

大村湾における有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* の

秋冬季出現状況と培養株の増殖特性

山砥稔文・平江 想・石田直也¹・岩滝光儀²

Blooms and growth characteristics of a harmful dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* in Omura Bay, Japan from autumn to winter

TOSHIFUMI YAMATOOGI, SOU HIRAE, NAOYA ISHIDA¹ AND MITSUNORI IWATAKI²

An armored dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* has formed red tides responsible for threats of cultured bivalve mollusks in the coasts of western Japan. This species is suspected to overwinter by motile cells because the resting cyst has never been found, even though the motile cells are adapted for warm water and the optimum growth was reported at 30.0–32.5°C. Occurrences of *H. circularisquama* was observed from November 2008 to February 2009 in Omura Bay, west Japan. Motile cells of *H. circularisquama* were detected at the ranges of temperature of 9.7–17.3°C and salinity of 32.3–32.9. Using a clonal culture of *H. circularisquama* isolated in January 2009 (9.7 and 9.0–9.9°C), the final cell yields and specific growth rates were also examined in 5 different temperature conditions (7.5–17.5°C) under an illumination of 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and salinity 32. The culture could grow at the temperature range of 10.0–17.5°C, and 10,000 cells mL^{-1} was obtained at 12.5°C. These results suggest that *H. circularisquama* has an ability to form red tides during cold seasons in Omura Bay.

有殻渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* Horiguchi による赤潮は、1988年に高知県浦ノ内湾で初めて確認されて以降、西日本沿岸域に広く分布することが報告されており、¹⁾二枚貝等の貝類を特異的に斃死させることで水産業に甚大な被害を及ぼしてきた。²⁻⁴⁾また、地球温暖化による水温上昇とともに *H. circularisquama* の分布域は北上することも予想されている。¹⁾これまで試験された *H. circularisquama* の培養株は、水温 30.0–32.5°C、塩分 30–35 で最大増殖速度を示し、^{3,5-7)}高水温、高塩分を好むという株間共通の特性を有する。また、培養試験の結

果から、*H. circularisquama* が増殖可能な下限水温は 11.2–12.5°C の範囲にあるとされてきた。^{3,6)} 実際、英虞湾、¹⁾ 広島湾⁸⁾における冬季現場調査においても、*H. circularisquama* は 10°C 以下では検出されていなかった。このような状況の中、加茂湖において 2009 年 10 月に赤潮を形成した *H. circularisquama* は、12 月に 10°C 以下で 10 cells mL^{-1} 未満の低細胞密度での出現が観察された。その後、冬春季の出現は確認されていなかったが、翌 2010 年夏季に再び赤潮化した。⁹⁾ 二枚貝類養殖が盛んに行われている大村湾での *H. circularisquama* 赤潮は 1995, 1999, 2008, 2011

¹ 現所属：水産庁増殖推進部栽培養殖課

² 東京大学アジア生物資源環境研究センター

および2012年¹⁰⁾に記録され、いずれも9-10月に大村湾南部海域で発生しているが、冬季における赤潮や出現の報告はない。近藤ら⁹⁾は、*H. circularisquama*の越冬機構を解明するには、当該産培養株の低温耐性や越冬可能な地点の有無に関する詳細な調査が必要としている。本研究では、低水温期の*H. circularisquama*の赤潮による漁業被害防止と越冬機構解明の観点から、冬季水温が10°C程度に低下する長崎県大村湾南部海域を対象とし、秋冬季の降温期における*H. circularisquama*の出現状況と環境要因との関係および冬季(水温10°C以下)に分離した培養株の低水温における増殖特性を調べた。

材料と方法

調査は大村湾南部海域(支湾の形上湾を含む)に設定した6定点(Fig. 1, St. 1-6)で*H. circularisquama*の赤潮発生(2008年9月末)前の2008年9月18日と発生後の10月22日、11月26日、12月12日、2009年1月15日および2月4日に月1回の頻度で計6回定期的を実施し、SY式採水筒(吉野計器)を用いて、0.5, 5, B-1 m層より海水を採取するとともに、水

温、塩分および溶存酸素飽和度(以後DO, %)を多項目水質計(Hydrolabo quonta)で測定した。海水は固定せずに室内に持ち帰り、St. 1-5では、*H. circularisquama*のみ、St. 6では、*H. circularisquama*と競合種の珪藻類について、当日中に光学顕微鏡(Olympus BX50)により1 mL中の細胞数を界線入りスライドガラス(離合社)を用いて直接計数した。2009年1月のSt. 1の生試水およびSt. 2-6の生試水をセルロースアセテートフィルター(孔径8 μm)で濃縮処理後、*H. circularisquama*の細胞を分離し、ピペット洗浄法¹¹⁾によりクローン株Hc0901KA(形上湾産)およびHc0901OM(大村湾産)を確立した。1月に検出された遊泳細胞はこの2細胞のみであった。培養株の保存および培養実験にはESM培地¹²⁾を用いた。なお、両株はIwataki et al.¹³⁾に従って細胞鱗片の透過型電子顕微鏡(JEOL JEM1010)観察により*H. circularisquama*であることを確認した(Fig. 2)。比増殖速度を求めるための培養実験には、1995年7月に五島西沖約60 km(32°55.5'N, 128°15.5'E)で採取した表層水(塩分34.4)をGF/Cでろ過し、純水希釈により塩分32(至適塩分⁹⁾)としたものを用いた。水温について、Hc0901KA株は7.5, 10.0, 12.5,

