

諏訪湖の富栄養化と生物群集の変遷

倉 沢 秀 夫*・ 沖 野 外 輝夫*

Eutrophication and Succession of Biological Communities in Lake Suwa

Hideo KURASAWA* and Tokio OKINO*

I ま え が き

ここ15年来諏訪湖の汚染が著しくなったことは、衆目の一致するところである。それは湖が過度に富栄養化された現象であって、その主原因の一つは、周辺の都市化や各種産業の発展に伴う流入河川の汚濁とされる。その究明にはよほど以前から今日に至るまでの諏訪湖の富栄養化の経過を水質や湖沼生物群集の変遷で明らかにする必要がある。

幸い、諏訪湖の湖沼学的・生物学的な総合研究は、明治末期の田中阿歌麿(1918)の「諏訪湖の研究」に始まり、終戦直後の宝月欣二・他(1947-1950)の「諏訪湖の生物生産力の研究」、JIBP-PF 諏訪湖研究グループ(1969-1973)の「諏訪湖の生物群集の生産力に関する研究」および諏訪湖集水域研究班(1978-1982)の「環境科学」特別研究による「諏訪湖集水域生態系研究」に至るまで約70年間に及ぶ歴史をもっているため、富栄養化の経過をたどるには好都合である。

以下で、諏訪湖の環境破壊を検討するために、過去70年間の水質と生物群集の変遷の大略を湖の富栄養化との関係でとらえて紹介し、生態学的視点から今後の水質の浄化対策についても論述する。

この報文は、倉沢・青山(1969)、倉沢・山岸(1971a,b)、によって発表された1960年代までの諏訪湖の生物群集の変遷に、1970年代後半の変動を加え、更に近年の湖の汚染浄化事業の施行効果とその問題点を明らかにしようとして書かれたものである。

II 諏訪湖の湖沼学的特徴

諏訪湖の起源は、地殻の変動・断層などによって生れた諏訪盆地の一部に湛水したことに始まるといわれ、静岡から糸魚川に至る糸魚川-静岡構造線、すなわちフォッサ・マグナと呼ばれる構造線の西崖にできた断層湖である。

天竜川が唯一の流出河川になった現在の姿が完成したのち、天竜川の河床のはげしい浸蝕や、徳川時代には洪水防除のため、天竜川への出水口附近の掘り下げがしば

しば行われたこと、湖中には山崩れや河川による土砂の流入によって堆積物が増加したことなどによって、湖の深さは著しく減少し、面積もまた縮少し、19世紀末には中栄養湖的な要素をいくらか残しながらも、全体としては富栄養湖としての姿を示している。湖の遷移系列からみると老年期に達している湖である。

周囲を山に囲まれた標高759mの高地にあり、13.3 km^2 (1911年には14.5 km^2)の大きな面積をもちながら最大深度6.5m(1904年には7.1m)、平均深度4.5mという浅い湖は珍しい存在である。したがって、この老年期の諏訪湖を高山にある深い湖と同列に考えて、山紫水明の面影を求めること自体が幻想に等しい。

諏訪湖には図1のように大小26の河川が流入し、その流域は512 km^2 と広大であるが、前述のごとく流出河川は天竜川ただ一本である。そのため、湖内に生息する生物群集が生産する有機物の増加・蓄積と、その分解による栄養塩類への回帰速度が大きく、しかも、河川による栄養塩類の搬入が多量であるので、湖の生物生産はますます増大するため、そもそもが湖の富栄養化が急速に進行する宿命をおびていた。

III 水 質 の 変 遷

湖の遷移の目安としてSawyer(1946)は、水中の無機窒素の量が0.3 ppm以下は貧栄養湖、それ以上を富栄養湖とし、無機リンは0.02 ppmを両者の境界とし、測定時期は春に湖水が垂直的に循環し、植物プランクトンの増殖の起らない初期に定めて比較すべきだと提唱している。表1(久保・他1981,中本1980)にあげた70年前の結果は夏のものであるため、そのまま他とは比較できないにせよ、窒素、リンともに30年前や近年に比べ著しく微量であり、この頃の状態は中栄養湖から富栄養湖への過渡期であったと推測される。その後はいずれも富栄養湖的な高い値を示している。これは水田地帯からの肥料の流入、増加する下水、し尿処理水、工場の有機排水の分解によって生じたものであるが、リンの場合は中性洗剤のビルダーとしてのリン酸塩との強い関係がある。というのは、各

* 信州大学理学部諏訪臨湖実験所 Suwa Hydrobiol. St. Shinshu Univ.

地の湖沼周辺の多くの都市では湖の富栄養化の防止策として、有リン洗剤の使用を規制しているのに、諏訪市では影響は少ないとして特に抑制手段をとっていないから

である。塩素イオン濃度も年とともに増大しているが、ここにも後述する人口増による排泄物量の増大との密接な関係がみられる。

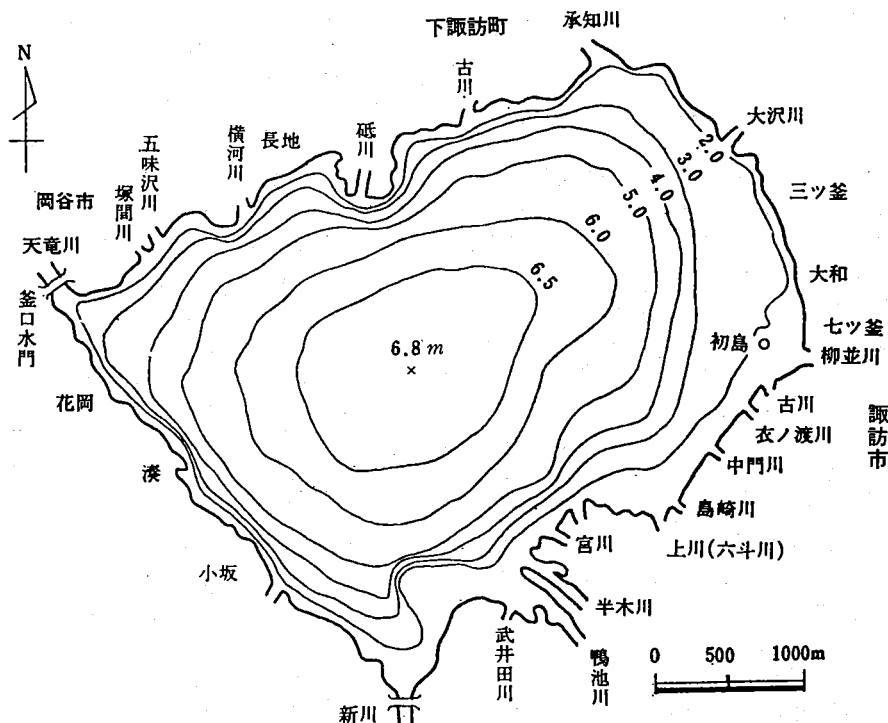


図 1. 諏訪湖の湖盆形態と流入，流出河川

表 1. 諏訪湖の表層水の溶存栄養塩濃度および塩素イオン濃度 (ppm) の変遷

	70年前(8月) (1911)	30年前(3月) (1949)	10年前(4月) (1967)	近 年(3月)
NH ₄ -N	0	0.1~0.15	0.1~0.2	0.235 (1981)
NO ₂ -N	0	0.003	0.01~0.02	0.110 (1981)
NO ₃ -N	tr	0.12	0.20~0.25	0.690 (1981)
PO ₄ -P	tr	0.002	0.01~0.02	0.039 (1979)
Cl ⁻	8.0	11.0	13.0	16.8 (1979)

IV 生物群集の変遷

A. 植物プランクトン群集と生産量の変遷

表 2 でみるように、夏の諏訪湖では70年前には珪藻類が最優占するが、その大発生による“水の華”を示す記録はない。それ以後珪藻類に代って藍藻類が優勢となり、30年前には *Microcystis* を主とする明らかな藍藻の“水の華”現象が出現し、植物プランクトン全細胞数の60%占

めた。これがここ10余年間にみられるアオコ（青粉）の大発生のはしりである。70年前は植物プランクトン相からみて中栄養的要素を残している。*Microcystis* は有機物の多い水中に発生しやすいことが知られているが、これが増加をはじめた30年前から表層水の植物プランクトン細胞数はますます増え、近年では100万個/mlに達することがあり、その99%が *Microcystis* で占められる。ま

た、年代の推移に伴ってベン毛藻類や緑藻類の種属数が増えており、近年では汚濁指標生物である鞭毛藻のミドリムシ (*Euglena*) が高い順位を示すのが目立つ(青山 1978)。

植物プランクトンの増加は当然クロロフィル量の増大につながる。日本の各種栄養型の湖の夏の表面水のクロロフィル量は、中栄養型が $1.0 \sim 10.0 \text{ mg/m}^3$ であり、これより小は貧、大は富栄養湖とされている。それ故諏訪湖の

30年前の $50 \sim 60 \text{ mg/m}^3$ の値は 当然富栄養型の値であるが、最近の10年間にはその約5～10倍のクロロフィル量を示した。細菌数においても70年前は、沖の水は飲料適の $100 \sim 1,000 \text{ 個/ml}$ であったが、30年前はその10倍、最近では10万～100万個/mlになる程に急速に汚れてしまった。

