

オウミア No.38

琵琶湖研究所ニュース

1991年12月

編集・発行／滋賀県琵琶湖研究所

〒520-0806 大津市打出浜1-10

TEL 077-526-4800

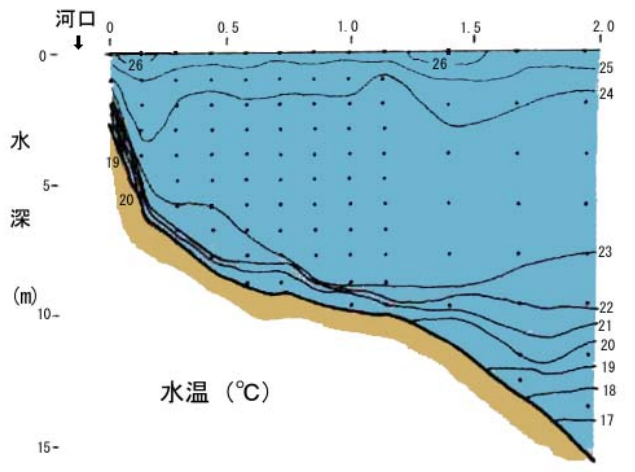
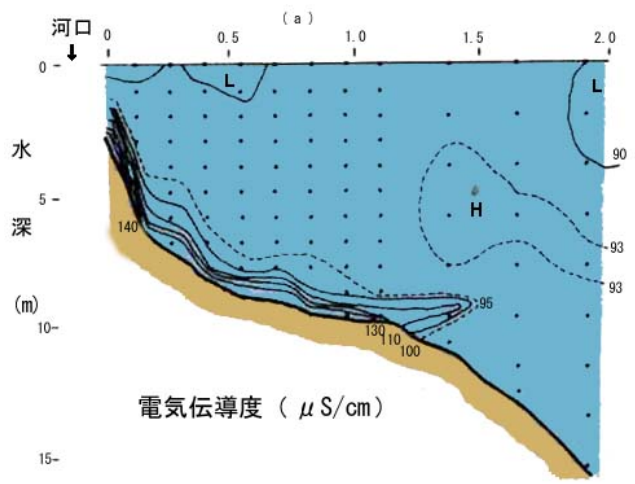
[芹川河口沖での河川水の挙動 - 滋賀大学名誉教授 岡本 巖](#)
[湖沼の富栄養化とリン - 京都大学生態学研究センター 手塚 泰彦](#)
[下水道におけるリンの除去について - \(財\)滋賀県下水道公社 中山 繁](#)
[お知らせ・トピックス](#)
[世界の湖\(33\) - レマン湖\(スイス、フランス\)](#)

びわ湖へ流入した河川水は？



芹川河口付近の空中写真
左手前の湖上に見えるのは観測塔、背後は彦根市街

図1 豪雨直後の
芹川河口沖にお
ける
河川水の分布
(a)電導度、
(b)水温



芹川河口沖での河川水の挙動

—滋賀大学名誉教授 岡本 巖—

びわ湖へ流入する河川の数には約500に達するが、その水質はそれぞれ異なるといわれています。河川の水質が流域の地質・植生・土地利用を反映し、流域の工場・家庭からの排水に影響されるからでしょう。これらの河川水が湖に集まり、混合して湖水となり、湖の水質を形成します。湖へ入る水には、この他に湖面へ降る雨や雪もあれば、湖底から湧出する地下水もありますが、湖の水質を考えると最も重要なのは河川水です。びわ湖が汚濁した主要な理由は、流入河川が汚濁したからです。川がきれいにならなければ、びわ湖はきれいになりようがありません。

「河川水が混合して湖の水質を形成する」というのは、大局的にはそのとおりですが、厳密には正確ではありません。異質の水が相互に接触するわけですから、そこでは化学反応が起こって、例えば、河川水中のマンガンイオンは湖水に入ると、二酸化マンガンに変化することが知られています。また、河川水に含まれていたリン酸など無機の栄養塩類は、湖のプランクトンに取りこまれて有機質に変わってしまいます。このように混合に伴って発生するさまざまな化学的・生物学的過程を経て、水質は変化するので、したがって、河口付近は物質循環の活発な水域として注目されています。

