

ホテイアオイによる窒素およびリン酸の除去について

野内孝則・大川雅登*・佐々木道也**・浜田篤信

1. はじめに

霞ヶ浦は、利根川水系最下流域に位置する湖面積 220 km²の富栄養湖である。漁業生産は、約 15,000 トン、30 億円で、他に淡水真珠の養殖が行われている。この他は、昭和40年に地域振興事業の一環として導入された網生簀養殖による生産が約 6,000 トン（約20億円）ある。漁業経営体は全体で 1,112 経営体であり、このうちには 8 経営体の淡水真珠及び 110 経営体の網生簀養殖業が含まれている。漁業経営は、主として農業との複合経営で行われているが、漁業依存度は年々高まる方向にあって、漁業者の水質改善への期待は極めて高い。

また霞ヶ浦は、標高14cm、平均水深 4 m、滞留日数約 200 日、集水面積は湖面積の約10倍と富栄養化しやすい条件を備えており、生産性は高く、そのことが豊かな漁業生産を支えてきた。しかし、霞ヶ浦総合開発事業等の開発事業の推進により、富栄養化は一段と加速され、水利用上様々の障害が現れて来ている。特に漁業にあっては、昭和40年代中頃からその傾向が激化し、魚病、酸欠死や高価な魚種の減少などによる被害が生じるようになって来ている。被害は農業、上水にもおよび、景観を損なう点もあって一般住民の関心も高く、早くから対策を望む声は高かった。

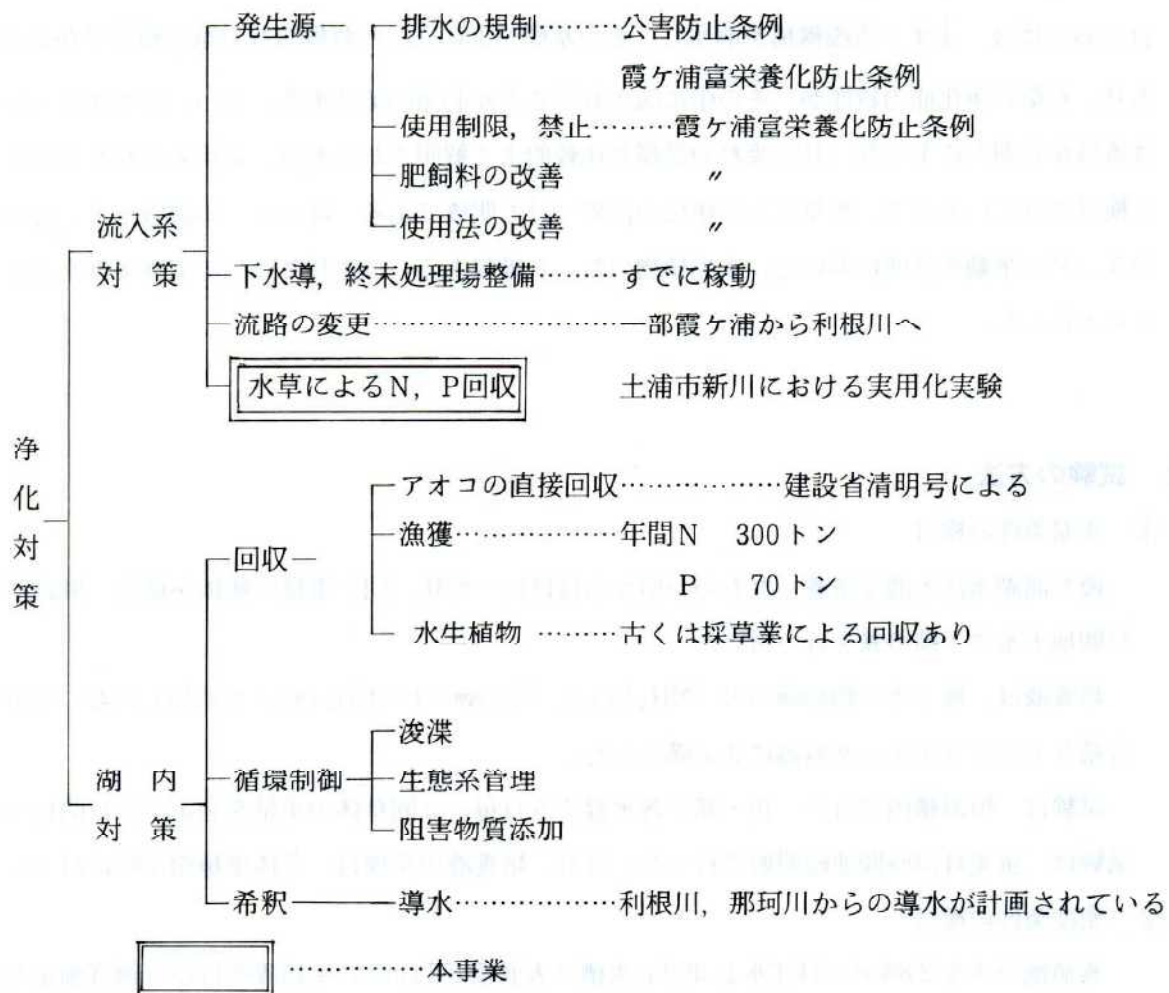
県は、昭和59年霞ヶ浦富栄養化防止条例を制定、施行し現在に至っている。富栄養化の主たる原因は、藻類の栄養となる窒素（以下N）、リン酸（以下P）と考えられ、その流入負荷を削減するねらいで各種の対策が組織的に強力におし進められている。しかし、それら施策の効果が現れるのには、なお時間を要するものと考えられる。また、すでに湖内に蓄積した栄養の循環も藻類増殖の強力な原因であり楽観は許されない。こうした状況を勘案すると漁業の側にあっても自衛的に何らかの対策を講ずる必要がある。

現在、推進されてい対策や今後計画されている諸対策を流域、湖内に分けて整理して第1図に示した。富栄養化対策の基本はN、P負荷を如何に削減するかであり、これに係る対策は、すでに強力におしすすめられているところである。しかし、低濃度の栄養塩の除去は、技術的になかなか困難であり、流入河川が湖内に入る前段での処理の検討がすすめられている。たとえば、ラグーンや各種濾床等であるが、本事業の水草によるN、P回収も、ここに位置づけられる。

また、湖内対策としては、すでにアオコの直接回収が建設省によって行われており、意識的で

* 現漁政課

** 現水産試験場



第1図 浄化体系の中の本事業の位置づけ

はないが漁業によっても年間約300トンのN、70トンのPが回収されている。現在ではみられないが、古くは農業用肥料として採草業によるN、Pの回収も行われていた。本事業の浄化対策の中における位置づけのもう一つは、湖内対策としての回収である。この他、浚渫による回収も検討されている。又、すでに事業化が進められているものの中に利根川及び那珂川からの導水がある。

以上、富栄養化防止対策の概要と、そこにおける本事業の位置づけを述べたが、本事業は、次の二側面の方向性を持つ。

- (1) 流域対策としての流入河川のN、P回収
- (2) 湖内において、広い湖面積を利用した回収

の二方向であり、そのいずれを選択するかは調査の結果にかかっている。

ホテイアオイ等水草による水質浄化に関する研究は比較的多い。しかし、それを実用化に向か

はしめるには、まず、汚濁機構を解明し、その基礎の上に立った有機的な対策の組合せが必要であり、水草の浄化能力特性が、その中に活かされることが必須の条である。幸い、霞ヶ浦については流域から湖内に至るN、Pの流れや循環も比較的良好に解明されており、対策もそれを基礎として検討されているので、水草による浄化の位置づけも明確である。従って、本調査では、霞ヶ浦のN、Pの挙動を念頭において、水生植物のN、P吸収あるいは生長について実験条件を設定することにした。

2. 試験の方法

(1) 水温条件の検討

霞ヶ浦湖水注入池で培養したものの中からほぼ同一形状、同一重量の個体を選び、供試前3日間地下水で予備培養を行い用いた。

培養液は、地下水に約40ppmのN (NH_4NO_3)、約10ppmのP (KH_2PO_4)を添加したものを、容積3ℓのプラスチック容器に2ℓ満たした。

試験は、恒温槽内で行い、10~35℃各水温で5日毎に3回草体の重量を測定、15日間行った。試験は、蛍光灯24時間連続照射で行った。なお、培養液の交換は、草体重量測定時に行った。

(2) 密度条件の検討

養殖池の水を2.88 m³/日注水し300ℓ水槽(表面積0.84 m²)にて培養を行い、適宜測定を行った。また、霞ヶ浦及び養殖池に1×1 m及び2×2 mの網生簀にホテイアオイを収容し、重量を131日間にわたって測定した。

重量測定については、取り上げたホテイアオイから水がしたたらない程度にまで水切りを行い、喜納ら¹⁾に従い、葉柄まで枯れた完全な枯葉、葉先が枯れて次の計量時には完全な枯葉になると予想されるもの、葉全体が黄葉になっているもの、親株の日陰にあり、葉が白くなり放置すると水腐れするもの、空胞、葉柄等が傷ついたもの等の除去を行い計量した。

