

反射スペクトルとデジタルカメラを用いた 礫付着藻類のモニタリング手法の開発

DEVELOPMENT OF MONITOR SYSTEM OF GRAVEL ADHESION ALGAE THAT USE
REFLECTED SPECTRUM AND DIGITAL IMAGE

菅 和利¹・向井伸幸²・大西真弘³

Kazutoshi KAN, Nobuyuki MUKAI and Masahiro OHNISHI

¹ 正会員 工博 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科

² 正会員 工修 電源開発株式会社技術開発センター

³ 正会員 工修 電源開発株式会社技術開発センター

(〒135-8548 東京都江東区豊洲3丁目7-5)

To improve the riverbed environment, the sediment sand discharge to the downstream of dam and the putting sand are done. Because a long term is required for this effect to become visible, it is necessary to monitor a long term. In addition, it is necessary to monitor the appearance of the renewal of algae due to the flood.

In the present study, the correlativity between the activation level of the chlorophyll of the gravel adhesion algae and the reflected spectrum were applied. The correlativity of a reflection spectrum characteristic and a digital number from the gravel adhesion algae was clarified, and the existence of the correlativity with the amount of the chlorophyll was able to be clarified.

The corresponding value to a digital number in the surface of the water and the correlation of the amount of the chlorophyll were examined, and it was able to propose a practicable estimated equation.

Key Words: *chlorophyll, gravel adhesion, digital number, reflection spectrum, putting sand*

1. はじめに

ダム、堰などの河川構造物の設置に伴い、河床の固定化が進行し、アユなど魚類の生息環境に影響を及ぼしている。礫に付着する藻類を餌にし、礫間の子砂利へ産卵を行うなど河床環境と生態系の関係は複雑である。しかし、砂移動量の減少は、河床の固定化、大型の礫に付着する藻類の更新能力を低下させてきた。出水時の砂移動に伴う礫付着藻類の更新は、餌資源としての有効性を維持してきた。

対策としてダム堆砂を下流に排砂する、あるいは特定の場所に置き砂をし、出水時の砂移動を促す方策が取られている。この効果が現れるには長期間を要するので、季節的、経年的なモニタリングが必要である。さらに、出水での藻類の更新の様子をモニタリングすることも必要である。

現在、礫付着藻類の調査は直接採取する方法によって行われている。河床の礫を採取し、その表面の付着藻類

を剥ぎ取り、分析によりクロロフィル量の測定を行っている。しかし、調査のたびに異なった礫を採取するため、礫付着藻類がどのように更新されているのかを同定することができない。また、付着藻類の量そのものを把握するだけではなく、更新の様子、成長の過程などを定期的にかつ大局的に把握することが重要である。そのためには指標とする礫を用いた現位置調査でクロロフィル量を測定する簡便なモニタリング手法の開発が求められている。

本研究では、礫付着藻類のクロロフィルの活性度と反射スペクトル特性との相関性を応用し、デジタル画像から読み取ったデジタルナンバーからクロロフィル量を推定する手法について研究を行った。水中にある礫表面の藻類を水面上からデジタルカメラで撮影すると共に、Field Spec で反射スペクトルを測定し、これらの分析結果を用いて、水深による減衰特性、水面での反射の影響を補正することで、水面直下にある物体固有のデジタルナンバーへと換算を行った。この換算デジタルナンバーを基準

値にし、クロロフィル量との相関関係を検討し、実用的な推定式の提案を行った。

2. クロロフィル溶液と反射スペクトルの関係

この研究の根拠となる、クロロフィル a 濃度と反射スペクトルとの関係を検討した。水槽にほうれん草の絞り汁で作成したクロロフィル溶液を満し、上方から CCD カメラで撮影を行った。Apogee 社製高感度冷却 CCD カメラ (U30-BI) に任意の波長成分を取り出すことができるバリスペック液晶チューナブルフィルターをセットし、可視域の波長毎の CCD 値を測定した。この際に、白板を基準にして各波長での CCD 値が一定値になる露出時間を測定し、それに倣ってクロロフィル溶液での測定を行った。なお、実験水槽を囲む枠組みを暗幕で囲い、内部に太陽光に近い光源をセットして実験を行った。

