総 説

日本 の 無 機 酸 性 湖 研 究

佐 竹 研 一

Limnological Studies on Inorganic Acid Lakes in Japan

Ken'ichi SATAKE

Abstract

Many volcanic acid lakes having pH from 0.9 to 5.5 are distributed throughout Japan. Most of the lakes with pH less than 4.0 are found in craters of volcanos, and their acidity depends on an inflow of acidic water from the lake bottom. Many of the remaining lakes are located in calderas or have a volcanic dammed origin, and their acidity depends on an inflow of acidic river water.

Studies on inorganic acid lakes in Japan were initiated by Tanaka, who observed Lake Katanuma in 1915 and Lake Onumaiki from 1920 to 1927. Next came the limnological works on the Goshikinuma lake group (pH 3.1-7.2) and Lake Katanuma by YOSHIMURA *et al.* The typology of acid lakes was discussed by UENO who observed the lakes located at North Shinano, South Kyushu and the Kuril islands. The biota in acid lakes were studied by NEGORO, KIKUCHI, KOKUBO, FUJIMATSU, TAMURA and MASIKO *et al.*

They researchers reported *Pinnularia braunii* var. *amphicephala* in Lake Katanuma (pH 1.4 at that time), *Brachionus urceolalis* in Lake Ichibishinaiko (pH 2.8), *Leptodictyum* sp. and fish in Lake Osoresanko (pH 3.4), as well as the other algae, zooplankton and insects in the acid lakes. Anzai investigated the change of pH with the cease of volcanic activity, and he found that the deposition of iron compounds was followed by the occurrence of *Pinnularia braunii* var. *amphicephala*.

Acidification of lake water under the inflow of the acid river Tamagawa (pH 4.3) was studied by YOSHIMURA and UENO on Lake Tazawako.

After world War II was over study was resumed by MINAMI *et al.*, who reported the chemical compositions of Lake Yugama which contains about 0.2 N sulfuric acid. Observation of biota in acid lakes was commenced by SUZUKI who reported the mold and bacteria in acid lakes. Phytoplankton and zooplankton were observed by MIZUNO on the lake Group located in Kirishima volcano (pH 3.7-7.5), and WATANABE and OYAGI observed benthic diatoms in Lake Fudoike. Macrophytes and fish were observed by YAMAMOTO *et al.*, in Lake Osoresanko. In Lake Katanuma SATAKE and SAITO measured total CO₂ and CO₂ uptake in oxic and anoxic water, and they also clarified the mechanism of sulfur-diatom lamination in the sediment.

Sato observed the change of biota caused by the acidification of Lake Tazawako. EGUCHI *et al.*, observed the inflow of acid river and the change of biota in Lake Toyako.

1. は じ め に

日本列島および千島列島の火山地帯には無機酸を多量に含む強酸性の湖が存在している。この無機酸性湖の湖水は、その水質と生物相に大きな特色があるため、1910年代から活発に研究が行なわれてきた。これらの研究報告は、世界的に見てもわが国の陸水研究の特

色ある分野を作っている。またその成果は、近年欧米で問題になっている工業活動に由来する陸水の酸性化の問題に対し、基礎的な情報を提供するものでもある。

このような点を考え、これまでわが国で行なわれてきた無機酸性湖に関する研究の概略をほぼ発表年順に整理してみたものが本稿である。ただ無機酸性湖の研究は内容がきわめて多岐にわたるため、本稿では、そ

れを十分整理し文献のすべてを網羅することはできなかった。

なお本稿を作成するにあたり、多くの御助言をいただいた名古屋大学西條八東教授ならびに金沢大学益子帰来也名誉教授に感謝いたします。

2. 無機酸性湖の分類と分布

湖沼を分類するにあたり、NAUMANN は湖沼を富栄養型と広義の貧栄養型に大別し、広義の貧栄養型の中に酸栄養型を分類した。次いで THIENEMANN は湖沼を調和湖沼型と非調和湖沼型に大別し、非調和湖沼型の中に腐殖栄養型等と共に酸栄養型を置いた。しかしいずれにせよヨーロッパの湖沼研究者の言う酸栄養型湖沼は腐殖栄養型湖沼の中の酸性の比較的強いものを指していて、わが国の火山地帯に多く見られる硫酸や塩酸等の解離に基いて酸性を示す湖沼は含まれていない。吉村はこの点を考えて、酸栄養型を有機酸栄養型（有機酸性湖）と無機酸栄養型（無機酸性湖）の2つの亜型に分けることを提唱した（YOSHIMURA, 1933）。また上野は日本の非調和型湖沼分類の検討と整理を行ない、非調和型湖沼を悪栄養型（dystrophic）と酸栄養型に大別し、酸栄養という言葉は無機酸性湖に限られるべきであると述べた（UENO, 1958）。

このようにして湖沼分類の中で位置づけられてきた無機酸性湖を pH によって便宜的に分け、pH 4.0 以下を示す湖を強酸性湖、pH 4.0-5.5 を示す湖を弱酸性湖とすると、火山の火口に存在する無機酸性湖には強酸性湖が多く、酸性河川が流入しているものには弱酸性湖が多い。

pH 4.0 以下を示す世界の無機強酸性湖のうち、フィリピン、ルソン島のタール山火口湖（吉村, 1940）、インドネシア、ジャワ島の Kawah Iden 湖（ATKINS, 1930）およびガテマラの Ixpaco 湖（IVANOV and KARAVAIKO, 1966）の他はそのほとんどが日本列島および千島列島に集中して分布し、この中には湯釜（pH 1.0）、濁沼（pH 2.0）、蔵王御釜（pH 2.9）、磐梯赤泥沼（pH 3.0）、恐山湖（pH 3.4-3.6）、磐梯赤沼（pH 3.8）、霧島不動池（pH 3.8）、一菱内小湖（Lake Kipyashcheye）（pH 2.3）、一菱内湖（Lake Goryashcheye）（pH 2.8）等の湖が含まれている。

さらに pH 4.0-5.5 を示す無機酸性湖としては日本では志賀大沼（pH 4.3）、屈斜路湖（pH 4.0-4.4）、猪苗代湖（pH 4.6-5.0）、田沢湖（pH 5.5）、洞爺湖（pH 5.0-7.0）等が代表的な湖である（第1図）。

Fig. 1. Representative inorganic acid lakes in Japan.

