

II-39

水域の富栄養化とその制御

- 富栄養化現象解析における問題点 -

北海道大学工学部 正会員 橋 治国

1. まえがき

筆者は、自然生態系の保護あるいは望ましい生態系の維持のための富栄養化制御方法の提案を目的に研究を行ってきた。特に流出栄養塩と生態系との関わりを重点に、発生源対策と流出制御方法について検討してきた。今回はこれまでの調査結果を基に、「富栄養化防止」を現実的・具体的に検討する場合の問題点について述べる。

2. 富栄養化と自然生態系の変化

《富栄養化の定義について》

元来富栄養化という言葉は自然状態で貧栄養状態から栄養レベルが高い状態に移した状態を意味し（例えば、文献¹⁾参照）、水質汚濁による人為的富栄養化とは区別される。人為的な富栄養化を過栄養と名付ける場合もある。人為的な栄養塩の水域への添加は、自然状態におけるものとは比較にならないぐらいその量が多い。急激に生態系の変化を引き起こす。貧栄養状態からの連続としてとらえるべき性質のものではない。そして陸水学の分野における富栄養化という定義についても、地形学的に変貌する速度を考えると、曖昧でもある。すなわち地形学的な変化速度に対応して生態系が決定するとも考えられる。富栄養化は本来的に人間の営みと関連するものかも知れない。わが国にみられる湖沼や河川の富栄養化のほとんどはこの種のものといってよい。陸水学的な分類をわが国の湖沼に適用するには無理があろう。富栄養化とは、栄養塩濃度が高いレベルにあることを指すだけでよいのではない。

《自然生態系の変化との対応について》

富栄養化というと、すぐ生態系の変化として、なかでも藻類の異常増殖を意味することが多い。しかし富栄養化には自然生態系の変化を引き起こす環境にある状態として意味を持たせるべきであり、結果としての生態系の変化とは切り離すべきである。北海道では冬期間も「富栄養化」している。

3. 栄養塩の形態と藻類増殖（制御指標の選定）

前述のごとく、対象水域の生態系について現実の状態を理解しさらには正確な予測のためには、湖沼内ばかりではなく、流入水はもちろん発生源における栄養塩の形態を、藻類への利用可能性という視点から調べておく必要がある。富栄養化制御という立場からは、水質指標の選定ということになる。しかし実際には、どの分野においても栄養塩を溶解態としてしか扱わない。特に室内実験においては、この傾向が著しく、現実との矛盾が大きい。シミュレーションにおいてもこの傾向は無視できない。AGP試験でも、高圧蒸気滅菌処理の適用で懸濁物質の影響を評価するようにはなったが、最終的には濾過処理を行うなど²⁾、その扱いは適正ではない。

《流下過程における栄養塩の形態変化について》

栄養塩は、発生源から湖沼までの流下過程において、生物による摂取、生物からの分泌・溶出、土壌や懸濁物質あるいは底質との吸脱着、化学的なあるいは酵素による変質、物理的破壊など、様々な作用によってその形態を変化する。発生源における存在形態そのものが多種多様であるから、流下過程の存在形態を予測することは困難にも思える。図1は、旭川市周辺水域における各種排水中の栄養塩（TNとTP）濃度を示したものである。³⁾ 発生源である排水においては複雑な存在割合あるいは形態であることが推察されるが、河川流出後（●印）はその勾配であるN/Pがほぼ同じ値となり、均質となる。またその値から懸濁物質が生物体組成（図中にLagoonにおけるN/Pを示した。）に近いことがわかる。河川への流下過程における水質変換作用の大きなことがわかる。また発生源での総栄養塩量と到達栄養塩量の比をみたものが表1である

が、窒素については硝化作用、リンについては懸濁化作用が認められ、生物化学的あるいは物理的な様々な作用を受けることがわかる。図2は、石狩川水系での調査結果⁴⁾に基づき、SSと懸濁態リン濃度の関係を示したものであるが、SSにはかなり均質にリンが含有されていることがわかる。

