

井出 哲 -Satoshi Ide-

教授 地震科学

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

Website : <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。

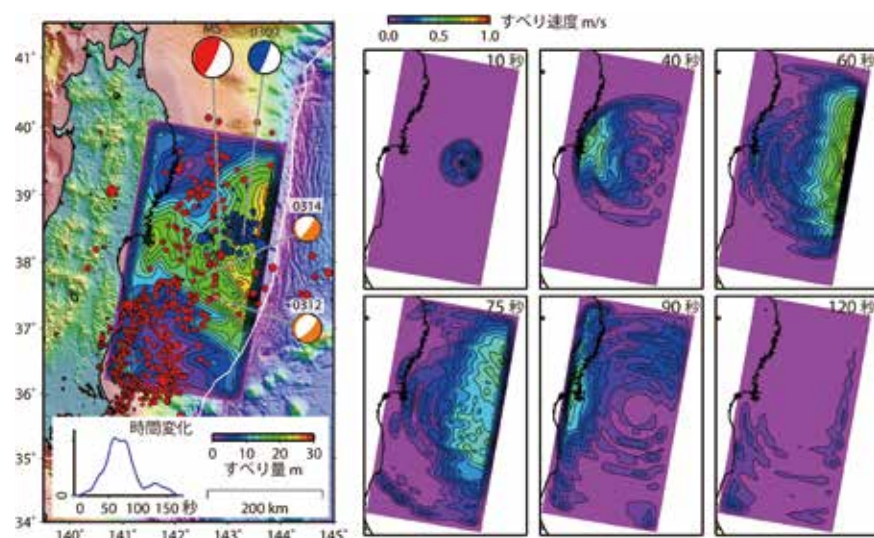


図 1. 2011 年東北沖地震のすべり分布と 6 つの時刻でのすべり速度のスナップショット。

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。

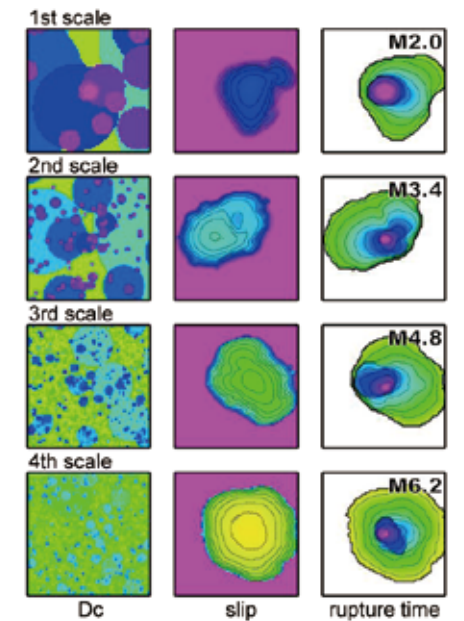


図 2. スケールを大きく変えて成長する地震モデルの例。

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.

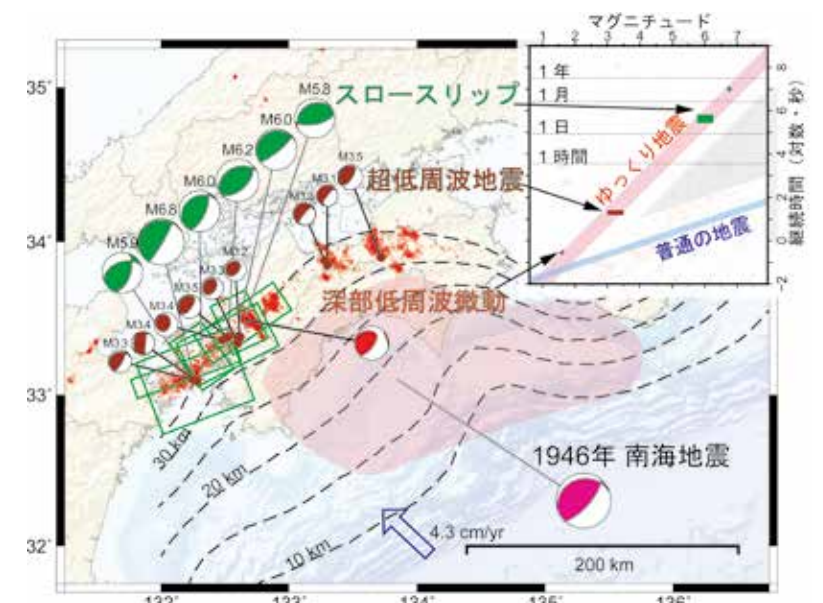
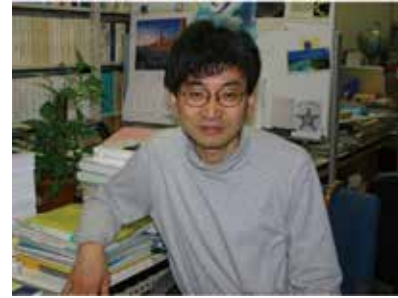


図 3. 四国西部の「ゆっくり地震」とそのスケール法則。

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

地球の大規模層構造は、地球内部の分化過程の賜で、それは地球内部から地表への熱輸送に伴って形成されてきたものです。地球内部の分化は様々な時間空間スケールで起きます。地球の分化を担うのは、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、主として上部マントル近傍で発生し、固相からの分離とマントル・地殻中の輸送を経て、火山活動として我々の目に触れるようになります。分化に関係するマグマ過程は、大きく分けるとマントルでの融解・メルト分離と地殻内部での結晶・融解分化です。こうしたマグマ活動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、地球が辿ってきた熱史の理解は地球の分化史を理解する上で不可欠です。このような課題に対し、地球のマントル物質を中心にして、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て鉱物・岩石科学的手法と理論・実験・モデリングの手法をあわせて研究を進めています。鉱物・岩石から、現象の本質にかかわる情報を抽出し、それを物理化学過程と結びつけて実体があり定量的である地球惑星の熱・分化史を解読することをめざしています。

上部マントルにおける融解過程と分化

マグマ発生の場合である上部マントルは、かんらん岩を主要な構成物質としています。融解を引き起こす基本的な誘因は、より深部からの断熱上昇と深部からの流体等の輸送です。一般に、前者は中央海嶺下、後者は島弧下マントルの融解の原因であるとされていますが、果たしてそうでしょうか？ 図1は、中央海嶺の融解について、マントル物質の微量元素を検討した結果です。中央海嶺のホットスポット近傍(a)と離れた場所(b)から採集されたかんらん岩中の単斜輝石の希土類元素パターンを開放的融解モデル[1]に基づいて、深部物質の流入率(β)、メルト分離効率、融解開始深さ、融解程度を検討してみました。すると、物質流入率、融解程度、融解開始深さの間に明瞭な相関が認められ、ホットスポットの近くでは深部物質の流入が融解を促進させていることが判明しました。

Fe-Mg 比や Cr-Al 比といったメルトと鉱物間で交換反応するような主成分元素の挙動は少量の物質流入の影響を受けないため、融解程度やメルト分離といった融解パ

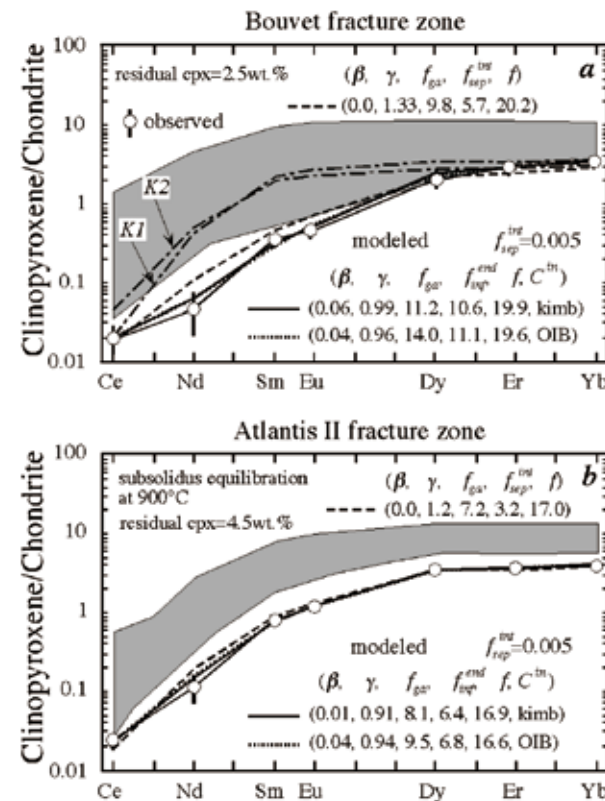


図1. 中央海嶺から得られたマントルかんらん岩中の単斜輝石の希土類元素パターン(○)を1次元の融解モデル(折線)で解析した結果。ホットスポットの近く(a)と離れた場所(b)で融解程度、物質流入率、分離効率が大きく異なることが判明した[1]。

ラメータに強い制約を課すことができます。したがって、微量元素や同位体組成の情報をあわせて解析することで、融解過程全体を正確に推定することができるようになります。

リソスフェアの熱構造とマントル熱流量推定

地表に露出している上部マントル物質は、マントル内を運動し最終的に上昇したものです。リソスフェアマントル上昇の温度・圧力履歴に時間目盛りを入れ、上昇する前のリソスフェアの熱構造を読み解く研究を紹介します[1]。図2は、かんらん岩中の斜方輝石のAlの濃度分布です。結晶の表面でAlが多いことがわかります。周囲の鉱物とのAlの分配と斜方輝石中のAlの拡散速度を用いて、Alの分布のパターンを定量的に解析し、冷却・上昇速度が推定できます。Alの拡散は大変遅いので900℃以上の高温での冷却速度が求められます。一方、かんらん石とスピネルのMg-Fe 分配反応は速いため、800℃以下で有効です。様々な鉱物と元素の組み合わせを駆使すれば、マントル物質の上昇過程の全貌を明らかにする事ができ、最終的に上昇前のリソスフェアの熱構造を推定できます。これとマントル物質の年代測定を組み合わせるとマントルからの熱フラックスの時間変化を明らかにしようとしています。この課題については、レビュー論文[2]に詳しく記されているので一読ください。

上部マントルの流動過程とリソスフェア・アセノスフェア境界の実体

マントルかんらん岩に少量含まれるCr-Alスピネルは、変形についても多くの重要な情報を与えてくれます。図3は、スピネルの一つの粒子のAlの3次元分布を段階解析法で決定したものです。このAl分布の特徴は、スピネル粒子表面に最大値と最小値が隣り合って出現するという特異なものです。Alの少ない所に大きな応力が、Alの多い所に小さな応力が働いていたことがわかっています。このAl分布を解析することで、かんらん岩の変形時にかかっていた応力やその時間変化の知見を得ることができます。マントル物質上昇過程に記録されたものを取り除くことで、リソスフェアあるいはアセノスフェアの応力状態を推定しリソスフェア・アセノスフェアの実体解明につなげようとしています。

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, 253-73, 2004.
- [2] 小澤一仁・永原裕子, 地球物質情報に基づく地球熱史解明:到達点の概観と今後の展開, 岩石鉱物科学, 42, 2013 (印刷中)。

