

足立区桑袋ビオトープ公園ため池におけるクロロフィル変化量から 見積もった植物プランクトンの比増殖速度と 動物プランクトンの比捕食速度の季節変動

¹ 橋本慎治 ¹ 新藤翔太

¹ 帝京科学大学生命環境学部自然環境学科

Seasonal variation in chlorophyll-specific phytoplankton growth and zooplankton grazing
in an artificial pond of Kuwabukuro biotope park

¹ Shinji HASHIMOTO ¹ Shota SHINDO

¹ Teikyo University of Science, Faculty of Life and Environmental Sciences

We investigated the seasonal variation of specific growth and grazing rate, zooplankton and phytoplankton species and chlorophyll *a* concentration, and examined the relationship between the phytoplankton biomass and species, and specific grazing rate and zooplankton species in a pond of the Kuwabukuro biotope park in April-December 2012. The chlorophyll *a* concentration ranged from 10 to 161 $\mu\text{g L}^{-1}$ and was the maximum value in August. The specific growth rate showed in the range of 0.05 to 1.46 d^{-1} and the maximum value in June. The specific grazing rate was in the range of 0.05 to 0.71 d^{-1} , and the maximum value in June. The value of the specific grazing rate reduced to 0.28 d^{-1} in July and increased to 0.61 d^{-1} in August. The values were lower than the specific growth rate throughout the study period. A significant positive relationship was found for the specific grazing and growth rate ($p < 0.05$, $n = 9$). It is thought that the specific grazing rate increased due to the fact that the specific growth rate increased with water temperature and the amount of solar radiation.

Cell number of diatom negatively correlated with individual number of nauplius from April to July ($p < 0.05$, $n = 4$). Consequently, it is possible that the nauplius top-down controlled the cell number of diatom. As blue-green algae were dominated in July, one factor the specific grazing rate was greatly reduced in July might be due to an increase in blue-green algae, *Microcystis novacekii*. In the biotope pond, a bloom of phytoplankton, particularly green algae, occurred in August, because the specific grazing rate of zooplankton was reduced by blue-green algae in July, and the higher water temperature and the amount of solar radiation and the lower N/P ratio in August.

Keywords : 比増殖速度 比捕食速度 希釈培養法 ビオトープ公園 ため池

1. はじめに

ここ数十年にわたり、閉鎖系水域の一つである多くの湖沼は富栄養化により藍藻類による大增殖（アオコ）が発生している^{1, 2)}。また、貯水池でも天然湖沼と同様に富栄養化現象が各地で起こっている³⁾。足立区桑袋ビオトープ公園のため池でも、7月から9月の夏季に、伝右川から高濃度の栄養塩（硝酸塩 + 亜硝酸塩・アンモニウム塩・リン酸塩）が負荷され、植物プランクトンの高い増殖により、池底にはヘドロが堆積し水質悪化が起こっている。このような植物プランクトンの種組成や生物量またその増殖が何に制御されているのかを把握することは大きな関心もたれ、切迫した問題として各地でそのメカニズムの解明が行われている^{1, 2)}。

植物プランクトンの異常増殖の直接の原因と考えられる窒素やリンなどの栄養塩類の流入を抑えることが重要であるが十分な効果を上げるには技術的にも経済的にも大きな負担が伴う⁴⁾。一方、植物プラ

ンクトン生物量は栄養塩類（ボトムアップ効果）だけではなく動物プランクトンなどの高次捕食者も食物連鎖を通じて関わっている（トップダウン効果）。

最近、富栄養化した陸水域ではこの動物プランクトンの捕食に依存するトップダウン効果を利用した生物間相互作用により過剰な植物プランクトン生物量を減少させる「バイオマニピュレーション」が実施されている^{5, 6)}。この水質改善技術は外国では盛んに行われているが、日本ではほとんど実施されていない⁷⁾。日本における実湖沼でのバイオマニピュレーションの実用可能性を探索するためにも動物プランクトンによる捕食効果についての基礎的知見を集積する必要がある。すべての水域における動植物プランクトン種組成や生態系は異なっているため、このような水質改善操作を実施するには各現場での富栄養状態や動植物プランクトン生物量やその種組成の調査だけでなく植物プランクトンの増殖速度や動物プランクトンの捕食速度を把握する必要がある。

そこで本研究は足立区桑袋ビオトープ公園のため池におけるクロロフィル a 濃度の季節変動とともに動物プランクトン種組成の季節変化および比捕食速度を調査し、クロロフィル a 濃度や植物プランクトンの種組成および比増殖速度との関連性を明らかにし、ため池における動植物プランクトンの生物間相互作用を解明することを目的とした。

2. 試料および方法

ため池の概要

調査場所のため池は、東京都足立区の桑袋ビオトープ公園内に位置し、貯水容量は 945 m^3 で水深は約 1 m である (Fig. 1)。公園内には伝右川の汚水が原因で国内の一級河川の中で最も汚れていると言われている綾瀬川の水質を改善するため桑袋浄化施設も併設されている。浄化施設は伝右川が綾瀬川に流入する地点に位置し、1日に伝右川の水を約 19000 m^3 浄化する。その後、浄化水の90%が綾瀬川、8%がビオトープ池に放流される。残りの2%は泥で

ありリサイクルされる。

ため池の主な生物相として、岸部にはヒメガマが生育し、池内にはプランクトン食性魚であるモツゴ等が生息している。

調査方法

調査は、2012年の4月から12月までの月1回の間隔で計9回行った。試料水は毎回10時から14時の間にため池中央部の表層水をバケツで採取した。調査項目は水温、栄養塩濃度(リン酸塩、硝酸塩+亜硝酸塩、アンモニウム塩)、クロロフィル a 濃度、動・植物プランクトン種組成、植物プランクトンの比増殖速度と動物プランクトンの比捕食速度の測定を行った。

