

環境基準超過水域の原因究明

－芦ノ湖について－

The cause of the waters exceed environmental water quality standard

－ Lake Ashi －

井上 充, 長谷川敦子 (調査研究部), 岡 敬一 (環境情報部)

Mitsuru INOUE, Atsuko HASEGAWA (Research Division)
and Keiichi OKA (Environmental Information Division)

キーワード : 芦ノ湖, COD, クロロフィル a, 湖底堆積物, 基準超過

1 はじめに

芦ノ湖は自然環境保全の目的から厳しい環境基準 (AA類型) が適用されており, 生活環境項目のうちCODについては経年的に環境基準 (1mg/L以下) を達成していない¹⁾。1985年度に, 当湖周辺の下水道処理が開始されてから, 下水道普及率は2005年度において, 約77%²⁾ (水洗化人口/処理区域人口) と高くなってきているが, 依然, CODの水質は改善されていない。

そこで, 本研究は, CODの増加要因を明らかにするために, 主要流入河川からの流入COD負荷量及び湖内からの放出COD負荷量を調べ, 湖内でのCODの増加割合を求めるCOD負荷量調査, これまで行ってきた水質調査結果を解析し, 湖内でのCOD増加要因を求める資料解析調査及び湖水中の蛋白質等の水質測定を行う。

2 方法

2.1 COD負荷量調査

主要河川の流入COD負荷量は, 元箱根にある明神川及び湖尻にある姥子川の2河川について, 2007年9月から2008年10月にかけて水質測定, 流速 (コスモ理研製小型流速計3631で測定), 河川幅, 水深等の測定結果を基に算出した。なお, 調査対象にした流入河川等は前もって行った現地の水量, 水質等の予備調査から決定した。

また, 湖内からの放出COD負荷量は, 放出

先の深良用水路について, 2009年5月から2009年12月にかけて深良用水路に放出する直前の湖水のCOD等の測定結果から算出した。なお, 当湖から深良用水路の放出水量は静岡県裾野市役所が管理を行っており, 通常, 4月中旬から10月中旬までは1.5m³/秒で, それ以外は0.5m³/秒で放出するように水門ゲートで調節を行っている。

2.2 資料解析調査

神奈川県が当湖について, 1975～2006年度 (32年間) までに, 毎月1回の頻度で行った湖内4地点 (湖央部, 湖東部, 湖西部, 湖北中央部) の上層 (水面下0.5m) 及び下層 (底上1m) の水質測定結果を基に, 市販の予測ソフト ((株) エスミ製 EXCEL 予測 Ver.2.0 で, 加重移動平均法等による予測を用いる。) 等を用いてCODの経年変化, 予測値等の解析を行った。なお, 水質測定結果の解析にはこれまで神奈川県環境農政部等が業者委託により測定した水質結果をコンピューターに蓄積保存してきたデータを用いた。

2.3 主要成分特定調査

2.3.1 水質測定項目

水質測定は湖内4か所から採水した下層の試料について, COD, 全糖, 蛋白質, リグニン, 単糖 (グルコース等計11種類), 飽和脂肪酸 (パルミチン酸等計12種類) 及び不飽和脂肪酸 (ドコサヘキサエン酸等計8種類) の総計35項目に

ついて行った。

2. 3. 2 水質分析

CODは工場排水試験法 JIS K0102-2004, 全糖はフェノール硫酸法³⁾, 蛋白質はPIERCE製の蛋白質分析キット, リグニンはニトロソ法⁴⁾で測定し, 糖類, 飽和脂肪酸及び不飽和脂肪酸はLC/MS(液体クロマトグラフィ-質量)分析計(Waters製Quattro Premier XE)で測定した。

3 結果

3. 1 CODの経年変化等

湖内全体の年平均CODの経年変化と予測値を図1に示す。

1975～1984年度は調査開始時に, 一時的に高い値を示したが, その後, 1.4～1.8mg/Lの範囲内を増減し, 1985～1988年度はさらに低下して, 1.3～1.6mg/Lの範囲を増減した。しかし, 1988年度以降になると増加に転じ, 2007年度には2.3mg/Lと水環境基準値を約2.3倍超過した。

下水道処理は1985年度に開始され, 1988年度には下水道普及率が約65%²⁾まで上昇したこともあって, 1985～1988年度のCODの低下は下水道普及による効果と考えられる。しかし, その後も下水道の普及率は向上しているにもかかわらず, CODは高くなる傾向を示した。

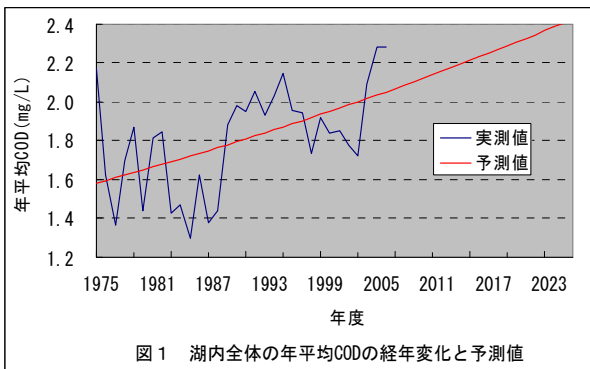


図1 湖内全体の年平均CODの経年変化と予測値

予測値では, 全体的にはっきりした増加傾向が見られ, 調査が開始された1975年度が1.6mg/L, 2007年度が2.3mg/Lと, 約1.4倍の増加を示している。なお, この増加傾向は採水地点4か所とも同様であった。

また, CODの増加要因の一つである生活排水に関するBOD及び大腸菌群数は, 図2及

び図3に示すように, CODとは逆に減少する傾向を示しており, これは下水道普及による効果によるものと想定される。このことから, 湖内のCOD増加は生活排水以外の別な要因が関係しているものと考えられる。

