

底生動物と光環境に基づく瀬 - 淵構造の検討

INVESTIGATION OF RIFFLE-POOL STRUCTURE BASED ON BENTHIC COMMUNITY AND SUNLIGHT CONDITION

諸田恵士¹・土屋十圀²・朝田聡³

Keiji MOROTA, Mitsukuni TSUCHIYA, Satoshi ASADA

¹学生会員 前橋工科大学大学院 工学研究科建設工学専攻(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

²正会員 工博 前橋工科大学教授 工学部建設工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

³非会員 前橋工科大学 工学部建設工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

In this study, physical quantities (velocity, depth, light quantum, etc.) in riffle-pool structure were measured. Further, since riffle and pool is habitats for benthic animal, those areas were surveyed. The object of this study is to analyze and appreciate about river environment including ecosystem by means of these survey of physical environment and benthic community.

The field survey was performed at research point being compatible with riffle, fast rapid and pool. As a result of, the reached lights on river-bed surface was intense in riffle comparing with pool. Because of dispersions, the standard deviation of light quantum in riffle was larger than that in pool.

The results of benthic community survey were performed in April and August showed a diversity of specie in riffle. And the process of succession to the climax was observed by means of classification of benthic life style.

Keyword: riffle-pool structure, benthic animals, light quantum, attached organisms, climax

1. はじめに

わが国の河川の地形的特徴について生態学の立場から可児¹⁾は流れの状態を「平瀬」,「早瀬」および「淵」に区分した。また,これらの一連の組み合わせを河川の単位形態として,瀬 - 淵構造を Aa 型, Bb 型, Bc 型の 3 つに分類した。この分類は今日,河川の生態環境を理解する上で重要な指標となっている。一方,瀬 - 淵構造の水理的特性に関する研究は流速,水深,フルード数の検討を行い,瀬と淵の状態の分類的説明がされている²⁾³⁾。

瀬 - 淵構造において縦断的に生物群集を見た際に「川の構成単位が動物群を完結させる単位である。」といわれている⁴⁾。河川生態系を理解する場合,物理的環境の違いをもつ平瀬,早瀬,淵は,それぞれを生息場所(Habitat)とする魚類や底生動物の種類組成が異なっていることは重要な知見となっている。

河川の淡水生物の中でも一次消費者である底生動物(Benthos)に着目した研究は河川生態学においてはなされているが,河川工学においては対象とされてこなかった。しかしながら,多摩川水系で底生動物

の調査が長期的に実施され⁵⁾⁶⁾,瀬 - 淵構造における時間的,場所的の変化とともに,人為的要素も加えたインパクトに対する影響とその変動に関する研究もなされている⁷⁾。また,渓流域におけるステップ・プールと底生動物の関係についての知見も得られている⁸⁾。

津田⁹⁾によれば瀬と淵との生物群集の違いは流速,水深,底質(石礫,砂泥)および底の光量によるものとされている。ここでは物理的な要素のうち光量に関する重要な指摘を行っている。しかし,瀬 - 淵構造における光環境と生物環境との関係を検討した研究はなされていない。そこで本研究では,「平瀬」,「早瀬」,「淵」に関する光の状態を含めた物理的環境の調査を行った。また,生産者である藻類にとって光は生息環境の構成要因としては重要であり,それを餌とする底生動物に対する影響も大きいと考えられる。よって,平瀬,早瀬,淵における付着藻類の調査も行った。

これらの河川環境について把握した上で,底生動物の調査を行い,この群集を指標として検討を行うことを本研究の目的とする。

2. 調査概要

(1) 調査対象河川

本研究では調査対象とする河川として河川整備が部分的で自然度が高く、平瀬、早瀬、淵が明確に現れている点から利根川水系薄根川を選定した。薄根川は群馬県利根郡川場村の武尊山に源を発し、群馬県沼田市で利根川に合流する一級河川である。山地河川ではあるが、調査区間は中流域でひとつの蛇行区間に平瀬、早瀬、淵が連続する単位形態がひとつ存在する Bb 型である。本調査の調査区間の平面図および縦断面図を図-1 に示した。今回の調査は図中の A~H 断面のうち、A、C、D を選定し、それぞれ淵、平瀬、早瀬の代表的な調査地点として位置づけ、調査を実施した。