測定方法

植物プランクトンの比増殖速度と動物プランクトンの比捕食速度は希釈培養法で測定した⁸⁾。試料水を5本のポリカーボネート瓶に、ワットマン GF/F フィルターでろ過したろ液を希釈水とし、原水の割合を100%、80%、60%、40%、20%に希釈し、現場法により24時間培養した。希釈した試料水をGF/F フィルターでろ過し、クロロフィル a 濃度を測定した。クロロフィル a 濃度はユネスコ法により測定した⁹⁾。植物プランクトン比増殖速度と動物プランクトン比捕食速度は、希釈培養法により得た試料中のクロロフィル a 濃度を Landry and Hassett⁸⁾ の以下の計算式に代入し、希釈率に対するクロロフィル a 濃度の変化を回帰直線から計算した。植物プランクトンの比増殖速度と動物プランクトンの比捕食速度はそれぞれ y 切片と直線の傾きとして決定した。

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

P_t は t 時間後のクロロフィル a 濃度、 P_0 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増殖速度、 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 (Chl_0) が植物プランクトンの比増殖速度 (μ) と動物プランクトンの比捕食速度 (g) を考慮した翌日のクロロフィル a 濃度 (ΔChl : クロロフィル a 変化量) を以下の式から見積もった¹⁰⁾。

$$\Delta Chl = Chl_0 \times [\exp (\mu - g) - 1]$$

培養時間の日射量は気象庁のホームページから東

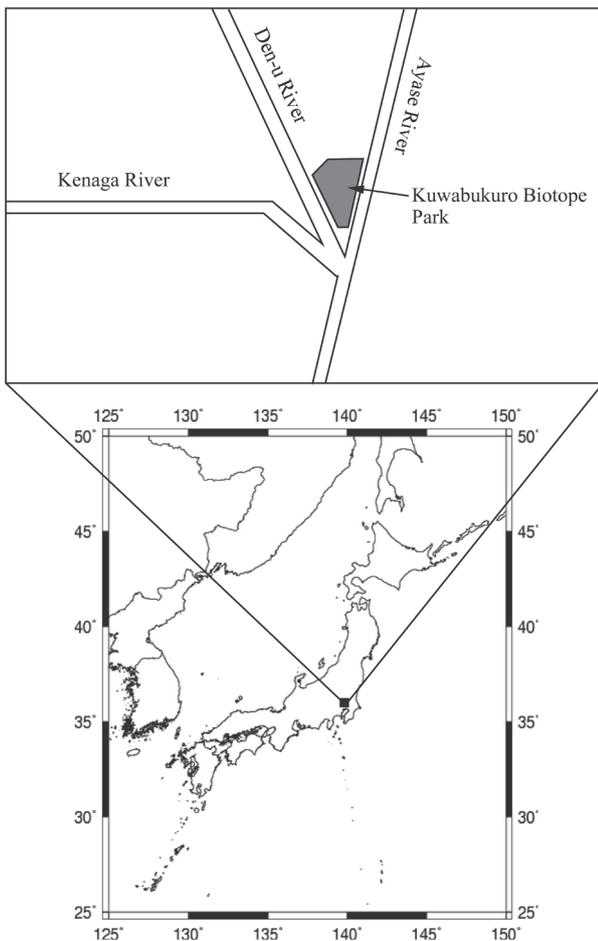


Fig. 1. Location of the Kuwabukuro biotope park, Tokyo Metropolitan prefecture, Japan.

Table 1. Solar radiation, water temperature, nutrient (ammonium, nitrate+nitrite, phosphate) concentration, and N/P ratio in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

	Solar radiation	Water temperature	Ammonium	Nitrate+nitrite	Phosphate	N/P ratio
	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(°C)				
April	21.4	21.6	1.1	130	0.9	146
May	20.7	25.8	0.3	64	2.2	29
June	29.1	24.7	0.4	75	1.7	44
July	17.6	27.6	0.9	78	1.7	46
August	21.8	32.0	0.6	35	3.6	10
September	6.3	22.5	1.2	83	3.3	25
October	12.7	18.5	1.9	77	4.3	18
November	10.4	11.0	8.8	110	2.2	54
December	11.7	6.0	9.8	113	3.9	31
Average	16.9	21.1	2.8	85.0	2.8	43

京都の1時間当たりの日射量を積算し求めた¹¹⁾。

植物プランクトンは、採水した表層水をポリ瓶に入れ、濃度1%になるように中性ホルマリンを加えて固定した。植物プランクトン種組成は計数板を用いて光学顕微鏡下で同定し、計数した。なお、藍藻類など塊状の群体を形成しているものについては群体を計数した。動物プランクトンは、底から鉛直曳きにより、プランクトンネット(NXX13・目合い94 μm)で採集し、ポリ瓶に入れ濃度5%になるように中性ホルマリンを加えて固定した。動物プランクトン種組成は実体顕微鏡下でサンプル中の全ての個体数を計数し、一定体積中の個体密度に換算した。

水温は、棒状温度計を用いて測定した。

ため池試料中のアンモニウム塩濃度はインドフェノール法、硝酸塩+亜硝酸塩濃度はナフチルエチレンジアミン法、リン酸塩はモリブデン法を用いて測定した⁹⁾。

3. 結果

水温・日射量

培養実験を行った時の水温および日射量を Table 1 に示す。水温は4月から夏季にかけて上昇傾向を示し、8月に最大値、12月に最小値を示した。また日射量は6月が最も高かった。9月は曇天のため最も低い値であった。

