

五色沼湖沼群の青色要因の調査を目的とする 日本各地の青色湖沼との共通点と相違点

高貝慶隆・遠藤 新・岡本香奈・阿部遼太（福島大学・共生システム理工学類）

要 旨

磐梯山の噴火によって形成された五色沼湖沼群は青、赤、緑など湖面が独特の色彩に見えることで有名であるが、鮮やかな青に見える要因について様々な指摘がなされてきた。これらの湖沼は、日中が最も鮮やかに見えること、また水中に銅イオンや青色色素が溶解していないことから、青く見える要因は湖沼中のコロイド粒子による光の散乱と考えられてきた。本研究では光散乱によって湖面の色彩変化を生じさせるナノレベルの大きさの微粒子に着目し、その粒径分布、粒子形状、さらには、その元素組成や結晶構造について調査している。昨年度は北海道美瑛町青い池と五色沼湖沼群との比較を行ったが、日本全国には他にも青色色彩を呈する湖沼が多く知られており、本年度は忍野八海（山梨）及び十二湖青池（青森）を含めてナノメートルオーダーの微粒子に関する粒子径と粒子数、形状を測定して比較検討した。

I. はじめに

五色沼湖沼群は、磐梯山の北側に位置する数十からなる湖沼群であり、現在の裏磐梯三湖（桧原湖、小野川湖、秋元湖）をはじめとする大小300余りの湖沼群のことである。特に、その湖沼の中でも青、赤、緑などに色づいて見える数十の小湖沼群を特別に五色沼湖沼群と呼ぶ。五色沼湖沼群の湖面は様々な色調を観察することが出来るため広く景勝地として認知されているが、五色沼湖沼群が鮮やかな青に見える要因について様々な指摘がなされてきた。吉村らは五色沼の青白色の原因として最も可能性が高いのは微粒子の存在であることを早くから指摘した。

一般的に水や湖沼の水面が青く見えることの要因には、

- (1) 水中の溶質の光吸収によって生じる色調
- (2) 浮遊物及び湖底堆積物によって生じる色調
- (3) 光の反射（湖面反射）
- (4) 水の光吸収
- (5) 微粒子による光散乱

がある。これらの要因を総合的に判断して、千葉

らは湖沼中の微粒子による光散乱が五色沼の色調の要因と考えてきたと推察できる。現在、その微粒子による光散乱を否定する因子は無く、ほぼ光散乱によるものと判断できる。しかし、一般に景勝地として知られる湖面の色彩では一過性の呈色ではなく多くの環境要因が複合して色彩を目視できる。そのため、色彩を呈する原因が、上記(1)～(5)のいずれか一つのみで湖面色彩を占有することは稀であり、複数で湖面色彩を占有するものと考えられる。

また、日本全国には、五色沼湖沼群のように水面が青く見える湖沼がいくつか存在する。これらの青色色彩の要因を確かなものにするために、本研究では、光散乱によって湖面の色彩変化を生じさせるナノレベルの大きさの微粒子に着目し、その粒径分布、粒子形状、さらには、その元素組成や結晶構造について調査してきた。昨年度は北海道美瑛町青い池と五色沼湖沼群との比較を行った。北海道美瑛町青い池は、水質の異なる3つの河川が合流することによって色彩変化を生じる湖沼であり、その河川の一つが火山性の河川であ

る。北海道美瑛町青い池を比較対象として選択した理由は、五色沼と同様に火山からの河川を源流とすること、微粒子の成分が五色沼と同様にアルミニウム系であることから、五色沼と類似点も多く、五色沼の微粒子の由来を議論するためである。昨年度の研究の結果、青い池のナノ粒子径分布は10~800 nm 付近まで幅広い分布幅を有し、その分布は、五色沼の青沼の挙動と類似していた。美瑛町青い池のコロイド粒子の形状は、不定形で大きさもまばらであるが、粒子自体は結晶性を示すため、多結晶状態であると判断された。

