

# 流れおよび潮汐場における付着藻類の増殖と水量との関係

細井由彦\*・村上仁士\*\*・玉川康弘\*\*\*

## 1. 緒 言

無機栄養塩濃度の高い下水処理水や、工場排水、生活排水の流入する河川では河床に付着藻類の増殖が見られる場合が多い。またこのような排水が海岸部に流出すると、海岸構造物の表面に付着藻類の増殖を促進する。これらの付着藻類は、夜間に溶存酸素を消費したり、剝離して新たな有機物汚染源となることも考えられる。さらに海岸構造物においては、大型生物の付着を誘引してその機能低下を招くことも考えられる。一方ではまた、付着藻類は水中から栄養塩を除去することや、微生物群とともに一つの生態系を構成することにより、自浄作用に貢献することも考えられる。

以上のような点から、付着藻類の増殖に関する検討を行っておくことは、水域の環境管理面から重要となるが、従来の研究はおもに水質の面からの増殖に関する検討が中心であった。しかし、近年水際の整備において、親水性や水質浄化効果も考慮した水際形状が考えられるようになってきており、水工学的な方面からも、このような生物関連事項の検討を行っておくことも必要になるものと考えられる。そこで本研究では、従来とはやや視点を変えて、これまであまり行われていない、流れや潮汐作用のような水理学的な作用の影響の面から、付着藻類の増殖について検討を行う。

本研究は室内開水路による実験と、感潮域における現地実験の2方法により進めた。開水路における実験では、種々の流れの条件のもとで河床に藻類が付着し増殖していく様子を調べた。感潮部における現地実験では、藻類が付着増殖する様子を潮汐との関係において検討した。

## 2. 実験方法

### (1) 開水路による室内実験

実験装置は各種の条件の流れを作り出すように、A、B 2 種類作成した。いずれも数本の水路とヘッドタンク

1 槽、受水タンク 1 槽で構成されている。ヘッドタンクから各水路に供給された水は、水路を流下後受水タンクを経てポンプで再びヘッドタンクへと循環させられる。したがって各水路には同じ水が流れ、流量や水路勾配等の水理条件のみ異なるようにすることができる。

装置 A の水路は長さ 180 cm、幅 8 cm であり、装置 B の水路は長さ 360 cm、幅 20 cm である。それぞれ木製でペイントで仕上げた後、十分長期にわたって水を流し、塗料成分の溶出が生じないようにした。

付着藻類の一連の形成過程の中でとくに流れの影響を受けやすいと考えられる部分を重点的に検討することとし、以下に説明する 3 つの場合を取り上げた。

第一は藻類の増殖が開始する最初の段階における付着過程についてである。本学内の藻類が浮遊した池の水を採取し、さらに栄養塩を加えて増殖させた高濃度の浮遊藻類を含む水を実験装置 A に循環させ、河床に付着する様子を調べた。付着初期の様子と流れの特性との関係を調べるのが目的なので、付着後の増殖を防ぐために、光が当たらないようにし、かつ循環水中には藻類のみ浮遊させ、栄養塩は加えなかった。流れの条件を表 1 に示す。

実験を開始して 6 時間後に流水を停止し、河床の付着物を収集した。測定する付着物の絶対量を多くし、誤差を少なくするように、各水路において、幅 8 cm、長さ 1 m にわたって河床の付着物を収集した。

さらに別途沈降試験を行い、実験に用いた藻類の沈降速度分布を求めた。ただしここで扱っている藻類とは、粒子として扱える植物プランクトンの事を言い、大型藻類ではない。

表 1 初期付着過程に関する実験条件

| 実験  | 流量 (cm <sup>3</sup> /s) | 摩擦速度 (cm/s) | Re   |
|-----|-------------------------|-------------|------|
| I-1 | 12.1                    | 0.17        | 153  |
| I-2 | 30.2                    | 0.22        | 380  |
| I-3 | 65.0                    | 0.41        | 812  |
| I-4 | 185.3                   | 0.66        | 2332 |
| I-5 | 199.3                   | 0.77        | 2458 |
| I-6 | 195.3                   | 0.18        | 2445 |
| I-7 | 194.3                   | 4.11        | 2430 |
| I-8 | 197.5                   | 5.55        | 2470 |

\* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部助教授 土木工学科

\*\* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科

\*\*\* 正会員 四国建設コンサルタント

表-2 付着増殖過程に関する実験条件

| 実験    | 流量 (cm <sup>3</sup> /s) | 摩擦速度 (cm/s) | 水温 (°C) | TIN (mg/l) | TIP (mg/l) |
|-------|-------------------------|-------------|---------|------------|------------|
| II-1  | 87.2                    | 1.6         | 21.0    |            |            |
| II-2  | 90.5                    | 3.0         | ~       | 1.5        | 0.3        |
| II-3  | 99.9                    | 4.6         | 28.4    |            |            |
| III-1 | 603.2                   | 0.57        | 19.0    | 1.5        | 0.3        |
| III-2 | 61.3                    | 0.57        | ~28.4   |            |            |
| IV-1  | 93.2                    | 1.7         | 19.8    |            |            |
| IV-2  | 83.5                    | 3.0         | ~       | 0.2        | 0.02       |
| IV-3  | 87.8                    | 3.9         | 26.3    |            |            |
| IV-4  | 99.5                    | 4.6         |         |            |            |

MgSO<sub>4</sub> · 7 H<sub>2</sub>O 30.0mg/l, CaCl<sub>2</sub> 40.0mg/l  
FeCl<sub>3</sub> 4.0mg/l, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 19.0mg/l

第二は付着した藻類の増殖に関するものである。所定の水理条件を得るように、各場合にに応じて装置AあるいはBを使用して実験を行った。先述の本学内の池の水に栄養塩を添加し、各装置に循環させた。実験期間中適宜N、Pを測定し、KNO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>を加えて、TIN（総無機窒素）、TIP（総無機リン）の濃度を一定に保つようにした。その他の水質項目は表-2下欄に示すものを実験開始時に加えただけで、実験継続中の濃度のチェックは行っていない。

各水路床より40 cm上方から蛍光灯により各水路で一定の照度になるように光を当てた。

実験開始後、一定の日間隔で河床付着物量を求めた。付着物の採取は、流水を停止した後、河床の一部から所定の面積について付着物をはぎ取ることによって行った。

同一装置で同時に行った実験では、各水路とも同じ水質の水が流れているので、水路相互の実験結果を比較することで水理条件の影響を検討することが可能であると考えられる。厳密には各付着植物群の構成種まで調べることが望ましいと考えられるが、本研究ではまず流れの一般的影響を調べることが目的としており、そこまでは立ち入らないことにする。

第三は増殖した藻類の剥離に関するものである。A、B両装置においてそれぞれ1本の水路を使用して河床に藻類を付着増殖させた後、水路勾配あるいは流量を段階的に増加させる事により河床せん断応力を増加させ、付着した藻類の剥離する様子を調べた。

剥離した量の測定は、せん断応力増加前後の循環水中の浮遊藻類量の変化から求めた。

(2) 感潮河川における現場実験

徳島市内を流れる感潮河川において、構造物の陰で流速のほとんどないところを選び、長さ140 cm、直径3.8 cmの塩ビ製パイプを7本、水中に鉛直に固定した。順次1本ずつ回収し、鉛直方向に10 cmずつ区切り、パイプ表面の付着物を採取して分析した。パイプ設置位

置のTPを求め、潮位表より得た潮位をもとに、実験期間中の水位変化を求め、付着物を採取したパイプ部分の実験期間中の水没時間を求めた。

3. 流れ場における実験結果および考察

(1) 初期付着と流れとの関係

初期付着における実験の、6時間後の付着量と摩擦速度  $u_*$  との関係を図-1に示す。

摩擦速度の増加にともない付着量は減少する傾向にある。明かに層流と考えられるI-1、2と、乱流と考えられるI-3~8では顕著な差が認められる。一旦河床に付着した藻体も、流れのおよぼすせん断応力によっていくらかは剥離する。層流では流れに平行な力のみ働くので、剥離した藻体は河床表面を転動して流下し再付着するものもある。乱流ではバースト現象にともなう鉛直方向の運動により、河床付近に存在する物質は河床を離れる方向の力も受ける。

