

諏訪湖における窒素・リンの季節変動¹⁾

川村 実²⁾・樋口 澄男³⁾
宮島 勲⁴⁾・鈴木 富雄⁵⁾

1. はじめに

富栄養化が進行した諏訪湖では、春期の珪藻類、夏期の *Microcystis* の大発生が毎年みられる。特に夏期には *Microcystis* が水の華をつくり、通称“アオコ”が水面をおおい景観を損ね、またその分解時には耐えがたい悪臭を発する。

また最近、国内においても *Microcystis* が毒性を持っていることが報告され¹⁾、水質保全上あるいは水産上の見地からも、藻類の大発生防止対策が求められている。

一方、諏訪湖浄化対策の要として流域下水道が整備され、その一部が1979年秋から供用開始になる。しかし、その処理は活性汚泥処理であり、藻類の発生をおさえるにはさらに高度処理が必要であると言われ、三次処理についての検討が行われているが、湖の富栄養化の実態を的確にとらえて処理方法を検討しなければならない。

筆者らは諏訪湖の富栄養化の実態調査を行っているので、その結果について報告する。

諏訪湖の概要についてはすでに多くの報告があるが、浄化対策の一環として底泥の浚渫およびその排泥による湖岸の埋立てと護岸工事が行われており、完成時には、面積 13.3km²、湖岸線長 16.2km、貯水量 61.3×10⁶m³となる予定である²⁾。

2. 調査方法

1977年5月～1979年3月の間、結氷する冬期を除きほぼ毎月1回、図1に示す地点において表層水および下層水(湖底より1m上)を採水調査した。なお、1979年の調査は地点1だけである。採水時刻は早朝とし、おそくとも午前10時に終了するようにした。

各地点の水深は地点1は6.5m、地点2, 3, 4は2.5m前後、地点5は4.5mである。夏季の水温成層は地点1においてみられるが、その他の地点では顕著な成層はみられず、この成層も風などによりくずれることがある。

水質の分析項目および分析方法は、表1のとおりであ



図1 調査地点

表1 水質調査項目および分析方法

項目	分析方法
水温	サーミスター温度計
pH	比色法
DO	ウインクラー・アジ化ナトリウム変法
SS	GFPろ過法
TCOD	KMnO ₄ 法 JIS K0102による
DCOD	ろ液についてのCOD
NH ₄ -N	インドフェノール法
NO ₂ -N	GR法
NO ₃ -N	サリチル酸ナトリウム法
K-N	ケルダール法
DKN	ろ液についてのK-N
PO ₄ -P	モリブデン青法
T-P	過塩素酸分解・モリブデン青法
DTP	ろ液についてのT-P
chl-a	比色法

ろ液は GFP (TOYO, GS-25) を用いてろ過したもの

1) Seasonal Fluctuations of Nitrogen and Phosphorus in Lake Suwa

2) Minoru KAWAMURA

3) Sumio HIGUCHI

4) Isao MIYAJIMA

5) Tomio SUZUKI (長野県衛生公害研究所) Nagano Research Institute for Health and Pollution

る。また、懸濁性物質の COD(PCOD), 総窒素(T-N), 溶解性無機態窒素 (DIN), 有機態窒素 (O-N), 溶解性有機態窒素 (DON), 懸濁性有機態窒素 (PON), 有機態リン (O-P), 溶解性有機態リン (DOP), 懸濁性有機態リン (POP) を次式に従って算出した³⁾。

$$\begin{aligned} \text{PCOD} &= \text{TCOD} - \text{DCOD} \\ \text{T-N} &= (\text{K-N}) + (\text{NO}_2\text{-N}) + (\text{NO}_3\text{-N}) \\ \text{DIN} &= (\text{NH}_4\text{-N}) + (\text{NO}_2\text{-N}) + (\text{NO}_3\text{-N}) \\ \text{O-N} &= (\text{K-N}) - (\text{NH}_4\text{-N}) \\ \text{DON} &= (\text{DKN}) - (\text{NH}_4\text{-N}) \\ \text{PON} &= (\text{K-N}) - (\text{DKN}) \\ \text{O-P} &= (\text{T-P}) - (\text{PO}_4\text{-P}) \\ \text{DOP} &= (\text{DTP}) - (\text{PO}_4\text{-P}) \\ \text{POP} &= (\text{T-P}) - (\text{DTP}) \end{aligned}$$

3. 結果および考察

図1に示したように諏訪湖は入江が少なく、湖岸線が単調であるために湖内の水質はほとんど均一で、調査を行った5地点においてはあまり大きな差は見られなかった。表層と下層についてみると、地点2, 3, 4は浅いためか、一部の項目を除きほぼ同じ結果を示したので、湖心にあたる地点1の結果を中心に述べる。

