

い場合には、早期に定常期に達してしまい、培養液中には溶解性の栄養塩類が高濃度に残存しており、藻体中では吸着性のN、Pがその全体の半分位を占めて存在する。K、Mg、Caは吸着性のものは少ないので、誤着範囲内に入り、吸着性の塩の有無が不明である。Naは藻中にほとんど利用されていないか、利用されるとしても微量である。

微量要素を添加した場合には、定常期に入ったときの培養液では溶存する栄養塩類の濃度が非常に低下していて、藻体中の吸着性元素はほとんど無く、実験誤差の範囲に入ってしまう。けたKはこの場合ほとんど変動がなく、N、Pのように残留塩類の濃度によって左右されず、ほぼ一定の値を示している。

微量要素の添加によって、主要栄養素塩が、極限と思われる量までも消費されることは、AGPにおいてLiebigの最小濃度則(Low of the minimum)が成立しているものと考えられる。通常の培養では、培養液の組成は、生物の繁殖が最も促進される配合を選択するものであろうが、排水処理ではこの最小濃度則を考慮して目的成分を最少にすることをはからなければならない。

8 リンの吸収に関する基礎的研究

近年公共水域における富栄養化の問題が深刻になって来て、これの防止について種々論じられていることであるが、特にPの問題が強く浮かび上がってきた。従来盛んに論じられたNの問題は、近時洗剤の排水などから来るPに置換えられた観がある。即ち、水域の富栄養化は、Pの増加によって支配されるように考えられるようになったのであるが、これは、Nに対してPが相対的に増加して来た場合、Nは制限因子にならず、ある種の藻類によって空中窒素の固定が行われるために、既存のNに無関係に藻類の増殖を来たす結果となるからである。

上の情勢からすると排水処理に当たっても、栄養塩除去の対象になるものは当然Pであって、この研究ではPの摂取速度がどのようなか、又、過剰摂取は如何に行われるかなど、Pの摂取機構を究明することが重要であって、この点に着目して研究を進めてみた。

8-1 リンの摂取速度

Pの吸収機構を究明するのに、藻体内への吸収速度がまず必要なものと考えられる。この研究では、 K_2HPO_4 と K_2HPO_4 を用いて、*Scenedesmus quadricapsa*のP吸収の問題を扱ってみた。

Cationに K^+ を用いたのは、Kが植物の3大栄養素のひとつであることと、7-3でも述べたようにKの植物体への吸収が、その生育過程等の条件によっては著しい影響を受けないことなどの理由からである。

又、実験に用いた植物プランクトンは純粋培養して定常期にある *Scenedesmus quadricornis* を用いた。定常期にある藻はPに対して飢餓状態にあると考えられる。

8-1-1 実験

Pの濃度が、約25/4 ppmになるように、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 の2塩類のそれぞれの溶液を調製し、試験溶液とした。これらの溶液の40 mlと、純粋培養した *Scenedesmus* を含む液10 mlとを混合し、25℃にした恒温振とう器中で振とうし、各時間ごとにこの中から取出し、濾過して濾液と残渣に分け、残渣は更に蒸留水で充分洗浄して分析試料とした。ここで用いた *Scenedesmus* の濃度は、細胞数で 6.2×10^6 個/ml、濁度でカオリン換算580 ppm、乾燥固型量として260 mg/lのものである。

濾液はそのままモリブデン青法でPを測定し、洗浄残渣はこれを HNO_3 、 HClO_4 で常法により加熱分解、中和希釈したものについて、同様モリブデン青法でPの測定を行った。

8-1-2 結果

実験の結果をまとめたものを表8-1-1、表8-1-2に示す。この表中で濾液の分析値で上段はその濃度 mg/l を示す。下段は藻中の含有量と対照し易くするために換算した数値で、上の全溶液即ち50 ml中に含まれるK、Pの量を μg であらわした値である。残渣の欄では上段は藻体に対するそれぞれの成分の重量%（対乾量）で、下段の数値はこの試験1単位中即ち試験液50 ml全量中の全藻体に含まれる μg 数で、濾液の下段に対応する。この表から各成分の挙動を考察すると次のようになる。

K 濾液中のKは始めの10分間位まで急激に減少するが、その後はほぼ一定の濃度となる（図8-1-1）。藻体内のKは始めの50分ぐらいまで上昇して行くが、その後一定となる（図8-1-4）。

P 濾液中のPは最初5分間で急激に減少し、その後徐々に減少を続ける（図8-1-2）細胞内のPは実験中の全時間（180分）にわたって増加を続けるが、時間がたつにしたがってその増加速度が鈍る（図8-1-3）。この場合 K_2HPO_4 溶液中のPの方が、 KH_2PO_4 のPよりも吸収量が多い。

Mg、Ca K、Pが吸収されるにつれて、細胞内濃度が減少してゆく傾向が見られる（図8-1-5、図8-1-6）。

Zn、Mn、Fe、Cu これらはほぼ一定の濃度を示す。Feはやや変動がみられるが、これは分析上分光光度計のBlank値が高く、誤差が大きいため、確実なことは言えない。

表 8 - 1 - 1 Scenedesmus quadrispina における KH_2PO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の P の
 吸収と各成分の平衡

時間(分)	濾液		残渣							
	K	P	K	P	Mg	Ca	Zn	Mn	Cu	Fe
0'	7.2 mg/ℓ	5.20	0.68 %	0.47	0.94	0.038	0.009	0.052	0.0008	0.022
	360 μg	260	88 μg	61						
1'	7.0 mg/ℓ	5.01	0.72 %	0.40	0.93	0.032	0.007	0.049	0.0019	0.02
	350 μg	251	94 μg	52						
2'	6.7 mg/ℓ	4.60	0.72 %	0.46	0.93	0.027	0.007	0.045	0.0014	—
	335 μg	230	94 μg	60						
10'	6.6 mg/ℓ	4.44	0.75 %	0.51	0.85	0.025	0.009	0.053	0.0013	0.01
	330 μg	222	98 μg	67						
20'	6.6 mg/ℓ	4.53	0.81 %	0.59	0.87	0.032	0.009	0.050	0.0065	0.05
	330 μg	227	105 μg	78						
40'	6.6 mg/ℓ	4.11	0.83 %	0.52	0.98	0.049	0.009	0.061	0.0012	0.04
	330 μg	206	109 μg	68						
60'	6.7 mg/ℓ	4.09	0.86 %	0.59	0.69	0.022	0.009	0.046	0.0014	—
	335 μg	205	113 μg	77						
90'	6.6 mg/ℓ	3.91	0.94 %	0.62	0.64	0.039	0.010	0.045	0.0018	0.004
	330 μg	196	122 μg	81						
120'	6.1 mg/ℓ	3.52	0.93 %	0.67	0.56	0.019	0.010	0.048	0.0015	0.02
	305 μg	176	121 μg	87						
180'	6.2 mg/ℓ	3.67	1.02 %	0.73	0.47	0.031	0.008	0.047	0.0017	0.004
	310 μg	184	132 μg	95						

表 8 - 1 - 2 Scenedesmus quadrispina における K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の P の
 吸収と各成分の平衡

時間(分)	濾液		残渣							
	K	P	K	P	Mg	Ca	Zn	Mn	Cu	Fe
0'	13.1 mg/ℓ	4.97	0.68 %	0.47	0.94	0.038	0.009	0.052	0.0008	0.022
	656 μg	249	89 μg	61						
1'	12.4 mg/ℓ	4.68	0.71 %	0.45	0.93	0.043	0.007	0.052	0.0010	0.02
	620 μg	234	93 μg	58						
2'	12.2 mg/ℓ	4.44	0.77 %	0.47	0.92	0.034	0.009	0.051	0.0013	0.01
	610 μg	222	100 μg	61						
5'	12.2 mg/ℓ	4.55	0.78 %	0.45	1.18	0.040	0.008	0.070	0.0016	0.02
	610 μg	228	102 μg	58						

濾液		残渣								
時間(分)	K	P	K	P	Mg	Ca	Zn	Mn	Cu	Fe
20'	11.5mg/l	4.35	0.75 %	0.53	0.90	0.039	0.008	0.049	0.0023	0.08
	575 mg	218	97 μg	70						
40'	11.5mg/l	3.83	0.87 %	0.59	0.86	0.033	0.008	0.046	0.0015	0.004
	575 mg	192	113 μg	77						
60'	11.5mg/l	3.93	0.95 %	0.65	0.95	0.072	0.009	0.052	0.0017	0.07
	575 mg	197	123 μg	85						
90'	11.3mg/l	3.78	0.91 %	0.78	0.82	0.032	0.008	0.046	0.0022	0.008
	565 mg	189	118 μg	101						
120'	11.3mg/l	3.42	0.86 %	0.82	0.76	0.006	0.008	0.050	0.0018	0.02
	565 mg	171	112 μg	106						
180'	11.3mg/l	3.23	1.00 %	0.87	0.75	0.010	0.008	0.052	0.0013	0.01
	565 mg	162	130 μg	113						

図 8 - 1 - 1 Scenedesmus quadricornis における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 (P 5 mg / l) 中の K の吸収 (濾液中の K の減少)

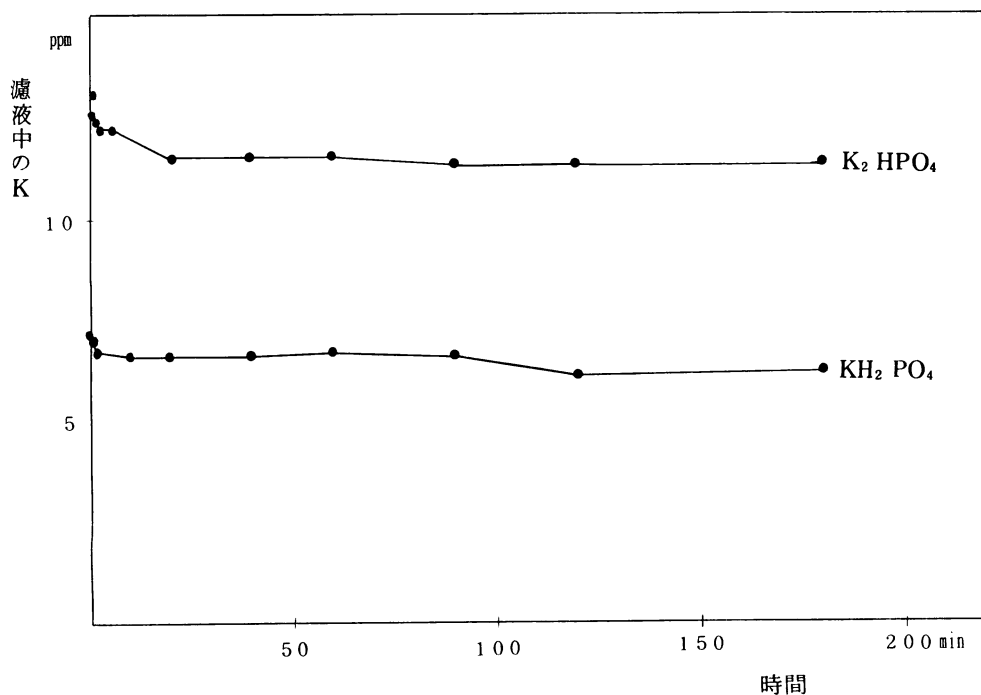


図 8 - 1 - 2 Scenedesmus quadricornis における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 (P 5 mg / ℓ)
 溶液中の P の吸収 (濾液中の P の減少)

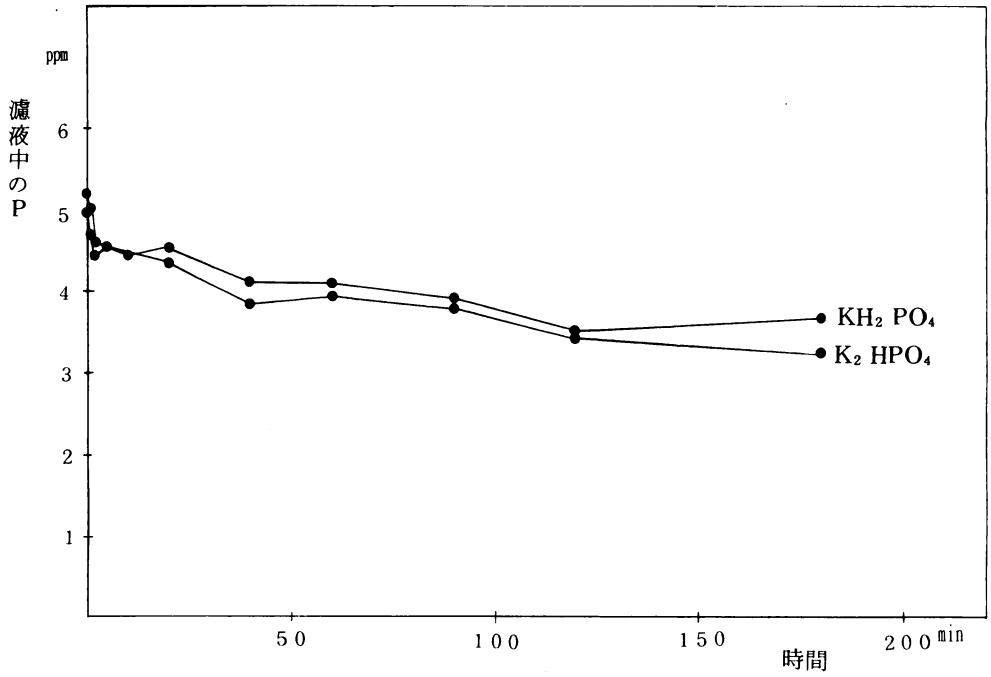


図 8 - 1 - 3 Scenedesmus quadricornis における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 (P 5 mg / ℓ)
 溶液中の P の吸収 (細胞中の P の増加)

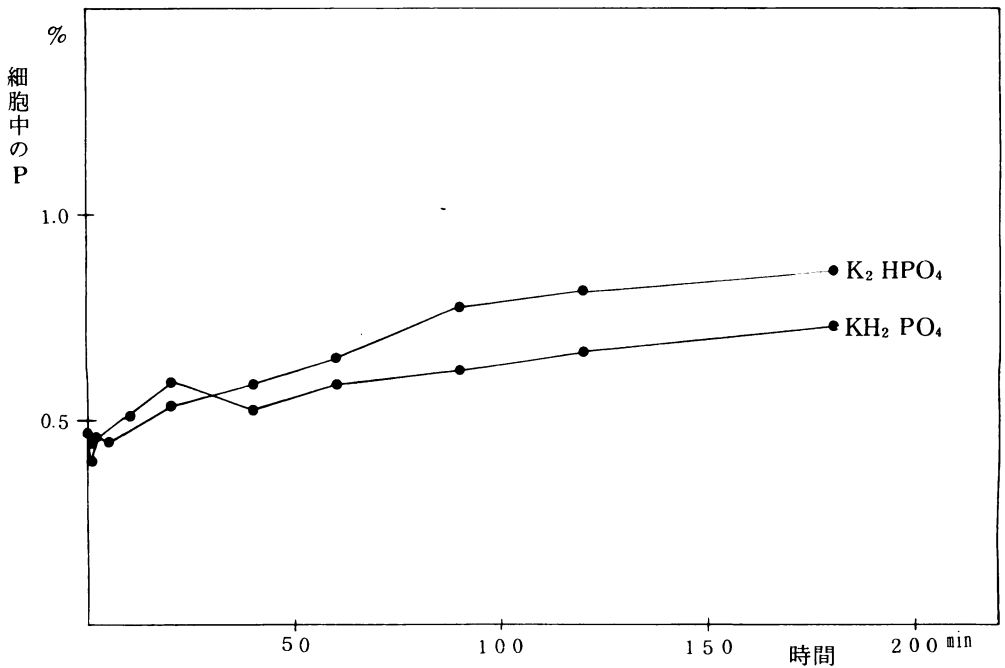


図 8 - 1 - 4 Scenedesmus quadrispina における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 溶液中の K の吸収 (細胞中の K の増加)

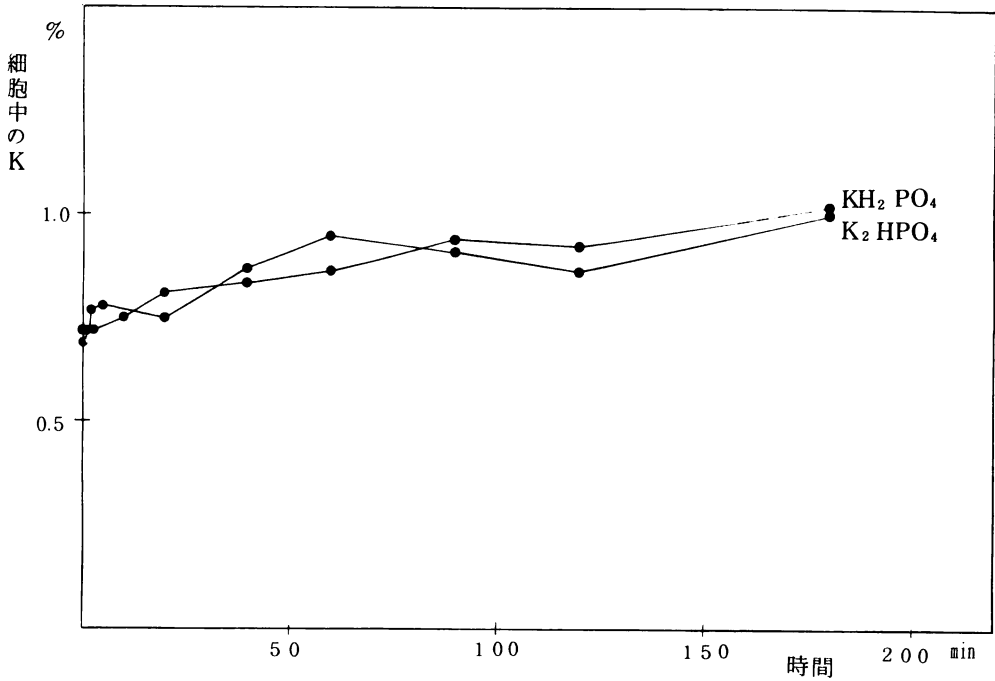


図 8 - 1 - 5 Scenedesmus quadrispina における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の Mg の吸収 (細胞中の濃度の変化)

