

浮島による水質浄化機能の予測解析

仲 沢 武 志 島 多 義 彦 ^{*1}
武 田 文 彦 ^{*2} 中 野 和 典 ^{*3}

概 要

湖沼あるいはため池のような水域では、富栄養化による植物プランクトンの発生によって水質汚濁の問題が生じることがある。富栄養化により汚濁した水域の水質改善手法は種々考えられるが、自然の生態系による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て、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。これに対してフジタは、沈水植物の再生や浮島による浄化機能の助長などの手法を活用して水質改善を試行してきている。しかし、それらの効果を予測する方法に関して検討する機会は少なかった。よって、昨年度に沈水植物の再生が水質改善に及ぼす影響を予測する解析手法を報告した¹⁾。本文では、さらにこの機能に加え、浮島を水面に設置することで、遮光や沈降促進あるいは動物プランクトンの増殖による水質改善への効果を予測するモデルについて検討し、水質改善の評価に対する計算例を示す。

Method for predicting water quality improvement using artificial floating islands

Abstract

Enclosed bodies of water, such as lakes and ponds, are susceptible to poor water quality caused by phytoplankton blooms and subsequent eutrophication. There are many methods that can be used to counteract eutrophication in these bodies of water. Spontaneous regeneration of aquatic plant communities is a very safe and low energy method of remediating eutrophic bodies of water.

We have tried reversing eutrophication using submerged plants and spontaneous regeneration using artificial floating islands. However, there is currently no method for predicting the effects of these techniques. Therefore, over the past year we have studied calculation methods for predicting the effects on water quality of submerged plants function. This study improves numerical models for calculating the effects on water quality by the spontaneous regeneration functions of floating island such as light shielding, accelerated sedimentation of chlorophyll, stimulation of zooplankton, and some numerical applications are presented.

キーワード: 湖沼 水質 浄化 予測
解析 浮島 遮光 沈降

-
- *1 建設本部 土木 EC 技術企画部
 - *2 東北大学大学院工学研究科 研究員
 - *3 東北大学大学院工学研究科 准教授

§1. はじめに

大気、水質あるいは土壌・地下水の化学的な汚染は、従来から大きな関心が寄せられ、法律や条例を制定することで行政的にも対応されている問題である。

一方で、貯水池、湖沼およびため池のような閉鎖性水域においては、人為的要因による化学的な汚染だけでなく、富栄養化による水質にも問題を生じている。

水環境の富栄養化では、植物プランクトンが異常に発生して水質が汚濁し、異臭の発生や飲料に供する際の毒性が懸念されている。また、ため池のような閉鎖性水域では、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等の被害を発生させる。

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、水生植物の生態系を活用する方法等が考えられるが、フジタは、従来からこの問題に対してフェスタ工法を提案し、浮島に設置する抽水植物と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、実証実験の実績を重ねてきている。

しかしながら、抽水や沈水植物による水質改善の様子を予測し得る手法に関しては十分な検討を実施していなかった。そこで、昨年度に沈水植物による水質改善効果を予測し得る解析手法について検討を行い、計算例を示した。そこで、本文では、沈水植物の影響に加え、浮島による水質改善効果を予測するモデル化について検討を加える。さらに、若干の計算例を示し、現地で効率的な計画を行うための基礎資料としての可能性等について検討する。

§2. 予測解析における支配方程式

本解析手法は昨年度実施した沈水植物における浄化予測のモデル化¹⁾と同様に、河川や湖沼の流動を求め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で構成される。

2.1 流動解析

流動計算には、沈水植物と同様に、通常の流体の挙動を予測する Navier-Stokes の方程式や浅水方程式等を用いる。この計算から必要な情報は流速であり、物質移行拡散方程式に含まれている移流項に代入することとなる。

2.2 濃度解析

河川や湖沼あるいはため池の水質状態を決めるのは水域内の物質の濃度である。流れを伴う物質の濃度変化を時系列に予測するには、式(1)のような物質移行拡散方程式が

用いられる。

$$\frac{\partial C^{(k)}}{\partial t} + v_m \frac{\partial C^{(k)}}{\partial x_m} = D_{ij} \frac{\partial C^{(k)}}{\partial x_i \partial x_j} + \Gamma^{(k)} \quad (1)$$

