

(24) 浅い湖における底泥の再懸濁化と藻類増殖について

Study on resuspended particulate matter and its contribution
to algal growth in a shallow lake

王 宝臣*、川辺英行*、清水達雄*、井上隆信**、橘 治国*

Baochen WANG*, Hidevuki KAWABE*, Tatu SHIMIZU*, Takanobu INOUE**, Harukuni TACHIBANA*

ABSTRACT ; Resuspended particulate matter and its contribution to algal growth in Lake Barato, a shallow lake of three lake basins, were researched.

Resuspension caused by lake currents was researched by a sediment-trap method. The density distributions of seston, resuspended matter and sediment were analyzed by a density gradient centrifugation method. Turbidity and concentration of particulate iron increased with increases in depth-averaged current velocity in Lake Barato. This indicates that the resuspended particulate matter is mainly from sediment, because the sediment is rich in iron. The particulate matter contains more organic material of lower densities and phosphorus than does the sediment. Bio-available phosphorus content is higher in sediment of the upper lake basin than in that of the lower lake basin, and when the particulate matter of sediment is resuspended, it can provide phosphorus for algae in the upper lake basin. These results indicate that resuspended particulate nutrients can not be neglected in the study of eutrophication of shallow lakes.

KEY WORDS ; Shallow lake, Seston, Resuspended matter, Density gradient centrifugation

1. はじめに

富栄養化が進んでいる湖沼では、藻類の増殖に、流域から流入した栄養塩と底泥からの溶出も含めて湖内で循環している栄養塩が用いられている。藻類増殖時には溶存態栄養塩だけではなく、懸濁態栄養塩も、水中の高い pH 条件や細胞外酵素の働きなどにより藻類に利用されることがわかってきている(橘ら、1986)。この懸濁態栄養塩を含む水中懸濁物質の湖内での動態には、流域からの流入や藻類としての挙動のほか、底泥の舞い上がりや沈降のプロセスが大きく関与していると考えられる。

底泥からの舞い上がりや沈降は、セジメントトラップを用いた沈降量の測定によって解析されることが多い(長田、1970, LASTEIN、1976, 福島ら、1982, 橘・井上ら、1996a、1996b)。橘・井上(1996a)は、浅い富栄養湖における懸濁態栄養塩の循環と関連して、沈降物質の沈降量とその化学組成をセジメントトラップを使用して調査した。その結果、浅い湖沼における沈降捕集物質には自生性のほかに底泥からの舞い上がった成分が多く含まれていること、また水中懸濁物質成分と舞い上がった底泥成分の沈降速度はそれぞれ $0.91\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $22\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ と差があり、それぞれ特徴的な化学組成を持つことを明らかにした。

* 北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻 (Department of Environmental Resource Eng., Graduate School of Eng., Hokkaido University)

** 国立環境研究所水士圏環境部 (Water and Soil Environment Division, National Institute for Environment Studies)

本研究では、浅い湖沼でのさまざまな懸濁物質の循環メカニズムの解明を念頭に、セジメントトラップによって沈降捕集物質の量を測定し、またその密度組成や化学組成を懸濁物質や底泥を含めて調査した。特に密度勾配法を用いて鉱物質と有機物質の割合について検討した。また懸濁物質の藻類増殖能力をAGP試験によって確認し、その湖沼における藻類増殖への寄与について検討した。

2. 研究方法

2. 1 調査水域概要

調査水域である茨戸湖は、図1に示すように上部・中部・下部の湖盆に分離されている。本研究では、上部、下部湖盆を調査対象とした。上部湖盆は、長さ2.6km、貯水量 $1.0 \times 10^6 \text{m}^3$ 、下部湖盆は長さ11.5km、貯水量 $8.7 \times 10^6 \text{m}^3$ である（石狩町、1973）。上部湖盆には流入河川がほとんどなく、閉鎖性が極めて強い。下部湖盆には、札幌市の2箇所の下水処理場からの放流水を受け入れた創成川、伏古川が流入し、また茨戸下水処理場放流水が直接下部湖盆に流入するなど、都市排水の影響を受けている。各湖盆はそれぞれ小さな水路で連結されており、流入した水は下部湖盆の生振運河から石狩川に流出している。調査地点は、St. 12（上部湖盆、水深7.5m）とSt. 4（下部湖盆、水深7.5m）である。

