

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2005～2008年度
課題番号：17404024
研究課題名（和文）メラピーウンガラン火山システムの地熱系発達史解明と地熱資源量評価に関する研究
研究課題名（英文）Evolution of geothermal systems of Merapi-Ungaran volcanic chain and geothermal resource assessment
研究代表者 江原 幸雄（EHARA SACHIO） 九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10002346

研究成果の概要：

インドネシア・ジャワ島中央部にある、火山弧に直交する方向に直線的に並ぶ3つの火山、メラピ火山、メルバブ火山およびウンガラン火山において、地球物理学的、地球化学的、および地質学的調査を行い、活動年代、地下構造を解明するとともに、火山体内に発達する熱水系（熱と水の流れのシステム）をコンピュータを使って定量的に解明した。さらに、熱水系が十分発達しているウンガラン火山に関しては、地熱資源量評価を行い、地熱発電（電気出力：2～40MW）が可能な資源量が存在していることを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,900,000	0	3,900,000
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
総計	12,600,000	1,950,000	14,550,000

研究分野：地球熱システム学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：メラピ火山、メルバブ火山、ウンガラン火山、地熱系発達、熱水系、重力構造解析、地熱系モデリング、地熱資源量評価

1. 研究開始当初の背景

火山体内部の熱と水の流れ、すなわち地熱系あるいは熱水系は、火山活動の年代に伴って発達して行くと考えられるが、地学的背景が同様の一連の火山列で実証的に解明された例はなかった。そこで、活動年代が異なる火山が直線的に配列している、格好の研究対象地域である、インドネシア・メラピーウンガラン火山列を対象として、各種の現地調査

を実施し、活動年代、地下構造を明らかにし、それぞれの火山体に発達する熱水系を解明することにより、熱水系発達の一般的理論を構築することが要請されていた。これによって、熱水系発達理解の学術的基盤を与えるとともに、合理的な地熱資源探査、さらには地熱資源量評価を行う手法の確立が求められていた。

2. 研究の目的

同様の地学的背景にあり、かつ、活動年代の異なる火山列において、熱水系発達の様子を実証的に明らかにし、熱水系発達の一般的な理論を構築し、火山地域における地熱資源探査へ合理的基礎を与えるとともに、実際に、資源量評価を行い、地熱開発への展望を具体的に与えることを目的とした。

3. 研究の方法

調査・研究方法の概要

メラピーウングラン火山列を構成する3つの火山、メラピ火山、メルバブ火山、およびウングラン火山において、地球物理学的、地球化学的および地質学的調査を行うとともに、各種のデータを総合し、地熱系の概念モデルを作成し、さらには可能な場合には数値モデルを作成することとした。そして、それらの結果に基づいて、地熱系発達の一般的な理論の構築を試みることにした。さらに、十分に地熱系が発達している火山については、地熱資源量評価を行い、地熱発電開発の可能性を具体的に示すことにした。

4. 研究成果

(1) ウングラン火山における調査・研究

本火山においては、地熱系が十分発達していることが予測され、最も詳細な調査が全研究期間にわたって行われた。まず、火山体の各所で火山岩の採取が行われ、古期（今から50万年前）および新期（今から30万年前以新）の活動に分かれ、古期カルデラ内に新期活動が発生したことを明らかにした。そして、現在見られる地熱活動は、新期活動に伴って形成されたカルデラ内に発達していることが明らかになった。

山腹に発達しているゲドンソング噴気地域および多くの温泉地域において、地球物理学的（地震観測・自然電位観測・放熱量観測）および地球化学的調査（土壌ガス調査・泉質分析）を行った。その結果、火山体中心部の浅部（地下500m以浅）において、微小な群発地震が多発し、地震活動が極めて活発であることが明らかにされた。

また、火山体地表の多くの地点で自然電位分布の測定を行い、火山体中心部において、熱水が上昇し、それが側方に流動していることが明らかにされた。

さらに、噴気地域については、赤外線を使用して地表温度分布をもとめ、放熱量を評価した。また、既存の温泉データから、温泉放熱量も評価し、それらを総合し、本地熱地域全体から放出される自然放熱量を評価した。

