

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の概要

松山 幸彦・木村 淳・藤井 斉・高山 晴義・内田 卓志

Occurrence of a *Heterocapsa circularisquama* Red Tide and Subsequent Damages to Shellfish in Western Hiroshima Bay, Seto Inland Sea, Japan in 1995

Yukihiko Matsuyama, Atsushi Kimura, Hitoshi Fujii, Haruyoshi Takayama
and Takuji Uchida

A red tide of the harmful dinoflagellate, *Heterocapsa circularisquama* (Peridinales, Dinophyceae) occurred at Ohno Strait of the western part of Hiroshima Bay, Seto Inland Sea, Japan in 1995. This is the first incidence of a *H. circularisquama* red tide in the Seto Inland Sea. Daily surveys were carried out in the center of Ohno Strait in order to clarify the environmental conditions during the red tide and the impact of *H. circularisquama* on bivalves mollusks.

H. circularisquama formed a red tide (> 700 cells ml^{-1}) from 10 November to 1 December, 1995. When the cell density of *H. circularisquama* reached $> 2,000$ cells ml^{-1} , the seawater was discolored to dark brown (coloration similar to "stained iron" or "cocoa"). Maximum cell density was 9,000 cells ml^{-1} at the Kuba Fishery Harbor. The occurrence of this red tide was restricted to the Ohno Strait where the water exchange rate is the lowest in Hiroshima Bay. A high cell density of this alga was observed particularly in the upper layer (0 – 2 m).

Water temperature and salinity during the red tide were 14.7 – 17.8°C and 31.7-32.2 psu, respectively. Water temperature during this red tide was 8 – 12°C lower than found for other *H. circularisquama* red tide in Ago Bay and Fukuoka Bay. Cell density of *H. circularisquama* gradually decreased when water temperatures became lower than 15°C. However, dividing cells of *H. circularisquama* were observed on 22 December when the water temperature was only 11.8°C. Due to the low precipitation in 1995, salinity in Hiroshima Bay during the red tide of *H. circularisquama* was uniformly high. Dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphate (DIP) during the red tide were 7.8 – 12.1 μM and 0.09 – 0.14 μM , respectively. The DIP concentration was relatively low and the DIN/DIP ratio ranged between 68 – 121. The number of diatoms was low (< 200 cells ml^{-1}) during the occurrence of *H. circularisquama* red tide. It is most likely that the high salinity, high DIN/DIP ratio, and low density of diatom cells enhanced the development of *H. circularisquama*. Populations of grazers such as tintinids and heterotrophic flagellates were low throughout the period of the *H. circularisquama* red tide.

The red tide of *H. circularisquama* in Hiroshima Bay led to mass mortalities in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*), short-necked clam (*Tapes philippinarum*), and blue mussel (*Mytilus galloprovincialis*). Economic losses to cultured oyster and short-necked clam were estimated at 325 million yen. Mortality of oyster was observed at 10 – 30% in the red tide area with particularly high mortalities (50 – 90%) observed in the high cell density area (3,500 – 9,000 cells ml^{-1}). Mortality of

the blue mussel was observed at 9.5% in the area of 1,000 – 3,000 cells ml⁻¹ and 30% in the area of 3,500 – 9,000 cells ml⁻¹. Further, mortality of oysters was higher in the near surface layer (0 – 2 m) than the bottom layer (> 5 m), which was closely related to the vertical distribution of the *H. circularisquama* cells.

Some biological assays on bivalves were conducted using samples of *H. circularisquama* from the natural red tide. Adult oysters died within 48 – 60h and showed vigorous clapping, extreme retraction of their mantle, and paralysis when exposed to a concentration of 11,200 cells ml⁻¹ of *H. circularisquama* cells. These refusal behaviors were observed from a concentration of 20 – 50 cells ml⁻¹ of *H. circularisquama*. Eighty five percent of juvenile mussels died within 4 days showing extreme retraction of their mantle, low production of byssus, and sustained valve closure when exposed to 10,000 cells ml⁻¹ of natural *H. circularisquama* cells. The mean clearance rate of oyster and mussel decreased to 1.5% and 8.8% of normal rates, respectively when exposed to 730 cells ml⁻¹ of natural *H. circularisquama*. However, reduction of the clearance rate or refusal behaviors were not observed for the filtrate (GF/F) of *H. circularisquama* (3,700 cells ml⁻¹) red tide.

Key words: *Heterocapsa circularisquama*, Red tide, Hiroshima Bay, Bivalve, Mortality

近年世界各地で有害藻類の大増殖（赤潮）による水産生物への漁業被害が急速に増加している（Shumway 1990, Haregraef 1993, Anderson 1994, Honjo 1994）。それら原因生物のなかには、これまで存在が知られていなかった新種のプランクトンが含まれていることも少なくない（Smayda and Villareal 1989, Rosenberg et al. 1988, Burkholder et al. 1992）。

わが国沿岸では、1988年に高知県浦ノ内湾で新種の渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* (Horiguchi 1995) の赤潮が初めて発生した（松山他 1995）。*H. circularisquama* の赤潮は二枚貝だけを特異的に斃死させ、魚類等には全く影響を及ぼさない（山本・田中 1990, 松山他 1995）。こうした、特定の生物群に対してのみ毒性を示す赤潮プランクトンはこれまで全く知られていなかった。その後本種は西日本各地で頻発するようになり、毎年多くの漁業被害を生じさせている（山本・田中 1990, Horiguchi 1995, 松山他 1995, Matsuyama et al. 1996）。本種の赤潮は1988年以降、太平洋沿岸および九州西岸の外海に面した内湾域で急速に拡大していた（松山他 1995）。

そうしたなか、1995年11月から12月にかけて、広島湾西部の大野瀬戸を中心に、*H.*

circularisquama の赤潮が発生した。本種が瀬戸内海で赤潮を形成したのは今回が初めてである。広島湾はカキやアサリなど二枚貝の集約的養殖が行われている海域だけに、赤潮による漁業被害は深刻で、広島県の取りまとめによると、カキやアサリを中心とした漁業被害は3億2500万円に上った（水産庁瀬戸内海漁業調整事務所 1996）。

本報では、今回発生した *H. circularisquama* 赤潮の発生状況、赤潮発生時の海況、および漁業被害の状況等について報告する。

材料と方法

赤潮海水の採水および海況等の観測 赤潮及び海況の観測は図1に示した大野瀬戸に位置する Stn. 1. (図2) を中心に、11月9日から12月27日にかけてほぼ毎日行った。採水は最高潮位時間の前後2時間以内に行い、採水層は原則として水深0, 2, 5 m とし、赤潮の最盛期には1 m 層の採水も実施した。採水はニスキン採水器を用いて実施した。1Lの海水を採水後、直ちに室内に持ち帰り、界線入スライドグラス上の海水に含まれるプランクトンを顕微鏡で同定・計数した。細胞密度が1 cells ml⁻¹ を下回った時には、

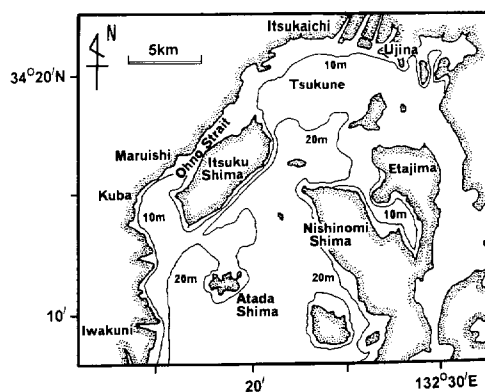


Fig. 1. Location of Ohno Strait in the western part of Hiroshima Bay where the water exchange rate is lowest in this Bay.

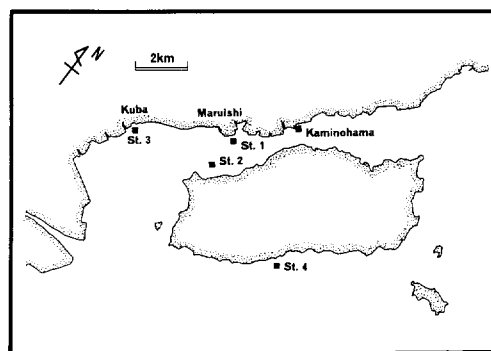


Fig. 2. Sampling sites of the red tide water in Ohno Strait.

