

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

EFFECTS OF THE DISCHARGE INCREASE ON ATTACHED ALGAE
IN THE OHYAMA RIVER (UPPER CHIKUGO RIVER)

齋藤正徳¹・河口洋一²・矢野真一郎³・井芹寧⁴・黨秀治郎⁵

島谷幸宏⁶・緒方健⁷・山崎正敏⁷・清野聡子⁸

Masanori SAITO, Yoichi KAWAGUCHI, Shinichiro YANO, Yasushi ISERI, Shujiro TO
Yukihiko SIMATANI, Takeshi OGATA, Masatoshi YAMAZAKI, Satoko SEINO

¹ 学生会員 工修 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

² 正会員 工博 九州大学大学院助手 工学研究院環境都市部門(同上)

³ 正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門(同上)

⁴ 正会員 工博 西日本技術開発株式会社 環境部(〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁵ 学生会員 九州大学工学部 地球環境工学科建設都市工学コース(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁶ フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門(同上)

⁷ 福岡県保健環境研究所 環境科学部(〒818-0135 太宰府市向佐野39)

⁸ 正会員 工博 東京大学大学院 総合文化研究科助手 (〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1)

The maintenance flow discharge of the Ohyama River (upper Chikugo River) had been restricted to 1.5m³/s by a hydroelectric dam. To improve the river environment, the river administrator has changed it to 4.5m³/s in summer and to 1.8m³/s in winter. In this study, we aim at investigating the effects of discharge increase on epilithic biofilms composed of algae. We conducted sampling of attached algae every two weeks from March to July, 2006, at an impact reach increasing the discharge, at a control reach maintained a constant discharge, and at two reference reaches in upstream of the hydroelectric dam. Results of the field surveys show that chlorophyll-a at the impact reach is higher than one at the control reach. However, in case of controlling flood disturbance by a dam, there is no difference in chlorophyll-a between the impact reach and the control reach, because attached algae is regulated by heterotrophic process.

Key words : maintenace flow discharge, periphyton, flood disturbance, heterotrophic process

1. はじめに

ダム直下の河川上流域では一般的に河床構成材料の粗粒化が見られる¹⁾。また、流量の減少や安定化による底生動物や魚類などの生物生息場への影響が懸念されている^{2), 3)}。このような状況を踏まえ、河川維持流量の増量やフラッシュ放流の試行が幾つかのダムで行われ、フラッシュ放流が付着藻類や底生動物へ与える影響の評価⁴⁾や魚類の生息に適したダム放流量の検討⁵⁾などの研究や調査が実施されてきた。

本研究の対象領域である九州北部地方を流域に持つ筑後川上流の通称大山川(図-1)では、ダム下流の流況改善を目的として、維持流量の増量が行われてい

る。かつての大山川では、体長30cm超のいわゆる尺アユが多数生息していたが、上流のダム群による発電用取水に起因して維持流量が著しく減少した。これにより、尺アユの生息場が損なわれ、大山川の河川環境は大きく劣化していた。そこで河川環境の改善を目的として、2002年度より大山川ダムの発電用取水量を調整し、大山川への維持流量を同年1.5m³/sから夏季(3月下旬~9月)4.5m³/s、冬季(10月~3月中旬)1.8m³/sに増加させた。

本研究では、物理調査、藻類調査、生物調査、ならびに地域環境調査を2002年より継続的に行ってきた。これらの調査結果より維持流量の増量や変動が当該水域の水理的状況や生態系に及ぼす影響を時空間的に評

価し、大山川流域の地域環境やアユをはじめとする生物の生息環境に対して最適な維持流量を設定することを目的としている。2005年の物理調査により、大山川の維持流量増加は淵での滞留時間の短縮による底質環境の改善や、水面積・底層流速の増大など、物理環境に対する維持流量増加の改善効果がある程度把握することができた⁶⁾。また、維持流量を増加させた2002年以降、大山川に生息しているアユの体長はダムが建設される以前ほどには戻っていないが、維持流量増加前と比較して大きくなったと言われている⁷⁾。アユを始めとする河川生態系の構成種は付着藻類の生育状態に大きく影響されることから、維持流量増加が生態系に及ぼす影響を把握するためには付着藻類に対する影響を明らかにする必要がある。河川上流域における付着藻類の現存量は、光合成による増殖と、出水によって引き起こされる流量増加による剥離や、バクテリアによる分解、アユや底生動物による摂食圧などのバランスにより規定されると考えられる。

