

相模湾表層における植物プランクトンの成長速度と 微小動物プランクトンの捕食速度の季節変動

¹ 橋本慎治 ² 堀本奈穂 ² 石丸隆 ³ 才野敏郎

¹ 帝京科学大学生命環境学部 ² 東京海洋大学海洋科学部 ³ 海洋研究開発機構

Seasonal variation in phytoplankton growth and microzooplankton grazing
of phytoplankton in Sagami Bay

Shinji HASHIMOTO¹ Naho HORIMOTO² Takashi ISHIMARU² Toshiro SAINO³

Phytoplankton growth (μ) and microzooplankton grazing rates (g) were estimated, based on the dilution method, in surface waters collected in central Sagami Bay from May 2002 to April 2003. The mean values of μ and g were $0.59 \pm 0.32 \text{ day}^{-1}$ ($n=12$) and $0.50 \pm 0.26 \text{ day}^{-1}$ ($n=12$), respectively. The g positively correlated with the μ ($P<0.05$). The estimated chlorophyll variation (ΔChl) was $0.09 \pm 0.19 \mu\text{g l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ($n=12$). The mean value of $\mu:g$ was 0.84 ± 1.02 ($n=12$). The low ΔChl may be due to almost the same values of g (0.50 day^{-1}) as μ (0.59 day^{-1}) on average. It is possible that phytoplankton biomass is strongly affected by microzooplankton grazing in Sagami Bay.

Key words : 植物プランクトン成長速度, 微小動物プランクトン捕食速度, 希釈培養法, クロロフィル *a*, 相模湾

1. 緒言

微小動物プランクトンは沿岸域や外洋域の様々な海域において全動物プランクトン生物量の重要な割合を構成する。海洋食物連鎖の理論研究は微小動物プランクトンが基礎生産の重要な割合を消費することを提唱した¹⁾。実際、様々な海域のフィールド研究から微小動物プランクトンが一次生産の大部分を消費していることが示された^{2,4)}。大型動物プランクトンは小型植物プランクトンを直接捕食することができない⁵⁾。一方、微小動物プランクトンは小型植物プランクトンを捕食することができる。したがって、微小動物プランクトンは小型植物プランクトンによって固定された炭素と大型動物プランクトンなどのより高次の栄養段階とをつなぐ重要な役割を演じる。これらの研究の多くは貧栄養海域や栄養塩の豊富な外洋域で行われたものであり、高生産性の沿岸域における微小動物プランクトンの重要性はよくわかっていない。

相模湾は水深が深くかなり開放的な湾である。Kamatani et al.⁶⁾ は相模湾で2年間クロロフィル *a* の測定を行い明瞭な季節変動を観測できなかった。その理由の一つとして動物プランクトンによる捕食圧の可能性を述べている。そこで本研究は希釈培養法により相模湾における微小動物プランクトンの重要性と植物プランクトン生物量における捕食圧の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 試料および方法

本研究は2002年5月から2003年4月まで毎月1回の東京海洋大学研究船「青鷹丸」の調査航海中に行われた。調査・観測点は相模湾の中央に位置するSta. S3 (35° 00' N, 139° 20' E) で行われた(図1)。

植物プランクトンの成長速度と動物プランクトンの捕食速度は希釈培養法により測定された⁷⁾。海水試料はプラスチックバケツを用いて海表面から採取された。ろ過海水は450°Cで燃焼したワットマンGF/F フィルターでろ過された。各3本の塩酸で洗浄された0.5 Lのポリカーボネイトビンに試料海水が100、70、40、10%となるようにろ過海水で希釈され、天然光を用いて表面水温で24時間培養後、直ちにワットマンGF/F フィルターでろ過された。クロロフィル *a* はN, N-ジメチルホルムアミドで抽出された後、蛍光光度計(Turner社製 Model 10-AU)で測定された⁸⁾。海水試料の培養中、光合成有効放射量(PAR)が自然蛍光光度計(PNF 2300, Biospherical Instruments)を用いて測定された。

