デジタル画像を用いた「見た目アオコ指標」の自動判定の試み

吉田　拓司[1]・岡本　佳子[2]・末廣　富士代[3]
小原　和之[2]・吉田　武司[4]・二瓶　泰雄[5]・片岡　智哉[6]

[1]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社　環境計画部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋五丁目 20-8）
E-mail:tk-yoshida@yachiyo-eng.co.jp
[2]非会員　八千代エンジニヤリング株式会社　環境計画部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋五丁目 20-8）
[3]非会員　八千代エンジニヤリング株式会社　九州支店（〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸二丁目 1-5）
[4]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社　情報技術部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋五丁目 20-8）
[5]正会員　東京理科大学教授　理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
[6]正会員　東京理科大学助教　理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）

ダム貯水池や湖沼の富栄養化問題における象徴的な存在であるアオコのモニタリングでは，ダム・湖沼の管理者が目視による「見た目アオコ指標」の調査を実施している．これは，人為的な誤差が含まれるなど初歩的な問題を抱え，高精度かつ簡素なアオコモニタリング手法の開発が求められている．本研究では，デジタルカメラによる撮影画像から「見た目アオコ指標」に基づくアオコレベルを自動的に判定する簡易手法を開発することを試みる．そのため，夏季の霞ヶ浦を対象として，デジタルカメラによる水表面撮影と採水サンプルの水質分析（Chl.a等），目視によるアオコレベルデータを収集した．その結果，デジタルカメラ画像の RGB 値のうち，G（緑）と B（青）の差が Chl.a や目視のアオコレベルと良好な正の相関が確認された．これらの結果に基づいて，デジタル画像からアオコレベルを判定するフローを整理した．

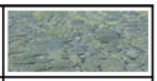
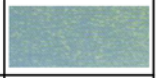
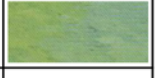
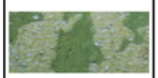
Key Words: *Visual cyanobacterial index, digital image, RGB value, lake Kasumigaura*

1. はじめに

ダム貯水池や湖沼における富栄養化問題については，発生メカニズム等の検討と共に [1]，曝気循環施設等の直接浄化対策や下水道整備等の流域対策による水質保全対策が実施されている．しかしながら，未だに富栄養化に伴うアオコやカビ臭の異常発生が確認される [2, 3]．近年，地球温暖化等の気候変動に起因して，水域の水温上昇や降雨量増加に伴う栄養塩流入により，アオコの原因となる藍藻類の異常増殖が懸念されていることから [4, 5]，アオコの対策についてより一層検討していく必要がある．

アオコの対策を考える上では，「発生原因の把握」，「対策案の選定」，「効果の把握」に従って検討する必要がある．これらにはアオコの実測データは必須であり，継続的・定期的なアオコモニタリングが不可欠となる．現状の定期的なアオコモニタリングとしては，ダム貯水池・湖沼管理上では，**表-1** に示す「見た目アオコ指標（Visual cyanobacterial index，以下 VCI と略す）」[3), 6)]を用いて目視によりアオコレベルを判別・記録することが一般的である．この手法は，簡便で日常の巡視の中で行え

表-1　見た目アオコ指標に基づくアオコレベル（国土交通省霞ヶ浦河川事務所 [3)] を再整理）

アオコレベル0	発生は見られない	
アオコレベル1	肉眼で確認できない（ネットで引いたり、白いバットに汲んでよく見ると確認できる）	
アオコレベル2	うっすらと筋状（アオコがわずかに水面に散らばり肉眼で確認できる）	
アオコレベル3	水の表面全体に広がり、所々パッチ状	
アオコレベル4	膜状にアオコが湖面を覆う	
アオコレベル5	厚くマット状に湖面を覆う	
アオコレベル6	スカム状(熱く堆積し、表面が白っぽくなり、紫、青の縞模様になることもある)に湖面を覆う	

