

## ナノ計測と超長期地球環境予測

## Nano-scale metrology for extra long-term prediction of global environmental change

佐藤 久夫<sup>1\*</sup>

Hisao Satoh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 三菱マテリアル

<sup>1</sup> Mitsubishi Materials Corporation

地球環境変動とエネルギーの問題は、無視することのできない人類共通の課題である。その中で、原子力と化石燃料の利用は対局にあるものでありながら、廃棄物という共通の問題をはらんでいる。廃棄物の行き先である地下では、常に鉱物の溶解と成長が起き、その系で安定な平衡状態へと鉱物変質反応が進行する。放射性廃棄物処分と CCS (carbon capture and storage) 分野では、地下水と岩盤、セメント建造物、バリア材粘土との反応速度、地下水流動を元に、安全性の長期予測を行っているが、正確な速度データはまだ限られている。

超長期 (~ 10 万年) の地下環境を予測するためには、 $1E-5$  nm/s オーダーの高精度な速度測定を行えばよい。その期間では、岩石・鉱物は数 cm 以上変位して、地下水流動などを大きく変化させているはずである。AFM や干渉計はその緩慢現象を認識できるものであるが、現象を再現してその場測定するには干渉計の方が有効である。近年実施した、位相シフト顕微鏡干渉計による (1) 造岩鉱物の溶解速度測定、(2) 流れによる分子浸食と分散、(3) カルサイトの結晶成長速度測定を以下に紹介する。

斜長石は地殻内で普遍的に存在する鉱物であるが、溶解の素過程についてはまだ完全には理解されていない。多くの地下水系では、弱アルカリ環境で溶解が進行する。一般的な二次鉱物であるカルサイトや、Ca 沸石相の成長に寄与するため、地下環境予測には Ca 鉱物の溶解過程が非常に重要である。アノーサイトやホルンブレンドの溶解実験をアルカリ領域で行うと、溶解に伴うステップ後退速度、ステップ密度、pH 間の関係 [1] が推定でき、現実の系での溶解は界面でのステップ挙動が支配していることがわかる。また累帯構造をもつ斜長石の溶解では、固溶体間の溶解度の違いが強く反映された結果となり、組成不均質系の溶解は非常に複雑である。また溶解中で起きる沈殿相の出現も重要であり、ホルンブレンドのアルカリ溶解過程では、エッチピット近傍にコロイド状微粒子の凝集体が生成され、溶解の進行を阻害する [2]。オリビンの酸性溶解では、溶解界面に非晶質 Si-rich 相が形成され、現象を複雑にしている [3]。

天然系でコロイド化する鉱物は粘土である。粘土は膨潤と DLVO 斥力 [4] によってリフトアップし、流れがあれば分散していく。この速度をフラックス ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) として干渉計その場測定すると、地下水の流れ ( $\text{m}/\text{s}$ ) によって生じるコロイドの定常濃度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) がわかる。地下水流速が数  $100 \mu\text{m}/\text{s}$  まででは、スメクタイト結晶から浸食・生成できるコロイド濃度は  $10 \text{ ppb}$  程度であることが予測できた。

カルサイトの成長速度は CCS 分野では最も重要な情報である。地下深部の高温岩体への  $\text{CO}_2$  水注入による「ジオリアクター」反応では、炭素はカルサイトとして固定化される [5]。この速度は、貯留帯がどれくらいの期間、どれくらいの量の炭素を安定的に貯留できるかの判断材料となる。高温高压反応セルを用いたその場測定と、地下深部でその場反応できる、「結晶成長ゾンデ」 [6] を用いた野外実験を行った結果、カルサイトの成長速度は、実際のジオリアクター系では、与えられた過飽和において期待される速度と比べて抑制されたものであることがわかった。

このように、天然での鉱物の溶解・沈殿反応の速度は、常に遅くなる要素をはらんでいることがわかる。その原因の一つとして、天然系に常に存在する、重要だが、忘れられている不純物、「コロイド」を考える必要があるだろう。その場合、現象予測はもっと長期間まで可能となる。講演では、結晶成長に及ぼすコロイドの効果なども紹介し、新しい視点での鉱物変質研究を提案する予定である。

### 文献

[1] Satoh et al. (2007) Am. Min., 92, 503-509.

[2] Satoh et al. (in prep.)

[3] King et al. (2010) IMA 2010, Abstract, 840.

[4] 黒澤ほか (2006) 原子力学会誌, 5, 251-256.

[5] 上田ほか (2009) 岩石鉱物科学, 38, 220-231.

[6] 佐藤 (2011) 高圧力の科学と技術, 21 (in press).

キーワード: ナノ計測, 溶解速度, 成長速度, コロイド,  $\text{CO}_2$

Keywords: Nano-scale metrology, dissolution rate, growth rate, colloid,  $\text{CO}_2$