

45. 地球温暖化による湖沼水質の変化の モデルによる評価

ESTIMATION OF THE EFFECT OF GLOBAL WARMING ON LAKE WATER QUALITY BY USING
SIMULATION MODEL

佐藤研三*⁺ 花木啓祐** 松尾友矩*
Kenzo SATO, Keisuke HANAKI, Tomonori MATUO

ABSTRACT; It is expected that global warming may affect the water quality of rivers and lakes. For example, the rate of bio-chemical reactions in lake water would increase by increasing water temperature. Extended thermal stratification and strengthened thermocline result in increase of algal growth in epilimnion and depletion of DO in hypolimnion. The change in precipitation would alter the retention time and total nutrient load in lake. But definite quantitative change remains unknown yet.

A mathematical model was applied to a hypothetical lake to quantitatively estimate possible change in lake water quality. Climate change would decrease DO and increase COD both by 1-2mg/l. The occurrence of low-DO concentration in hypolimnion and high-COD concentration in epilimnion become earlier.

Water inflow change affects water quality with increasing COD only when nutrient concentration also increases.

KEYWORDS; global warming, water quality, lake, model

1. 研究の目的と背景

温室効果ガスの影響で地球温暖化が起こることはほぼ確実であると言われている。地球温暖化が起こると温度が上昇したり、降雨量が変化するがその際に閉鎖性水域である湖沼の水質に様々な影響が発生することが予想される。

気温上昇に伴う 表層水温の上昇によって湖沼の温度分布が変化し、また生物反応や物理化学反応の速度に変化が生じる。降雨量や降雨形態に変化が生じると湖沼に流入する負荷量や水量が変化する。

こうした様々な影響が考えられるが、温暖化に伴う湖沼の水質変化を定量的に示した研究は非常に少ない。温暖化による温度上昇や降雨形態の変化それ自身がはっきりとわかっていないことや、まだ湖沼の水質変化の機構が明確につかめているとはいえないことがその理由であろう。しかし現在までに明らかにされている情報を用いて温暖化の影響をある程度定量的に評価することが可能であり、そのような努力がなされるべきである。

本研究では生態系モデルを中心とした湖沼モデルを用いて温暖化による湖沼水質の変化の予測と評価を行い、特にどの因子が温暖化による影響に効いてくるのか、またどのようなタイプの湖沼が温暖化の影響を受けやすいのかといったことをある程度定量的に明らかにすることを目的とする。

2. 地球温暖化に伴う湖沼水質の変化として考えられる要因

温暖化によって湖の水質に対して様々な影響が及ぼされることが考えられる。その影響は大きく以下のよう
にまとめることができる。

1. 湖に流入する水量、汚濁負荷量の変化
2. 湖内部での水質を支配する機構の変化

*東京大学工学部都市工学科 Department of Urban Engineering, University of Tokyo

+現在東京都下水道局

**東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

2. 1 湖に流入する水量、負荷量の変化

地球温暖化によって降雨形態に変化が生じると予測されている。降雨強度が大きくなると浸食が激しくなり、負荷の流出が大きくなることが考えられる。また温度上昇や土壌中の水分量の変化などによって土壌中での栄養塩や有機物の循環のバランスに変化が生じ、植物の成長速度や土壌の栄養塩保持能力、水分保持力が変化しその結果として降雨時の負荷流出量が変わることが考えられる。こうした降雨強度や降雨量の変化による負荷量の流出の変化は特に農地で大きいことが予想される。また雪解けの気候に変化が生じたり、蒸発散のバランスに変化が生じることによって河川の流出量の形態が異なると考えられる。

また汚濁負荷は主に河川を通して湖に流入するが、河川での汚濁物質の変化にも影響がでることも考えられる。水温が上昇すると河川内での分解反応や光合成の速度が増大する。また、流量が変化することにより、河川における汚濁負荷の流達率に変化が生じることも考えられる。これらを図式化すると図2. 1の様になる。

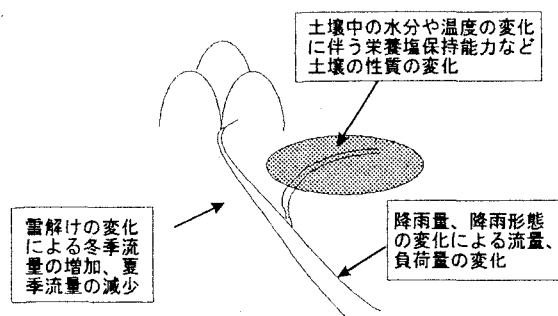


図2. 1 温暖化により湖に流入する水量や負荷量の変化

2. 2 湖内部での水質を支配する機構の変化

温暖化による、湖内部での水質機構への影響は物理的变化と、生物化学的变化に分けることができる。

(A) 物理的变化

気温が上昇することによって河川水温が上昇したり、また湖の表層水温が上昇すると言われているが、表層水温が上昇することによって夏季における温度成層の期間が長くなることが考えられる。また河川からの流入流量が変化することによって滞留時間や湖の温度分布が変化する。

