



Title	浅い湖沼における懸濁態栄養塩の循環と藻類増殖
Author(s)	橘, 治国; 王, 宝臣
Description	第6回衛生工学シンポジウム (平成10年11月5日 (木) -6日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 測定・解析 . 5-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 6, 183-188
Issue Date	1998-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7346
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-5-8_p183-188.pdf



5-8

浅い湖沼における懸濁態栄養塩の循環と藻類増殖

橋 治国、王 宝臣（北海道大学大学院工学研究科）

1. はじめに

湖沼の人為的な富栄養化は、藻類の異常増殖などに見られるように、自然の生態系を変化させたり、水利用上の価値を低下させる。この富栄養化に伴う様々な生態系の形成は、栄養塩の形態や動態と密接に関連している。筆者らは、富栄養化した河川や湖沼において栄養塩の形態を調査し、懸濁態として存在する割合の大きいことを明らかにした。特にリン化合物について、石狩川などでは90%以上に達することを報告した。（橋ら、衛生工学研究論文集、22巻、151-162、1986） また閉鎖性水域において、懸濁態栄養塩の藻類による利用可能性を指摘し、AGP試験によってこれらを実証した。（橋、衛生工学研究論文集、20巻、53-60、1984）

これらの成果から、水域での生態系の変化をもたらす富栄養化を制御するためには、ポイントソースとしての生活排水や工場排水の他、農業排水などノンポイントソースからの寄与が高い懸濁物質の流出制御が必要であることを提案してきた。

本研究では、浅い湖沼における懸濁態栄養塩の循環とその藻類への移行のメカニズムについて焦点をあてた。特に懸濁態栄養塩については、リン化合物を中心に藻類増殖時における形態変化を室内実験によって調査し、懸濁態として藻類が利用可能なリン化合物の性質について検討にした。またセジメントトラップを用いた懸濁物質の循環と藻類の増殖について調査を行い、現場での懸濁態栄養塩の藻類増殖効果について検討した。本報告では、研究成果の一例を紹介し、富栄養化を考える際の懸濁態栄養塩の重要性について説明したい。

本研究はフィールド調査を基本としているが、この成果は廃水処理や水管理に極めて有効な情報を示唆できるものと思われる。例えば、三次処理の効果、水域生態系保全のための集水域管理、人工湖の形状など多方面の分野と関連するだろう。

2. なぜ懸濁態栄養塩か？

自然水中での水質変化は、微生物の活動によるところが大である。この微生物の増殖に対し、懸濁物質が生息場所として効果があることが指摘されている。（例えば楠田、土木学会付着微生物研究分科会報告書、154-157、1986） さらに懸濁物質中の成分、特に栄養塩が水中の物質変換に関連することし生物の増殖を律速することを、栄養塩特にリン化合物を中心に述べる。

2. 1 自然水中における懸濁態栄養塩

人為的な汚濁源すなわち排水の中の栄養塩は、一般に溶存態が優占する。しかし自然水域では、生物学的あるいは物理化学的に変質し、特にリン化合物は懸濁態が優占する。（橋ら、衛生工学研究論文集、22巻、151-162、1986） 表1に、石狩川水系における栄養塩を中心とした水質成分の分析結果を示した。窒素は溶存態が優占し、排水ではアンモニア態が、河川湖沼では硝酸態の割合が高い。リンは、排水中では反応性リンを中心とした溶存態の割合が高いが、河川湖沼では懸濁態の割合が高く、石狩川本流では80~90%に達する。自然界では、リンを中心として懸濁態の存在を無視することができない。

2. 2 懸濁態栄養塩と藻類増殖

懸濁態栄養塩、特に存在割合が高い懸濁態リンの藻類増殖効果を *Microcystis aeruginosa* を用

2. 3 懸濁態栄養塩の藻類による摂取の可能性

懸濁態栄養塩の可溶化が、水域の藻類増殖を解く鍵である。以下に水系を対象とした場合の検討事項を整理した。

(1) 微生物の存在と藻類の栄養塩摂取

自然生態系は、微生物から大型生物まで、多様な生物相から構成されている。従って懸濁態栄養塩の分解・無機化には、微生物群が大きく関与しているものと推測される。表2からは、bacteriaの存在がAGPにあまり影響しないことがわかる。現実には生物群内を栄養塩が複雑に動くはずであるが、まず藻類による直接的な栄養塩摂取機構の解明が重要といえる。(橘、衛生工学研究論文集、20巻、53-60、1984)