一方、河川付着藻類に関する既往の研究において以下のことが把握されている。まず、流速を増加させた場合、付着膜上の境界層が薄くなることにより、栄養塩の付着膜内部への拡散輸送が促進され、付着藻類の増殖速度が大きくなること⁸⁾や、付着膜直上の乱れが大きいかほど付着藻類の一次生産力が大きくなること⁹⁾が分かっている。一方、降雨により引き起こされる流量増加による攪乱が頻繁に生じている河川では、付着藻類の現存量は降雨に伴う攪乱による剥離量により規定される¹⁰⁾。しかしながら、上流にダムがあり流量変動が制御されている河川では、一般的に降雨による攪乱が減少する。このような場合には、付着膜が成熟するため内部ではバクテリアが繁殖し、それによる藻類の分解が付着藻類量に大きく影響する¹¹⁾。また、分解された付着藻類が栄養塩に変換され、付着藻類の増殖に再利用されることも示唆されている。したがって、流速の増加は栄養塩の拡散輸送が促進されることより初期発生の付着藻類の増殖に対して影響があると思われるが、流量変動の攪乱が減少し、付着膜が成熟した場合には、バクテリアによる分解や栄養塩の再利用により、流速増加の影響は相対的に弱まることが予想される。既往の研究において、流速増加が付着藻類に与える数ヶ月程度の長期的な影響については把握されていない。

そこで、本研究では出水による攪乱がダムにより制御されている大山川において付着藻類の現地調査を行った。大山川ダムからの維持流量増加が付着藻類に与える効果を把握するために、ダム群下流域内の維持流量一定区間と維持流量増加区間、ならびに、それらと比較するため自然流況を示しているダム上流の計3区間において、2週間程度の間隔で付着藻類の連続調査を行った。また、付着藻類の生産量を把握する目的

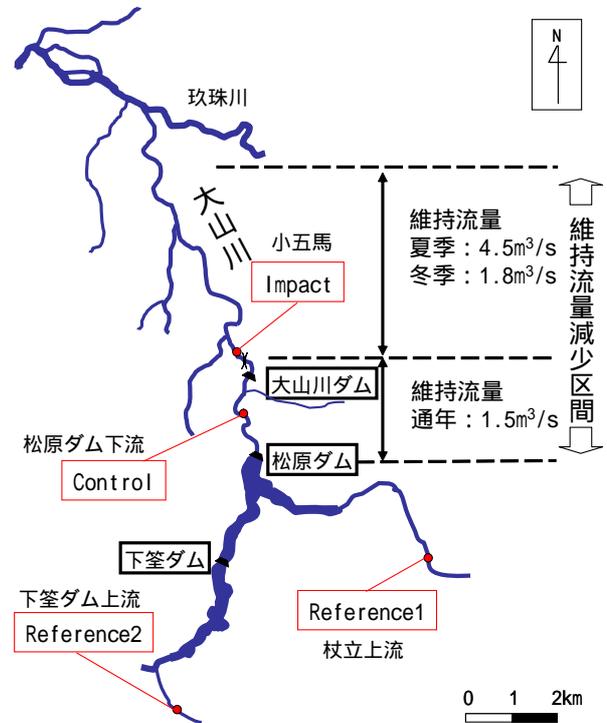


図-1 大山川と調査区間

で、2006年5月に総生産速度の連続測定を併せて行った。

2. 調査内容

図-1に示すように、上流にダムがなく自然流況を示す杖立上流(以下;Reference1区間)、平常時の流量が松原ダムによって通年 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ に制御されている松原ダム下流(以下;Control区間)、そして平常時の流量が大山川ダムによって冬季(10月初旬~3月中旬)は $1.8\text{m}^3/\text{s}$ に、夏季(3月下旬~10月初旬)は $4.5\text{m}^3/\text{s}$ に制御されている小五馬(以下;Impact区間)の計3区間で2006年3月~7月までの期間中に約2週間間隔で平常時に藻類調査を行った。なお、調査日のうち5月24日と6月13日の2回のみ下笠ダム上流(以下;Reference2区間)も含めた計4区間で藻類調査を行った。

