岩手県松尾「五色沼」の湖色の季節的变化

吉 田 稔・若 尾 紀 夫・井 上 克 弘

Seasonal Change in Color of Lake Matsuo-Goshikinuma, Iwata Prefecture

Minoru YOSHIDA, Norio WAKAO and Katsuhiro INOUE

Abstract

The name Goshikinuma means a lake or pond having five colors. Actually, Lake Matsuo-Goshikinuma has had three distinct colors, namely, a heavily turbid brown hue, a slightly turbid, pale blue, and a clear blue. This phenomenon was accounted for as follows: The lake was supplied solely with underground water from the bottom, containing ferrous iron, hydrogen sulfide, but no dissolved oxygen. In the colder seasons from September to June, the lake water was in the circulation period and, therefore, was supplied with oxygen. Both ferrous iron and hydrogen sulfide in the water were continuously oxidized and gave a turbid brown color to the lake. In July, the lake was in the early stagnation stage, and dissolved oxygen decreased. Then, oxidation of some hydrogen sulfide but no ferrous iron had occurred. Thus, the lake color turned a slightly turbid, pale blue. In August, oxidation of neither ferrous iron nor hydrogen sulfide occurred as a result of stagnation, and the lake hue became a clear blue. It was also noticed that oxidation of ferrous iron was quite dependent on the activity of iron-oxidizing bacteria.

十和田八幡平国立公園の東南の入口に当たる松尾鉱山は、かつてはわが国最大の硫黄鉱山で多年にわたって活発に操業したが、産業事情の変化により1968年ころから操業を中止し閉山した。この松尾鉱山の近くに表題の五色沼がある。この沼は直径50mに満たない小湖であるが、赤沼とも呼ばれ、その色が多様に変換することが知られている。すなわち、あるときは褐色に濁り、あるときは美麗に青白く濁り、またあるときは青く澄む。このような湖色の変化は当然、水質の変化を反映している。この水質の変化の過程に複雑な機構の存在が予想されたので、1976年から調査を始めた。以下に水質と湖色の変動の機構についてその概要を報告したい。

1. 現地の概要

現地の地形をFig. 1に示した。図の中央の湿原は、八幡平火山の石山外輪山の内側の凹地に発達したもの（地質調査所、1964）で、その中心に御在所沼があり、その周囲に湿地林と湿草原がひろがる。

五色沼は、御在所沼に接しているが、その水位は御

在所沼より70cm高い。すなわち、御在所沼が湿原の中にあるのに対して、五色沼は湿原中の微高地にある。五色沼を養うのは湖底湧水で、水は常に湖盆から溢れて御在所沼に流入している。溢流量は、 $1.77\text{m}^3/\text{min}$ の測定例（1977年3月1日、建設省岩手工事事務所）があるが、時期により増減がある。融雪期には湿原の水位が上るために湖岸から地表水が五色沼に流入していることがある。

湿原の南西の山地は、旧松尾鉱山の硫黄と硫化鉄の鉱床を内蔵し、諸施設の跡が残っている。また、湿原の西には御在所温泉の湯脈がある。

2. 調査方法

湖盆形態：1977年6月に測量を行ない、1978年6月にその補足と湧水点の調査を行なった。

水温、酸素飽和度、電導度、採水：Yellow Spring Instrument社（USA）製のいずれも投込型の溶存酸素計（YSI-51B）、電導度計（YSI-33）、および内蔵するサーミスタ温度計を用いた。採水は各深度にチューブを降ろして吸引した。湖心点ではロープで固定し

Fig. 1. 位置および地形

この地図は、国土地理院発行の 1: 25,000 地形図（茶臼岳）を使用したものである

たゴムボートから、また湧水点では竿で固定したブイに装置を吊して湖岸から、それぞれ操作した。

Fe^{2+} , ΣFe , 鉄酸化率：現場でフェナンスロリン法により Fe^{2+} を発色させ、遮光して実験室に運んでから汙別し、汙液について Fe^{2+} を測定した。また別の試水に HCl を加え加熱して濁りを溶解したのち、汉液についてヒドロキシルアミン・フェナンスロリン法で全鉄 (ΣFe) を定量した。 ΣFe と Fe^{2+} の差は Fe^{III} であるから、 $\Sigma\text{Fe}-\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{Fe}\%$ を鉄酸化率とした。

