

エクセルギー効率に基づく河川生態環境評価法の開発

DEVELOPMENT OF RIVER ECOSYSTEM ASSESMENT BASED ON EXERGY EFFICIENCY

赤松良久¹・宮本大輔²

Yoshihisa AKAMATSU and Daisuke MIYAMOTO

¹正会員 博（工）准教授 琉球大学工学部環境建設工学科（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1）

²非会員 琉球大学工学部環境建設工学科（同上）

A new ecosystem assessment method based on exergy efficiency is proposed to evaluate health of river ecosystem. The exergy takes into account of both energy quantity and energy quality. In this method, ecological exergy efficiency, which is calculated by the ratio of organism exergy produced in system to exergy supplied from outside of system (photosynthetically active radiation exergy and organic exergy supplied by flood) is defined as an indicator of health of river ecosystem. This ecosystem assessment method is applied to natural riffle zone and riffle zone with bank protection in Genka River, Okinawa. The result shows that the exergy efficiency at the natural riffle zone is 0.84 and that at the riffle zone with bank protection is 0.13.

Key Words : exergy, river ecosystem, ecological model, assessment method

1. はじめに

現在、広く用いられている生息場評価モデル¹⁾や生態系モデル²⁾は河川環境を水質や生態系上位の魚の生息環境という観点で評価する上ではある程度有効であるが、河川生態系の健全性という意味で評価するには不十分である。したがって、河川生態系の健全性は詳細な生物・水質調査から総合的に判断するしかない。生物・水質調査の結果は専門の知識を持ったものには理解できるものの、万人に理解できるものではないため、より普遍的で理解しやすい生態系の健全性の評価指標が必要とされている。

生態学の分野では古くから生態系内のエネルギーの流れに着目して研究がなされてきた³⁾。生態系を理解するに当たって、生態系内のエネルギーの流れを捉えることは本質的であり、生態系の健全性を評価する上で最も有効であると考えられる。また、近年では従来のエネルギーという量だけの考え方ではなくエネルギーの質と量を示すエクセルギーに着目した研究が行われている⁴⁾。そこで、本研究では生態系内のエクセルギー効率に基づく新たな河川生態環境評価法を開発する。

2. 既存の河川生態環境評価法

既存の生態系の評価法として最も広く活用されている生息場評価モデルおよび生態系モデルについて、その概要について説明するとともに河川生態系の健全性を評価する際の問題点についても考察する。

(1) 生息場評価モデル

生息場評価モデルの一つであるPHABSIMは河川の物理生息場の変化を流量の関数として表すように設計されており¹⁾、水質やエネルギーなどのその他の要素とは結びついていない。生息場評価モデルは特に魚類を対象として用いられることが多いが、最近では底生生物にも適用されている。また、生息場の空間的分布をより詳しく把握することのできる二次元水深平均河川流体力学・魚類生息場モデル⁵⁾ (River2D) が広まりつつある。このモデルでは平面二次元流れ場の計算を行い局所的な水深や流速を算出して、図-1に示すような流速、水深および物質濃度に対する生息場適性曲線によって魚類の生息環境に関してより正確に評価することが可能となっている。しかし、礫床河川のような河床形状が非常に複雑な区間では数値シミュレーションにより流れの局所的な流速を評価することは困難である。魚類や底生生物の生息場としては巨礫背面の流れが遅くなった領域など特に計算で

