衛生工学研究論文集・第20巻・1984 (Proc. of Environ. & Sani. Eng. Research, Vol. 20, 1984)

(8) びわ湖南湖における渦度を考慮した藻類の動態解析

DYNAMICS OF ALGAL POPULATION IN CONSIDERATION OF A HYDRAULIC PARAMETER "VORTICITY"

住友　恒*　・　原沢　英夫*　・　宇仁菅　伸介**

Hisashi SUMITOMO*　Hideo HARASAWA*　Sinsuke UNISUGA**

ABSTRACT; Nowadays, lake eutrophication, especially extreme algal growth phenomena, affects significantly drinking water resources and causes heavy damage to water supply systems. Therefore, analyses of algal growth mechanism and model construction of algal population dynamics are necessary for the conservation of water resources.

This paper discusses a computer model for simulating algal population dynamics and spatial distribution in the lake, which is based on the hydrodynamic characteristics such as vorticity and retention time. Spatial distribution of vorticity and currents in the lake are computed by the 2-dimensional vorticity-stream function model.

Next, a biological submodel describes the algal population distribution. This hydrodynamic process oriented model is applied to the southern part of the Lake Biwa.

As a result, vorticity, which is considerd the extent of local water circulation, makes substantial retention time of algae and affects algal growth process as well as nutrient condition.

KEYWORDS; Algal population dynamics, vorticity, simulation model

1. はじめに

湖沼など閉鎖性水域における藻類の増殖や死滅動態については，発生要因として主としてN，Pの栄養塩濃度がとり上げられそれによって現象の解明やモデル化がすすめられてきた。しかしながら，藻類の動態を明確に説明し得るまでには致っていない。本報告は藻類増殖に確保されるべき増殖時間が平均流速から決定される平均流下時間のみで説明しえないとの観点に立ち，渦度という流動特性が藻類増殖にいかに関与しているかをびわ湖南湖を例にしつつ比較・検討するものである。

2. 渦度を考慮することの意義について

筆者らの研究グループでは水道の異臭味発生予測を主たる目的として，びわ湖南湖における藻類の動態を継続調査している。究局的には異臭味発生藻類の動態予測を可能にすることが目的ではあるが，現段階では藻類総個体数を調査・解析している。本調査の一つの特徴は栄養塩としてNやPの無機塩を直接取り上げるのではなく，別報[1]にも詳しく記すように，藻類の増殖能 (Algal Growth Potential, AGP) の概念を導入して，総括的な指標であるAGR (Algal Growth Rate)の概念を活用している点である。このAGRはAGPと基本的に同一概念で表現されるものであるが，AGP測定では，供与藻類の初期状態を統一することが容易でないので，測定時の藻類の増減を初期値との比率 (Rate) で表わし，その値で増殖速度 (Growth Rate) を表現しつつ，藻類の増殖能 (Potential) を表現しようとするものである。その詳細を別報にゆずり，びわ湖南湖におけ

*京都大学工学部 Kyoto University, Faculty of Engineering,
** 院生 (現 厚生省 , Environmental Health Bureau)

る実測結果を示したのが図－1(a),(b)である。すなわち，各地点(南湖18地点)で採水した試水を20 ml L型チューブで，20℃，4000ルックス，12時間交代明暗条件で室内培養し，増減藻類個体数を初期値m_0とし(m_t/m_0)を本文では簡単のために対数値をとらずそのままAGR値として表現したものである。ここでtとして3日，6日を取り両者の平均値を図示している。アナベナAGRとは上記試水をSS測定用ろ紙でろ過し，このろ水に別途継代培養中のAnabaena macrospora を洗浄後注入し，このアナベナの増減を上記と同一の方法で定量化し，これらを藻類の増殖能とみなしたものである。

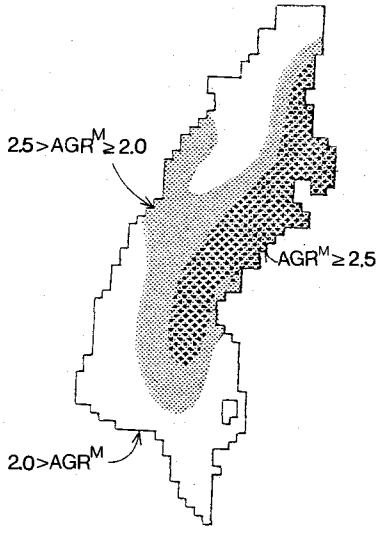

Fig. 1. (a) Measured AGR^M in Southern part of the Lake Biwa (1982, mean of 5 cases)

