

すべりの多体disk模型

-摩擦と破壊とフラストレーションがあるランダムスピンス系-

平田 隆 幸¹⁾

1. はじめに

すべりの多体disk模型から、摩擦、破壊、ランダムスピンス系を見ていく(Hirata, 1999; 平田・吉村, 1999)。すべりの多体disk模型は、摩擦すべり現象を解明するためのモデルである。摩擦現象は身近なものであり、古くから研究されている。それゆえ、多くのことが解明されていると思われがちであるが、分かっていないことも多く残されている。摩擦が寄与する現象は非常に非線形性が強いので、現象論的な法則は比較的良好に分かってきたが、その素過程にまでさかのぼって理解するという研究は、あまり進んでいないのが実状である。また、断層のすべり摩擦に関する研究は、地震学において、もっとも遅れている研究テーマの一つである。

ここでは、境界摩擦に分類される摩擦面間に介在物が存在するすべり現象をとりあげる。地震断層のすべり現象もこのカテゴリーに分類することができる。さらに、対象とする系を単純化するために、介在物を2次元の多体disk系でモデル化する。地球科学には多くの摩擦現象が現れるが、ここでは単純化したモデル

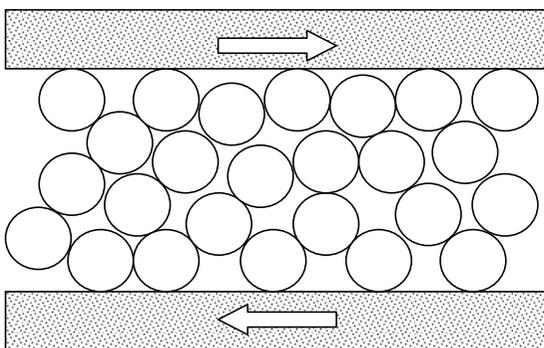
から、摩擦、破壊、そして、フラストレーションがあるランダムスピンス系を考えていく。摩擦と破壊というものを並べて取り上げたのは、摩擦と破壊の間に境界線を引くことは意外と難しいと考えているからである。

2. すべりの多体disk模型とフラストレーション

すべりの多体disk模型を第1図に示す。すべり面間に介在物が存在する境界摩擦に分類される滑り現象においては、介在物の挙動がすべり現象に大きな影響を与える。しかしながら、介在物の挙動は複雑である。このモデルは、すべり面間の介在物を単純化し、2次元の多体disk系でモデル化している。

また、このモデルは、フラストレーションがある多体系という観点からみることもできる。多体disk系にせん断応力をかけたときの挙動を考えてみよう。diskの配置が正方格子の場合には、せん断応力をdiskのスムーズな回転によって解消できる(第2図a)。つまり、時計回り、反時計回りに回転するdiskを矛盾なく配置できる。この場合、せん断応力は0となり、ずるずると滑ることになる。一方、diskの配置が三角格子の場合には、多体disk系は固体のようにふるまうことになってしまう(第2図b)。固体のようにふるまうことになる理由をフラストレーションという観点からみていく。なお、すべり面間にdiskをランダムに充填したこのモデルにおいては、diskの配置によりフラストレーションの発生は必然である。

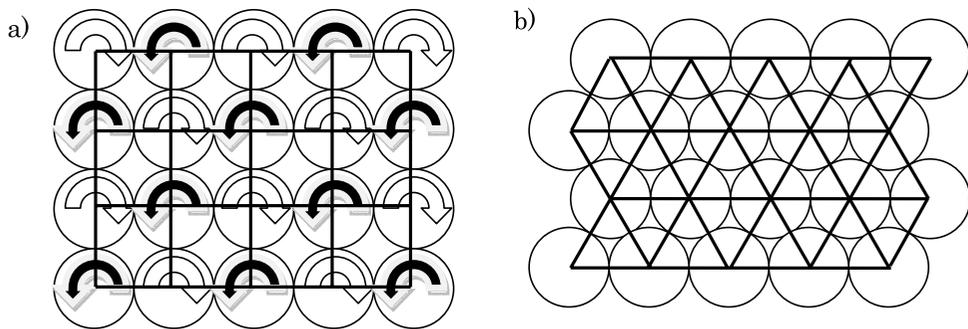
さて、フラストレーションとは、磁性体物理の分野で使われるようになった概念である。古典的な上向き↑と下向き↓の状態をとるイジングスピンを例に考えてみよう。スピンの向きを同じ方向にそろえようとする強磁性相互作用の場合には、どのような格子でも問題が生じない。しかし、近接するスピンの方向を逆方



