

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05348

研究課題名(和文) 多項目の環境トレーサーを駆使した地熱流体の滞留時間推定法の開発

研究課題名(英文) Development of a method to estimate residence time of geothermal fluid using multiple environmental tracers

研究代表者

柏谷 公希 (Kashiwaya, Koki)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40447074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水の起源や滞留時間の推定に活用可能な地球化学指標の分析を行うことで、地熱流体を構成する水の起源を明らかにし、起源の異なる水それぞれの滞留時間を推定する方法について検討した。インドネシア、バンドン盆地周辺の地熱地域で温泉水などを採取し、多項目の溶存成分や同位体を対象に、濃度や同位体組成の分析を行った。分析結果に基づいて起源の異なる水の混合割合を算出し、特に海水起源の水の滞留時間を推定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地熱流体の循環状態を把握することができれば、地熱発電を行う際に貯留層の圧力低下を防ぎ、再生可能エネルギーの一種である地熱エネルギーを持続的に利用する上で役立つ。本研究では、地熱流体の循環の活発さを反映した定量的指標として地熱流体の滞留時間に注目し、地熱流体を構成する起源の異なる水の滞留時間を推定する方法について検討した。その結果、地熱流体に含まれる海水起源の水の滞留時間を推定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：A method to estimate the origins of waters constituting a geothermal fluid and residence times of the waters whose origins are different through analyses of geochemical indices was developed. Hot spring water and other water samples were collected in four geothermal areas around the Bandung Basin, Indonesia, and concentrations of dissolved components and isotopic features were analyzed. The mixing ratios of waters originating from meteoric water, seawater, and magmatic water were calculated based on the analytical results. The residence time of the seawater could be estimated successfully.

研究分野：水理地質学，地球化学，資源工学

キーワード：地熱流体 温泉水 滞留時間 環境トレーサー 放射性塩素同位体 多変量解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動を背景に、温室効果ガスの排出量削減が求められている。地熱エネルギーは再生可能エネルギーの一種であり、そのライフサイクル二酸化炭素排出量は、火力発電だけでなく、風力発電、太陽光発電、原子力発電に比べても少ない(今村ほか, 2016)。日本は環太平洋火山帯に位置し、アメリカやインドネシアに続いて世界第三位の地熱ポテンシャルを有するとされており(村岡, 2011)、地熱エネルギーの更なる活用が期待されている。

地熱発電の代表的な発電方式であるフラッシュ方式では、地下の地熱貯留層から地熱流体を取り出し、タービンを回すことで発電が行われる。長期間にわたり持続的に発電を行うためには、地熱貯留層の圧力が維持されることが望ましいが、地熱流体となる水の供給に対して、地熱発電のために取り出される水の量が多い場合、貯留層の圧力が低下してしまう。そこで本研究では、地熱流体の循環の活発さを反映する定量的指標として、地熱流体の滞留時間に注目した。地下水学の分野では、様々な環境トレーサーを用いた滞留時間推定法が提案され、地下水の流動状態の把握に用いられている。しかし、環境トレーサーを用いた地熱流体の滞留時間推定法は確立されているとは言い難く、地熱流体の滞留時間に関する知見の蓄積も十分ではなかった。また、地熱流体は、地表から涵養される水だけでなく、熱源となる火山から供給される水や、堆積層の間隙水など、起源が異なる水の混合物であり、起源が異なる水はそれぞれ循環状態も異なるものと考えられた。そのため、地熱流体を構成する水の起源を踏まえ、起源の異なる水それぞれの滞留時間を推定する手法の構築が望まれた。

2. 研究の目的

地熱流体の滞留時間を推定することができれば、地熱流体の循環の活発さを反映した指標として地熱エネルギーの持続的利用に貢献するものと考えられた。そこで、地熱流体を対象に滞留時間の推定に利用可能な複数の環境トレーサーを含む多項目の分析を行い、地熱流体を構成する起源の異なる水の混合割合を求めた上で、それぞれの滞留時間を推定する手法を確立すること、本手法を適用することで地熱流体の滞留時間に関する知見を蓄積することを目的とした。

