これまでの研究内容

波多野恭弘（東京大学地震研究所）

これまで行ってきた研究を概観すると、非平衡統計力学～計算材料科学～摩擦・非線形レオロジー～地震発生過程と複数の異分野を渡り歩いてきたことになる。これらは一見すると互いに無関係にも見えるが、「地震発生の物理」という現在の研究課題の見地から俯瞰すると意外な形で相互に関連している。これら異なる複数のバックグラウンドは、私の今後の研究の独自性・独創性に少なからず影響を与えるかもしれない。以下では過去の仕事の背景・結果の要旨・その意義をなるべく統一的な見地から紹介する。文中リンクは関連論文のサイトに飛ばされるので注意。

1. 非平衡統計力学の基礎理論

平衡統計力学は「ハミルトニアンを与えれば巨視的系の微視的測度が分かり、そこから全ての観測量が（原理的には）計算できる」というGibbs理論により一応の完成をみた。一方、非平衡統計力学では線形非平衡過程の輸送係数（粘性率・熱伝導率など）を計算する「線形応答理論」が1950年代に確立し、一応の完成をみたと思われるかもしれない。しかし基礎理論の見地からは根本的な問題が複数残されている。

根本的問題の一つはエントロピーと熱の対応である。平衡系では熱とエントロピーはクラウジウス不等式で対応付けられ、これは熱力学第二法則と同値である。しかし非平衡系における熱は系の状態変化とは関係なく流れ続け（例えばジュール熱）、系のエントロピー変化とは関係ないように見える。この問題に対してOono & Paniconi (1998)は、非平衡系の状態変化とは関係なく発生する熱を「維持発熱」として分離して「正味の発熱」を定義すれば、それがクラウジウス不等式を通じて非平衡系のエントロピー変化と対応づけられると提唱した。ただし具体系における維持発熱の設定は全く非自明であった。このような原理的問題に本質的進展をもたらすことは大変困難な仕事であるが、多少の足がかりとなるであろう仕事を行った。

まず、パラメタ変化により平衡状態間を遷移する任意の過程に関して成立するJarzynski等式が、非平衡定常状態間の遷移にも（ある限定のもと）使えて、「正味の発熱」と非平衡系のエントロピーが対応することに気づいた。外力で駆動されるブラウン粒子系という簡単な系に対してこの等式を応用し、単著論文として発表した。その後、Hamiltonian系で同種の問題を考えていた佐々真一氏との共同研究によってこれを一般化し、系のシャノンエントロピーと「正味の熱」がクラウジウス不等式によって対応づけられることを示した。これは非平衡定常状態に拡張された熱力学第二法則と解釈できる。ここでの導出はMarkov過程に共通して成り立つ恒等式に基づいており、その理論形式はいくつか全く異なる興味深い文脈でも応用されている。

私が取り組んだもう一つの基礎的問題としては、低次元系における熱伝導率の発散の問題がある。軌道不安定性（カオス）が弱く熱化が不十分な系では、フォノンが散乱されず弾道的に伝わるため、熱伝導率が系のサイズに依存して異常に増大する。これは力学系的性質と熱力学的性質を関連づける基礎的問題であることから広く興味を持たれ、1980～90年代に盛んに研究されてきた。他方、先に述べた線形応答理論によれば、熱伝導率は熱流の自己相関関数の時間積分から計算される。ゆえに異常に大きな熱伝導率は熱流相関関数の異常に遅い減衰として理解される。実際、様々な相関関数がベキ的に減衰することがErnstらのくりこみ群的な計算によって1970年代にすでに知られていた。このシナリオによれば、実は熱伝導率の異常な増大は力学系カオスと関係ないことになる。これらの反省を背景にして、私は1次元格子系数種類について系統的なシミュレーションを行い、外場がなく運動量が保存する系では熱流の自己相関関数がベキ的な遅い減衰

を示すこと、その指数は1/3程度で、熱伝導率のシステムサイズ依存性の指数を説明することを明らかにした（論文）

2. 計算材料科学：結晶中転位の分子動力的研究

固体の機械的性質において最も重要な性質の一つは塑性である。とくに金属や鉱物などの結晶系では、塑性変形は各種格子欠陥の運動によって実現されるので、格子欠陥の運動には長い研究の歴史がある。中でも、転位の運動特性は降伏応力を実質的に決定している（転位が動きやすいほど降伏応力が低い）ので、転位の運動機構は材料科学における中心課題の一つである。

転位の運動は結晶中に含まれる様々な不純物や他の格子欠陥（第二相析出物・他の転位・粒界など）に阻害されうる。それらは材料の置かれた状況に応じて異なるが、我々は主に原子力材料の文脈から、ボイドや第二相析出物による転位ピン止め機構を大規模な分子動力学法によって解析し、ピン止めが外れる臨界応力やその原子論的機構を明らかにした（その1、その2）。とくに、硬い析出物を転位が迂回していく際の機構として標準的なもの（オロワン機構）とは大きく異なる機構（Hirsch機構）を初めて再現し、その実現条件を解明したことが特筆される。

このような話題は固体地球科学とは無関係に見えるが、例えば下部地殻やマントルを構成する鉱物の塑性変形は上部地殻の応力状態と結合して地震発生にも影響を与えるので、塑性の微視的機構は地震の理解のためにも重要である。また、転位の連続体理論は破壊（亀裂進展）理論とほぼ平行になっており、地震の動的破壊伝播の理解にも直結している。更に、転位の多体系においては雪崩的な運動が普遍的に発生し、その統計的性質は地震のものとはほぼ同じである。このように材料科学と固体地球科学との接点では新しい学際研究テーマが多く眠っており、摩擦現象に関する材料科学者との共同研究が実際に進行している。

