土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 72, No. 2, I_1249-I_1254, 2016.

諫早湾における夏季に発生する*Chattonella*および珪藻赤潮の生態特性と終息時期の予測

中嶋　雅孝[1]・横山　佳裕[2]・宇野　潔[3]・矢永　純一[4]・
武元　将忠[5]・小野　英治[6]・本城　凡夫[7]

[1] 一般財団法人九州環境管理協会　事業本部（〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台 1-10-1）
E-mail:m-naka@keea.or.jp
[2] 正会員　一般財団法人九州環境管理協会　環境部（〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台 1-10-1）
[3] 一般財団法人九州環境管理協会　環境部（〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台 1-10-1）
[4] 農林水産省九州農政局　農村振興部（〒860-8527 熊本県熊本市西区春日 2-10-1）
[5] 農林水産省農村振興局　整備部（〒100-8950 東京都千代田区霞が関 1-2-1）
[6] 農林水産省食料産業局（〒100-8950 東京都千代田区霞が関 1-2-1）
[7]国立大学法人香川大学瀬戸内圏研究センター　特任教授（〒760-8521 香川県高松市幸町1-1）

諫早湾において農林水産省九州農政局が実施している水質連続観測により得られたchl-a，海水密度等のデータを用いて，夏季赤潮プランクトン（*Chattonella*属と珪藻類）の生態特性の解析と終息時期の予測指標の抽出を試みた．*Chattonella*属は海水密度の躍層を越えて日周鉛直移動を繰り返して増殖し，終息期には底層へ移動すること，珪藻類は上層で増殖し，赤潮中期から沈降が始まり，海底付近で最盛期に達して終息すること，珪藻赤潮の終息開始の第一の指標は赤潮塊の海底付近への沈降であること，*Chattonella*赤潮の完全終息は上層と下層の海水密度差が小さい時から始まるが，珪藻赤潮ではその海水密度差が比較的大きい時からも始まることがわかった．また，それぞれの赤潮の移動速度または沈降速度が見積もられた．

Key Words : *Chattonella, Diatoms, diel vertical migration, chlorophyll-a, sewater density*

1.　はじめに

赤潮発生時における漁業被害防止対策として，有害プランクトンの早期識別，魚類養殖における餌止め（絶食），養殖筏の移動等による赤潮からの回避，早期出荷，活性粘土の散布などの漁場改善策等が挙げられる[1),2),3)]．これに加え，有害種の増殖特性を予め知ること，増殖が活発となる時期に漁場監視体制を強化すること等が必要とされている[4)]．

赤潮発生前に予察して被害を軽減するために，気象や水質などの環境条件との関連性に基づく数多くの研究も行われている[5),6),7),8)]．長崎県では平成17年（2005年）に，赤潮被害対策実施の目安となる有害種8種の細胞密度の基準を設定し，漁業者に対して適切な時期に対策をとるよう指導を行っている[4)]．

適切な漁業被害対策を行う上では，赤潮の発生，成長，衰退，終息の過程を十分に理解する必要があるが，このうち，終息の過程を知ることは，漁業者が餌止めなどの漁業被害対策をいつまで継続すべきか，対策費用や出荷調整の点からも重要な課題である．そのような中，長崎県の諫早湾では，農林水産省九州農政局が諫早湾干拓事業に係る環境モニタリングの一環として，湾内6地点で水質の連続鉛直観測を行っている（**図-1**）[9)]．調査項目にはクロロフィルa（chl-a）が含まれており[9)]，これにより赤潮の時間的・空間的推移を間接的に類推でき，終息に至るまでの赤潮構成種の生態や環境の特性がわかれば，漁業等において求められている赤潮終息時期の予測への適用が期待される．

そこで，本湾における夏季の水質連続観測により得られたchl-a，海水密度等のデータを用いて，諫早湾で夏季にみられる赤潮プランクトン（*Chattonella*属と珪藻類）の生態特性の解析と終息時期の予測指標の抽出を試みた．

