

(1) 炭素・窒素安定同位体比を用いた河畔林由来の有機物が水生昆虫群集へ与える影響について

高橋 真司^{1*}・五十嵐 夏奈²・伊藤 歩³・渡辺 幸三⁴
相澤 治郎²・大村 達夫⁵・海田 輝之²

¹東北大学工学部工学研究科技術部 (〒982-0014仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

²岩手大学工学部社会環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

³岩手大学大学院工学研究科フロンティア材料機能工学専攻 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

⁴Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (Mueggelseedamm 301, 12587 Berlin, Germany)

⁵東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒982-0014仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

* E-mail: shin@tech.eng.tohoku.ac.jp

河畔林は河川生態系にとって重要な有機物供給源となっている。本研究は上、中流域に溪・河畔林を有する河川において水生昆虫群集と餌資源である有機物の関係を量的に示し、さらに炭素、窒素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)を用いた混合モデル式による水生昆虫群集の餌資源の推定を行うことで河畔林由来の有機物が水生昆虫群集へ与える影響を調べた。河畔林より下流の地点では粒径3.35mm以上の流下有機物が増加し、採集食者の現存量も増加した。BFPOM, SFPOM, SCPOMの他生性有機物依存率はSt.4以降で増加傾向を示し、各有機物が河畔林の影響を受けていることが示唆された。FPOMを餌源とする採集食者、濾過食者及び掃き取り食者の水生昆虫の他生性有機物依存率は、河畔林を有するSt.4からSt.5にかけて増加した。

Key Words: Riparian forest, Aquatic insects, Particulate organic matter, Carbon and nitrogen stable isotope ratios, Mixing model

1. はじめに

河川生態系のエネルギー源は、河川外から供給される落ち葉等の他生性有機物 (allochthonous) と河川内で生産される藻類等の自生性有機物 (autochthonous) に区分される。河畔林は河川景観を向上させたり、堤防や護岸の物理的安定性を増す等の機能を有するが、それと共に近年、水生昆虫や魚類等の水生動物への他生性有機物の供給源としての機能が注目されている¹⁾⁵⁾。

河畔林の餌供給機能を評価する手段の一つとして、動物群集の摂食機能群解析が考えられる⁶⁾。例えば、落ち葉等の大きな粒径の他生性Coarse Particulate Organic Matter (CPOM; 粒径>1mm) が河川に供給されると、これらを捕食する破砕食者の個体数や現存量が増大すると想定し、群集に占める破砕食者の割合により、河畔林の効果を評価する手法である⁷⁾。さらに、他生性有機物は河川

内で物理的・生物学的に分解されると、Fine POM (FPOM; 粒径: 0.7 μm ~1mm) として水生動物に供給される。自生性有機物もFPOMの起源となるので、両者を起源に持つFPOMを捕食する濾過食者や採集食者の個体数や現存量に基づいて、河畔林の効果を適切に評価することは難しい。従って、河畔林の河川生態系に及ぼす影響を明らかにするためには、流下及び河床内有機物の挙動と水生昆虫相の食物網を解析することが必要である。

水生昆虫相の食物網を解析する方法として炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$) による栄養構造の評価が行われている⁸⁾。炭素安定同位体比は栄養段階が上昇しても値があまり変化せず、対象生物の $\delta^{13}\text{C}$ に近い一次生産者を探すことで、対象生物の一次生産者を推定することができる。つまり、 $\delta^{13}\text{C}$ が陸域植物 (約-27‰) と水域植物 (約-22~-18‰) で値が大きく異なることを利用して、生物の餌起源を推定することが可能である⁹⁾。一方、

$\delta^{15}\text{N}$ は栄養段階当たり平均3.4%増加するため、対象生物の栄養段階を算出するために利用される。

河畔林が河川生態系に及ぼす影響を評価した研究において、水生昆虫を捕食する魚類や陸生昆虫に着目したもの⁹⁾はあるが、河畔林由来の有機物が水生昆虫相へ与える影響については、Doi¹⁰⁾が炭素安定同位体比を用いて河畔林存在下に生息する*Stenopsyche marmorata* (濾過食者) が他生性有機物に依存した栄養構造を形成していることを報告している。しかしながら、河川水域環境保全の生態工学的観点から、水生昆虫相の多様性の維持や回復に関連付けて論じている報告は極めて少ない。

以上の観点より、本研究は河畔林が有する水生昆虫相への餌供給機能を評価することを目的として、上流域及び中流域に河畔林を有する岩手県宮守川において、粒径別有機物、水生昆虫群集及びそれらの炭素・窒素安定同位体比の調査を行い、それぞれの量的変化と餌資源依存率を求めた。

2 方法

(1) 調査地点

調査対象とした宮守川は、岩手県遠野市宮守町の中心部を流下し、北上川水系猿ヶ石川に合流する流域面積47.20km²、流路延長13.80km、河床勾配が上流域で1/50、中流域で1/125の1級河川である。

宮守川流域は、平成2年度の集中豪雨により甚大な被害を受けた。そこで、岩手県は県営圃場整備と事業調整を図りながら、約9kmに渡って護岸に草本植生を用いた多自然型工法による河川改修工事を平成9年度から平成