付着藻類の増殖速度は、物理的な要因の他に河川水中の栄養塩濃度に大きく影響される¹²⁾ことから、事前調査として2005年11月25~26日に藻類調査区間において河川水を採水し、AutoAnalyzer(swAAT, BLTEC社製)により、各種窒素、リンを測定した。測定結果を図-2に示す。Reference2区間は上流に栄養塩の負荷源がないため濃度は低い。また、Reference1区間の上流には栄養塩の負荷源(温泉街など)があるためReference1区間ではTN, TPが高い値を示しているものの、Reference1・Control・Impactの3区間において付着藻類の増殖率に大きく影響を与えるほどの栄養塩濃度の差はなかった。よって、Reference1・Control・Impactの3区間の藻類調査結果の比較において、栄養塩濃度

の違いによる影響は無視できると考えた。また、ダムからの流量増加が付着藻類へ与える影響を抽出することを目的としているため、調査区間の選定にあたっては、石礫上の付着藻類量に影響を与える水深・底層流速がそれぞれの区間の流心部分で流量増加前 (Impact 区間流量; $1.8\text{m}^3/\text{s}$) において大きな差が生じていないことを考慮した。

次に、藻類の調査内容を示す。それぞれの調査区間において、水際部分を除く流軸方向に約30mの範囲でランダムに石礫 (直径約15~25cm) を5個採取した。採取する際には水深と底層流速 (10秒平均流速を3回測定し平均した) を測定した。なお、流速測定には次元電磁流速計 (VE10, ケネック社製) を使用した。次に採取した石礫から付着物をナイロンブラシと蒸留水を用いてこすり取ったものを試料とし、剥ぎ取った部分の面積はデジタルカメラで撮影した写真から計測した。なお、石礫面において付着藻類のばらつきがある¹³⁾ことから、その影響を取り除くため石礫の上面すべてを剥ぎ取った。その後、それぞれの試料 (1区間当たり5個) を4つに均等に分け、1つ目の試料について吸光法によりクロロフィルaを測定した。2つ目の試料は約1時間静止させ沈殿量を測定し、3つ目の試料は105で2日間乾燥させ乾重量を測定後、600で3時間燃焼させ強熱減量と強熱残留物を測定した。さらに、4つ目の試料はホルマリン固定し、藻類種の同定用に保存した。また、試料採取時にそれぞれの調査区間において、多項目水質計 (YSI6600, YSI ナノテック社製) を用いて、河川水中の電気伝導度、濁度、クロロフィルa, pHを測定した。そして、Reference1・Control・Impactの3区間において2006年3月16~26日、4月13日~6月29日の2期間、Reference2区間においては5月24日~6月13日の期間にメモリー式クロロフィル濁度計 (COMPACT-CLW, アレック電子社製) を係留し、水温と濁度の連続測定を行った。

付着藻類の総生産速度の経時変化を把握する目的で Reference1・Control・Impactの3区間において2006年5月8~24日の期間に10分間隔で総生産速度の連続測定を行った。総生産速度は付着藻類の量や活性度に影響されるため、付着藻類の状態を把握する目安になる¹⁴⁾。なお、測定では付着藻類調査区間の上流端と下流端において流心部分の底層にDO計 (COMPACT-DOW, アレック電子社製) を設置し、2地点間の溶存酸素濃度の差から総生産速度を求める方法¹⁵⁾を用いた。再曝気係数と生物の基準呼吸速度を夜間の溶存酸素濃度の差から推定し、それらを昼間に外挿することにより、再曝気量と呼吸量を求め、総生産速度を算出した。また、評価区間内に早瀬や淵が存在している場合には再曝気量の推定に誤差が生じやすいので、平瀬が続く範囲を対象領域に選定した。さらに、総生産速度の算出に必要な設置区間内における河川水の平均流下時間

