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

吉岡　直人[1]・阪口　秀[2]

[1]深田地質研究所

[2]海洋研究開発機構

An analysis of the internal structure of gouge layers under shear stresses and a trial for prediction of slips

YOSHIOKA Naoto[1] and SAKAGUCHI Hide[2]

[1]Fukada Geological Institute

[2]Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

要旨：各種の砂を用いてつくったガウジ層に対して行ったせん断実験と，光弾性物質を用いて行った実験により，ガウジ層にせん断力をかけたとき，どのようなプロセスを経て最終破壊に至るかが明らかになった．すなわち，ガウジ層の内部は一様ではなく，ごく一部の粒子が柱状の構造（応力鎖）を作って力を支えている．せん断力がかかる前は断層面に垂直な柱が垂直力を支えているが，これにせん断力が加えられると，低角の新たな柱構造が発達し，次第に垂直な柱構造にとって替わる．さらにせん断力が加わると，柱が回転し，水平方向と垂直方向の変位が生じて見かけ上，ガウジ層が膨張する．柱の回転半径はガウジ層の厚さと，ガウジを構成する粒子の粒度分布によって決まるが，回転半径が短いほど強度が大きい．これらの過程を経て，最終すべりに至るが，最終すべりの直前ではせん断力の増加分はガウジ層全体に広く一様に配分されるように見える．ここで得られた知見は，断層を透過する波動の変化とともに，断層のすべり予測への手がかりを与えると思われる．

キーワード：ガウジ層，せん断力，応力鎖，ダイレイタンシー，すべり予測

Abstract: Shear loading tests on gouge layers and experiments using photo-elastic materials have revealed the detailed processes how the gouge layers finally reach the failure under shear loading. The internal structure of the gouge layers is not homogeneous and only a portion of gouges contribute to sustain the external forces by forming columnar structure (stress chains). Under the vertical force only, vertical columns are created. After the application of shear forces, new columnar structures with very low angle are produced which gradually replace the initial vertical structure. Further additional shear forces make the columns rotate and produce a large amount of horizontal and vertical displacements. This makes the gouge layer look like dilating. The rotation radius is determined by the thickness and the diameter distribution of the gouge layer and the strength of the layer depends on the rotation radius: the shorter the radius is, the stronger the layer is. At the final stage of shear loading, the forces added to the layer seems to be uniformly distributed. These observations will be useful for predicting slips on the faults.

Keywords: gouge layer, shear force, stress chain, dilatancy, prediction of slips

1. はじめに

一般に，２つの固体面間に作用する機械的摩擦力は，クーロンの摩擦則（$F=\mu N$　ここで F: 最大静止摩擦力，μ：摩擦係数＝２固体間の面の性質で決まる，N: 垂直力）にほぼ従う．他方，１つの固体にせん断力を加えると，固体のせん断剛性で抵抗し，破壊については，モール・クーロンなどの破壊基準に従うものと考えられている．流体については，そもそものせん断剛性がないので，粘性でせん断速度には抵抗するものの，一定のせん断力でいつまでも流れる．

一方，本報告で対象とする断層内のガウジ物質は，岩石という元々は固体の粉砕物が多数集合した，いわゆる「粒状体」である．粒状体の特徴は，砂山に見られるように（Yoshioka, 2003; Yoshioka and Sakaguchi, 2008），山を形成する固体的性質と，山の斜面を流れる流体的性質の両方を兼ね備えていることである．その他，粒状体固有の性質についてはこれまでに数多く調べられているが（Duran, 2000 など），なんと言っても最も特徴的な性質は，せん断変形に伴って体積変化する「ダイレイタンシー」である．

ダイレイタンシーを考慮した粒状体のせん断特性については，かなり古くから研究され続けているが（例えば，Shibata and Karube, 1965 から始まり近いところでは Schanz and Vermeer, 1996 など），主として土質力学における構成則にダイレイタンシー効果をいかに導入するかに議論は集中している．その結果，粒状体のせん断強度は固体間の摩擦係数に対応する内部摩擦角 ϕ と粘着力 c という二つのパラメータで整理された．また，地盤工学における土質力学の一般的な教科書では（例えば，村山 1990），粒状体のダイレイタンシーが発揮されるメカニズムは，単に粒子の乗り上げで説明されている．

しかし，光弾性材料や様々な物質を用いた粒状体のマイクロメカニックスの本格的な研究が始まってからは，せん断力を受けている粒状体内部に非常に不均質な応力鎖の網目構造が発達していることが見出され（Oda and Konishi, 1974），ダイレイタンシー発揮メカニズムの新しい解釈が加えられ，その後，議論が続いたが，応力鎖構造，ダイレイタンシー，せん断強度のそれぞれの発現メカニズムと発現量の関係については未だに解決がついていない．

