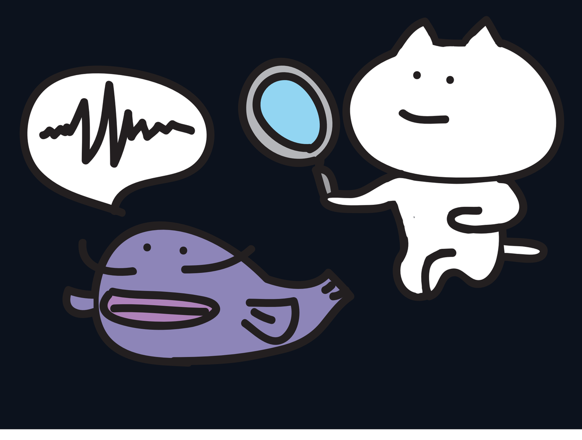


地球内部の物性とダイナミクスの研究

～岩石アナログ物質を用いて～

武井研究室
ytakei@eri.u-tokyo.ac.jp

はじめに

固体地球科学を研究する面白さの一つは、岩石の性質そのものにまだ分からないことがたくさんあることです。その中でも特に重要な未解明物性の一つが、以下に述べる岩石の「非弾性」と、非弾性に大きな影響を与える「粒界」（鉱物と鉱物の境界のこと）の物性です。これまでの固体地球科学では、岩石の力学物性は、岩石を構成している鉱物の物性が決めていると考えて、「粒界」の影響は考慮されてきませんでした。しかし、最近の私達の研究から、地球のダイナミクスや地球物理的観測量を支配している岩石物性は、これまで無視してきた粒界の影響を非常に大きく受けていることがわかってきました。この新しい未知のテーマに実験や理論を駆使して取り組んでみませんか？

室内実験によるアプローチ：アナログ実験

地震学者が地球内部を調べるために使っている地震波の周波数は1Hz ～ １ミリHzです。しかし、岩石を用いる高温高圧実験は非常に難しいため、室内実験における岩石の弾性波速度測定はメガHz ～ ギガHzという非常に高い周波数で行われてきました。最近までは、地震学から得られる地球内部構造の解像度はそれほど高くなく、地球の中がぼんやりと見える程度であったため、このような周波数の大きく異なるデータとも比較的良い一致を得てきました。ところが最近の地震学の発展によって、地球内部の詳細な３次元地震波速度構造が分かってくると、室内実験のデータを用いた地震波構造の解釈が、地球ダイナミクスや地球化学の研究結果と矛盾することがわかってきました。

私達のグループでは、岩石のアナログ物質として有機物の多結晶体を用いることで、1000度C以上の高温の岩石の振る舞いを、室温近傍（20度C）で実現し、1メガHz から１ミリHzに及ぶ広い周波数帯域での弾性波速度を調べてその周波数依存性を明らかにしました。その結果、高温の岩石の弾波性速度は、周波数によって非常に大きく変わることがわかりました。このような弾性波速度の周波数依存性を引き起こす物質の性質のことを「非弾性」と言います。実験データを詳細に検討した結果、非弾性の原因は粒界が柔らかくなって滑りやすくなることにあるとわかり、特に岩石が部分溶融する直前の温度でこのような変化が生じていることもわかりました（2枚目の山内さんの研究を参照）。メガHz ～ ギガHzという高周波の波は非弾性の影響を受けないためこれまでの室内実験ではわかりませんでしたが、地震波は粒界の影響を大きく受けています。そして粒界の影響を考慮すれば、地球内部構造を、地球ダイナミクスや地球化学の研究結果と矛盾なく説明できることもわかりました。しかし、実験で捉えられた粒界の物性変化が、どのような物理プロセスによって生じているのかは理解できておらず、実験の結果を地球内部の様々な場所（リッジやサブダクションなど）に適用するためには、さらに多くの実験を行って現象の物理に迫ることが重要となります。アナログ実験は、岩石以外の物質を用いて、個々の物質によらない普遍的物理の解明を目指すもので、このような未知のプロセスの研究に適した研究手法です。

