

## — 報告 —

## ガウジ層のせん断強度に関する実験結果について

吉岡 直人<sup>1,2\*</sup>, 堀 高峰<sup>2</sup>, 阪口 秀<sup>3</sup>

室内実験において、ガウジ層を挟む模擬断層にせん断力を加え、ガウジ層のせん断強度を測定する実験を行った。使用したガウジ層を構成する物質は、石英砂と大理石を粉碎して作成した方解石砂である。粒径はいずれも、0.125-0.250 mm であり、ガウジ層の厚さは2 mm または3 mm である。剛性の低いバネを用いて断層の上盤に力を加えたため、ほとんど例外なく、スティックスリップが発生した。その最終的なすべりの前には、前兆的なゆっくりとしたすべりと、これに伴うダイラタンシーが発生した。すなわち、上盤は持ち上がり、ガウジ層が膨張（ダイラタンシー）しているように見えた。この実験とは別に行った光弾性物質を用いた実験結果を考慮すると、せん断力の増加によってガウジ層内部には応力鎖（強い応力でつながった柱状の粒子群）が発生し、次第に斜めの方向に発達するようになり、最終的にこれが回転してダイラタンシーが発生するのではないかと推察された。せん断強度はガウジ層が薄いほど大きく、また石英砂より方解石砂の方が大きい値を示した。これらの事実はガウジ層内部に強力な柱状の応力鎖ができ、この柱の強度がガウジ層のせん断強度を決定することを示唆している。実際の断層のガウジは粒径がフラクタル分布をしていることもあり、このモデルがどこまで適用できるかは今後の課題である。

**キーワード：**ガウジ層, せん断強度, ダイラタンシー, 前兆すべり, 摩擦, 応力鎖

2011年3月28日受領；2011年6月8日受理

- 1 公益財団法人深田地質研究所
- 2 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト
- 3 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

\*代表執筆者：

吉岡 直人  
 公益財団法人深田地質研究所  
 〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12  
 03-3944-8010  
 yoshi@fgi.or.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Report —

## The experimental results of the shear strength of gouge layers

Naoto Yoshioka<sup>1,2\*</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>, and Hide Sakaguchi<sup>3</sup>

A series of laboratory experiments was performed on the shear strength of simulated gouge layers. The gouge layers were composed of quartz sand or calcite sand (particle size 0.125-0.250 mm) with 2 or 3 mm thickness. A stick-slip was occurred at the end of each experiment without exception because the upper block of the fault was pushed with a low stiffness spring. At the final stage of the experiments, a precursory slip and a dilatancy were observed prior to the stick-slip. This result and an experimental result using a photo-elastic material strongly suggest that stress chains (columnar structures with strong stresses) are created inside the gouge layer. They are gradually inclined to sustain the external additional shear force and finally rotated, lifting up the upper block. This seems to be the mechanism of the dilatancy in our experiments. The shear strength of the gouge layers is stronger for thinner layers than thicker layers and for calcite sand than quartz sand. These facts also suggest that the strength of stress chains determines the shear strength of the gouge layers. It will be a future problem whether this mechanism is applicable to the actual faults partly because of the fractal size distribution of fault gouge.

**Keywords:** gouge layer, shear strength, dilatancy, precursory slip, friction, stress chain

---

Received 28 March 2011 ; Accepted 8 June 2011

1 Fukada Geological Institute

2 Earthquake and Tsunami research project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

3 Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

\*Corresponding author:

Naoto Yoshioka

Fukada Geological Institute

2-13-12 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0021, Japan

Tel. +81-3-3944-8010

yoshi@fgi.or.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## 1. はじめに

ガウジとは、「断層運動に伴う破碎によって生じた細粒・未固結の断層内物質」(新版地学辞典, 1996)とされている。本研究は、このガウジによって構成されている層にせん断力が加わった時、どのような現象が生じ、その強度が何によって決定されるかを解明する目的をもって行われたものである。

ガウジは粉粒体であるから、はじめに粉粒体に関するこれまでの研究を概観し、その中で本研究の占める位置を明らかにしておきたいと思う。

粉粒体の性質や挙動に関する地球科学的な研究は、大きく分けて2つの分野で行われてきたのではないと思われる(もちろん工学や物理学の分野でも、粉粒体の研究は盛んに行われてきているが、ここでは紙面の都合上、必要に応じて引用するに止める)。すなわち、土質力学と地震学の分野である。

前者は古い歴史を持ち、1920年代にTerzaghiは土質力学(Soil Mechanics)の基礎となる論文を発表している(たとえば、Terzaghi, 1920)。この分野での大きな問題の一つは、土や砂といった、連続体としては扱えない、粉粒体を主体とする物質にせん断力が加わった時に生じる膨張(dilatancy)という現象の解明であり、その構成則の導入であったようである。このせん断力に伴う膨張という現象は、すでに19世紀の英国の物理学者であるReynolds(1885)によって見出され、はじめて'dilatancy'という用語が使われた。日本語でもダイラタンシー、ダイレイタンシー、ダイラタンシーなどと表記されて使われている。本報告ではダイラタンシーと表記することにする。この問題に最初に本格的に取り組んだのは、Rowe(1962)であろう。その後も多くの研究者によってダイラタンシーのメカニズムが議論されてきた(たとえば、Bolton, 1986; Vaid and Sasitharan, 1991; Schanz and Vermeer, 1996など)。

日本でも多くの研究がなされてきている。これらの研究は、大変優れた教科書として村山(1990)の「土の力学挙動の理論」にまとめられている。

粉粒体は連続体と異なり、その構成要素である個々の粒子が相対的に移動可能である。このため、ダイラタンシーという現象が発現すると思われるが、その発現メカニズムは多くの場合、粒子が隣接する粒子に乗り上げるというメカニズムで説明されている。しかしながら、粒子の大きさの分布や、粒子間に働く摩擦や粘性の大きさなど、生起する現象は複雑であり、これらすべてを統一する構成則は未だ完成されたものとはなっていないように見受けられる。せん断応力下にあるガウジ層の、個々の粒子に働く力を直接測定することは極めて困難であるが、円筒形の素材を用

いて2次元の積層を作り、これにせん断力を加えて接触角の分布の変化を測定したり(村山・松岡, 1971)、光弾性物質で同様の実験を行い、内部構造の変化を追跡した例がある(村山・松岡, 1970; Oda, 1974; Oda and Konishi, 1974; Matsuoka, 1983)。これらの結果から、ガウジ層内部の応力状態は一樣ではなく、柱状構造が発達し、これがダイラタンシーを含めて粉粒体の挙動や強度を決める要因になっていると考えられる。

ここで、一口にダイラタンシーといっても、実験の方法によって、その意味するところが異なる可能性があることに注意しなければならない。通常、土質力学で行われるせん断試験は、(1)せん断箱テスト(shear box test)と、(2)3軸テスト(tri-axial test)がある(Taylor, 1948; Rowe, 1962; Fedea, 1982)。前者では、剛性の高いせん断箱の中に粒状体を詰め、強制的にせん断を行い、せん断箱の上下運動の変位を測定し、ダイラタンシーの量を算出する。

これに対して後者は、ゴムジャケットの中にサンプルを封入し、封圧をかけた状態で軸圧を上げ、サンプル内部でせん断破壊を生じさせる。このとき、間隙水量の測定を行って体積変化を測定するのが通常行われる方法である。後述するように、われわれが行ったせん断試験は上記いずれの方法でもない。

最後に土質力学の分野で発展してきた有力な方法の一つに離散要素法(Discrete Element Method, DEMと略)があることに触れておかねばならないだろう(Cundall and Strack, 1979)。これは非常に有力な方法で、われわれもガウジ層内部の構造変化を解析する上で用いてきた(Yoshioka and Sakaguchi, 2006)。計算機の能力の向上とともに、これは今後も発展を続けるだろう。

次に、地震学の分野で行われてきた、ガウジ層を含んだ実験的研究を概観する。Dieterich(1981)は、いわゆるDieterich-Ruina(速度および状態依存)の構成則(Dieterich, 1979, 1981; Ruina, 1983)に登場する特徴的な長さ $D_c$ を決定する要因として、表面粗さに加えて、ガウジの粒径分布を議論している。その後も多くの研究が断層ガウジについて行われているが、代表的なものを挙げると、Morrow and Byrlee(1989), Sammis and Biegel(1989), Biegel et al.(1989), Morrow et al.(2000)などがある。これらは実際の断層に見出されるガウジの粒度分布がフラクタル分布をすることに関連して、その生成過程や、上記構成則との関連を議論したものである。Nakatani and Scholz(2004a, 2004b)は、200℃までの高温下での、断層ガウジの強度回復の問題を論じている。

米国ペンシルバニア州立大学のChris Maroneのグループは、彼がマサチューセッツ工科大学(MIT)に在籍していた時代から、断層ガウジについての多くの研究を行って

いる (たとえば, Mair and Marone, 1999; Karner and Marone, 2001; Frye and Marone, 2002; Anthony and Marone, 2005; Rathbun and Marone, 2010 など). これらの実験の多くは, 模擬ガウジを挟んだ模擬断層にせん断力を加えるシングルあるいはダブルダイレクト (サンドイッチ型) せん断装置を使ったもので, その意味では後述するように, われわれの行った実験に近い内容の実験である. しかし, 実験はすべり速度を急激に変えるステップ型の実験がほとんどで, この意味ではここで紹介するわれわれの実験とは異なっている. また Samuelson et al. (2009) では, 数 MPa の応力下でも, 速度増加の時にガウジ層にダイラタンシーが発現することが報告されているが, 速度をもとの遅い速度に戻すと, 体積はもとにもどる. これはせん断力をかけただけで膨張するという, 土質力学の分野でのダイラタンシーとは明らかに異なるメカニズムである.

ここまで, 土質力学の分野と, 地震学の分野で行われてきた実験的研究を概観してきたが, 両者で大きく異なる点は, ガウジ層すべり面にかかる垂直応力の大きさであろう. 土質力学の分野では 1 MPa 以下である. 数 kPa からせいぜい数 100 kPa の範囲である. これに対して地震学の分野で行われる実験は, 有効垂直応力 (垂直応力から間隙水圧を差し引いた応力) が, 小さくても数 MPa, 多くは数 10 MPa である. これは両者が対象とする地球内部の深度の違いを反映している.

以下に報告するわれわれの実験は, ガウジを挟んだ直接せん断実験であり, この意味では地震学の分野で行われている実験と同種であるが, 垂直応力の大きさは 1 MPa 以下であり, 土質力学の分野で行われている応力に近い.

実験方法は, 剛性の低いバネを用いて, 最終的にスティックスリップを発生させる, というもので, 地震学の分野では, ガウジを挟まない試料で行われてきたものに近い (たとえば, Ohnaka et al., 1986; Ohnaka and Shen, 1999; Iwasa and Yoshioka, 1998; Yoshioka and Iwasa, 2006).

このようにここで報告する実験は, 地震学, 土質力学の双方の特徴をもつものであるが, 実験手法は独特のものであり, 別の場で詳しく報告する光弾性物質を用いた実験結果とあわせて, ガウジ層のせん断力に対する振舞い, とくにダイラタンシーのメカニズムを明らかにすることを目的としている.

## 2. せん断実験

### 2.1. 実験装置と実験方法

#### 2.1.1. 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概要を示す. 速度を正確に制御でき

るリニアモーター (LM) を右方向に動かし, 板バネ (LS, stiffness 5100 N/m) を介して, 上盤 (UB, 真鍮製, 底面積  $13 \times 7 \text{ cm}^2$ , 重量 4.55 kg) の長手方向にせん断力を加える. リニアモーターの変位は水平変位計 (HDT1) によって測定される. ガウジ層 (GL) を挟んで下盤 (LB) の上に置かれた上盤の動きは, 2つの水平変位計 (HDT2, 3) によって測定される. 2つの水平変位計をつけることによって回転の成分も検出できる. 上盤の垂直方向の動きは, 3つのギャップセンサー (GS1は手前, GS2は右, GS3は向こう側) によって測定される. これらのセンサーにより, 上盤の動きは3次的に完全に把握することができる. 測定精度はいずれのセンサーもほぼ  $1 \mu\text{m}$  程度である.

せん断力は板バネに貼った歪ゲージで測定する. なお, 下盤と上盤の表面 (ガウジ層と接する部分) には, 凹凸を付けるため, 石英砂1層分をエポキシ系接着剤によって張り付けた.

#### 2.1.2. 実験手順

実験手順は以下の通りである. まずガウジを下盤の上に敷く. 下盤には高さ 5 mm の壁が4方を取り囲んでおり, この内部にガウジを 2 mm または 3 mm の高さに敷く. 上盤の進行方向に平行な壁は両者の幅が可変になっており, 上盤の幅より若干広くしてある. これは上盤と壁との摩擦を避けるためである. また壁と上盤の間にガウジ粒子が入り込み, これが摩擦を引き起こす可能性があるため, ガウジ粒子の最大粒径より若干広めの幅をもたせてある.

ガウジ層の厚さを一様にするために特製のへらで表面を整形し, 余分なガウジを除去する. 毎回このようにして表面整形し, 内部に残ったガウジの重量を測定した. 若干のバラツキはあるものの, 同種の試験では, 毎回ほぼ同様の

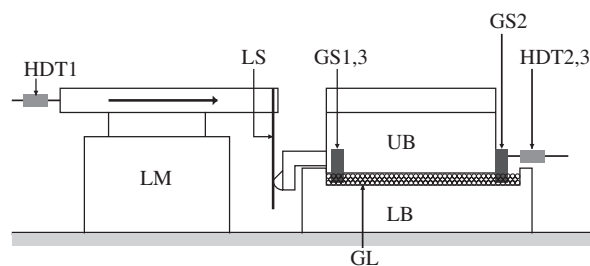


Fig. 1. A schematic illustration of the apparatus used in the experiments. LM: Linear Motor, LS: Leaf Spring, UB: Upper Block, LB: Lower Block, GL: Gouge Layer, HDT1: Horizontal Displacement Transducer 1 for LM movement, HDT2, 3: Horizontal Displacement Transducer 2 and 3 for UB movement, GS1, 2, 3: Gap Sensor 1, 2 and 3 for vertical movement of UB.

図1. 実験装置の模式図. LM: リニアモーター, LS: 板バネ, UB: 上盤, LB: 下盤, GL: ガウジ層, HDT1: リニアモーターの動きを測定する水平変位計, HDT2, 3: 上盤の水平変位計, GS1, 2, 3: ギャップセンサー (上盤の垂直変位計).

