



日本列島における火山周辺の酸性地下水分布

浅森 浩一 石丸 恒存 岩月 輝希

東濃地科学センター

Distribution of Acidic Groundwater around Quaternary Volcanoes in Japan

Koichi ASAMORI Tsuneari ISHIMARU Teruki IWATSUKI

Tono Geoscience Center

地質環境の長期安定性に関する研究課題の一つとして、火山活動が地質環境に及ぼす影響について科学的知見の整備を進めている。本研究では、日本列島全域における地下水のpHデータを基に、第四紀火山周辺の酸性地下水の分布範囲を検討した。その結果、pH < 4.8の酸性地下水の分布域は第四紀火山分布域とよく一致しており、全国的には酸性地下水は各火山から数km～20km程度まで分布していることがわかった。ただし、本結果はデータの偏在性や各火山の活動特性にも依存していると考えられるため、特定の火山地域を対象に詳細な検討を行う際は、火山の活動特性を考慮し、空間密度の高いデータを用いた個別的な調査・解析が必要である。

One important key issue in the understanding of the long-term stability of the geological environment is the influence of magmatism. In this study, we examined the general spatial distribution of acidic groundwater around Quaternary volcanoes in Japan using a database of groundwater geochemistry. The results may be summarized as follows: Acidic groundwater with pH < 4.8 mainly occur in present volcanic regions and are distributed from several kilometers to about 20 km from Quaternary volcanoes. The pH value of groundwater tends to decrease with increasing distance from a volcano. However, these results may be affected by inhomogeneity of groundwater data distribution and the characteristic activity of each volcano. In order to assess a specific volcanic region, a detailed analysis that considers volcanic activity, using a data set with high spatial density is necessary.

キーワード

第四紀火山, 酸性地下水, pH, 温泉地化学データベース, 日本列島全域, 火山活動の地球化学的影響, 地質環境, 長期安定性

Quaternary Volcano, Acidic Groundwater, pH, Database on Geochemistry of Hot Springs, Whole Japanese Islands, Geochemical Influence of Magmatism, Geological Environment, Long-term Stability



浅森 浩一*

地質環境長期予測研究グループ所属
地質環境の長期安定性に関する調査研究業務に従事



石丸 恒存*1

地質環境長期予測研究グループ所属
副主任研究員
地質環境の長期安定性に関する調査研究業務に従事



岩月 輝希*

地質環境長期予測研究グループ所属
副主任研究員
ナチュラアナログ研究に関する調査研究業務に従事
理学博士

* 現在：地質環境研究グループ

*1 現在：本社 バックエンド推進部 深地層研究施設計画グループ

1. はじめに

地層処分システムが長期的に安全性能を保持するためには、地層処分の場となる地質環境が期待される環境条件を長期にわたって維持することが必要である。地質学的な変動帯に位置する我が国においては、地質環境の長期安定性に関連する重要な天然現象として、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食、気候・海水準変動などが挙げられている。東濃地科学センターで進める地質環境の長期安定性に関する調査研究では、これらの天然現象に関し、現象自体の特性やその現象に伴う地質環境変化の程度及び影響範囲などに関する科学的知見の整備を進めている。この中で、火山活動が周囲の地質環境に及ぼす影響としては、マグマの貫入・噴出による周辺岩盤への直接的な影響、マグマからの熱による地温の上昇や熱水対流系の発生、マグマに含まれている揮発性物質が熱水や火山ガスとして混入することによる地下水への地球化学的影響などが考えられる¹⁾。

マグマに含まれる揮発性物質(H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl 等)は、マグマの上昇に伴い温度・圧力が低下することによってマグマから放出され、地下水中に溶解する²⁾。また、一般にマグマ性の揮発成分が地下水中に混入すると、 Cl^- や SO_4^{2-} を主成分とする酸性の地下水が形成される。地下水の水質やpH, Eh等の地球化学特性は、地層処分におけるオーバーパックの腐食及びガラスや核種の溶解に影響を与える重要な要素である。このため、このような火山活動に伴う周辺地下水の地球化学的变化の範囲についての科学的な知見を得ることは重要である。これに関し、サイクル機構の地層処分研究開発第2次取りまとめ¹⁾及び小松・梅田(1999)³⁾では、仙岩地域、阿寒、ニセコ、蔵王、九重、霧島の火山周辺地域において、火山からの距離と温泉水のpHとの関係の検討を行い、酸性地下水は火山から数km~10km程度までの領域に分布することを示した。しかしながら、これらの研究では5つの火山及び1つの火山地域のみを対象としているため、他の火山地域における酸性地下水の分布範囲については言及されていない。

このため、本研究では、全国規模で温泉水などの地下水の地球化学的特性について取りまとめられた「温泉地化学データベース」⁴⁾を活用し、地下水水質データの信頼性を吟味したうえで、日本列島全域を対象として、火山活動に起因すると考え