3・1 水温, pH, DO

地点1における水温, pH, DOの季節変動を図2に示す。pH, DOは植物プランクトンの光合成により1

日の間にも大きく変動するために採水時刻, 日照条件を考慮しなければならないが, 午前10時には採水を終わっているため、一応の傾向はつかめるものと思う。

表層の pH は夏季には高く10を超えることもあるが, 冬季には7.5以下になる。3月にも高い値を示すが, 夏季程には上昇しない。DOも同様の傾向を示し夏季に非常に高い値を示すが, 冬季には減少し, 3月には小さなピークがみられる。

下層の pH は夏季でもあまり高くないが, 一時的に高値を示すことがある。これは成層がくずれ水の循環が起るためと思われる。冬季には表層とほぼ同じ値となる。DOは夏季には表層とは逆に減少するが, pHと同様に一時的に増える事もある。

なお, 1978年8月末の調査時には水温分布からみて水の完全循環が起っているとされる。

3・2 COD, SS, クロロフィル a

地点1における表層水の TCOD, PCOD, DCODの季節変化を図3に, SS, クロロフィル a (chl-a)の季節変化を図4に示す。DCODを除き TCOD, PCOD, SS, chl-aはほとんど同様の変動を示し, 6月から7月にかけて急激に増加して, その後9, 10月まで高い値を示し, TCODが20mg/l以上, SSが50mg/l以上, chl-aが300mg/m³以上の高値を示すことも多い。11月以降は各項目とも急激に減少し11月には各年とも最低値を示す。しかし, 冬季にも小さなピークがみられる。この変化は夏季におけるアオコの大発生および春の硅藻類

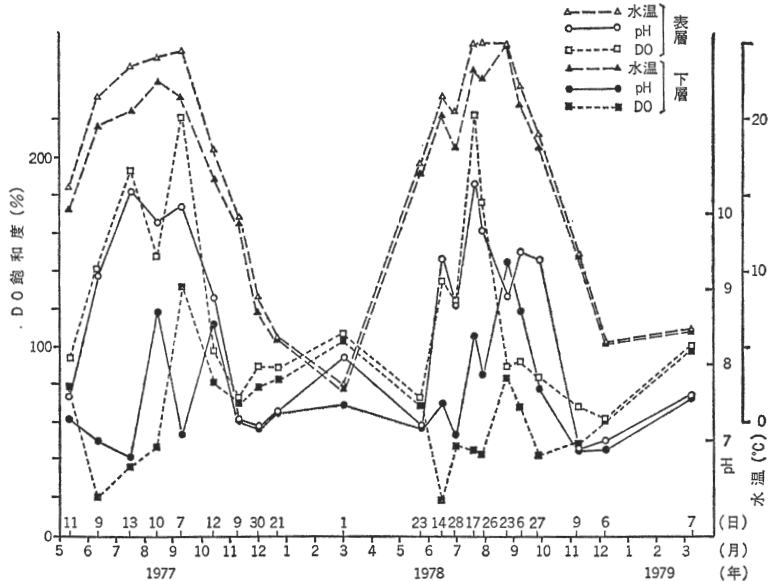


図2 水温, pH, DOの季節変動(地点1)

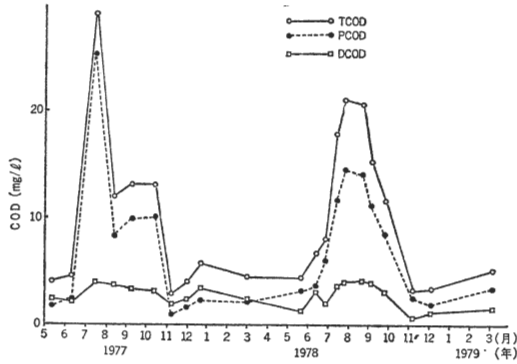


図3 CODの季節変動(地点1, 表層)

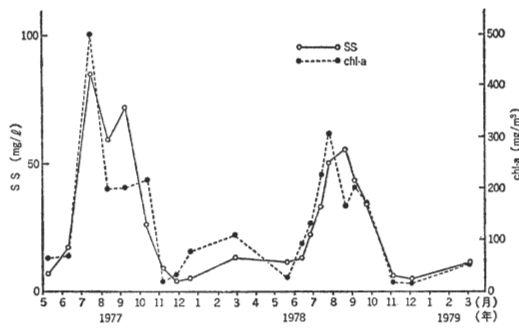


図4 SS, chl-aの季節変動(地点1, 表層)

