

自然水域における水質変動とホテイアオイ *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms の生長特性*

青山 勲・沖 陽子
西崎日佐夫・中川恭二郎

緒 言

河川や湖沼における水質汚濁は、水資源問題、環境保全、さらには生物体の生命維持の点からも重要な問題を呈している。近年、特に水系の富栄養化現象は水質汚濁の中でも対策の困難な問題の一つとなっている。このような状況のもとで、本研究は次の3点を明らかにすることを目的として行なわれた。

(1) 河川や湖沼などの自然の水域において、水質と水生植物の相互作用の結果として、水質が水生植物の生育に与える影響および、逆に水生植物の異常な繁殖が水質にどの程度の影響を与えうるかを明らかにすること。

(2) 近年特に水利上問題になっているホテイアオイ (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) をとりあげ、自然水域における生長特性を解析すること。

(3) ホテイアオイの旺盛な生長力と窒素、リンの吸収能に着目し、自然生態系の中で水質浄化手法の一つとしての位置付けとその可能性について検討すること。

ホテイアオイに関する研究は、外国では既に古くから着手されており、その生物学的特性に関する基礎的研究^{7,9)} から、水質浄化法や生物エネルギーその他への利用法などへの応用^{10,13,14)} まで広範な研究が行なわれている。わが国においてもホテイアオイの発生分布や繁茂地の実態、その生理生態的特性などについての研究あるいは利用化の可能性などについての研究が行なわれている⁸⁾。しかし、自然水域下において長期的なホテイアオイの生育を観測した研究例は少なく、またその生長特性の解析や水質浄化法への利用についても設計指針を得る程には十分定量的な考察がすすめられていないのが現状である。本論文では、上述のうち、(1)、(2)に重点をおき、これらの研究目的を達成するための基礎資料を野外観測によって得ようとするものである。

本論文に記載された日射量のデータは岡山大学農業生物研究所微細気象学研究室で観測されたものである。関係者に謝意を表す。試料の分析に際して御協力頂いた野木真理子技官に感謝する。

実験材料および方法

岡山県南部に所在する児島湖およびその湖内に流入する河川の一つである倉敷川の河口

昭和56年1月19日受理

* 本研究は昭和55年度文部省科学研究費「環境科学」特別研究、「児島湖およびその集水域における水質物質の動態」(研究代表者青山 勲) R12-19 No. 503524の研究の一環として行なわれたものである。

から約 2 km 上流の 2 地点を実験場所として設定した。児島湖縮切堰堤の樋門から海水が流入するために、湖水は倉敷川の河川水よりいく分塩分濃度が高い。それ故、ホテイアオイの生長におよぼす塩分の影響をも検討するために両地点を選定した。両地点の沿岸水域に、塩化ビニール製パイプ（直径 30 mm）で一定面積の枠（1 m × 4 m、各実験区について 2 連ずつ）を作成し、これを 30 cm 角の発泡スチロールを用いて、水面上約 20 cm の高さに浮かせ、竹杖とロープで水面上に固定し、その中でホテイアオイを栽培した。枠の周囲には幅約 50 cm の漁網をくくりつけ、これをコンクリート塊の重りで吊るし、ホテイアオイが外部へ散逸するのを防いだ。2 地点ともに同一面積を有する 2 反復の実験を行なった。第一の実験区では、実験期間中に、ホテイアオイの被度が 100% に達した後は、現場での観測作業の終了後、半量を収穫し、生育期間中、密度効果による生育阻害が起らないように管理した。この実験区を収穫管理実験区と呼ぶことにする。第二の実験区では、栽培開始後、ホテイアオイの収穫作業を一切行わず、自然のままに放置し、密度効果による生長の飽和性を検討した。この実験区を自然放置実験区と呼ぶ。

1980 年 5 月 28 日に、あらかじめファイトロン内で水耕栽培したホテイアオイの成株、5 株（新鮮重で合計約 300 g）を各実験区に投入した。実験開始後、約 2 カ月間は 10 日間隔で、それ以後はほぼ毎月 2 回全実験区について、株数、葉数、草高、新鮮重を現地観測し、水質およびホテイアオイの乾物重、窒素、リン含有量は実験室に持ち帰って後測定した。

実験結果および考察

1. 水質の変動特性

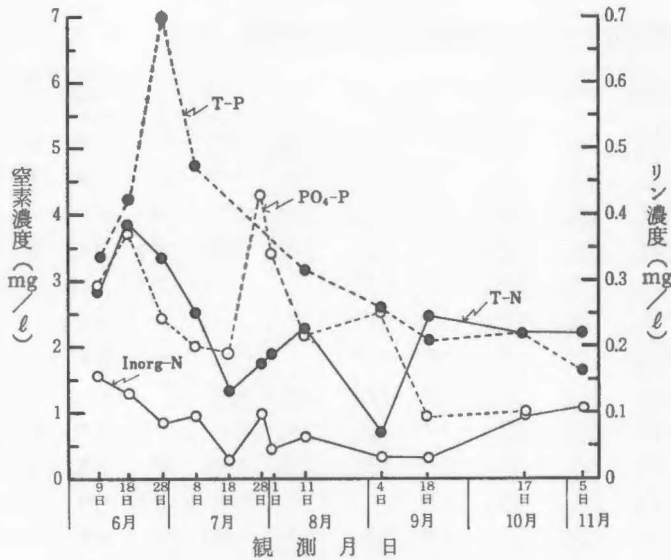
実験期間中の観測時に採取した水の全分析値を第 1, 2 表に示す。第 1 表は児島湖湖水、第 2 表は倉敷川河川水の分析値である。表中の亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 濃度の下に記載されたかっこ内の数値は無機態窒素 (Inorg-N) 分に対する比率、Inorg-N、有機態窒素 (Org-N) のかっこ内数値は全窒素 (T-N) に対するそれぞれの存在比、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$)、有機態リン (Org-P) のそれは全リン (T-P) に対する比率を表わしている。第 1, 2 図には児島湖および倉敷川の栄養塩濃度の季節変化を表わしている。自然水域において、月 2 ~ 3 回程度の観測で水質変動の季節特性を断定することは、観測値の変動誤差を考えると困難ではあるが、全般的には、栄養塩濃度は 6 月末から 7 月上旬に高いピークがあり、夏から秋にかけて減少傾向がみられた。観測期間中の平均 T-N、T-P 濃度はそれぞれ、湖水で $2.3 \pm 0.8 \text{ mg/l}$ 、 $0.35 \pm 0.17 \text{ mg/l}$ で、河川水では $2.8 \pm 1.0 \text{ mg/l}$ 、 $0.38 \pm 0.11 \text{ mg/l}$ で、特に P 濃度の高い富栄養型の水域となっている。しかし T-N と T-P の水質変動の相関は乏しく、主要な汚濁源は異質なものと考えられた。湖水中の T-N の季節変動に対して、Inorg-N の変動はゆるやかで、湖水の T-N の主要な変動要因は Org-N によるものであり、T-N 中に占めるその割合は平均 65.4% であった。一方河川水では逆に Inorg-N の変動は T-N の変動に追随しており、その比率は平均 66.2% であった。Inorg-N 中の $\text{NO}_2\text{-N}$ の占める割合は湖水、河川水ともに低く 3 ~ 4% であった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、湖水では $\text{NO}_3\text{-N}$ が Inorg-N 中の 65% を占めたのに対して、河川水では約 47% で $\text{NH}_4\text{-N}$ とほぼ同程度であった。これらの比率は水の酸化状態によって変化するもので、化学形態の差異が生物による利用可能性を支配する重要な因子となる。T-N 濃度は河川の方が高く、