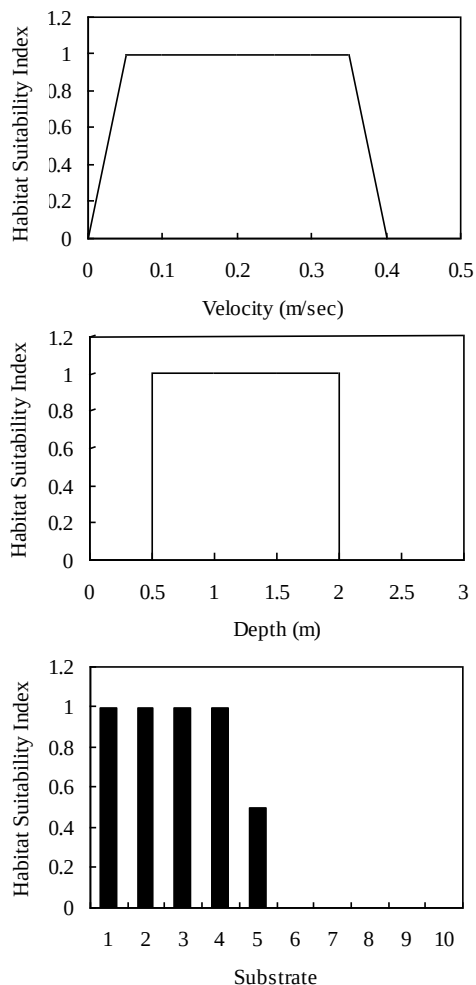


図-1 流速、水深および物質濃度に対する生息場適性曲線

流れ場がうまく再現できない領域が重要となることが多い。また、河川においては大きな洪水が起こることによって、河床形状が大きく変化するため、正確な流れの状況を把握するには時間的にも空間的にも密な河床形状データが必要である。さらに、河川の生態系の食物連鎖を考えると、魚類や底生生物は生態系下位の藻類や餌となる有機物の存在によってその生息場が決定されるため、餌環境の考慮した生息場評価が必要である。したがって、生息場評価モデルは希少種などの生息場を保護していく際の指針としては有用であるが、生態系全体の健全性を評価するには適していない。

(2) 生態系モデル

生態系モデルは今日広く使われており、内湾や湖沼など閉鎖性の強い場では物質循環に着目した生態系モデルの有効性が確認されている。図-2に生態系モデルで考慮される物質循環の模式図を示す。生態系モデルでは炭素・窒素・リン・酸素といった生物の基質となる物質の動態や、それらを利用する植物・動物プランクトンあるいは付着性藻類の成長・死滅といった複雑な生物・化学

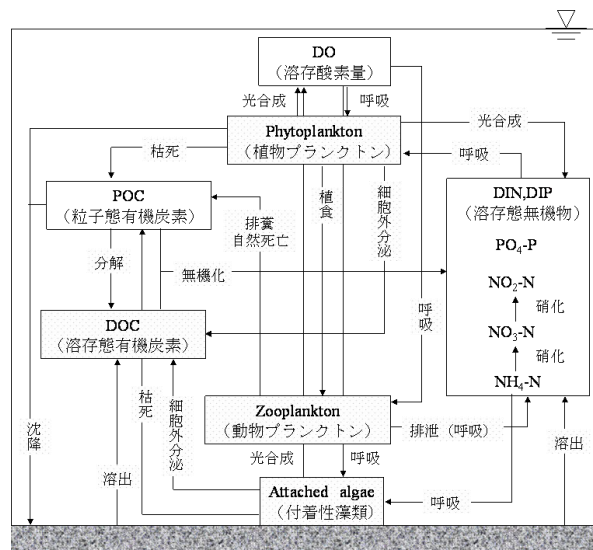


図-2 生態系モデルで考慮する物質循環の模式図⁶⁾

反応過程をモデル内に取り込んでいるため、多くのパラメータの決定が必要となる。つまり、生態系モデルを河川に適用するには河川における各種生物の現存量だけではなく水質および生物生理に関するパラメータ（硝化速度、生産速度、代謝速度等）の適切な情報が必要不可欠である。しかし、河川においては出水によって生態系の構造は大きく変化するためこのようなパラメータを決定するのは難しい。生態系モデルは現実には忠実な生態模型ともいえるが、多くのパラメータの同定が必要不可欠であり、河川生態系の評価法として実用的ではない。

3. エクセルギー効率に基づく河川生態環境評価法

河川環境の評価は古くはBOD（生物化学的酸素要求量）やCOD（化学的酸素要求量）といった水質指標によって行われてきた。BODやCODといった指標は河川環境を定量的に評価可能な指標であり、河川環境を管理していく上で便利であった。しかし、河川環境あるいは生態系への関心が高まり、新しい定量的な河川生態環境評価指標が必要とされている。

ここではエクセルギー（有効エネルギー）に基づく新たな河川生態系の評価法について考察する。河川をある区間で切り、その区間の生態系内での有機物・有機体エクセルギーの収支について考える。図-3に生態系内のエクセルギーの収支の概念図を示す。河川における系内のエクセルギーの供給源は河床の付着藻類の光合成活動に使われる光エクセルギー Ex_s と出水時に河床に供給される有機物エクセルギー Ex_{id} である。平水時に上流から供給される有機物エクセルギー（流入 Ex_{in} —流出 Ex_{out} ）があるものの、その量は他の要素に比べて小さく河川が安定した状態では無視できると考えられる（本評価法では出

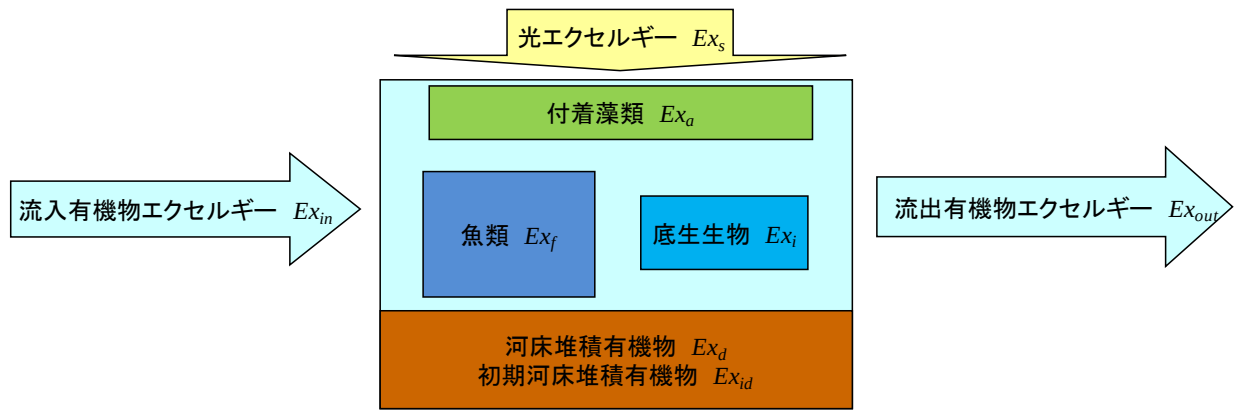


図-3 河川生態系内のエクセルギー収支の概念図

水後に河川生態系が十分に回復した際の河床堆積有機物 Ex_d に含まれる)。つまり、河川のある区間におけるエクセルギーの状態は出水ごとに完全に初期状態に戻り、出水時に河床に供給されたエクセルギーと太陽からの光エクセルギーを利用して、生態系が形成されていくと考えられる。ここでの出水とは対象域の河床の付着藻類がほぼ完全に剥離する規模のものを対象とする。出水後に河川生態系が十分に回復した際に河川内に存在する有機物・有機体エクセルギーは付着藻類 Ex_d 、底生生物 Ex_i 、魚類 Ex_f 、河床堆積有機物 Ex_d である（図-3）。河川における浮遊性の植物・動物プランクトンは湖沼や湾内のように系内に滞留することなく流下するためここでは無視する（現存量としても河床に生息する生物量に比べて圧倒的に少ない）。生態系の上位の者ほど高いエクセルギーを持つことから⁴⁾、河川が出水後に十分回復した状態で魚類や底生生物が多数存在する場合には系内は高いエクセルギー状態にあり、付着藻類の異常繁茂や有機物の堆積が顕著である場合には系内が低いエクセルギー状態にあると考えられる。系内のエクセルギー状態を定量的に評価するためには系内でのエクセルギーの利用効率を考える必要があり、この利用効率が高ければ高いほど健全な生態系が形成されていると考えることができる。系内のエクセルギー利用効率は系外から供給されたエクセルギー（出水によって系内に供給された有機物エクセルギー Ex_{id} + 出水後から定常状態になるまでに供給された光エクセルギー Ex_s ）に対する系内に存在する有機物・有機体の総エクセルギー（付着藻類 Ex_d 、底生生物 Ex_i 、魚類 Ex_f 、河床堆積有機物 Ex_d ）として以下のような式で示される。

$$\eta = \frac{Ex_d + Ex_i + Ex_f + Ex_d}{Ex_{id} + Ex_s} \quad (1)$$

このエクセルギー効率 η は出水直後には1に近い値をとりその後減少していくと考えられる。しかし、健全な生態系では高いエクセルギーを持つ底生生物や魚類の成長によってその系内のエクセルギー効率の低下は鈍く、次の

出水が起こることによって、エクセルギー効率は1に戻る。これに対して、出水による付着藻類の更新がなく、底生生物や魚類の少ない生態系ではエクセルギー効率が次第に低下していくと考えられる。

4. エクセルギーの計算法

エクセルギーの収支で河川の生態系を捉えるため、ここではエクセルギーの計算法を示す。河川生態系において考慮しなくていけないエクセルギーは光合成活動に使われる光エクセルギーおよび有機物・有機体を持つエクセルギーである。

(1) 光合成活動に使われる光エクセルギー

河川生態系においては河床付着藻類が光合成活動の担い手である。したがって、河床に到達する日射量を算出する必要がある。河床に到達する日射量は水中の日射の透過特性と水深の関係を表す Lambert-Beer の光透過式⁷⁾を用いて算出される。

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp\{-\alpha(\lambda) \cdot D\} \quad (2)$$

ここで、 $E_0(\lambda)$ ：水面直下の日射量 (W/m^2)、 $E(\lambda)$ ：深度 $D(m)$ の日射量 (W/m^2)、 $\alpha(\lambda)$ ：吸光係数であり、吸光係数は純水では0.28である。

河床に到達する光のエクセルギーは以下のように表わされる⁸⁾。

$$Ex(\lambda) = Ex - T^0 s_L \quad (3)$$

ここで、 T^0 ：環境温度 (K)、 s_L ：エントロピー ($W/m^2/K$) であり、プランクの輻射則より0.0506と算出される。

河床の到達した光エクセルギーのうち光合成活動に使われる光エクセルギー Ex_s は植物内の自由エネルギー増加をもたらす入射エクセルギーと定義され、以下の式⁹⁾で示される。

$$Ex_s = \int_{380}^{710} \varepsilon A(\lambda) Ex(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

ここで、 λ ：光の波長、 $A(\lambda)$ ：波長 λ の光エネルギーの植物体内への吸収率、 ε ：吸収された光エネルギーの内の植物の自由エネルギーの増加に使われる割合である。 ε はエネルギー収率と呼ばれ、0.35～0.4の値をとる。

(2) 有機物・有機体のエクセルギー

生態系内でのエクセルギーの収支を考えるにあたっては、有機物・有機体の持つエネルギーを考える必要がある。有機物・有機体の持つ化学エクセルギーはある物質が周囲の環境と化学的に平衡状態になるまでになすことのできる最大の仕事量と定義できる。近年、有機物・有機体の持つエクセルギーの生態系内での流れについて検討することの有用性がJørgensen⁴⁾によって示されている。デトリタスの持つ単位重量当たりのエクセルギーは18.5kJ/gであり、デトリタスを基準として、付着藻類(A)、底生生物(I)および魚類(F)からなる水界生態系におけるエクセルギー Ex は以下のように表わされる¹⁰⁾。

$$Ex / RT = A(3.4) + I(144) + F(344) + (D) \quad (5)$$

[g detritus / l]

