

## 沈水植物の再生による湖沼の水質改善に関する予測手法

仲 沢 武 志      島 多 義 彦  
袋   昭 太      武 田 文 彦 \*<sup>1</sup>  
中 野 和 典 \*<sup>2</sup>

### 概 要

湖沼などの閉鎖水域では、富栄養化による植物プランクトンの発生が水質汚濁の問題を生じさせることがある。富栄養化により汚濁した湖沼の水質改善への対応方法は種々考えられるが、水生植物群落を再生するなどのような自然の生態系が持つ浄化機能を用いる手法が周囲への悪影響も少なく安全に実施でき、また省エネルギーの観点からも優位性が高いものと考えられる。これに対して、筆者らは沈水植物の再生とその浄化機能を活用した湖沼の水質改善を試みてきている。沈水植物による水質改善を効果的かつ合理的に適用するためには、その挙動を事前に予測する手法が必要となる。本報告では、沈水植物が湖沼の水質に及ぼす影響を予測または評価できる計算手法を考案し、その水質改善の評価を試みた。

### Method for predicting water quality improvement in enclosed waters by using spontaneous regeneration functions of submerged plants

#### Abstract

Enclosed bodies of water, such as lake and ponds can have problems of water quality due to eutrophication. There are many methods that can be used to counteract eutrophication in these bodies of water. Spontaneous regeneration using submerged plants function is a very safe and low-energy method of remediating eutrophicated water. Although some authors have previously studied remediation using submerged plants empirically, no methods for predicting their effects had been developed. This study proposes a method for calculating the effects on water quality of submerged plants and considers its applicability.

キーワード： 湖沼 水質 沈水植物  
浄化 予測 解析

\*1 東北大学大学院工学研究科 研究員

\*2 東北大学大学院工学研究科 准教授

## §1. はじめに

従来から、環境問題は、大気や水質、また土壌・地下水における化学的な汚染には大きな関心が寄せられ、法律や条例が制定されることで、行政的に対応されている。

一方、河川、貯水池や湖沼では、人為的な化学的汚染だけでなく、富栄養化による水質悪化の問題が生じている。特に、閉鎖性水域においてはその傾向が強いことが指摘されている。水環境の富栄養化は、植物プランクトンの異常発生により汚濁し臭を生じたり、飲料に供する場合には、その毒性も懸念されている。また、閉鎖性水域がため池のような場合には、富栄養化による水質悪化により農業用水として利用できないという被害も発生しており、その対応が求められる。

水辺環境は、飲料や産業利水だけでなく、生物の生育やレクリエーションの場としての役割もあり、最近世界的に対応が求められている「生物多様性」にも関連した問題であり、水域の自然再生は急務である側面も持っている。

閉鎖性水域における富栄養化への対応策には、曝気や浚渫・覆土、水生植物等の生態系を活用する方法などが考えられる。当社は、従来からこの問題に対して、フェスタ工法を提案し、抽水・沈水植物の特性を合理的に活かした手法でその対応を試みていて、実証試験の実績を重ねている。

本文では、水域の富栄養化に対する沈水植物の再生による改善過程を評価・予測し得る解析手法を確立することを目的とした。さらに、その適用性を計算例で示し、現地の実施条件に応じた効率的な計画を行う等、今後の展開を合理的に実施するための基礎を提供する。

## §2. 予測における支配方程式

本予測手法は、湖沼内の流動を求めるための流体解析と対象物質の濃度を求める物質移行拡散方程式から構成される。

流動計算には、通常の流体解析で使われている Navier-Stokes の方程式や N-S 方程式において深さ方向の流速を一樣と仮定した浅水方程式が用いられる。また、クロロフィルや栄養塩の濃度が時間的に変化する様子は物質移行拡散方程式を基本とする。なお、湖沼内では、計算対象とする物質の濃度は、種々の条件のもとに相変化が発生する。そのため、このような物質相変化のもとでの収支を生成項として考慮する必要がある。この挙動は、物質循環モ

