

磐梯山とその周辺の水質, 同位体特性について

藪崎志穂 (福島大学・共生システム理工学類)・安原正也 (産業技術総合研究所)・

浅井和由 (地球科学研究所)・鈴木裕一 (立正大学・地球環境科学部)・

高橋 浩 (産業技術総合研究所)・稲村明彦 (産業技術総合研究所)

要 旨

磐梯山とその周辺地域の地下水や湧水などの水質特性と地下水流動を明らかにするために、60 地点において調査、採水を実施した。現地調査の結果と水質組成、 $\delta^{13}\text{C}$ の特徴から、北側斜面の湧水では火山性ガスの混入が示唆され、東側山麓の河川水では温泉の混入の影響がみられた。南側山麓では2つの水質組成が混在することから複数の地下水流動系があることが想定され、西側山麓では他の斜面よりも溶存成分量が少なく水質組成も異なっており、地質の影響を受けていると考えられる。また、 $\delta^{18}\text{O}$ を利用して求めた平均涵養標高の結果から、磐梯山の南側斜面では比較的大きな地下水流動系を持つが、西側斜面では比較的小きな地下水流動域を形成していることが示された。

I. はじめに

磐梯山は福島県の会津地方にある山で、磐梯朝日国立公園に指定され、裏磐梯の五色沼湖沼群をはじめとして自然に恵まれた地域である。磐梯山は火山性の透水性のよい地質が分布しているため、山体において多量の水が地中へと浸透し、それらの豊富な地下水は山麓の多くの場所で湧水帯を形成し、あるいは猪苗代盆地や会津盆地の地下水となり流動している。また活火山であるため、一部の場所では火山性ガスが噴出しており、温泉も数多く存在する。近くには同じく活火山である安達太良山もあり、この山を源流とする強酸性の河川(酸川)が磐梯山の東側山麓から南麓を流れている。

千葉(1983)は磐梯山南麓に広がる猪苗代平野を東部、西部、中央部の3地区に分けて、これらの地域の地下水や湧水水質の特徴について調査をおこない、東部では溶存成分量は比較的少なくCa-HCO₃型の組成を示し、西部では溶存成分は比較的多くNa, Cl, HCO₃を主要成分とし、中央部では溶存成分量は多くMg-HCO₃型を示すことを明らかにした。また、千葉(1988)は猪苗代湖や裏磐梯の湖沼群の水質について調査をおこない、

猪苗代湖の水質は流入河川の水質と流入量によって形成されていることを示した。五色沼湖沼群では水質は大きく2つの水系に区分でき、一つは瑠璃沼→青沼→弁天沼の系列、もう一つは弥六沼→父沼→母沼→柳沼の系列であり、これらの2つの系列が合流して竜沼→深泥沼→毘沙門沼の順に流れて長瀬川へ排出されていることを明らかにした。渡辺(2004)は磐梯山と猫魔ヶ岳の表流水、湧水などの水質と酸素・水素安定同位体比の特徴を示し、磐梯山地域では溶存成分量は比較的多くCa-HCO₃型の組成であるが、火口付近の水はCa-SO₄型を示し、猫魔ヶ岳では溶存成分量が少なく、Ca-HCO₃型を示す地点が多いことを明らかにした。また、同地域の同位体の高度効果について、 δD は-2.0~-1.8‰/100 m, $\delta^{18}\text{O}$ では-0.3~-0.2‰/100 mであることも示している。

このように、磐梯山地域とその周辺地域では、地形や地質の影響を受けて地下水や湧水等の水質が場所によって異なり、複雑な地下水流動系をもつことが考えられる。先行研究によって猪苗代盆地の水質、磐梯山周辺の表流水の水質や安定同位体の特徴は明らかにされているが、磐梯山の山地部に存在する地下水の調査はほとんど行われ

ていない。また、これらの水の涵養域や滞留時間についても把握されていない。こうしたことから、本研究では磐梯山を中心とした地域とその周辺の地域を対象として調査・採水を実施し、広域の水質特徴を把握し、安定同位体を用いた涵養域の推定や、時間情報をもつトレーサーを利用して滞留時間の推定をおこない、広域的な地下水流動を明らかにすることを目的とした。本稿では、現地調査の結果に加え、これまでに分析が終了した一般水質と SiO_2 , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ のデータを用い、磐梯山とその周辺地域の水質特性と地下水等の涵養域を推定した結果について述べる。

II. 研究対象地域の概要

1. 磐梯山とその周辺地域の地形・地質

磐梯山は福島県のほぼ中央に位置する猪苗代湖の北約 5 km に位置し、標高 1,816m の活火山である。一般的に、赤埴山 (1,450 m)、櫛ヶ峰 (1,639 m) を含めて磐梯山と呼ばれている。磐梯山は那須火山帯の一部に属し、東西約 7km、南北約 10 km の安山岩質の成層火山であり、かつては富士山とよく似た眺望であったため会津富士とも言われていたが、1888 年 7 月 15 日の水蒸気爆発により北側斜面で大規模な崩落が生じて馬蹄形の爆裂火口 (カルデラ) が形成され、北側 (北塩原村方面) からの眺めは一変した。磐梯火山の活動開始時期については不明な点が多いが、中期更新統後半以降にはすでに活動していた可能性が指摘されている (小池ほか, 2005)。三村 (1988) は、磐梯火山の初期には溶岩円頂丘群が形成され、石質火砕流が噴出し、その後、赤埴火山体、櫛ヶ峰火山帯、大磐梯火山体、小磐梯火山体の順で形成されたと指摘している。千葉・木村 (2001) は、火山編年法で決定した層序をもとに、火山岩の放射性元素による年代値を利用して磐梯山の活動を 7 期に区分し、山体西部が大きく崩壊した翁島岩屑なだれが生じたのは、3.6~2.8 万年前 (第 6 期) としているが、3~5 万年前 (小荒井ほか,

1995) や 5 万年よりも古い (三村・関口, 2001), 7.5 万年前 (鈴木ほか, 1990) などの意見もある (日本の地質増補版編集委員会, 2005)。

磐梯山のすぐ西側に位置する猫魔ヶ岳 (1,404 m) は、磐梯山より解析がすすんだ古い火山で、山頂に直径約 3km のカルデラである雄国沼を有している (三村, 1988)。猫魔ヶ岳はかんらん石または石英を含む紫蘇輝石安山岩から成る成層火山で、磐梯山と同様、活動の初めに火砕岩が、後に溶岩が主に噴出して主山体が作られ、山頂カルデラの形成御後、その内部に溶岩円頂丘を噴出したとされている (Nakamura, 1978)。

磐梯山地域の基盤は、先第三紀の変成岩・花崗岩類、新第三紀の堆積岩類と珪長質火山岩類である。また、磐梯山や猫魔ヶ岳から噴出された火山岩類はすべて斑状組織の発達した安山岩で、岩石中の主要な斑晶鉱物は斜長石、斜方輝石、普通輝石、磁鉄鉱である。磐梯山溶岩類の主成分として、 SiO_2 (磐梯山: 56.5~64.4%, 猫魔ヶ岳: 57.9~65.0%) や Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O が多く含まれており、微量元素として、Ba, Sr, V, Zr が相対的に多く含まれている。磐梯山の溶岩類はすべて典型的な島弧カルクアルカリ系列安山岩の岩石学的・地球化学的性質を示すが、猫魔ヶ岳の溶岩類は大部分が島弧ソレアイト質玄武岩マグマの結晶分化作用によって生成された安山岩の性質を示しており、磐梯山とは隣接しているにもかかわらず異なった系列の岩石から構成されている (青木・中村, 1988)。こうした地質の違いによって、磐梯山と猫魔ヶ岳の地下水等の水質は異なることが予想される。

磐梯山の北側に位置する西吾妻山は、東吾妻山、中吾妻山、西吾妻山の 3 火山からなる吾妻山の一番西に位置している。西吾妻山では、およそ 60 万年前に西吾妻・中大巔・籐十郎山体が、約 50~40 万年前に西大巔下部が形成され、約 35 万年前に西大巔山頂ができ、火山活動はほぼ終息した。吾妻山の溶岩類はカルクアルカリ安山岩が卓

越し、同系列デイサイトをともなっている（日本の地質増補版編集委員会，2005）。

磐梯山の南側に広がる猪苗代盆地は、南北約 16 km、東西約 10 km の広さを持ち、盆地の東縁は南北方向にのびる川桁断層によって区切られている。磐梯山や安達太良山を源流とする長瀬川によって扇状地が形成されており、盆地の大半は日本で第 4 位の広さをもつ猪苗代湖で占められている。猪苗代湖は構造運動に起因した湖と考えられており、面積は 103.3 km²、周囲長は 50 km、最大水深は 93.5 m、平均水深は 51.5 m、標高は 514 m である（国立天文台編，2013）。猪苗代湖の北部で行われたボーリング柱状図から、深度 60.5 m までは砂礫や粘土、シルトから成る湖成層、深度 60.5～73 m には火山性の泥流堆積物（安山岩質）が堆積しており、深度 73～120 m には古磐梯火山の古期溶岩（輝石安山岩）に相当する地層があり、この層の間には 5 m ほどの安山岩質の火山泥流堆積物が堆積している（鈴木，1987）。

磐梯山の南西～北西に位置する会津盆地は、南北約 32 km、東西約 13 km、約 324 km² の広さを持ち、南北方向に長い盆地である。盆地の東縁は日橋川を境にし、南側では第四紀前期の背中炙山層で構成され、開析された古い火砕流台地である標高 700～800 m の背あぶり高原が比高 500 m 程度の緩い山麓線で接している。北側は雄国山、猫魔ヶ岳の火山斜面が広がっており、西側は会津盆地西縁活断層系によって限られている（小池ほか，2005）。会津盆地の大部分には沖積層が広がっており、盆地周縁の標高の高い地域には異なった地層が分布している（鈴木ほか，1977）。会津盆地の中央より少し南の会津若松市北会津町柏原のボーリングでは、深度 150 m まで砂礫層が続き、その下位には七折坂層上部に対比される凝灰岩が深度 300 m まで分布している（小池ほか，2005）。このボーリングの結果から、会津盆地中央部の第四紀層の基底深度は約 650 m と推定されている（鈴木ほか，1977）。また、表層には透水性の良

い砂礫層が厚く堆積していることから、地表面からの浸透も多いと考えられる。

2. 磐梯山とその周辺地域の気象・気候条件

磐梯山周辺の気象観測地点のうち、喜多方、桧原、猪苗代、鷲倉の月降水量と月平均気温の年変化を図 1a, 1b に、各地点の年降水量と年平均気温のデータを表 1 にそれぞれ示した。気象データは気象庁 HP（2013）に掲載されているデータを利用し、1981～2010 年の平年値を用いた。また、鷲倉は冬季の降水量の観測に欠測があるため、データが揃っている 5～10 月のデータを利用した。

