

瀬と淵の水質及び生物一次生産 に関する現地観測

FIELD OBSERVATION ON WATER QUALITY AND PRODUCTION OF ATTACHED ALGAE AT RIFFLES AND POOLS

池田駿介¹・戸田祐嗣²・赤松良久³

Syunsuke IKEDA, Yuji TODA and Yoshihisa AKAMATSU

¹ フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

² 正会員 学士(工) 東京工業大学助手 工学部土木工学科

³ 学生員 学士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学科

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

From view points of ecology, it is important for river engineers to manifest the hydraulic and ecological characteristics of riffles and pools. A field observation was performed at riffles and pools in Tama-river in Tokyo. The hydraulic characteristics, the amount of attached algae and water the qualities were measured using various devices. It was found that the production rate of the attached algae at riffles is larger than that at pools. The primary production of observed riffles and pools are very large, yielding temporal variation of dissolved oxygen during day-time.

*Key Words: riffles and pools, attached algae, primary production, dissolved oxygen
water quality*

1. はじめに

近年、河川環境への関心が高まり、それに伴い河川系の基盤をなす河床付着生物(主に藻類)に関しては事業においては、多自然型川づくりが行われている。種分類などの生物学的な調査が行われている。しかしそれらの生産・増殖特性と流れ・水質との相互の関係に関する研究は少ない。

瀬と淵のように流れが一樣でなく複雑な水理特性を有する場では、水質や一次生産環境と水理量が何らかの因果関係を持っているものと推察される。したがって、瀬と淵における水理特性を考慮した水質、一次生産環境の研究が必要とされている。そこで著者らは実河川において、流れや地形の計測と同時に、付着藻類・水質の調査を行い、生産・増殖特性、水質、水理特性の相互の関係について検討を行ったので、その結果をここに報告する。

瀬の水理特性に着目した既存の研究として、山田・池内¹⁾のポテンシャル理論を用いた跳水形態や抵抗則に関する研究、京藤・福島²⁾の鉛直加速度を考慮した水深平均の運動方程式による水面波の研究などがあげられる。しかしこれらの研究は流れの物理現象の解明を目的としており、水質・生態環境との関連付けはなされてない。瀬と淵における環境面の既存の研究として、魚類や水性昆虫などのハビタットの構造と現存量に関する調査³⁾が多数行われている。また河川の生態

2. 観測地及び観測方法

(1) 観測地概要

観測は東京都青梅市に位置する多摩川上流域の下奥多摩橋付近の交互に続く七つ瀬と淵において観測を行った(図-1)。観測地は羽村取水堰の上流約3kmに位置している。また観測地の上流約20kmには小河内ダムがあり、観測期間中のほとんどにおいて流量は $12\text{m}^3/\text{sec}$ で一定に保たれていた。観測対象域に支川の合流といったようなきわだった横流入はなかったものの、河川際に住宅地が近接しており、多少の生活排水の流入が見られた。観測地では流速が早く、水深の浅い白波だった瀬と、水面が穏やかで流速が遅い淵が交互に構成されている。(写真-1)

(2) 観測方法

1997年8月26, 27日に地形測量、日射、水質、流速の計測を行った。まず、観測地の大局的な地形の構造をとらえるために約1.8km区間の連続する瀬と淵の河川形状、河床高、水面高の平板、水準測量を行った。測点は河川横断方向に45測線とり、計320点で計測を行った。

次に図-1中の測線A-A'において電磁流速計((株) KENEK 製)を用いて水平流速成分の水深、横断方向分布を測定した。流量は測線A-A'間を5つに区切り、各区間の中央部にいにおいて、1点法により求めた流速を用いて、断面分割法により算定した。各測定点における流速データは20Hzで100秒間サンプリングを行っている。さらに付着藻類の一次生産にとって重要である日射量、水温の測定を行った。日射計((株) 英弘精機製)を鉛直上向き、下向きの両方向に図-1の▼地点に設置し、8月26日6時～8月27日6時にかけて10分間隔で計測を行った。水温の測定は熱電対を用いて、日射計と同地点で同時に計測を行った。水質に関しては、8月26日6時～8月27日6時にかけて図-1中の×の地点で2時間間隔で採水を行った。採水されたサンプルを研究室に持ち帰り、吸光光度計((株) セントラル科学)を用いて栄養塩類(T-P, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, T-N)の測定を行った。また同じ場所で、同時に溶存酸素量の変化を簡易多項目水質計(U-10, (株) 堀場製作所製, 溶存酸素量: $\pm 0.02\text{mg/l}$)を用いて計測した。この溶存酸素量の計測には隔膜電極法が用いられている。