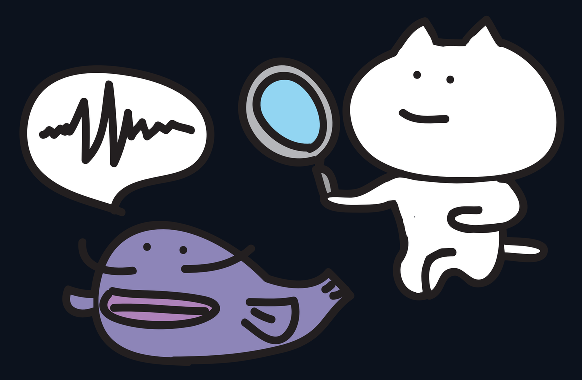
理論モデルによるアプローチ：熱・統計物理学

未知のプロセスの解明には、実験とともに物理モデルが重要な役割を果たします。近年の物性物理学では、界面の理解が大きく進展していますが、これらを岩石に応用する研究はまだ行われていません。岩石粒界を扱う適切な物理モデルを開発し、地球内部の温度、圧力、化学的条件下での粒界や岩石ーメルト界面の振る舞いを予想することが重要です。

メンバー

武井　康子（教授）
山内　初希　（特任研究員）：岩石の部分溶融が地震波速度と減衰に与える影響の解明
佐々木勇人（D2）：地球内部の差応力や変形が地震波速度と減衰に与える影響の解明
角田　明博　（M1）：粒界の熱力学モデル