ここで、 R ：気体定数、 T ：絶対温度(K)であり、生態系上位の生物ほど大きいエクセルギーを持つこととなる。

5. 現地河川への適用

(1) 現地観測概要

現地観測は沖縄県名護市の源河川において行った(図-4)。源河川ではリュウキュウアユの蘇生事業が実施されてきたが、河口拡幅や側壁護岸などの河川改修による生息環境悪化の影響が大きくリュウキュウアユの蘇生には至っていない。源河川の上流域の自然状態に近い瀬区間(Stn.A)と中流域の護岸による影響を強く受けた瀬区間(Stn.B)を対象として観測を行った。表-1に観測対象地の平瀬および早瀬の面積、平均水深、水表面への日射の到達率を示す。Stn.Aでは河畔林による日射の遮蔽の影響が大きい、Stn.Bでは護岸工事の際に河畔林の伐採が行われたため日射の水表面への到達率は高い。図-5に観測期間前後(2007年7月11日～8月13日)の降水量および



図-4 観測地

全天日射量の時系列変化を示す。7月13日から14日および8月10日から12日にかけてまとまった降雨があり、対象とした河川ではこれらの降雨によって河床が攪乱され、付着藻類の剥離が確認された。7月17日および7月23日に

表-1 観測地の特性

Point	面積 (m ²)	平均水深 (cm)	水表面への 日射到達率 (%)
Stn.A(平瀬)	178	28	10.4
Stn.A(早瀬)	110	10	3.6
Stn.B(平瀬)	275	12	68.5
Stn.B(早瀬)	72	8	49.8

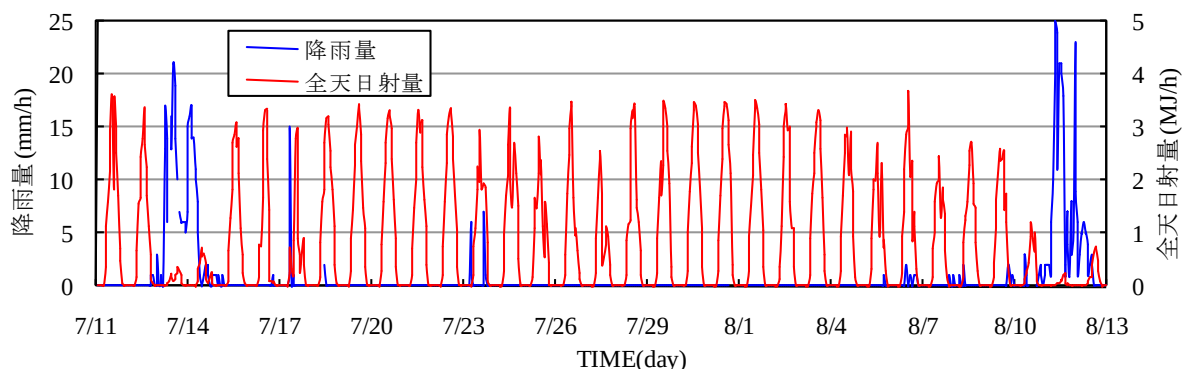


図-5 観測期間前後の降水量および全天日射量

表-2 単位面積当たりの河床堆積有機物量，付着藻類量，底生生物量

Time	Point	河床堆積有機物 (g/m ²)	付着藻類 (g/m ²)	底生生物 (g/m ²)
出水後 (2007/7/20)	自然区間	Stn.A (平瀬)	0.35	—
		Stn.A (早瀬)	3.33	0.06
	護岸区間	Stn.B (平瀬)	3.02	—
		Stn.B (早瀬)	6.07	—
回復後 (2007/8/8)	自然区間	Stn.A (平瀬)	3.28	11.7
		Stn.A (早瀬)	21.3	53.68
	護岸区間	Stn.B (平瀬)	0.51	59.27
		Stn.B (早瀬)	12.82	8.29

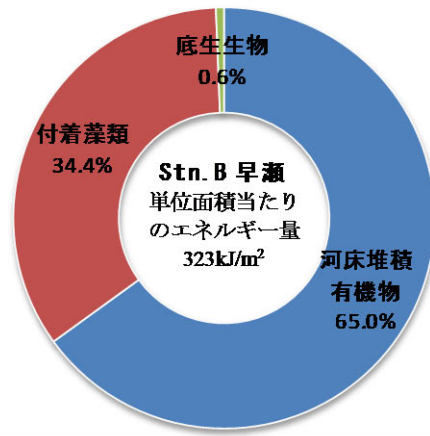
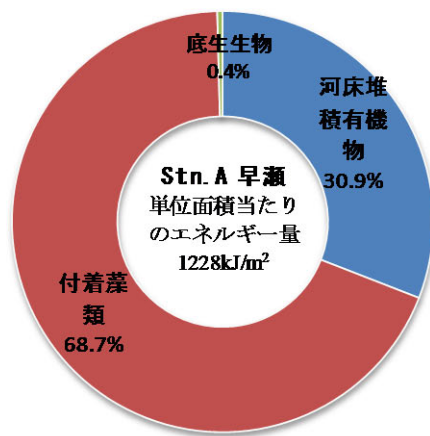
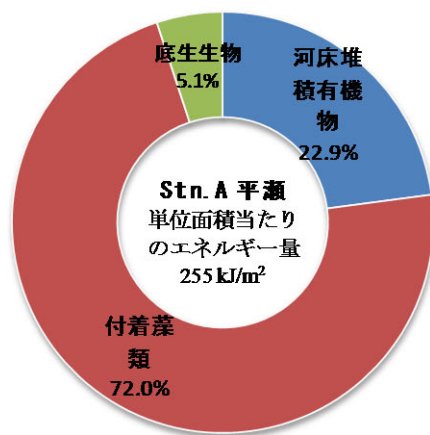


図-6 回復後の生態系内の有機物・有機体エネルギーの構成比

少量の降雨があったものの7月15日から8月9日にかけては晴天日が続き，この期間に付着藻類は十分に回復したと考えられる．現地観測では出水後（7月20日）および回復後（8月8日）にStn.A, Bの平瀬および早瀬において1m×1mのコドラード内の河床堆積物・底生生物・付着藻類量および対象域の魚類数の調査を行った．河床堆積物・底生動物・付着藻類に関しては乾燥重量および強熱減量を測定した．また，カロリーメーター（CA4PJ，（株）島津製作所）を用いて単位乾燥重量当たりの河床堆積物・底生動物・付着藻類の持つエネルギー量を計測した．

（2）観測結果と考察

表-2に出水後（7月20日）および回復後（8月8日）のStn.A, Bの平瀬および早瀬における単位面積当たりの河床堆積物・底生動物・付着藻類の乾燥重量を示す（魚類はほとんど確認されなかった）．出水後にはStn.Aの早瀬に少量の底生生物が見られたものの，他の地点では付着藻類および底生生物は確認されなかった．通常，平瀬は早瀬に比べて水深が深く付着藻類量は早瀬より少なくなることが多いが，Stn.Bの平瀬においては糸状藻類の異常繁茂が起こり，付着藻類量が多くなっている．また，Stn.Aでは河床に有機物が供給される傾向にあるのに対して，Stn.Bでは河床堆積有機物量が減少傾向にあることが

表-4 各エクセルギーの総量とエクセルギー効率

		出水後の総エクセルギー	回復後の総エクセルギー	供給された光エクセルギー	エクセルギー効率
		Ex_{id} (MJ)	$Ex_a + Ex_i + Ex_d$ (MJ)	Ex_s (MJ)	η
自然区間の瀬	Stn.A	8	657	779	0.84
護岸区間の瀬	Stn.B	23	1097	8572	0.13

表-3 単位乾燥重量当たりのエネルギー量

河床堆積有機物 (kJ/g)	付着藻類 (kJ/g)	底生生物 (kJ/g)
14.6	17.1	16.8

わかる。

回復後（8月8日）のStn.A, Bの平瀬および早瀬における有機物・有機体エネルギーの構成比を図-6に示す。エネルギー量の計算には表-3に示す単位重量当たりのエネルギー量の計測結果を用いた。これから河床堆積有機物、付着藻類、底生生物の単位乾燥重量当たりのエネルギー量にはほとんど差がないことがわかる。図-6からStn.Bの平瀬では付着藻類が大部分を占めているのに対して、Stn.Aの平瀬では河床堆積有機物や底生生物が有意なエネルギー量を持っていることがわかる。また、Stn.Aでは単位面積当たりのエネルギー量は早瀬の方が大きいものに対して、Stn.Bでは平瀬の方が大きくなっている。この結果からもStn.Bでは糸状藻類の異常繁殖によって河川内の生物の多様性が失われており、Stn.Aでは河床への豊富な有機物供給があり、多様な生物が育まれ、健全な生態系が作り上げられていることがわかる。

(3) エクセルギー効率を用いた河川生態環境評価

Stn.AおよびStn.Bにおける光エクセルギーおよび有機物・有機体エクセルギーを式(2)～(5)を用いて算出した。出水後の総エクセルギー (Ex_{id})、回復後のエクセルギー ($Ex_a + Ex_i + Ex_d$) および19日間に供給され光エクセルギー (Ex_s) とそれらから算出されたエクセルギー効率 η を表-4に示す。その結果、Stn.Aでは供給される光エクセルギーはStn.Bの1割程度であるが、回復後の総エクセルギーはStn.Bの6割程度であることがわかる。エクセルギー効率はStn.Aでは0.84と1に近い値であり、自然区間のStn.Aでは健全な生態系が保たれていることがわかる。それに対して、護岸区間のStn.Bにおいては側岸の植生を伐採し、護岸工事を行ったことにより、供給される日射量が増え、エネルギーのほとんどが付着藻類の増殖に使われるため、エクセルギー効率が0.13である不健全な生態系が形成されている。

6. 結論

本研究において提案されたエクセルギー効率に基づく河川生態環境評価指標はこれまであいまいであった生態

系の健全性を生態系内のエクセルギーの利用効率という形で定量的に評価する方法を提案した。また、本手法を現地河川に適用したところ、見た目には明らかな自然区間の瀬と護岸区間の瀬の生態系の健全性の違いを定量的に評価可能であることがわかった。しかし、エクセルギー効率は対象とする期間の設定によってその結果が大きく変わることが予測されその点をどのように扱うかが今後の課題である。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)（課題番号：19760345，研究代表者：赤松良久）の補助を受けている。現地観測では(財)沖縄環境科学センターの協力を得た。また、カロリーメーターを用いたエネルギー計測では琉球大学農学部川満研究室の皆様の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Bovee, K. D.: A comprehensive overview of the Instream Flow Incremental Methodology, National Biological Service, Fort Collins, Colorado, 1995.
- 2) 楠田哲也：水域生態系モデルの進歩と課題，第36回水工学に関する夏季研修会講義集Aコース，pp.A-3-1-23.
- 3) Odum, H. T.: Systems Ecology, John Wiley and Sons, New York, 1983.
- 4) Jørgensen, S. E.: Exergy and ecology, *Ecological Modelling*, vol.63, pp.185-214, 1992.
- 5) Ghanem, A. H., Steffler, P. M., Hicks, F. E. and Katopodis, C.: Two dimensional finite element flow modeling of physical fish habitat, *Regulated Rivers: Research and Management*, Vol.12, pp.185-200, 1996.
- 6) 赤松良久, 池田駿介：マングローブ水域における物質循環，土木学会論文集，No.768/II-68, pp.193-208, 2004.
- 7) 土木学会編：水理公式集，第1編11章，土木学会，1987.
- 8) H. Asada and M. Shukuya.: Exergy-Entropy Process of Electric Lighting Systems Using Fluorescent Lamps, *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, No.483, pp.91-100, 1996.
- 9) Bell, L. N.: Energetics of the Photosynthesizing Plant Cell, Harwood Academic Publ., Chur., 1985.
- 10) Jørgensen, S. E., Ladegaard, N., Debeljak, M. and Marques, J. C.: Calculation of exergy for organisms, *Ecological Modelling*, vol.185, pp.165-175, 2005.

(2007. 9. 30受付)