

# 井出 哲 -Satoshi Ide-

教授 地震科学

E-mail : ide@eps.s.u-tokyo.ac.jp

http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ide/



## 地震現象の物理的理解へ向けて

非常に希に社会のあり方を変えてしまうほどの巨大地震が起きます。一方、地球上あちこちでほとんどいつも無数の小さな地震が起きています。どちらも本質的には同じ現象、地下の断層で起きる破壊を伴うすべり運動（破壊すべり）です。巨大地震の破壊すべりは広範囲で起きますが、同じように大規模な破壊すべりが起きても地震波がほとんど出ないこともあります。地震の振る舞いは多様です。何がこの違いを生むのでしょうか？地震を根本から理解するには、プレート運動による応力の蓄積や、岩石の破壊と摩擦すべりを支配している法則について知る必要があります。地震の複雑さや多様性をなるべくシンプルで現実的な物理法則で説明し、その振る舞いの予測可能性を高める、それが私たちの目標です。

## 地震波形インバージョンによる地震破壊過程解析

地震が起きると多くの観測点で地震波が記録されます。多数の観測点の地震波形を同時に説明できる破壊すべりの分布を推定するのが断層すべりインバージョンといわれる手法です。私たちは手法を開発、改良しながら多くの地震について詳細な破壊すべりの推定を行っています。例えば東日本大震災を引き起こした東北沖地震は図1のような破壊すべりの時間空間分布として推定されます [1]。プレート境界の 400 km x 200 km くらいにわたって約 100 秒間、破壊すべりが起きました。最浅部で起きた大きな変動が大きな津波を引き起こしたことがわかります。他にも 1995 年の兵庫県南部地震や 2003 年十勝沖地震のような大地震から鉱山で観測される微小地震まで、同じような手法を用いて破壊すべりの詳細を明らかにしてきました。

断層面での破壊すべりの詳細から、震源の物理法則を考察できます。例えば私たちは断層すべりインバージョンの結果から破壊と摩擦の法則を推定する手法も開発してきました。その計算結果から、地震によってプレート運動が地球内部に蓄積したエネルギーが地震波エネルギーとして解放される割合もわかります。実は地震時には多くのエネルギーが周囲の岩石の破壊のために消費され、地震波にならないこともわかりました。地震のエネルギー放出が非効率的なのは不幸中の幸いです。

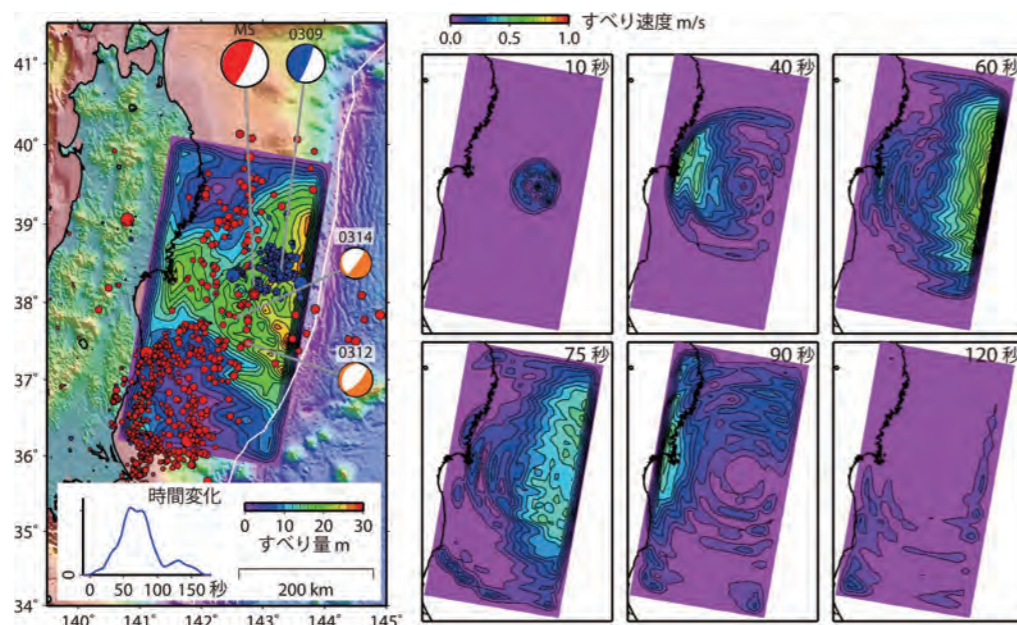


図 1. 2011 年東北沖地震のすべり分布と 6 つの時刻でのすべり速度のスナップショット。

## ダイナミックな破壊過程のシミュレーション

弾性媒質中に断層面と摩擦法則を仮定して微分方程式を解き、地震の破壊すべりをシミュレーションすることができます。シミュレーションを通して、何が地震現象の本質的要素か同定することも一つのゴールです。最近重視しているのは複雑な断層面の形状が地震破壊に及ぼす影響です。現実の断層面は様々なスケールの凸凹を持ちます。地震は最初小さな凸凹から始まり、次々に大きなスケールの凸凹で破壊すべりを起こしながら大地震になります。このような状況を表現しようと問題の定式化および新しい数値計算手法を開発しています (図 2) [2]。

日本周辺の沈み込み帯ではプレート境界面にデコルマ、分岐断層などの特徴的な構造が発達します。局所的な構造が破壊すべりをどの程度コントロールするかも現在シミュレーションを用いて研究している重要な問題です。同様のシミュレーションをもとに東北沖地震を考察すると、破壊すべりが地表に達したことでダイナミックオーバーシュート（すべり過ぎ）が起き、それが地震と津波の規模を増幅したと考えられます。

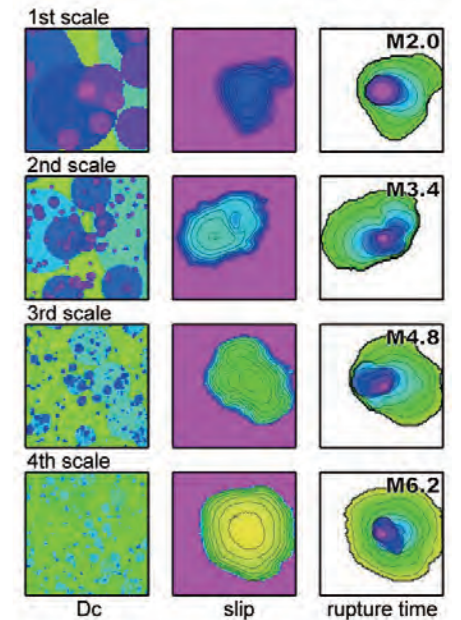


図 2. スケールを大きく変えて成長する地震モデルの例。

## 地震とゆっくり地震の総理解を目指して

一般に地震の起こり方は複雑です。しかし平均的な地震の性質、たとえば地震の断層運動の大きさ（地震モーメント）と波動エネルギーの放射量の比は地震のサイズにほとんど依存しません。また地震モーメントは地震の継続時間の 3 乗に比例します (図 3)。これらのスケール法則は地震が広い範囲で統計的に自己相似的な現象であることを示唆します。

このような地震のスケール法則を満たさない奇妙な地震がここ 10 年ほど、世界各地で見つかってきました。西日本では深部低周波微動、低周波地震、超低周波地震、スロースリップというサイズの異なる現象がほぼ同じ時刻に同じ場所で起きています。私たちはこれらの現象は共通のメカニズムを持つ「ゆっくり地震」というひとまとまりの現象であり、地震モーメントと地震の継続時間が比例する (図 3) という、普通の地震と異なるが単純なスケール法則で関連付けられることを見出しました [3]。但し、まだこれらの現象の背後にある物理法則はわからないことだらけです。私たちは現在地震観測、データ解析、シミュレーションなどの手法を用いて、ゆっくり地震と普通の地震の総合的理解を目指しています。

### 参考文献

- [1] Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza, Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, Science, 332, 1426-1429, 2011.
- [2] Ide, S., and H. Aochi, Earthquakes as multiscale dynamic rupture with heterogeneous fracture surface energy, J. Geophys. Res., 110, 10.1029/2004JB003591, 2005.
- [3] Ide, S., G. C. Beroza, D. R. Shelly, and T. Uchide, A scaling law for slow earthquakes, Nature, 447, 76-79, 2007.

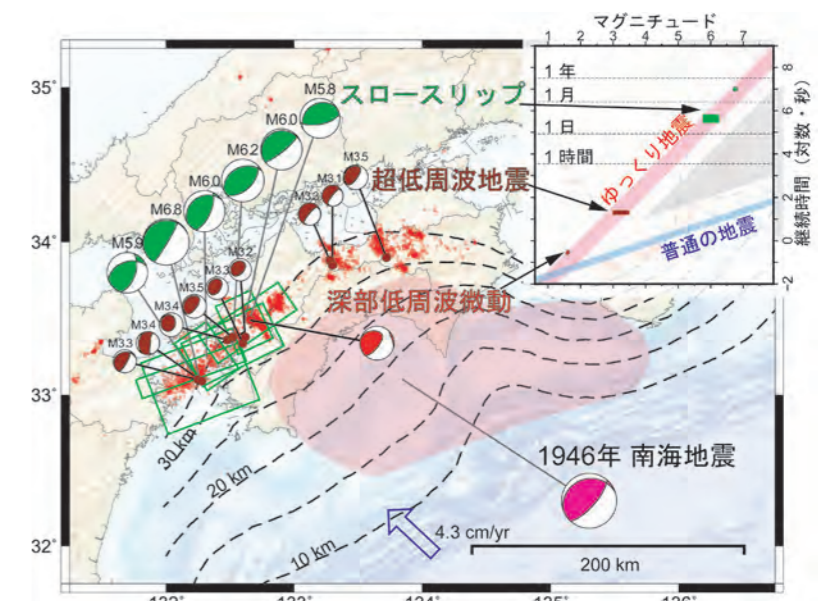


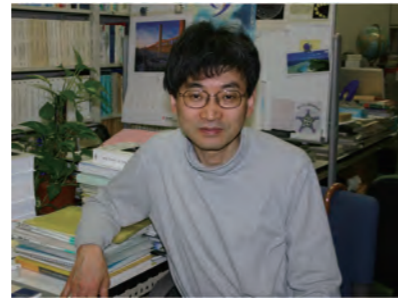
図 3. 四国西部の「ゆっくり地震」とそのスケール法則。



# 小澤 一仁 -Kazuhito Ozawa-

教授 岩石学

E-mail: ozawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp



## 地球惑星物質から読む地球惑星の熱史と分化過程

固体地球の大規模層構造は、時空間的に局在化した液相の存在による地球内部の分化過程のたまもので、それは地球内部から地表への熱輸送によって駆動されてきたと言えます。その熱源は地球形成初期に内部にため込まれた地球形成時の集積熱や放射壊変による発熱です。液相として上部マントル以浅で重要なものは、珪酸塩溶融体であるマグマです。マグマは、地球深部の物質や熱の輸送によって、主として最上部マントル～下部地殻で発生し、固相からの分離を経て、海洋と大陸地殻を形成・改変します(図1)。私は、地球の分化史を理解する上で地球熱史の理解は不可欠であるとの基本的考えに立ち、地球のマントル物質、火山岩、深成岩、変成岩、地球外物質等様々な地球惑星物質を対象とし、鉱物・岩石科学的手法と理論・実験・モデリングの手法を組みあわせ、物質の形成や改変に関わった熱現象の情報を抽出し、それらを物理化学過程と結びつけて地球惑星の熱・分化史を解読することをめざしています。

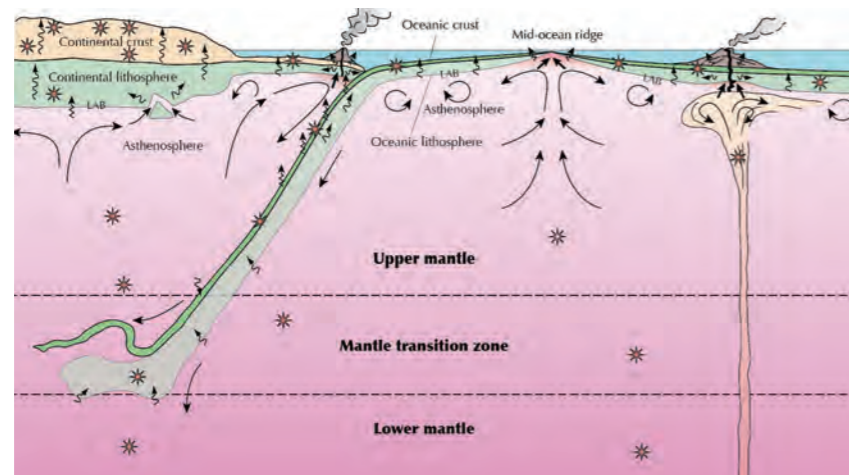


図1. 地球内部の発熱、熱輸送過程の概要。

## リソスフェアの熱構造の変動から読み解くリソスフェア・アセノスフェアの熱・物質相互作用

上部マントル物質は、マグマに取り込まれ地質学的に見ればほぼ瞬間的に地表にもたらされるか、固体状態でゆっくり流動しながらマントル～地殻内を上昇することで地表に露出します。前者はマントルゼノリスと呼ばれ、リソスフェアの熱構造とその変動を記録しています。後者は上昇過程の影響を色濃く受けますが、マントル上昇の温度・圧力履歴を把握すれば、上昇前のリソスフェアの熱構造の記録を取り出せます。図2は、マントルゼノリス中の反応組織で、中心に反応し残しのざくろ石があり、それを反応生成物を取り囲んでいます。粒径が外に向かって粗粒になることから、アセノスフェアの運動による加熱に伴って反応

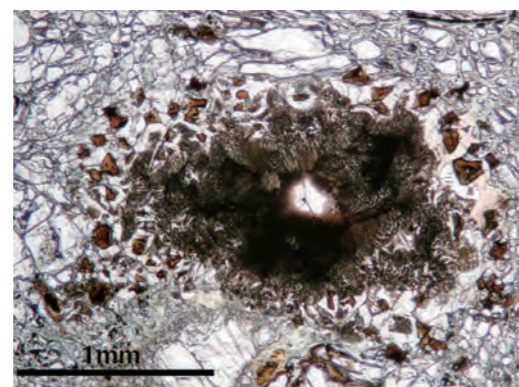


図2. フィンランドのキンバーライト中に産するマントルかんらん岩ゼノリスの反応組織。中心にざくろ石が残り、外に行くにつれて粗粒の反応組織になっており、リソスフェアがアセノスフェアの運動による温度上昇を経験したことを示唆している。

