

諏訪湖のプランクトンおよび大型水生植物の 優占種の経年変化と湖の富栄養化の関連

倉 沢 秀 夫*

H. Kurasawa: Relation between chronological changes of dominant species of plankton and rooted aquatic plant communities and lake eutrophication in lake Suwa.

I. ま え が き

モニタリングが「科学的に計画された連続的な測定と観察のシステムである」(不破・阿部・大槻(訳)1975)とすれば、特に最初から科学的に計画してなされたものではないが、諏訪湖には明治末期(田中 1918)に始まり、終戦直後(宝月ら 1952)および最近 10 年間(JIBP-PF 諏訪湖生物生産研究グループ 1968~1973)になされた、湖盆形態、水質および生物群の年間および季節変動に関して、長期にわたる詳細な生態学的記録があり、その上地元の中学校や高校の生物クラブの調査結果など多数の研究業績が存在している(小泉・大谷 1966, 諏訪臨湖実験所 1972, 1974, 倉沢・沖野・林 1978)。それ故に、湖の富栄養化(汚濁化)の進捗の判定について、モニタリングに必要な環境データの評価と解析により、将来起きうる変化の傾向を求め、その改善策を検討考究する上で、大いに役立って来た(倉沢・青山 1969, 倉沢・山岸 1971)。こうした事情からすると、すでにモニタリングによる環境管理の一翼を多少担ってきたわけである。

この報告では、諏訪湖産各種生物群のうち、筆者の直接担当している生物群である、プランクトンおよび大型水生植物の分類と生態について、約 70 年以前から今日までなされた、各年代の研究業績にみる何回かの観測結果を、自然環境モニタリングの立場から解析検討してきたが、若干の知見をえたのでその大要を述べる。

本研究には、信州大学理学部付属諏訪臨湖実験所の沖野外輝夫助教授、同大学理学部林秀剛講師の御協力と御助言をいただいた。記して感謝の意を表する。

II. 種類数、優占種および現存量の推移

池や湖の富栄養化(汚濁化)の進捗を知るためには、生息する生物群集の種類組成やその数量を観察測定することが、最も妥当な判定手段とされ、すでにその汚濁の程度を簡単に推測判定できる、指標となる生息、生育生物による生物学的水質判定表(津田 1964)が整備されて

いる。いま、この判定表を駆使することにより、諏訪湖におけるプランクトン並びに大型水生植物の、それぞれの年代における優占種や数量から、その時点における水質判定と富栄養化の程度を検討した結果は次のようである。

A. プランクトン

諏訪湖の主なる生物総目録は、約 70 年以前、約 30 年前および近年の 3 回に亘り作成されているが、そのうちプランクトンに関して上記目録から抜萃し、それぞれの年代における優占種を示すと Table 1 のようである。

1. 植物プランクトン

まず、植物プランクトンの種類数をみると、70 年前の服部(1908, 1918)の年間の観察記録には、黄緑鞭毛虫類および緑色鞭毛虫類はないが、珪藻類は 24 種で最多であり、ついで緑藻類の 6 種があり、ラン藻と渦鞭毛虫は数種で、合計 33 種である。

30 年前の目録(白石, 倉沢 1948)は、諏訪湖の生物生産力研究の季節遷移の観察記録(Kurasawa, Shirashi 1954, 1955)に、吉村(1931)の夏季の「水の華」現象で見られたラン藻およびその他の種属を、上述の服部の目録に加えたものである。その結果、珪藻は 28 種、緑藻は 16 種、ラン藻は 6 種となり、新たに緑色鞭毛虫 3 種が追補されたので、総計は 45 種になった。

この湖のプランクトン研究が盛んになったのは、1950 年以降で数多くの成果がえられた。まず Desmid の種の記載が Hirano (1952) によってはじめられ、地元の中学および高校の教師の指導で、生物研究班の活動が顕著になり(諏訪清陵高校 1964, 岡谷南部中学校 1962~1964, 岡谷南高等学校 1968 および笠原 1966), 採集観察が年間を通して行われるようになった。こうした採集材料から新しく追加すべき種が、福島(1964)や落合(1966)によりつぎつぎに発見された。そして JIBP-PF の研究では、季節的および経年的の遷移が検討された(倉沢ら 1967~1975)。その結果、Kurasawa, Okino (1975, 1976) の目録に黄緑鞭毛虫 5 種がはじ

* 信州大学理学部生物学教室

Table 1. Transitions in number of plankton species described and of dominant species of them in Lake Suwa.
Figures in ○ showing dominance ranking in summer.

Phylum	1908 (Hattori)		1948 (Shiraishi, Kurasawa)		1975, 1976 (Kurasawa, Okino)	
	Nos. of sp.	Dominant species	Nos. of sp.	Dominant species	Nos. of sp.	Dominant species
Chrysophyta						
Bacillariophyta	① 24 ② ③ ④	<i>Melosira granulata</i> <i>Asterionella formosa</i> <i>Tabellaria fenestrata</i> <i>Synedra ulna</i>	② 28	<i>Melosira granulata</i> <i>Asterionella formosa</i> <i>Synedra ulna</i> <i>Tabellaria fenestrata</i>	③ 55	<i>Mallomonas fastigata</i> <i>Melosira granulata</i> <i>Cyclotella kitzingiana</i> <i>Fragilaria crotonensis</i> <i>Synedra ulna</i>
Chlorophyta	6	<i>Scenedesmus quadricauda</i> <i>Pediastrum duplex</i>	③ 16 ④	<i>Pediastrum simplex</i> <i>Scenedesmus quadricauda</i>	⑤ 38 ④	<i>Microactinium pusillum</i> <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> <i>Pediastrum duplex</i> <i>Scenedesmus quadricauda</i>
Cyanophyta	③ 2	<i>Anabaena flos-aquae</i>	① 6	<i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Anabaena flos-aquae</i>	① 15 ②	<i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Anabaena flos-aquae</i>
Pyrrophyta	I	<i>Peridinium</i> sp.	2	<i>Peridinium</i> spp.	4	<i>Peridinium</i> spp. <i>Ceratium hirundinella</i>
Euglenophyta			3	<i>Euglena</i> spp.	10	<i>Trachelomonas</i> spp.
Total	33		45		127	
Protozoa			4	<i>Arcella vulgaris</i> <i>Centropyxis sculeata</i>	12	<i>Diffugia acuminata</i> <i>Carchesium polyptum</i>
Trochelminthes	② 2	<i>Polyarthra trigla</i> <i>Keratella cochlearis</i>	④ 12 ①	<i>Hexarthra mira</i> <i>Filinia longiset</i> <i>Polyarthra trigla</i> <i>Trichocerca</i> spp. <i>Keratella cochlearis</i>	38 ②	<i>Filinia longiset</i> <i>Polyarthra trigla</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Brachionus caliciiflorus</i> <i>Keratella cochlearis</i>
Crustacea	① 6	<i>Cyclops</i> spp. <i>Sida cristallina</i> <i>Bosmina longirostris</i>	③ 12 ②	<i>Bosmina longirostris</i> <i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Eodiaptomus japonicus</i>	① 21 ④	<i>Bosmina longirostris</i> <i>Diaphanosoma brachyrum</i>
Total	8		28		71	