その一方で、日本全国には他にも青色色彩を呈する湖沼が多く知られているが、その中でも特に透明度が極めて高いために青色色彩に見える湖沼もある。その代表例として、山梨県忍野八海の湖沼群や青森県十二湖の青池などである。これらの湖沼は、五色沼湖沼群や北海道美瑛の青い池のように乳白色微粒子が湖水全体に浮遊する状況とは異なる。これらは湖沼の深度が5メートル以上あるにも関わらず透明度が高く、目視にて湖底を確認することが出来き、目視で透き通ったブルーを確認することができる。本研究では、これらの湖沼との比較も合わせて、ナノメートルオーダーの微粒子に関する粒子径と粒子数、形状に関して比較検討した。

II. 採水地

試料採取は、下記3箇所において別日に採水した。採水においては、当該湖沼を管轄する責任官庁に許可を得て実施した。

1. 山梨県富士吉田市忍野八海における湧池、御釜池、濁池（2014年10月2日7:00）：下記は山梨県教育委員会および忍野村教育委員会作成の案内板より必要情報を転記した。

【湧池】山梨県南都留郡忍野村忍草 361-2. 直径12 m, 面積152 m²のほぼ逆円錐状の池。直視深度約3 m. 潜水深度約5 m. 湧出量2.2 m³/s. 年平均水温13℃. pH 7.1

【御釜池】山梨県南都留郡忍野村忍草 111-2. 直径約0.5 m, 面積24 m²のほぼ円筒状の池。深度約7.5 m. 湧出量0.18 m³/s. 年平均水温13.5℃. pH 7.2

【濁池】山梨県南都留郡忍野村忍草 269-2. 河床の一区画に位置する面積36 m²の楕円状の小池。深度は浅い。湧出量0.041 m³/s. 年平均水温12℃. pH 6.5. 一見濁っているように見える部分もあるが、それは川床の色彩を反映している、もしくは、落差工から水により川底砂が舞い上がって生じた一時的な濁りであり基本的に清流である。



写真 1-1 湧池(山梨・忍野八海)



写真 1-2 御釜池(山梨・忍野八海)



写真 1-3 濁池(山梨・忍野八海)

2. 青森県深浦町十二湖における青池および沸壺池（2014年10月7日7:00）：下記は青森県作成の案内板より必要情報を転記。

【青池】面積 975 m²，周囲 125 m，深度 9 m

【沸壺池】面積 575 m²，周囲 115 m，深度 3 m



写真 2-1 青池(青森・十二湖)



写真 2-2 沸壺池(青森・十二湖)

3. 北海道美瑛町青い池（2014年10月8日8:30）



写真 3 青い池(北海道)

III. 分析試料と分析方法

1. 器具・装置

メンブレンフィルターは直径 25 mm の ADVATEC 製のセルロース混合タイプ(孔径:5.0 μm, 0.8 μm)及び PTFE タイプ(孔径:0.1 μm)を使用した。光散乱式粒子径数器は RION 製の XL-10A 改造型を使用した。ペリスタルティックポンプは GILSON 製の MINIPULS3 をを使用した。超純水製造装置は日本ミリポア製の Direct-Q UV を使用した。高分解能電界放出型走査電子顕微鏡システム (SEM)は日立ハイテクノロジーズ製の SU8000 を使用した。水試料中の溶存金属イオンの定量分析には、パーキンエルマー社製 ICP-OES Optima8300 を使用した。

2. 分析操作

採水した水試料は孔径が 5.0 μm のメンブレンフィルターを用いて吸引ポンプで吸引ろ過した。その溶液を光散乱式粒子径数器にて粒子数を計数した。5.0 μm 以上の物質はコロイド粒子とは異なり、自然に沈降するので、ろ過により計測対象外とし、それ以下の粒子を計数した。その際、200～600 nm，および、1～5 μm の無機粒子と生物粒子の 4 種類に区別して計数した（以降，計測区分と記す）。これは、レイリー散乱が光の波長と同等の粒径の微粒子の散乱で起こることに対応させた。また、生物粒子は、クロロフィル由来の光吸収帯を有するため区別して測定した。

また、ろ過した溶液をさらに孔径 0.1 μm のメンブレンフィルターにてろ過した。そのフィルターを乾燥させて、乾燥させた試料をブラックカーボンテープに転写して SEM で観察した。

