

活火山体内部の熱水流動系の解明と火山エネルギーの利用

Geohydrology in an active volcano and utilization of its energy

代表研究者	京都大学理学部教授 Prof., Faculty of Science, Kyoto Univ. Yuki YUSA	由 佐 悠 紀
協同研究者	京都大学理学部助教授 Assoc. Prof., Faculty of Science, Kyoto Univ. Koichi KITAOKA	北 岡 豪 一
	京都大学理学部助教授 Assoc. Prof., Faculty of Science, Kyoto Univ. Keiji TAKEMURA	竹 村 恵 二
	九州大学工学部教授 Prof., Faculty of Engng., Kyushu Univ. Sachio EHARA	江 原 幸 雄
	九州大学工学部助手 Res. Assoc., Faculty of Engng., Kyushu Univ. Tohru MOGI	茂 木 透
	九州大学工学部助教授 Assoc. Prof., Faculty of Engng., Kyushu Univ. Ryuichi IROI	糸 井 龍 一

This study deals with geohydrology in an active volcano, which is discharging energy steadily through fumarolic activity, and utilization of its energy based on field surveys and numerical simulations. The main research field is Kuju-iwoyama, a highly active fumarolic area, located at the center of Kuju volcanoes in the Central Kyushu of Japan. It is said that the main eruptions flowing magma in Kuju volcanoes began at about 300,000 years ago and ceased at several 10 thousands years ago.

The natural heat output from Kuju-iwoyama has been estimated to be about 100 MW, and the maximum temperature of steam has been measured as 508°C. A three-dimensional numerical simulation of the geothermal regime suggests as follows; the subsurface magma (its upper surface was at a depth of about 4 km) started cooling from 50,000 years ago, but maintains high temperature of 400–700°C at a depth of 5 km at present. Kuju-iwoyama is located at the just above the highest temperature zone. In fact, the electromagnetic survey has revealed that a chimney-like very low resistivity zone (500–700 m in diameter) extends vertically downwards just below the fumarolic area at Kuju-iwoyama, through which volcanic gases may come up from the deep. Distributions of surface alteration and soil gases also indicate that the fumarolic area has not changed so much from the past to the present.

The stable isotope study shows that most of magmatic steam ascending from the deep mixes with meteoric water to make two-phase geothermal fluid and discharges from fumarolic area, although a part of magmatic steam discharges directly as super-heated steam. Percentage of geothermal fluid in the total groundwater runoff from the Kuju-iwoyama watersheds is estimated to be around 20%.

Based on data obtained, thermal process beneath Kuju-iwoyama has been simulated by

numerical modelling, by which a two-phase zone has been established. Numerical experiments indicate that producing the two-phase fluid from the shallower zone gives smaller influence on the natural fumarolic activity at the ground surface than producing from the deeper zone.

研究目的

将来的に利用可能な地熱エネルギーの一つとして、活火山体内部に蓄えられている熱エネルギーすなわち火山エネルギーが考えられており、近年、活動的な火山の地下に存在するであろうマグマの熱を直接抽出しようとする計画が提案されている。しかし、マグマ溜りの物理的・化学的性状はもとより、その探査法あるいは熱エネルギー抽出の安全性や安定性など、未解明な点が多岐に多く、近い将来での実現は困難と思われる。

一方、活火山の中には、マグマを噴出することは無いかわりに、おもに噴煙を通して、100 MWあるいはそれ以上の莫大な熱エネルギーを安定的に放出しているものがある。これらは、エネルギー利用の観点から極めて魅力的である。この種の火山エネルギーを有効に利用するに当たっては、まず、噴煙活動を維持していると考えられる火山体内部の水（熱水と水蒸気）の特性とその流動系を明らかにする必要がある。そして、定量的に明らかにされた流動系に基づき、環境に大きな影響を与えることなく、どの程度の熱エネルギーが利用可能であるかを評価する必要がある。

以上の観点から、本研究では、九州中部地域の活火山である九重火山を研究対象域とし、フィールド調査と数値シミュレーションにより、同火山の地下構造および水の流動系を明らかにするとともに、環境と調和を図りながら火山エネルギーを利用する手法を明らかにすることを目的とする。

こうした火山体内部の水の流動系が明らかにされた研究例はほとんど無く、地下深部からの火山ガス（その大部分は水蒸気）と地表水との混合過程、さらにその流動過程が解明されることは、陸水学および火山学上極めて意義のあることと考えられる。また、火山体内部における水の流動過程の研究は、必然的に、より深部の熱過程の研究へとつながり、活火山下の深部熱過程の解明にも寄