図式化すると図2. 2の様になる。

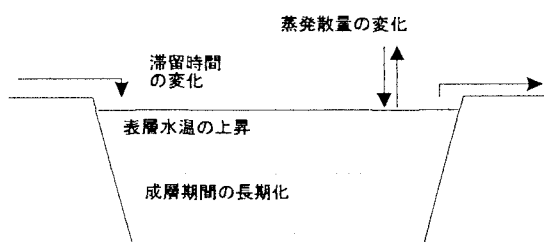


図2. 2 温暖化による湖内部での物理的变化

(B) 生物化学的变化

水温が上昇することによって物質変化に関わる各反応速度に変化が生じる。水温上昇によって植物プランクトンの最大比増殖速度が増大するが、水温が高くなりすぎると逆に増殖が阻害される。またデトリタスやCODの分解速度、底泥の酸素消費速度や溶出速度は水温上昇によって全て増大し、その結果DO消費が大きくなる。温度成層が発生している期間中は湖の上層から下層へのDOの移動がほとんど無い為、特に湖の底部におけるDO消費の増大は大きな影響を与えることが考えられる。図式化すると図2. 3の様になる。

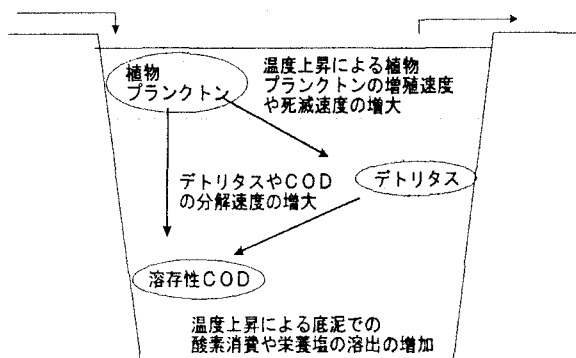


図2. 3 温暖化による湖内部での生物化学的变化

3. モデルの構造と考え方について

3. 1 それぞれのモデルの概要

本研究では仮想的な湖を考え、湖の内部での変化を記述する湖の生態系モデルをメインモデルとし、それに流量と負荷量の関係式を用いた簡単な負荷流入式を組み合わせることによって温暖化の影響を評価した。また湖モデルでは簡単な構造の完全混合モデルと二層モデルを対象モデルとして評価の比較を行った。全体の考え方を図3. 1に示す。

3. 2 温度上昇による変化の与え方について

現在、GCMモデルなどによって各地域での気温や降雨量の変動などが計算されている。しかし気温や降雨量の予測は非常に難しく、その精度と信頼性は良いとはいえない。そこで本研究においてはあえてGCMの出力を用いず、シナリオの形で気温を1～3度上昇させることによって温度上昇の変化を与えた。

3. 3 負荷流入式について

温暖化によって負荷流入に変動が起きるのは特に降雨形態の変化による非点源負荷からの流入であると予想されるが、現在、降雨量の変化を取り入れて非点源負荷の負荷量を算定することは非常に難しい。ここでは非常に簡単に評価する方法として、負荷量を流量の関数とするL-Q曲線から負荷の変動を調べ、流量に変動が起こった際に負荷量の濃度の変化がどの範囲で生じるかを調べた。

3. 4 湖モデルについて

鉛直一次元モデルをメインモデルとして用い、比較のためより簡単な完全混合モデル、二層モデル、Vollenweiderモデルを用いた。それぞれのモデルに対して次のような計算方法を用いた。

