Note

雨と風が湖色の季節変化を異常にした可能性について

牧 陽之助

A Possibility that Heavy Rainfalls with Strong Winds Altered the Seasonal Color Change in the Water of Lake Matsuo-Goshikinuma, in Northern Honshu, Japan

Yōnosuke MAKI

Abstract

In July of 1991, the water in Lake Matsuo-Goshikinuma turned from blue to yellowish red. This change in the color of the water was different from the usual seasonal change, namely blue in the spring, whitish blue in the summer, and yellowish red in the autumn and the winter. In order to explain this irregular change, the relationships among the color, temperatures of the water, dissolved oxygen concentrations, rainfalls, and wind for five years were studied. It became apparent that in June and July of 1991, there were repeated heavy rainfalls over $50\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ accompanied by strong winds. On the other hand, the stagnation of the oxygen-poor (less than $1\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) water of the lake was interrupted by oxygen-rich (over $2\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) water in the upper layer of the water. These findings made it possible to conclude that heavy rainfalls with strong winds led to the increase in the dissolved oxygen concentrations of the water which resulted not only in an oxidation of hydrogen sulfide but also in an oxidation of ferrous ions. The resulting iron hydroxide caused the yellowish-red color of the water in July of 1991.

Key words : dissolved oxygen, rainfall, wind, watercolor

松尾五色沼(通称赤沼)は、湖水の色調が季節によって規則的に変化する。すなわち、早春から初夏にかけては「あお」く、真夏に「しろ」くなり、秋には「あか」く濁るが、冬になるとしだいに透明度を増し、春の「あお」にいたる。ところが1991年、五色沼は通常の色調変化からはずれ、夏に「あか」くなった。

湖沼の陸水学的性質は、湖盆形態や水質・気候などのさまざまな環境条件によって影響を受けるが、気象条件の中では気温が最も重要と考えられる(水野, 1971)。松尾五色沼の場合、湖色の変化を決めているのは、気温の変動による湖水の停滞と循環である。吉田ら(1978)によれば、停滞期には湖水の溶存酸素が減り、表層近くまで上昇した硫化水素はそこで酸化され、単

体イオウの白色懸濁物ができて「しろ」となる。一方、循環期には溶存酸素が増え、水中の鉄(II)イオンが減り、水酸化鉄(III)の褐色コロイド物質が懸濁して「あか」くなる。

本報告では、1990年から1994年にわたる5年間の気温・降水量・風速・風向の観測記録と湖色との関連を検討し、1991年の夏の「あか」の原因について説明を試みた。

松尾五色沼は、十和田八幡平国立公園に近い、岩手県松尾村の御在所温泉の北東に位置する。海拔890mの高地にあり、平均直径約44.7mのはほぼ円形の湖で、最大水深は13.0mである。岸からはほぼ垂直に深くなって約10mに達しており、湖盆形態はちょうど「たらい」のようである。pHは一年を通じて3前後の非調和型湖沼

で、湖は底から湧出する水温約 16°C の地下水によってまっばら養われている。ほかに流入水はなく、また溢流水は隣接する御在所沼に流れ込む。湧出水には、鉄(II)イオン約 $30\text{mgFe}^{2+}\cdot\text{l}^{-1}$ と硫化水素約 $1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ が含まれている(吉田ら, 1978)。

湖色・水温・溶存酸素の観測は6月中旬から10月まではほぼ1週間に1度、それ以後は2週間ないし1ヶ月に1度とした。湖水の色は目視と偏光フィルターを使った写真撮影によって記録した。基本的な色調として「あお」・「しろ」・「あか」を区別した。「しろ」と「あか」については、「あお」の色調にすこしでも白色懸濁物の「しろ」ないし褐色懸濁物の「あか」が認められた場合には、それぞれ「しろ」ないし「あか」と記録した。水温と溶存酸素は、水深3mまで、溶存酸素計(YSI社57型：クラーク型隔膜ポーラログラフセンサ)と、溶存酸素センサに付属するサーミスタ温度センサによって測定した。