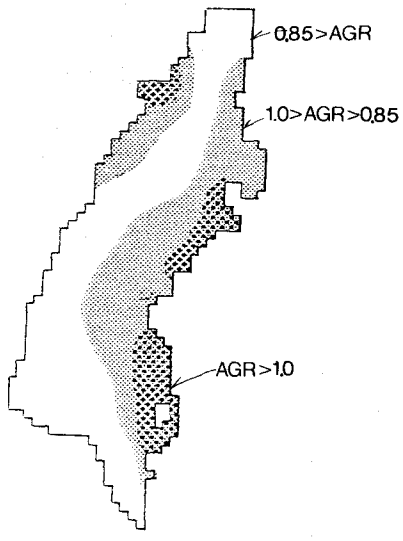

Fig. 1. (b) Measured Anabaena AGR in the southern part of the Lake Biwa (1982, mean of 8 cases).

一方，この測定期間には図－2に示すような藻類総個体数が実測された。ここでの藻類総個体数は試水中の藻類別に100倍の倍率で検鏡し，その合計値を藻類総個体数としたものである。両図から増殖能の高い地点ではやはり藻類総個体数も多いことが確認できるが，ここで問題となることは藻類総個体数が急激に変化する地域が存在することである。たとえば500 mも流下すれば藻類総個体数が5倍，10倍と急変することが認められたことである。平均的な湖内流速1cm/secで判断すれば500 mという流下距離は流下時間が1日未満である。

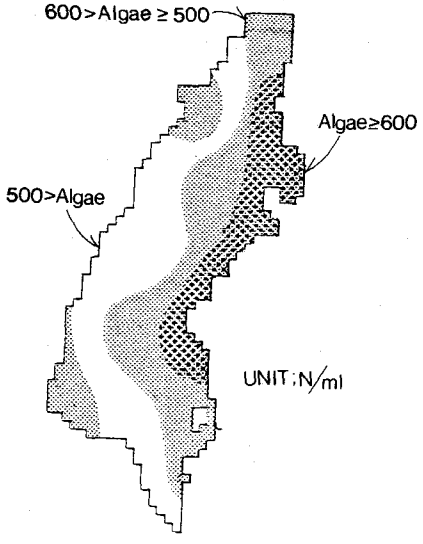

Fig. 2 Observed algal population density (all algal species) (1982, mean of 13 cases)

一方，藻類の増殖は栄養条件として比較的良好な環境下でも一定以上の増殖時間を必要とするのが一般的である。図－3はアナベナをCT培地という人工的にほぼ最良な条件下に置いたときの増殖例である。10倍増には10日近い増殖時間が必要であることがわかる。他の藻類についても，先述のAGR測定過程でも確認できるように比較的長い増殖時間が必要である。

測定結果の解析に当り上記の差異をいかに考慮するかが一つの重要な問題となった。そこで局部的な循環流が存在すれば，一部の藻類はこの循環流によって同一地点に滞留しつづけることがあり，十分な増殖時間が確保できれば藻類個体数が10倍，100倍になりうることに注目した。すなわち，何らかの形で上記循環流の存在を加味して藻類の動態を解析することを試みることとし，まず渦度という指標でその表現が可能か否かを探ることにした。

