

付着藻類の生長過程に水理量を与える影響

EFFECTS OF HYDRAULIC FACTORS ON BIOMASS ALONG BIOFILM FORMATION IN GRAVEL BED RIVER

大本照憲¹・田中貴幸²・馬場太郎³
Terunori OHMOTO, Takayuki TANAKA and Taro BABA

¹正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

²学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

³学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

Temporal and spatial variations in the biomass of the biofilm, which were constituted of algae, bacteria and fungi, with benthic algae the dominant components growing on a cobble submerged in running water were investigated every day for a period of 40 days, from January 28, 2004 to February 5, 2005 in the Shirakawa River. Using the logistic model, temporal variations of biomass was analyzed in the periphyton developed in three current regimes different in flow velocity and accumulated height of suspended sediment. The intrinsic growth rate and carrying capacities were estimated by the linear relationship between the algal growth rate and biomass. The results showed that the carrying capacity was maximized in the riffle without accumulated fine sediment and at the top of cobble.

Key Words : *biofilm formation, benthic algae, suspended sediment, current velocity, gravel bed river*

1. はじめに

ダム直下流の礫床河川では洪水流量の平滑化に伴う流速の低下や自然攪乱の抑制に伴い、河川生態系の劣化が懸念されている。特に付着藻類に関しては、生物膜の剥離・更新の低減、微細土砂の堆積といった要因により、その生長が阻害されている。

付着藻類の生長過程に関する研究として、流速や栄養塩濃度、日射量など実河川の特性を再現した人工水路における長期的な付着藻類の生長過程の観察は多くなされている。阿部ら¹⁾は流速を調節できる屋外人工水路に発達した付着藻類群落の動態を、ロジスティックモデルを使って解析した。ロジスティックモデルは、指数増殖モデルおよびゴンペルツモデルに比べ、付着藻類群落の現存量の時間変化を良好に近似することを明らかにした。皆川ら²⁾は出水が及ぼす石面の付着物の影響について実験河川を用いて検討を行った。その結果、種による生活様式や付着形態の違いによって出水の影響が異なることを指摘した。このように人工水路を用いた付着藻類の生長過程の観察例は多い^{3,4)}ものの、実河川での詳細な観察は

十分に行われていない。

実河川で行われた付着藻類の生長過程の観察を行った研究例として、田代・辻本ら⁵⁾は矢作川中流域における付着性藻類群の増殖と剥離について、強制減量をパラメータとするロジスティック方程式による記述を試みた。徳永ら⁶⁾は多摩川羽村堰下流の平瀬において、河床付着層の形成過程における付着層量の変動を素焼きタイルを用いて測定し、それに影響をおよぼす環境要因について考察した。また、戸田ら³⁾は水理特性の違いが河床付着藻類の一次生産特性に与える影響について、現地観測および室内実験による定量的調査を実施した。現地観測では瀬の河床礫に付着する藻類は、淵と比較して、増殖初期の生産活性が高いことを示した。

しかし、これらの実河川における付着藻類の成長過程の観察では藻類採取の間隔が1~2週間と長く、季節ごとの現存量変化やその増減サイクルは把握できるものの、詳細な経日変化については明らかにされていない。

そこで、本研究では実河川の瀬と滞留域に礫を設置し、その現存量を1日2回、40日間観測するという方法で付着藻類の生長課程を調査した。また、一個の礫表面における付着藻類量の空間分布および微細土砂の堆積が付着藻

