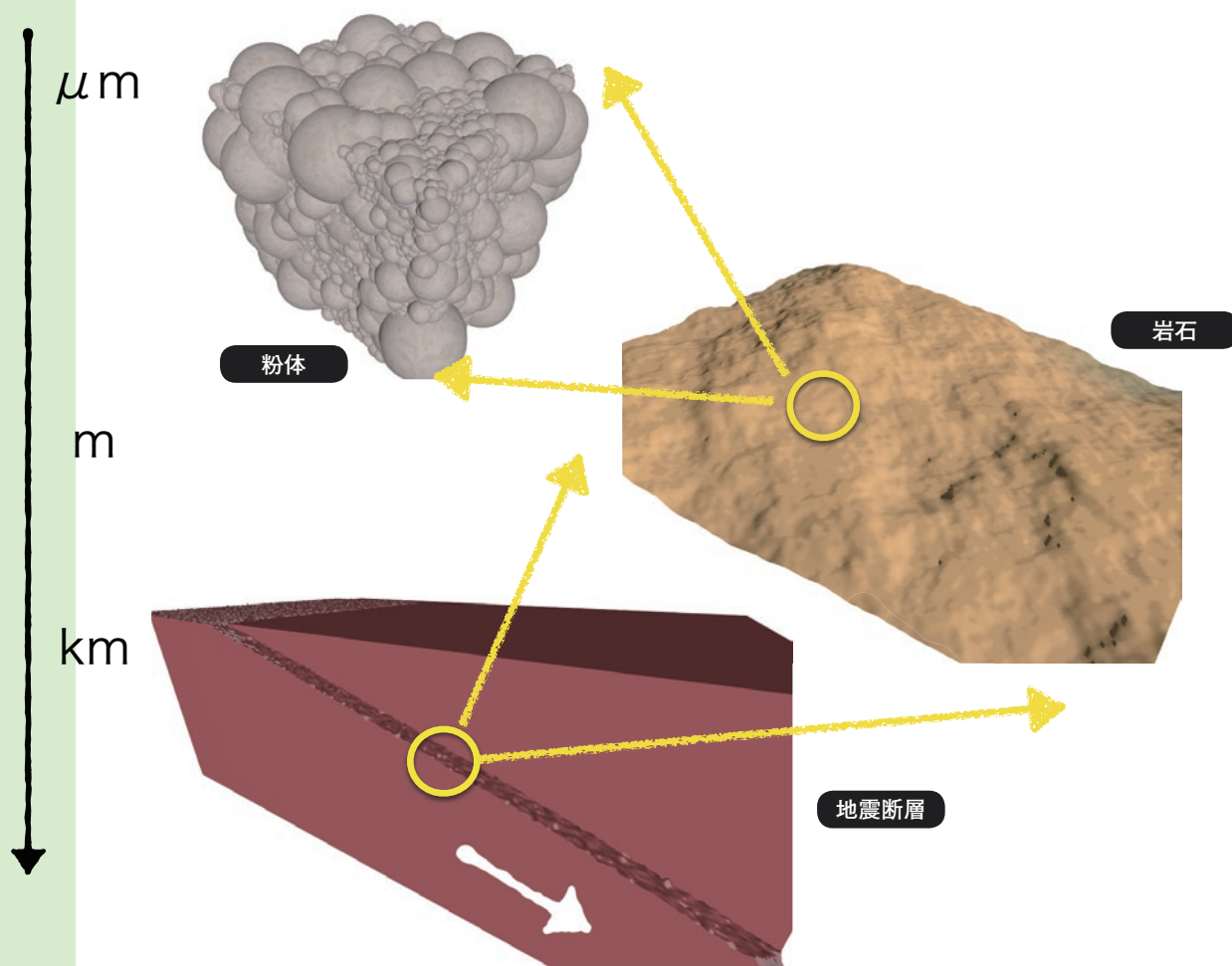


PIUS

地震研究所 ニュースレター

NEWS LETTER Plus No.24
Earthquake Research Institute,
The University of Tokyo



特集

地震の経験則の背後にある 普遍的理論を導き出す

現 象をモデル化し、シミュレーションを行って、その物理過程を解き明かす。
さらに、そこにある普遍的な法則を導き出し、数式で記述する。

——数理系研究部門の波多野恭弘 准教授は、
物理学的なアプローチで地震をはじめとする地球科学の問題に挑んでいる。
最近では、摩擦の不安定さを決める長さ定数を理論的に表現する数式を発見。
地震発生の経験則として有名なグーテンベルク・リヒター則と大森則の背後にある
普遍的理論の探索も進行中だ。