第1表 児島湖のホテイアオイ栽培地点における水質変動 (mg/l)

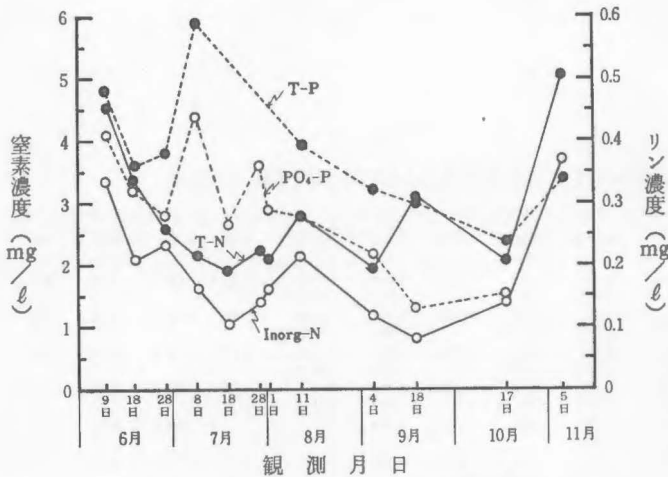
採取年月日	NO _x -N	NO _r -N	NH ₄ -N	Inorg-N	Org-N	T-N	PO ₄ -P	Org-P	T-P	Cl	COD	SS
55 6 9	0.088 (5.5)	0.902 (56.7)	0.598 (37.8)	1.59 (56.6)	1.23 (43.4)	2.81	0.293 (87.2)	0.043 (12.8)	0.336	120	6.08	22.0
6 18	0.120 (9.0)	0.964 (72.5)	0.249 (18.5)	1.33 (34.6)	2.51 (65.4)	3.85	0.370 (87.1)	0.055 (12.9)	0.426	140	7.20	31.0
6 28	0.006 (0.7)	0.381 (43.8)	0.482 (55.5)	0.87 (26.0)	2.48 (74.0)	3.35	0.242 (33.9)	0.476 (66.1)	0.714	193	15.9	50.0
7 8	0 (0)	0.712 (72.7)	0.272 (27.3)	0.98 (39.0)	1.53 (61.0)	2.51	0.200 (42.7)	0.268 (57.3)	0.468	43.4	13.6	40.5
7 18	0.015 (5.6)	0.120 (44.4)	0.130 (50.0)	0.27 (19.9)	1.09 (80.1)	1.36	0.177			87.3	7.21	29.6
7 28	0.024 (2.4)	0.576 (58.2)	0.390 (39.4)	0.99 (56.6)	0.76 (43.4)	1.75	0.432				7.81	
8 1	0.008 (4.1)	0.249 (56.6)	0.180 (39.3)	0.44 (23.1)	1.49 (76.9)	1.91	0.340				11.4	
8 11	0.016 (2.5)	0.433 (67.7)	0.194 (29.8)	0.64 (27.6)	1.68 (72.4)	2.32	0.215 (67.8)	0.102 (32.2)	0.317 (67.8)		11.0	
9 4	0.007 (2.1)	0.304 (92.1)	0.015 (5.8)	0.33 (47.1)	0.38 (52.9)	0.70	0.257 (98.9)	0.003 (1.1)	0.260	26.7	6.39	38.4
9 18	0.024 (7.3)	0.274 (83.0)	0.032 (9.7)	0.33 (13.3)	2.16 (86.7)	2.49	0.094 (44.8)	0.116 (55.2)	0.210 (44.8)	107	7.87	30.4
10 17	0.036 (3.7)	0.610 (62.2)	0.337 (34.1)	0.98 (44.0)	1.24 (86.0)	2.23			0.224	38.7	8.51	48.4
11 5	0.016 (1.5)	0.766 (70.3)	0.306 (28.3)	1.09 (48.8)	1.14 (51.2)	2.23	0.100 (60.2)	0.124 (39.8)	0.166	240	10.0	28.0
平均値	.030 ±.037	.524 ±.273	.263 ±.137	.82 ±.42	1.47 ±.65	2.29 ±.84	.247 ±.106	.148 ±.154	.347 ±.170	110 ±72.3	9.41 ±3.05	35.4 ±9.6
比率	(3.7 ±2.7)	(65.0 ±14.4)	(31.3 ±14.8)	(34.6 ±17.3)	(65.4 ±17.3)		(65.3 ±24.0)	(34.7 ±24.0)				

第2表 倉敷川のホテイアオイ栽培地点における水質変動 (mg/l)

採取年月日	NO _x -N	NO _r -N	NH ₄ -N	Inorg-N	Org-N	T-N	PO ₄ -P	Org-P	T-P	Cl	COD	SS
55 6 9	0.096 (2.9)	0.936 (27.9)	2.320 (69.2)	3.35 (73.6)	1.20 (26.4)	4.55	0.412 (85.5)	0.070 (14.5)	0.482	53.4	4.08	33.5
6 18	0.128 (8.1)	0.936 (44.8)	1.026 (49.1)	2.09 (62.4)	1.26 (37.6)	3.35	0.317 (88.5)	0.040 (11.5)	0.358	44.2	5.63	16.5
6 28	0.012 (0.5)	0.785 (33.5)	1.544 (66.0)	2.34 (90.0)	0.26 (10.0)	2.60	0.276 (73.4)	0.100 (26.6)	0.376	45.0	4.84	16.0
7 8	0.080 (4.9)	0.606 (37.2)	0.942 (57.9)	1.63 (75.1)	0.54 (24.9)	2.17	0.441 (33.9)	0.156 (66.1)	0.597	32.5	7.54	24.8
7 18	0.064 (6.9)	0.498 (47.4)	0.486 (45.7)	1.05 (55.0)	0.86	1.91	0.263			28.6	4.08	30.0
7 28	0.072 (5.1)	0.696 (49.9)	0.636 (45.0)	1.4 (82.2)	0.84 (3.78)	2.25	0.363				9.30	
8 1	0.056 (3.5)	0.620 (39.0)	0.914 (5.5)	1.59 (75.4)	0.52 (24.6)	2.11	0.291				5.99	
8 11	0.040 (1.9)	0.912 (42.4)	1.198 (55.7)	2.15 (75.4)	0.70 (24.6)	2.85	0.276 (70.8)	0.114 (29.2)	0.390		6.68	
9 4	0.048 (4.1)	0.708 (60.0)	0.423 (35.9)	1.18 (60.5)	0.77 (39.5)	1.95	0.225 (89.9)	0.097 (30.1)	0.322	21.3	4.03	26.0
9 18	0.056 (7.0)	0.622 (77.8)	0.120 (15.2)	0.80 (25.7)	2.31 (74.3)	3.11	0.133 (44.5)	0.166 (58.5)	0.299	60.0	8.50	19.6
10 17	0.040 (2.9)	0.938 (68.5)	0.436 (28.6)	1.37 (66.2)	0.69 (33.8)	2.07	0.150 (63.0)	0.088 (37.0)	0.238	61.3	6.64	42.4
11 5	0.112 (3.0)	1.472 (39.5)	2.144 (57.5)	3.73 (73.3)	1.36 (28.7)	5.09			0.337	80.0	6.21	28.8
平均値	0.067 ±0.033	0.811 ±0.258	1.016 ±0.689	1.89 ±0.94	0.94 ±0.54	2.83 ±1.04	0.286 ±0.097	0.104 ±0.042	0.378 ±0.106	47.4 ±18.5	6.13 ±1.73	28.4 ±8.5
比率	(4.1 ±2.0)	(47.3 ±14.7)	(48.6 ±15.7)	(66.2 ±15.8)	(33.8 ±15.8)	(100)	(66.2 ±18.8)	(33.8 ±18.8)	(100)			