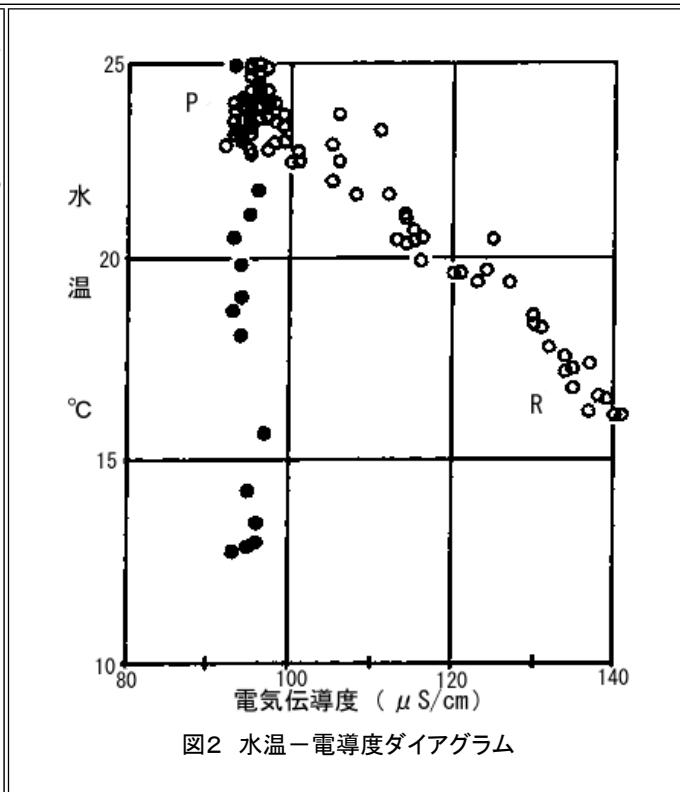
ところで、河川水は湖へ入った後、どんな挙動をするのでしょうか。以下、びわ湖の東岸に流入する芹川(流域面積65km²、表紙写真参照)の例について述べてみましょう。この川は上流に石灰岩地域があるために、水の電気伝導度(略して電導度)が高く、これを測定すれば、容易に川の水のゆくえを追跡することができました。調べてみると、流入後の河川水の挙動は温暖季と寒冷季とで異なることが確かめられました。一般に、温暖季には河川水のほうが高温で、そのため湖面をおおうように広がるのに対して、寒冷季には逆に河川水のほうが低温で、湖水の下へ潜るのです。雨が降ると、とくに大雨のときには真夏でも河川水温は低下して、湖底に潜ります。図1(表紙下段)はその観測例で高電導度・低温の河川水が密度流となって沖へ流れ、河口から1.3kmほどのところで今度は水温躍層のなかへ貫入しているのがわかります。

項目	単位	7月7日	7月14日~17日
湖底からの高さ	m	2.9	0.3
豪雨前の電導度	$\mu S/cm$	90	99
豪雨後の電導度	$\mu S/cm$	88	154

豪雨前: 7月7日
豪雨後: 7月14日~17日

河川水が湖水と遭遇した瞬間から混合は始まりますが、「完全混合」までには時間がかかるようです。例えば、図1の沖合い中層に浮いている、やや電導度の高い水塊はいつ湖へ流入したものかわかりませんが、こうして漂流をつづけています。とくに湖底に潜った河川水では、なかなか混合が進みません。表1はそれを示す例で、河口から400mの定点(水深6.9m)で得られた電導度の連続記録を整理した(二つの期間に分けてそれぞれ平均値を求めた)ものです。1988年7月14・15・16日3日間で計169mmに達する集中豪雨の結果、湖底直上では電導度が著しく増加したのに、湖底から2.9mの中層ではむしろ減少したではありませんか。なお、豪雨のときの河川流量は平水時の数十倍に達し、湖に対する汚濁負荷も格段に大きいから、湖におけるその動態は重要だと思われます。

最後に、「水温—電導度ダイアグラム」を用いて水塊分析を試みます。図2は芹川河口付近の資料によるもので、点群は二つのグループに大別されます。○印はPとRを結ぶ直線上にほぼ分布していますが、P(高温・低電導度)は湖固有の水型であり、R(低温・高電導度)は川固有の水型です。したがって、○印点群は二つの固有水型の混合によって形成された水塊群に対応するものであり、濃淡さまざまな水塊が存在していたことがわかります。●印は河口の沖合い2.5Kmの測点のもので、電導度は低くほぼ一定ですから、ここまでは河川水が到達していなかったことを示しています。ただ水温が広い範囲にわたって分布しているのは、当時の水温成層の存在を反映しているにすぎません。