めて記録され、結局珪藻 55 種、緑藻 38 種、ラン藻 15 種、渦鞭毛虫 4 種および緑色鞭毛虫 10 種の計 127 種となった。

さて、植物プランクトンの優占種の年代的遷移 (Table 1) と、それぞれの年代における季節遷移を Fig. 1 で見ると次のようである。

明治末期 (1908) の記録によれば、夏期の短期間にラン藻の *Anabaena flos-aquae* による「水の華」現象を観察しているが、あまり顕著なものではなく、むしろ初夏における珪藻類の *Melosira*, *Asterionella*, *Cyclotella* および *Synedra* の 4 種類の大増殖を記録している (Hattori 1908)。これら珪藻の 4 種のうちいくつかは、1948 年を経て、1960 年代および 1970 年代までひきつづき季節増大がみられ、その優占度を保持する。しかし増大する季節はやや異なり、たとえば、*Melosira* は 1908 年には初夏のみの増大を示したが、1948 年および 1970 年代では秋季のみの増大期を示した。

また *Astellionella* は、1908 年から 1960 年代までは、冬季より春季にかけて増殖したが、1970 年代ではこれに代って、*Cyclotella* が増え、*Asterionella* は衰乏する。

「水の華」現象の明確な記録は、約 40 年以前に吉村 (1931) が、30 年前には倉沢、白石が、ラン藻の *Microcystis* を主体とする夏の大発生を確認しており、それ以後今日に至るまで、毎年のように大増殖を引きおこし、地元では「アオコ」の名称で知られている。殊に年代の進むにつれて、増大期間が長期化する傾向をみせ、たとえば 1948 年の頃は 7 月から 9 月中旬であったものが、近年では 7 月から 10 月下旬まで続くようになった。

こうした各種の季節の増減関係からすると、冬季から春季にかけて珪藻類の増大期がおこり、盛夏にはラン藻類の大発生に伴い珪藻類は衰退するが、晩秋季にはラン藻の減少につれて再び珪藻の増大がおこるという、季節遷移のパターンが近年形成されつつある。

次に植物プランクトンの記載種数が、年代経過に伴って増えるのは、富栄養化による種類相の多様化を示唆するものであるが、それ以上に出現優占種の質的变化が問題となる。すなわち、汚水生物学的指標生物表によれば 1908 年にみる優占種のほとんどは β ms の水質に該当するが、1948 年では α ms と β ms に半々位が属し、1976 年では α ms の水質に該当する優占種が一層多くなっている。そして植物プランクトンの全細胞数の増加も著しく、夏においては 30 年以前では $\times 10^{3-4} / \text{mL}$ に対し、近年では $\times 10^{4-5} / \text{mL}$ となり、しかもそのうち *Microcystis* の細胞数は前者で約 60 % を占めるのに対し、後者では 90 % 以上で、この α ms の種属が極端な優占度を示した。またクロロフィルの量も 30 年以前の 50

～60 mg/m^3 に対し、近年では 100～150 mg/m^3 に増大している。

2. 動物プランクトン

丸川 (1909) は 70 年前の夏と秋の動物プランクトンの採集観察で、ワムシ類 2 種と甲殻類 6 種で計 8 種類を記録している。その後牛山 (1923) がワムシ類の多くを追加し、白石、倉沢 (1948) では新しく原生植物を加え、また経年の季節変化 (Kurasawa, Kitazawa 1951, 1952) からワムシ類および甲殻類のいくつかを追加し、結局目録では原生動物 4 種、ワムシ類 12 種、甲殻類 12 種で、総計 28 種を数えた。そして 1960 年代には、前述の地元中学校および高等学校の生物研究班の活動や、1968 年に始められた JIBP の諏訪湖研究グループの研究 (1969～1973) により、原生動物と、ワムシ類および甲殻類にそれぞれ追加記載があり、結局は原生動物 12 種、ワムシ類 38 種および甲殻類 21 種で総計は 71 種となった。

次に動物プランクトンの優占種の年代的遷移と、それぞれの年代にみる季節遷移を示した Fig. 2 によれば下記のように述べられよう。

約 70 年以前の丸川の採集結果は、夏と秋の 2 回の観察に基づくものであるので、種類数は極端に少ないが、優占種は明かである。すなわちワムシ類では、夏の優占種として現今まで引きつづき栄える *Polyarthra*、冬季と初夏に増大する *Keratella* である。一方甲殻類では Copepoda が他種に勝る優占度を示すが、他の年代の観察結果では、いずれも Cladocera が優占種となっている。

約 30 年前には、原生動物の根足虫類の *Centropyxis* や *Arcella* が夏季に出現しはじめ、またワムシ類では多くの種が観察されるようになり、優占種の *Polyarthra* や *Filinia* は冬季と夏季に、*Keratella* は早春に、*Hazarethra* や *Ploesoma* は夏季短期間増大する。甲殻類では Cladocera が増えはじめ、そのうち、*Bosmina* が春と夏に、*Sida* が夏に短期間増殖するが Copepoda では *Mesocyclops* が春と夏に、*Eodiaptomus* は夏季長期に亘って栄える。

1960 年代になると、原生動物の優占種中に、繊毛虫類の *Vorticella* や *Carchesium* が夏季に増大し、ワムシ類では夏季のみ豊富になる *Trichocerca*、春と夏に増大する *Polyarthra*、*Asplanchna*、冬から初夏にかけ連続的に優占する *Keratella* や盛夏と秋一時期に栄える *Filinia* など、多彩なワムシ類の季節変動をみせる。甲殻類は *Bosmina* や *Diaphanosoma* が夏季に最優占となる傾向を強め、Copepoda 類はややおとろえている。

1970 年代に入ると、原生動物のうちでも繊毛虫が年間を通じてえられ、優占度も高くなる。ワムシ類は夏季には甲殻類に次ぐ優占種となるものに、*Polyarthra*