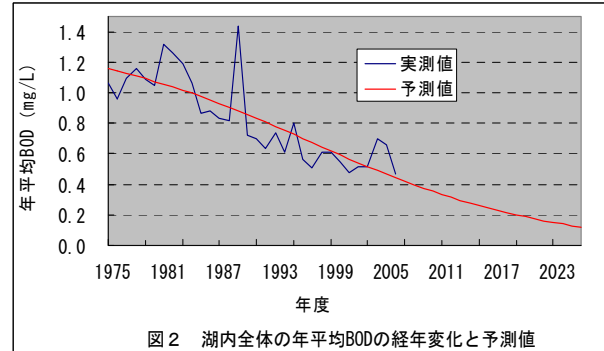


図2 湖内全体の年平均BODの経年変化と予測値

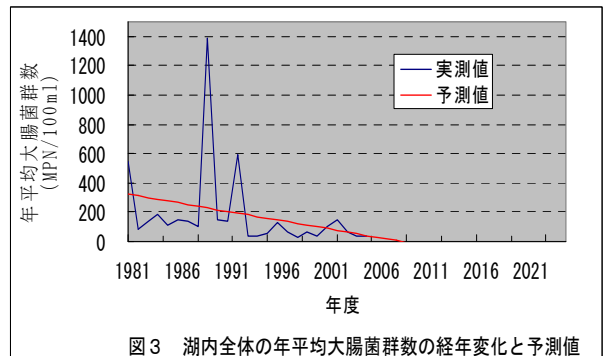


図3 湖内全体の年平均大腸菌群数の経年変化と予測値

3. 2 流入河川等のCOD負荷量

今回調査した主要2河川を併せた流入COD負荷量は0.7～24kg/日(平均3.1kg/日)で, 放流先の深良用水路への放流COD負荷量は約94～330kg/日(平均230kg/日)と流入COD負荷量の約74倍もあることから, CODの増加は主に湖内で生じているものと考えられる。

また, 放流量は流入水量の約21倍もあることから, 文献等⁵⁾でも報告されているとおり, 湖底から地下水が湧水として大量に湧出しているものと考えられる。なお, 深良用水路への放流量については水量の少ない時期の測定であったが, 流速計(アレック電子(株)製AEM1-D)を用いて計2回(11月と12月)実測したところ, 平均0.5m³/秒と, 裾野市役所が管理している放流量と同等であり, 適正な水量管理が行われていると考えられる。

3. 3 湖内でのCOD増加要因の解析

3. 3. 1 水温の経月変化による循環期及び停滞期

水温の経月変化を図4に示す。なお, この経月

変化は 32 年間の上層及び下層それぞれについて月毎に求めた総平均水温である。

1～3 月は上層及び下層の水温が等しいことから、この時期は上層及び下層が混合する循環期で、それ以降の 4 月～12 月は水温躍層が出現し、上層と下層が混合しない停滞期と考えられる。

神奈川県環境農政部が 2007 年度に行った鉛直水温調査や横山等⁶⁾が行った湖水循環等に係る水質調査でも 3～12 月に水温躍層が出現していることを報告している。

このことから、当湖は 1～3 月が混合期で、4～12 月が停滞期であると考えられる。

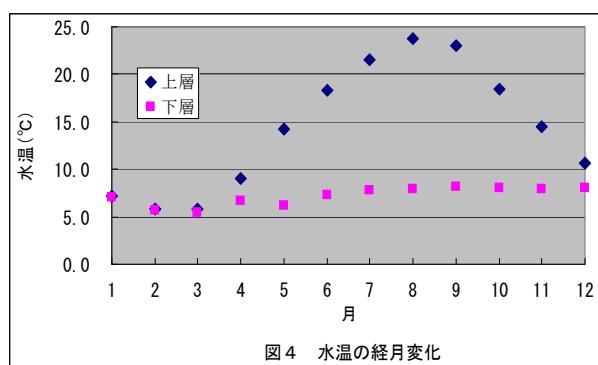


図4 水温の経月変化

3. 3. 2 CODの経月変化

CODの経月変化を図5に示す。

循環期のCODは想定どおり、上層と下層は同等の濃度であった。また、停滞期の下層CODは底上1mで既に約1.6mg/Lと高く、年間を通してほぼ一定していることから、湖底堆積物等から溶出したCOD溶出成分が供給源になっていると考えられる。

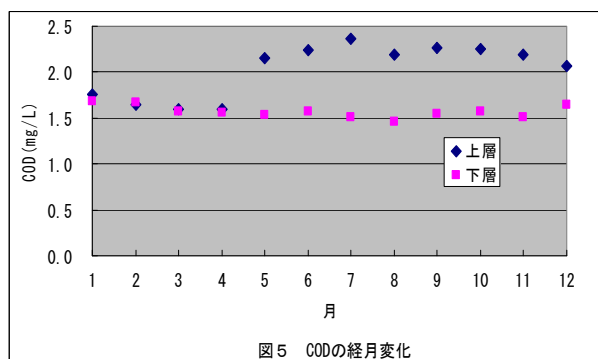


図5 CODの経月変化

また、上層CODから下層CODを差し引いた値(以下、「差COD」という。)を用いて停滞期の上層CODを表現すると、

$$\text{上層COD} = \text{差COD} + \text{下層COD}$$

となり、このことから、上層CODの内訳は差COD

が1.9～36% (平均27%)、下層CODが64～98% (平均73%)と算出され、湖内CODは主に下層CODで占められていると考えられる。

以下に、停滞期における差COD及び下層CODの解析結果をそれぞれ示す。

3. 3. 3 差COD

(1) 差CODと上層クロロフィルaとの関係

差CODと関係が深いと想定される上層クロロフィルaとの関係を図6に示す。

両者の相関関係は、相関係数が $r=0.645$ ($n=849$, 有意水準1%で $0.088^{7)}$ と、比較的高い正相関が確認され、また、寄与率も約42%と比較的高いことから、クロロフィルaを含んだ藻類が差CODの主要成分の一つと考えられる。

