

2014 年 1 月に山川湾で発生した有害ディクチオカ藻 *Pseudochattonella verruculosa* 赤潮の発生状況と分布特性

西 広海・保科圭佑・折田和三¹

1 水産振興課

ディクチオカ藻 *Pseudochattonella verruculosa* (Y.Hara et Chihara) Tanabe, Hosoi, Honda, Fukaya, Inagaki et Sako は、本県では 2012 年 2 月に山川湾で初めて赤潮化し、魚類養殖業に被害が発生した。本稿では、2014 年 1 月に山川湾で 2 年ぶりに発生した *P. verruculosa* 赤潮の発生状況、環境等を整理するとともに、本種の分布特性を推定した。

2013 年 12 月には湾奥部で競合種が増殖したことが、赤潮形成期以前の *P. verruculosa* の細胞密度が低水準で推移した要因の一つと考えられた。*P. verruculosa* 赤潮の発生期間中は湾奥部の方が本種の細胞密度が高い傾向が見られたが、湾口から湾奥に向けて吹く風が卓越していたことも影響して湾口部への拡散が抑制され、湾奥部に本種が留まり続けたと考えられた。なお 2014 年 1 月は、競合種である珪藻類が少なかったことが *P. verruculosa* の増殖が継続する要因となったと考えられた。

水平分布調査の結果、調査期間中の山川湾は比較的静穏な状態であったと考えられ、*P. verruculosa* 細胞が水平方向に大きく移動しなかった可能性がある。また湾奥部が *P. verruculosa* の発生域であったこと、湾奥部の水温が湾口部より低く、かつ本種が比較的低温域で増殖しやすいという特性により、湾奥部の本種の細胞密度が湾口部に比べて高く維持されたと考えられた。

日周鉛直分布調査の結果、*P. verruculosa* は 1 日を通じて表層から 5 m 層に分布し、大きな鉛直移動をしていなかった。一方 *P. verruculosa* は最も水温の低い水深で細胞密度が高くなり、逆の相関傾向がみられた。これらのことから *P. verruculosa* は、表層性が強いプランクトンである可能性が考えられるものの、水温分布から本種の鉛直分布が好適水温帯に影響されている可能性も考えられた。

また、*P. verruculosa* 赤潮の終息要因については、2012 年 2 月の *P. verruculosa* 赤潮の際も、今回と同様に赤潮が終息した直接の要因を推察することができず、他の要因が影響した可能性がある。今後は山川湾の水質等の漁場環境だけでなく、プランクトン組成等をより詳しく把握する必要があると考えられた。

P. verruculosa は、これまで西日本では香川県¹⁾や山口県²⁾などで赤潮を形成し、漁業被害が発生している。本県では 2012 年 2 月に山川湾で初めて赤潮化し、魚類養殖業に被害が発生した。このことを受けて、当センターは地元の山川町漁業協同組合（以下、「山川町漁協」と表記）や養殖業者に対し、*P. verruculosa* についての同定研修を実施した。その後、山川町漁協が顕微鏡を整備し、養殖業者とともに *P. verruculosa* を含めた有害プランクトンのモニタリング体制を構築し、山川湾のプランクトン発生状況を定期的に監視しており、同時に当センターも養殖業者が採水した海水試料の定期的な検鏡を実施してきた。このような状況の中、山川湾では 2014 年 1 月に

P. verruculosa が 2 年ぶりに赤潮を形成した。本稿では *P. verruculosa* 赤潮の発生状況、環境等を整理するとともに、*P. verruculosa* の 24 時間湾内調査や日周鉛直分布調査を実施して、本種の分布特性を推定したので報告する。

材料及び方法

1 *P. verruculosa* 赤潮発生前後の環境調査

図 1 に示す山川湾の 5 定点で 2013 年 12 月 2 日～2014 年 1 月 27 日まで *P. verruculosa* 赤潮の発生前後の環境調査を実施した。5 定点の 0, 5, 10 m 層 (St.3 は 20 m, 30 m, 40 m 層を追加) からバケツ又は採

水器 ((株)離合社製リゴーB号採水器)で採水し、プランクトンの計数と栄養塩の分析に供した。また、水温、塩分、pH、DO(溶存酸素量)を現場において多項目水質計(YSI社製 6600V2)で計測したほか、栄養塩は現場で採水した海水を当センターに持ち帰り、オートアナライザ(BL-TEC社製 AACS-4)でDIN(溶存態無機態窒素)、DIP(溶存態無機態リン)及びSi(ケイ酸態ケイ素)を測定した。気象情報のうち、降水量、日照時間は、鹿児島地方気象台指宿アメダスのデータを使用した(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2016年2月22日)。風向、風速は、山川湾に面した第十管区海上保安本部鹿児島海上保安部指宿海上保安署が、毎日8:00、12:00、16:00に測定したデータ(未公表)を使用した。またプランクトンの分布については、山川町漁協の養殖業者が2013年11月5日から2014年3月28日まで前述の山川湾の5定点で1回/週以上の頻度で0m層から採水した海水を山川町漁協及び当センターが検鏡して *P. verruculosa* と *Octactis octonaria* (現 *Dictyocha octonaria*) の細胞密度を計数した。

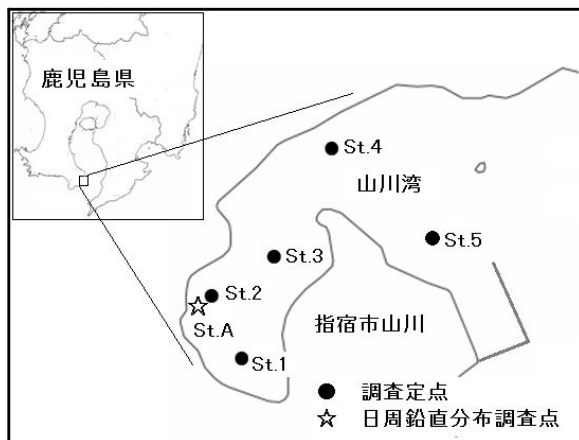


図1 調査定点

2 水平分布湾内調査

P. verruculosa の山川湾内における1日間の水平的な分布状況を把握するために、24時間の湾内調査を実施した。調査は、2014年1月22日13:00、同日18:00、1月23日0:00、同日6:00の4回実施した。調査定点、採水層、採水方法、水温、塩分、pH、DOの測定は、1の *P. verruculosa* 赤潮の発生前後の環境調査と同様とした。栄養塩分析は、1月23日6:00調査時の採水サンプルで実施した。

3 日周鉛直分布調査

P. verruculosa の、1日間の鉛直的な分布状況を把握するために、24時間の日周鉛直分布調査を実施した。

調査は2014年1月22日15:00～23日13:00に、指宿市山川町の山川湾の定点(St.A, 水深16～18m, 図1)で、0m, 5m, 10m, 15m層の海水を、採水器で2時間毎に採水し、採水後、顕微鏡で速やかに *P. verruculosa* の細胞密度を計数した。また採水と同時に多項目水質計を水面から海底まで平均0.14 m/secで降下させ、1秒毎の水温、塩分、pH、DO(mg/L, %), クロロフィル-a(以下、「Chl-a」と表記)濃度を測定した。

結果

1 *P. verruculosa* 赤潮発生前後の環境特性

P. verruculosa 細胞の分布状況を図2に、*P. verruculosa* と *O. octonaria* の最高細胞密度の推移を図3に示す。*P. verruculosa* は、2013年12月2日の調査では全ての定点で確認されなかったが、12月6日には最高細胞密度は102 cells/mlであった。なお、12月6日のSt.2の表層からは、*O. octonaria* が最高279 cells/ml確認された。翌12月7日の *P. verruculosa* の最高細胞密度は22 cells/mlであったが、この日はSt.1付近で、絨毛虫類の *Myrionecta rubra* の増殖による着色が確認(最高細胞密度は2,650 cells/ml)された(図4)。その後12月25日までの *P. verruculosa* の最高細胞密度は3～30 cells/mlと比較的低かったのに対し、*O. octonaria* の最高細胞密度は12月11～14日に100 cells/ml以上となり、比較的高かった(図3)。

