

上越地域の湖の水文環境

佐藤芳徳*

(平成16年4月30日受付；平成16年6月28日受理)

要 旨

湖の水文学的性質は、周辺地域の自然環境を強く反映するだけでなく、社会活動の影響も受けているため、環境モニターとして注目を集めている。本研究では、主に新潟県上越地域の湖を対象として、水質を中心とした水文学的性質について考察した。その結果、湖水のpH値には地域的な変化があり、特に山稜部の一部の湖において、酸性化の徴候が認められた。また、電気伝導度においては、主に自然的因子に支配されるものの、社会活動の影響もみられた。主要化学成分組成では、大きく3タイプに分類でき、海岸部、山稜部、内陸部でそれぞれ異なる特徴があり、水素及び酸素の安定同位体組成においては、明確な高度効果が認められた。

KEY WORDS

hydrologic environment	水文環境	lake	湖
acidification	酸性化	electoric conductivity	電気伝導度
stable isotopes	安定同位体	Joetsu district	上越地域

1 はじめに

湖は入力としての降水の性質を反映するだけでなく、集水域の地形・地質の特徴や社会的環境など、様々な因子のもとに存在しており、環境モニターとして注目すべき役割を有している。例えば、主要な環境問題の一つである酸性雨についてみると、国内のほぼ全域でpHが4台の降水が記録されているにもかかわらず、湖の酸性化等の影響については不明な点が多い。これまでに生態的・社会的な被害についての実態報告(Howard and Perley, 1980)や、酸性雨形成のメカニズムについての研究は多く(White, 1988; Kennedy, 1986; Binkley et al, 1988など)、酸性雨と湖についての研究(Jorgensen, 1993など)をもとに、酸性化した湖に石灰等を散布することにより環境が改善された例もある。日本においては、環境庁により平成9年3月に、ほとんど人為的な影響がない山間の湖において、湖水のpH値が低くなっていることが初めて報告されているが、湖の顕著な酸性化についての報告は極めて少ない。しかし、降水中のpH値は4台の低いままで推移しており、いずれ何らかの影響が顕在化すると予測され、環境問題の一つとして取り上げられることが多い(大喜多, 1996; 環境庁, 1997, 2000; 村野, 2000, 2001など)。また、湖の水質に関わる社会的な影響についても、山間部のあまり人手の入っていない湖では不明なことが多い。

本研究では、成因、湖面高度、隔海度、水収支、地形・地質等、様々な条件下にある湖を比

* 社会系教育講座

較考察することにより、湖の水文環境を明らかにし、湖を環境モニターとして利用する際の基礎的情報を得ることを目的とする。研究対象地域として、新潟県上越地方の坂田池、長峰池、朝日池、中条ノ池、小海池、頸城大池、鼻毛ノ池、多能池、坊ヶ池、玄藤寺池、東吉尾池、高浪池、妙高高原のイモリ池、長野県の野尻湖を選定した（図1）。

これらの湖では、これまでも水文学的な数多くの研究がなされてきた（新潟県, 1987）。頸城湖沼群といわれる長峰池、坂田池などでは海の近傍に存在するものの、海塩の影響があまり認められないことや、高浪池では、周辺地質で石灰岩が卓越するために、湖水がややアルカリ性を呈することが知られている（佐藤ほか, 1992）。坊ヶ池や鼻毛ノ池などのように、山上湖あるいは稜線上にある湖は、水位が降水量の変動と密接な関係にあることが多い。鼻毛ノ池ではそのような傾向が認められるが、坊ヶ池ではそれほどでもない。また、平均滞留時間の短いほうが量的にも質的にも降水の影響を受けやすいといえる一方で、山上湖でも広い集水域を有している場合には、湖への流入水は流域の地質等の影響を受けることが予測され、流入量とも密接に関連する。湖水と地下水の交流、あるいは湖周辺での地下水の挙動に関して、水質の地域的変化や、水質組成の時間変化などが利用されることが多い。水質の地域的（空間的）変化は、その水が持つ経歴を象徴しており、降水時での水質、表面地質、土壌、地下での滞留時間や混合状況など、様々な情報の集積といえる（佐藤ほか, 1997）。それゆえ、湖水の水質を検討することは、湖だけでなく環境全体を考察する上での基礎資料を得ることにつながる。また、より詳しく精度の高い情報を提供してくれるものとして、水素や酸素の同位体組成がある。例えば、中禅寺湖周辺の地下水や湧水において、湖から流出した水とそれ以外の水のトリチウム濃度では明らかな違いが認められ、両者を分離する有効な手段として用いられている（佐藤, 1983）。さらには、富士山及びその周辺でも安定同位体 (^2H , ^{18}O) を用いて水の同定や地下水流動が明らかにされており（安原・風早, 1995）、今後、さらに水文学的ツールとしての重要性が増すことと考えられる。