デルとして計算に組み込まれる。これらの支配方程式を以下に示す。

湖沼内の流れの分布は以下の計算式から得られる。

(Navier-Stokes 方程式)

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + v_{kl} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_k \partial x_l} + f_i \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \quad \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

(浅水方程式)

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + v_{kl} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_k \partial x_l} + f_i \quad (3)$$

$$\text{ただし、} \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + H \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $v_i$ :流速、 $P$ :圧力、 $v_{kl}$ :流体物性、 $\zeta$ :水位、 $H$ :水深、 $f_i$ :外力を表している。

また、湖沼内の対象物質の時間変化は以下の物質移行拡散方程式から基本的に得られる。

$$\frac{\partial C^{(i)}}{\partial t} + v_k \frac{\partial C^{(i)}}{\partial x_k} = D_{kl}^{(i)} \frac{\partial^2 C^{(i)}}{\partial x_k \partial x_l} + \Gamma^{(i)} \quad (5)$$

右肩上のカッコ内の  $(i)$  は湖沼内の対象構成物質の相を表すものとする。また、 $\Gamma$  は物質循環による生成項であるが、実際の解析モデルでは1階の時間微分の形となる。

## §3. 物質循環モデル

湖沼内の物質循環を構成する対象物質の濃度変化を実際に計算するためには、式(5)の物質循環による生成項  $\Gamma^{(i)}$  を構成物質ごとに決める必要がある。本文においては、細井等<sup>1)</sup>が琵琶湖に適用したモデルを基礎として若干の改良を施したモデルで解析する。

なお、本文では、計算モデルの対象となる物質を以下のように設定して考えるものとする。(本文中記号併記)

- (1) 植物プランクトン ( $P$ )
- (2) デトリタス ( $P_D$ )
- (3) 無機態窒素 ( $C_{DIN}$ )
- (4) 堆積層窒素 ( $N$ )
- (5) 無機態リン ( $C_P$ )
- (6) 堆積層リン ( $F$ )

ここに、植物プランクトンにおいては、単相モデルと藍藻、緑藻、珪藻と分離した3相モデルとを考えている。これらの関連の様子を図1に示す。また、上記物質の内、堆積層で

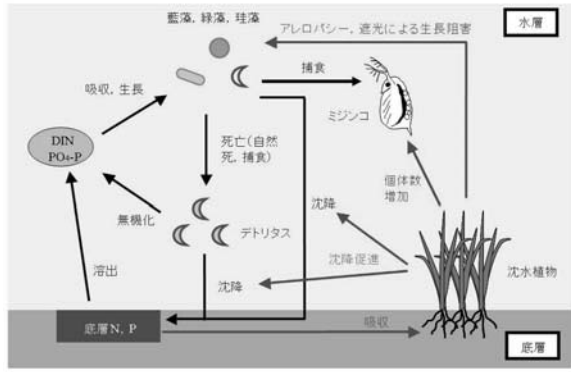


図1 物質循環概念図

の窒素とリンに関しては式(5)左辺第2項の移流項は考えなくてよいこととなる。

各相の計算に用いる生成項を以下に示す。

(1)植物プランクトン

植物プランクトンに対する生成項 $\Gamma$ を次式に示す。

$$\Gamma = \frac{\partial P}{\partial t} = (G_p - D_p)P - \gamma(1 + k_{SD}W)P \quad (6)$$

ここに、

$$G_p = \mu_{\max} \times f_s \times \frac{C_{DIN}}{K_N + C_{DIN}} \times \frac{C_{DIP}}{K_P + C_{DIP}} \times \frac{L_{AVG}}{K_I + L_{AVG}} \times f_T - k_{AS}$$

$$D_p = R_{CP} + C_g \times \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \times Z(1 + k_ZW)$$

$$k_{AS} = 1.10 \times \frac{W}{W + 4.91} \exp[-7.75 \times 10^{-3} \times P]$$

$$L_{AVG}D = \int_0^D L_0 \exp(-kt) dt = \frac{L_0}{-k} [\exp(-kD) - 1]$$

$$k = \theta P + \theta' \times W$$

本文では、単相モデルでも3相モデルでも植物プランクトンに対する生成項の形は同じ式(6)で考える。藍藻、緑藻および珪藻の違いはその中の係数が変わるものとして扱うものとする。

