

赤潮形成時における植物性プランクトンの 細胞容積と細胞密度との関係

松 岡 數 充

Relationship between a cell volum and a cell density in red tide causative phytoplankton

Kazumi MATSUOKA

Abstract

For reconstructing a past red tide caused by phytoplankton, we need following two parameters ; cyst formation index which shows how many cysts are produced by normal vegetative cells, and how many vegetative cells in minimum can make red-tide phenomema. In this paper, the relation between a cell volum and cell density was caliculated for clarifying cell desnity at the red-tide on the basis of previous data independently published in different literatures. The strong negative relation between two parameters was suggested.

Keywords:

渦鞭毛藻、生活史、休眠性接合子、シスト、赤潮、細胞密度、細胞容積、*Gymnodinium mikimotoi*

はじめに

渦鞭毛藻の生活史は栄養細胞から配偶子が形成され、その接合によって運動性接合子、さらに運動性を失って休眠性接合子になり、これが堆積物中に取り込まれて休眠期を過ごし、環境変化に伴って運動性減数細胞(planomeiocyte)を経て栄養細胞へと戻るといものである。堆積物に残されているのは、発芽したあるいは発芽できなかったシストである。堆積物中に残されたシストから栄養細胞の動態を推察するための基礎資料として、栄養細胞のどれほどがシストとして残存するのか(シスト形成率:cyst formation index)が必要となる。さらに栄養細胞が赤潮(異常増殖)状態になっていたか否かについてはその種の赤潮形成時の細胞密度を把握しておく必要もある。

シスト形成率については別稿で論考するので、本文では赤潮状態での細胞密度について検討する。

植物性赤潮原因プランクトンとしては珪藻をのぞくとこれまでに40種以上が知られているが、その時の細胞密度を報告している例は意外に少ない。飯塚(1985)は日本各地で出現した植物性プランクトンの最高密度をアンケート調査に基づいて明らかにしている。また Kim et al. (1993) は韓国南部沿岸域に赤潮を形成した植物性プランクトンの細胞容積と炭素含有量との関係を論じる中で、出現種の最高および最低出現密度を報告している。

感覚的には一定量の海水に含まれる最大細胞密度は、細胞容積に比例するであろう事が容易に理解されるが、定量的な議論はあまりなされていない。例えば飯塚(1985)は Siegelmann and Kycia (1979) が人工環境下で培養した細胞の大きさの異なる3種、*Amphidinium carterae*, *Cachonina niei*, *Gonyaulax excavata* (= *Alexandrium excavata*) の最大増殖量(細胞数ではない)は一定であるとの結果を引用して、ある条件で環境から引き出される生物量は種の違いと細胞の大きさとは無関係で、一定になると推測した。これは言い換えれば環境収容細胞数は細胞容積に比例することを意味している。

ある植物性プランクトンが赤潮状態にまで増殖したか否かの判断は、基本的には栄養細胞が海水を変色させたかどうかによる。それを表現するにはプランクトンの種ごとに海水中に含まれている細胞数を用いた方法が普遍的に用いられてきた。

堆積物中には栄養細胞が運動性接合子を経て形成したその後保存されたシストの残存数を直接得ることができるので、これとシスト形成率に基づいて栄養細胞の生産数を推定することが可能になる。したがってある植物性プランクトンが赤潮状態にまで増殖したか否かを判断するには、その種の最大環境収容細胞数と比較検討することが必要である。一定環境に収容される最大細胞数は、もし細胞容積のみが制限要素になるのであれば、細胞容積で一定環境容積を機械的に除すればよいが、現場で得られたこれまでの事例をみるとそうはなっていない。これは環境最大収容量に細胞容積以外の制限要因があるとみなしうるが、いまのところそれが何であるのかは不明である。

細胞容積の推定法

様々な形態を備えている微小プランクトンの細胞容積の正確な測定は困難である。しかし細胞を幾何学的立体に類似させて算出しようとする試みがなされている。今回の作業ではこれまでに異なった方法で推定された細胞容積値を引用しているので、同

一種でも異なった数値が示されている。このため異なった方法での推定にどの程度の開きがあるのかを確認しておく必要がある。ここでは3通りの方法で細胞容積が推定されている *Gymnodinium mikimotoi* を例としてその差を比較・検討した。

1) Kim et al. (1993) の方法と結果

韓国南部沿岸に発生した植物性プランクトンの細胞を球、回転楕円体、パラポロイド、円錐体、円筒、多面体などの幾何学的立体に近似してその容積を求めた。*G. mikimotoi* をこれらのどの立体に近似させたのかは示されていないが、細胞長を18-35 μm 、細胞幅を14-31 μm と測定し、その細胞容積の平均を4786 μm^3 と推定している。

