

# 現地観測に基づく瀬の水理と 生物一次生産に関する研究

池田駿介<sup>1</sup>・戸田祐嗣<sup>2</sup>・佐野貴之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>正会員 学士(工) 東京工業大学助手 工学部土木工学科

<sup>3</sup>学生会員 学士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

瀬の流れと水質及び生物生産に関する現地観測を東京都奥多摩地域の秋川で行った。河床礫や水表面波形の空間分布を様々な計測機器を用いて計測した結果、大礫の平均径や標準偏差が水表面のテクスチャに影響を与えることが明らかになった。同時に、瀬の日射環境、溶存酸素量や一次生産量を計測した結果、溶存酸素量の日変化は主に河床の藻類の光合成によって引き起こされること、観測対象とした瀬の河床付着藻類は $2.49\sim 6.65\text{g}\cdot\text{O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 程度の値を示し、他の水域と比較して高い一次生産力を有することが明らかになった。

**Key Words:** riffles, gravels, water surface texture, algae, dissolved oxygen

## 1. はじめに

近年水辺環境に対する認識が高まり、河川事業においては環境を考慮した多自然型川づくり事業が行われている。その中で、河川中・上流域で多数見られる「瀬と淵」は河川生態系あるいは景観、サウンドスケープといった観点から注目を浴びており、それらに関する研究が次第に行われるようになりつつある<sup>1),2)</sup>。「瀬と淵」という名称が生物、生態学の分野から提案されているが、注目が集まる以前から移動床水理学の分野では交互砂州、蛇行について数多くの研究がなされてきた<sup>3)</sup>。その中で基本的な瀬と淵(この名称は使用されていなかったが)の形成過程、形態などはおおむね明らかにされている。しかし、水深平均流れというような流れの大局的な特徴は明らかにされているものの、河川環境・景観上重要な流れの微細構造や水面テクスチャなどについては十分な研究がなされなかった。

移動床水理学の分野において「瀬と淵」という観点で研究が始まったのは比較的最近のことであって、中でも淵に関する研究<sup>4),5)</sup>は現地調査を主体として数多くなされているが、瀬の研究は流れの複雑さ故に比較的少ない。瀬の水理特性に着目した従来の研

究として、池内ら<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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が挙げられる。これらの研究では河床をサイン波等で近似した解析を行っている。しかし、実際の瀬の流況、水表面テクスチャは河床礫の影響を受けて3次元的な様相を呈し<sup>8)</sup>、河床の形状を単純な河床形状で表現したり、水面形状を水深平均モデルで再現することは困難であると思われる。

瀬の生態環境について様々な河川で魚類や水生昆虫などの生息調査<sup>9)</sup>が行われている。その中で大きな礫の存在は水生昆虫の生息場所や魚類の良好な補食場所を提供しているといったマイクロ・ハビタートとしての役割を担っていることが定性的に理解されてきた。しかし、瀬の一次生産力や自浄作用といった観点からの研究は少なく、生態系の下位の生産量やその生息環境を明らかにしていくことは水質のみならず、上位の消費者(魚類、昆虫)の生態環境を把握するためにも重要である。

これらの瀬の生物、水質環境や水面テクスチャに代表される景観特性などを解明して行くためには、河床礫の水理的効果や環境に果たす役割を詳細に捉える必要がある<sup>10)</sup>。以上のことから本研究では、瀬

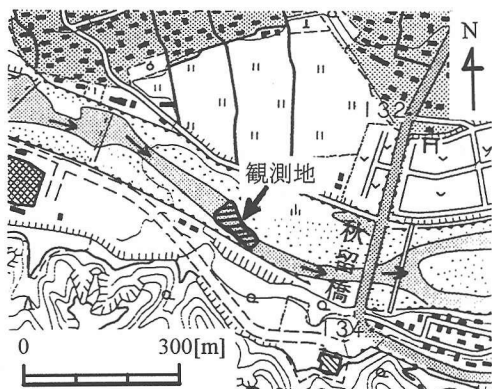


図-1 観測地地図

の河床礫が水面テクスチャに及ぼす水理的効果と河床礫に付着する藻類による一次生産特性を明らかにすることを目的として、実河川の瀬において空間的な水理特性と生産量や諸環境特性に関する現地観測を実施したので、その結果を報告する。

## 2. 観測地及び観測方法

### (1) 観測地概要

観測は平成8年9月11, 12日に、東京都あきるの市の秋川で実施した(図-1)。観測地の選定に当たっては、水面テクスチャが多様であることを基準として選んだ。このような条件を満足させる場所として、秋留橋の300m程上流を選んだ。ここでは、長さ60m程度にわたって水面変動の激しい瀬が存在し、その上下流に淵が形成されていた。本観測期間中は晴天で、水位変化の最大値は1cm程度であり、流れは殆ど変化がなかった。

### (2) 瀬, 淵の慣習的分類

一口に瀬と言ってもその流れの様相は多様である。河川生態学ではそれらを平瀬、早瀬と分類しているが<sup>10), 11)</sup>、それ以前から慣習的ではあるものの、より詳細な分類<sup>12)</sup>が釣り人によって行われている。その分類法は厳密なものではないが、流れの視覚的特徴の表現としての確かつ便利なものである。その分類による瀬の種類は数多くあるが、ここでは本観測地で見られた瀬について簡単に述べる。

