

流動が植物プランクトンに及ぼす影響に関する研究

李 勁松* 河原 長美** 小野芳朗**

A Study on Influence of Current Velocity on Phytoplankton

Jinsong LI*, Osami KAWARA** and Yosiro ONO**

(Received November 30, 2001)

The main problems caused by eutrophication result from the increase of phytoplankton. Therefore, controlling the increase of phytoplankton is the most important. In this study, we discuss the influence of current velocity on the growth of phytoplankton based on the field experiments and laboratory experiments. The laboratory experiments for the influence of current velocity on the growth have been conducted using circular channels, and the field experiments were conducted using a shallow pond. The results of the experiments show current velocity inhibits the growth of phytoplankton.

Key words: Eutrophication, growth of phytoplankton, influence of current velocity, experiment.

1 はじめに

日本においては、ダム貯水池、湖沼における富栄養化が長年の問題であり、湖沼、ダム貯水池などの閉鎖性水域では、大量の窒素、リン等栄養塩の流入によって、富栄養化が促進され、藻類の異常増殖が頻繁に発生し、景観、水圏生態に影響を与えるだけでなく、藻類の増殖による異臭味が上水にも影響を及ぼし、社会問題になっている(合田ら, 1968; 岩佐, 1990; 宗宮ら, 1998)。富栄養化防止の基本は、窒素やリンの流入負荷の削減であるが、富栄養化が生じる栄養塩濃度の限界値は、処理によって浄化された排水中の濃度のみならず山林からの流出水や降雨に含まれる濃度よりも低い。加えて、特定汚染源の高度処理対策には時間を要し、非特定汚染源に関しては、農地からの肥料流出が検討されつつあるが、山林からの流出水や降雨に含まれる濃度よりもはるかに低い場合、水域中の対策も考えなければならないと考えられる(浮田ら, 1997; 丹羽ら, 1993; 加藤ら, 1995)。富栄養化において、様々な問題を引き起こす原因は、植物プランクトンの増殖であり、植物プランクトンの増殖が抑制されれば、大きな問題は生じない。

従来より、河川においては流速の早い河道区間では植物プランクトンが増殖せず、プランクトンの増殖が生じるのは、堰やダムにより流速が遅い河道区間であることが事実

として知られていた。筆者らは旭川における流下過程における水質変化の調査を1993年より続けており、これらの観測の結果により、流速がクロロフィル-aの増減に大きく関与していることを確認している(河原ら, 1998, 2001)。これらの観測結果によれば、植物プランクトンの増殖が生じるのは、流速10cm/s以下の河道区間であり、流速25cm/s以上の区間では減少が生じていた。また、Skidmore et al.(1998)によって、英国Trent川においては、クロロフィル-aが流下過程で、春には増加し晩夏には減少することが明らかにされている。流速が明示的に示されていないが、2種類のクロロフィルの変化速度に関する表示(1/kmと1/d)より流速を推定することができ、観測時の流速の範囲は10cm~30cm/s程度と推定された。また、クロロフィル-a濃度の増加が顕著であった時点においては、流速が16cm/s~23cm/sであったと報告されている。

本研究では、流動を用いて植物プランクトンの増殖を抑制し、水域の水質浄化を達成できる可能性があるのかについて、植物プランクトンの増殖に影響を及ぼす因子として栄養塩、水温、照度などの他に流速を取り上げ、植物プランクトンの増殖速度について検討する。

2 研究方法

本研究においては、流動の藻類増殖に及ぼす影響について、現地実験と室内実験により検討を行った。

*岡山大学自然科学研究科

**岡山大学環境理工学部

2.1 現地実験の方法

現地実験を行った池は Fig.1 に示すようであり, 岡山空港ゴルフ場にある修景用に作られた人工の池である. この池は総面積が約 410m² で, 水深が約 0.6m であり, 底はコンクリートで固められている. 水位を一定に保つために山地からの水が常時流入しており, 池の水位は一定に維持されている. 観測に際して池を止水フェンスで3分割し, 平均流速約 30cm/s の池 (No.1 の池), 平均流速約 10cm/s の池 (No.3 の池), 及び, 人工的な流動を与えない池 (No.2 の池) を作り, 定期的に観測を続けた. なお, 流速 30cm/s の池では底泥の巻上げが生じたので, 流動は夜間に発生させることとした. また, 水平循環流を水中ミキサーで発生させたので, 池の中心部等ではこれよりも流速が遅い水域が存在した. 止水フェンスによって, 完全に水の出入りを止めることができず, 各池の水位はほぼ同一に保たれていた. また, 池によって僅かながら水温が異なっていた. 観測は 1997 年 9 月下旬より開始し, 1998 年 9 月までほぼ毎週一度行った. 現地では, 流速, 水温を計測し, 水質分析は実験室に持ち帰って行った. 水質分析の項目は, クロロフィル a, SS, 窒素, リン及び, 回数には少ないが COD であり, 上水試験方法 (日本水道協会, 1993) に準拠した.

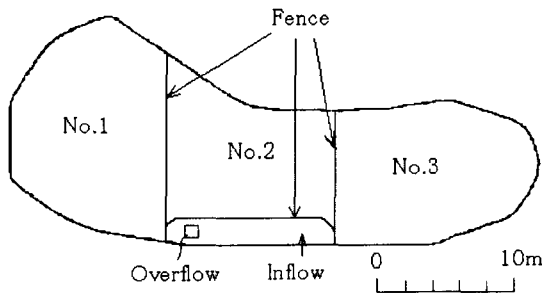


Fig.1 Outline of the pond used for field experiments

2.2 室内実験の方法

室内実験に供した藻類については, 混合培養系と純培養系の藻類であった.