植物プランクトンの増加は湖の水色を変え、濁度を増す。フォーレルの水色標準液による夏季の調査結果をみると、70年前にすでに最高度に栄養化の進んだ黄色湖で

表 2. 諏訪湖の夏季表層水の植物プランクトンの優占順位と現存量の変遷
(+少ない, r 非常に少ない)

植物プランクトン		優 占 順 位			
		70 年 前 1911	30 年 前 1948	10 年 前 1970	近 年 1977
鞭 毛 藻 類	<i>Peridinium</i> ウズオビムシ	+	④		r
	<i>Gymnodinium</i> ハダカオビムシ				⑤
	<i>Euglena</i> ミドリムシ				r
	<i>Phacns</i> ウチワヒゲムシ				
	<i>Trachelomonas</i> カラヒゲムシ				r
	<i>Chlamydomonas</i> コナヒゲムシ			r	r
	<i>Pandorina</i> カタマリヒゲマワリ		r		r
	<i>Eudorina</i> タマヒゲマワリ		r	f	
藍 藻 類	<i>Merismopedia</i> メリスモペデア	+		r	
	<i>Microcystis</i> ミクロキスティス		① 60 %	① 99 %	① 99 %
	<i>Aphanocapsa</i> アファノカプサ			+	
	<i>Coelosphaerium</i> ケロスフェリウム		+		
	<i>Phormidium</i> フォルミディウム			②	②
	<i>Anabaena</i> アメバナ	⑥	⑤	③	+
珪 藻 類	<i>Melosira</i> メロシラ	①	② 15 %	④	④
	<i>Cyclotella</i> ヒメマルケイソウ	⑤	③	+	⑥
	<i>Tabellaria</i> ヌサガタケイソウ	④			
	<i>Fragilaria</i> オビケイソウ	+	r	r	+
	<i>Asterionella</i> ホシガタケイソウ	②	+	+	+
	<i>Synedra</i> ハリケイソウ	③	r	r	r
	<i>Cocconeis</i> コッコネイス	+			
	<i>Navicula</i> フナガタケイソウ	+	+		r
	<i>Gomphonema</i> クサビケイソウ	+			
	<i>Cymbella</i> クチビルケイソウ		r		
	<i>Caloneis</i> カロネイス	r			
	<i>Nitzschia</i> ニツチア				③
緑 藻 類	<i>Pediastrum</i> クンショウモ	r	+	r	+
	<i>Golenkinia</i> グレンキニア			r	
	<i>Micractinium</i> ミクラクティニウム			⑤	r
	<i>Dictyosphaerium</i> ディクティオスフェリウム			r	
	<i>Coelastrum</i> ケラスツルム		r	+	r
	<i>Tetraedron</i> テトラエドロン				r
	<i>Chrorella</i> クロレラ				r
	<i>Selenastrum</i> ムレミカヅキモ		r		+
	<i>Ankistrodesmus</i> イトクズモ			+	r
	<i>Schroederia</i> シュレデリア				+
	<i>Actinastrum</i> アクティナスツルム			+	
	<i>Scenedesmus</i> セネデスウス	+	+	r	
	<i>Oedogonium</i> サヤミドロ	r			
	<i>Closterium</i> ミカヅキモ	+			r
	<i>Cosmarium</i> ツヅミモ	r			
	<i>Staurastrum</i> スタウラスツルム		r	r	
総細胞数 /ml		—	$\times 10^3 \sim 4$	$\times 10^4 \sim 5$	$\times 10^5 \sim 6$
クロロフィル-a量 mg/m^3		—	$50 \sim 60$	$100 \sim 500$	$400 \sim 700$
バクテリア数 /ml		$\times 10^2 \sim 3$	$\times 10^3 \sim 4$	$\times 10^5 \sim 6$	$\times 10^5 \sim 6$

ある。湖の透明度は5m以上あれば貧、それ以下では富栄養湖とされるが、図2(Okino 1982)にみるように、諏訪湖では夏冬共に70年前から5mよりはるかに小さく、年と共に減少する傾向がえられている。植物プランクトンの生産が最大になる夏季では、70年前ですでに1mよりやや大きい程度であったが、1960年頃を境に透明度の減少は急速に進み、特にひどい年では0.1~0.15mにもなり、アオコが風で吹きよせられフィルム状をなした部分では完全に0mを記録するまでになった。

夏季停滞期中の表面水でpH値が7.0より大きいものは富、小さいものは貧栄養湖とされている。諏訪湖の湖心で70年前に中栄養的な値の7.0~7.5が測定されたが、30年前には8.0~8.5に、ここ10余年間は9.0~10.0という強アルカリ性を示すまでに富栄養化が進み、植物プランクトンの光合成が盛大に行われていることを示している。

夏季停滞期中の表層水における植物プランクトンの光合成による酸素量の増大と、深層水におけるプランクトンの呼吸や有機物の分解による酸素量の減少という、両層の酸素量の差を指標として比較すると、図3に示すように、60年前には両層の差はほとんどないが、30年前は5ppmとなり10年前では9~10ppmまたはそれ以上となっている。このような両層の差の増大は、表層水での生産者の異常な増殖を示すものであって、近年における富栄養化と汚濁の急速な進展を示すものである。ところが、1970年頃から深層水での酸素不足はあまり定常的に起らなくなってきた。その原因は、過度の富栄養化により毎年連続して起る“水の華”現象によるものと考えられ、生態系内がアンバランスになった状態を、酸素収支の面でバランスを取り戻すのに、アオコが一役かっている。

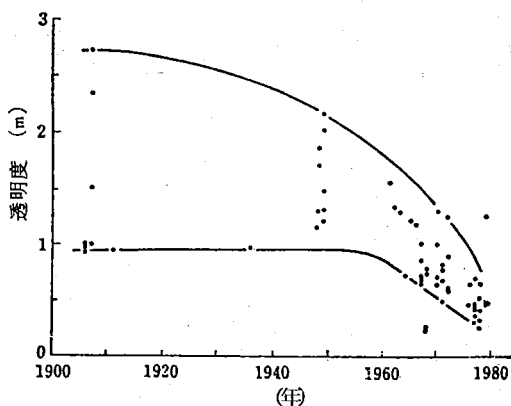


図2. 1910年代から1980年までの諏訪湖の透明度の変遷 下線は夏季、上線は冬季(林ほか, 1980)

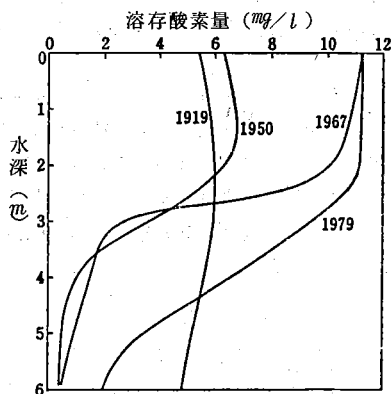


図3. 夏季成層期における溶存酸素量の鉛直分布の経年変化(林・ほか, 1980より引用)

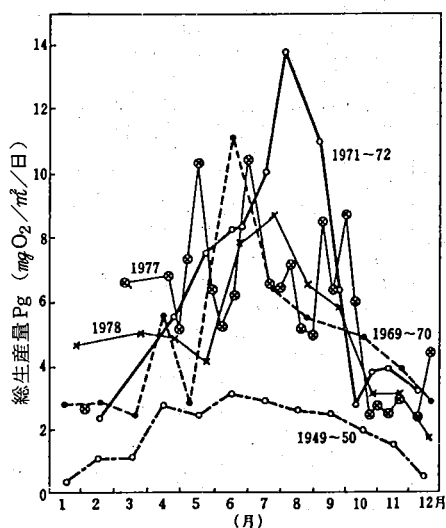


図4. 諏訪湖における植物プランクトンの総生産量の変遷(坂本, 1973 沖野, 1978追加修正)

表3. 諏訪湖の年間基礎生産量の経年変化

年 度	年間基礎生産量 gC/m ² /年	測 定 者
1949	260	宝月, 1949
1969-1970	557	沖野, 1970
1971-1972	799	倉沢ら, 1972
1977-1978	750	沖野, 1978

るものと推測される(沖野 1982)。

アオコの日中の光合成作用は極めて盛んであるので、放出する酸素によって表層水はたちまち酸素過飽和の状態になる。しかもこの植物プランクトンはゼラチン質の膜をもち大型コロニーをつくるので動物プランクトンに食われにくい。そのため養鰻池ではワムシなどの動物プランクトンの異常増殖による水変りを防ぎ、ウナギへの酸素供給を維持するためアオコの増殖を心がける程である。この点は諏訪湖でも例外でなく、大発生時には表面水の酸素飽和度は200%を軽くこえるから、アオコは、 9×9 mの網イケース一面に10,000尾以上のコイを収容している高密度の養鰻を支えているようなものだといえるが、ときにはアオコが水面を風で浮遊する性質が災を招く。もし風による吹送流でアオコが風下に運ばれて濃密な状態になると、そこの酸素は極度の過飽和状態になるが、風上側はアオコがひどく少くなり、さらに風下側からの反転流で酸素の少ない底層水が上昇するため、風上側の酸素は著しく減少し、当地で“スス水”と呼ばれる水変りが起き、たまたま風上側にあった網イケースのコイが窒息死することがある。“スス水”現象の生じたときの夏の夜半か早朝に風上側の湖岸に行けば、テナガエビやヨシノボリが大量に拾えるという。