ここに、 $C^{(k)}$:第 k 相の濃度、 v_m :流速、 D_{ij} :分散係数、 x_i :座標、 $\Gamma^{(k)}$:生成項

水域内では、幾つかの物質が一種の反応のような相互作用をしながら時系列に濃度変化が生じる。式(1)内での濃度に対する肩括弧はここで考える各相を表している。

§3. 物質循環モデル

3.1 従来モデルと概要

水域内で時々刻々変化する物質には、幾つかの種類が考えられるが、沈水植物でのモデルと同様にここでも以下の物質を対象とする。

- (1) 植物プランクトン(藍藻、緑藻、珪藻): 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_{DIP}
- (6) 堆積層リン: F

なお、植物プランクトンは、全植物プランクトンとして単相で扱うこともできるし、藍藻、緑藻および珪藻のように 3 相に分離した扱い方も可能である。

水域内のこれらの物質は、増殖や捕食あるいは死滅などの現象を起こしながら、各相で反応のような挙動の相互作用を生じ時系列に濃度が変化する。式(1)の左辺および右辺第 1 項では、単に流れと分散による濃度の変化を計算するが、右辺第 2 項でこの相互作用を考慮することとなる。この項は、物質循環概念図を元に定式化される。

沈水植物の影響を考慮した場合の物質循環概念図を図 1 に示す。各項の詳細は文献 1) に示す定式化となり、その基本式を図 2 に示す。なお、詳細は文献 1) あるいは文献 2) を参照されたい。

3.2 浮島の影響の組み込み

本文の主題は、図 2 のモデルに、浮島の効果を組み込むことである。ここでは、浮島の水質への影響は、

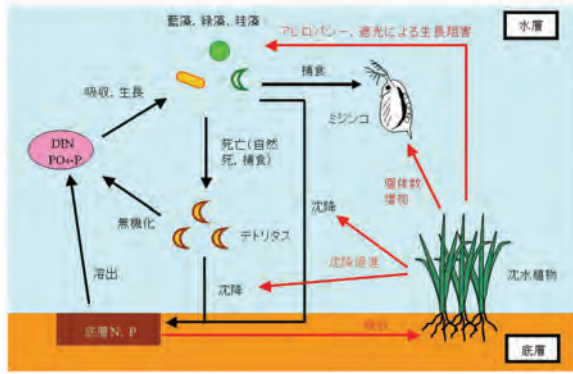


図1 物質循環概念図

- ① 遮光
- ② 沈降促進
- ③ 動物プランクトンの増殖

であるとする。

この場合でも、基本的には図2に示すモデルと同じ定式化となるが、モデル内のパラメータの調整でこれらの影響を組み込むことができる。以下順にパラメータの調整の考え方について記す。

1) 遮光

遮光の影響は、図2内のパラメータ G_p すなわち植物プランクトンの増殖速度に寄与する。パラメータ G_p の設定には以下の式を用いる。

$$G_p = \mu_{max} \times f_s \times \frac{C_{DIN}}{K_N + C_{DIN}} \times \frac{C_{DIP}}{K_P + C_{DIP}} \times \frac{L_{AVG}}{K_I + L_{AVG}} \times f_T - k_{As}W \quad (2)$$

ここに、

$$L_{AVG} D = \int_0^D L_0 \exp(-kt) dt = \frac{L_0}{-k} [\exp(-kD) - 1] \quad (3)$$

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

光の効果は式(2)中の L_{AVG} で考慮され、 L_{AVG} は式(3)のように深さ方向に平均化したものを用いる。浮島が存在する水域内の領域では水面での光強度 L_0 をほとんどゼロとおくことで、遮光に関する浮島の影響を組み込むことが可能となる。

2) 沈降速度

浮島が水面に存在することで、植物プランクトンやデトリタスの沈降挙動が変化する可能性がある。沈降速度は図2中で、 $-\gamma(1+k_{SD}W)$ という形の係数で組み込まれているが、この影響を組み込む場合、浮島が水面に存在する領域での沈降速度の係数を $-[(1+k_{SD}W) + k_{SF}]$ と置き換えることで沈降速度の影響を考慮する。なお、本文では、 $k_{SF} = 1.5$ とおく。

3) 動物プランクトンの増殖

浮島は、ポーラス体を板状に加工して水面上に浮かべら

(植物プランクトン)

