

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 22

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

【要旨】

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、掃流砂量、河床の状態、底生動物、魚類等の摂食圧の関係を把握し、これを基に、生物の摂食を加味した流量—土砂—付着藻類現存量推定モデルを構築し、河床環境劣化要因を推定する手法の提案を行う。21年度は、(1)河床付着物の状態に対する魚類の餌資源としての選択性、(2)掃流砂と河床の状態との関係解明、(3)一次生産速度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) アユは、付着膜の状態に対して摂食の選択性を有することが明らかとなり、河床の状態が生息密度、さらには摂食圧に影響を及ぼす可能性が示された。
- 2) 掃流砂による付着藻類現存量や一次生産量の減少が定量的に示され、これには、掃流砂による磨耗による剥離のみでなく、砂の堆積による付着基質となる礫面の面積の減少が関与していることが推察された。
- 3) 既存の一次生産速度推定モデルに土砂の影響を取り込むための考え方を整理し、モデルのフローチャートを作成した。

キーワード：河床、流量、掃流砂、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、掃流砂量、河床の状態、底生動物、魚類等の摂食圧の関係を

を把握し、これを基に、生物の摂食を加味した流量—土砂—付着藻類現存量推定モデルを構築し、河床環境劣化要因を推定する手法の提案を行う。

21年度は、(1)河床付着物の状態に対する魚類の餌資源としての選択性、(2)掃流砂と河床の状態との関係解明、(3)既存の一次生産速度推定モデルに土砂の影響を取り込むための考え方の整理を行った。

2. 河床付着物の状態に対する魚類の餌資源としての選択性

2.1 目的

微細土砂の河床への堆積は、アユ等の魚類の餌資源としての価値を低下させることが指摘されている。これまで、河床付着膜と藻食性生物との関係について、藻食類の生息場所利用に関する調査から、付着藻類の現存量の多い場所ではなく、一次生産量の高い場所に多くの個体が集まることが報告され¹⁾、アユに関しては、広い餌場あるいは流れのある生産力の高い場所に分布することが報告されている²⁾。しかし、魚類は、流速に対する選好性を有しており、アユが選好する流速域³⁾は、一次生産力も高いため、どちらの要因がどの程度アユの生息場所利用に寄与しているかは明かではない。また、付着藻類との関係において、一次生産力との関係は示されているが、