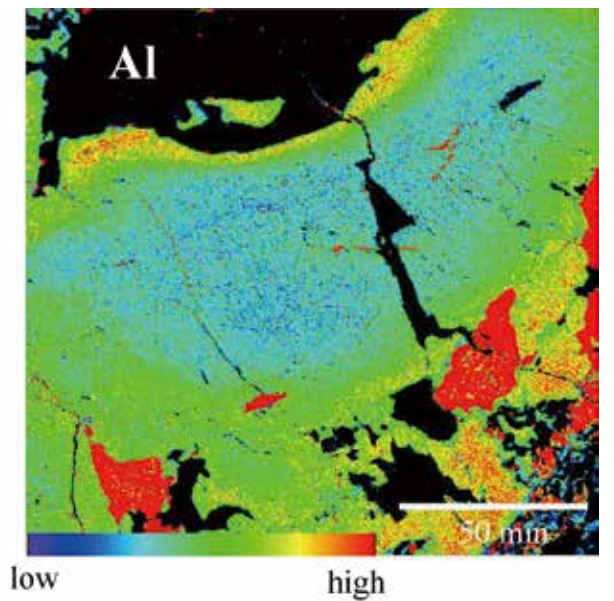


図2. 北海道幌満かんらん岩中の斜方輝石のAlの元素分布. この元素分布に、上部マントルの温度・圧力履歴が記録されている[2]。

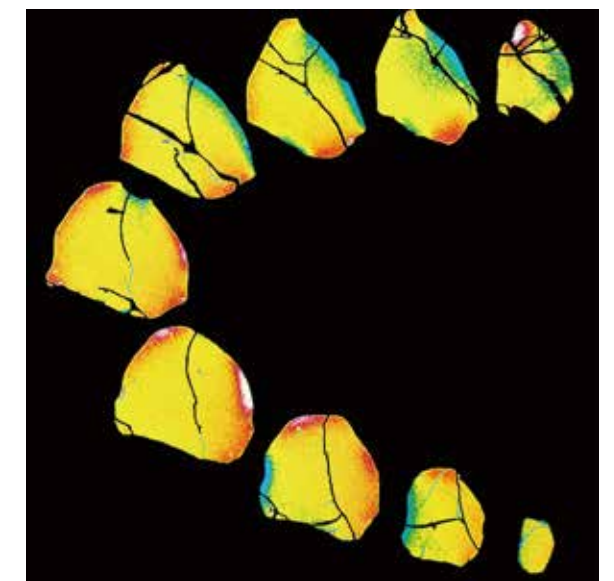


図3. 北上山地宮守かんらん岩体中のスピネルのAlの3次元分布. このAlの不均質性は、マントル内の変形流動過程を記録している。

木村 学 -Gaku Kimura-

教授 テクトニクス・構造地質学

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

Website : <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~gaku/>



超巨大海溝型地震発生、全地球テクトニクスそして地球環境・テクトニクスリンクに迫る

超巨大海溝型地震の謎に迫る！

地震・津波で甚大な被害をもたらす海溝型地震。それを引き起こすプレート境界断層。海底を掘り現在のプレート境界を直接研究します。陸上にある過去のプレート境界断層岩を研究しています。それらの変形破壊過程，化学過程を解明することにより，謎に迫ります。伝統的地震学に新しい息吹を吹き込むのが夢です。

日本列島西部の四国や紀伊半島の沖には，南海トラフという海溝があります。そこでは，繰り返し巨大地震が発生してきた世界で最も長い7世紀以降の記録があります。南海トラフの北には日本列島から海溝に流れ込んだ土砂が再び陸に押しつけられ，しっかりとした岩石になった「付加体」があります。その付加体の底は，海溝から沈み込む岩盤とともに持ち込まれた水を大量に含んだプレート境界である，と想像されます(図2)。そこで地震が繰り返し発生し，盛んに流体の移動・循環が起っていると予想されるのです。そこを「ちきゅう」(図1)で掘削中です(くわしくは<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/>)。



図1. 人類未到の深度を掘削できる科学探査船「ちきゅう」。

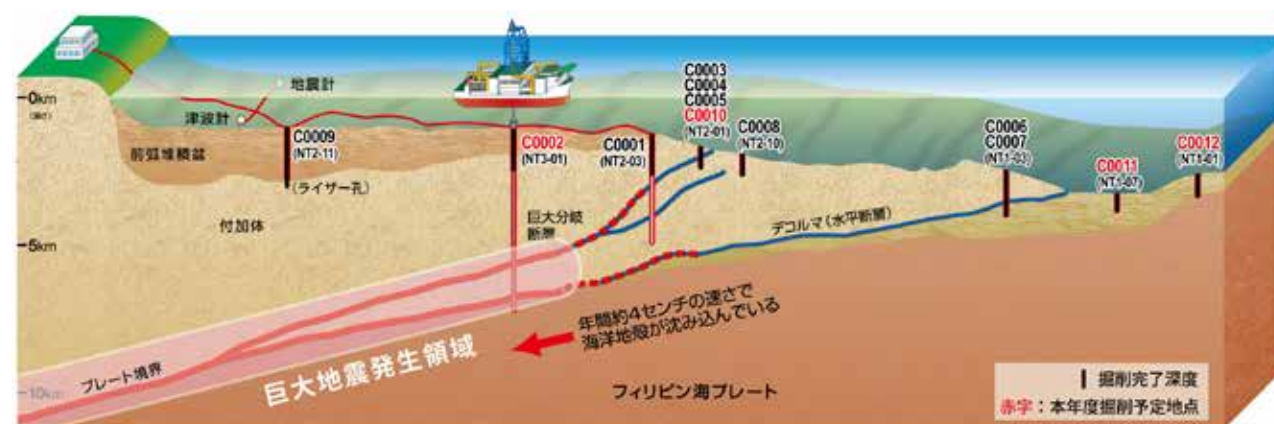


図2. 紀伊半島沖南海トラフ地震反射断面と「ちきゅう」による掘削予定地。

全地球テクトニクスの謎に迫る！

プレートテクトニクス理論の成立から40年。最近の精密な地殻変動観測，地下構造の様々なスケールでの観測，そしてそれらを構成する岩石の年代測定法などの長足なシンポ。それらは全地球史スケールの時間軸，全地球に及ぶ空間スケールでこの地球内部の進化過程の見直しを求めています。大陸の形成・進化と大規模物質循環に焦点を当てて，研究をすすめます。

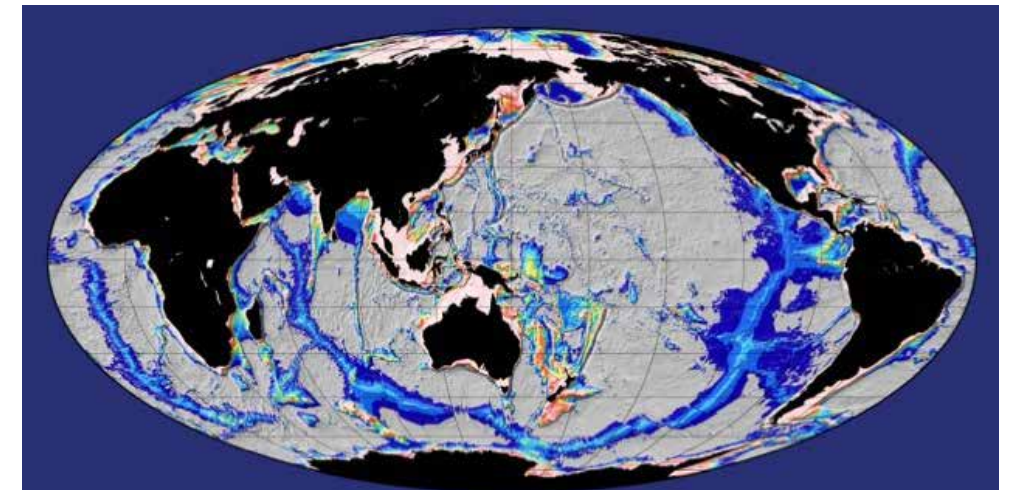


図3. プレート収束帯(衝突・沈み込み) テクトニクスのグローバルな見直し。

地球環境・テクトニクスリンクに迫る！

地球温暖化など地球環境が大きな問題。それを決める大きな原因の1つは地球内部の動き，すなわちテクトニクスと表層とのリンクです。大山脈の形成，大規模火山活動，大陸の離合集が及ぼす大気海洋大循環システムの変化などは地球環境・生命進化に甚大な影響を及ぼしてきましたし，現在も及ぼしています。それらにテクトニクスの側から迫ります。

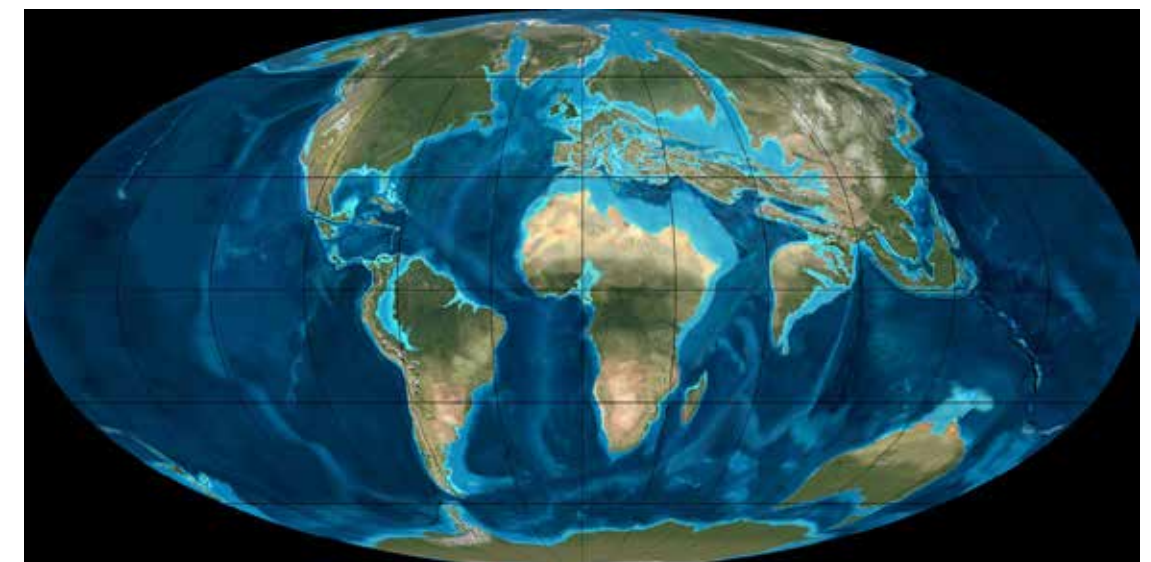


図4. 始新世地球の温暖化，漸新世寒冷化とグローバルテクトニクスリンク。

参考文献

- [1] 付加体と巨大地震発生帯—南海地震の解明に向けて 木村学・木下正高編著 東大出版会 2009.
- [2] プレート収束帯のテクトニクス学 木村学著 東大出版会 2002.
- [3] 地質学の自然観 木村学著 東大出版会 2013.