IV. 結果と考察

1. それぞれの湖沼におけるコロイド粒子の粒子数の比較

光散乱式粒子径数器 DLS により得られた各湖沼の粒子数を図 1 に示す。目視にて青色色彩に見えて景勝地となっている 8 湖沼と緑色色彩に見

える一般的な池2湖沼, 計10湖沼についてグラフ化した。粒度分布(計測区分)に関しては, 10湖沼すべてで0.2~0.6 μmのコロイド粒子が他の種別よりも最も多い粒子数であった。その粒子数は1 mL当たり25万個(深泥沼)から18億個(湧池)と湖沼によって幅広い分布が観察できた。次いで, 粒子数が多く観察された計測区分は, 青く見える湖沼では, 0.2~0.6 μmの生物粒子であったが, その一方で緑に見える湖沼では1~5 μmの生物粒子の区分であった。この1~5 μmの生物粒子は, 青色色彩の湖沼では1 mL当たりの粒子数が100個以内であり, その中でも忍野八海の御釜池(10 PCS/mL), 十二湖の青池(13 PCS/mL), 同じく湧池(6 PCS/mL), 美瑛の青い池(17 PCS/mL)と非常に低い値を示した(参考: 五色沼のり沼; 32 PCS/mL, 青沼: 91 PCS/mL)。

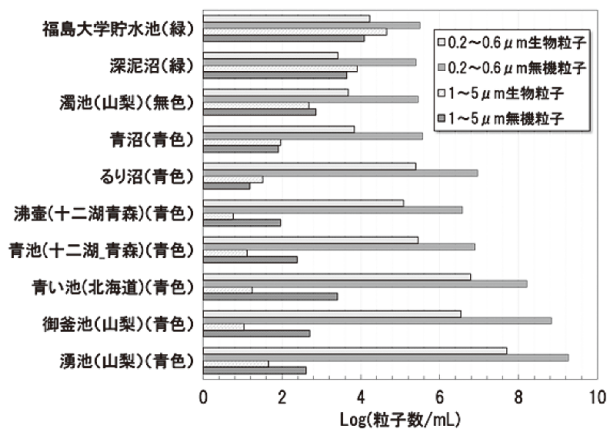


図1 各湖沼での1ミリリットル当たり粒子数。カッコ内は所在県, および, 目視で確認できる湖面色彩

また, 調査した全湖沼に共通して0.2~0.6 μmの生物粒子数は, 同じ粒径の無機粒子数に対してほぼ同程度の1~5%であった。このことから, 小さなコロイド粒子数は, 同程度の向き粒子に対してほぼ一定割合で存在することがわかった。また, その粒子数の大小によって, 湖面色彩が緑色に変化するような特徴を有していないことから, 0.2~0.6 μmの生物粒子は, 同じ粒径の無機粒子と同

等にふるまうことが予想できる。

その一方で, 青色色彩に見える湖沼に共通する点として, 0.2~0.6 μmの粒子数(無機粒子および生物粒子の総数)に対して, 1~5 μmの粒子数(無機粒子および生物粒子の総数)が圧倒的に少なかった。緑に見える湖沼において, 0.2~0.6 μmの粒子は1~5 μmの粒子数に対してほぼ同数~10倍程度の数量で存在したが, 青色に見える湖沼は, その比が約100~100万倍以上の数量で存在した。これは, 緑に見える湖沼の, 1~5 μmの粒子数の絶対数が, 青く見える湖沼に対して非常に多いと要因が挙げられる。例えば, 深泥沼(1.2万 PCS/mL), 福島大学貯水池(5.6万 PCS/mL)に対して, 忍野八海の御釜池(517 PCS/mL), 十二湖の青池(255 PCS/mL), 美瑛の青い池(2583 PCS/mL)であった。

さらに, 透明度が極めて高く青色色彩に見える湖沼(忍野八海, 十二湖)と乳白色微粒子が湖水全体に浮遊して青色に見える湖沼(五色沼, 美瑛)を比較した結果, 粒子数の点からは大きな差異は見出されなかった。

