土木学会論文集 No. 769／VII-32, 65-74, 2004. 8

ダム放流効果の検討のための超低空リモートセンシングによる付着藻類調査

大野博之[1]・斎藤大[2]・伊藤尚敬[3]・後藤惠之輔[4]

[1]正会員　工博　長崎大学助教授　工学部　(〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)
E-mail: h-ohno@civil.nagasaki-u.ac.jp
[2]応用地質株式会社　応用生態工学研究所　(〒963-7722 福島県田村郡三春町大字西方字石畑 275)
[3]国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所(現東北建設協会山形支所長井事業所)所長　(〒963-7722 福島県田村郡三春町大字西片字中ノ内 403-4)
[4]正会員　工博　長崎大学大学院教授　生産科学研究科　(〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

近年，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における弾力的運用もその一つの試みである．ダムの放流によってダム下流のアーマ・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これまで難しかった．

本研究では，ダムの放流の効果を定量的に把握する方法の一つとして付着藻類のより定量的かつ面的な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超低空リモートセンシングで撮影した近赤外画像を用いたクロロフィル量調査が有効であることを示した．また，三春ダムでは，放流量 100m^3/sec の方が 20m^3/sec の方よりも付着藻類の剥離は２倍以上の量になることが定量的に示された．

Key Words *: near-infrared color image, very low altitude remote sensing, chlorophyll a of periphyton, water discharge of dam, river environment*

1．はじめに

近年，各種の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．最近実施されるようにな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などの効果があることが物理的な環境状況の変化などから示され[1]，良好な環境の創出につながると考えられる．しかしながら，これまで様々な検討が行われてきたが，このダム放流の効果を生物の側面からは定性的に捉えられることが多く，現状では，生物の側面からも定量的に把握しその効果を具体的に示すことが求められている．

河床の石に付着する藻類はアユ（*Plecoglossus altivelis altivelis*）などの川魚の餌となることが知られている．特にアユ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ため，河床材料が洪水などによりダイナミックに変化し，その後に，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きたのが現状である．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．さらに，斎藤ら[3]は，藻類の変化を近赤外画像を利用した超低空リモートセンシングによる方法で把握することについて提案し，その有効性を示した．

こうしたことを受け，筆者らは，ダムの放流の効果を近赤外画像を用いた付着藻類調査の観点から定量的に捉え，ダム放流の効果を検討した．その結果，有意な知見が得られたのでここに報告する．

なお，本研究は国土交通省東北地方整備局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進めたものである．

2．調査方法と解析

(1) 超低空リモートセンシングによる調査法

近年，衛星リモートセンシングも，分解能が1m以下の高分解能衛星（IKONOS衛星やQuikBird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ると考えられる．しかしながら，ある特定の河川の環境変化をより高い分解能で捉えることは高分解能衛星が出現してきた現在でも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超低空リモートセンシングは，高度数十mから分解能数cm以下の超高分解能な画像を得ることを可能とし，特定の領域を詳細に把握する調査手法として有効な手段となる．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画像を得ることが可能であること等が挙げられ，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と考えられる．

超低空リモートセンシングに用いるカメラは，フィルムサイズが35mmから6×7(cm)くらいまでのものである．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 0.7μm)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フィルムが登場し紫外線から近赤外線(波長帯：0.25～1.00μm)までの光を感知できるようになってきた．近赤外線は，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いうことが知られている．

