

水域の富栄養化と基礎生産

名古屋大学・水圏科学研究所 坂本 充

はじめに

富栄養化という現象は、もともと自然条件の下での湖沼で認められてきた湖沼生態系の漸進的な経時変化で、水中は栄養塩量が少なく生物生産の低い貧栄養湖生態系が、時と共に生産力の高い肥沃な富栄養生態系に移り変っていく現象を意味していた。よく知られているように、調和型の湖沼は生物生産の大きさや、その生産活動と密接なつながりのある化学物質の量、や垂直分布状態などを基準にして貧栄養湖、中栄養湖、富栄養湖に分けられている。貧栄養湖は深く水中の栄養塩乏しく、かつ生物量少ないが、富栄養湖は浅く肥沃で生産活動さかんである。それぞれの湖は、構成生物相互の密接な働きあいにより、全体として自己調節機能のそなわった生態系として把握されよう。しかし、この系もその状態をいつまでも不変のまま保ち続けるわけではない。外囲からの物質の供給で長い年月の間に湖は少しずつ浅くなると共に、水中の栄養塩含量がたかまり、生物生産も次第に大きくなって湖により富栄養湖的状态にうつり変っていく。

しかし、近年における人口増加に伴う人間活動の活発化は、この経時変化過程に大きな変化をもたらすようになった。すなわち、都市や農地などからの水域への流入栄養塩量の増加は、藻類の生産活動を促進し、これを出発点として湖中の環境や生物群集の連鎖的变化をもたらし、個々の水域を安定なものとして利用してきた我々の生活に多くの難しい問題を持ち込むようになってきた。言うまでもなく、今日、社会でとりあげられている富栄養化は、このような人為的原因で引おこされた富栄養化であって、自然的富栄養化とはその原因、およびそれでもたらされる生物学的、化学的、物理学的な諸変化の内容、さらにそれら変化が我々人間生活に及ぼす内容においてかなり差異がある。しかしながら、どちらの場合も、今まで藻類の生産活動を制限していた栄養塩が外囲からの供給で量的に増加して生産活動を促進し、これを出発点として食物連鎖のつながりを通じ、また物質循環系を通じて生態系を構成する生物群集と環境が量的、質的に次々とかわっていく点では、共通の生態学的原理が支配すると考えてよい。

今日、殆んど湖沼および内湾では、都市排水や産業排水の流入で富栄養化が進みつつあり、この富栄養化阻止のために我国においても1970年以来各分野で活発な討論が交され、また方策が検討されてきている。法律的な規制を実行にうつすための排出基準なども検討されている。しかし、多くの場合、これらの方策や基準は技術的現状や経験、および汚染のすすむ前の過去の状態などを基礎にして考慮されてきており、富栄養化機構の量的解析にもとづき行なわれた例は少ないようである。人間社会の多様性の故に、富栄養化の影響のうけ方も多様である上、自然科学的現象面でも水域への栄養塩供給によりもたらされる生態系の変化の内容は、水域のおかれている地形的、気候的条件により異なる。富栄養化阻止の抜本的な対策をたてるためには、それ故、水域の富栄養化の生態学的機構…とくに栄養塩量増加と藻類生産の変化の量的因果関係を軸にして…の解析が基礎として必要であるように考えられる。私は、この討論会の話題の1つとして、このような立場に立って、湖沼における植物プランクトンの基礎生産活動を中心に話を進めることにしよう。

湖沼の栄養度と植物プランクトンの基礎生産

昔から一般に、山間の湖は深くて美しく澄んだ水をたたえ、住む生物の量が少ないが、平地の浅い湖は緑褐色ににごって生物の量が多いことが認められている。ドイツの Thienemann, スウェーデンの Nauman はこのような湖の諸性質の因果関係をすぐれた帰納的思考でむすびつけ、湖沼を 1 つの有機統一体として把握した。この有機統一体においては、個々の事象をつなげる中心が植物の有機物生産であ

表 1 いくつかの湖で現場法により測定された
生産層中の純生産量 (Sakamoto 1966)

