

付着藻類の変化から捉えたダム放流の効果

大野 博之・斉藤 大

Effect of Environmental Improvement by Discharge Water from Dam - A View Point of Change of Adhesion Algae -

Hiroyuki Ohno and Hiroshi Saito

Abstract

Recently, the projects to protect natural environment and/or to create a better environment have increased with related various construction projects. Flexible operation of water discharge of dam is one of these projects. Discharge water from dam could improve the downstream river environments by breaking of armor coat and reducing a problem of eutrophication. However, it was difficult to measure its effect quantitatively. In this paper, the method to grasp the effect on discharge water from dam is examined. It was found that the investigation method utilizing the near infrared photo image was effective to evaluate the change of adhesion algae quantitatively. Using this method, the amount of breakaway of algae in the case of 100m³/sec discharge is quantitatively compared with the case of 20m³/sec discharge.

Keyword : Near infrared image, Chlorophyll a, Algae, Water discharge of dam, River environment

(要 旨)

近年、各種の建設事業においても自然環境の保全・創出のためのプロジェクトが増加している。ダム貯水池の水位管理の弾力的運用もその一つの試みである。ダムの放流により、ダム下流のアーマ・コート化や富栄養化を抑制し、環境の改善を図ることが期待できるが、その効果を定量的に捉えることは難しい。本論では、ダムの放流効果を定量的に把握する方法として付着藻類の調査法について検討した。その結果、付着藻類の変化を定量的に捉えるには近赤外面像を用いる調査が有効であることを示した。また、100m³/secの放流量のほうが20m³/secの放流量の時よりも付着藻類の剥離は倍以上になるという定量的な評価ができた。

キーワード : 近赤外面像, クロロフィルa, 藻類, ダム放流, 河川環境

1 はじめに

近年、各種の建設事業において自然環境の保全・創出が重要となり、そうした事業が増加してきている。これまでも河川改修において河川環境を保全すること、道路事業において生態系を考慮することなど、各種の事業で自然環境の保全・創出が行われている。アジェンダ21はこうした事業を後押しし、河川法の改正などにより、河川事業の目的の一つに自然環境の保全・創出が加わった。ダムの弾力的運用は、こうした事業の一環でもある。弾力運用の一環であるダムの放流は、ダム下流の景観向上や生物の生息環境改善等の効果があり¹⁾、良好な環境の創出につながる。しかしながら、これまで、このダム放流の効果を定量的に把握することは困難であった。

河床の石に付着する藻類は鮎などの川魚の餌となるこ

とが知られている。鮎は古い付着藻類よりも新しく更新された付着藻類を好む。鮎などは、河床材料が洪水などによりダイナミックに変化し、その後、新たな付着藻類などが河床礫に繁茂することが重要な生息条件であることが知られている。それゆえに、ダム放流などによって、新しい付着藻類が更新されるような環境を作り出すことが必要となる。

一方で、こうした河川の変化を捉えるためのモニタリングの方法においては、これまでポイントデータによる把握が主体であり、河川のより広い範囲での面的な広がりを把握する方法が模索されているのが現状である。これに対して、大野ら²⁾は、河床材料分布の把握などを目的として低高度の空中写真撮影による調査法を提案し、その有効性を示しているが、藻類などの植生の変化については未解決のままである。

こうしたことを受け、本報告では、ダムの放流の効果を付着藻類の観点から定量的に捉える手法について検討した。

2 調査方法と解析

2.1 低高度プラットフォームによる調査法

近年、衛星リモートセンシングも、分解能が0.8mの高分解能衛星（IKONOS衛星）が出現し、第三世代に入ってきた。これらの画像を用いることで環境や防災に関わる詳細なモニタリングができるようになってきた。しかしながら、ある特定の河川の環境変化をより高分解能で捉えることは難しいのが現状である。これに対して、カイト気球やラジコンヘリなどの低高度型プラットフォームは、高度数十mからの高分解能な画像を得ることを可能とし、有効な手段となる。この手法は、①何時でも迅速に画像を取得することができること、②一般の衛星や飛行機による画像よりも分解能が良いこと等が挙げられ、河川のある対象区間を集中的にモニタリングすることなどには適している方法である。

低高度型プラットフォームに搭載できるカメラは、フィルムサイズが35mmから6×7（cm）くらいまでである。フィルムの種類としては、これまでは紫外線から可視光（波長帯：0.25～0.65 or 0.7 μm ）を捉える通常のカラーフィルムの搭載が可能であった。これに対して、平成9年より35mmカメラ用のカラー赤外線フィルムが登場し紫外線から近赤外線までの光を感知できるようになってきた。赤外線は、植生や水質などに反応する波長帯であり、環境調査に有用なものと考えられる。

本研究では、低高度型プラットフォームを用いた環境モニタリング手法の開発を行った。ここで用いる低高度型プラットフォームの例を写真-1に示す。

低高度型プラットフォームには、大野ら²⁾が示すようにカイト気球、ラジコンヘリコプター、ラジコン飛行機などがあり、調査地の状況によりその種類が使い分けられる。本研究では、河川の中流域における特定の部分を調査対象とし、比較的広い足場が確保できるので、浮揚高度の安定性が高いカイト気球をプラットフォームとして用いることとした。これは、写真-1に示されるように、ヘリウム気体を充填させた気球の下に撮影用カメラとモニター用カメラを搭載したものである。気球を浮揚させる時には、凧のように地上からカーボンファイバー等で係留し、調査対象地点を地上でモニターしながら必要箇所の画像を撮影する。カメラ部分は、地上からのリモートコントロールで向きの変更及びシャッターを切ることができる仕組みとなっている。モニター用カメラからは地上に設置したテレビに画像を電波で送信し、テレビをモニタリングしながら必要な画像を取得することができる。

この撮影方法は、ラジコンヘリやラジコン飛行機でも基本的に同じであり、ヘリコプターや飛行機の機体の下

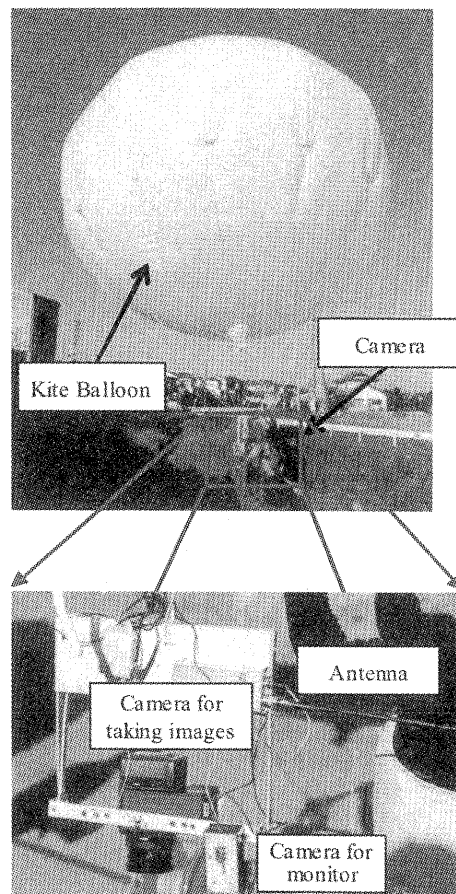


写真-1 低高度型プラットフォームの一例

Photo 1 An example of the low altitude platform.