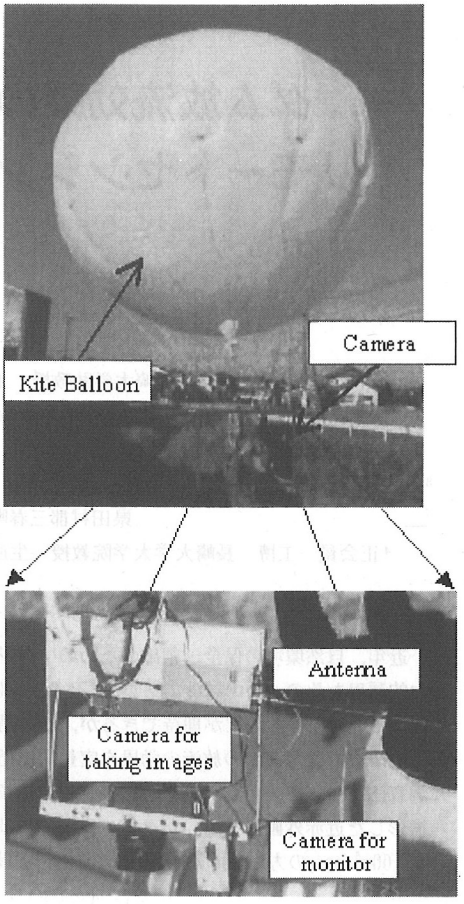


写真-1　超低空リモートセンシングの計測機器の例

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，ヘリウムガス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，テレビをモニター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，ラジコンヘリコプター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にカメラを搭載する点が異なるだけである．

(2) カラー赤外フィルムと近赤外画像[4]

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0.4～0.7μm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(0.65μm程度)，緑(0.55μm程度)，青(0.45μm程度)となるにしたがって波長が減少する．

一方，近赤外波長は，0.7～1.0μm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といわれている．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，近赤外カラー画像上においては，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．

こうした近赤外波長を捉える35mmの赤外フィルムとしては，これまでコダック社製の白黒のものしかなかった．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反射割合を捉えた指標）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，この方法では超低空リモートセンシングにおいて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，プラットフォームの性能の問題等から難しい状況であった．

この問題を解決するために今回新しく使用した35mmのカラー赤外フィルムは，「コダックエクタクロームプロフェッショナルインフラレッドEIRフィルム/2236」である．このカラー赤外フィルムは通常のカラーフィルムと同様3つの感光層から構成されているが，この3つの層は全て，青色光に感度を持っている．したがって，カラー赤外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．これにより，画像としての赤色が近赤外波長，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)を表すことになる．

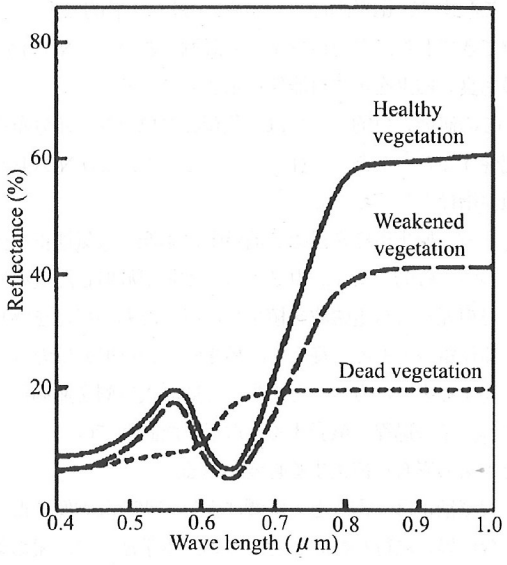


図-1　植物に一般的に見られる分光反射特性[3]

(3) 解析手法

一般に植物は，可視光の緑にあたる0.55μm付近に反射率 10～20%の一つの山と近赤外線 0.7～1.3μm 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 Vegetation Index (TSAVI)，Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)，Middle Infrared-Based Vegetation Index (MIVI)などである．Prasad ら[5]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，Red2(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．

$$NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED) \qquad (1)$$

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知する仕組みである．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．

大気補正は，霧などの影響により，明瞭な画像が得られない場合に行われることが多い．本手法では，撮影条件としては，良好な天候で行うので，こうした大気補正は基本的には必要ないものと考えた．また，斎藤ら[3]が示した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．以上のような理由から，ここでは特に大気補正は行わなかった．