*鉛直一次元モデル

水深方向以外には完全混合しているとし、流況計算と水質計算を行った。

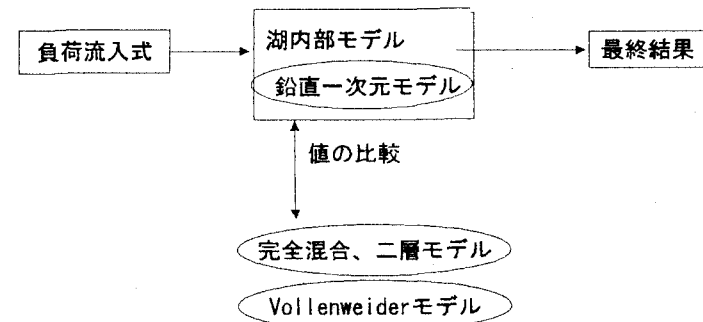


図3. 1 モデル全体の考え方

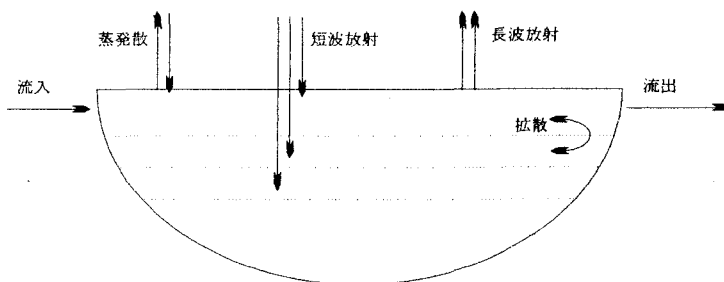


図3. 2 モデルにおける熱収支の構造

流況予測と水理状態予測... 上下層の移動は拡散のみによって生じるとし、拡散係数は密度と風の関数であるとした。熱収支を用いて水温構造、水理構造を計算した。流出入は最上層でのみ起こると考えた。計算方法はCrank-Nicholsonの方法を用いた。図式化すると図3. 2のようになる。

水質予測... 植物プランクトンまでを範囲に入れた生態系モデルを用いた。リン、窒素は溶存態全リン及び全窒素とデトリタスや植物プランクトン中のリン、窒素の形に分けた。計算方法についてはCrank-Nicholsonの方法を用いた。図式化すると図3. 3、図3. 4のようになる。

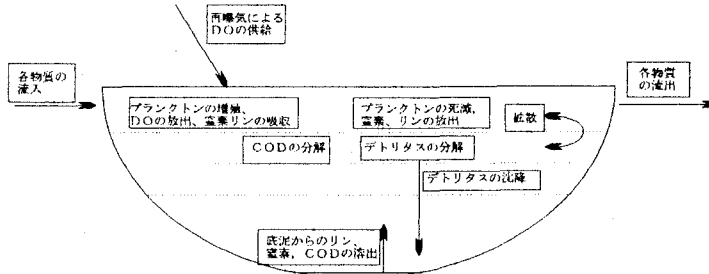


図3. 3 水質計算の全体の構造

*完全混合モデル、二層モデル

水理構造予測... 二層モデルの場合、温度をシナリオの形（正弦関数）で与え、拡散係数を温度差のみの関数として水理構造を計算した。水質予測... 植物プランクトンまでを範囲に入れた生態系モデルを用いた。

*Vollenweiderモデル

OECDの経験式⁽¹⁾を用いて流入リン濃度からクロロフィルa濃度の計算を行った。

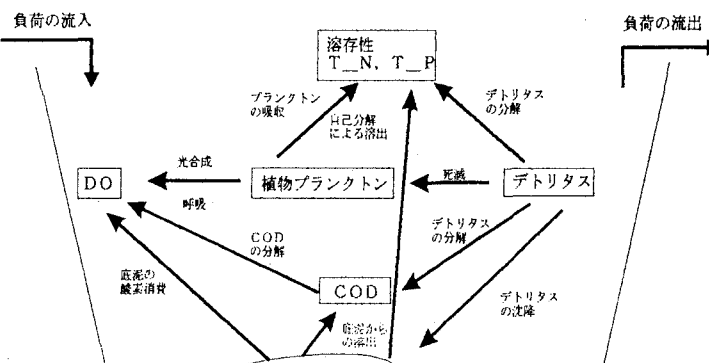


図3. 4 各水質項目の相互関係

4. 計算結果とその考察

4. 1 負荷流入式について

流量と負荷量の関係式には様々なものがあるが、ここでは非常に単純な例として Stevens らの式⁽²⁾を用いて流量の変動に対して負荷量がどのように変動するかを調べた。

流量（ $Q(m^3 \cdot 10^6/day)$ ）と負荷量（ $L(ton/day)$ ）の関係式は次のようなものである。

全窒素

$$\log L = 0.469 + 0.930 \log Q$$

全リン

$$\log L = -0.819 + 0.985 \log Q$$

この式を用いて、流量と負荷量の濃度の関係を計算したものを表 4. 1 に示す。

流量が二割程度変化してもリンや窒素の濃度はほとんど変わらない。このことから流量の変化によって負荷量の濃度に大きな変化は生じないと考え、以下の計算では流量の変化と共にリン濃度の変化をシナリオとして与えた。

表 4. 1 流量と負荷濃度の関係式

流量 (m^3/s)	1	1.2	10	12	100	120	1000	1200
全リン濃度(mg/l)	0.46	0.46	0.44	0.44	0.43	0.43	0.41	0.41
全窒素濃度(mg/l)	1.85	1.87	1.62	1.59	1.38	1.36	1.17	1.15

