

橋上から撮影したデジタル画像を用いた礫付着藻類 クロロフィル量の連続モニタリング手法の開発

DEVELOPMENT OF CONTINUOUS MONITOR SYSTEM OF GRAVEL ADHESION ALGAE
THAT USE DIGITAL IMAGE TAKEN FROM A BRIDGE

菅 和利¹・向井伸幸²・開 進一³・前田修一⁴

Kazutoshi KAN, Nobuyuki MUKAI, Shinichi HIRAKI and Syuichi MAEDA

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 電源開発株式会社水力発電部西日本支店

³正会員 工修 電源開発株式会社技術開発部茅ヶ崎研究所

⁴正会員 工修 電源開発株式会社技術開発部茅ヶ崎研究所

(〒135-8548 東京都江東区豊洲3丁目7-5)

In order to improve the health of river environment, it is an important problem that discharges the deposition sand to a dam downstream. In addition, the putting sand has been placed in order to increase the movement of sand and the renewal of algae during floods. Because a long term is required for this effect become visible, it is necessary to monitor a long term. In the former study, 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.

In this research, the technique of continuous monitoring from the digital image taken from on a bridge was developed. The technique of revising the influences of the distance, an angle, a rate of zoom, the water surface, water depth to the digital number read in the digital image respectively was developed. It was able to estimate quantity of chlorophyll using this revised digital number.

Key Words: *chlorophyll, gravel adhesion, digital number, continuous monitor system*

1. はじめに

出水に伴う砂移動は、礫付着藻類を更新させ、礫付着藻類を餌とするアユなどの魚類の生息環境を保全している。また、砂移動は礫間の小砂利へ産卵するトビケラなどの底性生物の生息環境を整備し、複雑な生態系基盤構成の基礎となっている。このように砂移動に伴う現象は、河道の健全性を示しており、礫付着藻類の状態は健全性の一指標と見なすことができる。しかし、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、大型の礫に付着する藻類の更新能力を低下させてきた。その結果、複雑に関連している河床環境と生態系の関係を変化させ、魚類の生息環境に影響を及ぼしている。

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、

出水に伴う藻類更新の様子をモニタリングすることも必要である。礫付着藻類の調査では礫表面から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、一定面積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、礫付着藻類の更新の様子、成長の過程などを把握することができない。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。そのためには河道内指標礫を対象にした現位置でのクロロフィル量を推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。

著者らは、礫付着藻類に含まれるクロロフィルからの反射スペクトル特性を数値化し、クロロフィル量を推定する藻類モニタリング手法の開発を行ってきた。^{1)、2)}

デジタル画像のデジタルナンバー(DN)は物体表面からの反射スペクトルと三刺激値である等色関数との掛け合

せによって決定されており、デジタルナンバーは反射スペクトルの特性を数値化していると考えられる。このデジタルナンバーからクロロフィル量を推定する手法である。

本研究では今までの成果を応用しながら、橋上から撮影したデジタル画像からクロロフィル量を推定する手法の開発を目的とした。橋上からのデジタル画像からクロロフィル量を推定するためには、距離補正、角度補正、ズーム補正が必要となる。これらの補正の方法を検討し、実用的なモニタリング手法を提案した。

2. デジタルナンバーDNからのクロロフィル量の推定

水中にある礫表面の藻類を水面上1 mの高さからデジタルカメラで撮影すると共に、Field Spec Hand Held(携帯型野外観測用可視・近赤外分光放射計)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い、クロロフィル量推定式の提案を著者らは行っている。¹⁾

式(1)より、水面の影響の補正、深さの補正を行なうことで、物体が水面直下にある場合での固有のデジタルナンバーへの換算DN値を求めることができる。式(1)はRGBの内のRについての式である。R、Gどちらの値でも同等の精度が得られ、単独で利用できる。

$$DN(\text{水面直下})_R = DN(\text{水面上1m})_R * \exp(1.1 * Z) - 49.24 \quad (1)$$

式(1)の左辺が換算DN値で、Zは礫表面までの水深である。実験室、実河川で測定したDN値から換算DN値を求め、換算DN値とクロロフィル量との相関を図示したのが図-1である。図中○は、室内実験の結果であり、●は実河川での結果である。室内実験では、礫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、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、水面上1 mの高さ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。

実河川では礫を撮影しやすい場所に設置し、水面上の1 mから測定した。いずれの場合もカメラのズームは最小である。

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る。この近似式での推定値と室内実験、現地観測データとの相関係数は0.86で、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ができる。

