

礫床河川における付着藻類現存量の迅速な定量化を目的とした携帯式計測機器の適用可能性

APPLICABILITY OF PORTABLE EQUIPMENT FOR MEASURING ALGAL BIOMASS RAPIDLY IN GRAVEL RIVERS

宮川 幸雄¹・溝口 裕太²・田代 喬³・中村 圭吾²
Yukio MIYAGAWA, Yuta MIZOGUCHI, Takashi TASHIRO and Keigo NAKAMURA

¹正会員 博(工) (国研) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) (国研) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 博(工) 名古屋大学 減災連携研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

The portable measuring equipment, “Bentho Torch” (B.T.), can observe the amount of chlorophyll *a* (Chl.*a*) in attached algae on a riverbed. However, few studies have used this equipment in gravel riverbeds and analyzed its accuracy. In this study, to verify the applicability of B.T. in the gravel riverbed, algal biomass was observed using B.T. The SCORE-UNESCO method (the major method) was also performed on the same riverbed material after which the accuracy and effort of measuring with both methods were compared. We found that although the amounts of Chl.*a* in both measurements do not completely correspond, these measurements are in a proportional relationship. The average time required for one round of sampling by B.T. was approximately 20 s. This was very shorter than time for measuring by the SCORE-UNESCO method. Thus, B.T. can acquire higher-density data quickly while ensuring average accuracy in the survey of attached algae.

Key Words : *Bentho Torch(B.T.), Algal biomass, SCORE-UNESCO Method, Riverbed environment, Measurement accuracy*

1. はじめに

付着藻類は河川における主要な一次生産者であり、底生動物・魚類等の高次消費者の餌資源として利用されることから、河川生態系の基盤を担う生物とされる¹⁾。このため、付着藻類の現存量（以下、現存量）は河川生物の生息に関わる重要なパラメータといえる²⁾。現存量は水理量、水温、水質等、様々な要因に影響されるが、中でも付着藻類の生育基盤である河床材料の安定性に左右されることが指摘されている²⁾。例えば、Cattaneoら³⁾は礫の粒径が大きいほど現存量が高い傾向であることを報告している。しかし、個々の河床材料の大きさに対する現存量の変化を捉えるためには、高密度で膨大なデータが必要であり、観測に時間がかかる一方、それに従事する熟練技術者も将来不足することが懸念される。

付着藻類の携帯式計測機器「ベントトーチ」(Bentho

Torch, 以下B.T., bbe Moldaenke GmbH社製, 図-1)は、付着藻類のクロロフィル*a*量(Chl.*a*量)を藍藻類、珪藻類、緑藻類の各分類群別に現地での非破壊計測可能な機器である。本機器の先端部分(図-1(b))を礫面または砂面に20秒程度あて、そこから射出される3種類の波長のLEDの吸光度を計測することで、各分類群に特有な色素波形をもとに、その面の各分類群のChl.*a*量の値が機器の画面に表示される⁴⁾。B.T.を用いることで、従来のChl.*a*量の計測で一般的に用いられるSCORE-UNESCO法(以下、従来法、詳細は2.(3)を参照)⁵⁾と比べ、短時間かつ簡易な計測が可能といえる。B.T.の導入により河床の礫単位の現存量の分布が把握できれば、魚類(特に、アユ)の採餌環境に基づく生息適地評価にも展開できるといえ、宇佐美ら⁶⁾の提案する水理量(水深、流速)と河床環境(砂被度)を組み合わせたアユの生息適地評価に更なる評価軸を追加し高度化できる可能性もある。

その簡便さからB.T.が用いられた研究は複数見られる

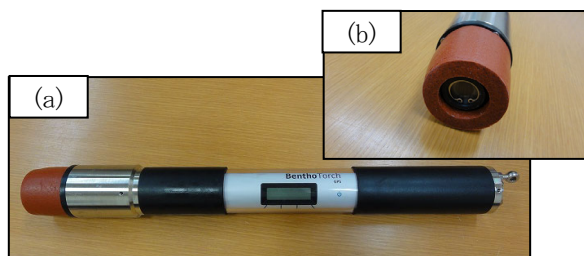


図-1 Benthos Torch本体(a)およびその先端の計測部分
(b) (bbe Moldaenke GmbH社製)

