

Protogonyaulax catenella (Dinophyceae) の日周鉛直移動¹⁾

竹 内 照 文

(和歌山県水産試験場)

Diel Vertical Migration of *Protogonyaulax catenella* (Dinophyceae)¹⁾

TERUFUMI TAKEUCHI

Wakayama Prefectural Fisheries Experimental Station, Kushimoto-cho,
Nishimuro-gun, Wakayama 649-35

Abstract

Diel vertical migration of *Protogonyaulax catenella* was observed in Tanabe Bay, Wakayama Prefecture, central Japan, during the spring blooms in 1984 and 1985. In 1984, this species swarmed at the surface in the daytime at a density more than 5.0×10^5 cells \cdot l $^{-1}$ (max. more than 1.0×10^6 cells \cdot l $^{-1}$) and evenly scattered into the water column at night, though swarms appeared sometimes in the bottom layer. Such a diel fluctuation of the vertical distribution was supported by that of chlorophyll *a*. The surface swarming in the daytime was also observed in 1985 at densities of 3×10^4 – 1×10^5 cells \cdot l $^{-1}$ in the surface layer, 3×10^3 – 3×10^4 cells \cdot l $^{-1}$ in the middle layer and 3×10^3 cells \cdot l $^{-1}$ in the bottom layer, while they scattered almost equally into the whole water column at night. Daytime occurrence of this species at the surface, which has a light intensity more than 10^4 lx (max. 1.2×10^5 lx), indicates to be different in light preference from a related species *Protogonyaulax tamarensis* which prefer to dim light below 5×10^3 lx. The upward migration started before sunrise and the downward migration occurred prior to sunset. Long chain colonies (4–8 cells) migrated more actively to deeper layer than solitary cells. The migration velocity was calculated to be 1.66 m \cdot h $^{-1}$ toward the surface and 2.5 m \cdot h $^{-1}$ downward, which are nearly equal to those obtained in *Gonyaulax polyedra* and *Cachonina niei*.

Protogonyaulax catenella (WHEDON & KOFOID) TAYLOR は西日本の沿岸域で広範囲に出現しており、貝類を毒化させるだけでなく、しばしば赤潮を形成 (佐々木 1979, 竹内 1985) して、養殖魚を殺すこともある (OGATA & KODAMA 1986)。魚類養殖では赤潮発生時の被害防止策の一つとして生簀網の深吊りが行われている (竹内ほか 1986)。貝類養殖の場合、毒化防止策として有毒種が高密度に分布する層を避けて貝類を垂下することが有効と考えられるが、そのためには、有毒種の鉛直分布の実態について知る必要がある。

一般に鞭毛藻類は日周鉛直移動を行い、日中は表層に分布し、夜間は底層に移動することが知られている (EPPLEY et al. 1968, 福代 1982, YAMOCIII & ABE 1984, ANDERSON & STOLZENBACH 1985)。また、夜間、底層で高濃度に分布する栄養塩を容易に取り込めることも生態学上の特徴と考えられている (EPPLEY et al. 1968, EPPLEY & HARRISON 1975, 渡辺ほか 1982, 中村・渡辺 1984)。

著者は養殖管理の立場から和歌山県田辺湾で *P. catenella* の出現生態を解明する調査を行っているが、その一環として昼夜における鉛直分布についての知見が得られたので報告する。

方 法

調査は田辺湾内ノ浦で 1984 年に 1 回、1985 年に 2 回行われた (Fig. 1)。1984 年には St. 1 で 5 月 21 日 12 時から 22 日 15 時まで 27 時間にわたり、1～3 時間間隔で、*P. catenella* の細胞数と環境要因の観測を連続的に行っ

¹⁾ 1988年11月18日受理 (Accepted 18 November 1988)

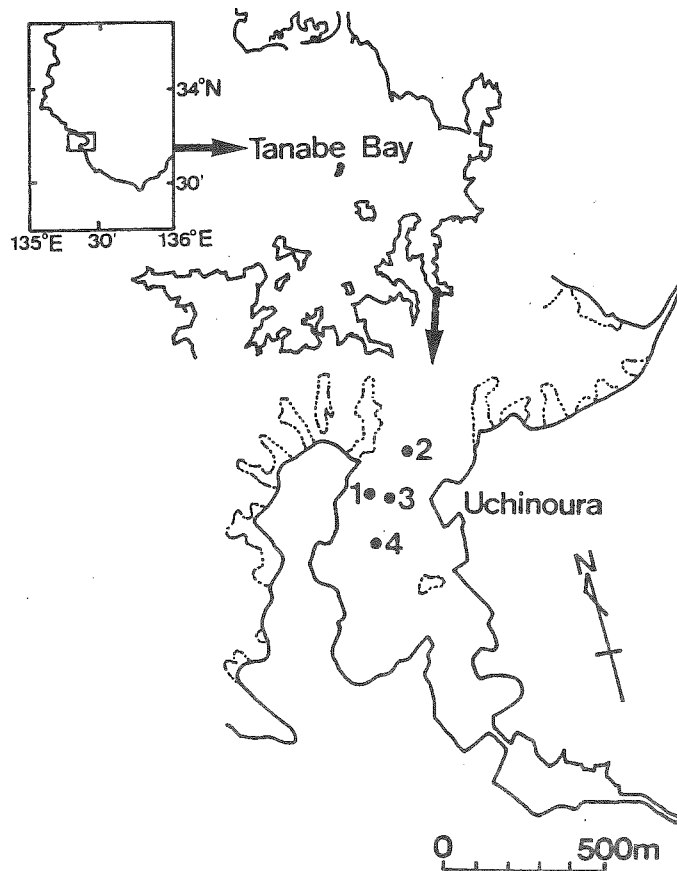


Fig. 1. Sampling stations (1-4) at Uchinoura in Tanabe Bay.

