

## 箱根山噴火後の渓流水、温泉水および湖水のPIXE分析

— 2015/6/30～2018/1/6 —

酒井正治<sup>1</sup>、世良耕一郎<sup>2</sup>、後藤祥子<sup>3</sup>、細川貴子<sup>3</sup>

<sup>1</sup>森林総合研究所立地環境研究領域  
305-8687 茨城県つくば市松の里1

<sup>2</sup>岩手医科大学サイクロترونセンター  
020-0603 岩手県滝沢市留が森348-58

<sup>3</sup>日本アイソトープ協会仁科記念サイクロترونセンター  
020-0603 岩手県滝沢市留が森348-58

### 1 はじめに

日本は、全世界の活火山の7%を占める世界有数の火山国で、有史以来、時として甚大な火山災害に見舞われてきた。最近では、御嶽山噴火（2014年9月27日）で登山客ら58名の死亡者、草津白根山噴火（2018年1月23日）では13名の死傷者を出すなど大きな人的被害をもたらす想定外の噴火が起こっている。人的被害以外にも、口永良部島噴火（2015年5月29日）では爆発的噴火が発生したため、全島民が屋久島への避難を余儀なくされ、また、噴火を繰り返している霧島新燃岳では2018年3月6日の爆発的噴火に伴う火山灰により、鹿児島空港の発着便の78便が欠航する等、日常生活に多大な影響を及ぼしている。しかも、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震以降、20におよぶ火山の地震活動が活発化するなど、火山活動の活発化が懸念されている<sup>1,2</sup>。

箱根火山も東北地方太平洋沖地震後、顕著な群発地震活動が発生した<sup>3</sup>。箱根山は2015年4月末から大涌谷付近を震源とする火山性地震が増加し始め、同年6月29日に大涌谷で小規模な水蒸気噴火が発生した。その翌日噴火警戒レベルをレベル3（入山規制）へと引き上げ、火口付近の入山が規制された。芦ノ湖を含む箱根一帯は、東京から比較的近く、良質な温泉と風光明媚な歴史を有する地として年間2,000万人もの観光客が訪れる人気の観光地であったが、火山活動に関する連日のマスコミ報道などもあり、観光客が激減し、宿泊、観光施設などに大きな経済的損失を与えた。噴火前年（2014年）および噴火当年（2015年）の入込観光客数はそれぞれ2,119万人、1,737万人で、噴火により382万人の観光客の減少となり、経済損失額はおよそ400億円とも推定されている<sup>4</sup>。箱根のみならず日本各地で起こっている火山活動は人的被害のみならず農林業・観光業などの大きな経済的損失を伴うことが多く、その

地域の社会・経済に大きな影響を与えるため、火山噴火の予知、火山活動の予測の研究が進められているが、火山活動のメカニズムがそれぞれの火山で異なることなどから、どの火山にも対応した予知・予測は現状では困難であると言われている。噴火当時、立ち入り禁止である大涌谷噴火域の活動程度を、噴火域を源流とする渓流水の成分変化から把握できるかもしれないと考え、噴火直後から定期的に、立入禁止区域外で、渓流水を採水している。また、この火山活動を反映すると考えられる溪流の他に、対照として芦ノ湖湖畔および仙石原で、それぞれ湖水および温泉水を採水している。それらの水サンプルの成分は、多元素同時分析が可能なPIXE分析法で行い、溶存態成分の元素濃度のモニタリングを行っている。前報<sup>5,6</sup>では、大涌谷噴火域を源流とする渓流水の溶存態物質の元素濃度の時系列変化（噴火後1年間）<sup>5</sup>、および渓流水の懸濁態物質の元素濃度の時系列変化（噴火後1年9ヶ月間）<sup>6</sup>について報告した。

ここでは、噴火から2年半の水質モニタリング（月1回の採水）について、渓流水、温泉水および湖水の成分濃度および時系列変化について報告する。

## 2 箱根山とは

箱根山は単一の火山ではなく、箱根とその周辺の地形を形成する火山の総称である。大規模な噴火は約 3,000 万年前の冠が岳の噴火が最後と考えられており、有史以降の噴火は比較的小規模な水蒸気爆発にとどまり、その位置も大涌谷周辺と神山などに限られたものとされている<sup>4</sup>。

## 3 方法

### 3.1 採水

図-1に渓流水、温泉水および湖水を採取した3カ所の位置図を示した。

渓流水は大涌谷噴火域を源流とする溪流（大涌沢）の下湯橋で採取した。この地点は噴火地帯から約1.5km下流に位置し、箱根町火山防災マップによれば<sup>7</sup>、噴火時には熱泥流が流下する可能性が示唆されている。実際、2015年6月29日、噴火域で発生した熱泥流は大涌沢上流で確認されており、この流域で噴火直後から火山活動に起因した白濁現象が認められることから（写真）、この渓流水の成分は噴火域の火山活動を十分反映していると考えられた。なお、大涌谷噴火域を源流とする大涌沢は川幅が狭く、砂利や岩が多いことから、これまでのNMCC報告書<sup>5,6</sup>で使用してきた河川水の呼び方を渓流水とした。