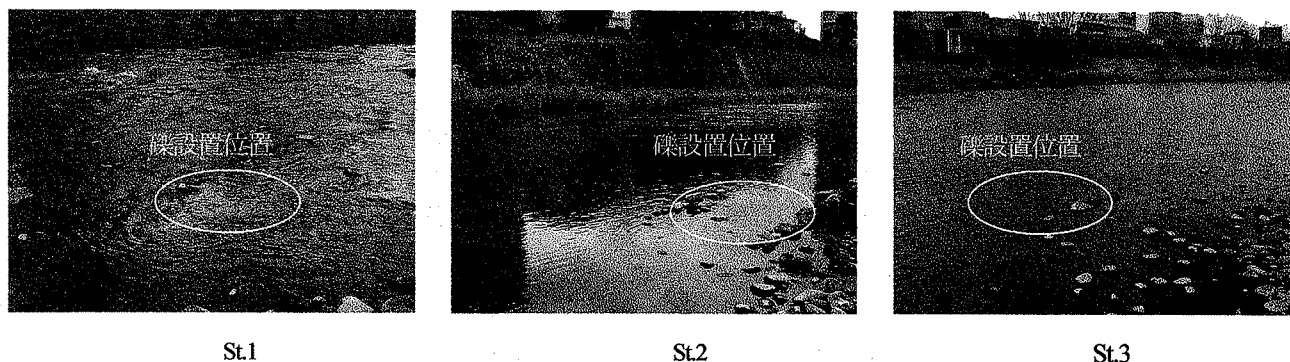


写真-1 各観測地点における礫設置位置

表-1 観測地における水深、流速、土砂体積量(HI6.12~HI7.2)

	St.1	St.2	St.3
平均水深H(cm)	5	7	7
平均流速U(cm/s)	31.5	6.2	6.7
土砂堆積量m(mg/cm ²)	-	0.9	141.6

表-2 観測地における水深、流速 (HI5.11~12)

	Sta	Stb
平均水深H(cm)	20	15
平均流速U(cm/s)	65.1	17.4

類の生長に与える影響についても検討を行った。

2. 付着藻類量の時系列変化

(1) 観測地および観測方法

a) 観測地概要

観測対象の白川は、その源を熊本県阿蘇郡高森町の根子岳（標高1,433m）に発し、阿蘇外輪山の立野付近において黒川をあわせ、熊本平野を貫流し、有明海に注ぐ、幹川流路延長74km、流域面積480km²の一級河川である。観測は白川下流域における熊本大学工学部近傍の竜神橋付近（白川河口より15.9km上流地点）およびその下流約1kmの子飼橋付近（白川河口より14.8km上流地点）で行った。ここで、下流側の子飼橋観測地点は、河道掘削工事に伴い浮遊土砂の顕著な場所を設定した。竜神橋観測地点左岸側の瀬をSt.1、竜神橋地点左岸側の滞留域をSt.2、子飼橋地点左岸側の滞留域をSt.3とする。写真-1に各観測地点における礫設置位置を示す。観測期間は平成16年12月28日から平成17年2月5日の40日間である。また、同様の観測を平成15年11月17日から平成15年12月16日の30日間においても実施している。その時の観測地は子飼橋と竜神橋の中間付近（白川河口より15.5km上流地点）で行っており、その左岸側の瀬をSta、左岸側の滞留域をStbとする。

b) 観測方法

各観測地点において水深、流速の計測を行った。さらに、St.1、2および3においては微細土砂堆積量も計測した。流速は電磁流速計を用いて測定し、微細土砂の堆積量は各地点の河床礫を取り出し、その表面に堆積している土砂の重量を測定した。その他に付着藻類の増殖に

影響を与える要因として栄養塩類、日射量などが挙げられる³⁾が、調査対象区間には流入河川が無いこと、日射を遮る河畔林等がないこと、観測地点間の距離が近いことから、各観測地点間におけるそれらの影響はほとんど違いがないため、詳細な検討は割愛した。

また、藻類を付着させる基物として調査地点近くの河川敷より大きさ、材質の似た表面が乾燥している礫を選定し、各観測地点に設置した。その平均粒径は縦12.0cm、横15.8cm、厚さ3.6cmである。1日2回、礫から付着藻類を採取した。同時に、水温と水深の推移、竜神橋地点（St.1、St.2）および子飼橋地点（St.3）で採取した河川水に含まれる付着藻類量も観測した。付着藻類の現存量はクロロフィルa量（chl-a量）として測定した。付着藻類の採取は、礫表面に面積2cm×2cmのコドラートをあて、枠外の部分はブラシを使用して取り去り、その後に残った枠内の部分を蒸留水を用い洗い流して採取する方法により行った。礫表面の微細土砂などの堆積物はあらかじめ蒸留水で洗い流した。採取した試料はWhatmanGF/Cグラスファイバーフィルターで吸引ろ過し、ろ紙をジメチルホルムアミド（DMF）に1時間溶質し、chl-aを抽出した。その後、蛍光法によりchl-a量を測定した。

