

霞ヶ浦抽水植物帯の水質特性

浜田篤信・河崎 正・外岡健夫・喜多 明

水生植物帯が湖沼の水質浄化機能を有していることが指摘されているが、その浄化機能が十分に大きいものであれば、浄化対策の一つとしても有効なものとなり得るものと考えられる。水生植物帯の水質浄化の機能と構造についての定量的検討は殆ど行われておらず、水生植物帯が消滅した場合に起こる水質変化や水生植物帯を復元した場合の浄化効果は明らかではない。本調査は、水生植物帯の構造と機能を明らかにするための一連の調査の一環をなすものであるが、ここでは、まず、手がかりを得る目的で水生植物帯（抽水植物帯）の水質調査を行い、結果を取りまとめ報告する。

1. 調査地点と調査の方法

調査地点は、玉造町浜地先の抽水植物帯で、ヒメガマとヨシからなる幅20 m、湖岸延長120 mの水生植物帯である。かつての水生植物帯と比較すると規模も小さく湖岸帯がコンクリート化されているため自然の条件との間には大きな差が見られるが、湖岸線にはほぼ平行に水生植物帯が分布し、120 mにわたって分断されることなく繁茂している。なお、抽水植物帯の沖側には沈水植物の分布は認められない（図1）。窒素及びリンの分析には自動分析計（テクニコン社）を

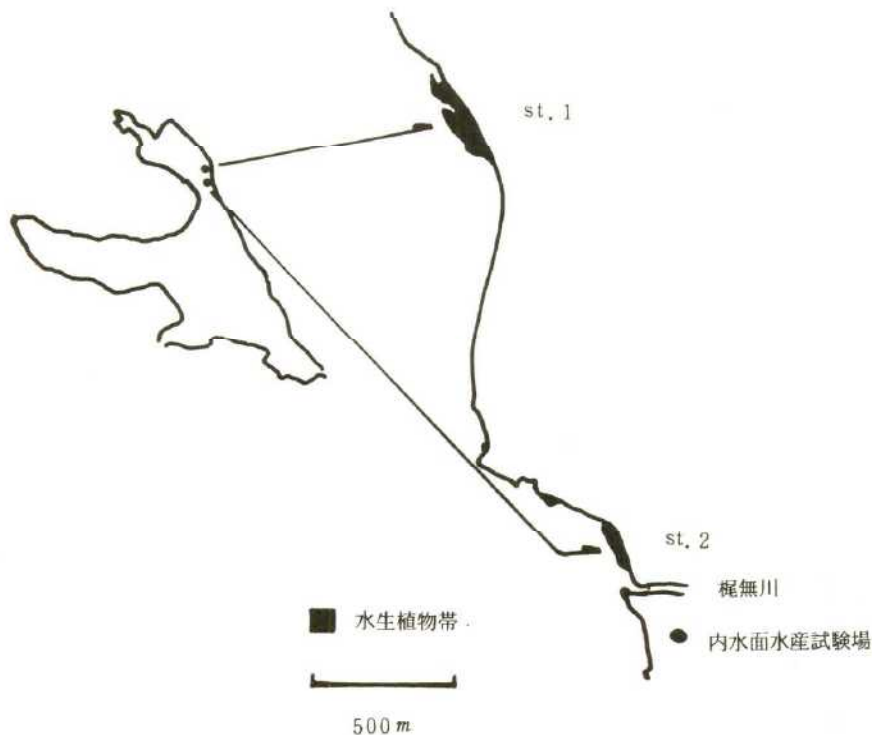


図1 調査地点

用いた。溶存酸素量の測定にはDOメーター（YSI社 58型）を使用した。流速の測定には色素（フルオレッセン・ナトリウム）を少量湖水中に滴下し、その移動速度から求めた。

2. 調査結果

(1) 水生植物帯の地形と水生植物分布状態

図2に水生植物帯付近の水深と8月中旬の植生を図示した。水生植物分布の先端は、50cm等深線に沿っていて、全域が概ねヒメガマで被われていた。水深が比較的浅く35cm以浅の部分にはヨシの分布が見られた。このヨシの分布する比較的浅い部分は、通常は汀線に近づくほど浅くなるが、この水生植物帯では汀線近くで、再び水深が大きくなり水生植物帯の中央部分では水深50cmを越える部分が出現した。この部分には、8月に入ると浮葉植物のトチカガミが見られるようになった。

この水生植物帯付近の底質は砂質であったが、汀線から5m付近までは砂層の上に枯死した水生植物が、数センチないし10数センチ堆積していた。

水生植物の現存量は、最も繁茂が活発であった中央付近で8月に1-3.5kgに達したが、距岸7.5-12.5m付近で2kg以上の比較的大きな値を示した。草丈も、現存量とほぼ同傾向を示し、水生植物帯中心部付近では150-200cmに達した。これに対し汀線よりの部分や沖側では小さな値を示し100cm程度であった（図3）。

(2) 水生植物帯内の湖水の流動

水生植物帯は浄化の場と見られるが、水生植物帯の機能は浄化だけではなく、物質の貯溜や消波等の機能をも果たしている。特に、波浪によって送り込まれた湖岸水を水生植物帯に滞留させる働きがあるのではないかと考えられる。そこで水生植物が活発に繁茂している8月に、しかも比較的風速の大きい条件下で、水生植物帯の流動を測定し水生植物帯が流動に与える影響について検討した。

調査は1990年8月14日10:00時から11時の間で風向・風速はSE 10Km/secであった。水生植物帯周辺の流速分布は図4に示した通りである。距岸25mの地点では13cm/secの流れがあるが、水生植物帯内では流速が小さくなるよう水生植物帯中央部では汀線に近づく程、流速は小さくなっていく。しかし、水生植物帯の両端では、汀線の近くでも比較的大きな流れが見られる。これは、水生植物帯両端では、汀線近くでも、波浪が水生植物帯による影響を受け難いからと考えられる。もし、水生植物帯の分布がかったのように湖岸周辺一帯に及んでいれば、流況は両端のような分布はみられず、ほぼ、水生植物帯中央部のそれに近い分布を示すものと考えられる。いま、水生植物帯中央部の流速を距岸との関係で図示したものが図4