(2) 栄養塩の化学的形態

栄養塩の形態は、藻類の摂取と密接に関連する。栄養塩の形態は、表1に示したようにStandard Methodsに基づく分析の他、微生物の組成と関連したSTS法や土壌の化学分析に利用されているCJ法がある。STS法における酸可溶性分のうちのリン酸各分や7分リンが直接利用できるものとされているがこれらは藻類中の話であり、排水中のリン成分や非微生物態のリンの利用可能性への関心の方が重要であろう。今後その詳細を明らかにする予定である。

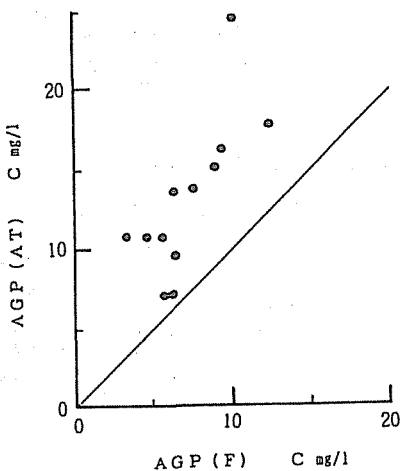
(3) 化学反応(吸・脱着反応や酸化還元反応)による可溶化

懸濁物質へはリン酸が容易に吸着される。(橘、河川・湖沼・水辺の水質浄化と生態系の保全と景観設計、工業技術会、1993)これが藻類培養期間中のpHの上昇によって利用されるものと推測される。図3に培養期間中のPRPの割合の変化、図4に減少RPと藻類増殖量の関係を示した。RPのほとんどがPRPなので、藻類に吸着あるいは易分解性のリンが藻類に利用されることがわかる。(橘、衛生工学研究論文集、20巻、53-60、1984)また懸濁物質の湖内における循環(好気ゾーン→嫌気ゾーン→好気ゾーン)過程における質変化も藻類の増殖と密接に関連している。またリン酸鉄も藻類培養期間中のpHの上昇によって可溶化するといえる。後述の3-2と関連し今後検討して行く。

(4) 酵素反応等生物による可溶化

一般に生物が分泌するホスファターゼは有機リン酸エステルを加水分解する。水中ではホスファターゼ活性は、図5のようにpH9で高く、また懸濁成分による寄与が大きい。(橘、富栄養化現象の解析と防止対策、北海道大学、1985)遊離および結合アルカリホスファターゼは、水中のリン不足時に高濃度に検出されること、また活性の高くなることが明らかになっている。この結合あるいは懸濁成分によるホスファターゼは、藻類量と対応するとも報告されている。(古田ら、水質汚濁学会講演集、203-204、1983、平田ら、水質汚濁学会講演集、248-249、1982)水中におけるホスファターゼ活性の実態と藻類増殖との関係の解析が大きな検討課題である。

根圏で認められるクエン酸などが無機態のリン化合物を可溶化するという報告もある。(但野ら、1997)従って水中においては、フミン酸などによる可溶化も無視できないだろう。