4. 2 各条件での鉛直一次元モデルの計算結果

(A) 計算条件

第三章で示した考え方を用いて、湖の水質を計算した。計算は表 4. 2 にある条件で行ない、表 4. 3 の各ケースについて計算を行った。

表 4. 2 計算に用いた共通の条件

湖の表面積	10km ² (底部 5km ²)
平均照度	300cal/cm ² .day
照度の変化幅	100cal/cm ² .day
平均気温	15℃
気温の変化幅	12℃
流入平均水温	12℃
流入水温の変化幅	8℃
流入水質	COD
	溶存態窒素
	全リン
全リンに対する懸濁態リンの割合	0.6
プランクトンの最大比増殖係数	1.5(1/Day)
プランクトンの死滅係数	0.1(1/Day)
底泥の酸素消費係数	1.0(gO ₂ /m ² /Day)
分解係数	0.04(1/Day)
空間差分	1m
時間差分	1/100 (日)

表 4. 3 各ケースに用いた計算の条件

	流量	水深	滞留時間(y)	流入リン濃度
ケース 1	50m ³ /s	20m	0.10	0.2(mg/l)
ケース 2	50m ³ /s	10m	0.05	0.2(mg/l)
ケース 3	50m ³ /s	50m	0.24	0.2(mg/l)
ケース 4	5m ³ /s	20m	0.95	0.2(mg/l)
ケース 5	5m ³ /s	10m	0.48	0.2(mg/l)
ケース 6	5m ³ /s	50m	2.38	0.2(mg/l)
ケース 7	6m ³ /s	20m	0.79	0.2(mg/l)
ケース 8	6m ³ /s	20m	0.79	0.18(mg/l)
ケース 9	6m ³ /s	20m	0.79	0.22(mg/l)

ここで、照度と気温の季節変動については正弦関数の形で表現させた。また流入流量は一定であるとして与えた。温度変化については流入水温、気温共に平均の温度を上昇させることによって与え、1度～3度まで変化させて計算した。ケース 1 からケース 6 ではそれぞれのケースについて温度上昇の変化の計算をさせ、水深、流量、滞留時間が異なる湖の各タイプについて水質に対する影響がどのように出るかを調べた。ケース 7 からケース 9 では流入流量と負荷量の濃度が変化した際に水質に対する影響がどのように出るかを調べた。

最後に温度上昇の変化と流量の両方の変化が起きた際の水質に対する影響を調べるためにケース 9 において温度上昇の変化の計算をさせた。計算結果の 1 例として、ケース 4（水深 20m、滞留時間約 1 年）における温暖化前の水質分布と 3℃上昇させた時の水質分布について図 4. 1～図 4. 4 に示す。

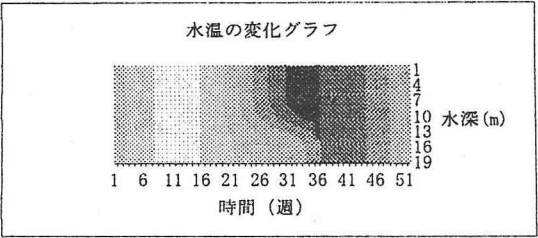


図4. 1 温度上昇による水温の変化

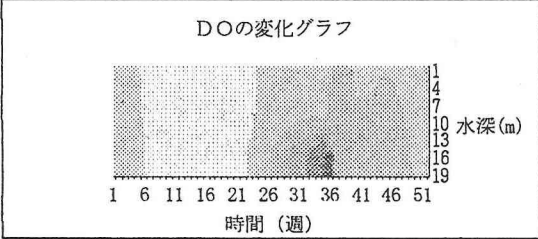
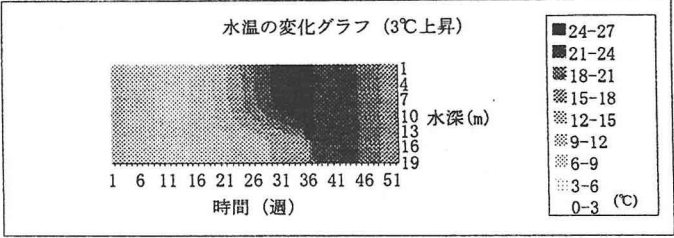