栄養度	湖	年月日	mg O ₂ /m ² /日
富栄養湖	霞ヶ浦	1956年 9月17日	720
		1956年 11月23日	219
		1957年 1月 2日	75
		1957年 4月28日	371
	諏訪湖	1949年 5月 9日	180
		1949年 6月14日	413
		1960年 2月26日	256
		1960年 4月27日	1378
中栄養湖	震生湖	1955年 6月18日	260
		1960年 6月10日	196
	木崎湖	1961年 11月 1日	230
	榛名湖	1958年 6月18日	117
貧栄養湖	赤城大沼	1955年 6月26日	151
		1960年 3月31日	43

り、湖盆の形態、流域の性質はまず水中の栄養塩量を左右することによりその生産を左右する。生産活動はプランクトン量をきめ、これは水色や透明度を、更にその死骸の分解による水中の O₂消費を決定し、また分解残渣の堆積や O₂ 量は底質を左右する。この水中の O₂量や底質は次いで冷水魚や底棲動物の構成や生産を支配すると考えた。湖盆が深く栄養塩量乏しく生産の低い湖を貧栄養型、浅く肥沃で生産の高い湖を富栄養型とし、この湖沼型、そしてその中軸としての植物の生産活動を決定する主要因として、湖盆の形態、および湖水中の栄養塩類量、とくに N や P の量を最も重要なものとした。この理解は、その後における世界各地の湖での多くの研究者による研究で、基本的に正しいことがたしかめられ、今日における湖沼生態系動態研究の基礎理解となっているばかりでなく、富栄養化機構研究のための重要な基礎知識でなければ

表 2 いくつかの湖における生産層中のクロロフィル-a 量
(Sakamoto 1966)

湖沼型	湖	年月日	mg/m ²	mg/m ³
富栄養湖	霞ヶ浦	1956年 9月16日	140.0	140.0
		1956年 11月24日	20.6	9.8
	諏訪湖	1958年 4月28日	36.7	18.3
		1960年 4月25日	103.2	27.9
		1960年 6月30日	35.8	11.9
		1960年 7月19日	21.0	5.4
		1960年 8月 3日	55.5	15.0
		1960年 10月20日	72.6	29.0
		1960年 12月 1日	63.4	13.8
	中綱湖	1961年 4月14日	70.0	16.7
		1961年 11月 3日	59.0	19.7
		1962年 7月18日	106.0	21.2
		1964年 8月20日	51.4	32.2
中栄養湖	中綱湖	1958年 12月 4日	31.0	3.0
		1963年 8月23日	74.0	6.2
	榛名湖	1958年 4月20日	66.8	14.8
		1958年 7月18日	18.5	1.5
		1958年 12月17日	27.8	3.9
		1960年 2月12日	10.4	1.3
	木崎湖	1961年 2月 9日	90.7	12.9
		1958年 12月13日	18.6	2.5
		1961年 11月 1日	48.6	4.9
		1962年 6月13日	27.7	4.3
		1963年 8月21日	29.0	4.8
		1964年 10月25日	80.0	8.0
	琵琶湖 (南湖)	1963年 7月18日	22.6	5.7
		1963年 10月14日	24.8	8.3
		1964年 7月 9日	12.5	3.1
貧栄養湖	琵琶湖 (北湖)	1962年 10月25日	40.7	2.1
		1963年 5月13日	22.7	1.0
		1963年 7月19日	51.0	2.5
		1963年 10月15日	42.8	2.1
		1964年 1月21日	34.9	1.6
		1964年 5月17日	25.6	1.1
	青木湖	1964年 7月28日	26.3	1.3
		1963年 8月24日	20.9	1.4
	本栖湖	1960年 5月30日	16.7	0.3
		1962年 7月17日	10.5	0.3

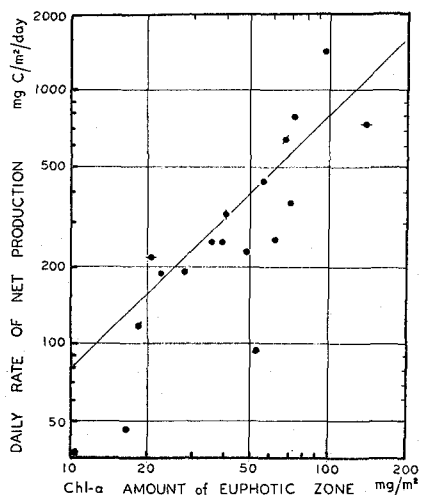


図1 日本のいくつかの湖における生産層中のクロロフィル-a量と、純生産量の関係 (Sakamoto 1966)