その他の分析法は各個所に記載した。

3. 湖色変化の観察結果

(1) 1977 年 5 月：黄褐色に濁る。この状態は前年 9 月に黄褐色に濁って以来続いている。全層とも鉄酸化率 85% 以上、透明度 1.2m。

(2) 同年 7 月：初旬に変色し始め、青白く乳濁した美しい色調となる。昨年 7 月にもこの湖色を観察した。鉄酸化率 2%，透明度 4m。

(3) 同年 8 月：上旬に白濁が消え、青く澄む。鉄酸化率 5% 以下、透明度 8m。

(4) 同年 9 月：22 日から濁り始め、28 日には褐色に著しく濁った。鉄酸化率 80%，透明度 1.1m。

(5) 1978 年 2 月：黄褐色に濁る。昨年 9 月以来、

濁りかたに濃淡はあるが継続的に濁っている。鉄酸化率 90% 以上、透明度 1.6m。

(6) 同年 4～5 月：4 月 20 日に観察したとき、昨年同時期とは違って意外に青緑色にほぼ澄んでいた。湖水は循環期にあり、酸素飽和度は全層 60% でこの湖としては十分に高いが、鉄酸化率は 10% 以下で酸化が意外に進んでいない。透明度 3.7m。この異常の状態は 6 月上旬まで続いた。

(7) 同年 6～7 月：6 月中旬に黄緑色に濁った。鉄酸化率 30% で酸化はある程度進んだ。透明度 2.5m。しかし酸素飽和度は 3m 以深では 10% 以下となり、循環が不良になり始めていた。6 月 29 日には湖色が著しく変わり、青白く乳濁した美しい色調となった。これは昨年 7 月の色調と同じである。

(8) 同年 8 月：上旬に青く澄んだ。昨年同月と同じ経過である。

(9) 同年 9 月：中旬に著しく黄褐色に濁る湖色に変わった。昨年および一昨年の変色の日付より 10 日ほど早い、ほぼ同様の推移である。

4. 湖盆形態と水質

湖盆形態を Fig. 2 に示した。湖盆は岸近くで絶壁をなして直ちに深くなる。底は平らで水深約 11m であるが、湖底の西北部にくぼみがあり、これが湖を涵養する湧水の湧口である。湧口の調査は湖水の循環の弱まった 1978 年 6 月に行なった。湖底から 10cm 上

Fig. 2. 五色沼湖盆形態

a: 水深 10cm 以下の棚状部,
b: ヨシ密生地, c: 溢流個所

に溶存酸素計と電導度計を降ろして湖底を走査し、上記の点だけが酸素飽和度が著しく低いこと、電導度がやや高いこと、および地形と調和することから湧口であると判断した。Table 1 に概要を示した。

1978年8月10日に採水し測定した結果を Table 2 に示した。この時期に湖水は停滞期にあり、したがって深度 13m の試水は湧水そのものにきわめて近いと考えられる。13m 試水は酸素を含まず Fe^{2+} と H_2S を含むものであるが、酸素飽和度と H_2S を除いて、

Table 1. 松尾「五色沼」の概要

標 高 : 890m	pH : 3.0~3.2
表 面 積 : 1,570m ²	湧水中の酸性成分 :
平均直径 : 44.7m	FeSO_4 , H_2SO_4 , H_2S
最大水深 : 13.0m	Fe : 20~40mg/l
涵 養 : 湖底湧水	SO_4^{2-} : 350~400mg/l
1.77m ³ /min.	蒸発残留物 : 500~600
(1977.3.1)	mg/l
湖 色	— 黄褐濁 — 青白濁 — 青清澄 —
透明度 m	— 1 — 4 — 8 —

