集水域の土地利用および河畔林伐採が 山地河川の刈取食者に及ぼす影響

三宅 洋¹・荻原 啓司²・金澤 康史³

¹正会員 愛媛大学講師 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: miyake@cee.ehime-u.ac.jp

²非会員 近畿技術コンサルタンツ (株) 河川防災技術部 (〒540-0012 大阪府大阪市中央区谷町2-6-4)

E-mail: ogiware@kingi.co.jp

³非会員 NECネットエスアイ (株) 西日本システム事業部 (〒564-0063 大阪府吹田市江坂町2-1-47)

E-mail: kanazawa@sb.nesic.com

本研究は、土地利用による栄養塩濃度の増加と河畔林消失に伴う光量の増加が河川性底生動物の刈取食者に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。愛媛県石手川上流域に位置する土地利用密度が異なる2支流の河畔林現存区および消失区にて調査を実施した。この結果、河畔林消失区では、開空度と付着藻類の生産性が上昇し、刈取食者の量および分類群数が増加することが示唆された。一方、土地利用による栄養塩濃度の上昇が刈取食者に及ぼす影響は見られなかった。対象河川では全体的に河川に到達する光量が少なく、付着藻類生産が光量により強く制限されていたことがこの原因と考えられた。複数の人間活動要因に注目してそれらの影響を把握する本研究の手法は、多様化する人間活動が河川生態系に及ぼす影響を理解する上で有効であると考えられた。

Key Words : *mountain streams, land use, riparian forest logging, nutrient concentrations, canopy opening, periphyton biomass, invertebrate scrapers*

1. はじめに

近年の人間活動の活発化により劣化した河川生態系を保全、修復する取り組みが世界各地で行われている¹⁾。日本においても1997年の河川法改正にて河川環境の整備と保全が目的として明記されるなど、河川生態系の健全性を維持、回復する必要性が広く認識され、様々な試みが行われている²⁾。河川生態系をより有効に保全するためには、まず、河川生態系の劣化を引き起こす人間活動要因を特定する必要がある³⁾。影響が強いことが判明した要因については、これにより引き起こされる生態系の劣化パターンとそのメカニズムを解明することにより、有効な保全、再生策を講ずることが可能になる。最近では、多岐に渡る人間活動要因を同時に対象とし、これらの影響の比較を行う必要性が指摘されている⁴⁾。

河川生態系の劣化は一般的に人間活動が活発な下流域平野部にて顕著に見られる。しかし、日本のように人口密度が高く山間部の土地利用が進行していると、上流域の山地河川においても人間活動の強い影響が見られる場合がある⁵⁾。河川は樹状ネットワークを構成するため、

これら小河川は全河川延長に占める割合が高く、積算すれば流域内における重要性が高い部分である¹⁾。さらに、河川は源流から河口まで連続した系であるため⁶⁾、河川の中、下流域の保全においても上流域における生態系保全は無視できない。

山間地の土地利用が進行した地域では、流域に成立する居住地や農地からの排水による水質の改変は河川生態系に影響を及ぼす要因となりうる^{7,8)}。河川流域に成立した居住地からは生活排水が、農地からは農業排水が河川に流入する。流入地点より下流の区間では栄養塩類(硝酸イオン、リン酸イオン等)の濃度が典型的に上昇する。栄養塩類の濃度上昇は、山地河川生態系における主要な一次生産者である付着藻類の生産性と、それを基底資源とする生食連鎖に影響を及ぼすことが知られている⁸⁾。

人間活動による河畔林の消失は山地を流れる小河川の生態系に影響を及ぼす人間活動として注目を集めている。河川辺縁に成立する河畔林は、落葉、倒木等の様々な物質を河川に供給するとともに、発達した樹冠により河川内の光環境を制御するなど、山地の森林域を流れる河川の生態系に支配的な影響を及ぼしている⁹⁾。しかし、河

畔林は林業活動やそれに伴う林道建設のため世界各地で伐採が進行している¹⁰⁾。さらに、山間地の土地利用が進行した地域においては、居住地や農地の造成、道路建設等の人間活動も河畔林の消失の主要な要因となっている。河畔林が消失すると、その多様な機能が失われ、河川生態系は著しく改変される。とりわけ河畔林伐採に伴う樹冠の消失は、隣接する河川に到達する光量を増加させることにより、上述の土地利用と同様に、これを利用する付着藻類と生食連鎖を改変することが知られている⁹⁾。

主に水生昆虫により構成される河川性底生動物は、餌資源とその摂食方法が異なる多様な摂食機能群により構成されており、植食者、分解者および捕食者として、また魚類など大型動物の主要な餌資源として、河川生態系で重要な位置を占めている¹¹⁾。さらに、底生動物は調査が簡便であると共に、世代時間に対応する一定期間の河川環境の状態をその群集構造が反映するため、河川生態系の健全性を表す指標として広く用いられている¹²⁾。付着藻類マットを摂食する機能群である刈取食者(Scraper)は、餌資源が豊富な瀬の礫表面にて多く確認される¹³⁾。健全性の高い山地河川では、土地利用が進行していないため栄養塩濃度が低く、河畔林が発達して光強度が低い場合、付着藻類による一次生産が抑制され、一般的に刈取食者の生息密度は高くない⁹⁾。しかし、人為的要因により栄養塩濃度や光量が増加した場合、一次生産量の増加を介して刈取食者量に変化が生じる⁸⁾。土地利用と河畔林伐採により増加する栄養塩濃度と光量を同時に対象とし、付着藻類に及ぼす影響を検証した研究は数多い¹⁾。しかし、これらの要因により刈取食者に及ぼす影響を同時に明らかにした研究は見られない。