2.　研究方法

(1)　水質鉛直分布の連続観測データ

図-1に示す諫早湾B3地点の観測櫓において観測されたデータを解析した．B3地点における水質の鉛直分布

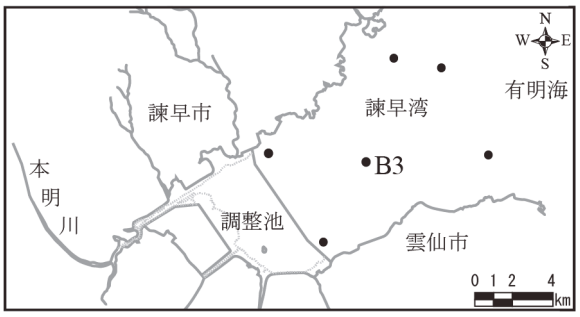

図-1　調査地点

の連続観測は，2002年6月下旬から継続して行われており，chl-a，水温，塩分，海水密度が観測されている．これらのデータは毎正時に1回の頻度で，表層から海底直上まで0.5m間隔の層で測得されている．chl-a，水温，塩分の観測には，自動昇降装置に取り付けられた多項目水質計（AAQ1183：JFEアドバンテック社製）が用いられている．なお，chl-aは，直接的には蛍光強度として観測されており，同一地点での採水試料のchl-a室内分析結果（海洋観測指針の方法[10]による）との関係式を用いて換算された値として報告されている[9]．また，海水密度は，同じく多項目水質計により観測された水温，塩分を用いて海洋観測指針の方法により算出されたσ_t（kg･m^{-3}）[10]で表されている．**図-2**に諫早湾湾央部のB3地点での2002～2014年のそれぞれ6～8月（夏季）におけるchl-a鉛直分布の経時変化を，等濃度線図（イソプレット）として示す．横軸は時間，縦軸は海底からの高さ，色はchl-a濃度を表し，暖色になるほどchl-aは高い．また，イソプレットの高さの変化は，潮位変動に対応している．

(2)　植物プランクトン調査結果

解析においてそれぞれの期間の赤潮種を特定するために，九州農政局が2002～2007年におおよそ2週間に1回の頻度で，2008～2014年には7月または8月に1回の頻度で実施した植物プランクトン調査結果[11),12)]，および長崎県県南水産業普及指導センターが調査し，長崎県総合水産試験場により発信されている赤潮発生状況速報[13)]のデータを用いた．

(3)　解析対象赤潮の抽出

図-2より，30μg･L^{-1}以上の高いchl-a濃度の時期を含み，比較的高い濃度が維持され，かつ，植物プランクトン調査結果により構成種を特定できた期間を解析対象赤潮とした．また，この鉛直分布より赤潮プランクトンが底層に移動し，赤潮発生前のchl-a濃度まで低下した時期を「終息期」と便宜的に定義して，解析対象赤潮を抽出した．解析対象に適合した赤潮は，**表-1**と**図-2**に示すとおり*Chattonella*赤潮が3件，珪藻赤潮が11件である．*Chattonella*赤潮は*Chattonella antiqua*と*C. marina*で，珪藻赤潮は主に*Skeletonema costatum*で形成されていた．

3.　解析結果および考察

(1)　赤潮塊の消長（発生～終息）

表-1に示す*Chattonella*赤潮と珪藻赤潮のうち，それぞれ2004年8月，2003年8月における赤潮の初期から終息期までのchl-aと海水密度の経時変化を，**図-3**と**図-4**に示す．各図の上段には，各観測時刻におけるchl-a鉛直分布から