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

(無機態窒素) $\Gamma^{(2)} = \frac{\partial C_{DIN}}{\partial t} = -\beta_N G_p P + v_N N \times f_T + v' \beta_N P_D \times f_T$

(堆積層窒素) $\Gamma^{(3)} = \frac{\partial N}{\partial t} = -v_N N \times f_T + \gamma(1+k_{SD}W)\beta_N P + \beta_N \gamma'(1+k_{SD}W)P_D - k_{RN}W$

(無機態リン) $\Gamma^{(4)} = \frac{\partial C_{DIP}}{\partial t} = -\beta_P G_p P + v_P F_T^2 + v' \beta_P P_D f_T^2$

(堆積層リン) $\Gamma^{(5)} = \frac{\partial F}{\partial t} = -v_P F_T^2 + \gamma(1+k_{SD}W)\beta_P P + \beta_P \gamma'(1+k_{SD}W)P_D - k_{RF}W$

(デトリタス)

$$\Gamma^{(2)} = \frac{\partial P_D}{\partial t} = D_p P - \gamma'(1+k_{SD}W)P_D - v' P_D \times f_T$$

G_p : 植物プランクトンの増殖速度 D_p : 植物プランクトンの死滅速度
 γ : 植物プランクトンの沈降速度 γ' : デトリタスの沈降速度
 v : デトリタスの無機化速度 v_N : 堆積層窒素無機化速度
 β : 換算係数

図2 物質循環モデル式

表1 記号説明

P : クロロフィル濃度	μ_{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_{DIN} : 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_{DIP} : 無機態リン	f_T : 水温に関する係数 昼 $f_T = 1$ if $T \geq 25$ else $f_T = T/25$
F : 堆積層リン	夜 $f_T = 1$ if $T \geq 20$ else $f_T = T/20$
k_{As} : アレロパシー係数	珪藻 $f_T = 1$ if $T \geq 15$ else $f_T = T/15$
γ : クロロフィルの沈降速度	v' : デトリタスの分解速度
k_{SD} : 植物群集による沈降の促進係数	f_T' : 水温係数
R_{CP} : 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_g : 動物プランクトンの増殖速度	γ' : 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	v_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	β_N : 植物プランクトンの N/Chla 比
K_Z : 植物群集による動物プランクトンの増加係数	K_{RP} : 地下茎の N 吸収
W : 植物群集バイオマス	v_P : 堆積層 F 分解速度
θ : 植物プランクトンによる光の減衰定数	β_P : 植物プランクトンの F/Chla 比
θ' : 沈水植物による光の減衰	K_{RP} : 地下茎 F 吸収
L_0 : 水面の光強度	

れるが、これは動物プランクトンの増殖を促す可能性がある。本モデルにおける動物プランクトンの影響は、植物プランクトンの死滅係数である D_p 内で考慮されている。

$$D_p = R_{CP} + C_g \times \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \times Z(1+k_ZW) \quad (4)$$

動物プランクトンの増殖促進は、式(4)における係数 $(1+k_ZW)$ を $[(1+k_ZW) + k_{MF}]$ と置き換えて考慮する。記号は表1を参照されたい。

なお、本文では、 $k_{MF} = 9.0$ とおく。

§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。

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た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、流動計算や式(1)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

5.1 計算条件

上記のように定式化したモデルの適用性を示すために、S 県 S 市の公園内のボート池に対する予測計算を実施した(図 3)。ボート池の諸元を表 2 に示す。

表 2 対象ボート池諸元

池面積 (m^2)	17700	
貯水容量 (m^3)	18600	
平均水深 (m :1998年調査)	1.05	
平均泥厚 (m :1988年調査)	0.6	
地下水の導水量 (t/日)	600	今回の計算においては流入流出を考慮しない
滞留日数 (日)	31	
地下水の水質		
T-N (mg/L)	0.53	
T-P (mg/L)	0.496	
COD (mg/L)	1.8	