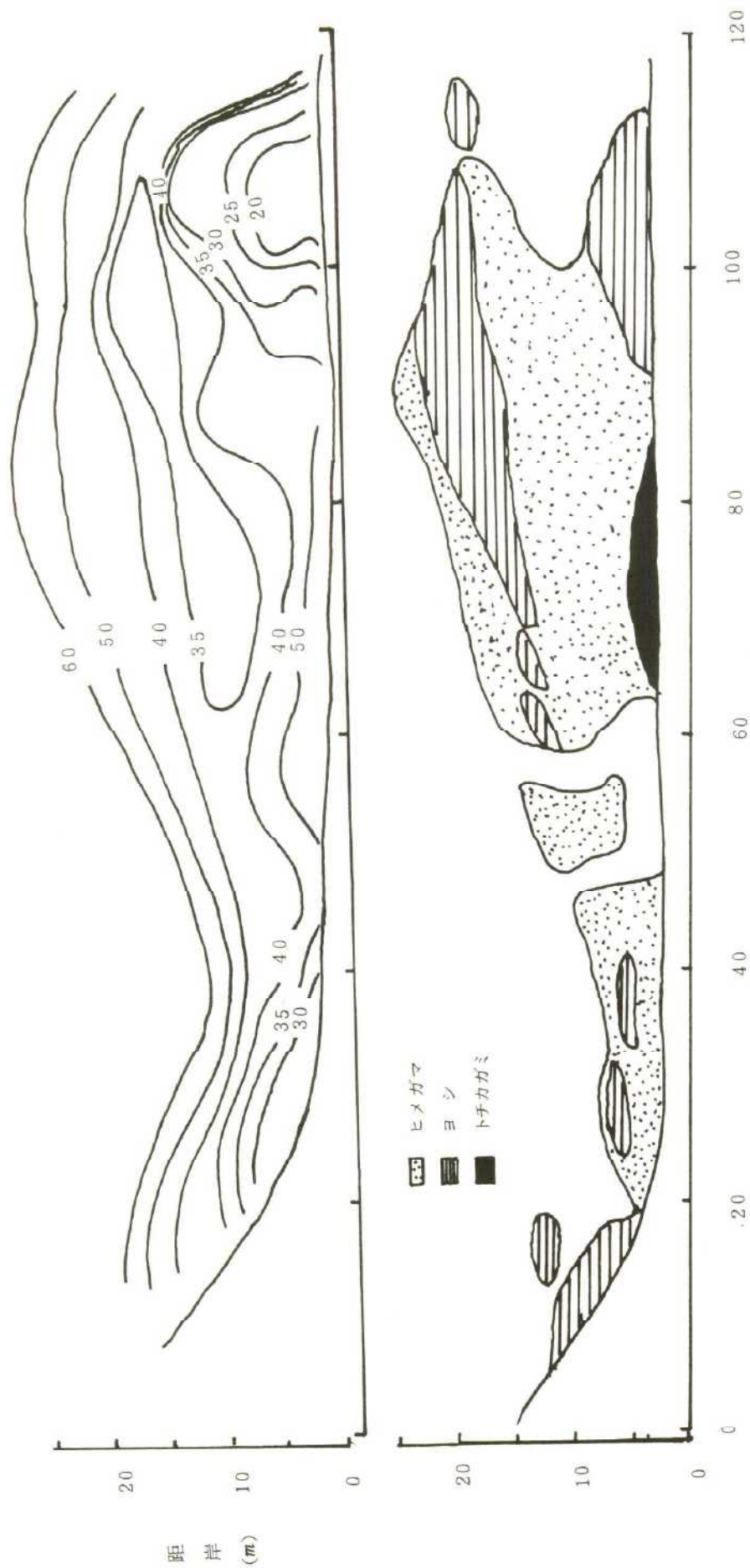


図2 水生植物帯の深度及び植生 (1990年8月)