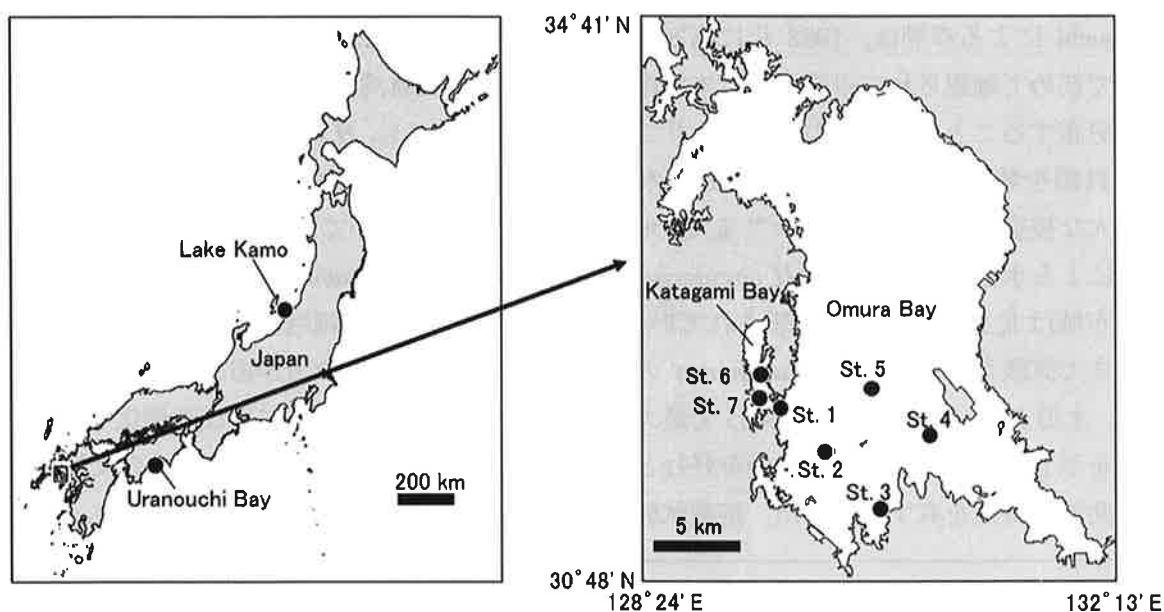


Fig. 1. Monitoring stations in Omura Bay, western Kyushu.

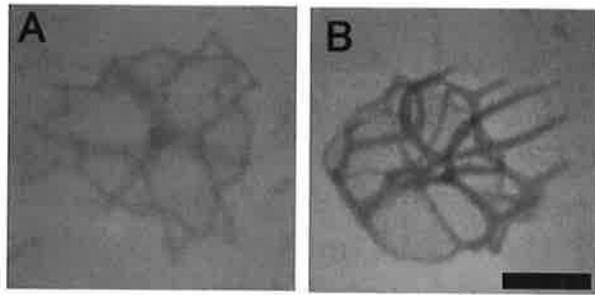


Fig. 2. Body scales of *Heterocapsa circularisquama* (Hc0901KA strain) collected from Omura Bay, transmission electron microscopy. A; immature scale, B: mature scale. Scale bar=200 nm.

15.0, 17.5°C の 5 段階, Hc0901OM 株は 7.5, 10.0°C の 2 段階とした。培養実験は次の通りに行った。ガラス製の試験管 (φ15 × 150 mm) に調整した滅菌 ESM 培地 5 mL に, 対数増殖期にある供試株を初期密度 100 cells mL⁻¹ となるように接種した。光強度 80 μmol m⁻² s⁻¹, の光照射下 (明暗周期 14 時間 : 10 時間) において 3 本立てで培養した。なお, 前培養条件は水温 12.5°C とした。培養温度は 1 日に 1.0–2.5°C ずつ上昇あるいは下降させ, 実験開始後 2 日以内に各実験温度へ移行した。細胞密度は, 実験開始後 2–6 日おきに培養液の一部を採取し, 界線入りスライドガラスを用いて直接計数して求めた。計数結果は片対数グラフにプロットし, 対数増殖期の直線部分 (プロット数, 6–12) に基づき, 最小二乗法により比増殖速度 (μ ; day⁻¹) を算出し, ¹⁴⁾ 比増殖速度がマイナスの場合はゼロとした。細胞収量については最大細胞密度を最終細胞収量とした。*H. circularisquama* の消長と気象, 海況との関係の検討には, 形上湾湾口部 (St. 7) の水深 2 m に設置したメモリー式温度記録計 (ティアンドデイ社製おんどとり Jr. TR-51i) で 20 分毎の水温を 2006–2013 年に連続記録したデータ, 気象庁アメダス大村観測所の日降水量と風向風速, 佐世保観測所の日照時間データ, 気象庁潮汐観測資料 (長崎) の一部を使用した。*H. circularisquama* 赤潮の発生状況については, 長崎県県央水産業普及指導センターによる現