そこで模擬ガウジ物質として，粒子破砕など，問題を複雑にする効果をできるだけ取り除いた材料を用いて（人工的に粉砕，粒度調整された石英），ミクロンオーダーの解像度での変位測定が可能な試験機を開発してせん断試験を行い，また，応力鎖の発達から消滅までの遷移過程を光弾性物質を用いて可視化した実験を行った．本報ではこれらの実験結果とその解析結果についての詳細な報告を行う．

2.　ガウジ層のせん断実験

2.1　実験装置と実験手順

せん断実験に用いた実験装置の模式図を図１に示す．下盤（LB）の上に一定厚さのガウジ層（GL）が敷かれ，その上に上盤（UB）が配置されている．リニアモーター（LM）によって LM の天板が矢印の方向に移動し，板バネ（LS）を介して上盤に水平力が加えられる．天板の変位は水平変位計（HDT1）によって計測される．上盤の動きは２つの水平変位計（HDT2, 3）と，３つのギャップセンサー（垂直変位計，GS1, 2, 3）によって３次元的に計測される．

上盤と下盤にはそれぞれピックアップと PZT 振動子が取り付けられるようになっていて，ガウジ層を挟んだ断層を透過する波動の変化を捉

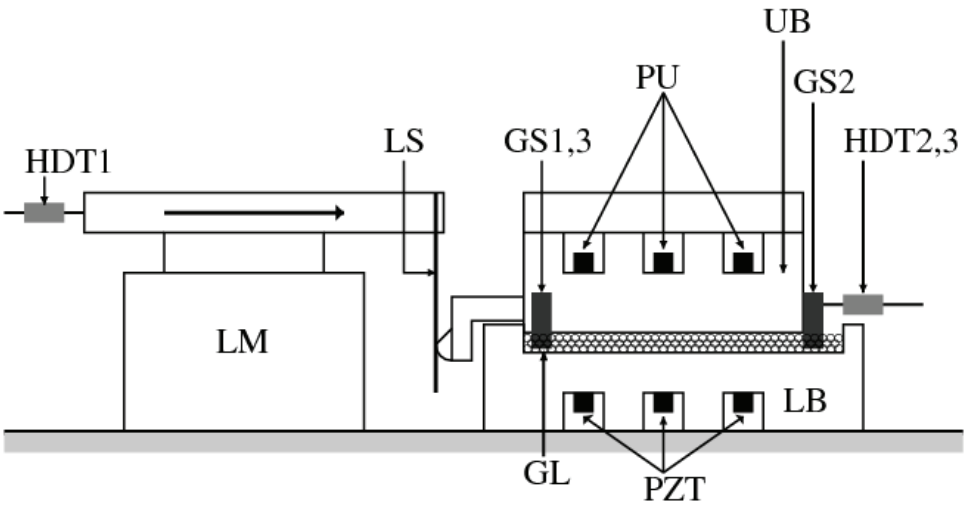

図１　せん断実験に用いた装置．LM：リニアモーター，LS：板ばね，UB：上盤，LB：下盤，HDT：水平変位計，GS：ギャップセンサー（垂直変位計），PZT：振動子，PU：ピックアップ．

えられるように設計されている．せん断応力の増加に伴う透過波動の変化については Yoshioka and Sakaguchi (2006)の報告があるが，本報告では透過波動については触れない．

実験手順は以下のとおりである．まずガウジ層を一定の厚さに敷く．このために，下盤には，上盤の幅より若干広く，滑り方向には 5 mm 程度長い空間が，高さ 5 mm の枠に囲まれて形成されていて，この枠内の空間にガウジ入れてヘラでガウジ層の厚さを揃える．このガウジ層の上に上盤を置いたあと，バイブレータで振動を加え，ガウジ層を圧密する．この作業を行わないと再現性ある結果は得られない．なお，圧密の段階では，上盤前方の 5 mm の空間は，上盤に治具を装着して塞ぎ，この部分も他の部分と同様の圧密が加えられるようにした．この手順を加えることにより，再現性が向上したばかりでなく，上盤の上下方向の運動の安定性が得られた．図２に圧密の記録の一例を示す．３本の灰色の曲線は，上盤に取り付けた３つのギャップセンサーの出力であり，黒の実線はその平均値である．この例ではもともと 3 mm の厚さの層が 0.3 mm 以上，すなわち１割以上沈み込んでいる．

ここまでがせん断試験の準備段階であり，こ

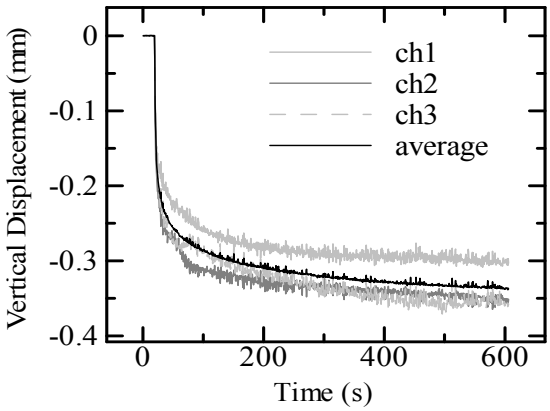

図２　バイブレータを用いた圧密による上盤の沈降の例．

のようにして得られたガウジ層に対してせん断力を加えていくのである．

本報告で記述するせん断試験で用いたガウジは，粒径が 0.15 ～0.25 mm の石英砂（qsb と略）と，0.125 ～0.25 mm の大理石の砂（msc と略）である．一部，粒径の分布がフラクタル次元 2.6 の石英砂（qsf と略）で行った実験結果も合わせて示す．