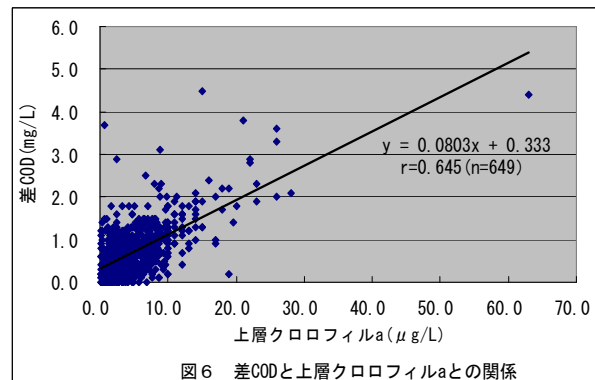


図6 差CODと上層クロロフィルaとの関係

(2) 藻類増殖の制限因子

藻類の増殖に必要な窒素及びリンとの関係を調べるために、上層クロロフィルaと上層の全窒素(T-N)及び上層の全リン(T-P)との関係をそれぞれ図7及び図8に示す。

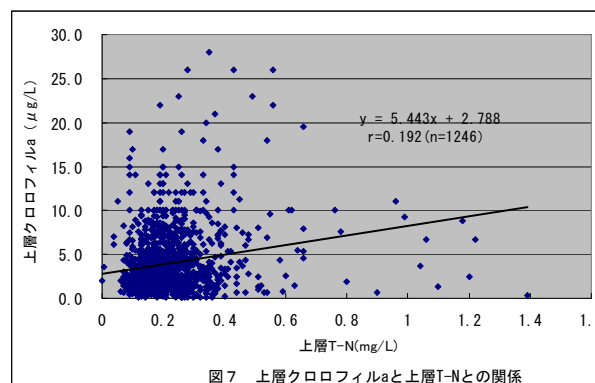


図7 上層クロロフィルaと上層T-Nとの関係

相関関係は上層T-Nでは相関係数が $r=0.192$ ($n=1246$, 有意水準1%で 0.073)、寄与率が約3.7%で、上層T-Pでは相関係数が $r=0.444$

(n=1246, 1%有意水準で 0.073), 寄与率が約 20%と両者共に正相関が確認された。

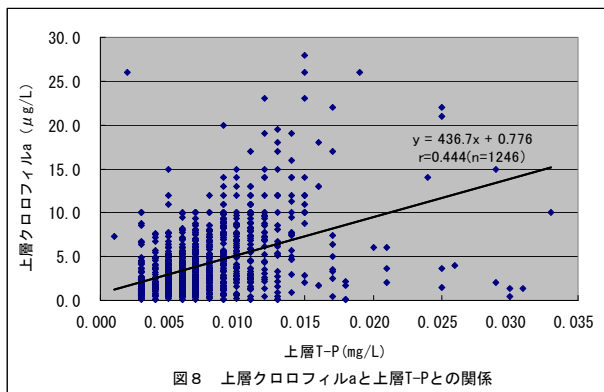


図8 上層クロロフィルaと上層T-Pとの関係

このことから、上層 T-P は比較的高い正相関が得られ、また、寄与率は上層 T-N の約 5.4 倍もあることから、当湖ではリンが藻類増殖の主要な制限因子になっていると考えられる。なお、当湖は、現在、リン制限湖沼となっており、リン規制等の適正な対応が行われている。

リンの供給源については、図9に示す T-P の経月変化から、停滞期の下層 T-P は COD 等と同様に上層 T-P とほぼ同等な値であり、また、年間を通してほぼ一定していることから、湖底堆積物等からの溶出が供給源になっていると考えられる。

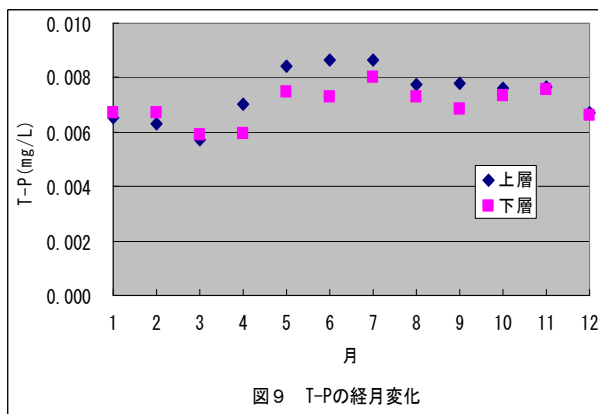


図9 T-Pの経月変化

(3) 経年変化

差 COD の経年変化を図10に示す。

予測値は、全体的に減少傾向を示し、また、調査開始時の 1975 年が 0.8mg/L, 2006 年が 0.6mg/L と減少していることから、差 COD は湖内の COD 増加には、ほとんど寄与していないと考えられる。

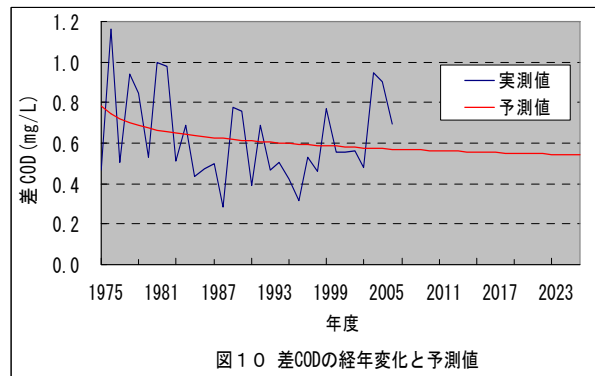


図10 差CODの経年変化と予測値

3. 3. 4 下層 COD

(1) 経年変化

下層 COD の経年変化を図11に示す。

下層 COD は増加傾向を示し、湖内全体の年平均 COD の増加傾向とほぼ類似していた。また、両者の経年変化の相関関係は相関係数が $r=0.559$ ($n=27$, 有意水準 1%で 0.470) と、正相関が確認されたことから、統計的にも同等な増加傾向を示しているものと考えられる。

予測値では調査が開始された 1975 年度が 1.3mg/L, 2006 年度が 1.8mg/L で、約 1.4 倍増加したこととなり、これは湖内全体の年平均 COD の増加量とほぼ同等であった。