諏訪湖の基礎生産量の大部分を担うのは植物プランク

トンである。図4は酸素法で測定した各年度の生産力の季節変動を比較したものである。仮りに CO_2/O_2 を1として各年度の年間基礎生産量を炭素量で表わすと表3のようになる。近年(1977)は30年前(1949)の約3倍の生産力を示しており、植物プランクトンのエネルギー効率でも近年の0.24~0.88%に対し、30年前は0.06~0.40であるから、この面でも諏訪湖の生産力が著しく高くなっており、富栄養化が進んだことを物語っている(沖野 1982)。

B. 大型水生植物群集と現存量の変遷

諏訪湖の大型水生植物の優占順位を年代別にみると表4のようである。70年前は中栄養湖によく繁茂するセンニンモが最優占し、30年前でもクロモ、セキショウモなどの沈水性の水草が上位を占め、それぞれ全量の32%および16%に及ぶ。そして半浮葉性のササバモや純浮葉性のヒシが増えはじめる。1967年では全湖で1,500(生重量)トンを超え最高となるがそのうちの約30%はヒシで占められ、沈水性のクロモ、特にセンニンモは激減する。またこの頃はクロモ群落の中に帰化種であるコカナダモが入ってきている。最近10年間は後述するように湖沿岸部の浚渫や埋め立てと護岸工事が急ピッチで進められ、水草分布帯は異常に狭められたため、水草全量は1967年の $\frac{1}{3}$ 以下に減る壊滅的な衰亡状態を呈するに至った。諏訪

表4. 大型水生植物の優占順位(①~⑤)と現存量(生重トン)の変遷()内は%

測定年代	1911 (8月)	1949 (7月, 8月)	1966 (9月)	1967 (8月)	1972 (7月)	1976 (8月)
全湖面積 (km^2)	14.5	14.3	14.1	14.1	13.7	13.3
(%)	(100.0)	(98.6)	(97.2)	(97.2)	(94.5)	(91.7)
分布限界深度 (m)	4.0	2.5	2.3	2.3	2.0	1.7
分布帯面積 (ha)	38.0	29.0	25.6	25.6	10.3	6.4
(%)	(100.0)	(76.3)	(67.4)	(67.4)	(27.1)	(16.8)
<i>Potamogeton nipponicus</i> ササエビモ	++	—	—	—	—	—
<i>Potamogeton malayanus</i> ササモ	—	④120.2(10.1)	③275.6(14.1)	④159.3(10.5)	④119.9(11.4)	③21.3(4.6)
<i>Potamogeton crispus</i> ヤナギモ	+	3.0	—	0.7	—	11.8(2.5)
<i>Potamogeton perfoliatus</i> ヒロノエビモ	++	28.5(2.4)	—	20.5(1.3)	39.3(3.7)	11.0(2.3)
<i>Potamogeton oxyphyllus</i> ホソヤナギモ	+	49.2(4.2)	—	—	—	—
<i>Potamogeton Maakianus</i> センニンモ	①++	—	—	19.7(1.3)	—	2.1(0.4)
<i>Potamogeton miduhikino</i> ミズヒキモ	+	2.0	—	0.2	—	—
<i>Najas mariana</i> イバラモ	++	39.6(2.7)	—	—	—	—
<i>Vallisneria spiralis</i> セキショウモ	++	②184.4(15.5)	15.6(0.8)	⑤129.6(8.6)	③120.0(11.4)	19.8(4.2)
<i>Hydrilla verticillata</i> クロモ	②++	①377.3(31.8)	②597.4(30.4)	238.0(15.8)	8.4(0.8)	10.1(2.1)
<i>Ceratophyllum demersum</i> マツモ	+	⑤105.1(8.9)	—	7.7	—	—
<i>Miriophyllum spicatum</i> ホザキノフサモ	③++	20.1(1.7)	—	—	—	—
<i>Chara braunii</i> シヤジクモ	—	1.3	—	—	—	—
<i>Trapa natans</i> ヒシ	—	22.7(1.9)	①630.4(32.3)	①442.4(29.4)	①349.1(33.3)	①358.0(75.6)
<i>Potamogeton distinctus</i> ヒルムシロ	+	—	—	98.1(6.5)	—	—
<i>Nuphar japonicum</i> コオホネ	++	22.6(1.9)	⑤141.7(7.2)	89.7(5.8)	74.0(7.0)	16.1(3.4)
<i>Zizania latifolia</i> マコモ	++	③174.2(14.7)	④234.7(12.0)	③234.7(15.6)	②268.4(25.6)	②22.9(4.9)
<i>Phragmites communis</i> ヨシ	++	42.7(3.6)	62.7(3.2)	62.7(4.2)	71.5(6.8)	—
沈水性植物計	++	807.5(75.5)	888.6(45.3)	575.5(38.3)	287.6(27.3)	76.1(16.1)
浮葉性植物計	+	22.7(2.1)	630.4(32.3)	540.5(36.0)	349.1(33.3)	358.0(75.6)
抽水性植物計	++	239.5(22.4)	439.1(22.4)	387.1(25.7)	413.9(39.4)	39.0(8.3)
水草量(生重)トン/全湖	—	1,067.9(100.0)	1,958.1(100.0)	1,503.3(100.0)	1,050.6(100.0)	473.1(100.0)
(%)	—	(54.6)	(100.0)	(76.7)	(53.7)	(24.2)

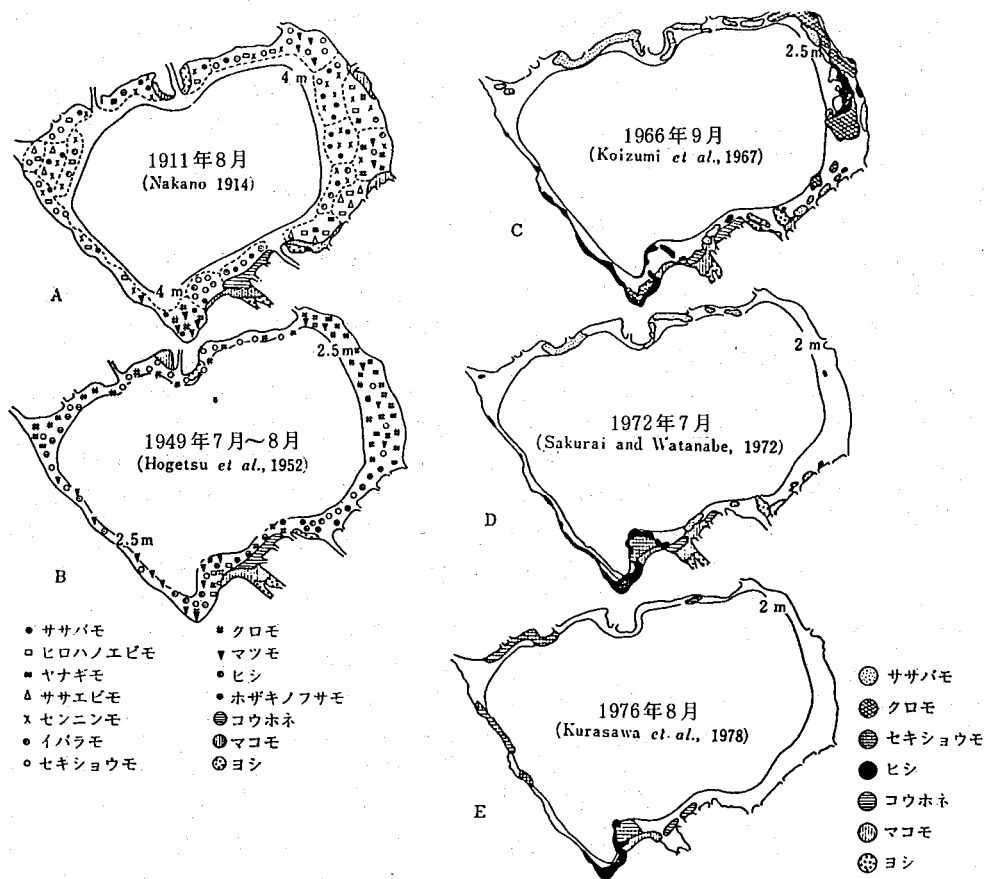


図5. 諏訪湖における水生植物の分布域の変遷と主要種の分布(倉沢ほか, 1979)

湖の水草分布帯と現存量の年代変動を図5と図6に示した。湖の富栄養化と大型水草群集との関連をみると、富栄養化は沈水性植物の発達を抑制し、浮葉性植物の繁茂を促進する。これは主として植物プランクトンの大発生により、水中への光の透過が著しく悪化したことに関係がある。それを裏書きするものとして、湖内大型水生植物の分布限界深度の減少があげられ(表4)、したがって分布帯面積の狭少化となって表われるのである(図5)。70年前には3.5~4.0mの深さまで沈水性植物が採集されたが、その後年代の推移とともに浅くなり、最近では1.7~2.0m付近が限界となっている。このように、植物プランクトンと根をもつ大型水草、特に沈水性植物は競争関係にあるので、こうした水草分布帯の狭少化は、諏訪湖の将来の自然の在り方を考える上で重要な問題となる。