3. 初期の研究 (1915-1930)

無機酸性湖の研究は1915年の田中(1918)による“潟沼”の深度と水温の調査が最初で、田中は9月にすでに湖水温が表層から深層まで均一で(24°C)、湖水が循環していることを報告した。次いで田中は1920年より志賀高原の“大沼池”の調査を行ない、湖水の強酸性は流入する赤石沢の強酸性水に起因し、変動が大きく(1926年 pH 2.8, 1927年 pH 3.4)、湖には魚類も棲息していないこと等を明らかにした(田中, 1927)。田中は湖水の pH に関する諸問題についても総合的に検討し(田中, 1928)、日本に酸性湖沼が多い理由として湖水のカルシウム分が少ないこと等を述べた。

4. 研究の発展 (1931-1944)

吉村は田中に引続いて湖沼の pH に関する詳細な整理を行ない(吉村, 1931a, b)、1931年から1936年にかけて根来・山本らと共に磐梯山周辺の湖沼(五色沼湖沼群)を中心に酸性湖の研究を行なった(吉村, 1932, 1935; 吉村・根来・山本, 1936a, b)。

五色沼湖沼群は1888年磐梯山が大噴火した時に山腹を流下した多量の泥流の窪地に生じた多数の湖沼群である。吉村らはこれらの湖を水素イオン濃度別に、(1) 中性または微酸性湖(pH 7.2-5.8)、(2) 弱酸性湖(pH 5.4-4.3)、(3) 強酸性湖(pH 3.8-3.1)に分けた。強酸性湖としては弁天沼(底水, pH 3.8)、赤沼(pH 3.8)、毘沙門沼(底水, pH 3.1)が上げられ、その酸性の原因は五色沼の水源となっている爆裂火口の赤沼(別名赤泥沼)の強酸性水が岩層中を流下、流入するためではないかとした。また強酸性湖赤沼の生物は、鉄細菌、ヨシ、*Leptodictyum* のみで他の生物が見あたらないと報告し、赤沼は酸性が強いと同時に鉄の含有量が大きいので(12.8 mg/l)、吉村はこれを鉄栄養湖とした。さらに吉村は日本の湖が一般に炭酸塩の含有量が少なく、水の酸性化に対し弱く緩衝され、酸性水の流入によって容易に酸性化される点を指摘した。

吉村による酸性湖の研究は“潟沼”でも行なわれ、湖水が硫酸によって強酸性を示し(pH 1.4)酸性度は世界一であるとした。また底生性珪藻 *Pinnularia* sp. が多数存在すること、湖水の循環期でも溶存酸素量が少なく、湖底堆積物が層理を形成していること、泥温は水温よりも若干高めであること等を明らかにし、深度図を作成した。上記の研究成果のうち、特

に pH 1.4 という強酸性条件下で藻類が多量に増殖していることを発見したことは生物の生存の限界に対する認識を広げた意味で重要である(吉村, 1933, 1934)。

吉村らの研究は主に湖内での物理的、化学的、生物の諸現象を総合的に調査し、全体としての関連性を求める総合湖沼学的立場をとっていたのに対し、主に分類を基礎に置く生物学的な立場からの研究は pH 3.4 の恐山湖において進められた(小久保, 1931; 小久保・田村・阿部, 1931; 田村, 1933, 1936; 益子, 1938, 1940)。

小久保は「酸性湖の魚とプランクトン」と題した論文の中で、恐山湖のウグイが自然界で最も低い pH で存在する魚類であること、恐山湖には枝角類(*Simocephalus vetulus*, *Chydorous spaeircus*)および橈脚類(*Cyclops stnuus*)を中心とする動物プランクトンが大量に存在することに注目した。

次にウグイの酸性水に対する耐性を検討するため、中性付近の pH を持つ河川から採取したウグイを酸性水に入れ、このウグイが pH 3.2 で2時間以内で死亡するのを見た。また恐山湖のウグイ(成魚)の胃の内容物はほとんどミズムシ(*Asellus* sp.)であったという。同年小久保は田村・阿部と共に湖底の面積の60%以上がやなぎごけ(*Leptodictyum* sp.)に覆われていること、湖水は冬期結氷すること、湖水の pH は極楽浜沖で最も低く(pH 2.8)、湖水は極楽浜沖の温泉水流入部では無酸素であったことを報告し、動物プランクトンの水平垂直分布についても予察的報告を行なった。恐山湖については引続き田村も研究を行ない、新たに(1)流入河川は9つあるがそのほとんどは中性に近く、湖水の酸性化には pH 2.1-2.2 で流入する温泉水の影響が大きいこと、(2)排水河川正津川では12 km 下流でも pH 3.5 で魚類は棲息しないこと、(3)湖水の pH は表面 3.2 深層 3.3-3.6 で季節変化しないこと等の結果を得た。同じく田村は1935年恐山湖の動植物プランクトンの組成、季節的消長、年変化、垂直移動等について定量的測定を行ない、動物プランクトンは橈脚類1種、枝角類3種、輪虫類4種が存在し、大部分は *Simocephalus vetulus* で次いで *Brachionus urceolaris* が多く報告した。植物プランクトンについてはラン藻類1種、緑藻類2種、珪藻類9種の合計12種で、種類と量がともに限定されていることを明らかにした。恐山湖のプランクトンについては益子も1933年以来研究を進め、1933年に主要であった *Simocephalus vetulus* が1934年にはほ

