

II—32 藻類増殖における懸濁態リン化合物の利用

北海道大学工学部 正会員 橘 治国
北海道大学工学部 和知英治
北海道大学工学部 大畑 博

1. 緒言

水域における藻類増殖のメカニズムについては、摂取する栄養塩の多様な存在状態あるいは複雑な環境条件によって、未だ充分説明されるに到っていない。著者等は、栄養塩の一つであるリン化合物が、自然水域では懸濁態として優占的に存在することに着目し 1)、その藻類増殖への利用について、フィールド調査や室内藻類培養実験に基づき検討してきた。その結果、吸着態リン酸塩(反応性リン化合物)が直接に 2)、また有機態リン化合物が酵素分解後 3)、藻類に摂取される可能性があり、水中での藻類増殖に対する寄与の大きいことを指摘した。本報告では、懸濁物質を多量に含む降雨増水時の試水について藻類増殖能力(AGP)試験を行い、これらの結果ならびに従来の知見を合せ、懸濁態栄養塩 特にリン化合物の持つ藻類増殖効果についての総合的な検討を行うことを目的とした。

2. 研究方法

著者等は、富栄養化現象についての解析を数年来取り組んできた。本研究はその一環で、研究方法については既発表論文にも詳しい。例えば 1)~6) 本項では、解析の中心となる1985年9月台風13号時における調査・研究例を中心に説明する。

2.1 藻類増殖能力(AGP)試験方法

(1) 試料の前処理

懸濁態栄養塩による藻類増殖効果を評価するため、2種の前処理を行った。〔 〕内は、(2)で述べる藻類増殖能力(AGP)の前処理後の表示方法である。

- ① 高圧蒸気滅菌処理(AC tr.) [AGP(AT)]: 121℃、1.055 kg/cm²の条件で20分間処理。
- ② ろ過処理(F tr.) [AGP(F)]: 孔径 0.45 μmメンブランフィルターで無菌ろ過。AGP測定的一般法。

(2) 藻類増殖能力(AGP)試験方法

須藤等による方法 7) に準じた。試水(10 ml)に *Microcystis aeruginosa* (東京大学、IAM-176株)を 10,000 細胞/mlとなるよう接種し、25±1℃、1,000±100Lux で、最大増殖時(2~3週間)まで培養した。最大増殖時は、2~3日おきに測定する濁度の増加率が5%以下となった時点とした。藻類増殖量は、有機炭素(TOC: C mg/l)の増加量で代表させ、2組の試験結果の平均値とした。前処理後の試水について、利用可能リンあるいは窒素量を推定するために、それぞれ過剰の窒素(NaNO₃添加、試水で1.0 N mg/l増加)とリン(K₂HPO₄添加、試水で0.1 P mg/l増加)を添加し、試験に供した。2種の前処理を行った試水について、それぞれ3種の条件で藻類増殖能力(以後AGPと略記する。)試験を行ったことになるが、各AGP値は、表1のように表示することとした。またこれらの測定値から、懸濁物質に由来するAGPを以下のように計算した。

$$AGP(SS) = AGP(AT) - AGP(F)$$

$$AGP(SS) + N(or + P) = AGP(AT) + N(or + P) - AGP(F) + N(or + P)$$

2.2 調査方法

(1) 対象水域

図1に示す石狩川流域(流域面積 143,000km²、流路延長 262km)を調査対象とし、本川については

St. 1 (旭川)、St. 3 (納内)、St. 6 (奈井江)、支川については St. 41 (雨竜川、雨竜)、St. 51 (空知川、赤平) の計 5 地点を調査定点とした。各地点の地理的概況については、文献 8)などを参考にしていきたい。

(2) 調査期間

昭和 60 年 9 月 1 日 14 時 40 分に渡島半島南部に上陸した台風 13 号の降雨による増水期間に調査を実施した。この時期の降水量は、旭川で 44 mm、札幌で 92 mm である。調査日は流出パターンを考慮して、9 月 1～4 日、6、21 日とした。また台風 13 号到来前の 8 月 20 日に、流量安定時の代表時期として調査しておいた。