重量のガウジが敷かれた (Table 1 参照)。

このようにして敷いたガウジ層の上に上盤を載せ、バイブレータ (V-TECH 社製, 回転式ローラバイブレータ DAR-2 型) によって圧密を行う。バイブレータは上盤の上に乗せ、一定時間放置する。上盤の長さは最終的なすべりを考慮して、カウジ層の長さより 5 mm 短くなっているのので、この部分にはアルミ板を取り付け、バイブレータによる加振の終了後、取り外した。これによってガウジ層全体を一様に圧密することができる。Fig. 2 に圧密による上盤の沈降の様子を示す。赤, 黄, 緑は 3 つのギャップセンサーの出力であり、黒はその平均である。Fig. 2 (a) の場合は 3 つのギャップセンサーがほぼそろって沈降しているが、同 (b) の場合は緑 (GS3) が大きく沈降し、赤 (GS1) と黄 (GS2) の沈降が小さい。また (b) の場合には、赤と緑のノイズ振幅が大きい。黒 (平均) の振幅はさほど大きくなっていないのは、赤と緑が丁度逆位相になっているからである。つまり、赤の測定点と緑の測定点の間のある点を支点として、シーソー運動をしているものと思われる。(a) と (b) は同じ試料を用い、同じ手順によっているにも拘わらず、このような違いが出る。へらによるガウジ層表面整形の際のちょっとした違いがこのような違いを生み出していると思われるが、その違いが何によるのかは解明できていない。

### 2.1.3. ガウジ層を構成する物質

ガウジ層を構成する物質として、今回使用したのは、石英砂 (qsb と略, 粒径 0.125-0.250 mm) と方解石砂 (msc と略,

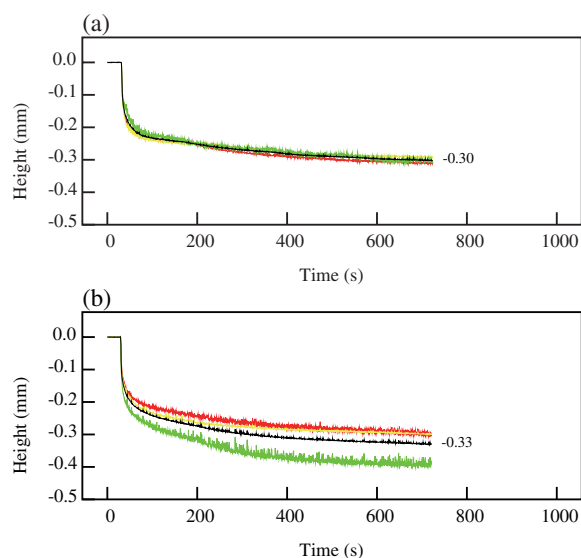


Fig. 2. Two examples of settling of the upper block by vibration. The gouge in the sample is quartz sand (diameter 0.125-0.25 mm, initial thickness 3 mm). See text for the differences between (a) and (b).

図2. バイブレータによる上盤の沈降の例。ガウジは石英砂 (粒径 0.125-0.25 mm, 初期層厚 3 mm)。 (a) と (b) の違いについては本文参照。

粒径 0.125-0.250 mm) である。

この 2 つの物質の固さを比較すると、モース硬度では、石英が 7, 方解石が 3 で、かなり石英の方が固い。また 1 軸圧縮強度 (封圧 0) は石英が 2400 MPa 程度であるのに対し、方解石は 80~130 MPa と 1 桁以上小さい (Handin, 1966)。

### 2.1.4. セン断試験とダイラタンシー

このように準備したガウジ層上の上盤に対し、リニアモーターを一定の速度で動かし、板バネを介してせん断力を加える。リニアモーターの変位速度は、 $6.9 \mu\text{m/s}$  に固定した。ガウジ層にかかる平均垂直圧は、4.9 kPa である。

Fig. 3 に、あるせん断試験 (試験名 a304, Table 1 (b) 参照) における上盤の水平変位、垂直変位のタイムチャートを示す。Fig. 3 (a) は水平変位、同 (b) は垂直変位、同 (c) は (b) を拡大したものである。(a) には 2 つの変位計の出力とその平均値 (黒) が示されているが、3 本は重なって平均値の黒のみが描かれているように見える。(b) と (c) には 3 本のギャップセンサーの出力 (赤, 黄, 緑) とその平均 (黒) が示されている。

この記録を見ると、このせん断試験では、初期の载荷で

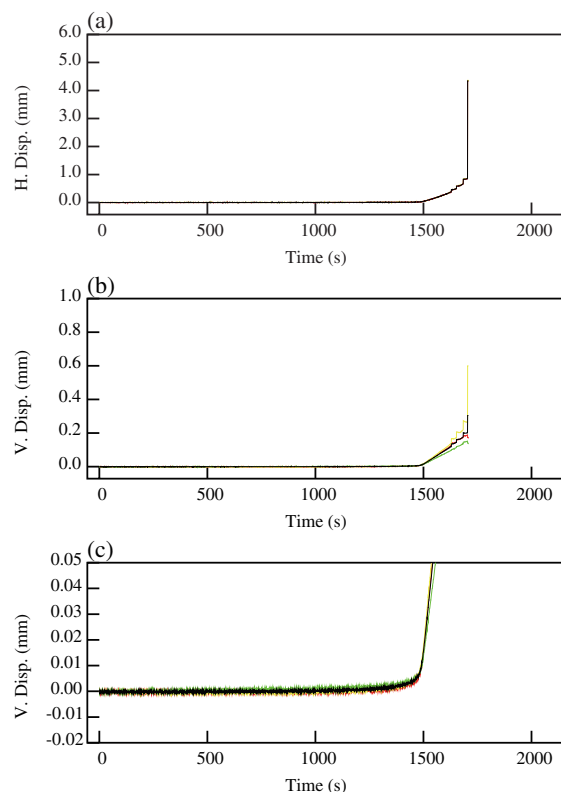


Fig. 3. Time charts of a shear test. (a) Horizontal displacement of the upper block. (b) Vertical displacement of the upper block. (c) Enlarged vertical displacement.

図3. セン断試験のタイムチャート。(a) 上盤の水平変位。(b) 上盤の垂直変位。(c) 垂直変位を拡大したもの。

Table 1. The parameters of the experiments.

表1. 実験パラメーター.

| (a) qsb 2 mm    |          |              |               |        | (c) msc 2 mm    |          |              |               |        |
|-----------------|----------|--------------|---------------|--------|-----------------|----------|--------------|---------------|--------|
| experiment name | weight g | strength kPa | subsidence mm | remark | experiment name | weight g | strength kPa | subsidence mm | remark |
| a130            | 18.364   | 3.32         | 0.25          |        | a122            | 18.949   | 3.52         | 0.26          |        |
| a131            | 18.700   | 3.32         | 0.25          |        | a123            | 18.833   | 3.14         | 0.20          |        |
| a155            | 17.682   | 3.27         | 0.26          |        | a124            | 18.866   | 3.20         | 0.22          |        |
| a156            | 17.823   | 3.45         | 0.26          | MS     | a125            | 18.642   | 3.34         | 0.21          |        |
| a204            | 18.236   | 3.22         | 0.26          | MS     | a126            | 19.289   | 3.54         | 0.23          |        |
| a205            | 17.815   | 3.33         | 0.22          | MS     | a127            | 19.246   | 3.39         | 0.21          |        |
| a206            | 17.606   | 3.20         | 0.26          | MS     | a128            | 19.105   | 3.65         | 0.19          |        |
| a306            | 18.511   | 3.32         | 0.24          |        | a215            | 18.824   | 3.37         | 0.26          | MS     |
| a307            | 17.898   | 3.19         | 0.27          |        | a316            | 19.034   | 4.10         | 0.22          | MS     |
| a308            | 17.986   | 3.19         | 0.25          |        | a317            | 19.166   | 3.86         | 0.23          | MS     |
| a309            | 18.017   | 3.13         | 0.27          |        | a318            | 19.055   | 4.04         | 0.20          | MS     |
| a310            | 18.026   | 3.24         | 0.27          |        | a319            | 18.898   | 3.45         | 0.22          | MS     |
| a404            | 18.501   | 3.41         | 0.22          |        | a320            | 18.912   | 3.65         | 0.24          | MS     |
| a405            | 18.110   | 3.31         | 0.23          |        | a412            | 18.723   | 3.52         | 0.21          | MS     |
| a406            | 17.913   | 3.41         | 0.24          | MS     | a413            | 18.392   | 3.42         | 0.22          |        |
| a407            | 18.332   | 3.44         | 0.25          |        | a414            | 19.024   | 3.25         | 0.20          | MS     |
| Average         | 18.095   | 3.30         | 0.25          |        | a415            | 18.603   | 3.53         | 0.19          | MS     |
| STD             | 0.317    | 0.10         | 0.02          |        | a416            | 18.314   | 3.56         | 0.18          | MS     |
|                 |          |              |               |        | a423            | 18.166   | 3.39         | 0.22          |        |
|                 |          |              |               |        | Average         | 18.844   | 3.52         | 0.22          |        |
|                 |          |              |               |        | STD             | 0.309    | 0.26         | 0.02          |        |