るという長所がある．その一方，観測者の経験度合いにより判断に差が生じるなど人為的な誤差が生じやすいことや，少子高齢化に伴う労働者不足 [7]による日常巡視の負担増加が予想される．そのため，行政の水質管理上，同じ VCI に基づくモニタリングを行うとしても，より簡素で人為的誤差を排除したモニタリング手法の開発が必要となる．

また，人工衛星を用いて，広範囲にわたる水域のクロロフィル a 濃度（以下，Chl.a）推定が多く実施されている [8)~10)]．特に，Oyama ら [10)] は衛星画像を用いた VCI に基づくアオコレベルを推定し，その手法を検証している．現在の人工衛星の小型化，センサの多様化を考えると，近い将来，高頻度・高解像度の人工衛星モニタリングが多分野で進み，アオコモニタリングにも適用されると考えられる．ただし，現段階では，日常的な水質管理に人工衛星の利用は少ないため，上述した日常巡視に伴うアオコモニタリングが有用と考えられる．

これらの状況を鑑みて，著者らは，スマートフォンによる湖面の写真撮影によるアオコレベルの自動判別システム（もしくはアプリ）の開発を最終目標としている．これを具現化するべく，本研究では，デジタルカメラにより撮影されるデジタル画像から，VCI に基づくアオコレベルを自動的に判定する簡易手法を構築することを試みる．そのため，①茨城県・霞ヶ浦を対象とした現地調査を夏季に実施し，デジタルカメラによる水表面撮影と採水サンプルの水質分析（Chl.a 等），目視によるアオコレベルデータを収集する．②これらの結果に基づいて，デジタル画像の RGB 情報と Chl.a・アオコレベルの関係性を明らかにすると共に，アオコレベルの自動判定アルゴリズムを構築する．さらに，③行政管理者が実施した既存のアオコレベル判別データに対して本手法を適用し，本手法の妥当性・汎用性について検証する．

図-1　観測地点マップ

表-2　調査日と調査項目

日付	時間	天気	地点	撮影枚数	アオコレベル	分析
2017/6/30	10:20～10:23	曇	Stn.1	3	0	
7/6	14:19～15:54	晴	Stn.2-6	26	0	
7/19	15:52～16:46	晴	Stn.7-9	7	0	
8/24	10:43～15:12	晴	Stn10-11	3	0、2	Chl.a 細胞数
9/10	10:46～15:08	晴	Stn.12	14	1,2,3,4,5	Chl.a

図-2　写真撮影状況と採水方法の模式図

2.　研究手法

(1)　研究対象サイト

霞ケ浦は，**図-1** に示すように，西浦・北浦などからなり，湖面面積は 220km^2 の全国第二位，平均水深は約 4m の浅い湖沼である．流域面積は 2,157km^2 と茨城県全体の約 1/3 を占め，流域人口は 97 万人（H17 年現在）である．長年，富栄養化問題に悩まされ，特にアオコの異常発生が問題となっているため，国 [3)] や茨城県 [11)] によるアオコモニタリングが行われている．

(2)　現地調査方法

現地調査では，デジタルカメラによる湖面の撮影と合わせて，目視によるアオコレベルの判定，アオコが発生している地点の一部では採水し，Chl.a や細胞数の分析を行った．調査地点としては，過去のアオコ発生状況 [3)] を参考に，**図-1** に示すように，北浦では山田川合流付近～武田川合流付近，長野江川合流付近，西浦では 17.5～30.75km，霞ポートを選んだ．調査日と調査項目は，**表-2** に示す通りであり，2017/6/30，7/6，7/19 はアオコレベルの確認とデジタル画像の取得のみであり，8/24 と 9/10 では，これらに加えて採水を行い，Chl.a の分析（両日）と植物プランクトンの種の同定と細胞数の計数（8/24 のみ）を実施した．いずれの観測日も天気は概ね晴れで（6/30 のみ曇り），静穏な波浪状況であった．なお．1 地点でも複数個所で写真撮影や採水を行っており，例え

