

水草による栄養塩類の除去について

佐々木 道也 ・ 外岡 健夫

最近、湖沼や内湾における富栄養化現象は著しく、極度に「水の華」や「赤潮」が発生し、各種の被害をもたらしている。この原因として考えられるものの一つは、種々の廃水中に含まれる栄養塩類がその主な原因と考えられている。

現在、水質浄化を目的に廃水の第一、二次処理が行われるが、この過程では栄養塩類の効果的な除去は望むことはできない状態にある。そこで、栄養塩の除去をめざした処理方法の開発が望まれるが、多くは化学薬品による方法で、廃水処理に用いた薬品を再び処理しなければならないという矛盾をおかしている。

本報告では、水草による栄養塩類の除去を実験的に検討し、さらに野外の池等で調査を行い実用化への問題点について考察を加えた。

実 験 の 方 法

$\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の定量は夫々ネスラー法、グリスロミン法、ブルシン法によった。クロロフィルの測定は 0.8μ のミリポアフィルターで濾過後90%アセトン溶液に入れて超音波発生装置で処理し、遠心分離器にかけてその上澄液を分光光度計にかけて測定した。クロロフィルa, b, cの量は、JIBP-PF¹⁾によった。

1. 水草による窒素吸収速度

霞ヶ浦の水(昭和50年6月)に NH_4Cl , KNO_3 および NaNO_3 をNとして1:1:1となるように試水を作成した。この試水中に各種水草を入れて80W蛍光灯で照射し、1~2日後の窒素濃度を測定し、前後の差に水溶積を乗じて吸収量を求めた。実験に供した水草は7種類で、結果は第1表の通りである。窒素吸収量は $0.46\sim 3.7\text{g/day/Kg}$ (乾重)で、ウキクサとクロモが3.7

第1表 水草による窒素吸収

種 名	水 温	試水の N 濃度	N吸収量($\text{g/Kg}\cdot\text{day}$)	
			湿 重	乾 重
ホテイアオイ	21.5	6.03	0.023	0.455
ミズアオイ	30.0	20.49	0.097	1.940
ウキクサ	24.9	19.00	0.231	3.609
ササバモ	30.5	4.02	0.198	1.238
ヒシ	30.0	16.57	0.077	0.648
クロモ	30.5	4.51	0.344	3.660
ホザキノフサモ	30.5	4.40	0.091	0.823

g/day/Kgで最も大きく、ミズアオイとササバがこれに続く。これに対し、ササバモ、ホサキノフサモ、ヒシホテアオイは小さい値を示している。

2. 水温の窒素吸収に及ぼす影響

水生植物の窒素吸収も、当然のことながら水温によって影響をうけるものと考えられる。ウキクサは春および秋に、ササバモ、クロモ、ホザキノフサモ、ホテアオイ等は夏季に、エビモは秋から春にかけてよく繁茂するといわれる。水草による窒素除去を実際に行おうとする場合に、一般的には水温の低い冬季には効率がおちると思われるが、適温の異なる水草を選択することによって、それを補うことができるのではないかと考えられる。このような観点もあって、水草数種の窒素吸収と酸素生産速度と水温との関係を検討した。まず、ウキクサについて4.95 ppmの窒素を含む試水に20gのウキクサを入れて80W蛍光灯を24時間照射し吸収量を求めた。結果は第2表のとうりである。窒素吸収量は24℃前後では0.3g/Kg/day(湿重)の高値を示すが、それ以上に水温が上昇すると吸収量は急激に減少する。又13.8℃の場合には24℃の吸収量の約1/30に低下しており、水温の低下とともに急激に減少するものと考えられる。

ホザキノフサモ、クロモ、ササバモについて行った実験の結果は第3表のとうりである。ホザキノフサモでは15~29.3℃の間で比較的高い値を示しているが33.5℃では明らかに低下が見られる。クロモは15~23.5℃の間では高値を示し23.5℃で最大値が見られるが、それ以上ではやゝ低下するようである。ササバモは29.2℃で最も高い値を示し、ホサキノフサモ、クロモに比較して、適温が高いようである。

