

# 数値シミュレーションによる低硫化系浅熱水性鉱床の 生成プロセス解明へのアプローチ

富田 昇平\*・小池 克明\*・高橋 洋\*\*・義山 弘男\*\*\*

## Numerical simulation approach to clarification of generation process of low-sulfidation epithermal deposits

Shohei Albert Tomita\*, Katsuaki Koike\*, Hiroshi Takahashi\*\* and Hiroo Yoshiyama\*\*\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,  
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.  
E-mail: tomita.shohei.57n@st.kyoto-u.ac.jp

\*\* 伊藤忠鉱物資源開発株式会社 ITOCHU Mineral Resources Development Corporation, 5-1,  
Kita-Aoyama 2-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0061, Japan.

\*\*\*西日本技術開発株式会社 West Japan Engineering Consultants, Inc., Denki-Bldg., Sunselco  
Annex 8F, 1-1, 1-Chome, Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0004, Japan.

キーワード: TOUGH2, 熱水変質, 鉱物沈殿, 冷却, 沸騰

Key words: TOUGH2, Hydrothermal alteration, Mineral deposition, Cooling, Boiling

### 1. はじめに

浅熱水性鉱床（エピサーマル鉱床）は斑岩銅鉱床などと同様に主要な金属源であるが、その詳細な生成メカニズムは十分に解明されていない。低硫化系浅熱水性鉱床の鉱物沈殿メカニズムとして、熱水の冷却、混合および沸騰などがあげられ、そのうち沸騰が最も重要な役割を果たすと考えられている（例えば、Simmons *et al.*, 2005; Clark and Gemmell, 2018）。これらの研究は、浅熱水性鉱床の生成が複数のプロセスによって引き起こされることを示唆しているが、それらの時間的・空間的な関係を明らかにした例はまだない。本研究では、これらを明らかにすることを目的に、低硫化系浅熱水性鉱脈型鉱床の典型例である宮城県細倉鉛・亜鉛鉱床を対象に、鉱床生成モデルを構築し、数値計算により検証を行った。

### 2. 鉱床生成モデル

Takahashi (2017) は、細倉鉱床の変質鉱物の定量的研究により、細倉鉱床の形成過程を次の3つのステージに区分した。前期では、鉱脈に沿って上昇した熱水が帯水層で低温地下水に冷却されることにより、鉱物が沈殿する。中期では、熱水変質作用によって鉱脈周辺の透水性が低下することで低温地下水の鉱脈への侵入が抑制され、その結果、鉱脈中の熱水温度が上昇して沸騰し、鉱物が沈殿する。後期では、熱水変質作用に伴うさらなる透水性の低下に起因して鉱脈内の圧力が上昇し、やがて鉱脈頂部で角礫化が生じ、その結果、再び流体圧力が低下することで沸騰が生じ、鉱物が沈殿する。このような浅部帯水層の低温地下水が関連して引き起こす一連の鉱物沈殿プロセスを「冷水トラップ」と称した。

### 3. 研究方法

冷水トラップのメカニズムを数値計算により検証する。解析には、ダルシー則と質量・エネルギー保存則を支配方程式とする気液二相流と熱の3次元流れの解析ソフト TOUGH2 を用いた。解析は前期、中期、後期に分けて行ったが、本要旨では紙面の都合上、前期と中期についてのみ説明する。

#### 3・1 前期の解析条件

数値モデルは細倉鉱床の主要鉱脈である富士脈を中心として、幅 542m、奥行 1km、鉛直方向 1200m とし、グリッド数は幅方向、奥行方向、鉛直方向にそれぞれ 9, 2, 10 区分とした（図 1）。また、境界の影響を小さくするために解析領域の四方に 10km の緩衝領域を設けた。岩石区分は地質層序や熱水変質帯分布などから推定される水理地質区分を基に設定した（表 1）。岩石の物性値は、形成年代および岩相が細倉鉱床の岩石と類似する地熱地域の岩石物性値（例えば、Kato *et al.*, 2006）を使用した。