た。採水層は0, 1, 3, 5, 7, 10mと海底上15cmの7層で、10m層まではバンドーン採水器で、海底上15cm層は内径11mmのシリコン製チューブを用いたポンプによる吸引方式で、採水を行った。環境要因としては次の項目についてそれぞれの方法で測定した。すなわち、水温(棒状水銀温度計)、塩分(オートラブ社製サリノメーター)、水中照度(モンテロド・ホイットニー社製LMD-8A型)、溶存酸素量(DO, ウィンクラー・アジ化ナトリウム変法)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (インドフェノール改良法)、 $\text{NO}_2\text{-N}$ (ジアゾ化法)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (Cdカラムにより $\text{NO}_2\text{-N}$ に還元)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ (ストリックランド・パーソンズ法)、クロロフィルa(吸光度法)などである。

1985年には5月15日の12時, 22時, 16日の13時と5月22日の14時30分, 22時および23日の12時にSt. 2, 3, 4の3定点で(Fig. 1), 水温, 塩分と*P. catenella*の細胞数を観測した。採水は北原式採水器を用い, 0, 1, 3, 5, 7, 10m, および, 海底上1mの7層で行った。

*P. catenella*については1984年の調査では試料を中性ホルマリン(1%に添加)で固定し, 濃縮せずに海水1ml中の単独細胞と連鎖群体ごとの細胞数について計数した。また, 1985年には採水した200mlを孔径 $5\mu\text{m}$ のフィルターを使用し, 重力ろ過法により10~30mlに濃縮したのち, 1ml中の細胞数を計数した。

結 果

1. 1984年の観測結果

P. catenella, クロロフィルaと水中照度の鉛直分布の推移をFig. 2に示す。*P. catenella*は5月21日の19時ころまでは表層で $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上, 特に, 15~17時には表面付近で $1.0 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の分布を示した。17時から20時にかけて表層の濃密群が分散し始め, 中~底層に向かって下降していた。20~24時には表~底層間の細胞数がほぼ均一になったが, 底層付近には $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ の群が出現し, 表~中層よりもやや

