

河床付着性藻類の増殖と剥離 に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE GROWTH AND DETACHMENT OF STREAM PERIPHYTON

赤松良久¹・戸田祐嗣²・池田駿介³

Yoshihisa AKAMATSU, Yuji TODA and Syunsuke IKEDA

¹ 学生員 修士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

² 正会員 学士(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻

³ フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

Laboratory experiments for the kinetics of periphyton growth in stream were conducted to know the effect of hydraulic characteristics on the growth and detachment of periphyton. 4 open channels were used in the experiments, and only the hydraulic conditions were varied between each channel while other external environments were controlled to be the same conditions. It was found that the growth rate of periphyton becomes large in case the turbulence near the channel bed becomes large. This result suggests that the primary production of periphyton is much affected by the nutrient diffusion due to turbulent flow structure. It was also found that the detachment of periphyton mainly depends on the propagation form of periphyton rather than the shear force of water flow.

Key Words: Stream periphyton, primary production, growth rate, detachment, friction velocity, nutrient diffusion

1. はじめに

近年,河川事業において生物の生息環境に配慮した河道設計が全国的に展開され,河川工学の分野では河川生物の生育環境に関する研究が盛んに行われるようになった^{1),2)}. その中で礫床河川中にみられる瀬と淵は河川生物の良好な生活の場を提供することが知られており,河川環境を構成する中核的な存在として注目を集めている.瀬と淵における生物環境においては,河床礫に付着する藻類が一次生産を行い,それらが魚類や昆虫類の餌となることによって食物連鎖を根底から支えている.従って瀬と淵の生態系を理解するためには付着藻類の一次生産特性を明らかにする必要がある.

これに対して池田ら³⁾は多摩川上流域の瀬と淵を対象として,付着藻類の一次生産特性に関する現地調査を実施しており,淵と比較して流速の大きな瀬では付着藻類の一次生産力が大きくなることを示している.

しかし池田ら³⁾の研究では付着藻類の現存量の大局的变化は捉えられているものの,増殖や剥離の詳細な特性を把握するほどの精度の高いデータは得られていない.

そこで本研究では水理特性の異なる複数の水路を用いて付着藻類の生育実験を実施し,流れの特性が河床付着性藻類の増殖・剥離に与える影響を把握することを目的とする.

2. 実験概要

多摩川上流域における栄養塩濃度や日射量の特性を実験室内に再現し,水理特性の異なる四つの水路を用いて,付着藻類の生育実験を行った.本実験ではまず流れの構造が単純である平坦な水路床を用いた実験(CASE1)を行い,次に河床礫を模した半球突起を千鳥状に配した水路床において実験(CASE2)を行った.

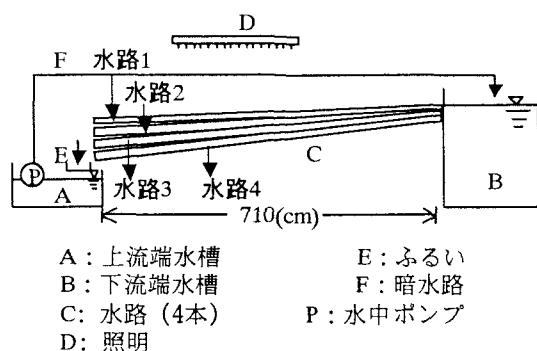


図-1 実験水路



図-2 付着板の模式図

(1) 実験水路

実験水路の概略図を図-1に示す。実験水路は勾配の異なる四つの水路から構成されている。四つの水路は上流端水槽・下流端水槽を共有しており、同じ水質の水が循環するようになっている。各水路はアクリル製でありその大きさは流下方向710cm、横断方向20cmである。水路底面には藻類の付着板として、CASE1では塩化ビニルのプレート(200×198mm)を、CASE2ではプレート上に直径6.2cmの半球を千鳥状(半球中心間の間隔:10cm)に設置したものを15枚敷きつめた。付着板の模式図を図-2に示す。河床表面は藻類が付着しやすいようにサンドペーパー(40番)で粗度をつけた。また付着板は流れが等流になっていると考えられる上流端から300cm～600cmのところに設置した。