| (b) qsb 3 mm    |          |              |               |        | (d) msc 3 mm    |          |              |               |        |
|-----------------|----------|--------------|---------------|--------|-----------------|----------|--------------|---------------|--------|
| experiment name | weight g | strength kPa | subsidence mm | remark | experiment name | weight g | strength kPa | subsidence mm | remark |
| a132            | 31.112   | 2.94         | 0.28          |        | a119            | 34.001   | 3.13         | 0.32          |        |
| a133            | 31.899   | 2.93         | 0.28          |        | a120            | 33.556   | 3.11         | 0.28          |        |
| a134            | 31.406   | 2.91         | 0.31          |        | a208            | 32.341   | 3.02         | 0.27          |        |
| a201            | 31.175   | 2.94         | 0.30          |        | a210            | 31.993   | 2.93         | 0.30          |        |
| a202            | 31.201   | 2.98         | 0.29          |        | a213            | 33.054   | 2.99         | 0.29          |        |
| a203            | 31.341   | 2.90         | 0.28          |        | a216            | 33.460   | 2.93         | 0.32          |        |
| a301            | 30.795   | 3.08         | 0.33          |        | a217            | 32.313   | 3.00         | 0.24          |        |
| a302            | 30.692   | 2.98         | 0.35          |        | a311            | 32.686   | 3.05         | 0.29          |        |
| a303            | 30.785   | 3.02         | 0.32          |        | a312            | 32.886   | 2.94         | 0.25          |        |
| a304            | 30.842   | 3.05         | 0.30          |        | a313            | 32.574   | 3.06         | 0.27          |        |
| a305            | 30.917   | 3.04         | 0.28          |        | a314            | 32.650   | 3.19         | 0.25          |        |
| a401            | 30.582   | 3.20         | 0.32          |        | a315            | 32.813   | 3.26         | 0.25          |        |
| a402            | 30.582   | 3.18         | 0.23          |        | a408            | 32.258   | 3.09         | 0.31          |        |
| a403            | 30.582   | 3.20         | 0.32          |        | a409            | 32.608   | 3.12         | 0.27          |        |
| Average         | 30.994   | 3.02         | 0.30          |        | a410            | 33.068   | 3.06         | 0.31          |        |
| STD             | 0.383    | 0.11         | 0.03          |        | a411            | 32.176   | 3.04         | 0.26          |        |
|                 |          |              |               |        | a419            | 32.348   | 3.12         | 0.25          |        |
|                 |          |              |               |        | Average         | 32.752   | 3.06         | 0.28          |        |
|                 |          |              |               |        | STD             | 0.540    | 0.09         | 0.03          |        |

は上盤は動かず、1500秒あたりから水平および垂直変位がほぼ同時に発生し、最終的に激しいスティックスリップが生じていることが分かる。3つのギャップセンサーがそろって上向きの変位を示す (Fig. 3(b)) ということは、上盤が下盤にほぼ平行状態を保ったまま持ち上がるということであり、あたかもガウジ層が膨張したように見える。これが本せん断試験におけるダイラタンシーである。

### 2.1.5. せん断強度の定義

Fig. 4にリニアモーターの変位に対するせん断力の増加のグラフの一例 (試験名 a304, Table 1 (b) 参照) を示す。Fig. 4に示されているように、せん断力ははじめは線形的に増加するが、Fig. 3に示されているように、すべりが生じはじめると直線からずれ始め、最終的なスティックスリップでストレスドロップが生じる (激しいすべりが生じた場合、リニアモーターが異常停止する場合もある)。Fig. 4において、ストレスドロップが生じる直前のせん断応力をもって、せん断強度と定義する。

## 2.2. 実験結果

Table 1にこの報告で使用するすべての実験の、実験名、砂重量 (g)、せん断強度 (kPa)、パイプレータによる最終的な沈降量 (3つのギャップセンサーの平均値, mm) を示す。(a) 石英砂 (qsb) 初期層厚 2 mm, (b) 同 3 mm, (c) 方解石砂 (msc) 初期層厚 2 mm, (d) 同 3 mm である。備考欄 (remark) のMSは、スティックスリップ後、激しいすべり運動に制御が追い付かず、モーターが自動 (異常) 停止したことを示す。

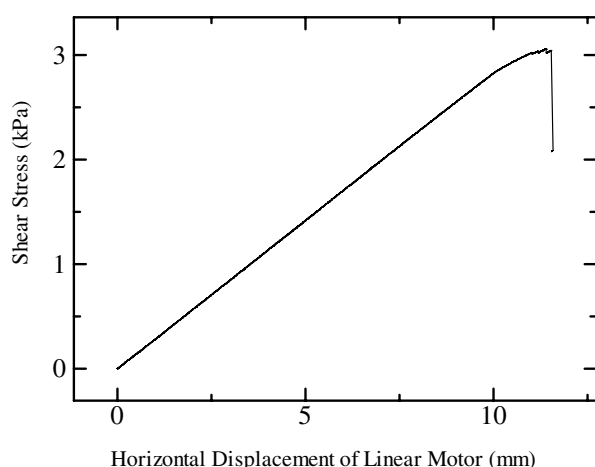


Fig. 4. Horizontal displacement of Linear motor vs. shear stress measured by strain gages on the leaf spring.