式(6)の最右辺は、 $G_p$ が植物プランクトンの増殖に関する係数、 $D_p$ が死滅に関する係数であり、第2項が自然沈降と植物群落による沈降の促進を表している。

なお、3相モデルを考える場合には、式(6)が各植物プランクトンに対して用いられることになり、植物プランクトンだけでも3元の連立微分方程式になることに注意する。

(2)デトリタス

デトリタスに対する生成項は以下に示す式で扱う。

$$\Gamma = \frac{\partial P_D}{\partial t} = D_p P - \gamma'(1 + k_{SD}W) - \nu' P_D \times f'_T \quad (7)$$

式(7)最右辺第1項は植物プランクトンの死滅、第2項はデトリタスの沈降、第3項はデトリタスの無機化を表している。

なお、式(7)中の植物プランクトン $P$ は単相モデルでは

そのもの、3相モデルでは全植物プランクトンの総計として扱う。

(3)無機態窒素

無機態窒素の生成項は以下に示す式で扱う。

$$\Gamma = \frac{\partial C_{DIN}}{\partial t} = -\beta_N G_p P + \nu_N N \times f'_T + \nu' \beta_N P_D \times f'_T \quad (8)$$

式(8)最右辺第1項は植物プランクトンによる吸収、第2項は堆積層窒素の無機化、第3項はデトリタスの無機化を表している。なお、式(8)最右辺第1項の $G_p P$ は植物プランクトンが単相の場合は値そのもの、3相の場合は各相で $G_p$ を計算し、対応した植物プランクトン濃度に乗算した上で総計するものとして扱う。

(4)堆積層窒素

堆積層窒素に関しては以下の生成項を用いる。

$$\Gamma = \frac{\partial N}{\partial t} = -\nu_N N \times f'_T + \gamma(1 + k_{SD}W) \times \beta_N P + \beta_N \gamma'(1 + k_{SD}W) P_D - k_{RN} W \quad (9)$$

式(9)最右辺第1項は堆積層の無機化、第2項は植物プランクトンの沈降、第3項はデトリタスの沈降、第4項は沈水植物の根による堆積層窒素の吸収を表している。なお、デトリタスや無機態窒素と同様に、式(9)の最右辺第2項における植物プランクトンに関する項は、単相の場合はそのものを、3相モデルの場合は各植物プランクトンの総計を用いる。

(5)無機態リン

無機態リンの生成項は基本的に無機窒素と同じ形の定式化で扱う。

$$\Gamma = \frac{\partial C_{DIP}}{\partial t} = -\beta_N G_p P + \nu_N F \times f_T^2 + \nu' \beta_N P_D \times f_T^2 \quad (10)$$

植物プランクトンは無機態窒素と同様な扱い方となる。各項の内容は無機態窒素と同じ意味を表している。

(6)堆積層リン

堆積層リンの生成項もまた基本的に堆積層窒素と同様に以下の式で計算する。

$$\Gamma = \frac{\partial F}{\partial t} = -\nu_N F \times f_T^2 + \gamma(1 + k_{SD}W) \times \beta_N P + \beta_N \gamma'(1 + k_{SD}W) P_D - k_{RN} W \quad (11)$$

植物プランクトンは堆積層窒素と同様な扱い方となる。各項の内容は、無機態リンと同様、無機窒素と同じ意味を表している。式(6)から式(11)における記号をまとめて表1に示す。

§4. 計算方法

§2.および§3.で本文における支配方程式を示した。実際の計算では、植物プランクトンが単相の場合6元の連立微分方程式となり、3相の場合には8元の連立微分方程式となる。

