公共用水域水質調査

田沢湖の COD 及び全窒素濃度の変動要因に関する一考察

生魚利治

秋田県が継続して行っている調査データをもとに，田沢湖の各水質項目について比較，検討を行った。その結果，田沢湖の COD 上昇の要因には Chl-a の値に反映される植物プランクトン量が関与し，その増殖を制限する要因としては，pH のみではなくリンも関与することが推測された。また，田沢湖の T-N の経年変化が増加傾向を示す要因としては，降水中の NO_3^-の経年的な増加が影響を及ぼしていると推測された。

1. はじめに

秋田県の仙北市に位置する田沢湖（図 1，2）は，1940 年に国策であった電源開発と農地開拓に伴う利水を目的として，強酸性の玉川源泉（大噴）が流入する玉川河川水を湖水による希釈効果を期待し導水したため酸性化した。1978 年に当時の玉川毒水対策技術検討委員会の知事答申

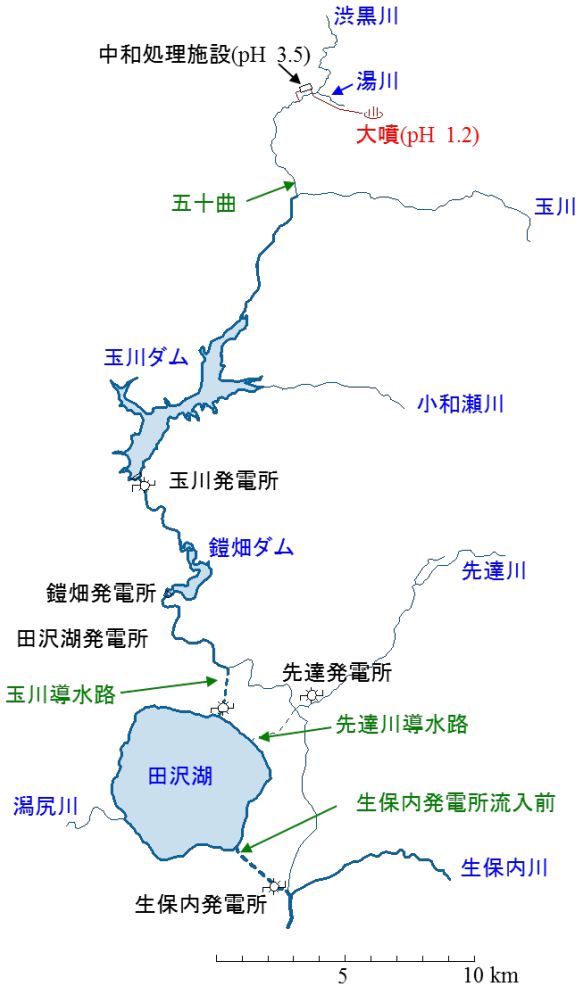

図 1　玉川上流域及び田沢湖

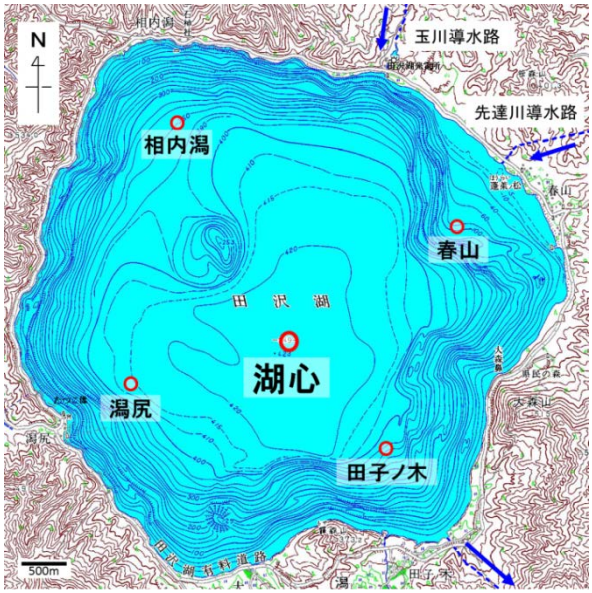

図 2　田沢湖調査地点図

において，田沢湖の pH を将来的に 6.0 に改善することが要望されている [1]。1989 年 10 月に，恒久的な対策として玉川上流部に玉川酸性水中和処理施設（中和処理施設）が完成し稼働して以降，田沢湖表層水の pH（図 3）は一時的に回復傾向を示した。しかし，2002 年以降は源泉水の酸度上昇に代表される水質の変化の影響 [2] を受けて，2012 年時点で pH は 5.0 に留まっている。また，pH が回復傾向を示した同時期に化学的酸素要求量（COD）（図 4）も増加傾向を示し，2000 年には 75 %値が 1.1 mg/L と環境基準値 1.0 mg/L を超過した。このように pH の回復に伴い COD の変動が懸念 [3] されることから，pH 及び COD の変動を考慮し，その他の項目の変動との関係性を明らかにすることは，今後の水質改善施策に重要である。本報では，秋田県が実施している田沢湖の公共用水域水質調査の

データの中から，特に pH，COD，クロロフィル-a（Chl-a），全窒素濃度（T-N）及び全リン濃度（T-P）の変動と関係性に注目し報告する。