気象観測結果は、松尾五色沼の南西約3kmにある旧松尾鉱山強酸性廃水の新中和処理施設の屋上で、自動観測装置によって記録されたもので、1990年から1994年にわたる記録を調べた。1日当たりの降水量と、10分間の平均風速が $5\cdot 10\cdot 15\cdot 20\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ を超えたそれぞれの回数を1日毎に数え、これを風の強さの指標とした。あわせて風向を記録した。

Figure 1 には1990年から1994年の5年にわたる松尾五色沼の湖色変化を示した。色調の交代時期は年毎に少しずつ違ったが、年間を通しての色調の経過という立場からみると、

Fig. 1. Seasonal change in the watercolor of Lake Matsuo-Goshikinuma from 1990 through 1994. The watercolor of Lake Matsuo-Goshikinuma was classified into three categories: blue or greenish blue (*), white (○), and yellowish red (●).

1990・1992・1993・1994年の湖色変化は、規則的なパターンを示した。これに対して1991年には、6月頃まで「あお」であった湖水が7月に入って突然「あか」く濁った。この「あか」は強弱を繰り返しながら8月末まで続き、その後一時的に「しろ」くなり、次いで秋の「あか」となった。

Figure 2 には1991年と1992年の5月後半から10月までの水温の垂直分布を示した。この期間の水温の変動は、1993年および1994年も1992年と同様であった。すなわち、5月から水温は14ないし15°Cからしだいに上昇し、7月と8月には17から18°Cを維持した。9月にはいる頃緩やかに下降に転じ、9月中旬から後半には16°Cに戻った。(Fig. 2B)。これに対し、1991年には6月には16から17°Cであったが、7月中旬から8月中旬にかけての約1ヶ月間、水温は14から15°C代にさがった。8月後半からは16から17°Cに回復したが、9月後半から10月にかけてふたたび14から15°C台になった。(Fig. 2A)。

Figure 3 には、1991年と1992年の溶存酸素

Fig. 2. Vertical distributions of water temperature during the summer and autumn in 1991 (A) and 1992 (B). In 1991, cold water (lower than 16°C) appeared from the middle of July through the first half of August. In contrast, the temperatures during July and August in 1992 were higher than 17°C.

の垂直分布を示した。1992 年は、6 月中頃から溶存酸素が 1 から $2\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ の水塊が表層近くまで上昇してくるようになり、7 月から 9 月いっぱい恒常的に 1 から $2\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ という状態であった。これに対し 1991 年では、6 月中旬に溶存酸素が $1\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ 以下という水塊が上昇し、停滞した。この貧酸素水の勢いは 1992 年に較べて非常に強く、表層近くまで広がって、断続的にはあるが 9 月中旬まで、約 3 ヶ月にわたって続いた。この期間の溶存酸素は、水深 1m では 0.3 から $0.7\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ 、水深 3m では 0.2 から $0.5\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ であった。停滞期にこのような溶存酸素の低い層ができる事は、湖底から湧出する地下水にはほとんど分子状酸素が含まれておらず、したがって水深約 10m

の底に近い部位では、無酸素層が形成されると推定される。このような表層の貧酸素状態はなんとか中断され、 3m 以深にまで 2 から $3\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$ をこえる溶存酸素が数度観測された。この事は水の停滞がなんらかの原因で一時的に解消し、その後ふたたび貧酸素状態になって停滞した事を示しており、注目に値する。

Figure 4 には、1990 年から 1994 年の 6 月から 9 月の日雨量と風の状況を示した。1991 年

Fig. 3. Vertical distributions of dissolved oxygen concentration from June through October in 1991 (A) and 1992 (B). In 1991, the welling of the oxygen-poor (lower than $1\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) water was powerful and it reached the surface of the lake. The stagnation of the oxygen-poor water began from the middle of June and lasted through the first half of September, but it was interrupted by oxygen-rich (higher than $2\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) water. The welling in 1992 was weak and the oxygen-poor water remained a few meters below the surface.

Fig. 4. Daily rainfall (■) and relative wind strength (⋯) during June, July, August, and September from 1990 through 1994. In 1991, repeated heavy rainfalls over $50\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ occurred in June and July, and further rainy days (about $20\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) continued from the latter half of July to the first half of August. In addition to heavy rainfalls, winds were very strong, especially during June and July in 1991. These rainfalls and winds probably resulted in the increase in dissolved oxygen concentrations of the water and caused the yellowish-red color.