表 1 記号説明

$P$ : クロロフィル濃度	$\mu_{max}$ : クロロフィルの最大比増殖速度
$P_D$ : デトリタス濃度	$f_s$ : 光に関する係数 $f_s = 1$ in light, $f_s = 0$ in dark
$C_{DNR}$ : 無機態窒素	$K_N$ : 窒素の半飽和定数
$N$ : 堆積層窒素	$K_P$ : リンの半飽和定数
$C_{DP}$ : 無機リン	$f_T$ : 水温に関する係数 藍藻 $f_T = 1$ if $T \geq 25$ else $f_T = T/25$
$F$ : 堆積層リン	緑藻 $f_T = 1$ if $T \geq 20$ else $f_T = T/20$
$k_{AB}$ : アレロパシー係数	珪藻 $f_T = 1$ if $T \geq 15$ else $f_T = T/15$
$\gamma$ : クロロフィルの沈降速度	$\nu'$ : デトリタスの分解速度
$k_{SD}$ : 植物群落による沈降の促進係数	$f_T'$ : 水温係数
$R_{DP}$ : 植物プランクトンの死滅速度	$f_T' = 1$ if $T \geq 20$ else $f_T' = T/20$
$C_p$ : 動物プランクトンの過速度	$\nu''$ : デトリタス沈降速度
$K_{PP}$ : 飽食効果に関するミカエリス定数	$\nu_N$ : 堆積層 $N$ 分解速度
$Z$ : 動物プランクトン炭素量換算係数	$\beta_N$ : 植物プランクトンの $N/Chla$ 比
$K_P$ : 植物群落による動物プランクトンの増加係数	$K_{DN}$ : 地下茎の $N$ 吸収
$W$ : 植物群落バイオマス	$\nu_P$ : 堆積層 $P$ 分解速度
$\theta$ : 植物プランクトンによる光の減衰定数	$\beta_P$ : 植物プランクトンの $F/Chla$ 比
$\theta'$ : 沈水植物による光の減衰	$K_{RP}$ : 地下茎 $P$ 吸収
$L_0$ : 水面の光強度	

このように得られた6元あるいは8元の微分方程式を汎用性のある形で計算するためには、何らかの手法により離散化して数値解析で計算することとなる。本文では、空間を有限要素法でまた時間領域を前進差分で離散化して計算する。なお、式(1)あるいは式(3)での流動計算および式(5)による各相の濃度変化の計算は、時間に関する実質導関数の性質から計算における安定化を必要とする場合が生じる。本文でも PSPG/PUPG 等の安定化を必要に応じて施すこととしている。

§5. 計算例

本文で示した計算手法はまとめて水質予測モデルとされている。本章では、ここまで説明した水質予測モデルの適用性を計算例で示す。

本文では、湖沼内に存在する対象物質の濃度変化に主眼をおいているため、物質循環に関しては詳細に記述した。しかしながら、流動計算においては § 2. で式(1)あるいは式(3)を用いることを示しただけで、流動現象が生じる原動力を明記していない。流動現象を生じさせる要因は、流入・流出、風応力による流れなど種々考えられるが、ここでは風による湖沼内の流動現象を考えて対象物質濃度の時間変化への影響を考えるものとする。

風応力は式(1)あるいは式(3)の外力項  $f_i$  で考慮されるが、ここではその具体的な形に次式を用いる<sup>2)</sup>。

$$f_i = \frac{1}{\rho} \tau_i = \frac{1}{\rho} \gamma_a W_i \sqrt{W_k W_k} \quad (12)$$