第1図 すべりの多体disk模型の模式図。

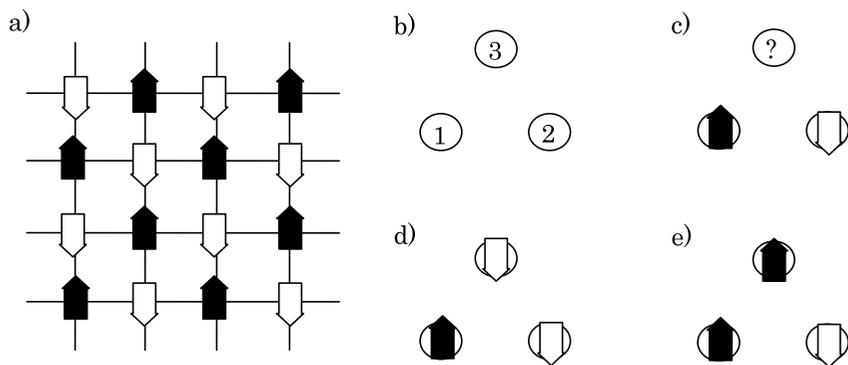
1) 福井大学 工学部 知能システム工学科
910-8507 福井市文京3-9-1

キーワード: 摩擦, 破壊, ランダムスピンス系, フラストレーション, 多体disk系



第2図 diskの配置と回転による力の伝達.

- a) 正方格子上にdiskを配置したときのスムーズな回転による力の伝達
- b) 三角格子上にdiskを配置したときにはスムーズに回転を伝達できない



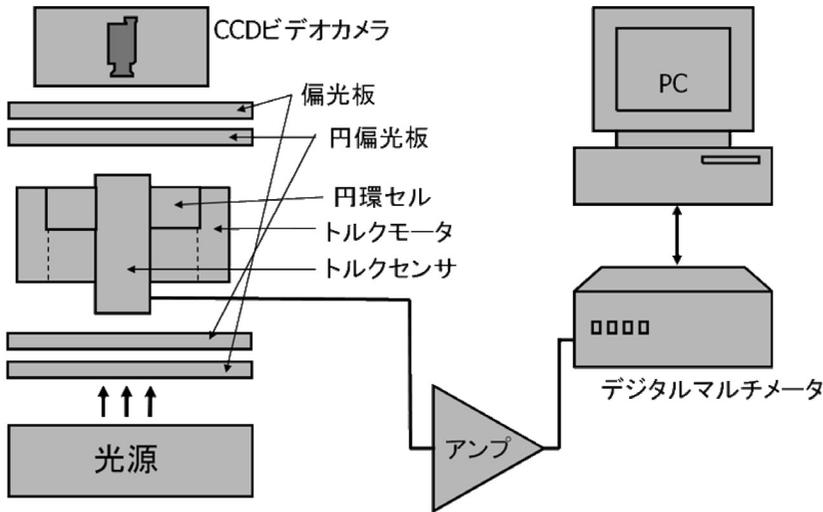
第3図 フラストレーションの発生.

