

# 抽水植物, 沈水植物が河川水質に与える影響

関根雅彦\*・浮田正夫\*\*・中西 弘\*\*・  
城田久岳\*\*\*

実河川において抽水植物, 沈水植物が河川水質に与える影響を調査した。その結果, 抽水植物は平水時には水質浄化に寄与していないことが明らかになった。抽水植物の水質浄化効果は増水時の堆積作用が主要なものである。一方沈水植物は群落全体としては平水時水質浄化に寄与している。しかし増水時には剝離流出することにより下流域への負荷量削減効果は小さい。抽水植物, 沈水植物の存在意義は, 水質浄化面ではなく, 生態系の保全という観点から評価する必要がある。

*Key Words* : river water quality, emersed plants, submerged plants

## 1. 序 論

アオコの大量発生や赤潮等に代表される富栄養化問題の主たる原因は生活排水であるという考え方はすでに定着しており, 水域に流入する栄養塩負荷量をいかに低減するかが目下の課題である。このための対策として, 下水道, 浄化槽等の人工的な施設による処理が進められている一方で, 自然界にもともと存在した自浄作用を高度に利用しようとする動きもある。自然界の自浄作用の利用という考え方は, 近年の環境問題に対する関心の高まりに伴い, 地球に優しい技術として一般に受け入れられやすいものとなっており, これに関連して「生態工学」, 「自然型工法」等の新しいキーワード<sup>1)</sup>が定着しつつある。

水域での自浄作用を利用した技術としては, 礫間接触酸化等とならび, 水生植物の利用が検討されることが多い。水生植物による水質改善は古くから述べられているが, 多くは湖沼等の静水域で, ホテイアオイ等の浮漂植物を取り扱ったものである<sup>2)~4)</sup>。浮漂植物は栄養塩を直接水体から吸収するという意味で, 最も明確に水質浄化に寄与していると言える。また静水域であれば植物体と水の接触時間が長く, 効果を期待しやすい。抽水植物はもっぱら根から栄養塩を吸収していると考えられるため, 浮漂植物ほど単純に浄化効果を評価できないが, 植物体内の栄養塩は間違いなく水域内から吸収したものであるという意味で水質浄化に寄与すると期待されるのが普通である<sup>5)~9)</sup>。この観点から抽水植物についても静水域の岸辺での水質浄化についての詳しい研究<sup>10)</sup>がある。河川などの流水においては, 静水域ほど研究されていないが, 抽水植物を排水処理に用いる研究<sup>11)~14)</sup>や, 河川内における浄化の可能性に言及している研究<sup>15)</sup>が見られる。近

年では水質浄化のみならず, 抽水植物による流速低減効果に着目し, 河岸の保護工としての利用<sup>16), 17)</sup>まで検討されている。

しかし一方では, 水生植物栽培法は収穫量に比較して栄養塩除去量が少なく, また刈り取りに伴う回収が膨大になるとの指摘<sup>9), 18)</sup>や, 実湖沼におけるホテイアオイによる水質浄化施設において水質の浄化が認められないという報告<sup>4)</sup>等, その効果を疑問視する意見も少数ながら見受けられる。

水生植物帯は, 植物, 魚類から昆虫, バクテリアにいたる多様な生物の存在, 底泥との物質交換など, 複雑な生態系を持っている。このため, 実験室で測定された純粋な水生植物による水質浄化速度だけではとらえられない水質変化が起こっていると考えられる。

本研究は, これまであまり研究されていない流水中の抽水植物帯, 沈水植物帯に焦点を絞り, 実河川において底泥や種々の生物の効果を包括した水生植物帯全体が河川水質に与える影響を明らかにし, これら水生植物の河川水質浄化法としての利用可能性を評価しようとするものである。

## 2. 抽水植物の影響

### (1) 調査河川

調査河川は山口県宇部市の真締川である。調査期間は1989年4月から12月および1990年5月から12月である。水質調査の対象区域を図-1に示す。対象区域は全長831mの直線区間で, 途中流入はない。河床勾配は0.09—0.17% (平均0.13%), 川幅は10—20m (平均13m)である。この区域の上流端を上流採水地点, 上流から373mの位置にある堰を中流採水地点, 下流端を下流採水地点とした。以下では中流採水地点より上部を上流部, 下部を下流部と呼ぶ。6月1日から10月1日まで堰のため上流部の水位が高くなる。下流採水地点の直下には伏せ越

\* 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科  
(〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

\*\*\* 工修 宇部短期大学講師

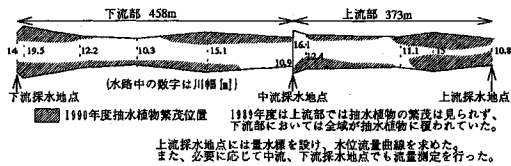


図-1 真綿川調査地点

しの暗渠があり、これが堰の働きをして下流部では通年水位が高い。上流部は1989年2月から3月にかけて河床整備が行われ、4月時点ではほとんど水生植物はみられなかった。下流部においてはほぼ全域においてガマ、ヨシ等の抽水植物が河床を覆い、河岸付近ではススキ等が繁茂していた。主流部は狭い水みちとなり、植物の密度が小さくなっていたが、抽水植物帯のほぼ全域が冠水していた。河床状態は、上流部においては砂利、下流部では粘土質の土壌の上に多量の泥が堆積していた。1989年7月14日には、下流部において人手により抽水植物が刈り取られたが、根節は残されたため植物相は急速に回復した。1989年10月13日にはパワーショベルが下流部河床に入り、堆積物とともに植物も除去された。一方上流部では、1989年中は植物の繁茂はごく一部に留まったものの、1990年度にはほぼ全面でヨシ、ガマが繁茂した。

(2) 水生植物量の季節変化

a) 抽水植物量

1989年度の植物量については、著者らが1984年から1985年にかけて同河川を含む数河川で実施した植生密度調査結果<sup>19)</sup>を用いて推定した。1990年度については、1989年度の河床整備の結果植生密度が小さくなっていたため、改めて調査を行なった。1990年5月から12月の間月1回、調査区間における代表的な抽水植物であるヨシ、ヒメガマ、ガマについて、それぞれの群落において1m<sup>2</sup>あたりの植物体本数を計数し、代表的な1本を根節を含めて採取した。ヨシ群落においては前年度の枯死した植物体も存在したが、これは計数は行ったが植物量としては計上しなかった。ヨシについては調査区間から約300m下流の群落、ガマについては上流部の群落、ヒメガマは下流部の若い群落から採取した。採取した植物体は、含有COD, T-N, T-Pを測定した\*。この分析結果から、月毎の各植物群落の単位面積あたり植物量を決定した。