比較対照として採水した温泉水および湖水の採取地点は大涌谷噴火域からそれぞれ北および西の方向に約3 km離れている（図-1）。温泉水は噴火域の北に位置する仙石原地区の別荘に、仙石高原開発株式



図-1 噴火、採水および造成温泉製造場所の位置図

出典：電子国土 web

会社が供給している温泉水を採取した。この温泉水は造成温泉といわれ、大涌谷および姥子地区の噴出蒸気を地下水と混合し、それをパイプラインで仙石原地区に引き湯した造成温泉で、その成分は噴気の影響を受けている。ここでは、これを温泉水と呼ぶ。また、湖水は芦ノ湖北岸に位置する湖尻水門付近で採取した。なお、温泉水および湖水は、渓流水と異なり、全ての採取時において透明であった。

渓流水の採取はなるべく渓流水量の安定した平水状態の日を選んで行い、他の2地点の採水は渓流水の採取と同じ日に行った。各現場で100 ml容ポリビンに採水し、その後、メンブレンフィルター(孔径0.8  $\mu\text{m}$ )でろ過した。50 ml容ポリビンに保管したろ液は溶存態成分分析用サンプルとして、PIXE分析を行うまで冷蔵庫に保管した。

採水は原則として月1回とし、採水期間は2015年6月下旬～2018年1月上旬までの2年半である。なお、急な噴火であったため、各採水場所の選定などの準備のため、各採水場所の採水開始日は同じではなく、温泉水は2015/6/30～2018/1/6までの30回、渓流水は2015/7/28～2018/1/6までの29回、および湖水は2015/8/31～2018/1/6までの28回であった。なお、月一度の採水は現在も継続中である。

### 3.2 PIXE 分析

水の成分分析は仁科記念サイクロトロンセンター (NMCC) の PIXE 分析システムを使った内部標準法で行った<sup>8</sup>。内部標準元素として In 標準液 (1000 ppm、0.2 mol HNO<sub>3</sub> 溶液中、和光純薬) を水サンプルに加え、In 濃度 10 ppm に調整し十分攪拌後、その内部標準混合溶液 30  $\mu\text{l}$  をホルダーに貼りつけたバックリングフィルム上に滴下し、室温において乾燥させたものを PIXE ターゲットとした。小型サイクロトロン (島津製作所 MCY-1750) により加速された 2.9 MeV の陽子線をターゲットに照射し、発生した X 線を二検出器同時測定システム<sup>8</sup>により検出した。検出器 1 には低エネルギー線を吸収する吸収体として 500  $\mu\text{m}$  Mylar を装着し Ca 以上の元素を測定、検出器 2 では吸収体を装着せず Na～K までの元素を測定した。2 台の検出器の橋渡しは Ca で行った。なお、渓流水では Fe だけが突出していたため、計数率の大部分を占める Fe 元素からの X 線を吸収する特殊吸収体を検出器 1 に装着し、Ni 以上の重元素を測定した。得られたスペクトルは PIXE 専用スペクトル解析プログラム SAPIX および定量計算プログラム KEI により各元素濃度を求めた<sup>9</sup>。なお、定量値に対する SE (Standard Error) が 50% 以下の元素についてのみ元素濃度として採用した。

なお、得られた元素濃度データは JMP(SAS 社製、Mac 版 ver.13) で統計解析および図化を行った。

## 4 結果と考察

### 4.1 検出元素

全期間で31元素が検出された。渓流水、温泉水および湖水の共通検出元素数は25元素、渓流水と温泉水の共通検出元素数は27元素、渓流水と湖水の共通検出元素数は25元素、温泉水と湖水の共通検出元素数は24であった。

なお、渓流水、温泉水および湖水で検出された元素数は、それぞれ、30元素 (Al, As, Br, Ca, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sc, Se, Si, Sr, Ti, V, Y, Zn, Zr)、29元素 (Al, As, Br, Ca, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Nb, Ni,



写真 渓流水の採水状況 (大涌沢の下湯橋下)  
撮影日：噴火後1ヶ月の2017年7月28日  
大涌谷噴火域から直接流下しているため、白濁している。

P、Pb、Rb、S、Sc、Se、Si、Sr、Ti、V、Y、Zn、Zr)、25元素(Al、As、Br、Ca、Cl、Co、Cr、Cu、Fe、Ga、Hg、K、Mg、Na、Ni、P、Pb、Rb、S、Si、Sr、Ti、V、Y、Zn)であった。

それらの検出元素のうち、毎採水時に高頻度で検出される元素と数回しか検出されない低頻度で検出される元素が認められた。また、Mn元素は渓流水と温泉水では毎回検出されたが、湖水では検出されないなど、採水場所によって、元素検出率(検出回数/全採取回数)の異なることが認められた。