ここで調査対象とした淵は蛇行した水衝部に形成されており、M 型(蛇行型, Meander type)の淵であるといえる。この形態の淵は Bb 型の区域で見られる典型的な型といわれている⁹⁾。各調査点の流況の諸数値は表-1 に示した。また、本河川は 2002 年 7 月、台風による大きな出水が起こっている。

(2) 調査項目

今回の調査は 2003 年 4 月、8 月の 2 回実施した。底生動物の調査については 30×30cm のコドラート付サーバーネット(網目 0.5 mm)によりサンプリングを行った。また、瀬と淵の物理的環境指標として、各調査地点で流速、水深の測定および河川横断測量を行った(図-1)。4 月の調査では溶存酸素、濁度及び水温の測定も行った。更に、河床砂礫の構成を明らかにするためにサンプリングを行い、ふるいわけ試験によって、瀬と淵の粒度分布も調査した。

また、一次消費者である底生動物と生産者である付着藻類の関係を検討する目的で、河床礫の付着藻類を採集した。6×6cm コドラートで採集した湿潤状態の藻類を乾燥させた後、電気炉で燃焼させ、強熱減量(Ignition Loss)を測定した。なお、電気炉については 600℃で 30 分間燃焼させた¹⁰⁾。更に、これらの付着藻類が光合成を行う上で必要である光環境の状態を把握するために、各調査地点における流水中の光量子量を測定し、河床面に到達する光量および水中への光量の減衰過程を調査した。

3. 調査結果

(1) 物理的環境調査

瀬と淵における物理的環境の調査として最大流速、水深、河川幅、溶存酸素、濁度、水温の調査結果を表-1 に示した。流速、水深については早瀬で流速が大きいため、最もフルード数が大きく、0.60 であった。また淵ではフルード数が最も小さく、0.06 と

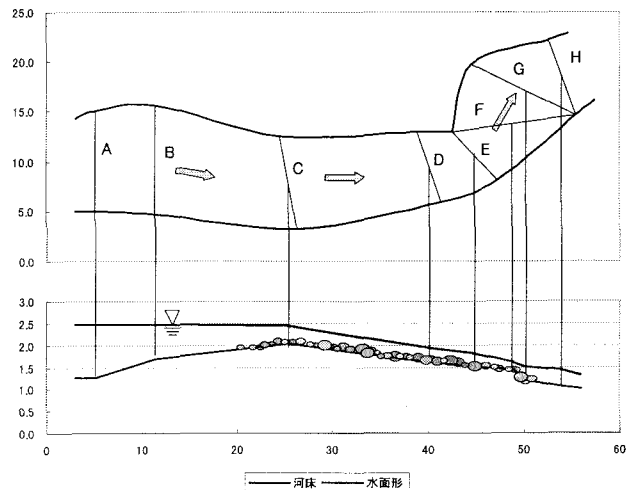


図-1 調査区間の平面図および断面図

表-1 各調査地点の流況

調査地点	A(淵)		C(平瀬)		D(早瀬)	
	4月	8月	4月	8月	4月	8月
最大流速(cm/s)	24.4	22.4	80.5	63.9	101.3	81.8
水深(cm)	158.0	150.4	47.4	28.8	43.5	19.0
フルード数	0.06	0.06	0.37	0.38	0.49	0.60
水面幅(cm)	788	791	940	1002	820	847
溶存酸素(mg/l)	12.6	—	12.2	—	11.6	—
濁度(NTU)	2.0	—	1.8	—	2.6	—
水温(℃)	4.5	—	6.0	—	7.5	—

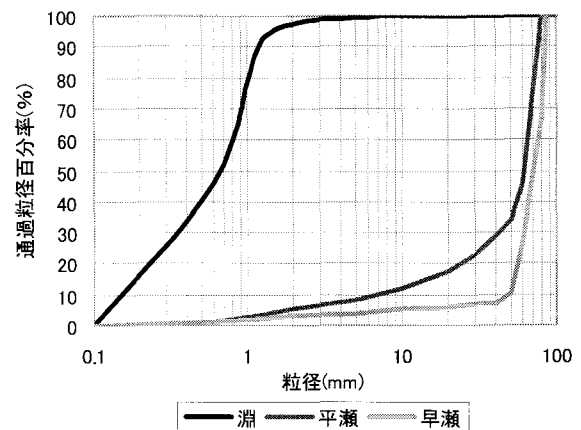


図-2 各調査地点での河床礫の粒径加積曲線

なり、それぞれの特徴をよく表す結果が得られた。また、4 月の調査では融雪出水を伴っていたため、流量が大きく流速、水深とも各地点で 8 月の調査結果を上回っていた。しかし、溶存酸素、濁度及び水温については瀬と淵での差異は見られなかった。