混合培養系の場合には, 現地実験を行った池から藻類を含む水を採取し, これに Chu-10 改変培地 (日本水道協会, 1993) を 1 m l / l の割合で添加して実験を行った. Fig.2 に示すような水槽を用いて, 異なる流速を与えた水槽 2 つとコントロールとして流速を与えない水槽 1 つとを用いた. 水深については, 水深方向の照度の減衰が大きくなるようにすることと, サンプルングによる水量の減少量の割合が大きくなることを考慮して, 約 10cm に一定とした. 流速を与えた水槽は, 試作した円形水路で水車の回転速度により流速を 0-50 cm/s の範囲でコントロールできる. 実験室内で昼夜を設定するために, 従来の研究 (小島ら, 1995 ; 西澤ら, 1979) を参考にして, タイマーにより 12 時間ごとに蛍光灯 (照度 2000lux) の点灯

と消灯を繰り返した. 水温はヒーターでコントロールした. クロロフィル a の経日変化, 実験開始前の栄養塩濃度及び藻類の種構成, 並びに, 実験終了時の栄養塩濃度及び藻類の優先種について調べた.

純培養実験の場合には, 予めの培養により *Chlorella* (緑藻類) のみが高濃度で卓越する培養液を蒸留水で希釈し, MA 培地 (日本水道協会, 1993) を 1 m l / l の割合で添加して実験を行った. なお, MA 培地は藍藻類と緑藻類の両者に適した培地とされている. 混合培養の場合と同様に, Fig.2 に示す水槽 4 つを用い, 3 つの水槽に流動を与え, 一つの水槽はコントロールとして流動を与えなかった. 照度については, 夏期の日射量を想定して 8000lux に設定し (西澤ら, 1979), 水温については室温の空調によるコントロールと水中ヒータにより 24℃ にコントロールした. 実験中はクロロフィル a と栄養塩濃度の経時変化を測定した.

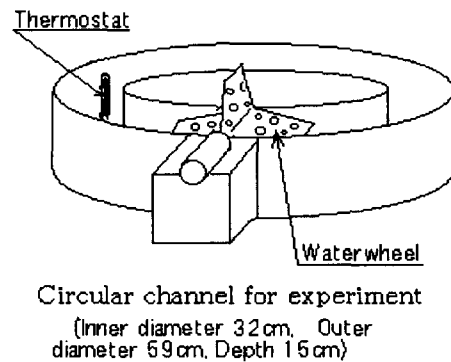


Fig.2 Circular channel for laboratory experiment

3 現地実験の結果と考察

現地での流動実験における水質変化の結果を Fig.3 ~ Fig.7 に, 各池における藍藻類, 珪藻類, 緑藻類などの藻類種の変化について Fig.8 ~ Fig.10 に示す

3.1 クロロフィル a の変化

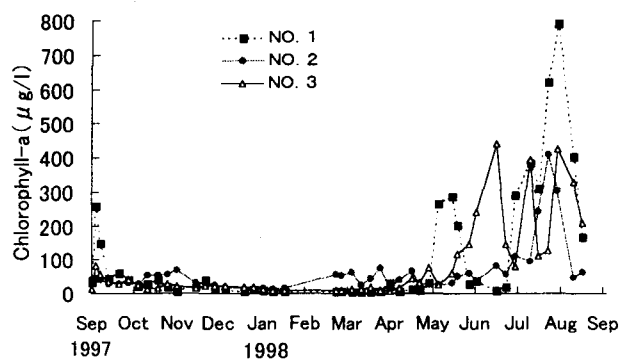


Fig.3 Variation of chlorophyll-a in each pond

各池におけるクロロフィル-a 濃度については、1997年9月から11月、12月から1998年4月、並びに5月以降の時期に3分割できる。実験初期の9月から11月までは、池 No.1での底泥の巻き上げや水中ミキサーのトラブル等により実験条件が安定しなかった。12月から翌年の4月までは比較的安定な条件下で実験が行われ、5月以降の最後の時期には、水温が上昇しただけでなく窒素やリンの濃度が大きく増加したので、クロロフィル-a が大きく増加した。

池 No.1では、実験当初は底泥の巻き上げが生じたために、クロロフィル-a が高い値 ($60 \mu\text{g/l}$) であった。その後徐々に値は下がり $10 \mu\text{g/l}$ 前後となった。池 No.2では10月下旬から、栄養塩濃度の増加に伴い急に増加したが12月に約 $70 \mu\text{g/l}$ となってからは値も下がり、12月下旬から池 No.3よりも値は低くなった。池 No.3では時間とともに値は低下し、 $20\sim 30 \mu\text{g/l}$ 前後で変動した。

流動の効果を検討できるのは、実験条件が安定していた3月前後の時期であるが、流動のない池 No.2に比べ流動を発生させている2つの池でクロロフィル-a 濃度が低く、幾分流動による増殖抑制効果が現れているようである。