図-2に、渓流水、温泉水および湖水の元素検出率を示した。渓流水では、Al、Ca、Cl、Fe、K、Mg、Mn、Na、S、Si、Srの11元素は全ての採水サンプルで検出された。次いで高い検出率の順にZnが97%、Cr、Niが60%台、Coが50%台、それ以外の元素は50%以下であった(図-2)。温泉水では、Ca、K、Mg、Mn、Na、S、Si、Znの8元素は全ての採水サンプルで検出された。次いで高い検出率の順にSrが97%、Feが90%、Cuが87%、Clが70%、Br、Pbが67%、Niが53%、それ以外の元素は50%以下であった(図-2)。湖水では、Br、Ca、Cl、K、Mg、S、Si、Znの7元素は全ての採水サンプルで検出された。次いで高い検出率の順にCu、Fe、Na、Srが90%台、Pbが71%、それ以外の元素は50%以下であった(図-2)。

ここでは、渓流水、温泉水および湖水の中では、渓流水は噴火域を源流とし噴火域から直接流下しているため、噴火活動の影響を最も受けている渓流水の溶存態成分の時系列変化を中心に考察する。従って、これ以降、渓流水において、2015/7/28~2018/1/6まで測定期間中(採水回数29回)、検出率100%の11元素、Al、Ca、Cl、Fe、K、Mg、Mn、Na、S、Si、Sr、および高い検出率97%のZn元素の計12元素について、データ解析を行った。

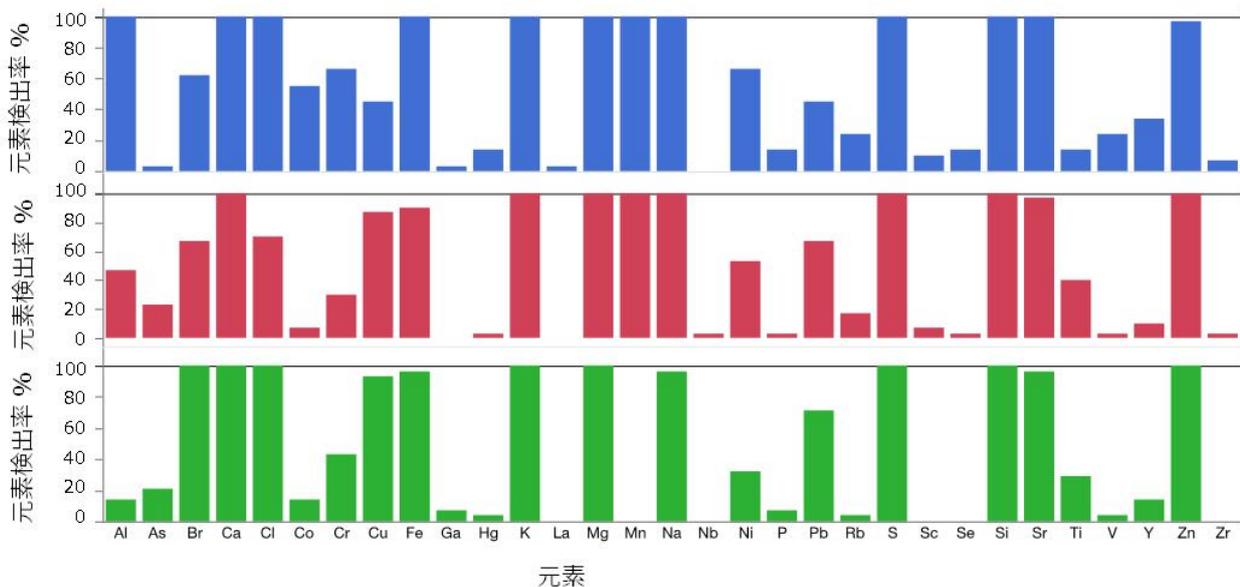


図-2 渓流水、温泉水および湖水の溶存態元素(31元素)の検出率  
上図：渓流水、中図：温泉水、下図：湖水

#### 4.2 元素濃度

図-3に、高頻度検出元素である12元素における、渓流水、温泉水および湖水の溶存態成分の元素濃度を示した。濃度範囲を視覚的にわかりやすく表現できる箱ひげ図で示した。箱内のバーはデータの中央値、箱の上下のバーはデータの第一四分位点(下側)および第三四分位点(上側)、箱から上下に伸びたひげのバーはデータの最小値および最大値を示している。例えば、渓流水のCl元素の箱の長さが長く

元素濃度のばらつきが大ききことを示す一方、S元素は箱の長さが短く各測定回の元素濃度に大きな変化がないことを示している。また、箱の上側および下側の点は外れ値である可能性を示唆している。