(3) N、P濃度別試験

KCl 39.9 mg MgSO₄ · 7 H₂O 123.0 mg CaCl₂ · 2 H₂O 57.7 mg EDTANa · FeSalt 20.6 mg²⁾を蒸留水で溶かして1ℓとし、各試験濃度のN (NH_4NO_3)、P (KH_2PO_4)を溶かして試験区とした。試験は25℃に設定した恒温槽内で行い、試験期間は15日間とし、5日ごと草体の重量測定を行った。また培養液の交換は毎日行い、試験開始前7日間N、Pを加えていない述の培地にて予備培養を行った。

なお、低濃度範囲のPと生長の関係については、水草によるP吸収による濃度の低下が心配されるので500ℓのコンテナに90~120 gのホテイアオイを収容、培養を行った。又、試験期

間中は5日毎にN、Pの濃度を測定し著しい低下のないことを確認した。この間の水温は22～26℃であった。

(4) 草体の分析

生重量は、水分を十分除去したものについて測定した。乾燥重量の測定にあたっては、まず草体を凍結乾燥し、更にこれをデシケータ内で乾燥させた。草体のN、Pの分析には、 SeO_2 を触媒として H_2SO_4 で分解後、テクニコン・オートアナライザーを用いた。

(5) 栄養塩吸収試験（検査試験）

1.4 × 0.6 × 0.6 mのコンテナにホテイアオイを収容し、養殖池水を2.88 m³/日の割合で注水して試験した。対照としては、ホテイアオイを収容しない同条件のコンテナを用いた。水質分析に供した試水は注入水と、コンテナからの流出水を用いた。

水質分析は、下記によった。

COD	JIS-KO 102の法
NO ₂ -N	Griess Romijin 法
NO ₃ -N	Auto Analyzer (TECHNICON) 法
NO ₄ -N	Auto Analyzer (TECHNICON) 法
ケルダール N	SeO ₂ H ₂ SO ₄ による分解後
(K-N)	Auto Analyzer (TECHNICON) 法
T-P	Auto Analyzer (TECHNICON) 法
PO ₄ -P	Auto Analyzer (TECHNICON) 法
SS	Whatman GF/C 濾紙により湧過
Chl. a	Strickland and Parsons の法

3. 試験結果

1) 水温と生長

照度 6,000 lux, 水温10～30℃の条件下で生長を測定した。第2図はその結果を示したものであるが、生長は水温の如何によらず指数曲線に従って増大していることがわかる。すなわち、ホテイアオイの湿重量 (Wt) は、

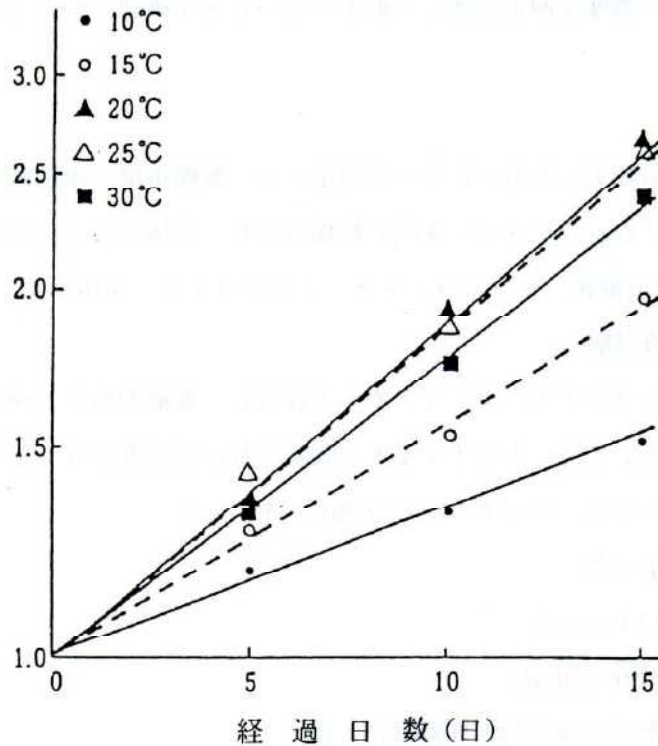
$$W_t = W_0 \cdot \text{Exp.} (K \cdot t) \dots\dots\dots(1)$$

W₀ : 初期湿重量

K : 水温等の条件で決まる生長係数

t : 経過日数

に従った。



第2図 ホテアオイの成長

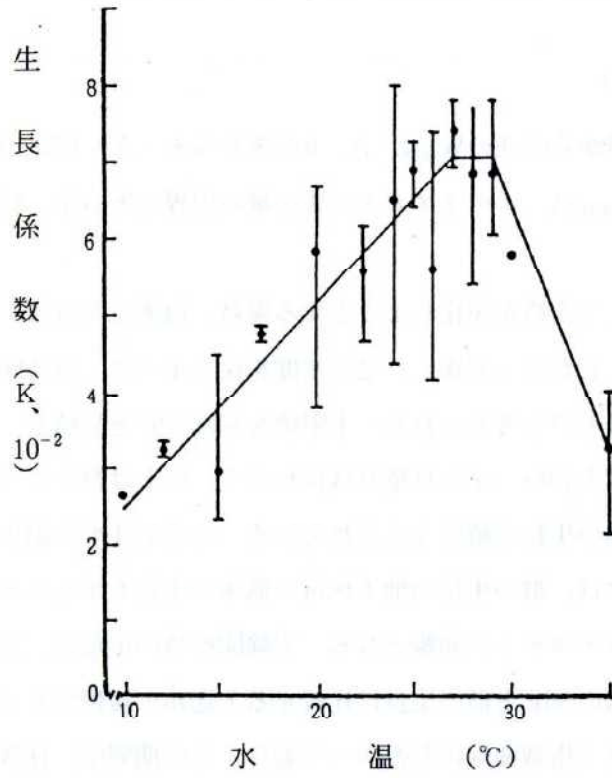
次に照度 6,000 lux, 水温 10~35°C で 15 日間栽培し, 生長係数 (K 値) を求め, 水温との関係を示したものが第 3 図である。K 値は, 10°C では 2.7×10^{-2} であったものが, 水温の上昇に伴い 27°C までは直線的に増大している。27~30°C の間では横ばい状態の最高値を示しているが, それ以上では急激な低下が見られる。K 値の水温変化に伴うこのような傾向からみて, ホテアオイの生長の適温は 20~30°C, 最適温は 25~30°C と考えられる。これまでの研究では 18~30°C が最適温とされる³⁾ が, ここでの検討では若干低温側にずれているようである。また, 15°C 以下では生長が悪く, K 値は $2 \sim 4 \times 10^{-2}$ であった。水温 (T) と K 値の関係は,

$$K = (2.76 \cdot T - 3.27) \times 10^{-3} \dots\dots\dots(2)$$

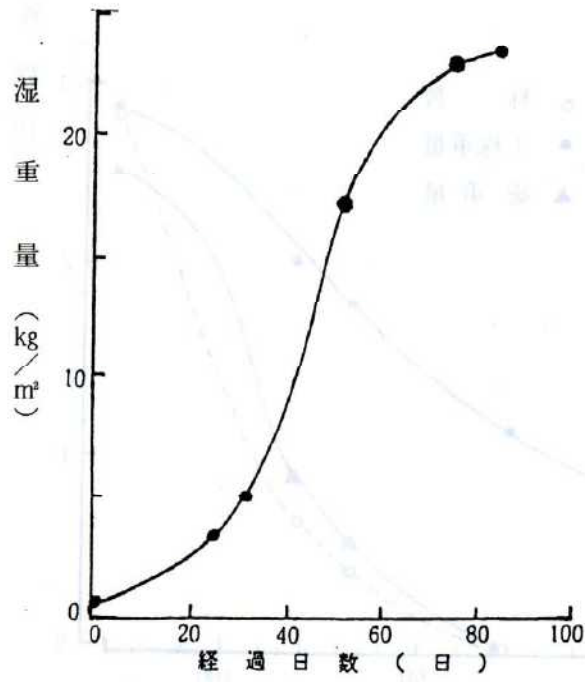
で表わすことができる。K 値は, 栄養条件や照度によって異なるが, 水温に比例して上昇するという関係は, 常に成り立つものと考えられる。

2) 生育密度と生長

ホテアオイの生長は, 上述のように十分広い水面では指数曲線に従うが, 栽培場が空間的に制限される場合には, 密度効果が働き生長が抑制されるものと考えられる。第 4 図は, 面積 1 m² の水槽中に養殖池の水を供給しながら栽培した場合の全重量の変化を示したものである。生長はロジスティック曲線に従っており, 5~20kg/m² の範囲では速い生長を示すが, 25kg/m²



第3図 水温がホテアオいの成長におよぼす影響 (6,000 lux)