第1図 児島湖における栄養塩濃度の月変化



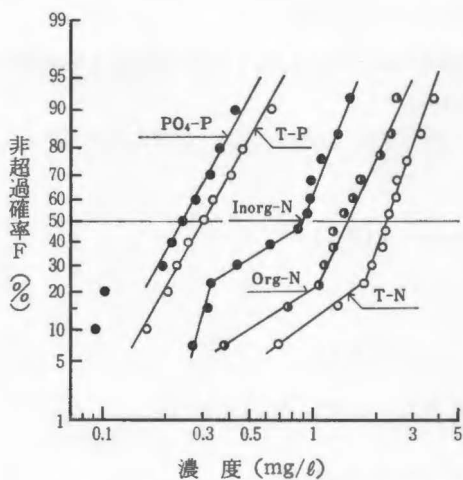
第2図 倉敷川における栄養塩濃度の月変化

河川から湖内へ主として無機態として流入した窒素はその内の一部は脱窒や底泥への堆積などによって水中から除去されるとともに、生物作用によって全濃度としては減少しつつ、有機化されていることがわかる。リンについても窒素ほどに著しい傾向はみられないものの、河川から湖内に流入すると、全濃度と $PO_4\text{-P}$ が減少し、 $Org\text{-P}$ 濃度の増加がみられた。この傾向は化学的酸素消費量 (chemical oxygen demand, COD) にも現われており、河川水の平均濃度 6.1 ppm が湖内では 9.4 ppm と増加しており、湖内における COD 物質の内部生産が認められた。COD 分析は全量測定を行なっただけであるが、溶解性 COD と粒子状 COD とに分離して測定すれば湖内

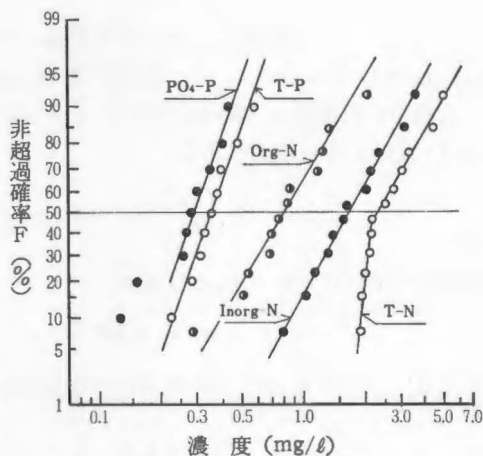
では後者が増加するものと思われる。懸濁物質 (suspended solid, SS) についても湖内の方が平均値で約 9 ppm 高くなっていた。塩素イオン (Cl) については既に述べたように堰堤から浸入してくる海水のため、河川水より湖水の方が約 2.3 倍高かった。

リンと懸濁物質の分析に少し欠測があるが、実験期間中に 12 回の水質分析を行なった。この期間中の水質変動の大きさから考えると分析回数は決して多くはないが、変動の大きさの統計的構造について若干の考察を行なう。自然水域における水質変動は極めてランダムなものであり、一方生物におよぼす水質は一過的な値よりもむしろ集積効果の方が大きいと考えられる。このような場合、水質の統計的構造の中でも、水質変動の幅とある濃度

以上の水質が現われる出現確率が重要な要因となると考えられる。そこでデータ数の少ない資料に対して有効なトーマスプロット (Thomas plot) 法によって N, P 濃度の母集団分布の統計的構造を調べた。これを第3～5図に示す。第3, 4図はそれぞれ児島湖および倉敷川における各態 N, P 濃度を対数正規確率紙上にプロットしたものである。観測したデータの範囲内では、湖水の T-P, 河川水の T-P, Inorg-N, Org-N はほぼ対数正

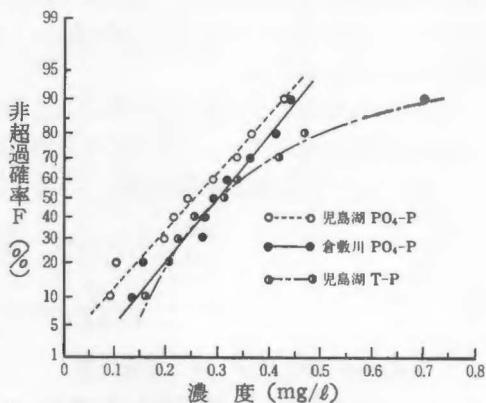


第3図 児島湖における N-P 濃度の対数正規確率紙へのトーマスプロット



第4図 倉敷川における N-P 濃度の対数正規確率紙へのトーマスプロット

規分布になると予想される。湖水の T-N, Org-N, 河川水の T-N の分布は確率紙上でみる限りでは、2つのピークを有する対数正規分布の和で表わされる。PO₄-P については高濃度域の分布は対数正規分布で表現しうが、低濃度域では、対数正規分布からのずれが認められた。そこでこれらのデータを普通正規確率紙にプロットし直した。これを第5図に示す。これらは普通目盛の確率紙上ではほぼ直線になり、正規分布をするものと考えられる。比較のために湖水中の T-P もプロットした。この場合には、前述のように対数正規分布になるので上に凸な曲線になっている。自然水域における水質が何故このように分布型をなすのか現段階では明らかでないが、これら水質の統計的構造については別な機会に論じたい。



第5図 P濃度の正規確率紙へのトーマスプロット

2. ホテイアオイの生長特性

生物の生長を一般的に表現するため、いくつかの近似的な数式表現が提案されている。ホテイアオイの生長についても、他の植物と何ら変わる点はないが、その生長過程を表わ

す数字モデルは研究者によって異なり、必ずしも統一されていない。取扱いが簡便であるという点から、一日当たりの生産量を現存量に対する百分率で表わす方法^{2,11,12)}や、単位面積、一日当たりの生体増加量で表わす方法^{3,10,15)}などがある。前者の百分率表示は次の(1)式に由来するもので、 X の値を小数値で表わしたものであるが、これは生物の生長を記述する数式表現法としては必ずしも理論的ではないと思われる。

$$w_t = w_0(1+X)^t \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 w_t : t 時間後における現存量 (weight/unit-area) w_0 : 初期現存量 (weight/unit-area), X : 生長率, t : 経過時間 (time unit).

