

研究

固体地球科学を研究する面白さの一つは、地球を作っている物質の性質そのものにまだ分からないことがたくさんあるということです。我々の研究室は、そのような未解明の物性を明かにすることにより、地球のダイナミクスや地球観測量を説明・解釈するための新しい視点を提案することを目指しています。特に、水やメルトなどの流体相や微量元素など、いわば地球の「不純物」が、地球の流動破壊特性や、様々な観測量に与える影響には、重要でかつ未解明の点が多くあり、研究室の主要テーマとして取り組んでいます。

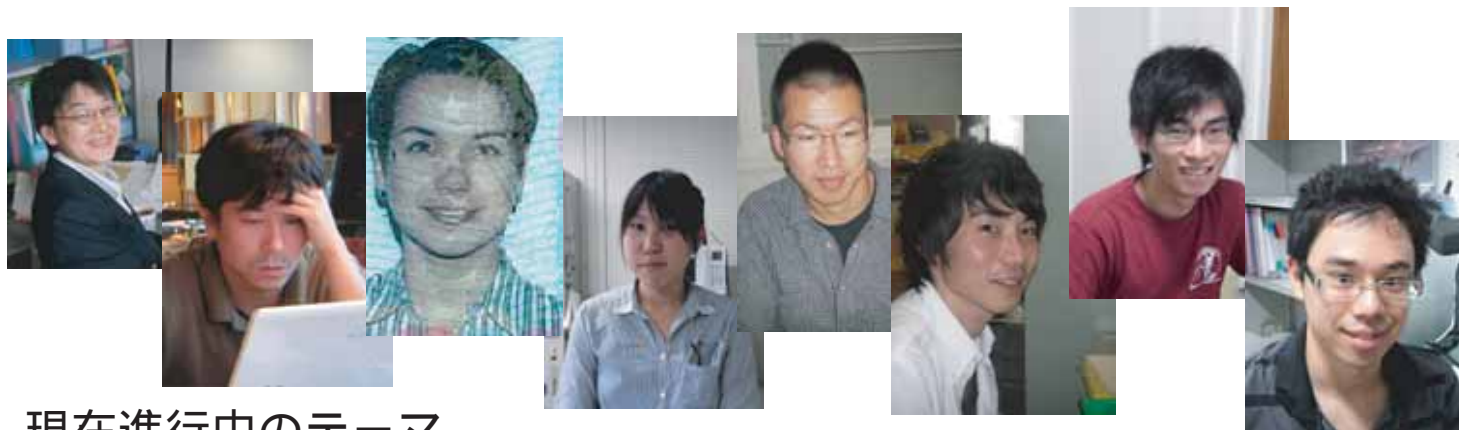
手法

グループとしての特徴は、地球物理学的なバックグラウンドの武井と地質学的なバックグラウンドの平賀が共同で、境界領域で活躍できる学生を育てたいと考えていることです。研究手法は特に限定しません。未解明の物性を研究するには実験が不可欠ですが、実際の地球物質を用いる本格的な実験（平賀）と、岩石のアナログ物質を用いたモデル実験（武井）を目的に合わせて行うことができます。また、実験室と実際の地球科学現象をつなぐための理論モデリングが重要であり、物質のミクロな性質とマクロな物性を結びつけるための新しい理論を開発しています。さらに、シミュレーションやフィールドワークへと手法を開拓中です。

連携

研究環境としての地震研の特徴は、地震学、電磁気学、測地学、岩石学、地球化学などの地球の観測データが身近にあることです。実験や理論モデリングで得られた成果を実際の観測データに応用したり、観測データから新たな研究のアイデアを得るために、地震研の他の研究グループとの連携を行っています。

メンバー 武井康子、平賀岳彦、Christine McCarthy(PD)、田阪美樹(D1)、小林民夫(M2)、宮崎智詞(M2)、渡部泰史(M1)、渡邊俊一(M1)



現在進行中のテーマ

多結晶体（水やメルトなどの流体相を含む、含まない）の力学物性（弾性、非弾性(Q)、レオロジー）の解明と、観測やダイナミクスへの応用
(McCarthy、田阪、小林、渡辺、平賀、武井)

鉱物粒界の物理化学の解明と、マントル内での物質の蓄積・移動過程への応用
(田阪、小林、宮崎、渡部、渡辺、平賀、武井)