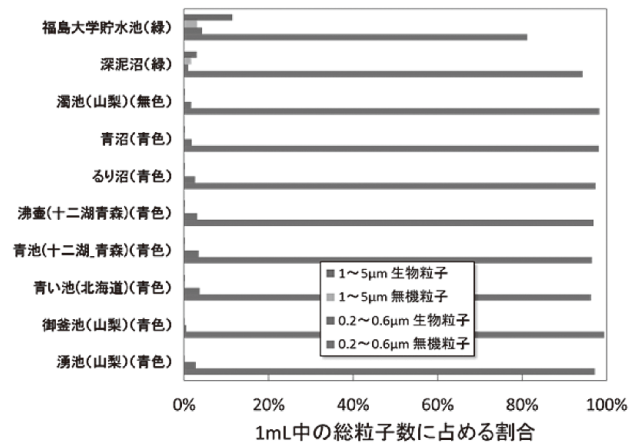


図2 各湖沼での1ミリリットル当たり総粒子数にしめる測定区分ごとのコロイド粒子の割合

各湖沼での総粒子数(1 mL当たり)に占める測定区分ごとのコロイド粒子の割合を図2に示す。

前述したように, いずれの測定区分においても

総粒子数のほとんどが $0.2\sim 0.6\ \mu\text{m}$ の無機粒子で占められている。また、 $0.2\sim 0.6\ \mu\text{m}$ の生物粒子も湖面色彩に関わらず一定割合で存在している。また、緑色に見える湖沼では $1\sim 5\ \mu\text{m}$ の生物粒子が多く含まれており、青色色彩の湖沼にはその存在割を無視できるほどであることが理解できる。

2. 粒子の形状観察

各湖沼に浮遊した粒子をろ過し、ろ紙に残存した微粒子を SEM 撮影した (図 3-1~3-7)。SEM 写真より、各湖沼のコロイド粒子の形状は定型を示さず、様々な形状と大きな粒子が存在していた。五色沼および美瑛青い池からは、非結晶体と思われる粒子を計測した。五色沼から採取した微粒子は昨年度の報告より非結晶体と同定されたが、青い池の方は未計測である。昨年度は美瑛青い池からは、やじり上の結晶体を計測したが、本年度採水した試料からはそれは検出されなかった。透明度が極めて高く青色色彩に見える湖沼 (忍野八海、十二湖) と乳白色微粒子が湖水全体に浮遊して青色に見える湖沼 (五色沼、美瑛) を比較すると、この非結晶体と思われる物質の差が考えられる。結晶体および非晶質帯の組成は未測定であるが、昨年度の計測よりそのほとんどが SiO_2 由来の物質と予想される。その一方で、緑色に呈する湖沼は、ほとんどが珪藻類であった。

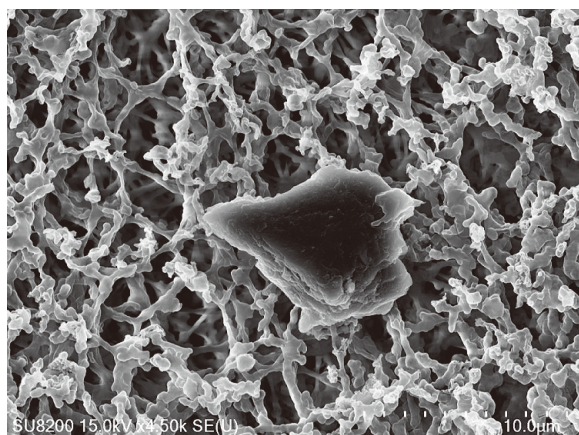


図 3-1 孔径 $5.0\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルター上に捕集された沸壺池 (十二湖) のコロイド粒子の SEM 写真

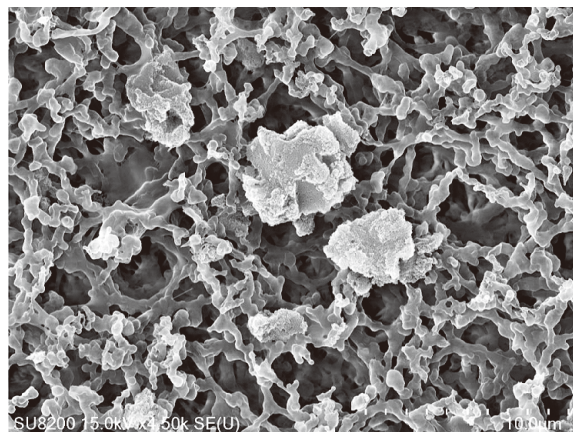


図 3-2 孔径 $5.0\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルター上に捕集された青池 (十二湖) のコロイド粒子の SEM 写真