チャラ瀬(写真-1)：水深が浅く(30cm~50cm程度)、水表面は波だっているが気泡の混入は起こっていない。

ザラ瀬(写真-2)：チャラ瀬と同程度の水深であるが、水面の波立ちは激しく気泡の混入を伴って白濁している。

瀬わき：瀬の川岸近くに位置し、水表面の波立ちが小さく穏やかな流れ。

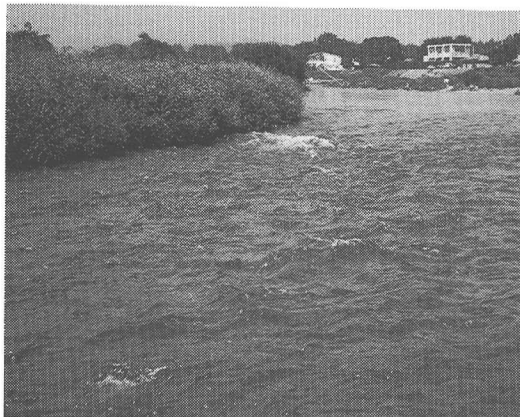


写真-1 チャラ瀬

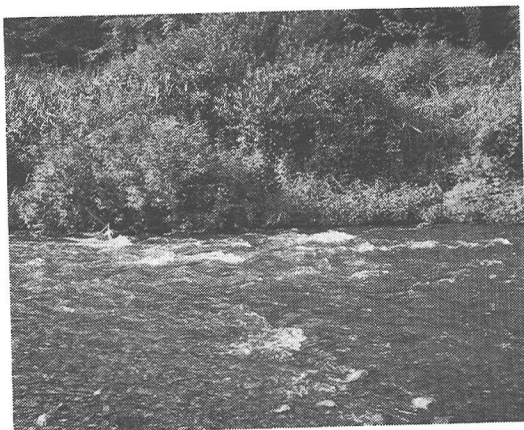


写真-2 ザラ瀬

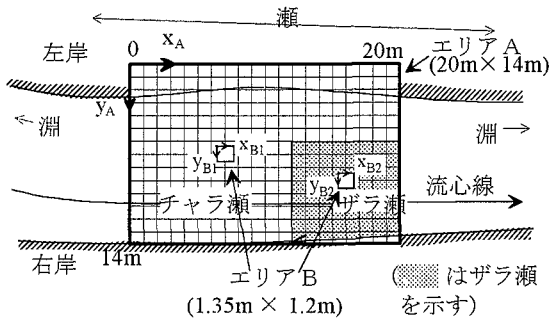
チャラ瀬やザラ瀬は河川生態学で言う平瀬、早瀬の中に局在しており、局所的な流れの様相を表現した分類法といえる。一般に、チャラ瀬は平瀬の中に、ザラ瀬は早瀬の中に多く見られる。これらの流れが発生している地点を観測場所として選び、以下に述べるような観測を行った。

### (3) 観測方法

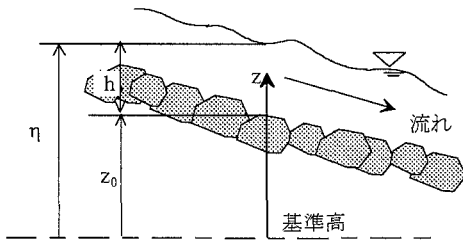
現地観測では地形、日射、水質、底質、一次生産量、流速、水面形など多岐にわたる計測を行った。図-2(1), (2)に観測の概要図と座標系を示す。

まず、大局的な地形の構造を捉えるために、淵~瀬~淵と続く110mの区間の流心線に沿った河床高、水面高をレベル((株)SOKIA製)を用いて計測した。観測最下流地点の河床高を高度0mとし、本観測の高さの基準点とした。この基準高からの水面高(水位)を $\eta$ 、河床材料表面までの高さを河床高 $z_0$ と定義し、局所水深を $h=\eta-z_0$ とした(図-2(2)参照)。

ついで、その中で60m程度の瀬の中で見られる多様な水面テクスチャと底質の礫の分布状況との関連



(1) 平面図 (太枠内がエリア A, 1つの格子は1m×1mの大きさ)



(2) 縦断面図

図-2 観測の平面・縦断面図と座標系

を捉えるため、20m (流下方向) × 14m (横断方向) の領域 (エリア A, 図-2(1) 中の太い黒枠内) を選定し、その中に 1m × 1m 間隔の格子を配置し、各格子点上で水深の計測を、格子点を中心とする 1m 四方の領域で底質礫の計測を行った。水深の測定には定規を、底質礫の測定にはビデオ画像を用いた。水深測定に際しては、河床に接地する側の端部に約 5cm 四方の平面板を取り付けることにより、石の上部付近でも安定に定規を設置できるようにした。

底質礫の測定に際しては以下のことに注意した。瀬の流れは底質礫の大きさに対する相対的な水深が小さいため、礫の近傍の流れ場や礫による局所水深の変化などが流れの抵抗則といった水理特性や波のような水面テクスチャに影響を及ぼす。つまり、底質の礫は粗度というより、河床形状としての働きが強い。従って、瀬の流れの特性を支配する河床礫は、河床の凸凹に大きな影響を与える大粒径のものと考えられ、その特性を的確に把握する必要がある。しかしながら、これらの大粒径の礫の大きさは 10cm 以上のものが多く、河床礫のサンプリング法として一般的に行われているふるい分け試験による重量百分率の計測は困難である。また、ふるい分け試験による計測では河床表面の礫だけでなく大礫の下にある小さな砂礫の重量も計測することとなり、本観測

表-1 各地点における観測項目

観測地点	観測項目	観測機器
流心線	河床高, 水面高	レベル
エリア A	底質, 水深	ビデオ, 定規
エリア B	水面波形, 流速	電磁流速計, 容量式波高計
瀬の流入部	日射量, アルベド, 溶存酸素量, 水温	日射計, 多項目水質計
瀬の中央	光の透過率, クロロフィル a 量	エコプローブ, 吸光分析
下流側の瀬の流入部	水温, 溶存酸素量	多項目水質計
下流側の瀬	光の透過率, クロロフィル a 量	エコプローブ, 吸光分析

のように表面構成材料の特性を知るには不適當であると考えられる。従って、河床表面の材料特性を捉えることができ、かつ計測が容易であるビデオ画像からの個数サンプリング法を用いた。具体的には、透明の亚克力板を底面とする約 1m 四方の箱を用いて河床のビデオ撮影を行い、その領域内にある河床礫のうち大きいものから 5 個選んでその長軸長さを計測した。その妥当性や物理的意味については 3. (2) で検討する。

さらに、チャラ瀬とガラ瀬 (2. (2) 参照) の局所的な水理特性、水面形を明らかにするため以下のような計測を行った。先述のエリア A の中からチャラ瀬 ( $x_A=7m, y_A=7m$  付近)、ガラ瀬 ( $x_A=16m, y_A=9m$  付近) を 1 箇所づつ選び、1m 前後の水面の空間変動の波長を捉えられるように 1.35m (流下方向) × 1.2m (横断方向) の領域 (エリア B) を 2 個設定した。エリア B では流下方向に 15cm 間隔、横断方向に 10cm 間隔の格子状に区切り、各格子点上の水面高を容量式波高計 ((株) KENEK 製, 分解能: ± 1mm) を用いて計測した。エリア B のそれぞれの中心で I 型の電磁流速計 ((株) KENEK 製, 検出部の大きさ: 8mm × 3cm, 精度: ± 1cm/s) を用いて水平流速成分の水深方向分布を計測した。水面および流速データは各測点において 20Hz で 1 分間のサンプリングを行い、移動平均処理によって 5Hz のデータに変換した。