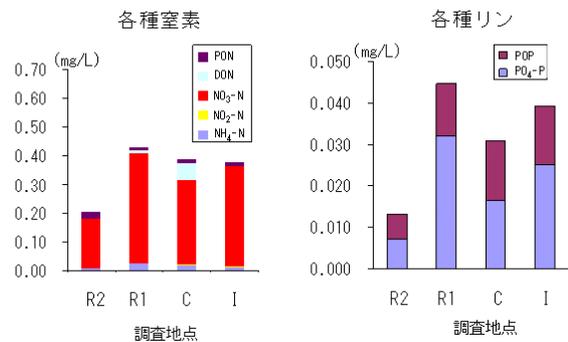


図-2 2006年11月25~26日に行った各藻類調査区間における各種窒素・リンの測定結果 (R2; 下笠ダム上流, R1; 杖立上流, C; 松原ダム下流, I; 小五馬)

表-1 藻類調査区間における河川水の水質 (平均値 ± SD)

水質項目	地点			
	Reference1 (n=7)	Reference2 (n=3)	Control (n=8)	Impact (n=8)
電気伝導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	112±13	71±18	102±13	98±17
濁度 (mg/L)	3.9±1.1	1.2±0.7	1.5±0.7	2.1±1.1
Chl. a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	2.0±1.4	1.2±0.2	1.7±0.6	2.4±0.8
pH	8.12±0.56	8.11±0.27	8.09±0.6	8.05±0.56

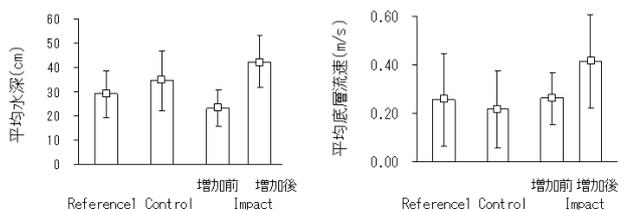


図-3 付着藻類調査区間における採取した石礫上の平均水深と平均底層流速 (平均値 ± SD)

は、表層流速を測定するために河川水を半分程度入れた250mLのポリビンを下流させて表層水の流下時間を求め、それを0.6で割ることにより算出した。

なお、流下時間はReference1区間で約6分、Control区間は約15分、Impact区間で約10分であった。

3. 調査結果

各調査区間における河川水の水質項目を全調査日で平均した値を表-1に示す。上流に栄養塩の負荷源がないReference2区間において電気伝導度は他の区間より低い値を示し、pHに関しては4区間においてほぼ同じ値を示していた。また、濁度やクロロフィルaについては全ての区間において低い値を示していた。次に、各調査区間毎の石礫採取地点における平均水深と平均底層流速を図-3に示す。平均水深についてはReference1・Control区間では30cm前後であった。一方、Impact区間での流量増加前 ($1.8\text{m}^3/\text{s}$ 調査時、3月5日) は約20cmであったが、増加後 ($4.5\text{m}^3/\text{s}$ 調査時、4月~7月) は約40cmになり、流量増加により平均水深

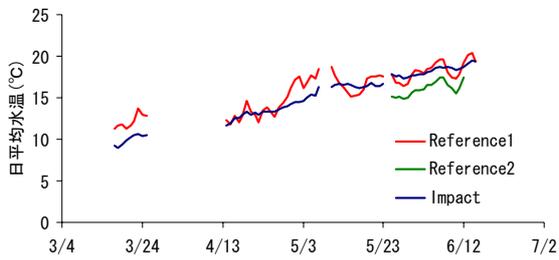


図-4 付着藻類調査区間における水温の経時変化

は約20cm上昇していた。水深が深くなれば付着膜に届く日射量が減少するが、Lambert-Beerの光透過式¹⁶⁾より、純水の場合で水深が20cm深くなった場合に約5.4%しか日射量が減少しないこと、大山川は平常時において濁度が非常に低い値を示していたことから、水深の変化による付着藻類の成長への影響は無視できると思われる。

