

II-38 茨戸湖における栄養塩の挙動と藻類増殖

北海道大学工学部 正会員 橘 治国、佐々木博康
北海道生活環境部 江口久登

1. 緒言

*Microcystis aeruginosa*を中心として藍藻類を優占種としたアオコの発生は全国に共通した問題で、その発生メカニズムについては精力的な実態に関する研究や調査が実施された。昭和57年には湖沼について窒素および磷に係る環境基準が設定され、昭和60年には排水基準も定められた。しかし現状は、進行を食い止めることには効果があったものの、自然の状態に回復したという話は聞かない。これは富栄養化が水を利用するうえでの様々な障害を引き起すものの、昭和30年代の腐った状態でないため、一般人の関心が低いことなどが根本に考えられる。研究にしても、最近は「過ぎ去った」感がしないでもない。子孫に残すべき、20年代の水生態系にはほど遠い。札幌近郊の茨戸湖においても同様である。札幌の人口の増加とともに汚染が進行し、発生する生活排水の茨戸湖への集中が拍車をかけた。現在は下水処理が安定し改善の方向にあるが、依然深刻な状態にあることはいうまでもない。筆者らは、この茨戸湖の水質について昭和44年以来調査を続けてきた。本報告では、藻類増殖と最も関連の深いリン化合物を中心とした栄養塩の形態および挙動についての調査結果について述べる。特に栄養塩の形態分画の現場での調査例は少く、藻類増殖防止対策上の基本調査といえる。すなわちマクロな発生源対策と共に、今後重要となってくるとされる藻類の発生状況の把握や記述さらに予測には不可欠である。

2. 研究方法

2.1 茨戸湖の概況: 茨戸湖は昭和6年石狩川生振新水路の完成によって本流と切り離された三ヶ月湖で、図1に示すように狭い人工水路で結ばれた上部、中部、下部の三湖盆に分れる。総水面積は4.37km²、全貯水量は約1,400万m³に達する。水面積では、ほぼ根室の温根沼に対応する。平均水深は約3.2mと浅く、最深部でも8~9mである。流域面積は約160km²、流域人口は約60万人である。主な流入河川に、創成川、伏龍川、発寒川があり、平水時5~10m³/sが流入する。茨戸湖からは下部湖盆北端から石狩川へ流出している。創成川、伏龍川には昭和42年以来札幌市の下水処理場放流水が流入しており、放流水が最大の汚濁源となっている。また昭和52年から下部湖盆河川敷に茨戸下水処理場が運転されるようになり、汚濁負荷は高くなる傾向にある。昭和49年に水質環境基準が設定され全域に対してB類型が指定されたが、BODに関しては中・下部湖盆の多くの地点ではるかにオーバーしているのが現状である。富栄養化という面からは、夏場になると*Microcystis aeruginosa*が異常繁殖し、いわゆる過栄養の状態にある。また水質面からは、生振運河を通じて石狩湾の海水の侵入が認められ、有機汚濁と相まって硫化水素の発生などによる劣化が心配される。

2.2 調査方法: 昭和54年7月から12月にかけてリン化合物の動態解析を中心とした水質調査を実施した。主要採水地点は、図1に示すSt.4、5(下部湖盆)およびSt.12(上部湖盆)を基本とし、随時創成川茨戸橋と創成川下水処理場放流口および茨戸下水処理場放流口で採水した。湖内では、原則として上、中、下層および底泥直上(2~3cm)で採水した。なお7月から9月の調査期間中に*Microcystis aeruginosa*を優占種とするアオコの発生をみた。

2.3 分析方法: 【一般水質成分】リン化合物の基本分画についてはStandard Methods 3)に準拠した。その他の分析項目については水の分析—第3版—4)に拠った。【Schmit-Thannhauser-Schneider(STS)法によるリン化合物の形態分画】湖沼においては懸濁物質が生物体で構成されることが多い。そこでリン化合物についてもその挙動を解析するため、微生物の構成成分の区分と関連して分画することとした。本研究では、生化学の分野で用いられるSTS法5)を、Standard Methods法3)と併せて採用することとした。図2にSTS法のフローシートを示したが、最終的にはリン化合物を酸可溶(AS)性、RNA態、DNA態、脂質態、蛋白態に分画する。また酸可溶性分については、PO₄³⁻-P(リン酸態リン、Corell 6)による。、7-min-P(7分リン、Overbeck 7)による。)および残りのStable-P(安定性リン)に分画することとした。

