

小麦粉を用いた断層モデル実験

岡本 義雄 *

1. はじめに

実験室での断層形成の模擬実験は1950~70年代を中心に sandbox experiment¹⁾ という方法で盛んに行われた。白い砂と染色した砂を透明な容器に交互に成層させて地層を形作り、水平方向の圧縮や伸張、上下方向の段差などを外部より与え、その変形をモニターするものである。教材としても類似の装置が市販されているようである。しかし、高価なことと、材料の砂の準備や廃砂の廃棄等困難な点が多く、教室で普及しているとは言いがたい。また、粘土を用いる褶曲の模擬実験の場合も同様である。スケール相似則を考慮すると、専門的にはこのような実験は無意味であるという評価²⁾ があり、計算機実験の興隆にも押され一時下火になるかと思われた。しかし、最近では複雑系科学の進展に伴い、現実の物質を用いたこうしたアナログ実験が再評価されてきている。

筆者は、教材用として、上記の砂の代わりに入手が容易な小麦粉を、また地層の変形マーカーとしてココア粉を用いて、スライドケースの中に、ミニチュアの「逆断層」形成を再現する簡単な実験の試行を公表した³⁾。今回、実験の方法に改良を加え、さらに付帯実験等を行ったので、その成果の教材への活用を中心に報告する。

2. 断層実験の概要

(1) 準備物

- 〈小麦粉 (薄力粉)〉 100 g
- 〈ココア〉 大きじ1杯
- 〈スライドケース (透明)〉 24枚用がよい。
- 〈スライドケース (緑)〉 端を金鋸で図1 Aのように切り落とし、地層を固めるための治具とする。
- 〈プリント基板をカットした押し板〉 地層を横から押すために用いる。
- 〈キャッシュカード〉 付着した粉の清掃に用いる。

(2) 地層の製作

- ① 地層を作る前に、押し板をテープでケースの端に止めておく (底のレンズから遠い側, 図1 A参照)。
- ② 小麦粉をスプーンに適量取り、ケース (透明)

の中に平らに敷き詰める。ケースの1/3位の深さまで、小麦粉を入れると丁度地層1層分となる。次にケース (緑) で少し上から押し固める。このとき、ケースの透明な内壁が粉で汚れるので、これをキャッシュカードの端などを用いて、きれいに清掃する。これで第1層ができる (図1 A, B)。

③ 次に、ココア粉を適量スプーンに取り、同様に第2層を作るが、高価なので、粉を容器の周囲のみ落としてマーカーの役目をさせるだけでよい (図1 C)。①のときと同様押し固めと内壁の清掃を行う。