日本は急峻な地形と湿潤な気候により、本来は河畔林に覆われた清冽な山地河川が広く分布していた¹³⁾。しかし、高い人口密度に起因する山間部の土地利用により、河畔林の消失や水質の劣化が見られる場合も多い^{5,18)}。そこで本研究は、愛媛県の山地河川にて、土地利用による栄養塩濃度の増加と河畔林の消失に伴う光量の増加に注目し、複数の人間活動が河川性底生動物の刈取食者に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。より具体的には、土地利用密度が異なる2河川の河畔林現存区および消失区にて調査を実施し、栄養塩濃度、光量の指標である開空度、付着藻類量と、刈取食者の生息密度、生物体量および分類群数を比較するとともに、これら変数間の関係を検討した。

2. 方法

(1) 調査地概況

調査は2007年8月28日および29日に愛媛県松山市を流

図-1 調査地図

れる重信川水系石手川の支流である岩屋小屋川および九川川で行った(図-1)。石手川上流域は地質的に花崗閃緑岩で広く構成されている¹⁴⁾。岩屋小屋川の集水域は主に森林で構成されており、居住地や農地は存在しないものの、林業活動および道路建設により河畔林が人為的に伐採され消失した区域が存在する。一方、九川川の集水域も主に森林で構成されているが、河川沿いの平坦地には居住地や農地が見られ、生活排水および農業排水が河川に流入している。この河川区間では土地利用および道路建設に伴い部分的に河畔林が消失している。

本研究では、両河川の河畔林現存区および消失区に4箇所ずつの計16調査地(河川長:12-24 m)を設置した(図-1)。調査地設定に際して、河川上空が河畔林の樹冠によって全体的に覆われている区間を現存区、覆われていない区間を消失区とした。岩屋小屋川および九川川の各調査地に対応する集水域における土地利用の面積割合は、それぞれ0%および17.8-35.6%であった。両河川ともに河床は主に花崗閃緑岩に由来する長径50-300 mm程度の礫で構成されていた。部分的に50 mm以下の礫や砂も見られたものの、各調査地における河床材料構成に顕著な差は見られなかった。調査期間中に計測した各調査地の物理化学的環境にも大きな変異が見られなかった(表-1)。調査実施前の約1ヶ月間および調査中に目立

表-1 調査期間中に測定した各処理区の物理化学的環境 (平均値±標準誤差)

河川	河畔林	流量 (m ³ /s)	流路幅 (m)	平均流速 (cm/s)	水深 (cm)	水温 (°C)	溶存酸素濃度 (mg/l)	pH
岩屋小屋川	有	0.12 ± 0.01	2.30 ± 0.07	50.6 ± 5.1	17.7 ± 0.8	19.6 ± 0.5	9.93 ± 0.14	7.3 ± 0.0
(土地利用: 無)	無	0.15 ± 0.03	3.47 ± 0.32	53.4 ± 4.6	17.1 ± 0.7	19.1 ± 0.3	10.14 ± 0.19	7.3 ± 0.0
九川川	有	0.17 ± 0.02	3.45 ± 0.51	35.7 ± 4.1	15.1 ± 1.1	20.0 ± 0.3	10.65 ± 0.44	7.3 ± 0.0
(土地利用: 有)	無	0.15 ± 0.03	2.48 ± 0.12	60.0 ± 4.8	20.7 ± 1.4	20.3 ± 0.2	10.26 ± 0.10	7.3 ± 0.0

った降水は見られず、流量は長期にわたって安定していた。

調査対象河川で行われた既往研究によると、両河川には全体的に群集構造の類似した魚類群集および底生動物群集が見られる⁹⁾。また、石手川上流域の付着藻類相においては珪藻が優占している¹⁵⁾。

(2) 野外調査

各調査地においてサーバーネットサンプラー (コドラート 25 cm×25 cm, ネット長 1 m, 目合い 0.5 mm, 三浦理化産業) を用いて瀬の流心部で4サンプルずつ底生動物を採取した¹⁶⁾。採取したサンプルは分析を行うまで5%ホルマリン溶液で保存した (計64サンプル)。

各底生動物サンプルに含まれる礫を無作為に1つ選び、直径24 mmの円孔を開けたゴム板を押し当て、円孔内の付着藻類を特殊アクリル繊維 (マイクロクロス, 興洋) で擦り取った¹⁷⁾。これを付着藻類量の推定のためのサンプルとし、分析を行うまで冷暗所で保管した。

底生動物サンプルを採取した各地点における光環境を評価するために、魚眼レンズ (フィッシュアイコンバータ, Nikon) を装着したデジタルカメラ (CoolPix4500, Nikon) を河川水面直上に設置し、全天空写真を撮影した (図-2)。各調査地の流心部表層にて水質分析用の河川水サンプルを採取した。