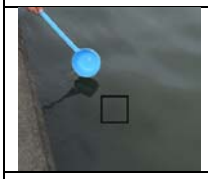
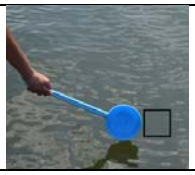
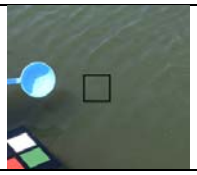
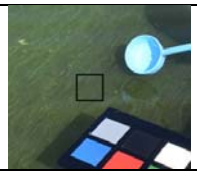
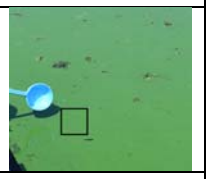
アオコレベル 0	アオコレベル 1	アオコレベル 2	アオコレベル 3	アオコレベル 4	アオコレベル 5
					
Chl.a：21.0μg/l	Chl.a：8.4lμg/l	Chl.a：42.8μg/l	Chl.a：196μg/l	Chl.a：704μg/l	Chl.a：3877μg/l

図-3　各アオコレベルの典型的な画像と Chl.a の分析値（2017/8/24，9/10 に実施．図中□部で採水し分析．）

ば Stn.12 では武田川河口付近で 14 か所調査を実施した．

デジタル画像の取得には，一眼レフカメラ（DIGITAL CAMERA D5300，㈱Nikon 製）を使用し，**図-2** に模式的に示すように湖岸そばから湖面を撮影した．研究開始当初，撮影画像が光条件の影響を強く受ける可能性が懸念されたため，リファレンス試料として，明るさの補正を行うために，白，黒，その中間色の灰色を選定し，さらに本検討で用いる RGB 情報との比較も確認するために，赤，緑，青を選定した．これらの 6 色を塗ったしたアクリル板（約 30cm 四方）を，ほぼ水平となるように配置して撮影した．

採水する際には，アオコが表面付近に集中的に分布することを考慮し，水表面付近の水を柄杓で約 1L 採取した．採水試料は冷暗所に保持し，Chl.a は SCOR/UNESCO 法 [12]，細胞数は顕微鏡分析により実施した． なお，採水時に，後述の画像解析対象のエリアに影が映らないように，柄杓の位置に注意して撮影した．

(3)　デジタル画像の解析手法

デジタルカメラの撮影画像に関する解析では，最もベーシックなものとして，対象画素の RGB 値（各々0～255）の抽出とその四則演算を実施した．まず，Chl.a やアオコレベルと RGB 値の相関関係を得る際には，採水地点近傍における 25 pixel×25 pixel（計 625 pixel）の R 値（赤）と G 値（緑），B 値（青）の値の平均値を算出した．合わせて，RGB 値の差・比演算も行った．また，リファレンス試料を用いた光補正としては，サンプル箇所の RGB 値の演算結果を，各色における RGB 合計値で除す比演算を用いた．