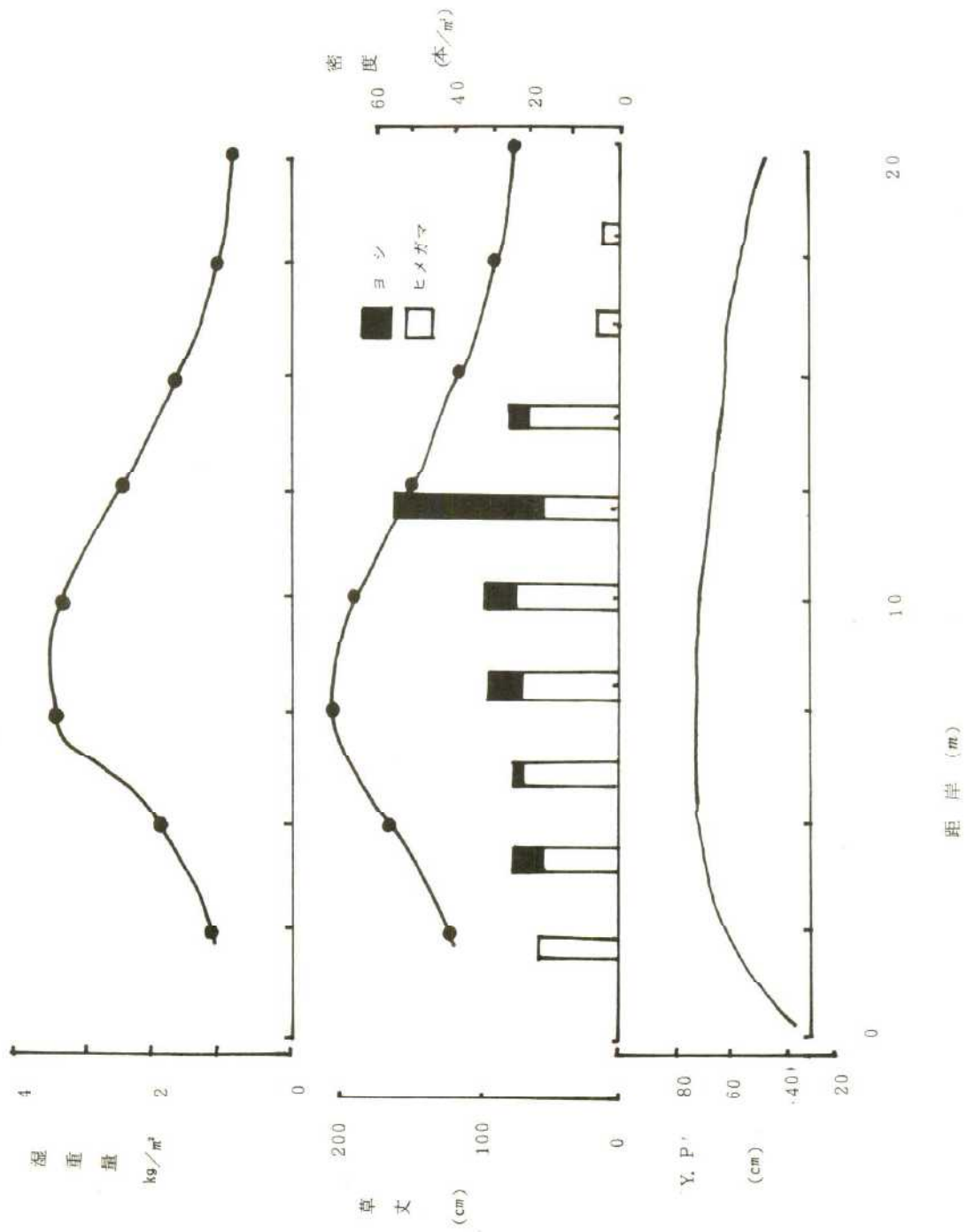


図3 水生植物帯中央部 (st. 2) の現存量, 草丈及び地形

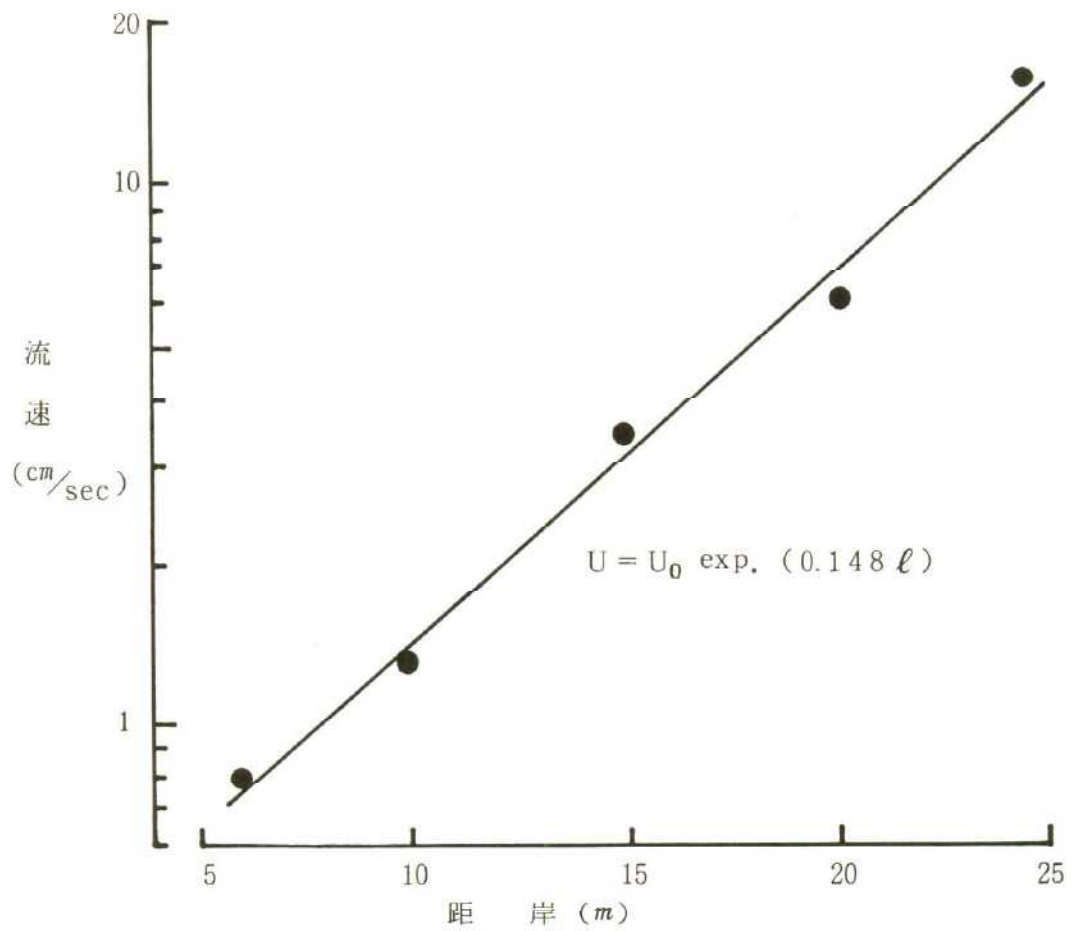
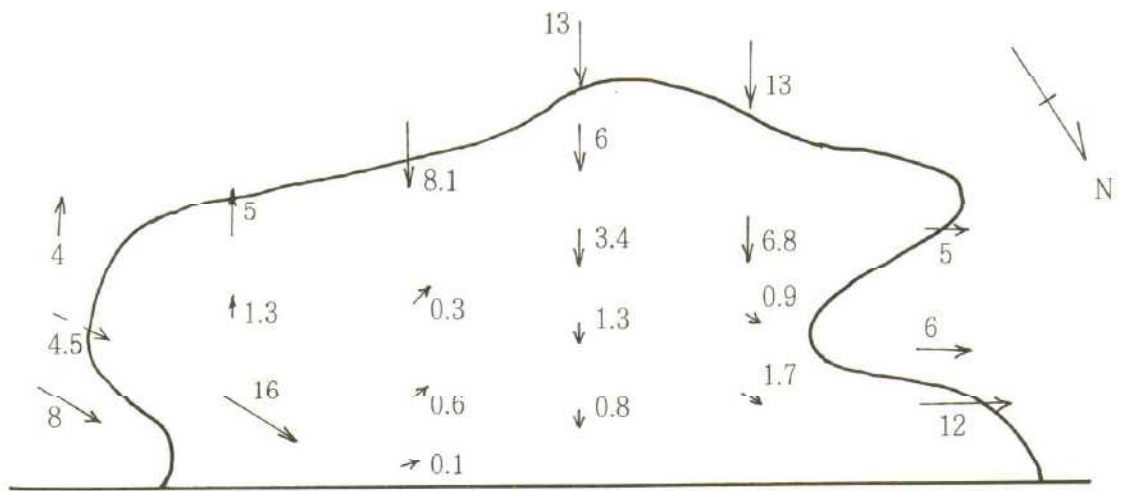


図4 水生植物帯内の速流分布（上）と中央部付近の流速（下）

風向・風速 SE 10 m/sec. 1990年8月14日 10 - 11時 測定

下である。流速は距離が大きくなるにしたがって急激に増大し、距岸距離（ l ）と流速（ u ）との関係は

$$u = u_0 \cdot \exp(k \cdot l)$$

に従っており、極めて高い相関関係を示している。ここで、 u_0 は水生植物帯へ流入する直前の流速である。流速が汀線に近づくにしたがって減衰しているのは、主として、水生植物が抵抗となって水生植物帯への進入が阻害されるからと考えられる。この水生植物帯中央部の植生を図示したものが図3である。汀線から15 m付近までは20 - 55 / m^2 、ヒメガマについて見ると20 - 24本と比較的安定した密度で繁茂していることが分かる。水生植物の茎の直径はヨシでは約5 mm、ヒメガマでは約20 mmであった。従って、流動の抵抗としては、ヒメガマの方が大きく作用しており、水生植物帯全体の抵抗としては比較的均一と見ることが出来る。距岸と流速の関係が、ここで見たように比較的高い相関関係（ $R = 0.995$ 、 $K = 0.148$ ）は、このような条件に支えられているものと見ることが出来る。水生植物帯内の流速は1 mを進行する毎に14%失速して行くから、水生植物帯の中ごろまで進むと24%に、20 m進んで汀線に近い地点では6.1%にまで失速する。