地震波速度構造と電気伝導度構造の同時インバージョン

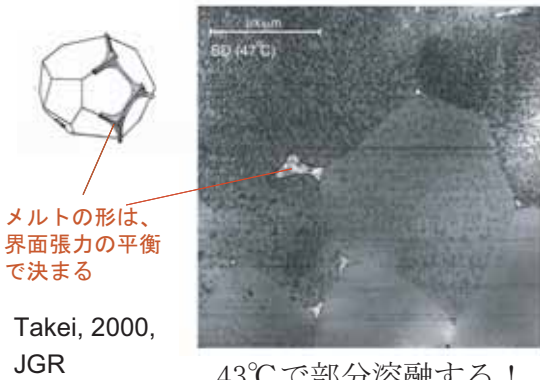
(武井、with上嶋さん他)

興味のある方は、お気軽にご連絡下さい。

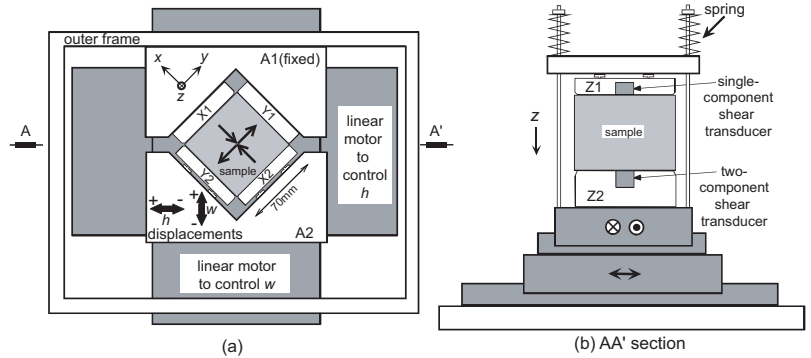
など。具体的には以下のページで。

これまでの主な成果（武井）

部分溶融岩石に良く似たアナログ物質 アナログ物質を用いた部分溶融物質の変形実験



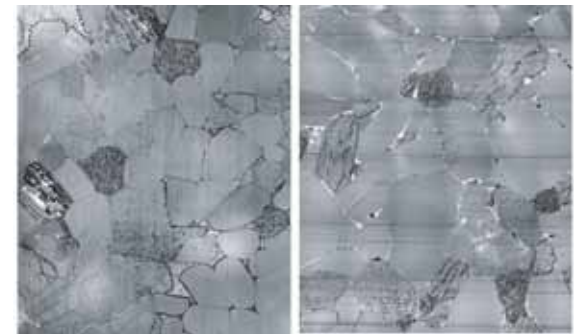
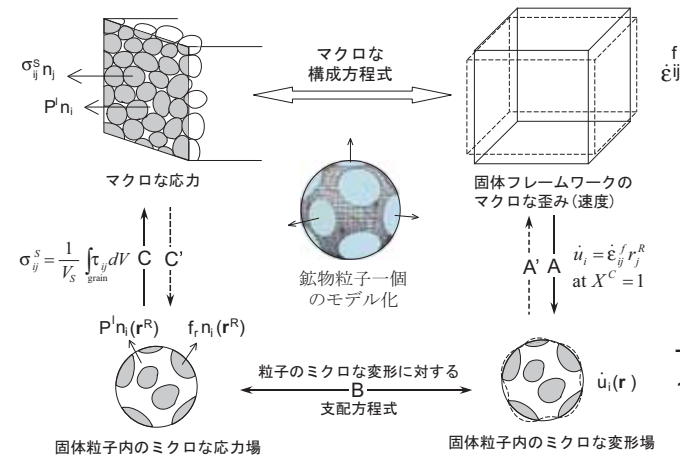
43°Cで部分溶融する！



