

人工基盤上における河川付着藻類相の 付着状況に関する現地実験

FIELD EXPERIMENTS ON CONDITIONS OF RIVERINE ATTACHED ALGAL COMMUNITIES ON ARTIFICIAL SUBSTRATA

矢野真一郎¹・吉海宏祐²・井芹寧³・林琳⁴・黄偉⁵・石原耕一⁴

Shinichiro YANO, Kosuke YOSHIKAI, Yasushi ISERI, Lin LIN,
Wei HUANG and Koichi ISHIHARA

¹正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²非会員 工修 西日本電信電話株式会社 (〒540-8511 大阪市中央区馬場町3-15)

³正会員 工博 西日本技術開発株式会社環境部部長代理 (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁴学生会員 九州大学大学院修士課程 工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵学生会員 工修 九州大学大学院博士後期課程 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

In the upper Chikugo River, the so-called “Ohyama River,” decrease of the flow rate due to intake to hydroelectric power stations by dams has made the riverine environment worse. Thus, it is necessary to decide an appropriate flow condition as a maintenance discharge to improve it. In this study, we attempted to confirm availability of artificial substrata instead of natural stones for sampling of attached algae in order to reduce arbitrariness with natural stones. In May-June 2009, we carried out weekly sampling of attached algae on both natural and artificial stones which we installed at three sampling sites. As a result of the present research, we clarified the followings: 1) Less biomass of algae (chlorophyll-a) can attach on artificial stones than on natural stones, because shear stress can readily obstruct the growth due to their flat shapes; 2) judging from amount of sediment trapped into attached algae and identifying species of algae, their adherence patterns and species on natural stones and artificial ones are not significantly different; 3) attached algae which contain biofilm and bacterium tend to show larger $\delta^{13}\text{C}$; and 4) artificial stones can assimilate into natural stones by installing for more than 2 weeks.

Key Words : attached algae, Chikugo River, flow regime, artificial substrata, field measurement, dam

1. はじめに

大山川(図-1)は筑後川上流域に位置し、一連のダム群建設前は $20\text{m}^3/\text{s}$ という豊かな流量を誇り、ここで捕れた 30cm を超えるいわゆる“ひびきアユ”は日本一のアユとまで謳われていた。しかし、戦前戦後の経済の成長・復興を支えるため、流域に下笠ダム、松原ダム、大山川ダムなどの治水・利水目的のダム群が建設された。特に柳又発電所への発電用水は大山川ダムから導水路で高瀬川を経由して流すため、その結果ダム直下から日田市の中心部を通る区間の流量が大幅に減少することになった。一時は大山川ダム直下の維持流量がゼロになり、ひびきアユはほとんど見られなくなっていた。

1983年、松原・下笠ダム再開発事業を受けて松原ダムからの放流量を $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 、大山川ダムからの放流量を 1.5

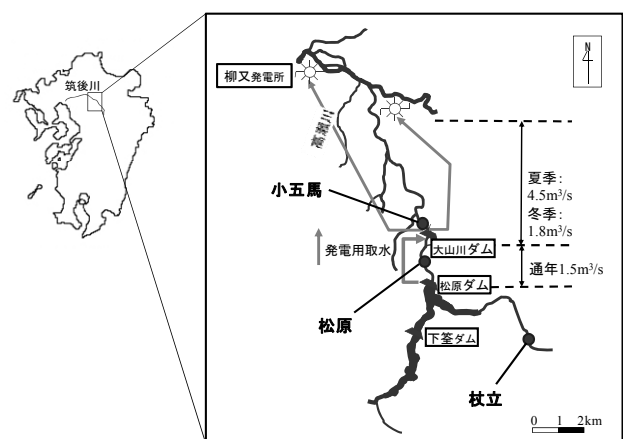


図-1 大山川と調査地点の概要

m^3/s としたものの、河川環境は回復しなかった。このあ

まりにも変わり果てた河川の惨状に住民の間で危機感が募り、1999年3月31日に柳又発電所の発電用水利権が30年ぶりに更新期を迎えるにあたり、日田市と大山町住民による流量増加を求める市民運動が始まった。これを受けて、旧建設省、大分県、電力会社、学識経験者、住民代表による「三隈川・大山川河川環境協議会」が結成され、協議を重ねた結果、2002年度4月より河川環境の改善を目的として、大山川ダムの放流量を通年 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ から夏季（3月下旬～9月末）が $4.5\text{m}^3/\text{s}$ 、冬季（10月～3月中旬）が $1.8\text{m}^3/\text{s}$ に増加するという合意に至った。また、その翌年には、松原ダムからの放流量も通年 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ から $1.5\text{m}^3/\text{s}$ に増加された。