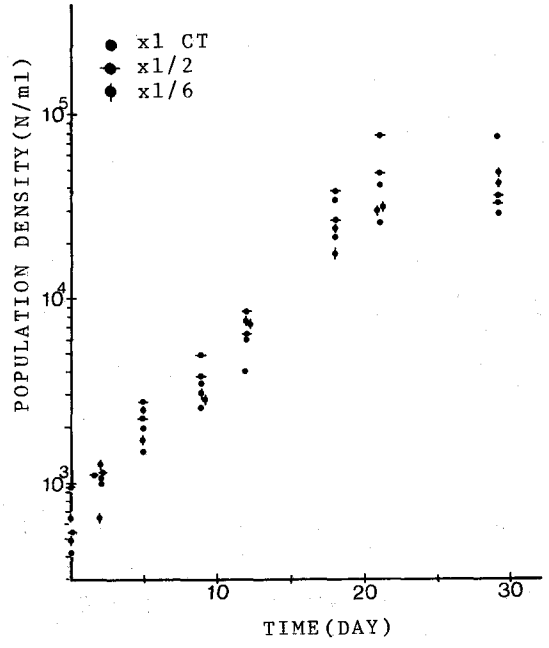

Fig. 3 An example of the Algal assay procedure (Anabaena macrospora, CT culture medium, 20 ml L-tube, 20°C, 4000lux)

3. 渦度・流れ関数モデルによる流動解析[2)]

3.1 基礎式

びわ湖南湖を渦流を中心とした流れ場として解析するために，流れを非圧縮性2次元定常流れと考え，Navier-Stokesの運動方程式を流れ関数，渦度により表現した基礎方程式を用いた。Navier-Stokesの運動方程式は次のようになる。

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{1}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

ここに，ρ：流体の密度

u，v：x，y方向の流速

p：圧力　　μ：粘性係数

(1)，(2)式を各々y，xで微分し，次に示す流れ関数ϕ，渦度ω及び連続の式を代入する。

$$u=\frac{\partial \phi}{\partial y}\qquad v=-\frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{3}$$

$$\omega=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}=-\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{5}$$

以上より基礎方程式として次式を得る。

$$\frac{\partial\phi}{\partial y}\cdot\frac{\partial\omega}{\partial x}-\frac{\partial\phi}{\partial x}\cdot\frac{\partial\omega}{\partial y}=\nu\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right) \tag{6}$$

ただし　$\nu=\mu/\rho$：動粘性係数

さらに代表速度V，流路の幅Dを用いて(4)，(6)式を無次元化すると，

$$\omega_*=-\left(\frac{\partial^2\phi_*}{\partial x_*^2}+\frac{\partial^2\phi_*}{\partial y_*^2}\right) \tag{7}$$

$$\frac{\partial\phi_*}{\partial y_*}\cdot\frac{\partial\omega_*}{\partial x_*}-\frac{\partial\phi_*}{\partial x_*}\cdot\frac{\partial\omega_*}{\partial y_*}=\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2\phi_*}{\partial x_*^2}+\frac{\partial^2\phi_*}{\partial y_*^2}\right) \tag{8}$$

ただし　$Re=\frac{V\cdot D}{\nu}$

以下，簡単のため，＊印は省略する。

3.2　方程式の差分化

方程式を差分化するため，びわ湖南湖を南北方向64，東西方向32の一辺250mのメッシュに分割した（図－4）。方程式を差分化するために，まず流れ場内を図－5に示すようにx軸，y軸と平行にそれぞれi，jの格子に分割した。簡単のためにそれぞれ等間隔に分割し，これらの間隔をdx，dyとする。また任意の点Pのまわりを N，S，W，E などの記号を用いて，図－5のように表わす。

まず，(8)式を差分表示するが，(8)式左辺は非線形のために，収束性がよくないので，速度ベクトルの方向に応じて前進差分，後進差分でおきかえる風上差分法を用いる。例えば左辺第1項は次のように表わせる。

$$u\geqq 0 \quad \cdots\cdots \frac{(\phi_{NEP}-\phi_{NWP})}{dy}\cdot\frac{(\omega_P-\omega_N)}{dx}$$

$$u<0 \quad \cdots\cdots \frac{(\phi_{SEP}-\phi_{SWP})}{dy}\cdot\frac{(\omega_S-\omega_P)}{dx}$$