変形がメルトの形に与える影響を調べるため、装置を開発。
超音波の横波二成分で、変形中の試料をその場観察できる！

流体のミクロな存在状態とマクロな物性をつなぐ

変形によるメルトの形の変化をとらえる



メルトの形は界面
張力の平衡で決まる

粒界のぬれが進んだ

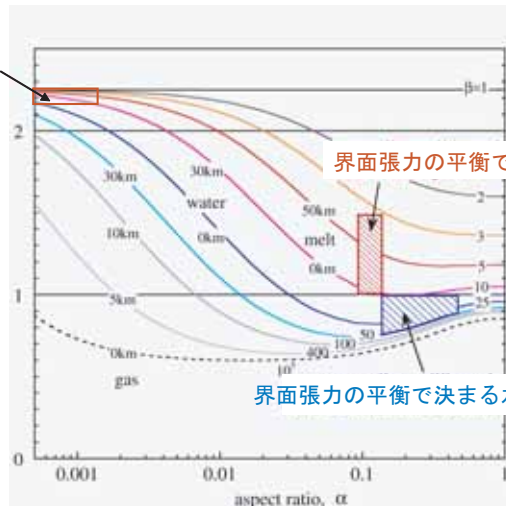
Takei, 2001,
2005, JGR

実験結果を観測やダイナミクスに結びつける鍵となる理論

流体の存在状態 と 地震学的観測量 をつなぐ理論



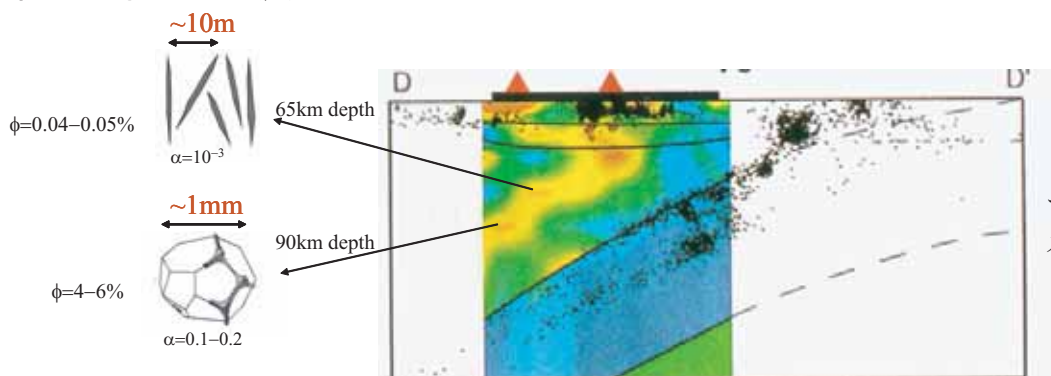
$$R_{SP} = \frac{\Delta V_S / V_S^0}{\Delta V_P / V_P^0}$$



縦波と横波の両方の
トモグラフィー像から、
流体の存在状態が
わかる！

Takei, 2002, JGR

東北日本下の地震波トモグラフィーへの応用



マントルウェッジにおける
メルトの存在状態を推定

Nakajima, Takei, &
Hasegawa, 2005, EPSL

これまでの主な成果（平賀）

－地球欠陥学－万物、欠陥があるからこそ、面白い！

地球は結晶の巨大な集合体である。しかし、その地球は「完全」ではない。完全結晶からズレた乱れた領域、「欠陥」を有している。点欠陥である原子空孔、線欠陥の転位、面欠陥の粒界である。これらの存在と運動が、地球内部での巨大地学現象（マントル対流やマグマの生成・移動など）や観測量（地震波減衰や電気伝導度）を出現させる。欠陥の構造や性質をナノスケールにおいて解明し、キロメートルスケールの地球ダイナミクスをミクロな物理で理解しようというのが地球欠陥学である。平賀は、実験、分析、野外観察、モデリングを通し、また、研究グループ内の武井さん、物質材料研究機構との共同研究や、地球化学、地震学、材料科学などの他の分野と積極的に連携することで、このユニークな学問、地球欠陥学を遂行している。

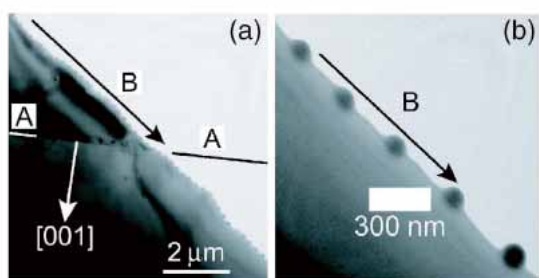
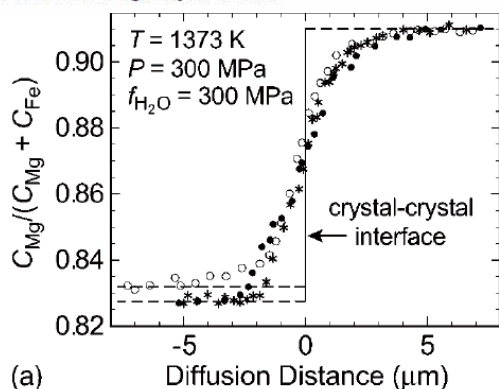


FIG. 1. Transmission electron micrographs of (a) interface, A, between the two halves of a diffusion couple and (b) contamination spots along the ion-thinned edge, B, used to mark the positions of chemical analyses relative to interface. In (b), the micron marker also indicates the size of the 100×300 nm scanning analysis window.