従って、橋上から撮影した画像から読み取ったDN値を、水面上1 mの高さでのDN値に変換すれば、その値に深さ補正、水面の影響の補正を行うことで、図-1と同

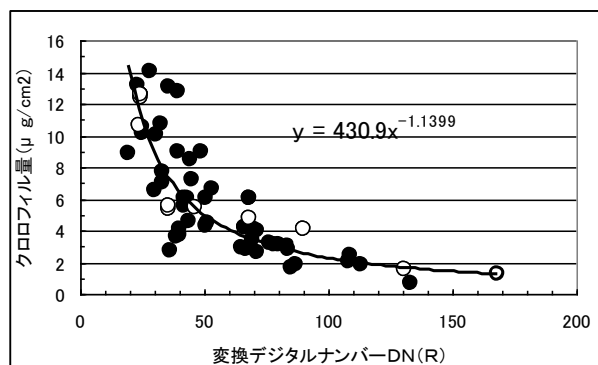


図-1 換算DN値 (R) と単位面積当たりクロロフィル量

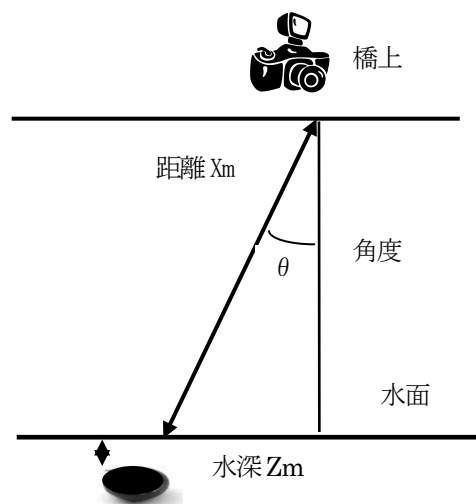


図-2 橋上からの測定の模式図

様な推定式を求めることができる。任意の角度、距離、ズーム最大でのDNを角度ゼロ、距離1 m、ズーム最小でのDNへの補正の方法を検討した。

3. 角度、距離、ズーム補正

図-2に橋上からの撮影の様子を模式的に示した。任意の場所にある礫を対象に、橋上からカメラのズームを最大にして撮影を行う。また、水深、距離、角度は実測する。用いたカメラはCanon EOS20D(EFS19-95mm)で、距離は10 m～20 mの範囲を対象とした。

(1) 角度補正

白板、色版をカメラとの距離1 mの地点に水平 $\theta = 0$ 度、15度、30度、35度、40度に角度を変化して設置し、カメラのズーム最大で画像を取得し、RGBのデジタルナンバーDN値をそれぞれ読み取った。測定の模式図を図-3に示した。また、デジタル画像の解析には「ERDAS IMAGINE8.6」を用いた。

各距離で取得した $DN_{\text{角度, 距離, ズーム最大}}$ を、距離1 mでの $DN_{\text{角度, 1m, ズーム最大}}$ で無次元化して図示したのが図-4である。図-4によるとデータのばらつきはあるが、角度 θ 毎