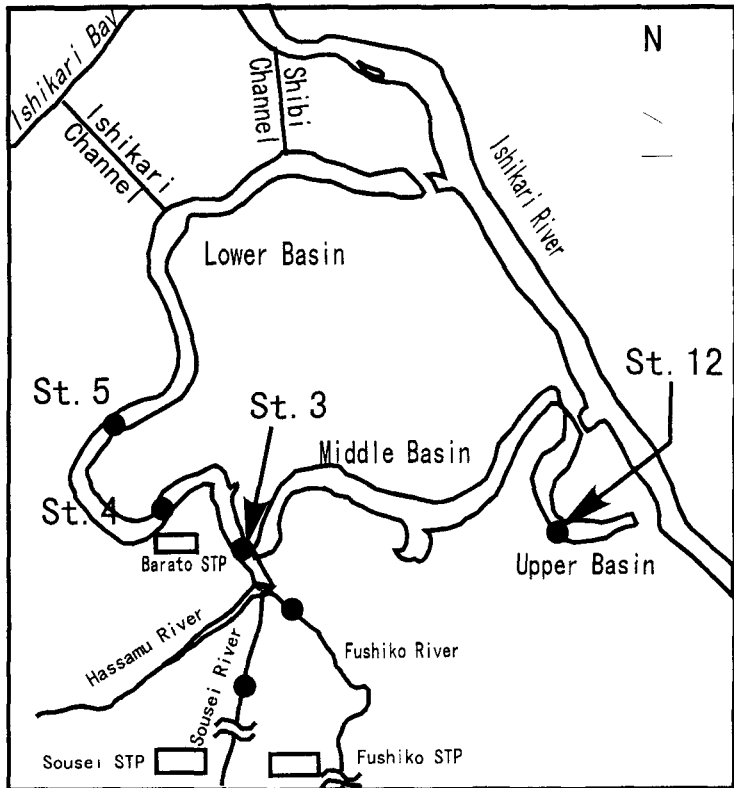


Fig.1 Location of sampling station

2. 2 調査方法

調査は、1997 年の 5 月～7 月にかけて実施した。採水、底泥採取および現場観測（水深毎の水温、溶存酸素、濁度、流向、流速、気温、風向、風速（30 秒、3 回平均））などの現地調査はアンカーで固定したボート上で行った。試料水は水深 0m、3m、6m において 20l 容器にポンプによって採取した。採水した試料は、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターで全液とろ液に分離し分析に供した。また水中懸濁物質の組成を明らかにするため、連続遠心法で水中懸濁物質を分離収集した。懸濁物質については化学組成のほか、密度勾配法によって密度組成を明らかにした。流向、流速の観測にはセンサーデータ社製ロータ式流速計（SD-4、50 秒平均値）を用いた。調査時には沈降物質捕集実験も同時に行った。水質ならびに底質の化学分析は常法（主に水の分析、1994）によった。

2. 3 沈降物質捕集実験

沈降物質の捕集には、セジメントトラップを用いた。福島ら（1984）は浅い湖沼においては口径 5cm、筒長 25cm 程度の円筒形がよいことを報告した。本研究における沈降物質捕集装置として、福島らの報告を基本とした前報（橘・井上、1996a）と同様に、図 2 に示したアクリル製円筒を水深 2m、4m、6m に位置に 4 個ずつ取り付け、セジメントトラップを用い、本装置をアンカーとフロートを用いて湖水中に固定して実験を行った。本実験は、上部湖盆で 6 月 26 日～29 日に、下部湖盆で 6 月 14 日～17 日、26 日～29 日に実施した。