以上は8月中旬、風速10 m/secという条件下の測定例であるが、水生植物が潜掘を起こすことなく極めて大きな消波機能を果たしていることを示している。波浪によって水生植物帯へ供給された湖水の保持や水質の変化は水生植物帯の繁茂状況によって変化するものと考えられ、溶存酸素量や無機態窒素の分布が季節によって異なった分布を示すことは既に見た通りである。このことは、水生植物帯による水質浄化の構造、例えば無機化、硝化や脱窒が行われる水生植物帯内での位置、水質あるいは生物相等が季節によって変化することを示している。

次に波浪によって水生植物帯へ供給される湖水の大きさであるが、基本的には波浪によって砂浜に打ち上げられる水量とはほぼ同程度で風向・風速から推定できるものと考えられる。この場合には、SE 10 m/secであったから、前報1)の方法に従って波浪流量を計算すると117 ton/hを得る。一方、ここでの実測は水生植物帯の先端部の流速、6 cm/secと水深0.6 mから計算すると、129.6 ton/hを得る。この結果は風向・風速から求めた値と良く一致しており、抽水植物帯についても、風向・風速から計算によって求めても差し支えないことを示している。

(3) 溶存酸素量の分布

玉造町地先の霞ヶ浦の水生植物帯内の溶存酸素量が長期にわたって比較的低い値を示すことを観測し、抽水植物帯が生産よりも分解の卓越する場であろうと前報2)で述べた。このことが霞ヶ浦の全ての抽水植物帯について成り立つ現象であるかどうかを確かめることは重要であ

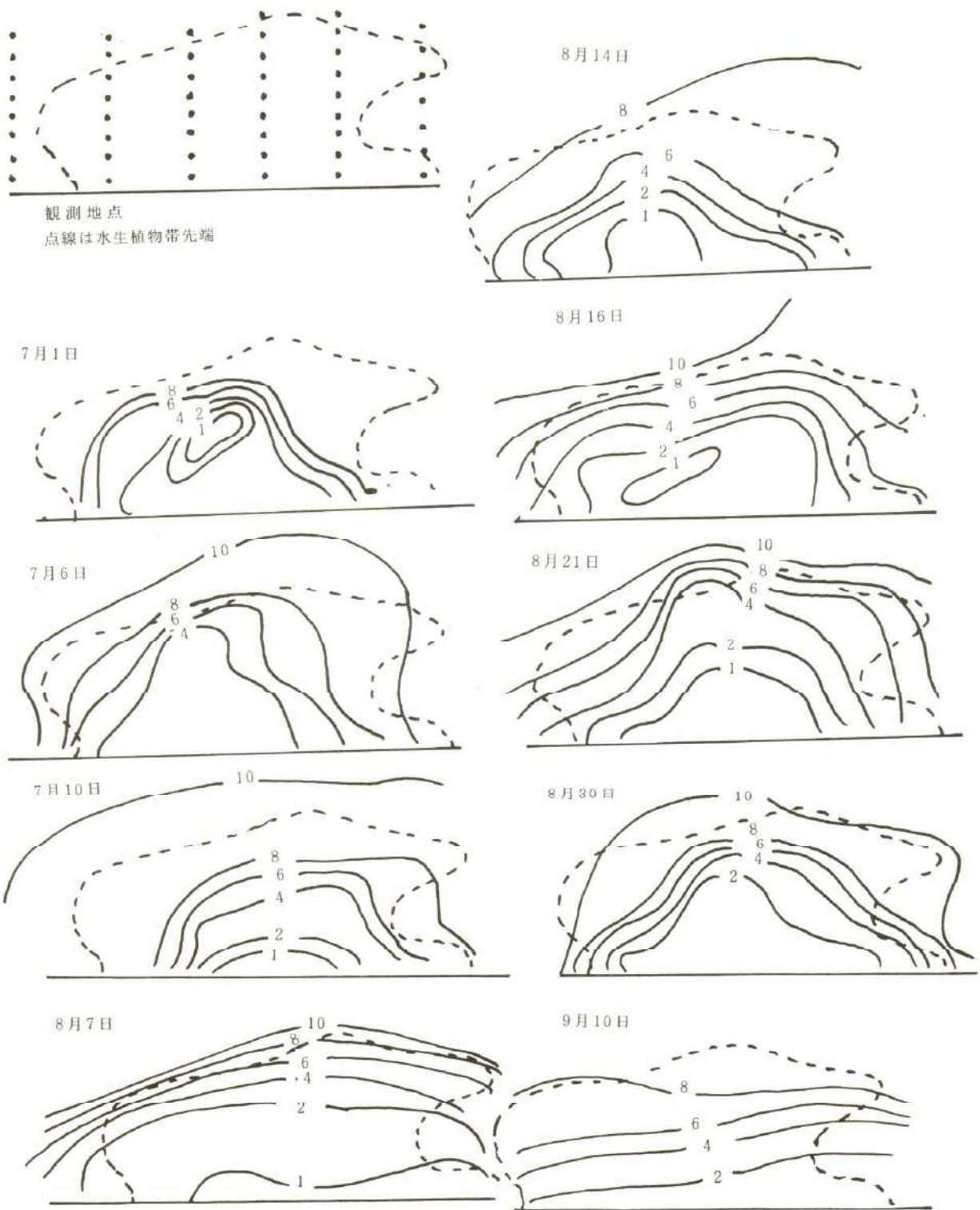


図5 水生植物帯の溶存酸素量 15:00-16:00に観測

る。そこで、ここでは前述の玉造町浜地先（図1）の水生植物帯を調査対象として溶存酸素量の観測を行った。調査は7月1日から9月10日までの間で9回の調査を実施した（図5）。

