

13.5 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

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：水環境研究グループ(自然共生)

研究担当者：萱場祐一、皆川朋子、真田誠至

【要旨】

本研究は、生物の摂食効果により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを加味した河川流量管理の考え方を提示することを目的としている。20年度は、①生物の摂食が河床付着膜の状態に果たす役割の解明、②河床の健全性を評価することを目的に、流量、生物の密度、摂食圧等を組み込んだ付着藻類現存量推定モデルを構築した。得られた成果は以下のとおりである。

- ① 珪藻等の出現割合が大きい付着膜に対しては、アユだけでなくオイカワの摂食についても、AIを低下させ、強熱減量(%)及び生藻類比を高める効果があることを明らかにした。また、摂食は、付着物量(膜の厚さ)や構成の改変のみならず、膜内への光の透過を向上させることを定量的に示し、光合成速度に影響を及ぼしていることを示唆した。
- ② 流量の多寡に応じた付着藻類の生産と摂食、剥離のバランスをある程度再現できる数理モデルを構築し、自生的な有機物が生食連鎖により消費されている様子を再現することができた。

キーワード：河川流量、付着藻類、摂食、光合成速度、数理モデル、健全性

1. はじめに

近年、人為的な流量制御に伴う流況の平滑化や上流からの土砂供給の減少等により、河床の状態の健全性が損なわれていることが広く認識されている。主な課題として、有機物やシルトなどの微細な土砂の堆積、糸状緑藻の繁茂、生物の餌資源としての質への影響、基礎生産への影響、下流への自濁作用、景観の悪化等があげられる。

現在、これらを改善するための具体的な取り組みとして、維持流量の増加やダムからのフラッシュ放流等が実施されている。しかし、河床の健全性が損なわれる要因は、流量(流速)の減少や流況の平滑化といった要因のみでなく、生物生息場の変化によって生物相や生息密度が変化し、河床付着膜が生物に摂食されなくなったことがあげられる。そのため、今後の河川流量管理においては、流量のみでなく、その場に生息すべき生物の棲み場(空間、流量等)を整え、生物が生息でき、それによって河床付着物が「摂食」されるといった生態系のしくみを加味した流量管理の考え方を提示していくことが必要である。

以上を背景に本研究では、生物の摂食効果により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを加味した河川流量管理の考え方を提示することを目的に、流量、河床の状態、底生動物、魚類等の摂食圧の関係解明、生物の摂食を加味した付着藻類現存量推定モデルの構築、適

切な流量管理についての提案を行う。

20年度は、①生物の摂食が河床付着膜の状態に果たす役割の解明、②河床の健全性を評価することを目的に、流量、生物の密度、摂食圧を組み込んだ付着藻類現存量推定モデルの開発を行った。

2. 生物による摂食が河床付着膜の状態に果たす役割の解明

2.1 目的

生物による河床付着膜の摂食は、1.で示した課題の改善を図る上で、大きなウエイトを占めると考えられる。しかし、生物の摂食が付着藻類群集に及ぼす影響や河床付着膜を巡る生物間の関係を扱った研究は生態学の分野で比較的多く行われているが¹⁾²⁾³⁾、工学的な観点から、摂食により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを定量的に評価した研究はほとんどみられない。19年度はアユの摂食によって、河床付着膜は一定の厚さ(薄い)が維持され、生きている藻類の割合や強熱減量(%)が高い状態に変化すること、また、摂食された付着藻類の最大光合成速度は、摂食されなかったものより高いことを示した。しかし、アユ以外の魚類に関する知見はないこと、また、摂食と最大光合成速度への影響に関しては、付着藻類現存量や群集の違いが関与していることが既往の研究で報告されているが⁴⁾、知見は限られている。

そこで、20年度は、付着藻類を摂食する雑食性のオイカワを対象魚種に加え、摂食が河床付着膜に与える影響を明らかにすること、そして、魚類の摂食が付着藻類の光合成速度に及ぼす影響とそのメカニズムに関する定量的データを取得することを目的に研究を行った。

2.2 方法

2.2.1 摂食による河床付着膜の変化

(1) 実験方法

実験は、(独)土木研究所自然共生研究センター内の実験河川(岐阜県各務原市)において2008年7月~8月に行った。付着膜の状態の違いによる摂食の影響の違いを考慮し、異なる2つの水理条件下(ケースI、II)で付着膜を成立させ、摂食の影響を把握することとした。ケースI、IIの実験区の水深及び流速は、それぞれ、水深約40cm、流速(6割水深)15-20cm/s、水深約30cm、流速30-40cm/sに設定し、両ケース3つずつ実験区を設けた。各実験区の上下流端にはナイロン製ネット(5mmメッシュ)による仕切りを設け、魚類の出入りを遮断した。また、鳥類の補食を防止するため、実験区上部及び側面は10cm×10cmメッシュのネットで被った。実験に際し、実験区内に生息している魚類をすべてエレクトロフィッシャーを用いて排除した。その後、河床に新たに礫(径15-20cmの玉石)を設置し、河床付着膜を成長させた。

礫設置から約1ヶ月経過した後、両ケースの3つの実験区からそれぞれ礫3つをランダムに採取し、それぞれ上面5cm×5cmの範囲から、ナイロンブラシと蒸留水を用いて河床付着膜を採取し(「処理前」とする)、冷暗条件で実験室へ運搬した。その後、各ケースの3つの実験区を、オイカワを放流した「オイカワ区」(放流密度:4個体/m²)、放流しない「対照区」、そして、アユとの比較が行えるように、アユを放流した「アユ区」(放流密度:1個体/m²)を設定した。実験に用いたアユは、岐阜県内の養殖場から購入したもので、平均体長15.7cm、湿重量47gである。オイカワは、実験河川においてエレクトロフィッシャーを用いて採捕したもので、平均体長7.5cm、平均湿重量6.5gである。

アユ、オイカワ放流から10日後、各実験区において、再び礫3つ(「アユ区」及び「オイカワ区」については、摂食跡があるもの)をランダムに選定し、前述と同様に河床付着膜を採取し、実験室へ運搬した。なお、放流から10日後の付着膜採取までの水温平均値は25.3°C(測定間隔10分)であった。

採取した試料は、速やかにガラス繊維濾紙で濾過した後、乾燥重量(60°C24時間乾燥)、強熱減量(マッフル炉

で550°C2時間燃焼)、クロロフィルa(chl.a)及びフェオフィチンをLorenzen(1967)により測定し、強熱減量(%)、無機物量(ここでは、乾燥重量から強熱減量を差し引いた重量を無機物量とした)、クロロフィルa/(クロロフィルa+フェオフィチン)(以下、生藻類比とする)、AI(Autotrophic Index, =強熱減量/クロロフィルa)を算出した。AIとは、河床付着膜の質的評価の指標として用いられているもので、値が小さいほど、藻類の割合が大きく、藻類以外の生物や生物以外の有機物の割合が小さいことを示す。

また、試料の一部はホルマリンで固定した後、それぞれ採取した3つの試料を同じ採取面積の割合で混合させ1試料とし、電子顕微鏡(600倍)の下で400個以上の付着藻類の細胞を同定、計数した。

底生動物については魚類放流から5日後において、それぞれ実験区の3つの礫から、サーバーネット(250nmメッシュ)を用いて採取し試料とし、ホルマリンで固定した後、同定、計数した。採取面積は、採取した礫の径(長さ、幅、高さ)から以下に示すGraham et al.(1988)⁹⁾を用いて礫表面を算定し、生息密度を求めた。

$$\text{表面積 (m}^2\text{)} = 1.15 (LW + WH + HL) \text{ } ^9$$

ここでLは径(m)、Wは幅(m)、Hは高さ(m)を表す。

(2) 統計的処理

各ケースの「処理前」の3つの実験区の初期条件が同じであることを確認するため、乾燥重量(g/m²)、強熱減量(g/m²)、無機物量(g/m²)、強熱減量(%)、chl.a量(mg/m²)、生藻類比、AIの各項目について、一元配置分散分析(有意水準5%)を行った。また、「処理前」と処理後の「対照区」、「アユ区」、「オイカワ区」の付着膜の状態の比較には、各項目について一元配置分散分析(有意水準5%)を行い、有意差が検出された場合には、Tukeyの多重比較検定(有意水準5%)を行った。なお、上記検定に際し、データの等分散性と正規性を得るため、実数値は対数変換、%値は逆正弦変換して用いた。

2.2.2 摂食が付着藻類の光合成速度に及ぼす影響

(1) 実験方法

2.2.1で示したものと同規模の実験区に「アユ区」、オイカワを放流した「オイカワ区」、放流なしの「対照区」を設定し、河床藻類の光合成速度を、明暗瓶法を用いて測定した。なお、各実験区の水深は25-30cm、流速は25-30cm/sとした。測定は2008年9月~10月に各実験区の付着膜を対象に、計3回行った。

各実験区の河床材料3つから付着膜を採取し、試料とした。試料の一部は速やかに河川水で希釈し、100mlの酸

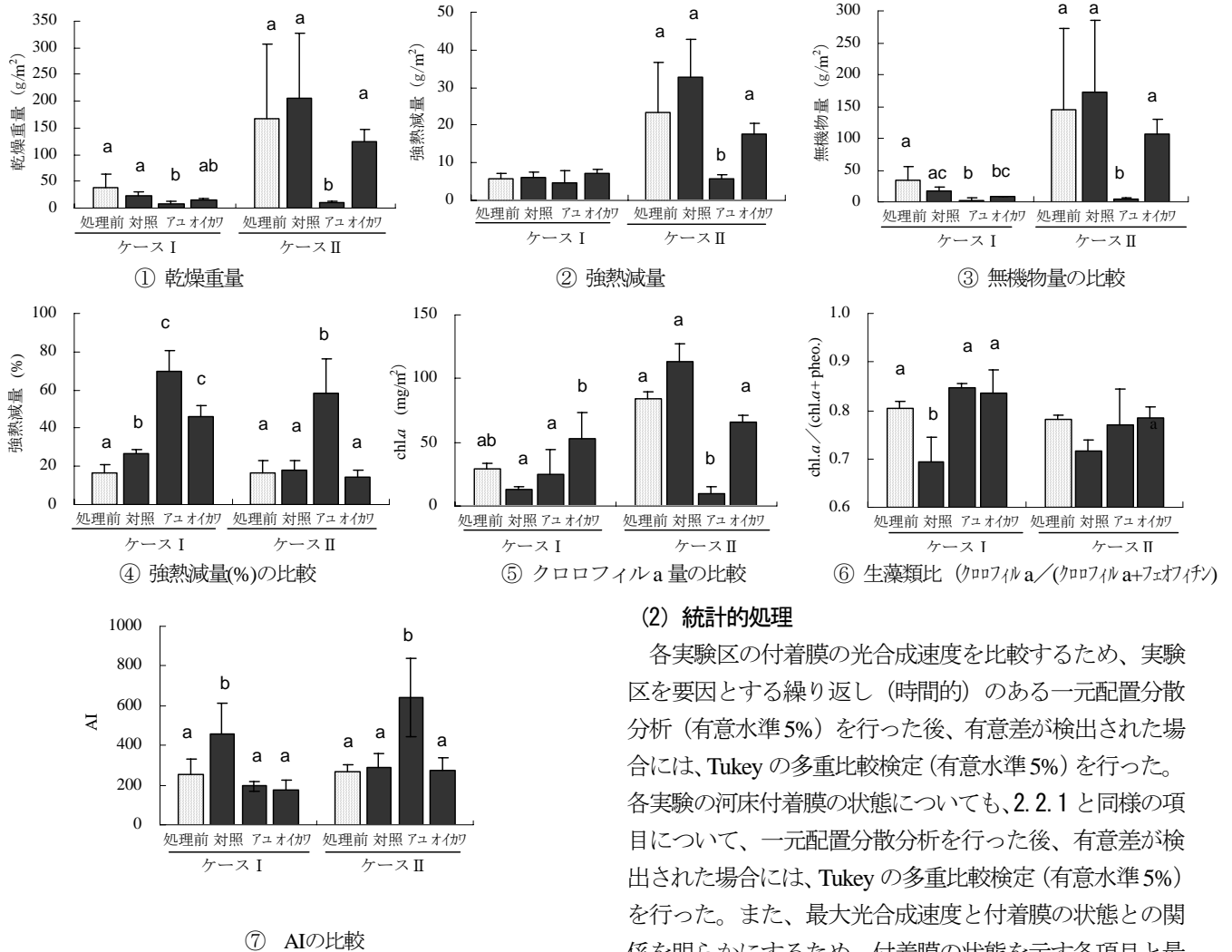


図-1 付着膜の状態の比較

素瓶 (明瓶 18 本, 暗瓶 3 本 (アルミホイルで密閉)、初期溶存酸素測定用 2 本) に詰めた。初期酸素測定用については速やかに溶存酸素を固定した。試料及び希釈した試料の一部は実験室へ持ち帰り、2.2.1 と同様の項目を測定した。希釈した試料を詰めた明瓶と暗瓶は、実験河川沿いに設置した簡易暗室内のバケツ (河川水をポンプで汲み上げ通水) に水没させ、レフランプ(500W) 3 個からの光量子密度が、徐々に変化するように設置した。そして、光量子計を用いて各明瓶の底面付近の光量子密度を測定した。3 時間経過後、これらを回収し、ウインクラ法により溶存酸素を測定し、単位クロロフィル a、単位時間当たりの最大光合成速度を算出した⁶⁾。また、河床付着膜に対する光の透過の程度については、Nozaki (1999)⁷⁾ の方法 (付着膜を懸濁させた 6 段階の濃度の試料をそれぞれガラスシャーレに入れ、これにレフランプ(500W) で光を照射させ、シャーレ上部、及びシャーレを通過した下部の光を計測) により測定した。

(2) 統計的処理

各実験区の付着膜の光合成速度を比較するため、実験区を要因とする繰り返し (時間的) のある一元配置分散分析 (有意水準 5%) を行った後、有意差が検出された場合には、Tukey の多重比較検定 (有意水準 5%) を行った。各実験の河床付着膜の状態についても、2.2.1 と同様の項目について、一元配置分散分析を行った後、有意差が検出された場合には、Tukey の多重比較検定 (有意水準 5%) を行った。また、最大光合成速度と付着膜の状態との関係を明らかにするため、付着膜の状態を示す各項目と最大光合成速度との関係について、ピアソンの相関係数の検定を行った (両側検定 有意水準 5%)。なお、上記検定においても、実数値は対数変換、%値は逆正弦変換して用いた。

2. 3 結果及び考察

2.3.1 アユ、オйкаワの摂食による河床付着膜の変化

「処理前」の各ケースの 3 つの実験区から得られたデータを対象に一元配置分散分析を行った結果、ケース I、II とともに、前述したいずれの項目においても、実験区間に有意差は検出されず、各ケースの処理前の実験区の付着膜の状態に差はないことが確認された。図-1 ①~⑦ に各ケースの「処理前」及び処理後の「対照区」、「アユ区」、「オйкаワ区」の河床付着膜の分析結果を平均値及び標準偏差で示した。図中の「処理前」のデータは、各ケースの 3 つの実験区から採取した計 9 データを示している。また、図中の小文字アルファベットは、一元配置分散分析により、「処理前」、「対照区」、「アユ区」及び「オ

13.5 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

表-1 付着藻類群集の代表種とそれらの出現割合 (%)

		ケース I			ケース II				
		処理前 (N=3)	対照区	アユ区	オイカワ区	処理前 (N=3)	対照区	アユ区	オイカワ区
藍藻	<i>Homoeothrix janthina</i> *	10.1±17.9		81.1	57.9	0.4±0.5	1.4	85.3	3.5
	<i>Chamaesiphon</i> sp.			18.6	8.3			12.9	
珪藻	<i>Melosira varians</i>	6.0±3.9	2.4		0.5	14.7±6.5	14.7	0.5	3.5
	<i>Fragilaria pinnata</i>				0.3	9.6±3.2	13.4		0.7
	<i>Fragilaria pseudogaillonii</i>						16.3	0.1	2.0
	<i>Navicula confervacea</i>	23.1±3.4	64.3		0.7	24.6±8.9	8.3		30.9
	<i>Achnanthes exigua</i>					2.8±3.7	0.3		
	<i>Nitzschia amphibia</i>				6.1	0.9±0.3	0.5	0.5	2.0
緑藻	<i>Nitzschia palea</i>	4.6±1.8	5.4		1.7	2.0±1.5	1.4		0.1
	<i>Nitzschia paleacea</i>				5.0		1.1		7.0
	<i>Scenedesmus</i> spp.	41.1±7.0	15.5		9.9	21.2±2.9	19.8		17.0
	<i>Oedogonium</i> sp.	0.9±1.3		0.2	0.6	7.4±8.1	10.5	0.2	23.4
	<i>Spirogyra</i> sp.					4.7±5.8	0.8		1.0
	上記合計	92.7±2.3	87.5	100.0	90.9	87.3±2.5	88.4	99.5	91.2

表-2 底生動物の出現種と個体数 (m²)

	ケース I			ケース II		
	「対照区」	「アユ区」	「オイカワ区」	「対照区」	「アユ区」	「オイカワ区」
コカゲロウ属 <i>Baetis</i> sp.			6	11	5	
コンギョウビケラ <i>Goera japonica</i> Banks	9					7
シマトビケラ科 <i>Hydropsychidae</i>	78	5	127			
ユスリカ科 <i>Chironomidae</i>	997	68	1,374	90	5	51
ガガンボ科 <i>Tipulidae</i>	5		6			
アブ科 <i>Tabanidae</i>			6			
ヒル綱 <i>Tipulidae</i>	32	53	46	79	18	58
ミス綱 <i>Oligochaeta</i>				5	9	
シジミ属 <i>Corbicula</i> sp.	101	87	29			22
計	1,222	213	1,594	184	37	138

「オイカワ区」に有意差が確認された ($P<0.05$) 項目に対して行った Tukey 検定の結果を示したもので、同じ文字が含まれないケース間には有意差が認められたことを示している。「処理前」の付着膜の状態はケース I、II でそれぞれ異なり、ケース II の付着物量 (乾燥重量、強熱減量、無機物量、chl.a 量) は、ケース I より大きい傾向がみられた。ケース II では、大型糸状緑藻の繁茂と、これに砂やシルト等の土粒子が捕捉された状態が目視によっても確認でき、ケース I との状態とは視覚的にも異なるものであった。なお、ここでは砂以下 (粒径 2mm 以下) の土粒子を細粒土砂とする。

処理後の「対照区」の付着膜は、ケース I では、「処理前」との間に、強熱減量(%)、生藻類比及び AI において有意差が検出された。これは、時間経過に伴う付着膜の変化 (膜の発達に伴う老化) を示すものと考えられたが、ケース II ではいずれの項目においても有意差は検出されず、変化はみられなかった。「アユ区」、「オイカワ区」について、ケース I では、「対照区」との間に、多くの項目において有意差が検出された。「アユ区」では、強熱減量と chl.a を除くすべての項目において「対照区」との間に有意差が検出され、乾燥重量、無機物量、AI は「対照区」より小さく、強熱減量(%)、生藻類比は大きかった。「オイカワ区」では、乾燥重量、強熱減量を除く項目において「対照区」との間に有意差が検出され、無機物量、AI

は「対照区」より小さく、chl.a、生藻類比及び強熱減量(%) は大きかった。また、「アユ区」と「オイカワ区」の間には、chl.a 量に有意差が認められたが、その他の項目では検出されなかった。ケース II の「アユ区」では、生藻類比を除くすべての項目において「対照区」との間に有意差が検出され、乾燥重量、chl.a、強熱減量、無機物量は「対照区」より小さく、強熱減量(%)、AI は大きかった。これに対し「オイカワ区」では、いずれの項目においても「対照区」との間に有意差は検出されず、変化がみられた「アユ区」とは異なっていた。

表-1 に、処理前後の付着藻類群集の種組成について、代表種と、それらの出現割合 (全細胞数に占める割合(%)) を示した。ここで代表種とは、各サンプルのそれぞれ全細胞数 (一部の種は 1 糸状体を 1 として計数) に占める割合が 5%以上の種とした。「処理前」のケース I では、珪藻のフネケイソウ *Navicula confervacea*、緑藻 (浮遊性) のイカダモ *Scenedesmus* spp.、ケース II では、これらに加え、珪藻のタルケイソウ *Melosira varians* の出現割合が大きかった。また、ケース II では、大型糸状緑藻のサヤミドロ *Oedogonium* sp. の割合がケース I より大きく、アオミドロ *Spirogyra* sp. も出現していた。ケース I の「対照区」は、「処理前」と比較して、各種の出現割合の増減はみられたが、代表種の構成はほぼ同様であった。ケース II においても、「対照区」の珪藻の種数は「処理区」より多い

が、「処理前」とほぼ同様の種構成であった。これに対し「アユ区」では、ケースⅠ、Ⅱともに糸状藍藻のピロウドラソウ *H. janthina* が大きく優占し、「処理前」や「対照区」の群集と異なっていた。「オイカワ区」については、ケースⅠでは、「アユ区」と同様に糸状藍藻の *H. janthina* が優占したが、その割合は「アユ区」より小さく、珪藻類は「アユ区」より多く出現していた。ケースⅡでは、「対照区」と似た種組成であり、ケースⅠのような変化は生じていなかった。表-2 に底生動物の出現種及び個体数を示した。ケースⅠではユスリカ科 *Chironomidae*、ケースⅡではユスリカ科及びヒル綱 *Tipulidae* が優占した。総個体数は、ケースⅠがⅡより多く、両ケースともに、「アユ区」の個体数は、「対照区」及び「オイカワ区」より少ない傾向がみられ、アユによる捕食の影響をうけたものと考えられた。

以下に、アユ、オイカワの付着膜に対する摂食効果の違いを考察する。

アユは、ケースⅠで成立していた付着膜に対して、乾燥重量を減少させ、強熱減量(%)を増加させた。これらは主に無機物量の減少によるものであった。一方、オイカワの摂食においては、乾燥重量の減少はみられないが、アユと同様に、無機物量の減少に伴う強熱減量(%)の増加が確認された。ただし、ここで示した無機物量には、土粒子の他に、珪藻の珪酸質の被殻に含有するケイ素重量が含まれる。そこで、まず、以下に示す細胞体積とケイ素含有量の関係式⁸⁾を用いて、無機物量に占めるケイ素の割合の算出を試みた。

$$\text{Log [Si]} = 0.707\text{log V} - 0.263 \quad 8)$$

ここで、Si は細胞に含まれるケイ素の重量 (pg/cell)、V は細胞の体積 ($\mu\text{m}^3/\text{cell}$) を示す。珪藻の体積は、Phycology Section, Patrick Center for Environmental Research による 2001 Biovolume Measurements⁹⁾ の体積平均値を用い、これに掲載されていない種については、顕微鏡下で撮影した画像からおおよその体積を算定した。その結果、本実験で形成された付着膜中の無機物に占めるケイ素の割合は小さいことが確認され、無機物量はほぼ細粒土砂で占められていたと判断された。したがって、無機物量の減少は、摂食による細粒土砂の減少によるものと評価された。また、アユ及びオイカワに摂食された付着膜の生藻類比はいずれも「対照区」より大きく、AI は小さく、「処理前」と同レベルであった。アユのみでなく、オイカワに摂食によっても、老化した付着膜が除去され、活性の高い藻類の割合が増加し、付着膜の質的改善が図られることが明らかになった。なお、強熱減量については、「対照区」、「アユ区」、「オイカワ区」の間に有意差はな

かった。要因として、「対照区」と「オイカワ区」では、デトリタスや藻類を摂食するユスリカ科の個体数が多く、その摂食圧が「アユ区」より大きく作用した可能性が考えられたが(表-2)、chl a 量は「オイカワ区」が「アユ区」「対照区」より大きく、バクテリアの影響が関与している可能性もあり、要因は明瞭ではなかった。

アユはまた、ケースⅡの大型糸状緑藻の *Oedogonium* sp. や *Spirogyra* sp. が出現し、細粒土砂が糸状緑藻に捕捉され、付着物量が大きい付着膜に対しても摂食し、乾燥重量を減少させ、強熱減量(%)を増加させ、そして、大型糸状緑藻を減少させた。しかし、生藻類比は「対照区」よりやや大きい傾向がみられたものの有意ではなく、AI については「対照区」より大きく、ケースⅠの付着膜に対してみられた明瞭な質的改善は確認されなかった。オイカワの摂食に関しては、いずれの項目においても変化はみられず、ケースⅡの付着膜に対しては、オイカワの摂食による付着物の減少や質的な改善効果は期待できないことが確認され、節状歯とよばれる独特の歯をもつアユと、これをもたないオイカワの口の形態の違いが顕著に表れたものと考えられた。

以上のようにアユ、オイカワの摂食の付着膜への影響は異なっていたが、ケースⅠの付着膜に対しては、オイカワの摂食によっても質的な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、5月頃から11月に限られていることから、通年を通して河川に生息す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。

2.3.2 アユ、オイカワの摂食が光合成速度に及ぼす影響

図-2 に各実験区の単位クロロフィル a、単位時間当たりの最大光合成速度を示した。図中の小文字アルファベットは、Tukey 検定の結果を示したもので、同じ文字が含まれない実験区間には有意差が認められたことを示している。繰り返しのある一元配置分散分析の結果、「処理前」、「対照区」、「アユ区」間には有意差が検出され ($P < 0.05$)、「アユ区」の最大光合成速度は、「オイカワ区」、「対照区」よりも有意に大きかった。「オイカワ区」と「対照区」の間には有意差は検出されなかった。

表-3 に、各実験で用いた付着膜の各項目の平均値と標準偏差、及び最大光合成速度と各項目とのピアソンの相関係数の検定結果を示した。表中の小文字アルファベットは、Tukey 検定の結果を示したもので、同じ文字が含まれないケース間には有意差が認められたことを示している。chl a 及び AI を除く項目で、各実験区間に有意差が検出され、「アユ区」の乾燥重量、無機物量は、「オイカ

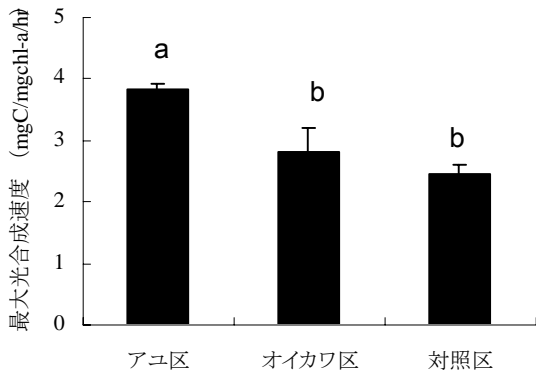


図-2 単位 chl. a 当たりの最大光合成速度

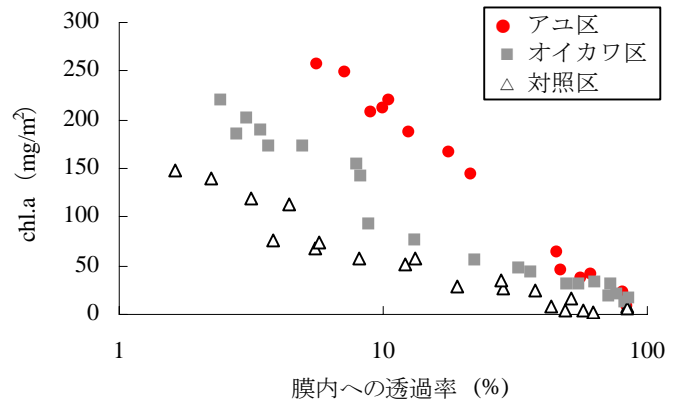


図-3 膜内への光の消散

表-3 各実験区の付着膜の状態及び最大光合成速度との相関

	付着膜の状態			ピアソンの相関係数の検定	
	アユ区	オイカワ区	対照区	相関係数	P
乾燥重量 (g/m ²)	13.7±1.2 ^a	146.0±128.0 ^b	317.7±263.5 ^b	-0.79	<0.05
強熱減量 (g/m ²)	11.9±2.0 ^a	14.9±5.1 ^a	31.1±6.2 ^b	-0.61	0.083
無機物量 (g/m ²)	1.7±1.0 ^a	131.1±123.2 ^b	286.6±257.4 ^b	-0.85	<0.01
強熱減量 (%)	87.4±8.4 ^a	14.7±7.6 ^b	13.5±7.6 ^b	-0.83	<0.01
chl.a (mg/m ²)	89.8±18.0	115.6±39.5	150.8±29.9	-0.41	0.27
AI	157±25 ^a	1017±1001 ^b	1580±1604 ^b	-0.42	0.19
生藻類比	0.89±0.03 ^a	0.79±0.05 ^b	0.77±0.02 ^b	0.88	0.01

ワ区」、「対照区」より小さく、強熱減量 (%)、生藻類比はそれらより大きかった。また、最大光合成速度は、乾燥重量と無機物量の間有意な負の相関関係が、強熱減量 (%)、生藻類比との間に有意な正の相関関係が認められた。図-3 に、膜内への光の透過について、chl.a 量と膜内への光の透過率 (%) (シャーレ下部光量子 / 上部光量子 × 100) の関係を示した。光の透過率は、各区で異なり、消散係数は、「アユ区」で 0.011~0.012、「オイカワ区」では 0.017~0.020、「対照区」では 0.028~0.057 であった。図-2 に示した最大光合成速度の違いは、付着物量 (膜の厚さ) や付着膜に含まれる無機物量等が関連し、これが膜内への光の透過、生藻類比を変化させ、膜内の付着藻類の活性に影響を与えていると考えられた。これらの知見は、今後モデルに反映させていきたいと考えている。

3. 流量-付着藻類現存量モデルの構築

3.1 モデルの概要

河床の健全性の評価は付着藻類の現存量だけでなく、付着藻類の活性度 (単位クロロフィル a、単位時間当たりの光合成速度)、河床付着膜に含まれる無機物量等が関連する。しかし、付着藻類の現存量の増加に伴い、活性度が低下し、無機物量が増加する傾向が見られることから、

ここでは、現存量を指標として河床の健全性を評価することを目的とし、対象場の条件に応じて付着藻類の現存量を推定する数理モデルの開発を行う。

一般に単位面積当たりの付着藻類の現存量 (クロロフィル a) の増減は以下の式で示すことができる。

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

ここに、 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 : 単位時間当たりの摂食量、 I : 単位時間当たりの移入量である。

ここで、 P_n は光合成速度を光量子量、栄養塩濃度を従属変数とし、ミカエリス・メンテン型の方程式で表現した数理モデルにより得られる。平成 19 年度に構築した数理モデルでは、付着膜を鉛直方向に分割し、各層における光量子密度は河床付着膜内部における光の消散を考慮し、栄養塩濃度は拡散方程式 (Non-uniform cluster and sparse モデル) を用いて P_n を導いた¹⁰⁾。ただし、実際の計算において各時間ステップの光量子密度、流量、付着藻類の現存量に対して拡散方程式を解くことは計算時間が長くなり現実的でない。そこで、本研究では、純生産速度を目的変数、現存量、光量子密度、摩擦速度を説明変数とし

た簡易式を作成し(式(2))、これら説明変数の任意の値に対する P_n をミカエリス・メンテン型の数理モデル及び拡散方程式から計算し、式(2)の係数を非線形最小二乗法としての解として求め、計算を簡易化した。

$$P_n = \left(P_c \frac{I_s}{I_c + I_s} - R_c \right) \cdot \frac{B_{chl-a}}{B_{chl-a} + B_k} \cdot \frac{(u_* + u_{*c})}{(u_* + u_{*c}) + u_{*k}} \quad \text{式(2)}$$

ここに、 I_s : 河床付着膜表層での光量子密度、 B_{chl-a} : 底生藻の単位面積当たりの chl-a、 u_* : 摩擦速度、 I 、 P 、 R 、 B 、 u_* の添字 'c' 及び 'k' はそれぞれ係数であり、最小二乗法の解として得られる。計算では、全基質飽和条件下での最大光合成速度、呼吸速度を $10\text{mg-C chl-a}^{-1}\text{hr}^{-1}$ とし、現存量 (10 、 50 、 100 、 150 、 $200\text{mg-chl-a}^{-1}\text{m}^{-2}$)、光量子量 (0 、 10 、 50 、 100 、 500 、 $1000\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$)、摩擦速度 (0.1 、 0.5 、 1.0 、 5.0 、 10.0cm s^{-1}) の全ての組み合わせで条件を与えて定常状態になるまで計算を実施し、得られた P_n から式(2)の各係数を導出している。

単位時間当たりの剥離量は、流速レンジにより剥離が始まる現存量が異なるとし、剥離率を定義して以下の式で与えた¹¹⁾。

$$D_e = Det(B_{chl-a} - B_o) \quad \text{式(3)}$$

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¹²⁾。

単位時間当たりの摂食量は以下の式で与えた。

$$G = G_{\max} / D \cdot (S_v \cdot S_H \cdot S_d)^{1/3} \quad \text{式(4)}$$

ここに G_{\max} : アユの単位面積当たりの最大摂食量で既往の研究から $6.9\text{mg-chl-a m}^{-2}\text{day}^{-1}$ を与える¹³⁾。 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 とし一様に与え、流速と水深は計算流量から得られた値として与えた(詳細は「3.2 計算条件」参照)。選好曲線は摂食生物としてアユを想定し、河村らが作成したアユ(8月)における流速、水深、底質の選好曲線を与えた¹⁴⁾。摂食量が現存量を上回る場合には、現存量の最低値として $20\text{mg-chl-a}^{-1}\text{m}^{-2}$ とし一定値を与えた。なお、移入量 I は現存量に与える影響が小さいと考え、ここでは扱わなかった。

3.2 計算条件

計算対象河川としてアユが生息する河川として自然共生研究センター実験河川の近傍に位置する木曾川中流域

を選定し、計算時期を7月とし、水質の条件を設定した。また、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時間と設定し、以下の式より河床に到達する光量子密度の時間変化を求めた。

$$I_s = I_{ws} \sin^2\left(\frac{\pi t}{D}\right) \exp(-k_w H) \quad \text{式(5)}$$

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。式(2)及び式(5)における摩擦速度、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 $0.01 \sim 0.3\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$ 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週間後の底生藻現存量、日当たり摂食量、日当たり剥離量を求めた。

3.3 モデルの適用方法と適用例

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、日当たり剥離量に変化することが示された(図-4)。また、流量、現存量の多寡、流速の大小に応じて純生産速度が変化する様子が示された(図-5)。流量が増加するに従い日当たり摂食量は増加し、アユの生息環境が改善されて生息密度が増加し、摂食圧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伴に減少し、日当たり剥離量は単位幅流量が $0.1\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$ 程度から急速に減少し、 $0.12\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$ 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大きくなり、付着藻類の成長が抑制されること、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。また、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ている様子が再現できた。

このように、本モデルは流量の多寡に応じた付着藻類の生産と摂食、剥離のバランスをある程度再現できることを示したが、幾つか問題点も見られた。まず、本モデルではアユの摂食開始現存量を 20mg chl-a m^{-2} としているため、単位幅流量が $0.15\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$ より増加すると現存量が一定となる現象が見られた。実河川においても付着藻類の現存量が低下すると、より現存量が大きい河床へと移動する行動が見られるが、今回数理モデルで得られた結果が実現象とどの程度対応しているかについては今後の課題として残された。付着藻類の剥離量は、既往の研究をベースに付着藻類の現存量と流速の関数として数理

モデルに組み込んだが、付着藻類の剥離は藻類の種類によって異なる可能性がある¹⁵⁾。また、本モデルでは膜内部での光量子の消散係数は一定値として扱ったが、2章で示したように、膜内での光の消散は摂食生物によって変化することが明らかとなった。今後、得られている藻類の種類、摂食による消散係数の変化を数理モデルに組み込み、より実態にあった結果を導く必要がある。

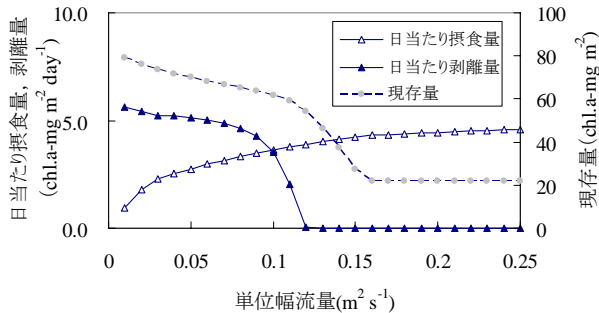


図-4 単位幅流量と日当たり摂食量・剥離量、現存量との関係

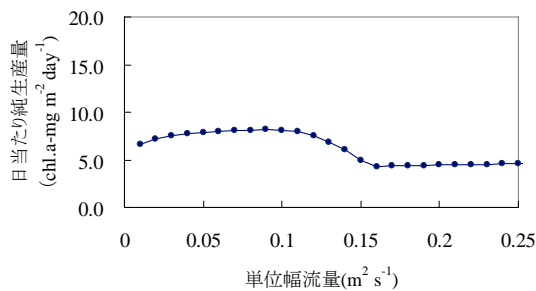


図-5 単位幅流量と日当たり純生産量との関係

N. まとめ

本研究は、生物の摂食効果により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを加味した河川流量管理の考え方を提示することを目的としている。20年度は、①生物の摂食が河床付着膜の状態に果たす役割の解明、②河床の健全性を評価することを目的に、流量、生物の密度、摂食圧を組み込んだ付着藻類の現存量推定モデルの構築を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- ① 珪藻等の出現割合が大きい付着膜に対しては、アユだけでなくオイカワの摂食についても、AIを低下させ、強熱減量(%)及び生藻類比を高める効果があることを明らかにした。また、摂食は、付着物量(膜の厚さ)や構成の改変のみならず、膜内への光の透過を向上させることを定量的に示し、光合成速度に影響を及ぼしていることを示唆した。
- ② 流量の多寡に応じた付着藻類の生産と摂食、剥離のバランスをある程度再現できるモデルを構築し、自

生的な有機物が生食連鎖により消費されている様子を再現することができた。

今後は、底生動物の摂食に関するデータを実験等により補足するとともに、本年度に得られた知見をモデルに組み込み、現地への適用を図っていく予定である。

参考文献

- 1) Abe, S., Uchida, K., Naguma, T., Ioriya, T., Tanaka, J.: Effects of a grazing fish, *Flecoglossus altivelis* (Osmeridae), on the taxonomic composition of freshwater benthic algal assemblages, *Arch. Hydrobio.* 150(4), pp. 581-595, 2003.
- 2) Horner, R. R., Welch, E. B., Seeley, M. R., and Jacoby, J.M.: Response of periphyton to change in current velocity, suspended sediment, and phosphorus concentration., *Freshwater Biology*, 24, pp.215-232, 1990.
- 3) Kuhara, N., Nakano, S. and Miyasaka, H.: Interspecific competition between two stream insect grazers mediated by non-feeding predatory fish, *OIKOS* 87, pp.27-35, 1999.
- 4) Abe, S., Uchida, K., Nagumo, T., Tanaka, J.: Alterations in the biomass-specific productivity of periphyton assemblages mediated by fish grazing, *Freshwater biology*, 52, pp.1486-1493, 2007.
- 5) Graham, A. A., McCaughan, D. J., and McKee, F. S.: Measurement of surface area of stones. *Hydrobio.*, 157, pp. 85-87, 1988.
- 6) 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、博士論文、2007.
- 7) Nozaki, K.: Algal community structure in a littoral zone in the north basin of Lake Biwa, *Japanes Journal of Limnology*, 60, pp.139-157, 1999.
- 8) Reynolds, C. S.: Diatoms and the geochemical cycling of silicon., *Biom mineralization in the Lower Plants and Animals.* Leadbeater, B. S. C. and Ridings, R. eds., pp.269-289, Oxford University Press, 1986.
- 9) http://diatom.acnatsci.org/autecology/uploads/{443C03CA-FE56-40BF-B6D8-26243E2DE83F}_BiovolumeMetric s.txt
- 10) 19年度重点研究報告書
- 11) Biggs, J. F., Goring, D. G. and Nikora, V. I.: Subsidy and stress of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. *Journal of Phycology*, 34, pp. 598-607, 1998.
- 12) Bouletreau, S., Carabetian, F., Sauvace, S. and

Sanchez-Ferez, J. : Assessing the importance of a self-generated detachment process in river biofilm models. *Freshwater Biology*, 51, pp.901-912, 2006.

- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Peterson, C. G., and Stevenson, R. J.: Resistance and resilience of lotic algal communities: Importance of disturbance timing and current, *Ecology*, 73, pp.1445-1461,1992.

STUDY ON RIVER FLOW MANAGEMENT FOR MAINTAINING ECOLOGICAL FUNCTIONS OF RIVERBED

Abstract : This study aims to propose a new approach of river flow management to sustain healthy riverbed condition by utilizing the grazing effects of freshwater fauna, which depend on river discharge. In the fiscal year 2008, the main results of this study are as follows:

- 1) Feeding activities by not only ayu (*Plecoglossus altivelis*) but also pale chub (*Zacco platypus*) contributed to a decrease in the Autotrophic Index and an increase in the AFDM(%) and the ratio of living algae for the periphyton assemblages which were dominated by diatom. The photo- extinction coefficient was influenced by fish grazing, this role of grazing effect on the progression in the photosynthetic rate of the epilithic algae .
- 2) We developed a numerical model estimating the chl-a of epilithic algae, in which net production, detachment rate and grazing rate were incorporated. In terms of grazing rate, ayu (*Plecoglossus altivelis*) was focused and we applied PHABSIM (Physical Habitat Simulation) for estimating grazing rate associated with unit width discharge. As a result, it was shown that chl-a of epilithic algae and detachment rate decreased with the increase of unit width discharge, but grazing rate indicated vice versa.

Key words : flow regime, periphyton, grazing, riverbed, numerical model, health