



Title	懸濁態栄養塩の藻類増殖能力
Author(s)	橘, 治国; 行木, 美弥; 山田, 正人
Description	第2回衛生工学シンポジウム (平成6年11月10日 (木) -11日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 8 都市・水・室内等の環境 . P8-6
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 2, 335-340
Issue Date	1994-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7639
Type	departmental bulletin paper
File Information	2-8-6_p335-340.pdf



懸濁態栄養塩の藻類増殖能力

橋 治国、行木美弥（北海道大学工学部）、山田正人（京都大学工学部）

1. 栄養塩の形態と藻類増殖

人間活動の結果として廃棄された窒素やリンなどの栄養塩の水域への流入は、水の華やアオコとして代表されるように藻類の異常増殖を引き起こし、水環境を劣化させている。

この水中の栄養塩は、供給源の多様さや水中での質的変換によって、その存在形態はさまざまであり、藻類の増殖状況を把握するためには、まず栄養塩の形態と藻類増殖状況との関連を調べることが、基本的な課題である。筆者らは、2. に挙げる資料のように、水中の栄養塩の形態とその濃度分布を調査し、優占的な懸濁態栄養塩に着目して、その藻類による利用可能性について検討した。その結果、いままでほとんど問題にされることがなかった藻類の懸濁態栄養塩の利用を富栄養化現象解析の新しい視点として呈示することができた。

本報告では、これまでの2. の成果と、その後の実験的あるいは経験的にわかった知見（栄養塩の利用率、摂取メカニズム、藻類種による差異など）や問題点を紹介する。

2. 栄養塩の形態別定量と藻類増殖能力（AGP）試験による富栄養化の評価（環境微生物工学研究法 土木学会衛生工学委員会 1993、技報堂出版 転載承諾）

1. 水質汚濁と水質浄化

これまでのわが国における水域の汚濁制御は、有機物の処理・処分に重点があり、栄養塩の除去については関心が低かった。しかし図-1に示すように戦後の有機的に汚濁した水質が大幅に改善された現在、さらなる水環境の保全として富栄養化防止すなわち栄養塩濃度減少への試みがクローズアップをされてきた¹⁾。自然生態系の回復が現実の課題になりつつある。本章では、富栄養化防止を中心とした将来の水質浄化対策を考えるうえで基本となる栄養塩の形態と藻類増殖の関係を、藻類増殖能力（AGP）試験によって調査・研究した例を紹介する。

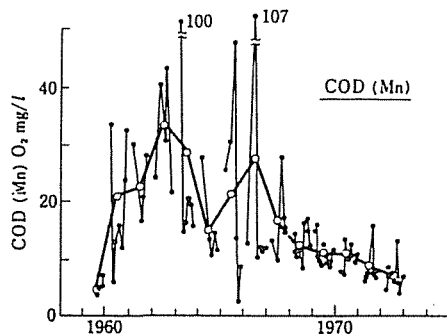


図-1 石狩川の水質汚濁（石狩川橋，St. 5）

2. 栄養塩の形態と藻類増殖特性（藻類増殖能力（AGP）試験の実施例）

藻類は窒素、リンなどの栄養塩を摂取し増殖することはいうまでもない。しかし、自然水中の栄養塩の形態は、発生源の種類や流出過程での質変換に対応して多種多様で、藻類の摂取過程や摂取能力との関係に関心がもたれている。表-1に石狩川水系内の河川、湖沼、排水中の栄養塩分析結果の例を示した²⁾。図-2には石狩川水系の概況と調査地点を示した。栄養塩の形態はStandard Methods³⁾に従って分画したが、水域や排水の特性に応じて特徴的である。たとえば、窒素は溶存態が優占し、排水でアンモニア態が、河川・湖沼では硝酸態の割合が高い。リンは、排水では反応性リン（リン酸態リンのこと）を主体とした溶存態リンの割合が高いが、河川・湖沼では懸濁態が優占した特定の形態に偏りが無いようである。

このような試料水の特徴と藻類増殖能力の関係を明らかにするためには藻類培養試験が有効である（この試験を藻類増殖能力試験、略してAGP試験と呼ぶ）。AGP試験は試料水に特定の藻類を植種し、照度、温度、振盪条件など一定条件で培養して、最大増殖量（AGP値）を測定するもので、試料水のもつ潜在的な藻類増殖能力を予測して水域保全に役立つようとするものである。AGP試験には数多くの方法が提案されているが、筆者らは須藤らの方法⁴⁾に準じている。須藤らは、供試藻類として *Selenastrum*