表 1 から、年降水量（鷲倉を除く）は桧原＞喜多方＞猪苗代の順に多く、山形県との県境を成している山地に近い桧原や喜多方で降水量が多い傾向がみられる。日本の年降水量の平均値（1971 年から 2000 年にかけての平均値）は 1,718 mm であるため（国土交通省，2013）、桧原では平均よりも約 100 mm 多くなっているが、喜多方、猪苗代は平均よりも 200～400 mm 少ない。猪苗代は周囲が山で囲まれた盆地地形を示しているため、降水量が相対的に少なくなっていると考えられる。また、鷲倉は 5～10 月の 6 か月分の降水量として示しているが、それでも同期間の降水量は 1,528.9 mm となっており、かなり多くの降水が山地部に降り地下水を涵養しているといえる。年平均気温は、喜多方＞猪苗代＞桧原＞鷲倉となっている。年平均気温と標高には負の相関が認められ、気温減率は $-0.58^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ($r^2=0.996$) である。

次に月降水量の年変化（図 1a）をみると、6～9 月の期間において相対的に降水量は多くなっている。これは秋雨前線や梅雨前線、台風などの影響を受けていると考えられる。一方、冬季においても桧原や喜多方では 100 mm を超える降水量があり、降雪の影響があらわれている。4 地点の観測データがそろっている 5～10 月で比較すると、鷲倉の降水量は他の 3 地点と比べて非常に多くなっており、標高の高い山地部に位置しているこ

とが起因していると考えられる。月平均気温の年変化（図 1b）では、4 地点共に同じような変動をしている。鷲倉と松原では 12～3 月で 0℃以下となっており、特に鷲倉では 1 月と 2 月の最高気温（平年値）においても -2.0℃以下と低い値を示している。1 年間で最も気温が高くなる 8 月のデータをみると、4 地点の中で一番気温が高い喜多方でも月平均気温は 24.4℃となっており、比較的過ごしやすい気温といえるが、同月の日最高気温（平年値）で 30℃を超している日もある。

表 1 気象観測地点の位置と気象データ

	site	latitude	longitude	Elevation (m)	P (mm) ^{*1}	T (°C) ^{*2}
P-1	Kitakata	N37°39.5'	E139°	212	1500	11.2
P-2	Hibara	N37°43.3'	E140°	824	1826	7.5
P-3	Inawashiro	N37°33.3'	E140°	522	1294	9.6
P-4	Washikura	N37°40.1'	E140°	1220	1528.9	5.5

*1 annual precipitation amount based on the annual average over 30 years between 1981 and 2010

*2 annual mean air temperature based on the annual average over 30 years between 1981 and 2010

*3 annual precipitation amount which is accumulated from May to October

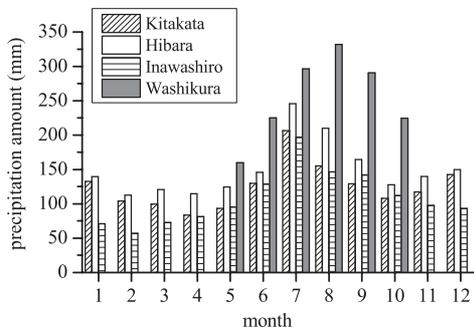


図 1a 降水量の年変化

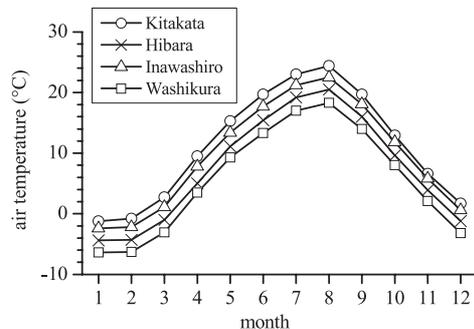


図 1b 平均気温の年変化

III. 研究方法

1. 現地調査の概要

磐梯山の大部分は磐梯朝日国立公園の特別保護地区あるいは特別地域に指定されているため開発が制限されており、民家が所有する井戸などは少なく、新たにボーリングを行うことも困難である。しかし、磐梯山の中腹から山麓にかけて、北塩原村、磐梯町、猪苗代町の三自治体の水道水源用の井戸や湧水が存在するため、これらの自治体の許可と協力を得て、地下水、湧水の調査・採水を実施した。調査は 2012 年 8 月 7 日に磐梯町（8 地点）、8 月 8 日に北塩原村（8 地点）、9 月 10 日に猪苗代町（7 地点）で実施した。併せて、磐梯山山頂付近の湧水や温泉、山腹や山麓の湧水の調査も実施した。また、広域の地下水の水質や流動を把握するために、2012 年 6～11 月にかけて、西吾妻山の南側斜面、喜多方市・会津若松市の一部の地下水、湧水等についても調査を行った。本報告では、調査を実施した地点のうち、地下水 14 地点、湧水 32 地点、温泉 1 地点、河川水 12 地点、湖水 1 地点、合計 60 地点の調査結果を用いて議論を行う。なお、F-13 と PJ-12、F-14 と PJ-13 はそれぞれ同じ地点であるが、時期を変えて 2 回調査を行ったため、本報告では同じ地点でも 2 地点としてカウントした。調査・採水を実施した地点位置を図 2、標高等のデータ等を表 2 に示した。

2. 分析項目とその方法

現地調査では EC、pH、水温、ORP を測定し、一部地点については DO の測定も行った。EC と pH は pH/EC メーター（HORIBA 社製、D-54）、ORP は pH/ORP メーター（YOKOGAWA 社製、PH72）、水温はサーミスタ温度計（CUSTOM 社製、CT-500WP）を用いた。また、水温に関してはあらかじめ標準温度計により補正を行った。湧出量についても可能な地点で測定を実施した。

現地調査に合わせて、化学分析用の採水も実施した。測定項目として、全ての地点において、

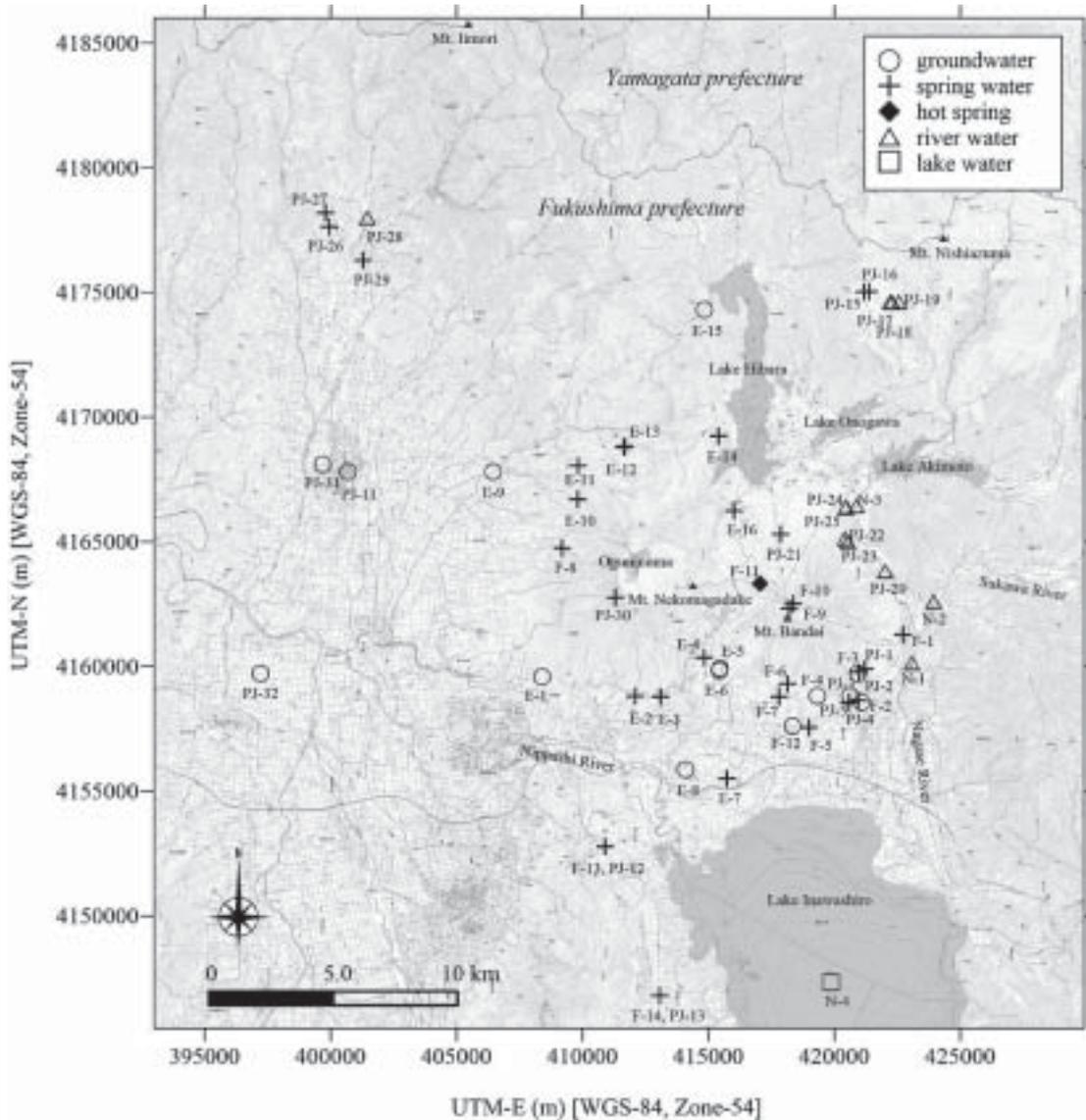


図2 対象地域と調査地点

一般水質 (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), SiO_2 , 酸素・水素安定同位体を, 自治体水源については, 上記の項目の他に, 炭素安定同位体, トリチウム, CFCs (クロロフルオロカーボン類), SF_6 (六フッ化フッ素), ヘリウム (He) についても実施した. このうち, CFCs と SF_6 , He に関しては大気からのコンタミンの影響を防ぐために, 大気とサンプル水とが接触しないように採水しなければならないため, 専用の器具を利用して採水をおこなった. 本報告では, 分析項目のうち, これまでに分析が終了している一般水質, SiO_2 , 酸素・炭素安定同位体のデータを考察に用いた.

IV. 結果・考察

1. 現地調査の結果 (EC, pH, 水温, ORP)

ここでは, 現地で測定した各項目の特徴について述べる. なお, 磐梯山西側斜面にある温泉 (F-11) は, 他の地点と測定値が大きく異なるため, この地点を除いて各図を作成した.