また観測地の瀬と淵の付着藻類の生産・増殖特性をとらえるため、1997年7月24日～9月11日にかけて以下の観測を行った。最初に瀬と淵に多数の模擬石を設置し、それらを一週間毎に三個づつ回収した。付着した藻類を歯ブラシではがしとり、藻類に

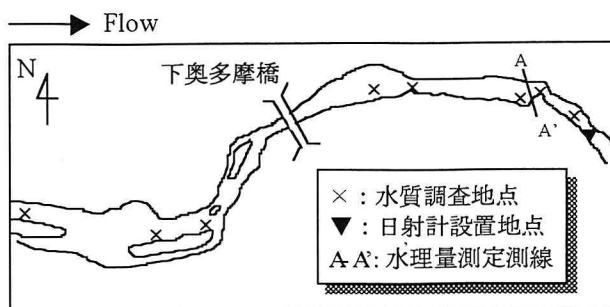


図-1 観測地図



写真-1 観測地

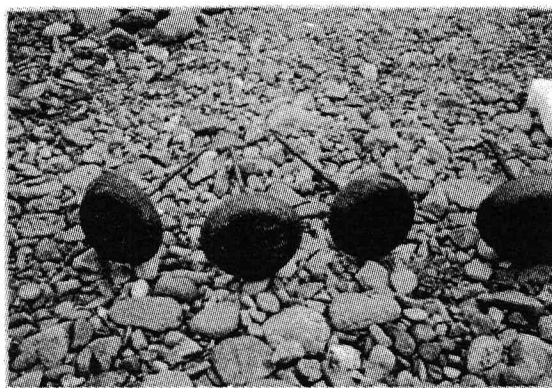


写真-2 模擬石に付着した藻類

含まれるクロロフィルa量を吸光光度計で測定した。模擬石は直径12cmの半球を押しつぶしたような形状であり、材料にはモルタルを使用している。藻類の付着した様子を写真-2に示す。実際の河床礫表面とモルタル表面の付着藻類付着量を比較した結果、両者に優位な違いは認められなかったので、本研究で用いた模擬石は実際の河床礫を再現していると考えられる。さらに礫周りの藻類の付着分布を知るために瀬、淵それぞれにおいて長径15cm～20cmの河床礫を5個採取して、その流れに対して前面、上面、後面のそれぞれに付着するクロロフィルa量を測定した(採取面積: $5\text{cm} \times 5\text{cm}$)。また河床への光の到達率を知るために、模擬石設置ポイントの内もっとも水深が大きかった淵で鉛直方向に5点で採水し、吸光光度計により光の透過率を測定した。