$$AGP(AT) = 1.45 AGP(F) + 2.3 \quad (R=0.75)$$

図1 AGP (F) とAGP (AT) の関係

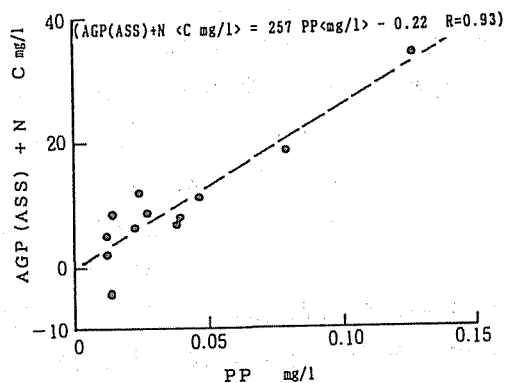


図2 PP (懸濁態リン) と AGP (ASS) + N の関係

表1 栄養塩の分析結果の例

河川	月日	Q m³/s	SS mg/s	TOC mg/l	TN mg/l	DN mg/l (%)	TIN mg/l	NH ₄ ⁺ -N mg/l	TP mg/l	DP mg/l (%)	Cl ⁻ mg/l	溶存態* 懸濁態*					
												OP	DCP	DRP	PCP	POC	DOC
0 50 100 %																	
<河川> 石狩川 (St.1)	4/23/83	132	27	2.9	0.47	0.36 (77)	0.23	0.01	0.031	0.009 (29)	3.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	8/17/83	20.5	12	4.1	0.55	0.53 (96)	0.25	0.03	0.041	0.010 (24)	3.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	9/13/83	70.5	31	6.4	0.71	0.68 (96)	0.53	0.04	0.044	0.012 (27)	6.7	[Bar chart showing nutrient distribution]					
石狩川 (St.3)	4/23/83	317	17	5.6	0.73	0.53 (73)	0.36	0.12	0.035	0.012 (34)	5.9	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	8/17/83	60.1	15	5.9	1.02	0.84 (82)	0.42	0.04	0.067	0.027 (40)	15.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	9/13/83	289	77	7.4	1.53	0.82 (54)	0.31	0.10	0.096	0.020 (21)	17.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
石狩川 (St.6)	4/23/83	1118	91	4.9	0.70	0.62 (89)	0.42	0.11	0.040	0.008 (20)	6.7	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	8/17/83	91.8	11	4.6	0.86	0.82 (95)	0.34	0.02	0.078	0.031 (40)	13.3	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	9/13/83	86.6	44	9.5	1.38	1.26 (91)	0.65	0.08	0.246	0.016 (7)	18.7	[Bar chart showing nutrient distribution]					
<都市河川>																	
創成川 (St.SF)	12/23/81		19	9.1	9.73	9.09 (93)	8.75	7.10	0.294	0.041 (14)	53.5	[Bar chart showing nutrient distribution]					
<湖沼(冬期)>																	
茨戸湖 (St.B 4)	12/23/81		18	8.1	8.53	8.08 (95)	7.68	6.10	0.180	0.034 (19)	67.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
茨戸湖 (St.B12)	12/23/81		11	11.8	1.80	1.75 (97)	1.20	0.29	0.119	0.017 (14)	38.5	[Bar chart showing nutrient distribution]					
<各種排水>																	
A (乳業)	12/22/82	0.008	47	36.3	7.58	2.84 (37)	0.28	0.18	5.74	4.72 (82)	346	[Bar chart showing nutrient distribution]					
B (醸造)	12/24/82	0.008	23	21.4	1.81	0.67 (37)	0.10	0.01	1.85	1.40 (76)	48.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
C (油脂)	12/18/82	0.063	173	81.2	44.3	8.99 (20)	5.57	5.45	9.98	4.86 (49)	38.7	[Bar chart showing nutrient distribution]					
D (ノシルブ)	11/4/83	3.00	85	74.5	3.33	2.54 (76)	1.90	0.02	0.235	0.043 (18)	163	[Bar chart showing nutrient distribution]					
<下水・し尿処理場>																	
E 処理 (旭川・下水放流水)	11/4/83	0.155	7	14.8	27.5	(100)	27.5	22.8	4.10	3.49 (85)	150	[Bar chart showing nutrient distribution]					
F 処理 (江別・下水原水)	9:00 11/30/83	0.083	430	224	56.4	(100)	55.6	55.0	10.3	7.07 (69)	59.0	[Bar chart showing nutrient distribution]					
	18:00 11/29/83	0.053	204	145	27.5	(100)	24.8	24.5	4.58	2.78 (61)	76.3	[Bar chart showing nutrient distribution]					
G 処理水 (旭川・し尿)	11/4/83	0.038	11	15.4	35.6	(100)	35.6	32.8	5.99	4.99 (83)	182	[Bar chart showing nutrient distribution]					

*OP:有機性リン,CP:縮合性リン,RP:反応性リン

表2 藻類増殖へのバクテリアの影響

(L.Barato(St.4), December 6, 1982)