3.　結果と考察

(1)　Chl.a とアオコレベルの関係性

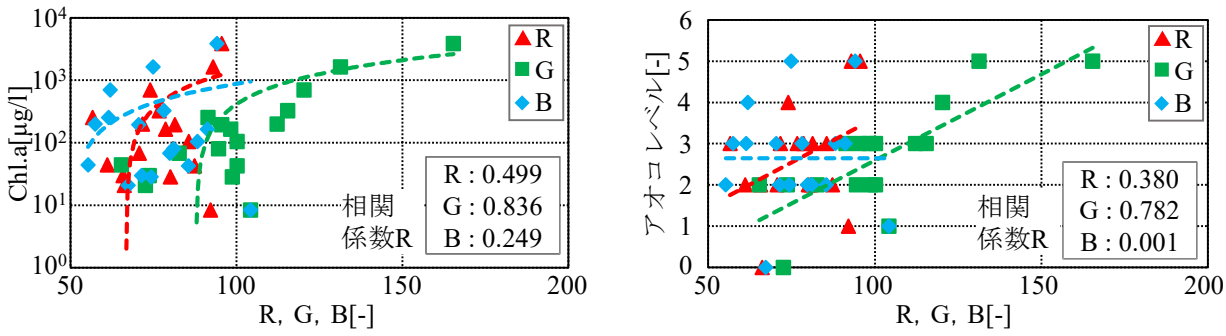
デジタル画像の RGB 値と Chl.a，アオコレベルの相関関係を検討する前に，各アオコレベルの典型的なデジタル画像とその時の Chl.a を**図-3** に示す．ここでは，アオコレベル 0～5 における 6 枚の画像を表示している．これより，アオコレベルが大きくなると共に，水表面の緑色が顕著になっている様子が分かる．アオコレベルと Chl.a の関係としては，アオコレベル 0・1，2，3・4，5 でそれぞれ Chl.a は 1，10，100，1000 のオーダーとなっており，アオコレベルが 1 もしくは 2 上がると，Chl.a が 1 桁増加することが分かる．なお，細胞分析の結果，本研究で対象とするアオコは「*Microcystis*」が優占種（79.6～85.6%（アオコレベル 2））であり，既往検討と同じ傾向であることを確認した [12]．

(2)　Chl.a・アオコレベルと RGB 値の比較

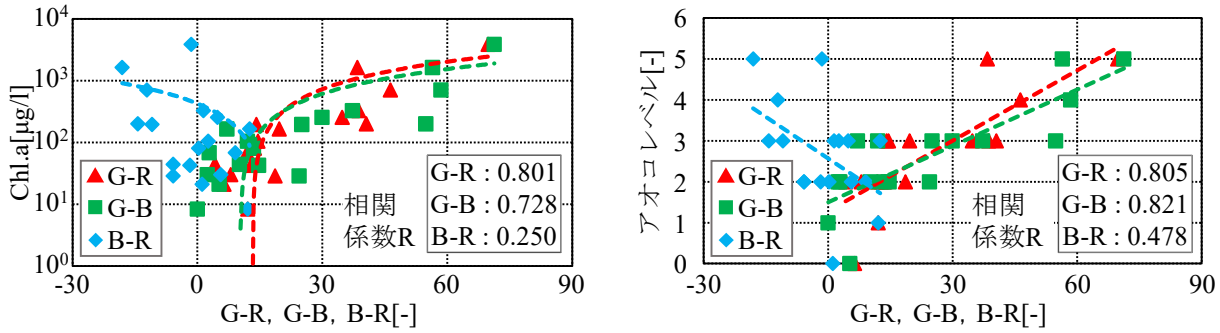
このような Chl.a やアオコレベルと，デジタル画像の RGB 値の相関図を**図-4** に示す．ここでの RGB 値としては，対象範囲（625 pixel）における R 値，G 値，B 値の平均値（**同図(a)**），この G 値と R 値の差（以下，G-R 値）及び G-B 値，B-R 値（**同図(b)**），G/R 値，G/B 値，R/B 値（**同図(c)**）をそれぞれ示す．このうち，G/R 値などの比演算はリモートセンシングデータ解析におけるバンド間演算で一般に用いられる [13]．この比演算を行う際にも，バンド間の輝度値の差を取り，その比を取ることも多い（例えば，植生指標の NDVI[13]）．そのため，このバンド間の差に相当するのが，G-R 値等の差の演算である．また，図中には，Chl.a・アオコレベルに対して近似式を当てはめ，得られた相関係数 R も示す．