13年度まで実施した。調査地点は最上流部をSt.1として、計6ヶ所設置した(図-1、表-1)。St.1は溪流の最下流部に位置し、溪畔林を有した未工事地点である。St.2とSt.3の間に農地への取水を目的としたゴムチューブ製の堰が存在する。St.4付近は改修区間の直上に位置し、左岸沿いに約1.75kmの広葉樹を主とする河畔林を残した地点である。St.2からSt.3、St.4からSt.6の区間は、覆土した護岸に植生があるのみで河畔林は存在しない。St.3は工事区間外で旧来のコンクリート護岸を有している。各調査地点の平瀬の平均流速は、上流から下流にかけて0.2～0.8m/sであり、底質は砂礫からなっていた。

溪・河畔林の植生は、St.1では特にヤマガワ、ミツデカエデ等であり、St.4ではイタヤカエデ、オオヤマザクラ、ハンノキ、ヤブガラシ等であった。

(2) 調査方法

河畔林から供給される有機物の量的影響を評価する目的で流下及び河床内の粒子状有機物の調査を、2003年6月から2008年10月までの夏5回、秋26回、冬9回の計40回行った。水生昆虫の調査は同期間内で夏5回、秋12回、冬6回の計23回行った。また、改修工事が行われた中流域から下流域にかけて、河畔林が河川生態系へ及ぼす影響を栄養学的な視点で評価するために、河畔林の上流地点であるSt.3からSt.6までの4地点について安定同位体比分析調査を行った。この調査は2008年10月から12月までの毎月1回ずつ計3回行った。但し、10月は有機物の採取のみを行い、11月及び12月は有機物と水生昆虫を採取した。

水生昆虫は、各調査地点の平瀬の中から無作為に選んだ2ヶ所でコドラード付きサーバーネット(25cm×25cm、メッシュサイズ:38メッシュ/fmch²)を用いて定量的に採取した。標本は80%エタノール溶液で固定した後、実験室で実体顕微鏡を用いて可能な限り細かいレベルまで同定^{11)・12)}し、種及び摂食機能群毎に個体数を計数した。また、標本を110℃で2時間乾燥し、重量測定して現存量を求めた。各分類群を破碎食者、採集食者、濾過食者、掃き取り食者、捕食者の5群の摂食機能群^{9)・10)}に分けて、摂食機能群ごとの乾燥重量を求めた。判別が不可能な分類群はその他とした。

有機物の調査は、各調査地点の平瀬の中から無作為に選んだ2ヶ所で行った。CPOMは、水生昆虫の生息場や餌資源として重要であるため、水生昆虫と餌資源の関係を検討するためにCPOMをサイズごとにさらに分類することも多い^{13)・14)}。本研究ではCPOMの挙動を詳細に検討するため、1～3.35mm及び3.35mm以上の2つに分類することとした。流下有機物量の採取は、1mm以上の流下物はサーバーネット(50cm×50cm)を15分間流心に置き、

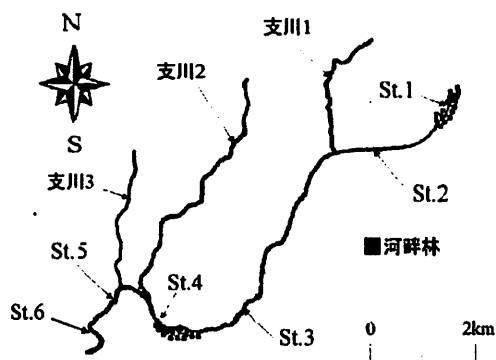


図-1 調査地点の位置

表-1 各地点の環境条件と工事の有無

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
河畔林の有無	有り	—	—	有り	—	—
河岸植生	多い	少ない	少ない	多い	少ない	少ない
日照	少ない	多い	多い	少ない	少ない	多い
工事の有無	—	有り	—	有り	有り	有り
地点間距離	—2km—	—4km—	—2km—	—1km—	—1km—	—

採取した物質を篩で1~3.35mm, 3.35mm以上にそれぞれ分け、強熱減量¹⁷⁾を流下有機物 (SCPOM) 量とした。また、1mm未満は1mm, 0.25mm及び0.075mmの篩を重ねて流心に30秒間手で持ちながら設置し、そこに留まった物質の強熱減量を流下有機物 (SFPOM) 量とした。河床内有機物の採取は、コドラード付きサーバーネット (25cm×25cm, 38メッシュ/inch²) を用いて水生昆虫の採取と同時にいった。採取した河床内有機物は、水生昆虫を取り除いた後、篩で1mm未満, 1~3.35mm及び3.35mm以上にそれぞれ分け、強熱減量を測定した。

(3) 安定同位体比分析

水生昆虫の安定同位体比分析には分類群毎に十分な量が必要なので、キックネット法 (メッシュサイズ: 38メッシュ/inch²) を用いて各地点の平瀬で定性的なサンプリングを行った。実験室で水生昆虫を80%エタノールで固定し、実体顕微鏡を用いて可能な限り細かい分類レベルまで同定した。その後、分類群毎に、安定同位体比分析まで冷凍保存 (-20℃) した。エタノールで固定したサンプルの安定同位体比は30日以内なら分析に影響を与えないこと⁹⁾が報告されており、本研究では固定後30日以内に分析を行った。