与できるであろう。

研究経過

ここで研究対象域に選んだ九重火山は、大分県中部の東西約 22 km・南北約 24 km の範囲に広がる典型的な島孤の安山岩質火山であり、およそ 20 個のドーム状火山体より成る火山群の総称である。この火山群を作り出した主要なマグマ噴出活動は、約 30 万年前に始まり数万年前に終了したと考えられている。火山群の中心部に位置する星生山・北東山腹の爆裂火口には、現在も非常に活発な噴気活動が見られる。この噴気より自然硫黄が産出することから、九重硫黄山とも呼ばれてきた。これまでに観測された噴気の温度は最高 508°C、また噴気（蒸気）や温泉として流出する水量は 1 日当たり約 5600 トン、総自然放熱量は約 100 MW と見積もられている。

以上のような噴気活動の形態、およびこの活動に伴う微小地震などの調査研究に基づいて、硫黄山の直下には、地下深所より上昇してくるマグマ起源の流体と地表からの浸透水が混合して、一部に気液 2 相の流体系が形成され、それが噴気活動の源となっていると推定されている。

本研究を開始するに当たり、上記の推定を作業仮説として、研究を進めることとした。

1) 第 1 年次（平成 2 年度）

平成 2 年 4 月に開催した研究グループ全員による研究打合せ会において、第 1 年次における調査・研究項目を次のように設定した。

①九重硫黄山の山体内部における地熱流体（水・水蒸気・ガス）の流動の大局的な構造を把握するため、各種現地調査（変質帯・土壌ガス・噴気ガス・水文状態など）を実施するとともに、水・蒸気・ガス・岩石・土壌試料の採取と分析を行う。また、比較研究のため、九州中部地域の東端に位置する鶴見火山群（別府）においても類似の調査を行う。

②九重硫黄山の地下構造調査を行う。

③九重硫黄山の地下深部の動的状態と地表での活動との対応を明らかにするため、地震・地電流・温度の観測システムを展開し、連続観測を行う。

④九重火山域の地熱構造に関するシミュレーションに着手する。

以上に基づき、7月から12月にかけてフィールド調査を実施した。先に述べたように九重硫黄山は非常に活発な地熱地域であるため、硫化水素や二酸化硫黄などの有毒ガスが噴出し、また、落石の危険性もあるなど劣悪な条件下にあるにもかかわらず、各メンバーの工夫と努力により、質の高い調査が無事故で行われた。なお、調査地は標高1000 mから1600 mの山岳地であるため、厳寒期の調査は事実上不可能である。

年度の終わりには、研究会を開催して、得られた調査結果をもとめるとともに、次年度以降も同様の調査を継続することを確認した。

2) 第2年次(平成3年度)

第1年次末の研究会で確認したように、フィールド調査を継続し、データ量の増加と質の向上を図った。また、第1年次に着手した地熱構造のシミュレーションを改良した。さらに火山エネルギー開発の可能性、および開発に伴う影響を評価するための数値シミュレーションモデルを構築し、若干の数値実験を行った。

年度の終わりには、第1年次と同じく研究会を開催した。

3) 第3年次(平成4年度)

最終年度であるので、前年度までに得られたデータを補足することに主眼をおいて、フィールド調査を継続した。室内においては、とくに、水試料の酸素・水素安定同位体に焦点をあてて分析を行った。以上のようにして得られた各種データを整理・解析するとともに、シミュレーション手法のいっそうの改良を試みた。最後に研究会を開催して、3年間の調査研究を討論した。

研究成果

調査研究項目は多岐にわたっているので、各項目ごとに成果の概要を述べる。

(1) 広域地熱構造

数値シミュレーションによって、九重硫黄山に活発な地熱活動をもたらしているこの一帯の地熱構造を検討した。

まず、九重硫黄山を横断するような南北の測線に沿う断面について、水平—鉛直2次元の定常モデルを構築した。必要な岩石の物性値などは、公表されているデータを用いたが、不明のものについては適当な値を仮定した。このモデルにより現在の高い地殻熱流量(100 mW/m²を超える)を説明することのできる地下温度構造を試行錯誤的に求めたところ、硫黄山の地下5 kmで1000℃に達する温度となった。これは、この地域の基盤岩とされる花崗岩が溶融する温度である。しかしながら、地震波の観測結果からは、この深さに大規模な溶融状態が存在する可能性は考えにくい。