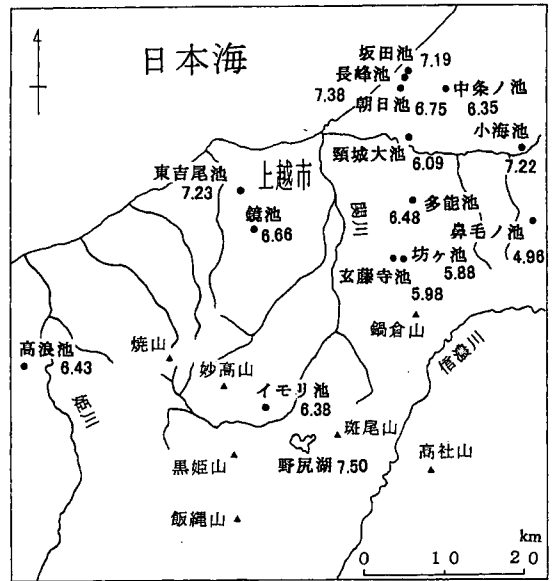


図1 研究対象とした上越地方の湖の分布と pH 値 (2000年5月)

2 各湖の水質とその形成因子

2.1 pH 値の分布

まず、pH 値の分布について述べる（図1）。坂田池では、2000年5月では7.19でややアルカ

り性であった。坂田池の pH 値について、経年変化をみると、1985年10月には7.2~7.4、1999年11月は6.68、2001年8月は7.61であった。このように、pH 値の季節変化が大きいのは、水深が浅く湖容積が小さいこと、流入量が多いことなどによるものと思われる。また、人為的な影響も無視できない。

長峰池では、2000年5月は7.38でややアルカリ性であった。経年変化をみると、1985年10月では7.6~7.9、1991年8月では6.6~7.4で、水深数10cm のところでややアルカリ性となっていた。1999年11月は7.06で中性であり、ここでも季節変化が大きいといえる。

朝日池では、2000年5月は6.75と中性ないし弱酸性であった。経年変化をみると、1985年8月では7.2~8.2と、場所による変化が大きかったほか、1999年11月には6.80と中性に近い値を示した。

中条ノ池では、2000年5月は6.35、1999年11月に5.94と酸性であった。この池の水は農業用水として利用されており、非灌漑期には水を落とすほか、雨水や表面流入水など集水域での滞留時間が短い水によって涵養される割合が高いと考えられる。

小海池では、2000年5月は7.22と中性に近い値を示したが、1999年11月には6.32であった。また、1998年5月では6.80、7月は6.50と全体としてやや酸性である。この池は、一年を通して常に湛水しており、pH 値の季節変動はそれほど大きくない。5月にややアルカリ性に傾くのは、この時期に融雪起源の地下水流入が卓越することが考えられる。

頸城大池では、2000年5月は6.09とやや酸性であった。1985年9月では6.3~6.4、1998年7月は6.79、1999年11月に6.44といずれの時期でもやや酸性で大きな変化はみられなかった。ちなみに、水源がほぼ同じである小池も、大池とほぼ同じ値をとっている。

鼻毛ノ池は、2000年5月に、今回調査したなかで最も低い pH 値である4.96を示した。1999年5月は5.72であり、1998年5月は5.65、7月は6.37で、融雪期にかなり低い値を取ることが分かる。この池の近傍にある鼻毛湧水では、2000年5月に6.03、1999年11月は5.84、1998年7月は6.02で、地下水ということもあり、湖水に比べて年間の変動幅が小さい。小海池との比較では、小海池は融雪期に地下水涵養が多いと考えられるが、鼻毛ノ池では地表にあった雪が融けて、そのまま流入していることが考えられる。

多能池では、2000年5月は6.48、1999年11月に6.54とやや酸性であり変動がない。1998年7月には6.71と同様の結果であった。多能池は、その水が農業用水や生活用水として活発に利用されており、また非灌漑期にはかなりの部分落水することもあり、雨水や滞留時間の短い水によって涵養されている割合が高いと考えられる。