1mm以上の流下有機物は、サーバーネット (メッシュサイズ: 38メッシュ/inch²) と篩を用いて1~3.35mm (Suspended Coarse Particulate Organic Matter, SCPOM) 及び6.7mm以上の2種に分けて採取した。6.7mm以上の流下物は樹木の葉のみをサンプル (Leaf) とした。1mm未満の流下有機物 (Suspended Fine Particulate Organic Matter, SFPOM) は、各地点で河川水を6L採取し、実験室へ持ち帰り、1mm篩を通過した試料水をWhatman GF/Fに1回あたり1~2L濾過して濾紙上に残った物質をサンプルとした。河床内堆積物はプラスチック製の筒 (筒径=25cm, 筒高=50cm) の筒口を河床に密着させるように設置し、筒内の河床を攪拌して堆積物を筒内の水に浮遊させて、その濁水をポリエチレン容器に2L採取した。その後、実験室で流下有機物と同様の作業を行い河床内堆積物 (Benthic Fine Particulate Organic Matter, BFPOM) とした。

付着生物膜は平瀬の河床に堆積している複数の石を無作為に選び、ブラシを使ってトレーに剥ぎ落して集め、十分な量を採取した。その後、実験室でWhatman GF/Fに濾過し、濾紙上の物質をサンプル (Periphyton) とした。

水生昆虫の冷凍サンプルを1N塩酸を用いて酸処理を行い無機炭素の除去をした¹⁸⁾後、60℃の温風乾燥器で乾燥させ、デシケータ内で保存した。各種有機物も酸処理を行いデシケータに保存した。サンプルをそれぞれスズ箔に入れ、元素分析計 (NA2500, CE Instruments社) と質

量分析計 (DELTA plus Finnigan社) を使用し、炭素・窒素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)を測定し、次式から算出した。

$$\delta^{13}\text{C} \text{ or } \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

ここで、 R_{sample} : サンプルの $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, R_{standard} : 標準試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。標準試料は炭素がPDB (Belemnite from the Pee Dee formation), 窒素が大気中の窒素である。この装置で標準試料を繰り返し分析した際の標準偏差は、 $\delta^{13}\text{C}$ が $\pm 0.05\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ が $\pm 0.1\text{‰}$ であった。

(4) データ解析

2003年6月から2008年10月までに行った水生昆虫調査毎のコドラードサンプル (採取面積: 0.0625m²) の2回分の合計サンプル (総採取面積: 0.125m²) に基づいて、水生昆虫の個体群密度 (0.125m²), 現存量 (g/m²) 及びShannon-Wiener多様性指数H'を求めた。また、H'は次式から算出した。

$$H' = -\sum \{x_i/N \times \ln(x_i/N)\}$$

ここで、 x_i : i分類群の現存量, N: 総個体現存量である。

2003年6月から2008年10月までに行った調査地点 (St.1~St.6) の粒径別流下及び河床内有機物量と水生昆虫に関する変量及び2008年10月から12月までに行った調査 (St.3~St.6) の各有機物 (Periphyton, Leaf, BFPOM, SFPOM, SCPOM) 及び水生昆虫の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ について多重比較を行った。本研究では各群の母集団分布について必ずしも正規分布が想定できないため、Steel-Dwass法を用いて検定を行った。

2008年10月から12月までに行った調査における水生昆虫の各分類群の $\delta^{13}\text{C}$ 及びPeriphytonとLeafの $\delta^{13}\text{C}$ を混合モデル式¹⁹⁾に適用して、各分類群の他生性有機物へのエネルギー依存度を表す他生性有機物依存率 (%allochthonous) を次式により算出した。

$$\% \text{allochthonous} = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{autochthonous}} - f)}{(\delta^{13}\text{C}_{\text{allochthonous}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{autochthonous}})} \times 100$$

ここで、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$: 粒子状有機物の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{autochthonous}}$: Periphytonの $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{allochthonous}}$: Leafの $\delta^{13}\text{C}$, f : 栄養段階が1つ上がるときの $\delta^{13}\text{C}$ の平均増加量をそれぞれ表す。 f の値は生物によって異なるが、その平均値の $f=0.8\text{‰}$ を用いた⁹⁾。他生性有機物依存率が100%の分類群は他生性有機物だけにエネルギー依存し、逆に0%の分類群は自生性有機物だけに依存していることを表す。SCPOM, SFPOM, BFPOMは自生性有機物及び他生性有機物の両方の有機物から構成されている。SCPOM, SFPOM, BFPOMのそれぞれに含まれる両有機物の割合を推定するために、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$ に各FPOMとSCPOMの $\delta^{13}\text{C}$ を代入して、それぞれの他生性有機物の割合を求めた。なお、各

FPOMとSCPOMはPeriphyton及びLeafと同じ栄養段階と仮定し、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値は体細胞が完全に入れ替わる1, 2ヶ月の間に捕食した餌の値を反映するため²⁰, 本研究では2008年10月に採取した有機物データと11月に採取した水生昆虫データ及び11月に採取した有機物データと12月に採取した水生昆虫データの2組の安定同位体比を元に解析を行った。