Table 2. 五色沼の水質 (1978年8月10日)

水 深	m	0	10	13
水 温	°C	19.2	16.2	16.0
酸素飽和度	%	43	1	1
電 導 度	$\mu\text{S}/\text{cm}$	710	720	710
pH		3.0	3.0	3.0
Na^+	mg/l	8.7	—	8.8
K^+	"	2.4	—	2.4
Ca^{2+}	"	71.3	—	71.3
Mg^{2+}	"	3.4	—	3.5
Fe^{2+}	"	31.6	32.9	32.1
ΣFe	"	31.6	33.6	32.1
Al^{3+}	"	8.4	—	8.0
Cl^-	"	2.5	—	4.0
SO_4^{2-}	"	369	373	370
SiO_2	"	54	—	54
H_2S	"	0.0	0.6	1.2
蒸発残留物	"	553	572	571

注) 水深 13m 地点で採水した。透明度 7.0m, 気温 24.3°C。分析法は次の通り。Na⁺・K⁺: 炎光光度法, Ca²⁺・Mg²⁺: 原子吸光光度法, Al³⁺: アルミノン法, Cl⁻: チオシアン酸第二水銀法, SO₄²⁻: 硫酸バリウム比濁法, SiO₂: モリブデンブルー法, H₂S: p-アミノジメチルアニリン法。

水深による分析値の差は小さい。

5. 水質の季節的变化

1977年8月から翌年2月にかけて、湖心において水質測定を行なった。

1. 水 温

水温の垂直分布を Fig. 3 に示した。湧水の水温のために厳寒期も 10°C くらいの水温が維持されている。1月および2月の平均気温は -6.8°C および -6.3°C (松尾鉱山観測資料) であるから、この湖水では冬期にもっとも活発な水の循環が起こる。夏期には表層水温が高く、湖水は停滞する。

2. 酸素飽和度

酸素飽和度の垂直分布を Fig. 4 に示した。8月は停滞期に当たるために、表層は飽和度が高いが5m以深は数%以下である。9月28日には循環が活発化し、5m 以深の飽和度が上がった。それ以降、冬に向って全層の飽和度が上昇する。

3. 鉄の形態

表層水の ΣFe と Fe^{2+} を Fig. 5 に示した。湖色

Fig. 3. 各時期の水温の垂直分布

Fig. 4. 各時期の酸素飽和度の垂直分布

Fig. 5. 鉄の形態の季節的变化

の黄褐色の濁りは鉄の酸化と対応している。

4. 水質と湖色の対応

五色沼が毎年9月中に清澄から黄褐濁に変わる現象は、気温の低下→湖水の循環の活発化→溶存酸素の増加→鉄酸化率の増大という経過によって、湧水に由来する Fe^{2+} が Fe^{3+} および FeIII 沈殿（水酸化物または塩基性硫酸塩）になるためと認められた。この鉄酸化は、後に述べるように鉄酸化細菌の活性に依存する関係から、必ずしも酸素飽和度とは相関しない。

秋から春まで循環期にある五色沼は、6～7月の頃に気温の上昇とともに循環が鈍化し、酸素飽和度が低下する。そして7月には湖色は白く濁り、またときに白色浮上物を生ずる。このときの湖水の蒸発残留物および浮上物について二硫化炭素抽出を行ない、FLIERMANS and BROCK (1973) の方法によって遊離Sを確認した。これは湧水に由来する H_2S がSまで酸化されたことを示す。8月には湖水は清澄となる。このとき湖底湧水には H_2S が存在するが表面水には消失している (Table 2)。この時期の H_2S の挙動は明らかにできなかった。

6. 1978年4～5月の湖色の異常と鉄酸化反応の微生物依存性について

湖色の観察結果で述べたように、1978年4～5月の湖色は異常であった。すなわち、4月20日に観察したとき湖水は循環期にあり酸素飽和度は全層にわたって50%以上の高いレベルにあった。しかし湖色は青緑ではぼ澄んでおり、鉄酸化率は10%に過ぎなかった。その前の観察は2月17日で、そのときは酸素飽和度は全層にわたって50%、鉄酸化率は90%以上で、黄褐色に濁っていた。それからの2カ月の間にどのように酸化率が低下したかの経過は不明であるが、意外な現象であるのでその時期の湖水について微生物的検