興味のある方、研究室の見学を希望する方、お気軽にご連絡下さい。
武井メール：ytakei@eri.u-tokyo.ac.jp

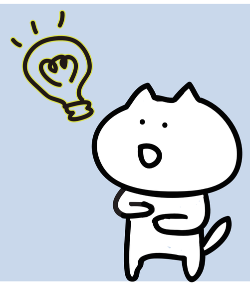


地球内部の物性とダイナミクスの研究

〜岩石アナログ物質を用いて〜

武井研究室
ytakei@eri.u-tokyo.ac.jp

多結晶体の非弾性が切り開く地球内部の新たな描像

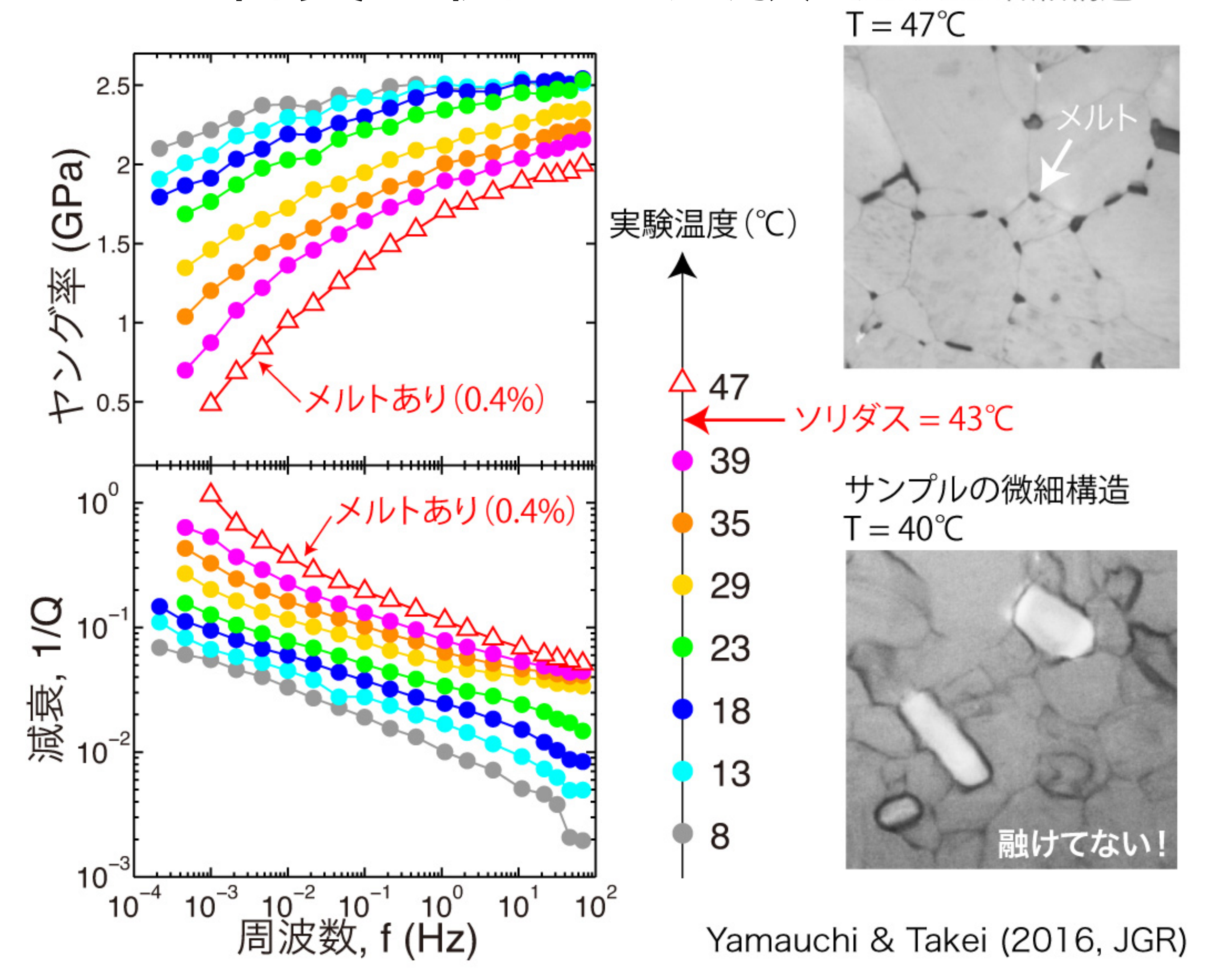


岩石の非弾性（弾性と粘性の中間的な物性）は地震波の速度分散と減衰を引き起こす。従って、地震波トモグラフィーの結果を解釈するには、非弾性が岩石の様々な状態からどのような影響を受けるか調べる必要がある。