また珪藻類は、12月上旬までは少なかったが、12月13日以降は湾奥部のSt.1やSt.2で多く、12月25日には湾奥部で茶色がかった濁りがみられ、検鏡したところ *Skeletonema* spp. が66,800～76,800 cells/ml確認され、この濁りは本種の増殖に由来するものであった(図5)。2014年1月9日の調査では、*P. verruculosa* の細胞密度は1～17 cells/mlと低かった(図2)が、山川湾全体で珪藻類がほとんど確認されなかった。1月15日午前には *P. verruculosa* が最高568 cells/ml確認され、同日午後には本種が湾奥部の船溜まりで最高860 cells/ml確認され、着色がみられた。その後も細胞密度が100 cells/ml以上で推移し、1月20日の午前にはSt.1の0m層で2,527 cells/ml、1

月23日の午前と同じく St.1 の0m層で2,250 cells/ml 確認された。その後1月25日の午後には本種の細胞密度は50 cells/ml 以下に減少し、1月27日には全調査点で細胞密度が2 cells/ml 以下となって終息を確認した(図2)。

P. verruculosa の最高細胞密度の推移を見ると(図

3)、12月末までは本種が確認された定点はほとんど St.1 ~ 3 の湾奥部だった。*P. verruculosa* が増殖した2014年1月中旬以降は、St.4, 5の湾口部でも細胞密度が高くなったが、最高でも115 cells/ml と湾奥部の最高細胞密度の2,527 cells/ml に比べるとかなり低く推移した。

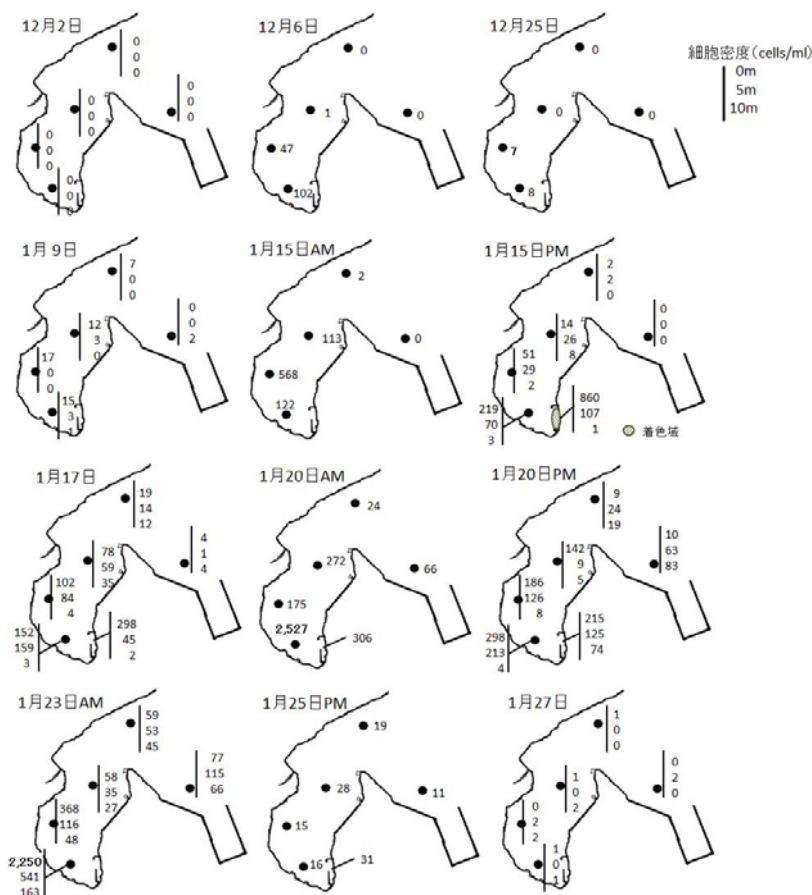


図2 山川湾における*P. verruculosa*赤潮発生期間中の*P. verruculosa*細胞分布状況
(3段書きしていない数字は0m層の細胞密度)

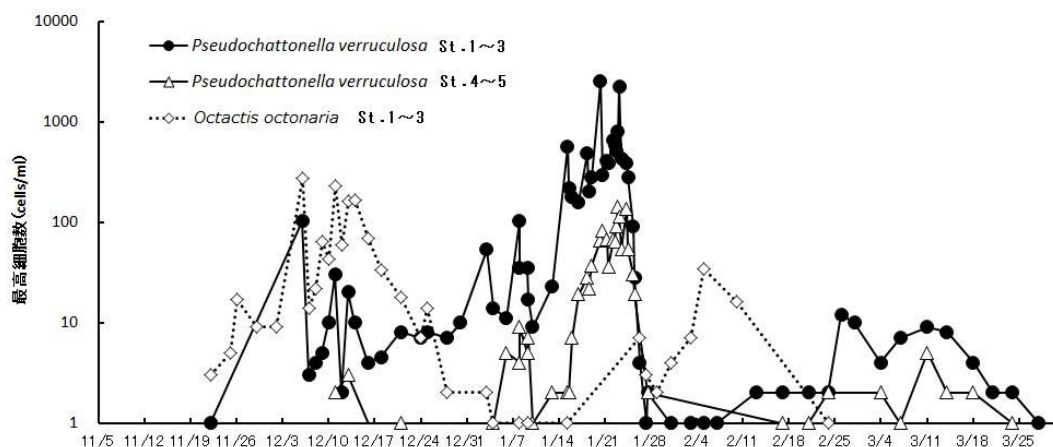


図3 *P. verruculosa*と*O. octonaria*の最高細胞密度の推移

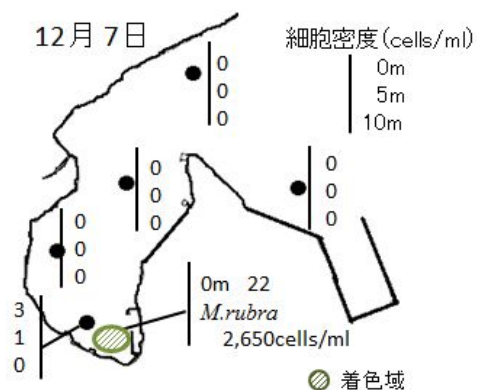


図4 *P. verruculosa*と*M. rubra*の細胞密度
(2013年12月7日)

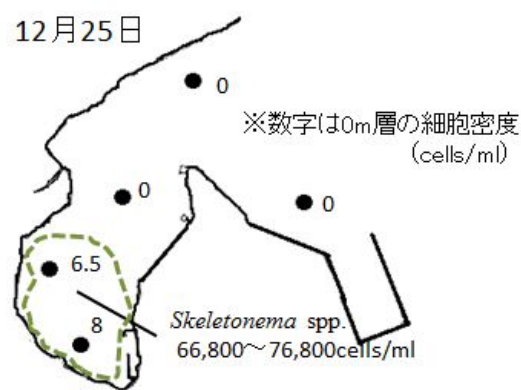


図5 *P. verruculosa*と*Skeletonema spp.*の細胞密度 (2013年12月25日)

