

II-73

アオコ発生モデルの数値シミュレーションに関する基礎的研究

北見工業大学大学院 学生員 宮田 佳明
北見工業大学工学部 正員 佐渡 公明

1. はじめに

近年、網走湖ではアオコが大発生して湖水環境が著しく悪化している。そこで水質浄化対策を施す必要があるが、対策を実行した場合に、水質における影響を予測するため生態系モデルを考えることが多い。網走湖の場合では宗宮モデル²⁾をもとにして計算が行われている。そして計算の結果、流入負荷削減などの主要な対策を評価し、水質を予測できる段階にある¹⁾。しかし、このモデルは植物プランクトンにおいて、総量を予測するものであり、植物プランクトンの一種であるアオコ自体の発生量を予測するものではない。そこで本研究では網走湖におけるアオコ発生現象を可能な限り再現した上で、将来的にはアオコの発生量を予測することを目的とする。まず今回は、植物プランクトン量を珪藻と、藍藻・緑藻に分けてそれぞれ発生量を予測し、夏期のアオコ発生を再現できるかどうかを検証する。

2. 網走湖とアオコ

1. 網走湖の水質 : 網走湖には、都市からの生活排水や森林、農地からの排水が、網走川を通じて大量に流れ込んでおり、さらに長年にわたって湖底に沈澱したヘドロから栄養塩類が溶出して窒素・磷濃度が高まる富栄養化が極度に進行している。湖が海から近いので(7km)満潮時には逆流があり、網走湖は塩水層と、淡水層(汽水状態)の2層構造になっている。下層の塩水層の水質はきわめて悪く、DOが0の無酸素層になっている。また、春先にはその塩水層が強風によって水表面に湧昇してくる青潮が発生する。その塩淡水境界層が年々上昇傾向にあることから水質改善が急務となっている。

2. アオコについて : アオコとは主に夏期の水温が高い時期に、植物プランクトンが大発生して湖

面が緑色のクリーム状の膜で覆われる現象である。このアオコ発生でシジミなどが大きな被害を受ける。網走湖のアオコの原因種は、植物プランクトンの藍藻類、アナベナ属であり、寒冷地の富栄養湖において見られる種類である。水温が20~25℃の時最もよく増殖する。夏期の網走湖で真夜中(AM1:00)に突然アオコが大発生している事実がある。藍藻は、細胞内のガス胞の大きさを変えて浮上・沈降を繰り返すものが多く、この場合の発生原因は、水面下の藍藻類が全体的に浮上したためと思われる。

3. 計算で用いた生態系モデル

網走湖の生態系モデルは、宗宮モデルを用いて8個(植物プランクトン、動物プランクトン、無機態窒素・磷、有機態窒素・磷、溶解性・浮遊性のCOD)の水質指標それぞれについて微分方程式で表現する。

植物プランクトンの式を(1)に示す。(1)式中の増殖速度 G_p を(2)式に示すが、その水温に関する項は、藻類を適温が15~20℃の珪藻と、適温が25~30℃の緑藻・藍藻類に別れている。そこで、珪藻の増殖に及ぼす水温の影響を放物線(17℃で最大値)で近似し、また藍藻・緑藻の増殖速度は水温に一次比例するとした。

本研究ではこの生態系モデル(宗宮モデル)に、1日毎の流入出量、逆流入量、日射量、湖体積、水温のデータを与えてルンゲクッタ法で数値計算した。また p (珪藻比率) = 0.5を予め与えて植物プランクトン全体量を推定した場合(全藻類モデル)と、(2)式の水温に関する項を2次と1次の2式に分けて珪藻と藍藻・緑藻のそれぞれを推定した場合(4),(7)式(藍藻・珪藻モデル)について計算し、比較を行った。

○ 全植物プランクトンの水質方程式（全藻類モデル）

$$\frac{dP}{dt} = (G_P - k_2 \cdot T - G_z \cdot \frac{Z}{P} - d) \cdot P - \frac{P \cdot Q}{V} \quad (1)$$

$$G_P = \{p \cdot \mu_0 \cdot \left[-\frac{T^2}{289} + \frac{T}{8.5} \right] + (1-p) \cdot \mu_c \cdot k_1 \cdot T\} \cdot \frac{L}{K_L + L} \cdot \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \cdot \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}} \quad (2)$$