このことから、下層 COD は湖内の COD 増加に大きく寄与しているものと考えられる。

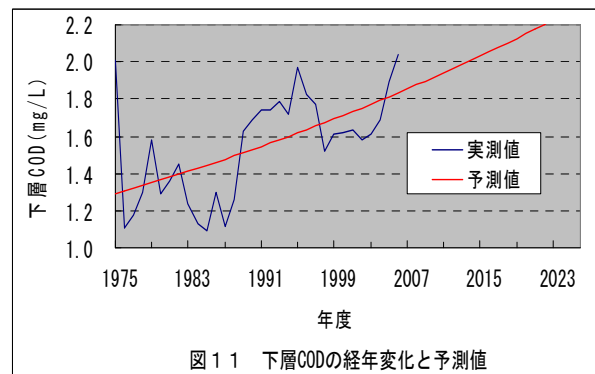


図11 下層CODの経年変化と予測値

(2) 下層 BOD 等の関係

下層 COD と関係が深いと想定される下層 BOD, 下層 SS 等との関係について調べた。

① 下層 BOD との関係

下層 COD と下層 BOD の関係を図12に示す。

両者の相関関係は相関係数が $r=0.000$ ($n=1536$, 有意水準 1%で 0.066) と全く相関を示さなかった。

これは下層が生物分解性の悪い有機成分で

大部分占められているためと考えられる。

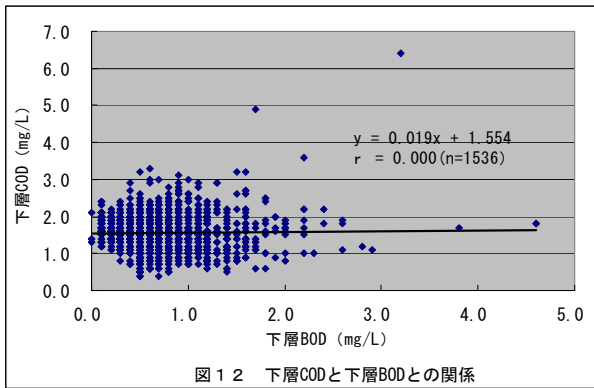


図 1 2 下層CODと下層BODとの関係

そこで、下層の生物分解性を求めるため、図 1 3 に示すように、下層の BOD / COD 比の経年変化を調べた。

当比は調査が開始された 1975～1987 年度までは 0.65～0.80 (平均 0.65) と高く、生物分解性は良好⁸⁾であったが、それ以降は 0.20～0.35 (平均 0.34) と生物分解性が顕著に低下している。

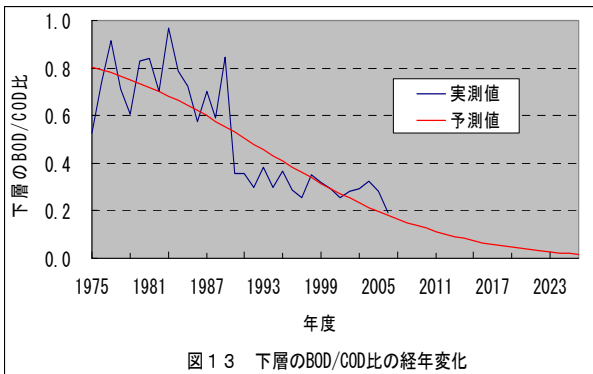


図 1 3 下層のBOD/COD比の経年変化

次に下層 COD 及び下層 BOD を併せた経年変化を図 1 4 に示す。

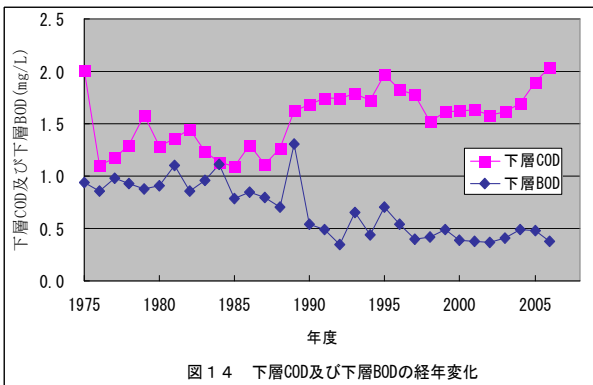


図 1 4 下層COD及び下層BODの経年変化

下層 COD は 1988 年度を境に高くなり、下層 BOD は 1985 年度から低くなる傾向を示し

た。これは、湖底堆積物からの COD 溶出成分等が 1988 年度を境に増加傾向を示すようになったためと考えられる。また、下層 BOD については 1985 年度から下降傾向にあることから、上記でも述べたように、1985 年度から開始された下水道普及による効果と考えられる。

下層 COD への下層の BOD / COD 比の影響を調べるため、下層 COD と当比の関係を図 1 5 に示す。

両者の相関関係は相関係数が $r = -0.493$ ($n=1539$, 有意水準 1% で 0.066) と、負相関が確認され、当比が小さくなるに従って、下層 COD は高くなることが分かった。いわゆる生物分解性が悪くなるに従って、下層 COD は高くなることを示している。

当湖は 1988 年度から当比の低下がはじまり、このことが下層 COD を高くする要因の一つになっていると考えられる。

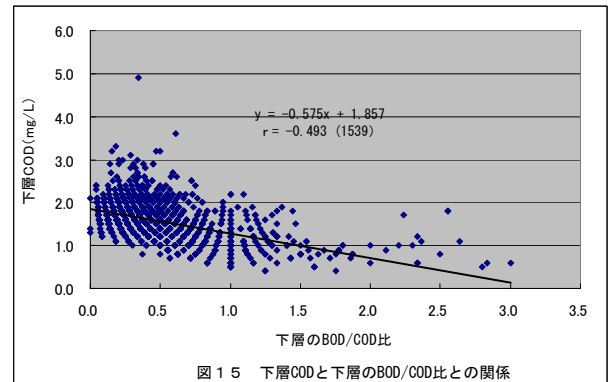


図 1 5 下層CODと下層のBOD/COD比との関係

② 下層SSとの関係

下層 COD と下層 SS との関係を図 1 6 に示す。

両者の相関関係は相関係数が $r=0.170$ ($n=1536$, 有意水準 1% で 0.066) と、正相関が確認されたが、寄与率は約 2.9% と低かった。