ロバート ゲラー - Robert J. Geller -

教授 地震学

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

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



波形インバージョンをもちいた 地球内部構造の推定

地球の内部構造を正確に把握することは地球ダイナミクスの理解に大きく貢献します。これまでの地震波トモグラフィの研究のほとんどは、実体波の走時もしくは表面波の位相など、観測された地震波形データから抽出された一部の情報（二次データ）を扱ってきました。ところが、地球内部を伝播してきた地震波形記録が持つ情報を十分に活用することができれば、より詳細で正確な内部構造推定が可能ははずです。

そこで、我々の研究室では、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。

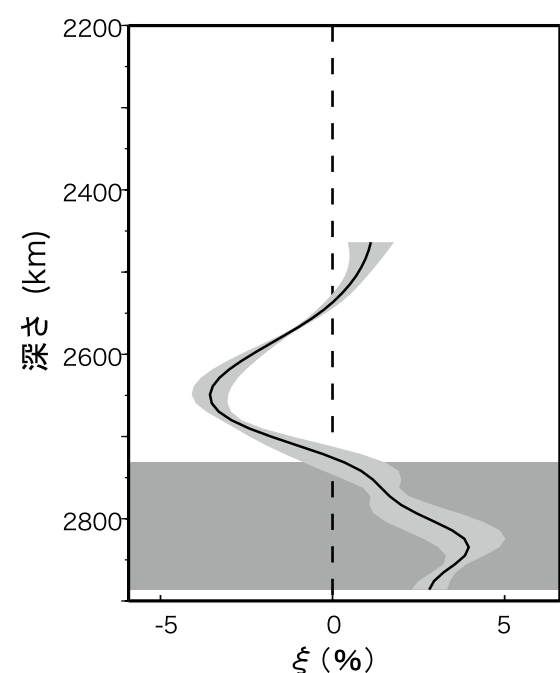
高解像度の内部構造推定のために、理論波形及びその偏微分係数を正確に計算しなければなりません。計算精度がよく計算時間が短い計算手法が必要なため、波形インバージョンの研究を行いながら手法開発の最先端研究にも取り組んでいます。ちなみに、これまで開発してきた全地球規模内部構造の推定のための理論及び計算手法は、小さいスケールの構造推定（例えば油田開発における物理探査）にも応用できます。これからその分野へ研究の対象を広げて行きたいと考えます。現在進行中の主要な研究テーマは二つあり、(1) 波形インバージョンによる地球内部の地震波速度の推定、(2) 時間領域での有限差分法の最適計算スキームの開発、です。上述の研究について興味があれば、是非ご相談ください。以下に2010年に発表した研究成果(Kawai and Geller, EPSL, 2010 [1])について述べます（図1、図2を参照）。

ハワイのホットスポット火山下の最下部マントルにある上昇流の 地震学的証拠

【概要】

マントルは対流しており、最下部マントルでは水平流および上昇流の存在が予想されている。しかし、これまで上昇流の存在を示す直接的な証拠はなかった。本研究では、私たちのグループで独自に開発を行った“波形インバージョン”を用いてデータ解析を行い、ハワイの下部の最下部マントルで、SV波の速度がSH波の速度よりも速いという“異方性構造”の存在を発見した。これは、ハワイのホットスポット火山の起源となる上昇流が、核・マントル境界から上がってきていることを示唆する。

図1. 本研究で推定したハワイ下の下部マントル最深部における異方性パラメータ（ ξ ）。この値の符号が正の場合SH波の方が速く、負の場合SV波の方が速い。本研究により、核・マントル境界上200-400kmの深度において、SV波がSH波よりも速い構造を得た。



【背景】

私たちの研究グループは、これまで“波形インバージョン”と呼ばれる地震波解析手法の開発を独自に行ってきた。これにより、従来の手法と比較して、より詳細で正確な地球内部構造の推定が可能となった。そして、波形インバージョンを用いて、下部マントル最深部における等方媒質地震波速度の深さ依存性を、適切なデータが存在する地域に対して推定してきた。その結果、我々が調べた全ての地域の最下部マントルにおいて、「地震波速度は、核・マントル境界に近づくにつれて減少する」という結果が得られた。このことは、「下部マントルの最深部はマントル対流の熱境界層であり、核との境界に近づくにつれて温度が急激に上昇する」ことを示唆する。

一方、マントルの対流についての情報を得るためには、波形インバージョンによって地震波の異方性構造を推定することが必要不可欠であった。本研究では、波形インバージョンの機能をさらに向上させることでこれを可能とし、実際に推定を行った。

【明らかにした点】

私たちは、ハワイ下の下部マントル最深部における異方性構造の深さ依存性を、初めて定量的に求めることに成功した（図1）。その結果、SV波がSH波よりも速いという異方性構造が得られた。このことは上昇流の存在（図2）を示唆するものであり、ハワイのホットスポット火山を形成する上昇流が、核・マントル境界に起源を持つことを示している。

【補足説明】

注1 地震波速度の異方性

等方な媒体では、地震波のP波とS波の伝播速度は、場所によって異なることがあるが、ある一点においては変位方向や伝播方向によって伝播速度が異なることはない。ところが、同じ点においても、伝播速度が変位方向や伝播方向によって異なる場合があり、これを「異方性」と呼ぶ。地震波の異方性構造の正確な推定によって、マントル対流やマントルの構成物質についての情報を得ることができる。

注2 SH波・SV波

地震波には縦波と横波があり、「横波」のことをS波と呼ぶ。すなわち、S波の振動方向は伝播方向に直交する。S波には2つの互いに直交する震動成分がある。水平方向に震動する成分を持つS波をSH波と呼び、それと直交する成分をSV波と呼ぶ。

注3 マントル

地殻の下から深さ約2900kmまでの岩石からなる固体の層（深さ2900km以深は、液体の鉄で構成される外核であり、また、深さ5150km以深は、固体の鉄で構成される内核である）。マントルは、その主要構成鉱物が相転移する深さ660kmにおいて、上部マントルと下部マントルに区分される。さらに、核・マントル境界上の約200-300kmの最下部マントルはD''領域と呼ばれる。近年の研究により、下部マントルの主要鉱物ペロブスカイトが、D''領域の温度圧力下でポストペロブスカイトに相転移することが発見された。そのため、現在では下部マントルは主にペロブスカイトおよびフェロペリクレス、D''領域はポストペロブスカイトおよびフェロペリクレスによって構成されていると考えられている。

参考文献

- [1] Kawai, K. and R.J. Geller, The vertical flow in the lowermost mantle beneath the Pacific from inversion of seismic waveforms for anisotropic structure, Earth Planet. Sci. Lett., 297, 190-198, 2010.
- [2] Fuji, N., K. Kawai, and R. J. Geller, A methodology for inversion of broadband seismic waveforms for elastic and anelastic structure and its application to the mantle transition zone beneath the Northwestern Pacific, Phys. Earth Planet. Inter., 180, 118-137, 2010.
- [3] Kawai, K., and R. J. Geller, Waveform inversion for localized seismic structure and an application to D'' structure beneath the Pacific, J. Geophys. Res. 115, B01305, doi:10.1029/2009JB006503, 2010.

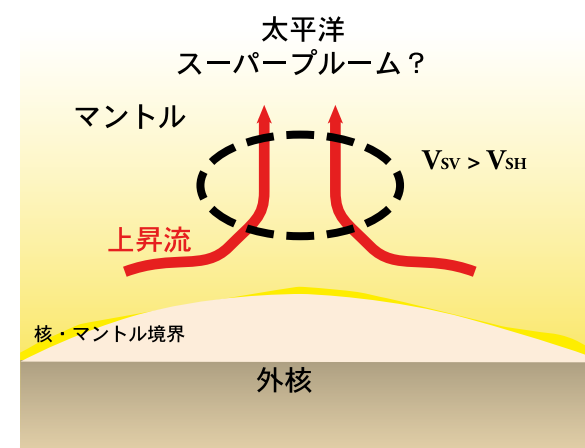
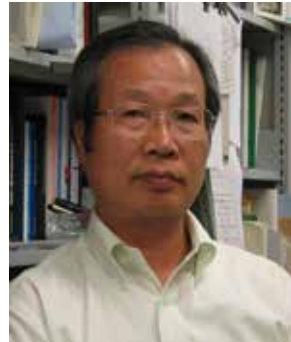


図2. 本研究によって得られたハワイ下の下部マントル最深部の異方性構造（図1）の解釈。核からの熱によって温められた物質は、浮力を得て上昇流を作る。それが異方性の原因と考えられる。

池田 安隆 -Yasutaka Ikeda-

准教授 変動地形学, アクティブテクトニクス
E-mail : ikeda@eps.s.u-tokyo.ac.jp
Website : www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ikeda/



活断層と地形の進化を探る

我々が専門としている変動地形学には、大別して二つの流儀があります。ひとつは、最近の地質時代における地殻変動を明らかにすることを目的とした地形の研究であり、いわばツールとしての変動地形学です。もうひとつは、地殻変動によって生ずる地形の進化そのものの研究であり、「純粋変動地形学」とでも言うことができます。どちらが良いとか悪いとか言っているのではありません。それぞれに面白さと研究の意義があるのです。

断層の挙動を探る

我々は、陸域の活断層や沈み込み帯に発達する巨大断層の挙動を明らかにする研究を行ってきました。これは前者の流儀（ツールとしての変動地形学）に属する研究といってよいでしょう。地形学的方法と物理探査手法（反射法地震探査、重力探査等）を併用して、断層の動きに伴う地表変形や地下構造を知ることができます。このようなデータに基づいて、断層活動の履歴や広域的な地殻歪みの累積速度を明らかにすることができます。

沈み込み帯と巨大地震

日本列島は沈み込み型のプレート境界に位置しています。沈み込み帯における歪みと応力の蓄積・解放の過程を解明することは、純粋に理学的見地からおもしろいのみならず、自然災害の軽減にも寄与する、という意味でも重要です。沈み込み帯の巨大断層を含め、一般に断層は繰り返し動き、そのたびに大きな地震を発生します。その活動間隔は、測地学的観測や地震学的な観測の歴史より遙かに長く、歴史記録を紐解いたとしても十分な情報は得られないのが普通です。したがって、断層の挙動を研究する上で地質学的データは必要不可欠です。とはいえ、一口に沈み込み帯といっても、その挙動はバラエティーに富み極めて個性があるので、なかなか厄介なのですが。



図 1. 2004 年 12 月のスマトラ沖地震は、全長 1200 km にも及ぶ巨大な断層が破壊することによって生じた地球上で最大規模の地震です。写真は破壊領域の北端部に位置するアンダマン島における調査風景です。ここでは、珊瑚礁が地震に伴って隆起し離水したことによって一斉に死滅しています。同様な超巨大地震は 2011 年 3 月に東北沖で起こりました。このような低頻度・超巨大地震を真に理解するためには、地質学的データと思考法が必要です。



図 2. ヒマラヤーチベット研究と聞くと何故か私が連想するのは「群盲象を撫でる」という仏教説話です（左上図：英一蝶作，衆瞽撫象之図，Library of Congress, Prints and Photographs Division, Washington, D.C.）。地球上最大の造山帯は、長年にわたって実に沢山の地球科学者の関心をとりえて放しませんでした。いまだに多くの問題が未解決のまま残っています。我々も群盲の一人となって象を撫でたいと思いはじめ、チベット高原の拡大過程の解明に取り組んでいます。

地形の進化を探る

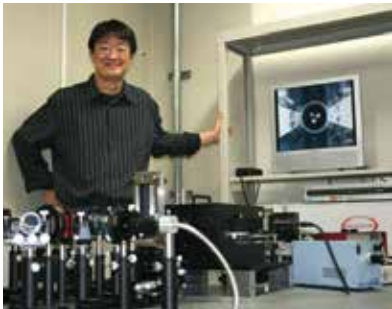
地球の地形がどのようにして進化してきたかという問題は、古くから地球科学の重要なテーマです。地球の地形は、地殻変動と浸食・堆積作用の両方によって作られますが、プレート境界に近い日本列島のような地域では、地殻変動の役割が重要です。地殻変動は、地震や活断層の動きなどによって体験できるし、地球物理学的な観測によっても捕らえることができます。しかし、この大地の動きを遠い地質時代までさかのぼって探求すると、そこには予想もしなかった面白い世界が開けてきます。

参考文献

- [1] 池田安隆・岡田真介・田力正好, 2012, 東北日本島弧—海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪解放イベント, 地質学雑誌, 118, 294–312.
- [2] Okada, S., and Y. Ikeda, 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, J. Geophys. Res., 117, B01404, doi: 10.1029/2011JB008355.
- [3] 箕浦幸治・池田安隆, 2011, 地球のテクトニクス 1: 堆積学・変動地形学, 現代地球科学入門シリーズ 9, 共立出版. 202 頁.
- [4] Ikeda Y., T. Iwasaki, et al., 2009, Active nappe with a high slip rate: Seismic and gravity profiling across the southern part of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan, Tectonophysics, 472, 72-85, doi:10.1016/j.tecto.2008.04.008.