10 μm のオムニポアフィルター（ミリポアー社製）を装着したろ過器を用いて、試水中の 10 μm 以上の粒子画分を濃縮した。濃縮直後の *H. circularisquama* は衝撃等により球形化・不動化しているため同定が困難である。このため、濃縮海水を一晩 20°C に設定したインキュベーター中に静置して遊泳細胞に変化するのを待った後、細胞密度の計数を行った。

水温、塩分は CTD (model NS-3P, Merbabu trading 社製) を用いて測定した。栄養塩類（溶解態無機窒素塩: DIN, 溶解態無機リン酸塩: DIP, 珪酸塩）の測定は、Strickland and Parsons (1972) の方法に準じ、自動分析装置 (TrAAcs 800, ブランルーベ社製) を用いて測定した。試水は 0.45 μm のシリンジフィルター（東洋濾紙

社製）で濾過後、分析まで -20°C 以下で凍結保存した。気象データは気象月報を用いて解析した。

H. circularisquama の増殖速度を調べるため、12月1日に採水した 0 m の海水を、目合 30 μm のナイロンメッシュを用い動物プランクトンなどの補食生物を除いた後、三角フラスコに 100 ml 分注し、明暗周期 12L : 12D, 100 $\mu\text{E}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の条件下でインキュベーターに静置した。採水時点での水温は 14.7°C, インキュベーターの設定温度は 15°C であった。細胞密度と栄養塩の測定は翌日および翌々日に行った。

赤潮現場における二枚貝の斃死状況 マガキ *Crassostrea gigas* については、Stn. 1 付近で養殖されていた 1 年生マガキを 11 月 14 日に採取してカゴに収容し、Stn. 1（赤潮発生域）および Stn. 4（赤潮非発生域）に懸垂して斃死状況を観察した。懸垂水深は 0, 2, 5, 8 m で、Stn. 1 では各水深 30 個体ずつ、Stn. 4 では 22 個体ずつを実験に供した。

ムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis* については、11 月 13 日に、Stn. 1 付近の浮ブイ等に付着していた天然個体（94 個体、30.0 \pm 5.2 mm）を目相 2 mm のナイロンネットに収容し、そのまま表層に懸垂して斃死個体数を計数した。

赤潮海水が二枚貝の生残等に及ぼす影響 現場赤潮海水がマガキに及ぼす影響を確認するために実験を行った。11 月 12 日に、Stn. 2. で採水した赤潮海水（2,500 cells ml^{-1} ）を、75 μm のナイロンメッシュを用いて捕食生物などを除いた後、前述のように 10 μm のオムニポアフィルターを装着したろ過器で、*H. circularisquama* を重力下で濃縮した。この試水を一晩 22°C のインキュベーター中に静置した後、細胞密度を 11,200 cells ml^{-1} に調整した。この赤潮海水 200 ml 中に殻高 27.5 mm と 30.8 mm のマガキ 2 個体（赤潮非発生時に Stn. 1. 付近で採取し、所内濾過海水中で 1 ヶ月間維持していた天然個体）を収容して観察を行った。曝気は *H. circularisquama* の細胞を破壊するので行わなかった。25 時間後

に一度同じ濃度・容量の赤潮海水と交換した。

また、大きさ 2.3 ± 0.3 mm のムラサキイガイを、1個体ずつ12穴のマイクロプレート（直径23 mm）に収容し、前述の赤潮海水（ $10,000$ cells ml^{-1} に調整）を5 ml/個体ずつ加えて観察を行った（ $n=20$ ）。実験海水は毎日同様の細胞密度に調整したものと交換し、4日目まで実験を実施した。

11月10日に Stn. 1. で赤潮海水（ 730 cells ml^{-1} ）を採水し、マガキ（殻高 22.9 ± 2.6 mm, $n=3$ ）とムラサキイガイ（殻高 10.9 ± 0.5 mm, $n=5$ ）を用いてヘテロカプサが二枚貝の濾水量に及ぼす影響を調べるための実験を行った。方法は Matsuyama and Uchida (1997) に従った。対照区の貝の濾水量は二枚貝に無害な渦鞭毛藻 *Heterocapsa triquetra* を、濾過海水に対して $1,000$ cells ml^{-1} の濃度になるように接種して測定した。また、赤潮海水の濾過液の影響を調べるため、グラスファイバーフィルター（GF/F, Whatman 社製、孔径 ca. $0.7 \mu\text{m}$ ）で濾過した現場海水に *H. triquetra* を同様の濃度になるよう接種して濾水量を測定した。

赤潮海水中の麻痺性および下痢性貝毒の有無を調べるため、11月21日に Stn. 3 において採水した表層海水をガラスフィルターで濾過後、

HPLC に供して分析を行った。フィルターは分析まで -20°C 以下で凍結保存した。

赤潮の発生、貝の斃死状況等に関する関係各漁業の組合員などからの聞き取り調査資料も参考にして、各データの解析を行った。

結 果

1. *H. circularisquama* 赤潮の発生と環境

H. circularisquama 赤潮の推移 広島湾で最初に *H. circularisquama* の遊泳細胞が確認されたのは1995年9月2日、Stn. 1（丸石地先）の表層水中においてであり、細胞密度は 2 cells ml^{-1} であった（図3）。しかし、翌日および一週間後に同地点を観察したが遊泳細胞は検出されなかった。その後広島県水産試験場の調査により、10月5日に湾奥部宇品地先で 70 cells ml^{-1} の細胞が検出された。さらに、11月9日に再び大野瀬戸で 314 cells ml^{-1} の値が計数され、その後大野瀬戸を中心に細胞密度が増加し、11月10–12日頃にかけて湾全域で赤潮を形成した（図4）。赤潮のピークは11月12–14日頃で、この期間の細胞密度は Stn. 1 においては $1,600$ – $2,100$ cells ml^{-1} の範囲にあった。13日に Stn. 1 以外の大野

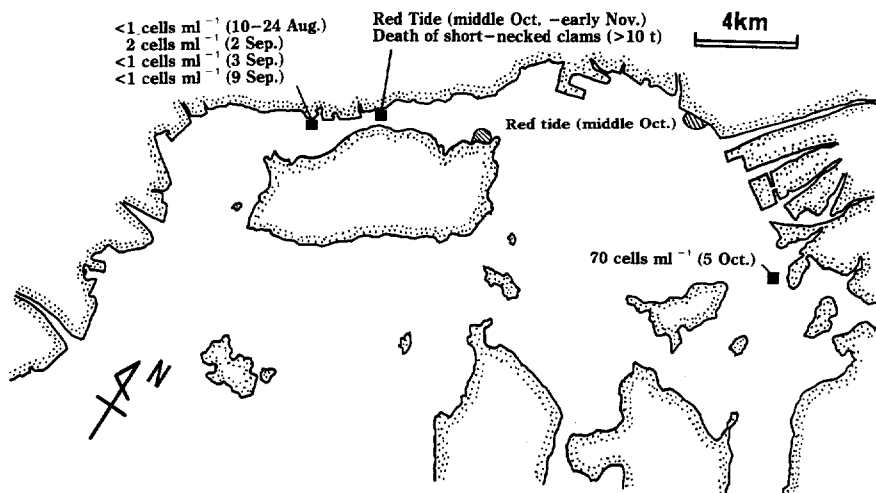


Fig. 3. Records of densities of *Heterocapsa circularisquama* and site of occurrence of high densities of this species before the occurrence of the large scale red tide in Ohno Strait.

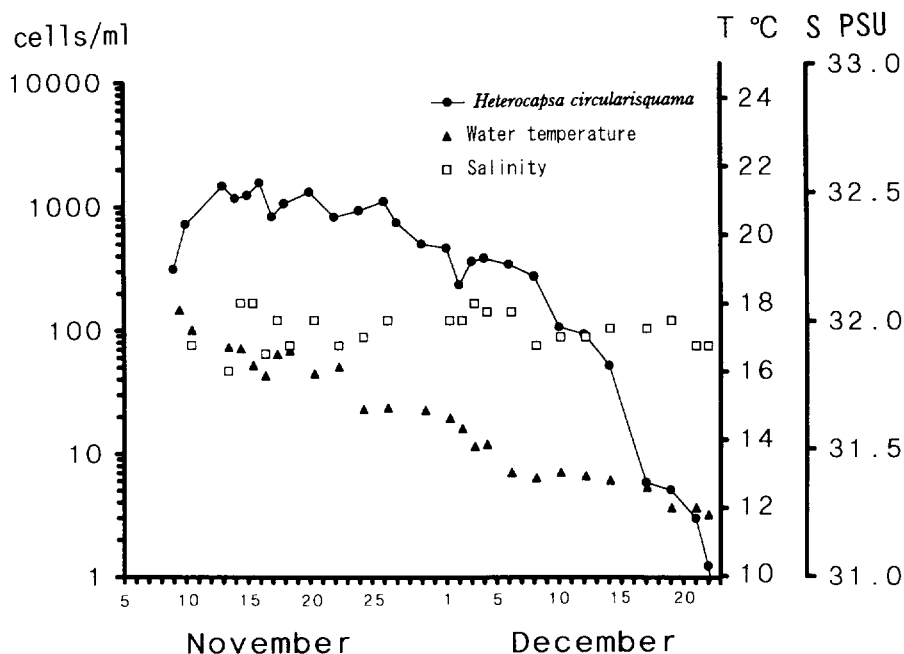


Fig. 4. Changes in the mean water temperature, mean salinity, and mean cell density of *Heterocapsa circularisquama* in the water column at Stn. 1.