られる酸性地下水の分布に関する検討を行った。

2. 「温泉地化学データベース」と解析手法

日本列島における地下水の水質は様々である。それらは異なる起源を持つ水が岩盤中を流動する過程で、岩石との反応やマグマ起源の揮発性物質の溶解、他の地下水系との混合などを生じるためである。東濃地科学センターでは、日本列島の地質環境特性に関するデータ収集の一環として、全国各地の地下水・温泉水に関する公表文献の収集及び化学分析値などのデータベース化作業を進め、「温泉地化学データベース」⁴⁾を作成した。このデータベースは、日本列島各地に存在する温泉などでの地下水の採水位置・水源種別・湧出量・化学分析値・pH・利用目的などについて、公表文献や各県の衛生研究所発行の報告書などでの記載値約20,800件を取りまとめたものであり、全体の約半数は温泉または鉱泉に関連する測定データにより構成されている。また、本データベースに含まれる約9,500件のデータには文献中の採水位置図を基に求めた緯度・経度を記載しているため、日本列島全域における広域的な地下水水質の空間的特徴を解析することが可能である。

本研究では、この「温泉地化学データベース」に収録した地下水水質データを使用した。ただし、このデータベースには人間活動による地下水汚染などの要因によって生じたと考えられる酸性地下水データも含まれており、火山活動に起因する周辺地下水の地球化学的影響を検討するうえでは、それ以外の要因によって生じた酸性地下水データを選別する必要がある。そこで本研究では解析結果の信頼性を高めるため、以下のように、いくつかの記載項目について基準を設け、3つのデータセットに区分して解析を行った。なお、多数の水質分析値を用いた解析に際しては、イオンバランスを用いたデータの品質に関する検討がなされる場合がある。しかし、本解析で使用しているデータの多くは比較的溶存成分の種類や量に富む温泉・鉱泉に関連する測定データであり、主要化学成分のすべてがデータとして記載されていないため、イオンバランスによるデータの検討は行っていない。

