

生物による付着藻類摂食は河床環境の健全性に寄与するか？

皆川朋子* 萱場祐一**

1. はじめに

河川流量の減少や流況の平滑化は、しばしば有機物やシルトの堆積、糸状緑藻の著しい繁茂を引き起こし、生物の餌資源としての河床付着膜の質の低下、景観の悪化や親水性の低下をもたらす。

現在、これらの状況を改善するため、維持流量の増加やダムからのフラッシュ放流を行い、河床付着膜を剥離する、堆積物を掃流するといった試みが行われている。しかし、河床の健全性が損なわれる要因は、流量の減少、平滑化だけでなく、これら流況の変化を介して生じる水生生物の生息場所の劣化と付着藻類を摂食するアユなどの生物の生息密度の低下も一因と考えられる。

以上を背景に、本報では、河床環境の健全性を保全・修復するための基礎的知見の提供を目的として、(1)河床環境の健全性の低下、(2)河床環境の修復手法、(3)アユ、オイカワの摂食実験結果、(4)数理モデルによる河床環境改善効果シミュレーション結果について概説する。

2. 河床環境の健全性の低下とは何か？

河床環境とは、河床の状態や瀬・淵構造を含む概念と捉えることができる。本報で扱う河床付着膜（付着膜）とは、河床の状態を示す重要な要素であり、礫表面に発達した付着藻類群集を主体とし、堆積した懸濁物質、生息するバクテリア等から構成される付着生物膜とする。

付着藻類が過度に発達し現存量が大きくなる（付着膜が厚くなる）、付着膜上にシルト等の無機物が沈積する（写真-1、左）、大型糸状緑藻が繁茂する（写真-1、右）といった現象は、河床環境の健全性の低下の典型例である。これらによって生じる影響を以下に示す。

付着藻類が発達し、膜が厚くなると、光が膜内部まで透過しにくくなるため、下層の細胞の活性は低下し、枯死・分解し剥離しやすくなり、流下した付着膜は、下流への有機汚濁負荷となる。シ



写真-1 付着物量の増加やシルト等の堆積（左）
大型糸状緑藻の繁茂（右）

ルトの沈積についても、付着物内部への光の透過を遮断し、付着藻類の成長を阻害する要因となる。

河床に生息する底生動物にとっては、付着膜の変化は、棲み場の直接的な改変となり、種組成が変化する。例えば、付着物量の増加により、滑行型（扁平な体型で石表面を滑るように移動するヒラタカゲロウ科などの底生動物群）は減少し、シルトの堆積によって、シルトや細砂で筒巣をつくるヒゲユスリカ属は増加することが知られている。また、シルトを多く含む付着膜は、アユの餌として良質ではないと考えられている。

大型糸状緑藻については、底生動物の餌資源として好まれないこと、底生動物群集の多様性を低下させることが報告されている。大型糸状緑藻の一種であるカワシオグサ *Cladophora glomerata* については、アユにとって成長阻害となる可能性があることが懸念されている。また、大型糸状緑藻の繁茂は、底生動物群集の多様性を低下させる。

さらに、このような付着藻類の過度の発達、シルト等の沈積、大型糸状緑藻の繁茂は、景観の悪化や親水性を低下させる要因になることが認識され、既に、ニュージーランドなどでは、親水・リクリエーション利用の基準値が設けられている。

3. 河床環境修復のためのアプローチ

一般に付着藻類の現存量は付着藻類の純生産速度、付着藻類の剥離率、摂食率、移入率のバランスによって表現される（式(1)）。

$$\frac{dB_{chl.a}}{dt} = P_n - D_e - G \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $B_{chl.a}$ ：付着藻類現存量、 P_n ：付着藻類の単位時間当たり一次純生産量、 D_e ：単位時間あたりの付着藻類剥離量、 G ：単位時間当たりの

Does the grazing of freshwater fauna contribute to sustain healthy riverbed condition?