$$G_z \cdot Z = C_g \cdot K_{PP} \cdot \frac{P}{K_{PP} + P} \cdot Z \quad (3)$$

○ 珪藻と藍藻・緑藻に分けた水質方程式（藍藻・珪藻モデル）

$$\frac{dP_1}{dt} = (G_{P1} - k_2 \cdot T - G_{z1} \cdot \frac{Z}{P_1} - d) \cdot P_1 - \frac{P_1 \cdot Q}{V} \quad (4)$$

$$G_{P1} = \mu_c \cdot k_1 \cdot T \cdot \frac{L}{K_L + L} \cdot \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \cdot \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}} \quad (5)$$

$$G_{z1} \cdot Z = C_g \cdot K_{PP} \cdot \frac{P_1}{K_{PP} + P_1 + P_2} \cdot Z \quad (6)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = (G_{P2} - k_2 \cdot T - G_{z2} \cdot \frac{Z}{P_2} - d) \cdot P_2 - \frac{P_2 \cdot Q}{V} \quad (7)$$

$$G_{P2} = \mu_0 \cdot \left[-\frac{T^2}{289} + \frac{T}{8.5} \right] \cdot \frac{L}{K_L + L} \cdot \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \cdot \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}} \quad (8)$$

$$G_{z2} \cdot Z = C_g \cdot K_{PP} \cdot \frac{P_2}{K_{PP} + P_1 + P_2} \cdot Z \quad (9)$$

P : 全藻類濃度 (μgchl. a/l)
 Z : 動物プランクトン濃度 (mgC/l)
 P₁ : 藍藻・緑藻濃度 (μgchl. a/l)
 P₂ : 珪藻濃度 (μgchl. a/l)
 C_{IN} : 無機態窒素濃度 (μg/l)
 C_{IP} : 無機態リン濃度 (μg/l)
 T : 水温 (°C)
 Q : 網走湖からの流出水量 (m³/d)
 V : 網走湖容積 (m³)
 L : 日射量 (cal/cm²・d)
 t : 時間 (day)

p : 植物プランクトン群衆中の珪藻の割合
 μ₀ : 珪藻の最大増殖速度 (day⁻¹)
 μ_c : 藍藻・緑藻の最大増殖速度 (day⁻¹)
 k₁ : 藍藻・緑藻の増殖速度の温度影響定数。 (°C⁻¹)
 k₂ : 植物プランクトンの呼吸速度 (°C⁻¹・d⁻¹)
 k_a : 動物プランクトンの呼吸速度 (°C⁻¹・d⁻¹)
 K_i : iに関する Michaelis 定数 (cal/cm²・d)
 C_g : 動物プランクトンの濾過速度 (l/mgC・d)
 d : 沈降速度 (day⁻¹)

上記だけでなくすべての水質方程式に用いられている係数は、すべて平成6年度網走湖水質保全対策検討委員会の資料¹⁾のものを用いた。また水温・日射量は、平成3年の日毎のデータをあたえ、プランクトン以外の負荷量は日流量を使用し、流量負荷曲線（平成4年度の委員会資料¹⁾）に代入して求めた。

4. 計算条件

Case1. まず、平成3年度8月の実測データによる31日間の計算を行い、1日毎の物質量を求めた。

さらに31日間の水温を一定にして計算した。その場合15°C、20°C、25°C、30°Cの4通りの水温について計算し、水温と各水質指標間の関係を調べた。

Case2. 平成3年のデータを用い数値計算を365日間行った。そして各水質指標の季節変動や実測値との誤差について調べた。

上記Case1, 2の方法は、全藻類モデルと藍藻・珪藻モデルでそれぞれ計算を行って結果を比較した。

Case3. (6)式は藍藻・緑藻についての動物プランクトンの補食速度だが、諏訪湖の生態系モデル³⁾で

は藍藻は珪藻より動物プランクトンの捕食量が少なく設定されている。そこで(6)式に0, 0.2, 0.5, 0.8の比率を乗じて藍藻・緑藻の捕食量を表し、平成3年のデータを用いて数値計算を365日間藍藻・珪藻モデルについて行った。そして藍藻・緑藻と珪藻、さらに動物プランクトンの季節変動について調べた。

5. 計算結果と考察

Case1. 図1.1は、実測気温データから回帰式で水温を求めて計算した結果であり、全藻類モデルと藍藻・珪藻モデルとを比較している。図1.1の珪藻と藍藻・緑藻の和は、やや少な目であるが、ほぼ全藻類モデルで求めた植物プランクトン量に等しくなっている。図1.2では水温を一定に保ち(30℃)、計算を行った場合であるが、藍藻・緑藻が珪藻の最大値を上回っており、藍藻・緑藻と珪藻の和が全藻類量モデルで求めた全藻類量とほぼ等しくなっている。他にも15℃、20℃、25℃で計算したが、それらは図1.1にかなり近い波形となった。