にカメラを搭載する点が異なるだけである。

2.2 カラー赤外線フィルム

一般に光というとき、人間の目で認識できるものを可視光といい、波長領域で0.4～0.7 μm のものをさす。この可視光の色の構成は、光の三原色と呼ばれる赤（R）、緑（G）、青（B）から構成され、様々な色がこの3色からできあがる。また、赤（0.65 μm 程度）、緑（0.55 μm 程度）、青（0.45 μm 程度）となるにしたがって波長が減少する。

一方、近赤外は、0.7～1.0 μm の波長帯をさし、人間の目で感知することができない。ところが、この波長帯は、図-1にも示されるように植物の健全度に反応し、また水の汚れに対して反応しやすい性質を持つ。

植生でいえば、近赤外波長帯では、健康な植物（植物の葉などに含まれるクロロフィルa量が多い場合）は反射率が高く、不健全になると反射率が低くなる。この違いは、カラー赤外線フィルム上においては、反射率が高いものが赤や赤に近い色に、反射率が低くなるにしたがって、黄色みが増してくることを意味する。通常は、春から夏においては、健康な落葉樹はマゼンタや赤に、健康な常緑樹は赤茶色、これらが不健康になることで、暗赤

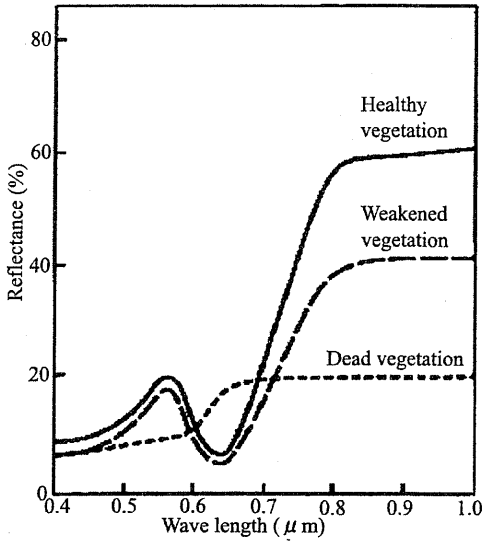


図-1 植生の反射率
Fig. 1 The reflectance of vegetation.

色から緑に変化するか、しばしば黄色として画像に写り込む。秋の落葉の時期においては、落葉樹の葉が赤や黄色に変化するにしたがって赤外画像も変化する。すなわち、赤い葉は黄色に、黄色い葉は白に写る。ある種の植生は、季節、土壤中の水分量やミネラル量、植生の年齢や健康状態によって、赤外の反射率は変化する。このことは、不健康な植生は赤外反射率を減少させ、カラー赤外画像に最初に表れることを意味する。

カラー赤外フィルムは、公害モニタリングへの適用も可能である。きれいな水や空気は、赤外で低い反射率を示す。これらの反射率も水や空気に異質物が存在するようになると増加する。藻類や雑草の大増殖はピンク色として記録される。水面の上にはみ出る植物はやや赤いピンク色によって表現される。また、多くの溶解化学物質は、水のカラー赤外写真上に劇的に現れる傾向がある。しかしながら、カラー赤外フィルムは、発電所からの熱水や煙突からの熱ガスなどのような熱汚染を捉えることはできない。温度の変化は、水や空気の色の変化ないしは透過率の変化としてしか捉えられない。

これまで赤外線フィルムとしては、コダック社製の白黒のものが発売されていた。しかし、このフィルムでは、近赤外波長のみしか捉えることができず、植生の健全度などの指標となる植生指標（近赤外波長と赤色波長の比）を一つのカメラで撮影し捉えることはできなかった。カメラは、機種が異なれば光の吸収・反射の仕方が異なり、同じ条件での撮影は難しくなる。従って、近赤外波長と赤色波長を同時に捉えるためには、同じ機種のカメラを同時に2台使って撮影する方法で行われてきた。しかし、この方法では低高度型プラットフォームに2台同時にカメラを搭載しなければならず、良質の画像を取得することは、機種の問題等から難しい状況であった。

今回使用したカラー赤外線フィルムの正式名称は、「コダックエクタクロームプロフェッショナルインフラ

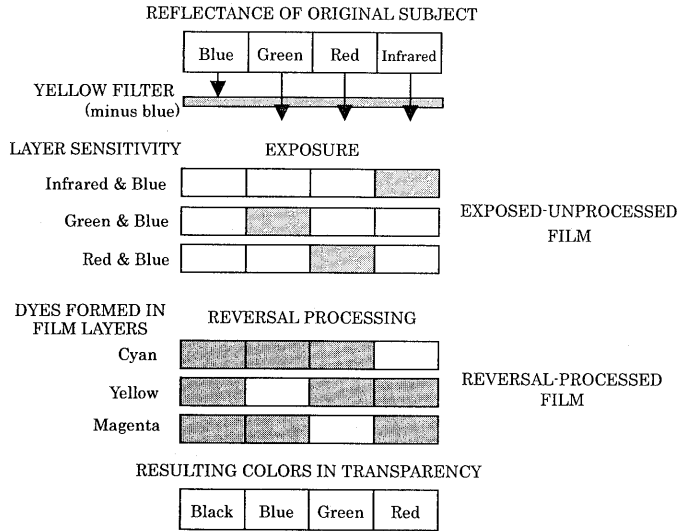


図-2 カラー赤外線フィルムのカラー再生
(斎藤他³⁾ 参照)

Fig. 2 The color reproduction with Kodak Infrared Color Films. (See Saito et al. ³⁾)

レッドEIRフィルム/2236」である。カラーフィルムは、基本的に3つの感光層から成り立っている。通常のカラーフィルムでは、これらの感光層が、青、緑及び赤の3原色に感光する。現像処理によって、各感光層は補色の色素である、イエロー、マゼンタ及びシアンに発色し、各感光層で生成される色素量は被写体からの光の放射量に反比例する事になる。この様に、通常のカラーフィルムでは、各感光層は各々の三原色の輝度を記録することになる。

カラー赤外線フィルムは赤外反射率を強調する。図-2はカラー赤外線フィルムが、実際の色とどう異なって再生されるかを示した略図である。3つの層は全て、青色光に感度を持っているので、カラー赤外線フィルムの各層が特定の色にだけ感光するにはイエローフィルター（マイナスブルー：青色光をこのフィルターで吸収）が必要となる。イエローフィルターを設置した場合、感光層は赤外、赤、緑にのみ反応する（すべての青の放射がフィルターによって吸収されるので）。これにより、カラー赤外線フィルムでは、現像処理により、赤外線感光層にはシアン色素が、緑色感光層にはイエロー色素が、赤色感光層にはマゼンタ色素が生成され、通常カラーフィルムと同様に色素量は露光量に反比例する（図-2参照）。つまり、画像としての赤色が近赤外線波長、緑色が赤色波長、青色が緑色波長の反射の強さ（画像で言えば輝度）を表す。

2.3 植生指標

一般に植物は、可視光の緑にあたる0.55 μm付近に反射率10~20%の一つの山と近赤外線0.7~1.3 μmの間で反射率が40~50%という緑よりも高い割合で反射する波長帯を持っている（図-1参照）。これらの特徴を利用