が、従来の計測方法と原理が異なることから、B.T.が用いられる際はその計測値の精度が検証されている。例えば、Kahlertらはスウェーデンの河川でB.T.値の精度を検証し、全Chl.a量の計測結果では従来の計測方法と同様の傾向であったが、種組成別の計測結果では異なる傾向であったことを報告している⁷⁾。また、藍藻類が繁茂する河川でB.T.を用いた研究では、石に付着した状態での厚みがある場合 (>2 mm) はない場合 (<2 mm) より、B.T.から射出されるLEDが下層に到達するまでに減衰するため、B.T.値の精度が低下する可能性があることが報告されている⁸⁾。河川以外では、干潟の砂面上にてB.T.の測定精度が従来の計測方法と同程度であることが報告されている⁹⁾。しかし、魚類（特に、アユ）の摂食活動場である礫床河川での検証事例はほとんどなく、天竜川の瀬でB.T.を用いた研究でも、室内分析により測定されたChl.a量との相対関係については未検討であり¹⁰⁾、礫床河川にB.T.を導入するにあたっての十分な精度が示されているとはいえない。

本研究では、礫床河川で付着藻類の現存量を計測する際のB.T.の適用可能性を検証するため、同じ礫でB.T.による計測と従来法による計測を行い、両者の計測値の精度を比較した。さらに、B.T.による計測結果を用いて、河床材料と現存量との関係解明を目的とした分析を行った。

2. 方法

(1) 調査場所

愛知県豊田市を流れる矢作川水系の巴川の瀬（矢作川との合流点から約5 km上流）を対象として現地調査を行った（図-2）。対象とした瀬は延長が約70 m、川幅が約40 m（中州：平均幅約15 mを含む）であり、2本の流路（以下、右岸側の流路を右流路、左岸側の流路を左流路とよぶ）を有する（図-2）。Wentworthの粒径区分（巨礫：256 mm以上、大礫：64 mm以上256 mm未満、中礫：16 mm以上64 mm未満、細礫：2 mm以上16 mm未満、砂：2 mm未満¹¹⁾）に基づく、右流路は上流が大礫や中礫を中心に構成されており、下流になるにつれ細礫や砂が多くなる。一方、左流路は上流が巨礫と砂の2極

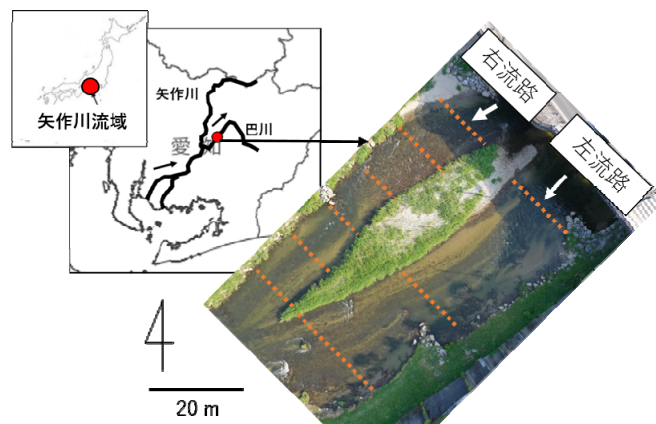


図-2 矢作川水系の巴川における調査地点
(港橋下流、点線部は調査した測線の位置を表す。)