(2) 観測結果および考察

a) 観測地の諸条件

観測地点St.1、2および3における水深、流速および微細土砂堆積量を表-1に表す。瀬のSt.1では流速が31.5cm/sであり、滞留域とみなしたSt.2、3に比べ約5倍の値を示す。土砂堆積量は観察30日目の値を示している。St.3においては土砂体積量は上流側で河道掘削工事が行われている影響により141.6mg/cm²と他の観測地点に比べ大きな値となることが確認できる。St.1では土砂の堆積はほと

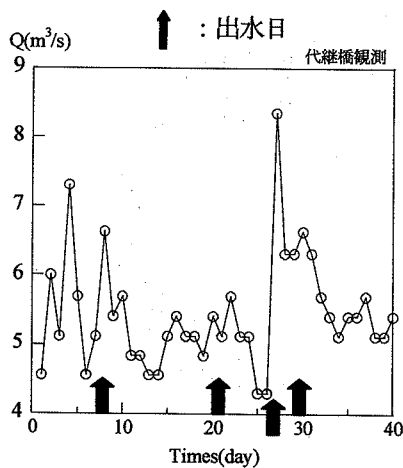


図-1 白川の流量変化

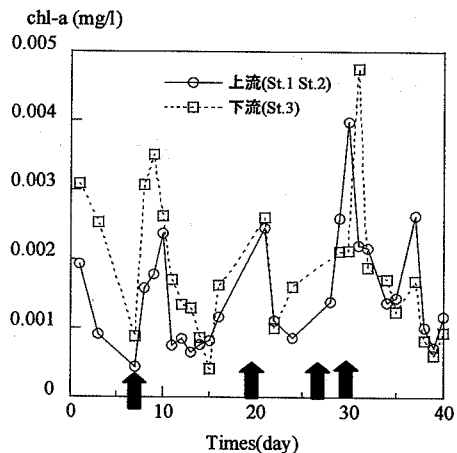


図-2 河川水中のchl-a量変化

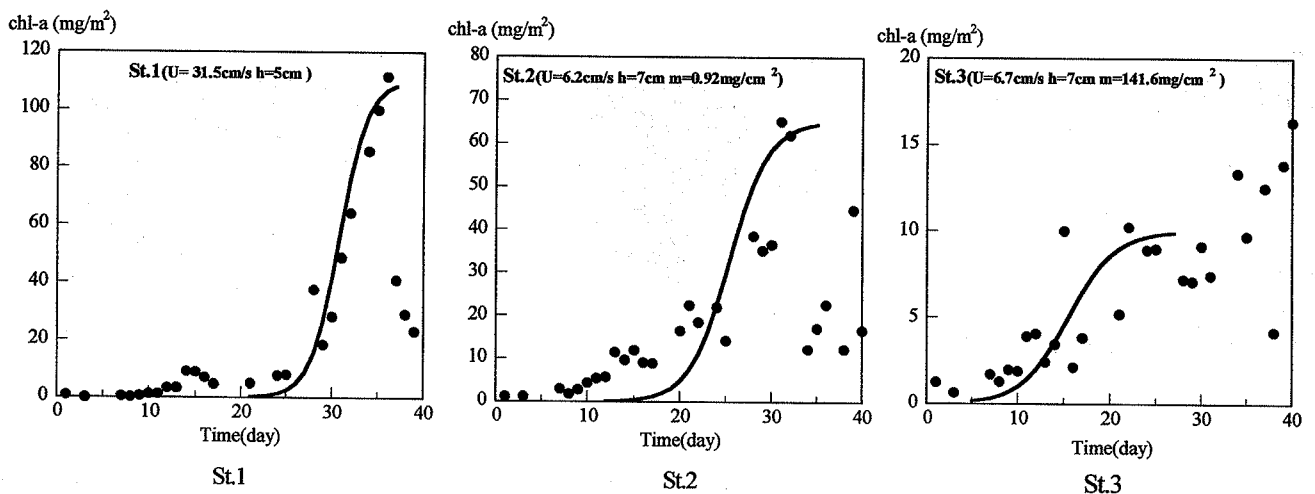


図-3 St.1,2,3におけるchl-a量変化とロジスティックモデル(HI6.12~HI7.2)