水路中の水は、下流端水槽に設置した水中ポンプ(ES型ポンプ150ESL511(株)エバラ)で循環しており、水中ポンプの流量の調節はインバーター(FRENIC5000G9S, (株)富士電機)を用いて行った。また各水路下流端にはふるい(口径150μm, 22×18cm)を設け、ここに残留する剥離した藻類量を測定した。

(2) 実験条件

各水路内は、多摩川上流域の水質を想定し供給水道水に KNO_3 を窒素濃度として3.0(mg/l), K_2HPO_4 をリン濃度として0.1(mg/l)になるように添加した。リンや窒素等の栄養塩濃度は付着藻類の増殖に伴い減少するため、一週間間隔でその濃度を測定し、規定の濃度になるように随時添加した。栄養塩濃度(T-P, PO_4 , $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, T-N)の測定は吸光光度計

((株)セントラル科学)を用いた。また栄養塩と同時に水温、溶存酸素濃度についても簡易多項目水質計(U-10, (株)堀場製作所製, 精度: 溶存酸素濃度 $\pm 0.1\text{mg/l}$, 水温 $\pm 0.3^\circ\text{C}$)を用いて一週間間隔で測定した。さらに長期間の実験水の循環により藻類の成育に悪影響のある代謝物が蓄積することや窒素・リン以外の微量栄養元素が成長の制約因子になることを防ぐため、実験中3回水の取り替えを行った。

日射に関しては過去の藻類の生育実験例⁴⁾を参考にして、水路上方に設置した8個の白熱灯により与えた。昼夜の別はタイマーで制御し、昼を16時間、夜を8時間とした。白熱灯点灯中の水路床における照度は約20kluxであり、この程度の照度が得られれば付着藻類は飽和光合成状態にあるとみなせる⁵⁾。またこれより与えられる光エネルギーは一日あたり約860(J/cm²/day)であり、これは関東圏における夏期の地表が受ける太陽エネルギーの可視、紫外部に相当するものと考えられる。

CASE1では実験を行った時期が7月下旬から9月下旬であり、実験水の水温に長期的変動が少なく、低水温による生育阻害が生じないと判断されたため、水温に関しては特別なコントロールはしなかった。実験期間中の水温は27～30°Cであった。CASE2では実験期間が11月上旬から1月上旬であり、水温低下による藻類の生育阻害を防ぐため、投げ込み式のヒーター(BWA1115, (株)JET)及びサーモスタッド(DG2-100, (株)HAKKO)を用いて水温を一定に保った。水温は藻類の光合成活動に最適な温度である25°Cに設定した⁵⁾。

(3) 測定法

付着藻類の現存量と剥離量はクロロフィルa量として測定した。現存量は付着板(200×198mm)上の付着藻類をブラシではぎ取り、水道水中の浮遊させ、ガラスフィルター(口径:1.2μm)を用い濾過し、アセトンで抽出した後に吸光度計測を行うことによりクロロフィルa量として定量した。剥離量に関しても水路下流端に設置されたふるいから剥離した藻類をブラシではぎ取り、同様の手順でクロロフィルa量を測定した。

また各水路における流下方向流速成分の鉛直分布をピトー管によって測定した。CASE2では半球頂上での流下方向流速成分の鉛直分布を測定した。さらにCASE2では側面の影響を受けない水路中央の半球上および半球周りの底面付近での流下方向流速成分の乱れ強度をレーザー流速計により測定した。

表-1 各水路の水利特性(CASE1)

	水路勾配	平均流速(cm/s)	平均水深(cm)	Fr	Re	摩擦速度(cm/s)
水路1	1/500	9	3.5	0.15	3.9×10^3	0.73
水路2	1/285	13	2.7	0.25	4.3×10^3	0.99
水路3	1/138	51	1.8	1.21	1.1×10^4	2.57
水路4	1/68	71	1.5	1.85	1.3×10^4	3.15