第2表 水温のウキクサのN吸収
におよぼす影響

水 温	N 吸 収 量	
	mg/20g·day	g/Kg·day(湿重)
13.8	0.22	0.011
23.9	5.80	0.290
24.7	5.64	0.282
29.0	1.96	0.098
36.0	0	0

第3表 水温と光合成速度の関係

ク ロ モ		ホザキノフサモ		サ サ バ モ	
水 温	O ₂ (ml/g)	水 温	O ₂ (ml/g)	水 温	O ₂ (ml/g)
15.0	1.31	15.0	1.22	15.1	0.32
23.0	1.20	23.0	1.13	21.1	0.69
23.5	1.43	23.5	1.49	23.9	0.96
29.3	0.97	29.3	1.06	29.2	1.11
33.5	0.69	33.5	0.55	34.0	0.92

3. 屋外の実験池における検討

ササバモ、ホザキノフサモ、リュウノヒゲモが2Kg/m²の密度で繁茂している200m²の池に1,255.7ℓ/dayの前記試水を注入して、窒素濃度を測定した。注入水の窒素濃度は21ppmであった。結果は第4表のとうりである。実験は注入を開始してから16日目まで行い、この間5回の測定を行った。窒素濃度(NH₄

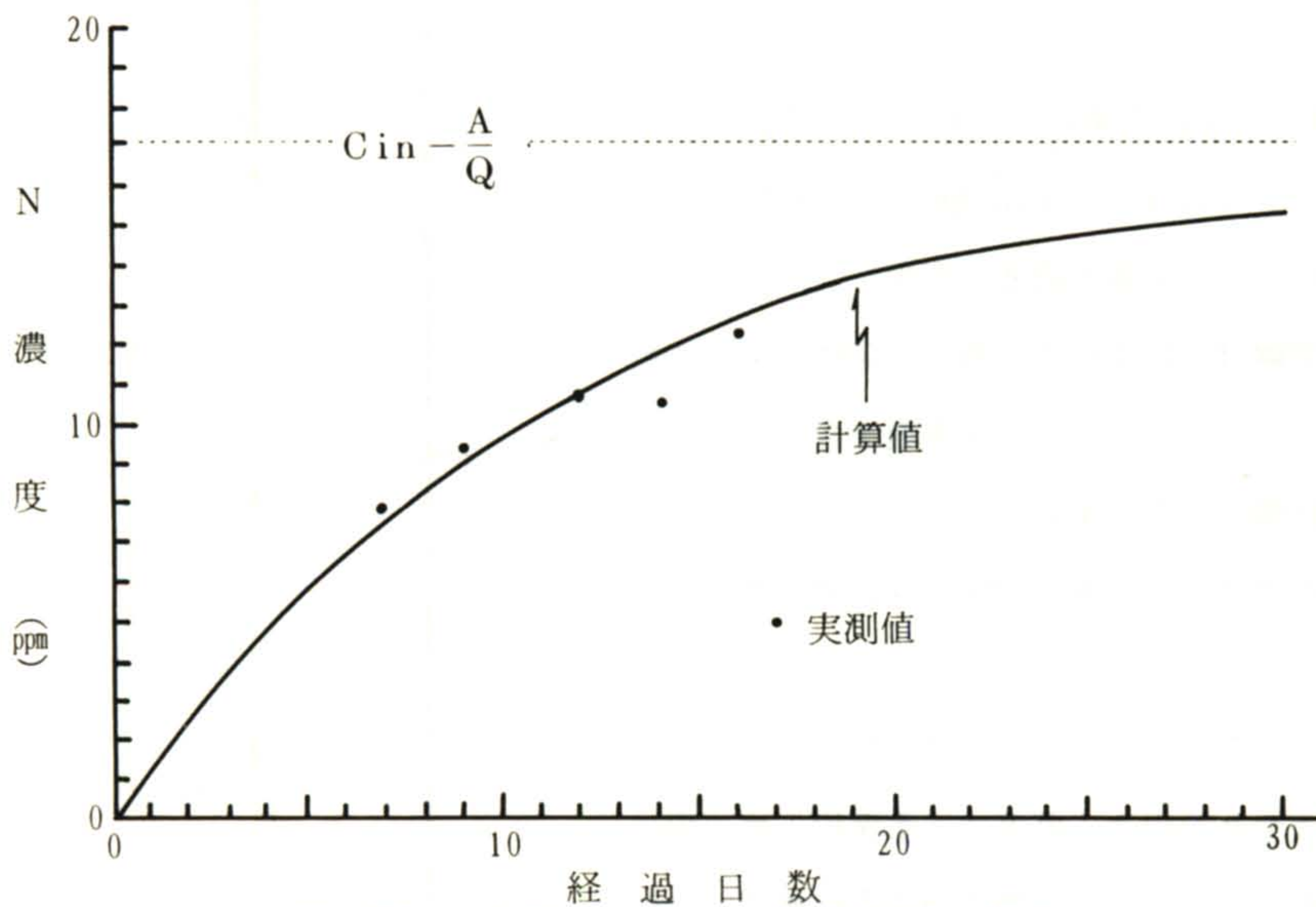
-N, NO₂-N, NO₃-N)の変化を図示したものが第1図である。N濃度は時間の経過とともに徐々に上昇するが、これは、始めに池に貯水された殆んど無機態窒素を含まない水に高濃度の