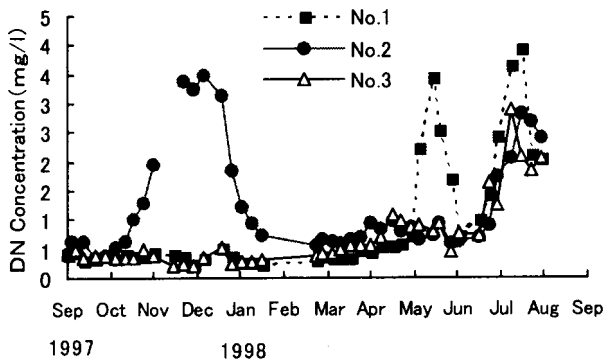


Fig.4 Variation of DN in each pond

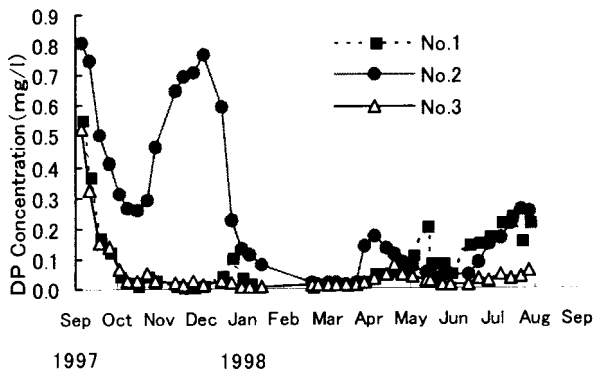


Fig.5 Variation of DP in each pond

各池における栄養塩変化は、Fig.4, Fig.5 のようであった。各池における栄養塩の時間変化は、汚水処理水の流入や降雨時の芝生に散布された肥料の流入などの影響を受けて、複雑な変化を示した。

3.2 藻類の変化

藻類の変化について、1998年1月から9月まで各池で採取して、優先種と個体数について観測を行った。藻類を大きく藍藻類、珪藻類、緑藻類に分けて、各池の藻類種の変化を検討すると以下のものであった。緑藻類は、流速のない池や 10 cm/s 池では大量に発生する時期があったが、流速が 30 cm/s の池では常に僅かしか存在しなかった。珪藻類では、冬季に流速 30 cm/s の池で大量に発生したが、他の2つの池では4月以降に発生のピークが生じた。藍藻類については、流速のない池よりも流速の大きい池のほうで細胞数が多い傾向であった。

各池においては、藻類種の変化の異なることが分かったが、流動により、藻類種に与える影響がある傾向があることから、ここでは、水温が上昇した3月以降の各池における藻類種の変化を水質や流動と関係付け比較検討を行った。

3月中旬からは気温が上昇し、水温が 12°C 以上になった。この時期には、流動のある池 No.1, 池 No.3での藻類の優占種は珪藻類の *Aulacoseira* 属であった。また、流動のない池 No.2では緑藻類の *Ankistrodesums falcatus var.mirabilis* (日本名イトクズモ, 66000 cells/ml , 細胞の幅 $2\sim 3 \mu\text{m}$ で長さ $150 \mu\text{m}$) と *Chlamydomonas* 属 (20000 cells/ml 細胞は幅 $5\sim 12 \mu\text{m}$, 長さ $10\sim 17 \mu\text{m}$) が優占種であった。

4月中旬になると、流動の無い池では、緑藻類の *Ankistrodesums alcatu var.mirabilis* (230000 cells/ml) と藍藻類の *Phormidium tenue* (3300 cells/ml) が優占種になった。流動のある池の No.1 および No.3 の池のクロロフィル-a 濃度は、 $5 \mu\text{g/l}$ と $20 \mu\text{g/l}$ の前後で変動した。流動のない池においては、クロロフィル-a 濃度が $56 \mu\text{g/l} \sim 77 \mu\text{g/l}$ の濃度に達した。この時期の DN, DP の濃度からみると、No.1~No.3 の池の DN 濃度はそれぞれ $0.31, 0.57, 0.38 \text{ mg/l}$, DP 濃度は $0.017, 0.015, 0.011 \text{ mg/l}$ であった。流動のある池 No.1 と池 No.3 では栄養塩が十分な濃度であるにもかかわらず、藻類がほとんど増加しなかった。

1998年5月下旬からは、流動有無によらず各池のクロロフィル-a 濃度が大きく増加したので、各池ごとに藻類種の変化を考察する。

池 No.1では、5月下旬に水の華が発生したが、この時期、藍藻類の *Anabaena* 属 (1100 cells/ml 糸状体で直径 $9.5\sim 12 \mu\text{m}$ 長さ $17\sim 26 \mu\text{m}$), 珪藻類の *Aulacoseira* 属 (4900 cells/ml , 殻径 $3\sim 21 \mu\text{m}$, 殻高 $5\sim 18 \mu\text{m}$) 及び緑藻類の *Holmidium* (7000 cells/ml) 属が優先種となっていた。栄養塩の急増に伴ってクロロフィル-a も増加した。

6月中、下旬には、池 No.1での優占種は藍藻類の *Phormidium tenue* (12000 cell/ml , 直径 $1\sim 2 \mu\text{m}$ で、長さは $2.5\sim 5 \mu\text{m}$) であった。6月下旬から7月の中旬までは、クロロフィル-a 濃度が $10 \mu\text{g/l}$ 程度に低下した。DN,

DP 濃度の低下や水温の低下の影響を受けたと考えられた。7月24日には、水温は30℃まで上昇し、また、溶存態栄養塩も上昇したことにより、クロロフィル-a濃度が急増した。この時の優占種は藍藻類の *Anabaena* 属 (4500cells/ml) と緑藻類の *Schroederia setigera* (2800cells/ml, 細胞は幅3~6μm, 長さ100~200μm) であった。

8月中旬に入ると優占藻類種が藍藻類の *Microcystis areruginosa* (群体数, 11000cells/ml) になった。7月下旬から8月まで、DNは2.0mg/l以上で、DPは0.15以上であった。

池 No. 2では、5月中旬から7月下旬の間、優占種は緑藻類の *Sphaerocystis Schroeteri* (6月下旬の濃度は29000cells/ml, 7月中旬の濃度は43000 cells/ml, 細胞直径6~22μm) であった。クロロフィル-a濃度は時間とともに増加し、7月下旬には109.5μg/l, 8月中旬には410μg/lまでになった。8月の優占種は藍藻類の *Microcystis areruginosa* (群体数で計数, 1200cells/ml) であり、DNは2.8mg/l, DPは0.26mg/lであった。

池 No.3では、5月下旬の優占種は、緑藻類の *Sphaerocystis Schroeteri* (32000cells/ml) であり、クロロフィル a の濃度が76μm/lに上昇した。6月中旬に、水中ミキサーが故障し、7月下旬まで流動が停止した。6月の終わりに緑藻類の *Sphaerocystis Schroeteri* が大発生し (200000 cells/ml), クロロフィル-a濃度も440.7μm/lまで上昇した。7月下旬の優占種は藍藻類の *Merismopedia tenuissima* (1900cells/ml) と *Phormidium tenue* (1300cells/ml) であった。8月には、優占種とクロロフィル-aの変動が大きかった。DP濃度が低いため、リン制限となり、優占種としての藍藻類の増殖が抑制されたと考えられた。

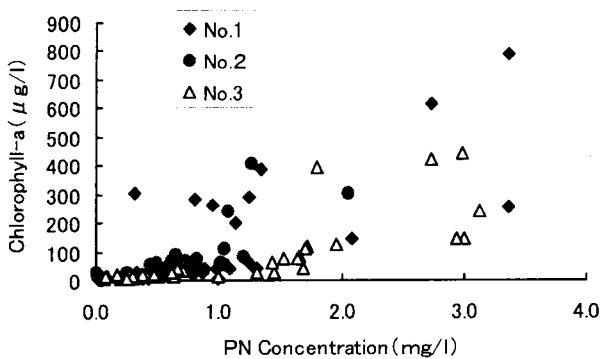


Fig.6 Relation between PN and chlorophyll-a

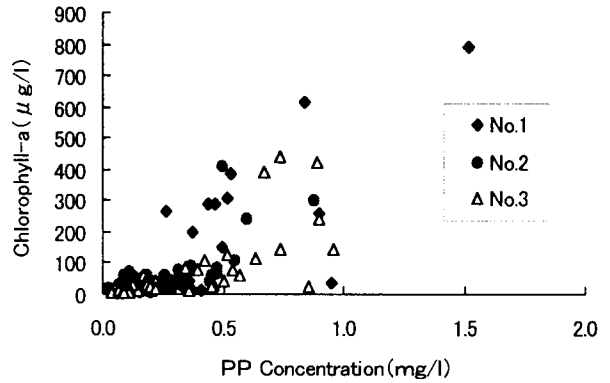


Fig.7 Relation between PP and chlorophyll-a

次にクロロフィル-a濃度とPN濃度もしくはPP濃度との関係を検討する。Fig.6, Fig.7に示すようにPN濃度およびPP濃度とクロロフィル-a濃度の関係はすべての池において正の相関が認められるが、かなり大きな分布幅が存在する。各池の藻類は大発生と死滅を繰り返しており、死滅後の藻類が浮遊物として存在していることが影響していると考えられる。

DN, DP濃度の変化より、藻類が大発生すると、栄養塩濃度が一時的に不足し、藻類の増殖が抑制されていた。

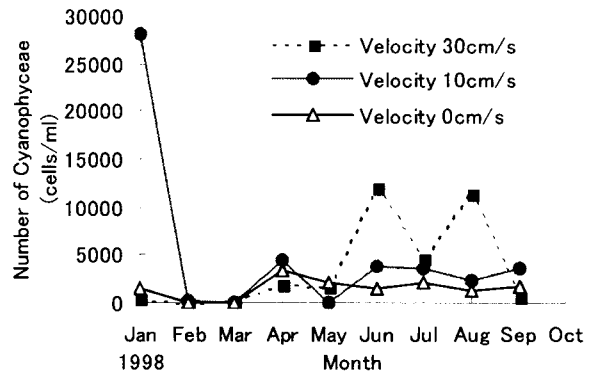


Fig.8 Variation of Cyanophyceae in experiment period

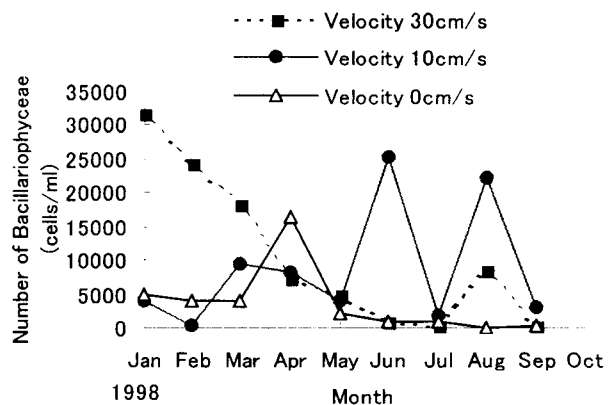


Fig.9 Variation of Bacillariophyceae in each pond

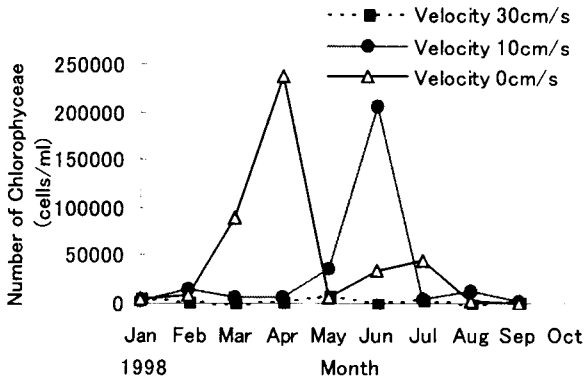


Fig.10 Variation of *Chlorophyceae* in each pond

現地観測を行った池において、藍藻類 *Microcystis aeruginosa* が大発生したとする場合は、水温が 25℃以上、DN が 2.0mg/l 以上、DP が 0.1mg/l 以上、並びに N/P が 20 以下の条件であった。このような条件は、藤本ら (1995) による藍藻類についての N/P 関する研究結果や、藤田・大城 (1989) が指摘している藍藻類の増殖に及ぼすリンが影響することの結果に一致するものであった。

4 室内実験の結果と考察

4.1 混合培養実験の結果と考察

藻類の増殖には栄養塩や水温などの様々な要因が関与し、現地実験においては、これらの条件を制御するのは、困難である。そこで流動の影響のみを明確にするために、室内実験を行った。

混合培養における実験条件は Table 1 と Table 2 に示す。実験結果を Fig.11, Fig.12 に示す。どの実験においても、静止した場合に増殖が早く、流速を与えた場合は増殖が遅くなっている。Fig.11 は昼間および夜間の各時間帯の中間で採水した場合で、Fig.12 は昼間、もしくは夜間の最後に採水した場合である。夜間にクロロフィル-a が減少し、昼間にクロロフィル-a が増加している様子が伺える。Fig.11, Fig.12 に示したクロロフィル-a 濃度の経時変化により、明らかに静置した水槽での藻類増殖が大きく、流速を与えると増殖が抑制されることが伺える。ただし、流速 40cm/s の場合と流速 10cm/s の場合とで多少違いがあるが、流速差による相違は 10 - 40 cm/s の範囲では明確ではない。

Table 1 Current velocity in mixed culture experiment

	Period (day)	No.1 Velocity (cm/s)	No.2 velocity (cm/s)	No.3 velocity (cm/s)
RUN1	5.5	40	10	0
RUN2	6	40	10	0

各水槽間には、水の蒸発速度の違いによる水温差が幾分ついているが、何れの水槽の水温は最適増殖温度の範囲にある。西澤ら (1979) によれば、いずれの藻類においても増殖の最適水温付近では、水温変化の影響が小さいことが示されており、松岡 (1984) によれば 26~29℃の温度範囲内では水温変化が藍藻種 *Microcystis sp* の増殖に及ぼす影響は一分以内の差と推定できるとしている。

また、次式で示す藻類増殖式 (岩佐, 1990) における

$$G_M = \mu_{max} \left(\frac{DN}{K_{mN} + DN} \right) \left(\frac{DP}{K_{mP} + DP} \right) \left(\frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \right)^\epsilon \beta$$

温度影響係数 $(T/T_{opt} \exp(1 - T/T_{opt}))^\epsilon$ によって、本実験で生じた水温差の影響を試算すると、水温差の影響は、実験結果で生じている増殖の差の影響からすると十分に小さいと判定された。

混合培養系を用いた実験 RUN1, RUN2 においては、供試した藻類と実験後の優先種について、Table 3~Table 6 に示す。

Table 2 Other conditions in mixed culture experiment

	Sampling time	Measured temperature (°C)		
RUN1	Middle of daytime and nighttime	26	27	29
RUN2	End of daytime and nighttime	26.5	27.5	29.5

Table 3 Algae species before RUN1

Algae species	Number (cells/ml)
Cyanophyceae	
<i>Microcystis aeruginosa</i> *	240
Bacillariophyceae	
<i>Aulacoseira sp</i>	4000
<i>Nitzschia amphibia</i>	160
<i>Nitzschia palea</i>	3100
Chlorophyceae	
<i>Oocystis sp</i>	100
<i>Pediastrum boryaum</i>	380
<i>Staurastrum paradoxum</i>	120
<i>Cosmarium sp</i>	500
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	440
<i>Other green algae sp</i>	370

*The colony number

**The filament number

Table 4 Algae Species after RUN1

Sample	Velocity 40cm/l	Velocity 10cm/l	Velocity 0cm/l
Algae species	cells/ml	cells/ml	cells/ml
Cyanophyceae			
<i>Microcystis aeruginosa</i> *	2300	1900	2200
<i>Phormidium sp</i> **	9000	6100	6000
Bacillariophyceae			
<i>Nitzschia palea</i>	60000	1700	77000

*The colony number

**The filament number

Table 5 Algae species before RUN2

Algae species	Number (cells/ml)
Cyanophyceae	
<i>Microcystis aeruginosa</i> *	3400
<i>Microcystis wesenbergii</i> *	180
<i>Phormidium sp</i> **	590
Bacillariophyceae	
<i>Aulacoseira sp</i>	16000
Chlorophyceae	
<i>Oocystis sp</i>	180
<i>Pediastrum boryaum</i>	920
<i>Cosmarium sp</i>	520
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	920
<i>Other green-algae sp</i>	310

*The colony number

**The filament number

Table 6 Algae species after RUN2

Sample	Velocity 40cm/l	Velocity 10cm/l	Velocity 0cm/l
Algae species	(cells/ml)	(cells/ml)	(cells/ml)
Cyanophyceae			
<i>Microcystis aeruginosa</i> *	3000	2800	5100
<i>Phormidium sp</i> **	2200	1300	1400
Bacillariophyceae			
<i>Aulacoseira sp</i>	110000	74000	110000
<i>Nitzschia palea</i>	58000	29000	62000