坊ヶ池では、2000年5月は5.88であったが、1998年7月は7.23、1999年11月は6.60と変動が大きい。坊ヶ池は、雨水と集水域での滞留時間が比較的短い表流水や地下水流入によって涵養されている。融雪期の pH 値が小さい水による涵養が卓越する時期には、湖水の pH 値も小さくなり、酸性を示すと考えられ、比較的中性に近い滞留時間の長い地下水によって涵養されている時期には、中性ないし微アルカリ性になるということが出来る。また、経年的な変動をみると、1985年9月には、6.2~6.8であり、現在の値の変動幅の中に入っている。

玄藤寺池では、2000年5月は5.98、1999年11月に6.39と酸性であった。また、1998年7月には6.95でほぼ中性となっていた。坊ヶ池に近いこともあり、変動の傾向としては坊ヶ池によく似ている。坊ヶ池に比べて、全体的に pH 値が酸性のほうに傾いているのは、それだけ雨水に近い水による涵養が卓越していることを示唆するものといえる。

東吉尾池では、2000年5月に7.23、1998年5月は7.44、1998年12月は6.39と変動が大きい。全体的にはややアルカリ性であり、季節によってやや酸性になるということができる。

高浪池では、2000年5月は6.43であった。経年的な変動についてみると、1991年6月には、6.9~7.2でほぼ中性を示したものの、夏季には表層で8.0~8.4とアルカリ性となり、同11月には6.7~7.7と中性ないし弱アルカリ性に戻っていた。また、1985年10月では、表層で8.6とアルカリ性、深度10m付近では5.1~5.5と極端な酸性を示したデータがある。全体的には、中性ないし弱アルカリ性であったのが、やや酸性に傾いているということができ、また、近年の酸性雨の影響が現れている可能性もあり、継続した観測が必要である。

イモリ池では、2000年5月は6.38、1999年11月に6.58でやや酸性ということができる。この池は、雨水や表流水流入が卓越していることが考えられる。また、表面流出量も多く、湖水の滞留時間は短い。

野尻湖は、上越の湖と比較して、降水の起源や風向などの気候要素がかなり異なる。また、湖の容積や湖面積にも大きな相違があるため、単純な比較は適当ではないが、それらの要素を考慮した上での比較考察は充分意味のあることと考えられる。2000年5月は7.50、1999年11月は6.86であり、中性ないし弱アルカリ性ということができる。面積が広いため、場所によって値に変化があることが考えられ、また、深度によっても違いがあると思われる。しかし、全体的には中性付近であり、少なくとも酸性雨の影響が湖水のpH値に現れているとはいえない。

2.2 電気伝導度の分布

湖水の電気伝導度値について、各湖の水質や水収支といった水文学的特性を考慮に入れて検討する(図2)。坂田池では、2000年5月は $223\mu\text{S}/\text{cm}$ (以下、単位省略)で経年的な変動はあまりない。平均滞留時間の長さに対して値が大きいのは、海岸に近いことによる海塩の影響が考えられる。長峰池では、2000年5月は255であった。経年的な変化をみても、坂田池と同様大きな変動は認められず、250~270くらいの値を取っている。朝日池では、172で、坂田池や長峰池に比べてやや値が小さいのが特徴である。中条ノ池では、2000年5月は69で、朝日池よりさらに低い値となっていた。この池は、取水量が多く水位変動が大きいため、値の変動も大きいだが、1999年11月では87と、経年変化をみても100を越えることはほとんどない。

小海池では、2000年5月は60で、1999年11月に69と、50~70くらいで変動が小さい。この池は、鯉が放流されており、多少その影響があることが予想されたが、観測値からはあまり認め

