山形県「鍋越沼」の湖沼学的研究

加 藤 武 雄

Limnological investigations of Lake Nabekoshi-numa,
Yamagata Prefecture
By Takeo KATŌ

1. 緒 言

山形・宮城両県境の鍋越峠付近には数多く湖沼が分布するが、その代表的なものとして鍋越沼、若畑沼、魚取沼の3者が挙げられる。これらの湖沼については、これまでほとんど調査が行なわれたことはない。筆者はこれらを中心にして、この地域の湖沼を地方湖沼学的に検討し体系づける目的で、まず鍋越沼から研究をはじめた。この湖沼は東経 $140^{\circ}38'$ 北緯 $38^{\circ}36'$ に位置し、その湖面標高は440mである。この東、南、北側の湖岸には比較的急に山がせまり、西側だけが狭く開いている。その狭窄部には尺八吐が設置されており、ここより排水された湖水はすぐ西方にある小湖沼に湛えられてから農業用水に供せられる。地形的には、この湖沼はこの狭窄部が山地の地すべりか崩壊によつて堰き止められて生じた湖沼と見られる。さて、筆者は1965年にこの湖沼の湖盆形態の調査と、夏季における水温・水質の成層構造の解明に重点をおいて研究を行なつたので、その際得られた成果を報告する。

2. 湖 盆 形 態

1965年7月26日から28日にかけて鍋越沼の測量および鍾測を実施した。その結果得られた深度図を図2に示し、さらにそれから求めた湖盆形態の諸計測値を表1にかかげる。これから明らかなように湖岸線にはきわめて不規則な出入が認められ、したがつて肢節量が大きく1.95である。この湖表面は東西に長く南北に短い形態をなし、その東西径および南北径がそれぞれ467m、270mと計測された。なお、湖岸線の長さは1,650m、湖表面積は $5.69 \times 10^4 \text{m}^2$ 、容積は $3.66 \times 10^5 \text{m}^3$ 、最大深度は19.20mである。また湖沼の西半分が一般に浅くて東半分が深い。図2に $R_1 \sim R_8$ と記してあるのはこの湖沼への流入河川で、盛夏には流量はいずれも小さい。しかし降雨時または融雪期には流量が増加して湖水の涵養に大きい役割を果たす。また図のH地点には排水口（尺八吐）が設置されている。

図1. 鍋越沼周辺の地形図 (五万分の一地形図: 葉菜山)

図2. 深 度 図

表 1. 湖盆形態諸計測値表

湖 表 面 積	$5.69 \times 10^4 \text{m}^2$	深度 (m)	等深線延長 (m)	等深線水準面面積 (m^2)
湖表面の長さ(東西径)	467m	0	1650	56900
湖表面の長さ(南北径)	270m	2	1580	50760
湖 岸 線 延 長	1,650m	4	1440	41110
最 大 深 度	19.20m	6	1320	31230
平 均 深 度	6.42m	8	975	19780
容 積	$3.66 \times 10^6 \text{m}^3$	10	750	11350
肢 節 量	1.95	12	615	7560
		14	450	5445
		16	330	1958
		18	90	248

3. 湖水の理化学的性質

この湖水の理化学的性質を明らかにするために、現地および実験室にて 諸種の測定や化学分析を行なったが、それらの方法は前報 (1966) と同じである。現地調査を 1965 年 7 月 29 日と 11 月 7 日との 2 回にわたって実施したが、第 1 回目には水温・水質の成層発達の

観察に重点を置き、第2回目には湖表水の水質分析を目的とした。採水点としては最深点(図2のMを)選んだ。

表2. 湖表水の水質 (1965)

採水日	Ta (°C)	Tw (°C)	pH	RpH	Re (mg/l)	DO O ₂ (mg/l)	O ₂ (%)	pH4.3Bx (me/l)	Na ⁺ (mg/l)
7月29日	27.2	22.2	6.8	6.9	64	8.28	102.2	0.061	3.6
11月7日	7.2	9.6	6.6	6.7	60	12.23	110.9	0.130	5.1

採水日	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Hd (CaCO ₃ mg/l)	Fe (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	COD (O ₂ mg/l)
7月29日	0.3	2.4	1.3	11.3	0.06	5.8	2.5	18.8	0.82
11月7日	0.3	1.4	1.0	5.6	0.02	5.6	1.2	16.9	1.06