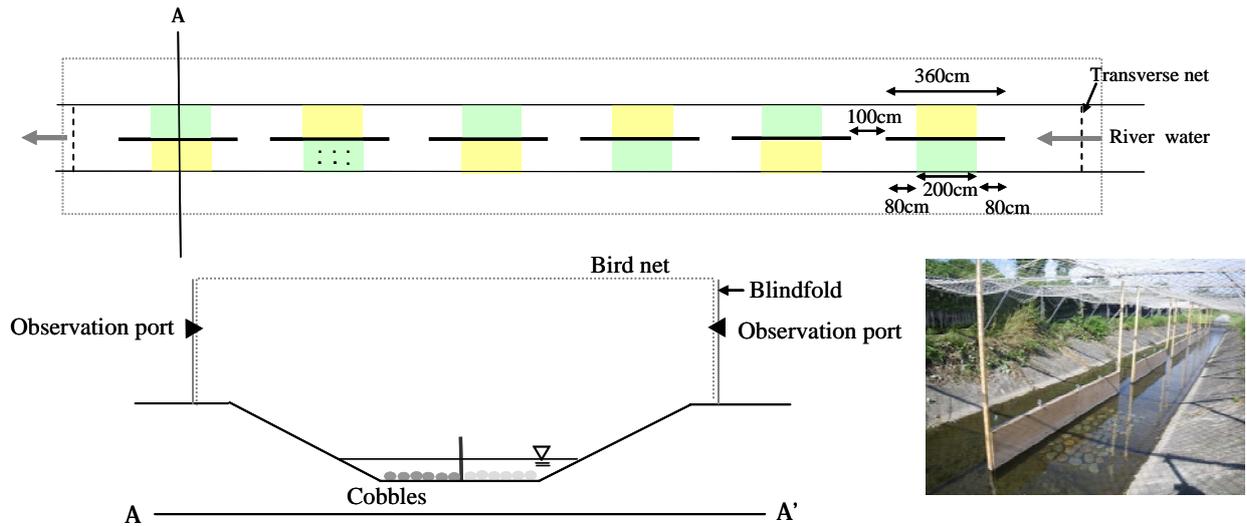


図-1 実験区の設定

表-1 実験ケース

実験ケース	礫タイプ	対象魚種	放流密度 (m ⁻²)	サイズ(標準体長cm)
Ex. I	N I 新たに設置した礫	オイカワ	5.2	6.3±14.3
	S I 設置から14日経過後の礫 (細粒土砂が付着)			15.5±0.9
Ex. II	N II 新たに設置した礫	アユ及びオイカワ	アユ:1.2 オイカワ:5.2	15.5±0.9
	S II S Iを継続			6.3±14.3
Ex. III	S III S Iを継続	アユ及びオイカワ	アユ:1.2 オイカワ:5.2	15.5±0.9
	H 実河川から採取した礫(アユの食み跡あり)			6.3±14.3

付着膜の状態、例えば、アユの餌資源としての価値が低いとされる細粒土砂が沈積した河床付着膜との関係に関する定量的知見はほとんどない。そこで、本章では、河床付着膜に対する魚類の餌資源としての選択性に着目し、これを明らかにするため、藻食性魚類のアユ、そして雑食性のオイカワを対象に実験を行った。

2.2 方法

実験は、自然共生研究センター内の実験河川（岐阜県各務原市）において行った。実験河川は、木曾川支川新境川（流域面積 42.6km²、流路延長 13.6km）から河川水を導水し、人工的に造成した河川（実験河川）に自然流下させたもので、延長約 800m、川幅約 2.5~6m、河床勾配は 1/300 又は 1/800 である。

川幅約 2m、河床勾配 1/800 の区間に、12 の実験区 (1m × 3.6m) を設定し、付着膜の状態が異なる礫を 2 タイプ (1m × 2m、N=6、計 12) 設置し、オイカワ、アユの摂食行動を観察窓から観察・記録した (図-1)。観察回数は、1 日 3 回 (9:00-11:00、12:00-14:00、15:00-17:00) とし、1 区間の観察時間はそれぞれ 10 分とした。なお、実験区の上部及び側面には、防鳥のためのネット (10cm × 10cm メッシュ) を設け、さらに観察窓を設けた縦断方向側面には、人間の行動が魚類の行動に影響を与えないよう、

黒色の目隠しネットを設置した。

河床に敷設する礫は、付着膜の状態が異なる長径 15cm 程度の玉石 3 タイプ (礫 N、礫 S、礫 H) を用いた。礫 N は、新たに設置した礫で付着膜が全くない状態、礫 S は、設置から 14 日以上経過させ、付着膜を成長させたもので、砂やシルトの沈積している状態、礫 H は、実験河川の取水河川である新境川河床の礫で、アユの食み跡があるものとした。実験は、このうち 2 タイプを千鳥状に 6 ヶ所ずつ配置し、Ex. I ではオイカワを対象に、礫 N (n=6) と礫 S (n=6)、Ex. II では、オイカワ及びアユを対象に、礫 N と礫 S、Ex. III では、オイカワ及びアユを対象に、礫

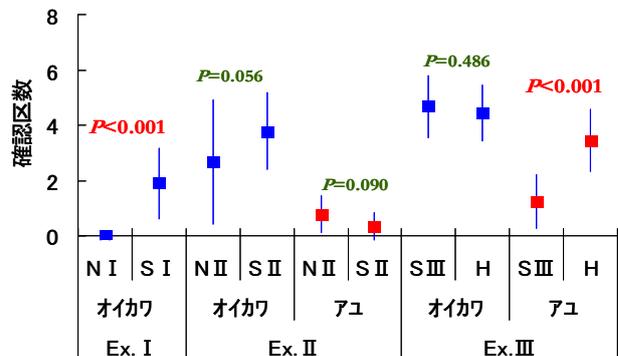


図-2 礫に対する摂食行動の確認区数

表-2 実験時の水理量

	Ex. I		Ex. II		Ex. III	
	N (n=6)	S (n=6)	N (n=6)	S (n=6)	S (n=6)	H (n=6)
Water depth (cm)	19.9±1.8	20.9±1.4	20.8±1.6	21.2±1.4	22.3±1.4	21.7±1.8
Current velocity (cm/s)	33.4±3.9	33.7±2.3	33.1±1.7	33.0±1.9	26.9±1.5	27.1±1.8