まず EC の分布について図3示した. 磐梯山の北側斜面にある湧水 (PJ-21) と, 磐梯山北東側の山麓にある河川水 (PJ-24, 25) で EC が非常に高くなっており, いずれも $1,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ を超えている. PJ-21 については, 1888 年に発生した水蒸気爆発の際の火口付近で H_2S や HCl などの火山ガスの影響を受けた水が浸透して, 下流側の斜面

で湧出している可能性が考えられる。PJ-24 と PJ-25 は磐梯山から流れてくる小川（渓流水）であり、流量は少ないが、近くに温泉があるのでその影響を受けていると思われる。山頂付近には 2 か所の湧水があるが（F-9, 10）、EC はそれぞれ $32.7 \mu\text{S/cm}$ 、 $42.5 \mu\text{S/cm}$ と低く、火山ガスの影響を受けておらず、降水として地表に降り、浸透してからあまり時間が経過していない滞留時間の短い湧水であると考えられる。一磐梯山の南から西・北西側（猫魔ヶ岳の西・北西側）山麓の一带では、EC の値が低くなっている。特に、西側の雄国沼の下流に位置する地域の地下水（E-10, 11, 12, 13, 14, 15, F-8）は、EC の値が $50 \mu\text{S/cm}$ 前後を示しており、今回実施した観測地の中では非常に低い値であることから、磐梯山の他の斜面や山麓の地下水や湧水とは異なる流動をもつことを示唆している。また、磐梯山の東側山麓を流れる河川水（N-1, 2, 3）の EC も高い値である。

西吾妻山の南側斜面（PJ-16, 17, 18, 19）では $43 \sim 176 \mu\text{S/cm}$ と分布範囲がやや広い。PJ-17 と PJ-18 の河川水は河床の石の色が赤く着色しており、調査中に若干硫黄臭を感じたため、火山ガスの影響を受けていることも考えられる。喜多方市の北部地域（PJ-26, 27, 28, 29）では EC は $81 \sim 140 \mu\text{S/cm}$ で、山麓部に位置し周囲が水田や畑で囲まれた場所にある湧水（PJ-29）に対して、標高の高い山間部にある湧水（PJ-26, 27）のほうがやや高い値を示している。喜多方市街地付近（PJ-11, 31）では $150 \mu\text{S/cm}$ 前後の値を示しており、喜多方市北部よりも若干高い値となっている。会津若松市内の猪苗代湖西岸に近い地点（F-13, 14, PJ-12, 13）ではそれぞれ $48 \sim 74 \mu\text{S/cm}$ で、EC は相対的に低い値を示している。

次に pH の分布について述べる（図 4）。磐梯山周辺に関して大まかにみると、pH は東で低く、西で高いという特徴が認められる。EC が高い値を示す磐梯山北側斜面（PJ-21）酸川、長瀬川沿い（N-1, 2, 3）、喜多方市北部の湧水で相対的に

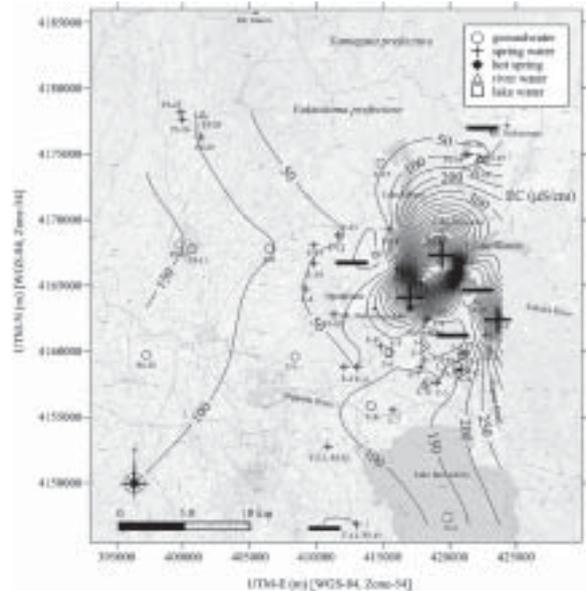


図 3 磐梯山とその周辺地域の EC 分布図

（等値線は $50 \mu\text{S/cm}$ 間隔）

低い値（酸性）となっている。特に酸川（N-2）では 2.90 、長瀬川下流（N-1）では 3.91 と共に強酸性を示しており、安達太良山の温泉や鉱山跡地からの排水の影響があらわれている。また、酸川の合流地点前の長瀬川上流（N-3）の pH は 6.47 であり、下流との pH とは大きく異なる。長瀬川は秋元湖から流れており元は中性に近いが、酸川が合流することによって強酸性の河川水になることが明瞭である。なお、酸川と長瀬川の流下に伴う pH の変化については、黒澤ほか（1997）で報告されている。一方、磐梯山の南東山麓と、西側山麓（猫魔ヶ岳西麓）では pH が 7.5 以上を示す地域が広がっている。この一帯では EC も他の地点とは異なり低い値を示していることから、磐梯山の他の斜面の地下水・湧水等の水質とは異なっている。猪苗代湖（N-4）の pH は 8.36 と高い値を示している。猪苗代湖の pH については流入河川である長瀬川（酸川）の影響を受けて pH が 4 前後の低い値を示すことが報告されているが（千葉, 1988）、本調査の結果では 8 以上の高い値を示している。本調査を行った地点は猪苗代湖の湖心近くであるため、pH が低い河川水の流入の影響があまり及んでいないことが考えられる。

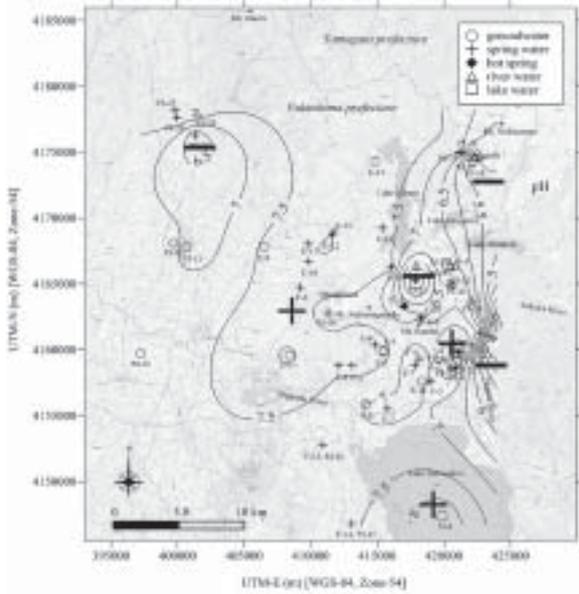


図4 磐梯山とその周辺地域の pH 分布図
(等値線は 0.5 間隔)

水温の分布を図5示した。河川水や湖沼水の水
温は気温の影響をより強く受けるため、調査の時
期によって異なるため厳密に比較をすることは
できない。しかし、今回実施した調査は8~9月
に集中し、また地下水や湧水の水温は年間を通じ
てほぼ一定しているため、大まかな傾向を把握す
るためにも同一の図上にプロットした。全体の傾
向をみると、磐梯山の山頂付近、西吾妻山の南麓

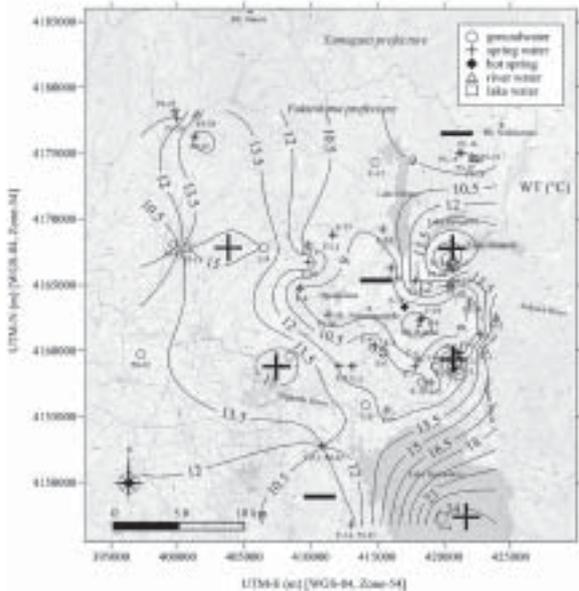


図5 磐梯山とその周辺地域の水温分布図
(等値線は 1.5°C 間隔)

(PJ-15, 16, 17, 18, 19) で9.0°C以下の低い地
点認められる。これらの地域は標高が高いため、
涵養域の標高の影響を受けて水温が低くなって
いると言える。一方、磐梯山の北東側や南東側で
は水温が相対的に高くなっている。特に、北東に
位置するPJ-24やPJ-25ではそれぞれ22.3°C、
17.2°Cと高い。これらの地点はECも非常に高く
なっていることから、近くにある温泉の影響が及
んでいると考えられる。今回実施した調査地点の
うち、地下水や湧水の水温の分布範囲をみると
5.7~16.4°Cと範囲が広がっているが、磐梯山
の周辺に限ってみると大部分の地点で9~12°C
の範囲内にあり、周辺の平均気温(表1)よりも
やや高くなっている。また、E-10のように周辺
の水温とは異なっている地点もあり、涵養域(標
高)の違いが表れていると予想される。

ORPの分布図を図6示した。磐梯山の南側から
西側山麓(猫魔ヶ岳西麓)にかけて、ORPは
160 mV以下の相対的に低い値が分布している。
対して、磐梯山の北側斜面(PJ-21)と東側山麓
に位置する地点(PJ-24, 25, N-1, 2, 3)では
ORPは高くなっている。これらの地点は火山性
ガスや温泉、鉾山廃水などの影響が及んでいる地

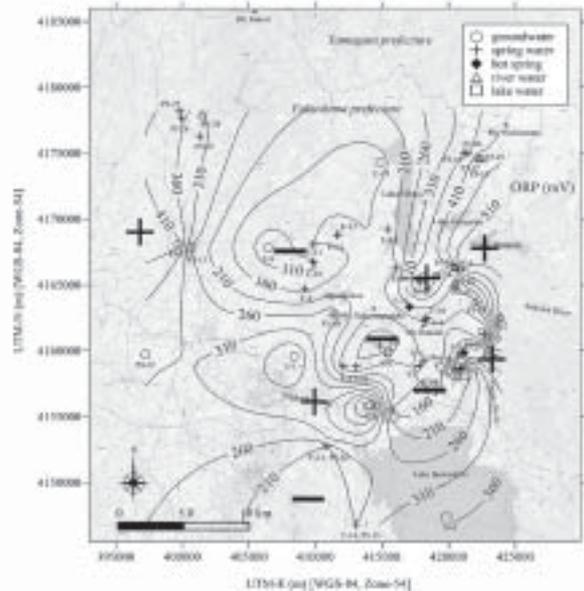


図6 磐梯山とその周辺地域の ORP 分布図
(等値線は 50 mV 間隔)

点であり、ORP の値にもこうした影響が表れていると考えられる。なお、磐梯山南麓の E-8 の地下水で ORP が 566mV と高い値を示しているが、ここは自治体の水道水源の一つで、この地点のみ殺菌消毒が行われていたため、ORP の値が高くなっていると思われる。

2. SiO₂ の分布特性

SiO₂ は降水には含まれておらず地中の土壌や岩石等から供給されるため、同じ地質条件の場所にある地下水や湧水では、SiO₂ 濃度が高いほど地中に長く存在している、すなわち滞留時間が長いと判断することができ、相対的な水の年代を比較することが可能である。岩石には様々な鉱物が含まれているが、岩石の風化による寄与率は K や Na, Ca, Sr などと比べて SiO₂ は特に高く (鹿園, 2002)、SiO₂ 濃度は他の鉱物よりも地質の影響をより明瞭に示すという性質を備えている。一般的な傾向として、河川水や湖沼水では SiO₂ 濃度は低く、ケイ酸塩鉱物を多く含む火成岩が広がる地域で濃度が高くなる。磐梯山や安達太良山、西吾妻山は火成岩の一種である安山岩で構成されているため、これらの地域の SiO₂ 濃度は総じて高いことが予想される。その一方で、喜多方市内の地下水・湧水の主要な涵養域であると予想される北側の飯森山や飯豊山は非火山性の地質で、飯森山の周辺では前～中中新世の堆積岩類、飯豊山の周辺では暁新世～始新世の花崗岩等が広く分布しており (産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2011)、磐梯山周辺地域とは SiO₂ 濃度が異なると予想される。