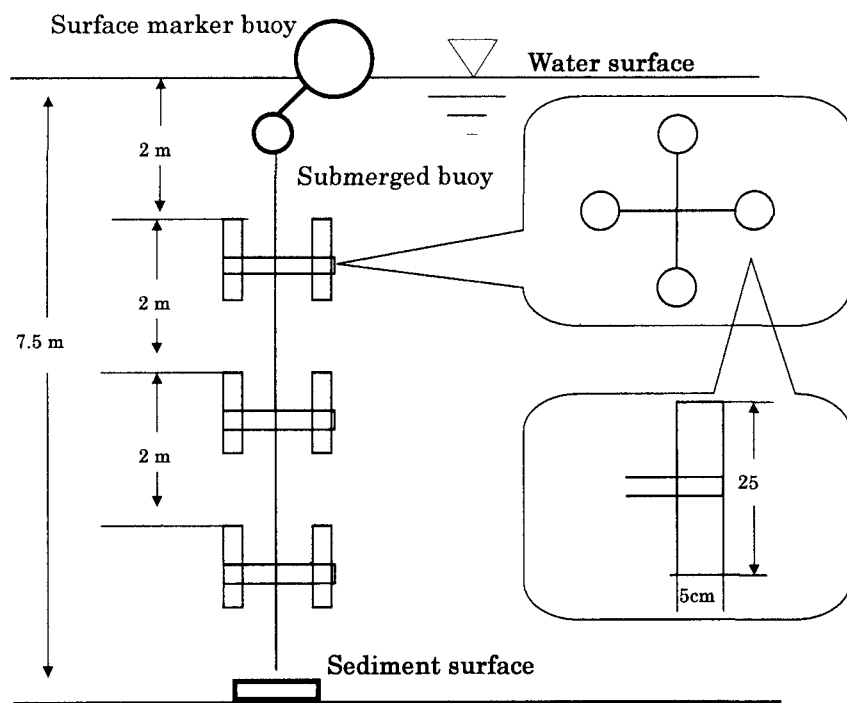


Figure2 Illustration of sediment-trap *in situ*

2. 4 密度組成分析

真空凍結乾燥して保存した懸濁物質、沈降捕集物質及び底泥試料を密度遠心勾配法 (BRITTEN & ROBERTS, 1960) によって密度組成を測定した。重液として Thoulet 液 (ヨウ化第2水銀/ヨウ化カリウム) を使用した (石渡ら, 1977)。Thoulet 液として懸濁物質の構成を参考に密度 $2.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ と $1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の2種を用い、密度勾配液とした。自然界に存在する物質の密度分布は、これまでの資料を参考にすると表1のようにまとめられる。以下に密度勾配法について簡単に説明する。

Table 1. Densities of some materials

Material	Density(g/cm^3)	Author
Kaolinite	2.61 - 2.63	LAMMERS (1962)
Vermiculite	2.65 - 3.20	LAMMERS (1962)
Quartz	2.59 - 2.66	LAMMERS (1962)
Diatomite	2.10 - 2.30	BAAS BECKING & MOORE (1959)
Cellulose	1.50	BAAS BECKING & MOORE (1959)
Organic debris In benthic samples	> 1.12	ANDERSON (1959)
Phytoplankton (growing cells)	1.03 - 1.15	EPPLEY <i>et al</i> (1967)
Phytoplankton (non-growing cells)	1.06 - 1.33	EPPLEY <i>et al</i> (1967)

(1) 密度勾配液の調製

まず 50ml のガラス遠心管の下部に密度 $1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の重液を 15ml 入れ、その後密度 $2.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の重液を 15ml 静かに遠心管の下部に入れて、12 時間静置する。拡散によって遠心管内に密度 $2.4\sim 1.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の密度勾配液が形成される。

(2) 試料の重層と遠心分離

乾燥試料約 10mg を密度 $1.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の Thoulet 液 1ml に入れて、超音波処理によって分散させた後、調整した密度勾配液の上に静かに重層して、懸垂式遠心機 (4000rpm、1 時間) で遠心分離をする。数分間静置後、遠心管底部にステンレス細管 (1mm ϕ) を入れ、吸引ポンプを用いて底部の密度高い液から吸出し、その濁度の分布を測定する。また濁度の分布に対応して液を収集する。液は密度分布に対応して3グループに分けた。

3 グループは電子顕微鏡の観察から次のように観察された。(1) 密度が $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ より小さいもの。主に大型有機物質である (約 6ml)。(2) 密度が $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ より大きく $2.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ より小さいもの。ほとんどが硅藻及び硅藻の殻であった (約 15ml)。(3) 密度が $2.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ より大きいもの。粘土など無機物質と多少の硅藻の殻からなる (約 10ml)。

2. 5 沈降捕集物質と底泥の藻類増殖効果実験

舞い上がった懸濁態リンの藻類増殖効果を調べるために、橘らの方法 (1984) に基づき A G P 試験を行った。供試藻類として *Microcystis Aeruginosa* を用いた。懸濁物質としては、上部湖盆と下部湖盆の沈降捕集物質及び底泥試料を用いた。試料水として St. 12 (上部湖盆) 水深 3m の湖水のろ液のほか、そのろ液に上記の懸濁物質を全液と同じ S S 濃度となるように ($30\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) 混合したものを準備し、A G P 試験を行った。