第4表 実験池における水質の変化

経過日数		7	9	12	14	16
水温 ℃		22.0	20.0	20.0	24.0	20.8
無機態N (ppm)	注水	21	21	21	21	21
	排水	7.9	9.5	10.8	10.4	12.0
無機態P (ppm)	注水	-	-	-	-	8.86
	排水	-	-	-	-	4.79
SS (ppm)	注水	-	-	-	-	9.0
	排水	-	-	-	-	8.3

池面積：200 m²， 水深：0.7 m， 注水量：12,556.9 l/day

水草：ササバモ，リュウノヒゲモ，アオミドロ，ホサキノフサモ (2 Kg/m²，湿重)



第1図 実験池におけるN濃度の変化

が供給されるためと考えられる。いま、水草による栄養吸収量をA，注水量をQ，池の水容積をV，注水および排水の窒素濃度をC_{in}，Cとすれば，池水の窒素濃度変化は，

$$V \frac{dc}{dt} = -QC - A + Qc_{in} \cdot C_{in} \dots\dots\dots (1)$$

となる。上式を解くと，

$$C = \left(C_{in} - \frac{A}{Q} \right) \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。

実験では第4表から明らかなように $C_{in} = 21 \text{ ppm}$, $Q \doteq 12 \text{ M}^3$ 。 C_0 は始めの濃度で 1 ppm 以下で C_{in} に比較して小さいから無視する。 A は水草の吸収量で 0.2 g/Kg/day 程度と考えられるから全体で 40 g/Kg/day となる。したがって(2)式は,

$$C = 17 \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \right)$$

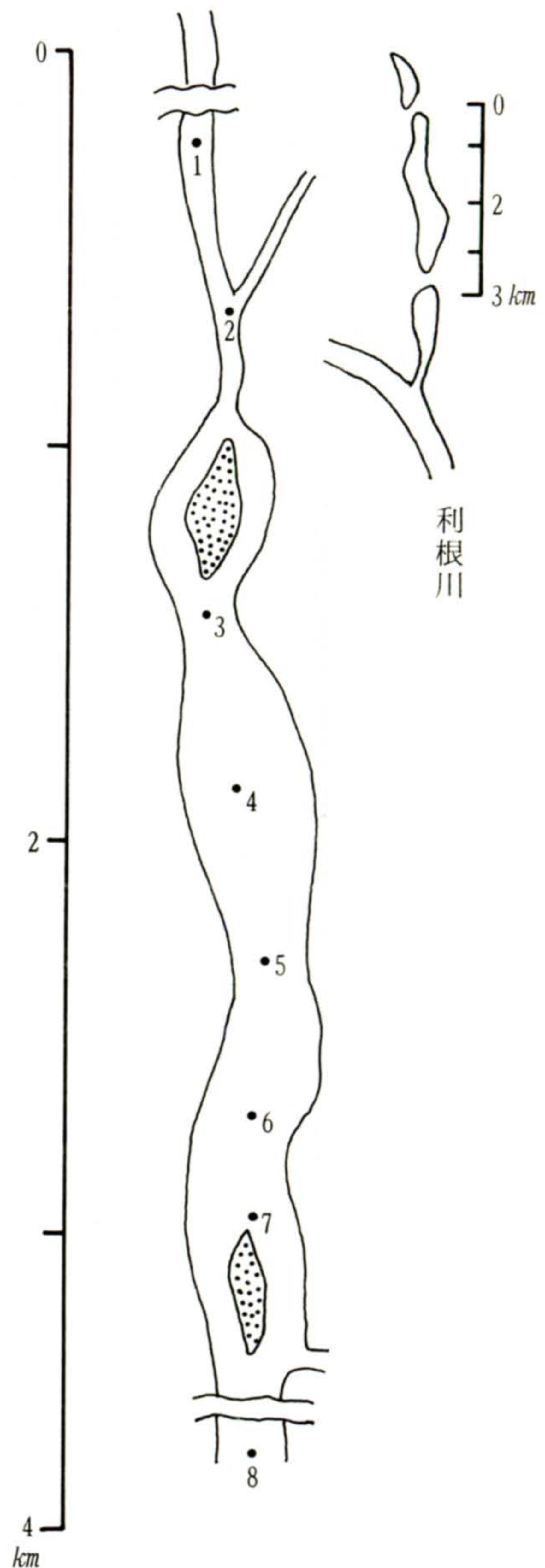
となる。この値を第1図に示してみた。実験値と計算値はよく一致しており、先の実験で求めた水草の窒素吸収量にもとづいて広い水域の窒素除去量を推定してもさしつかえないものと考えられる。実験値は16日までしかないが、計算値から推定すると池の窒素濃度は30日を過ぎる頃から平衡に達するようになり $C = 17$ に近づく。したがって $(21 - 17) \times 12 = 48 = 48 \text{ g/day}$ の窒素が 200 m^2 の池で除去されることになる。これは 0.25 ton/km^2 に相当する。

4. 菅生沼における栄養塩濃度の変化

以上の実験は、いずれも人為的な条件のもとで行われたものである。たとえば栄養塩を含む試水や水草の生理状態も天然の条件とは差があって、実際に水草を繁茂させた広い池での検討も必要と考えられる。

菅生沼は第2図のように 3 km 余りの長さを持ち、コウガイモやヒシのよく繁茂する水深約 1 m の沼である。上流から相当に高い濃度の窒素が運び込まれ、栄養塩除去池の実験池とみることが出来る。昭和50年7月22日、菅生沼上流から下流までの7点について、栄養塩類を中心に行った水質分析結果を第5表に示した。上流の水は全窒素が 4.37 ppm と相当に高く、しかも、このうちの 88% が $\text{NO}_3 - \text{N}$ である。