	BAC	Water Quality (Initial)				Maximum Growth		
		TP mg/l	DP mg/l	PRP mg/l	DRP mg/l	TN mg/l	TIN mg/l	Chl-a μg/l
N tr.	BAC. +	0.144	0.033	0.053	0.022	9.33	7.34	171.2
AC tr.	(T) BAC. +	0.160	0.083	0.025	0.056	7.93	6.30	174.1
	(F) BAC. +	0.083	0.083		0.056	7.80	6.30	5.0
AC tr.	(T) BAC. -	0.160	0.083	0.025	0.056	7.93	6.30	157.0
	(F) BAC. -	0.083	0.083		0.056	7.80	6.30	3.0
F tr.	BAC. -	0.033	0.033		0.022	8.74	6.34	3.0

Growth period: 17 days

(F) : filtered sample (L) : total sample

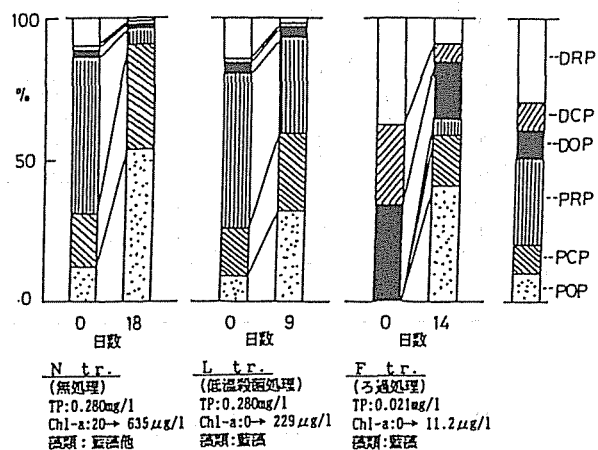


図3 藻類培養中のリン化合物の形態変化 (茨戸湖 St. 3)

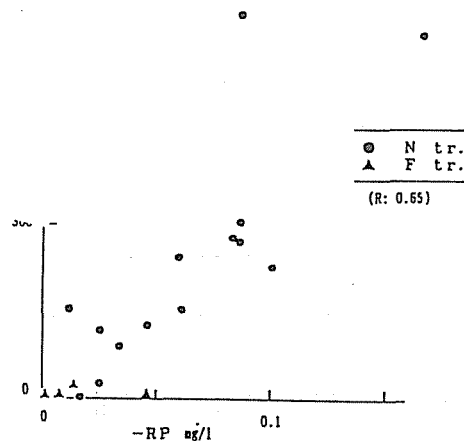


図4 減少反応性リンと Chl-a の関係 (-RP = 初期RP - 最大増殖時RP)

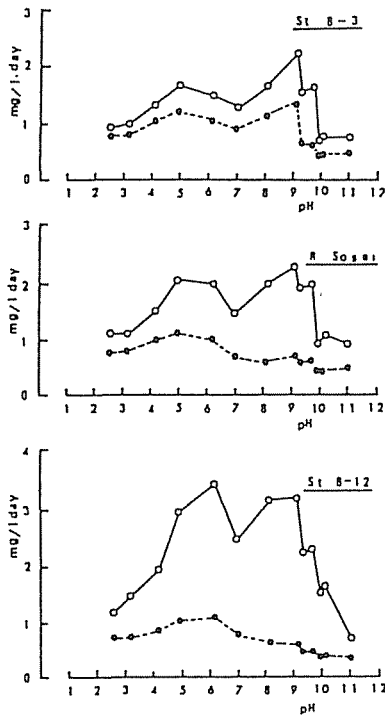


図5 ホスファターゼ活性のpHプロフィール
(1/11/85)

表3 AGP試験に供した試料

サンプル	採水日	表記 T:未濾過、F:濾過
創成川	12月10日	創成川(T)、創成川(F)
伏古川	12月10日	伏古川(T)、伏古川(F)
St. 3	12月10日	St. 3(T)、St.3(F)
St. 12*	12月8日	St. 12(T)、St. 12(F)
St. 12(S)*	12月8日	(St. 12(F)+沈降捕集物質)
St. 12(D)*	12月8日	(St. 12(F)+底泥)