調査区間全体の植生面積は、調査時に撮影した河床の写真から約50m毎の河川断面における各植物群落の被覆率を求め、区間面積を乗じる事により月毎に推定した。これに先の単位面積あたり植物量を乗じる事により調査区間全体の植物量を得た。

以上より求めた抽水植物量の季節変化を図-2に示す。

\* 含有CODとは植物体そのもののCODである。

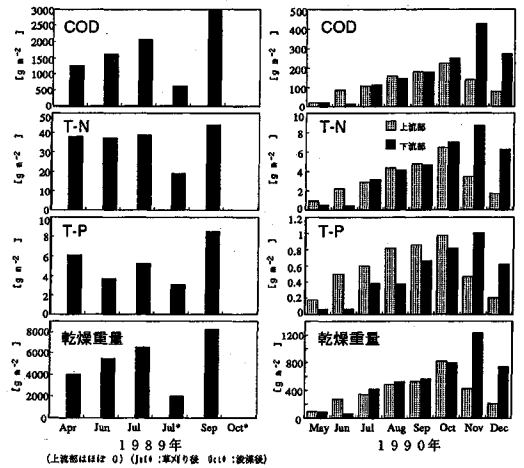


図-2 抽水植物量の季節変化

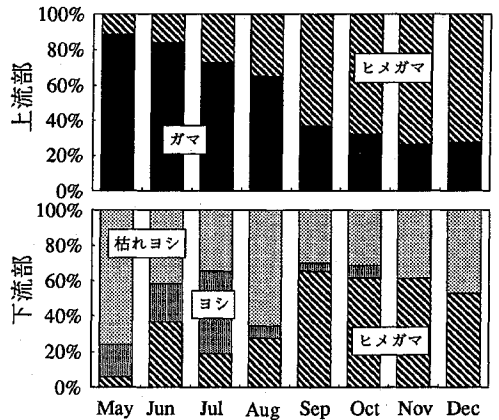


図-3 抽水植物構成比の季節変化 (CODによる)

また、1990年度調査に基づく抽水植物構成比の季節変化を図-3に示す。

b) 総生物量

植物群落内には、植物体だけではなく、魚や昆虫等様々な生物が生息している。これらの総生物量をヨシ群落において測定した。調査地点は水質調査を行った区間の約300m下流である。調査地点は川幅約16mで、左岸側約6mが流水部、残りの右岸側がヨシを主体とした抽水植物帯となっている。流水の接する左岸はほぼ鉛直の石組護岸となっており、植生はない。右岸はコンクリート傾斜護岸である。ヨシ群落部分は堆積作用により河床が高まっており、流水部に接する約1mの範囲を除いて平水時には地盤高と水面高がほぼ一致しており冠水していない。

調査にあたっては流下方向に10mの区間の上下を目的の網き1.5mmの網で仕切り、さらにその内部を同じ網に

表-1 総生物量調査結果 (1990/5/21)

	数量	湿重 (g)	乾重 (g)
水生植物帯			
貝	2	22.2	2.26
エビ	3	6.09	1.72
魚	11	0.136	0.017
昆虫	7	1.84	0.34
蛙	1	600	-
亀	1	350	-
流水部			
魚 (タナゴ)	1	2.71	0.62

(水生植物帯約 100m<sup>2</sup>, 流水部約 60m<sup>2</sup>あたり。ただし水生植物帯の非冠水部約 80m<sup>2</sup>は実質的には調査していない。)

表-2 総生物量調査結果 (1990/9/7)

	COD		T-P		T-N	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
生きたヨシ	2300	(5)	13.3	(10)	111.6	(11)
枯れたヨシ	4210	(9)	8.0	(6)	84.3	(8)
ガマ	680	(1)	3.6	(3)	15.5	(1)
根	38100	(84)	107.6	(78)	799.2	(76)
カニ	98.2	(0)	4.0	(3)	30.6	(3)
魚 (大)	23.1	(1)	1.0	(1)	5.4	(1)
魚 (小)	1.1	(0)	0.1	(0)	0.3	(0)
オタマジャクシ	0.96	(0)	0.09	(0)	2.0	(0)

(水生植物帯約 100m<sup>2</sup>あたり。)

表-3 抽水植物帯季節変化調査結果の概要

	1989年度			1990年度		
	上流部	中流部	下流部	上流部	中流部	下流部
流量 [m <sup>3</sup> /a]	0.194 (0.097)			0.223 (0.144)		
滞留時間 [hr]	2.36 (3.71)	3.44 (1.97)		2.49 (2.28)	3.88 (2.77)	
水質濃度	上流	中流	下流	上流	中流	下流
solCOD	3.13 (0.84)	3.16 (0.78)	3.35 (0.71)	3.09 (0.80)	3.40 (0.64)	3.22 (0.73)
[mg/l]						
ssCOD	0.970 (0.491)	0.976 (0.573)	1.196 (0.641)	0.790 (0.429)	0.725 (0.191)	1.061 (0.921)
[mg/l]						
solT-N	0.881 (0.158)	0.779 (0.158)	0.739 (0.157)	0.712 (0.305)	0.786 (0.246)	0.734 (0.281)
[mg/l]						
ssT-N	0.100 (0.071)	0.101 (0.067)	0.113 (0.080)	0.129 (0.181)	0.123 (0.047)	0.180 (0.122)
[mg/l]						
solT-P	59.2 (38.9)	46.2 (10.3)	45.0 (10.7)	46.7 (10.4)	44.7 (8.6)	37.5 (11.3)
[μg/l]						
ssT-P	26.3 (20.0)	32.2 (28.7)	42.9 (26.3)	20.5 (9.6)	24.5 (8.9)	29.7 (18.0)
[μg/l]						

(括弧内の数字はデータの標準偏差)

よってヨシ群落と流水部に分けた。網を張る作業により生物が区間外に逃げることを避けるため、網は調査日の前日に川底に沈め、調査当日には網を引き上げることに直ちに網を張れるようにした。区間内の生物は手網により全量採取を目指した。調査結果を表-1に示す。表-1より、植物帯には流水部の10倍以上の動物が存在していることが判明した。抽水植物帯は小動物の格好の生息場となっている。

