

猪苗代湖の水質特性〔I〕*

——富栄養化の観点からの考察——

千葉 いせ子**・木村 篤***

1. はじめに

猪苗代湖は面積 104.8km²、最大深度 94.6m、平均深度 51.5m、容積 5.4km³ で面積では琵琶湖、霞が浦、サロマ湖に次いでわが国第 4 位、容積では第 5 位の大きな湖である。この湖は長瀬川水系の酸川がもたらす酸性水により酸性化し、pH 約 5 のわが国最大の無機酸性湖でもある。酸性湖の場合は生物生産が阻止され、一般には富栄養化が進行しにくいといわれているが、現実には屈斜路湖、洞爺湖などの酸性湖においても人為的富栄養化の例が報告されている¹⁾。

猪苗代湖の透明度は 1930 年には世界第 6 位の 27.5 m、1972 年には 7.0m²⁾、1977 年には 4.5m³⁾ と近年低下傾向を示し、渡辺は北部湖岸に汚水域でしばしば観察されるラン藻の *Oscillatoria chlorina* が分布していることを報告しており⁴⁾、近年の観光やリゾート開発等による湖沼の富栄養化が心配されている。猪苗代湖は福島県の重要な水資源となっているため、その水質保全が重要な課題である。

筆者らは昭和 58 年度から湖沼に関する基礎調査を実施してきたが、調査結果を基に猪苗代湖の水質特性を富栄養化の観点から考察し得られた知見について報告する。

2. 調査方法

2・1 調査地点および調査時期

調査地点は図 1 に示した湖内 17 地点、流入河川 13、流出河川 2 (河川の調査地点は湖の河口より約 30m の地点) とした。また調査は年 4 回 (5, 7, 8 または 9 月、

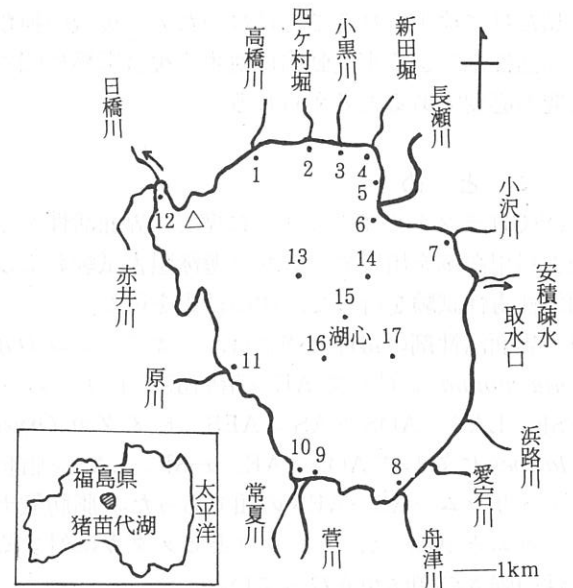


図 1 調査地点

10 または 11 月) 実施した。

2・2 調査項目および分析方法

調査項目は気温、水温、pH、DO、BOD、COD、SS、全リン (T-P)、全窒素 (T-N)、オルトリン酸態リン、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、TOC、鉄、マンガン、アルミニウム、硫酸イオン、炭酸水素イオン。

さらに河川については流量、湖については透明度、クロロフィル a、塩素イオン、カルシウム、マグネシウムについて実施し、分析方法は JIS K0102 および環境庁告示に掲げる方法に準じた。またナノプランクトンの検索も試みた。

* Characteristics in Water Quality of Lake Inawashiro—A study on Eutrophication of the Lake—