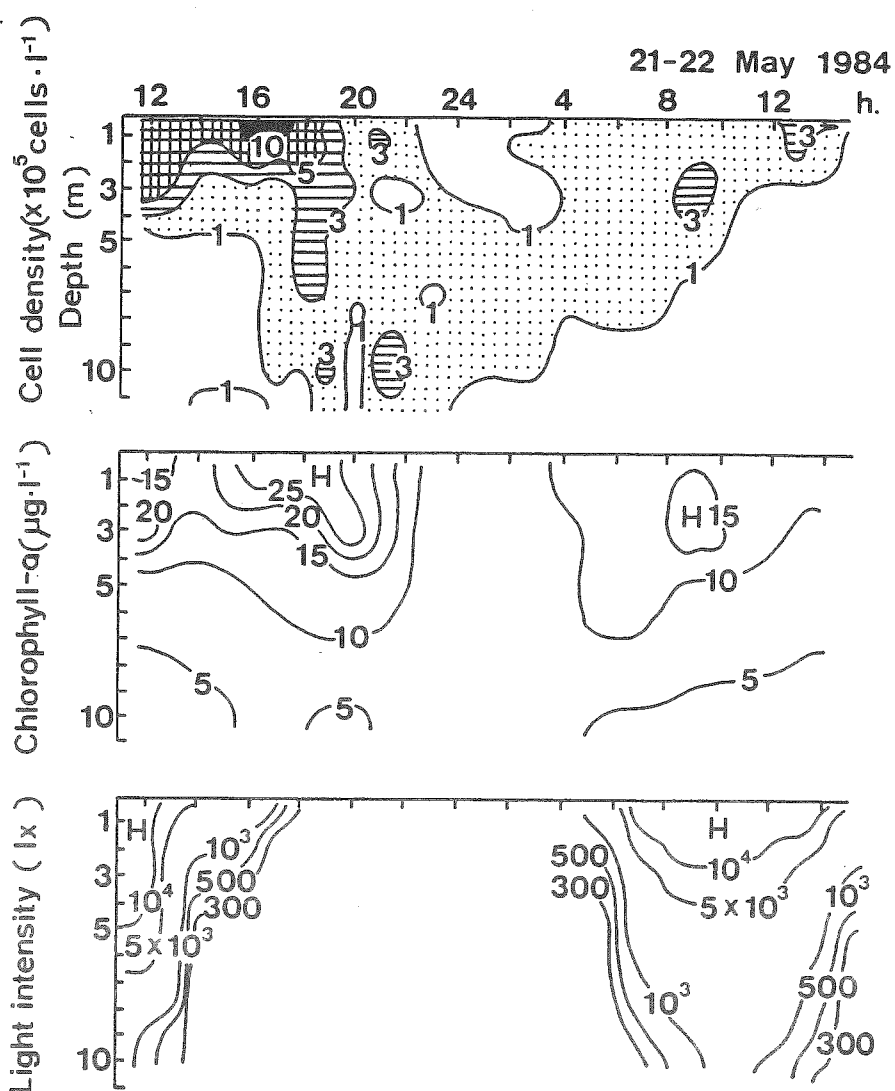


Fig. 2. Changes in vertical profiles of cell density of *Protogonyaulax catenella* (upper), chlorophyll *a* (middle) and light intensity (lower) at St. 1 in Tanabe Bay from 21 to 22 May 1984.

濃い分布を示した。24時ころから翌朝にかけて表層に向け上昇し始め、翌日の日中には再び表層が中、底層よりも濃密な分布を示した。

クロロフィル *a* は 21 日の日中は表層が $15 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上 (最大 $36.6 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)、中層が $5\sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、底層が $5 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下であった。18時ころから $15, 20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ の等値線が中層付近まで下り、本種の下降移動の状況が示唆された。また、夜間は全層が $5\sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ でほぼ均一になった。

日中、表層での照度は最高 $1.2 \times 10^5 \text{ lx}$ に達し、中～底層でも短時間ながら 10^3 lx 以上の値を示した。表層の濃密群が下降し始める時の照度は $300\sim 500 \text{ lx}$ であり、また、上昇は明け方前の暗期から始まっていた。

単独細胞と連鎖群体ごとの鉛直分布の推移を Fig. 3 に示す。日中は単独細胞、連鎖群体ともに表層に多く分布し、中～底層で少なかった。17時ころからはいずれも中～底層に向けて分散していたが、4-8 細胞連鎖群体では非常に顕著で、群として移動しているような状況が窺えた。19～24時ころには単独細胞は日中に比べると全層がほぼ均一になっていたが、連鎖群体では底層の方が表～中層よりも濃く分布していた。

表層水温は $18.7\sim 20.3^\circ\text{C}$ 、底層水温 (10 m 層) は $18.8\sim 19.3^\circ\text{C}$ で、表～底層間の水温差は約 1.0°C であ

