

第 47 回 理工学部門研究談話会

日時：令和 7 年 10 月 22 日 (水) 13:30～15:00

会場：理工学部 2 号館 6 階 第 1 会議室

話題および提供者

「地質学者のルネッサンス ―フィレンツェで再発見したメランジュのダイナミズム」

橋本 善孝

「点接合分光法を用いた強相関物質の物性測定」

志賀 雅亘

「環境調和型スルフィド合成法の開発」

金野 大助

教職員，院生，学生，一般の皆様のご参加をお待ちしております

(問い合わせ先：nara@kochi-u.ac.jp)

地質学者のルネッサンス——フィレンツェで再発見したメランジュのダイナミズム

地球環境防災学科・橋本善孝

●はじめに

昨年度、私はサバティカルでイタリア・フィレンツェに10ヶ月間滞在しました。フィレンツェ大学の Paola Vannucchi 教授、そしてそのご主人でスペイン海洋研究所の Jason Morgan 博士と共に、不均質物性のレオロジーモデリングに取り組みました。

ご存じのようにフィレンツェは、芸術ではミケランジェロやレオナルド・ダ・ヴィンチ、科学ではガリレオ・ガリレイの出身地として知られています。彼らの創造性は、ローマ時代の文化の再発見・再生・再評価という機運の中で花開き、「ルネッサンス」と呼ばれる新たな時代を形づくりました。その精神は、いまでも街の随所に残る芸術作品や建築に息づいています。

さて、私はこれまで、陸上および海洋の付加体を対象とした構造地質学的研究を行ってきました。受け入れホストの Vannucchi 教授は、同じ構造地質学の分野で長年交流のある友人です。一方、Morgan 博士はプレートテクトニクスの理論モデラーであり、Vannucchi 教授との共著論文で、有限要素法によるメランジュのレオロジーモデリングを進めていました。私はこの手法をぜひ学びたいと考え、サバティカルの地としてフィレンツェを選びました。このモデリング研究を通じて、私は地質学的観察に基づく定性的な構造解釈が、時間の中で動き出す瞬間を体験しました。それはまるで、化石の中に潜むプロセスが命を吹き返すような感覚でした。私にとってこの経験は、構造地質学の再発見であり、再生であり、まさに“地質学者としてのルネッサンス”と言えると思います。

●研究上の目的

沈み込みプレート境界では巨大地震を引き起こす高速すべりの他に、近年では低速すべりのスロー地震が多く発見され、巨大地震の前兆現象として注目されています。昨年の南海トラフ注意情報の発動は日向灘地震だけでなく、直後に連動して東海地方でスロー地震が起こったためです。高知の観光経済に大打撃を与え、米価の高騰後の高止まりを招くなど、我々の生活にスロー地震が影響する事例となりました。

このように沈み込みプレート境界では遅いすべりから速いすべりまで、多様なすべりが起こっていると言えます。また、別の言い方をすれば、不安定すべりから安定すべりまでの異なるすべりをしていると言えます。このような多様なすべりを説明するレオロジーモデルが必要です。

そのモデルの一つの仮説として、不均質媒体（ブロックが基質に取り囲まれた, Block-

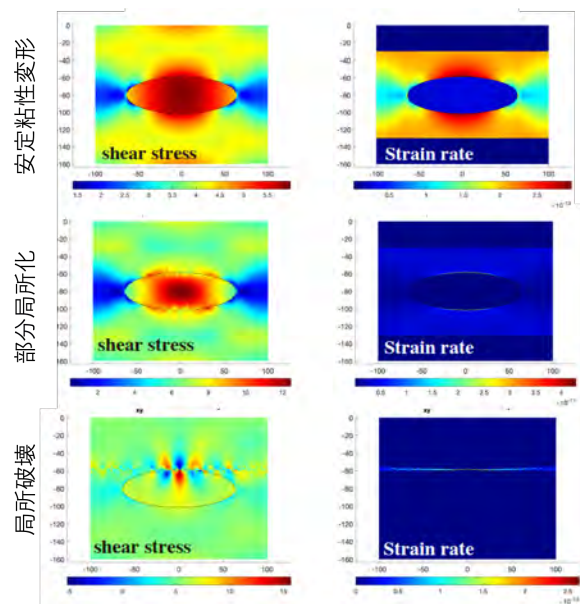
in-Matrix, 物性不均質) のレオロジーが挙げられています。しかし、構造不均質がどのように多様なレオロジー挙動を産むのかについて詳しく述べられている研究は少ないと言えます。そこで本研究では、有限要素法による Block-in-Matrix 構造の応力歪み速度分布が時空間的にどのように変化するか、その際の構造の役割について検討しました。