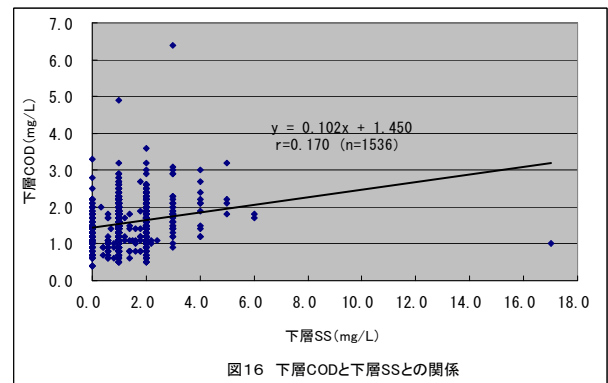


図 16 下層CODと下層SSとの関係

下層 SS の主要成分は上層から沈降する藻類等と考えられるが、寄与率が低かったことから、下層 COD への寄与は少ないと考えられる。

また、SS 分を除去した下層 COD の減少割合の結果でも、7.0~19% (平均 13%) と低く、下層 COD への下層 SS の寄与は低いと考えられる。

③ 水深との関係

下層 COD と水深との関係を図 17 に示す。

両者の相関関係は相関係数が $r = -0.241$ ($n=1152$, 有意水準 1%で 0.076) と、負相関が確認され、水深が深くなるに従って、下層 COD は低くなる傾向を示した。

平均水深は湖北中央部 (約 25m) < 湖東部 (約 26m) < 湖中央部 (約 36m) < 湖西部 (約 39m) の順で深くなっており、水深の浅い湖北中央部及び湖東部では下層 COD が高くなっている。

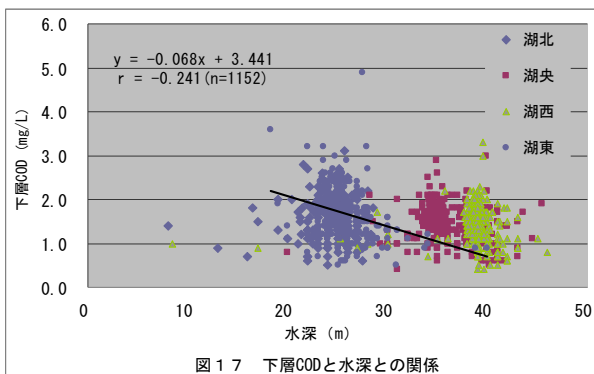


図 17 下層CODと水深との関係

この要因としては、水深の浅い地点は溶出 COD の源となる湖底堆積物が溜まりやすい環境にあると想定されることから、湖底堆積物の由来のひとつである下層 SS と水深との関係について調べたところ、図 18 に示すように両者の相関関係は相関係数が $r = -0.135$ ($n=1152$, 有意水準 1%で 0.075) と負相関が確認された。

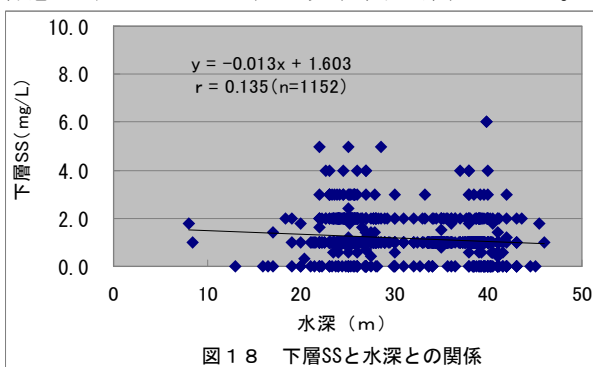


図 18 下層SSと水深との関係

このことから、水深の浅い湖北中央部及び湖東部では下層 SS が高くなる傾向にあることから、湖底堆積物が溜まりやすい環境にあると考えられる。

④ 下層 DO (溶存酸素) との関係

下層 DO の経月変化を図 19 に示す。

下層 DO は停滞期に入ると約 10mg/L あった DO が月の経過に伴って直線的に減少し、11 月頃には約 2.0mg/L まで低下した。

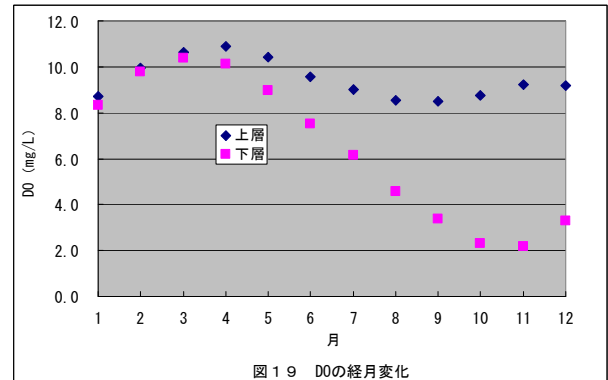


図 19 DOの経月変化

下層 DO の経年変化は図 20 に示すように、年々、減少傾向を示し、下層での DO 低下が徐々に進行していると考えられる。

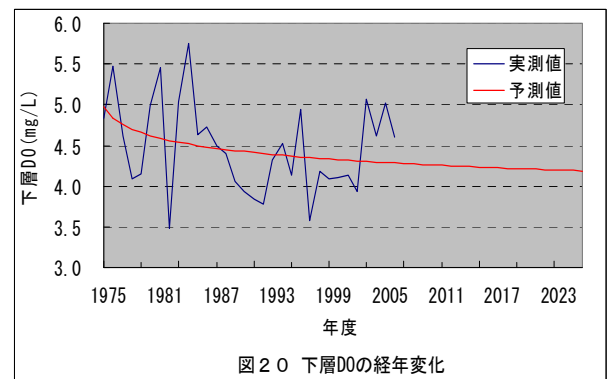


図 20 下層DOの経年変化

そこで、下層 DO の低下による下層 COD の影響を調べるため、下層 COD と下層 DO の経年変化を基に両者の相関関係を調べたところ、図 21 に示すように両者の相関係数は $r = -0.348$ ($n=32$, 有意水準 5%で 0.341, 1%で 0.435) と、有意水準 5%の信頼であるが、下層 DO の低下に伴って下層 COD が高くなることが考えられる。