図-1 は各濃度、波長毎の反射率を示したものである。白板での CCD 値で各濃度の CCD 値を除して反射率を算定した。図の最も下の曲線がクロロフィル a 濃度 186.7 $\mu\text{g/l}$ を示し、最も上の曲線がクロロフィル a 濃度 1.22 $\mu\text{g/l}$ の結果を示している。クロロフィル a 濃度が異なれば反射スペクトルの形が異なることを示している

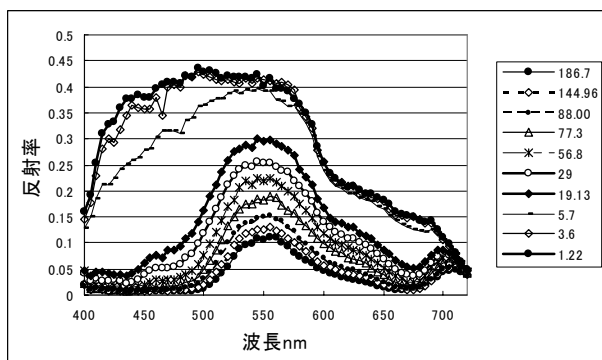


図-1 クロロフィル濃度と反射スペクトルとの相関

すなわちクロロフィルの光合成による光エネルギーの消費を示しており、葉緑素の活性度をクロロフィル a 濃度として測定できることを示している。この反射スペクトルの変化を数値化する、あるいは特定の波長での反射率に着目することで、クロロフィル a 濃度と反射率との相関関係を求めることができる。

3. デジタルカメラのデジタルナンバーと CCD カメラの CCD 値との関係

スペクトルの形を数値化する方法としてデジタルカメラのデジタルナンバーへの変換を応用することとした。

デジタルカメラの各画素は CCD 素子で構成されており、この CCD 素子によって物体から反射される光量 (強さ・明るさ) を測定している。デジタル画像の各画素に

格納されているデジタルナンバー DN 値は、CCD 素子からの微弱なアナログ電流の情報を画像解析回路を通して解析し、デジタル化した CCD 値の情報に光の三原色である赤 (R)、緑 (G)、青 (B) を合わせ、各色を 0~255 の数値として 256 段階に分けてから、カラー画像にした時の情報である。つまり、CCD 値は、画像情報の初期情報であり、デジタルナンバー DN 値は、画像情報の最終情報といえる。デジタル画像の各画素には物体の情報に応じた反射スペクトルを CCD 素子で測定し、RGB のデジタルナンバーに変換して数値として格納されている。すなわち、CCD カメラで波長を切り替えながら測定した図-1 の反射率の分布をデジタルカメラの各画素の CCD 素子は測定しており、デジタルナンバーに変換して 1~255 の数値として格納されている。従ってデジタル画像の各画素のデジタルナンバー (DN) には物体の性質に応じた反射スペクトルが反映されている。

デジタルナンバーは式 (1) で計算される。

$$DN_i = \alpha \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [f_i(\lambda) * S(\lambda)] d\lambda \quad (1)$$

λ は波長、 $\lambda_{\min}$ は可視域の最小波長 400nm、 $\lambda_{\max}$ は可視域の最大波長 720nm で、 $S_i(\lambda)$ は反射スペクトルである。 $f_i(\lambda)$ は図-2 に示す赤 (R)、緑 (G)、青 (B) それぞれの波長に対する感度特性である三刺激値の等色関数である。R に対する等色関数を用いれば R のデジタルナンバーが計算できる。係数 α は白板での DN が 255 になるように 2.5 とした。