これより，R，G，B 値に着目すると，Chl.a とアオコレベル共に G 値とは正の相関が認められる一方，R 値や B 値とは明確な相関関係は見られない．この 3 つの中では G 値との相関性が高く，その相関係数は Chl.a に対しては 0.84，アオコレベルに対しては 0.78 である．次に，G-R 値と G-B 値，B-R 値に関しては，G-R 値と G-B 値は正の相関が見られ，G 値の影響が表れている．この二つの相関係数は B-R 値の場合よりも高く，Chl.a に関しては G-R 値では 0.80，G-B 値では 0.73，アオコレベルに関してはそれぞれ 0.81，0.82 となる．比演算の G/R 値，G/B 値，R/B 値に関しては，概ね正の相関関係が得られるが，相関係数 R が最も高い G/R でも Chl.a では 0.63，アオコレベルでは 0.74 となっている．以上より，これらの RGB 指標の中では，G 値及び，G-B 値や G-R 値の差演算を用いた場合が，Chl.a やアオコレベルとの相関性が高いことが明らかとなった．

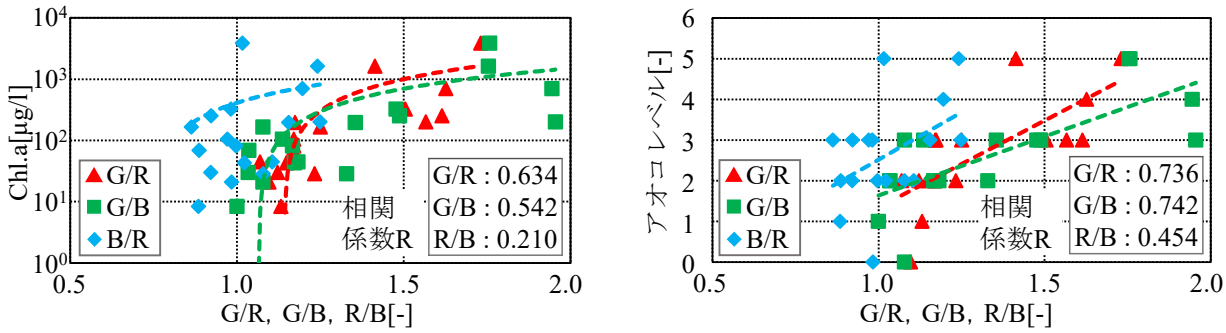
(3)　リファレンス試料の効果検証



(a)R 値，G 値，B 値



(b)G-R 値，G-B 値，B-R 値



(c)G/R，G/B，R/B 値

図-4　Chl.a・アオコレベルと RGB 値の相関関係（図中の点線は，各データに対する近似式を示す）

リファレンス試料による画像解析精度向上の効果を検討するために．上記で精度の高かった G-B，G-R 値をリファレンス試料の各 6 色の値（RGB 合計値）で除して得られた補正値と，Chl.a 及びアオコレベルの相関係数を整理した結果を確認した（図省略）．その結果，G-B，G-R 値共に，黒系以外の色で補正をした場合は高い相関関係が認められたが，いずれもリファレンス資料を用いなくてもほぼ同程度となった．そのため，本論文では，リファレンス試料を用いた光補正を行わずに画像解析を実施する．今回は，太陽高度の高い時間に撮影が行われたため，リファレンス試料による補正が不要であったが，様々な時間帯での撮影を考慮すると光補正は必要であり，今後，詳細に検討する必要がある．

(4)　アオコレベルの判別指標の選定と自動判別手法

上記に基づいてアオコレベルを判定する際に，アオコレベルが 2 以上のデータは多く含まれていたが，アオコレベル 0 や 1 は非常に少ない（n=1）．そこで，6/30，7/6，7/19 に多く得られたアオコレベル 0 に対する画像のうち，水面に影を含まない画像を抽出した（n=79）．その画像に対する G，G-R，G-B 値の累積頻度分布を**図-5** に示す．これより，累積値 90%を一つの基準とすると，G，G-R，G-B 値はそれぞれ 158，25，3 となった．これらと**図-4** の結果を比べると，G 値が 158 では近似式によるアオコレ