2. 方法

秋田県は,公共用水域水質測定計画に基づき,1972 年から田沢湖の環境調査を実施している。年度によって地点，回数及び項目に多少の変更はあるが，湖心，相内潟，春山，潟尻，田子ノ木の 5 地点（図 2）において 4 月から 11 月の月 1 回，合計で年 8 回の調査を実施している。この調査結果のうち，1972 年から 2012 年の湖心表層水の pH，COD，Chl-a，T-N，T-P の 5 項目の経年変化をまとめた。各項目における報告下限値未満の値は，その年の報告下限値の値としてグラフに示した。平均値については，報告下限値未満の値が存在する年度については算出しないこととした。

なお，玉川導水路の T-N については秋田県が行っている玉川酸性水影響調査の値を使用した。玉川ダムの T-P は，国土交通省のダム諸量データベース[4]の値を使用し，N.D 及び<0.003 mg/L の値は 0 mg/L としてグラフに示した。また，降水中の硝酸態イオン濃度（NO_3^-）及びアンモニアイオン濃度（NH_4^+）の値は，秋田県環境白書に記載されている大館，秋田，横手の平均値を算出し使用した。

3. 結果と考察

3.1 COD の変動要因

pH（図 3）は， 1990 年から 2002 年まで改善傾向にあった。特に 1995 年，1998 年，2000 年および 2001 年の最大値は 6.0 以上となり，一時的ではあるものの水質改善目標値である 6.0 を越えた。しかし, 2003 年から低下傾向を示し，現在まで年平均値が 5.2 付近で推移している。COD（図 4）は，1976 年から 1989 年まで，値の範囲は報告下限値未満（<0.5 mg/L）～0.8 mg/L であった。1989 年以降は，最小値はいずれの年も<0.5 mg/L であったが，最大値では 1990 年から 2002 年の間に上昇傾向が見られ，1997 年及び 2000 年にそれぞれ 1.1 mg/L, 1.2 mg/L と環境基準値の 1.0 mg/L を超過し，1998 年及び 2001 年にも 1.0 mg/L の値を示した。2003 年以降は，<0.5～0.6 mg/L の範囲となり 1989 年以前とほぼ同等の値を示した。