摂食量である。

栄養塩類、水温、光の増加は、純生産速度を上昇させ、付着藻類を増加させる要因となる。一方、流速、流砂の増加、アユ等の付着藻類を摂食する生物の生息密度の増加は、付着藻類の剥離、摂食を介して付着藻類の現存量を減少させる要因となる。なお、外部からの移入率の項は、現存量に与える影響が小さいと考え、式(1)では考慮しないこととした。

河床環境の健全性の維持には、付着藻類現存量を抑制することが一つの鍵となり、その抑制においては、①純生産速度の抑制、②剥離率の増大、③摂食率の増大(回復)、といった3つのアプローチが考えられる。このうち、①では、栄養塩濃度、水温、光といった要素を操作することが必要になるが、河川管理においてこれらを管理することは難しい。②の手法には、ダムからのフラッシュ放流があげられ、実施事例は増えつつある。流速の増加による付着藻類の剥離や堆積物の掃流は現象としてイメージしやすく、一定の効果が多くの事例で認められている。しかし、著者らが調査した事例では、フラッシュ放流によって付着藻類や堆積物は一旦減少するが、10日後には放流前を越える量に増加する等、効果は長期間継続しない場合がある¹⁾。

これに対し、③は、生物相を回復させ、付着藻類を摂食する生物の生息密度の回復を図るものであり、②の物理的な現象と比べ、イメージしにくい。また、付着藻類を摂食する生物の生息密度の回復には、流速、水深、底質といった当該箇所の生息環境の保全だけでなく、それらの生活史全体で見渡し、ボトルネックになっている環境の修復が必要となる。しかし、本アプローチは、河川生態系の構造や機能を修復するといった体質改善型のより本質的な河川環境の保全・修復の一端を担うものである。さらに、その場所で生産された有機物(付着藻類)がその場で消費される生態系へと変化するため、下流への有機汚濁負荷の減少に寄与することもポイントとなる。

③のアプローチの意義は上記のとおりであるが、実際に摂食生物は河床環境の改善にどの程度寄与しているのだろうか? 次章では、アユとオイカワを対象に実験河川で実施した付着藻類の摂食実験結果を示す。また、式(1)の摂食の項 G を、

PHABSIM(物理環境生息場モデル、潜在的な生息場の多寡を評価する手法)によって付着藻類の現存量がどのように変化するかを評価する。数理モデルによる評価は幾つかの仮定を設けているが、摂食による河床環境改善の有効性を確認する上で有用な知見を提供するものと考えている。

4. アユ、オイカワの摂餌が河床環境に果たす役割²⁾

4.1 方法

生物の摂食が河床環境に果たす役割を明らかにするため、日本の代表的な藻食性魚類であるアユ *Plecoglossus altivelis*、そして、付着藻類を摂食する雑食性魚類のオイカワ *Zacco platypus* を対象に実験を行った²⁾。

自然共生研究センター内の実験河川(岐阜県各務原市)をナイロン製ネットで仕切り、幅2.5m×長さ4mの実験区を設け、河床に新たに礫(径約15cmの玉石)を設置し、異なる水理量の下で状態が異なる2タイプの付着膜を成長させた。その後、実験区をそれぞれアユを放流した「アユ区」(平均体長15.7cm、放流密度1個体 m^{-2})、オイカワを放流した「オイカワ区」(平均体長7.5cm、放流密度4個体 m^{-2})、いずれも放流しない「対照区」に設定し、放流前及び放流10日後の付着膜を採取・分析し(各実験区サンプル数3)、比較した。

検討項目は、乾燥重量(有機物及び無機物を合わせた付着膜全体の重量の目安)、強熱減量(有機物量の目安)、無機物量(微細な土砂量の目安; 乾燥重量-強熱減量)、クロロフィル a 量(付着藻類現存量の目安)、付着膜を構成している要素の割合を示す強熱減量(%) (付着膜に占める有機物の割合; $=強熱減量/乾燥重量 \times 100$)、生藻類比(付着藻類の活性の程度を目安として定義したもの; $=クロロフィル a / (クロロフィル a + フェオフィチン)$)、付着藻類の出現種及び細胞数とした。

4.2 結果及び考察

放流前に形成された2タイプの付着膜の状態はそれぞれ異なり、付着膜①; 珪藻の出現割合が大きく、付着物量(乾燥重量)は小さい、付着膜②; 大型糸状緑藻のサヤマドロ *Oedogonium sp.* が出現し、これらの間隙に細粒土砂が捕捉され、付着物量は大きい付着膜であった。