表-1　赤潮解析期間とプランクトン調査日，赤潮構成種

赤潮種類	解析期間			植物プランクトン調査日	観測水深（海面下）と主な種類
Chattonella 属	2004/8/13	～	8/19	2004/8/16	0.5m: *Chattonella antiqua, C.marina, Ceratium furca*
	2007/8/10	～	8/14	2007/8/10	0.5m: *Chattonella antiqua, C.marina*
				8/10*	0.5m, 2m, 5m: *Chattonella marina, C.antiqua*, 珪藻類
				8/13*	0.5m, 2m, 5m, 8m: *Chattonella marina, C.antiqua*, 珪藻類
	2009/7/26	～	8/10	2009/7/30*	0.5m: *Chattonella antiqua, C.marina*
珪藻類	2002/7/7	～	7/11	2002/7/8	0.5m: *Skeletonema costatum*
	2002/7/22	～	7/25	2002/7/22	0.5m: *Chaetoceros curvisetum*
	2003/7/21	～	7/29	2003/7/22	0.5m: *Nitzschia pungens, Chaetoceros curvisetum*
				7/28	0.5m: *Skeletonema costatum*
	2003/7/31	～	8/8	2003/8/4	0.5m: *Chaetoceros curvisetum, Skeletonema costatum*
	2003/8/16	～	8/28	2003/8/18	0.5m: *Skeletonema costatum*
				8/25	0.5m: *Skeletonema costatum*
	2004/6/28	～	7/5	2004/6/28	0.5m: *Skeletonema costatum*
	2005/7/12	～	7/27	2005/7/12	0.5m: *Skeletonema costatum*
				7/19	0.5m: *Gephyrocapsa oceanica*
				7/25	0.5m: *Thalassionema nittzschioides, Thalassiosira* spp.
	2006/7/7	～	7/17	2006/7/11	0.5m: Thalassiosiraceae
	2006/7/24	～	8/8	2006/7/24	0.5m: Thalassiosiraceae
				8/7	0.5m: Thalassiosiraceae, *Leptocylindrus danicus*
	2007/7/22	～	7/30	2007/7/23	0.5m: *Skeletonema costatum, Chaetoceros lorenzianum*
	2011/6/20	～	6/26	2011/6/21*	0.5m, 5m, 8.5m: 珪藻類

*）長崎県総合水産試験場による[13)]