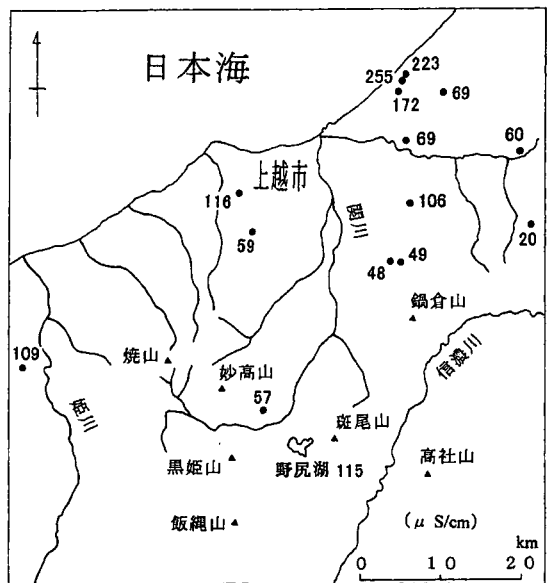


図2 湖水の電気伝導度の分布(2000年5月)

られなかった。湖水の滞留時間が短く、雨水や滞留時間の短い表流水・地下水によって涵養されていると考えられる。

頸城大池では、2000年5月は69で、比較的低い値であったが、100くらいの値を取ることもあり、地下水、表流水、保倉川からの河川水等、流入水の割合を反映しているともいえる。この池では、魚の養殖を行っているが、規模が小さいためかその影響はあまり認められなかった。

鼻毛ノ池では、2000年5月は20と極端に低い値を示した。1999年11月では36、その他の観測値をみても、15~20のことが多い。この池は稜線にあり、涵養が雨水あるいは滞留時間の非常に短い表流水によると考えられることから、このような低い値を取るものと思われる。秋には落水して、池にはほとんど水がないような状態になることもあり、一層降水の値を反映するものと考えられる。また、このことはこの池のpH値が酸性であることとも一致する。なお、周辺湧水では、50~80でやはり低い値を取っているが、湖水ほどではなく、地下での滞留時間が長いことを示唆している。

多能池では、2000年5月は106、1999年11月では87であり、表流水や比較的滞留時間の短い地下水によって涵養されていると考えられる。また、水位の低い時には130くらいの値を取るときもある。坊ヶ池では、2000年5月は49、1999年11月に61と低い値である。この湖は、雨水と滞留時間の短い地下水が主な涵養源であるために、このような値を取ると考えられる。その他の観測でも50付近の値を示すことが多い。玄藤寺池では、2000年5月は48、1999年11月は49、1998年7月は41と坊ヶ池よりもさらに低い値である。これは、地下水流入量の差を示すものと思われる。

東吉尾池では、2000年5月に116、1998年5月は119、同7月は116と経年的な変動はほとんど認められなかった。表流水とともに地下水の流入量が多いことが推定される。

高浪池では、2000年5月は109で、1999年11月では140であった。5月のほうが低い値となっているのは、値の低い融雪水によるものと考えられる。経年的な変動をみると、100~130を示す場合が多いが、今回のように140程度の値のときや、80くらいのときもある。また、夏季に水温成層ができている時は、表層より深層での値のほうが小さい。なお、周辺湧水では272と、湖水に比してかなり高い。

イモリ池では、2000年5月は57と降水に近く、野尻湖では115であった。野尻湖では観測地点や時期によって変動が大きいと推定されたが、観測値の変動幅はそれほど大きくなかった。

2.3 主要化学成分組成

主要化学成分組成について、その特徴を検討する(図3)。各イオン濃度は、陽イオン及び塩化物イオン・硫酸イオンについては、横河 IC7000RP イオンクロマトグラフィにて測定し、重碳酸イオンについては、pH4.8アルカリ滴定法で求めた。

坂田池は、ナトリウムイオンと塩化物イオンが多いNa-Cl型であり、重碳酸イオン濃度がやや高いときもある。長峰池でもNa-Cl型といえるが、1999年11月は重碳酸イオンが多いNa-HCO₃型であった。また、朝日池もNa-Cl型といえる。3湖に共通することは、ナトリウムイオンと塩化物イオンが卓越するが、時期によって重碳酸イオンの割合多くなることがあるという点である。この組成は、電気伝導度が他の湖と比して高いことと考え合わせると、海塩によるものということができる。

中条ノ池は、典型的なNa-Cl型であった。この池は、電気伝導度が低く、雨水及び滞留時間

の短い水によって涵養されているといえる。

小海池は、ややナトリウムイオンが多いものの中間型ということが出来る。電気伝導度も低く、融雪水等の涵養が卓越していることが考えられる。電気伝導度が高かった1999年11月では、 Na-HCO_3 型であった。頸城大池は、 Na-Cl 型であった。