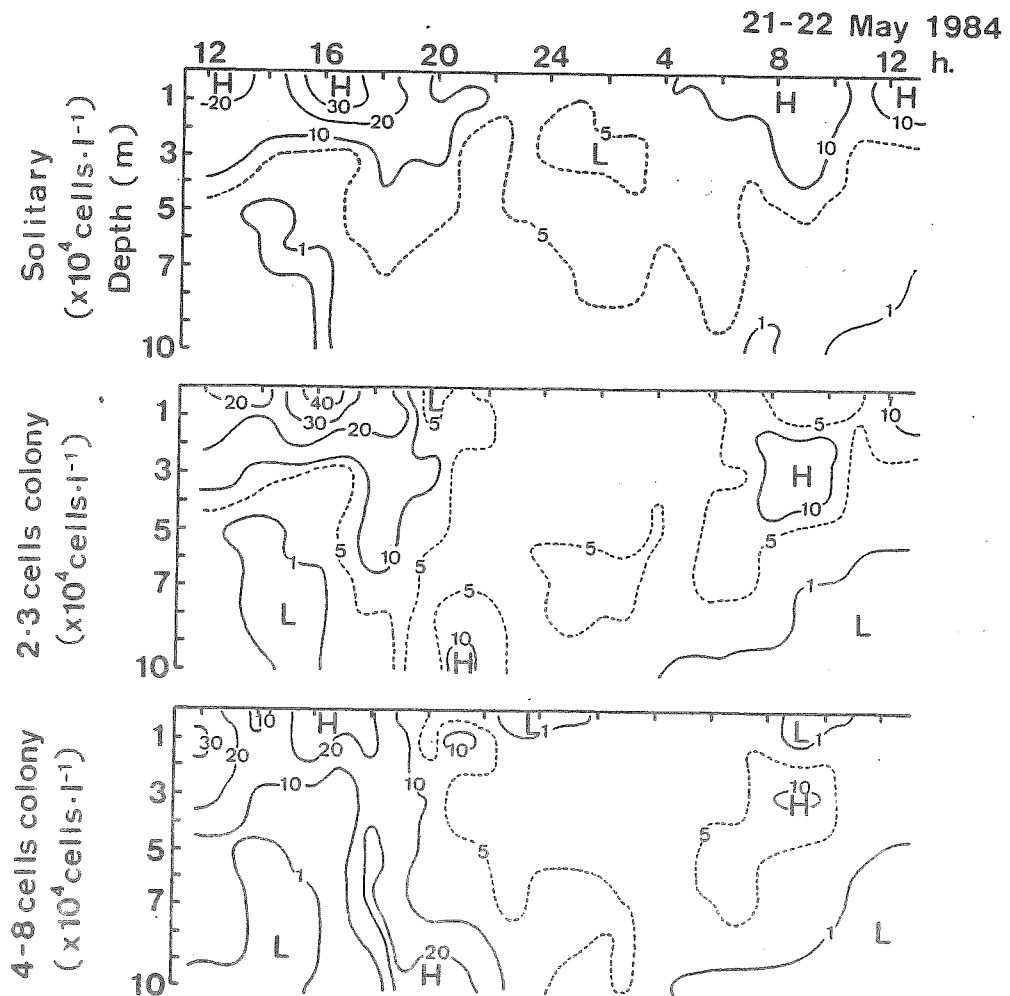


Fig. 3. Changes in vertical profiles of density of solitary cell (upper), 2-3 cells colony (middle) and 4-8 cells colony (lower) of *Protogonyaulax catenella* at St. 1 in Tanabe Bay from 21 to 22 May 1984.

った。塩分は表層が 34.00 以下，底層が 34.20 以上で推移していた (Fig. 4)。

栄養塩類のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ は $0.11\sim 2.25 \mu\text{g at}\cdot\text{l}^{-1}$ で無機態 N の中では最も多かった。このうち，21日17時ころまでの全層と夜間の中～底層では $0.5 \mu\text{g at}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下でやや少なかった。 $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ は各々 $0.17 \mu\text{g at}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下と $0.01\sim 0.60 \mu\text{g at}\cdot\text{l}^{-1}$ で非常に少なく，また， $\text{PO}_4\text{-P}$ も $0.06\sim 0.30 \mu\text{g at}\cdot\text{l}^{-1}$ で日中，夜間とも表～底層間での差があまりみられなかった (Fig. 5)。

2. 1985年の観測結果

表層水温は $20.3\sim 21.8^\circ\text{C}$ ，底層水温は $17.2\sim 19.6^\circ\text{C}$ で，表～底層間の水温差は5月15日が $1.3\sim 2.6^\circ\text{C}$ ，16日が $3.5\sim 3.9^\circ\text{C}$ であった (Fig. 6, 中段)。塩分は表層では15日が 30.00 以下，16日が $31.60\sim 32.00$ で両日とも低塩分化していた。底層は $33.40\sim 34.10$ で両日とも大きな変化はなかった (Fig. 6, 下段)。一方，*P. catenella* は5月15日の12時には表層が $3.0\times 10^4\sim 1.0\times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{l}^{-1}$ であるのに対して，中層では $3.0\times 10^3\sim 3.0\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{l}^{-1}$ ，また，底層では $3.0\times 10^3 \text{ cells}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下になり，表層で高密度に分布していた。22時には表～底層とも $10^4 \text{ cells}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下になり，日中にくらべるとうすく，しかも，全層が均一になっていた。翌日の13時には表層が $1.0\times 10^4\sim 3.0\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{l}^{-1}$ で，前日の日中にくらべるとややうすかったが，中～底層よりも濃く分布していた (Fig. 6, 上段)。

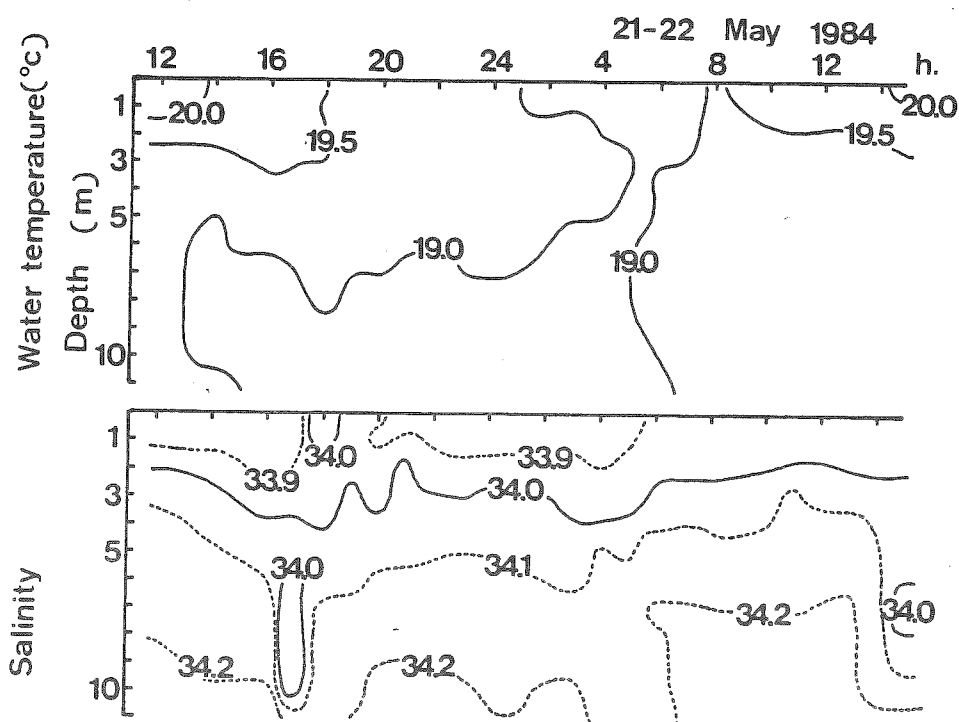


Fig. 4. Changes in vertical profiles of water temperature (upper) and salinity (lower) at St. 1 in Tanabe Bay from 21 to 22 May 1984.