P. verruculosa の増殖前（12 月 2 日）から終息（1 月 27 日）までの表層における 5 定点の平均の水温、塩分、DO、DIN、DIP、Si の推移を図6に示す。水温は 12 月上旬は 17 ～ 18 °C 台であった。*P. verruculosa* 赤潮の発生期間である 2014 年 1 月 9 日から 1 月 27 日の水温は 14.9 ～ 15.9 °C であった。*P. verruculosa* 赤潮の発生期間の塩分は 33.7 ～ 34.0、DO は 7.4 ～ 9.1 mg/L を示した。DIN は、2013 年 12 月の間は 7.5 ～ 12.4 $\mu\text{mol/L}$ であったが、*P. verruculosa* 赤潮の発生期

間には $5.1 \sim 8.1 \mu\text{mol/L}$ と低く推移した。DIP は、2013 年 12 月の間は $0.02 \sim 0.06 \mu\text{mol/L}$ であったが、*P. verruculosa* 赤潮の発生期間には $0.29 \sim 0.98 \mu\text{mol/L}$ と高く推移した。Si は、2013 年 12 月の間は $0.6 \sim 1.0 \mu\text{mol/L}$ であったが、*P. verruculosa* 赤潮の発生期間には $17.2 \sim 32.3 \mu\text{mol/L}$ と高く推移した。表層の N/P 比を図7に示す。2013 年 12 月中の N/P 比は $131.6 \sim 718.6$ と高かったが、*P. verruculosa* 赤潮の発生期間には $8.1 \sim 20.2$ と低く推移した。

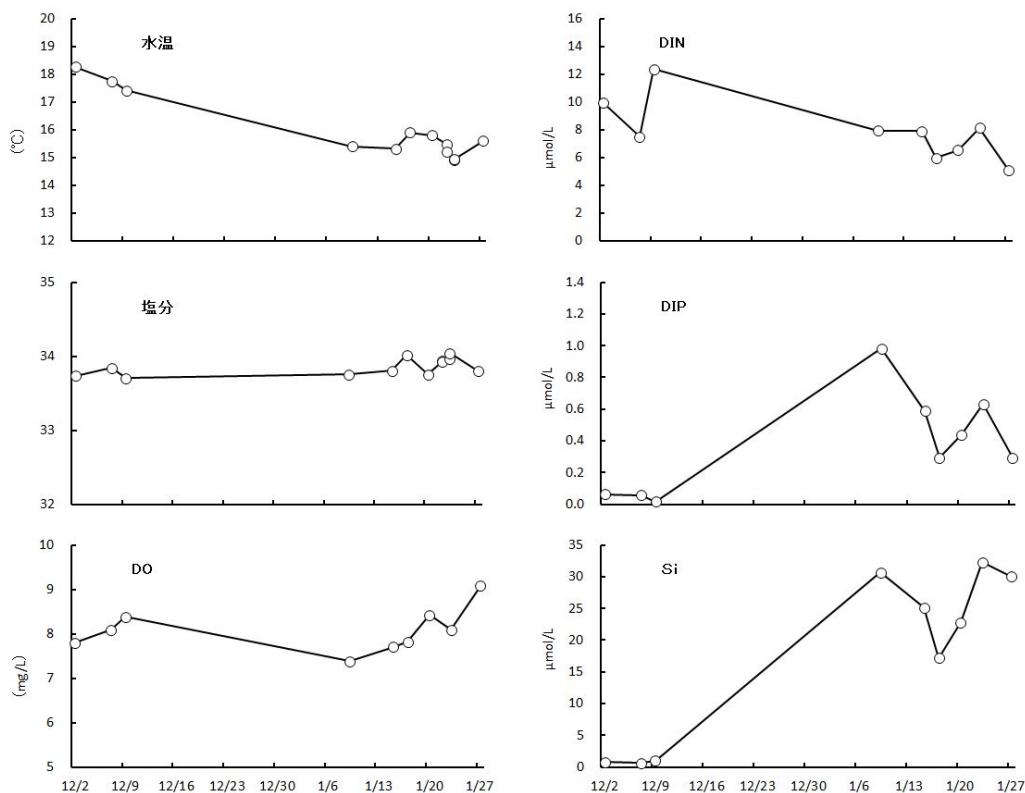


図6 表層平均水温，塩分，DO，DIN，DIP，Siの推移

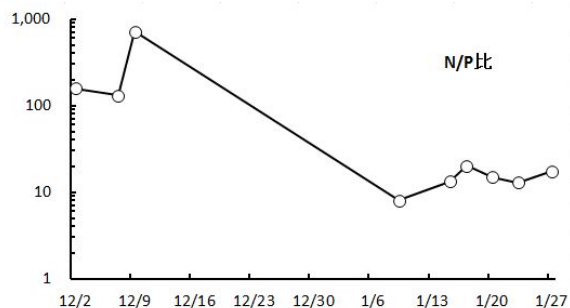


図7 表層のN/P比の推移

旬毎の降水量と年間偏差を図8に、日照時間と年間偏差を図9に示す。降水量は、11月上旬から12月中旬までは概ね50mm程度みられたが、12月下旬から1月下旬は5～32.5mmと比較的少なかった。2月以降は概ね50～100mmの降雨が見られた。平年値と比較すると、12月下旬から1月下旬は平年並みか平年より少なく、それ以外の時期は概ね平年より多かった。日照時間は、12月中旬と2月中旬が50h以下だったが、それ以外の時期は概ね50h以上で推移した。平年値と比較すると、12月中旬と2月中旬の日照時間が平年より低かったほかは、概ね平年より長かった。

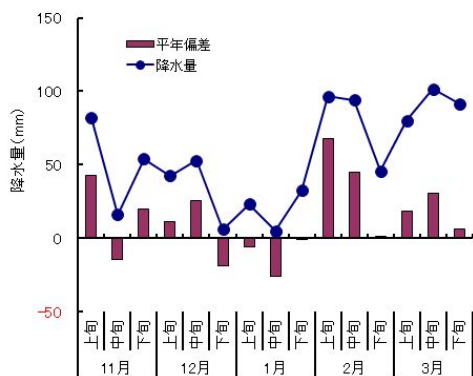


図8 旬毎の降水量と年間偏差（指宿アメダス）

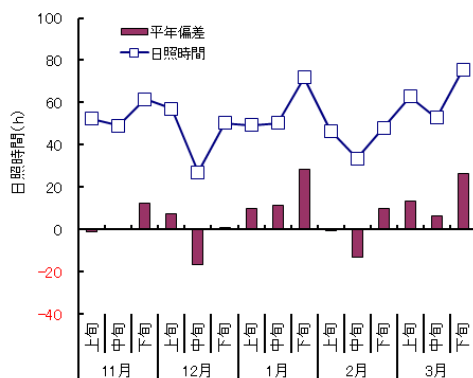


図9 旬毎の日照時間と年間偏差（指宿アメダス）

2014 年 1 月 9 日～1 月 27 日に観測された風向の頻度を図 10 に示す。期間中の風向の頻度は、北が 42.3 %と最も多く、次いで北東が 25.0 %、北西が 13.5%、北北東が 3.8 %であった。

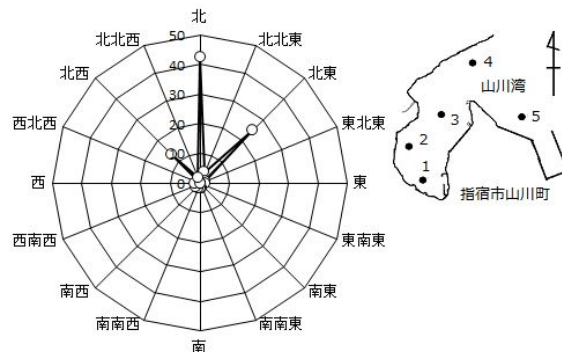


図10 風向の頻度
(2014年1月9～27日、鹿児島海上保安部
指宿海上保安署調べ)