④ ②~③の操作を繰り返し、地層を5層程度 (小麦粉3層, ココア2層が適当) 作る。

※ ここで内壁に付着した不要な粉や治具の底をその都度清掃して、境界のシャープな美しい地層を作ることがこの実験の重要なポイントである。

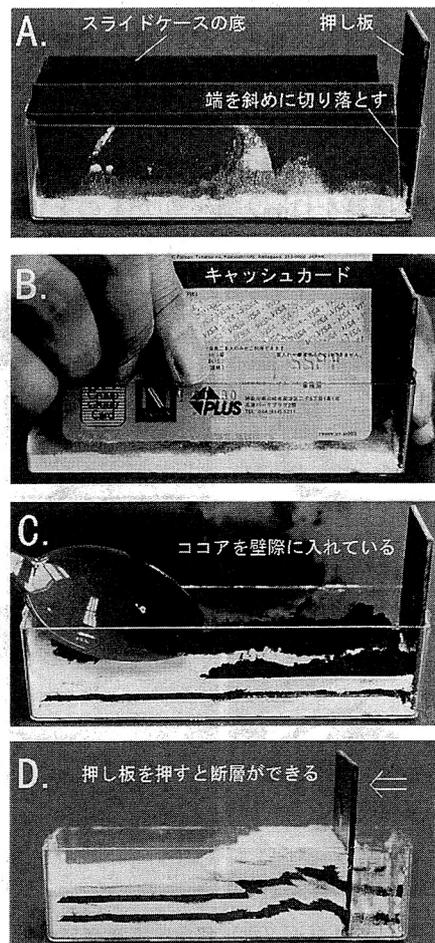


図1 断層実験の概要

* 科学教育部 理科第二室

(3) 断層の形成と観察

前記の地層ができたなら、次に押し板を慎重に地層を横に圧縮していく。その際の断層の

- ① 位置 ② 順序 ③ 角度 ④ ずれの量 ⑤ ずれの間隔等に注目しながら、押し板で押す。このとき適宜、カメラで経過を撮影したり、スケッチをしたりして、次章の測定に用いるとよい。

この実験では、次々と見事な逆断層が形作られていく。1つの断層がずれである限界に達すると、手で押し板から離れる向きに、次々と新たな断層がステップして形成されていく。その様子を子細に観察するだけでも大変興味深い(図1D)。

3. 地層の初期条件と断層の諸パラメータの関係

次に、生徒実験としても応用可能な定量的測定を試みる。ここでは地層の初期条件を地層厚と、地層を詰め込むときの圧力の2点に限って、調べることにする。なぜなら、筆者の経験上、この実験は複雑な粉体としての小麦粉の物理特性に支配されており、再現性が乏しく定量的な分析は非常に難しいからである。そこで他のパラメータの影響等は無視し、最も基本的なものに限ることにする。その他、粉の詰め込みの不均質、容器の底、壁での摩擦等の影響も考えないことにした。

(1) 地層の条件設定

- ① 地層厚について薄・厚2種類の条件

全体の地層厚を11mmと薄くしたものと16mmと厚く

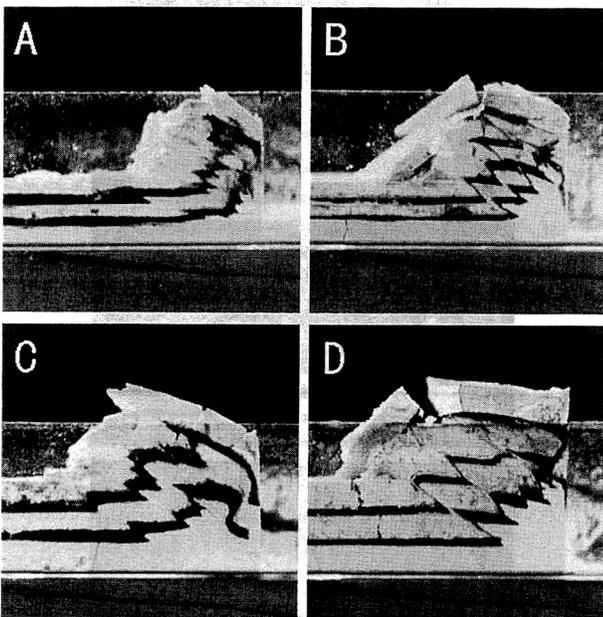


図2 4種類の条件下での断層モデル 地層の厚み、固さの違いにより微妙に異なる形態をとる。

したものとの2つのモデルを考えた。

- ② 地層詰め込み圧について強・弱2種類の条件

地層を作製する際、粉は1層作るごとに、そのつど上から押し固めるが、このときの詰め込み圧について、軽く詰め込んだもの(約30gw/cm²)と、かなりの力で詰め込んだもの(上記の10倍近い圧力でこの時、粉の体積はほぼ最小で安定する)との2種類用意し、上記①、②の条件を各々組み合わせた4種類を模擬地層として用意し、それぞれ次のように名付けることにする(図2参照)。

Aモデル: 11mm厚で柔らかい (11, Lと表記)

Bモデル: 11mm厚で固い (11, T)

Cモデル: 16mm厚で柔らかい (16, L)