でAGP(AT)がAGP(F)の細胞数として約40倍にも達する例を観察している。AGP(AT)はAGP(AF)より大きく、藻類は懸濁物質中の栄養塩もよく利用していることになる。栄養塩の藻類への移行には吸脱着反応や酵素による低分子化などのメカニズムが考えられている⁵¹⁻¹⁰⁾。微生物混合系のAGP(T)がAGP(AT)より小さくなるのは、藻類としての生産物が微生物によって分解されるためといえる。下水・し尿処理場排水ではAGP(F)が大きく最大値を示すこともあるが、表-1で示したように溶存態栄養塩の濃度とその割合が高いためである。栄養塩添加試験結果の例を、石狩川納内橋 St. 3(1983年9月17日)について図-3に示した。この図からもAGP(F)+Nを除いてAGP(F)が小さく、懸濁態栄養塩の藻類増殖効果の大きいことがわかる。AGP(F)+Pが、AGP(F)+Nより大きくまた他のリン添加のAGPとの差が小さいことから、窒素については溶存態が藻類増殖量を支配していることがわかる。したがって、懸濁態としてはリンが藻類の増殖と密接にかかわっていることになる。これはリンと窒素の形態別存在割合と対応している。なお図-3では明らかではないが、栄養塩添加後のAGPは、無添加との差が窒素よりもリン添加で小さいことが多く、藻類増殖は窒素制限型にあった。この点は、窒素濃度が高くリン制限型の都市河川水とは傾向が異なった¹¹⁾。図-4は、懸濁態リン(PP)とAGP(ASS)+Nとの関係を示したものである。AGP(ASS)+Nは、AGP(AT)+NからAGP(AF)+Nを差し引いたもので、利用可能な懸濁態リンを摂取したときのAGPである。PPの値は高圧処理中の水質の変化を考慮

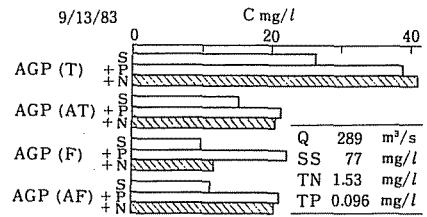


図-3 AGP 試験結果(栄養塩添加試験)(石狩川納内橋 St. 3, S:無添加,+P:リン添加,+N:窒素添加)

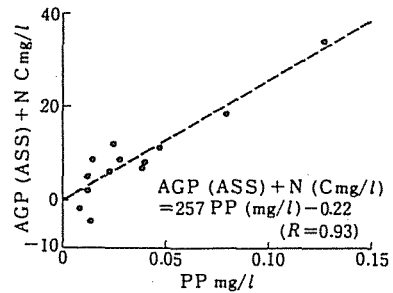


図-4 PP と AGP(ASS)+N の関係

してある。両者の回帰直線は $AGP(ASS)+N(C \text{ mg/l}) = 257 PP(mg/l) - 0.22$ (相関係数 0.93) となり、増殖した *Microcystis aeruginosa* の C/P が約 260 ということになる。矢木ら¹²⁾ と高村ら¹³⁾ の研究結果を参考にすると、 $PO_4^{3-}-P$ を用いたときの *Microcystis aeruginosa* の藻体収率(藻体量 C mg/消費されたリン量 P mg)は約 350 となり、この値と比較すると懸濁態リンは非常に高い割合(74%)で、溶存態と同程度にまで藻類によって摂取されたこととなる。藻類の懸濁態栄養塩の摂取速度²⁾ や、増水時流出栄養塩の形態¹⁴⁾⁻¹⁶⁾ とその利用効率¹⁷⁾ などについては文献を参考にされたい。

3. 藻類の増殖と環境保全

水質分析及藻類培養能力(AGP)試験によって、水域では栄養塩がさまざまな形態として存在すること、懸濁態栄養塩の存在割合が高くその藻類増殖能力(AGP)も無視できないことを紹介した。水質が回復してきたいま、藻類を中心とした自然生態系への関心が高くなってきている。藻類は、過度の栄養塩の供給によって異常増殖し水質を劣化させるが、本来自然の生態系を形成・維持するピラミッドの土台¹⁸⁾(一次生産物)である。水域の特性や供給源の性質を考慮した栄養塩の流出制御が、自然に近い環境を復元させる重要な環境保全対策である。排水処理対策とともに懸濁態栄養塩を多量に含む土壌の流出防止対策など、重点的に取り扱われるべき課題であろう。