場調査¹⁵⁾で得られたデータを利用した。

結果

***Heterocapsa circularisquama* と珪藻類の消長** 大村湾南部海域における *H. circularisquama* 細胞密度の各調査点 (Fig. 1, St. 1–6) での遊泳細胞密度の層別平均値の推移を Fig. 3A に, 調査期間中の最高値の水平分布変化を Fig. 4 に示す。*H. circularisquama* は 9 月 18 日と 10 月 22 日には確認されなかったが, 11 月 26 日と 12 月 12 日には全定点での最高値がそれぞれ 2–8 と 2–10 cells mL⁻¹ であり, B-1 m よりも 0.5–5 m 層での出現が多かった。1 月 15 日には St. 1 の 0.5 m 層で 1 cell mL⁻¹ の出現があったが, 2 月 4 日には確認されなかった。St. 6 における珪藻類細胞密度の層別の推移を Fig. 3B に示す。*H. circularisquama* の出現がなかった 9 月 18 日, 10 月 22 日および 2 月 4 日には, 珪藻類は 730–3,725 cells mL⁻¹ と高密度で確認されたのに対し,

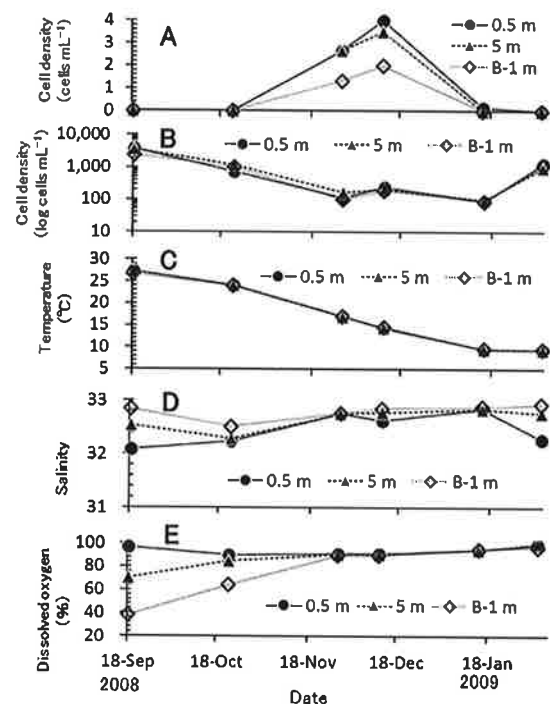


Fig. 3. Temporal change of cell density of *Heterocapsa circularisquama* (A) and diatoms (B), water temperature (C), salinity (D) and dissolved oxygen (E) in Omura bay from September 2008 to February 2009. A, C–E: average value of St.1–6, B: value at St. 6.

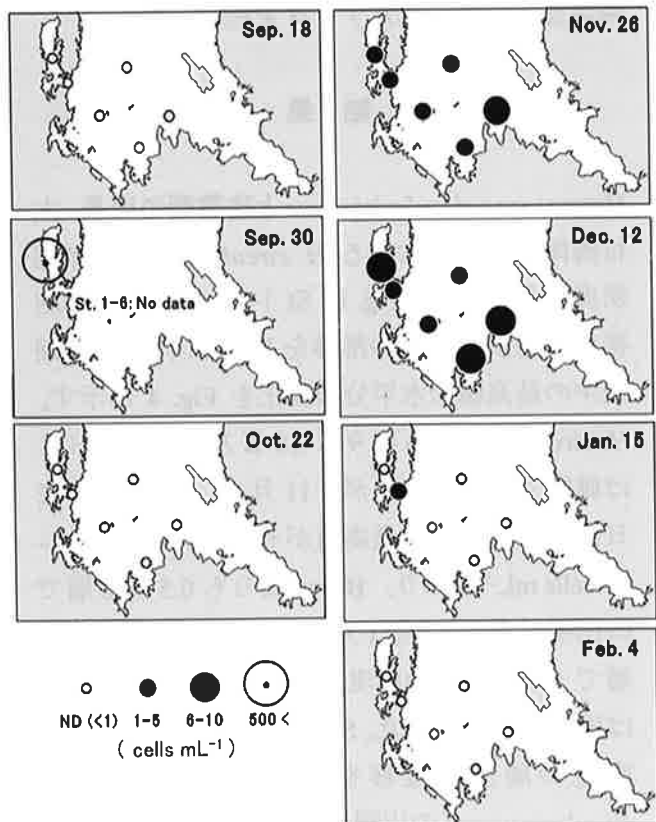


Fig. 4. Spatio-temporal variation of the maximum cell density in *Heterocapsa circularisquama* in Omura Bay from September 2008 to February 2009.

H. circularisquama が出現した 11 月 26 日, 12 月 12 日および 1 月 15 日には, 90–210 cells mL⁻¹ と低密度の出現に留まった。別に行った長崎県県央水産業普及指導センターの調査において, *H. circularisquama* は 9 月 30 日に調査海域の形上湾西岸中部地先の浅海域 (水深 ca. 2 m) で局所的に細胞密度 610 cells mL⁻¹ の小規模赤潮の形成が表層で確認 (Fig. 3) されたが, 翌 10 月 1 日には着色域は確認されず赤潮は終息した。¹⁵⁾ 気象・海況 (水温, 塩分, DO, 風向・風速, 降水量, 日照時間, 潮位) 調査期間中の水温, 塩分および DO の St. 1–6 の層別平均値の推移を Fig. 3C–E に示す。水温は 9 月 18 日の 26.7–27.2°C から徐々に低下し, 2 月 4 日には 9.5°C にまで低下した。塩分は 32.1–32.9 の範囲で推移した。いずれの調査日も水温と塩分の上下層の差はそれぞれ 0.5°C と 0.7 以下であった。*H. circularisquama* 出現時の水温と塩分はそれぞれ