CTDにより水深200 mまでの水温および塩分が測定された。また、硝酸塩+亜硝酸塩濃度がオートアナライザー(Bran and Luebbe社製 AACS III)を用いて測定された。硝酸塩+亜硝酸塩濃度の分析に用いた海水試料とクロロフィル *a* 濃度の測定に用いたフィルター試料は分析に供するまで-20°Cで凍結保存された。

植物プランクトンの成長速度と微小動物プランクトンの捕食速度は Landry and Hassett⁷⁾ の以下の式に従い、希釈率に対するクロロフィル *a* 濃度の変動の回帰直線から計算された。植物プランクトンの成長速度と微小動物プランクトンの捕食速度はそれぞれ *y* 切片と直線の傾きとして決定された。

$$1/t \ln (Pt/P_0) = \mu - cg$$

Pt は *t* 時間後のクロロフィル *a* 濃度、P₀ は培養前のクロロフィル *a* 濃度、*c* は希釈率、 μ は植物プランクトンの成長速度、*g* は微小動物プランクトンの捕食速度を表す。

また、観測されたクロロフィル *a* 濃度 (Chl₀) が植物プランクトンの成長速度 (μ) と微小動物プランクトンの捕食速度 (*g*) を考慮した翌日のクロロフィル *a* 濃度 (Δ Chl: クロロフィル *a* 変化量) を以下の式から見積もった。

$$\Delta\text{Chl} = \text{Chl}_0 \times [\exp (\mu - g) - 1]$$

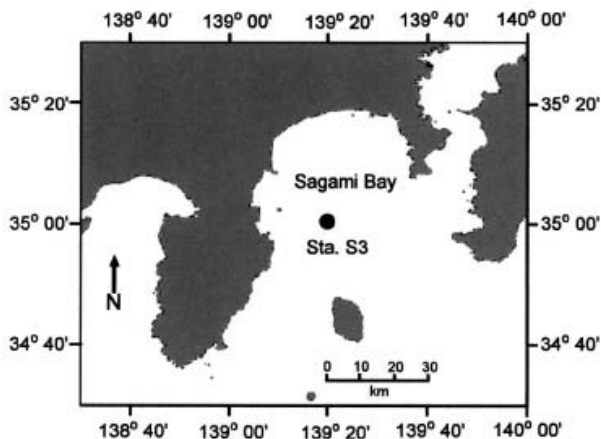


図1 相模湾における採水地点

3. 結果および考察

培養中の PAR は 10.2-55.5 mol quanta m⁻² day⁻¹ で、夏季に高く冬季に低い値であった (表 1)。表層混合層は 10-108 m と大きく変動し、秋季から冬季にかけて深い傾向を示した (表 1)。有光層 (1% 光深度) は 32-54 m で表層混合層のような大きな変動は示さなかったが、冬季には深い傾向を示した。秋季から冬季にかけて表層混合層は有光層よりも深かった (表 1)。表面水温は 14.8 - 27°C で 2002 年 8 月から 10 月にかけて 25°C 以上の値を示し 2002 年 8 月に最も高く、2003 年 2 月に 15°C と最も低い値を示した。

硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度は、0.2 から 6.1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ の

範囲であった (表 1)。水温の高い 2002 年 6 月から 10 月は <0.5 $\mu\text{mol l}^{-1}$ であったが、水温が低い傾向を示す 2002 年 11 月から 2003 年 4 月にかけて >2.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$ であった。これは、相模湾中央部の表層における栄養塩の供給が陸域からよりも鉛直混合の方が大きいことを意味している。