2.2　実験結果

図３に，せん断試験で得られた典型的な結果の一例を示す．(a)はリニアモーターの変位であり，一定速度（6.9 μm/s）で移動していることが分かる．(b)は上盤に取り付けた２本の水平変位計の出力の平均値である．２本の出力はこのスケールでみると全く重なってしまい，平均値とも区別がつかない．最終的なすべり（スティックスリップ）に至る前の段階で，前兆的なすべりが必ず先行する．(c)は板バネに張った歪ゲージの出力から求めたせん断力である．せん断力の載荷の初期段階では，せん断力は直線状に増加するが，水平変位がわずかに出始めると，せん断力は直線からずれ始め，最終的なすべりにともなって大きく減少する（ストレスドロップ）．

(d)は上盤に取り付けた３つのギャップセン

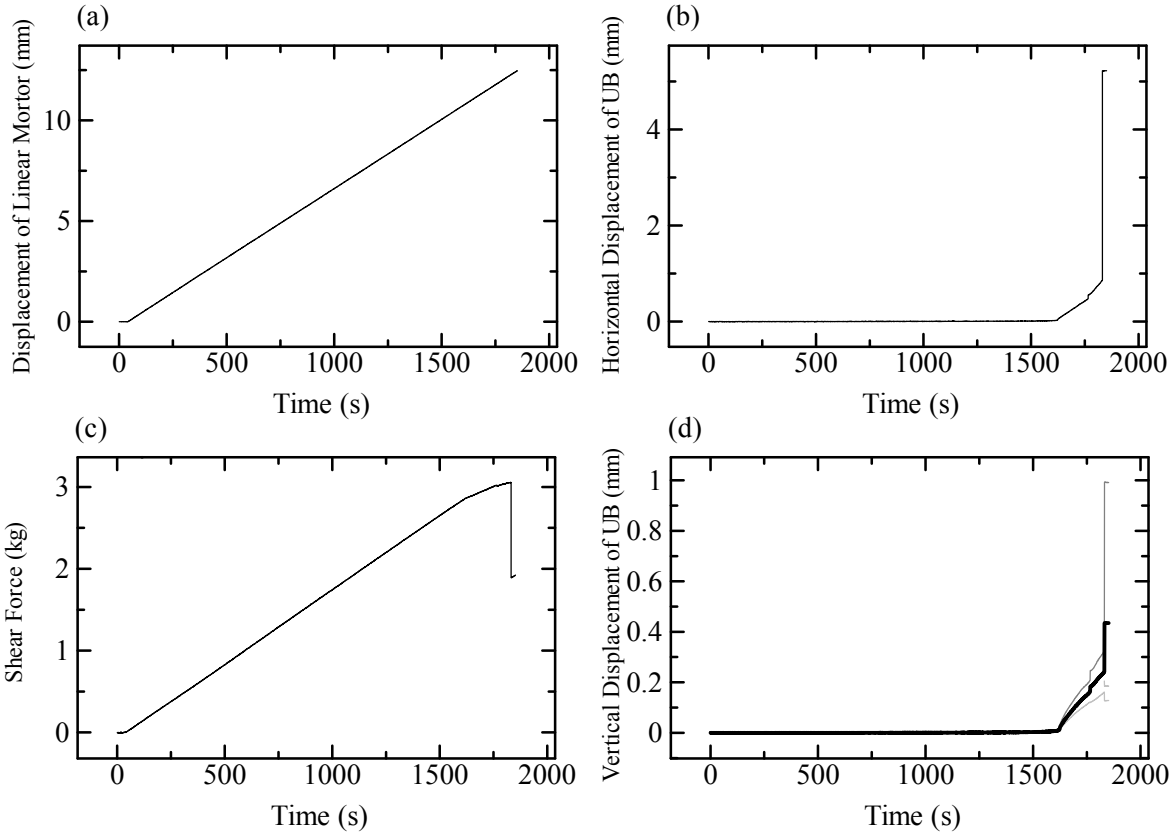

図３　せん断試験の結果の一例．(a) リニアモーターの変位．(b) 上盤（ＵＢ）の水平変位（２本の変位計の平均値）．(c) 板バネにかかるせん断力．(d) 上盤（ＵＢ）の３本のギャップセンサー出力（灰色）とその平均（黒太実践）．

サーの出力（灰色）とその平均（黒太実践）である．(b)の水平変位を参照すると，前兆的な水平変位の開始に同期して垂直方向にも大きく変位していることが分かる．重要なことは，３つのギャップセンサーは揃って上昇の記録を示している，ということである．すなわち，上盤は下盤とほぼ平行を保ったまま，持ち上がるのである．