船守 展正 -Nobumasa Funamori-

准教授 超高压物理学・鉱物物理学
E-mail : funamori@eps.s.u-tokyo.ac.jp



超高压高温の世界の探査

人類は、1969 年に月面への着陸に成功し、その後、無人探査機は火星への着陸、土星や木星の探査にも成功しました。もはや宇宙旅行は SF ではありません。一方、地球内部は宇宙空間に比べて距離的には近いにも関わらず、地底旅行は今なお SF の世界のお話です。人類の到達深度は、高々、地下 12000 m (ロシア・コラ半島) に過ぎません。アルピニストは山の空気が薄いことを知っていますし、ダイバーは海中で高い水圧にさらされることを知っています。山頂や海中の圧力はどのくらいなのでしょう？ 表 1 を見てみましょう。世界一高いエベレストで 0.03 MPa (0.3 気圧)、潜水の世界記録で 1.7 MPa です。一方、温度については、世界最高気温が 58.8℃ (イラク・バスラ; 1921 年)、最低気温が -89.2℃ (南極・ボストーク基地; 1983 年) と記録されています。人類は、この程度の圧力温度環境でも生命を維持することはできません。それでは、地球や惑星の内部の圧力温度はどのくらいなのでしょう？ 地球中心で約 360 GPa (360 万気圧)・6000℃、木星中心で約 5000GPa・20000℃と推定されています。



図 1. 放射光 X 線回折実験用キュービクアンビル装置 (高エネルギー加速器研究機構・PF-BL14C2 に建設)。

このような極限の圧力温度条件に耐えうる探査機を作りえないことは容易に想像できるでしょう。地球や惑星の内部は、直接探査の不可能な極限の世界なのです。探査機の代わりに用いられるのが、大型プレス装置 (図 1) やダイヤモンドアンビル装置 (筆者写真の前景: 理学部 3 号館 201 号室に建設したレーザー加熱

式装置) などの超高压高温発生装置です。我々のグループでは、超高压高温発生および超高压高温条件下における各種計測に関する新技術の開発を行うことで、地球や惑星の内部の状態やそこで生起する諸現象について理解することを目指しています。

我々のグループは、ルビー、ガーネット、スピネルといった重要鉱物の新しい相転移の発見やマントルの最重要鉱物であるケイ酸塩ペロフスカイトの状態方程式の決定などの成果を挙げてきました。最近では、以下に紹介するように、地球や惑星のダイナミクスの理解に欠かせないメルトに関する研究を推進しています。

液体の構造の圧力変化

液体の構造という怪訝な顔をされるかも知れません。しかし、結晶に見られるような長距離秩序はないものの、短・中距離秩序は液体にも厳然として存在します。また、液体は巨視的には等方的ですが、微視的には結晶と同様に異方性をもっています。結晶が圧力の効果により構造を変化させるのと同様、液体の構造も圧力によって変化します。液体の構造測定は、結晶の構造測定に比べ圧倒的に難しいため、その圧力変化についての研究は、現在まさに本格的に始まろうとしているところです。我々は、放射光 X 線回折と大型プレス装置の組み合わせにより、液体試料の構造を 20 GPa 領域まで精密に測定する技術を開発し、液体 Si などの測定に成功しました [1]。図 2 に示すように液体 Si の最近接原子間距離は、8 GPa と 14 GPa の間で、圧力の増加にも関わらず伸びています。縮むべきものが伸びていることは、配位数の増加を伴う大きな構造の変化が起きたことを意味しています。最近では、熔融ケイ酸塩の構造変化の測定にも取り組んでいます [2]。

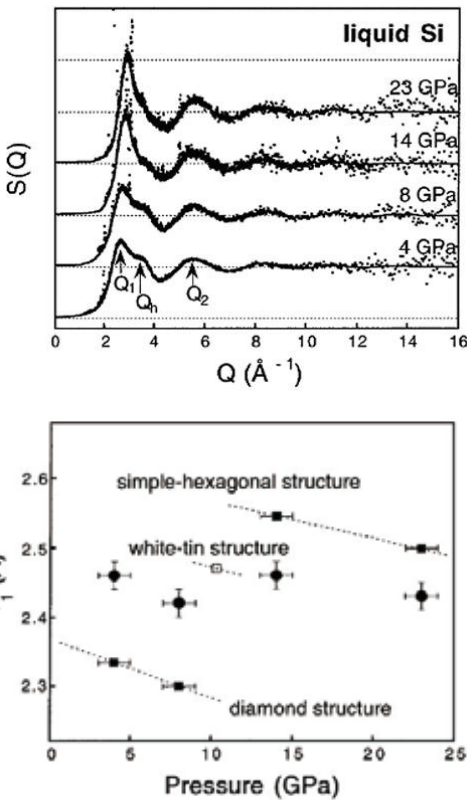


図 2. 液体 Si の構造因子 S(Q) と最近接原子間距離 r1 の圧力変化。黒丸で示される液体 Si の r1 は、8 GPa と 14 GPa の間で増加している。

ガラスの密度の圧力変化

非晶質 (液体やガラス) の密度の測定は、構造の測定と同様に、あるいはそれ以上に難しいため、ケイ酸塩についての報告は、なんと半世紀以上も 10 GPa 領域までで止まっていました。我々は、放射光 X 線吸収とダイヤモンドアンビル装置の組み合わせにより、ケイ酸塩ガラスの密度を測定するための技術開発を行い、50GPa を超える圧力領域まで SiO2 ガラスの密度を測定することに成功しました [3]。図 3 に示すように、約 40 GPa で SiO2 ガラスの圧縮率に変化が起り、ガラスと結晶の密度逆転は、起こらないことが明らかになりました。こうして得られた新しい知見は、地球マントル深部におけるマグマの浮沈の議論に重要な制約を与えるものと期待されます。

超高压高温の世界を探査するためには、高性能の探査船 (実験技術) が必要です。我々とともに新しい探査船を建造し、自らパイロットとして、未知の世界を旅してみませんか？

参考文献

- [1] Funamori, N., and K. Tsuji, Pressure-induced structural change of liquid silicon, Phys. Rev. Lett., 88, 255508, 2002.
- [2] Funamori, N., S. Yamamoto, T. Yagi, and T. Kikegawa, Exploratory studies of silicate melt structure at high pressures and temperatures by in situ x-ray diffraction, J. Geophys. Res., 109, B03203, 2004.
- [3] Sato, T., and N. Funamori, Sixfold-coordinated amorphous polymorph of SiO2 under high pressure, Phys. Rev. Lett., 101, 255502, 2008.

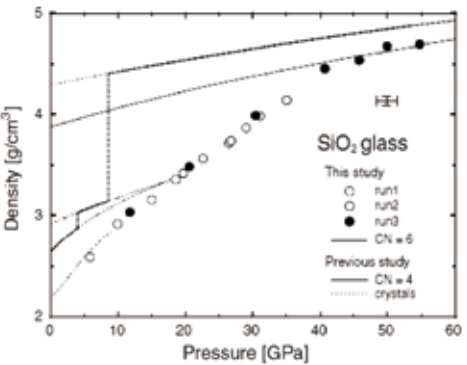


図 3. SiO2 ガラスの密度測定用試料構成と測定結果。ガラス試料 (写真右上) とともに参照物質であるベリリウム (下) とアルミニウム (左上) が同時に加圧されている。

飯塚 毅 -Tsuyoshi Iizuka-

講師 宇宙地球化学

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



生命を宿す星ができるまで

隕石・月岩石や惑星形成理論の研究から、地球形成の最終段階は約 45 億年前に原始惑星のジャイアントインパクトにより進み、その際には地球の大部分が溶融しマグマオーシャンに覆われていたと考えられます。一方、約 35 億年前の生痕化石が見られることから、その当時には生命が存在していたはずですが、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地球型惑星の初期進化、生命の起源、そして地球外生命の存在可能性を議論する上で重要となります。我々はこの地球史最初の 10 億年の変遷過程解明を目指して、次のような研究テーマに、主に地球化学的手法を駆使して取り組んでいます。

1. いつマグマオーシャンは固化したのか？

マグマオーシャンがいつ固まったのかを解明することで、地球初期の熱史（冷却率）に重要な制約を与えられます。しかし、月などと違い地球表層にはマグマオーシャン固化時に形成された一次地殻が保存されていないため、このタイミングを直接決定するのは困難です。そこで我々は、 ^{182}Hf や ^{92}Nb などの短寿命（現在は消滅した）放射性核種を用いて、マグマオーシャン固化の時期を決定しようと試みています。この手法は、マグマオーシャンの固化が早く起こっていれば、太陽系のより初期により多く存在していた短寿命核種の痕跡がはっきりと現在の地球岩石に残されているはず、という原理に基づいた年代測定法です。この年代測定法では、非常に高い精度で放射性娘核種の存在度を決定する必要があるため、クリーンルーム下で試料を融解して分析目的元素を化学分離した後に（図 2）、質量分析計で高精度同位体比測定を行います。また我々は、地球試料だけでなく、様々な隕石の年代測定にも挑んでいます。そして、地球を含む様々な惑星の結晶化年代を比較することにより、惑星のサイズと熱史の間にはどのような関係があるのか解明することを目指します。

2. 固体地球惑星と水の共進化

海洋の存在は地球の主要な特徴の一つであり、原始生命の活動に大きく貢献したと考えられます。地球の海洋は約 38 億年前には存在していたことが地質学的証拠から分かっており、さらに、~42 億年前の地殻鉱物の酸素同位体比から、その当時液体の水が存在していたことが示唆されています。また、高压実験の結果から、現在の海洋よりも遙