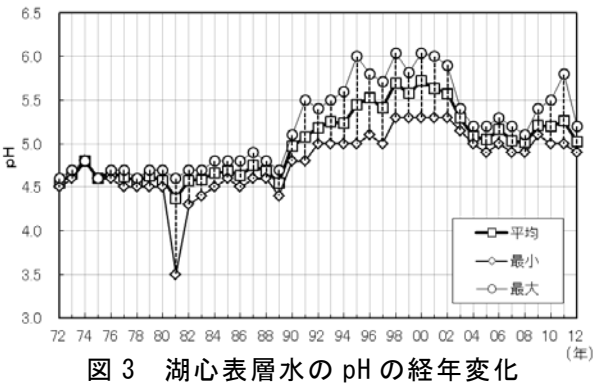

図 3　湖心表層水の pH の経年変化

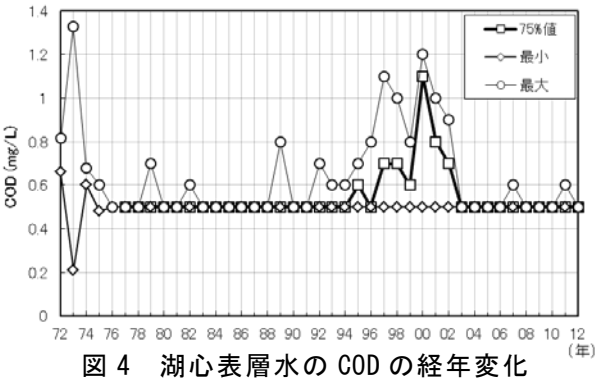

図 4　湖心表層水の COD の経年変化

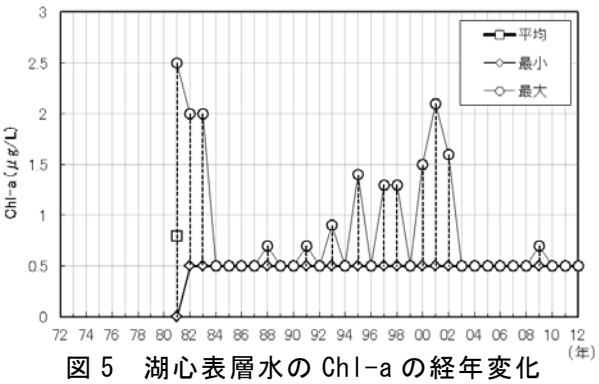

図 5　湖心表層水の Chl-a の経年変化

pH 及び COD の変動は，1989 年 10 月からの中和処理施設の稼働により 1990 年から 2002 年にかけて pH が上昇すると COD も増加し, また, 2002 年以降に大噴の水質が変化すると pH が低下し COD も減少するように，相関性が見られる。有機物量を反映する COD の変動には植物プランクトン量の指標となる Chl-a の変動も関与すると考えられることから，これらの関係性に注目した。

Chl-a（図 5）は, 最小値は 1981 年では 0 μg/L, 1982 年以降は報告下限値未満（<0.5 μg/L）であった。1981 年から 1983 年の最大値は 2.0 μg/L 以上の値を示した。1984 年以降の最大値では pH及び COD と同様の傾向が見られた。1984 年か