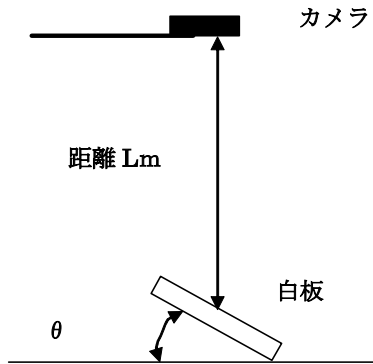


図-3 角度、距離変化でのDN値の測定

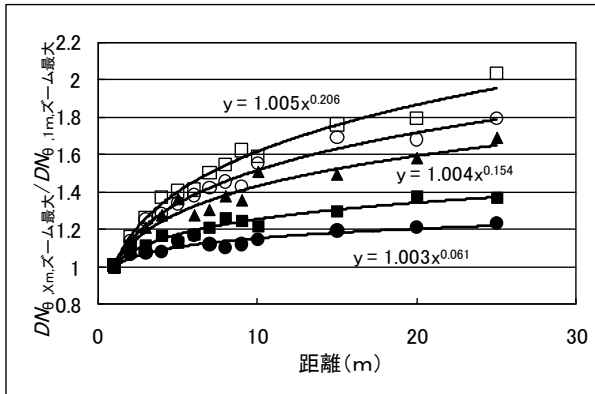


図-4 無次元DNと距離との関係

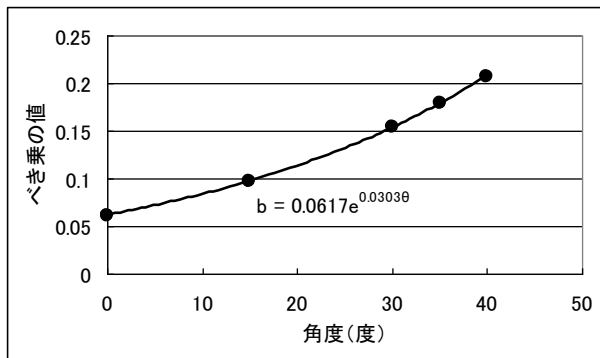


図-5 累乗近似曲線のべき乗と角度の関係

に一つの累乗近似曲線の周りに分布することを示している。

$$y = ax^b \quad (2)$$

角度毎の累乗近似曲線係数の関数形を示したのが表-1である。べき乗 b の値は角度によって変化し、 b と角度との関係を示したのが図-5である。べき乗値 b は式(3)の指数近似曲線で表すことができる。

$$b = 0.0617 \exp(0.03039\theta) \quad (3)$$

また、係数 a は近似式が距離1mで無次元量1を通るので1に近い値であるので、角度0度での値である1.0032とした。これらの結果を用いると、図-4中の累乗近似式

表-1 各角度での累乗近似曲線

角度(度)	シンボル	近似式(X:カメラから水面までの距離m)
0	●	$1.0032X^{0.0615}$
15	■	$1.0029X^{0.0976}$
30	▲	$1.0045X^{0.1544}$
35	○	$1.0057X^{0.1786}$
40	□	$1.0052X^{0.2063}$

は式(4)で表すことができる。

$$\frac{DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}}{DN_{\theta, 1m, \text{ズーム最大}}} = 1.0032X(m)^{0.0617 \exp(0.03039\theta)} \quad (4)$$

さらに式(4)で θ をゼロ度とすると式(5)が得られる。

$$\frac{DN_{0, X_m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}} = 1.0032X^{0.0617} \quad (5)$$

式(5)を式(4)で割ると次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, X_m, \text{ズーム最大}}} \cdot \frac{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}}{DN_{\theta, 1m, \text{ズーム最大}}} \\ &= \frac{DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}}{DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}} \cdot \frac{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}} \\ &= C \cdot \frac{DN_{0, X_m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, X_m, \text{ズーム最大}}} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)の C の値は、室内実験によると角度によらずほぼ一定値1.1であった。

式(6)より、式(7)に書き直すことができる。

$$\begin{aligned} DN_{0, X_m, \text{ズーム最大}} &= DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}} \\ &\quad * \frac{1}{C} \cdot \frac{1.0032X^{0.0615}}{1.0032X^{0.0617 \exp(0.03039\theta)}} \end{aligned} \quad (7)$$

$DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}$ が橋上から撮影したデジタル画像から読み取ったデジタルナンバーDNであり、式(7)により角度 θ で取得したDNを角度ゼロでのDNに補正することができる。

(2) ズーム、距離補正

同じ画像をズーム率を変化して撮影すると、光子を集積する画素数が異なるために、反射率すなわちDNが変化する。距離の離れた橋上から礫を撮影する場合には、ズーム率最大で撮影するが、式(1)を適応するためにはズーム率最大でのDNをズーム率最小でのDNに補正が必要である。ズーム率 S は以下の方法で定義した。

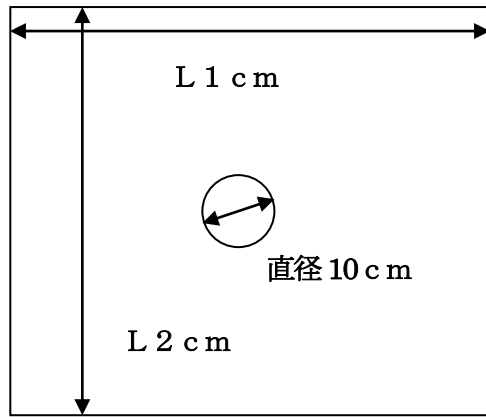


図-6 ズーム率の定義

白板に直径 10 cm の円を書き、任意の距離に設置して写真を撮影する。写真に映っている範囲の面積 A を円の直径を指標にして算定し、この面積と円の面積との比をズーム率と定義する。しかし、画像のひずみ補正は行っていない。

$$\begin{aligned} \text{ズーム率 } S &= \frac{\text{円の面積}}{\text{写真に写っている面積}} \\ &= \frac{5\text{cm} * 5\text{cm} * 3.14}{L1 * L2} \end{aligned} \quad (8)$$