以上の調査を通じて、ヨシ群落中に多数のカニ等の生息が観察された。しかしながら、本調査ではヨシ群落を刈り取らずに作業を行ったため、これらを計数することができなかった。この反省に基づき、ヨシの刈り取りも含め、完全に植物帯内生物を採取する調査を実施した。本調査では流水部生物量は調査せず、非冠水部を含むヨシ群落内のみをビニールシートで完全に囲い込んだ。前調査と同様、ビニールシートは前日あらかじめ河床に設置した。調査当日はまずヨシを全量刈り取り、地上部の全湿重を測定した。次いで冠水部、非冠水部に生息する動物を全量採取し、計数、重量測定を行った。最後に、非冠水部において25×25cmの範囲に存在する根部を全量採取した。採取した植物、動物については、含有COD、T-N、T-Pを測定した。調査結果を表-2に示す。表-2より、抽水植物帯における生物の存在形態としては植物の根が圧倒的に多く、全体のおよそ80%を占めることが判明した。動物は地上部植物量の2%(COD)—20%(T-N、T-P)程度が存在していた。

(3) 平水時水質への影響

a) 季節変化

調査期間中はほぼ週1回、上、中、下流採水地点にて11採水し、同時に水温と流量を記録した。流量に関しては採水地点間でほとんど違いが見られなかった。このため、上流採水地点に量水標を設置して水位—流量曲線を作成

し、特に事情のない場合は上流採水地点の水位を測定することにより流量を得た。また、滞留時間を得るため、あらかじめ調査区間の河床断面を約50mおきに測量し、各採水地点の水位、流量、河床の粗度係数を用いて水面形を算出し、調査区間の存在水量を推定した。水位—流量曲線や存在水量は、堰上げや浚渫が行われた場合にはそのつど更新した。なお、滞留時間の推定は以下の解析の基礎となるため、別に上流、中流採水点より食塩を流下させて中流、下流採水点にて電気伝導度計により塩素イオン濃度の時間変化を測定し、この測定値が拡散を伴う塩素イオン流下の解析解と一致するよう解析解に用いる拡散係数および存在水量を調整することにより推定存在水量に補正を施した<sup>20)</sup>。また、精度の高い水質データを得ることを目的として、1989年4月24—25日、7月3—4日、7月24—25日、12月6—7日の4回、24時間調査を実施した。24時間調査では各採水点にて1時間毎に11の採水、流量、水温測定を行った。調査時の水質濃度の概要を表-3,4に示す。

一般に、河川のある区間における水質濃度の変化には次式が適用されることが多い。

表-4 抽水植物帯 24 時間調査結果の概要

	流量 m <sup>3</sup> ・sec <sup>-1</sup>	水温 °C		滞留時間 hr		水量 m <sup>3</sup>		水深 m		下流部植物量 g・m <sup>-2</sup> ・m <sup>-1</sup>		
		上流部	下流部	上流部	下流部	上流部	下流部	上流部	下流部	COD	T-N	T-P
4/24 昼	0.190	16.0	16.4	0.40	3.13	275	2145	0.10	0.37	3520	102.1	15.5
4/24 夜	0.158	11.7	11.6	0.43	3.72	247	2119	0.09	0.37	3520	102.1	15.5
7/3 昼	0.245	20.4	20.5	1.87	2.54	1653	2239	0.46	0.39	5245	106.0	12.9
7/3 夜	0.200	19.5	19.1	2.24	2.64	1613	1905	0.45	0.33	5245	106.0	12.9
7/24 昼	0.115	28.0	30.0	3.88	3.74	1600	1540	0.45	0.27	2586	78.6	12.6
7/24 夜	0.091	24.2	24.9	4.81	4.43	1580	1456	0.44	0.25	2586	78.6	12.6
12/6 昼	0.086	11.6	12.5	0.60	3.51	186	1090	0.07	0.178	0	0.0	0.0
12/6 夜	0.076	8.5	8.6	0.68	3.98	186	1090	0.07	0.178	0	0.0	0.0

	上流濃度 mg・l <sup>-1</sup>			中流濃度 mg・l <sup>-1</sup>			下流濃度 mg・l <sup>-1</sup>			上流部減少係数 hr <sup>-1</sup>			下流部減少係数 hr <sup>-1</sup>		
	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P
04/24 昼	4.51	0.961	0.097	4.36	0.920	0.083	4.59	0.923	0.085	0.086	0.108	0.386	-0.017	-0.001	-0.009
04/24 夜	3.69	0.929	0.078	3.95	0.898	0.074	3.90	0.898	0.064	-0.158	0.078	0.120	0.003	0.000	0.040
07/03 昼	5.48	0.863	0.101	4.72	0.851	0.098	4.99	0.825	0.084	0.080	0.008	0.018	-0.022	0.012	0.060
07/03 夜	4.38	0.868	0.084	4.70	0.756	0.077	3.90	0.817	0.074	0.075	0.062	0.040	-0.020	-0.029	0.018
07/24 昼	3.21	0.838	0.077	3.50	0.649	0.081	4.37	0.650	0.097	-0.087	0.066	-0.016	0.008	-0.001	-0.046
07/24 夜	3.17	0.985	0.083	3.55	0.673	0.071	4.24	0.600	0.073	-0.023	0.079	0.033	-0.040	0.026	-0.008
12/06 昼	3.98	1.123	0.107	3.86	1.022	0.090	3.75	0.923	0.077	0.051	0.158	0.282	0.008	0.029	0.044
12/06 夜	3.09	0.951	0.069	2.74	0.867	0.057	2.90	0.852	0.062	0.180	0.138	0.274	-0.015	0.004	-0.021

(水質濃度, 流量, 水温は, 1 時間毎の測定値を 6 時から 17 時までを昼, 18 時から 5 時までを夜として平均している.)

下流部植物量は単位面積あたり植物量を水深で除したもので, 式 (3) の  $B_p/h$  に対応している.)

$$C = C_0 \exp(-kt) \dots\dots\dots (1)$$

$$k = -\frac{1}{t} \log\left(\frac{C}{C_0}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに C: 下流濃度 [mg/l], C<sub>0</sub>: 上流濃度 [mg/l], t: 滞留時間 [hour], k: 減少係数 [hour<sup>-1</sup>] である.

k が正值の場合, その区間で水質濃度が低下した, すなわち浄化されたことになる. 本論文では, 減少係数が正值の場合を浄化型, 負値の場合を汚濁型と呼ぶ.