2) 池田他 (1982) の方法と結果

山口県沿岸域に出現する代表的な赤潮原因プランクトンの粒径別粒子分布をコーンターカウンターを用いて把握した。*Gymnodinium* sp. type '65 (= *G. mikimotoi*) の平均細胞容積としては平均で4096 μm^3 の値を得ている。この方法は基本的に細胞を球形と見なして測定している。

3) 本論での試み

G. mikimotoi は背腹面では丸みを帯びた五角形であるが、背腹方向に圧迫されていることから横溝を境に、上錐と下錐とに分けて幾何学的に近似した立体を求めた。すなわち上錐は四角錐に、下錐は直方体に近似させ、計測値として細胞長18-37 μm 、細胞幅14-35 μm 、細胞厚6-12 μm (高山 1990) を用いた。これによって得た最大細胞容積は9472 μm^3 、最小細胞容積は1008 μm^3 で平均値は3593 μm^3 であった。

Kim et al. (1993) が得た値と本論での試算値との間には1000 μm^3 程度の開きがある。前者がどのような近似幾何学的立体を採用したのか不明であるが、あるいは本種の細胞が背腹方向に圧迫されている要素を見落としている可能性も考えられ、その場合には細胞容積はやや大きく算出されたことになる。このことを考慮すると3つの異なった方法でえられた平均的な大きさの *G. mikimotoi* の細胞容積はおおよそ3600~4800 μm^3 にはいることになり、細胞サイズの変異量(例えば長さや幅がほぼ2倍の変異)と比較すると妥当であるといえる。

しかし Kim et al. (1993) と池田他 (1984) の推定に大きな差が認められるのは *Heterosigma akashiwo* (= *H. carterae*)、*Prorocentrum minimum*、*Prorocentrum triestinum* など比較的小型の種である。これらではその差が2~3倍に及び、個体群の地域差も考えられなくもないが、それよりも細胞密度の推定方法の違いに起因するように思える。例えばこれまでに報告された赤潮状態での最大細胞密度は瀬戸内海の屋島湾で1981年6月に発生した *Prorocentrum minimum* の 8.6×10^5 cells/ml である。この値は Kim et al. (1993) の推定細胞容積1787 μm^3 では1 ml あたりの最大収容数は 5.6×10^3 cells にしかならず、自然の赤潮状態での観測結果と合わない。今のところい

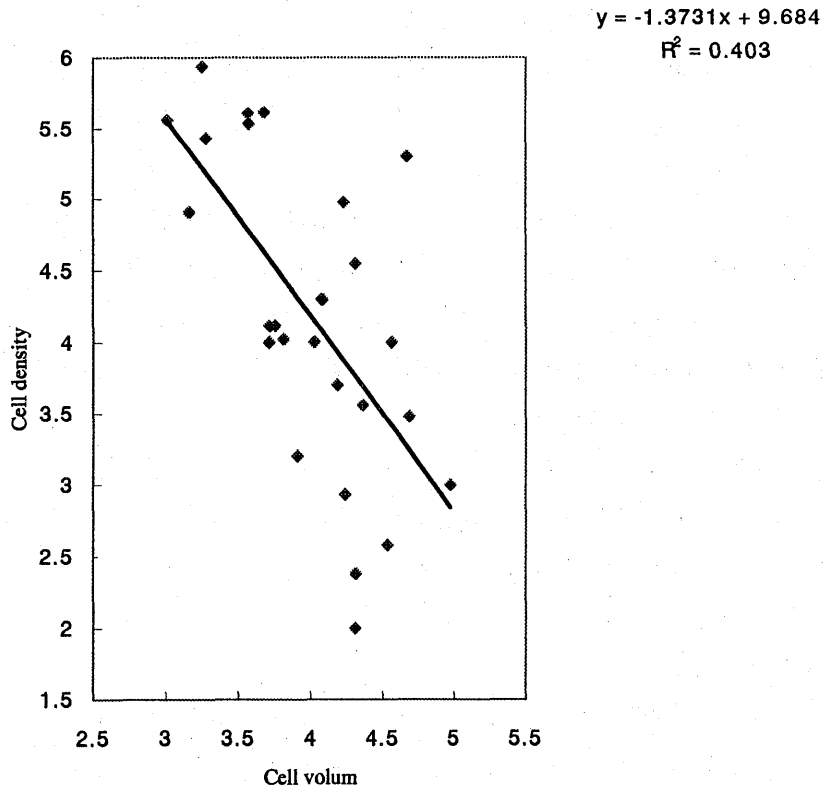


Figure 1 The correlation between cell volumes which are given by Kim et al. (1993) and the present work, and cell densities of red-tide causative phytoplankton.