水質

調査期間における栄養塩(リン酸塩・アンモニウム塩・亜硝酸塩+硝酸塩)濃度の季節変化を Table

1 に示す。アンモニウム塩濃度は、4月から10月にかけて2 μmol L⁻¹以下の低い値であったが、11月以降8 μmol L⁻¹以上の高い値を示した。硝酸塩+亜硝酸塩濃度は、4月に最大値を示した後、減少傾向を示し8月に最小値を示した。その後、12月まで増加傾向を示した。リン酸塩濃度は、11月に少し減少したものの4月から12月にかけて増加傾向を示した。また、Redfield比(N/P=16)により植物プランクトンの制限栄養塩を推定することが出来る。N/P比は8月に10となり、16以下の値であったが他の月は16以上であった(Table 1)。すなわち、

Table 2. Chlorophyll a concentration and estimated daily variation of chlorophyll a in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

	Chlorophyll a	Chl daily variation
	(μg L ⁻¹)	(μg L ⁻¹ d ⁻¹)
April	32	31.6
May	10	8.3
June	29	32.1
July	11	17.1
August	161	13.4
September	24	16.1
October	28	6.3
November	29	10.6
December	11	0.0
Average	37	15

8月の制限栄養塩は窒素であったが、その他の月はリンであった。しかしながら、いずれの月も窒素、リンともに豊富に存在し、植物プランクトンの増殖を制限するほど低い栄養塩濃度ではなかった。

調査期間中のクロロフィル *a* 濃度およびクロロフィル *a* 変化量を Table 2 に示す。クロロフィル *a* 濃度は、8月に最大値の $161 \mu\text{g L}^{-1}$ を示したが、その他の月は $10 \sim 32 \mu\text{g L}^{-1}$ であった。また、クロロフィル *a* 変化量は4月、6月に $30 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 以上の高い値を示した。

植物プランクトン種組成の季節変化

各植物プランクトンにおける細胞密度とその構成割合の季節変化を Fig. 2a, b に示す。各植物プランクトンにおける全細胞密度の季節変化はクロロフィル *a* 濃度と同様の变化を示し、有意な正の相関性を示した (*t*-test, $p < 0.001$, $n = 9$)。このことは、ため池が光学顕微鏡で観察できる大型の植物プランクトンによって占められていることを表している。調査期間中ため池では、珪藻類、緑藻類、鞭毛藻、藍藻類が出現した。珪藻類の細胞密度は $2.2 \times 10^2 \sim 4.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲で平均 $1.9 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。全植物プランクトンの細胞密度に対する珪藻類の相対的な割合は、 $17 \sim 96\%$ で平均 54% と最も大きな割合を占めた。その細胞密度は4月から9月にかけて増減を繰り返した。出現した珪藻類は主にヒメマルケイソウ属 *Cyclotella* spp. であった。藍藻類の細胞密度は $0 \sim 9.8 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲で平均 $2.1 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。藍藻類の相対的な割合は、 $0 \sim 50\%$ で平均 8% であった。藍藻類は7月に最も多く出現し、主にメリスモベディア属 *Merismopedia* sp. やマイクロキスティス属 *Microcystis novacekii* が出現した。緑藻類の細胞密度は $8 \times 10 \sim 8 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲で平均 $1.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。緑藻類の相対的な割合は、 $4 \sim 67\%$ で平均 31% であった。緑藻類の細胞密度は8月に最も多くなり、珪藻類の2倍以上存在し、緑藻類の大増殖が生じた。主にプレオドリナ属 *Pleodorina* sp. やデスマデスムス属 *Desmodesmus* spp. が多く出現し、*Pleodorina* sp. は1群体32から64細胞、*Desmodesmus* spp. は1群体4から8細胞のものが存在した。その後、再び10月から12月にかけて珪藻類が優占し、春季同様に *Cyclotella* spp. が多く出現した。鞭毛藻類の細胞密度は $0 \sim 3.1 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ の範囲で平均 $1.6 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。鞭毛藻の相対的な割合は、 $0 \sim 15\%$ で平

均 7% であった。鞭毛藻類はギムノディニウム属 *Gymnodinium* sp. やユーグレナ属 *Euglena* sp. が出現した。

動物プランクトン種組成の季節変化

動物プランクトン個体密度とその構成割合の季節変化を Fig. 3a, b に示す。調査期間中、動物プランクトンではツボワムシ属 *Brachionus* spp.、ケブカミジンコ属 *Macrothrix* sp.、ゾウミジンコ属 *Bosmina longirostris*、オナガミジンコ属 *Diaphanosoma* spp.、ヒゲナガケンミジンコ科 *Diaptomidae* sp.、ノープリウス幼生、コペポデイド幼生が主に出現した。ノープリウス幼生の個体密度は、 $6.4 \times 10 \sim 5.0 \times 10^4 \text{ inds m}^{-3}$ の範囲で平均 $1.6 \times 10^4 \text{ inds m}^{-3}$ であった。全動物プランクトン個体密度に対するノープリウス幼生の相対的な割合は、 $20 \sim 84\%$ で平均 48% と最も大きな割合を占めた。その個体密度は4月から9月にかけて増減を繰り返し、7月になるとノープリウス幼生だけでなく、コペポデイド幼生も多く出現した。コペポデイド幼生の個体密度は、 $0 \sim 2.1 \times 10^4 \text{ inds m}^{-3}$ の範囲で平均 $3.6 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ であった。コペポデイド幼生の相対的な割合は、 $0 \sim 25\%$ で平均 9% であった。8月になると、コペポデイド幼生だけでなく *Diaphanosoma* spp., *Diaptomidae* sp., *Brachionus* spp. の個体密度が増加した。*Diaphanosoma* spp. の個体密度は、 $0 \sim 7.0 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ の範囲で平均 $1.1 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ であった。*Diaphanosoma* spp. の相対的な割合は、 $0 \sim 18\%$ で平均 3% であった。*Diaptomidae* sp. の個体密度は、 $0 \sim 6.3 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ の範囲で平均 $9.0 \times 10^2 \text{ inds m}^{-3}$ であった。*Diaptomidae* sp. の相対的な割合は、 $0 \sim 20\%$ で平均 6% であった。*Brachionus* spp. の個体密度は、 $1.9 \times 10^2 \sim 8.8 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ の範囲で平均 $2.4 \times 10^3 \text{ inds m}^{-3}$ であった。*Brachionus* spp. の相対的な割合は、 $1 \sim 60\%$ で平均 25% であった。しかし9月になると水温の急激な低下とともに動物プランクトン個体密度は急激に減少し、12月にかけてさらに減少傾向を示した。11月、12月にはワムシ類が 50% 以上を占めた。