3. 結果および考察

3.1 藻類の消長と栄養塩濃度変化: 藻類は、昭和54年8月8日の調査において、St. 12 表層で $408.5 \mu\text{g/l}$ というクロロフィル-a (Chl-a) 濃度が観測されるなど、夏場は極めて高い発生状況で、本湖の富栄養化は諏訪湖や霞ヶ浦並かそれ以上である。ここでは季節的な藻類の消長とリンや窒素など栄養塩の挙動について、St. 4とSt. 12を例に述べる。なお藻類の優占種は、St. 4では夏場は *Microcystis aeruginosa* で10月以降は *Melosira* sp. が、St. 12では8月中は *Microcystis aeruginosa* で9月中が *Anabena* sp. であった。また藻類増殖に伴ってpHが上昇し、両湖盆とも9.6を記録した。低温時はほぼ中性付近にある。

《表層水の水質変化》 図3-1~2に、調査期間中の水温ならびに藻類の増殖と関連した水質成分濃度を示した。水温の上昇とともにChl-a濃度が高くなり、20℃以下になると減少傾向にあり、藻類増殖の温度依存性が明確である。St. 12では低温でもChl-a濃度が高いが、流入河川水量が少いため湖外に流出しにくいためであろう。冬場は $10 \mu\text{g/l}$ 以下となり、フミン質の着色はあるものの透明感さもある。COD (Cr) Tもほぼ同様な傾向で、有機物の藻体で構成されている割合の高いことがわかる。COD (Cr) Fでみると、溶存態有機物の濃度変化は小さい。溶存酸素も藻類の発生状況と対応し、夏場はSt. 4で150%程度に達し、低温で減少する。減少の程度がSt. 4で著しく約70%となるが、これは下水由来のBOD物質が多いためであろう。栄養塩については、リンが全リンとしてChl-a濃度と同じ変化パターンを示すことが特徴的である。これはリンが窒素に対して相対的に低濃度であり、またほとんどが藻体を構成する懸濁態 (PP) として存在するためである。St. 4の夏場ではほとんどリン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) が存在せず、増殖の律速成分になっている可能性がある。低温時においてSt. 4はSt. 12より高濃度であるが、これは河川から供給される分が他成分とともに残存するためであろう。窒素については、藻体の構成成分である懸濁態 (PN) がChl-a濃度と対応して変化するため、窒素濃度の低いSt. 12では藻類の発生状況と同じ変化を示す。しかしSt. 4では変化が少い。これは下水に窒素が多量に含まれおり、St. 4ではその影響があるためである。創成川の茨戸湖流入地点のSt. SF (昭和54年10月29日) では、全窒素 16.49、全リン 0.263と高濃度でまた窒素過多である。St. 12で9月から *Microcystis aeruginosa* が *Anabena* sp. に変化したが、上部湖盆での溶存態窒素濃度が低く下部とは逆に窒素が増殖形態を制限し、窒素固定能力のある種に遷移したものといえる。なお下部湖盆St. 5では最大 $400 \mu\text{g/l}$ (8月8日) を記録した。