我々は、特に、部分溶融と転位が多結晶体の非弾性に与える影響を調べている。

部分溶融の影響

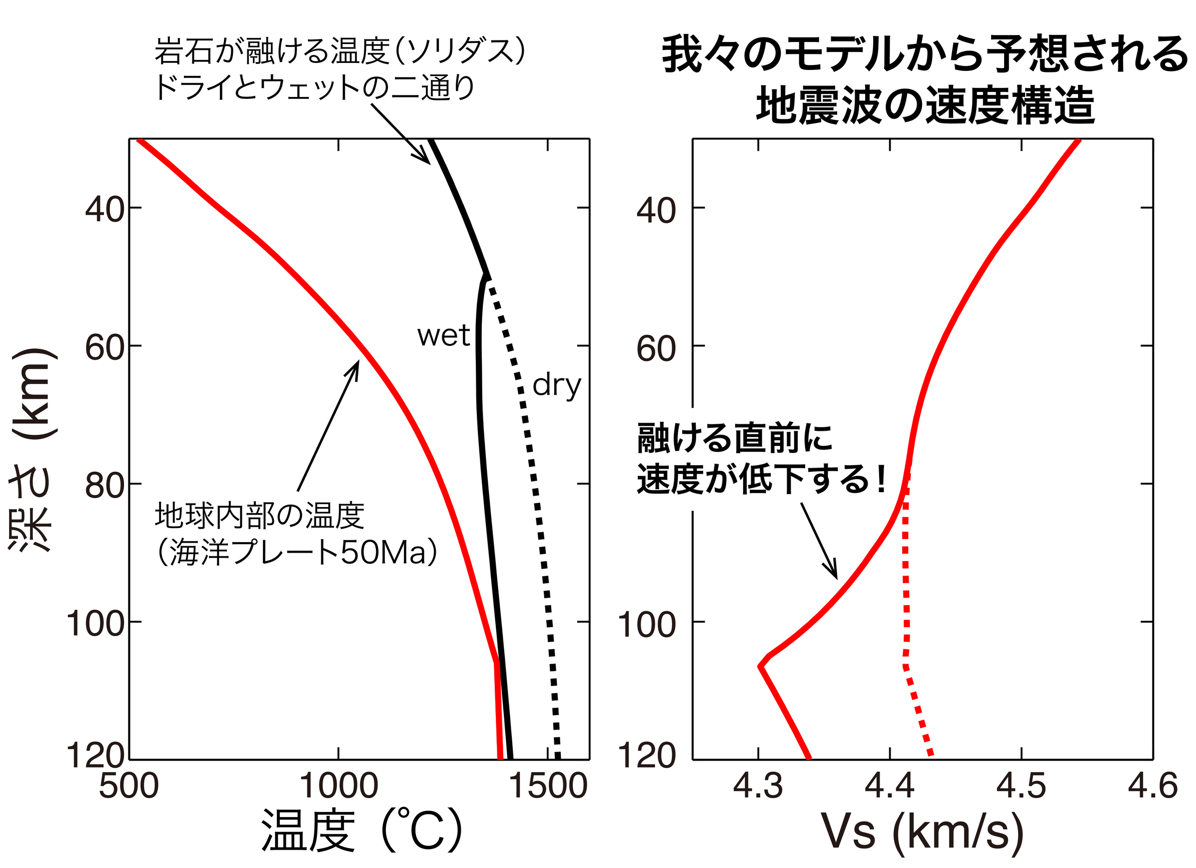
部分溶融岩石のアナログ物質を使って、融点（ソリダス）直下から部分溶融に至るまでの多結晶体の非弾性を調べている。これまでに、「部分溶融の直前」でメルトが無くても、非弾性が顕著に増大することを明らかにした。その結果をもとにして得られた非弾性モデルを地球内部の温度構造に応用し、融ける直前に地震波速度が低下することを示した。現在は、応用的研究を中心に行ない、上部マントルの低速度層（アセノスフェア）の解釈に取り組んでいる。（特任研究員・山内）