かに多い量の水が、含水鉱物として固体地球内に含まれることが示されています。しかし、これら地球の水が、いつどのようにしてもたらされたのかについては、未だに議論が続いています（図 3）。この理由の一つは、地球型惑星の形成・成長の間に、水がどのように振る舞うのか良く分からないためです。我々はこの問題に、隕石中のリン酸塩鉱物を用いて挑んでいます。リン酸塩鉱物は水酸基を結晶中に含むため、その隕石母天体の含水率推定に利用できます。そして、様々なサイズの惑星について含水率を調べることで、惑星の成長と共に含水率がどのように変化したのか考察します。さらに、この手法を隕石試料だけでなく、地球の世界最古（40 億年前）～現代の岩石試料に適用することにより、固体地球の含水量、引いては海洋質量が、地球史を通してどのように変化してきたのか解明したいと考えています。

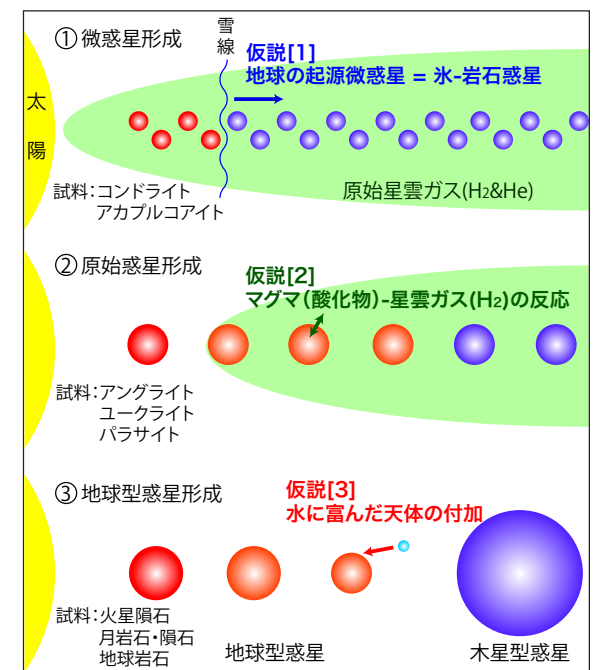


図 3. 惑星の形成過程と、考えられる水の起源の模式図。

3. 大陸地殻の進化

原始生命の活動には、海洋の存在だけでなく大陸の存在も重要であったと考えられます。これは、大陸地殻上部を構成する花崗岩にはリンなど生命活動に必要な元素が高濃度で含まれており、その侵食・風化作用をとおりて海洋に栄養塩が効率良く供給されるためです。したがって、大陸地殻の誕生時期と成長史を解明することは、原始海洋組成の変遷や生命進化を知る上で必要不可欠です。我々は、世界中の巨大河川河口の砂に含まれるジルコン鉱物やモナザイト鉱物の年代測定をすることにより、広範囲の大陸地殻の成長率を推定しようと試みています（図 4）。これまでに既に、北アメリカ、南アメリカ、アジア、アフリカ大陸の約 1500 粒の川砂ジルコンの分析結果から、35 億年前以前の大陸地殻の量は非常に少なかったことが分かりつつあります。今後は、さらに他の河川についての分析を進めると共に、>35 億年前の地質岩体について調査を進め、なぜその当時の地球マントルは現在よりも高温だったにも関わらず、大陸地殻の成長が進まなかったのかを理解していきたいと考えています。

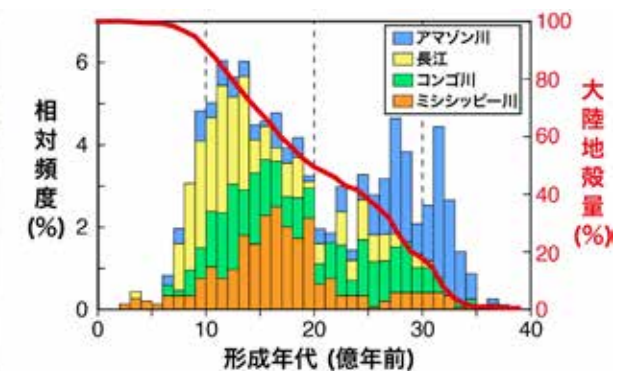


図 4. 川砂試料のサンプリングの様子（左）と大陸地殻の形成年代と成長曲線（右）。

参考文献

- [1] 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. *Geochim. Cosmochim. Acta* 107, 96–120.
- [2] Rumble D., Bowring S., Iizuka T., Komiya T., Lepland A., Rosing M.T. & Ueno Y. (2013) The oxygen isotope composition of Earth's oldest rocks and evidence of a terrestrial magma ocean. *Geochem. Geophys. Geosys.*, doi: 10.1002/ggge.20128.
- [3] Iizuka T., Nebel O. & McCulloch M.T. (2011) Tracing the provenance and recrystallization processes of the Earth's oldest detritus at Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia: An in situ Sm-Nd isotopic study of monazite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 308, 350–358.
- [4] 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 Planet. Sci. Lett.* 291, 189–200.

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

Website : <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~mseis/>

地震を外科的・病理学的に観察し理解する ー物質地震学ー



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ので、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 ー歴史／環境依存性ー

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、断層破碎帯と呼ばれています。断層破碎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／変成の影響を受けた岩石からなっています。破碎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碎帯も珍しくはありません。断層生成の初期の産状は、地表に露出する破碎帯で時折、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。溶融域には臨界のサイズがありそうです。地下 5 ～ 10 km では破碎帯の幅は 100 m 以上に広



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。破碎帯を伴わず、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。

がり水の影響を受けた変質岩が破碎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、断層破碎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出来ます。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。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、これは基本的に鉱物の粉碎に使用され、鉱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。

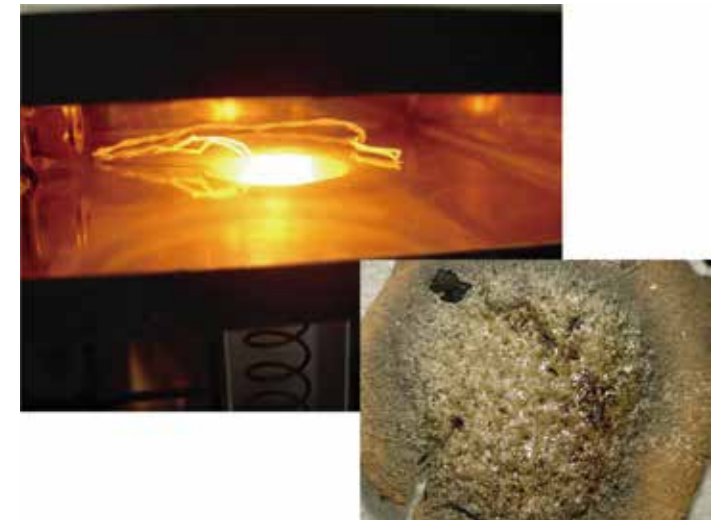


図 2. 瞬間加熱溶融実験の様子。環境因子に依存するが、ある場合には断層が動き始めて 10 秒以内に溶融温度に達すると見積もられているので、同条件での溶融を再現した。溶融物を伴う断層面（例えば図 1）は滑動中にはこのような色調になっていると思われる。

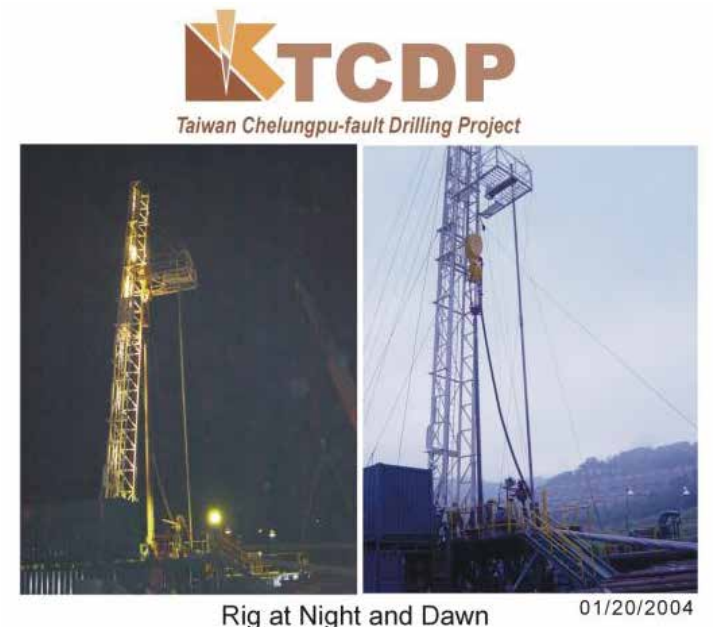


図 3. 台湾中央部（台中）で行われている大深度断層貫通掘削の様子。掘削は 24 時間で進行するため、夜間は煌煌とライトアップされている。

桜庭 中 -Ataru Sakuraba-

助教 地球電磁気学

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

Website : 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次元的な自由度で（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3000 km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い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、10 km/year (= 0.3 mm/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2000 km以上もの「鉄の海」が横たわっている、といったとしてもそれほどまちがいはありません。

コアの鉄の海は地表の海とは違って、流れが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、ユニークな性質を多く兼ね備えています。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。

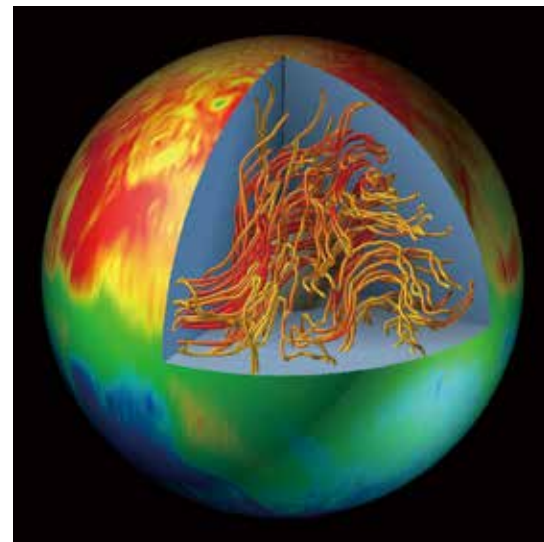


図1. 地球型ダイナモの数値シミュレーションの例。コア表面を貫く磁場分布（赤が外向き、青が内向きの磁場）と、コア内部（北半球の1/4）の磁力線の様子を示す。コアの外では赤道対称性のよい双極子磁場が卓越している。激しい対流運動により、コア内部の磁場は乱雑である。

地球ダイナモの数値シミュレーション

コアの中では、流体運動がローレンツ力に逆らって仕事をするので、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、磁場生成のようすを研究してきました（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、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、粘性の効果があまりあらわれないようなパラメーター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はじめてわかることで、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。

粘性を低くすればするほど、より広い時間スケールの現象を再現することができます。最近の計算結果は、地球の実時間で数十年程度の時間スケールの磁場変動のようすさえシミュレーションで再現できる可能性を示しています。実際、地磁気には、数年以下のきわめて短時間で変動するジャークと呼ばれる現象や、数十年周期でコア内を伝搬する波動によると考えられる変動が確認されています（図3）。シミュレーション結果とこうした地磁気の観測データとを比較することで、地球の深部で起こっている物理過程を読み解くことができると信じています。

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 Y. Hamano, Turbulent structure in Earth's fluid core inferred from time series of geomagnetic dipole moment, Geophys. Res. Lett. 34, L15308, 2007.