討を行なった。

1. 鉄酸化細菌接種の影響

4月20日の試水（ほぼ清澄）に、松尾鉱山坑道水から SILVERMAN and LUNDGREN (1959) の 9K 培地を用いて分離培養した鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) を接種し、無接種を対照として 30°C に保温し、2～6日後の鉄酸化率を調査した (Table 3)。その結果から、鉄酸化に対して接種の効果が著しいことが認められる。

2. 除菌または殺菌の影響

5月13日の試水（ほぼ清澄）にメンブラン濾過（孔径 0.2μ ）による除菌または 0.1% HgCl_2 添加による殺菌の処理を行ない、無処理を対照として 30°C に保温し、5日後の鉄酸化率を調査した (Table 4)。除菌または殺菌処理をした場合には鉄酸化率は上昇しなかった。したがって原水の鉄酸化率の上昇は完全に原水中にある微生物活性に依存していると認められる。

3. 湖色の異常の原因について

1978年4～5月に、鉄酸化が意外に進まず湖色が異常であったことの直接的な原因は、この期間に鉄酸化細菌の活性が低かったことにあって考えられる。Table 4 からこの湖水における鉄酸化に微生物を必要とすることが明らかであり、また Table 3 からこのときの湖水の鉄酸化率の活性が比較的低かったことが認められる。

Table 3. 鉄酸化細菌接種の鉄酸化率におよぼす影響*

日 数	鉄 酸 化 率 %			
	0	2	4	6
接 種 区	18.5	96.5	—	—
無接種区	18.5	18.9	39.2	97.8

* 原水： ΣFe 22.7mg/l, 酸素飽和度 60%, pH3.2

Table 4. 除菌または殺菌処理の鉄酸化率におよぼす影響*

処 理	鉄 酸 化 率 %	
	原 水	5 日後
無 処 理	9.2	100.0
除 菌		10.5
殺 菌		8.6

* 原水： ΣFe 23.8mg/l, 酸素飽和度 76%, pH3.1

2月に観察したときには鉄酸化率は高く、したがって鉄酸化細菌の活性は十分に大きかったと認められるが、その後に地表水の流入または湧水量の増大などが原因となって水の湖内滞留時間が短縮し、菌体の増殖が溢出による損失に追いつかなくなり、その結果、菌数の減少による活性の低下を招いたのであろうと推測される。

7. 考 察

1. 湖盆と水質の起源

松尾五色沼の形態は一種の火口湖に似ている。八幡平火山域にはいくつかの火口性の小湖や穴窪の存在が認められている(地質調査所, 1964)ので、五色沼もその一つである可能性が高い。そして、外輪山と中央火口丘との間の凹地にあるために火口底に地下水が湧出し、湧水に涵養される湖になったものである。

湖底湧水の水質は、明らかに松尾鉾山の鉾床の影響を受けている。地下水が鉾床に触れ、溶存酸素を失うと同時に FeS_2 と S を酸化して FeSO_4 と H_2SO_4 を溶出し、この水が湖底に湧出したものである。松尾鉾山跡においては、閉山後の現在も FeSO_4 と H_2SO_4 を含む強酸性水が坑道から流出して赤川に注いでいる(後藤, 1973)。湖底湧水は坑道水よりはるかに低濃度であるが、同じようにして生じた FeSO_4 を含む酸性水である。湖底湧水と坑道水の違いは、湖底湧水が H_2S を含むことである。この H_2S は御在所温泉の影響であろう。御在所温泉(ボーリング深度 505m)は pH6.0, 泉温 26.2°C の比較的低温の温泉であるが、主成分 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4$ のほかに H_2S を含む(佐藤, 1965)。