2 水平分布特性

図 11 に調査期間中の山川湾における *P. verruculosa* の細胞密度、表層水温、表層塩分、表層 DO(mg/L, %), Chl-a の分布状況を、図 12 に山川湾における *P. verruculosa* の最高細胞密度、表層水温、表層塩分、表層 DO(mg/L, %), 表層 Chl-a の St.1～3 平均値及び St.4～5 平均値の推移を示す。St.1, 2 は期間中、表層で *P. verruculosa* の細胞密度が 176～2,250 cells/ml と高かった。St.3 は 1 月 22 日 18:00 と 23 日 0:00 に本種が 122～234 cells/ml みられたが、ほかは 50 cells/ml 前後とやや細胞密度が低かった。湾口部の St.4,5 の細胞密度は、1 月 22 日 13:00 と同日 18:00 には表層で 9～66 cells/ml と低かったが、23 日 0:00 と同日 6:00 には 59～142 cells/ml とやや高くなった。期間中の表層水温は、湾奥部の St.1～3 では 14.1～15.4℃であったが、湾口部の St.4,5 は、15.3～16.4℃と湾奥部より高めであった。期間中の表層塩分は 33.6～34.2 を示し、調査時間や調査定点での大きな変動は見られなかった。表層 DO(mg/L, %)については、湾奥部の St.1～3 では 7.5～9.2 mg/L, 92.2～111.9%と高かった。湾口部の St.4, 5 は、7.4～8.0 mg/L, 92.6～99.6%と、湾奥部と比べて低かった。期間中の Chl-a は 0.5～11.5 µg/L を示し、*P. verruculosa* の細胞密度が高い定点、水深で Chl-a が高い傾向が見られた。

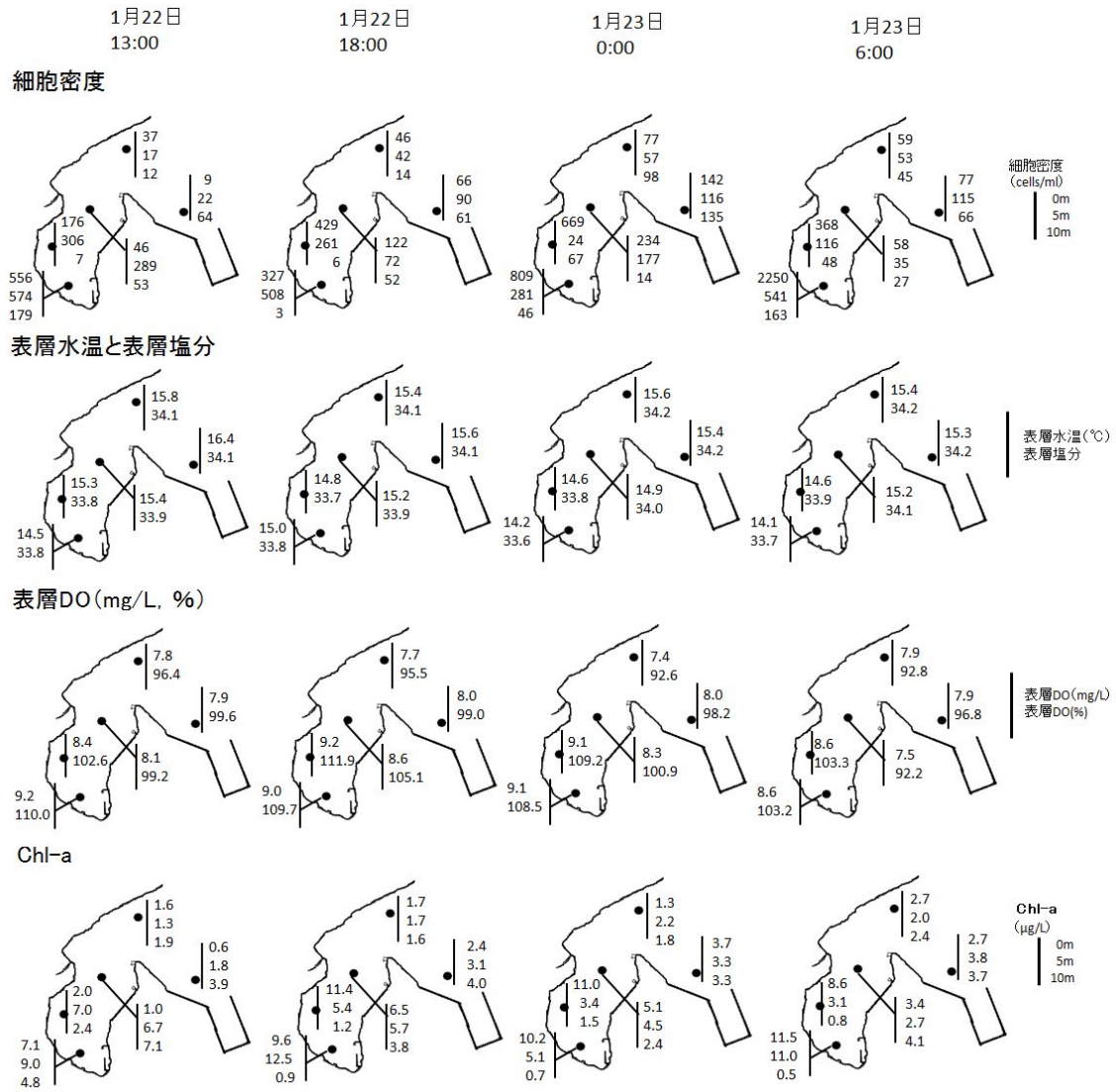


図11 山川湾における*P. verruculosa*の細胞密度, 表層水温, 表層塩分, 表層DO, Chl-aの経時的比較 (2014年1月22日~23日)

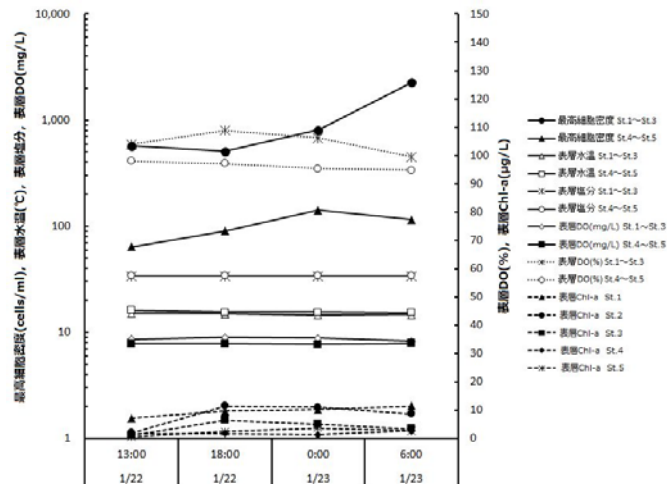


図12 山川湾における*P. verruculosa*の細胞密度, 表層水温, 表層塩分, 表層DO, 表層Chl-a (2014年1月22日~23日)

表1に、2014年1月20日から1月26日の風速と風向の推移を示す。期間中の風向は北、北東、南西で、最低風速は1月22日16時の1m/sで、最高風速は1月22日8時と1月23日16時の3m/sであった。

表1 風速と風向の推移
(鹿児島海上保安部指宿海上保安署調べ)

年月日	時	風速(m/s)	風向
2014年1月20日	8	2	東北東
	12	2	南南東
	16	6	北西
2014年1月21日	8	4	北
	12	2	北
	16	2	北
2014年1月22日	8	3	北
	12	2	北東
	16	1	北
2014年1月23日	8	2	北東
	12	—	—
	16	3	南西
2014年1月24日	8	2	北東
	12	3	北東
	16	—	—
2014年1月25日	8	—	—
	12	4	南
	16	6	南南西
2014年1月26日	8	4	北西
	12	3	北西
	16	4	北西