の増加時期とよく一致している。なお、1977年8月に一時的に減少がみられるが、これはこの年の8月は異常低温と長雨より、アオコが減少したためと思われる。

DCODは年間を通して5mg/l以下であるが、夏季にはわずかに高くなる傾向を示す。しかし、その変動の範囲は小さく1.3mg/l~4.3mg/lの間である。夏季の高値はアオコの大発生の時期と一致しており、岡田ら⁴⁾の報告にもあるように、Microcystisの代謝生産物に由来しているものと思われる。

COD, SS, chl-aの相関をみると表2に示すように大変により相関がみられる。このことから、諏訪湖においては植物プランクトンの増加によりSSも多くなり、

表2 COD, SS, chl-aの相関

X	Y	r	回 帰 式
SS	TCOD	0.88	$y=0.27x+2.59$
SS	PCOD	0.94	$y=0.24x+0.65$
chl-a	SS	0.87	$y=0.18x+3.04$
chl-a	TCOD	0.87	$y=0.06x+1.89$
chl-a	PCOD	0.93	$y=0.05x+0.00$
PCOD	TCOD	0.99	$y=1.11x+1.99$

TCODも高くなる。この大部分は藻体に由来する懸濁性物質によっても占められている。岡田ら⁴⁾は培養した各種の藻類につきCODを測定し、乾燥藻体1mg当りのCODは0.3~0.5mg/mg cellと報告している。一方、表2の回帰式からSS1mg当りのCODは0.24mg/mg SSとなり、岡田らの値よりもわずかに低いほぼ同じ値となる。この違いは純粋培養した藻類に比べ、諏訪湖のSS中には藻類以外の物質が含まれていることによるものであろう。

また、chl-aとPCODの相関回帰式により単位chl-a当りのCODを求めると、

$$PCOD(mg)=chl-a(mg) \times 52 \dots\dots\dots(1)$$

となる。この値は桜井⁵⁾が“水の華”発生時に採取した湖水を静置し、Microcystisのコロニーを分離し、蒸留水に分散させて測定した値

$$Microcystis-COD(mg)=chl-a(mg) \times 55.4 \dots\dots(2)$$

とよく一致している。

秋季にCOD, SS共に急減するが、この原因は林⁶⁾による水中の沈殿物量変化は8~11月に非常に多いという報告から、COD, SSの減少は藻類が死滅あるいは休眠状態になり、沈殿物として底質へ移行したためと考えられる。

3.3 窒素

地点1の表層における各態窒素の季節変動を図5に示す。T-Nは夏期に多く秋から冬にかけて減少し、冬~春の間は少ないが、夏期になると再び増加し、TCOD, SSと同様の変動を示す。PONはT-Nと同様の変動をして冬~春季には少ないが、6~7月に急増し、その変動はT-Nよりも激しい。一方、DINは冬~春季には比較的多いが、夏季になると減少してほとんど検出されなくなる。DINのうちNO₃-Nの減少が特に著しい。しかし11月になると再び増加する。この変動はT-N, PONと全く逆である。

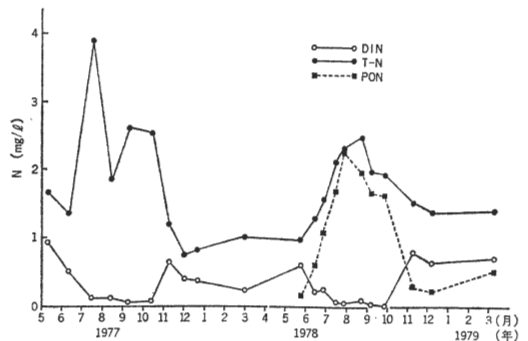


図5 各態窒素の季節変動(地点1, 表層)

この窒素の変動は *Microcystis* が増殖する6~8月にかけて DIN は植物プランクトンに取り込まれ、PON となり10~11月に沈殿物として底質へ移行する。しかしその一部は水中で、あるいは湖底へ達してから分解により再び水中へ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ などとして回帰してくる様子を示している。

また、夏季の *Microcystis* が最高に達した後の7月末~9月の間にも、水中あるいは底泥上において分解し、 $\text{PON} \rightarrow \text{DON} \rightarrow \text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と変化しているが、DIN を消費する植物プランクトンが多いために再び植物プランクトンに取り込まれ、その結果 DIN の増加はみられないものと思われる。

表層では *Microcystis* が増える6~7月 T-N が増加しているが、これは湖外より搬入される窒素および底質から溶出する窒素が *Microcystis* に取り込まれ、また *Microcystis* が浮上しやすく、その体内に取り込まれた窒素が表層に集められるためであろう。