なお，以下に示すせん断実験では，リニアモーターの速度はすべて 6.9 μm/s で一定であり，上盤を押す板バネもすべて同一のバネを用いている．

2.3　解析１　――　すべり強度

図４にさまざまな種類のガウジを用いて行ったせん断試験の，せん断強度を示す図を示す．これは図３の(c)に対応したものである．すなわち板バネによって測定したせん断力の時間変化を，図４(a)初期カウジ層厚 2 mm と(b)同 3 mm に分けて示したものである．

図中，msc で示したものは，大理石の砂（粒径 0.125 ～0.25 mm），qsb で示したものは石英砂（粒径 0.15 ～0.25 mm），qsf で示したものは石英砂で，粒度分布がフラクタル次元 D=2.6 になるように調整したものである．

また，qsb＋msc で示したものは，石英砂と大理石の砂を混合したものであり，括弧内に示した数値は全体の中に占める msc の重量%である．

図４から，まず 3 mm 厚のガウジ層は 2 mm 厚のガウジ層よりせん断強度が小さいことが分かる．また，同じ石英砂でも，粒度が比較的そろった砂（qsb）より，粒度分布がフラクタル分布をしている砂（qsf）のほうが強度が大きいことも明瞭である．

つぎに，石英砂と大理石砂を比べると，柔かい大理石砂のほうが強度が大きいことも明らかである．2 mm 厚のガウジ層では 1.26 倍，3 mm 厚のガウジ層では 1.20 倍である．

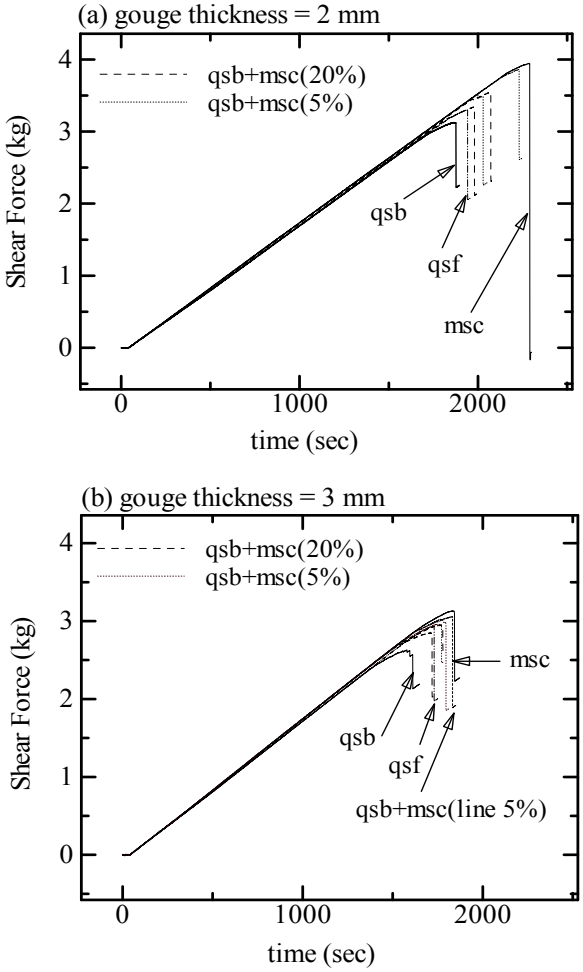

図４　さまざまな粒子によるガウジ層のせん断試験におけるせん断力の時間変化．qsb（石英砂）、msc（大理石の砂）、qsf（フラクタル分布をもつ石英砂，qsb＋msc（石英と大理石の混合砂）．

それでは，これを混合したガウジ層では強度はどうなるのであろうか．qsb に msc を少量加えることによって強度がどのように変化するかを見たのが qsb+msc で示されたものである．これをみると，混合砂の強度はいずれの場合も qsb 単体と msc 単体の強度の中間に位置するよ

うになるが，5%混合した場合のほうが 20%混合した場合より msc 単体の強度に近いようにさえ見える．この差は有意であるのかどうかは判然としないが，いずれにしても非常に少量の msc を混合しただけで，msc 単体の強度に近い値を示すようになることは間違いない事実である．

3 mm 層厚の場合の，qsb+msc(line 5%)で示したデータは，qsb と msc を混合するのではなく，上盤進行方向に全体の 5%幅にあたる部分に msc だけからなる帯状の層を作り，せん断試験を行ったものである．図にみられるように，msc は 5%の幅しかないにも拘わらず，msc 単体で行った試験とほぼ同じ強度を示すことが分った．

2.4　解析２　――　ダイレイタンシー

「２．２　実験結果」の項で，前兆的な水平変位の開始にともなって垂直方向にも大きく変位していることと，３つのギャップセンサーは揃って上昇の記録を示している，ということを指摘した．このことは，上盤は水平方向に移動しながら，全体として大きく持ち上がる，言い換えれば，ガウジ層が膨張（ダイレイタンシー）しているように見えることを意味している．