表-3 AGP 試験結果(栄養塩無添加)

地点名	月日	AGP(T)	AGP(AT)	AGP(F)	AGP(AF)
		C mg/l	C mg/l	C mg/l	C mg/l
石狩川(St.1)	4/23/83	2.1	7.2	5.9	2.6
	8/17/83	3.6	13.9	7.7	7.8
	9/13/83	4.2	9.6	6.7	4.4
石狩川(St.3)	4/23/83	11.8	7.1	6.3	9.8
	8/17/83	6.0	13.6	6.7	11.3
	9/13/83	26.3	15.1	9.0	12.4
石狩川(St.6)	4/23/83	3.3	10.5	4.6	3.5
	8/17/83	10.8	16.3	9.5	14.0
	9/13/83	25.0	24.4	10.2	25.0
創成川(St.SF)	12/23/81	44.7		1.8	18.3
茨戸湖(St.B 4)	12/23/81	30.3		3.5	10.3
茨戸湖(St.B12)	12/23/81	3.9		6.4	7.1
〈下水・し尿処理場〉					
E処理場(旭川・下水対流水)	11/ 4/83	544	414	146	149
F処理場(江別・下水原水) 9:00(原水)	11/30/83	84.4	295	230	193
G処理場(旭川・し尿処理水)	18:00 11/30/83	150	181	278	124
	11/ 4/83	147	151	158	89.6

参考文献

- 1) 橘治国：富栄養化とその防止対策—石狩川水系を例として—, 北海道環境技術会誌, 9号, pp. 57-66, 1989
- 2) 橘治国, 森口朗彦, 井上隆信, 今岡孝之：藻類増殖能力の推定に関する一考察(2), 衛生工学研究論文集, 22巻, pp. 151-162, 1986
- 3) APHA・AWWA・WEF: Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, American Public Health Association, 1992
- 4) 須藤隆一, 田井慎吾, 矢木修身, 岡田光正, 細見正明, 山根敦子：藻類の培養試験法によるAGPの測定, 国立公害研究所研究報告, No. 26, pp. 1-53, 1981
- 5) 青木稔, 瀬戸義正, 建部修, 中村一誠：濾過障害生物 *Synechococcus acus* の増殖特性—AGP試験による増殖特性の検討—, 水道協会雑誌, Vol. 59, No. 3, pp. 20-29, 1990
- 6) Clesceri, N. L. and Lee, G. F.: Hydrolysis of Condensed Phosphates-2 Sterile Environment, Int. J. Air Wat. Poll., Vol. 9, pp. 743-751, 1965
- 7) Helfrich, L. A. and Kevern, N. R.: Availability of Phosphorus-32, Absorbed on Clay Particles to Green Algae, The Michigan Academician, Vol. 6, No. 1, pp. 71-81, 1973
- 8) 平田強, 田口勝久, 梅山和子：津久井湖における水質とアルカリ性ホスファターゼ活性の調査, 第16回水質汚濁学会講演集, pp. 248-249, 1982
- 9) 古田張子, 秋山高：遠賀川水系アルカリホスファターゼ活性について, 第17回水質汚濁学会講演集, pp. 203-204, 1983
- 10) 前田秋一：相模湖におけるホスファターゼによる無機リン酸の生成, 用水と排水, Vol. 30, No. 2, pp. 111-120, 1988
- 11) 橘治国：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, 20巻, pp. 53-60, 1984
- 12) 矢木修身, 岡田光正, 須藤隆一, 萩原富司, 高村義親：Microcystisの増殖特性, 国立公害研究所研究報告, No. 25, pp. 47-58, 1981
- 13) 高村義親, 野村和輝, 萩原富司, 平松昭, 矢木修身, 須藤隆一：霞ヶ浦に発生するアオコと *Microcystis aeruginosa* の化学組成について, 国立公害研究所研究報告, No. 25, pp. 31-58, 1981
- 14) 橘治国, 江口久登, 佐藤茂之, 河西正美, 小棚木修：水域におけるリンの存在状態と挙動—石狩川流域を例として—, 衛生工学研究討論会講演論文集, 第18回, pp. 1-8, 1982
- 15) 橘治国, 石川清, 大林純一, 小林伸吉：懸濁態反応リンの流出と藻類増殖への可能性—石狩川流域を例として—, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, 第37回, pp. 147-148, 1982
- 16) 滝本和人, 川相吉弘, 有吉靖信：黒瀬川流域における形態別リンの変動特性, 水質汚濁研究, Vol. 11, No. 3, pp. 188-193, 1988
- 17) 橘治国, 和和英治, 大畑博：藻類増殖における懸濁態リン化合物の利用, 土木学会北海道支部論文報告集, 43巻, pp. 309-314, 1987
- 18) オダム (三島次郎訳) 生態学の基礎, 培風館, 1974