原子空孔は、一つが原子サイズという極めて小さな穴であることから、それそのものを観ることは不可能である。左図では、Fe と Mg 量比が異なるオリビンを貼り付け、Mg と Fe 原子が相互に移動（拡散）していく様子が透過電子顕微鏡を用いた局所分析でとらえられた（左下図）。このような原子の移動には、原子空孔の存在が不可欠であり、温度、圧力、水の有無や、酸素分圧を変化させた拡散実験およびその後の電子顕微鏡を用いた分析によって、空孔の性質を調べることが出来る。左の結果において、水の存在によって拡散が促進することが示され、空孔の数が水の添加によって、著しく増加したことが推定された。地球内部での物質移動速度、またそれに対する水の影響をこのような研究から理解することが出来る。



Wang, Hiraga and Kohlstedt (2004) Applied Physics Letters 85, 209

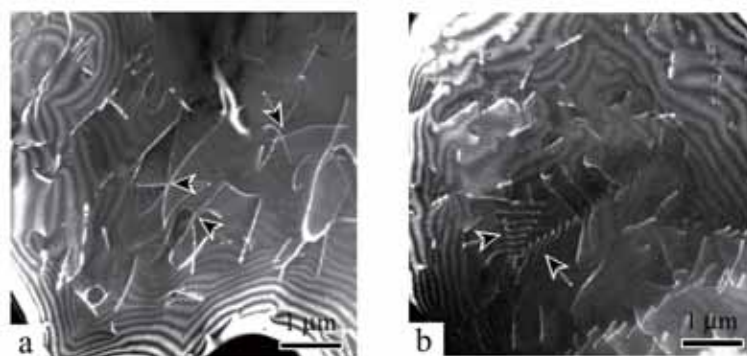
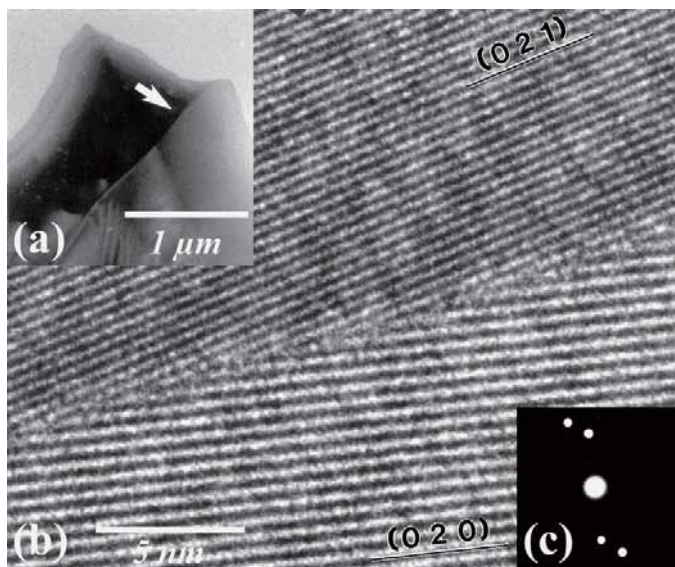


Figure 8. Weak beam, darkfield transmission electron microscopy images of dislocations in deformed samples. (a) This image of a dry sample (PI-1125) was taken along the $[114]$ axis with $g = (220)$. The dislocations are often tangled (marked by arrows). (b) This image of the wet sample (PI-1209) was taken along the $[3\ 25]$ axis with $g = (111)$. Dislocations form subgrain boundaries (indicated with arrows) more frequently than those in dry sample.

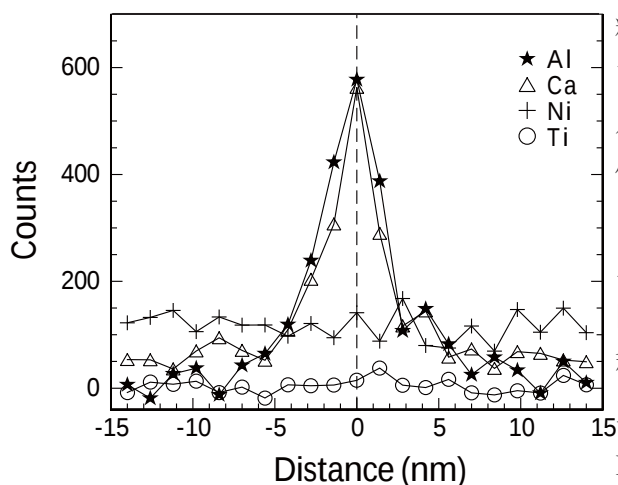
転位は、左の透過電子顕微鏡下で線状（白）に観察されるものである。転位が動くことで結晶が変形し、また、結晶の向きが揃い始める。地殻・マントルの粘性流動や地震波の速度異方性を、このナノメートルにも満たない太さを持つ転位が生じさせているのである。左の像は高温で変形させた無水の単斜輝石粒子内の転位、右は同じく単斜輝石であるが水を添加させた粒子内の転位像であり、水の有無が転位構造を変化させ、ひいては単斜輝石が主要となる下部地殻の流動性が変化することを示している。