東京大学地震研究所

地震の経験則の背 普遍的理論を導き

地球科学の問題に 物理的な手法でアプローチ

波多野准教授の専門は、非平衡物理学・統計力学だ。「スケールの異なった多様な現象をつなぐ普遍的な理論を導き出し、数式で記述することを目指す研究分野です」と解説する。地震研の中では珍しい。「物理的な手法で地球科学の問題にアプローチする助手を募集していると知り、面白そうだと応募しました」。2005年のことだ。

地球科学は門外漢だったため、あらゆるセミナーに参加して勉強することから始めた。そして、面白いと思ったのが、摩擦だ。理由は？「地震現象において断層面に働く摩擦力は非常に重要です。にもかかわらず、普遍的な理論がまだないのです」

地震とは、大きな力がかかって地下の岩石が壊れ、断層が急激にすべる現象である。弾性波が発生し、伝播して地表を揺らす。地震の大きさは、どのくらいの面積の断層が、どのくらいの速さですべったかによって決まる。それを支配しているのが、断層面に働く摩擦力なのだ。

地震が発生する断層の摩擦力を直接調べることはできない。そこで、10cmほどの岩石を用いて摩擦特性を調べる室内実験が、古くから行われてきた。しかし、常に指摘され

る問題がある。——実験室スケールで明らかになった岩石の摩擦特性を、はるかにスケールが大きい地震断層に適用できるのか。

「その問題に答えを出せるのが物理的なアプローチなのです」と波多野准教授。実験を繰り返すことで、岩石の摩擦特性について経験則が得られる。しかし経験則では、実験室での経験を超えて地震断層に適用できない。「実験の現象をモデル化し、シミュレーションすることで、経験則の背後にある物理過程を探るのです。経験則が何によって成り立っているのか普遍的理論が分かり数式で記述できれば、それを異なるスケールの現象にも適用できるようになり、適用限界も分かります」

すべり速度が速くなると、 摩擦力は上がる？ 下がる？

波多野准教授は、さっそく岩石の摩擦のシミュレーションに着手。ところが計算したのは、岩石ではなく、つぶつぶの粉体の挙動だ。「複雑な現象を理解するには、ミクロな世界を拡大して見て単純化したモデルをつくる。それが物理学の基本です。岩石はこすれると、破碎されて粉体になります。だから、粉体のレベルで摩擦を理解しなければ始まらないと考えたのです」

程なく、いくつかシミュレーション結果が出た。

「満を持して発表したのですが、そんな単純化したモデルで地震が理解できるのかと、反応は散々でした」と苦笑いを浮かべる。「納得してもらうにはシミュレーション結果だけでなく、それが実験と一致すること、そしてその背後にある理論まで導き出す必要があると、あらためて認識しました」

2008年にテニユアトラックプログラムに採用されたことから、装置など環境を整え、桑野修 特任研究員（現 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野 研究員）と共に実験に着手した。しかし、用意した装置は岩石実験でよく使われているものではなく、レオメーターといって液体の粘性を計測するものだ。「すべり速度によって摩擦力がどのように変化するかを、幅広い速度領域で精度よく系統的に測定したかったからです」

すべり速度が速くなると摩擦力が下がるならば、ブレーキがかからず大きな地震となる。逆に、摩擦力が上がるならば、ブレーキが利いて大きな地震にはならない。摩擦の速度依存性は、地震を理解する上で、とても重要だ。「これまでの岩石実験では、すべり速度が速くなると一気に摩擦力が下がるという結果が出ていました。しかし、私のシミュレーションでは摩擦が上がると出た。本当はどちらなのかを確かめたかったのです」

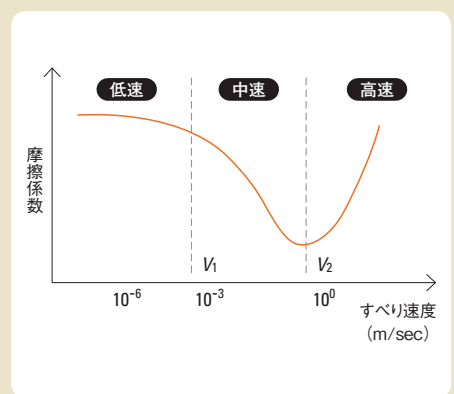
図1 レオメーターによる
摩擦実験

左は粉体の摩擦計測用に改造したレオメーター。右上は摩擦計測用の岩石サンプル。実験前のもので、直径は約1cm。右下は実験後で、摩擦により岩石サンプル表面から大量の粉体が生成される。



図2 すべり速度に応じた摩擦係数の振る舞い

低速、中速、高速の三つのステージがあり、それぞれ異なる物理過程が支配していることが明らかになった。



後にある 出す

数理系研究部門 准教授
波多野恭弘

岩石実験では、地震が発生する地球内部の環境を模擬して大きな圧力をかける。すべり速度が遅いときはいいのだが、速くなると速度の制御が難しく精密な実験ができないことが指摘されていた。「レオメーターは大きな圧力はかけられませんが、速度を幅広く、精度よく制御できるので、実験の目的にちょうどいい。レオメーターを岩石実験に使うという話は、ほかでは聞かないですけどね」(図1)