表2に、2014年1月22日から1月23日の山川湾の潮汐を示す。期間中は小潮であった。22日は10:40

に満潮(潮位241cm)で、17:08に干潮(潮位81cm)となり、22:56に満潮(潮位217cm)となった。その後潮位は下がり、23日5:10に干潮(潮位85cm)となった。

表2 山川湾の潮汐(2014年1月22日～23日)

年月日	潮	満潮		干潮	
2014年1月22日	小潮	10:40	22:56	4:32	17:08
		241cm	217cm	66cm	81cm
2014年1月23日	小潮	11:17	23:56	5:10	17:56
		234cm	204cm	85cm	81cm

3 日周鉛直分布特性

図13に2014年1月22～23日の日周鉛直分布調査点(St.A)における*P. verruculosa*の各観測水深別細胞密度を示す。22日15:00から21:00には、表層及び5m層で*P. verruculosa*の細胞密度が概ね101 cells/ml以上と高かったが、22日23:00から23日9:00までは表層の*P. verruculosa*の細胞密度が概ね201 cells/ml以上で、5m層以深では100 cells/ml以下となり、表層だけが本種の細胞密度が高い傾向が見られた。期間中の最高細胞密度はこの時間帯に見られ、22日23:00の表層で618 cells/mlであった。その後23日11:00には、表層及び5m層の*P. verruculosa*の細胞密度が201 cells/ml以上と高かったが、13:00には5m層の細胞密度が101 cells/ml以上と他層より高かった。

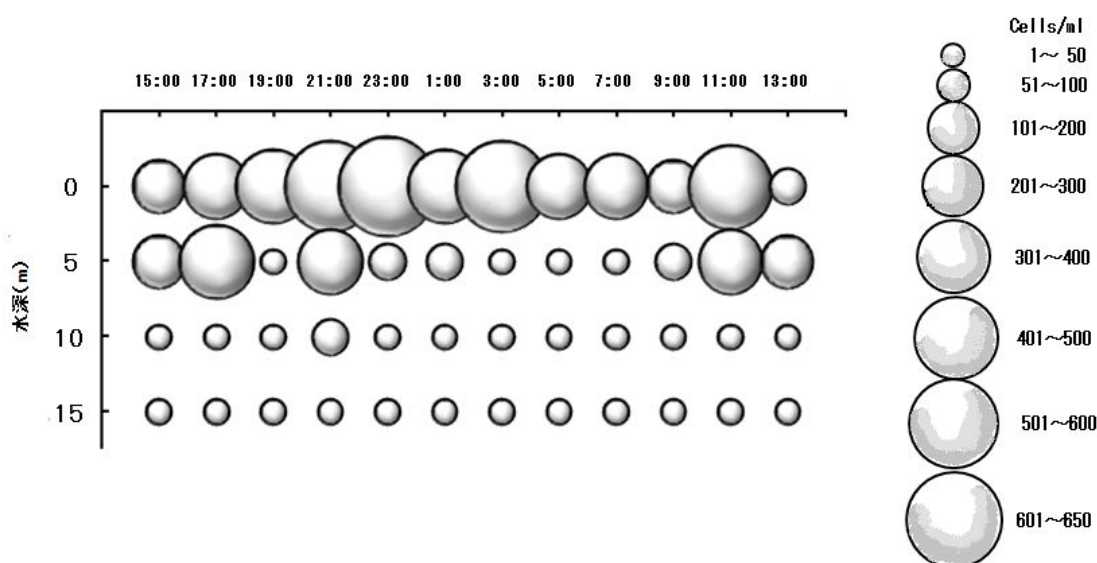


図13 日周鉛直分布調査点(St.A)における*P. verruculosa*の日周鉛直分布
(2014年1月22～23日)

図 14 に同地点における水温と Chl-a の鉛直連続測定結果を示す。調査期間中の水温は 14.6 ~ 15.6 °C で、Chl-a は 0 ~ 13.7 µg/L で推移した。水温は概ね底層になるほど高くなったが、22 日 15:00、17:00、23 日 13:00 には最も低い水温のピークが水深 3 ~ 5 m にみられた。Chl-a は概ね底層になるほど低くなったが、22 日 15:00、17:00、23 日 13:00 には最も高い Chl-a のピークが水深 3 ~ 5 m にみられた。

調査期間中の珪藻類は少ない状況だった。また期間中の *P. verruculosa* の細胞は、22 日 21:00 から表層、5m 層で分裂途中と思われる細胞が確認されはじめ、23 日 3:00 まで確認された。また 23 日 11:00 と 13:00 には、正常な個体に比べて小型で球形の細胞が多く

見られた。

図 15 に *P. verruculosa* の最高細胞密度と栄養塩の推移を示す。2013 年 12 月上旬に表層 DIP は 0.1 µmol/L 以下と低レベルであったが、2014 年 1 月 9 日には 0.98 µmol/L と増加し、これに同調するように *P. verruculosa* 細胞が見られ、1 月 15 日から細胞密度が増加した。1 月 25 日午後には細胞密度は 50 cells/ml 以下になり、1 月 27 日には全調査点で細胞密度が 2 cells/ml 以下と急速に減少して終息したが、1 月 27 日の表層 DIP は 0.29 µmol/L であった。一方表層 DIN は、1 月 9 日には 7.9 µmol/L であったが 1 月 27 日には 5.1 µmol/L となり、大きな増減はなかった。