3．検討対象地と結果

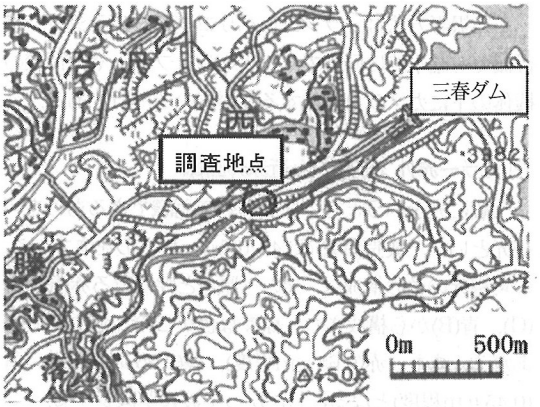
(1) 検討対象地

斎藤ら[3]は付着藻類の分布の把握にカラー赤外フィルムが有効であることを示している．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．

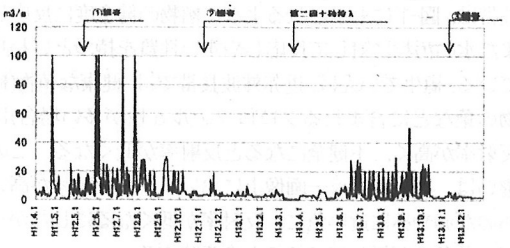
調査地点は**図-2 (a)** のような箇所であり，ダム堤体より約 800m 下流の地点に位置し，ダム放流は，2000 年 5 月 30 日と 2001 年 9 月 8 日の放流を対象に調査を実施した．

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（この中には土砂投入も含まれている）を行ってきている（**図-2 (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た．なお，以下，100m³/sec の放流量の放流を 100 m³ 放流，20m³/sec の放流量のほうをリフレッシュ放流と呼ぶ．



(a)　三春ダムと調査地の位置図



(b)　三春ダムのダム放流量（伊藤[6]参照）

図-2　三春ダムの放流調査対象地及びダム放流量

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 範囲をブラッシで擦り取り，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．

(2) 結果

100 m³ 放流とリフレッシュ放流の調査結果を，それぞれ**図-3** 及び**図-4** に示す．これらの図は，近赤外画像より

植生指標NDVIを求めて得られた分布図であり，白いほどNDVI値が高く黒いほどNDVI値が低いことを示している．さらに，NDVI値が高いほどクロロフィルa量も高いことを示している[3]。また，採取した付着藻類のクロロフィル分析による結果を**表-1**及び**表-2**に示した．

図-3や**図-4**に見られるように，放流の前後で，NDVIが減少した部分(**図-3**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，こうした傾向は当てはまらない．この理由として，比較的大きな石で，浅くなっている部分は濁りがあっても近赤外画像への映りこみは良いが，深い場合(経験的に数十cm)には濁りがなくても捉えにくくなるといったことなどが考えられる．

表-1や**表-2**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，非常に多くの藻類がはがれた個所とそうでない個所が存在するなど，場所により異なっているように見受けられる．

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．

(1) 河床材の移動・藻類の量と本手法の有効性

図-5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-5**中の30cm移動した基盤)やNo.0525-1(**図-5**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-3**のようなNDVI分布図では，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(Chl)と植生指標との関係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，データ数は共に付着基盤の5個である)．

$NDVI=0.0692\ln(Chl)-0.1276$ ‥ 100m³放流前

$NDVI=0.1189\ln(Chl)-0.0951$ ‥ 100m³放流後

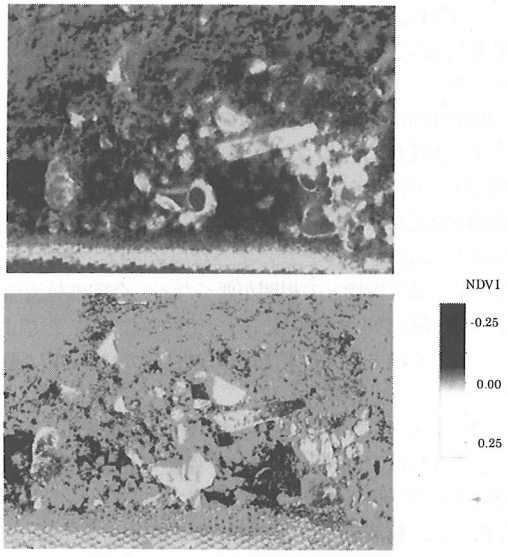


図-3 100m³放流の場合のNDVI分布。放流前(上)と放流後(下)