生物の生長速度は制限要因のないときには、現存量に比例するという考え方に基づく(2-1)式がより一般的である。

$$\frac{dw_t}{dt} = \lambda w_t \dots\dots\dots(2-1)$$

初期条件 $t=0$ で $w_t=w_0$ とすると、

$$w_t = w_0 e^{\lambda t} \dots\dots\dots(2-2)$$

となる。ここで λ は生長係数 (1/unit-time) である。しかし $\lambda \ll 1$ のとき、

$$e^{\lambda t} = 1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{\lambda^2 t^2}{2!} + \dots\dots\dots(3)$$

と級数展開され、右辺の2次以上の項を省略すると(2-2)は(1)式で近似表現される。後者の生体量による表現法は、具体的な次元をもっている方法なので、直感的には理解しやすいが、(1)式や(2-2)式における w_0 の値によって異なるので、データを相互に比較しにくい欠点がある。

一般的には栄養塩や生育空間の制限、その他の要因があると、生物の生長が阻害され、生長量は飽和性を示す。この場合の生長曲線は(4)式のロジスティック曲線で表現するのが、簡単で、全生長過程を現象論的にうまく表現できる。

$$\frac{dw_t}{dt} = \lambda w_t \left(1 - \frac{w_t}{K}\right) \dots\dots\dots(4-1)$$

$$w_t = \frac{K}{1 + k e^{-\lambda t}} \dots\dots\dots(4-2)$$

ここで K : w_t の上限値, k : 積分定数。

しかし、この場合にも、初期条件 $t=0$ で、 $w_t=w_0$ とすると、

$$k = \frac{K}{w_0} - 1 \dots\dots\dots(5)$$

となり、 t が十分小さいとき、

$$w_t \approx \frac{K}{k} e^{\lambda t} = \frac{K w_0}{K - w_0} e^{\lambda t} \dots\dots\dots(6)$$

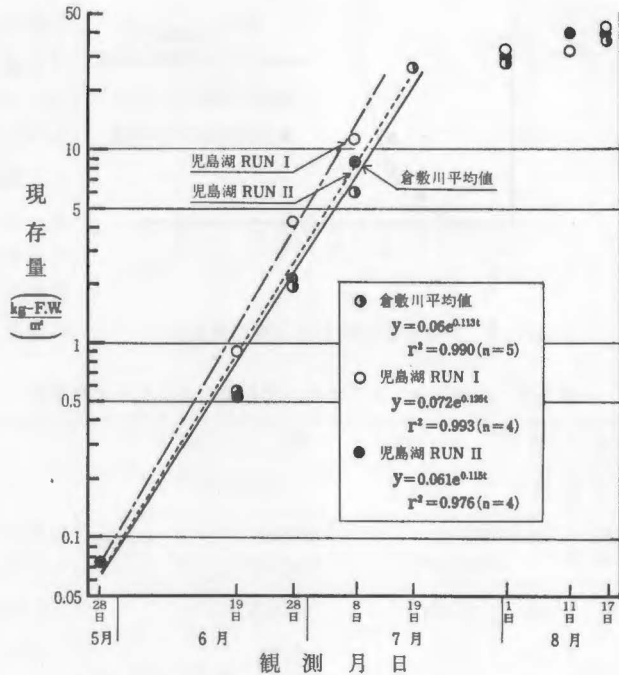
となり、さらに $w_0 \ll K$ のとき(6)式は、

$$w_t \approx w_0 e^{\lambda t} \dots\dots\dots(7)$$

と近似される。

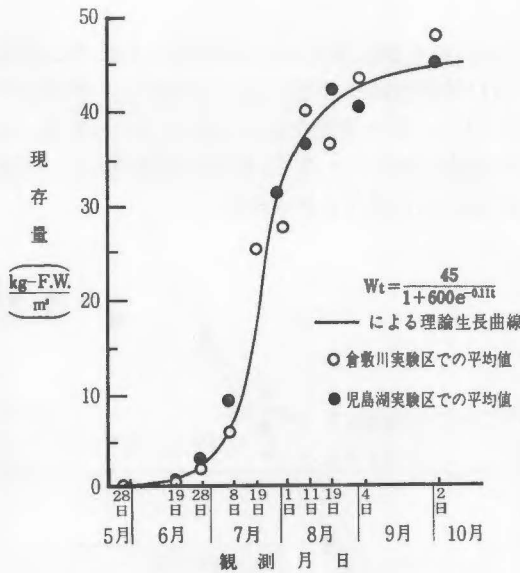
本来、生物の生長は種々の環境要因によって生長係数自身が時間的に変化する関数 $\lambda(t)$ として表現されるべきである⁹⁾が、 λ は時間的には不変であると仮定し、密度効果だけを数式の構造の中に組み込んだものが(4-1)式で表現されていると考えられる。以下において、ホテイアオイの生長は、その初期の段階では(2-2)式で近似表現され、有限な空間条件のもとでの全生長過程は(4-2)式にしたがうことを示す。

第6図は自然放置実験区における初期の指数生長期における単位面積当たりの新鮮重の時間的変化を片対数紙上にプロットしたものである。児島湖、倉敷川の両実験区ともに、ホテイアオイの生長曲線は実験開始後、約50日間は(2-2)式に示した指数関数型の生長曲線と、相関係数 $r=0.98$ 以上の良い適合性を示した。倉敷川での2回の反復実験とも生長速度はほとんど変わらなかったため、図には平均値を示した。このときの生長係数は0.113/日であった。児島湖では、2つの反復実験区は互いに隣りあってはいるが、その周囲に生育していた他の水生植物の影響があったためか、2回の反復実験のうち、