** Iseko CHIBA 福島県福島保健所 (Fukushima Prefecture Fukushima Public Health Center)

*** Atsushi KIMURA 福島県衛生公害研究所 (Fukushima Institute for Public Health and Environmental Science)

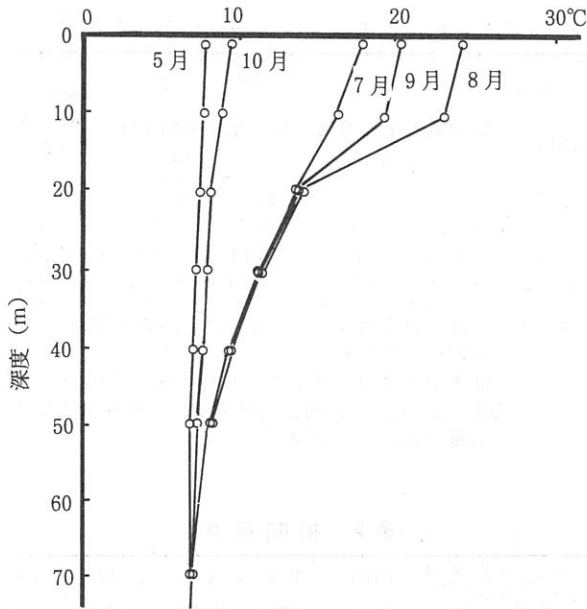


図2 猪苗代湖（湖心）の水温変化

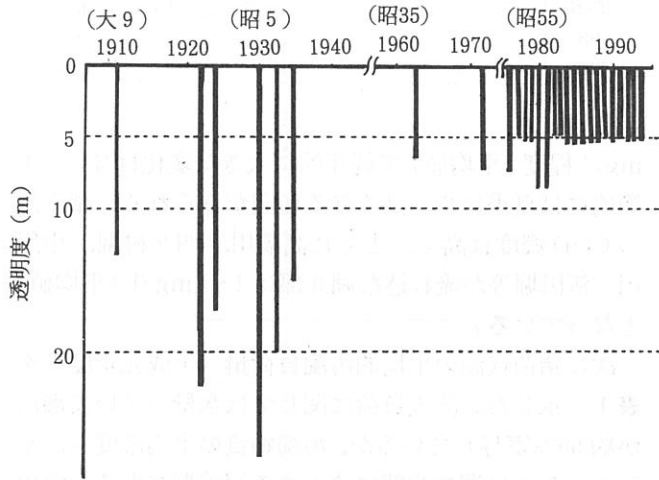


図3 猪苗代湖の透明度の推移
（湖心7, 8月）

3. 結果および考察

猪苗代湖の水温については図2に湖心の深度別測定結果を示したが、春秋の循環期には上層から下層まで水温はほとんど同一である。夏季（7～9月）には水深10～20mに顕著な水温躍層が形成される。13～17地点でも湖心と類似している。

