

(37) 大型水生植物の葉と付着生物による河川内水質変換

Changes in water quality due to leaves of aquatic macrophyte and their periphytons

永礼英明*、吉沢 香**、橘 治国**

Hideaki NAGARE, Kaori YOSHIKAWA, Harukuni TACHIBANA

ABSTRACT ; Aquatic macrophytes form a "system" consisting of the macrophytes themselves and periphytons attached to them. The system has a significant role in purifying water. In this study, we evaluated such water purification functions of macrophytes-periphytons "system", as removing nutrients of the river water prior the river flowing into a lake. Using the data obtained by a field survey and laboratory tests, we made a model of the water quality purification by macrophytes and the periphytons. As a result, we found (1) the "system" of aquatic macrophytes and periphytons play a role as "catalysis" to suspend the dissolved nutrients, and (2) a physical purification function by the aquatic macrophytes which act as a filter to remove suspended solid from the water. Also, we clarified the efficiency of these functions at the water surface.

KEY WORDS ; Aquatic Macrophyte, Periphyton, Filter, Suspended Solid, Dissolved Nutrient

1. 目的

近年、自然の系が有する機能を利用し河川水を直接的に浄化する研究が数多くなされている。それらの研究は有機物分解を中心として扱ったもの^{1)~5)}、栄養塩除去を目指したもの^{6)~7)}の二つに大別することができる。前者は下水処理における二次処理に相当する機能を河川に負担させようというものであり、後者は三次処理に相当する機能といえよう。両者は対象とする物質が異なるものの、浄化を微生物、とりわけ長期間にわたり比較的安定した効果を期待できる付着性微生物の作用に期待する点で同じである。

付着性微生物による有機物、栄養塩除去を期待し、それらの効率を高めようとするなら、微生物が付着できる「面」を増やす、つまり、河川内に立体的な構造を創出する必要がある。河川内大型水生植物（以下、水生植物）は立体的な構造を有し、かつ構造が柔軟で雨天時に水の流れを妨げることもないため、付着性微生物の増殖の場としてふさわしい構造物と考える。

水生植物が存在することにより、河川内には微生物から鳥類に至る複雑な系が形成される。本研究では、下流湖沼の富栄養化防止の観点から、水生植物が形成する複雑な系が有する機能の一部ではあるが、水生植物表面の付着性微生物による栄養塩摂取とその剥離による懸濁化、水生植物が作り出す流れによる懸濁物質の沈降除去の2つに注目し、それら機能の評価を試みた。

2. 水生植物による水質変換

水生植物が河川水質に及ぼす影響には①水生植物上に増殖した微生物の活動によるもの（生物的作用）^{1)~11)}、②水生植物が作り出す流れの場に起因するもの（物理的作用）の2つが考えられる。本研究で考える比較的短時間での水生植物による水質変換の概念図をFig.1に示す。

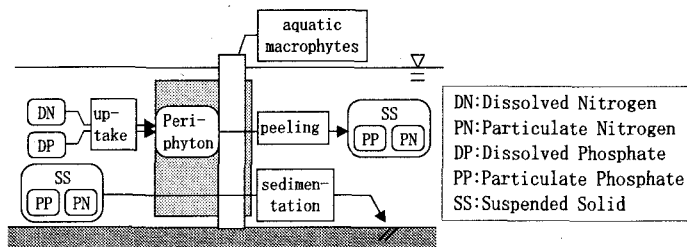


Fig. 1 Concept of water purification phenomenon in a river

* 北海道大学工学部 Faculty of Engineering, Hokkaido University (現在 (株) 日立製作所勤務)

** 北海道大学工学部 Faculty of Engineering, Hokkaido University

本研究では富栄養化の制御を目的としているため、対象とする微生物を栄養塩の動態と関連した藻類中心の付着性微生物とした。水生植物および付着性微生物による栄養塩濃度の変化および形態変換に関する機構として、付着性微生物の摂取による溶存態栄養塩の懸濁化と、懸濁物質の物理的沈降を取り上げた。

これらの変化を数式で表したものが Equation 1 である。成分は懸濁物質 (SS)、懸濁態・溶存態リン (PP, DP)、懸濁態・溶存態窒素 (PN, DN) である (これらの単位は [mg/l])。溶存態/懸濁態の定義は、0.45 μm のろ紙を通過するものを溶存態、通過しないものを懸濁態とした。

$$u \cdot \frac{dSS}{dx} = \epsilon \cdot \frac{\mu \cdot Pe \cdot A}{1000 \cdot d} - \alpha \cdot SS$$
$$u \cdot \frac{dPP}{dx} = \psi_P \cdot \frac{\mu \cdot Pe \cdot A}{1000 \cdot d} - \frac{\psi_P}{\epsilon} \cdot \alpha \cdot SS$$
$$u \cdot \frac{dDP}{dx} = -\psi_P \cdot \frac{\mu \cdot Pe \cdot A}{1000 \cdot d}$$
$$u \cdot \frac{dPN}{dx} = \psi_N \cdot \frac{\mu \cdot Pe \cdot A}{1000 \cdot d} - \frac{\psi_N}{\epsilon} \cdot \alpha \cdot SS$$
$$u \cdot \frac{dDN}{dx} = -\psi_N \cdot \frac{\mu \cdot Pe \cdot A}{1000 \cdot d}$$

Pe : 水生植物表面および河床 1 m²あたりの
付着性微生物量 [mg/m²]
A : 河床 1 m²あたりの水生植物表面積 (面積密度) [m²/m²]
μ : 付着性微生物比増殖速度 [mg/m²/s]
α : 懸濁物質減少速度係数 [1/s]
ε : 付着性微生物乾燥重量/Chl-a 比 [-]
ψ_P : 付着性微生物リン/Chl-a 比率 [-]
ψ_N : 付着性微生物窒素/Chl-a 比率 [-]
d : 水深 [m], u : 流速 [m/s], x : 流下距離 [m]

Equation 1 Water quality change model

Equation 1 は次のような観点より作成した。①付着性微生物は水生植物上および河床表面上に均一に増殖する、②付着性微生物量は定常状態にあり、増殖した量だけ剥離する、③河川水質は定常状態にある、④水生植物の形状は非常に複雑であるため詳細な形状は評価しない、⑤水生植物の成長による栄養塩摂取は取り扱わない、⑥水中での生物・化学的水質変化を無視する、⑦大型生物の影響を無視する。

3. 研究方法

本研究は①フィールド調査、②回分式水槽実験、③実験室内水路実験、④河川内水質変化シミュレーションの4段階からなる。

3. 1 フィールド調査

札幌市内を流れる創成川において、1992 年 6 月から 1993 年 1 月にかけて、流下過程における水質変化、水生植物の植生・現存量、付着性微生物増殖状況を調査した。水質調査は期間中 7 回実施した。

創成川は、豊平川に端を発し札幌市北部の茨戸湖へ流入する川幅約 17 m、流路延長 14.8 km の一級河川である¹⁾²⁾ (Fig. 2)。途中、下水処理場放流水が流入し、水量、水質ともに大きく変化する。また、流量が多くなる放流水流入地点付近からは抽水性、浮葉性、沈水性水生植物が繁茂し、コイやイトヨ等の魚類、カモを中心とした鳥類が多く生息する。

水質調査は放流水流入地点より下流の 2 地点 (屯田団地橋、北 4 番橋：地点間距離 1.6 km) にて行った。上流側の屯田団地橋付近には塩化ビニール (以下、塩ビ) 製の板を設置し、付着性微生物の増殖状況を調査した。

3. 2 回分式水槽実験

実験室内の水槽において、付着性微生物の栄養塩摂取速度を調査した。一般に、微生物、特に藻類の増殖速度は温度と栄養塩の関数であること、後に述べるとおり創成川の水質がリンに比べ窒素過剰であることから、水槽内の水温、リン濃度を変化させ、各々の条件下における増殖速度すなわち栄養塩摂取速度を調査した (Fig. 3)。微生物は創成川内設置の塩ビ板上に増殖したものをを用いた。