《水質の垂直分布》 図4-1~2に、St. 4とSt. 12について代表成分の垂直分布を夏期 (9月29日) と冬期 (12月21日) について示した。まず夏のSt. 4におけるChl-aおよびCOD (Cr) T濃度の、表層から底層への減少が特徴としてあげられる。Chl-aは表層で $114 \mu\text{g/l}$ が下層5mでは $71.7 \mu\text{g/l}$ (底層6.4m、 $34.0 \mu\text{g/l}$) となる。上層での活発な増殖と、暗条件下での下層における増殖の抑制が原因である。これは酸素飽和率 (DO %) が上層で150%近くで、下層で消費されてしまうことと対応する。pHも上層で高い。一方St. 12では、上・下層の差は小さい。これはSt. 4よりSt. 12で、風波による混合が強いためまた易分解性物質が少いため酸素消費が少くなることによるものといえる。St. 4での水温変化が小さいことから、後者は無視できない。低温で藻類が減少する冬期には上・下層の差はなくなる。茨戸湖で同じような表層の藻類発生状況でも、地形的状況や汚濁の内容によって垂直変化のパターンは著しく異なることが認められた。栄養塩濃度については、懸濁態窒素 (PN) がChl-aとほぼ同じ変化を示した。前述のように藻体成分であることによる。懸濁態リン (PP) はその垂直分布を認めにくい、これはリンが藻体ばかりでなく、SS成分に吸着されやすいためといえる。無機態のリン・窒素については底泥から溶出するため、夏場で下層で高くなり、全量を左右する傾向にある。溶存酸素が無くなるSt. 4で顕著である。なおSt. 5はSt. 4と同様な特徴を示したが、下層に海水の停滞をみた夏には、底泥からの栄養塩の溶出量ははるかに大となった。9月29日の底層8.9mで無機態窒素 (TIN) は 275mg/l ($\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度: 27.2mg/l) に達した。

3.2 湖水中の懸濁態栄養塩組成: 図5に示すように、Chl-aはCOD (Cr) SSと高い相関関係にあり、有機懸濁物質は藻類が優占して形成されている。懸濁態栄養塩との相関係数は (底泥直上水を除く18試料)、PPで0.82、PNとは0.89と、St. 4で藻類以外の成分との関わり

あいも考えられるが、これらも藻類量に支配されていることは明らかである。表1には、SSと藻類構成成分の比を整理したものである。参考として、夏期の霞ヶ浦と Mendota湖および藻類についてのデータを合せて示した。(文献 8) 藻類がアオコとして発生した9月では、純粹藻類種よりは小さいものの霞ヶ浦や Mendota湖の値に近い。茨戸湖も典型的な富栄養湖である。PP/SSが幾分小さいが、リン濃度が低く増殖を制限しているためと推察できる。季節的には、冬へと藻類が少くなるにしたがって Chl-a/SSおよびPN/SSが減少するが、PP/SSの変化は小さく、St. 4そして5では増加の傾向にある。外来性のシルトや粘土質などのSSにもかなりの割合で含まれていることになる。表2にN/P比を整理した。懸濁態についてのPN/PPは夏場の生物組成に近い10から徐々に低下したが、このことから非生物体への移行が推測できる。なお溶存態のDN/DPも示したが、St. 4では懸濁態に比較すると著しく大きく、リンが増殖を制限していることが明白である。St. 12はSt. 4より小さい値で、特に9月4日は10に近いが、Anabenaの優占種となった時期と対応し、この点においても面的に広がる農地からの流出水の窒素制限型であることがわかる。