は6月と7月に日雨量が50mmをおおきく超える豪雨が頻発しており、7月には20mm前後の日が連続した。また、降水とともに強い風が吹いたことが読み取れる。この時期、10分間の平均風速が $15\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ を超えることもしばしばで、その場合、風向は北西ないし北北西に限られていた。一方、1992年から1994年では日雨量が50mmを超えるような豪雨は、1994年の9月末だけであった。また風も1991年の6月と7月にくらべて弱かった。

Table 1 には、6月から9月にかけての月別の積算雨量と日雨量が50mmを超える豪雨の月別回数を示した。1991年は1992年の3倍、1993年と1994年の2倍もの雨量が記録された。ことに7月には1992・1993・1994年の2倍から8倍の雨が降った。さらに1991年には、計8回の豪雨が観測された。

夏に湖色が「あか」になる例は、1978・1979・1983年にも観察されている(吉田ら, 1978; 若尾ら, 1980, 1985)。その場合、「あか」は春から夏にかけて、短期間だけ、循環期から停滞期に移行する頃に現われると報告されている。これに対して1991年の場合は、「あか」の期間は7月始めから8月末の約2ヶ月間にも及び、非常に長かった。さらに、1991年の場合は貧酸素水が6月中旬にはすでに表層まで広がっており、これは「あか」の始まる2週間以上前であった。すなわち、「あか」になったのは停滞期にはいった後である。これらのことから、吉田らの観測例は、循環から停滞への移行期に一時的に見られた現象であるのに対し、1991年の「あか」は、停滞期に長期間にわたってみられた、この夏特有の現象と考えられる。

1991年の夏の水温は14から16°Cで、確かに低かった。一般に、低温条件は化学反応とし

ての酸化活性を抑制するはずだから、鉄(II)イオンの酸化反応に起因する「あか」にとってはマイナスの要因である。したがって冷水そのものが「あか」と直接に関係したとは考えられない。一方、14から16°Cという水温は、例年の秋に「あか」になるときの水温に相当するから、この水温は、湖色を「あか」くするには十分な温度である。

夏の「しろ」は、酸化還元電位のより低い硫化水素の酸化はすすむが、鉄(II)イオンの酸化は、溶存酸素の不足によって抑えられている状態にあると考えられる。このような微妙な状態の形成と維持とは、溶存酸素の供給のされかたにも依存しているに違いない。すなわち秋の「あか」は、水温の低下によって水の循環が始まり、表層にあった溶存酸素に富んだ水が急激に湖全体にゆきわたることによって引き起こされ、この場合には、おそらく鉄(II)イオンと硫化水素の酸化が同時に進行する。これに対して夏の「しろ」の場合には、水が停滞して安定し、深層から上昇してくる硫化水素を含んだ貧酸素水と表層の富酸素水とが相接した境界面で硫化水素の酸化だけが進行し、鉄(II)イオンの酸化には至らないのであろう。

1991年には貧酸素水も充分に広がっており、この点で「しろ」になる条件はそろっていた。それにもかかわらず「あか」になったのは、秋の「あか」に対応するような、いわば水体を攪拌するような急激で豊富な酸素供給があったためと推察される。それによって硫化水素の酸化に加え、硫化水素の数十倍も含まれている鉄(II)イオンの酸化反応が進行し、その結果「あか」になったものと考えられる。

Figure 3Aに見られるような、断続的で3m以深におよぶ溶存酸素の「くさび」は、1992・

Table 1. Monthly rainfall ($\text{mm}\cdot\text{Month}^{-1}$) and the frequencies ($\text{Times}\cdot\text{Month}^{-1}$) of heavy rainfalls over $50\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ in the area of Lake Matsuo-Goshikinuma from June through September.