図1.3は藍藻・珪藻モデルで計算したものである。藍藻・緑藻の濃度は水温が上昇するほど増加することが分かる。図1.3のように、水温と共に増加する他の水質指標は、他に無機態磷があった。溶存性COD(SCOD)は、水温上昇に対して逆に減少した。

それとは異なり、図1.4の珪藻では、20℃が最大のピークをもつ曲線であり、増殖速度係数が二次曲線のためその性質が濃度の変化に現れている。動物プランクトン濃度も水温変化に対して図1.4と同様になっている。それは、動物プランクトンが主に珪藻を餌にして増殖していることを表しているものと思われる。

Case2. 図2.1から2.4は、全藻類モデルでの平成3年の365日間の計算結果に、網走開発建設部が測定した水質指標の実測値データを重ね合わせたものである。平成2年12月31日を初期値(経過日数0)とし、ドットは実測値を示している。図2.1では、植物プランクトンの直後に動物プランクトンのピークが起きている。植物プランクトンの計算結果と実測値に近い部分があるが、相対誤差が-100~160%になり、RMS誤差が29.0($\mu\text{g/l}$)であるので、オーダ的には再現しているが、余りよく実測値を再現できたとはいえない。動物プランクトンは、実測値が

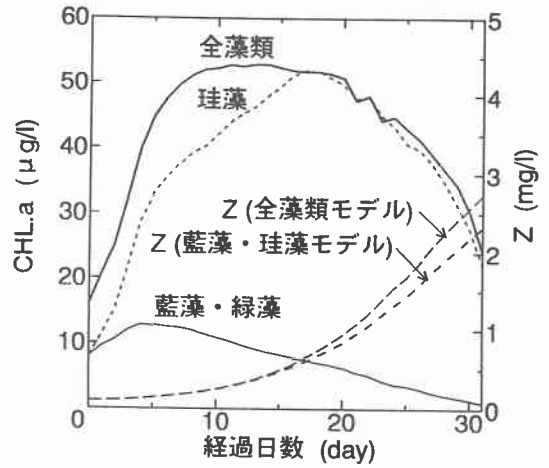


図 1. 1

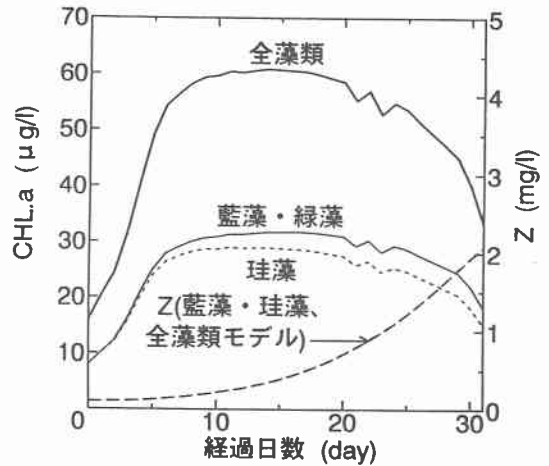


図 1. 2

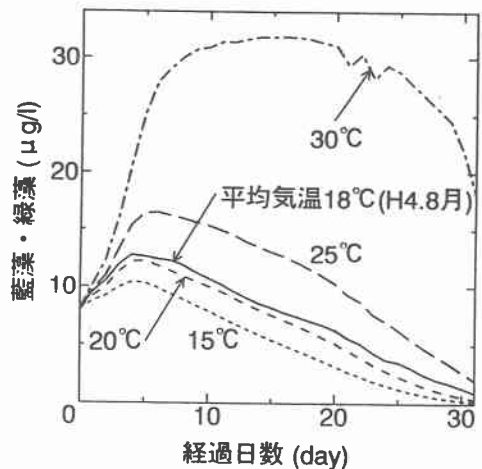


図 1. 3

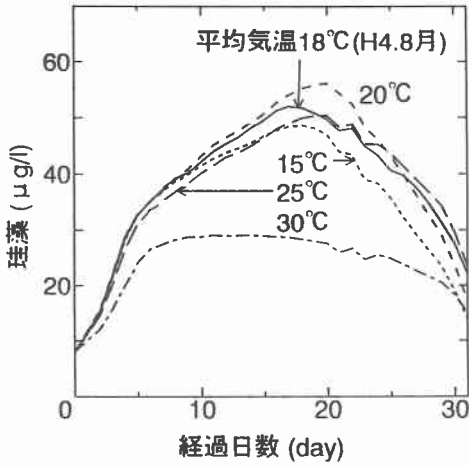


図 1. 4

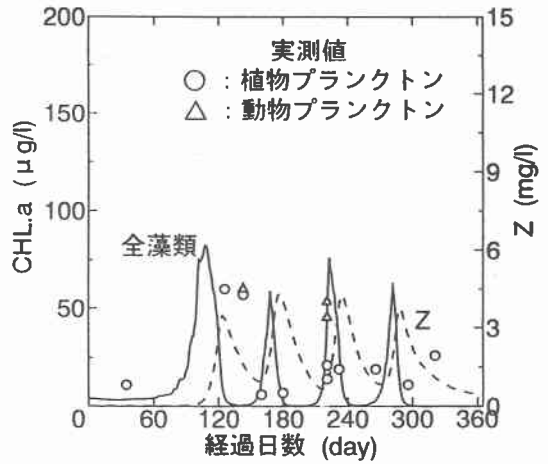


図 2. 1

1年間に2回しかないが、相対誤差は-70%前後であり、やや計算結果が少な目である。