が進んだことがわかり、その運動の時間スケールが推定できます。一方、図3は、固体状態でゆっくり上昇したかんらん岩中の斜方輝石巨晶中のAlの濃度分布です。結晶の表面近くでAlが多いゾーンが存在し、上昇中に加熱イベントを経験したことがわかります。中心部分には、ほぼ一様な低いAlの濃度の領域が存在し、この部分が上昇開始前のリソスフェアの熱構造を反映しています。中心組成の岩体内空間変化から、上昇前のリソスフェアが高い地温勾配が推定されます[1]。図3のような斜方輝石のAlの累帯構造解析によって、かんらん岩の冷却・上昇時の局所的加熱イベントが検出できますが、このイベントの熱源は、アセノスフェアの対流です。このかんらん岩体では、深部にあったリソスフェアが浅所のリソスフェアを覆って露出しています。この逆転構造は、アセノスフェア、リソスフェア、地殻の変形流動のカップリングによって生じたもので、現在知られている地殻～マントルの地震波構造を考慮した熱輸送モデルの解析によりリソスフェア・アセノスフェア間の熱と物質のやりとりを明らかにできます。

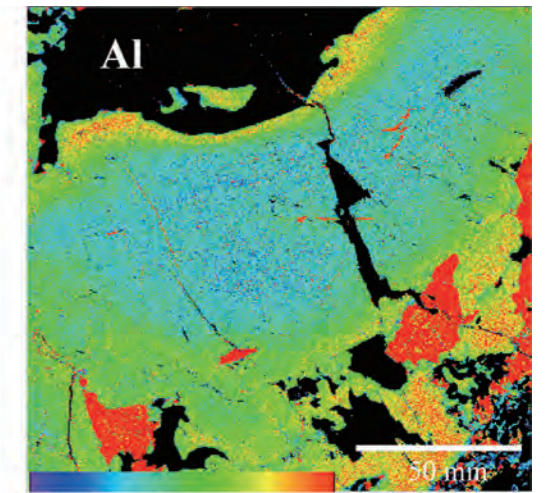


図3 北海道幌満かんらん岩中の斜方輝石のAlの元素分布。この元素分布に、上部マントルの温度・圧力履歴が記録されている。

## オルドビス紀オフィオライトパルスの形成機構から読み解く地球の熱史

原生代以降のオフィオライトは、原生代後期(750 Ma)、オルドビス紀(450 Ma)、ジュラ紀～白亜紀(150 Ma)に形成頻度のピークを持っており、これらは、初生的地殻形成イベントのパルスと同期しているように見えます。これらを説明するモデルとしては、地球深部からの間欠的なプレーム上昇や超大陸の形成と分裂に関係した表層テクトニクスによる説明がなされていますが、何が間欠性をもたらしているのかは、いまもって定かではありません[2]。そこで、より多くの情報を残している顕生代初期(カンブリア紀～オルドビス紀)のオフィオライトパルスに着目し、そのパルスの時空構造を明らかにする研究をすすめています[2]。図4は、オルドビス紀の島弧オフィオライトが露出する南部北上山地の島弧発達過程です。この島弧オフィオライトは、含水鉱物を多く含むマントルもつという特異性を持っており、同様な特徴を持つオルドビス紀ノオフィオライトはスペインなどでも知られており、グローバルな視点からこの現象を検討することで、オルドビス紀が地球熱史の特異点であるかどうかを明らかにしようとしています。

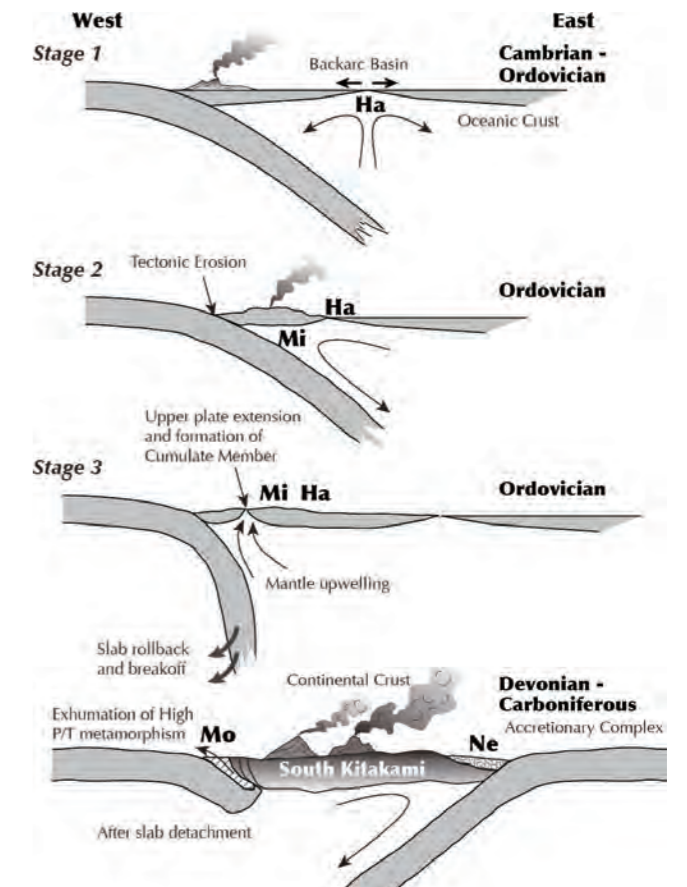


図4. 南部北上山地のオフィオライト、低温高压変成岩、花崗岩質火成活動の時空分布から推定した島弧発達過程 [2]。

### 参考文献

- [1] Ozawa, K., Thermal history of the Horoman peridotite complex: a record of thermal perturbation in the lithospheric mantle. *J. Petrol.*, 45, 253-273, 2004.
- [2] Ozawa, K., et al., Evolution processes of Ordovician-Devonian arc system in the South-Kitakami Massif and its relevance to the Ordovician ophiolite pulse. *Island Arc*, 24, 73-118, 2015.



# 廣瀬 敬 -Kei Hirose -

教授 地球惑星深部物質学・高圧地球科学

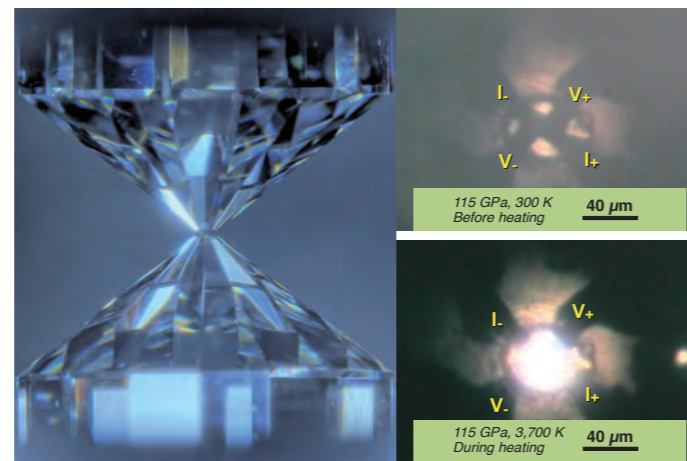
E-mail: kei@eps.s.u-tokyo.ac.jp



## 高圧下での物質のふるまいから地球を理解する

廣瀬研究室では、「超高压高温実験」という手法で、地球や惑星の形成、進化、そして現在の姿に関する謎解きをしています。天然のダイヤモンドと高出力のレーザーを用いた「ダイヤモンドセル」と呼ばれる装置（図1）を用いて、地球の中心を超える超高压高温環境を比較的容易に作り出すことができます [1]。この装置を用いることにより、地球内部のあらゆる物質を実験室で合成できるのです。地球表面にある物質のほとんどは高圧下で相転移を起こし、別の形の結晶構造は変わって、異なる物性を持つようになります。そのような結晶構造や物性を高圧下で測定して初めて、地球の構造やダイナミクス（運動）、さらには進化を理解することができます。試料が小さいので、実験は細かい作業ですが、不器用な学生でも大丈夫です。とにかく実験が好きな学生や、実験ならできると思う学生を歓迎します。

図1. ダイヤモンドセル高圧発生装置。先端の尖った2つのダイヤモンドで試料を加圧し（左）、さらにレーザーで加熱して試料に高圧高温状態にする（右下）。地球深部に相当する高圧高温下で、電気抵抗率などの物性を測る（右の2枚）。



## 地球や惑星の深部はどうなっているのか？

地球や惑星の“構造”や“物質の状態”、さらには“進化”を理解する上で重要なのが、高圧高温下での相転移や融解です。たとえば上部マントルの主要鉱物かんらん石は深さ 410km で、より緑色の鉱物ウォズリアイトへ相転移します。これが上部マントルと遷移層の境界です。ウォズリアイトの特性から、遷移層は上部マントルより水を多く含むと考えられているのです。同様の相転移はマントル中であと3回起こります。最下部マントルにおける相転移は廣瀬研究室で世界で初めて発見されたものです（図2） [2]。ポストペロフスカイトの特性から、最下部マントルは伝導性が高く、流動性に富むとされています。

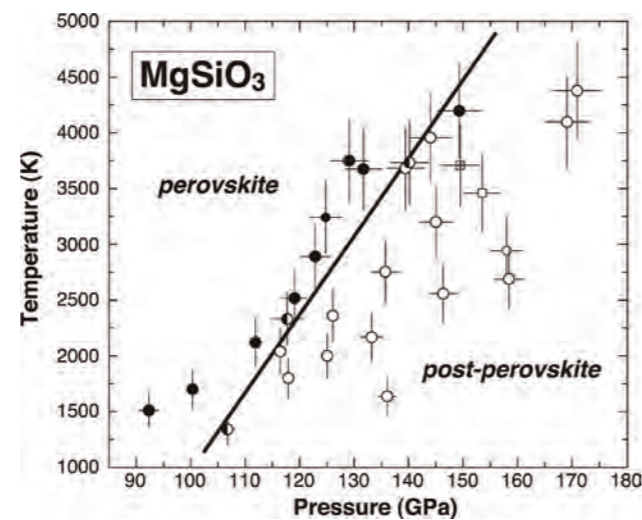


図2. マントルを代表する化学組成  $MgSiO_3$  のペロフスカイトからポストペロフスカイトへの相転移境界。相転移は最下部マントルの温度 2400K で、およそ 120 万気圧で起きる。この圧力は、地震波速度が不連続に上昇する深さ 2600km の圧力と一致している。

あらたな相転移を発見すればもちろん重要な成果ですし、相転移境界の圧力や傾き・融解温度を精度良く決めることも大切です。地球のマントル深部やコアに相当する超高压下まで、融解温度や相転移境界がきちんと決まっていない、重要な物質はたくさんあります。コアの温度を推定する上で重要な鉄の融解温度についても、コアの圧力下（135 万気圧以上）における過去の結果は 1000 度以上ばらついています。

さらに、このような実験結果から推定される地球の構造を実際に観測で確かめるため、地震波などを使った観測グループとの共同研究も重要です。またマントル対流のシミュレーションに関する共同研究も積極的に進めています。

## 地球はどのようにして出来たのか？

初期の地球では、ジャイアントインパクト・マグマオーシャン・コアとマントルの分離など、一連の大きなイベントがあり、それらを通じて、地球は大気・マントル・コアへと分化したと考えられています。それが現在へと続く、地球の出発点となっただけです。これら一連の大イベントの詳細はまだよく理解されていませんが、現在でも観察され、その成因があきらかにされていない、地球深部の“異常”が大きなヒントになると考えています。またコアには鉄・ニッケル以外に多量の“軽元素”が含まれていることは 65 年も前から知られているにも関わらず、現在でも大きな謎とされています。この軽元素を同定することは、地球を作った原材料物質は何だったのか、水などの揮発性成分は地球にいつ運ばれてきたのか、金属は地球の中心へとどのように集積したのか（コア形成）、など重要な問題を解決する大きな手がかりになります。それには、高圧高温下における、マグマ（マントル）と金属（コア）の化学平衡や、マグマオーシャンの結晶化をしっかりと理解する必要があります。また惑星の形成を理論的に研究しているグループとも議論することが大切です。

## 地球はどのように進化してきたのか？

地球の熱的・化学的進化を理解するには、熱伝導率・粘性・融解相関係・元素分配などを地球深部の環境下で測定する必要があります。過去に行われた、超高压下での測定はかなり限られています。コアの熱進化を計算するのに重要な、鉄の熱伝導率をコアの高圧高温下で初めて測って見たら従来より 3 倍高かった、というのはごく最近の話です [3]。

超高压実験の試料は小さいので化学分析がこれまで困難でしたが、収束イオンビームという装置の導入により、今では初心者でも問題なく、超高压下で化学反応や元素分配を調べられるようになってきました。たとえば、液体金属鉄が高温のマグマオーシャン中を通してコアへと集積していく過程で、マグマと化学反応し、大量のシリコンと酸素を取り込んだと考えられています。最近そのような液体 Fe-Si-O の結晶化実験を行ったところ、地球初期からコアでは二酸化珪素が結晶化してきていたことがわかりました（図3） [4]。これにより、コアが対流し、地球磁場も長い間維持されてきたと考えられます。現在では、内核で液体より重い固体が結晶化する条件を実験から探っています。これが長年議論されてきた、コアの組成を決める有力な手がかりになると考えています。

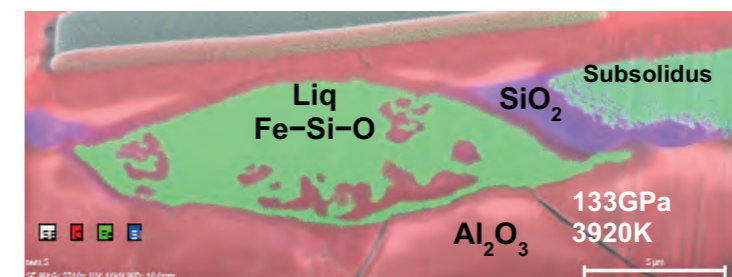


図3. 液体 Fe-Si-O の結晶化実験。シリコンと酸素に富む、初期の地球コアから結晶化する  $SiO_2$ 。

## 参考文献

- [1] Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y., Tatsumi, Y., The structure of iron in Earth's inner core, Science, 330, 359-361, 2010.
- [2] Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N., Ohishi, Y., Post-perovskite phase transition in  $MgSiO_3$ , Science, 304, 855-858, 2004.
- [3] Ohta, K., Kuwayama, Y., Hirose, K., Shimizu, K., Ohishi, Y., Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, Nature, 534, 95-98, doi:10.1038/nature17957, 2016.
- [4] Hirose, K. et al., Crystallization of silicon dioxide and compositional evolution of the Earth's core, Nature, 543, 99-102, doi:10.1038/nature21367, 2017.