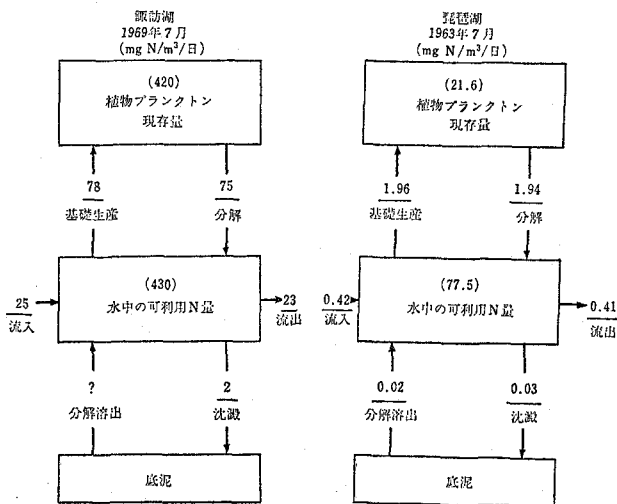


図2 諏訪湖、琵琶湖(北湖盆)におけるNの収支、諏訪湖の数値はIBP-PF 諏訪湖研究グループ1970年度の報告²⁹⁾より計算、琵琶湖の数値はSaijo and Sakamoto³⁰⁾の報告に用いた原資料より計算。()内は現存量、アンダーラインしてある数字は速度。

ならない。

湖沼生態系において最も主要な有機物の基礎生産者は植物プランクトンである。沿岸帯や1~2 m水深の浅い沼では水草が重要な位置を占めるが、一般の湖では湖全体としての代謝に重要な位置を占めるのは植物プランクトンで、人為的富栄養化の進行にともない、この大增殖が種々のトラブルのもとになっていることはよく知られた事実である。表1は我国の主要な湖で測られた植物プランクトン群集の1日あたりの光合成生産量を示す。また表2には、クロロフィル-a量としてあらわした植物プランクトン現存量を示す。この2つの表から明らかなように、富栄養湖では植物プランクトン量多く、純生産量も大きい、貧栄養湖では両者共に小さい。

図1には、生産層中のクロロフィル量と生産量の関係を示す。氷結した湖についての結果が(3点)ずれている外は、生産量はクロロフィル量の増加につれて大きくなるのがこの図から明らかであろう。それでは、このような植物プランクトンの量の差をもたらす要因は何であろうか。言うまでもなく、植物プランクトン群集の増殖はその生産活動を基礎に

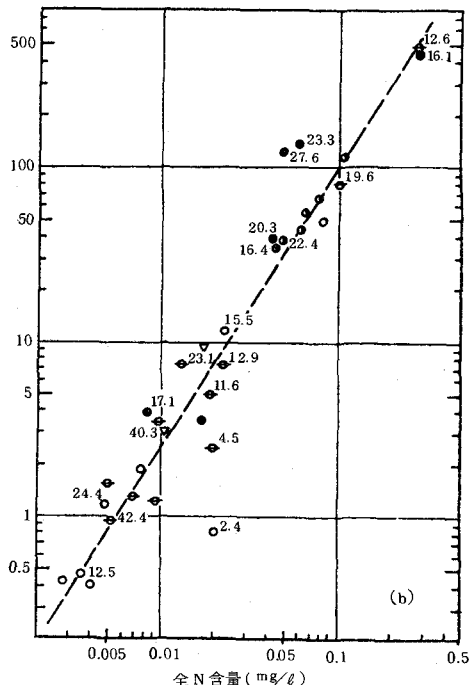


図3 日本のいくつかの湖や池の表水層中の植物プランクトンの現存量と水中の全窒素量との関係 (Sakamoto 1966)

しておこる。環境はこの生産活動を支配することを通じてその生産物の蓄積としての現存量を左右する。

湖沼における植物プランクトンの生産活動を支配する因子としては、光、温度、栄養塩のほかに種々の生物学的因子があるが、この中で栄養塩の供給状態がとくに水域による生産活動の差をもたらす因子として、きわめて重要である（Sakamoto 1966）。植物プランクトンは、その生長に各種の栄養塩を必要とするが、自然水中における存在量と生物の要求比とを比べて見ると明らかなように、自然水中にはとくにNやPの量は少なく、生産をもっとも大きく支配する因子となっている。このため、植物プランクトンの増殖につれて水中のN、P量は時と共に低下していくのが普通である。しかし、自然水域では室内での純粋培養系とことなり、植物プランクトンと共存する動物プランクトン、バクテリアなど他栄養生物の活動で、一度生産された藻体は次々と分解無機化され、再び生産者としての植物プランクトンに利用されていく。すなわち、植物プランクトンの生産活動は、湖沼生態系における物質循環系の中で起こり、この系の中の代謝活動のバランスとし現存量がきまってくる。図2に示した諏訪湖、および琵琶湖におけるNの収支は、この事情をよく示そう。したがって、水中の栄養塩と植物プランクトンの生産、現存量の間の量的因果関係を知るためには、このような物質循環系を包含した系での解析が必要であろう。図2にも示されるように、自然水域においては生産者、消費者、分解者の間に、N、P、Cなどの物質循環系を通じて1つの動的平衡関係が成立しており、この動的平衡はそれら物質の全存在量によりきめられる。したがって、同じ気候条件のもとでは、系の栄養塩レベル（水にとけているもの、生物体に入っているもの、デトリタスに入っているものをすべて含めて、1つの水塊中のN、又はP、又はCの全量）により生産量も、その上になりたつ現存量もきめられてくる。このような理解から、水中の全N量又は全P量と植物プランクトンの現存量の量的関係をとると、図3に示すごとき明瞭な関係を見出すことができる。ここでは、全N量に対するデータのみを示したが、この図から明らかなように水中の全N量が増加するにつれて、植物プランクトンの現存量は増加すると考えられる。

それでは、湖水中の全N量、全P量は何によりきめられるのであろうか。湖水への栄養塩の供給源としては、流入水とともに流れこむもの、降水、フォールアウトの外に、Nでは湖内でのN固定などがある。一般には、流入水による供給が最も大きいと考えられている。湖内へ供給された栄養塩は生物の生産活動に利用され生物体になるとともに、その枯死体は分解をうけながら湖底に沈降し、湖底堆積物として堆積する。水中の溶存態、けんだく態の栄養塩の一部は、流出水とともに湖外へ出ていく。この収支のバランスが、湖中の全N、又は全P量となる。図2に明らかなように、一般に流入水による供給と流出水による供給のバランスは比較的良好とれていて、流入負荷がふえるに従い流出量も多くなる。湖底への移行量、湖底からの溶出量は一般に小さい。したがって、湖中の栄養塩レベルをきめる要因として湖外からの栄養塩供給が最も重要なものと言ってよいであろう。

人間活動の活発化に伴う都市、工場、農地から水域への栄養塩の流入負荷の増大については、近年きわめて多くの報告が提出されている。表3は諏訪湖における例である。このような増大により諏訪湖中の全N量は表4に見るごとくに著しい増加を示した。その結果、植物プランクトンの現存量は増加し、とくに全N量の増加の著しい近年においては顕著なものである（図4）。このような栄養塩の増加による植物プランクトンの生産増加は、当然食物連鎖のつながりを通じ、物質循環のつながりを通じ、他の生物群の生活や環境に大きな影響をあたえる。しかし、この詳細な機構は今日まだ十分には明らかにされていない。ここでは比較的良好に解っているO₂消費度の変化について述べよう。先に述べたような藻類生産の増大は、当然その作られた藻体の分解によるO₂消費に伴う。とくに成層している夏期の深層水ではO₂減少は著しいものがある。上述のように、藻類生産が水中の全N量に伴い大きくなるとすれば、深層水中のO₂消費も増大するはずである。図5は吉村氏のデータよりプロットしたもので、この関係が