3. 懸濁態リン化合物の藻類による利用

懸濁物質のリン含有率は、図1のとおり、ほぼ一定の割合である。しかし図2にPP濃度と懸濁態リン成分による藻類増殖分 (AGP (SS) + N) との関係を示したが (石狩川：①、②は増水時の、③～⑤が流量安定時)、PP (懸濁態リン) 濃度に対する増殖した藻類濃度の割合は、PP濃度が高くなるほど低下する傾向が認められる。表1には、PP濃度と両者の関係を窒素無添加での藻類増殖濃度 (AGP (SS)) を含め、回帰式で示してある。〔例えばPPが1mg/lとすると、過剰な窒素を添加した場合すなわち利用可能なPP (懸濁態リン) によるAGPは30.3Cmg/l (①式、Chl-a 400~500μg/l) となる。実際の状況に近い無添加では26.5Cmg/l (②式) となるので利用可能リン化合物のうち87%が利用されたことになる。また *Microcystis aeruginosa* 増殖時のC/Pが350なので、懸濁態リンのうち約9% (30.3mg/350mg×100) のリン化合物が利用可能で7.5% (26.5mg/350mg×100) が利用されたことになる。なお流量安定時には、懸濁態リン (PP 1mg/lと仮定) のうち、28%が利用可能 (③式) で15%利用された (④式) ことと比較すると、増水時はこの約半分の効率ということになる。〕

4. 懸濁態リン化合物の動態との関連

懸濁態リン化合物は、図3に示したように、

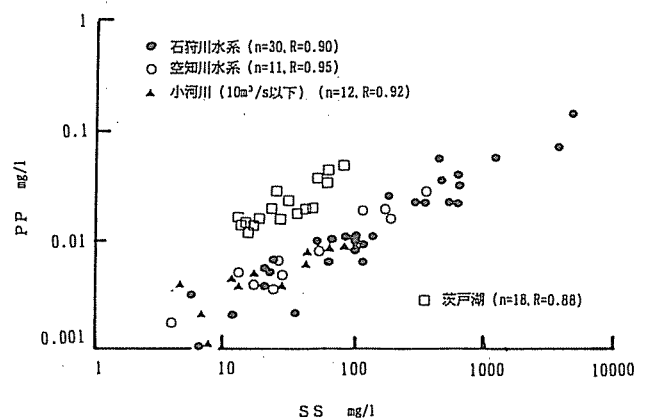


図1 PPとSSの関係

表1 AGP (炭素C) と懸濁態リン (PP) の関係

回帰式 (C, PP: mg/l)	
増水時 (n=30) (1985 9/1~9/21)	① C (AGP (SS) + N) = 25.7 PP + 4.6 (R=0.83)
流量安定時 (n=12) (1983 4~9)	② C (AGP (SS)) = 23.9 PP + 2.6 (R=0.89)
	③ C (AGP (SS) + N) = 93.4 PP + 4.3 (R=0.58)
	④ C (AGP (SS)) = 51.3 PP + 2.6 (R=0.86)
Microcystis aeruginosa (増殖時) (矢木、高村 1991)	⑤ C (AGP (SS) + N) = 257 PP - 2.4 (R=0.93)
	⑥ C = 350 PP

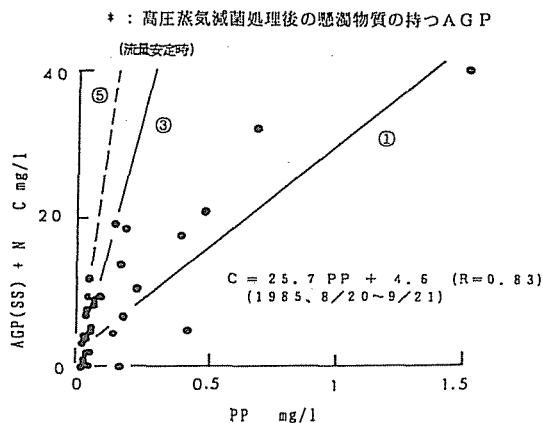


図2 PPとAGP (SS) + Nの関係
(图中数値は、表1参照)