図4. 2 温度上昇によるDOの変化

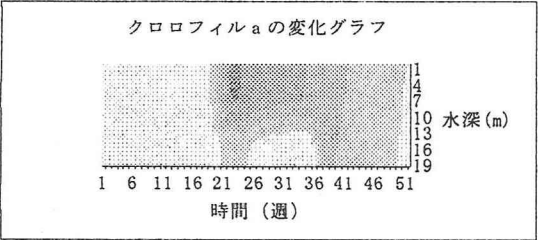
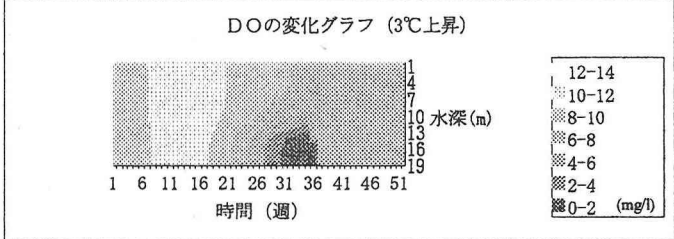


図4. 3 温度上昇によるクロロフィルaの変化

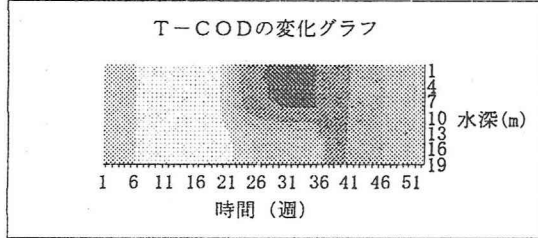
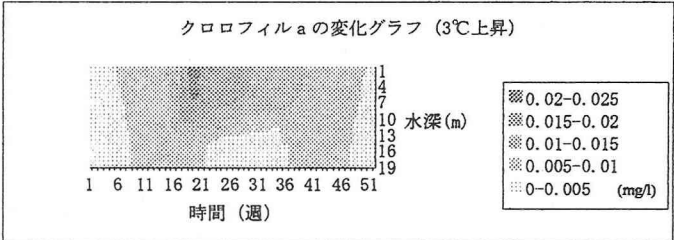
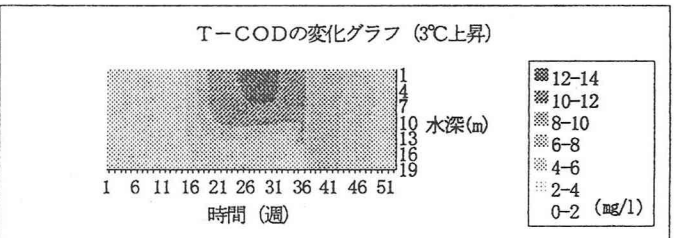


図4. 4 温度上昇によるT-CODの変化



(B) 計算結果のまとめ

以下に温暖化による影響の特徴について、DO、全COD（以下T-CODと記す）、クロロフィルa（以下Chl-aと記す）の濃度変化を中心としてまとめる。

(1) 温度上昇の直接影響

1) 年平均水質について

各ケースについて3度上昇した際に、温度成層の上下別に年間平均水質の変動の程度についてまとめたのが表4. 4である。この表から、次のような傾向を示すことが分かった。

(ア) どのケースにおいても各水質の変化は同じ傾向を示す。それらは次のようにまとめられる。

*DOは上層、下層共に0. 5～1. 5 mg/l程度減少する。下層での減少は成層化の起きている湖で大きい。

*Chl-a, COD、デトリタスは温度成層の上層を中心として増加する。T-CODの増加は1mg/l程度である。

表4. 4 各ケースでの温度上昇による平均水質の変化

	DO(mg/l)		溶存態COD(mg/l)		デトリタス(mg/l)		Chl-a(ug/l)		全COD(mg/l)	
温度成層との上下	上層	下層	上層	下層	上層	下層	上層	下層	上層	下層
流量 5m3/s 水深 10m	-0.4		+0.4		+0.2		+2		+0.7	
流量 5m3/s 水深 20m	-0.5	-1.5	+0.3	+0.3	+0.2	+0.2	+1	微増	+0.7	+0.7
流量 5m3/s 水深 50m	-1.0	-1.5	+0.6	+0.1	+0.3	0	+2	0	+1.5	+0.2
流量 50m3/s 水深 10m	-1		+0.2		+0.3		+3		+1.0	
流量 50m3/s 水深 20m	-0.7	-1.5	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+2	0	+0.9	+0.5
流量 50m3/s 水深 50m	-0.7	-1.0	+0.2	0	+0.2	0	+3	0	+1.0	0

- * 溶存態リンの濃度は上層を中心として減少する。
- * 溶存態窒素についてはほとんど変化がない。
- (イ) 本計算において特に水深が 20m のケースではD Oの減少が大きい。

2) 季節変化、水質の最大値、水質の悪化期間について
各ケースでの全CODとクロロフィルの最大値と高濃度の期間の変化についてまとめたのが図4. 5、図4. 6である。