第6図 放置実験区における指数生長期の現存量変化

一方の RUN I の実験区の生長係数は0.125/日で、もう一方の RUN II では0.115/日とわずかの差がみられた。各実験ともに7月8日には被度が100%に達していたが、その後も10日間、現存量が20~25 kg 新鮮重/m²に達するまでには指数関数的な生長が認められた。被度が100%に達した時の現存量は約4~6 kg 新鮮重/m²であった。両実験区で生長速度の差異はあっても、現存量が飽和した時点では、ほぼ40~50 kg 新鮮重/m²の現存量となりほぼ同程度であった。第7図は放置実験区の全生長過程をプロットしたもので、図中の曲線は(4-2)式で、 $K=45$ kg 新鮮重/m²、 $k=600$ 、 $\lambda=0.11$ /日において計算した理論生長曲線である。若干のばらつきはみられるものの、両地点における実験区とも理論値との良い適合性が認められた。データのばらつきの範囲を考えると、生長係数の値は生長初期の指数生長期の解析で得られた値の範囲内に入っている。つまり、ホテイアオイの生長過程において生育空間の制限要因によって密度効果が現われる場合にも、指数生長期における生長係数を(4-2)式にあてはめることによって全生長過程の現存量の変化を予測することができる。しかし上限値Kは栄養塩濃度、生育空間の広さあるいは種々の気象要



第7図 放置実験区における現存量変化

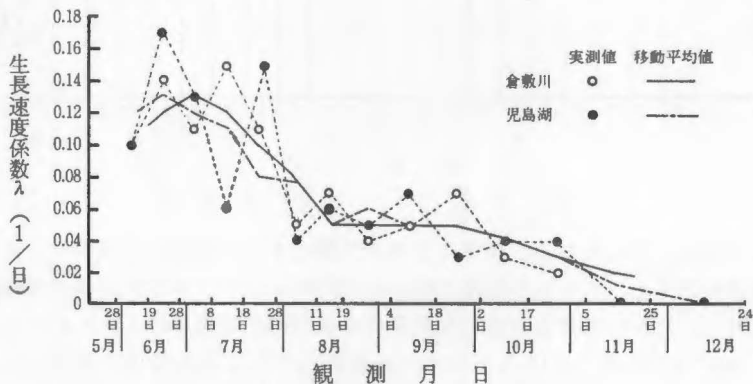
因, その他の環境条件によって変化するものと考えられるので, この点に関しては, 今後環境条件を管理した実験的検討を必要とする。

収穫管理実験区では, 7月8日の観測時には被度が100%に達したので, それ以後は, 半量を収穫し, その一部を実験室に持ち帰って, 乾物重, N.P含有量を測定した。第3表は各観測時点における収穫前の現存量を経時的にまとめたものである。どの時点においても現存量は20kg新鮮重/m²以下であったので, 各期間におけるホテアオイの生長は(2-2)式で示した指数関数的な生長曲線に従うとして, 期間毎に生長係数 λ を求め, 同表に示した。

第3表 水域別ホテアオイの現存量および生長速度係数(λ)の季節変化(収穫管理実験区)

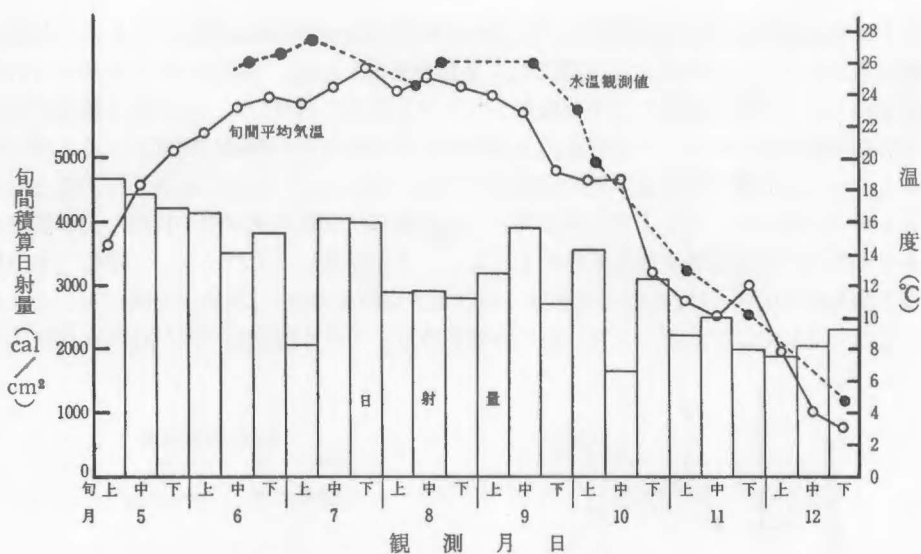
水 域	倉 敷 川			児 島 湖						
	RUN I		RUN II		RUN I		RUN II			
採年 取日	現存量 (kg/m²)	λ (1/日)	現存量 (kg/m²)	λ (1/日)	現存量 (kg/m²)	λ (1/日)	現存量 (kg/m²)	λ (1/日)	現存量 (kg/m²)	λ (1/日)
55 5 28	0.075		0.075		0.075		0.075			
6 19	0.54	0.09	0.63	0.10	0.69	0.10	0.56	0.09	0.10	0.10
6 28	2.10	0.15	1.95	0.13	3.15	0.17	2.48	0.17	0.17	0.17
7 8	6.70	0.12	5.47	0.10	9.51	0.11	9.69	0.14	0.13	0.13
7 19	12.36	0.15	9.46	0.14	7.82	0.06	7.54	0.05	0.06	0.06
7 28	18.16	0.10	18.50	0.12	18.06	0.14	18.82	0.15	0.15	0.15
8 11	17.56	0.05	18.34	0.05	19.32	0.05	14.84	0.03	0.04	0.04
8 19	15.22	0.07	15.06	0.06	13.1	0.04	13.6	0.08	0.06	0.06
9 4	15.38	0.04	14.34	0.04	13.74	0.05	13.48	0.04	0.05	0.05
9 18	15.36	0.05	13.92	0.05	15.40	0.06	17.36	0.07	0.07	0.07
10 2	18.96	0.06	21.12	0.08	12.56	0.03	12.26	0.02	0.03	0.03
10 17	15.40	0.03	16.34	0.03	10.78	0.04	10.00	0.03	0.04	0.04
11 5		0.01	11.40	0.02	10.14	0.03	11.20	0.04	0.04	0.04
11 25					4.96	0	5.55	0	0	0
12 24					3.04	0	4.00	0	0	0

倉敷川、児島湖両地点の生長係数の平均値の経時変化を点線で第8図に示した。生体量の秤量にあたっては、それが少ない期間には全量を秤量したが、被度が50%を超えてからは全量の1/2~1/8量を測定し、単位面積当たりの生体量に換算した。λの値は観測日毎に周期的な変動がみられた。この周期的な変動は生長係数自身の周期的変動であると考えよりも、むしろ現場での秤量誤差や収穫量の誤差などによっても生じた変動であると考えの方が妥当であろう。このような時系列データに現われた誤差成分や不規則な変動誤差を除去するために単純移動平均化操作によってデータを変換し、それによって求めた生長係数の季節変動を図中では、倉敷川実験区での移動平均値を実線で、児島湖実験区でのそれを一点鎖線で示した。第3表で8月以後の各観測時点における両地点での生体量を比較する