透明度についてはその歴史的推移を図3に示した。筆者らが調査を開始した1980年代以後の夏季の透明度は5m前後、春秋の循環期にも7～8mと比較的安定している。

近年の透明度の低下現象について千葉⁵⁾は猪苗代湖周辺の開発により裸地が増え、表層が流されて塩基性イオンと結合したコロイド状の粘度粒子が湖内に流出

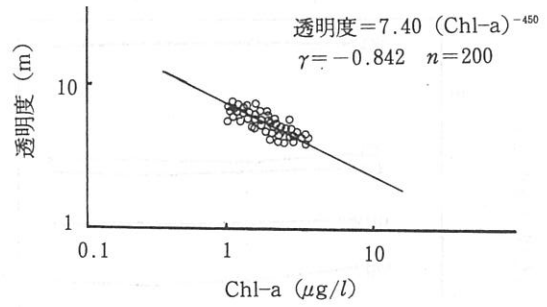


図4 猪苗代湖の透明度とクロロフィルaの関係

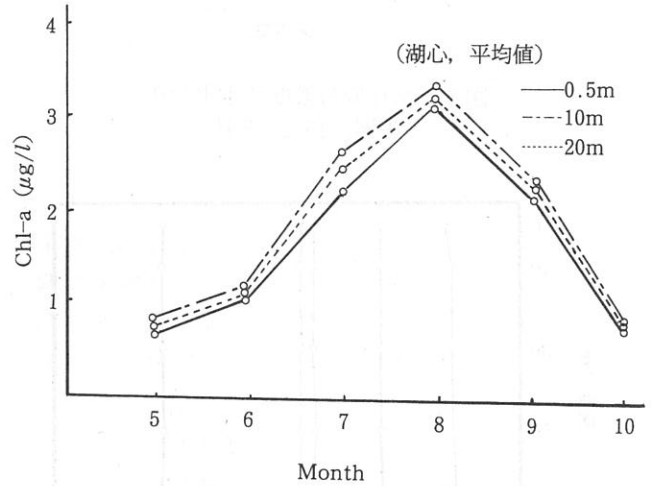


図5 猪苗代湖のクロロフィルaの濃度

したためと考えている。

春秋の循環期に比べて夏季に透明度が低下する現象については、透明度とクロロフィルa濃度に図4のような逆相関が成立することから、プランクトンの増殖が一因と考えられる。

南部ら⁶⁾は日本の無機酸性3湖沼（猪苗代湖、屈斜路湖、洞爺湖）に共通して出現したものとしてナノプランクトン *Nannochloris*. sp をあげており、しかも最優占種であることを確認している。また屈斜路湖では水深10～20m層に多く分布しており、かなり弱い光条件下でも光合成活動を営める特性を備えているのではないかと述べている。

筆者らの実験結果もこれとよく一致しており、クロロフィルa濃度は図5のように表層よりも10～20m層の方がやや高い傾向を示す。

猪苗代湖でもナノプランクトン *Nannochloris*. sp は最優占種で、夏季に増殖することを確認した。

このプランクトンは0.005～0.06mmの大きさで、通常のプランクトンネットで捕集することはできない。湖心では夏季に約15,000個/ml、循環期には約1,000個/mlであり、湖岸部では夏季に多くても約

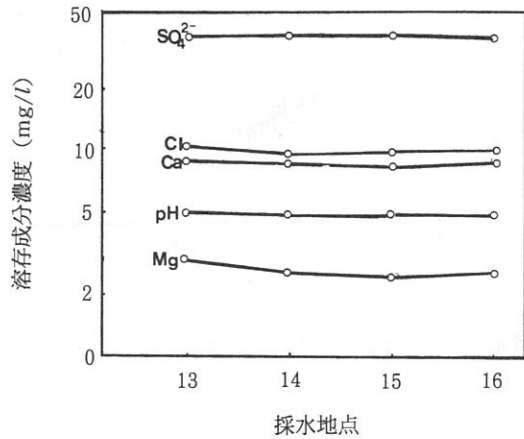


図6 溶存成分濃度の水平分布 (表層, 1992, 5月)

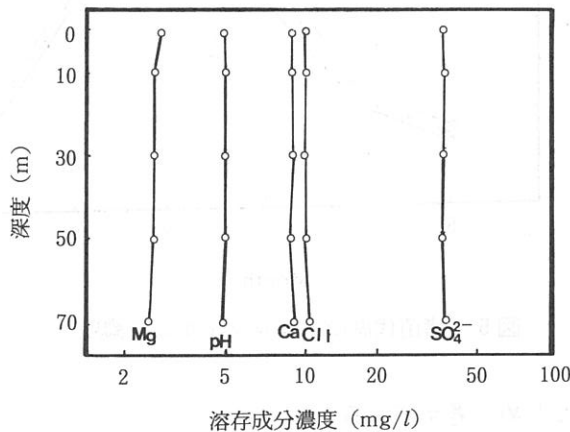


図7 溶存成分濃度の垂直分布 (湖心, 1992, 5月)

5,000個/ml, 春秋には数十個/m³と少ない。湖内の溶存成分濃度やpHは図6, 図7に示したように湖岸から約300m沖合になると水平的にも垂直的にもほとんど均一で, 季節的变化も少ない特徴がある。

北部の湖岸付近には小黒川, 高橋川, 四ヶ村堀など有機汚濁の著しい河川が流入し汚濁が進んでいるが, 長瀬川の流入水と湖内で急速に混合し, 約300m沖合では湖心と類似した清澄な水質になることが判明した。