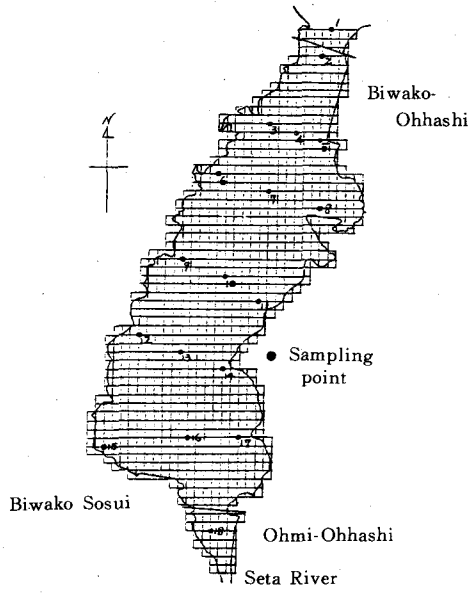

Fig. 4 Networks of the southern part of the Lake Biwa

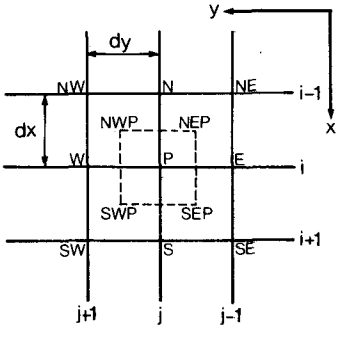

Fig. 5 Difference schieme

ここで ϕ_{NEP}, ω_Pなどは，その添字の位置におけるϕやωの値である。以上を $u \geqq 0$ であれば $\phi_{NEP}-\phi_{NWP} \geqq 0$, $u < 0$ であれば $\phi_{SWP}-\phi_{SEP} > 0$ であることを利用して，次のように表わす。

$$\phi_{NEP}-\phi_{NWP}=\frac{(\phi_{NEP}-\phi_{NWP})+|\phi_{NEP}-\phi_{NWP}|}{2}$$

$$\phi_{SEP}-\phi_{SWP}=-\left\{\frac{(\phi_{SWP}-\phi_{SEP})+|\phi_{SWP}-\phi_{SEP}|}{2}\right\}$$

左辺第2項についても，同様にして差分化する。右辺は，線形のため，中央差分法を用いて差分化する。結局，(8)式を差分化した式は次のようになる。

$$\left\{\frac{(\phi_{NEP}-\phi_{NWP})+|\phi_{NEP}-\phi_{NWP}|}{2\cdot dy}\right\}\cdot\frac{(\omega_P-\omega_N)}{dx}-\left\{\frac{(\phi_{SWP}-\phi_{SEP})+|\phi_{SWP}-\phi_{SEP}|}{2\cdot dy}\right\}$$

$$\times\frac{(\omega_S-\omega_P)}{dx}+\left\{\frac{(\phi_{NWP}-\phi_{SWP})+|\phi_{NWP}-\phi_{SWP}|}{2\cdot dx}\right\}\cdot\frac{(\omega_P-\omega_W)}{dy}$$

$$-\left\{\frac{(\phi_{SEP}-\phi_{NEP})+|\phi_{SEP}-\phi_{NEP}|}{2\cdot dx}\right\}\cdot\frac{(\omega_E-\omega_P)}{dy}$$

$$=\frac{1}{Re}\left(\frac{\omega_S-2\omega_P+\omega_N}{dx^2}+\frac{\omega_E-2\omega_P+\omega_W}{dy^2}\right) \tag{9}$$

NEP, NWP, SEP, SWP での値は，そのまわりの4点の値の算術平均をとるものとして，上式を整理すると，次式を得る。

$$\omega_P=\frac{1}{\sum A}(A_N\omega_N+A_S\omega_S+A_W\omega_W+A_E\omega_E) \tag{10}$$

ここで，$A_N=\frac{1}{8}\{(\phi_{NE}+\phi_E-\phi_{NW}-\phi_W)+|\phi_{NE}+\phi_E-\phi_{NW}-\phi_N|\}+\frac{dy}{R_e\cdot dx}$

$A_S=\frac{1}{8}\{(\phi_{SW}+\phi_W-\phi_{SE}-\phi_E)+|\phi_{SW}+\phi_W-\phi_{SE}-\phi_E|\}+\frac{dy}{R_e\cdot dx}$

$A_W=\frac{1}{8}\{(\phi_{NW}+\phi_N-\phi_{SW}-\phi_S)+|\phi_{NW}+\phi_N-\phi_{SW}-\phi_S|\}+\frac{dx}{R_e\cdot dy}$