# ウォリス・サイモン -Simon Wallis-

名古屋大教授 (2017年9月 本学着任予定)

E-mail : swallis@eps.nagoya-u.ac.jp

http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100003640\_ja.html



## フィールドワークに根ざした 構造岩石学とテクトニクス研究

私は、造山運動プロセスを理解するために、野外調査に根ざした構造岩石学的研究を専門としています。地球を巨大な天然実験室として使い、野外での観測・観察と天然試料を研究材料とする最大の利点は長い時間スケールで起きる地球プロセスの結果を直接に見られることにあります。研究の多くは収束プレート域に分布する岩石の変形や変成履歴を究明することがベースになっていますが、これらの成果を大規模なスケールで起きるテクトニックな運動とリンクさせる為に熱モデリングや年代測定などの手法も研究に取り入れてきました。また、地震学者と連携して岩石変形構造と地震学的異方性やスロー地震の仕組みについて研究しています。

## 沈み込み帯のダイナミクス

収束プレート境界における地震発生やマグマ形成と火山活動を理解するためには、温度構造と流体の移動様式が鍵を握っている。これらのプロセスが起きる深いところを垣間見る方法として、かつて沈み込み帯付近で形成し、その後地表まで上昇した岩石に内在する情報に着目する。

## 沈み込み帯熱構造

沈み込み帯の温度構造は、第一近似的に2つのプロセスの釣り合いで決定される。冷たいリソスフェアの流入によって沈み込み面付近の領域が冷却される。一方、プレート沈み込みによって誘発されるマンテル対流 (図1) により高温マンテルが沈み込み面に向かって流動し、沈み込み面付近を加熱する。

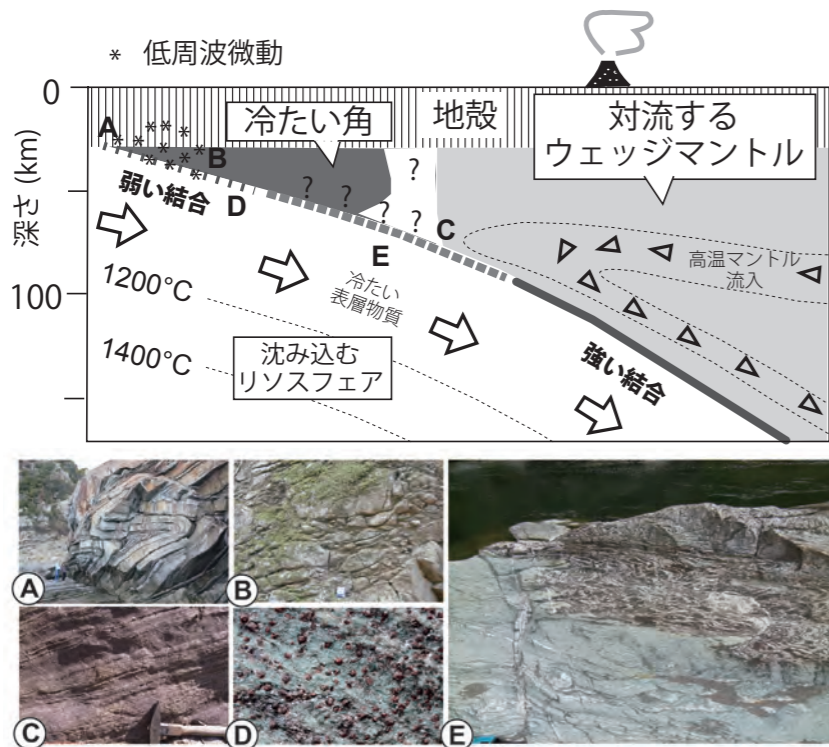


図1. 沈み込み帯の温度構造と主要な構成要素。A: 大規模な褶曲構造を示す付加体の地層。B: 冷たい角の蛇紋岩。C: 沈み込み帯マンテル岩石。D: エクロジャイト (沈み込み型変成作用を被った玄武岩)。E: 褶曲構造を示す変成チャートと玄武岩。

沈み込み型変成岩から推定される圧力温度条件は、熱モデリングから得られた沈み込み面の温度構造と調和的である。ただし、沈み込み境界より下方に分布する変成岩の存在領域 (図 1D, E) を全体考慮すると、岩石の形成条件より熱モデリングの方が優位に冷たい。この不一致はまだ十分に説明されていないが、岩石上昇機構や岩石の形成条件見直しなど、様々な観点から再検討することによって糸口を得ることができると期待される。

## 沈み込み帯における流体の流動様式

次世代の沈み込みモデルを構築するために流体の流速や化学組成などを定量的に見積もることが求められる。加水されたマンテル岩石である蛇紋岩が低周波微動を含む深いスロー地震が起こる領域と一致する沈み込み帯が多いので、これらの現象と地質構造の関係を究明するために、近年、蛇紋岩の形成と変形が重視される課題である。流体流動様式に強い影響を与える面構造の形成と発達を明らかにするために、冷たい角から上昇してきた岩石 (図 1B) の変形・変成履歴を研究している。

## 大陸の高地の形成と拡大

チベットや南米アルティプラノなどの高地の存在が気候などに強い影響を与え、これらの広大な高地の形成と拡大が重要な研究課題である。プレート収束によって分厚くなった大陸地殻が部分溶融するために、中・下部地殻において岩石の強度が大きく低下し、地殻内の大規模な岩石流動が可能となっていることが近年多くの研究者から指摘されている。この現象がチャンネルフローと呼ばれる。チャンネルフローの考えに立つと、中部地殻における岩石注入が高地の拡大と高地周辺の地域における隆起の主要な原因であると予想される。この考えが大陸テクトニクスを理解する上で新しい観点であるのみならず、大規模なチャンネルフローが起きている地域では、上部地殻が中・下部地殻と独立した運動を示し、地表の測量によりリソスフェアの動きを推定することがほぼ不可能であることを意味する。よってこのチャンネルフローモデル検証が大陸テクトニクスにおいて極めて重要である。

気候変動によってかつてチベットと南米アルチプラノ高地に存在していた巨大な湖が干上がり、ほとんど消滅した (図2)。しかし、無数の湖段丘は湖の広がりや水位の変化を記録する。これらの段丘は優れた水平マーカであり、数千年時間スケールにおける地殻変動を調べるのに高い研究ポテンシャルを持っている。現在、水平ではない段丘があれば、形成後の地殻変動があったことを示している。私が注目するのが湖の水位低下と直接的に関係する地表の隆起である。水位変化と盆地の地形及び水の密度から、地殻への負荷の減少を算出できる。また、段丘の形成年代と現在の傾斜が決まれば、弾性的に振る舞う上部地殻の厚さと中部地殻における岩石流動の規模や有効粘性などの究明が可能となり、チャンネルフローの存在・規模を明らかにできると期待される。



図2. 南米ボリビア国のウユニ塩湖における地質調査の風景。



# 安藤 亮輔 -Ryosuke Ando-

准教授 震源物理学・地震テクトニクス

E-mail: ando@eps.s.u-tokyo.ac.jp

http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ando

## 計算力学と地質データから固体地球の破壊・変形を探る



地震の発生は、固体地球で生じるもっともダイナミックな破壊・変形であり、幅広い時空間スケールにまたがる現象です。地震発生そのものは波動伝播速度で規定される瞬間的な現象ですが、そこに関与するテクトニックな過程は、地質学的な時間スケールにもおよびます。当研究室では、断層への応力の蓄積と破壊、それにともなう地球内部と表層の変形、さらには断層帯のミクロな構造やその進化など、多様で複雑な現象を、物理学に基づいて包括的に理解することを目指しています。一方で、将来の地震像を予測するには、初期条件・境界条件を与えるために、数100年、数1000年以上といった過去にさかのぼって、地震発生の履歴を調べることが重要です。これを古地震学といいます。当研究室では、地質学・地形学の専門家と協力して、フィールド調査も重視しながら、地層や地形に記録された過去の地震像を、計算機シミュレーションを活用して復元する研究にも取り組んでいます。

## 計算力学で地震発生の物理を探る

最近の稠密な地震・測地観測網や合成開口レーダー干渉法(InSAR)などの宇宙測地技術の発展で、地震の発生やプレート運動に伴う様々な変化が、詳細に捉えられるようになってきました。その進歩は劇的です。これらのデータと計算力学的なシミュレーション技術を融合することで、現象の背後にある普遍的な物理法則を明らかにできるようになってきました。

最近では、2016年熊本地震の理解にも重要な、大地震の発生と火山の相互作用(図1)を明らかにしたり、スロー地震の多様な現象をシンプルに説明で

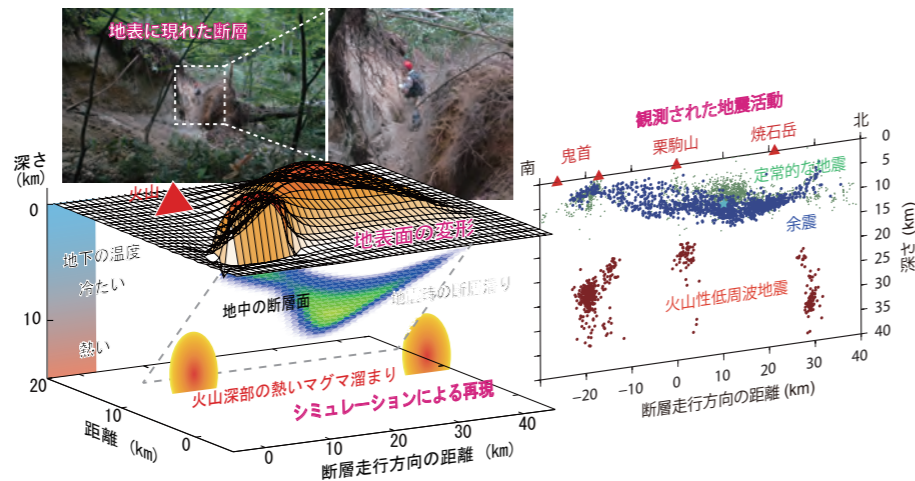
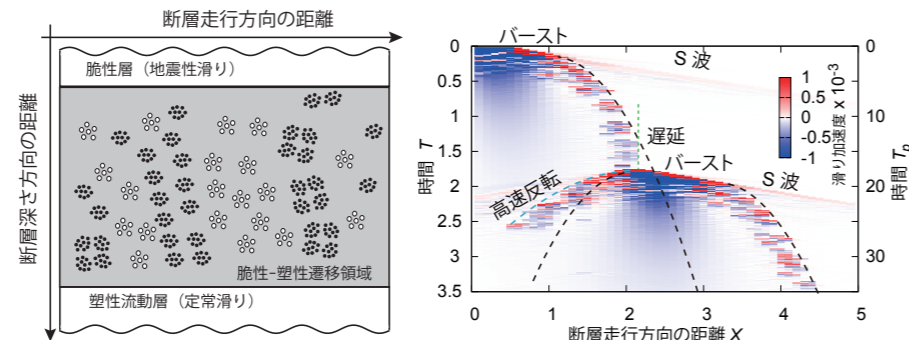


図1. 2008年M7.2岩手・宮城内陸地震とそのシミュレーションによる再現。右図の地震活動から分かるように、震源領域には火山が複数存在し、地震の起こり方に大きな影響を与えている。シミュレーションを行い、写真で示した数mの断層滑りが火山付近で再現できた。2016年熊本地震でも類似現象が重要な役割を果たしているかも知れない。

図2. スロー地震の物理モデルとシミュレーション。(左)スロー地震が生じる領域では、断層面上の灰色で示した背景領域の中に、丸印で示したバリッと割れる領域が存在しているらしい。(右)このようなモデルを計算機シミュレーションで調べると、多様な観測事実が説明できる。Ando et al., JGR (2012) の図を改変。



きる震源モデル(図2, 文献3)の作成に成功したりしています。また、2011年東北沖地震など大地震が連鎖する過程(図3, 文献4)、さらには、天然断層帯の幾何学的形状の進化過程など、一見複雑な地震と断層に関する現象の背後にある、比較的シンプルなメカニズムを解き明かすいくつかの発見をしています。また、「京」などのスーパーコンピュータを活用したシミュレーション手法の開発にも力を入れています(文献2)。

## 地形・地質データから過去の地震を探る

地震の理解に立ちふさがる大きな困難は、長期間にわたる大地震の繰り返し現象を、最近数10年で整備されてきた現代的な観測網のデータで、カバーしきれないことです。それを乗り越えるには、地層の中に眠っている過去に発生した地震の痕跡を掘り起こすことが重要です。過去の地震をよく知ることによって、将来の地震の予測可能性を少しずつ上げていければと考えています。

断層がずれ動くことによって生じる地形の段差も、地震が残す痕跡のひとつです(図4)。また、海溝型の大地震に伴う津波が、海底の砂などを巻き込みながら遡上すると、陸上に津波堆積物を残します。断層運動による摩擦発熱や破碎などの痕跡が、断層を構成する岩石に残されることもあります。当研究室では、このようなフィールド調査のデータを元にして、物理モデルと数値シミュレーションを駆使することで、過去の地震像を復元するといった研究に取り組んでいます。最近では、海岸段丘の堆積物を大量に掘削し年代測定することで、相模トラフで発生する、過去に発生した「元禄型関東地震」の最短再来間隔が、従来の露頭ベースで推定した値である2000年から、500年にまで短縮される可能性が高いことを、実証データを持って明らかにしました(文献1)。この成果はマスコミにも大きく取り上げられました。

本研究テーマは、産業技術総合研究所の宍倉正展グループ長(本専攻、兼任教授)と緊密に連携して行っており、直接的な指導を受けることもできます。フィールド調査を専門としたい人も歓迎します。

## 境界領域への誘い

当研究室では、物理や数値計算を多用します。しかし、一方で、フィールドでの直感と体力が重要なテーマも扱っています。その意味で当研究室は、少し変わった、立ち位置にあるかもしれません。関心のある皆さんは、ぜひ一度、様子をのぞきにきて下さい。

当研究室では、物理や数値計算を多用します。しかし、一方で、フィールドでの直感と体力が重要なテーマも扱っています。その意味で当研究室は、少し変わった、立ち位置にあるかもしれません。関心のある皆さんは、ぜひ一度、様子をのぞきにきて下さい。

## 参考文献

- Ando, R., N. Takeda and T. Yamashita, Propagation Dynamics of Seismic and Aseismic Slip Governed by Fault Heterogeneity and Newtonian Rheology, J. Geophys. Res., 117, B11308, 2012.
- Ando, R. and K. Imanishi, Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from Mw 7.3 foreshock, Earth, Planets Space, 63, 767-771, 2011.
- Ando, R., B. E. Shaw, C. H. Scholz, Quantifying Natural Fault Geometry: Statistics of Splay Fault Angles, Bull. Seism. Soc. Am., 99 (1), 2009.
- 安藤亮輔 訳, 新種の地震, スロースリップ, J. E. ヴィダーレ, H. ヒューストン, パリティ, 丸善, 3月号, 2013.