化した河床材料で構成されており、下流になるにつれそれ以外の粒径区分が多くなる。

(2) Benthos Torchによる計測

調査場所にて、2020年8月24日および10月21日の計2回現地計測を行った。はじめに、様々な河床面および水深の条件下にて計測を行うため、調査場所に右流路は6つ、左流路は3つ横断測線を設定し、河岸から対岸まで右流路は約1 m、左流路は約2 m間隔で計測箇所を設定した。これにより、1測線あたり平均8個のデータを収集したが、これは従来法との計測値の比較のほか、河床材料の粒径との関係を従来法より高密度で解析するためである。各計測箇所では、礫があればその頂点面にB.T.の先端を約20秒あて、藍藻類、珪藻類、緑藻類の各Chl.a量および細胞数を非破壊で自動計測した。計測箇所に礫がなく砂一面の場合は砂面上にB.T.をあてて同様の計測を行った。また、礫、砂面ともに同じ箇所での水深を記録した。

(3) SCORE-UNESCO法および関連手法による計測

2. (2) を実施した同じ日および箇所にて従来法による計測も実施した。ここで、B.T.との計測値の比較のため、1横断測線あたり平均2箇所計測した。計測は、2. (2) の非破壊計測を行った後の礫または砂面上で実施した。計測箇所が礫面の場合はその礫を河岸に引き上げ、B.T.を当てた部分を含む5×5 cmの面をチャンネルブラシで擦り、その部分を純水で流し、流した液体を付着藻類のサンプルとして、プラスチック製のボトルに回収した。このとき、巨礫はいずれも500 mmを超え、引き上げが困難なため、計測対象から除外した。計測箇所が砂面の場合はプラスチック製の空のボトルを開封した状態で、ボトル口を砂面にあて、その表層から厚さ1 cm程度の砂をボトルですくって、砂ごと砂面上の付着藻類を回収した。そして、砂面と付着藻類を分離するため、回収した砂交じりの水を良く攪拌し、その後の上澄み液を付着藻類のサンプルとした。サンプルはその日のうちに約-20℃で冷凍保存した。

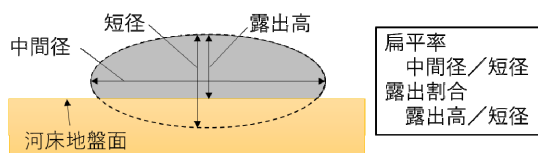


図-3 礫に関するパラメータの模式図

後日、Chl.a量等の計測のため、サンプルを解凍し一部をガラスろ紙（GA-100、アドバンテック社製）でろ過した後、そのろ紙を暗所で12時間以上100%エタノールに浸し、ろ紙に含まれるChl.aを抽出した。その後、サンプル中の現存量の目安となる単位面積あたりのChl.a量（mg/m²）および死滅した藻類量を示すフィオフィチン量（mg/m²）をLorenzenの方法¹²⁾に基づき、レシオビーム分光光度計（U-5100、日立製）で測定した。また、藍藻類、珪藻類、緑藻類ごとの細胞数をB.T.の計測値と比較するため、顕微鏡下で、これらの単位面積あたりの細胞数（mm²）を計数、算出した。このとき、Chl.a量が少ないサンプルは計数が困難なため対象から除外した。

また、調査箇所への付着藻類に関する質的なデータ収集のため、サンプルの全量に占める有機物量の割合を示す強熱減量（%）、有機物量に占める藻類量の比率（Autotrophic Index, AI）および生藻類比（=Chl.a量/(Chl.a量+フィオフィチン量)）を算出した。算出に必要な有機物量は、上記と同じろ紙でろ過したものを50℃で24時間以上かけて乾燥させ、その乾燥重量を計測した後、マッフル炉にて550℃、4時間燃焼させ有機物を除去し、その後に残った無機物量と乾燥重量との差から算出した。

(4) 礫に関する計測

河床材料である礫の粒径と付着藻類の現存量との関係を解析するため、以下の調査を2. (2) と同日の10月21日に実施した（8月24日は流れが速く計測が困難であったため未実施。また、引き上げが困難な巨礫は対象外とした）。具体的には、B.T.を計測した礫の中間径および短径を計測した。同時に、礫床河川では多様な粒径の河床材料により河床に凹凸が形成されており、現存量への影響が報告されていることから¹³⁾、礫の露出高（河床地盤面から礫の天端までの高さ、図-3）¹³⁾を潜水目視で計測した。さらに、既往文献を参考に^{13) 14)}、礫の形状の出っ張りを一般化した指標として扁平率（= 短径/中間径）、礫の鉛直方向の配置を一般化した指標として露出割合（= 露出高/短径）を算出した（図-3）。