3. 研究の方法

研究対象地域は、インドネシア、ジャワ島西部のバンドン盆地周辺に位置する4箇所の地熱地域(Wayang Windu, Patuha, Tampomas, Tangkuban Perahu)とした(図1)。これら地熱地域の温泉、噴気、地熱生産井、湧水、河川などで、水温、pH、酸化還元電位、電気伝導度、溶存酸素濃度を測定するとともに、分析用水試料を採取した。主要溶存イオン濃度をイオンクロマトグラフで、アルカリ度を中和滴定で、微量元素濃度を誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)で、水の水素酸素同位体比をキャピティリングダウン分光法(CRDS)で、トリチウム濃度を液体シンチレーション計数法で、放射性炭素同位体(^{14}C)濃度、放射性塩素同位体比($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$)、放射性ヨウ素同位体比($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$)を加速器質量分析でそれぞれ分析した。分析により、多項目の濃度や同位体組成に関するデータが得られることから、多変量解析である主成分分析と独立成分分析を適用し、地熱流体を構成する起源の異なる水(端成分)の検出を試みるとともに、地熱流体の水質進化プロセスについて検討した。さらに、バンドン盆地周辺の深部には海成堆積層が分布していることから、海成堆積層の間隙に含まれる海水と、地表から浸透する天水、火山から供給されるマグマ水が混合していると仮定し、試料のハロゲン濃度に基づいて端成分それぞれの混合割合を算出した。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分析結果から天水とマグマ水の混合の影響を補正した上で、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ に基づく滞留時間推定を行うことで、海水起源の水の滞留時間を推定した。

4. 研究成果

- (1) 水の水素酸素同位体比の分析結果において、採取した水試料の多くは世界天水線の周辺にプロットされ、これらが天水起源であることが示された。また、一部試料は天水線から水素酸素同位体比が重くなる方向(δ ダイアグラムで右上の方向)に外れてプロットされており、これらの地点では火山から供給された水が混合しているか、高温での同位体分別の影響を受けているものと考えられた。また、バンドン盆地の北側に位置するTampomasおよびTangkuban Perahuに比べて、南側に位置するWayang WinduおよびPatuhaの地熱流体は軽い同位体比を示すことが明らかとなった。北側に対して南側の地熱地域は標高が高いことから、高度効果により天水の同位体比が軽く、地熱流体の水素酸素同位体比でも差異が生じたものと考えられた。
- (2) Tampomasの分析結果に主成分分析を適用したところ、地下深部から供給されていると考えられる溶存成分濃度の高い水と浅層から涵養した濃度の低い水の混合や、水-岩石反応の度合いなどに各主成分が対応するものと解釈された。また、独立成分分析でも主成分分析とほぼ同様の結果が得られた。計算に用いる項目を最適化することで、地熱流体の起源推定や水質進化プロセスに関するより有用な情報を抽出できる可能性があり、多変量解析の活用についてさらに検討を続ける。

(3) 水試料の Br 濃度と I 濃度に基づいて算出された、天水、海水、マグマ水の混合割合を図 2 に示す。ほとんどの試料で天水の混合割合が最も高く、94%以上であるが、一部海水の混合割合が高い地点も認められた。また、地熱地域に関わらず、海水とマグマ水が 3 : 1 で混合した水と天水との混合線周辺に分析結果がプロットされることが明らかとなった。推定された混合割合を踏まえて、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分析結果から天水とマグマ水の混合の影響を補正し、海水の滞留時間を推定した。Wayang Windu の安山岩の組成から計算された放射平衡値は $6.91 \sim 19.5 \times 10^{-15}$ であり、放射平衡値を 6.91×10^{-15} として計算した滞留時間は 58 万年～放射平衡 (150 万年以上)、放射平衡値を 15×10^{-15} とした場合には 17 万年～放射平衡となった。一部地点で ^{36}Cl は放射平衡に達しており、地熱流体に含まれる海水は基盤の海成堆積層から供給されたものであると考えられた。

参考文献

村岡洋文, 日本の地熱発電の現状と将来への期待, OHM, 98, 30-35, 2011.
 今村栄一・井内正直・坂東茂, 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価, 電力中央研究所報告, Y06, 2016.

