

# 粉体中に3タイプの断層を形成できる 組立て式万能地層変形モデル実験装置

山下 清次\*・川村 教一\*

## Formation of Three Types of Faults in Powder Utilizing the Prefabricated Universal Experimental Apparatus for Educational Use

YAMASHITA, Seiji\*; KAWAMURA, Norihito\*

### Abstract

The authors developed a new method of forming lateral faults utilizing the prefabricated model experiment device of deformation in powder. The method can make both of right-lateral and left-lateral faults easily. This device may be useful for high school earth science classes. Finally, we can make normal, reverse and lateral faults in powder using a set of the device.

キーワード：褶曲，正断層，逆断層，横ずれ断層

**Key Words** : *folding, normal fault, reverse fault, lateral fault*

### 1. はじめに

筆者らはこれまでに、小・中学校理科の教材を想定した、地層変形、特に断層のモデル実験装置を工夫してきた。このうち、山下・川村(2014)、川村・山下(2015)では、地層の褶曲と逆断層を岡本(1999, 2000)による方法と同様に形成できる、製作費の安価な組立て式実験装置を開発した。山下ほか(2016)では、先のモデル実験装置を改良することで正断層を形成できることを紹介した。川村・山下(2016)、川村ほか(2016)では、この褶曲・逆断層を形成するモデル実験装置が、横ずれ断層を形成させうることを示した。これら一連の開発により、一式の組立て式モデル実験装置で、正断層、逆断層、横ずれ断層のすべてを再現することが可能となった(山下・川村, 2016)。本報では、目的別の実験装置の用法を整理して機能と使用法の特徴を明らかにするとともに、川村・山下(2016)、川村ほか(2016)では概要を述べるにとどまっていた横ずれ断層形成におけるモデル実験装置の性能評価について紹介する。

### 2. 本実験装置の特徴

#### (1) 基本構造

モデル実験装置の基本構造は川村・山下(2015)に示したように、おおよそ次のような構造である。

後で述べるように、地質体を形成する実験装置は、実験槽とモデルの地質体(地層など)、地層に応力を与えるための板から構成される。実験槽の側面は、地質体を観察するため、無色透明な塩ビ板もしくはアクリル板であり、底部には比較的長い角材を、側部片側には短い角材を用いる(図1)。長短の角材1本ずつを用いてL字型に組んだ角材を2枚の塩ビ板などで挟み込み、図2のようにダブルクリップで固定する。板材(実験槽内に入れる中板)は、長方形(逆断層・横ずれ断層形成用)、もしくは2種の台形の組み合わせ(正断層形成用)のいずれかを使用する。また、白色の地質体には珪砂を粉碎したシルトサイズの岩石粉(北日本産業製、商品名:ファインサンド、平均粒径10~14 $\mu$ m)を、茶色の地質体にはココアパウダー(森永製菓製、商品名:純ココア)を使用する(川村・山下, 2015)。

#### (2) 用途に応じた装置の組立て

表1は、これまで公表した正断層、逆断層をそれぞれ

\* 秋田大学教育文化学部  
Faculty of Education and Human Studies, Akita University

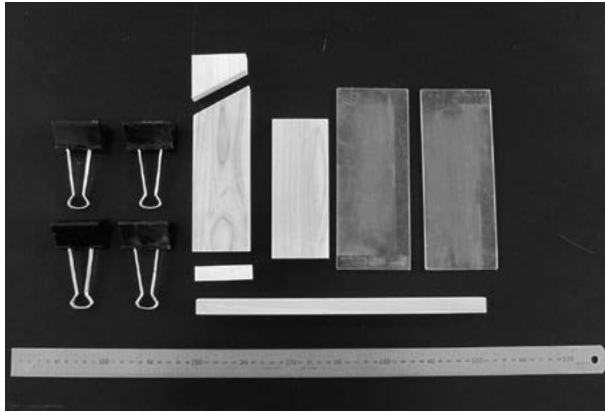


図1 モデル実験装置の部品一式

左から、ダブルクリップ、切り出した板材と角材、亚克力板（画面下の定規は60cm長さ、部品寸法は図3参照）

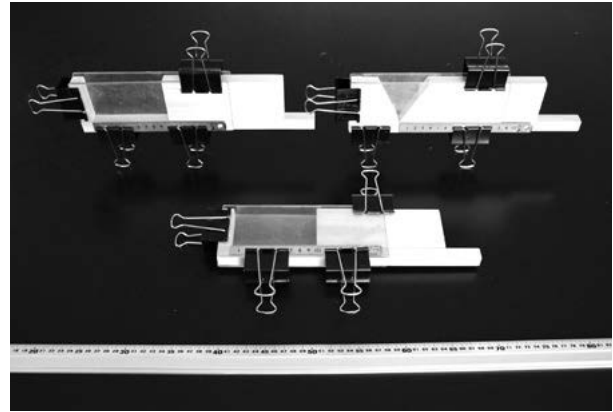


図2 万能地層変形モデル実験装置組立て3方式

左上：逆断層形成用，右上：正断層形成用，下：横ずれ断層形成用

形成できるモデル実験装置の構成に、今回詳述する横ずれ断層形成のための実験装置についても加え、3方式を比較したものである。

### 1) 褶曲（背斜）・逆断層形成

#### ①モデル地質体変形のしくみ

岡本（1999, 2000）が用いた方法で、地質体としての粉体を圧縮することにより、地層に褶曲や逆断層といった変形を起こすことをねらいとする、簡易な3軸圧縮実験である（図4（a））。

逆断層の形成理論（Andersonの理論）では、鉛直方向の主応力よりも、水平方向、例えば南北方向や東西方向の2つの主応力の方が大きくなれば逆断層が形成される（ショルツ, 2010）。

川村・山下（2015）では、実験装置内の一方の側面から差し込む板材（中板）により粉体を圧縮することで水平方向に応力 $\sigma_1$ を与え、粉体を左右から挟む塩ビ板は、 $\sigma_1$ に対し直交する水平面内で封圧による $\sigma_2$ を与える。 $\sigma_1$ に直交する鉛直面内では、実験装置底面から封圧による応力（ $\sigma_{3B}$ と呼ぶことにする）が与えられるが粉体の上方は開放されているため、上方からの封圧（主に大気圧に起因する）による応力（ $\sigma_{3T}$ と呼ぶことにする）は小さい。つまり、実験装置内の応力条件は $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_{3B} > \sigma_{3T}$ となり、十分に $\sigma_1$ を与えた時、鉛直上

向きに破壊が起こることが期待される。その際、せん断破面として逆断層が観察される。

なお実験を行うと、粉体内全体での応力条件は均一にはならないようで、差し込んだ板材に近い部分に集中して変形が見られる。

#### ②実験装置の操作

変形を起こすために実験装置内に1枚の長方形の板材（押し板）を長い角材上に乗せて、水平方向に動かせるようにする（図2左上）。この板材と短い角材で挟まれた空間に次に述べる粉末を用いて地質体（水平な地層）をつくり、板材で水平方向に押すことにより地層変形を起こさせる（川村・山下, 2015）。

#### ③モデル地質体の充填

川村・山下（2015）の手順では、地質体である白色の地層は厚さ5mm程度、茶色の層は厚さ1mm程度とし、3層の白色層中に2枚の茶色層を挟入するように製作した。5枚の地層の層厚は約17mmとなる。鍵層となる地層（茶色層）が2枚以上あるほうが観察しやすいことが、経験的にわかっている。

### 2) 正断層形成

#### ①モデル地質体変形のしくみ

正断層の形成にかかるAndersonの理論では、鉛直方向の主応力の方が、水平方向の2つの主応力より大きく

表1 用途に応じた地層変形モデル実験装置の3方式のセッティング

形成する断層	正断層	逆断層	横ずれ断層
中板形状・枚数	台形の板2枚	長方形の板1枚	
装置の設置向き	縦置き		横置き
セットする地質体（側面の形状）	水平層（逆三角形板状）	水平層（直方体状）	垂直岩脈のある岩体（直方体状）
参考文献	山下ほか（2016）	山下・川村（2014） 川村・山下（2015）	川村・山下（2016）