3. 実験結果及び考察

3-1 平坦水路床における

付着藻類の増殖・剥離(CASE1)

(1)水利特性

各水路における水利特性を表-1に示す。水路1,2は流速が小さく、緩やかな流れであるのにたいして、水路3,4では流速が大きく、射流になっている。各水路の流下方向流速成分の鉛直分布を図-3に示す。流速分布はほぼ対数分布を示している。表-1における摩擦速度は流速分布から得られる各水路における摩擦速度を示しており、水路1,2と比べ水路3,4では大きな値を示している。

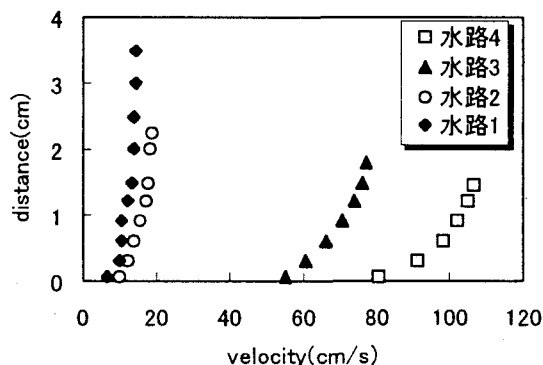


図-3 鉛直方向の流速分布(CASE1)

(2)付着藻類の増殖過程

各水路における付着藻類の現存量変化を図-4に示

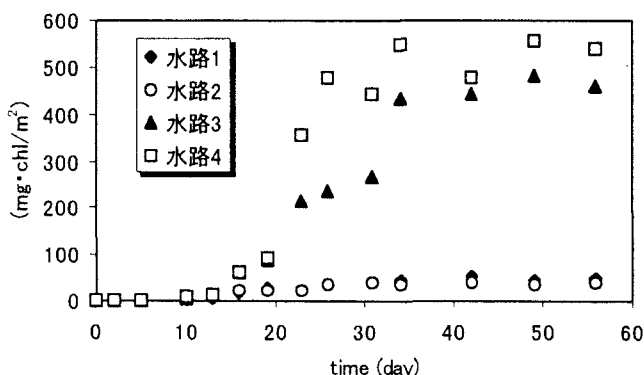


図-4 付着藻類の現存量変化(CASE1:全水路)

す。また水路1,2に関しては拡大図を図-5に示す。一般に生物の増殖は初期段階において、指数関数的に増加し、栄養分や環境の制約により増殖が低下するといわれており、本実験においても全ての水路において実験開始後15~20日付近に指数的増殖を示し、40日目以後は現存量変化かが小さくなっている。水路間の増殖過程の違いについてみると、水路1,2と比較して水路3,4では実験開始後15日目付近から急激な増殖を示している。このような増殖過程の違いがみられた原因として次のような二つの要因が考えられる。一つは流れの違いによって付着藻類の生物膜内部への基質(栄養塩,酸素)の供給に違いがあったと考えられる。水路1,2と比較して、水路3,4は摩擦速度が大きい。その結果、水路3,4の付着藻類の生物膜表面では乱れによる基質の拡散が激しく、生物膜内部まで基質が浸透すると推察される。そのため生物膜深部の付着藻類も増殖に寄与することが可能であったと考えられる。

もう一つの要因として付着藻類の種類の遷移が考えられる。実験開始後5日目と34日目における、各水路における付着藻類の種類の分析結果を表-2に示す。表-2は付着藻類の体のつくりで分類しており、ここでは糸状の形態で生育しているものを糸状型、単細胞や群体の形態で生育しているものを群体型と分類した。水路1,2では実験開始後5日目と34日目ともに糸状型の藻類の割合は20%以下であるのに対して、水路3,4では実験開始後5日目では糸状型の藻類は40%前後であったが、実験開始後34日目には90%前後まで増加している。このように水路3,4においては顕著な種の遷移が起こり糸状型の藻類が優占しており、そのため水路1,2