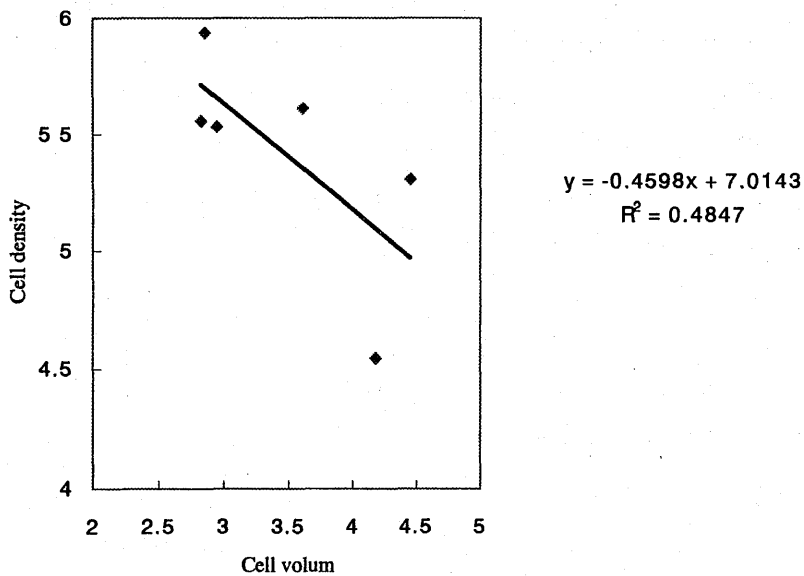


Figure 2 The correlation between cell volumes which are given by Ikeda et al. (1984) and cell densities of red-tide causative phytoplankton.

Table 1 Cell volumes of red-tide causative phytoplankton indicated by Kim et al. (1993) and newly calculated in the present work and maximum cell density in red-tide condition.

Species	Cell volum (μm^3)	(log 10)	Cell density/ml	(log 10)
<i>Prorocentrum dentatum</i>	1460	3.1643529	80000	4.90309
<i>Prorocentrum minimum</i>	1787	3.2521246	860000	5.9344985
<i>Heterocapsa triquetra</i>	3730	3.5717088	400000	5.60206
<i>Prorocentrum triestinum</i>	3768	3.5761109	340000	5.5314789
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	4786	3.6799727	410000	5.6127839
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	5754	3.7599699	13000	4.1139434
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	6561	3.81697	10500	4.0211893
<i>Alexandrium affine</i>	10671	4.0282051	10000	4
<i>Prorocentrum micans</i>	12060	4.0813473	20000	4.30103
<i>Alexandrium fraterculus</i>	12279	4.089163	20000	4.30103
<i>Gyrodinium fissum</i>	15533	4.1912553	5000	3.69897
<i>Gyrodinium instriatum</i>	17031	4.2312401	93600	4.9712758
<i>Ceratium fusus</i>	34540	4.5383223	380	2.5797836
<i>Gonyaulax polygramma</i>	36770	4.5654936	10000	4
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	47372	4.6755217	200000	5.30103
<i>Pheopolykrikos hartmannii</i>	49235	4.6922739	3000	3.4771213
<i>Gymnodinium breve</i>	5238	3.7191655	10000	4
<i>Pyrodinium bahamense</i>	17556	4.2444256	860	2.9344985
<i>Alexandrium catenella</i>	20569	4.3132132	35000	4.544068
<i>Alexandrium tamarense</i>	20569	4.3132132	240	2.3802112
<i>Alexandrium minutum</i>	8181	3.9128064	1600	3.20412
<i>Dinophysis fortii</i>	20312	4.3077527	100	2
<i>Gymnodinium</i> sp. Type-84K	1907	3.2803507	270000	5.4313638
<i>Peridinium quinquecorne</i>	5277	3.7223871	13000	4.1139434
<i>Heterosigma akashiwo</i>	1031	3.0132587	360000	5.5563025
<i>Dictyocha fibura</i>	95545	4.980208	1000	3
<i>Chattonella antiqua</i>	23059	4.3628405	3600	3.5563025

Table 2 Cell volumes of red-tide causative phytoplankton observed by Ikeda et al. (1984) and maximum cell density in red-tide condition.