次に、平均底層流速はReference1区間で約0.26m/s、Control区間で約0.22m/s、Impact区間の流量増加前は約0.26m/sであり、3区間とも同様な値を示していた。一方、Impact区間において流量増加後は約0.41m/sを示し、流量増加により底層流速は約0.15m/s増加した。よって、流量増加後は区間同士の比較で最大0.19m/sの違いがある。ここで、発生初期の付着膜について、底層流速を0.3m/sから0.6m/s増加させた場合、付着藻類の現存量が3倍近く増加したという実験結果⁸⁾があることから、Reference1・Control両区間とImpact区間の底層流速の違いは付着膜に大きく影響を与えたと考えられる。なお、Reference2区間は底層流速と水深に関してReference1区間と同様の値を示していた。

図-4に調査期間中の各調査区間における日平均水温を示す。なお、Control区間については、Impact区間とほぼ同じ値を示していたので図示は省略した。日平均水温よりReference1区間はダム下流区間と比較して3月下旬と5月上旬で約2高い値を示しているが、調査期間での平均値は概ね同じ値であった。ただし、Reference2区間は標高の違いに起因して他の区間より約2低い値を示していた。

以上より、それぞれの調査区間において付着藻類に最も影響を与えている物理指標は底層流速であったことから、付着藻類調査の結果より流速の増加が与える影響を把握することができると考えられる。

次に、付着藻類調査結果をそれぞれの調査区間の日平均流量と併せて図-5、ならびに図-6に示す。なお、Reference2区間の流量変化はReference1区間と等しいと見なした。クロロフィルaの経時変化より、Reference1区間では、増減を繰り返しているのが分かる。この増減は降雨により生じる流量増加の攪乱の影響を強く受けており、降雨の影響が緩和されているダム下流2区間の増減の要因とは性質を異にしている。