とんど影を潜め、逆に橈脚類の *Cyclops fuscus* が大きく増加し、出限種が年によって大きく変化することや、湖水の停滞期（7月、8月）には7-10 m にかけて水温躍層が生じ、10 m 以深は無酸素になること（強酸性無酸素層の出現）を報告した。

酸性湖の中には強酸性河川の流入によって酸性化されているものがある。例えば赤石沢の流入による大沼池（田中、1927）、pH 2.1 のセセクベツ川の流入による屈斜路湖（pH 5.1-5.6）（高安と沢、1931；田中館と五十嵐、1939）、pH 3 の長瀬川の流入による猪苗代湖（pH 5.3-5.6）（吉村、1931 a, b）などがこれにあてはまる。上野はこれらの研究成果をふまえ、NAUMANN や THIENEMANN らの湖沼分類の改訂を試み、非調和湖沼型の中に pH 4.0 を基準として酸性湖を分類することを提案した（上野、1932）。

次に上野（1934 b）は長野県に分布する大沼池を含む酸性湖沼群について、湖水の化学分析（KMnO₄ 消費量、SiO₂, Ca, Cl, SO₄, Fe, Mn, NH₃-N, Albuminoid NH₃-N, N₂O₅-N, Free P₂O₅, CO₂, pH 等の測定）および湖内に棲息する生物群集の種類の同定と現存量の推定を行ない、その結果に基づいて湖の分類を行なった。このうち大沼池（pH 3.6）については栄養塩量、出現生物種とも非常に少なく、動物プランクトンは *Bosmina longirostris*, *Chydorus spaericus*, *Cyclops strenuus* の3種のみなので貧栄養（oligotrophic）でかつ酸栄養（acidotrophic）の湖とした。

また同年上野・田中・星野・菊池らは1933年に行なわれた国後島の強酸性湖、一菱内湖（pH 2.8）および一菱内小湖（pH 2.3）の調査結果を報告した（上野、1934a；田中・星野、1934；菊池、1934）。上野はこれの中で、一菱内湖には底生性の珪藻 *Eunotia* sp. を除き植物性プランクトンがまったく存在せず、動物プランクトンとして *Brachionus urceoralis* が独占的に存在していたと報告した。この輪虫は中性湖でも普通に見られる種類であり、生物の適応とその生産を考える上で興味深い。田中と星野は一菱内湖がカルデラ湖で南千島列島湖群の中で最大深度（62.3 m）を有し、冬期は結氷し、夏期には湖水が成層して水温躍層以深が無酸素になること、一菱内小湖は湖内に硫黄噴出口（ブキ）が存在し表層でも無酸素状態になっていること、および塩化物の量が非常に多い（1773 mg/l）こと等を報告した。無酸素になる原因は湖底から供給される硫化水素にあり、両湖では硫化水素の酸化によって生じたイオウの採取が当時行なわれていた。

上野による酸性湖の研究は霧島の不動池でも行なわ

れ、底生動物としてユスリカ幼虫が棲息し、プランクトンは存在しないことが確認された（上野、1936、1938）。酸性湖の生物相に関する研究は pH 1.7 に変化した潟沼でも藤松と根来によって行なわれ（藤松、1933；根来、1933、1944）、藻類から昆虫に至る湖内の生物相の種類が明らかにされた。藤松は珪藻 *Pinnularia* sp. のほかに *Chironomus acerbiphilus*, *Chironomus* sp. (Salinarius-group) 等6種の昆虫の存在や原生動物 *Stylonichia* sp. 輪虫 *Callidina bidens* 等の存在を確認し、根来は潟沼の珪藻を *Pinnularia braunii* (Grun.) CLEVE var. *amphicephala* (A. Mayer) HUSTED と同定した。

なお1933年の根来の論文には赤泥沼（pH 3.3）に一菱内湖と同様 *Eunotia* sp. が存在することや、強酸性湖にはごく限られた生物が多量に出現することに注目した記述（群集生物学の第二法則の引用）が見られる。根来は潟沼の生物相に関する調査を継続し、藻類については後に珪藻の *Pinnularia braunii*, ラン藻の *Cyanidium caldarium*, 緑藻の *Chlamydomonas acidophila* sp. nov., 原生動物については *Euglena mutabilis* *Hormidium vulcanum* 等の存在も確認した。

なお潟沼に関する同年代の研究としては渡瀬（1938）および吉村（1939）による湖底堆積物に関する研究がある。渡瀬は湖底の硫黄鉱床と湖周辺の地質を調査し、硫黄鉱床が湖面一面に層状に分布する粘土質の成層鉱床であり、硫黄鉱の品位は21.3~82.4% にわたり50~60% のものが多いとしている。また硫黄鉱床の成因については湖水に供給された硫化水素や亜硫酸ガスが化学的に酸化されて生じたものではないかと推定した。硫黄鉱床の組成については吉村も分析し、SiO₂ 30-50%, Al₂O₃ 2-4%, Fe₂O₃ 1.1-1.8%, S 36-61% という値を発表した。