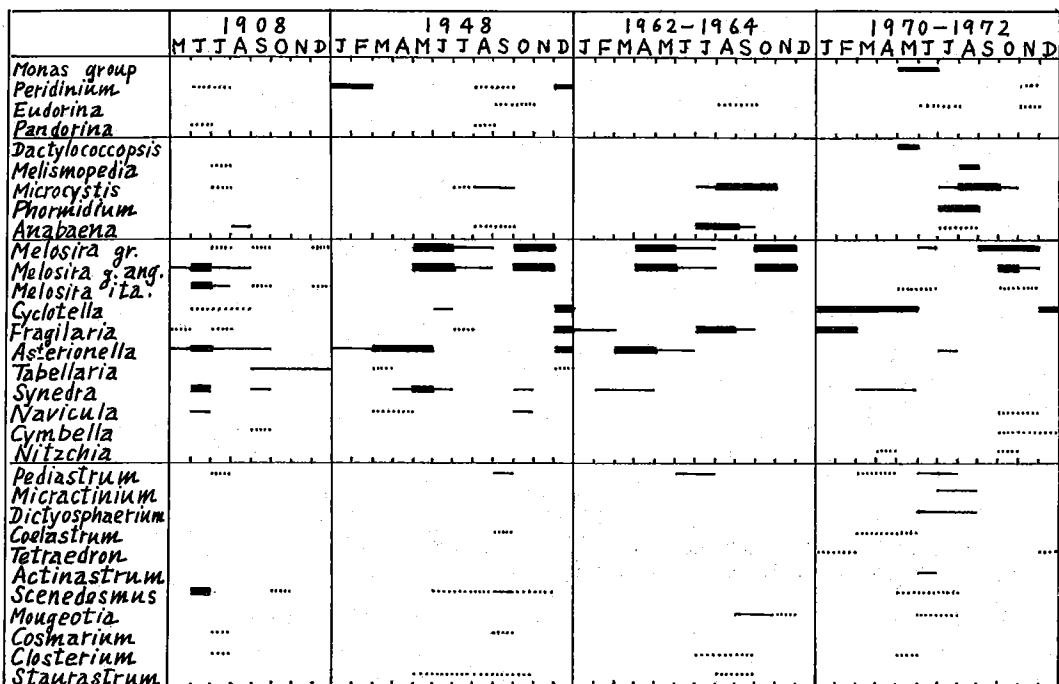


Fig. 1. Transitions of seasonal changes in number of phytoplankton in Lake Suwa. common, — much, — very much

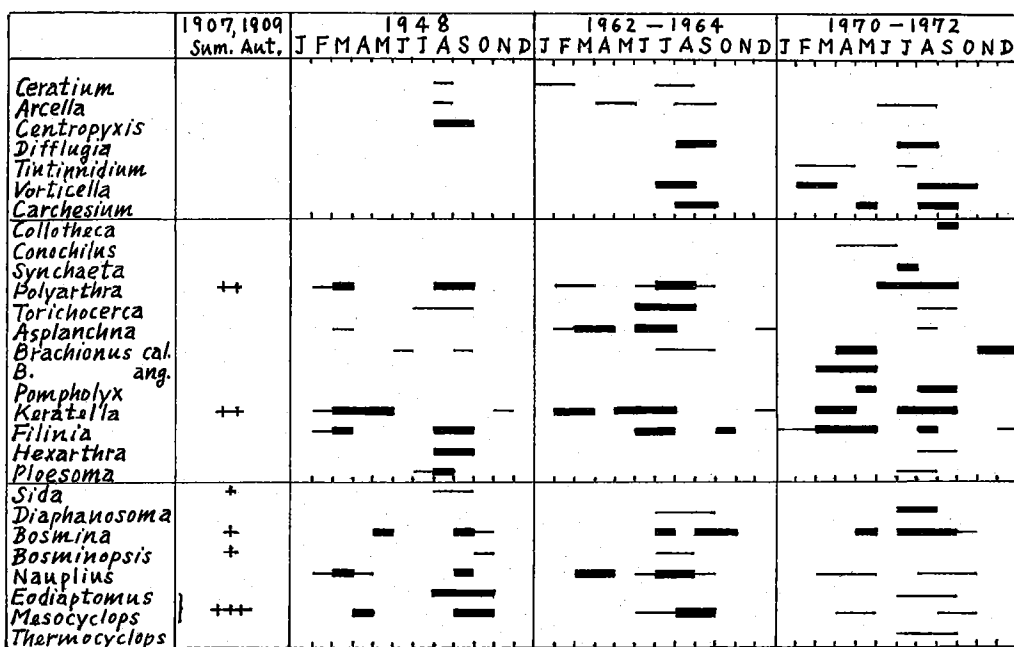


Fig. 2. Transitions of seasonal changes in number of zooplankton in Lake Suwa. + common, ++ much, +++ very much, — much, — very much

Keratella などがあるが、他の季節はほとんどワムシ類で占められ、*Brachionus* や *Filinia* は春季または秋から冬に優占し、全体的にみてワムシ類の豊富な年代になったことをうかがわせる。甲殻類は *Bosmina* と *Diaphanosoma* が夏季に最優占種となるのみで、他の季節にはみべき増大期はない。殊に Copepoda の衰退は著しく、目につくような増殖期は出現しない。

以上のような動物プランクトンの優占種の季節変動はこれを年代的にみると、次のようになる。すなわち、原生動物では、根足虫類から繊毛虫類へと優占種が変動しワムシ類は年代の進むにつれて *Brachionus* が豊富になると共に、他の種も栄え、甲殻類では、Cladocera が優勢になる反面で Copepoda が劣勢化していく傾向が顕著である。

動物プランクトンも植物プランクトンと同様に、年代の経過に伴って種類数は2～3倍増しており (Table 1)、湖の富栄養化による種類相の多様化の一面を見せている。そして優占種自体の質的变化を、水質判定のための汚水生物学的指標生物表にあてはめてみると、次のようである。まず、1909年の優占種は βms 性の動物であるが、1948年の原生動物群の一部は明らかに αms に属するがワムシ類は βms の水質を示す。最近では原生動物の大半は、明らかに αms であり、ワムシ類でも βms から αms へと種類が移行し、また、甲殻類でも Copepoda 優勢から Cladocera 優勢へと年代的变化をするなど、湖の富栄養化に伴う水質汚濁の経過を明確に物語っている。また総個体数において夏季のものを比べると、30年以前では400～600個体/ℓを数えたが、経年的に起伏はあるものの増加の傾向は顕著で、最近では2000～3000個体/ℓとなり、ワムシ類の占める割合が多くなっている (倉沢・山岸 1971)。

動物プランクトンではないが、近年ミズムシ *Asellus* のような汚水域に生息する αms 水質にみられる動物が容易に採集できるようになったことは、その汚濁化の進度の急速なことを示すものである (渋のエゴ調査委員会 1973)。