$A_E=\frac{1}{8}\{(\phi_{SE}+\phi_S-\phi_{NE}-\phi_N)+|\phi_{SE}+\phi_S-\phi_{NE}-\phi_N|\}+\frac{dx}{R_e\cdot dy}$

$\sum A=A_N+A_S+A_W+A_E$ である。

次に(7)式を中央差分法を用いて差分方程式に改めると，次式を得る。

$$\omega_P=-\left(\frac{\phi_S-2\phi_P+\phi_N}{dx^2}+\frac{\phi_E-2\phi_P+\phi_W}{dy^2}\right) \tag{11}$$

従って

$$\phi_P=\frac{1}{2\left(\frac{1}{dx^2}+\frac{1}{dy^2}\right)}\left(\frac{\phi_S}{dx^2}+\frac{\phi_N}{dx^2}+\frac{\phi_E}{dy^2}+\frac{\phi_W}{dy^2}+\omega_P\right) \tag{12}$$

実際の計算においては，dx＝dy とおいたので(12)式は更に簡単に次のようになる。

$$\phi_P = \frac{1}{4}(\phi_S + \phi_N + \phi_E + \phi_W + dx^2 \cdot \omega_P) \tag{13}$$

3.3　流れ関数と渦度の求め方

流れ関数 ϕ と渦度 ω の求め方は，まずそれぞれ適当な初期値を与え，全格子点について(10)式と(12)式により反復計算する。n 回の繰り返しにより得られる第 n 次近似解を $\omega_P^{(n)}$，$\phi_P^{(n)}$ と表わすと，次式で求める。

$$\omega_P^{(n)} = \omega_P^{(n-1)} + \delta_1 \{ \omega_P^{((n-1))} - \omega_P^{(n-1)} \} \tag{14}$$

$$\phi_P^{(n)} = \phi_P^{(n-1)} + \delta_2 \{ \phi_P^{((n-1))} - \phi_P^{(n-1)} \} \tag{15}$$

ここで $\omega_P^{((n-1))}$，$\phi_P^{((n-1))}$ は，第 (n－1) 次近似解を(10)式及び(12)式の右辺に代入して得られる値，δ_1，δ_2 は緩和係数である。また，反復計算は，次式を満たせば値が収束したものとみなして完了する。

$$\sum | \omega_P^{(n)} - \omega_P^{(n-1)} | \leqq \varepsilon_1 \tag{16}$$

$$\sum | \phi_P^{(n)} - \phi_P^{(n-1)} | \leqq \varepsilon_2 \tag{17}$$

ここで∑記号は全格子点についての総和を表わし，ε_1，ε_2 は十分小さいある一定値である。ただし，反復回数がMに達した場合は，上記の条件を満たさなくても反復を中止するようにした。実際の計算においては，$dx = dy = \frac{1}{6}$ とし，ω，ϕ の初期値として後で述べる一部の境界を除いた全ての格子点に 0 を与え，緩和係数として $\delta_1 = \delta_2 = 0.5$ を ε_1，ε_2 の値として 1.0×10^{-2}，Mの値として 1000 をそれぞれ与えて，ω と ϕ の値を求めた。

3.4　境界条件

びわ湖大橋東～瀬田川東側に至る境界は流れ関数 $\phi = 1.0$，瀬田川西側～疎水取入口南側に至る境界は $\phi = 0.25$，疎水北側～びわ湖西に至る境界は $\phi = 0.0$ とした。このように設定することにより，〔北湖からの流入量〕：〔瀬田川からの流出量〕：〔疎水からの流出量〕の比が 4：3：1 となる。北湖からの流入は一定速度分布としたが，他の境界上ではどこでも，境界に垂直な流速を 0 とした。

3.5　渦度分布及び流れ関数より求めた湖流速の分布

図－6は本モデルによる渦度の分布を示したものである。北湖との境界より岸沿いに渦度が大きく，南端の流出口瀬田川まで連続している。図－7は流れ関数より求めた流速分布を示したものであり，湖中央部，流出部で流速ベクトルが滑らかに連続するのに対し，沿岸部の凹凸が流れ方向に変化する両岸では速度ベクトルの方向は一定せず，渦度が沿岸部で大きいことと対応している。

先述のように渦度をメッシュ内の水塊の局所的な滞留特性を表わす指標の1つと考えているが，さらに次式で示すメッシュ内の平均的滞留時間をも定義し，各メッシュについて流速データより定量化して以下の検討を行う。

$$T = \min \left(\left| \frac{\triangle x}{u} \right| , \left| \frac{\triangle y}{v} \right| \right) \tag{18}$$

このTの計算結果を図－8に示した。湖中央部と沿岸部と滞留時間が相当異なることがわかる。

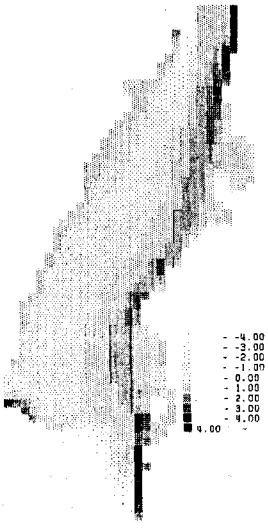

Fig. 6 Computed vorticity distribution

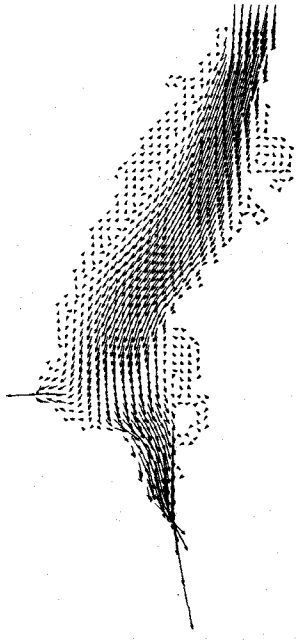

Fig. 7 Computed currents

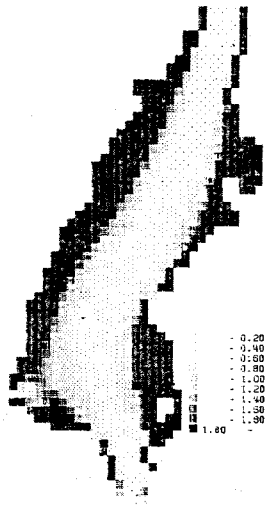

Fig. 8 Computed retention time distribution

4. 藻類の動態解析

4.1 基礎式

南湖における藻類分布を求めるために，移流拡散方程式に，増殖，死滅項を加えた次式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial M}{\partial t}+u\frac{\partial M}{\partial x}+v\frac{\partial M}{\partial y}=D_x\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}+\mu\cdot M-kM \tag{19}$$

ここで，u，v：x，y 方向の流速

M：藻類個体数（個体数密度）

D_x, D_y：x，y 方向の拡散係数

μ：比増殖速度

k：自己分解定数

(19)式中比増殖速度 μ は次式の monod 型の増殖速度式を用いた。

$$\mu=\mu_{max}\cdot\frac{X}{K+X} \tag{20}$$

ここで，μ_{max}：最大比増殖速度

K：定数

X：律速栄養塩濃度

Mは藻類個体数を表わし，ここでは藻類総個体数をとった。本研究では(20)式中のXとしては，先述のようにAGR値を用いる。このAGR値としては図－1(a)に示す AGR^M（ここで試水をそのまま培養する混合培養系

をAGR mixと呼びAGR^{M}で表わす）で表現する方法と図－1(b)に示すアナベナAGRで表現する両者の方法があるが，以下ひとまずアナベナAGRで検討を加える。

4.2　湖のアナベナAGR分布の推定

(19)式を適用して藻類分布を求めるためには式中のXの分布，すなわちアナベナAGRの分布が既知でなければならない。AGR値として図－1(b)に示す実測値を活用する方法もあるが，ここでは南湖への全流入河川のアナベナAGRをも実測しているので，これらの値を活用して湖内全域の詳細値を得るために，次の拡散計算を行うことにより，湖内AGR分布を計算によって求めることにした。