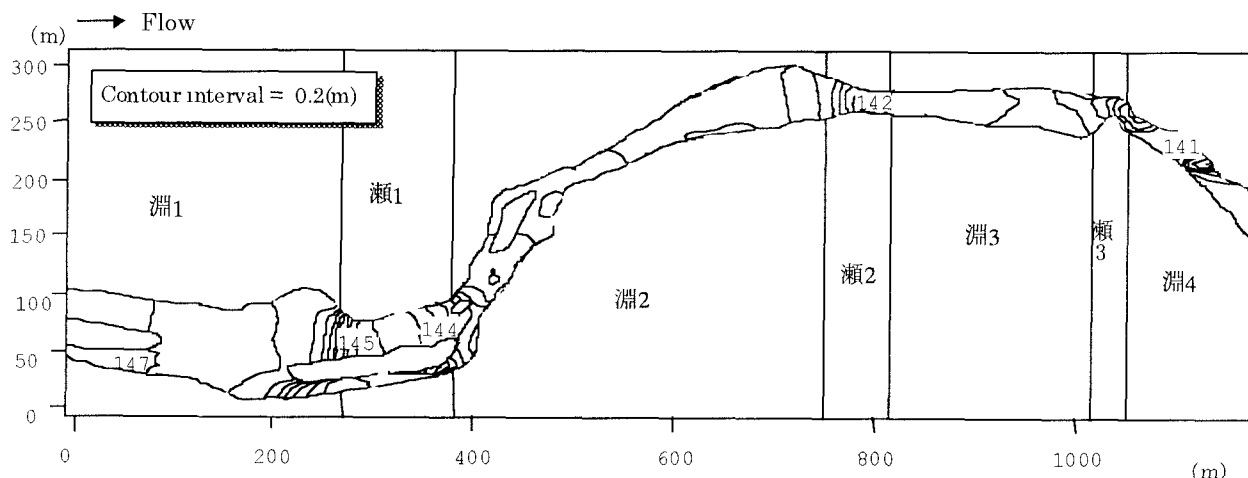


図-2 水面コンター

表-1 瀬と淵の水理量

	瀬		淵			
	瀬 1	瀬 3	淵 1	淵 2	淵 3	淵 4
平均水深(m)	0.27	0.36	0.31	0.40	0.59	0.76
平均流速(m/s)	1.22	0.96	0.71	0.44	0.55	0.44
フルード数	0.69	0.49	0.41	0.22	0.23	0.16
水面勾配 ($\times 10^{-3}$)	1.9	1.7	2.7	5.9	1.9	2.5

表-2 観測地の栄養塩濃度(mg/l)

T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
8.8×10^{-2}	4.4×10^{-2}	4.3×10^{-2}	2.7	2.8

3. 観測結果及び考察

(1) 測量結果及び瀬と淵の水理特性

全長約1.8kmにわたる瀬と淵の水面コンターを図-2に示す。本観測では水面勾配が大きく水面が波立っているところを瀬として、それ以外の場所はすべて淵と判断した。図-2の流下方向の0m～200m、600m～700m、900m～1000mの地点は一般に言われる深掘れした淵ではなく川幅が広く、水深の小さい淵（トロ）が形成されている。

また各瀬と淵の水理量（時間・空間平均流速，空間平均水深，時間・空間平均フルード数）を表-1に示す。瀬2は流速が早く測量が正確に行えなかったため各水理量を見積もることができなかったため割愛する。瀬ではフルード数が大きく，特に瀬1ではフルード数が0.69と非常に大きい値を示している。そのため瀬の中に存在する大きな礫の上部では局所的に見たときフルード数が1を越える射流になっており，観測対象の瀬では常流，射流の混在する流れが形成されていたものと思われる。

(2) 栄養塩の日変化

栄養塩(PH₄-P, T-P, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, T-N)の全地点・日平均濃度を表-2に示す。本観測地では河川水中に

酸素が十分含まれていたため，窒素はほとんどはもっとも酸化された状態である硝酸態窒素(NO₃-N)として存在している。藻類の増殖に関しては，全窒素濃度で0.2(mg/l)程度以下，全リン濃度で0.05(mg/l)程度以下の時，栄養塩が藻類の増殖の制約要素になると報告されている⁴⁾。従って本観測地では全窒素，全リンともに藻類の増殖に十分な濃度で存在し，これらによる制約は受けてないものと判断される。

全窒素(T-N)，全リン(T-P)の全地点平均値の日変化を図-3に示す。全窒素の日変化は8月26日正午頃と8月26日22時以降に大きな値を示している。一般的に住宅地などからの生活排水の影響を受けた河川区間においては汚濁物負荷量のピークは9～11時頃と19～21時頃の一日に2回出現すると言われている。本観測で見られた全窒素の変動はそれらの報告より1～2時間程位相が遅れているものの，これらの変動は流域からの負荷変動に起因しているものと考えられる。これに対して全リンの日変化では特徴的な変動は見られなかった。このことから，流域からの負荷中のリン含有量が少ないこと，観測期間中の水理量