湖沼の富栄養化とリン

京大大学生態学研究センター 手塚 泰彦

富栄養化の鍵をにぎるリン

火山国であるわが国には多数の湖沼が散在していて、古くから山紫水明の一翼を担ってきました。しかし、これらの湖沼の多くは、高度経済成長の時代に入って、都市排水、工場排水、農業排水などの流入によって透明さを失い、植物プランクトンの大増殖を引き起こすようになりました。人間活動に由来する排水の流入によって、湖水中の栄養塩類(窒素やリン)の濃度が上昇し、植物プランクトンの増殖が促進される現象を人為的富栄養化と呼んでいます。霞ヶ浦(茨城県)や諏訪湖(長野県)は、1970年代以降人為的富栄養化が極端に進んだ湖です。湖沼の富栄養化によって水道水に異臭味がついたり、魚が斃死することがしばしばあります。

それでは、湖沼の富栄養化を引き起こすもっとも重要な要因は何でしょうか。今日では、富栄養化をもたらす元兇は湖外から流入する窒素やリンであることが常識になっておりますが、この常識は古くからあったわけではありません。1960年代の終わり頃、北米では五大湖の富栄養化をめぐる研究者の間に一大論争が巻き起こりました。五大湖のうち、二番目に小さなエリー湖が家庭下水の流入によってもっとも富栄養化したのですが、その原因をめぐって、一部の研究者は家庭排水に含まれる有機物が富栄養化の元兇であると主張し(彼らは湖に流入した有機物は湖水中で分解され、その結果生じた炭酸ガスが植物プランクトンの増殖を促進すると考えたのです)、他の研究者は窒素やリンが元兇であると主張して、なかなか決着が付きませんでした。

この頃、カナダでは水産庁陸水研究所のシンドラー博士が中心になって、富栄養化の機構を明らかにするために、オンタリオ州北西部にある多数の湖(いずれも水の清冽な貧栄養湖)を用いて、有機物(主として蔗糖)、窒素、リンなどを単独、または種々組合わせて湖に投入するという大規模な実験を何年も続けました。その結果、1)有機物は富栄養化に貢献しない(植物プランクトンの増殖に必要な炭酸ガスは大気中から湖水に容易に溶けこむからです)、2)富栄養化を引き起こす唯一の要因はリンであって、リンを供給しなければ、有機物(炭素)や窒素をいくら供給しても富栄養化は起こらない(すべての生物にとって窒素は必須の栄養素であるのに、リンの供給だけで植物プランクトンの大増殖が起こるのは、結合型の窒素がなくても、空気中の窒素ガスを固定するラン藻が発生するからです)、3)リンの供給を止めれば、一度富栄養化した湖でも急速にもとの状態にもどる、ということが明らかになりました。シンドラーらの研究によって、富栄養化にとって決定的な要因はリンであることが立証され、かくして富栄養化論争は一応の決着をみました(シンドラーらは、その後、同じ湖沼域で酸性雨による湖沼の酸性化に関する研究を活発に行っております)。これとは別に、地球上の多数の湖沼で観測されたクロロフィルa濃度(植物プランクトン量の指標)と湖水中の全リンの濃度の間に高い相関のあることが多くの研究者によって報告されています。ここではシンドラーの得た結果をあげておきましょう(図1)。全リン濃度による湖沼の栄養度(富栄養化の程度)の区分は、国によっても、人によっても、多少異なりますが、米国環境保護庁は $10 \mu\text{g}/\ell$ 以下を貧栄養湖、 $10\sim 20$ を中栄養湖、 20 以上を富栄養湖としています。