火山の火口に存在する強酸性湖は火山活動が衰えた後火口内に水が停滞して湖となったものであるが、当時火山活動をようやく休止し、湖水が停滞するに至った蔵王“御釜”では、安斎により1923年から1938年までの長期にわたる連続観測が行なわれていた。安斎は火山活動と湖水温や化学成分との関係、化学成分の量的変化と微生物の出現との関係等について報告した（安斎、1934 a, b, 1938, 1939）。

御釜の pH は1934年には2.2で生物の存在は確認されなかったが、その後しだいに pH が上昇し、1936年には pH 2.7 となり、湖水中の鉄イオンが酸化沈殿をはじめ、珪藻 *Pinnularia* sp. や輪虫 *Rotifer*

vulgaris 等の生息が認められるようになったという安斎の報告は、火山活動の衰えに伴う酸性湖の推移と生物の活動を考える上で非常に興味深い。後にこの珪藻の種名は根来によって *Pinnularia braunii* var. *amphicephala* Hustedt と同定された (根来, 1939)。御釜については1940年虎石、富永らによる観察も行なわれ、結氷時に氷の下に硫化水素が充満すること等が報告された (虎石・富永, 1940 a, b, c; 虎石・広江・富永, 1940)。

酸性湖の中にはそれまで中性湖であったものが人為的な酸性水の導入によって酸性湖となったものがある。その代表的な湖が田沢湖である。田沢湖は本邦で最も深い湖 (425 m) で発電事業に伴う強酸性河川玉川の導入によって酸性化した。東北振興電力会社による田沢湖への多量の塩酸を含む玉川 (pH 4.3) の導水は1940年より開始されたが、この流入状態についてははじめ吉村 (1942) によって調査され、湖水と導入水の混合は速やかに行なわれること等が明らかにされた。

酸性化前の田沢湖の生物相については上野 (1940) によって調査が行なわれ、底生動物としてユスリカや *Asellus* が420 mの湖底で発見され、他にプランクトンとして輪虫の *Keratella quadrata*、枝角類の *Bosmina coregoni* 等が見い出されたが植物プランクトンの存在は確認されなかった。また当時魚類としてはクニマス、ヒメマス、ウグイ、ナマズ等が棲息していた。

以上が1930年から1944年に至る酸性湖に関する研究の概略であるが、当時日本の無機酸性湖の特性を簡潔に整理したものとしては吉村 (1937) の論文をあげることができる。また酸性湖のみでなく、温泉等も含まれるが、根来 (1944) の酸性水中の微細藻類を主とした植物相に関する研究は、水質と生物相を考える上で重要である。

5. 戦後の研究 (1945-1978)

戦後の火山性酸性湖の研究は南らによる草津白根“湯釜”の化学成分に関する研究によって新たに開始された (南・山県・島・西條, 1952)。湯釜の湖水の酸性度は0.2 Nの強酸と同じで、その酸性には硫酸よりも塩酸の寄与が大きいこと、Feの量は320 mg/l、Caの量は255 mg/l 達すること等を報告した。湯釜はこの調査によって始めて世界で最も強酸性の湖として注目されることとなった。

湯釜の存在によって第二の強酸性湖となった濁沼については、まず鈴木が湖内のカビとバクテリアについ

て調査し (鈴木, 1961 a), 当時 pH 1.9 に上昇した水中に *Penicillium citrinum*, *Aspergillus* sp. *Trichoderma* 硫黄酸化細菌等が存在することを明らかにした。カビの中での最優先種は *Penicillium citrinum* で、酸性湖内での有機物の分解者を考える上で興味深い結果であった。鈴木による微生物の研究は他の酸性水域でも行なわれ、酸性水と微生物との関係特に菌類との関係が述べられた (鈴木, 1960, 1961 b, 1962; 鈴木・畠山, 1960; 鈴木・二村, 1960, 1962)。

濁沼の生物相については、1965年には日本自然保護協会による調査がまとめられ、湖内には新たに *Eunotia tanella*, *Eunotia septentrionalis*, *Frustraria rhomboides*, *Navicula cinctaeformis*, *Eunotia pectinalis* var. *minor* 等の藻類が確認された。この時の pH は2.0-2.1であった (日本自然保護協会, 1965)。藻類については渡辺らもその後調査を行ない、*Hormidium subtile* (Kütz.) Heering var. *planc tonicum* Negoro, *Microspora quadrata* Hazen, *Microspora tumidula* Hazen, *Microspora willeana* Lagerbeim, *Stigeoclonium pachydermum* Prescott, *Zygonium* sp. 等の糸状緑藻やラン藻の *Myxosarcina spectabilis* 等を見出した (渡辺・益子・上條, 1974)。

濁沼等における基礎生産および物質循環の研究は佐竹らによって行なわれた (SATAKE and Saijo, 1973, 1974; SATAKE, 1977)。佐竹らは ^{14}C - NaHCO_3 を用い濁沼を含めた強酸性湖 (濁沼、湯釜、赤沼、御釜、大沼池、三角池、赤泥沼) の基礎生産量を求め、二酸化炭素量の測定も行なった。

その結果、湖中に噴気孔などの火山ガスの供給源のある湖では、二酸化炭素が藻類の炭素固定に十分なだけ存在していることが明らかになり、濁沼では1968年10月に $0.18 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ という高い基礎生産量も測定された。この高い値は緑藻 *Chlamydomonas acidophila* によるものであった。また ^{14}C でラベルした有機物を用いた実験の結果、濁沼で有機物の分解も活発に行なわれていることが確認され、新たに有機物分解者として酵母の *Rhodotorula glutinis* の存在も明らかになった。さらに佐竹らは濁沼で有機物の生産と分解に関与する微生物を pH-成長の関係から好酸性生物 (珪藻 *Pinnularia braunii* var. *amphicephala*) および耐酸性生物 (緑藻 *Chlamydomonas acidophila*, カビ *Penicillium citrinum*, 酵母 *Rhodotorula glutinis*) に分けた。濁沼では夏に形成される水温躍層以深は硫化水素を含むが、このような強酸