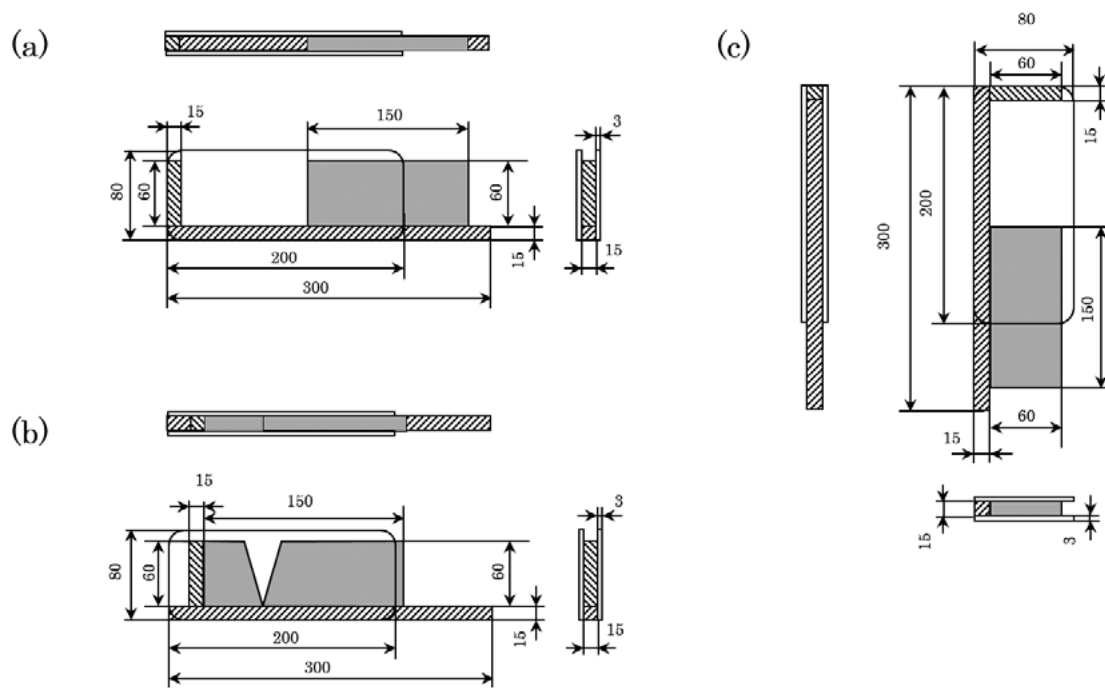


図3 地層変形モデル実験装置設計図

- (a) 圧縮型（逆断層形成）（単位 mm，以下同様）上：平面図，下：正面図，右：側面図  
 (b) 引張型（正断層形成）上：平面図，下：正面図，右：側面図  
 (c) 圧縮型（横ずれ断層形成）左：正面図，中央：平面図，下：側面図

なれば正断層が形成される（シヨルツ，2010）。

正断層は，岩石を3軸圧縮する際（図4（b））に鉛直方向に応力 $\sigma_1$ を与えてできるせん断破面に相当する。モデル実験では，鉛直方向に圧縮を加えるために，地層である粉体に作用する重力を利用する。地層に重力を加えて変形させるために，地層底面を支える「基盤岩」モデルの板材を，実験槽から外す向きに移動させる過程で水平方向の封圧 $\sigma_3$ を減少させ，鉛直下向きの応力を相対的に大きくさせて，粉体内にせん断破面を形成させるものである。

#### ②実験装置の操作

実験装置（図2右上）内の左右2枚の基盤岩層に挟まれたV字形の空間に白色と茶色の細粒の粉末を用いて水平な地層を作る。モデル基盤岩を引き離していくと，基盤岩上に堆積している非固結の地層がゆっくりと沈降し，その際に正断層が形成されるなどの地層の変形が起こることが期待できる（山下ほか，2016）。板を引き抜く手順を繰り返しながら実験を継続させるには，板材を少し引き抜いては，上から白色・茶色の粉末（地層構成物質）を堆積させて補充する。

#### ③モデル地質体の充填

山下ほか（2016）では，白色の地層は厚さ10mm程度，茶色の層は厚さ数mmとし，4枚の白色層中に3枚の

茶色層を挟在するように製作した。これら7枚の地層の実験前の層厚は，約70mmとなる。山下ほか（2016）では変位がより明瞭に観察できるように3枚の茶色層を挟在させたが，1～2枚でも正断層形成は可能である。

#### 3) 横ずれ断層形成

##### ①モデル地質体変形のしくみ

Andersonの理論では，鉛直方向の主応力の大きさが，水平方向の2つの主応力の中間であれば横ずれ断層が形成される（シヨルツ，2010）。

横ずれ断層を再現するために，先述の逆断層形成のモデル実験装置を， $\sigma_1$ の軸に対して90度回転させて行う。つまり，先の実験装置を横倒しにして設置し，粉体に圧縮を加えるものである（図4（c））。逆断層形成の場合と同様，実験装置の一方の側面から水平方向に差し込む板材により粉体を圧縮することで応力 $\sigma_1$ を与え，粉体を上下から挟む塩ビ板は，鉛直方向に封圧による $\sigma_2$ を与える。 $\sigma_1$ に直交する水平方向では，実験槽のうちの一方の側面から封圧は与えられるが他方は開放されているため，開放側の封圧 $\sigma_3$ はもっとも小さくなる。つまり，実験装置内の粉体では $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ となり，Andersonの理論で示されたように，地質体は実験槽の開放された側方に変位する。その際，せん断破面として横ずれ断層が観察される。応力 $\sigma_1$ を発生させるために押し込む板

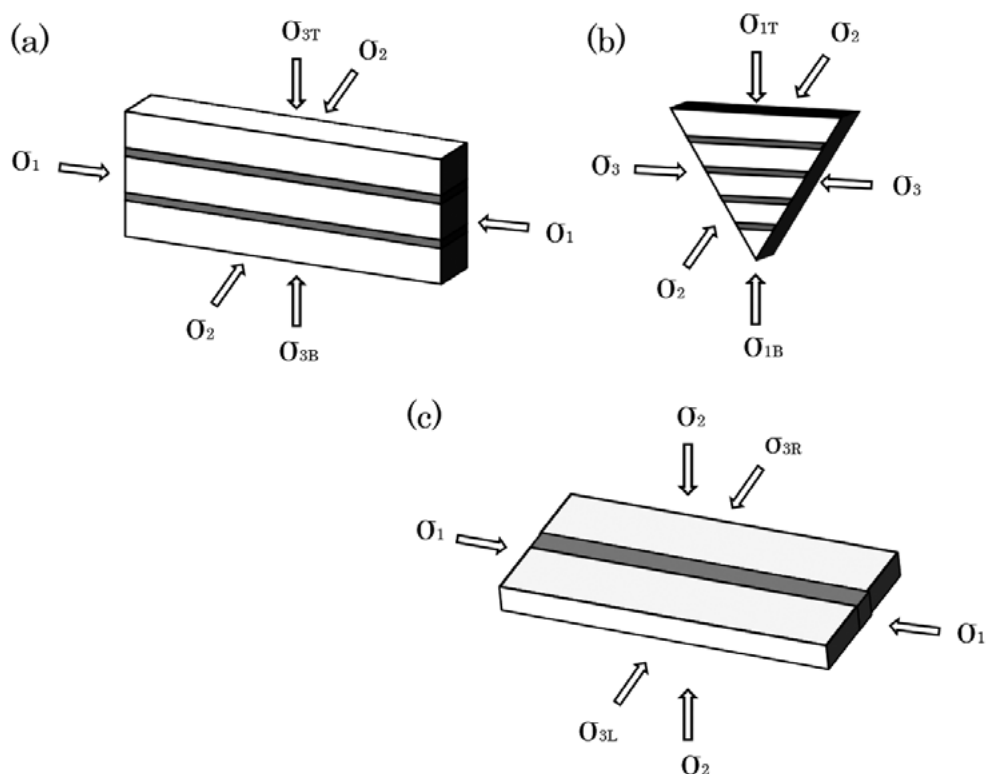


図4 モデル実験装置内の地質体の応力

(a) 圧縮型(逆断層形成)装置の場合, (b) 引張型(正断層形成)装置の場合,  
(c) 圧縮型(横ずれ断層形成)装置の場合

材の差し込み方向に対し実験装置の左側を閉鎖して右側を開放した場合、左側に封圧 ( $\sigma_{3L}$  と呼ぶことにする) があり、右側 ( $\sigma_{3R}$  と呼ぶことにする) は大気圧しかないので、実験装置内の粉体での応力条件は  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_{3L} > \sigma_{3R}$  となり、十分に  $\sigma_1$  を加えた時、変形した地層のうち板材に近い部分が押し込んだ方向に対し右方に変位する。せん断破面である横ずれ断層は  $\sigma_1$  に斜交して発達し、押し込みの方向に対して断層手前側ブロックが右方に変位するので、左横ずれ断層となる。一方、押し込む板材の進行方向に対し実験槽の右側を閉鎖して左側を開放した場合、右横ずれ断層が形成される。