(3) 室内作業

底生動物は実体顕微鏡下で可能な限り下位の分類群まで同定を行い、計数した。底生動物はMenitt and Cummins¹¹⁾および当該地域における既往研究^{8),14),18)}に従って各摂食機能群 (刈取食者, 破碎食者, 濾過食者, 収集食者および捕食者) に分類した。同定, 計数後の底生動物の1個体ごとの絶乾重量を秤量し, これを生物体量 (mg) とした。ただし, 個体数が30個体を越える32分類群については, 湿重量を説明変数, 絶乾重量を応答変数とする回帰式を作成し, 以後, 湿重量のみを秤量して絶乾重量を算出した¹⁴⁾。回帰式作成には30-52個体を使用した。回帰式 (原点を通過する一次式) の傾きは0.032-0.601の範囲で, 決定係数 (R^2) の平均値は0.80であった。

KC1-3地点, 開空度13.5%

IO3-3地点, 開空度31.1%

図-2 全天空写真の例

付着藻類の現存量の指標としてクロロフィルa量 (Chl. a mg/m²) を測定した。付着藻類を採取した特殊アクリル繊維を99.5%エタノール20 mlに浸し (4°C, 24時間), 色素を抽出した。抽出液の吸光度を分光光度計 (U 1800 形レシオビーム分光光度計, HITACHI) を用いて計測し, クロロフィルa量をSCOR/UNESCOの方法に準じて算出した¹⁹⁾²⁰⁾。光環境を評価するために, 全天空写真をCanopOn 2²¹⁾を用いて解析し, 開空度を算出した (図-2)。この開空度は, 水深の小さな河川における河床上の光環境を表すために用いられる指標である¹⁴⁾。持ち帰った河川水サンプルをオートアナライザー (Auto Analyzer 3, BRAN-LUEBEE) により分析し, 硝酸態窒素濃度 (NO₃-N mg/l) およびリン酸態リン濃度 (PO₄-P μg/l) を求めた。

(4) データ処理および統計解析

まず、刈取食者その他の摂食機能群との関係を検討するため、各調査地におけるそれぞれの個体数の間で相関係数(ケンドールの τ)を算出した。本研究は、主に土地利用および河畔林伐採が栄養塩濃度、光量および付着藻類量の改変を介して河川性底生動物に及ぼす影響に注目したため、以降の解析では藻類マットを摂食する機能群である刈取食者のみを対象とした。この際、ある分類群の底生動物が典型的な刈取食者とは見なせない場合でも、既存の文献で刈取食者である可能性が示されている場合には刈取食者として解析に加えた。また、サワガニ(*Geothelphusa dehaani* White)も藻類マットを摂食することがあるものの、生物体量が他の底生動物と比較して非常に大きく個体数が少なかったため、以降の全解析から除外した。

刈取食者に属する底生動物の量を表すために、各サンプルについて、総生息密度(N/m^2)および総生物体量(mg/m^2)をサンプル採取面積($0.0625\ m^2$)に基づいて算出した。また、各調査地で出現した総分類群数を算出した。

土地利用状況が異なる河川の違いおよび河畔林の有無が、生息場所環境および刈取食者に及ぼす影響を明らかにするために、河川の違いおよび河畔林の有無を固定要因、栄養塩濃度、開空度、付着藻類量および刈取食者に関する変数を従属変数とする二元配置分散分析を行った。また、表-1に示した物理化学的環境変数についても、同様に二元配置分散分析による解析を行った。なお、各解析の検出力を等しくするために、調査地あたり1試料から得た栄養塩濃度についてはその値を、それ以外の反復がある変数については平均値を解析に用いた($N=16$)。

付着藻類量を決定する要因を明らかにするために、各栄養塩濃度および開空度を説明変数、付着藻類量を応答変数とする単回帰分析を行った。同様に、刈取食者の量および多様性を決定する要因を明らかにするために、各栄養塩濃度、開空度および付着藻類量を説明変数、刈取食者の生息密度、生物体量および分類群数を応答変数とする単回帰分析を行った。これらの単回帰分析で有意な結果が得られた場合、河川および河畔林の有無について別個に同様の単回帰分析を行った。また、表-1に示した物理化学的環境変数について、二元配置分散分析にて有意な固定要因の効果が見られた変数については、刈取食者に関する変数との関係を単回帰分析により検討した。分散分析と同様に、これらの単回帰解析についても各調査地における平均値を解析に用いた($N=16$)。

変量の正規性および分散の一意性の仮定により整合させるため、必要に応じて解析前に対数変換を行った。同様に、全ての割合データについては逆正弦変換を行った。全ての解析は統計解析ソフトSPSS 11.5J (SPSS Japan

Inc.)を用いて行った。

3. 結果

(1) 栄養塩濃度および開空度

河川水中の栄養塩濃度には河川間で差が見られた(図-3)。二元配置分散分析の結果、硝酸態窒素濃度は河川間で有意な差が見られ($F_{1,12}=324.26$, $P<0.001$)、岩屋小屋川(平均: $0.56\ mg/l$)よりも土地利用の見られる九川川($1.22\ mg/l$)のほうが2倍以上高かった。河畔林の有無については有意な差が見られず($F_{1,12}=0.76$, $P=0.400$)、交互作用も有意ではなかった($F_{1,12}=1.08$, $P=0.320$)。リン酸態リン濃度についても河川間で有意な差が見られ($F_{1,12}=72.60$, $P<0.001$)、岩屋小屋川($1.6\ \mu g/l$)よりも九川川($10.0\ \mu g/l$)のほうが6倍以上高かった。また、河畔林の有無については有意な差が見られず($F_{1,12}=0.60$, $P=0.454$)、交互作用も有意ではなかった($F_{1,12}=0.07$, $P=0.801$)。