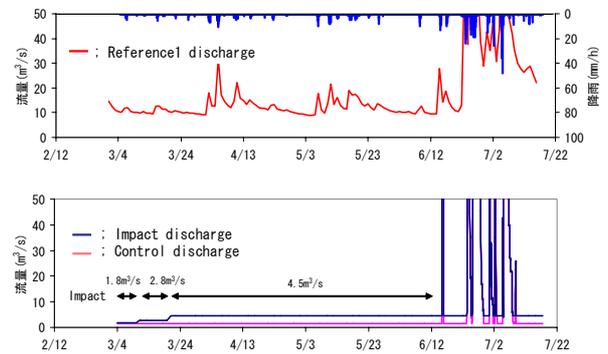


図-5 付着藻類調査期間における日平均流量

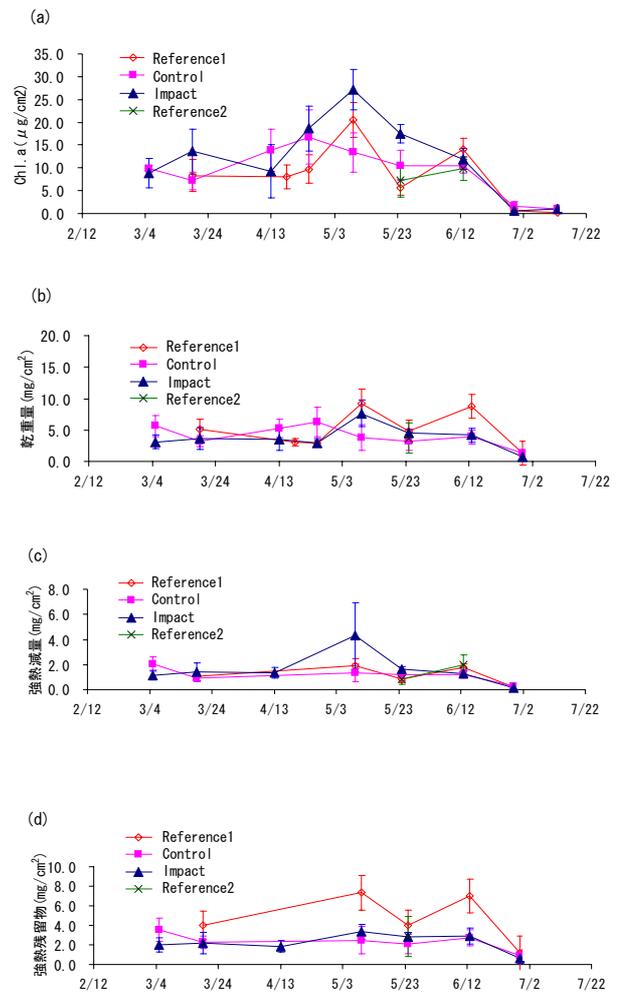


図-6 付着藻類調査結果(平均値 ± SD, n=5)
(a)Chl. a, (b)乾重量, (c)強熱減量, (d)強熱残留物

また、流量が安定していた5月24日から6月13日の期間でダム上流の2区間(Reference1, 2)において比較すると、Reference2区間はReference1区間より水温と栄養塩の濃度が低かったことに起因して増殖率が低いことがわかる。一方、ダム下流の2区間におけるクロロフィルaの経時変化に関しては、Impact区間では5月8日にピーク値(27 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)を、Control区間では4

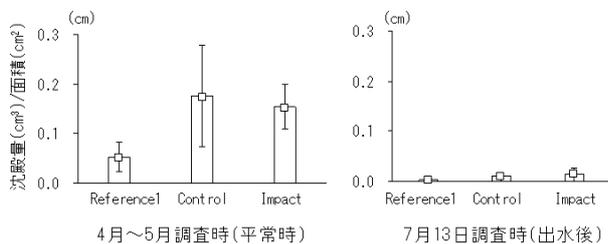


図-7 平常時と出水後における付着膜の容量(沈殿量/面積), (平均値 ± SD)

月25日にピーク値(17 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)を示した。その後、流量が安定している状況下でクロロフィルaは減少している。6月15日以降は出水により、すべての区間において2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下に減少している。次に、乾重量については、クロロフィルaの経時変化にほぼ対応していた。また、乾重量の構成成分として、強熱残留物の経時変化よりダム上流のReference1区間はダム下流区間と比較して土粒子成分が多いことがわかる。強熱減量に関しては、Impact区間においてクロロフィルaのピークが確認された5月8日のみ高い値(4.3 mg/cm^2)を示し、他の調査日については、各調査区間で大きな差はなかった。

図-7に付着膜の容量(沈殿量を付着藻類を剥ぎ取った面積で割った値)を平常時と出水後に分けて示す。出水後では付着膜が剥離し石礫に付着膜が残存していないが、平常時ではダム上流と比較してダム下流の方が付着膜の容量が大きいことがわかる。

次に、5月8～24日までのそれぞれの調査区間における総生産速度の経時変化、ならびにReference1のハイドログラフを図-8に示す。ダム上流のReference1区間において、平常時の流量約10 m^3/s に対し、降雨によって40 m^3/s 近くまで流量が増加した10日以降、総生産速度の日中最大値が約1.6 $\text{g}\cdot\text{O}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}$ から約1.0 $\text{g}\cdot\text{O}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}$ へ減少していることが分かる。一般的に、平常時の3倍の流量であれば付着藻類量が剥離などにより減少するといわれている¹²⁾ことから、総生産速度の減少は流量増加による付着藻類の剥離が原因であることが考えられる。一方、ダム下流の2区間においては、総生産速度の晴天時における日中最大値が除々に減少しているが、特にImpact区間において減少率が大きいことがわかる。

4. 考察

2006年3月～7月の付着藻類に関する定期調査結果より、以下のことが明らかとなった。まず、大山川ダムからの流量増加が付着藻類に与える影響については、Control区間(松原ダム下流)とImpact区間(小五馬)のクロロフィルaのピーク値の違いより、増殖効果があることが確認できた。Control・Impact両区間と

