

粒界に存在する流体が岩石物性やダイナミクスに与える影響

Effects of grain-scale microstructure on the mechanical properties and dynamics of solid-liquid two-phase system

武井 康子^{1*}

Yasuko Takei^{1*}

¹東京大学地震研究所

¹ERI, Univ. of Tokyo

1.はじめに

流体を含む系における波動伝播、マントル対流、流体移動のようなマクロスケールの現象は、固液二相系の理論によって扱われる。私はこれまで、実験室で観察される流体のマイクロなふるまいが、このようなマクロスケールの現象にどのような影響を与えるかを調べるために、内部状態変数を用いた固液二相系のアプローチを行ってきた。その結果、粒界のようなマイクロスケールでの流体のふるまいが、マクロな現象に大きな影響を与えることが分かった。これまでに得た結果は、主に流体がメルトの場合のものであるが、流体が水である場合についても多くの示唆を与えるため、アプローチ法を含めて紹介したい。

2. マイクロとマクロをつなぐための理論的枠組み：内部状態変数を含む構成方程式

固液二相系の理論では、系に加わるマクロな応力と系のマクロな変形とを関係づける構成方程式を与える必要がある。マクロな応力と歪（歪速度）を結ぶ係数が、マクロな弾性（粘性）である。メルトや水のような流体相を含む岩石では、そのマクロな弾性や粘性が、含まれる流体相のマイクロな形状に大きく依存するという「構造敏感性」があり、しかも、ポア形状は一定不変なものではなく、差応力や変形に伴い変化する。系のこのような性質は、マイクロスケールでのポア形状を表す適切なパラメータ（内部状態変数）を導入して、構成方程式をポア形状の関数として与え、また、ポア形状の変化を記述する発展方程式を与えることにより定式化できる。つまり、内部状態変数の導入により、マイクロなプロセスの影響が考慮できるようになる。

3. 粘性は構造敏感、それに比べると弾性は鈍感

流体が粒界に存在する場合には、マクロな弾性や粘性は固体粒子同士のつながり具合により決定される。各粒子の全表面積のうち周囲の粒子と結合している部分の割合を表すパラメータ「コンティグイティ」が、適切な内部状態変数を与える。（「コンティグイティテンソル」を導入すると結合の異方性も記述できる）。部分熔融岩石の弾性と粘性の構成方程式を、それぞれコンティグイティの関数として導いた結果、弾性に比べて粘性の方が遥かに強くコンティグイティに依存し、内部状態に敏感であることが分かった。例えば0.1%程度の微量メルトは、地震波速度にはほとんど影響しないが、粘性を約5倍小さくする。また、2%の地震学的異方性が観察される場合、粘性には300%もの異方性が存在する。これまで、弾性がポアの状態を反映することはよく知られており、このことを利用して地震波速度の低下や異方性の観察からポアの状態を知る試みが良くなされてきた。しかし粘性の構造敏感性はそれよりさらに大きく、以下に示すように、さらに重要な意味を持つ。

4. 差応力下での流体形状の異方性と粘性の異方性

粒界に存在する流体は、静水圧下ではぬれ角で特徴付けられる平衡構造をとることが良く知られ、コンティグイティはぬれ角と液相分率の関数として与えられる。しかし差応力下では、最小圧縮応力の方向に粒子同士の結合が小さくなるのが、部分熔融岩石やそのアナログを用いた

最近の変形実験から報告されている。上記3の結果とあわせると、部分熔融岩石の粘性は最小圧縮応力の方向に非常に柔らかいことになる。

5.固体のせん断変形と流体移動の相互作用

流体移動の駆動力は流体の圧力勾配である。等方的な系では、固体中のせん断応力は流体圧に強い影響を及ぼさない。ところが粘性に4で述べたような異方性があると、「せん断成分と等方成分のカップリング」が生じ、固体中のせん断応力が流体圧に大きな影響を及ぼすことが分かった。例えば、せん断応力の強い方向へ流体が流れて集まるという現象が起こる。近似的に解くと、沈み込み帯ではせん断応力の高いプレート境界にメルトが集まるということが分かった。メルトが集まると粘性が下がってマントル対流にも影響を与えるため、対流とメルト移動は相互作用しながら発展し、最終的にはマントル対流が流体によって潤滑される可能性もある。このように、メルトのマイクロなふるまいが、最終的なマントルの実効粘性や流体の分布に大きな影響を与えている可能性があるのである。

6.おわりに

沈み込み帯では、水の移動が大きな関心を集めている。本研究の結果は、岩石の変形に与える水の影響、差応力下での水の形、などを一つ一つ明らかにすることの重要性と、これらが適切に考慮されたシミュレーションを行うことによってマクロスケールでの流体のふるまいを解明することの重要性を示している。

キーワード:マイクロとマクロ,固液二相系,構造敏感,粘性の異方性,流体移動,流体潤滑

Keywords: micro-macro, solid-liquid two phase system, structural sensitive, viscous anisotropy, fluid migration, lubrication