*: 同じSS濃度に調整した。

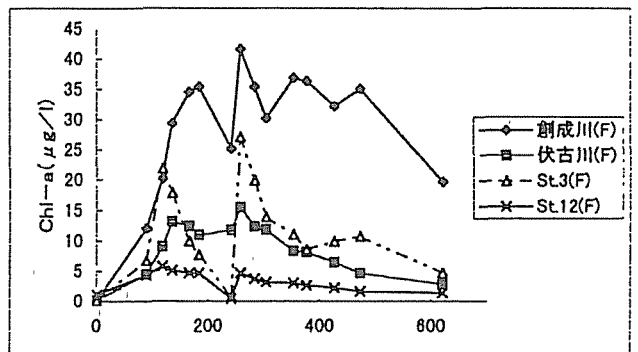
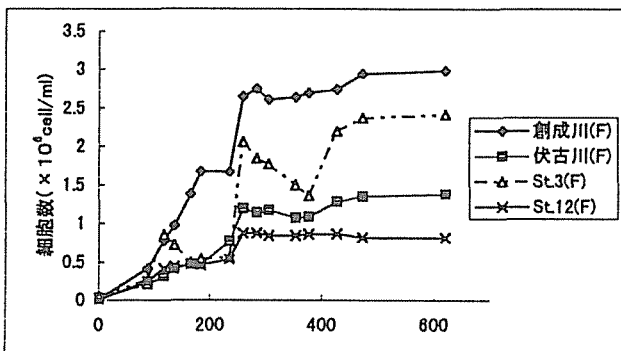
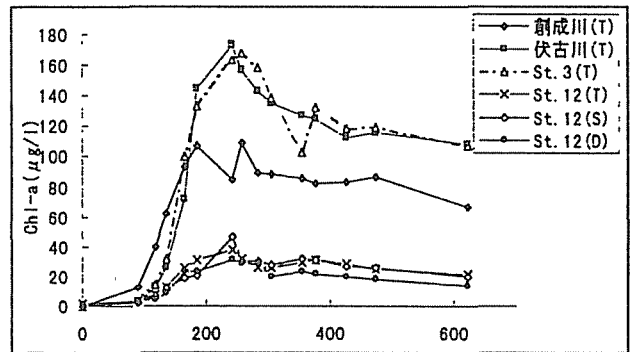
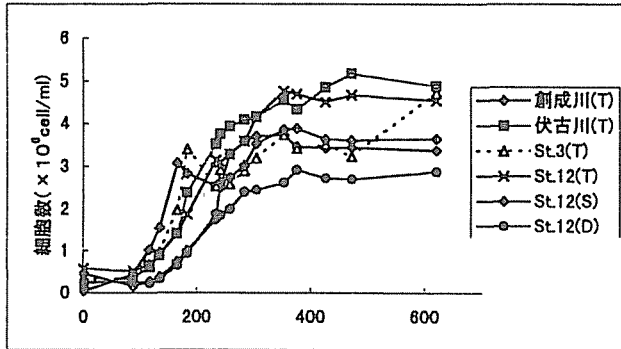


図6 藻類細胞数の経時変化

図7 Chl-a濃度の経時変化

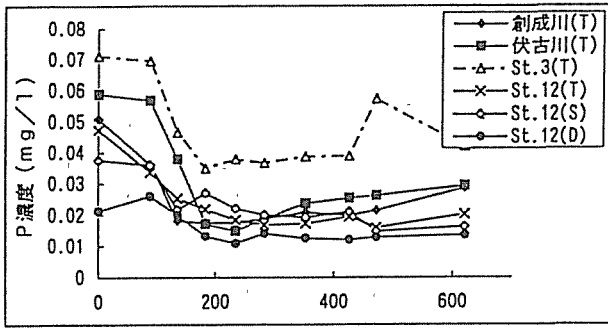


図8 溶存態リン (D P) 濃度の経時変化

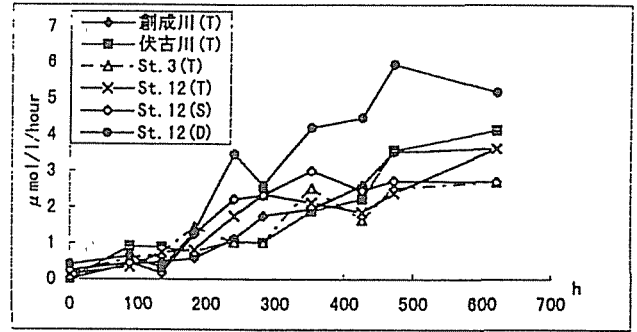


図9 ホスファターゼ活性の経時変化 (pH 9)