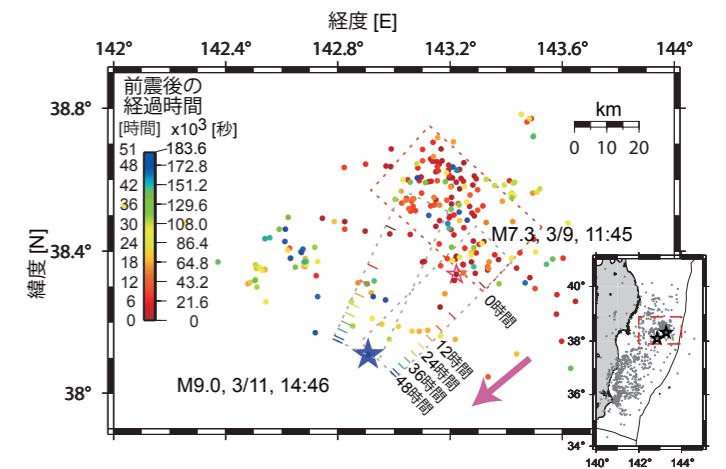


図3. 地震の連鎖の様子。2011年M9.0東北地方太平洋沖地震では、3月11日の本震の前に3月9日に最大の前震が発生。その余震は本震の震源の位置に向かって移動しており、これが本震を誘発させた可能性が高いことを、世界で初めて示した。Ando and Imanishi (2011) の図を改変。



図4. 2014年M6.7長野県北部の地震の直後に、研究室で行った地表踏査の様子。地表地震断層による1m弱の段差が、糸魚川静岡構造線の一部に出現していた。



# 飯塚 毅 -Tsuyoshi Iizuka-

准教授 宇宙地球化学・地質学  
E-mail: iizuka@eps.s.u-tokyo.ac.jp



## 固体地球惑星の進化を探る

我々の住む地球がどのようにして現在の姿に至ったのか、他の惑星との違いは何が生んだのか、地球ではいま何が起きているのか、我々はこれらの問いに答えることを大目標として、地球岩石・隕石試料から地球惑星の進化を解読しようと研究を進めています。現在は、次のような研究テーマに特に着目しています。

### 1. 初期地球進化

地球の形成は太陽系史 45.67 億年の初期に進み、その最終段階で火星サイズ原始惑星の衝突（ジャイアント・インパクト）により月が形成され、地球と月の大部分が溶融しマグマオーシャンに覆われていたことが、月岩石や惑星形成理論の研究から知られている。一方、約 38-35 億年前の岩石中に生物源を示す炭素同位体組成をもった化石が見つかることから、その当時には生命が存在していたはずである。したがって、地球史最初の 10 億年は地球が灼熱地獄から生命居住可能な星へと変遷した時代と捉えることができ（図 1）、その変遷過程を理解することは重要である。しかし、地球では 40 億年前以前（冥王代）に形成された岩石は見つかっておらず、初期地球進化については未だに分からないことが多い。

そこで我々は初期地球進化を、僅かに存在する冥王代の碎屑性ジルコンや短寿命（現在は消滅した）放射性壊変系列の同位体を利用して調べている。例えば、冥王代ジルコンの同位体組成から、その母岩の形成年代が 45 億年前よりも古いことを明らかにし、その当時にはマグマオーシャンが固化していたことを示した [文献 1]。また、短寿命核種  $^{182}\text{Hf}$  が  $^{182}\text{W}$  に半減期 890 万年で壊変し 45.0 億年前には消滅していたことを利用し、現在の地球における  $^{182}\text{W}$  同位体の変動を調べることで、初期地球において Hf/W 分別を伴う過程（コア形成など）が 45.0 億年前以前に起きていたかどうかを調べている [文献 2]。これらの研究では、高精度で同位体比を測定する必要があるため、クリーンルームで岩石試料を融解して分析目的元素を化学分離し、世界最先端の質量分析計で高精度同位体分析を行っている（図 2）。

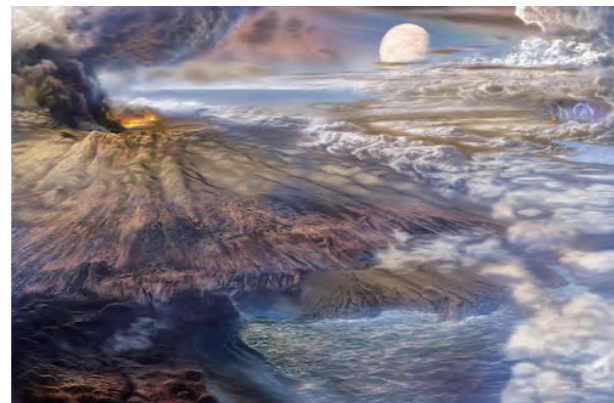
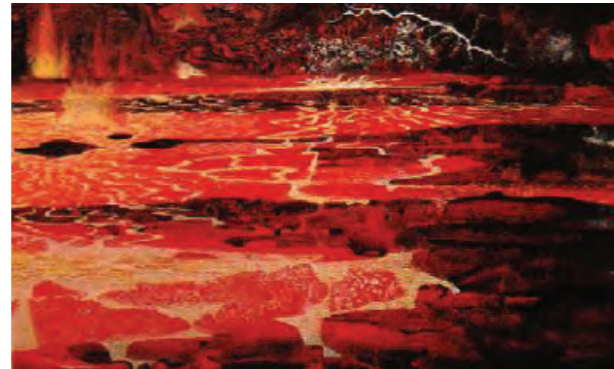


図 1. マグマオーシャンに覆われた形成直後の地球（上）と約 35 億年前の地球（下）の描像。



図 2. クリーンルームでの化学分離作業の様子。

### 2. 微惑星～原始惑星の形成・進化

地球の起源や形成・成長過程を知るためには、その材料物質と考えられる微惑星～原始惑星がどのような性質をもっていたのか・どのように形成・進化したのか理解する必要がある。我々は隕石の年代や化学組成を測定することで、隕石母天体の微惑星～原始惑星の進化の時間スケールや特徴を調べ、地球型惑星の形成・成長過程について理解することを目指している。特に、短寿命放射性核種を利用した同位体年代測定法を確立し、高感度ウラン-鉛同位体年代測定法を開発することにより、未だ年代の分からない隕石の年代測定を可能にしようと試みている [文献 3]。さらに、隕石中に存在する水などの揮発性元素濃度とその同位体組成を調べることで、微惑星～原始惑星の成長過程において揮発性元素がどのように振舞ったのか、初期太陽系において水に富む惑星はどのように分布していたのかを明らかにしようと試みている。これらの研究に基づいて、地球の水の起源に迫っていくことを目指す（図 3）。

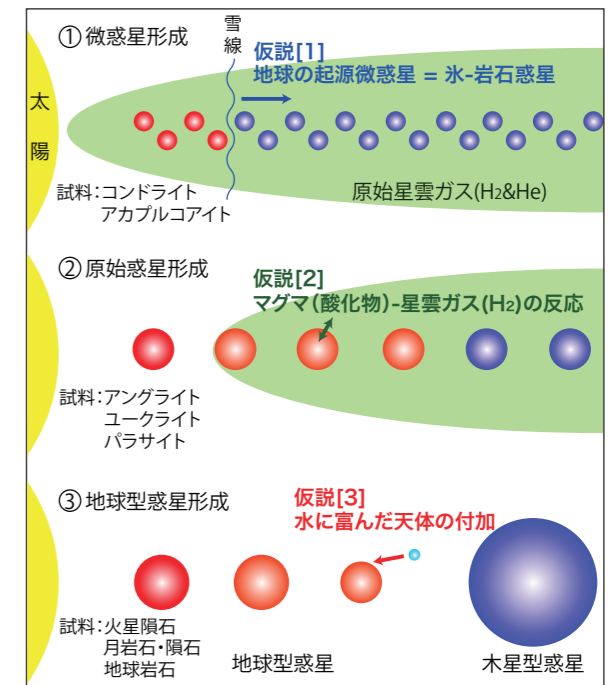


図 3. 惑星の形成過程と水の起源の仮説：[1] 地球の材料物質に含水微惑星が含まれていた；[2] 地球の成長過程で、マグマ-星雲ガス（水素）の酸化還元反応により水を獲得した；[3] 地球形成後に太陽系外側天体によりもたらされた（レイトベニア）。

### 3. マグマ活動と地殻の形成・進化

マグマは、地球内部の熱・物質輸送や化学分化を担い、表層では噴火活動を引き起こす。また、マグマ活動の結果として、地殻の形成・成長が進んできた。特に、花崗岩からなる大陸地殻の存在は、プレートテクトニクスの稼働する水惑星・地球の特徴の一つであり、さらに、風化・浸食作用を通して海水・大気組成を制御している。このため、地球史を通じた地殻の形成・進化を理解することは、地球惑星科学において重要な課題である。そこで我々は、マグマの固結物である火成岩や火成鉱物について年代測定や化学・同位体分析を行うことにより、マグマ活動の実態を掴み、地殻の形成・進化を解読しようと試みている。例えば、世界中の巨大河川の砂に含まれるジルコン鉱物の年代測定をすることにより、大陸地殻形成年代の頻度分布を推定してきた（図 4） [文献 4]。また最近では、川砂に含まれるモナザイト鉱物の年代測定をすることにより、一度形成された大陸地殻がウィルソンサイクルに伴っていつ・どのような変成作用を被ったのかを調べている。今後は、地殻深部やマントルからもたらされた捕獲岩試料や火山岩中の斑晶鉱物を用いて、マグマの起源や生成・固化・噴火過程をより良く理解することを目指す。

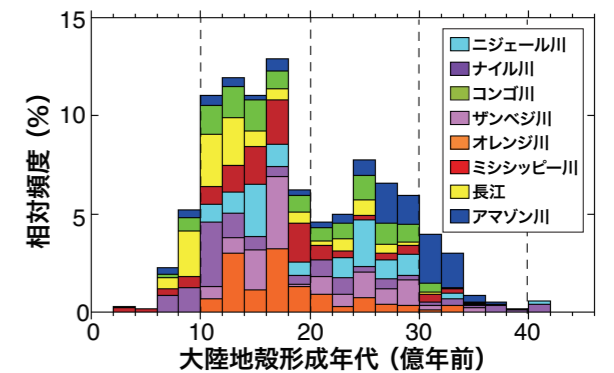


図 4. 川砂ジルコンから推定される大陸地殻形成年代の頻度分布。

具体的な研究テーマは相談しながら決めていきます。実際に行う研究は、宇宙地球化学・地質学が中心で、必要に応じて分析手法の開発なども行っています。

#### 参考文献

- Iizuka T., Yamaguchi T., Hibiya Y. & Amelin Y. (2015) Meteorite zircon constraints on the bulk Lu-Hf isotope composition and early differentiation of the Earth. *Proceedings of National Academy of Sciences* 112, 5331-5336.
- Iizuka T., Nakai S., Sahoo Y.V., Takamasa A., Hirata T. and Maruyama S. (2010) The tungsten isotopic composition of Eoarchean rocks: Implications for early silicate differentiation and core-mantle interaction on Earth. *Earth and Planetary Science Letters* 291, 189-200.
- Iizuka T., Lai Y.-J., Akram W., Amelin Y., & Schönbächler M. (2016) The initial abundance and distribution of  $^{92}\text{Nb}$  in the Solar System. *Earth and Planetary Science Letters* 439, 172-181.
- Iizuka T., Campbell I.H., Allen C.M., Gill J.B., Maruyama S. & Makoka F. (2013) Evolution of the African continental crust as recorded by U-Pb, Lu-Hf and O isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 107, 96-120.



# 河合 研志 -Kenji Kawai-

准教授 グローバル地震学・地球内部構造論  
E-mail: kenji@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
http://kenjikawai.jimbo.com

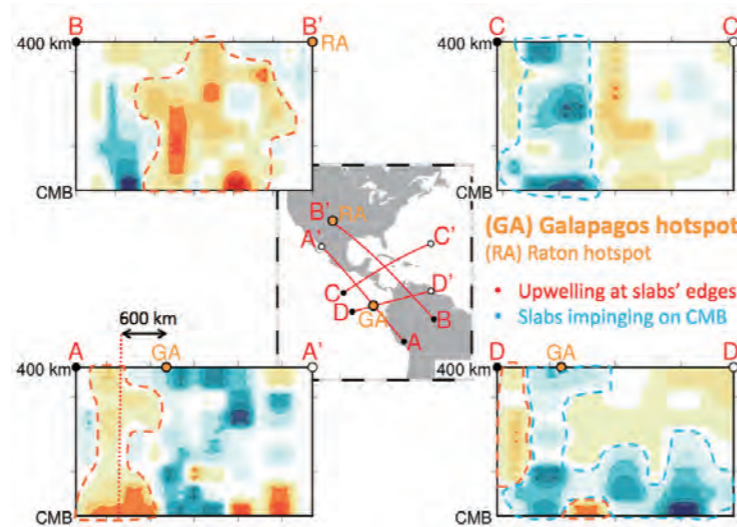


## 物理・化学を両輪に地球内部現象の統合的理解に挑む

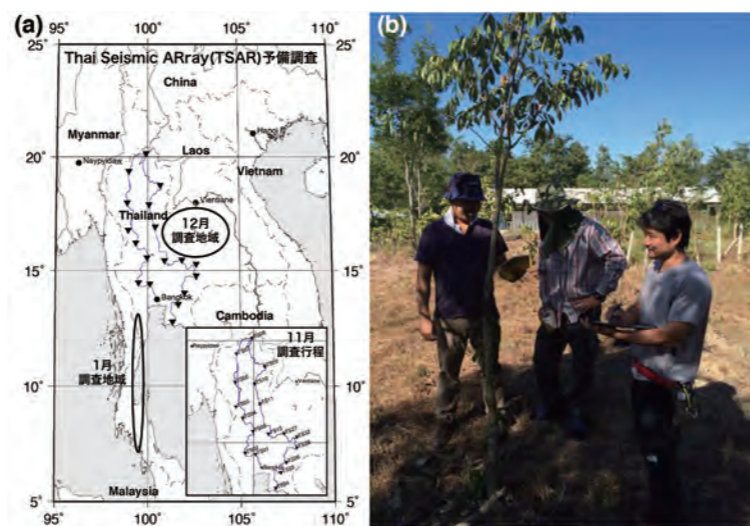
地球の中はどのようになっているのだろうか。地球はどのように進化してきたのだろうか。その問いに答えるため、地震波動計算およびソフトウェア、データ解析手法の開発、さらに新規地震波形の観測に取り組んでいます(文献1)。一方で、固体地球の進化の総合的理解のためには、地震学だけでなく、鉱物物理学、岩石学、地球ダイナミクス、地質学、地球化学、といった異分野との積極的な連携および境界領域の開拓が必要です(文献2)。そのために、私たちは地震波解析手法の開発およびデータ解析を主として、数値計算、データ解析、野外観測など様々な手法を駆使して、次のような研究テーマに取り組んでいます。以下の研究に興味があれば、是非ご相談ください。