季節変化調査より求めた減少係数を約 1 カ月毎に平均したものを図-4 に示す.

溶存態 (sol) 成分では, T-P, T-N は, 上流部では水生植物の存在しない 1989 年度には浄化型であるのに対し, 水生植物が繁茂しはじめた 1990 年度には汚濁型に転じた. 下流部についても, 上流部ほど明確ではないが植物の多い 1989 年度の方が植物の少ない 1990 年度より汚濁型傾向にある. COD については, 上流部では季節変化がみられ, 4 月~5 月には汚濁型の傾向があり, 夏場はやや浄化型に転じると見られる. また, T-P, T-N, COD いずれについても, 1989 年度単年では水生植物除去の直接の影響は明確には読み取れない. これは水生植物除去作業による河床の乱れが安定化するのに時間を要するためであると考えられる.

懸濁態 (ss) 成分では, COD, T-N, T-P とも sol に較べて減少係数の変動範囲が大きいことがわかる. また, sol ほど明確な傾向は見いだせない.

溶存態と懸濁態を合計した total 成分では, sol 成分の影響が卓越するため sol に近似した結果となっている.

以上から理解されるように, 抽水植物の存在は平水時水質浄化にほとんど寄与していないか, もしくはいくぶん水質汚濁に寄与しているように思われる.

表-5 抽水植物帯 24 時間調査結果の最小 2 乗近似による減少係数

	相関係数*	k <sub>20</sub>	k <sub>20p</sub>	k <sub>T</sub>	k <sub>Tp</sub>
上流部					
COD	0.11	7.19 × 10 <sup>-2</sup>	—	1.077	—
T-N	0.76	5.24 × 10 <sup>-2</sup>	—	0.912	—
T-P	0.52	1.16 × 10 <sup>-1</sup>	—	0.923	—
下流部					
COD	0.71	-1.28 × 10 <sup>-2</sup>	-1.76 × 10 <sup>-6</sup>	1.207	1.163
T-N	0.60	2.19 × 10 <sup>-2</sup>	-2.68 × 10 <sup>-4</sup>	1.033	1.051
T-P	0.41	4.07 × 10 <sup>-2</sup>	-1.14 × 10 <sup>-4</sup>	1.159	1.000

\* 相関係数は測定 K と計算 K の相関.

b) 植物の影響の抽出

抽水植物が水質に与える影響を抽出するため, 式 (2) の減少係数 k に抽水植物生物量 B<sub>p</sub> [g/m<sup>2</sup>] と水温 T [°C] を明示的に導入し, 次式のように表記できると仮定した.

$$K = k_{20} k_T^{T-20} + k_{20p} k_{T_p}^{T-20} B_p/h \dots\dots\dots (3)$$

ここに k<sub>20</sub>: 20 °C における水生植物以外に係わる減少係数 [hour<sup>-1</sup>], k<sub>20p</sub>: 20 °C における水生植物に係わる減少係数 [m<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>hour<sup>-1</sup>], k<sub>T</sub>: 水生植物以外に係わる温度係数 [-], k<sub>Tp</sub>: 水生植物に係わる温度係数 [-], T: 水温 [°C], h: 水深 [m] である.

解析には 24 時間調査結果を用い, 水温・水質濃度を日中の 12 時間と夜間の 12 時間でそれぞれ平均して 1 つのデータとした. ただし, 草刈直後で河床が安定していなかった 1989 年 7 月 24 日のデータは除き, 6 組の K, T, h を求めた. (表-4) これらの値を用い, 最小 2 乗回帰により式 (3) の k<sub>20</sub>, k<sub>T</sub>, k<sub>20p</sub>, k<sub>Tp</sub> を求めた結果を表-5 に示す.

表-5 より, 下流部において COD では水生植物項 (k<sub>20p</sub>), 非水生植物項 (k<sub>20</sub>) 共に汚濁型となった. T-N, T-P では非水生植物項は浄化型であるが, 水生植物項は汚

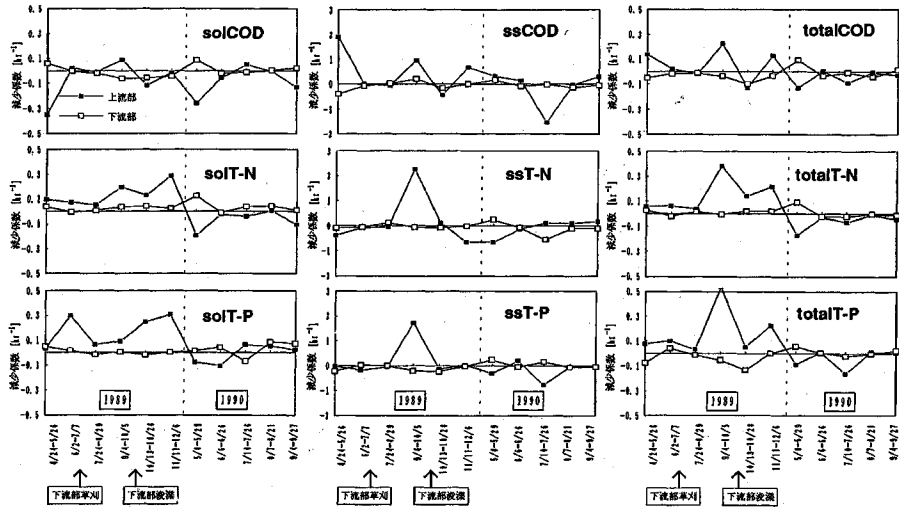


図-4 抽水植物帯水質季節変化調査における減少係数の変化

表-6 抽水植物帯における非水生植物項と水生植物項の比と水生植物による汚濁物質減少速度

	$\frac{k_{20p}k_T^{T-20}B_p/h}{k_{20}k_T^{T-20}}$		水生植物による汚濁物質減少速度 [g・hr <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	
	4/24	7/3	4/24	7/3
COD	0.66	0.75	$-6.79 \times 10^{-3}$	$-3.08 \times 10^{-2}$
T-N	-1.08	-1.28	$-1.63 \times 10^{-2}$	$-2.17 \times 10^{-2}$
T-P	-0.15	-0.04	$-1.21 \times 10^{-4}$	$-1.11 \times 10^{-4}$