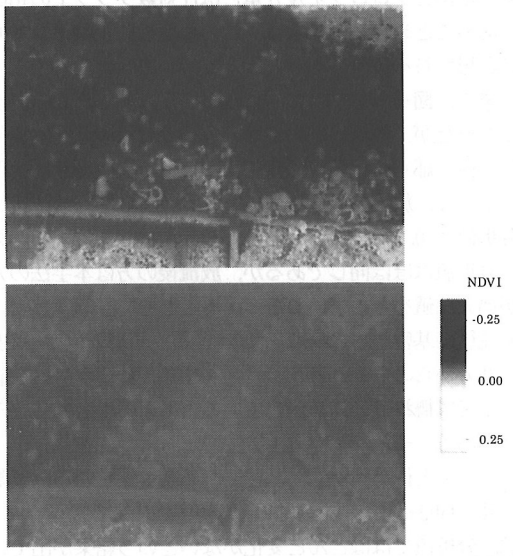


図-4 リフレッシュ放流の場合のNDVI分布。放流前(上)と放流後(下)

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-6**に示す．**図-6**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．

近赤外画像を用いてクロロフィルa量の変化を捉えるには，斎藤ら[3]が示したように，クロロフィルa量と植生指標との相関を取ろうとする石に付着している藻類の量が問題となる．すなわち，全ての石に付着している藻類が0.5μg/cm²以下となるような場合には，クロロフィルa量と植生指標との相関が悪くなる．今回の放流前後では，藻類がそこまで少なくなってはいない．ここでは，このことを踏まえて本手法の有効性について以下に論じる．

図-6のαでは，本手法から求められた放流前のクロロフィルa量は1.43～2.78μg/cm²程度であるのに対して，放流後は2.78～5.40μg/cm²程度に減少する。この石の分析では，放流前のクロロフィルa量が2.93μg/cm²，放流後が3.43μg/cm²となっている．この場合，本手法による量と分析値とでは，やや異なる値となっているが，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であることを考えるならば，この程度の誤差は生じるものと思われる．

また，**図-6**のεでは，放流前に5.40～10.50μg/cm²であったが，放流後は大半が1.43～2.78μg/cm²に変化し，極一部(2ピクセル分)で0.77～1.43μg/cm²に変化している．放流前の分析値は8.72μg/cm²で，放流後の分析値は0.27μg/cm²である．放流前は画像による結果と分析値はほぼ同じであるが，放流後の方は本手法の方が過大な値を示していると考えることもできる．しかし，放流後の基盤からの採取箇所を0.77～1.43μg/cm²程度の部分からのものと考えれば，分析値と**図-6**とは対数値としては概ね近い値を示していると考えることもできそうである．

このεと似た状況は，基盤についても見られる．基盤のNo.0509-2(**図-5**中の44cm移動した基盤で**図-6**のδ)は，分析値ではほとんど変化がないという結果が出ているが，これも同じ石の採取箇所の違いが原因である．

図-6中のδでは，放流前に2.78～5.40μg/cm²と5.40～10.50μg/cm²との部分があったが，放流後は0.77～1.43μg/cm²と1.43～2.78μg/cm²との部分に変化している．放流前の分析値は2.58μg/cm²で，放流後の分析値は2.82μg/cm²である．これは，放流前の基盤からの採取箇所は2.78～5.40μg/cm²程度の部分，放流後の基盤からの採取箇所は1.43～2.78μg/cm²程度の部分である．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ると考えられる。