(1) 採水位置データの有無

まず、可能な限り多くのデータを用いて酸性地下水分布の特徴を把握するため、pH及び採水位置

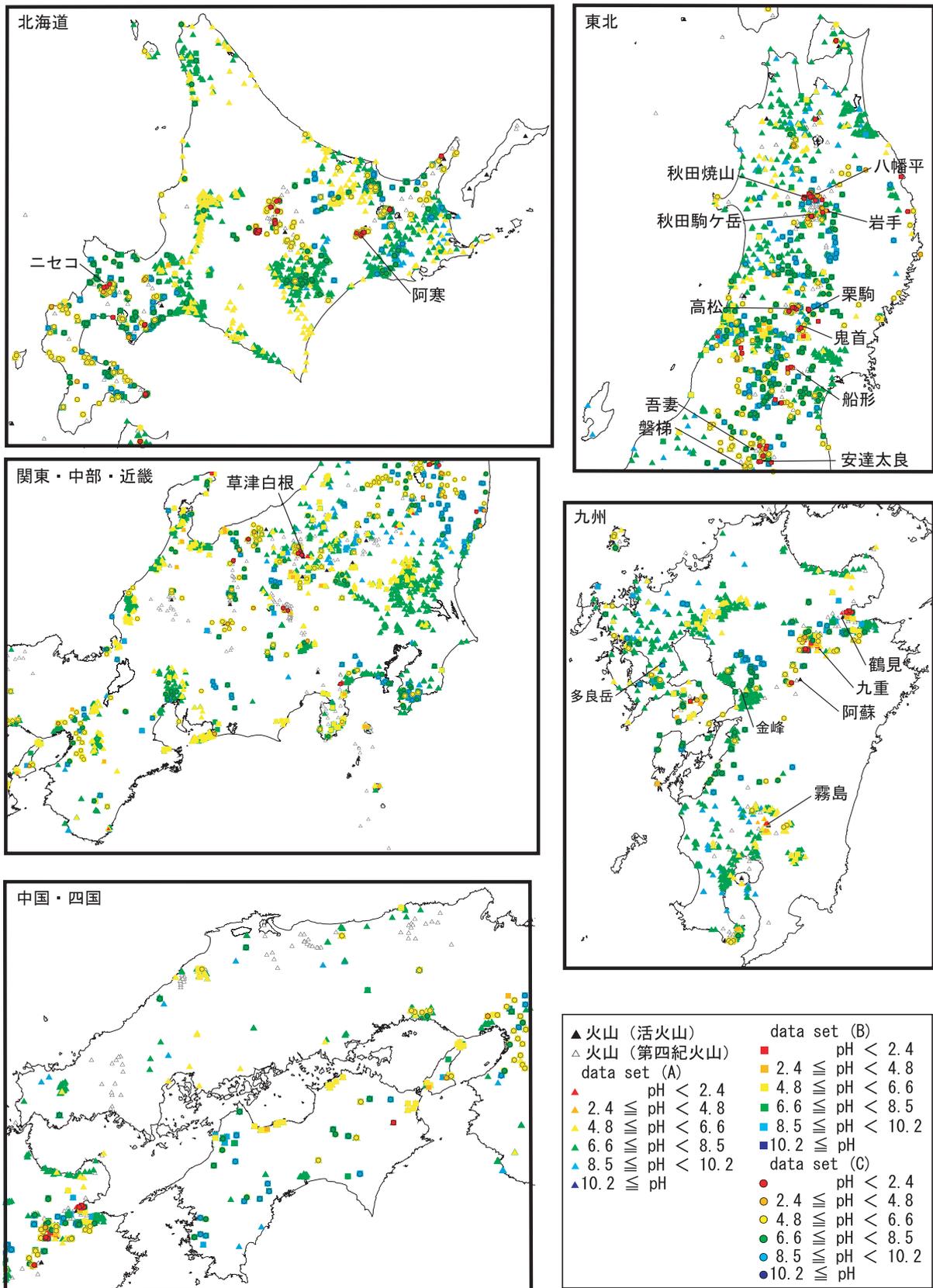


図1 日本列島の各地域におけるpH分布図

が記載されている約9,300件のデータをdata set (A)とした。このデータセットでは、人間活動の影響による水質変化の可能性のあるデータを含んでいる。

(2) 水源種別，利用目的による選定

一般に，人間活動の影響により地下水が酸性化する原因として，硫化物を含む鉱山廃水や農業排水の地下水への混入⁵⁾⁶⁾等が考えられ，比較的浅い深度を対象としている用水や鉱山の坑道で測定された地下水はこのような地下水汚染の影響を受けている可能性が高い。これらの影響を除くため，以下に示すいずれかの基準に該当するデータをdata set (A)から除外し，data set (B)とした。

- ・採水利用目的が用水及び不明であるもの
- ・採水水源が坑道湧水及び不明であるもの

このように人間活動による地下水汚染の影響を受けている可能性の高いデータを除外した結果，約3,600件のデータが選定された。

(3) 湧水量の有無による選定

採水試料が湧水であると確認できないものには，地表近くの採水地点に長時間滞留している地下水が含まれている。それらの試料は大気との反応や雨水の混入などにより，水質変化が生じている可能性がある。したがって，湧水であることが確認できたものに比べて，その水質データの信頼性は劣ると考えられる。これらを除くため，以下に示すいずれかの基準に該当するデータをdata set (B)から選出し，data set (C)とした。

- ・湧水量の記載があり，採水試料が湧水であると断定可能なもの
- ・採水水源が湧水であるもの

このように，測定試料が湧水であることが確認できなかったデータを除外した結果，約2,400件のデータが選定された。

以上の基準によって選出・分類されたdata set (A)，data set (B)，data set (C)について，pHの値に基づいて区分したデータ分布を図1に示す。この図において同一位置のデータが複数存在する場合には，その位置におけるpHの最小値を表示している。ここで，前述のようにdata set (A)及びdata set (B)には，火山活動以外の要因によって生じた酸性地下水データが含まれている可能性が高いが，それらに含まれるすべてのデータが火山活動以外の要因によって水質変化が生じているとは言いきれない。そのため，火山活動に起因して生

