

論文内容の要旨

論文題目

Linkage between faulting, fluid flow and earthquake generation in seismogenic subduction zones

(沈み込み帯地震発生帯における断層運動・流体移動・地震発生の相互作用)

氏名 山口 飛鳥

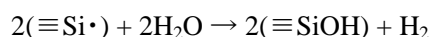
はじめに

沈み込み帯を特徴づける、断層運動・流体移動・地震発生という 3 つの現象は、岩石－流体相互作用の枠組みの中で統一的に捉えることができる。すなわち、岩石の破壊・変形に伴う流路の形成や粒子の細粒化は、流体移動、および岩石－流体間の反応・鉱物沈殿を促し、それによって生じる物理化学条件の変化が再び岩石の破壊・変形に影響を与えるというフィードバックプロセスが考えられる。本研究では沈み込み帯地震発生帯を対象にその実態を解明すべく、九州・アラスカの陸上付加体中に見られる大規模な低角衝上断層について岩石－流体相互作用の様式を検討した。以下にそれぞれの結果の概要を示し、沈み込み帯における岩石－流体相互作用の多様性とそれを生み出す要因について考察する。

断層運動時の還元流体：九州四万十帯延岡衝上断層

四万十付加体中の大規模な Out-of-sequence thrust である延岡衝上断層の周囲には、鉱物脈の濃集帯が見られる。これらを、剪断面を充填する脈(Fault vein)、および開口クラックを充填する脈(Extension vein)に二分し、それぞれの主要・微量元素組成を EPMA・(LA)ICP-MS により測定した。その結果、Fault vein はアンケライト $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$ からなり、アンケライト中の Fe 濃度は脈の成長とともに減少すること、脈内の場所によらず正の Eu 異常をもつことが判明した。一方、Extension vein は Fe を含まない方解石 CaCO_3 と石英からなり、Eu 異常も見られない。この結果は、Fault vein 形成時の流体中では Eu^{2+} が常に多量に存在した一方で Fe^{2+} の濃度は徐々に減少したこと、Extension vein 形成時の流体中では Eu^{2+} ・ Fe^{2+} ともに低濃度であったことを示している。Fault vein, Extension vein それぞれの形成条件を鉱物共生と熱力学計算から推定したところ、Fault vein は中性～アルカリ性で酸素分圧が低く二酸化炭素分圧が高い条件下で沈殿し、Extension vein は中性で酸素分圧が比較的高い条件下で沈殿したことが明らかになった。

断層面上のみ局所的に還元環境が生じた原因として、既知のものでは鉱物の新鮮な破断面で生じるラジカル反応による水素ガスの発生



(Kita et al., 1982; Kameda et al., 2003) の寄与が考えられるが、1 回の地震での水素ガス発生量は 1m^2 の断層面あたり 3~40mmol と計算され、アンケライト脈中の Fe^{2+} の量よりも明らかに不足している。よって、粉碎に伴う水素ガスの発生のみならず、鉱物からの Fe^{2+} の直接放出、断層を通しての深部からの還元流体の移動などのメカニズムが複合することにより効果的に還元環境が形成されたことが示唆される。

断層運動時の高温流体: アラスカ州 Kodiak 付加体 Pasagshak Point

米国アラスカ州 Kodiak 付加体 Pasagshak Point では, Ghost Rocks Formation のテクトニックメランジュ中に大規模な断層帯が発達する. ここでは, 厚さ 30-50m の連続性の良い砂岩層の直下に厚さ 5-10cm 程度の黒色細粒緻密なウルトラカタクレーサイトが見られ, その下位に厚さ 5-20m のカタクレーサイトが続き, 弱変形の泥岩へと漸移する. ウルトラカタクレーサイトと周囲のカタクレーサイトとの境界は直線状あるいは指交状である. ウルトラカタクレーサイト内部には形成時の形状を保持しているものと, 再び変形に巻き込まれたものがあり, それらが幅 2mm 程度の層状構造をなしている. SEM 観察によればウルトラカタクレーサイトは μm オーダーまでの粉碎・細粒化が進行するが, 摩擦熔融の痕跡は認められない.

この断層岩の微量元素分析からは, ウルトラカタクレーサイトは Sr に富む一方で Rb・Cs に乏しく, 岩石と熱水との反応で元素の移動が生じた可能性が示された. 岩石中の元素濃度 C_s は, 流体中の元素濃度 C_f および分配係数 $D = C_s/C_f$, 水/岩石比 R を用いて, 質量保存より

$$C_s = D(C_{s0} + RC_{f0}) / (R + D)$$

と表せる. You et al. (1996) の水熱実験により得られた D の値, および C_{f0} として Ishikawa et al. (2008) の台湾車籠埔断層の流体の値を用いると, ウルトラカタクレーサイトの微量元素濃度分布は 300-350°C の熱水と岩石が反応して形成されたことが推定された. 母岩の最高被熱温度 (230-260°C) と比較して約 100°C の温度上昇が, 断層面での摩擦発熱によるものだとすると, 断層にかかる剪断応力は $\tau_f = 0.005\text{MPa}$ (変位量 $D=10\text{m}$ の場合) $\sim 0.5\text{MPa}$ ($D=10\text{cm}$ の場合) と大変低く, 静岩圧に近い流体圧のもとで断層運動が行われたことを示唆する.

まとめ・議論

延岡衝上断層・Pasagshak Point の断層の双方とも, 特異な流体の関与(還元流体・高温流体)が示された. これらはいずれも地震時の岩石-流体反応の痕跡であると考えられる.

両者の顕著な差異は炭酸塩鉱物脈の有無である. 炭酸塩鉱物の溶解度は①温度の上昇, ② CO_2 分圧の減少, ③pH の増加, が起こったときに減少し, 沈殿を引き起こす. 両者ともに炭酸塩に過飽和な流体のもと, 250°C 付近で断層運動が起こったとすると, ①は, Pasagshak Point において温度が上昇しているにも関わらず沈殿が生じていないことを説明できない. また③は脈内の石英の存在 (pH 減少で沈殿) を説明できない. よって②の CO_2 分圧の減少が最も妥当な沈殿メカニズムである. 高圧下では沸騰による CO_2 の脱ガスは考えにくく, 流体圧自体が効果的に下がるか否かが重要だと考えられるので, 沈殿の有無は地震直後に流体圧減少が効果的に起こるか否かに依存する. Pasagshak Point ではウルトラカタクレーサイトの直上に厚い砂岩があり, これが低浸透率の cap rock となって高流体圧を保持していると考えられる. このことは断層岩の解析から得られた低い剪断応力とも調和的である.

Pasagshak Point の断層岩の諸々の産状は, ウルトラカタクレーサイトの固結がすぐには行われず, また断層帯の発達過程において常に同じ場所が弱面として機能したことを示しているが, 延岡衝上断層では対照的に, 一つの剪断面を数回のすべりで放棄し, 下方に伝播している. この差は鉱物脈形成による断層面のシーリングの有無を反映していると考えられる. すなわち, 断層近傍における物質の分布が断層帯の浸透率構造を規定し, それによって規定される岩石-流体相互作用の様式が, 断層帯の発達過程や地震サイクル内での強度回復過程にも重要な影響を与えている可能性が高い.