瀬戸中心域で行った調査では、1,300–6,725 cells ml⁻¹ の範囲にあった (図 5)。

Stn. 3. (玖波地先) においては、11月20日の表層で9,000 cells ml⁻¹ の細胞密度が記録された。これは今回の赤潮で最も高い細胞密度であった。大野瀬戸の中でも、玖波地先から丸石地先にかけての沿岸部では特に細胞密度が高かったように思われた (図 5)。*H. circularisquama* による赤潮はおよそ2週間継続した後、12月7日頃から徐々に細胞密度は減少した。最後に遊泳細胞を確認したのは、12月27日で、この時の細胞密度は0.0105 cells ml⁻¹ であった。

本種の天然群集内には、分裂中の細胞が1.3–12.5% の範囲で観察された (採水は9–16時にかけて実施)。最後に分裂中の細胞を観察したのは12月22日で、この時の分裂細胞の割合は2.9% であった。12月1日に採水した表層試料を、一晩現場とほぼ同じ15°C のインキュベーター中に静置して増殖速度を測定したところ、1日目は0.26 division d⁻¹、2日目は0.16 division d⁻¹ を示した (表 1)。

る海面の着色は、午前中から昼下がりにかけて顕著であり、夕方以降は0 mでの細胞密度が減少するようであった。また、海水の着色は細胞密度が700 cells ml⁻¹ 以上で認められた。2,000 cells ml⁻¹ を越えると鉄サジあるいはココアのような濃厚な赤褐色を呈していた。

本種の遊泳細胞は、全体的に0–2 m付近に多数分布していた (図 6)。

図 5 に、赤潮期間中の *H. circularisquama* の水平分布 (水柱平均密度) の調査結果を示した。前述のとおり、本種の赤潮は大野瀬戸の中心部が高く、その中でも玖波地先から丸石地先にかけて最も高密度であった。細胞密度は大野瀬戸の両端に行くにつれ、急激に減少していた。

気象・海象 広島地方は1994年から1995年にかけて降水量の低い状態が続いた。1995年は5月と7月に平年を越える降雨があったものの、ほとんどの期間で平年を下回っていた (図 7)。赤潮発生前の8月と9月の降水量は、それぞれ平年の36% および65% と極端に低かった。

***H. circularisquama* の水平・鉛直分布** 本種によ

水温・塩分・栄養塩等 赤潮が発生した期間の

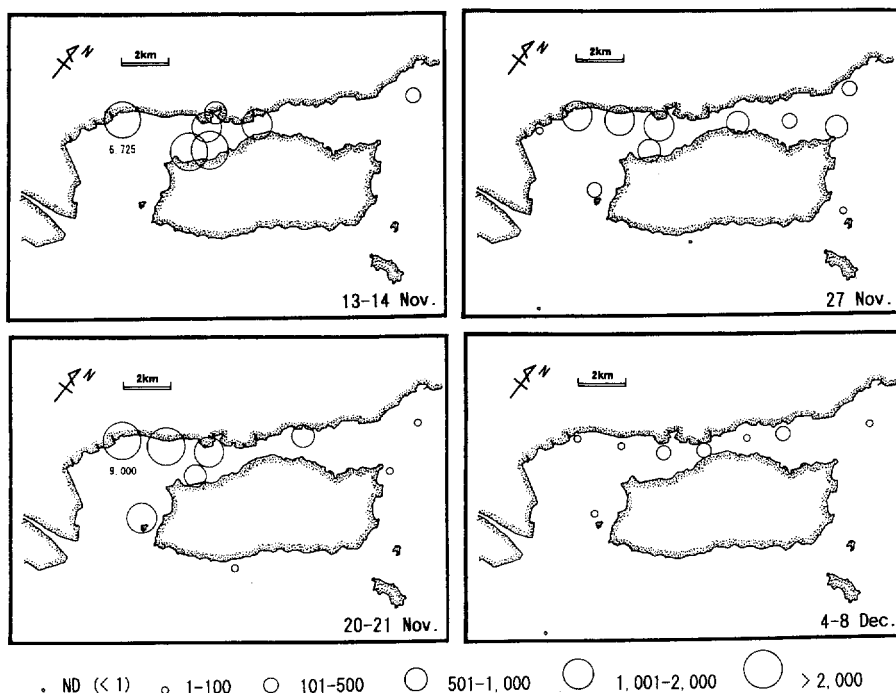


Fig. 5. Changes in the horizontal distribution of the mean *Heterocapsa circularisquama* cell density (cells ml⁻¹) in the water column during the red tide period in Ohno Strait.

Table 1. Changes of DIN, DIP, and Si concentrations (μM) during the incubation of *Heterocapsa circularisquama* cells at 15°C, and photoperiod of 12L : 12D

| Days | NO ₃ | NO ₂ | NH ₄ | DIN | PO ₄ | Si | N/P | Si/P | cells ml ⁻¹ | div. d ⁻¹ * |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|------|-----|------|------------------------|------------------------|
| 0 | 5.2 | 2.0 | 5.0 | 12.1 | 0.14 | 14.3 | 87 | 102 | 725 | - |
| 1 | 3.9 | 1.4 | 1.0 | 6.4 | 0.03 | 10.9 | 200 | 341 | 870 | 0.26 |
| 2 | 0.7 | 0.8 | 1.4 | 2.9 | 0.02 | 6.3 | 147 | 318 | 960 | 0.14 |

* div. d⁻¹: $(\log C_t - \log C_0) / (\log 2 \cdot t)$

水温は 14.7–17.8°C の範囲にあった (図 4)。発生初期から盛期にかけての水温は、本種が多く分布していた 0–2 m 層で 15.7–17.8°C の範囲にあった。また、細胞密度が下降を始めた時の水温は 12–15°C の範囲にあった。分裂中の細胞を最後に確認したとき、および遊泳細胞を最後に確認した時のそれぞれの水温は、11.8°C および 11.3°C であった。

塩分は赤潮発生期間中 31.7–32.2‰ の範囲にあって大きな変動を示さなかった (図 4)。赤潮発生期間中は、降水量が少なかったため例年に

比べ湾全体が高塩分化していたものと考えられる。

赤潮期間中、Stn. 1 の海水試料中の栄養塩濃度を測定した結果を表 2 に示す。DIN が 7.8–12.1 μM 、DIP が 0.09–0.14 μM 、Si が 14.3–17.1 μM の範囲にあった。DIN の濃度に比較して DIP の濃度が極めて低く、DIN/DIP が 68–121 と高くなっていた。このように、本種の赤潮はリンの濃度が低い状態であったにも拘わらず、継続的に発生していた。

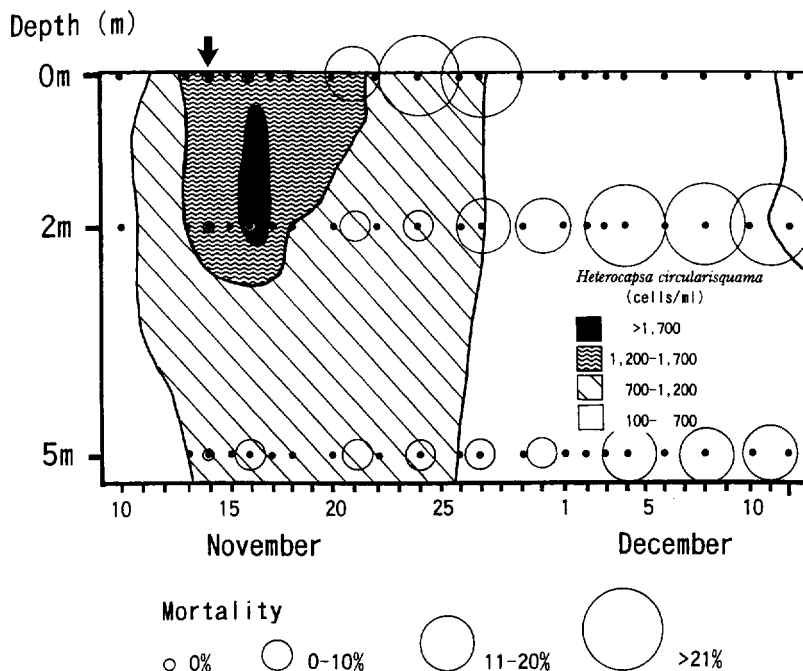


Fig. 6. Changes in the vertical distribution of *Heterocapsa circularisquama* cell density, and concurrent mortality of adult oysters at Stn. 1. Arrow denotes the start of the suspension of oysters in the water column on November 14.

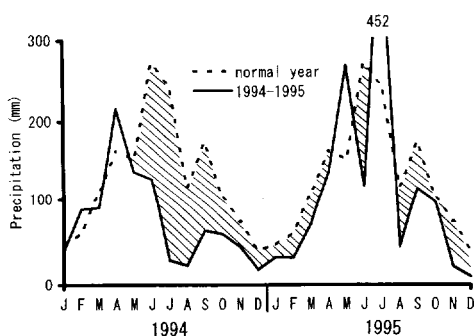


Fig. 7. Precipitation (mm) in Hiroshima City from 1994 to 1995. Date for the 'normal year' curve is an average of the 1961-1989 levels.

他種プランクトン *H. circularisquama* 赤潮期間中珪藻類の密度は多くても 100 - 200 cells ml⁻¹ で、ほとんど計数値はそれ以下であった (表 3)。図 8 に五日市および廿日市地先におけるプランクトン沈殿量の推移を示す。9月から10月までは高い値の沈殿量が観察されており、この

時期は珪藻群が増殖していたものと考えられる。しかし、10月後半からその量は著しく減少し、珪藻を中心としたプランクトン現存量が大きく減少したことが伺える。

補食生物については、赤潮の間を通じて従属栄養鞭毛藻である *Gyrodinium* spp. もしくは *Oxyrrhis marina* が最高で数 10 cells ml⁻¹ 程度観察されたものの、それ以上の増殖はなく、また、*H. circularisquama* の細胞密度の増減との相関は見られなかった。また、繊毛虫類は赤潮期間中ほとんど観察されなかった。

2. *H. circularisquama* 赤潮による漁業被害と二枚貝への影響

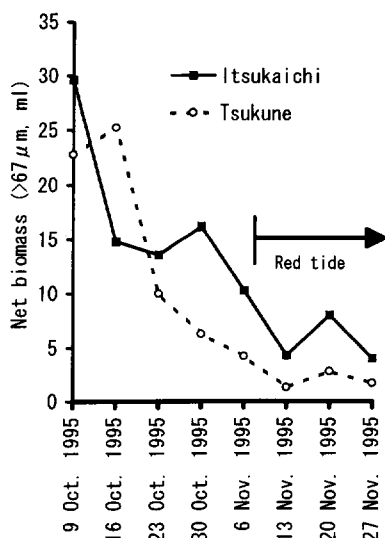
被害額と被害生物 今回の赤潮は、大野瀬戸付近で養殖されているマガキやアサリに大きな漁業被害を及ぼし、被害額は累計で3億2500万円にも及んだ (水産庁瀬戸内海漁業調整事務所 1996)。二枚貝以外の付着生物、例えばホヤやフ