アナログ物質を使った実験



Yamauchi & Takei (2016, JGR)

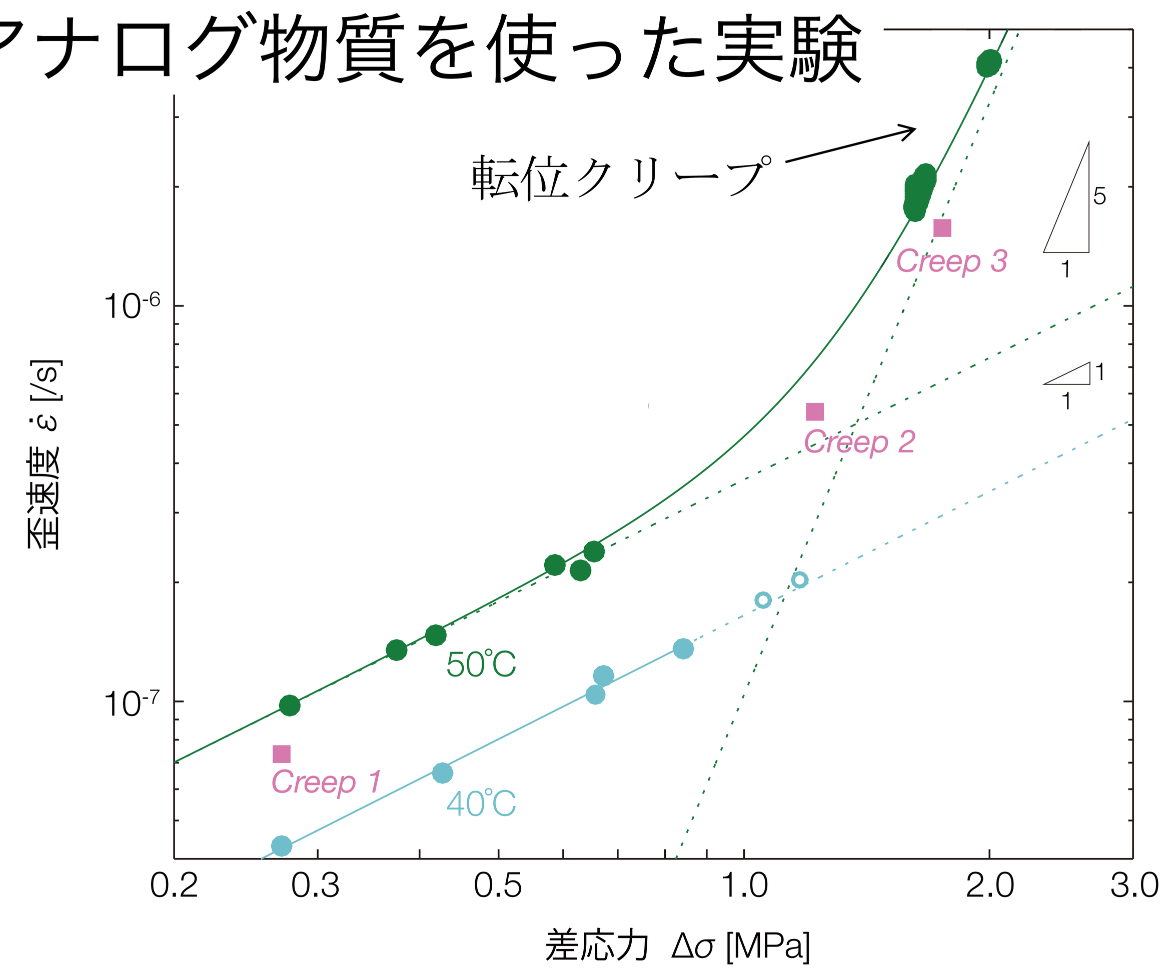
地球内部への応用



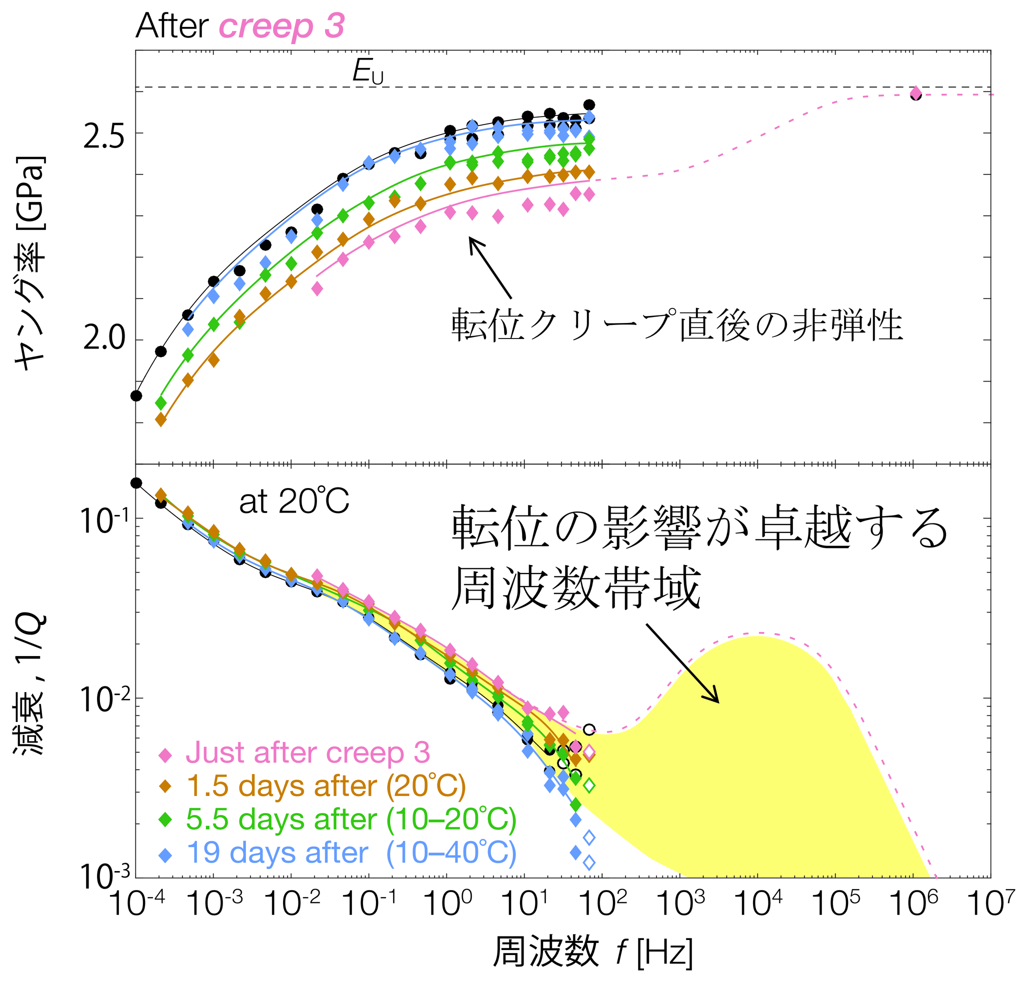
転位の影響

岩石のアナログ物質を使って、転位が多結晶体の非弾性に与える影響をを実験的に調べている。応力を受けて変形した物質では、結晶中の原子配列がダメージを受け、転位という欠陥が存在する。転位の影響が分かれば、地震波観測に基づいて地球内部の変形状態を推定できるようになる。これまでに、アナログ物質に転位が入る変形条件を明らかにし、転位導入後では著しい非弾性緩和が見られ、限られた周波数帯域で卓越した。現在は、地球内部と同様、転位を入れながら非弾性測定を行う実験に取り組んでいる。（D2・佐々木）