用いたカメラでは、ズーム率最小値が 0.000707、最大値が 0.014252 である。カメラから白板までの距離を 1m、5m、10m、15m、20m、25m とし、それぞれの距離でズーム率を変化して画像を取得した。距離ごとに各ズーム率での DN をズーム率最小の時の DN で無次元化して示したのが図-7 である。ズーム率を変化させた無次元 DN 値は、距離毎に、式(9)の累乗近似式で近似できることを示している。

無次元デジタルナンバー $DN(R)$

$$\begin{aligned} &= \frac{DN_{0, Xm, \text{任意のズーム率}}}{DN_{0, Xm, \text{ズーム最小}}} \\ &= aS^{-b} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)の係数 a 、べき乗値 b は距離によって異っており、距離の関数と考えられる。それぞれ、係数、べき乗値を距離 X に対して整理したのが、図-8、図-9 である。係数 a 、べき乗値 b は式(10)、式(11)の近似式で表すことができる。

$$a = 0.016X + 0.3062 \quad (10)$$

$$b = 0.1613\exp(-0.0369X) \quad (11)$$

式(10)、式(11)を式(9)に代入すると式(12)となる。

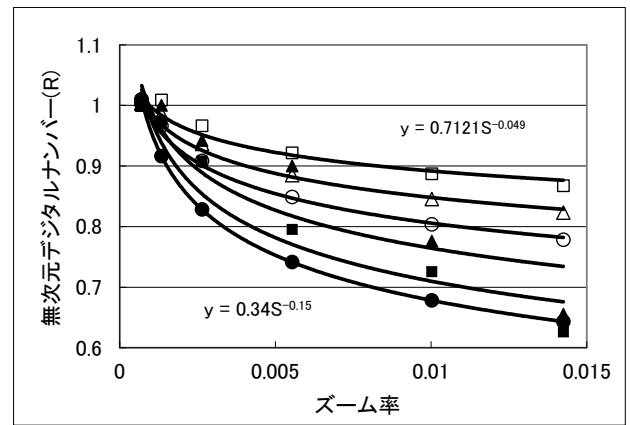


図-7 距離毎のズーム率と無次元デジタルナンバー

表-2 カメラからの距離毎の累乗近似曲線

カメラからの距離 (m)	シンボル	近似式 (S : ズーム率)
1	●	$0.3400S^{-0.15}$
5	■	$0.3743S^{-0.139}$
10	▲	$0.453S^{-0.1136}$
15	○	$0.5465S^{-0.0843}$
20	△	$0.6259S^{-0.066}$
25	□	$0.7121S^{-0.0488}$

$$\begin{aligned} &\frac{DN_{0, Xm, \text{任意のズーム率}}}{DN_{0, Xm, \text{ズーム最小}}} \\ &= (0.016Xm + 0.3062)S^{-0.1613\exp(-0.0369Xm)} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)を用いて以下の手順で、距離、ズーム補正を行った。但し、最大のズーム率 S は 0.014252 とする。

$$\begin{aligned} &\frac{DN_{0, Xm, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, Xm, \text{ズーム最小}}} \cdot \frac{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, 1m, \text{ズーム最小}}} \\ &= \frac{DN_{0, Xm, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, 1m, \text{ズーム最小}}} \cdot \frac{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, Xm, \text{ズーム最小}}} \\ &= C_1 \frac{DN_{0, Xm, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, 1m, \text{ズーム最小}}} \\ &= (0.016Xm + 0.3062) * 0.014252^{-0.1613\exp(-0.0369Xm)} \\ &\quad * (0.016 + 0.3062) * 0.014252^{-0.1613\exp(-0.0369)} \end{aligned} \quad (13)$$