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \qquad (21)$$

ここにCはAGRを表わし，他は式(19)と同じである。

u，vを先に示した渦度・流れ関数のモデルより求めた値を使い，$\triangle x=\triangle y=250$ m，$D_x=D_y=1.0$㎡/sec，境界条件として北湖との境界では，C＝一定とし，他の湖岸では$\frac{\partial C}{\partial n}=0$（nは湖岸にたてた法線），瀬田川，疎水の取入口では，$\frac{\partial^2 C}{\partial n^2}=0$ つまり，濃度は直線的に変化するとしてAGRの計算を行う。(21)式の数値計算の過程でC＜0となることがあるが，物理的に意味をもたないので，この場合にはC＝0とした。また拡散物質の総量が初期の総量に等しくなるように，計算ステップごとに補正を行った。[6] 河川から流入するAGR値については，河川流量の影響も考慮するために，対象河川の平均流量に対する流量比を重みとして乗じ，それが湖に流入すると考えた。図9はほぼ定常状態に達したと考えられる時のアナベナAGR分布の計算値で，図－1(b)の実測値と対比すれば，絶対値には問題を残すが，相対的な面的分布を一応再現しているものとみなしうる。

4.3　渦度を考慮しない場合の藻類分布の計算

図－9に示したAGR値をXとして(19)式により湖内の藻類分布を求めた。絶対値の正確な算出を今後の課題とし，ここでは相対的にいかに面的分布を再現しうるかを主として検討する。そのための境界条件として，北湖からの流入は一定値（M＝2.0），また各メッシュの計算初期値を一律0.5とした。計算結果を図－10に示す。図－2に示した実測値と対比して特に重要な差異は，計算値に湖中央部に東岸と同程度の藻類総個体数が出現している点である。図－2の実測値にそれを認めることができない。

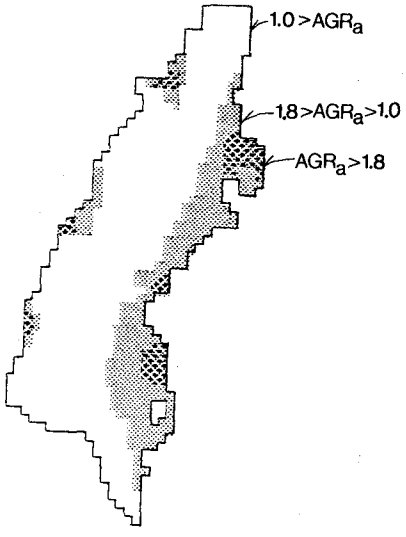

Fig. 9　Computed Anabaena AGR distribution

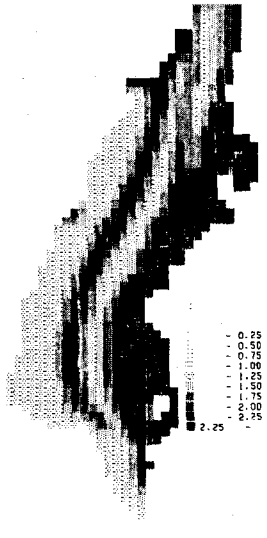

Fig. 10　Computed algal population density (All algae, α = 1.0)

4.4　渦度を考慮した場合の藻類分布の計算

図－10の結果の問題点は湖中央部と東岸部がほぼ同レベルの藻類数となっている点である。図－2の実測値では明らかに東岸部が高い値となっている。そこで冒頭にも示したように渦度と局所的な滞留時間について考察を加える。いま，図－6の渦度の計算値と図－8の局所的長滞留時間域の計算結果から，強い渦度で囲まれた長滞留時間域を図－11に示すように求めることができる。いいかえれば，境界に循環作用のあるよどみ部が図－11で表示されているものと考えてみる。先にも記したように，この部分での増殖時間がみかけ上他の部分より長くなっているものと考えてみる。増殖時間のみかけ上の長大化はたとえばつぎの(22)式の場合，(23)式と計算上同等の効果を持つ。

$$\frac{dM}{dt} = \left\{ \mu_{max} \frac{X}{K+X} \right\} \cdot M \tag{22}$$

$$\frac{M}{M_0} = \exp\left\{ \mu_{max} \frac{X}{K+X} \cdot (1+\beta)\, t \right\}$$

$$= \exp\left\{ (\alpha \cdot \mu_{max}) \frac{X}{K+X} \cdot t \right\} \tag{23}$$