*The colony number

**The filament number

実験RUN1とRUN2においては、開始前には様々な藻類種が存在したが、実験後においては、流速がない水槽

と流速がある水槽のどちらにおいても同じ種が卓越し、優先種は、藍藻類の *Microcystis aeruginosa* (群体数) と *Phormidium sp* (糸状体数) および珪藻類の *Nitzschia palea* であった。流速がない水槽と比べて流動のある水槽での優先種として藻類量が明らかに少なく、クロロフィル-a 濃度も、流動がある二つの水槽の濃度が低い。流速がある水槽で藻類増殖が抑制されることが明らかだと判定できる。しかし、藻類数の計測結果によれば、流速 10 cm/s の水槽における藻類の群体数もしくは糸状体数が少ない。このようなクロロフィル-a 濃度と藻類数との矛盾は、その群体及び糸状体の大きさに関係していると考えられる。

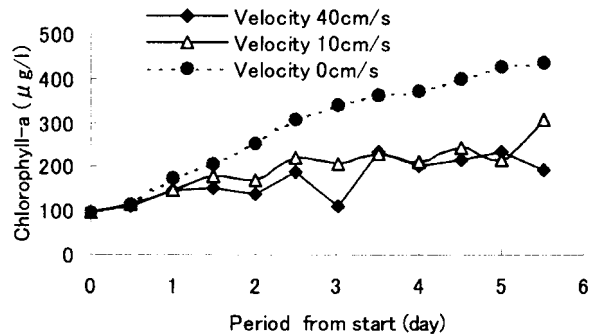


Fig.11 Change of chlorophyll-a in RUN1

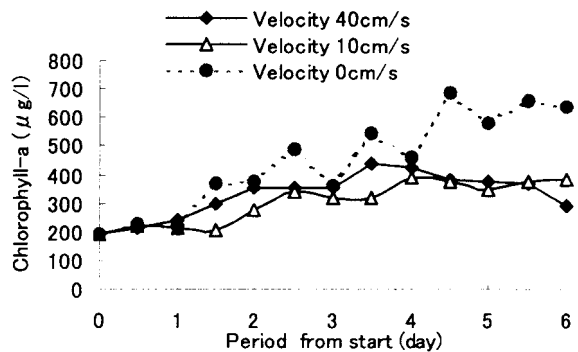


Fig.12 Change of chlorophyll-a in RUN2

4.2 緑藻類を用いた室内実験の結果

藻類の混合培養系を用いて流動の影響を検討した結果では、藻類増殖が流動によって抑制されるという結果が得られたが、混合培養系の場合には藻類種を一定にすることが困難であり、実験ごとに藻類種が変化するので、時期の異なる実験結果には藻類種の影響が含まれる。そこで、藻類の純培養系を用いて流動実験を行った。今回は河川水に含まれる藻類を培養し、卓越した *Chlorella* (単細胞緑藻類) を用いて、流動の増殖に与える影響を検討した。今後の実験として予定している藍藻類 *Microcystis* 純培養実験と比較するため、藍藻類と緑藻類の両方に適した培地である MA 培地を用いた。藻類の純培養系を用いた実験 RUN3, RUN4は、Table 7 と Table 8 に示すような実験

条件で行った。本室内実験では四つの水槽を用いた。各水槽の流速は Table 7 に示すようにそれぞれは 0, 5, 10, 20cm/s に設定した, 各実験ではクロロフィル-a の経時変化と栄養塩濃度の変化について分析を行った。

Table 7 Current velocity in pure culture experiment

	Period (day)	No.1 Velocity (cm/s)	No.2 velocity (cm/s)	No.3 velocity (cm/s)	No.4 velocity (cm/s)
RUN3	6.5	5	10	20	0
RUN4	7	5	10	20	0

Table 8 Other conditions in pure culture experiment

	Sampling time	Measured temperature (°C)			
		No.1	No.2	No.3	No.4
RUN3	End of daytime and nighttime	24	24	24	24
RUN4	End of daytime and nighttime	24	24	24	24