性でしかも硫化水素を含むような条件下でも微生物による炭素固定も確認され、他に $^{35}\text{S-SO}_4$ を用いた測定によって硫酸塩の硫化水素への還元活性も測定された。

このほかに佐竹らは潟沼の湖水温と地熱との関係や、湖内の二酸化炭素の収支（佐竹，1974，1975）、湖底堆積物の組成とその層理の生成機構も明らかにした（SATAKE and SAIJO, 1978）。潟沼の湖底堆積物はそれぞれ黒褐色と灰白色を持つ層理によって構成されているが、この層理の生成には湖水の停滞と循環が密接に関係し、珪藻の殻を主成分とする黒褐色層は湖水が酸素を含むとき形成され、イオウ粒子を主成分とする灰白色層は湖水が停滞期から循環期に移行する時蓄積した硫化水素が酸化されて生じたものであることも明らかにした。

酸性湖の生物相に関する研究は不動池、恐山湖、磐梯赤泥沼等でも行なわれた。まず不動池では水野（1963）による調査が行なわれ、不動池（pH 3.7-3.8）の動物プランクトンや植物プランクトンの垂直分布や種類組成の検討の結果、新たに *Alona guttata* や *Cosmarium constructum*, *Mellicion* sp. 等の動物プランクトンが見い出された。さらに渡辺・大柳（1978）らは *Eunotia*, *Pinnularia* 属等の酸性水域に特長的な属を主体とする珪藻群集を調べ、10属32種に及ぶ珪藻の存在を確認した。

恐山湖では山本ら（山本・樫村・吉田・関野，1969）によって分類を基礎にした調査が行なわれ、湖内の主な基礎生産者は抽水、沈水植物群落（コウホネ、ヤナギゴケ *Leptodictyum riparium* (Hedw.) WORNST）であることや、湖内のウグイは流入する中性河川に6月に溯上して産卵し稚魚は7-8月ごろ湖面に現われること等が明らかにされた。また続いて行なわれた益子・渡辺らの調査結果（益子・渡辺・上條，1973；渡辺・上條・森下・新谷・益子，1973）、動物プランクトンとしてかつて一菱内湖でも多量に出現した輪虫の *Brachionus urceolaris* や橈脚類の *Macrocyclus fuscus* が優先していること、蘚類のやなぎごけの分布面積が狭くなっていること、底生動物がやなぎごけ群落中では渦虫類の *Plogocata kawakatsui* と甲殻類のミズムシ *Asellus hilgendorffii* が優先し、蘚類群落のない湖心部ではセスジユスリカ *Chironomus dorsalis* の幼虫が多いこと等が明らかにされた。また益子らは（益子・定塚・朝倉，1973）恐山湖のウグイの鰓には北海道や青森産のウグイには見られない特異な塩細胞群が多量存在することを見出した。この

結果は強酸性水への生物の適応を考える上で興味深い。恐山湖のベントス群集については他に森下（1973）による報告があり、8種の底生動物の存在が認められた。

なお益子らは無機酸性湖の富栄養化と酸性化による湖沼型遷移の逆転、および強酸性水域への生物の侵入と定着等の無機酸性湖研究の基本的課題についても考察を加えている（益子・渡辺，1974）。

赤泥沼では根来（1968）による調査が行なわれ、緑藻の *Cladophora* sp. と珪藻の *Nitzschia palea* が見い出され、さらに福島らは優先種として *Nitzschia palea* の他に *Pinnularia braunii*, *Oedogonium* sp., *Eunotia septentrionalis* の存在を報告した（福島・星，1972）。

赤泥沼（pH 3.2）の化学的物理的研究は、加藤・会田・志田らによって行なわれ、Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, SO_4 , Cl, SiO_2 等の量が明らかにされると共に（加藤・会田，1970）、地温の測定や（志田・加藤・会田，1971）、湖の形成過程についての考察が行なわれた（志田・加藤，1972）。赤泥沼の化学成分の中では硫酸イオン量（2767 mg/l）と鉄イオン量（69.5 mg/l）が著しく多いことが特長的で、このような多量の無機イオン量にもかかわらず種々の藻類が生存する事実は興味深い。

なお、IBP・PF（国際生物学事業計画・陸水グループ）の研究（MORI and YAMAMOTO, 1975）において、非調和型湖沼の例として裏磐梯の湖沼群がとりあげられた。その報告の一部は、上記赤泥沼等の無機酸性湖の物理条件、化学成分にふれているが、生物学的研究は pH 6.7 の竜沼に向けられている。

酸性河川の導入によって酸性湖となった田沢湖および洞爺湖については、主に酸性化に伴う生物相の変化に関心が向けられ研究が行なわれた。田沢湖についてはまず佐藤によって1948年に湖内の生物相の調査が行なわれ、植物プランクトンとして *Oscillatoria* sp. が、動物プランクトンとして *Scanpholeberis mucronata*, *Chydorus spaericus*, *Cyclops strenuus* 等が確認された。このうち *Scanpholeberis mucronata* は量が多く 4636 個/ m^3 に達していた。魚類としてはかつて田沢湖に多量に存在したクニマスは全く確認されず、ウグイも減少していた（佐藤，1951）。湖水の酸性化の様相は有泉・牧（1954）らによって詳しく調べられ、当時湖水の pH は 4.5-4.7（150-200 m）で酸性水導入前の pH 6.5 と比較して甚だしく酸性化が進行していること、田沢湖は酸性化に対し殆んど緩衝