初期条件として、変質鉱物の安定温度を基に初期温度を 20–130°C に設定し、地下水面を深度 350m に設定し、それ以上は静水圧を与え、表層は大気圧とした。境界条件として、側面を透水性境界、底面を不透水性境界とし、表層には 20°C の水を 400mm/年（日本の平均地下水涵養量）の割合で流入させた。鉱脈の底面からは 300°C の熱水を 3.6kg/s の割合で流入するように設定した（図 1）。

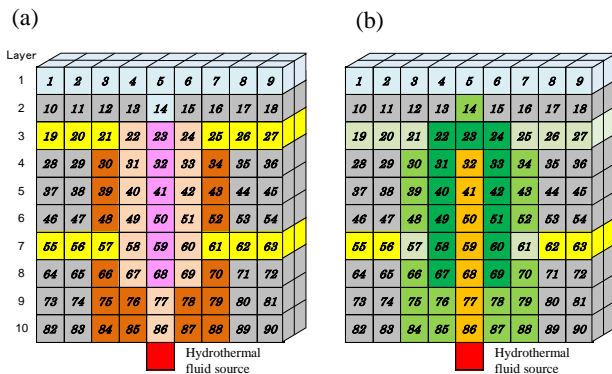
#### 3・2 中期の解析条件

中期では、前期の鉱化作用・熱水変質作用により岩石の空隙率と浸透率が低下したことに起因して、鉱脈 1 が鉱脈 2 に、透水層・断層破碎帯・断層角礫帯が低透水性

変質帯 (Low-Permeability Alteration Halo, LPAH) に変化したことを想定している (表 1)。岩石の物性値は前期と同様に類似の地熱地域における岩石物性値を参考に設定し、初期条件として前期の温度・圧力結果を与え、前期と同様の境界条件を設定した。ただし、中期における透水性の低下を考慮して、底面からの熱水の流入量を 2.6kg/s とした。

第1表 岩石区分と岩石物性値

Rock classification	Density (kg m <sup>-3</sup> )	Porosity	Permeability (m <sup>2</sup> )		Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Specific heat (J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
			horizontal	vertical		
Vein 1	2600	0.7	5.0E-13		3.0	1000
Fault-breccia zone	2600	0.2	1.0E-13		3.0	1000
Fault-damage zone	2600	0.1	2.0E-14		2.7	1000
Permeable layer	2600	0.2	1.0E-13	1.0E-15	3.0	1000
Semi-permeable layer	2600	0.2	8.0E-14		2.5	1000
Low-permeability layer	2600	0.1	2.0E-17		2.0	1000
Vein 2	2600	0.2	5.0E-13		2.0	1000
LPAH stalk 1	2600	0.1	2.0E-14		2.0	1000
LPAH stalk 2	2600	0.1	1.0E-14		2.5	1000
LPAH cap 1	2600	0.1	2.0E-14	1.0E-15	2.0	1000



第1図 (a) 前期および (b) 中期での地質モデル, 岩石区分, およびセル番号

## 4. シミュレーション結果と考察

### 4・1 前期鉱化作用

富士脈周辺の温度分布と熱水流動形態の推定結果を図2に示す。前期シミュレーションは地質観察から示唆された次の3点: (i) 低温地下水の流入による浅部での鉱脈内の熱水の温度低下 (図2a), (ii) 深度750–800mでの深部透水層から鉱脈への低温地下水の流入, (iii) 浅部帯水層における熱水の側方流動を再現している。計算による温度分布は熱水変質帯分布とそれらの形成温度から推定される温度分布と整合的である。圧力はほぼ静水圧状態であり、沸騰は生じていない。鉱脈内部の深部 (セル番号#68~#59) および浅部 (#32~#23) では顕著な温度減少, それらの中間のセル (#59~#32) では緩やかな温度低下が現れた。鉱石の品位分布と比較すると, 鉱脈内に緩やかな温度減少が生じた場所では, 珪化を伴って高品位の鉛・亜鉛が沈殿するのに対して, 温度減少が大きい浅部では珪化を伴わず低-中程度の品位の鉛・亜鉛が沈殿したと考えられる。