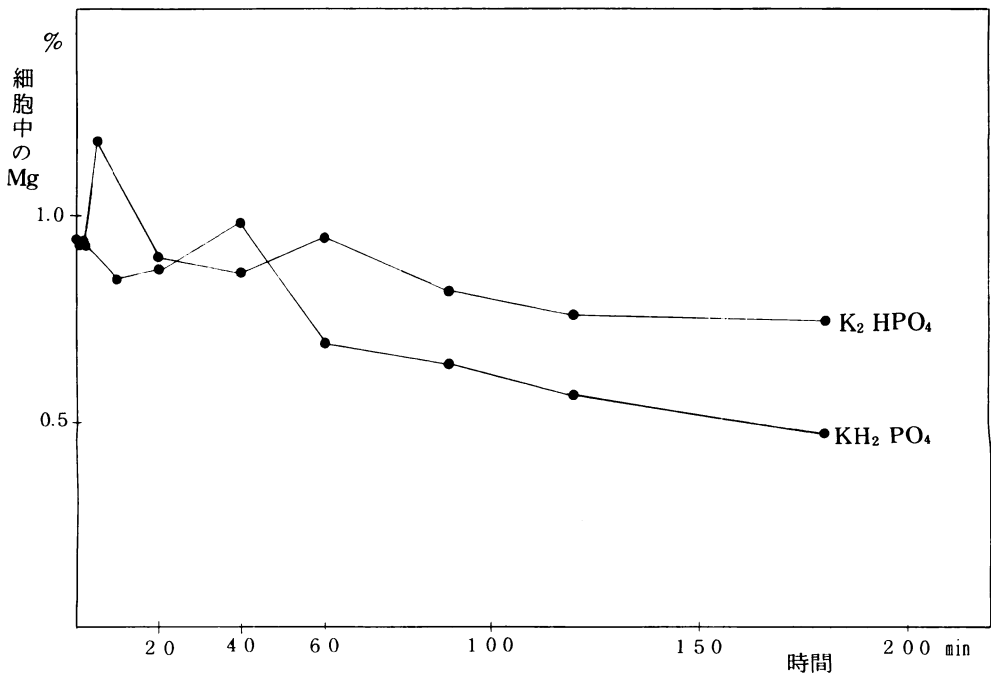
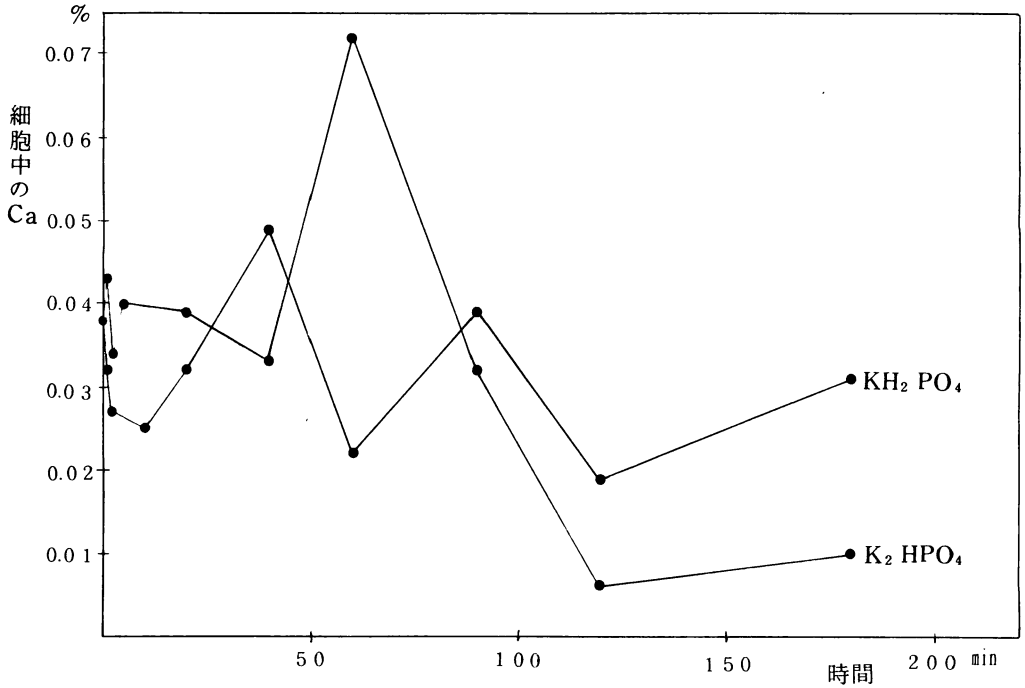


図 8-1-6 Scenedesmus quadrispina における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の Ca の吸収 (細胞中の濃度の変化)



8-1-3 考 察

Scenedesmus quadrispina の細胞内塩類相互の間の相関係数を表 8-1-1、表 8-1-2 から計算すると、表 8-1-3、表 8-1-4 のようになる。この表からわかることは、K、P が細胞内に吸収されると、Mg が細胞から排出されることである。

表 8-1-3 Scenedesmus quadrispina における KH_2PO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中で平衡した各元素間の相関行列

	K	P	Mg	Ca	Zn	Mn	Cu	Fe
K	1	0.935	-0.895	-0.093	0.420	-0.273	0.045	-0.199
P		1	-0.900	-0.229	0.521	-0.286	0.165	-0.127
Mg			1	0.430	-0.366	0.541	0.070	0.450
Ca				1	0.038	0.602	-0.014	0.443
Zn					1	0.147	0.055	0.190
Mn						1	-0.072	0.656
Cu							1	0.615
Fe								1

$$\begin{aligned} P &= 0.855K - 0.150 \\ Mg &= -1.451K + 1.985 \\ Mg &= -1.595P + 1.673 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r-P, K &= 0.935 \\ r-Mg, K &= -0.895 \\ r-Mg, P &= -0.900 \end{aligned}$$

表 8-1-4 Scenedesmus quadricornis における K_2HPO_4 ($P 5 mg/l$) 中で平衡した各元素間の相関行列

	K	P	Mg	Ca	Zn	Mn	Cu	Fe
K		0.841	-0.484	-0.169	0.056	-0.214	0.358	-0.066
P			-0.766	-0.536	-0.082	-0.386	0.377	-0.151
Mg				0.589	0.112	0.813	-0.147	0.187
Ca					0.306	0.152	-0.006	0.566
Zn						-0.026	-0.110	0.194
Mn							-0.179	-0.001
Cu								0.430
Fe								

$$\begin{aligned}
 P &= 1.290K - 0.461 & r-P, K &= 0.841 \\
 Mg &= -0.556K + 1.361 & r-Mg, K &= -0.484 \\
 Mg &= -0.573P + 1.249 & r-Mg, P &= -0.766 \\
 Mn &= 0.450Mg + 0.115 & r-Mn, Mg &= 0.813
 \end{aligned}$$

濾液中の塩濃度を C、時間を t とすれば、 dC/dt は塩の増加 (減少) 速度であるが、表 8-1-5 には次式

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_i - C_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \dots\dots\dots (8.1)$$

を用いて計算した値を示した。

表 8-1-5 濾液の K、P の減少速度

KH_2PO_4					K_2HPO_4				
min	K $mg/l \cdot hr$	$\mu g / \text{※}$ $mg \cdot hr$	P $mg/l \cdot hr$	$\mu g / \text{※}$ $mg \cdot hr$	min	K $mg/l \cdot hr$	$\mu g / \text{※}$ $mg \cdot hr$	P $mg/l \cdot hr$	$\mu g / \text{※}$ $mg \cdot hr$
0'	-1.20	-4.615	-1.14	-4.385	0'	-4.20	-16.15	-1.74	-6.692
1'	-1.80	-6.923	-2.46	-9.462	1'	-1.20	-4.615	-1.44	-5.538
2'	-0.75	-2.88	-1.20	-4.62	2'	0	0	2.20	8.46
10'	0	0	0.54	2.08	5'	-2.80	-10.77	-0.80	-3.08
20'	0	0	-1.26	-4.85	20'	0	0	-1.56	-6.00
40'	0.30	1.15	-0.06	-0.23	40'	0	0	0.30	1.15
60'	-0.20	-0.77	-0.36	-1.38	60'	-0.40	-1.54	-0.30	-1.15
90'	-1.00	-3.85	-0.78	-3.00	90'	0	0	-0.72	-2.77
120'	0.10	0.38	0.15	0.58	120'	0	0	-0.19	-0.73

※ 全部細胞に吸収されたとして、乾燥藻体 1 mg 当りに 1 時間で吸収される量を計算した。

図 8-1-7、図 8-1-8 で、K、P の初期に濾液から急激に減少し、その後次第に減少率の低下する様子を見ることが出来る。

一方細胞内の K、P の増加率も同様に計算することが出来、その結果を表 8-1-6、図 8-1-9、図 8-1-10 にまとめた。

表 8-1-6 細胞内K、Pの増加速度

KH ₂ PO ₄ μg/mg・hr					K ₂ HPO ₄				
min	K	前表から 計 算	P	前表の 数 値	min	K	前表から 計 算	P	前表の 数 値
0'	2.4.0	4.6.2	-4.2.0	4.3.9	0'	1.8.0	1.6.2	-1.2.0	6.6.9
1'	0	6.9.2	3.6.0	9.4.6	1'	3.6.0	4.6.2	1.2.0	5.5.4
2'	2.2.5	2.9	3.7.5	4.6	2'	2.0.0	0	-4.0.0	-8.5
10'	3.6.0	0	4.8.0	-2.1	5'	-1.2.0	1.0.8	3.2.0	3.1
20'	0.6.0	0	-2.1.0	4.9	20'	3.6.0	0	1.8.0	6.0
40'	0.9.0	-1.2	2.1.0	0.2	40'	2.4.0	0	1.8.0	-1.2
60'	1.6.0	0.8	0.6.0	1.4	60'	-0.8.0	1.5	2.6.0	1.2
90'	-0.2.0	-3.9	1.0.0	3.0	90'	-1.0.0	0	0.8.0	2.8
120'	0.9.0	-0.4	0.6.0	-0.6	120'	1.4.0	0	0.5.0	0.7

図 8-1-7 Scenedesmus quadricornis におけるKH₂ PO₄ 及びK₂ HPO₄ 溶液 (P 5mg/l) 中のPの吸収— 浴液中のPの減少速度

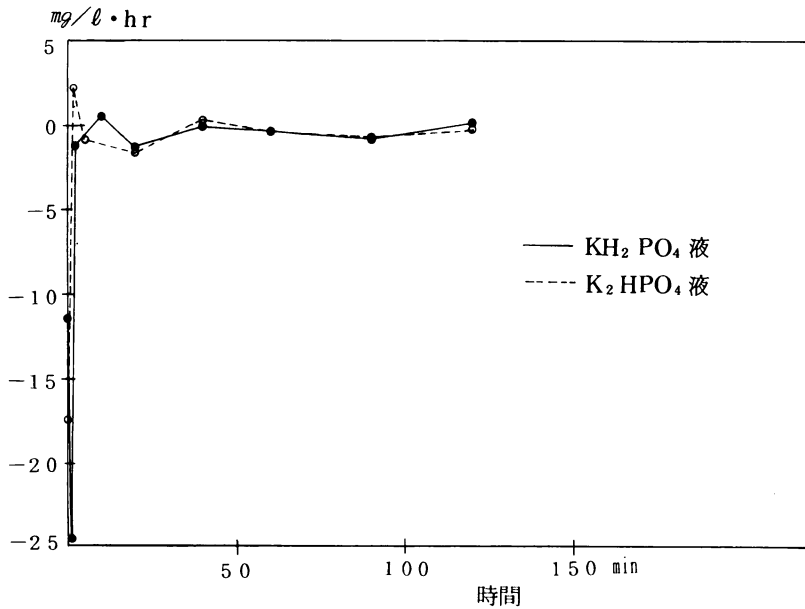


図 8-1-8 Scenedesmus quadricornis における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の K の吸収—— 培養液中の K の減少速度

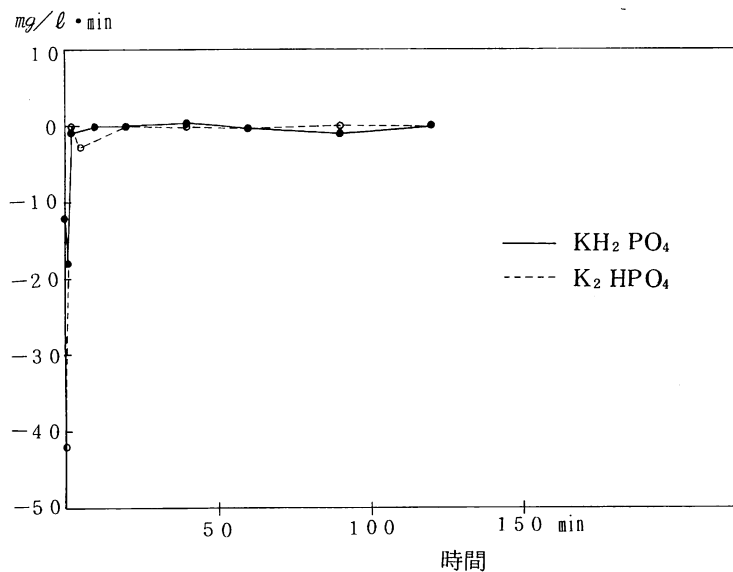


図 8-1-9 Scenedesmus quadricornis における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の P の吸収—— 細胞中の P の吸収速度

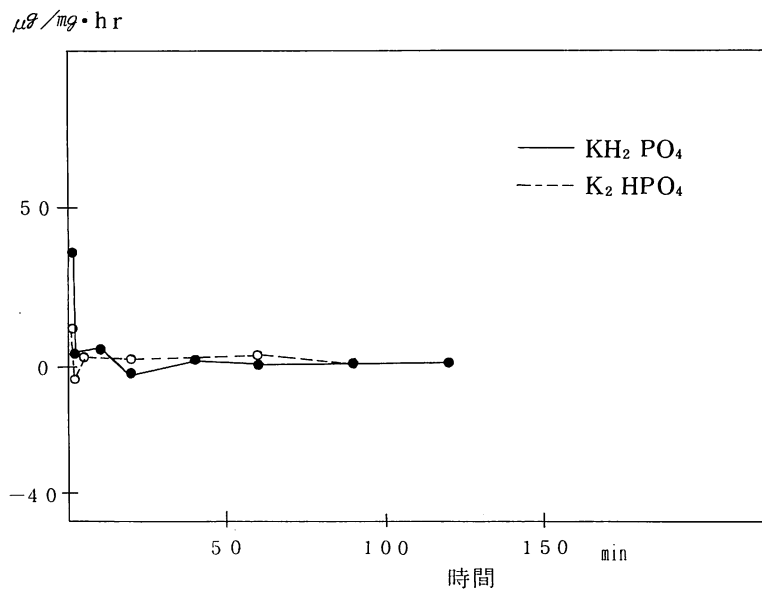
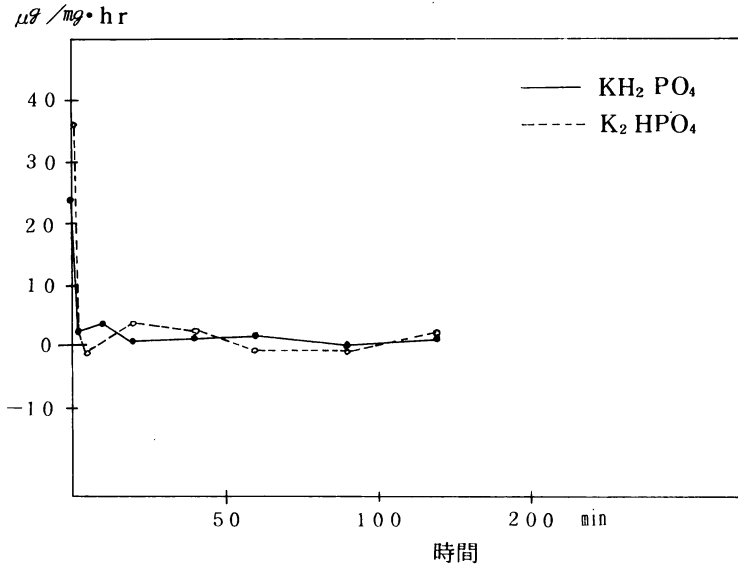


図 8-1-10 *Scenedesmus quadricornis* における KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液 ($\text{P } 5\text{mg}/\ell$) 中の K の吸収——細胞中の K の増加速度



これらによると、細胞内の K、P の増加率も上と同様に初期に大きく、時間の経過するに従って、その減少する模様がみられる。藻細胞を塩類を含む溶液内に投入すると、溶液内の P の減少は直ちにおこるようであるが、細胞内のリンの増加は 1 分くらい遅れて起こるようになる。これは P が一旦細胞膜の表面に吸着され、ついでこの膜を透過して細胞中に取り込まれることによるものと考えられる。

細胞中に摂取されるリンの量は、当然限界があり、この値が一定量 A を示すと仮定し、P の摂取速度が、この上限値 A と現在の細胞内濃度 P の差に比例するとすれば、

$$\frac{dP}{dt} = k(A - P) \dots\dots\dots (8.2)$$

が成立する。k は定数であるが、栄養塩濃度が変わればこの値も変わるので、細胞外の P 濃度を C_p とすれば、(8.2) 式は、

$$\frac{dP}{dt} = kf(C_p)(A - P) \dots\dots\dots (8.3)$$

となる。f(C_p) の関数型モデルによって異なるが Monod 型がよく用いられる。この (8.3) 式に関する動力学的な考察は、最後の節(補記)で述べたい。

以上のようなP吸収の機構は、Pの除去を目的とする排水処理の実施に当たって、原排水の水質でPの濃度の激変に対抗することが可能で好都合であると思われる。

8-2 水中のリン濃度による藻のリン吸収

8-1では濃度を一定にした場合のPの摂取の時間的変化を追跡したが、この節では適当な一定時間に濃度の異なる液中でのPの摂取量を調べてみた。

8-2-1 実験

方法の概略は8-1-1と同じであるが、作用時間を3時間とし、添加する KH_2PO_4 又は K_2HPO_4 の濃度を数段階に変えて実験を反復した。

8-2-2

分析結果はすべて表8-2-1から8-2-4にまとめた。表8-2-1、8-2-2で右端の列はそれぞれのリン酸塩の濃度を mmol/ℓ で示し、左端の第1、第2列は、使用したScenedesmusの母液に含まれていたリン酸塩を含めて、リン酸塩を加えた後のK、Pの計算上の濃度である。また最下段の行には、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 のリン酸塩を加えない母液(培養液の滷液)のK、Pその他の濃度を示した。