表-3 実験時の付着膜の状態

	Ex. I		Ex. II		Ex. III	
	N I (n=6)	S I (n=6)	N II (n=6)	S II (n=6)	S III (n=6)	H (n=6)
AFDM (g/m ²)	0	8.4±1.6	0	7.6±1.0	5.7±1.5	10.2±2.2
強熱残差	0	158.2±27.0	0	109.3±19.1	73.5±25.0	23.3±8.4
Chl.a (mg/m ²)	0	29.5±4.0	0	23.6±6.5	25.1±6.5	68.9±11.4
優占種	—	<i>Homoeothrix janthina</i>	—	<i>Scenedesmus</i> spp.	<i>Achnanthes japonica</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
	—	<i>Navicula rostellata</i>	—	<i>Achnanthes japonica</i>	<i>Scenedesmus</i> spp.	<i>Achnanthes japonica</i>
	—	<i>Scenedesmus</i> spp.	—	<i>Navicula rostellata</i>		<i>Stigeoclonium</i> sp.

Sと礫Hを配置した(表-1)。オイカワは、実験河川で捕獲した337個体(標準体長6.3±14.3cm、湿重量4.5±3.0g)、アユは、岐阜県内の養殖場から購入した人工アユを実験河川で3日間順応させた75個体(標準体長15.5±0.9cm、湿重量45.1±8.1g)を用いた。放流密度はオイカワ、アユ、それぞれ5.2個体/m²、1.2個体/m²とし、実河川で行われた調査結果(オイカワ:0.02-7.32個体/m²、アユ:0.03-5.50個体/m²)の範囲内とした。Ex. I、II、IIIは、それぞれ9月16~18日、9月22~24日、9月30日、10月1、2日に行い、いずれも河川水の濁りがない条件下で行った。

実験時の水深、流速は、それぞれ、19.9~22.3cm、26.9~33.4cm/sの範囲にあり、各実験ケースの礫2タイプ間(それぞれn=6)に有意差は検出されなかった(表-2)。実験時の水温はEx. I、II、IIIそれぞれ、22.4、22.9、22.3°C(9~17時の毎正時データ平均値)であった。

設置した礫の付着物の状態は、調査日前に各実験区から、ランダムに取りあげた3つに礫の上面5cm×5cmの範囲の河床付着膜を、蒸留水とナイロンブラシを用いて採取し、乾燥重量、強熱減量、クロロフィルaを定量した(表-3)。また、試料の一部にホルマリンを添加し、電子顕微鏡(600倍)の本で400個以上の付着藻類の細胞を同定・計数した。ただし、設置直後の礫N Iは、付着物がないため、付着膜の採取は行わなかった。

2.3 結果及び考察

礫に対する摂食行動が確認できた区数の平均値及び標準偏差(n=9)を図-2に示す。対応のあるt検定を行った結果、礫間の確認区数に有意差が検出されたのは、Ex. Iのオイカワ(P<0.001)、Ex. IIIのアユ(P<0.001)であった。オイカワの選択性はアユがいない条件下(Ex. I)では、付着物がない状態(N I)より、細粒土砂の沈積量が大きく、付着藻類がやや発達した礫(S I)をよ

り選択するが、アユの存在下(Ex. II、III)では、選択性は検出されず、アユの存在の影響によるものと考えられた。アユについては、付着物がない状態(N II)と細粒土砂の沈積量が大きく、付着藻類がやや発達した礫(S II)に対する選択性に有意差は検出されていないが、付着藻類現存量が大きく、*H. Janthina*が優占する付着膜(H)に対する選択性は、S IIIより大きかった。

以上の結果は、河床付着膜の有無や状態の違いは、アユやオイカワの生息場所に影響を与えていることを示すものである。また、細粒土砂が多く沈積した付着膜に対するアユの餌資源として選択性は低く、このよう場所では、アユの生息密度は低下する可能性があることが示唆された。