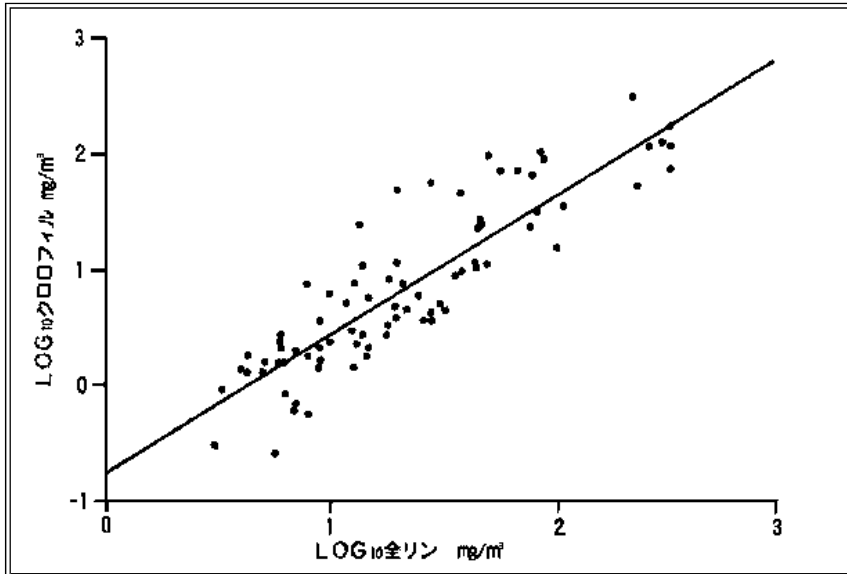


図1 クロロフィル(年平均値)濃度と全リン(年平均値)濃度の関係。相関係数は0.88と大きい。 $\log[\text{クロロフィル}] = 1.213\log[\text{全リン}] - 0.848$ (シンドラー、1978)

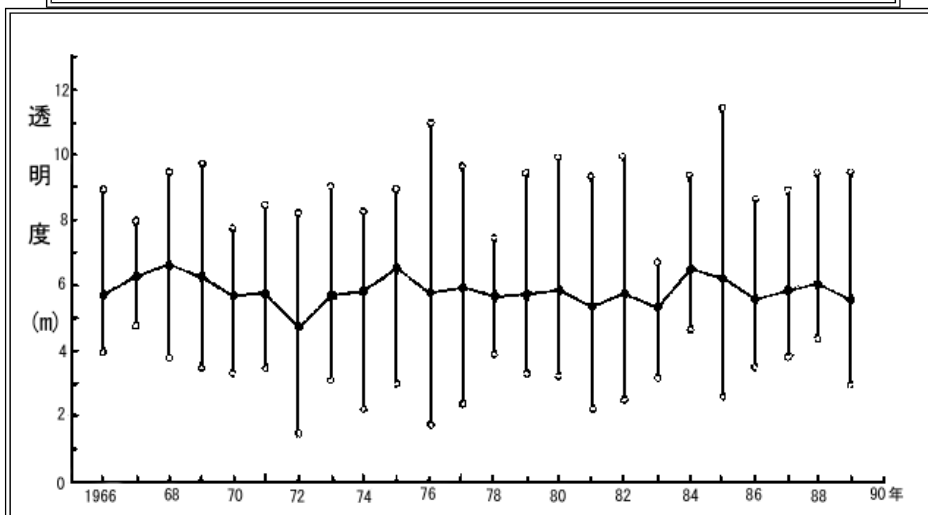


図2 琵琶湖北湖の定期観測地点(近江舞子沖、水深約72m)における透明度の経年変化。測定は月1回の頻度で行なわれているが、各年度における縦線の上端の白丸は当該年度における透明度の最大値(ほとんどは冬季に観測される)、下端の白丸は最小値(多くは春季または秋季に観測される)、中間の黒丸は当該年度の平均値(旧京都大学大津臨湖実験所定期観測資料より)

琵琶湖の富栄養化

近畿圏1,300万人の飲料水源である琵琶湖が富栄養化しつつあるかどうかは、大変気になるところです。今世紀のはじめには、琵琶湖北湖(主湖盆)の透明度は年平均値で10mを超えていたそうですし、現在は5~6mですから、過去90年の間に富栄養化が起こったことは事実です。しかし、透明度の経年変化を調べてみますと、最近の25年間は透明度がほとんど減少していないことがわかります(図2)。琵琶湖は、他の多くの湖と同様に、リンが植物プランクトンの増殖にとって制限栄養素になっている湖です(すなわち、年間を通してみますと、窒素の方がリンに比べて過剰に存在します)。琵琶湖の湖水の全リン濃度については、残念ながら古いデータがないのですが、滋賀県の観測資料によれば、北湖の全リン濃度は1970年以降ほぼ横ばい状態で、年平均値は約 $10\mu\text{g}/\ell$ となっています(南湖は約 $25\mu\text{g}/\ell$)。