下層では(図6)、T-N は表層で増加する6~7月には増加はみられず、植物プランクトンの沈降がおこる8月末~9月初めに高い。PON も同様の傾向を示す。DIN は5~7月の間、表層では減っていくが、下層ではわずかではあるが増加しており、底質からの回帰をうかがわせる。しかし、表層で極度に減少した後は、下層でも減少し、11月に再び増加する。

地点2, 3, 4, 5の下層では、水深が浅いためか表層とほぼ同様の変動を示した。

3.4 リン

図7に各態リンの季節変動を示す。表層における T-P は7月に急増し、秋季には減少し、冬季~春季の間は少なく、T-N と同様に TCOD, SS と類似した変動を示す。POP も PON と似た変動を示し、*Microcystis* へ

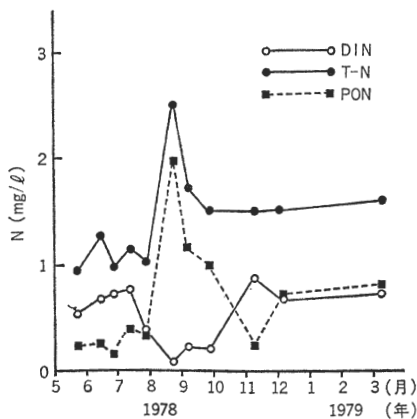


図6 各態窒素の季節変動(地点1, 下層)

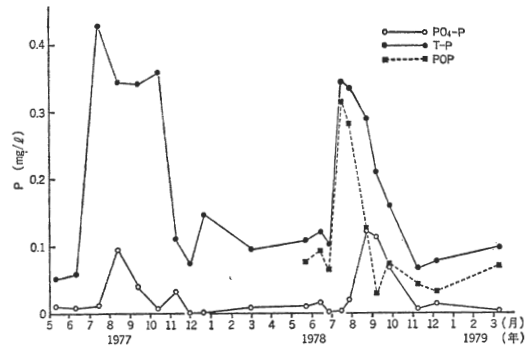


図7 各態リンの季節変動(地点1, 表層)

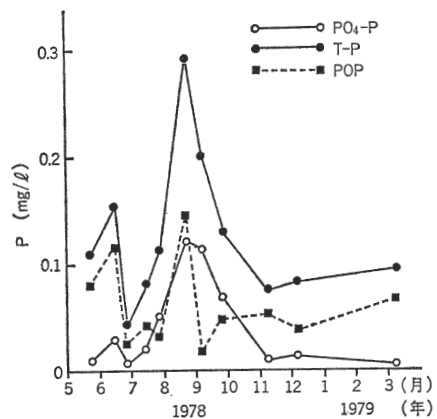


図8 各態リンの季節変動(地点1, 下層)

のリンの取り込みを示唆している。しかし、POP の減少は PON と比較して急激であり、8月末~9月初めには増加前のレベルにもどり、高値を示す期間が比較的短い。

PO4-P は春から7月初めまでは少なく0.01mg/l 前後であるが、8月には増加して0.1mg/l 以上にもなる。DIN は11月にならないと増加しないが、PO4-P は DIN が非常に少ない時期に増加している。この現象は1973年の調査でもみられ⁷⁾、また諏訪湖と同様に *Microcystis* の異常発生のある霞ヶ浦においても観測されており⁸⁾、*Microcystis* の大増殖における特徴ではないかと推察される。

下層においては(図8)、7月末まで T-P の顕著な増加はない。8~9月に高く、水の循環あるいは植物プランクトンの沈降などによるものと思われる。PO4-P は表層とほぼ同じ変動を示している。

3.5 懸濁物質中の窒素・リン

懸濁物質中の窒素・リンは PON/SS, POP/SS を用

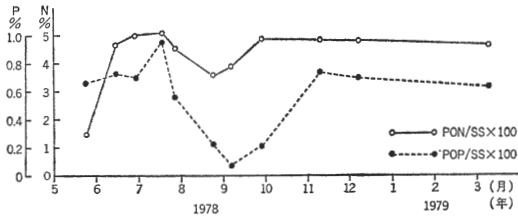


図9 PON/SS, POP/SS の季節変動

いて表わせる。PON/SS, POP/SS の季節変動を図9に示す。両者共に7月末から9月にかけて低くなり、POP/SSの低下はPON/SSよりも大幅である。その後は再び高くなる。