鼻毛ノ池は小海池と同様に、溶存イオンがごくわずかだった2000年5月は中間型、電気伝導度が多少高かった1999年11月には Na-HCO_3 型であった。ちなみに、近傍の湧水は、 Na-HCO_3 型であり、地下水としての滞留時間が長くなると増加するイオンを示唆しているということが出来る。

多能池は、2000年5月では硫酸イオンが多い Na-SO_4 型であったが、1999年11月では陰イオンに特に多いものはなかった。ちなみに、近傍の美女池清水は Na-Cl 型である。坊ヶ池、玄藤寺池ともに、電気伝導度が低く溶存イオンも少ない。2000年5月ではナトリウムイオンがやや多いものの、陰イオンでは特に多いイオンがない中間型であり、電気伝導度が高い時期には Na-HCO_3 型を示す。このことは、鼻毛ノ池などと同様、流入地下水等の滞留時間の反映と考えられる。

東吉尾池は中間型、高浪池はカルシウムイオンと重炭酸イオンが多い典型的な Ca-HCO_3 型であった。高浪池については、この湖周辺の地質に起因するものといえる。また、高浪池の周辺湧水では、カルシウムイオン、重炭酸イオン濃度が高いものの、マグネシウムイオンも多く含まれ、地質に起因するものと推定される。

イモリ池は、溶存イオンが少なく、カルシウムイオンと重炭酸イオンが多い Ca-HCO_3 型であった。野尻湖も溶存イオン量はイモリ池より多いものの、水質型としては Ca-HCO_3 型といえる。

2.4 一般水質と各因子との関係

各湖のpH値と海岸からの距離との間には、ほとんど相関がみられなかったが、電気伝導度と海岸からの距離には、相関が認められた。電気伝導度については、流入する地下水の滞留時間がもう一つの大きな因子となっているため、それを分離することが必要であり、今後の課題である。

各イオン成分と海岸からの距離との関係を見ると、ナトリウムイオンや塩化物イオンにおいて良い相関が認められた。各湖の水質と標高との関係については、pHの値と標高には、ほとんど相関はなかったが、各イオン成分の間には、ナトリウムイオン及び塩化物イオンに相関が

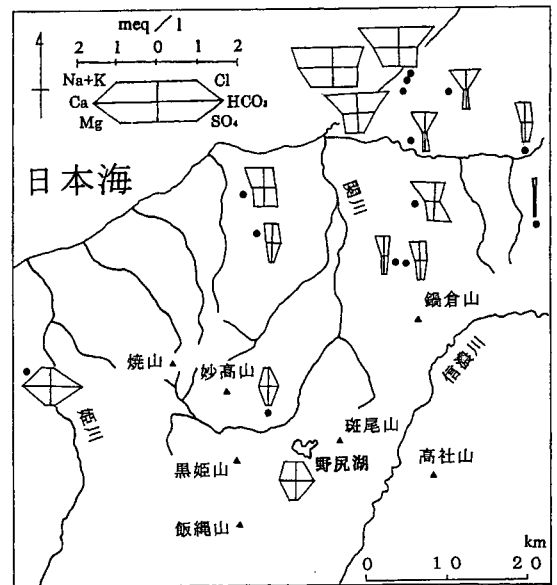


図3 湖水の主要化学成分組成 (2000年5月)

認められた。しかし、これは標高というより海岸からの距離によるものと考えたほうが良い。

電気伝導度とナトリウムイオン及び塩化物イオンとの相関が高く、海塩起源のイオンが水中のイオン成分に卓越していたことの表れといえる。また、カルシウムイオンと電気伝導度との相関も高く、流入地下水等の地下での滞留時間を反映したものといえる。それと同様のことが重碳酸イオンにもいえた。地質成分については、カルシウムイオンだけでなく、マグネシウムイオン濃度に影響している湖水が認められた。さらには、集水域での滞留時間が湖水の水質形成にとって大きな因子となっていることも示された。

2.5 安定同位体組成

湖の環境を考察する上で、湖水の涵養起源や水収支は極めて重要であり、その解析において水素や酸素の安定同位体組成から得られる情報は大変有効である。本論では採取した湖水について、水素同位体比を、水素ガス同位体交換法(大隅, 1991)にて水素ガスを生成し、酸素同位体比は、二酸化炭素平衡法(Yoshida and Mizutani, 1986)にて二酸化炭素を生成して、いずれも同位体比測定用質量分析計(Finnigan MAT 社製 Delta S)を用いて測定した。