#### ②実験装置の操作

逆断層形成の時と同じ装置を用い、板材と短い角材で挟まれた空間に色が異なる粉末を用いて地質体をつくる。その後、装置全体を横倒しにして、板材で水平方向に押すことにより地質体に変形を起こさせる。

#### ③モデル地質体の充填

先述の地質体が水平層を想定しているのに対し、本実験では垂直な岩脈が貫入している岩体を想定した地質体を作る。製作手順は、川村・山下 (2015) とほぼ同様である。白色の地質体は厚さ 3 cm 程度の幅、茶色の地

質体は幅 5 mm 程度とし、2枚の白色部分中に1枚の茶色層を挟在するように製作した。茶色層は変位を確かめるためのマーカーとなる。これら3枚の地質体の実験前の幅は、約 65mm となる (図5, 6)。

### 3. 横ずれ断層形成モデル実験

#### (1) 実験の目的

ここでは、地質体を圧縮した際の変形の様子、特に横ずれ断層の形成状況 (断層の本数や軸応力の向きに対する角度) について明らかにし、地質体の変位が明瞭に観察できるか、理科教材としての適切性の視点から評価するために実験を行った。

#### (2) 実験手順

図3 (c) に示した装置を用い実験した。右・左横ずれ断層の実験は各 20 回ずつ行った。実験では押し板を 1 cm ずつ押し込み、地層変形の様子などを観察するようにした。押した距離が 3 cm に達した時点で操作を終了し、変形した地質体の様子を観察した。

粉体中に3タイプの断層を形成できる組立て式万能地層変形モデル実験装置

表3 横ずれ断層形成実験における断層数および断層の角度

(a) 右横ずれ断層, (b) 左横ずれ断層

(a) 左側開放

実験回数	移動量1cmごとの断層数			軸応力方向と断層のなす角度[°]					
	1[cm]	2[cm]	3[cm]	断層A	断層B	断層C	断層D	断層E	断層F
1	0	2	2	45	45				
2	0	3	3	50	50	45			
3	0	2	2	50	50				
4	1	2	2	50	50				
5	0	1	2	50	50				
6	1	2	3	45	45	45			
7	0	2	2	55	55				
8	0	1	2	45	45				
9	2	3	3	40	40	50			
10	2	3	3	40	40	50			
11	0	1	1	50					
12	0	2	3	50	50	50			
13	1	2	2	45	45				
14	0	2	2	45	45				
15	0	1	2	45	45				
16	1	2	2	45	50				
17	0	3	4	50	50	50	50		
18	0	2	2	50	55				
19	0	2	3	45	45	45			
20	0	3	3	50	50	50			
平均	0.40	2.05	2.40						47.6

(b) 右側開放

実験回数	移動量1cmごとの断層数			軸応力方向と断層のなす角度[°]					
	1[cm]	2[cm]	3[cm]	断層A	断層B	断層C	断層D	断層E	断層F
1	2	4	5	40	45	45	50	60	
2	0	2	4	50	60	50	60		
3	1	3	5	55	60	55	50	60	
4	0	2	4	50	50	50	60		
5	0	2	3	50	50	50			
6	0	1	3	50	50	50			
7	0	2	3	50	50	50			
8	1	3	3	45	50	50			
9	0	0	3	50	50	55			
10	1	2	3	50	50	50			
11	0	4	6	50	60	60	50	50	50
12	0	3	4	50	50	50	50		
13	0	4	4	50	60	50	50		
14	0	1	2	55	50				
15	0	3	3	50	50	50			
16	0	2	3	50	50	60			
17	0	1	4	50	50	50	50		
18	0	1	2	60	60				
19	0	1	2	50	55				
20	0	2	2	55	60				
平均	0.25	2.15	3.40						52.0