次に無機態窒素についての計算結果を図2.2に示す。植物プランクトンのピークの直後に有機態窒素のピークが現れ、その時点で無機態窒素の谷が現れる。理由としては、無機態窒素を植物プランクトンが吸収して増殖する。そのため有機物も増加するが、動物プランクトンの増加によって植物プランクトンが減少し、再び無機態窒素が増加していると考えられる。この図からわかるように、無機態窒素の計算結果と実測値がかなりかけ離れている。特に網走湖における夏期の無機態窒素の激減がシミュレーション結果と一致していない。有機態窒素を見てみると、相対誤差は-60~2%の間であり、実測値よりやや低い、比較的実測値に近いことがわかる。

磷についての結果を示すと、図2.3の様になる。無機態磷は実測値が夏期において測定不能になるほど減少するため実測値が少ないのであるが、相対誤差は約100~1400%の大きい値になった。有機態磷では、-70~約400%であり無機態磷よりも実測値に近い。

溶解性COD(SCOD)は、実測値の増減の傾向が計算値に近いように思われる。(図2.4)相対誤差も-60~2%程度で誤差の傾向が有機態窒素と似ている。浮遊性COD(PCOD)では、相対誤差が-60~180%の範囲であり、比較的好く再現できているが、夏期において相対誤差180%と計算値が高い。

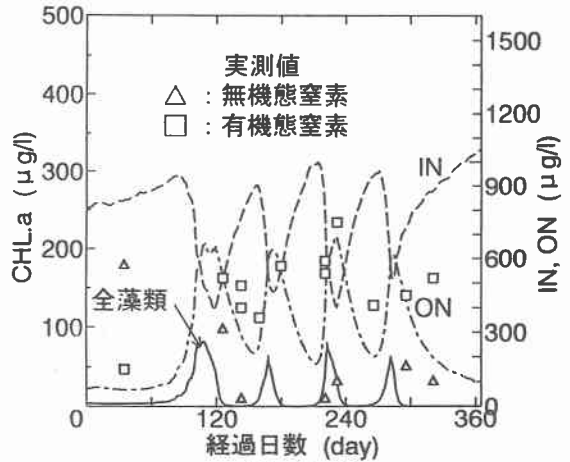


図 2. 2

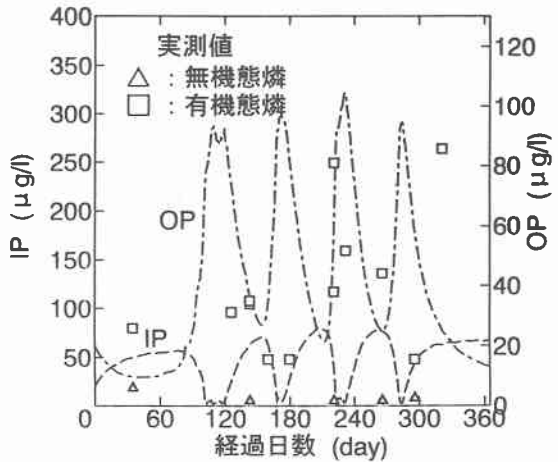


図 2. 3

このように窒素・燐の栄養塩類の数値シミュレーションは、あまり実測値に一致していないことがわかる。特に無機態の窒素・燐は計算結果が実測値を著しく上回っているが、これは夏期において実測値がきわめて小さい値になり、測定不能になる事も少なくなく、実測結果が多少ずれるだけで大きな相対誤差になることも考えられる。網走湖において無機栄養塩類の欠乏が、植物プランクトンの摂取によるものなのかは不明である。