3. 摩擦と非線形レオロジーの現象論

地震とは断層の急激な摩擦運動であるから、地震を力学的に理解しようと思えば、まず断層に働く摩擦力の法則を理解しなくてはならない。しかし断層の大きさは数km～数100kmにも及ぶため、直接の実験はできない。したがってその研究は理論的にならざるを得ない。

我々の戦略は、断層の構成要素である鉱物・岩石の摩擦法則に関する知見をまず実験室スケールで解明し、その理解を「部品」としてより巨大な断層スケールの摩擦法則を演繹していくというもので、いわば統計力学的なボトムアップアプローチである。ただ、現状では実験室スケールの摩擦現象自体が難しく課題が山積みである。その中でも代表的な仕事を以下に解説する。

地震研着任後すぐに、断層ガウジの摩擦法則を微視的な観点から理解するための研究を開始した。ある種の粒子間相互作用を仮定した粉体粒子のシミュレーションを系統的に行うことで、高密度・準静的変形速度における粉体のレオロジー特性を解明した（剪断応力が無次元変形速度のべき関数として普遍的に増大）。シミュレーションで得られたこの摩擦法則を検証するために、レオメータを用いた粉体摩擦実験を桑野修氏との共同研究として行った。その結果、比較的速い変形速度においてシミュレーションと実験はよく一致するが、非常に遅い変形速度の実験では剪断応力が負の速度依存性を示し、正の依存性しか示さないシミュレーションとは定性的に異なることを発見した [その1]、その2]。我々は粒子間接触の時間依存強化過程を粒子間力のモデルにとり入れることで実験結果が統一的に説明できることを提唱している。この新規なモデルの妥当性を、現在シミュレーションで調査中である。負の速度依存性を持つ摩擦は巨視的変形過程を不安定にするので、負の依存性から正の依存性へ切り替わる特徴的速度の解明は、地震や地滑りなど不安定な変形現象全般に重要な意義を持つ。

他方、高速かつ高圧力(> 1 MPa)の条件下では摩擦熱により新たな物理化学過程が発現し、摩擦現象を大きく変える。我々は比較的単純な鉱物粉末についての実験を行い、mm/s—cm/s程度の変形速度において摩擦力が顕著に弱化的ことを示し、その弱化的が真接触部位の局所的な温度上昇に基づいて半定量的に説明できることを示した。さらに、変形速度がm/s（地震すべり程度）まで速くなると摩擦力は変形速度の増大関数となるが、これは摩擦磨耗物に起因することも定量的に示し、高速摩擦においては磨耗物の影響が無視できないことを強調した。これらの詳細は桑野氏との共著論文を参照。

以上は全て定常状態の摩擦特性であるが、地震発生過程には過渡状態の性質も重要である。高速変形(~m/s)での過渡状態を模擬した粉体系においては摩擦の緩和過程が特性距離ではなく特性時間で支配されていることをシミュレーションで発見している。この結果は、摩擦力の緩和過程が常に自己相似的であることを意味しており、地震波インバージョンによる推定結果とも整合的である。過渡状態の性質についてはこの論文にまとめているが、より低速領域で知られている緩和過程とは定性的に異なっているので、両者の間のクロスオーバーがいかにして起こるのが興味深い課題として残っている。

他方、天然断層ガウジの組織構造は地震時の滑り様式・履歴と深い関わりがあり、過去の地震に関する有益な情報を持ちうることで地質学から示唆されている。我々は、天然断層で稀に観察されるブラジルナッツ効果（大きい粒子が重力に逆らって上層部に偏析する現象）を数値シミュレーションで再現し、断層でブラジルナッツ効果が発生する定量的条件を解明した [Itoh & Hatano, Phil. Trans. A, accepted]。

4. 地震の発生過程と統計法則

項目3で述べたような実験室スケールでの摩擦現象に関する知見を「部品」として断層スケールでの摩擦（すなわち地震）を理解していくためには、地震発生場の地質学的構造を適宜取り入れることが大事である。例えば断層の凸凹形状はフラクタル的であり、固体岩石どうしがどこでも一様に接触・摩擦されるわけではない。さらに、その隙間には過去の地震で破碎・摩耗された岩石の粉末（断層ガウジ）が分布しており、摩擦特性は空間的に非一様である。そのような複雑構造の影響を過不足なく取り入れることが地震発生物理における最重要課題であろう。

4-1. 最小の地震とその統計法則

地震の最大サイズは地質学的構造が決めていて、地球ではMw10程度よりも大きな地震は起こらないと思われているが、では小さい「地震」はどこまで地震とみなせるのか？地震の規模別発生頻度が自己相似的であるというグーテンベルク・リヒター(GR)則を考えると、小さいスケールの地震はどこまでも続くように見える。しかし地質学的構造を考えれば、断層ガウジ内で発生する微小破壊が「最小の地震」の有力候補と言ってよいだろう。最小サイズの地震とMw 1 ~ 8程度の「普通の地震」がどこまで同じでどこが異なるのか？という問いは原理的な観点から興味深い。我々は断層ガウジを模擬した粉体剪断系におけるエネルギー放出イベントを微小破壊と見なし、GR則と余震の大森則が成り立つことを確認した。さらにこれら法則に含まれるパラメタの応力依存性まで調べ、実際の地震に関して提唱されている依存性を直接再現することを示した。とくに大森則のc値については、ここで発見した応力依存性がのちに実際の地震でも確認された。

4-2. フラクタル形状の断層における滑りの加速シミュレーション（論文投稿中）

4-3. 滑りの加速過程や地震発生への統計に対する応力擾動の効果（論文準備中）