ここに C_1 は次式である。

$$C_1 = \frac{DN_{0, 1m, \text{ズーム最大}}}{DN_{0, Xm, \text{ズーム最小}}} \quad (14)$$

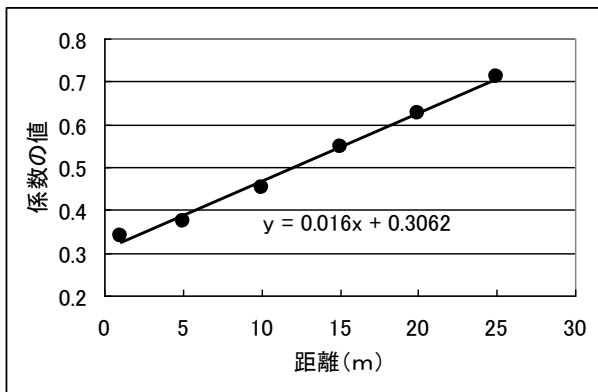


図-8 白板までの距離と係数 a との相関

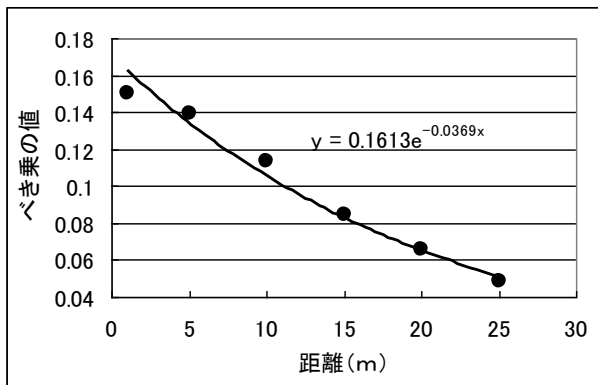


図-9 白板までの距離とべき乗 b との相関

実験によると、 C_1 の値は多少ばらつくが、平均的には一定値 0.65 と見なすことができる。

式(13)より、 $DN_{0,1m, \text{ズーム最小}}$ について次式が得られる。

$$DN_{0,1m, \text{ズーム最小}} = C_1 DN_{0,Xm, \text{ズーム最大}} \left[\frac{(0.016Xm + 0.3062) * 0.014252^{-0.1613 \exp(-0.0369Xm)}}{(0.016 + 0.3062) * 0.014252^{-0.1613 \exp(-0.0369)}} \right] \quad (14)$$

式(14)に式(7)を代入すると角度、距離、ズーム補正を行うことができる。

すなわち、 $DN_{\theta, Xm, \text{ズーム最大}}$ を、 $DN_{0,1m, \text{ズーム最小}}$ に変換することができる。この変換した DN に水深、水面補正を行うと、礫表面固有の DN の水面直下での値に変換することができる。

4. 現地でのデジタル画像の取得とクロロフィル量の測定

橋上からの礫付着藻類モニタリング手法開発のため、データ取得を実河川で(A河川、B河川)行った。場所の選定では、橋上から水面までの距離、河川の流れ、河床礫の可視化の鮮明度などを考慮しながら数箇所を調査した。橋上で安全に作業ができ、河原へのアクセスと礫付着藻



図-10 A河川での調査の様子、橋上からのデジタル画像

類の採取が可能な場所として 2 河川の 2 地点を選定し、現地調査を行った。

A河川では橋上から対象礫の水面での距離が 10m、角度が 16 度、B河川では橋上から対象礫の水面までの距離が 20.2m、角度が 38.2 度であった。

まず、対象礫を決定し、橋上からの距離、角度、水深を測定する。カメラのズーム率を最大にし、対象礫が画像の中心になるように撮影する。対象礫を川から採取し、表面の付着藻類を採取する。

対象礫の撮影した面を下にして、5 cm x 5 cm 穴の開いたゴム板を設置したスチール台の上に礫を設置する。ゴム板の下から、噴霧器で蒸留水を噴射しながら礫から歯ブラシで藻類をこすり落とし、大型パレットに集積する。パレット容器に入った藻類溶液に蒸留水を加えて 500ml とし、吸引ろ過装置で濾過する。濾過した濾紙をラップで包み、ドライアイスで冷凍して、実験室に輸送し、クロロフィル量の測定を行った。測定したクロロフィル a 濃度から礫の単位面積当たりの付着クロロフィル量を算定した。

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(15)の計算式でサンプル中のクロロフィル a 濃度を求めた。

$$Chl_{-a} = \frac{(11.64A_{663} - 2.16A_{645} + 0.1A_{630}) * \alpha}{V * L} \quad (15)$$