開空度には河畔林の有無について差が見られた(図-4)。二元配置分散分析の結果、開空度は河川の違いについては有意な差は見られなかったが($F_{1,12}=3.96$, $P=0.070$)、河畔林の有無については有意な差が見られ($F_{1,12}=19.26$, $P=0.001$)、現存区(平均: 13.6%)よりも消失区(24.9%)で2倍近く高かった。また、これら要

図-3 硝酸態窒素濃度およびリン酸態リン濃度の比較
(平均値±標準誤差)

図-4 開空度の比較
(平均値±標準誤差)

図-5 付着藻類量の比較
(平均値±標準誤差)

図-6 栄養塩濃度および開空度と付着藻類量との関係
(単回帰分析による決定係数 (R^2) および P 値を示す)

図-7 刈取食者の生息密度、生物体量および分類群数の比較 (平均値±標準誤差)

因間の交互作用は有意ではなかった ($F_{1,12} = 0.14$, $P = 0.715$) .

栄養塩濃度および開空度と同様に、表-1に示した物理化学的環境変数について二元配置分散分析で解析した結果、平均流速と水温を除く変数については、河川間または河畔林の有無について有意な差は見られなかった (全てについて $F_{1,12} < 3.74$, $P > 0.077$) . 平均流速は河畔林の有無について有意な差が見られ ($F_{1,12} = 5.63$, $P = 0.035$) , 現存区よりも消失区で大きな値を示した (表-1) . 水温は河川間で有意な差が見られ ($F_{1,12} = 5.21$, $P = 0.041$) , 石手川流域のより上流部に位置する岩屋小屋川の方が水温が低かった (表-1) .

(2) 付着藻類量

付着藻類量については、河川の違いおよび河畔林の有無による差は見られず (図-5, 河川: $F_{1,12} = 0.20$, $P = 0.666$, 河畔林: $F_{1,12} = 0.24$, $P = 0.633$) , これら要因間の交互作用も有意ではなかった ($F_{1,12} = 0.01$, $P = 0.936$) . また、単回帰分析の結果、栄養塩濃度および開空度と付

着藻類量との間には有意な関係は見られなかった (図-6, 全てについて $R^2 < 0.081$, $P > 0.285$) .

(3) 刈取食者相

全サンプルを合計して5,544個体, 6,835 mg, 97分類群の底生動物が採取された. これらのうち、サワガニ (計30個体, 4,478 mg) を除く刈取食者は、3,456個体 (62%) , 1,162 mg (17%) , 35分類群 (36%) を占めていた. 刈取食者と、収集食者 ($\tau = 0.733$, $P < 0.001$) および捕食者 ($\tau = 0.467$, $P = 0.012$) の個体数との間に有意な正の相関が見られた. 破碎食者および濾過食者については有意な相関は見られなかった (破碎食者: $\tau = 0.126$, $P = 0.499$, 濾過食者: $\tau = 0.200$, $P = 0.280$) .

刈取食者のうち最も個体数の多かった分類群は、シロハラコカゲロウ (*Baetis thermicus* Uéno, 相対個体数32.7%) で、以下、エリユスリカ亜科 (*Orthocladinae*, 9.3%) , エルモンヒラタカゲロウ (*Epeorus latifolium* Uéno, 7.6%) , クダトビケラ属 (*Psychomyia* spp., 6.4%) , キブネタニガワカゲロウ (*Ecdyonurus kibunensis* Imanishi,

5.7%)、フタバコカゲロウ (*Baetiella japonica* Imanishi, 5.1%) の順であった。相対個体数が5%を超えるこれら6分類群で全体の66.8%を占めていた。河川の違いおよび河畔林の有無による各処理区でもこれら分類群が優占しており (52.2-75.1%)、刈取食者の群集構造に大きな変異は見られなかった。

生物体量が多かった分類群は、エルモンヒラタカゲロウ (相対生物体量, 20.0%) で、以下、シロハラコカゲロウ (16.5%)、ヨシノマダラカゲロウ (*Drunella ishiyamana* Matsumura, 13.9%)、ユミモンヒラタカゲロウ (*Epeorus nipponicus* Uéno, 5.9%) の順であった。生物体量が5%を超えるこれら4分類群で全体の56.2%を占めていた。大型個体の出現による影響は見られたものの、各処理区でもこれら分類群が優占しており (43.8-62.8%)、生物体量構成に大きな変異は見られなかった。