2. 鉄の酸化と湖色

松尾鉾山廃坑から流出する強酸性(pH1.5)の坑道水について、WAKAO *et al.* (1977) は、水中の Fe^{2+} の Fe^{3+} への酸化に鉄酸化細菌の存在が必要であることを認めた。この関係は五色沼についても同じであって、 Fe^{2+} の酸化には酸素のほかに鉄酸化細菌が必要であった。この湖の水質条件においては、 Fe^{2+} の酸化と同時に、 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow$ 塩基性 Fe コロイド $\rightarrow$ 水酸化物沈殿の方向の加水分解と重合が進行し、湖水が褐濁化する。しかし、 Fe 含量がほぼ同一であっても湖色や透明度が多少異なることがあり、また鉄酸化のほぼ完了した湖水を採水して放置すると濁度を増すと同時に一部の沈降が観察されることもある。これらの観察はこの湖水中で Fe^{3+} の加水分解と重合がかなり長時間を要して進行することを示すものである。吉田ら(19

77) は、秋田県玉川の酸性河川水中の Fe^{2+} と Al^{3+} が、流下する間の希釈と中和に伴って消失する順序と機構を述べた。五色沼で進行する過程はその前半に相当している。

8. 摘 要

松尾「五色沼」は八幡平火山域の中にある火口湖様の小湖であるが、その湖色が多様にまた著しく変わることが認められた。この湖には三つのはっきり異なる湖色がある。すなわち、秋冬春には黄褐色に濁り、夏前半には美麗に青白く濁り、夏後半には青く澄む。この現象について次のような機構を認めた。この湖は FeSO_4 と H_2S を含む無酸素の湖底湧水により涵養される。秋冬春には湖水は循環期にあり、酸素供給があるために湖水中の Fe^{2+} は酸化され、黄褐色に濁る。しかし Fe^{2+} の酸化には鉄酸化細菌が必要で、これが酸化反応の進行と湖色の変化を複雑にしている。夏前半に湖水は停滞期に移行し、 H_2S の S への酸化だけが起こって湖色は青白く濁る。夏後半には青く澄むが、このときの H_2S の挙動は明らかにし得なかった。

謝 辞

この研究に当たって、測定および分析作業には柴田正樹・中司啓二の両君を中心として、福岡成悦・甲斐嘉明・千葉斐子の諸君の協力を得た。また八幡平観光 K K, 斉藤忠造専務・青木 正部長には便宜をはかって頂いた。なお、微生物活性の検討には岩手大学、塩田日出夫教授・桜井米吉助教授の、また湖盆測量には佐藤晃三教授・青木貞恵助手の指導と協力を頂いた。また名古屋大学名誉教授 菅原 健先生には助言を頂いた。各位に謝意を表する。

文 献

- 地質調査所(1964): 5万分の1地質図「八幡平」および同説明書。
FLIERMANS, C. B. and T. D. BROCK (1973): Assay of elemental sulfur in soil. *Soil Sci.*, 115: 120-122.
後藤達夫(1973): 工業活動と水質——北上川, 半谷高久編, 汚染水質機構, 共立出版, p. 27-43.
佐藤 彰(1965): 岩手県衛生研究所温泉分析表, 40 衛研 808-1号。
SILVERMAN, M. P. and D. G. LUNDGREN (1959): Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. I. An impr-

oved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. *J. Bacteriol.*, 77: 642-647.

WAKAO, N., Y. SAKURAI and H. SHIOTA (1977): Microbial oxidation of ferrous iron in acid mine water at sulfur and iron-sulfide mine. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 23: 207-216.

吉田 稔・井上克弘・小川良子 (1977): 酸性河川水

中のアルミニウムイオンが水田土壌におよぼす悪影響——秋田県玉川の例. 土肥誌, 48: 160-165.

(著者: 吉田稔・若尾紀夫・井上克弘, 岩手大学農学部農芸化学科, 盛岡市上田; Minoru YOSHIDA, Norio WAKAO and Katsuhiro INOUE, Department of Agricultural Chemistry, Faculty of Agriculture, Iwate University, Ueda, Morioka 020)