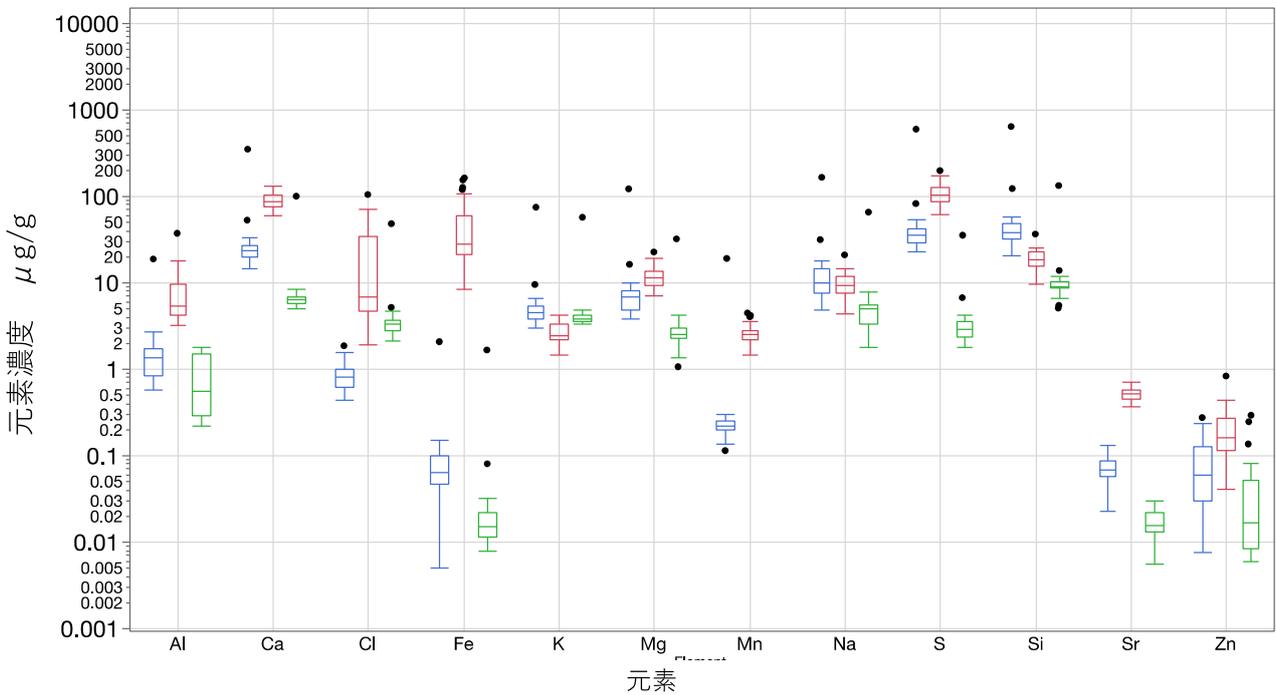


図-3 渓流水、温泉水および湖水の溶存態成分の12元素濃度箱ひげ図：左から、温泉水、渓流水、湖水

渓流水の元素の平均濃度を降順に以下に示す。S、Ca、Fe元素の平均濃度は、それぞれ110.7、90.2、48.5 µg/gと、他の元素に比べ極めて高い値を示した。Cl、Si、Mg元素は10~20 µg/g、Na、Al、K、Mn元素は1~10 µg/g、Sr、Zn元素は0.1~1 µg/gの範囲の値であった。

温泉水の平均濃度は渓流水より低い傾向にあった。温泉水の元素の平均濃度を降順に以下に示す。Si元素は41.7 µg/g、Cl、S、Ca元素は20~50 µg/g、Na元素は10.9 µg/g、Mg、Al、K元素は1~10 µg/g、Cl、Mn元素は0.1~1 µg/g、それ以外は0.1 µg/g以下であった。但し、Si元素は渓流水より高い濃度であった。

湖水の平均濃度は渓流水、温泉水より低い傾向にあった。湖水の元素の平均濃度を降順に以下に示す。Si、Ca、Na、K、Cl、S、Mg元素は1~10 µg/g、Zn元素は0.05 µg/g、それ以外は0.1 µg/g以下であった。なお、Mn元素は検出されなかった。

渓流水に最も多く含まれるS元素は、大涌谷噴気地帯の火山ガス中の硫化ガス(H<sub>2</sub>S)と亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)から生成された硫酸イオンが起源と考えられ、噴火活動を反映している指標元素の一つである。さらに、4番目に高い濃度を示すCl元素の起源は火山ガス中のHClから生成された塩化物イオンで、火山ガスのHClはマグマ起源であるため、S元素同様、マグマの寄与を判別する重要な指標と考えられる。その他の元素で、平均濃度が1 µg/g以上の高い濃度を示す元素を降順に示すと、Ca、Fe、Si、Mg、Na、Al、K、Mnの8元素であった。これらの8元素は岩石の主要な構成元素で、岩石重量の約半分を占める酸素元素を加えると、これら8元素の酸化物としての重量割合は岩石の99.5%以上を占めている<sup>10</sup>。つまり、これら8元素は岩石由来の元素、つまり、熱水、噴出ガスによる岩石の火山性変質により岩石から容脱されたものと考えられる。