ところで、湖沼の富栄養化は湖外から流入してくるリンによって起こるとさきに述べましたが、どの位のリンの量が流入すれば、どの程度の富栄養化が起こるのでしょうか。1970年代以降、富栄養化に関する研究が著しく進んで、最近では、湖外から流入するリンの量から湖水中のリンの濃度を、ある程度、予測できるようになりました。カナダ内水面センターのヴォレンバイダー博士もそのような予測モデルを作った一人で、彼によれば、湖水の全リン濃度は湖外から流入する全リンの量(これを外部負荷量といいます)、湖の平均の深さ、および湖水の滞留時間(湖水の入れかわる速さ)によって決定されるということです。一方、1年間に琵琶湖に流入しているリンの総量を測定することは、琵琶湖には沢山の河川が流入しているので、大変困難なのですが、滋賀県は1985年と1990年における流入量を、それぞれ、550、620トンと推定しています。紙面の都合で詳しい説明は省略しますが、この外部負荷量はヴォレンバイダーの予測モデルに従えば、琵琶湖の急速な富栄養化を引き起こすはずの量です。

それにもかかわらず、琵琶湖の富栄養化がこのところ足踏み状態を続けているのはなぜでしょうか、私は過去10年ばかり、琵琶湖内における窒素とリンの挙動を調べてきましたが、その秘密は琵琶湖のプランクトンがもつリンの浄化能にあるらしいということがわかってきました。これも紙面の都合で詳しくは述べられませんが、琵琶湖では、流入してくるリンを植物プランクトンが吸収して、湖底へ運びこんでしまうために(換言すれば、リンの内部循環がほとんど起こらないために)、現状では、富栄養化が抑えられているものと思われます。

しかし、だからといって安心はできません。湖外から流入するリンの量がどんどん増えると、それだけ植物プランクトンによる有機物の生産が増加し、その結果、深層水が無酸素化する危険性があるからです。深層水が無酸素化すると、底泥中に眠っていたリンが湖水中に溶け出し、富栄養化が急速に進むことは多くの湖で証明されています。このようなことがないように、琵琶湖に流入するリンの量を厳しく抑えることが肝要です。今のうちなら、リンの流入量を削減することによって、琵琶湖を昔のような澄んだ湖にとり戻すことは可能なはずですが。

下水道におけるリンの除去について

—(財)滋賀県下水道公社 中山 繁—

はじめに

琵琶湖の富栄養化によるプランクトンの大量発生は、琵琶湖の水質保全を考えるうえで最も重要な問題です。富栄養化の原因物質には多くのものがありますが、リンはそのなかで最も大きな役割を果たしているといえます。一方、リンは生物の成育のために必須の物質であるため、人間が生活する場から家庭雑排水(洗濯や厨房から)や、し尿に含まれ、下水として排出されます。ところが、リンは通常の二次処理では30%~50%程度しか除去されません。このため、滋賀県では貴重な琵琶湖を富栄養化から守るため、有機物だけでなく、窒素やリンも除去できる高度処理を全国にさががけて採用しました。

下水道事業の概要

いま、滋賀県では県下50市町村の内44市町を対象とする「湖南中部」、「湖西」、「彦根長浜」、「高島」の4処理区からなる琵琶湖流域下水道と、それに接続される関連公共下水道および大津市、近江八幡市の沖島、土山町などの単独公共下水道で下水道整備を進めています。現在、これらのうち、「湖南中部」、「湖西」、「彦根長浜」の3処理区と大津市および近江八幡市の沖島の公共下水道2ヶ所、合計5ヶ所の処理場が稼働しています。これらのすべての処理場は、いずれも高度処理を導入し、窒素、リンの除去を行っています。平成3年4月の下水道普及率は28.2%、処理区域内人口は約35万人となっています。

下水処理の状況

流域下水道で最初に稼働した湖南中部浄化センターが平成2年度に処理した水量は約1,780万 m^3 (1日平均約49,000 m^3)になります。また、処理状況は表1のとおりです。リンに注目すると、流入下水の全リン濃度の平均値は2.95 mg/l です。