(2) 河床礫の粒径組成調査

図-2 に各調査地点の河床礫のふるいわけ試験による粒度分布の結果を示した。淵の粒径組成は平瀬、早瀬と比較して細粒分の割合が極めて多いことが明確に認められる。淵では 1.2 mm 以下の粒径が約 90% を占めるのに対し、早瀬、平瀬においてはそれぞれ

2%, 3%にとどまることがわかった。

また、平瀬と早瀬の粒度分布には大きな差は生じていないが、50 mm以下の粒径の割合は平瀬のほうが多いのに対し、50 mm以上の粒径の割合は早瀬で多いことがわかった。以上の結果は、瀬・淵構造における砂礫の粒径組成の顕著な違いとその特徴を示しているといえる。

(3) 光量調査

各調査地点における2003年4月に行った光量の測定結果を表-2に示した。観測当日の天候は晴れ及び曇天であり、日射の状態が必ずしも安定していなかった。また、測定時間中にも光量に差が生じるため、光量子量の測定値については大気中においても測定を行い、流水中の光量を大気中の測定値に対する比で扱い、相対光量とした。また、測定方法は流水中での光量は水面から淵では10 cm間隔、瀬では5 cm間隔で水深(鉛直)方向に測定した。なお、測定にはLI-COR社製の光量子計を使用した。測定値の単位は[E/m²/s (E:Einstein)]である。

表-2は河床面付近における相対光量を示したが、淵で最も減少率が大きく、水深に比例し、河床に到達する光が吸収される結果が得られた。また、瀬において値にばらつきが大きいことが見受けられる。とくに、早瀬において顕著であるが、これは一般に瀬において見られる白波を伴う水面振動により流水中に入射する日光が散乱し、微小時間内で激しく変動していることを裏付けている。

8月の調査においても同じく測定を実施したが、同様の傾向を示す結果が得られた。

(4) 付着藻類調査

本調査では、各調査地点の大礫に付着している藻類をそれぞれ6×6 cmの範囲で採集し、湿潤重量を測定し、乾燥させ、乾燥重量を測定した後、電気炉にて燃焼させ、強熱減量を測定した。なお、この調査は2003年8月のみ実施した。

表-3に付着藻類の分析結果を示した。強熱減量(IL)の計算方法は式(1)のとおりである。

$$IL(\%) = \frac{IL(mg)}{TR(mg)} \quad (1)$$

ここで、TRとは蒸発残留物(乾燥重量)である。

電気炉を用いて600℃で燃焼させた強熱減量とは、藻類中に含まれる有機化合物が揮発したものである¹¹⁾。表-3より、蒸発残留分に占める瀬の強熱減量は淵のそれよりも大きな値を示した。この結果から言えることは、平瀬、早瀬は付着藻類が光合成を行う場であり、生物生産量の点から見ても淵よりも優れていると考えられる。

表-2 河床面付近における光量測定結果

調査地点	淵	平瀬	早瀬
水深(cm)	82	21	24
平均値	0.379	0.618	0.445
標準偏差	0.009	0.026	0.105
最大値	0.396	0.656	0.563
最小値	0.370	0.575	0.273
レンジ	0.027	0.081	0.290

表-3 付着藻類分析結果

調査地点	淵	平瀬	早瀬
TS:蒸発残留物(%)	39.47	8.69	6.38
含水率(%)	60.53	91.31	93.62
IR:強熱残留物(%)	91.55	51.14	46.90
IL:強熱減量(%)	8.45	48.86	53.10

表-4 底生動物調査結果

	淵		平瀬		早瀬	
	4月	8月	4月	8月	4月	8月
種類数	9	8	26	35	34	30
個体数	2085	47	367	627	698	603
湿重量(g)	2.49	0.11	7.85	4.39	6.87	4.58

(5) 底生動物調査

30×30 cmコドラート付サーバーネットを用いて、底生動物を採集し、分析した結果を表-4に示す。各調査地点にて2回のサンプリングを行った。この表に示した値は、その2つのサンプルの分析結果を合計したものである。したがって、0.18 m²当りの種類数、個体数、湿重量となる。