植物プランクトンの比増殖速度と動物プランクトンの比捕食速度

植物プランクトンの比増殖速度と動物プランクトンの比捕食速度の季節変化を Table 3 に示す。比増殖速度は、比増殖速度は6月に最大値を示したが、

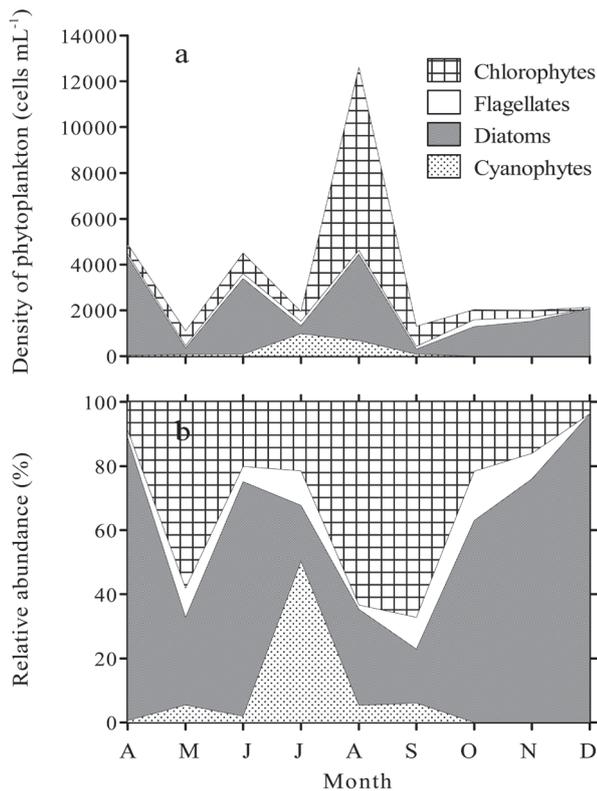


Fig. 2. Cell density of phytoplankton species and the relative abundance in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

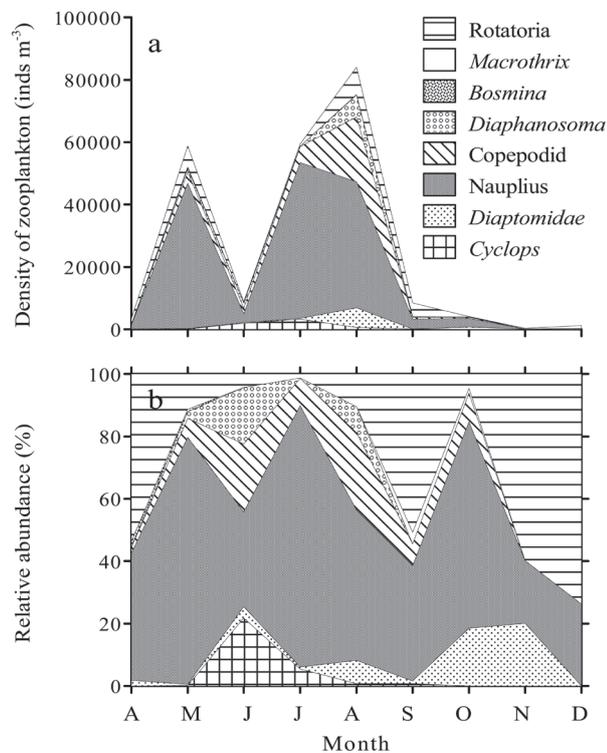


Fig. 3. Individual density of zooplankton species and the relative abundance in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

Table 3. Chlorophyll-specific growth rate (μ), grazing rate (g), and $g : \mu$ in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

	μ	g	$g : \mu$
	(d^{-1})		
April	0.86	0.18	0.21
May	0.82	0.22	0.27
June	1.46	0.71	0.49
July	1.20	0.28	0.23
August	0.69	0.61	0.88
September	0.65	0.14	0.22
October	0.29	0.09	0.31
November	0.37	0.06	0.16
December	0.05	0.05	1.00
Average	0.71	0.26	0.42

その後12月(0.05 d^{-1})まで徐々に減少した。比捕食速度は、調査期間中、比増殖速度は比捕食速度よりも常に高い値であった。比増殖速度と同様に6月に最大値を示した。その後、7月に0.28 d^{-1} まで減少したが、8月に0.61 d^{-1} まで増加した。8月の比捕食速度(0.61 d^{-1})は比増殖速度(0.69 d^{-1})に近い値であった。その後、9月に大きく減少し、10月以降は0.1 d^{-1} 以下の低い値であった。

4. 考察

クロロフィル a 濃度および動植物プランクトン種組成について

平均クロロフィル a 濃度が $8 \mu g L^{-1}$ 以上の湖沼は富栄養湖である¹²⁾。調査期間中におけるため池の平均クロロフィル a 濃度は $37 \mu g L^{-1}$ であったことから、富栄養な池であると考えられる。

7月の優占種は藍藻類であったが、8月には緑藻類に変化した (Fig. 2a, b)。Suttle and Harrison¹³⁾ は N/P 比が 45 の時には藍藻類が優占し、15 以下の時には緑藻類や珪藻類が優占することを報告している。この7月から8月にかけての優占種の遷移は N/P 比が関係しているのかもしれない。