以上のように，近赤外画像によってクロロフィルa量分布を概ね把握することができると考えられる．

表-1 100m³放流の場合のクロロフィルa量

Measured point No.		Chlorophyll a(μg/cm²) Before	After
Concrete block	0509-1(γ)	4.770	0.400
	0509-2(δ)	2.580	2.820
	0509-3	2.280	0.580
	0525-1	0.360	0.060
	0525-2	0.080	0.290
	Average	2.014	0.830
Stone	N1,N6	7.110	5.670
	N2,N7(ε)	8.720	0.270
	N3,N8	4.920	9.120
	N4,N9(α)	2.930	3.430
	N5,N10	5.350	1.140
	Average	5.806	3.926
	Average	3.910	2.378

注) StoneはBeforeとAfterで異なる石。
Point Noの()内は**図-6**の石の記号。

表-2 リフレッシュ放流の場合のクロロフィルa量

Measured point No.		Chlorophyll a(μg/cm²) Before	After
Stone	B1	4.370	2.970
	B2	5.680	3.050
	B3	7.050	2.460
	B4	4.530	2.870
	B5	4.030	3.300
	Average	5.132	2.930

注) StoneはBeforeとAfterで同じ石

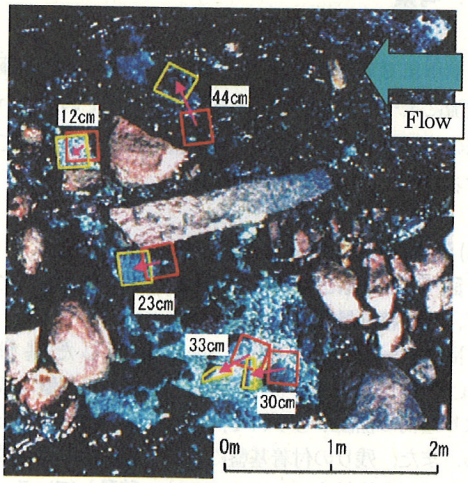


図-5 100m³放流の場合の放流前後におけるコンクリートブロックの移動量

(2) 従来の調査法に対する本手法の優位性

前節で述べたように，**図-6**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-6 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 5.40μg/cm² 以上が分布していたが，放流後には 1.43～5.40μg/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 2.78～5.40μg/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を特定できず，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 1.43～2.78μg/cm² 程度であったのに対して，放流後は 2.78～5.40μg/cm² 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 1.43～2.78μg/cm² 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，サンプル数が少ないポイントデータ（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-6** 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（場合によっては過大評価）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（経験的ではあるが，概ね5～10点）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くなるのではないかと考えられる．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．ただし，その適用限界（すなわち，適用できる水深や水質など）や適切な藻類の採取ポイントなどについて，今後検討していく必要がある．

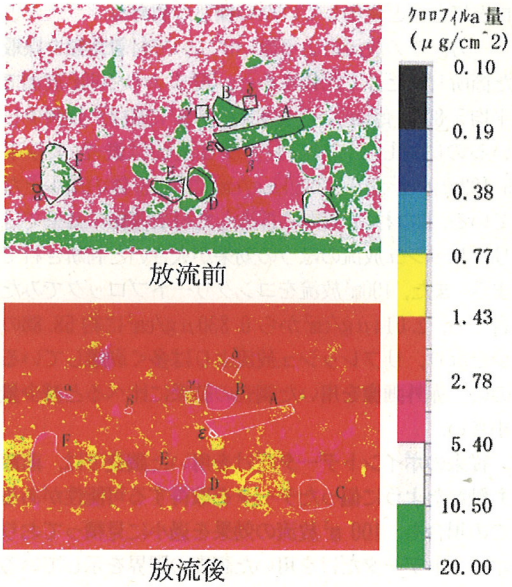


図-6 100m³ 放流の場合の放流前後におけるクロロフィルa量分布の変化

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～ε：φ30cm 以下の石（放流によって動いたが、同一の石と特定）