本調査の SiO₂ の分布をみると (図 7)、磐梯山の北側、東側、南側の斜面や山麓で濃度が高くなっていることがわかる。特に、磐梯山北と北東山麓に位置する PJ-21, 24, 25 で 100 mg/L を超える高濃度となっている。PJ-21 (SiO₂ : 115.9 mg/L) では pH が低く酸性を示しているため、周辺の安山岩質の岩石の溶解が進み、SiO₂ も水中に溶出し

て高濃度に含まれていると考えられる。また、P-21 の上流側に位置する銅沼においても、SiO₂ はおよそ 120~150 mg/L と多く含まれており (國井ほか, 2012)、P-21 の湧水は銅沼の水が含まれている可能性がある。PJ-24, 25 では、pH は 7 付近の中性を示しているが、EC や ORP の値から温泉水が混入していることが予想され、こうした影響により SiO₂ 濃度が高くなっていると考えられる。N-2, 3 の酸川、長瀬川上流においても SiO₂ 濃度は 44.8 mg/L と相対的に高くなっており、安達太良山の鉱山廃水や温泉中に含まれている SiO₂ が寄与していると思われる。磐梯山の南側山麓においても SiO₂ 濃度が 40 mg/L 以上の相対的に高濃度の地点が分布しており、磐梯山で涵養された水が地下水や湧水として存在していることが示唆される。磐梯山の山頂付近の湧水 (F-9, 10) では SiO₂ 濃度は 16.7, 28.6 mg/L 以下と山麓の地下水等に比べて濃度は低く滞留時間が短いと思われるが、源流域近くの湧水の一般的な値 (10~15 mg/L 前後: 藪崎・島野 (2010)) に比べると濃度は高くなっていることから、安山岩の地質の影響を受けていると考えられる。また、磐梯山の西側山麓 (猫魔ヶ岳西麓) では、SiO₂ は

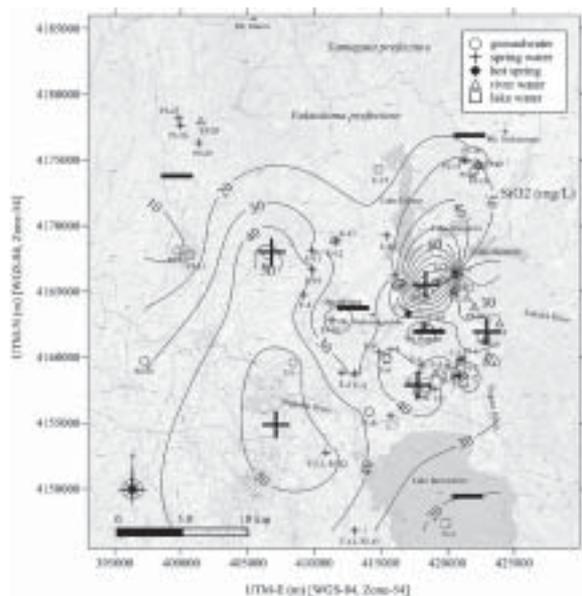


図 7 磐梯山とその周辺地域の SiO₂ 分布図
(等値線は 10 mg/L 間隔)

40 mg/L 以下となっていることから、この地域では磐梯山の他の斜面とは水系が異なることがわかる。しかし、同じ西側山麓においても、E-9 (56.8 mg/L), E-1 (54.9 mg/L), F-13 (57.1 mg/L), PJ-12 (51.5 mg/L) のように濃度が高い地点もあり、これらは相対的に滞留時間が長いと考えられる。一方、喜多方の PJ-11, 26~29, 31 では 10~16 mg/L 以下と調査地域の中で最も濃度が低くなっており、これは滞留時間が相対的に短いか、あるいは主要な涵養域であると考えられる飯盛山や飯豊山周辺の地質の影響が影響していることが想定される。

3. 水質組成の分布特性

各地点の水質データを元にヘキサダイアグラム (シュティフダイアグラム) を作成し、地下水 (図 8a), 湧水 (図 8b), 温泉・河川水・湖水 (図 8c) に示した。ヘキサダイアグラムの右下の軸で黒く塗りつぶした部分は NO_3^- 濃度を示している。また、ヘキサダイアグラム自体に薄く色がついているものは溶存成分量が多いため、縮小して示した地点である。倍率は各ヘキサダイアグラムの上側に表示した。

まず、地下水の水質組成分布をみると (図 8a), Ca-HCO_3 型, Na-HCO_3 型, その他に区分できる。 Ca-HCO_3 型は E-5, E-6, E-8, F-4, PJ-2, PJ-3, PJ-11, PJ-32 の 8 地点である。 Na-HCO_3 型は E-1, E-9, F-2, F-12 の 4 地点である。その他の組成として、E-15 は $(\text{Na}+\text{Mg})\text{-HCO}_3$ 型, PJ-31 は $\text{Na-(Cl}+\text{SO}_4)$ 型である。 Ca-HCO_3 型は日本の浅層地下水や河川水等で最も一般的にみられる水質組成であり、本研究対象地域の地下水でもこの組成を示す地点が多い。 Na-HCO_3 型は滞留性の地下水で多くみられる水質組成であり、この組成をもつ水は相対的に滞留時間が長い水 (深層の地下水) である場合が多い。本研究対象地域の地下水においても 4 地点で Na-HCO_3 型を示しており、これらの地点は SiO_2 濃度も相対的に高いことから、滞

留時間が相対的に長い地下水であると考えられる。4 地点の標高をみると、磐梯山西側山麓 (猫魔ヶ岳西麓) にある E-1 は 350 m, E-9 は 286 m であり、両地点とも山体と会津盆地の境界付近に位置し、磐梯山の南側にある F-2 は 583 m, F-12 は 581 m でほぼ同じ標高に位置している。磐梯山南麓には複数の地下水調査地点があるが、その中でもこの 2 地点は同じ標高に位置し、 Na-HCO_3 型を示すことから、同じ地下水流動系の水であることが考えられる。E-15 は $(\text{Na}+\text{Mg})\text{-HCO}_3$ 型と他の地点とは異なり、溶存成分量も非常に少なく降水に近い値を示していることから、この地下水は滞留時間の短い水であると言える。PJ-31 も他の地点とは異なる $\text{Na-(Cl}+\text{SO}_4)$ 型で少し特殊な水質組成となっており、この地点は喜多方市街地の浅い地下水で周囲には畑が広がっているため、地表面からの人為的な影響を受けていると考えられる。また喜多方市を含め会津地方では冬季の降雪量が多く、凍結防止剤や融雪剤として凝固点が低くなる性質を有する塩化カルシウム (CaCl_2) が道路上に散布されており、この影響も多少含まれている可能性も考えられる。

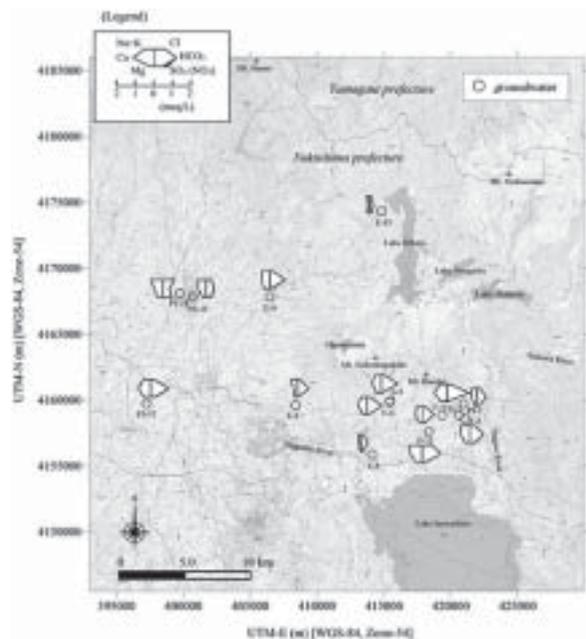


図 8a 地下水の水質組成図

次に湧水の水質組成をみると (図 8b), 地下水と同じく Ca-HCO_3 型と Na-HCO_3 型が多くみられ

る。水質組成ごとに区分すると、Ca-HCO₃型では北からPJ-27, PJ-26, PJ-16, PJ-15, E-14, E-11, E-16, PJ-30, F-10, F-9, E-4, PJ-1, F-6, F-7, PJ-5, F-5の16地点、Na-HCO₃型はE-13, E-12, E-10, F-8, F-3, E-2, E-3, PJ-4, F-13, PJ-12, F-14, PJ-13の12地点である。その他の水質として、PJ-29はNa-Cl型とMg-SO₄型の混合型、PJ-21はCa-SO₄型で溶存分量は非常に多く、F-1はCa-(HCO₃+SO₄)型、E-7はCa-HCO₃型であるがNO₃⁻が多く含まれている。

Ca-HCO₃型を示している地点は、磐梯山の南側斜面と南麓、磐梯山西側山麓（猫魔ヶ岳西麓）、西吾妻山南麓、喜多方市北部に分布しているが、それぞれの地域で溶存分量が多少異なっているため、流動系も異なることが予想される。PJ-26とPJ-27は喜多方の北部の山間部で湧出する湧水で、磐梯山のCa-HCO₃型を示す地点と比べて溶存分量が多く、地質や滞留時間の違いがあらわれていると思われる。Na-HCO₃型は磐梯山の南麓と西～北西麓、猪苗代湖の西側に分布し、これらの地点にはSiO₂濃度が高いF-13も含まれていることから、滞留時間が相対的に長いと考えられる。Na-HCO₃型を示す地点の標高は、磐梯山の南麓では519～642 m、磐梯山の西～北西麓では566～624 m、猪苗代湖の西側では524～536 mで、総じて510～650 mの範囲に分布しており、磐梯山山麓の末端部近くに位置している。また、磐梯山の南側斜面では距離的に近くに位置していても水質組成が異なっている地点があることから、複雑な地下水流動系があることが推定される。PJ-29はNa-Cl型とMg-SO₄型の混合型で特殊な水質組成であるが、この周囲には水田が広がっており、近くには強食塩類泉の熱塩温泉があるため（奥田, 2000）、地質等の自然起源に加え何らかの人為的な影響が及んでいると思われる。PJ-21は磐梯山北側斜面にある湧水で、前述したようにECは高く、pHは低く、火山性ガスの混入等の影響の存在が示唆される地点であり、國井ほか（2012）で

示されている銅沼の水質結果とほぼ一致しているため、銅沼の水が地下に浸透してPJ-21地点で湧出していることが水質組成の点においても考えられる。F-1は周囲の地点よりも溶存分量が多く、SO₄²⁻濃度が高いという特徴がある。F-1は酸川と合流した後の長瀬川の右岸から約200 mの地点に位置し、すぐ近くには磐梯山山頂の沼ノ平を源流とする琵琶沢が流れているため、火山起源のSO₄²⁻が含まれている可能性が高い。E-7の水質組成は周囲の地点と同じCa-HCO₃型であるが、NO₃⁻濃度が27.1 mg/L（NO₃-Nでは6.1 mg/L）とやや多く含まれている。しかしながら、水道水質基準ではNO₃⁻濃度は44.3 mg/L（NO₃-N濃度で10 mg/L）であるため、基準値以下である。NO₃⁻の起源として、周辺に畑地や牧場があるため、その影響があらわれているものと考えられる。