そして、すべての観測結果を総合し、以下のような地熱系概念モデルを作成した。すなわち、カルデラ内の地下数km深には未だ高温のマグマが存在している。そのマグマの熱

によって加熱された、火山体深部に浸透した雨水が火山体中心部を上昇し、地下500m深程度に達したところで、火山地形に沿うように側方に流動し、一部がゲドンソング噴気地域に流出するとともに、大部分の熱水はさらに火山山麓深部を流動しているというものである。さらに、このような概念モデルに基づいて、コンピュータを使い、数値モデルを作成した。これによって、火山体内部の温度分布あるいは熱水の流動が定量的に明らかにされた。そして、これらの温度分布および岩石物性に基づいて、地熱資源量評価を行った結果、2～40MWの地熱発電が可能であることが示された。

(2) メラピ火山における調査・研究

現地調査は2度行ったが、火口の噴気地域の調査（地表温度分布・放熱量調査）は、ドームが形成中で、登山調査が危険なため、遠隔地点からの赤外線によるドームの高温部の把握を行った。

一方、山麓およびドーム直下地域までの登山道に沿って、浅層地温調査および土壌CO₂ガス調査を行った。その結果、地表には噴気・温泉などの地熱徴候は見られないが、1800m以高において明瞭な浅層地温異常が存在することが明らかにされた。これに伴って、マグマから放出されるCO₂異常も予測され得たが、実際には検出されなかった。上昇する途中で、これは地下水に溶け込んでしまい、観測されなかったものと判断された。

これらの観測結果、われわれの震源決定結果、および、現地で行われている地球物理学調査を総合して地熱系概念モデルを作成した。その結果、過去1000年以上にわたり継続的に存在する火道マグマが熱源となり、周囲を加熱し、火山体中心部からは高温火山ガスが放出されるが、マグマの熱によって加熱された組織的な熱水の上昇流とそれに続く側方流動は形成されていないものと推定された。

そして、このような概念モデルに基づいて、コンピュータによる数値モデルの作成を行った。その結果、細い火道は1000℃前後の高温を維持しているが、数100℃を超える高温部分は火道の周辺に限られた。そして、この高温部分では地震は発生せず、延性領域と推定されたが、実際の震源分布と良く一致している。また、熱水の側方流動は発生せず、高温火山ガスの火山体中心部での上昇のみが可能となったが、これは1800mより高地部で観測された地温異常をよく説明できることが示された。

以上のように、メラピ火山では高温の熱源が火山体浅部にまで存在しているが、まだ、活動期間が十分長くはなく、火山体全体が暖められての熱水の組織的上昇とそれに続く

側方流動は生じていないと判断された。

(3) メルバブ火山における調査・研究

メルバブ火山ではまず地質調査が行われたが、火山活動の年代はウンガラン火山とメラピ火山の中間に位置すると判断された。熱水変質帯は火山体中心部に存在するが、地熱徴候は見られなかった。山麓から山頂に向かい、浅層地温調査及び土壌CO₂ガス調査を行った。地温分布は1800m以高で、メラピ火山ほど明確ではなかったが、高温異常が見出された。土壌CO₂ガスは1800m程度までは標高とともに上昇する傾向が見られたが、1800m以高では標高とともに低下し、メラピ火山と同様な結果となった。

一方、山麓および山頂近くに地震計を設置し、地震観測を行ったが、火山体内に微小地震が発生していることは確認されたが、1日1個以下の非常に低い活動状態であることが明らかにされた。

以上のことを総合化し、地熱系の概念モデルを作成した。その結果、火山体中心部に熱水の上昇は存在すると推定されるが、それはまだ大規模なものとなっていないことが推定された。有史以後、噴火の記録が存在し、高温のマグマの存在が推定される。しかしながら、地表地熱徴候がほとんど見られないこと及び、火山体内部での非常に低い地震活動等を考慮すると、メルバブ火山ではまだ十分熱水系が発達していないのではないかと推定された。

(4) 総合的検討結果

火山活動の年代から見ると、古い年代から、ウンガラン火山、メルバブ火山、そして、メラピ火山となる。ウンガラン火山の新期火山活動は今から30万年前以降であり、火山体内部の熱水系が十分発達していると考えられる。すなわち、地下深部からの組織的な熱水の上昇と側方流動の発達が見られる。