そこで、2次元の非定常モデルを構築してシミュレーションを行い、その結果をふまえて、3次元非定常モデルへと発展させた。モデルの大きさは、東西36 km・南北56 km・平均の深さ約14 km(地形の起伏のために場所により異なる)とし、地質学的な知見に基づいて、地下の熱源(1000℃のマグマ)は5万年前から冷却し始め、それ以後の熱源の付加は無かったものとした。そして、現在(すなわち冷却開始後5万年)の地殻熱流量にできるだけ合致するように、熱源の深さや形状を変化させて最適モデルを求めた。その結果、初期においては、九重火山地域の中央部で、地下4 km程度まで熱源が盛り上がっていたことが明らかとなった。また、現在、マグマの大部分は固化しているが、5 km深では400~700℃の高温状態であると推定される。伝導による熱伝導を考える限り、熱源に近いところでは今後5万年から10万年ほどは、浅層部の温度は上昇し続ける可能性がある。

(2) 九重火山の地下構造

九重硫黄山を中心とする地域の地下構造を明らかにするため、電磁探査によって地層の比抵抗構造を調査した。このような地域においては、複雑な3次元的地形や地下構造が存在するので、得られた観測値の解析に当たっては、3次元モデリン

グを試みた。その結果、火山体の大部分は 500 Ωm 以上の高比抵抗を示すが、硫黄山の噴気地直下の東西 900 m・南北 500 m の範囲に、5 Ωm 以下の極めて低い比抵抗域が少なくとも 1000 m 深まで鉛直下方へと煙突状に連続していることが知られた。200~300 $^{\circ}\text{C}$ の高温域において、こうした低比抵抗値を示すのは、空隙率が 30% 程度の粘土や導電性鉱物を含む地層とするのが妥当である。地表に噴出している大量の蒸気や熱水は、このような多孔性の地層を通して、深所より上昇してきているものと考えられる。

他方、比較的浅部においては、この極低比抵抗域から 10 Ωm の低比抵抗帯が北・東・南の 3 方に伸び出していることが明らかとなった。硫黄山周辺に存在する温泉湧出地がこれらの方向の延長上にあることからみて、熱水が横方向に流動する通路となっている可能性がある。

上の調査とは別に、噴気孔直下の浅部地下構造を、比抵抗法電気探査・ γ 線スペクトル探査および 1 m 深地温探査によって調べた。その結果、地下深部から上昇してきた蒸気は、地下約 30 m 深付近から分岐し、数ヶ所の噴気孔に達しているようすがうかがわれた。

(3) 変質帯

地熱活動の活発な火山体を構成する岩石は、硫黄成分などを含有する熱水や蒸気の影響を受けて金属成分が溶脱され、最終的には珪酸を主体とする物質に変質する。したがって、変質の度合と広がり、過去から現在に至る地熱活動に関する優れた指標となる。この調査のため、現地での肉眼による観察および試料の X 線回折による鉱物の同定という一般的な手法に加えて、鉄などの磁性物質の残存量に着目した新手法、すなわち帯磁率分布の測定を導入した。金属成分の濃度が小さいほど(すなわち変質が激しいほど)、帯磁率の値は小さいはずである。

このことを確かめるため、現地で採取した岩石試料につき蛍光 X 線分析装置により主要 10 成分を分析し、帯磁率の測定値と比較した。その結果、九重硫黄山のように酸性の地熱変質を受けた試料では、鉄およびマグネシウムの含有量と帯磁率の

間には明瞭な正の相関が、一方、珪酸含有量と帯磁率の間には負の相関のあることが明確となった。また、現地の露頭での測定と試料の室内測定は、ほぼ同じ値を示した。したがって、この方法を用いれば、現地調査を迅速に行えるばかりでなく、変質度を定量的に表示することができる。

この手法により現地調査を行ったところ、変質帯と非変質帯がかなり明瞭に区別された。噴気地の南西側(すなわち星生山山頂方向)では、現在顕著な地熱活動は見られないが、変質度が大きい。したがって、過去の地熱活動域はいくらか南西方向にまで広がっていた可能性がある。しかしながら、とくに激しい変質帯は現在の噴気地を中心に発達している。このことは、過去から現在まで、噴気活動の範囲に極端に大きな変化はなかったことを示唆しているものと考えられる。