Table 2. Concentrations of DIN, DIP, Si (μM), and *Heterocapsa circularisquama* cell density (cells ml^{-1}) at St. 1

| Date | Depth (m) | NO_3 | NO_2 | NH_4 | DIN | PO_4 | Si | DIN/DIP | Si/P | cells ml^{-1} |
|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|------|---------------|------|---------|------|------------------------|
| 16 Nov., 1995 | 0 | 3.8 | 1.4 | 6.2 | 11.4 | 0.09 | 14.8 | 121 | 157 | 1,613 |
| 20 Nov., 1995 | 0 | 4.2 | 1.5 | 4.1 | 9.8 | 0.13 | 17.1 | 75 | 131 | 1,579 |
| 20 Nov., 1995 | 2 | 4.0 | 1.5 | 2.8 | 8.3 | 0.11 | 16.7 | 76 | 153 | 1,057 |
| 20 Nov., 1995 | 5 | 3.8 | 1.7 | 2.2 | 7.8 | 0.11 | 16.6 | 68 | 146 | 1,377 |
| 1 Dec., 1995 | 0 | 5.2 | 2.0 | 5.0 | 12.1 | 0.14 | 14.3 | 87 | 102 | 725 |

Table 3. Cell densities of phytoplankton collected on 24 November. Sample was directly used for measurement of clearance rate of mussel

| | cells ml^{-1} | % |
|------------------------------------|------------------------|------|
| <i>Skeletonema costatum</i> | 91 | 7.5 |
| <i>Nitzschia</i> spp. | 2 | 0.2 |
| <i>Eucampia zodiacus</i> | 8 | 0.7 |
| <i>Thalassiosira</i> spp. | 15 | 1.2 |
| <i>Thalassionema</i> sp. | 29 | 2.4 |
| <i>Leptocylindrus danicus</i> | 1 | 0.1 |
| <i>Pleurosigma</i> sp. | 5 | 0.4 |
| <i>Prorocentrum triestinum</i> | 2 | 0.2 |
| <i>Cryptomonas</i> sp. | 90 | 7.4 |
| <i>Heterocapsa circularisquama</i> | 975 | 80.0 |

**Fig. 8.** Change in the net biomass (ml) in the water column (10 m) collected on a 67 μm mesh plankton net. Sampling sites are given in Fig. 1.

ジツボなどに斃死は全く認められなかった。この時期に盛んなナマコ漁にも、特に異常は認められなかった。また、天然魚の斃死や逃避行動は観察されなかった。

マガキおよびムラサキイガイの斃死率推移

Stn. 1 における赤潮海水中のマガキ *Crassostrea gigas* の懸垂試験の結果、11月14日から12月15日までの累計斃死率は、水深0 m層で30.0% (11月27日まで、それ以後は試験貝が紛失した)、2 m層で36.7%、5 m層で20.0%、そして8 m層で6.7%で、各層の平均では19%であった (表4)。このように、斃死率は *H. circularisquama* の細胞密度が高く推移した0–2 m層で顕著であった。この期間の *H. circularisquama* の細胞密度は、各層平均で239–1,588 cells ml^{-1} 、水温は15–17°Cの範囲にあった。一方で、赤潮がほぼ終息した12月15日から、翌年(1996年)の4月25日までの累計斃死率は、各層とも3.3%に留まっていた (表4)。 *H. circularisquama* がほとんど観察されなかった Stn. 4では、11月14日から11月30日までの累計斃死率は、0 m層で6.7%、5 m層および8 m層では0%で、全層の平均値は3%に留まっていた。

Stn. 1 における顕著な斃死は11月21日頃から観察されていた (図6)。また、Stn. 1 付近の天然マガキの場合、斃死は11月19日まではほとんど認められなかったが、21日頃から急に斃死個体が目立つようになった。今回の赤潮で斃死したと思われる天然マガキの個体を計数した結果、斃死率は11月30日の段階で約30%であった (表層付近のみ観察)。

Table 4. Comparison of mortalities (%) of 1 year old oysters*¹ between the red tide and a non-red tide area

| Mortality at St. 1 (red tide area) | | |
|------------------------------------|---|--|
| Depth (m) | 14 Nov. – 15 Dec. (31 days)* ² | 15 Dec. – 25 Apr. (132 days)* ³ |
| 0 | (> 30.0)* ⁴ | – * ³ |
| 2 | 36.7 | 3.3 |
| 5 | 20.0 | 3.3 |
| 8 | 13.3 | 3.3 |

| Mortality at St. 4 (non-red tide area) | | |
|--|---|--|
| Depth (m) | 16 Nov. – 15 Dec. (25 days)* ² | 15 Dec. – 25 Apr. (136 days)* ³ |
| 0 | 9.1 | 0 |
| 2 | 4.6 | 0 |
| 5 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 |

*¹ The oysters used in this study was maintained near the St. 1. until 14 Nov.

*² Red tide period

*³ Non-Red tide period

Oysters were consistently suspended at the same depth from the red tide period

*⁴ Caged oysters suspended at 0 m were lost

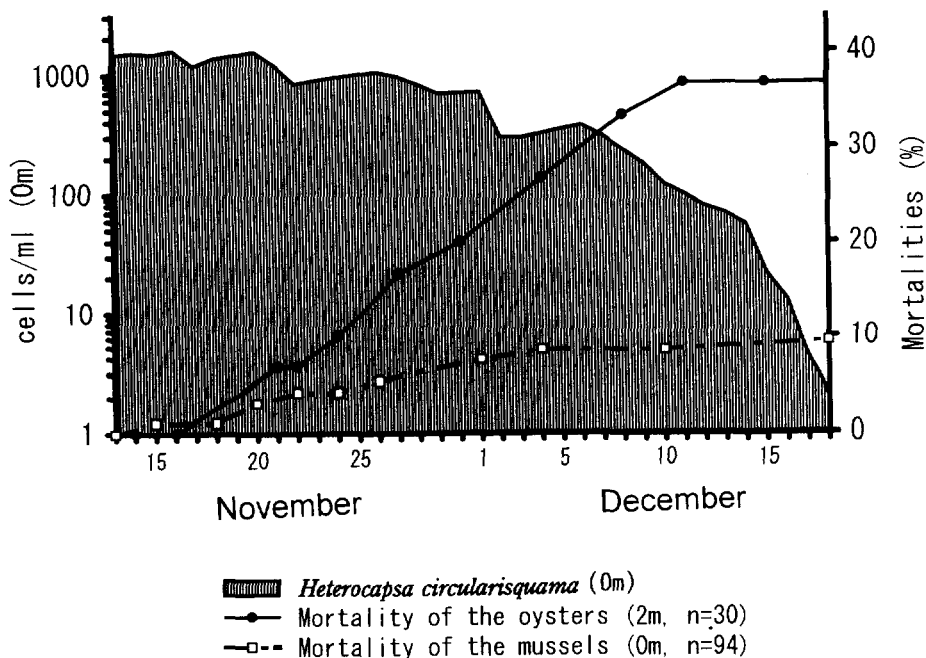


Fig. 9. Changes of *Heterocapsa circularisquama* cell density, and concurrent mortalities of adult oyster and mussel at Stn. 1.

Stn. 1 におけるムラサキガイ *Mytilus galloprovincialis* の場合、0 m 層での累計斃死率は 9.5% であった (図 9)。これはマガキに比べ

かなり低い値である。その他ロープ等に付着している天然個体にも、マガキ程の目立った斃死は観察されなかった。

玖波漁港内での斃死貝の観察等 Stn. 1. から南西方向に約 5 km 離れた大竹市玖波町の玖波漁港 (Stn. 3) は、赤潮期間中 *H. circularisquama* が 3,500 – 9,000 cells ml⁻¹ と最も高い細胞密度で確認された海域であり、11 月 21 日に漁港内の斃死貝の状況について観察を行った。なお、この時も漁港内は濃厚な赤潮状態で、表層水を計数した結果、3,700 cells ml⁻¹ の *H. circularisquama* が認められた。ロープやフロート壁面に付着している天然マガキやムラサキイガイはかなり被害を受けていた (図 10)。斃死貝は腐敗臭がひどく、外套膜と閉殻筋を若干残したもものから、まだ軟体部がほとんど残っているものまで様々であった。マガキは 90% 以上の斃死、ムラサキイガイでは 30% 程度の斃死であった。水面近くの個体の斃死率が少なかったが、これは干潮時に水面上に露出するため、高濃度の赤潮海水に暴露されている期間が短かったためと思われる。

マガキとムラサキイガイの斃死実験 11 月 12 日に、Stn. 2 で採水した赤潮海水を濃縮し、これを用いてマガキの斃死実験を行った結果を表 5 に示した。赤潮海水 (11,200 cells ml⁻¹) に収容されたマガキは、異物が混入した時に、それらを排

除しようとして繰り返す開閉運動 (clapping) をすぐに開始した。閉殻する瞬間に殻内から水流が吹き出すのが、この中にヒモ状のミューカスが含まれ、少ないながらその中に *H. circularisquama* の細胞も包み込まれていた。clapping は実験開始直後に 5 – 10 回/分程度の頻度であるが、徐々に回数は減少しながらも 10 時間以上続いた。実験に供した 2 個体とも 25 時間後までは閉殻の状態になり、その後麻痺状態 (大きく開設したままの状態、外套膜などをピンセットで強く刺激するとゆっくりと殻を閉じ始める状態) に陥り、それぞれ 48 時間および 60 時間後に完全に斃死した。斃死したマガキは外套膜周辺部が大きく収縮していた。斃死実験中に *H. circularisquama* の細胞数は減少することはなかったため、ほとんどマガキに摂取されなかったと考えられる。

一方、ムラサキイガイ稚貝の場合、現場の赤潮海水を濃縮して *H. circularisquama* の細胞密度が 10,000 cells ml⁻¹ になるよう調整した海水で実験を行った。その結果、*H. circularisquama* を暴露されたムラサキイガイは、糸足の形成が阻害され (表 6)、3 日後に 55%、4 日後に 85% の個体が斃死した (図 11)。

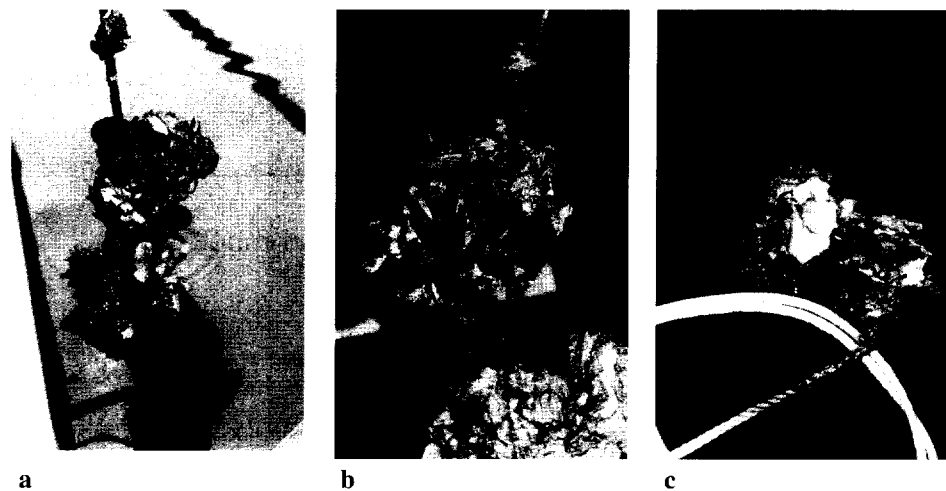


Fig. 10. Photographs of dead bivalves due to *Heterocapsa circularisquama* red tide. a. dead natural oysters (death/total = 9/12). b. dead natural mussels (death/total = 12/22). Several dead individuals remained their mantle and adductor muscle. c. dead natural oysters which might be killed within a few day, showing notable mantle contraction.

Table 5. Effect of red tide seawater of *Heterocapsa circularisquama* (11, 200 cells ml⁻¹) on the survival of the 1 year old oysters

| Time (h) | shell height | |
|----------|---------------|---------------|
| | 27.5 mm | 30.8 mm |
| 1 | clapping | clapping |
| 12 | valve closure | valve closure |
| 24 | paralysis | valve closure |
| 48 | death | paralysis |
| 60 | - | death |

Water temperature was 20°C. Aeration was not conducted. *H. circularisquama* medium was replenished once at 25 h.

Table 6. Effect of *Heterocapsa circularisquama* red tide (10,000 cells ml⁻¹) on the byssus production*¹ rate of mussel. Observations were conducted at 12 h

| | Byssus production rate* |
|-------------------|-------------------------|
| Filtered Seawater | 90% |
| Red tide Seawater | 60% |

* individuals which produced ≥ 2 byssus were counted (n = 20).

マガキおよびムラサキガイの濾水量に及ぼす赤潮海水の影響 11月10日に採水した *H. circularisquama* の赤潮海水 (730 cells ml⁻¹) を用いてマガキおよびムラサキガイの濾水量を測定したところ、それぞれ対照区の 1.5% および 8.8% まで減少することが判明した。ただし、グラスフィルターで濾過した赤潮海水濾液には毒性が全く認められなかった。ムラサキガイで調べた結果、50 cells ml⁻¹ では対照区の 1/2 になった (図 12)。

二枚貝毒化の可能性 広島県が赤潮発生海域から採取したマガキやアサリの毒性を検査した結果、貝毒は検出されなかった。また、11月21日に玖波漁港内で採水した赤潮海水から得た藻体を、HPLC で分析した結果、麻痺性貝毒成分も下痢性貝毒成分も検出されなかった (坂本, 私信)。

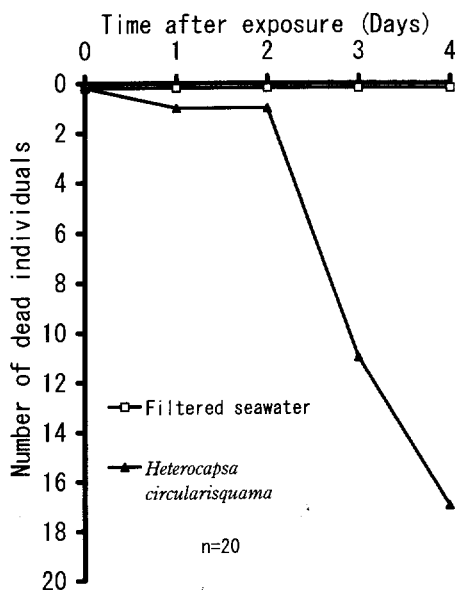


Fig. 11. Changes in mortality of juvenile mussels exposed to 10,000 cells ml⁻¹ of natural *Heterocapsa circularisquama* cells. A seawater sample (3,200 cells ml⁻¹ of *H. circularisquama*) was collected at Stn. 2 on 14 November and concentrated on a filter (10 μm) to an approximate four-fold concentration. Each individual mussel was placed in a vessel separately containing 5 ml of *H. circularisquama* culture (ca. 10,000 cells ml⁻¹). The assay medium was replaced with a fresh algal suspension every day. The exposure experiment was conducted at 22 ± 1°C in the dark.

考 察

1. *H. circularisquama* 赤潮の発生と環境

広島湾における *H. circularisquama* の推移 著者らは9月上旬の段階で本種の遊泳細胞を確認した。しかし、その後一旦遊泳細胞が検出されなくなったこと、本種の赤潮発生が頻発する夏季 (松山他 1995) を過ぎ本格的な水温下降期に入っていたことから、大野瀬戸では9月下旬から10月下旬までプランクトンの観察を実施しなかった。11月9日に再検出した段階では既に細胞密度は 300 cells ml⁻¹ を越えていたので、本種は非観察期間に増殖し始めたと推察される。

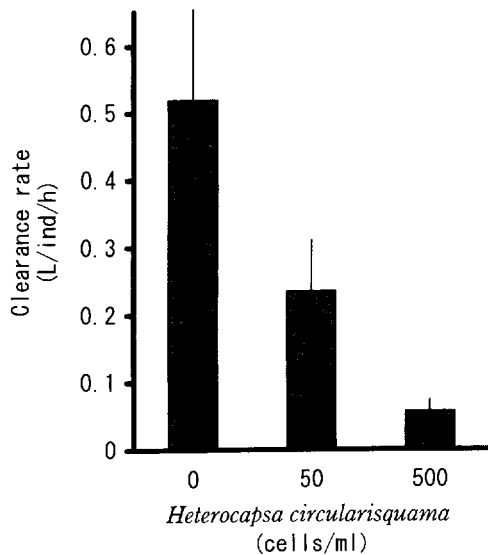


Fig. 12. The mean clearance rate of mussels exposed to natural cells of *Heterocapsa circularisquama*. Vertical bars denote the standard deviation. Seawater sample (975 cells ml⁻¹ of *H. circularisquama*) was collected at Stn. 1 on 24 November, and used immediately for the assay. For the clearance rate measurement, the non-toxic algae, *Heterocapsa triquetra* was added to the assay media at a concentration of 700 cells ml⁻¹.

複数の漁業者らの報告によれば、10月中旬から11月上旬にかけて大野町上の浜地先（図2参照）において濃密な赤潮が観察されている。この時隣接する漁場で養殖されていたアサリが累計で10t以上斃死している（浜毛保漁業協同組合浜崎富彦氏，私信）。さらに、10月半ばに宇品地先より西へ数キロの地点にある広島市五日市地先でも、同じ時期に濃厚な赤潮を観察したという報告がある（広島市漁業協同組合員，私信）。これらいずれの赤潮も、詳細なプランクトン同定が行われていないので、*H. circularisquama* が存在したかどうかは確認できない。しかし、その赤潮によりアサリが大量に斃死したことは、*H. circularisquama* の存在を強く示唆している。また、五日市地先の赤潮の場合、その数 km 離れた所では実際に *H. circularisquama* が検出されているので、このいずれの場合も、*H. circularisquama* が原因生物で

あった可能性は十分にあると考えられる。従って、9月上旬から低密度ながら遊泳していた *H. circularisquama* が、10月半ば以降湾奥部から西部にかけて局地的な赤潮を形成し、その後11月に入って大野瀬戸全域で本格的に増殖して大規模な赤潮を形成したものと考えられる。

本種の赤潮は、これまで太平洋沿岸、および九州西岸の外海に面した内湾で発生しており、瀬戸内海で発生したのは本例が最初である。本種がいつの段階でどのようにして、瀬戸内海に分布するようになったのか明らかでないが、小豆島の内海湾で、1993年2月に本種の遊泳細胞が2 cells ml⁻¹ 観察されている（内田・松山，未発表）。こうした事実から、本種は遊泳細胞の状態、既に1993年2月の時点で瀬戸内海東部に分布していたことになる。瀬戸内海は非常に閉鎖的な構造を有しているものの、海水はおよそ1年程度で外海の水と交換すると言われる（上島他1985）。瀬戸内海に隣接する太平洋沿岸では、既に1988-1992にかけて *H. circularisquama* の赤潮が頻発していた（松山他1995）。従って、そうした場所で大量に増殖した遊泳細胞が逸散して潮流により運ばれ、徐々に瀬戸内海に侵入した可能性は十分に考えられる。こうして運ばれた遊泳細胞が、今回広島湾で発生した赤潮のシードポピュレーションになった可能性が考えられる。

一方、貝毒原因生物の *Alexandrium* 属では、シスト（休眠孢子）などが貝などの移送に伴って移動することが指摘されている（古畑他1996）。*H. circularisquama* についても、今後二枚貝を媒体とした移送の可能性があるのでどうか検討する必要がある。

***H. circularisquama* の水平・鉛直分布** 今回の本種による赤潮発生時期には上層から下層にかけて水温および塩分の値が一様であったので、海水は鉛直方向に良く混合されていたと考えられる。それにも拘わらず *H. circularisquama* の遊泳細胞は常に表層を中心に分布していた。英虞湾の場合、秋季赤潮は今回と同様水深1-2m付近を中心に多く分布していた（松山他1995）。一方、本種が夏季に増殖する場合、高い細胞密

度は 5 m 以深の中底層に多く観察されている (松山他 1995)。赤潮鞭毛藻の鉛直分布に影響を及ぼす物理化学的な環境としては、照度、水温、海水の鉛直安定度などが考えられる。*Gymnodinium mikimotoi* の場合、赤潮盛期に日周鉛直移動を行うことが既に明らかになっているが (Honjo et al. 1989, Koizumi et al. 1996)、一方で *G. mikimotoi* の遊泳細胞は、晴天時には中層で、また曇天時には表層に多く分布することも観察されている (山口 1994)。培養による観察においても、*H. circularisquama* は走光性を示すことを確認している (松山、未発表) ことから、本種の鉛直分布には照度が強く影響していることが考えられる。

広島湾の海水は、潮汐流により主に湾の南東部から湾外水と交換して行く。広島湾の北西部に位置する大野瀬戸は、湾南東部から見て最も湾奥部にあり、湾外水の侵入が緩やかである。さらに、南東方向を厳島に遮られているため、他の海域と比較して海水交換が最も低くなっている (中国工業技術試験所 1986)。後述のように、今回の赤潮は本種が増殖できる下限に近い水温で発生しており、増殖速度はそれほど早くなかったと思われる。しかし、大野瀬戸は他の海域に比べ海水交換が著しく悪いため、緩慢ながら増殖した *H. circularisquama* の細胞が瀬戸内部に停滞し続けたものと推察された。*G. mikimotoi* についても、増殖至適水温は 25°C 付近である (山口 1989) にも拘わらず、まれに 10–12°C といった冬季に赤潮を形成することがある (寺田他 1987, Honjo 1990)。この原因は、冬季に海水交換が著しく悪くなるのが原因であると考えられている (本城 1991, 杜多他 1996)。

気象 本種の大規模な発生には台風などによる鉛直混合が強く影響することが知られている (松山他 1995, Matsuyama et al. 1996)。この場合、海水が攪拌されることで、底層の海水や底泥中に多く含まれる栄養塩類や増殖促進物質が表層へ供給されるので、それを利用して本種が盛んに増殖するのではないかと考えられている (Matsuyama et al. 1996)。今回の赤潮の場合、発生前に台風等による攪拌は起きていない。しか

しながら、水温下降期に入っていたため、海水は上下方向に良く混合されている状態であった。また、広島地方は 1994 年から 1995 年にかけて降水量が平年より著しく低い状態が続いたため、河川からもたらされる淡水の量がかなり少なかったと推察される。

水温 博多湾において、本種の赤潮は、水温が 27.7–28.0°C の時に発生している (田中・山本 1990)。また、英虞湾における赤潮は主に、23.8–31.6°C の範囲で発生する (Matsuyama et al. 1996)。従って、今回の赤潮はそれらと比較すると 10°C 以上低い水温で発生している。また、英虞湾では 1992 年の秋季に赤潮を形成しているが、この時の水温は 16.9–22.2°C と、今回広島湾で発生した水温に比較的近い。しかしながら、今回広島湾で発生した本種の赤潮は、過去の発生例の中でも最も低い水温で発生しており、極めて特徴的な事例であった。

山口 (1995) が英虞湾産の *H. circularisquama* 培養株を用いて調べた結果によれば、本種の最大増殖速度を示す水温は 30°C であり、10°C ではほとんど増殖できなかった。従って、今回の赤潮は増殖可能水温の下限近くで発生したことになる。本種の増殖速度は室内実験において最大で 1.3 division day⁻¹ (山口 1995) であるが、夏季の赤潮現場でもこれに近い増殖速度を示すことがある (松山他 1995)。今回、*H. circularisquama* が増殖して赤潮を形成しつつある初期の増殖速度は不明であるが、12 月 1 日の試料の場合は 0.26 division day⁻¹ であった。これは、本種の最大増殖速度の、1/5–1/4 とかなり低い値であった。

また今回の調査の結果で、本種天然個体群の増加は 15°C を下回るとほとんど停止することが推察された。1992 年秋季に三重県の英虞湾で発生した本種の赤潮の場合も、水温が 15–16°C を下回ると細胞密度が急激に低下した (松山他 1995)。従って、*H. circularisquama* 赤潮は少なくとも今までの例では、水温が 15°C 以上で発生すると考えられる。しかし、水温が 11.8°C を記録した 12 月 22 日の試料中にも、分裂中の細胞が全体の 2.9% 認められた。また、今回の赤潮海水

を10°Cのインキュベータ中に静置すると、ほとんどの細胞が球形化してしまうものの、少なくとも1週間後までは低い割合ながら遊泳細胞が存在することを確認した。従って、本種の分裂が完全に停止する水温あるいは生存が不可能な水温はさらに低いものと推察された。生残が可能な水温下限を確認することは、本種の遊泳細胞で越冬できる水温がどの程度であるのか、あるいは北方海域へどこまで分布可能なのかなどの重要な判断基準となるので、今後さらに詳細に調べる必要がある。

塩分 博多湾において、*H. circularisquama* による赤潮は、塩分が32.6–32.83‰の時に発生している(田中・山本1990)。また、英虞湾における本種の赤潮は、30.5–34.1‰の範囲で発生することが明らかにされている(Matsuyama et al. 1996)。今回の広島湾における*H. circularisquama* 赤潮も、31.7–32.2‰の範囲で発生しており、過去の発生時の塩分に近かった。

山口(1995)によれば、本種の増殖は塩分30‰以上で良好で、それより低くなると悪くなる。広島湾は太田川の影響を受け、表層で塩分が30‰を下回ることも珍しくないが、1995年の広島湾西部海域では高塩分状態が続き本種の大量発生を助長する一因になったものと推察される。

栄養塩 *H. circularisquama* の赤潮期間中、DINは10 μM前後存在しており、比較的高い値であった。しかし、DIPの濃度はDINに比較すると極端に少なく、DIN/DIPは60を越えていた。本湾におけるリンの動態には、太田川の河川水量が深く関与している(田中1995)。1995年の降水量は、例年に比較して極端に少なかったため、太田川等陸水からもたらされるリンの量も低かったと推察される。

本種のDIPの最小細胞含量はこれまで知られている赤潮生物の中でも比較的小さい(山口1996)。このことは、他の赤潮生物と比較して、リンの濃度が少なくてもある程度増殖できることを意味している。また、DIP以外に溶存態有機リン(DOP)も利用できることが明らかに

なっている(山口1996)。本赤潮が低DIP濃度下で増殖し、長期間赤潮を形成した背景には、このような生理学的な特性があるものと考えられる。

***H. circularisquama* と競合生物・捕食生物との関係** *H. circularisquama* 赤潮発生期の植物プランクトン相で最も特徴的なことは、珪藻群の細胞密度が低かったことである。広島湾の沿岸部における珪藻の秋季ブルームは9月頃発生し、10月以降になると徐々に現存量が減少し始める(山口1995)。1995年の場合、ネットプランクトンの現存量から推察すると、珪藻等の秋季ブルームは10月中旬以降急激に衰退してしまったことが推察される。珪藻類が急激に衰退した原因は不明であるが、降水量が少なかったため、河川からの栄養塩、特にDIPの補給が極端に少なかったことが影響していたものと推察される。他の赤潮鞭毛藻においても、競合生物である珪藻の現存量が減少した後に、急激な増殖が起こることが知られている(Kondo et al. 1990)。

Uchida et al. (1996)によれば、珪藻と一緒に培養された*H. circularisquama* は、細胞が球形化してその増殖が著しく抑制される。また、英虞湾における4年間の観測結果においても、*H. circularisquama* と珪藻の出現密度との間には明瞭な逆相関が認められる(三重県水産技術センター・小林智彦氏、私信)。このように、本種赤潮の発生には、水温、塩分、栄養塩といった物理化学的な要因とともに、競合生物としての珪藻の動態も関連性があるように考えられる。1996年秋季の広島湾西部では、珪藻群が衰退した後に、低DIP濃度下でも増殖可能な*H. circularisquama* が優占し、赤潮を形成したのと考えられる。

本種を摂食する生物としては、動物プランクトン、絨毛虫類、従属栄養鞭毛藻などが考えられるが、いずれの現存量とも赤潮期間中は少なかった。本種の赤潮が長期間持続し、しかもゆるやかに減少に転じたのは、こうした捕食生物の摂食圧の低かったことも影響しているものと考えられる。

2. *H. circularisquama* 赤潮による漁業被害と二枚貝への影響

マガキおよびムラサキイガイの斃死実験 *H. circularisquama* に暴露されたマガキの場合、clapping や外套膜の収縮を引き起こしながら、60 時間以内に斃死した。これらの結果は、英虞湾で発生した *H. circularisquama* 赤潮時におけるアコヤガイの観察事例とよく一致する (Matsuyama et al. 1996)。ムラサキイガイの場合、Stn. 1 ($1,000 - 3,000 \text{ cells ml}^{-1}$) での斃死率は 9.5% と低かったものの、細胞密度が $3,500 - 9,000 \text{ cells ml}^{-1}$ と比較的高く推移した Stn. 3 での斃死率は 30% に及んでいた (天然個体の観察結果)。さらに室内実験 ($10,000 \text{ cells ml}^{-1}$) では 4 日間で 85% もの個体が斃死した。室内実験に供した個体は小型の稚貝であること、また、斃死実験時の温度が 22°C と現場よりかなり高かったことから、赤潮現場で得られた結果と同一に論じることはできない。しかし、Stn. 1 で得られたムラサキイガイの低い斃死率は、*H. circularisquama* の細胞密度が急激な斃死を引き起こす細胞密度にまで至っていなかったためであろうと考えられる。

英虞湾における観察においても、*H. circularisquama* 細胞密度が $1,000 - 2,000 \text{ cells ml}^{-1}$ ではアコヤガイの顕著な斃死は起こらないが、 $4,000 - 6,000 \text{ cells ml}^{-1}$ に至ると急激な斃死が観察されている (Matsuyama et al. 1996)。同様の結果は培養株を用いた室内実験でも確認されている (Nagai et al. 1996)。今回の広島湾における赤潮の場合、Stn. 3 を除けば、細胞密度は $1,000 - 3,000 \text{ cells ml}^{-1}$ の範囲で推移しており、大部分の海域では $4,000 \text{ cells ml}^{-1}$ を越えることはなかった。こうしたことから、ムラサキイガイの顕著な斃死は、アコヤガイと同様に、*H. circularisquama* の細胞密度が $4,000 - 6,000 \text{ cells ml}^{-1}$ で始まると考えられる。

なお、マガキは Stn. 1 および Stn. 3 のいずれの地点においても、ムラサキイガイを大きく上回る斃死率を記録した。この結果から、マガキはアコヤガイやムラサキイガイと比べてより低密度の *H. circularisquama* で斃死すると言える。

今回の結果から推察すると、*H. circularisquama* の細胞密度が $1000 - 3000 \text{ cells ml}^{-1}$ でマガキの顕著な斃死が始まると推察された。今後室内実験で二枚貝の斃死と *H. circularisquama* 細胞密度との関係を確認して行く必要がある。

なお、赤潮期間中、溶存酸素の測定は行わなかったが、二枚貝以外のベントス群集に全く異常は認められなかったことなどを考慮すると、極端な貧酸素状態は発生していなかったものと推察された。

マガキおよびムラサキイガイの濾水量に及ぼす影響 *H. circularisquama* の細胞密度が $700 \text{ cells ml}^{-1}$ におけるマガキの濾水量は、対照区の 8% まで低下した。 $700 \text{ cells ml}^{-1}$ においても、clapping などの顕著な拒否反応が認められた。ムラサキイガイについても、濾水量は 11% まで低下した。培養株を使った実験によると、マガキは 20 cells ml^{-1} 以上の細胞密度で (松山, 未発表)、ムラサキイガイは 50 cells ml^{-1} の細胞密度で (Matsuyama et al. 1997) 濾水量が有意に減少し始める。このように、*H. circularisquama* の場合、斃死が起こらない低密度であっても、濾水活動などを顕著に阻害する。従って、現場においても、濾水量の低下は $20 - 50 \text{ cells ml}^{-1}$ 付近から始まると考えられる。濾水量の低下は摂餌能力や酸素の消費を著しく阻害するので、生理状態に悪影響を及ぼすことが考えられる。

こうした結果から推察すると、11 月中旬から下旬にかけて高密度の *H. circularisquama* 赤潮による斃死を免れたマガキやムラサキイガイでも、細胞密度が $20 - 50 \text{ cells ml}^{-1}$ を下回るようになった 12 月中旬までは、餌料摂取や酸素の取り込みが十分に行われず、劣悪な生理状態に陥っていたものと考えられた。実際にカキなどの場合、赤潮終息後 (12 月中旬以降) も斃死が引き続き継続したり、身入りが回復しない現象が見られた。

3. 広島湾における *H. circularisquama* 赤潮の発生機構及び対策

H. circularisquama の赤潮は、これまで (1996

年10月現在) 確認されているだけで、全国で19回発生しているが、秋季(10月以降)に発生したのは、今回も含めて2回のみで、ほとんどが夏季の高水温期に発生している。室内実験では本種は高水温・高塩分で増殖が活発であり、水温が15°C以上、塩分が25‰以下になると増殖は急激に遅くなる(山口1996)。このように本種赤潮の発生時期は、過去の発生状況および、増殖至適水温から判断して夏季の可能性が最も高い。

今回の場合、赤潮は*H. circularisquama*の増殖可能な水温の下限付近で発生した。水温が増殖できる下限域付近であっても、海水交換が著しく低い海域で、しかも塩分が高い状態が続き、また珪藻類など競合する植物プランクトンの密度が低い状態が続くと、本種がゆるやかながら増殖して赤潮を形成する可能性がある。1995年秋季の大野瀬戸の海況は、こうした条件が満たされていたものと考えられる。こうした状況を考慮すると、*H. circularisquama*の赤潮は夏季を中心に発生するものの、珪藻類の秋季ブルームが終わった直後の秋季でも、急激に増殖する可能性が高いと考えられる。

今後*H. circularisquama*が高水温期に出現した場合、その増殖速度は今回よりもかなり早くなると考えられる。従って、夏季に出現した場合は、大野瀬戸以外の海水交換が比較的良好な海域でも赤潮を形成する可能は十分に考えられる。従って、モニタリングや避難体制は、今回赤潮の発生が見られなかった他の広島湾海域でも広く確立すべきである。

本種の赤潮による漁業被害を防止するためには、その出現をできるだけ早い時期に察知し、対策を講じることが重要である。そのためにも*H. circularisquama*の細胞密度を低密度な状態からモニターする必要がある。本種は固定濃縮や遠沈濃縮によって形態変化を起こしたり、遊泳を停止させてしまうので、これらの濃縮法は用いることができない。本研究で用いた方法は、5-10 μm程度のポアサイズを持つフィルターによる自然濾過濃縮とその後の静置培養を組み合わせたものである。この方法を用いれば、藻体に対する物理的ダメージが最小に抑えられ、

たとえ鎧版を失った個体であっても、ほとんどが一晩で元の遊泳細胞に回復した。

今回の*H. circularisquama*赤潮時に観察された細胞密度は、これまで他の海域で観察されたレベルに比べれば若干低かった。英虞湾での発生規模と比較すれば、今回の広島湾の赤潮は中規模程度の発生といえる。英虞湾においては、本種の細胞密度が5,000-10,000 cells ml⁻¹を越えることも珍しくなく、最高で87,420 cells ml⁻¹を記録したこともある(松山他1995)。英虞湾と比較して赤潮の規模が小さかったにも拘わらず、今回漁業被害が大きくなったのは、赤潮が長期に及んだことが最大の原因であると考えられる。前述のように顕著な斃死が始まったのは赤潮発生から約10日間経過してからであった。今後本種の赤潮が引き続き発生するかどうかは全く不明であるが、二枚貝の斃死は*H. circularisquama*の細胞密度が増加するにつれ、指数対数的に増加する傾向にある(Nagai et al. 1996)。室内実験が示すとおり、10,000 cells ml⁻¹を越えるとマガキは2-3日間で100%近く斃死するものと考えられる。従って、もし今回の規模を上回る赤潮が発生するとすれば、斃死に至る期間はさらに短くなり、斃死率も急激に高くなると考えられる。

要 約

1. *H. circularisquama* 赤潮の発生規模

1995年11月から12月にかけて、広島湾で*H. circularisquama*の赤潮が発生した。本種の赤潮が瀬戸内海で発生したのはこれが初めてであった。この赤潮で、マガキやアサリに3億2500万円もの漁業被害が生じた。赤潮海域は大野瀬戸に限られたが、この原因はこの付近の海水交換が著しく低いためであると考えられた。また、本種遊泳細胞は主に水深0-2mの表層を中心に分布していた。

2. 赤潮発生と海況の関連

*H. circularisquama*出現水温は11.3-17.8°C、赤潮時の水温は14.7-17.8°Cの範囲にあった。水温が15°Cを下回ると細胞密度は減少した。し

かし、分裂中の細胞は 11.8°C においても観察された。降水量が少なかったため塩分は 31.8–32.2 の範囲と高めに推移していた。競合する珪藻類などの他種プランクトン、あるいは補食生物は赤潮期間中低い密度で推移した。