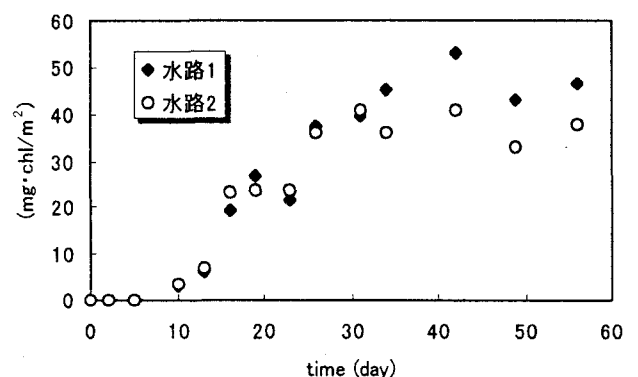


図-5 付着藻類の現存量変化(CASE1:水路1,2拡大図)

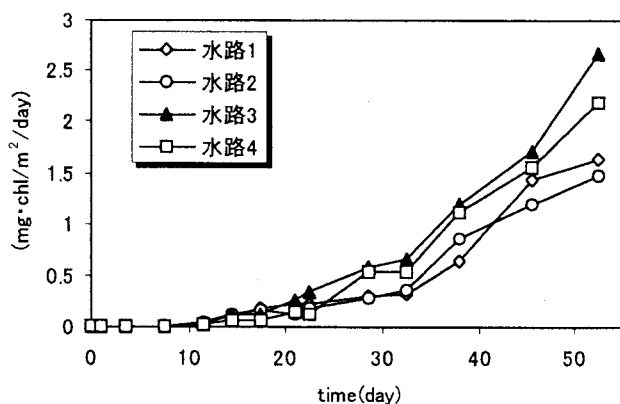


図-6 付着藻類の剥離量変化(CASE1)

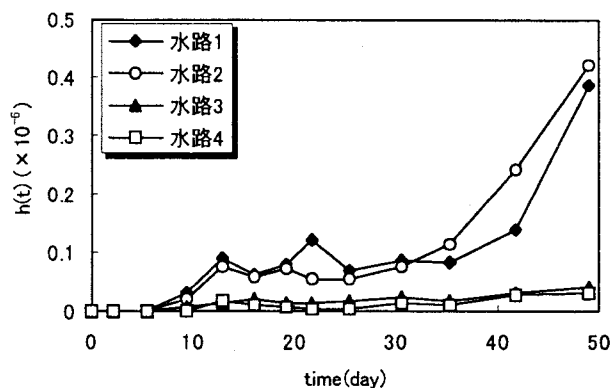


図-7 剥離速度定数の時系列変化(CASE1)

と水路3,4の現存量に大きな違いが生じたと考えられる。

表-2 糸状型, 群体型の付着藻類の割合(%)

		群体型	糸状型
CASE1 実験開始後5日目	水路1	94	6
	水路2	85	15
	水路3	66	34
	水路4	53	47
CASE1 実験開始後34日目	水路1	84	16
	水路2	80	20
	水路3	18	82
	水路4	5	95

(3)付着藻類の剥離過程

図-6に付着藻類の剥離量変化を示す。実験開始後からの時間の経過とともに全ての水路で剥離量は増加している。水路1,2と比較して水路3,4の剥離量が大きな値を示している。しかし,ある時刻における剥離量はその時刻の付着藻類の現存量の影響を強く受けるので,付着藻類の現存量に対する剥離量の割合を剥離速度定数 $h(t)$ と定義し,次式を用いて $h(t)$ を求めた。

$$h(t) = \frac{De(t)}{\{M(t - \Delta t) + M(t + \Delta t)\}/2} \quad (1)$$

ここで $M(t)$:時刻 t における付着藻類の現存量, $De(t)$:時刻 t における付着藻類の剥離量である。図-7に剥離速度定数の時系列変化を示す。剥離速度定数は付着藻類の剥離のしやすさをあらわした指標と考えられるが,これから付着藻類の成長にともなって剥離のしやすさが増すことがわかる。付着藻類の剥離は流体せん断力による剥離と,光合成や代謝によって生じる気泡が生物膜内部に溜まり,その浮力によって起こる剥離⁶⁾が考えられる。また藻類の種類によって剥離のしやすさが変化すると考えられる。水路1,2と比較して水路3,4では流体せん断力が大きいにも関わらず,水路