- a) 正方格子上の反強磁性相互作用イジングスピン
- b) 三角格子
- c) 格子3のスピンの向きはどうなるのか
- d-e) 格子3に上向き↑あるいは下向き↓のスピンを配置してもフラストレーションが発生

向にそろえようとする反強磁性相互作用の場合は面白いことが起きる。正方格子上にスピンを配置するときは、第3図aのように反強磁性相互作用をうまく満足するように上向き↑と下向き↓のスピンを配置することができる。しかし、三角格子(第3図b)にスピンを配置する場合は問題が生じる。格子1に上向き↑のスピンを配置したとしよう。格子2には、反強磁性相互作用を満足するようにすると、下向き↓のスピンを配置することになる(第3図c)。では、格子3には、上向き↑あるいは下向き↓のどちらのスピンを配置すればよいだろうか？ 格子1のスピンは上向き↑なので、反強磁性相互作用を満たすためには、下向き↓

のスピんでなければならないが(第3図d)、格子2のスピンは下向き↓なので、格子2からみると上向き↑のスピんでなければならなくなる(第3図e)。つまり、格子1の顔を立てれば、格子2の顔が立たなくなり、格子2のスピンを満足するように格子3のスピンの方向を決めれば、格子1のスピンを満足させるようにはできなくなる。これをフラストレーション(frustration)と呼ぶ。

すべりの多体disk模型に戻ろう。多体disk系にせん断応力をかけた場合、diskの回転によって応力を解放させるとすると、diskは隣接するdiskを逆の方向に回転させようとする相互作用が働くことになる。こ



第4図
 実験システムの模式図。

れは、磁性体における反強磁性相互作用に対応する。さらに、力の伝達は、接触しているdisk間にものみ発生する。diskは不規則格子上に配置されていると考えられるので、これは反強磁性的な最近接相互作用が働く不規則格子系と言える。また、不規則格子自体も変化し続けるという点がこの系の興味深いところである。なお、例えば、時計回りのdiskの回転を下向き↓のスピンの、反時計回りのdiskの回転を上向き↑のスピンの対応させることにより、イジングスピンとの対応がより明確になる。

すべりの多体disk模型の挙動を不規則格子上の反強磁性相互作用をするイジングスピン系としてみることは、単純化しすぎた見方かもしれない。なぜなら、すべりの多体disk模型においては、disk間にかかっている応力は一様ではない。それゆえ、厳密にはフラストレーションは生じない。フラストレーションは相互作用の大きさが同じ場合に生じるもので、相互作用の大きさが異なる場合は強いほうの相互作用を満足させるようにスピンの方向は一意的に決まるからである。すべりの多体disk模型においては、強く接触しているdiskからの影響の方が大きくなる。しかしながら、系の挙動を大雑把に理解する上で、不規則格子上の反強磁性相互作用をするイジングスピン系という近似はいろいろな示唆を与えてくれる。

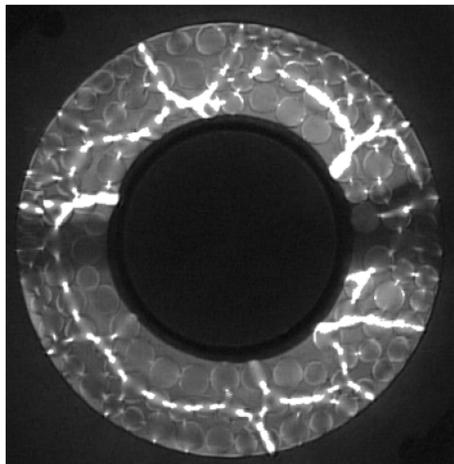
3. モデル実験と光弾性応力パターン

すべりの多体disk模型の挙動を詳しく調べるため

にモデル実験を行っている。第4図に実験システムの模式図を示す。円環セルに充填された多体disk系には、円環セルの外側の円筒をモーターによって回転させることにより、せん断応力をかけることができる。また、円環セルの中心の円柱にかかるトルクを計測している。さらに、円環セルの上下に偏光板と円偏光板(四分の1波長板)を入れることにより、多体disk系の光弾性応力パターンをビデオカメラによって計測することができる。