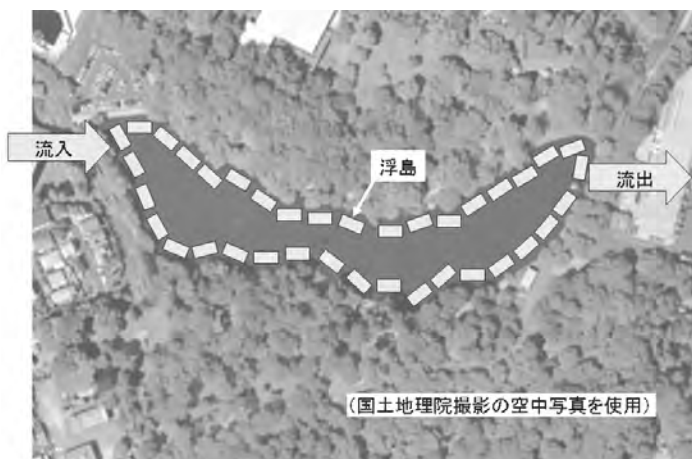


図 3 計算例対象概要

注) 図 3 に示す流入流出は流動を求める際の境界条件を示し、池内の物質に関しての流入流出はないものとした。

表 3 物質初期値

植物プランクトン ($Chl - a$)	藍藻類 ($\mu g/L$)	18
	緑藻類 ($\mu g/L$)	18
	珪藻類 ($\mu g/L$)	18
	デトリタス	0 (仮定値)
水質	無機態窒素 (mg/L)	0.014
	無機態リン (mg/L)	0.05
堆積層	堆積層窒素 (mg/L)	5
	堆積層リン (mg/L)	0.77

表 4 平均水温

	平均水温
4月	17.2
5月	21.5
6月	24.2
7月	27.5
8月	28.2
9月	24.2
10月	19.2
11月	13.6
12月	8.1
1月	5.3
2月	6.8
3月	11.1

さらに、池内の物質の初期値や月別年間水温の変化を表 3 および表 4 に示す。

なお、浮島の設置は池全周に辺に沿って設置するものとし、面積比 20%と設定した。また、ここでの計算例では沈水植物のバイオマスの効果は考慮していない。計算は 4 月 1 日から開始し、1年間分実施している。

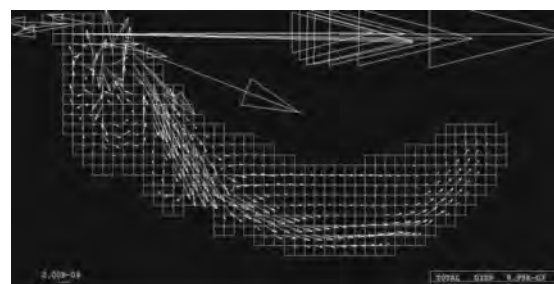


図 4 流速分布

5.2 計算結果

まず、図3のもとで発生する池の流速分布を図4に示す。今回の計算では、藻類を藍藻、緑藻および珪藻の3種類に分けて計算している。

浮島を設置しない場合の計算結果を図5に、浮島を設置した場合の計算結果を図6に示す。また、各藻類で浮島設置の有無による濃度状況の比較を図7に示し、全藻類における合計での濃度を比較した結果を図8に示す。全体的に浮島がある場合にクロロフィル濃度は低い値を示し、浮島による藻類発生抑制効果が見受けられる。なお、これらは池内の平均濃度を表している。

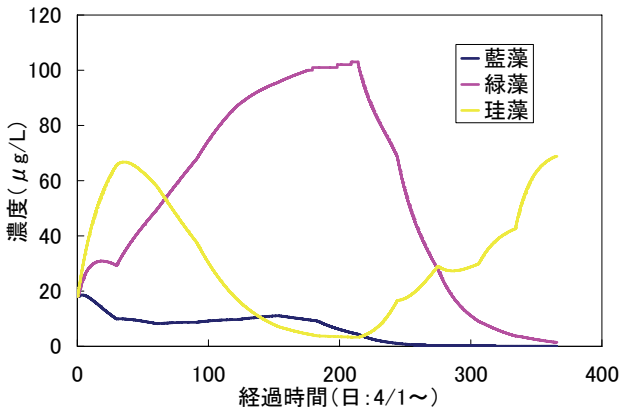


図5 計算結果 (藻類: 浮島なし)