して、カラー赤外線フィルムで取得した画像の波長毎に植生の反射光をデジタル値として表現し、バンド間演算を行う。このバンド間演算により植生の健全度やクロロフィルの量などを指標化することができる。リモートセンシングの分野ではこの指標を植生指標と呼び、様々な指標が提案されている。正規化差分植生指標 (NDVI) Transformed Soil Adjusted 植生指標 (TSAVI), Atmospherically Resistant 植生指標 (ARVI), Middle Infrared Base 植生指標などである。Prasad 他⁹⁾ は、植生を評価するときナローバンドの2バンド植生指標 (TBVI) やマルチバンド植生指標 (OMBVI) が最も良い結果になることを示した。それによれば、Red 2 (667.5~682.5nm) ではクロロフィルaとクロロフィルbとに強い相関を持ち、NIR (785~905nm) は全クロロフィルと強い相関を持つことが示されている。NDVIはTBVIの一つであり、次式によって表している。

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (\text{Eq.1})$$

ここで、NIR: 近赤外の反射率, RED: 赤色の反射率

これまで、衛星画像ではNDVIが最も一般的に用いられてきており、クロロフィルの計測において、NDVIが最も良い結果を示す可能性が示されている。

この研究の目的の一つは、藻類のクロロフィル分布を把握することである。従って、ここでは、このNDVIを植生指標として用いる。

一方、植生指標を求める前段階に画像の大気補正を行うのが一般的である。カメラは、太陽が放射した近赤外や可視光を含む電磁波を植生が反射したものだけを感じ取る仕組みである。従って、植生からの反射光はカメラに達するまでにカメラと植生との間の大気層を通過しており、この過程で減衰する。取得した画像では、こうした大気の影響を補正する必要がある。しかしながら、後述するように、この手法では、クロロフィルと植生指標との相関が強く、一つの画像で求められたクロロフィルとの相関式は既に大気の影響を含んでいることになるので、ここでは特に大気補正は行わなかった。

2.4 植生指標とクロロフィルa量との関係

衛星リモートセンシング技術においては、植生指標は良く知られたものであるが、河川の付着藻類などは、水の中の状況を見ることになる。地上の植生であれば、水による光の吸収の影響を考慮する必要はないが、水中の植生は、光が水に吸収され、波長帯によって吸収率が異なるのが一般的である。すなわち、青色光、緑色光、赤色光、近赤外線と変わるにしたがって、水に吸収されやすくなる。従って、深度が深くなれば、植生指標が異なる可能性が考えられる。

ここでは、実際に河床の付着藻類を調査しようとした

ときに生じると思われる以下の3点について、現地調査を行い検討した。

- ① 水深の違いによるカラー赤外線フィルムの感光性能
- ② 付着藻類が少ない時期におけるカラー赤外線フィルムの感光性能
- ③ 速の異なる箇所におけるカラー赤外線フィルムの感光性能

なお、この現地は比較的水の透明度が高く、水深1m程度までは河床を肉眼で観察することのできる場所(多摩川中流域の永田地区)である。

この検討対象地域において、カイト気球により近赤外カラー画像を取得すると同時に、その場で藻類の付着した石を選定し(1箇所につき5個)、藻類を石から採取したものを分析(クロロフィル分析)した。調査時期は、比較的藻類の多く繁茂する時期として9月を、逆に少ない時期として12月を選んだ。また、9月の調査では、水深40cm以下と浅く白波だっていない部分(瀬と呼ぶ)と水深80cm程度で周辺よりも深く流速の遅い部分(淵と呼ぶ)の2箇所を、12月の調査では水深が40cm程度と同じ瀬で、流速が早く所々白波だっている瀬(早瀬と呼ぶ)と流速が比較的遅く波の少ない瀬(平瀬と呼ぶ)の2箇所を検討対象とした³⁾。つまり、4箇所の調査で、水深の違い、流速の違い、藻類量の違いを検討する。

調査結果を図-3に示す。この図の内、(a)と(b)は9月の付着藻類の多い時期、(c)と(d)は12月の付着藻類の少ない時期の画像から得られた結果である。また、(a)と(b)は深度が異なり、(c)と(d)は流速の異なる箇所を撮影した画像から得られた結果である。

これらの結果から分かるように、水深80cm程度の淵の部分でも、透明度の高い水であれば付着藻類を感知し、クロロフィルa量と植生指標(NDVI)との相関性も良い(相関係数Rの二乗が0.7以上)。一方、流速の早い早瀬でも水面が極端に波打っていないければ付着藻類の分布を捉えることが可能であることもわかる。むしろ流速の違いよりは、(c)に見られるようにクロロフィルa量が $0.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下のものでは良好な相関は得られなかった。

このようにクロロフィルa量と植生指標との相関性は平瀬を除いてよいが、(a)と(b)の相関式が異なるように、瀬と淵などの違いによりクロロフィルa量と植生指標との関係は異なるので、それぞれの場を考慮した相関式より藻類分布を捉える必要がある。従って、現地調査においては、この相関式を求めるためのクロロフィル分析を必ず実施する必要がある。

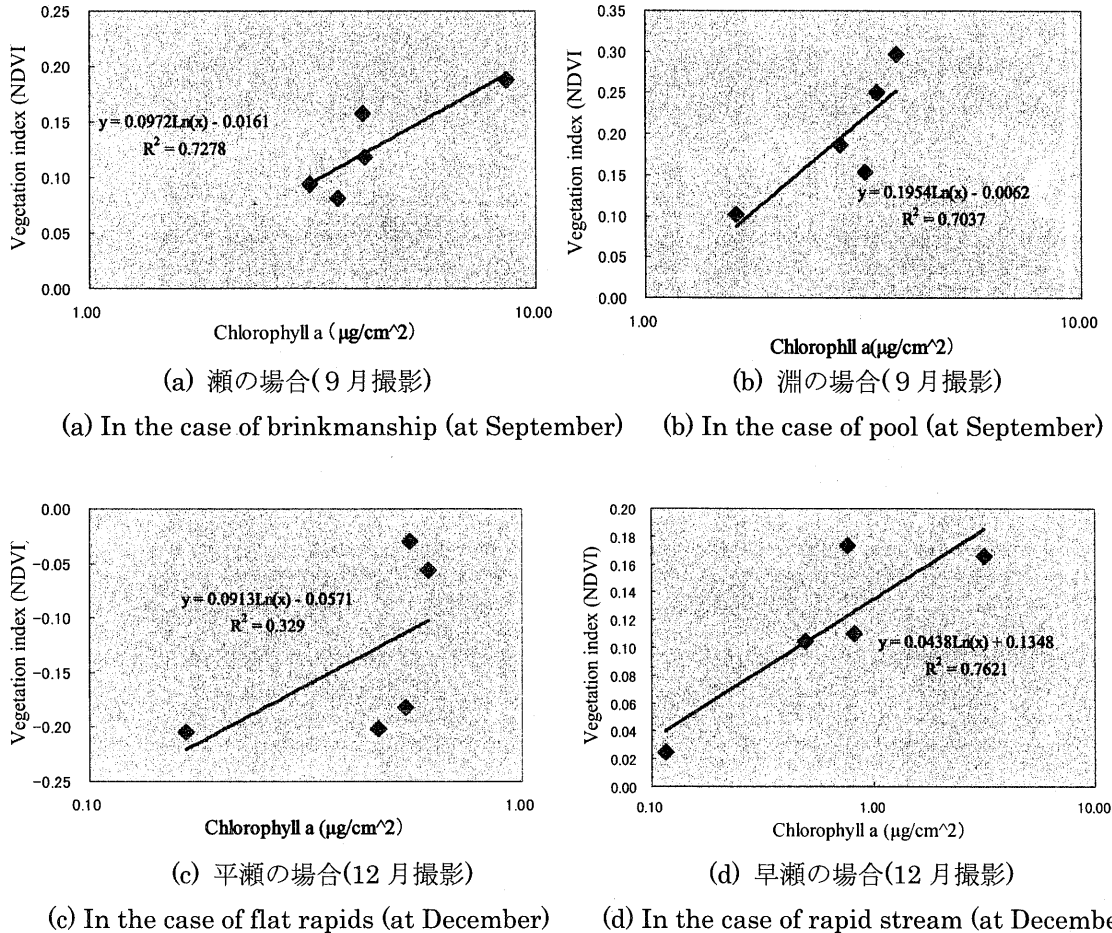


図-3 河川形態や時期の違いによるクロロフィルaと植生指標NDVIとの関係

Fig. 3 The relationship between chlorophyll a and normalized differential vegetation index (NDVI), in terms of difference of river morphology and difference at time.