3. 3 人工水路実験

(1) 懸濁物質除去機能評価

水生植物を模倣したクシ状構造物 (Fig. 4) および、長さ 0.5 m の循環型水路 (Fig. 5) において、水生植物が有する物

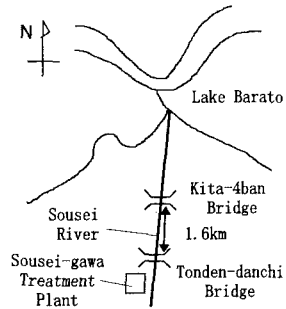


Fig. 2 Observation sites

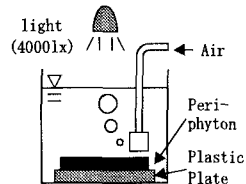


Fig. 3 Tank experiment to estimate the growth rate of periphyton

理的作用、すなわち懸濁物質除去機能の評価を行った。クシの密度が異なる4種類のクシ状構造を用意し、密度(水生植物量)と懸濁物質除去効果の関係を評価した。

(2) 模擬河川水質変化調査

微生物以外の生物作用がない状況での河川内水質変化の把握を目的とし、循環型水路および微生物が付着したクシ状構造物を用いた水路実験を行った。さらに、この結果を用い、水質変化モデルの妥当性検証を行った。クシ状構造物は、一ヶ月間ほど実河川にて微生物を増殖させたものを使用した。

3. 4 水質変化シミュレーション

上記の調査・実験の結果から Equation 1 の係数を決定し、河川内水質変化モデルを作成した。それらモデルを用いたシミュレーションを行い、水生植物が存在する河川での栄養塩、懸濁物質除去の可能性について検討を行った。シミュレーションでは次のような仮定を設定している。①河川断面は矩形、②微生物の増殖量と剥離量が等しく、微生物量は一定。

4. 結果と考察

4. 1 フィールド調査

(1) 水質調査

調査期間中7回行った水質調査の結果を Table 1 に示す(数値は平均値)。採水・分析の結果、調査期間中の平均値は上流側の 屯田団地橋で BOD 5.18[mg/l]、また、全窒素 8.96[mg/l]、全リン 0.19[mg/l] と栄養塩濃度が高く、下水処理場放流水が河川水質に大きく影響していた。懸濁物質濃度は低く、栄養塩濃度をのぞいては比較的良好な水質であった。

窒素成分は溶存態の割合が高く、硝酸態窒素 (NO₃-N) が全体 (TN) の 76~82% を占め、アンモニア態窒素 (NH₄-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N) を含めると全窒素の 89~90%、溶存態全窒素の 92~95% に達する。硝酸態・亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素がこれだけ多く存在すること、ならびに創成川における付着微生物の組成が藻類中心であることから、付着性微生物による溶存性有機窒素の利用は相対的に小さいと考えられる。従って、本稿では硝酸態窒素、アンモニア態窒素および亜硝酸態窒素 (NO₂-N) を合わせ、溶存態窒素 (DN) として扱う。

流下にとまらう変化を見ると、アンモニア態窒素、全窒素が下流側で増加している。調査期間中の平均値が増加していることから、鳥類等の大型生物や地下水による河川系外からの流入があると推測される。

(2) 微生物増殖過程調査

Fig. 6 は河川内塩ビ板上に増殖した微生物の乾燥重量 (D.W.)、クロロフィル (Chl-a) の変化である。調査期間中、付着性微生物はほぼ対数的に増殖していた。同じ札幌市内を流れる豊平川、発寒川に増殖する付着性微生物¹³⁾と比較すると、単位面積当たりの Chl-a がはるかに高い (Chl-a : 豊平川 42[mg/m²]、発寒川 9.9[mg/m²])。付着性微生物の組成 (Table 2) を他の河川における組成¹⁴⁾と比較すると、Chl-a に対する DW、N、P の割合が低く、このことから創成川における付着性微生物が藻類中心であったことが分かる。

(3) 水生植物植生調査

1992 年 8 月、創成川において水生植物の植生調査を行った。本河川では、クサヨシ (Phalaris arundinacea)、キシヨウブ (Iris pseudacorus)、