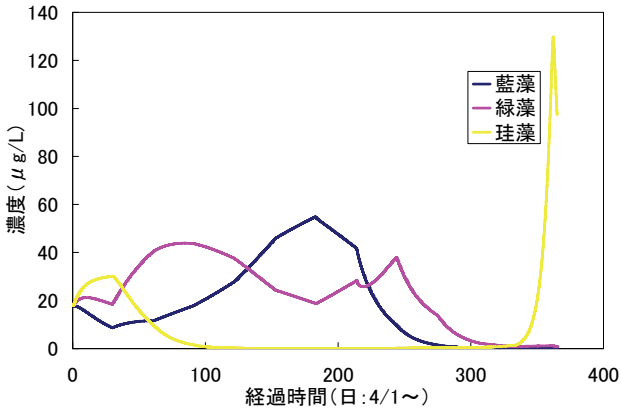


図6 計算結果 (藻類: 浮島あり)

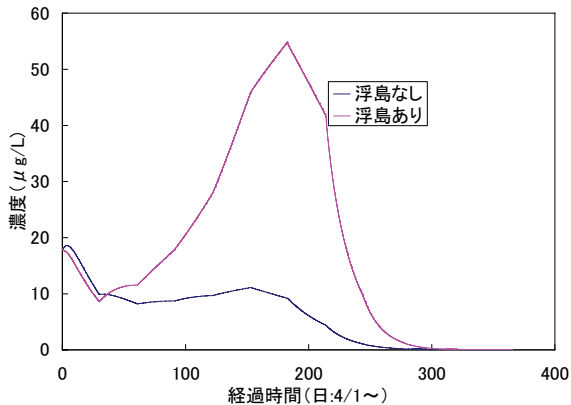


図7(a) 計算結果 (藍藻比較)

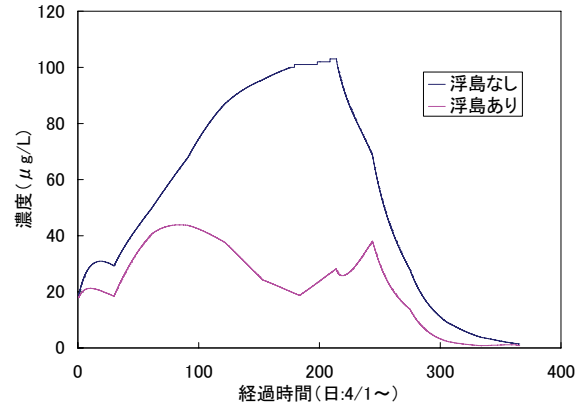


図7(b) 計算結果 (緑藻比較)

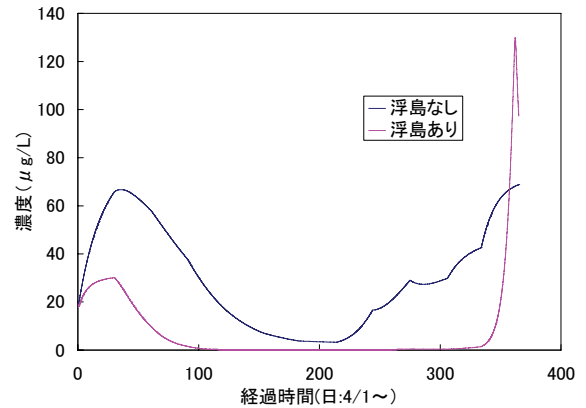


図7(c) 計算結果 (珪藻比較)

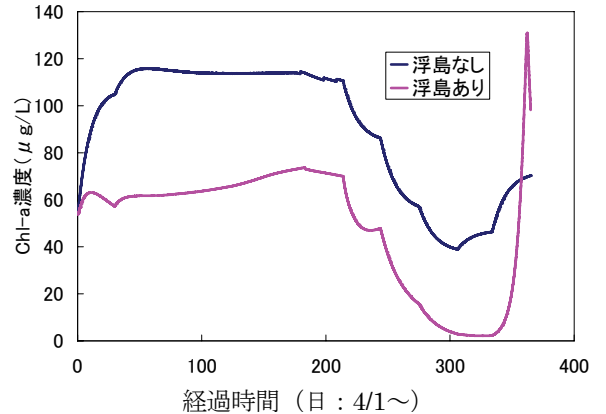


図8 計算結果 (全藻類比較)