んど見られなかった。また、表-2にSt.aおよびSt.bにおける水深と流速を表す。

b) 河川水中に含まれる植物プランクトン

図-1に代継橋基準点における観測期間中の白川の流量変化を、図-2に河川水中に含まれるchl-a量の推移を示す。流量は観測地点のSt.3から約2km下流の代継橋において正午に水位を計測し、その水位より平水時の水位-流量図から流量を求めた。図中の矢印は出水が発生した日を示しており、出水は観測開始日より7~8日目、20~21日目、26~27日目、29~30日目に発生した。

図-2より、河川水中のchl-a量は出水の発生に伴う流量の増加後に上昇していることが確認できる。その傾向はいずれの観測地点においてもほぼ同様である。また、観測期間中において最も流量が大きくなった29~30日目では河川水中のchl-a量も最大値をとる。これは出水により河床礫の付着藻類が掃流されやすくなる²⁾ことから、河川水中のchl-a量が上昇すると考えられる。

c) 河床礫の付着藻類量変化

図-3に観測地点St.1, 2および3における河床礫に付着した藻類の生長過程を示す。付着藻類量は、観測開始時刻においてはゼロに設定している。St.1およびSt.2において、付着藻類量は初めの10日間ほどは緩やかな増加はみ

表-3 St.1,2,3における r, K の値

	St.1	St.2	St.3
内的自然増加率 r (1/day)	0.65	0.47	0.4
環境収容力 K (mg/m ²)	110	65	10

られるもののほぼゼロに近い値をとる。これは礫表面にバクテリアクラスターで構成される基礎フィルム⁷⁾の形成期間であることが示唆される⁷⁾。その後、約2~3週間目あたりから指数関数的に増加し、約1~2週間の急激な増殖期間を経て極大値をとる。付着藻類現存量の極大値に注目すると、瀬のSt.1では約110mg/m²、滞留域のSt.2では約65mg/m²となり、流速の適度な大きさは付着藻類の生長にプラスに働くことが認められる。また、微細土砂の堆積量が上流側に比べ顕著に大きい下流側滞留域のSt.3では、約3週間で付着藻類現存量が極大値をとり、その値は約10mg/m²である。これにより微細土砂の堆積は付着藻類現存量を激減させることが明らかになった。St.3は他の観測地点と比べ付着藻類の生長過程が異なる動態をとるが、これは土砂堆積による日射量、溶存酸素の不足や土砂中に含まれるchl-aの影響などが考えられる。付着藻類現存量が極大値をとった後、いずれの観測地点に

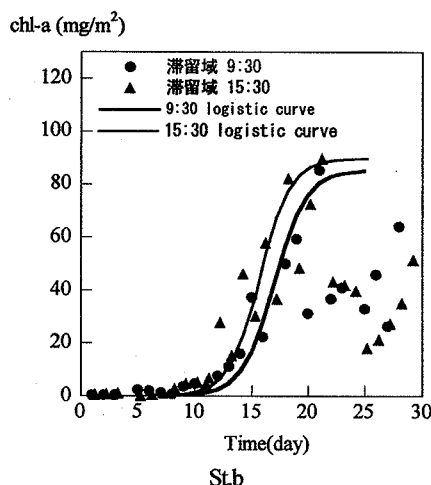
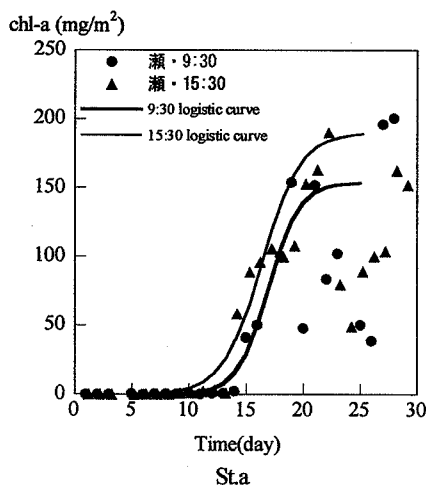


図-4 St.a,bにおけるchl-a量変化とロジスティックモデル(H15.11~12)