3. 結果及び考察

3. 1 風による底泥の舞い上がりについて

(1) 風速と流速及び濁度

調査水域の上部湖盆では、水深 1m の流速と風速の相関が強いことが明らかにされている(橘・井上、1996a)。図 3 と図 4 に風速と水深 1 m の流速、および風速と湖水の平均濁度の関係を示した。湖沼では一般的に風が湖水流動の要因の一つとなっている。風速として、茨戸湖近くの地域気象観測所の前日の日平均値(札幌管区気象台編、1997)を用いた。風速が大きくなると湖水の流速が大きく、濁度が高くなる傾向が見られる。この結果から、風によって湖水が循環し、底泥からの舞い上がりが起こっていることがわかる。

(2) 濁度と懸濁物質の乾燥重量

図 5 に示したように、St. 12 (上部湖盆) では濁度が増えると S S も増える傾向が見られる。St. 4 (下部湖盆) での関係を図 6 に示したが、6 月 14 日～17 日、26 日～29 日に分けると、上部湖盆と同じように相関関係が見られる。原因としては、6 月 26 日～29 日の調査前に降雨があったことが考えられる。下部湖盆について、S S 中の有機炭素の割合は 9.3% (26 日) および 12.8% (29 日) であり、14 日と 17 日の、それぞれ 16.7% と 14.5% より低く、降雨時には密度の高い粘土などの無機物質が流域から流入していることがわかる。

(3) 流速と濁度及び懸濁態鉄

図 7 に湖水の平均流速と濁度の関係を示した。本研究では、湖水の全体的な動きが底泥からの舞い上がりを支配するものと考え、深さ 1m 間隔の湖水流速の平均値を湖水の平均流速とした。また、深さ 1m 毎の濁度の平均値を全体的な舞い上がりとした。上部湖盆 St. 12 では、強風時の調査ができず、橘・井上 (1996a) が認めたような両者の明瞭な関係が認められなかった。しかし流速が大きくなると舞い上がりが大きくなることがわかる。図 8 に上部湖盆 (St. 12) における湖水の平均流速と水深が 0m、3m、6m の懸濁態鉄濃度の関係を示した。流速が大きくなるほど各水層の懸濁態鉄濃度の高くなることがわかる。上部湖盆において、懸濁態鉄の濃度が St. 12 の底泥でもとも高く、沈降捕集物質、水中懸濁物質の順に低くなることが橘・井上 (1996a) により報告されている。今回、鉄の含量を、沈降捕集物質、水中懸濁物質および底泥のほか、岸域の泥について調べた。鉄の含量は底泥で高く (約 9.6%)、ついで沈降捕集物質 (約 9.0%)、水中懸濁物質 (1.3～3.8%) と岸域の泥 (0.5～0.8%) の順に低くなる。底泥の湖水中への舞い上がりが流速すなわち風速に依存していることは確実であり、底泥が再懸濁化に寄与していることは間違いない。

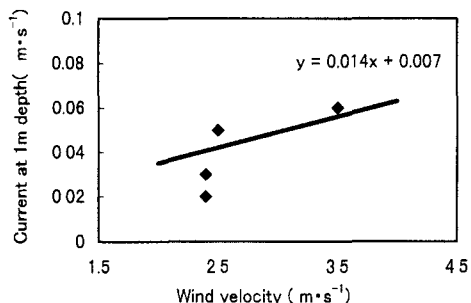


Fig.3 Relationship between wind velocity and current at 1m depth at St. 12. The line shows the relationship reported by Tachibana and Inoue(1996)