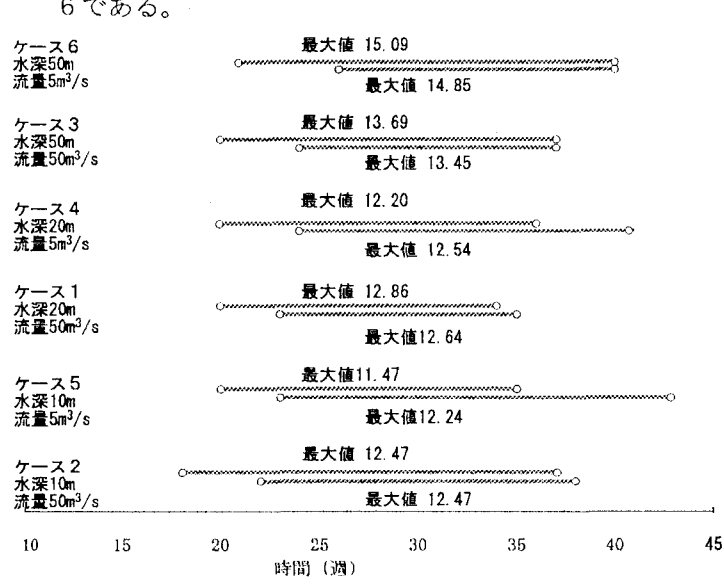


図4. 5 T-CODの高濃度期間と最大値の変化。
(各ケースにおいて下は温度上昇前、上は温度上昇後の値。
時間は1月から経過した週、数字は最大値、棒線はT-COD 10mg/l 以上の区間を示す。)

この図から以下の傾向にあることが分かった。
* 湖の全タイプに共通して、温度上昇により夏季に低層のD Oが減少し、クロロフィルとT-CODの濃度が高くなり始める時期が早くなっている。また汚濁水質の年変動が小さくなり、最大値は減少するが、濃度の高い期間が長くなり、年平均の値が大きくなる。
* 滞留時間が長い湖の場合ではクロロフィルやT-CODが増加し始めるのも早くなっているが、減少し始めるのも早い。特に水深が小さい湖であるケース4、5では濃度の高い期間は短くなる。それに対して滞留時間が小さい湖であるケース1～3や、水深の大きい湖であるケース3、6の場合、増加し始めるのが早くなり、減少し始める期間は変わらない。水質基準について考える際には、滞留時間の短い湖や水深の大きな湖について注意が必要であることがわかる。

(2) 流量変化の影響
滞留時間が長い湖における流量と負荷濃度の変動に対する影響をここでは調べた。ケース4における全CODとクロロフィルaについての最大値と高濃度の期間の変動をまとめたのが図4. 7である。
濃度が変化せずに流量のみが増加した場合は各水質の最大値、高濃度期間ともにほとんど変化しない。図4. 7の各水質指標において濃度が増大すると高濃度期間、最大値共に増加し、濃度が減少すると共に減少していることが分かる。流入流量の増大と共に流入汚濁物質(この場合はリン)濃度も増大する場合、注意が必要であることが分かる。

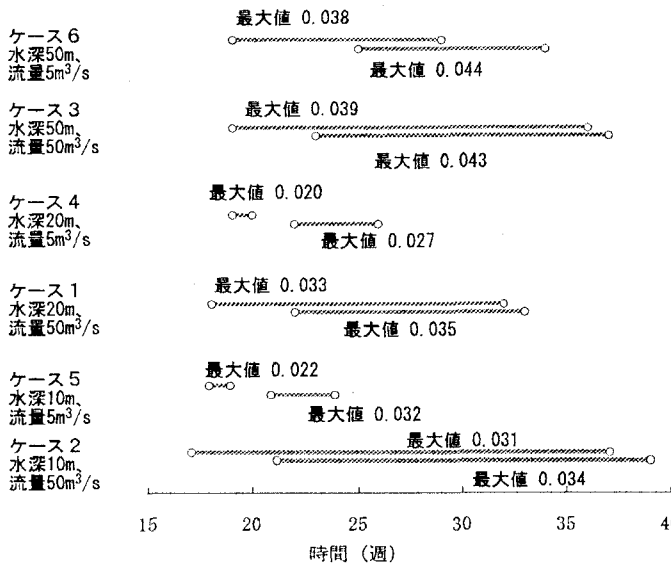


図4. 6 クロロフィルの高濃度期間と最大値の変化。(各ケースにおいて下は温度上昇前、上は温度上昇後の値。
時間は1月から経過した週、数字は最大値、棒線はChl-a 0.02mg/l 以上の区間を示す。)