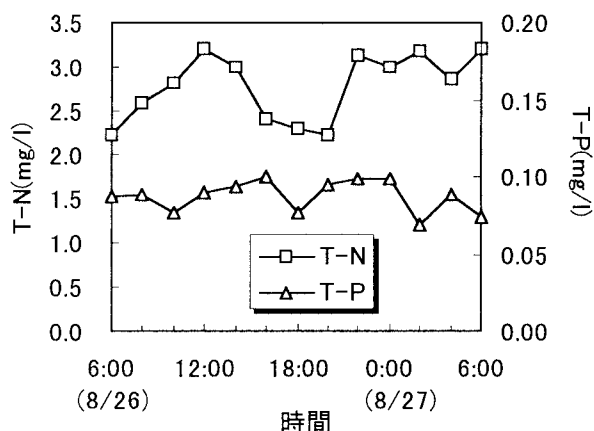


図-3 全窒素, 全リンの日変化(8/26, 27)

の変化がほとんど見られなかったため, リンを吸着して運搬する濁度の濃度の変動もほとんどなかったことが推察される。

(3) 日射及び溶存酸素量の日変化

日射量の日変化を図-4に示す。日射量の4%程度が水で反射しており, ほとんどが水中に透過している。吸光光度計によって透過率を測定した結果, 本観測地での河川水中への透過率は純水に近く, 吸光係数は純水の0.28と等しいと見なせる。水中の日射の透過特性と水深の関係をあらわす Lambert-Beer の光透過式⁵⁾は

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp\{-a(\lambda) \cdot D\} \quad (1)$$

で示される。ここに $E_0(\lambda)$: 水面直下の日射量(W/m^2), $E(\lambda)$: 深度 $D(m)$ の日射量(W/m^2), $a(\lambda)$: 吸光係数。式(1)から得られる各瀬と淵の模擬石設置地点での河床への光の到達率は, もっとも水深の大きい淵4でも日射の80%程度が河床に到達しており, いずれの地点においても日射のほとんどが河床へ到達していることがわかった。植物の光合成活動は光量(照度)に依存するため, 日射量と照度の関係を明らかにする必要がある。エネルギーの単位である日射量と光量である照度を完全に変換することは厳密には不可能であるが, 両者の間に近似的に次式が成り立つことが知られている。

$$1W/m^2 = 103.4lux \quad (2)$$

本観測では上述のように日射のほとんどが河床へ到達しているため, 水中を透過する際の波長毎の吸光特性の違いは無視できるものと考えられる。従って上記の近似的な関係は河床付近に拡張することが可能である。式(1), (2)を用いて算定した河床の照度は日中40～60klux程度であった。観測対象地では珪藻が優先的に生息しており, その場合約20klux以上でほぼ飽和光合成速度に達するため, 日中は瀬, 淵にかかわらず光合

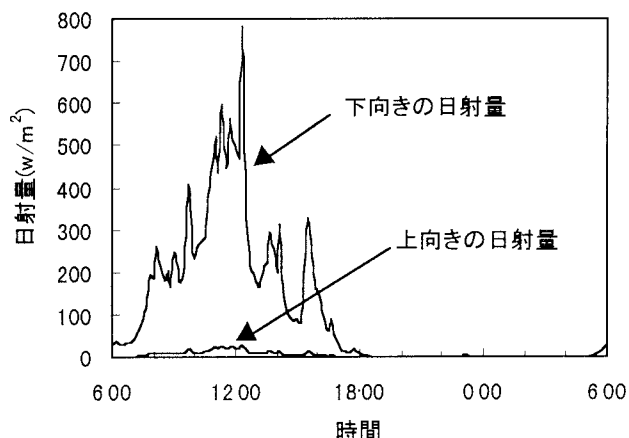


図-4 日射量(8/26, 27)