富栄養化成分についてみると, T-Nは湖心で約0.3mg/lであるのに対し, 湖岸部では1~5倍の濃度でとくに北部の濃度が高い。また流入河川では0.3~2.0mg/l程度で小黒川がもっとも高い。T-Pは湖心で0.003mg/l程度であり, 湖岸部では3~30倍の濃度で湖北部の濃度が高い。流入河川については0.004~0.3mg/l(平均値)で新田堀がもっとも高い。

有機汚濁の代表的指標であるCODは, 湖心で0.5

表1 猪苗代湖の流入・流出の汚濁負荷量

項目	流 入		流 出		湖心の濃度 (mg/l)
	負荷量 (g/s)	平均濃度 (mg/l)	負荷量 (g/s)	平均濃度 (mg/l)	
COD	61.0	1.9	32.0	0.7	0.5
SS	142.1	4.4	90.7	2.0	1.0
全窒素	19.64	0.61	15.81	0.34	0.30
全リン	0.91	0.029	0.19	0.004	0.003

注) 1 平成元年度の5, 7, 9, 11月の現況調査データの平均値より作成

2 流入は長瀬川, 舟津川, 小黒川等13河川の合計で流量は32.0m³/s, 流出は日橋川, 安積疎水の合計で流量は46.3m³/sである

表2 相関係数

	クロロフィルa	COD	T-P	T-N	SS	TOC
クロロフィルa		0.843	0.722	0.620	0.904	0.888
COD			0.754	0.739	0.920	0.911
T-P				0.826	0.761	0.778
T-N					0.658	0.603
SS						0.927
TOC						

mg/l程度(平均値)で経年的に大きな変化はない。季節的には夏季にやや高くなる傾向がみられる。湖岸部のCOD濃度は高く, とくに高橋川, 四ヶ村堀, 小黒川, 新田堀等が流れ込む湖北部は1~4mg/l(平均値)となっている。

次に猪苗代湖の平均的汚濁負荷量(平成元年度)を表1に示した。流入負荷に関しては水量の多い長瀬川が約50%寄与しているが, 汚濁物質の平均濃度を高くしているのは湖の北部に流入する河川群である。流出水の平均濃度は流入水の平均濃度よりずっと低く, 各項目とも湖心の平均濃度と類似している。

流出水と流入水の平均濃度の比はCOD0.32, SS0.23, T-N0.48, T-P0.14となり, このことから猪苗代湖においては汚濁物質が湖内で沈降する割合が大きく, 湖内における有機物質の内部生産がほとんど起こらないことがわかる。

湖沼の富栄養化に関する6項目COD, クロロフィルa, T-N, T-P, SS, TOCについて相関解析を行い表2に示したが, CODとクロロフィルa, SSおよびTOCとの相関は高かったが, 栄養塩とクロロフィルaの相関はさほど高くない。富栄養化の進行した湖沼においては窒素やリン等の栄養塩とクロロフィルaが高い正の相関を示すことが一般に知られており, 猪苗代湖でも有機汚濁の高い湖北部の河口付近のみはこれに該当するが, 湖全体としては富栄養化が問題になる

程度ではないと考えられる。

次に湖の水質汚濁に関する複雑な事象いわゆる水質特性を解析するために主成分分析を行ってみた。猪苗代湖に関しては第2主成分までの累積寄与率が70%を超えるので、水質特性はこの第2主成分まででほぼ表現が可能と考えられる。

もっとも寄与率の大きい第1主成分(56.5%)にはCOD, SS, T-N, T-P等の水質汚濁を代表する項目が並び、次に寄与率の大きい第2主成分(16.8%)にはFe³⁺, Al³⁺, SO₄²⁻など長瀬川の流入に由来する項目が並んでいる。この第1および第2主成分のスコアを各測定点に関して計算してみると、猪苗代湖は図8に示したように大きく3つの水域に分けられる。

第1の水域は北部の湖岸付近で有機物による水質汚濁を代表する第1主成分のスコアの大きい水域であり、第2の水域は長瀬川の河口付近で酸性河川に由来する第2主成分のスコアの大きい水域である。そして