これを定量的に検証するために，横軸に水平変位の平均値を，縦軸に垂直変位の平均値をとり，大きくすべる（スティックスリップする）直前までの上盤の軌跡を描いた．図５はその結果である．（図中，数値の単位はすべて mm である．）

図中，小さな円で示したのが上盤の軌跡である．これは，大きなすべりの直前まで，水平変位が 10 μm 以上増加するごとに摘出した上盤の位置の点の集合である．((c)などに見られる点のジャンプは，小さな早い滑り（スティックスリップ）が間歇的に起きたことによるものである．）この変位の軌跡を眺めると，極めて円弧に近いものであることに気付かされる．最小二乗法により，この軌跡を円弧で近似したものが扇型の図形で示されており，その半径 r と円の中心座標も併せて図中に示されている．

図５(a) は初期層厚 2 mm の石英砂, (b) は同 2 mm の大理石砂, (c) は同 3 mm の石英砂, (d) は同 3 mm の大理石砂の場合である．初期層厚が小さくなると, 円弧半径が小さくなる. また, 大理石砂のほうが石英砂よりも円弧半径が小さい．

図４に示されている強度と，図５の解析結果を比べると，半径の小さいものほど強度が大きいことが分かる．

これらの図から強く示唆されることは，せん断力の増加によってガウジ層内に柱状の構造が形成され，それがある点を中心として回転し，上盤が持ち上げられているのではないか，ということである．この機構が見掛け上，ガウジ層が膨張しているように見える原因ではないか，という仮説が成り立ちそうである．

層厚 2 mm の場合も 3 mm の場合も，水平方向にはガウジの平均粒径（約 0.2 mm）の数倍もの変位があり，また垂直方向にも平均粒径に匹敵するほどの膨張量がある. 後述するように, これはダイレイタンシーに対するこれまでの解釈，すなわち粒子の乗り上げでは説明がつかないほどの量である．