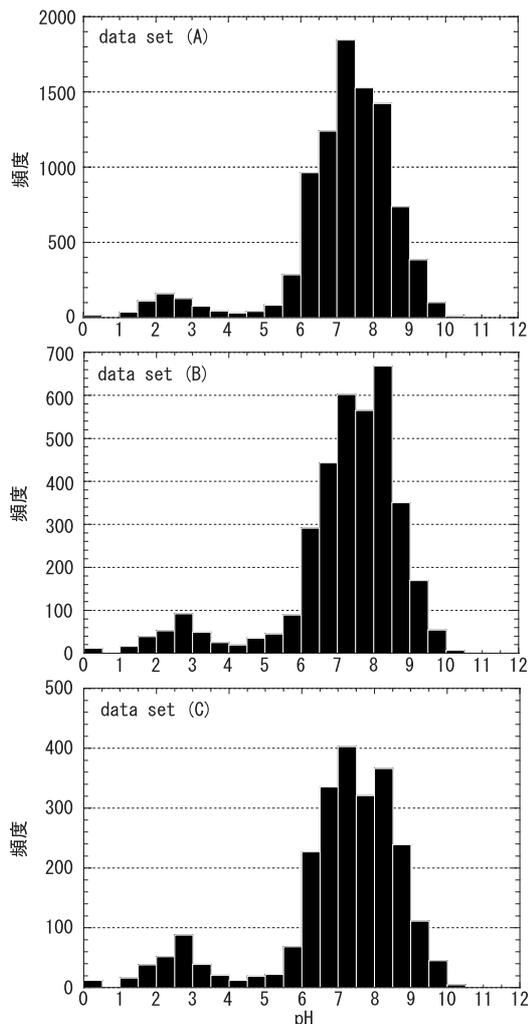


図2 各データセットのpHに対するヒストグラム

じた酸性地下水の分布範囲についての過少評価を避けるため，参考としてdata set (A)及びdata set (B)についても解析結果として示した。このことから，火山活動に起因して生じた酸性地下水の存在範囲を評価する場合，data set (A)を含めた解析結果は最も安全側の見積りであり，data set (C)のみを考慮した解析結果は火山活動に起因して生じた酸性地下水の信頼性の高い（最低限の）分布範囲を意味する。

解析に用いたデータのpHに対する頻度分布を図2に示す。一般に， HCO_3^- が溶液中に存在するpH領域は4.8以上であり，4.8未満は自然界における実質的な酸性領域である⁷⁾。また，本解析に用いたデータセットにおいてもpH = 7前後のピークとpH = 2付近の小さなピークとの間に，pH = 4付近においてくびれがみられることから，pH = 4.8は酸性地下水とそれ以外の地下水を区分する

しきい値として妥当であると考えられる。このため、以下、 $\text{pH} < 4.8$ の酸性地下水を火山活動や人間活動などの二次的な影響に起因して生じた可能性のある地下水であるとして述べる。

3. 酸性地下水分布の解析結果

3.1 日本列島における地下水のpH

図1に示す日本列島におけるpH分布より、pHが4.8未満の低いpHを示すデータ（以下、低pHデータ）が比較的集中して分布している領域は、北海道東部（阿寒）、北海道中央部（大雪、十勝）、北海道南西部（ニセコ、倶多楽、恵山）、東北脊梁山地（仙岩、栗駒、安達太良、那須、高原、草津白根）、中部地方東部（八ヶ岳）、伊豆半島北東部、九州中央部（別府、島原）及び九州南部（霧島、指宿）であり、それらのほとんどの地域において前述したdata set (C)による低pHデータが分布している。これらの分布域は第四紀火山分布域とよく一致しており、以前の研究³⁾による酸性温泉の分布と同様の特徴を示している。しかし、第四紀火山または活火山であるにもかかわらず、火山周辺に低pHデータが認められない領域もある。

火山活動に起因する周辺地下水の水質変化についての一例として、阿寒周辺における地下水水質データを図3に示す。ここで、火山からの距離は、それぞれの地下水採水地点から火山までの水平距離としている。 Cl^- 及び SO_4^{2-} 濃度は、火山周辺で高くなっていることがわかる。これは、マグマから放出された揮発性物質が地下水中に混入したためであり、 HCl の地下水中への溶解や H_2S の酸化により生じた硫酸のため、酸性地下水が生み出されると考えられる。

このように、第四紀火山周辺に位置するこれらの酸性地下水は火山活動に起因して生じたものである可能性が高いと考えられるが、すべての第四紀火山及びその周辺地域に酸性地下水の存在が認められるわけではない。