以下、流れのもとで剥離をとまなう付着過程を乱流と層流に分けて検討してみる。なお本節の以下においては、バイオマスをクロロフィルではなく、乾燥重量で表すこととする。

Cleaver and Yates (1976) は乱流場におけるバーストによる剥離を考慮した粒子の沈着モデルを検討した。彼らは沈着現象を拡散支配、慣性支配、重力支配に分けて検討した。本実験において流水中に浮遊していた藻類の沈降速度分布は図-2のとおりであった。これより平均的

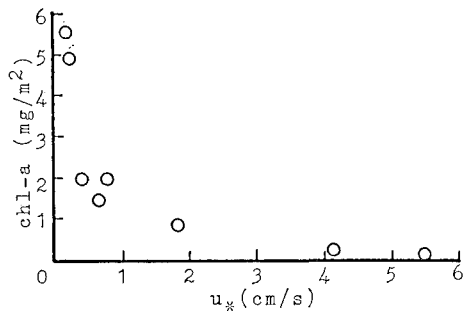


図-1 初期付着量と摩擦速度との関係

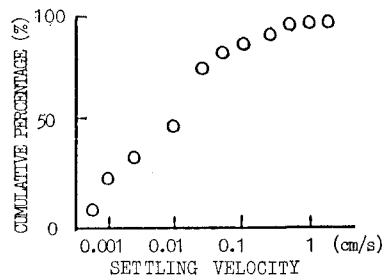


図-2 沈降速度分布

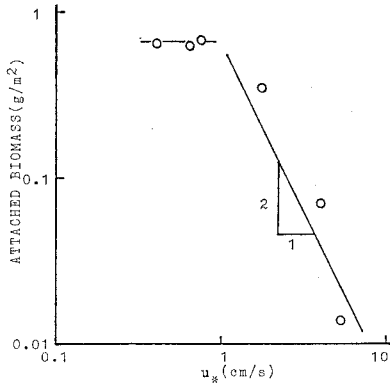


図-3 乱流場における付着物量と摩擦速度の関係

な沈降速度は約 0.01 cm/s であり、これを Stokes の式より粒子径に換算すると約 10  $\mu\text{m}$  程度になる。拡散が支配的であるのは粒子径が 0.1~1  $\mu\text{m}$  以下の場合であると言われている。ここでは現象を重力支配と考え、彼らの求めた次式を適用してみる。

$$u_* \leq u_{*0} : N = \text{const.} \quad (1)$$

$$u_* > u_{*0} : N \sim 1/u_*^2 \quad (2)$$

ここで  $u_{*0}$  は粒子の離脱に要する摩擦速度、 $N$  はある時間内に沈着する量である。

実験 I-3~8 を対数紙上で整理した結果が図-3 であり、ほぼ式 (1), (2) にしたがっていることがわかる。

つぎに層流における河床に働く摩擦と、付着した藻体の離脱について検討する。先述したように本実験における藻類の河床への付着には重力が支配的であると考えられる。そこでまず次のようにして、全付着量を計算する。

平均流速を  $u$ 、流下距離を  $L$  とすると、層流場において河床から高さ  $z$  のところにある  $dz$  中に含まれる藻体のうち、距離  $L$  を流れるうちに河床に到達するものは、沈降速度が  $uz/L$  より速いものである。そこで図-2 で与えられる累積沈降速度分布を  $f(w)$  とすると、沈降による付着量は