5月22, 23日の水温, 塩分と *P. catenella* の鉛直断面分布を Fig. 7 に示す. 表層水温は 20.5~22.0°C, また, 底層水温は22日には 19.0~20.0°C, 23日は St. 3 が19°C 台, また, St. 2, 4 では 17°C 台になっていた. 表~底層間の水温差は22日には 1.5~2.5°C, 23日には 2.5~4.5°C であった. 塩分は表層が 29.60~32.50, 底層は22日の14時30分には33台, 22時には34台であった. また, 23日の12時には St. 3 が 33.70~33.80 であるのに対して, St. 2, 4 では 34.40~34.50 で水温と同様に定点間に差が認められた. *P. catenella* は22日14時30分には表層が $9.0 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ で最も濃く, 中, 底層では徐々に少なくなっていた. 22時には 4~8m 層が $3.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ で最も濃くなっていた. 23日12時には表層が $4.2 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ で最も濃く, 中, 底層では St. 3 を除くと $10^2, 10^3 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ のオーダーであった.

考 察

一定点の連続観測 (Fig. 2) は小潮期に行われ, 水温, 塩分の鉛直分布の推移 (Fig. 4) からは水塊の大きな変動はなかったものと考えられる. このような中で, *P. catenella* の鉛直分布に明らかな日周性が認められた. 夕方下降や明け方の上昇は明暗の光周期に若干先行して行われていることが明らかである. この時のプランクトン群集は *P. catenella* が優占しており, クロロフィル *a* の変化 (Fig. 2) からも本種の日周鉛直移動の状況は裏付けられる.

しかし, 一定点における観測では水塊の移動などにより同一群集を追跡できない可能性が考えられたので, 1985年には日中と夜間に3定点で, 本種の鉛直分布について観測を行った. その結果, 日中はいずれも *P. catenella* が表層で濃密に分布していた. 一方, 夜間は5月15, 16日 (Fig. 6) には表層と中~底層での細胞数に差がなくなり, 全層に分散していた. 5月22, 23日 (Fig. 7) には濃密群が 4~8m 層に移っていた. この層の水温, 塩分は日中の 4~8m 層の値に相当していた. このことは *P. catenella* が明らかに 4~8m 層に移動していたことを示唆している.