円環セルに充填する多体diskとしては、アクリル製の円柱を用いている。アクリルは、応力をかけると複屈折を起こすので、光弾性応力可視化装置を用いて応力分布を調べることができる(平田ほか, 2001)。第5図に、円環セルにdiskを充填し、せん断応力をかけたときの光弾性応力パターンの例を示す。光弾性応力可視化装置では、主応力差を明るさの濃淡としてみることができる。大雑把には、主応力差に比例して明るくなる。第5図から、応力がかかっているところは、系全体に一様ではなく、不均質に応力がかかっていることが分かる。つまり、力がチェーンのよう伝達されているのが分かる(応力チェーンの形成)。

トルク時系列からみたとすべり多体diskモデルの挙動を述べる。トルク時系列の特徴はstick-slipが見つまっていることである。stick-slipのサイズ分布はどうなっているのだろうか。stick-slipにおけるトルクの変化量をイベントサイズとすると、サイズ分布は、地震の規模別頻度分布Gutenberg-Richter則と同じようにべき乗則に従うことが明らかになっている(平田, 2000)。



第5図 光弾性応力可視化装置による応力パターンの例。

応力パターンとstick-slip発生の関係についてふれておく。stick-slipは、光弾性応力可視化装置で可視化した応力のネットワーク(応力チェーン)が壊れたときに発生する。このような意味でも、すべり現象と破壊現象との区別が難しいことが分かる。

4. おわりに

すべりの多体disk模型について、摩擦、破壊、フラストレーションがあるランダムスピン系という視点から見てきた。すべりの多体disk模型を地震断層すべりのモデルとして考えた場合、地震発生に対応するstick-slipが再現できている。この模型の特徴は、フラストレーションが発生することである。フラストレーションの発生により、diskの回転ではせん断応力を解消できなくなり、多体disk系が固体のようにふるまうようになる。stick-slipが発生するためには、固体としてふるまっていた多体disk系が流動化する必要がある。別の見方をすると、この系でのstick-slipは、多体disk系における応力チェーンがせん断を支えきれなくなり壊れたときに発生する。金属を用いた摩擦すべり実験においてstick-slipはすべり面間の物質の固体→流

動によって説明されていることを考えれば、すべりの多体disk模型も摩擦すべりのモデルとして悪くないと思える。

さて、もう四半世紀前になるが、西澤さんに「常に新しいことをやりなさい」という言葉をいただいた。そのころは、私は「破壊と自己組織構造」を岩石実験のスケールから巨大地震までのスケールで、統一的に理解できないかと取り組んでいるつもりだった。しかし、西澤さんの言葉を受け止めて、フラクタルという視点からの研究から脱却し、多体系での相互作用という観点から仕事を進めるような方向転換を行ったつもりである。もっとも、一貫して、粘弾性物質の破壊などを含めて、破壊の物理学という観点で研究をしているつもりではあった。現在行っている群ロボット、粉粒体の研究、ニューラルネットワークを使った脳の研究への方向転換のきっかけは、西澤さんの助言が大きいと感じている。さらに最近では、スノーボードロボット、剣道の力学へと、さらにとりとめないような研究になっているかもしれないが、研究を楽しめているのは西澤さんのおかげと感謝している。もっとも、同時に、着実に成果を出されている西澤さんに負けないように頑張らねばと思っている。

最後になりましたが、原稿を書くチャンスをくださった西澤修さん、中島善人さんに感謝いたします。

参 考 文 献

- Takayuki Hirata (1999) : 1/f fluctuation and a many-body disk model of slip phenomena, J. Phys. Soc. Japan, 68, 10, 3195-3198.
 平田隆幸・吉村龍明 (1999) : すべりの多体disk模型におけるdiskの移動-不規則格子上のフラストレーションがあるスピン系-, 形の科学会誌, 14, 2, 79-90.
 平田隆幸・河合康博・吉村龍明・小川淳司・原田義文 (2001) : 粉粒体系での応力伝達ネットワークをみるための光弾性実験装置の開発, 福井大学工学部研究報告, 49, 1, 95-100.
 平田隆幸 (2000) : すべりの多体disk模型と自己組織化臨界現象, 地震, 52, 417-424.

HIRATA Takayuki (2009) : A many-body disk model for slip phenomena -friction, fracture and frustrated random spin system-.

<受付: 2008年12月17日>