ただし，βは増殖時間のみかけ上の長大化率で，αはこれを最大比増殖速度のみかけ上の換算補正率とみなしうる（$\alpha = 1+\beta$）。いいかえればみかけ上μ_{max}が渦度の関数となることを指摘している。

αの具体的な数値上の取り扱いについては今後の問題とし，とりあえず図－11に示す高渦度に囲まれたよどみ域でのαをいろいろに変えて計算した場合の結果を図－12に例示する。当然このよどみ域以外ではαは1.0である。図－12の結果からも明らかなようにαとしてほぼ1.5程度の値をとれば，計算値の分布と実測値の分布がより一致してくることが明らかとなった。

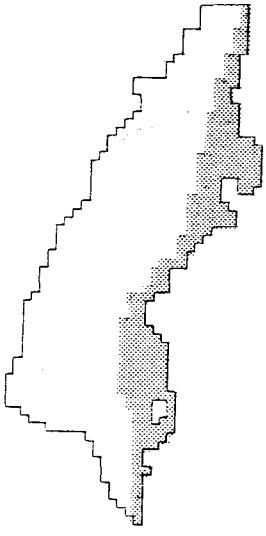

Fig. 11　Zone of long retention time surrounded by high volticity

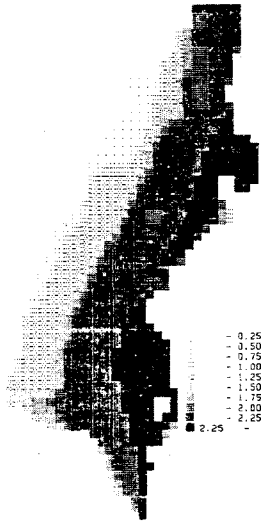

Fig. 12　Computed algal population density (all algae, $\alpha = 1.5$)

5. おわりに

一ケ年の現地調査の結果とその解析的検討から，藻類の動態解析では高濁度で囲まれたよどみ部の増殖時間をみかけ上大きくとる必要があることを定性的にではあるが指摘した。具体的な解析手法としてはこれらよどみ部での μ_{max} 値をみかけ上大きくとればよいことを示している。定量的には今後さらに検討を加えなければならない問題を多く残しているが，解析技術としては μ_{max} が濁度の関数として取り扱えばよいことを示唆した。

また，すでに活用されつつあるAGPの概念が解析上十分有用であり，その測定法上の困難（供与藻類の初期条件の統一という困難）を少しでも軽減し，データ集積を重視して解析結果をより有効にするためにはAGRという指標をより重視するのが実用上有益であることをも示唆した。ただ，藻類増殖を何が律速条件として支配している場か，さらにはAGPあるいはAGRが解析過程で加算可能かなど藻類増殖にかかわる基本事項を未解決のまま議論を展開している点が問題である。本文に示したような方向での検討が実用的解析技術として有用であると確信するものの，今後根本的に検討を追加してゆかなければならない事項を残している。御指導，御助言をお願いする次第である。

最後に，昭和57年度調査に献身的協力をいただいた木沢敏浩氏（現・ダイキン工業），58年度の本格的調査に全面的協力をいただいている河村正純技官，赤沢尚久氏，川村佳則氏はじめ研究室各位に謝意を表わす。

参考文献

1）原沢英夫，住友　恒，河村正純；藻類の動態解析における増殖能の取扱いについて，衛生工学研究論文集，vol．20，1984年．
2）宇仁菅伸介；流れ場における浮遊粒子の挙動解析に関する基礎的研究，京都大学卒業論文，1982年3月．
3）合田健編；水環境指標，思考社，1977年7月．
4）木沢敏浩；びわ湖南湖における藻類の動態に関する基礎的研究，京都大学卒業論文，1983年3月．
5）住友　恒，木沢敏浩，宇仁菅伸介；びわ湖南湖におけるアナベナAGPの調査，京都大学環境衛生工学研究会，第5回シンポジウム，1983年8月．
6）堀口孝男；汚染物質拡散の数値解析について，第16回海岸工学講演会講演集，1969年．