(4) 土壌ガス

地下の熱源からは種々のガスが微量ではあるが上昇しており、これらが地表近くの土壌空隙中に存在している。そうしたガス濃度の分布は、地下高温域の広がりや断層位置を反映することが知られている。そこで、九重硫黄山の噴気地を中心に土壌ガスの調査を行った。調査項目は、土壌空気水銀濃度、土壌吸着水銀濃度、ラドン・トロンガス濃度、炭酸ガス濃度である。

得られた結果は、変質帯調査の結果と調和的であった。すなわち、土壌空気水銀濃度は、現在の噴気帯を中心とした直径約 1 km の範囲で高く、地下の高温域の水平的な広がりもこの範囲に広がっていると推定される。また、これより南西方向に土壌空気および土壌吸着水銀の両者とも高濃度範囲が見いだされた。

他方、ラドン・トロンガスおよび炭酸ガス濃度の分布より、噴気地から北西方向に伸びる断層帯の存在が推定された。

(5) 水文状態

山体内部における水の流動系を把握する上で、水文調査は不可欠である。この調査を開始するに当り、噴気地を含む流域を踏査した。これにより、噴気地を中心とする地域の湧水と溪流の状況が知られた。すなわち、噴気地の最上端に近い標高

1530 m の地点で湧出した酸性の高温水が源流となって、噴気地を貫く谷部を流下する。この途中で、側方から湧出する酸性の高温水の供給を受けて流量を増すが、噴気地を抜けると流量を減じ、標高 1350 m 付近で消滅する。そして、標高 1230 m 付近で再び湧出し、その後は連続した流れとなる(白水川)。この再湧出した水の温度は気温とほぼ等しいが、その pH 値は 4 前後の酸性を呈している。この溪流に沿って、流量と雨量の観測点を設け、原則として 1 月に 1 回の頻度で定期的に観測を行った。なお、雨量はこの間の積算値ということになる。

この 3 年間の観測によれば、この溪流が渴れることは無かった。試みに 1990 年の 7 月から 12 月における流量と雨量を比較すると、噴気地下端の標高 1430 m の地点での流量は流域雨量の約 60% (流出率) に相当する。一方、標高 1050 m の白水川観測点での流出率は約 120% であった。種々の状況から判断して、これらの流出率は過小評価と思われる。噴気地における蒸気としての流出、および蒸発による損失も考慮に入れると、九重硫黄山から流出する水には、地形上の流域外からの天水の寄与とともに、地下深所から上昇してくる熱水の寄与があるものと推定される。

(6) 水の水素・酸素安定同位体

水分子を構成する水素と酸素の同位体、すなわち重水素(D)と重酸素(^{18}O)は、自然界における水の起源や移動過程を反映する優れたトレーサーである。九重硫黄山の噴気についても、これに着目した研究が行われ、マグマ性の水の寄与のあることが推定されている(例えば、Mizutani *et al.*, 1986)。しかしながら、前項で述べた水文現象と関連づけた研究は行われていない。そこで、山体内部における水(水蒸気も含む)の移動過程に焦点を当てた安定同位体の研究を計画し、水文調査実施時に、渓流水・噴気凝縮水・雨水などの試料を採取し、分析した。その結果、これまでに知られていない興味深いデータが得られたので、その概要と若干の考察を述べる。

従来の研究によれば、九重硫黄山の噴気凝縮水においては、上記 2 つの安定同位体濃度は、この

地域の一般的な地下水の値を下限とし、島孤の安山岩質火山から放出される火山ガスに共通した値を上限として、その間にほぼ直線的に分布している。このことが前述したマグマ性の水の寄与の根拠となっている。今回の分析値も、これまでの報告値より低い、上記の直線の周りに分布している。

他方、噴気地を貫く渓流水の同位体濃度は、雨水より高い値を示し、かつ噴気とは別の直線の周りに分布するという際だった特徴を示す。こうした特徴は、雨水が直接流出してくるのではなく、山体内部にいったん浸透した水とマグマ性の水が混合し、しかも気液 2 相流過程を経た後に流出するという複雑な移動過程を示唆している。このように、安定同位体の面からも、マグマ性の水の寄与が推定された。

さて、今回の調査で、渓流水の流量が減少すると同位体濃度が増加するという傾向が見出された。これは、同位体濃度の高い水(火山地熱水と呼ぶことにする)と雨水起源の地下水との混合割合が変化するためと考えられる。暫定的なモデルによって、九重硫黄山全体から流出する火山地熱水の量を試算したところ、平均 2650 ton/day と求められた。これは、全流出量のおよそ 20% 程度に相当する。