3. 掃流砂と河床の状態との関係解明

3.1 目的

上流からの土砂供給量の減少は、河床低下、これに伴う瀬・淵構造の変化、河床材料の粗粒化を引き起こす場合があることが知られている。

粗粒化に伴う底質の変化は、これを生育・生息基盤とする付着藻類、底生動物及び魚類相を変化させる。付着藻類への影響に関しては、付着基盤としての河床材料が移動する機会の減少により、付着藻類が剥離・減少する機会の減少をまねく。また、粗粒化に伴い掃流砂量が減少するため、掃流砂が付着藻類に衝突し、これを剥離させる作用が低下する。さらに粗粒化に伴う底生動物相の変化を介した間接的な影響も生じる。例えば、巢材として砂や小礫を利用する藻食性の底生動物であるヤマトトビケラは、掃流化によってこれらの細粒土砂が欠落すると、生息密度が低下し⁹⁾、摂食量は減少する。このように、粗粒化とこれに伴う掃流砂量の減少は、付着藻類現存量を増加させ、立体的な構造をもつ付着藻類群集へと発達

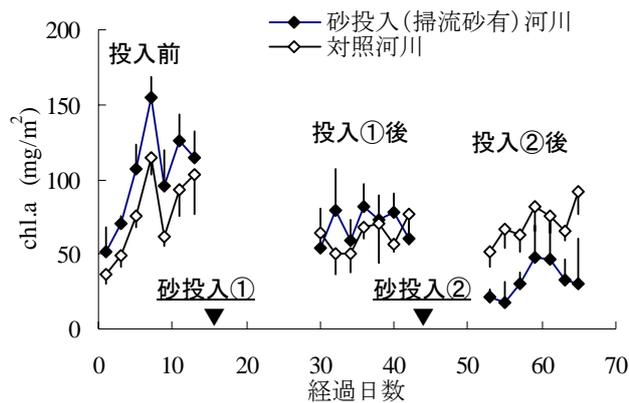


図-3 chl.a量の経時変化

しやすくする。付着藻類の過度の発達は、光合成速度の低下や魚類及び底生動物の餌としての価値が低いとされる大型糸状緑藻の繁茂を引き起こす可能性が指摘される等、河床の健全性の低下をもたらす要因になると考えられている。しかし、掃流砂と河床の状態に関する定量的知見は限られ、掃流砂が河床の健全性に果たす役割は明らかでない。そこで本章ではこれを解明するため、実験河川を用いた操作実験を行った。

3.2 方法

実験区として、同一の形状を持つ2つの実験河川の上流部(川底幅2m、長さ70m)を実験区として設定した。実験に先立ち、実験区河床は、重機を用いて表層約10cmの河床材料をすき取り、径15cm程度の玉石を敷設し、掃流砂がない状態とした。両河川に流量200L/sを流下させ、河床付着膜を生長させた後、一方の実験河川上流の土砂供給サイト河床に砂を敷設し、これを自然流下させて掃流砂を生じさせた。砂(<2mm)の投入は2回行い(投入①:80m³、投入②:27m³)、投入後の調査を行った(投入①後、投入②後)。もう一方の河川は砂を投入しない対照河川として、両河川の河床付着膜、一次生産量、底生動物を比較した。実験は平成22年8月から10月の間に行った。

調査は、砂投入前、投入①後、投入②後に行い、それぞれ約2週間の調査期間を設けた。河床付着膜の採取は、2日に1度の頻度で行い、実験区から縦断的にランダムに方形区(25cm×25cm)を5つ設定し、水深、流速の測定、方形枠に占める砂の面積割合の目視による読みとりを行った。その後、方形区内にある河床材料を容器に取り上げ、礫表面の河床付着物をナイロンブラシ及び蒸留水を用いて採取し、強熱減量、クロロフィルa等を測定した。一次生産量は、日中及び夜間の溶存酸素濃度を測定することにより算出した⁶⁾。底生動物は、各調査期間に

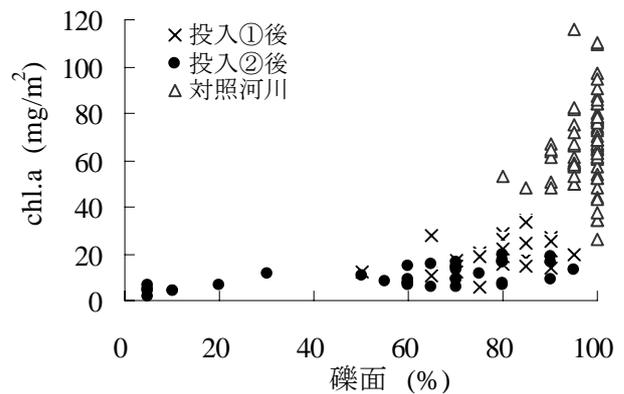


図-4 礫面の割合と付着藻類現存量の関係

1~2回、縦断的にランダムに4つの方形枠(25cm×25cm)を設定し、方形枠内に生息するすべての底生動物をサーバーネットを用いて採集し、ホルマリンで固定した後、可能な限り種レベルまで同定し、個体数を計数した。

3.3 結果及び考察

3.3.1 付着藻類現存量への影響

調査期間における付着藻類現存量(chl.a mg/m²)の経時変化を図-3に示す。砂投入前においては、両河川の付着藻類現存量に違いがみられ、砂投入河川の方が大きい傾向がみられたが、対照河川の投入前、投入①後、投入②後に有意差は検出されなかった(Tukeyの多重比較検定、 $P>0.05$)。一方、砂投入河川は、投入前、投入①後、投入②後の間に有意差が検出され(一元配置分散分析、 $P<0.001$)、投入①後の現存量は投入前より有意に小さく(Tukeyの多重比較検定、 $P<0.001$)、投入②後の現存量は投入①後より有意に小さく(Tukeyの多重比較検定、 $P<0.001$)、掃流砂の影響による付着藻類現存量の減少が把握された。掃流砂の影響には、掃流砂の衝突による摩擦作用、及び掃流砂の堆積に伴う付着基質となる礫面積の減少があげられる。図-4に、投入河川における投入①後、投入②後、及び同時期の対照河川の河床に占める礫面(%)と付着藻類現存量の関係を示した。礫面(%)が小さいほど、付着藻類現存量は小さい傾向がみられるが、同程度の礫面(%)であっても、投入②後の方が投入①後より小さい傾向がみられ、掃流砂の衝突が関与していると考えられた。

3.3.2 一次生産速度への影響

砂投入前、砂投入①後の実験河川Bにおける日当たり一次生産量及び生態系の日当たり呼吸量を図-5に示す。砂投入前の日当たり一次生産量はおよそ10(O₂·g m⁻² day⁻¹)を示し、2003年6月に実施した実験河川における

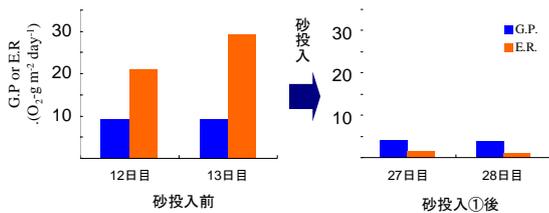


図-5 砂投入前後の一次総生産速度 (G.P.)、生態系呼吸速度 (E.R.)
調査時期については図-3 参照

生産量と同程度となった⁹⁾。日当たり呼吸量は20~30(O₂-g m⁻² day⁻¹)を示し、同様の実験河川における結果を上回った⁹⁾。今回の実験では河床に大礫を敷き詰めているため河床間隙が前回の実験と比較して多くなっている。このため、流下する粒状の有機物が間隙に捕捉されやすくなり、結果として日当たり呼吸量のみが前回と比較して上昇したものと考えられた。土砂投入①後は、日当たり一次生産量はおよそ4(O₂-g m⁻² day⁻¹)と概ね40%に減少し、また、日当たり呼吸量は1(O₂-g m⁻² day⁻¹)となり3~5%と著しく減少した。この結果、砂投入前は1未満だったP/R比が1を上回った。

このように細粒土砂の影響により実験河川における有機物代謝は大きく変化し、一次生産及び呼吸速度の減少を確認できた。この内一次生産速度の減少は、(1)砂の増加に伴い付着藻類の基質となる礫面積が減少する効果

(礫面積減少の効果)、(2)砂が掃流することによる付着藻類の磨耗効果(磨耗効果)、2つに起因すると考えられる。平成21年度の実験では2つの効果の分離が不完全だったため、平成22年度はこれを個別に評価し一次生産速度の推定モデルへと反映させる予定である。

4. 一次生産速度推定モデルの構築

一次生産速度推定モデルを推定するフローチャート(案)を示した(図-6)。本研究では山間地河道の瀬、平常時の流況を前提としてモデルの構築を行っている。まず、瀬の地形、河床粗度から瀬の任意の地点における流量-水深、流量-流速、流量-摩擦速度の関係式を導出する。河床については、巨礫・大礫・中礫といった大粒径集団は移動しないで河床構造の骨格を構成し、小礫以下の小粒径集団が掃流力に応じて当該河床構造上に分布・移動する現象を念頭に置く。ここで、任意の地点における大粒径集団からなる河床構造が与えられた場合、当該地点における小粒径集団が河床に占める割合(以下、簡単のために砂被度とする)は小粒径集団の供給量(以下、砂供給量)と掃流力で決まる。本モデルでは、河床構造を現地観測に基づき与条件として与え、流量-掃流力-移動限界粒径-砂被度-砂供給量との関係については、混合粒径を対象としたSurface-based transport model(河床表層輸送モデル)に基づき現地観測結果から

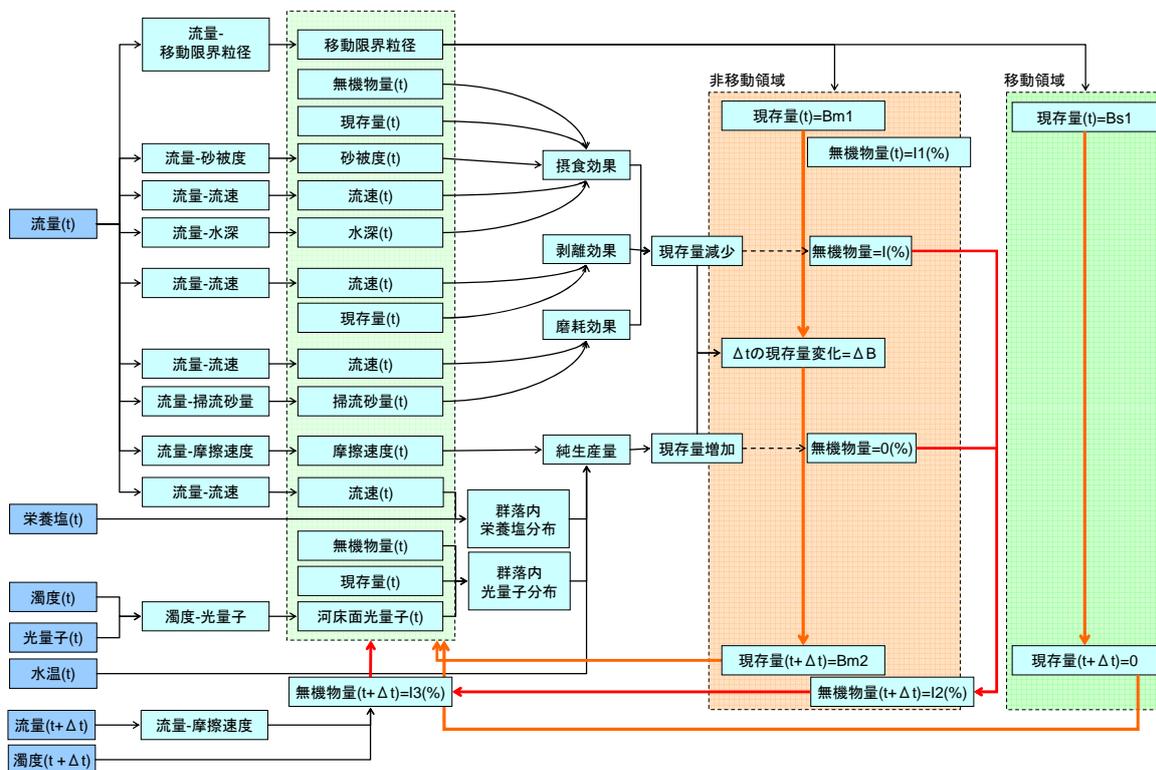


図-6 一次生産速度推定に至るフローチャート

推定し、この結果から、流量—砂供給量、流量—砂被度の関係式を作成する。

推定は付着藻類の現存量と付着藻類群落内に捕捉される無機物量を対象として、瀬の任意の地点に設定したコードラート（1m×1m）上で行う。現存量は移動限界粒径以下の非移動領域、以上の移動領域に区分し、ある時刻 t において移動領域に区分される粒径については現存量をゼロとする。非移動領域については、摂食効果、剥離効果、摩耗効果による現存量の低下、純生産量に基づく現存量の上昇の差分として与える。ここで、摂食効果についてはアユを対象として生息場の選好曲線に基づき潜在的な摂食効果を仮定する。通常、魚類生息場の選好曲線は流速、水深、河床材料粒径等に基づき設定するが、今年度の成果から明らかになってようにアユの摂食は流速、水深といった水理環境だけでなく、付着藻類中の状態、付着藻類の現存量と無機物量も支配要因となっている。従って、これらの要因を加味した選好曲線を作成し、任意の地点の摂食効果を推定することが必要となる。純生産量、剥離量の項については過年度に報告したとおりであり、河床材料の移動に伴う摩耗効果については北村らの方法に従い推定を行い、これらの結果から次の時間ステップにおける現存量を算出する。無機物量については剥離、摂食、磨耗のいずれかにより付着藻類が減少した場合には、残存する付着藻類に占める無機物量の割合は変化しないものとして取り扱う。また、純生産により増加した付着藻類については無機物が含まれないものとして扱い、 Δt 後の時間ステップにおける摩擦速度と濁度との関係から、残存した付着藻類と追加された付着藻類内に捕捉される無機物量を推定し、次の時間ステップにおける無機物量とする。

5. 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に、流量、掃流砂量、河床の状態、底生動物、魚類等の摂食圧の関係を把握し、これを基に、生物の摂食を加味した流量—土砂—付着藻類現存量推定モデルを構築し、河床環境劣化要因を推定する手法の提案を行うものである。21年度は、(1)河床付着物の状態に対する魚類の餌資源としての選択性、(2)掃流砂と河床の状態との関係解明、(3)一次生産速度推定モデルに土砂の効果を組み込んだフローチャートの作成を行った。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) アユは、付着膜の状態に対して摂食の選択性を有することが明らかとなり、河床の状態が生息密度、さらには摂食圧に影響を及ぼす可能性が示された。
- (2) 掃流砂による付着藻類現存量や一次生産量の減少が定量的に示され、これには、掃流砂による磨耗による剥離のみでなく、砂の堆積による付着基質となる礫面の面積の減少が関与していることが示され、
- (3) 既存の一次生産速度推定モデルに土砂の影響を取り込むためのフローチャートを作成した。

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) Power, M.E.:Habitat quality and the distribution of algae-grazing catfish in a Panamanian stream. *J. Anim. Ecol.* 53, 357-374, 1984.
- 2) Abe, S., Uchida, K., Naguma, T., Ioriya, T. and Tanaka, J.: Effects of a grazing fish, *Flecoglossus altivelis* (Osmeridae), on the taxonomic composition of freshwater benthic algal assemblages, *Arch. Hydrobio.* 150, pp. 581-595, 2003.
- 3) http://fra-seika.fra.affrc.go.jp/~dbmng/cgi-bin/search/search_detail.cgi?RESULT_ID=2129&YEAR=2007
- 4) 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.
- 5) Voelz, N. J., and Ward, J. V.: Biotic and abiotic gradients in a regulated high elevation Rocky Mountain river. *Regulated Rivers: Research. & Management.*, 3. pp. 143-152, 1989.
- 6) 萱場祐一：溶存酸素濃度の連続観測を用いた実験河川における再曝気係数、一次生産速度及び呼吸速度の推定. *陸水学雑誌*, 66, pp.93-105, 2005.
- 7) Wilcock, P. R. and Crowe, J. C. :Surface-based transport model for mixed-sized sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, pp. 120-128.
- 8) 北村忠紀・加藤万貴・田代喬・辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究. *河川技術に関する論文集*, 6, pp.125-130, 2000.

STUDY ON RIVER FLOW MANAGEMENT FOR MAINTAINING ECOLOGICAL FUNCTIONS OF RIVERBED

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Water Environment Research Group
(Aqua Restoration Research Center)

Author : KAYABA Yuichi

MINAGAWA Tomoko

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. For this purpose, we will built biomass prediction model comprising of the relationship among flow, sediment load and epilithic algae based on the research on grazing effects of fish and aquatic macroinvertebrate, and dislodgments effects brought by sediment loads. In the fiscal year 2009, the main results of this study are as follows:

- 1) Ayu fish (*Plecoglossus altivelis altivelis*) had a significant preference to the condition of periphyton on stream bed. This indicates that stream bed condition has a strong effect for the population density of grazers, resulting on the grazing effects of freshwater fauna.
- 2) Bed load influences on the reduction of biomass and primary production of periphyton. It is presumed that not only dislodgment caused by bed load but also the area of gravel on stream bed contribute to the reduction.
- 3) In order to develop a numerical model to predict primary production, flowchart was formed, in which the function of bed load for primary production was incorporated based on previous studies.

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