表3. 主要イオンの当量濃度 (me/l)

—1965—

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
7月	0.16	0.08	0.12	0.11	0.16	0.052	0.27
11月	0.22	0.08	0.07	0.04	0.16	0.025	0.32

3.1 湖表水の水質

はじめに表2をもとにして湖表水の水質を二、三検討してみよう。この湖沼では7月、11月を通じて全蒸発残留物がせいぜい60 mg/l程度に過ぎず、溶存化学成分の量はきわめて少ない。pHはそれぞれ6.8、6.6でほぼ中性に近く、酸素飽和度はいずれの場合も100%を越している。いま表2から主要成分を取り出して含有量を当量にて表現すると表3のようになるが、当量の大小関係は両月に共通して、カチオンではNa⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺、アニオンではCl⁻>HCO₃⁻>SO₄²⁻の順になる。一般に内陸地方の陸水ではCa²⁺>Na⁺がふつうであるが、ここでは逆で特異な関係にある。しかもカチオン、アニオンの代表成分であるNa⁺、Cl⁻間にNa⁺≒Cl⁻が成り立つので、この湖表水の主成分はNaClであることが明らかである。さきに筆者ら(1965)が研究した鳥海山の火口湖「鳥の海」においても、湖表水の主成分はNaClであつた。いずれも深雪地帯にあり、冬季には北西季節風の影響をいちじるしく受ける地域である。鯛越沼の湖水はおもに融雪水によつて涵養されるものと考えられるから、溶存主成分であるNaClは鳥の海の場合とおなじく積雪中に含有する風送塩に由来するものとみてよからう。つぎに、この湖表水の特徴としてケイ酸含有量の多いことが挙げられる。7月、11月にそれぞれSiO₂として18.8、16.9 mg/l含まれるが、この集水域には凝灰岩や砂岩などの露頭が顕著で、それから比較的容易にケイ酸が溶出されるためと考えられる(1962)。

表 4. 水温・水質の深度分布

(1965年 7 月29日)

深度 (m)	Ta (°C)	Tw (°C)	pH	RpH	Re (mg/l)	DO (mg/l)	DO (%)	B・C・G アルカリ度 (me/l)	Ph. 酸度 (me/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Hd CaCO ₃ (mg/l)	Fe (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	COD (O ₂ mg/l)
0	27.2	22.2	6.8	6.9	64	8.28	102.2	0.061	0.027	3.6	0.3	2.4	1.3	11.3	0.06	5.8	2.5	18.8	0.82
1	26.1	22.6	6.7	6.8	46	8.37	104.8	0.063	0.035	2.7	0.3	2.4	2.5	16.1	0.11	6.4	1.2	18.8	0.92
2	26.0	19.4	6.7	6.8	70	8.39	99.2	0.063	0.071	2.7	0.3	2.4	2.5	16.1	0.03	6.2	1.0	19.5	0.94
3	26.2	18.5	6.6	6.8	70	9.85	114.5	0.061	0.039	2.7	0.3	2.4	2.4	15.7	0.05	6.2	1.0	18.8	0.85
4	25.5	14.7	6.3	6.9	60	8.64	92.5	0.063	0.055	2.7	0.3	2.4	2.4	15.7	0.03	6.8	0.8	19.5	0.88
5	26.0	10.9	6.3	6.9	58	9.21	91.2	0.068	0.067	4.1	0.3	2.2	2.4	16.3	0.06	6.4	0.8	18.5	0.75
6	25.8	7.6	6.3	6.8	96	9.94	91.2	0.070	0.090	4.2	0.3	2.4	2.5	16.3	0.10	7.4	0.6	19.5	0.63
7	26.5	5.2	5.9	6.9	60	8.98	77.3	0.068	0.120	3.9	0.3	2.6	2.4	16.3	0.10	7.2	0.6	18.5	0.42
8	27.0	5.6	5.8	6.9	74	7.48	65.1	0.079	0.124	3.7	0.3	2.4	2.5	16.3	0.05	7.4	0.5	20.2	0.45
9	25.6	5.1	5.8	6.9	66	2.92	25.2	0.072	0.103	3.8	0.2	2.2	2.6	16.3	0.14	7.4	0.5	20.0	0.82
10	25.1	5.0	5.8	6.9	62	3.45	29.7	0.074	0.090	3.8	0.3	2.2	2.7	16.5	0.08	7.4	1.0	19.2	0.45
11	25.0	4.0	—	6.9	52	2.08	17.3	0.074	0.039	4.0	0.3	2.2	2.6	16.3	0.12	7.6	0.5	20.3	0.57
12	25.2	5.0	—	6.9	62	1.96	16.7	0.080	0.106	4.0	0.3	2.2	2.9	17.3	0.07	7.6	0.6	20.3	0.58
13	26.1	5.0	—	6.9	68	1.97	16.8	0.027	0.150	4.0	0.3	2.2	2.9	17.3	0.07	7.8	0.5	20.8	0.42
14	25.2	4.9	—	6.9	60	1.69	14.4	0.082	0.159	4.0	0.3	2.2	2.9	17.3	0.07	7.6	1.0	18.8	0.43
15	25.0	4.9	—	6.9	56	1.64	14.0	0.084	0.150	4.1	0.3	2.2	2.6	16.3	0.10	7.4	0.6	18.8	0.47
16	25.3	4.9	—	6.9	86	1.66	14.2	0.084	0.149	3.8	0.3	2.2	2.6	16.3	0.10	8.0	1.1	21.1	0.31
17	25.3	5.0	—	6.9	—	1.49	12.7	—	0.150	4.0	0.3	2.2	2.6	16.3	0.06	7.8	0.6	20.1	1.14
18	25.0	4.9	—	6.9	44	1.64	14.0	0.091	0.150	3.8	0.3	2.2	2.9	17.3	0.03	7.8	1.0	20.8	0.80