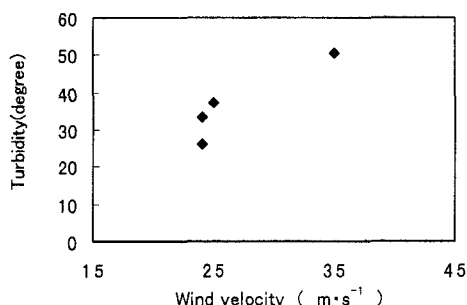


Fig.4 Relationship between wind velocity and mean turbidity at St. 12

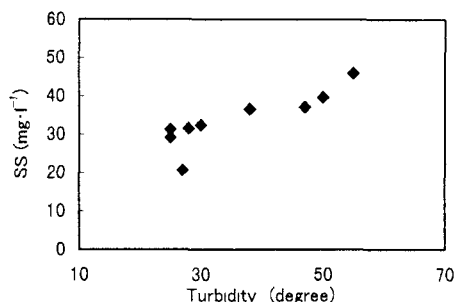


Fig. 5 The relationship between the concentration of SS and turbidity at St. 12

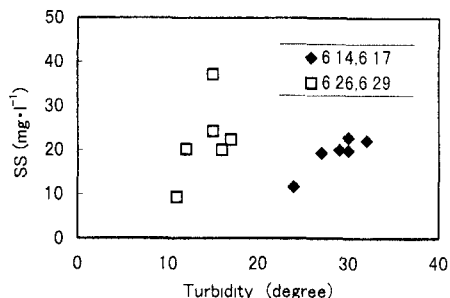


Fig. 6 The relationship between the concentration of SS and turbidity at St. 4

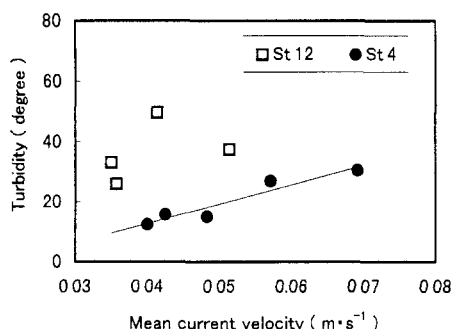


Fig. 7 The relationship between mean current velocity and mean turbidity in Lake Barato

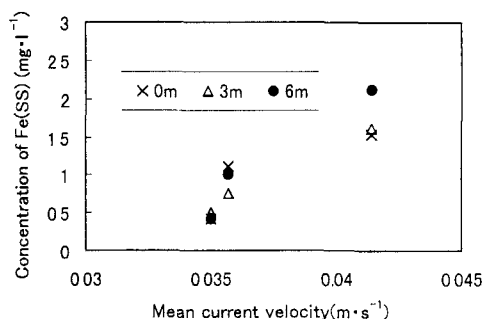


Fig. 8 Relationship between current at 1m depth and the concentration of particulate Fe in Lake Barato

(4) 懸濁物質の循環

各水層の沈降捕集物質は、単純に上層からの沈降物質以外の部分を舞い上がり負荷と仮定すると、各水層の沈降捕集物質質量と底泥から各水層への舞い上がり負荷は図9のようになる。底質からの舞い上がり負荷を、各水層(0~2m、2~4m、4~6m)の沈降捕集物質質量から上層の量を差し引いた値とした。0~2mの表層の沈降捕集物質は舞い上がりだけではなく、藻類の増殖による内部生産や外部負荷の影響を強く受ける。しかし表層の沈降捕集物質質量(例えば上部湖盆 St. 12 では $94.3\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)のうち、内部生産が $10\sim 20\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ と報告されているので(橘ら 1996a)、舞い上がり物質の割合は 80%から 90%となり、かなり大きいことがわかる。このことは湖沼における栄養塩の循環を考える場合極めて重要な事実といえる。水深が大きくなると沈降捕集物質質量が増加した。また6月26日~29日の上部湖盆の沈降物質質量は下部湖盆の5.8(2m)倍、6.1(4m)倍、4.9倍(6m)となった。風の影響による舞い上がりが下部湖盆より上部湖盆で起こりやすいことがわかる。下部湖盆では地形的に風の影響を受けにくく、また下部湖盆低層部に石狩湾からの海水が混入するため、底泥が舞い上がりにくいと考えられる。

ここで水深 6m の沈降捕集物質が上層から底泥まで沈降すると仮定して、水深 6m の沈降捕集物質質量 ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) を水中懸濁物質の平均濃度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) で除した値を沈降速度とすると、St. 12 (上部湖盆) は $4.4\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、St. 4 (下部湖盆) は $1.6\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ になった。滞留時間に換算すると St. 12 は 1.4 日、St. 4 では 3.8 日になる。水深 2m の滞留時間はそれぞれ 0.7 日と 2.1 日となる。