濁型となった。非水生植物項においても上流部より下流部のほうが減少係数が小さいことから、抽水植物の繁茂する河床では水生植物以外の生産・分解活動等も活発であることがうかがわれる。

次に、非水生植物項に対する水生植物項の比率と水生植物による汚濁物質減少速度を表-6に示す。CODでは水生植物が河床全体の生産活動の約40%を占めている。T-Nでは非水生植物項による浄化分と同程度が水生植物により汚濁されている。T-Pでは水生植物の影響はCOD, T-Nに較べると小さい。

細川ら<sup>10)</sup>が整理した淡水性水生植物の栄養塩取り込み速度は、ヨシで  $200-400\text{kg-N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ,  $20-45\text{kg-P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ , ガマで  $600-2630\text{kg-N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ,  $75-403\text{kg-P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ である。また、枯れヨシからの溶出速度は窒素について取り込み速度の概略4割としている。一方表-6では、水深を50cmと仮定すると抽水植物帯ではN, Pそれぞれ  $700-950\text{kg-N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ,  $5\text{kg-P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ 程度の栄養塩を放出していることになり、これは前述の枯れヨシからの溶出速度とオーダー的に匹敵するものである。

#### (4) 堆積速度の推定

河道内での懸濁物質堆積速度は、パン法により測定することが普通であるが、河床付近の流れを乱すため自然状態の堆積速度を求めることは難しい。このため、積年の堆積物量から堆積速度の推定を試みた。

山口県支部土木事務所によると、1989年度の真縮川浚渫により629mに渡って1404m<sup>3</sup>の底泥が除去され、この時の工費は約600万円であった。前回の同様の浚渫は1986年度末に実施されているから、3年間分の堆積物が除去されたことになる。1984年6月から1986年1月にかけて著者らが実施した真縮川水生植物帯における底泥調査結果5地点×5回の平均によると、約15cm厚の底泥の汚濁物質含有量(mg/g-湿泥)はCOD:13.7, T-N:0.60, T-P:0.24, 比重は1.36g-湿泥/cm<sup>3</sup>であった。これらの値を底泥の汚濁物質含有量の代表値と仮定し、平均幅幅を12mとして3年間平均の汚濁物質堆積速度(kg-ha<sup>-1</sup>・y<sup>-1</sup>)を概算すると、COD:11600, T-N:510, T-P:220となる。Nに関しては水生植物帯からの汚濁物質放出量に匹敵する量、またPに関しては放出量の約40倍が堆積することになる。ただしこの値は植物体自身が倒伏し積層する分も含んでおり、純粋に懸濁物質のみが堆積したものではない。

なお、このような観点からは、増水時の水生植物帯上流端、下流端の水質調査では浄化作用が見られるはずであるが、実際の水質調査結果では増水時の河川水質は採水位置による違いや時間変動が大きく、明確な傾向は見出せなかった。

### (5) 水質浄化効率の評価

平水時に水質浄化が見られないことから, 抽水植物帯では植物体の倒伏および増水時の懸濁物質の堆積により河床が上昇し, 植物体はもっぱら枯死した植物体および堆積物からなる底泥から栄養塩を吸収して成長していると考えられる. 実際植物帯では3年間で50cm以上も河床が上昇した部分もある. このため植物体の平水時水質への寄与は小さく, かえって植物体の新陳代謝に伴うCODの生産や付着微生物の生産・分解作用により汚濁側に作用している. また, 堆積物からの脱窒も考えられるが, 植物帯においては懸濁物質の堆積が堆積物の流出より卓越しているため堆積物の水体への回帰が少ないと考えられ, 水質浄化への直接の寄与という形では評価できなかった. また, 植物帯では脱窒だけでなく窒素固定もありうることに注意する必要がある.

以上の考察より, 堆積作用が抽水植物帯における主要な浄化作用であると考え, 水生植物帯を処理装置と見なした場合の処理コストを先の真締川の浚渫工事を元に概算し, 他の水処理費用と比較した. 浚渫はそもそも汚濁物質除去を目的としたものではないため, これを水処理費用として比較することには無理があるが, 一つの参考にはなろう. 堆積物の汚濁物質含有量を式(4)<sup>21)</sup>により総酸素要求量(TOD)に換算する.

$$\text{TOD} = 3 \times \text{COD} + (19.7/2) \times \text{T} - \text{N} + (143/2) \times \text{T} - \text{P} \quad (4)$$

これによれば単位湿泥あたりのTODは64.2mg/g-湿泥となり, 真締川の浚渫により除去された底泥のTODは123tonである. 植物体は最も繁茂している状態でCOD:3000, T-N:40, T-P:9g・m<sup>-2</sup>程度であるから(図-2), 0.75haの河床全体のTODに換算すると75ton, 底泥と合わせて総除去TODは約200tonとなる. 浚渫工事費は600万円であるから処理単価はおよそ30円/kg-TODである. 一方, 公共下水道や屎処理場の処理単価は220—250円/kg-TOD, 食品工業の産業排水処理単価は39—42円/kg-TODである<sup>22)</sup>から, 抽水植物帯での堆積作用と浚渫による堆積物の除去は, 処理コスト的には公共下水道等のほぼ1/8, 食品工業の排水処理にほぼ匹敵する.

ただし, 真締川流域の総排出負荷量1800ton-TOD/y(COD:227, T-N:30, T-P:11ton・y<sup>-1</sup>より推算<sup>23)</sup>)と比較すると, 調査区間0.75haの河床で年間の汚濁物質除去率はわずか4%弱にすぎない. 仮に真締川全河床約7haに抽水植物が繁茂しているとして, 全域を浚渫することでようやく35%程度の汚濁物質除去率となる.

さらに, 水生植物帯におけるCOD存在量の大部分は植物の生産によるものであるとも考えられるため, 除去TODの算定からCODを除外して考えると, 同様の計算により総除去TODは約50ton, 処理単価はおよそ120円/kg-TODとはね上がる. 汚濁物質除去率は真締川流域

の総排出負荷量1100ton-TOD/yと比較すると0.75haの河床で1.6%, 真締川全域でも15%となってしまふ.