### 1. 波形インバージョンを用いた地球内部構造推定

広帯域波形データそのものを波形インバージョンで解析することにより、高精度かつ高解像度の地球内部構造モデルの推定を目指しています。高解像度の内部構造推定のために、理論波形及びその偏微分係数を正確に計算しなければなりません。計算精度がよく計算時間が短い計算手法が必要であるため、波形インバージョンの研究を行いながら手法開発の最先端研究にも取り組んでいます。ちなみに、これまで開発してきた全地球規模内部構造の推定のための理論及び計算手法は、小さいスケールの構造推定(例えば物理探査や岩石破壊実験)にも応用できます。これからその分野へ研究の対象を広げて行きたいと考えています。



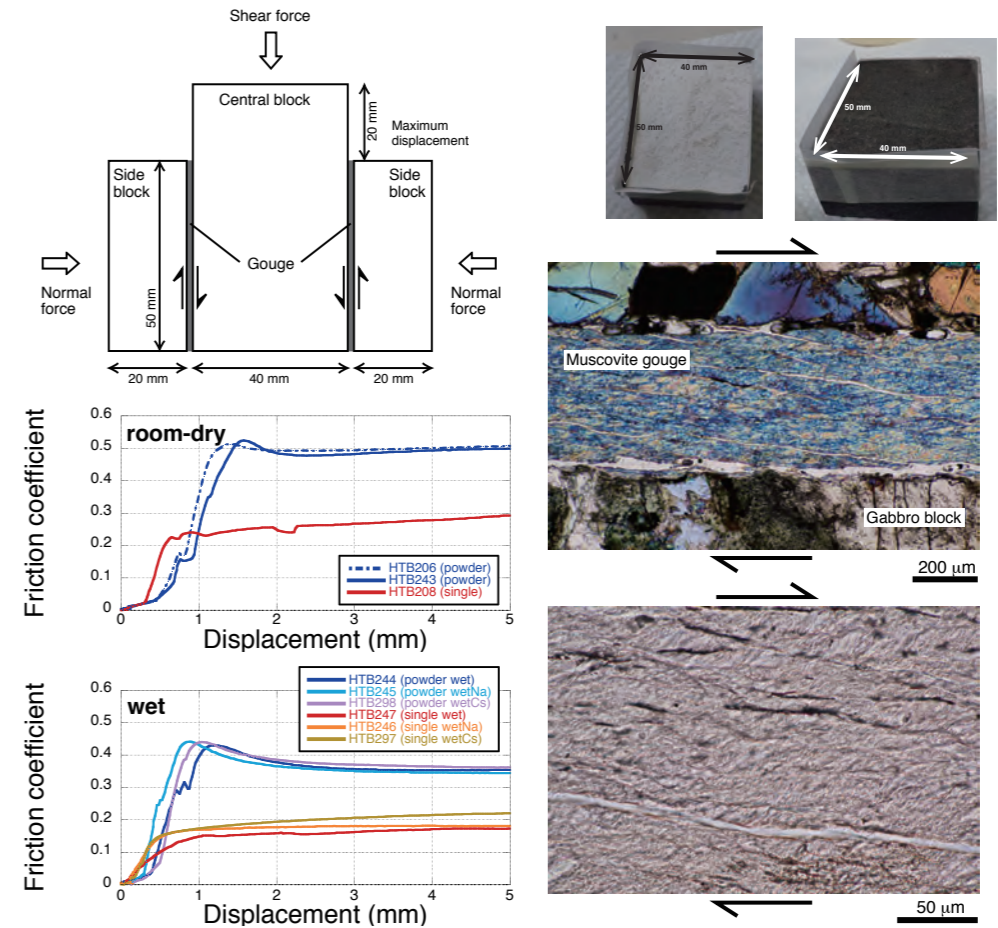
(上) 私たちの研究グループで開発された波形インバージョン法を近年設置された稠密アレイデータ(US-Array)に適用することによって中米下の最下部マントルの詳細な3次元S波速度構造を推定することが出来ました。沈み込んだファラロンプレートが核マントル境界に到達して熱境界層と相互作用している様子がわかりました(Borgeaud, Konishi, Kawai, Geller, JpGU 2016)。



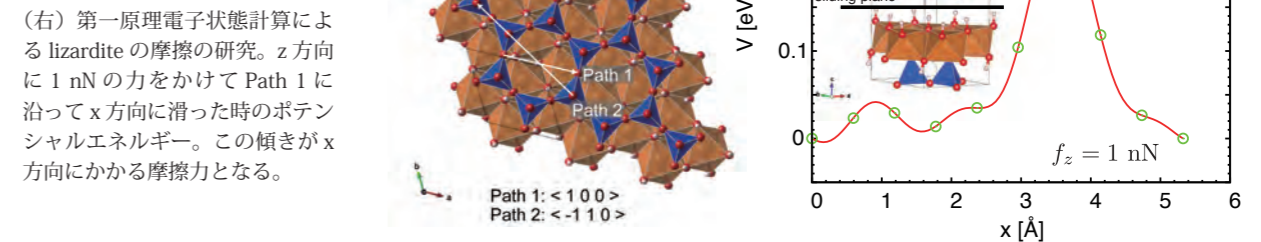
(下) 地球深部を調べるためには新規に地震観測点を設置して地震波形を観測することも重要です。文部科学省科研費「新学術領域研究」に「核-マントルの相互作用と共進化-統合的地球深部科学の創成-」が採択され、タイにおいて広帯域地震観測網(TSAR)を展開予定である。マヒドン大学と連携し、2016-2018年度にかけて40観測点の運用を目指しています。

### 2. 鉱物の摩擦特性に関する理論および実験的研究

岩石・鉱物間の摩擦は、地震に関連した断層すべりや地滑りを理解する上で重要です。とくに層状の粘土鉱物は通常の岩石鉱物よりも最大摩擦係数(0.1~0.6)が小さく断層のすべり挙動を支配すると考えられるため、その摩擦特性に関して理論・実験の両面から取り組んでいます。



(上) 2軸摩擦試験による白雲母劈開面(001)の摩擦特性を評価した。せん断応力を測定し、せん断応力を法線応力で除することで摩擦係数を導出した。(001)面での摩擦係数は小さく、ガウジ中の結晶配向の度合いが摩擦に関して重要であることがわかった(参考文献[3])。



(右) 第一原理電子状態計算による lizardite の摩擦の研究。z 方向に 1 nN の力をかけて Path 1 に沿って x 方向に滑った時のポテンシャルエネルギー。この傾きが x 方向にかかる摩擦力となる。

#### 参考文献

- [1] Kawai, K., K. Konishi, R.J. Geller, and N. Fuji, Methods for inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D" beneath Central America, Geophys. J. Int., 197, 495-524, 2014.
- [2] Kawai, K. and T. Tsuchiya, Temperature profile in the lowermost mantle from seismological and mineral physics joint modeling, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 106, 22119-22123, 2009.
- [3] Kawai, K., H. Sakuma, I. Katayama, and K. Tamura, Frictional characteristics of single and polycrystalline muscovite and influence of fluid chemistry, J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, 6209-6218, doi:10.1002/2015JB012286, 2015.



# 田中 秀実 -Hidemi Tanaka-

講師 物質地震学・構造地質学  
E-mail : tanaka@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
http://growdas.com



## 地震を外科的・病理学的に観察し理解する —物質地震学—

地震は断層が滑動することによって発生します。このことは一般の方々にもよく知られるようになりました。このため地震発生に関して断層が重要であることは十分に認識されるようになりました。しかし断層そのものの実態の理解はようやく黎明を迎えた段階なのです。「断層帯はいったいどんな物質／構造からなっているのか?」「それらの物質はどのような物理的／化学的特性を持っているのか?」「それらの断層内の物質とその分布様式は、地震の発生に対してどのように機能するのか?」これらの疑問は、おそらく人体の外科的観察の初期の頃の疑問とよく似ていると思います。地震学は伝統的に地震計の記録の解析手法の発達によって支えられて来ましたが、医科に例えれば内科的といえるかもしれません。学問発達の歴史的制約から、地震の研究分野は、外科を欠いたまま進み、内科が極端に肥大しています。「心臓は血液のポンプだ」といった程度の概念で人体の諸機能を理解しても、それに基づいて人体を再構成することはできないように、断層の物質や構造の諸特性を理解しなければ、地震に対する本質的疑問(なぜ起こる?いつ起こる?どのくらいの大きさの地震が起こる?など)を理解したり予測したりすることは難しいでしょう。そういうわけで我々は、地震断層を外科的に観察し、実験的に素過程を確かめることによって、真正面からこの複雑な対象の全貌を明らかにすることを志向して研究を続けています。

## 地震断層の大局的構造の理解 —歴史／環境依存性—

現世の地震断層を調べてみると地震断層は、実際には面ではなく、断層活動の影響を受けた岩石からなる幅を持った(通常10 m ~ 1 km ぐらい)ゾーンからなっています。このゾーンは普通、断層破砕帯と呼ばれています。断層破砕帯は断層の滑動面とその周囲を取り巻く破壊と熱水変質／変成の影響をうけた岩石からなっています。破砕帯の形成には驚くべき長い時間がかけられているようです。1000 万年以上かけて作られた破砕帯も珍しくはありません。断層生成の初期の産状は、地表に露出する破砕帯で時折、観察することができます。それらの観察結果によると、地震断層は、地下10 - 15 km 程度の深度において極めて微小な物性境界面を利用して始まるようです。滑り面の幅は mm ~ 1 cm 程度のことがほとんどで、摩擦熱による溶融層を伴うこともあります(図1)。その過程は実験的に再現することもできます(図2)。滑り面の周りには破壊ゾーンはほとんど発達しないので、岩石はまるでカミソリで切られたような産状となります。溶融部分のサイズは、近年の精密な掘削調査により、500 m 四方以内である可能性が出て来ましたが、溶融域には臨界のサイズがありそうです。地下5 ~ 10 km では破砕帯の幅は100 m 以上に広がり水の影響を受けた変質岩が破砕帯の主役になります。封圧の低い地表から5 km 深度では、断層帯は再び薄くなり10 m 以下の幅しか持たなくなります。物質の改変は著しく、粘土鉱物が主力の構成物質になっています。断層が胚胎する母岩や断層活動の履歴によって、上記の物質や構造



図1. 震源深度の地震断層面の一例。図の中央を横切る灰色の薄い脈が地震断層面。破砕帯を伴わず、摩擦発熱によって溶融した物質からなる。その脈に直角に交わる複数のやや太い脈は、溶融物が割れ目に注入したものの。

は多様な産状を示しますが、それらを地震の環境因子群として捉え、断層破砕帯を直接掘削し物質を回収する技術の発達とともに、徐々に因子の詳細が明らかになりつつあります。このような断層の活動履歴に依存した構造と物質因子群も、断層帯周辺への応力の蓄積、定常的応力解放(クリープ)、地震性滑りのモードを決める重要な要因となっているため、これらの諸現象を明らかにすることによって地震学にブレークスルーがもたらされると思います。外科の冥利につきるというものです。

## 地震のエネルギーフロー

地震は地殻中に蓄積されたエネルギーの解放過程としてみることができます。しかしその全貌はまるで分かっていませんでした。最近我々によって確立されつつある断層の精密掘削によって地震時のエネルギーフローの輪郭が描出されるようになって来ましたが、1995 年の兵庫県南部地震と1999 年の台湾の集集地震の際の地震断層において、精密掘削が実施され、熱エネルギーとしてどの程度消費されているかを見積もる研究が行われています。その結果、それぞれの地震の全放出エネルギーの90%以上が熱に転換され、断層帯の温度上昇に使われていることが推定されました。この結果の合理性と正否を確かめるため、2004 - 2005 年にかけて、再び台湾において2000 m 級の集集地震の断層掘削が行われました(図3)。こちらは現在もデータの解析が続けられています。これが確定すると、全エネルギーの残り10%以下を弾性波動エネルギー(いわゆるこれが狭い意味の地震です)と破壊エネルギーが分け合っているということになるでしょう。

ところで破壊エネルギーは、地震のエネルギーのわずかな部分を占めるに過ぎないようですが、これは基本的に鉋物の粉碎に使用され、鉋物破壊面の表面エネルギーに転換されます。そのうちのごく一部は粉碎部分の周囲にある水を還元し、水素ガスを作り出します。跡津川断層という大きな活断層を掘削したところ、断層の滑り面近傍から、大量の水素が、断層中軸からメタンが検出されました。また断層中軸から採取された水には、微生物の濃集が認められました。地震によって放出されたエネルギーの最終消費者は微生物かもしれません。バイオリジストがこの結果に大きな興味を持ち、最近共同研究が始まりました。先行きが楽しみです。

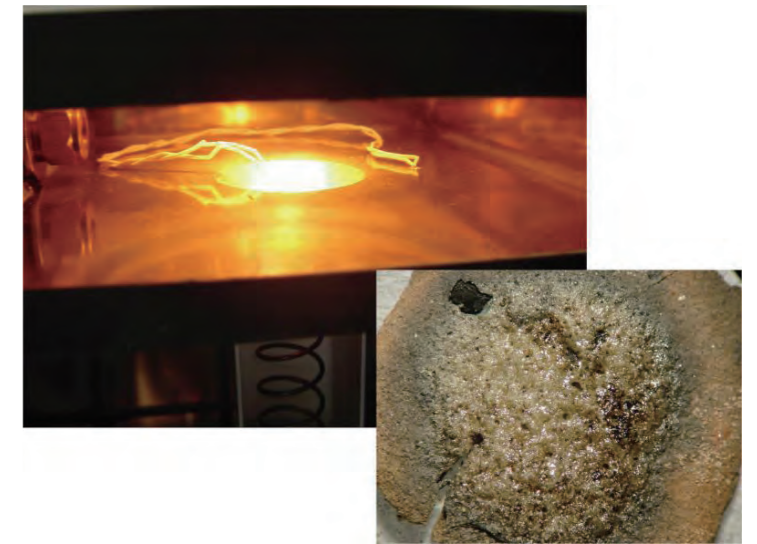


図2. 瞬間加熱溶融実験の様子。環境因子に依存するが、ある場合には断層が動き始めて10秒以内に溶融温度に達すると見積もられているので、同条件での溶融を再現した。溶融物を伴う断層面(例えば図1)は滑動中にはこのような色調になっていると思われる。

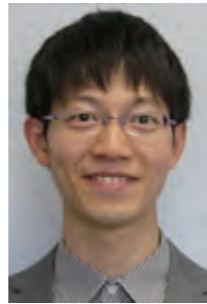


図3. 台湾中央部(台中)で行われている大深度断層貫通掘削の様子。掘削は24時間で進行するため、夜間は煌煌とライトアップされている。



# 麻生 尚文 -Naofumi Aso-

特任助教 地震学・震源物理学・氷河学・水文学  
 E-mail : aso@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
 http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~aso/