この維持流量の増量や流量変動が当該水域の水理条件や河川生態系に及ぼす影響を評価するため、流動構造などの物理環境、付着藻類とアユなどの魚類、水生昆虫、ならびに地域住民の意識や音環境に関する総合的河川環境調査が行われてきた^{1)~8)}。その結果、維持流量の増加による河川環境の改善効果、特にひびきアユが復活したことが認められているが、現在、その改善効果をさらに強化すべく、新たに維持流量を $10\text{m}^3/\text{s}$ まで増加することを要請する地元住民の運動が起こっている。しかしながら、水利権を有する電力会社にとって、これ以上の放流量増加は現実的に厳しいという見方である。そこで、一つの代替案として、現行の放流量の枠内（または、若干の増量の範囲内）で、放流のパターンを操作することにより、現在の一定放流以上の効果を得る方法に期待が寄せられている。すなわち、小規模のフラッシュ放流を定期的の実施し、アユの餌資源である付着藻類相の生育環境を改善できれば、ある程度住民の納得も得られるものと期待されている。

現在、大山川の河川環境に適した流量変動パターンを決定するために、室内模擬水路による流量変動影響実験を実施することを予定している。これまでの我々が実施してきた現地調査結果もある程度利用できると考えられるが、サンプリングする自然石を選定する際の任意性が影響することや、現地調査に付随する曖昧性や土砂の影響、さらに底生生物などによる捕食圧の評価が難しいことから、定量的な評価は容易でない。模擬実験では現地の河川水を利用してタイル状の人工的な基盤上に繁茂させた付着藻類相の生育状況で流量変動の影響を評価したいと考えているが、利用する人工基盤が現地の自然状態を再現する上で問題がないかどうかを事前に確認する必要がある。これまでも、人工的な基盤上における付着藻類の生育状態に関する自然河川や実験水路における実験の報告例^{9)~14)}があるが、大山川における特徴を再現する必要があることから、比較実験を試みる必要があると判断した。模擬実験で人工基盤を使用する理由として、室内水路のスケールの制限から現地の自然石では大きすぎることを、人工基盤は河川中に散在する自然石と較べて大きさや形状、設置位置、流れや日射の基盤への当たり



図-2 タイル（人工基盤）と藻類採取状況

方などの物理的条件を統一できること、などが上げられる。そこで、本研究では、人工基盤を対象河川に実際に設置し、自然石と人工基盤の間での付着藻類相の比較を行い、模擬実験を行う上での人工基盤の利用可能性を検討したので報告する。

2. 観測概要について

2009年5月初旬から6月末にかけて、1週間程度の間隔（人工基盤設置日：5/8、調査日：5/15、5/25、5/29、6/5、6/12、6/18、6/26。計7回）で、過去（2006～2008年）の調査と同様に定期的に付着藻類調査を行った。なお、2006、2007年は2週間間隔、2008年は1週間間隔で実施している。また、7月8日に8回目の調査を行ったが、出水により人工基盤は全て流失していた。調査地点は、上流にダムがなく自然流況を示す杖立地点（Reference地点）、平常時の流量が松原ダムにより通年 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ に制御されている松原地点（Control地点）、平常時の流量が大山川ダムにより夏季 $4.5\text{m}^3/\text{s}$ 、冬季 $1.8\text{m}^3/\text{s}$ に制御されている小五馬地点（Impact地点）の3地点である（図-1）。

2006年～2008年は各調査地点で流軸方向に約30mの範囲で水際部分を除く平瀬において自然石（直径約15～25cm）を5個ずつ採取し（アユのはみ跡が目視で確認できる石礫はできるだけ除いた）、上面から歯ブラシと水道水を用いて付着物をこすり取り試料としたが、2009年は自然石の採取（各地点3個ずつ）に加え、各調査地点に正方形のタイル状人工基盤（商品名：ラグストーン。大きさ：20cm×20cm×2cm。重量は2.5kg。素材は御影石。以下、タイルと記述する。図-2参照）を5枚ずつ設置した。タイルには、判別用に裏面に油性ペンで番号を記した。各調査地点において、5枚のタイル全てを横断方向に並べて置ける平瀬部分を設置場所を選び、従来の調査で自然石を採取している場所と水深や流速が可能な限り近い状態になるようにした。各地点の5枚のタイルにつ