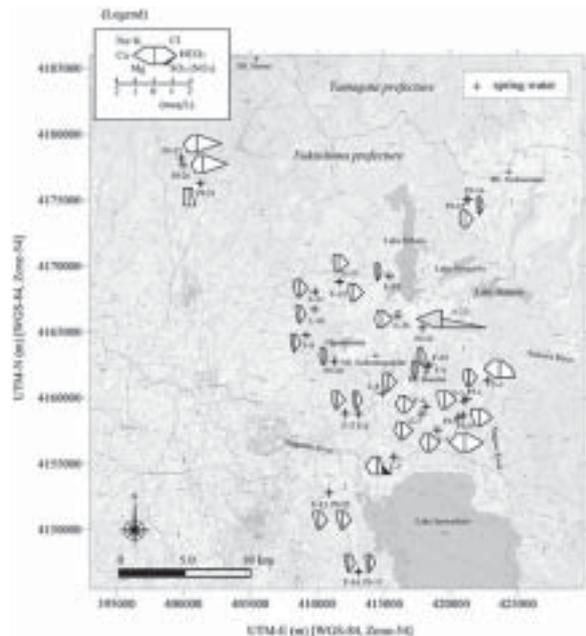


図 8b 湧水の水質組成図

温泉、河川水、湖水の水質組成図をみると（図 8c）、地下水や湧水の水質組成と比べて溶存分量の多い地点が多く、水質組成も大きく異なっている。Ca-HCO₃型を示すのはPJ-19とPJ-20の2点のみであり、Ca-SO₄型はPJ-17とPJ-18の2地点、Ca-(Cl+SO₄)型はN-3, PJ-22, F-11, N-2, N-1の5地点、Na-(Cl+SO₄)型はPJ-24, PJ-25の2地点である。その他の組成として、PJ-22は

Ca-(Cl+SO₄)型と Na-(Cl+SO₄)の混合型, PJ-28 は Mg-SO₄型, PJ-23 は Ca-(HCO₃+SO₄)型を示している. 全体的な傾向として, SO₄²⁻濃度が高いという特徴があり, 河川水等の表流水はより火山ガスや温泉の影響を受けやすいことがこの結果にも表れている. Ca-(Cl+SO₄)型は磐梯山の北～東側の斜面・山麓に分布し, F-11 の温泉や酸川, 長瀬川もこの水質組成に含まれている. 酸川の源流域に位置する安達太良山の山頂付近で湧出している温泉の泉質は, カルシウム・アルミニウム-硫酸塩・塩化物温泉となっており (福島県環境センター, 2009), この源泉が酸川やその周辺の河川水等の水質に影響を与えていることがわかる. また長瀬川上流 (N-3) と, 長瀬川下流 (N-1), 酸川 (N-2) も同じ組成を示すが, N-3 では HCO₃⁻の占める割合が若干高く, 溶存分量は N-1, N-2 に比べて少ないが, 酸川が合流した後の N-1 では溶存分量が多くなり, 水質も N-2 により似た成分を示すことから, 長瀬川下流は酸川の影響が強く及んで水質が形成されていると言える. N-4 の猪苗代湖も酸川や長瀬川と同じ水質組成を示しているが, 長瀬川下流 (N-1) と比べて溶存分量は少なくなっており, 相当の希釈が生じていることが明らかである. PJ-24, 25 は酸川や長瀬川の近くに位置しているが, 溶存分量は非常に多く, 異なった水質組成 (Na-(Cl+SO₄)型) を示している. この2地点のそばには川上温泉や磐惣温泉などがあり, 河川に温泉水が混入している可能性も考えられる. 磐梯山には単純泉やナトリウム泉, ナトリウム-塩化物泉, カルシウム-硫酸塩・塩化物泉など, 異なる泉質の温泉が存在していることから, それらの影響を受ける表流水の水質も場所によって異なることがこの結果にもあらわれている. PJ-22 と PJ-23 は土湯沢温泉の跡地のそばに流れる河川水であり, 両地点はすぐ近くに位置しているにも関わらず, 水質組成は大きく異なる. PJ-23 は Ca-(HCO₃+SO₄)型で溶存分量は少なく, 約 2 km 南東に位置する F-1 の水質

組成とよく似ている. 一方, PJ-22 は溶存分量が多く, Ca-(Cl+SO₄)型と Na-(Cl+SO₄)の混合型を示しているため, Na-(Cl+SO₄)の組成を示す PJ-24 や PJ-25 のような水と, Ca-(Cl+SO₄)型の組成をもつ水が混合していることが推定される. 西吾妻山の南側斜面では Ca-SO₄型の水質組成を持つ地点があり, これは西吾妻山の火山の影響を受けていると考えられる. IV-1 の EC の項目でも説明したように, これらの河川では河床が赤く色付き (おそらく鉄が酸化して沈着している), EC も比較高く, pH は 4.0 前後の低い値を示していることも, 上述の推定を支持している. 一方で, すぐそばに位置する PJ-19 の水質組成は Ca-HCO₃型で溶存分量が少ない河川水であり, また湧水の PJ-16 や PJ-15 も同様に Ca-HCO₃型を示すことから, 吾妻山南側斜面でも比較的狭い範囲で水質組成が異なっていることが明らかとなった. 喜多方の山地 (飯盛山の南側山麓) に位置する PJ-28 の渓流水は Mg-SO₄型で溶存分量は少なく, 他の地点では見られない水質組成を示しているが, PJ-28 の下流側に位置する湧水の PJ-29 (Na-Cl と Mg-SO₄の混合型) と似た組成となっている. こうしたことから, この周辺の地域では, 地質などの影響により特殊な水質が形成されている可能性が考え

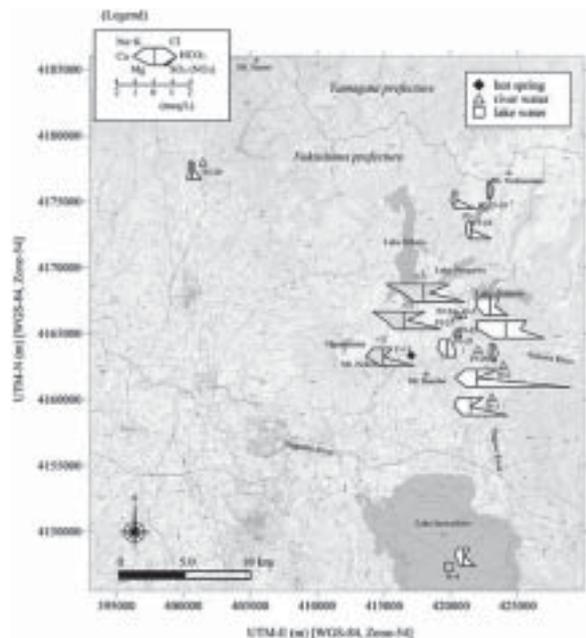


図 8c 温泉水, 河川水, 湖水の水質組成図

られるが、明瞭に示すためには更に調査を追加する必要がある。

4. 炭素安定同位体の分布特性

$\delta^{13}\text{C}$ (炭素安定同位体比) は、質量数 12 の炭素 (^{12}C) と質量数 13 の炭素 (^{13}C) の存在比を標準物質である PDB (Pee Dee Belemnite) に対する千分率偏差として示したものである。 $\delta^{13}\text{C}$ は大気や岩石、植物に由来する炭素で異なる同位体比を示すことが知られており、有機物では-20‰以下、火山性 (深部起源) CO_2 では-8~-3‰、海成炭酸塩鉱物では約 0‰、C3 植物では-27‰、C4 植物では-13‰である。水サンプルの場合、水中に溶存している溶存炭酸 (DIC) の C の同位体を測定することにより、その起源を推定することが可能となる。火山性 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ は相対的に高いため、水中に火山性 CO_2 ガスが混入している場合、その水の同位体比は火山性 CO_2 の混入が無い水よりも $\delta^{13}\text{C}$ は高くなる。こうした特徴を有しているため、本研究対象地域のように火山が分布する地域の地下水や湧水等の流動について調査をする場合には、 $\delta^{13}\text{C}$ の利用は有効的である。

本研究では、磐梯山の主に自治体水源 (E, F 地点) のサンプルについて $\delta^{13}\text{C}$ を測定し、その結果を元に $\delta^{13}\text{C}$ の分布図を作成した (図 9)。多くの地点で $\delta^{13}\text{C}$ は-22~-15‰の値を示しているが、磐梯山北西斜面の E-16 (-11.6‰)、F-11 (-3.9‰)、磐梯山南側斜面の F-4 (-9.6‰)、F-6 (-5.8‰)、F-7 (-4.9‰) で相対的に高い値を示しており、火山性 CO_2 の影響を受けている可能性が考えられる。一般的に、火山性 CO_2 が混入している場合には、 SO_4^{2-} も多く溶存している。たとえば、鹿児島県と宮崎県の県境に位置する霧島火山の調査では、火山性 CO_2 の混入が考えられる地下水や湧水において、 $\delta^{13}\text{C}$ は-8‰以上で、 SO_4^{2-} 濃度は 50 mg/L 以上含まれていた (藪崎ほか, 2012)。しかしながら、本研究対象地域の場合には $\delta^{13}\text{C}$ と SO_4^{2-} 濃度には明瞭な相関は認められない (図 10)。

先に挙げた 5 地点の SO_4^{2-} 濃度は、温泉の F-11 を除くと 2.1~5.3 mg/L と低く、これらのデータのみでは火山ガスの影響を受けていると断定することは難しい。一方、F-1 では $\delta^{13}\text{C}$ は-16.8‰、 SO_4^{2-} は 37.1 mg/L で、図 11 では他の地点とは異なる位置にプロットされており、火山性 CO_2 の混入が示唆される。F-1 の水質組成は Ca- SO_4 型で SiO_2 は 56.3 mg/L であり、この結果からも火山性ガスの混入の可能性が示唆される。本調査の結果では、磐梯山の山体にある地下水や湧水は、あまり火山性 CO_2 の混入の影響は表れていないことが示された。しかしながら、今回の調査では $\delta^{13}\text{C}$ の測定は一部の地点に限られているため、広域の状態を把握するまでには至っていない。今後 EC や pH、水質組成の結果から火山性ガスの混入が示唆される磐梯山東側山麓などで測定地点を増やすことにより、より詳細に特徴を示すことができると期待される。また、現在測定中の He の測定値を得た後、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 SO_4^{2-} 、全炭素濃度を併せて用い、火山性ガスの混入の有無を含め、磐梯山周辺の水質形成過程について明らかにする予定である。

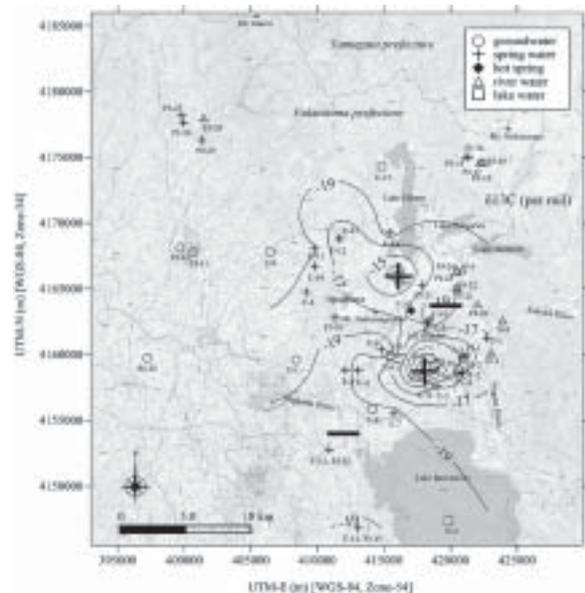


図 9 磐梯山とその周辺地域の $\delta^{13}\text{C}$ 分布図
(等値線は 2‰間隔)