(5) 解析

はじめに、B.T.による計測値を対象に、砂、巨礫以外の礫、および巨礫上で計測されたChl.a量（藍藻類、珪藻類、緑藻類のChl.a値の総和）に有意な差があるかを一元配置分散分析で解析した。有意水準は $p < 0.05$ とし、有意差がある場合は、テューキーのHSD法による多重比較を行った。従来法による計測値は、巨礫以外の礫、お

よび砂の2群間で等分散性を検定した後、t検定を行った。次に、B.T.によるChl.a量の計測値の精度を従来法と比較するため、従来法に対するB.T.によるChl.a量の回帰分析を行った。このとき、既往研究で砂面でもB.T.による計測値の一定の精度を有すること⁹⁾、河床表層のテクスチャの違いによるB.T.の計測値への影響が確認されなかったことが報告されていることから⁸⁾、礫面、砂面での計測値ともに解析を行った。さらに、B.T.による藍藻類、珪藻類、緑藻類の各細胞数およびその総和について、光学顕微鏡による値に対する回帰分析を実施した。

そして、巨礫を除く礫については、礫の粒径および凹凸状況と現存量との関係をより詳細に解析するため、礫の中間径、短径、露出高に対するB.T.で計測したChl.a量の回帰分析を行った。さらに、水深とB.T.で計測したChl.a量との関係についても同様の解析を行った。また、付着藻類の質的な情報および礫の大きさに関する情報の収集のため、現存量（B.T.および従来法による計測値）、強熱減量、AI、生藻類比、礫の中間径、短径、露出高、扁平率、露出割合の平均および標準偏差を算出した。また、扁平率および露出割合に対するB.T.で計測したChl.a量の回帰分析を行った。

上記の分散分析および回帰分析において、解析にはR ver3.5を用いた¹⁵⁾。

3. 結果

(1) 河床材料上の付着藻類の現存量の違い

B.T.による測定値について、砂、巨礫以外の礫、巨礫上のChl.a量に有意な差があるかを一元配置分散分析で解析した結果、砂上のChl.a量が他と比べて有意に低かった（図-4, $p < 0.05$ ）。また、B.T.による測定値について、巨礫と巨礫以外の礫との間には有意差は見られなかった（図-4, $p = 0.90$ ）。

また、従来法による砂と巨礫以外の礫の測定値について、等分散性を確認した後にt検定を行った結果、砂上のChl.a量がもう一方と比べて有意に低かった（図-4, $p < 0.05$ ）。

(2) Benthic Torchと従来法との計測値の比較

付着藻類のChl.a量（B.T.および従来法による計測値）、強熱減量、AI、生藻類比、礫の中間径、短径、露出高、扁平率および露出割合の平均および標準偏差は表-1のとおり。付着藻類については、有意差のあった砂と礫上の2つに分けて記している（表-1）。

従来法に対するB.T.によるChl.a量の回帰分析の結果、回帰係数は0.52（ $p < 0.05$ ）で有意な正の相関が示された（図-5）。また、光学顕微鏡による藍藻類、珪藻類の細胞数とB.T.による細胞数で同様の解析を行った結果（緑藻類は本研究ではほとんど検出されなかったので解析が

表-1 付着藻類および石に関するパラメータの平均値および標準偏差

	Chl.a量 (mg/m ²)		従来法	強熱減量 (%)	Al	生藻類比	中間径 (mm)	短径 (mm)	露出高 (mm)	扁平率	露出割合	
	B.T. 砂	B.T. 礫										
平均	1.32	30.83	3.98	20.03	71.3	0.0042	0.96	114.1	64.8	58.6	0.63	0.89
標準偏差	1.87	19.20	5.11	13.34	45.6	0.0025	0.29	62.9	35.2	33.4	0.15	0.27