沈降物捕集実験から、浅い湖沼においては風により底質がかなり速い速度で循環していることがわかる。

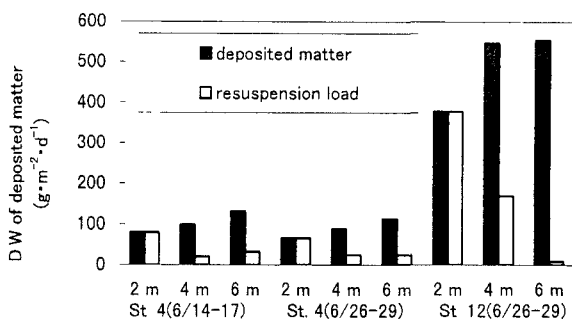


Fig.9 Deposited matter and resuspension load of different depth at St. 4 and St. 12

3. 2 懸濁物質・沈降捕集物質・底泥の密度組成

密度勾配遠心分離法により得られた St. 12（上部湖盆）と St. 4（下部湖盆）の懸濁物質、沈降捕集物質及び底泥の密度分布を図 1 0 と図 1 1 に示した。

（1）懸濁物質と沈降捕集物質の密度組成について

水中懸濁物質と沈降捕集物質の密度は $1.95 \sim 2.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ のものがほとんどで、これらには珪藻と珪藻殻が大きな割合で存在することがわかった。表層の懸濁物質は密度の低い物質（密度 $< 1.95 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）の割合が高く、内部生産の影響が大きいことがわかる。懸濁物質と沈降捕集物質の密度は、 $2.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ より重い鉍物質の含量が低く、底質から密度の低い物質が舞い上がっていることがわかる。下部湖盆の沈降捕集物質では鉍物質（密度 $> 2.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）の割合が水中懸濁物質より高い。このことは、沈降物質捕集実験の前の降雨によって、流入河川から粘土など無機物質が流入したためと考えられる。

（2）底泥の密度組成について

St. 12（上部湖盆）と St. 4（下部湖盆）の底泥の密度組成分析結果から、底泥に含まれている鉍物質の割合が下部湖盆より上部湖盆において高いことがわかる。この差は、上部湖盆の方が風により生じる舞い上がり強いことによるものといえる。また舞い上がりによって再懸濁化する物質は底泥だけではなく、沿岸域底泥の鉍物質も再懸濁化していることが推察される。

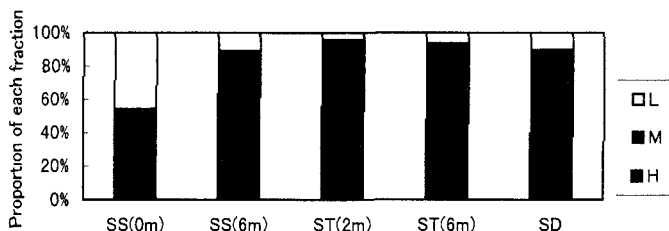


Fig.10 The proportion of three fractions of particulate materials according to density ranges at St. 12. (L $< 1.95 \text{ g/cm}^3$; M: $1.95 \sim 2.35 \text{ g/cm}^3$; H $> 2.35 \text{ g/cm}^3$. SS: seston, 6/29; ST: deposits in sediment traps 6/26-29; SD: sediment)

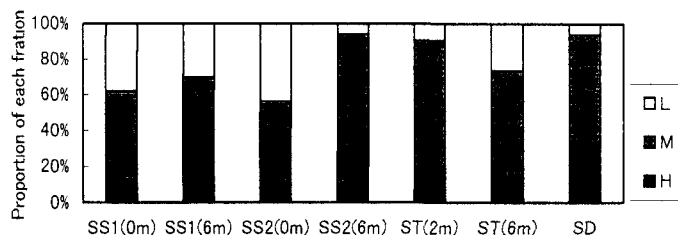


Fig.11 The proportion of three fractions particulate of materials according to density ranges at St. 4. (L< 1.95g/cm³; M: 1.95~2.35g/cm³; H>2.35g/cm³. SS1: seston, 6/14; SS2: seston 6/29; ST: deposits in sediment traps 6/26~29; SD: sediment)