それが放流水では0.12 mg/l まで処理され、95.9%という高い除去率が得られています。重量にすると、1年間で約50トンものリンが下水から取り除かれたことになります。

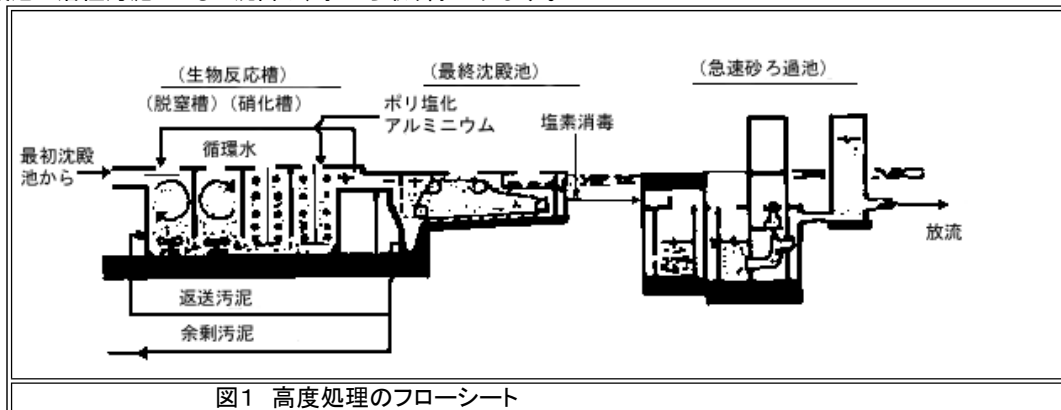
項目	流入水質 mg/l	放流水質 mg/l	除去率 %
BOD	159	2.0	98.7
COD	67.8	4.5	93.4
浮遊物	154	0.4	99.7
全窒素	26.1	6.1	76.6
全リン	2.95	0.12	95.9

リン除去方法

下水中からリンを除去する方法としては、現在のところ、有機物や窒素を除去するための活性汚泥法に金属(鉄やアルミニウム)を含む凝集剤を添加する方法が最も一般的ですが、近年、生物学的にリンを除去する方法も注目を集めてきました。

どちらの方法も、下水中に溶けているリンを前者は物理化学的に、後者は生物学的に水に溶けない形にして余剰汚泥として取り除きます。

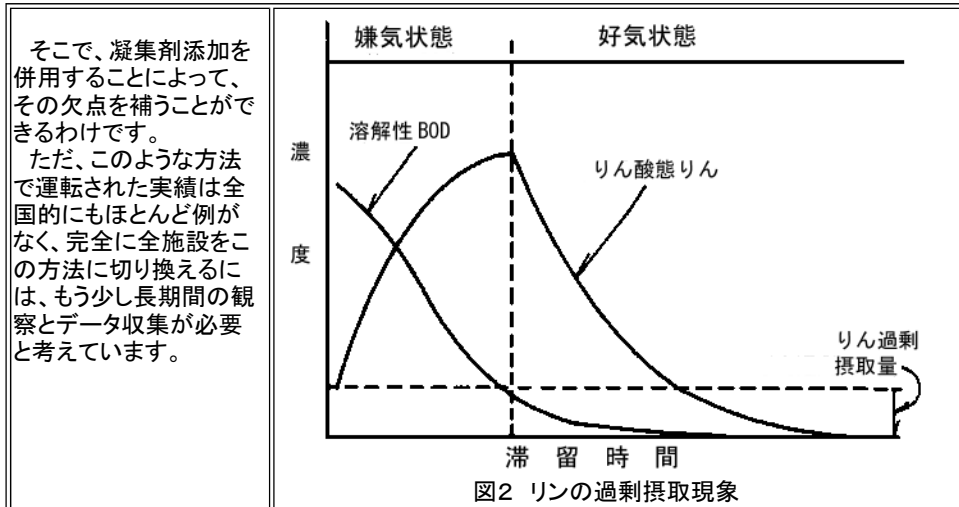
滋賀県が採用しているリン除去の方法は凝集剤添加活性汚泥循環変法に急速砂ろ過法を加えたものです(図1)。添加する凝集剤はポリ塩化アルミニウムという薬品で、浄水場でもよく使用されているものです。このポリ塩化アルミニウムが下水中に溶けているリンと結合して、水に溶けないリンの化合物(リン酸アルミニウム)となり、最終沈殿池で活性汚泥とともに沈降し、水から取り除かれます。



この方法によって、前に述べたように非常に高いリン除去効率を安定的に得ることができますが、現在、この薬品を下水1 m^3 当たり40~50 ml 添加しており(1 ml は100万分の1 m^3)、これに要する薬品費は下水1 m^3 当たり2円程度かかることとなります。今年度の予定処理水量は湖南中部浄化センターだけで約2千万 m^3 ですから、薬品費だけで約4千万円になります。年々増加する下水量に対応して、この薬品費の節減は、下水道の維持管理の効率化を考えるうえで重要な課題となっています。そこで、生物学的リン除去法を併用することにより薬品量の節減ができるのではないかと考え、今年の1月から調査を始めました。実施の一部を用いて実験を行ってきた結果、従来の方法の半分程度の薬品添加量で、従来の方法に劣らない成績をあげることが確認できました。

生物学的リン除去法

リンは活性汚泥微生物にとって、細胞の構成要素として重要な元素です。一般的に、活性汚泥微生物のリン含有量は1.5~2%ですが、特殊な条件下に活性汚泥を置くことによって、これより高濃度なレベルでリンを吸収することが可能になります。すなわち、活性汚泥が嫌気状態(水中に溶存酸素も硝酸性窒素などの結合酸素もほとんど無い状態)で液中にリンを放出し、それに引き続く好気状態では液中のリンを、放出した以上に吸収する現象が確認されています。この現象は、専門的には「活性汚泥微生物によるリンの過剰摂取」と呼ばれています。図2にこの現象の概念図を示します。微生物のこのような働きを利用してリンを除去する方法が「生物学的リン除去法」です。この方法は、薬品を添加せずにリンを相当量除去する事ができる非常に優れた方法です。しかし、生物による処理であるために季節的な変動、天候による処理効率の低下が生じるので、琵琶湖のようにリンについて厳しい排水基準が定められている地域では本法のみによる運転は困難と考えています。

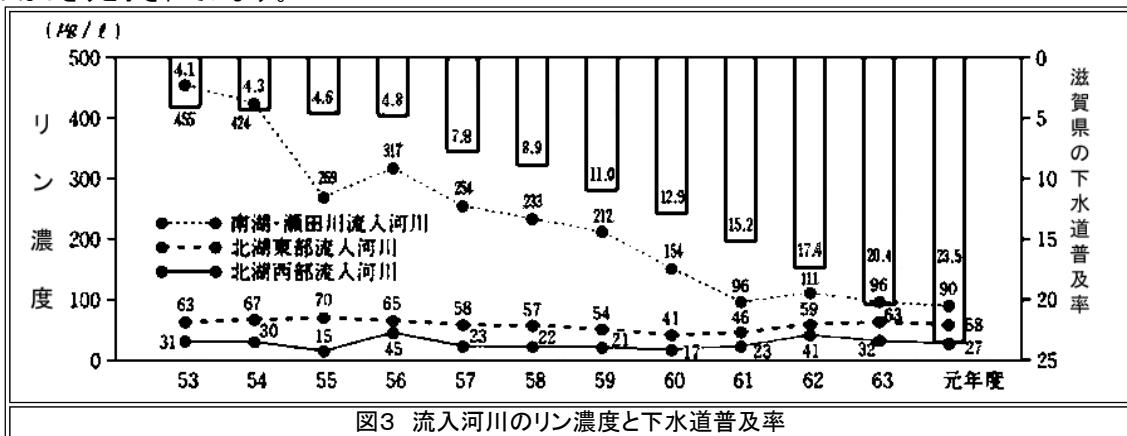


水質改善効果

さて、下水道を整備していくことや、さまざまな水質保全対策によって皆さんの周りの水環境がどのように改善されていったかを見てみましょう。

「ここ数年の琵琶湖の水質状況は、全体的には横ばいの状況ないしは、やや悪化しているとも考えられる」状態であるが(平成元年版、滋賀県環境白書)、下水道整備が進められている琵琶湖南部の南湖や瀬田川に流入する河川の水質には顕著な効果が表われています。