B. 大型水生植物

諏訪湖における大型水草の種類目録は、主として生態学的研究を主目的に行った結果、リストアップされたものが多いが、それにしても明治以来の前述の如き数多くのプランクトン調査の際には、必ずと言ってよい程大型水草の研究も併行してなされてきたので、まず諏訪湖産の全種属に近いものを網羅しているものとして、それぞれの年代の種類数と優占種を Table 2 にまとめた。

約70年以前の中野の記載種は24種であるが、その中には、後年多量に繁茂するヒシや、比較的容易に採集できる車軸藻が発見できなかったとしており、またササエ

ビモの多量観察を記録しているが、その後の報告では知られてない。一方、後年相当広範囲の分布を示すササバモの記録がないことなどが、当時の種類組成の特徴といえよう。1949年の調査では、沈水性植物では1911年当時とほとんど変化はなく、車軸藻が追加された位であるが、浮葉性ではヒシが随所で発見されるようになり、全種の観察総数は28種を数えた。Kurasawa, Okino (1975) は1948年以来なされた地元中学および高校の生物クラブ、JIBP-PF の諏訪湖生産力研究 (1968～1973) や渋のエゴ調査研究委員会 (1973) の記載種をもとに、総計37種となる目録を作成した。殊に生島 (1970) は帰化植物となって諏訪湖で増えたコカナダモ *Elodea Nuttallii* を発見し、また倉沢、沖野、林 (1976) は車軸藻のヒメフラスモ *Nitella flaxilis* を新たに確認記載した。

記載された全種属数をみると、年代を経るにしたがい漸増の傾向があるが、これも富栄養化による種類相の多様化を示すものかもしれない。殊に沈水性や抽水性に比べ浮葉性植物種数の増加の著しいことは、後述する湖の富栄養化に伴う水質汚濁との関連性に対し、強い支持を打ち出す一助となろう。

次に大型水生植物の優占種および全体の現存量の経年変化を Fig. 3 に示した。全湖面についての現存量調査は、1949年は宝月ら (1952)、1966年は小泉ら (1967)、1967年は岡谷南高校生物クラブ、落合 (1968)、1972年は桜井、渡辺 (1973) および1976年は倉沢、沖野、林 (1977) により5回行われた。そして現存量の測定はないが、分布範囲と密度に関して詳しい観察がなされた1911年中野 (1911) の報告があり、計6回の全湖分布調査がなされたわけである。

以上経年の調査から、それぞれの年代の優占種をみると、1911年にはセンニンモ、クロモ、ホザキノフサモが優占種とされ、また1949年にはクロモ、セキシヨウモがそれぞれ全現存量の32%および16%で1位と2位を占め、沈水性植物全体で76%に達した。しかし、1960年代の湖の富栄養化が急速に高まった年代では、1949年には僅少で全量の2%位しかなかったヒシが、非常に増大しており、約30%前後で1位を占め、クロモがこれにつぎ、3～4位はササバモとマコモである。そして沈水性植物の40%前後の値に対し、浮葉性は35%位まで優位を増して来る。1970年代では、後述するように湖沿岸部の浚渫、埋立および護岸工事という、大型水草分布帯を根本的に破壊する人為的変化が年次計画にしたがい強行されつつあったため、全現存量は急激に減少した。このような状態における水草の優占種は、ヒシが最優占で1972年には76%を占め1位を保持する。ついでマコモが2位であるが1972年の26%に対し1976年には5%

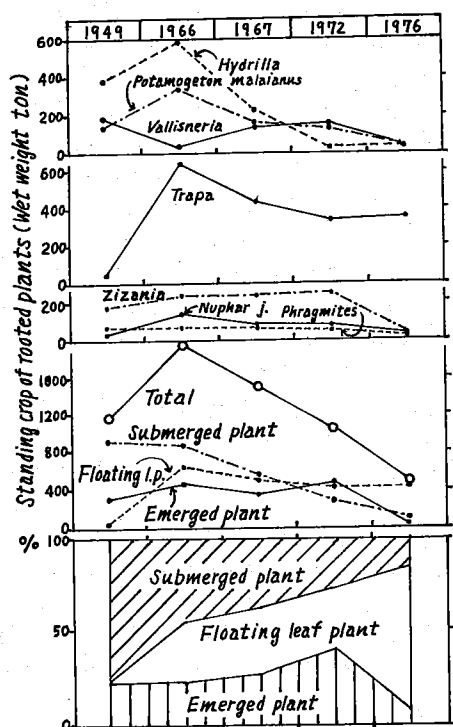


Fig. 3. Transitions in standing crops of rooted aquatic plants in whole area of Lake Suwa in summer.

に激減した。

すなわち、1911年から1949年に至る間は、沈水性植物が浮葉性および抽水性に勝り、1911年には中栄養型の湖に多くみられるセンニンモやホザキノフサモなどが優位を保つが、約40年後には富栄養湖で増殖するクロモが最優占となり、反面センニンモやホザキノフサモは激減する。1960年代では浮葉性のヒシの大増殖が目立ち沈水性のクロモとほぼ同列の優位を示し、また沈水性と浮葉性の現存量差は少なく、僅かに沈水性が他に勝る。

1970年になると、沈水性の凋落は著しく、1972年にはヒシを優占種とする浮葉性、マコモを優占種とする抽水性はほぼ同じ現存量であるが、沈水性はこれら2者より相当に劣り、更に1976年に至ってヒシを優占種とする浮葉性は他の2者に比し、格段の高率の現存量を示す。

大型水生植物の全湖の現存量の経年変化は、1966年

Table 2. Transitions in number of rooted aquatic plant species described and of dominant species of them in Lake Suwa in summer.

Plant community	1911 (Nakano)		1949 (Hogetsu, Kurasawa, others)		1975 (Kurasawa, Okino)	
	Nos. of sp.	Dominant species	Nos. of sp.	Dominant species	Nos. of sp.	Dominant species
Submerged plant	13	Potamogeton Maackianus Myriophyllum spicatum Hydrilla verticillata Potamogeton nipponicus Vallisneria spiralis Ceratophyllum demersum Najas marina Potamogeton perfoliatus	14	Hydrilla verticillata Potamogeton malaiianus Vallisneria spiralis Ceratophyllum demersum Potamogeton amphylus Najas marina Potamogeton perfoliatus Myriophyllum spicatum Potamogeton crispus Potamogeton midulifolius Chara braunii	16	Potamogeton malaiianus Vallisneria spiralis Potamogeton crispus Potamogeton perfoliatus Hydrilla verticillata Potamogeton Maackianus
Floating leaf plant	7	Nuphar teragona	9	Trapa natans	13	Trapa natans Potamogeton distinctus Nymphaea indica
Emerged plant	4	Zizania latifolia Phragmites communis	5	Zizania latifolia Phragmites communis Nuphar japonicum Typha latifolia	8	Zizania latifolia Nuphar japonicum
Total	24		28		37	