クロロフィル *a* 濃度は 0.33 - 1.32 $\mu\text{g l}^{-1}$ の範囲で、平均値 \pm 標準偏差は 0.65 \pm 0.27 $\mu\text{g l}^{-1}$ (n=12) であった (表 2)。2002 年 11 月は 1.32 $\mu\text{g l}^{-1}$ と他の月に比べて極端に高い値を示した。相模湾へは東京湾からの海水も流入することが報告されている⁹⁾。東京湾表層では一年を通して 10 $\mu\text{g l}^{-1}$ 以上の高いクロロフィル *a* 濃度が存在する¹⁰⁾。このことから、11 月の高いクロロフィル *a* 濃度はクロロフィル *a* 濃度の高い東京湾系水が何らかの理由により相模湾に流入した可能性が考えられる。また、表面水温が 10 月および 12 月よりも低かったことから何らかの影響により栄養塩の豊富な下層の水が表面にもたらされたことにより、植物プランクトンが増殖したことも考えられる。温帯域の沿岸域では一般的に春季から夏季にかけて光量と水柱の安定性の増加に伴い植物プランクトンの大増殖 (ブルーミング) が行われ、クロロフィル *a* 濃度も 1.0 $\mu\text{g l}^{-1}$ 以上に達する^{5,11)}。有光層が表層混合層よりも深くなる春季から夏季にかけて相模湾では過去の報告と同様にブルーミングのような高い値は観測されなかった。

植物プランクトンの成長速度は 0.06 day⁻¹ から 1.09 day⁻¹ の範囲で平均値 \pm 標準偏差は 0.59 \pm 0.32 day⁻¹ (n=12) であった (表 2)。2002 年 6, 9 月に 1.0 day⁻¹ 以上を示し、2002 年 5, 7 月、2003 年 1, 2 月に 0.5 day⁻¹ 以下であった。植物プランクトンの成長速度は夏季に高く冬季に低い傾向を示した。植物プランクトンの成長速度は PAR や硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度と有意な相関性を示さなかった (t-test, どちらも P > 0.1)。このことから、PAR や硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度は相模湾における植物プランクトンにとって 1 年を通して増殖に大きな影響を及ぼさないのかもしれない。11 月の高いクロロフィル *a* 濃度は下層から栄養塩が供給されたことよりもクロロフィル *a* 濃度の高い東京湾系水が何らかの理由により相模湾に流入した可能性の方が大きいと考えられる。しかし、植物プランクトンの成長速度は表面水温と有意な正の相関性を示した (t-test, P < 0.05)。これは Eppley¹²⁾ の報告とも類似している。したがって、相模湾では植物プランクトンは PAR や硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度よりも水温に影響されるのかもしれない。

表1 相模湾における培養期間中の PAR、海水試料採取地点の水温、混合層、1%光深度、硝酸塩+亜硝酸塩濃度

| 年 | 月 | PAR (mol quanta m ⁻² day ⁻¹) | 水温 (°C) | 表層混合層 (m) | 1%光深度 (m) | 硝酸塩+ 亜硝酸塩 (μmol l ⁻¹) |
|-------|-----|---|------------|--------------|--------------|---|
| 2002年 | 5月 | 10.16 | 19.45 | 25 | 45 | 0.62 |
| | 6月 | 46.86 | 20.20 | 10 | 39 | 0.20 |
| | 7月 | 50.95 | 22.07 | 18 | 32 | 0.42 |
| | 8月 | 55.51 | 27.20 | 12 | 31.5 | 0.15 |
| | 9月 | 30.61 | 26.10 | 11 | 39 | 0.21 |
| | 10月 | 30.79 | 25.02 | 12 | 43 | 0.35 |
| | 11月 | 11.18 | 17.55 | 47 | 33 | 6.08 |
| | 12月 | 14.52 | 20.08 | 20 | 54 | 2.09 |
| 2003年 | 1月 | 20.77 | 15.95 | 108 | 46 | 5.82 |
| | 2月 | 26.10 | 14.78 | 81 | 48 | n.d. |
| | 3月 | 34.95 | 15.22 | 17 | 53 | 4.19 |
| | 4月 | 14.54 | 15.96 | 19 | 39.5 | 3.18 |