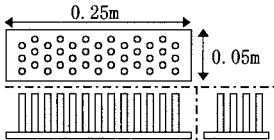


Fig. 4 Imitation macrophyte - combed structure

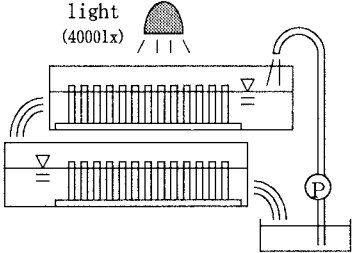


Fig. 5 Water channel experiment

Table 1 Chemical analysis of sampled water in Sousei river (average)

	DO	BOD ₅	BOD	SS	COD _{Cr}	COD
Tonden-danchi Br.	7.7	1.5	5.2	8.9	4.4	5.1
Kita-4ban Br.	7.2	2.2	4.5	5.7	4.7	5.6
	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	TN	DP	TP
Tonden-danchi Br.	7.43	0.25	0.30	8.96	0.12	0.19
Kita-4ban Br.	7.22	0.37	1.00	9.53	0.12	0.19

[mg/l]

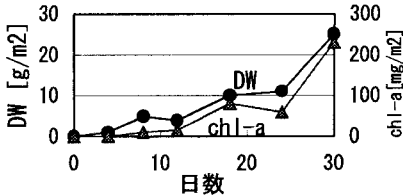


Fig. 6 Amount change of periphyton in Sousei River

Table 2 Composition of periphyton

DW/Chl-a	N/Chl-a	P/Chl-a
ϵ [-]	ψ_N [-]	ψ_P [-]
85.4	5.61	0.79

ヒルムシロ(*Potamogeton distinctus*)、フトイ(*Scirpus tabernaemontani*)、エビモ、イトモ、サンカクイ(*Scirpus triqueter*)と
 いった沈水性・浮葉性・抽水性の8種類の水生植物が確認された。量的にはクサヨシ、キショウブ(ともに抽水性植物)
 が最も多かった。

上流側調査地点である屯田団地橋では非常に多くの水生植物が存在していたが、流下にともない減少し、下流側の北4
 番橋ではまばらにしか存在しなかった。この変化は水深および底質の変化によるものと思われる。

調査の際、存在が確認された植物を実験室に持ち帰り、乾燥重量と表面積を求めた。さらに、この結果と植生図から、
 調査区間における全水生植物現存量および表面積を推定した (Table 3)。

Table 3 Existing amount and its surface area of aquatic macrophyte

	Iris pseudacorus	Phalaris aquinacea	Scirpus tabernaemonta	Scirpus triqueter	Potamogeton distinctus	Area Density
Tonden-danchi Br.	174	137	42	5	4	
- Kita-2ban Br.	2340	804	414	62	8	0.51
- Sanae Br.	111	42	0	0	1	
- Kita-3ban Br.	1493	247	0	0	2	0.24
- Kita-4ban Br.	172	175	28	8	2	
- Kita-4ban Br.	2314	1027	0	103	3	0.48
- Kita-4ban Br.	79	15	0	0	0	
- Kita-4ban Br.	1062	86	0	0	0	0.16
Total	536	369	70	13	7	
	7209	2164	414	165	13	0.35

Upper: Dry Weight[kg], Lower: Surface Area[m²]
 Area Density[m²/m²]

4. 2 回分式水槽実験

リン濃度、水温を変化させ付着性微生物による栄養塩摂取速度、すな
 わち増殖速度を調査した。この結果、比増殖速度は溶存態リン濃度、水
 温の関数として、Monod 型の式で表現することができ、Equation 1にお
 ける付着性微生物比増殖速度 μ [mg/m²/s] は Equation 2 で表現できた
 (DP: 溶存態リン濃度[mg/l]、T: 水温[°C])。この式にて創成川におけ
 る付着性微生物増殖速度を計算すると 0.15[1/day] となり、フィールド
 調査から得られた微生物比増殖速度 0.25[1/day] に比べ若干低い値とな
 った (DP 濃度、水温: 調査期間中平均値 0.13[mg/l]、18.0[°C] を使用)。

4. 3 人工水路実験

(1) 懸濁物質除去機能評価

水生植物を模擬したクシ状構造物および長さ 0.5[m] の循環
 型水路において、水生植物が有する物理的作用、すなわち懸
 濁物質除去機能の評価を行った。

Fig. 8 は、4 種類の密度の異なるクシ状構造物、およびク
 シ状構造物を入れない場合の 5 ケースの人工水路における懸
 濁物質濃度変化である (SS: 濃度[mg/l]、SS₀: 初期濃度[mg/l]、
 A: 面積密度 (=河床 1 m² あたり水生植物表面積)。懸濁物質
 濃度は流下にともない減少し、面積密度が高いほど減少速度
 が大きい。

Equation(3-1)は、Equation 1 の懸濁物質 (SS) に関する
 式の減少項だけを取り出したのである。Fig. 8 の結果をもと
 に Equation(3-1) の α (減少係数 [1/s]) を直線回帰により求
 め、面積密度 (A) に対してプロットしたのが Fig. 9 である。
 図のように、減少係数 (α) は面積密度 (A) に対して直線的

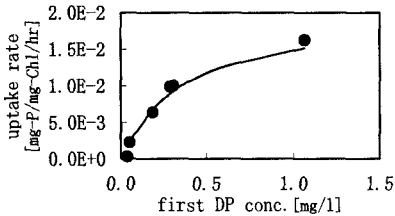


Fig. 7 DP uptake rate at 25°C

$$\mu = \mu_{20,max} \cdot \frac{DP}{K_p + DP} \cdot \theta^{T-20}$$

$$= 8.06 \times 10^{-6} \cdot \frac{DP}{0.38 + DP} \cdot 1.02^{T-20}$$

Equation 2 Growth speed of periphyton

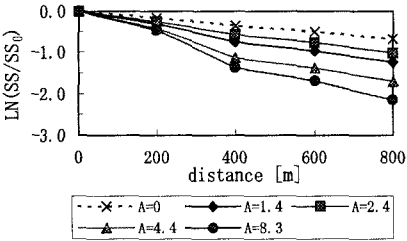


Fig. 8 SS concentratin change in channel experiment

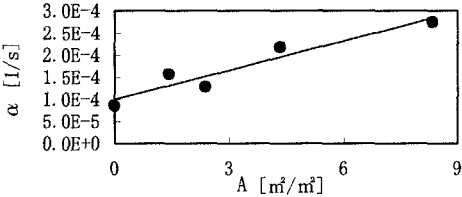


Fig. 9 Relation between area density(A) and reduction coefficient(α)

に変化している。このことは水生植物が懸濁物質を水中から除去する "フィルター" として機能し、その効果は面積密度 (水生植物量) に比例して増大することを示している。

上記の結果より、Equation (3-1) を変形し Equation (3-2) を作成、さらにこれらの結果より、水生植物が有する懸濁物質除去能力の大きさを表す"懸濁物質阻止率 (λ [1/m])"、そして懸濁物質自体の沈降速度 (σ [m/s]) を求め、水生植物が存在する場合の懸濁物質濃度変化式を作成した (Equation (3-3))。

(2) 模擬河川水質変化調査

微生物以外の生物作用がない状況での河川内水質変化の把握を目的とし、循環型水路および微生物が付着したクシ状構造物を用いた水路実験を行った。栄養塩の変化としては、アンモニア態窒素の減少と硝酸態窒素の増加、溶存態リンの減少が確認された。フィールド調査において、実河川では下流側でのアンモニア態窒素増加が確認されているが、この増加は微生物以外の生物によるもの、あるいは系外からの流入によると推察される¹⁵⁾。

水路実験の結果を用い、水質変化モデルの妥当性検証を行った。Fig. 10、11 は溶存態リン (DP)、溶存態窒素 (DN) の変化、およびモデルの計算結果である。計算結果は実際の現象をよくとらえており、モデルが妥当であることが確認された。

4. 4 水質変化シミュレーション

(1) 実河川における計算値と実測値の比較

フィールド調査、室内実験の結果をもとに作成した河川内水質変化モデル (Equation 1～3) がどの程度実際の河川における現象を表現しているのかを検証した。計算の初期値として上流側 屯田団地橋の平均水質を与え、流下距離 1.6 km における水質 (計算値) と下流側北 4 番橋における平均水質を比較した (Table 4)。懸濁物質濃度 (SS) は計算値に比べ実際の河川での減少が大きい。窒素については実河川において溶存態・懸濁態ともに増加しており、計算結果と逆の変化となる。

(2) 河川水質予測

上記のように、本研究における河川水質変化モデルは完全に実河川における現象を表現しているとはいえないが、一つの試みとして河川環境が変化した場合の河川水質変化を予測し、水生植物量の変化が河川水質にどのように影響するかを評価した。

一般に、河川内での微生物増殖は下流での懸濁物質濃度の増加をもたらすといわれている。リン制限にある本河川において、溶存態リンの増加は微生物増殖を活発にする。また、水生植物量の増加もまた、増殖量を増やす。そこで、これら二つの要因を変化させ、微生物増殖が活発になった場合の懸濁物質除去率を計算した (Fig. 12、流下距離 5 km)。懸念される下流での懸濁物質濃度の増加は、上流側溶存態リン濃度が高く、かつ面積密度が非常に小さい場合にのみ発生、懸濁物質濃度の除去率は、面積密度が高くかつ上流側溶存態リン濃度が低いほど懸濁物質除去率は高く、最大で 92% となっている ($A=5$ [m²/m²], $DP=0.1$ [mg/l])。同じ計算結果において、溶存態リンの除去率を表したのが Fig. 13 である。溶存態リン

$$u \cdot \frac{dSS}{dx} = -\alpha \cdot SS \quad \dots (3-1)$$

$$u \cdot \frac{dSS}{dx} = -u \cdot \left(\lambda \cdot A + \frac{\sigma}{d \cdot u} \right) \cdot SS \quad \dots (3-2)$$

$$= -u \cdot \left(2.21 \times 10^{-4} \cdot A + \frac{4.97 \times 10^{-6}}{d \cdot u} \right) \cdot SS \quad \dots (3-3)$$

Equation 3 Equation of SS concentration change

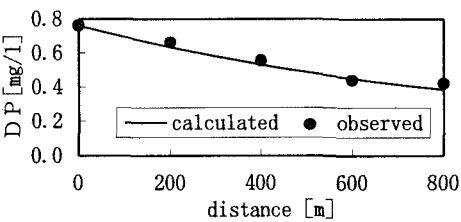


Fig. 10 DP concentration change in channel (observed value and theoretical values)

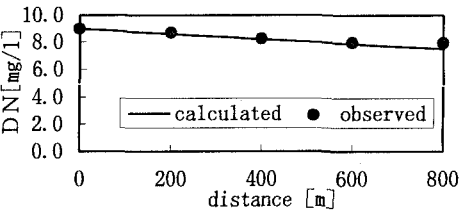


Fig. 11 DN concentration change in channel (observed value and theoretical values)

Table 4 Comparison of calculated values and observed values

	SS	DP	PP	DN	PN
Tonden-danchi Br.	8.93	0.123	0.067	8.68	0.28
Kita-4ban Br. (calculated)	7.43	0.117	0.056	8.64	0.23
(observed)	5.74	0.124	0.065	9.02	0.51

[mg/l]

除去率も面積密度の増加に伴い向上し、最大51%に達する。溶存態窒素は、リンに比べ過剰に存在しており、除去率としては2~10%となる。

これらの結果から、水生植物は河川水中から懸濁物質を高い効率で除去し、清澄な河川水を作り出している、また栄養塩の除去についても期待できるといえる。

5. 結論

河川内水生植物は、その表面に付着性微生物増殖のための場を提供する。表面の付着性微生物は水中の溶存態栄養塩を摂取し増殖する一方、せん断、摩擦による剥離により河川水中へ帰還する。そのため、水生植物とその表面の付着性微生物からなる“系”は、溶存態懸栄養塩を懸濁化させる“触媒”として機能している。その一方、水生植物はその表面積に比例して懸濁物質を水中から除去する“フィルター”としても機能している。

本研究にて作成した水質変化モデルによるシミュレーションの結果、水生植物は流下過程において河川水中から懸濁物質を高い効率で除去し、清澄な河川水を作り出している、また栄養塩の除去についても期待できることが明らかとなった。

今後の課題

今後は微生物以外の生物が水質に与える影響、水中の化学・物理的变化等を調査し、河川環境と水質との関係を総合的に評価する必要がある。

本研究に対し、河川環境管理財団河川整備基金の助成を得た。また北海道栽培漁業振興公社井上聡博士には貴重な助言をいただいた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲森悠平、林紀男、須藤隆一：水路による汚濁河川水の直接浄化、用水と廃水、Vol. 32, No. 8, p32-37, 1990
- 2) 稲森悠平、林紀男、須藤隆一：直接浄化法を活用した河川水からの汚濁負荷の削減、用水と廃水、Vol. 32, No. 11, p22-29, 1990
- 3) 長岡裕、大垣眞一郎：礫で構成された河床における生物学的自浄作用、水質汚濁研究、Vol. 9, No. 8, p510-527, 1986
- 4) S. Srinanthakumar and A. Amirtharajah : Organic carbon decay in stream with biofilm kinetics, Journal of ASCE (EE div.), Vol. 109, No. 1, p102-119, 1983
- 5) 川島博之、鈴木基之：数理モデルによる人口水路法の処理効果に関する検討、水質汚濁研究、Vol. 9, No. 9, p576-585, 1986
- 6) 市川秀夫、佐竹潔、安野正之：人口水路における一次生産と栄養塩の取り込みの関係、国立公害研究所研究報告、No. 99, p143-149, 1986
- 7) 川島博之、鈴木基之：河床付着生成物膜による脱窒、水質汚濁研究、Vol. 9, p225-230, 1986
- 8) 今岡 努、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、Vol. 8, No. 5, p314-322, 1985
- 9) 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, p87-94
- 10) 津野 洋、宗宮 功、占部章次郎、宮林哲司、神村正樹：下水処理水による花卉植物の水耕栽培と栄養塩除去、用水と廃水、Vol. 33, No. 3, p207-215, 1991
- 11) 細見正明、稲葉一穂、稲森悠平、原沢英夫、須藤隆一：アシ原の自然浄化機能を活用した生活雑排水処理、国立公害研究所研究報告、No. 119, p7, 1988
- 12) 橘 治国、工藤憲三：札幌の川、北海道大学工学部衛生工学科、1987
- 13) 橘 治国、森口朗彦、井上隆信、木村直人、大室 敏：河床生物膜の組成と水質浄化、衛生工学論文集、Vol. 24, p1, 1988
- 14) 井上隆信、海老瀬潜一：河床付着生物膜現存量の周年変化シミュレーション、水環境学会誌、Vol. 17, No. 3, p169-177, 1994
- 15) 徐 開欽、高崎みづる、佐藤敦久：河床礫付着生物膜からの $\text{NH}_4\text{-N}$ 溶出に関する実験的研究、水道協会誌、Vol. 58, No. 1, p9-16, 1989

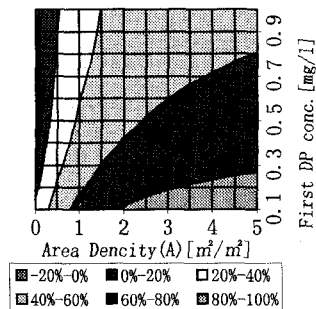


Fig. 12 Distribution map of SS removal rate

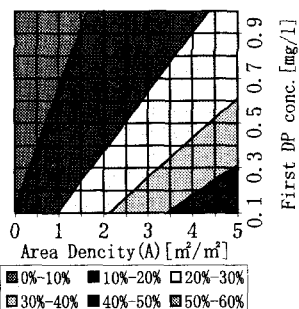


Fig. 13 Distribution map of DP removal rate