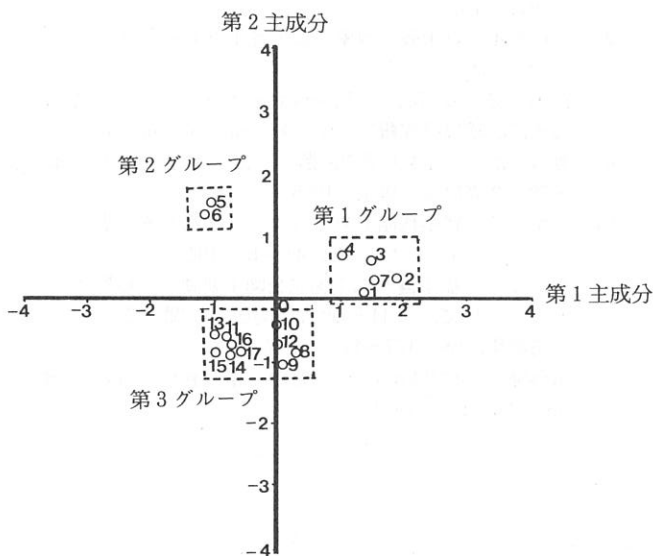


図8 猪苗代湖の主成分のスコア分布

第3はそれ以外の水域で湖の中央部や南部の水域でいわゆる第1および第2主成分のスコアの小さい水質の良好な水域である。

第2の水域は汚濁物質濃度の高い北部の水域と比較的清澄な中央部から南部にかけての水域を分断している。このことから長瀬川の流入は湖水の浄化に寄与し、北部から中央部および南部への汚濁物質の移流や拡散を防ぐ働きをしていると考えられる。

流入河川および湖水の汚濁成分(BOD, COD, SS, T-N, T-P)とイオン成分(H⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, Al³⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻)についてイオン収支の解析を試みその結果を表3に示した。

湖内における沈降率は、イオン成分についてはFe³⁺ 91%, Al³⁺ 80%となり、また汚濁成分ではCODやT-Pは90%以上、SS 87%となり、T-NやBODは約60%となることから、猪苗代湖においては汚濁成分や富栄養化に関与する成分が鉄やアルミニウムイオンと一緒に沈降することが考えられる。

鉄やアルミニウムは凝集沈殿法による排水等のリン凝集剤として用いられている物質であり⁷⁾、猪苗代湖においても同様の役割を果たしていると考えられる。

猪苗代湖の富栄養化の制限因子はリンであると考えられ、湖沼の窒素、リンに関する環境基準もリンについてⅡ類型(P0.01mg/l以下)があてはめられている。現在は北部の湖岸付近を除けば環境基準が守られている。

このように猪苗代湖には脱リン作用があることがわかったが、リンの沈降機構について考察してみた。

まず長瀬川から流入する鉄イオンが湖内の豊富な溶存酸素によって容易に酸化され、3価の鉄イオン(Fe³⁺)になる。3価の鉄イオンはpH5程度の湖内では[Fe³⁺][OH⁻]₃ = 4 × 10⁻³⁸と比較的溶解度積の小さい水酸化第二鉄Fe(OH)₃となり、大部分が褐色の沈

表3 猪苗代湖の水質成分濃度と沈降率

	汚濁成分					イオン成分					
	BOD	COD	SS	T-N	T-P	H ⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
流入水質 (mg/l)	1.2	3.4	8.9	0.86	0.062	0.13	1.20	0.08	2.00	24.5	53.1
湖の水質 (mg/l)	0.5	0.3	1.1	0.30	0.003	0.01	0.10	0.13	0.40	3.1	35.1
沈降率 (%)	58.3	91.2	87.6	65.1	95.2	92.1	91.7	-62.5	80.0	87.4	33.3
沈降量 (t/年)	724	3,208	8,071	579	61	120	1,138	-52	1,656	22,175	18,315