9.7–17.3°C と 32.3–32.9 の範囲にあり, 各定点ともによく混合し, 鉛直的な差異はほとんどなかった。DO は 38–99% の範囲で推移し, 9 月 18 日の B-1 m では 38% と貧酸素状態にあり, *H. circularisquama* 赤潮の発生 (9 月 30 日) があつた形上湾 (St. 6) の B-1 m は 32% であつた。*H. circularisquama* 赤潮発生前後の 9 月 17 日–10 月 3 日の風向・風速 (24 時間移動平均値) と降水量の経日変化を Fig. 5 に示す。9 月 18 日午後–19 日と 9 月 26–27 日にそれぞれ北寄りの強い風が連吹 (5 m s⁻¹ 前後) した後, 9 月 28–30 日午前まで南東–南南東の一定方向の風が連吹 (2 m s⁻¹ 前後) した。9 月 30 日には, 風下にあたる形上湾西岸で *H. circularisquama* 赤潮の発生が確認された。赤潮発生時の水深 1 m 層の水温, 塩分および DO は, それぞれ 24.1°C, 31.7 および 70% であつた。その日の午後から赤潮が消滅した 10 月 1 日にかけて北寄りの強い風 (5 m s⁻¹ 前後) が吹いた。*H. circularisquama* 赤潮の発生前日の 9 月 29 日と当日の 2 日間に計 123 mm の大量降雨が記録されていた。日照時間は, 9 月

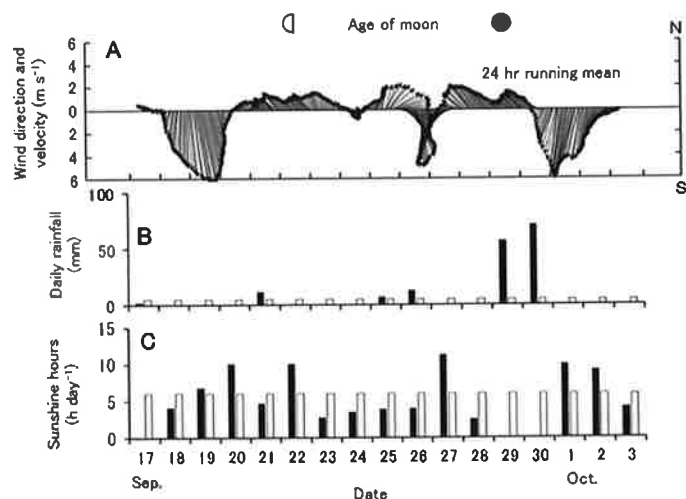


Fig. 5. Temporal change of wind vector (A), daily rainfall (B) at Omura and sunshine hours (C) at Sasebo from 17 September to 3 October 2008 (closed bars) and the average value during 1981–2010 (open bars).

18–30 日に平年値を下回ることが多く, この期間の平均値は 4.9 時間であり平年平均値 6.0 時間より低かった。潮位は, 9 月 22 日が小潮, 9 月 29 日が大潮であった。

水温の連続観測 形上湾 (St. 7 の 2 m 層) における水温 (日平均値) の推移について, 秋季 (9 月 30 日–11 月中旬) を Fig. 6 に, 冬春季 (12–3 月) を Fig. 7 に示す。2008 年秋季は例年 (2006–2011 年) に比べ, 10 月初旬–11 月中旬を通じて 0.1–1.0°C 高めで推移した。形上湾では冬季水温 (2007–2009 年, 2011–2013 年) は, 概ね 12 月下旬–3 月上旬に 12.5°C を下回った。最低値は, 各年とも 2 月中–下旬に観測され, 8.3–9.2°C の範囲にあった。2013 年は 9.2°C

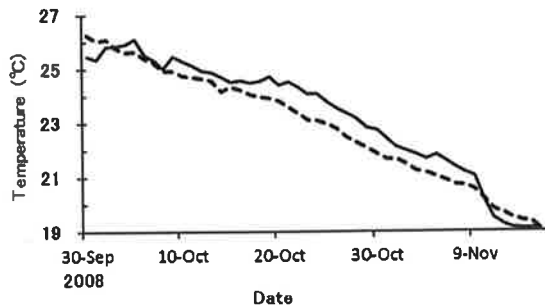


Fig. 6. Temporal changes in water temperature at St. 7 at 2 m depth from 30 September to 16 November 2008 (solid line) and the average value during 2006–2011 (broken line).