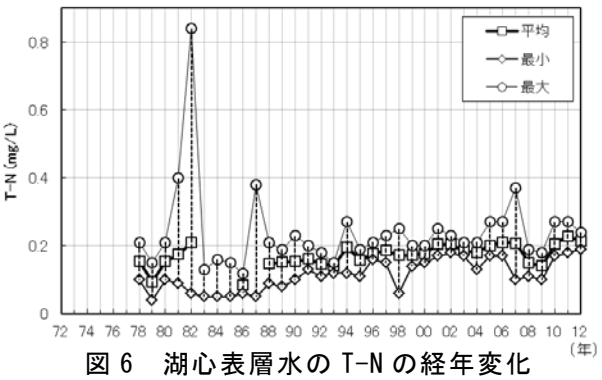

図 6　湖心表層水の T-N の経年変化

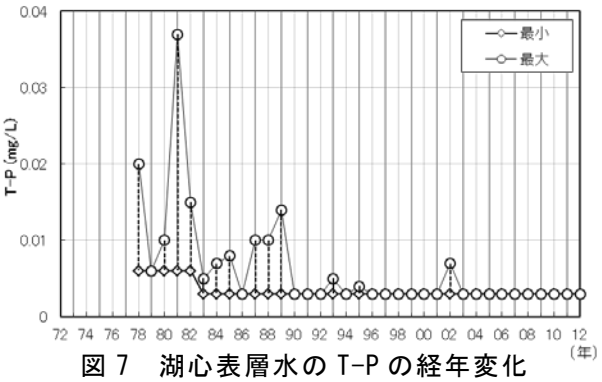

図 7　湖心表層水の T-P の経年変化

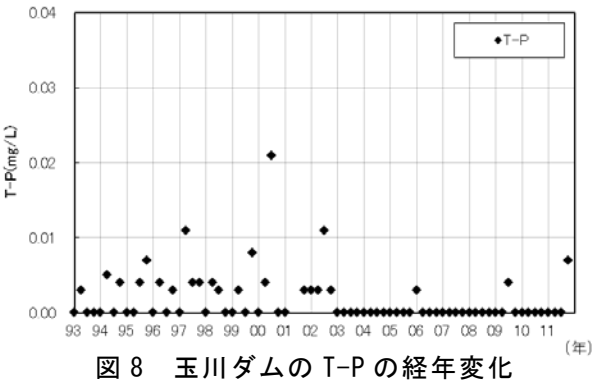

図 8　玉川ダムの T-P の経年変化

（※年度により調査回数が違うために 1, 5, 7, 9 月の値のみ使用）

ら 1988 年では<0.5 ～0.7 μg/L と低い値を示したが，1990 年から 2002 年の間は上昇傾向が見られ 2001 年には 2.1 μg/L を示し，2003 年以降は，再び<0.5 ～0.6 μg/L と低い値を示した。このことから，pH が上昇し平均値が 5.5 付近になると田沢湖内で植物プランクトン量が増殖したため Chl-a が高くなり，COD も高くなったと考えられる。また pH の平均値が 5 付近まで低下すると植物プランクトンの増殖が抑制され，COD も低下したものと推測される。

これらのことから，COD の変動は，Chl-a に反映された植物プランクトンの増殖によるものであり，その制限要因は pH であることが推察された。しかし，1981 年から 1983 年の pH の平均値がおよそ 4.5 であった期間に，COD には反映されなかったが Chl-a の最大値が 2.0 μg/L 以上であったことに注目すると，田沢湖の植物プランクトンの増殖には pH 以外の要因も関係することが考えられる。また，1969 年及び 1973 年に当時の秋田県水産試験場が実施した調査 [5] では，田沢湖表層水の平均値は，pH はそれぞれ 4.22，4.64 と現在よりも低いが，COD はそれぞれ 1.38 mg/L，1.43 mg/L と高い値を示した。プランクトンは，1969 年に *Dinobryon sertularia*，1973 年には *Peridinium sp.* と，いずれも植物性鞭毛虫類の優占が記録されている。

植物の増殖速度は，必要とされる栄養素の中で供給割合の最小のものにより支配されるというリービッヒの最小量の法則に従うとされている。植物プランクトン細胞の元素比をレッドフィールド比 [6] と呼び，海洋中の植物プランクトンの窒素とリンの元素比は N : P = 16 : 1（重量比 7 : 1）となる。2012 年における田沢湖の T-N（図 6）及び T-P（図 7）の平均値は，それぞれ 0.21 mg/L，報告下限値未満（<0.003 mg/L）であるから，レッドフィールド比は重量比でリンを 1 としたときに窒素は 70 以上となり，窒素に対するリンの量は小さいため，リンが植物プランクトンの増殖を制限する要因となっていると推測される。

しかし，前述の秋田県水産試験場の調査によるリン濃度は，リン酸態リン濃度のみの値でも 1969 年及び 1973 年にそれぞれ 0.024 mg/L 及び 0.016 mg/L と，現在の T-P 濃度と比較し高かった。以上のことから，現在の田沢湖では，pH だけではなく栄養素的にリンも植物プランクトンの増殖を制限する要因になっていると考え，リンに着目し考察を行った。

T-P（図 7）は，1989 年以前の最大値では，ほぼ毎年報告下限値（1982 年以前は 0.006 mg/L，1983 以降は 0.003 mg/L）を上回る値で検出されている。1990 年以降は，最大値もほぼ毎年 0.003 mg/L 未満であるため田沢湖内での推移は不明である。この 1990 年以降に T-P の最大値が低下した要因には，玉川中和処理施設の稼働による影響が考えられる。大噴からの湧出水には鉄が多量に含まれており，中和処理施設の稼働により水酸化鉄として流域に沈殿する。有酸素環境下では，リン酸イオンは，鉄（Ⅲ）イオンに捕