標高と δD 値との関係を図4に示す。一般に、標高が高くなるにつれて降水中の δD 値は小さくなる、すなわち軽い降水となる。湖水の同位体組成には、集水域の平均標高が強く反映される。また、大気中の水蒸気の起源にも影響を受ける。図4をみると、標高と δD 値の間には明瞭な相関が認められる。一カ所だけ回帰直線から離れた位置に存在するのは鼻毛ノ池であるが、直線から外れている理由は不明である。また、標高と $\delta^{18}O$ 値との関係を図5に示す。 δD 値と同様、標高と $\delta^{18}O$ 値の相関も良好であり、特に回帰直線から外れる地点もなかった。 δD 値と $\delta^{18}O$ 値の関係では、回帰直線の傾きは7.18であり、標準的な天水線に近く、また、 d 値もこれまでに求められている日本海側の値に近かった(図6)。しかし、湖水の場合、高度効果などの他に湖

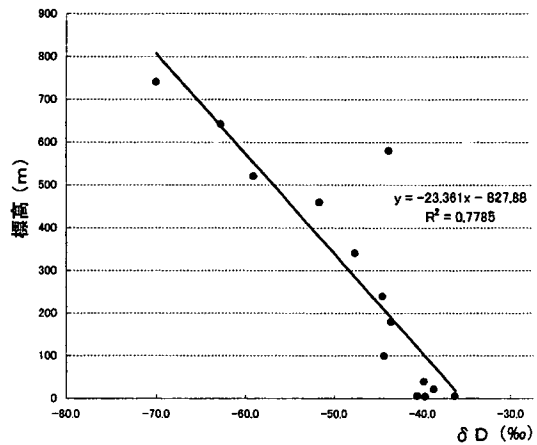


図4 標高と δD 値との関係(2000年5月)

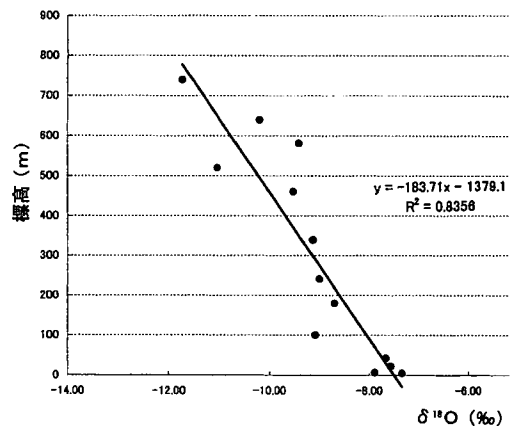


図5 標高と $\delta^{18}O$ 値との関係(2000年5月)

面での蒸発効果の影響も強く受けることが知られており、今後はその点についても明らかにする必要がある。

3 まとめと今後の課題

本研究で得られた結果と今後の課題は、以下の通りである。

- (1) 湖水の pH 値分布において、明らかに酸性を呈する湖が認められた。ただし、季節的な変動が大きく、直ちにこの結果を酸性雨と結び付けるには、さらに継続的な調査研究が必要である。湖水の pH 値形成には、湖へ流入水の集水域での滞留時間が大きな因子であり、降水が短時間のうちに流入する湖での pH 値は低かった。また、集水域での地層も関連しているほか、人為的な影響も強く受けていると考えられた。
- (2) 電気伝導度の値は、その湖の位置や成因と密接に関連しているほか、水取支や集水域での水の滞留時間の影響を強く受けていた。
- (3) 湖水の主要化学成分組成では、海岸部に近い湖では Na-Cl 型、山上や山稜部では溶存物質量の少ない Na-Cl 型、滞留時間の長い地下水涵養が卓越する内陸部の湖では Ca-HCO₃型が多かった。
- (4) 水素及び酸素の安定同位体組成において、標高との間に高い相関が認められた。また、 δD 値と $\delta^{18}O$ 値の関係では、回帰直線の傾きは標準的な天水線の値に近く、 d 値もこれまでに報告されている値と整合していたが、湖面での蒸発効果については今後の課題として残された。

本研究には、平成11・12年度科学研究費補助金（基盤研究(C)2）、研究代表者 佐藤芳徳の一部を使用した。また、水質分析及び同位体比測定においては、産業技術総合研究所の安原正也博士に多大なご協力をいただいた。記して深く感謝致します。

