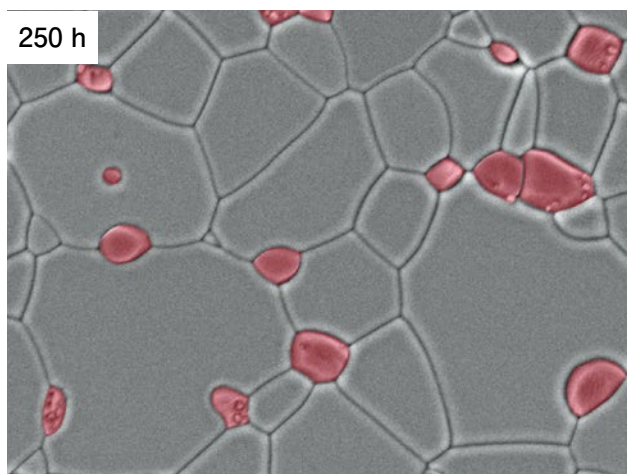
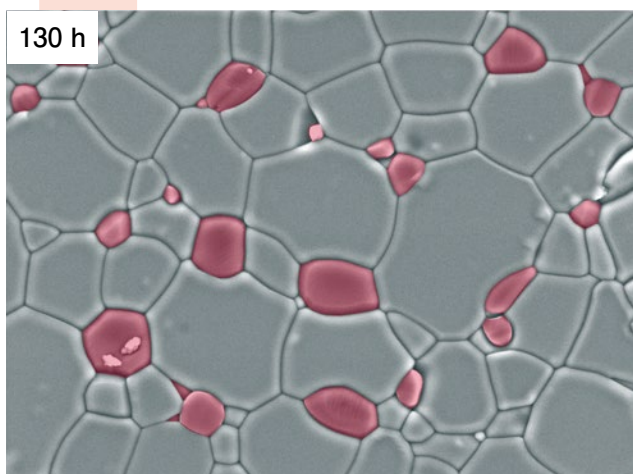
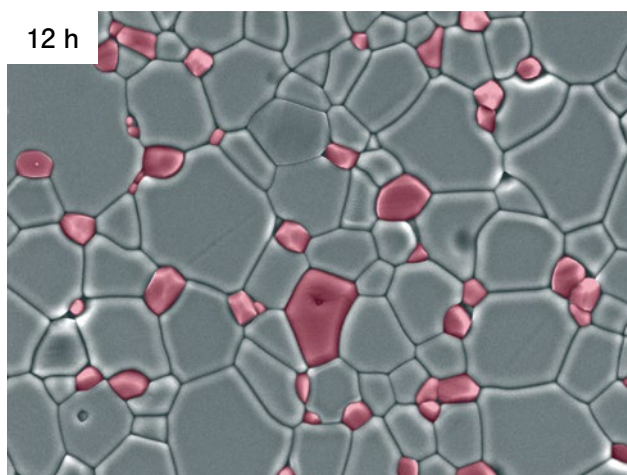
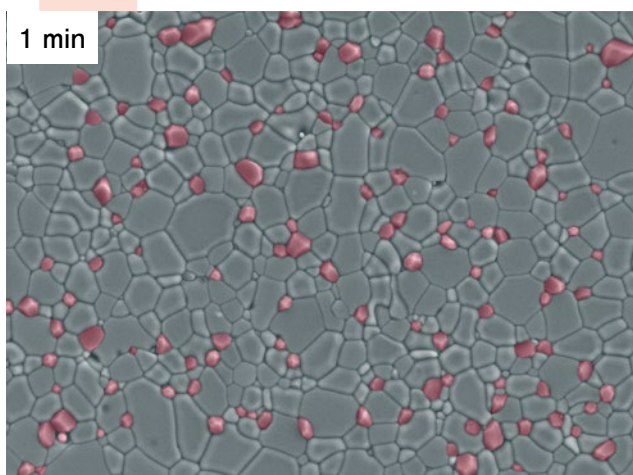


Plus

地震研究所 ニュースレター

No.40
NEWS LETTER Plus
Earthquake Research Institute,
The University of Tokyo



プレート運動やマントル対流は、長大な時空間スケールで起きる。物質科学系研究部門の平賀岳彦教授は、微細な鉱物粒子から成る高緻密な人工岩石を自作して実験に用いることで、そうした地球内部の変動現象を短時間の室内実験で再現している。岩石に力が加わることで鉱物粒子が成長し、サイズや形が変わり、移動・回転し、結晶軸の向きがそろう様子を連続的に捉えることに成功。それらのメカニズムも明らかにした。そして平賀教授は、地球内部のさまざまな変動現象や性質は鉱物粒子の粒成長で説明できるのではないか、と考えている。

特 集

粒成長が地球内部を 支配している!?