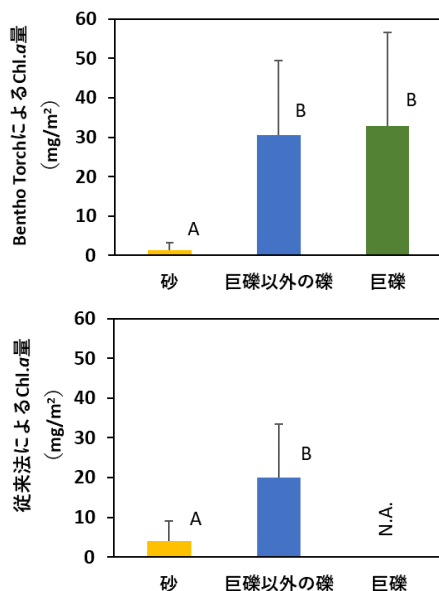


図-4 河床材料によるChl.a量の違い

(上段：Benthos Torchによる計測値，下段：従来法による計測値，図中のA，B間には有意差があることを示す。有意水準は $p < 0.05$ ，N.A.は計測不可のためデータなしを表す。エラーバーは標準偏差を表す。)

ら除外)，それぞれ $p = 0.21$ ， 0.85 となり，有意な相関は得られなかった。この結果は細胞数の総和でも変わらなかった (図-5, $p = 0.10$)

(3) 礫に関する値と付着藻類の現存量との関係

巨礫を除く礫について，河床材料の中間径，短径，露出高に対するB.T.で計測したChl.a量との回帰分析の結果，中間径，露出高で有意な正の相関が確認されたが (図-6，ともに $p < 0.05$)，短径では有意な相関が確認されなかった (図-6, $p = 0.42$)。有意な正の相関が確認されたものの中での決定係数は，露出高が0.1697と，中間径の0.0876よりも高かった (図-6)。一方，水深に対するB.T.で計測したChl.a量についても同様の解析を行ったが，有意な相関は確認されなかった ($p = 0.33$)。

また，扁平率および露出割合に対するB.T.によるChl.a量との回帰分析の結果，露出割合に有意な正の相関が確認され (図-7, $p < 0.05$)，扁平率では確認されなかった (図-7, $p = 0.43$)。ここで，扁平率については，0.3～0.8まで概ね均等にばらつく傾向であったが，露出割合については，0.2～1.5まで幅広く分布するものの，1.0

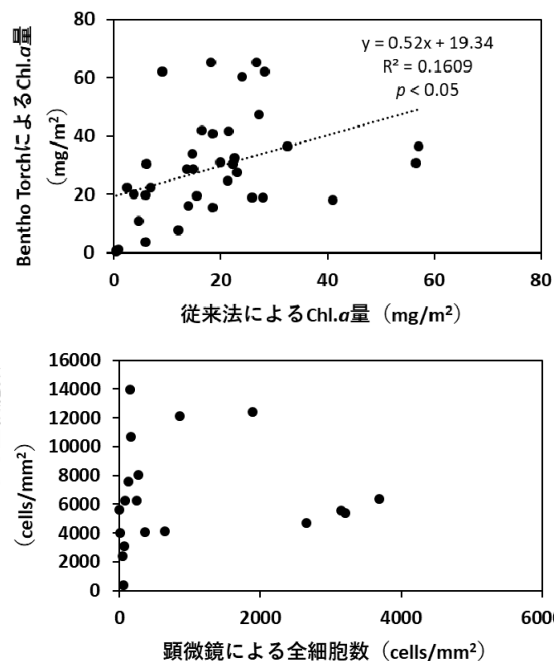


図-5 従来法によるChl.a量に対するBenthos TorchによるChl.a量の回帰分析結果

(上段：Chl.a量，下段：全細胞数，点線は回帰直線を表す。)