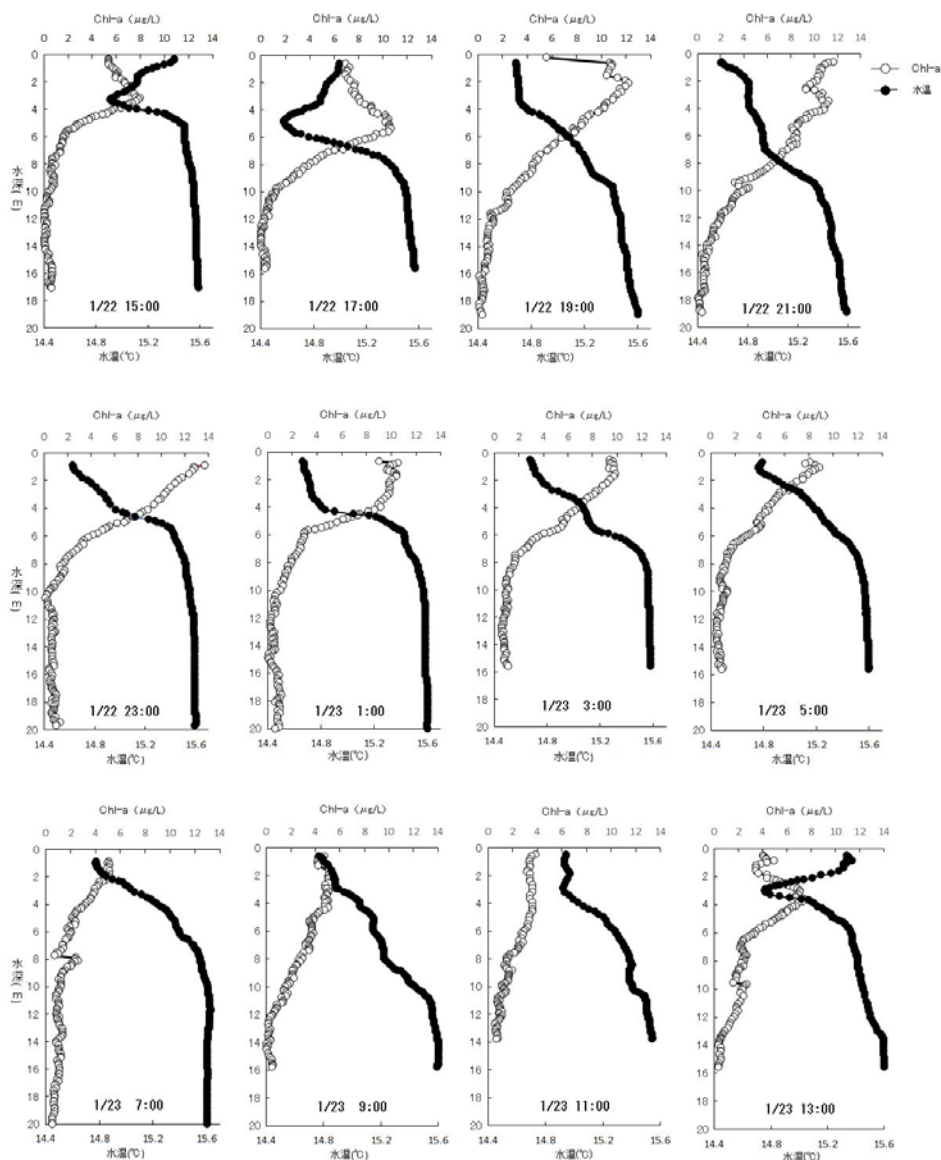


図14 日周鉛直分布調査点 (St.A) における水温とChl-aの鉛直連続測定結果
(2014年1月22~23日)

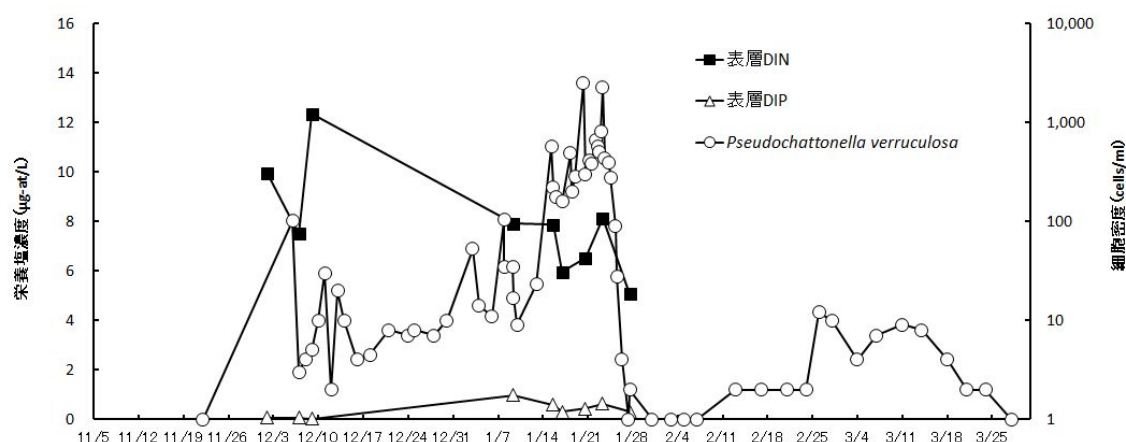


図15 *P. verruculosa*の最高細胞密度と栄養塩の推移

考 察

1 *P. verruculosa*赤潮発生前後の環境特性

P. verruculosa が確認されはじめた 2013 年 12 月上旬の水温は 17.4 ~ 18.3 °C で、赤潮を形成した 2014 年 1 月 9 日から 1 月 27 日の表層水温は 14.9 ~ 15.9 °C であった (図 6)。本県では、2012 年 2 月 9 ~ 17 日に山川湾で *P. verruculosa* が初めて赤潮を形成したが、その際の水温は 14.2 ~ 14.4 °C であった。³⁾山本・田中⁴⁾は、1989 年 12 月に福岡県福岡湾で *Chattonella* sp.として本種赤潮が発生したと記録しており、出現時の水温は 12.3 ~ 12.7 °C であった。また馬場ら²⁾は、1993 年 6 月に山口県徳山市 (現 周南市) 戸田地先で本種赤潮が発生した際の水温は、表層で 21.2 ~ 21.5 °C だったとしている。

一方山口⁵⁾は、広島湾産の *P. verruculosa* を用いた室内試験で、本種の最大増殖速度を与える水温と塩分の組み合わせは 15 °C、塩分 25 であったとしている。また本田・吉松⁶⁾は、培養試験の結果、本種は水温 10 ~ 25 °C、塩分 16 ~ 32 で増殖し、最大細胞収量は水温 10 ~ 20 °C、塩分 23 ~ 32 で多く、比増殖速度は水温 20 °C 塩分 28 の組み合わせで高かったとしている。さらに他の有害プランクトンの増殖に適水温、塩分が *Chattonella antiqua* や *Chattonella marina* でそれぞれ 15 ~ 30 °C、10 ~ 35PSU⁷⁾、*Karenia mikimotoi* で 10 ~ 30 °C、15 ~ 30PSU⁸⁾、*Cochlodinium polykrikoides* で 15 ~ 30 °C、20 ~ 36PSU⁹⁾と報告されていることから、本種は比較的低温水域で増殖する種であるといえる。今回の *P. verruculosa* 赤潮における発生期の水温範囲は、山川湾における 2012 年 2 月の本種赤潮発生時の水温範囲より高かったが、他

県での本種の発生事例や培養試験の結果と比較しても、至適とされた範囲内であり、本種の適水温域にあったと考えられる。

2013 年 12 月の St.1 ~ 3 における *P. verruculosa* の細胞密度の推移をみると、6 日に *P. verruculosa* が 102 cells/ml 確認されたが、その後の本種の最高細胞密度は 3 ~ 30 cells/ml と比較的低かった (図 3)。同時期他プランクトンの細胞密度の推移を見ると、7 日に St.1 付近で *M. rubra* による着色が確認され (図 4)、*O. octonaria* が 11 ~ 14 日に 100 cells/ml 以上と比較的細胞密度が高かった (図 3)。

また珪藻類は、12 月 13 日以降に湾奥部で多くなり、12 月 25 日には *Skeletonema* spp.の増殖が見られた (図 5)。このように、湾奥部で、競合種であるこれらのプランクトンが増殖したことが、赤潮形成期以前の *P. verruculosa* の細胞密度が低水準で推移した要因の一つと考えられる。*P. verruculosa* の最高細胞密度の推移を定点毎に見ると、12 月末までは本種が確認されたのはほとんど St.1 ~ 3 の湾奥部であり (図 2)、本種の初期発生域は湾奥部と推察される。2014 年 1 月中旬以降になると、St.4 ~ 5 の湾口部でも細胞密度が高くなったものの、湾奥部に比べるとかなり低く推移し (図 3)、湾奥部の方が本種の細胞密度が高い傾向が見られた。2014 年 1 月 9 日 ~ 1 月 27 日に観測された風向の頻度 (図 10) をみると、期間中は山川湾の湾口から湾奥に向けて吹く風 (北 ~ 北東) が全体の 71.7% を占めていた。このため、*P. verruculosa* は湾奥部で発生して増殖したが、湾口から湾奥に向けて吹く風が卓越していたことも影響して湾口部への拡散が抑制され、湾奥部に本種がとどまり続けたと考えられる。