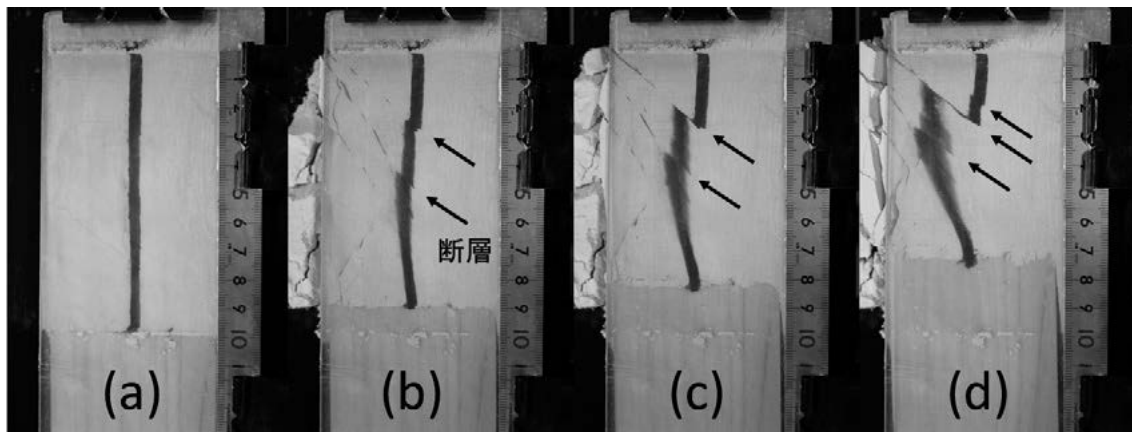


図5 圧縮型(横ずれ断層形成)地層変形モデル実験装置による右横ずれ断層の形成  
(a) 変形前, (b) 押し板移動量1cm, (c) 同2cm, (d) 同3cm

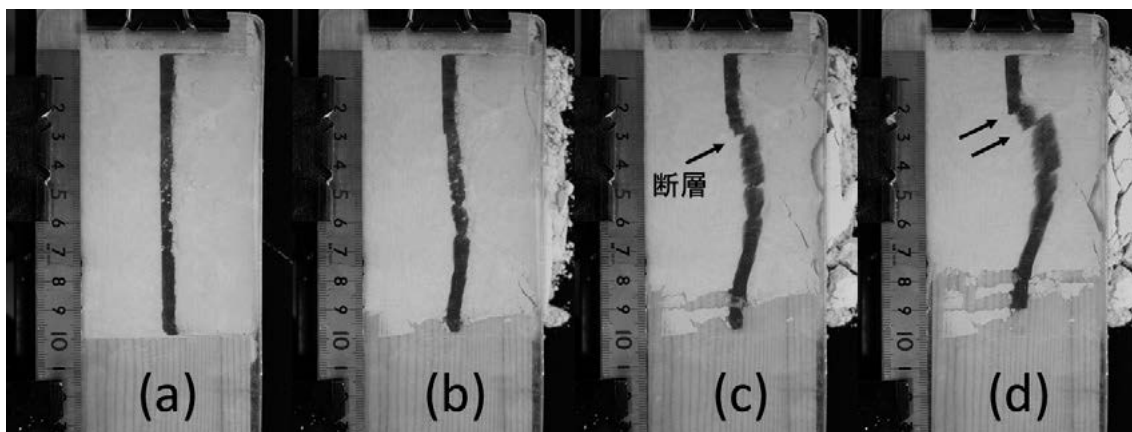


図6 圧縮型(横ずれ断層形成)地層変形モデル実験装置による左横ずれ断層の形成  
(a) 変形前, (b) 押し板移動量1cm, (c) 同2cm, (d) 同3cm

### (3) 結果

#### 1) 右横ずれ断層の様子

図5の(b)は押し板を1cm押し込んだ時点の様子を示している。地質体の様子を見ると中央付近に2条の右横ずれ断層が見られ、変位量は2.5mm程度である。マーカーである茶色層を見ると、わずかに装置の開放側に膨らんでいる様子がみられる。再度1cm押し込むと形成された断層の変位量が2.5～7.5mm程度と大きくなるとともに、断層よりも押し板側(図5画面下方)の地質体が開放側に向けて膨らんでいる様子が見える(図5(c))。さらに1cm押し込むと2条あるうちの一方の断層の変位量がさらに大きくなる(図5(d))。

表3(a)には、20回分の実験結果を示す。これを見ると、上記の実験のように、押し板を押しこむたびに形成される断層が増える傾向にあり、3cm押し込むことで平均2.4条(範囲:1～4条)の右横ずれ断層が形成される。形成された断層の伸びる角度は軸応力の方向に対して平均約48度(範囲:40～55度)である。

