

愛媛県下波湾で観察された渦鞭毛藻 *Gonyaulax polygramma* Stein の日周鉛直移動

小泉喜嗣[†], 市川 衛², 田村成男³, 永友聖代⁴, 内田卓志⁵

Diurnal Vertical Migration of *Gonyaulax polygramma* Stein (Dinophyceae) during a Red Tide in Shitaba Bay, Ehime, Japan

Yoshitsugu KOIZUMI¹, Mamoru ICHIKAWA², Shigeo TAMURA³,
Masayo NAGATOMO⁴ and Takuji UCHIDA⁵

A bloom of *Gonyaulax polygramma* Stein was observed in Shitaba Bay, from June 29 to October 15, 1998. The density of the organism was recorded over 10^4 cells·ml⁻¹ in the surface water. Pattern of the vertical migration investigated using a fluorometer suggested *G. polygramma* migrated vertically about 19 m a day at velocities of 1.8 m·hour⁻¹. During the night surveys, bioluminescence was observed by mechanical stimulations such as stirring of the sea water, fish swimming and motions of research vessels. This indicates that *G. polygramma* is the bioluminescent dinoflagellate as reported for *Gonyaulax polyedra* Stein.

Key words: red tide, *Gonyaulax polygramma*, vertical migration, bioluminescence

はじめに

Gonyaulax polygramma Steinは細胞長35–66 μm, 幅26–56 μmの比較的大型の渦鞭毛藻で(鳥海, 1990), 国内ではこれまでに英虞湾(西川, 1900), 大村湾(塩川ほか, 1966), 大分県沿岸(水産庁, 1994)および豊後水道東岸域(以下, 宇和海)で(小泉ほか, 1996)赤潮の発生が報告されている。 *G. polygramma*は貧酸素水塊を形成する有害赤潮とし

て知られ(Taylor, 1979; Ferraz-Reyes *et al.*, 1979; Smayda, 1979; Catherine and Suzanne, 1990), 1994年に宇和海で発生した赤潮では, その後の同生物の死滅・分解により, 長期に渡り貧酸素水塊が形成され魚類が大量斃死した(小泉ほか, 1996)。近年, 西日本沿岸の各地では, *G. polygramma*による赤潮の形成が報告され(水産庁, 1999), 有害赤潮としての認識の高まりとともにその動向が重要視されている。

*G. polygramma*が属する海産鞭毛藻類は一般に鉛直移動を行うことが知られ(飯塚・入江, 1966; Eppley *et al.*, 1968; Honjo *et al.*, 1990; Kamykowski, 1995; Koizumi *et al.*, 1996), 鉛直移動能力は主としてその能力を持たない珪藻類との種間競争に打ち勝つための生態的特徴の一つであると考えられている(Honjo *et al.*, 1990)。 *G. polygramma*の日周鉛直移動については, Kamykowski (1980)が水深15 mと32 mの間で1.8 m·hour⁻¹の移動速度を観測し, 小泉ほか(1996)が夜間の*in vivo*クロロフィル蛍光値の鉛直分布に基づいてその可能性を示唆しているが, その詳細は明らかとなっていない。

本報では1998年に宇和海の中央に位置する下波湾(Fig. 1)で発生した*G. polygramma*赤潮時に, それらの日周鉛直移動の詳細を捉えるとともに, 夜間の発光現象を観察したので報告する。

2000年8月7日受付, 2001年9月8日受理

¹ 愛媛県宇和島地方局水産課 〒798-0004 愛媛県宇和島市天神7-1

Ehime Prefectural Uwajima Regional Office Fishery Division, Tenjin, Uwajima, Ehime, 798-8511, Japan

² 愛媛県水産試験場 〒798-0104 愛媛県宇和島市下波5516

Ehime Prefectural Fisheries Experimental Station, Shitaba, Uwajima, Ehime, 798-0104, Japan