(注) 15時より18時までの間に採水, 透明度=2.20m.

図3. 水温水質の深度分布図 (1965年7月29日)

3.2 水温・水質の垂直変化

1965年盛夏に実施した水温・水質の深度分布の測定結果を表4、図3に示す。はじめにこれらにもとずいて盛夏における水温の分布状況を観察すると、この湖沼には温帯湖に特有な水温成層の顕著な発達が認められる。すなわち成層の構成は大局的に見て0～3mの表水層、3～9mの躍層（変水層）、9～19.2mの深水層の3層と考えられる。いま、これらの層を表面から順にI層、II層、III層と呼ぶことにしよう。躍層はさらに3～6m、6～9mの2層から成るものと考えたほうがよいので、これらをII₁層、II₂層と細分して名づけておく。このように成層構造を考えた論拠は、水質の深度分布を考察するさいに明らかにされるはずである。

つぎに溶存酸素量の深度分布について検討を試みよう。盛夏における湖水の停滞期にはこの湖沼は水温の成層発達にともなつて溶存酸素も成層するが、その発達のようなすは水温とは多少おもむきを異にする。こまかに述べれば、溶存酸素は表面から深度3mまではほぼ過飽和の状態を続けながらわずかに増加し、3m以深6mまでの層では飽和に近い状態を保ちつつさらに増加の傾向を示す。それから6～9mの層において激減し、それ以深では深度の如何にかかわらずほぼ定値（約2mg/l）を保つようになる。溶存酸素の場合には水温のときと異なり6～9mが顕著な躍層と見ることができる。0～3mのI層では前述のように溶存酸素が過飽和になつており、水温成層と対比しても表水層と見たほうがよい。また9m以深の層においては、水温、溶存酸素量ともにその値が変化せず、明らかに深水層を形成するものと言える。このように溶存酸素の場合にも、水温のときとおなじ深度区

分によつてその成層構成を無理なく説明できるのである。

pH に関する成層発達のようなは溶存酸素の場合と類似し、変水層に当る II_1 , II_2 兩層の区別がとくに明らかである。ここに 10m 以深の pH については現地における測定値を欠くが、いずれも 5.8 以下であることを確認している。RpH は全層を通じて一定と見てよく、その値は 6.8 または 6.9 である。さらに RpH と pH との差を見るに I 層ではとくに値が小さくて約 0.1 に過ぎないが、 II_1 , II_2 層ではそれぞれ約 0.5, 約 1.0 となり、III 層では 1.0 以上となるものと推定される。