の約 2000 ton をピークに、前後の年代で減少しており最少は 1976 年の約 470 ton で最高時の約 $\frac{1}{4}$ に減少した。この最近 10 年間における急速な減退は、後述の沿岸部水草分布帯の人為的破壊によることは言うまでもない。

III. プランクトン、大型水草の優占種の経年変化と湖沼環境モニタリング

湖の富栄養化（汚濁化）が、プランクトンおよび大型水生植物の種数組成、優占種ならびに数量に変化をもたらすことに関しては、諏訪湖を一例として既述してきたとおりである。そこで、貧栄養湖および中栄養湖のプランクトンおよび大型水草測定結果を、諏訪湖の経年変化の過程におけるそれぞれの年代の状況と対比すると次のようである。

1. 白駒の池および左京沼の夏季のプランクトンとの比較

白駒の池は北ハケ岳の海拔 2115 m の高山湖で、やや腐蝕的な貧栄養湖であり、左京沼は下北半島の東海岸通りの中栄養型湖沼として知られる。

白駒湖において 1960～1971 年当時の夏季に採集された植物プランクトン（倉沢ら 1976）は、Table 3 によれば、優占種は *Dinobryon cylindricum* と *Synedra pulchella* で、いずれも清澄な水質の湖、例えば日光菅沼など（倉沢ら 1967）にみられるもので、1908 年当時の諏訪湖の優占種と共通した種属は見当らない。これに対し左京沼は *Melosira granulata*, *Tabellaria fenestrata* 等の諏訪湖との共通優占種を有し、この時代の諏訪湖が多分に中栄養湖的要素を残していたことが窺われる。しかし 1948 年には、諏訪湖では *Microcystis* などのラン藻の「水の華」現象が起る様になり、完全に富栄養湖となる。動物プランクトンによれば、白駒池では Copepoda の *Acanthodiaptomus* を 1 位とし甲殻類を主体とした典型的貧栄養型の動物相を見せる。一方 1909 年の諏訪湖では甲殻類群と同等にワムシ類が出現し、また左京沼では優勢なワムシ類に対し貧弱な甲殻類のイメージを与える動物相であるが、1909 年当時の諏訪湖がやはり中栄養的な側面を残していたことを物語る。そして 1948 年以降は、諏訪湖は貧栄養湖や中栄養湖ではほとんどみられない、原生動物の根足虫類や繊毛虫の参加があり、ワムシ類優占型の富栄養型の湖へと明瞭に変貌している。

以上プランクトン相についての、貧栄養湖および中栄養湖と諏訪湖との対比において知られたことは、夏季ラン藻を主とする「水の華」の出現と、珪藻のうち

Tabellaria などの減少や、ワムシ類の種類数、個体数の増大および根足虫類、繊毛虫類の出現と Copepoda 類の減少は、湖の富栄養化の進捗と深い関連性をもつこ

とを示唆するものである。

2. 左京沼の大型水生植物との比較

1957 年の夏に測定された左京沼全湖の大型水草の現存量（倉沢ら 1958）の、分布帯の単位面積当りの湿重量を Table 4 に示し、また、同様に諏訪湖におけるものは Table 5 に示した。

これら両表を対比すると、1911 年代の諏訪湖の優占種のセンニンモ、クロモ、ホザキノフサモ、マコモおよびヨシのうち、左京沼ではセンニンモが全量の約 44 %、クロモが 22 %、ヨシが 10 % を占め、センニンモが中栄養型湖で非常によく成長する場合の一例を示している。すなわち、この頃の諏訪湖は中栄養的な大型水草相を多く含んだ富栄養湖への過渡の時代と言えよう。1949 年以降の諏訪湖は、化学的にも生物学的にも典型的な富栄養湖となったためか、あれほど豊富にみられたセンニンモは全く影を潜め、クロモの最優占時代（1949～1966）を経てヒシの全盛期（1970 年代）となり、クロモは著しく凋落する。しかし、沈水性、浮葉性および抽水性植物量の比率をみると、左京沼ではそれぞれ 37 %、11 %、15 % に対し、諏訪湖では、1949 年にはそれぞれ 76 %、2 %、22 % で、似通った中栄養湖的な比率を見せている。1960 年代以降の諏訪湖では、これら沈水、浮葉、抽水の各植物群の重量比は、沈水性が減少するに伴ない浮葉性の増大が急速に進み、1976 年には沈水性 16 % に対し浮葉性は 76 % となった。

次に透明度と大型水生植物との関係については、大型水草の垂直分布の限界深度が、透明度の約 2 倍に相当するとされ、現に諏訪湖においても各年代において夏季の透明度の約 2 倍の深度に水草の分布限界のあることを確認した。左京沼でも夏の透明度は 2.0～2.5 m であり、水草帯の最深部が約 4 m である。そして 1911 年の諏訪湖の透明度約 2.0 m に対し、水草分布限界が約 4 m であることを照合すると、この頃の諏訪湖が、左京沼と生態的な様々な点で共通するもののあったことを窺わせる。

Table 5 にみる分布限界度の減少は、湖の富栄養化の進行で湖水が汚れ、湖水中への光の透過量の減殺されることと関連がある。その直接の被害を感受するのは、その生育環境から見てまず沈水性植物であり、分布限界深度は植物体の補償点深度に左右されるからである。一方浮葉性および抽水性は、水面または水面より上に葉を露出できる生活型を持つため、沈水性のような悪影響はほとんどうけなくてすむことになる。これが上述したように湖の富栄養化の進行に伴って生じる沈水性植物の衰退と浮葉性植物の繁殖をもたらす一大原因と推測される。

さて、分布帯の単位面積当りの現存量を Fig. 5 でみると諏訪湖では最高が 10.2 ton/ha（1972 年）、最低が 4.1 ton/ha（1949 年）で、年代的な湖の富栄養化に

	Lake Shirakoma-no-ike 1960-1971	Lake Sakyo-numa 1957
Phytoplankton	② <i>Synedra pulchella</i> <i>Fragilaria crotonensis</i> <i>Melosira italica</i> <i>Cyclotella kützingiana</i> <i>Navicula</i> sp.	② <i>Melosira granulata</i> <i>Melosira distance</i> ③ <i>Tabellaria fenestrata</i> <i>Fragilaria crotonensis</i> <i>Synedra ulna</i> <i>Cymbella tumida</i>
	<i>Sphaerosoma granulatus</i>	<i>Spirogyra</i> sp. <i>Closterium Ehrenbergii</i>
	③ <i>Stigonema ocellatum</i>	
	① <i>Dinobryon cylindricum</i>	① <i>Ceratium hirundinella</i> <i>Peridinium</i> sp.
Zooplankton	<i>Polyarthra trigla</i>	② <i>Asplanchna priodonta</i> ① <i>Polyarthra trigla</i> <i>Keratella cochlearis</i> ③ <i>Monostyla bulla</i>
	③ <i>Allona affinis</i> ② <i>Daphnia longispina</i> <i>Chydorus sphaericus</i> ① <i>Acanthodiaptomus pacificus</i> <i>Cyclops strenuus</i>	<i>Bosminopsis deitersi</i> <i>Mesocyclops leuckartii</i>
Note	Olygotrophic lake	Mesotrophic lake

Table 3. Dominant species of plankton obtained from Lake Shirakomano-ike and Lake Sakyo-numa in summer. Figures in ○ showing dominance ranking.