いては、1枚目（タイル1）は1回間隔で、2, 3枚目（タイル2, 3）についてはそれぞれ入れ違いに2回間隔で付着藻類の採取を行い試料とした。残りの2枚（タイル4, 5）についてはタイル1と2の予備とし、対応するタイルと同様に1回間隔と2回間隔で表面全体の藻類の剥ぎ取りだけを行った。

自然石とタイルを採取する際には、ドライスーツを着用した観測者2名が下流側から採取地点に近づき、水深センサー付きの2次元電磁流速計(AEM213-D, アレック電子社製)を用いて、水深ならびに石面上約10cmの位置での底層流速（10秒平均流速を3回測定し平均した）を測定した後に、水面上に取り上げた。2009年の観測期間中は梅雨入りが遅く、6月末までまとまった降雨が無かった影響で、安定した流況を示していた。図-3にタイルおよび自然石の採取地点における底層流速と水深を全調査で平均したものを示す。各地点のタイルと自然石での水理条件は概ね同一と見なせた。

タイルや自然石から付着藻類を剥ぎ取った部分の面積は、メジャーと一緒にデジタルカメラで撮影したデジタル画像（図-2参照）を利用してパソコンのモニタ上で計測した。剥ぎ取った試料はクーラーボックスに入れて冷却した状態で数時間以内に研究室に持ち帰り、実験室内で4等分した。等分した試料のうち、1つ目についてはガラス繊維濾紙（GF/C, 1 μ m, Whatman Japan Ltd.）で濾過し、90%アセトンで抽出後、吸光光度法によりクロロフィルa（以下、Chl. a）を測定した。2つ目の試料は105℃で3日間定温乾燥機に入れて乾重量を測定した後、電気炉により600℃で3時間燃焼させ、強熱減量と強熱残留物を測定した。3つ目の試料については実体顕微鏡（倍率：45倍）を用いて確認できた底生動物と土粒子を取り除いた後、CM溶媒（クロロホルムとメタノールを2：1で混ぜたもの）を入れてソニケーション（超音波破碎）を行う作業を3度繰り返して脱脂し、凍結乾燥機に12時間入れて乾燥させ、粉末状にしたサンプルから0.8mg（ $\pm$ 0.03mg）のチンカプセルを2つずつ作成し、炭素・窒素安定同位体比を測定した。4つ目の試料は中性ホルマリンを用いて固定し、藻類種の同定に使用した。それぞれの測定値は、剥ぎ取り面積で割ることで単位面積当たりの値に換算した。

さらに、各調査地点において表層水を採水ボトルで直接採取し、一部を現場にて濾過した。それらの原水と濾過水の試料を冷凍保存後、後日オートアナライザー（swAAT, BLTEC社製）を用いて全窒素、全リン、ならびに無機態窒素・リンを測定している。

