

京都大学	博士 (工学)	氏名	富田 アルバート昇平
論文題目	数値シミュレーションによる陸域・海域熱水鉱床の鉱化帯形成プロセスの解明に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、陸域および海域熱水鉱床の鉱化帯形成プロセスに関して、熱水流動シミュレーションおよび反応-輸送シミュレーションにより、熱水の物理的挙動(温度・圧力・相状態・流体流動)および化学的挙動(熱水の pH, 化学組成および鉱物の溶解・沈殿)の観点から論じたものである。</p> <p>今後さらなる金属資源の需要が見込まれている一方で、新規鉱床の発見は困難な状況となっていることから、金属鉱床の成因に関する理解の深化がますます重要となっている。既往研究では、主に陸域鉱床の地質学的な観察に基づいて成因研究が進められてきたが、それらの鉱床は過去に形成されたものであるため、鉱床形成に重要な役割を果たす熱水環境は既に失われており、その挙動は岩石に残された痕跡に基づいて推定されているなどの問題がある。それゆえ、鉱床の生成を引き起こす具体的な物理条件(熱水の温度、圧力、流体流動)や化学条件(熱水の化学組成や pH など)は明らかになっていない。</p> <p>熱水鉱床の形成プロセスを理解するためには、熱の流れ、流体の流れ、化学反応などの熱水に関する複数のプロセスの相互作用を把握することが不可欠である。しかしながら、これらのプロセスは非常に長期間(数万年程度)かつ広範囲(数 km 程度)にわたるため、正確に熱水の物理的・化学的挙動を観測することは不可能である。そのため、数値シミュレーションを用いて熱水の挙動を時間・空間的、かつ定量的に再現することが有効である。</p> <p>そこで、本研究では熱水鉱床の鉱化帯形成プロセスの解明のため、陸域・海域熱水鉱床を対象に熱水流動シミュレーションと反応-輸送シミュレーションを適用し、熱水挙動の観点から鉱化帯形成プロセスに関して新たな知見・解釈を加えることを図った。</p> <p>本論文は7章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。</p> <p>第1章は緒論であり、本研究の背景と目的、本研究に関連する従来の研究成果、および本研究の概要を示した。</p> <p>第2章は手法の説明であり、本研究で用いた熱水流動シミュレーションおよび反応-輸送シミュレーションの概要と基礎理論について述べた。</p> <p>第3章では、陸域浅熱水鉱床である細倉鉱床を対象に、地質モデリングと熱水流動シミュレーションを組み合わせ、鉱化帯形成プロセスの変化について検討を行った。その結果、熱水変質作用の進行に伴う浸透率・間隙率・熱伝導率の低下に伴って、前期鉱化期から中期鉱化期にかけて熱水の温度が上昇し、やがて沸騰が生じて高品位な鉱石が沈殿することが明らかとなった。</p> <p>第4章では、背弧海盆に位置する沖縄トラフ伊平屋北海丘および伊是名海穴熱水域を対象に、鉱床形成時の物理的条件と鉱化帯形成プロセスを明らかにすることを目的として、熱水流動シミュレーションを実施した。解析の結果、海底下の流体流動は、キャップ層および熱水パスである Conduit の存在によって支配されていることが明らかとなった。キャップ層の有無を変化させた感度分析では、キャップ層が未形成の場合、</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	富田 アルバート昇平
<p>ほとんどの熱水は海底面から噴出した一方で、キャップ層が形成された場合、沸騰および熱水の側方流動が発生することが示された。解析結果と現地観測を統合することにより、海底熱水鉱床の鉱化帯形成プロセスを二段階に分けて提案した。前期では、熱水はブラックスモーカーとして噴出し、海水と混合することにより、海底面上に硫化鉱物が堆積した。後期では、時間の経過とともにキャップ層が形成され、それに起因して熱水の温度が上昇し沸騰が生じた。気相に富む熱水は熱水噴出孔からホワイトスモーカーとして噴出する一方で、液相に富む金属に富んだ熱水はキャップ層下部を側方流動し、主に沸騰に起因して海底下の鉱化帯を形成した。このような海底面上・海底下の鉱化帯の存在は、伊平屋北海丘での電気比抵抗トモグラフィーの結果とも整合的であった。</p> <p>第5章・第6章では、鉱床形成時の熱水の化学的挙動を明らかにするため、沖縄トラフ伊是名海穴を対象として反応-輸送シミュレーションを適用した。第5章では、第6章で必要となる深部熱水の化学組成を推定することを目的に、海水が海底下を流下して高温熱水となる過程を模した次元反応-輸送シミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、水-岩石反応に伴って流体の化学組成が以下のように変化することが明らかとなった。概ね100℃以下の低温領域ではMgを含有するフィロケイ酸塩鉱物の多くが沈殿し、流体中のMg濃度が低下するとともにpHが低下した。85~200℃の領域では、温度上昇に起因して硬石膏が沈殿し、CaとSO₄²⁻が岩石中に固定された。また、100℃以上の温度領域になると、緑簾石が沈殿しはじめ、HS⁻が流体に添加された。高温になるにつれて流体のpHが低下したことにより、Fe、K、Znを含有する鉱物が徐々に溶解し、流体中のそれらの濃度が上昇した。さらに、各種鉱物の溶解・沈殿によってpHがコントロールされていることが示された。</p> <p>第6章では、第5章で得られた深部熱水の化学組成を用いて、沸騰に伴うpHや熱水の化学組成変化、および鉱化帯形成に対する影響を詳細に検討することを目的に、伊是名海穴 Hakurei サイトを対象として、熱水が深部から海底面に向かって上昇し、噴出する過程を模した次元数値モデルを構築し、反応-輸送シミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、熱水の上昇に伴って圧力が低下し、海底面付近で沸騰が生じること、および沸騰に伴って二酸化炭素の脱ガスが生じ、それに付随してpHが上昇することが示された。また、pHの上昇に起因して、沸騰領域で硫化鉱物が急激に沈殿することを明らかにできた。これらの硫化鉱物の沈殿量は、海底掘削で確認された沈殿量と整合的であった。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果を総括している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