図3は、藍藻・珪藻モデルでの一年間の数値計算の結果である。藍藻・緑藻は冬季の低温により途中で死滅してしまうのに対し、珪藻は図2.1の場合よりもピークが一つ多くなっている。この原因として考えられるのは、藍藻・緑藻による栄養塩類の摂取がない分、珪藻の増殖を活性化させていると思われる。

Case3. 図4.1は、動物プランクトンが藍藻・緑藻を全く捕食しない(0%捕食)と仮定して計算した結果である。

珪藻と同様に捕食されるとした藍藻・珪藻モデル(図3)では、夏期におけるピークが全く見られなかったが、この場合では藍藻・緑藻の発生量のピークが高く現れている。植物プランクトン量は、動物プランクトンの捕食作用によってかなり制限されていることを示すものである。しかし、表-1のRMS誤差 $70.1 \mu\text{g/l}$ が他の場合よりもかなり大きく、非現実的であると思われる。その一方で、無機態の窒素・燐のRMS誤差は、他の場合よりもかなり小さい。大量の藍藻・緑藻に栄養塩類が吸収されたため、網走湖の夏期の栄養塩類の欠乏の状態に近づいたものと思われる。

図4.2は藍藻・緑藻の20%を動物プランクトンが捕食すると仮定した場合の計算結果である。図4.1と比較すると藍藻・緑藻がかなり減少しているが、発生初期は8月のアオコ発生時とほぼ一致しており、ピークの値もアオコ発生の可能性が十分にあると思われる。

図4.3は、想定した捕食比率での計算結果を比較したものである。20%比率での計算では、オーダーや発生時期的に実際と比較して妥当であると思われるが、9月の終わり頃までかなりの藍藻・緑藻が存在していることが、実際に網走湖で見られるかどうか

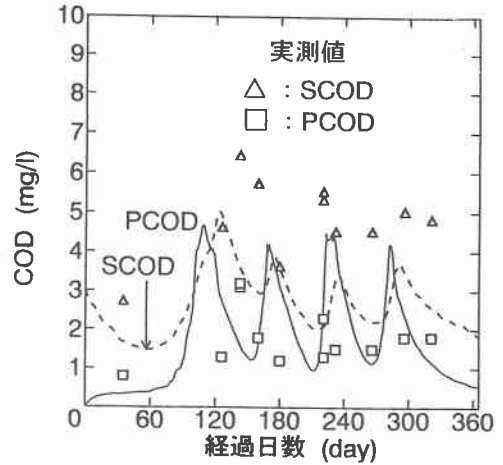


図 2. 4

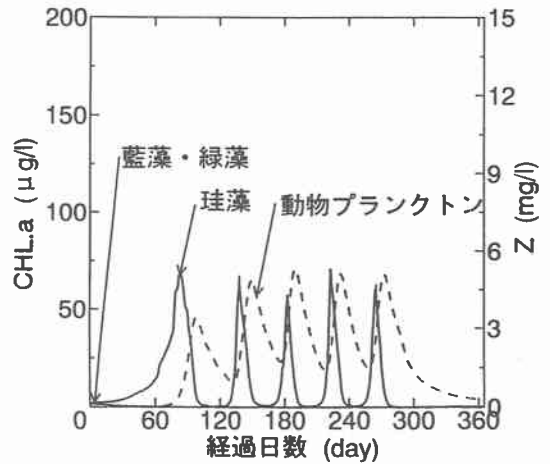


図 3

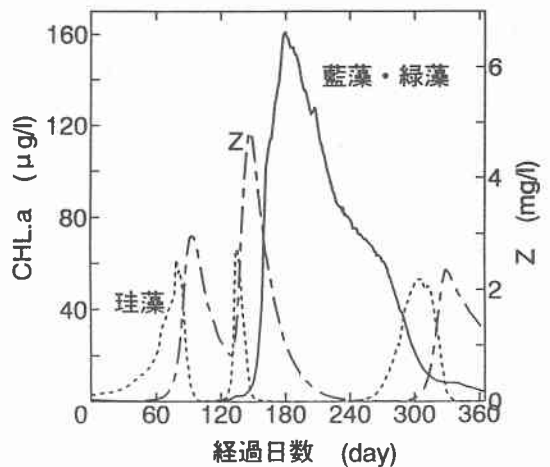


図 4. 1

表-1 捕食比率と各水質指標のRMS誤差
(Chl.a, N, P : $\mu\text{g/l}$ /Z, COD: mg/l)