B. C. G. アルカリ度 (pH 4.3 Bx) の成層発達の傾向は溶存酸素, pH の場合と異なるが、層の構成はさきに挙げた I 層, II_1 層, II_2 層, III 層と一致する。アルカリ度は I 層においてはほぼ一定値 (0.06 me/l) を保ち、 II_1 層では 0.06 me/l から 0.07 me/l へと単調にその値を増加する。 II_2 層ではその深度による増加率は II_1 層の場合よりゆるやかになり、アルカリ度は 0.070 me/l から 0.072 me/l に増加するに過ぎない。III 層では 0.072 me/l から 0.084 me/l へと順次増加の傾向を示す。以上の事実にもとづいて総合的に考察すると少なくともつぎのことが言える。まず I 層では湖水は 1 日周期の水温変化をなしてよく混合し、しかもここでは光合成もよく行なわれるものと考えられる。したがつて前述のようにこの層では溶存酸素が過飽和状態にあり、 CO_2 の溶存量は少ない。さきに見たとおり、この層では (RpH-pH) がわめて小さく、しかも pH が全層中最大値を示すことは当然のことである。II 層以深では湖水は完全に近く停滞して、酸素の表水層からの補給や光合成による生成が僅少かまたは絶無であると考えられる。透明度は 2.20m であるから補償深度は約 4 m

と推定され、この考えは支持されるであろう。したがって溶存有機質の分解に溶存酸素が消費されて CO_2 を生成し、pHの減少と(RpH-pH)の値の増加がひき起されることになる。

おわりに、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の3イオンについて深度分布をまとめて観察するが、いずれの場合にも成層し、しかもこれまでとおなじ3層から構成されているものと考えられる。とくに Na^+ と Cl^- の深度分布の傾向は類似し、それぞれの濃度はI層ではほぼ一定で、II層では深度とともに増加の傾向を示し、III層ではふたたび一定値を保つようになる。III層において特記すべきことは Na^+/Cl^- の含有比がほぼ0.5を保つが、この値は Na/Cl の原子量比0.6に近いことである。さらにこの層では調査時の盛夏においてさえ水温は最大密度に近い 5°C を示すので、この水塊は融雪水に由来しその溶存主成分は風送塩起源の NaCl であることもよく理解される。 SO_4^{2-} の深度分布はいままで述べた2イオンとは逆にI、II層では深度の増加につれてしだいにその濃度の減少を来とし、III層では多少不規則ではあるが大局的には一定値をとると見られる。深度を増加してとくにII、III両層になると、湖水は還元的環境に置かれるので、このような傾向を示すものと考えられる。

なお、化学組成から成層の構成が上記の3層と見るのが妥当であるか否かを検討した。すなわち主要カチオンとして Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ を選び、深度ごとの当量百分率を三角座標に表現した(図4)。図4の数字は深度(m)を示したものである。これによると湖表水の組成は他とは異なるが、補償深度と推定される深度4 mまでの1群がこの三角座標にま

図4. カチオン組成に関する三角座標 (深度別)

まつて位置し、それ以深のものも別の一領域によいまとまりを示す。これによると深度4mまでを表水層と見たほうがよいかもしれないが、これまで述べたいろいろの根拠から3mまでを表水層と考えたのである。このように大局的に見れば表水層のカチオン組成は変水層、深水層のそれらとは異なることがわかる。また、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} の3アニオンについてもこれと同様な三角座標を描いて検討してみたが、全層の各点がすべて座標中の一領域にまとまり、層ごとの差異は認められなかった。

3.3 湖沼の生産

WINKLER 法にもとずいて深度10cmにおける湖沼の一次生産量の測定を試みた。すなわち1965年7月26日18時～28日18時の48時間にわたって観測し表5のような結果を得た。この測定法には多くの議論(西条, 1957)はあるが、われわれの結果は一応湖表水の生産力を表わすものと見てさしつかえない。なお表中1m²当りの生産量は湖表より深度10cmま

表5. 湖表水の一次生産

	$\text{O}_2\text{mg/l. day}$	$\text{O}_2\text{mg/m}^2\text{. day}$
総生産量	0.870	87.0
純生産量	0.080	8.0
呼吸量	0.790	79.0