図3は、流入河川のリン濃度と下水道普及率の推移を示したのですが、普及率の上昇とともにリン濃度の低下がはっきりと示されています。



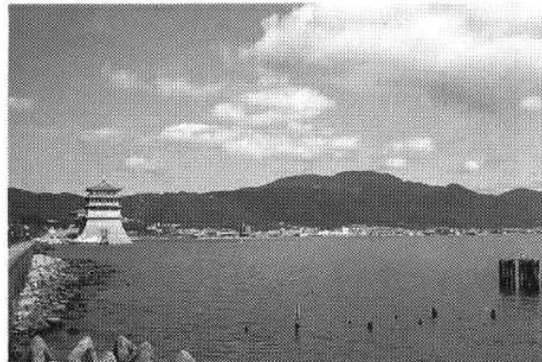
トピックス — 今年の琵琶湖の水草 —

近年、夏場になるとコカナダモの大繁茂で湖岸は一面水草に埋めつくされてきました。しかし、今年はほとんど流れ藻は発生しませんでした。おかげで、湖岸に打ち上げられた水草が腐って悪臭を出したり、船のスクリューにからみついたなどという被害もほとんど聞かれませんでした。いつもなら、研究所前の湖岸にも浮き島のような大量のコカナダモが流れ着くのに、今年は例年になくすっきりした湖岸でした。

水草が少なかった原因として、昨年夏に大量のコカナダモが流れ藻になったのに加え、9月にやってきた台風19号が水草を運び去ってしまった事が考えられています。案外忘れられがちですが、こうした気象条件も水草の発生量を左右する大きな要因であるようです。



昨年
の水
草



今年
の水
草

世界の湖(33) - レマン湖 - (スイス、フランス)

ヨーロッパの代表的な湖としてよく知られたレマン湖は、スイスとフランスにまたがる三日月形をした湖です。北岸はスイス領に、南岸がフランス領に属しています。その位置は北緯46度付近ですから、日本では北海道の稚内よりまだ少し北になります。高度も、海拔372mと琵琶湖よりかなり高い所に位置しています。湖の形成は氷河起源で、その表面積は584.2km²と、琵琶湖よりやや小さいのですが、底が深く、最大水深は309.7m、平均水深が152.7mもあって、そのため、水量が多く、琵琶湖の3倍を少し超えます。



湖の水は西の端から流れ出し、ローヌ川となってフランスの中を長く流れ下ってやがて地中海に注ぎます。湖周辺の気候は緯度が高い割に温和で、冬の寒さもそれほどきびしくなく、夏は快適な保養地になります。北岸のスイス領では、東の端にシヨン城でよく知られた保養地モントローが、まんなかあたりにはローザンヌが、また西の端には大きな国際政治観光都市ジュネーブもあり、南岸のフランス領では、中ほどに鉱泉水で有名なエビアン町があります。湖周辺のなだらかな丘にはブドウ畑が広がり、全体に緑豊か、保養観光の適地となっているため、湖周辺の景観はよく管理保全されており、背後の自然や人工の修景と一体となった美しい風景は、優れた湖沼景観の世界的な代表例の一つに数えられています。

集水域面積は琵琶湖の約2倍半、パリサーアルプスとベルナルアルプスのほぼ半分を含む広い地域から水が集ってこの湖に流入するため、流入水の栄養塩の自然負荷は、工業排水や都市排水による負荷と同様に大きい割合を占めています。集水域の総人口は約95万で、琵琶湖の場合よりやや少なく、1平方キロ当たりの人口密度は119人で琵琶湖の場合の半分以下ですが、その年間窒素負荷およびリン負荷は、ともに、1,300トンを前後しています。リン負荷は、琵琶湖の場合よりむしろ少し多いくらいです。したがって、平均的には、湖水中の全窒素の濃度は琵琶湖の2倍くらい、全リンの濃度は、3倍くらいの値を示し、透明度は、5~6mを上下し、最近では、毎年のようにラン藻オシロリアのブルームも発生し、底層の無酸素化も憂慮されています。

年平均の漁獲量は約350トンと少なく、水産業の比重は低いのですが、約70万人の人々がこの湖の水を飲用水源としており、さらに観光やレクリエーションとしての利用価値がきわめて高く、その水質の悪化は非常に深刻に受けとめられ、住民運動も活発で、法的規制も周辺諸州できびしく行われています(倉田 亮)。



レマン湖とジュネーブの大噴水(150m)