捕食条件	藍藻・珪藻モデル				全藻類モデル
	0%捕食	20%捕食	50%捕食	80%捕食	100%捕食
Chl.a	70.094	32.804	27.923	27.571	29.034
Z	2.548	1.366	1.515	1.515	2.826
IN	87.927	589.149	561.850	563.858	566.602
ON	200.122	177.379	196.313	197.340	149.114
IP	13.218	33.386	34.586	35.089	48.482
OP	62.750	48.529	48.480	48.503	38.949
SCOD	1.403	1.690	1.653	1.650	2.033
PCOD	2.515	1.390	1.621	1.615	1.325

かは、水温の点でかなり疑問である。しかし、50%

捕食での増殖量はわずかで、アオコ発生が起こるとは考えにくい。表-1を見ても20%や、50%の捕食では、RMS誤差が全藻類モデルと比較してもそれ程差がない。以上のことから20%~50%の間の捕食率が網走湖のアオコ発生の再現に適切であると思われる。

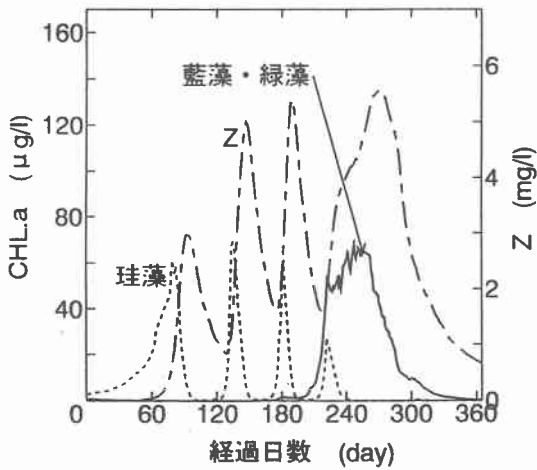


図 4. 2

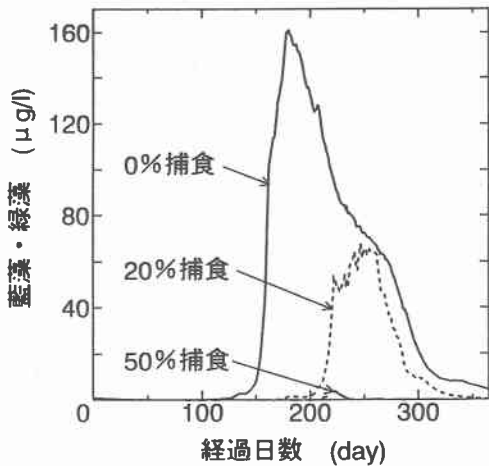


図 4. 3

6. 結論

1. 宗宮モデルを藍藻・緑藻と、珪藻の式に分けて計算すると、珪藻では、水温上昇に対し放物線の増加、藍藻・緑藻では一次比例増加する。
2. 宗宮モデルにおいては、無機態栄養塩類の数値計算結果が実測値よりもはるかに大きいのが、有機態は比較の実測値に近く再現されている。
3. 宗宮モデルを藍藻・緑藻と珪藻に分けて、動物プランクトンの藍藻・緑藻の捕食率を20%~50%に制限すれば、アオコ発生の再現が可能と思われる。

謝辞 : この論文作成に当たっては、網走開発建設部発行の網走湖水質保全対策検討委員会資料がなくしては不可能であった。関係諸氏に心から感謝する。

参考文献

- 1) 網走開発建設部 : 網走湖水質保全対策検討委員会資料 (平成3, 4, 6年度版)
- 2) 宗宮 功 : 湖沼の物質循環モデル、国立公害研究所調査報告第18号, p114~151, 1981
- 3) 平塚 茂雄、沖野 外輝夫、西田 直短、田中 哲治郎 : 湖の物質循環モデルと水質の予測、国立公害研究所調査報告第18号, p92~113, 1981