(3) 分析方法

SS、TOC、各態窒素、Chl-a などの一般水質項目は、水の分析—第 3 版—9)に従って分析した。リン化合物については、Standard Methods 10)を基本に分画定量した。なお時刻流量データについては、北海道開発局石狩川開発建設部ならびに旭川開発建設部の協力によって入手した。

3. 結果および考察

分析データについては、2. 研究方法で述べたように、昭和 60 年 9 月の台風 13 号による降雨増水時調査結果を中心に示す。考察は、既発表分 (主に文献 3)) を併せて行った。

3. 1 降雨増水時における栄養塩の流出と藻類増殖能力 (AGP) 値

台風 16 号による増水期間を含めた 8 月 15 日から 9 月 30 日の流量変化を、St. 3 (納内) を例として図 2 に示した。9 月 2 日 0 時に最大流量 1.198 m³/s は、平水量 110.04 m³/s (昭和 33 年から 59 年の平均) の約 10 倍である。図 3 は、St. 3 について、8 月 20 日と 9 月 21 日を含めた増水時の流量と水質成分濃度の関係を、代表成分について示したものである。最大流量時に合せてサンプリングできなかったが、増水時の流出パターンを把握できたものといえる。経時的な両者の関係に、図中の矢印で示したように時計廻りの状況がいずれの成分にも認められる。すなわち、初期には高濃度の水質成分を含有する水塊が流出する。この傾向は SS や懸濁態リン (PP) に著しく、流出初期の地表蓄積物や河床堆積物の洗い出し効果を認めることができる。またこれら成分については流量に対応した濃度の増加があきらかで、起源となる土壌粒子や人為的に発生する固体の有機・無機物質が多量に存在することになり、水環境への影響の無視できないことがわかる。懸濁態窒素 (PN) や溶存成分についてはこのような顕著な増加傾向はない。溶存性反応リン (DRP: PO₄-P) については初期を除くと減少する。この期間の AGP を、St. 3 と St. 6 を例に図 4 に示した。参考として流量と SS 濃度を付記してある。SS 濃度の増加に伴う未ろ過試料 (T) AGP の増加とろ過試料 (F) AGP の減少が第一の特徴で、増水時とりわけ流出初期には懸濁物質の持つ AGP が非常に大きくなることが明らかである。今回は、図に示した 9 月 2 日の St. 6 で最大値を観測し、AGP (AT) で 46.2 C mg/l となった。C/Chl-a については Microcystis aeruginosa で 67.3 11)、アオコで 50～60 9)、11) と報告されており、700～900 μg/l のクロロフィル-a が存在することになる。AGP (SS) では 36.9 C mg/l で、550～750 μg/l となる。著しい「水の華」が発生した状態に近い。もうひとつの特徴は、各試水の AGP に共通して、栄養塩無添加 (S) と栄養塩添加 (+N、+P) との差が、都市内河川 2) や石狩川の流量安定時 3) に比較して小さいことで栄養塩組成が生物体に近いものといえる。高濃度 SS 流出時に SS に対する AGP の割合が低下するが、栄養塩含有率の低下のほか、リンと窒素の同時添加効果が小さくなることから (データ省略)、このような時期は懸濁物質中のリン・窒素以外の微量成長促進物質の含有率の低いことも原因として考えられる。

3. 2 リン・窒素濃度と AGP

自然湖沼においては、通常の場合、リン・窒素が藻類増殖制限物質とされている。12) 表 2 に、各 AGP とリン・窒素濃度の相関係数 (n=30)、図 5 に全リン (TP) と全窒素 (TN) の関係を示した。TP、TN は、AGP (AT) および各々窒素、リンを添加したものとの相関が高く、河川水についても藻類増殖の一次的栄養塩となっていることがわかる。一方、溶存態栄養塩については、AGP