C. 動物プランクトン群集の変遷

一般に貧栄養湖では甲殻類のケンミジンコなどのCopepodaが優占するが、富栄養化が進むにつれて輪虫類や原生動物が豊富になる。夏季の諏訪湖では表5のように、70年前はケンミジンコが最多であったが、30年前と10年前ではゾウミジンコとオナガミジンコのようなCladoceraが優位を占め、同時にワムシ類の種属数も個体数も増える。殊に最近では汚濁生物の指標とされる原生動物の繊毛虫であるエダワカレツリガネムシが急増し、動物プランクトン総個体数の90%以上を占めるに至った(磯部 1980)。全個体数は近年では30年前の5~6倍の1000~2000個体/melにも増えている。諏訪湖にワムシ類が増えたことは、魚のなかでワカサギが優占種となったことに関係が

表 5. 諏訪湖の夏季の動物プランクトンの変遷 (+少ない, r 非常に少ない)

動物プランクトン		優 占 順 位			
		70 年 前 (1911)	30 年 前 (1948)	10 年 前 (1970)	近 年 (1977)
原生動物	<i>Diffugia</i> ツボカムリ				⑧
	<i>Arcella</i> ナベカムリ		+	+	
	<i>Centropyxis</i> トゲフセツボカムリ		⑤		
	<i>Vorticella</i> ツリガネムシ				⑥
	<i>Carchesium</i> エダワカレツリガネムシ			② 25 %	① 96 %
輪虫類	<i>Rotaria</i> ヒルガタワムシ			r	
	<i>Conochirus</i> テマリワムシ	+	④	⑥	r
	<i>Polyarthra</i> ハネウデワムシ		+	+	r
	<i>Trichocerca</i> ネズミワムシ		+	+	+
	<i>Asplanchna</i> フクロワムシ			+	② 1.1 %
	<i>Brachionus</i> ツボワムシ		r	+	+
	<i>Keratella</i> カメノコワムシ	+	r		+
	<i>Lepadella</i> ウサギワムシ			r	+
	<i>Colurella</i> チビワムシ				+
	<i>Monostyla</i> エナガワムシ				
	<i>Filinia</i> ミツウデワムシ		② 15 %	④	⑦
	<i>Hexarthra</i> ミジンコワムシ		① 43 %		
	<i>Ploesoma</i> スジワムシ		③	r	r
甲殻類	<i>Pompholyx</i> アワワムシ				r
	<i>Diaphanosoma</i> オナガミジンコ			③	⑤
	<i>Sida</i> シダ	+	⑦		
	<i>Daphnia</i> ミジンコ	+			
	<i>Simocephalus</i> オカメミジンコ	+			
	<i>Bosmina</i> ゾウミジンコ	+	⑥	① 46 %	③
	<i>Bosminopsis</i> ゾウミジンコモドキ	+	+		
	<i>Leptodora</i> ノロ	r	r	r	r
	<i>Eodiaptomus</i> エオヒゲナガケンミジンコ		r	+	r
	<i>Cyclops</i> ケンミジンコ	①	+		
	<i>Mesocyclops</i> アサガオケンミジンコ			⑤	
	<i>Thermocyclops</i> テルモケンミジンコ				④
総 個 体 数 / l		—	400-500	1000-2000	1000-2000
原 生 動 物		—	1~10 %	20~30 %	90~95 %
輪 虫 類		—	80~90 %	10~20 %	1~3 %
甲 殻 類		—	10~15 %	60~70 %	1~3 %

あると思われる。ワカサギの卵からかえった直後の仔魚は、暫時ワムシのような小型動物プランクトンしか食えない。丁度ワカサギの産卵のピークの少しあと、ワムシの発生の春のピークが現われる。そしてワカサギがもっと大きな餌を食べるようになった頃、ゾウミジンなどの甲殻類がふえてくるので、ワカサギの生長は動物プランクトンの季節遷移とうまく合致しているのである。

なお低温で *Microcystis* の大発生がみられなかった年の9月末には、ツノモ (*Ceratium*) が大発生し、湖水の溶存酸素を著しく下げた。これなど明らかに一種の赤潮であって、夏の富栄養湖では藍藻類の“水の華”がむしろ湖水の安定化要因として働いていることを示唆するものであろう。

D. 底生動物群集の変遷

表6に示すように、諏訪湖では70年前からユスリカの幼虫が多く、羽化した成虫が灯火に多数飛来したという。沿岸動物のうち礫や水草の多い場所では、ヒルのような

汚染動物が年々増加し、カワニナやヒメタニシなどの巻貝は10年以前までは沿岸部の礫や棒杭などに群生していたが、最近に至ってまずカワニナが、次にヒメタニシが激減した。深底帯の泥部にまで分布するマルタニシ、オオタニシ、カラスガイ類は30年前より減りはじめ、現在では非常に稀になった。特に砂地に好んで生息するマシジミの衰退の経過は著しい。マシジミは70年前には湖水の天竜川への開口部水域や、最大の流入河川の上川の河口部および豊田地先の霞崎水域のような、流水域で常に溶存酸素の豊富な場所で多く採取され、昭和初期までは諏訪湖名物とされるほどに饒産した。それが30年前にはすでに非常に減産し、今日ではほとんど採れない。これは、富栄養化の進行による夏季底層水の酸素欠乏による結果であろう。マシジミの減産で琵琶湖から多量のセタシジミの移殖放流がつけられたが、これも琵琶湖でも減少してきたので10年以前に中止され、現在は汽水性のヤマトシジミが毎年放流されているが、自然増殖のきざしはない。

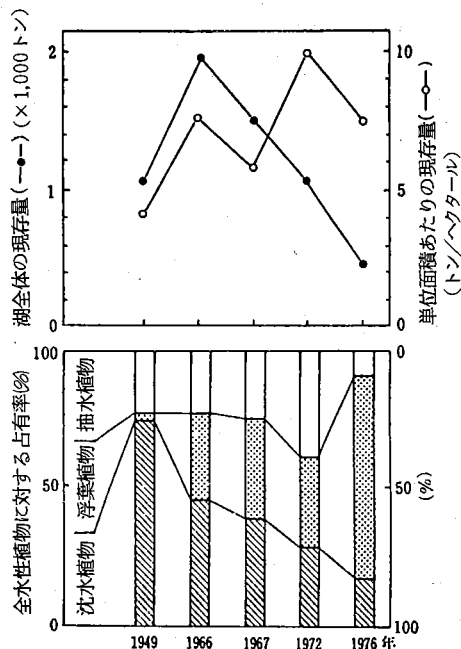


図 6. 諏訪湖における水生植物の現存量と単位面積当たりの現存量 (上図), および全水生植物量に対する抽水・沈水・浮葉各植物の占有比率の変遷 (下図) (倉沢ほか, 1979)

オオユスリカとアカムシユスリカの幼虫はともに酸素欠乏に強く、ともに8~11月の間に羽化期があり、この深底部からは赤色色素をもつ酸素耐乏性のイトミミズ類($\times 10^3 \sim 4$ 個体/ m^2)や上記ユスリカ類($\times 10^2 \sim 3$ 個体/ m^2)が、70年以前より今日まで豊富に採集されている(福原・他 1980)。

E. 主要漁獲種とその量の変遷

諏訪湖および流入河川の河口部の漁獲物は、諏訪湖漁業協同組合(1917~1978)によって取り扱われてきたので、年代別の比較が容易にできる。図7(倉沢 1980)は年間総漁獲量と各主要魚種の量の百分比の経年変化を示した。魚介類の量の順位をつけると表7(倉沢 1980)のようになる。70年前の資料は魚介種別は詳細に分けて記録されていないので、細部の順位は不明であるが、シジミが全量の40%を占め、エビ、ウグイ、コイとつづき、アメノウオなどのいわゆる冷水魚が相当量捕獲されている。その後大正年代にはワカサギが霞ヶ浦から、フナが各所から移殖放流されるとともに、これら兩種が急激にふえはじめ冷水魚は減り、30年前にはタニシが全量の25%、ワカサギが22%、フナが14%を占めそれぞれ1位、2位、4位となり、シジミは3位(20%)にエビ9位(1%)に転落する。最近10年間はワカサギが全量の60~70%と全漁獲量の $\frac{2}{3}$ 以上を占め、暖水性のフナ、コイ

表 6. 夏季の底生動物の優占種と個体数の変遷 (アカムシユスリカは秋季)

底 生 動 物		70 年 前 1911	50 年 前 1931	30 年 前 1948	10 年 前 1969	近 年 1977
沿岸部 ↑	Hirudidae ヒル	r	+	+	++	++
	<i>Semisulcospira</i> カワニナ	++	++	++	+	+
	<i>Sinotaia historica</i> ヒメタニシ	++	++	++	++	+
	<i>Corbicula leana</i> マシジミ	++	++	+	r	r
	<i>Corbicula sandai</i> セタシジミ			+	r	r
	<i>Corbicula japonica</i> ヤマトシジミ				+	r
	<i>Cipangopaludina malleata</i> マルタニシ	+	+	r	r	r
	<i>Cipangopaludina japonica</i> オオタニシ	+	+	r	r	r
	<i>Cristaria</i> カラスガイ	+	+	r	r	r
	<i>Anodonta</i> スマガイ	+	+	r	r	r
深底部 ↓	<i>Unio</i> イシガイ	+	+	r	r	r
	<i>Chironomus plumosus</i> オオユスリカ	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Spaniotoma akamushi</i> アカムシユスリカ		(++)	(++)	(++)	(++)
	<i>Procladius</i> カユスリカ		+	r	r	r
	<i>Chaoborus</i> フサカ			r		
	<i>Tubifex</i> , <i>Limnodrilus</i> イトミミズ	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Branchiura</i> エラミミズ			++	++	++