もちろんこの除去率が毎年維持されるようであれば河川が埋没していくことになるし, 河床の埋没が土砂の流亡とバランスするようであれば除去率は維持されないことになる.

逆に言えば植物体や堆積物による通水断面積の減少という治水上困った事態を回復させるための工事が結果的に汚濁物質除去となっているわけであり, 抽水植物による河川水質の浄化は治水問題と表裏一体であることを認識する必要がある.

また, 抽水植物を積極的に刈り取れば植物体に含まれているN,Pを河川系外に除去できることははっきりしているが, それにより植物帯の堆積作用が弱まり, せっかく沈殿除去した汚濁物質を再流出させてしまう可能性があることに注意しなければならない.

## 3. 沈水植物の影響

### (1) 調査河川

調査河川は山口県山口市の九田川である. 調査地点の川幅は, 上流点で約4.5m, 下流点で8.5mであった. また, 上流点と下流点間の距離は約450mであった. 調査は1989年7月から平成2年7月にかけて約1カ月毎に行った.

### (2) 水生植物量の季節変化

調査区間内の上流点・中流点・下流点の3箇所川幅方向に2~3本程度の測線を設け, 順次50cm×50cmの方形枠を置き, 方形枠内での面積当たりの沈水植物の種類別植被面積を現場における作図とビデオ記録を基に定めた. また, それぞれの出現種について, 植被率測定点周辺で平均的な植被密度を示す代表的な株を選び, 植被面積を概測した. 次に, その株をなるべく乱さないように根こそぎ採取し, 蒸留水中で十分すすぐことにより藻本体と付着物質を分離し, それぞれの含有成分を分析した. 得られた沈水植物および付着物量の季節変化を図-5に, 沈水植物の出現種の構成比の季節変化を図-6に示す.

### (3) 平水時水質への影響

#### a) 季節変化

調査時の水質濃度(mg・l<sup>-1</sup>)はCOD 2.55—7.31(平均4.44) T-N 0.005—0.547(平均0.188) T-P 0.076—0.19(平均0.132)であった. また, 流量(m<sup>3</sup>/s)は0.225—1.16(平均0.52), 流下時間(hr)は0.22—0.82(平均0.46)であった. 抽水植物と同様に, 式(2)を用いて求めた減少係数を図-7に示す. 調査頻度が抽水植物のものより少ないため, 同列に論じることはできないが, 図-4と比較すると沈水植物帯の減少係数は抽水植物帯のそれより大きな正値をとっている. すなわち, 見掛け上浄化型であるといえる.

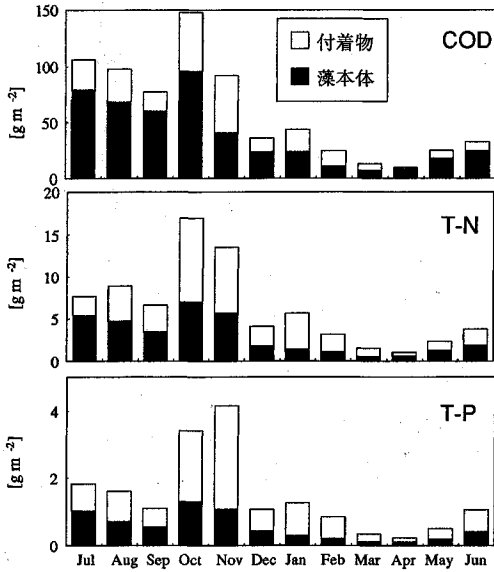


図-5 沈水植物および付着物量の季節変化

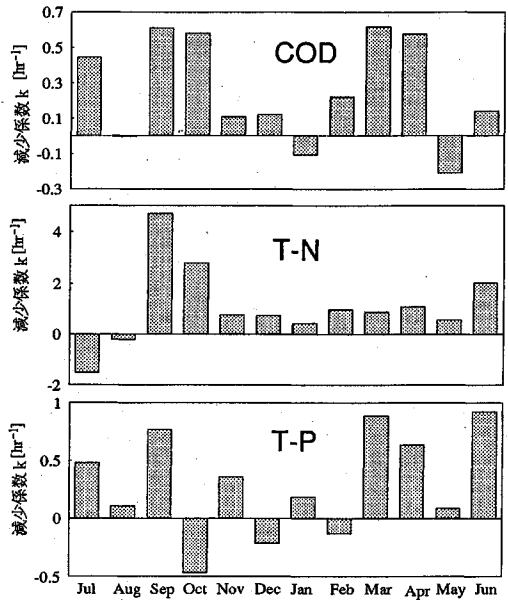


図-7 沈水植物帯の減少係数

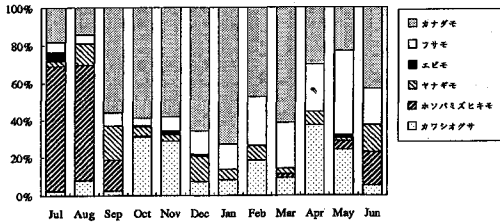


図-6 沈水植物出現種の構成比の季節変化

b) 植物の影響の抽出

抽水植物の場合と同様に、式(3)を用いて植物の影響の抽出を試みた。ただし、沈水植物においては付着物量が植物体に匹敵するほど存在するため、式(3)の他に、植物体に加えて付着物をも考慮した式(5)による解析もあわせて行った。

$$K = k_{20}k_T^{T-20} + (k_{20p}k_{T_p}^{T-20}B_p + k_{20s}k_{T_s}^{T-20}B_s)/h \dots (5)$$

ここに  $k_{20s}$ : 20℃における付着物に係わる減少係数 [ $m^3g^{-1}hour^{-1}$ ],  $k_{T_s}$ : 付着物に係わる温度係数 [-] であり、他の記号は式(3)と同様である。抽水植物の解析にあたっては24時間調査結果の12回の採水の平均を1データとして解析を行ったが、ここでは月1回の調査結果をそのまま1データとして用いた。式(3)に対しては  $k_{20}, k_T, k_{20p}, k_{T_p}$  を、式(5)に対してはこれに加えて  $k_{20s}, k_{T_s}$  を、それぞれ最小2乗回帰により求めた。結果を表-7に示す。

表-7における相関係数は、 $k_{20}, k_T, k_{20p}, k_{T_p}, k_{20s}, k_{T_s}$  により求めた  $k$  と実測値による  $k$  の相関である。これによれば、