能を持たないこと、先達川の導入が酸性化を阻止する有力な手段であること等が報告された。田沢湖の pH、水温、流向、流速に関する調査は三浦によっても詳しく行なわれ、その特色が述べられた(三浦, 1962 a, b)。また田沢湖に関連する多数の資料や湖沼学的概観を述べた吉村、湖内の生物について述べた上野、本湖特有のクニマスについて述べた大島らの多くの寄稿は富木によって“田沢湖”としてまとめられた(富木, 1959)。

その後田沢湖については渡辺らの調査があり、酸性水の流入後プランクトンが増加したこと等が報告された(渡辺・益子・上條, 1975)。

洞爺湖(深度 179 m)も鉱山排水の流入によって酸性化した湖である。本湖の酸性水の流入の状況とそれに伴う湖水の変化、生物相の変化については江口・黒萩(1966)および川村(1970)によって主に検討された。これらの報告には酸性水の流入が1939年より始まり、流入前 pH 6.8-7.2であったものが1965年には pH 5.4-5.6 に低下したこと、1965年当時流入する発電所の排水は pH 4.7、鉱山排水の pH は 3.5 であったこと、洞爺湖では1950年代初期ワカサギとヒメマスが漁獲されていたものが1964年には漁獲は皆無の状態になってしまったこと、1968年当時動物プランクトン2種、植物プランクトン5種しか産しない貧栄養湖であったこと等が報告されている。さらに洞爺湖については、これが国立公園内にあることから、湖沼水質の汚濁の現状を把握するため、汚濁負荷の外的要因の実態調査、水域の汚濁源の現況等の湖沼汚濁の背景調査と共にその水質とプランクトン等に関する総合的調査が1973年に行なわれた(環境庁自然保護局, 1974)。その結果湖内の全窒素量が高いことや、周辺町村からの流入下水に有機物の負荷の高いものがあること、酸性水の原因となっている洞爺発電所からの懸濁粒子負荷量が非常に高いこと等が指摘された。

屈斜路湖や猪苗代湖は酸性河川の流入による酸性湖であるが、屈斜路湖については、下田・遠藤ら(1967)によって調査が行なわれ、湖水が1929年から1960年の間に酸性が次第に強くなり(1929年 pH 5.5, 1936年 pH 5.1, 1938年 pH 5.4-5.9, 1960年 pH 4.0-4.2)、湖内で魚類が著しく減少したことが報告された。

また上記環境庁の報告書には屈斜路湖(pH 4.2-4.7)の富栄養化は、有機物やN、Pに富む流入河川の影響によることが指摘されている。

猪苗代湖については益子ら(1973)によって調査が行なわれ、典型的な貧栄養状態にあること、湖心部ではプランクトンは少なく、*Bosmina longirostris* の

他に植物プランクトンが1種しか確認されなかったこと、湖岸には付着生物として緑藻の *Microspora* やラン藻の *Oscillatoria chlorina* 等が分布することが報告された(津田, 1975)。このうち *Oscillatoria chlorina* は汚水域でしばしば観察されるラン藻である。

有機物やN、Pに富む汚濁水の流入が引起す無機酸性湖の富栄養化現象は上記洞爺湖や屈斜路湖の場合に限らず、湖の観光地化、周辺地域の開発等と共に近年急速に進みつつあると考えられ、湖を保全する意味で憂慮される。

文 献

- 安斎 徹(1934): 蔵王山火口湖活動休止後に於ける湖沼学の変化の研究(上)。斎藤報恩会時報, No. 85: 1-18.
- 安斎 徹(1934): 蔵王山火口湖活動休止後に於ける湖沼学の変化の研究(下)。斎藤報恩会時報, No. 86: 1-9.
- 安斎 徹(1938): 蔵王山火口湖お釜の観測。陸水雑, 8, 3, 4: 264-272.
- 安斎 徹(1939): 蔵王火口湖の活動開始に就て。斎藤報恩会時報, No. 155: 1-14.
- ATKINS, W. R. G. (1930): Some geochemical applications on measurements of hydrogen ion concentration. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, 19: 455-460.
- 有泉 昌・牧 隆正(1954): 酸性河川の水質に関する調査研究(1)、田沢湖の酸性化について。土木研究所報告, 88, 6: 115-134.
- 江口 弘・黒萩 尚(1966): 最近における洞爺湖の様相について。水産孵化場研究報告, 21: 91-98.
- 福島 博・星 一彰(1972): 強酸性沼、銅沼(磐梯山)の環境と藻類。用水と廃水, 14, 5: 603-605.
- 藤松 馨(1938): 強酸性湖沼沼の生物に於て。生態学研究, 4, 2: 131-140.
- IVANOV, M. V. and G. I. KARAVAİKO (1966): The role of microorganisms in the sulphur cycle in crater lakes of the Golovnin caldera. *Zeitschrift für Allg. Microbiologie*, 6, 1: 10-22.
- 環境庁自然保護局(1974): 国立公園湖沼水質調査報告書(第3集) pp. 248.
- 加藤武雄・会田徳旺(1970): 裏磐梯湖沼群の無機環境について——とくに化学組成からみた湖沼の類