また、水理学的な計測と同時に瀬の一次生産特性を明らかにするために以下に挙げる項目を計測した。瀬の流入部に日射計 ((株) 英弘精機製) を鉛直上向き、下向き、両方向に設置し、水面のアルベド、水中透過日射量を計測した。この日射量に関して、瀬の中央と下流側の瀬で河床植物の光合成に重要であ

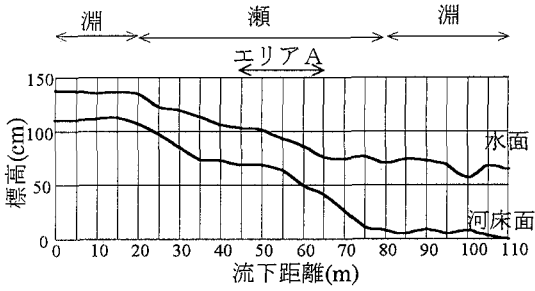


図-3 流心線に沿った河床高と水面高

る可視光域の波長帯中の光 (660nm) の水中透過率をエコ・プローブ (株) TERAL KYOKUTO 製, 精度:  $\pm 0.1\%$  を用いて水深方向に 10cm 間隔で計測した。また, 観測対象とした瀬の流入部と下流側の淵の流入部で底面から 10cm 付近の溶存酸素量及び水温の変化を簡易型多項目水質計 (U-10, (株) 堀場製作所製, 精度: 水温:  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ , 溶存酸素量:  $\pm 0.01\text{mg/l}$ ) 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を用いた。さらに, 河床付着藻類の現存量を明らかにするために, チャラ瀬, ザラ瀬, 下流側の淵の底質からその地点を代表していると思われる 10~20cm 程度の大礫をそれぞれ 3 個 (計 9 個) サンプルングし, それぞれの石の表面に付着している藻類を一定の表面積 (3cm $\times$ 3cm) 削り出し, アセトン抽出を行った後に吸光分析を行うことによりクロロフィル a 量を計測した。

表-1 に以上の観測項目の一覧を示す。

### 3. 観測結果

#### (1) 観測対象とした瀬の概要 (地形測量の結果)

図-3 に観測対象とした瀬の流心線に沿った縦断地形図を示す。上流側には水深は小さいものの川幅が広く, 穏やかな水面を持つ淵 (トロ) が形成されていた。河床勾配が大きくなる 20m 地点から 80m 地点までの約 60m にわたって水面変動の激しい瀬が形成されていた。瀬の領域の平均的な水深は 38cm, 河床勾配は 1/162 であった。その下流には, 湾曲部洗掘の M 型淵<sup>10)</sup> が形成されていた。瀬の中で, 区間 45m から 65m の間にはチャラ瀬やザラ瀬が混在して多様な水面が形成されており, この領域が先述のエリア A である。

#### (2) 底質, 水面テクスチャの空間的特徴 (エリア A の計測結果)

1 例としてエリア A 内の 1 地点 ( $x_A=16\text{m}$ ,

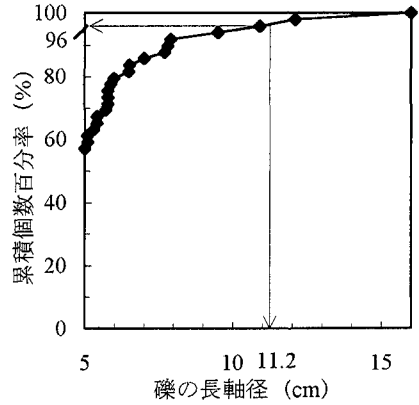


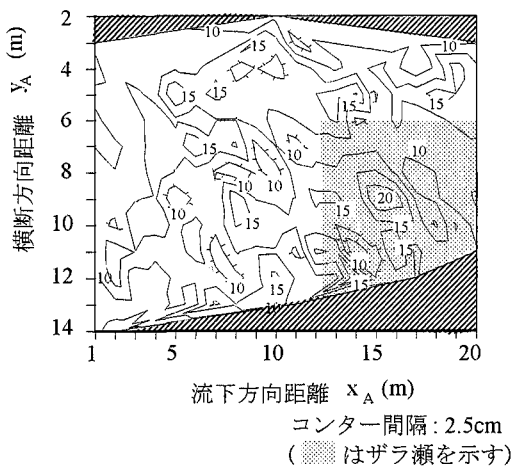
図-4 河床礫の粒度分布

( $x_A=16\text{m}$ ,  $y_A=4\text{m}$  付近)

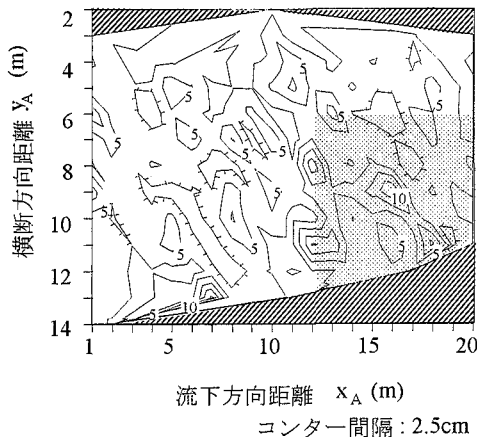
表-2 各観測点における 5 個の大礫の内の最大径, 最小径の平均値および標準偏差

	平均値 $d_A$ (cm)	標準偏差 $\sigma_A$ (cm)
最大径	17.8	5.4
最小径	8.5	2.2

$y_A=4\text{m}$  付近において 5cm 四方の格子を用いた面積格子法<sup>10)</sup>を適用し計測した個数百分率による長軸径の粒度分布 (◆印) を図-4 に示す。全サンプルング個数は 49 個であり, 画像から正確な大きさを判別することが困難である 5cm 以下の礫は個数のみ数えたので, 図-4 にはプロットしていない。2. (3) で述べた大きい方から 5 個サンプルングした礫は  $d_{95}$  以上に相当する。図中の×印はサンプルングした 5 個の大礫の平均径 ( $d_m$ ) を示している。その大きさは  $d_{95}$  に相当し, これに対応する長軸径は 11.2cm である。大きい方から 5 個サンプルングした大礫が各地点での大礫を代表する集団として妥当かどうかを検討する。エリア A 内の全観測点 (193 地点) でそれぞれサンプルングした 5 個の大礫の長軸長さの最大値と最小値を抽出し, それらの平均値 ( $d_A$ ) と標準偏差 ( $\sigma_A$ ) を表-2 に示す。大礫の最大径の標準偏差は 5.4cm であり, 平均値と併せて考えると 12cm~23cm 程度の大小の分布があり, 各観測点で最大礫の大きさが大きく異なる。大礫の最小径の標準偏差は 2.2cm であり, 同様に平均値と併せて考えると大礫の最小径は 6~11cm 程度の大きさであり, その大きさの礫はエリア A 全域で多数見られた。つまり, サンプルングした 5 個の大礫の最小径のものは全て