柱の回転に必要な柱状構造の構築の問題を光弾性物質による実験によって次節にて追及する．

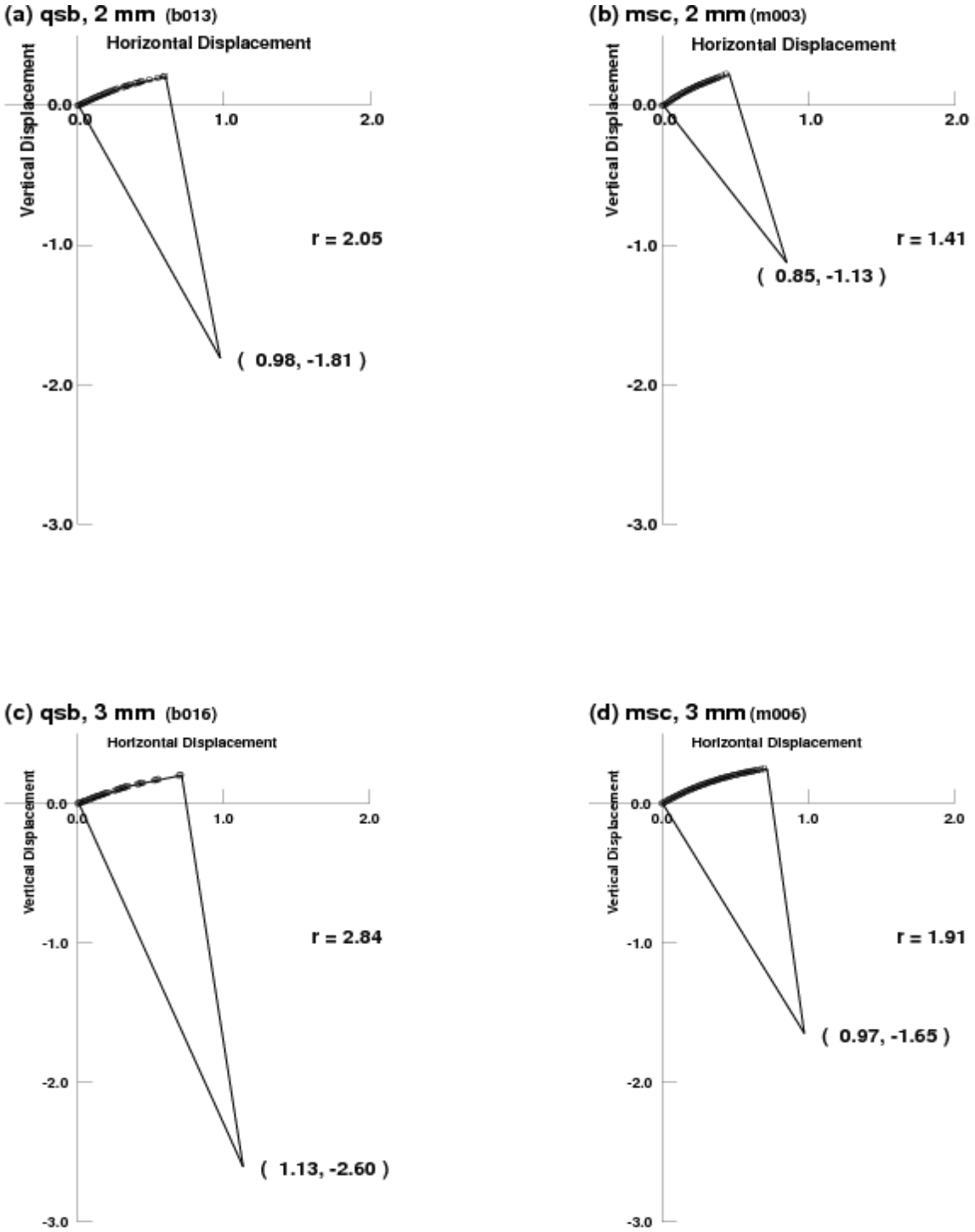

図５　上盤の、最終の大きなすべり（スティックスリップ）に至るまでの，２次元的な軌跡（小さな〇で示したもの）．これを円弧で近似したのが扇型で示した図形。最小二乗法によって求めた円弧の半径と中心座標も併せて示してある．（図中、単位は mm）

(a) 初期層厚 2 mm の石英砂，(b) 同 2 mm の大理石砂，(c) 同 3 mm の石英砂，(d) 同 3 mm の大理石砂.

3.　光弾性実験

3.1　実験方法

光弾性物質によって模擬砂を作成し，これを用いて模擬ガウジ層を作り，せん断実験を行った．この様子を図６に示す．

光弾性物質としては米国の Vishay Micro-Measurements 社の PSM-1（Photo-elastic Solid Material）を採用した．この物質は 10×20×1/4 インチの板として販売されている．この板から直径 12 mm と 9 mm（厚さ 1/4 インチ＝6.35 mm）の円盤状の模擬砂を切り出した．

これを２枚の透明なアクリル製の壁（40 cm × 15 cm）の間（壁間 7 mm）に詰め，「２．せん断実験」における上盤に相当する天板の上に約 4.8 kg の錘を乗せて荷重をかけ，これと同時に，「せん断実験」で用いたリニアモーターで，板バネを介してせん断力を加えた．ガウジ層内のガウジと接触をよくするために，天板の下面には，模擬砂を半分に切ったものをランダムに貼り付けて凹凸をつけた．

光弾性画像は，米国の Stress Photonics 社の GFP1200 システムにより採取した．このシステムは光源，カメラ，解析ソフトからなっており，カメラで１組の画像（16 枚１組）を採取するのに約 30 秒程度の時間を必要とする．この間に被写体は静止している必要があるが，後で示すように，30 秒間には被写体に大きな変化はないと仮定して，画像採取中もリニアモーターを止めることなく実験を行った．

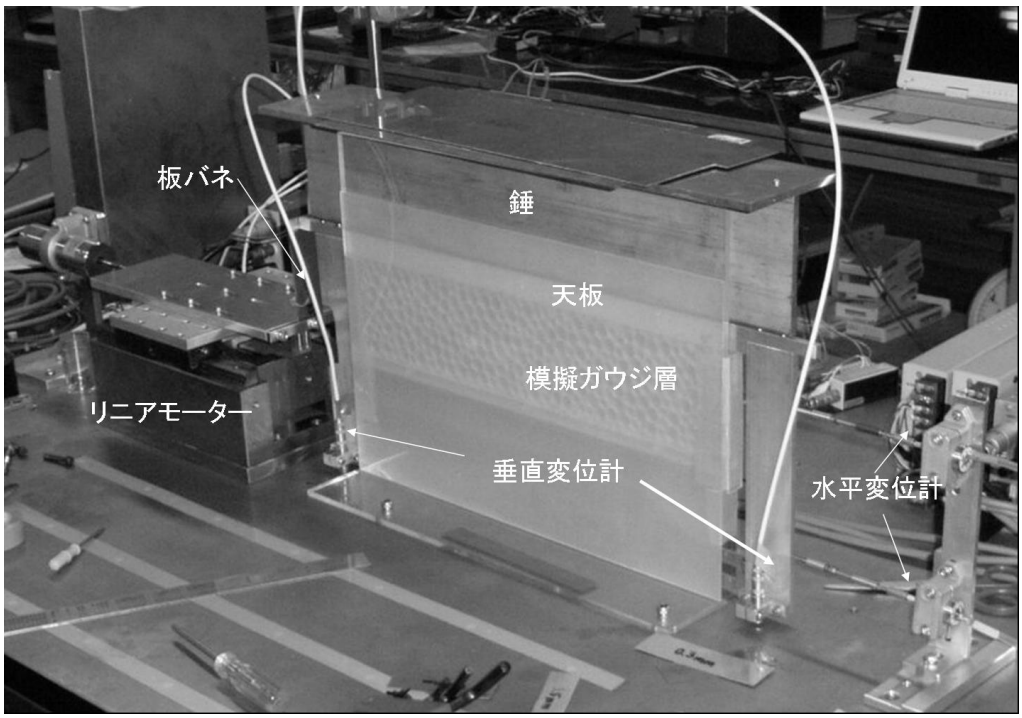

図６　光弾性実験装置。光弾性物質でつくった模擬ガウジ層の上に，錘を乗せた天板を置き，これに板バネを介してリニアモーターでせん断力を載荷する．天板（上盤）の動きは，水平および垂直変位計によって測定される．