東京大学地震研究所

粒成長が地球内部を支配している!?

物質科学系研究部門 教授

平賀 岳彦

マンツルの超塑性を人工岩石で再現

世界で唯一無二の石をつくり、地球内部のダイナミックな現象を実験室で再現する——それが平賀岳彦教授の研究手法だ。

平賀教授は、地球内部のマンツルを模擬した人工岩石をつくり、秒速0.001mmでゆっくり左右に引っ張る実験を行った。数時間引っ張り続けると、岩石が5倍以上に伸びた(図1)。「かたい岩石が水あめのように伸びたのです。それを見たときの興奮は今でも忘れられません」。物質に力を加えたときに通常ならば壊れてしまう破壊点を超え数倍以上に伸びる特異な現象を「超塑性」と呼ぶ。

地球表面は十数枚のかたい岩石の板、プレートに覆われている。プレートは地殻とマンツル最上部から成り、海嶺で生まれ、一定方向に移動し、別のプレートの下に沈み込んでいく。そのとき、プレート境界やその下の上部

マンツル内などで超塑性が発現すると考えられていた。推測にとどまっていた地球内部の超塑性を、平賀教授が人工岩石を用いた室内実験によって初めて実証したのだ。

人工岩石は、オリビンという鉱物の粒子を焼き固めてつくった。岩石は鉱物粒子が集まったものであり、マンツルの主成分であるかんらん岩は主にオリビンで構成されているからだ。マンツルに多く含まれている輝石やペリクレーズという鉱物も加えた。

「超塑性の発現に成功したポイントは鉱物粒子の小ささ」と平賀教授は言う。岩石の変形は、鉱物粒子を構成する原子の移動(拡散)によって起きる。粒子が小さいほど拡散による変形が効率よく進み、岩石全体も速く変形する。「プレートの沈み込みを伴うマンツル対流は数千kmのスケールで数千万年から数億年かけて起こり、マンツルの超塑性もそうした時空間スケールで発現します。マンツルのオリビンの粒径は1~10mmであるのに対して人工岩石のオリビンの粒径は1 μ m。1000分の1から1万分の1という微小な粒子から成る人工岩石を使うことで、長大な時空間スケールで起きる地球内部の変動現象を、数時間の室内実験で再現できたのです」

結晶軸がそろふ原因は粒界すべり

この研究は大きく広がっていく。変形前後

の人工岩石を電子顕微鏡で詳しく調べたところ、変形後は鉱物粒子のサイズ(粒径)が大きくなっていた。隣り合う同じ種類の鉱物粒子が合体して大きくなっていく粒成長が起きたのだ。さらに、鉱物粒子の向き(結晶軸)が特定の方向にそろっていた。「どのようなメカニズムで鉱物粒子の結晶軸がそろふのかを明らかにしたいと思いました。定説となっていたメカニズムはちょっとおかしいな、と感じていたのです」と平賀教授。

マンツルの岩石を地下深から直接取ってくることはできないが、マンツル最上部を含む海洋プレートが陸上に現れている特殊な場所がある。そこで採取されたマンツルかんらん岩の観察などから、オリビンの結晶軸が特定の方向にそろっていることが分かっている。地震の発生に伴って生じる地震波が地球内部を伝搬するとき、方位によって伝搬速度が異なることが知られ、「地震波速度異方性」と呼ばれる。波の伝搬速度は1個の鉱物粒子の中でも方向によって異なることから、鉱物粒子の結晶軸がそろふことで地震波速度異方性を生み出していると考えられている。そして結晶軸がそろふ原因とされていたのが、転位クリープである。転位クリープとは、粒子の中に原子の結合が強い面と弱い面があり、力が加わると原子の結合が弱い面がすべることで生じる変形をいう。粒子内の特定の面がすべって粒子が変形し、結晶軸がそろふ。それが定説になっていた。