$$\int_0^h c \{1 - f(uz/L)\} dz$$

となる。実験継続時間を  $T$  とすると、水路下流から下流に向かって距離  $L$  の区間の河床に付着する量  $M_T$  は次式となる。

$$M_T = \frac{uT}{L} \int_0^h c \{1 - f(uz/L)\} dz \quad (3)$$

ただし  $c$  は流水中の藻類濃度である。

図-2 の沈降速度分布を数式表示した

$$f(w) = 1 - \exp(-8\sqrt{w}) \quad (4)$$

を用いて、式 (3) より計算される理論的付着量  $M_T$  に対する実際の付着量を求め、 $u_*$  との関係で示したものが図-4 である。

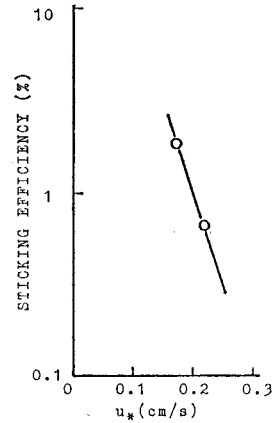


図-4 層流場における付着残留率と摩擦速度の関係

図中の直線は  $u_* = 0$  で  $M/M_T = 1$  を通るものである。したがって付着面に運ばれた全藻体のうち、せん断応力による離脱を克服して残存する率は摩擦速度の指数関数で整理されることがわかる。Powell and Slater (1983) が層流場において行った *Bacillus cereus* のガラス面への沈着に関する実験結果を用いて Characklis (1984) が求めた沈着残存率も、やはり摩擦速度の指数関数で表すことが可能であった。これらのことから、せん断応力を受ける場における、細菌や藻類等の微生物の付着は、摩擦速度の指数関数で表されると考えてよさそうである。

ただし、図-3 に示される乱流の場合には、粒子の離脱に要する摩擦速度  $u_{*0}$  が 1 cm/s 付近の値を取ると考えられるのに対し、層流の場合の検討においては、わずかでもせん断応力が存在すれば離脱が生じると考えており、両モデルの整合性については今後の検討課題として残されている。

このような可逆的な付着状態にある細胞は、ポリマー等の分泌により不可逆な付着へと移行していく。

## (2) 増殖過程と流れとの関係

中間増殖過程に関する実験は表-2 に示すような条件で行った。実験 II-1~3, III-1, 2, IV-1~4 はそれぞれ同時に行ったものである。したがって水質条件は等しい。実験 II, VI, は摩擦速度の及ぼす影響を、実験 III は摩擦速度が等しい場合の層流と乱流による違いを、それぞれ調べる目的で行った。

図-5 は実験開始後 5 日目に行った第一回目の測定の結果である。摩擦速度が大きくなると付着現存量は減少している。したがってこの時点においては、前項で検討した初期付着過程の影響をまだ強く受けていると考えられる。また層流の方が乱流の場合よりも付着量が多いが、これもさきに述べた初期付着特性と同じ傾向である。

乱流場における固定境界面への物質移動は、境界面付近に分子拡散に支配される拡散底層を考えるモデルによ

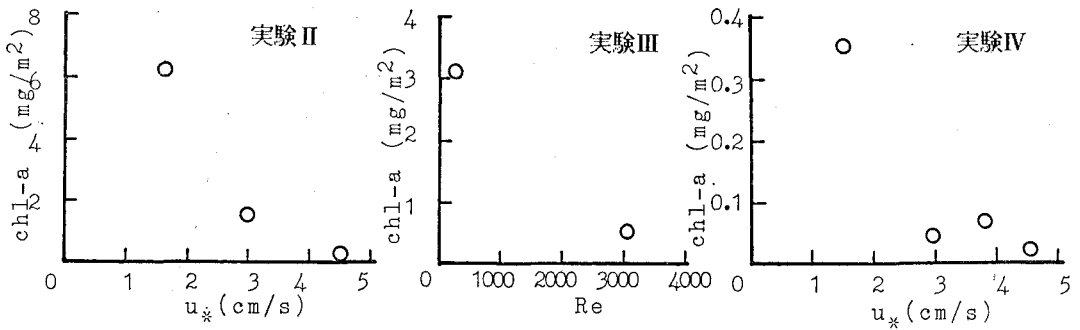


図-5 実験開始日後における付着量

り, 次のように表すことができる(たとえば Davis, 1972).

$$j = 0.075 u_* S_e^{-2/3} \Delta c \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $j$  は物質輸送フラックス,  $\Delta c$  は拡散底層の液側と固定境界面側の濃度差,  $S_e$  はシュミット数である.