捉され不溶解性凝集物として沈降堆積する[6]。玉川上流域においても鉄を主成分とした沈殿物がリンを含有している[7]ことが報告されていることから，1989 年 10 月以降は中和処理施設が稼働したことによって，流域に鉄と共にリンが沈殿するようになり，田沢湖に流入するリンが減少したものと考えられる。また，大噴の鉄濃度では，1999 年以前は約 50 mg/L で推移していたが，2002 年頃から上昇し 2009 年では約 160 mg/L とおよそ 3 倍の濃度になった[8]。また，中和処理施設から 5 km 下流の五十曲（図 1）地点の鉄濃度においても 1999 年以前は約 5 mg/L で推移していたものが，2002 年以降は 10～15 mg/L に上昇し[8] 2～3 倍の値となったことから，2002 年頃に見られた大噴の鉄濃度の上昇は，玉川上流域における鉄とリンの沈殿する流域の範囲を以前よりも下流に拡大させたことがわかる。前述のとおり，田沢湖内のリン濃度の推移は不明であるが，玉川ダムにおける T-P（図 8）では， 2003 年からほぼ 0.003 mg/L 未満となる。これは，大噴の鉄濃度の増加による鉄の沈澱する流域の拡大が，より下流で合流する支流由来のリンを玉川ダムまでに鉄と共沈させたためであると考えられる。

以上のことから，2002 年以降の田沢湖 COD が低下した要因は，大噴の水質変化が田沢湖の pH の低下させたことに加え，玉川上流域における鉄とリンの共沈する流域が拡大したことによる田沢湖に流入するリン負荷量の減少が，植物プランクトン増殖を抑制したためであると推察される。

3.2 T-N の増加要因に関して

リンに対する窒素の比率は 70 以上であり，現状の田沢湖の窒素濃度では植物プランクトン増殖の制限要因にはならないことから，COD の増加にもほとんど関与しないと考えられる。しかし，T-N の平均値の経年変化（図 6）は，1978 年の平均値は 0.15 mg/L であったが 2012 年の平均値では 0.21 mg/L とおよそ 1.5 倍になり，緩やかな増加傾向を示すことから，この要因を推定しておくことは田沢湖の水質保全を進めていく上で重要である。