表8-2-1 Scenedesmus quadricornisにおける KH_2PO_4 溶液の種々の濃度に対する吸収各元素の滷液中に残存する濃度

最 初 mg/ℓ		滷 液 (3 hr 振盪後) mg/ℓ							最 初
K	P	K	P	Mn	Mg	Ca	Na	pH	KH_2PO_4 mmol/ℓ
0.681	0.107	0.747	0.006	0.005	6.12	3.72	14.6		0.00329
0.810	0.209	0.736	0.004	0.010	5.76	3.35	12.6		0.00659
1.20	0.515	0.918	0.004	0.006	5.41	3.28	12.3		0.0165
1.84	1.03	1.36	0.019	0.006	5.73	3.36	14.1		0.0329
3.13	2.05	2.55	0.835	0.008	5.58	2.49	14.2	7.1	0.0659
5.70	4.09	4.76	2.60	0.010	5.11	1.49	14.0	7.0	0.1317
13.4	10.21	13.4	8.50	0.016	4.94	1.03	14.1	7.1	0.329
26.3	20.4	25.1	17.5	0.022	5.14	0.947	14.1	7.0	0.659
64.9	51.0	62.7	46.4	0.036	5.73	0.949	14.9	6.4	1.647
129.3	102.0	118.5	88.3	0.043	5.87	0.976	14.2	6.1	3.293
KH_2PO_4 液 を加えず		0.552	0.005	0.002	5.96	3.80	13.3		

SS 260 mg/ℓ

表 8-2-2 Scenedesmus quadrispina における K_2HPO_4 溶液の種々の濃度に対する吸収——各元素の滲液中に残存する濃度

最初濾液		(滲液) 3 hr 振盪後 mg/ℓ							最初
K	P	K	P	Mn	Mg	Ca	Na	pH	K_2HPO_4 $mmol/\ell$
0.809	0.107	0.756	0.004	0.006	5.79	3.60	13.3		0.00328
1.066	0.209	1.02	0.003	0.006	5.52	3.34	12.5		0.00657
1.84	0.514	1.46	0.005	0.003	5.46	3.32	12.8		0.0164
3.12	1.022	2.54	0.018	0.002	5.57	3.39	14.5		0.0328
5.69	2.04	4.88	0.793	0.003	5.39	2.63	14.2	7.5	0.0657
10.65	4.07	9.88	2.55	0.004	4.65	1.54	13.9	7.4	0.1313
25.8	10.18	24.8	7.96	0.002	4.25	1.10	14.5	7.5	0.3283
51.9	20.3	47.2	16.8	0.001	4.14	1.04	14.2	7.7	0.6567
128.9	50.9	116.7	43.8	0.003	4.48	1.09	14.7	7.9	1.642
257.3	101.7	249.0	87.3	0.003	4.56	1.12	15.5	8.0	3.283
K_2HPO_4 液を加えず		0.552	0.005	0.002	5.96	3.80	13.3		

SS 260 mg/ℓ

図 8-2-1 Scenedesmus quadrispina の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する滲液中の P の濃度推移

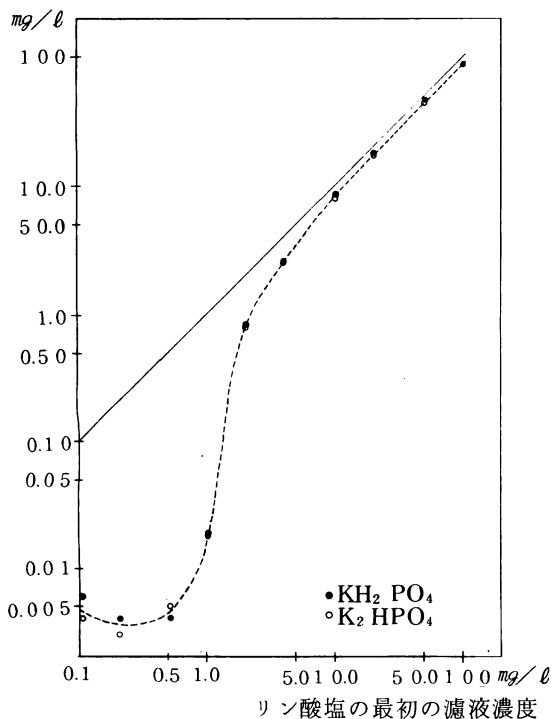


図 8-2-2 Scenedesmus quadrispina の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する滲液中の K の濃度推移

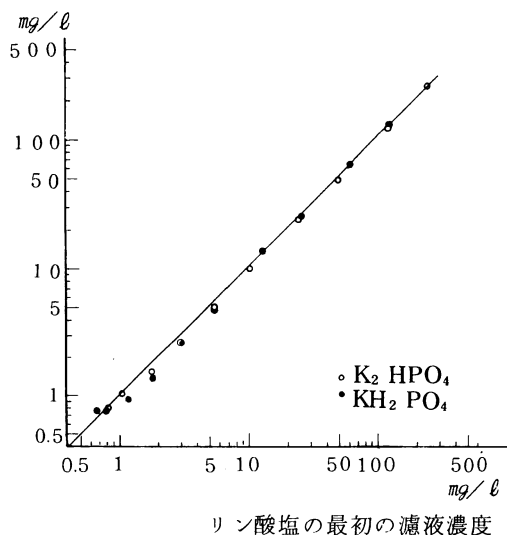


表8-2-3、8-2-4は残渣のK、P及び他の元素の分析値を掲げた。各欄は上下2段に数値を掲載してあるが、上段は濾過残渣の乾物に対するその成分の百分率、下段は濾過残渣を蒸留水で充分洗浄したもの、即ち前出の洗浄残渣の乾物百分比である。この残渣は鏡によれば、實際上全部Scenedesmus quadrispinaの藻体であると考えてよい。

表8-2-3 Scenedesmus quadrispinaにおけるKH₂PO₄溶液の種々の濃度に対する吸収——各元素の細胞中の濃度

溶液濃度	振盪後(25℃、3hr)の乾燥百分率(%)								
KH ₂ PO ₄ mol/l	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Zn	Na	Cu
3.29 × 10 ⁻⁶	0.517 0.495	0.697 0.714	0.806 0.749	0.047 0.021	0.0392 0.0415	0.013 0.007	0.010 0.009	0.04 0.03	0.0011 0.0007
6.59 × 10 ⁻⁶	0.546 0.583	0.762 0.896	0.835 0.593	0.075 0.036	0.0471 0.0435	0.023 0.011	0.011 0.012	0.11 0.15	0.0023 0.0023
1.65 × 10 ⁻⁵	0.624 0.602	0.800 0.783	0.798 0.712	0.044 0.024	0.0387 0.0377	0.007 0.006	0.008 0.009	0.14 0.03	0.0007 0.0007
3.29 × 10 ⁻⁵	0.800 0.728	0.869 0.836	0.702 0.614	0.041 0.020	0.0383 0.0410	0.027 0.009	0.011 0.015	0.24 0.14	0.0011 0.0011
6.59 × 10 ⁻⁵	0.818 0.765	0.971 0.922	0.600 0.625	0.026 0.035	0.0402 0.0444	0.023 0.013	0.009 0.009	0.12 0.11	0.0011 0.0016
1.32 × 10 ⁻⁴	0.803 0.784	0.925 0.889	0.418 0.391	0.026 0.014	0.0283 0.0333	0.003 0.010	0.007 0.008	0.06 0.04	0.0013 0.0008
3.29 × 10 ⁻⁴	0.754 0.784	0.876 0.827	0.315 0.296	0.016 0.005	0.0343 0.0290	0.011 0.001	0.013 0.007	0.04 0.03	0.0011 0.0005
6.59 × 10 ⁻⁴	0.778 0.865	0.969 0.909	0.229 0.283	0.012 0.008	0.0296 0.0400	0.023 0.040	0.010 0.009	0.10 0.03	0.0010 0.0036
1.65 × 10 ⁻³	0.803 0.747	0.990 0.900	0.172 0.160	0.007 0.004	0.0277 0.0310	0.018 0.019	0.007 0.009	0.04 0.08	0.0011 0.0021
3.29 × 10 ⁻³	0.797 0.834	1.028 1.024	0.146 0.149	0.005 0.011	0.0269 0.0319	0.015 0.036	0.006 0.018	0.10 0.10	0.0011 0.0011

SS 260mg/l 上段 洗浄せず 下段 洗浄後

表8-2-4 Scenedesmus quadrispinaにおけるK₂HPO₄溶液の種々の濃度に対する吸収——細胞中の各元素の濃度

溶液濃度	振盪後(25℃、3hr)の乾燥百分率(%)								
K ₂ HPO ₄ mol/l	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Zn	Na	Cu
3.28 × 10 ⁻⁶	0.555 0.514	0.729 0.765	0.885 0.762	0.047 0.030	0.0383 0.0429	0.024 0.011	0.011 0.010	0.02 0.06	0.0007 0.0027
6.57 × 10 ⁻⁶	0.527 0.524	0.741 0.781	0.749 0.818	0.044 0.028	0.0429 0.0462	0.015 0.016	0.016 0.007	0.02 0.00	0.0015 0.0013
1.64 × 10 ⁻⁵	0.646 0.643	0.818 0.838	0.666 0.744	0.014 0.022	0.0437 0.0425	0.013 0.013	0.006 0.018	0.01 0.02	0.0004 0.0027
3.28 × 10 ⁻⁵	0.718 0.750	0.925 0.841	0.827 0.552	0.056 0.016	0.0440 0.0385	0.017 0.015	0.015 0.010	0.15 0.09	0.0020 0.0016
6.57 × 10 ⁻⁵	0.822 0.818	0.877 1.247	0.656 0.873	0.037 0.058	0.0425 0.0469	0.014 0.023	0.009 0.011	0.12 0.10	0.0011 0.0016
1.31 × 10 ⁻⁴	0.803 0.847	0.964 0.871	0.589 0.589	0.045 0.031	0.0417 0.0367	0.012 0.006	0.009 0.010	0.11 0.08	0.0010 0.0004
3.28 × 10 ⁻⁴	0.953 0.953	0.995 0.997	0.564 0.598	0 0.030	0.0425 0.0415	0.003 0.024	0.009 0.011	0.04 0.04	0.0018 0.0017
6.57 × 10 ⁻⁴	0.960 0.935	1.024 0.953	0.631 0.562	0.051 0.018	0.0396 0.0333	0.040 0.019	0.009 0.007	0.15 0.08	0.0043 0.0013
1.64 × 10 ⁻³	1.060 1.028	1.217 1.090	0.723 0.704	0.046 0.038	0.0462 0.0427	0.022 0.028	0.010 0.010	0.10 0.08	0.0014 0.0016
3.28 × 10 ⁻³	1.148 1.047	1.493 1.143	0.637 0.666	0.027 0.028	0.0483 0.0423	0.022 0.027	0.008 0.009	0.13 0.04	0.0007 0.0013

SS 260mg/l 上段 洗浄せず 下段 洗浄後

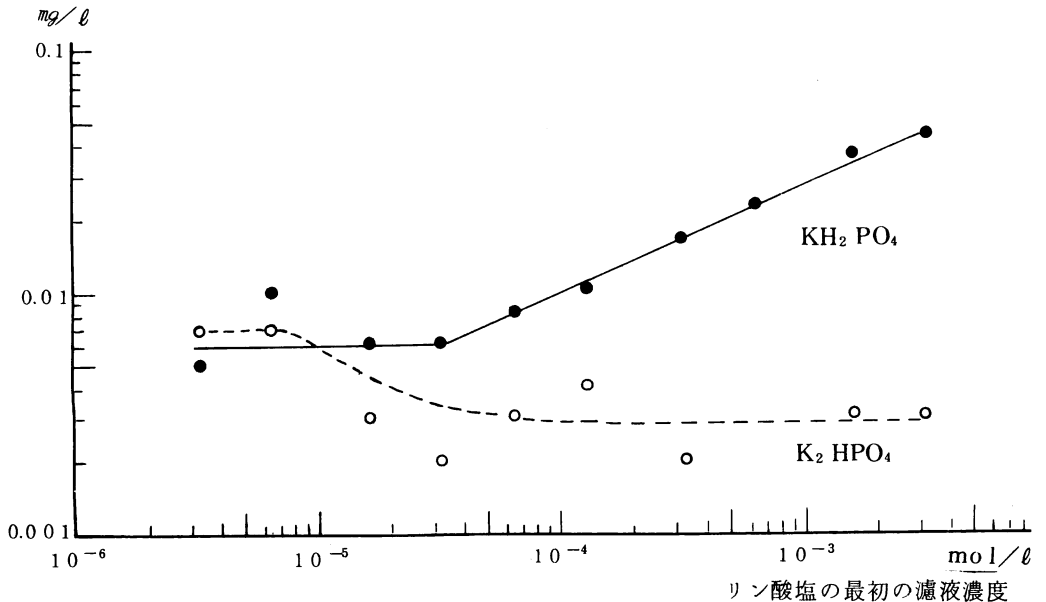
滷液の K、P の減少

図 8-2-1、8-2-2 は表 8-2-1、8-2-2 のそれぞれの K、P の濃度推移をグラフ化したものである。横軸は緑藻に接触する前の液の K、P の濃度で、縦軸は 25℃、3hr の振とうによって、液と緑藻とが接触した後の滷液の濃度を示している。これによると、滷液の K、P の減少量は最初の K、P の濃度に強く依存している。滷液中のこの K、P の濃度減少が全て *Scenedesmus* の摂取によるものとするれば、*Scenedesmus* の細胞中の P の増加量は滷液中の P の濃度だけによって決定されることになる。しかし実際に細胞内の P を定量した結果の表 8-2-3、8-2-4 を比較検討してみると、細胞内の P の増加の量は液中の P の濃度のみで決定せず、その K の濃度もこれにあずかることが見出される。この矛盾については考察のところで詳しく述べることにしたい。

液中の Mn、Mg、Ca、Na

KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の両溶液を用いた摂取実験の滷液の組成中では、Mn の行動が最も特徴的である。図 8-2-3 では横軸に、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 の濃度を mmol/ℓ でとり、縦軸に滷液中の Mn の濃度 (mg/ℓ) を取った。

図 8-2-3 *Scenedesmus quadrispina* の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する滷液中の Mn の濃度推移



この図でわかることは、 KH_2PO_4 溶液を用いた場合、この濃度が約 $4 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ を超えるとその濃度の上昇にともなって濾液中の Mn の濃度が次第に増加し、 K_2HPO_4 を用いたときにはその濃度による濾液の Mn の変化ははっきりしないことである。

Mg と Ca は互いに似たような変化を示す。即ち両者は KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 の両リン酸塩の溶液の別に関係なく、これらの濃度が約 $4 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ を超えると急激に減少を始め、リン酸塩の濃度 5×10^{-4} 付近までその濃度上昇にともなって減少し続ける。その後は Mg では再び増加の傾向をたどるが、Ca はここで変化が止まり、リン酸塩の濃度増加に無関係にはば一定値を保つようになる。(図 8-2-4、8-2-5)

図 8-2-4 *Scenedesms quadrispina* の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する濾液中の Mg の濃度推移

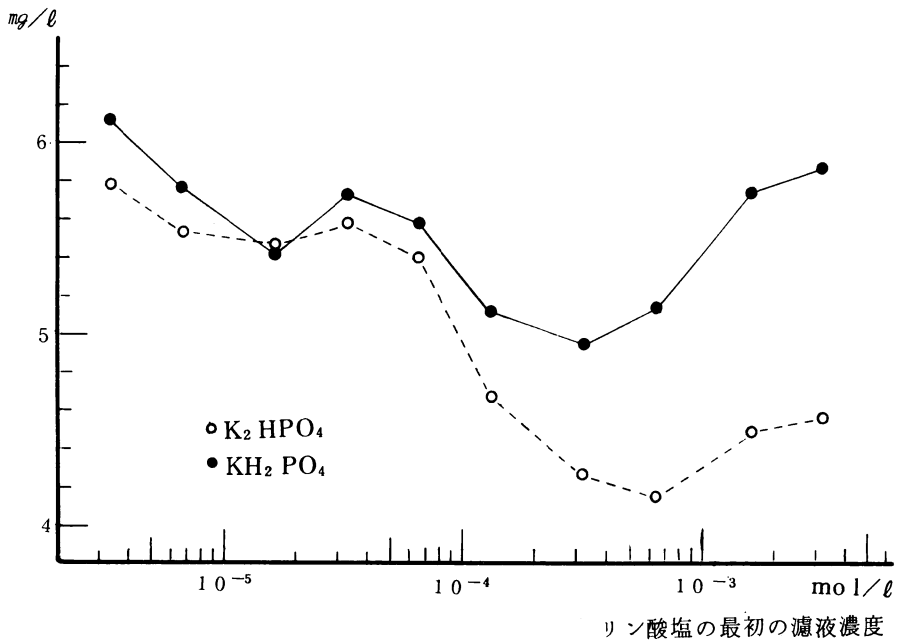


図 8-2-5 Scenedesmus quadricornis の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する 滲液中の Ca の濃度推移

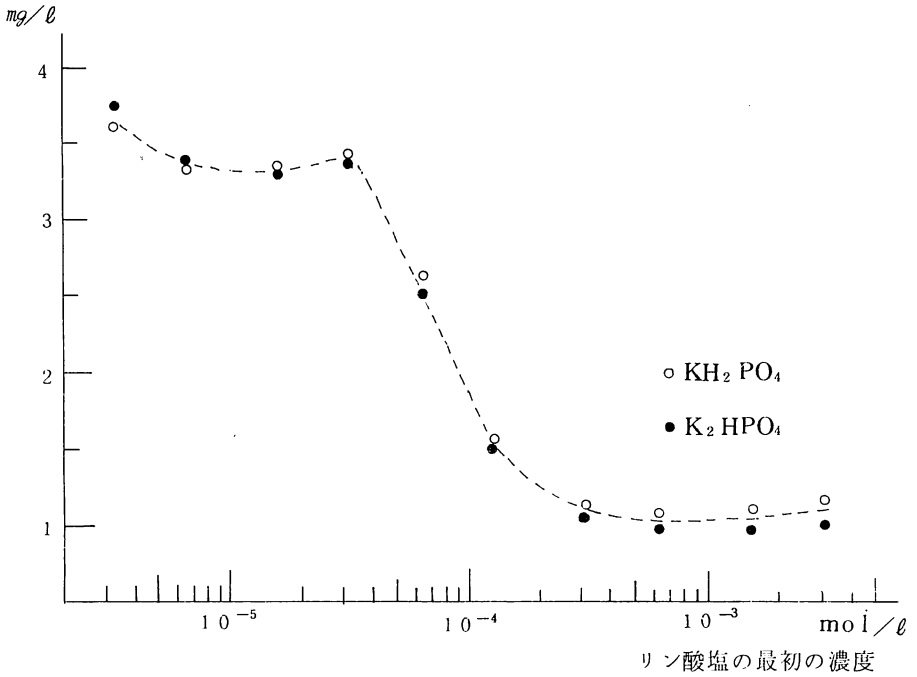


図 8-2-6 Scenedesmus quadricornis の浸漬による KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の濃度に対する 滲液中の Na の濃度推移