3 対象地と結果

3.1 対象地

前章の検討で、付着藻類の分布の把握にカラー赤外線フィルムが有効であることが示された。ここでは、この検討を踏まえて、福島県の三春ダムの弾力的運用に伴う放流によって、ダム下流にある瀬の中の河床礫に付着している藻類分布の変化をモニタリングした。

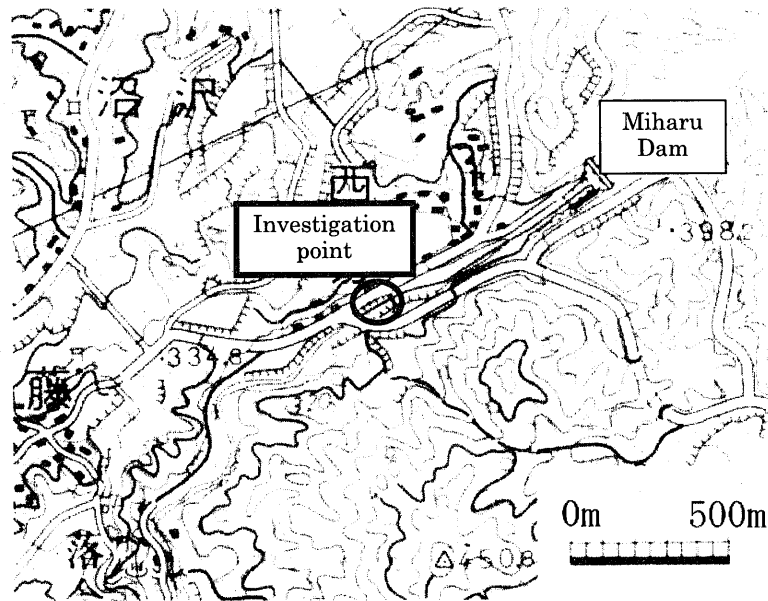
調査地点は図-4 (a) のような箇所であり、ダム堤体より約800m下流の地点に位置し、ダム放流は、2000年5月30日と2001年9月8日の放流を対象に調査を実施した。

三春ダムでは、1999年より下流環境の回復を目的としたダム放流や堆積土砂の供給試験を行ってきている(図-4 (b) 参照)。この図に見られるように1999年と2000年は100m³/secの放流を行っているが、2001年は降雨量が少ない年で、最大でも50m³/secの放流にとどまっている。これに対して、20m³/secの放流は1999年より毎年、夏の時期に断続的に行われている。2000年5月は100m³/secの水のみによるダム放流を、2001年9月は20m³/secの水のみによるダム放流を行ったので、本調査手法

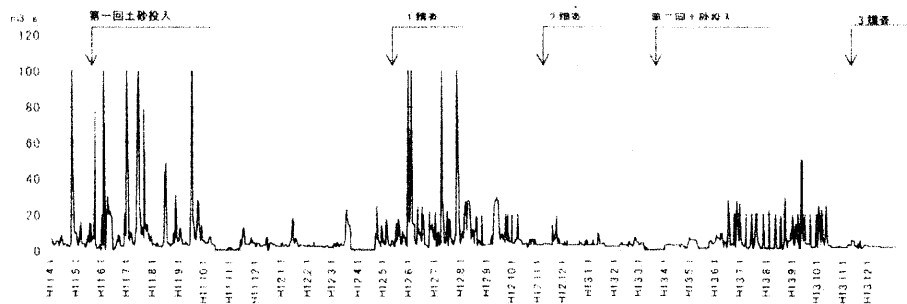
を用いてその放流前後における河床の付着藻類の変化を把握した。これにより、水のみの場合の放流量の違いによる付着藻類の剥離の違いを捉えることができる。なお、以下、100m³/secの放流量の放流を100m³放流、20m³/secの放流量のほうをリフレッシュ放流と呼ぶ。

調査にあたっては、河床から標準的な藻類の付着状況の石(こぶし大程度)を5個選定(放流前後で異なる石)し、それと同時に付着基盤(30cm×30cmのコンクリート盤ブロック)を5個設置(放流前後で同一のもの)した。なお、調査地周辺の河床に分布する岩石の多くは、花崗岩や花崗閃緑岩である。

これらの石と付着基盤の付着物について、5cm×5cm範囲をブラシで擦り取り、約2%のホルマリン固定後室内分析を行った。カイト気球を用いてこの付着物の採取と同時に近赤外カラー画像の取得を行った。これら付着物の採取と近赤外カラー画像取得はダム放流前と放流後の2回実施した。それぞれの調査は、放流前として2000年5月27日と2001年9月6日に、放流後として2000年5月30日と2001年9月8日に実施した。



(a) 三春ダムと調査地の位置図
 (a) The object area of investigation at Miharu dam.



(b) 三春ダムのダム放流量 (伊藤⁹⁾参照)
 (b) The flow rate of discharge water with time at Miharu dam (See Ito⁹⁾).

図-4 三春ダムの放流調査対象地位置図及びダム放流量

Fig.4 The object area of investigation and the discharge water at Miharu dam.

3.2 結果

100m³放流とリフレッシュ放流の調査結果を、それぞれ図-5及び図-6に示す。また、図-7及び図-8にNDVIの分布を示した。採取した付着藻類のクロロフィル分析結果を表-1に示した。

これらの図に見られるように、放流の前後で、NDVIが減少した部分(図-6で白から黒に変わった部分)があることがわかる。ただし、石以外の部分については、この傾向は当てはまらない。

表-1に見られるように、放流前後ではクロロフィルa量が平均的に減少している。自然石では、放流前後で同一の石での藻類の採取ができないが、付着基盤では同

一基盤上の別の箇所から採取しており、放流後に大きくクロロフィルa量が減少していることがわかる(部分的に増加しているものが見られるが、この点の詳細については後述する)。

以上のことから、放流以前に石に付着していた藻類は、放流により石からはがれたことを示していると考えられる。さらに、藻類のはがれ具合は、非常に多くの藻類のはがれた箇所とそうでない箇所が存在するなど、場所により異なっているように見受けられる。

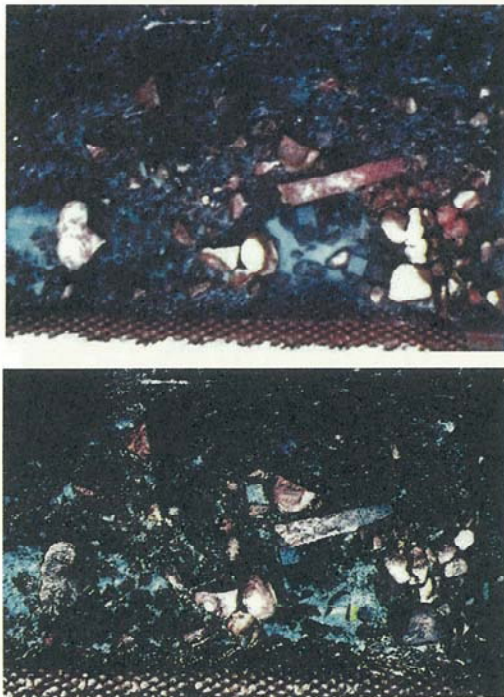


図-5 100m³放流の場合の近赤外カラー画像。放流前(上)と放流後(下)

Fig. 5 In the case of 100m³ discharge, the near infrared images before (above image) and after (below image) the discharge water from dam.

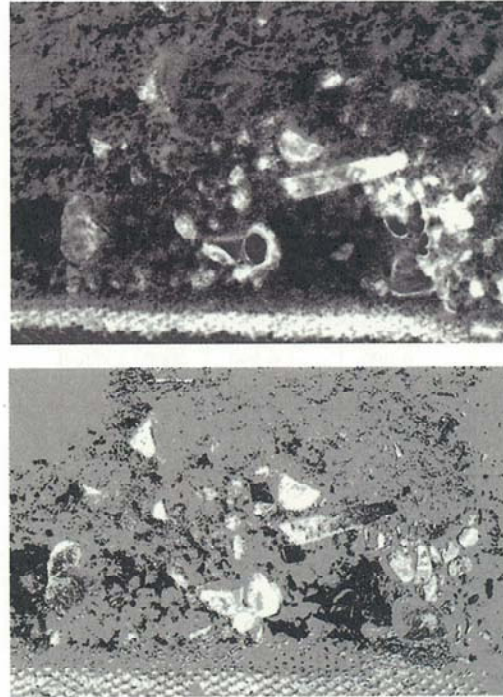


図-7 100m³放流の場合の近赤外画像から求めたNDVI分布。放流前(上)と放流後(下)

Fig. 7 The distribution of normalized differential vegetation index (NDVI) calculated from the near infrared images before discharge water from dam (above) and after it (below), in the case of 100m³ discharge.

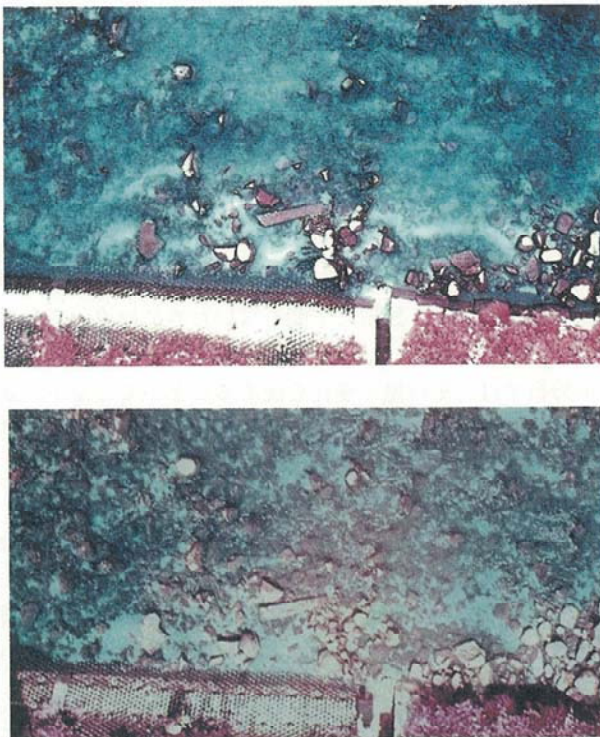


図-6 リフレッシュ放流の近赤外カラー画像。放流前(上)と放流後(下)

Fig. 6 In the case of refresh discharge, the near infrared images before (above image) and after (below image) the discharge water.

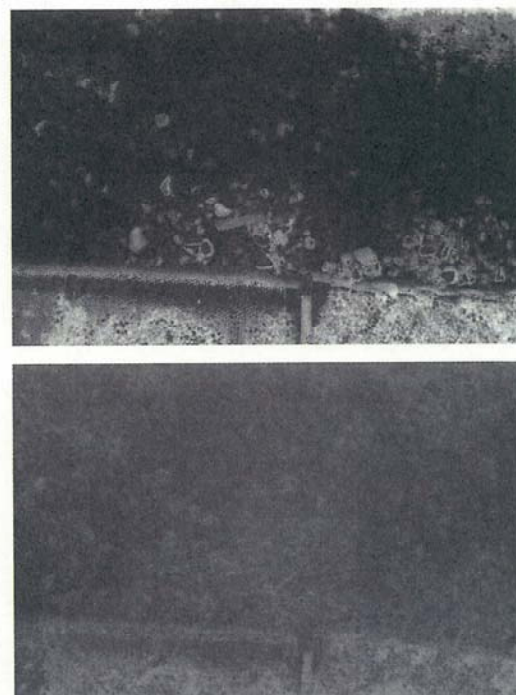


図-8 リフレッシュ放流の場合の近赤外画像から求めたNDVI分布。放流前(上)と放流後(下)

Fig. 8 The distribution of normalized differential vegetation index (NDVI) calculated from the near infrared images before discharge water from dam (above) and after it (below), in the case of refresh discharge.

表-1 ダムの放流前後の付着藻類のクロロフィルa
Table 1 The chlorophyll-a of adhesion algae before and after the discharge water from dam.

(a) 100m³ 放流の場合

(a) In the case of 100m³ discharge water

Measured point No.	Chlorophyll a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		Remarks	
	Before	After		
Concrete block	0509-1	4.770	0.400	2000/5/9
	0509-2	2.580	2.820	2000/5/9
	0509-3	2.280	0.580	2000/5/9
	0525-1	0.360	0.060	2000/5/25
	0525-2	0.080	0.290	2000/5/25
	Average	2.012	0.830	
Stone	N 1	7.110	5.670	
	N 2	8.720	0.270	
	N 3	4.920	9.120	
	N 4	2.930	3.430	
	N 5	5.350	1.140	
	Average	5.806	3.926	
Average	3.910	2.378		

(b) リフレッシュ放流の場合

(b) In the case of refresh discharge water

Measured point No.	Chlorophyll a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		Remarks	
	Before	After		
Stone	N 1	4.370	2.970	
	N 2	5.680	3.050	
	N 3	7.050	2.460	
	N 4	4.530	2.870	
	N 5	4.030	3.300	
	Average	5.132	2.930	

4 考察

前章までで述べたように、河床に分布する付着藻類は放流によって変化する。また、放流前後でいくつかの河床の石が移動する。ここではそれらのことについて考察する。

4.1 河床材の移動・藻類の量と本手法の有効性

図-9に放流による移動を特定できる付着基盤について、その移動量を示した。

No.0509-3(図-9中の30cm移動した基盤)やNo.0525-1(図-9中の33cm移動した基盤)の基盤は放流により当初の位置からずれて河床にその一部が埋まっている。また、残りの付着基盤についても、放流前と放流後との位置を比較すると、12cm~44cm移動している。その移動方向についても、まちまちで、局所的な流向の違いを受けて移動ベクトルがさまざまな方向になっているが、全体的な流れの方向に影響された移動であることがわかる。

付着藻類の量を検討するために、図-7のようなNDVIでは、その定量的な変化を捉えることができない。一方、クロロフィルa量と植生指標との関係性を導き出すことができれば、その関係式よりクロロフィルa量分布

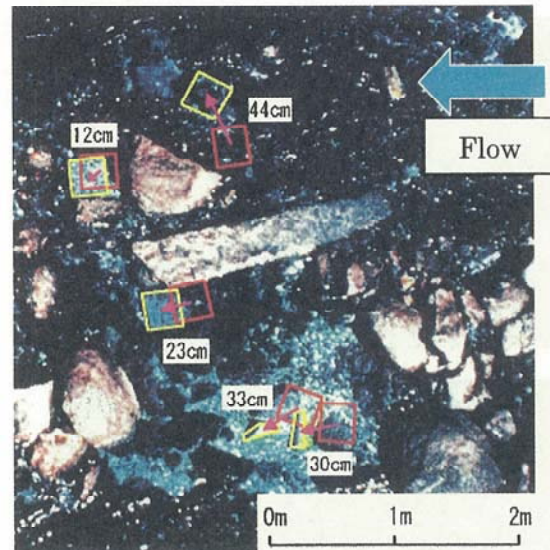


図-9 放流前(赤色枠)と放流後(黄色枠)におけるコンクリートブロックの位置の変化。100m³放流の場合。

Fig. 9 The change of locality for concrete blocks on riverbed before discharge water from dam (red rectangle) and after it (yellow rectangle), in the case of 100m³ discharge.

を求めることができる。そこで、本調査によって得られた近赤外カラー画像とクロロフィル分析結果より、クロロフィルa量と植生指標(NDVI)との関係を求めた(それぞれ、相関係数は0.988(前)と0.893(後)である)。

$$\begin{aligned} NDVI &= 0.0692\ln(Chl) - 0.1276 && 100\text{m}^3\text{放流前} \\ NDVI &= 0.1189\ln(Chl) - 0.0951 && 100\text{m}^3\text{放流後} \end{aligned}$$

この関係式より求められたクロロフィルa量分布図を、図-10に示す。図-10における、上の図は放流前の平面分布図であり、下の図が放流後の平面分布図である。

これら付着基盤のクロロフィルa量の変化に着目すると、No.0525-1及びNo.0525-2(図-9中の23cm移動した基盤)は、設置して間もないために放流前でもクロロフィルa量は $0.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下である。クロロフィルの分析では、その量の変化を捉えることができるが、3章で示したように $0.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下では植生指標とクロロフィルa量との相関が悪くなる。従って、ここでは、これ以外の付着基盤について論じる。

No.0509-2(図-9中の44cm移動した基盤)は、分析値ではほとんど変化がないのに対して、No.0509-1(図-9中の12cm移動した基盤)とNo.0509-3の付着基盤については、 $1/5\sim 1/10$ 程度の減少となっている。

この基盤の位置による付着藻類の変化の違いは、図-10の平面分布においても確認することができる。

すなわち、図-10の γ (No.0509-1)のように放流前は $2.78\sim 5.40\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度(分析した値 $4.77\mu\text{g}/\text{cm}^2$)であるのに対して、放流後は $0.77\sim 1.43\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度(分析した値 $0.40\mu\text{g}/\text{cm}^2$)に減少していることが読み

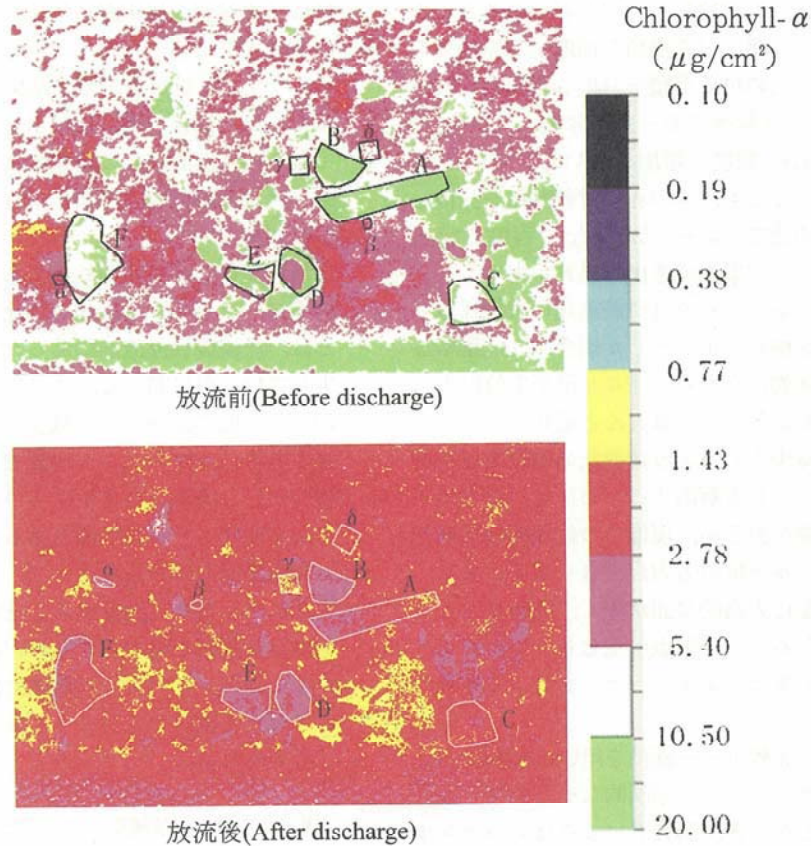


図-10 ダムの100m³放流にあたっての放流前と放流後のクロロフィルa量分布の変化
 A~F: φ50cm以上の石(放流によっても不動), α~β: φ10cm以下の石(放流によって動き、同一の石と特定できず), γ~δ: φ30cm以下の石(放流によって動いたが、同一の石と特定)

Fig.10 The distribution of chlorophyll a calculated from normalized differential vegetation index, in the case of 100m³ discharge.

A~F: Gravel larger than φ50cm (Immovable by discharge water), α~β: Gravel smaller than φ10cm (It cannot be judged the same gravel because it moved by discharge water), γ~δ: Gravel smaller than φ30cm (It can be judged the same gravel though it moved by discharge water).

取れる(やや値は異なるが植生指標とクロロフィルa量とは片対数グラフ上の相関なので、この程度の誤差は生じると思われる)。

また、図-10中のδ(0509-2)では、放流前に2.78~5.40 μg/cm²と5.40~10.50 μg/cm²との部分があったが、放流後は0.77~1.43 μg/cm²と1.43~2.78 μg/cm²との部分に変化している。放流前の分析値は2.58 μg/cm²で、放流後の分析値は2.82 μg/cm²である。これは、放流前の基盤からの採取箇所は2.78~5.40 μg/cm²程度の部分、放流後の基盤からの採取箇所は1.43~2.78 μg/cm²程度の部分であり、分析値と図-10とはほぼ同じ値を示していると考えることができる。そのようにこのδの基盤を捉えると、分析値で示された、放流前後でほとんど変わらないという結果は付着基盤上の局所的な違いであり、付着基盤全体で考えた場合には、放流によってクロロフィルa量が、この基盤についても減少していると考えることができる。

4.2 従来のポイント計測に対する本手法の優位性

前節で述べたように、図-10のクロロフィルa量分布図は概ね分布状況を良くあらわしていると考えられる。そうしたことを前提として、他の石に付着している藻類について考察する。

図-10中において、放流によってほとんど移動がなかった石であるA~Fについて着目する。その内、AやBのクロロフィルa量は、放流前で5.40 μg/cm²以上が分布していたが、放流後には1.43~5.40 μg/cm²に減少している。ところが、C~Fでは全体的には減少しているが、放流前も放流後も2.78~5.40 μg/cm²程度の部分があることがわかる。仮に、AやBの石から付着藻類を採取した場合には、どの部分を採取しても放流後に減少したという結果を得ることができるが、付着藻類の採取をこのC~Fの石で行った場合、採取する場所によっては放流前後で藻類がほとんど変化しなかったという結果を導き出す恐れがある。

この放流後に減少するという結果を導き出せない場合

があるという傾向は、石が移動して同じ石であるということ特定できず、任意に付着藻類を採取する場合にもおきる。仮に、 α の石の付着藻類を分析した場合、放流前は $1.43\sim 2.78\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度であったのに対して、放流後は $2.78\sim 5.40\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度に増加している。この α の石のように増加しなくとも、 β の石の付着藻類を分析した場合でも、放流前後で $1.43\sim 2.78\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度とほとんど変わらないという結果を導き出す恐れがある。

このように、ポイントデータ（付着藻類の現地採取）だけで放流の効果を検討しようとした場合には、実際は、図-10のように全体的にクロロフィルa量が半分以上も減少しているはずであるのに、ほとんど変化しない、もしくは、わずかに減少というように放流の効果を過小評価する恐れがある。これを解消するためには、採取ポイントを多くする必要があるが、現地での付着藻類採取や室内でのクロロフィル分析の労力が大きくなる。また、採取ポイントの選定は人為的な面が多く、調査者によるばらつきが大きくなるという欠点も生じると思われる。こうした点は、これまでのポイントデータによる調査の限界といえよう。

これに対して、近赤外カラー画像を用いた本手法では、比較的少ない採取ポイントで、平面的なクロロフィルa量分布を捉えることができ、調査者によるばらつきも少ないと考えられる。本手法は平面的に藻類の分布を捉えることで、放流によって減少した部分とほとんど変化しなかった部分を定量的に捉えることが可能であり、ポイントデータに比べて総合的な判断が可能となると思われる。

以上のような観点から、本手法の付着藻類調査への適用は有効なものと考えられる。

4.3 放流量の違いによる放流効果の考察

ここでは、付着藻類の変化からダム放流量の違いによる放流効果の違いを検討した。検討にあたっては、図-

11に示す26個の河床礫に付着する藻類を対象にした。

前節までに述べた方法でそれぞれの放流量に対するクロロフィルa総量を求めた結果は表-2のようになる。また、この結果を図-12に示した。

図-13は放流前後の藻類のクロロフィルの頻度分布を、図-14は放流前後の藻類のクロロフィル減少比を示したものである。

当然といえば当然の結果であるが 100m^3 放流の時の減少率はリフレッシュ放流時に比べて大きい。 100m^3 放流では、放流後は放流前にあった付着藻類の80~90%が減少しているのに対して、リフレッシュ放流では多くても70%、一般に20~60%の減少で、平均して言えば35%程度である。リフレッシュ放流では河床礫の場所による影響のせいと考えられるがばらつきが多く減少率ゼロとほとんど変化していない礫もある。

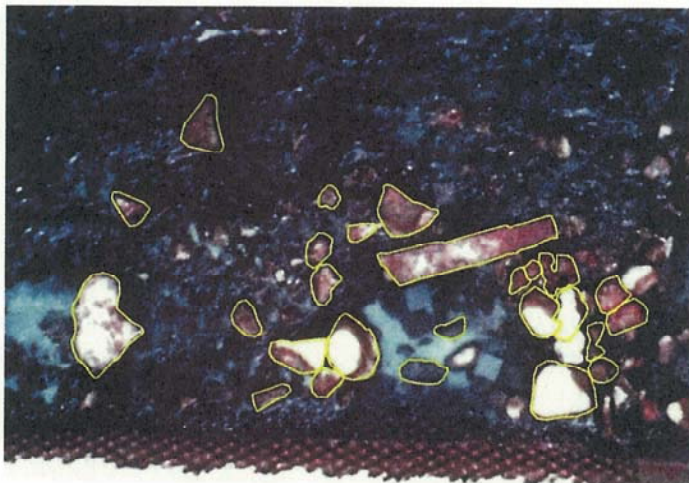
今回提案した方法によって、このような環境変化を面的にかつ定量的に把握することが可能になった。下流河川の付着藻類を再生して鮎などの川魚の生態環境を改善するために、どのような放流計画を立てることが最適なのかを更に検討していくうえで、重要な手法になり得ると考えられる。

表-2 ダムの放流量の違いによるクロロフィルa総量の変化とその割合

Table 2 The total amount of chlorophyll a of adhesion algae from different flow rate of discharge water.

	放流前	放流後	放流前後 の変化率
$100\text{m}^3/\text{sec}$ 放流の場合	545.2mg	115.3mg	78.9% (減少)
$20\text{m}^3/\text{sec}$ 放流の場合	758.1mg	498.0mg	34.3% (減少)

注) ここで、クロロフィルa総量とは、図-11に示す26個の河床礫に付着する藻類のクロロフィルa量の総和である。



The gravels enclosed with a frame yellow in this figure are made analytical objects. There are in all 26 gravels.

図-11 三春ダムの放流効果を検討するために対象として抽出した石

Fig.11 The gravels of analytical objects to examine the effects of discharge water at downstream of Miharu dam.

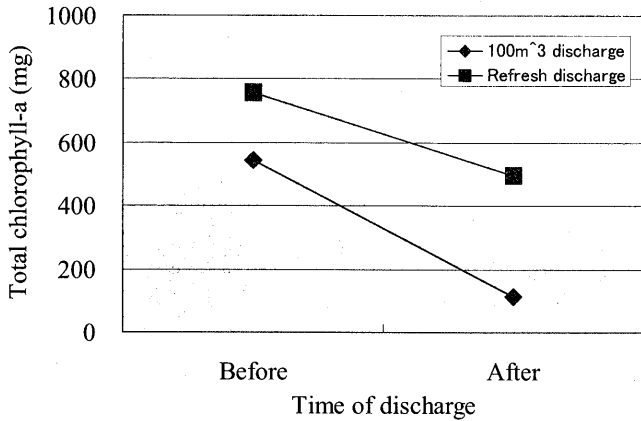


図-12 三春ダムの放流量の違いによるクロロフィル a 総量の変化

Fig.12 The change of total amount of chlorophyll-a from the difference of the flow rate of discharge water from Miharu dam.

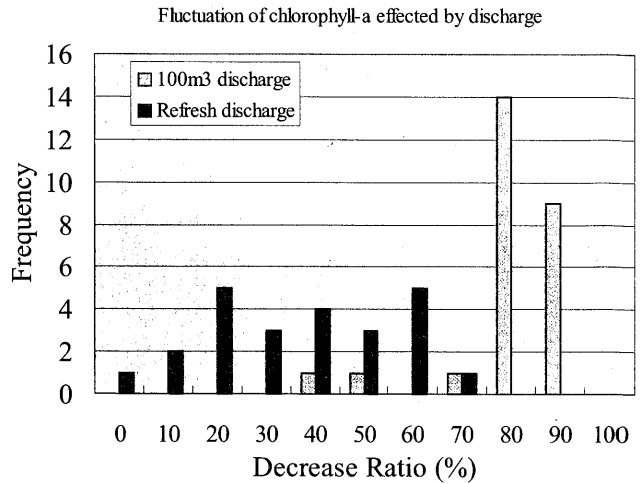


図-14 100m³ 放流とリフレッシュ放流によるクロロフィル a 量の減少比

Fig.14 The decrease ratio of chlorophyll-a from the difference of 100m³ discharge and refresh discharge.