《栄養塩の形態と藻類増殖について》

栄養塩の形態は、藻類の増殖と関連して重要である。しかし、これまであまりにも自然系での存在形態を無視した藻類増殖モデルが考えられてきたのではないだろうか。河川系においては、栄養塩のうちリンの多くは懸濁態として存在している。(水質分析例を表2に示す。⁵⁾) 溶存態成分だけでは水系の藻類に異常増殖がみられるとは考えられない。好気的水域において、現在シリカ共存⁶⁾あるいはキレート物質の存在による底泥からのリンの溶出が検討されているが、室内実験やフィールドでの観察での否定的な見解からは直ちにその寄与を認めることは難しい。物質収支からの検討もなされていない。図3に示すように、浅い湖では懸濁態物質から溶存態栄養塩への移行が無いと、藻類の異常増殖の起こり得ないことは明らかである。⁷⁾

図4と表3は、懸濁態栄養塩の藻類による利用可能性を検討するために実施したAGP試験結果と比藻類増殖速度を示したものである。⁵⁾ 懸濁物質の存在によって藻類の増殖は顕著であり、その比増殖速度についても濾過試料水(溶存態栄養塩のみを含む。)で培養したものと差が無い。(リン酸をP源でのMicrocystis aeruginosaの μ 、 20°C :0.07、 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$:0.25day⁻¹⁸⁾)

《制御指標について》

富栄養化の制御指標として、全リン・全窒素濃度を指標とする必要のあることは、前述の指摘で明らかである。富栄養化を予測するAGPについても、藻類培養試験での試料処理方法を改める必要があり、ろ過試料に加え未濾過試料をも供試試料としてその値をもとめるべきである。なお藻類へのリン摂取機構においては、酵素作用による有機あるいは縮合リンのリン酸化⁹⁾も重要であるし、図5、6のように懸濁態反応リンが藻類増殖を支配する場合¹⁰⁾などもあるので、形態を区別して定量することによって実態を知ることができる。

4. 富栄養化防止対策の現状について

富栄養化防止対策は、主に藻類の異常増殖を抑制する立場から、多くの試みがなされている。しかし都市近郊水域の富栄養化した湖沼の水質改善は、いまだいっこうに進行していないのも事実である。生態系保護に対する認識が低いため、人間生活への直接的な被害がある場合を除き富栄養化防止対策に遅れがからである。下水・工場排水については法律上の対策が定められたが、適用された例をあまり聞かない。経済性が問題になる場合を除くと行政の対象にならないようである。この理由は、環境基準や上乗せ基準の設定過程とほぼ同じといって良いだろう。

自然の環境条件に適応した生態系を保存できる水環境への回復は、将来に対して潜在的資源を残すことになり、コンクリートで固められた人間生活への精神的よりどころにもなることは間違い無い。また個々の生態系が広域的な生態系とのバランスや地球上の物質循環と密接な関連を持って維持されていることはもはや万人に認められるところであるので、このことは広域的に健全な生態システムを保つためには地域的な生態系を望ましい状態に保つ努力の必要なことを意味している。このような意味からも富栄養化防止対策は真剣に取り組まなければならない。

《栄養塩発生源対策について》

○点汚濁源対策

点汚濁源において、最善の栄養塩除去処理がなされることはいうまでもないが、その限度は長期的に考えるべき人間の生活環境やエネルギー問題とのバランスで決められるべきであろう。例えば、下水処理場においては高度処理のための費用の問題がある。中途半端では実効の無い可能性がある。合流式下水道においては雨水を貯留できる施設を建設しなければ、降雨時には多量の栄養塩を水域に流出してしまう。このための莫大な費用と放流水面環境保護との兼ね合いを考える必要がある。札幌市を例にとれば、創成川・伏古川あ

るいは茨戸下水処理場で不安定な高度処理を行うよりは、流水系の豊平川下流や海域に放流先を変更するという案も悪くない。(変更して欲しい。)(図7) これら札幌市の都市排水によって下流の茨戸湖の富栄養化が著しく進行しているからである。¹¹⁾¹²⁾ 茨戸湖の水容量、自然環境、水産資源、レクリエーションとしての価値を考えると、この案を否定する人はあまりいないだろう。高橋¹³⁾は、処理還元水を多量に含んだ水について上水処理が可能になればその上流域での水利用を抑制することになり、例えば枯渇した瀕死の豊平川上流域の環境を回復できるとしている。点汚濁源については、その扱いを総合的に検討する必要がある。