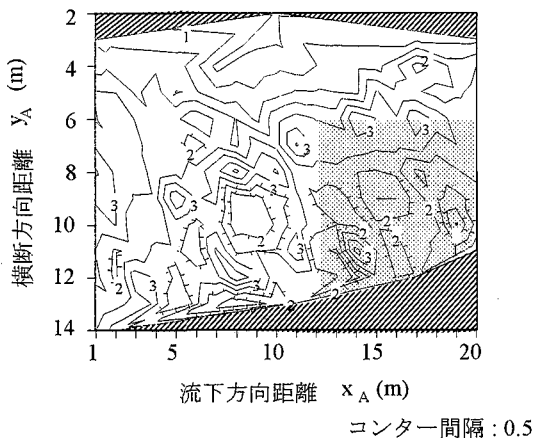


(1) 平均径  $d_m$

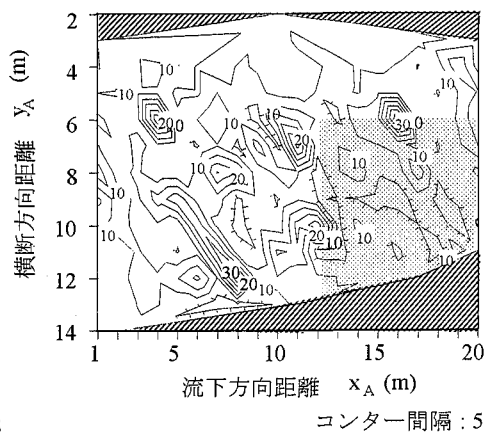


(2) 標準偏差  $\sigma_m$

図-5 大礫の空間分布  
(流れは左から右)



(1)  $\bar{h}/d_m$



(2)  $\bar{h}/\sigma_m$

図-6 相対水深の空間分布  
(流れは左から右)

の観測点に存在する大きさの礫であり、観測点間の隔たりが小さい。従って、本観測で用いたサンプリング手法によって各観測点における大礫の構成特性を捉えていると考えられる。

図-5(1), (2) に計測した 5 個の大礫の平均径 ( $d_m$ ) とその標準偏差 ( $\sigma_m$ ) のコンター図を示す。図中の斜線部は川岸と光量不足のため計測不可能であった地点であり、網掛け領域はガラ瀬、その他がチャラ瀬 (左岸近くは瀬わき) となっている。髭がついているコンターラインは周囲と比較して凹にな

っている領域を示す。大礫の平均径は 10~20cm 程度の間でばらついており、流況に対応して以下のような特徴的な分布が見られた。ガラ瀬では 15cm~20cm 程度の値を示す領域が集中しているのに対して、チャラ瀬の中では局所的に 15cm 以上を示す地点があるものの全体的には 10~15cm 程度の大きさである。同様に標準偏差もガラ瀬では 5cm 以上の値を示す領域が多く見られるのに対して、チャラ瀬では最大で 5cm 程度であり、ガラ瀬では平均径と標準偏差がともに大きな値を示していることが示されて

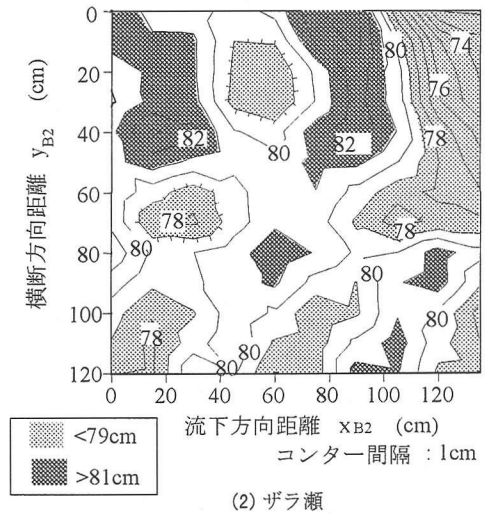
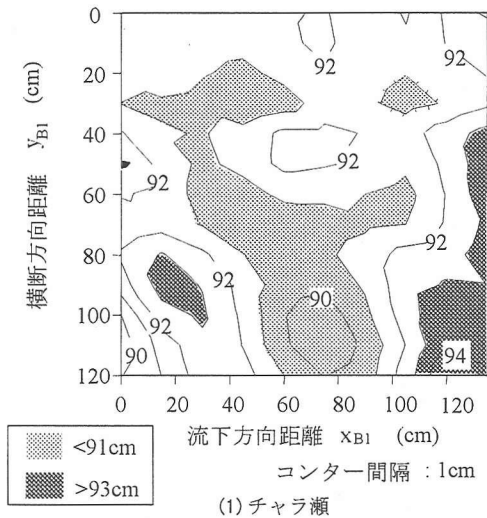


図-7 時間平均水位  $\eta$   
(流れは左から右)

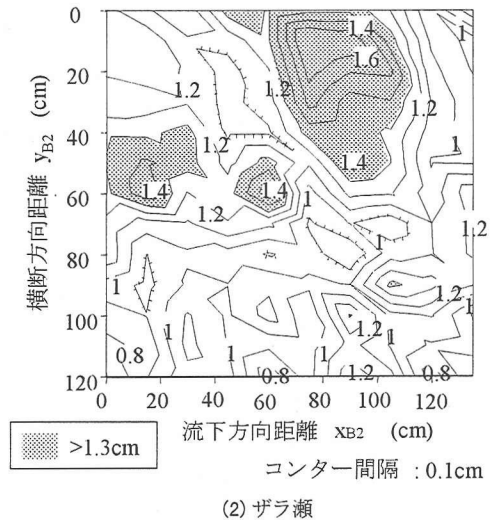
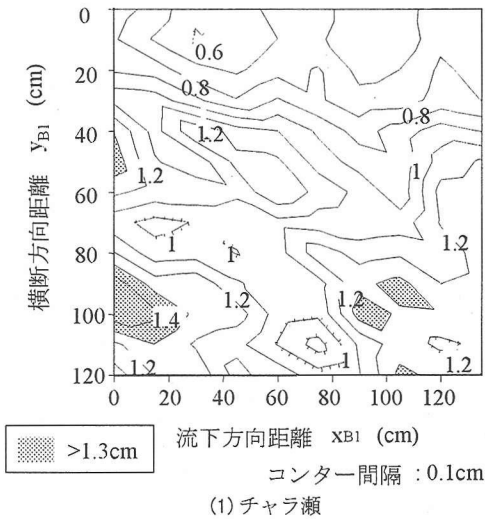