3. 結果

(1) 流下及び河床内有機物

粒径 1mm 未満の流下有機物量の平均値は 6 地点間に有意差はなかった (表-2)。一方, 粒径 1~3.35mm の流下有機物量は, 上流の St.1 と St.2 が下流の St.3~5 よりも有意に高かった ($P<0.05$)。また, 粒径 3.35mm 以上の流下有機物量は, 溪畔林を有する St.1 が St.3 より有意に高かった ($P<0.05$)。溪畔林を有する St.1 と河畔林を有する St.4 がその他の 4 地点より有意に高かった ($P<0.05$)。

粒径 1mm 未満の河床内有機物量は, 流下有機物量と同様に 6 地点間に有意差はなかった。1~3.35mm の河床内有機物量は, St.1 と St.2 が St.3~6 より有意に高かった

($P<0.05$)。粒径 3.35mm 以上の河床内有機物量は, 溪畔林を有する St.1 が St.3~6 より有意に高かった ($P<0.05$) が, 河畔林を有する St.4 は全地点で最も低く, その下流で増加した。

(2) 水生昆虫

調査期間を通して採取された水生昆虫の総個体数は 90457 匹であり, 総分類群数は 112 分類群であった (表-3)。St.1 では *Microsema quadriloba* (マルツツトビケラ), *Chironomidae* (コスリカ科), *Artocha sp.* が優占した。その他の地点では *Hydropsyche orientalis* (ウルマーシマトビケラ) と *Baetis sp.* (コカゲロウ属) が多数確認された。現存量は, St.1 で最も低く (1.29g/m^2), St.3 で最も高く (4.94g/m^2), 両者に有意差があった ($P<0.05$) が, 出現分類群数及び個体数密度は 6 地点間に有意差はなかった。現存量は, St.1 が St.3~6 より有意に低かった。H' は St.1 (2.94) が最も高く, St.2 から St.4 まで流下方向に進むに伴い低下したが, St.5 で再び高くなった。

各摂食機能群別の現存量を表-3 に示す。破碎食者の現存量は, 最上流の St.1 で 0.08g/m^2 と最も高く, 流下に伴い減少し, 下流の St.4~St.6 は, St.1 と St.2 よりも有意に低かった ($P<0.05$)。濾過食者の現存量は, St.1 で

表-2 各調査地点における流下及び河床内有機物量 (平均値±標準誤差, $n=40$)
(同行の異なるアルファベット間で有意差あり ($P<0.05$))

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
流下有機物($\text{g/m}^2/\text{h}$)						
1mm未満	136.8±16.5 ^a	148.9±21.0 ^a	107.6±15.4 ^a	123.4±16.3 ^a	124.7±15.8 ^a	136.2±15.2 ^a
1~3.35mm	41.1±9.4 ^a	34.6±8.2 ^{bc}	10.3±2.2 ^b	15.5±3.2 ^b	16.2±3.2 ^b	21.2±4.1 ^{bc}
3.35mm以上	128.4±35.7 ^{bc}	46.9±16.2 ^{ab}	36.7±8.7 ^b	222.7±55.7 ^c	51.2±11.7 ^a	52.2±15.8 ^a
河床内有機物(g/m^2)						
1mm未満	12.5±1.2 ^a	13.0±1.4 ^a	8.5±0.8 ^a	8.1±1.0 ^a	8.2±1.0 ^a	8.2±0.9 ^a
1~3.35mm	4.6±0.4 ^a	4.3±0.4 ^{bc}	1.9±0.3 ^b	1.6±0.2 ^b	1.9±0.2 ^b	2.4±0.2 ^{bc}
3.35mm以上	10.8±1.4 ^a	8.7±1.7 ^{bc}	3.9±0.7 ^{bc}	3.8±0.8 ^b	3.9±0.7 ^{bc}	6.1±1.6 ^{bc}

表-3 水生昆虫の総個体数及び群集構造に関する変量 (平均値±標準誤差, $n=23$)
(同行の異なるアルファベットで有意差あり ($P<0.05$))