第8図 生長速度係数の季節変化

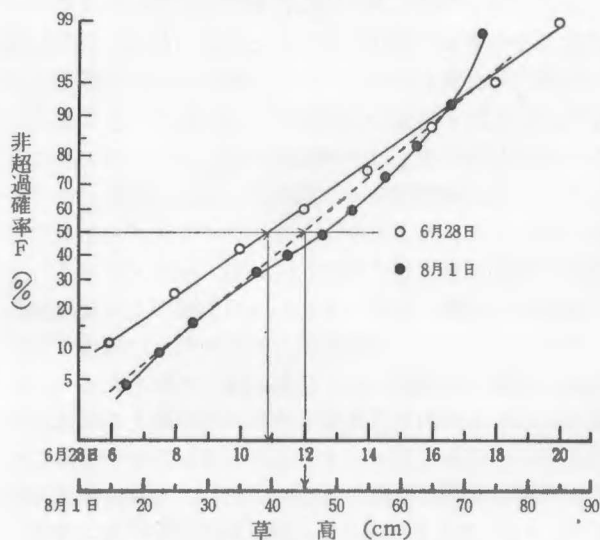
と、倉敷川実験区の方が大きい。また、両者のλ値で比較すると7月末までは少し倉敷川実験区の方が大きい、8月以後ではほとんど差異は認められなかった。つまり8月以後の両地点における現存量の差異は5~7月の2カ月間における生長速度の差異が8月始めの生体量の差を生じ、10月までその差異がそのままに継続したものと考えられる。11月以後は、倉敷川実験区では水鳥によって茎葉部に食害を受けたので、正確な生体量を観測できなくなり実験を停止した。5~7月の生長係数は両地点の実験区ともに0.10~0.131/日の範囲内にあり、放置実験区で得られた生長係数の値とほぼ同程度であった。8月以後になるとλ値は急速に減少し、11月に入ると児島湖実験区での値は0となり、新しいホテイアオイの生体量としての生長は認められなくなった。このようなホテイアオイの生長係数の変動は第1, 2図に示したN, P濃度の季節変動と良く対応している。ホテイアオイの生長速度は栄養塩濃度のみならず、その他にも気温、水温、あるいは日射量のような気象要因によっても著しく影響を受ける。そこで、これらの気象要因と生長係数との関係を検討するために、毎月の旬間別積算日射量と旬間平均気温、および観測時の水温とを調べ、これを第9図に示した。日射量は倉敷市における岡山大学農業生物研究所内露上で観測されたもの、旬間平均気温は岡山県気象月報から引用したデータである。また図中で気温より水温の方が高いのは、気温が一日平均気温の旬間平均値であるのに対し、水温は観測時の時間帯が10~15時の間の実測値をプロットしたためである。1980年は例年にない冷夏で夏期の日射量が通年に比べて極めて少ないため、8月以後のホテイアオイの生長に影響を



第9図 気象データの月変化

与えたものであると考えられる。気温や水温も同様に8月以後低下しており、水域における栄養塩濃度の低下と、これらの気象要因が相対的にホテイアオイの生長速度に作用したものであると思われる。しかし6月と9月の気象条件がほぼ同じであるにもかかわらず、両時期におけるλ値に差異があるのはもう一つの気象要因である日長時間に起因するものと考えられる。

ホテイアオイの生長過程における生体量は新鮮重や乾物重で表わされるが、その群落構造の生態学的な意味では草高も重要な因子の一つである。一つの群落を構成しているホテイアオイの集団の中にはいろいろな生長段階に位置するものが存在しており、それは草高



第10図 倉敷川放置実験区における草高の確率分布

が一つの指標になりえよう。その分布構造を検討するために、倉敷川での放置実験区において被度が約50%の時期(6月28日)と100%の時期(8月1日)における各々約150個の草高の観測値を順位統計量として非超過確率を計算し、これを正規確率紙上にプロットしたのが第10図である。これによると被度が100%に満たない時期には草高はほぼ正規分布になったが、100%以上の密度で生育するようになると、図上でやや逆S字形となり、尖度の程度が小さい分布形をなすと予想され

る。図中には超過確率で50%値、つまり分布の中央値を細い実線で示しているが、この草高は各実験区の平均草高の計算値とはほぼ一致した。被度が小さいときには、なお草高を伸ばしながら生長する茎葉と、新しく生長するもの、そしてそれ以上草高が伸びないものとが併存し、それらが集団として正規分布をなすが、生育環境が高密度になると平均的な草高を有するものの割合が増加し、分布型は鈍峯となったものと考えられる。しかし今回の草高についての実験観測値はすべてがこのような特徴を示した訳ではなく、群落構造の指標の草高については今後の解析を必要とする。

3. ホテイアオイの N, P 含有量

自然水系における水生植物と水質との相互作用を検討するため収穫管理実験区と自然放

第4表 ホテイアオイの N, P 含有量の季節変化 (収穫管理実験区)

児 島 湖									
採取月日	7 月 8 日			8 月 11 日			9 月 4 日		
実験区	RUN I	RUN II	平均値	RUN I	RUN II	平均値	RUN I	RUN II	平均値
N 含有量 (%)	3.49	3.57	3.53	3.26	3.65	3.46	2.84	2.40	2.62
P 含有量 (%)	0.796	0.730	0.763	0.744	0.822	0.783	0.615	0.528	0.572
乾物率 (%)	4.11	4.00	4.06	3.37	3.66	3.52	4.52	4.42	4.47
採取月日	10 月 2 日			11 月 5 日			11 月 25 日		
N 含有量 (%)	2.82	3.37	3.10	2.98	2.39	2.69	2.86	3.07	2.97
P 含有量 (%)	0.475	0.492	0.484	0.358	0.286	0.322	0.295	0.337	0.316
乾物率 (%)	4.72	4.21	4.46	4.84	4.91	4.48	5.70	6.12	5.91
倉 敷 川									
採取月日	7 月 8 日			8 月 11 日			9 月 4 日		
実験区	RUN I	RUN II	平均値	RUN I	RUN II	平均値	RUN I	RUN II	平均値
N 含有量 (%)	3.83	3.46	3.65	3.29	3.63	3.46	3.65	3.76	3.71
P 含有量 (%)	0.656	0.737	0.697	0.802	0.684	0.743	0.762	0.746	0.754
乾物率 (%)	4.92	4.94	4.93	4.21	3.97	4.09	3.83	3.95	3.89
採取月日	10 月 2 日								
実験区	RUN I	RUN II	平均値						
N 含有量 (%)	3.74	3.19	3.47						
P 含有量 (%)	0.661	0.520	0.591						
乾物率 (%)	3.70	4.14	3.92						
水域別平均値									
	児 島 湖			倉 敷 川			全 平 均		
N 含有量 (%)	3.06 ± 0.42			3.57 ± 0.23			3.26 ± 0.43		
P 含有量 (%)	0.540 ± 0.199			0.696 ± 0.088			0.602 ± 0.179		
乾物率 (%)	4.51 ± 0.79			4.21 ± 0.47			4.39 ± 0.68		