岩石試料だけでなく、直径0.3mmほどのガラス球を用いた実験も行った。素性の知れたガラス球を使って制御された実験を行うことで、単純化して本質に迫るためだ。実験の結果、すべり速度が速くなると摩擦力が上がることが明らかになった(図2)。それはシミュレーション結果と定量的に一致している。しかも、すべり速度が遅い領域については、従来の岩石実験の結果とも整合している。「摩擦の速度依存性について新しい法則も発見することができ、海外の研究者からも関心を示していただきました」

摩擦力を決めている 普遍的理論を導き出す

次に目指したのが、摩擦力を決めている普遍的理論の導出だ。岩石はぴったりくっついていてるように見えても、岩石の表面には凹凸があり、実際に接触しているのはほんの一部だ。岩石実験から、摩擦力は実際に接触している凹凸の長さで決まることが、経験的に知られていた。波多野准教授は、この長さ定数を理論的に表現する数式を発見した。

「これでようやく、実験室スケールで明らかになった岩石の摩擦特性を自然のスケールにつなげることができるのか、その適用限界はどこかを、議論することができるようになりました」。この成果はごく最近発表され、今後注目を集めると期待されている。

地震の統計的性質を解く

「私の研究内容は今、実験室の摩擦の研究から、地震の統計的性質の研究へシフトし

図3 簡単な数理モデルから計算された断層面上の応力分布

均一な状態から始まった断層面上の応力が自発的に不均一化していき、短波長から長波長までさまざまなスケールの乱れを示すようになる。断層スケールにおけるこのような不均一性がグーテンベルク・リヒター則の背後にあると考えられている。

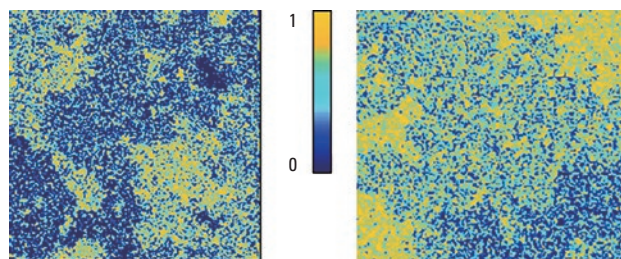
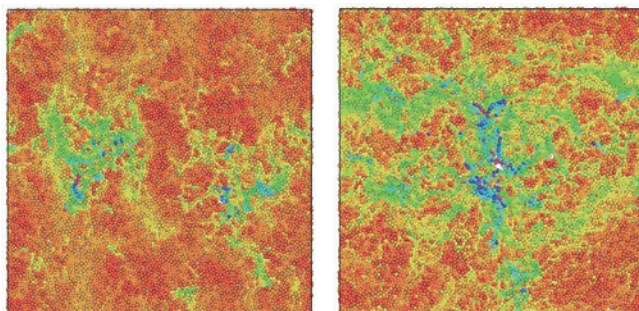


図4 断層を構成している粉体粒子の剪断変形シミュレーション

変形が安定的に進行している領域(赤)の中に、突如として不安定に変形する領域(青〜緑)が出現する。これはマイクロメートルスケールでの地震ともいえるべきものだが、このスケールで不安定化した変形が断層スケールまで一気に進行する可能性もある。その場合、マイクロメートルスケールでの現象も地震の開始と発生率に無視できない影響を及ぼすことになる。



つつあります」と波多野准教授。地震については、統計的な法則が二つ知られている。グーテンベルク・リヒター則と大森則だ。グーテンベルク・リヒター則は規模の大きい地震ほど発生頻度が低い、大森則は余震の回数は本震からの経過時間に従って減っていくというものである。「観測データから統計的に求められたもので、地域などによらず普遍的な法則です。しかし、この二つの法則がなぜ成り立っているかは分かっていません。それを明らかにしようとしています」

地震の発生には二つの段階がある。一つは岩石に亀裂ができる核生成過程で、亀裂の成長はゆっくり進み地震波を出さない。二つ目は不安定破壊過程で、亀裂の大きさが臨界サイズを超えると、一気にすべて地震波を出す。地震の発生個数に関わる大森則は核生成過程、規模に関わるグーテンベルク・リヒター則は不安定破壊過程に関わっている。この二つの物理過程を明らかにすることで、普遍的理論を発見することを目指す(図3、4)。「最近、応力が関連しているらしいことが分かってきました。二つの法則の普遍的理論を数式で記述できれば、地震の観測データから逆問題を解くことで核生成過程や不安定破壊過程など地下の断層の状態が分かります。それは、地震予知にも役立つことでしょう」