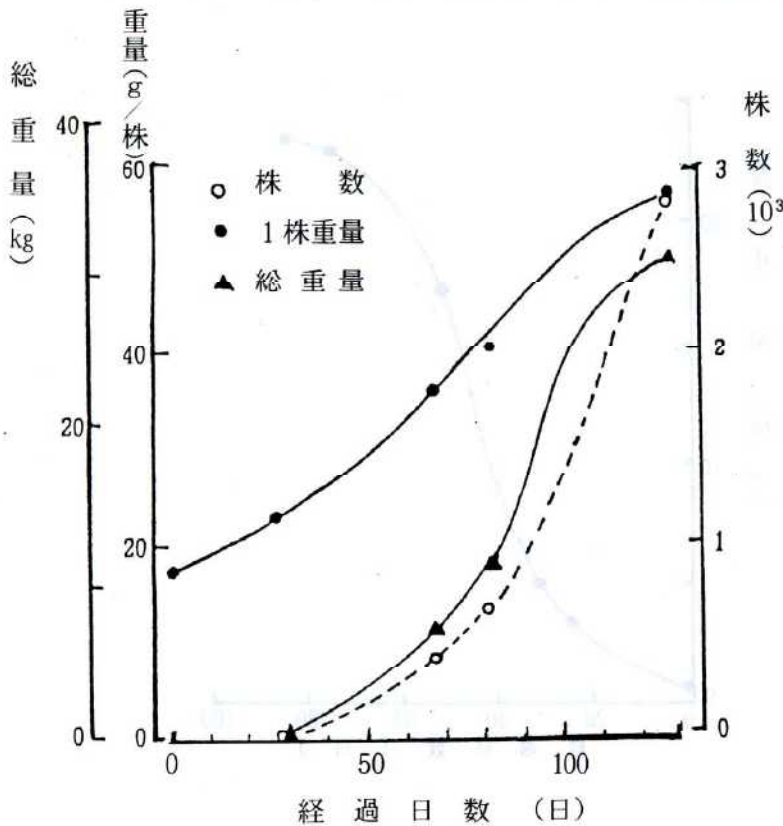
第4図 単位面積当りのホテアオイ

以上になると生長速度は抑制され、25kg/m²付近に収れんするようである。すなわち

$$W_t = \frac{W_{\max}}{1 + A \cdot \text{Exp.}(-bt)} \dots\dots\dots(3)$$

に従っている。第4図の実測値から(3)式のW_{max}, A, bを求めると、A=1.37, b=2.81×10⁻³ W_{max}=28.1 kg/m²を得る。W_{max}は、ホテイアオイの生産量の限界であるが、約30kg/m²と考えられる。

実際にホテイアオイを栽培して水質を浄化しようとする場合、過密となれば、密度効果が働き生長は低下することになる。したがってW_{max}/2の密度を保つようにし常時間引くようにした場合に最大の効果が得られるものと考えられる。上限値を30kg/m²と見積もったから、収穫時の密度を15kg, 収穫後の密度を10kg/m²と見積れば良からう。以上は群としての生長であるが、それは個体数の増加と個体の生長の積で支えられている。そこで4 m²の網生簀で実験を行い第5図の結果を得た。ここには、群の生長の他1株毎の個体の生長も示してある。個体の生長は、群としての生長同様、ロジステック曲線となる。実験開始時の重量は、17gであるが、90日で約2倍、130日で約3倍の56gと群の生長に比較すると遥かに緩慢である。一方株数の増加は、実験終了の131日目まで指数曲線にしたがっており、この期間中、株数の増加は密度の影響を受けなかったことになる。(N = 7.10 · Exp. [0.05050 t], r = 0.975)



第5図 網生簀 (2×2 m) 内におけるホテイアオイの生長

長は、群としての生長同様、ロジスティック曲線となる。実験開始時の重量は、17gであるが、90日で約2倍、130日で約3倍の56gと群の生長に比較すると遥かに緩慢である。一方株数の増加は、実験終了の131日目まで指数曲線にしたがっており、この期間中、株数の増加は密度の影響を受けなかったことになる。(N=7.10・Exp.[0.0505t], r=0.975)

以上のように、群の生長が密度抑制効果を受ける場合、その効果は個体数の増加には働かず、個体の生長の方に優先して働く。密度抑制効果の実体が、単に生育空間の物理的な抑制であれば、この条件下では上方への生長が可能であるところから、個体の生長は抑制されず、逆に個体数の増加が加えられそうである。このように考えると密度効果の機序は単に生育空間の物理的な制限ではなく、太陽エネルギーや栄養吸収等の生理上の原因によるものではないかと考えられる。そうであれば栽培の条件、たとえば流速や照度が収穫を左右することになり、原因を究明することによって更に効率化を図ることもできよう。今後の課題である。

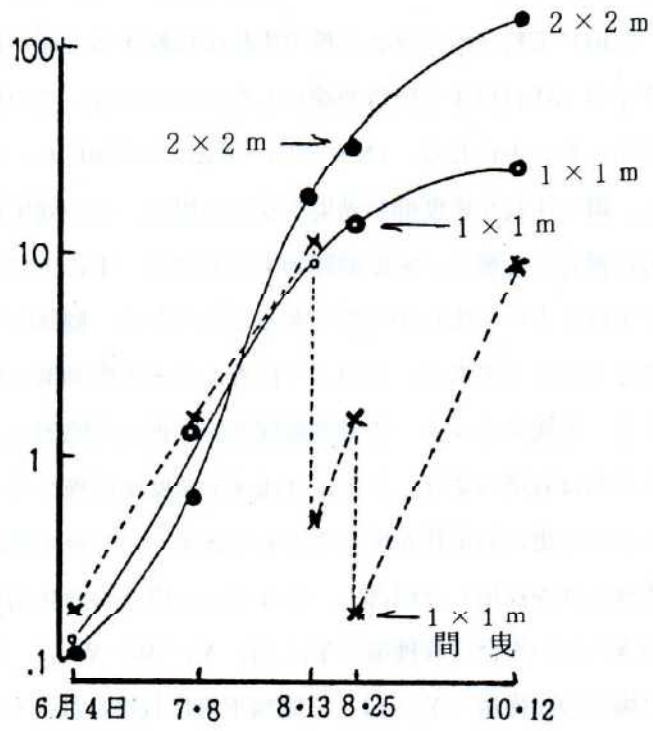
このような管理方式を採用した場合、そうでない場合の浄化効果の比較を次に検討してみる。まず、間引きのない場合の収穫量 (Y_1) は、 $Y_1 = W = W_{\max} / (1 + A \cdot \text{Exp.}[-kt])$ 。一方、間引きした場合の収穫量 (Y_2) は、日間増重量に栽培日数 (t) を乗じたものである。日間増量は、成負曲線の微分型であるから $Y_2 = K \cdot W (W_{\max} - W)$ 。 $W = W_{\max} / 3$ とすると $Y_2 = 2/9 K \cdot W^2_{\max}$ 、近似的に $Y_2 / Y_1 = 2/9 K \cdot W_{\max} \cdot t$ となる。すなわち、間引き方式は、期間が長い程又、成長が速いほど優利であることを示している。かりに $t = 150$ 日、 $k = 0.05$ とすると間引き方式は、栽培末期刈り取り方式に対して、50倍の効率となる。従来、従来ホテアオイによるN、P回収の資算は、(栽培面積×密度×N、P含有率)によって求められているが、ここで検討したように、間引き方式によれば数10倍の効率が得られることがわかる。この方式は、常時、間引きを行う必要がある。このため、その管理に人手を要することになる。

間引きによって、最大効率が得られるかどうかについて、第6図中に、間引きをしたときの例を示したが、0.1kgから10kgに達する間の勾配とほぼ同じ勾配で成長していることがわかる。