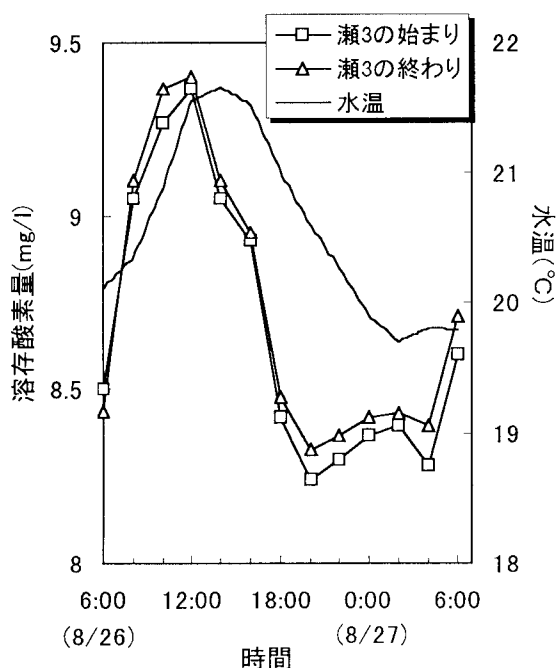


図-5 水温と溶存酸素量の日変化(8/26, 27)

成を行うのに十分な光量が確保されていると考えられる。

水温及び溶存酸素量の瀬3の始まりと瀬の終わりの2点での日変化を図-5に示す。水温変化は水の熱容量のため日射のピーク(正午)から位相が遅れ, 14時頃にピーク値を示している。水温の日変化を考慮して算定した溶存酸素量の飽和度の日変化を図-6に示す。夜間は付着藻類の光合成活動は行われないので, 8月26日18時頃～8月27日6時頃の間の流下に伴う溶存酸素量の増加は水面からの曝気によるものである。また8月26日8時頃～8月26日17時ごろにおける溶存酸素量は過飽和状態であるが, それにもかかわらず, 午前中には水中の溶存酸素量が増加している。このような増加が起こるには, 過飽和に逆らうほどの強制的な曝気や付着藻類による光合成によ

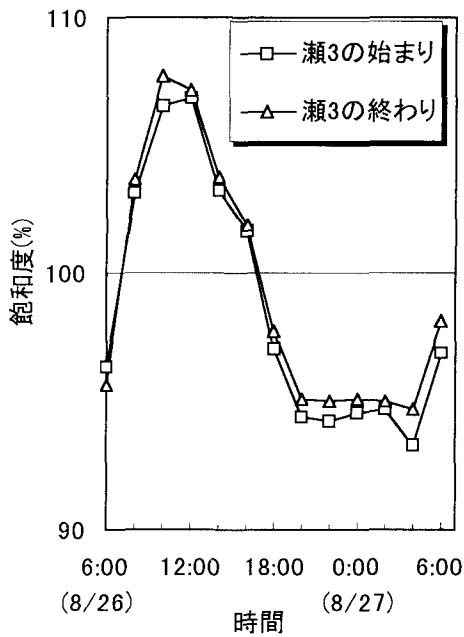


図-6 溶存酸素の飽和度の日変化(8/26, 27)

て酸素が供給されてなければならない。観測期間中の水理量はほとんど変化していないため、このような溶存酸素量の変化は付着藻類の光合成によって生じているものと考えられる。