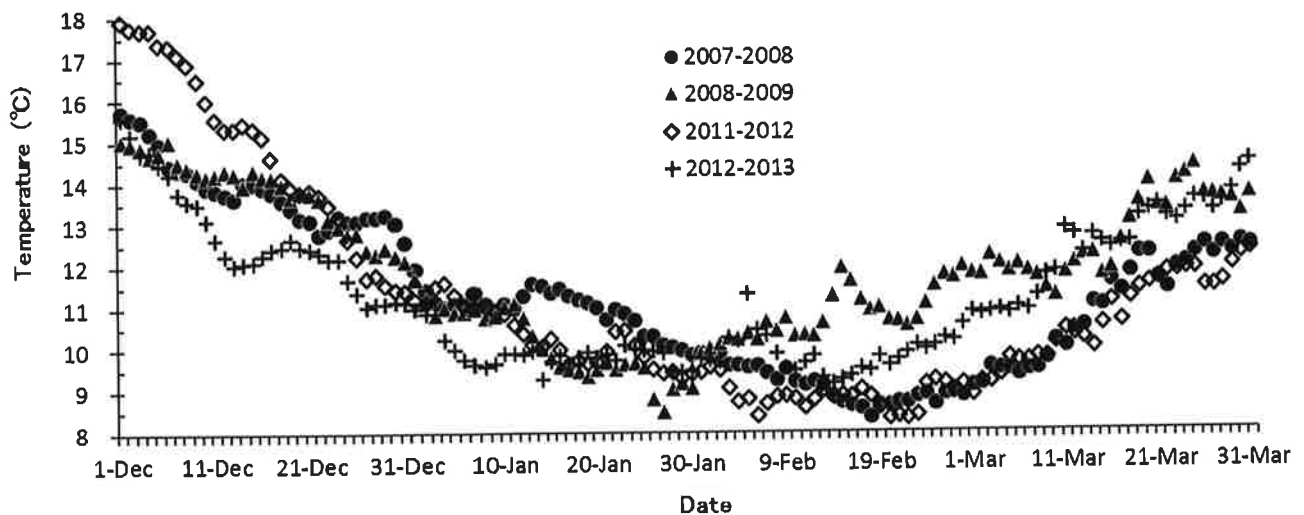


Fig. 7. Temporal changes in water temperature at St. 7 at 2 m depth from December to March, 2008–2009 (closed circles), 2008–2009 (closed triangles), 2011–2012 (open squares) and 2012–2013 (crosses).

を下回ることがなく, 9.5°C 未満も 2 月中旬に 4 日間観測されたのみであった。冬季水温が最も低く推移した 2012 年は, 8.5°C 未満が観測されたのは 3 日間であった。

増殖に及ぼす水温の影響 (培養実験) 実験を行った各水温条件における *H. circularisquama* 培養株 2 株, 形上湾産 Hc0901KA 株と大村湾産 Hc0901OM 株の最終細胞収量と比増殖速度を Fig. 8 に示す。10.0–17.5°C で増殖が認められ, 最終細胞収量は $260\text{--}12.74 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$, 比増殖速度は $0.04\text{--}0.39 \text{ day}^{-1}$ の範囲であった。最終細胞収量, 比増殖速度ともに水温が高くなるにつれて高い値を示した。Hc0901KA (形上湾産) 株は, 17.5 と 15.0°C で 14 日後, 12.5°C で 39 日後に細胞収量が $10,000 \text{ cells mL}^{-1}$ を超えた。10°C では, 最終細胞収量の最高値は Hc0901KA (形上湾産) 株は 18 日後に, Hc0901OM (大村湾産) 株は 18–24 日後に確認され, $220\text{--}380 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲にあった。また, 実験開始後 3 日目に Hc0901OM (大村湾産) 株の細胞分裂が確認された (Fig. 9)。7.5°C では, 両株ともに増殖は認められなかったが, Hc0901KA (形上湾産) 株は実験開始後 3 日目に細胞分裂中の細胞, 8 日後

考察

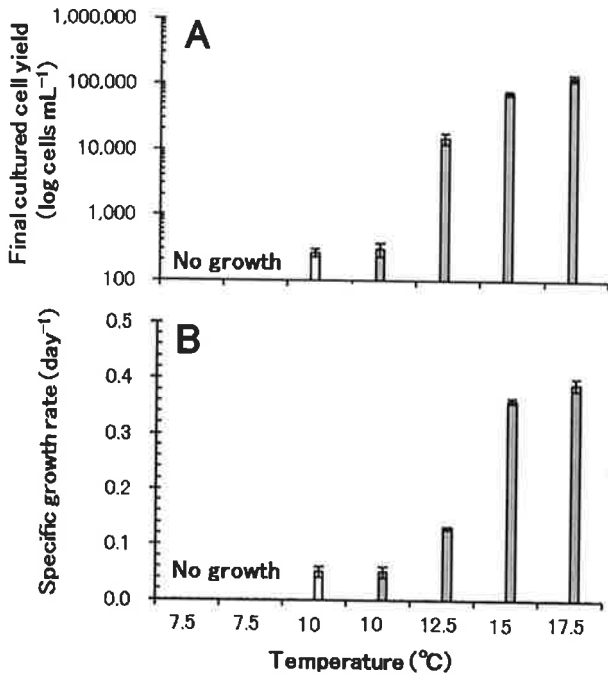


Fig. 8. Final cell yields (A) and specific growth rates (B) of *Heterocapsa circularisquama*. Error bar: standard deviations. Closed bar: Hc0901KA strain, open bar: Hc0901OM strain.



Fig. 9. Binary cell division of *Heterocapsa circularisquama* observed under 10°C. Scale bar=10 μm.