図4. リニアモーターの変位に対するせん断力。せん断力は、板バネに貼った歪ゲージによって測定。

各表の下には、砂重量、せん断強度、パイプレータによる沈降量の平均値 (Average) と、標準偏差 (STD) が示されている。

### 2.2.1. せん断強度

Table 1を見ると、それぞれの石種と層厚に対して、かなりのばらつきは見られるものの、2つのことが明確となった。

第一に、層厚が薄い方がせん断強度が大きいこと、第二に、同じ層厚であれば、方解石砂のほうが石英砂より、せん断強度が大きいことである。Fig. 5にこれを示す (初期層厚は見やすいように若干ずらして描いてある)。エラーバーは標準偏差の大きさである。

なお、パイプレータによる沈降量とせん断強度、砂重量とせん断強度には相関は見られなかった。

### 2.2.2. 前兆的変位とダイラタンシー

すでにFig. 3で見たように、この実験ではほぼ例外なく、最終的にスティックスリップが発生し、その前に前兆的なすべりとダイラタンシーが出現した。しかし、その発現の仕方は一様ではなく、Fig. 6に示すように、石英砂では小さなスティックスリップが連続して発生し、前兆的なすべりが階段状になるものが多くみられるのに対し、方解石砂ではこのような現象は全く見られなかった。(石英砂でも滑らかに進行するものもあった。) 小さなスティックスリップが生じると、垂直変位にも同様の小さなすべりが見られる。この原因については後に考察する。この前兆すべりとダイラタンシーによって、上盤はどのような動きをするか

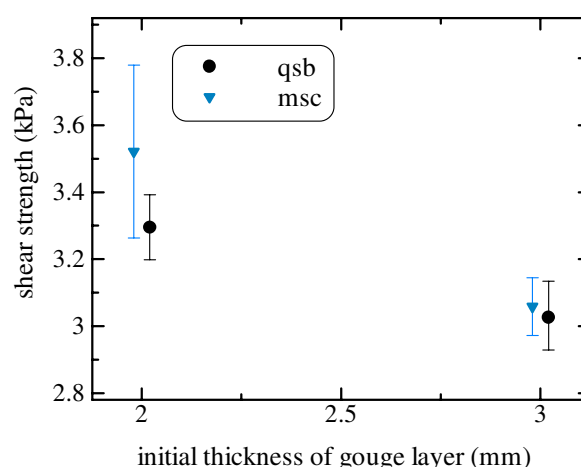


Fig. 5. Shear strength of gouge layer for 2 materials and thicknesses.

図5. 2つの物質と初期層厚に対するせん断強度の比較。

を詳しく見るために、水平変位を横軸に、垂直変位を縦軸にとって、スティックスリップを起こす直前までの軌跡を描いた。Fig. 7にその結果の一部を示す。

上盤の軌跡は各図の第1象限に描かれている丸印の連続である。赤、黄、緑は3つのギャップセンサー（GS1, GS2, GS3, Fig. 1参照）の軌跡であり、黒は3つのセンサーの平均値の軌跡である。

この軌跡は円弧で極めてよい近似が得られるので、最小二乗法でその円の中心座標と半径を求めた。これらの値が図中に描かれている。またこれは、柱が回転しているように見えるので、回転開始の角度と、スリップ直前の角度も併せて示してある。

Fig. 7 (a)は石英砂 (qsb), 初期層厚 2 mm, (b)はqsb, 同 3 mm, (c)は方解石砂 (msc), 初期層厚 2 mm, (d)はmsc,

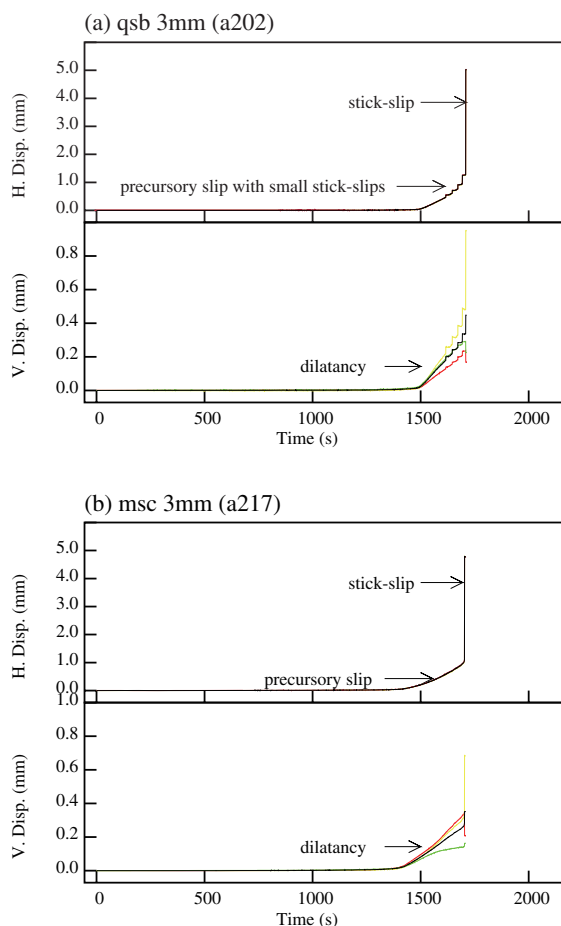


Fig. 6. Precursory slip (Horizontal displacement) and Dilatancy (Vertical displacement). (a) Quartz sand gouge layer with 3 mm initial thickness. (b) Calcite sand gouge layer with 3 mm initial thickness.

図6. 前兆的すべり（水平変位）とダイラタンシー（垂直変位）。  
(a) 3 mm初期層厚の石英砂ガウジ層。 (b) 3 mm初期層厚の方解石砂ガウジ層。

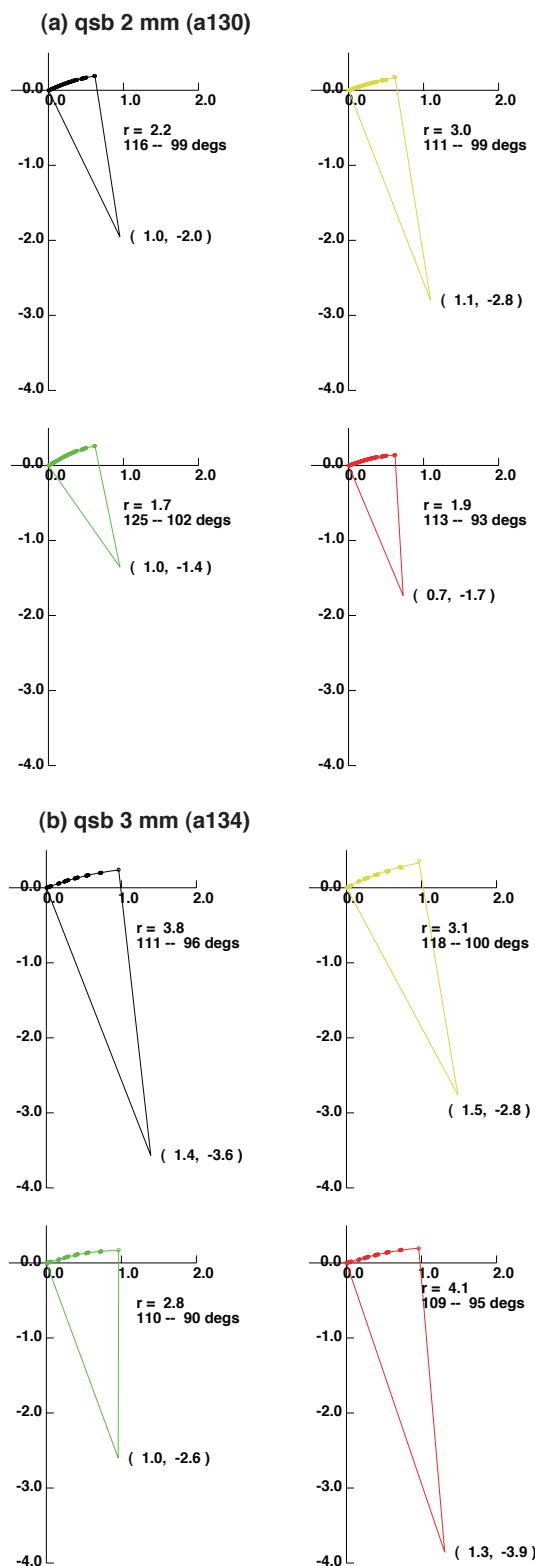


Fig. 7. The loci of the Upper Block. Red, yellow, green show those of GS1, GS2 and GS3, respectively. Black is the average of the 3 sensors. (a) qsb, 2 mm. (b) qsb, 3 mm. Unit of length is mm. (continue to next page.)