この2回の調査結果は *P. catenella* が一定点の連続観測でみられたような昼夜の移動を行っていることを証

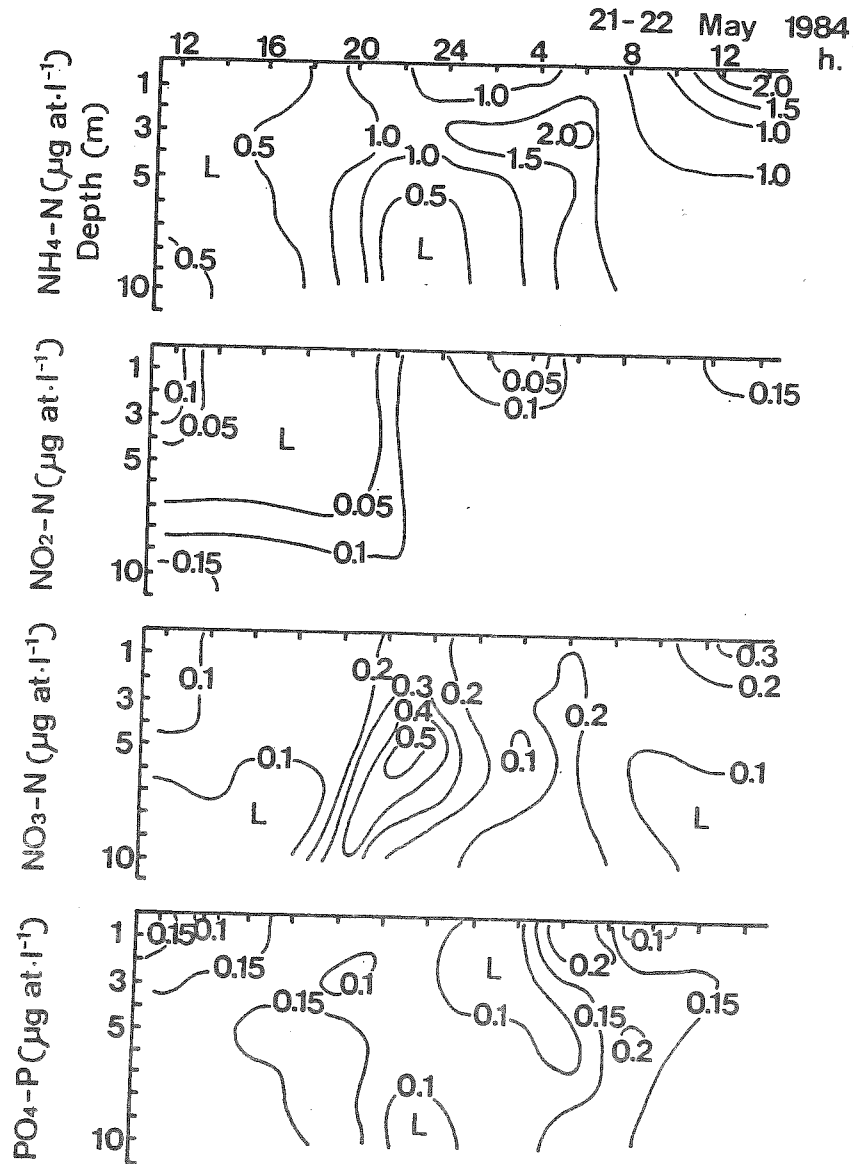


Fig. 5. Changes in vertical profiles of inorganic nitrogen (upper 3) and phosphorus (lower) at St. 1 in Tanabe Bay from 21 to 22 May 1984.

明するものであり、*P. catenella* も基本的には *Chattonella antiqua* (中村・渡辺 1984) や *Heterosigma akashiwo* (YAMOCHI & ABE 1984) とほぼ同様な日周鉛直移動をしているといえよう。ただ、夜間の分布はかならずしも同じではない。このことは本種の昼夜移動が常に同じパターンで行われるものでないことを示している。この原因としては物理、化学的な環境要因の差とともに、生物側の要因も無視できないと考えられる。すなわち、各調査時の細胞密度の差は群集の生長段階の違いを示すものと考えられ、各調査時の群集を構成する細胞にはさまざまな生理状態のものが含まれていることが想定される。培養系では増殖盛期に細胞分裂が同調的になることが知られているが、自然群集でもその生長段階により、構成する細胞の分裂等についての同調性が異なり、それが夜間の分布に影響したものと推察される。

同属の *P. tamarensis* でも日周鉛直移動が認められている。しかし、日中、表層付近まで浮上するが表面に達することがなく (福代 1982, ANDERSON & STOLZENBACH 1985), 5,000 lx 程度の深さの層に留まっている (福代 1982)。そして、その生長は 4,000 lx ($1 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} = 50 \text{ lx}$ で換算) で最も良く、それ以上では強光阻

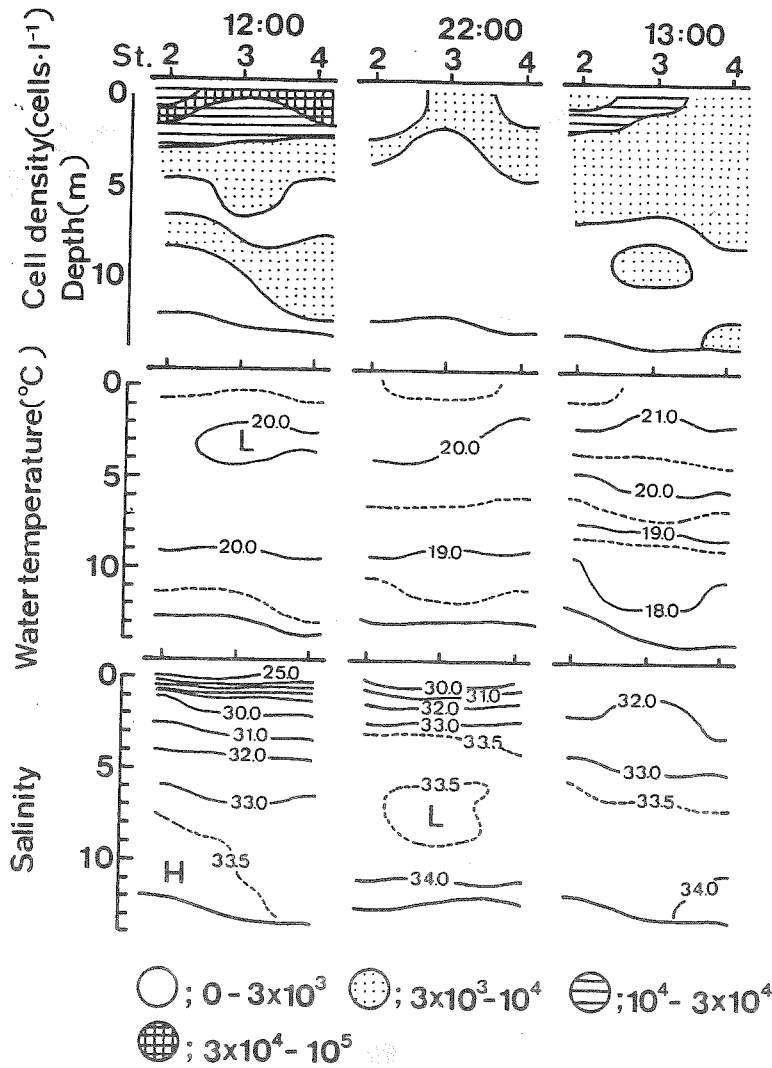


Fig. 6. Vertical profiles in cell density of *Protogonyaulax catenella* (upper), water temperature (middle) and salinity (lower) at Stns. 2-4 in Tanabe Bay, at noon and 10 pm on 22 and 1 pm on 23 May 1985.