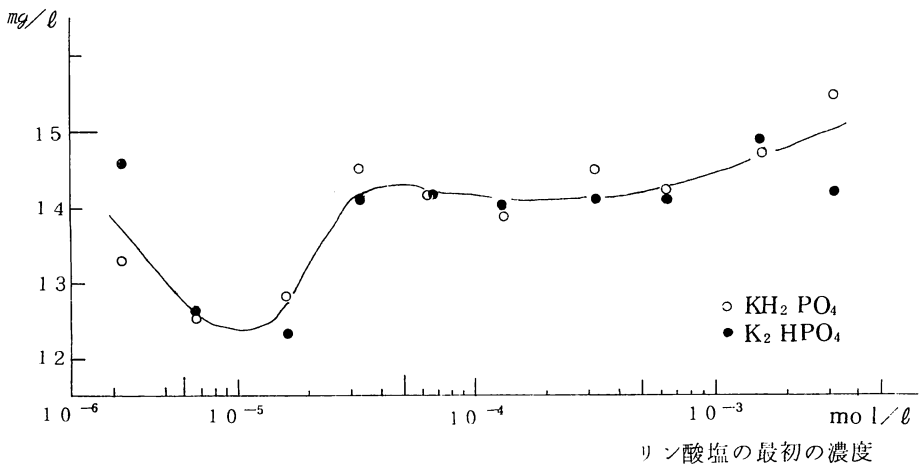


図8-2-6は同様にNaの行動を示したものである。リン酸塩濃度 4×10^{-5} 付近に最低値が見られるようであるが、その他ではほぼ濃度に関係なく一定値を示す。

細胞中のK、P

細胞中の元素組成は前出の表8-2-3、8-2-4に示されたとおりである。

図8-2-7では横軸が、最初に添加した KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 溶液の濃度で、縦軸には25℃、3hr振とう後の細胞中のPの含有量(乾燥百分率)をとった。

このグラフから知られるように、Pを KH_2PO_4 で与えた場合 K_2HPO_4 の場合とでは、それらの濃度が低い間は両者に対応する細胞中のリン含量の間には差異がなく、液中の濃度が $4 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ を超えるとPの摂取の状態に明瞭な差異が見られて来る。即ちこの濃度以上になったとき、 KH_2PO_4 溶液ではPの摂取量は、その濃度の増加に関係なくほぼ一定であることに反して、 K_2HPO_4 溶液の場合にはその $4 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 以上の濃度で濃度が増加するに従って摂取量も増大する。細胞を蒸留水で洗浄したものを、しないものと対比してみると、両者の間にほとんど差が認められないが、洗浄した方がわずかに低い値を示すかと感じられる程度である。

図8-2-7 Scenedesmus quadricornisの KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬によるPの摂取——細胞中P濃度の推移

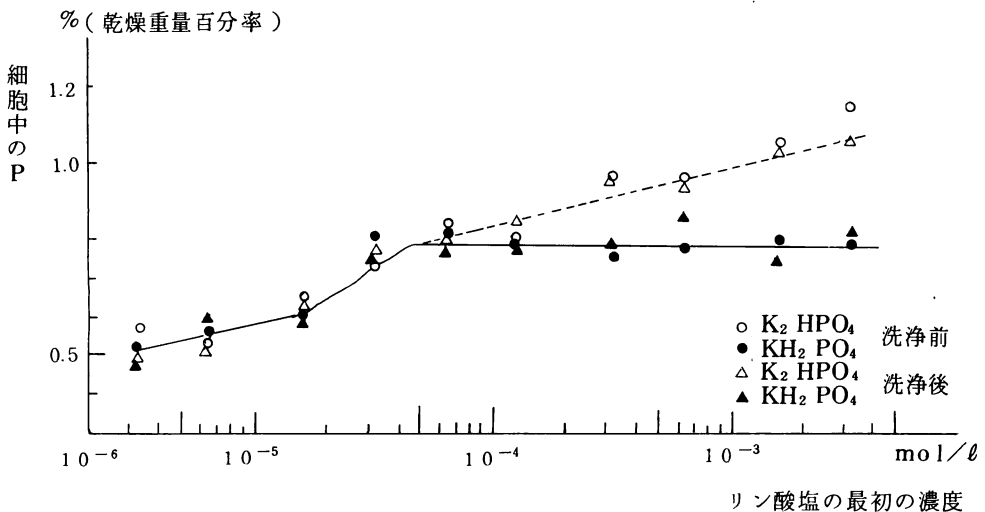
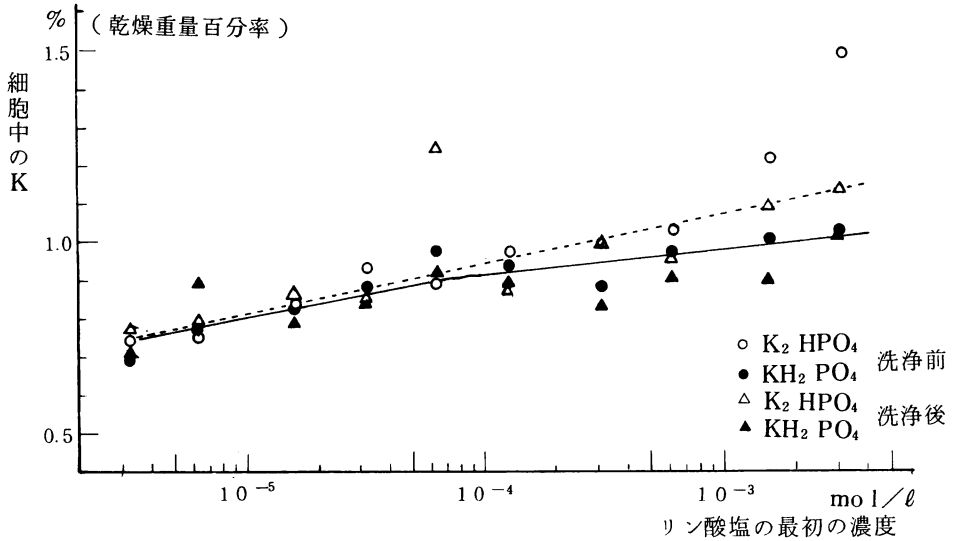


図 8-2-8 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による K の 摂取——細胞中の K 濃度の推移



K の摂取量については、その K の濃度が高い程多いことが、図 8-2-8 で認められる。又、同図から見て、等しい K 濃度では K_2HPO_4 の方が KH_2PO_4 溶液に比べてやや摂取量が多い。蒸留水洗浄の影響については、K 濃度が 10^{-5}mol/l をこえる辺から K の濃度の増大にともなって洗浄によって細胞中の K が低くなる様子がわかる。

細胞中の Mg、Ca、Mn

細胞中の Mg、Ca、Mn はいずれもよく似た傾向をもっている。

図 8-2-9 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 浸漬による Mg の 摂取——細胞中 Mg 濃度の推移

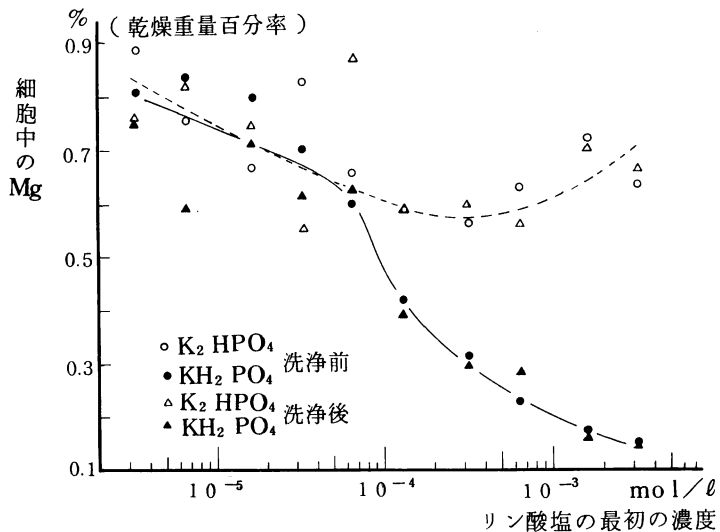


図 8-2-10 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Ca の摂取——細胞中 Ca 濃度の推移

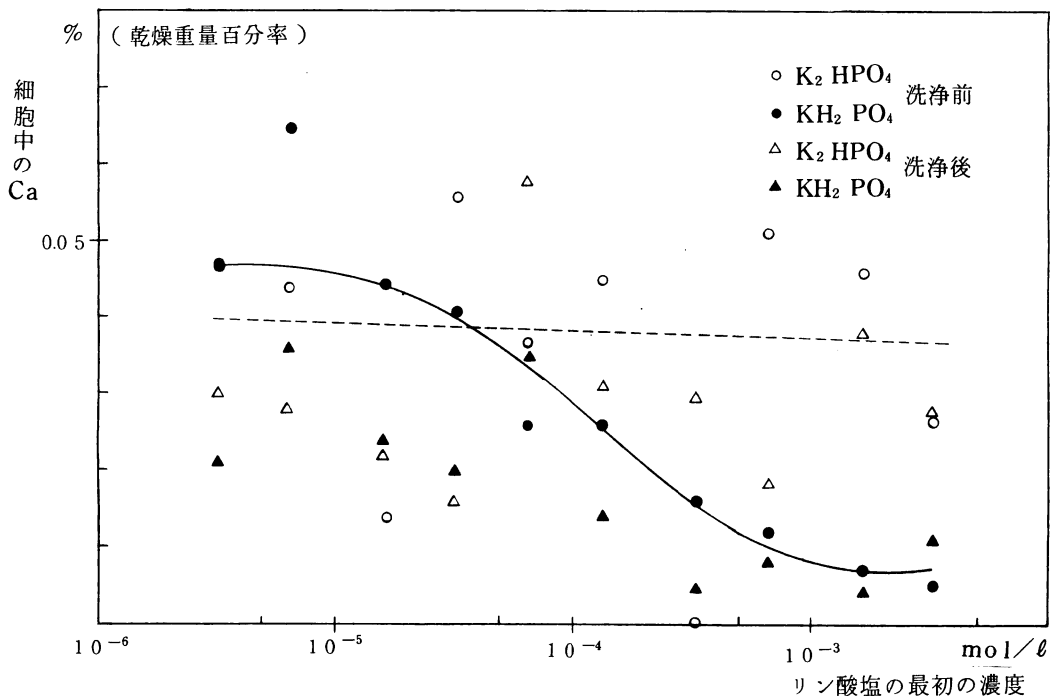
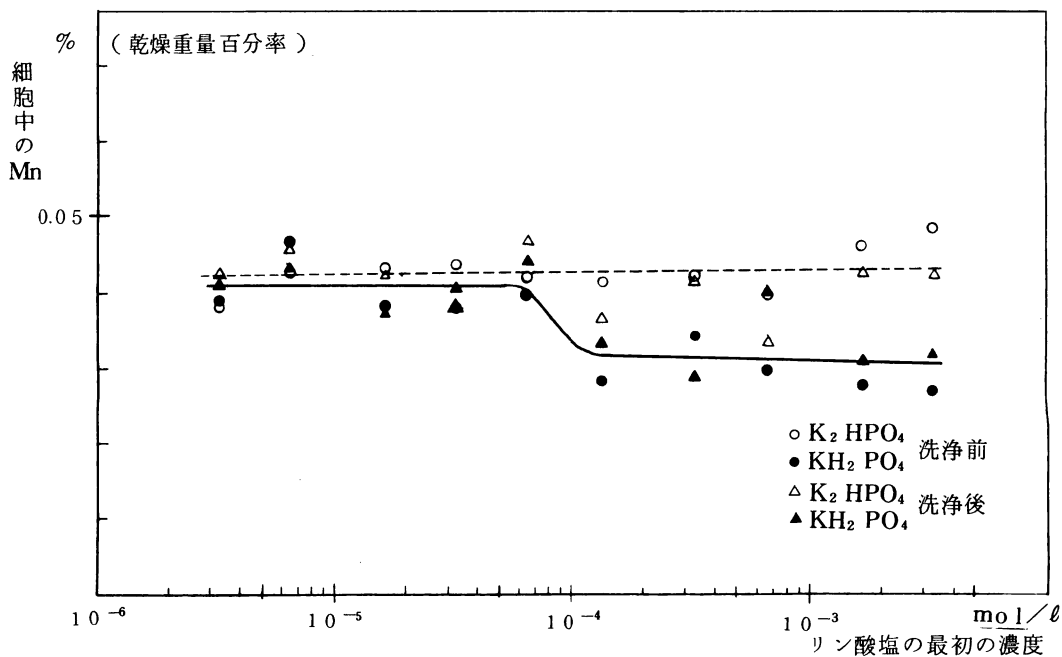


図 8-2-11 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Mn の摂取——細胞内 Mn 濃度の推移



即ち、図 8-2-9 から 8-2-11 にみられるように、 K_2HPO_4 溶液を用いるときはいずれもその濃度を変えても、細胞内の量には変動がありみられないが、一方 KH_2PO_4 溶液ではその濃度を増すと逆に細胞内のこれら金属濃度は減少する。

これら元素については細胞の洗浄の効果はいずれもはっきりしない。

細胞中の Fe、Zn、Na、Cu

Fe、Na はもとと細胞中のブランク値が高く、Zn、Cu は細胞内の含量が微量であるため、分析誤差が大きく、測定値の変動が大きい、両リン酸塩のいずれでも、変動なく一定値であるとみてよさそうである。(図 8-2-12 から 8-2-15) いずれもリン酸塩濃度が 10^{-4} mol/l 程度から上では、細胞中のこれら元素は蒸留水洗浄によって含量の低下がおこるようである。

図 8-2-12 *Scenedesmus quadricornis* の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Fe の摂取——細胞中 Fe 濃度の推移

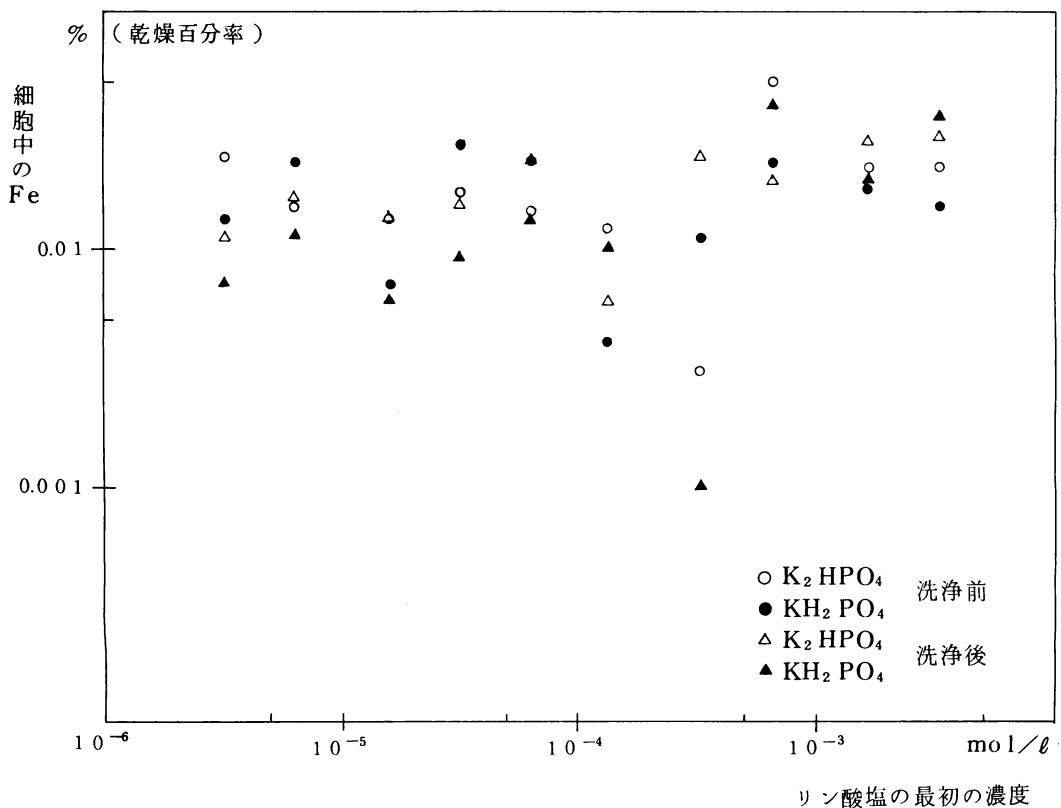


図 8-2-13 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Zn の摂取——細胞中 Zn 濃度の推移