*土木用語解説: PHABSIM

付着膜
①



付着膜
②



写真-2 付着膜の状態

表-1 アユ、オイカワの摂食効果

+, - は、Tukeyの多重比較検定(有意水準5%)の結果、それぞれ、「対照区」より有意に大きい、小さいことを示す。

写真-2に各実験区の付着膜の状態、表-1に、アユ、オイカワの摂食効果を、「対照区」との比較により示した。表中の+、-はそれぞれ、「対照区」より有意に大きい、小さいことを示している。アユの摂食はいずれの付着膜に対しても付着物量や無機物量(微細な土砂)を減少させ、強熱減量(%)を高めた。さらに、大型糸状緑藻の *Oedogonium* sp.の細胞数は、「対照区」及び「オイカワ区」では、それぞれ放流前の2.8、2.5倍増加したのに対し、「アユ区」ではわずか2.5%にまで減少していた。これらの結果は、アユの摂食は、河床環境の健全性を保つ上で大きな役割を果たしていることを示すものである。写真-3に、「対照区」と「アユ区」の河床を示した。景観的にも大きく異なっていることが確認できる。

一方、オイカワの摂食については、付着膜②に対しては変化はみられなかったが、付着膜①に対しては、「対照区」よりも強熱減量(%)や生藻類比が大きく、アユの摂食と同様の質的改善効果が認められた。アユが付着藻類を摂食する期間は、概ね5月から11月に限られることから、通年河川に生息しているオイカワ等の魚類の摂食が河床付着膜の性状に果たす役割の重要性が示唆された。

5. 数理モデルによる河床環境改善効果の評価

5.1 数理モデルの概要^{3) 4)}

数理モデルは式(1)の純生産速度、剥離率、摂食率を定式化し、単位幅流量を増減させた際の付



写真-3 「対照区」(左)と「アユ区」(右)の河床

着藻類の現存量、そして、剥離率、摂食率の増減パターンを確認することを目的として解析を行った。ここで、純生産速度 Pn は光量子密度、栄養塩濃度、摩擦速度等を変数とし、付着藻類を何層かに分割し、各層の光量子密度、栄養塩濃度を数値的に計算し、現存量の増減をミカエリス・メンテン型の方程式で表現した(本手法の詳細は文献3)を参照のこと)。

剥離率は以下の式(2)で与えた。従って、流量の増減に伴う剥離率の変化はこの項の中に含まれている。

$$D_e = Det(B_{chl-a} - B_o) \quad \text{式(2)}$$

ここに、 Det : 剥離率(=0.05)、 B_o : 剥離が始まる現存量で既往研究における流速と現存量との関係から、流速値が大きい場合は B_o が小さく、流速値が小さい場合は B_o が大きくなるよう設定した。

摂食率の定式化にはPHABSIMによる潜在的な生息場の評価手法を用いた。本手法は、米国において発達したIFIM(正常流量増減法)の一部を構成し、流量の増減に伴う物理環境の変化(主として流速、水深)と対象魚種が選好する物理環境との関連から対象魚種の潜在的な生息場の多寡を評価することができる。従って、対象生物の生息を支配する他の条件が満足されていればPHABSIMによる摂食率の評価は可能と考えた。具体的にはアユを対象として、摂食率を以下で定義した。

$$G = G_{max} / D \cdot (S_v \cdot S_H \cdot S_d)^{1/3} \quad \text{式(3)}$$

ここに G_{max} : アユの単位面積・日当たりの最大摂食量であり、既往の研究⁵⁾から $6.9 \text{ mg} \cdot \text{chl-a} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ を与えた。 D は日長時間、 S は流速(V)、水深(H)、底質(d)の選好曲線であり(添え字がそれぞれの選好曲線を示す)、底質 d は10cm、流速と水深は計算流量から得られた値、選好曲線は河村らが作成した選好曲線⁶⁾を与えた。