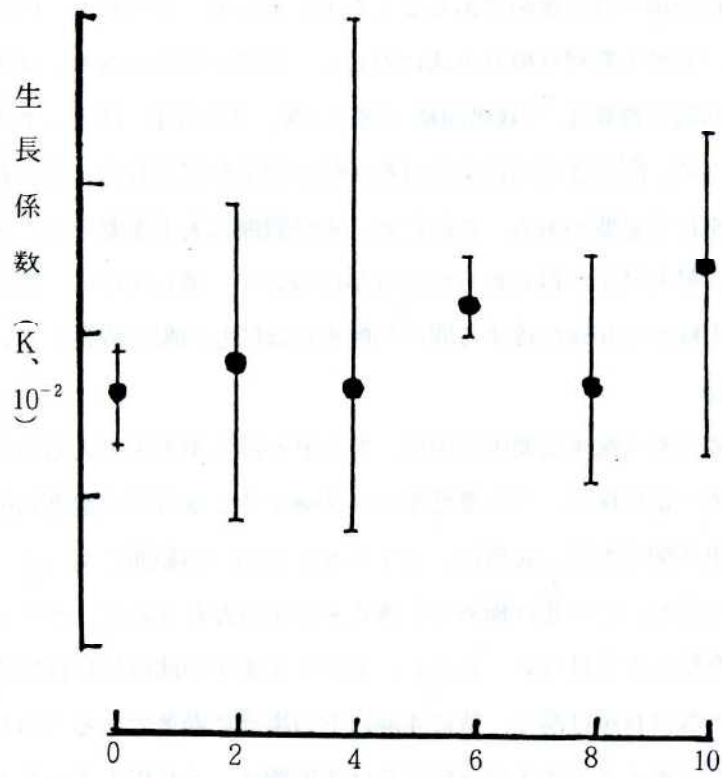
3) 栄養塩濃度と生長

ホテアオイの成長を支配する要因の中で、NとPが最も重要と考えられる。そこで、最初にPの濃度を5ppmで一定に保ち、Nの濃度を0~10ppmまで2ppm刻みの濃度勾配で栽培し、K値を求めたものが、第7図である。K値は、 $5.7 \sim 6.2 \times 10^{-2}$ の範囲にあって、若干高濃度の側で大きいようではあるが、その差は極めて小さくPが十分存在すれば、ホテアオイの生長速度はN濃度の影響を殆んど受けない。しかし、ホテアオイの体成分には影響が及び、Nの濃度が高い程草体中のN含有量は高く、特に4ppm以下の場合に顕著である(第8図)。

以上から、N濃度のホテアオイの成長に及ぼす影響は、それ程大きいものではないように思われる。



第6図 養殖池におけるホテアオイの生長



第7図 N濃度がホテアオイの生長に及ぼす影響

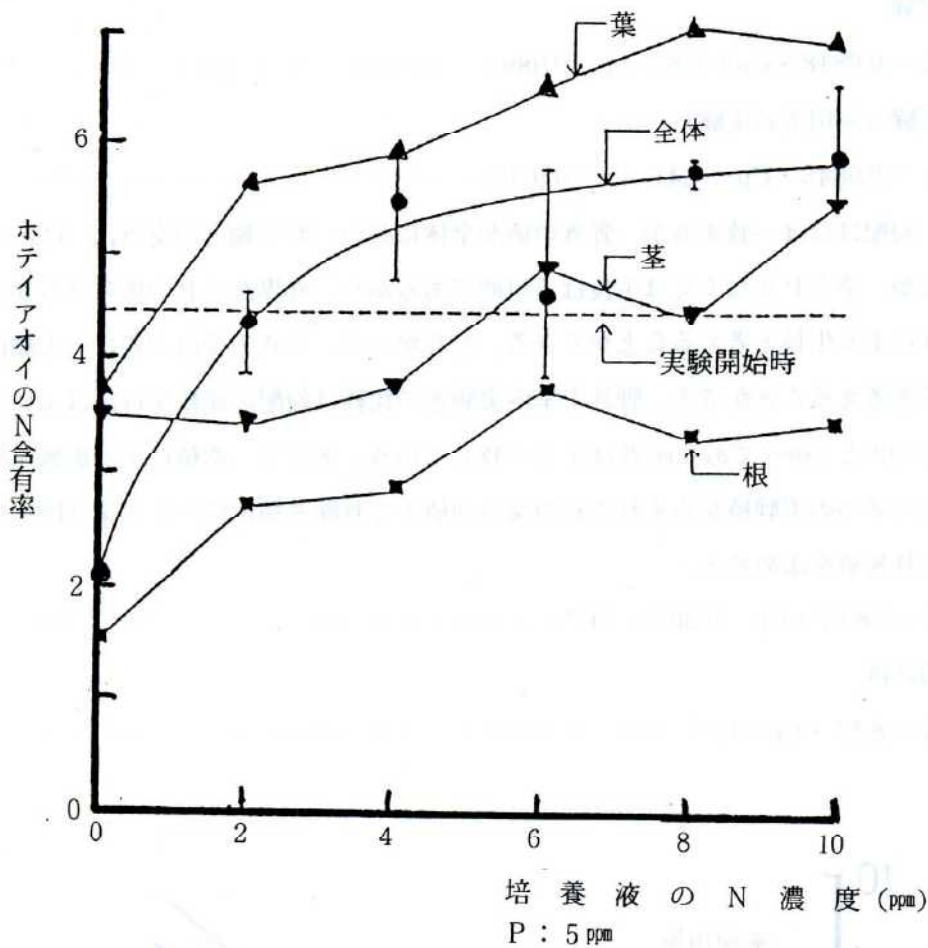


図8図 培養液のN濃度とホテニアオイのN含有率の関係

次に、培養液中のリン濃度がホテニアオイの生長に及ぼす影響について検討を加えた。地下水にPを添加した実験では、K値はP濃度に比例して増大した。また、あらかじめ河川のP濃度を測定し、地点を選定してK値を測定した(第9図)。

室内実験のK値は、0.01 ppmでは 2.1×10^{-2} であるが、P濃度の上昇とともに直線的に増大し、0.10 ppmでは 8.8×10^{-2} に達し、野外で得られる良好な生長に匹敵する値が得られた。なお、P濃度が0の場合の実験はないが、たて軸との交点は+0.9であった。

同様に河川における実験では、最下流の地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $5 \mu\text{g}/\ell$ で、K値は 2.5×10^{-2} であるが、P濃度の上昇とともに直線的に増大し、0.086 ppmでは 8.5×10^{-2} に達した。河川と室内実験のK値を比較すると、全体に河川における成長がやや上方に位置するようである。しかし、直線の勾配はほぼ一致すると思われる。実験および野外における試験のK値とP濃度の関係は、それぞれ

室内実験

$$K = 0.0818 \cdot C_p + 0.85 \quad (r = 0.989) \dots\dots\dots(4)$$

野外実験 (河川での実験)

$$K = 0.0845 \cdot C_p + 1.41 \quad (r = 0.970) \dots\dots\dots(5)$$

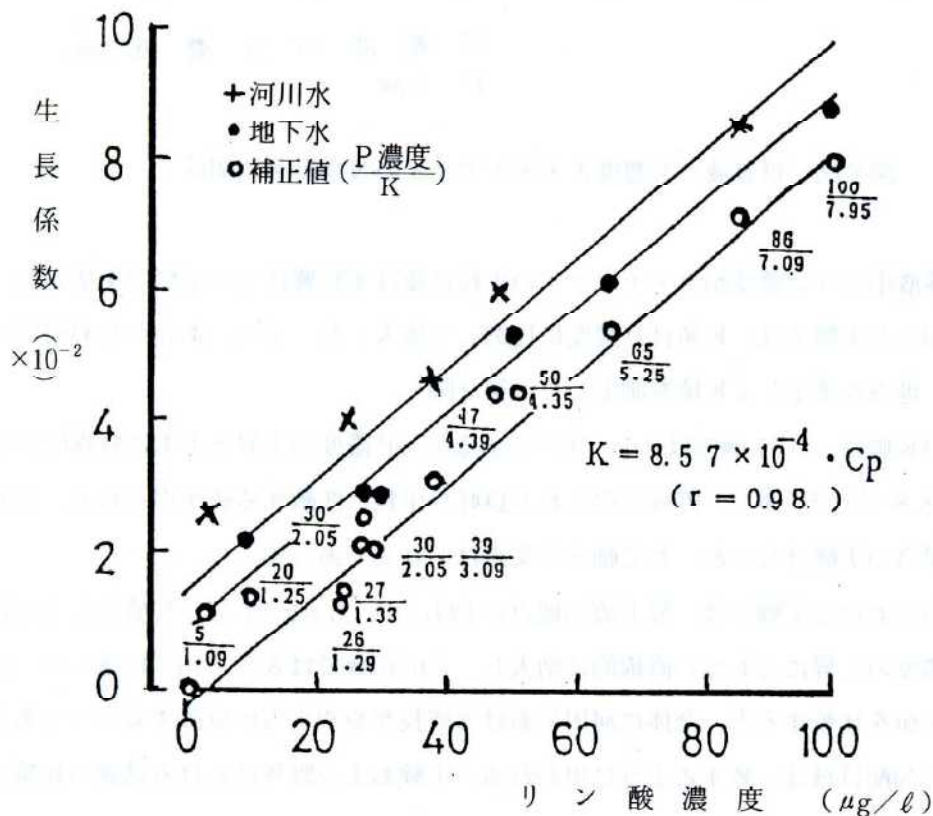
となり、勾配はほぼ一致するが、野外の値が全体に高い。たて軸との交点は、 $C_p=0$ のときK値であるが、全くPがなくては生長は不可能であるから、外界からPの取り込みがなく体内の蓄積だけによる生長と考えることができる。したがって、上式の交点の差は、実験前のP蓄積状態の差と考えることができ、野外と室内実験との比較は勾配の比較を行えばよいことになる。勾配は0.082と0.085であり両者はよく一致している。そこで、蓄積による影響を除去する目的で、この2つの実験値からそれぞれの交点の値をとり除き補正值として第9図中に示した。これによりK値を求めると、

$$K = (8.57 \cdot C_p - 0.30) \times 10^{-4} \dots\dots\dots(6)$$

近似的には

$$K = 8.57 \cdot C_p \times 10^{-4} \dots\dots\dots(7)$$

となる。



第9図 リン酸塩濃度とホテイアオイの生長の関係

4) 生長式の一般化

以上、P濃度のホテイアオイの生長を十分現実の条件の中で検討し、P濃度との間に規則性を認めることができた。河川の実験では、 PO_4-P と同時に無機態N (Ni) が測定してあるが、生長はN濃度には影響を受けていないことがわかる ($K = 9.63 - 3.2 Ni$, $r = 0.432$)。特に流入河川のN濃度が比較的高い点も勘案すれば、ホテイアオイの生長は、栄養塩としては PO_4-P だけを考慮すればよいものと考えられる。