このことから、下層 DO の低下も下層 COD の増加要因の一つになっていると考えられる。

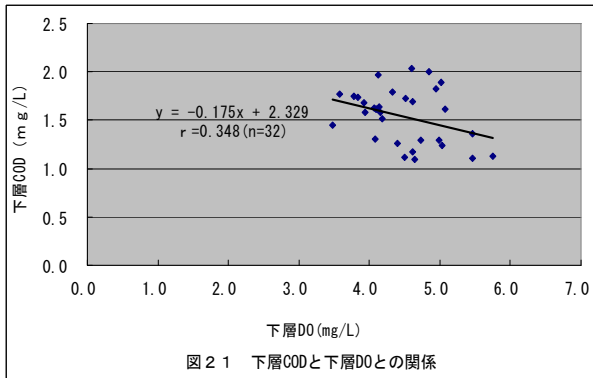


図 2-1 下層CODと下層DOとの関係

下層 DO の低下要因について調べるために、停滞期の下層 DO と下層 BOD との関係を図 2-2 に示す。

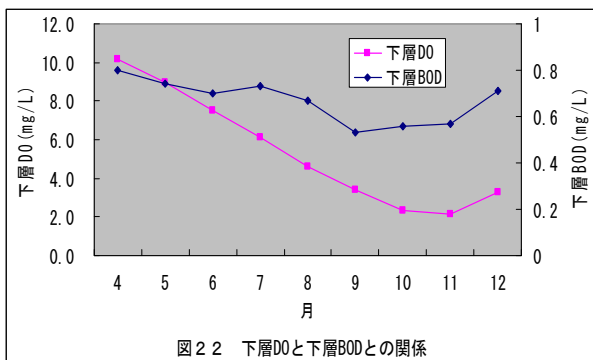


図 2-2 下層DOと下層BODとの関係

両者ともほぼ同じ減少傾向を示し、両者の相関関係を調べたところ、相関係数は $r=0.845$ ($n=9$, 有意水準 1%で 0.743), と高い正相関が確認されたことから、下層 DO は生物分解によって減少しているものと考えられる。

しかし、下層 BOD は下層 DO の約 1/8 と少ないため、DO 消費に相当する BOD 成分の供給源について、以下に検討を行った。

下層 SS の主な由来は、上層から降下する沈降 SS 等と想定されるため、下層 SS と下層 BOD の関係について調べ、その結果を図 2-3 に示す。

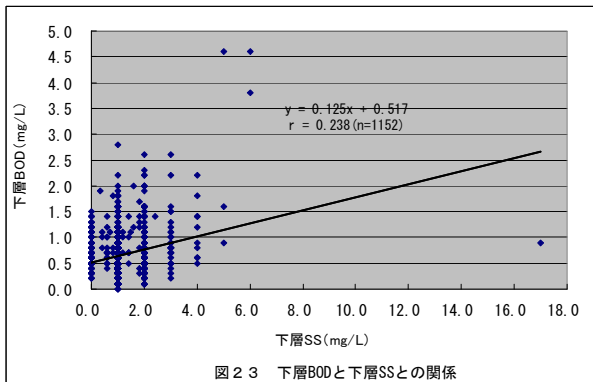


図 2-3 下層BODと下層SSとの関係

両者の相関関係は相関係数が $r=0.238$ ($n=1152$, 有意水準 1%で 0.076) と、正相関が確認されたが、寄与率は約 5.7%と低かった。

このことから、沈降 SS 中の BOD 成分は少ないが、沈降 SS は連続的に降下してくるため、下層 DO は連続的な生物分解によって十分消費されると考えられる。また、下層では湖底堆積物等の生物分解による DO 消費も加わるため、通常であれば、無酸素化が生じることが想定されるが、多量の湧水からの DO 供給によって、無酸素化が阻止されているものと考えられる。

⑤ 下層の有機態窒素との関係

有機態窒素 (Org-N) の主な由来としては、生活排水の流入の減少から、藻類、魚類等の動植物に含まれている蛋白質等が想定されるため、下層 COD と下層 Org-N の関係について調べた。

両者の相関関係は相関係数が $r=0.000$ ($n=923$, 有意水準 1%で 0.084) と、相関は全く確認されなかったが、下層の Org-N/ T-N (全窒素) 比で調べたところ、両者の相関係数は $r=0.332$ ($n=923$, 有意水準 1%で 0.084) と、正相関が確認された。

これは Org-N が時間の経過に伴ってアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の順に分解していくことから、T-N とは密接な関係があるためと考えられる。

下層 COD と下層の Org-N/ T-N 比の関係を経年変化で調べたところ、図 2-4 に示すように両者の変動傾向はほぼ類似しており、さらに両者の相関関係を調べたところ、相関係数は $r=0.630$ ($n=25$, 有意水準 1% 0.486) と比較

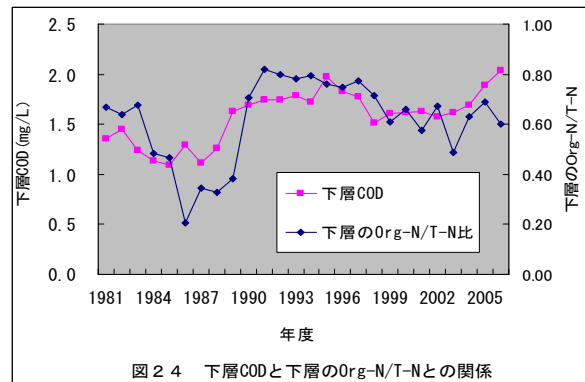


図 2-4 下層CODと下層のOrg-N/T-Nとの関係

的高い正相関が得られた。寄与率も約 40% と同じく高い値が得られたことから、下層 COD の主要成分の一つとして蛋白質が考えられる。

また、下層の Org-N / T-N 比が 0~0.98 (平均 : 0.53) と、藻類の活動が活発に行われている丹沢湖の平均 0.13⁹⁾ と比べると約 4 倍と異常に高いことから、藻類以外の別な要因が強く影響しているものと考えられる。