以下に、第四紀火山及びその周辺地域にみられる低pHデータの分布領域に着目した解析結果について述べる。

3.2 個別火山を対象とした解析

使用するデータの分布は著しく偏在しているため、比較的多くのデータが周辺に分布し、低pH

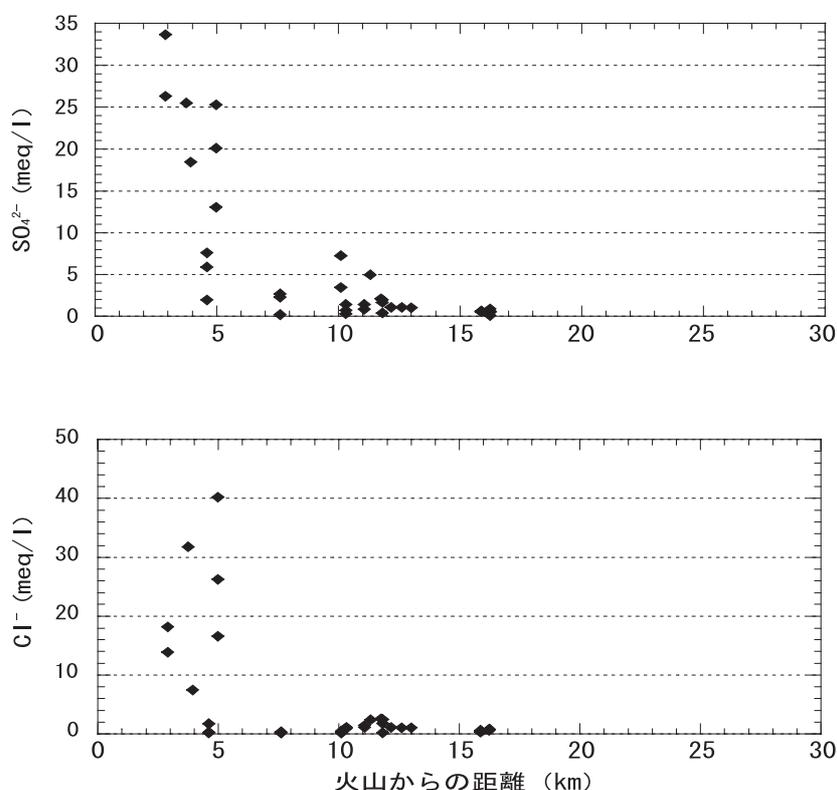


図3 阿寒周辺における地下水水質

データが見られるいくつかの火山を対象として、火山からの距離とpHとの関係を検討した。ここで、火山からの距離は各々の地下水データの採水位置から対象とする火山までの水平距離とした。

阿寒、ニセコ、仙岩地域（岩手、秋田駒ヶ岳、秋田焼山、八幡平）、栗駒山周辺（鬼首、高松、栗駒）、船形、吾妻山周辺（吾妻、磐梯、安達太良）、草津白根、九州地方北部（九重、鶴見、阿蘇）、霧島の各第四紀火山及び各火山地域についてのpHと火山からの距離との相関図を図4に示す。ここで、仙岩地域、栗駒周辺、吾妻周辺、九州地方北部については採水位置から最も近くに位置する火山までの距離とした。なお、第四紀火山の位置は「日本の第四紀火山カタログ」⁹⁾による火山体データを用いた。

いずれの火山においても低pHデータは火山付近に集中して見られ、比較的データ数の多い草津白根、九重、霧島においては、火山から遠ざかるにつれて徐々にpHがバックグラウンドの値に近

づく傾向が認められる。このような特徴は以前の研究³⁾によるものと同様であり、地下水に対する地球化学的影響の程度はその中心から離れるにしたがって小さくなっていると推定される。

また、各火山周辺にみられる低pHデータの存在範囲は各々の火山によって異なっており、多くの火山周辺においては数km～13km程度である。最も広範囲の分布領域を有すると見積られる火山及びその範囲は、data set (C)による解析結果では安達太良での約20kmとなっている。これに関し、これまでの研究¹⁾³⁾では低pHデータの分布領域は数km～10km程度と見積られており、今回のより多くのデータを用いた解析により得られた低pHデータの最大分布範囲はそれよりも広い。また、仙岩地域、阿寒、ニセコ、九重、霧島のそれぞれの火山地域における低pHデータの分布域は、以前の研究において推定された範囲よりも数km広がっている。