「上部マンツルで転位クリープが起きるには、鉱物粒子のサイズがいくつで、どのくらいの力が加わる必要があるか、推定されています。しかし、さまざまな観測から導き出されている値と合わないのです。そこで私たちは、鉱物粒子の結晶軸がそろふ本当のメカニズムを明らかにするため、その様子を詳しく観察してみようと考えました」

マンツルを模擬した人工岩石の表面に目印となる細い線を何本も引き、力を加えて電子顕微鏡で観察して、また力を加えて観察して、と繰り返せば、粒子1個1個の振る舞いをこま送りのように捉えられるのではないかな? そんな平賀教授のひらめきを大学院生が実現し、粒子が相対的な位置を変え、回転し、

図1 超塑性を発現したマンツルを模した人工岩石

上は変形前の試料。下は変形後の試料で、かたい人工岩石が500%以上伸びた。



図2 鉱物粒子の粒界すべりによる移動・回転

人工岩石試料の表面に幅100nmの溝を掘り、それに平行な方向に圧縮試料を電子顕微鏡で観察することを繰り返した。1と4の粒子は1こま目では離れている。圧縮されると粒界すべりが発生して近づき、3こま目では接触し、4こま目では合体している。4の粒子は圧縮に伴って右回転し、4こま目では最初と比べて20度回転している。上段のスケールバーは5 μ m、下段は1 μ m。

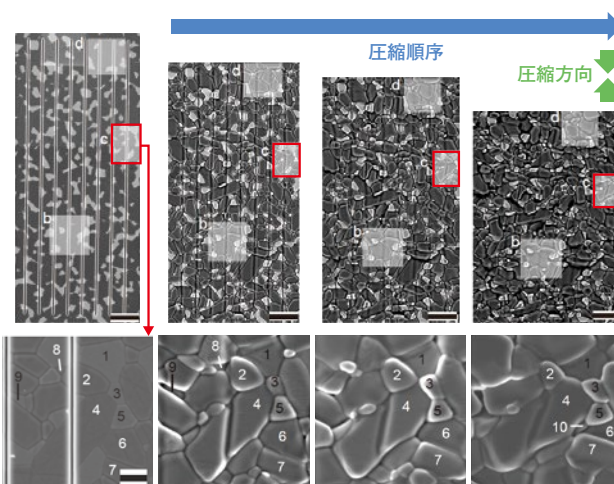
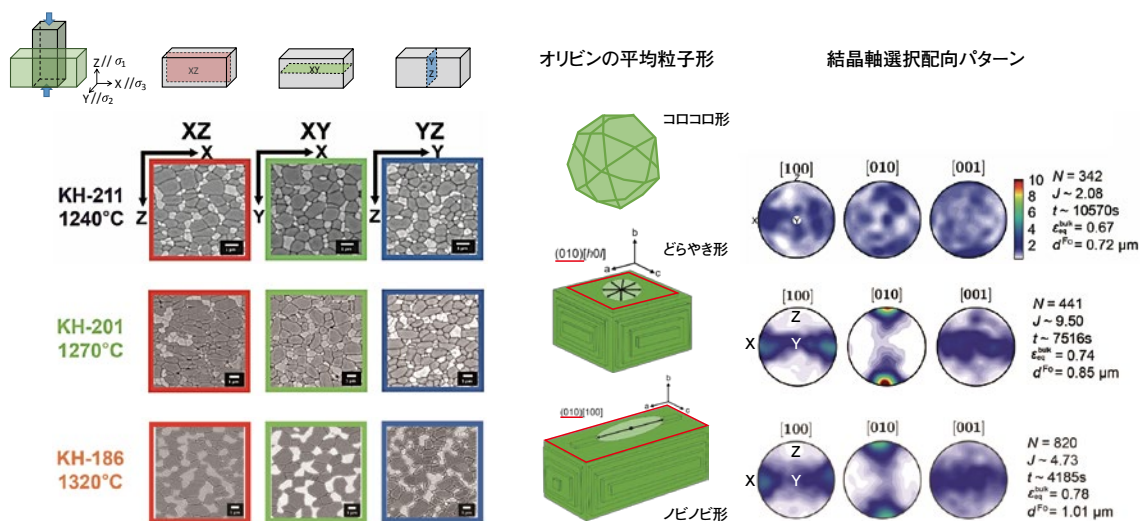