まで遊泳細胞が観察された。Hc0901OM（大村湾産）株は7日後まで遊泳細胞が観察された。

秋季赤潮の消長の原因 *H. circularisquama* 赤潮の発生前の9月18日に、大村湾南部海域の底層は貧酸素化しており、形上湾では40%未満の顕著な貧酸素水塊が発達していた。この時、底層では底泥から溶出した栄養塩類（窒素・リン）が高濃度化していたと考えられる。8月18日には台風13号が九州に最接近しており、強い北寄りの風が大村で観測されていた。*H. circularisquama* の高密度化と底層の貧酸素水塊の発達とは密接に関連しており、^{3,9,16)}9月中旬には底層で高濃度化した栄養塩類が吹送流により表層に供給されたことに加えて、9月中-下旬の小潮時期の滞留効果、日照時間減少による珪藻類の増殖抑制効果が相乗的に作用し、*H. circularisquama* の増殖を促したと考えられる。赤潮形成直前から当日（9月28-30日午前）には、赤潮形成場所に向かう南東-南南東の風が連吹したため、吹送流による集積作用が赤潮化の一因となった可能性がある。10月1日には、台風15号が九州に最接近し、9月30日午後から形上湾の内部から湾口部に向う北寄りの強風が吹いたことから、湾口方向への吹送流が表層に集積していた*H. circularisquama* 高密度水塊を湾外へ移流拡散させたことが赤潮消滅の一因と推察された。同様の事例は広島湾でも確認されている。³⁾ この赤潮のシードに関して、2008年の資料を再整理したところ、形上湾では、長崎県県央水産業普及指導センターの調査で7月30日に *Heterocapsa* sp. が出現していたとの情報が得られた。細胞鱗片の観察はしていないが、当時の顕微鏡観察結果に基づき形態等を再検討した結果、細胞の長さや幅が約20と15μmであり、外形はほぼ等長の円錐形の上殻と半球形の下殻からなることやピレノイドが横溝付近に位置すること^{17,18)}などの形態や緩やかに回転しながら泳ぎ、ときどきぐるりと方向を変え、前後につくような動きの特徴¹⁹⁾が

ら, この時の細胞は *H. circularisquama* であったと強く疑われ, 今回の赤潮のシードとなった可能性がある。今回の *H. circularisquama* 赤潮の消長機構は, 先行研究で示された要因・過程^{3,9,16)}を一定期間内に網羅した「貧酸素発達→台風通過・攪拌→赤潮形成→台風通過・移流拡散→赤潮消滅」型赤潮であったといえる。

晩秋 - 冬季出現の消長の原因 *H. circularisquama* 赤潮消滅後の 10 月 22 日には, 大村湾南部海域 St. 1-6 において, *H. circularisquama* の出現は確認されず, 降温期にあたることから, 関係者はこのまま終息に向かうものと予測していた。ところが, 11 月 26 日に St. 1-6 全てで遊泳細胞が 2-8 cells mL⁻¹ の密度で出現し, 2009 年 1 月 15 日まで継続して確認された。冬季における大村湾での *H. circularisquama* の出現は初記録である。10 月下旬-11 月上旬の日照時間 (54 h) は平年値 (117 h) の半分以下であり, 増殖に多くの光量を必要とする珪藻類の増加を抑制したことが *H. circularisquama* の出現の要因と考えられた。実際に, 形上湾での珪藻類の細胞密度は 11-1 月に 210 cells mL⁻¹ 以下であったのに対し, *H. circularisquama* の出現がなかった 10 月と 2 月には 1,000 cells mL⁻¹ 以上の出現が確認されていた。広島湾や英虞湾では, 水温と照度が低下している環境でも珪藻類など他種植物プランクトンが減少する時期に *H. circularisquama* は赤潮を形成することがあり, *H. circularisquama* と珪藻類との間には明瞭な逆相関が認められている。³⁾ これらの事例は今回の観察結果とよく一致し, やはり栄養の競合種である珪藻類の減少・増加が *H. circularisquama* 出現の消長の要因であったと指摘できる。また, 形上湾における水温の連続観測結果から, 2008 年の 10 月初旬-11 月中旬は, 例年に比べて 0.1-1.0°C 高めで推移し, 降下が鈍化していたことが判明した。このことが, 比較的高水温を好む *H. circularisquama* が降温期に長期にわたって遊

泳細胞の状態を低密度ながらも維持することを可能にしていたと推察され, *H. circularisquama* が晩秋期に出現できた一因と考えられる。

増殖におよぼす水温の影響と越冬の可能性

H. circularisquama 培養株の水温の増殖応答実験結果に基づくと, 形上湾産 Hc0901KA 株は 10.0-17.5°C の範囲, 大村湾産 Hc0901OM 株は 10°C で増殖が可能であった。10°C では, 継代培養は行っていないが, 形上湾で 2009 年 1 月に 9.7°C で遊泳していた細胞 (形上湾産 Hc0901KA 株) および大村湾南部海域で 9.0-9.9°C で遊泳していた細胞 (大村湾産 Hc0901OM 株) はともに 10°C で増殖できるポテンシャルを有していることを証明することができた。10°C での継代培養の可否は今後検討すべき課題ではあるものの, 今回の試験においては両株の最高細胞収量が培養 18-24 日目に得られていることから, 冬季の大村湾においては水温以外の制限要因がなければ, *H. circularisquama* が遊泳細胞として少なくとも 3 週間程度は出現可能であることも示唆される。