あたりに集中する傾向であった (図-7)。

4. 考察

(1) Benthos Torchと従来法による計測の比較

B.T.で計測したChl.a量と従来法で計測したChl.a量と同じ礫および砂面上で比較した結果，両者のChl.a量は完全に一致しないものの，比例関係にあり，増減傾向が一致することが示された (図-5)。数値が完全に一致しない理由として，両者の計測原理が異なるためと推定される。すなわち，B.T.では礫上に直接LEDをあて，その吸光度をもとに現存量を計測するのに対し，従来法では礫からサンプルを採取しエタノールでサンプルの色素を抽出した後，その液に光をあてたときの吸光度から現存量を計測する。両方法で測定されたサンプルは同じ礫の同じ部分から採取されたものだが，吸光度を分析するためのプロセス (サンプルの採取の仕方を含む) は異なっており，それがChl.a量の違いに反映されたと推定される。ただし，両者のChl.a量の増減傾向が一致するため，

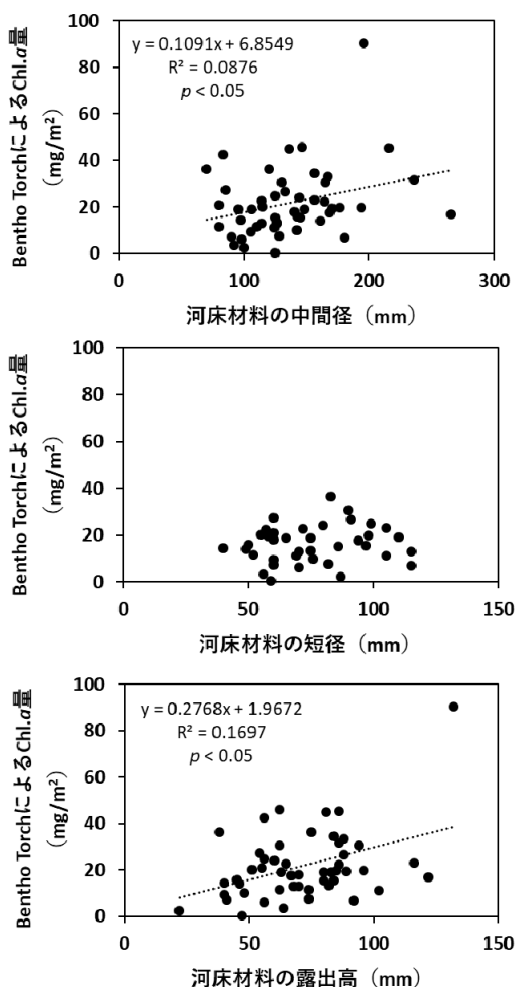


図-6 河床材料の中間径、短径、露出高に対するBenthic Torchで計測したChl.a量の回帰分析結果
(点線は回帰直線を表す。)

現存量の大小関係を相対的に把握する観点では、B.T.は従来法と比べても一定の精度を有していると考えられる。

B.T.を導入するメリットは、従来法と比べ短時間かつプロセスが簡易である点である。本調査では、B.T.を用いた場合の計測にかかる時間は、1サンプルあたり約20秒であった。一方、従来法では、現地のサンプル採取に1サンプルあたり約5分かかり、室内分析(ろ過、Chl.a量の抽出、吸光度測定)の一連の作業に抽出の待ち時間をのため約2日を要する。このため、礫単位で付着藻類の現存量を観測するような高密度なデータが必要な調査においては、B.T.の導入を検討するメリットは十分にあるといえる。

本調査では、大型糸状緑藻を含む緑藻がほとんど検出されておらず、Chl.a量は0~70 mg/m²の範囲であった。このため、大型糸状藻類が繁茂し、現存量が100 mg/m²を超えるような河床において、B.T.の観測値の精度は未検証である。上記の場合、付着藻類はある程度生育して層状になっていると考えられ、射出するLEDが下層の付着藻類で減衰することが懸念される⁸⁾。B.T.にはこれを補正する機能が備えられているものの、計算式による機