³ 愛媛県栽培漁業センター 〒798-0104 愛媛県宇和島市下波5516

Ehime Prefectural Fish Farming Center, Shitaba, Uwajima, Ehime, 798-0104, Japan

⁴ 宮崎県水産試験場 〒889-2162 宮崎県宮崎市青島6丁目16番3号

Fisheries Experiment Station MIYAZAKI Prefecture, Aoshima, Miyazaki, Miyazaki, 889-2162, Japan

⁵ 瀬戸内海区水産研究所 〒739-0452 広島県佐伯郡大野町丸石2-17-5

National Research Institute of Fisheries and Environment of Seto Inland Sea, Maruishi, Ohno-cho, Saeki, Hiroshima, 739-0452, Japan

[†] E-mail: y-koikoi@air.linkclub.or.jp

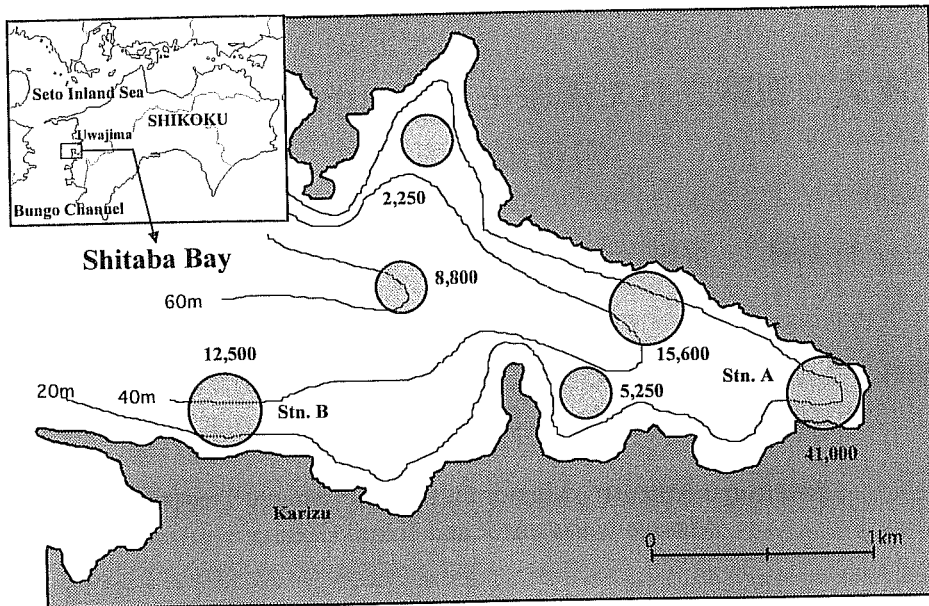


Figure 1. Location of sampling stations in Shitaba Bay, Bungo Channel, Japan. Fluorimetric observations were carried out at Stn. A. Circles show the cell density (cells·ml⁻¹) of *Gonyaulax polygramma* on 21 August 1998.

材料と方法

下波湾における *G. polygramma* 赤潮の発生状況を把握するため、赤潮による着色域が出現した1998年8月17日以降8月31日まで毎日、湾口に位置する Stn. B (Fig. 1) および湾内の赤潮発生域において表層水を採取し、顕微鏡下で *G. polygramma* 遊泳細胞を計数した。湾のほぼ全域が赤潮によって着色した8月22日14時00分から翌23日11時30分の間に、最も高濃度の赤潮が形成された湾奥の Stn. A (Fig. 1) において、現場投入型蛍光光度計 (アレック電子 (株) 製 ACL-1151DK) を用いて連続観測を行った。観測は60~120分間隔で計19回、0.1m毎の *in vivo* クロロフィル蛍光値 (以下蛍光値) および水温・塩分を測定した。更に、この観測時に表層および任意の水深から海水を採取し (計38検体)、同蛍光光度計により海水の蛍光値を測定するとともに、*G. polygramma* 遊泳細胞数を上記と同様に計数した。