Depth (m)		0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	0 - 4
Area of distribution zone (ha)		1.99	0.79	1.27	1.01	5.06
<i>Typha latifolia</i>	ガ マ	83.2	—	—	—	32.7 (1.9)
<i>Sparganium erectum</i>	ミ ク	7.4	—	—	—	2.9
<i>Phragmites communis</i>	ヨ シ	437.8	—	—	—	172.1 (9.9)
<i>Zizania latifolia</i>	マ コ	32.6	—	—	—	12.8
<i>Scirpus mucronatus</i>	カ ン ガ レ イ	0.2	—	—	—	0.1
<i>Scirpus lacustris</i>	フ ト イ	90.0	—	—	—	35.4
<i>Brasenia Schreberi</i>	ジュンサイ	2.5	—	—	—	1.0
<i>Nuphar japonicum</i>	コウホネ	78.0	35.3	—	—	36.2
<i>Nymphaea tetragona</i>	スイレン	—	7.6	—	—	1.2
<i>Trapa natans</i>	ヒ シ	182.3	595.2	—	—	157.8 (9.1)
<i>Myriophyllum spicatum</i>	ホザキノフクサ	5.5	14.0	—	—	4.4
<i>Potamogeton Maakianus</i>	センニンモ	72.5	159.9	2,790.7	—	755.5 (43.7)
<i>Najas marina</i>	イバラモ	—	5.1	3.2	—	1.6
<i>Najas minor</i>	トリゲモ	—	16.5	—	—	2.6
<i>Vallisneria gigantea</i>	セキシヨウモ	16.1	455.6	93.6	9.9	118.8 (6.9)
<i>Hydrilla verticillata</i>	クロモ	58.4	793.1	948.1	8.9	387.0 (22.4)
<i>Chara</i> sp.	シャジクモ	13.6	—	—	—	5.3
Total W.W.g/m ²		1,080.1	2,082.3	3,835.6	18.8	1,727.4 (100)
Total W.W.ton/ha		10.8	20.8	38.4	0.2	17.3

Table 4. Standing crops of rooted aquatic plants per unit area of distribution zone of Lake Sakuma in summer, 1957. Figures in () showing percentage.

伴って水草の生長度も約2倍に増大したという傾向が想定される。しかし、1949年の深度別の現存量をみると0～1mの深度では6.5 ton/haの値を示し、深度の増すにしたがい減少している。この点に着目した場合、1960年代と1970年代の分布帯の深度は、0～2m附近であることからみて、一概に湖の富栄養化の進捗と水草量の増大の関係がプラスであると肯定できない面も考えられる。Table 4に示す左京沼は、既述の如く中栄養湖の典型とされるが、その分布帯単位面積当りの現存量は17.3 ton/haで、諏訪湖の最大値の約1.7倍である。また深度別の現存量をみると、分布帯深度(4m)より少し浅い2～3mが最大分布量を示し、0～1m深度はむしろ小さな値をみせている。こうした両湖における深度別の単位面積当りの水草量の増減の相違は、湖盆形態の違いもその一因であろう。そして、当時の左京沼には、小舟一艘あるわけではなく、投網や刺網などの魚獲用具および泥澄器や錨などの使用による水草分布帯の破壊行為は、ほとんどなく、ましてや浚渫、埋立、護岸工事などの、水草の生育にとって致命的ともいえる沿岸部の改変は皆無であった。それに比べ諏訪湖では、古来より漁業が盛んであり、昭和23年(1948)には手漕漁船約1700隻(長野県土木部1950)をかぞえ、その後は隻数は減っても、船外機による操船力の増大で魚類の水揚量は全く減少していない。それに加えて湖の氾濫防止のために小規模ながら浚渫、埋め立ておよび護岸工事が着々と進められ、その度に水草分布帯はつぶされ続けてきた。そして1970年代に至り、諏訪湖の浄化対策計画の期待を担って、湖の富栄養化推進の一大要因である沿岸部湖底泥の浚渫と、湖岸に堆積する有機物の排除のための埋立、護岸工事が企図された。すなわち1978年までに水深2.5m以浅の浚渫を、大型の機械力を駆使して、岡谷市地区と下諏訪町から諏訪市の武井田川付近までの約280haに對し施行するというもので、1978年現在ではそのほとんどを完遂した。われわれの概算によれば、浚渫土砂を利用しての埋立面積は大凡80haにおよび、護岸工事も同時に開始され、湖岸線長約16.2km(桜井・渡辺1974)のうち1978年までに約15.0kmを(諏訪湖工事事務所1977)、コンクリート製の岸壁で湖を取り囲むことになり、それもすでに完了に近い。このような人為的手段による大型水生植物分布帯の破壊と消滅は、いかに富栄養湖といえども水草の繁茂を助長することは困難であろう。

以上左京沼と諏訪湖の大型水草群落の比較により知れたことは、富栄養化が進むにつれ、中栄養湖で栄えたセンニンモが減り、次第にクロモが優占するが、尚一層富栄養化が促進すると浮葉性のヒシが繁茂し、沈水性植物はすべて衰乏する。しかし、分布帯単位面積当りの現存量については、富栄養化現象との明確な関係は見出せ

Table 5. Transitions in standing crops of rooted plants per unit area of distribution zone of Lake Suwa in summer.