式(5)(付着物量を考慮して評価)の方が明らかに相関が高い。従って、沈水植物帯では付着物量の評価も大切であることがわかる。 $k_{20p}$  と  $k_{20s}$  を比較すると、N,Pでは植物体は汚濁側に働き、付着物は浄化側に働いており、CODはその逆であることがわかる。これは付着物が栄養塩を吸収して生長し、分泌物あるいは本体が流出してCODとして検出されるものと考えられる。

次に、非水生植物項と沈水植物項+付着物項の比、沈水植物項と付着物項の比、および沈水植物と付着物による汚濁物質減少速度の年平均値を表-8に示す。これより、Nでは植物体および付着物が水質に大きな影響を及ぼしているが、COD,Pでは植物体や付着物以外の影響が大きいと考えられる。ただし、水生植物量や付着物量と直接的に関連していなくとも、植物が存在することにより河床全体の浄化活性の向上に寄与している可能性はある。

(4) 水質浄化効率の評価

抽水植物帯に比べ沈水植物帯では区間全体として明らかに強い浄化型を示した。しかしながら植物の寄与を抽出するときほど大きくないという結果を得た。もちろん植物量や付着物質量と直接の関係が得られなくとも、植物の存在により河床環境が浄化型となっていることは十分考えられるが、ここではそれを示すことはできない。

ところで、沈水植物帯では、抽水植物帯に見られるような堆積物による顕著な河床の上昇は見られない。これは沈水植物が抽水植物に比べ河床への固着力が弱く、増水時には河床から剥離して流亡することによる。仮に沈

表-7 沈水植物帯における毎月調査結果の最小2乗近似による減少係数

		相関係数	$k_{20}$	$k_{20p}$	$k_{20s}$	$k_t$	$k_{T_p}$	$k_{T_s}$
植物量のみを考慮	COD	0.14	0.218	$1.67 \times 10^{-4}$	—	1.006	1.016	—
	T-N	0.14	0.876	$6.89 \times 10^{-3}$	—	0.995	0.993	—
	T-P	0.57	0.697	$-5.31 \times 10^{-2}$	—	1.126	1.208	—
植物量と付着物量を考慮	COD	0.53	0.188	$4.61 \times 10^{-4}$	$-1.15 \times 10^{-4}$	0.977	1.0	0.757
	T-N	0.70	0.887	$-9.93 \times 10^{-3}$	$9.03 \times 10^{-2}$	1.042	1.931	1.518
	T-P	0.63	0.539	$-2.02 \times 10^{-2}$	$8.87 \times 10^{-2}$	0.998	0.864	0.905

(相関係数は、 $k_{20}, k_T, k_{20p}, k_p, k_{20s}, k_{T_s}$ により求めた  $k$  と実測値より  $k$  の相関)

表-8 沈水植物帯における非水生植物項と沈水植物項+付着物項の比, 沈水植物項と付着物項の比, および沈水植物と付着物による汚濁物質減少速度の年平均

	$\frac{(k_{20p}k_{T_p}^{T-20}B_p + k_{20s}k_{T_s}^{T-20}B_s)/h}{k_{20}k_T^{T-20}}$	$\frac{k_{20p}k_{T_p}^{T-20}B_p}{k_{20s}k_{T_s}^{T-20}B_s}$	沈水植物と付着物による汚濁物質減少速度 [ $g \cdot hr^{-1} \cdot m^{-3}$ ]
COD	0.02	-19.31	$3.85 \times 10^{-3}$
T-N	0.86	-0.22	$3.89 \times 10^{-2}$
T-P	-0.04	-1.10	$-3.05 \times 10^{-3}$

抽水植物帯が平水時水質浄化に寄与しているとしても、栄養塩を吸収した植物体や付着物が剥離・流下し、分解されることにより、結局は下流部に汚濁物質をもたらすことになる。

このように考えると、沈水植物帯は平水時水質に好影響を与える可能性がある反面、管理が難しく、下流に対する汚濁物質総量の削減はあまり期待できないのではないか。

#### 4. 結論

抽水植物帯, 沈水植物帯が河川水質に与える影響を実河川において調査・解析した。

抽水植物帯においては植物体の成長に伴う栄養塩の吸収により目に見えて水質浄化が起こっているように考えられがちであるが、平水時の水質浄化効果はほとんど認められないばかりか、水質悪化を招く場合すら見られた。抽水植物は、水体からではなく、もっぱら枯死した植物体および堆積物からなる底泥から栄養塩を吸収していると考えられる。抽水植物帯における主要な水質浄化作用は増水時の懸濁物質堆積作用であると考え、堆積物の浚渫費を水処理費用と見立てて水処理コストを試算すると、下水処理費用より安価となった。ただし、河床を最大限に利用しても汚濁物質除去率は15%程度であり、通水断面の低下を伴うことを考えれば水質浄化法としての積極的な利用はためらわれる。

一方、沈水植物帯においては平水時水質の浄化作用が認められた。しかし、沈水植物帯では増水時に植物体や付着物が容易に剥離・流下する。剥離した植物体や付着物は分解されることにより COD 増加に寄与するため、下流域にかえって汚濁負荷をもたらす可能性がある。このような意味で、沈水植物帯でも水質浄化作用を有効に利用することは難しい。

以上の結果のみを考えると、水質の浄化という観点からは河川における抽水植物, 沈水植物の存在価値は評価しにくいことになる。しかしながら、これをもって抽水植物, 沈水植物の存在価値に疑問を呈するのは筆者らの本意では決してない。総生物量調査結果からも明らかのように、水生植物帯の生物の生息場としての側面を見落としてはならない。著者らのアンケート調査<sup>24)</sup>によれば、市民は河川環境の重要な要素として水質ではなく魚をあげている。水生植物帯を破壊すると魚が生息できなくなる可能性が高い。水生植物帯は水質浄化の観点から論ずるより生態系の一部としての価値を論ずることが重要であろう。