(3) 下層 COD の重回帰分析

下層 COD と相関があった水深、下層 DO、下層 SS 及び下層の Org-N/T-N について、重回帰分析を行ったところ、寄与率、定数項等の結果から、寄与率が高く、定数項が小さい以下の回帰式が最適と考えられた。

下層 COD(mg/L)=1.015×下層の Org-N/T-N 比 +0.952
(寄与率 : 約 40%)

このことから、湖底堆積物等からの主な COD 溶出成分は、Org-N の由来となる蛋白質と想定されたが、蛋白質の寄与率が異常に高いことから、湖底堆積物からの溶出だけでなく、魚類等の水生動物の死骸等から直接溶出している可能性もあると考えられる。

3. 3. 5 下層湖水の水質調査

下層 COD の主要成分の特定を行うため、停滞期における下層について LC/MS 法を用いた水質調査を行った。

(1) 全糖及び単糖

植物由来のセルロース、グルコース等の糖類を確認するために、全糖分析を行ったところ、 $<0.5\sim 1.7\text{mg/L}$ で、採水した試料数の 9 割程度と多く定量されたが、グルコース等が定量されないことやリグニンの定量した試料数が比較的少ないことから、セルロース等以外の物質が定量された可能性もあると考えられる。

(2) リグニン

植物由来のリグニンを確認するために、リグニンの測定を行ったところ、 $<0.5\sim 0.9\text{mg/L}$ で、採水した試料数の 4 割程度定量された。

(3) 蛋白質

動植物由来の蛋白質を確認するために、簡易法による蛋白質の分析を行ったところ、 $<0.5\sim 3.5\text{mg/L}$ で、採水した試料数の 9 割程度と多く

定量されたことから、蛋白質を注視して行く必要があると考えられる。

(4) 飽和脂肪酸

水生動物からの由来を想定するパルミチン酸等の飽和脂肪酸等について LC/MS 法を用いて水質測定を行ったが、全て $<0.07\text{mg/L}$ であった。

(5) 不飽和脂肪酸

水生動物からの由来を想定するドコサヘキサエン酸等の不飽和脂肪酸について、同じく LC/MS 法を用いて水質測定を行ったが、飽和脂肪酸と同様に全て $<0.07\text{mg/L}$ であった。

以上のことから、主要成分の特定はできなかったが、蛋白質が比較的多く定量されたことから、今後は精度の高い分析法による蛋白質の確認、蛋白質の由来等の調査が必要と考えられる。

3. 3. 6 底泥からの COD 溶出量の算出

単位面積あたりの湖底堆積物等からの COD 溶出量を以下に示す手順で算出した。

(1) 降雨による当湖への流入水量

流入水量は、過去 10 年間の当湖周辺の年平均降水量¹⁰⁾と当湖の集水域⁵⁾を基に、以下の式から、 $100\times 10^6\text{m}^3/\text{年}$ と算出した。

3.695m (年平均降水量) $\times 27.38\times 10^6\text{km}$ (集水域) $= 1.0\times 10^8\text{m}^3/\text{年}$

(2) 湧水量

湧水量は、降雨の約 58%⁵⁾ が地下水へ流入することから、以下の式から $5.8\times 10^7\text{m}^3/\text{年}$ と算出した。

$1.0\times 10^8\text{m}^3/\text{年}$ (流入量) $\times 0.58 = 5.8\times 10^7\text{m}^3/\text{年}$

(3) 下層 COD 濃度

停滞期における下層 COD は、平均 1.6mg/L で、そのうち、約 13% は上層等から沈降してきた沈降 SS の COD と考えられることから、溶出 COD は下層 COD から SS を除いた濃度となり、以下の式から、 1.4mg/L と算出した。

1.6mg/L (下層 COD) $\times (1-0.13) = \text{約 } 1.4\text{mg/L}$

(4) 湖底堆積物等からの 1 日あたりの COD 溶出量

1 日あたりの COD 溶出量は、下層 COD 濃度と湧水量から求め、以下の式から $220\text{kg}/\text{日}$ と算出した。

$1.4\text{g}/\text{m}^3$ (溶出 COD) $\times 5.8\times 10^7\text{m}^3/\text{年}$ (湧水量) $\div 365\text{日} = 220\text{kg}/\text{日}$

(5) 単位面積あたりの 1 日の COD 溶出量

単位面積あたりの 1 日の COD 溶出量は、芦ノ湖の表面積約 7.1km^2 ¹⁾ と 1 日あたりの COD

溶出量を基に、以下の式から、 $0.031\text{g/m}^2\cdot\text{日}$ と算出した。

$$220 \times 1000\text{g/日 (COD 溶出量)} \div 7.1 \times 1000 \times 1000 \text{ (表面積)} = 0.031\text{g/m}^2\cdot\text{日}$$

以上のことから、芦ノ湖の湖底堆積物等からの COD 溶出量は、現在、約 $31\text{mg/m}^2\cdot\text{日}$ と考えられる。

この値は 1985 年度に実際に測定された当湖の湖底堆積物からの COD 溶出量約 $43\text{mg/m}^2\cdot\text{日}$ ¹¹⁾と比較すると、若干低い値となっているが、これは下水道普及による影響が多少でているものと考えられる。また、富栄養化が進行している相模湖の COD 溶出量約 $17\text{mg/m}^2\cdot\text{日}$ ¹²⁾と比べて、約 1.8 倍高かったことから、藻類以外の別な要因によって、COD 溶出量を高くしている可能性があると考えられる。

4 まとめ

芦ノ湖の COD の増加要因を明らかにするために、主要流入河川及び放流先の深良用水路への流入及び放流の各 COD 負荷量調査、これまで神奈川県が行ってきた水質調査結果を基にした資料解析調査及び LC/MS 等を用いて COD 成分を特定する主要成分調査をそれぞれ行い、その概要を以下に示す。

