

氏 名	おお うえ かず とし 大 上 和 敏
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2135 号
学位授与の日付	平 成 12 年 1 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	Evolution of an Hydrothermal System : Study of the Chinoike-Jigoku Hot Pool, Beppu Geothermal Field (熱水系の変遷に関する研究——別府血の池地獄における研究——)

論文調査委員 (主 査)  
教 授 由 佐 悠 紀 教 授 巽 好 幸 教 授 竹 本 修 三

### 論 文 内 容 の 要 旨

大分県の別府温泉には、「血の池地獄」と呼ばれる、高温の強酸性水が湧きだす池が存在し、池底には赤色の沈殿物が堆積している。本論文では、血の池地獄沈殿物の色・鉱物組成・化学組成の時間変化とその機構を調べ、得られた結果に基づいて、地獄周辺の地下に形成されている熱水系の変遷を論じた。論文は、3部から成る。

第1部では、強酸性熱水に適用可能な地化学温度計（水と鉱物間の化学平衡理論に立脚して、地表に湧出する温泉水の化学組成から地下での温度を推定する方法）として、硬石膏地化学温度計が有効なことを明らかにした。まず、文献検索と野外調査により、強酸性水と平衡可能な鉱物として硬石膏を抽出した。これを検証するため、実際の強酸性温泉水（pH 約 2）を、オートクレーブを用いて加熱昇温し、高温で硬石膏が析出することを確認した。他方、共同研究者が作成していた溶液化学平衡計算コードを硬石膏用に改変して、硬石膏と熱水（92℃, pH 0.89）が共存する高温泥池水の硬石膏平衡温度を算出し、測定温度とはほぼ同温度であることを認めた。さらに、別府地域の強酸性温泉水（59.1℃, pH 1.7）を120℃から20℃刻みで200℃まで昇温させ、各温度で硬石膏が析出した後の残液のCa濃度を解析し、この酸性水の硬石膏飽和温度が約110℃であることを見出した。この温度は、先の化学平衡計算コード（硬石膏地化学温度計）による値と良く合致している。

第2部では、血の池地獄の赤色沈殿物の色・鉱物組成・化学組成の時間変化を調べ、沈殿物の生成機構および変化の原因を、この地域の熱水系と関連づけて考察した。

申請者らは、1990年、95年および96年に採取された沈殿物の色を色彩色差計を用いて測定し、後2者が前者より黄色化していることを明らかにした。また、同試料の鉱物組成をX線回折法で調べ、赤色鉱物は赤鉄鉱であることを再確認し、黄色鉱物は鉄明礬石であることを明らかにした。さらに、沈殿物の化学分析を行って、近年の黄色化は鉄明礬石の増加によることを突き止めた。

他方、申請者らは、血の池地獄および周辺地域に分布する温泉水の化学組成を調査し、血の池地獄の温泉水は、高温のNa-Cl型熱水とそれより低温のH-SO<sub>4</sub>型熱水（鉄分を含有する）の混合によって形成されていること、また、両熱水の混合によって血の池地獄の沈殿物が生じる得ることを示した。さらに、過去約25年間にわたって得られた血の池地獄温泉水の化学組成を整理し、近年Na-Cl型熱水の混合割合が低下したこと、また、第1部の硬石膏地化学温度計を用いて、地下熱水温度が200℃から150℃まで低下したことを見出した。ついで、申請者は赤鉄鉱と鉄明礬石の安定性に関する加熱実験を行い、高温では赤鉄鉱が、低温では鉄明礬石が安定であり、そのため、鉄明礬石と赤鉄鉱の存在比率が温度に依存して変化することを明らかにした。

以上より、血の池地獄一帯の熱水系では、高温Na-Cl型熱水の混合割合が低下したことにより熱水温度が低下し、これと連動して沈殿物の組成変化と黄色化が進行したと結論した。

第3部では、第2部で得られた結果に基づき、血の池地獄を涵養する熱水系の変遷過程を解析した。まず、池底から採取

した長さ約 40 cm の不攪乱柱状試料を 1 cm 間隔で切り分け、各部分の鉱物組成・化学組成を分析し、鉄明礬石と赤鉄鉱の含有率の鉛直分布を求めた。他方、湖沼堆積物などの堆積速度の推定に用いられている<sup>210</sup>Pb法を応用して、各深さでの堆積年代を求めた。両者を組み合わせて得られる鉄明礬石と赤鉄鉱の含有率の時間変化より、過去約 130 年間における熱水系の変化が、つぎのように解読された。(1) 1850 年頃、熱水系は高温 Na-Cl 型熱水を主体とし、その温度は 250 ~ 300°C であった。(2) 1850 年 ~ 1950 年の間は、H-SO<sub>4</sub> 型熱水の割合が徐々に増加したが、高温状態が保たれていた。(3) 1950 年 ~ 70 年の間に、H-SO<sub>4</sub> 型熱水の割合がさらに増し、熱水系の温度が幾分か低下した。(4) 1970 年以降、H-SO<sub>4</sub> 型熱水の割合が著しく増大し、熱水温度が急激に低下した。