表-4より淵における4月の個体数が極めて多い。優占種はユスリカ科であり、個体数、湿重量とも95%以上を占める。また、その他の種類数も少ない。8月に淵の個体数が激減したが、これはユスリカ科が羽化したためだと考えられる。

また、平瀬、早瀬において8月の調査結果は4月の時点と比較し、現存量(湿重量)が減少した。4月の調査では種類数、個体数とも早瀬が平瀬を上回っていた。しかし、8月の調査の段階では平瀬での底生動物の生息状況は早瀬と同等にまで増加している。これは4月の段階では融雪による流量の増加のため、表-1に示したとおり、平瀬と早瀬の環境の違いがはっきりしていた。しかし、8月の調査の際には流量が減少しており、平瀬、早瀬とした2つの調査地点において明確な差異が見られなくなったためだと考えられる。

4. 考察

(1) 瀬、淵における光環境の違い

図-3は流水中の光量子量の鉛直分布である。図

が示すとおり、各調査地点とも水面から河床に向かい、光量が減衰していく過程が顕著に現れた。しかし、淵では光量が単調に減衰しているのに対し、平瀬、早瀬では減衰過程におけるばらつきが非常に大きい。

水中で光が吸収され、減衰する過程は式(2)に示す Lambert-Beer の法則に従うとされる¹²⁾。

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2)$$

ここで、 I_0 は水面の光量子量であり、 I_z は水深 z における光量子量である。 α は吸光係数である。吸光係数とは水中の植物性プランクトンの濃度によって決まる定数である。本研究では植物性プランクトンについては調査していないため、この定数については特定できない。よって、ここでは最小二乗法により、鉛直方向の光量子量の実測データに指数関数を近似させ、定数 α を求めた。この定数を式(2)に代入し求めた式を図-3の各調査地点にグラフ内に示した。また、各近似式と実測値との相関係数も同様に示した。

この近似式と実測値との相関を見ると、平瀬、早瀬においては前述したように水面振動の影響により実測値のばらつきが大きく、相関係数も低い値を示した。早瀬ではその傾向が極めて強い。したがって、早瀬においては水中で指数関数的に光が減衰するという Lambert-Beer の法則が適用できないといえる。

一方、表-3より瀬における付着藻類の強熱減量、すなわち藻類が有する有機化合物が淵に比べ、豊富であった。したがって、平瀬、早瀬は藻類が生息する上で良好な環境であるといえる。藻類は光合成を行うため、良好な生息場所として、流水中の日射の状態に大きく依存している。瀬は水深が小さいため、河床に到達する光量子量が多く、日射の状態が優れている。また、早瀬の相対光量の流水中における散乱状態は粒径が大きく間隙の多い砂礫間に光量が十分に到達していると考えられる。したがって、藻類生産量の増加に寄与している早瀬の特異な物理的構造を示しているといえる。

(2) 一個体における季節的变化

4月と8月の調査結果より底生動物にどのような変化が起こっているかを見るために、一個体当たりの湿重量を比較した。ここで2回の調査を通じてある程度の個体数が採取されたこと、ひとつの個体が十分な大きさであることを考慮して、ウルマーシマトビケラに着目して一個体当たりの湿重量を求めた。表-5にその結果を平瀬、早瀬の両生息場において示した。