図3 オリビンの粒子形と結晶軸選択配向

左は人工岩石試料断面の電子顕微鏡写真。濃いグレーがオリビン粒子、白がダイオプサイド。右は結晶軸選択配向パターンで、結晶軸選択配向が強いほど暖色で示されている。平均粒子形がコロコロ形はほぼランダム、どらやき形はb軸一軸集中(AG-タイプ)、ノビノビ形は三軸それぞれ集中(A-タイプ)と、粒子形によって結晶軸選択配向パターンと強度が違う。



結晶軸がそろっていく様子を観察することに成功した(図2)。

「人工岩石を変形させたときの鉱物粒子の振る舞いを詳細に観察・解析した結果、力が加わると粒子と粒子の境界がすべり、その粒界すべりによって粒子が相対的な位置を変え、回転し、結晶軸がそろっていくことが明らかになりました。定説となっていた転位クリープでは、粒子の中にある原子の結合が弱い面がすべります。そうではなく、粒子の外、粒界がすべて結晶軸がそろっていくことで、地震波速度異方性が生じることを示しました。定説を覆す発見でした」。この粒界すべりは原子の拡散によって生じる変形であり、そのような変形を拡散クリープと呼ぶ。

粒子の形が結晶軸の配向を決めている

平賀教授らはさまざまな実験を行う中で、同じ組成の人工岩石でも温度によって鉱物粒子の形が変わることに気付いた。そこでオリビンとダイオプサイドから成る人工岩石を作製し、試料ごとに温度と継続時間を変えて変形させる実験を行った。すると、試料ごとにオリビン粒子のサイズが違い、また形が異なってくるのが分かった。粒子の3次元的な形を捉えるために、3方向から観察した(図3左、濃いグレーがオリビン粒子)。また岩石は多結晶であり粒子の形は周りの粒子の影響を受けるため、平均化した形状で議論する必要がある。そうして求めた平均粒子形は、1240°Cでは丸いコロコロ形、1270°Cでは扁平などらやき形、1320°Cでは細長いノビノビ形であった(図3中央)。

どらやき形とノビノビ形は、粒子の表面に広い平滑な面を持つ(図3中央、赤線)。力を加えると、その面がすべて粒子が回転し

て結晶軸がそろっていく(図3右、結晶軸がどの向きにそろっているかという結晶軸選択配向パターンを示し、暖色ほど強く配向していることを示す)。しかも、右回転を始めた粒子は結晶軸がそろうまで右回転、左回転を始めた粒子は結晶軸がそろうまで左回転を続けた。すべりやすい面、すべりやすい方向が決まっているのだ。

結晶軸がそろわない場合があることも分かった。コロコロ形の場合で、粒子の表面に広くはないが平滑な面がたくさんあるため、すべりやすい面・方向が決まっておらず、粒子はクルクル回って結晶軸はそろわない。

「粒成長の過程で温度や時間によってオリビン粒子の形が変化し、その形が結晶軸選択配向のパターンや強さを決定している、ということが明らかになりました」と平賀教授は解説する。「それが分かったとき、『雪は天からの手紙』という言葉が浮かんできました」

オリビンは地底からの手紙

雪は天からの手紙——初めて人工雪の作製に成功した物理学者・中谷宇吉郎の有名な言葉である。中谷は、雪の結晶の形やサイズは気温と水蒸気量によって変わることを明らかにして、その関係を図に表した。中谷ダイヤグラムと呼ばれている。「これは雪の結晶の一生を表したものであり、また結晶の形やサイズから上空の状態を推定できることを示しています。オリビン粒子でも同じようなこと、つまり粒成長に伴って変化するオリビン粒子の形やサイズから地球内部の状態を推定できるのではないか？ そうひらめいたのです」と平賀教授。