3. 3 懸濁物質・沈降捕集物質・底泥のリンの組成

舞い上がった物質中の栄養塩、特にリンの特徴を調べるために、St. 12（上部湖盆）と St. 4（下部湖盆）の水深 6m の懸濁物質、沈降捕集物質及び底泥中のリンの含量を測定した。結果を図 1 2 に示す。St. 4（下部湖盆）のリンの含量が多く、これは都市排水流入によって増殖した藻類量が多いためといえる。また水中懸濁物質のリンの含量がかなり多いが、これは橘ら（1996）の指摘にもあるように、リン含量の高い藻類を中心とした水中浮遊物質が長く滞留しているためである。St. 12（上部湖盆）においては、沈降捕集物質中と底泥中のリンの含量がそれぞれ 0.23% と 0.15% で、内部生産が 10~20g・m⁻²・d⁻¹（橘・井上、1996a）と考えると、沈降捕集物質に含まれる底泥からの成分が 86%~93% であるので、舞い上がった物質のリン含量が高いといえる。St. 4（下部湖盆）では底泥と沈降捕集物質のリン含量がほぼ同じである。これは舞い上がりにくい下部湖盆では、舞い上がったものの密度組成（図 1 1）が底泥の密度組成とほぼ同じであるという結果と対応している。

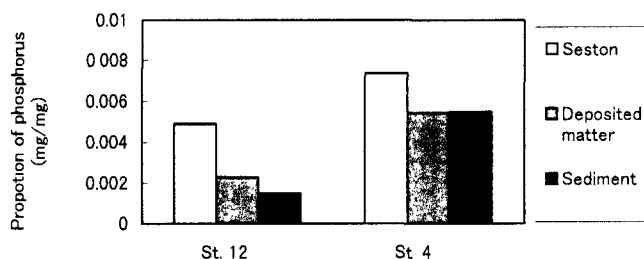


Fig.12 The proportion of phosphorus in seston, deposited matter and sediment

3. 4 AGP実験の結果

St. 12（上部湖盆）と St. 4（下部湖盆）の沈降捕集物質（2m、6m）及び底泥の AGP 試験の結果を図 1 3、図 1 4 に示した。ろ液に沈降捕集物質や底泥を添加した試料の AGP 値が大きく、懸濁態栄養塩は藻類増殖に対する寄与が高いことがわかる。また図 1 5、図 1 6 に AGP/TP の値を示した。図 1 5 と図 1 6 中の「blank」はろ液の AGP の結果を示し、「microcystis」は本 AGP 試験と同じ藻類（*Microcystis aeruginosa*）の純水培養の結果を示している。St. 4（下部湖盆）の方が AGP 値は大きく、これは下部湖盆の捕集物質および底泥中のリン含量が St. 12 より高いためと考えられる。単位リンに換算すると（図 1 5 と

図16)、St. 12 (上部湖盆) の沈降捕集物質及び底泥中のリンの藻類増殖能力が全体的に高いこともわかる。これは藻類に利用可能な懸濁態リンの割合がSt. 4 より多いためと考えられる。

閉鎖性の強い上部湖盆において、底泥での分解活動により沈降した藻類の死骸など藻類が利用可能な懸濁態リンに変化する。さらに、強い舞い上がりによりこれらの懸濁態リンが湖水中の藻類の増殖に直接的にあるいは間接的に寄与していると考えられる。

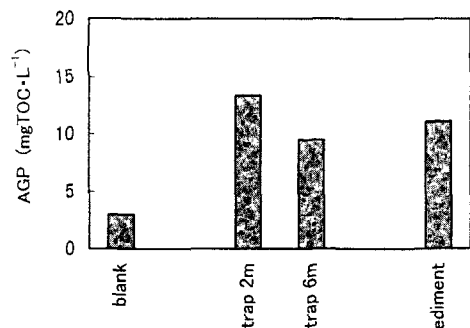


Fig. 13 Distribution of AGP (St. 12)

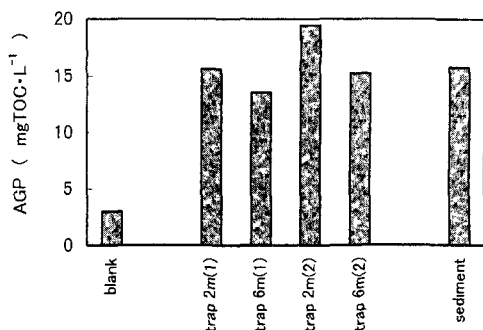


Fig. 14 Distribution of AGP (St. 4)
(1). deposits in sediment traps 6/14-17
(2). deposits in sediment traps 6/26-29