図7. 上盤の軌跡。赤、黄、緑は3つのギャップセンサー（GS1, GS2, GS3）のそれぞれの軌跡であり、黒は3つの平均である。  
(a) qsb, 2 mm. (b) qsb, 3 mm. 長さの単位はmm. (続く)

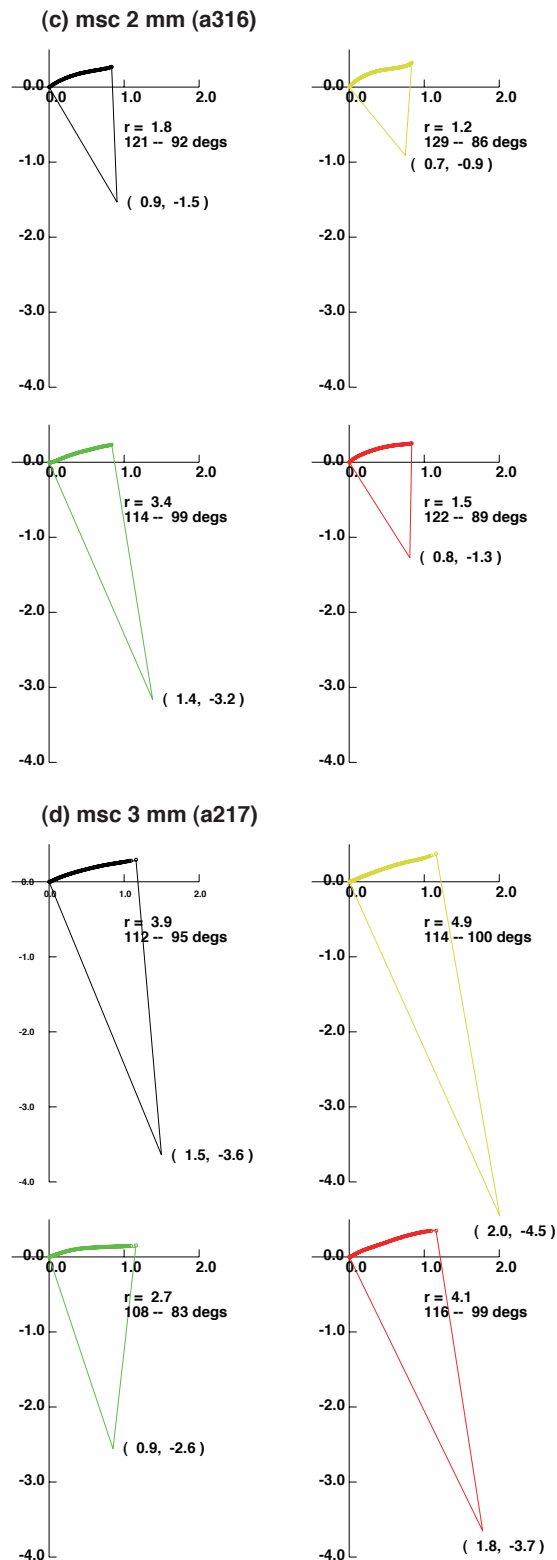


Fig. 7. continued from previous page. (c) msc, 2 mm. (d) msc, 3 mm.

図7. 前ページからの続き. (c) msc, 2 mm. (d) msc, 3 mm.

同3 mmである.

これらの図から、ガウジ層の厚さが薄いほど、回転半径が短いことが分かる。各試験の平均（黒で示したもの）の回転半径とせん断強度の関係を Fig. 8 に示す。同様に、回転を始めるときの角度とせん断強度との関係を Fig. 9 に示す。回転を始めるときの角度とは、Fig. 7 に示されている動径の左側の角度で、上盤の進行方向（Fig. 7 の右側方向）から計った角度である。これが大きいほど柱は傾いている

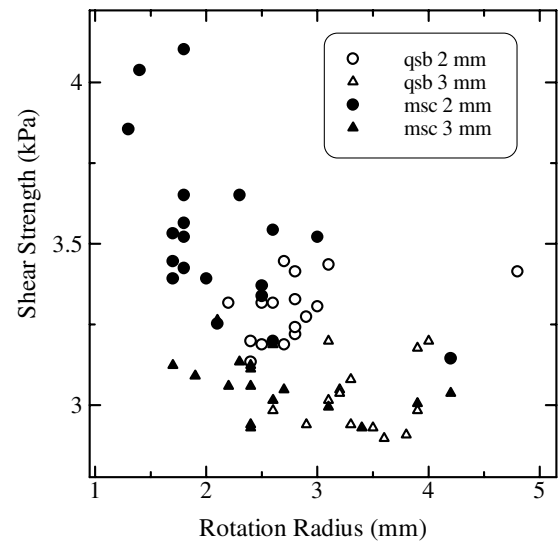


Fig. 8. Relation between shear strength and rotation radius.

図8. せん断強度と回転半径の関係.

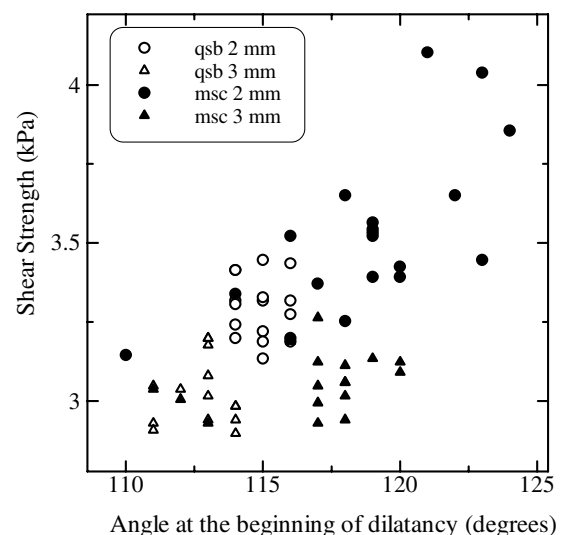


Fig. 9. Relation between shear strength and the angle at the beginning of dilatancy.

図9. せん断強度と回転開始角度の関係.

ことになる。

バラツキはかなり大きいですが、Fig. 8およびFig. 9から言えることは、回転半径が小さいほど、また回転開始角度が大きいほど、せん断強度が大きいということである。方解石砂 (msc) の2 mmのガウジ層のせん断強度が大きいのは、回転半径が小さく、かつ回転開始角度が低角（より大きく傾いている）であることによる。

このように、上盤の軌跡が円弧によってよく近似されるということは、せん断力の増加によってガウジ層内に柱が形成され、それが回転することによってダイラタンシーが引き起こされることを強く示唆するものである。

しかしながら、Fig. 8からも明らかなように、柱の長さが層厚をはるかに超えるものもあり、これらは1点を中心とした回転のみでダイラタンシーのメカニズムを説明することはできない。

### 3. まとめと考察

#### 3.1. ダイラタンシーのメカニズム

本報告で示したガウジ層のダイラタンシーは、せん断力を載荷したときに自発的に生じる体積膨張であって、応力レベルから見ると土質力学で言われているダイラタンシーに近いが、実験方法は異なっており、最終的なスティックスリップが発生する前に生じる、前兆的なすべりを伴うダイラタンシーである。

ここでは、われわれの実験で発現したダイラタンシーのメカニズムについて考察する。

ここで報告したせん断試験結果、および吉岡・阪口 (2009) で示した光弾性試験の結果を総合すると、ガウジ層内部にはせん断力の増加とともに柱状の応力鎖の構造変化が発生し、せん断力に抵抗する方向に柱状の構造が発達することが強く示唆される。この柱が形成されていく時点では、上盤はほとんど動いておらず、ガウジの個々の粒子の微妙な位置の変化がこれを可能にしていると思われる。さらにせん断力が増加すると、上盤の動きは、円弧を描くように浮き上がり、あたかも、その柱が回転し、ダイラタンシーが引き起こされたように見える (Yoshioka and Sakaguchi, 2006)。この柱の回転というメカニズムは、3次元のガウジ層内部ではおそらく可能ではないと思われる。それは、わずかな回転が生じると、柱を構成していないガウジ粒子の自由度が増し、柱の動きを許し、それがまた粒子の自由度を増す方向に作用すると考えられるからである。(2次元の光弾性の実験では両側の拘束のため、柱の回転は不可能である。)

しかしながら、すでに述べたように、回転半径がガウジ

層の厚さをはるかに上回るものもあり (Fig. 8参照)、単純な回転運動だけでは説明できないものもある。この場合は古典的な粒子の乗り上げのメカニズムとの複合作用なども考慮しなければならないが、一つの可能性として上盤のすべりがある。Fig. 10は下盤に回転半径5 mmの蝶番 (ちょうつがい) を2個貼り (初期角度約120度)、その上に上盤を置いてせん断実験を行ったときの軌跡である。この図がFig. 7に酷似していることは、「柱の回転」のメカニズムを支持するものである。

ただし蝶番の回転半径は5 mmに設定したのであるが、この解析では平均値の回転半径はかなり長くなっている。この実験では上盤が蝶番の上をわずかではあるがすべっていることが確認されており、これが見掛け上、回転半径を大きくしていると考えられる。同じことがガウジ層と上盤の間で起っている可能性も否定できない。

#### 3.2. せん断強度をきめるもの

前項で述べたように、せん断力の増加によってガウジ層内に柱構造の応力鎖ができ、これがせん断力を支えているとすれば、このガウジ層のせん断強度はこの柱の強度で決

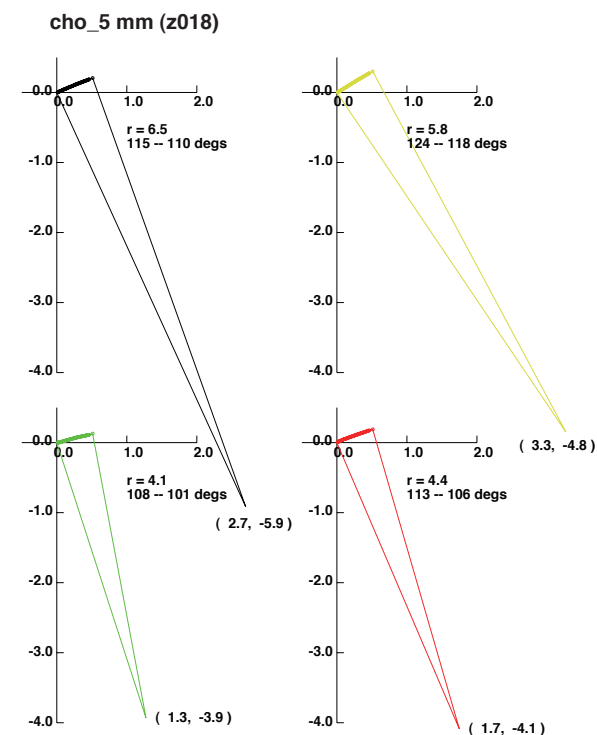


Fig. 10. The loci of the Upper Block in an experiment using 2 hinges with rotation radius of 5 mm and the initial angle of 120 degrees. The colors are the same as Fig. 7.

図10. 初期角度120度 (60度)、回転半径5 mmの蝶番を使ったせん断実験の、上盤の軌跡。色はFig. 7と同じ。

まると考えられる。この考えを支持する実験事実がいくつか存在する。

第一は、柱の長さが短いほど（ガウジ層が薄いほど）強度が大きい（Fig. 8参照）という点である。これは同じ太さの柱であっても、短い方が折れにくい、という経験から容易に想像される。

第二は、方解石砂のガウジ層のほうが、石英砂のそれより強度が大きい、という点である（Fig. 5参照）。「2.1.3. ガウジ層を構成する物質」で述べたように、硬度や一軸圧縮強度は、石英のほうが方解石よりはるかに大きい。しかし、粒子になるとこれが逆転するという逆説的な事実が柱強度説を支持する。すなわち、柱を構成する粒子間の摩擦は、柔らかい方解石の方が大きく、強力な柱を構成すると考えられるからである。実体顕微鏡による粒子の観察によると、実験前には、いずれの粒子も角ばっており、このような粒子と粒子が接触し、押しつけられた場合、柔らかい粒子のほうが容易に塑性変形を起こし、粒子間の接触面積が大きくなると考えられるからである。（ただし、方解石砂で、実験前後に撮った写真から、塑性変形の量を定量的に分析するのは困難であった。これは、実際に大きな力を受け、塑性変形する粒子は全体の粒子のごく一部であり、どの粒子が変形を受けたものであるかを見極めるのはほとんど不可能であったためである。）

また、「2.2.2. 前兆的変位とダイラタンシー」の項で述べたように、石英砂では、前兆的な変位のときに、小さなスティックスリップ状のすべりが生じたことが報告されたが（Fig. 6 (a) 参照）、これは柱を構成する粒子間で微小なすべりが生じたためではないかと考えられる。このすべりは、粒子間の摩擦の小ささのために生じたもので、最終的な柱の弱さに通じる。

しかしながら、Fig. 5で見たように、同じ手順を踏んで実験を行っても、せん断強度はばらつきが大きく、現在のところ、この強度の変化（ばらつきの大きさ）を決める要因については、はっきりとしたことは言えない。

### 3.3. まとめと今後の課題

本研究は、ガウジ層を含む断層のすべりを予測するための手がかりを探る目的で行われたものである。すなわち、これまで、筆者らは断層を透過する波動を観測するという実験を行ってきた（Iwasa and Yoshioka, 1998; Yoshioka and Iwasa, 2006; Yoshioka and Sakaguchi, 2006）。これらの実験結果、とくにガウジ層を挟む断層について行った実験は、前兆的なすべりとダイラタンシーによって、透過波動に大きな変化がもたらされることを明瞭に示した。そのような、透過波動に変化をもたらすのはガウジ層内部の構造変化であるはずであるから、その内部構造変化のメカニズムと、

最終的なせん断強度を決める要因を探る目的をもって、2種類の、硬さや強度の異なる物質からなるガウジ層で実験を行ったのが今回の実験である。この結果、ガウジ層のような粉粒体となった物質の強度は、もとの物質の強度とは異なる性質を示すことが明らかとなった。

実際の断層破砕帯では、大きな意味で粒状体とみなせる構造が発達していると考えられるが（たとえばChester and Logan, 1986; Chester et al., 1993）、どの程度の深度までこの粒状体モデルが成り立つかはよく分かっていない。もしかなりの深度まで、このような粒状体モデルが成り立つとすれば、この実験で見られたような柱構造が存在し、これが断層を支え、これが強度を決めるということも考えられる。