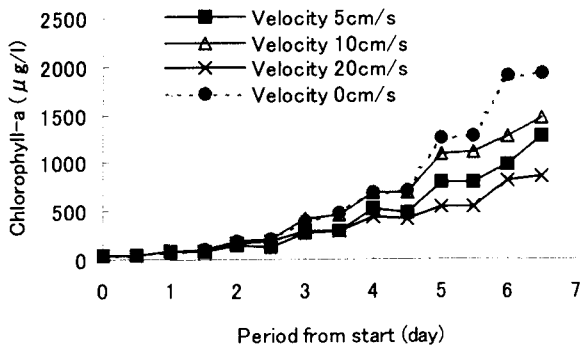


Fig.13 Change of chlorophyll-a in RUN3

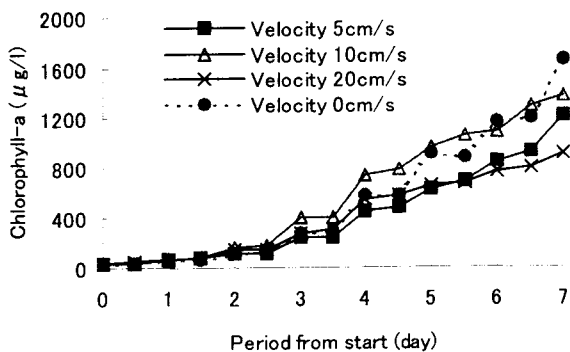


Fig.14 Change of chlorophyll-a in RUN4

Fig.13 と Fig.14 に、各水槽におけるクロロフィル-a の増殖変化を示した。流速の違いにより、藻類増殖速度に違いが生じた。流速のない水槽では藻類増殖大きく、流速のある水槽では藻類増殖速度が抑制されていた。実験 RUN 3 と RUN 4 の場合、流速の変化による藻類増殖の差はさほど大きくないが、流速 20cm/s の場合に最も増殖速度が遅くなり、流速がない場合に増殖速度が大きくなった。これらより、流動が藻類の増殖速度に影響していることが明らかである。グラフを詳細に見ると、どちらの実験でも、培養の前半と後半とで増殖の傾向が異なり、後半部分では、流速が小さくなるほど増殖速度が大きくなっているが、詳細な検討は、今後の検討課題である。

4.3 増殖速度の検討

混合培養系における藻類の増殖速度と流動との関係性を定量的に検討するために、植物プランクトンの増殖速度式を用いて、クロロフィルの経日変化を回帰し、得られたパラメータに基づいて検討を加えた。

植物プランクトンの増殖速度 G_M は様々な環境要因により左右されるが、本実験においては照度を 2000lux に一定としたため、ここでは藻類の増殖速度は、栄養塩濃度、スペース効果及び水温の影響を受けると考え、藻類の増殖速度 G_M として次のような式を用いた。

$$G_M = \mu_{max} \left(\frac{DN}{K_{mN} + DN} \right) \left(\frac{DP}{K_{mP} + DP} \right) \left(\frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \right)^\xi \beta \quad (1)$$

ここで、 μ_{max} は最大比増殖速度 (1/d)、 K_{mN} は窒素の半飽和定数 (mg/l)、 K_{mP} はリンの半飽和定数 (mg/l)、 DN は溶存態窒素濃度 (mg/l)、 DP は溶存態リン濃度 (mg/l)、 T は水温 (°C)、 T_{opt} は最適水温 (°C)、 ξ は定数、 β はスペース効果の影響係数で、 $\beta = \exp(-\sigma C_{chla})$ とした。(σ : 定数、 C_{chla} : クロロフィル-a 濃度)。

また、植物プランクトンの死滅速度 K_d により、被捕食、呼吸による自己分解、自然死等を総合的に表し、次の式により藻類の死滅速度を表した。

$$\frac{dC}{dt} = -K_d C_{chla} \quad (2)$$

植物プランクトンの増殖と死滅を考慮すると、クロロフィルの濃度変化は、次の式のようになる。なお、増殖は昼間だけ生じ、死滅は昼間も夜間も生じると仮定している。

$$\frac{dC}{dt} = G_M C_{chla} - K_d C_{chla} \quad (3)$$

スペース効果並びに死滅速度は、いずれもクロロフィル

濃度の増加を低減するように働き、両者を機械的な回帰で同時に求めることは、大きな誤差を生む可能性があるため、実験結果より、スペース効果並びに死滅速度の概略値を次のように求めた。スペース効果を表す定数の平均値 $\tilde{\sigma}$ については、クロロフィル濃度が高くなって増殖速度が減衰した時期における増殖速度 \bar{G} とこの時期のクロロフィルの平均濃度 \bar{C}_{chla} 、及び、初期のスペース効果が無視できる段階の増殖速度 G_M とを用いて、 $\tilde{\sigma} = -\ln(\frac{\bar{G}}{G_M}) / \bar{C}_{chla}$ により求めた。

また、総括的な死滅速度 K_d については、藻類の増殖は昼間に生じ夜間は死滅が卓越することから、正味の死滅速度を夜間のクロロフィル濃度の減少の観測から次のような式を用いて求めた。 $K_d = \ln \frac{C_t}{C_0} / t$

μ_{max} , K_{mN} , K_{mP} , T_{opt} 及び $\tilde{\sigma}$ については、従来の研究から概略値が知られている(岩佐, 1990)。これらの概略値を初期のパラメータ推定値として用いて、回帰により各パラメータを推定した。回帰に用いたデータは実験 RUN1 の結果である。得られたパラメータを Table 9 に示す。これらのパラメータを式(1), (3)に代入して、経時変化の適合性を示すと、Fig.15~Fig.17 のようである。良好に経時変化が再現されている様子がかがえよう。パラメータの値と流速の大小との関係を検討すると、流速がある水槽では、藻類の最大増殖速度が低く、死滅速度が大きいうという結果であった。

5 結論

現地の池での実験と室内実験により、藻類の増殖と流動との関係について考察した。得られた主要な結論は次のようである。

現地実験より、以下の結論が得られた。

(1) 流動によって各池の藻類増殖に違いがあることが分かった。流速が速いと緑藻類の増殖が抑制されると考えられた。他の藻類については、影響が明確ではなかった。

(2) 藻類の増殖は DN, DP と関し、藻類が大発生する場合は、溶存態栄養塩の濃度が高い場合であった。現地観測によれば、藍藻類が大発生する場合は、DN2.0mg/l, DP0.1mg/l 以上の条件であった。また、池での DN/DP の比より、リン制限が生じていたと考えられる。