7月1日には既にヒメガマとヨシによって汀線から沖合い20mの薄囲が被われていた。

7月1日の溶存酸素量の分布は水生植物帯縁辺部に9-10ppmの高濃度が見られる縁辺部から10m程度内側以内で4ppm以下の低値が見られた。8月に入ると低酸素の分布範囲がさらに広がり8月7日の場合には水生植物帯の80%程度が4ppm以下、約50%が2ppmの低酸素状態となった。9月10日の調査では4ppm以下の範囲が水生植物帯の40%程度に減少している。いま、水生植物帯の全面積に占める溶存酸素量4ppm以下の面積の割合の季節変化を図示したものが図6である。4ppmを指標としたのは前報2)で4ppm以下の溶存酸素量で活発な脱窒の可能性が示唆されたからである。低酸素の範囲は7月上旬頃から急増し、8月上旬に約80%の最大値に達した後、8月下旬まで高水準を維持した。8月下旬には減少に向い9月下旬には20%程度になった。

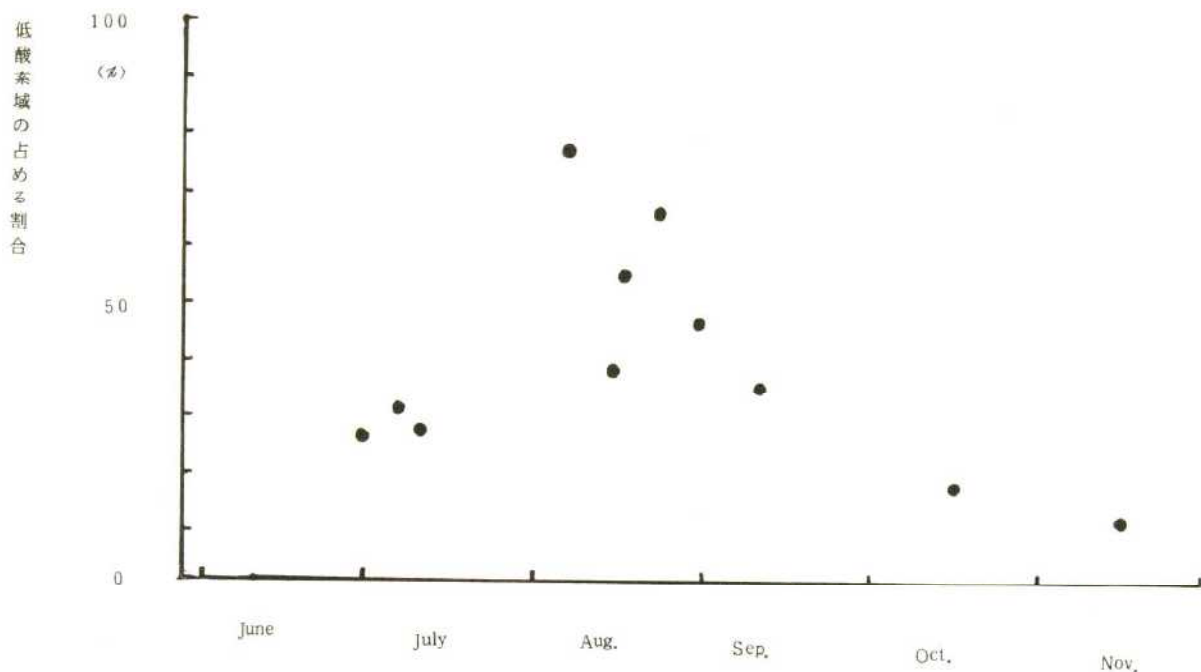


図6 水生植物帯の中で低酸素（4ppm）域の全体に占める面積

(4) 低酸素をもたらす諸要因

低酸素をもたらす要因はいくつか考えられるが、水生植物の繁茂にともなう照度の低下が考えられる。ここでは、浜地先 (st 2) の抽水植物帯における測定例を表 1 に示した。何れも比較的繁茂の活発な時期の観測であるが、快晴の日の 15:00 時に水生植物帯の外で測定した場合には 10000 lux 以上の照度があるが、測定例においても抽水植物帯の中では極めて低く 1000 lux 以下に低下していることが多い。霞ヶ浦で優占種となる *Microcystis* や *Oscillatoria* の光-光合成曲線を見ると 1000 lux 以下では生産が行われなことが多い。従って、照度という一つの条件を取り上げても、抽水植物帯では活発な生産は期待できない。

表 1 抽水植物帯内の照度

年 月 日	1989. 7. 18	1989. 7. 28
対 照	3200	10800
2.5	620	420
5.0	110	2100
7.5	400	120
10	1600	60
15	1530	5400
20	1400	8200
30	1640	10200
40	3200	10200
50	3200	10200

* 対象は抽水植物帯の外側陸寄

* 調査地点: st. 1。

照度以外の要因の中で、まず、考えられるのは枯死した水生植物による酸素消費である。そこで、酸素量の低下の大きい 8 月下旬に水生植物帯内の湖底の酸素消費量を測定した。直径 9.6 cm、長さ 40 cm のパイプを湖底に打ち込み湖底泥と湖水を同時に採取し、実験室に持ち帰り、パイプ中の湖水を酸素を十分に含んだ地下水に置き換え、密閉し、25℃ で暗所に放置し 4 時間後の酸素消費量を測定し表 7 の結果を得た。酸素消費量は湖岸に近い方で高く、400 $ml \cdot h \cdot m$ という高い値を示している。水生植物帯中央部では、これより若干低い約 345、水生植物帯の先端部では 295 という値を得た。水生植物の存在しない湖岸の酸素消費量は通常 20 - 50 ml であるから相対的に高値といえる。

表2 水生植物帯内の湖底泥の酸素消費量

距岸 (m)	酸素消費量 $mg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$	
2.5	389	351
10	317	371
20	-	295
測定年月日	1990. 6. 20	1990. 9. 10

* 水温 25℃

一方、ヒメガマの枯死した状態のものを（水生植物帯において自然に枯死した状態のものを採集）使用して、ヒメガマの酸素消費量を測定した。測定の方法は $50 \times 100 \text{ cm}$ 、水深 30 cm の水槽に湖水を毎分 60 l の割合で注入し、流入出口の溶存酸素量の差に流量を乗じて求めた。収容したヒメガマの量は抽水植物帯の現存量に相当する 1000 g であった。酸素消費量は水温の低い3月下旬までは 100 ml 以下であるが、4月に入り水温が上昇すると酸素消費量も上昇し5月上旬には 300 、7月上旬には 430 ml に達した。この値は先に行った抽水植物帯の底面からの酸素消費量に近い値であった（図7）。このことは抽水植物帯において酸素を消費する最大の要因は前年繁茂し枯死して冬を越した抽水植物の消費であることを示している。