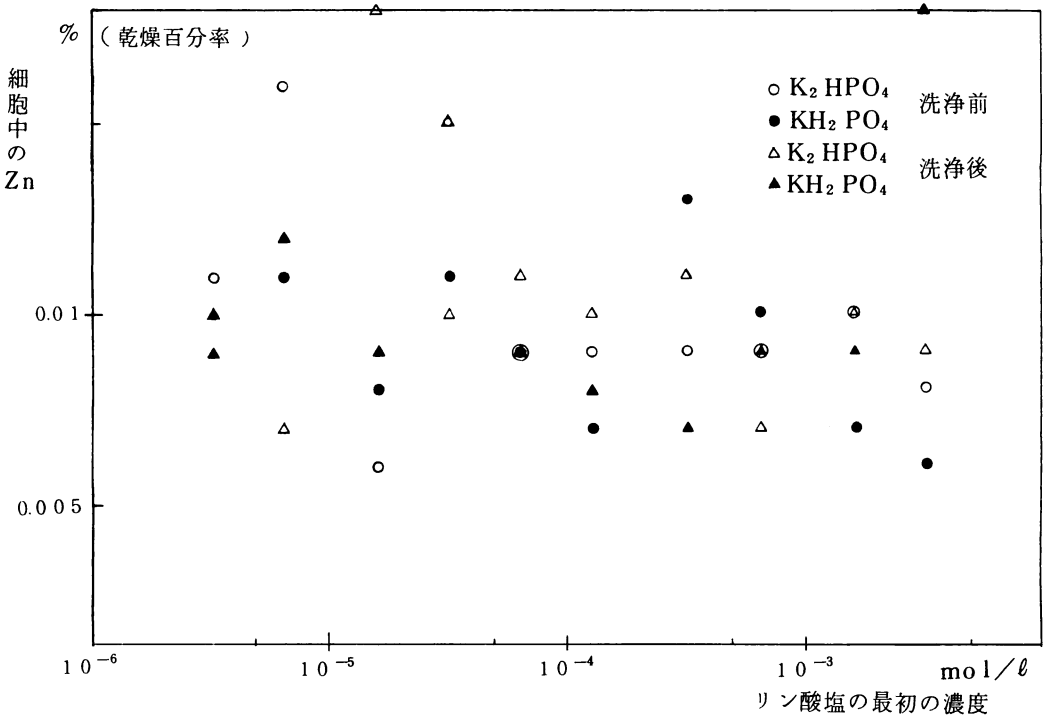


図 8-2-14 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Na の摂取——細胞中 Na 濃度の推移

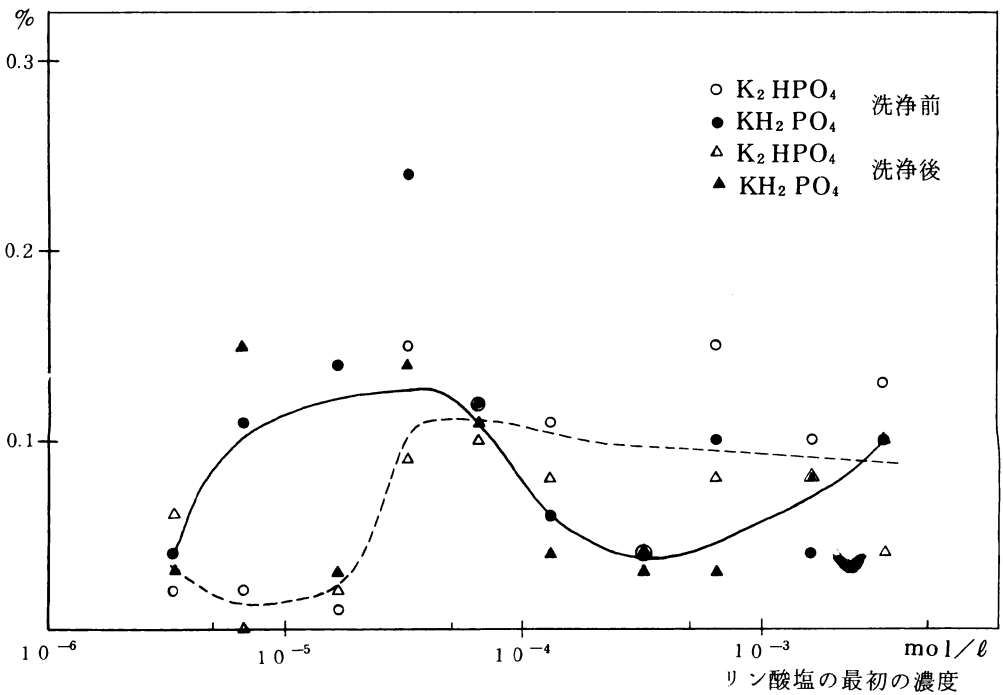
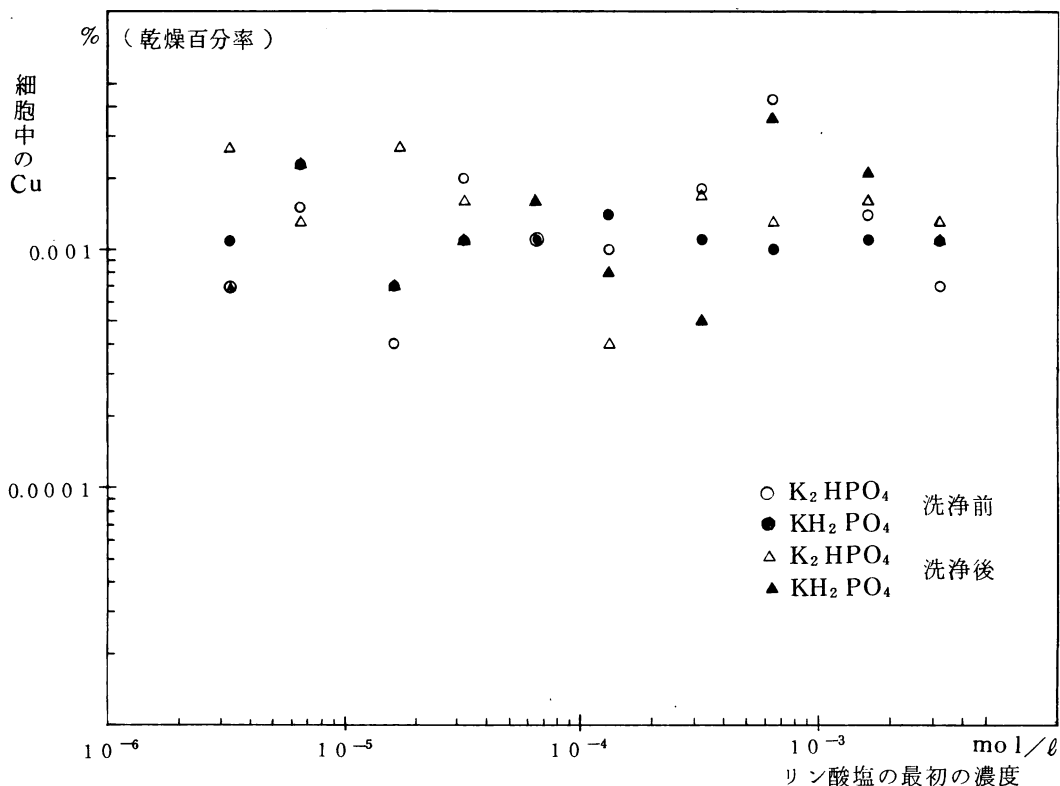


図 8-2-15 Scenedesmus quadricornis の KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液浸漬による Cu の摂取——細胞中の Cu 濃度の推移



8-2-3 考 察

(1) 細胞内リンの増加量と溶液中リンの減少量

細胞内リンの量を a 、溶液中のリンの量を f とすれば

$$a + f = S \dots\dots\dots (8.4)$$

S : 全体のリンの量

が成立すると考えられる。ここで今、行った実験で全体の P の量 S は、 KH_2PO_4 又は K_2HPO_4 を溶液として加える以前の培養液（藻体を含む）の中の P の量に、加えたリン酸塩中の P の量を加算した量である。表 8-2-5、8-2-6 は分析値から求めた a 、 f 及び計算して得た S の量を掲げてある。ここでは培養液の P も、加えた試薬中の P も分析して得られた数値であるから、 S は実測値と考えてよい。

表 8 - 2 - 5 KH_2PO_4 溶液における P、K の減少量

P					K				
最初の 濾液 ppm	全 体 量 μg (S)	濾 液 中 μg (f)	藻 μg (a)	a+f-S μg	最初の 濾液mg/l	全 体 量 μg (S)	濾 液 中 μg (f)	藻 μg (a)	a+f-S μg
0.005	65.3	0.27	64.1	-0.93	0.552	126.6	27.6	95.3	-3.7
0.107	69.5	0.30	67.5	-1.7	0.681	129.4	37.4	90.5	-1.5
0.209	74.6	0.20	71.0	-3.4	0.810	135.8	36.8	99.0	0
0.515	89.9	0.20	81.0	-8.7	1.196	155.1	45.9	104.0	-5.2
1.025	115.4	0.95	104	-10.4	1.84	187.3	68.0	112.5	-6.8
2.045	166.4	4.18	106.5	-18.2	3.13	251.8	127.5	126	1.7
4.09	268.6	130	104.5	-34.1	5.70	380.3	238	120	-22.3
10.21	574.6	425	98	-51.6	13.4	765.3	670	114	18.7
20.41	1085	875	101	-109	26.3	1410.3	1255	126	-29.3
51.0	2614	2320	104.5	-189	64.9	3340.3	3135	129	-76.3
102.0	5164	4415	103.5	-645	129.3	6560.3	5925	133.5	-501.8

表 8 - 2 - 6 K_2HPO_4 溶液における P、K の減少量

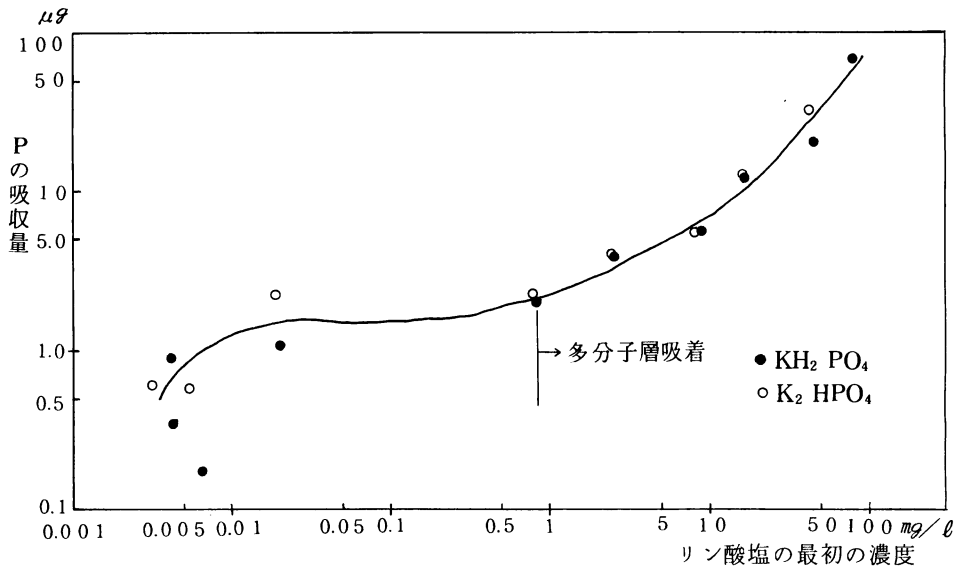
P					K				
最初の 濾液mg/l	全 体 量 μg (S)	濾 液 中 μg (f)	藻 μg (a)	a+f-S μg	最初の 濾液mg/l	全 体 量 μg (S)	濾 液 中 μg (f)	藻 μg (a)	a+f-S μg
0.005	65.3	0.27	64.1	-0.93	0.552	126.6	27.6	95.3	-3.7
0.107	69.5	0.20	72.0	2.7	0.809	135.8	37.8	95.0	-3.0
0.209	74.5	0.15	68.5	-5.9	1.066	148.6	51.0	96.0	-1.6
0.514	89.8	0.25	84.0	-5.6	1.84	187.3	73.0	106.0	-8.3
1.022	115.2	0.90	93.5	-20.8	3.12	251.3	127	120	-4.3
2.039	166.1	39.7	107.0	-19.4	5.69	379.8	244	114	-21.8
4.073	267.8	127.5	104.5	-35.5	10.65	627.8	494	125.5	-8.3
10.18	573.1	398	124.0	-51.1	25.8	1385.3	1240	129.5	-15.8
20.3	1079.1	840	124.5	-114.6	51.9	2690.3	2360	157.5	-172.8
50.9	2609	2190	138	-281	128.9	6540.3	5835	157.5	-547.8
101.7	5149.1	4365	149	-635.1	257.3	12960	12450	194.0	-316.3

さて、このふたつの表の中で、 $a + f - S = 0$ が成立しなければならないはずであるが見られる通り表の中の値は 0 とはならない。この $a + f - S$ の値は失われた P の量であるが、これがどこに去ったものであるかを究明する。図 8 - 2 - 16 では濾液中のリン濃度と、消去した P の量との関係を表わした。

ここで起こる P の消失は実験誤差であり得ない量であり、同図に見られる変化の規則性から見て、使用器具への吸着によるものと考えられる。従って f の値は過少に出ており、 a は実験の手順から正しい値を示すものであると考えられる。

もしこの吸着が真であるならば、図 8 - 2 - 16 は B E T 型の吸着等温線をなしていると言える。

図 8-2-16 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液における P の容器への吸着等温線 (25℃)



(2) 沝液成分の容器への吸着

P 以外の元素についても、上の $a + f - S$ を消失量として求めたのが表 8-2-7、8-2-8 で、これを図示すると図 8-2-17 から 8-2-22 となる。

表 8-2-7 KH_2PO_4 液の各濃度における種々の元素の減少量

mol/l	μg					
	P	K	Mg	Ca	Mn	Na
0	-0.93	-3.7	8	10.6	0.38	23.2
3.29×10^{-6}	-1.7	-1.5	-10.2	5.11	-1.34	86.2
6.59×10^{-6}	-3.4	0	-24.5	-9.8	-0.07	-4.7
1.65×10^{-5}	-8.7	-5.2	-46.8	-17.3	-1.36	-15.8
3.29×10^{-5}	-10.4	-6.8	-43.2	-13.7	-1.41	87.2
6.59×10^{-5}	-18.2	1.7	-64.0	-59.1	-1.06	76.6
1.32×10^{-4}	-34.1	-22.3	-111.2	-109.1	-2.51	58.8
3.29×10^{-4}	-51.6	18.7	-133.1	-133.4	-1.43	61.2
6.59×10^{-4}	-109	-29.3	-134.2	-138.0	-1.74	69
1.65×10^{-3}	-179	-76.3	-112.1	-138.6	-1.29	101.2
3.29×10^{-3}	-645	-50.2	-108.5	-137.6	-1.04	74

表 8-2-8 K_2HPO_4 液の各濃度における種々と元素の減少量

	P	K	Mg	Ca	Mn	Na
0	-0.93	-3.7	8	10.6	0.38	23.2
3.28×10^{-6}	2.7	-3.0	-16.5	-0.9	-1.41	18.6
6.57×10^{-6}	-5.9	-1.6	-47.6	-14.3	-0.81	-21.4
1.64×10^{-5}	-5.6	-8.3	-61.4	-19.2	-0.86	-7.7
3.28×10^{-5}	-20.8	-4.3	-35.0	-10.2	-0.87	95.5
6.57×10^{-5}	-19.4	-21.8	-66.2	-50.7	-1.02	76.6
1.31×10^{-4}	-35.5	-8.3	-111.9	-104.2	-1.07	60.3
3.28×10^{-4}	-51.1	-15.8	-135.2	-132.0	-1.07	81.2
6.57×10^{-4}	-114.6	-172.8	-132.0	-128.4	-1.49	80.5
1.64×10^{-3}	-281	-547.8	-103.0	-126.5	-0.53	99.0
3.28×10^{-3}	-635	-316.3	-110.2	-127.5	-0.26	142.9

図 8-2-17 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液におけるカリウムの吸着等温線 (25°C)

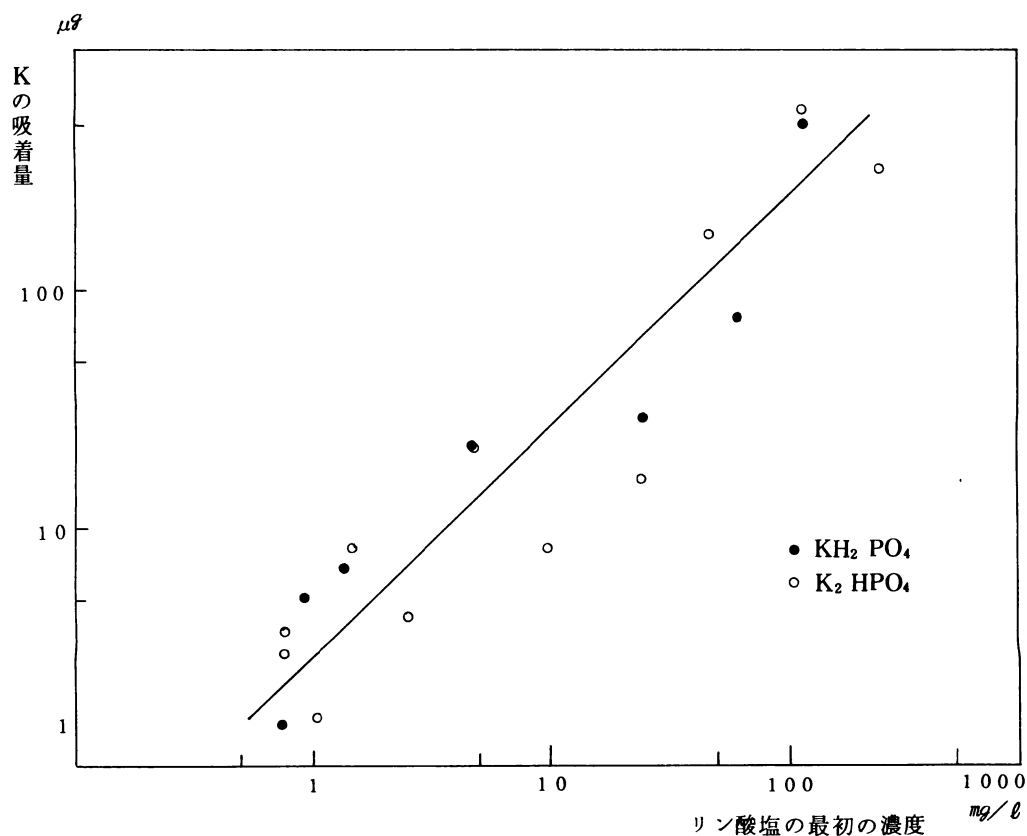


図 8-2-18 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液中における Ca、Mg の吸着量

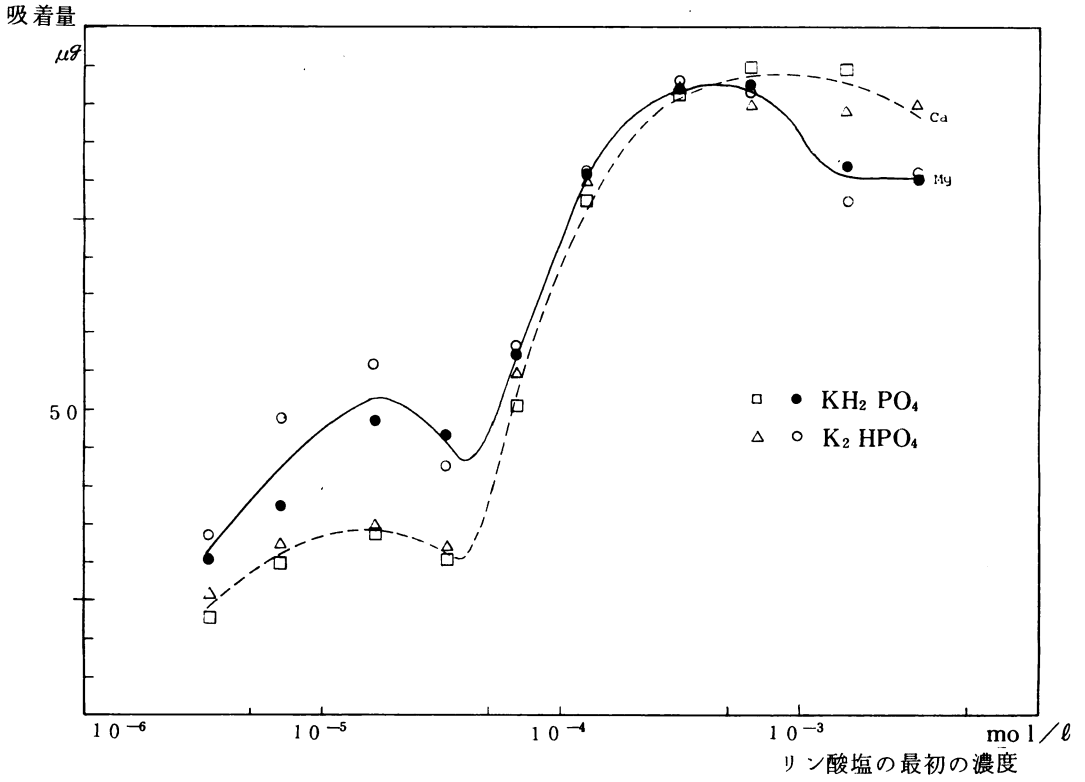


図 8-2-19 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 の溶液中における Mg 濃度とその消失量