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
総個体数	17739	15560	15694	12046	15098	14320
個体数密度(/0.125m ²)	422.4±43.7 ^a	370.5±33.1 ^a	348.8±33.0 ^a	267.7±35.9 ^a	335.5±35.1 ^a	318.2±29.3 ^a
現存量(g/m^2)	1.29±0.12 ^a	2.19±0.26 ^a	4.94±1.68 ^a	3.94±0.96 ^a	3.13±0.46 ^a	3.51±0.54 ^a
分類群数	23.8±0.8 ^a	21.8±1.0 ^a	21.2±0.8 ^a	21.5±0.8 ^a	22.9±0.8 ^a	23.1±0.8 ^a
H'	2.94±0.11 ^a	2.62±0.12 ^{ab}	2.23±0.17 ^{ab}	2.21±0.17 ^b	2.45±0.18 ^{ab}	2.31±0.15 ^b
摂食機能群別現存量(g/m^2)						
破碎食者	0.080±0.02 ^a	0.010±0.004 ^b	0.010±0.007 ^{bc}	0.006±0.003 ^c	0.008±0.007 ^c	0.001±0.001 ^c
濾過食者	0.07±0.02 ^a	0.95±0.17 ^b	6.18±2.50 ^{bc}	4.00±1.65 ^{bc}	2.07±0.43 ^{bc}	2.54±0.63 ^c
採集食者	0.47±0.07 ^a	0.43±0.09 ^a	0.52±0.12 ^a	0.33±0.07 ^b	0.41±0.06 ^{bc}	0.29±0.05 ^a
掃き取り食者	0.17±0.03 ^a	0.51±0.09 ^b	0.60±0.17 ^b	1.19±0.78 ^{ab}	0.45±0.06 ^b	0.46±0.08 ^b
捕食者	0.50±0.06 ^a	0.30±0.05 ^b	0.43±0.11 ^c	0.14±0.03 ^c	0.20±0.04 ^{bc}	0.21±0.07 ^c

0.07g/m²と最も低く、下流に行くに従い増加した ($P<0.05$)。採集食者の現存量はSt4でSt1~St3より有意に低かったが、St5で増加した ($P<0.05$)。掃き取り食者の現存量は、St1がSt4を除くすべての地点より有意に低かった ($P<0.05$)。捕食者の現存量は、St1で0.50 g/m²と最も高く、下流のSt3~St6は、St1より有意に低かった ($P<0.05$)。

(3) 安定同位体比

河川における水生昆虫の餌源を推定するために、St3~St6の各種有機物及び水生昆虫の安定同位体比を求めた。各調査地点のBFPOM, SFPOM, SCPOM, Leaf, Periphyton及び水生昆虫の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の測定値を図-2に示す。全4地点において、 $\delta^{13}\text{C}$ はPeriphyton (-20.4‰~-17.3‰)で最も大きく、Leaf (-29.2‰~-29.0‰)で最も小さく、両者に有意差があった ($P<0.05$)。また、すべての水生昆虫の $\delta^{13}\text{C}$ はLeafとPeriphytonの値の間に分布していた。各地点の水生昆虫で最も $\delta^{13}\text{C}$ が低かった分類群はコカゲロウ属であり (-27.1‰~-25.6‰)、逆に、 $\delta^{13}\text{C}$ が最も高かった分類群は*Antocha* sp.であった (-22.4~-21.8‰)。

表-4に各種有機物の他生性有機物依存率を示す。

BFPOM, SFPOM, SCPOMの他生性有機物依存率はSt3を除いて50%以上であり、各有機物の構成割合は自生性有機物より他生性有機物の方が高いことがわかる。BFPOMとSFPOMの他生性有機物依存率は河畔林を有するSt4でSt3より有意に高く ($P<0.05$)、河畔林を有するSt4以降のすべての有機物で他生性有機物依存率が上がり、BFPOMはSt5, SFPOMはSt4, SCPOMはSt6でそれぞれ最大値を示した。

各調査地点における水生昆虫群集の他生性有機物依存率を表-5に示す。餌資源は自生性有機物をPeriphyton, 他生性有機物をLeafとした。コカゲロウ属以外の分類群は、サンプルサイズが小さかったため、多重比較を行うことができなかった。混合モデル式を用いた解析の結果、採集食者のコカゲロウ属の他生性有機物依存率は、St4で87.3%となり、St3より有意に高かった ($P<0.05$)。他の採集食者であるシリナガマダラカゲロウ、フタマタマダラカゲロウ、モンカゲロウ、*Antocha* sp.の他生性有機物依存率はSt3からSt4にかけて1.6~11.9%の範囲で増加し、St5で最大となった。濾過食者であるウルマーシマトビケラと掃き取り食者であるヤマトビケラ属の他生性有機物依存率も、St3からSt5にかけて増加する傾向を示した。他生性有機物依存率の最大値はすべての分類群でSt5で