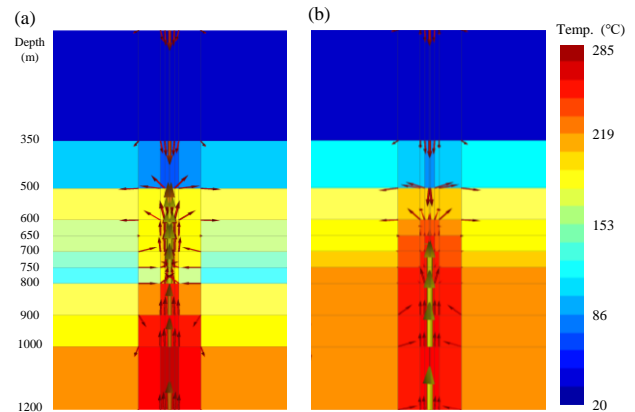
以上の結果から, 前期では熱水の冷却によって鉱化作用が生じたことが確かめられる。

### 4・2 中期鉱化作用

中期では, LPAHの形成に伴って, 熱水が鉱脈内により集

中して流れることが明らかになった (図2b)。鉱脈周辺の圧力は静水圧に比べて0.2 MPa程度上昇したものの, それ以外の場所ではほぼ静水圧であった。

また, LPAHの保温・遮水効果に起因して鉱脈およびその周辺で最大27°C温度が上昇し, その結果, 鉱脈内 (#32, #41, #50) において沸騰が生じ, 中期鉱化作用が生じたと解釈できる (図2b)。中期における沸騰は最も品位の高い鉱石サンプルの流体包有物分析からも確認されており, 沸騰の位置とそこでの温度はシミュレーションと整合的である。



第2図 (a) 前期, (b) 中期における温度分布・熱水流動形態。凡例は(a) と (b) で共通。

## 5. まとめ

細倉鉱床をケーススタディとして, 浅熱水性鉱床の形成プロセスを数値シミュレーションで復元し, 鉱物沈殿を誘発する冷却, 沸騰, および角礫化の3つのイベントからなる冷水トラップのメカニズムを検証した。その結果, 前期鉱化時には熱水は鉱脈を上昇し, 浅部帯水層の低温地下水と混合して冷却されたが, 中期鉱化時になると熱水変質の進行に伴って形成される低透水性変質帯の遮水・保温効果により鉱脈内で沸騰が生じた。これらの結果から, 冷水トラップは浸透率などの物性値の変化によって生じ, 鉱脈形成において重要な役割を果たしていることを明らかにできた。なお, 後期に関しては Takahashi *et al.* (2020) を引用されたい。

## 文献

- Clark, L.V., and J. Bruce Gemmel, J.B. (2018) Vein stratigraphy, mineralogy, and metal zonation of the Kencana low-sulfidation epithermal Au-Ag deposit, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, Indonesia. *Econ. Geol.*, vol.113, no.1, pp.209–236.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D. (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Econ. Geol.*, 100th Anniversary vol., pp.485–522.
- Kato, H., Ariki, K., Kudo, S., and Abe, Y. (2006) Reservoir modeling of the Appi geothermal field, geothermal development promotion survey (NEDO). *Geochemical Journal*, vol.28, pp.19–36.
- Takahashi, H. (2017) Cold-water traps in epithermal vein-type deposits (abs.). Abstracts with Programs, the Society of Resource Geology, vol.67, p.55.
- Takahashi, H., Tomita, S.A., Koike, K., and Yoshiyama, H. (2020) A Cold-Water Trap as an Essential Process for the Generation of Low-Sulfidation Epithermal Deposits: Geological and Numerical Studies of the Hosokura Deposit, Northern Japan (in press), *Ore Geology Reviews*.