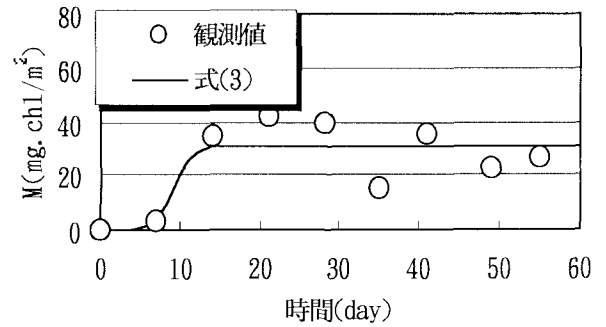
(4)付着藻類の増殖過程

瀬3と淵3それぞれの模擬石に付着した藻類の増殖過程を図-7に示す。一般に生物の増殖は最初、指数関数的に増加し、栄養分や環境条件の制約により、増殖が低下すると言われており、その様子が本観測でもとらえられている。瀬では、藻類は模擬石設置後7～14日の間に $35(\text{mg. chl}/\text{m}^2)$ 程度まで増殖し、その後ほぼ一様な付着量を示している。それに対して、淵では、藻類は時間をかけて徐々に増殖しており、両者で藻類の増殖過程が大きく異なっていることがわかる。このような増殖過程の違いを定量的に考察するため、非線形最小二乗法を用いて、観測値にロジスティック曲線をフィッティングし、増殖の特性量を算出した。図-7から明らかに藻類の剥離の現象が見られ(瀬3の35日付近と淵3の40日以降)、単純にロジスティック曲線を当てはめることには問題はあるものの、瀬と淵の増殖の特性量を定性的にとらえるには有効であると考えた。ロジスティック曲線を用いると、時刻 $t(\text{day})$ における生物量 $M(\text{mg. chl}/\text{m}^2)$ は次式で表される。

$$M = \frac{M_0 \cdot K}{M_0 + (K - M_0) \cdot \exp(-\mu \cdot t)} \quad (3)$$

ここで μ は比増殖速度(day^{-1})、 K は飽和増殖量($\text{mg. chl}/\text{m}^2$)、 M_0 は初期($t=0$)における生物量である。ここで μ は付着藻類の増殖の活性度を表し、この値は

(瀬3)



(淵3)

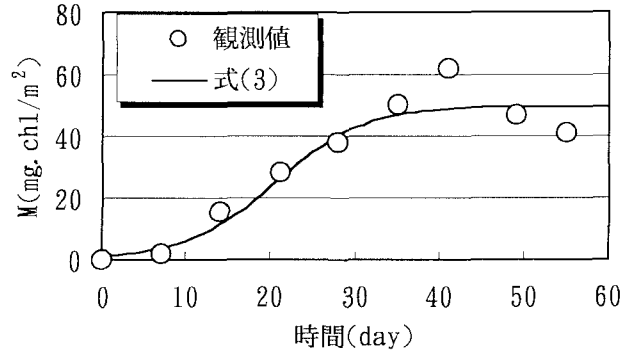


図-7 河床藻類の増殖過程

表-3 河床藻類の比増殖速度と飽和増殖量

		比増殖速度 (day^{-1})	飽和増殖量 ($\text{mg. chl}/\text{m}^2$)
瀬	瀬1	0.72	45
	瀬3	0.87	31
淵	淵1	0.42	56
	淵2	0.21	31
	淵3	0.19	50
	淵4	0.37	30

表-4 河床礫の藻類付着量($\text{mg. chl}/\text{m}^2$)分布

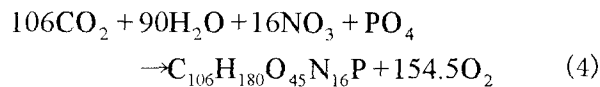
	前面	上面	後面
瀬	7.0	35.7	33.6
淵	20.3	19.9	19.1

既往の研究⁹⁾では光強度・水温・栄養塩によって強く支配されると考えられている。飽和増殖量 K はある環境条件のもとで維持できる個体数の上限を与えている。このようにして求めた各瀬と淵での比増殖速度と飽和増殖量を表-3に示す。表-3から付着藻類の比増殖速度は明らかに淵より瀬の方が大きい傾向にある。観測対象とした1.8km程度の区間では水温・栄養塩の有意な違いはみられなかった。また前述の通り、模擬石を設置した地点における河床への日射の到達率は高く、十分な光量が確保されている。したがって、このような比増殖速度の違いは流れの特性に起因するものと推察される。観測では、流速や摩擦速度が大きいほ

ど比増殖速度が大きくなる傾向がみられたものの、そのような傾向が見られる要因は不明であり、今後の課題である。一方、飽和増殖量に関しては、瀬と淵で系統的な違いは見られなかった。実際の河床礫について礫を前面・上面・後面に分け、それぞれの場所に付着する藻類量を表-4に示す。淵の河床藻類は全面にほぼ一様に付着しているのに対して、瀬では前面に比べて上面・後面に多く付着している。瀬の前面では流れが早く、藻類が付着しにくかったと考えられる。このような分布の違いから、瀬では比増殖速度が高い藻類が礫の上面、後面に付着し、初期に著しい増殖をみせるものの、それらの付着できる面積が限定されており、飽和増殖量では系統的な違いが見られなかったと推察される。