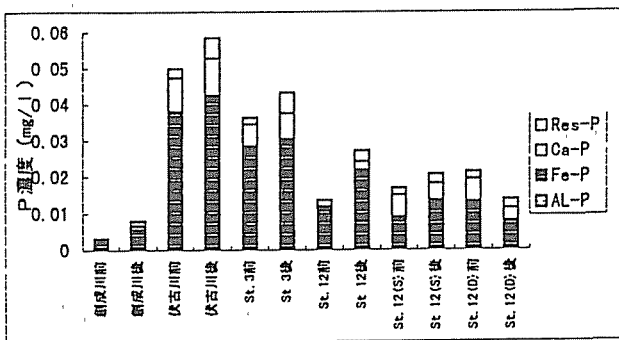


図10 無機態リン化合物の変化 (実験前と後)

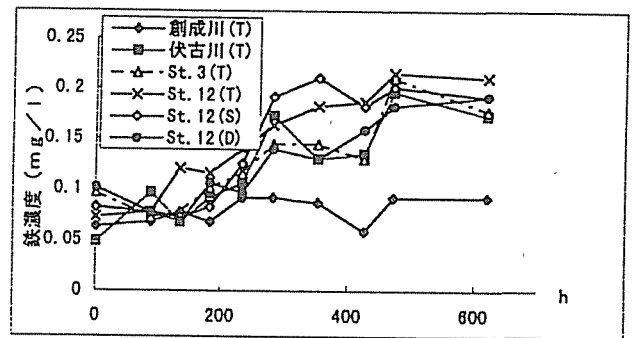
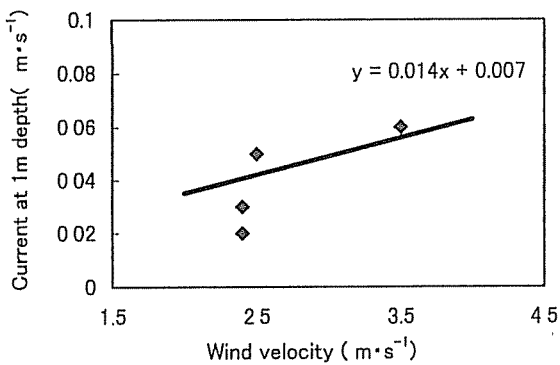


図11 溶存鉄濃度の経時変化



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

図12 風速と流速 (St. 12)

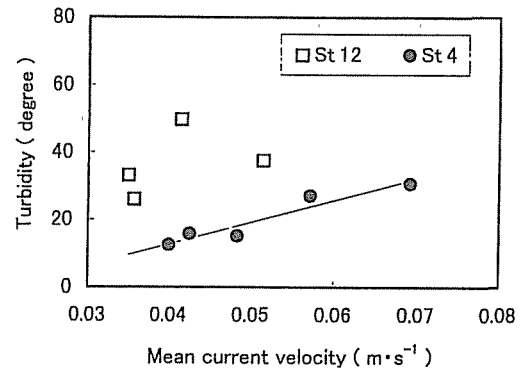


図13 流速と濁度 (St. 12, St. 4)