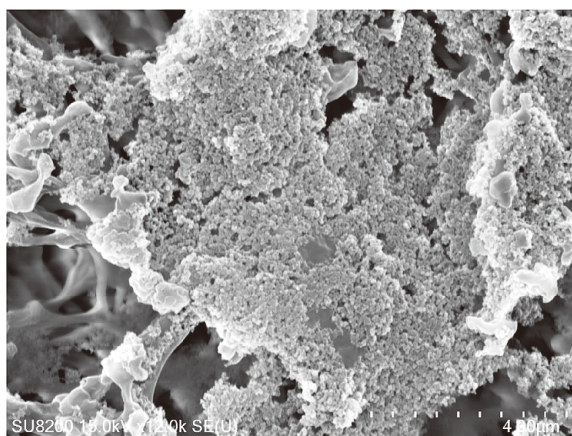


図 3-3 孔径 $5.0\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルター上に捕集された青い池 (美瑛) のコロイド粒子の SEM 写真

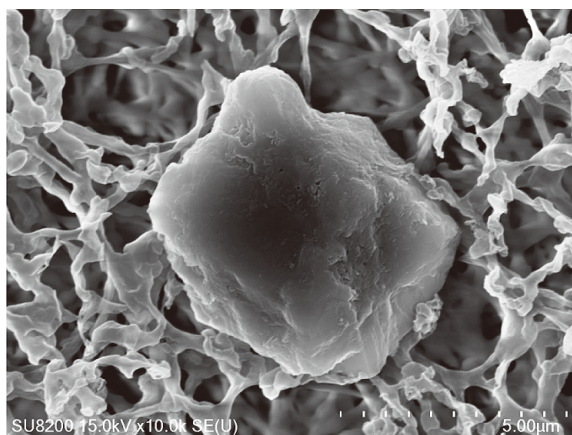


図 3-4 孔径 $5.0\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルター上に捕集された湧池 (忍野八海) のコロイド粒子の SEM 写真