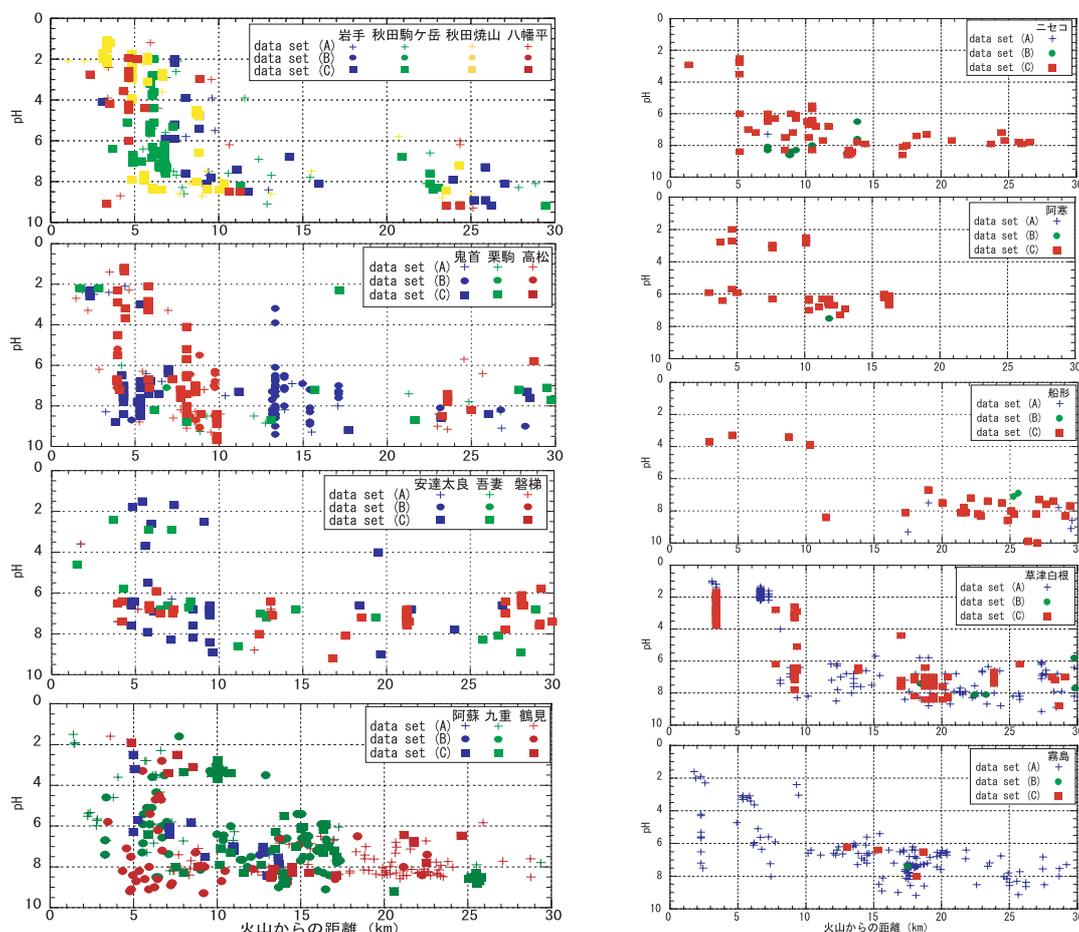


図4 個別の火山及び火山地域における火山からの距離と地下水のpHとの相関図

4. 考察

4.1 個別火山の解析結果と低pHデータの最大存在範囲

個別火山を対象とした解析結果より、各火山周辺にみられる低pHデータは火山から数km～20km程度までに分布していた。その最大の分布域が認められた安達太良において火山から最も離れた位置にみられた低pHデータは、地下水のpHが火山から遠ざかるにつれてバックグラウンドの値に近づく傾向と調和的である。このことから、安達太良周辺の火山活動に起因する低pHデータの分布範囲は火山から約20kmまで広がっている可能性がある。また、同様の特徴が草津白根についての解析結果にもみられ、低pHデータの最大分布範囲は約17kmとなっている。以上のことから、これまでに推定されていた分布範囲よりも、いくつかの地域では低pHデータの分布域が広範囲に及んでいると考えられる。

4.2 日本列島全域を対象とした解析結果とその解釈

限られた火山地域を対象として実施された以前の研究³⁾では、低pHデータの分布範囲は数km～10km程度であるとされており、本解析結果による分布範囲に比べて少なく見積もられている。本研究においては、更に広範囲の酸性地下水分布領

域を有する例外的な火山が存在する可能性があることから、前述の限られた第四紀火山及びその周辺を対象とした解析のみならず、日本列島全域を対象として同様の解析を行うことにより、低pHデータの最大分布範囲に着目した検討を行った。

この解析において対象とした火山は「日本の第四紀火山カタログ⁹⁾」によるすべての第四紀火山についての火山体データである。火山からの距離は、各々の地下水データの採水位置から最も近くに位置する火山までの水平距離とした。図5に日本列島全域についての解析結果を示す。

解析結果より、ほとんどの低pHデータは、第四紀火山からの距離が20km程度までに分布していることがわかる。このような特徴は以前の研究³⁾及び本研究での個々の火山に対する解析結果と同様であり、日本列島全域において火山活動は酸性地下水を生み出す支配的な要因となっていると推定される。

しかしながら、火山から20km以上離れた位置においても低pHデータの存在が認められる場合がある。火山から20km以上離れた地域に認められる低pHデータの分布を図6に示すとともに、その概要を表1に示す。