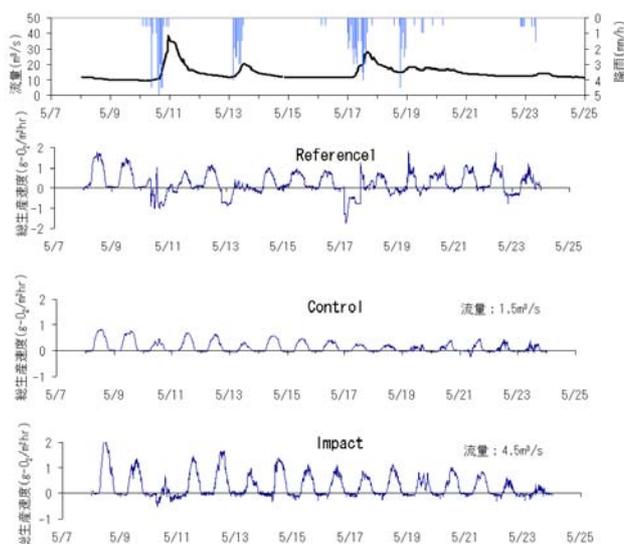


図-8 Reference1の時間平均流量とReference1・Control・Impact区間における5月8～24日の総生産速度の経時変化

も3月から4月にかけてクロロフィルaは増加しているが、この原因の一つとして水温の上昇が考えられる。また、この時期にはダム上流と比較してダム下流の2区間では糸状藻類が繁茂し始めたことが確認された。このように付着膜に糸状藻類が繁茂した場合、細長い藻類が流れにより振動することによって付着膜表面の水塊の交換が促進され、栄養塩が付着膜内へ輸送されやすくなること¹⁷⁾もクロロフィルaの上昇に寄与していたことが示唆される。さらに、Impact区間では流速の増大により栄養塩の付着膜内部への拡散輸送が強化されクロロフィルaがControl区間よりも高くなった可能性が考えられる。

一方、ダム上流のReference1(杖立上流)におけるクロロフィルaの変化や6月下旬以降の出水によるクロロフィルaの減少から、付着藻類の増減には降雨に伴う流量増加の攪乱の影響が最も大きく、攪乱の規模や間隔により付着藻類量は規定されていることがわかる。しかしながら、降雨による攪乱を受けない状況では、バクテリアによる付着藻類の分解による影響を付着藻類は強く受けることがある⁸⁾。バクテリアは成熟した付着膜の下層では暗条件となり光合成による生産よりもバクテリアによる分解の方が上回る。その上、バクテリアの活性度は付着藻類よりも水温に対して敏感である。よって、付着膜の容積が大きかったダム下流の2区間では付着藻類量のピーク値を示した後、付着膜の下層において遮光により十分に暗条件であること、かつ流量が安定していたことから、バクテリアによる分解によって付着藻類が減少したことが考えられる。また、付着膜が成熟した場合、自己遮光のため下層の付着藻類の石礫面に対する定着力が弱まり、通常、クロロフィルaが20～25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ に達した付着藻類

群落は剥離しやすくなる¹⁸⁾ため、Impact 区間では自己遮光に起因する剥離によってもクロロフィルaが減少していた可能性がある。このように、自己遮光による剥離やバクテリアによる分解など内生的な要因により付着藻類量が減少した場合、藻類による生産量が著しく減少することが指摘されており¹⁴⁾、クロロフィルaの減少が確認された5月8～24日のImpact 区間における総生産速度が著しい減少を示したことから、内生的な要因により付着藻類が減少したことが示唆される。

さらに、ダム下流のImpact・Control 両区間において、付着藻類量が減少傾向を示した後、出水前の6月13日ではクロロフィルaの値に明瞭な差が見られなかったことから、この時期には維持流量増加による流速増加の付着藻類に対する影響が相対的に弱まっていることがわかる。以上をまとめると、維持流量増加による流速の増加は初期の付着膜においてある程度影響を及ぼすが、ダムによって降雨による攪乱が著しく減少している場合には、付着膜が成熟しやすくなるため、バクテリアによる分解、枯死や自己遮光による剥離などの複合的な要因により流速増加の影響は相対的に弱まることを示唆された。

5. 結論

筑後川上流の大山川における維持流量増加が付着藻類へ与える影響について、継続的な現地調査より以下の知見が得られた。

(1)Control 区間(松原ダム下流)とImpact 区間(小五馬)におけるクロロフィルaのピーク値の違いより、流速増加が付着藻類量に対して影響がある。

(2) 付着藻類の増減には降雨に伴う流量増加の攪乱の影響が最も大きく、攪乱の規模や間隔により付着藻類量は規定される。

(3)ダム下流では、維持流量増加後に流量が安定した状態が続いた場合、成熟した付着藻類が付着層の内生的な要因によって減少することにより、流速増加が付着藻類へ与える影響は相対的に弱まる。