第5表 ホテイアオイの部位別 N, P 含有量(%) (自然放置実験区)

児 島 湖												
採取月日	9 月 18 日				11 月 5 日				11 月 25 日			
部 位	茎 葉 部		根 部		茎 葉 部		根 部		茎 葉 部		根 部	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
個 体 1	2.40	0.608	1.62	0.341	2.68	0.315	1.91	0.258	2.24	0.412	2.40	0.341
2	2.51	0.677	1.17	0.319	2.61	0.412	1.89	0.267	2.36	0.341	2.06	0.228
3	2.86	0.739	1.98	0.388	2.98	0.596	1.87	0.269	2.37	0.339	2.22	0.301
平 均	2.59	0.675	1.77	0.349	2.76	0.441	1.89	0.265	2.32	0.364	2.23	0.290

倉 敷 川									
採取月日	9 月 18 日				11 月 5 日				
部 位	茎 葉 部		根 部		茎 葉 部		根 部		
	N	P	N	P	N	P	N	P	
個 体 1	2.08	0.510	1.95	0.289	3.06	0.543	2.32	0.360	
2	2.67	0.525	2.17	0.286	2.39	0.708	2.11	0.363	
3	2.42	0.449	2.21	0.333	3.22	0.673	2.19	0.312	
平 均	2.39	0.495	2.11	0.303	3.02	0.641	2.21	0.345	

水域別平均値								
地 点	児 島 湖				倉 敷 川		全 平 均	
部 位	茎 葉 部		根 部		茎 葉 部		根 部	
	N	P	N	P	N	P	N	P
N	2.56 ± 0.25	0.602 ± 0.179	1.96 ± 0.24	0.301 ± 0.051	2.71 ± 0.42	0.568 ± 0.101	2.62 ± 0.32	0.523 ± 0.142
P	0.493 ± 0.162	0.310 ± 0.045	0.301 ± 0.051	0.230 ± 0.045	0.568 ± 0.101	0.324 ± 0.034	0.523 ± 0.142	0.310 ± 0.045

置実験区とから季節別に採取したホテイアオイの N, P 含有量を測定し、これを第 4, 5 表に示した。この N, P の含有量はホテイアオイの植物生理学上の意味だけでなく、水生植物を水質浄化に利用しようとする場合に特に重要な指標である。第 4 表は各管理実験区の N, P 含有量を水域別に示し、それらの平均値を記載したものである。第 5 表は放置実験区から採取した 3 個体のホテイアオイの部位別 N, P 含有量を水域別およびそれらの全平均値として示した。これらの値はいずれも乾物重に対する N, P の含有量を % で表示したものである。第 4 表に示されているように、平均的な N, P 含有率は一般にホテイアオイの生長の旺盛な時期に高く、生長速度が衰えてくると低くなっている。これは特に P の含有率に顕著な傾向がみられた。全期間における全平均値は N 含有率は 3.26 ± 0.43%, P 含有率は 0.602 ± 0.179% であった。倉敷川と児島湖とにおける実験区を比較すると N, P とも前者の方が高い含有率を示した。乾物率について季節的な変動でみると、児島湖実験区では、N, P の含有量とは逆に夏期に低く、秋に高かった。しかし倉敷川実験区ではそのような傾向は必ずしも認められなかった。また両地区の乾物率の値を比較すると、N, P

の含有率とは逆に、児島湖実験区の方が高い。

部位別の N, P 含有率については 9 月以後の資料しか分析していないので、一般的な変動傾向は明確ではなかったが、茎葉部、根部の N, P 含有率ともに倉敷川実験区の方が高い値が得られた。全平均値では N は茎葉部が $2.62 \pm 0.32\%$ 、根部が $2.04 \pm 0.22\%$ 、P は茎葉部が $0.523 \pm 0.142\%$ 、根部が $0.310 \pm 0.045\%$ で、N, P いずれも茎葉部の方が N で 22%、P で 41% 高い含有率であった。茎葉部と根部の平均重量比を 4 対 1 として加重平均した個体全体の N, P 含有率を計算すると、N が 2.51%、P は 0.480% となる。これらの値を第 4 表に示した N, P 含有率の全平均値と比較すると、管理実験区の方が放置実験区より N で約 23%、P で約 20% 高い結果が得られた。これは管理実験区では放置実験区より相対的に若い株の存在比率が高いということに起因するもので、平均的には幼株の方が成株より N, P の含有率が多いという沖らの実験結果⁴⁾と対応するものである。この事実はホテイアオイを水質浄化に利用する場合に、ホテイアオイによる N, P の吸収能を最大にするのに、収穫管理上最適な現存量が存在することを示唆している。つまり、ホテイアオイの生長速度と N, P 含有量との相対効果で水中からの N, P 吸収量を最大にする条件が決定されることになる。児島湖実験区より倉敷川実験区の方が N, P 含有率が高くなったのは、水質の変動特性の項で述べたように、全濃度として倉敷川の水質の方が高かったことにもよるが、その成分についてみると、無機態成分の濃度が河川水の方が高いということが主要な原因であると考えられる。特に N 濃度成分について、湖水と河川水とを比較すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は後者が約 1.6 倍、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は約 3.9 倍も高く、窒素の化学形態では $\text{NH}_4\text{-N}$ が $\text{NO}_3\text{-N}$ より選択的に吸収されやすい⁵⁾ ことによると考えられる。

上に述べたように、水中の N, P 濃度によってホテイアオイ生体中の N, P 含有量も異なる。そこで第 5 表に示した水域、部位別の平均 N, P 含有率と第 1, 2 表に示した期間平均水中 N, P 濃度とから、次式に示す N, P の濃縮係数 (concentration factor, C.F.) の概念をこれに適用し、N, P 含有率の一般化を試みた。

$$\text{濃縮係数(C.F.)} = \frac{\text{乾物中N(又はP)濃度 (mg/kg)}}{\text{水中のN(又はP)濃度 (mg/l)}} \dots\dots\dots(8)$$

この計算結果を第 6 表に示す。部位別の濃縮係数の平均値をみると、全量に対する無機態量の濃縮係数は N で 2.19 倍、P で 1.37 倍であった。また根部に対する茎葉部の濃縮係数の比は N で 1.28 倍、P で 1.69 倍となった。N と P の濃縮係数を全濃度と無機態濃度とで比較すると茎葉部、根部ともに全量では P の方が高く、無機態では N の方が高かった。倉敷川と児島湖の各実験区について濃縮係数を比較すると茎葉部、根部ともに Inorg-N