図-8 水面の時間変動( $\eta'$ )のR.M.S.  
(流れは左から右)

いる。つまり、ザラ瀬には大きな礫が存在するとともに、それらの大小の分布が大きいことがわかる。

礫が流れに影響を及ぼす度合いはそれぞれの場所での局所的水深に応じて変化するので、局所相対水深による検討が必要である。時間平均局所水深 ( $\bar{h}$ , 上付きの $\bar{\cdot}$ は時間平均値を表す) の影響を考慮した平均径と標準偏差による局所相対水深 ( $\bar{h}/d_m$ ,  $\bar{h}/\sigma_m$ ) のコンターを図-6(1), (2)に示す。エリアA全域における大礫の平均径を用いた相対水深は 2~3 付近の値を示し、この程度の値になると Manning の粗度係数は河床面の粗さだけで一意的には決まらな

表-3 チャラ瀬, ザラ瀬の水理量

	水深平均 流速 $\bar{u}$ (cm/s)	局所水深 $\bar{h}$ (cm)	局所フルード数 Fr
チャラ瀬	72	26	0.45
ザラ瀬	90	25	0.57

いことが理論的<sup>14)</sup>、実験的<sup>9)</sup>に知られている。従って大礫は底面粗度としての取り扱いが困難であり、河床形状としての扱いが必要となることが確認される。

局所相対水深は先ほどの大礫の分布に対応してチャラ瀬で大きく、ザラ瀬で小さな値を示し、それに加えて左岸近くでも小さくなっている。左岸は湾曲の内岸側に位置し、水深が小さいために局所相対水深が小さくなっている。しかし流速が遅く流れが穏やか（つまり Fr 数が小さい）であるため、チャラ瀬、ザラ瀬の様な水面の波立ちは生じず、瀬わきよくなっている。

### (3) チャラ瀬、ザラ瀬の水量と水表面の時空間変化 (エリアBの計測結果)

瀬の水表面は時間的、空間的に変動する。この内、時間平均運動と非定常運動の違いを明確にするため、局所瞬間水位 $\eta(x,y,t)$ を次式のように時間平均値と時間変動値に分離する。

$$\eta(x,y,t) = \bar{\eta}(x,y) + \eta'(x,y,t) \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\eta}$ ：時間平均水位、 $\eta'$ ：時間平均水位からの時間変動である。水位は流心線に沿った地形測量(図-3)の観測最下流点の河床高(基準高)からの高さとして定義している。

表-3にチャラ瀬、ザラ瀬の各観測領域の中央付近での水量(時間・水深平均局所流速( $\bar{u}$ ), 時間平均局所水深( $\bar{h}$ ), 局所フルード数(Fr))を示す。この水深平均流速は水深方向の測定間隔を考慮した重み付き平均法により算定した。局所フルード数 Fr は若干ザラ瀬の方が大きい。

図-7に時間平均水位( $\bar{\eta}$ )のコンター図を示す。時間平均水位には明確な高低差があらわれ、瀬の水面が定在波動的な波形を持つことを示している。水位の高い(あるいは低い)地点同士を結ぶ間隔(波長)はチャラ瀬、ザラ瀬ともに流下方向に1m前後、斜め方向(流下方向に対して45度傾いた方向)では60~80cm程度で大きな差異は見られなかった。しかし、ザラ瀬ではチャラ瀬と比較してコンター間隔が密であり、振幅の大きな波形が形成されている。

図-8に時間平均水位からの時間変動量( $\eta'$ )のR.M.S.値のコンター図を示す。時間変動量は殆どの地点で1cmを越え、定在波動的な水面形が非定常にも変動していることが分かる。時間変動量はチャラ瀬に比べザラ瀬の方が大きい。時間平均水位の波形と対応して見ると、時間平均水位の低い所から高い所へ遷移する近辺で時間変動が大きくなっている。このことは、射流から常流へ遷移する跳水に伴って激

しい水面変動が生じているためと推測される。瀬の流れの様に相対水深が小さい流れでは、流れ場全体のフルード数が0.4付近でも、大きな礫の上部で局所フルード数が1を越え射流域が見られることが室内実験より報告<sup>15)</sup>されており、観測対象の瀬も同様で常流、射流が混在する流れが形成されていたものと思われる。射流域ではチャラ瀬、ザラ瀬ともに水面変動は小さい。変動の最大値は跳水の強さに起因するので大礫の平均径および標準偏差が大きく、それに伴って局所フルード数の空間変化が大きいザラ瀬で大きな値を示していると考えられる。

以上をまとめると水面テクスチャについて次のことが言える。左岸付近では局所相対水深は小さいものの流速が遅く、フルード数が小さいために水面の空間変動が小さい瀬わきを形成している。川岸から流心付近に近づくにつれフルード数が大きくなり、同時に大礫の効果によって局所水深が大きく変化するため、流れの中に射流域や常流域が混在するようになる。その結果、局所的な跳水が生じ、それに伴った水面の空間変動が顕著になり、チャラ瀬やザラ瀬が形成される。ザラ瀬では相対水深が小さく、チャラ瀬より強い局所フルード数の変化が生じる。そのため水面の波立ちは激しくなり、気泡の混入が生じている。即ち $\bar{h}/d_m$ ,  $\bar{h}/\sigma_m$ , Frの値によりチャラ瀬、ザラ瀬、瀬わきの違いが生じている。なお、本観測では同定できなかったが、流れのスケールによっては表面張力の効果を表すウェーバー数が水表面形態の形成に対して無視できなくなることに注意を払う必要がある。