## 地震学から読み解く地球惑星科学

地震の揺れは地震波として地球の内部を伝播しますが、水の流れ、マグマの移動、隕石衝突なども地震波（弾性体中を伝播する波動）を放出します。このような（広義の）地震波を解析して地球および惑星で発生する様々な自然現象の正体を探ることをめざしています。具体的には、火山型スロー地震の解析と物理モデル構築、通常の地震とスロー地震の統一モデル構築、中規模地震の地震波解析による破壊力学の理解、地震波解析による氷河の流動および氷河における水文学の解明などに取り組んでいます。ここでは、特に二つのテーマについて紹介します。

### 火山型スロー地震の解析と物理モデル構築

活火山直下のモホ面付近には、火山型深部長周期地震と呼ばれる小さな地震が分布しています。近年注目を浴びているスロー地震の中でも、火山周辺で発生する特殊な現象です。プレート境界型スロー地震はプレートテクトニクスという大きな枠組みでの理解が進んでいる一方で、火山型スロー地震の理解は進んでいません（図1）。

そこで、微小地震を独自に検出した上で地震活動を解析したところ、規模別頻度分布および潮汐応力による誘発現象において、プレート境界型と火山型との大きな違いを発見しました。これは、火山型の深部長周期地震が現在の地表での火山活動と直接の関係なく発生している可能性を示唆しています。

島根東部の火山型深部長周期地震に注目し、運動様式を調べたところ、通常の地震のような滑り運動に起因するダブルカップル型ではなく、一軸方向の伸縮運動に起因するCLVD型であることを突き止めました（図2）。詳細な震源位置決定により、その伸縮運動方向に沿って地震が一キロメートルにわたり線状に分布していることも発見しました。

火山型の深部長周期地震が分布するモホ面が密度境界面であることに注目し、上昇過程のマグマが停滞して冷却する際の熱応力が地

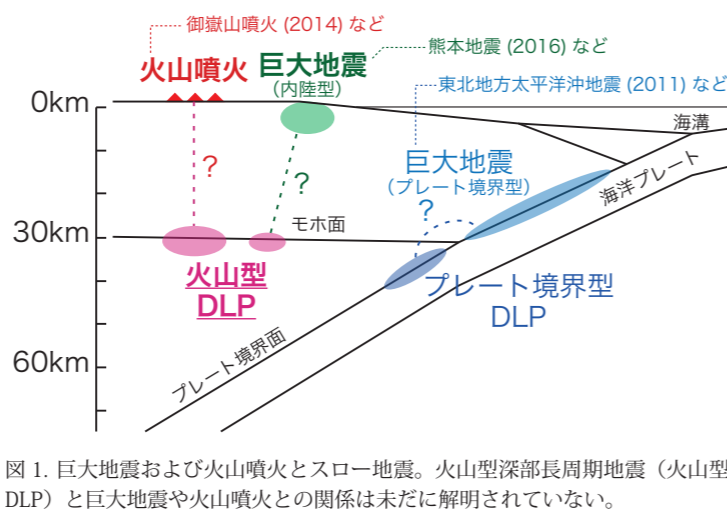


図1. 巨大地震および火山噴火とスロー地震。火山型深部長周期地震（火山型DLP）と巨大地震や火山噴火との関係は未だに解明されていない。

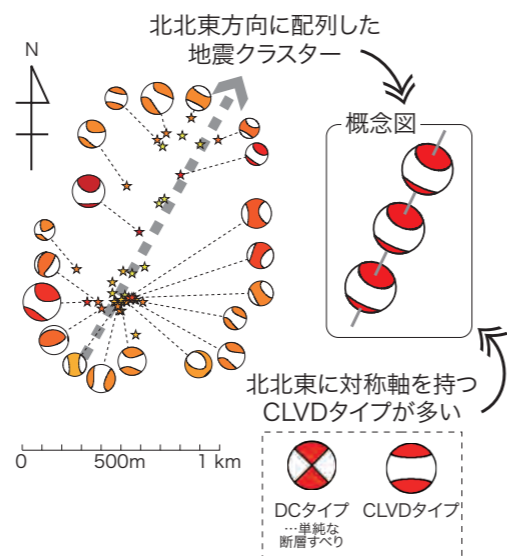


図2. 島根東部で発生する火山型深部長周期地震の空間分布とメカニズム解。

震の発生に起因しているというモデルを提唱しました。本モデルは活火山だけでなく休火山の直下でも発生していることも説明します。いくつかの単純な形状のマグマについて冷却プロセスの解析解を導き、熱応力の時間変化を定量的に見積もり、広域応力を補う形で地震発生の必要条件として寄与している可能性を指摘しました。

今後は、世界中の深部長周期地震を解析することで、普遍的な特徴を取り出し、火山型スロー地震の根本的解明に取り組んでいきます。

### 地震波解析による氷河の流動および氷河における水文学の解明

地球における水循環プロセスの中で、雪氷圏における氷河の流動は地球温暖化との関連で非常に重要です。従来行われてきた掘削などの直接的な観測は容易でない一方で、近年は地震波を用いた間接観測が行われ始めています。特に最近では、人工地震を用いた構造探査だけでなく、微小地震観測や地震波干渉法など地震学における最新の解析手法が応用されています。こうしたアプローチは、脆性破壊（氷震）を伴う表面付近のクレバスの開口運動や氷河底面でのすべり運動だけでなく、雑微動（微小な揺れ）を伴う氷河内での水の流れなど、これまで捉えることの難しかった現象の観測を可能にします。

アラスカのカスカウルシュ氷河における地震観測データを用いて、氷河内の水の流れを調べました。雑微動の解析によく使われる地震波干渉法と、巨大地震のイメージングによく使われるバックプロジェクション法とを組み合わせることで、雑微動源を特定することに成功しました。雑微動源はムーランと呼ばれる穴に対応して分布しており、ムーランにて表面から氷河内や氷河底面へ流れる水が地震波を励起していることを突き止めました。また、活動には一日周期が確認され、氷河表面での溶融に起因すると考えられます。より長い周期では、降水による水流の増加も確認されました。氷河内への水の供給源および供給量が地震観測のみから推定できることにより、氷河での水文学および氷河の流動の解明への貢献が期待されます。

今後は、同じデータを用いて、氷震の時間空間分布およびメカニズムの解明を行う予定です。また、グリーンランドや南極での観測も計画しています。

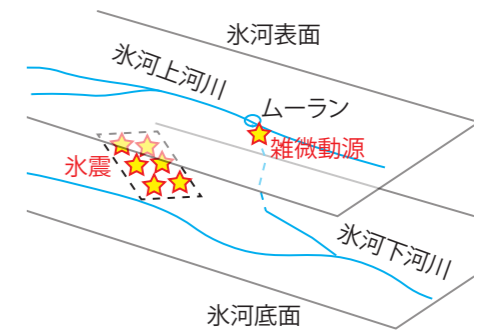


図3. 氷河における地震波動源。水の流れはムーランで地震波を励起し、脆性破壊により氷震が発生する。

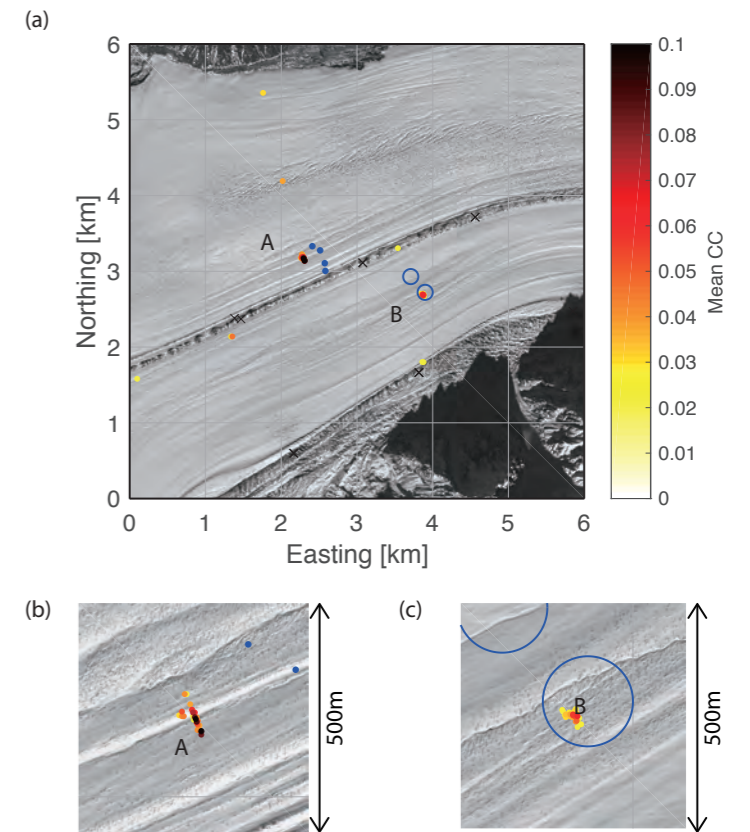


図4. カスカウルシュ氷河でのムーラン分布。地震波から推定した分布（赤色系の点）は地上での観測（青点）およびヘリコプターでの観測（青丸）と整合的である。



# 桑山 靖弘 -Yasuhiro Kuwayama-

特任助教 高圧地球科学

E-mail : kuwayama@eps.s.u-tokyo.ac.jp



## 地球の中心はどのような物質で出来ているのだろうか？

地球や惑星の内部はどのような物質で出来ているのだろうか？この問いに答えるためには、まず惑星内部の温度圧力条件に相当する高圧高温条件下でどのような物質が存在しているのかを調べる必要があります。レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置（図1）は、現在、地球の中心の温度圧力条件を発生することのできる唯一の装置です。惑星内部に存在する物質を特定し、その物質の性質を知ることが、惑星の内部構造やダイナミクスを知る上での第一歩です。私は、このレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いて、次のようなテーマに取り組んでいます。



図1. ダイヤモンドアンビルセルに用いる単結晶ダイヤモンドアンビル。直径約3mmのダイヤモンドを二つ使用する。

## 内核および外核の化学組成の解明

地球の中心にある液体金属と固体金属からなる外核や内核には、鉄やニッケルの他に軽元素と呼ばれる鉄よりも軽い元素が含まれていると考えられています。常圧下では、鉄にその他の元素が溶け込むと、融点・密度・結晶構造・弾性定数など様々な物性が大きく変化することが知られており、高圧下においても同様に、軽元素の存在はその物性に大きな影響を与えられます。核に含まれる軽元素の候補として、水素・炭素・酸素・ケイ素・硫黄などが考えられています。しかし、1952年に Birch により核中の軽元素の存在が示唆されてから半世紀以上がたちますが、依然、どの元素がどの程度含まれているかについてよくわかっていません。地球の内核と外核の境界の温度は核の物質の融点であると考えられており、核の物質の組成を特定しその融点を決定することは、現在の地球深部の温度分布を推定するうえで大変重要です。また、核に含まれる軽元素は、地震波観測により報告されている内核内部の構造や、外核の対流や冷却の歴史を理解する上での重要な鍵であると考えています。私は、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いて、以下に述べるような実験を行ってきました。

### 1. 内核の成長と内核中の軽元素

地震波観測により得られた内核の密度は、高圧実験から推定される核の温度圧力条件での純鉄の密度よりも若干小さいと言われており、そのため内核にもわずかながら軽元素が含まれていると考えられています。内核は外核の液体金属が固化することにより成長しますので、内核の化学組成は、内核-外核境界での固体鉄と液体鉄の間の軽元素の分配によって決まりま

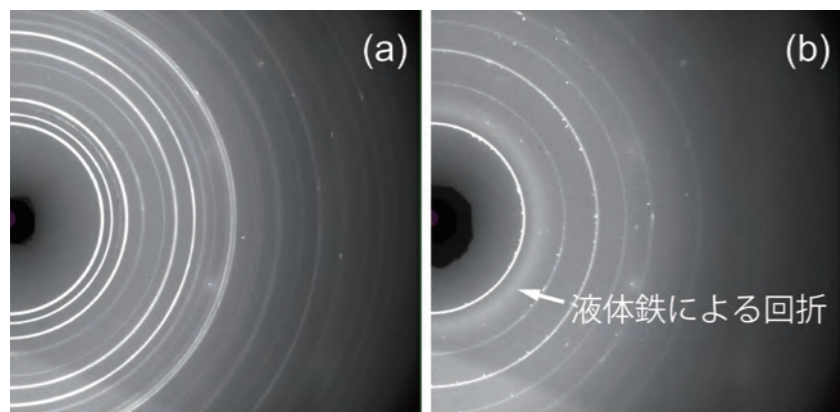


図2. 高圧高温下における (a) 固体鉄および (b) 液体鉄の X 線回折データ。固体鉄では結晶の周期構造に対応したシャープなデバイリングが観察できるが、液体鉄ではブロードなリングが観察できる。(a) と (b) 両方に見えるリングは断熱のために試料室内に配置した KCl による回折線。

す。すなわち、内核が結晶化する際に固体鉄中にどれだけの軽元素が溶け込むことができるかによって内核の組成が決まります。私たちは、このような観点から、鉄合金の超高压下での相平衡関係を調べてきました [文献1 など]。特に、固体と液体の間での軽元素の分配によって決まる内核と外核の組成差は、観測によって得られている内核と外核の密度差に一致する必要があります。

### 2. 液体鉄合金の密度測定と弾性波速度測定

地震波観測により得られる核の内部の密度分布は、弾性波速度分布と共に、核の化学組成を制約するうえでの数少ない情報のひとつです。しかし、核の圧力において液体鉄の密度が測定された例はこれまでのところありません。そこで私たちは、SPring-8 の放射光をもちいて液体鉄の X 線回折実験から密度を決定することを試みています (図2)。現在、80 万気圧程度まで実験を行っており、核の圧力まであともう一步のところまで来ています。また、X 線非弾性散乱測定による、高圧下における液体鉄の弾性波速度を決める実験も行っています (図3)。

以上に述べたような、鉄合金の状態図や液体鉄の密度と弾性波速度といった情報から、核の化学組成を明らかにしたいと思っています。また、核の物質の研究以外にも、以下のような研究も行っています。



図3. SPring-8 のビームライン BL43LXU に設置された非弾性 X 線散乱分光器。X 線のエネルギーの変化を測定することにより高圧高温下での試料の弾性波速度がわかる。

## マントル最下部に水は存在するか？

地球表層の7割は海に覆われていますが、地球内部に貯蔵できる水の質量は海水の数倍とも見積もられています。地球表層に存在する水は含水鉱物という形で、プレートの沈み込みと共にマントル深部へと運ばれていますが、多くの含水鉱物は沈み込みに伴う温度や圧力の上昇に伴い、脱水分解して水を吐き出してしまいます。しかし私たちの行った実験によると含水鉱物の一つである FeOOH は深さ 1500 km ほどで新しい結晶構造へ相転移をし(図4)、そのままマントル最下部まで運ばれうるということが分かりました [文献2]。水の存在は、マントル物質の融点や融解相関係に大きな影響を与える可能性があります。