写真-2 St.2における観測4日目の礫



写真-3 St.2における観測37日目の礫

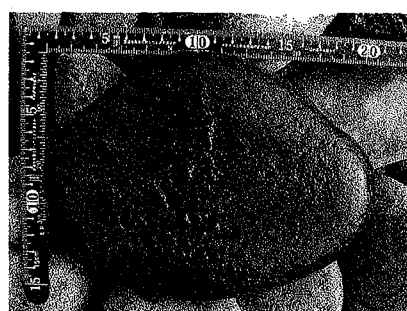


写真-4 剥離後、下層に増殖し始める付着藻類

においてもわずか1日ないし2日で現存量が急激に減少することが確認できる。特にSt.1では1日で約70mg/m²と極大値から約60%, St.2では2日で約50mg/m²と極大値から約70%もの減少がみられた。これらの動態については平成15年にSt.aおよびSt.bで行った観測結果図-4においてもみることができる。また、St.1では観測期間の不足によりみられないものの、その他の観測地点においては現存量が減少した後さらに増加する傾向が伺える。ここで、写真-2, 3にSt.2における観測4日目および37日目の礫表面の様子を表す。観測開始4日目に比べ37日目には付着藻類量の増加が明瞭にみられる。付着藻類は生長するに従って、礫表面を厚く覆い、藻類の色は初期段階はうすい褐色であったが次第に濃い茶色に変化していくことを観測することができた。写真-3の礫表面上は枯死状態となっており、付着藻類が剥離した跡を確認できる。これにより、付着藻類現存量が極大値まで増加した後に急激に減少するものと考えられる。また、写真-3の礫において付着藻類が枯死状態にある部分に水を流すと簡単に剥がれてしまったが、その下層では薄く藻類が礫表面を覆っていることが確認できた。その様子を写真-4に表す。このために、付着藻類現存量が減少した後すぐに増加傾向に転じると予想される。

生長に限界のある付着藻類群落の動態を表すモデルとしてロジスティックモデルが提案されている⁹⁾。各観測

表-4 St.a,bにおけるr,Kの値

	Sta午前	Sta午後	St.b午前	St.b午後
r (1/day)	0.74	0.59	0.70	0.73
K (mg/m ²)	154	190	85	90

地点において付着藻類の生長に対して適用したロジスティックモデルを図-3および図-4中の実線に示す。下記の式(1)にモデルの基礎式を示し、式(1)の微分方程式を積分した式(2)によりロジスティックモデルを表現する。

$$\frac{dB}{Bdt} = r \left(1 - \frac{B}{K} \right) \quad (1)$$

$$B(t) = \frac{K}{1 + (K/B_0 - 1) \exp(-rt)} \quad (2)$$

ここに、 B は付着藻類の現存量(mg/m²), t は経過日数, r は内的自然増加率(1/day), K は環境収容力(mg/m²), および B_0 は $t=0$ における現存量(mg/m²)を表す。 r および K は西村ら⁹⁾ の簡易法を用いて推定した。求めた r および K を表-3, 4に示す。

図-3, 4より、付着藻類の成長過程に対して、ロジスティックモデルは現存量が極大値に達するまでの約1~2週間の急激な増殖期間はその動態を良好に表しているが、

表-5 観測地における水深, 流速 (H16.11)	St.1	St.2	St.3
平均水深H(cm)	13	15	15
平均流速U(cm/s)	32.1	8.4	7.7

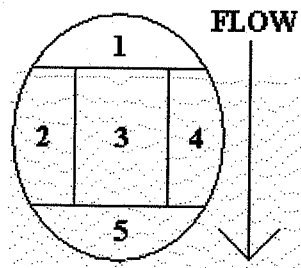


図-5 土砂堆積量測定部分割図

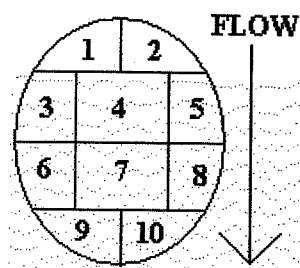


図-6 付着藻類量測定部分割図

表-6 礫表面における土砂堆積量分布 (mg/cm ²)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
St.2(工事上流)	0.60	0.64	0.92	0.52	0.67
St.3(工事下流)	20.50	22.60	141.60	16.90	24.90

表-7 礫表面におけるChl-a量分布 (mg/m ²)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
St.1	44.2	28.0	100.9	100.2	92.7	17.0	122.9	40.5	28.8	17.1
St.2	66.9	31.8	69.5	135.0	79.2	51.4	34.4	31.0	37.7	41.5
St.3	18.3	36.6	29.5	16.3	24.0	20.7	18.5	18.9	48.1	46.5