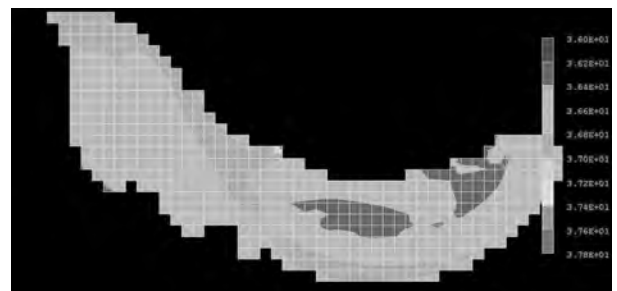


図9(a) 濃度分布 (藍藻:8月15日)

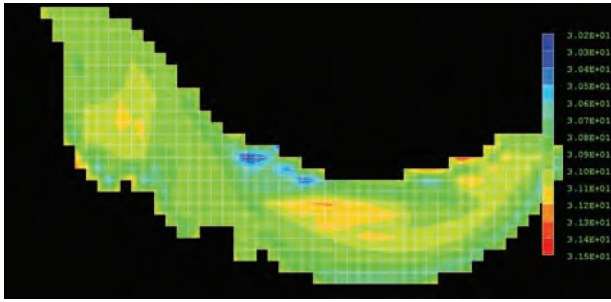


図 9(b) 濃度分布 (緑藻:8月 15 日)

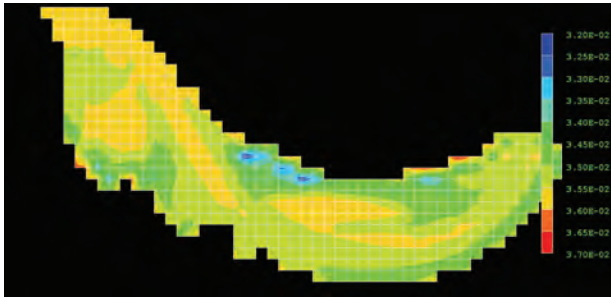


図 9(c) 濃度分布 (珪藻:8月 15 日)

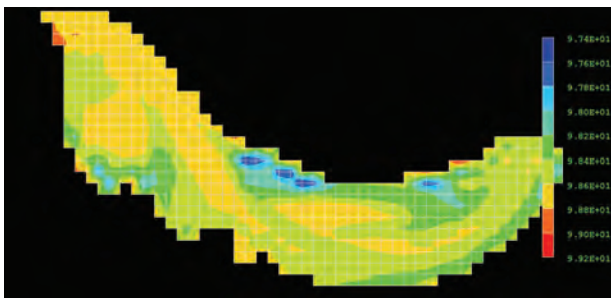


図 10 濃度分布 (全藻類:8月 15 日)

4月1日から開始した計算において、8月15日に相当する各藻類の濃度分布コンター図を図9に、また全藻類での濃度分布コンターを図10示す。なお、浮島のない計算においては、池内部の濃度勾配は発生しないので特にコンター図を記載しない。計算結果は図6などを参照されたい。

これらのコンター図から、クロロフィルは下流(図の右側)になるほど一般には濃度が低く、また図4の流速分布と見比べると中央部は流向がほぼ渦となって殆ど浮島に接触しないものと考えられる。つまり、水質は浮島領域に水が浸入しなければ改善効果を得ることができないものと考えられる。今回の計算では、池周辺に20%の面積で浮島を設置することを想定したが、年間を通して卓越する池内部の流れなどを詳細に調査して設置計画を立てることが望ましいと思われる。

§6. まとめ

昨年度報告した沈水植物の再生による河川、湖沼あるいはため池の水質改善に対する予測解析モデルを浮島の効果を組み込んで拡張した。ここで組み込んだ遮光と沈降促進および動物プランクトンの増殖における物性値など詳細な検討が必要な問題も残されているが、計算例を示すことで一応計算モデルを確立できた。

ここでは2次元の限定した定式化とその計算例を示したが、対象水域が深い場合など、3次元的な扱いが必要なケースや、浮島の抽水植物によるアレロパシーなどここで考慮していない水質改善効果についても今後検討を続けることとする。

参考文献

- 1) 仲沢武志、島多義彦、袋昭太、武田文彦、中野和典：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、フジタ技術研究報告、第46号、2010
- 2) 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

ひとこと



仲沢 武志

昨年の沈水植物だけでなく浮島の機能も加えた水質再生の予測手法について検討した。複雑な定式化となっているが、今後は実用化への寄与、あるいは他の環境問題に水平展開に話を進めたい。