(F)との相関性が低く、低濃度でもあり、藻類増殖への影響の低いことがわかる。いずれにしても、図表からは懸濁態成分の寄与の大きいことが容易に推定される。

3.3 藻類による懸濁態栄養塩の摂取

これまでの分析結果から、増水時に多量に流出する懸濁物質が潜在的に大きな藻類増殖能力を持つことがわかった。図6は、SSと懸濁態リン(PP)、懸濁態窒素(PN)、懸濁物質の持つAGP(SS)の関係を示したものである。いずれの成分にも正の相関が認められ、SSには平均的にリンと窒素が含まれ、これらが藻類増殖の栄養塩となっていることが容易に推察される。全体の分布から離れた*印の特異点はSt. 51での増水時で、周辺に広がる火山灰地帯からの栄養塩が少い懸濁物質流入の影響かもしれない。表3に懸濁態栄養塩と懸濁物質によるAGP(SS)との相関係数、図7に懸濁態リン(PP)と懸濁態窒素(PN)のAGP(SS)との関係を示した。いずれにも良好な対応が認められ、懸濁成分も藻類に容易に摂取されやすい形態にあることがわかる。PNとAGP(SS)+Pとの相関性が劣るが、窒素濃度が溶存態に比較してかなり低く分析上の問題も原因の一つといえよう。様々な形態の窒素に生物分解の差があるのかも知れない。

3.4 藻類による懸濁態リン化合物の利用可能性

これまで懸濁態栄養塩が、従来の認識を越えて生物に摂取されることを指摘した。ここでは、特にリン化合物が懸濁態として優占的に存在することに着目し、その利用可能性について検討した。表4に、9月1日から6日までの各態リン化合物および窒素の存在割合をSt. 3を例に示した。窒素については溶存態の割合が高いのに対し、リンは80%以上が懸濁態である。流量安定時もほぼ同様な傾向にある。3) 図8は、PPとAGP(SS)+Nの関係を示したものである。AGP(SS)+Nは、懸濁態物質中の利用可能リン化合物量の目安となる。両者に一応の相関性が認められる。図中に流量安定時の例3)の回帰直線を描いたが、これに比較し勾配が小さく、増水時の利用可能性懸濁態リン化合物濃度の割合がかなり低くなるようである。PPの濃度が高くなるとAGPの割合が低下するようであるが、この理由については3.1で述べたように、微量増殖促進物質の存在割合低下をも考慮する必要がある。表5には、AGPとPP濃度の関係を示す回帰直線式を、流量安定時のもの3)および *Microcystis aeruginosa* のC/P(重量比、文献11),13)より)を含めて総括として整理した。表中の⑤式は、試水の高圧蒸気滅菌処理後に残存する懸濁物質のもつAGPで、PP濃度は処理に伴う変化分を補正してある。懸濁態リン化合物の藻類増殖能力が、増水時に劣ることがはっきりするが、それでも相当量の有機炭素を生産することがわかる。PPが0.1mg/lとすると、7.2 C mg/l(①式、Chl-a 100~120 μg/l)の生産となる。実際には5.0mg/l(②式)で利用可能リン化合物のうち約70%が利用されたことになる。また *Microcystis aeruginosa* 増殖時のC/Pが360なので、約20%のリン化合物が利用可能で14%が利用されたことになる。流量安定時は、39%が利用可能(③式)で22%利用された(④式)ことと比較すると約半分の効率である。なお高圧滅菌処理したものについては75%近い利用効率となり、環境条件によっては懸濁態リン化合物は非常に生物に摂取されやすくなることが推察される。閉鎖性水域を含め広い環境でのリンの循環を考える場合に重要である。

4. 結論

石狩川水域を対象とした水質調査ならびに藻類増殖能力(AGP)試験を降雨増水時に行い、多量に流出する栄養塩濃度とAGPの関係 特に懸濁態リン化合物の藻類による増殖への利用可能性について検討した。結果の一つとして懸濁態リン化合物の高い藻類による摂取能力を観察したが、これらは従来の研究や現場での水質管理で考慮されなかったところである。流域開発による懸濁物質の流出増加と下流域でのダムを中心とした貯水は今後避けられないところであり、懸濁態栄養塩による富栄養化と生態系の変化が重要な課題になるものと予想され、本研究での指摘は意義を持ってくると考えられる。以下に結果を要約する。

◇ 河川降雨増水時には多量の懸濁物質とこれに含まれる栄養塩が流出し、これらが高い藻類増殖能力を持つ。今回の調査でChl-aとして最大700~900 μg/lに達する潜在力を観察した。

- ◇ 懸濁物質に含まれるリンと窒素の平均的濃度は、生物体の組成に近い。
- ◇ リン化合物はその80%以上が懸濁態として存在し、(AGP試験では)流量安定時には約20%が、増水時には14%が藻類に直接摂取された。藻類利用可能リン化合物は、この約2倍存在する。

今後はこれら藻類増殖を支配する栄養塩の負荷発生機構と具体的な藻類への移行機構を明らかにし、さらに実効ある富栄養化防止対策について検討する。

(謝辞) 本研究の成果の一部は、日本生命財団(56~58年度)および北海道(昭和58年度)の研究助成によるものである。また本研究は、今岡孝之氏(現 オルガノ)、森口朗彦氏(現 水産庁漁港部)そして北海道大学工学部水質工学研究室のスタッフと共同で実施したものである。また流量資料については北海道開発局の協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

(参考文献)

- 1) 橘、江口、佐藤、河西: 衛生工学研究討論会講演論文集、Vol.18、p1、1982
- 2) 橘: 衛生工学研究論文集、Vol.20、p53、1984
- 3) 橘、森口、今岡、井上: 衛生工学研究論文集、Vol.22、p151、1986
- 4) 橘、杉浦、河西: 水質汚濁学会講演集、第18回、p100、1984
- 5) 橘、森口、今岡、井上: シンポジウム「富栄養化現象の解析と防止対策—リン化合物を中心として—」論文集、p5、北海道大学、1985
- 6) 橘、和知、井上: 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部、第41回、p717、1986
- 7) 須藤、田井、八木、岡田、細見、山根: 国立公害研究所研究報告、No.26、p17、1981
- 8) 橘、那須: 衛生工学研究討論会講演論文集、Vol.14、p90、1978
- 9) 日本分析化学会北海道支部編: 水の分析—第3版—、化学同人、1981
- 10) APHA—AWWA—WPCF: Standard Methods for the examination of water and wastewater、16th edition、1985
- 11) 高村、野村、萩原、平松、八木、須藤: 国立公害研究所研究報告、No.25、p31、1981
- 12) Sakamoto: Arch. Hydro. biol.、Vol.62、p1、1966
- 13) 矢木、岡田、須藤、萩原、高村: 国立公害研究所研究報告、No.25、p47、1981

表1 AGPの表示方法

高圧蒸気滅菌処理 (AC tr.)			ろ過処理 (F tr.)
無添加	(S)	AGP (AT)	AGP (F)
窒素添加*	(+N)	AGP (AT) +N	AGP (F) +N
リン添加**	(+P)	AGP (AT) +P	AGP (F) +P

*: NaNO_3 添加 (添加後、1.0 N mg/l)
 **: K_2HPO_4 添加 (添加後、0.1 P mg/l)

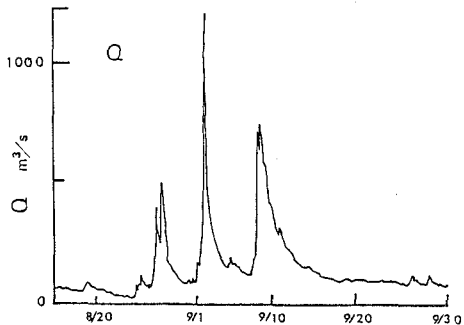


図2 時刻流量の変化 (1985、St. 3 納内)