実験で示された温度に応じた粒成長によるオリビン粒子の結晶軸選択配向パターンとその強さから地震波速度異方性の分布を

予想したところ、太平洋下でのアセノスフェア(上部マントルのやわらかい層)で観測されている地震波速度異方性の分布とよく合っていた。また、岩石を構成する鉱物粒子が小さいほど岩石はやわらかく、大きいほどかたくなる。別の粒成長実験で明らかになったオリビン粒子のサイズ(表紙、グレーがオリビン粒子)も、アセノスフェアのかたさ(粘性率)をよく説明する。そうした事実から平賀教授は、「地球内部の状態はオリビン粒子の粒成長に伴う形とサイズに支配されているのではないか」と考えているのだ。

ただし、オリビン粒子の形やサイズを決定する条件は、温度以外まだ詳しく分かっていない。「オリビン粒子の形やサイズと地球内部の状態を正確に結び付けるためにも、中谷ダイヤグラムの岩石版を早く完成させたい」と意気込む。岩石は多結晶であるため、単結晶である雪の場合とは異なる難しさが多々ある。それでも平賀教授のところには、超微細な鉱物粒子から成る高緻密な人工岩石試料を作製できるという、唯一無二の技術がある。鉱物組成も精度よく自在に制御できる。独自の実験装置も開発している。中谷ダイヤグラムの岩石版づくりは、着々と進んでいくことだろう。

平賀教授には実現したいことがある。「マントルは、プレート沈み込み帯で下降して核との境界まで沈み込み、水平に移動し、ホットスポットや海嶺の下で上昇してくる。そうした対流の間にオリビンやその高压で安定な鉱物粒子は、粒成長をして形とサイズを変えていきます。サイズが変わると、マントルのかたさが変わります。地球内部のかたさの変化は粒成長で決まっているかもしれないのです。鉱物粒子の一生を通して地球内部を理解したいと思っています」

TOPICS

広報アウトリーチ室活動報告

●「東大オープンキャンパス/一般公開」開催報告

2023年も東京大学オープンキャンパス/地震研一般公開はオンラインで開催されました。公開講義、学生実験などのライブ配信を8月2日に実施しました。「図書室所蔵資料展示」などのオンデマンドコンテンツは、地震研ホームページの一般公開のページでいつでもご覧いただけます。

●「大正関東地震から100年」 特集ホームページを公開

2023年9月1日で大正関東地震から100年となります。地震研は大正関東地震を契機として設立されました。特集ホームページでは、地震研が所蔵する当時の波形記録などを紹介しています。



●「大正関東地震100年シンポジウム」開催報告

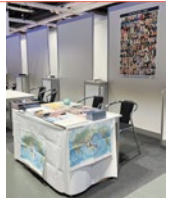
2023年7月23日と30日、東京大学安田講堂にて大正関東地震100年シンポジウム「関東大震災と東京大学—教訓を首都直下地震対策に活かす—」を開催しました。

●「JpGU 2023」に出展

2023年5月21～26日に開催された日本地球惑星科学連合(JpGU)2023年大会の会場(幕張メッセ)に、地震研展示ブースを出展しました。

●「EGU General Assembly 2023」に現地出展

2023年4月23～28日に開催された欧州地球科学連合(EGU)2023年大会に、地震研展示ブースを約3年ぶりに現地出展しました。



●「サイエンスカフェ」開催報告

- 第17回「火山活動の評価と噴火予測」
橋本武志 教授(北海道大学大学院理学研究院)・行竹洋平 准教授(東京大学地震研究所) 2023年1月12日
- 第18回「関東大震災:地震像と社会的影響」
酒井慎一 教授(東京大学大学院情報学環・地震研究所)・関谷直也 准教授(東京大学大学院情報学環) 2023年4月21日
- 第19回「1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震」
小菅正裕 名誉教授(弘前大学)・佐藤比呂志 名誉教授(東京大学) 2023年5月17日

●「懇談の場」開催報告

2022年12月9日にオンラインで開催しました。「光ファイバー地震計が拓く海域観測の新展開」について、篠原雅尚教授(観測開発基盤センター)によるお話でした。



本所永遠の使命とする所は
地震に関する諸現象の科学的研究と
直接又は間接に地震に起因する災害の予防並に
軽減方策の探究とである(寺田寅彦)