現場海域では 10°C 以下 (表層水温 7.6-8.3°C) で遊泳細胞が確認された加茂湖の事例⁹⁾はあるが, 培養株では 10°C 以下での増殖が確認された研究事例はこれまでなかった。^{3,5-7)} 7.5°C 区では, 両株ともに増殖しなかったが, 1 週間程度であれば遊泳細胞の状態を維持できることがわかった。冬季水温が 5°C を下回ることがあり, 10°C 以下で数ヶ月推移する加茂湖⁹⁾での越冬は難しいと考えられるが, 形上湾での水温の連続観測の結果に基づくと, 最低値は 8.3-9.2°C の範囲にあり, 2013 年の最低値は 9.2°C, 9.5°C 未満は 4 日間であった。耐久性のあるシストを形成しないとされる *H. circularisquama*^{1,20)} は, 形上湾において, 冬季水温が 10°C 程度で推移する場合には, 遊泳細胞の状態でも越冬できる可能性を示唆している。今後, 冬季水温が高く推移するような場合には, その可能性がさらに高まると指摘できる。

今回、*H. circularisquama* 個体群の由来の特定には至っていない。大村湾外部からの *H. circularisquama* 個体群の移入要因については、カキの種苗導入あるいは潮流の二つが考えられる。大村湾のカキ養殖業者は種苗を宮城県から購入していることから、このカキ種苗に *H. circularisquama* が付随しており、湾内への移入に到った可能性が推察される。しかし、宮城県では *H. circularisquama* の発生例がない⁹⁾ことから、外部からの種苗導入を介した人為的な移入の可能性は低いと考えられる。潮流に関することとして Matsuoka *et al.*²¹⁾は、渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides* Margalef が東シナ海東部沿岸沖合域から北部沿岸域に移送されたことを確認している。Iwataki *et al.*²²⁾は、香港での *H. circularisquama* の出現を報告しており、対馬暖流の上流から下流域の大村湾への海流による運搬の可能性は否定できないと考えられる。これに対し、長崎県総合水産試験場は、大村湾の上流域沖合域にあたる五島列島周辺海域でプランクトン調査を周年実施し、*H. circularisquama* を含む有害プランクトンの早期検出を試みている。2017年2月に五島西沖約60km (32°55.5'N, 128°15.5'E) で採取した表層水中に、*Chattonella marina* (Subrahmanyam) Hara and Cihara の出現が冬季の長崎県周辺海域で初めて確認されている(長崎県総合水産試験場未発表)。

被害を与える細胞密度と水温 *H. circularisquama* 培養株の水温の増殖応答実験結果に基づくと、10°Cでは、最終細胞収量は220–380 cells mL⁻¹の範囲にあり、12.5°Cでは細胞収量は10,000 cells mL⁻¹を超えることがわかった。松山³⁾は二枚貝のろ水率低下は *H. circularisquama* の細胞密度が20–50 cells mL⁻¹を超えると顕著に低下し、5,000–10,000 cells mL⁻¹あたりから二枚貝の斃死が指数級数的に始まり、10,000 cells mL⁻¹以上の場合には貝類の漁業被害が多く報告されるとしている。山砥ら⁶⁾は、*H. circularisquama* の細胞密度が1,000–10,000

cells mL⁻¹でアコヤガイおよびアサリに対する毒性を有するとしている。2009年11月中旬の加茂湖では、*H. circularisquama* は13.3–15.8°Cの時に、300–2,600 cells mL⁻¹の細胞密度で出現し、養殖マガキの斃死が確認されている。⁹⁾これらのことは、*H. circularisquama* が秋冬季の低水温期でも二枚貝の生残や生理に影響を及ぼす密度で出現することを示している。*H. circularisquama* の漁業被害の警戒レベルとして、山砥・石田²³⁾は50 cells mL⁻¹、Imai *et al.*²⁴⁾は500 cells mL⁻¹を設定している。形上湾の水温連続観測と培養実験に基づく、大村湾南部海域では、貧酸素水塊の発達、台風等の強風、日照時間の低下、珪藻類の減少といった環境要因が整った場合には、12.5°Cを下回る12月下旬–3月上旬を除く時期には、*H. circularisquama* は二枚貝の生残に影響を与えるレベルの赤潮を形成し、12月下旬–3月上旬には二枚貝の生理に影響を与えるレベルで出現する可能性がある。このことから、冬季水温が10°C程度まで低下する貝類養殖漁場周辺海域では、低密度出現を確実に捕捉するため、定期的に試水を濃縮処理し検鏡する方法に加え、高感度検出技術(モノクローナル抗体を用いた間接蛍光抗体法やリアルタイムPCR法を用いた簡易定量法)を導入したモニタリング体制を整備・強化する必要がある。

謝辞

本研究において、取りまとめに際してご助言を頂いた国立研究開発法人水産研究・教育機構瀬戸内海海区水産研究所の坂本節子博士に感謝します。また、調査研究における現場調査に際してご協力頂いた、大村湾漁業協同組合、長崎県県央水産業普及指導センターの皆様にお礼申し上げます。