3,4では剥離速度定数が小さくなっている。このことから水路1,2では流速が小さいため気泡が生物膜内部から取り去られず,同時に比較的剥離しやすい群体型の藻類が優占したため,剥離速度定数が大きくなったと考えられる。それに対して水路3,4では種類の遷移が起こり,糸状型の藻類が優占していた。糸状型の藻類は剥離しにくく,それに加え水路3,4では流速が大きいため気泡が迅速に取り除かれることから,水路3,4においては剥離速度定数が小さくなったものと考えられる。

3-2 半球突起を有する河床における付着藻類の増殖・剥離(CSAE2)

(1)水理特性

各水路における水理特性を表-3に示す。各水路の平均水深に大きな違いはないが,水路1,2に比べ水路3,4の流速は大きくなっている。また半球前面では上昇流が生じ,半球背面には剥離流による弱い逆流域が存在し,複雑な流れ場が形成されていた。

表-3 各水路の水理特性(CASE2)

	水路勾配	半球頂上での平均流速(cm/s)	平均水深(cm)
水路1	1/500	8	8.1
水路2	1/285	12	9.8
水路3	1/138	33	8.2
水路4	1/68	41	8.5

(2)付着藻類の増殖過程

CASE2における水路中央の半球上での付着藻類の現存量変化を図-8に示す。CASE1と同様に流速の大きい水路ほどその現存量が大きい傾向がみられるものの,水路間の現存量の違いはCASE1ほど顕著ではなかった。実験開始後13日目と27日目での付着藻類の種類の分析結果を表-4に示す。付着藻類の分類方法は表-3と同じである。実験開始後13日目では全水路において群

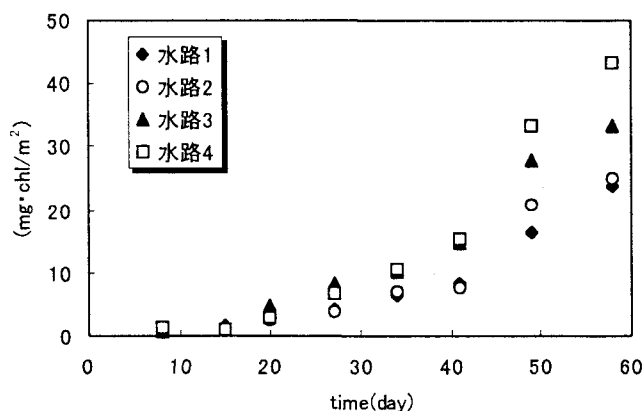


図-8 付着藻類の現存量変化(CASE2)

体型の藻類が70%以上を占めている。しかし実験開始後27日目には水路3,4では糸状型の藻類が80%程度を占めており、水路1,2でも糸状型の藻類が40%程度を占めるまで増えていることがわかる。つまりCASE1と比較してCASE2では流速の小さな水路においても糸状型の占有率が増加しており、そのため水路間の現存量の違いが小さくなったものと考えられる。

またCASE2における付着藻類の現存量はCASE1に比べて全般的に少ない。これは半球という形状が付着藻類の増殖に影響したことが考えられる。CASE2においては糸状型の藻類が流下方向に長くのびて成長していたのに対して、CASE2の半球上では糸状型の藻類は半球周辺で流れが複雑であったため、CASE1のように長くのびて成長することができなかった。その結果、CASE2ではCASE1と比較して現存量が少なかったと考えられる。しかし付着面の形状が付着藻類の増殖にどのような影響を与えるかにつて、その詳細は明らかでなく、今後の検討が必要である。またCASE2においては実験開始後約2ヶ月経過しても現存量は一定の値を示しておらず、CASE1と比較して付着藻類の増殖が緩やかであることがわかる。