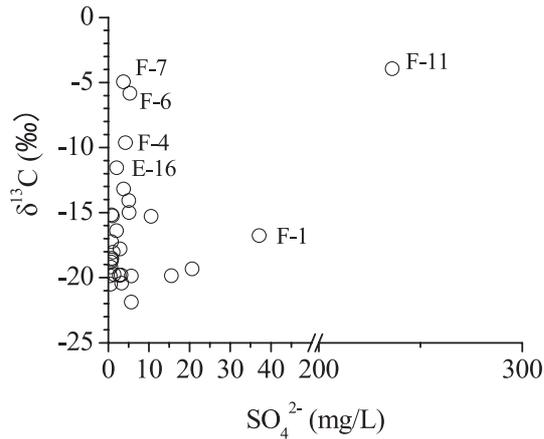


図 10 SO_4^{2-} と $\delta^{13}\text{C}$ の関係

5. 酸素安定同位体の分布特性

酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は、質量数 16 の酸素 (^{16}O) と質量数 18 の酸素 (^{18}O) の存在比を標準物質である SMOW (Standard Mean Ocean Water : 標準平均海水) に対する千分率偏差として示したものである。 $\delta^{18}\text{O}$ は水 (H_2O) を構成している同位体比であるため、水そのものを追跡できるという点で優れている。また、放射性同位体のように時間と共に値が変化することはなく、通常の状態では岩石とは反応しないため、他の異なる $\delta^{18}\text{O}$ を示す水体との混合が無ければ、地中を流動する間、一定の値を持ち続けるという特徴もある。地下水等の起源である降水の $\delta^{18}\text{O}$ 値には、標高が高くなるにつれて $\delta^{18}\text{O}$ 値が低くなる高度効果や、内陸部にゆくほど $\delta^{18}\text{O}$ 値が低くなる内陸効果、高緯度地域ほど $\delta^{18}\text{O}$ 値が低くなる緯度効果、気温が低い地域ほど $\delta^{18}\text{O}$ 値は低くなる温度効果など、幾つかの法則が存在しており、こうした特徴を利用して地下水等の流動や涵養域の推定が行われている。

本研究対象地域で観測した地点の $\delta^{18}\text{O}$ の分布図をみると (図 11), $-12.2\sim-10.4\%$ の範囲で分布している。 $\delta^{18}\text{O}$ 値は磐梯山山頂付近や西吾妻山南麓、喜多方北部の山麓部で相対的に低くなっており、標高が高い地点ほど同位体比が低くなる高度効果が認められる。本研究対象地域の標高と $\delta^{18}\text{O}$

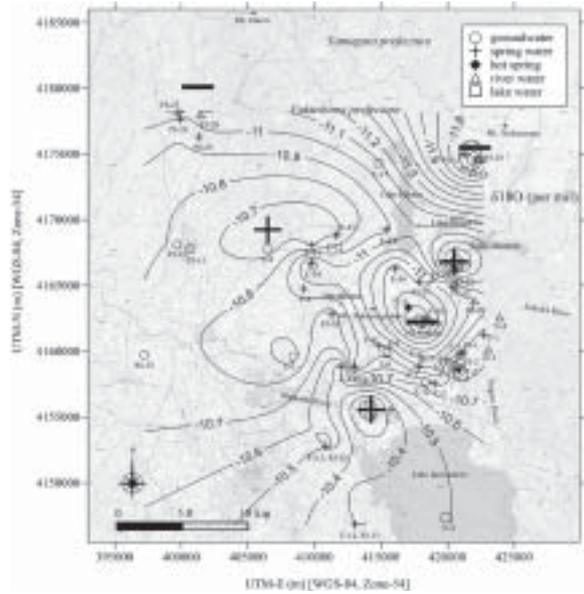


図 11 磐梯山とその周辺地域の $\delta^{18}\text{O}$ 分布図 (等値線は 0.1‰ 間隔)

の関係 (図 12) より、高度効果の値は -0.1% / 100 m である。西吾妻山南麓 (PJ-15~PJ-19) の $\delta^{18}\text{O}$ 値は磐梯山山頂付近 (F-9 : -11.8% , F-10 : -11.5%) よりも低い値を示していることから、PJ-15~PJ-19 は磐梯山の標高 (1,816 m) よりも高い地点で涵養された水であると考えられる。西吾妻山 (標高 2,035 m) の他にも、近くには西大巔 (標高 1,981 m), 中大巔 (標高 1,963 m) などがあるため、こうした標高の高い山地部で涵養された水が PJ-15~PJ-19 の湧水、あるいは河川水として流れていると考えられる。一方、磐梯山北東側山麓の PJ-24, PJ-25 の河川水や、磐梯山西側山麓 (猫魔ヶ岳西麓) の E-9, E-11, E-12, E-13 の地下水や湧水、磐梯山南西側山麓の E-7, E-8 の地下水や湧水、猪苗代湖西岸の F-13, PJ-12, F-14, PJ-13 の湧水で、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は相対的に高い値を示している。PJ-24 や PJ-25 は水質組成等の結果から温泉の混入が考えられる地点であるため、 $\delta^{18}\text{O}$ 値にもこの影響が及んでいると思われる。猪苗代湖西岸の地点では周囲に標高 1,000 m 以下の比較的低い山が分布し、これらの山地部が涵養域となっていることが同位体比の結果から想定される。磐梯山西側山麓 (E-9, E-11, E-12, E-13) では磐梯山の南

側山麓に比べて相対的に $\delta^{18}\text{O}$ 値は高いが、これは前者の涵養域が磐梯山よりも標高の低い猫魔ヶ岳(標高1,404 m)や雄国山(標高1,271 m)の山地斜面で涵養されているためであると考えられる。以上のように、安定同位体の結果からも、磐梯山西側斜面(猫魔ヶ岳西側斜面)の地下水流動は、他の斜面とは異なっていることが示された。

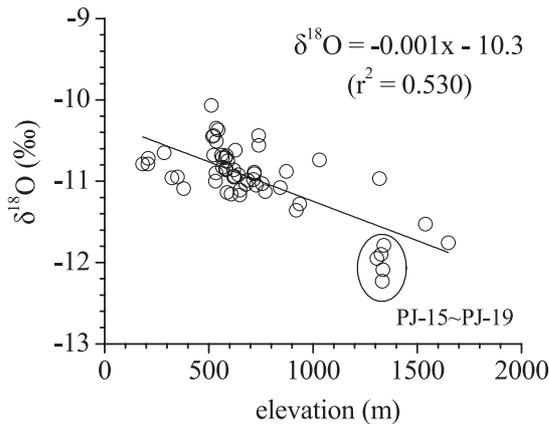


図12 標高と $\delta^{18}\text{O}$ の関係

6. 酸素安定同位体比を用いた平均涵養標高の推定

IV-5でも述べたように、酸素安定同位体比は標高と負の相関をもっており、この性質を利用することによって地下水や湧水の涵養域を推定することができる。調査地点において水文学的に涵養域を推定できる湧水の中で、集水域が十分に狭く、標高差で100~300 m程度の地点を選び、それらの同位体比と標高を利用して地下水涵養線を示し、この図に他の地点のデータをプロットすることにより、それらの水の平均涵養標高を求めることができる。風早・安原(1994)や風早(1997)では、地下水涵養線を利用して、八ヶ岳や富士山の湧水の平均涵養標高を明らかにしている。

本研究対象地域においても、F-9, F-10, PJ-30の湧水のデータを利用し、同様の方法で地下水涵養線を求めた(図13)。この図から各地点の平均涵養標高を推定すると、西吾妻山の南麓では調査地点の中で最も平均涵養標高が高く(1,700~

2,000 m)、この結果はIV-5で述べたように西吾妻山や西大巔などの標高の高い山地部で涵養されていることと一致している。磐梯山北側斜面と山麓の平均涵養標高は900~1,700 mと範囲が広く、これは調査地点の標高が山頂付近から山麓部にかけて位置していることに起因する。磐梯山東側山麓では1,000~1,400 m、磐梯山南側山麓では800~1,400 m、磐梯山西側山麓(猫魔ヶ岳西麓)では1,100~1,500 mで湧出地点と平均涵養標高が近くなっている地点がある。南側山麓では同じような標高に位置していても $\delta^{18}\text{O}$ の値は異なっている地点が多いため、比較的大きな地下水流動系を持つことが考えられるが、西側山麓では $\delta^{18}\text{O}$ 値の地点間の差が少ないため、比較的小さな地下水流動域を形成していることがわかる。喜多方・会津では1,100~1,400 m、猪苗代湖西岸では900~1,100 mとなっている。猪苗代湖西岸の湧水(F-13, PJ-12)では地形上から想定される集水域と、 $\delta^{18}\text{O}$ 値から推定された平均涵養標高には大きなずれが存在しており、湧出量から考えても地形上の集水域の広さでは足りず、涵養域がどこに位置しているのかが疑問である。これらの地点の地下水流動の解明は、CFCs等による滞留時間の結果を待ちたい。また、猪苗代や会津地域では調査地点が少ないため、地下水流動を明確にするには更に調査をおこなう必要がある。

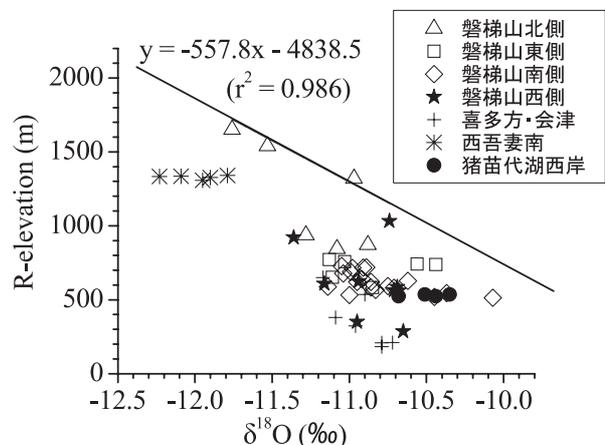


図13 地下水涵養直線を用いた磐梯山とその周辺地域の涵養域の推定

以上のように、磐梯山とその周辺地域では場所によって地下水や湧水の平均涵養標高は異なることが示された。今回は各地域のおおまかな特徴についてまとめたが、現在測定中の δD 値の測定結果と、CFCs や SF₆ による滞留時間の結果を併せて考察することにより、更に詳細な地下水流動系を示すことができると期待される。