さらに、実際の断層のガウジはフラクタル分布をしていることが報告されており（Biegel et al., 1989）、粒径分布が幅広い。粒径のそろったここでの実験結果を実際の断層にそのままあてはめるわけにはいかない。フラクタル分布をした粒子を用いた実験も今後行う必要があるだろう。これらの問題は今後の課題である。

実験に関して言えば、粒状体の実験における結果のばらつきの大きさは、柱状構造のでき方や、最終的にせん断力を決定する柱の本数が少なくて済むこと（吉岡・阪口, 2009）などを考えると、実験技術上の問題というよりも、むしろ本質的なことと言えるかもしれない。

## 謝 辞

本報告の原稿を査読された、林為人氏、坂口有人氏、谷川亘氏のコメントによって、原稿は大幅に改善することが出来ました。記して感謝致します。

本研究は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」の助成を得たものである。

また本研究の実験装置、材料は、平成14年度～平成17年度科学研究費補助金・基盤研究(B)（課題番号14340134）「透過弾性波による、破砕物質を挟んだ断層のすべり予測に関する研究」の援助を受け、作成されたものである。

## 参考文献

- Anthony, J. L., and C. Marone (2005), Influence of particle characteristics on granular friction, *J. Geophys. Res.*, *110*, B08409, doi:10.1029/2004 JB003399.
- Biegel R. L., C. G. Sammis, and J.H. Dieterich (1989), The frictional properties of a simulated gouge having a fractal

- particle distribution, *J. Structural Geology*, 11 (7), 827-846.
- Bolton, M. D. (1986), The strength and dilatancy of sands, *Géotechnique*, 36 (1), 65-78.
- Chester, F. M., and J. M. Logan (1986), Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California, *Pure Appl. Geophys.*, 124, 79-106.
- Chester, F. D., R. L. Biegel, and J. P. Evans (1993), Internal structure and weakening mechanisms of the San-Andreas fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 771-786.
- 地学団体研究会編 (1996), 新版地学辞典, 平凡社.
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29, 47-65.
- Dieterich, J. H. (1979), Modeling of Rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, 2161-2168.
- Dieterich, J. H. (1981), Constitutive properties of faults with simulated gouge, eds. L. Carter, M. Friedman, J. M. Logan and D.W. Stearns, *Geophys. Monogr. Ser. 24*, AGU, 103-120.
- Feda, J. (1982), *Mechanics of particulate materials*, Elsevier.
- Frye, K. M., and C. Marone (2002), The effect of particle dimensionality on granular friction in laboratory shear zones, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19), 1916, doi:10.1029/2002GL015709.
- Handin, J. (1966), Strength and ductility, ed. S.P. Clark, Jr., *Handbook of Physical constants* (Revised Edition, ), The Geological Society of America, 223-275.
- Iwasa, K., and N. Yoshioka (1998), An experimental trial to detect precursory slips by transmission waves across a fault, *Geophys. Res. Lett.* 25, 3907-3910.
- Karner, S. L., and C. Marone (2001), Frictional restrengthening in simulated fault gouge: Effect of shear load perturbation, *J. Geophys. Res.*, 106, 19319-19337.
- Mair, K., and C. Marone (1999), Friction of simulated gouge for a wide range of velocities and normal stress, *J. Geophys. Res.*, 104, 28899-28914.
- Matsuoka, H. (1983), A stress-strain models for granular materials considering the mechanism of fabric change, eds. J.T. Jenkins and M. Satake, *Mechanics of Granular Materials: New models and Constitutive Relations*, 99-115.
- Morrow, C. A. and J. D. Byerlee (1989), Experimental studies of compaction and dilatancy during frictional sliding on faults containing gouge, *J. Struct. Geol.* 11, 815-825.
- Morrow, C. A., D. E. Moore, and D. A. Lockner (2000), The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge friction strength, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 815-818.
- 村山朔郎 (1990), 土の力学挙動の理論, 技報堂出版.
- 村山朔郎, 松岡 元 (1970), 2次元モデルによる粒状体のせん断現象の微視的考察, *京都大学防災研年報*, 13 (B), 505-523.
- 村山朔郎, 松岡 元 (1971), 砂と粘土のせん断特性の類似性とそのメカニズムについて, *京都大学防災研年報*, 14 (B), 551-563.
- Nakatani, M., and C. H. Scholz (2004a), Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions: 1. Experimental evidence for solution transfer healing mechanism, *J. Geophys. Res.*, 109, B07201, doi:10.1029/2001JB001522.
- Nakatani, M., and C. H. Scholz (2004b), Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions: 2. Quantitative interpretation with a physical model, *J. Geophys. Res.*, 109, B07202, doi:10.1029/2003JB002938.
- Oda, M. (1974), A mechanical and statistical model of granular material, *Soils and Foundations*, 14 (1), 13-27.
- Oda, M., and J. Konishi (1974), Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear, *Soils and Foundations*, 14 (4), 25-38.
- Ohnaka, M., Y. Kuwahara, K. Yamamoto, and T. Hirasawa (1986), Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities, eds. S. Das, J. Boatwright and C. H. Scholz, *Geophys. Monogr. Ser. 37*, AGU, 13-24.
- Ohnaka, M., and L-f. Shen (1999), Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces, *J. Geophys. Res.*, 104, 817-844.
- Rathbun, A. P., and C. Marone (2010), Effect of strain localization on frictional behavior of sheared granular materials, *J. Geophys. Res.*, 115, B01204, doi:10.1029/2009JB006466.
- Reynolds, O. (1885), On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, *Phil. Mag. Ser. 5*, 20, 469-481.
- Rowe, P.W. (1962), The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, *Proc. Royal Soc. London, Ser.A*, 269, 500-527.
- Ruina, A. (1983), Slip instability and state variable friction law, *J. Geophys. Res.*, 88, 10359-10370.
- Sammis, C. G. and R. L. Biegel (1989), Fractals, fault gouge, and friction, *Pure Appl. Geophys.*, 131, 255-271.
- Samuelson, J., D. Elsworth, and C. Marone (2009), Shear-

- induced dilatancy of fluid-saturated faults: Experiment and theory, *J. Geophys. Res.*, 114, B12404, doi:10.1029/2008JB006273.
- Schanz, T., and P. A. Vermeer (1996), Angle of friction and dilatancy of sand, *Géotechnique*, 46 (1), 145-151.
- Taylor, D.W. (1948), Fundamentals of soil mechanics, J. Wileys and Sons.
- Terzaghi, K. (1920) , Old earth-pressure theories and new test results, *Engineering News-Record*, 85 (14) (1960 Reprinted in *From theory to practice in soil mechanics*, J. Wiley and Sons.)
- Vaid, Y. P., and S. Sasitharan (1991), The strength and dilatancy of sand, *Can. Geotech. J.*, 29, 522-526.
- Yoshioka, N. and K. Iwasa (2006), A laboratory experiment to monitor the contact state of a fault by transmission waves, *Tectonophysics*, 413, 221-238.
- Yoshioka, N. and H. Sakaguchi (2006), An experimental trial to detect nucleation processes by transmission waves across a simulated faults with a gouge layer, eds. W-H. Ip, and Y-T. Chen, *Advances in Geosciences, Vol.1 Solid Earth*, World Scientific, 105-116.
- 吉岡直人, 阪口 秀 (2009) , せん断応力下にあるガウジ層の内部構造解析とすべり予測の試み, *財団法人深田地質研究所年報*, 10, 109-121.