文献

- 1) 外丸裕司, 白石智孝. *Heterocapsa circularisquama* の個体群動態と環境要因. 「有害有毒プランクトンの科学」(今井一郎, 山口峰生, 松岡數充編). 恒星社厚生閣, 東京. 2016; 175–190.
- 2) 玉井恭一. *Heterocapsa circularisquama* 赤潮の発生と被害の現状. 日本プランクトン学会報 1999. **46**: 153–154.
- 3) 松山幸彦. 有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* に関する生理生態学的研究 – I. *H. circularisquama* 赤潮の発生および分布拡大機構に影響する環境要因等の解明. 水産総合研究センター研究報告書 2003. **7**: 24–105.
- 4) 松山幸彦. 有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* に関する生理生態学的研究 – II. *H. circularisquama* の毒性および貝類斃死機構の解明. 水産総合研究センター研究報告書 2003. **9**: 13–117.
- 5) Yamaguchi M, Itakura S, Nagasaki K, Matsuyama Y, Uchida T, Imai I. Effects of temperature and salinity on the growth of the red tide flagellates *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) and *Chattonella verruculosa* (Raphidophyceae). *J. Plankton Res.* 1997. **19**: 1167–1174.
- 6) 山砥稔文, 坂口昌生, 松田正彦, 岩永俊介, 岩滝光儀, 松岡數充. 大村湾産有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* の二枚貝への影響と増殖特性. 日水誌 2005. **71**: 746–754.
- 7) 長崎慶三, 外丸裕司, 中山奈津子, 山口峰生, 坂本節子, 紫加田知幸. 新奇有害プランクトンに係る発生・増殖機構の解明. モニタリング及び予察技術に関する研究. 平成 22 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報告書 2011; 48–56.
- 8) 松山幸彦, 木村淳, 藤井斉, 高山晴義, 内田卓志. 1995 年広島湾西部で発生した *Heterocapsa circularisquama* 赤潮の発生状況と漁業被害状況の概要. *H. circularisquama* の毒性および貝類斃死機構の解明. 水産総合研究センター研究報告書 2004. **9**: 13–117.
- 9) 近藤真一, 中尾令子, 岩滝光儀, 坂本節子, 板倉茂, 松山幸彦, 長崎慶三. 有害赤潮藻へテロカプサの分布域北上現象 – 佐渡島加茂湖での赤潮によるマガキの大量死 –. 日水誌 2012. **78**: 719–725.
- 10) 平成 7 年～平成 24 年九州海域の赤潮. 九州漁業調整事務所, 福岡. 1996–2013.
- 11) 今井一郎. 赤潮微細藻類の計数と無菌培養法. 「海洋環境アセスメントのための微生物実験法」(石田祐三郎, 杉田治男編) 恒星社厚生閣, 東京. 2000: 85–90.
- 12) 岡市友利, 西尾幸郎, 今富幸也. 有毒プランクトン研究法. 水産学シリーズ 42. 「有毒プランクトン – 発生・作用機構・毒成分」(日本水産学会編) 恒星社厚生閣, 東京. 1982; 26.
- 13) Iwataki M, Takayama H, Matsuoka K, Fukuyo Y. *Heterocapsa lanceolata* sp. nov. and *Heterocapsa horiguchii* sp. nov. (Peridinales, Dinophyceae), two new marine dinoflagellates from coastal Japan. *Phycologia* 2002. **41**: 470–479.
- 14) 山砥稔文, 坂本節子, 山口峰生, 村田圭助, 櫻田清成, 高野義人, 岩滝光儀, 松岡數充. 西九州沿岸における有害渦鞭毛藻 *Cochlodinium* sp. Type-Kasasa の分布と増殖特性. 藻類 2010. **58**: 16–172.
- 15) 長崎県総合水産試験場. 平成 19 年度有害赤潮プランクトン等監視調査事業報告書 – I. 長崎県下における赤潮の発生状況. 長崎県総合水産試験場, 長崎. 2009.
- 16) 中西克之, 大中澄美子, 小林智彦, 増田 健. 英虞湾における *Heterocapsa circularisquama* 赤潮の発生過程. 日本プランクトン学会報 1999. **46**: 161–164.
- 17) 堀口健雄. *Heterocapsa circularisquama* の分

- 類とその問題点—形態分類. 日本プランクトン学会報 1999. **46**: 164–166.
- 18) 岩滝光儀. 有殻渦鞭毛藻 *Heterocapsa* 属の分類学的研究. 博士論文, 東京大学, 東京 2002.
- 19) 松岡數充, 岩滝光儀, 山砥稔文. 長崎周辺海域の有害植物プランクトン. 財団法人長崎県産業振興財団・独立行政法人科学技術振興機構. 2006.
- 20) 内田卓志, 松山幸彦, 山口峰生, 本城凡夫. 有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* の赤潮発生機構. 「有害・有毒赤潮の発生と予知・防除」(石田祐三郎, 本城凡夫, 福代康夫, 今井一郎編) 日本水産資源保護協会. 恒星社厚生閣, 東京. 2000; 137–149.
- 21) Matsuoka K, Mizuno A, Iwataki M, Takano Y, Yoo YH, Lee JB. Seed population of a harmful unarmored dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef in the East China Sea. *Harmful Algae* 2010. **9**: 584–556.
- 22) Iwataki M, Wong MW, Fukuyo Y. New record of *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) from Hong Kong. *Fish. Sci.* 2002. **68**: 1161–1163.
- 23) 山砥稔文, 石田直也. 島嶼海域での低密度赤潮による新たな漁業被害の発生. 「有害有毒プランクトンの科学」(今井一郎, 山口峰生, 松岡數充編). 恒星社厚生閣, 東京. 2016; 131–138.
- 24) Imai I, Yamaguchi M, Hori Y. Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Benthos Res.* 2006. **1**: 71–84.