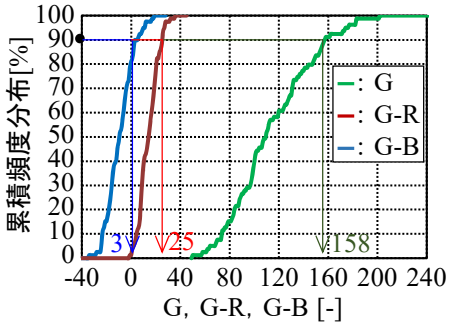
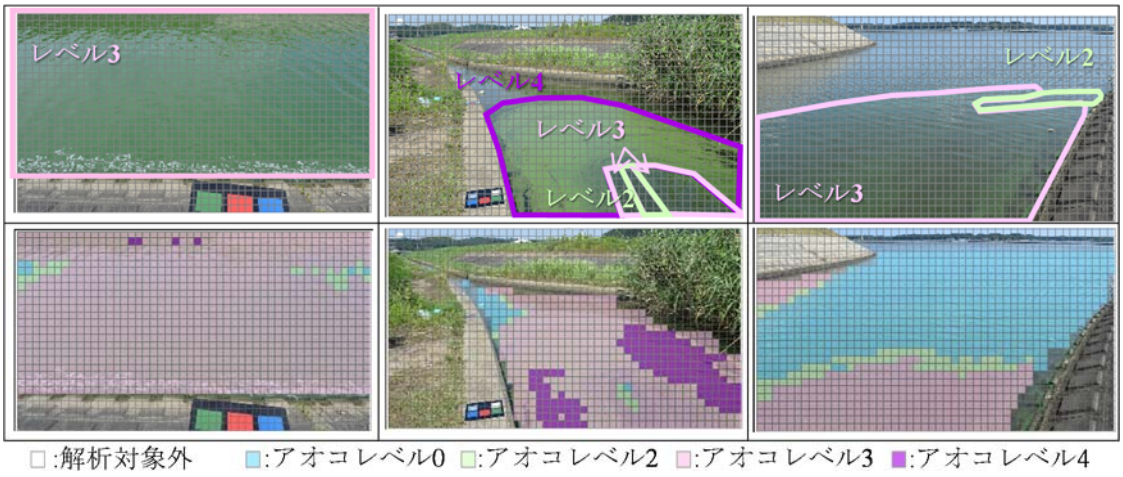
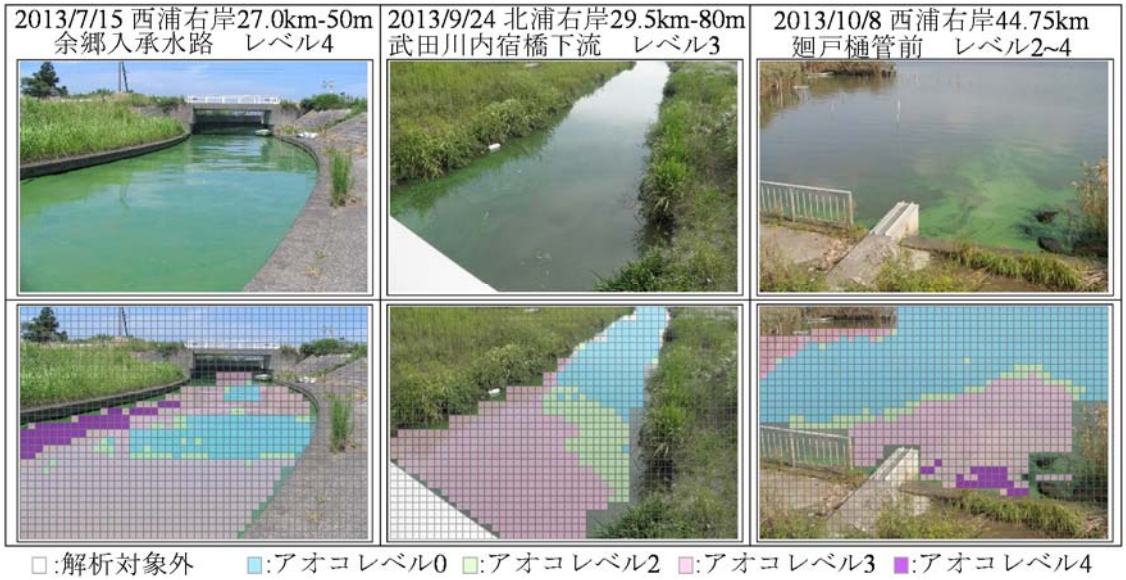