表-4 糸状型、群体型の付着藻類の割合(%)

		群体型	糸状型
CASE2 実験開始後13日目	水路1	92	8
	水路2	73	27
	水路3	79	21
	水路4	81	19
CASE2 実験開始後27日目	水路1	64	36
	水路2	61	39
	水路3	25	75
	水路4	20	80

(3)付着藻類の剥離過程

各水路の剥離量および剥離速度定数の時系列変化を図-9,10に示す。増殖の初期段階においては水路1,2

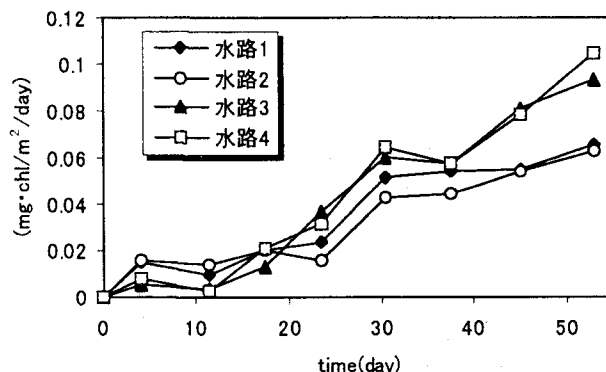


図-9 付着藻類の剥離量変化(CASE2)

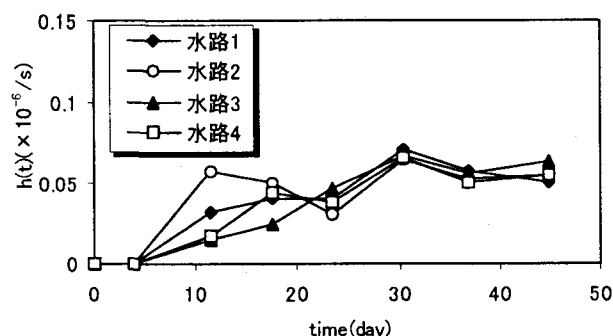


図-10 剥離速度定数の時系列変化(CASE2)

では水路3,4に比べて流れが遅いため気泡ができやすく、群体型の藻類が優占したため剥離速度定数が大きい値を示したと考えられる。しかしある程度増殖した後は水路1,2においても水路3,4と同様に糸状型の藻類が優占してきたため(表-4),剥離のしやすさを表す剥離速度定数が各水路でほぼ同じ値を示すようになっている。

(4)藻類の付着分布

半球周辺では前面(流れに対して上流側の面)、上面、背面(流れに対して下流側の面)で流れが大きく違い、そのため藻類の付着も半球上で一様ではない。そこで本実験では実験開始後27日目と41日目における半球の前面、上面、背面での付着藻類の現存量をクロロフィルa量として求めた。その結果を表-5に示す。表中の括弧内の数値は上面の付着藻類現存量を1としたとき

表-5 半球上の藻類の付着量(mg·chl/m²)分布

		前面	上面	背面
実験開始後 27日目	水路1	4.0 (0.34)	12.0 (1)	9.5 (0.79)
	水路2	5.1 (0.58)	8.9 (1)	7.8 (0.89)
	水路3	6.3 (0.54)	11.56 (1)	8.1 (0.69)
	水路4	11.2 (0.80)	14.1 (1)	12.1 (0.86)
実験開始後 41日目	水路1	5.4 (0.34)	15.3 (1)	14.3 (0.93)
	水路2	4.9 (0.32)	15.3 (1)	12.5 (0.82)
	水路3	11.8 (0.61)	19.4 (1)	19.9 (1.02)
	水路4	15.1 (0.59)	25.6 (1)	25.5 (1)