これまでの現地調査により、大山川の維持流量増加による流速増加が付着藻類へ与える影響について、ある程度把握できた。今後は、生態系の上位に位置しているアユに対して維持流量増加が与える影響を評価することを目標として、本研究の調査結果を踏まえて、アユと付着藻類の関係性を時空間的に把握していく予定である。

謝辞：本研究は(財)河川環境管理財団のH17年度、H18年度河川整備基金助成事業「維持流量の弾力的運用による河川環境の保全・改善効果(研究代表者：矢野真一郎)」により実施された。また、土木研究所自然共

生研究センターの萱場祐一総括主任研究員、ならびに皆川朋子主任研究員には調査方法についてご指導を受けた。椛山女学園大学人間関係学部の野崎健太郎講師には付着藻類調査結果の考察において多大なるアドバイスを頂いた。最後に調査や分析において九州大学工学部の田辺智子さんに助力を得た。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1)辻本哲郎：ダムが河川の物理的環境に与える影響-河川工学及び水理学的視点から-、応用生態工学, Vol. 2, No. 2, pp. 103-112, 1999.
- 2)谷田一三, 竹門康弘：ダムが河川の底生動物に与える影響, 応用生態工学, Vol. 2, No. 2, pp. 153-164, 1999.
- 3)森誠一：ダム構造物と魚類の生活, 応用生態工学, Vol. 2, No. 2, pp. 165-177, 1999.
- 4)皆川朋子, 清水高男, 島谷幸宏：流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp. 191-196, 2000.
- 5)両角和重, 三野直人, 赤石沢則男：魚(特にアユ)の生息にとって好ましいダム放流変動に関する調査, ダム技術, No. 154, pp. 44-52, 1999.
- 6)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, 第12巻, pp. 443-448, 2006.
- 7)清野聡子, 小松利光, 足利由紀子, 安倍元子：筑後川上流大山川ダムの流量増加にいたる地域住民の自然認識の変遷, 第32回環境システム研究論文発表会講演集, pp. 331-336, 2004.
- 8)Richard R. Horner, Eugene B. Welch, Marguerite R. Seeley and Jean M. Jacoby：Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration, *Freshwater Biology*, 24, pp. 215-232, 1990.
- 9)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/ -59, pp. 161-174, 2002.
- 10)井上隆信, 海老瀬潜一：河床付着生物膜現存量の周年変化と降雨に伴う剥離量の評価, 水環境学会誌, 第16巻, 第7号, pp. 507-515, 1993.
- 11)Bouletreau, S., Garabetian, F., Sauvage, S. and Sanchez-Perez, J.-M.：Assessing the importance of a self-generated detachment process in river biofilm models, *Freshwater Biology*, 51, pp. 901-912, 2006.
- 12)Barry J. F. Biggs：Eutrophication of stream and rivers (dissolved nutrient-chlorophyll relationships for benthic algae, *Journal of the North American Benthological Society*, 19(1), pp. 17-31, 2000.
- 13)大本照憲, 田中貴幸, 馬場太郎：付着藻類の生長過程に水理量が与える影響, 河川技術論文集, 第12巻, pp. 425-430, 2006.
- 14)相崎守弘：富栄養河川における付着微生物群集の発達にともなう現存量および光合成量の変化, 陸水学雑誌, 41, pp. 225-234, 1980.
- 15)萱場祐一：溶存酸素濃度の連続観測を用いた実験河川における再曝気係数, 一次生産速度及び呼吸速度の推定, 陸水学雑誌, 66, pp. 93-105, 2005.
- 16)土木学会編：水理公式集(第1編11章), 土木学会, 1987.
- 17)Battin T.J., Kaplan L.A., Newbold J.D. and Hansen C.M.E.：Contributions of microbial biofilms to ecosystem processes in stream ecosystems, *Nature*, 426, pp. 439-442, 2003.
- 18)野崎健太郎：自然的攪乱・人為的インパクトに対する河川水質と基礎生産者の応答, 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系, 技報堂出版, pp. 231-257, 2005.

(2006.9.30受付)