○面汚濁源対策

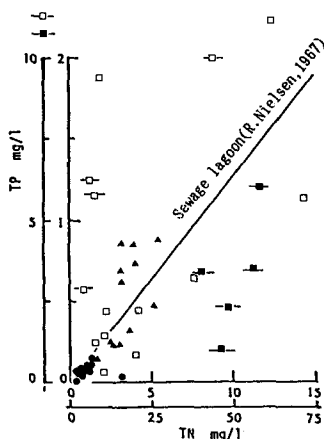
栄養塩はあらゆる土壤に含まれている。森林は大気・雨水から多量の栄養塩を摂取し、田畑には肥料が投入され、土壤の蓄積量はさらに増す。動物も糞尿として栄養塩を排出し、地域の栄養塩含量を高める。都市の地表面には栄養塩が廃棄物として捨てられている。栄養塩は、面的に広く分布する。一例として、リン化合物の降雨増水時の流出パターン¹⁰⁾を図8に、また図9に比流量と比成分流出量の関係⁴⁾を示した。流域による特性はあるものの、窒素成分を含め栄養塩は流量増加にともなって多量に流出してくる。特に懸濁態栄養塩にこの傾向が著しい。これら面源流出物のコントロールは、土地利用と関連してその実現が難しい。しかし長期的な視点にたつて、土地の利用制限や水系網の整備を行う必要がある。図10には、融雪期の水質を示したが、この時期にも多量の硝酸イオンの流出が認められる。雪ダムの建設などが検討されているが、選択取水等の工夫をしなければ新たな富栄養化問題が生ずる。いずれにしても面的発生源についての行政上の対応は無策に近い。

《生態系の保護対策について》

富栄養化した湖沼の回復を考える場合、その目標とする藻類濃度はクロロフィル濃度で代表されて示される。しかし安定した湖沼は、自然環境のもとで決定されるものであるから、生物種を特定して目標を定めるべきである。VOLLENWEIDER型¹⁴⁾の対策では、生物相への関心が低くなる。下水処理水中と未汚染地区の水中に育つプランクトン相は異なる。どのような生物相あるいは生態系を望むか、きめ細かな制御が望まれる。
*《副題の変更》 調査中の交通事故の後処理によって調査・研究が滞った。このため副題を変更した。

(参考文献)

- 1) M. Sakamoto Primary Production by Phytoplankton Community in some Japanese lakes and Dependence on Lake Depth, Archiv Hydrobiol., 62, 1, 1966
- 2) 須藤隆一、田井慎吾他 藻類の培養試験報告によるAGPの測定、国立公害研究報告、R-26、1981
- 3) 橘 治国 石狩川の水質—上流域(旭川市周辺)栄養塩負荷の影響—、寒地技術シンポジウム講演論文集、3、p88、1987
- 4) 橘 治国、江口久登他 水域におけるリンの存在状態と挙動—石狩川流域を例として—、衛生工学研究討論会講演論文集、18、p1、1982
- 5) 橘 治国、森口朗彦他 藻類増殖能力の推定に関する一考察(II)—自然河川水中の懸濁態栄養塩による藻類増殖効果—、衛生工学研究論文集、22、p151、1986
- 6) 河合崇欣、大槻 晃他 好気的湖水中への底泥からのリンの溶出について、水質汚濁学会講演集、17、p255、1983
- 7) 橘 治国、井上隆信他 茨戸湖上部湖盆における栄養塩の循環—懸濁態に着目して—、土木学会北海道支部論文報告集、44、p373、1988
- 8) 矢木修身、岡田光正他 Microcystisの増殖特性、国立公害研究報告、R-25、p47、1981
- 9) N.L. Clesceri and G.F. Lee Hydrolysis of condensed Phosphates-1:Non-Sterile Environment, Int.J.Air Water.Poll., 9, p723、1965
- 10) 橘 治国、石川清他 懸濁態反応リンの流出と藻類増殖への可能性、土木学会年次学術講演会講演概要集第2部、37、p205、1983
- 11) 橘 治国 茨戸湖の水質汚濁現象の解析—富栄養化に関連して—、衛生工学研究討論会講演論文集、18、p107、1979
- 12) 日野修次、青井孝夫 茨戸川の水質変化について、北海道公害防止研究所報、10、p142、1983
- 13) 高橋敬男 札幌の水と下水道、寒地技術シンポジウム講演論文集、4、p431、1988
- 14) R.A. Vollenweider Input-Output models With Special Reference to the Phosphorus Loading Concept in Limnology, Hydrologie, 37、p53、1975