- 型化を中心に——。文部省特定研究「生物圏の動態」, 非調和型湖沼の生物群集の生産力に関する研究, 53-68.
- 川村輝良 (1970): 最近の洞爺湖の酸性化と生物に対する影響。陸水雑, 30, 3: 87-107.
- 菊地健三 (1934): 国後島の桃脚類。陸水雑, 3: 109-110.
- 小久保清治 (1931): 酸性湖の魚と「プランクトン」。帝水, 10, 12: 10-15.
- 小久保清治・田村 正・阿部襄 (1931): 恐山湖の生物学的研究概要。斎藤報恩会時報, No. 59: 1-22.
- 益子帰来也 (1938): 恐山湖プランクトンの研究, 最近の変化と夏期垂直分布。陸水雑, 8, 1: 45-52.
- MASIKO, K. (1940): Limnological study of lake Osoresan-ko, A remarkable acidotrophic lake in Japan. Science report of the Tohoku Imperial University. Fourth Series, Biology, 15, 3: 331-356.
- 益子帰来也・渡辺仁治・上條裕規 (1973): 猪苗代湖の湖沼学的研究, 陸水富栄養化の基礎的研究, 第2集, 19-22.
- 益子帰来也・渡辺仁治・上條裕規 (1973): 恐山湖の富栄養化。陸水富栄養化の基礎的研究, (第2報): 23-25.
- 益子帰来也・定塚謙二・朝倉弘修 (1973): 恐山湖産ウグイの鰓の Chloride Cell. 能登臨海実験所年報, 13: 33-37.
- 益子帰来也・渡辺仁治 (1974): 無機酸性湖の富栄養化。陸水富栄養化の基礎的研究 (第3報): 23-24.
- 南 英一・山県 登・島 誠・西條八束 (1952): 草津白根山の火口湖「湯釜」に於て (その1)。陸水雑, 15: 1-5.
- 三浦彦次郎 (1962 a, b): 田沢湖に玉川毒水を導入した場合の混合に関する研究 (1), (2), 工業用水, 第41号, 第42号: 28-41, 24-44.
- 水野寿彦 (1963): 霧島火口湖群および薩南湖沼の陸水生物学的研究。陸水雑, 23: 22-30.
- MORI, S. and G. YAMAMOTO (1975): Productivity of Communiies in Japanese Inland Waters, IBP Synthesis, vol. 10, pp. 436.
- 森下郁子 (1973): 恐山湖のベントス群集。陸水富栄養化の基礎的研究 (第2報): 105-107.
- 根来健一郎 (1938): 強酸性湖濁沼の湖底泥中に産する珪藻。植物及び動物, 6, 10: 1731-1736.
- 根来健一郎 (1939): 酸性湖蔵王御釜の珪藻。陸水雑, 9, 3: 176-179.
- NEGORO, K. (1944): Untersuchungen über die Vegetation der Mineralogen-Azidtrophen Gewasser Japans. Science Reports of the Tokyo Bunrica Daigaku, section B. No. 101, 6: 231-374.
- 根来健一郎 (1968): 磐梯山赤泥沼の藻類および五色沼の柳沼湖群のプランクトン。非調和型湖沼の生物群集の生産力に関する研究, 59-61.
- SATAKE, K. (1974): CO₂ escape rate from the surface of strongly acid lakes to the atmosphere. Jap. J. Limnol., 35, 2: 60-64.
- 佐竹研一 (1975): 火山性酸性湖“濁沼”の湖水温度変化。陸水雑, 36, 1: 1-5.
- SATAKE, K. (1977): Microbial sulphate reduction in a volcanic acid lake having pH 1.8 to 2.0. Jap. J. Limnol., 38, 1: 33-35.
- SATAKE, K. and Y. SAIJO (1973): Microbial CO₂ fixation in the anoxic zone in a volcanic acid lake. Nature., 243: 99-100.
- SATAKE, K. and Y. SAIJO (1974): Carbon dioxide content and metabolic activity of microorganisms in some acid lakes in Japan. Limnol. & Oceanog., 19, 2: 331-338.
- SATAKE, K. and Y. SAIJO (1978): Mechanism of lamination in bottom sediment of the strongly acid lake Katanuma. Arch. Hydrobiol., 83, 4: 429-442.
- 佐藤隆平 (1951): 酸性化された田沢湖の夏季の生物相。陸水雑, 15: 96-103.
- 下田信男・遠藤信也 (1966): 湖水の化学成分の地球化学的研究 (第4報)。室蘭工業大学研究報告, 21-26.
- 志田 勇・加藤武雄・会田徳旺 (1971): 赤泥沼母沼に関する地球物理学的2, 3の知見 (予報)。文部省特定研究「生物圏の動態」非調和型湖沼の生物群集の生産力に関する研究, 14-20.
- 志田 勇・加藤武雄 (1972): 裏磐梯湖沼群における酸性湖沼と磐梯火山活動との関係について。文部省特定研究「生物圏の動態」非調和型湖沼の生物群集の生産力に関する研究, 8-11.
- 鈴木静夫 (1960): 志賀高原湖沼の微生物相。陸水雑, 27: 56-51.
- 鈴木静夫 (1961 a): 強酸性湖濁沼の微生物相。陸水雑, 22: 201-207.