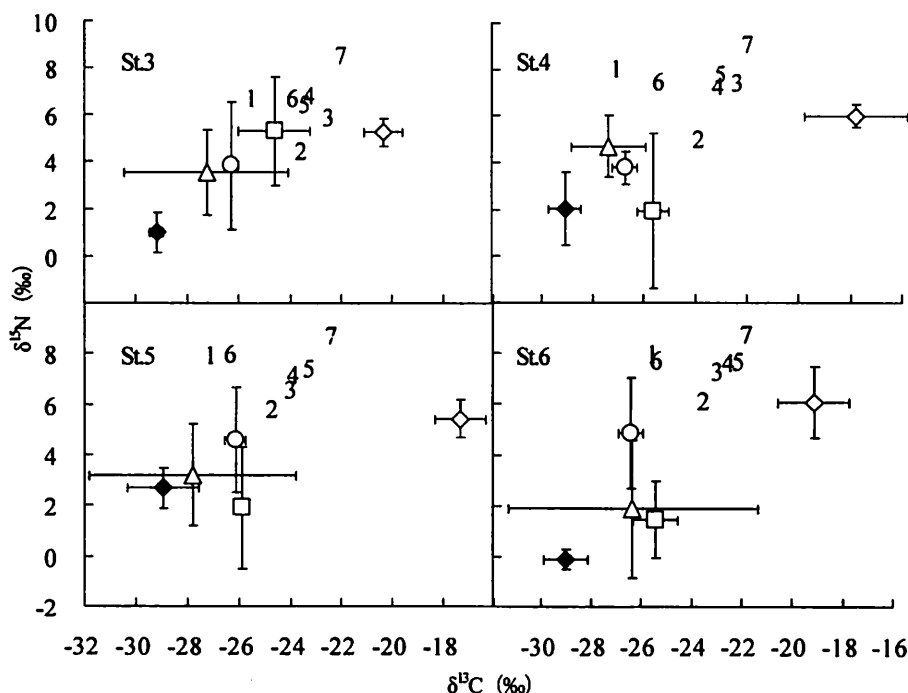


図-2 各調査地点における各種有機物と水生昆虫の $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{15}\text{N}$

◆はLeaf, ◇はPeriphyton, □はBFPOM, ○はSFPOM, △はSCPOMの値を示している (平均値 $\pm$ SD, $n=9$)。グラフ内の数字は以下の水生昆虫の値を示している (平均値)。1.コカゲロウ属 ($n=5$)、2.シリナガマダラカゲロウ ($n=4$)、3.フタマタマダラカゲロウ ($n=4$)、4.モンカゲロウ ($n=4$)、5.ウルマーシマトビケラ ($n=4$)、6.ヤマトビケラ属 ($n=4$)、7.*Antocha* sp. ($n=4$)。

表4 有機物の炭素安定同位体比と他生性有機物依存率（平均値±標準誤差，n=9）
（他生性依存率の同行の異なるアルファベットで有意差あり（P<0.05））

	St.3	St.4	St.5	St.6
$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$				
Periphyton	-20.4±0.8	-17.8±0.9	-17.3±0.5	-19.1±0.7
Leaf	-29.2±0.1	-29.1±0.39	-29.0±0.5	-29.0±0.4
BFPOM	-24.6±0.6	-20.4±0.8	-20.4±0.8	-20.4±0.8
SFPOM	-26.2±1.0	-26.5±0.2	-26.1±0.1	-26.4±0.2
SCPOM	-27.2±1.1	-27.4±0.5	-27.8±1.4	-26.3±2.0
%allochthonous (%)				
BFPOM	49.9±5.5 ^a	68.7±3.4 ^b	74.8±2.6 ^b	64.1±2.5 ^{ac}
SFPOM	66.6±0.9 ^a	76.9±1.4 ^b	76.9±3.1 ^{ab}	73.3±1.9 ^b
SCPOM	85.3±10.4 ^a	83.9±3.3 ^a	73.3±5.6 ^a	98.7±10.2 ^a

表5 水生昆虫の他生性有機物依存率
（コカゲロウ属の異なるアルファベットで有意差あり（P<0.05））

		(Unit: %)				
	n	FFGs	St.3	St.4	St.5	St.6
コカゲロウ属	5	採集食者	67.8±14.0 ^a	87.3±1.7 ^b	88.4±4.1 ^b	69.3±4.1 ^a
シリナガマダラカゲロウ	4	採集食者	43.9±6.3	50.9±11.2	56.1±7.8	48.8±3.1
フタタマダラカゲロウ	4	採集食者	38.0±8.6	49.9±1.2	56.5±6.8	44.3±9.8
モンカゲロウ	4	採集食者	45.6±2.8	47.2±4.7	49.8±1.0	42.7±2.6
<i>Antocha sp.</i>	4	採集食者	29.2±1.9	39.0±2.3	47.2±4.0	32.9±9.0
ウルマーシマトビケラ	4	濾過食者	38.2±5.3	48.9±8.9	50.9±6.9	35.7±9.0
ヤマトビケラ属	4	掃き取り食者	50.9±11.9	75.0±8.4	80.3±6.9	64.5±3.9

あった。

4. 考察

(1) 河川内粒子状有機物の動態

流下有機物量に関しては，流下方向の地点間の変動パターンに明瞭な傾向は見られなかったが，粒径3.35mm以上の流下有機物は，河畔林を有するSt4の流下量が直上のSt3よりも顕著に高まり，直下のSt5で低下していた。このことは，St4の河畔林から大量に供給された葉などの大きな有機物が，St4とSt5に挟まれた河川区間に堆積もしくは滞留していることを示唆している。また，粒径3.35mm以下の流下有機物は，St2からSt3にかけて減少した。この原因としてSt2とSt3の間に設置されたゴムチューブ製の堰が小さな有機物量の流下を抑制したことが考えられる。一方，河床堆積有機物量は，すべての粒径において，河畔林を有する最上流St1で高く，下流に進むほど低下する傾向が見られた。これは，最上流部の河畔林や更に上流の河川から供給された有機物が，物理的・生物学的過程を経て，流下に伴って分解されて河床に堆積していることを示している。