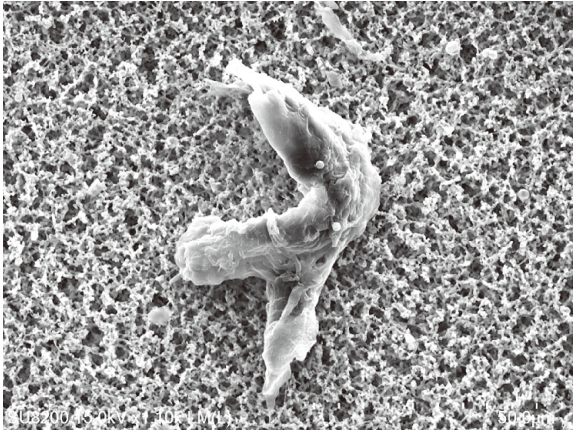


図 3-5 孔径 5.0 μm のメンブランフィルター上に捕集された濁池(忍野八海)のコロイド粒子の SEM 写真

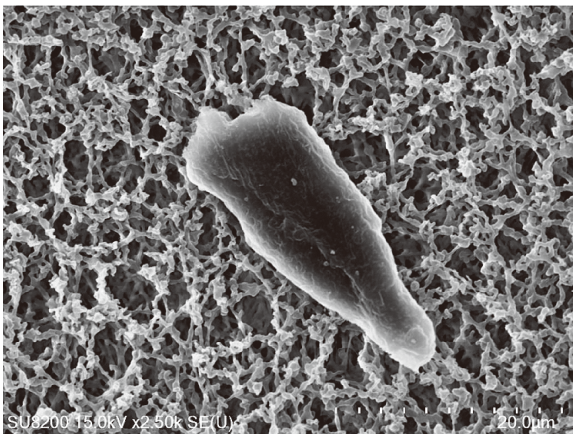


図 3-6 孔径 5.0 μm のメンブランフィルター上に捕集された御釜池(忍野八海)のコロイド粒子の SEM 写真

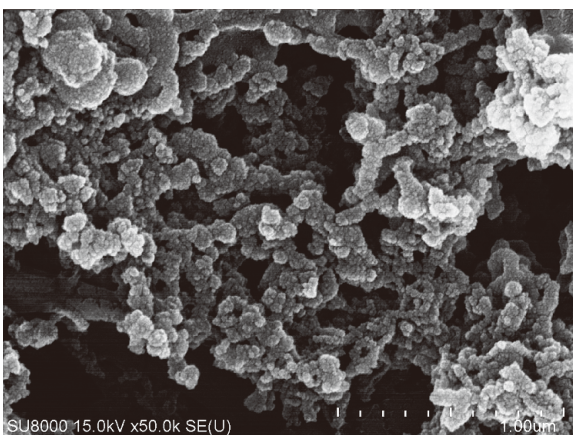


図 3-7 孔径 5.0 μm のメンブランフィルター上に捕集された毘沙門沼(五色沼)のコロイド粒子の SEM 写真

3. 湖水の全元素定量分析

各湖沼における全元素分析の結果を図 4 に示す。五色沼に関するデータは、福島県が測定しているためここでは省略する。図 4-1 に濃度が ppb レベル以上の主要元素成分の定量値を示す。図 4-2 に濃度が ppb レベル以下の元素の定量値を示す。

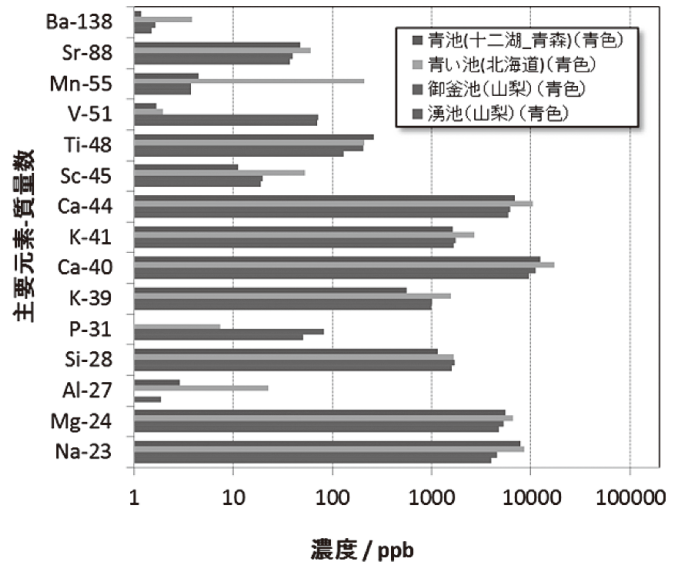


図 4-1 湖水の全元素定量結果(ppb レベル以上の主要成分)

美瑛の青い池では、乳白色微粒子の構成成分である Al や火山性土壌由来の Mn, Ba が他よりも多く検出された。一方, V は忍野八海で特徴的に検出された。これは富士山の地下水に起因すると考えられる。同じく P も忍野八海で検出されたが、これは観光地化による一般生活水や魚類などの生態由来と考えられる。その一方で, Na, Mg, Si, K, Ca, Ti, Sr などのいわゆる一般主要元素に関しては定量値に大きな差異は無かった。