一方、現在、ドーム形成中の若い火山メラピ火山では、火山体中心部に存在する火道中心部付近には確かに高温部が存在しているが、火山体が長期間熱せられることによる組織的な熱水の上昇は発生していないと判断された。

さらに、メルバブ火山では、現在地表地熱徴候は見られないが、有史以後噴火活動がみられる比較的若い火山である。変質帯が火山体中心部に存在しており、過去における火山体中心部での噴気活動の存在が認められるが、現在は、組織的な熱水の上昇があったとしても弱いものであり、まだ、熱水系が十分発達していないのではないかと判断される。

以上のことから、メラピーウンガラン火山列から見られる、異なる段階における熱水系発達に基づいて、火山における熱水系発達に

関しては以下のようなことが推論される。

ドーム形成あるいは頻繁な噴火活動をするような火山では、火山体中心部に数100℃以上の高温部が存在し、火山体中心部地表には高温噴気地域が存在するが、熱源の持続時間が短かければ、火山体内部に組織的な熱水上昇および側方流動は発生せず、従って、熱水系が十分に発達しているとは言えず、現在行われているような地熱発電としての利用は困難である。

一方、熱源が一定以上の長期間継続する場合（ウンガラン火山の場合は30万年程度。数値モデルによる検討では一般に数万年程度以上。もちろん、余り長い場合、たとえば100万年程度以上では熱源は冷えてしまい、熱水系の活動も停止してしまうことになる。）、火山体内部が十分に加熱され、その結果、火山体中心部の深部に組織的な熱水の上昇流が発達し、さらに、火山体に沿う側方流動が発生するものと考えられる。

地熱発電に利用される熱水は、組織的上昇流あるいは側方流動領域の2つの領域のものが想定されるが、一般的には、地形の急峻さから、火山体中心部の組織的上昇流部分ではなく、火山山麓深部に発達する側方流動部分になると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

(1) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Saibi, H., and Aboud, E. (2009) The gravity anomaly of Ungaran volcano, Indonesia : Analysis and interpretation, Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan, 査読有, Vol.31, No.2. 掲載決定済.

(2) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y. and Saibi, H. (2009) Assessment of geothermal potential at Ungaran volcano, Indonesia deduced from numerical analysis, Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, USA, 査読有, SGP-TR-187, 94-98.

(3) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuoka, K. and Saibi, H. (2008) Integrated geophysical surveys of Ungaran volcano : Understanding the hydrothermal system, The 2nd International Workshop and Conference on Earth Resource Technology : Stepping towards Sustainable Mining, Metallurgical and Petroleum

Technology Development, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 査読無, 14-19.

(4) Saibi, H., Setyawan, A., Aboud E., Barianto, D., Nishijima, J. and Ehara, S., (2008) Relationship between the locations of hot springs and the deduced subsurface structure from gravity data analysis in Ungaran volcano, Indonesia, Proceedings of 30th New Zealand Geothermal Workshop 2008, 査読有, 167-173.

(5) Setyawan, A., Ehara, S., and Fujimitsu, Y., (2008) Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2008, 査読有, 695-702.

(6) Udi, Harmoko, Fujimitsu, Y. and Ehara, S., (2007) Shallow ground temperature anomaly and thermal structure of Merapi volcano, Central Java, Indonesia, Jour. Geotherm. Res., Soc. Japan, 査読有, Vol.29, No.1, 25-37.

(7) Setyawan, A., Ehara, S., Nishijima, J., Saibi, H. and Wahyudi (2007) Proceedings of International Workshop on Earth Resources Technology 2007, 査読有, 41-45.

(8) Fujimitsu, Y., Setyawan, A., Fukuoka, K., Nishijima, J., Ehara, S. and Saibi, H. (2007) Geophysical investigations of Ungaran volcano, central Java, Indonesia, Proceedings of 29th New Zealand Geothermal Workshop 2007, 査読有, CD-ROM.

(9) Setyawan, A., Nishijima, J., Saibi, H., Aboud, E. and Ehara, S. (2007) Proceedings of 5th International Symposium on Earth Science and Technology, 査読有, 131-138.

[学会発表] (計14件)

(1) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., and Saibi, H. (2009) Assessment of geothermal potential at Ungaran volcano, Indonesia deduced from numerical analysis, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, USA, Feb.9-11, 2009.