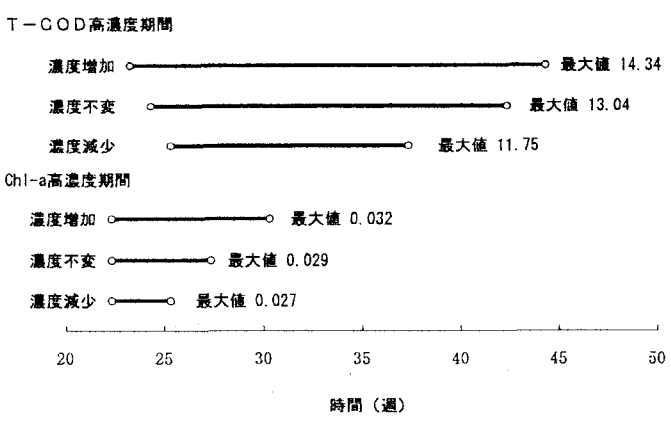


図4. 7 流量が増加した際のT-COD、クロロフィルaの高濃度期間(「高濃度」の基準は図4. 4、図4. 5と同じ)

4. 3 感度解析

温暖化によりプランクトンの増殖によるCODの増加と低層でのDOの減少に大きな影響が出る可能性が大きいことがわかった。そこで、そのプランクトンの増殖と、低層でのDOの減少に関わっていると思われる以下のパラメーターについて、まず温度上昇によってどの程度値が変わるかを調べた。そしてその値の変動の幅を用いて各パラメーターの値を変化させ、感度解析を行った。

それぞれのパラメーターの値の時間及び空間の総平均値は表4. 5のようになった。

	温度上昇前	3℃上昇後	倍率
底泥での酸素消費速度 (gO ₂ /m ² .Day)	0. 5 3	0. 6 1	1. 1 5
分解速度(1/Day)	0. 0 2 9	0. 0 3 3	1. 1 4
プランクトンの最大比増殖速度 (1/Day)	0. 0 9 6	0. 1 1 2	1. 1 7
プランクトンの死滅速度(1/Day)	0. 1 1 3	0. 1 3 2	1. 1 7

それぞれのパラメーターは10～20%の変動をしていることがわかる。そこで各パラメーターの基本値を表4. 6のように±20%変更させて計算させた。

計算をさせた結果を以下にまとめる。

(単位は表4. 5と同じ)	もとの値	変更した値	
底泥での酸素消費速度	1. 0	0. 8	1. 2
分解速度	0. 0 4	0. 0 3 6	0. 0 4 8
プランクトンの最大比増殖速度	1. 5	1. 2	1. 8
プランクトンの死滅速度	0. 1	0. 0 8	0. 1 2

各パラメーターの値を増加させた時の表層でのクロロフィルとT-COD、底泥での酸素濃度の悪化期間とその最大値を図4. 8から図4. 10に示す。

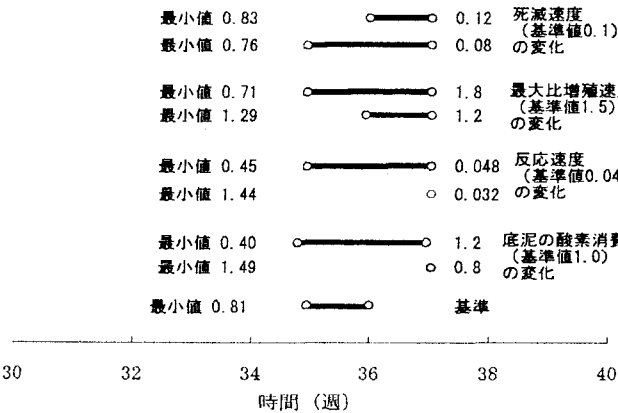


図4. 8パラメーターが変化した際の底層のDO濃度の最小値と低濃度期間（2 mg/l 以下）

以上の図から、各パラメーターについて、以上のことがわかる。

*底泥の酸素濃度が低くなる原因として、底泥の酸素消費速度と分解速度が大きくなることが挙げられる。

*クロロフィル濃度やT-COD濃度は最大比増殖速度とその他の係数の変化のかね合いによって決まるが、特にT-CODについてはプランクトンの最大比増殖速度の影響が大きい。