個体数/ m^2 r < 10, + 10^{1-2} , ++ 10^{2-3} , +++ 10^{3-4} , ++++ $> 10^4$

がつづき、エビは激減している。ここ2~3年はフナもコイに劣るようになり、10年来毎年移入しているシジミ(ヤマトシジミ)は水揚げ量が放流量を下廻る有様である。

ワカサギは現在では砥川と上川(六斗川)の2ヶ所にある採卵場で、冬一早春期にそ上する親魚を捕えて採卵、

人工受精し、毎年10~20億粒の卵を湖に放流し、その上かって諏訪湖への卵の移入原産地であった霞ヶ浦をはじめ各地の湖沼へ輸出している。したがって、産卵場になる流入河川の大半が汚染されても、資源の補充という点では今のところ問題はないといえる。それにしても、冷水性といわれるワカサギが、盛夏には湖底でも24℃で溶

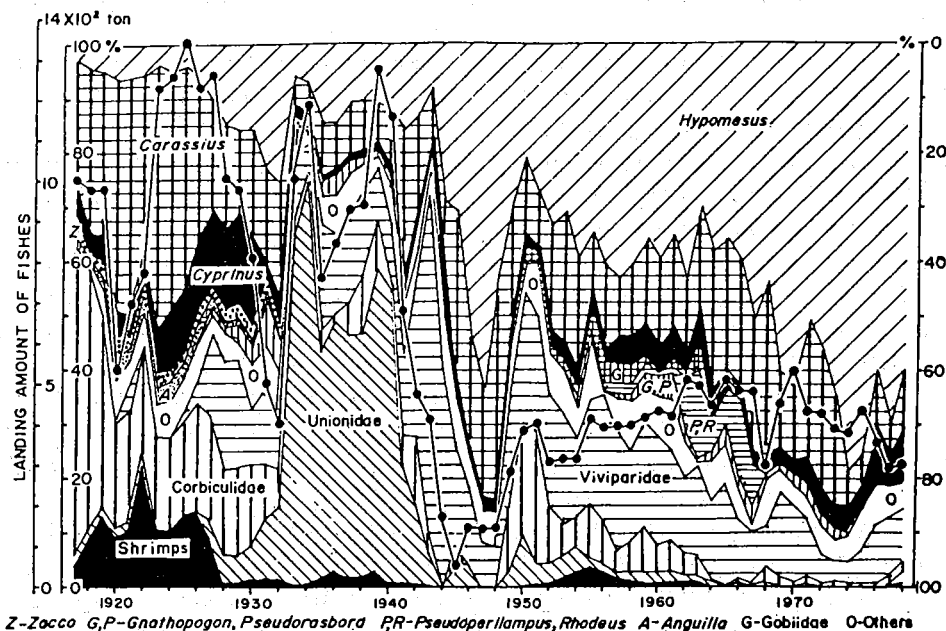


図 7. 諏訪湖の漁獲総量および各種属量の百分比の1917から1978までの変遷
 ● 漁獲総量

表 7. 主要漁獲種とその量（漁業組合取扱い）の変遷（網イケスのコイは含まない）

漁 獲 種 ()内は移入年	漁獲量 (トン) および% (カッコ内) ①~⑮順位			
	70年前 (1910)	30年前 (1950)	10年前 (1970)	近 年 (1978)
<i>Oncorhynchus</i> アメノウオ	⑥ 1.5 (0.2)	0.03	0.2	0.01
<i>Salmo</i> ニジマス	—	—	0.02	—
<i>Plecoglossus</i> アユ	—	0.001	0.02	0.2
<i>Hypomesus</i> ワカサギ (1915)	—	② 83.8 (21.9)	① 331.1 (62.4)	① 178.3 (58.9)
<i>Parasilurus</i> ナマズ	—	⑪ 3.3 (0.9)	⑨ 3.3 (0.6)	⑧ 4.1 (1.4)
<i>Pseudoperilampus</i> ゼニタナゴ	—	⑫ 3.1 (0.8)	—	—
<i>Gnathopogon</i> モロコ (1925)	—	—	⑤ 9.0 (1.7)	⑩ 3.2 (1.1)
<i>Pseudogobio</i> カマツカ	—	—	0.1	—
<i>Sarcocheilichthys</i> ヒガイ (1912)	—	0.4	⑭ 0.4 (0.1)	⑬ 1.2 (0.4)
<i>Tribolodon</i> ウグイ	③ 41.9 (6.2)	0.01	⑬ 0.4 (0.1)	⑭ 0.9 (0.3)
<i>Zacco</i> オイカワ	—	⑩ 3.7 (1.0)	⑫ 0.6 (0.1)	⑮ 0.3 (0.1)
<i>Carassius</i> フナ (1580, 1920)	—	④ 52.7 (13.7)	③ 75.3 (14.2)	③ 30.5 (10.1)
<i>Cyprinus</i> コイ (1912)	④ 30.4 (4.5)	⑦ 7.3 (1.9)	④ 12.7 (2.4)	② 35.0 (11.6)
<i>Ctenopharyngodon</i> ソウギョ (1967)	—	—	0.1	—
<i>Hypophthalmichthys</i> レンギョ (1967)	—	—	⑪ 1.2 (0.2)	—
Cobitidae ドジョウ類	—	⑬ 2.1 (0.5)	⑦ 5.5 (1.0)	⑫ 2.9 (1.0)
<i>Anguilla</i> ウナギ	⑤ 4.9 (0.7)	⑧ 6.3 (1.7)	0.2 (0.1)	0.03
Gobiidae ビリンゴ, ヨシノボリ	—	⑥ 11.2 (2.9)	⑩ 2.9 (0.5)	⑨ 4.0 (1.3)
Viviparidae タニシ類	—	① 94.0 (24.5)	② 76.3 (14.4)	④ 26.9 (8.9)
Corbiculidae シジミ類 (1839)	① 281.2 (41.9)	③ 77.4 (20.2)	⑥ 7.1 (1.3)	⑤ 6.1 (2.0)
Unionidae カラスガイ類	—	⑤ 32.7 (8.5)	⑧ 4.3 (0.8)	⑦ 5.8 (1.9)
Shrimps エビ類 (1789)	② 117.8 (17.5)	⑨ 5.1 (1.3)	—	⑪ 3.0 (1.0)
其の他 (アユ, フナ, ナマズ, タニシなどの計)	198.8 (28.8)	—	—	—
計	671.5	383.3	530.7	302.6

存酸素ゼロに近い条件の汚れた湖で、ほとんど被害を受けずに過しているのはその適応性の強さを示すものであろうか。

一方、ナマズ、オイカワ、ハゼ類など天然繁殖で移殖放流の行われない魚種は、著しく減りはじめたため、15年程前から比較的汚れの少ない流入河川河口部などに、人工的に産卵地造成場を設けて資源確保をしなければならなくなっており、諏訪湖では人工栽培的な強力な補助なくしては、自然繁殖で水産業が成立つ魚種はなくなっている(倉沢 1982)。

表7にタナゴ、モロコおよびヨシノボリとある魚種は、実際には現在ではそれぞれ2種から成っている。すなわち、タナゴは昔はゼニタナゴが主であったが、30年前ごろから移入種のタイリクバラタナゴがふえはじめ、1960年代ではゼニタナゴを完全に制圧していた。周知のようにタナゴは二枚貝に産卵するのであるが、年2回産卵できるほど長い繁殖期をもつタイリクバラタナゴが、秋1回しか、しかも一定の大きさの貝を選択して産卵するゼニタナゴとの競争に勝ったのであろう。1960年代には相当量の水揚量を記録したタナゴ類も1970年代には全くの不振で、最近では漁獲統計の記録からはずされる程に減少したが、これは産卵習性に欠くことのできない二枚貝の激減がもたらした結果であろうか。モロコといわれるものはホンモロコとモツゴから成るが、現在その比は1:14くらいで、これもモツゴの産卵期が非常に長いことと関係があるようだ。ヨシノボリのなかにはビリンゴが含まれるがそれはヨシノボリの10倍ほど多い。

なお魚としてはこのほかにメダカがおり、汚れた河川にもまだ生息している。面白いことに1968年頃から諏訪市内の温泉排水が流入している川の中に熱帯魚のグッピーがふえはじめ近年では湖の沿岸部にまで進出する程になり、その量はメダカ研究者が採集に行くと、目的のメダカよりはるかにグッピーが多く捕れるという。この胎生メダカ科の小魚は、20℃近い水温さえ冬季に保証されれば、他の魚が住めないような汚れた下水中でもユアカとヘドロを食って生きていける、いうなれば“公害”に強い魚である。筆者らはこの美しい魚の出現は、諏訪湖の過度の汚濁化を警告するものとして重視したい。