普遍性を求めて

波多野准教授は、地震研に来た当初、とても戸惑ったという。「物理学では対象の背後にある普遍的理論を探すことに重きを置いています。ある現象から導き出した普遍的理論を使って、スケールや分野の異なる現象を説明できたときに、私たち物理学者は大きな喜びを感じるのです。一方、地球科学、特に地震研究は観測によって分かった地域性や特殊性が目立ち、普遍性はあまり気にしない傾向があります。普遍性の探索が一番面白いと思っている私にとっては、風土が違うなと感じました」

地震研究者も、同じように戸惑った。地震現象の理解に物理学的アプローチが有効であると認識されるようになったのは、比較的最近だ。「欧米の地震研究では、いち早く物理学的アプローチが取り入れられています。一方、日本でそれをやっているのは私くらいです。このままでは、日本は観測データをたくさん持っているけれども、普遍的理論の発見は欧米に取り尽くされてしまうのではないかと、危惧しています。普遍的理論を見つけ数式で記述することができれば、観測データだけでは分からない深いところまで分かり、スケールの違う現象も理解できる。そういう物理学的アプローチの魅力を布教していくことが、私の重要な任務の一つです」



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)

東京大学地震研究所 ニュースレターPlus 第24号

発行日 2016年4月1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
フォトンクリエイト
(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
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/>

TOPICS

イベント報告

●地震研究所職員研修会

毎年恒例の職員研修会が開催されました。北は北海道大学から南は鹿児島大学まで、全国9機関から総勢48名の参加がありました。所外研修としては、公益財団法人鉄道総合技術研究所および国立極地研究所を訪問しました(写真は極地研)。

受賞・表彰

●西田究准教授が「日本学術振興会賞」

「日本学士院学術奨励賞」を受賞

●小原一成所長が

AGUのGutenberg Lectureの講演者に選出

2015年12月に開催された米国地球物理学連合(AGU) 秋季大会において、小原一成地震研究所所長・教授が、地震分野のGutenberg Lectureの講演者に選出され、講演を行いました。選出されることは各分野における優れた業績を挙げた研究者に与えられる名誉で、Gutenberg Lecture講演者に選出された日本人としては、1996年の金森博雄教授以来、2人目となります。



1898年7月4日、ロンドン郊外にあるキュー観測所に宛てた手紙。

図書室から

「近代地震学の父」と呼ばれるジョン・ミルンの子孫であるジェニー・ミルンさんが、地震研究所図書室で所蔵するジョン・ミルン直筆の手紙を閲覧するために来所されました。手紙は、1989年に地震研究所の当時の図書委員会と有志の研究室が費用を出し合い、神田にある古書店のオークションにて落札したもので、全部で53点に上ります。現在、日本語訳とともに、図書室の「特別資料データベース」で画像を見ることができます。

http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/dl/meta_pub/G0000002erilib
(「ミルンの手紙」で検索してください)

地震研究所図書室では、自然災害に関する古文書などの史料をデータベース化しており、上記URLにてご覧いただけます。



図書室で、ミルンが出版に関わった『The Great Earthquake in Japan, 1891』(濃尾地震の記録写真集)を見るジェニー・ミルンさん(左)。

最近の研究から 最近の研究を紹介するコンテンツ「最近の研究から」に、新たな論文が追加されています。地震研究所のホームページで、ぜひご覧ください。

- プレート間固着域と深部低周波微動発生域の間のギャップで発見された長期的スロースリップイベント
- 2012年スマトラ地震によって活断層などで誘発された微動
- 2012年スマトラ地震によって日本で生じた地殻弾性擾乱の連鎖
- 西之島の空振活動を父島でモニタリング

INFORMATION

人事異動

●4月1日	採用	平田 直 黒石裕樹 加藤愛太郎 大塚宏徳 佐伯綾香	地震予知研究センター 教授(特例) 地震火山噴火予知研究推進センター 教授 地震予知研究センター 准教授
	昇任	竹内昭洋 浦野幸子 田中伸一	技術部総合観測室 技術職員 技術部総合観測室 技術職員 技術部技術開発室 技術専門職員 技術部技術開発室 技術専門職員 技術部総合観測室 技術専門職員
●3月31日	早期退職	平田 直	地震予知研究センター 教授
	辞職	渡辺俊樹	地震火山噴火予知研究推進センター 教授
●2月16日	任期満了	井本良子 坂 守	技術部情報処理室 再雇用職員 技術部総合観測室 再雇用職員
	昇任	等々力 賢 武井(小屋口) 康子 新谷昌人	災害科学系研究部門 特任助教 物質科学系研究部門 教授 観測開発基盤センター 教授
●1月31日	辞職	森 健彦	技術部総合観測室 技術専門職員