3. 測定結果について

(1) Chl. a量について

まず、基盤の違いによる各観測間での成長量の比較を

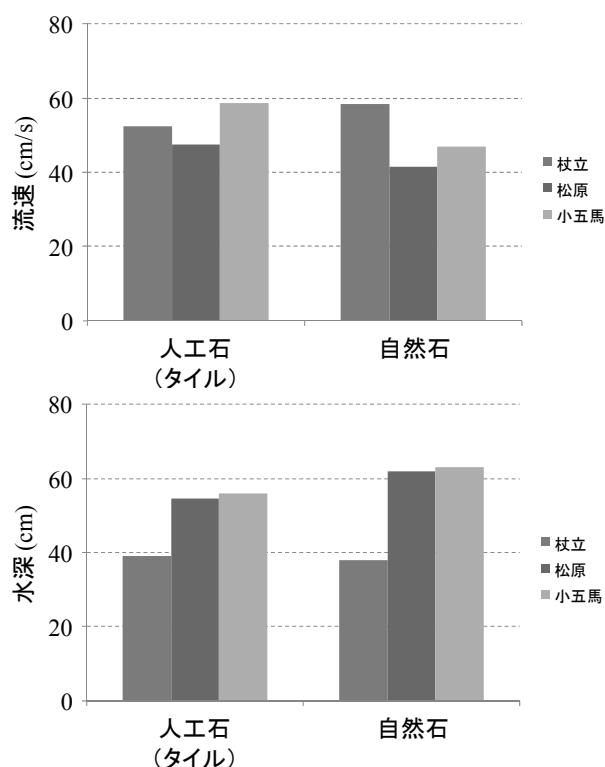


図-3 観測期間中の平均底層流速と平均水深

行うために、図-4に示すようにChl. a量の単純比較を試みた。全地点で自然石の方が大きいChl. a量を示し、タイルとは異なる傾向であった。しかしながら、タイルについては測定毎に付着物を全て剥ぎ取るため、例えばタイル1の藻類量は、基板表面上に全く藻類の付着していない状態から1週間程度での成長量を表すことになる。一方、自然石については毎回任意に選定されるため、成長に要した期間が不明である上（観測期間中に剥離を起こす様な出水がなかったことから、1週間より十分長いと考えられる）、表面に生物膜などの付着物がある状態からの成長量を一般的には表すことから、これらの測定値は単純には比較できないと考えられる。

そこで、自然石のデータについては各観測間での差分を取って連続した2回の観測間の増分に相当する量に換算した。また、タイルについても、2回毎に剥がした試料（タイル2, 3）と1回前の観測におけるタイル1の試料との間で差分を取った。こうすることにより、両者とも藻類や生物膜がある程度付いた状態から1週間程度の期間に成長した量に相当する量を算出できることになる。ただし、自然石については、観測毎に石が異なるので厳密には観測間での増分ではないことに注意が必要である。このように、差分を取って比較した測定結果を図-5に示す。まず、自然流況の杖立地点については、両者は非常によく一致した変動を示した。次に、流量一定（4.5m³/s）の小五馬地点において、前半は比較的一致していたが後半はズレが大きくなっていた。これは、タイル上の藻類は2週間程度で成長したものであるため、

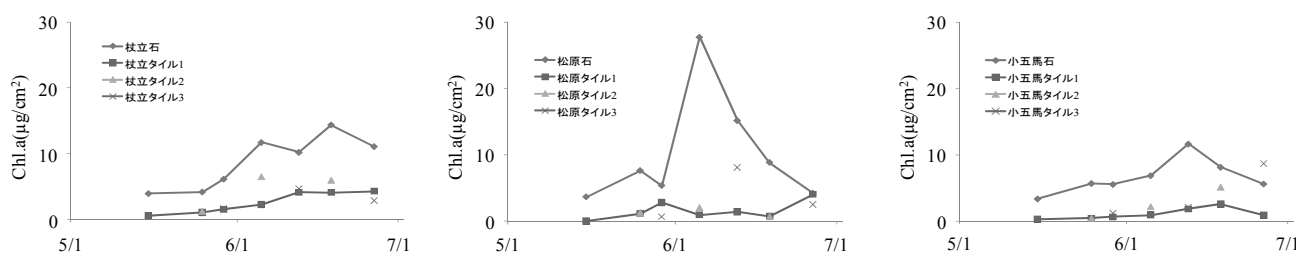


図-4 Chl. a量の変化 (左：杖立地点(Reference)，中：松原地点(Control)，右：小五馬地点(Impact))

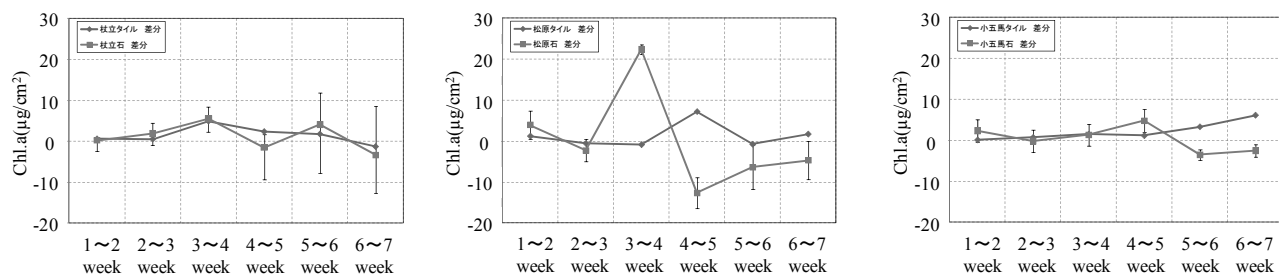


図-5 Chl. a量の観測間差分の変化 (左：杖立地点(Reference)，中：松原地点(Control)，右：小五馬地点(Impact))