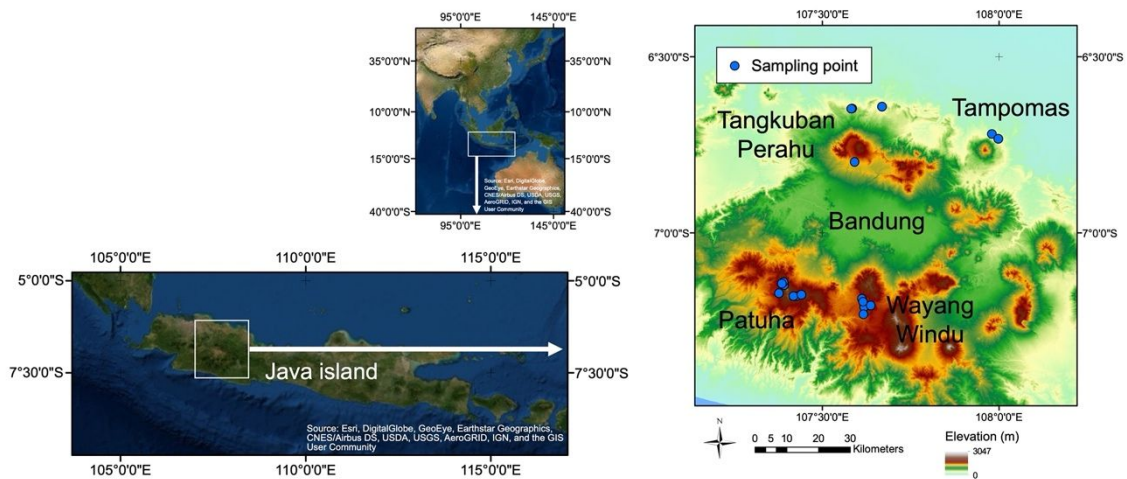


図 1 研究対象地域であるインドネシア、バンドン盆地周辺の地熱地域 (Wayang Windu, Patuha, Tampomas, Tangkuban Perahu) と試料採取地点

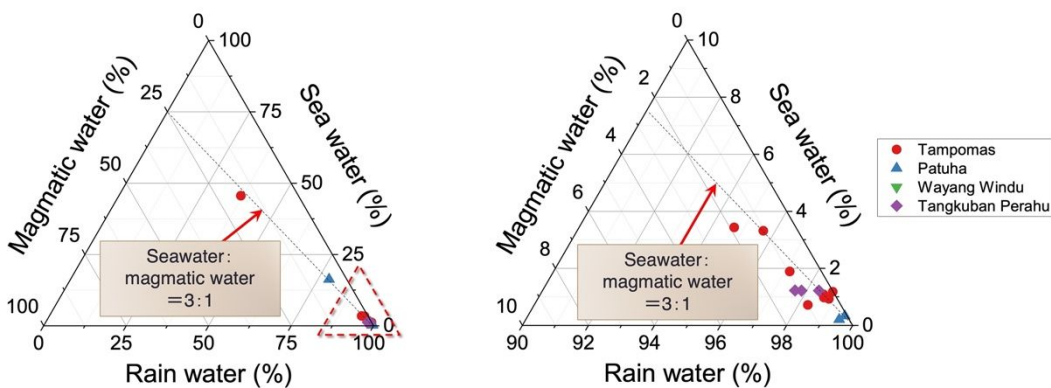


図 2 Br-イオン濃度と I 濃度の分析結果から算出された天水、海水、マグマ水それぞれの混合率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 柏谷公希, 山本駿, 川嶋芳明, Yudi Rahayudin, Riostantieka Shoedarto, 多田洋平, 小池克明 |
| 2. 発表標題 地球化学的指標と数値シミュレーションを活用した地下水および地熱流体の起源と循環状態の解明 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 柏谷公希, 犬飼郁也, Rahayudin Yudi, Shoedarto Riostantieka Mayandari, 多田洋平, 小池克明 |
| 2. 発表標題 インドネシア, バンドン盆地周辺の地熱地域で湧出する温泉水の放射性塩素同位体による滞留時間推定 |
| 3. 学会等名 日本地下水学会2021年秋季講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 犬飼郁也, 柏谷公希, Yudi Rahayudin, 多田洋平, 小池克明 |
| 2. 発表標題 インドネシアTampomas地熱地域における複数の放射性同位体を用いた地熱流体の起源と滞留時間の推定 |
| 3. 学会等名 日本地下水学会2020年秋季講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 犬飼 郁也, 柏谷 公希, ユディ ラハユディン, リオスターンティエカ マヤンダリ, 松崎 浩之, 小池 克明 |
| 2. 発表標題 バンドン盆地周辺の地熱地域における ^{3H} と ^{129I} を用いた地熱流体の起源と滞留時間の推定 |
| 3. 学会等名 資源・素材2019（京都） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 犬飼 郁也, 柏谷 公希, ユディ ラハユディン, リオスタンティエカ マヤンダリ, 松崎 浩之, 小池 克明 |
| 2. 発表標題 インドネシアTampomas地熱地域における129I/I比と微量元素を用いた地熱流体の起源と滞留時間の推定 |
| 3. 学会等名 資源・素材学会関西支部第16回若手研究者・学生のための研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加納 陸生, 柏谷 公希, ユディ ラハユディン, リオスターンティエカ マヤンダリ, 小池 克明 |
| 2. 発表標題 インドネシアPatuha地熱地域を対象とした主要溶存イオン濃度の主成分分析による地熱流体の起源推定 |
| 3. 学会等名 資源・素材学会関西支部第16回若手研究者・学生のための研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |