

近年の研究紹介①千曲川

河川中流域における生物生産量の推計と河川管理への応用

千曲川研究グループ代表 平林公男

1. はじめに

生態系を評価するための手段は、「密度や構成種などの群集構造の評価 structural measures」と「物質循環やエネルギーフローなどの機能的評価 functional measures」を組み合わせた方法が推奨されており、「構造的評価」と「機能的評価」の両者をカバーする評価法の一つに二次生産の分析がある。また生物生産は、生物相互作用や環境条件などの影響を受けるため、環境変化や人間の活動からの影響を評価する手段ともなり、重要な指標の一つだと報告されている (Buffagani and Comin, 2000 ; Dolbeth, 2012)。しかし、我が国の河川においては、「物質循環と生物生産性」について、1970年代にJIBPにより実施された2河川(奈良県吉野川と北海道遊楽部川)の総合研究調査があるのみで、その後の研究は大きく進展していない。近年、河川生態系を取り巻く環境は大きく変化しており、魚類現存量の減少やコクチバス等の肉食性外来魚の侵入などにより、1970年代とは異なる「物質循環と生物生産パターンの形成」が推測される。近年の観測・分析や数値計算技術の進展・普及に伴い、一次生産を中心とした調査・研究には進捗がみられ、「物質循環と生物生産性」の実態解明の実現性は高くなっている。しかし、実河川における二次生産までを含めた生物生産性の実態把握とそのモデル化は未だ不十分であり、魚類現存量の減少をはじめとする水圏生産性の低下などの原因解明や、これら問題を解決するための河川管理上の留意点等の把握には至っていない。

本研究では、河川中流域の瀬・淵ユニットにおいて、観測技術、分析技術を駆使し、物理環境、一次生産及び二次生産を一連の系としてとらえる「二次生産系」の実態を把握し、その量的な関係を明らかにすることを第一の目的とした。また、野外において直接観測できない項目や、推測が難しい項目については、近年、著しい進歩が認められる数値モデルを駆使し、全体像の把握に努めた。河川生態系は時間的な変動が大きいため、季節や年を通じた野外でのデータ観測を継続するとともに、複数の手法を用いて生物生産力を推定した。さらに、推定したデータをもとに、開発したモデルを用いて過去からの生物生産性の変遷を再現し、二次生産に関する問題の原

因推定と二次生産系を良好に保つための河川管理基準「生産性管理基準」を提案した。

2. 主な研究成果

千曲川研究グループでは、共通調査地点(上流より、常田新橋、岩野橋 図1)を設け「千曲川中流域における生物生産」というテーマについて、河道の物理特性や、バクテリア生産、藻類の一次生産、水生昆虫類の二次生産、魚類の分布と餌内容、鳥類の食物内容、流域スケールの水収支や遺伝的多様性、物理場と生物生産とを統合したコンパートメントモデルの開発と指標性の検討など、以下の研究組織を編成し、解明を進めてきた(図2)。

生物分野では、①バクテリア生産の時空間変動、②マスバランス法による生態系代謝の推定、③水生昆虫類の二次生産力の推定、④コクチバス駆除に伴う魚類群集の変化、⑤生息する鳥類からみた「捕食

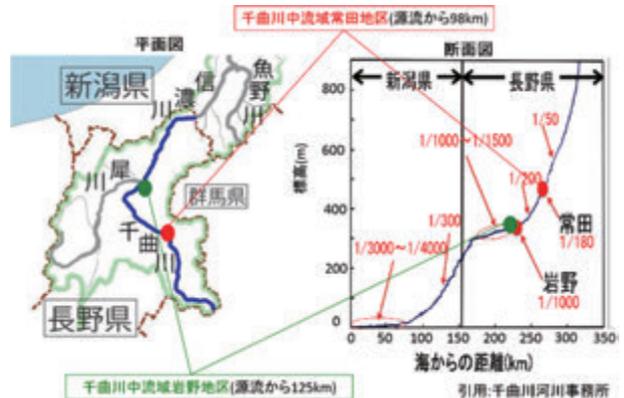


図1 調査地点



図2 研究組織

一被食関係」を実施した。また、物理環境分野では、⑥数値解析を用いた淵における微細粒子堆積傾向の比較、⑦河川版コンパートメントモデルを用いた複数年間の生物生産性の検証と生産性管理基準への展望を検討した。流域スケールの研究としては、⑧流域における水循環、⑨遺伝子マーカーを用いた底生動物の水系内移動分散評価 (source-sink の関係性や遺伝的多様性のホットスポット追究) などを行った。本稿では①バクテリア生産の時空間変動、②マスバランス法による生態系代謝の推定、③水生昆虫類の二次生産力の推定、⑦河川版コンパートメントモデルを用いた生物生産性の検証と生産性管理基準への展望の概要を紹介する。

2.1. バクテリア生産 (BP) の時空間変動

常田地区の瀬 (Sta. TS)・淵 (Sta. TF)、岩野地区の瀬 (Sta. W) におけるプランクトンBPとバイオフィームBPを図3に示した。プランクトンBPは5.5~466 mg C/m³/day, バイオフィームBPは2.9~132 mg C/m²/dayの範囲で変動した。プランクトンBPは春に、バイオフィームBPは夏に最大値を示した。プランクトンBPは地点間で差は見られなかったが、Sta. TSにおけるバイオフィームBPはSta. TF, Sta. Wと比較して高かった。また、バイオフィームBPの水柱全体のBPへの寄与率は15.4~97.8%を示し、春に最も低く、冬に高い値を示した。ガンマ分布と対数リンク関数を仮定した一般化線形モデルを用いて、環境変数がプランクトンおよびバイオフィームBPに及ぼす影響を検討したところ、プランクトンBPは水温と溶存態有機炭素、バイオフィームBPは水温、地点、流速、溶存態無機窒素濃度、バイオフィームバクテリア現存量が主要な説明変数であることが示唆され、両BPは異なる環境要因によって制御されていたことが明らかとなった。

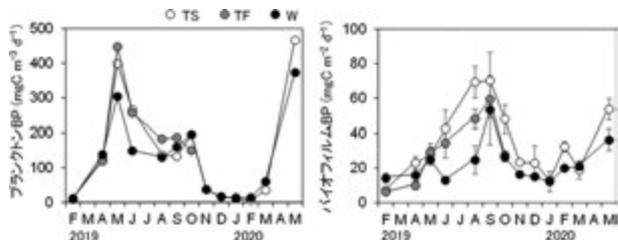


図3 バクテリア生産の季節変化

2.2. マスバランス法による生態系代謝の推定

千曲川中流域における生態系代謝を明らかにするため、二つの調査を行った。一つ目の調査では、みかけ上の純生産量を明らかにするため、現場における付着藻類の増加を2年にわたり観察した。この観察では、水生昆虫による被食量や増殖などにも

なう剥離量は評価できないため、持ち帰った付着藻類から水生昆虫を取り除き、培養し、培養時の光合成速度と呼吸速度から現場での純生産量を見積もった。現場で観察した純生産量との差分を、被食量と剥離量の合計とし、その純生産量に占める割合を推定した。その結果、純生産量の81%が被食量と剥離量の合計と見積もることができた。一方、年間の総生産量(純生産量と呼吸量)を見積もるため、1年間水中の溶存酸素濃度を測定し、マスバランス法で純生産量および呼吸量を推算した。年間の純生産量および呼吸量を推算するため、各月10日間について推算を行い、年平均値を得た。

二つ目の調査では、流下懸濁物質中の有機物の起源解析を試みた。流下懸濁物質は付着藻と陸上植物の2つが主な起源であるため、炭素安定同位体比とC/N比から、流下懸濁物質の有機物に占める付着藻類の寄与率を推定した。陸上植物の炭素安定同位体比の試料差はC/N比よりも小さかったため、こちらから算出された寄与率を採用することとし、流下懸濁物質の4割は付着藻類、6割は陸上植物由来とした。以上、二つの調査をまとめ、千曲川中流域(常田地区)の生態系代謝を整理すると図4のようになった。

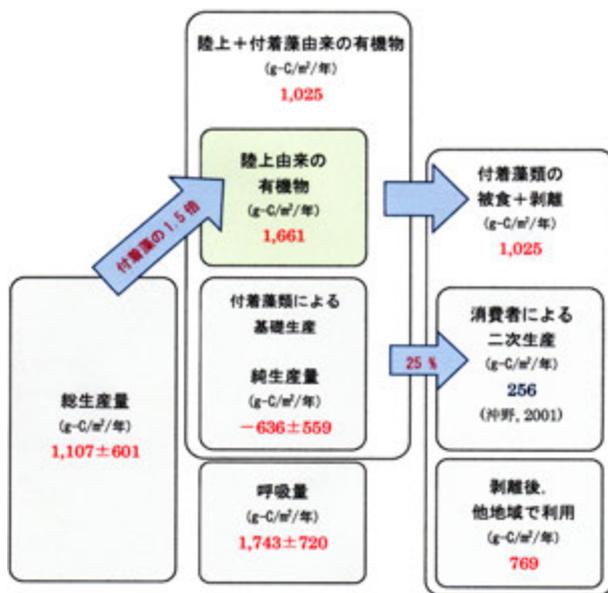


図4 常田地区における生態系代謝

2.3. 水生昆虫類の二次生産力の推定

2015-2017年を例に、分類群ごとの二次生産力を表1に示した。各地区の二次生産力は、瀬と淵の平均値とした。算出された二次生産力 (AFDW g/m²/年) は、常田地区では53.5~90.0、岩野地区は46.2~58.4の変動幅であった。また、二次生産力の各分類群が占める割合を図5に示した。常田地区、岩野地区ともに全年度でトビケラ目の割合が高く、最低でも47% (常田地区2015年, 2016年) を占め、最

高では67% (常田地区2017年) を占めた。トビケラ目の中でも常田地区ではヒゲナガカワトビケラの割合が高く、岩野地区ではヒゲナガカワトビケラを除くトビケラ目の割合が高かった。世界の河川における水生昆虫類の二次生産力の値 (Gaines et al., 1992; Meyer and Poepperl, 2003; Tsuda, 1975) と比較してみると、アメリカやニュージーランドなどの温暖湿潤の気候帯を流れる河川と比べても2-3倍高い値を示した。

表1 全水生昆虫類の二次生産力 (AFDW g/m²/年)

	ヒゲナガカワトビケラ	ウレマンマヒケラ	エチゴシマヒケラ	その他のヒケラ類	カゲロウ目	ユスリカ科	カガンボ科 (Atelulella)	その他	合計 (全水生昆虫)
2015年度	28.9	1.3	0.2	11.6	8.6	10.8	1.1	27.5	90.0
常田地区 2016年度	17.8	2.1	0.1	5.6	7.0	12.9	1.1	7.1	53.5
2017年度	26.7	3.2	0	7.3	5.7	3.4	0.5	8.9	55.7
岩野地区 2016年度	10.1	1.8	2.8	12.1	7.6	5.6	0.3	6.0	46.2
2017年度	13.5	6.0	2.8	9.8	7.8	4.4	0.1	14.0	58.4

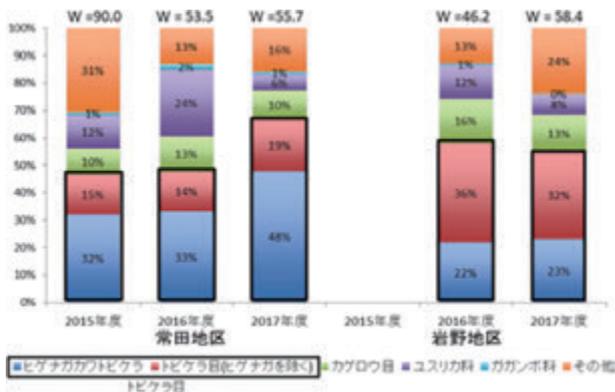


図5 水生昆虫類の二次生産力を各分類群が占める割合

2.4. まとめ

図6に本研究における千曲川中流域における炭素の物質収支を示した。沖野 (2001) の図に、オレンジ枠、赤字を追加して、新たな知見・情報を追記した。一次総生産量の1.6倍にあたる1743 gC/m²/yearもの呼吸量が計測された。そのため、通年での純生産は-636 gC/m²/yearと負の値となった。この河川全体での呼吸量に対し、細菌類の呼吸量は129.2 gC/m²/yearであり、その差は河床での呼吸量と推定され、かなり大きな値である。一方、この負の純生産を陸上由来の有機物が補い、河川生態系の二次生産を支えており、その量は1661 gC/m²/yearと推定された。総一次生産量に占めるバクテリアの純生産量は、52.9 gC/m²/yearと比較的小さい値であった。しかし、千曲川中流域における付着性および浮遊性バクテリアの純生産量 (それぞれ3~132 mgC/m²/day, 6~466 mgC/m³/day) は、他河川における値 (付着性: 7~286 mgC/m²/day, 浮

遊性: 0~618 mgC/m³/day; Ainsworth and Goulter 2000a, b, Carr et al. 2005, Fukuda et al. 2006, Scott et al. 2008, Kamjunke et al. 2015) と同程度であった。陸上由来の有機物量と細菌類による純生産量を含めた有機物生産量 (1078 gC/m²/year) を消費者による二次生産量と剥離後、他の地域で利用される有機物量の合計と見積もった。魚類や水生昆虫類などの消費者による二次生産量は、付着藻類による純生産量の20-30%とされているが、ここでは上記の有機物生産量の25%とし、270 gC/m²/yearと見積もった。この内の約20%が水生昆虫類による二次生産量 (およそ43-70 gC/m²/year) であり、残りの約80%が魚類などによる二次生産量 (およそ200-227 gC/m²/year) と推計された。アユの二次生産力は他の魚類に比べて極めて高いことが報告されており、京都府の宇川では、最大で413.7 (g/m²/year: 炭素換算で33.1gC/m²/year) と報告されている (川那部, 1970)。千曲川ではアユ (全て放流由来) は、遊泳魚の1%未満にとどまっている。

水中有機物の安定同位体比の測定結果より、陸上由来の有機物と、内生有機物との比がおよそ6:4であることから、陸上由来の有機物量は1661 gC/m²/yearと見積もられ、付着藻類による総生産量を上回る大きな値を示した。また、剥離後、他地域で利用される有機物は808 gC/m²/yearで、消費者による二次生産量の3倍の値を示した。

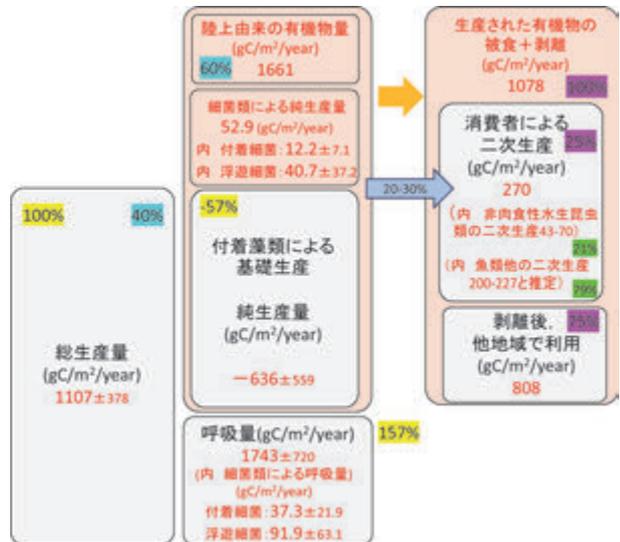


図6 千曲川中流域における炭素の物質収支

図7には、魚類を中心とした生物生産力の季節変化をまとめた。時空間的に生物生産力に違いが認められること、それらを利用する魚類の捕食速度も大きく異なることが示唆される。千曲川の魚類生産は秋に生産力が高く、洪水が少ない年であれば、藻類も水生昆虫類も豊富に存在するため、生物生産力全体は、さらに高くなると予想される。

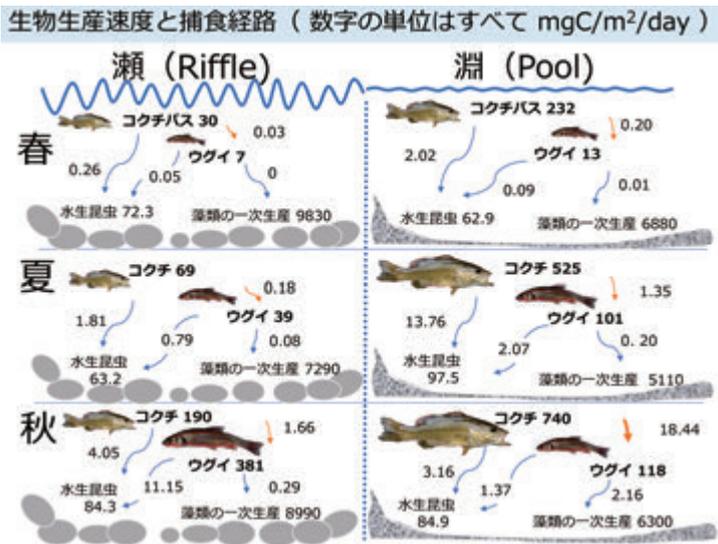


図7 瀬・淵における魚類を中心とした生物生産力

3. 河川版コンパートメントモデルを用いた生物生産性の検証と生産性管理基準への展望

各生物における現地観測・モデル化の結果、平水時における「流速」, 「水深」が、各生物における現存量・生産性に影響を与えることを明らかにした。一般的に、流速は平水時における流量を断面積で除して求めることができる。平水時における断面積は川幅(以下, 「b」)と「水深」(以下, 「h」)の積で求められる。bとhを用いれば、流速を推定することができる。対象区間における横断測量、平均河床勾及び簡易等流計算を用いて、平水時におけるb, h及び流速を求める手法を考案し、その指標化として生産性管理基準「b/h」を考案した(図8)。千曲川においてb/hを求め、河道内微地形の特徴や生産性に影響を与える流速、水深を良好に表現できることを確認した。

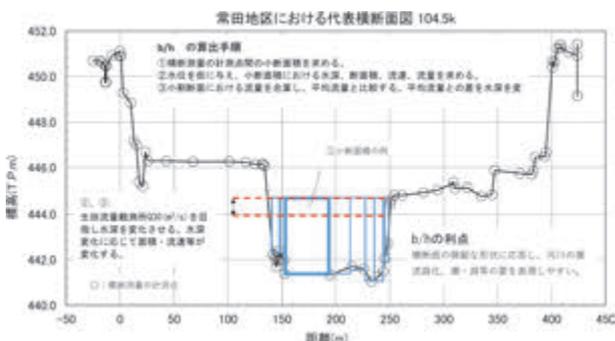


図8 横断測量を用いたb/hの算出手法の概要

4. おわりに

沖野(2001)によると、千曲川の総生産量は1056 gC/m²/year, 呼吸量は272 gC/m²/year, その差が純生産量786 gC/m²/yearとして報告されている。本研究では、総生産量は1107 gC/m²/yearと、沖野(2001)の報告とほぼ同様の値を示したが、呼吸量

が1743 gC/m²/yearと高い値を示した。これは、本研究で採用したマスバランス法が、河床/河床下をも含めた呼吸量を測定しているためであると推測され、結果として、付着藻類による純生産量がマイナスの値を示した。このことは、調査期間内における千曲川中流域の二次生産力は、陸上由来の有機物に支えられていたことを示唆している。陸上由来の有機物が、近傍の河畔林由来であるのか、さらには、上流域から供給されてくる有機物なのかは、現時点では不明である。二次生産者のうち、水生昆虫類では、水中の粒状有機物を網で濾過して摂食する濾過食者の生産力が高いのも、理解できる。河床が大きく変動するような大規模洪水が起きると、河床下に堆積した有機物が一掃され、河床の呼吸量が小さくなり、相対的に藻類の純生産量が高くなるのかもしれない。逆に長期間、大規模な洪水が起きなければ、河床下に有機物が堆積し、呼吸量が増大し、二次生産者は陸域の有機物に依存せざるを得なくなっているのかもしれない。

魚類に主に利用される水生昆虫類はカゲロウ類(7-9月の夏期に羽化)であるため、河川が安定化し、造網型のヒゲナガカワトビケラなどの密度が高くなると、水生昆虫類全体の生産力は高くなるが、トビケラ類は魚類にあまり捕食されないため、物質循環上は、あまり重要ではない。このことから、水生昆虫類は造網性トビケラ類が主となる極相に至らぬよう、河床が適度な攪乱を受け、カゲロウ類が優占する群集であることが望ましい。魚類では、本来、存在しなかったコクチバスを少なくすれば、ウグイ、オイカワの生産力は上がると予想される。しかし逆に、水生昆虫類はウグイ、オイカワなどに捕食され、減少する可能性もある。本研究の成果は、高生産性の中流域を構成する単位の瀬・淵区域を対象としている結果であり、より多様性の高い流域全体を対象とする場合には、さらなる基礎的な研究の展開が必要となる。

モデル研究により、河床低下に伴う水深増加・単流路化が、一次生産、二次生産に影響を与えることを明らかにした。また、河道掘削によるメリハリのある瀬・淵を有する複数流路の再生は、砂礫河原再生だけでなく生産性保全にも役立つ可能性を示唆した。

令和元年東日本台風で、対象調査地の河道の構造が大きく変動したため、これまで蓄積してきた千曲川中流域における生物生産力のポテンシャルが、この洪水でどのように変化し、どのように回復しているのかについて、新たな視点で検討をスタートさせることが重要である。