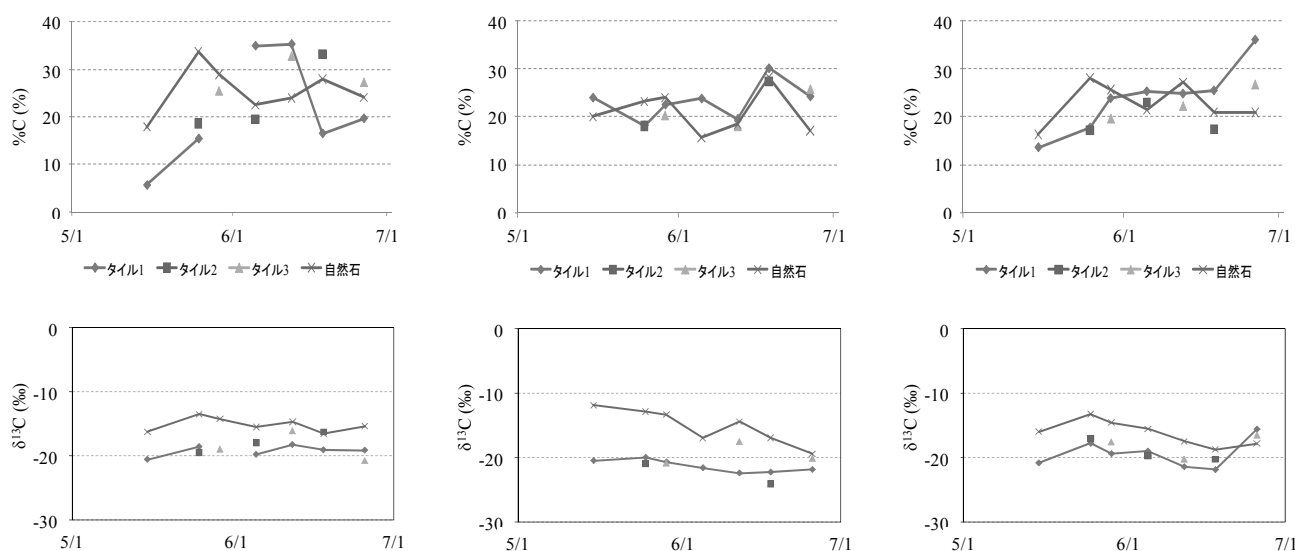


図-6 炭素量(%C)と炭素安定同位体比(δ¹³C)の変化

(上図：%C，下図：δ¹³C，左：杖立地点(Reference)，中：松原地点(Control)，右：小五馬地点(Impact))

その間に過剰に成長した藻類の枯死は起こらないと考えられるため、大きな負の値を取りにくいということに起因していると考えられる。最後に一定流量(1.5m³/s)の松原地点に関しては、大きな違いが見られる。違いが生じた原因としては、前述の大きな負値を得にくいことに加えて、自然石については3つサンプルの平均値であるが、サンプル数が少ないために場を代表しきれていなかった可能性もあるが、明確な原因は不明である。さらに、タイルは5µg/cm²を超える増減を示すことはほとんどなかったが、これはタイルの形状が平面状であり、ほぼ水平に設置されていたため、流れにより表面でせん断力が働きやすい条件であったことから、付着物の剥離または付着の阻害が起こりやすく、付着物を表面に維持するには厳しい条件であったためでないと推測される。

これに対して自然石は流れに対して色々な方向に面を持つために、大きなChl. a量を取り易い部分があり、総じて大きな違いが生まれたと推測される。両者の違いについては、自然石も同じものを継続的に利用してサンプリングするなど、物理的条件を極力一致させた調査による検討が今後必要であると考えられる。

(2) 付着藻類の優占種について

次に、種の同定結果について表-1に示す。5月29日の観測データをもとに、各地点に現れた藍藻および珪藻の優占種上位3種のみを示した。観測期間中の1回だけのデータであるため不確定ではあるが、自然石とタイルに付着した優占種は概ね似た組成を示していたと評価できた。

表-1 付着藻類の優占種(5/29の観測データのみ)