3.3 STS法によるリン化合物の形態分画: 微生物中のリン化合物の形態を明らかにするために提案されたSTS法に基づいて懸濁態リン化合物を分画し、藻類の増殖と関連したリンの動態について検討した。

《STS法による分画の特徴》 図6にSt. 4、12の表層における分画結果の季節変化を示した。図7には代表例における垂直分布と存在割合を示した。全体的には、まず酸可溶性(AS-P)の濃度が非常に高く、冬期に減少するもののその割合は高くなる傾向が認められる。St. 4では、夏の表層で30%、冬には75%に達している。全リン(PP)濃度からAS-P分を差し引いた分は、Chl-a濃度変化と対応しているようである。図8に、Chl-aとAS-P、図9にChl-aと(PP-AS-P)の関係を示したが、前者より後者に相関関係の強いことがわかる。酸可溶性(AS-P)分は藻類構成成分としての比重は小さく、残りの(PP-AS-P)が藻類構成成分として存在することがわかる。AS-Pの内容については、後で述べる。(PP-AS-P)分すなわち藻体構成成分についてみると、RNA-Pがもっとも存在割合が高く(St. 4〈9月4日表層〉45%)、DNA-P(同30%)、Lipid-P(同5%)そしてProtein-P(同3%)がこれに続き、表3に示す通り、いずれもChl-aとの相関性が高く比較的安定した藻体構成であることがわかる。各態リン化合物の分布パターンが、表4に示した代表藻類についてまとめたものに近いことから明らかである。夏場のアオコ発生期のパターンはMicrocystis aeruginosaの分布に近く、現実と対応する。茨戸湖への流入河川である創成川St. SFおよび茨戸下水処理場放流水についての分画結果を図10に示したが、生活排水中ではほとんどがAS-Pとして存在していることがわかる。これは様々な排水の影響を受ける河川(St. SF)で著しく、80~90%を占めた。河川水中では懸濁態の占める割合が大きいので、このAS-P分が生物の増殖に直接関連していることは容易に想像できる。藻体との接触によって直接利用しやすく、また還元状態で溶出しやすいのでないだろうか。下部湖盆の冬期において、AS-Pの割合が高いのはこれらの物質の直接的な影響があるものといえる。St. 5は塩類濃度の高い底層を除きSt. 4と同じ特徴を示した。

《酸可溶性リン(AS-P)分の内容と特徴》 酸可溶性リン(AS-P)が藻類構成成分に含まれにくいことを指摘した。AS-Pは、FeやCaと化合物を形成していたり、粘土粒子に吸着あるいは含有されているものと考えられている。図11は無機態SS(有機性分を除いたもの)との関係を示したが、相関性が認められ、これらのリンが土壌由来であることがわかる。AS-Pを PO_4^{3-} -P、7-min-P(貯蔵リン)、Stable-P(安定性リン)に分画した結果を図12に、各態リンとChl-a、無機態SSとの相関係数を表5に示した。 PO_4^{3-} -P割合が非常に高く、これが藻類の少い冬場と流入する排水での割合で特に著しく80%にもなる。 PO_4^{3-} -PはChl-aとの相関が全く無いことから、これが懸濁物質の性質と対応して含有されたもの(主に吸着あるいは弱酸可溶性化合物)で、藻類へのリン供給と位置づけることができよう。他の形態はChl-aとの相関が認められ、藻体中の成分であることがわかる。高水温時に7-min-Pの割合が増す(St. 4〈9月29日〉42%)が、夏には藻類の活性が高く貯蔵分が増加するものと推察される。Stable-Pは、Chl-aとの相関性が高く藻体構成成分の一部といえるが、内容については不明の点が多い。

4. 結論

都市排水の流入で著しく富栄養化した茨戸湖を対象に、藻類の増殖機構と関連して栄養塩の形態および挙動について調査した。本湖は霞ヶ浦に匹敵する富栄養湖であるが固有のパターンを持つこと、また浅い湖沼特性が認められるなど特異な点についても若干の知見が得られた。

○ 茨戸湖は最大 $408.5 \mu\text{g/l}$ の Chl-a 濃度を観察するなど、我国でも富栄養化の程度は高い。しかし上、中、下に分れる湖盆では、異なった機構で富栄養化し、都市排水のみならず農地流出水も富栄養化の大きな原因になることがわかった。都市排水の場合はリンが、農地流出水の場合は窒素が藻類増殖の律速成分となった。

○ 都市排水による有機汚染の少ない上部湖盆においては、風波の混合によって上下層の水質の差は少なく、また好氣的に保たれた。したがって底泥からの溶出量も少ない。

○ 夏は *Microcystis aeruginosa* が優占種し、窒素制限となった上部湖盆では *Anabena* に遷移した。

○ 藻類の発生および関連する水質変化は水温に支配される。冬期はほとんど発生しない。

○ 懸濁態の有機物やリン・窒素は藻類の構成成分である。リンについては冬期や底層部で土壌粒子に含有される割合が高くなった。

○ 懸濁態リンのうち、土壌粒子に含まれる酸可溶性分の割合が特に冬期にまた下層で高い傾向にあった。また都市排水でも高濃度で含まれる。このうち $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の割合が高く、藻類増殖への寄与が大きいようであった。貯蔵性の 7-min-P および安定性リンは藻類に構成成分として含まれる。前者は藻類の活性が高い夏に存在量が多い。