St3～6の有機物の安定同位体比解析の結果，Imm未満の流下有機物（SFPOM）の他生性有機物の割合はSt3よりもSt4，5の方が高く，粒径Imm未満の河床内有機物（BFPOM）の他生性有機物の割合はSt3では50%未満であるが，河畔林があるSt4から下流に位置する地点では70%以上に増加した。この結果は，St4の河畔林から河川に供給された落ち葉等が河床に堆積するとともに，分解されて粒径が小さな有機物として堆積し，河床内の他生性有機物の割合が高まったことを示している。

(2) 河畔林と水生昆虫の栄養構造の関係

水生昆虫群集の個体群密度及び分類群数は，6地点間に大きな違いは見られなかったが，総現存量は最上流のSt1で顕著に低下する傾向が見られた。CPOMの堆積量が多い上流2地点では，CPOMを餌源とする破砕食者の現存量が他の地点に比べて高くなることが予想されたが，St2では高くならなかった。河畔林から供給されたCPOMは河川のワンドや淵などに堆積しやすいため，破砕食者はそのような緩流性のハビタットで生息していることが多い。本研究では緩流域で調査せず，瀬のみで調査したため，St2における破砕食者の現存量が増加しな

かった可能性がある。St1は河川を覆う溪畔林から落ち葉などの有機物が供給されるものの、河床に到達する光量が減少し、付着藻類の発達抑制や水温低下などの影響により総現存量が低下した可能性がある。河床の付着生物を捕食する掃き取り食者は、最上流のSt1で顕著に現存量が低下していた。これは、溪畔林による光合成の低下による餌資源の減少が原因の一つとして挙げられる。

炭素安定同位体比分析の結果、全4地点において、PeriphytonとLeafは大きく $\delta^{13}\text{C}$ が異なっており、これら2つを起源として自生性及び他生性有機物への水生昆虫の依存度を評価することが可能であった。

水生昆虫の他生性有機物依存率は、分析した全7分類群で河畔林のないSt3で低く、河畔林のあるSt4とその下流に位置するSt5にかけて増加する傾向が見られた。特にコカゲロウ属の他生性有機物依存率は、St3よりもSt4とSt5で有意に高かった。従って、河畔林を起源とするFPOMは、河畔林より1km先まで流下し、多くの水生昆虫の栄養構造に影響を与えていると考えられる。濾過食者であるウルマーシマトビケラは隙間にネットを作り、流下してくる有機物をろ過して捕食するので、他生性有機物依存率が最大値を示すSt5までは河畔林由来のFPOMが流下してきていることが示唆された。掃き取り食者は、自生性有機物である河床付着藻類を主な餌資源とするとされているが、掃き取り食者のヤマトビケラ属の他生性有機物依存率は、採集食者及び濾過食者と同等かそれ以上に高くなった。水生昆虫の食物網解析の1つの手段である胃内容物分析の結果、掃き取り食者は付着藻類以外に無形粒状有機物を捕食することが報告されている¹⁹⁾。従って、本調査地のヤマトビケラ属もBFPOMを捕食し、その結果として他生性有機物への依存度が高まっている可能性はある。

河畔林が存在しないSt3と河畔林が存在するSt4以降の地点の間での水生昆虫群集(表-3)を比較すると、St5以降ではSt3に比べて有意な差は無いが、分類群数と多様性指数が若干ではあるが高くなっている。また、St5での採集食者の現存量はSt4よりも高い値を示した。採集食者はBFPOMを餌資源とするため、BFPOMの量及び質が現存量の増減に関連していると予想される。St5のBFPOM量はSt4とほぼ変わらないが、BFPOMの他生性有機物依存率はSt4で68.7%、St5で74.8%であり、St5の方が他生性有機物依存率は高かった。従って、他生性有機物の割合が高いBFPOMは水生昆虫にとって、好適な餌資源となっていることが示唆された。

以上の結果より、本調査河川において、安定同位体比解析により、河畔林から供給される粒子状有機物が水生昆虫の餌資源として有効に利用されていることが分かり、また、その供給量の増加及び質的变化は採集食者の現存

量の増加とそれによる多様性の回復に貢献している可能性が示唆された。

5. おわりに

本研究は、河畔林が水生昆虫相に及ぼす影響を解明することを目的として、岩手県宮守川において餌資源及び水生昆虫の炭素・窒素安定同位体比分析を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 粒径335 μm 以上の流下有機物量は、河畔林を有するSt4で最も高かった。また、St4以降ではCPOMを餌資源とする破碎食者の現存量が増加すると予想していたが、St4以降の破碎食者の現存量はSt1及びSt2より有意に低かった。採集食者の現存量は、河畔林を有するSt4より下流のSt5で高かった。
- 2) BFPOM、SFPOMの他生性有機物依存率はSt4以降でSt3より増加した。これは、河畔林から供給された落ち葉などが河川内で細かく分解され、流下・堆積したためと考えられる。
- 3) 水生昆虫の他生性有機物依存率は河畔林を有するSt4で増加し、St5で最も値が高くなった。本研究で他生性有機物依存率解析の対象とした水生昆虫の摂食機能群はFPOMを餌資源とするため、河畔林由来のCPOMが細かく分解されFPOMとなり、水生昆虫群集の餌資源になったと考えられる。
- 4) コカゲロウ属の他生性有機物依存率は、St4及びSt5でSt3より有意に高かった。この結果は、河畔林由来のFPOMが河畔林から1km下流の地点であるSt5まで影響を及ぼしていることが示唆された。
- 5) 安定同位体比解析により、河畔林由来の粒子状有機物が水生昆虫の餌資源として有効利用されていることを解明できた。また、BFPOMの他生性有機物依存率の増加が採集食者の現存量増加及び種多様性の回復に関連していることが示唆された。