九重硫黄山における安定同位体の特徴と比較するために、別府地域においても同様の調査を行った。この地域の熱源域に当たる鶴見火山群では、鶴見岳とガラン岳の山頂部に噴気活動が見られ、その山麓部に大規模な地熱温泉活動が展開している。結果として、マグマ性の水の寄与は検出されなかった。

(7) 九重硫黄山の熱過程モデル

従来の研究と本研究によって得られた知見に基づき、九重硫黄山における熱過程の数値モデル化を試みた。モデルの大きさや形状は、直径 5 km・深さ 2 km の軸対象円筒形とした。その中心部(直径 500 m)は周辺より透水性を高くし、さらにその底面から高温のマグマ性流体が供給される。また、上面では、流体が自由に出入りできるようにした。そして、種々の観測結果をよく説

明することのできるモデルを試行錯誤的に求めた。その結果、地下深部から供給されるマグマ性水（過熱蒸気）の温度は約 600°C、その供給量は 30 kg/s、他方、浸透水（10°C）の量は 10 kg/s という最適モデルが得られた。これら 2 種の水は混合して 2 相状態となり、地表から流出する。また、2 相流系の温度は、中心部で 210~340°C と計算された。このモデリングにより、「噴気地から流出する水量の 75% はマグマ性水」という注目すべき結果が得られた。

また、気液二相流による熱輸送の基礎的な特性についても、数値解析によって検討した。その結果、二相流による熱輸送量は伝導のみによる輸送量の数十倍に達すること、また、この過程によって、浅層に高温域が形成されることが明らかとなった。

(8) 火山エネルギー開発の数値実験

九重硫黄山の噴気地直下に存在する気液 2 相系から流体を生産するとき、自然の地熱活動に現れる影響を予測するために、前項と同様のモデルを用いて数値実験を行った。ただし、次の二つの場合を設定した。すなわち、底面中央部から一定流量（30 kg/s）の過熱蒸気が供給される場合（モデル 1）と、底面の境界条件を一定圧力温度に設定した場合（モデル 2）である。実験では、一定量の流体（30 kg/s）を 30 年間連続的に生産する場合を想定して、採取深度を 2 通りに変えて行った。

流体を浅層（250-300 m）から生産した場合、両モデルとも、地下の温度・圧力などは初期に低下するが、その後回復し、また低下するというように、長い周期の変動を繰り返す。深層（1250-1500 m）から生産した場合も同様なふるまいをする。

地表からの自然放熱量は、浅層からの生産では、開始直後に増加するがおよそ 2 年後には減少に転じ、10 数年後には回復に向かう。深層から生産する場合、モデル 1 では減少が著しく、一時的に放熱量が 0 となる期間が現れる。それに対し、モデル 2 では時間の経過とともに放熱量が低下する時期があるが、全体としては増加傾向を示す。このように、底面の境界条件によって、とく

に自然放熱量の挙動が大きく異なる。いずれにせよ、自然状態への影響を小さくするには、浅部から生産する方が望ましいと言えそうである。

(9) 地熱活動の変動

九重硫黄山の活動については、17 世紀以降の記録が残されている。それによれば、60 年から 100 年程度の間隔で変動してきたらしい。近年においては、今世紀の初め頃に噴煙活動が活発になり、1920~1925 年には活動が衰え、その後回復して 1960 年頃に活動のピークを迎え、その後また衰弱するというような消長を繰り返している。そして、最近では 1985 年頃からやや活発化の傾向に転じているようである。

こうした変動の状態は、長期にわたって観測を継続する必要があるので、九重硫黄山を含む 5 km×6 km の広い範囲を対象として、噴気と温泉の温度・微小地震・地電流・地磁気・重力変動の継続観測を続けている。これまでのところ地電流のパワーが増大した後、地震が発生し、ついで温度が低下するという現象が捉えられた。

(10) 浅層ボーリングによる蒸気生産の試み

これまでの調査研究結果を実際に確認するとともに、噴気生産の安定性を調べるため、九重硫黄山の噴気地で浅層ボーリングを実施した。その結果、深さ 27 m のボーリング孔より安定した噴気（大気開放状態での最高温度は 233.2°C、噴出量は 500 kg/h）を得ることに成功した。この噴気を用いて、火山発電や材料の腐食試験などの各実験が可能になった。