Dモデル: 16mm厚で固い (16, T)

(2) 測定量

実験後の地層の入ったケースを回収し、スケッチや写真なども参考にして以下の断層の諸パラメータを決定する(図3参照)。

- ① 断層の角度: 水平面からの角度でDip角という。プラスチック板でコンパスのような簡単な角度測定の道具を作り、分度器に当てて測定した。
② 断層間の距離(mm): 各断層間の距離を物差しを直接、容器の壁に当てて測定した。
③ 断層個々のずれの量(mm): ②と同様に、各断層の最終的なずれをココアのマーカの食い違い量を頼りに物差しで測定した。

(3) その他の設定

〈歪み速度〉手で地層を押すときの速度は一定と考えることにする(実際は途中で中断したり、少し速度が変化したりするがその影響は小さいと考える)。
〈押す距離〉端から30mmまでとする。これ以上押すと粉がこぼれる。

〈標本数〉同一条件の実験を10個の容器ごとに行い、各測定は容器の片面での測定値を採用した。

4. 実験結果と解析

本実験の測定結果を図4に示す。図4.I~IIIは諸量の頻度分布、図4.IVは諸量とばらつきとの関係

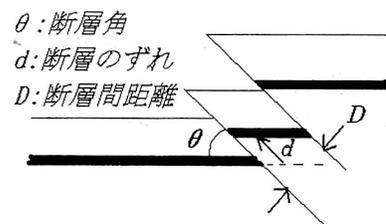


図3 測定する断層パラメータ

を標準偏差で表したものである。全般の印象として柔らかく詰め込んだA, CのモデルはB, Dに比べ、諸量のばらつきが大きいように感じる。これは柔らかいと小麦粉の不均質性の影響がより大きく出たためかも知れない。以下詳細に結果を検討する。

- ① 断層角は正規分布に似た分布になる。柔らかいモデルA, Cの方は30度付近にピークを示し、35度付近にピークのあるB, Dより小さい角度が多い。さらに図で△印は共役断層（押し板に近い方に逆向きにできる断層）の値で少し大きな角度を取り易い。
- ② 断層間の距離は柔らかいものでは層厚の薄いAで狭い幅を示し、Bで広がる。固いC, Dでは差が小さく、むしろばらつきが少なくなる印象がある。正規分布よりずれた非対称の頻度分布となる。

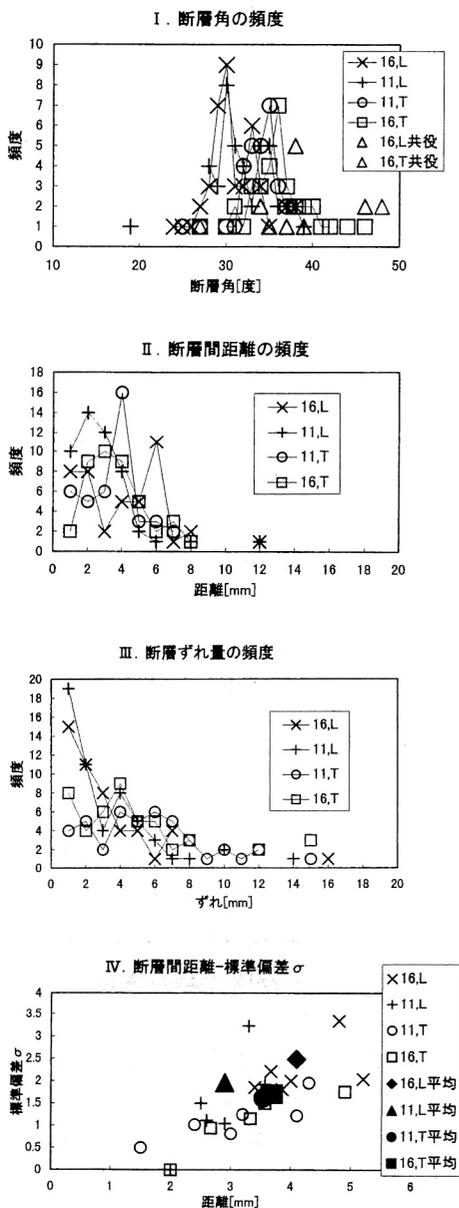


図4 断層実験測定結果

③ 断層のずれについては、柔らかいA, Bで小さなずれが目立ち、C, Dではずれの量が少し大きくなる。全体に大きいずれに向かって単調減少する。

5. 関連実験と議論

(1) 粉の内部摩擦係数の測定と断層角

Hubbert (1951) では、砂の内部摩擦と断層角の関連を議論している。これに倣って、同じような実験を行った。

(2) 実験装置

塩ビパイプを切った容器（内径50mm, 長さ15mmと30mmのものを重ねる）の中に、小麦粉を入れ、上部のパイプ（長さ30mm）の中に落とし蓋を入れ、石などの重りを乗せる(W)。次にバネばかりで上部のパイプを水平に引き、パイプをずらす。この時、最初に動いた瞬間のバネばかりの目盛りを読み取り、記入する(F)。この測定で重りをいろいろと変更してくりかえす。この実験の写真と実験結果の一部を図5に示す。これによれば、重りとずらす力はほぼ比例する ($F = \mu W$)。これは内部摩擦に関するクーロンの法則と呼ばれている⁴⁾。さらに砂の実験の逆断層の傾斜角θと内部摩擦係数μ（および内部摩擦角φ）は次の式で結ばれる⁵⁾。

$$\mu = \tan \phi \quad \phi = 90 - 2 \times \theta$$

小麦粉を用いた本実験ではμは図5より0.3~0.4となり、これに呼応するφは17~22度、θは34~37度となり、C, Dの例と調和的となる。しかし、測定値は経験上、小麦粉の詰め方やバネばかりの引っ張り方に大きく左右される。大きな動きの前に小さなプレスリップが見られることも多く、どの時点での値を読むか判断に迷うことも多い。したがって数値の再現性は乏しく、一つの参考実験として位置付けた方がよい。

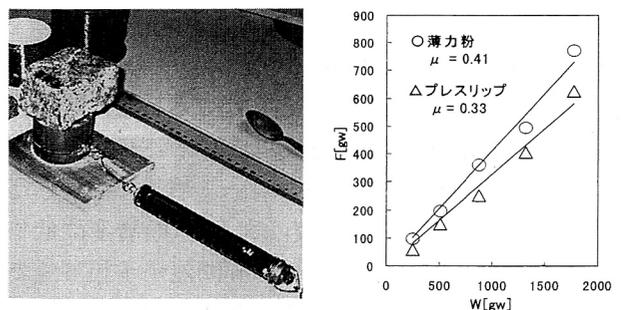


図5 内部摩擦測定実験（左）と結果の一部（右）

(3) 断層実験全体の問題点

断層の形態は小麦粉の詰め方にも大きく左右される。わざと小麦粉を不均等に詰めた実験では、特に断層間距離が大きくばらつく結果となった。A, BがC, Dに比べばらつきが大きいのは、ゆるい詰め方のため、小麦粉の不均等の影響が強く出ていることを示唆する。また、断層面は、立体的には船底型の上に凹の形を示し、ケースの底や壁などでの摩擦の影響が出ていると考えられる。さらに、左右の壁で断層の形態が大きく異なることもあり、上記で測定したパラメータの意味を根底から覆すことになりかねない。したがって、本実験では各モデルをそれぞれ10個ずつ準備したが、定量的な議論には標本数を増やす必要がある。これらは今後の課題である。

6. 実験と地学教材への発展

本稿の実験はあくまでモデル実験であり、露頭で見られる断層の形成や地震発生のメカニズムと直接結び付けるのは危険である。しかし、その限界を踏まえた上でなら、様々な地学現象との関連を議論することができる。まず、断層の形態だけに限定すると、このモデルは小・中学校では、断層や「山がなぜできるか」という疑問に対する一つの興味付けとして面白い。高等学校では、プレートテクトニクスの単元で“付加体”の形成をうまく説明する教材にもなる。また、断層の破壊の結果生じる地震発生との関連にも発展する。次にこれらについて述べる。

(1) 断層の発生と圧力変化

手で板を押していくと、断層ができる前後で地層を押す板に対する抵抗力が微妙に変化するようには思える。これを実証するため、モータードライブで駆動する同種の器械を作り、地層内部の圧力変化を実証しようとしたが、粉体内部の不均質と附着性に阻まれ再現性が乏しかった⁶⁾。しかし、地震の前後で地下の応力が変化することが議論されており、この精密な測定は今後の課題としたい。

(2) 地震の周期性や予知と関連して

地震が一つの断層で繰り返し起こることに関連して最近、time predictable model⁷⁾が注目されている。これは、一つの断層やプレート境界に注目したとき、そこに発生する地震の大きさ(断層変位量で表される)で次の地震までの時間間隔が予想可能であるという仮説である。これにモチーフを得て、断層実験の断層間隔(D)とずれ(d)の累積変位量を時間順にプロットしたのが図6右である。実験の方は、断層が次々に場所をジャンプしていくため単純な比

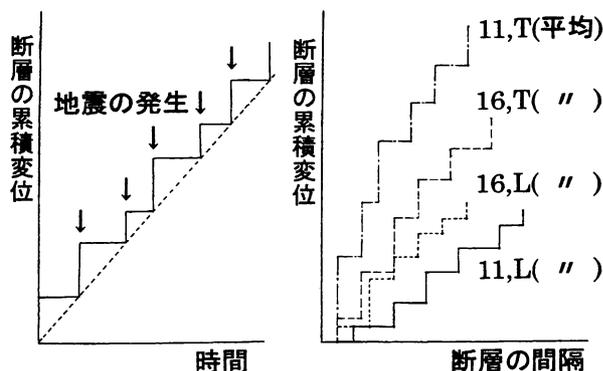


図6 A. Time predictable model B. 本実験の断層の間隔とずれの累積グラフ

較はできないが、よく似たグラフが書けるところが非常に興味深い。実験でも断層の生じる瞬間が地震の起こる瞬間と類推し、実験をしながら次に生じる断層(地震)の位置や時間を予測してみる。次の断層にジャンプする時間の方は、今動いている断層の動きが止まった頃と概ね予測できるが、その位置の予測は、粉の不均質の程度が大きくなるほど難しくなる。以前に地震予知の難しさを示した⁸⁾が、実験を通して地震の周期性という点にも注目し、改めて地震予知の問題に触れるのも興味をそそると思われる。

7. おわりに

小麦粉を用いた簡単な断層実験を紹介した。砂の実験に較べても地層や断層の複雑な構造やメカニズムを手軽に、また子細に観察できる利点は大きい。教室や家庭でまず行ってみて、野外実習に出かけたときなどの、現物の断層露頭の前での議論につなげてほしいと考えている。ただ定量的な評価は本論で記したように粉体の複雑な物理特性が災いし、一筋縄ではいかない。その点はむしろ今後の課題実験としての広がり期待できるのでないかと思っている。

〈文献〉

- 1), 4), 5) Hubbert, M.K.: Bull. Geol. Soc. America, 62, 355-372 (1951)
- 2) 島津康男: 地球内部物理学, p.80, (1966)
- 3) 岡本義雄: 日本地震学会広報紙「なるふる」, 13, 7 (1999)
- 6) 岡本義雄: 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 CDROM (1999)
- 7) 島崎邦彦・長浜裕幸: 科学, 65, 241-256 (1995)
- 8) 岡本義雄: 大阪と科学教育, 11, 21-26 (1997)