(2) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuoka, K. and Saibi, H., The 2nd International Workshop and Conference on Earth Resource Technology : Stepping towards Sustainable Mining,

Metallurgical and Petroleum Technology Development, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, April, 2008.

(3) 江原幸雄、藤光康宏、福岡晃一郎、蘭幸太郎、火山の熱水系と浅層地温・浅層土壌ガス、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月、幕張。

(4) 蘭幸太郎、江原幸雄、藤光康宏、西島潤、福岡晃一郎、Setyawan A., Udi, H., 山城理恵、糸井龍一、齋藤政城、九重火山における土壌二酸化炭素濃度測定及びインドネシア、メラピ・メルバブ・ウンガラン火山との比較、日本地熱学会平成 20 年学術講演会、2008 年 10 月、金沢。

(5) Setyawan, A., Ehara, S., and Fujimitsu, Y., Numerical model of hydrothermal system at Ungaran volcano, central Java, Indonesia, December, 2008, Fukuoka, Japan.

(6) Setyawan, A., Ehara, S., Nishijima, J., Saibi, H. and Wahyudi, Gravity study of Ungaran volcano, central Java, Indonesia, International Workshop on Earth Resources Technology, April, 2007, Fukuoka, Japan.

(7) 藤光康宏、福岡晃一郎、江原幸雄、西島潤、インドネシア・ジャワ島中部ウンガラン火山熱水系の地球物理学的調査、日本地球惑星科学連合 2007 年合同大会、2007 年 5 月、幕張。

(8) Fujimitsu, Y., Setyawan, A., Fukuoka, K., Nishijima, J., Ehara, S. and Saibi, H., Geophysical investigations of Ungaran volcano, central Java, Indonesia, 29th New Zealand Geothermal Workshop, November, 2007, Taupo, New Zealand.

(9) Setyawan, A., Saibi, H., Nishijima, J., Aboud E. and Ehara, S., Processing and interpretation of gravity data for Ungaran volcano, central Java, Indonesia, 日本地熱学会平成 19 年学術講演会、2007 年 11 月、東京。

(10) Setyawan, A., Nishijima, J., Saibi, H., Aboud, E. and Ehara, S., Structure of Ungaran volcano from gravity data, 5th International Symposium on Earth Science and Technology, December, 2007, Fukuoka, Japan.

(11) Setyawan, A., Nishijima, J., Fukuoka,

K., Fujimitsu, Y. and Ehara, S., Subsurface structure imaging of Ungaran volcano, Indonesia based on geophysical surveys, 日本地熱学会平成18年日本学術講演会、2006年11月、福島。

(12) Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuoka, K., and Wahyudi, 4th International Workshop on Earth Science and Technology, December 2006, Fukuoka, Japan.

(13) 福岡晃一郎、江原幸雄、藤光康宏、西島潤、Udi Harmoko、インドネシア中央ジャワ・ウンガラン地熱地域の地球物理学的調査(その2)、日本地熱学会平成17年学術講演会、2005年11月、東京。

(14) Udi Harmoko, Ehara, S. Fujimitsu, Y., The hydrothermal study of Merapi volcano, central Java, Indonesia, 3rd International Workshop on Earth Science and Technology, December 2005, Fukuoka, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江原 幸雄 (EHARA SACHIO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 10002346

(2) 研究分担者

糸井 龍一 (ITOI RYUICHI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 50108768

(3) 研究分担者

藤光 康宏 (FUJIMITSU YASUHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10264095

(4) 研究分担者

今井 亮 (IMAI AKIRA)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 90223304

(5) 研究分担者

西島 潤 (NISHIJIMA JUN)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 40315114

(6) 研究協力者

UDI HARMOKO
九州大学・大学院工学府・大学院生

(7) 研究協力者

AGUS SETYAWAN

九州大学・大学院工学府・大学院生

(8) 研究協力者

蘭 幸太郎 (ARARAGI KOHTARO)
九州大学・大学院工学府・大学院生

(9) 研究協力者

永瀬大祐 (NAGASE DAISUKE)
九州大学・大学院工学府・大学院生

(10) 研究協力者

WAHYUDI
インドネシア・ガジャマダ大学・理学部・講師