室内実験より、次の結論が得られた。

(3) 流動により藻類増殖が抑制されることが判明した。

(4) 藻類増殖式 $\frac{dC}{dt} = G_M C_{chla} - K_d C_{chla}$ を用いて藻類

増殖実験の解析を行ない、流動がない場合と流動がある場合と比較すると、流動がある場合に増殖速度が小さく、死滅速度が大きくなるという結果が得られた。

Table 9 Estimated parameters for RUN2

	μ_{max} (1/d)	K_{mN} (mg/l)	K_{mP} (mg/l)	T_{opt} (°C)	σ (l/mgM)	K_d (1/d)
Velocity 40cm/s	1.305	0.01	0.001	28.9	0.0043	0.323
Velocity 10cm/s	1.462	0.01	0.001	30	0.0038	0.343
Velocity 0cm/s	2.049	0.01	0.001	30	0.0040	0.136

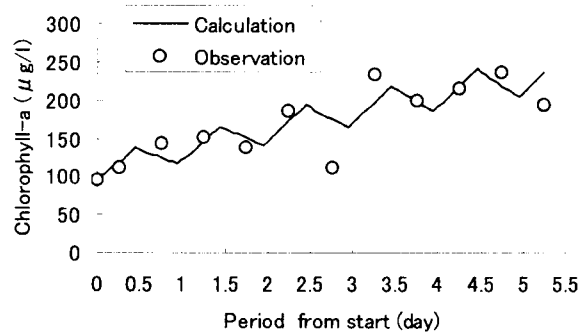


Fig.15 Simulated chlorophyll-a for case of current velocity 40cm/s

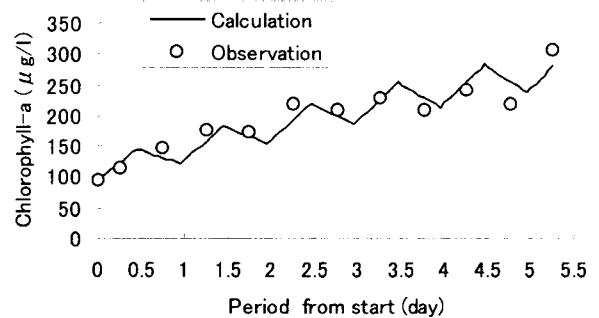


Fig.16 Simulated chlorophyll-a for case of current velocity 10cm/s

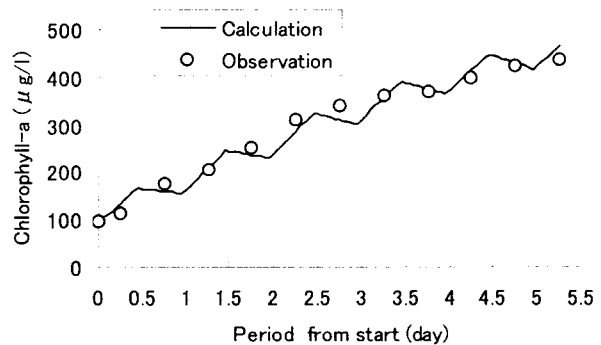


Fig.17 Simulated chlorophyll-a for case of current velocity 0cm/s

謝辞：本研究の遂行に当たり、現地実験に際して、アイサワ工業(株)、岡山空港開発(株)、エコテックマルソル(株)の関係各位に協力をいただきました。また、当時の院生、学生諸氏には試料採取等で協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(c)による助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 藤田善彦, 大城 香 (1989): ラン藻という生き物, 東京大学出版会, pp.101-107.
- 藤本尚志, 杉浦則夫, 稲森悠平, 須藤隆一 (1995): 湖沼の富栄養化原因藍藻類の種構成に及ぼす N/P 比及び水温の影響, 湖沼の富栄養化第 6 回世界湖沼会議霞ヶ浦 '95 論文集, Vol.2, S3-8,5, pp.830-833.
- 合田 健, 山本剛夫, 中西 弘, 津郷 勇, 西田 薫 (1977): 衛生工学, 新訂版, 彰国社刊, p.245.
- 岩佐 義朗 (1990): 湖沼工学, 山海堂, pp.215-218, pp.305-353.
- Kawara, O., Yura, E., Fuji, S., and Matsumoto, T., (1998): A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir, *Water Science and Technology*, Vol. 37, No. 2, pp.245-252.
- Kawara, O., Li, J., Ono, Y., (2001): A study on influence of current velocity on growth of phytoplankton, IWA 2nd World Water Congress, CD-ROM.
- 小島 貞男, 須藤隆一, 千原光雄 (1995): 環境微生物図鑑, 講談社サイエンティフィック, pp.131-445.
- 松岡 譲 (1984): 霞ヶ浦の富栄養化モデル, 国立公害研究所研究報告, 第 54 号, p.100.
- 日本水道協会 (1993): 上水試験法, pp.92-94, pp.109-110, pp.182-183, pp.202-203, pp.444-446, pp.590-591.
- 日本水道協会 (1993): 上水試験法 解説編, pp.638-639.
- 丹羽 薫, 久納 誠, 久保徳彦, 古永 充 (1993): 流動制御システムによるダム湖の水質保全の現地実験, 土木技術資料, 35-6, pp.26-31.
- 西澤一俊, 千原光雄 (1979): 藻類研究法, 共立出版, pp.171-223, pp.441-449.
- Skidmore, R.E., Maberly, S.C. and Whitton, B. A.(1998): Patterns of spatial variation in phytoplankton chlorophyll a in the River Trent and its tributaries. *Sci. Total Environ.*, 210/211, 357-365.
- 宗宮 功, 岸本直之 (1998): ダム貯水池で発生する淡水赤潮の現状と問題点, ダム技術, No.144, pp.4-10.
- 浮田正夫, 河原長美, 福島武彦 (1997): 環境保全工学, 技報堂出版, pp. 68-70.