○ RNA-P 、 DNA-P 、 Lipid-P は藻類の主要な構成リン成分である。

『謝辞』 本研究は佐藤茂之氏 (NEC 神戸) との共同研究として実施した。記して感謝申し上げます。

(参考文献) 1) 橘ら 衛生工学研究討論会講演論文集、第15回、p107、1979
2) 橘、江口、佐藤、河西、小棚木 衛生工学研究討論会講演論文集、第18回、p1、1982
3) APHA-AWWA-WPCF, 14thED, 1975
4) 日本分析化学会北海道支部編、1981
5) G. Schmidt and S. J. Thannhauser J. Bio. Chem., Vol. 161, p83, 1945
6) D. L. Corell Limnol. & Oceanogr., Vol. 10, p364, 1965
7) J. Overbeck Archiv fur Mikrobiologie, Vol. 41, p11, 1962
8) 国立公害研究所 陸水域の富栄養化に関する総合研究—霞ヶ浦を対象域として—、特別研究成果報告 (R-1)、(津野ら p80、相崎 水質・生物調査資料編)、1977
9) Miyachi et al Plant and cell physiology, Vol. 2, p405, 1961

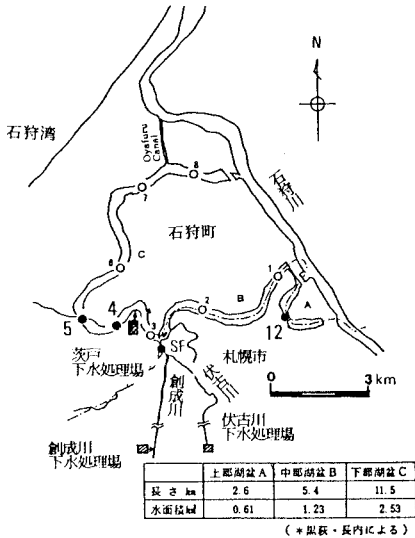


図1 茨戸湖の概況

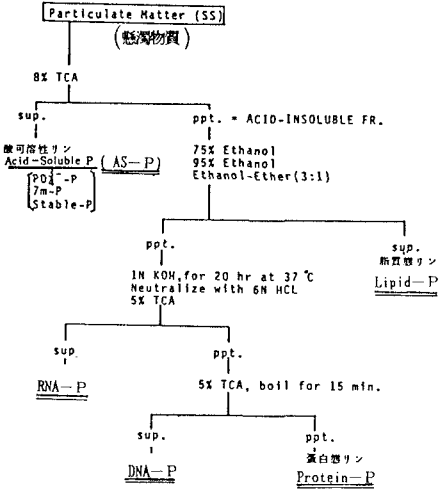


図2 STS法のフローシート

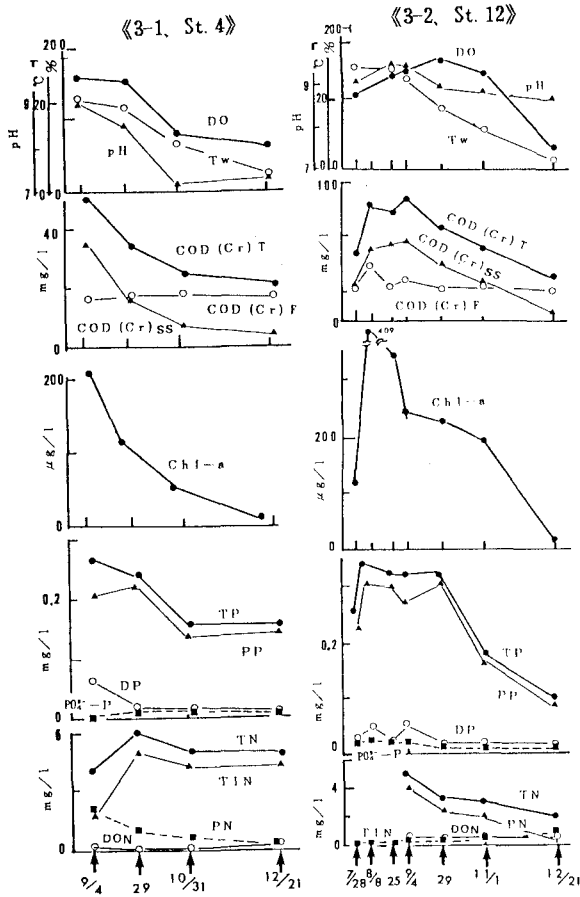


図3 水質の季節変化

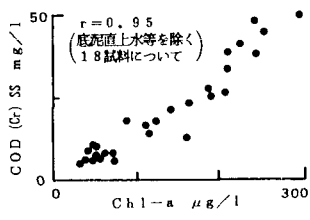


図5 Chl-a と COD (Cr) SS

表3 各態リン化合物と Chl-a との相関係数
(底泥直上水を除く 18 試料)

(n=18)	Chl-a
RNA-P	0.88
DNA-P	0.86
Lipid-P	0.77
Protein-P	0.80

表1 懸濁成分 (表層) の組成

	St. 4					湖沼	