#### 2) 左横ずれ断層の様子

図6(c)は押し板を2cm押し込んだ時点の様子を示している。地質体の様子を見ると中央付近に1条の左横ずれ断層が見られ、変位量は2.5mm程度である。さらに1cm押し込むと新たに1条の断層が形成されている(図6(d))。

表3(b)には、20回分の実験結果を示す。これを見ると、右横ずれ断層形成の実験のように、押し板を押しこむたびに形成される断層が増える傾向にあり、3cm押し込むことで平均3.4条(範囲:2～6条)の左横ずれ断層が形成される。形成された断層の伸びる向きの角度は軸応力の方向に対して平均約52度(範囲:40～60度)である。

#### (4) 実験結果の比較

右横ずれと左横ずれの場合で、断層の形成数や軸応力に対する角度に差異があるように見える。これは、地質体を充填して押し固める際の加圧に差があった可能性があり、圧密の度合いが地質体変形のように若干変化させる可能性がある。

#### (5) 成果

以上の実験結果から本実験装置を用いたときの横ずれ断層の再現率は100%であり、失敗することがきわめてまれであろうことは教材として重要な性能である。本実験の手順では、形成された断層の変位量は数～20mm程度であり観察は十分可能である。

## 4. 課題

今回開発したモデル実験装置を教材として高校生を対

象に実践したところ、高校生自身による実験装置、地質体形成、実験の実施と観察など一連の教育活動が支障なく行えた。今後は、本実験装置を用いた指導における成果を議論する必要がある。また、本実験装置を学校の授業において活用するためには、教員が演示実験において利用するときや、生徒が実験で利用する際に、比較的簡単、短時間で準備ができることが必要となる。このことを踏まえ、教材として普及するときの実験手順をさらに検討したい。

## 謝辞

本研究の費用の一部は、JSPS平成28年度科研費(奨励研究, 課題番号16H00212, 山下清次)を使用した。また、実験は秋田大学教育文化学部地学研究室の石水英梨花さんに手伝っていただいた。ご支援くださった関係各位に感謝する。

## 参考文献

- ショルツ, C.H. (2010): 地震と断層の力学第二版. 柳谷 俊・中谷正生訳, 古今書院, 448p.
- 川村教一・山下清次 (2015): 児童生徒が持つ地層変形概念: 組立て式地層変形モデル実験装置による粉体の変形実験結果をもとにして. 秋田大学教育文化学部教育実践研究紀要, **37**, 37-45.
- 川村教一・山下清次 (2016): 粉体中に横ずれ断層を形成する組立て式モデル実験装置の考案. 日本地球惑星科学連合2016年大会, G04-P02.
- 川村教一・山下清次・石水英梨花 (2016): 粉体中に横ずれ断層を形成する組立て式モデル実験装置の性能試験. 日本地質学会第123年学術大会講演要旨, 284.
- 文部科学省 (2008a): 小学校学習指導要領解説理科編. 大日本図書, 東京, 105p.
- 文部科学省 (2008b): 中学校学習指導要領解説理科編. 大日本図書, 東京, 149p.
- 文部科学省 (2009): 高等学校学習指導要領解説理科編理数編. 実教出版, 東京, 232p.
- 岡本義雄 (1999): ココアと小麦粉で断層を作ろう. なみふる, **13**, 7.
- 岡本義雄 (2000): 小麦粉を用いた断層モデル実験. 大阪と科学教育, **14**, 13-16.
- 山下清次・川村教一 (2014): 組み立式断層モデル実験装置の製作. 日本理科教育学会第53回東北支部大会論文集, 11.
- 山下清次・川村教一 (2015): 簡易正断層形成モデル実験装置の考案. 日本理科教育学会第54回東北支部大会論文集, 30.
- 山下清次・川村教一 (2016): 正・逆・横ずれ断層を形成できるユニバーサル地層変形モデル実験装置の考案. 日本理科教育学会第55回東北支部大会論文集, 19.
- 山下清次・川村教一・金田皓樹 (2016): 粉体中に正断層モデルを形成する組立て式地層変形モデル実験装置の考案. 秋田大学教育文化学部研究紀要 教育科学, **71**, 71-76.