平瀬、早瀬の両生息場とも4月よりも8月の調査結果のほうが一個体当たりの湿重量が減少した結果

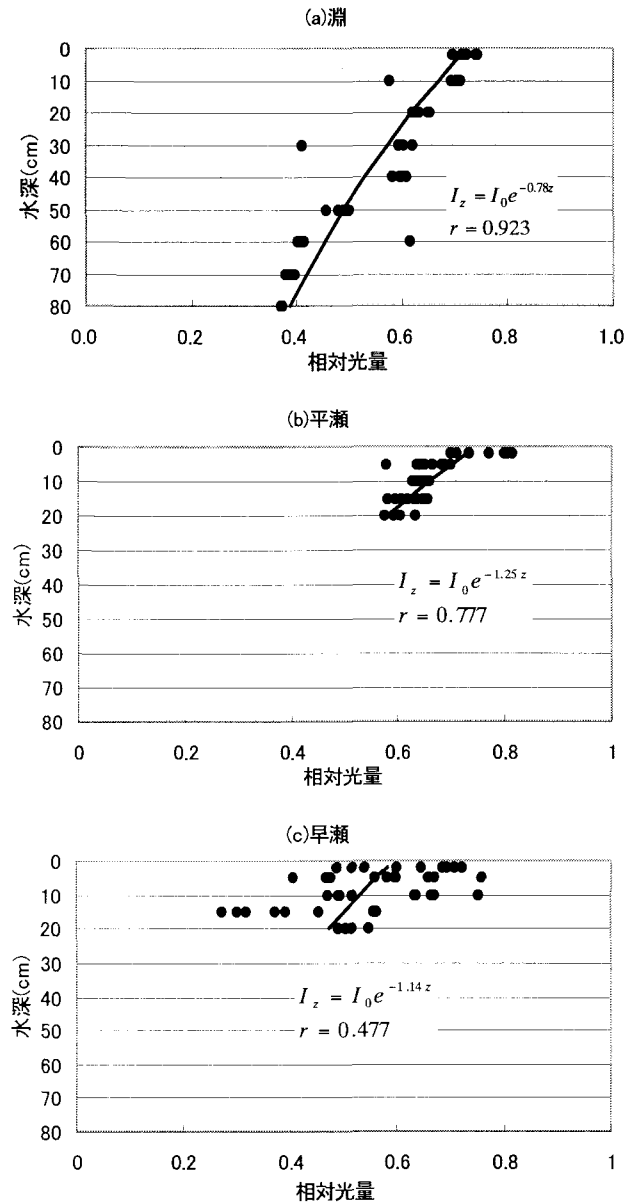


図-3 光量子量測定結果

表-5 ウルマーシマトビケラの一個体当たりの湿重量

	平瀬		早瀬	
	4月	8月	4月	8月
個体数	17	116	102	240
湿重量(g)	0.39	0.60	0.98	1.64
g/個	0.0229	0.0052	0.0096	0.0068

が表-5より得られた。また、8月の採集サンプルには小型のウルマーシマトビケラが数多く見られた。トビケラ目の羽化に関する季節の特性として5月と8月が多いとされている¹⁾。したがって、8月の調査の時点では終齢幼虫は羽化してしまい、令期の少ない体長の小さな個体が多数を占めていたものと考えられる。

(3) 生活型による底生動物の分類

底生動物の種は数多く、これらの種をひとつひとつ把握し、群衆の動態として検討するのは非常に難しい。しかし、生活様式や造営物の特徴から6つのグループに分類できる¹⁾。これらを生活型と呼び、その特徴は生息する環境と深く結びついており、場の環境に適した生活様式を持つものがその場において優占するようになる。

図-4は生活型別に分類し、湿重量におけるその構成を示したグラフである。4月の調査では河床の礫上や礫間を這って移動する匍匐型(Creeping)が平瀬では全体の82%、早瀬では76%を占めている。この代表的な種としてはオオマダラカゲロウ、エルモンヒラタカゲロウが採集された。ところが8月には匍匐型は減少し、代わって造網型(Net-spinning)が優占していることが見受けられる。造網型はウルマーシマトビケラ、ヒゲナガカワトビケラなどが挙げられる。8月の調査より、造網型が全体に占める割合は平瀬、早瀬でそれぞれ35%、66%である。これは河川の水生生物相における攪乱が起こってから、極相に至るまでの過程であると考えられる。津田仮説¹⁴⁾によると攪乱後、まず優占種となるのは匍匐型に属する種であり、やがて造網型が増殖し始め、匍匐型との共存状態を経て、造網型の種が大部分を占める極相となるといわれている。事実、本調査対象河川の薄根川では1年前の2002年7月に台風による大きな出水が起こっており、調査区域の河床も攪乱されたと推測される。

以上のことから、本調査結果で出現した優占する生活型の遷移は、この調査区間での底生動物相における攪乱が起こった後の極相化の一過程であると考えられる。ただ、この地点での底生動物調査はまだ2回行ったのみである。底生動物群集の極相についてはさらに検証する必要があるので、今後、継続して調査を行っていくことが課題である。

また、淵については生息種のほとんどがユスリカ科であった。生活型の特定は属、種まで同定する必要があるが、ユスリカ科の場合、この作業は非常に困難であり、本研究では生活型の特定までは至らなかった。ユスリカ科以外の淵における生息種についてはガガンボ科やミズミズ科やイシビル科などの環形動物をはじめとする掘潜型が多数を占めた。河床礫の大部分が細粒分である淵は掘潜型に適した生息環境であり、瀬で多く見られた匍匐型、造網型は生息困難な環境にあるといえる。

