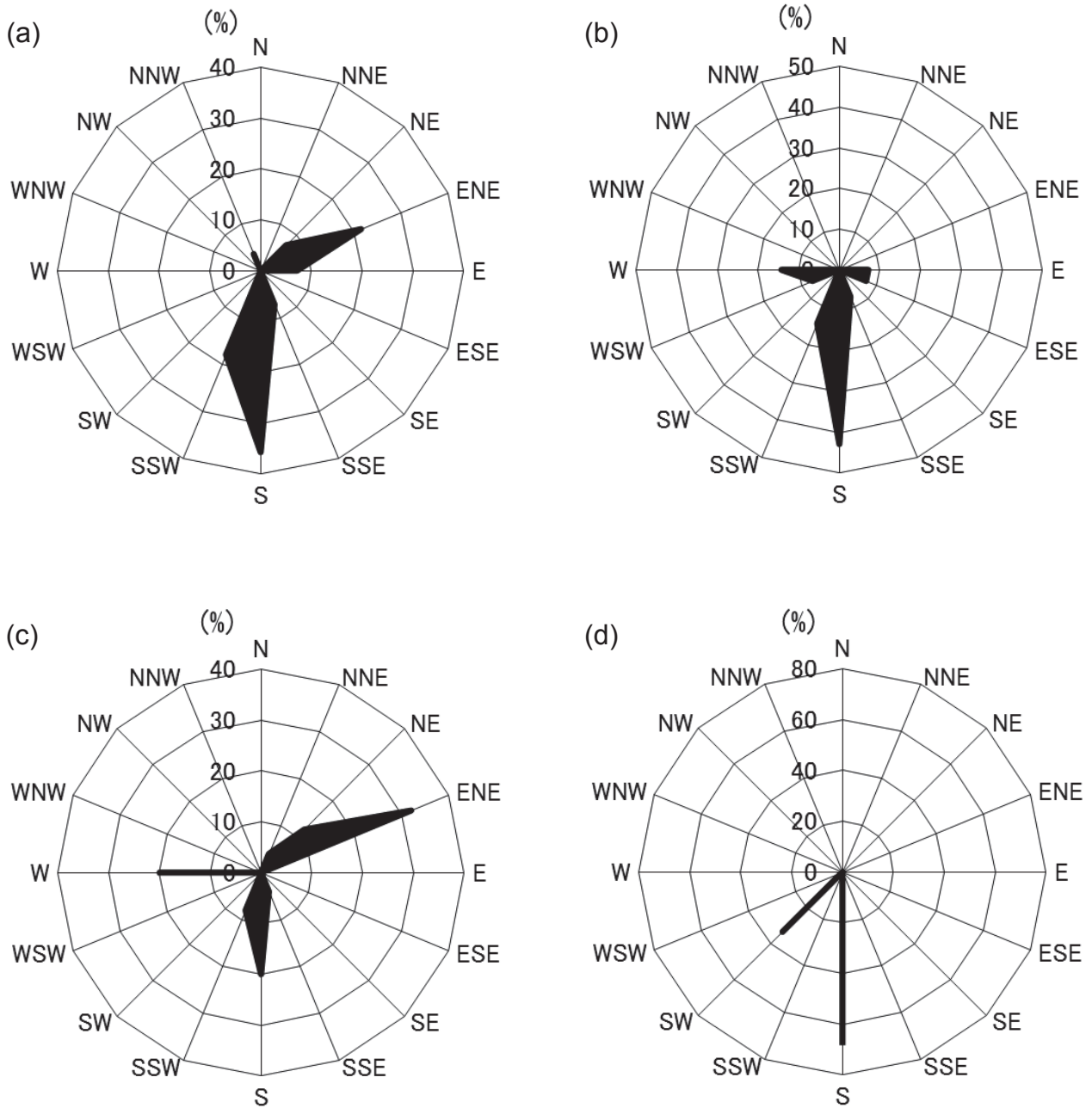


Fig. 5-2 Frequency of wind direction at Saga city before 1st *Chattonella* red tide (Jun. 4-Jul. 1) (a), during 1st *Chattonella* red tide (Jul. 2-Jul. 15) (b), before 2nd *Chattonella* red tide (Jul. 16-Aug. 9) (c) and during 2nd *Chattonella* red tide (Aug. 10-Aug. 12) (d) in 2010.