- 鈴木静夫 (1962) : 湖沼の pH とその生態学的意義について. 陸水雑, 23: 15-21.
- SUZUKI, S. (1961b) : Culture experiments on the relation of lake bacteria to lake type. *Bot. Mag. Tokyo*, 74: 490-493.
- 鈴木静夫・畠山忠史 (1960) : 志賀高原湖沼の水生菌類. 陸水雑, 21: 64-71.
- 鈴木静夫・二村担孝 (1962) : 酸栄養湖の水棲不完全菌類. 陸水雑, 23: 107-112.
- SUZUKI, S. and H. NIMURA (1960) : The microbiological studies of the lakes of volcano Bandai II. Ecological study on aquatic hyphomycetes in the Goshikinuma and Akanuma lake group. *Bot. Mag. Tokyo*, 73: 360-364.
- 高安三次・沢 賢蔵 (1931) : 屈斜路湖調査. 北海道水産試験場事業旬報, No. 137: 1316-1324.
- 田村 正 (1933) : 恐山湖の調査報告. 陸水雑, 2: 76-90.
- 田村 正 (1936) : 強酸性化された恐山湖のプランクトン. 陸水雑, 6: 63-73.
- 田中阿歌麿 (1918) : 湖沼めぐり. pp. 322.
- 田中阿歌麿 (1927) : 大沼池の不思議な水. 自然科学, 2: 181-189.
- 田中阿歌麿 (1928) : 湖の水の水素イオン濃度に就て. 自然科学, 3: 63-74.
- 田中阿歌麿・星野隆一 (1934) : 北緯 44° 以南国後島湖沼踏査概況 (第一報). 陸水雑, 3: 95-108.
- 田中館秀三・五十嵐彦仁 (1938) : 屈斜路湖の水素「イオン」濃度に就て. 陸水雑, 9, 1: 45-49.
- 富木友治 (1959) : 田沢湖の湖沼学的概観. 田沢湖, 1-89, 291-333.
- 虎石成美・宝永 斎 (1940a) : 蔵王山お釜の鞠状硫黄. 科学, 10, 1: 3-4.
- 虎石成美・富永 斎 (1940b) : 蔵王山お釜の活動 (第2報). 科学, 10, 4: 123-124.
- 虎石成美・富永 斎 (1940c) : 蔵王山お釜の観察 (第4報). 科学, 10: 234.
- 虎石成美・広江正五・富永 斎 (1940) : 蔵王山お釜についての観察 (第3報). 科学, 10, 6: 194-196.
- 上野益三 (1932) : 強酸性の湖水と湖沼標式の一問題. 地球, 17, 2: 111-124.
- 上野益三 (1934a) : 国後島西南部湖沼のプランクトン. 陸水雑, 3: 129-133.
- UENO, M. (1934b) : Acid lake water in North Shinano. *Arch. f. Hydrob.*, 27: 571-584.
- 上野益三 (1936) : 霧島火山麓の湖沼. 科学, 6, 10: 6-7.
- UENO, M. (1938) : The crater lakes of Mt. Kirişima, A limnological study with special reference to biocoenosis. *Jap. J. Limnol.*, 8: 348-360.
- 上野益三 (1940) : 田沢湖生物群衆の昭和 14 年夏季の状態. 陸水雑, 10: 106-113.
- UENO, M. (1958) : The disharmonious lakes of Japan. *Verh. internat. Ver. Limnol.*, 13: 217-226.
- 渡辺仁治・上條裕規・森下郁子・新谷 力・益子帰来也 (1973) : 無機酸性湖恐山湖の富栄養化に関する研究. 能登臨海実験所年報, 13: 39-51.
- 渡辺仁治・益子帰来也・上條裕規 (1974) : 強酸性湖沼の陸水生物学的研究. 陸水富栄養化の基礎的研究. No. 3, 18-22.
- 渡辺仁治・益子帰来也・上條裕規 (1975) : 田沢湖の酸性化と生物の変遷. 陸水富栄養化とその対策 (第一報). 12-16.
- 渡辺仁治・大柳実喜子 (1978) : 霧島国立公園の無機酸性湖不動池の陸水学的研究, とくに珪藻群集. 陸水雑, 39: 156-162.
- 渡瀬正三郎 (1938) : 宮城県鳴子町 湯沼 硫黄鉱床. 地質雑, 45: 508-509.
- 山本護太郎・樫村利道・吉田勝一・関野哲雄 (1969) : 下北半島における陸水生物学とくにプランクトンと魚類分布について. 日本生態学会誌, 19, 6: 246-254.
- 吉村信吉 (1931a) : 日本湖水の水素イオン濃度(上). 地理学評論, 7: 848-876.
- 吉村信吉 (1931b) : 日本湖水の水素イオン濃度(下). 地理学評論, 7: 943-969.
- 吉村信吉 (1932) : 磐梯火山四周の火山湖の地方湖沼学的予察研究(二). 地理学評論, 8: 46-66.
- YOSHIMURA, S. (1933) : Kata-numa, a very strong acid water lake on volcano Katanuma, Miyagi prefecture, Japan. *Arch. f. Hydrob.*, 26: 197-202.
- 吉村信吉 (1934) : 世界最酸性湖——鳴子温泉湯沼. 科学, 4, 12: 498-499.
- YOSHIMURA, S. (1935) : Lake Akanuma a siderotrophic lake, at the foot of volcano Bandai, Hukusima Prefecture, Japan. *Proc. Imp. Acad. Tokyo*, 11, 10: 426-428.
- 吉村信吉 (1937) : 日本の無機酸性湖の特性. 日本学

術協会報告, 12, 2: 161-164.

吉村信吉 (1939): 鳴子温泉潟沼の湖沼学的研究. 地理学評論, 15: 466-467.

吉村信吉 (1942a): 湖沼学. 三省堂.

吉村信吉 (1942b): 玉川毒水の田沢湖に於ける流入状態. 陸水雑, 11: 151-156.

吉村信吉・根来健一郎・山本莊毅 (1936a): 磐梯五色沼の湖沼学的予察研究 (上). 地理学評論, 12, 1: 1-17.

吉村信吉 (1943): 東亜の陸水, 太平洋の海洋と陸水, 525-754, 岩波書店.

吉村信吉 (1936b): 磐梯五色沼の湖沼学的予察研究 (下). 地理学評論, 12, 2: 42-69.

(著者: 佐竹研一, 環境庁国立公害研究所, 茨城県筑波郡谷田部町; Ken'ichi SATAKE, National Institute for Environmental Studies, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki, 300-21)