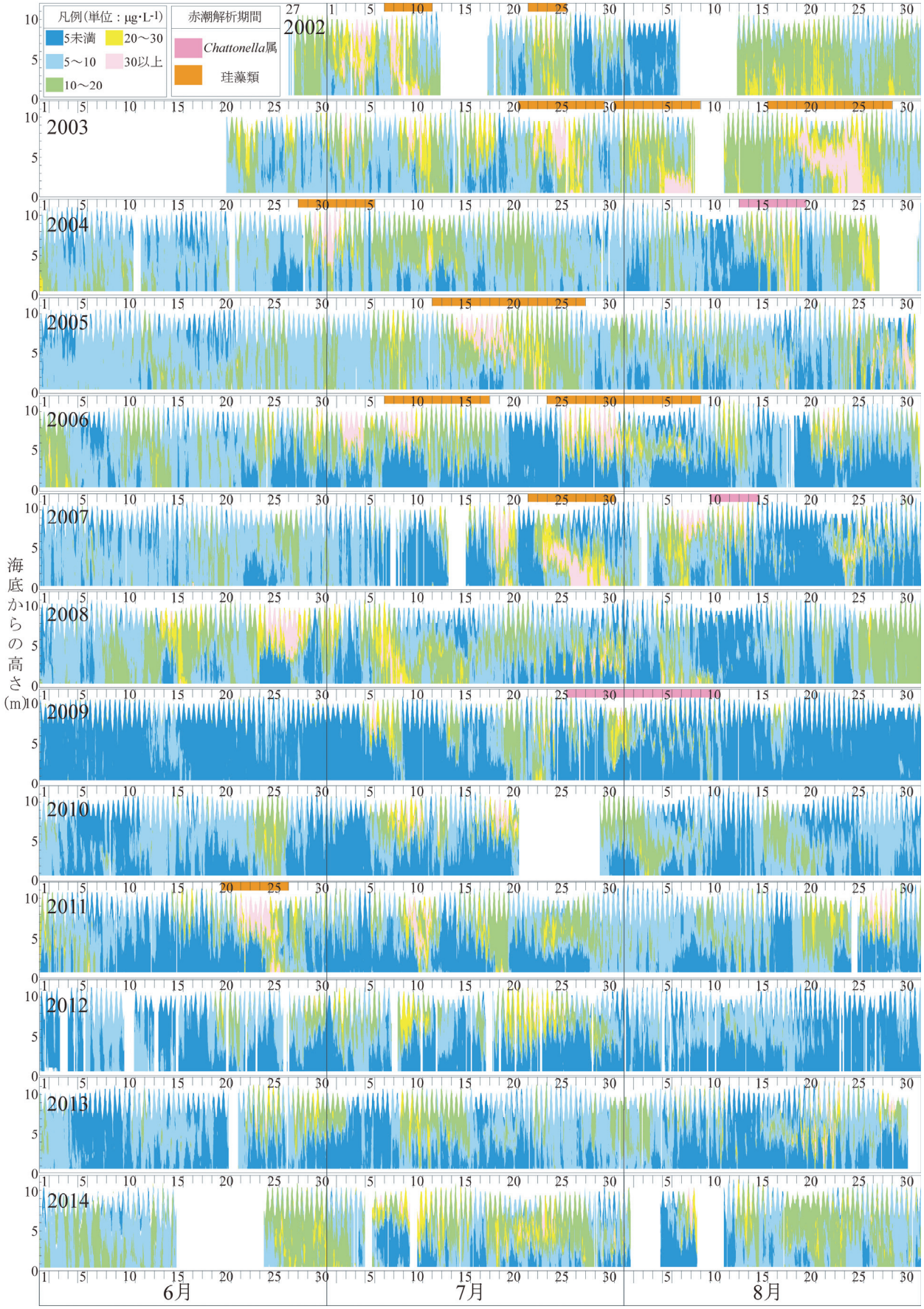

図-2　2002～2014年の各6～8月におけるchl-a鉛直分布のイソプレット（B3地点）

求めたchl-a最大値位置の時間変化を赤実線で，下段には，各観測時刻における表層から底層までの水柱のchl-a総量（mg･m^{-2}）を黒実線で示した．なお，時刻tにおける水柱のchl-a総量（W_t）は式(1)で求めた．

$$W_t = \sum C_i \times x \qquad (1)$$

ここで，C_iはchl-a濃度（μg･L^{-1}），添え字iは観測層，xは観測間隔（0.5m）である．**図-3**に示す*Chattonella*赤潮では，増殖の途中（赤潮中期）から上下に躍層（海水密度の鉛直方向の変化における境界）を超えた移動が毎日観測され始めた．この移動を繰り返しながらさらに増殖し，chl-a総量が最大に達した（赤潮最盛期）後，海底に到達し，底層から上方への移動がみられなくなり，赤潮発生前のchl-a濃度まで低下し終息した．一方，**図-4**に示す珪藻赤潮では上層で増殖し，赤潮中期から赤潮状態の塊（chl-a最大値を含む高濃度域，以下，「赤潮塊」という）が沈降しはじめ，数日をかけて海底付近に到達した後，赤潮最盛期を形成して終息期に達した．これらの傾向は，解析対象としたその他の赤潮でも同様にみられた．

これより，*Chattonella*赤潮，珪藻赤潮の発生時における赤潮塊の海底付近への沈降は，終息開始の目安の一つと考えられ，特に珪藻赤潮ではその傾向が顕著であった．

(2) 赤潮塊の海底到達から完全終息までの期間における上下水塊の海水密度の差

赤潮塊が海底付近に到達し，完全終息するまでの躍層を境とする上下水塊の海水密度の差に注目した．海底到達の時期（海底到達期）は，解析対象とした赤潮のそれぞれのイソプレットから読み取り，*Chattonella* 赤潮では，上下方向の移動がみられなくなり，定常的に海底付近に至った時期とし，珪藻赤潮では，定常的に海底付近に分布し始めた時期とした．完全終息の時期（終息期）は，いずれの赤潮もchl-aが赤潮発生前の濃度まで低下した時期とし，また，両時期の間の期間を終息期直前とした．躍層の位置は，各時刻における海水密度より各層間の密度差を求め，その絶対値が最大となる2層の平均高さとした．この躍層位置下側の水塊の平均海水密度から上側の水塊の平均海水密度を差し引き，上下層の海水密度差とした．各赤潮の各時期での上下層の海水密度差の変化を**図-5** に示す．これによると，珪藻赤潮では終息開始

