

界面エネルギーに駆動される岩石中の流体移動と物質輸送：石英 - 水系の浸透実験から

Interfacial energy-driven fluid migration and mass-transfer mechanism inferred from quartzite-water infiltration experiments

中村 美千彦[1]

Michihiko Nakamura[1]

[1] 東工大・理・地球惑星

[1] Earth Planet. Sci., Tokyo Inst. Tech.

<http://www.geo.titech.ac.jp>

石英岩 - 水系を用いたピストンシリンダー装置による高温高圧実験を行い、界面エネルギーに駆動される流体移動のカイネティクスを明らかにした。水の浸透は、porosity wave (高空隙率部分) の伝播によって進行する。浸透速度に定常拡散モデルをあてはめて計算した流体中のシリカ濃度勾配は、粒子の曲率勾配から計算した値と一致する。また流体の浸透によって促進される粒子成長の効果により、浸透流における岩石 - 流体間の物質輸送は、結晶内拡散よりも溶解 - 沈殿作用に支配されることがわかった。

水・マグマなどの流体は物質や熱を運搬して地球の温度構造や化学進化に大きな影響を与え、岩石の物理的性質を支配するので、多くの地球科学現象で中心的な役割を担っている。流体の及ぼすこれらの作用の効率は、流体の微視的な分布形態に支配される。二面角が約 60 度よりも小さい場合、流体は粒子の稜や角を濡らしてネットワークを形成するとともに、界面エネルギー最小化の要請から、流体に接するドライな岩石には流体が浸透する。このように結晶 - 結晶間と結晶 - 流体間の界面エネルギーのバランスは、流体のネットワークを欠く岩石中での流体の移動速度を決定するとともに、空隙率や浸透率を通じて、流体のネットワークが形成された後のダルシーの流れに間接的ながら大きく影響する。本講演では、石英岩 - 水系を用いた高温高圧実験を行い、界面エネルギーに駆動される流体移動のカイネティクスを明らかにするとともに、流体の浸透によって促進される粒子成長が持つ化学的な重要性を示す。実験はピストンシリンダー装置を用いて、石英岩の合成と流体浸透実験の 2 段階で行った。非晶質シリカ 細粒石英の混合粉末と Ni-Pt カプセルを用い、1GPa, 925 °C で無水の石英岩を合成し、一旦冷却回収した後、水溜との浸透対を作って 0.8GPa まで再加圧し、621-925 °C, 1-90 時間の実験を行った。界面エネルギーのみが浸透の駆動力になるよう、水溜には予め細粒の石英を入れ、昇温と共に速やかにシリカに飽和するようにした (99 年合同大会で発表済)。

今回新たに得られた実験産物の空隙率分布から、石英岩への流体の浸透に伴う流体分率 (空隙率) は浸透前線付近でも最も高く、後方 (早い段階で浸透した部分 / 水溜に近い部分) では低くなる“孤立波”の形状を示すことがわかった。これは、浸透によって粒子成長が促進され、先に浸透が起こった部分で粒子の曲率が低下することによる平衡流体量の変化に主に起因すると考えられる。高空隙率部分は、浸透が進むに連れて、孤立波が伝播するように前進していく。高空隙率部分の幅 (波長に相当) はほぼ一定で、一端溶解した石英が再沈殿するまでに運搬される距離は実験時間内ではあまり増加しない。これは、浸透距離がおおよそ時間に比例して増加することをうまく説明する。高空隙率部分の定常拡散モデルに基づき、流体中のシリカ成分の拡散係数と、実験によって得られた空隙率・浸透速度を用いると、界面エネルギー差による微小な圧力勾配に起因するシリカの濃度勾配が計算できるが、これは浸透前後での空隙の曲率差から計算した値とほぼ調和的な値を示す。この一致は、粒子サイズ・界面エネルギー値・流体中の溶質の拡散速度・粒子成長速度などの基礎データが得られれば、他の岩石 - 流体系でも、定常拡散モデルが適用できる空間スケール内で流体の浸透速度が予想できる可能性を示している (Nakamura & Watson, 投稿中)。

本実験では、流体の浸透により粒子成長が著しく促進されることが見出されたが、その際 (出発物質に起因する) 石英岩中の微量成分の不均質が浸透とともに速やかに解消する過程がカソードルミネセンスにより観察された。これは、水の浸透に伴う粒子成長は石英岩の全面的な溶解 - 沈殿作用を経て起こり、それに伴い流体 - 鉱物間の急速な化学平衡化が進んでいることを示唆する。つまり、岩石 - 流体間の物質輸送は、結晶内拡散よりも溶解 - 沈殿作用に支配されると予想される。そこで、浸透流中の物質保存則を考慮し、鉱物内の拡散係数と鉱物の溶解・沈殿速度とを、流体 - 結晶間の物質流束に対する効果の観点から比較した。まず実験で得られた石英の溶解 - 沈殿速度と酸素の拡散速度とを比べると、圧倒的に溶解 - 沈殿作用が酸素の輸送を支配することがわかる。この予測は、酸素同位体を用いた浸透実験産物の解析によって検証の予定である。粒子成長速度は粗粒の岩石ほど小さくなるので、この結論を直ちに粗粒の石英岩に応用することはできない。しかし少量の液相が存在する状態での岩石の粒子成長則を用いて天然の石英岩の粒子サイズまで同様の計算を外挿しても、やはり溶解 - 沈殿作用が拡散による物質

輸送を圧倒することがわかった。同様に、限られた実験データを基に、他の岩石 - 流体系（玄武岩マグマ - 単斜輝石系における希土類元素の運搬など）において比較を行うと、多くの場合にやはり溶解 - 拡散機構による粒子成長が鉱物内拡散よりも支配的であることが推論できる。以上の結果は予察的ではあるが、岩石 - 流体系における粒子成長速度が、浸透流内の物質輸送を定量化する上で決定的に重要であることは間違いない。