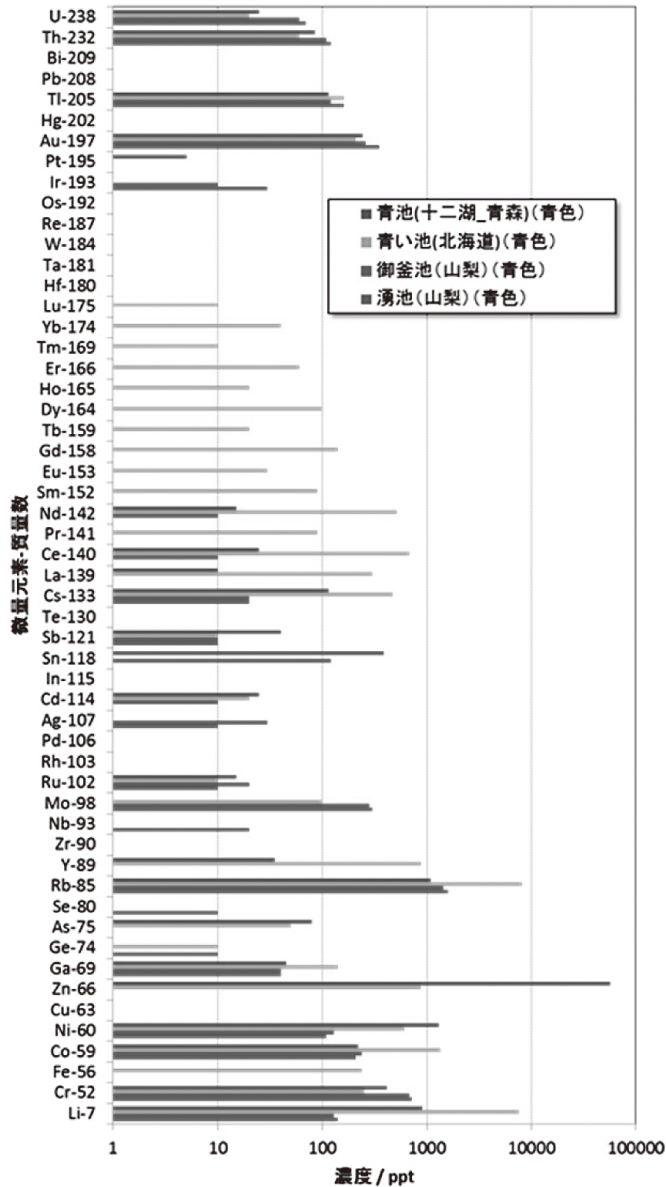


図 4-2 湖水の全元素定量結果(ppb レベル以下の微量成分)

ppb レベル以下の微量元素に関しても、その際は地質的な要因から判断されるものが大きかった。特に北海道美瑛からは、レアアースメタルが他の箇所よりも多く検出された。

V. まとめ・今後の課題

日本全国には他にも青色色彩を呈する湖沼が多く知られているが、その中でも今回、透明度が極めて高いために青色色彩に見える湖沼として、山梨県忍野八海の湖沼群や青森県十二湖の青池、

ならびに、乳白色微粒子が湖水全体に浮遊して青色色彩に見える五色沼湖沼群や北海道美瑛を選択し、ナノメートルオーダーの微粒子に関する粒子径と粒子数、形状に関して比較検討した。浮遊するコロイド粒子を 4 つの測定区分に分けて測定した結果、総粒子数のほとんどが 0.2~0.6 μm の無機粒子で占められていることが分かり、それぞれの湖沼の粒子絶対数を計数した。また、0.2~0.6 μm の生物粒子も湖面色彩に関わらず全体に対して一定割合で存在してことがわかった。また、緑色に見える湖沼では 1~5 μm の生物粒子が多く含まれており、青色色彩の湖沼にはその存在割合を無視できるほどであることがわかった。湖沼が青く見える主要因としては、1 μm 以上の大きさの生物粒子が存在しないことが条件であることが分かった。また、透明度が極めて高く青色色彩に見える湖沼(忍野八海、十二湖)と乳白色微粒子が湖水全体に浮遊して青色に見える湖沼(五色沼、美瑛)を比較した結果、粒子数の点からは大きな差異は見出されなかったが、SEM の結果より非結晶体と思われる物質質量において差異があることが考えられる。一方で、透明度が高く青色色彩に見える湖沼(忍野八海、十二湖)では SEM 観察される微粒子のほとんどが結晶体と思われる微粒子であった。

また、各湖水の全元素定量を行い、その元素と定量値について比較した。各地の地理的特性を表していたが、湖面色彩と直接かかわる特異性としては、乳白色微粒子が湖水全体に浮遊して青色色彩に見える北海道美瑛の青い池において Al を多点とは異なり多く検出した。

謝辞

北海道開発局旭川開発建設部の諸橋雅幸様、青森県深浦町の佐藤健吾様、忍野村教育委員会の後藤課長補佐様、福島大学環境放射能研究所の横山文様および高瀬つぎ子特任准教授にはご多忙中にもかかわらず、ご協力いただきお礼申し上げます。

す.

引用文献

高貝 慶隆・阿部 遼太 (2014) 湖面の青色色彩に関する五色沼と北海道美瑛町青い池の化学的類似性と相違性について, 共生のシステム, 14, 80-87.