図-5　アオコレベル 0 の G，G-R，G-B 値の累積頻度分布



(a) 著者らによる撮影画像



(b) 国交省・霞ヶ浦河川事務所による撮影画像[3)]

図-6 アオコレベルに関する目視の判定結果と本手法の推定結果の比較（上段：元画像と目視判定結果，下段：推定結果）

ベルはほぼ5に相当し，G-R値が25の時には近似式によるアオコレベルは2と3の間である．一方，G-B値が3の時では，近似式によるアオコレベルは1と2の間になっており，三者の中ではG-B値が最も適している．

以上より，G-B値を用いてアオコレベルの自動判定を行う．アオコレベル1は，肉眼では確認できず，デジタル画像でも認識できない可能性が高いため，ここではアオコレベル0と同一ランクとする．また，アオコレベル4以上もサンプル数が少ないため，同一のランクに扱う．そこで，アオコレベルを「0・1」，「2」，「3」，「4以上」の4ランクに分け，G-B値の閾値を**図-4**より選定すると，それぞれ2.4，7.1，55となった．以上をまとめると，アオコレベルの自動判別手法としては，

① 解析対象画像の25×25pixelのRGB値を平均する．
② G-B値を求め，閾値2.4，7.1，55との大小関係より，アオコレベル「0・1」，「2」，「3」，「4以上」を判別する．

(5) 本手法によるアオコレベルの推定結果

本手法により湖面のデジタル画像に対するアオコレベルの推定結果を**図-6**に示す．ここでは，著者ら及び管理者（国交省・霞ヶ浦河川事務所）の撮影画像と目視によるアオコレベル判定結果を表示している．なお，著者らの画像は，**図-4**には含まれていない結果である．まず，著者らの画像に対しては，本手法の推定結果はいずれも目視の判定結果と概ね一致している．次に，管理者の撮影画像に対しても，本手法はアオコレベル3までは概ね一致する結果が得られている．ただし，アオコレベル4に関しては，過小評価傾向であり（**図-6** (a)中央の画像や，**同図**(b)左の画像），今後，閾値の見直しなどが必要となる．また，写真の手前側（撮影者近傍）は概ねアオコレベルを再現できているが，遠方は再現できていない場合が多い（**同図**(b)中央）．そのため，画像解析には，撮影地点近傍を選定する必要があることが示唆され

る．今後は，情報を蓄積し，さらなる判定精度の向上や境界条件の検証を行う必要がある．

4. まとめ

本研究で得られた結論は以下のとおりである．

1）アオコ発生地点のアオコレベルを記録し，採水した場所の Chl.a とデジタル画像の RGB 情報を比較したところ，G 値及び，G-B 値や G-R 値の差演算を用いた場合が，Chl.a やアオコレベルとの相関性が高かった．

2）リファレンス試料による画像解析精度向上の効果を検討したが，本検討では太陽高度の高い時間に撮影が行われたため，補正が不要であった．そのため，今後は様々な時間帯で撮影し，検討する必要がある．

3）アオコレベル 0 の画像を対象に G 値，G-B 値，G-R 値の累積頻度分布の 90%値を基準とすると，G 値はアオコレベル 5 相当，G-R 値は 2 と 3 の間，G-B 値は 1 と 2 の間と，G-B 値がアオコレベルの自動判定に適している事が示された．