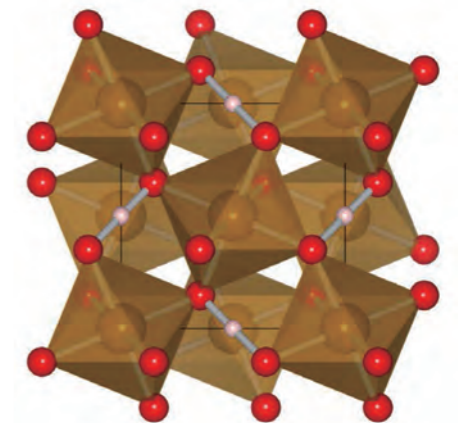


図4. 今回発見した FeOOH の高圧相の結晶構造。

## 超高压下での新物質探索～系外惑星の内部物質学

近年太陽系外で発見されたスーパーアースなどが注目されています。これらの深部の圧力は数百万気圧や数千万気圧といった超高压に達します。これまで、このような超高压下で安定に存在する、pyrite 型構造の SiO<sub>2</sub> 相 [文献3] や、Fe<sub>2</sub>P 型構造の TiO<sub>2</sub> [文献4] といった超高压物質を見つけてきました。

研究内容に興味を持った方はぜひ話しかけてみてください。

### 参考文献

- [1] Kuwayama, Y., Hirose, K., Sata, N. and Ohishi, Y., Phase relations of iron and iron-nickel alloys up to 300 GPa: Implications for composition and structure of the Earth's inner core, Earth and Planetary Science Letters, 273, 379-385 (2008)
- [2] Nishi, M., Kuwayama, Y., Tsuchiya, J. and Tsuchiya, T., in press.
- [3] Kuwayama, Y., Hirose, K., Sata, N. and Ohishi, Y., The pyrite-type high-pressure form of silica, Science, 309, 923-925 (2005)
- [4] Dekura, H., Tsuchiya, T., Kuwayama, Y. and Tsuchiya, J., Theoretical and experimental evidence for a new post-cotunnite phase of titanium dioxide with significant optical absorption, Physical Review Letters, 107, 045701 (2011)



# 桜庭 中 -Ataru Sakuraba-

助教 地球電磁気学

E-mail : sakuraba@eps.s.u-tokyo.ac.jp

http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ataru



## 地磁気の起源とコアのダイナミクス

人間は、地球の表面付近を、ほぼ2次元的自由度で（はいつくばって？）活動しているにすぎません。地球の内部には、人間の想像を絶する、莫大な領域が横たわっています。なかでも地球最深部に位置する「コア」とよばれる領域は、地球体積の16%、質量の30%を占め、地球の成り立ちやその後の進化の過程で、無視することのできない役割を担ってきました。コアはわれわれの直下、はるか3000kmものかなたに位置しており、その活動のようすを直接観測することは困難です。しかし金属鉄であるコアには、強大な電流が流れています。その結果、コアは地磁気を発しており、われわれはそれを地表にしながらにして観測することができます。わたくしの主たる研究は、このコアからのメッセージをもとにして、コアの活動の実態をさぐり、ひいては地球全体の成り立ちや進化をひも解くための知的貢献をすることです。

### コアの鉄の海

地球誕生直後、重たい鉄は地球の中心に沈み、金属コアを形成します。コアは高温下にあり、現在でもなおその大部分が液体状態にあります。液体の鉄は粘性率が低く、大規模な流れ（対流）を起こして熱をマントルに逃がし、ゆっくりと冷えていると考えられます。実際、この対流運動が引き起こすダイナモ（発電）作用によって、コア内に電流が自然発生し、地磁気が維持されているのです。

固体の岩石からなるマントルもゆっくりと流動しています。そのスピードは数cm/yearほどです。コアはその約100万倍、10km/year (= 0.3mm/sec)ほどのスピードで対流運動をしていると考えられています。これはどちらかというと海洋の深層循環の流速に近いので、地球の中心には、深さ2000km以上もの「鉄の海」が横たわっている、と言ったとしてもそれほどまちがいはありません。

コアの鉄の海と地表の海は、ともに自転（コリオリ力）の影響を強く受けるという共通点がありますが、いっぽうでコアの海は流れの3次元性が強いこと（海洋の深さはせいぜい数km）、強い電流が流れているためにローレンツ力が生ずること、などの著しい特徴をもっています。コアの流れや電磁場は、回転系の流体力学と電磁気学とによって明らかにすることができます。

しかしこれら二親のもとに生まれた「コアの力学」は、単に先祖の性質を足し算しただけでは説明できない、ユニークな性質を兼ね備えています。たとえばコア内で自然発生する磁場の強度は、コリオリ力とローレンツ力との微妙なバランスによって決定されていると考えられますが、そこで生じる流れは、コリオリ力だけが存在する場合とも、またローレンツ力だけが存在する場合とも異なる、独特な空間構造を呈します。

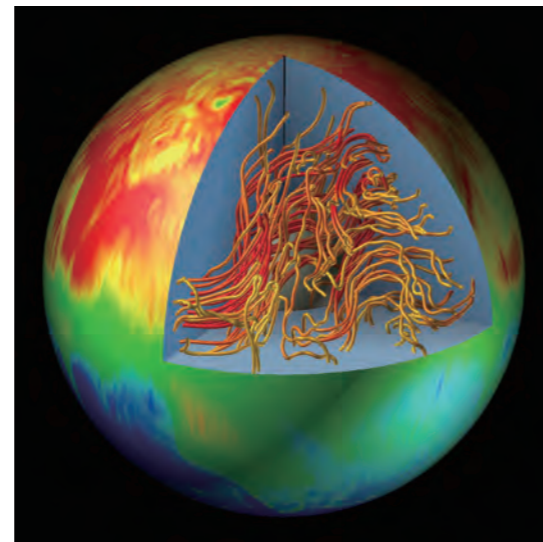


図1. 地球型ダイナモの数値シミュレーションの例。コア表面を貫く磁場分布（赤が外向き、青が内向きの磁場）と、コア内部（北半球の1/4）の磁力線のようすを示す。コアの外では赤道対称性のよい双極子磁場が卓越している。激しい対流運動により、コア内部の磁場は乱雑である。

## 地球ダイナモの数値シミュレーション

コアの中では、ローレンツ力に逆らって流体が流れて仕事をすることで、電磁気的なエネルギーが生み出されます。流れと磁場の変動の時空間スケールは、乱流や波動伝搬などといった局所的な数年～数十年程度の変動から、地磁気の逆転（双極子磁場の向きが突然反転する現象）などといったグローバルで数万年周期で起こるような変動まで、きわめて広範囲にわたっており、数値シミュレーションにせよ、室内実験にせよ、この地球のダイナモ作用を完全に再現して理解することは至難の業です。

わたくしはこれまで、地球シミュレーターなどの大型並列計算機をもちいた数値計算によって、コアの中で起こっているであろう流れや磁場生成のようす、そして地磁気変動の成因について研究してきました（図1）。基礎的な物理過程のいくつかはこうした研究によってある程度理解することができるようになりましたが、磁極がなぜ逆転するのか、など、まだまだ多くの謎が残されています。

最近わたくしが目指しているのは、できるだけ地球に近い、磁場強度が強くて、かつ粘性の効果があまりあらわれないようなパラメータ領域での地球ダイナモモデルの構築です。わたくしのモデルでは、コアが冷えることで対流不安定が生じ、流れが駆動されます（熱対流）。モデル流体の粘性を低くすると、コア表面の温度境界条件によって、発生する流れや磁場の空間構造が激変することがわかりました（図2）。このような現象は、大規模数値計算によって初めてわかることで、今後の地球ダイナモ理論を構築する上で、大きな示唆を含んでいます。

### 地球科学における諸問題

その他、地球科学の諸問題のひとつとして、火山で起こる長周期の地震動の発生メカニズムにも興味をもっています。とくに、振動スペクトルに複数のピークがあらわれるような、周期1秒程度で継続時間の長い、トレマーと呼ばれる火山性微動の発生を説明するために、マグマが岩盤中に平板状の割れ目（ダイク）をつくって貫入する際に起こる自励振動を、弾性体力学と流体力学とを連成させた線形安定問題として定式化し、大変おもしろい結果を得ました（図3）。マグマが流れているダイクは、これまで考えられているよりも、はるかに容易に不安定化し、特徴的な弾性波の発信体となりうるかもしれません。

#### 参考文献

- [1] A. Sakuraba and P. H. Roberts, Generation of a strong magnetic field using uniform heat flux at the surface of the core, Nature Geoscience 2, 802-805, 2009.
- [2] A. Sakuraba and H. Yamauchi, Linear stability of plane Poiseuille flow in an infinite elastic medium and volcanic tremors, Earth Planets Space 66, 19, 2014.

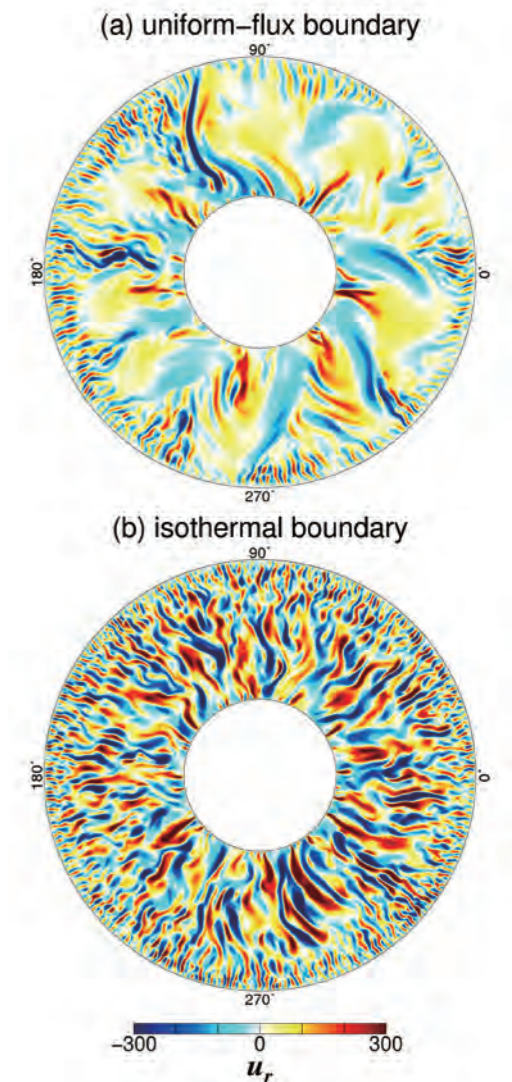


図2. 温度境界条件の違う2つのダイナモモデルで得られた数値解 [1]。赤道断面での流れの動径成分を示す。(a) コア表面の熱フラックスを一律にすると流れが大規模になり、強い磁場が生成される。(b) 表面温度を固定すると、流れのスケールが細かくなって、磁場が弱くなる。地球のコアでは前者の境界条件のほうがより適当である。

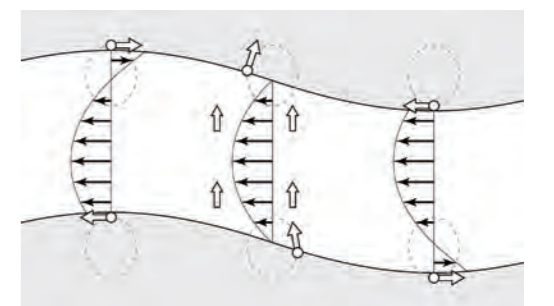


図3. マグマが流れるダイクに沿って伝わるレイリー波の不安定化メカニズムをあらわす模式図 [2]。黒矢印はマグマの流速ベクトル、白丸とそこから出る矢印はダイク壁面の固体粒子の運動をあらわす。マグマが壁をこすって、楕円形のレイリー波の粒子運動を加速する。



# 清水 以知子 -Ichiko Shimizu-

助教 構造地質学・岩石レオロジー  
E-mail : ichiko@eps.s.u-tokyo.ac.jp



## 岩石レオロジーから探る 沈み込み帯のダイナミクス

2011年、「想定外」のM9東北沖地震が発生しましたが、巨大地震の発生メカニズムをめぐっては様々な仮説や、ときに相反するモデルが出されてきました。その背景として沈み込み帯深部における岩石の応力状態、またそれを規定する断層強度について、いまだに未知の部分が多いということがあります。一方、西南日本に広く観測される深部低周波微動については、沈み込むスラブの脱水で生じた水が関与しているという考えがありますが、高温高压下にある地下深部での断層すべり過程はまだよく理解されていません。私たちは室内実験によって岩石の摩擦・変形などのレオロジー物性を調べ、地震発生と水のかかわりを解明しようとしています。また過去の沈み込み帯物質であるに変成岩の流動組織や、マントル起源のカンラン岩中の断層を様々な分析手法で解析して、地下深部における応力状態や変形過程を推定する研究を行っています。

## 地殻流体と断層運動

断層の破壊・摩擦強度は間隙圧によって変化しますが、地殻深部の熱水条件下ではこうした力学的効果だけでなく、H<sub>2</sub>O流体を介する溶解沈殿反応や、雲母・緑泥石・蛇紋岩など含水鉱物の生成によって、強度が劇的に変化する可能性があります。私たちは、このような水の物理化学的影響を定量化するために、地下の温度圧力状態を再現した圧縮試験・摩擦実験を行っています。また、これまで知識の乏しかった脆性-延性遷移領域に焦点をあて、新たな熱水式回転摩擦試験機の設計開発を行っています。これらの実験結果を総合して、地殻浅部の脆性領域から下部地殻の延性領域に至る断層帯・剪断帯の強度断面モデルを作成するとともに、プレート境界断層深部における摩擦構成則や下部地殻・マントルウェッジにおける媒質の粘弾性挙動を明らかにしていきたいと考えています。



図1. 固体圧式高温高压岩石変形試験機。



図2. 開発中の熱水式回転摩擦試験機。

## 地殻の塑性流動

結晶内部に溶け込む微量の水は転位クリープの流動応力を著しく低下させます。下部地殻の断層延長部は、こうした水的作用により歪の集中帯となっていると考えられます。また沈み込むスラブの力学的性質は海洋地殻物質を構成する石英の水軟化が大きく寄与しているのではないかと推察しています。私たちは白亜紀の沈み込みによってできた変成岩中の石英の転位クリープ組織を走査型電子顕微鏡で詳しく解析するとともに、結晶に含まれる水の量を赤外分光顕微鏡によって測定し、含水量とレオロジカルな性質の関係を調べています。また実験室で得られた結果とクリープ理論との比較から、沈み込みプレート境界断層の力学的構造を解明しつつあります。