なお、ここに  $W_i$  は風速ベクトルを示している。

本来は、対象区域の風データを計測した上で式(12)に反

映させて湖沼内の流速を求めて、式(5)に代入することで、物質濃度変化を計算することとなる。

また、水草が存在することで、その領域には一種の流速に関する抵抗が発生することが考えられる。流速抵抗に関しては、以下の2種類のどちらかで表現できる。

$$f_i^R = -\alpha v_i \quad (13)$$

あるいは、

$$f_i^R = -\alpha v_i \sqrt{v_k v_k} \quad (14)$$

本計算例では、湖沼内の物質循環をここでの定式化が適切に表現できるか？その際に湖沼内の流動が物質循環にどの程度どのように影響するか？を検討することとして、単純に一方向からの風の影響について考え、また流速抵抗に関しては単純に式(13)を用いることとする。

よって、湖沼内に流動がない場合、流動が比較的単純に生じている場合、流動がある場合には、植物群落の配置の影響について幾つかの計算例を示す。なお、計算例は埼玉県さいたま市にある別所沼で実施する。

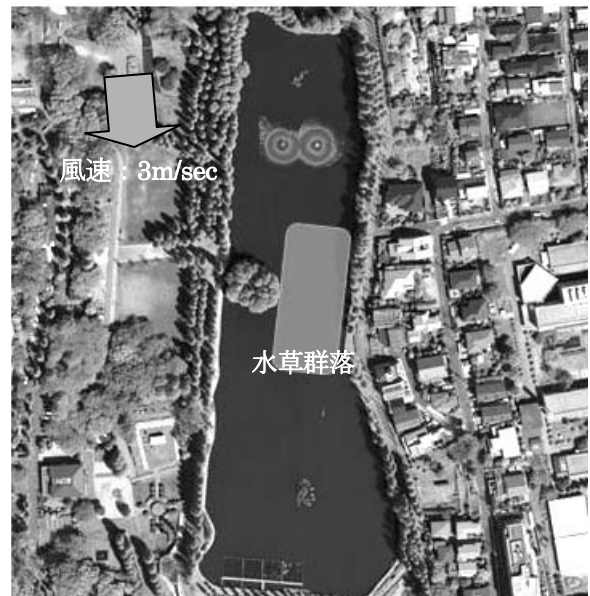
5.1 流動計算

計算対象とする別所沼の概要を有限要素メッシュならびに流速分布とともに図 2 に示す。

計算条件としては、上面からの平面 2 次元モデルとし、沼周囲での流速をゼロとした境界条件を設定している。ここでえられた流速分布を以降の濃度計算に用いている。

5.2 物質循環解析

物質の循環に伴う濃度変化の計算は、湖沼内の流速分



(国土地理院撮影の空中写真を使用)

図 2 解析対象と流速分布

布がない状態と風によって発生する流速分布を考慮するものとの計算する。なお、比較のために湖沼内に沈水植物がない状態の計算も実施する。本計算に用いるパラメータの詳細は文献 3)を参照されたい。これらは、現地で別途隔離水界を使って処理区と対象区を設置したときの実測値を既往の種々の報告を参照しながらの同定から決めている<sup>3)</sup>。また、本計算例では植物プランクトンの 3 相モデルの結果を示すこととする。

すべての時系列計算結果は 4 月 1 日から翌年の 3 月 31 日までの 1 年間で実施している。

(1)湖沼内に沈水植物がない場合

湖沼に沈水植物がない場合には、湖沼内に濃度勾配が発生しないので、流速があってもなくても同じ結果を得る。このときのクロロフィルの時系列的な濃度変化を図 3 に示す。

(2)湖沼内の流速分布がない場合

湖沼内の流速分布を考慮しない場合のクロロフィル濃度の時間変化を図 4 示す。なお、平面的な濃度分布を図 5 に示す。図 4 におけるグラフ表示箇所を図 5 に記載する。沈水植物の効果はその集落群に局所化している。

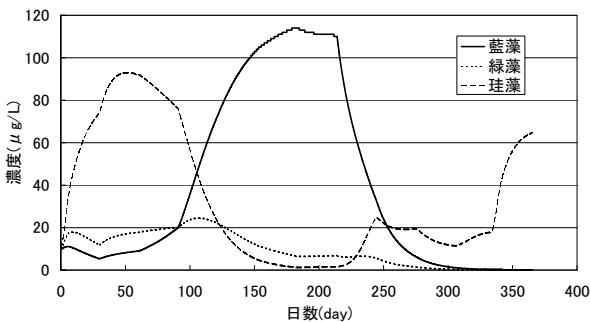


図 3 沈水植物なしのクロロフィル変化

(3)湖沼内の流速分布を考慮した場合

前計算例と同様に、クロロフィル濃度の時間変化を図 6 に、湖沼内の流速分布を考慮した場合の平面的な濃度分布を藍藻について図 7 に示す。なお、濃度をグラフ化している場所は図 7 に記してある。流速分布がない場合に比べて湖沼内の濃度分布が平滑化している結果が得られている。

§6. まとめ

本文で沈水植物による自然再生機能を用いた湖沼の水質浄化予測手法を考案し、若干の例題を示した。湖沼内の流動がない場合でも、沈水植物群落内で水質改善効果があること、湖沼内の流動がある場合では、沈水植物群落内および流れの下流方向には水質改善効果が見ら

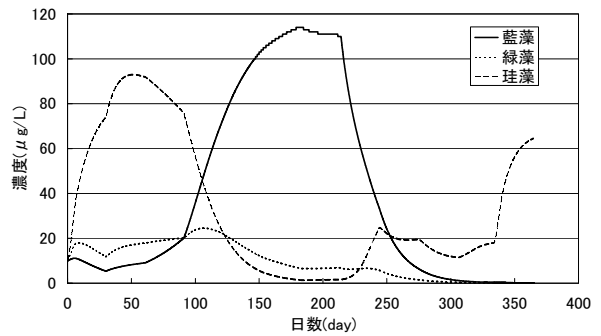


図 4(a) 沈水植物によるクロロフィル変化 (流速なし：A 点)

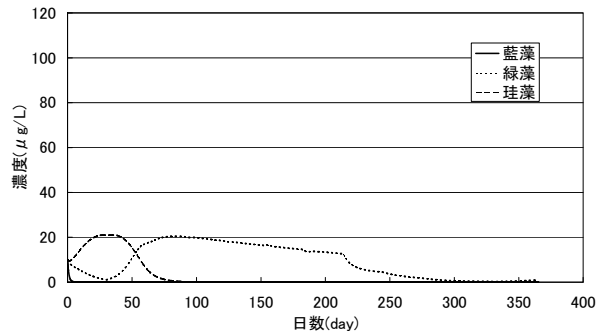


図 4(b) 沈水植物によるクロロフィル変化 (流速なし：B 点)

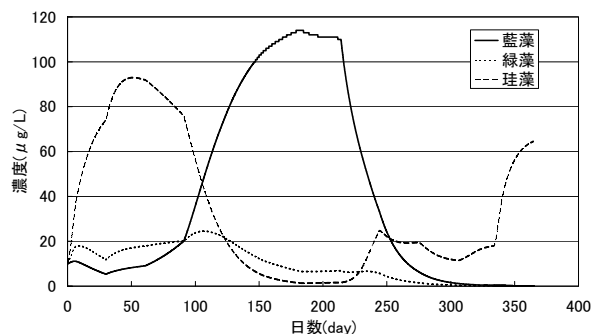


図 4(c) 沈水植物によるクロロフィル変化 (流速なし：C 点)

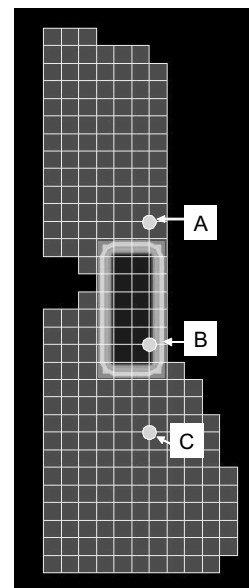


図 5 沈水植物の平面的な効果 (流速なし)