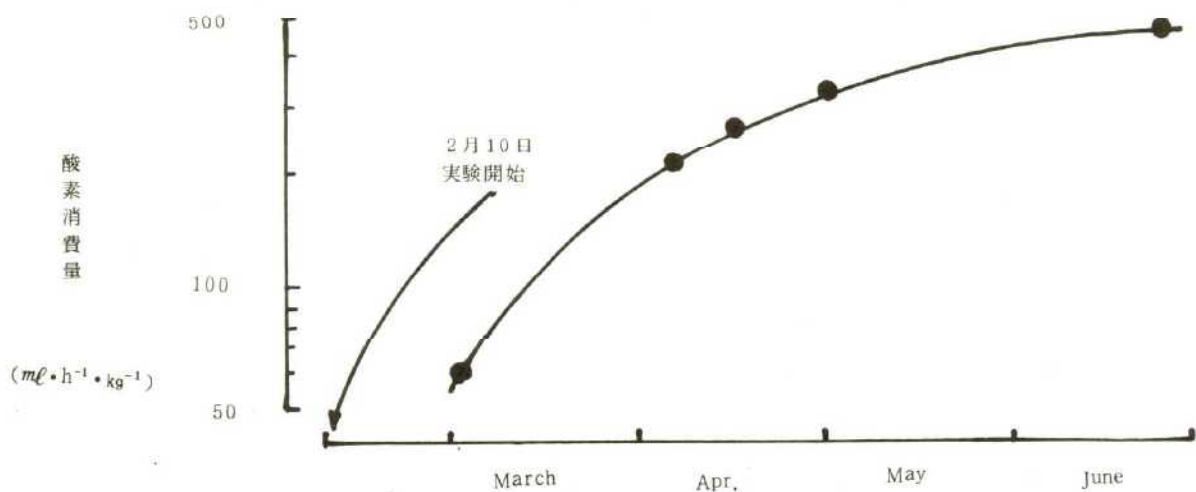


図7 枯死状態にあるヒメガマの酸素消費量

水生植物帯の酸素量を決定する要因はこの外に湖水の生産力がある。図8は水生植物帯で採水した湖水の自然光での（8000 lux，14-16:00）酸素生産速度を測定した一例を示したものである。生産力は汀線から4 mの範囲で負の値を示し，4 mを越える地点から正に転じ，全体としては，ロジスチック状の曲線を示している。このことは，まず，水生植物帯の水質が沖合いのそれと異質であることを示している。水生植物帯の沖側の湖水は生産側にあるのに対し，汀線よりで分解に転じているのは沖合いから水生植物帯に送り込まれた生産力を有する湖水が水生植物帯で何らかの影響を受けて生産力を失い分解に転じたことをしめしている。水生植物帯内で溶存酸素量が低値を示す原因の一つとして水生植物の繁茂にともなう照度の低下が考えられたが，それに加えて，水生植物帯自身が生産力を有する湖水を失活させるのではないかと考えられる。水生植物帯の生産力を失活させる作用の実体については，水生植物の代謝産物に