参考文献

- 1) Sweeney B.W. : Effect of streamside vegetation on macroinvertebrate communities of white clay creek in eastern North America, *Proc. Acad. Natl. Sci. Phila.*, 144, 291-340, 1993.
- 2) Wallace J. B., Eggert S. L., Meyer J. L., Webster J. R. : Multiple Trophic Levels of a Forest Stream Linked to Terrestrial Litter Inputs, *Science* 277, 102, 1997.
- 3) Inoue M., Nakano S. : Fish abundance and habitat relationships in forest and grassland streams, northern Hokkaido, Japan, *Ecological Research*, 16, 233-247, 2001.
- 4) Achim P., Klement T. : Effects of riparian arthropod predation on the

- biomass and abundance of aquatic insect emergence, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 24(2), 395-402, 2005.
- 5) Achim P., Carsten J. S., Klement T. : Aquatic Terrestrial Linkages Along a Braided-River: Riparian Arthropods Feeding on Aquatic Insects, *Ecosystems*, 8, 748-759, 2005.
- 6) Merritt R.W., Cummins K.W. : An Introduction to the Aquatic insects of North America, *Kendall Hunt Publishing Company*, 1996.
- 7) Bisson P. A., Montgomery D. R., Hauer F. R., Lamberti G.A. : Methods in stream ecology, *Academic Press*, 585-610, 1996.
- 8) 阿部俊夫, 布川雅典 : 春期の溪流における安定同位体を用いた食物網解析, *日林誌*, 87(1), 2005.
- 9) 富永修, 高井則之 編 : 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態, 日本水産学会監修, 159, 2008.
- 10) Doi H., Takemon Y., Ohta T. : Effects of reach-scale canopy cover on trophic pathways of caddisfly larvae in a Japanese mountain stream, *Marine and Freshwater Research*, 58, 811-817, 2007.
- 11) 川合禎次 編 : 水生昆虫検索図説, 東海大出版会, 1986.
- 12) 津田松苗 編 : 水生昆虫学, 北隆館, 1979.
- 13) 上野益三 編 : 日本淡水生物学, 北隆館, 1986.
- 14) 竹門康弘 : 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価, *日本生態学会誌*, 55, 187-197, 2005.
- 15) Suren A. M. : Meiofaunal communities associated with bryophytes and gravels in shaded and unshaded alpine streams in New Zealand, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 26, 115-125, 1992.
- 16) Kobayashi S., Kagaya T. : Differences in litter characteristics and macroinvertebrate assemblages between litter patches in pools and riffles in a headwater stream, *Limnology*, 3, 37-42, 2002.
- 17) 建設省河川局監修 : 河川水質試験方法 (案) ~試験方法編~ 技報堂出版, 1997.
- 18) Kachler S. E., Pakhomov A., Moquin C. D. : Trophic structure of the marine food web at the Prince Edward Islands (Southern Ocean) determined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis, *Marine ecology progress series*, 208, 13-20, 2000.
- 19) Junger M., Planas D. : Quantitative use of stable carbon isotope analysis to determine the trophic base of invertebrate communities in a boreal forest lotic system, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51, 52-61, 1994.
- 20) Maruyama A., Yamada Y., Rusuwa B., Yuma M. : Change in stable nitrogen isotope ratio in the muscle tissue of a migratory goby, *Rhinogobius* sp., in a natural setting, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 2125-2128, 2001.

(2009. 5. 22 受付)

Effect of Organic Matter Supplied by Riparian Forest on Aquatic Insect Biota by Using Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios

Shinji TAKAHASHI¹, Kana IGARASHI², Ayumi ITO³, Kozo WATANABE⁴,
Jiro AIZAWA², Tatsuo OMURA⁵ and Teruyuki UMITA²

¹ Technical Division, Tohoku University

² Dept. of Civil and Env. Eng., Iwate University

³ Graduate School of Eng., Iwate University

⁴ Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (Mueggelseedamm 301, 12587 Berlin, Germany)

⁵ Graduate School of Eng., Tohoku University

Riparian forest is one of the important factors for river ecosystem since it is a major organic source for aquatic insects in rivers. In this study, behavior of suspended fine and coarse particulate matters (SFPOM and SCPOM) and benthic fine organic matter (BFPOM) was investigated in a river which has a riparian forest in the upper and middle reaches and the diet source of aquatic insect was studied by measuring the carbon stable isotope ratio of POMs, periphyton and aquatic insects. It was found that SCPOM larger than 3.35 mm remarkably increased in the location of riparian forest and POM in the lower reach was mainly composed of allochthonous organic matter supplied by the riparian forest in the middle reach. Furthermore, aquatic insects in the middle and lower reaches were fed to allochthonous organic matter.