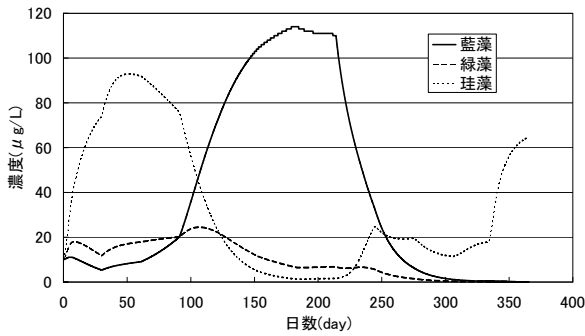


図6(a) 沈水植物によるクロロフィル変化  
(流速あり：A点)

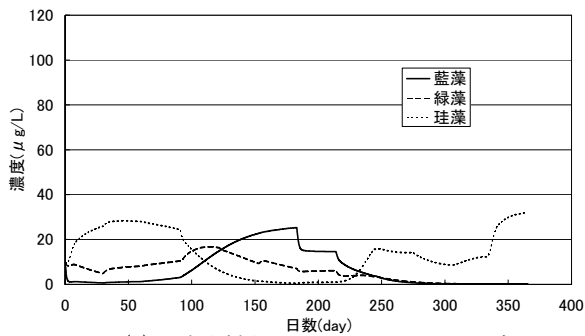


図6(b) 沈水植物によるクロロフィル変化  
(流速あり：B点)

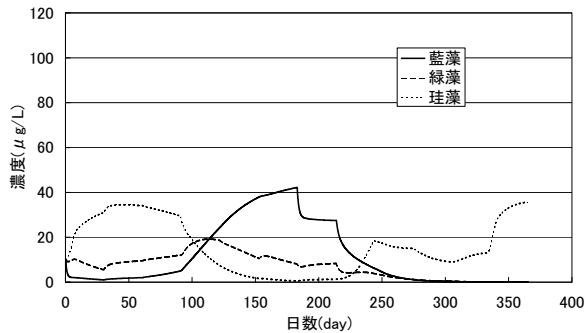


図6(c) 沈水植物によるクロロフィル変化  
(流速あり：C点)

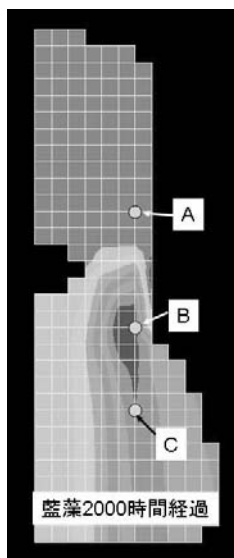


図7 沈水植物の平面的な効果 (流速あり)

れることが確認された。今後、種々の計算を実施し、沈水植物群落の効率的な配置などの検討を行う。

### 参考文献

- 1) 細田尚、細見知彦:琵琶湖北湖の水質鉛直分布の季節変化に関する簡易モデルと温暖化の影響への適用、河川技術論文集、第8巻、2002年6月
- 2) 松梨順三郎編著:環境流体汚染、森北出版株式会社
- 3) 環境省総合政策環境局総務課環境研究技術室:生態工学技法としての沈水植物再生による湖沼の水環境回復と派生バイオマスリサイクル統合システムの開発に関する研究、環境省環境研究・技術開発推進費終了研究成果報告、平成19年度～平成21年度

### 謝辞

本文の内容は、環境省の環境研究・技術開発推進費で実施した「生態工学技法としての沈水植物再生による湖沼の水環境回復と派生バイオマスリサイクル統合システムの開発に関する研究」の一環として実施した。筆頭研究者の福島大学理工学研究群共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻の稲森悠平教授に記して謝意を表します。

### ひとこと



仲沢 武志

自然再生機能を用いた水質の改善・回復に対する提案は、これまで当社において実施してきているが、その予測解析に関しては開始し始めた段階です。今後、植生浮島などの種々の機能に手法を展開し、水環境の改善に寄与できればと考えています。