Chen, Hiraga and Kohlstedt (2006) Journal of Geophysical Research 111, B08203



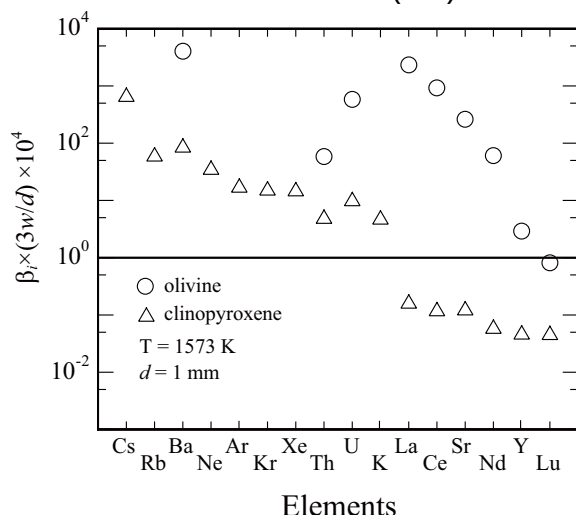
粒界は、左の透過電子顕微鏡像において、二種類の格子縞で表される二つの結晶の境界に相当する。粒界は、地球内部で唯一三次元的に連結した欠陥であり、原子の高速移動する経路として、変形のすべり面としての役割を果たす。しかし、粒界そのものの研究は、他の欠陥のそれと比べて大きく遅れおり、下部マントルでの粘性流動、地震波減衰は、粒界でのミクロな素過程が引き起こすと考えられているが、未だ推測の域を出ていない。粒界の幅すらも特定されておらず、左の像から粒界の幅は1ナノメートルよりも十分に小さいことが初めて示された。

Hiraga, Anderson, Zimmerman, Mei and Kohlstedt (2002) *Contributions to Mineralogy Petrology* 144, 163



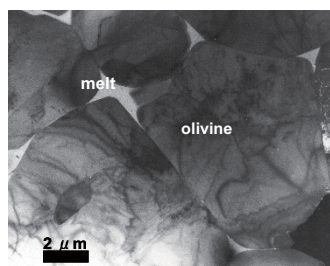
粒界には、上で述べた働き以外に、これまで全く予想されていなかった地球内部での役割が発見された。それは、マントル内で、結晶に入りにくい元素の貯蔵庫として粒界が有効に働くということである。左図は、粒界を横断する形で、ナノオーダーでの局所化学分析を透過電子顕微鏡内で行った結果で、オリビンにほとんど入らないCaやAlが粒界では極めて高く固溶することが判明した。粒界において、どの元素が、どの程度濃集しているかが、マントル内での元素の分布を考える上で鍵になってきた。

Hiraga, Anderson and Kohlstedt (2004) *Nature* 427, 699



結晶に入りにくい元素ほど、マントル内で長距離移動できるという、一見奇妙な予想が立てられた。これは、粒界に濃集する強さと粒界拡散という極めて高速な元素移動を可能にするメカニズムが相互に作用するためである。左図において、1より大きな値をとるYより不適合性の高い元素は、マントル内をオリビン多結晶体と近似できるので、粒界拡散で移動することが予想される。地球内部の化学進化の時間・空間変化を、粒界偏析と粒界拡散というミクロなプロセスを理解することで定量化できる。

Hiraga, Hirschmann and Kohlstedt (2007) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 1281



修士学生・博士学生の研究テーマ

3次元欠陥も地球内部では重要になる。上の像のように、わずかな量の流体が粒界3重点や4重点に分布し、三次元的に見ると、岩石中をネットワーク状に分布している。わずかな量の流体が、地殻やマントルでは、粘性、電気伝導度、地震波減衰、マグマの生成など様々な地学現象・観測に影響を与えている。学生さんと共に、体積分率1%さえ切るような極微量のメルトがどのように地球内部で移動するのか、高温実験と微細構造観察から解明しようとしている。また、貴金属元素や希ガスといった地球化学プロセスのマーカーとなる元素の挙動を、当研究室で開発した高緻密鉱物結晶体（下図）を用いて、他研究室と共同で解明を進めている。