5.2 モデルの適用例^{3) 4)}

アユが生息する7月の木曾川中流域を対象として条件を設定した。光量子密度は南中時の水表面における光量子密度を $1,500\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ 、日長時間を14時間とし、以下の式(4)より河床に到達する光量子密度の時間変化を求めた。

$$I_s = I_{ws} \sin^2\left(\frac{\pi}{D}\right) \exp(-k_w H) \quad \text{式(4)}$$

ここに、 I_s ：河床付着膜表層での光量子密度、 I_{ws} ：水表面における光量子密度、 k_w ：表流水の光に対する消散係数(0.5)、 H ：水深、 D ：日長時間、 t ：日の出からの経過時間である。摩擦速度及び水深は、木曾川中流域の瀬の河床勾配を1/50、河床材料の84%通過粒径を20cmとし、単位幅流量を $0.01\sim 0.3\text{m}^2\text{s}^{-1}$ までの30流量を対象とし、等流計算より得られた数値を用いた。式(1)の計算は、同一流量、同一光量子密度の日周変化を4週間与え、4週間後の付着藻類現存量、日当たり摂食量、日当たり剥離量を求めた。

計算結果から流量の増減に従って付着藻類現存量、日当たり摂食量、日当たり剥離量が変わることが示された(図-1)。また、流量が増加するに従い、アユの生息環境が改善されて生息密度が増加し、摂食量が大きくなる傾向が示された。一方、日当たり剥離量と現存量は流量の増加と共に減少した。日当たり剥離量は $0.1\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 程度から急速に減少し、 $0.12\text{m}^2\text{s}^{-1}$ でゼロを示した。これは、流量増加に伴い剥離開始現存量が小さくなり、付着藻類の純生産速度が抑制されること、また、アユの生息環境が改善され摂食量が増加することに起因している。この場合、日当たり純生産量と摂食量がほぼ均衡し、自生的な有機物が生食連鎖により消費され、下流への有機物負荷は生じないことを示している。ただし、仮定した条件の変更によって、結果は異なってくる。今後は、現場の条件を把握し、より実態にみあった検討を行う必要がある。

6. まとめ

本報は、河床環境の健全性の保全・修復のための一手法として、生物による摂食効果に着目し、その定量的評価を試みた。アユの摂食によって、大型糸状緑藻(*Oedogonium* sp.など)の繁茂や細粒土砂の沈積が抑制されること、珪藻の出現制

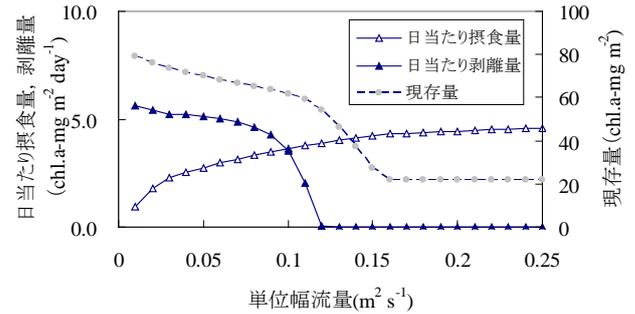


図-1 単位幅流量と日当たり摂食量・剥離量、現存量との関係

合が大きい付着膜に対しては、オイカワの摂食によっても、生藻類の増加などの質的な改善効果が図られることを示した。また、摂食による河床環境改善効果を数理モデルで表現した。今後は、河床環境の診断方法や適切な流量管理のあり方の提案を行い、河床環境の健全性が損なわれている現場への適用を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 皆川朋子・福嶋悟・萱場祐一：ダム下流の河床付着膜の特徴とフラッシュ放流による掃流、土木技術資料49(8)、pp.52-57、2007
- 2) 皆川朋子・萱場祐一：アユ、オイカワの摂食が河床付着膜の性状に果たす役割—藻類食者の生態的機能を加味した河床環境の保全—、河川技術論文集 Vol.15、pp.97-102、2009
- 3) 萱場祐一：河川中流域における物理環境場が一次生産過程に及ぼす影響に関する研究、名古屋大学学位論文、2007
- 4) 萱場祐一・皆川朋子：河床の生態的健全性を維持するための流量設定手法に関する研究、平成20年度重点研究報告書、2009
- 5) 深見公雄・水成貴之・久保田浩・西島敏隆：高知県下の二河川における付着藻類の増殖速度およびアユによる藻類消費速度の見積り、水産増殖 Vol.42 No.2、pp.199-206、1994
- 6) 河村三郎：魚類生息環境の水理学、(財)リバーフロント整備センター、東京、2003

皆川朋子*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水環境
研究グループ自然共生研
究センター 主任研究
員、博士(工学)
Dr. Tomoko MINAGAWA

萱場祐一**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水環境
研究グループ自然共生研
究センター 上席研究
員、博士(工学)
Dr. Yuich KAYABA