増水時に多量に流出する。また図4 (茨戸湖上部湖盆1985) に示したように、懸濁物質は湖底堆積後も風等によって舞い上がり、見かけ以上に湖内での循環量が多いのが現実である。図5 (茨戸湖上部湖盆1985) のように藻類生産にはこの舞い上がった底泥由来の懸濁物質に含まれる栄養塩分による寄与を考慮される必要がある。

5. 懸濁態栄養塩の摂取のメカニズム

無菌状態においても懸濁物質に含まれるリン化合物は藻類に利用される。¹⁾ 自然界において、懸濁物質中の酸可溶性リンの季節的な消長 (図6 茨戸湖1979 藻類増殖時に減少) や懸濁物質存在下でのフォスフォターゼ活性の増加 (図7) は、懸濁態栄養塩が生物へ比較的容易に利用されていることを示唆している。

6. 藻類種による増殖能力の差

藻類種によって、藻類増殖のパターンが異なるのは当然である。しかし試水の持つ藻類増殖能力の比較は、特定種によって行われることが普通である。図8 (雨竜川1988 AGP (AF)) に、オートクレーブ処理後の石狩川試水についての2種の藻類増殖状況を示した。多くの実験結果から、私どもが現場と対応させて使用する *Microcystis*

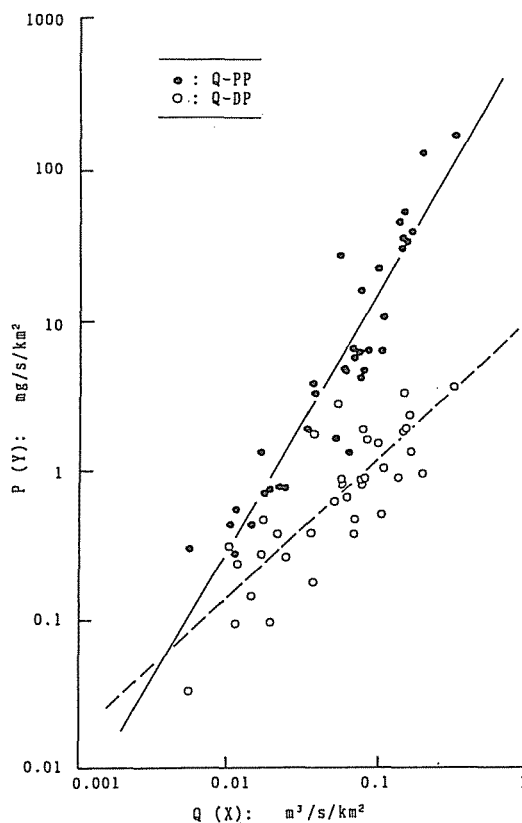


図3 比流量 (流量(Q)/流域面積(A): X) と比成分流出量 ((温度×流量)C・Q/流域面積(A): Y)
(石狩川本・支川29~31地点、1979年)

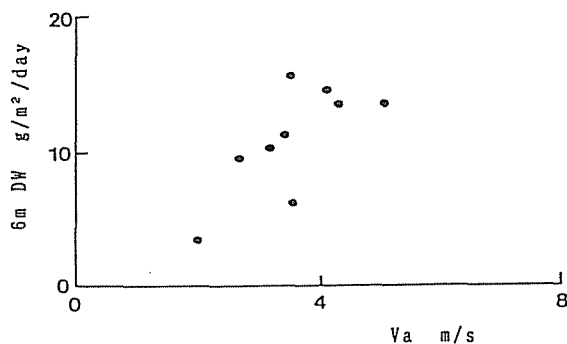


図4 風速と沈降物量の関係

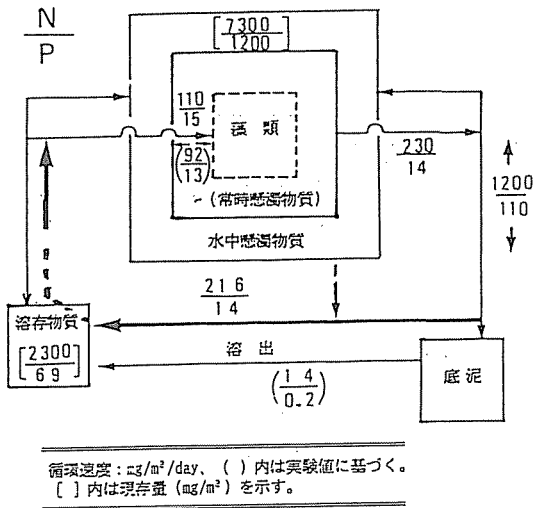


図5 栄養塩の循環とその速度
(9/29~10/2/85)