での湖水について考えた値である。光合成のさいには、酸素1モル生産するのに必要なエネルギーは112 KCalとされている。

そこで、さきとおなじく湖表水の生産力をエネルギーで表現すれば表6のようになる。こ

表6. 湖表水の一次生産に必要なエネルギー

	必要エネルギー $\text{cal/m}^2\text{. day}$	エネルギー効率 %
総生産	305	0.0063
純生産	28	0.0006
呼吸	277	0.0057

こには湖表水における一次生産に消費される太陽放射量のエネルギー効率を算出しておいた。7月における太陽放射量としては熊ヶ谷における測定値481 cal/cm²・dayを現地における値として採用した。この結果から判断すると、この湖沼の一次生産力が小さく、この湖沼は貧栄養湖に属するものと見られる。全蒸発残留物も表4に見られるように全層にわたって100 mg/l以下で貧栄養湖の性格を反映する。なお、透明度が2.20mで小さく富栄養型を思わせるが、これは融雪時に集水域から流送されて来た無機質のサスペンションでプランクトンによるものではないと考える。

4. 結 言

鍋越沼について研究した結果、これまでに得られた知見はつぎのとおりである。

- (1) 湖盆形態は複雑で肢節量が1.95である。諸計測値をつぎに示す。

湖 表 面 積	$5.69 \times 10^4 \text{m}^2$
湖岸線延長	1,650m
最 大 深 度	19.20m
平 均 深 度	6.42m
容 積	$3.66 \times 10^5 \text{m}^3$

- (2) 夏季停滞期には温帯湖特有の顕著な水温成層の発達が見られる。これにともなうて諸種の溶存成分も成層する。

- (3) 夏季において湖表水は pH 6.8で中性に近く、溶存成分のおもなものは NaCl と考えられる。この供給源は融雪水中の風送塩にあるものと推定される。

- (4) 湖表水について、夏季における一次生産量を測定したが、はなはだ低くつぎのとおりである。

総生産量	$0.870 \text{ mgO}_2/\text{l} \cdot \text{day}$
純生産量	$0.080 \text{ mgO}_2/\text{l} \cdot \text{day}$

当時、透明度は2.20mで小さかったが、これはプランクトンの存在によるものでなく、融雪水から供給された無機質の浮遊物によるものと考えられる。

- (5) 湖沼標式は貧營養湖に属する。

(1966年4月23日東北地理学会春季学術大会にて講演)

この研究をなすに当り、当教室の海藤仁君が現地調査および実験に協力した。ここに記して深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 加藤武雄：角川水系（山形県）の地球化学的研究，陸水雑，23, 2, 45～54, 1962.
 加藤武雄，米地文夫：鳥の海火口湖の湖沼学的研究，東北地理，17, 1, 36～40, 1965.
 加藤武雄：一切経「五色沼」の湖沼学的研究，陸水雑，27, 1, 40～47, 1966.
 西条八束：“湖沼調査法”，古今書院，東京，1957.

S U M M A R Y

In the surrounding area of Nabekoshi Pass, many lakes and swamps are distributed here and there. In spite of abundance of lakes, this district has ever been ignored by the limnologists. The author has had cherished desire to explore these lakes from the standpoint of regional limnology. In the summer

of 1965, he had a chance to carry out the survey of Lake Nabekoshi-numa, a representative one of these lakes. The results of the investigation are summarized as follows:

(1) The morphometrical data calculated from the bathymetric map (Fig. 2) are shown in the next table.

Surface area	$5.69 \times 10^4 \text{ m}^2$
Length of shore line	1,650 m
Maximum depth	19.20 m
Shore development	1.95
Volume	$3.66 \times 10^5 \text{ m}^3$

From the geomorphological point of view, this lake is considered to be a dammed lake formed by landslide.

(2) In summer stagnation period, this lake exhibits a thermal stratification common to temperate lakes. As for many dissolved materials, the development of stratification is also observed.

(3) The chemical analyses reveal that the surface water shows neutral reaction and the main dissolved substance is sodium chloride derived from the atmospheric salt which is transported by the melt water.

(4) Judging from the low photosynthetic productivity and the poor content of dissolved materials, this lake is deduced to be an oligotrophic lake.

(著者：加藤武雄；山形大学教育学部化学教室，山形市；Takeo KATŌ, Chemical Laboratory, Faculty of Education, Yamagata University, Yamagata City)