第 6 表 形態別 N, P の濃縮係数

部 位	茎 葉 部		根 部		平 均 値	
	倉敷川	児島湖	倉敷川	児島湖	茎葉部	根 部
T-N	9.58×10^3	1.12×10^4	7.63×10^3	8.56×10^3	1.04×10^4	8.10×10^3
Inorg-N	1.43×10^4	3.12×10^4	1.14×10^4	2.39×10^4	2.28×10^4	1.77×10^4
T-P	1.50×10^4	1.42×10^4	8.57×10^3	8.67×10^3	1.46×10^4	8.62×10^3
$\text{PO}_4\text{-P}$	1.99×10^4	2.00×10^4	1.13×10^4	1.22×10^4	2.00×10^4	1.18×10^4

の値が児島湖実験区の方が高くなったのを除くと、濃縮係数は相互に近い値となり、両実験区における差異は認められなかった。つまり水質の濃度が増加すると、それに伴って体内の含有量も増加するが、ある濃度の範囲内では(8)式で定義された濃縮係数の値が一定であれば、水中濃度だけ測定すれば体内含有量の予測が可能となる。しかし Inorg-N については前述のように、さらに $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ との吸収の程度が異なり、また両者の存在比も異なるために、水域によって濃縮係数に差異が生じたものと思われる。

当初、塩分がホテイアオイの生長に影響を与えると予想して、塩分濃度の異なる2地点を実験区に選定したが、今回行なった濃度の範囲内では、顕著な影響を観察することができなかった。

本論文で述べた実験結果はいくつかの客観的事実を示すものではあるが、自然環境下で栽培された植物の生長は当然多くの環境因子が多角的に作用した一つの結果にすぎない。今後ホテイアオイの生長に関与する主要因の定量的な解析をするためには、管理された環境下での実験的研究が系統的に実施されねばならない。

本稿では緒言で述べた研究目的のうち、ホテイアオイによる水質浄化能という視点からの考察についてはほとんど触れられなかったが、この点については別に詳細に論じた¹⁾。

摘 要

自然水域の河川と湖沼に、それぞれ収穫管理実験区と自然放置実験区とを各2反復ずつ設定しホテイアオイを栽培した。各実験区における水質変動の特性を明らかにし、ホテイアオイの生長特性を水質や気象条件の季節変動との関連で解析し、あわせて近い将来、ホテイアオイの旺盛な生長力と窒素、リンの吸収能を、水質浄化に利用するための基礎的データを収集するために本研究が行なわれた。得られた結果を概要すると次の通りである。

1) 分析した水質項目は栄養塩(各態 N, P), COD, Cl, SS である。栄養塩濃度は春から初夏にかけて高く、それ以後は減少傾向がみられた。

2) N, P 濃度は湖水より河川水の方が一般的に高く、COD 濃度は逆に湖水の方が高かった。湖沼における生物作用のため、湖内では有機態成分の相対的存在比率が高くなった。

3) 水質の濃度変動の統計的構造については、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は正規分布に従うが、他の栄養塩の各成分濃度は多くの場合対数正規分布で近似することができた。

4) 放置実験区でのホテイアオイの生長曲線を数学モデルにあてはめると、生長初期は指数関数モデルで、相関係数 $r=0.98$ 以上の高い相関で適合し、また全生長過程では、生育空間の制限による密度効果を十分な適合性をもってロジスティック曲線で近似できた。このときの生長係数 λ の値は $0.10\sim 0.13/\text{日}$ の範囲となった。

5) 管理実験区では、各観測期間毎のホテイアオイの生長を指数関数型の生長曲線にあてはめて λ を求めると、初期には放置実験区で得られた λ の値とほぼ同じ値であったが、8月以後では急速に減少し、11月には0となった。

6) λ 値の変化傾向は栄養塩濃度の減少傾向、気温、水温、日射量等の気象要因の変化傾向とも一致するものであった。

7) 草高によってホテイアオイ生育の群落構造をみると、被度が100%に満たない時には草高は正規分布になるが、高密度の生育環境下では尖度の程度が小さい分布形になるも

のと予想された。

8) ホテイアオイの栄養塩含有量は平均値でN 3.26%, P 0.602%であった。この含有量は主として水中無機態成分に支配され、その成分濃度の高い倉敷川実験区の方が高い含有率を有していた。

9) ホテイアオイの栄養塩含有率を濃縮係数の概念を導入して整理すると、水中の濃度にかかわらず、本実験の濃度範囲内ではほぼ一定の値になることが示唆された。

文 献

1. 青山勲, 沖陽子, 西崎日佐夫. 1981. 生態系を利用した水質浄化法に関する研究—ホテイアオイによるN, Pの除去能—. 第15回水質汚濁研究会学術講演会論文集: 169-174.
2. Bock, J. H. 1969. Productivity of the water hyacinth *Eichhornia crassipes* (MART.) Solms. Ecology. 50: 460-464.
3. Boyd, C. E. 1976. Accumulation of dry matter, nitrogen and phosphorus by cultivated water hyacinth. Economic Botany 30: 51-56.
4. 沖陽子, 伊藤操子, 植木邦和. 1978. ホテイアオイ (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) の生育および繁殖に関する研究. 第1報 水中の栄養塩が生育および繁殖に与える影響. 雑草研究 23: 15-20.
5. 沖陽子, 伊藤操子, 植木邦和. 1978. ホテイアオイ (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) の生育および繁殖に関する研究. 第2報 水中の窒素形態の差異が生育ならびに繁殖に及ぼす影響. 雑草研究 23: 20-25.
6. 沖陽子. 1980. 水生雑草ホテイアオイをめぐる諸問題. 農業技術 35: 15-21.
7. Penfound, W. T. and Earle, T. T. 1949. The biology of the water hyacinth. Ecological Monographs 18: 447-471.
8. Sahai, R. and Sinha, A. B. 1969. Contribution to the ecology of Indian aquatics. I Seasonal changes in biomass of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). Hydrobiology 35: 376-382.
9. 篠崎吉郎. 1979. 植物の密度効果. 化学と生物 17: 402-404.
10. Taylor, J. S. and Stewart, E. A. 1978. Hyacinth. Conf. Biol. Nutrient Removal Alternatives 143-180.
11. 徳永隆司, 北喜代司, 北直子, 森本昌宏. 1978. ホテイアオイの生長と無機栄養元素の貯蔵. 日本水処理生物誌 14: 1-8.
12. 植木邦和. 1977. 第III章ホテイアオイの生産量. 河川, 水路, 池沼におけるホテイアオイの生態とその対策に関する研究. 森林水産特別試験研究補助金による研究報告書 11-17.
13. Wolverton, R. C., MacDonald, R. C. and Cordon, J. 1975. Bio-conversion of water hyacinths into methane gas: Part 1. NASA Technical Memorandum. NASA-TM-X-72725. p. 12.
14. Wolverton, B. C. and MacDonald, R. C. 1976. Don't waste waterweeds. New Scientist 12: 318-320.
15. Wolverton, B. C. and MacDonald, R. C. 1978. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) productivity and harvesting studies. ERL Report No. 171: 43-60.