●手法

楕円形のブロックを中心に一つ置き、長方形の基質に取り囲まれた構造で、上と下をより硬い板で挟みます。同形状の構造で2倍の大きさのものも用意しました。上面境界に右方向へ変移速度を与えます。下面の速度はゼロです。ブロックと板の粘性は大きくし、基質により小さな粘性を与え、その粘性を変化させます。ブロック、板、基質ともに粘着力を持ち、基質を最も弱くします。要素の応力が粘着力を超えると、歪みと共に弱化させさせます。弾性・粘性・塑性変形を含む物理モデルで、1年ごとに空間的な剪断応力と歪み速度の分布を計算します。

●応力・歪み速度の構造依存と変形モード

有限要素法を用いた Block-in-Matrix 型のレオロジーモデルは、物性不均質構造に依存する変形様式に3つの異なる相があることを明らかにしました(右図:モデル結果の一例)。一つは安定粘性変形、もう一つは、局所破壊、そしてその中間に遷移的な状態の部分局所化が存在しました。この遷移的な状態は遅い応力降下を示し、スロー地震に類似した状態でした。相変化の実態を見ると、応力および歪み速度の集中は物性境界に生じていることから、局所化の応力・歪みの再分布において



不均質構造(ジオメトリ)が重要な役割を果たすことが明らかとなりました。さらに、これらの変形様式の相転移は、粘性比および境界条件速度と剪断帯厚さの比によって支配されます。すなわち、長さスケールに依存しない挙動として特徴づけられます。

このような局所断層がブロックの境界に集中して見られる構造は天然でも一般に観察され、同様のダイナミズムが働いたことを示唆しています。

●スケーリングと構造の階層性

天然の断層帯に存在する不均質構造は、単一スケールで生じるものではなく、しばしばフラクタルな階層性を有しています。たとえば断層面の凹凸は、一定のハースト指数に

従うパワースペクトルで表現されることから、セルフアフィンの性質を持つとされています。また、脆性破砕によって生成された粒子の累積頻度もフラクタル分布を示すことが知られています。こうした階層的ジオメトリの存在は、スケールに依存しない局所化メカニズムと本質的に整合的であり、ミリメートルからキロメートルに至る多様な不均質スケールにわたって、共通の変形集中プロセスが繰り返されることを意味します。すなわち、ジオメトリのスケーリング構造こそが、断層帯における時空間的なすべり様式の統一的理解を可能にする鍵です。たとえば、シュードタキライトを含む断層帯が構造性メランジュの北縁に位置する例は、物性不均質構造によって変形が空間的に制約されている一例と解釈されます。

また、このようなジオメトリのスケーリングと局所断層の発達による相変化の長さスケール非依存性は、ジオメトリスケールが局所下の速度閾値を決定することを示しています。また、天然の観察では、スケールに依存して変形メカニズムが変化しているようにも見え、モデリングだけでは再現できないプロセスが潜んでいる可能性があります。

●まとめ

本研究は、断層帯における変形様式が単なる物性の違いによってではなく、それらの空間的配置——すなわちジオメトリとスケーリング構造——によって動的に規定されることを、多スケールの観察および数値モデルを通じて示しました。断層面の凹凸や高粘性ブロックなどの構造的不均質は、応力や歪み速度の集中帯を形成し、すべり挙動の時空間的な変化を支配します。また、これらの不均質構造はしばしば階層的かつフラクタルな特徴を持ち、変形の局所化をスケールに依存せず引き起こします。また、スケールを与えると、逆に局所断層の速度閾値を決定し、その速度に依存した変形メカニズムの変化がある可能性が示唆されました。本研究の知見は、地震発生帯におけるすべり様式の多様性に対する物理的理解を深化させる枠組みを提供するものです。本研究を通じて、私は改めて、岩石変形組織中にダイナミズムが宿っていることを実感しました。それは、静止した断層を動的に見直す一まさに地質学者としてのルネッサンスかな、と思いました。

点接合分光法を用いた強相関物質の物性測定

数学物理学科 物理科学コース 志賀 雅互

物質の性質（物性）には、物質中に高密度で存在する電子の運動が重要な役割を担います。我々が注目する強相関物質は、電子間に強い相互作用が働く物質の総称です。強相関物質では、この相互作用が物性に影響を及ぼします。