- 注) 1. 流入水質は主要13河川の年平均値を比流量で加重平均し、湖面からの蒸発量が10%程度あるものとして1.1を乗じた
 2. 湖の水質は、湖中央付近の5地点の年平均値である
 3. 沈降率 = (流入水質 - 湖の水質) / 流入水量
 4. 年間沈降量 = (流入水質 - 湖の水質) × 年間流量

殿物となる。リン酸塩が存在すると、それらの沈殿物に吸着されたり、あるいは Fe PO_4 となり共沈する。またアルミニウムイオンの場合も湖内で生成された水酸化アルミニウム $\text{Al}(\text{OH})_3$ にリン酸塩が吸着されたり、 Al PO_4 となり共沈する。

ただしアルミニウムイオンの場合は、溶解度積が $[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3 = (3.1 \sim 4.7 \times 10^{-38})$ と3価の鉄イオンの場合よりも大きいので沈殿が生成しにくい。そのため湖心の溶解性鉄濃度が 0.1 mg/l であるのに対し、アルミニウムイオンは 0.4 mg/l と高い濃度で溶解したまま残存しているものと考えられる。また湖内においては CaCO_3 も生成され、リンは CaCO_3 にも吸着されるかヒドロキシ・アパタイト $[\text{3Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2]$ として沈殿することも考えられる。

筆者らの長年の調査結果から、猪苗代湖では流入してくる栄養塩、とくにリンの沈降による除去作用があり、富栄養化の進行が遅いのではないかと考えている。

しかし将来汚濁物質の流入が大きくなり、また長瀬川の酸性度が変われば、この状態を保つことができるかどうか疑問である。

4. ま と め

以上猪苗代湖の水質特性をとくに富栄養化の観点から解析し、次のことが明らかになった。

- ① 水温は春秋の循環期には上層から下層までほとんど同一であるが、夏季には水深 $10 \sim 20 \text{ m}$ に顕著な水温躍層が形成される。
- ② 近年約10年間の透明度は夏季に 5 m 前後、春秋も $7 \sim 8 \text{ m}$ と比較的安定していた。

③ 夏季の透明度低下の一因としてナノプランクトン *Nannochloris*. SP の増殖が考えられる。

④ 主成分分析により猪苗代湖は水質汚濁の面から3つの水域に分けられる。第1の水域は生活排水等による汚濁の進んだ北岸付近、第2は鉄やアルミニウムや硫酸イオン等の多い長瀬川流入口付近、そして第3は比較的水質の良好な湖の中央部から南部の水域である。

⑤ 長瀬川からの酸性流入水により、湖の中央部および南部への汚濁物質の移流が分断される。そして富栄養化の制限因子であるリンが沈降し富栄養化が進行しにくい状況にある。

今後は富栄養化の制限因子であるリンの挙動について、底質等の調査結果もあわせてさらにくわしく調べていきたいと考えている。

一引用文献一

- 1) 西條八束, 阪口 豊: 日本の湖, 科学, Vol. 48, pp. 352~362, 1978
- 2) 岡田光正: 富栄養化現象, 富栄養化対策総合資料, pp. 43~62, 1983
- 3) 鈴木 馨, 成田広一: 猪苗代湖の水質と底質, 福島県内水面水産試験場研究報告 第3号, pp. 59~58, 1979
- 4) 渡辺仁治: 「日本湖沼の診断——富栄養化の現状」, pp. 72~78, 共立出版, 東京, 1975
- 5) 千葉 茂: 猪苗代湖をめぐる——湖水と流入水の水質, アーバンクボタ, No. 26, 41~45, 1987
- 6) 南部洋一, 橋爪健一郎: 国立公園主要湖沼の植物プランクトンについて, 第11回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集, pp. 107~113, 1977
- 7) 須藤隆一, 桜井敏郎: 排水処理, 富栄養化対策総合資料, pp. 100~113, 1983

■お知らせ■

毎年第3号に掲載していました“投稿規定”は、紙幅の関係で当号には登載できませんでした。したがって“投稿規定”は、1996年第21巻第1号に掲載いたします。取急ぎお知らせいたします。