結果

1. *Gonyaulax polygramma* 赤潮発生状況

下波湾 (Fig. 1) では8月8日に Stn. B の3m層で16 cells·ml⁻¹ の *G. polygramma* 遊泳細胞が初確認されたが、8月16日までは湾内に顕著な着色域は出現しなかった。8月17日に湾奥を中心として10³ cells·ml⁻¹ を超える着色域が出現し、8月19日には一部海域で10⁴ cells·ml⁻¹ を超え、翌20日には湾内のほぼ全域が赤潮によって着色した。湾内全域を覆う赤潮はその後8月23日まで継続し、遊泳細胞の最高密度は8月21日に Stn. A で4.1×10⁴ cells·ml⁻¹ に達した (Fig. 1)。

湾奥では8月22日以降、*G. polygramma* の死滅・分解に

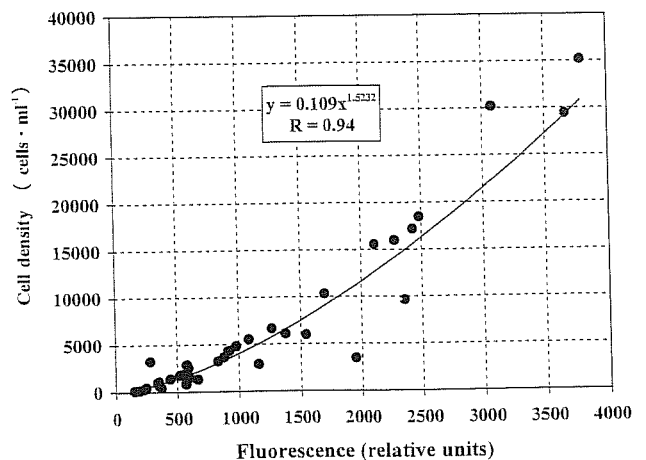


Figure 2. Relationship between cell density and *in vivo* fluorescence of *Gonyaulax polygramma*. Samples (n=38) from various layers at Stn. A.

よると思われる貧酸素水塊の形成とともに海水は腐敗臭を呈したが、8月24日以降に発生した急潮 (cf. Takeoka and Yoshimura, 1988) とその後の低温水の侵入による顕著な海水交換作用 (小泉, 1991) によって、赤潮は急速に消滅に向かった。

2. *Gonyaulax polygramma* の鉛直移動

Stn. A (Fig. 1) における連続観測時に採取した海水 (38検体) の蛍光値と *G. polygramma* 遊泳細胞との間には顕著な相関関係 ($r=0.94$) が認められた (Fig. 2)。顕微鏡下では *G. polygramma* 以外にも *Protoperidinium* sp. および *Ceratium*

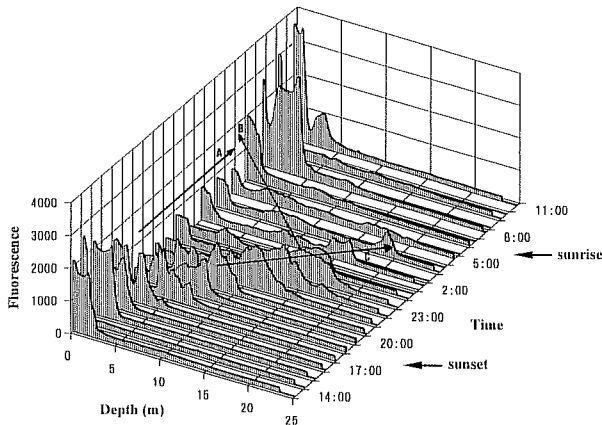


Figure 3. Changes in vertical profiles of fluorescence (relative units) during the *Gonyaulax polygramma* bloom from 22 to 23 August at Stn. A. The population of the *G. polygramma* was supposed to be divided into three groups, which resides in the surface layer (A), swims down and back to the surface in a day (B), and goes further down (C).

furca が観察されたが、平均細胞密度は *G. polygramma* が $6.77 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ であったのに対して、*C. furca* は $1.98 \times 10^2 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 、*Proto-peridinium* sp. は $1.95 \times 10^2 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ と低く、*G. polygramma* が全てのサンプルで第1優占種であった。従って、蛍光光度計で得られた蛍光値は主として *G. polygramma* によるものと考えられた。

G. polygramma の鉛直分布の変化を見ると (Fig. 3), 細胞群は 17時00分頃から徐々に下層へ移動を開始し、04時00分頃には 19 m 深に達した。上層への移動は下層への移動に比べて蛍光値に顕著なピークが認められず、その経時変化は明瞭でないが、07時00分頃には細胞群は表層に集積しており、*G. polygramma* が顕著な鉛直移動を行っていたことは明らかである。

これらの鉛直移動を細かく検討すると、鉛直移動を殆ど行わず夜間も表層に留まった細胞群 (A群)、17時00分頃から 01時00分頃までは下層へ移動したが、02時00分以降に顕著なピークではないが、上層へ移動したと思われる細胞群 (B群)、更に 04時00分頃まで下層への移動を続け 19 m 深程度にまで達した細胞群 (C群) に区分することができる。明瞭な蛍光値のピークが観測された水深と観測時間に基づいて、最も顕著な下層への鉛直移動を示した C 群の移動速度を求めると、その速度は約 $1.4 \text{ m} \cdot \text{hour}^{-1}$ と見積もられた。一方、02時00分以降上層へ移動を開始した B 群の上方への移動速度は約 $1.5 \text{ m} \cdot \text{hour}^{-1}$ と見積もられた。

3. 発光

夜間の調査時に、海表面は調査船の航行や魚類の遊泳等の物理的的刺激によって発光し、蛍光値と遊泳細胞数の測定のために採取した海水も採水時や検鏡時の攪拌操作により顕著に発光した。今回の観測と同じ時期に宮崎県沿岸でも同

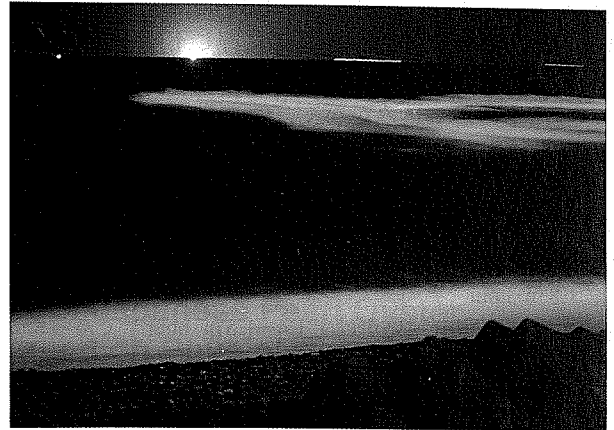


Figure 4. Bioluminescence of *Gonyaulax polygramma* at sea surface. The eastern coast of Miyazaki Prefecture on 25 August, 1998. (photographed by Miyazaki Nichinichi Shinbun).

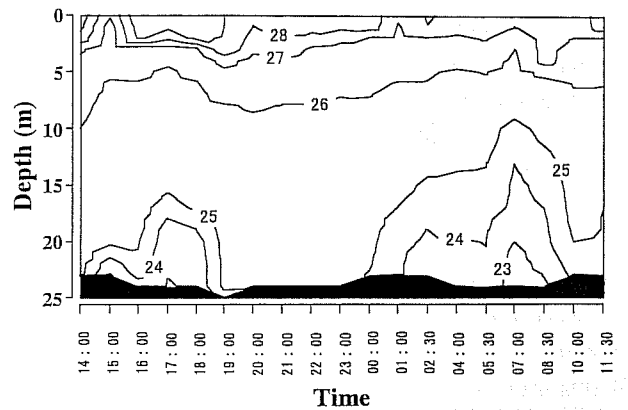


Figure 5. Changes in vertical profiles of water temperature during the *Gonyaulax polygramma* bloom from 22 to 23 August at Stn. A.

種の赤潮が観測され (永友, 1999), 宮崎日々新聞社はその鮮明な写真を紙面に掲載している (Fig. 4).

考察

1. 鉛直移動

浅海域におけるプランクトンの鉛直移動については、プランクトン自身による移動以外にも潮流等による物理的移送の影響を受ける。そこで、観測点における 1 m 毎の水温の鉛直分布変化と本種の鉛直移動との関係を検討してみる。なお、塩分の変化 ($33.06 \sim 34.02 \text{ psu}$) は水温変化 ($22.5 \sim 30.0^\circ\text{C}$) と比較して小さく、密度分布はほぼ水温分布に支配されているので、ここでは水温の鉛直分布のみ示した (Fig. 5)。水温 25°C 以下の水塊を指標として見ると、14時00分~17時00分、00時00分~07時00分の間は底層水が上

層に持ち上げられ, 17時00分~19時00分, 07時00分~10時00分の間は逆に上層水が下層に押し下げられたものと推測される。これに対し, 19時00分~00時00分の間は底層への冷水の差し込みがなく, *G. polygramma* 自身による真の移動速度を表していると考えられる。そこで, この間に蛍光値のピークが19時00分頃の4m付近から00時00分には13m付近へと移動したC群 (Fig. 3) の下層への移動速度を求めると, 先に求めた速度 $1.4\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{hour}^{-1}$ ではなく, $1.8\text{ m}\cdot\text{hour}^{-1}$ となる。つまり, *G. polygramma* の移動速度は本観測期間中, 見かけ上 $1.4\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{hour}^{-1}$ であったが, 実際には $1.8\text{ m}\cdot\text{hour}^{-1}$ あったと考えられる。これは, Kamykowski (1980) が報告している同種の移動速度 ($1.8\text{ m}\cdot\text{hour}^{-1}$) と一致する。

G. polygramma は日の入り前には下層への移動を, 日の出前には上方への移動を開始し, 07時00分頃には上層に集積した (Fig. 3)。また, B群およびC群はいずれも海底に到達することなく上方への移動を開始しており, *G. polygramma* の鉛直移動も他の鞭毛藻類で報告されている概日リズム (circadian rhythm) により支配されているという報告 (Eppley *et al.*, 1968; Kamykowski, 1995; Koizumi *et al.*, 1996) を支持する。従って, *G. polygramma* は日中には光合成を行うことのできる適度な水深に到達し, 夜間は底層の栄養塩類を利用することで, 増殖する能力を持つと考えられる。

今回と同様の手法で実施した *Gymnodinium mikimotoi* Miyake et Kominami ex Oda の鉛直移動の観察では, 殆ど全ての遊泳細胞が下層に移動したが (Koizumi *et al.*, 1996), 本観測では細胞群が3つの異なる鉛直移動パターンを示した (Fig. 3)。*G. mikimotoi* は細胞密度が $10^3\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ 以下の細胞群では鉛直移動を行わないことが報告されているので (Honjo *et al.*, 1990), これらの違いは各細胞群の増殖期の違いによる可能性も考えられる。

2. 発光

採取した海水中には *Protoperdinium* sp. が観察された。 *Protoperdinium* 属の多くは発光性の鞭毛藻類として知られているが (Sweeney 1987), 顕微鏡下では *G. polygramma* が第1優占種 ($4.0\times 10^3\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$) であったことから, 発光現象が *G. polygramma* 自身によるものであることは明らかである。 *G. polygramma* の発光に関する報告は Sweeney (1987) が未発表データとして記載しているのみであるが, 著者らは *G. polygramma* の単離培養株が暗黒下で発光することも確認しており (小泉, 未発表), これまでに報告のある同属の *Gonyaulax polyedra* Stein (Sweeney and Hastings, 1957) と同様, *G. polygramma* が発光性の渦鞭毛藻類であることが今回の現場観測から明らかとなった。