V 過富栄養化の主原因

上述の如き諏訪湖の過度の富栄養化現象を生じた経緯を知るには、湖周辺地域の近代の開発経過と、それに伴う流入河川の汚濁状況を明らかにする必要がある。

A. 諏訪湖周辺の産業の発達経過

諏訪湖の周辺は石器時代より先住民族が居住し、ソネ遺跡をはじめとして多くの遺跡が発見されている。山間に孤立した盆地であるにかかわらず、その後次第に大和

民族が居住するようになって人口を増し、戦国時代には交通上の要所、地方行政の中心としての地位を確立している。

明治の初期までは都市を除いて湖周辺の平地は水田地帯であった。明治の中頃から岡谷地方を中心として近代日本の主要産業の一つであった製糸業(生糸)が発達し、大正年代には最盛期を迎える。1920年(大正9年)に製糸工場数は250、まゆを煮る釜の数約40,000、工具数約48,000人、生糸生産高は2,900トンに及んでいる。諏訪湖周辺に製糸業が発達した理由として、天竜川および諏訪湖に流入する河川流を繰糸動力の水車に利用できたこと、弱アルカリ性の諏訪湖の水質が製糸に適していたこと、冷涼乾燥の気候がまゆの貯蔵をたやすくしたことなどが挙げられる。湖水は製糸用水として利用されたが、同時にまた湖水には大量のまゆの煮汁その他の有機排水がすてられることとなり、これが湖水大量汚染の嚆矢となった。

製糸業はその後生産過剰と国外の需用減で不況におちいり、さらに大平洋戦争で輸出先を失うに至って没落し、これら工場群は疎閑した軍需工場に転換する。戦後はこれら疎閑工場を基盤として、カメラ、レンズ、オルゴール、時計などの精密工業が発展し始め、これらの工場が関連する多数の企業とともに、シアンや重金属を含む大量のメッキ排水を諏訪湖に流しこむことになった。一方、昭和恐慌のあと、一部の製糸業者は女工用に自家製造していたみそを、本業としてつくるようになり、大小50以上の工場数とそれらの経営規模が大きくなるにつれて、大豆の煮汁を主成分とする有機排水がますます大量に湖にすてられるようになった。食品工業の有機排水としては、その他に凍り豆腐の製造や冬季の寒天製造などによるものがある。

諏訪湖の漁業は1895年(明治28年)には漁獲量308トンにすぎないが、その後いくつかの魚種の移入と増殖が積極的に行われた結果、明治年間のシジミや昭和初期のカラスガイは魚獲物量の大部分を占め年間の総漁獲物量は1000トンを越えていたが、その後の両貝の量産は著しく減少した。それにもかかわらず最近でも300~400トン漁獲物量は維持されている。湖からの漁獲とともに1964年から湖面に浮かべた網イセス(9×9m)によるコイの養魚が行われるようになった。32面のイセスから発したこの事業は1970年からは100面前後のイセス数を維持し、技術的向上により最近5年間では全漁獲量の3倍以上の水揚げ量がある(倉沢 1982)。しかし、このコイ養殖は給餌によるものであるから、年間約1,500トン(乾量)の餌の大量投与による水質や底質の汚染はさけられない(林・他 1979)。

産業構造の変革につれて湖周辺の4市町(諏訪市、岡

谷市、ちの市、下諏訪町)の定住人口は、1913年の11万人から18万人(1970年)に増加した。加えて上諏訪温泉・下諏訪温泉と背地に蓼科・霧ヶ峰の両高原を控えた観光地の諏訪湖周辺への旅行者数は、近年の観光ブームに乗って急増し、両温泉だけでも年間100万人(1970年)に達している。これだけの人が住み、また観光人口の多い諏訪湖周辺の都市には、1978年の下水道の一部稼動に至るまでは下水道設備は全くなかった。家庭下水も工場排水も流入河川へたれ流しの諏訪湖へ直結である。湖畔

に設置された処理場のし尿処理水も、30軒以上の旅館の浄化槽の排水も湖に放流されてきた。諏訪湖周辺の住民は、諏訪湖の汚濁の被害であるとともに加害者であることもまぬがれない。このように、諏訪湖は一貫して汚水の沈澱池と酸化池の運命を担ってきたのである。

自然と文化財の保護にここのほか熱心であるこの地域の住民が、諏訪湖をここに至るまで放置していたのは、水に流せばすむという意識を出なかったためか、あるいは四辺の豊富な水源にあまりに恵まれすぎていて、湖水を上水道源にも、工業用水にも利用する必要がなかったためであろうか。

表 8. 諏訪湖の代表的流入河川の夏季の栄養塩濃度(ppm)の最近30年間の変遷

	年	NH ₄ -N	(NO ₂ + NO ₃) -N	PO ₄ -P	外見的水質
上川 (六斗川)	1949	0	0.015	0.005	農業用水
	1963	0.019	0.061	0.006	
	1969	0.05	0.780	0.030	
	1977	1.240	1.522	0.028	
衣之渡川	1949	0.600	0.030	0.080	都市下水, 温泉排水, みそ工場排水を含む
	1963	—	—	—	
	1969	0.310	0.150	0.220	
	1977	1.590	2.204	2.207	
古川 (下諏訪)	1949	0.10	0.020	0.040	都市下水, メッキ工場排水を含む
	1963	0.020	0.267	0.291	
	1969	0.080	0.910	0.170	
	1977	0.404	2.082	0.185	

B. 流入河川汚濁の経年変化と湖の汚染

表 8 に最近30年間の代表的な流入河川の無機窒素と無機リンの含量を示した。上川のように最大流量をもつ川も上流のちの市の発展に伴って、30年前に比べ近年では窒素は約10倍、リンは5倍と濃度は高まり、都市下水や工場排水を入れる衣之渡川や古川(下諏訪)も異常な濃度の増大ぶりを示し、各河川の水質が急速に変わったことがわかる。特にリンの急増はビルダーとしてリン酸塩が使われる中性洗剤の使用量の増大とも関係があるろう。

湖への流入河川の汚濁が急激に進んだとされる1960年代から1970年代の初期の状態を、付着藻類相、底生動物

表 9. 各生物群集別水質判定の総合結果による流入河川汚濁の経年変化

河川名 月年	承知川	古川	砥水川	清河川	横河川	五味沢川	塚間川	大堀川	新田川	高田川	武井川	鴨池川	宮波川	舟波川	六斗川	島崎川	中門川	衣之渡川	柳並川	千本木川	天竜川
4 '60	①	—	①	—	—	—	●	○	—	—	◎	◎	①	—	①	—	—	●	●	—	⊕
8 '63	⊕	●	○	⊕	○	●	●	○	◎	◎	⊕	—	①	①	⊕	⊕	—	●	●	●	⊕
10 '66	◎	●	①	◎	①	◎	●	○	◎	◎	—	◎	—	⊕	◎	—	—	●	●	—	◎
7 '67	◎	●	①	◎	①	—	●	①	◎	—	—	—	◎	—	◎	—	—	●	●	—	◎
10 '67	◎	●	⊕	◎	①	●	●	⊕	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
4 '68	◎	●	①	◎	⊕	●	●	◎	◎	—	—	—	◎	—	◎	—	—	●	●	—	◎
8 '68	◎	●	⊕	◎	⊕	—	●	◎	◎	◎	◎	⊕	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
7 '72	◎	●	◎	◎	◎	—	●	◎	◎	—	◎	◎	◎	—	◎	—	◎	◎	◎	—	◎
10 '72	◎	●	◎	◎	◎	—	●	◎	◎	—	—	—	◎	—	◎	—	◎	◎	◎	—	◎
11 '72	◎	●	◎	◎	◎	—	●	◎	◎	—	◎	—	◎	—	◎	—	◎	◎	◎	—	◎
流量 全流入量%	1.07	14.34	0.61	3.84	0.10	0.69	17.04	35.02	2.49	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.49	3.57	3.64	0.07	0.09	1.03	9.63	0.47	1.41	0.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

○…os ①…os~βms ⊕…βms ◎…βms~αms ●…αms ①…αms~ps ●…ps

相、バクテリア数を指標とした生物学的な水質判定結果で示すと表9（倉沢・他1973）のようである。これによると、1960～1963年の頃の各河川汚濁の進捗はゆるやかであるが、1966年以降のそれは急速である。すなわち1963年には砥川、横河川および大堀川の3本あったos（貧腐水性）河川が1968年には皆無となり、これら河川はほとんど β_{ms} （ β -中腐水性）に変わり、その他の河川はすべて β_{ms} からps（強腐水性）の範囲に入る汚濁河川になった。そして1972年7月には大部分の河川が α_{ms} ～psの高い汚濁水質を示すに至り、砥川と横河川のみが β_{ms} 河川として残された。

各河川により諏訪湖へ注がれる流入水量は、洪水時以外は年間10～15 ton/secの範囲であるが、河川別に求め

表 10. 諏訪湖流入河川の汚濁化に伴う汚濁水流入量（%）の経年変化

月 年	生物学的な水質階級			
	ps	α_{ms}	β_{ms}	os
4'60	8.6	6.7	45.3	39.4
8'63	8.8	8.9	53.8	28.5
10'66	8.6	29.3	54.4	7.7
7'67	8.7	61.9	21.8	7.6
10'67	10.9	63.6	25.2	0.3
4'68	14.1	42.5	36.2	7.2
8'68	14.1	70.3	15.6	0
7'72	30.8	68.9	0.3	0
10'72	22.8	69.7	7.5	0
11'72	23.2	60.8	16.0	0

表 11. 全流入河川から諏訪湖へ入る1日のBOD負荷量（1966）
（長野県諏訪湖浄化対策委員会資料による）

	BOD負荷量 (kg)	%
工場排水	5,028	54
家庭下水	2,560	28
家畜ふん尿	1,000	11
し尿処理水	470	5
温泉下水	100	1
と殺場排水	100	1