世界的な人口増加や経済発展，および低炭素化技術の加速度的普及などから金属資源の需要はますます増加している。金属資源の多くは熱水鉱床から産出される。よって，新規鉱床の効率的かつ高い成功確率での発見のため，熱水鉱床の形成要因や発達過程の深い理解が求められている。そのためには流体と熱の流れ，周辺岩石との化学反応，鉱物沈澱など，熱水に関する複数の物理・化学の相互作用を把握して鉱化帯形成プロセスを定量的に明らかにすることが不可欠である。しかし，鉱床形成は超長期と広範囲にわたり，熱水の物理・化学や流動形態も複雑なために，これまでは限られた地質情報に基づく定性的な解釈にとどまっている。そこで本研究では陸・海の両域を対象とし，数値シミュレーションにより熱水鉱床の鉱化帯形成プロセスの解明を試みた。これは，数値シミュレーションによる初めての資源地質学的研究であり，主な成果は次の4点に纏められる。

- 1) 陸域浅熱水鉱床の細倉鉱床を対象とした解析で，鉱化ステージは3つに分類され，前期では地下水との混合による熱水の冷却，中期では熱水変質に伴い鉱脈周辺の浸透率が大幅に低下したことによる熱水の温度上昇と鉱脈内での沸騰，後期ではさらなる浸透率の低下に伴う鉱脈内部の熱水の圧力上昇，それによる岩石破砕，という異なるプロセスによって鉱化帯が形成されることを検証できた。
- 2) 沖縄トラフ伊平屋北海丘と伊是名海穴の海底熱水噴出域を対象にした解析で，鉱床形成時の熱水の温度・圧力条件を支配する因子は，低透水性のキャップ層の発達と高透水性の熱水通路の存在であることを特定できた。また，海底熱水鉱床は，①熱水が通路から海底に噴出し，海水との混合冷却による海底面上での硫化鉱物の初期鉱体形成，②それからキャップ層が発達し熱水の温度上昇で沸騰が生じ，金属に富んだ液相卓越の熱水がキャップ層下部を側方流動することによる海底下での鉱体形成，の2段階からなると解釈できた。
- 3) 反応-輸送シミュレーションにより，高温になるにつれて流体の pH 低下が生じ，これに伴い Fe, K, Zn を含有する鉱物が徐々に溶解し，流体中のそれらの濃度が上昇することなど，海底からの浸透海水が深部で熱水の化学組成に変わる過程を明らかにできた。
- 4) 推定できた深部熱水の化学組成を用いて反応-輸送シミュレーションを行った結果，熱水が深部から海底に向かって上昇，噴出する過程において，熱水の沸騰に起因して H^+ が減少し，その結果，沸騰領域で硫化鉱物が大幅に沈澱することがわかった。その推定沈澱量は海底掘削孔で観測された沈澱量と整合的であり，本手法の妥当性を実証できた。

以上，本論文で検討され，種々改良を加えた数値シミュレーション法は陸域・海域における熱水鉱床の鉱化帯形成の解明に大いに貢献し，得られた知見は新規鉱床の探査と開発にも応用できるので，学術上，實際上，寄与するところが少なくない。よって，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また，令和5年

氏名	富田 アルバート昇平
----	------------

2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