V. まとめ・今後の課題

磐梯山とその周辺地域の地下水、湧水、河川水等の調査・採水、水サンプルの分析をおこなった結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 磐梯山の山頂付近の湧水は EC が低く、SiO₂ 濃度も相対的に低いこと、滞留時間が短く、水質には温泉や火山ガスの影響が及んでいない。
- 2) 北側斜面の湧水では EC が非常に高く、pH は低く、SiO₂ 濃度は高いことから、火山ガスの影響を受けていることが想定される。水質組成は Ca-SO₄ 型で上流側にある銅沼とほぼ一致していることから、銅沼の水がこの湧水に混入している可能性が高い。 $\delta^{18}O$ 値を利用して求めた平均涵養標高は約 1,450 m で、磐梯山北側で 1888 年に崩壊した箇所上部に相当している。
- 3) 磐梯山東側山麓の河川水では EC は非常に高く、水質組成は Na-(Cl+SO₄) 型で、SiO₂ 濃度が高いことから、温泉水の混入が考えられる。
- 4) 磐梯山の東側を流れる酸川(長瀬川下流)は、EC は高く、pH は非常に低く、水質組成は Ca-(Cl+SO₄) 型で特に SO₄²⁻ 濃度が高くなっており、源流域である安達太良山の火山性ガスや温泉、鉦山排水の影響を強く受けている。
- 5) 磐梯山南麓の地下水や湧水は Ca-HCO₃ 型と Na-HCO₃ 型の 2 つの組成をもつ水が混在しており、複数の地下水流動の存在が考えられる。また、西側山麓(猫魔ヶ岳西麓)では Na-HCO₃ 型の組成を示す地点が多くなっているが、EC は低く、SiO₂ 濃度も相対的に低くなっていることから、他の斜面と比べて滞留時間は相対的に短いことが

想定される。

6) 磐梯山南麓で $\delta^{13}C$ が相対的に高い値を示す地点があり、火山性ガスの混入の可能性が考えられるが、SO₄²⁻ 濃度はそれほど含まれていないことから、火山性 CO₂ の混入と SO₄²⁻ の付加のプロセスは異なっており、複雑な水質形成のメカニズムが存在していると考えられる。

7) $\delta^{18}O$ の高度効果は -0.1‰/100 m であった。 $\delta^{18}O$ を用いて平均涵養標高を推定した結果、西吾妻山の南麓の湧水と河川水では、1,700~2,000 m と高い場所で涵養されていることが示された。磐梯山の北側斜面では 900~1,700 m と範囲が広く、東

表 2 現地調査の結果

No	Date	Type	Elevation (m)	Well depth (m)	WT (°C)	EC (μS/cm)	pH (mV)	ORP (mg/L)	DO (mg/L)
E-1	2012/8/7	G	350	148.37	15.9	76.5	8.10	412	7.4
E-2	2012/8/7	Sp	519		12.0	59.0	7.53	143	10.0
E-3	2012/8/7	Sp	533		10.2	47.2	7.69	116	10.6
E-4	2012/8/7	Sp	715		12.5	62.8	7.80	56	10.3
E-5	2012/8/7	G	719	90	9.6	108.1	7.66	83	8.2
E-6	2012/8/7	G	718	90	11.4	100.5	7.77	151	8.6
E-7	2012/8/7	Sp	545		11.2	131.3	6.91	143	8.6
E-8	2012/8/7	G	513	5	13.0	151.0	6.98	566	8.0
E-9	2012/8/8	G	286	50	15.0	107.7	7.57	76	7.5
E-10	2012/8/8	Sp	608		13.6	46.2	7.97	99	8.7
E-11	2012/8/8	Sp	562		9.4	57.1	7.93	162	10.2
E-12	2012/8/8	Sp	566		9.9	67.1	8.04	171	10.6
E-13	2012/8/8	Sp	586		9.4	64.5	7.44	176	10.8
E-14	2012/8/8	Sp	872		9.4	33.9	7.78	171	10.9
E-15	2012/8/8	G	843	40	9.5	41.1	7.97	141	7.7
E-16	2012/8/8	Sp	921		7.5	73.9	7.71	201	10.9
F-1	2012/9/10	Sp	583		10.7	165.1	6.90	98	9.2
F-2	2012/9/10	G	583	43.0	10.5	129.5	7.10	128	9.5
F-3	2012/9/10	Sp	642		9.3	92.0	7.20	137	9.7
F-4	2012/9/10	G	678	83.7	10.8	79.0	7.20	99	9.1
F-5	2012/9/10	Sp	567		9.0	90.1	7.00	143	9.5
F-6	2012/9/10	Sp	728		8.9	78.7	6.50	171	9.0
F-7	2012/9/10	Sp	688		10.0	79.9	6.60	158	9.7
F-8	2012/9/10	Sp	624		8.4	46.5	7.70	138	9.3
F-9	2012/9/11	Sp	1650		5.7	32.7	7.10	—	—
F-10	2012/9/11	Sp	1540		7.3	42.5	6.40	—	—
F-11	2012/9/11	HSp	1320		39.3	5416.7	5.20	—	—
F-12	2012/9/11	G	581	70	11.4	164.2	7.00	162	(10.74)
F-13	2012/9/11	Sp	524		10.1	65.5	7.00	182	9.4
F-14	2012/9/11	Sp	536		9.5	48.7	7.30	164	10.0
PJ-1	2012/6/23	Sp	620		9.5	67.9	8.93	418	—
PJ-2	2012/6/23	G	620		16.4	78.9	8.65	375	—
PJ-3	2012/6/23	G	628		13.0	137.5	7.19	—	—
PJ-4	2012/6/23	Sp	588		11.5	105.9	8.04	318	—
PJ-5	2012/6/23	Sp	592		13.0	158.3	8.30	332	—
PJ-11	2012/7/19	G	210		15.0	124.9	6.67	243	—
PJ-12	2012/7/19	Sp	524		14.0	74.4	7.17	282	—
PJ-13	2012/7/19	Sp	536		10.4	51.5	7.41	300	—
PJ-15	2012/10/14	Sp	1307		7.4	65.1	7.07	351	—
PJ-16	2012/10/14	Sp	1327		8.2	91.2	7.19	324	—
PJ-17	2012/10/14	R	1333		7.0	134.8	4.02	461	—
PJ-18	2012/10/14	R	1335		9.0	176.8	3.83	457	—
PJ-19	2012/10/14	R	1341		7.5	43.5	6.08	421	—
PJ-20	2012/10/16	R	651		8.9	48.4	6.57	252	—
PJ-21	2012/10/16	Sp	937		13.4	1736.0	4.17	455	—
PJ-22	2012/10/27	R	771		13.0	446.0	6.88	255	—
PJ-23	2012/10/27	R	757		10.0	115.8	7.14	267	—
PJ-24	2012/10/27	R	739		22.3	1746.0	7.50	473	—
PJ-25	2012/10/27	R	741		17.2	1533.0	7.49	353	—
PJ-26	2012/10/27	Sp	535		11.1	137.4	8.03	364	—
PJ-27	2012/10/27	Sp	650		10.0	140.4	7.92	401	—
PJ-28	2012/10/27	R	380		13.5	81.2	7.98	314	—
PJ-29	2012/10/27	Sp	323		15.5	92.9	6.08	328	—
PJ-30	2012/11/22	Sp	1032		7.5	45.2	7.27	288	—
PJ-31	2012/11/22	G	209		9.3	162.0	7.28	432	—
PJ-32	2012/11/22	G	183		13.1	144.1	7.20	316	—
N-1	2012/10/12	R	549		15.8	350.0	3.91	472	—
N-2	2012/10/13	R	585		15.4	893.0	2.90	526	—
N-3	2012/10/13	R	696		15.9	193.6	6.47	535	—
N-4	2012/9/13	L	616		25.2	116.9	8.36	356	—