### (4) 水温、溶存酸素の日変化

図-9に瀬および淵(それぞれ図-3中の流下距離50m, 90m地点)における水温及び溶存酸素量の日変化を示す。瀬と淵の水温の違いは見られなかったため、図中に一本の線で示している。この中で、14:00時付近の溶存酸素量のデータが他のデータと比べて特異な変化を示しているが、その原因については現在の所不明である。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、水温は15:00時付近でピークを示している。溶存酸素量は水温の影響によって飽和値が変化するので飽和度としての検討も必要である。水温の日変動を考慮して算定した溶存酸素の飽和度を図-10に示す。時間帯8:00~17:00の間、溶存酸素量は過飽和状態であるにもかかわらず、午前中は水中の溶存酸素量が増加している。過飽和状態であるにもかかわらず水中の溶存酸素量を増大させるには強制的な曝気や光合成などによって酸素を供給しなければならない。観測期間中、

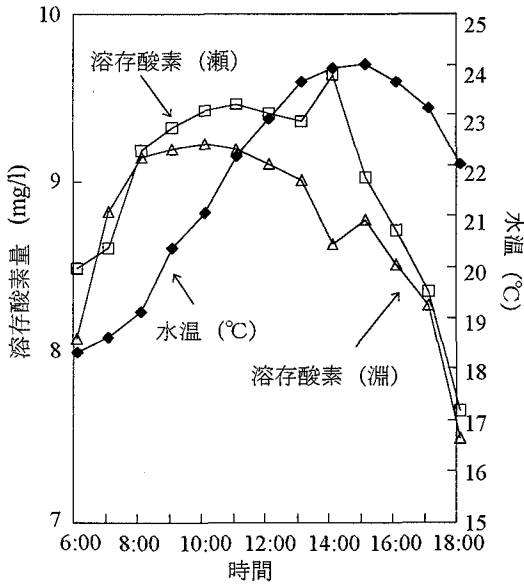


図-9 水温と溶存酸素量の日変化  
(9月12日)

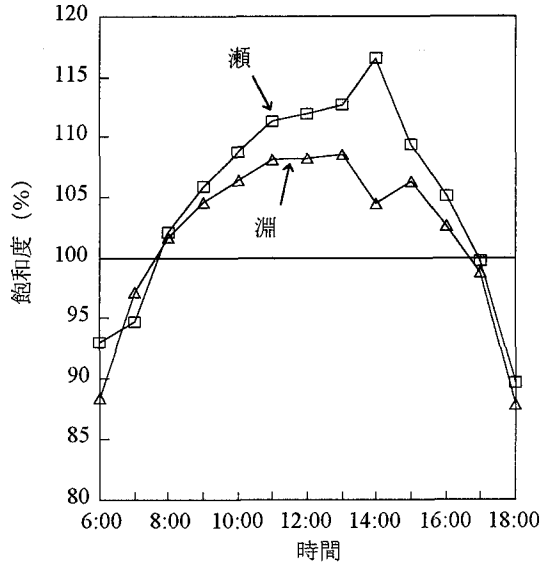


図-10 溶存酸素の飽和度の日変化  
(9月12日)

水理量の変化が少なかったことを考慮すると、午前中の溶存酸素量の増加は植物の光合成に起因するものと推察できる。

瀬と淵の溶存酸素量の違いを引き起こす原因としては光合成活動や水面からの溶出が考えられるが、光合成活動は瀬と淵の観測地点間の距離では無視できる(瀬と淵間の距離は40m程度なので、日中最も光合成が盛んな時でも0.03mg/l程度しか変化しない)。下流側に位置する淵の溶存酸素量が上流側の瀬より小さくなっていることから、溶存酸素量の空間的な違いは日中の過飽和状態によって瀬の水表面から大気への酸素溶出が主たる要因と考えられる。

### (5) 日射と河床藻類の一次生産

河床藻類の生産に日射は重要な働きをする。図-11に9月12日の日射量を示す。日射量の5%程度が水面で反射しており、ほとんどが水中へ透過している。水中の日射の透過特性と水深の関係が Lambert-Beer の法則<sup>10)</sup>に従うとして、高さ  $z$  (m) における日射量  $S$  ( $W/m^2$ ) は

$$S = (S_h \downarrow - S_h \uparrow) \exp\{-\lambda(\bar{\eta} - z)\} \quad (2)$$

で示される。ここに  $S_h \uparrow$ : 上向き短波放射量 ( $W/m^2$ )、 $S_h \downarrow$ : 下向き短波放射量 ( $W/m^2$ )、 $\lambda$ : 吸光係数 ( $m^{-1}$ ) である。ここで  $\lambda$  に実測値 (0.30) を用いると、河川水中の光 (ここでは 660nm の波長の可視光) の日射透過率の鉛直分布は図-12 のようになる。この吸

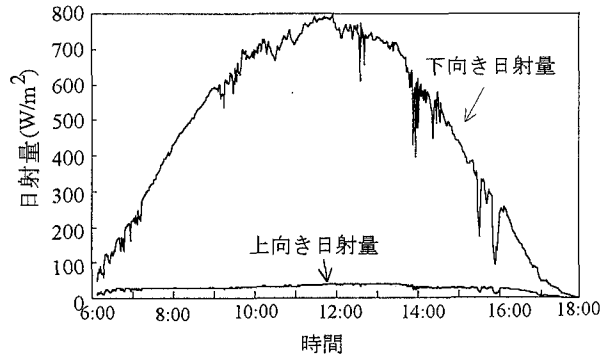


図-11 日射量 (9月12日)

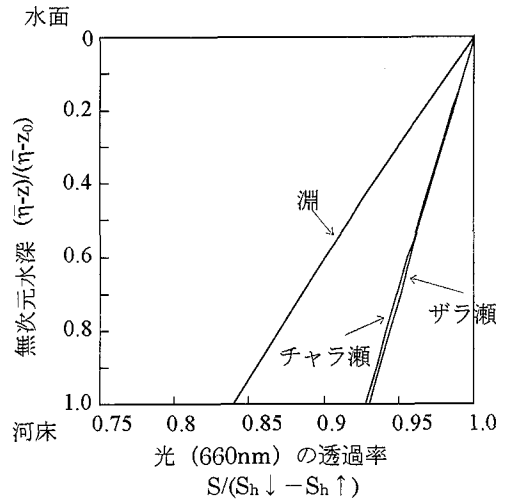


図-12 河床への光の到達 (縦軸中の記号の定義は図-2(2)を参照)



表-4 底面への光の到達と一次生産者の現存量

	水深 (cm)	河床への光の到達率 (%)	クロロフィル a 量 (mg Chl/m <sup>2</sup> )
チャラ瀬	26	92.5	39
ザラ瀬	25	92.8	104
淵	60	83.5	61