図3. 地磁気双極子モーメントの時間変動のパワースペクトル [2]。地球磁場は、数年から数十万年以上にわたる広い時間スケールで、さまざまな変動を示す。たとえば周期500年あたりにみられるスペクトルの傾きの変化は、コアの中の大規模渦の固有の脈動と関係づけられる。

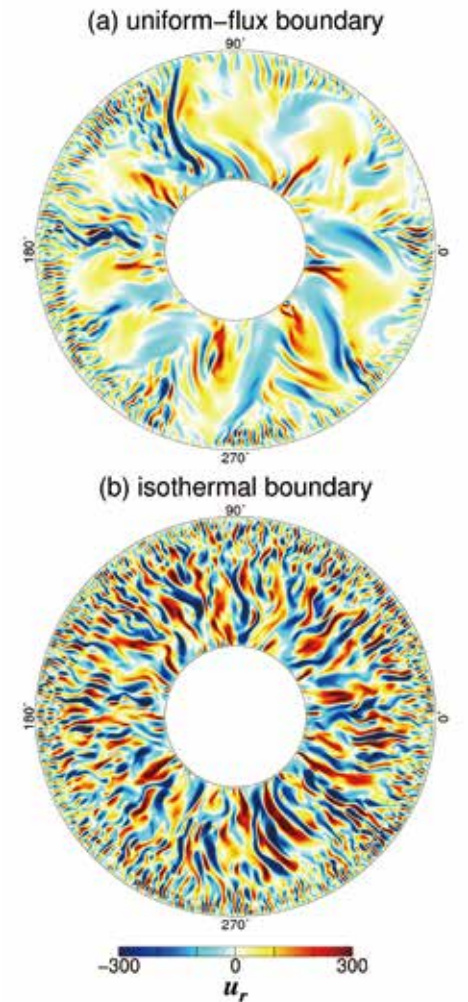
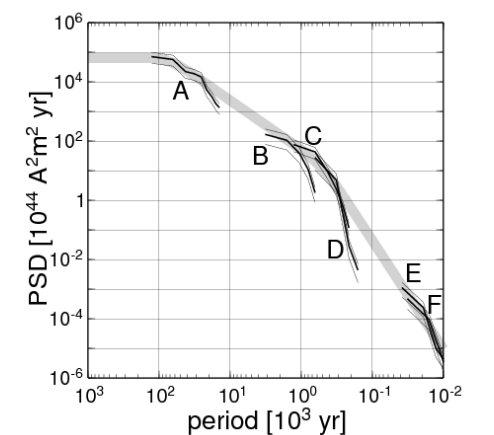


図2. 温度境界条件の違う2つのダイナモモデル [1]。赤道断面での流れを示す。(a) コア表面の熱フラックスを一律にすると流れが大規模になり、強い磁場が生成される。(b) いっぽう表面温度を固定すると、流れのスケールが細かくなって、磁場が弱くなる。地球のコアでは前者の境界条件のほうがより適当である。



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 - 水系の変形物性 ～地震発生場の素過程を探る～

最近、地震波トモグラフィーや地下の比抵抗探査などから、地殻や沈み込むスラブの震源域に流体（水）が存在した可能性が指摘されています（図1）。西南日本に広く観測される深部低周波微動もスラブの脱水で生じた水が関与していると想像されており、こうした地下の水の動きを観測で捉えることが巨大地震の発生予測につながるのではないかと期待されています。しかし、地下深部での震源過程と水の関わりはまだよく理解されていません。私たちは室内実験（図2）によって流体を含む岩石の力学物性や透水過程を調べ、地震発生と水のかかわりを解明しようとしています。また変成帯などにあらわれた岩石をもちい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も行なっています。

脱水反応とスラブ内地震

沈み込むスラブの深部では、海洋プレートとウェッジマントルの境界ではなく、スラブの内部に二重の震源の帯（和達・ベニオフ帯）があることが古くから知られていましたが、それが何によるものなのか長い間謎のままでした。最近、沈み込み帯の温度構造の解析などから、スラブ内地震がマントルや海洋地殻物質の脱水反応によって引き起こされるという説が有力視されています。特に注目されているのが蛇紋岩の脱水不安定性です。蛇紋岩はマントルを構成するカンラン岩に水が付加されることによって形成され、600-700℃くらいの高温になると分解して水を放出します。私たちは高温高压変形実験によって、モホ面近くの圧力条件で蛇紋岩を変形させ、脱水反応前と反応後で岩石強度や変形様式に著しい変化があることを発見しました（図3）。従来、このような高い圧力のもとで信頼できる力学データを得ることは困難でしたが、私たちのグループでは応力を精密に決定するため独自の方法を用いています。東京大学では新たに固体圧式変形試験機を設計開発し（図2）、さらに高压の条件（地下 50 km 相当）を

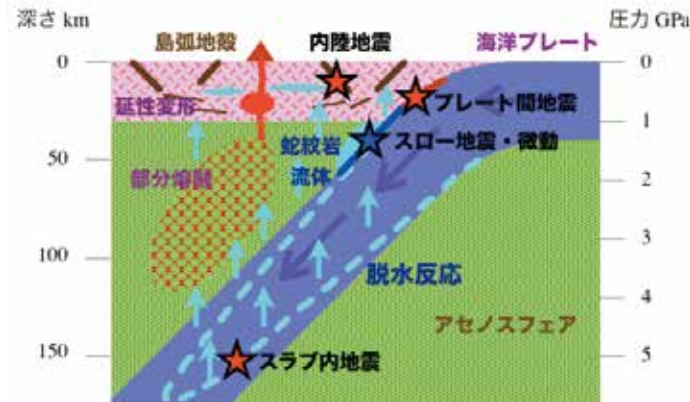


図1. 沈み込み帯における流体の流れと地震発生過程。

図2. 高温高压岩石変形試験機. 住友重機械(株)製 100 トンプレス。



めざして実験を続けています。蛇紋岩はまたウェッジマントルにも存在していて、スロー地震と呼ばれる特異なすべり現象に寄与しているのではないかとされています（図1）。私たちは蛇紋岩の脆性-延性挙動を詳しく調べることで、沈み込みプレート境界の性質を定量的に明らかにしていくことを計画しています。

地殻流体と断層運動

スラブから遊離した流体は浮力によってウェッジマントルを上昇し、地殻内部に停留していることが地震波の観測によって明らかにされてきています。地殻中部の帯水層で高い間隙圧が生じているとすると岩石の破壊強度が下がるため、内陸地震のいくつかは帯水層の存在と関連するのではないかとされています。そこで地殻内部の流体移動と、岩石の破壊や摩擦強度におよぼす間隙圧の効果を明らかにすることが重要になってきます。私たちは、間隙圧を制御できる変形実験装置によって、断層帯や微小割れ目（図4）を通した透水率の変化を調べています。

含水地殻の塑性流動

岩石の変形に影響を及ぼすのは、間隙圧だけではなく、結晶粒界の水の薄層は圧力溶解クリープ（図5）を起こし、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。私たちは地殻の主要鉱物である石英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。実験室で得られた結果とクリープ理論との比較や、変成帯などに露出している岩石の解析も行なっていきたいと考えています。

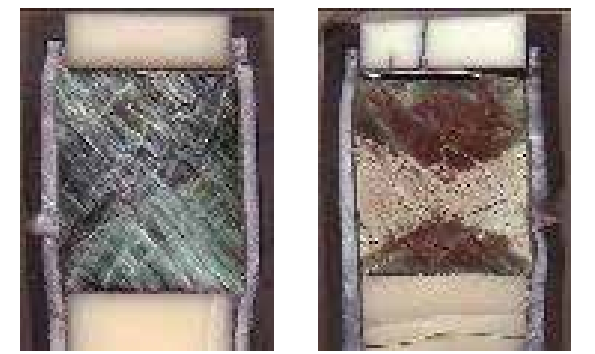


図3. 蛇紋岩の実験後の試料の例。いずれも温度 700℃ 封圧 0.8 GPa の実験であるが、左は昇温後すぐに変形させ、右は予備加熱により脱水反応させた後に変形させた。

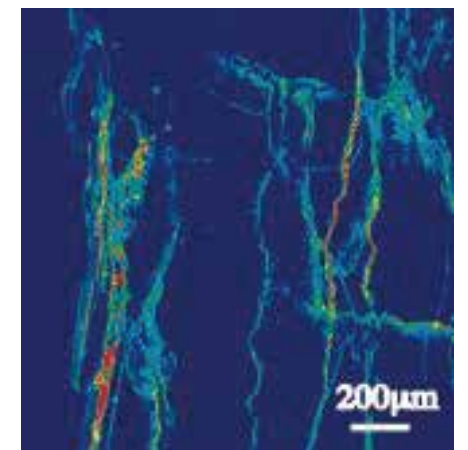
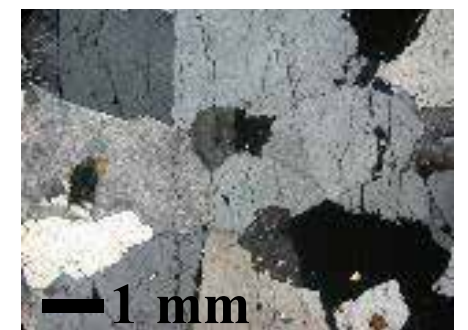


図4. 断層近傍の花崗岩中の微小割れ目。(上) 領家花崗岩ボーリングコアの偏光顕微鏡写真。直交ニコル。(下) 蛍光樹脂で充填した微小間隙の分布を走査型レーザー顕微鏡によって可視化（擬似カラー表示）。

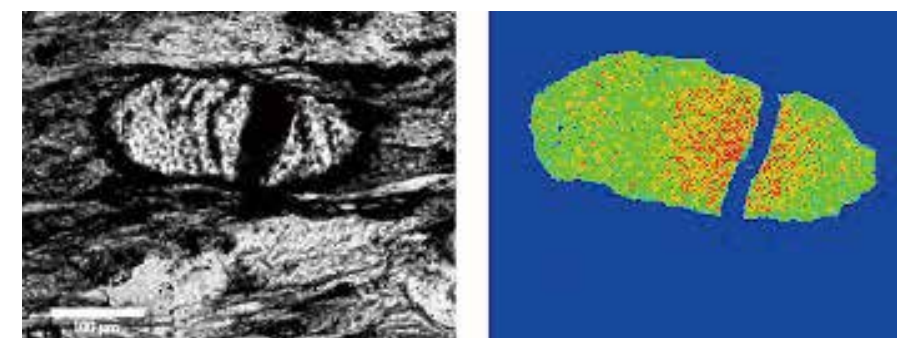


図5. ガーネットの圧力溶解。(左) 光学顕微鏡像。開放ニコル。(右) Mn 組成。自形成長を示す六角形のインクルージョン（左）や組成累帯構造（右）が片理にそって溶脱している。関東山地三波川変成帯ガーネット帯。

並木 敦子 -Atsuko Namiki-

助教 固体地球ダイナミクス

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

Website : www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~namiki/

ヘンテコな流体を使って固体地球のダイナミクスを理解する



みなさんは生クリームを泡立てた経験はありますか？ スーパーで売っている小さいパックに入った生クリームは、ちょっとドロっとしているものの、そのままではスポンジケーキのデコレーションには使えません。でも泡立て器を使って空気をまんべんなく混ぜてあげると角が立ってデコレーションの形が保たれるようになります。泡立てた事で流体だった生クリームが固体的に振る舞うようになったと解釈できます。でも、生クリームも泡に含まれる空気も流体です。なんで流体+流体が固体的になったのでしょうか？