(4) 造網型における種の構成

このように造網型の現存量の増加は極相への遷移過程ではあるが、津田仮説をさらに発展させ、造網型に分類された構成種に着目することでさらに詳細に生物群集の遷移過程を知ることができる。底生動

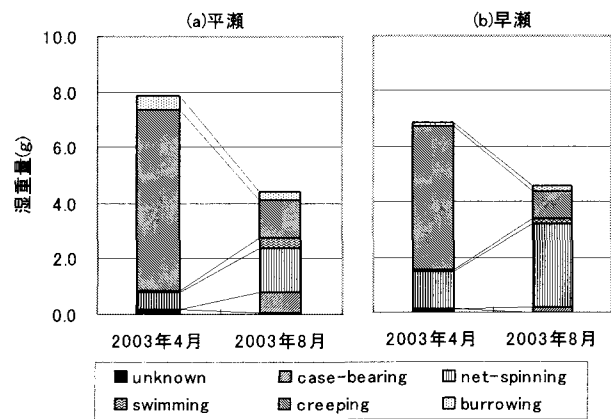


図-4 生活型による分類をした湿重量

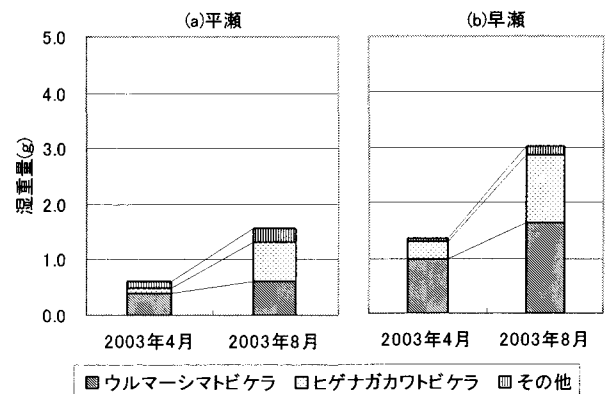


図-5 造網型の湿重量

物群集において造網型が優占することで極相に達することはすでに述べたが、造網型優占の状態もさらに「シマトビケラ科優占の群集」⑤と「ヒゲナガカワトビケラ科優占の群集」⑥の2つの時期に分けられる。ヒゲナガカワトビケラ科のほうが大型であるため、攪乱の被害を受けやすいこと、シマトビケラ科優占の場に侵入可能であることなどの理由から、造網型優占の期間は⑤の時期を経て、⑥に至るといわれている¹⁾。よって、「シマトビケラ科優占」の時期を亜極相、「ヒゲナガカワトビケラ科優占」の時期を極相といえる。

図-5は造網型のウルマーシマトビケラとヒゲナガカワトビケラに着目し、造網型生物の現存量に占めるこの2種の現存量を4月と8月とで比較したものである。これら2種はそれぞれ、シマトビケラ科、ヒゲナガカワトビケラ科に属する。図-5より平瀬、早瀬とも4月はウルマーシマトビケラが圧倒的に優占していたが、8月にはヒゲナガカワトビケラがほぼ同等にまで現存量を増やしていた。また、8月の全生物現存量におけるウルマーシマトビケラ、ヒゲナガカワトビケラの現存量の割合は早瀬でそれぞれ、36%、27%である。よって、この調査地点においては8月の時点では、亜極相から極相への変換点であると考えられる。

(5) 採餌型による底生動物の分類

生活型のほかに餌の摂取の仕方の違いによる分類の方法がある。湿重量における採餌型の各種の構成を図-6に示した。採餌型による種の構成比については4月、8月とも大きな変化はなかった。平瀬、早瀬とも4月、8月通じて最も多いのは採集食者(Collector)であった。採集食者とはデトリタス(有機性の堆積物)や藻類をかき集めて食べる種を指す。平瀬においては8月の調査では他の動物を捕食する肉食者(predator)が減少し、その代わりに藻類などを削り取って食べる刈取食者(Scraper)が増加する結果が得られた。