(4) 刈取食者群集

刈取食者の量および多様性は河畔林が消失した調査地で大きな値を示した (図-7)。二元配置分散分析の結果、刈取食者の生息密度、生物体量および分類群数はいずれも河畔林の有無について有意な差が見られた (生息密度: $F_{1,12} = 19.46$, $P = 0.001$, 生物体量: $F_{1,12} = 40.79$, $P < 0.001$, 分類群数: $F_{1,12} = 33.64$, $P < 0.001$)。いずれの変数も河畔林消失区で大きく、生息密度は約2.3倍、生物体量は約2.6倍、分類群数は約1.5倍の値を示した。一方、いずれの変数も河川の違いについて有意な差は見られなかった (生息密度: $F_{1,12} = 3.80$, $P = 0.075$, 生物体量: $F_{1,12} = 0.08$, $P = 0.783$, 分類群数: $F_{1,12} = 0.78$, $P = 0.396$)。両要因間の交互作用も全ての変数について有意ではなかった (生息密度: $F_{1,12} = 0.02$, $P = 0.898$, 生物体量: $F_{1,12} = 1.26$, $P = 0.284$, 分類群数: $F_{1,12} = 3.93$, $P = 0.071$)。

開空度と刈取食者変数との間には密接な関係が見られた (図-8)。単回帰分析の結果、開空度が高い場所で、生息密度、生物体量および分類群数の値は大きい傾向が見られた。河川別の単回帰分析の結果、岩屋小屋川では生息密度 ($R^2 = 0.552$, $P = 0.035$) および生物体量 ($R^2 = 0.559$, $P = 0.024$) について、九川川では生息密度 ($R^2 = 0.560$, $P = 0.033$)、生物体量 ($R^2 = 0.708$, $P = 0.009$) および分類群数 ($R^2 = 0.744$, $P = 0.006$) について開空度との間に有意な正の関係が見られた。河畔林の有無別の単回帰分析の結果、河畔林消失区での生息密度についてのみ開空度との間に有意な正の関係が見られた ($R^2 = 0.520$, $P = 0.044$)。

一方、硝酸態窒素濃度、リン酸態リン濃度および付着藻類量と刈取食者に関する各変数との間には有意な関係が見られなかった (図-8)。また、二元配置分散分析にて河畔林の有無について有意な差が見られた平均流速との間にも有意な関係は見られなかった (生息密度: $R^2 =$

図-8 栄養塩濃度、開空度および付着藻類量と刈取食者の生息密度、生物体量および分類群数との関係 (単回帰分析による決定係数 (R^2), P 値および回帰直線 ($P < 0.05$ の場合) を示す)

0.003, $P = 0.840$, 生物体量: $R^2 = 0.031$, $P = 0.516$, 分類群数: $R^2 = 0.044$, $P = 0.438$)。河川間で有意な差が見られた水温についても、刈取食者に関する変数との間に有意な関係は見られなかった (生息密度: $R^2 = 0.009$, $P = 0.728$, 生物体量: $R^2 < 0.001$, $P = 0.962$, 分類群数: $R^2 = 0.023$, $P = 0.575$)。

4. 考察

(1) 栄養塩量および開空度の反応

河川水中の硝酸態窒素濃度およびリン酸態リン濃度は、集水域の土地利用が見られない岩屋小屋川より土地利用が進行している九川川で高かった。これは、既往研究で見られるように^{7,8)}、集水域の居住地や農耕地からの排水の流入により、河川水中の栄養塩濃度の上昇が見られたためと考えられる。栄養塩濃度の低さから両河川とも貧栄養河川の分類に入るが、既往研究より、両河川で見られた変異は付着藻類の生産性や現存量に差異を生じさせるに十分であることが明らかになっている⁷⁾。

河畔林伐採は河川の光環境に強い影響を及ぼしていることが示された。開空度は河畔林現存区より消失区で高かった。これも多くの既往研究で示されているように、河畔林の消失により日射を遮断する機能が失われ、河床に到達する光量が多くなったことによるものと考えられた^{5,10,14)}。なお、本研究では河畔林消失区でも開空度が平均で25%程度でしかなかった。これは、調査対象河川がいずれも急峻な山地に位置し、河畔林が消失している

場合でも河岸や周囲の山稜により被陰されていたためと考えられる。

(2) 付着藻類量の反応

土地利用状況および河畔林伐採が付着藻類の現存量に及ぼす影響は明らかにならなかった。前述の通り、集水域の土地利用に伴う河川水の栄養塩濃度の上昇および河畔林伐採に伴う開空度の上昇は、いずれも付着藻類の増加を引き起こしうる。しかし本研究では、二元配置分散分析および回帰分析のいずれの結果からもそのような増加は見られなかった。Hillebrandは、栄養塩濃度²²⁾の上昇または光量の増加²³⁾による藻類量へのボトムアップ効果が、消費者(刈取食者)の摂食によるトップダウン効果により相殺され、付着藻類量に変化の生じない場合が多いことを示している。本研究でも栄養塩濃度または開空度の上昇により付着藻類の生産量が増加した可能性はあるものの、刈取食者の摂食により付着藻類の現存量の増加が抑制されていたものと推測された。