光係数は純水の 0.28 に近く、観測対象水域の透明度は高い。チャラ瀬、ザラ瀬、淵での河床への光の到達率を表-4 に示す。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る。

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が、エネルギー単位である日射量と光量である照度を完全に交換することは厳密には不可能である。しかし、太陽光の波長毎の放射量構成（エネルギースペクトル）と被視感度特性から近似的に次の関係が成り立つことが知られている<sup>17)</sup>。

$$1 \text{ W/m}^2 = 103.4 \text{ lux} \quad (3)$$

本研究では観測対象地域の水深が浅く、日射のほとんどが河床へ到達しているので、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(2)、(3)を用いて算定した河床の照度は日中 50~80klux 程度であった。観測対象地では珪藻が優占的に生息しており、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成を行うのに十分な光量が確保されているといえる。

河床藻類の光合成活動は以上に述べた照度の外に水温に依存する。一般に水温が高く（珪藻の場合約 25℃）、照度が 60klux を越えると強光阻害が顕著になり、光合成活動が減少する。本観測の期間中の水温の最高値は 24℃であり、顕著な強光阻害は生じていないと判断される。強光阻害の影響を無視した場合、単位クロロフィル a 量当たりの総光合成速度  $p$  と照度間の近似曲線として次の近似式<sup>16)</sup>

$$p = \mu_{\text{sat}} \frac{I_b / I_k}{\{1 + (I_b / I_k)^2\}^{1/2}} \quad (4)$$

が適用できる。ここに、 $I_b$  : 河床照度 (klux),  $I_k$  : 初期飽和照度（光—光合成特性曲線の照度 0 付近の勾配を持つ直線が光飽和光合成量に達する時の照度）、 $\mu_{\text{sat}}$  : 光飽和光合成速度 (mg·O<sub>2</sub>/mg·Chl/hr, Chl はクロロフィル a を示す)、 $p$  : 総光合成速度 (mg·O<sub>2</sub>/mg·Chl/hr) である。

式中の  $I_k$ ,  $\mu_{\text{sat}}$  は生物種と水温に依存するパラメ

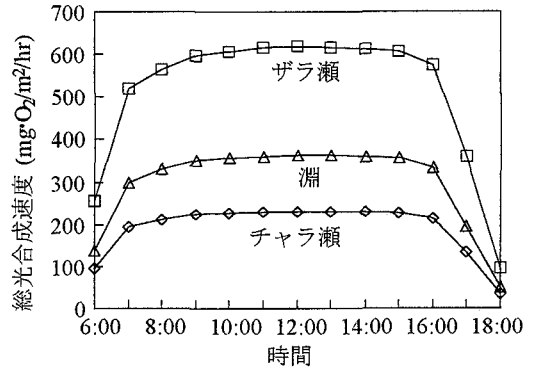


図-13 総光合成速度（単位河床面当たり）の日変化（計算値）

ータであるが、水温への依存性は一般的に Lehman<sup>16)</sup>による正規分布型の次式で近似できる。

$$I_k = I_{\text{max}} \exp\{-2.3(T - T_{\text{opt}})^2 / (T_{\text{inf}} - T_{\text{opt}})^2\} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{sat}} = \mu_{\text{max}} \exp\{-2.3(T - T_{\text{opt}})^2 / (T_{\text{inf}} - T_{\text{opt}})^2\} \quad (6)$$

ここで、 $T$  : 水温 (℃),  $T_{\text{opt}}$  : 最適光合成水温,  $I_{\text{max}}$  :  $T_{\text{opt}}$ における初期飽和照度,  $\mu_{\text{max}}$  :  $T_{\text{opt}}$ における飽和光合成速度 (mg·O<sub>2</sub>/mg·Chl/hr),  $T_{\text{inf}}$  :  $\mu_{\text{sat}} = 0.1 \mu_{\text{max}}$ となる水温である。河川中の珪藻の光合成特性が湖沼の珪藻類 (*Synedra* sp.)<sup>16)</sup>のそれと大きく異なることは無いものとして、湖沼での珪藻で得られた  $I_{\text{max}} \approx 8.0$ (klux),  $\mu_{\text{max}} \approx 6.0$  (mg·O<sub>2</sub>/mg·Chl/hr),  $T_{\text{opt}} \approx 23.0$  (℃),  $T_{\text{inf}} \approx 3.0$  (℃)を用いる。付録の図-14 にこれらの値を用いて得られた式(4)による近似曲線と有賀<sup>16)</sup>による実測の比較を示す。

吸光分析により測定した河床礫に付着していたクロロフィル a 量を表-4 に示す。チャラ瀬、淵に比べザラ瀬の一次生産者の現存量は多い。観測対象地域においては河床礫に付着する藻類だけで中栄養湖の単位水柱の植物プランクトン量に匹敵するクロロフィル a 量(例えば、諏訪湖: 55~103mg·Chl/m<sup>2</sup>)<sup>20)</sup>を有しており、高い一次生産者の現存量が示されている。しかし、流況に対応した現存量の違いを詳細に把握するには、対象地域の栄養塩量や生物の生息環境におよぼす流れのミクロな構造を明らかにする必要があり、今後の課題である。

河床照度および水温を考慮し、式(4)とクロロフィル a 量を用いて算定した観測対象日の河床藻類による単位河床面当たりの総光合成速度の日変化を図-13 に示す。総光合成速度の 8:00 時の値を観測地の瀬の平均水深 (38cm) を用いて単位体積当たりの溶存酸素の変化量に換算すると、チャラ瀬: 0.6、ザラ瀬: 1.5、淵: 0.9mg/l/hr となる。8:00 時付近は溶存

表-5 1日当たりの総光合成量

	総光合成量 ( $g \cdot O_2/m^2/day$ )
チャラ瀬	2.49
ザラ瀬	6.65
淵	3.85

酸素の飽和度が101.9%と飽和状態に近いため曝気、溶出の影響が少なく、その時刻の溶存酸素量の変化量(図-9)と河床藻類による総光合成速度はオーダ一的に一致する。このことから、河床藻類の光合成活動が午前中の瀬・淵の溶存酸素量の増加を引き起こしていることが推察される。その後、光合成活動による飽和度の増加や日射による水温の上昇にともなって、水面からの酸素溶出量や河川生物の呼吸量が増加し図-9で示されるような日変化が生じていると思われる。