(5)付着藻類の酸素生産量

溶存酸素量の日変化を考えたとき、付着藻類の光合成による酸素の生産が日中の溶存酸素量に大きく影響している。この付着藻類の酸素生産速度は次のように見積もることができる。付着藻類の光合成は次式の化学反応によって近似的に表される⁷⁾。



式(4)と付着藻類のクロロフィル a 含有率(chl-a/ $\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$ = $7.5 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-2}$)⁸⁾を使って、比増殖速度から、瀬と淵での酸素生産速度($\text{mg} \cdot \text{O}_2 / \text{mg} \cdot \text{chl} / \text{hr}$)が算出される。以上より算出した単位河床面・一日当たりの総酸素生産量を表-5に示す。3.(4)で述べた通り、瀬と淵の付着藻類の現存量には際だった差はないが、総酸素生産量は瀬の方が淵より大きな値を示す。これは瀬の方が淵より光合成の活性度が高く、その結果、高い一次生産力を有していることを示している。他の水域の総酸素生産量の例として諏訪湖: $0.5 \sim 3.8(\text{g} \cdot \text{O}_2 / \text{m}^2 / \text{day})$ 、琵琶湖: $0.2 \sim 1.7(\text{g} \cdot \text{O}_2 / \text{m}^2 / \text{day})$ の値が報告されている⁹⁾。これらの値は単位面積当たりの水柱全体が持つ生産力であり、この値と比較して、観測対象とした瀬と淵では河床礫表面だけで、それらに匹敵する高い生産力を有しているといえる。

表-5 付着藻類の総酸素生産量

		酸素生産速度 ($\text{mg} \cdot \text{O}_2 / \text{mg} \cdot \text{chl} / \text{day}$)	総酸素生産量 ($\text{g} \cdot \text{O}_2 / \text{m}_2 / \text{day}$)
瀬	瀬1	110~190	5.2~8.7
	瀬3	150~260	4.8~8.0
淵	淵1	68~110	3.8~6.4
	淵2	34~58	1.0~1.8
	淵3	30~51	1.5~2.6
	淵4	59~100	1.8~3.0

4. 結論

多摩川中の瀬と淵に関する現地観測を行った結果、本観測の範囲内では、以下の知見を得た。

- 1) 河川内では、日中、溶存酸素は過飽和状態にあり、日射量が最大となる正午付近にピークを持つ。この主たる原因は付着藻類の光合成による酸素の放出であると考えられる。
- 2) 付着藻類の比増殖速度は淵より瀬の方が大きい。その違いは瀬と淵の水理量の違いに起因しているものと考えられる。
- 3) 観測対象とした瀬と淵の河床礫表面は高い一次生産力を有する。また瀬の一次生産力は淵のそれより高い。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(1)(課題番号：08305017、研究代表者：池田駿介)、並びにとうきゅう環境浄化財団研究助成(課題番号：1997-06、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。記して謝意を表す。

参考文献

1)土屋十朗, 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.

2)山田正, 池内正幸, 堀江良徳：不規則底面を持つ開水路流れに関する研究, 水工学論文集, 第28巻, pp. 149-155, 1984.

3)京藤敏達, 福島, 雅紀：波状底面を持つ開水路流れの安定性と河川早瀬の波, 土木学会論文集, No. 539/ II 35, pp. 69-78, 1996.

4)川原田裕, 岩崎英雄, 谷口旭：海洋プランクトン, 東海大学出版社, 1975

5)土木学会編：水理公式集, 第1編11章, 土木学会, 1987.

6)川島博之, 鈴木基之：河床付着藻類の増殖と剥離, 化学工学論文集, 第9巻, 第3号, pp324-329, 1983.

7)津田松苗：水質汚濁の生態学, 公害対策技術同友会, 1972.

8)Parsons, T. R., Stephens, K. and Strickland, J. D. H. : “On the chemical composition of eleven species of marine photoplankters”, *Jour. of Hydroscience and Hydraulic Engrg.*, JSCE, Vol. 15, pp. 49-58, 1961.

9)山本譲太郎, 伊藤猛夫：水界動物生態学 I, 共立出版, 1973.

(1998. 9.30受付)