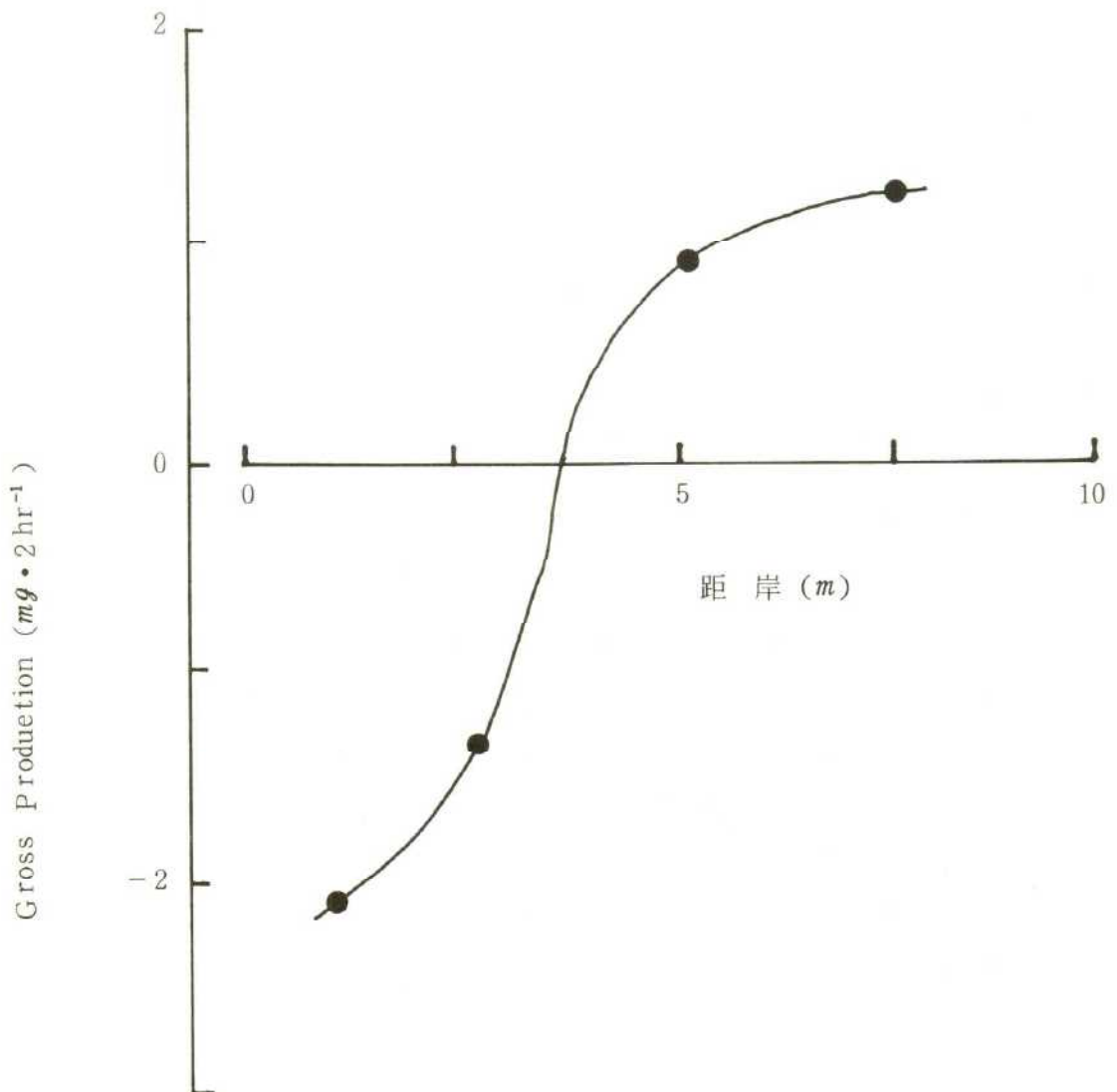


図8 抽水植物帯内の湖水の生産力

1990年8月30日 14-16時観測，8000 lux

よる他感作用や水生植物の分解産物である溶存態有機物が考えられる。ここでは、その実体を解明することはしないが、確認のために次の様な実験を行った。1 l のビーカーに湖水を採集しヒメガマの水面から10 cmの箇所の茎を10 cmの長さに切取り、湖水を含有するビーカー中に投入し、プランクトンの個体数の変化を対照と比較しながら観察した。実験を行った時の湖水中には、*Microcystis* spp. と *Oscillatoria agardii* が優占種であったが対照と比較すると藍藻2種の減少はヒメガマを投入した区で明らかに大きく、特に *O. agardii* で顕著であった(表3)。ここではヒメガマのプランクトン分解促進の実体については明らかではないが水生植物帯は、水生植物の繁茂によって照度を低下させると同時に何らかの機構によってプランクトンの生産機能を抑制し分解を促進する作用を有していることが示唆された。

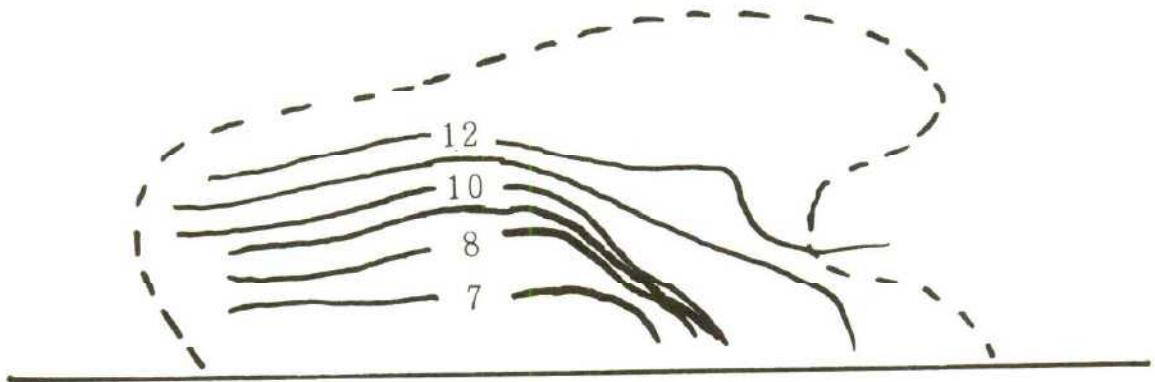
表3 ヒメガマを投入した水槽中の *Microcystis* spp. と *Oscillatoria* spp. の現存量の変化

経過 日数	対 照		ヒメガマ投入	
	M. spp.	O. spp.	M. spp.	O. spp.
0	2160	2700	2160	2700
3	1620	1740	900	1080
6	420	60	360	0
28	360	0	60	0

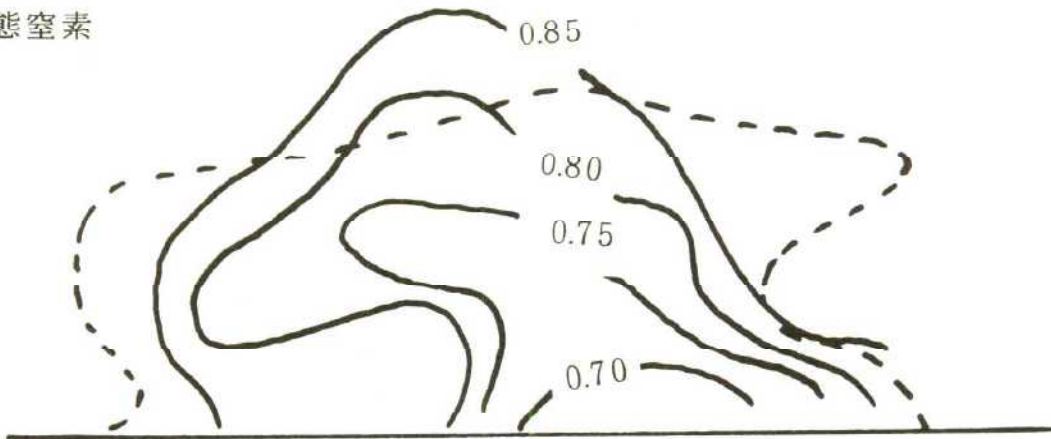
(5) 栄養塩の分布

水生植物帯内(st. 2)の栄養塩の分布は図9、表4の通りである。アンモニア態窒素水生植物帯の沖側の一部に高濃度の水塊が認められる以外は比較的低い水準にあった。硝酸態窒素について見ると、0.7 - 1.0 ppmの範囲にあって比較的高濃度に存在している。汀線近くで比較的低く水生植物帯先端部で高い値を示していた。これに対しリン酸の分布は0.06 - 0.14 ppmの範囲にあったが硝酸態窒素とは対照的に汀線よりで高く沖側で比較的低い値を示した。こうした硝酸態窒素とリン酸の分布の差を反映しN/P比は汀線よりでは7であるのに対し、沖方向へ進むにしたがって高くなり12となった。このように汀線に近づくに従って低値を示す現象は前報2)においても見られたところであり脱窒が係わっているのではないかと考えられた。