表2 相模湾における海水試料採取地点のクロロフィル a 濃度と植物プランクトン成長速度 (μ)、微小動物プランクトン捕食速度 (g)、微小動物プランクトン捕食速度：植物プランクトン成長速度 (g：μ)、クロロフィル a 変化量

| 年 | 月 | クロロフィル a (μg l ⁻¹) | 植物プランクトン 成長速度 (μ) (day ⁻¹) | 微小動物プラン クトン捕食速度 (g) (day ⁻¹) | g：μ | クロロフィル a 変化量 (μg l ⁻¹ day ⁻¹) |
|-------|-----|-----------------------------------|--|---|------|--|
| 2002年 | 5月 | 0.55 | 0.06 | 0.09 | 1.44 | -0.02 |
| | 6月 | 0.44 | 1.08 | 0.58 | 0.54 | 0.28 |
| | 7月 | 0.77 | 0.29 | 0.67 | 2.35 | -0.25 |
| | 8月 | 0.33 | 0.69 | 0.62 | 0.90 | 0.02 |
| | 9月 | 0.46 | 1.09 | 1.04 | 0.96 | 0.02 |
| | 10月 | 0.51 | 0.80 | 0.47 | 0.59 | 0.19 |
| | 11月 | 1.32 | 0.67 | 0.53 | 0.78 | 0.21 |
| | 12月 | 0.63 | 0.57 | 0.28 | 0.49 | 0.21 |
| 2003年 | 1月 | 0.72 | 0.39 | 0.23 | 0.60 | 0.12 |
| | 2月 | 0.64 | 0.21 | 0.39 | 1.84 | -0.10 |
| | 3月 | 0.48 | 0.62 | 0.78 | 1.27 | -0.07 |
| | 4月 | 0.93 | 0.67 | 0.29 | 0.44 | 0.43 |

一方、微小動物プランクトンの捕食速度は9月に 1.04 day^{-1} の最大値を、5月に 0.09 day^{-1} の最小値を示し、平均値 \pm 標準偏差は $0.50 \pm 0.26 \text{ day}^{-1}$ ($n=12$) であった(表2)。微小動物プランクトンの捕食速度は植物プランクトンの成長速度と同様に夏季に高く冬季に低い傾向を示した。植物プランクトンの成長速度と微小動物プランクトンの捕食速度は有意な正の相関性を示し(t-test, $P < 0.05$) (図2)、微小動物プランクトンの捕食速度が植物プランクトンの成長速度に大きく依存していた。

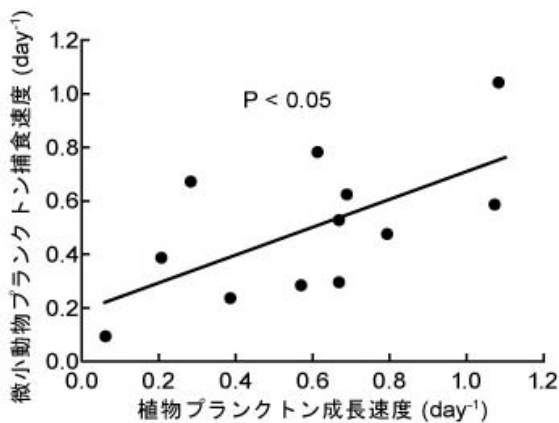


図2 植物プランクトンの成長速度と微小動物プランクトンの捕食速度との関係

クロロフィル *a* 変化量は -0.25 から $0.43 \mu\text{g l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ の範囲で、平均値 \pm 標準偏差は $0.09 \pm 0.19 \mu\text{g l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ($n=12$) であった(表2)。さらに、 $g:\mu$ を見積もった結果、 0.44 から 1.84 の範囲で、平均値 \pm 標準偏差は 0.84 ± 1.02 ($n=12$) であった(表2)。これは、平均して微小動物プランクトンの捕食速度が植物プランクトンの成長速度の約84%に相当していることを意味している。クロロフィル *a* 変化量の平均値が $0.1 \mu\text{g l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ よりも低い値を示したのは、植物プランクトンの成長速度の80%以上を占める微小動物プランクトンの捕食速度によると考えられる。