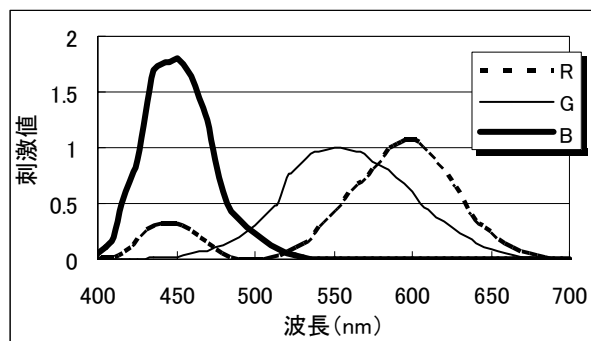


図-2 R、G、B の等色関数

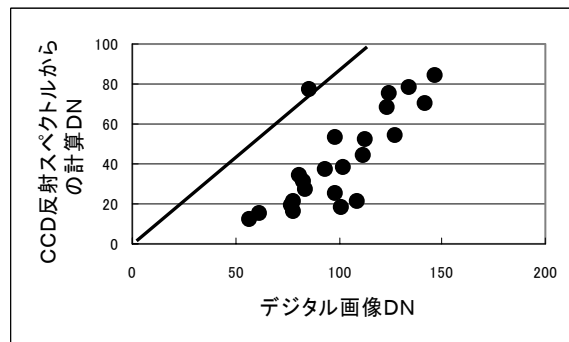


図-3 反射スペクトルからの計算 DN と画像 DN

図-3 はデジタル画像から読み取ったデジタルナンバーと反射スペクトルから算定したデジタルナンバーとの相関を示したものである。水面での反射の影響は波長が700nm から400nm と短くなるにしたがって大きくなり、冷却 CCD カメラでの露出時間の長さ比べて露出時間の短いデジタルカメラでは、この影響を強く受ける。この影響を補正することで CCD カメラの反射スペクトルを忠実に反映したデジタルナンバーを算定することができる。

図-4 は反射スペクトルから算定したDN (R) とクロロフィル a 濃度との相関を示したものである。多少のばらつきは有るが良好な相関を示しており、デジタル画像のデジタルナンバーDN値から溶液中のクロロフィル a 濃度を推定することが可能であることを示している。

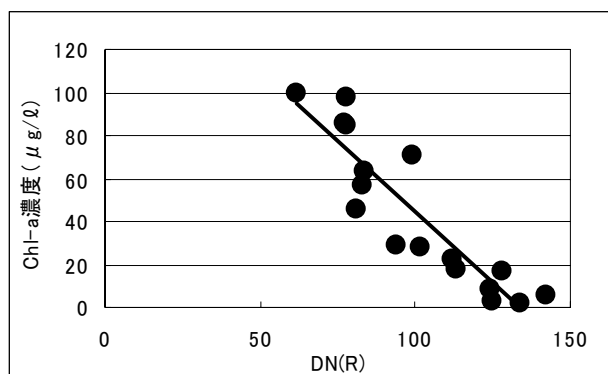


図-4 デジタルナンバーとクロロフィル a 濃度

このクロロフィル a 溶液の濃度をデジタル画像のDNから推定する手法を礫付着藻類の活性度算定に応用し、新たなモニタリング手法の開発を検討した。

4. 礫付着藻類モニタリングへのデジタルカメラの応用

植物の活性度の指標となるクロロフィル-a(chl-a)の溶液からの反射スペクトルに濃度が影響を与えることを示し、反射スペクトルと等色関数から算定したDN値にも当然クロロフィル a の情報が含まれていることを示した。また、クロロフィル濃度とデジタルナンバーとの相関性の存在も明らかにした。

礫付着藻類の主要部分はクロロフィルを含む葉緑素からなっており、付着藻類の活性度もクロロフィル a 量を基準として算定することができる。室内実験で、水槽内に沈めた礫表面のクロロフィル濃度を水面上からの反射スペクトルの測定、デジタル画像のデジタルナンバーの測定から溶液と同様に推定することを検討した。

用いた実験水槽は前述した水槽で、測定の仕方も同じである。しかし、現地での測定を考慮し、反射スペクトルの測定には、CCDカメラではなく簡易型の計測器

Field Spec を使用した。Field Spec Hand Held は、米国 ASD 社によって開発された携帯型野外観測用可視・近赤外分光放射計である。測定波長範囲は325-1075nm と広範囲に亘り、波長毎の反射率、放射輝度、放射照度を測定する事が出来る。また 325~1075nm の測定範囲を17miliseconds という高速でスキャンする事が可能な為、計測環境が変化しやすい室外においても、環境要因によるエラーを最小限に抑えることができる。また、PC と接続する事でリアルタイムなデータ収集・保存・表示を行う事も可能になる。上記の様な性能から、農業分野、森林環境、環境アセスメント等、多方面の分野で使用されている。デジタルカメラは Canon EOS20D を使用した。

Field Spec とデジタルカメラは水槽を囲む枠組み外の上方に設置して測定した。デジタル画像の解析には「ERDAS IMAGINE8.6」を用い、デジタルナンバーを取得した。また、礫付着藻類として小松菜で模擬し、物体表面に固定してクロロフィル濃度の測定を行った。