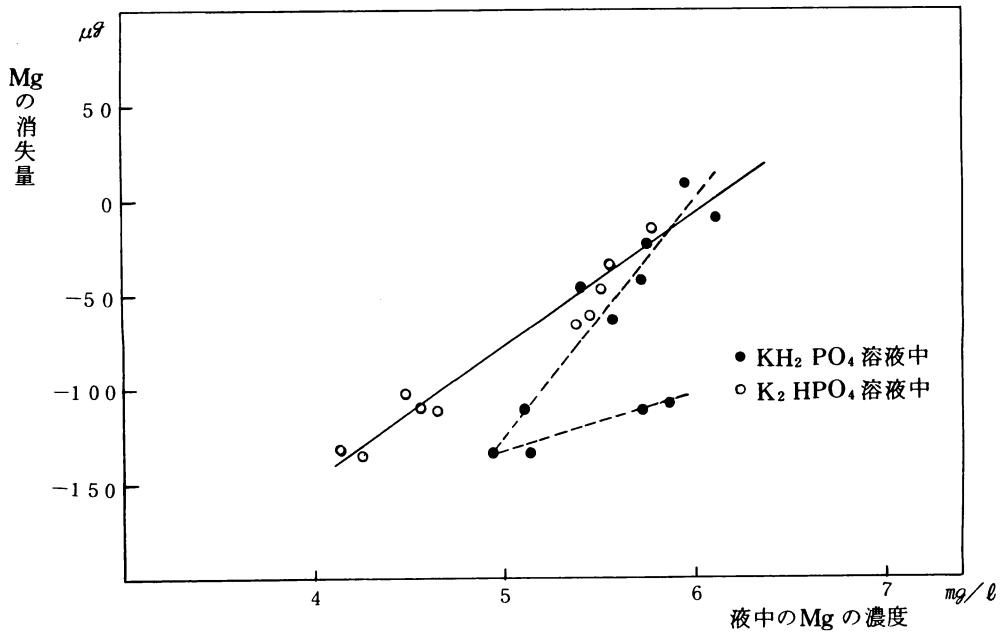


図 8 - 2 - 20 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液中における Ca 濃度とその消失量

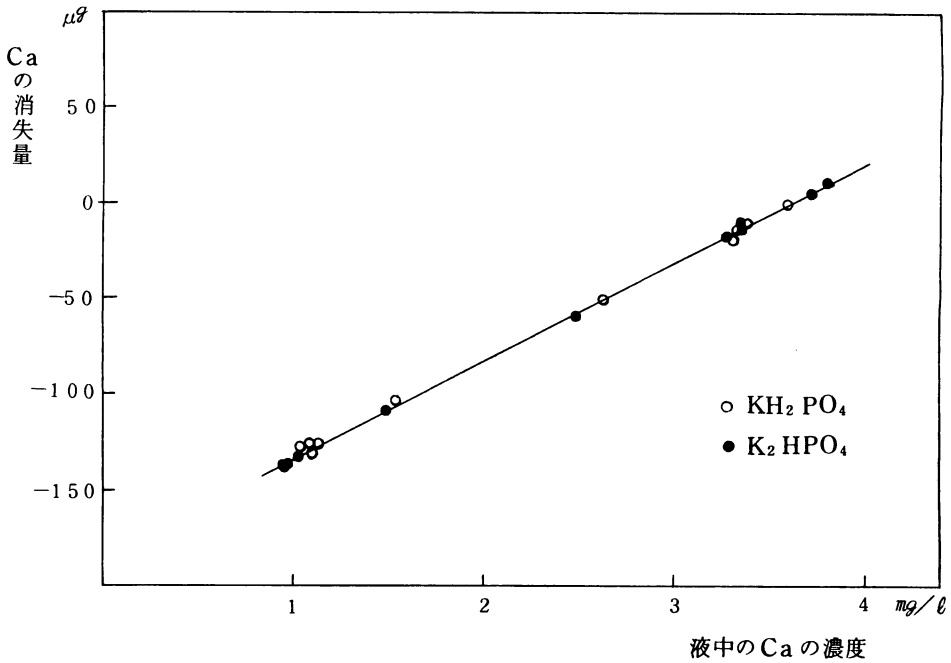


図 8 - 2 - 21 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液中における Mn 濃度とその消失量

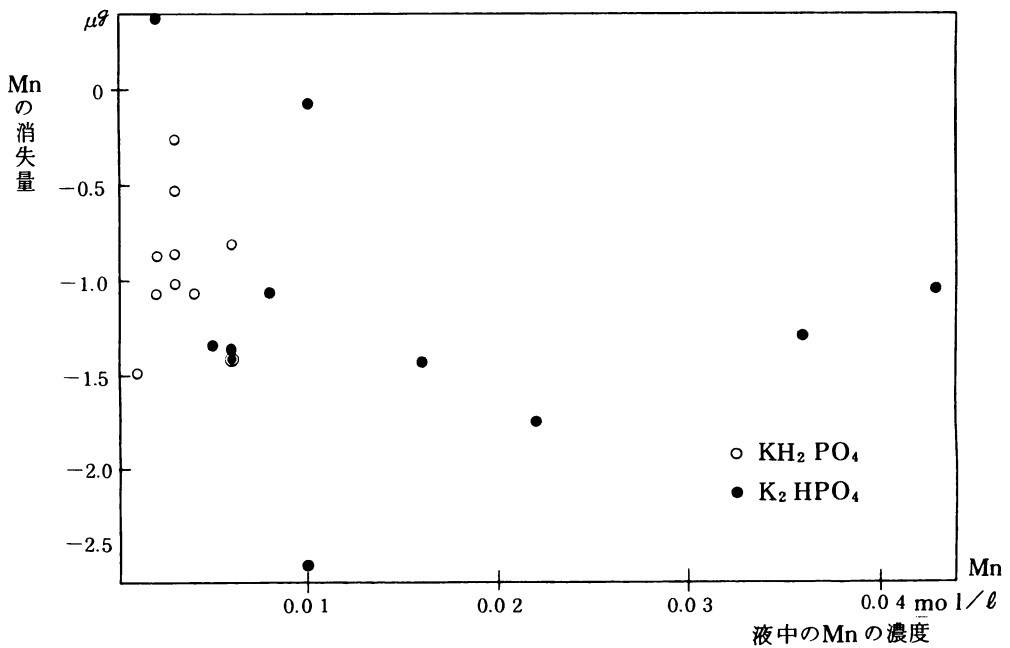
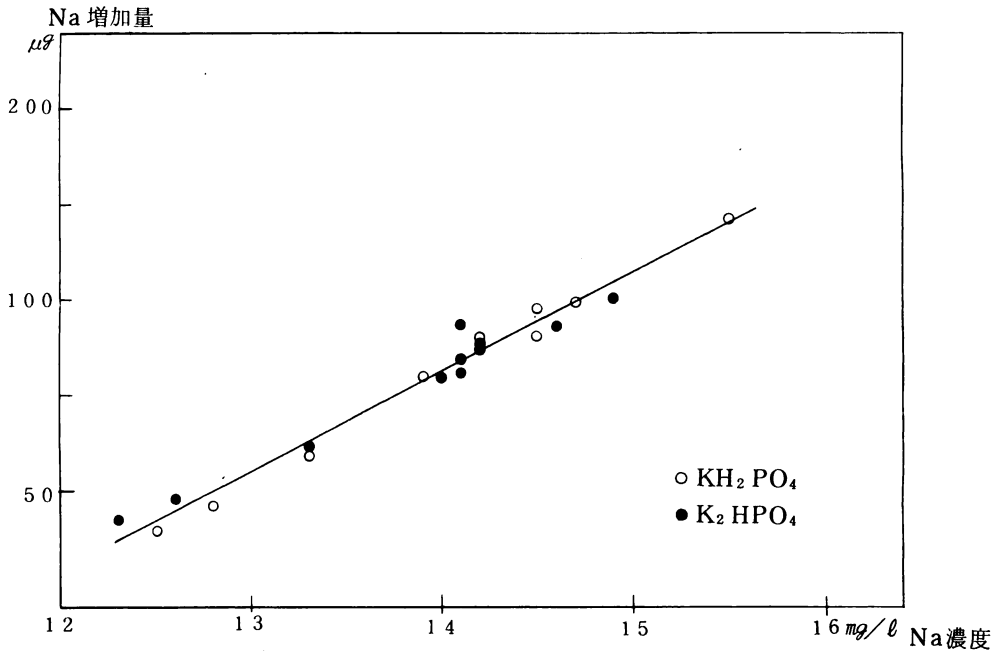


図 8-2-22 KH_2PO_4 及び K_2HPO_4 溶液中における Na 濃度とその増加量



これらによると、Mg、Ca では汙液中の濃度が高いと吸着量が低下するという結果が得られる（図 8-2-19、8-2-20）。ところが、図 8-2-17、8-2-18 では、 PO_4^{3-} の濃度と、消失量とを対比すると、P の濃度が 4×10^{-5} をこえるときに、Mg、Ca は急激に増加することを示している。これはおそらくガラス表面に吸着された PO_4^{3-} によって、Mg、Ca が吸着される現象がおこっているものであろう。

ゆえに CaHPO_4 の溶解度積は 1×10^{-7} であり、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ はデータが見当たらないが、 CaHPO_4 より大きいことは確かであり、 $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ は 10^{-23} のオーダーである。従って Ca^{2+} が 5 mg/l 、 HPO_4^{2-} が 100 mg/l 存在する溶液でも、両イオンは溶解はしているが、このような液で更に H_2PO_4^- のある液などでは溶解はしていても、吸着され易い状態にあるものと考えられるのである。なお $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ の溶解度積は、 1.5×10^{-6} であって、この場合も吸着が起り易いであろう。

Na^+ イオンは逆にガラス容器からの溶解で汙液中の濃度が増加することが考えられる。

(3) 細胞内のリンの増加

細胞内のPの乾燥百分率は図8-2-8に示されている。今、もし汙液中の減少量から式(8.4)を用いて計算した値を細胞内のPの乾燥百分率として図示したならば、Pの濃度100mg/lの位置では、細胞内のPが5%と言う非常識な値に達してしまはずである。液中のP量を1ppmとすれば、この際の計算値は0.9%くらいとなり、正常値に近いが、実測値より一割位高くなる。汙液中のPの減少量を直ちに細胞中のPの増加量と考えることは大きな誤りであることがここで知られた。

さて、KH₂PO₄溶液からPの摂取はPとして5×10⁻⁵mol/lで頭打ちとなる。これは細胞内のMg、Ca、MnがこのPの濃度で減少していることから、細胞内の何らかの変化が生じているためであると思われる。この点、K₂HPO₄溶液を用いるときはPO₄濃度が増加するほど摂取量が多くなり、Mg、Ca、Mnの細胞内の量の変化は少ない。

細胞内元素間の相関関係

表8-2-3、8-2-4にはScenedesmus細胞の元素組成を掲げてあるが、これから求めた元素相互の相関係数を表8-2-9、8-2-10にまとめた。

表8-2-9 KH₂PO₄溶液の濃度変化におけるScenedesmus quadrispinaの細胞中元素の相関行列

	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Zn	Na	Cu
P		0.907	-0.714	-0.779	-0.663	0.129	-0.293	0.147	-0.375
K	0.728		-0.844	-0.841	-0.737	0.139	-0.494	-0.020	-0.288
Mg	-0.771	-0.681		0.921	0.893	0.074	0.355	0.399	0.280
Ca	-0.549	-0.126	0.783		0.891	0.133	0.391	0.315	0.600
Mn	-0.445	-0.215	0.753	0.825		0.331	0.564	0.356	0.482
Fe	0.589	0.695	-0.600	-0.334	-0.051		0.343	0.522	0.285
Zn	0.131	0.501	-0.129	0.100	0.071	0.423		0.133	0.256
Na	-0.027	0.434	0.100	0.519	0.400	0.041	0.649		-0.048
Cu	0.318	0.407	-0.296	-0.028	0.321	0.679	-0.005	0.182	

対角線より上側は洗浄しない細胞
下側は洗浄した細胞

表8-2-10 K₂HPO₄溶液の濃度変化におけるScenedesmus quadrispinaの細胞中元素の相関行列

	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Zn	Na	Cu
P		0.920	-0.572	-0.203	0.552	0.200	-0.470	0.596	0.240
K	0.736		-0.398	-0.124	0.733	0.212	-0.354	0.555	0.041
Mg	-0.473	0.177		0.569	-0.210	0.245	0.613	-0.183	-0.156
Ca	0.134	0.672	0.668		-0.234	0.603	0.557	0.478	0.327
Mn	-0.338	0.237	0.881	0.626		-0.218	-0.099	0.246	-0.342
Fe	0.683	0.788	0.095	0.324	0.293		-0.009	0.436	0.596
Zn	-0.173	-0.057	0.181	0.025	0.206	-0.184		0.000	0.179
Na	0.385	0.408	-0.260	0.322	-0.365	0.032	-0.179		0.482
Cu	-0.472	-0.236	0.378	-0.072	0.365	-0.028	0.587	-0.262	

この相関行列は、やや変則的な形式であるが、対角成分より上側の数値は洗浄しない細胞中に含まれる元素間の相関係数であり、下側の数値は蒸理水洗浄後の同じく細胞中諸元素間の相関係数で、両者を対比し易くするためにこのような形をとった。

この表で、栄養要素であるK、Pの間にはいずれも相関がみられることがわかる。その他では、不洗浄でもK-Mn、洗浄でFe-P、Fe-K、Mg-Mn等に相関係数の高いものがみられ、これらがいずれも一応植物の必須元素であることに注目されるが、今後の検討にまちたい。

排水処理

排水処理に応用する場合、Pの急変に対して、緑藻類が適応出来ることについては先に述べたことであるが、本節で論じたところによって、その変動の限界を定める見通しの得られることがわかる。

9 タマミジンコによる緑藻の除去

*Scenedesmus quadricornis*の培養実験からわかるように、このような緑藻をうまく培養することによって、排水中のN、Pを95%以上の除去率で除去することが充分可能であるとも言ってもよい。しかし残る問題は、繁殖した緑藻を水中から除去することである。

タマミジンコ (*Moina macrocopa*) は、*Scenedesmus* のような緑藻を好んで摂食し、これを栄養として良好な繁殖をする。このことを利用して緑藻を分離することが、この研究の主眼でもあるので、植物として *Scenedesmus* が選ばれたもの、この理由による。

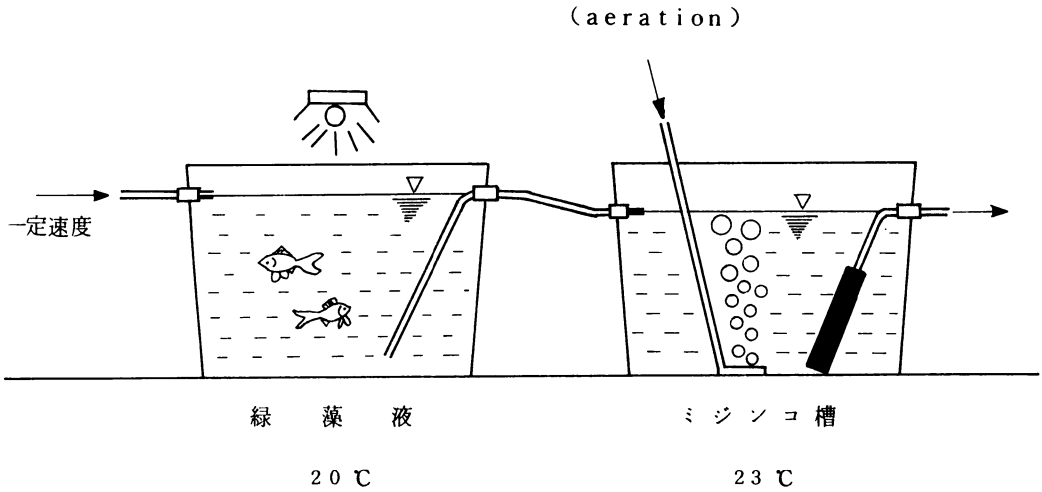
繁殖したタマミジンコは、細かい網 (ミューラーガーゼ) を用いると容易にすくい上げることが出来、又、これで汚すことも可能である。このような措置をしないときは、緑藻はその体表に分泌する粘液のために汙過に当たっては目詰りを起こし易く、沈澱させることも難しいもので、分離作業はほとんど手段がない。

9-1 タマミジンコの連続的繁殖

Batch方式でタマミジンコを飼育すると、ある程度の繁殖は達成出来るが、通常は飼料の残渣、排泄物の蓄積などによって水の変質を来し、高い密度で長期間飼育を継続することは、これまであまり行われていなかった。

この研究では、一定密度の緑藻を含む培養液を高い密度に保ったミジンコの飼育槽中に連続注入し、飼育槽内の水が常に更新される System を考案した。図9-1にこの方法を示した。

図 9-1 タマミジンコの連続飼育



上図について説明を加えると、装置は、緑藻培養槽と、ミジンコ槽の2槽からなっている。緑藻培養槽は種々考えられるが、ここでは10ℓ入りの水槽（市販の金魚鉢、寸法350×180×230）で実際は2～3個を直列に使用している。ミジンコ槽は同型の金魚鉢を用いるが、その容量は緑藻培養液の全容量の1/2～1/3位がよい。両水槽は緑藻培養槽からミジンコ槽に、オーバーフローによって液が流れ、更にミジンコ槽の内容は内径20mm、長さ100mmの不透明塩ビパイプを経てオーバーフローして流れ去るようにしてある。

緑藻培養槽には通常緑藻と共に金魚を飼う。これは金魚の排泄物の肥料効果と運動によるかく拌作用、呼吸による過剰酸素の除去及び炭酸ガスの供給などの点で、装置を極めて簡単になし得るからである。光の供給は、自然光（窓際設置）とビタルックス蛍光灯（20W）をこの水槽1個当たり1本程度で照射する。

この緑藻培養槽に一定速度で水道水、又はこれに無機栄養塩溶液を加えたものを注入する。注入速度は培養槽容量の1/2～1/3が24hrに流れる程度を限度として、緑藻の増殖状態を見ながら次第に増加し、この間光量も始め弱く、次第に強くして3～5日位で定常状態となるようにする。こうするとその後は日常流量の調節と水槽の汚れを掃除する程度の管理で、ほぼ一定濃度の緑藻液が、ほぼ一定密度のミジンコ培養液中に流入し、ミジンコ培養液は自然に交換されるようになる。このときミジンコは暗い所を嫌う性質から排水管の入口の端につけられた塩ビ管内に入ることを避けるが、その密度が極限に近くなると一定割合で出て行くようになるために、その密度がほぼ一定に保たれるのである。

9-2 捕食者と被食者 (Predator-prey relationship)

捕食者(この場合ミジンコ)と被食者(緑藻)が共存する系では有名なLotka-Volterraのモデルがある。このモデルは自然界では、捕食者と被食者の個体数が一定周期で変動していることに注目し、アメリカのLotka(ロトカ)とイタリアのVolterra(ボルテラ)達が次のような微分方程式を仮定した。

- (1) 被食者の個体数 (N_1) は、捕食者がいないときは増殖率が k_1 である。
- (2) 捕食者の個体数 (N_2) は $k_2 \cdot N_1 \cdot N_2$ の速度で増殖する。
- (3) 被食者は捕食者された分だけ減少する。
- (4) 捕食者は死によって減少する。

この仮定によって次の式が成立つ。

$$\frac{dN_1}{dt} = k_1 N_1 - C_1 N_1 N_2 \dots\dots\dots (9.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = k_2 N_1 N_2 - C_2 N_2 \dots\dots\dots (9.2)$$

k_1 、 k_2 、 C_1 、 C_2 は定数である。

さて、この研究でのミジンコ槽では、 N_1' の濃度の藻が速度 v で流入するとすれば、全体の槽の容量を V として、

$$\frac{dN_1}{dt} = k_1 N_1 - C_1 N_1 N_2 + N_1' \frac{v}{V} - N_1 \frac{v}{V} \dots\dots\dots (9.3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = k_2 N_1 N_2 - C_2 N_2 - N_2 \frac{v}{V} \dots\dots\dots (9.4)$$

となる。

定常状態では、 $dN_1/dt = dN_2/dt = 0$ であるから、 $N_1 N_2 = 0$ とすれば、

(9.4) 式から

$$N_1 = \frac{C_2 + v/V}{k_2} \dots\dots\dots (9.5)$$

(9.3) 式から

$$N_2 = \frac{1}{C_1} \left\{ k_1 + \frac{N_1' v}{N_1 V} - \frac{v}{V} \right\} \dots\dots\dots (9.6)$$

が成立する。

9-3 ミジンコ槽における窒素とリン

9-3-1 乾燥ミジンコの重量と含有窒素量

ミジンコをミュラーガーゼを用いて液から分離し、その個体数を数えたのち、乾燥重量

をはかり、1個の乾燥重量を計算して、平均0.015 mgであることを知った。

一方、ミジンコをケールダール法によって窒素定量して乾燥百分率9.1%を得た。

従って培養液中に1 ml当たり10個のミジンコがいるならば、その含有窒素量は13.4 μgでこの液1 lについて約13 mgのNがミジンコの増殖のため消費されることになる。

なお、ミジンコ中のNを粗蛋白に換算すると、定説に従って6.25倍して、56.88%即ち、約57%の蛋白質となり、良好な蛋白源とすることが出来る。

9-3-2 タマミジンコの餌料の窒素とリン

緑藻

図9-1のような系で緑藻を増殖した場合のことを考える。今、

- (1) 緑槽培養槽の容積は約60 lとする。
- (2) 1日当たり金魚に2 gの餌料を与える。
- (3) 金魚の排泄物を栄養塩として緑藻が繁殖する。
- (4) 水道水は1日当たり10 lの速度で流している。

なお、ここで(2)で与えている餌料は乾燥物として、Nが8.54%、Pが0.66%である。

金魚の排泄物中糞は緑藻の繁殖が著しいとき濃緑色を呈して、検鏡すると緑藻の残骸を含んでいる。この糞を定量すると、

N : 6.50 % P : 1.73 %

を含む。

さて、(1)~(4)の状態で(20℃で)定常状態に達したとき、水の状態は次のとおりである。

水 温 21.7℃ pH 10.10 Eh 312 mV Eh₇ 474 mV (pH 7としたときに換算した酸化還元電圧)

濁 度 136 ppm (カオリン換算)

Scenedesmus の個体数	3.5 × 10 ⁵ 個/ml
Selenastrum "	2.6 × 10 ⁴ "
Lyngbya の群体数	3.2 × 10 ⁵ "
K-N (ケルダール窒素)	9.6 mg/l
T-P (全リン)	1.52 "

この汙液については

K-N	0.6 mg/l
T-P	0.04 "

このときの水道水の状態

pH 6.98、Eh 830 mV、Eh₇ 829 mV、K-N、nd、T-P、nd

9-3-3 タマミジンコ槽の窒素とリン

前節の緑藻培養液をミジンコに餌料として与えた。この条件は、

- (1) ミジンコ水槽の容量約20ℓ
- (2) 緑藻培養液は1日20ℓの速度でミジンコ槽に流入する。

このようにして定常状態に達した時の水の状態は次のとおりとなった。

ミジンコをミューラーガーゼで濾し去った液

水温 21.7℃ pH 6.75 Eh 444mV Eh₇ 429mV

濁度 14.6 ppm (カオリン換算)

Scenedesmus の個体数 3.8×10^4 個/ℓ

Selenastrum " 2.8×10^4 "

Lingbya の群体数 0.2×10^4 "

メンブランフィルター (1.0 μ) で濾過した液

K-N 4.4 mg/ℓ

T-P 0.37 mg/ℓ

9-3-4 ミジンコを使用したときの窒素とリンの除去効果

9-3-2、9-3-3でタマミジンコは藻類の90%以上捕食している。ミジンコを除いた液はこの場合緑色を呈し混濁していて、あまりよい状態のものでなかったが、放置することによって無機性の懸濁物は数十分で沈降し、上澄液をメンブランフィルターで濾過することは比較的容易である。

濾過前の処理液の分析は、懸濁物のすべてを含めたもので、そのNの除去率が39.6%、Pが27.6%にすぎない。濾過後のものについてみるとNの除去率は54.2%、Pは75.7%、で一応の有用性を示しているが、9-3-2で見られる緑藻培養液の濾液に見られるN、Pがそれぞれ93.8%、97.4%に比べて相当低くなっているが、これはミジンコの排泄物によるものである。なお、Pに比べてNの除去率が低い、これはもとの液組成が偏ってPが少なく、これが緑藻培養の制限要因となっていたためである。

9-3-5 無機態の窒素とリンの除去

9-3-2、9-3-3の状態で定常状態になっている槽に微量成分を加えない無機栄養の配合液(第3章参照)を適宜希釈して水道水の代りに定量ポンプで20ℓ/dayの速度で流した。この際、金魚には1ℓ/dayの餌料を与えた。

この無機栄養塩液の組成は次のとおりである。

K-N 23.6 mg/ℓ、T-P 3.85 mg/ℓ、pH 6.41、Eh 741mV、Eh₇ 706mV

この状態で1日経過した時の液の状態は次のようである。

緑藻培養槽

水温	24℃	pH	10.12	Eh	405 mV	Eh ₇	588 mV	濁度	119 ppm
Scenedesmus の個体数									2.1×10^5 個/ml
Selenastrum	"								0.4×10^4 "
Lyngbya の群体数									1.6×10^5 "
K-N									13.7 mg/l
T-P									1.14 "

藻の滷液

K-N	2.3 mg/l	T-P	0.04 mg/l
-----	----------	-----	-----------

ミジンコ液 (ミジンコを取去った残液)

K-N	6.1 mg/l	T-P	0.60 mg/l
-----	----------	-----	-----------

ミジンコ液の滷液 (1.0μメンブランフィルター)

K-N	6.3 mg/l	T-P	0.65 mg/l
-----	----------	-----	-----------

以上のデータによって無機性のN、Pも有機態と変わらない結果が得られることがわかった。

この場合には加えた液の組成に比べて、緑藻培養槽内のPが著しく低下していることが注目される。このことは、金魚の糞による吸着沈澱、無機態リンの沈澱生成などが考えられるが、この場合おそらく緑藻等に取り込まれたPが金魚に摂食され糞として沈澱したものではないかと考えられる。

又、ミジンコ液とその滷液とのK-N、T-Pに差がなく、むしろ後者の方が多くなっているのは奇異な感があるが、これはミジンコ槽の掃除が行き届かず、ミジンコの糞や死骸の残物が液中に長い時間残ったときに起こるもので、この種の処理に当たっておおいに留意しなければならない。

この場合の除去率を見ると、ミジンコ液でN 55.5%、P 47.4%、ミジンコ液の滷液内でそれぞれ、54.0%、43.0%と低いが、ミジンコ液の滷液については前に述べたように欠陥があったので9-3-3の場合と比較することが出来ない。

緑藻培養槽内での除去率は、Nについて、83.2%、Pで96.5%となっていて、9-3-3の場合とほとんど同じ結果になっている。Pが緑藻培養の制限要素となっている点も前回と同じである。

9-3-6 タマミジンコ利用に対する考察

この実験には、タマミジンコ捕食後の液の藻類の残量が多かったこと、Lyngbya (らん藻の一種)の繁殖のあったことなど、やや欠陥があり、不十分な結果であったが、9-3-3

で得られたミジンコ液の汙液でPの除去率約75%は、これまで別に行って来た断片的な実験結果からみても達成の充分可能な値であると思われる。この場合、ミジンコ液の汙過は緑藻培養液と比べると容易であるが、なお実用的には不利であるけれども、この液は通常は緑藻をほとんど含んでいない (10^3 個/ml以下) ので、短時間の沈降によって懸濁物の除去は十分に可能であろう。

この実験ではNとPの比率を一応考慮外としたので、Pが制限要素となり、従ってPの除去率だけが高くなったが、必要があれば最初の液にPを補充することによって、Nの除去率を向上することは容易なはずである。しかし現今都市排水などに含まれるPは非常に多くなっていて、これらの処理についてこのことは考慮の必要がないであろう。

ミジンコ槽から出た処理排水は、放置すると残存した緑藻の細胞を母体として、再び速かに緑藻が増殖して来るので、これを第2段階処理に移し、あるいは循環処理することによって、更に処理の度を高めることはこの際容易なことで、これによって除去率を所望する程度までの向上することが可能である。

緑藻によるN、Pの除去の際に問題のひとつは、pHの著しい上昇にある。この実験ではこの値が10.1付近であることが多い。これを単に汙過して放流するとすれば、法規に従ってこれを中和して放流しなければならない。ミジンコが緑藻を捕食するときは、その呼吸、排泄などによってpHが6.9程度に低下する。この点では極めて好都合である。

タマミジンコはムレミカヅキモ属、セネデスムス属などの緑藻を好んで食う習性があり、これによってよく増殖する。又、このミジンコは蛋白質を多く含み(乾燥で約50%)魚のよい餌料で、利用の道が広い。

以上のような点が、水のN、P除去処理に本方法を採用することの利点で、今後光照射の問題、操作中の副生物の除去(魚の糞、ミジンコの糞、死骸)など究明すべき問題はあるが、充分研究の価値はあるものと思われる。

9-3-7 (付)ミジンコの液の吸収スペクトル

タマミジンコを除去した液は、薄い黄色ないし黄褐色を呈する。緑藻培養液の濃い緑色はこのとき全く失われている。この残った黄系の色が何であるかは、処理排水を放流するときを知っておかなくてはならない問題であろう。

実験

ミジンコ液をミューラーガーゼで汙してミジンコを除き、更にこれを 1.0μ のメンブランフィルターで汙過して、これに残った残渣をアセトンで抽出し、この液を自記分光光度計(日立323型)にかけて吸収スペクトルをとった。

一方、ほとんどが *Selenastrum* からなる緑藻培養液を同様に処理して、得られたアセト

ン抽出液の吸収スペクトルを得た。

結果

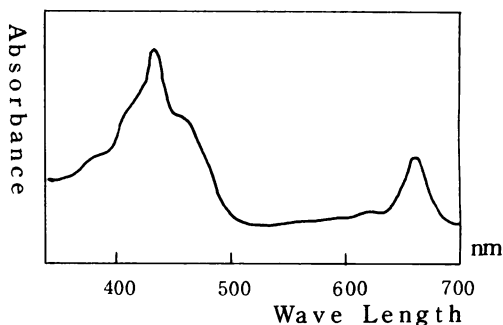
Selenastrum の抽出液で得られた吸収スペクトルは、Scenedesmus の吸収スペクトル (図 4) とほとんど同じであるが、ミジンコ槽から得られたものの方は、曲線の形状は似ているが、吸収の位置がずれている。

即ち緑藻の方の極大値は436,660 mm近辺にあるが、ミジンコの水槽に
来たものは、418,670 mmに極大点の波長がずれているのである。

フェオフィチン (Phaeophytin) はクロロフィルからその中に結合しているMgがとれて、Hがここに置換ったものであるが、クロロフィルを酸で処理して得られ、自然界では植物

の稠落したもの即ち枯葉などに含まれている。この色素の吸収スペクトルは、クロロフィルのスペクトルと比べると短い方の極大波長は、より短い方へ、長い方の極大波長はより長い方へシフトする。しかも長波長側の極大値は小さくなる。このことからみて、図9-2の吸収スペクトルはフェオフィチンのものが主体であると思われる。

図 9-2 ミジンコ槽内の水中の色素の吸収スペクトル



10 今後の課題

以上の実験によって、緑藻は培養液中の溶解性のNやPを摂取して生育するので、培養液の濃度を相当低い値まで低下することが出来、N、Pの除去を目的とする排水処理に役立ちそうである。この方法の利点の中で、今回気のついたことは、緑藻はP濃度の急な上昇に当たって、これを数時間で細胞内に取込み、液中のPを低濃度に保つとともに、藻体自身が障害を受けないで済むことである。

繁殖した緑藻を除去するためにタマミジンコを使って、これに捕食させる方法は、タマミジンコの排泄、死骸の残留などでN、Pが再溶出するために75%程度の除去しか出来ないかも知れないので、ここで2段処理、循環処理などを工夫する必要があるだろう。

別に緑藻の除去に、凝集剤を使用する方法についても着目している。緑藻培養液はさいわい強いアルカリ性を呈するので、塩化アルミニウム系の凝集剤を用いると、アルカリ添加が不要で、処理水もほぼ中性付近のpHで放流することが出来そうである。

N、Pの量に対する緑藻の発生量、その濃度等についてはほぼ判明したが、光の照射の問題、

その場合効率のよい液深とこれに応じた緑藻の濃度、したがってこれから割出される必要な面積等については、ここであらためて正確に検討しなおす必要がある。

謝 辞

最後に、*Scenedesmus quadrispina*の同定で御指導を賜った増田高校の後藤先生に深謝の意を表す。

文 献

- (1) 田宮、渡辺：「藻類実験法」 南江堂
- (2) L、O、Björn、宮地監訳：「光と生命」(1976) 理工学社
- (3) 「生物学辞典」第2版 岩波書店
- (4) 津野、合田：藻類の増殖における基質の摂取における動力学モデル、水質汚濁研究Vol. 1、
No. 1、(1978)、pp 49～pp 62
- (5) 西沢敏：海洋低次生産試論

補 記

リン摂取の動力学 (Kinetics of Phosphorus Pools)

$f(C_p)$ の関数型は色々考えられるが、通常はMond型がよく用いられる。

$$f(C_p) = \frac{C_p}{K_s + C_p} \dots\dots\dots (11.1)$$

この形の式はミハイリス-メンテンのモデル (Michaelis - Menten's model) と呼ばれ、酵素反応速度論の基礎をなしている。すなわち、細胞膜に輸送担体 (Carrier) があって中間複合体を作り、この複合体から細胞内に摂取されると考えてよい。

また、腹の表面にPが単分子吸着してから細胞内に摂取されると考えても、(11.1)式が導かれる。Langmuir型の吸着等温式と全く同じ型をしているからである。

K_s はミハエリス定数あるいは半飽和定数であって、 $f(C_a) = 1/2$ となったときお C_p と等しい。

さて(8.3)式に(11.1)式を代入すれば

$$\frac{dP}{dt} = k \frac{C_p}{K_s + C_p} (A - P) \dots\dots\dots (11.2)$$

となる。

$C_p \gg K_s$ であれば

$$\frac{dP}{dt} = k (A - P) \dots\dots\dots (11.3)$$

となり、この式は簡単に積分出来て

$$\ln(A - P) = -kt + \text{const}$$

あるいは、

$$P = A - (\text{Const}) e^{-kt} \dots\dots\dots (11.4)$$

となる。最初の細胞膜内リン濃度を P_0 とすれば、

$$P = A - (A - P_0) e^{-kt}$$

あるいは

$$\ln(A - P) = \ln(A - P_0) - kt \dots\dots\dots (11.5)$$

となる。

次に $C_p \ll K_s$ のときは、

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k}{K_s} C_p (A - P) \dots\dots\dots (11.6)$$

となる。仮りに溶解性リンと細胞内リンの総和が一定であれば、

$$aC_p + P = B \dots\dots\dots (11.7)$$

(a, B は定数)

となるので(11.6)式は

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k}{aK_s} (B - P)(A - P) \dots\dots\dots (11.8)$$

となる。これを積分すれば、

$$\frac{1}{B - A} \ln(B - P) + \frac{1}{A - B} \ln(A - P) = \frac{k}{aK_s} t + \text{const}$$

となり、初期値を $t = 0, P = P_0$ とすれば、

$$\ln \frac{A - P}{A - P_0} - \ln \frac{B - P}{B - P_0} = \frac{k(A - B)}{aK_s} t \dots\dots (11.9)$$

となる。

(11.2式)式の一般的な解は、(11.7)を仮定して

$$\frac{dP}{dt} = k \frac{B - P}{aK_s + B - P} (A - P) \dots\dots\dots (11.10)$$

を解けばよい。

(11.10)式は部分分数に分かれて、

$$\frac{aK_s}{A - B} \cdot \frac{dP}{B - A} + \left(1 - \frac{aK_s}{A - B}\right) \frac{1}{A - P} dP = k dt$$

となり

$$\frac{aK_s}{A-B} \ln \frac{B-P}{B-P_0} + \left(1 - \frac{aK_s}{A-B}\right) \ln \frac{A-P}{A-P_0} = -kt \dots\dots\dots (11.11)$$

が成立する。

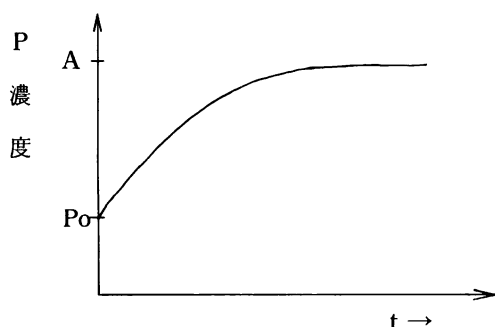
この式で $aK_s \rightarrow 0$ とすれば、(11.5)式となり、

$$1 \ll \frac{aK_s}{A-B} \text{ とすれば (11.9) 式となる。}$$

$A=B$ のとき、すなわち溶解性リンを全て体内に摂取した時が、細胞内濃度の上限値である場合は、

$$\ln(A-P) - \frac{aK_s}{A-P} = -kt + \text{const} \dots\dots\dots (11.12)$$

となる。



$k, C_p, K_s > 0$ である限り、(11.2)式から求められる P と t の関係は左図のようになる。

リン摂取速度定数の算出法

Batch方式で藻にリンを吸収させた場合は、熱力学的に見れば閉鎖系 (Closed System) であって、物質の収支は系内だけを考えれば良い。すなわち、容器の表面への物質の吸着が一定値であるか、無視出来るなら (11.7)式が成立し、(11.3)の方程式の一般解は、(11.11)式となる。勿論、藻の細胞分裂があっても良いが、細胞分裂などで藻の容積が増加すれば、いちいち藻体量の測定をする必要があるので、ここでは誘導期 (Lag Phase) 内で考えることにする。

(11.11)式で求めたいのは A, K_s, k である。各測定点の数値を (11.11)式に代入して連立方程式を解く方法もあるが、めんどうであり、しかも解けたとしても求められた数値はばらばらである。そこで一般的に最小自乗法が用いられるが、(11.11)式の場合は困難である。

仮りに、Aの値がわかったとすれば、k、Ksを最小自乗法で求めることが可能である。

今、 $\frac{aKs}{A-B} = \alpha$ とすれば(11.11)式は、

$$\ln \frac{B-P}{B-P_0} - \ln \frac{A-P}{A-P_0} \cdot \alpha + \ln \frac{A-P}{A-P_0} = -kt \quad \dots\dots\dots (11.13)$$

となる。そこで、

$$Z_i = \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \alpha + \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} + kt_i$$

として、

$$\sum_i Z_i^2 = Q$$

からQが最小値になる時の α 、kを求めるのが最小自乗法である。

この場合、

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial k} = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11.14)$$

の連立方程式から α 、kを求めることになる。したがって、

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial \alpha} = \alpha \sum_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right)^2 + k \sum_i t_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \\ \quad + \sum_i \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) = 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial k} = \alpha \sum_i t_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) + k \sum_i t_i^2 + \sum \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) t_i = 0 \end{cases}$$

から求められる α 、kがQを極小にする。

$$A = \begin{vmatrix} \sum_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right)^2 & \sum_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \\ \sum_i t_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) & \sum_i t_i^2 \end{vmatrix}$$

として、

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{1}{A} \left[\begin{array}{l} -\sum_i \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \quad \sum_i t_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \\ -\sum_i \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) t_i \quad \sum_i t_i^2 \end{array} \right] \\ k = \frac{1}{A} \left[\begin{array}{l} \sum_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right)^2 \quad -\sum_i \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \\ \sum_i t_i \left(\ln \frac{B-P_i}{B-P_0} - \ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) \quad -\sum_i \left(\ln \frac{A-P_i}{A-P_0} \right) t_i \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (11.15)$$

となる。

実際の計算

今、Pを乾燥重量百分率(%) Cpをmg/ℓで表わせば、(11.7)式より、

$$a = \frac{100}{SS} \dots\dots\dots (11.16)$$

SS : 液中の固型物乾燥含量 (mg/ℓ)

ただし、ここでSSは全部藻体と考える。

SSは260 mg/ℓであるので、式(11.7.)からBが求められる。表8-1-1、8-1-2から

$$\text{KH}_2\text{PO}_4 \text{ 溶液では } B = \frac{100}{260} \times 5.20 + 0.47 = 2.47$$

$$\text{K}_2\text{HPO}_4 \text{ 溶液では } B = \frac{100}{260} \times 4.97 + 0.47 = 2.38$$

となる。

実際の測定データを式(11.15)で計算した場合は、表11-1、11-2の様になるが、KH₂PO₄溶液とK₂HPO₄溶液中のPの摂取に関しては、

A < Bのときは α > 0 となり K_s < 0 となる。

A > Bのときは α < 0 で K_s < 0 となる。

すなわち、半飽和定数は負であるという結果になる。

結局、

KH₂PO₄ 溶液の場合は K_s が -4.5 ~ -5.2

K₂HPO₄ 溶液の場合は K_s が -3.7 ~ -4.9

くらいとなる結論に達する。

表 11 - 1 Ks、K の計算結果 (KH₂PO₄)

A (%)	α (Ks) $\frac{mg}{\ell}$ "	k ($\sqrt{\text{min}}$)	A (%)	α (Ks) $\frac{mg}{\ell}$ "	k ($\sqrt{\text{min}}$)
0.731	0.997 (-4.51)	8.47×10^{-4}	1.10	1.44 (-5.15)	-1.59×10^{-4}
0.734	0.9995 (-4.51)	8.47×10^{-4}	1.20	1.56 (-5.16)	-1.36×10^{-4}
0.735	1.0004 (-4.51)	8.32×10^{-4}	1.30	1.70 (-5.16)	-1.19×10^{-4}
0.74	1.0062 (-4.53)	7.53×10^{-4}	1.40	1.86 (-5.17)	-1.05×10^{-4}
0.75	1.022 (-4.57)	5.89×10^{-4}	1.50	2.05 (-5.17)	-9.37×10^{-5}
0.77	1.060 (-4.68)	2.91×10^{-4}	1.70	2.59 (-5.18)	-7.73×10^{-5}
0.78	1.079 (-4.74)	1.74×10^{-4}	2.00	4.24 (-5.18)	-6.11×10^{-5}
0.79	1.098 (-4.79)	8.00×10^{-5}	2.20	7.38 (-5.18)	-5.36×10^{-5}
0.80	1.115 (-4.84)	6.90×10^{-6}	2.40	2.85×10^1 (-5.18)	-4.77×10^{-5}
0.801	1.117	5.77×10^{-7}	2.45	9.97×10^1 (-5.18)	-4.62×10^{-5}
0.801	1.1168	1.68×10^{-8}	2.46	1.99×10^2	-4.60×10^{-5}
0.801	1.1169	-4.546×10^{-8}	2.469	1.99×10^3	-4.65×10^{-5}
0.802	1.1175	-2.52×10^{-6}	2.47	∞	
0.802	1.118 (-4.85)	-5.58×10^{-6}	2.471	-1.99×10^3	-4.59×10^{-5}
0.803	1.120	-1.16×10^{-5}	2.475	-3.99×10^2	-4.59×10^{-5}
0.805	1.123 (-4.86)	-2.31×10^{-5}	2.50	-6.64×10^1 (-5.18)	-4.53×10^{-5}
0.81	1.13 (-4.88)	-4.93×10^{-5}	2.60	-1.53×10^1 (-5.18)	-4.30×10^{-5}
0.82	1.15 (-4.92)	-9.19×10^{-5}	2.70	-8.67 (-5.18)	-4.10×10^{-5}
0.85	1.19 (-4.99)	-1.65×10^{-4}	2.8	-6.04 (-5.18)	-3.92×10^{-5}
0.90	1.24 (-5.06)	-2.00×10^{-4}	3.0	-3.76 (-5.18)	-3.59×10^{-5}
0.95	1.29 (-5.10)	-1.97×10^{-4}	3.5	-1.94 (-5.18)	-2.98×10^{-5}
1.00	1.34 (-5.12)	-1.85×10^{-4}	4.0	-1.30 (-5.19)	-2.54×10^{-5}

表 11 - 2 Ks、K の計算結果 (K₂HPO₄)

A (%)	α (Ks) $\frac{mg}{\ell}$ //	k (1/min)	A (%)	α (Ks) $\frac{mg}{\ell}$ //	k (1/min)
0.88	9.55×10^{-1} (-3.73)	2.24×10^{-3}	2.379	1.85×10^3	-1.16×10^{-4}
0.89	9.49×10^{-1} (-3.68)	2.22×10^{-3}	2.38	∞	
0.90	9.55×10^{-1} (-3.68)	2.07×10^{-3}	2.381	-1.85×10^3 (-4.82)	-1.15×10^{-4}
0.91	9.72×10^{-1} (-3.71)	1.84×10^{-3}	2.385	-3.71×10^2 (-4.82)	-1.15×10^{-4}
0.92	9.95×10^{-1} (-3.78)	1.57×10^{-3}	2.39	-1.86×10^2 (-4.82)	-1.15×10^{-4}
0.95	1.08 (-4.01)	8.39×10^{-4}	2.40	-9.28×10^1 (-4.82)	-1.14×10^{-4}
1.00	1.20 (-4.31)	1.69×10^{-4}	2.41	-6.18×10^1 (-4.82)	-1.14×10^{-4}
1.02	1.24 (-4.38)	3.36×10^{-5}	2.45	-2.65×10^1 (-4.82)	-1.11×10^{-4}
1.025	1.25 (-4.40)	7.04×10^{-6}	2.50	-1.55×10^1 (-4.83)	-1.08×10^{-4}
1.026	1.25	2.03×10^{-6}	3.00	-2.998 (-4.83)	-8.62×10^{-5}
1.026	1.25	4.63×10^{-8}	3.50	-1.66 (-4.84)	-7.15×10^{-5}
1.026	1.25	-2.996×10^{-9}	4.00	-1.15 (-4.84)	-6.11×10^{-5}
1.026	1.25	-5.23×10^{-8}	5.0	-7.11×10^{-1} (-4.84)	-4.72×10^{-5}
1.027	1.25	-4.46×10^{-7}	6.0	-5.15×10^{-1} (-4.85)	-3.85×10^{-5}
1.027	1.25	-2.90×10^{-6}	7.0	-4.04×10^{-1} (-4.85)	-3.25×10^{-5}
1.03	1.26 (-4.42)	-1.71×10^{-5}	8.0	-3.32×10^{-1} (-4.85)	-2.81×10^{-5}
1.05	1.29	-9.42×10^{-5}	10.0	-2.45×10^{-1} (-4.85)	-2.21×10^{-5}
1.10	1.37 (-4.57)	-1.99×10^{-4}	15.0	-1.48×10^{-1} (-4.85)	-1.46×10^{-5}
1.2	1.52 (-4.668)	-2.53×10^{-4}	20.0	-1.06×10^{-1} (-4.85)	-1.07×10^{-5}
1.3	1.68 (-4.72)	-2.49×10^{-4}	30.0	-6.76×10^{-2} (-4.86)	-7.08×10^{-6}
1.4	1.86 (-4.75)	-2.32×10^{-4}	40.0	-4.96×10^{-2} (-4.86)	-5.28×10^{-6}
1.5	2.08 (-4.77)	-2.13×10^{-4}	50.0	-3.92×10^{-2} (-4.86)	-4.21×10^{-6}
1.8	3.18 (-4.80)	-1.67×10^{-4}	60.0	-3.24×10^{-2} (-4.86)	-3.50×10^{-6}
2.0	4.87 (-4.81)	-1.45×10^{-4}	70.0	-2.76×10^{-2} (-4.86)	-3.00×10^{-6}
2.3	2.32×10^1 (-4.82)	-1.21×10^{-4}	80.0	-2.41×10^{-2} (-4.86)	-2.62×10^{-6}
2.35	6.18×10^1 (-4.82)	-1.17×10^{-4}	90.0	-2.13×10^{-2} (-4.86)	-2.33×10^{-6}
2.37	1.85×10^2 (-4.82)	-1.16×10^{-4}	99.0	-1.93×10^{-2} (-4.86)	-2.11×10^{-6}
2.375	3.71×10^2	-1.16×10^{-4}	99.999	-1.91×10^{-2} (-4.86)	-2.09×10^{-6}

リン速度定数 k は A の値によって激しく変化するので正しく求めることは困難である。

以上のように考えると、栄養塩摂取における Monod 型のモデルは実験事実を正しく把握するには不完全であると結論しなければならない。

分 析 一 覧 表

分析項目	操作手順
<p>① K-N (ケルダール窒素)</p>	<p>○サリチル硫酸分解</p> <p style="text-align: center;"> 検 体 (ケルダールフラスコ使用) サリチル硫酸 5 ml 添加 </p> <p style="text-align: center;"> ↑ (サリチル酸 10 g を濃硫酸 300 ml 中に溶解したもの) </p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">時々振とう、30分以上放置</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">小さな炎で加熱 ← チオ硫酸カリウム 1 g を少量ずつに分けて添加</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">泡沫がおさまってしばらく後に放冷</p> <p style="text-align: center;"> ← conc H₂ SO₄ 5 mg ← 分解促進剤 1 g 添加 </p> <p style="text-align: center;"> ↑ </p> <p style="text-align: center;">徐々に火力を強め、最後強熱 (K₂ SO₄ と Cu SO₄ を 9 : 1 で混合したもの)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">褐色が消え青緑色となり白煙を発生する状態となって更に30分加熱</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">放 冷</p> <p>○水蒸気蒸留</p> <p style="text-align: center;"> 分解液 </p> <p style="text-align: center;"> ← 40% Na OH </p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">40% Na OH を用いて微酸性となるまで中和</p> <p style="text-align: center;"> ← 10 wt % MgO 懸濁度 10 ml 又は、40% NaOH 5 ml </p>

分析項目	操作手順
	<p style="text-align: center;">↓</p> <p>水蒸気蒸留 $N/10 \sim N/20$ N_2SO_4 10ml 中に捕集</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>100ml 定容</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>適当量をインドフェノール青法で NH_4^+ の定量を行う (定量法 JIS K 0102)</p> <p>注 この分析法はケルダール法の一つであるが、特に検体中に存在する NO_3^-、NO_2^- をよく回収するように注意が払われており、事実上総窒素が定量される。</p>
② T-P	<p>○硝酸一過塩素酸分解</p> <p style="text-align: center;"> 検体 (コニカルビーカー中で) </p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">← conc HNO_3 (3~5ml)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>ホットプレート上で加熱</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">← 分解の様子をみて適宜 conc HNO_3 を追加 ← ほぼ分解が終了すれば、$HClO_4$ 1ml 添加</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>蒸発乾固</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">← 0.2~0.5 N HCl</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>溶解</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>50または100ml 定容</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>液の適量を取り、必要に応じて希釈、モリブデン青法で PO_4^{3-} を定量する。(定量法 JIS K 0102)</p>

分析項目	操作手順
③ K	②の分解液を炎光分光法、波長(7665 Å)で定量
④ Na	同上 波長(5890 Å)で定量
⑤ Mg、Fe、Ca、Cu、Mn、Zn	いずれも②の分解液を試料とし、原子吸光法によって測定。手法はいずれもJIS K0102を準用
⑥ SS(固型物量)	検水をミリポア(メンブラン)フィルターで適当量ろ過、105℃で恒量となるまで乾燥して重量を測定して求める。
⑦ 濁度	積分球式濁度計(日本精密光学製、SEP-TRE)を用い、カオリンの標準液(JIS K0102)を対照として測定、カオリン濃度に換算した。
⑧ クロロフィル、カロチノイド	<p>植物体を含む液をメンブランフィルターでろ過したものを、超音波を投射しながら、アセトンで抽出。得られたアセトンについて663nm、630nm、750nm、480nmの波長で吸光度を測定、次式によってそれぞれの濃度を算出する。</p> <p>クロロフィル $a = 11.64 D_{663} - 2.16 D_{645} + 0.10 D_{630} - 9.58 D_{750}$</p> <p> " $b = -3.94 D_{663} + 20.97 D_{645} - 3.66 D_{630} - 13.37 D_{750}$</p> <p> " $c = -5.53 D_{663} - 14.81 D_{645} + 54.22 D_{630} - 33.88 D_{750}$</p> <p>カロチノイド = $10 D_{480} - 30 D_{750}$</p> <p>(海洋観測指針を準用)</p>

本年10月、不慮の自動車事故によって急逝された、水質科技師、盛岡文雄君の遺稿が研究の指導者である、前所長、松本秀三氏によって補筆整理されて、本報に掲載することが出来ました。松本氏の労を深謝するとともに盛岡君のご冥福をお祈りいたします。

昭和54年11月

秋田県公害技術センター
所長 小田野 直