$j$  が  $u_*$  の一次関数となるのは, 拡散底層厚さが  $u_*$  の逆数に比例するため,  $u_*$  が大きくなるほど拡散底層内の濃度勾配が大きくなるためである. このような結果は栄養塩の河床への輸送にも当てはまり, したがって付着藻類の増殖に対しても摩擦速度が有利に働くものと考えられる.

実験 II, III は 1 ヶ月間, 実験 IV は 3 週間続け, その間 3~5 日間隔で付着物の採取を行った. そこで各採取日間の平均的な比増殖速度  $\mu$  を次式で求めた.

$$\mu = \frac{1}{t_i} \ln \frac{M_i}{M_{i-1}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $t_i$  は  $i-1$  回目と  $i$  回目の採取の時間間隔,  $M_i$  は  $i$  回目の採取時の付着物現存量である. 全実験期間中の  $\mu$  の最大値を  $\mu_{\max}$  とし, 実験 II, IV における  $\mu_{\max}$  と  $u_*$  との関係を図-6 に, 実験 III における同じ  $u_*$  のもとでのレイノルズ数と  $\mu_{\max}$  との関係を図-7 に示す. これを見ると式 (5) より予測されるように, 摩擦速度が増殖に有利に働いている事がわかる. さらに乱流場の方が層流場より栄養塩の輸送がよく行われ, 増殖に有利であると考えられる.

### (3) 剥離過程と流れとの関係

図-8 に摩擦速度と剥離率との関係を示す. 摩擦速度  $u_{*0}$  の状態で 23 日間付着生育させた後, 水路勾配また

は流量を段階的に順次 10 分間隔で増加させた. それぞれの段階の最後に, 剥離していた量の実験開始初期の付着量に対する割合を剥離率としている.

本図より摩擦速度の値が増殖時の摩擦速度の値の 2~3 倍になると剥離が始まり, 4~5 倍になると大きく剥離し始めることがわかる.

## 4. 感潮場における実験結果および考察

感潮場における付着の実験は 2 回行った. (実験 IV-1, 2) 鉛直方向の付着物量の分布の変化を図-9, 10 に示す. 深いところの方がよく付着する傾向にあるようである. そこで別途計算した潮位変化より, 各点の水中にある時間の割合(水没率と呼ぶことにする)を計算し, これと最終の付着物量との関係を示したものが図-11 である.

これらの図より水没率がほぼ 70% 以上になると付着物量が多くなる事がわかる. この理由として水中にある方が, 各種の浮遊物が付着材に衝突する機会が多くなること, 付着した生物に水中から栄養が供給される機会が多くなること等が考えられる.

図-12 は全付着物量中にクロロフィルがしめる割合と水没率との関係を示したものである. 先の全付着物量とは異なり, 水没率が 70~80% のところで最大となっている. これは植物の場合, 水中にあって栄養塩の供給を受けるとともに, 光合成のための日照も重要である事を示しているものと考えられる.

実験期間が短かったため, ここで対象とされたのは,

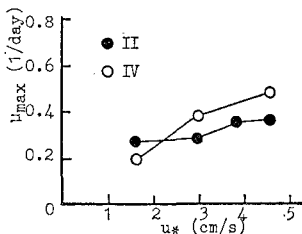


図-6  $\mu_{\max}$  と  $u_*$  との関係

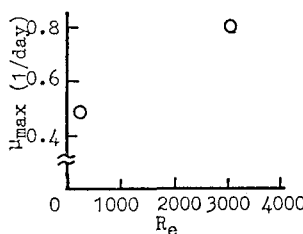


図-7  $\mu_{\max}$  と  $Re$  との関係

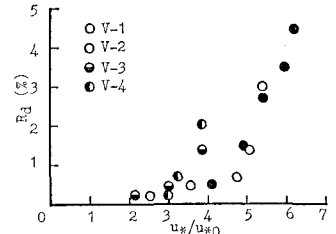


図-8 摩擦速度と剥離率の関係(実験 V)