地点	種類	タイル1 (1週間間隔)	タイル3 (2週間間隔)	自然石
杖立	藍藻	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.
		<i>Croococcus</i> spp.	<i>Croococcus</i> spp.	<i>Oscillatoria(f)</i> spp.
		<i>Oscillatoria(f)</i> spp.	<i>Chamaesiphon</i> spp.	<i>Chamaesiphon</i> spp.
	珪藻	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.
		<i>Navicula</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.
		<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Navicula</i> spp.	<i>Navicula</i> spp.
松原	藍藻	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.
				<i>Oscillatoria(f)</i> spp.
				<i>Croococcus</i> spp.
	珪藻	<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.
		<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.
		<i>Gomphonema</i> spp.	<i>Synedra or Navicula 小型</i> spp.	<i>Navicula</i> spp.
小五馬	藍藻	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.	<i>Homoeothrix</i> spp.
		<i>Chamaesiphon</i> spp.	<i>Croococcus</i> spp.	<i>Chamaesiphon</i> spp.
		<i>Croococcus</i> spp.	<i>Chamaesiphon</i> spp.	<i>Croococcus</i> spp.
	珪藻	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Achnanthes</i> spp.
		<i>Cymbella+ Encyonema</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp.
		<i>Achnanthes</i> spp.	<i>Cymbella+ Encyonema</i> spp.	<i>Navicula</i> spp.

(3) 炭素量、安定同位体比について

各地点の自然石およびタイルの%Cおよび $\delta^{13}\text{C}$ を図-6に示す。%Cは全質量（チンカプセル=0.8mg）中における炭素量を指す。純粋な藻類であれば40%以上の値を取ると考えられるため、有機物中における土砂などの無機物の相対的な量を知ることができる。各地点とも、自然石の%Cはタイルのプロットと概ね似た傾向を示しており、表面にトラップされている土砂の量に大差はないと考えてよい。これは、タイルと自然石の表面で藻類の付着形態が似ていたことを意味すると考えられる。

次に、 $\delta^{13}\text{C}$ については、タイル1の値が自然石より低く、安定していることが分かる。体積の上で藍藻類よりも珪藻類のほうが支配的であったことから、純粋な珪藻に近い値を取ると考えられる。タイルと自然石はよく似た藻類の種組成を持っていたため（表-1）、同様な $\delta^{13}\text{C}$ 値を取ると期待されたが、得られた結果では、自然石の $\delta^{13}\text{C}$ はタイルよりも概ね大きかった。これは、自然石にはタイル1と比べて厚い藻類層ができていたため $\delta^{13}\text{C}$ が高くなったと考えられる¹⁵⁾。さらに、付着層内部のバクテリアや生物膜を同時に評価している影響も考えられる。一方、観測毎に表面を全て剥がしたタイル1表面には、このような厚い生物膜が発達できず、藻類のみの $\delta^{13}\text{C}$ を示したために安定したと考えられる。さらに、タイル2,3の $\delta^{13}\text{C}$ 値は自然石に近い値が見られ、2週間程度で生物膜が成熟した結果、自然石の藻類生育状態に近づいた場合があったと考えられる。タイルが自然石とほぼ同一化する時間スケールについては、今回より長い期間で藻類を繁茂させた場合について実験し、検討する必要があるだろう。なお、本論文執筆時点では、窒素安定同位体比のデータが十分利用できる精度で得られていなかったため、別の機会に報告したいと考えている。

4. 結論

筑後川上流の大山川において、現地再現実験に用いる予定の人工基盤（タイル）と現地の自然石について、付着藻類を繁茂させる現地実験より、以下の知見が得られた。

(1) タイルはその平面的な形状から、表面でせん断力が働きやすく、剥離が起こりやすいため、自然石と比較して大きなChl. a量を取りにくかった。

(2) 表面にトラップされた土砂量の推定から、タイルと自然石は藻類の付着形態が似ていると考えられる。また、現れた藻類種も類似度が高かった。

(3) 生物膜やバクテリアなどの不純物を多く含むため、自然石の付着藻類層は、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が高い傾向にある。

(4) タイルは2週間以上の設置で、自然石と同一化する可能性が示唆された。

以上の結果より、人工基盤（タイル）を利用して物理条件を一致させた現地再現実験において、ある程度の時間スケール（2週間以上）に繁茂する付着藻類については現地の再現性が期待できそうである。