Year	June	July	Aug.	Sep.	Total
Rainfall (Frequency)					
1990	156.0 (0)	270.0 (2)	140.0 (0)	348.0 (1)	914.0 (3)
1991	218.5 (2)	443.5 (2)	334.0 (2)	226.0 (2)	1222.0 (8)
1992	45.5 (0)	106.0 (0)	134.5 (0)	108.5 (0)	394.5 (0)
1993	148.5 (1)	215.5 (0)	130.0 (0)	137.0 (0)	631.0 (1)
1994	139.0 (0)	53.5 (0)	120.0 (0)	312.5 (3)	625.0 (3)

1993・1994年の夏には観測されていない(Fig. 3B)。このくさびは1991年の夏に、攪拌を伴うような急激で豊富な分子状酸素の供給があったことを予想させる。

湖の水体への分子状酸素の供給源としては、1)底からの地下湧水、2)水体内の光合成活性、3)大気、4)雨水、などが考えられる。1991年の溶存酸素の分布図(Fig. 3)から判断して、底からの湧水そのものの溶存酸素が増加したとは考えられない。また2)と3)についても例年と変わって変化した証拠はない。

1991年の6月と7月の降水の状況は多量であるばかりでなく、集中的になんども降るというかたちであった(Table 1)。降水によってどの程度の分子状酸素が供給されるかについては、ほとんどわかっていない。しかし、松尾五色沼は水体が小さく、表面積(約1,570m²)に対して水深が浅い(吉田ら, 1978)。したがって、溶存酸素の供給という点からみて、Table 1のような多量の降水は松尾五色沼にとって重要な意味を持つであろう。さらに松尾五色沼のような水深の浅い小さな湖では、一定方向の風に連続的にさらされる事によって、垂直混合が比較的容易に起こる事も予想される。Figure 4に示したように、豪雨は強い風をともなったことが読み取れ、表層水の攪拌とそれにとまう分子状酸素の供給に、おおきく寄与したと思われる。

謝 辞

気象観測記録の帯出に快く応じてくださった金属鉱業事業団松尾管理事務所前所長の菊池巖氏ならびに現所長の井上忠夫氏、またお世話いただいた金属鉱業事業団と新中和処理施設の方々に、厚く御礼申し上げます。本研究をすすめるに際しては、岩手医科大学教養部の中館興一教授、岩手大学名誉教授吉田稔先生、岩手大学農学部若尾紀夫助教授、岩手医科大学教養部の松政正俊博士はじめ多くの方々にご教示をいただき、討論に加わっていただきました。こころより感謝申し上げます。なお、冬季の現地調査は、家族(牧香久子・牧秋穂・牧冬誌)の協

力無しには遂行できなかった。記して謝意を表します。

摘 要

1991年の7月、松尾五色沼の湖色が、「あお」から「あか」に変わった。この変化は、春には「あお」く、夏に「しろ」くなって、秋から冬には「あか」くなるという、通常の規則的な湖色変化とは異なるものであった。この現象を説明するために、1990年から1994年の5年間の湖色変化と、水温・溶存酸素濃度・降水量・風向・風速との関連を検討した。その結果、1991年の6月と7月には日雨量が50mmを超える強い風を伴った降雨が繰り返り起きた事がわかった。この時期には、停滞していた表層水の溶存酸素は1mg O₂・l⁻¹以下であったが、2mg O₂・l⁻¹以上の富酸素水の「くさび」が数回観測された。以上の知見から、1991年の夏には、強い風を伴った多量の降雨が頻発し、一時的に表層水の溶存酸素量が増加し、その結果、硫化水素の酸化反応に加えて、鉄(II)イオンの酸化がすすみ、湖色が「あか」になったと推察した。

文 献

- 水野寿彦(1971):池沼の生態学 築地書館
吉田稔・若尾紀夫・井上克弘(1978):岩手県松尾「五色沼」の湖色の季節変化 陸水誌, 39: 170-178.
若尾紀夫・吉田稔(1985):岩手県松尾「五色沼」における全細菌数、鉄酸化活性および湖色の季節的变化 岩手大農報, 17: 333-341.
若尾紀夫・吉田稔・桜井米吉・塩田日出夫(1980):連続培養系としての松尾「五色沼」における微生物酸化と湖色変化 岩手大農報, 15: 29-47.

(著者:牧陽之助, 岩手大学人文社会科学部生物学教室, 〒020 盛岡市上田 3-18-34; Yonosuke MAKI, Laboratory of Biology, Faculty of Humanities and Social Sciences, Iwate University, Ueda 3-18-34, Morioka 020)

1995年3月28日受付

1995年5月8日受理