5. まとめ

本研究では底生動物と光環境に着目した現地調査を行い、その河川構造の検討を行った。得られた結果および知見を以下に示した。

- 1) 光量を測定した結果、瀬では河床面に到達する光量は淵に比べ大きく、その測定値のばらつきもとくに早瀬において大きなものとなった。さらに流水中における光の減衰過程についても、淵では河床に向かい単調に減衰しているのに対し、瀬では変動が大きくばらつきながら減衰する過程が見られた。これは瀬における白波を伴う水面振動により流水中に入射する光が散乱した結果であると考えられる。
- 2) 付着藻類の強熱減量による分析の結果から平瀬、早瀬の付着藻類は淵に比べ、有機化合物が豊富であった。したがって、光合成が活発であるといえる。この知見から平瀬、早瀬における光量測定の結果と併せ、日射の状態が良好であると評価できる。
- 3) 底生動物については、その種類数、個体数、湿重量を調べたが、淵に比べ瀬のほうが底生動物相に関して、多様であった。また、生活型について分類し、その全体に占める構成に着目し、4月と8月の調査結果を比較したが、匍匐型(Creeping)が減少し、造網型(Net-spinning)が増幅する極相への遷移過程と思われる結果が得られた。また、造網型に属する2種類のトビケラに着目すると、8月の調査の時点は亜極相と呼ばれる段階から極相へ代わる変換点にあたることわかった。

上記の結果より早瀬、平瀬、淵においてそれぞれの河床状況の違いから、底生動物の種類数、個体数、付着藻類の生産量は異なるといえる。特に早瀬において多種でかつ量的に多くなったが、この瀬-淵構造間での生物量の相違は河床状態が浮石構造である早瀬で生じる入射光の散乱に起因すると考えられる。

今後、同調査区間における継続的な調査を続け、

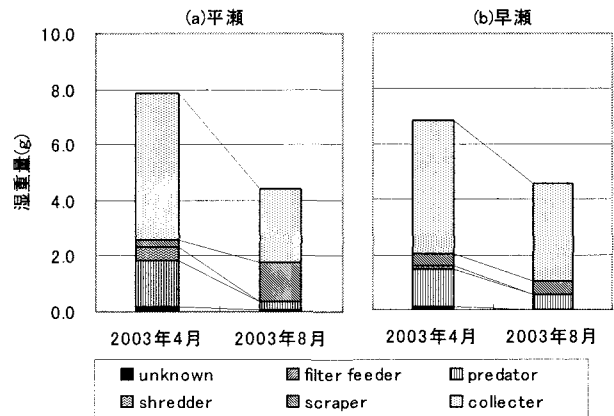


図-6 採餌型により分類した湿重量

河川環境と底生動物相の関係をさらに検討していくことが必要である。また、瀬-淵構造について水理量に関する特性をより詳細に明らかにすることも課題である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたっては三洋テクノマリン株式会社環境コンサルタント部平井正風氏よりご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学, 補訂版, 築地出版, 1993
- 2) 土屋十朗: 都市河川の総合親水計画, 信山社サイテック, 1999
- 3) 野上武, 渡辺康玄, 中津川誠: 急流河川における河床地形の定量的区分, 水工学論文集, 第47巻, pp.1087-1092, 2003
- 4) 谷田一三: 淡水生物の生息場所と種の保全, 土木学会誌, vol.83, April, pp.34-36, 1998
- 5) 東京環境保全局水質保全部: 都内河川の水質・水生生物の15年間の変動データ集, 1996
- 6) 東京都環境局: 昭和58年度~平成11年度 水生生物調査結果報告書, 1985~2001
- 7) 土屋十朗, 平井正風, 風間真理: 多摩・山地河川における河床環境と底生動物の変化に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.1235-1240, 2002
- 8) 長谷川和彦, 川村信也, 張祐平: 群別川におけるステップ・プールの水理特性と底生動物の関係, 水工学論文集, 第47巻, pp.1111-1116
- 9) 津田松苗: 水生昆虫学, 北隆館, 1979
- 10) 中島重旗: 土木技術者の陸水環境調査法, 森北出版, 1983
- 11) 合田健: 水環境指標, 思考社, 1979
- 12) 岩佐義明: 湖沼工学, 山海堂, 1990
- 13) 宮地重遠: 光合成, 朝倉出版, 1992
- 14) 津田松苗, 御勢久右衛門: 川の瀬における水生昆虫の遷移, 生理生態 12, 1964
- 15) 大串龍一: 水生昆虫の世界, 東海大学出版会, 1981

(2003. 9. 30 受付)