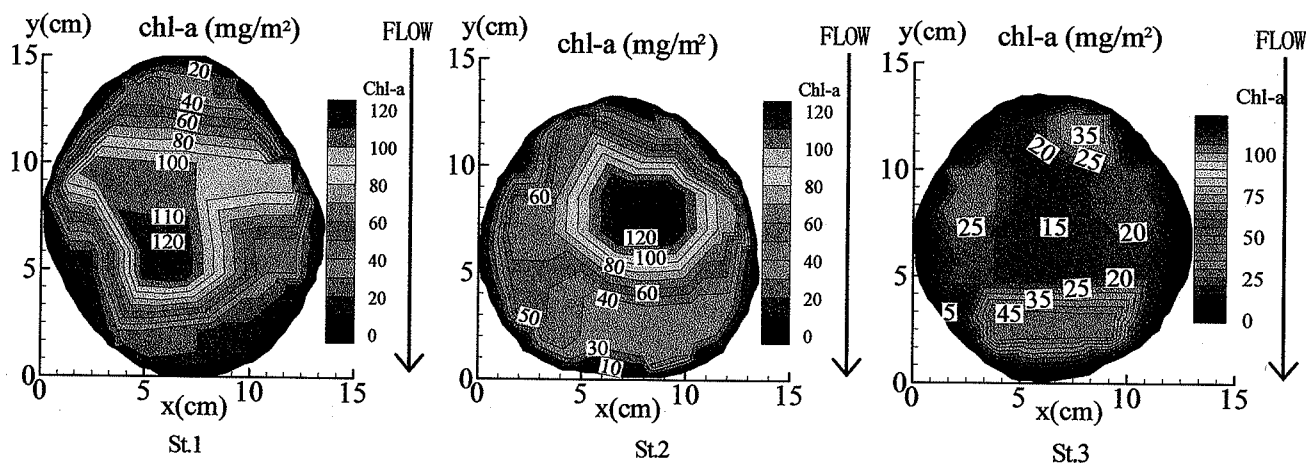


図-7 各観測地点における礫表面Chl-a量分布

それ以降の増減は説明できていない。これにより付着藻類現存量極大値となった後、枯死状態となった付着藻類に対してはロジスティックモデルの適合性は低いことが明らかになった。

とんど行われていない。そこで本研究では、実河川において一個の礫表面における付着藻類量の空間分布および微細土砂の堆積が付着藻類の生長に与える影響について検討した。

3. 付着藻類量の礫表面における空間変化

一個の礫表面における付着藻類量の空間分布に関する研究として、戸田ら³⁾は、礫を模したモルタル製の半球を人工水路に設置し、表面に付着する藻類の量を比較している。その結果、礫頂部下流側の面および頂部に比べ上流側の面では付着藻類の現存量が少ないことを指摘している。しかし、実河川においてこのような観察はほ

(1) 観測地および観測方法

観測地は前章と同様のSt.1, 2および3で行った。河川より選定した礫の平均粒径は縦14cm, 横13cm, 厚さ2cmである。観測は平成16年11月に行い、観測30日目の礫を対象とする。図-5および図-6のように礫表面を分割して土砂堆積量および付着藻類量を測定した。

土砂堆積量として、礫表面に堆積している土砂の単位面積重量を測定した。土砂の採取は面積3cm×3cmのコドラートをあて水を流しながら行い、採取した土砂をろ過後乾燥させ、重量を測定した。なお、St.1では礫に土砂

の堆積が目視できなかったため、土砂堆積重量を計測していない。付着藻類の採取方法およびchl-a量の測定方法は前章と同様である。

(2) 観測結果および考察

観測地点St.1, 2および3における水深および流速を表-1に表す。瀬のSt.1では流速が32.1cm/sと滞留域であるSt.2およびSt.3に比べ約4倍の値となる。

表-6にSt.2およびSt.3で採取した礫の土砂堆積量を示す。いずれにおいても礫の頂部に堆積する微細土砂量が礫端部より大きな値となる。礫頂部の値に注目すると、St.3では土砂堆積量がSt.2と比べ顕著に大きな値となることが確認できる。