総光合成速度を積分することにより算出した単位河床面・1日当たりの総光合成量を表-5に示す。他の水域の総光合成量(例えば、諏訪湖:  $0.5 \sim 3.8g \cdot O_2/m^2/day$ , 琵琶湖:  $0.2 \sim 1.7g \cdot O_2/m^2/day$ )<sup>20)</sup>と比較すると観測対象とした瀬の河床は生産者の現存量が多いうえに、生産環境も良好で高い一次生産力を有している。チャラ瀬、ザラ瀬、淵による生産量の違いは基本的に河床照度と生物現存量に起因するが、本観測の範囲内では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ため生物現存量に依存した違いが顕著であった。

#### 4. 結論

東京都の秋川中に見られる瀬と淵を対象に空間構造と一次生産特性に関する現地観測を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1)チャラ瀬とザラ瀬では河床の大礫の平均径や標準偏差はザラ瀬の方が大きい。フルード数に加えて、河床の大礫の平均値や標準偏差といった河床の大礫分布の影響によってチャラ瀬、ザラ瀬、瀬わきなどの瀬の水面テクスチャの違いが生じる。
- 2)チャラ瀬とザラ瀬の時間平均の水面波形は波長に大きな違いは見られないが、振幅はザラ瀬の方が大きい。
- 3)チャラ瀬とザラ瀬における時間平均水面からの非定常な水面変動はザラ瀬の方が大きい。これは跳水に伴う水面変動であり、ザラ瀬の方が強い跳水が生じている。
- 4)溶存酸素量の午前中の増加は河床の植物の光合成活動に起因している。

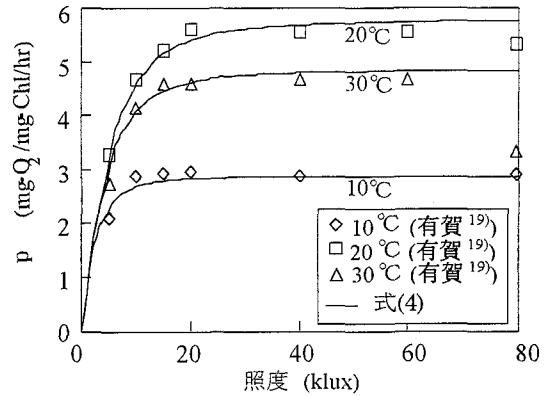


図-14 水温をパラメータとした珪藻 (*Synedra* sp.) の総光合成速度  $p$  と照度の関係

5)観測対象とした瀬と淵の河床は一次生産者の現存量が多く、日射の殆どが河床へ到達しているため高い一次生産力を有する。

謝辞：本研究は文部省科学研究費基盤研究(B)(2)(研究代表者：池田駿介，課題番号：07455195)の補助を受けたものである。また、現地観測に際しては東京工業大学水工学研究室の学生の援助を受けた。記して謝意を表します。

#### 付録

本研究では、河床付着藻類の生産力の算出にあたり、式(4)中の各係数を有賀ら<sup>19)</sup>によって得られた琵琶湖湖沼の珪藻 (*Synedra* sp., 水温約 20°Cで生育したもの)の照度-水温-光合成特性によって同定している。その光合成特性を図-14に示す。図中には式(4)が実線で示されており、各係数を適切に選ばば珪藻の光合成特性を十分に近似しうることが分かる。

#### 参考文献

- 1) 安田実, 美寺寿人, 樋口経太: 多自然型川づくりの現状と課題, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp.1-8, 1995.
- 2) 土屋十朗, 佐藤一夫, 岩永勉他: いきも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) 例えば, Ikeda, S. and Parker, G.: River Meandering, *Water Res. Monograph* 12, AGU, 1989.
- 4) 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, pp.181-186, 1996.
- 5) 中村圭吾, 島谷幸宏: 淵の水質浄化効果の把握に関する基礎調査, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.1268-1269, 1995.
- 6) 池内正幸, 山田正, 村上良宏: 溪流を模擬した開水路流れの水面形遷移と抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 第30巻, pp.73-78, 1986.
- 7) 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, pp.69-78, 1996.
- 8) 池田駿介, 戸田祐嗣: 瀬の水理特性に関する現地観測, 水工学論文集, 第40巻, pp.901-906, 1996.
- 9) 例えば, 沼田真, 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学(補訂版), 築地書館, 1993.
- 10) 川那部浩哉, 宮地伝三郎, 森主一, 原田英司, 水原洋城, 大串竜一: 遡上アユの生態とくに淵におけるアユの生活様式について, 京大大学生理生態業績, 79, 1956.
- 11) 可見藤吉: 溪流性昆虫の生態, 研究社, 1944.
- 12) 古川トンボ: アユ友釣り, 西東社, 1994.
- 13) 河村三郎, 小沢功一: 山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分析, 土木学会誌, 55-12, pp.53-58, 1970.
- 14) 日野幹雄: 明解水理学(第7章), 丸善, 1983.
- 15) 佐野貴之, 池田駿介, 戸田祐嗣: 瀬の流れの時空間変動および抵抗則に関する実験的研究, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, pp.636-637, 1997.
- 16) 土木学会編: 水理公式集(第1編-11章), 土木学会, 1987.
- 17) 日本海洋学会編: 海洋環境調査法(第6章), 恒星社厚生閣, 1987.
- 18) 例えば, Alian, D., Jean, D., Francoise, P. and Lhoussaine, B.: Growth rate of freshwater algae in relation to light and temperature, *Jour. of Applied Phycology*, Vol.2, pp.221-226, 1990.
- 19) 有賀祐勝: 水界植物群落の物質生産 I, 共立出版, 1973.
- 20) 山本譲太郎, 伊藤猛夫: 水界動物生態学 I, 共立出版, 1973.

(1997. 5. 28 受付)

## STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND PRODUCTION RATE OF CHLOROPHYLL-A AT RIFFLES BY FIELD OBSERVATION

Syunsuke IKEDA, Yuji TODA and Takayuki SANŌ

From view points of ecology and landscape, it is important for river engineers to manifest the hydraulic and ecological characteristics of riffles. We performed a field observation at riffles in Aki-river in Tokyo on 11 and 12th, Sept. in 1996. The hydraulic and ecological characteristics are measured in detail using various devices. It is found that water surface texture at riffles is much affected by the mean diameter and the standard deviation of large size gravels. The primary production of algae on such large gravels is large, inducing the temporal variation of dissolved oxygen due to photosynthesis during the day-time.