本解析に用いたデータセットに含まれる低pHデータのうち、火山からの距離が20kmを超えるものは16地点認められた(表1)。この中にはdata

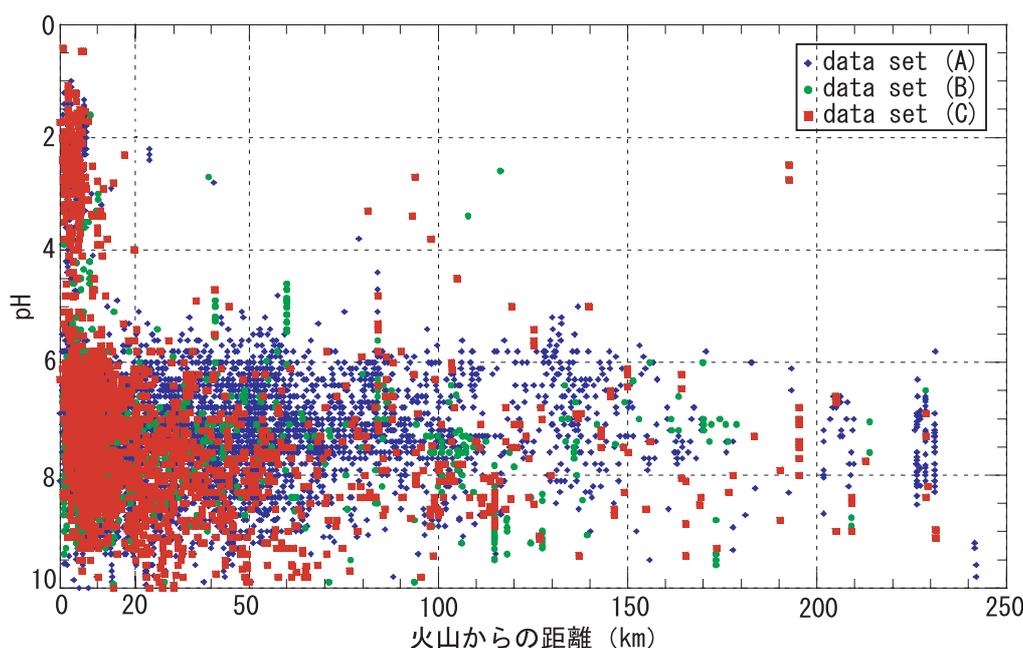


図5 日本列島全域における火山からの距離と地下水のpHとの相関図

表1 火山から20km以上離れた地域に位置する酸性地下水の概要

番号	pH	火山からの距離 (km)	採水地	水源種別	利用目的	データセット区分
1	4.6*	59.9	岩見沢市(北海道)	井戸	調査井	B
2	3.3	81.3	宇部** (岩手県)	湧泉	温泉	C
3	2.7	93.8	宮本** (岩手県)	湧泉	温泉	C
4	4.7	40.9	金峰** (秋田)	湧泉	温泉	C
5	2.7	39.3	火打崎** (山形県)	井戸	温泉	B
6	3.8	97.9	白岩金波** (福島県)	湧泉	温泉	C
7	3.4	93.1	赤井** (福島県)	湧泉	温泉	C
8	4.5	104.9	原木田** (福島県)	湧泉	温泉	C
9	2.2*	23.7	黒部トンネル(富山県)	坑道	温泉	A
10	2.6	116.3	祿剛崎** (石川県)	井戸	温泉	B
11	3.4	107.9	谷崎** (石川県)	井戸	温泉	B
12	4.4*	83.9	有馬** (兵庫県)	不明	温泉	A
13	2.0	259.2	湯川** (和歌山県)	不明	温泉	A
14	3.8	79.1	姫路市(兵庫県)	井戸	用水	A
15	2.5*	192.6	新次郎鉱山(徳島県)	湧水	温泉	C
16	2.8	40.6	白岳** (長崎県)	不明	温泉	A

* 同一位置における複数のpH測定値の最小値

** 温泉または鉱泉名

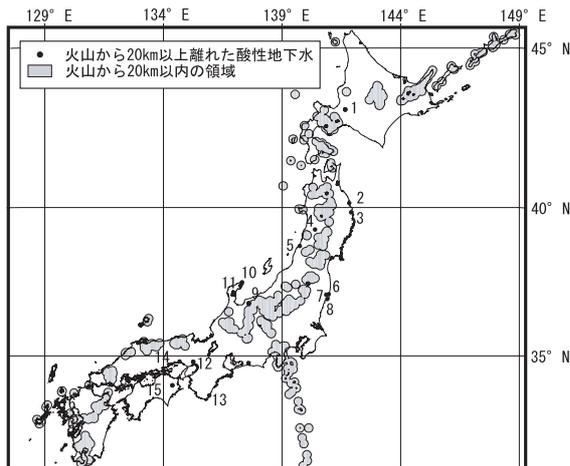


図6 火山から20km以上離れた地域に位置する酸性地下水の分布

set (A)として分類した坑道内及び用水に関する測定データも含まれており、それらは坑道内での鉱物の溶解や農業排水起源の窒素酸化物の混入⁵⁾⁶⁾等の人間活動による地下水汚染によって生じた可能性が考えられる。また、北海道岩見沢市に見られる低pHデータは、泥炭地における測定データ³⁾であるためフミン酸により酸性化した地下水であると考えられる。更に、東北地方及び関東地方の太平洋沿岸部や能登半島先端部などの温泉・鉱泉に見られる低pHデータは、火山周辺に分布する低pHデータの集中域からは大きく隔た