(3) 刈取食者の反応

河畔林伐採が刈取食者の量および多様性を変化させることが示された。刈取食者の生息密度および現存量は、二元配置分散分析では河畔林現存区よりも消失区で多く、回帰分析では開空度の高い河川区間で増加する傾向があった。また、栄養塩濃度が異なる河川について別個に解析した場合でも、多くのケースで開空度と各刈取食者変数との間に正の関係が見られた。これらの結果は、河床に到達する光量の増加が、付着藻類の一次生産量の増加を介して付着藻類を餌資源として利用する刈取食者の量を増加させることを示した既往研究の結果と合致する⁹⁾。また、上述の通り光量増加により付着藻類の一次生産量は増加したと予想されるが、付着藻類の現存量は増加した刈取食者の摂食により抑制された可能性が高い^{22,23)}。実際に、調査対象河川である岩屋小屋川を対象河川とした既往調査により、河畔林が伐採されると藻類の生産量は増加するが、刈取食者の摂食により藻類の現存量の増加は抑制されることが明らかになっている¹⁴⁾。刈取食者の分類群数も生息密度および生物体量と同様に河畔林消失区で多かった。これは、消失区は現存区と比較して生息密度が高く、多くの分類群が含まれる確率が高まったためだと考えられる²⁴⁾。

河畔林の消失にともなう陸生無脊椎動物の落下量の減少が、魚類の底生動物採餌頻度を高め、採餌圧の上昇により底生動物量の減少と付着藻類量の増加を引き起こす例が報告されている²⁵⁾。しかし、本研究では河畔林消失区で底生動物量が増加していたため、このようなトップダウン効果の影響は小さかったものと推測される。他方、刈取食者量が他の摂食機能群に属する底生動物との生物

間相互作用により制限される可能性も考えられる。ただし、本研究では個体数間に負の相関が見られることはなかったため、他の機能群(例えば、濾過食者や収集食者)に属する低次消費者との空間を巡る競争や、底生動物の捕食者による捕食圧が、刈取食者全体の生息密度を低下させていないものと考えられた。以上より、本研究においては生物間相互作用が刈取食者に及ぼす影響は全体的に小さいと推測されるが、河畔林消失に伴う刈取食者の増加の影響が他の河川動物に波及する可能性はある。今後は、より広範な分類群を対象にして、河畔林伐採の影響を生態系レベルで解明するような研究が必要と考えられる。

本研究では、河畔林伐採による光量増加の影響が明らかになった一方で、集水域の土地利用に伴う栄養塩濃度増加が刈取食者に及ぼす影響は見られなかった。付着藻類を対象として光量および栄養塩濃度の影響を検討した既往研究では、光量の影響が見られた研究と^{26,27)}、栄養塩濃度の影響を検出した研究の双方が見られる^{28,29)}。前者は山地の小河川における結果であることから、一般的に河畔林による被陰が著しい山地小河川では光量が付着藻類生産の主要な制限要因であると考えられる²⁷⁾。従って、本研究の対象河川で刈取食者に対する河畔林消失の影響のみが見られた原因は、全体的に河川に到達する光量が少なく、付着藻類生産が光量により強く制限されていたためと推測される。このため、前述の通り両河川間には付着藻類量に変異を生じさせるに十分な栄養塩濃度の差があったものの⁷⁾、その影響が顕在化しなかったものと考えられる。なお、本研究では両河川間において刈取食者の群集構造に顕著な違いが見られなかったため、九川川における水質汚濁は汚濁耐性の低い分類群の減少や高耐性分類群の増加をまねくようなレベルには達していなかったと解釈できる。なお、河畔林の有無について有意な差が見られた平均流速と河川間で有意な差が見られた水温についても、刈取食者への影響は明らかではなかった。これら環境要因についても、調査地間の変異による影響が開空度の影響と比して小さかったため、刈取食者への影響が顕在化しなかったものと推測される。

5. おわりに

本研究により、河畔林伐採による開空度の上昇が、付着藻類生産の増加を介して刈取食者の量および分類群数を増加させることが示された。すなわち、河畔林伐採は山地河川において刈取食者の人為的な増加をもたらし、本来とは異なる状態に変化させることにより河川生態系の劣化を引き起こしているものと考えられた。高橋ら³⁰⁾は、国外研究のレビューより、水生動物の生息場所環境

の保護には幅30 m程度の緩衝林帯の設置が推奨される場合が多いことを報告している。国内河川においても、これらの情報に基づき、河畔林の効果に関する研究成果を様々な河川から蓄積し、具体的な河畔林の管理法を開発することが望まれる。一方、人間の土地利用による栄養塩濃度の上昇が付着藻類を介して刈取食者に及ぼす影響は明らかではなかった。本研究で対象としたような小河川では河川内に到達する光量が全体的に少なく、栄養塩濃度よりも光量が付着藻類の生産量を強く制限し、刈取食者の量および多様性を制御していたためと推測された。今後は、本研究では計測しなかった付着藻類の一次生産量やその変動に対する刈取食者の反応など、詳細なプロセスを解明する必要があるだろう。

土地利用および河畔林伐採はいずれも陸上における現象であるが、前者は流域レベルの、後者は河川区間レベルの空間的スケールで見られる人間活動である。Feld and Hering³⁾は多数の低地河川において複数の空間的スケールで見られる人間活動が河川性底生動物に及ぼす影響を比較し、氾濫原の土地利用、河岸の安定性および河川内の倒流木量のような河川区間スケールで変化する要因の影響が強いことを示した。本研究の結果は、山地河川において河川区間スケールの人間活動が底生動物に強い影響を及ぼすことを示しており、同スケールに注目して河川管理を行う重要性を支持するものである。