	9/4	9/29	10/31	12/11	観ヶ浦	Mendota湖	
COD (Cr) SS/SS	116	55.2	38.9	28.0			
PP/SS	0.66	0.77	0.75	1.11	0.86	0.93	
PN/SS	8.74	4.64	4.56	3.13	6.4	7.3	
Chl-a/SS	0.67	0.39	0.29	0.05	0.71		

	St. 12					藻類	
	9/4	9/29	10/31	12/11	Chlorella	Microcystis	
COD (Cr) SS/SS	91.4	73.5	68.7	41.7	1.20	1.79	
PP/SS	0.43	0.55	0.42	0.46	0.84	1.83	
PN/SS	6.49	4.36	5.18	1.61	8.6	11.3	
Chl-a/SS	0.39	0.41	0.50	0.07		1.88	

表4 藻類のリン組成

	Chlorella 9)	Microcystis
AS-P	20.2%	38.2%
RNA-P	53.3	42.8
DNA-P	2.9	11.8
Lipid-P	21.6	5.4
Protein-P	2.0	1.8

図4 水質の垂直分布

表2 懸濁物質中 (表層) の N/P

	9/4	9/29	10/31	12/11
St. 4				
TN/TP	19.8	33.1	41.3	37.0
PN/PP	13.2	5.72	6.11	2.83
DN/DP	42.2	413	299	651

	St. 12				
TN/TP	15.5	9.97	17.7		2.99
PN/PP	15.3	7.89	12.4		3.19
DN/DP	16.9	49.4	67.1		125

表5 各態リンと Chl-a および
無機 SS との相関係数
(底泥直上水を除く 18 試料)

(n=18)	Chl-a	無機 SS
AS-P	0.66	0.79
PO ₄ -P	-0.06	0.40
7-min-P	0.58	0.38
Stable-P	0.90	0.83

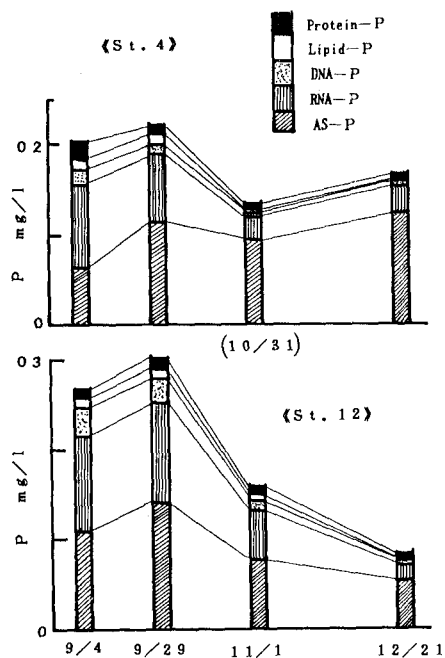


図6 STS法分画結果 (表層の季節変化)