中島ら⁹⁾は印旛沼での研究でPON/SS, POP/SSについて論じている。その中で、植物プランクトンの一般組成式を $C_{106}H_{268}O_{110}N_{16}P$ として計算した窒素・リン含有量および底質の窒素・リン含有量から懸濁物質に含まれる植物プランクトンの割合を求め、PON/SS, POP/SSの低くなる時期には底質の巻き上げの割合が多いと推測している。

今回の調査では5月を除き、前日の気象状況(特に風の強さ)から底質の巻き上げはあまり考えられず、また7月末～9月はMicrocystisの成長が最高に達した後で、死滅、分解も始まる時期であり、Microcystisを主とする懸濁物質の内部的变化があるものと推察できる。

リンについては PO_4-P の増加とPOP/SSの減少とが時期的に一致しており、 PO_4-P の増加はMicrocystisからの回帰によるものと思われる。

3・6 DINと PO_4-P

以上測定項目ごとに述べたが、富栄養湖においては、植物プランクトンが直接に利用する栄養塩類については個々の項目ごとではなく、相互の関連において検討しなければならない。

植物プランクトンの一般組成によると¹⁰⁾、 $N/P=7.2$ (重量比)である。地点1の表層水の各測定時における DIN/PO_4-P を求めると、7月末～9月には7.2以下であり、他の時期には7.2で以上ある。すなわち、諏訪湖においては全般的にはリン制限の状態にあるが、7月末～9月の間は一時的に窒素制限状態となる。これをそのまま藻類増殖の制限要因とみるのは危険を伴うが、中本¹¹⁾の諏訪湖水のMBOD測定においても同じ結果になっており、少なくとも窒素・リンに関してはある程度の目安にはなるとと思われる。

4. まとめ

1977年5月から1979年3月の間において諏訪湖の富栄養化実態調査を行った。

夏季にCOD, SSが非常に高くなり、その原因は植物プランクトンの増殖によるものであり、植物プランクトン由来のCODは次式により表わされる。

$$PCOD(mg) = chl-a(mg) \times 52$$

栄養塩類としての窒素・リンについては、夏季にT-N, T-Pとも急増するが、それは植物プランクトンに取り込まれたものであり、DINは減少してほとんど検出されなくなる。しかし、 PO_4-P は夏季後半にはMicrocystisから水中へ回帰があり増加がみられる。

窒素・リンに関しては、全般的にはリン制限的であるが、7月末～9月は一時的に窒素制限的になっているものと推察される。

今後は底質との関連についても検討し、より効果的な浄化対策を考えていかなければならない。

なお、本報告の一部は第5回環境保全・公害防止研究発表会において報告したものである。

謝辞

今回の調査において、試料採取に御協力をいただいた諏訪保健所および岡谷保健所の諸氏に感謝します。

一引用文献一

- 1) 渡辺真利代, 大石真之, 松本浩一: 藍藻Microcystisの毒性(予報), 東京都衛生研究所年報, Vol. 29, No. 1, pp. 389~391, 1978.
- 2) 長野県: 諏訪湖治水事業概要, 1972.
- 3) 沖野外輝夫編著: 「富栄養化調査法」p. 111, 講談社, 東京, 1976.
- 4) 岡田正光, 矢木修身, 須藤隆一: 藻類によるCODの内部生産について, 日本陸水学会第44回大会講演要旨, p. 20, 1979.
- 5) 桜井善雄: 諏訪湖汚濁の特性と汚濁防止対策の経過, 諏訪湖水域生態系研究報告, No. 3, pp. 87~102, 1979.
- 6) 林秀剛: 諏訪湖小坂沖地点における基礎生産, 二次生産, 分解, 栄養塩類の季節変化に関する研究Ⅱ報, 沈殿物量の堆定(1971~1972), 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究経過報告, No. 5, pp. 40~43, 1973.
- 7) 西沢節二, 宮島勲, 他: 長野県衛生公害研究所調査研究報告第126号, 1975.
- 8) 大槻晃, 相崎守弘, 河合崇次: 栄養塩類濃度の季節変化からみた霞ヶ浦の富栄養化現象の特徴, 国立公害研究所研究報告, No. 6, pp. 95~103, 1979.
- 9) 中島淳, 小倉久子, 鎗田功, 小林節子, 三好洋: 印旛沼における窒素・リンの季節変動について, 全国公害研究会誌, Vol 3, No. 1, pp. 49~55, 1978.
- 10) 半谷高久著: 「水質調査法」p. 35, 丸善, 東京, 1960.
- 11) 中本信忠: 富栄養湖諏訪湖における生物利用可能栄養物質の季節変化(MBOD法による評価), 諏訪湖水域生態系研究報告, No. 3, pp. 35~40, 1979.