図-5 Field Spec Hand Held と High Power
キセノン光源 MAX-301

クロロフィル a 濃度の測定は吸光度測定方法（三波長吸光度法）で行った。吸光度の測定には島津製作所製 UVmini-1240 の分光光度計を使用した。

クロロフィルは、可視光線領域において強い吸光度特性を持っており、その吸収極大波長や吸光係数はクロロフィルの種類によって異なる。この実験ではアセトンで

色素を抽出し、特定波長(663nm、645nm、630nm)の吸光度を測定し、式 (2) の計算式でサンプル中のクロロフィル a 濃度を求めた。

$$\text{Chl}_{-a} = \frac{(11.64A_{663} - 2.16A_{645} + 0.1A_{630}) * \alpha}{V * L} \quad (2)$$

ここに、An は波長 n の吸光度から波長 750nm の吸光度を引いた値 (波長 750nm の吸光度を引くのは、懸濁物質による光の散乱の影響を差し引く為である)、α は検液量 (遠沈管に投入した 14ml)、V は 1 回のろ過に用いた検水量 (ℓ)、L はセル長 (1cm) である。

反射率は図-5 の Field Spec とキセノン光源を用いて測定した。

(1) デジタルナンバーの測定

模擬藻類として小松菜を用い、コンクリートブロックに固定して水槽内の所定の深さにセットした。この水槽をデジタルカメラを用いて暗室上方から撮影する。その後、デジタル画像を「ERDAS IMAGINE8.6」により解析することで実測値 DN を求めた。実測値 DN を求める際には、小松菜が映し出されている 1 枚の画像から小松菜のみの部分を 4 箇所切り取り、各値の平均値を正式な値とした。これは、小松菜のみの DN 値を抽出するのと同時に、選定箇所によるばらつきを無くすためである。

同様に測定した Field Spec の反射率測定から式 (1) を用いて計算デジタルナンバーを算定した。

葉面クロロフィル a 濃度の測定は、葉面を 3cmx3cm 採取し、この葉面をすり潰して 500ml の水に溶解し、クロロフィル溶液の濃度として測定した。この濃度 $\mu\text{g}/\ell$ から単位面積あたりのクロロフィル a 量 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ に換算した。

(2) 水深による光の逸散影響の補正

光は水中に入ると指数関数的に低減する。従って、水中に有る物体からの反射エネルギーは水深が深いほど小さくなり、見かけ上反射率が低下する。その結果、水深が深くなると同じ物体であるにも関わらず、測定したデジタルナンバーも小さくなる。同じ物体であるので、水深の影響を補正し、その物体固有のデジタルナンバーに換算する必要である。

模擬藻類を水面直下 (0m)、0.1、0.2、0.3、0.4m に設置し、デジタルカメラと Field Spec で測定を行った。

デジタルカメラから読み取った水面直下での DN 値を基準にして各深さでの DN 値を正規化し、各実験ケースの平均を表したのが図-6 である。図に示されるように深くなるにつれて DN 値が減衰している様子が分かる。R、G はほぼ同様な減衰特性を示すが、B については R、G に比べて減衰が大きいことを示している。

R、G については式 (3) で補正をし、B については式

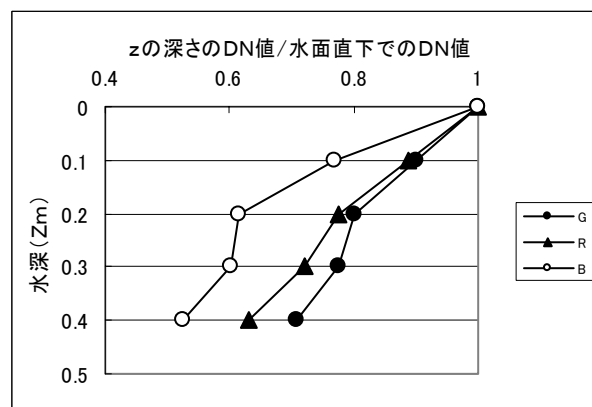


図-6 水深による反射率の減衰

(4) で補正を行なう。

R、G についての減衰関数

$$\text{DN}(Z)_{R,G} = \text{DN}(\text{水面直下})_{R,G} * \exp(-1.1 * Z) \quad (3)$$

B についての減衰関数

$$\text{DN}(Z)_B = \text{DN}(\text{水面直下})_B * \exp(-2 * Z) \quad (4)$$

この減衰関数を用いることにより、水面下での物体の反射特性を水面直下での反射特性に換算することができ、水面直下での DN 値を基準としてクロロフィル濃度との相関を検討することが可能になる。なお、Field Spec で測定した反射率から算定した DN 値の深さ方向の減衰特性は図-6 と同様であった。