3. *H. circularisquama* 発生による二枚貝斃死の実態

赤潮期間中マガキで 10–90%、ムラサキイガイで 10–30% の斃死が観察された。漁港内など局地的に細胞密度が高かった海域を除けば、斃死率はマガキで 10–30%、ムラサキイガイで約 10% であった。*H. circularisquama* の細胞密度が高い海域や細胞の多い表層に近い所の個体ほど斃死率が高かった。また、10,000–11,200 cells ml⁻¹ の *H. circularisquama* を用いて斃死実験を行った結果、マガキは 2–3 日間で、ムラサキイガイは 4 日間でほとんど斃死した。

謝 辞

本調査を行うにあたり、多大なご協力を戴いた広島県水産試験場の大内晟博士、赤繁悟博士および西井祥則氏、大野町役場の村上雅信氏をはじめとする各位、広島県農林事務所の各位、広島市水産振興協会の各位に心から感謝する。また、赤潮の発生状況や被害の状況について有益な情報を提供戴いた浜毛保漁業協同組合長の浜崎富彦氏をはじめ、大野町漁業協同組合、大野漁業協同組合、玖波漁業協同組合、広島市漁業協同組合、西能美漁業協同組合の組合員の各位にお礼を申し上げます。*H. circularisquama* の発生状況について、情報等の周知徹底にご協力戴いた広島県農政部の平本義春係長をはじめとする各位に厚く御礼を申し上げます。また、調査等で多大なご協力と情報提供を戴いた南西海区水産研究所資源増殖部の石岡宏子博士、薄浩則氏、濱口昌己博士、後藤幹夫氏の各位に感謝する。PSP と DSP の分析は、科学技術振興事業団特別研究員の坂本節子博士の尽力による。

文 献

- Anderson, D. M., 1994: Red tide. *Scientific American*, **271**, 52–58.
- Burkholder, J. M., E. D. Noga, C. H. Hobbs and H. B. Glasgow, Jr., 1992: New "phantom" dinoflagellate is the causative agent of major estuarine fish kills. *Nature*, **358**, 407–410.
- 古畑和哉・柿野純・深山義文・福与康夫, 1996: チョウセンハマグリ殻内に混入した有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium* 属シストの簡便な除去方法について. 日水誌, **62**, 813–814.
- Hallegraeff, G. M., 1993: A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, **32**, 79–99.
- Honjo, T., S. Yamamoto, O. Nakamura and M. Yamaguchi, 1990: Annual cycle of motile cells of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during the period of red tide development. In "Toxic marine Phytoplankton" (ed. by E. Graneli, B. Sundstrom, L. Edler, and D.M. Anderson), Elsevier, New York, 168–170.
- Honjo T., M. Yamaguchi, O. Nakamura, S. Yamamoto and A. Ouchi, 1991: A relationship between winter temperature and the timing of summer *Gymnodinium nagasakiense* red tides in Gokasyo Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 1679–1682.
- Honjo, T., 1994: The biology and prediction of representative red tides associated with fish kills in Japan. *Rev. Fish. Sci.*, **2**, 225–253.
- Horiguchi, T., 1995: *Heterocapsa circularisquama* sp. nov. (Peridinales, Dinophyceae): a new marine dinoflagellate causing mass mortality of bivalves in Japan. *Phycol. Res.*, **43**, 129–136.
- 広島地方気象台, 1995: 広島県気象月報. 平成 7 年 1 月～12 月.
- 今井一郎・山口峰生・板倉茂・長崎慶三・松山幸彦・内田卓志・神山孝史・板岡陸・玉井恭一・本城凡夫・吉田正雄・大塚弘之・萩平将, 1994: 珪藻類を用いた *Chattonella* 赤潮の生態学的制御技術の基礎の確立. 有害赤潮の生態学的制御による被害防止技術の開発に関する研究報告書. 153–165
- Kondo, K., Y. Seike and Y. Date, 1990: Red tides in the brackish lake Nakanoumi (II) Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bull. Plankton. Soc. Japan*, **34**, 19–34.
- 松山幸彦・永井清仁・水口忠久・藤原正嗣・石村美佐・山口峰生・内田卓志・本城凡夫, 1995: 1992

- 年に英虞湾において発生した *Heterocapsa* sp. 赤潮発生期の環境特性とアコヤガイ斃死の特徴について. 日水誌, **61**, 35-41.
- Matsuyama, Y., K. Nagai, M. Ishimura, A. Nishimura, M. Yamaguchi, T. Uchida and T. Honjo, 1996: Biological and environmental aspects of noxious dinoflagellates red tides by *Heterocapsa circularisquama* in the west Japan. Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris p. 247-250
- Matsuyama, Y., T. Uchida and T. Honjo, 1997: Toxic effects of the dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on clearance rate of the blue mussel *Mytilus galloprovincialis*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **146**, 73-80.
- Matsuyama, Y. and T. Uchida, 1997: Simplified method for measurement of clearance rate to assess the effect of microalgae on bivalve. Bull. Nansei. Natl. Fish. Res. Inst., **30**, 183-188.
- Nagai, K., Y. Matsuyama, T. Uchida, M. Yamaguchi, M. Ishimura, A. Nishimura, S. Akamatsu and T. Honjo, 1996: Toxicity and LD₅₀ levels of the red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on juvenile pearl oysters. Aquaculture **144**, 149-154.
- Rosenberg, R., O. Lindahl and H. Blanck, 1988: Silent spring in the sea. *Ambio*, **17**, 289-290.
- Smayda, T. J. and T. Villareal, 1989: The 1985 "brown tide" and the open phytoplankton niche in Narragansett Bay during summer. In: E. M. Cosper, V. M. Bricelj, and E. J. Carpenter (eds.), *Novel Phytoplankton Blooms*, Springer-Verlag, NY, pp. 159-187.
- Shumway, S. E., 1990: A review of the effects of algal blooms on shellfish and aquaculture. *J. World Aquaculture Soc.*, **21**, 65-104.
- Strickland J. D. H. and T. R. Parsons, 1972: A practical handbook of seawater analysis. 2nd. Ed. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, **167**, 310 pp.
- 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所, 1996: 平成7年瀬戸内海の赤潮.
- 田中勝久, 1995: 沿岸・河口域のリン循環過程におよぼす土壌物質の影響. 南西水研報, **28**, 73-119.
- 寺田和夫・池内仁・高山晴義, 1987: 冬季の周防灘で観察された *Gymnodinium nagasakiense*. 日本プランクトン学会報, **34**, 201-203.
- 杜田哲・阿保勝之・本城凡夫・山口峰生・松山幸彦, 1993: 追間浦における *Gymnodinium* 赤潮の発生に及ぼす海水交換の影響. 海岸工学論文集, **40**, 996-1000.
- 中国工業技術試験所, 1986: 瀬戸内海における海水交換速度及び負荷量影響度の研究. p. 41-42.
- Uchida, T., Y. Matsuyama, M. Yamaguchi and T. Honjo, 1996: Growth interactions between a red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* and some other phytoplankton species in culture. Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, p. 369-372.
- 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康, 1985: 瀬戸内海と外洋水の海水交換. 第23回海岸工学講演会論文集, p. 742-746.
- 山口峰生・本城凡夫, 1989: 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌, **55**, 2029-2036.
- 山口峰生, 1994: *Gymnodinium nagasakiense* の赤潮発生機構と発生予知に関する生理生態学的研究. 南西水研報, **27**, 251-394.
- 山口峰生, 1995: 広島湾における植物プランクトンの現存量と光合成速度の季節変化. 南西水研報, **28**, 63-72.
- 山口峰生, 1995: 新型赤潮生物の増殖に及ぼす水温と塩分の影響. 渦鞭毛藻・ラフィド藻等新型赤潮の発生機構と予測技術の開発に関する研究, 平成6年度研究報告書, 7-12.
- 山口峰生, 1996: *Chattonella verruculosa* と *Heterocapsa circularisquama* の栄養塩利用特性. 渦鞭毛藻・ラフィド藻等新型赤潮の発生機構と予測技術の開発に関する研究, 平成7年度研究報告書, 5-9.
- 山本千裕・田中義興, 1990: 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. 福岡水試研報, **16**, 43-44.

1997年1月13日受理 (Accepted January 13, 1997)

南西海区水産研究所業績 A 第62号 (Contribution No. A62 from the Nansei National Fisheries Research Institute)

松山幸彦：南西海区水産研究所 〒739-04 広島県佐伯郡大野町丸石 2-17-5 (Y. Matsuyama: Nansei National Fisheries Research Institute, 2-17-5 Maruishi, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-04, Japan)

木村淳：広島県広島農林事務所 〒730 広島市中区基町 10-52 (A. Kimura: Hiroshima Agriculture and forestry office, 10-52 Motomachi, Naka-ku, Hiroshima 730, Japan)

藤井斉：広島市水産振興協会 〒733 広島市西区商工センター 8-5-1 (H. Fujii: Hiroshima City Marine Products Promotion Foundation, 8-5-1 Shokosenter, Nish-ku, Hiroshima 733, Japan)

高山晴義：広島県水産試験場 〒737-12 安芸郡音戸町波多見 6-21-1 (H. Takayama: Hiroshima Prefectural Fisheries Experimental Station, 6-21-1 Hadami, Ondo, Aki, Hiroshima 737-12, Japan)

内田卓志：南西海区水産研究所 〒739-04 広島県佐伯郡大野町丸石 2-17-5 (T. Uchida: Nansei National Fisheries Research Institute, 2-17-5 Maruishi, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-04, Japan)