- : 河川
- ▲ : 都市河川
- : 工場・事業所排水
- ◆ : 事業所排水（下水・し尿処理場）

図1 排水中のTPとTNの関係
(石狩川上流、12/18~24/82)

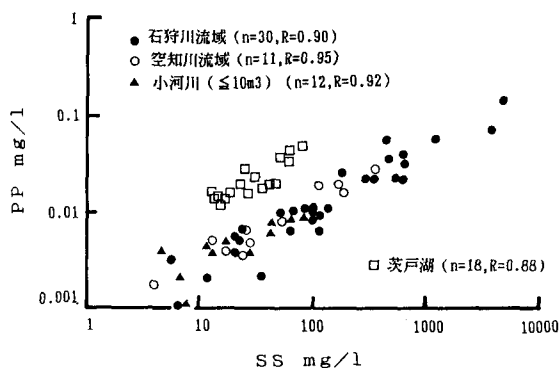


図2 SSとPPの関係
(石狩川水系、1979~1980)

表1 旭川市周辺(ΣC・Q、発生負荷)と石狩川納内流出負荷(C・Q、到達負荷)の比率(石狩川上流、12/22~24/82)

	SS	TOCT	TP	DP	(DRP)	PP	(POP)	(PCP)
ΣCQ/CQ (St. 3)	1.32	1.35	0.79	1.87	2.89	0.47	0.29	0.59
(*)	1.63	1.67	0.98	2.31	3.57	0.58	0.36	0.73
	(PRP)	TN	DN	O-NT	TIN	(NH ₄ -N)	(NO ₃ -N)	Cl ⁻
ΣCQ/CQ (St. 3)	0.59	1.06	1.02	0.86	1.07	1.43	0.73	0.81
(*)	0.73	1.31	1.26	1.06	1.32	1.77	0.90	1.00

(ΣCQ: 79.8 m³, Q (St. 3) : 88.9 m³, ΣQ/Q (St. 3) : 0.90)

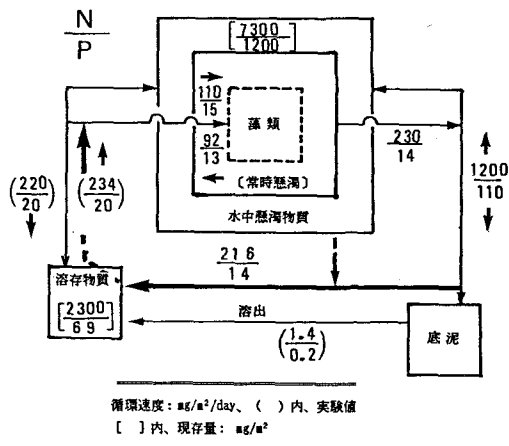


図3 茨戸湖における栄養塩の循環
(9/29~10/2/85)

表2 分析結果の一例(石狩川納内)

Date	Q m ³ /s	SS mg/l	TOC mg/l	TN mg/l	DN mg/l (%)	TIN mg/l	NH ₄ -N mg/l	TP mg/l	DP mg/l (%)	Cl ⁻ mg/l	TN/TP	DO	DCP	DRP	POP	PCP	PPp
12/23/82	88.9	13	4.2	1.09	0.97 (89)	0.72	0.35	0.078	0.021 (27)	30.0	14.0						
4/23/83	317	17	5.6	0.73	0.53 (73)	0.36	0.12	0.035	0.012 (34)	5.9	20.8						
8/17/83	60.1	15	5.9	1.02	0.84 (82)	0.42	0.04	0.067	0.027 (40)	15.0	15.2						
9/13/83	289	77	7.4	1.53	0.82 (54)	0.31	0.10	0.096	0.020 (21)	17.0	15.9						

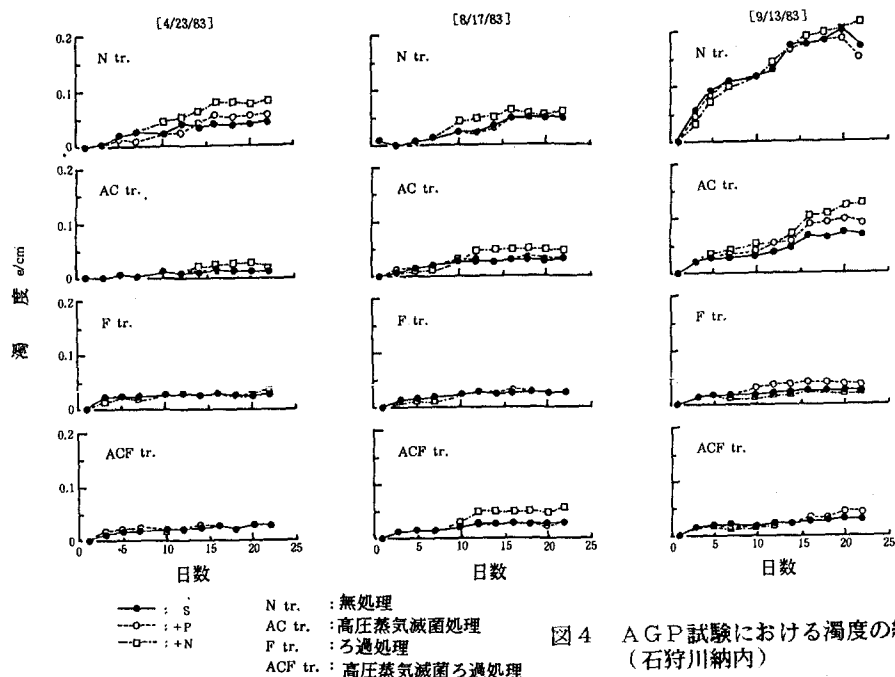


図4 AGP試験における濁度の経時変化 (石狩川納内)

表3 藻類の比増殖速度 (図4と同じ条件)

			無処理			高圧蒸気滅菌処理		
			S	+P	+N	S	+P	+N
旭川 (金星橋)	4/23/83		0.19	0.05	0.13	0.02	0.05	0.03
	8/17/83		0.11	0.09	0.11	—	0.01	0.01
	9/13/83		0.21	0.22	0.11	0.04	—	0.04
納内 (石狩川)	4/23/83		0.24	0.06	0.15	—	0.15	—
	8/17/83		0.15	0.14	0.20	0.10	0.04	0.05
	9/13/83		0.07	0.12	0.12	0.02	0.03	0.05
奈井江 (石狩川)	4/23/83		0.08	0.28	0.14	0.15	0.25	0.11
	8/17/83		0.06	0.10	0.27	0.05	0.04	0.02
	9/13/83		0.27	0.04	0.16	0.08	0.03	0.06
赤平 (空知川)	4/23/83		0.07	0.22	0.08	0.17	0.17	0.22
	8/17/83		0.13	0.03	0.28	0.03	0.06	0.08
	9/13/83		0.10	0.16	0.08	0.14	0.12	0.12

day⁻¹ 照度 1,000±100Lux 温度 25±1℃

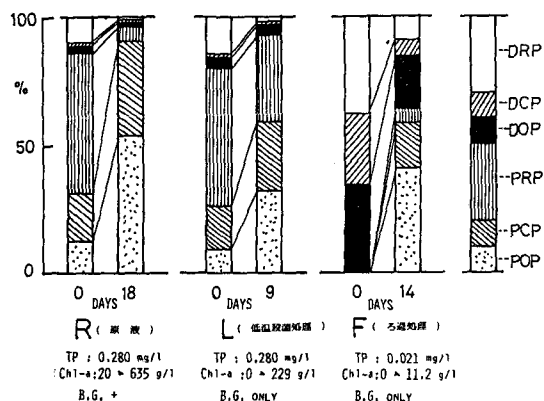


図5 AGP試験における各態リンの経時変化 (茨戸湖、1981)

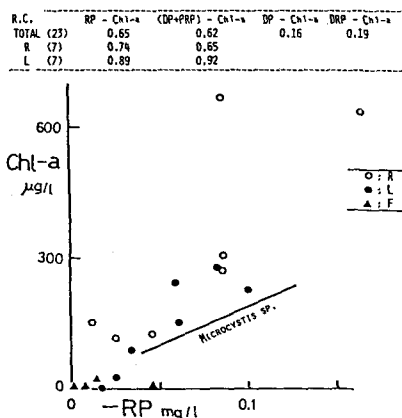


図6 減少反応リンとクロロフィル (図5と同じ条件)