富栄養な淡水ではカイアシ類やワムシ類が多く存在する⁴⁾。ため池では調査期間を通して小型カイアシ類やワムシ類が多く存在していたことから、クロロフィル a 濃度だけでなく動物プランクトン種組成からも富栄養型の池である。

10月を除いた9月以降、ワムシ類が優占していた (Fig. 3b)。ワムシ類の多くは、デトリタス、微小藻類、バクテリア、原生動物などを捕食する¹⁴⁾。したがって、水温の低下や植物プランクトン生物量の減少により、他の動物プランクトン個体密度が減少したが、ワムシ類はバクテリアやデトリタスを主に捕食することによって優占した可能性が考えられる。

比増殖速度と水温・日射量・栄養塩濃度との関係

植物プランクトンの比増殖速度は、日射量、水温、栄養塩濃度に影響される¹⁵⁾。そこで、植物プランクトンの比増殖速度と水温、日射量、栄養塩濃度との関係について調べた。その結果、水温、日射量ともに有意な正の相関性を示した (Fig. 4a, b)。したがって、ため池における植物プランクトンの比増殖速度は、水温、日射量に大きく影響されるようである。また、栄養塩濃度との関係はアンモニウム塩のみ有意な負の相関性がみられ、硝酸塩 + 亜硝酸塩とリン酸塩は有意な相関性がみられなかった (Fig. 5a, b, c)。硝

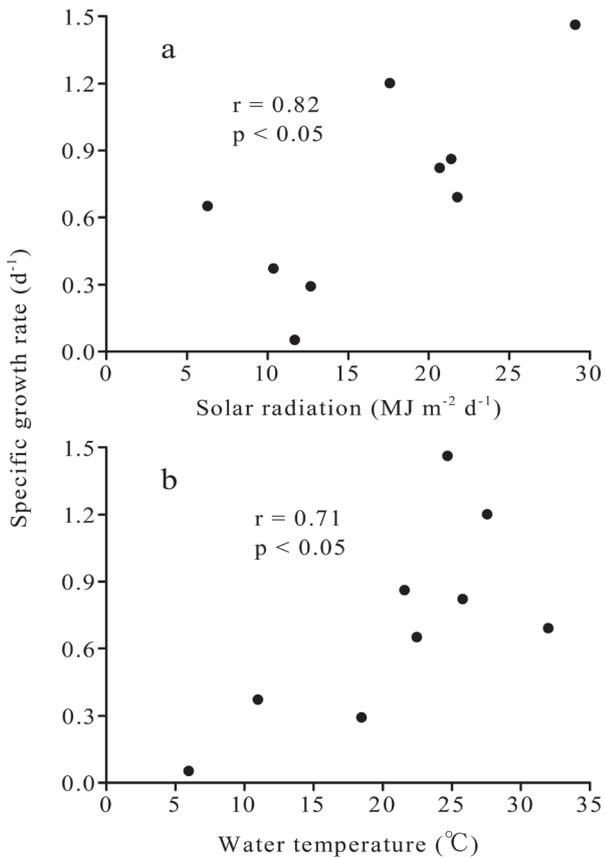


Fig. 4. Relationship between chlorophyll-specific growth rate and solar radiation (a), water temperature (b). The r and p in the figure represent correlation coefficient and significance of t-test, respectively.

酸塩 + 亜硝酸塩とリン酸塩は浄化槽や堆積物から豊富に供給され、またいずれの濃度も植物プランクトン増殖を制限する値 (硝酸塩 + 亜硝酸塩: $1 \mu\text{mol L}^{-1}$, リン酸塩: $0.03\text{-}0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$)^{16, 17)} よりも大幅に高い値であったことから有意な相関性がみられなかったものと思われる。一方、アンモニウム塩は硝酸塩 + 亜硝酸塩よりも取り込まれやすく¹⁷⁾、また比増殖速度が高い時には取り込むことが出来る最低濃度に近い値 ($0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$)¹⁸⁾ であり、比増殖速度が低い時には高い値を示していることから、ため池のアンモニウム塩濃度は比増殖速度の影響を受けているようである。

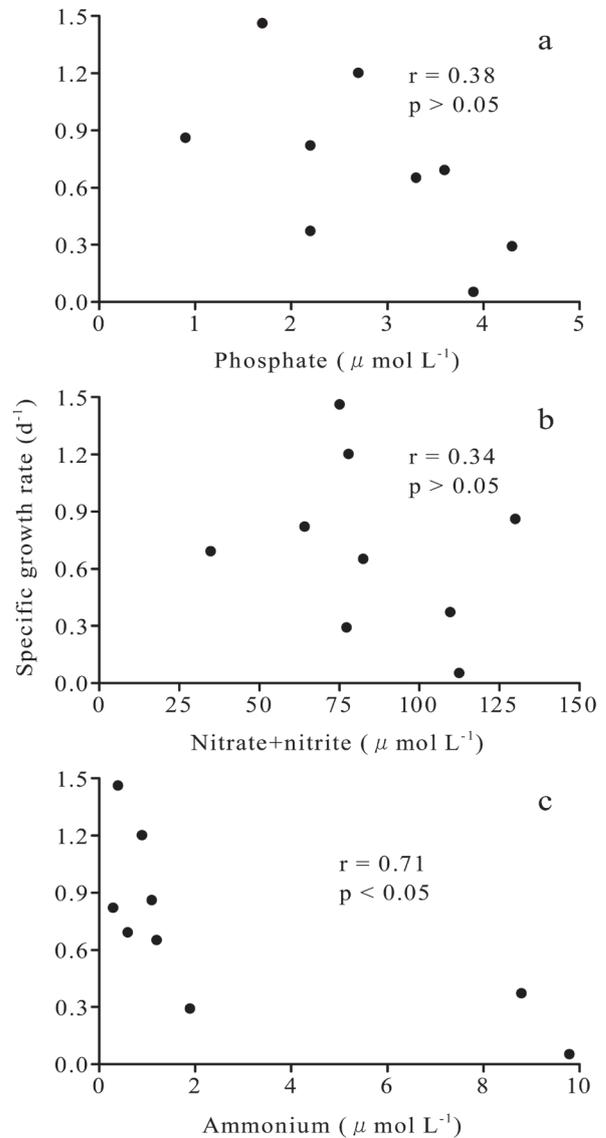


Fig. 5. Relationship between chlorophyll-specific growth rate and nutrient (a: phosphate, b: nitrate+nitrite, c: ammonium) concentration. The r and p in the figure represent correlation coefficient and significance of t-test, respectively.