ホテイアオイの生長は、前述したように、水温、pH、塩分、密度、栄養塩によって影響を受けるが、適正な密度で栽培するように管理すれば、生長は密度と PO_4-P で支配されることになる。

まず室内実験で水温 (T) とK値の間に (前述) の関係があった。普通水温と生長の間には指数関係が適用される例が多いが、これはほぼ原点を通る直線である。

一方、 C_p とK値の関係も前述したようにほぼ原点を通る直線であった。また、生長はホテイアオイの現存量に比例することは最初に確かめた点で、本調査の幾多の例で成り立つものであった。したがって、生長式は次式となる。

$$\frac{dw}{dt} = K_G \cdot C_p \cdot W \dots\dots\dots(8)$$

$$W = W_0 \text{ Exp } [K_G \cdot T \cdot C_p] \dots\dots\dots(9)$$

室内実験で得た先のK値は $24^\circ C$ ($22 \sim 26^\circ C$) で、 $8.5 \times 10^{-4} \times C_p$ であったから、 $24K = 8.5 \times 10^{-4}$ 、 $K = 0.354 \times 10^{-4}$ を得る。したがって、生長式として、

微分型

$$\frac{dw}{dt} = 0.354 \times 10^{-4} \cdot T \cdot C_p \cdot W \dots\dots\dots(10)$$

積分型

$$W = W_0 \text{ Exp } [0.354 \times 10^{-4} \cdot T \cdot C_p \cdot t] \dots\dots\dots(11)$$

を得る。(ただし、 C_p は $\mu g/l$)

又、 $27^\circ C$ 以上については、

K値は $9.56 \times 10^{-4} C_p$ で一定となる。

ところで、上式は C_p の濃度によって生長が支配されるとするものであるが、適用範囲については不明である。数多いK値測定例の中で、生長速度が速かったのは、 $0.1 \sim 0.11$ であり、最大値は、8月の養魚池に於ける生長で、 0.132 であった。この値を(11)式に代入すると、 $P =$

0.14 ppmとなる。従って、上式の適用範囲を、0～0.15 ppmと考えれば過大評価は避けられよう。

5) 回収量, すなわち浄化量の算定

ここでの浄化量は、ホテイアオイの取り上げ量であるから、増重量とホテイアオイのN, P含有量の積となる。N含有量については、P濃度に関係なく3.8%である。水分を93%として湿重量の0.34% (3.8×0.07) を(10)式に乗ずればよい。Pについては、P含有率($q \cdot P$)が環境水中の PO_4-P に比例し、

$$q \cdot P = 3.5 \cdot C_p \cdot 0.3 \dots\dots\dots(12)$$

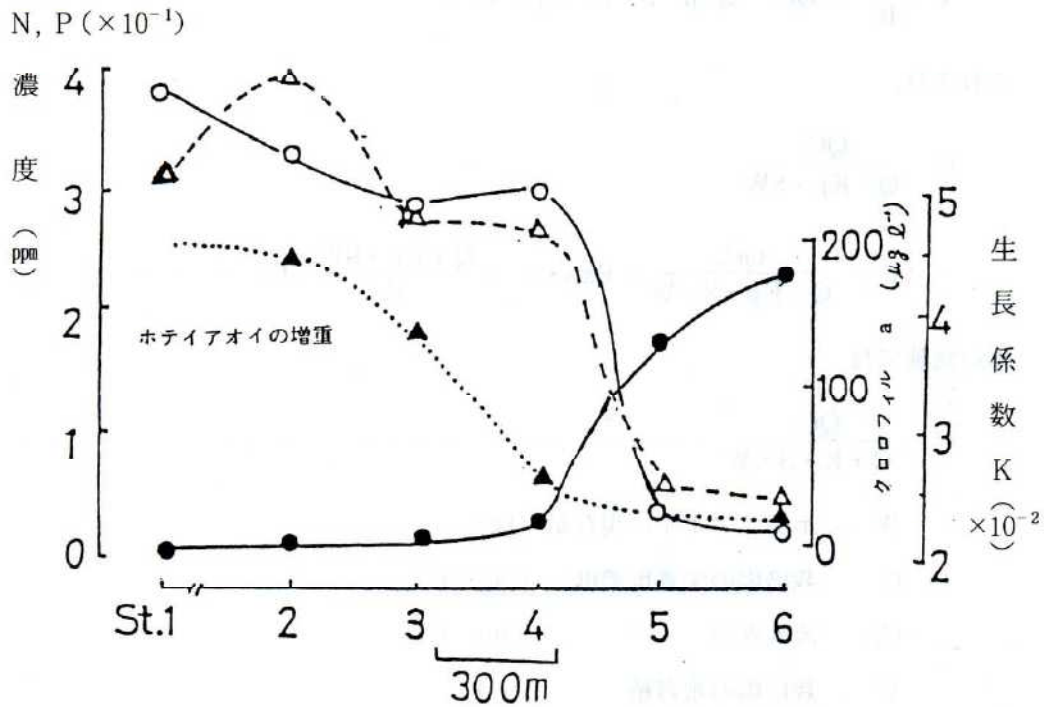
$q \cdot P$: P含有率 (%)

C_p : 環境水中のP濃度 (ppm)

の関係がある。従って(12)式に C_p を代入し $q \cdot P$ を算出し、これを増重量に乗じて求めることができる。

6) 適地の選定

ホテイアオイにN, Pを効率的に吸収させるためには、N, P特にPの濃度が高く、pHが低めの場所を選ぶことが好ましいように思われる。勿論濃度が低くても、それに代わって広大な栽培場が容易に確保できる場合も検討の対象となる。こうしたことを考慮しながら、ここでは霞ヶ浦へ流入する河川として梶無川を選び、玉造町中心部でN, Pの濃度が最も高くなる地点を最上流に選び、この地点から下流、河口までに5地点、更に河口沖 300 mの地点の合計6地点について、ホテイアオイの生長、水質等を測定した(第10図)。無機態の窒素及びリンは、河口から上流1,000 mの地点では、それぞれ3.3および0.04 ppmであるが、下流に行くにしたがって減少し、特に河口から上流1,000 mの範囲で急激に減少している。この栄養塩類の急激な減少は河口付近に分布がみられる *Oscillatoria* を優占種とする植物プランクトンによる消費と考えられる。こうした環境を反映して、ホテイアオイの生長は最上流部で最も高く、K値は 4.5×10^{-2} であるが、河口から300 mの地点では、 2.7×10^{-2} で約1/2の値となる。このように河口近くになって生長が低下する第1の原因は、栄養塩類が河川下流域に分布する植物プランクトンによって消費され、低濃度となる点が考えられる。またそれによってpHの上昇が起こり、ホテイアオイに不利な環境となることがあげられる。霞ヶ浦に流入する河川は、最近の浚渫、拡幅によって流れが停滞し、植物プランクトンの増殖がみられる。このため、梶無川同様河口付近では、pHの上昇と栄養塩濃度の低下が起きているものと考えられる。こうしたことから、ホテイアオイを栽培する地域は、河口から500～1,000 m上流の、植物プランクトンの分布がみられない範囲が適当と考えている。



第10図 河川における環境条件とホテイアオイの生長の関係

7) 浄化モデルの検討

① 水生植物による栄養塩類吸収の系

適地調査の結果から、河川内の pH が低く、リン酸の濃度が高い地点が適地であることがわかった。又、基礎調査の中でホテイアオイの生長がリン酸塩の濃度によって決まることがわかり、K 値を算出できることがわかった。そこで、次に霞ヶ浦に流入する主要河川の $\text{PO}_4\text{-P}$ の値を第 1 表にあげた。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、30~0.2 ppm の範囲にある。この濃度と水温によって水生植物の生産量が決まることになる。ここでホテイアオイの生長量 (dw/dt) とリン酸塩濃度の変化 (dc/dt) は、次式となるから、

$$\frac{dw}{dt} = K \cdot C_p \cdot W \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$V \frac{dC_p}{dt} = QC_1 - QC_p - Kp \cdot C_p \cdot W \quad \dots\dots\dots (14)$$