ただし、本研究は土地利用および河畔林の有無に注目したため、これら要因の影響を、付着藻類や底生動物に影響を及ぼすことが知られている他の要因（水温、流速、流量など）が類似した河川区間にて比較している。今後は、多様な要因の影響を加味して、栄養塩量や光量による影響と比較し、要因間の交互作用を明らかにすることにより、人間活動による河川生態系の劣化についてより現実的な知見を得ることが可能になるだろう。

近年、人間活動が活発化、多様化し、これらが河川生態系を劣化させることが危惧されており、複数の人間活動の影響を対象とした研究を行う重要性が指摘されている^{4,32)}。しかし、潜在的に河川生物に影響を及ぼしうる複数の人間活動要因のうち、どの要因が、どの様なプロセスを経て、どの様な条件で影響力を持つかについては、近年になって研究が始まったばかりである⁴⁾。本研究では、土地利用－水質、河畔林伐採－光環境、水質－付着藻類、光環境－付着藻類および付着藻類－底生動物の、2種類の人間活動要因に関わる5種類の関係に注目した。個々の関係については、既往研究により、影響の有無や、その正負、強弱が様々に報告されている¹⁾。よって、これら関係の全てが潜在的に含まれる系において、顕在化する影響を予測することは難しい。付着藻類－底生動物のような生物間相互作用を含む場合は特に困難になる^{22,23)}。本研究では、山地河川において典型的に見られ

る2種類の人間活動要因を対象とし、それらの強弱が異なる地点間で比較することにより、刈取食者に影響を及ぼす要因を明らかにし、影響が及ぶプロセスおよびその影響が顕在化する条件を考察した。このようなアプローチは、多様化する人間活動が河川生態系に及ぼす影響を理解する上で有効であると考えられる。今後は様々な河川生態系または河川生物について、重要性が指摘される複数の人間活動要因に注目した比較研究を行うことにより、河川生態系保全に有用な知見を蓄積することが可能になるものと思われる。

謝辞：本研究を通して貴重なご助言を頂いた愛媛大学大学院理工学研究科の井上幹生准教授と、水質測定で協力して頂いた愛媛大学沿岸環境科学研究センターの大西秀次郎氏に深く感謝する。野外調査を手伝って下さった愛媛大学大学院理工学研究科保全生態学研究室の土肥唱吾氏、峰松勇二氏ならびに愛媛大学工学部環境建設工学科の中島健吾氏、中野裕氏、野村直道氏に心からお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Allan, J. D. and Castillo, M. M. : *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*, Springer, 2007.
- 2) 中村圭吾, 天野邦彦, Tockner, K. : ヨーロッパを中心とした先進国における河川復元の現状と日本の課題, 応用生態工学, Vol. 8, pp. 201-214, 2006.
- 3) Naiman, R. J. and Bilby, R. E. : *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Springer, 1998.
- 4) Ormerod, S. J., Dobson, M., Hildrew, A. G. and Townsend, C. R. : Multiple stressors in freshwater ecosystems, *Freshwater Biology*, Vol. 55, Suppl. 1, pp. 1-4, 2010.
- 5) 森 照貴, 三宅 洋, 柴田叡式 : 河畔林の伐採が河川性底生動物の群集構造に及ぼす影響, 日本生態学会誌, Vol. 55, pp. 377-386, 2005.
- 6) Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R. and Cushing, C. E. : The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 37, pp. 130-137, 1980.
- 7) Bowman, M. F., Chambers, P. A. and Schindler, D. W. : Epilithic algal abundance in relation to anthropogenic changes in phosphorus bioavailability and limitation in mountain rivers, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 62, pp. 174-184, 2005.
- 8) 潮見礼也, 三宅 洋, 上田竜士, 井上幹生 : 森林河川から農地河川への傾度に沿った河川性動物の群集構造および魚類食性の変化, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 68, pp. I-697-I-702, 2012.
- 9) 三宅 洋 : 森林の科学, pp. 108-109, 朝倉書店, 2005.
- 10) Kiffney, P. M., Richardson, J. S. and Bull, J. P. : Responses of periphyton and insects to experimental manipulation of riparian buffer width along forest streams, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 40, pp. 1060-1076, 2003.
- 11) Merritt, R. W. and Cummins K. W. : *An Introduction to*