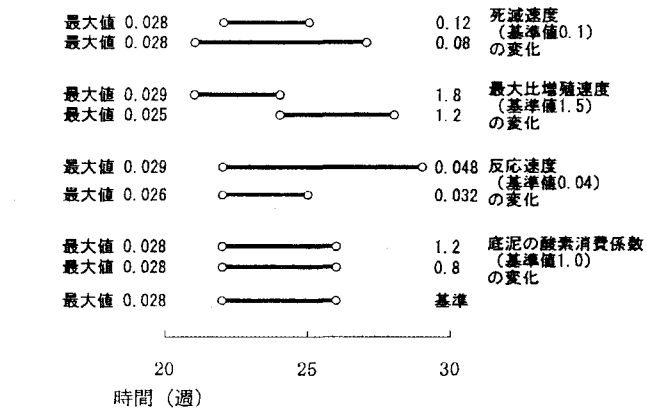


図4. 9パラメーターを変化させたときの表層でのクロロフィルaの最大値と高濃度期間

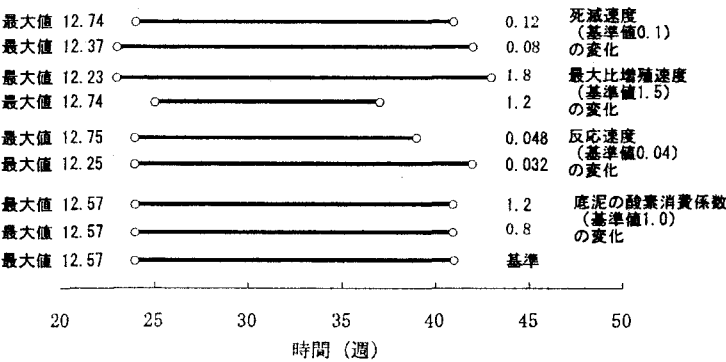


図4. 10パラメーターを変化させたときのT-CODの最大値と高濃度期間

4. 4簡単なモデルとの値の比較

ここでは鉛直一次元モデルでの値と、温暖化の影響を示すには不十分であるが、簡単なモデルである完全混合モデル、および二層モデルと、さらに Vollenweider 式での値と比較し、モデルの信頼性について検討してみる。

ここでは水深 10m と、水深 50m の各湖について各モデルで平均の Chl-a 濃度について比較を行った。結果を表に示す。

水深 10m	流入リン濃度(mg/l)	平均 Chl-濃度(ug/l)	水深 50m	流入リン濃度(mg/l)	平均 Chl-濃度(ug/l)
鉛直一次元	0.2	9.1	鉛直一次元	0.2	2.5
完全混合	0.2	9.6	二層	0.2	5.0
Vollenweider	0.2	16.0	Vollenweider	0.2	11.0

Vollenweider モデルでの平均 Chl-a 濃度が高い値になっているが、このモデルが経験式であり、予測精度があまり高くないことを考えれば、モデル間の値において矛盾は生じていないことが分かる。

5. 結論

本研究では以下の条件において温暖化の影響について計算した。

- * 仮想的な湖における内部のみを考えた鉛直一次元モデルを用いた。
- * 気候変化についてはシナリオの形で与えた。その際、温度変化については 1 ～ 3℃ の上昇を、流量変化については 2 割前後の増減について想定した。

結果をまとめると以下の様になる。

- * 温度上昇の影響
 - 1) 湖内の DO の濃度が減少し、T-COD の濃度が増加する。
 - 2) 一年のサイクルの中で、底層の DO が減少し、COD の濃度が増大し始める時期が早くなる。減少し始めるのは湖のタイプによって異なる。滞留時間の短い湖の場合、減少がしにくい傾向にある。
 - 3) T-COD のある程度高い濃度の期間が長くなる。最大値はほとんど増加しないか、減少する。
 - 4) 底層の DO 濃度の減少には底泥の酸素消費速度と分解速度の増大が原因となっており、T-COD の増大は増殖速度の増大が大きな原因となっている。

* 流量変動の影響

- 1) 流量が増加する際に、負荷量の濃度も増大すると T-COD の最大値や、平均値が増加する。負荷の濃度が変化しなければ、流量の変化の影響は小さい。

6. 今後の課題

本研究では湖の内部モデルを中心として行ってきたが、総合的な温暖化による影響は湖に流入する流量モデル、流入負荷モデルと組み合わせて初めて評価可能である。より精度の高い予測をするためには両モデルの構築が必要となる。また、精度を高めるためには実際の流域にあてはめて計算を行い、パラメーターを補正していく作業も必要となるであろう。

主要参考文献

(1) . OECD(1980):Eutrophication of Waters -monitoring, assessment and control.
(2) . Stevens, R.J. and Smith, R .V(1978): A comparison of discrete and intensive sampling for measuring the loads of nitrogen and phosphorus in the river Main, County Antrim,Water Research, 12
(3) . 環境庁 (1 9 8 5) : 湖沼水質管理指針策定調査
(4) . 湖沼工学 : 岩佐義郎／編著
(5) . 津野洋、宗宮功、西村文武 : “都市水利用・循環システムへの影響評価及び対策に関する研究”、環境庁企画調査局地球環境部環境保全対策課研究調査室、地球環境研究総合推進費平成 4 年度終了研究成果報告集、p288-300