火山で噴火するマグマにも生クリームのように多くの気泡が含まれています。この気泡が噴火メカニズムを決める重要な役割をしているのです。

アナログ物質を用いたモデル実験とは？

さて、私は固体地球のダイナミクスの研究をしています。一般に人類は地球内部の殆どの場所に到達する事ができません。ですから、ダイナミクス（動き）の研究をする為には力学の式を立ててそれを解析的・数値的に解く方法が一般的には取られます。でも、それができない場合がまだまだ沢山あります。

前出の火山の噴火などはその代表例です。マグマ中には火山ガスが作る気泡がたくさん含まれます。マグマそのものにはあまり圧縮性がありません。したがって、爆発的噴火はマグマそのものではなく、マグマに含まれる気泡が膨張して起こります。このように気泡はマグマの爆発的噴火の主役です。ありますから、火山噴火を理解する為には気泡を含む系を記述する物理が必要です。しかし、前出の生クリームの例のように、気泡を含むマグマは流体なのか、固体なのかよくわかりません。ダイナミクスを理解する為に式をたてようにも流体力学と弾性体力学のどちらをどんな条件で使ったらいいのか、自明ではありません。このような状況では、気泡を含む系の実験を行い、この振る舞いを記述する式を作成する事が必要です。

と、いう訳で気泡を含むマグマの実験をしたいところですが、その為には岩石を 1000℃くらいまで加熱しなければなりません。常温常圧と異なり、状態を維持する事がとても難しくなりますし、実験に使える容量も限られます。そこで私は、常温常圧下でもマグマと似たような粘性率と表面張力を示す魔法の流体(?)を用いて実験を行って

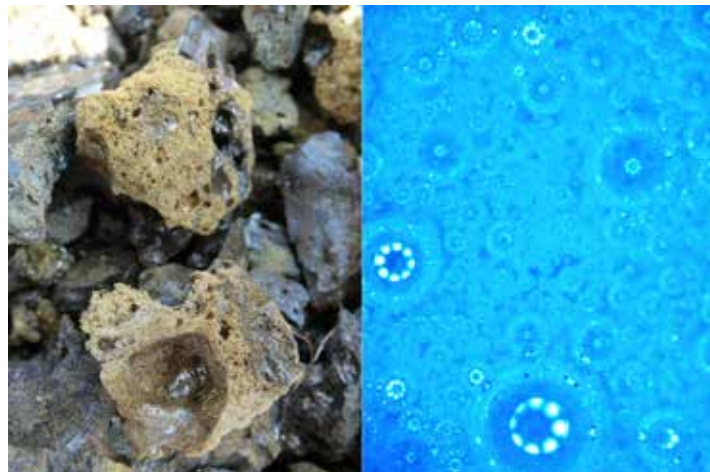
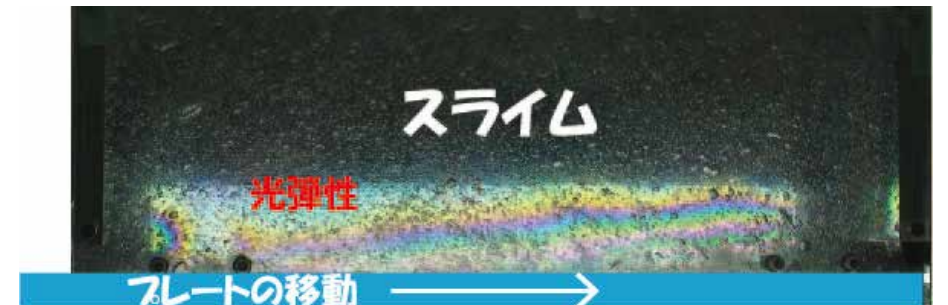


図1. (左) 泡を含む(すでに固まった)玄武岩質マグマの写真。(右) 実験に使っている泡の拡大写真。

図2. スライムを用いた沈み込み帯で発生する地震の実験。下にあるプレート(岩石のアナログ物質)に歪が蓄積します。スライムに応力が蓄積していく様子を光弾性により可視化しています。



ます(図1)。ちょっと難しい言葉で書くと、無次元数という物を合わせれば、流体や弾性体などの連続体は実際の物を使わなくても実験できる事が知られています。研究対象となる系と無次元数を合わせた実験を行い、その結果を説明する式を作成し、この式を用いて実際の火山の噴火に関して何かを言う、という研究スタイルをとっています。

火山のモデル実験以外の研究もしています

ここまで火山の噴火を例にとってモデル実験の説明をしてきましたが、研究対象は火山だけではありません。マントル対流やテクトニクスの研究も行っています(図2)。最近は水文学に含まれるような研究も始めています。手法もモデル実験が主体ではありますが、地質学的なサンプリングや地球物理学的な観測に出かける事もあります(図3)。とりあえず、今興味がある疑問をできるだけ簡単かつ安価な方法で解決する事を目標に研究しています。

おわりに

ここまで読んで下さったあなたは既にお気付きと思いますが、私はカッコイイ最先端の研究にあまり興味がありません。日常のふとした疑問が解けると何となく嬉しい感覚の延長で地球の事を研究しています。生クリームを泡立てながら火山の噴火ダイナミクスに思いを馳せる、そんなボーっとした研究にちょっとでもご興味がありましたら、いつでも遊びに来てください。なんで生クリームを泡立てると固体的になるのか知りたい人も Welcome です。

最後に、生クリームと牛乳を沸かして書いた火山の論文を参考文献に挙げておきます。

参考文献

- [1] Namiki, A., T. Hatakeyama, A. Toramaru, K. Kurita, and I. Sumita, Bubble size distributions in a convecting layer, Geophys. Res. Lett., 30(15), 1784, doi:10.1029/2003GL017156, 2003.



図3. チリの間欠泉 El Tatio。2012年、観測で行ってきました。

亀田 純 -Jun Kameda-

特任助教 構造地質学・鉱物学

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



ナノスケールの物質解析から理解する地震断層

海洋プレートの上にたまった堆積物は、海溝から地下に沈みこみ始め、やがて付加体と呼ばれる地質体に取り込まれてその一部となります。堆積物が地下に持ち込まれると、温度や圧力の上昇とともに次第に岩石化していきます。この岩石化の過程は続成作用と呼ばれ、例えば間隙の水が抜けたり、その隙間に鉱物が沈殿したり、あるいはある鉱物から別の鉱物への相変化が起こったりします。最近の研究によって、これらの続成過程が沈み込み帯で発生する地震や津波と密接に関連していることが明らかになってきました。私は、付加体の成り立ちや、付加体が作られていく過程で発生する地震や津波を理解するために、堆積物に含まれる「粘土鉱物」と呼ばれる微細な結晶に注目して研究しています。沈み込む堆積物の大半は粘土鉱物でできていますので、粘土鉱物の理解なくしては付加体研究の進展も多くは望めません。



図1. 200 kV 高分解能透過型電子顕微鏡 (日本電子 JEM-2010)。

電子顕微鏡を用いたナノ領域の分析

一口に粘土鉱物といっても、それらの結晶構造や物理的な性質は非常に多様です。また、一般に粘土鉱物は非常に小さく、しばしばナノスケールでの分析が求められます。私たちは、走査型電子顕微鏡 (SEM) や透過型電子顕微鏡 (TEM, 図1) などの各種電子顕微鏡を駆使して、粘土鉱物の微細構造や形成機構、ある相から別の相へ移り変わる時の反応機構などについて研究を行っています。図2は、緑泥石と呼ばれる粘土鉱物の高分解能TEM像です [1]。また図3は、緑泥石が変質していく際の界面の様子を示しています [2]。TEMの高分解能観察法を用いることで、原子スケールに近い分解能で粘土鉱物を観察することができます。またこのようにして得られた像を解析することで、粘土鉱物が形成された地質環境や形成機構などについて多くの知見を得ることができます。

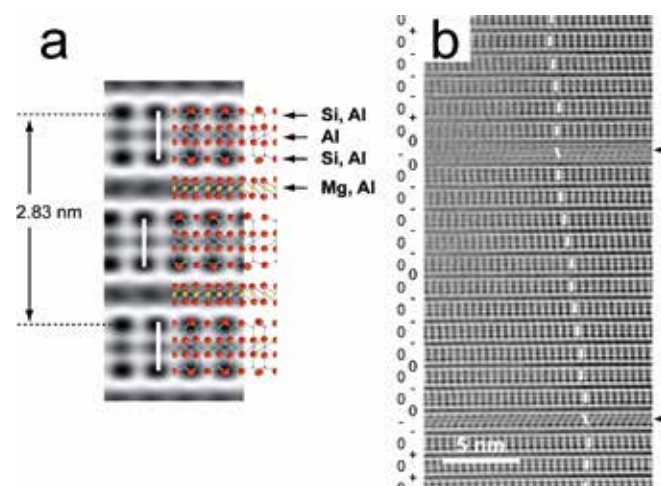


図2. 緑泥石の結晶構造とマルチスライス法で計算されたTEMのコントラスト (a). (b) 実際に得られたTEMの高分解能写真。写真左の0, +, - は、各粘土基本層の方向に対応。積層構造の乱れ (積層不整) が観察されます [1]。

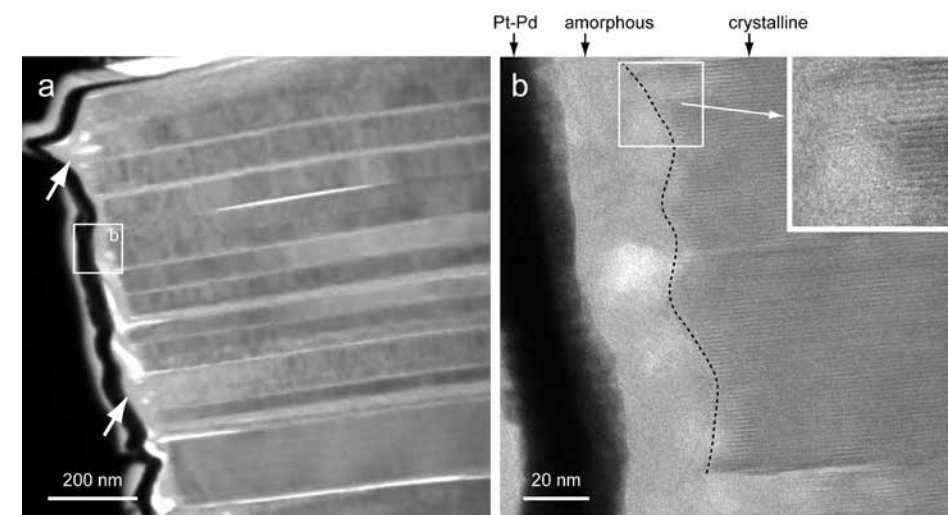


図3. 変質の進んだ緑泥石界面のTEM像 (a) とその拡大図 (b)。緑泥石の変質が非晶質な溶脱層の形成によって進行することが分かりました [2]。

粘土鉱物に記録された過去の地震の痕跡

過去に地震を起こしたと考えられる断層の多くは、粘土鉱物で充填されています。付加体に残されている海溝型断層も例外ではありません。私たちは現在、このような断層の中に形成された粘土鉱物の分析を通して、断層運動の実態を探る研究を進めています。図4は、およそ6000万年前の地層から発見された沈み込み型の断層です。断層にはスメクタイトと緑泥石という2種類の粘土鉱物の混合物が形成されていました。TEMを用いてこの混合比を分析すると、周囲の岩石中のものに比べて断層の中ではより緑泥石が増加していることが分かりました (図5)。スメクタイトが緑泥石へと変化する反応は、続成作用における代表的な反応ですが、断層の中でこのような反応が局所的に進むのはなぜでしょうか? 類似の反応が過去の付加体の様々な断層から見つかってきました。このような謎を解き明かしていくのが私たちの目標です。

参考文献

- [1] Kameda, J., Miyawaki, R., Kitagawa, R., and Kogure, T., XRD and HRTEM analysis of the stacking structure in sudoite, di-trioctahedral chlorite, American Mineralogist, 92, 1586-1592, 2007.
- [2] Kameda, J., Murakami, T., and Sugimori, H., Modification to the crystal structure of chlorite during early stage of its dissolution, Physics and Chemistry of Minerals, 36, 537-544, 2009.