2 式を解いて、濃度を予測できる。しかし、現実には一定面積の栽培場に常に上限に近い量を維持し、生長量分を間引くことによって最大浄化を果たすことができるから栽培場の面積を S として(14)式は、

$$V \frac{dC_p}{dt} = QC_1 - QC_p - S \cdot K \cdot C_p \cdot W \dots\dots\dots(15)$$

これより、

$$C = \frac{QC_1}{Q + K_p \cdot S \cdot W}$$

$$= \left(C_0 - \frac{QC_1}{Q + K_p \cdot S \cdot W} \right) \text{Exp} \cdot \left[- \left(\frac{Q + K_p \cdot S \cdot W}{V} \right) t \right] \dots\dots\dots(16)$$

平行状態では、

$$C = \frac{QC_1}{Q + K \cdot S \cdot W} \dots\dots\dots(17)$$

- W : ホテイアオイの現存量 (kg)
- C : 栽培場の栄養塩濃度 ($\mu\text{g}/\ell$)
- C_p : 流入水の " ($\mu\text{g}/\ell$)
- V : 栽培場の水容積 (ℓ)
- S : " の面積 (m^2)
- K_p : 栄養塩収収係数 (2.07 × T T=27℃で, 56)

(17)式より、浄化目標としての水質、P濃度が決まれば、目標達成に必要な栽培面積(S)を求めることができるし、栽培面積が決まれば浄化される水質を予測することができる。

第1表 霞ヶ浦へ流入する河川の水質予測

項 目		境 川	山王川	清明川	梶無川	一瀬川	花室川	園部川	恋瀬川	小野川	桜 川	
A. 流量 (m ³ /日)		32.8	36.8	37.1	47.5	56.6	112.3	112.3	187.4	334.3	718.8	
B. PO ₄ -P (ppm)		0.14	0.22	0.075	0.050	0.040	0.070	0.100	0.039	0.089	0.030	
C. A × B (kg)		4.6	8.0	2.8	2.4	2.6	7.8	11.4	7.3	29.8	21.5	
D. ホテイアオイ導入後のP	1	P	0.008	0.013	0.005	0.004	0.004	0.02	0.017	0.010	0.033	0.017
	ha	P/B()	5.7	5.9	6.7	8.0	10.0	17.1	17.0	25.6	37.0	56.7
	1,000	P	0.051	0.087	0.030	0.023	0.023	0.046	0.068	0.030	0.076	0.027
	m ²	P/B()	36.4	39.5	40.0	46.0	57.5	65.7	68.0	76.9	85.4	90.0
浄化目標現状の80%		m ²	147	149	152	194	232	460	460	768	1371	2948
浄化目標現状の50%		m ²	336	337	380	486	580	1156	1152	1921	3428	7371

4. 検証実験

本試験は、水生植物による水質改良技術に開発を目的としている。ここでは、水生植物のN、P吸収能が、水質改良、環境保全の主役であり、技術の担い手であるが、水生植物のN、P吸収能を水質保全技術の中にどう位置づけるか、又、技術の実体をどのように考えておけばよいかという点が問題となる。この点について、本試験では、技術の定義について、「実践の場における規則性・法則性の意識的適用」という立場をとって来た。すなわち、浄化機能を最大に発揮させるための水草の栽培・管理基準と、その時の水質予測の手法を目ざす技術と考えて、試験をすすめ、以上の結果を得た。しかし、技術を確立させるための条件の一つとして、その有効性と再現性を保障しておくことが必要である。こうした観点から、上記の結論を検証するための3つの実験を行った。

(1) 止水池における検証実験

ホテイアオイによる水質浄化の予測は、(13)および(14)式によるが、止水池で試験を行う場合流量 $=Q=0$ であるから、(14)式は、

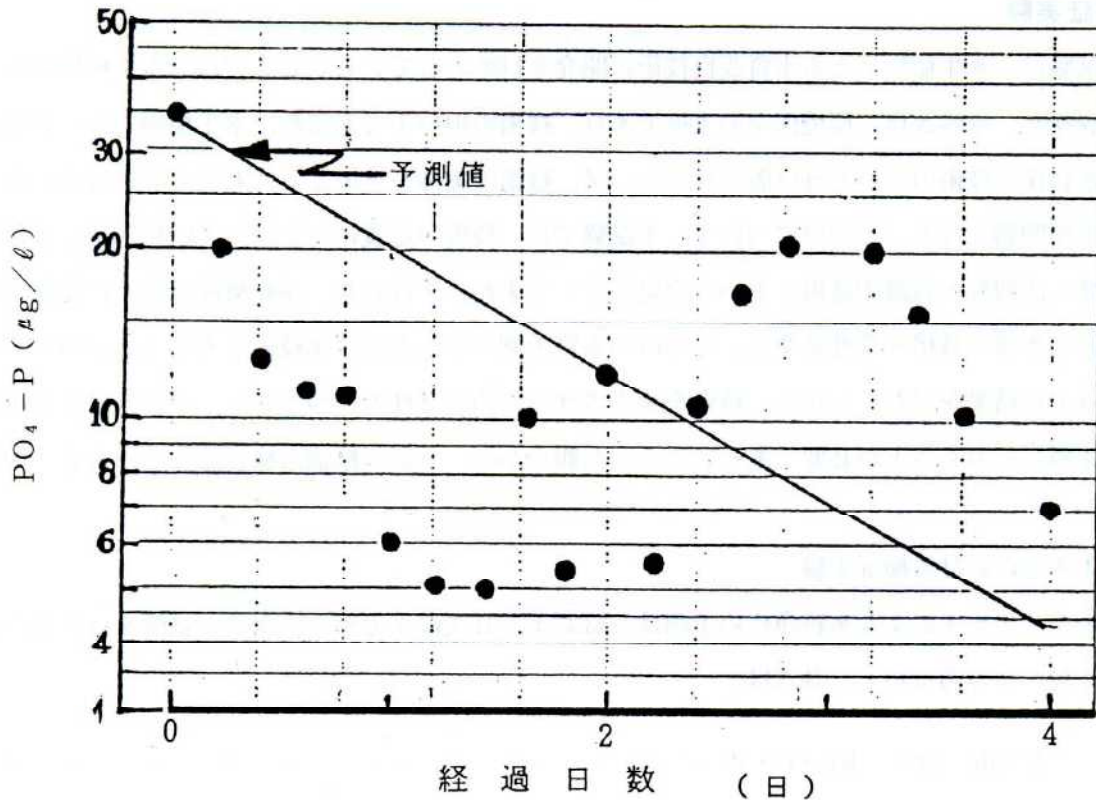
$$V \cdot dc/dt = -K_p \cdot C \cdot W \quad \dots\dots\dots(18)$$

となる。ホテイアオイの生長を無視できる実験期間を選べば、(18)式から簡単に検証を行うことができる。(18)式を積分して、

$$C = C_0 \cdot \text{Exp}(-K_p \cdot W \cdot t/V) \quad \dots\dots\dots(19)$$

となる。

水容積432ℓ、実験開始時のP濃度35μg/ℓ、ホテイアオイの湿重量を4kgとして、実験を行った。実測値のPは、実験開始時に35μg/ℓであったものが、約1日で指数曲線にしたがって急激に減少し、30時間後には5μg/ℓに低下した。この間の減少傾向は、 $C = C_0 \cdot \text{Exp}(-1.51t)$ に従っている。第11図中の実線は、予測である。(19)式中()内の値は、 $(56 \times 4)/432 = 0.518 \cdot t$ であり、 $C_0 = 35$ としてP濃度の変化を示したものである。予測値に比較すると実測値は、実験開始から約30時間の範囲にわたって急激な減少を示した。2日目にはいと濃度は、逆に上昇し約20μg/ℓに達したが、3日目にはいと再び減少した。この減少は、第1日目の減少に比較すると、勾配は、若干ゆるやかであるが、予測値に比較すると依然として大きい。実測値の勾配は-1.51であった。ここから、 K_p を逆算すると、 $4 \times K_p / 432 = 1.51$ から $K_p = 163$ を得るが、これは、ホテイアオイの生長とP含有量から求めた56の約3倍である。P濃度が、3日目に入り上昇している点を考慮すると、ホテイアオイのP吸収速度が一定でないばかりでなく、分解等による $\text{PO}_4\text{-P}$ の放出が生じているのではないかと考えられる。この