各観測地点の河床礫における付着藻類量の空間分布を表-7および図-7に示す。St.1およびSt.2に注目すると、いずれも礫頂部において礫端部に比べ大きな値を示し、St.1ではNo.7, St.2ではNo.4において極大値をとる。これにより今回の観測条件では、流速が大きくなる部分で付着藻類量も大きな値をとることが示唆された。また、礫端部における上流側のNo.1および2と下流側のNo.9および10について比較すると、上流側の礫端部において付着藻類量は大きな値を示す。これは、付着藻類量のオーダに違いがあるものの、戸田ら³⁾の人工水路実験とは異なる結果となった。

St.3に注目すると、土砂堆積量が大きな値を示した礫頂部のNo.4および7においてその周辺部に比べ小さな値を示す。また、その値は土砂堆積量が少ないSt.2と比べても顕著に小さい値となることが認められる。このように、微細土砂の堆積は日射量や流速の低下などの要因により付着藻類の生長を妨げることが明らかになった。

4. おわりに

本研究では実河川の瀬と滞留域に礫を設置し、1日2回、40日間にわたり付着藻類の生長を観測した。また、一個の礫表面における付着藻類量の空間分布および微細土砂の堆積が付着藻類の生長に与える影響についても検討を行った。本研究により得られた知見を列挙する。

1) 瀬と滞留域に設置した礫中に含まれる付着藻類量は、いずれも観測開始から10日間ほどはほぼゼロに近い値をとる。これはバクテリアクラスターで構成される基礎フィルム形成期間であることが示唆される。その後、約1~2週間の急激な増殖期間を経て極大値を示し、そこからわずか1日ないし2日で現存量が急激に減少する。また、現存量が減少した後、さらに増加する傾向が伺えた。このような付着藻類の生長過程の詳細な経日変化が今回の観測により明らかになった。

- 2) 各観測地点における付着藻類量の極大値についてみると、瀬では約110mg/m²、上流側の滞留域では約65mg/m²となり、流速の大小関係が付着藻類の生長に大きく寄与することが認められた。また、微細土砂の堆積量が上流側に比べ顕著に大きい下流側滞留域では、約3週間で付着藻類現存量の極大値をとり、その値は約10mg/m²とその他の観測地点に比べ顕著に小さくなった。これにより微細土砂の堆積は付着藻類現存量を激減させることが明らかになった。
- 3) 付着藻類の生長過程に対して、現存量が極大値に達するまではロジスティックモデルで説明可能であるが、その後枯死状態となった付着藻類に対してはその適合性は低いことが明らかになった。
- 4) 礫表面における付着藻類量の空間分布特性に注目すると、礫端部の付着藻類量が小さな値を示し、礫頂部に極大値が現れる傾向が読み取れた。また、今回の観測条件においては、礫端部では下流側に比べ上流側で付着藻類量が大きな値を示すことが確認できた。

参考文献

- 1) 阿部信一郎, 南雲保, 田中次郎: ロジスティックモデルによる河川付着藻類群落の量的動態の解析, 陸水学雑誌63, p209-p213, 2002.
- 2) 皆川朋子, 福嶋悟, 萱場祐一, 尾澤卓思: 出水が河床石面付着物に及ぼす影響に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第9巻, p475-p480, 2000. 06.
- 3) 戸田祐嗣, 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, No. 705/II-59, p161-p174, 2002. 05.
- 4) 赤松良久, 戸田祐嗣, 池田駿介: 河床付着藻類の増殖と剥離に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, 2000. 06.
- 5) 田代喬, 加賀真介, 辻本哲郎: 河床付着性藻類群の繁茂動態のモデル化とその実河川への適用, 河川技術論文集, 第9巻, p91-p96, 2003. 06.
- 6) 徳永真知子, 森川和子: 河床付着層形成過程の量的変動に関する研究-多摩川における人工基層浸漬実験-, 陸水学雑誌61, p147-154, 2000.
- 7) Tom J. Battin, Louis A. Kaplan, J. Denis Newbold and Claude M. E. Hansen: Contributions of microbial biofilms to ecosystem processes in stream mesocosms, NATURE, VOL426, p439-P442, 2003.
- 8) Jacoby, J. M.: Alterations in periphyton characteristics due to grazing in a Cascade foothill stream, Freshwater Biology, 18, p495-P508, 1987.
- 9) 西村和紀, 安藤生雄: 付着藻類の増殖量測定方法とアユによる摂食状況, 日本水産学会誌, 57, p391-p396, 1991.

(2006. 4. 6 受付)