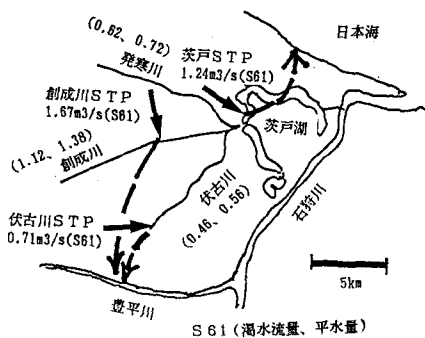


図7 茅戸湖流域概況

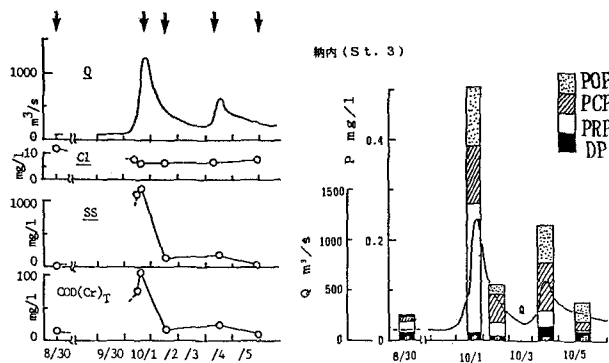
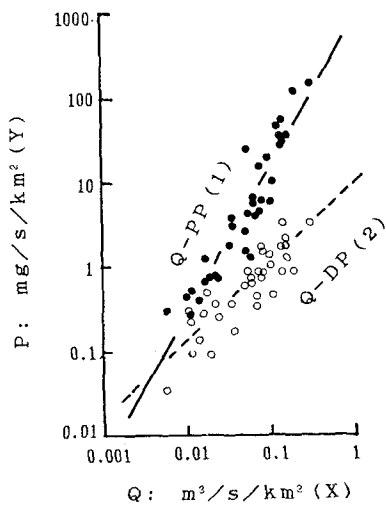


図8 各態リン化合物の洪水時流出 (8/1981、台風15号)



X	Y	R	C	n
Q - TP	0.93	675	1.60	
PP	0.93	754	1.70	(1)
DP	0.83	10.4	0.93	(2)
(PRP)	0.80	131	1.54	
Q - TN	0.96	3030	1.31	
PN	0.82	1897	1.82	
DN	0.95	1350	1.14	
TIN	0.96	1190	1.23	
Q - SS	0.92	323000	2.23	

R: $\log - \log$ 、 $Y = C \cdot X^n$
Y: mg/s/k 、X: $\text{m}^3/\text{s/k}$

図9 リンについての比流量と比流出量の関係 (1979~1980)

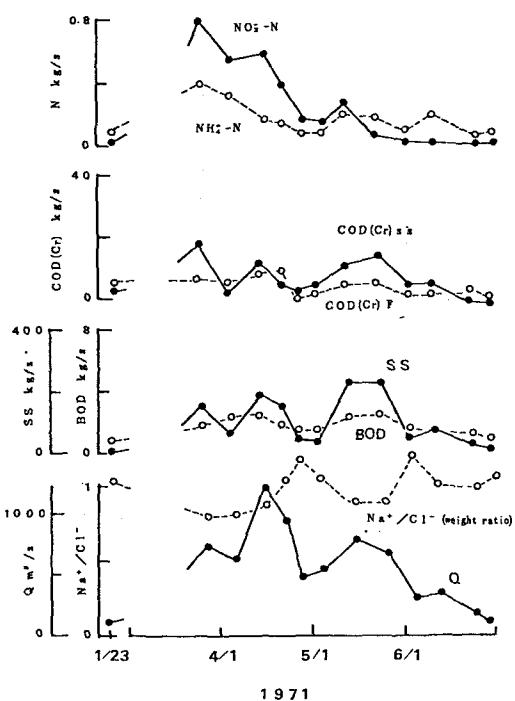


図10 融雪期の各成分流出負荷量 (石狩川奈井江、1971)