っており、火山から遠ざかるにつれてpHがバックグラウンドの値に近づく特徴とは一致しないことから、火山活動に起因するものとは考えにくい。これらの非火山地域にみられる酸性地下水の発生原因に関しては、京都府船井郡などの火山ガスのない地域においても堆積層(頁岩層内の破砕帯)中に存在する含硫黄鉱物の溶解¹⁰⁾によって酸性泉が生じる可能性が指摘されていることから、火山からの距離が20km以上離れた領域にみられる酸性地下水は第四紀火山の活動とは関連のないものであると推定される。

以上のことから、日本列島全域においても火山周辺にみられる火山活動に起因する低pHデータの分布範囲は、火山から数km~20km程度までの範囲であると言える。

4.3 酸性地下水の偏在的分布

先に述べたように、低pHデータはすべての第四紀火山周辺に認められるわけではない。例えば、九州地方においては、活火山である阿蘇、九重、鶴見、雲仙、霧島周辺に低pHデータが集中しており、それらから数十km離れた第四紀火山である多良岳、金峰などの周辺においては低pHデータの存在は認められない(図1)。この原因としては、以下の二つの可能性が考えられる。

一つは、解析に用いたデータ分布の偏りによる

空間分解能の地域差によるものと考えられる。個別の火山に対する解析結果では、低pHデータが多数認められる火山近傍においても中性～アルカリ性を示すデータが多く認められる。このことから、火山活動の影響を受けた地下水は、火山近傍においても付近の地質構造などに関連して空間的に不均質に存在していると推定される。つまり、比較的データ数が少ない火山については、その周辺に偏在する酸性地下水を捉えることができなかった可能性がある。

もう一つは、それぞれの火山における活動度や活動形態の差によるものと考えられる。一般に、火山周辺の地下水はその活動に関連して水位・温度・水質などが変化する。本解析結果では、前述のように九州地方における低pHデータ及び活火山の分布域に相関が認められ、現在、活動度が比較的低いと考えられる活火山以外の第四紀火山付近には低pHデータがみられない。このことから、本解析によって見出された各々の火山によって異なる低pHデータの分布範囲やその有無は、火山の活動度に依存している可能性を示唆している。

以上のことから、本解析結果は、使用するデータの分布や対象とする火山の活動度や活動形態などにも依存していると考えられる。したがって、特定の火山地域を地質環境の長期安定性の観点から詳細に検討する際には、空間密度の高いデータを用いた個別的な調査・解析が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、全国規模で火山周辺に存在する酸性地下水分布の特徴を把握することを目的として、日本列島における地下水のpHと火山からの距離との相関について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

1) 個々の火山を対象とした解析結果より、火山から遠ざかるにつれてpHが高くなる傾向が見られ、pH < 4.8の酸性地下水データは火山からの距離が数km～20km程度までみられた。

2) pH < 4.8の酸性を示すデータが存在する空間的範囲は各々の火山によって異なることから、火山周辺の地下水水質は火山の活動度や活動形態、地下水・熱水流動系などに依存すると推定される。

3) 日本列島全域を対象とした解析結果においても個々の火山を対象とした解析結果と同様の傾向がみられ、火山活動に起因すると考えられる酸性地下水データは、火山を中心として20km程度まで広がっている。

4) 今回の解析結果は、データの偏在性や火山の活動度や活動形態などにも依存していると考えられるため、個々の火山や火山地域に対して個別的に検討を行う際には、火山の活動特性に留意し、空間密度の高いデータを収集したうえで解析を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊1 わが国の地質環境”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99 021 (1999)
- 2) White, D. E.：“Thermal waters of volcanic origin”，*Geol. Soc. Am.*,68,p.1637(1957)
- 3) 小松 亮，梅田浩司：“日本列島における温泉・熱水変質帯について”，*サイクル機構技報*，No.4,p.121 (1999)
- 4) 小松 亮，黒墨秀行，他：“温泉地化学データベースの作成”，*日本温泉科学会* (2002)。
- 5) 半谷高久，小倉紀雄：“水質調査法”，丸善，pp.378 (1986)
- 6) 田口雄作：“窒素による地下水汚染と水文学の課題”，*ハイドロロジー*，vol. 25,p.51(1995)
- 7) 野田徹郎，高橋正明：“地熱系に關する起源水の地球化学的分類とその意義”，*地球化学*，Vol. 9,p.63 (1992)
- 8) 第四紀火山カタログ委員会編：“日本の第四紀火山カタログ”，*日本火山学会* (1999)。
- 9) 本島公司：“天然ガス鉱床の成因的研究”，*地質調査所報告*，vol. 183, p.10(1959)
- 10) 浅見益吉朗，桂 京造，他：“京都府下で発見された酸性泉の性状とその成因について”，*温泉科学*，vol. 35,p.128(1985)。