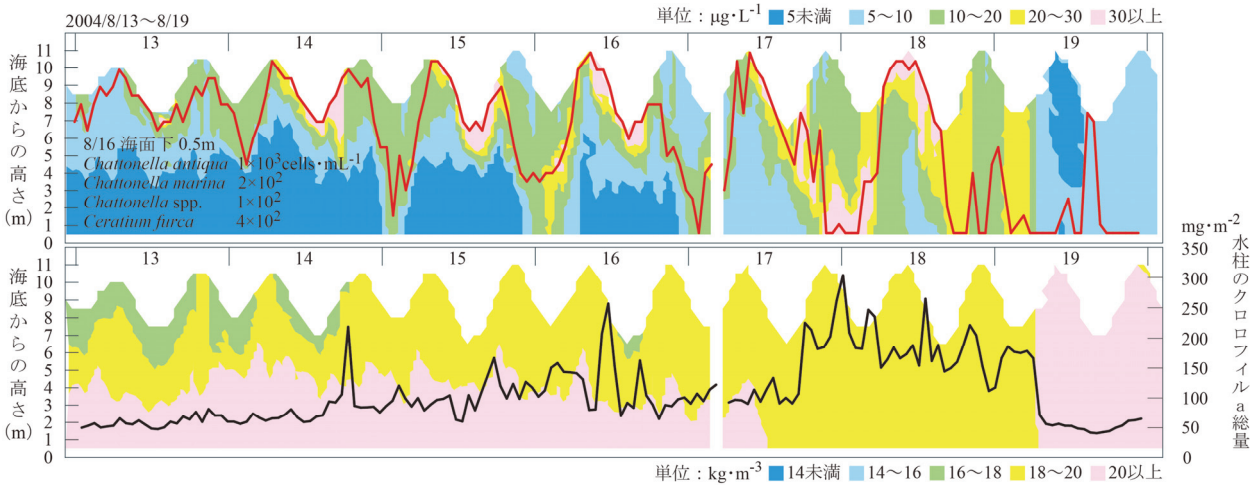

図-3 2004年8月13日～19日にみられた*Chattonella*赤潮におけるchl-a（上）と海水密度（下）のイソプレット

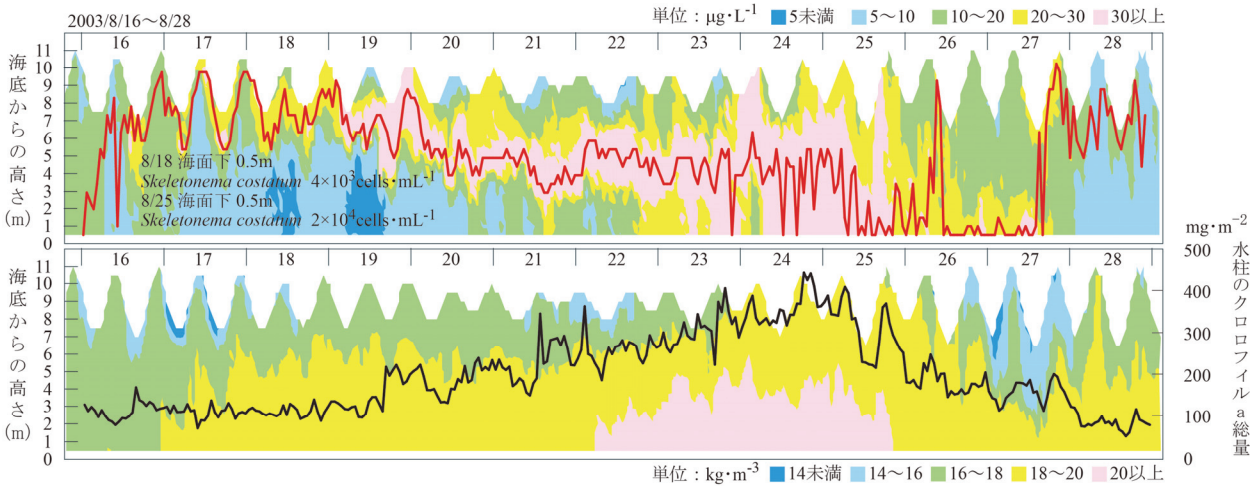

図-4 2003年8月16日～28日にみられた珪藻赤潮におけるchl-a（上）と海水密度（下）のイソプレット

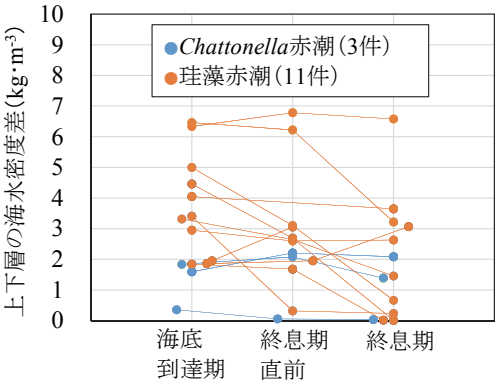

図-5 海底到達期から終息期における上下層の海水密度差

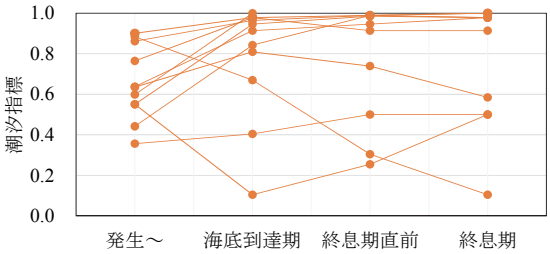

図-6 珪藻赤潮の赤潮発生から終息期における潮汐変化

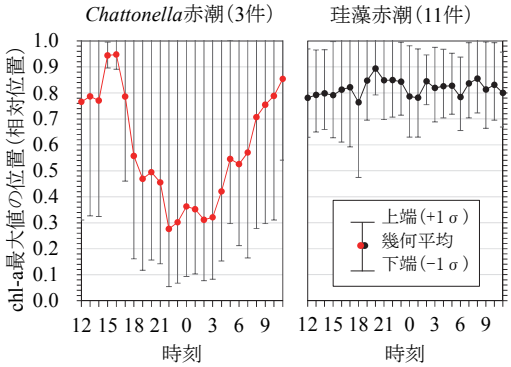

図-7 海底到達期以前における *Chattonella* 赤潮と珪藻赤潮の毎日の chl-a 最大値位置の時間変化

（海底到達時）の海水密度差は比較的大きく，終息期直前，終息期にはその差が小さくなる傾向がみられるが，*Chattonella* 赤潮では終息開始から終息期までいずれの時期も海水密度差は小さかった．このように，両種の間には，終息開始から終息期までの海水密度差の時間変化に違いがみられた．ここで，珪藻赤潮の発生から海底到達期，終息期までの潮汐の変化を**図-6** に示す．縦軸の潮汐指標（f）は式(2)のとおり，朔望時に 1，上弦・下弦時に 0 となるように，余弦関数と月齢を用いて求めた．

$$f = \left|\cos\left(\omega \times m\right)\right| \qquad (2)$$

ωは月齢 1 日当たりの角度変化（$= \pi/15$ rad・day^{-1}），m は月齢（day）である．すなわち潮汐指標が大きければ満潮時の潮位は高く，潮位振幅は大きくなる．珪藻赤潮では，発生から終息期にかけて潮汐指標が増加する場合が多く，潮位上昇に伴う高塩分水の流入による希釈が珪藻赤潮の終息を加速させる一因となっている可能性がある．

表-2 *Chattonella* 赤潮の鉛直移動速度，珪藻赤潮の沈降速度

種類	下降速度 (m・h^{-1})	平均	上昇速度 (m・h^{-1})	平均	沈降速度 (m・d^{-1})	平均
Chattonela 赤潮	1.4	1.4	1.3	1.2	-	-
	2.3		1.3		-	
	0.6		1.0		-	
珪藻赤潮	-	-	-	-	1.3	0.7
	-		-		2.2	
	-		-		0.2	
	-		-		1.0	
	-		-		0.3	
	-		-		0.4	
	-		-		0.3	
	-		-		0.2	
	-		-		0.2	
	-		-		0.7	
	-		-		1.0	