今後の課題と発展

表題にあるように、本研究は二つの柱から成っている。この目的に近づくため、九重硫黄山を主な研究フィールドとした。目的の第 1 は、噴煙活動の状態にある活火山体内部における水の流動系の解明である。具体的には、火山体の構造と生じている現象の調査・解析であるが、それらは複雑多岐であり、また、それらが展開する地理的範囲は広く、かつ、時間的スケールは長い。したがって、さまざまな観点からの調査を広範囲・長期にわたって行い、各種資料を蓄積することによって、はじめに、その本質に迫ることができる。その意

味では、3年間という期間は十分とは言えないが、それに関連した研究が行われていたこともあって、所期の目的をほぼ達成することができた。しかしながら、例えば、山体全体からの流出水中に占める火山地熱水の割合、ひいてはマグマ性流体の寄与など、水の流動系の定量的な評価には任意性が残されており、評価法やモデリングの改良も含めてさらに検討する必要がある。

第2の目的である火山エネルギーの利用については、上記の研究を基礎として、噴煙活動のエネルギーに焦点をあてて研究が進められた。本研究で提案された新たな視点であり、第一歩を踏み出した段階であるが、その可能性が得られたように思われる。しかしながら、火山蒸気には硫化水素をはじめとする腐食性のガスが含有されているため、実用化のためには蒸気生産や発電の設備の材料の研究などが必要である。

この研究をすすめてきた議論を通して、九州中部地域における火山・地熱活動の特徴が浮き彫りにされた。数多くの新しい火山と地熱地域が存在するが、大局的にはつぎの3地域に分けれる。すなわち、東から西へと鶴見火山域・九重火山域・阿蘇火山域である。本研究で明らかにされたように、最東部の鶴見火山域ではマグマ性流体の活動は検出されず（おそらくマグマは固化しているものと考えられる）、九重火山域では検出されたがマグマの大部分は固化・冷却の過程にあると考えられる。それに対し、阿蘇火山域では地表にまでマグマの活動がある。他方、自然の放熱量は鶴見火山域でもっとも大きく、ついで九重火山域、阿蘇火山域がもっとも小さい。こうした現象は、偶然とするにはあまりに特徴的であり、九州中部地域における火山活動史・地熱構造発達史の枠組みの中で検討を加える必要があるとの共通認識を得

た。問題は大きい、今後発展さすべき重要な研究課題であると考えている。

発表論文リスト

- 1) 竹村恵二・由佐悠紀(1991): 九重硫黄山の変質帯. 大分県温泉調査研究会報告, 42号, 23-27.
- 2) 江原幸雄・茂木 透(1992): 噴気活動期の火山の活動予測—九重火山の例—. 自然災害研究西部地区部会報, 14号, 36-42.
- 3) 江原幸雄(1992): 活火山下の熱過程の解明と火山エネルギー抽出の試み—九重硫黄山地域におけるケーススタディ—. 九大地熱研究報告, 1号, 17-24.
- 4) 江原幸雄・橋本和幸(1992): 活動的な噴気地域の背景の熱構造—九重硫黄山の例—. 日本地熱学会誌, 14(3), 205-221.
- 5) 江原幸雄・茂木 透(1992): 活火山下の熱過程と能動的な地熱エネルギー抽出. 能動的な地熱抽出システムに関するシンポジウム論文集, 47-50.
- 6) Ehara, S. (1992): Study on thermal processes beneath Kuju volcano, Japan —A step to volcano energy utilization—. *Geothermal Resources Council Transaction*, 16, 153-156.
- 7) 栗脇善朗・糸井龍一・福田道博(1992): 九重硫黄山の地熱貯留層解析. 九大地熱研究報告, 1号, 30-37.
- 8) 竹村恵二・由佐悠紀(1992): 九重硫黄山の変質帯(2). 大分県温泉調査研究会報告, 43号, 17-20.
- 9) 由佐悠紀(1992): 二相流による地熱構造. 能動的な地熱抽出システムに関するシンポジウム論文集, 57-62.
- 10) 北岡豪一・由佐悠紀・大沢信二・竹村恵二・福田洋一(1993): 九重硫黄山における噴気と湧出温泉水の安定同位体比. 大分県温泉調査研究会報告, 44号, 25-38.
- 11) 北岡豪一・由佐悠紀・神山孝吉・大沢信二・M. K. Stewart・日下部実(1993): 水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程. 地下水学会誌 (印刷中).
- 12) Mogi, T. and K. Nakama (1993): Magnetelluric interpretation of geothermal system in Kuju volcano, southwest Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* (印刷中).