N/P



硝酸態窒素



リン酸

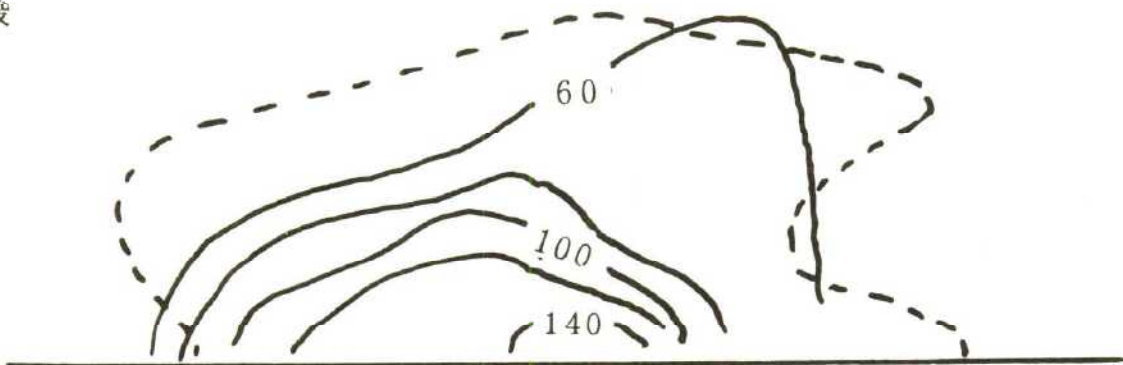


図9 抽水植物帯におけるリン酸，硝酸態窒素及びN/P比の分布
点線は抽水植物帯先端を示す。

表 4 抽水植物帯内の栄養塩の分布

1990年8月14日11:00観測, 地点1-1はst. 2

地 点		NH ₄ -N	NO ₂ +NO ₃ -N	PO ₄ -P	N/P
基点からの距離(m)	湖岸(m)				
70	2.5	0.07	0.83	0.139	6.47
	7.5	0.03	0.70	0.08	8.39
	12.5	0.00	0.82	0.058	12.06
	17.5	0.01	0.94	0.052	18.27
80	2.5	0.01	0.82	0.136	6.10
	7.5	0.01	0.93	0.121	7.77
	12.5	0.01	0.79	0.074	10.81
	17.5	0.00	0.72	0.054	13.33
90	2.5	0.01	1.07	0.163	6.63
	7.5	0.01	0.75	0.084	9.05
	12.5	0.00	0.77	0.059	13.05
	17.5	0.00	0.70	0.062	11.29
100	2.5	0.00	0.68	0.066	10.30
	7.5	0.00	0.84	0.066	12.72
	12.5	0.012	0.81	0.079	
	17.5	0.014	0.04	0.069	

3. 考 察

かつての霞ヶ浦湖岸の水生植物の植生を見ると湖岸帯陸域にヨシが分布し、更に水深30-40cm水深の湖岸帯水域まで繁茂していて、その沖合いにヒメガマが出現するのが一般的で、その沖側には浮葉植物と沈水植物の分布が見られた。しかし、今回調査を実施した浜地先の抽水植物帯を見ると水深40-60cmの範囲にヒメガマが分布していて、汀線よりの比較的浅い範囲にヨシが見られる。更に詳細に見ると距岸15m付近の比較的水深が浅く30-40cmの範囲にもガマにはさまれるようにして、ヨシの分布がみられる。自然の湖岸帯であれば水深は汀線から沖合いに向かって徐々に大きくなるのが普通であるが、この地点では湖岸が45度の勾配を有するコンクリート護岸で構成されているために汀線近くで水深が大きくなっていて、そのことが植生に反映し、不自然な分布を示しているものと考えられる。

水生植物帯内で溶存酸素量が、比較的低い値を示す現象は前年の調査においても認められたと

ころであった。今回の調査でも、水生植物帯の汀線よりの範囲で低酸素状態が殆ど常に観察された。水生植物帯の溶存酸素量を規定する要因は沖合いからの酸素供給量、水生植物帯における生産力、水生植物帯の酸素消費である。このうち生産力は、水生植物帯の沖側では照度が十分であれば酸素生産を行うが水生植物の繁茂にともない照度が低下し 1000 lux 以下となることが多く、そのような条件下では無視しても差し支えないであろう。従って、水生植物帯の溶存酸素量は、沖合いからの供給と水生植物帯内の呼吸量で決まるものと考えられる。供給量は前述のように水生植物帯内を単位延長進行する際に一定割合 (k) で減少していく。又、底面からの酸素消費は沖合いに向かうにしたがって一定割合 (k') で減少していく。従って、水生植物帯内の溶存酸素量 (dc/dl) は、 $V \cdot dc/dl = -k - k'$ で近似することが出来る。積分すると $C = C_0 \exp. (-k-k') \cdot l/V$ を得る。 C_0 は水生植物帯先端部の溶存酸素量であるが、水生植物帯の溶存酸素量は沖合いの溶存酸素量に比較して相対的に低値となる。又、水生植物帯の溶存酸素量の減衰勾配は酸素消費と沖合い水の供給によって決まるものであるから、風力が小さくなる程、 k' が大きくしたがって、 $-(k+k')$ が大きくなり酸素量の減衰勾配が大きくなる。水生植物帯の酸素消費量は、それまでに蓄積された水生植物の枯草によって決まるものであるから、この場の溶存酸素量の変動に大きな影響を及ぼしているのは沖合いからの湖水の供給で、波浪による供給と湖水の流動の抵抗となる水生植物の繁茂状況、密度や茎の直径等、が低酸素をもたらす主たる要因といえる。1989 及び 1990 年の 2 年にわたって 25 回の観測を実施したが、水生植物帯内の溶存酸素量の分布が汀線に向かって増加傾向を示したことは、従って水生植物帯内の溶存酸素量はその沖合いのそれを上回ったことは、皆無であった。このことは、抽水植物帯は、基本的には、抽水植物による生産によって気圏にたいしては生産の場ではあるが、水圏に対しては生産の場ではなく分解の場とみることが出来るように思われる。抽水植物帯が分解系の卓越する場であるとすると、そのような環境、例えば、pH が比較的低い状態で抽水植物の生育が保証されているはずである。pH の異なる条件下でのヨシの育成実験結果（茨城県内水面水産試験場、赤潮対策技術開発試験報告書、1986）によれば、ヨシの生育は、pH 7.0 の区で最も速く、pH の高い 9.0 の区で劣っている。抽水植物帯は、基本的には、水圏に対して分解系であり、分解系を反映した環境条件が、抽水植物自身の生育を有利に導くことも考えられるが、この実験結果は、そのことを裏付けている。又、抽水植物帯が分解の場を確保するための戦略としては、抽水植物の繁茂による日照の阻害だけではなく、抽水植物自身の代謝産物による積極的な分解促進が示唆された。

次に水質的な特徴のもう一つは、栄養塩の濃度が比較的高水準に存在することで、特に硝酸態窒素が存在することが特徴であった。前報 2) でも指摘したところであるが低酸素及び硝酸態窒素の存在という条件は脱窒の可能性を示唆する。

引用文献

- 1) 浜田篤信他（1990）：霞ヶ浦湖岸汀線上における波浪流量について，本誌26。
- 2) 浜田篤信他（1991）：霞ヶ浦の水生植物帯の生態学的検討、本誌27。
- 3) 茨城県内水面水産試験（1986）：赤潮対策技術開発試験報告書
- 4) 綿貫知彦（1990）：水草でアオコを防ぐ，遺伝44(9)。
- 5) 渋谷慶一他（1986）：*Microcystis aeruginosa* 無菌クローン株の増殖に対する栄養要因の検討，陸水誌，47，3，247-255。