Species	Cell volum (μm^3)	(log 10)	Cell density/ml	(log 10)
<i>Prorocentrum minimum</i>	724	2.8597386	860000	5.9344985
<i>Prorocentrum triestinum</i>	891	2.9498777	340000	5.5314789
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	4096	3.6123599	410000	5.6127839
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	28526	4.4552409	200000	5.30103
<i>Alexandrium catenella</i>	15286	4.1842939	35000	4.544068
<i>Heterosigma akashiwo</i>	675	2.8293038	360000	5.5563025

ずれの値がより正確であるのかを判断する手段を持たないが、今後の検討すべき課題である。

細胞容積と最大出現細胞数との関係

Siegelman and Kycia (1979) は人工培養によって得られる植物性プランクトンの最高細胞密度は *Amphidinium carterae* では 1.4×10^6 cells/ml、*Cachonina hallii* (= *Cachonina niei*) では 6.4×10^5 cells/ml、*Alexandrium excavata* (= *Gonyaulax excavata*) では 5.0×10^4 cells/ml の結果を得た。*Cachonina hallii* の細胞 (細胞長 17-20 μm 、11-12 μm ; Dodge 1982) を回転楕円体に近似してその容積を求めると、最大値は $1507 \mu\text{m}^3$ 、最小値は $1076 \mu\text{m}^3$ 、平均値が $1309 \mu\text{m}^3$ である。これが 1 ml 容積に収容されうる最大値は 9.2×10^5 cells、最小値は 6.6×10^5 cells、平均で 7.6×10^5 cells となり、実験室で得られた値とよく一致し、おそらく最適環境での最大細胞密度を示しているのであると判断される。

赤潮期間中でも細胞密度の変動は著しい。特に流れによる物理的な集積や分散があり、また他の生物による捕食や増殖抑制もあることから、自然状態では最適環境での細胞密度にまで増殖できないと推察できる。しかし本論では赤潮状態では細胞密度を支配している諸作用が相互に関与していると考えことから、これまでに観察された最高細胞密度を採用した。先に議論したように赤潮原因プランクトンの細胞容積の推定値に問題が残されているものの、異なった数値を用いてそれぞれに個別に両者の対応関係を検討した。細胞容積は最大値と最小値とのあいだに 70 倍程の、細胞数に至っては 10^3 倍程度の差が認められるので、両者とも対数値を用いてグラフを作成した。Fig. 1 は Kim et al. (1993) の値を、Fig. 2 は一部に池田他 (1984) の値を入れて両者の関係を図化した。Fig. 1 では寄与率が $R^2=0.403$ 、Fig. 2 では $R^2=0.432$ でいずれも危険率 1% 以下で、細胞容積と細胞数に強い逆相関関係のあることを示している。回帰直線はそれぞれ $Y = -1.3731X + 9.6843$ (Fig. 1) と $Y = -1.2572X + 9.108$ がえられた。これらの回帰式をさらに妥当なものにしていくためには、より適切な細胞容積の測定と自然赤潮状態での細胞数の計測数を増やすことが必要である。

謝 辞

広島県水産試験場の高山晴義氏からは植物性プランクトンの細胞容積に関する情報を提供していただいた。記して感謝の意を表します。

引用文献

- 福代康夫 1980 日本沿岸における *Protogonyaulax* の分類と生態に関する研究。東京大学博士論文220pp。
- 飯塚昭二 1985 最近のわが国沿岸内湾域における植物プランクトンの出現状況(1)―海域の最高出現細胞数に関するアンケートまとめ―日本プランクトン学会報、32:67-72。
- 飯塚昭二・上 真一 1987 群生長・生物間関係・行動生態：赤潮の科学「沿岸生態系の遷移と環境の海域特性」、91-148、恒星社厚生閣。
- 飯塚昭二 1980 赤潮生物の生態学的特性―自然環境系における生物感関係―：日本水産学会（編）赤潮―発生機構と対策―、38-49、恒星社厚生閣。
- 池田武彦・松野 進・桃山和夫 1984 粒度分布による赤潮生物の定量に関する研究。南西海区水産研究所・東海区水産研究所・水産大学校（編）大規模赤潮の形成及び赤潮被害抑止に関する研究-最近5年間の研究成果-、39-48。
- Kim, H. G., Park, J. S., Lee, S. G. and An, K. H. 1993 Population cell volum and carbon content in monospecific dinoflagellate blooms. In: Smayda T. J. and Shimizu, Y. (eds.) Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, 769-773, Elsevier Science Publishers B. V., New York.
- 竹内照文 1988 和歌山県沿岸域における麻ひ性貝毒プランクトン *Protogonyaulax catenella* の分布と出現。昭和61年度和歌山県水産試験場事業報告、p.87-96。
- Su Huei Meei 1989 The biological characteristics of *Alexandrium tamarensis* TKi collected from Taiwan. Ph.D. thesis of National Taiwan University, 156pp.