3.2　実験結果と解析

図７に，ある光弾性実験（試験番号 S0425-1）の変位と力のタイムチャートを示す．光弾性写真は，リニアモーターの変位を示す直線上に示した丸印の 17 点で採取した．00，05 などの数字は写真番号を表す．

水平力（せん断力）はほぼ直線状に上昇しているが，水平変位が大きくなるにつれて傾きが鈍り始め，最後にはすべりとともに減少する（ストレスドロップ）．

水平変位と垂直変位はかなり早い段階から出始めているが，これは模擬ガウジ砂間の「なじみ」の形成によるものと思われる．「２．せん断実験」においてはせん断力載荷に先駆けて，バイブレータによる圧密を行ったが，実験装置の構造上，大粒の模擬粒子にたいして事前に圧密を行うのは極めて難しい．その意味で，載荷中の早い段階から見られる上盤の比較的大きな変位は，この試験では避けられないものであるかも知れない．

図８に，図７で示した４つの写真番号に対応する光弾性写真を並べて示す．赤い部分が応力の大きい部分である．

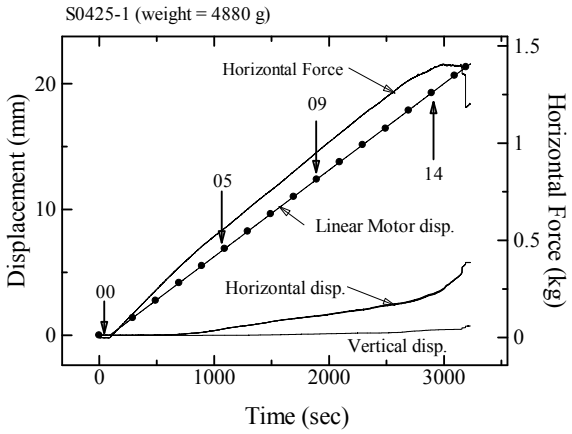

図７　光弾性実験の変位、力のタイムチャート.

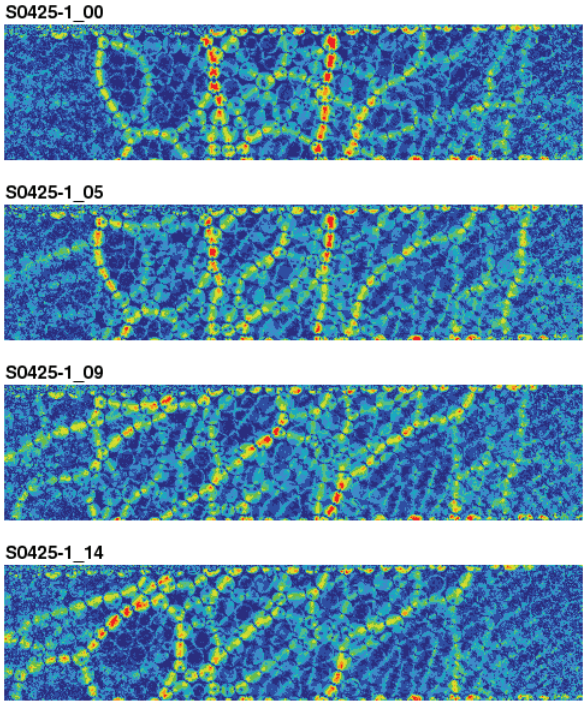

図８　光弾性写真による，ガウジ層内部の応力鎖の変化．番号は図７に示された番号に対応している．せん断力は上盤が右から左に押される方向に加えられている．

00 はせん断力が加えられる前のものであるが，上下方向の応力鎖が発達していることが分かる．せん断力は上盤が右から左に押される方向に加えられているが，番号が大きくなるにしたがってせん断力は大きくなり，これにともなって右上から左下に向かう，斜め方向の応力鎖が発達する．

この応力鎖の方向を統計的に処理し，すべてのデータをローズダイアグラムで表したものを図９に示す．各角度への分布には，本数だけでなく応力鎖の強さも考慮されている．

これを見ると，せん断力が小さい場合には応力鎖は上下方向（90 度方向）に発達しており，せん断力が大きくなるにつれて傾き始めることが分かる．しかしこの傾きの変化は徐々に傾きが増すように進行するのではなく，06 から 10