P. verruculosa が増殖してから終息するまでの要因を、水質、気象、プランクトンの状況により検討した。*P. verruculosa* の初期出現期である 2013 年 12 月中は、DIN は高かった ($7.5 \sim 12.4 \mu\text{mol/L}$) が、DIP は低かった ($0.02 \sim 0.06 \mu\text{mol/L}$) (図6)。山口⁹⁾は、窒素及びリン制限下の半連続培養による新型赤潮生物の動力学的解析を実施したところ、最小細胞内窒素・リン含量から求めた *P. verruculosa* の最適 N:P 比は 33.6 と計算され、この比は *C. antiqua* (11)¹⁰⁾、*Heterosigma akashiwo* ($10 \sim 15$)¹¹⁾、*Gymnodinium mikimotoi* (12.5)、*Heterocapsa circularisquama* ($13.1 \sim 17.2$)、*Heterocapsa triquetra* (11.3)¹²⁻¹⁴⁾ よりもかなり大きく、本種はこれらの種に比べてリン制限下での増殖に有利であると考えられると報告している。2013 年 12 月の山川湾の表層 N/P 比は 131.6 $\sim$ 718.6 と高かった (図7) が、これは DIP が少なかったことによると考えられる。このような水質状況の中で、12 月 6 日に本種の最高細胞密度が 102 cells/ml に達した (図3) のは、本種のリン制限下の増殖に有利であるという特性によるものと推察される。しかしその後は他の *M. rubra* や *O. octonaria*、珪藻類の増殖 (図3) が影響し、12 月中は本種がそれ以上増殖しなかったと考えられる。

その後 2014 年 1 月には表層 DIN は $5.1 \sim 8.1 \mu\text{mol/L}$ 、表層 DIP は $0.29 \sim 0.98 \mu\text{mol/L}$ を示し (図6)、2013 年 12 月と比較して表層 DIN は低く、表層 DIP は高くなり、このため N/P 比は $8.1 \sim 20.2$ と低下 (図7) した。具体的には、2013 年 12 月9日の N/P 比が 718.6 で、2014 年 1 月9日には 8.1 となった (図7) が、その間に *P. verruculosa* の最適 N/P 比である 33.6 を通過した。このことが *P. verruculosa* の増殖を促すきっかけとなった可能性が考えられる。なお 2014 年 1 月の N/P 比は本種の最適値 (33.6) と比べて低かったが、競合種である珪藻類はほとんどない状況であり、競合種が少なかったことが *P. verruculosa* の増殖が継続する要因となったと考えられる。

旬毎の日照時間は、12 月中旬と 2 月中旬が 50h 以下だったが、それ以外の時期は概ね 50h 以上で推移し、12 月中旬と 2 月中旬の日照時間が平年より短かったほかは、概ね平年より長かった (図9)。本田・吉松⁶⁾は、*P. verruculosa* の増殖に及ぼす光強度の影響について室内試験で検討したところ、本種の比増殖速度は光強度の上昇とともに増大したが、比増殖速度が飽和した光強度 (約 $35 \mu\text{E/m}^2/\text{s}$) および半飽和定数 K_s ($7.6 \sim 8.5 \mu\text{E/m}^2/\text{s}$) は、*C. antiqua* 及び *C.*

marina の同光強度 (約 $110 \mu\text{E/m}^2/\text{s}$) ならびに半飽和定数 K_s ($42.35 \sim 63.38 \mu\text{E/m}^2/\text{s}$)⁷⁾ に比べてかなり低い点から、本種は *Chattonella* より弱光を有効に活用して増殖できる種と考えられたとしている。以上のことから *P. verruculosa* が増殖した 2014 年 1 月の光環境は、日照時間が平年より長かったことから、光強度が強く、本種が増殖するのには不適であった可能性があるが、実際の現場における光強度は測定しておらず、当時の光環境が本種に有利であったか不利であったかの詳細は不明であり、今後の課題である。

2 水平分布特性

調査期間中の *P. verruculosa* の細胞密度をみると、どの調査時間帯も湾奥部の細胞密度が湾口部より高かった (図 11)。調査期間前後の風は、前述のとおりの概ね湾口から湾奥に向かって吹いていたが、風速は $1 \sim 3 \text{ m/s}$ と比較的弱かった (表 1)。また潮汐 (表 2) をみると、1 月 22 日 13:00 は満潮から約 2 時間後、22 日 18:00 は干潮から約 1 時間後、23 日 0:00 は満潮から約 1 時間後、23 日 6:00 は干潮から約 1 時間後であり、調査時は潮の動きが小さい状態であったと考えられる。さらに期間中は小潮であり、満潮と干潮の潮位の差は $123 \sim 175 \text{ cm}$ と大潮時 (1 月 17 日 $155 \sim 235 \text{ cm}$) と比べて低かった。このような風や潮汐の状況から、調査期間中の山川湾は比較的静穏な状態であったと考えられ、*P. verruculosa* 細胞が水平方向に大きく移動しなかった可能性がある。また湾奥部が *P. verruculosa* の発生域であったこと、湾奥部の水温が湾口部より低く、かつ本種が比較的低水温域で増殖しやすいという特性により、湾奥部の *P. verruculosa* の細胞密度が湾口部に比べて高く維持されたと考えられる。

3 日周鉛直分布特性

有害プランクトンのいくつかの種は、日周鉛直分布することが知られている。*C. antiqua* について西ら¹⁵⁾は、2010 年に八代海で *C. antiqua* 赤潮が発生した際に日周鉛直分布調査を実施し、赤潮前半の長島町獅子島弊串地先と御所浦地先では、*C. antiqua* の水深別分布状況は同じ時間帯でも場所によって異なり、両地先とも *C. antiqua* は水深 $0 \sim 15 \text{ m}$ に高密度層がみられたこと、同赤潮後半の長島町脇崎地先では、*C. antiqua* の細胞が 1 日のうち多くの時間帯で中底層に高密度で分布し、時間帯によっては底層にも高密度

で分布することを報告している。また *C. polykrikoides* について Park *et al.*¹⁶⁾ は、本種が夜間に水深 15m 層、昼間に表層という日周鉛直運動をすることが観察されたと報告している。このように *C. antiqua* や *C. polykrikoides* は現場海域で 15m 層や場合によってはそれ以深まで分布することが観察されている。今回、2014 年 1 月 22 日～23 日の山川湾の *P. verruculosa* 赤潮発生時の日周鉛直分布調査で、22 日 15:00 から 21:00 には、表層から 5 m 層に、22 日 23:00 から 23 日 9:00 までは表層に、23 日 11:00 以降は表層及び 5 m 層に *P. verruculosa* 細胞が多い傾向が見られ (図 13)、本種は 1 日を通じて表層から 5 m 層に分布し、大きな鉛直移動をしていない。一方 *P. verruculosa* の細胞密度と水温の鉛直的な推移を比較すると、*P. verruculosa* は最も水温の低い水深で細胞密度が高くなり、逆の相関傾向がみられた。これらのことから *P. verruculosa* の分布が 5m 以浅に偏っているため、表層性が強いプランクトンである可能性も考えられるものの、水温分布から本種の鉛直分布が好適水温帯に影響されている可能性もある。

P. verruculosa の細胞密度と Chl-a の鉛直的な推移を比較すると、調査期間中の *P. verruculosa* の細胞密度と、その時の Chl-a が同調している (図 14)。調査期間中は珪藻類等の *P. verruculosa* 以外のプランクトンはほとんど確認されていないこともあり、今回の調査では Chl-a の値は *P. verruculosa* の細胞密度に対応していると考えられる。

なお 23 日の 11:00 と 13:00 には、正常な個体に比べて小型で球形の細胞が多く見られたが、当日は 11:00 調査の前に地元の養殖業者が *P. verruculosa* 赤潮を駆除するために湾奥部の St.1 と St.2 付近を中心に粘土 (入来モンモリ) を散布していた。山川町漁協職員から聞き取ったところによると、粘土は 40 袋を使用し、1 袋あたり 25kg 入りなのでその散布量は 1,000kg であった。当センターでは *P. verruculosa* に粘土を散布して防除効果を確認する室内試験を実施したところ、生残している本種の細胞が小型化、球形化していたのを確認している (未発表)。そのため山川湾で見られた *P. verruculosa* の細胞の小型化、球形化は、粘土散布が影響したと考えられる。