今後、2週間以上の間隔でサンプリングするタイルを設置することや、自然石として同一のものをを用いて比較することで、今回得られた知見の確度を高めたいと考えている。

謝辞：

本研究は、平成21年度（財）クリタ水・環境科学振興財団研究助成「河川生態系の保全に有効な維持流量の放流法検討のためのモニタリング」（研究代表者：矢野真一郎）の援助により実施された。また、安定同位体比の測定と解析には、九州大学大学院比較社会文化研究院環境変動部門生物多様性講座の小池裕子教授とAme Garong博士の協力により実施された。ここに記し深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省筑後川河川事務所：筑後川上流河川環境特性検討会報告書，2004。
- 2) 矢野真一郎，齋藤正徳，井芹寧，河口洋一，島谷幸宏，緒方健，山崎正敏，清野聡子：筑後川上流（大山川）における維持流量変化が河川環境に与える影響に関する現地観測，河川技術論文集，12，pp. 443-448，2006。
- 3) 井芹寧，矢野真一郎，石川泰助，齋藤正徳，河口洋一，島谷幸宏，緒方健，山崎正敏，清野聡子：ダム維持放流量変化が河床付着生物膜形成に与える影響に関する現地観測，河川技術論文集，12，pp. 277-282，2006。
- 4) 齋藤正徳，河口洋一，矢野真一郎，井芹寧，黨秀次郎，島

- 谷幸宏, 緒方健, 山崎正敏, 清野聡子: 筑後川上流域におけるダム放流量増加が付着藻類に与える影響, 水工学論文集, 51, pp. 1219-1224, 2007.
- 5) 齋藤正徳, 矢野真一郎, 黨秀治郎, 河口洋一, 井芹寧, 宮坂仁: 筑後川上流(大山川)におけるダム湖由来の浮遊性藻類がアユの採餌環境に与える影響, 河川技術論文集, 13, pp. 95-100, 2007.
- 6) 矢野真一郎, 黨秀治郎, 吉海宏祐, 田辺智子, 河口洋一, 齋藤正徳, 井芹寧: 筑後川上流大山川における流量変動が付着藻類の生育に与える影響, 河川技術論文集, 14, pp. 421-424, 2008.
- 7) 緒方健, 山崎正敏, 中村朋文, 矢野真一郎, 齋藤正徳, 井芹寧, 島谷幸宏, 河口洋一, 清野聡子: 筑後川上流大山川における流量変動が水生昆虫群集に与える影響, 日本陸水学会第71回大会講演要旨集, p177, 2006.
- 8) 清野聡子, 森和恒, 矢野真一郎, 齋藤正徳, 石川泰助, 島谷幸宏, 河口洋一, 井芹寧, 緒方健, 山崎正敏: 筑後川上流大山川における住民の地域知と河川環境再生研究での作業仮説形成, 環境システム研究論文発表会講演集, 34, pp. 231-238, 2006.
- 9) 大塚泰介: 河川の一形態単位内における付着藻類群落, 特に珪藻群落の生息場所による違い, 陸水学会誌, 59, pp. 311-328, 1998.
- 10) 渡辺仁治, 鈴木紀子: 被付着物の違いが付着性珪藻群集の形成と生物学的水質判定に及ぼす影響, 陸水学雑誌, 50(2), pp. 129-137, 1989.
- 11) 中井大介, 大塚泰介, 中原紘之, 中野伸一: 人工水路において添加された微細粒子の堆積が付着藻類の群落構造に与える影響, 陸水学雑誌, 69, pp. 209-221, 2009.
- 12) 戸田祐輔, 赤松良久, 池田駿介: 水理特性が付着藻類の一次生産特性に与える影響に関する研究, 土木学会論文集, 705/II-59, pp. 161-174, 2002.
- 13) Brown, H.D.: A Comparison of the Attached Algal Communities of a Natural and Artificial Substrata, *J. Phycol.*, 12, pp. 301-306, 1976.
- 14) Tuchman, M.L. and Stevenson, R.J.: Comparison of Clay Tile, Sterilized Rock, and Natural Substrate Diatom Communities in a Small Stream in Southeastern Michigan, USA, *Hydrobiologia*, 75, 73-79, 1980.
- 15) Hill, W.R. and Middleton, R.G.: Changes in Carbon Stable Isotope Ratios during Periphyton Development, *Limnol. Oceanogr.*, 51(5), 2360-2369, 2006.

(2010. 4. 8受付)