害のおこることが知られている (石丸 1985). *P. catenella* の生長と照度との関係については不明であるが、本種は表面付近の $5.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ lx の層にも高密度に分布することが観察された (Fig. 2). これは *P. catenella* の照度に対する感受性の一面を表しており、両種の鉛直分布の差違は照度に対する感受性の差に基づくものと考えられる。

また、Fig. 2にみられる濃密群の経時変化から *P. catenella* の上、下層への移動速度を算出すると下降が約 $2.5 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、上昇が約 $1.66 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ という値が得られた。この速度は *Gonyaulax polyedra* や *Cachonina niei* の $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ (EPPLEY et al. 1968) とほぼ一致するが、*Heterosigma akashiwo* の $1.0 \sim 1.3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ (YAMOCHI & ABE 1984) や *P. tamarensis* の $0.5 \sim 0.75 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ (ANDERSON & STOLZENBACH 1985) に比べると若干高い値となっている。

観測を行った内ノ浦は栄養塩が乏しく、上下差も顕著ではないので、日周鉛直移動による栄養塩摂取の生態的意義については検討できなかった。しかし、Fig. 3にみられるように、夜間、単独細胞は中～底層よりも表層にやや濃密に分布していたのに対して、4-8細胞連鎖群は表層よりも底層に濃密に分布していた。このことは

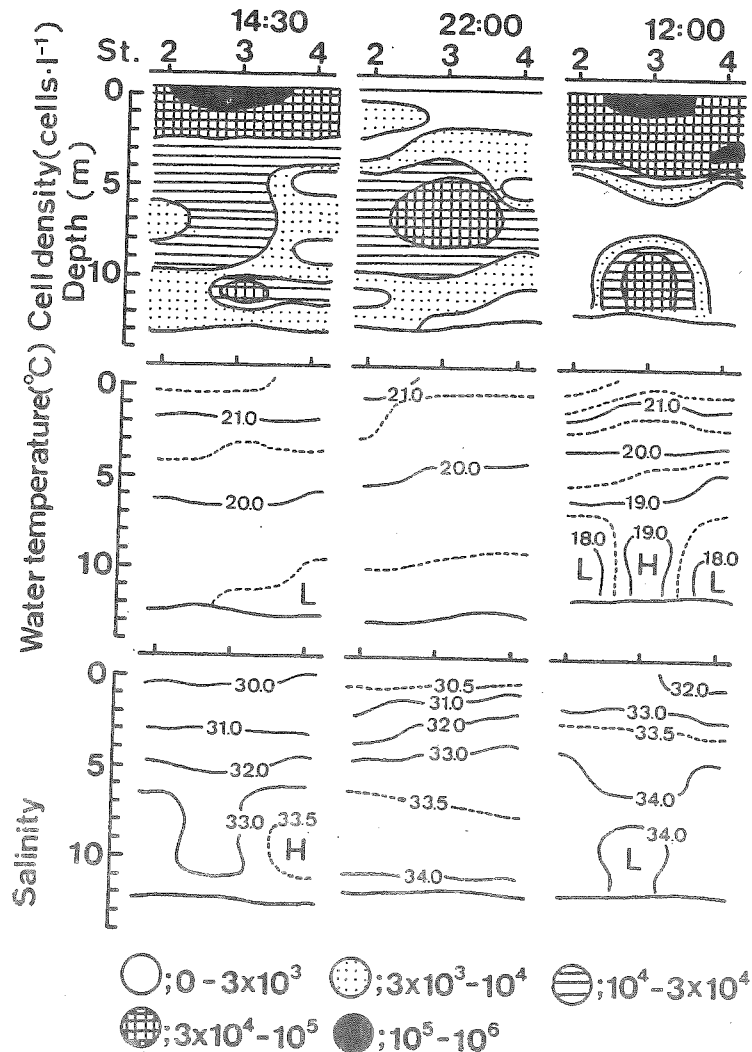


Fig. 7. Vertical profiles in cell density of *Protogonyaulax catenella* (upper), water temperature (middle) and salinity (lower) at Stns. 2-4 in Tababe Bay, at 2:30 pm and 10 pm on 22 and noon on 23 May 1985.