第11図 止水池における検証。
ホテイアオイ投入後の PO_4-P の変化

点については、本試験ではとりあげなかったが、予測をよりたしかなものとするためには、今後検討を必要とする課題である。

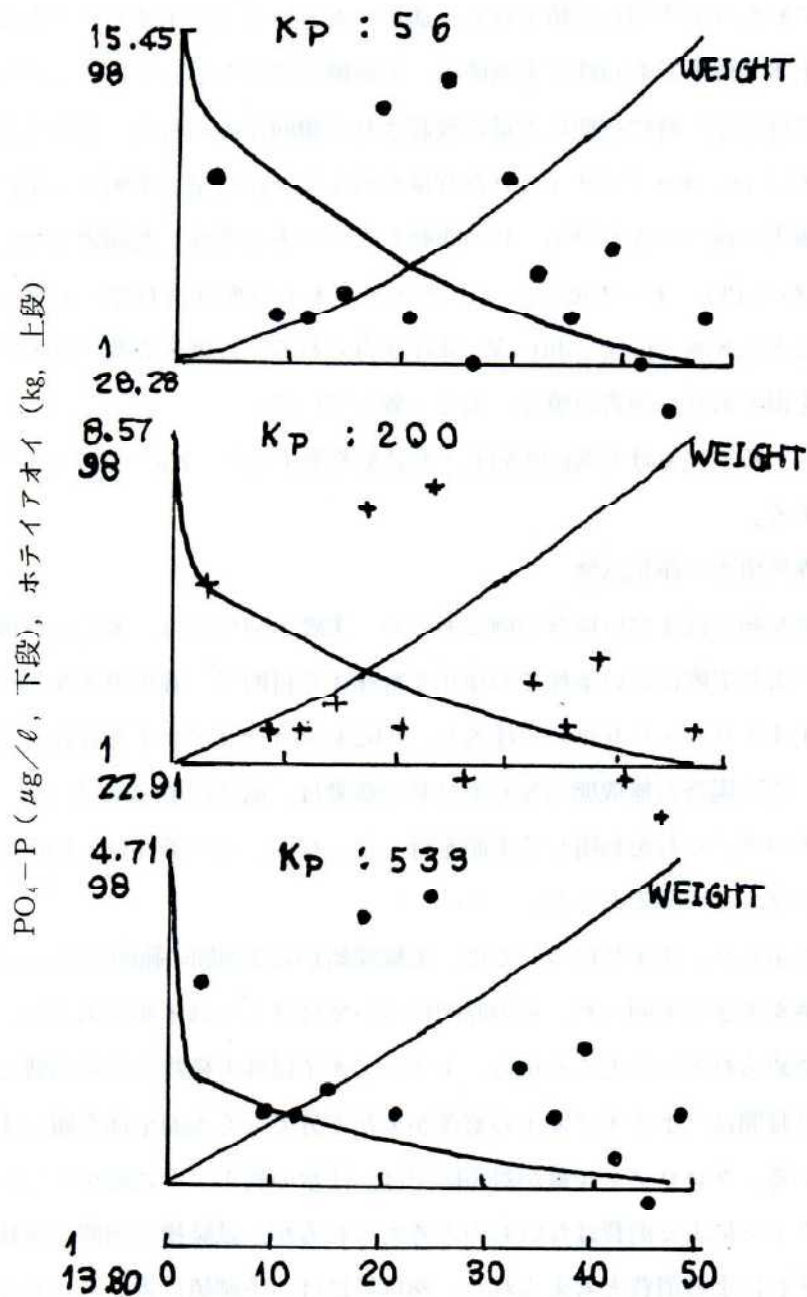
以上のように、実測値は、予測と異なり、極めて大きな変動を示した。ごく大まかにみれば、2日の周期をもつ変動のように見ることもできる。そう考えると予測値の周辺を或る振幅を保ちながら変動しているものと見ることもできる。しかし、それを確かめるには、更に長期にわたる実験が必要となるが、Wがそれにともない変動することになる。したがって、流水実験とし、しかも(13)(14)式を利用した長期間の試験が必要となる。

又、本試験で得られたもう一点は、水生植物による栄養吸収の測定から、浄化力を算定しようとする場合には、過大評価にかたむく傾向があり注意を要することである。

(2) 流水池における検証実験

止水条件下における検証実験では、ホテイアオイの栄養塩吸収が一定でなく大きな変動を示す。このことから、検証のためには比較的長期の実験が必要であることがわかった。そこで、ここでは $Q = 446 \text{ l/日}$, $Co = 90 \text{ μg/l}$, $W_0 = 1.0 \text{ kg}$ の条件で50日間をわたり、3日間隔で PO_4-P の測定を行った。(第12図)。 PO_4-P の濃度は、実験開始時に 90 μg/l であるが、最初

の10日間で急激な減少を示した。その後は、数回の上昇を示したが、全体としては、減少に向かい45日目、48日目には、それぞれ10および30 $\mu\text{g}/\ell$ に低下した。これらの実測値を予測と比較して示したものが第12図である。同図中、上段は、 $K_p=56$, $Q=446$ (ℓ/day), $W_0=1.0$, $C_0=90$, $V=432$ として、前述のように4次 Runge-Kutta 法によって(13), (14)式の近似解を求めたものである。止水池における場合と同様に変動は大きいが、予測値にそって振幅をくり



第12図 流水池におけるホテイアオイ投入後の現存量および $\text{PO}_4\text{-P}$ の予測と実測の比較

かえしながら減衰していく。特に、最初の6日間の減少が予測値を大幅に下まわっているがこれは、ホテイアオイのP吸収特性による結果と考えられる。又、全体として振幅を示しながら減衰していく減少も同様の原因によるものと考えられる。

下段は、実測値の下限に適合する K_p を探索し、 $K_p = 533$ として予測を行ったものであり、実測値の下限は、この予測値とよく一致している。下限値の K_p は、生長とホテイアオイの組成から求められた $K_p = 56$ の約10倍にも達する値である。このことは、ホテイアオイのP吸収能は比較的長期にわたって平均した値よりも、遥かに大きいことを示すものである。こうした傾向は、前述の止水条件下でも同様で実測値は、予測値の3倍を示している。このようにPの吸収は、定常的ではなく、特に初期に大量に吸収される傾向がみられる。このことについて、今岡・寺西(1985)は、ホテイアオイのP含有量を最小リン含有量と余剰リン量に分けて整理しているが、本報告で述べてきた PO_4-P の変動もこのことと関係した問題であるものと考えられる。 $K_p = 56$ から $PO_4-P = 100 \mu\text{g}/\ell$ 、ホテイアオイの水分含有量=93%としてP比吸収速度を算出すると $0.8 \text{ mg-p/g-day W/day}$ が得られる。今岡・寺西(1985)は、実験的に $0.4 \sim 1.2 \text{ mg}$ を得ており、両者の値は、よく一致している。

以上の検討から、 27°C における K_p 値を56、水温を考慮すると、 $K_p = 2.07 \times T$ として、 C_p の予測が可能である。

(3) 有機物の多い養魚用水の浄化試験

以上は、有機物を殆ど含まない場合の例であるが、実際の河川では、多くの有機物が含まれている。そこで、より実際に近い条件での浄化を吟味する目的で、養魚用水を $2.88 \text{ m}^3/\text{日}$ の割合でコンテナ ($1.4 \times 0.6 \times 0.6 \text{ m}$) に注入し、 0.62 kg のホテイアオイを収容し栄養塩等の水質分析を行った。この場合の無機態のNおよびPの変動は、前述の(17)式によった。ここでは、 W が測定してあるので、これを利用して予測を行った。なお、この条件は、 $K_p = 56$ 、 $N = 224$ 、 $W_0 = 0.62$ 、 $W_t = 22$ 、 $t = 63$ であった。

結果を第2表に示した。まずPについては、実験開始から3週間の範囲で高く、流入水の1/2の濃度で予想値を大きく上回った。その原因については詳しくは不明であるが、Nについても同様の傾向が認められているところから、ホテイアオイ以外の植物による消費と考えられた。この初めの約1カ月間は、ホテイアオイの繁茂が未だ十分でなく水面全体を覆わず太陽光線が試験区に入っている。クロロフィル量が対照区では、注水の約1/2に減少しているところから、植物プランクトンによる消費はないものと考えられるが、試験槽の内側に糸状藻類が付着したところからそれによる消費と考えられた。28日目には、予測値に近いところまで低下しているが、35日目には注入水の PO_4-P が 0.015 ppm であったのに対し、 0.040 ppm と試験槽内での増加が起こった。この時期の試験槽表面は、ホテイアオイで覆いつくされており、酸素量の低