ここに、 A_n 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。

なお、デジタル画像からデジタルナンバーを読み取るために、「ERDAS IMAGINE8.6」を用いた。

5. 橋上から撮影したデジタル画像からのクロロフィル量の推定

A河川、B河川の橋上から撮影したデジタル画像から対象礫のデジタルナンバーを数点読み取り、その平均値を求めた。その値が $DN_{\theta, X_m, \text{ズーム最大}}$ であり、それぞれ測定した角度 θ 、距離 X_m を式(7)、式(14)に代入して、 $DN_{0,1m, \text{ズーム最小}}$ を算定する。さらにこの算定値に深さ、水面補正を行って、変換デジタルナンバーを算定する。

$$\begin{aligned} & \text{変換デジタルナンバー} DN(R) \\ &= DN_{0,1m, \text{ズーム最小}} * \exp(1.1 * Z_m) - 49.2 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)で算定した換算デジタルナンバー $DN(R)$ と礫表面単位面積当たりのクロロフィル量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)の実測値の相関を示したのが図-11である。○はA河川、B河川でのデータで、●は図-1のデータである。図中の近似曲線は図-1の近似曲線であり、式(17)で表わすことができる。データはこの曲線の周りに分布している。橋上からのデジタル画像から取得した DN に、距離、角度、ズーム、水深、水面補正を行って得られた変換デジタルナンバーを用いて式(17)から求めた推定値と実測値との相関を示したのが図-12である。相関係数は0.89で、変換デジタルナンバーへの補正手法の妥当性を示している。

$$\begin{aligned} & \text{クロロフィル量}(\mu\text{g}/\text{cm}^2) \\ &= 430.9 * \text{変換デジタルナンバー} DN(R)^{-1.14} \end{aligned} \quad (17)$$

多少の誤差を含むが、20m程度の高さの橋上からのモニタリングの可能性を示しており、この手法を用いることにより、比較的簡易な方法で、対象礫の付着藻類を連続してモニタリングすることができる。

6. 結論

橋上から撮影したデジタルカメラの DN に、角度、距離、ズーム補正を行い、さらに水面影響の補正、水深影響の補正を行なうことで、物体固有のデジタルナンバーに変換することができ、この変換デジタルナンバーを用いることで、単位面積当たりのクロロフィル量を推定するモニタリング手法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、橋上からのデジタル画像から、対象礫の現位置でのクロロフィル量を連続的に推定することができる。橋上からの簡易なモニタリングにより、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

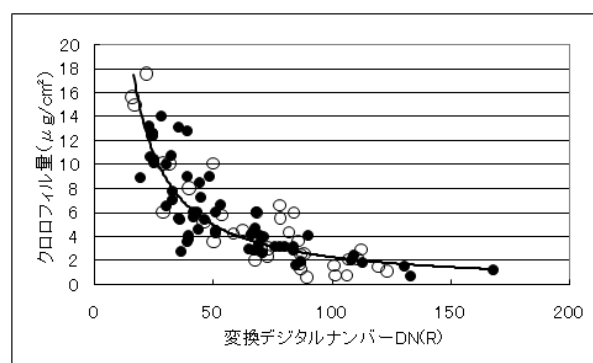


図-11 換算 DN 値 (R) と単位面積当たりクロロフィル量
(○: A, B河川 ●: 図-1 のデータ)

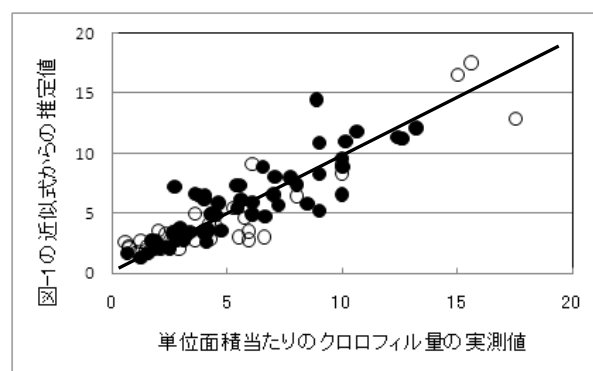


図-12 式(17)での推定値と実測値との相関
(○: A, B河川データ ●: 図-1 のデータ)

リングできる本手法は、河川管理技術として応用性が高いと思われる。

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

- 1) 菅 和利, 向井伸幸, 大西真弘: 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、河川技術論文集、Vol. 16、2010。
- 2) 菅 和利, 向井伸幸, 矢田崇恭, 前田修一: 橋上からのデジタル画像を用いた礫付着藻類クロロフィル量の推定法の開発について、第66回土木学会年次学術講演会、II-73、2011。
- 3) 菅 和利, 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。
- 4) 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。
- 5) 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。

(2012. 4. 5 受付)