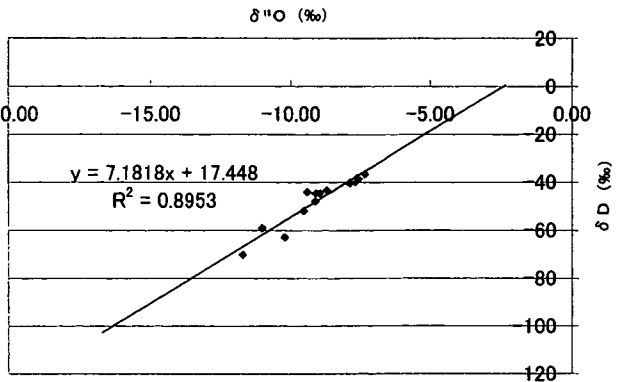


図6 δD 値と $\delta^{18}O$ 値との関係（2000年5月）

参 考 文 献

- 大喜多敏一（監修）1996. 「新版 酸性雨」博友社。
 大隅多加志 1991. 水文資料の安定同位体の自動測定. ハイドロロジー（日本水文科学会誌） 21, 37-42.
 環境庁地球環境部 1997. 「酸性雨－地球環境の行方－」中央法規出版。
 環境庁 2000. 「環境白書（各論）」ぎょうせい。
 佐藤芳徳 1983. 中禅寺湖における湖水の混合とトリチウム収支. 地理学評論 56, 10, 667-678.

- 佐藤芳徳・山縣耕太郎・平田 洋 1992. 新潟県高浪池における水質の評価と水収支について. 上越教育大学研究紀要 12, 1, 87-95.
- 佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・高山茂美 1997. 富士山周辺の湧水および地下水の水質について. 日本水文科学会誌 27, 1, 17-25.
- 新潟県 1987. 第3回自然環境保全基礎調査湖沼調査報告書.
- 村野健太郎 2000. 酸性雨-広がる被害, 影響, 対策の行方を最近の動向から捉える (II). 資源環境対策 36, 10, 818-825.
- 村野健太郎 2001. 酸性雨. 資源環境対策 37, 1, 9-15.
- 安原正也・風早康平 1995. 富士山における天水の安定同位体組成と地下水の涵養高度. 高山茂美編「富士山の地下水流動系の研究」(平成4・5・6年度科学研究費総合研究(A)研究成果報告書) 42-55.
- Binkley, D., Driscoll, C.T., Allen, H.L., Schoeneberger, P. and McAvoy, D. 1989. Acidic Deposition and Forest Soils Springer-Verlag.
- Howard, R. and Perley, M. 1980 Acid Rain-The North American Forecast Anansi Press.
- Jorgensen, S.E. 1993. Management of Lake Acidification Guidelines of Lake Management Vol. 5 International Lake Environment Committee.
- Kennedy, I.R., 1986. Acid Soil and Acid Rain John Wiley and Sons.
- White, J.C., 1988. Acid Rain The Relationship between Source and Receptors Elsevier.
- Yoshida, N. and Mizutani, Y. 1986. Preparation of carbon dioxide for oxygen-18 determination of water by use of a plastic syringe. Anal. Chem., 58, 1273-1275.

Hydrologic Environment of Natural and Artificial Lakes in Joetsu District, Niigata Prefecture

Yoshinori SATO*

ABSTRACT

Lake hydrology has been investigated in natural and artificial lakes of Joetsu district in Niigata prefecture, where various kinds of lakes are distributed. To clarify the chemical and isotopic characteristics of the lake, pH values, electric conductivities, major dissolved ions and the stable isotopic ratio of hydrogen and oxygen were measured.

The pH values ranged from 4.96 to 7.50, and those of the lake in ridge crests exhibited acidic properties, while those in a coastal area and mountainous area were alkalescent. Ion compositions were divided into three types: Na-Cl type in the lake of a coastal area, Na-Cl type with a low electric conductivity in the lake of ridge crests, Ca-HCO₃ type in the lake of inland areas. The close relation between the altitude and the isotopic compositions of hydrogen and oxygen has been clearly recognized; as for δD values and $\delta^{18}O$ values, the slope of the regression line was similar to the standard value of meteoric waters, and the d-excess values were analogous to that of the side of the Sea of Japan.

* Division of Social Studies, Department of Humanities and Social Sciences