### 論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は、別府温泉にある強酸性水の高温湯池「血の池地獄」の赤色沈殿物の鉱物および化学組成の時間変化を手掛かりにして、地獄周辺の地下に形成されている熱水系の変遷を論じたものである。

熱水系の研究では、地下の熱水温度を知ることが不可欠であるが、それを実測することは容易ではない。たとえ掘削井で測定されたとしても、その温度がもともとの熱水の温度であるという保証はない。そのため、熱水と鉱物の間に化学平衡が成り立っていると仮定して、採取される熱水の化学組成から平衡温度を求める方法(地化学温度計という)が考案されている。しかし、従来の温度計は中性に近い熱水を対象としており、「血の池地獄」には適用できない。そこで、申請者は共同研究者との協力のもと、論文の第 1 部において、強酸性熱水に適用可能な地化学温度計の構築を試み、硬石膏を用いた温度計が有効なことを明らかにしている。強酸性水と平衡になり得る鉱物として硬石膏を見だし、オートクレーブを用いた水-鉱物相互作用の加熱実験によって、その妥当性を検証するに至る道筋は、実験の一部に改良すべき点を残してはいるものの、合理的である。なお、加熱実験は、申請者がほとんど独力で行ったものであり、その実験技術は高い水準に達していると言える。構築された硬石膏地化学温度計(内容は化学平衡計算コード)は、今後の酸性熱水の研究に貢献するものと期待される。

「血の池地獄」は、その赤色沈殿物の特異性ゆえに研究者の注目を引き、過去にもその鉱物および化学組成が分析され、赤色の原因は赤鉄鉱によることが明らかにされていた。また、池に湧出する酸性水の組成が経年的に変化していること、さらには、沈殿物の色にも変化の見られることが指摘されていた。本申請論文の中核をなす第 2 部では、それらの研究や観察の結果を総合し、新たな調査も行って、沈殿物の生成機構と変化の原因を、この地域の熱水系の形成機構と変遷に関連づけて研究している。

まず、視覚による定性的な色の変化を、色彩色差計を用いた測定によって定量化したことは、新しい試みである。これにより、近年の沈殿物の黄色化が明かにされたが、申請者らは鉱物組成・化学組成の分析も行って、黄色化の原因が鉄明礬石の出現によることを突き止めている。一方で、申請者らは、「血の池地獄」の熱水は、高温の Na-Cl 型熱水とそれより低温の H-SO<sub>4</sub> 型熱水(鉄分を含有する)の混合によって形成されていること、両熱水の混合によって血の池地獄の沈殿物が生じる得ることを示すとともに、近年 Na-Cl 型熱水の混合割合が低下し、地下熱水温度が 200°C から 150°C まで低下したことを見出ししている。この温度低下の解析には、第 1 部で確立した硬石膏地化学温度計が用いられている。以上の解析結果を踏まえて、申請者は、赤鉄鉱-鉄明礬石-熱水系の加熱実験を行い、高温では赤鉄鉱の存在比率が、低温では鉄明礬石の存在比率が、それぞれ大きくなることを初めて明らかにした。こうした一連の解析と実験に基づき、申請者は、血の池地獄一帯の熱水系では、高温 Na-Cl 型熱水の混合割合が低下したことにより熱水温度が低下し、これと連動して沈殿物の組成変化と黄色化が進行したという興味深い結論に到達している。

第 3 部は、「血の池地獄」の池底から採取した長さ約 40 cm の堆積物柱状試料に対して、先に求められた解析手法を適用したものであり、約 130 年前から現在に至る熱水系の変遷過程を解読した結果が述べられている。基礎となったデータは、鉄明礬石と赤鉄鉱の含有率の鉛直分布、および、大気から降下してくる<sup>210</sup>Pbの放射壊変から推定された各深度における堆積年代である。年の経過とともに H-SO<sub>4</sub> 型熱水の混合割合が増大してきたこと、また、その増大の度合いには 4 つのステージがあったことが述べられている。とくに、1970 年以降の H-SO<sub>4</sub> 型熱水の増大は著しく、熱水温度が急激に低下することが指摘されている。この原因については、今後の研究に期待したい。

地殻表層における熱現象の重要な部分に関与する熱水系の特性については、これまで多面にわたる研究がなされ、熱水の

生成・流動・循環過程への理解が進んでいる。しかし、その変遷過程に関しては、熱水変質鉱物の年代や流体包有物均質化温度の測定などが行われている程度で、研究例はわずかしかない。そのため、具体的な研究手法も乏しく、このことが、熱水系の総合的理解の深化を妨げていた。本研究が対象としたのはローカルな現象であるが、研究の準備段階に相当する第1部から第2部・第3部の結論にいたるまでの道程、すなわち、野外データの収集・室内実験・解析・議論は論理的で一般性があり、熱水系の変遷過程の研究に新たな視点・方法を提供したものと評価できる。よって、申請者が提出した論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

調査委員会は、平成11年9月16日に、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。