これらの物質は 3 km の流程を流下する過程で減少



第2図 菅生沼調査地点

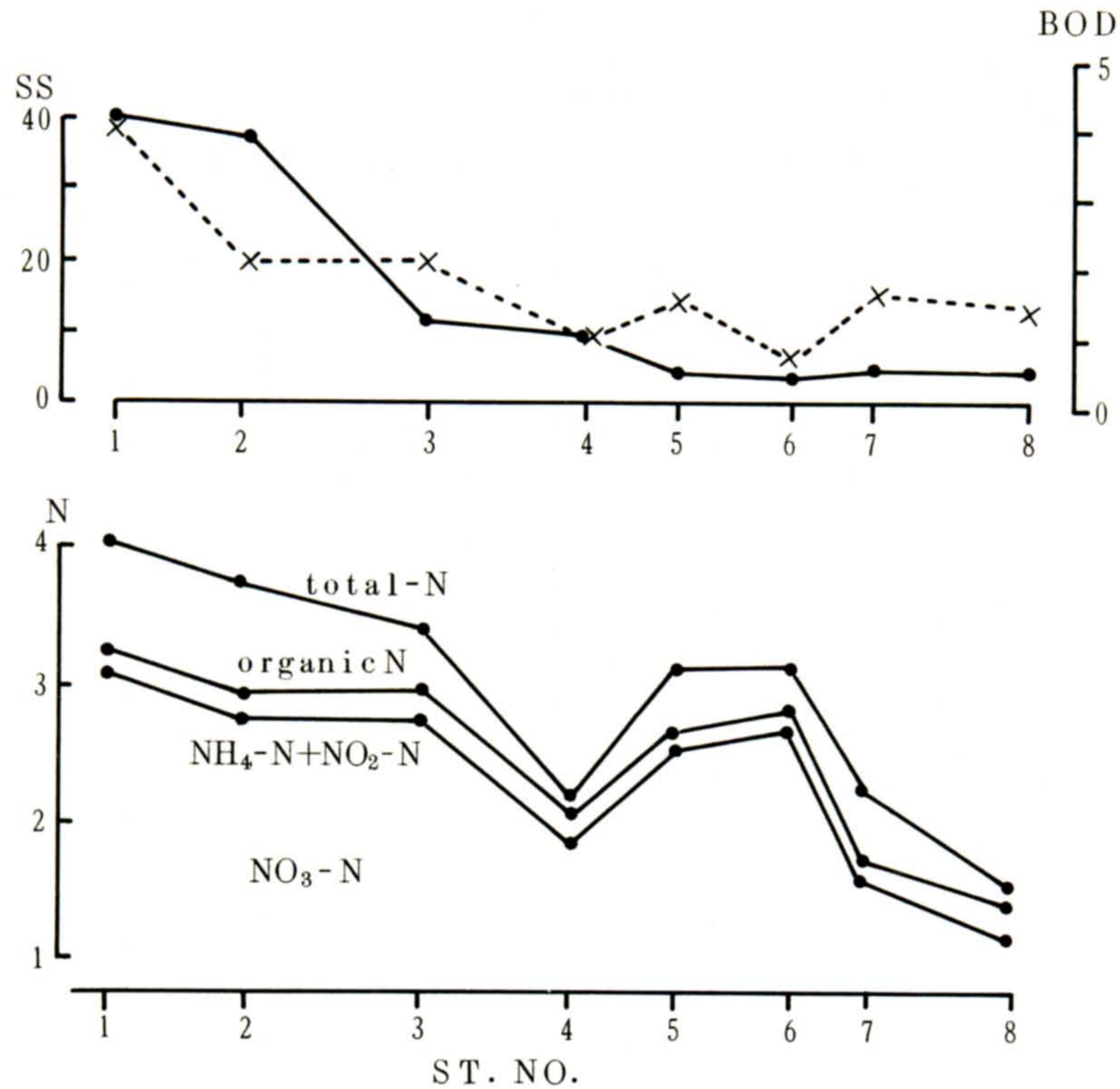
第5表 菅生沼の水質

(1975. 7. 22)

項目目	st.1	2	3	4	5	6	7	8
水深 (m)	-	-	0.8	1.1	0.8	0.9	0.9	0.57
水温 (℃)	26.5	26.2	25.9	26.0	27.0	27.5	27.3	26.5
透明度 (m)	0.4	0.5	-	-	B	B	B	B
透視度 (cm)	-	17.5	22.0	30 <	30 <	30 <	30 <	30 <
濁度 (ppm)	7.78	8.82	6.74	7.26	2.07	0.51	2.07	3.63
pH	7.02	7.13	7.02	7.24	7.92	8.01	7.52	7.10
SS (ppm)	40.0	38.5	12.0	10.0	4.0	4.5	5.5	6.5
Cl (")	24.27	25.89	24.27	23.46	24.27	25.89	25.89	24.27
NO ₂ (")	0.034	0.029	0.038	0.032	0.064	0.060	0.056	0.038
NO ₃ (")	3.118	2.796	1.849	1.882	2.580	2.742	1.640	1.236
NH ₄ (")	0.166	0.15	0.17	0.19	0.09	0.07	0.15	0.23
DO (")	5.0	5.1	4.9	8.1	11.4	10.7	9.2	4.4
COD (")	3.65	3.54	3.19	2.96	2.42	2.338	2.42	2.99
BOD (")	4.10	2.03	2.16	1.03	1.43	0.69	1.67	1.43
P (")	0.035	0.029	0.031	0.026	0.021	0.019	0.016	0.02
T-N (")	0.85	0.92	0.51	0.29	0.51	0.39	0.63	0.30
T-P (")	0.16	0.03	0.10	0.08	0.03	0.03	0.02	0.03