(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の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-7** に示す26個の河床礫に付着する藻類を対象にした．これらの河床礫は，水深が20cm以下と浅く，100m³ 放流とリフレッシュ放流とで同一の箇所の石として比較できるものとして選定した．

前節までに述べた赤外画像による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-3**のようになる．

図-8 は放流前後の藻類のクロロフィルa量の頻度分布を，**図-9** は放流前後の藻類のクロロフィルa量の減少率の頻度分布を示したものである．

この結果を見る限りにおいては，当然といえば当然の結果であるが 100m³ 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．100m³ 放流では，多くの河床礫で，放流後は放流前にあった付着藻類の 70～90%が減少しているのに対して（平均76%，標準偏差11%），リフレッシュ放流では多くても70%で，平均28%である（標準偏差 23%）．リフレッシュ放流では河床礫の場所による影響のためと考えられるが，ばらつきが大きく減少率ゼ

ロとほとんど変化していない礫も3個ある.

一方，この放流による違いについて付着藻類を採取した箇所(石)だけで比較すると，**表-1** より 100m³放流では平均5.806μg/cm²から3.926μg/cm²に約32.4%減少しているのに対して，リフレッシュ放流は**表-2** より平均5.132μg/cm²から2.930μg/cm²に約42.9%の減少となっている.すなわち,石から採取した付着藻類の結果では,リフレッシュ放流のほうの効果が大きいと判断されてしまう．また，100m³放流をコンクリートブロックでみた場合でも，2.014μg/cm²から0.830μg/cm²に約58.8%の減少となり，リフレッシュ放流よりは多く剥離しているものの，赤外画像を用いた調査の結果に比べると減少量が小さい.

従来のポイントデータだけを用いた調査では，前節でも触れたように偏ったデータを取得する可能性がある.この場合も，100 m³放流の効果を過小に見積っており，ポイントデータだけを用いた調査の限界を示しているものと考えられる.

今回提示した調査方法によって，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．このことは，下流河川の付着藻類を再生してアユ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.

20m³/secのリフレッシュ放流を数多く行うことがよいのか,回数は少なくても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.

特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させ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.

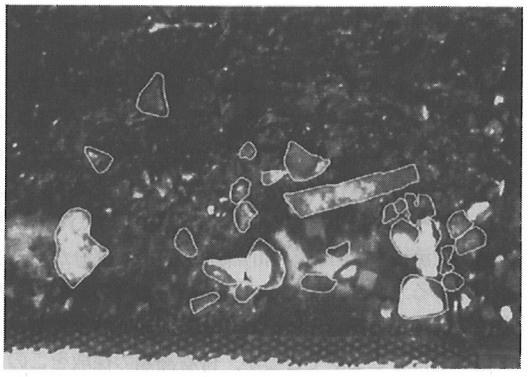


図-7 三春ダムの放流効果を検討するために対象として抽出した河床礫

表-3 ダムの放流量の違いとクロロフィルa総量の変化

	放流前	放流後	放流前後の変化率
100m³/sec放流の場合	545.2mg	115.3mg	78.9%(減少)
20m³/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-7** 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。