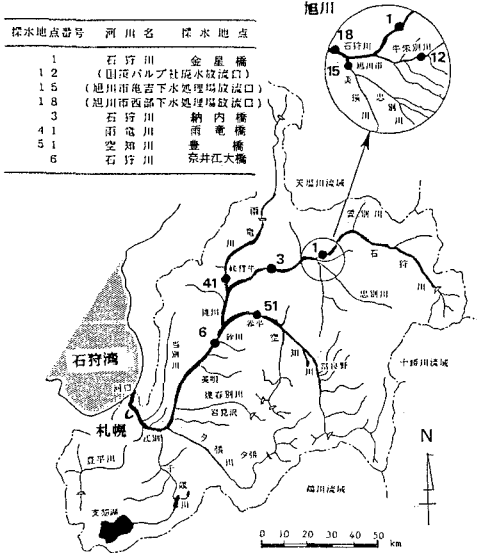


図1 石狩川流域の概況

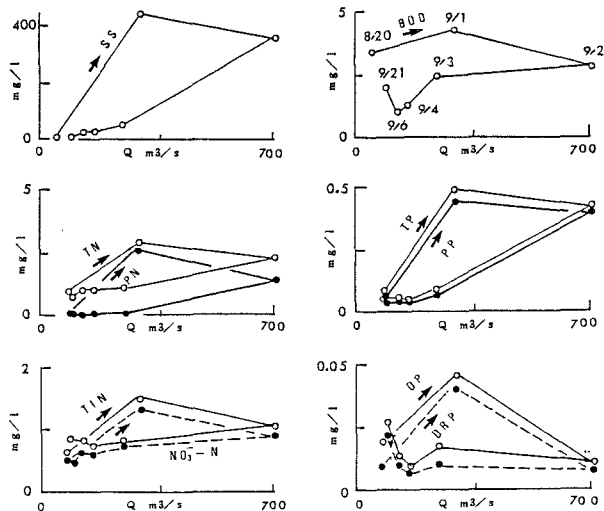


図3 流量と水質成分濃度の関係 (1985、St. 3 納内)

表2 AGPとリン・窒素濃度の相関係数 (n=30)

		TP	DP	TN	DN
AGP (AT)	S	0.88		0.80	
	+N +P	0.84		0.79	
AGP (F)	S		0.35		0.16
	+N		0.42		
	+P				0.67

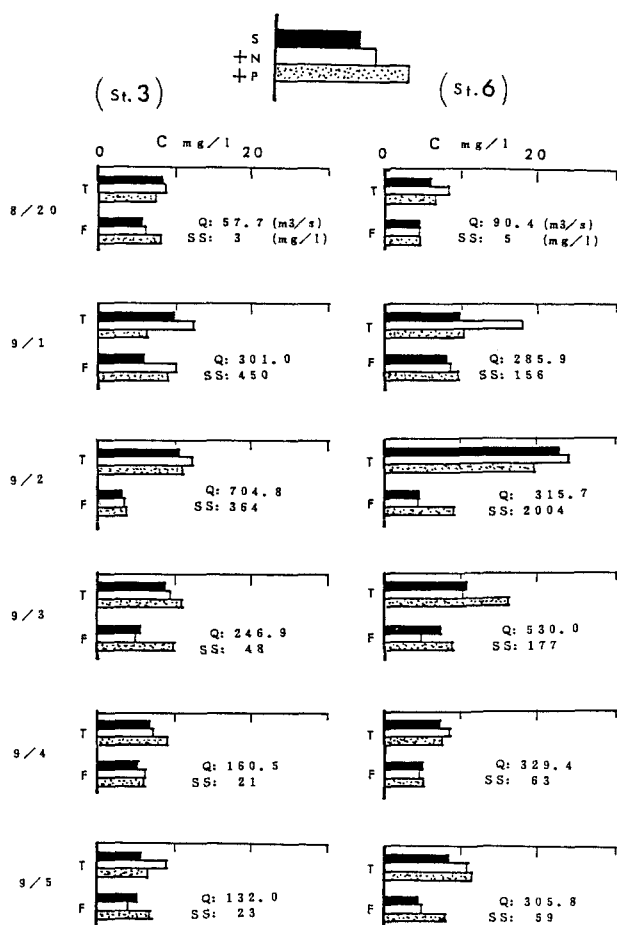


図4 AGP試験結果の例 (1985、St. 3 納内、St. 6 奈井江)
(T: 未ろ過試水、F: ろ過試水)

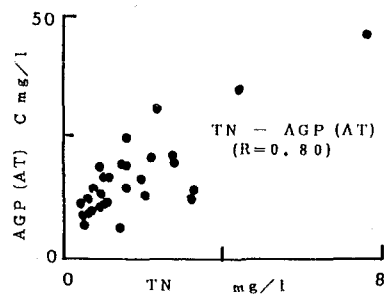
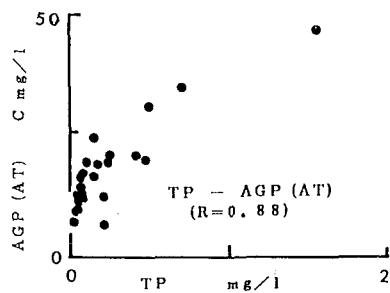