#### 5. あとがき

筆者は Dr. G. Friedrich の自然型工法についての講演会<sup>25)</sup>に参加する機会を得た。ドイツでは多様な生態系を回復するため河岸に草や樹木を植えることが推奨されているとの話であった<sup>26)</sup>。日本でもかつては害虫の発生を防ぐため農家が自発的に河川の草刈りを行っていた。ところが、農業の進歩によりもはや草刈りの必要がなくなり、現在ではほとんど行政の手にまかされている。この結果、管理の面倒をなくすために河川をコンクリート三面張としたり、治水上問題になる寸前まで河岸や河床の植物が放置されたりするのである。ドイツでは草の管理はどうするのかとの筆者の質問に対して、Dr. Friedrich からは「河川管理者 (River Authority) が草刈りや浚渫をする」という回答を得た。講演会の参加者の多くは実際に河川管理にあたっている行政担当者であったが、この答えに失笑が起こっていた。この笑いはおそらく、「日本じゃ治水で手いっぱいなのに、さらに手の掛かるような



工法は採用できないよ」という意味であろう。筆者はこの笑いが日独の行政者の見識の違いをはっきり表していると考え、ドイツの行政者は、河川の草刈りという面倒を背負ってでも生態系を守っていくことが河川管理上不可欠で重要な事項と認めているのである。また、それが当然と受けとめるほど社会が成熟しているのである。

常に植物を管理し、堆積物を除去するといったきめのこまかい対策がとれるほどに社会が成熟すれば、抽水植物、沈水植物が目に見えるような浄化の役割を担うこともあるいは可能かもしれない。

謝辞：本研究は財団法人河川環境管理財団のご援助を得た。記してここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 森忠洋・長川秀実：エコテクノロジーを活用した松江城堀川の直接浄化，用水と廃水，Vol.32, No.8, pp. 686-691, 1990.
- 2) 今岡務・寺西靖治：ホテイアオイの成長速度と栄養塩吸収特性に関する解析—とくに窒素について—，衛生工学研究論文集，Vol.19, pp. 109-115, 1983.
- 3) 小田中敏男：水生植物による流水の浄化に関する研究，東京都立工科短期大学研究報告，Vol.14, pp. 145-156, 1986.
- 4) 本橋敬之助：ホテイアオイ植栽圃場における水質の経時変化—手賀沼を例にして—，水処理技術，Vol.33, No.4, pp. 185-192, 1992.
- 5) 新井洋一・大槻忠・名取真：リビング・フィルター 生物の働きを利用した環境浄化，PPM, Vol.10, No.8, pp. 16-23, 1979.
- 6) 徳永隆司：水生植物の水質汚濁防止への利用，用水と廃水，Vol.23, No.2, pp. 127-135, 1981.
- 7) 小島貞男：自然の浄化力を利用した水質改善，用水と廃水，Vol.24, No.1, pp. 5-12, 1982.
- 8) 青山勲：水生植物を利用した水質改善，用水と廃水，Vol.24, No.1, pp. 87-94, 1982.
- 9) 細見正明：湿地による水質浄化，用水と廃水，Vol.32, No.8, pp. 716-719, 1990.
- 10) 細川恭史・三好英一・古川恵太：ヨシ原による水質浄化の特性，港湾技術研究所報告，Vol.30, No.1, pp. 205-237, 1991.
- 11) 名取真：水生植物による排水処理，環境技術，Vol.7, No.9, p. 87, 1978.
- 12) Reddy, K. R. and Busk, W. F. D.: Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes, Journal of Environmental Quality, Vol.14, No.4, pp. 459-462, 1985.
- 13) 橋本英・古川憲治・刑部忠彦：鹿沼土と水生植物による2次処理水の高度処理に関する研究，水道協会雑誌，Vol.57, No.4, pp. 47-54, 1988.
- 14) 本部広哲・新納正也・上田耕三郎：ブラックマップを用いた植物フィルターによる水中の窒素・リンの除去，用水と廃水，Vol.32, No.6, pp. 486-490, 1990.
- 15) 三島亨：水生植物による水域浄化システム，ヘドロ，Vol.33, pp. 43-50, 1985.
- 16) 福岡捷二・新井田浩・佐藤健二：オギの河岸侵食抑制機構と耐力の評価，水工学論文集，Vol.36, pp. 81-86, 1992.
- 17) 福岡捷二・甲村謙友・渡辺明英・三浦央晴：船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果，水工学論文集，Vol.36, pp. 713-716, 1992.
- 18) 須藤隆一：水域の直接浄化の意義と展望，用水と廃水，Vol.32, No.8, pp. 663-667, 1990.
- 19) 関根雅彦・山本修司・浮田正夫・中西弘：河川水質解析における河床堆積物の評価—水草帯堆積物について—，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，Vol. 2, pp. 509-510, 1985.
- 20) 関根雅彦・浮田正夫・中西弘・豊田商久：河川水質モデルにおける拡散の取扱いに関する一考察，第43回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 138-139, 1991.
- 21) 浮田正夫：わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究，学位論文，京都大学，1983.
- 22) 浮田正夫・中西弘：瀬戸内海への栄養塩類の流入負荷解析と対策，瀬戸内海研究フォーラム in 広島瀬戸内海研究会，1992.
- 23) 関根雅彦：汚濁負荷流出・流下モデルに基づく河川水質予測手法に関する研究，学位論文，京都大学，1991.
- 24) 豊田商久・関根雅彦・浮田正夫・中西弘：アンケート調査による河川に対する住民意識の解析，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，Vol. 2, pp. 244-245(II-102), 1991.
- 25) Friedrich, G.: ライン川におけるピオトープと自然型工法，1992. 28 Oct. 治水関係事業促進山口県大会記念講演会 於 山口県視聴覚センター.
- 26) Friedrich, G. and Mueller, D.: Rhine, ECOLOGY OF EUROPEAN RIVERS (Ed. by Whitton, B. A.), Blackwell Scientific, Oxford; Boston, pp. 265-316, 1984.

(1992. 12. 2 受付)

## EFFECT OF THE EMERSED PLANTS AND SUBMERGED PLANTS ON THE RIVER WATER QUALITY

Masahiko SEKINE, Masao UKITA, Hiroshi NAKANISHI and Hisatake SHIROTA

Effect of the emerged plants and submerged plants on the river water quality was estimated based on the field survey. Concerning the emerged plants, it was revealed that they didn't purify the river water in ordinary water discharge period. The main cause of purification by the plants was the sedimentation in flood period. On the other hand, the submerged plants purified the river water in ordinary water discharge period. In flood period, however, they came off from the river bed and caused pollutant loads to the lower reaches. The merit of existence of aquatic plants in the river bed should not be estimated from the view point of water quality purification but from the view point of ecosystem conservation.