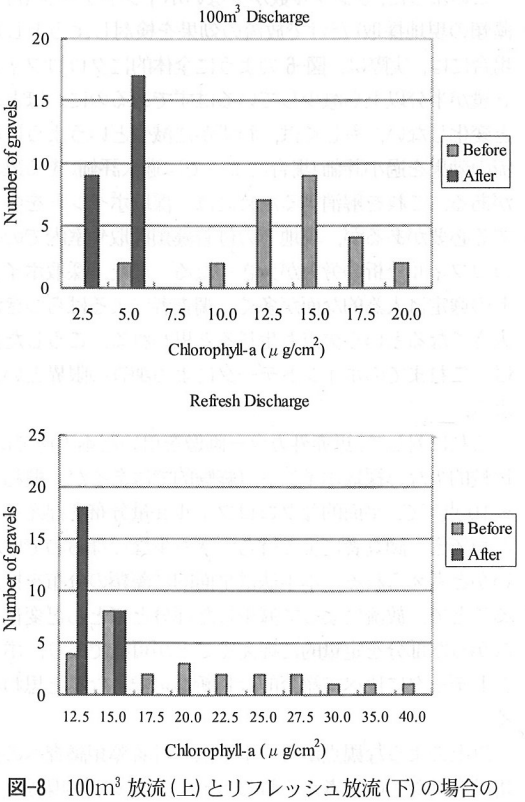


図-8 100m³放流(上)とリフレッシュ放流(下)の場合の放流前後のクロロフィルa量の変化

5．おわりに

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，クロロフィルと植生指数との相関式を求め，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 ダムの 100 m^3 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．

③ 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可能と思われる．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．

④ 100m^3/sec 放流は 20m^3/sec 放流よりも藻類を多く剥がすことが定量的に示された．両者の放流による違いは，100m^3/sec が 20m^3/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ろう．

謝辞：本研究を進めるにあたり香川大学の山中稔助手にご指導・ご協力をいただいた．ここに，深く感謝の意を表する．また，近赤外画像の撮影にあたっては(有)青高館の狩野正好氏にお世話になった．ここに，感謝の意を表する．

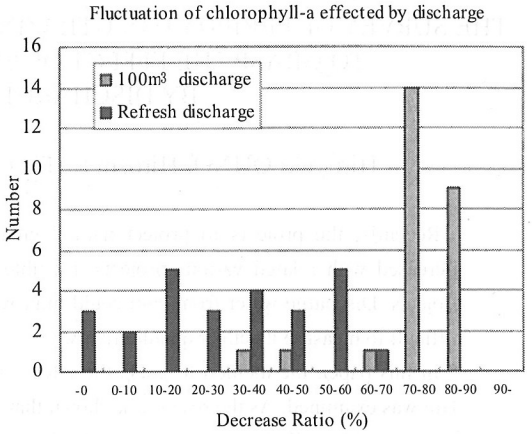


図-9 100m^3 放流とリフレッシュ放流によるクロロフィルａ量の減少率

参考文献

1) 尾澤卓思，大杉奉功，原田譲二：ダム放流による下流河川の環境復元，大ダム，No. 177，pp. 87-97，2001.

2) 大野博之，萱場祐一，林貴宏，傳田正利，浅見和弘，島谷幸弘：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，Vol. 5，pp. 23-28. 1999.

3) 斎藤大，大野博之，後藤惠之輔，山中稔，三浦國昭：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. 101-108，2001.

4) 大野博之，斎藤大：付着藻類の変化から捉えたダム放流の効果，応用地質技術年報，No. 22，pp. 1-12，2002.

5) Prasad, S. T., Ronald, B.S. and Eddy, De P. : Evaluation of Narrowband and Broadband Vegetation Indices for Determining Optimal Hyperspectral Wavebands for Agricultural Crop Characterization, *PE&RS*, June 2002, pp.607-621, 2002.

6) 伊藤尚敬：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. 64-69，2002.

(2003. 12. 12 受付)

THE SURVEY OF PERIPHYTON UTILIZING VERY LOW ALTITUDE REMOTE SENSING TO GRASP THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT BY DISCHARGE WATER FROM DAM

Hiroyuki OHNO, Hiroshi SAITO, Naotaka ITO and Keinosuke GOTOH

Recently, the projects to protect natural environment and/or to create a better environment have increased with related various projects. Flexible operation of water discharge of dam is one of these projects. Discharge water from dam could improve the downstream river environments. However, it was difficult to measure its effect quantitatively.

In this paper, the method to grasp the effect of environmental improvement by discharge water from dam was examined. As the result, it is shown that the change of chlorophyll a of periphyton quantitatively is estimated by utilizing the near-infrared color image taken with the very low altitude remote sensing.