1) 湖内全体の年平均 COD は 1975～2006 年度までの 32 年間にわたる水質調査から、年々、増加傾向にあった。

2) 湖内の COD 増加は放流先の深良用水路への放流 COD 負荷量が河川からの湖内への流入 COD 負荷量より約 74 倍と圧倒的に多いことから、湖内で生じているものと考えられる。

3) 上層（水面下 0.5m）COD は上層 COD と下層（底上 1 m）COD を差し引いた差 COD と下層 COD を併せた COD と想定され、上層 COD の内訳を算出したところ、湖水が循環しない停滞期では差 COD が約 27%、下層 COD が約 73% となり、下層 COD の占める割合が高かった。

4) 差 COD の主要成分は、差 COD とクロロフィル a との相関関係から、藻類を含むクロロフィル a が差 COD の約 42% を占めていたことから、藻類が差 COD の主要成分の一つと考えられる。

5) 差 COD は将来にわたって増加傾向が見られないことから、湖内の COD 増加には寄与していないと考えられる。

6) クロロフィル a と T-P の相関関係から、藻類増殖の制限因子はリンと想定され、また、T-P は停滞期において、下層で既に高く、年間を通して一定していることから、湖底堆積物等からの溶出が供給源になっていると考えられる。

7) 下層 COD は湖内全体の平均 COD の増加傾向と統計的にはほぼ類似し、また、増加割合もほぼ同等であることから、湖内の COD 増加に大きく寄与していると考えられる。

8) 下層 COD は、T-P と同様に停滞期において下層で既に約 1.6mg/L と高く、年間を通してほぼ一定しており、また、下水道普及率の向上で生活排水に係る BOD、大腸菌群数等の水質項目が減少傾向を示している中で、下層 COD だけが増加傾向を示していることから、供給源としては湖底堆積物等からの COD 溶出成分が考えられる。

9) 湖底堆積物等からの COD 溶出量は、約 $31\text{mg-COD/m}^2\cdot\text{日}$ と算出され、過去に行われた実測値より若干低めであったが、これは下水道普及による影響が多少でているものと考えられる。

10) 下層では、DO 及び生物分解性を評価する下層の BOD/COD 比が年々、低下傾向にあり、これらは下層 COD を高くする要因の一つになっている。また、水深が浅い湖北中央部及び湖東部では、COD が高くなる傾向を示しているが、これらは全て湖底堆積物等が関与していると考えられる。

11) 停滞期の下層 DO の低下は下層 DO と下層 BOD の経年変化の相関関係から、生物分解による DO 消費と想定され、また、生物分解に利用される BOD 成分は下層 SS と下層 BOD の相関関係から下層 SS に含まれる BOD 成分と考えられる。

12) 下層 SS に含まれる BOD 成分は約 10% 以下と少ないが、上層から連続的に降下してくる沈降 SS 等が生物分解によって DO を消費しているものと考えられる。

13) 下層での無酸素化は、下層 SS による DO 消費以外に湖底堆積物等による DO 消費も加わって、促進することが想定されるが、多量な湧水からの DO 供給によって、阻止されているものと考えられる。

14) 湖底堆積物の主な源である下層 SS は、生物分解性が良好でないことから、湖底堆積物

からの溶出成分も生物分解性が悪いことが想定され、このことが、下層の BOD/COD 比を低下させている要因になっていると考えられる。

1 5) 蛋白質の主な由来である Org-N は下層の Org-N/T-N 比が 0.53 と、藻類の活動が盛んな丹沢湖の約 4 倍もあることから、藻類以外の動植物が関与しているものと考えられる。

1 6) 下層 COD の主要成分調査でも、蛋白質が比較的多く定量されたことから、今後は精度の高い分析法での確認とその由来を調べる必要があると考えられる。

1 7) 下層 COD と相関が認められた水深、下層 DO、下層 SS 及び Org-N/T-N 比の重回帰分析を行ったところ、寄与率が高く、定数項が小さい以下に示す回帰式が最適と考えられた。

$$\text{下層 COD(mg/L)}=1.015 \times \text{Org-N/T-N}+0.952$$

(寄与率=40%)

1 8) 湖底堆積物等からの主な COD 溶出成分は、Org-N の由来とする蛋白質と想定されたが、蛋白質の寄与率が異常に高いことから、湖底堆積物だけでなく、魚類等の水生動物の死骸等から直接溶出している可能性もあると考えられる。

以上のことから、芦ノ湖の COD 増加は、湖底堆積等から溶出成分による可能性が高いと想定されることから、今後は蛋白質の高度な定量とその由来、湖底堆積物、魚類等の水生動物の死骸等の量的推移等を監視して行く必要があると考えられる。

参考文献

- 1)神奈川県：神奈川県公共用水域及び地下水の水質測定結果(18年度版),17,環境農政部(2008)
- 2)箱根町:統計はこね,54 他,環境整備部(2007 他)
http://www.town.hakone.kanagawa.jp/hakone_j/ka/kikaku/5sougoukeikaku/index.html
- 3)日本生物工学会編:生物工学実験書(改訂版),21-22,培風館(2002)
- 4)日本分析化学会北海道支部編:水の分析(5版),374-377,化学同人(2005)
- 5)箱根水質調査団:箱根カルデラ河川流出水の溶存成分に対する温泉の影響について,湿地研報告,6(2),87-116(1975)
- 6)横山尚秀,柳内志保子:箱根芦ノ湖の水温変化

- と湖水循環,湿地研報告,18(2),97-104(1987)
- 7)奥村士郎:品質管理入門テキスト(改訂版),197,日本規格協会(2007)
- 8)園欣弥:有機物質の生物学的分解性,PPM,12,39-44,(1974)
- 9)井上充,長谷川敦子,岡敬一:神奈川県環境科学センター研究報告,第32号,70-77(2009)
- 10)気象庁:気象統計情報,箱根(1999-2008)
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 11)神奈川県:昭和60年度芦ノ湖窒素・磷環境基準設定調査,47,新日本気象海洋(株)(1986)
- 12)神奈川県:相模湖富栄養化防止対策調査結果報告書,101,環境部(1982)