季節的にみると2002年5、7月、2003年2、3月といった春季に微小動物プランクトンの捕食速度が植物プランクトンの成長速度を上回る傾向が認められた。このことは、春季から夏季にかけて有光層が混合層よりも深く、さらに栄養塩濃度も十分存在するにもかかわらず沿岸域で観測されるような高いクロロフィル *a* 濃度が観測されなかったのは微小動物プランクトンの捕食が関わっている可能性がある。さらに植物プランクトンの成長速度と微小動物プランクトンの捕食速度は秋季から冬季にかけて植物プランクトンの成長速度が微小動物プランクトンの捕

食速度を上回る傾向がみられた。このことから、秋季から冬季において混合層が有光層よりも深いにも関わらずクロロフィル *a* 濃度が春季から夏季のものに比べて大差が認められないのは植物プランクトンの成長速度が微小動物プランクトンの捕食速度よりも高いことが一つの要因であるかもしれない。これらのことから、相模湾における植物プランクトン現存量が季節的に大きく変化しない一つの理由として微小動物プランクトンの捕食が大きく関わっていることが示唆された。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東京海洋大学研究練習船「青鷹丸」船長はじめ乗組員の皆様には試料採取等に際し多大なるご協力をいただき感謝致します。本研究は科学技術振興機構戦略的基礎研究プロジェクト「衛星利用のための実時間海洋基礎生産計測システムの開発」(研究代表者：才野敏郎)の一環として行われた。

引用文献

- 1) B. W. Frost: The role of grazing in nutrient-rich areas of the open sea. *Limnol. Oceanogr.*, 36: 1616-1630, 1991.
- 2) M. R. James and J. A. Hall: Microzooplankton grazing in different water masses associated with the Subtropical Convergence round the South Island, New Zealand. *Deep-Sea Res.*, 45: 1689-1707, 1998.
- 3) S. L. Strom, M. A. Brainard, L. L. Holmes and M. B. Olson: Phytoplankton blooms are strongly impacted by microzooplankton grazing in coastal North Pacific waters. *Mar. Biol.*, 138: 355-368, 2001.
- 4) T. Odate and K. Imai: Seasonal variation in chlorophyll-specific growth and microzooplankton grazing of phytoplankton in Japanese coastal water. *J. Plankton Res.*, 25 (12) : 1497-1505, 2003.
- 5) T. R. Parsons, M. Takahashi and B. Hargrave: *Biological oceanographic processes*, 3rd edn, Butterworth Heinemann, Oxford, 1984.
- 6) A. Kamatani, N. Ogura, N. Nakamoto, M. Funakoshi and S. Iwata: Distribution of nutrients in Sagami Bay during 1971-1973. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 47 (11) : 1493-1498,

- 1981.
- 7) M. R. Landry and R. P. Hassett: Estimating the grazing impact of marine micro-zooplankton. *Mar. Biol.*, 67: 283-288, 1982.
 - 8) R. Suzuki and T. Ishimaru: An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 46: 190-194, 1990.
 - 9) 古島靖夫：相模湾奥部の水質環境に与える湾外水の影響，*海流と生物資源*，成山堂書店，東京，2004，pp.62-73.
 - 10) 神田穰太，チョムタイソンパチャラー，堀本奈穂，山口征矢，石丸隆：東京湾2定点における栄養塩類濃度の経年変動. *水環境学会誌*, 31(9): 559-564, 2008.
 - 11) Y. Maita and T. Odate: Seasonal changes in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funaka Bay, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 44: 268-279, 1988.
 - 12) R. W. Eppley: Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, 70: 1063-1085, 1972.