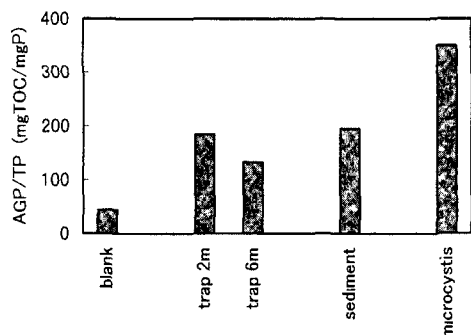


Fig. 15 Distribution of AGP/TP (St. 12)

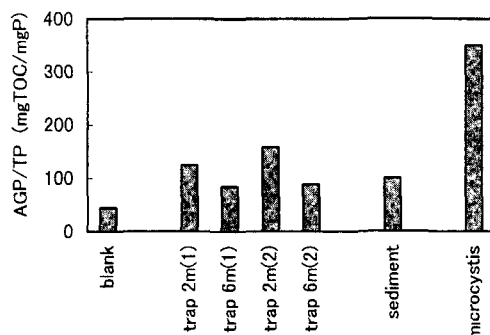


Fig. 16 Distribution of AGP/TP (St. 4)
(1): deposits in sediment traps 6/14-17
(2): deposits in sediment traps 6/26-29

4. 結論

富栄養化した湖沼では、藻類増殖に関して様々なメカニズムが考えられる。筆者らは、懸濁態栄養塩の湖内での動態と藻類増殖の関係を風による底泥の舞い上がりという視点に着目し、調査を行った。その結果、底泥の舞い上がりや沈降のプロセスが湖内の栄養塩循環を大きく左右し、これが藻類増殖に影響を及ぼしていることが推察された。主な結果を以下に要約する。

- (1) 浅い湖沼においては風による舞い上がりによって、懸濁態物質が比較的に早い速度で循環している。懸濁物質の舞い上がりに関しては、湖底のほか沿岸域の寄与も大きい。
- (2) 風によって舞い上がった懸濁物質は、底泥と比べて密度が小さい成分の割合が多く、栄養塩としての

- リンの含量も多い。栄養塩の動態を考える上で、舞い上がった懸濁態栄養塩の影響は無視できない。
- (3) AGP試験により、舞い上がりが生じやすい上部湖盆の底泥中には、藻類が利用可能なリンの含量が多い。また舞い上がりにより、湖水中で再懸濁化したリンの藻類増殖への寄与は無視できない。

謝辞

本研究での調査、分析において、北海道大学工学部水質工学研究室、国立環境研究所水圏環境部の皆様にお世話になった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) BRITTEN, R. J. and R. B. ROBERTS (1960) : High-resolution density gradient sediment analysis. *Science*, 131:32-33
- 2) 福島武彦・相崎守弘・大坪国順・村岡浩爾 (1982) : 湖沼の沈降物質に関する研究、衛生工学論文集、18 巻、9-14
- 3) 福島武彦・相崎守弘・大坪国順・村岡浩爾 (1984) : 浅い湖沼における懸濁態物質の沈降現象の測定方法とその起源、国立公害研究所研究報告、R-51, 73-87
- 4) 石狩町、1973 : 茨戸湖環境調査報告書
- 5) 石渡良志・高松信樹・石橋智子 (1977) : 密度の違いを利用した湖底堆積物中の外来性および自生性物質の分離、陸水学雑誌、38 巻 3 号、94-99
- 6) 長田芳和 (1970) : 湖沼における沈殿物質の測定について。陸水学雑誌、31 巻、27-35
- 7) 日本分析化学会北海道支部編 (1994)、第 4 版水の分析、東京化学同人
- 8) 札幌管区気象台編 (1997) : 北海道気象、日本気象協会北海道支部
- 9) 橘 治国、森口朗彦、井上隆信、今岡孝之 (1986) : 藻類増殖能力の推定に関する一考察、衛生工学研究論文集、22 巻、151-162
- 10) 橘 治国、井上隆信 (1996a) : 浅い湖沼における沈降物質の評価、陸水学雑誌、57 巻 2 号、65-73
- 11) 橘 治国、吉田邦伸、井上隆信 (1996b) 都市近郊湖沼 (茨戸湖) における栄養塩の形態と藻類増殖、水環境学会誌、19 巻 2 号、132-139