4）著者ら及び管理者の目視によるアオコレベル判定結果と，本手法を用いた推定結果を比較したところ，撮影地点近傍では目視の判定結果と概ね一致した．

謝辞：本研究において，現地調査時の採水試料の取り扱い方やアオコ確認方法等ついて，ABES 主任研究員田辺雄彦氏，藻類研究所分析センター福嶋悟氏に多大なるご助言を頂いた．ここに記して，深甚なる謝意を表します．

参考文献

1) 例えば，岩佐義郎：湖沼工学，pp.1-504，山海堂，1990.
2) 木村文宣，塩見裕亮，富岡浩，高橋定雄：ダム貯水池におけるアオコ発生予報技術の研究開発，平成 26 年度水源地環境技術研究所所報，pp.3-7，2014.
3) 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所：アオコ対策作業状況，http://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00313.html（閲覧日：平成 29 年 9 月 28 日）．
4) 梅田信，落合雄太：気候変動による国内のダム水質への影響評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.5，pp.I_127-I_135，2012.
5) 杉浦則夫：地球温暖化で変わる水環境　歴史と文化から水質を知る，水マネジメント，Vol.23，pp.2-5，2014.
6) 森田昌敏，福島武彦，今井章雄，松重一夫：湖沼環境指標の開発と新たな湖沼環境問題の解明に関する研究，国立環境研究所特別研究報告，SR-24，pp.1-52，1998.
7) 平成 28 年度国土交通白書：国土交通省，pp.2-3，2017.
8) 圓佛伊智朗，馬場研二，岡憲一郎，依田幹雄，原 直樹：衛星データ利用による水圏監視技術の検討，環境システム計測制御学会，Vol.1，No.2，pp.194-197，1996.
9) 作野裕司，神野有生，鯉渕幸生：リモートセンシングによる浅水域の SS・クロロフィル同時推定，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1026-1030，2010.
10) Oyama, Y., Fukushima, T., Matsushita, B., Matsuzaki, H., Kamiya, K. and Kobinata, H.: Monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI), *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.38, pp.335-348, 2015.
11) 茨城県霞ケ浦環境科学センター：霞ケ浦のアオコ情報，http://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/04_kenkyu/aoko/aoko.htm（閲覧日：平成 29 年 9 月 28 日）．
12) 本間隆満：霞ヶ浦における植物プランクトン群集の分布，茨城県霞ケ浦環境科学センター年報，No.1，pp.85-92，2005.
13) 日本リモートセンシング学会編：基礎からわかるリモートセンシング，理工図書，pp.1-319，2011.

（2017.9.29 受付）

ATTEMPT OF AUTOMATIC JUDGEMENT OF THE VISUAL CYANOBACTERIA INDEX (VCI) USING DIGITAL IMAGES

Takushi YOSHIDA, Keiko OKAMOTO, Fujiyo SUEHIRO
Kazuyuki OHARA, Takeshi YOSHIDA, Yasuo NIHEI, Tomoya KATAOKA

The overgrowth of cyanobacteria, which causes Algal bloom will continue to be a major concern regarding the eutrophication problem in dam reservoirs and lakes. The current main-stream monitoring method of Algal bloom is visual examination, in which administrators of dam reservoir and lake keep records using “Apprearance Algal bloom Index” in daily patrolling. However, with this method, there is a limitation to the detailed analysis and grasp of Algal bloom because of the limit of Algal bloom’s confirmation place or the possibility of human errors, etc.. In this study, in order to make an automatic judgment of the “Algal bloom level” described in "Appearance Algal bloom Index" from digital images, the images of Algal bloom were taken and the water quality in Kasumigaura were analyzed. As a result, the relationship was found between “G-B level” and Chl.a or “Algal bloom level”. In addition, the usefulness of the automatic judgment of Algal bloom level using digital images in which Algal bloom is actually occurring was demonstrated through this study.