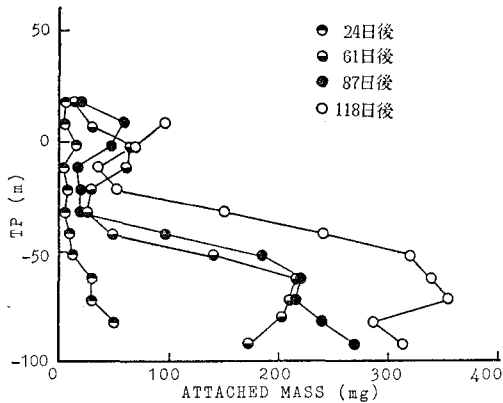


図-9 感潮場における付着実験結果 (IV-1)

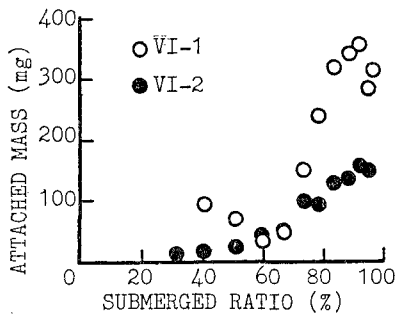


図-11 付着量と水没率の関係

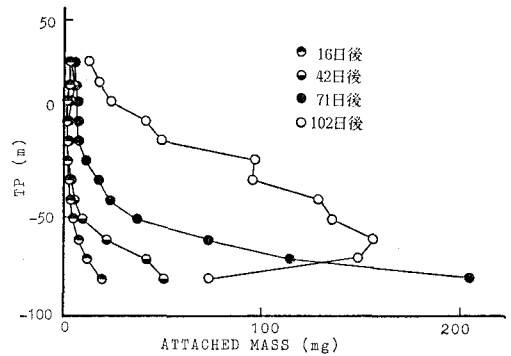


図-10 感潮場における付着実験結果 (IV-2)

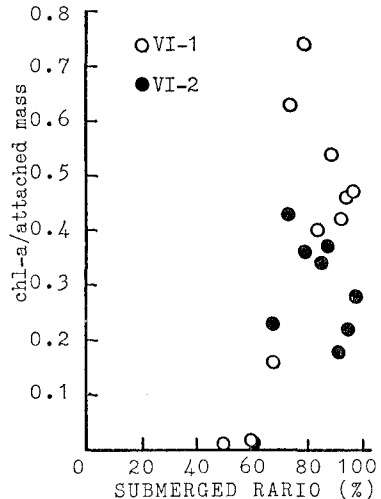


図-12 付着物中のクロロフィルの割合と水没率

スライムあるいは初生微生物膜とよばれるものであり、大型動物の幼生が着生する前段階として形成されるものである。このような被膜は冷却水系ではその効率を低下させ、さらに大型動物の着生を誘引するものであると考えられている。

## 5. 結 言

本研究においては、流れおよび潮汐の場における付着藻類の挙動について、従来の研究とは視点をかえ、水理学的諸元の影響を中心に検討を加えた。流れの場においては摩擦速度が、潮汐の場においては水没率が、付着藻類の増殖に密接に関わっていることが示された。

研究に協力して頂いた元本学大学院生住山真氏(現日水コン)に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- Characklis, W. G. (1984): Biofilm development: A process analysis, in K. C. Marshall ed., Microbial adhesion and aggregation, Springer-Verlag, pp. 137~157.
- Cleaver, J. W. and B. Yates (1976): The effect reentrainment on particle deposition, Chemical Eng. Sci., Vol. 31, pp. 147~151.
- Davis, J. T. (1972): Turbulent phenomena, Academic Press, pp. 121~174.
- Powell, M. S. and N. K. H. Slater (1983): The deposition of bacterial cells to solid surfaces, Biotech. and Bioeng., Vol. 25, pp. 891~900.