表 3 水質と安定同位体比の測定結果

No	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	SiO ₂ (%)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹³ C (‰)
E-1	0.0	3.7	0.0	0.0	1.2	0.2	0.1	36.9	0.0	6.6	0.0	1.4	2.1	4.9	54.9	-10.95	-18.0
E-2	0.0	4.1	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	27.5	0.0	4.9	0.0	0.7	1.2	4.6	32.2	-10.45	-20.5
E-3	0.0	3.0	0.0	0.0	0.9	0.4	0.0	20.1	0.0	4.0	0.0	0.6	0.9	4.1	27.8	-11.00	-17.2
E-4	0.0	2.9	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	29.0	0.0	4.5	0.0	1.2	1.2	5.8	35.9	-10.98	-20.4
E-5	0.0	6.3	0.0	0.0	2.7	0.0	0.1	53.7	0.0	6.7	0.0	2.6	2.9	10.0	48.6	-10.89	-19.8
E-6	0.0	5.8	0.0	0.0	2.9	0.2	0.1	47.9	0.0	6.8	0.0	2.4	2.7	9.9	48.2	-10.91	-17.8
E-7	0.0	5.1	0.0	0.0	15.6	27.1	0.0	16.2	0.0	5.3	0.0	1.1	4.0	12.4	32.6	-10.37	-19.9
E-8	0.1	13.7	0.0	0.0	20.7	9.6	0.0	24.7	0.0	7.0	0.0	2.1	3.1	15.5	39.3	-10.07	-19.3
E-9	0.0	5.3	0.0	0.0	3.2	2.4	0.1	51.9	0.0	8.2	0.0	1.5	3.7	8.5	56.8	-10.65	-19.8
E-10	0.0	3.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.1	21.7	0.0	4.5	0.0	1.0	0.8	3.2	41.5	-11.16	-18.5
E-11	0.0	3.0	0.0	0.0	0.7	1.4	0.0	28.1	0.0	4.1	0.0	0.7	1.3	5.5	28.7	-10.68	-19.2
E-12	0.0	3.5	0.1	0.0	1.0	1.0	0.0	32.3	0.0	5.3	0.0	0.8	1.7	5.5	30.3	-10.71	-15.2
E-13	0.0	3.6	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0	33.3	0.0	5.3	0.0	0.8	1.8	5.4	31.3	-10.69	-15.2
E-14	0.0	2.5	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	13.4	0.0	2.5	0.0	0.4	0.7	2.5	20.9	-10.88	-19.9
E-15	0.0	2.3	0.0	0.0	5.7	0.0	0.0	11.9	0.0	3.3	0.0	0.4	1.6	1.5	13.8	-11.08	-19.9
E-16	0.0	2.5	0.0	0.0	2.1	0.3	0.0	37.2	0.0	4.0	0.0	0.9	2.4	6.6	27.1	-11.36	-11.6
F-1	0.0	3.6	0.0	0.0	37.1	2.0	0.1	41.5	0.0	8.5	0.0	2.3	3.5	17.1	56.3	-10.85	-16.8
F-2	0.0	8.3	0.0	0.0	10.5	1.8	0.1	45.8	0.0	9.5	0.0	3.0	3.0	10.2	55.3	-10.86	-15.3
F-3	0.0	7.9	0.0	0.0	3.8	0.5	0.0	38.4	0.0	8.1	0.0	1.8	2.2	7.1	43.4	-10.92	-13.2
F-4	0.0	3.4	0.0	0.0	4.3	0.2	0.1	38.1	0.0	5.2	0.0	2.1	1.8	7.8	52.9	-11.04	-9.6
F-5	0.0	4.6	0.0	0.0	5.1	0.3	0.0	34.8	0.0	5.1	0.0	1.7	1.8	7.7	42.7	-10.83	-15.0
F-6	0.0	3.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	35.4	0.0	4.5	1.7	1.7	1.4	8.2	41.2	-11.05	-5.8
F-7	0.0	3.6	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	35.1	0.0	4.7	1.5	1.5	1.3	8.5	42.8	-10.99	-4.9
F-8	0.0	3.2	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	21.0	0.0	4.3	1.2	1.2	0.8	3.3	39.5	-10.94	-18.6
F-9	0.0	1.3	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0	13.1	0.0	1.8	0.1	0.1	0.5	3.4	16.7	-11.76	-16.4
F-10	0.0	1.0	0.0	0.0	5.7	0.0	0.0	16.2	0.0	2.7	0.3	0.3	0.7	4.5	28.6	-11.53	-21.9
F-11	0.0	48.9	0.0	0.0	236.1	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1	0.3	27.9	5.4	57.4	34.0	-10.97	-3.9
F-12	0.0	19.3	0.0	0.0	5.1	0.8	0.1	61.6	0.0	14.7	0.0	3.6	3.7	12.4	58.7	-10.71	-14.1
F-13	0.0	4.4	0.0	0.0	1.5	1.1	0.0	28.4	0.0	6.3	0.0	2.3	1.1	4.7	57.1	-10.44	-19.8
F-14	0.0	4.7	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	21.7	0.0	5.2	0.0	1.1	0.6	3.2	35.8	-10.35	-18.8
PJ-1	0.0	3.9	0.0	0.0	3.2	0.8	0.1	26.8	0.0	4.4	0.0	1.2	1.4	5.7	36.6	-10.86	—
PJ-2	0.0	5.1	0.0	0.0	3.6	0.7	0.1	31.1	0.0	5.6	0.0	1.4	1.6	6.5	37.9	-10.95	—
PJ-3	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	1.5	0.0	72.0	0.0	7.1	0.0	2.2	4.0	13.9	37.7	-10.62	—
PJ-4	0.0	6.2	0.0	0.0	3.6	0.7	0.1	44.2	0.0	8.9	0.0	2.3	2.1	7.4	54.0	-11.14	—
PJ-5	0.0	7.9	0.0	0.0	12.0	2.1	0.0	63.8	0.0	9.4	0.0	1.5	3.6	16.3	21.1	-10.75	—
PJ-11	0.0	10.0	0.0	0.0	12.2	2.8	0.0	26.5	0.0	8.7	0.0	1.5	2.3	8.7	12.8	-10.72	—
PJ-12	0.0	4.6	0.0	0.0	1.7	1.1	0.0	29.0	0.0	6.3	0.0	2.3	1.1	4.7	51.5	-10.68	—
PJ-13	0.0	4.7	0.0	0.0	0.7	0.3	0.0	19.2	0.0	5.1	0.0	1.1	0.6	3.1	33.4	-10.51	—
PJ-15	0.0	1.6	0.0	0.0	5.1	0.4	0.0	27.5	0.0	3.2	0.0	1.3	1.6	6.0	31.6	-11.95	—
PJ-16	0.0	1.6	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	14.0	0.0	2.1	0.0	0.5	0.7	2.3	17.2	-11.90	—
PJ-17	0.1	1.1	0.0	0.0	47.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	1.3	1.6	5.7	48.6	-12.23	—
PJ-18	0.1	1.0	0.0	0.0	52.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	1.4	1.7	5.7	50.1	-12.09	—
PJ-19	0.0	1.4	0.0	0.0	1.9	0.6	0.0	14.9	0.0	2.2	0.0	0.6	0.7	2.9	22.4	-11.79	—
PJ-20	0.0	2.3	0.0	0.0	5.4	0.8	0.0	16.5	0.0	3.1	0.0	1.3	0.7	4.0	31.6	-11.11	—
PJ-21	1.3	5.0	0.0	0.0	1132.4	0.0	0.0	0.0	0.0	36.3	0.0	5.4	46.9	269.7	115.9	-11.28	—
PJ-22	0.0	38.9	0.0	0.0	99.2	0.4	0.1	47.3	0.0	32.4	0.0	6.8	8.6	29.8	59.7	-11.13	—
PJ-23	0.0	6.1	0.0	0.0	23.8	0.4	0.0	24.4	0.0	7.1	0.0	2.6	2.2	9.8	44.5	-11.03	—
PJ-24	0.1	242.1	0.0	0.0	529.8	0.1	0.0	87.9	0.1	210.4	0.0	35.1	34.0	110.8	108.8	-10.44	—
PJ-25	0.1	200.5	0.0	0.0	479.7	0.0	0.0	64.4	0.1	172.1	0.0	28.8	30.1	100.2	99.6	-10.56	—
PJ-26	0.0	3.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.1	79.6	0.0	7.4	0.0	0.6	5.3	13.1	15.9	-10.90	—
PJ-27	0.0	2.7	0.0	0.0	1.3	0.9	0.0	81.8	0.0	5.7	0.0	0.3	6.4	14.2	16.3	-11.17	—
PJ-28	0.0	2.6	0.0	0.0	22.7	0.3	0.0	6.7	0.0	3.6	0.0	0.6	3.4	3.5	10.7	-11.09	—
PJ-29	0.1	7.0	0.0	0.0	15.9	1.0	0.0	15.6	0.0	5.7	0.0	1.3	3.3	4.4	11.6	-10.96	—
PJ-30	0.0	3.2	0.0	0.0	1.6	2.5	0.1	14.3	0.0	3.1	0.0	0.2	0.6	3.8	13.7	-10.74	—
PJ-31	0.0	22.3	0.0	0.0	22.5	1.1	0.0	19.8	0.0	14.4	0.0	1.3	3.6	9.3	7.3	-10.79	—
PJ-32	0.0	6.5	0.0	0.0	10.0	2.4	0.1	59.5	0.0	8.6	0.0	0.8	4.5	13.1	28.5	-10.79	—
N-1	0.4	23.7	0.0	0.0	96.9	0.2	0.0	0.0	0.0	13.9	0.0	3.1	4.7	17.3	26.3	—	—
N-2	1.3	39.0	0.0	0.0	239.9	0.4	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	3.8	7.1	23.4	44.8	—	—
N-3	0.0	16.5	0.0	0.0	46.7	0.0	0.0	17.7	0.0	13.3	0.0	2.5	3.7	15.1	18.3	—	—
N-4	0.1	10.1	0.0	0.0	30.2	0.3	0.0	5.5	0.0	7.3	0.0	1.8	2.2	8.4	15.5	—	—

側山麓では1,000~1,400 mである。磐梯山南側山麓は800~1,400 mで、比較的大きな地下水流動系を持つことが示された。一方、磐梯山西側山麓(猫魔ヶ岳西麓)では1,100~1,500 mで湧出地点と平均涵養標高が近い地点があり、また地点間でのδ¹⁸O値の差が少ないことから、比較的小さな地下水流動系の存在が考えられる。

今後は、現在測定中のδDやHe, CFCs, SF₆,

³Hの結果を利用して、水質形成過程の解明や火山性ガスの混入の有無の確認、涵養域の把握、滞留時間について明らかにする。また、調査地点の少ない地域において追加の調査をおこない、磐梯山とその周辺地域の広域の地下水流動を詳細に示すことに努めてゆく。

謝辞

本研究を実施するにあたり、自治体水源の調査では猪苗代町上下水道課の神 義明様、磐梯町上下水道課の鈴木裕明様、遠藤賢一様、北塩原村建設課の小椋崇広様、渡部大志様には、資料を提供の提供、ならびに現地調査への同行などで多大なるご協力をいただきました。会津保健所の若林伸一様、高橋 充様には、各自治体への調査依頼の際にご助力をいただきました。福島県内水面水産試験場の岩上哲也様には採水時に現地案内をしていただきました。喜多方市教育委員会の植村泰徳様には、磐梯山の湧水の場所について情報をいただき、また調査に同行していただきました。福島大学実践教育推進センターの佐藤一男教授には、各自治体へ調査の許可をいただく際にお世話になりました。福島大学共生システム理工学類の柴崎直明教授には、喜多方市や会津若松市の調査に関してご助言をいただきました。また、 $\delta^{13}\text{C}$ の測定では、産業技術総合研究所の半田宙子氏にご尽力いただきました。以上の方々に、心から御礼申し上げます。

引用文献

青木謙一郎・中村洋一（1988）磐梯山の岩石について、地学雑誌，37(4)，43-50。
 千葉 茂（1983）猪苗代平野の地下水の水質，福島大学理科報告，33，25-34。
 千葉 茂（1988）猪苗代湖・裏磐梯湖沼群の水質，地学雑誌，97，376-381。
 千葉茂樹・木村純一（2001）磐梯火山の地質と火山活動史－火山灰編年法を用いた火山活動の解析－，岩石鉱物科学，30，126-156。
 福島県環境センター（2009）平成20年度猪苗代湖水質モニタリング調査事業報告書，55p。
 風早康平・安原正也（1994）湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程，ハイドロロジー，24，107-119。
 風早康平（1997）地下水の涵養源と流動：同位体

水文学的手法，地質ニュース，513，20-25。
 気象庁 HP（2013）：気象観測データ，URL：
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/obsmenu.html>
 小荒井衛・津沢正晴・星野 実（1995）岩屑流発生場に関する研究分科会，磐梯山，前田印刷，135-143。
 小池一之・田村俊和・鎮西清高・宮城豊彦編（2005）日本の地形3 東北，東京大学出版会，355p。
 国土交通省（2013）水管理・国土保全，URL：
http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-1-1.html
 国立天文台編（2013）理科年表プレミアム，URL：
<https://www.rikanenpyo.jp/index.html>
 國井芳彦・鈴木 仁・佐久間智彦・林王克明（2012）裏磐梯五色沼湖沼群の湖水の化学的な成分に関する調査結果，裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告書，51-60。
 黒澤幸二・中村玄正・高橋幸彦・松本順一郎（1997）猪苗代湖の水質に及ぼす酸性河川長瀬川の水質および底質特性，環境工学研究論文集，34，111-120。
 三村弘二（1988）磐梯火山の地質と活動史，地学雑誌，97(4)，37-42。
 三村弘二・関口辰夫（2001）磐梯山南西麓の岩屑なだれの ^{14}C 年代，火山，46，11-16。
 Nakamura Y, (1978) Geology and petrology of Bandai and Nekoma volcanoes, Tokyo Univ Sci Rpt, 14, 67-119。
 日本の地質増補版編集委員会編（2005）日本の地質増補版，共立出版，374p。
 奥田 博（2000）福島のと温泉，歴史春秋社，163p。
 産業技術総合研究所地質調査総合センター（2011）：20万分の1日本シームレス地質図，URL：<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/db084/>
 鹿園直建（2002）化学的風化作用の河川水水質，特に溶存シリカ濃度に与える影響，地学雑誌，111，55-65。

鈴木敬治・真鍋健一・吉田 義 (1977) 会津盆地
における後期新生代層の層位学的研究と会津
盆地の発達史, 地質学論集, 14, 17-44.

鈴木敬治 (1987) 猪苗代盆地の地形, URBAN
KUBOTA, 26, 20-23.

鈴木敬治・真鍋健一・中馬教允 (1990) 猪苗代湖
盆の起源と地史的変遷, 地質学論集, 36,
151-166.

渡辺珠実 (2004) : 磐梯山および猫魔ヶ岳周辺地
域の陸水の水質について, 平成 15 年度立正大
学地球環境科学部環境システム学科卒業論文,
80p.

藪崎志穂・島野安雄 (2010) 山形県南部の名水,
地下水学会誌, 52, 285-303.

藪崎志穂, 浅井和由, 安原正也, 高橋 浩, 鈴木
裕一, 塚田公彦 (2012) 霧島火山の湧水の水質,
安定同位体比の特性について, 地球惑星科学連
2012 年合同大会, AHW26-13.