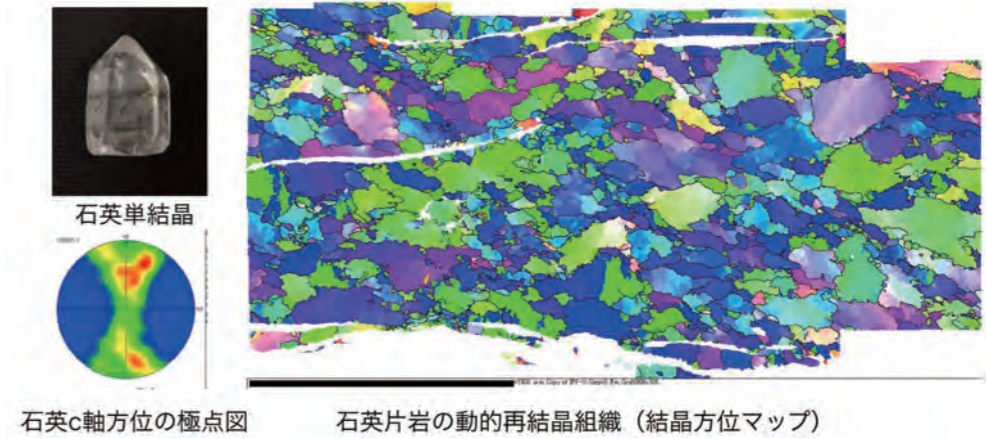


図3. 三波川変成帯の石英片岩における結晶方位解析。走査型電子顕微鏡の後方電子散乱像による。

## 国内外の共同研究

私たちは東北沖地震後の日本列島の応力や変形場を把握するために、全国の研究者と連携して新学術領域研究プロジェクト「地殻ダイナミクス - 東北沖地震後の内陸変動の統一的理解 -」（平成26～30年度）を進めています。詳しくは領域ホームページ <http://cd.dpri.kyoto-u.ac.jp/> をご覧下さい。またオランダのユトレヒト大学や、フランスのオルレアン大学など、世界の第一線の実験岩石学・レオロジー研究拠点とも提携し、若手研究者の派遣など相互交流しながら共同研究を行っています。

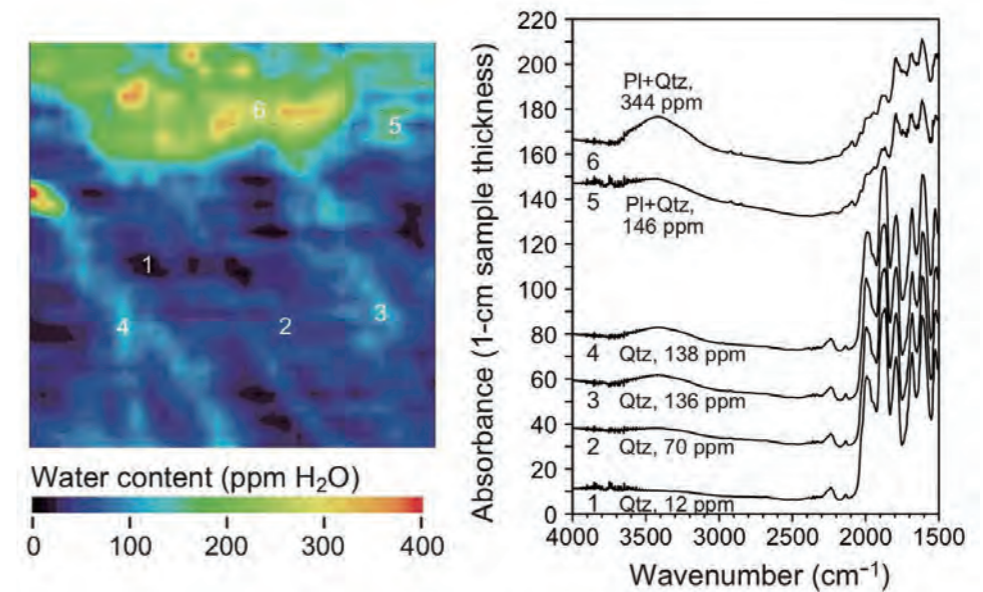


図4. 三波川変成帯の石英片岩中の水分分布。(左) 顕微赤外分光像。(右) 赤外スペクトル。



# 西田 圭佑 -Keisuke Nishida-

助教 高圧地球科学

E-mail : nishidak@eps.s.u-tokyo.ac.jp

http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~high-pressure/



## 高圧実験で探る地球型惑星の内部構造

地球や火星などの地球型惑星は、主にケイ酸塩鉱物でできた地殻・マントルと鉄合金の核で構成されていると考えられています。しかしながら、地球や惑星の内部の試料を直接取ってきて観察することはできません。そこで私は、高温高圧発生装置を使って地球や惑星の内部を実験的に再現して、地球・惑星内部の構造や現象、進化過程を明らかにする研究を行っています。特に、鉄合金メルトでできた液体の核に興味を持って研究しています。

### 地球型惑星の液体核

地球の外核は、主に地震波観測と衝撃圧縮実験の結果から、純鉄に比べ、密度で約10%低く、縦波(P波)速度で約3%程度速いことが知られています。したがって、外核は主成分の鉄-ニッケル合金メルトに密度を下げる軽元素(水素、炭素、酸素、硫黄、ケイ素など)が含まれていると考えられています。しかし、どの元素がどのくらい含まれているか50年以上議論されていますが、未だによくわかっていません。また、近年の物理観測から、水星、火星、月や木星の衛星であるガニメデの核は、地球と同じように、部分的に液体である可能性が示唆されています。しかしながら、それらの天体の液体核については、大きささえも良くわかっていません。現在の核の推定温度や冷却に伴う惑星進化過程は、核の組成によって異なります。また、核の組成は、惑星形成時の材料物質や酸化還元環境の解明につながるため、原始太陽系での地球型惑星の形成モデルを考える上でも重要です。

密度、音速、弾性率は、地震波観測など地球物理学的手法によって測定できる物性値です。これらの物性値は、温度、圧力、組成によって変化するため、惑星核を理解するためには、鉄合金メルトの物性を理解することが非常に重要です。

### 高圧実験

地球や惑星の内部を再現するには、高温高圧の世界を作り出さなくてはなりません。現在、地球や惑星の内部を想定した高圧実験には、主に小型のダイヤモンドアンビルセルと大型のマルチアンビルプレス(図1)の2つの装置が使われています。日本の高圧地球科学の分野では、特にアンビルを二段にした川井型マルチアンビルの実験が、盛んに行われてきました(図2)。マルチアンビルプレスは、圧力発生の

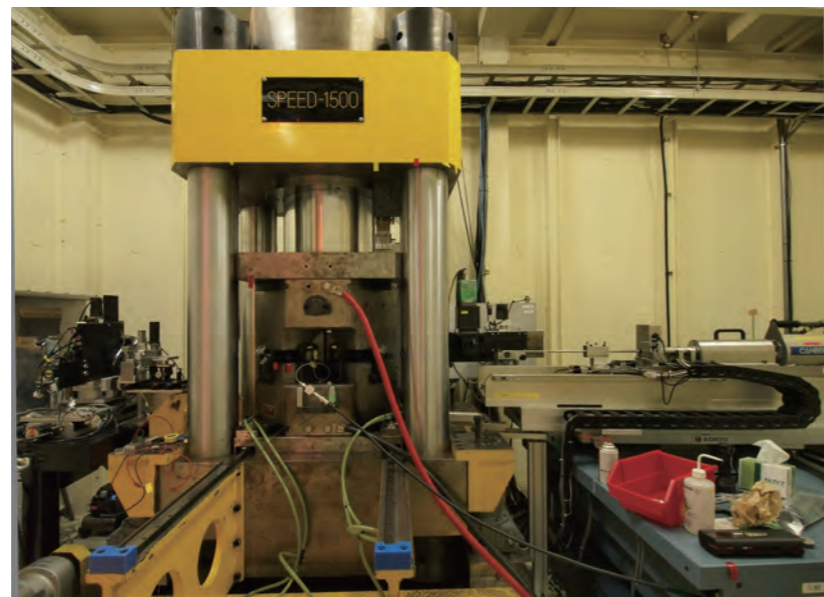


図1. 大型放射光施設 SPring-8 の BL04B1 ビームラインに設置されているマルチアンビルプレス (SPEED-15000)。放射光 X 線を使って、高温高圧下での試料の回折 X 線やイメージ (レントゲン写真) のその場観察が可能。

点でダイヤモンドアンビルセルに劣りますが、抵抗加熱を行うことができるため、高い温度を安定的に発生することができます。また、比較的試料容積が大きいため、高圧セル内に様々な仕掛けを仕込むことができるため、メルトの物性測定実験に適しています。メルトに関する研究は、理論・実験共に難しく、固体に比べまだまだ発展途上です。より高い圧力でメルトの物性を測定できるように実験技術開発も行っています。次章では、最近精力的に行っている、高圧下における鉄合金メルトの音速測定に関して紹介します。

### 鉄合金メルトの音速測定

音速は、地震波速度と直接比較できるため、地球や惑星の内部の組成や構造を推定する上で非常に重要な情報です。我々は、超音波パルスエコーオーバーラップ法を用いて、高圧下の鉄合金メルトの音速測定を行っています。この手法は非常に単純で、試料の長さを伝播時間で割ることで音速が求められます。高温高圧下の試料は、セラミックスの圧力媒体で覆われているため、可視光で観察することはできません。そこで、強力な放射光 X 線イメージング (レントゲン写真) を使い、高温高圧下での試料の長さを求めます (図 3a)。伝播時間は、高圧セル内に超音波を伝播させ、試料の前面と背面で反射した超音波の時間差をデジタルオシロスコープで計測することで求められます (図 3b)。我々は、世界で初めて月核条件 (5 万気圧) までの鉄合金 ( $\text{Fe}_{60}\text{S}_{40}$ ) メルトの音速測定に成功しました [1]。この技術を使い、鉄合金メルトの音速に及ぼす S の効果 [2] や Ni, C の効果 [3] を調べ、月核の組成や地震波速度構造の推定を行っています。また、より高圧下での測定を目指し、技術開発も行っています。最近、火星の核-マントル境界 (約 20 万気圧) まで Fe-S メルトの音速測定範囲を拡大することができました。現在、次の目標として火星の実際の核条件 (20-30 万気圧) での測定を目指して技術開発を行っています。

#### 参考文献

- [1] K. Nishida, et al., Sound velocity measurements in liquid Fe-S at high pressure: Implications for Earth's and lunar cores, Earth and Planetary Science Letters, 362, 182-186, 2013.
- [2] K. Nishida, et al., Towards a consensus on the pressure and composition dependence of sound velocity in the liquid Fe-S system, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 257, 230-239, 2016.
- [3] S. Kuwabara, H. Terasaki, K. Nishida, et al., Sound velocity and elastic properties of Fe-Ni and Fe-Ni-C liquids at high pressure, Physics and Chemistry of Minerals, 43, 229-236, 2016.
- [4] K. Nishida, et al., Density measurement of liquid FeS at high pressures using synchrotron X-ray absorption, American Mineralogist, 96, 864-868, 2011.
- [5] K. Nishida, H. Terasaki, E. Ohtani, and A. Suzuki, The effect of sulfur content on density of the liquid Fe-S at high pressure, Physics and Chemistry of Minerals, 35, 417-423, 2008.

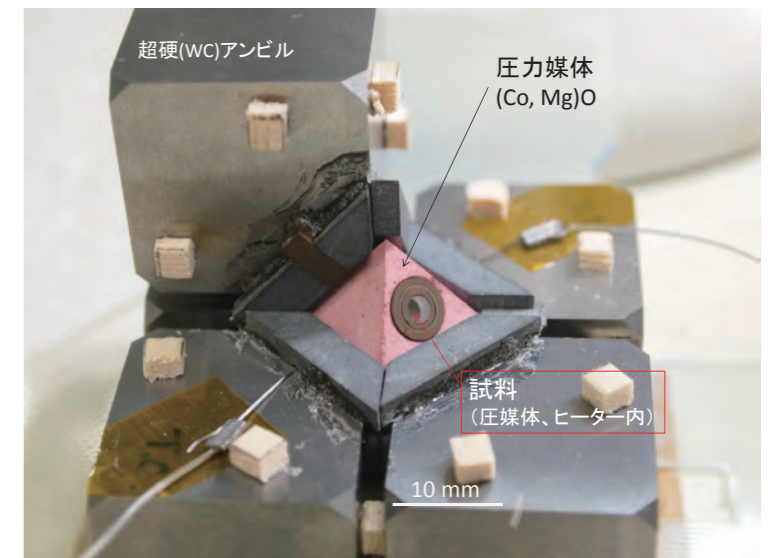


図2. 川井型マルチアンビルの二段目アンビルと音速測定用の高圧セル。高圧セルは、セラミックスの圧力媒体の中にヒーターと試料、熱電対などが仕込まれている。超音波は、透明な部分 (単結晶サファイア) を通って試料に伝播する。

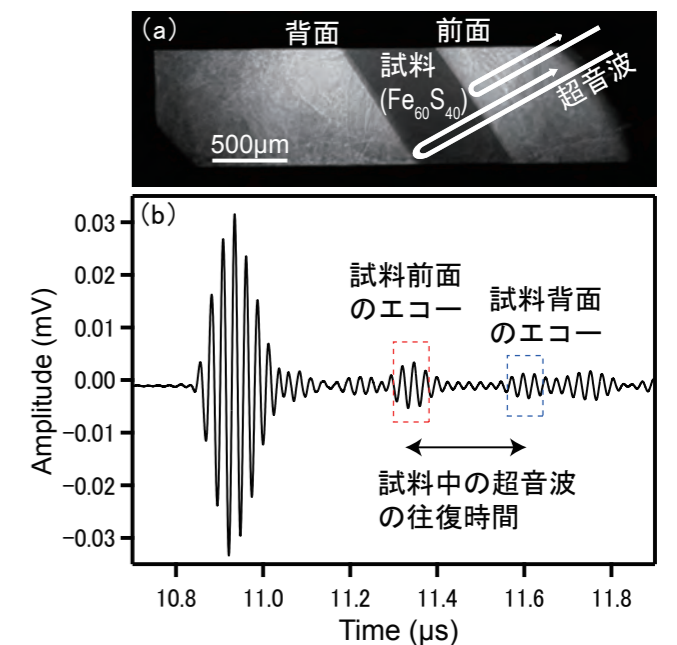


図3. 火星核条件を目指して開発中の高圧セルを使った11万気圧、1400°Cにおける $\text{Fe}_{60}\text{S}_{40}$ メルトのX線イメージ(a)と超音波波形(b)。