認められ、三度の大潮期を経ても解消されず8月10日まで1ヵ月以上にわたり確認された。この要因としては当該期間、北よりの風がほとんど吹いていなかったことが考えられた (Fig. 5-2 (b), (c))。この一度目の貧酸素水塊は8月11日の台風による攪乱により解消された。2011年の二度の貧酸素水塊も出水による成層形成に伴うものであった。一度目の貧酸素水塊は中潮期の7月5日に確認され、7月15日の大潮期でも解消されなかった。この間、南よりの風が多い傾向であった (Fig. 5-3 (b))。この

一度目の貧酸素水塊は7月19日の台風により解消された。二度目の貧酸素水塊は中潮期の8月12日に確認され、二度の大潮期を経ても解消されず8月31日まで2週間以上にわたり確認された。この間、北寄りの風が少ない傾向であった (Fig. 5-3 (d))。以上のように、有明海佐賀県海域における出水後の成層形成に伴う貧酸素水塊は、北風による鉛直混合や台風による攪乱がない限り、たとえ大潮期でも解消されないことが確認された。

2009年から2011年までの3ヵ年の貧酸素水塊の発生

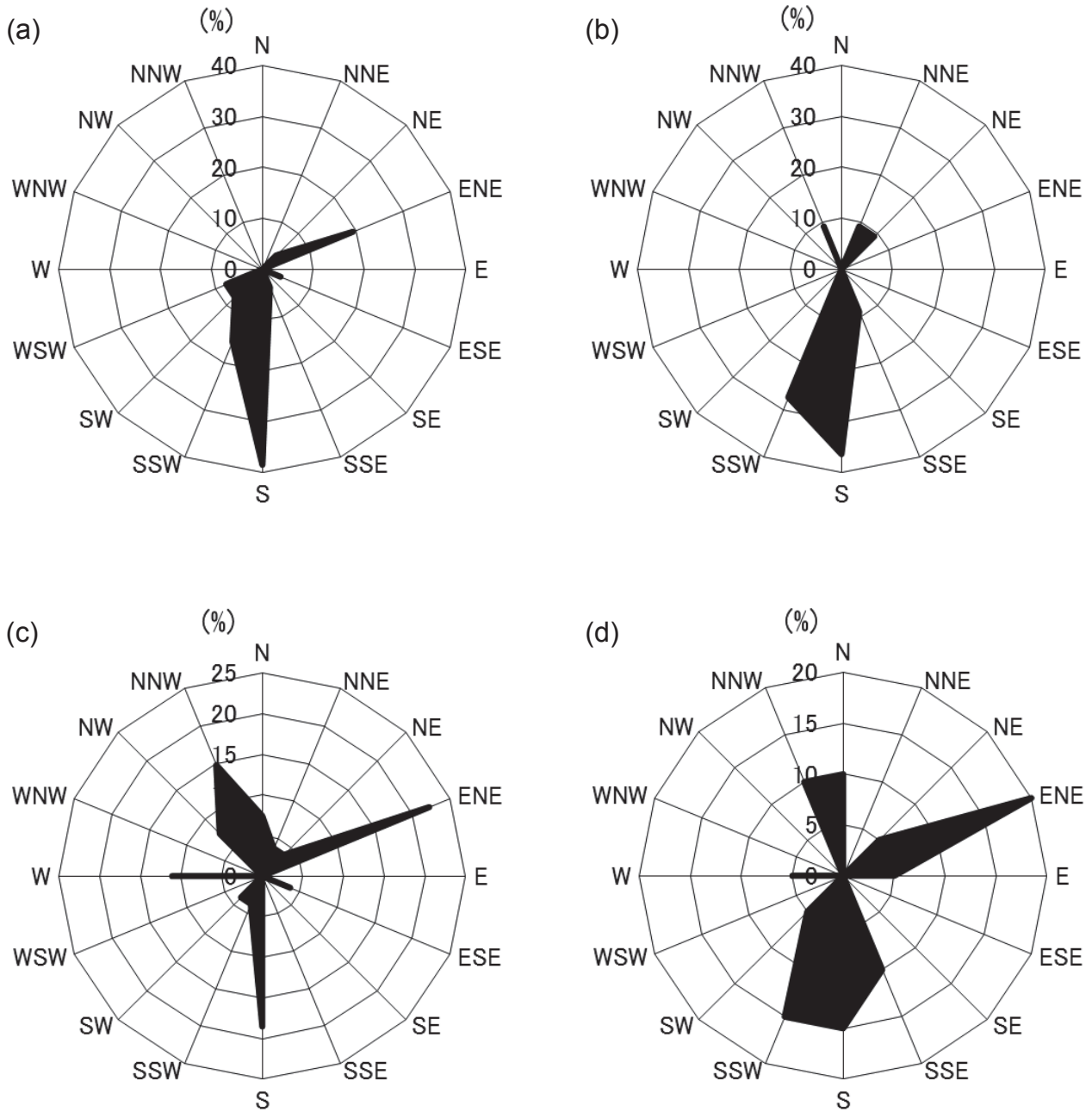


Fig. 5-3 Frequency of wind direction at Saga city before 1st hypoxia (Jun. 9-Jul. 4) (a), during 1st hypoxia (Jul. 5-Jul. 15) (b), before 2nd hypoxia (Jul. 16-Aug. 11) (c) and during 2nd hypoxia (Aug. 12-Aug. 31) (d) in 2011.