- the Aquatic Insects of North America*, 3rd edition, Kendall/Hunt Publishing Company, 1996.
- 12) Morse, J. C., Bae, Y. J., Munkhjargal, G., Sangpradub, N., Tanida, K., Vshivkova, T. S., Wang, B., Yang, L. and Yule, C. M. : Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in East Asia, *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 5, pp. 33-42, 2007.
 - 13) Inoue, M., Shinotou, S., Maruo, Y. and Miyake, Y. : Input, retention, and invertebrate colonization of allochthonous litter in streams bordered by deciduous broadleaved forest, a conifer plantation, and a clear-cut site in southwestern Japan, *Limnology*, Vol. 13, pp. 207-219, 2012.
 - 14) 杉原達也, 三宅 洋 : 光環境勾配に対する河川性刈取食者群集の反応, *応用生態工学*, Vol. 13, pp. 113-122, 2011.
 - 15) Ohtsuka, T., Nakamura, Y., Nakano, S. and Miyake, Y. : Diatoms in Ishite Stream, near the Komenono Forest Research Center of Ehime University, Japan, *Diatom*, Vol. 23, pp. 29-48, 2007.
 - 16) Miyake, Y. and Nakano, S. : Effects of substratum stability on diversity of stream invertebrates during baseflow at two spatial scales, *Freshwater Biology*, Vol. 47, pp. 219-230, 2002.
 - 17) 谷田一三, 三橋弘宗, 藤谷俊二 : 特殊アクリル繊維による付着藻類定量法, *陸水学会誌*, Vol. 60, pp. 619-624, 1999.
 - 18) 金澤康史, 三宅 洋 : コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較, *応用生態工学*, Vol. 9, pp. 141-150, 2006.
 - 19) SCOR/UNESCO : *Monograph on Oceanographic Methodology*, pp. 69, UNESCO, 1966.
 - 20) Miyake, Y., Hiura, T. and Nakano, S. : Effects of frequent streambed disturbance on the diversity of stream invertebrates, *Archiv für Hydrobiologie*, Vol. 162, pp. 465-480, 2005.
 - 21) 竹中明夫 : TAKENAKA's Web Page: CanopOn 2, <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/index.html>, 2009.
 - 22) Hillbrand, H. : Top-down versus bottom-up control of autotrophic biomass—a meta-analysis on experiments with periphyton, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 21, pp. 349-369, 2002.
 - 23) Hillbrand, H. : Light regime and consumer control of autotrophic biomass, *Journal of Ecology*, Vol. 93, pp. 758-769, 2005.
 - 24) McCabe, D. J. and Gotelli, N. J. : Effects of disturbance frequency, intensity, and area on assemblages of stream macroinvertebrates, *Oecologia*, Vol. 124, pp. 270-279, 2000.
 - 25) Nakano, S., Miyasaka, H. and Kuhara, N. : Terrestrial-aquatic linkages: riparian arthropod inputs alter trophic cascades in a stream food web, *Ecology*, Vol. 80, pp. 2435-2441, 1999.
 - 26) Larned, S. T. and Santos, S. R. : Light- and nutrient-limited periphyton in low order streams of Oahu, Hawaii, *Hydrobiologia*, Vol. 432, pp. 101-111, 2000.
 - 27) Greenwood, J. L. and Rosemond, A. D. : Periphyton response to long-term nutrient enrichment in a shaded headwater stream, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 62, pp. 2033-2045, 2005.
 - 28) Stockner, J. G. and Shortreed, K. R. S. : Enhancement of autotrophic production by nutrient addition in a coastal rainforest stream on Vancouver Island, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, Vol. 35, pp. 28-34, 1978.
 - 29) Mosisch, T. D., Bunn, S. E., Davies, P. M. and Marshall, C. J. : Effects of shade and nutrient manipulation on periphyton growth in a subtropical stream, *Aquatic Botany*, Vol. 64, pp. 167-177, 1999.
 - 30) 高橋和也, 林 靖子, 中村太士, 辻 珠希, 今泉浩史 : 生態学的機能維持のための水辺緩衝林帯の幅に関する考察, *応用生態工学*, Vol. 5, pp. 139-167, 2003.
 - 31) Feld, C. K. and Hering, D. : Community structure or function: effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales, *Freshwater Biology*, Vol. 52, pp. 1380-1399, 2007.
 - 32) Malmqvist, B. and Rundle, S. : Threats to the running water ecosystems of the world, *Environmental Conservation*, Vol. 29, pp. 134-153, 2002.

(2012. 10. 23 受付)

IMPACTS OF CATCHMENT LAND USE AND RIPARIAN FOREST LOGGING ON INVERTEBRATE SCRAPERS IN MOUNTAIN STREAMS

Yo MIYAKE, Keiji OGIWARA and Koji KANAZAWA

A variety of human activities were reported to affect stream ecosystems as multiple stressors. However, few studies have simultaneously evaluated the impacts of anthropogenic factors on stream invertebrates in mountain streams. This study aimed to elucidate the impacts of catchment land use and riparian forest logging on invertebrate scrapers, via altering nutrient concentrations and light condition, in Japanese mountain streams. Field survey was conducted in stream reaches with and without riparian forests in two mountain streams in Ehime Prefecture, of which catchments have different intensities of human land use.

Inflow of domestic and agricultural wastewater was found to increase nutrient concentrations ($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$) in the stream with human land use. Canopy opening was higher in stream reaches without riparian forest than with, owing to the loss of the shading by forest logging. Total density, biomass and taxon richness of scrapers were higher in the stream reaches without riparian forest than with. Decreased canopy shading and associating high productivity of periphyton was suggested to cause these increase. In contrast, the effect of catchment land use via nutrient concentration did not prevail in this study. These results supported the hypothesis that the light condition is a primary limiting factor of in-stream primary productivity in heavily shaded mountain streams. There were not significant difference in periphyton biomass between streams and present/absent of riparian forests, probably caused by strong grazing pressure by abundant scrapers in the stream reaches without riparian forest. We suggest that our multi-factor approach can contribute to gain insight into the impacts of various human activities on stream ecosystems.