していく。まず、SSについて見ると、第3図(a)のように上流から約1.2kmのst. 3で40 ppmから10 ppmに急激に減少し、BODも同傾向で減少し、4 ppmからst. 6では0.6 ppmにまで低下している。このような変化は肉眼的にも認められるところであって上流では懸濁物が多く、透視度が18であったものが1.7km下流付近では透明となり、2.5km下流のst. 6では濁度で0.5となっている。窒素の中88%を占めるNO₃-Nにあっても、st. 5で付近からの流入の影響を受けて一時増加しているが、再び低下し最終的には1.2 ppmにまで低下した。Pについても同様に、相当の低下が見られ、無機態のPについても半分に減少している。

このような変化をもたらす原因として考えられるものは、一つは沈殿でSSやBODによる栄養塩の吸収である。この時の菅生沼の流量は7.5 ton/secであったから、全体での低下はそれであろう。第2は植物による $3 \text{ g} \times 7.5 = 22.5 \text{ g/sec}$ が、NO₃-Nとしてその1/2が除去されたことになる。12時間を光合成を行う時間とするとNO₃-Nとして約0.5 ton/dayが除去されたことになる。菅生沼の面積は約1 km²



第3図 菅生沼の水質

であるから、 0.5 ton/day/km^2 の栄養塩の状態の窒素が、沈澱を含めると 1 ton/day/km^2 の窒素が除去されていることになる。この値は、先に実験で求めた $0.25 \text{ ton/day/km}^2$ よりやや高い。その原因の一つは、おそらく水草の種類と現存量の差であろう。菅生沼の水草の現存量は詳しくは不明であるが、st.6~7付近で $3 \sim 5 \text{ Kg/m}^2$ (湿重)であった。このことを考慮すると実験池と菅生沼における栄養塩類の除去能力はほぼ同一と見ることができ、その量は窒素として $0.25 - 0.5 \text{ ton/day/km}^2$ となる。

5. 問題点

以上の結果から、水草を繁茂させた池に廃水を導くことによって相当量の栄養塩を除くことができるものと思われる。処理に当っては排水源に、池を設けることが効率から見ても望ましいが、窒素負荷量の $8.7 \text{ ton/day}^2)$ から見ると 10 km^2 の池があれば、その $30 \sim 60\%$ が除去される。 10 km^2 は広大ではあるが、最近の休耕地の増加等を考えると不可能な数字ではないように思われる。そこで、こうした方式を実現させる場合に問題となる点について述べてみる。

まず、第一は技術的な問題である。

菅生沼では自然に水草が繁茂していたが、水草によって栄養塩を除去しようとする場合には、

常に水草を繁茂させておかななくてはならない。どのような種類の水草を使用するかを検討し、栽培し、管理する技術が必要となる。

第二は経済的問題である。水草を利用して浄化を行う場合に、その利用の途があるかどうか重要である。各種水草の成分を分析した結果は第6表のとうりで、蛋白質が20～50%含まれており飼料や肥料にも利用できよう。

しかし、現在の農業あるいは経済の動きの中では、このような利用方法は経済的に成り立ち難い。そこで、水草による浄化方法が有効であれば、それが円滑に運営されるための行政上の手助が必要となって来るわけで、技術的な問題と平行して、そうした検討も必要であろう。

第6表 各種水草の蛋白質含有量

種 類	粗蛋白	水分	エーテル浸出物	灰分
	%	%	%	%
ホテアオイ	24.1	94.9		
ミズアオイ	22.6	95.0		
ウキクサ	37.8	93.6	4.2	15.1
ササバモ	23.9	86.0		
ヒシ	31.6	88.2		
ササバモ	48.1	90.6		
ホザキノフサモ	28.9	88.9		

文 献

- 1) 陸水生物生産測定法論研究会編：陸水生物生産研究法，講談社（1969）。
- 2) 霞ヶ浦北浦水質保全専門調査会：霞ヶ浦の水質保全対策についての中間報告（1973）。