海域をみると、いずれも St. 9, 12, 15, 18 で囲まれた水深 8~15 m (昼間満潮時) の海域が中心であった。速水⁶⁾ はこのような有明海奥部の浅海域で底層 DO が低下し易い要因として、エスチャリー循環に伴う底層残差流が当該海域で収束すること、その残差流によって有機懸濁物が当該海域に集積すること等を報告している。つまり、当該海域は底層の水塊が停滞しやすく、酸素消費に使われる有機懸濁物が豊富であるため、水塊の酸素消費速度が大きい海域であるといえる。有明海奥部において貧酸素水塊の元となる有機懸濁物は主に珪藻類もしくは

Chattonella 赤潮由来であることが指摘されている^{4,12)}。2009 年および 2010 年の二度目の貧酸素水塊はいずれも *Chattonella* 赤潮の衰退後に発生し、2011 年の二度目の貧酸素水塊は *H. akashiwo* の赤潮発生時から衰退後にかけて発生するなど、ラフィド藻類の赤潮衰退後に貧酸素水塊の発生が確認された。殻をもたないラフィド藻類による赤潮の残骸は分解されやすく、貧酸素水塊を引き起こしやすいのかもしれない。

田中ら¹³⁾ は有明海奥部の貧酸素水塊発生対策として、河川からの流入負荷の削減やサルボウやカキなどの二枚

貝の増加により、底層への有機物負荷を軽減させることを提案している。また、2015年までは潮汐振幅が増大し、その後数年は潮汐振幅が比較的大きな期間であるため、この時期に有効な施策が実施されれば湾内を貧酸素が起きない状況に改善できる可能性が高いと指摘している。有明海佐賀県海域における貧酸素水塊による被害防止のためには、これまで以上に重点的な二枚貝資源の回復に向けた研究や実行可能で大規模な施策案の作成を急ぐ必要がある。

文 献

- 1) 今井一郎 (2012) : シャットネラ赤潮の生物学. 171pp, 生物研究社, 東京.
- 2) 松原 賢・吉田幸史・久野勝利 (2009) : 2007年夏季に有明海佐賀県海域で発生した *Chattonella* 赤潮. 佐有水研報, (24), 39-47.
- 3) 松原 賢・横尾一成・古賀秀昭 (2011) : 有明海佐賀県海域における *Chattonella* 赤潮の発生予察. 日本プランクトン学会報, **58**(1), 18-22.
- 4) 児玉真史・徳永貴久・木元克則・柴原芳一 (2009) : 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, **B2-65**(1), 1006-1010.
- 5) 日本海洋学会 (2005) : 有明海の生態系再生をめざして. 211pp, 恒星社厚生閣, 東京.
- 6) 速水祐一 (2007) : 有明海奥部の貧酸素水塊. 海洋と生物, (173), 577-584.
- 7) 生田和正・日向野純也・桑原久実・辻元哲郎 (2009) : アサリと流域圏環境-伊勢湾・三河湾での事例を中心として. 162pp, 恒星社厚生閣, 東京.
- 8) 堤 裕昭・堤 彩・高松篤志・木村千寿子・永田紗矢香・佃 正則・小森田智大・高橋 徹・門谷 茂 (2007) : 有明海奥部における夏季の貧酸素水塊発生域の拡大とそのメカニズム. 海の研究, **16**(3), 183-202.
- 9) 独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所・千葉県・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県 (2012) : 平成23年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業 赤潮貧酸素水塊漁業被害防止対策事業 貧酸素水塊漁業被害防止対策報告書.
- 10) 今井一郎 (1990) : 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella* のシストに関する生理生態学的研究. 南西水研研報, (23), 63-166.
- 11) 山口峰生・今井一郎・本城凡夫 (1991) : 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* の増殖速度に及ぼす水温, 塩分および光強度の影響. 日水誌, **57**(7), 1277-1284.
- 12) 田中昌宏・小田切光典 (2010) : 有明海湾奥部の貧酸素水塊形成過程とそのモデル化. 土木学会論文集, **B2-66**(1), 1011-1015.
- 13) 田中昌宏・小田切光典 (2011) : 生態系モデルによる有明海湾奥部の貧酸素水塊発生対策の検討. 土木学会論文集, **B2-67**(2), I_896-I_900.