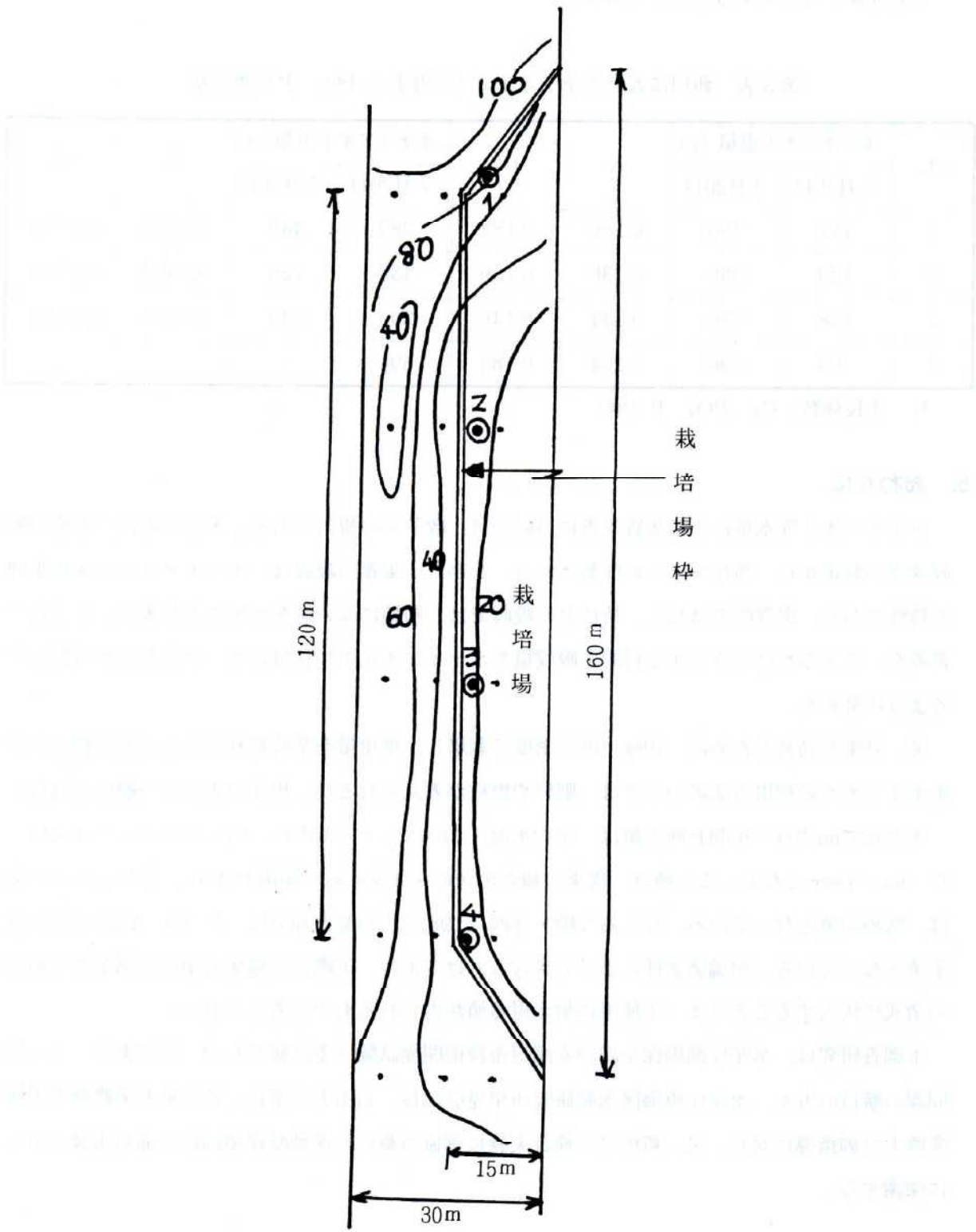
下による溶出とみられた。その後、51及び63日日には流入水の20%以下を示していた。このようにPについては、実測値が予測値を大きく上回ることが多く、予測技術の評価は困難であった。おそらく、沈澱・溶出等ホテイアオイの吸収以外の要因が関係していることが考えられる。実際に事業を実施するに当たっても、こうした点は十分に考慮しなければならない点であろう。

次に無機態のN (Ni) については、 PO_4-P 同様初めの3週間に低めの値を示すことは前述した通りである。しかしその後の4回の測定では、予測値を上回りはするが、殆ど同じ傾向で濃度の減少を示した。51及び63日日の実測値は、予測値よりも50%多めに低下していた。実測値が高めであった理由としては、他の植物による吸収や、酸素量が殆ど0で、 NO_4-N が多いところから脱窒も考えられるが解明はできなかった。

この実験で重要な点は、実際に1ha程の規模で実施した場合に、N、P吸収以外の様々な浄化が複合的に起こることが予想されることである。例えば、比較的小さい河川での流量は、約30tであるが、水深50cmとして、1,000 m^2 および10,000 m^2 の池の滞留時間は、それぞれ16.6日および166日となる。最大流量の桜川でも0.7日及び7日であり、本実験の0.1日に比較してきわめて大きい。本実験においてもSS、T-P、T-N等の懸濁物質の大幅な減少がみられておりホテイアオイの吸収以外にも沈澱、脱窒等副次的効果も見逃せない。

(4) 新川における検証

流入河川のうち比較的流量の少ない河川では、1,000 m^2 程度の栽培面積で有効であろうと推定された。茨城県環境局では、新川において2,100 m^2 のホテイアオイの試験栽培場を設置し浄化試験を実施している。この施設を利用して、試験池内の4地点(第13図)において個体識別した個体の生長を測定し、生長速度からリン酸塩濃度を推定した。ホテイアオイの繁茂状況は、7月8日には、全面積の1/3程度を被う程度であったが7月15日には約80%、7月21日にはほぼ全面を被いつくしていた。第1回目の実験(7月8~20日)の実験ではホテイアオイの生長は極めて速く、K値は0.12~0.16と実験結果を上廻る程であり、この値から推定したリン酸塩濃度 C_A は0.14~0.18であった(第3表)。これに対しホテイアオイの繁茂がすすんだ第2回目の実験(7月20~28日)では生長速度は0.05~0.07に低下しリン酸濃度が低下していることが示唆された。K値から推定した C_A は、0.06~0.03 ppmの範囲にあって、前述した流入河川のうちの小河川の予測と比較的よく一致していた。又、7月21日には、11:00~12:00時の間に河川のリン酸塩濃度の測定を行い第13図の結果を得たが、この値も上流で0.10 ppmであるものが、下流では0.02~0.06 ppmとなっており、ホテイアオイによるリン酸塩の除去効果が極めて大きく、しかも前述の予測値とよく一致していることがわかる。本試験では、ホテイアオイの植栽が川幅の半分であることから、河川水が植栽場の沖側を流下し効率が低下するのではないかと考えられたが、予想に反し、極めて良い結果が得られた。栽培方法の空間的検討につい



第13図 新川におけるホテイアオイ栽培場
 付近の PO_4-P の分布 ($\mu g/l$)。
 1988年7月21日 11:00~12:00。

ても今後一考を要するところである。

第3表 新川におけるホテイアオイの生長と PO_4-P の推定値

st.	ホテイアオイ重量 (g)		K	C_A	ホテイアオイ重量 (g)		K	C_A
	7月8日	7月20日			7月20日	7月28日		
1	117	760	0.156	0.182	280	440	0.0565	0.0662
2	129	660	0.136	0.159	430	730	0.0662	0.0756
3	158	770	0.124	0.145	390	640	0.0619	0.0722
4	93	590	0.154	0.182	590	-	-	-

K：生長係数， C_A ： PO_4-P (ppm)

5. おわりに

ホテイアオイ等水草による水質改善については、数多くの報告がある。多くの場合、栄養の吸収速度の測定から、浄化モデルが作製される。しかし、栄養の吸収は、ホテイアオイの栄養生理的特性等から、定常的ではなく、特にPの吸収では、初期に高い値を示すことが多い。こうした誤差を、できるだけ小さくする目的で吸収量をホテイアオイの生長量とN、P含有量から推定するように努めた。

又、効果を高めるために、 $10\text{kg}/\text{m}^2$ の密度で栽培し、増重量を常時刈り取る方式を目標とした。ホテイアオイの利用方法については、肥料や燃料が考えられるが、現在のところ一般的ではない。

本方式でha当りの年間P除去量は、平均水温 = 22.5°C 、 $t = 150$ 日、 $C_p = 100$ として $460\text{kg-P}/\text{ha}/\text{Year}$ となる。この値は、従来の報告の $300 \sim 1,300\text{kg}$ の範囲にあり、どちらかといえば、低めの値となっている。むしろ今岡・寺西 (1985)⁴⁾の最大 $600\text{kg-P}/\text{ha}/\text{Year}$ に近い推定値となっている。勿論諸条件によって異なるわけであり、実際に実施する地域の諸条件を前述の諸式に代入することによって使用に耐え得る値が得られるものと考えられる。

本調査研究は、水産庁漁場保全課の赤潮対策技術開発試験 (委託研究) の一部である。この間、同課の職員の方々、水産庁東海区水産研究所里見弘部長、石田力三室長、名古屋大学教授半田暢彦博士の御指導に対し、又、新川での検証実験に御協力戴いた茨城県環境局霞ヶ浦対策課の方々に深謝する。

参考文献

- 1) 喜納政修・屋良朝徳：ホテイアオイの生長と硝酸性窒素吸収におよぼす個体密度の影響水質汚濁研究 8 (5), 1985.
- 2) 沖 陽子・伊藤操子・植木邦和：ホテイアオイの生育及び繁殖に関する研究, 雑草研究23, 1978.
- 3) Pieterse, A.H.(1978) : Abstracts on tropical agriculture. 4 (2), 942
- 4) 今岡 務・寺西靖治：ホテイアオイの栄養塩吸収能を利用した水質浄化に関する研究, 水質汚濁研究 8 (56), 1978.