比増殖速度と植物プランクトン種組成との関係

比増殖速度が最も高かった時 (1.69 d^{-1}) の植物プランクトン種は珪藻類であったことから、珪藻類は比増殖速度が最も高い植物プランクトン種の一つであると考えられる¹⁹⁾。また、藍藻類が優占した7月も、6月の次に高い比増殖速度 (1.20 d^{-1}) であった。藍藻類は 20°C 以上の高水温で高い比増殖速度を示す³⁾。7月の水温も 27.6°C と 20°C 以上を示していたことから高い比増殖速度を示したことが考えられる。一方、緑藻類が優占した5月、8月の比増殖速度はそれぞれ 0.82 d^{-1} 、 0.69 d^{-1} であった。8月の細胞密度 ($8.0 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$) は5月 ($6.4 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$) の10倍以上であるにも関わらず、8月の比増殖速度は5月よりも低い。8月の細胞密度は非常に高い細胞密度であったことから、自己遮へいにより比増殖速度が低くなった可能性が考えられる²⁰⁾。

比捕食速度と水温との関係

動物プランクトンの比捕食速度は、水温と有意な正の相関を示した (Fig. 6a)。水温の上昇は動物プランクトンを活性化させる一つの要因である²¹⁾。このことから、水温の高い時期に植物プランクトン

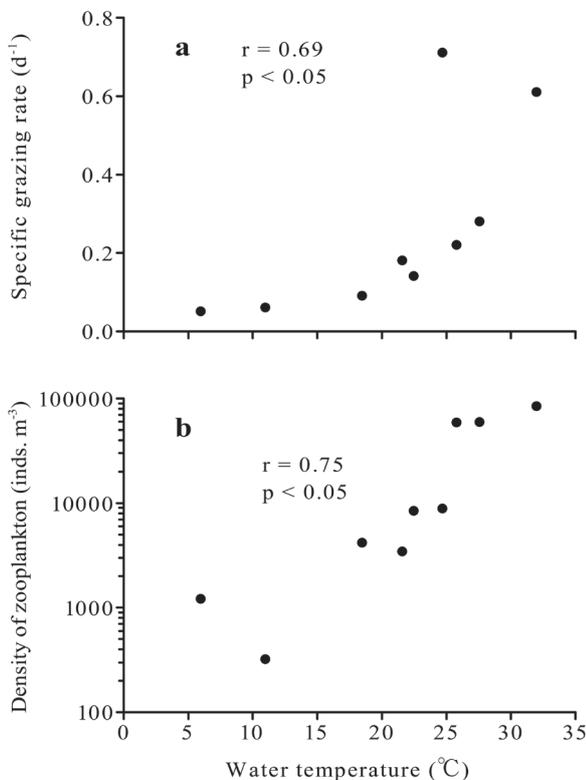


Fig. 6. Relationship between water temperature and grazing rate (a), individual density of zooplankton (b). The r and p in the figure represent correlation coefficient and significance of t-test, respectively.

を積極的に捕食していたと考えられる。また、水温と動物プランクトン個体密度の間にも有意な正の相関が示されたことから水温と動物プランクトンの活性化との関係がうかがえる (Fig. 6b)。それ故に、ため池における動物プランクトンの比捕食速度は水温が上昇する春季から夏季にかけて増加し、水温が低下する冬季にかけて減少したと考えられる。

比増殖速度と比捕食速度との関係

比捕食速度は比増殖速度と有意な正の相関性を示した (Fig. 7)。水温、日射量の増加に伴い高まった比増殖速度に合わせて比捕食速度も増加したことが考えられる。動物プランクトンの比捕食速度は植物プランクトンの比増殖速度に大きく依存していた²²⁾。動物プランクトンの比捕食速度は植物プランクトンの細胞密度と有意な正の相関を示した (Fig. 8)

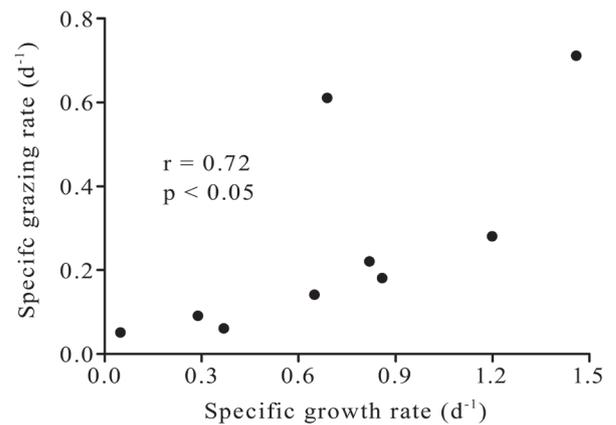


Fig. 7. Relationship between chlorophyll-specific growth rate and grazing rate. The r and p in the figure represent correlation coefficient and significance of t-test, respectively.