図4. 過去の付加体から見つかった地震断層 (pictured by Dr. K. Ujiie). 両矢印で示したところが断層の中央部。

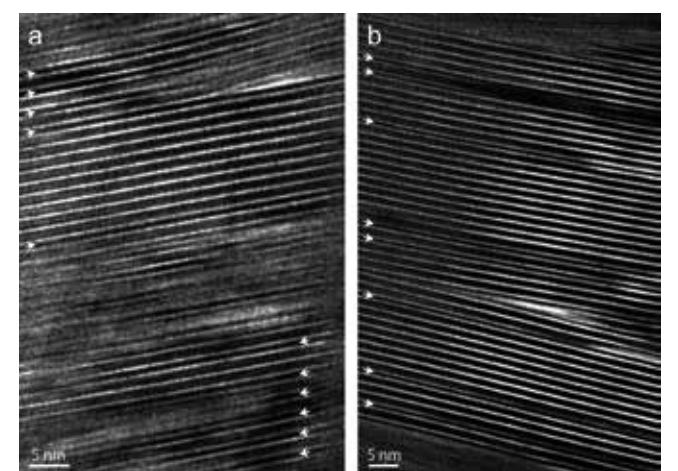
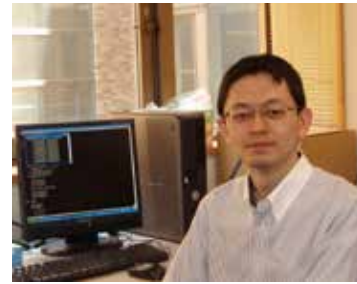


図5. 図4の断層とその周囲の岩石中に形成されていた粘土鉱物のTEM格子像。矢印は1.0nmのスメクタイト層。断層周囲のサンプルに比べ (a), 断層内のサンプル (b) ではスメクタイトが減少し、緑泥石化反応が進行しています。

鈴木 岳人 -Takehito Suzuki-

特任助教 地震物理学

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



動的地震破壊過程を記述する 包括的モデルの構築

我々は地震破壊過程の多様な側面を統一的に説明することを目的に、熱・流体圧及び非弾性な空隙生成の間の相互作用及び微小亀裂（損傷）を解析的・数値的に取り扱ってきました。一口に「地震破壊」と言ってもその振る舞いは多種多様です。一例を挙げれば、地震波を放出する通常の地震もあれば非常にゆっくりとした地震もあります。このように地震現象は多くの様相を見せますが、それらを包括的に説明する数理モデルはありませんでした。我々はそういった包括的モデルを、上に挙げた相互作用や損傷を考えることで探求してきました。そして特にその数学的成果は地球科学にとどまらない分野へと発展しつつあります。

なぜ三つの効果を考えるのか

まず相互作用についてお話しします。地震とは断層滑りですから、それを熱源とする摩擦熱の発生が考えられます。また地下に流体（水）が存在し、地震の振る舞いに影響を与えていることが過去の研究から示唆されています。更に滑りに伴い物がガラガラと（弾性的にではなく、という意味です）壊れるという効果も実験的に確かめられています。このようにこれら三つの効果が重要であると考えられるわけですが、それに加えてこれらの効果の間の相互作用も考えられます（図1）。まず温度が上昇すると流体も膨張しようとしませんが、固相に押さえつけられているので、代わりに圧力が上昇することになります。すると押さえつけられていた圧力に反発しますから、よりするすると滑りが進行するようになります。一方、物が壊れると空隙が増え、そこに流体が広がっていくことで圧力は減少します。この時滑り面がより強く押さえつけられるので、滑り辛くなります。こういった過程が熱源に影響を及ぼすと同時に、流体圧の空間変化も生じるので、それを打ち消すような流れも引き起こします。このようにして三つの効果は滑り過程にフィードバックを引き起こすのです。

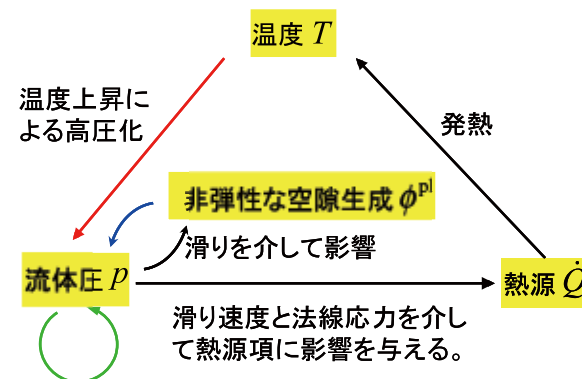


図1. 相互作用の概念図。

無次元数の導入と2次元問題への応用 ー通常の地震とゆっくりした地震ー

我々の重要な成果として、 S_u と S_u' という新しい2つの無次元数を見出し、これによって上の3つの効果の相互作用を取り扱いやすくして、地震破壊の多様な側面を統一的に説明できるようになったことが挙げられます [1]。発熱の効果を基準とした、物が壊れる効果の強さが S_u であり、同じく発熱の効果を基準とした流体の流れの効果の強さが S_u' です。このように定義すると、上で述べたように S_u が大きいほど強力な減速を導きます。また S_u' が大きいほ

どその減速がゆっくり効きます。まずは2次元系で、 $1 < S_u < 2$ かつ $S_u' \sim 0$ の場合を扱いました。その結果、破壊開始点付近で滑り速度が適度に抑えられ、破壊先端域にのみ高速滑りが集中するという、パルス的な滑りが現れました。こういった特徴はいわゆる「通常の地震」で見られるものです。

一方、ゆっくりとした地震も我々のモデルで説明できます。先程よりも大きい S_u と S_u' の値を仮定すると、流体の流入と滑り強化がバランスすることにより、弾性波速度よりもはるかに小さい破壊伝播速度を再現しました（図2）。

ここまでの内容の発展として、最近では空隙発展則を改良したものを考えています。これにより無次元数や非線形項が増えますが、これらを含む複数変数連立の拡散反応方程式系のモデルにより、一般の非線形物理学的成果も狙っています。地球科学という分野に拘らない研究を目指しています。

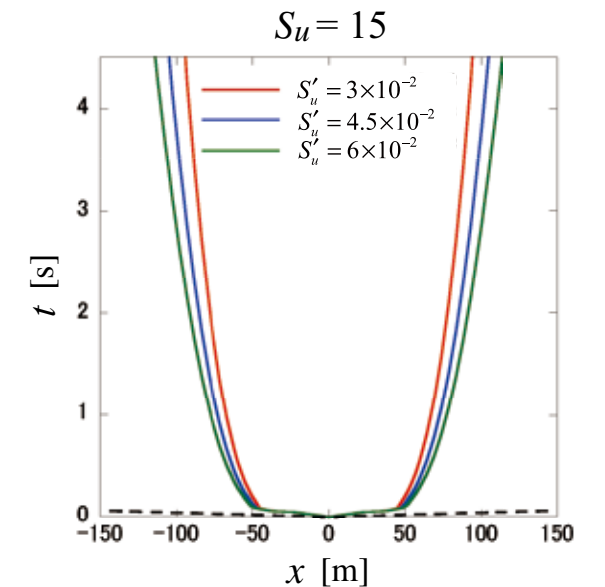


図2. ゆっくりした地震の破壊伝播。点線は剪断波のフロントを表す。

非弾性な効果の拡張 – 面外損傷の導入 –

ここまで述べてきた非弾性な空隙生成の効果を発展させ、断層面外にも損傷という形でそれが広がっている状況もテーマにしています。これをテンソル量として定量的に扱うことにより、特に二次破壊（断層岩の破碎や断層面の分岐）の振る舞いの多様性を説明することが可能になりました（図3）[2]。特にモードIIIの場合には、無次元化によって2つの無次元数で破碎と分岐の違いが理解できるようになりました [3]。

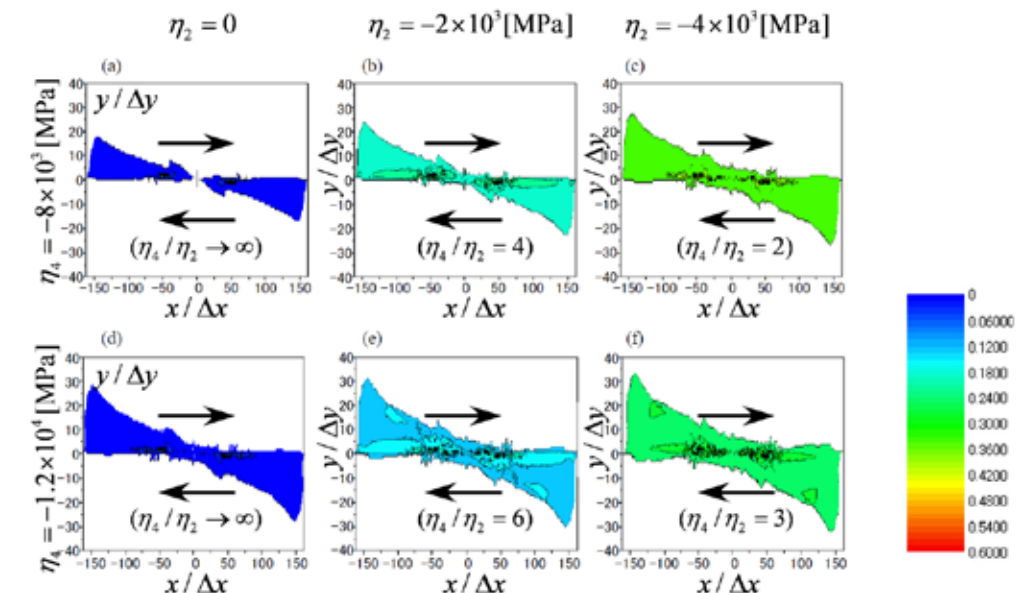


図3. 固有値比。この値が大きいほど等方的に破碎しやすく、小さいほど分岐を誘発し易い。黒矢印は巨視的亀裂の運動の向き、色の着いた領域は損傷生成領域を表す。 η_2 と η_4 は損傷生成に関するパラメータ。

参考文献

- [1] Suzuki, T. and T. Yamashita (2010), J. Geophys. Res., 115, B02303, doi:10.1029/2009JB006557
- [2] Suzuki, T. (2012), J. Geophys. Res., 117, B05309, doi:10.1029/2011JB008908
- [3] Suzuki, T. (2013), Tectonophysics, in press, doi:10.1026/j.tecto.2013.02.034.