田沢湖への T-N の負荷量割合は，玉川導水路が約 70%，先達川導水路が約 20%，その他中小

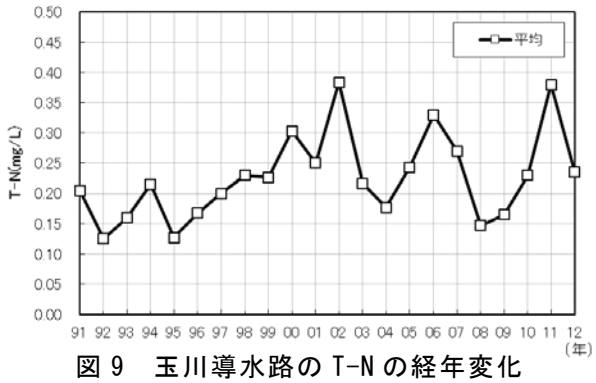

図 9　玉川導水路の T-N の経年変化

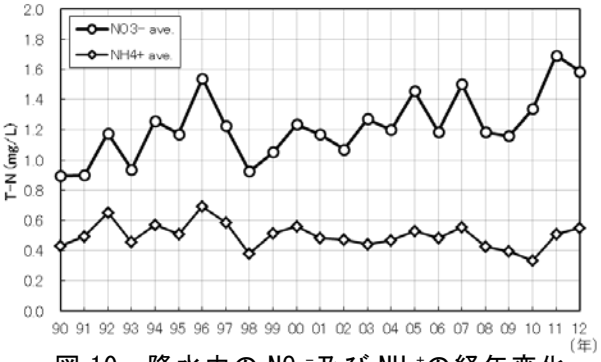

図 10　降水中の NO_3^-及び NH_4^+の経年変化

河川が約 5%，湖面への直接降水が約 5%と玉川導水路からの負荷量割合が大きい[9]と推定されている。玉川導水路の T-N（図 9）の経年変化もまた緩やかな増加傾向を示す。田沢湖及び玉川導水路の T-N のどちらにも 2002 年頃に pH の低下に見られたような大きな変動が見られないことから，大噴の水質変化が原因ではないと考えられる。また，玉川導水路の流域である玉川上流域は，奥羽山脈の山麓を流下し大噴付近の温泉施設及び玉川導水路の取水地点付近に集落が存在するのみで，大部分が山地及び森林である。このため，人為由来の窒素供給による変動は考え難いことから，玉川導水路の T-N の増加傾向は，玉川上流域で自然由来の窒素負荷によると推測される。

近年，窒素飽和[10]と呼ばれる，降水やガスといった大気沈着窒素の断続的な負荷によって，森林渓流水を通じた多量の NO_3^-の流亡が日本の森林において生じ始めている[11]現状がある。秋田県内における降水中の NO_3^-及び NH_4^+の経年変化（図 10）は，NH_4^+では変動が見られないが，NO_3^-は増加傾向を示し，1991 年の平均値 0.89 mg/L に対し 2012 年の平均値は 1.58 mg/L とおよそ 1.8 倍に増加した。この降水中の NO_3^-の経年的な増加が，玉川上流域の山地及び森林

から田沢湖への窒素供給量を増加させていることが推測される。

4. おわりに

酸性化のため中和事業の行われている田沢湖は，中和に伴い pH の回復と COD の関係が注視されている。そのため，秋田県が継続して行っている調査データをもとに田沢湖の水質について考察を行った。その結果，田沢湖の COD 上昇の要因には Chl-a の値に反映される植物プランクトン量が関与し，その増殖を制限する要因としては pH のみではなくリンも関与することが推測された。また，田沢湖へのリンの負荷量は，中和処理施設と大噴の水質の変動よって左右されることがうかがえた。これを明らかにするため，今後玉川ダム底質の層別のリン含有量の調査を行う必要があると考える。また，田沢湖の窒素が増加傾向を示す要因は，降水中の NO_3^-も経年的に増加傾向にあることが，玉川上流域の山地及び森林からの窒素供給量を増加させていると推測されることから，玉川上流域において降水前後で形態毎の窒素濃度に変動があるかを調査する必要があると考える。また，より詳細なリンや窒素の動態と負荷原推定のため，上記の調査に加え玉川上流域の各地点の窒素濃度及びリン濃度に関するモニタリング調査も併せて実施する必要があると考える。

今後，これらの調査データの蓄積及び解析をすることが，田沢湖の水質改善に取り組む上で重要になると考える。

参考文献

1) 玉川毒水対策技術検討委員会: 玉川毒水対策について〔答申〕，1978.
2) 後藤達夫:「続報」神秘的な田沢湖の水質改善化について(4)その 1, 水, 2008, 50-1, 33-37.
3) 秋田県: 平成 25 年度版秋田県環境白書（本編），2013.
4) 国土交通省: ダム諸量データベース，2014, http://dam5.nilim.go.jp/dam/
5) 秋田県: 田沢湖生物相調査結果，玉川自然汚濁対策調査報告書，1974, 135-160.
6) 永田俊　他: 温暖化の湖沼学，2012.
7) 鈴木純恵　他: 玉川酸性水中和処理におけるシュベルトマナイト様化合物の形成によるヒ素及びクロムの取り込み，水環境学会誌，**5**, 2013, 137-141.
8) 成田修司　他: 玉川源泉の成分が田沢湖の pH に及ぼす影響，秋田県健康環境センター年報，**5**, 2009, 93-99.
9) 珍田尚俊　他: 田沢湖に流入する中小河川の水質及び負荷量調査結果（平成 14, 15 年度），秋田県環境センター年報，**31**, 2003, 55-60.
10) John D.Aber et al.: Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems, BioScience, **39**, 1989,378-386.
11) 楊宗興　他: 渓流水の NO_3^-濃度と森林の窒素飽和，地球環境，**9**, 2004, 29-40.