よく示される。このようなO₂量の減少が動物群集の生活にどのように影響するか、については今後の詳細な研究が必要とされよう。

表 3 諏訪湖における主要流入河川水中のN、P含量の変化、Nは無機態N化合物の合計 PはPO₄-P

流域	河川名	菅原 他(6) 1948年8月6日		矢木 他(7) 1969年7月22日		全流入水量に対するそれぞれの河川の流入水量の割合
		N ($\mu\text{g}/\text{l}$)	P ($\mu\text{g}/\text{l}$)	N ($\mu\text{g}/\text{l}$)	P ($\mu\text{g}/\text{l}$)	
田園地区	上川	150	5	830	30	35
	宮川	500	10	1130	40	17
	船渡川	100	30	1090	20	10
山岳地区	砥川	200	5	400	60	14 %
	中門川	300	30	840	170	2.5 %
工業地区	衣ノ渡川	600	80	1010	220	1.4 %
	古川	100	40	190	170	2.5 %
工業地区	承知川	100	20	750	70	1.6 %

表 4 諏訪湖湖水中のN量、P量の変化 ($\mu\text{g}/\text{l}$)

測定者	年 月	全 N	無機態 N	全 P	PO ₄ P
吉村 ⁸⁾	1931年8月	260	(—)	20	(—)
宝月 ⁹⁾	1949年9月	493	(217)	80	(14)
" ⁹⁾	1950年2月	291	(195)	63	(—)
坂本 ²⁾	1958年5月	1160	(—)	80	(14)
伊藤 ¹⁰⁾	1966年5月	—	(520)	26	(11)
" ¹⁰⁾	1966年7月	—	(193)	30	(3)
矢木 ¹¹⁾	1969年6月	1350*	(325)	—	(—)
" ¹¹⁾	1969年11月	1240*	(311)	—	(3)
坂本 ¹³⁾	1970年12月	1014	(335)	—	(9)
諏訪湖Bag実験グループ ¹⁴⁾	1971年8月	1210	(364)	—	(6)

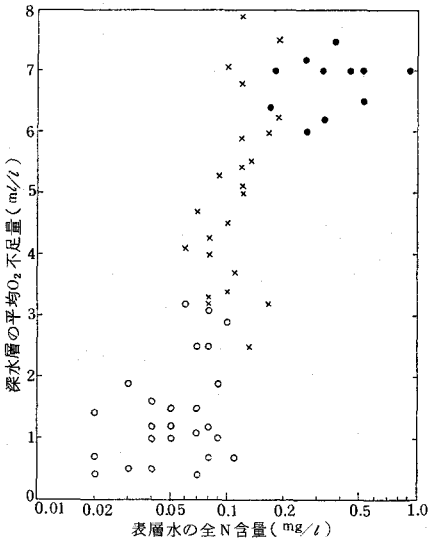


図 5 日本の調和型湖沼における夏期成層期中の深水域の平均酸素不足量と表層水の全N量との関係。Yoshimura (1938)²⁸⁾ のデータよりプロットした。
●…富栄養湖, ×…中栄養湖, ○…貧栄養湖 (坂本 1974)

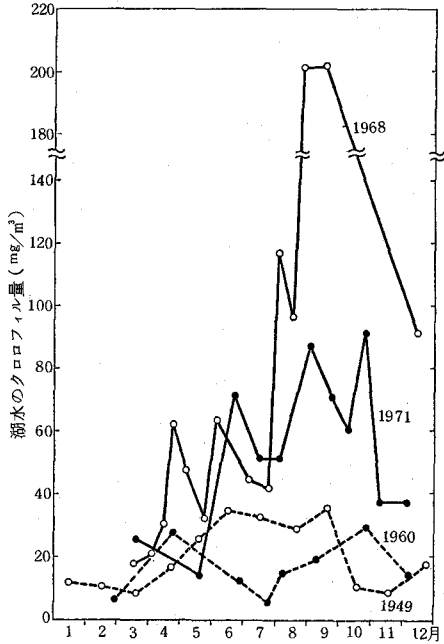


図 4 諏訪湖における過去 20 年間のクロロフィル量の変化。1949 年のデータは宝月他 (1952), 1960 年は Sakamoto (1966), 他は IBP-PF 諏訪湖研究グループのデータ