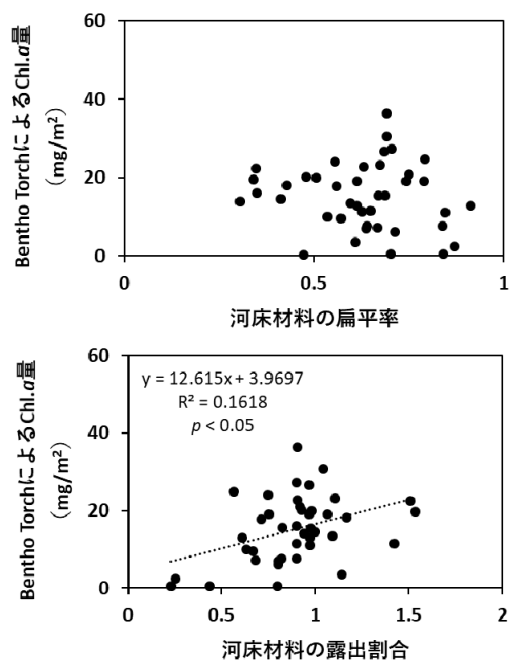


図-7 河床材料の扁平率および露出割合に対するBenthic TorchによるChl.a量の回帰分析結果
(上段は扁平率、下段は露出割合との結果を表す。点線は回帰直線を表す。)

械的な補正であり⁴⁾、現場での精度の確認は今後の課題といえる。

(2) 河床材料と付着藻類の現存量との関係

B.T.によるChl.a量において、礫の中間径との比例関係が示されたことは(図-6)、礫が大きいほど流況に対して安定するため現存量が高い傾向であるという従来の報告²⁾と一致する。さらに、中間径よりも露出高の方がChl.a量との相関が強く、露出高に関係する短径では有意な相関が確認されなかったことから(図-6)、Chl.a量は礫の大きさに加え、礫の鉛直方向の配置(相対的な高さ)にも左右されるといえる。このことは、Chl.a量との有意な正の相関が扁平率ではなく露出割合で確認された点にも裏付けられている(図-7)。露出高(または露出割合)が高いほどChl.a量が高い理由としては、掃流砂は一定の高さで跳躍して流下するため¹⁴⁾、露出高が高いほど跳躍する掃流砂の粒子が届きにくく、掃流砂が礫頂点面の付着藻類に衝突し付着藻類が剥離する可能性が低くなるためと考えられる。掃流砂は主に洪水時に流下するが、本研究の2回の調査においては、調査日からその3週間前までの期間で平水時より高い水位が観測された日が数日確認されたことから¹⁶⁾、その間に掃流砂の流下および付着藻類の剥離が生じた可能性がある。以上より、礫の中間径および露出高と現存量との関係を分析し、更にその関係がデータを観測した日からの洪水履歴でどう変化するかを解析することで新たな知見が得られる可能性がある。

本研究で対象とした瀬では、例年、アユの定位が確認

されており、アユの餌である付着藻類もよく摂食される環境であると考えられる。調査場所の付着藻類は、生藻類比が90%以上と高く、強熱減量およびAIも他の河川で観測される値とそれほど逸脱していないため(表-1)、質的には良好といえる。このため、アユの定位場所(餌場)の良否に関する議論の対象は主に現存量になるといえる。本研究では、アユの定着場所と付着藻類の現存量との関係について調査できなかったが、同じ場所における既往研究では、砂が主な河床より礫が主な河床の方がアユの選好性が高いことが報告されている⁹⁾。後者の方がより付着藻類の現存量が大きいことを鑑みると(図-4)、アユが餌量の高い場所を選好して定着している可能性がある。今後は、アユの定位場所と付着藻類との関係についても、高密度の調査が可能なB.T.の導入による調査を検討している。

5. おわりに

本研究では、礫床河川におけるB.T.による現地観測の適用可能性を検証するため、同じ石礫でB.T.による観測と従来法による観測を行い、両者の精度を比較するとともに、河床材料と現存量との関係解明を目的とした分析を行った。以下に、本研究で得られた成果を記す。

- 1) B.T.で計測したChl.a量と従来法で計測したChl.a量を同じ礫および砂面上で比較した結果、両者のChl.a量は完全に一致しないものの、比例関係にあり、増減傾向が一致することが示された。このため、現存量の大小関係を相対的に把握する観点では、B.T.は従来法と比べても、一定の精度を有していると考えられる。
- 2) 本研究で計測されたChl.a量は0~70 mg/m²であり、大型糸状緑藻等が繁茂する100 mg/m²以上のChl.a量の環境下における精度の検証については今後の課題である。
- 3) 砂、巨礫以外の礫、巨礫上のChl.a量を一元配置分散分析で解析した結果、砂上のChl.a量が他と比べて有意に低く、同じ瀬においても、付着藻類が定着しにくい河床環境であることが示された。
- 4) 礫について、河床材料の中間径、短径、露出高に対するChl.a量(B.T.で計測した場合)との回帰分析の結果、中間径、露出高で有意な正の相関が確認され、決定係数は、露出高の方が高かった。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、建設環境研究所(研究当時:土木研究所)の北川哲郎博士ならびに、土木研究所の川尻啓太交流研究員、河野誉仁専門研究員、松澤優樹研究員には現地調査およびデータ収集にご協力をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Lamberti G.A. and Steinman A.D.: A comparison of primary

production in stream ecosystems, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol.16(1), pp.95-104, 1997.

- 2) *Algal Ecology*, Stevenson R.J., Bothwell M.L., Lowe R.L.(eds), Academic Press, 1996.
- 3) Cattaneo A., Kerimian T., Roberge M. and Marty J.: Periphyton distribution and abundance on substrata of different size along a gradient of stream trophy, *Hydrobiologia*, Vol.354, pp.101-110, 1997.
- 4) Benthos Torch User Manual, *bbe moldaenke GmbH*, ver.1.3, 2011.
- 5) SCOR-UNESCO: Determination of photosynthetic pigments in seawater, *Monographs on Oceanographic Methodology*, Vol.1, pp.11-18, 1966.
- 6) 宇佐美将平 et al.: 対照的な河床環境を有する流路におけるアユの生息地適性評価モデルの構築とそれに基づく予測精度の比較による河床環境の重要性の検討, *河川技術論文集 Vol.26*, pp.361-366, 2020.
- 7) Kahlert M. and McKie B.G.: Comparing new and conventional methods to estimate benthic algal biomass and composition in freshwaters, *Environmental Science: Process & Impacts*, Vol.16, pp.2627-2634, 2014.
- 8) Echenique-Subiabre I., Dalle C., Duval C., Heath M.W., Coute A., Wood S.A., Humbert J.-F. and Quiblier C.: Application of a spectrofluorimetric tool (bbe BenthosTorch) for monitoring potentially toxic benthic cyanobacteria in rivers, *Water Research*, Vol.101, pp.341-350, 2016.
- 9) 高尾敏幸, 北野倫生, 山本秀一, 小田秀夫, 岡田智也: 携帯式蛍光光度計を用いた付着藻類の現存量測定による造成干潟の環境調査, *海洋開発論文集*, Vol.22, pp.631-636, 2006.
- 10) 田代喬, 檀上直也, 辻本哲郎: 現地型計測機器による付着藻類現存量測定とその有効性に関する考察, *河川技術論文集*, Vol.13, pp.81-84, 2007.
- 11) Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, *The Journal of Geology*, Vol.30(5), pp.377-392, 1922.
- 12) Lorenzen C.J.: Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, Vol.12, pp.343-346, 1967.
- 13) 宮川幸雄, 小野田幸生, 萱場祐一, 角哲也, 竹門康弘: 土砂供給で変動する河床の石礫の露出高を予測する方法の提案, *河川技術論文集*, Vol.24, pp. 83-88, 2018.
- 14) 田代喬, 渡邊慎多郎, 辻本哲郎: 掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について, *水工学論文集*, Vol.47, pp.1063-1068, 2003.
- 15) R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/> (2021.3.15閲覧).
- 16) 国土交通省 水文水質データベース HP, <http://www1.river.go.jp/>, (2021.3.24閲覧).

(2021. 4. 2受付)