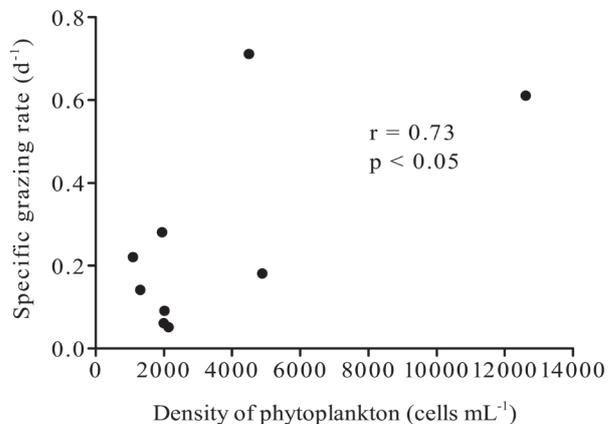


Fig. 8. Relationship between cell density of phytoplankton and grazing rate. The r and p in the figure represent correlation coefficient and significance of t-test, respectively.

Table 4. Seasonally integrated chlorophyll *a* production and grazing mortality, and the rate of grazing / production.

	Production (mgChl L ⁻¹ per period)	Grazing	Grazing / Production (%)
Spring (April-May)	1.54	0.34	22
Summer (June-August)	6.00	4.13	69
Fall (September-October)	0.89	0.22	25
Winter (November-December)	0.38	0.06	16
Total	8.81	4.75	54

ことから、植物プランクトン細胞密度が高い時期に動物プランクトンの捕食が活性化することが明らかとなった。海洋沿岸域におけるクロロフィル *a* 変化量が年間を通して $1.0 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 以下である¹⁰⁾ことを考えると、ため池におけるクロロフィル *a* 変化量 (平均 $15 \mu\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$) は沿岸域に比べて非常に高い値である。これはため池の栄養塩 (硝酸塩 + 亜硝酸塩、リン酸塩) 濃度が沿岸域に比べて数倍高い値¹⁰⁾であることが関係しているのかもしれない。比増殖速度はいずれの時期も比捕食速度と同等かあるいは上回っており、さらに $g:\mu$ を見積もった結果、0.16 から 1.00 の範囲で、平均は 0.42 であった (Table 3)。これは、平均して動物プランクトンの比捕食速度が植物プランクトンの比増殖速度の約 42% に相当していることを意味している。相模湾における $g:\mu$ は平均 0.84 であり²²⁾、ため池における値はその約 2 分の 1 である。これは、ため池におけるクロロフィル *a* 濃度が平均 $37 \mu\text{g L}^{-1}$ と非常に高い値である一つの要因であるかもしれない。

クロロフィル *a* 生産量 ($\Delta\text{Chl}_{\text{growth}}$) と動物プランクトン捕食によるクロロフィル *a* 消費量 ($\Delta\text{Chl}_{\text{grazing}}$) は比増殖速度と比捕食速度との関係から以下の式により見積もることが出来る^{10, 23)}。

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

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

クロロフィル *a* 生産量は $0 \sim 115 \mu\text{gChl L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 、一方クロロフィル *a* 消費量は $0 \sim 102 \mu\text{gChl L}^{-1} \text{d}^{-1}$ であった (Fig. 9)。7月の比増殖速度は 1.20 と 6月に次いで高い値であるにも関わらずクロロフィル *a* 生産量に対するクロロフィル *a* 消費量の割合が 23% と 6月の 2 分の 1 以下の低い値であることから、8月のクロロフィル *a* 濃度が調査期間中最も高い値になった一つ

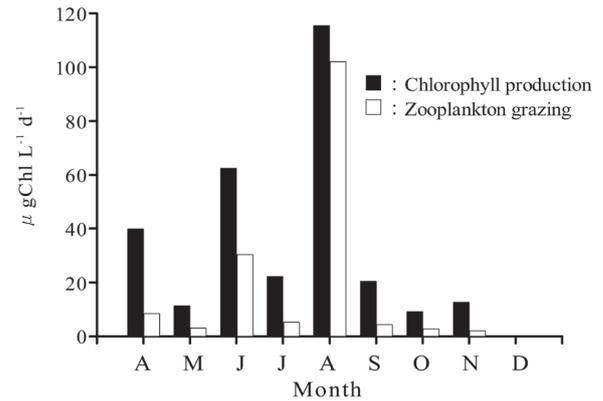


Fig. 9. Chlorophyll *a* production and grazing mortality in the Kuwabukuro biotope pond from April to December, 2012.

の要因であると考えられる。一方、8月におけるクロロフィル *a* 消費量の割合は調査期間中最も高い 88% であり、9月におけるクロロフィル *a* 濃度の急激な減少をもたらした一つの要因であると考えられる。クロロフィル *a* 生産量に対するクロロフィル *a* 消費量の割合は翌月のクロロフィル *a* 濃度に影響をもたらしているようであった。すなわち、動物プランクトンによるクロロフィル *a* 消費量はため池のクロロフィル *a* 濃度に強く影響を及ぼしていたと考えられる。

調査期間を通してクロロフィル *a* 生産量はクロロフィル *a* 消費量よりも高く、クロロフィル *a* 生産量に対するクロロフィル *a* 消費量の割合は 54% であった (Table 4)。この割合は海洋沿岸域 (57%) とほぼ同じ値であった¹⁰⁾。植物プランクトンによる一年間の生産量の約半分が動物プランクトンによって消費されていた。季節別にみると、その消費量の割合は夏季に最も高い値であった (Table 4)。この傾向は沿岸域においても同様である²⁴⁾。すなわち、ため池における植物プランクトンから動物プランクトンへ転送されるエネルギー量は沿岸域のものと同様であった。

植物プランクトン細胞密度と動物プランクトン個体密度との関係

4月から7月にかけて、ノープリウス幼生の個体密度が増加すると珪藻類の細胞密度は減少し、ノープリウス幼生が減少すると珪藻類が増加し (Figs. 2a, 3a)、珪藻類の細胞密度はノープリウス幼生の個体密度と有意な負の相関性を示した (t-test, $r = 0.98$, $p < 0.05$, $n = 4$)。このことから、ノープリウス幼生がトップダウン的に珪藻類の細胞密度を制御していた可能性が考えられる。