引用文献

- Catherine, W. Y. L. and S. Y. Y. Suzanne (1990) A Three-Month Red Tide Event in Hong Kong. In *Toxic Marine Phytoplankton*, eds. E. Graneli *et al.*, Elsevier, New York. 481–486.
- Eppley, R. W., O. Holm-Hansen and J. D. H. Strickland (1968) Some observations on the vertical migration of dinoflagellates. *J. Phycol.*, **4**, 333–340.
- Ferraz-Reyes, E., G. Reyes-Vasquez and I. B. Bruzual (1979) Dinoflagellate Blooms in the Gulf of Cariaco, Venezuela. In *Toxic Dinoflagellate Blooms*, eds. D. L. Taylor and H. H. Seliger, Elsevier, New York. 155–160.
- 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*, eds. E. Graneli *et al.*, Elsevier, New York. 165–170.
- 飯塚昭二・入江春彦 (1966) 1965年夏期大村湾赤潮時の海況とその被害, II 後期赤潮とその生物学的特徴について。長崎大学水産学部研究報告, **21**, 67–101.
- Kamykowski, D. (1980) Subthermocline maximums of the dinoflagellate *Gonyaulax simplex* (Lohman) Kofoid and Swezy and *Gonyaulax polygramma* Stein. *Northeast Gulf Science*, **4**, 39–43.
- Kamykowski, D. (1995) Trajectories of autotrophic marine dinoflagellates. *J. Phycol.*, **31**, 200–208.
- 小泉喜嗣 (1991) 急潮時の下波湾における海水交換過程, 沿岸海洋研究ノート, **29**, 82–89.
- 小泉喜嗣・河野慈敬・松山紀彦・内田卓志・本城凡夫 (1996) 1994年宇和島湾周辺で発生した *Gonyaulax polygramma* 赤潮の環境特性と魚介類の大量斃死。日本水産学会誌, **62**, 217–224.
- Koizumi, Y., T. Uchida and T. Honjo (1996) Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during the red tide in Hoketsu Bay, Japan. *J. Plankt. Res.*, **18**, 289–294.
- 永友聖代 (1999) 平成10年8月に日向灘で発生した大規模赤潮について。日本水産学会誌, 支部のページ, **65**, 505–506.
- 西川藤吉 (1900) 赤潮に就て。動物学雑誌, **12**, 127–133.
- 塩川 司・立石 賢・飯塚昭二・入江春彦 (1966) 1962年大村湾に発生した赤潮現象と水産被害について。長崎大学水産学部研究報告, **21**, 45–58.
- Smayda, T. (1979) The Phenomenon on Anoxia as related to Dinoflagellate Blooms. In *Toxic Dinoflagellate Blooms*, eds. D. L. Taylor and H. H. Seliger, Elsevier, New York. 456–458.
- 水産庁 (1994) 平成5年瀬戸内海の赤潮。48 pp.
- 水産庁 (1999) 平成10年瀬戸内海の赤潮。81 pp.
- Sweeney, B. M. (1987) Bioluminescence and circadian rhythms. In *The Biology of Dinoflagellates*, ed. F. J. R. Taylor, Blackwell Sci. Publ., London, 269–281.
- Sweeney, B. M. and J. W. Hastings. (1957) Characteristics of the diurnal rhythm of luminescence in *Gonyaulax polyedra*. *J. Cell. Comp. Physiol.*, **49**, 115–128.
- Takeoka, H. and T. Yoshimura. (1988) The Kyucho in Uwajima Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **44**, 6–16.
- Taylor, F. J. R. (1979) The Toxicigenic *Gonyaulacoid* Dinoflagellates. In *Toxic Dinoflagellate Blooms*, eds. D. L. Taylor and H. H. Seliger, Elsevier, New York, 47–56.
- 鳥海三郎 (1990) 日本の赤潮生物一写真と解説一, 福代康夫・高野秀昭・千原光雄・松岡数充 編, (株) 内田老鶴圃, 東京, 98–99.