図5 TP・TNとAGP (AT) の関係 (n=30)

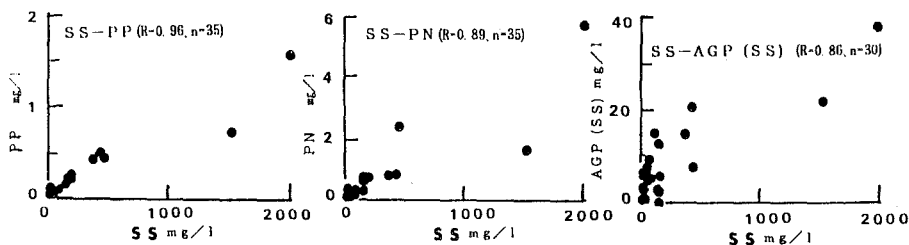


図6 SSとPP、PN (n=35) およびAGP (SS) (n=30) の関係

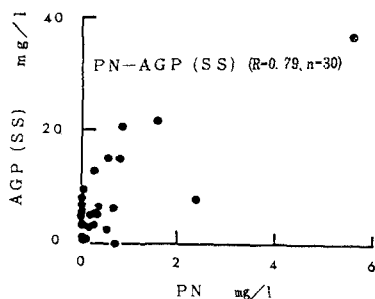
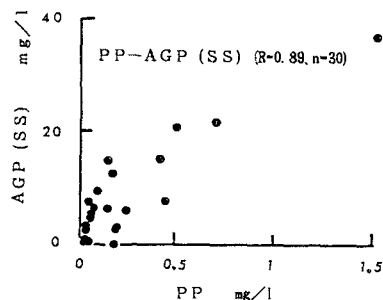


図7 PP、PNとAGP (SS) の関係 (n=30)

表3 AGP (SS) とPP・PNの相関係数 (n=30)

	PP	PN
AGP (SS)	0.89	0.79
+N	0.83	
+P		0.52

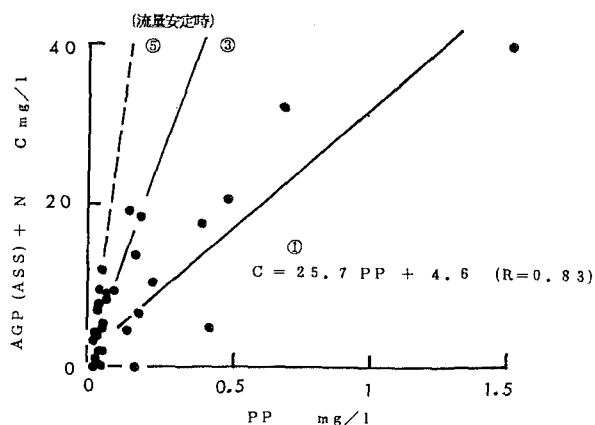


図8 PPとAGP (SS) +Nの関係 (n=30)

表4 降雨増水時の栄養塩の存在形態 (1985、St. 3 納内の例)

	Q	TP	PP	DP	PP/TP	TN	PN	DN	PN/TN
	m3/s	mg/l	mg/l	mg/l	%	mg/l	mg/l	mg/l	%
9/1	301	0.482	0.436	0.046	90.5	4.31	2.33	1.98	54.1
9/2	704	0.418	0.407	0.011	97.4	2.21	0.79	0.42	35.7

表5 AGP (炭素 C) と懸濁態リン (PP) の関係

回帰式 (C, PP: mg/l)			
増水時 (n=30)	①	C (AGP (SS) + N) =	25.7 PP + 4.6 (R=0.83)
(1985 9/1~9/21)	②	C (AGP (SS)) =	23.9 PP + 2.6 (R=0.89)
流量安定時 (n=12)	③	C (AGP (SS) + N) =	93.4 PP + 4.3 (R=0.58)
(1983 4~9)	④	C (AGP (SS)) =	51.3 PP + 2.4 (R=0.86)
	⑤	C (AGP (SS) + N)* =	257 PP - 0.2 (R=0.93)
Microcystis aeruginosa (増殖時)			
(矢木、高村 11) 13)	⑥	C =	350 PP

* : 高圧蒸気滅菌処理後の懸濁物質の持つAGP 3)