*aeruginosa*とAGP標準種である*Selenastrum capricornutum*では、前者において初期に増殖の停滞や最大増殖後の早期の白濁化、両種の栄養要求の若干の差が観察されたが、最大増殖量の把握については大きな問題がないといえる。試水に対して、複数の藻類種による測定が望ましいことは云うまでもないが、現場優占種AGP測定も、価値があり普遍性のあることがわかった。

7. 今後の対策

自然界で優占的に存在する懸濁物質中の栄養塩が水系生態系や生物の現存量に大きな影響を与えていることが明らかにしたが、環境での動態や、生物への摂取過程については、溶存成分に比較して未だ未解明の部分が多い。筆者らは、今後の重要な課題として研究を継続して行く予定であるが、このシンポジウムの機会に、多くの方のご意見や批判をいただけたら幸いである。

1) 橘治国、藻類増殖能力の推定にかんする一考察、衛生工学研究論文集、20、p53-p60

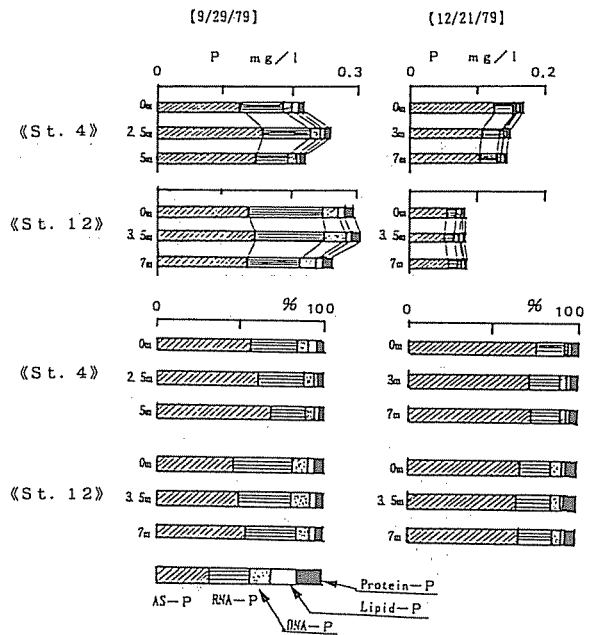


図6 STS法分析結果(茨戸湖垂直分布)

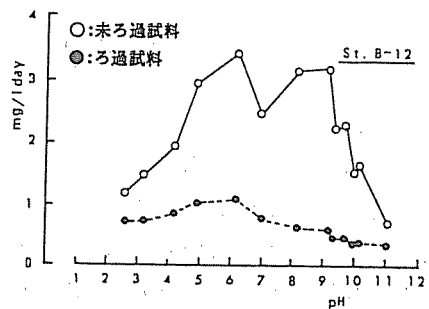


図7 茨戸湖のフォスファターゼ活性のpHプロファイル
(横山理恵氏, 1985.11.1)

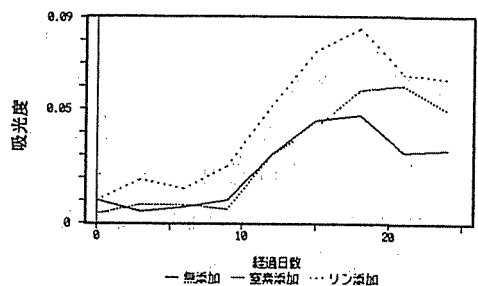
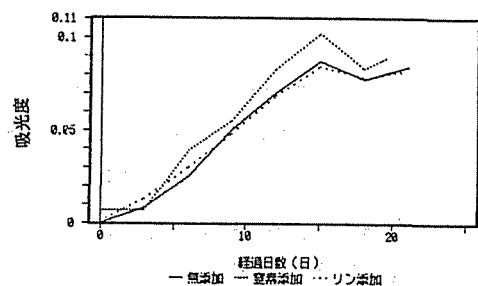


図8 藻類増殖の濁度変化
(上:Selenastrum、下:Microcystis)