溶存態成分中の元素が岩石に由来する程度を調べる指標として、濃縮係数（EF値）を求めた。EF値が、1前後～10以下の場合、岩石が大きく関わっている元素、上記以上の値は何らかの自然・人為的発生源の影響を受けていると考えられる。EF値は、Alを基準として次式で表現される。

$$EF = [X/Al]_{\text{水}} / [X/Al]_{\text{地殻}}$$

Xは対象元素、分子は水のAlとの濃度比、分母は地殻中のAlとの濃度比。

図-4に、渓流水、温泉水および湖水のEF値を示した。渓流水ではFe、K、Mg、Na、Si元素、温泉水ではFe、K、Si元素、湖水ではFe、Si、Sr元素が岩石起源に強く由来する元素であった。一方、著しく大きな値を示すCl元素およびS元素は、岩石以外の発生源、つまり、マグマから放出された元素と考えられた。

図-5に、渓流水、温泉水および湖水の溶存態成分の高頻度検出元素である、12元素の時系列変化を示した。

渓流水では、マグマ起源ガスに由来するS、Cl元素、およびSiを除く岩石由来元素（Ca、Fe、Mg、Al、Na、K）は噴火直後から下降傾向を示した。S、Ca、Fe、Mg、Al、Na、

K元素は噴火一年目まで、Cl元素は約一年半まで、減少傾向を示した。その後、減少傾向に歯止めがかかり、横ばいながら、上下に変動していた。

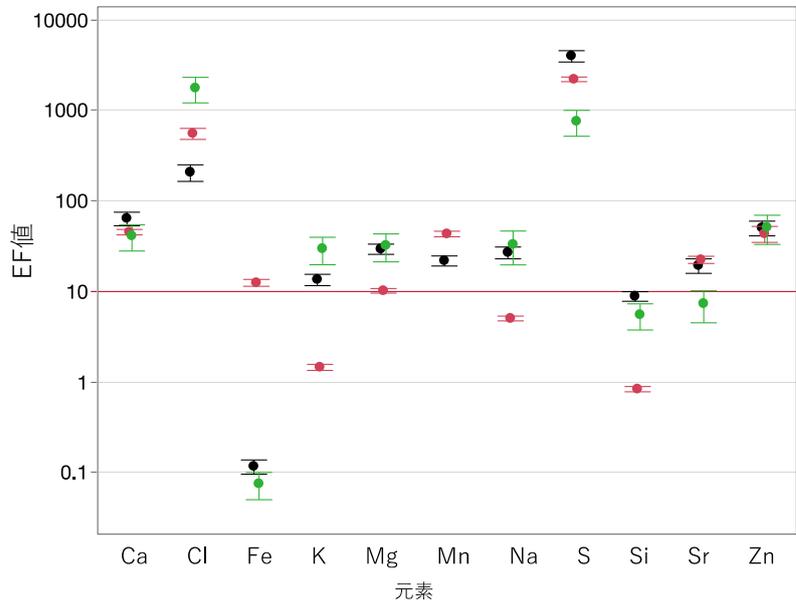


図-4 渓流水、温泉水および湖水のEF値  
 図中の点と幅はそれぞれ平均値および標準誤差を示す  
 赤丸：渓流水、黒丸；温泉水、緑丸：湖水  
 1前後～10以下のEF値は岩石が大きく関わっている。10以上のEF値は何らかの自然・人為的発生源の影響を受けている。

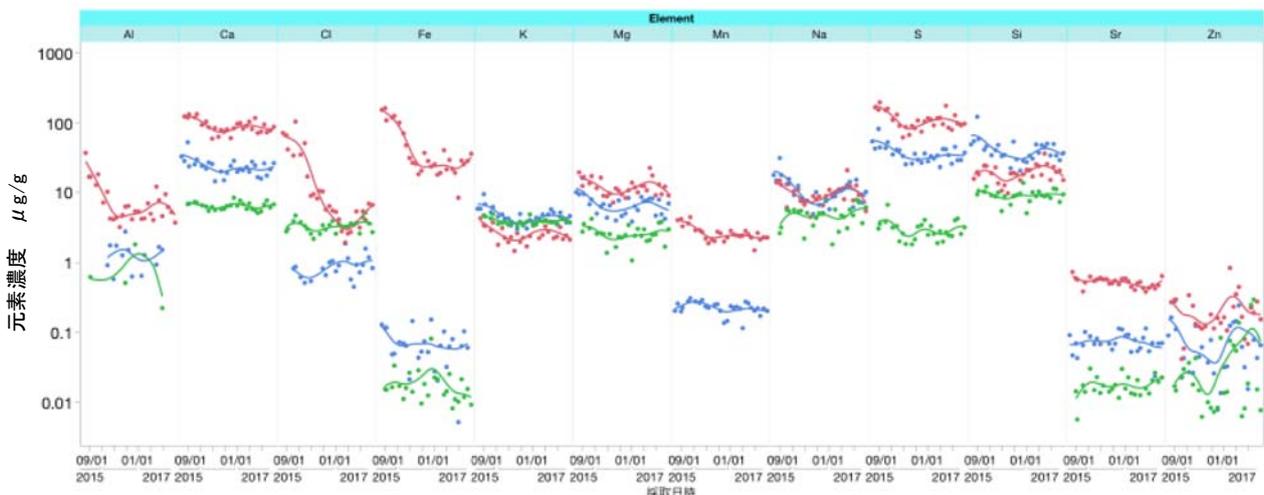


図-5 渓流水、温泉水および湖水の溶存態成分の12元素濃度の時系列変化  
 赤線：渓流水、黒線：温泉水、緑線：湖水

噴火後1年までは、火山活動の低下傾向とよく同調しているようにみえる。つまり、2015年6月の小規模な噴火時には、活発な火山活動によりマグマ起源とされるSO<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>から二次生成されたH<sub>2</sub>SガスおよびHClガスが大量に噴出し、それらが地表で冷やされた水蒸気に硫酸イオン、塩素イオンとして取り込まれ、渓流水の元ができた。さらに、火山ガスにより、付近の岩石が激しい分解を受けるため、岩石中の元素が容脱し、これらが負荷された地表水が大涌沢を流下したものと考えられる。噴火以降は、ガスの噴出量が徐々に少なくなったため、マグマ起源のS、Cl元素の生成量および岩石の熱水変質作用による元素の容脱が少なくなり、その結果、ガスの噴出量の低下に伴って、地表水に溶存する元素濃度が低下したと考えられた。一方、Si元素の季節変化は山型を示し、他の9元素とは異なる傾向を示した。岩石を構成するケイ酸（二酸化ケイ素）は、熱水、アルカリに溶けやすい、一方、冷水にはわずかししか溶けず、酸には溶けない<sup>11)</sup>。噴火域では、熱水や噴気による岩石の熱水変質の結果、大量のSi元素が生成されるが、採取場所の渓流水は酸性（pH 2.3-3.2）かつ低温（平均 13.3℃）であった（図-6）。そのため、渓流水中のSiはフィルタ上に補足される一方、溶存態Si濃度は低濃度を示すと考えられる。このことは、特に噴火直後は渓流水のpH値が2.3と強酸性のため、溶存態Si濃度が低かった原因と考えられた。

温泉水では、噴火直後から約一年まで減少する元素は、Ca、K、Mg、Na、S、Siであった。その後の傾向も渓流水の各元素と同様であった。一方、湖水では、K、Mg、Sは渓流水、温泉水と同調して変化する傾向は認められるが、その変動は渓流水、温泉水に比べて明確でなかった。

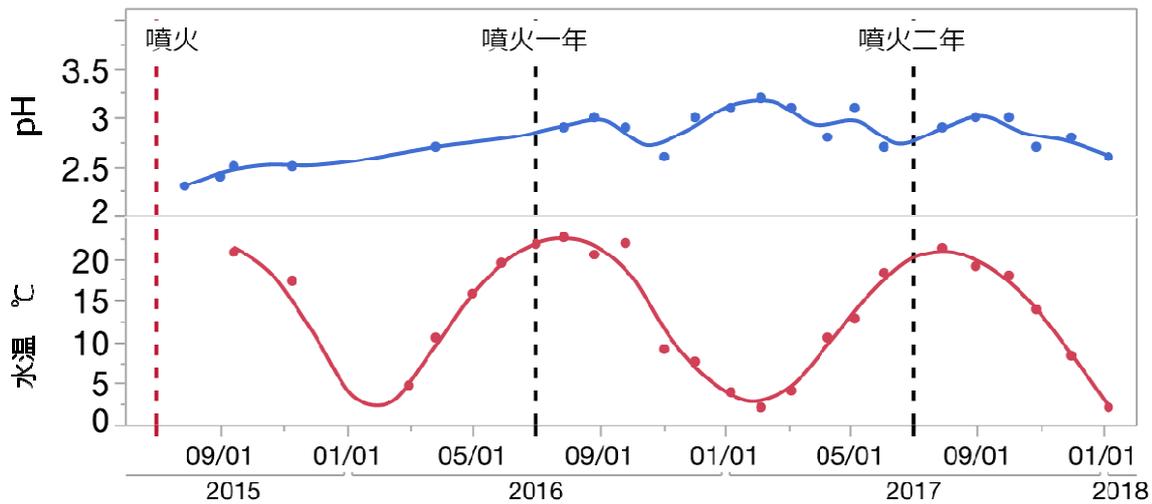


図-6 渓流水のpHおよび水温の時系列変化

渓流水の溶存態成分の8元素で認められた傾向、つまり、噴火約一年目、或いは二年目まで明確な減少傾向を示したが、これは、噴火活動の低下に伴う現象と考えられた。そこで、高濃度かつ明確な減少傾向を示す元素である、S、Cl（マグマ由来）およびAl、Fe元素（岩石由来）と、火山活動の指標の一つである火山性地震との関係を調べた（図-7）。各元素濃度は、噴火直後から一年目あるいは二年目まで指数関数的に減少した。噴火一年後には、Al、F、Cl濃度はほぼ1/10に、S濃度は3割から4割まで減少した。一方、1000回を超していた地震回数/日は噴火前後をピークに、その後L字型に急減し、濃度変化とは異なる傾向を示した。これは、地震回数の変化に比べて、元素濃度変化は火山活動の低下現象をより詳細に表現していることを示唆していた。噴火一年以降は、地震はほとんど確認されない、平穏な日が続いた。一方、元素濃度は、指数関数的な減少傾向に歯止めがかかり、横ばい状態を保ったが、上下に変動を繰り返していた。このような元素濃度変化は地震活動観測では得られない火山内部で起こっている変化をうまくとらえている可能性を示唆した。

## 5 まとめ

一般に、噴火予知は多くの観測データ、例えば1.重力・電磁気観測、2.地殻変動観測、3.地震活動観測、4.噴出物（火山ガス）観測などからの総合的判断が求められ、しかも、平常時の長期モニタリングも重要と考えられている。今回得られた、渓流水、温泉水および湖水のモニタリング結果では、渓流水では、マグマ起源ガスに由来するS、Cl元素、およびSiを除く岩石由来元素（Ca、Fe、Mg、Al、Na、K）の8元素、温泉水では、6元素（Ca、K、Mg、Na、S、Si）は、火山内部で起こっている変化をうまくとらえている可能性を示唆したことから、水質観測は噴火を予知するための重要な判断データと考えられた。さらに、渓流水や温泉水は、噴火時には噴火域から離れているため、安全に採取できる。これは噴石やガス暴露を避けることができる点で重要である。また、PIXEによる水質分析では短時間で元素濃度が得られるため、噴火などの緊急対応が可能で、採取間隔を密にすることにより、噴火前の変化をとらえることができる。これらのメリットから、現在難しいと言われている噴火予知の観測に、今後水質モニタリングが加えられることを期待したい。

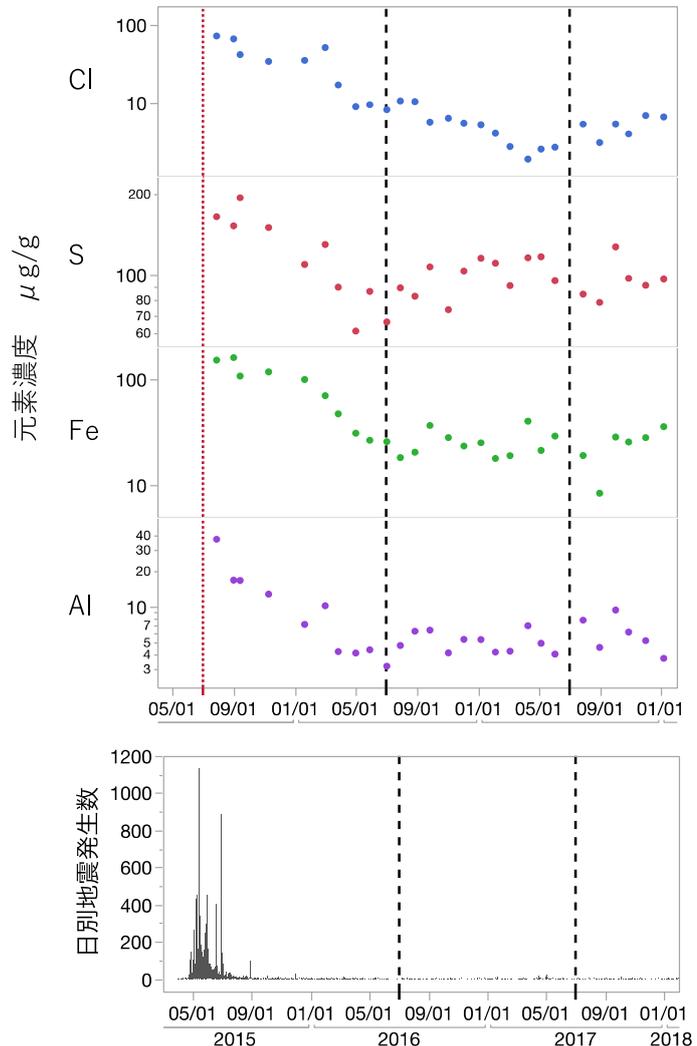


図-7 渓流水の溶存態元素濃度（4元素）と日別地震発生数の時系列変化

## 謝辞

箱根火山の活動状況および採水についての情報および助言を頂きました神奈川県温泉地学研究所の板寺一洋さん、芦ノ湖漁業協同組合の鎌倉俊数さん、仙石高原開発株式会社の勝俣剛人さんに感謝いたします。

## 参考文献

1. 鶴川元雄：大地震と噴火の連動性、地震ジャーナル 55、13-25、2013
2. 小山順二：巨大地震は火山の大噴火を励起するか？ 北海道大学地球物理学研究報告 78、53-68、2015、doi:10.14943/gb.hu.78.53
3. 原田昌武、明田川保、伊藤博、本多亮、行竹洋平、板寺一洋、吉田明夫：2011年東北地方太平洋沖地震によって、誘発された箱根火山の群発地震活動、64、135-142、2012、doi10.4294/zisin.64.135
4. 吉田功：箱根山の現状と観光について、運輸政策研究（早期公開版）、21、1-6、2019

5. 酒井正治、世良耕一郎、後藤祥子：箱根大涌谷噴火域から流出する河川水のPIXE分析—成分組成の変化—、NMCC共同利用研究成果報文集 22、130-139、2015
6. 酒井正治、世良耕一郎、後藤祥子：箱根大涌谷噴火域から流出する河川水・懸濁物質のPIXE分析—2015/7/28~2017/4/10—、NMCC共同利用研究成果報文集 23、80-90、2016
7. 箱根町火山防災マップ全域図  
<https://www.town.hakone.kanagawa.jp/index.cfm/10,1218,46,167,html>
8. K. Sera, T. Yanagisawa, H. Tsunoda, S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitoh, S. Suzuki and H. Orihara, Bio-PIXE at the Takizawa Facility (Bio-PIXE with a baby cyclotron), *Int. J. PIXE* **2(3)**, 325-330, 1992
9. K. Sera and S. Futatsugawa, Personal computer aided data handling and analysis for PIXE. *Nucl. Instrum. Meth.* B109/110, 99-104, 1996
10. R. L. Rudnick and S. Gao, Composition of the Continental Crust, in *Treatise on Geochemistry*, Volume **3**, eds. H. D. Holland and K. K. Turekian, (Elsevier, United Kingdom, 2003), 1-64
11. B. Mason, in *Principles of geochemistry*, (John Wiley & Sons, New York, 1966), p. 329

# PIXE analysis of the water of stream, hot spring and lake following the Mt.Hakone eruption on June, 2015

– temporal variation from June, 2015 to January, 2018 –

M.Sakai<sup>1</sup>, K.Sera<sup>2</sup>, S.Goto<sup>3</sup> and T.Hosokawa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Forestry and Forest Products Research Institute  
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

<sup>2</sup>Cyclotron Research Center, Iwate Medical University  
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

<sup>3</sup>Nishina Memorial Cyclotron Center, Japan Radioisotope Association  
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

## Abstract

After the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, volcanic activity in Japan was observed to increase. On 30 June 2015, Japanese Meteorological Agency raised the volcanic alert to a Level 3 for Mt.Hakone, after a small eruption. For the purpose of grasping the volcanic activity degree in the Owakudani fumarolic area, we analyzed elements of three kinds of water of stream, hot spring and lake, by using PIXE method. It is thought that composition in stream water and hot spring water are reflecting the volcanic activity, because stream water is flowed directly from the Owakudani fumarolic area and hot spring water is made in a process of a mixing between volcanic hot gases and underground water in the nearby Owakudani fumarolic area. Water samples were collected approximately once a month from June 2015 to January 2018.

For one year after the eruption, the concentrations of magma-derived elements (S, Cl) and rock-derived elements (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, and Na), except for Si, showed a clear decreasing trend in the stream water. These measurements suggest that magmatic activity and fumarolic activity reduced gradually over one year. In the hot spring water, the concentration of six elements, Ca, K, Mg, Na, S and Si showed the similar temporal variation to these of stream water. These results suggest that nine elements (S, Cl, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn and Na) in the stream water and six elements (Ca, K, Mg, Na, S, and Si) in the hot spring water are useful as the index of the magnitude of volcanic activities in Mt. Hakone.

After this year-long period, elemental concentrations stopped decreasing and instead showed broadly flat levels with sporadic increases and decreases. However, throughout the year immediately following the eruption, the number of volcanic earthquakes was consistently at zero or close to zero. These different indications of volcanic activity suggest that the elemental

concentrations in the stream water or in the hot spring water may be more sensitive indicators of small changes in subterranean behavior than of the number of volcanic earthquakes. And PIXE method was suitable for grasp of the volcanic activity degree, because PIXE is high sensitive and multi-element analysis at the same time.