4-8細胞連鎖群の方が単独細胞よりも底層への移動を活発に行っていることを示唆している。本種は細胞分裂によって連鎖群を形成するので、連鎖群ほど分裂直後の細胞の割合が高いと考えられる。したがって、日周鉛直移動は細胞が生長するための何らかの意義ある行動と考えられ、単なる circadian rhythm に基づく行動とは思われない。本城 (1974) によると、*Heterosigma akashiwo* の増殖は底泥中に含まれる Fe, Mn などの微量元素によって促進されるといわれている。今後、*P. catenella* の微量元素による増殖促進効果の有無、ならびに日周鉛直移動との関連についても実験、検討する必要がある。

C. nica を用いたタンク内での観察では、日中はすべての細胞が表層に集まるが、夜間は半数の細胞が底層に移動し、このうち表層群のみが明け方に分裂する (EPPLEY et al. 1968)。*H. akashiwo* でも明け方の上昇移動時に細胞分裂を行うことが知られている (渡辺ほか 1984)。*P. catenella* でも明け方ころに集中して細胞分裂を行うことが観察されている (竹内 未発表)。ここで、夜間、表～中層に多く分布している単独細胞や比較的短い連鎖群が分裂後時間を経過した細胞群で、底層に多く分布している4-8細胞連鎖群体が分裂後まもない細胞群と仮定すると Fig. 3 において7～10時ころにみられる中層付近の2・3細胞連鎖群や4-8細胞連鎖群の $1.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の群は、夜間、中層付近に分布していた単独細胞や短い連鎖群が明け方ころに細胞分裂

し、長い連鎖群体を形成した状況を把えたものといえるかも知れない。

本研究の結果 *P. catenella* が日周鉛直移動を行うことが明らかになった。ただ、底層では、夜間においても日中表層にみられるような濃密群を形成することはなく、周日、表層よりもややうすい密度で分布していた。底層に貧酸素水塊の出現しないような水域では、貝毒シーズンには養殖貝類を深吊りすることが貝毒の蓄積を軽減する上で有効であると考えられる。

謝 辞

本稿を終えるにあたり、御指導、御教示と原稿の校閲を賜った北里大学水産学部児玉正昭教授、東京大学農学部福代康夫博士、東京大学海洋研究所石丸隆博士、ならびに現場調査等に御協力をいただいた和歌山県水産試験場芳養晴雄研究員、和歌山県内水面センター中西 一研究員に心から感謝の意を表する。

引用文献

- ANDERSON, D.M. & K.D. STOLZENBACH, 1985. Selective retention of two dinoflagellates in a well-mixed estuarine embayment: the importance of diel vertical migration and surface avoidance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 25: 39-50.
- EPPLEY, R.W. & W.G. HARRISON, 1975. Physiological ecology of *Gonyaulax polyedra*, a red water dinoflagellate of southern California, pp. 11-22. In *Proc. 1st. int. Conf. on Toxic Dinoflagellate Blooms*, (ed. LoCicero, V.R.). The Massachusetts Science and Technology Foundation, Wakefield, Massachusetts.
- EPPLEY, R.W., O. HOLM-HANSEN & J.D.H. STRICKLAND, 1968. Some observation on the vertical migration of dinoflagellates. *J. Phycol.*, 4: 333-340.
- 福代康夫, 1982. 日本沿岸における *Protogonyaulax* の分類と生態に関する研究. 東京大学学位論文, 220 pp.
- 本城凡夫, 1974. 博多湾における赤潮発生機構に関する研究—Ⅳ. 赤潮発生期の内湾環境と発生要因. 東海区水産研究所研究報告, 79: 77-121.
- 石丸 隆, 1985. “貝毒プランクトンの生物学, 4. 増殖と環境要因”. 水産学シリーズ56, 貝毒プランクトン—生物学と生態学 (福代康夫編): pp. 40-46. 恒星社厚生閣, 東京.
- 中村泰男・渡辺 信, 1984. *Chattonella antiqua* の日周鉛直移動—特にその生態的意味について. 国立公害研究所報告, No. 63: 97-102.
- OGATA, T. & M. KODAMA, 1986. Ichthyotoxicity found in cultured media of *Protogonyaulax* spp. *Mar. Biol.*, 92: 31-34.
- 佐々木正雄, 1979. 元根井港 (小松島湾) における *Gonyaulax catenella* 類似種の発生状況について—1. 徳島県水試事報 (昭和52~53年度): 346-355.
- 竹内昭文, 1985. “貝毒プランクトンの生態学. 9. 紀伊半島西岸域”. 水産学シリーズ 56. 貝毒プランクトン—生物学と生態学 (福代康夫編): pp. 98-108. 恒星社厚生閣, 東京.
- 竹内昭文・金盛浩吉・渡辺勇二郎・芳養晴雄・金丸誠司・中西 一・小川満也・竹内淳一・南 忠七, 1986. 1984年7月熊野灘南部域に出現した *Gymnodinium nagasakiense* 赤潮について (調査報告). 和歌山県水試事報 (昭和59年度): 54-111.
- 渡辺 信・中村泰男・木幡邦男, 1984. 赤潮鞭毛藻 *Heterosigma akashiwo* HADA の日周鉛直移動—特にその生態的意味について. 国立公害研究所報告, No. 63: 69-77.
- 渡辺 信・矢持 進・木幡邦男・渡辺正孝, 1982. 赤潮鞭毛藻 *Olisthodiscus luteus* の垂直移動とリン酸摂取の日周性. 国立公害研究所報告, No. 30: 131-141.
- YAMOCHI, S. & T. ABE, 1984. Mechanisms to initiate a *Heterosigma akashiwo* red tide in Osaka Bay. II. Diel vertical migration. *Mar. Biol.*, 83: 255-261.