(3) 水面での反射の影響の補正

白板を水面上、水面直下に設置し、Field Spec でスペクトル (反射率) を測定すると同じ値になり、Field Spec での反射スペクトルは水面の影響を受けていないことが分かる。すなわち、Field Spec で測定した反射率には水面での影響を受けず、深さ方向の減衰の影響のみを受けると考えることができる。デジタルカメラで撮影した水面直下の物体からの DN と Field Spec から算定した DN の差が水面での影響を表している。実験ケースの平均値を示したのが、表-1 である。

表-1 水面での影響の DN 値での補正值

	R	G	B
DN の補正值	49.24	51.87	34.94

例えば水面直下に有る物体を水面上から撮影し、その DN (R) 値が 100 の場合には、水面での影響を除去した $100 - 49.24 = 50.76$ が物体固有の反射率を反映したデジタルナンバー DN と考える。

(4) 水面での影響と深さの影響の補正

Field Spec で各深さの物体から測定した反射スペクトルを用いて算定した DN (Z) 値を真値とし、デジタル

カメラで撮影した水面直下の物体のDN値から水面の影響を除去し、その値に深さ方向の補正を行ったDN値との相関を検討した。この相関が認められると水面の影響の補正、深さの補正を行なった物体固有のデジタルナンバーをデジタル画像から推定することが可能になる。

式 (5)、(6)、(7) を用い、ある深さにある物体の固有のデジタルナンバーを算定した。このDN値と Field Spec から算定したDN値との相関を示したのが図-7、8、9である。

$$DN(Z)_R = (DN(\text{水面直下})_R - 49.24) * \exp(-1.1 * Z) \quad (5)$$

$$DN(Z)_G = (DN(\text{水面直下})_G - 51.87) * \exp(-1.1 * Z) \quad (6)$$

$$DN(Z)_B = (DN(\text{水面直下})_B - 34.94) * \exp(-2.0 * Z) \quad (7)$$

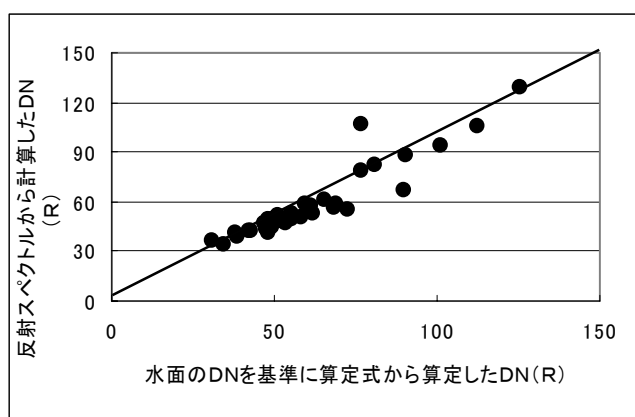


図-7 水面の補正と深さの補正 (R)

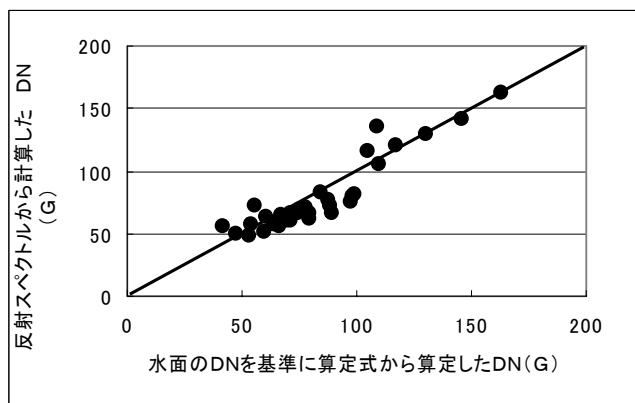


図-8 水面の補正と深さの補正 (G)

図-7、図-8 から分かるように、R、Gについては高い相関を示し、水面、深さの補正が適切に行なえたことを示している。しかし、図-9 が示すようにBについては全く補正が適切に行なえないことを示している。可視域での波長の短い領域ではCCDカメラでも光量を十分に蓄積することができなかった。同様に、Bに相当する等色関数の領域ではデジタルカメラ、Field Spec 共に正確な反射特性を測定できていないと判断する。従って、デジ

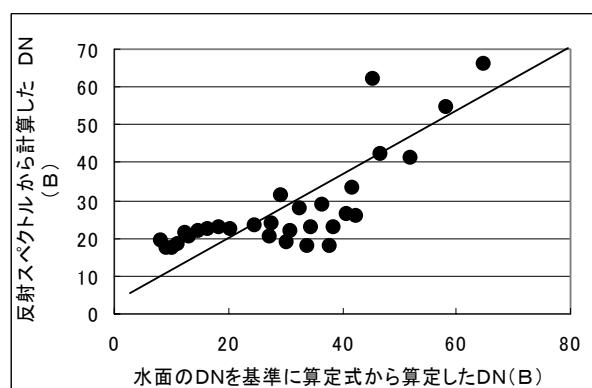


図-9 水面の補正と深さの補正 (B)

タル画像からクロロフィル量を推定する際には、R、Gを用いて検討することとする。

(5) 磯付着藻類のクロロフィル量のDN値での推定

a) 室内実験での結果

磯付着藻類のクロロフィル a を小松菜のクロロフィル a で模擬し、小松菜の色々な状態でのクロロフィル a 濃度とデジタル画像を撮影した。コンクリートブロックに固定した小松菜を水深 20 cm に設置し、上方から撮影したデジタル画像からデジタルナンバーを読み取った。

このデジタルナンバーに深さ補正を行ない水面直下で

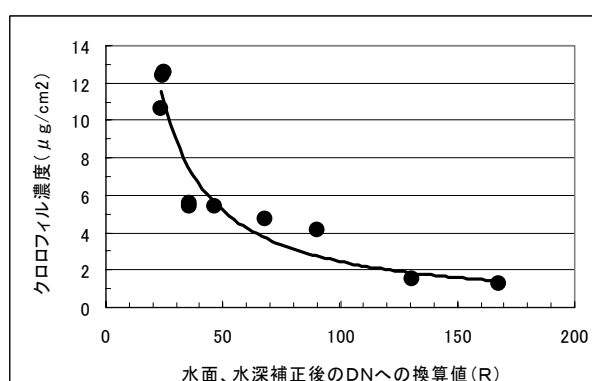


図-10 換算DN値 (R) とクロロフィル量

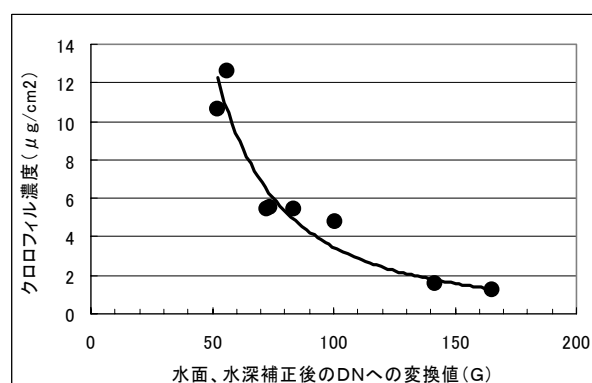


図-11 換算DN値 (G) とクロロフィル量

のデジタルナンバーに変換し、さらに水面の影響を除去することで、物体表面固有のデジタルナンバーに変換した。小松菜のクロロフィル a 濃度とデジタルナンバーの関係を図示したのが図-10、図-11 である。

図-10 は R のデジタルナンバーとの相関を、図-11 は G のデジタルナンバーとの相関を示したものである。デジタル画像から読み取った B のデジタルナンバーと Field Spec で測定した反射率から算定したデジタルナンバーとの同一性が得られなかったため、クロロフィル a を推定するときには R、G のデジタルナンバーのみを利用することとした。

図中の曲線は累乗近似曲線を示し、両対数グラフでは直線の周りにデータが分布する。データの多少のばらつきはあるが、近似曲線の周りに分布しており、単位面積あたりのクロロフィル量をデジタル画像のデジタルナンバー DN 値で推定できることを示している。

b) 現地観測データの整理

現地河川での礫付着藻類と換算デジタルナンバーとの相関について、室内実験同様に検討を行った。現地での礫表面からはぎ取った藻類を葉面の場合と同様に、500ml の蒸留水に溶解して溶液に含まれるクロロフィル a 濃度として測定し、500ml の溶液に含まれるクロロフィル a の量を単位面積あたりに換算して $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ で表した。水中の礫のデジタル画像から読み取ったデジタルナンバー DN を水面でのデジタルナンバーに換算し、単位面積あたりのクロロフィル量との相関を整理したのが、