Depth	1911	1949					1966	1967	1972	1976
Depth of distribution zone (m)	0 - 4	0 - 1	1 - 2	2 - 2.5	0 - 2.5	0 - 2.3	0 - 2.3	0 - 2.0	0 - 1.7	
Area of distribution zone (ha)	380	115	118	57	290	256	256	103	64	
<i>Potamogeton malainus</i>		40.3	62.7	—	41.5	107.7	62.2	116.4	33.3	
<i>Pot. crispus</i>	+	—	2.5	—	1.0	—	0.3	—	18.4	
<i>Pot. perfoliatus</i>	++	24.6	0.1	—	9.8	—	8.0	38.2	17.1	
<i>Pot. oxyphyllus</i>	+	19.4	12.8	20.8	17.0	—	—	—	—	
<i>Pot. macrodonus</i>	+++	—	—	—	—	—	7.7	—	3.3	
<i>Pot. nidulicrino</i>	+	1.7	—	—	0.7	—	—	—	—	
<i>Najas marina</i>		17.2	10.7	0.3	11.3	—	0.1	—	—	
<i>Valisneria spiralis</i>	++	58.6	99.2	0.1	63.7	6.1	50.6	116.5	30.9	
<i>Hydrilla verticillata</i>	+++	221.8	92.8	21.9	130.3	233.3	93.0	8.1	15.8	
<i>Ceratophyllum demersum</i>	+	35.9	54.1	—	36.3	—	3.0	—	—	
<i>Mirriophyllum spicatum</i>	+++	6.5	10.7	—	6.9	—	—	—	—	
<i>Chara braunii</i>		0.3	0.8	—	0.5	—	—	—	—	
<i>Trapa natans</i>		17.0	2.6	—	7.8	246.3	172.8	338.9	559.3	
<i>Potamogeton distichatus</i>	+	—	—	—	—	—	38.3	—	—	
<i>Najas japonicum</i>	+	17.0	2.5	—	7.7	55.4	34.3	71.8	25.1	
<i>Sagittaria latifolia</i>	+++	151.0	—	—	60.1	91.5	91.5	260.6	35.8	
<i>Phragmites communis</i>	+++	36.9	—	—	14.7	24.5	24.5	69.4	—	
Total w.w.g/m ²		648.2	351.5	43.1	409.3	764.8	586.3	1,019.9	739.0	
Total w.w.ton/ha		6.5	3.5	0.4	4.1	7.6	5.9	10.2	7.4	

なかった。

IV. 諏訪湖の浄化に対する将来の展望

既述してきたように、諏訪湖は過去 70 年間においてプランクトンや大型水草の経年変化からみて、最初中栄養湖の末期ないし富栄養湖の初期の状態から、強度に富栄養化された湖に至るみを歩んできた。これは湖には周知のように自浄能力に限界のあることを忘れ、有機汚水を流入河川を通じて多量に永年流し続けた結果であって、このまま放置するならば、遠からず湖内の酸素は有機物分解のために消費しつくされ、遷移系列を逸脱した死の湖と化すであろう。

このように、諏訪湖を巨大なドブ池にしないためには、当然周辺都市の下水やし尿処理水を含めて終末処理をする必要があるが、昭和 54 年度 (1979 年) から広域下水道の供用が一部開始され、昭和 57 年 (1982 年) には全面供用の予定であるので、実現すれば湖水の水質は著しく改善されよう。しかしそれには、終末処理場で十分に窒素やリンの除去 (3 次処理) が必要且つ重要な条件である。若しこの窒素やリンの除去対策が不十分であれば、農耕作業における水耕栽培方式と同様な速効肥料的な役割を果たすことになり、植物プランクトンや一部の水草群落の大量増殖を惹起することにもなりかねない。

浄化対策の一環として沿岸部の底泥の浚渫は、今まで蓄積した有機物や重金属を除くためには有効であるが、浚渫土砂を利用して湖沿岸部の埋立や護岸および湖岸道路の建設をするため、大型水生植物の根絶を招くことに

なる。これは、競争関係にある植物プランクトンを一層増す結果を生むかもしれない。こうした点よりすれば、沈水性や浮葉性の植物は、栄養塩の吸収のために逆に利用すべきではなかろうか。1976 年の調査 (倉沢ら 1977) の沿岸部水草分布調査では、ここ 2、3 年に浚渫、埋立護岸が完了した水域では沈水植物は皆無であることが確認された。こうした状態から、将来水生植物群落が形成されるか否かの二次遷移の追跡調査は、今後の研究課題の一つとなろう。

水生植物の欠除は、諏訪湖本来の自然景観を失わせるだけでなく、湖沼生態系における物質循環においても、水草は何らかの役割を果たしていると思われるが、現在のところその評価があまり明確ではない。諏訪湖で行った湖沼生態系からの大型水草の除去という実験が、この問題に解答を与えてくれるかもしれない。しかし人類にとって直接の有効性が見出しえないとはいっても、湖の生物群集にとっては大いに価値のあるもので、例えば水鳥や魚の産卵場所、稚魚その他の幼生の生育場所、巻貝や食草性昆虫の餌場など、生活環境として欠くことのできないものである。

諏訪湖が、産業の発達するにつれて富栄養化と汚染度の高まったのは、何の浄化対策も施行せずそのまま放置した結果の歴史的経過を物語るものであるが、これからは、この富栄養化の進行を阻止し、進んで湖を若返らせる施策を講ずるために、環境のモニタリングを実質的に行なう必要に迫られている。

V. 引用文献

- 安達六郎・福島博・小林艶子 (1969) 諏訪湖プランクトンの重要種属と現存量の季節的推移。JIBP-PF 諏訪湖の生物群集の生産力に関する研究。1: 1~4.
- 青山莞爾・倉沢秀夫 (1969) 諏訪湖におけるプランクトンの水平、垂直分布の季節変化。JIBP-PF 諏訪湖の生物群集の生産力に関する研究。1: 31~44.
- 青山莞爾・磯部吉章・倉沢秀夫 (1973) 諏訪湖小坂沖定点における基礎生産、二次生産、分解、栄養塩類量の季節変化に関する研究。Ⅲ. 植物プランクトン、動物プランクトンの現存量の季節変化。同上。5: 44~49.
- 不破敬一郎・安部喜也・大槻晃 訳 (1975) 環境モニタリング。1~298. 環境情報科学センター.
- 福島博・小林艶子 (1969) 諏訪湖でえたケイ藻。横浜市立大学論叢 (自然科学) 2: 45~73.
- Hattori, H. (1908) Vorläufige Mitteilung über das Phytoplankton vom Suwa-see. Bot. Mag. 22 (25): 121~126.
- Hirano, H. (1952) Plankton Desmids from lakes of Shinano Province. Acta Phytotax. Geobot. 14 (6): 165~167.
- 宝月欣二・北沢右三・倉沢秀夫・白石芳一・市村俊英 (1952) 内水面の生産および物質循環に関する基礎的研究。水産研究会報。4: 41~127.