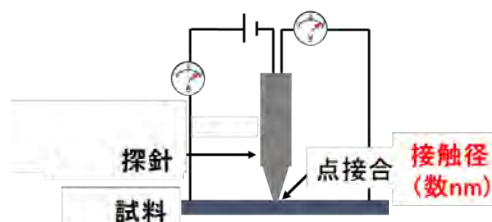


図 1 点接合分光実験の模式図

Ce(セリウム)や Yb(イッテルビウム)などのランタノイドを含む化合物（希土類化合物）も強相関物質に分類されます。希土類化合物の物性において重要な役割を担うのは、 $4f$ 軌道に収容されている電子($4f$ 電子)です。 $4f$ 軌道は、 s , p , d 軌道に比べて原子核の周りに局在しています。これにより $4f$ 電子は、高温(~ 300 K)近傍において、希土類化合物の電気伝導率などの伝導特性にほとんど影響を及ぼしません。一方、低温(~ 4 K)では、 $4f$ 電子は、 s , p , d 軌道などの伝導電子と相互作用(c - f 混成)することで、遍歴的な性質を獲得します。これにより、 $4f$ 電子の性質が物性に現れます。実際、希土類化合物では、 c - f 混成強度が変化することで、電気抵抗がゼロになる超伝導状態、希土類イオンの価数が時間・空間的に変換する価数揺動状態、磁気的な性質をもつ磁気秩序状態などの多彩な量子状態が現れます。従って、希土類化合物の低温物性を理解するためには、 c - f 混成の強さなどの詳細を解明する必要があります。

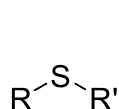
この目的を達成するため、これまでに国内外の多くの研究者が、様々な手法を用いて理論・実験研究を行ってきました。実験研究においては、電気抵抗、比熱や磁化測定などのバルク物質値の測定が中心でした。我々は、ミクロな観点から c - f 混成の理解を通して、希土類化合物の物性を解明することはできないかと考えました。そこで、点接合分光(point-contact spectroscopy: PCS)法を通したミクロ測定に注目しました。この手法では、図 1 に示すように、プローブと試料(希土類化合物)を微小面積(数 nm)で接触させて伝導測定を行います。これにより、物性を決定する電子状態密度を直接取得することができます。つまり、PCS 法によって電子状態密度というミクロな観点から希土類化合物の物性を解明できると考えました。

講演では、希土類化合物の物性、PCS 法などについて概説した後、我々が行った希土類化合物の PCS 実験結果[M. Shiga, *et al.*, Physical Review B (Lett.) **103**, L041113 (2021)等]について説明する予定です。

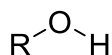
環境調和型スルフィド合成法の開発

金野大助（農林海洋）

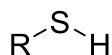
スルフィドとは、二価の硫黄原子に二つの有機基が結合した構造を持つ物質の総称であり、様々な生理活性物質や医薬品の部分骨格として存在することから、有機合成化学において最も重要な部分構造の一つとされている。現代の有機合成の分野では持続可能な社会に向けて、より環境や人体にやさしい条件での合成方法の開発が求められているが、スルフィド合成において最も一般的に用いられている方法は、アルコールの酸素原子が硫黄原子に置き換わったチオールとよばれる物質を原料に用いた方法であり、チオールは揮発性が高く悪臭や毒性を持つものが多いことが問題になっている。そこで近年では、より取り扱いが容易な原料を用いたスルフィド合成法の開発が研究されており、そのうちの一つとして、チオ尿素を用いたスルフィド合成法が報告されている。



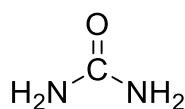
スルフィド



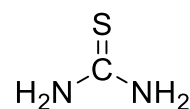
アルコール



チオール



尿素



チオ尿素

チオ尿素は、尿素的酸素原子が硫黄に置き換わった構造をしており、常温では無臭の個体であることから取り扱い易いという特徴があり、スルフィド合成に用いられたチオ尿素は反応後に人体に無害な尿素に変換されるという利点もある。我々はこのチオ尿素をもちいたスルフィド合成法について、既に報告されている方法の触媒や溶媒、反応条件を検討して、より環境に優しい反応条件下での合成実現を試みてきた。その結果、触媒に炭酸ナトリウム、溶媒にポリエチレングリコールや水などの環境負荷が低い物質を用いた条件でのスルフィド合成を実現した。また特に環状スルフィドの一種であるチアゾール合成においては、水を溶媒に用いて触媒不使用条件下で目的とするチアゾールが得られることを見出した。本談話会ではこれらの反応の詳細について紹介する。