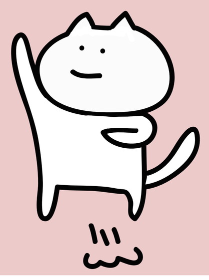
アナログ物質を使った実験



転位クリープで転位を入れた後非弾性を測ると転位の影響を強く受けていた。

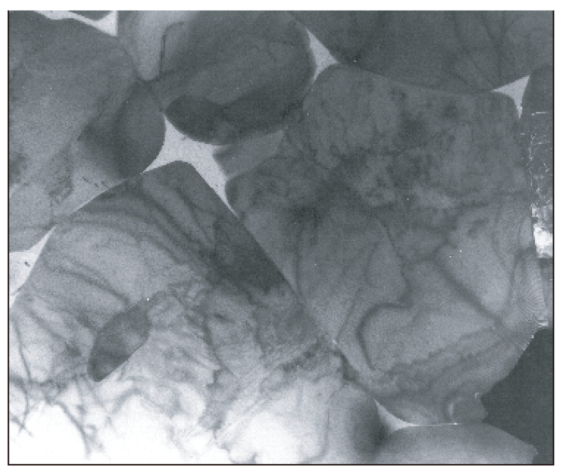


部分溶融マントルからのメルトの分離・上昇に関する大きな謎



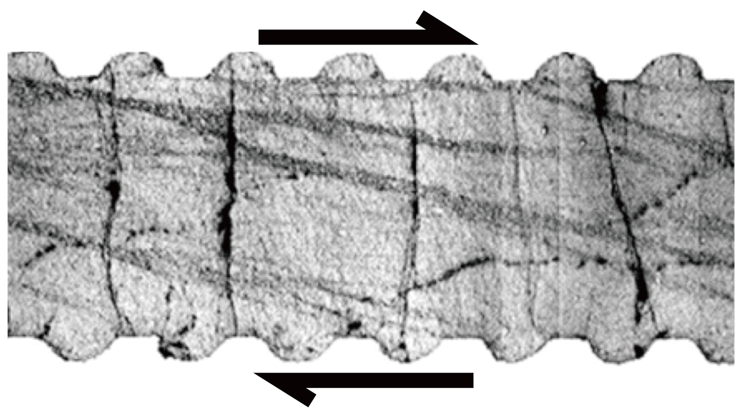
マントル部分溶融層では、メルト相がわずか0.1%程度できた段階で素早く抜けてしまうことが地球化学的な観測からわかってきたが、なぜそんなに素早く抜けるのかは謎である。部分溶融岩の単純せん断変形の結果、メルトの集まったシート構造ができることが報告された、このような構造をメルトが高速で通り抜けるのかも知れない、と注目されている。しかし本物の岩石を用いた高温高圧実験には制約が多いため、なぜこのような構造ができるのか、そのメカニズムの解明には至っていない。部分溶融岩のアナログ物質を変形させて、このような構造を再現し、そのメカニズムを解明することで、マントルからのメルトの分離上昇問題にも迫ることができる。

顕微鏡で見た内部構造



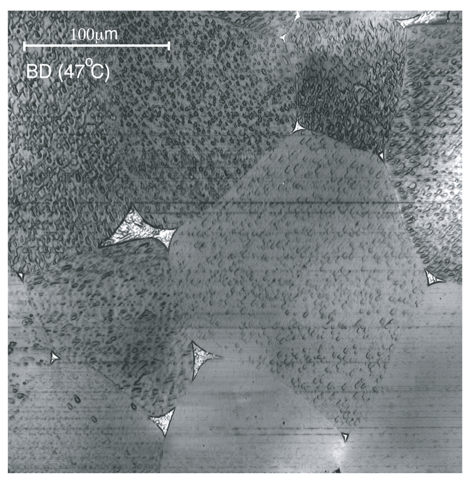
本物の部分溶融岩石（1200℃）

サンプルを変形



部分溶融岩の変形実験（Holtzman et al, 2003）

顕微鏡で見た内部構造



アナログ部分溶融試料（43℃）

Takei, 2000, JGR

サンプルを変形（どうやって？）

シート構造はできるか？