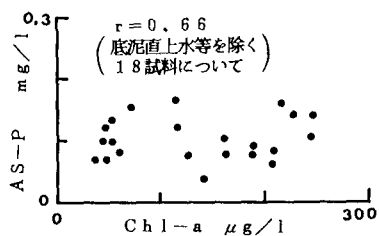


図8 Chl-a と AS-P

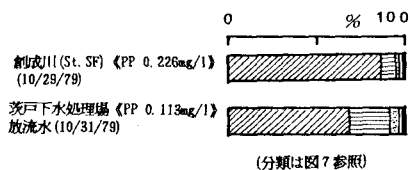


図10 創成川と下水処理場排水のP分画

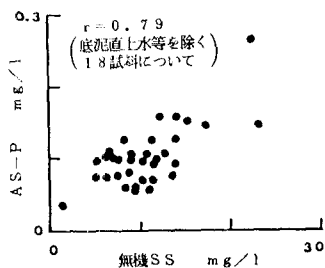


図11 (AS-P) と無機SS

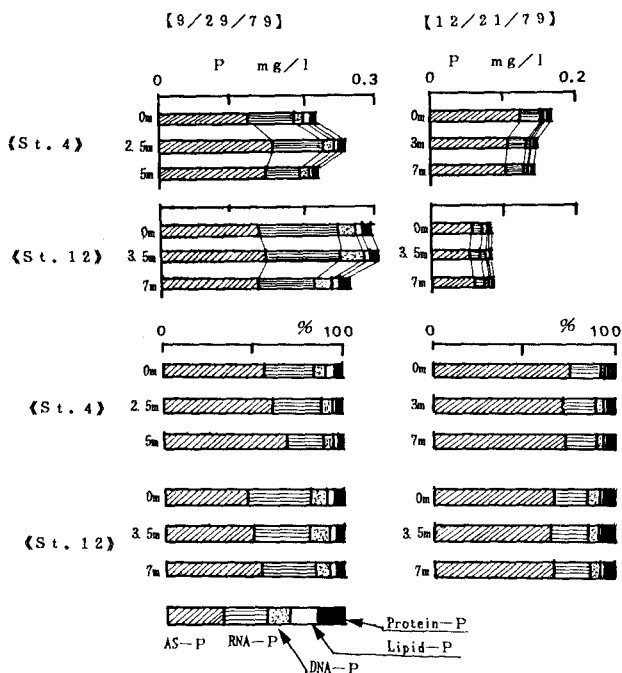


図7 STS法分画結果 (垂直分布)

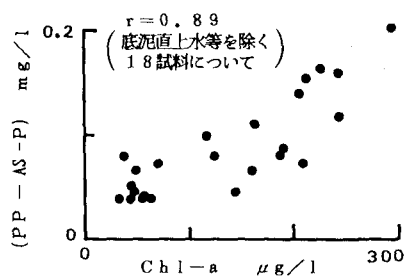


図9 Chl-a と (PP - AS-P)

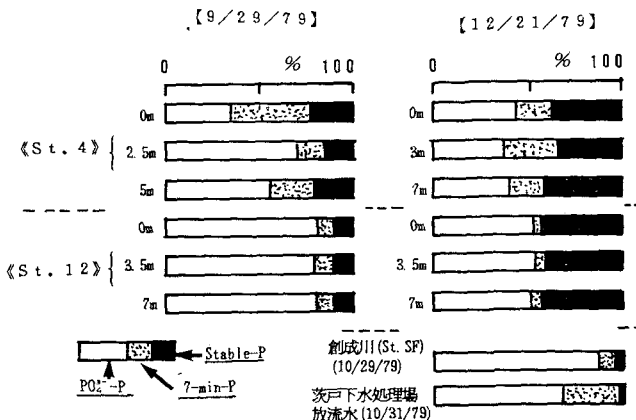


図12 AS-Pの分画