(3) 赤潮塊の鉛直方向の移動

海底到達以前における両赤潮のchl-a最大値の鉛直方向における毎日の移動状況（位置の変化）を**図-7**に示す．縦軸の chl-a最大値の位置は，観測時の潮汐によっても変動することから，この影響を除くために観測時の全水深に対する比（相対位置）として示した．これより，*Chattonella*赤潮の下降は夕方に始まり，夜間に海底付近に到達すると間もなく上方へ移動し始め，朝から日中にかけて表層に集積して赤潮を形成した．この上下移動の時間帯は潮汐変化の周期とは一致せず，毎回同じ時刻の周期，すなわち日周鉛直移動としてみられた．この時，光のない真夜中から上昇し始めており，本種は細胞内日周リズムで移動していることが示唆された．また，**図-3**にもみられるように，赤潮発生の初期から中期，海底到達時にかけて，この鉛直移動の深さが徐々に深くなっており，この傾向は*Chattonella*赤潮の終息の指標の一つとして示唆される．一方，珪藻類は一日中上層に留まっていた．

(4) *Chattonella*赤潮の鉛直移動速度と珪藻赤潮の沈降速度

*Chattonella*赤潮の日周鉛直移動における下方への移動速度（下降速度，夜間に現れる），上方への移動速度（上昇速度，夜間から早朝にかけて現れる）は，三つの解析対象期間の観測日毎のchl-a最大値の時間変化をプロットし，日の入り時刻，日の出時刻を考慮して求めた．一方，日周移動を行わない珪藻類に対しては，発生から終息にかけての平均的な赤潮塊の沈降速度として，chl-a最大値の経時変化の傾きより求めた．

*Chattonella*赤潮の鉛直移動速度，珪藻赤潮の沈降速度の算出結果を**表-2**に示す．*Chattonella*赤潮の下降速度は平均で1.4m・h^{-1}，上昇速度は平均で1.2m・h^{-1}と見積もられ，Imai *et al.*が示した値（～0.8 m・h^{-1}）[14]と比べてやや大きかった．また，珪藻類の沈降速度は平均で0.7m・d^{-1}（0.2～2.2m・d^{-1}）と見積もられ，Onitsuka *et al.*が示した八代海での7月における値（1m・d^{-1}）[15]と比べて高い値もみられたが，全体としてやや低い傾向にあった．

4. おわりに

本研究は，赤潮終息時期予測への適用を目的として諫早湾B3地点における水質連続観測結果を用いて解析したものである．その結果，以下のことがわかった．

*Chattonella*属は海水密度の躍層を超えて日周鉛直運動を繰り返しながら増殖し，終息期には底層へ移動する．一方，珪藻類は上層で増殖し，赤潮中期から徐々に下降が始まり，海底付近で最盛期に達し，終息する．また，*Chattonella*属では日周鉛直移動速度が，珪藻類では赤潮塊の沈降速度が見積もられた．

珪藻赤潮の終息開始の第一の指標は赤潮塊の海底付近への沈降である．また，*Chattonella*赤潮の完全終息は上層と下層の海水密度差が小さい時から始まり，珪藻赤潮ではその海水密度差が比較的大きい時からも始まる．このことは，構成種の特定と連続観測データをモニタリングすることで赤潮の終息を事前に予測できることを示唆しており，「終息予報」を積極的に発信することにより，漁業者が抱える被害継続への不安の解消や，計画的な赤潮対策の実施に寄与すると考えられる．