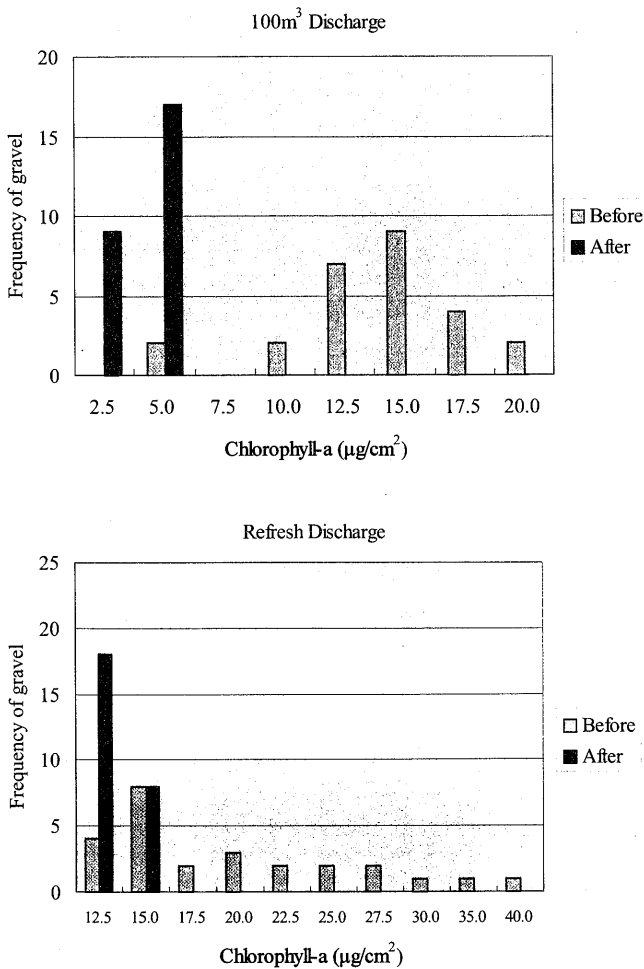


図-13 100m³ 放流とリフレッシュ放流の場合のクロロフィル a 量の変化

Fig.13 The change of chlorophyll-a from the difference of 100m³ discharge and refresh discharge.

20m³/secのリフレッシュ放流を数多く行うことがよいのか、回数は少なくとも100m³放流を行うのがよいのか、あるいは50m³/sec程度の放流を行うのがよいのか、などは現状の限られた資料から結論を導き出すことは難しいと考えられる。

とくに今回の調査検討では、100m³放流と20m³放流の2種類しか対象にされておらず、またそれぞれ一回の調査しか行われていないので、今後いろいろな放流量、また様々な放流の組み合わせに対する調査研究を継続することが必要であろう。

今回の調査から判断するとすれば、きわめて大きな効果を期待するような場合には100m³放流は効果があること、断続的に付着藻類を減少する効果を期待する場合には20m³/secのリフレッシュ放流もかなりの効果を示すことが確認できたといえる。

また、今後より最適な放流パターンを研究するためには、種々の放流パターンを計画し放流パターン前後の付着藻類の変化を捉え、リフレッシュ効果を定量的に判定することが重要である。ここでは、その一つの有効な方法を提案することが出来たと考えている。

5 まとめ

本論では、低高度型プラットフォームを用いた付着藻類の調査法について基礎的な検討を行うとともに、その結果を踏まえたダムの放流前後の河床に分布する付着藻類の変化を捉えるにあたっての本手法の有効性について検討した。また、この手法を用いて放流の効果についても検討した。その結果以下のことが示された。

- ①本手法で用いたカラー赤外線フィルムの植生反射光をデジタル処理することにより、クロロフィルとの相関植生指数を求め、ダム下流河川における放流に

伴うクロロフィルの変化を面的に定量化することの可能性を示すことが出来た。

- ②瀬や淵の違い、早瀬や平瀬の違いにより、クロロフィルa量と植生指標との相関式は異なる。従って、現地調査においては、この相関式を求めて定量的なクロロフィルa量分布を捉えるために、キャリブレーション用のいくつかのクロロフィル分析を行う必要がある。
- ③ダムの100m³放流(水のみ)においては、全体的に付着藻類が放流による影響で減少している。これは、放流によって生じた流れにより、石に付着していた藻類がはがれてしまったことを示している。また、放流による流れの局所的な違いや放流前の石のおかれた状況の違いにより、付着藻類の減少の仕方が異なり、場所による減少割合の違いが見られた。
- ④本手法は平面的に藻類の分布を捉えることで、ダム放流によって付着藻類が減少した部分とほとんど変化しなかった部分を含め面的にかつ定量的に捉えることが可能であり、ポイントデータに比べて総合的な判断ができる。そのような観点から、本手法の付着藻類調査への適用は有効なものと考えられる。
- ⑤本手法において、水深の違いや流速の違いについては大きな誤差要因にはならないと判断される。むしろ藻類量の違いがクロロフィルa量と植生指数との相関を悪くする可能性が指摘される。とくに、クロロフィルa量が0.5 μ g/cm²以下の場合には相関性が悪くなり、本手法の適用は薦められない。
- ⑥100m³/sec放流は20m³/sec放流よりも藻類を多く剥がすことが定量的に求まった。両者の放流による違いは、100m³/secが20m³/secに比べて2倍以上の剥離量となることがわかった。

今後は、この手法を他の放流実験等にも適用し、その放流効果をより詳細に検討するとともに、本手法の適用限界についても検討していく必要がある。

謝 辞

本研究は国土交通省三春ダム管理所の委託業務および応用地質株式会社の自主研究、さらに一部は河川環境整備基金によって勧めたものである。三春ダム管理所の方々には、資料提供をはじめ、調査の際便宜を図って戴いた。また、本研究を進めるにあたり長崎大学の後藤恵之輔教授、山中肇講師にご指導・ご協力をいただいた。ここに、深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 尾澤卓思・大杉奉功・原田譲二 (2001) : ダム放流による下流河川の環境復元, 大ダム, No.177, pp.87-97.
- 2) 大野博之, 萱場祐一・林貴宏・傳田正利・浅見和弘・島谷幸弘 (1999) : 低高度空中写真による河川環境調査法, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.23-28.
- 3) 斎藤大・大野博之・後藤恵之輔, 山中稔・三浦國昭 (2001) : 超低空リモートセンシングによる河川生態調査法—近赤外画像による付着藻類調査—, 第4回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.101-108.
- 4) Prasad S. T., Ronald B.S. and Eddy De P. (2002) : Evaluation of Narrowband and Broadband Vegetation Indices for Determining Optimal Hyperspectral Wavebands for Agricultural Crop Characterization, PE&RS, June 2002, pp.607-621.
- 5) 伊藤尚敬 (2002) : 三春ダム下流河川における土砂供給試験, ダム技術, No.193, pp.64-69.