（長野県諏訪湖浄化対策委員会資料による）

表 12. 湖を富栄養化させないための許容負荷量と危険負荷量（OECD報告1966）

平均水深 (m)	許容負荷量 (g/m ² /年)		危険負荷量 (g/m ² /年)	
	窒素	リン	窒素	リン
5	1.0	0.07	2.0	0.13
10	1.5	0.10	3.0	0.20
50	4.0	0.25	8.0	0.50
100	6.0	0.40	12.0	0.80
150	7.5	0.50	15.0	1.00
200	9.0	0.60	18.0	1.20

た全流入量に対する割合は表9の下欄に示すようである。流入量の多いのは六斗川（上川）が最大で35%、官川が17%、砥川が14%、舟渡川が9%で、他の河川はそれ以下である。今、生物学的な水質階級別に各河川の流入量を合計して、その経年変化をみると表10のようである。すなわち、1960年には、osの水量は全量の約40%、msは51%、psは8%であったものが、1966年にはosは急減して約8%、msは急増して84%になり、1972年にはosは0%、msは60～70%、psは23～31%にまで達する程汚濁したことになり、10余年間の流入水質の急変がいかに著しいものであったかを物語る。

流入河川と湖との汚濁経過の関連をみると、流入河川のos水量が約30%、 β_{ms} が約50%を占める1960～1963年の間は湖の水質は β_{ms} であるが、os水量が10%を割り α_{ms} 水量が30%以上に増える1966～1968年には湖は β_{ms} ～ α_{ms} の水質となり、os水が0%、 α_{ms} 水が60%を越え、ps水20%以上に達する1972年には湖の水質は α_{ms} を示すようになった。これは最大流入水量を示す水質階級が出現した年より1～2年遅れて湖がそれと同階級の水質となることを示しており、湖の汚濁の進行が河川の汚染物質の量によって支配されていることを示唆している。溶存栄養塩を含むこのような汚濁流入水の著しい増加は、諏訪湖の富栄養化をさらに加速する一大原因であることは明白である。

流入水の有機汚濁の指標として河川から湖へ入る1日のBOD負荷量を表11に示した。長野県諏訪湖浄化対策研究委員会（1968）が行った推計によると、1966年当時ではし尿処理水を含めた家庭下水と工場排水の比は3：7であり、この数字は諏訪湖汚染の主役が工業群だけとはいき切れないことを如実に示すものである。

さて、貧栄養湖から中栄養型の湖を経てやがて富栄養湖となるのは、調和型湖沼のたどる正常な自然系列であるが、これにはかなりの長年月を要するものである。しかし、日本の現状では地理的にまたは余程の立地条件にでも恵まれない限り、湖沼の富栄養化は人類の生活の影響を直接間接に受けて極めて急速に進まざるをえない状況にある。こうした富栄養化の条件を、湖へ入る栄養塩類量で表わしたのが表12である。これは湖を富栄養化させないための、湖の平均深度と窒素とリンの流入に対する許容負荷量と危険負荷量を提示している。

諏訪湖の場合1970年代の初期のリンの負荷量は3.5g/m²/年、無機態窒素では43.9g/m²/年であるが、諏訪湖の平均深度5mとすると、表12の値に対しリンで約50倍、窒素では44倍も許容負荷量を上廻っている。これでは諏訪湖がここ15年間に目にみえて汚れがひどくなったのは当然のこととしかいえない（倉沢・沖野1982）。

また、最近の諏訪湖における微生物の酸素消費量は、

ほとんど一年中基礎生産の酸素量を上廻っており、夏では1.5倍にまでになる。また、前述の如く近年の年間の有機物生産は1949年の約2倍であるのに対し、呼吸量では約3倍を示すが、これらは流入河川からの多量の有機物供給に原因するものである（倉沢・沖野 1982）。周知のように、川にせよ湖にせよ、その自浄能力には限界があるから、有機汚水を流し続けければ、遠からず湖内の酸素は分解者による有機物分解のために消費しつくされ、“死の湖”と化することは明らかである。

VI 諏訪湖の浄化対策と問題点

諏訪湖の汚濁に対する浄化のためにとられた公的な対策と実施されたものは、次の三つであり、それぞれについて問題点とその効果を以下に記することにする。

A. 水質汚濁の環境基準の設定

上述のように多量の汚水の流入状況からみて、諏訪湖を巨大なドブ池にしないためには、当然のことながら汚水の流入を規制するしかない。諏訪湖については1973年より環境基準（湖沼）類型Aが設定され、長野県による上のせ排水基準の設定・施行となった。これによって流入有機物負荷も重金属汚染も軽減している。長野県の調査によると魚介類中の重金属濃度の減少に現われ、1969年を頂点として亜鉛、銅、鉛はともに減少傾向で、1975年以降は亜鉛20ppm、銅0.6ppm、鉛0.1ppm以下、カドミウムは検出以下と1969年当時の値に比べすべて低い値となり、亜鉛を例にとると $\frac{1}{4}$ に減少している。しかし、現在の排水基準は濃度規制であるので、水で希釈して流せば違反にならないという抜け道があるから、諏訪湖のような半閉鎖性水域に対しては総量規制が絶対必要である。一方、諏訪湖浄化の最大の問題であるアオコ発生防止（富栄養化防止）には、原因物質となっている窒素、リンの規制が不可欠であることは、環境基準設定と同じ10年以上前から確認されているにもかかわらず、目的が十分に達成されていないというのが実状である（沖野1982）。

B. 沿岸帯の浚渫と大型水生植物の除去

湖底の腐泥を除去する湖の浄化を目的とした浚渫は、1969年から浚渫船による大がかりな作業が開始され、現在すでに第一期計画が完了しているが、水質浄化の効果は今のところ明確ではない。汚水の流れる市街地からの小河川の流入河口付近では、いわゆる「ヘドロ」が堆積し、夏にはメタンガスの発生するような場所があるが、こうした腐泥は除去の対象になる。しかし湖底全域がヘドロであるという認識は明らかに誤りであろう。

諏訪湖では1960年代には、湖沿岸部に生育する沈水性、浮葉性の大型水生植物は、操舟をさまたげたり、ゴミなどがからんで観光上よろしくないとして、市職員や漁民

の手により除草作業を積極的に行っていた。そこへ上述の機械力を駆使しての湖全域にわたる沿岸部の浚渫作業が行われるようになり、併行して浚渫土による埋立てと

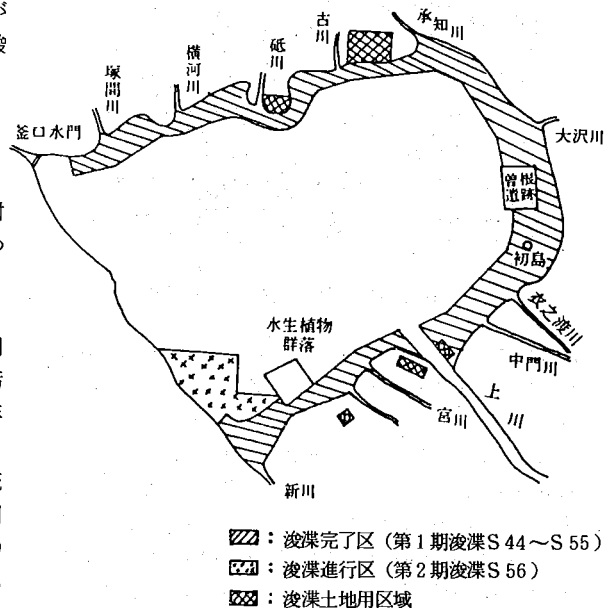


図 8. 諏訪湖浚渫の概況
(長野県土木部、河川資料 1980)

表 13. 1969年以後の諏訪湖の浚渫土砂量

年度	浚渫土砂量	
	年間浚渫土砂量 (m^3 /年)	積算土砂量 (m^3)
1969	58,566	58,566
1970	120,136	178,702
1971	203,598	382,300
1972	213,423	595,723
1973	150,204	545,927
1974	133,825	879,752
1975	113,800	993,552
1976	114,740	1,108,292
1977	103,570	1,211,862
1978	88,500	1,300,362

(長野県諏訪湖工事事務所資料による)

築堤工事を施行する徹底した水草根絶作戦をはじめたのである。その浚渫目標は湖岸線の深度が2.5mに維持されるようにするという膨大なものである（倉沢・他1979）。この深度では、諏訪湖では大型水草の生育は阻止され、湖内での二次汚染が防止できるのである。それは、大型水草が生育をはじめる諏訪湖の春季の透明度が約1mで

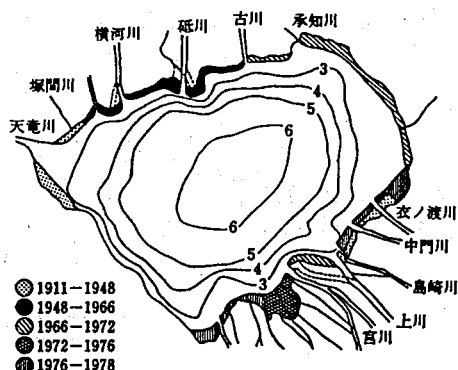


図9. 諏訪湖の形態の現状と埋立年度

あるので、補償点深度とされるその2倍以上の深度があれば、光条件の制約で水草の生育限界深度となるからである。

1969年から1978年まで総浚渫面積は約3 km^2 で、湖の全面積の約23%に当る。それは1972年当時の水草分布帯総面積約103haのほぼ3倍であり、浚渫土量は表13でみるように総計130万 m^3 と報告されている。埋立てによる大型水生植物分布帯の侵蝕の有様は図9の埋立て沿岸部により鮮明に表わされる。1950年代までは、諏訪湖には入江に発達した「エゴ」と呼ばれる水草の繁茂する大群落帯が何処所も存在していた。それらが、横河川と砥川のデルタ突出部の入江のエゴは1966年までに、下諏訪の「高浜のエゴ」は1972年までに、最大面積をもっていた「渋のエゴ」は1976年までに、最後まで残された「泉沢のエゴ」も1978年までに次々に埋立てられ、現在は豊田地先（霞鼻）沖の「渋のエゴ」の一部が原生のまま残されているだけである。「渋のエゴ」の広大な埋立て地には、湖水浄化を目的とした下水道終末処理場が建設され、湖周辺の埋立て地は広い路巾をもつ湖周環道路が通じるようになった。したがって現在みられる諏訪湖は、コンクリート製護岸壁に囲まれた大きな池の中に、沈水性、浮葉性の植物群落がわずかに散在するといった景観である。