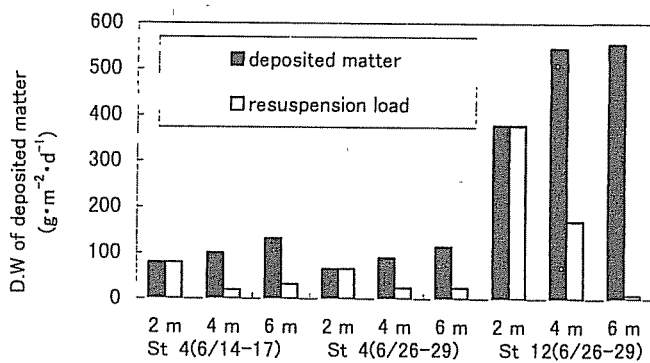


図14 セジメントトラップ捕集物質質量

3. 平成9年度調査結果の例

1997年に実施した調査と実験結果について報告する。

3. 1 懸濁態リン化合物の形態変化と藻類増殖—茨戸湖湖水による室内実験結果—

懸濁態リン化合物の藻類への利用過程を明らかにするため、表3に示す試料について藻類培養実験を行った。試料を10lの平底フラスコに入れ、*Selenastrum capricornutum*を10000細胞/mlになるよう摂取後、25℃、4000lux（ガラス面）の条件で最大増殖に達するまで培養した。図6に藻類細胞数、図7にChl-aの経時変化を示した。まず未濾過試料が濾過試料に対して細胞数、Chl-aの両者とも高濃度で、その差分すなわち懸濁成分による藻類増殖効果の大きいことがわかる。特に懸濁成分濃度が高い伏古川で顕著な影響がみられる。ホスファターゼ活性は溶存態リンが無くなってから高く、特にアルカリホスファターゼ活性で酸性に比較し5倍以上高く顕著であった。（図8、図9）Chl-aや藻類細胞数が最大に達する前であり、ホスファターゼ活性が藻類増殖に寄与していることがわかる。ホスファターゼ活性は細胞数の変化が無くなってからも増加を続けている。実験の前後のCJ法による形態変化が図10であるが、Fe-Pが優占するという特徴があるが濃度としては大きな変化はなかった。溶存鉄濃度が増加していることから、鉄がホスファターゼ活性で生じた少量の可溶性リンをプールしているとも考えられる。（図11）この点は今後の綿密な調査が必要となろう。

3. 2 懸濁態リン化合物の循環と藻類増殖—茨戸湖における実測例—

湖沼内の懸濁態栄養塩の循環と藻類の増殖状況を調査するため、茨戸湖上部湖盆St. 12と下部湖盆St. 4にセジメントとラップを設置し、懸濁物質特に懸濁態リン化合物の形態的特徴を調査した。風により懸濁物質が舞い上がることで、これが底泥に置いていても明確であることを明らかにした。（図12、図13）また上部湖盆で舞い上がり量が大きい（図14）、これらは遠心分離による密度勾配法によって底泥より粘土成分が少なくまた幾分リン含量あたりのAGPが高いこと（図15、図16）、従ってセジメントトラップ補修物のAGPの大きいことが明らかになった。舞い上がった底泥は、一次生産物質よりかなり循環速度が速いが、藻類増殖への寄与はかなり大きいと推測される。筆者らの調査では、舞い上がり物質は2.2m/d（1996）や4.4m/d（今回）を観察し、一時生産物の0.91m/d（1996）よりはるかに循環速度が大きいことがわかった。

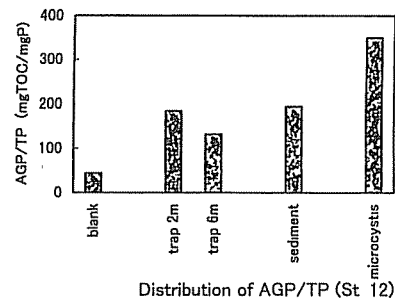
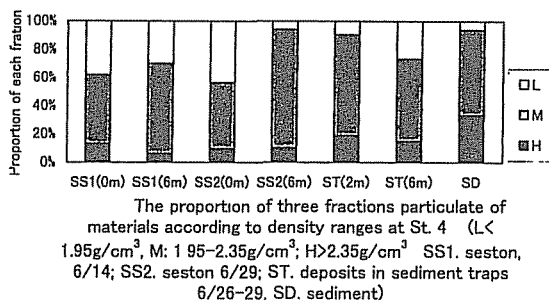
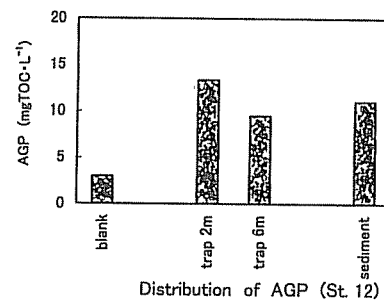
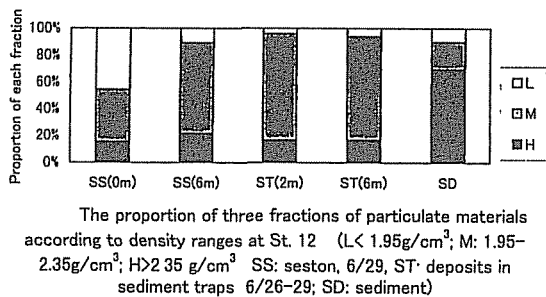


図15 密度勾配法による分画

図16 AGP/TP