P. verruculosa の最高細胞密度と栄養塩の推移 (図 15) をみると、2013 年 12 月上旬に表層 DIP は 0.1 $\mu\text{mol/L}$ 以下と低レベルであったが、2014 年 1 月 9 日には 0.98 $\mu\text{mol/L}$ と増加し、これに同調するように *P. verruculosa* 細胞が見られ、1 月 15 日から細胞密度が

増加した。1 月 25 日午後には本種の細胞密度は 50 cells/ml 以下、1 月 27 日には全調査点で 2 cells/ml 以下と急速に減少して終息したが、その時の表層 DIP は 0.29 $\mu\text{mol/L}$ 、表層 DIN は 5.1 $\mu\text{mol/L}$ であり、栄養塩は *P. verruculosa* 細胞が減少した際もそれほど減少せず、枯渇するまでには至らなかった。また風向風速を見ると、1 月 20 ～ 23 日の赤潮ピーク時には 20 日を除き概ね北よりの風が吹いていたが、25 日午後に南よりに転じ、風速が 4 ～ 6 m/s とそれまでよりやや強くなった。翌 26 日には北西の風になったが、風速が 3 ～ 4 m/s とやや弱くなった (表 1)。*P. verruculosa* は表層に偏在し、風の影響を受けやすかったため湾外に拡散したことが推察されるが、この風環境の変化は湾内に時化を引き起こすような大きなものではなかったと推察され、本種の細胞数の減少、赤潮終息に影響したとは断定できなかった。これらのことから、*P. verruculosa* 赤潮が終息した直接の要因を推察することはできなかった。

今回の *P. verruculosa* 赤潮発生時に、山川湾の 24 時間湾内調査や日周鉛直分布調査を初めて実施し、本種の日中だけでなく夜間の水平的及び鉛直的な分布状況を把握することができた。すなわち山川湾における *P. verruculosa* については、低水温域で増殖しやすいという特性を再認識するとともに、1 日を通じて表層から 5 m 層に分布し、他の有害プランクトンと比べて表層性が高い、または分布が水温に影響されやすいことが分かった。そのため、最低水温期である 1 ～ 2 月は、*P. verruculosa* が赤潮を形成する可能性が高いため、山川湾では最低水温期の前から本種のモニタリングを徹底する必要がある。前述のように、地元の山川町漁協は顕微鏡を整備し、養殖業者とともに *P. verruculosa* を含めた有害プランクトンのモニタリング体制を構築しており、山川湾の有害プランクトン発生状況を定期的に監視している。冬季は表層水温が低いことを考えると、表層水を採水して検鏡すれば、*P. verruculosa* の発生状況を概ね把握することができると考えられる。表層海水はバケツで採水でき、専用の採水器は必要ないので、*P. verruculosa* 赤潮を監視する労力等が軽減される。現在の監視体制を維持し、モニタリングを継続することで赤潮の前兆を速やかに把握し、赤潮発生の恐れがある時は、餌止め、生簀避難等の対策を有効に講じることができると考えられる。

また、*P. verruculosa* 赤潮の終息要因については、

2012 年 2 月の *P. verruculosa* 赤潮の際も, 今回と同様に赤潮が終息した直接の要因を推察することができず³⁾, 他の要因が影響した可能性がある。今後は山川湾の水質等の漁場環境だけでなく, プランクトン組成等をより詳しく把握する必要があると考えられる。

謝 辞

本調査にご協力いただいた山川町漁協の職員の方々, 本調査のために昼夜を問わず漁船を提供していただいた山川町漁協所属の養殖業者の方々, 山川湾の風向, 風速の観測データを提供いただいた第十管区海上保安本部鹿児島海上保安部指宿海上保安署の方々に感謝申し上げる。

文 献

- 1) 松本紀男, 吉松定昭, 香川哲, 本田恵二, 宮川昌志, 一色正. 平成元年の赤潮発生状況. 香川県赤潮研究所年報 1990; 3-10.
- 2) 馬場俊典, 桃山和夫, 平岡美登里. 徳山市戸田地先で発生した有害赤潮プランクトンについて (短報). 山口県内海水産試験場報告 1995; **24**: 121-122.
- 3) 折田和三, 西広海, 田原義雄, 徳永成光, 中村章彦. 2012 年 2 月山川湾で発生した有害ディクチオカ藻 *Pseudochattonella verruculosa* 赤潮の発生状況とブリに与える影響. 鹿児島県水産技術開発センター研究報告 2013; **4**: 17-23.
- 4) 山本千裕, 田中義興. 福岡湾で発生した 2 種類の有害赤潮プランクトンについて (短報). 福岡県水産試験場研究報告 1990; **16**: 43-44.
- 5) 山口峰生. 生理学的特性に基づく新型赤潮プランクトン優占化機構の解明. 渦鞭毛藻・ラフィド藻等による新型赤潮の発生機構と出現予測技術の開発に関する研究 (5 ヶ年の研究報告書) 1999; 7-20.
- 6) 本田恵二, 吉松定昭. *Pseudochattonella verruculosa* (Y.Hara et Chihara) Tanabe, Hosoi, Honda, Fukaya, Inagaki et Sako の増殖に及ぼす水温, 塩分, 光強度の影響. 香川県赤潮研究所研究報告 2009; **7**: 1-8.
- 7) 山口峰生, 今井一郎, 本城凡人. 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *Chattonella marina* の増殖速度に及ぼす水温, 塩分及び光強度の影響. 日本水産学会誌 1991; **57**(7): 1277-1284.
- 8) 山口峰生, 本城凡人. 有害赤潮渦鞭毛藻類 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖に及ぼす水温, 塩分, 光強度の影響. 日本水産学会誌 1989; **55**(11): 2029-2036.
- 9) Kim D I, Y Matsuyama, S Nagasoe, M Yamaguchi, Y H Yoon, Y Oshima, N Imada and T Honjo: Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *J. Plankton Res.* 2004; **26**(1): 61-66.
- 10) 中村康男. 窒素あるいはリン制限下における *Chattonella antiqua* の増殖の動力学. 国立公害研究所報告 1985; **80**: 73-83.
- 11) 渡辺信・中村康男. 赤潮鞭毛藻 *Heterosigma akashiwo* Hada の増殖特性. 2. 栄養塩の利用. 国立公害研究所報告 1984; **63**: 59-68.
- 12) 山口峰生. 海洋性渦鞭毛藻の増殖に及ぼす栄養塩類構成比の影響. 平成 4 年度栄養塩類構成比変化影響調査報告書 1993; 15-29.
- 13) 山口峰生. 海洋性渦鞭毛藻の増殖に及ぼす栄養塩類構成比の影響. 平成 5 年度栄養塩類構成比変化影響調査報告書 1994; 9-17.
- 14) 山口峰生. 海洋性渦鞭毛藻の増殖に及ぼす栄養塩類構成比の影響. 平成 5 年度栄養塩類構成比変化影響調査報告書 1995; 19-29.
- 15) 西広海, 田原義雄, 徳永成光, 久保満, 吉満敏, 中村章彦. 2009 年及び 2010 年に八代海で発生した *Chattonella antiqua* 赤潮. 鹿児島県水産技術開発センター研究報告 2011; **3**: 5-20.
- 16) Park J G, M K Jeong, J A Lee, K J Cho and O S Kwon. Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea. *Phycologia* 2001; **40**: 292-297.