参考文献

1) 水産庁，社団法人日本水産資源保護協会：赤潮対策，pp.10-17，公益社団法人日本水産資源保護協会ホームページ http://www.fish-jfrca.jp/02/pdf/pamphlet/009.pdf，参照 2016-04-14.
2) 長崎県総合水産試験場環境養殖技術開発センター漁場環境科：赤潮対策について（高水温期に要注意），漁連だより，長崎県漁業協同組合連合会，No.146，pp.16-19，2007.
3) 本城凡夫：赤潮被害軽減策と発生のシナリオ，環境管理，一般財団法人九州環境管理協会，No.44，pp.4-15，2015.
4) 山砥稔文：赤潮被害対策について－有害植物プランクトンの早期識別と増殖特性－，水産開発，社団法人長崎県漁港漁場協会，No.94，pp.11-19，2006.
5) Aoki, K., Onitsuka, G., Shimizu, M., Yamatogi, T., Ishida, N., Kitahara, S. and Hirano, K. : *Chattonella* (Raphidophyceae) bloom spatio-temporal variations in Tachibana bay and the sourthern area of Ariake Sea, Japan : Interregional displacement patterns with *Skeletonema* (Bacillariophyceae), *Mar. Pol. Bul.*, Vol.99, No.1-2，pp.54-60, 2015.
6) Matsubara, T., Nagasoe, S., Yamasaki, Y., Shikata, T., Shimasaki, Y., Oshima, Y. and Honjo, T. : Effects of temperature, salinity, and irradiance on the growth of the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol.342, No.2, pp.226-230, 2007.
7) 中嶋雅孝，横山佳裕，本城凡夫：諫早湾および北部有明海における *Chattonella* 赤潮発生予察の試み，環境管理，財団法人九州環境管理協会，No.38，pp.37-45，2009.
8) Shikata, T., Sakamoto, S., Onitsuka, G., Aoki K. and Yamaguchi, M. : Effects of salinity on diel vertical migration behavior in two red-tide algae, *Chattonella antiqua* and *Karenia mikimotoi*, *Plank. Benth. Res.,* Vol.9, No.1, pp.42-50, 2014.
9) 九州農政局：平成 27 年度諫早湾自動昇降装置等データ管理業務報告書，2016
10) 気象庁：海洋観測指針（第 1 部），財団法人気象業務支援センター，200p.，1999.
11) 九州農政局：平成 20 年度諫早湾地域生物等環境調査委託事業報告書，2009.
12) 九州農政局：平成 27 年度環境調査結果とりまとめ業務報告書，2016.
13) 長崎県総合水産試験場：赤潮速報，長崎県総合水産試験場ホームページ http://www.marinelabo.nagasaki.nagasaki.jp/news/akasiosokuho-index.html，2002-2014.
14) Imai, I. and Yamaguchi, M. : Life cycle, physiology, ecology and red tide occurrences of the fish-killing raphidophyte *Chattonella*, *Harmful Algae*, Vol.14, pp.46-70, 2012.
15) Onitsuka, G., Shikata, T., Kitatsuji, S., Abe, K., Yamamoto, T., Ochiai, H. and Matuso H. : Factors influencing maintenance and decline of a diatom bloom in the Yatsushiro Sea, Japan, *J. Oceanogr*. Vol.72, No.1, pp.1-11, 2016.

(2016.3.16 受付)

PREDICTIONS AND CHARACTERISTICS OF *CHATTONELLA* AND DIATOM RED TIDE BLOOM CESSATION DURING SUMMER IN ISAHAYA BAY

Masataka NAKASHIMA, Yoshihiro YOKOYAMA, Kiyoshi UNO, Jun-ichi YANAGA, Masatada TAKEMOTO, Eiji ONO and Tsuneo HONJO

Using sequential data including chlorophyll-a (chl-a) and sea water density observed by Japan's Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, we tried to characterize the ecological properties of *Chattonella* and diatom red tides occurring in Isahaya Bay during the summer and to find indices for prediction of these red tides cessations.*Chattonella* red tides grew with repeated diel vertical migrations observed moving beyond halocline levels and settling down at the sea bottom in cessation periods. On the other hand diatom red tides grew in the upper layers before it started to fall at the middle period, then it reached full bloom and ceased growth at the bottom layer. Moreover, it was observed that a dominant index of diatoms' cessation was settling clusters which started at the time when the difference of sea water density between upper and lower layers was rather large, unlike *Chattonella* red tides which were small. Additionally, the velocities of diel vertical migrations of *Chattonella* and those of settling clusters of diatoms were estimated numerically.