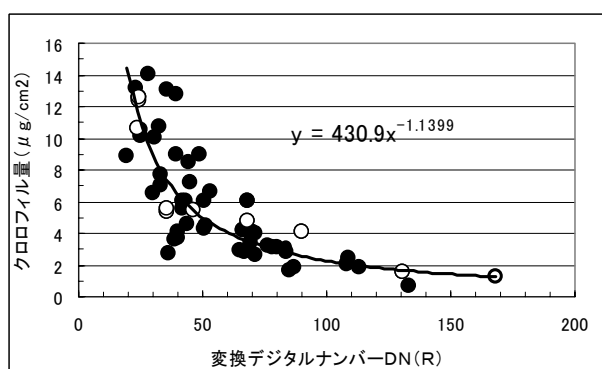


図-12 換算DN値(R)と単位面積当たりクロロフィル量

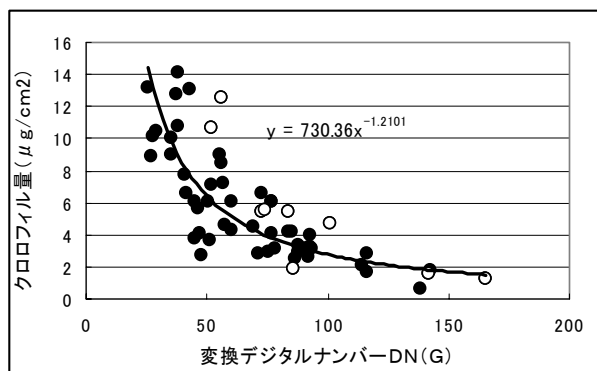


図-13 換算DN値(G)と単位面積当たりクロロフィル量

図-12、図-13 である。図中の●丸は現地での結果、○丸は室内実験での結果を示した。

図中の曲線は現地、室内でのデータを用いた累乗近似曲線であり、この曲線のまわりにデータはばらついていく。ばらつきの原因として、①デジタル画像からピンポイントでデジタルナンバーを読み取っているが、測定した付着物には対象面内全体の付着藻類が採取されている、②単一種でない複合的な藻類を採取している、③付着藻類以外の浮遊藻類の沈殿物が含まれているなどが考えられる。しかし、図-12、13の近似式は、ほぼ使える程度のばらつきであり、図中の近似式を用いてデジタル画像から単位面積あたりのクロロフィル量を推定することの可能性を明らかにできた。

5. 結論

Field Spec で測定した反射スペクトルから計算したデジタルナンバーと、デジタル画像のデジタルナンバーとの比較から、デジタル画像のデジタルナンバーには光合成物質であるクロロフィルの反射スペクトル特性が反映されていることを明らかにした。デジタルカメラのデジタルナンバーに水面影響の補正、水深影響の補正を行なって算定した物体固有のデジタルナンバーからクロロフィル量を推定する式を提案することができた。

この手法は、調査のたびに異なった礫を採取して付着藻類のクロロフィル量を測定していた従来の手法と異なり、現位置での指標とする礫の付着藻類のクロロフィル量の測定を連続的に行うことができる。出水、置き砂による礫付着藻類の更新の様子を同じ礫を対象にしてモニタリングできる本手法は、河川管理技術として応用性が期待できる。しかし、礫付着藻類の種の特異性、強熱減量の測定を合わせて行い、推定精度の更なる向上を図る必要がある。

謝辞：礫付着藻類、河川生態環境について（財）淡水生物研究所の森下郁子さんに多くのご指導を賜った。記して謝意を表す。

参考文献

- 菅 和利, 佐藤充彦, 矢内裕一：CCDカメラから推定したDNを用いた水質モニタリングについて、第62回土木学会年次学術講演会、VII-127、2007。
- 佐藤充彦, 菅 和利, 佐々木啓太：藻類の影響を考慮したDNを用いたクロロフィル濃度推定法について、第62回土木学会年次学術講演会、VII-132、2007。
- 篠宮典明, 瀬田尊紀, 菅 和利：付着藻類の増殖過程についての現地観測、第58回土木学会年次学術講演会、II-234、2003。

(2010.4.8 受付)