水生植物は河川を経由して湖内に流入した栄養を吸収して、光合成により植物体を形成する。これは湖内に新たに有機物を供給する二次汚染につながり、湖周辺からの有機物負荷と同様に湖の汚濁の原因の一つとなるという見解から、浚渫がなされたのである。しかし、この見解はあまりにも一方的な解釈であり、明らかに誤解である。底泥の浚渫は、蓄積した有機物や重金属を除くには有効であるが、同時に大型水草も除去することになるので、競争関係にある植物プランクトンの大発生を助長する結果を生む可能性がある。かつて、松本城の濠は一

面に大型水草が繁茂していたが、草魚を放流して水草の根絶に成功した。しかし、その直後から処理をするのに厄介な植物プランクトンの大発生に手をやいているという実例がある（倉沢・他 1978）。こうしてみると、沈水性、浮葉性の植物は栄養塩吸収のために逆に利用すべきではなかろうか。水生植物帯の湖沼生態系における重要性を量的に問題視できる程には実状は知られていない。しかし、天然の湖沼であれば、湖内生物が自然繁殖し、種を維持していく生活の場が確保されることが絶対に必要な筈である。近年ようやく見直され始めた「水辺環境」の保護保全のために、湖の回復に役立つような計画の練りなおしが期待される所以である。

C. 下水道の建設

浄化対策としてもっとも直接的な効果が期待できるのは下水道設置である。諏訪湖では1971年よりはじめられた流域下水道が、1979年によりやく一部が稼動を開始し今年で4年目を迎える。しかし、問題点としては環境基準とも関連して最も重要な窒素とリンの除去については明確な対応策や決定が見送られていることと、何年後かに下水道が完成しても湖の浄化がそれほど期待できないことである。では、どの程度の効果が期待できるか。多くの知見をもとにシミュレーションを行った結果は次のようである（Okino 1982）。

下水道が完成して計画通り汚水が終末処理場に収容され、全窒素、全リンの除去が行われたとすれば、現在湖に流入している全窒素の50%、全リンの75%が除去できる計算である。そうなれば、諏訪湖内で発生するアオコの量は、最大の夏で、1977年当時(160 mg Chl. a/m^2)の半分位(80 mg Chl. a/m^2)となり、透明度は30~40 cm から60~70 cm になる。

1981年8月現在、終末処理場への汚水の流入量は10,000トン/日以上で、計算によればこれまで諏訪湖に流入していた窒素、リンの負荷量をそれぞれ25%および30%削減したことになる。そこで、アオコの発生量と高い相関をもつCODの状況を、下水道が一部稼動した1981年と稼動前の1977年を比較すると次のようである。指定された諏訪湖の環境基準の湖沼類型Aの目標COD値は3ppmである。1977年の湖心における年間10日間隔での観測値では、環境基準の達成率は7%に過ぎないが、1981年の同様な観測値での達成率は25%にもなっている。湖水をろ過した試水のCOD値でも1981年は1977年に比べ濃度が約20%低下した。この値を直ちに水質回復とするのは危険であるが、水質にいくらかの変化が現われつつあることは認められよう。

栄養塩負荷の影響を大きく受ける植物プランクトンの夏季の発生量を、クロロフィル量で比べると、1977年

では最高が8月の $1,150\text{mg}/\text{m}^3$ であり、7～9月の期間は常に $500\text{mg}/\text{m}^3$ 以上を維持するのに対し、1981年は7～9月の期間での最高が $490\text{mg}/\text{m}^3$ に過ぎない。この傾向は総生産量でもみられ、両年の4～11月は1977年が $1,360\text{gO}_2/\text{m}^3$ に対し、1981年は $1,010\text{gO}_2/\text{m}^3$ と約20%の減少が認められた。生産量の増減は気象条件によって大きく左右されるので、両年の日射量や水温などを検討した結果、大きな差のないことが判明した。こうした1981年の結果は、下水道の稼動もその要因の一つと考えられようが、全面的に断定するまでには至っていない。

VII あとがき

以上で70年間の時間の推移と共に生じた諏訪湖の富栄養化と、それに伴う生物群集の変遷の経過について述べた。そして現在諏訪湖周辺の市町村に流域下水道をつくり、湖の汚染を防ぐ計画の工事が着々と進行中であるが、これが完備しても万全であるとは考えられない。すでに70年を経過した産業の発達と開発に伴う諏訪湖の富栄養化と汚染の歴史は、いよいよ次の段階へと入ってきている。それは、富栄養化を死の湖へ移行させないために、富栄養化の進行を人類の英知によって阻止し、湖の老化を逆に若返らせる各種の方策を、今こそ積極的に実行することである。

VIII 引用文献

- 青山莞爾(1978)諏訪湖集水域生態系研究。2, 62～180。
 福原晴夫・大高明史・磯部吉章(1980)諏訪湖集水域生態系研究。4, 30～33。
 林 秀剛・沖野外輝夫・倉沢秀夫(1979)諏訪湖集水域生態系研究。3, 81～86。
 宝月欣二・北沢石三・倉沢秀夫・白石芳一(1950)水産研究会報。3, 58～82。
 磯部吉章(1980)諏訪湖集水域生態系研究。4, 51～68。
 JIBP-PF 諏訪湖研究グループ(1969～1973)諏訪湖の生物群集の生産力に関する研究。1, 1～119, 2, 1～173, 3, 1～123, 4, 1～101, 5, 1～70。
 久保博彦・沖野外輝夫・竹内勝巳(1981)諏訪湖集水域生態系研究。8, 111～119。
 倉沢秀夫・青山莞爾(1969)陸水生物ならびに陸水群集の保護の方法に関する研究。3, 24～30。
 倉沢秀夫・山岸 宏(1971)バイオテク。4, 261～268。
 倉沢秀夫・山岸 宏(1971)地域開発。昭和46年2月号 17～29。
 倉沢秀夫・青山莞爾・磯部吉章(1973)陸水富栄養化の研究。2, 63～70。
 KURASAWA, H. & T. OKINO(1975) J. Fac. Sci. Shinshu Univ. 10, 85～104。
 倉沢秀夫・沖野外輝夫・加藤憲二・吉沢清晴(1978)諏訪湖実験所報告。2, 1～217。
 倉沢秀夫・沖野外輝夫・林 秀剛(1979)諏訪湖集水域生態系研究。3, 7～26。
 倉沢秀夫(1980)信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究。2, 15～21。
 倉沢秀夫(1980)諏訪湖実験所報告。3, 1～46。
 倉沢秀夫・山本 長・沖野外輝夫・林 秀剛(1980)諏訪湖集水域生態系研究。4, 69～106。
 倉沢秀夫・山本雅道・沖野外輝夫(1981)信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究。3, 1～6, 7～13。
 倉沢秀夫(1982)水温の研究。25, 2～18。
 倉沢秀夫(1982)東書生物。224, 1～5。
 倉沢秀夫(1982)信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究。4, 9～13。
 倉沢秀夫・沖野外輝夫(1982)諏訪の自然誌「陸水編」。113～176。
 長野県水産指導所諏訪支所(1917～1978)諏訪湖漁獲統計資料。手書き。
 中本信忠(1980)諏訪湖集水域生態系研究。4, 28～30。
 沖野外輝夫(1974)水温の研究。18, 2～9。
 沖野外輝夫・林 秀剛(1978)水温の研究。22, 2～6。
 沖野外輝夫(1981)遺伝。35, 2～18。
 OKINO, T. (1982) Rep. Suwa Hydrobiol. St. 4, 1～8。
 長野県土木部(1980)河川課資料。
 SAKAMOTO, M., H. KURASAWA & T. OKINO (1975) JIBP Synthesis 10, Productivity of Communities in Japanese Inland Waters, 379～420。
 SAWYER, C. N. (1947) J. N. E. Water Work Ass. 61, 109。
 諏訪湖漁業協同組合(1949～1978)同組合事業報告書。
 諏訪湖浄化対策研究委員会(1968)諏訪湖の浄化に関する研究。1～199。
 諏訪湖集水域研究班(1978～1982)諏訪湖集水域生態系研究。1, 1～90, 2, 1～200, 3, 1～102, 4, 1～155, 5, 1～105, 6, 1～120, 7, 1～145, 8, 1～130。
 田中阿歌麿(1918)湖沼学上より見たる諏訪湖の研究。(上) 1～936, (下) 937～1667, 岩波書店, 東京。