7月には藍藻類が優占していた (Fig. 2b)。藍藻

類のミクロキスティス属はミクロシスチン（有毒性物質）を含有し、多くの動物プランクトンの捕食速度や生存率が低下することが知られている^{25, 26)}。したがって、7月において大きく動物プランクトンの比捕食速度が減少した一つの要因は藍藻類、特に *Microcystis novacekii* の増加によるのかもしれない。以上のことから、ビオトープ池では藍藻類が増殖することによって動物プランクトンの比捕食速度が低下し、同時に日射量、水温の増加や N/P 比の低下によって緑藻類が大増殖したというメカニズムが考えられる。すなわち、動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食がため池のクロロフィル *a* 量に強く影響を及ぼしていることが示唆された。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご協力を頂いた桑袋ビオトープ公園自然解説員の伊藤正哉氏に深く感謝致します。

6. 引用文献

- 1) 藤本尚志・福島武彦・稲森悠平・須藤隆一：全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係．*水環境学会誌*，18：901-908, 1995.
- 2) 本間隆満・小松信行・根岸正美・中村剛也・朴 虎東：霞ヶ浦（西浦・北浦）における *Microcystis* 属の形態種組成と栄養塩濃度との関係．*日本水産学会誌*，74：189-198, 2008.
- 3) 梅田 信・富岡誠司：貯水池における水質環境要素と藻類増殖の関連．*水工学論文集*，51：1373-1378, 2007.
- 4) 花里孝幸：ミジンコ－その生態と湖沼環境問題－．名古屋大学出版会，名古屋，1998.
- 5) Shapiro, J. and Wright, D. I. : Lake restoration by manipulation. Round Lake, Minnesota, the first two years. *Freshwater Biology*, 14 : 371-383, 1984.
- 6) Ventella, A., Wiackowski, K., Moilnen, M., Saorikari, V. and Sarvalia, J. : The effect of small zooplankton on the microbial loop and edible algae during a cyanobacterial bloom. *Freshwater Biology*, 17 : 1807-1819, 2002.
- 7) Hanazato, T. : Restoration of lake water quality by controlling fish community. *Environmental Research Quarterly*, 137 : 112-119, 2005.
- 8) Landry, M. R. and R. P. Hassett : Estimating the grazing impact of marine microzooplankton. *Marine Biology*, 67 : 283-288, 1982.
- 9) 西條八束・三田村緒佐武：新編 湖沼調査法．講談社サイエンティフィク，東京，1995.
- 10) Odate, T. and K. Imai : Seasonal variation in chlorophyll-specific growth and microzooplankton grazing of phytoplankton in Japanese coastal water. *Journal of Plankton Research*, 25 : 1497-1505, 2003.
- 11) 気象庁：気象統計情報，2012.<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.
- 12) 浅枝 隆：図説 生態系の環境．朝倉書店，東京，2011.
- 13) Suttle, C. A. and Harrison, P. J. : Ammonium and phosphate uptake rates, N : P supply ratios, and evidence for N and P limitation in some oligotrophic lakes. *Limnology and Oceanography*, 33 : 186-202, 1988.
- 14) Brönmark, C. and L.-A. Hansson : The Biology of Lakes and Ponds (Translated by J. Urabe) . Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 2005.
- 15) Magnuson, J. J., K. E. Webster, R. A. Assel, C. J. Bowser, P. J. Dillon, J. G. Eaton, H. E. Evans, E. J. Fee, R. I. Hall, L. R. Mmortsch, D. W. Schindler and F. H. Quinn : Potential effects of climate changes on aquatic systems : Laurentian Great Lakes and Precambrian shield region. In *Freshwater Ecosystems and Climate Change in North America*, C. E. Cushing (ed.) : 7-53. John Wiley & Sons, Chichester, 1997.
- 16) Dugdale, R. C. : Nutrient limitation in the sea : dynamics, identification and signification. *Limnology and Oceanography*, 12 : 685-695, 1967.
- 17) Horn, A. J. and C. R. Goldman : *Limnology* (Translated by Y. Tezuka) . Kyoto University Press, Kyoto, 1994.
- 18) Parsons, T. R., M. Takahashi and B. Hargrave : *Biological Oceanographic Processes*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1984.
- 19) Hashimoto, S. and A. Shiimoto : Light utilization efficiency of size-fractionated phytoplankton in the subarctic Pacific, spring and summer 1999 : high efficiency of large-sized diatom. *Journal of Plankton Research*, 24 : 83-87, 2002.

- 20) Han, M.-S. and K. Furuya : Size and species-specific primary productivity and community structure of phytoplankton in Tokyo Bay. *Journal of Plankton Research*, 22 : 1221-1235, 2000.
- 21) 花里孝幸 : 地球温暖化と湖のプランクトン群集. *陸水学雑誌*, 61 : 65-77, 2000.
- 22) 橋本慎治・堀本奈穂・石丸 隆・才野敏郎 : 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. *帝京科学大学紀要*, 8 : 21-25, 2012.
- 23) Moigis, A. G. : Photosynthetic rates in the surface waters of the Red Sea : the radiocarbon versus the non-isotopic dilution method. *Journal of Plankton Research*, 22 : 713-727, 1999.
- 24) Odate, T. and Y. Maita : Seasonal changes in the biomass of zooplankton and their food requirement in Funka Bay. *Journal of Oceanographic society of Japan*, 44 : 228-234, 1988.
- 25) 花里孝幸 : 富栄養湖におけるラン藻と動物プランクトンの相互関係. *陸水学雑誌*, 50 : 53-67, 1989.
- 26) 花里孝幸 : 動物プランクトンと水質. エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化－持続可能な水環境の保全と再生－, 島谷幸宏・細見正明・中村圭吾 (編著) : 21-30. ソフトサイエンス社, 東京, 2003.