- Hogetsu, K. (1953) Studies on the biological production of Lake Suwa. V. The standing crop of rooted plants. Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Resources. **30** : 4~9.
- 生島功 (1970) 諏訪湖の水生植物群落の生産に関する二、三の知見. JIBP-PF 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究. **2** : 33~40.
- JIBP-PF 諏訪湖研究グループ (1969~1973) 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究. **1** : 1~117, **2** : 1~173, **3** : 1~123, **4** : 1~101, **5** : 1~70.
- 笠原大洋 (1966) 諏訪湖のプランクトン. 水温の研究. **10** (1) : 18~23.
- 小泉清明・大谷隼人 (1966) 諏訪湖湖沼文献リスト. 諏訪湖浄化対策委員会出版物. 1~14.
- 小泉清明・桜井善雄・川島信二 (1967) 諏訪湖の高等植物の現存量 (諏訪湖陸水学資料 1). 陸水学雑誌 **28** (2) : 57~63.
- Kurasawa, H., Y. Kitazawa & Y. Shiraishi (1952) Studies on the biological production of Lake Suwa. I. The stratification the seasonal succession and the standing crop of zooplankton (1), (2). Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Resources **27** : 29~39, **28** : 98~106.
- Kurasawa, H. & Y. Shiraishi (1954, 1955) Studies on the biological production of Lake Suwa. VI. The stratification and the seasonal succession of phytoplankton (1), (2). Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Resources **33** : 24~32, **34** : 49~57.
- 倉沢秀夫・足田静郎・青山莞爾 (1963) 左京沼, 荒沼および片倉沼における夏季の生物生産量 (1), (2). 資源研彙報 **60** : 115~125, **61** : 61~70.
- 倉沢秀夫・青山莞爾・白石芳一・手塚泰彦・本谷勲・小堀和夫・沖野外輝夫 (1967) 日光菅沼の生態学的研究. I. 水質とプランクトンの生産量 (1), (2). 資源研彙報 **68** : 61~77, **69** : 66~86.
- 倉沢秀夫・青山莞爾 (1967) 諏訪湖ならびに流入河川の水質とプランクトンの経年変化. JIBP-PF 陸水生物ならびに陸水生物群集の保護の方法に関する研究. **1** : 7~8.
- 倉沢秀夫・青山莞爾 (1967) 過去 60 年間に於ける諏訪湖の水質と湖沼生物の変遷の大略. JIBP-PF 陸水生物ならびに陸水生物群集の保護の方法に関する研究. **3** : 24~30.
- 倉沢秀夫・青山莞爾・山岸宏・磯部吉章 (1970) 諏訪湖におけるプランクトンの季節変化と水平分布. JIBP-PF 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究. **2** : 41~64.
- 倉沢秀夫・山岸宏 (1971) 諏訪湖における産業と生物分布の変化. バイオテク, **2** (4) : 261~268.
- 倉沢秀夫・山岸宏 (1971) 湖沼と地域開発. 地域開発. **77** : 17~29.
- 倉沢秀夫・山岸宏・吉川正武・為政園野 (1971) 諏訪湖プランクトンの季節変化. I. プランクトンの数と量との優占種の比較. 同上. **3** : 41~54.
- 倉沢秀夫・青山莞爾・磯部吉章 (1972) 最近 10 年間の諏訪湖プランクトンの遷移と水平垂直分布. 陸水富栄養化の基礎的研究. **1** : 5~10.
- Kurasawa, H. & T. Okino (1975) List of animal and plant species of Lake Suwa. J. Sci. Shinshu Univ. **10** (2) : 85~104.
- 倉沢秀夫・青山莞爾・磯部吉章 (1976) 高標高湖沼の生態学的研究. 第一報. 北八ヶ岳白駒の池におけるプランクトン垂直分布の季節変化. 生理・生態. **17** (1・2) : 59~68.
- 倉沢秀夫・沖野外輝夫・林秀剛 (1977) 諏訪湖の大型水生植物の分布と現存量. 臨海, 臨湖実験所周辺の生物相および主要実験生物に関する研究. **2** : 35~57.
- 倉沢秀夫・沖野外輝夫・林秀剛 (1978) 諏訪湖の生物目録と主要実験生物について. 臨海・臨湖実験所周辺の生物相および主要実験生物に関する研究. **4** : 57~72.
- 長野県土木部 (1950) 諏訪湖の資料. 1~158.
- 長野県 (1964) 諏訪湖産プランクトン, 貝類. 生物展示関係参考資料, 1~14.
- 落合照雄 (1966) 諏訪湖の植物性プランクトンとその 60 年間の変遷について. 長野県学校教育研究会「研究集録」. **3** : 39~50.
- 岡谷南部中学生物クラブ (1962) 諏訪湖におけるプランクトンの研究—その季節変化について. 岡谷南部中学校生徒会誌. **2** : 1~8.
- 岡谷南部中学生物クラブ (1963) 諏訪湖における水生植物の分布. 同上. **5** : 1~5.

- 岡谷南部中学生物クラブ(1964) 諏訪湖における生物の生態学的研究。長野県学校教育奨励基金。第4回奨励レポート。
昭和39年度：69～72。
- 岡谷南高校生物クラブ・落合照雄(1968) 諏訪湖生物生産の研究。帰らぬ生徒たち。81～99。岡谷南高等学校。
- 桜井善雄・渡辺義人(1972) 諏訪湖の水生植物。JIBP-PF 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究。5：1～4。
- 桜井善雄・渡辺義人(1974) 信州の陸水。第1号。1～193。環境科学研究会。
- 左京沼研究グループ(1958) 左京沼の湖沼学的研究。資源研彙報。46～47：131～156。
- 洪のエゴ調査委員会(1973) 洪のエゴ調査報告書。1～130。諏訪市教育委員会。
- 白石芳一・倉沢秀夫(1948) 諏訪湖産生物目録。水産研究会報。1：57～64。
- 諏訪実業高等学校生物班(1964) 諏訪湖及びその周辺の貯水池に生息するプランクトンの比較。長野県学校教育奨励基金。第4回奨励研究レポート。昭和39年度：138～142。
- 諏訪清陵高校生物クラブ(1966) 諏訪湖のプランクトンおよび水生植物の研究。諏訪清陵高校生物研究。8：1～24。
- 諏訪清陵高校生物クラブ(1968) スワ湖におけるプランクトン相の季節変化及び環境との関係。同上。10：4～29。
- 諏訪臨湖実験所(1972) 諏訪臨湖実験所業績目録。(1962～1971) 1：1～5。
- 諏訪臨湖実験所(1976) 諏訪臨湖実験所業績目録。(1972～1975) 2 諏訪臨湖実験所報告。1：60～63。
- 田中阿歌麿(1918) 湖沼学上より見たる諏訪湖の研究(上、下)。上1～936。下937～1667。岩波書店。
- 津田松苗(1964) 汚水生物学。1～258。北隆館。
- 吉村信吉(1931) 諏訪湖夏季における水の華。陸水学雑誌。1(1)：48～50。