プレスリリース

- 2023年6月19日 世界初、ミュー粒子による地下ナビゲーションに成功
- 2023年5月22日 国産のシリコン振動式の水圧計で深海での海面変動の観測に成功—南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)に採用し、被害低減に貢献—*
- 2023年1月13日 世界初、ミュー粒子によるワイヤレスセキュリティ技術
- 2023年1月11日 南海トラフ巨大地震が連続発生する確率を算出*

*共同プレスリリース

受賞

- 藤田航平 准教授、YEOW Trevor Zhiqing 研究員、王 澤霖 D3、毎田悠承 准教授らが2022年度日本地震工学会大会優秀発表賞を受賞
- 超大規模地殻変動解析に関する研究がGordon Bell Prize finalistに選出
- 佐竹健治 教授・所長が2022年濱口梧陵国際賞を受賞
- 井田喜明 名誉教授が令和4年秋の瑞宝中綬章を受章
- 小原一成 教授が令和4年秋の紫綬褒章を受章

最近の研究



最近の研究を紹介するコンテンツ「最近の研究」に、新たな論文が追加されています。ぜひご覧ください。

- 日本海盆の海洋プレート内部に見つかった予期せぬ不連続面
- 浅部—深部流体循環をとらえる:阿蘇カルデラを含む九州中部での地下水組成解析
- 大規模データ同化に基づく摩擦特性空間分布不確実性の高解像評価
- 2021年福徳岡ノ場噴火における海水とマグマとの相互作用のプロセスを解明

INFORMATION

お知らせ

- 「懇談の場」を2023年8月30日(水)16時からオンラインで開催予定です。今号の特集「粒成長が地球内部を支配している!？」について、平賀岳彦教授によるお話です。接続情報をお送りしますので、orhp@eri.u-tokyo.ac.jp宛てに件名を「懇談の場参加希望」としてEメールをお送りください。お気軽にご参加ください。

人事異動

- 2023年5月1日
採用 三反畑 修 地球計測系研究部門 助教
- 2023年4月16日
昇任 五十嵐俊博 地震予知研究センター 准教授
小山崇夫 地震火山噴火予知研究推進センター 准教授
- 2023年4月1日
採用 伊東優治 地震予知研究センター 助教
辻 浩 技術部小諸地震火山観測所 再雇用職員
小林花音 財務チーム・管理担当 一般職員
転入 落合弘樹 庶務チーム・環境安全管理担当 専門員
春山秀雄 研究支援チーム・共同利用担当 主査
前田美貴子 財務チーム・契約担当 係長
佐伯祐哉 財務チーム・経理担当 係長
中井珠美 庶務チーム・人事担当 主任
近藤六花 庶務チーム・庶務担当 一般職員
小原智未 庶務チーム・図書担当 一般職員
井上紗江 研究支援チーム・研究協力担当 一般職員
転出 瀬戸教仁 庶務チーム・環境安全管理担当 上席係長

- 転出 狩野真二 財務チーム・経理担当 上席係長
里村俊彦 財務チーム・契約担当 係長
川本あゆみ 庶務チーム・庶務担当 主任
高角敦子 庶務チーム・人事担当 主任
吉田芳江 研究支援チーム・研究協力担当 主任
昇任 三浦弥生 物質科学系研究部門 准教授
一瀬建日 海半球観測研究センター 准教授
横島 潤 庶務チーム・庶務担当 上席係長
- 2023年3月31日
定年退職 小屋口剛博 数理系研究部門 教授
山野 誠 地震予知研究センター 教授
辻 浩 技術部小諸地震火山観測所 技術専門員
根岸恒夫 研究支援チーム・共同利用担当 上席係長
早期退職 林 浩彦 財務チーム・管理担当 主任
- 2023年3月16日
昇任 西田 究 数理系研究部門 教授
- 2023年2月1日
転出 丹治有沙 庶務チーム・図書担当 一般職員
- 2022年12月31日
退職 大谷真紀子 数理系研究部門 助教

東京大学地震研究所
ニュースレターPlus
第40号

発行日 2023年8月16日
発行者
東京大学 地震研究所
編集者
地震研究所 広報アウトリーチ室
制作協力
フォントクリエイト
(デザイン: 酒井デザイン室)

問い合わせ先
〒113-0032
東京都文京区弥生1-1-1
東京大学 地震研究所
広報アウトリーチ室
Eメール
orhp@eri.u-tokyo.ac.jp
ホームページ
https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/