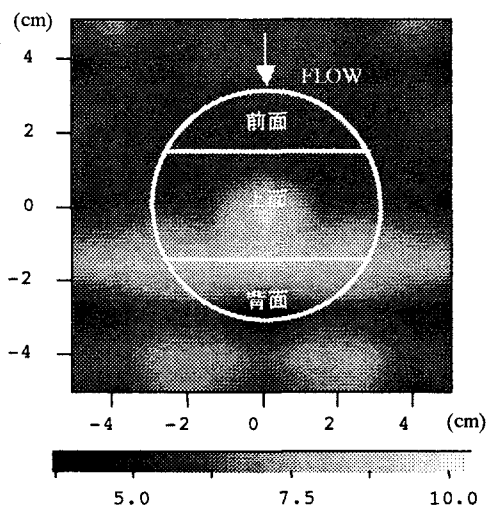


図-11 半球周辺の流下方向乱れ強度(cm/s)分布 (水路4)

の各面での割合を示している。実験開始後27日目と41日目ともに全ての水路において、前面での藻類の付着量は上面、背面に比べて少なくなっている。

図-11に水路4における半球周辺の流下方向流速成分の乱れ強度(底面から6mmの位置で測定した)のコンター図を示す。半球状突起を有する開水路流れでは半球上部付近から流れの剥離が生じるため⁷⁾、乱れ強度は半球の上面、背面に比べて前面では小さい値を示す。そのため前面では付着藻類の生物膜表面での基質の拡散が上面・背面に比べて小さく、その結果、付着藻類の生産力が低下したものと考えられる。なお流下方向流速成分の乱れ強度が前面に比べ、上面・背面で大きい傾向は水路4のみでなく全水路においてみられた。

4. 結論

河床付着性藻類の増殖と剥離特性に関する室内実験を行った結果以下のような知見を得た。

- (1)底面付近の乱れが大きい場合ほど付着藻類内部への基質の拡散が激しく行われるため、付着藻類の増殖の活性が高く、一次生産力が大きい。

- (2)流れが安定した状態では付着藻類の剥離は流体のせん断力よりも付着藻類の繁殖形態や光合成によって藻類膜内部に生じる気泡の除去特性の影響を強く受ける。

- (3)半球突起を有する水路床における半球上での藻類の付着分布は、流れの影響を強く受けて、乱れ強度の大きな半球の上面・背面で大きな値を示す。

謝辞:本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(2)(課題番号:11305035, 研究代表者:池田駿介)の補助を受けている。また、水質分析に関しては東京工業大学大学院総合理工学研究科石川忠晴教授ならびに石川研究室の学生の皆様に機材の使用等方法等、多くのご指導を頂いた。さらに藻類の種類分析に関しては東京大学農学部附属緑地植物実験所加藤和弘助教授の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1)藤田正治, 道上正規: 千代川における淵の構造と魚類の生息環境, 水工学論文集, 第40巻, pp181-186, 1996.
- 2)土屋十圓, 佐藤一夫, 岩永勉ほか: 生き物の生息環境を考慮した河川改修と生物相に関する調査, 水工学論文集, 第40巻, pp.175-180, 1996.
- 3)池田駿介, 戸田祐嗣, 赤松良久: 瀬と淵の水質および生物一次生産に関する現地観測, 水工学論文集, 第43巻, pp1037-1042, 1999.
- 4)川島博之, 鈴木基之: 河床付着性藻類の増殖と剥離, 化学工学論文集, 第9巻, 第3号, pp.324-329, 1983.
- 5)山本譲太郎, 伊藤猛夫: 水界動物生態学 I, 共立出版, 1973.
- 6)大橋晶良, 原田秀樹, 桃井清至: 平板上に形成される窒処理生物膜の生長過程, 衛生工学研究論文集, 第27巻, pp.45-54, 1991.
- 7)高橋由夫: 水路床上の存在する半球下流部の流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.417, II-13, pp.73-82, 1990.5.

(2000. 4. 17 受付)