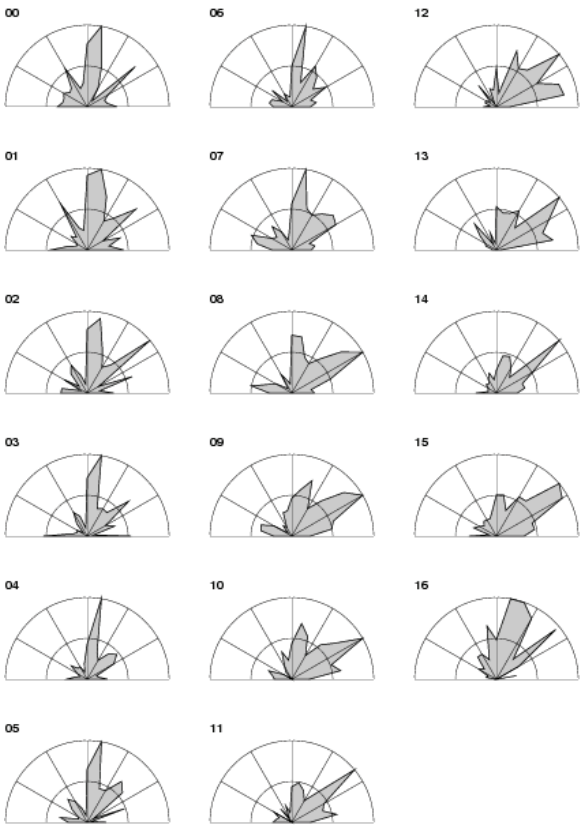

図９　応力鎖の向きの変化. 番号は図７に示したものに対応している.

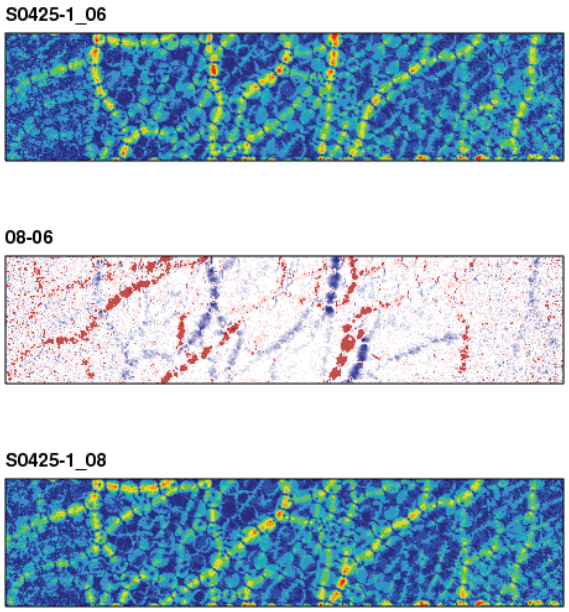

図 10　06 と 08 の応力鎖の構造（上と下）と、その差（中）. 06 から 8 に至る過程で増加した部分が赤で、減少した部分が青で示されている.

への遷移に見られるように，はじめ 90 度の方向にあった鎖を残しながら，30 度の方向の鎖が発達し，やがて 90 度方向が消滅し，30 度方向の鎖に入れ替わるように遷移している.

この様子は光弾性写真の強度の差からも窺える．図 10 は 06 から 08 へ移行する際に増加した部分（赤）と減少した部分（青）を示したものである．90 度方向の柱が減り，30 度に近い方向の鎖が増加しているのが分かる.

図９からはさらに，30 度の方向に発達した鎖は，11 から 15 にかけてやや角度を 40 度の方向へと向きを変えるように起き上がり，最終破壊に至る様子が窺える（16 はすべった後の記録である）. 図５に示したせん断実験の結果ほどには明瞭ではないが，この起き上がりが破壊直前の柱の回転に相当していると考えられる.

図 11 にすべてのステップにおける応力鎖の強度の増減を表す図を示す．図 7 に示すように 14 はすべり始める直前の段階であるので，14－13 はすべる直前の変化である．これは他の図と比べると，変化分が全体に一様に分布しているように見える．実際の地震活動に見られる大地震前の「静穏化」に対応しているのかも知れない.

4. 考察とまとめ

ガウジ層を挟んだせん断実験と，光弾性物質によるせん断実験の結果を報告した．これらの実験事実から示唆されることは，このような粒状体から構成される層にせん断力が作用すると，その内部では自己組織化的に強い柱状の構造が

まず形成され，それがせん断力の増加とともに変化し，破壊に至るまでの挙動と最終的な強度はこの柱構造によって決定される，ということである．

柱状の構造というのは，光弾性物質による２次元の実験で可視化されただけでなく，砂を用いたせん断実験においても，最終的なすべりに至る段階で見られるダイレイタンシーが，柱の回転によって，最もよく説明される（図５参照）という事実からも強く示唆されている．

せん断力を支える柱状の強い構造が，どのようなメカニズムで形成されるかは，光弾性物質

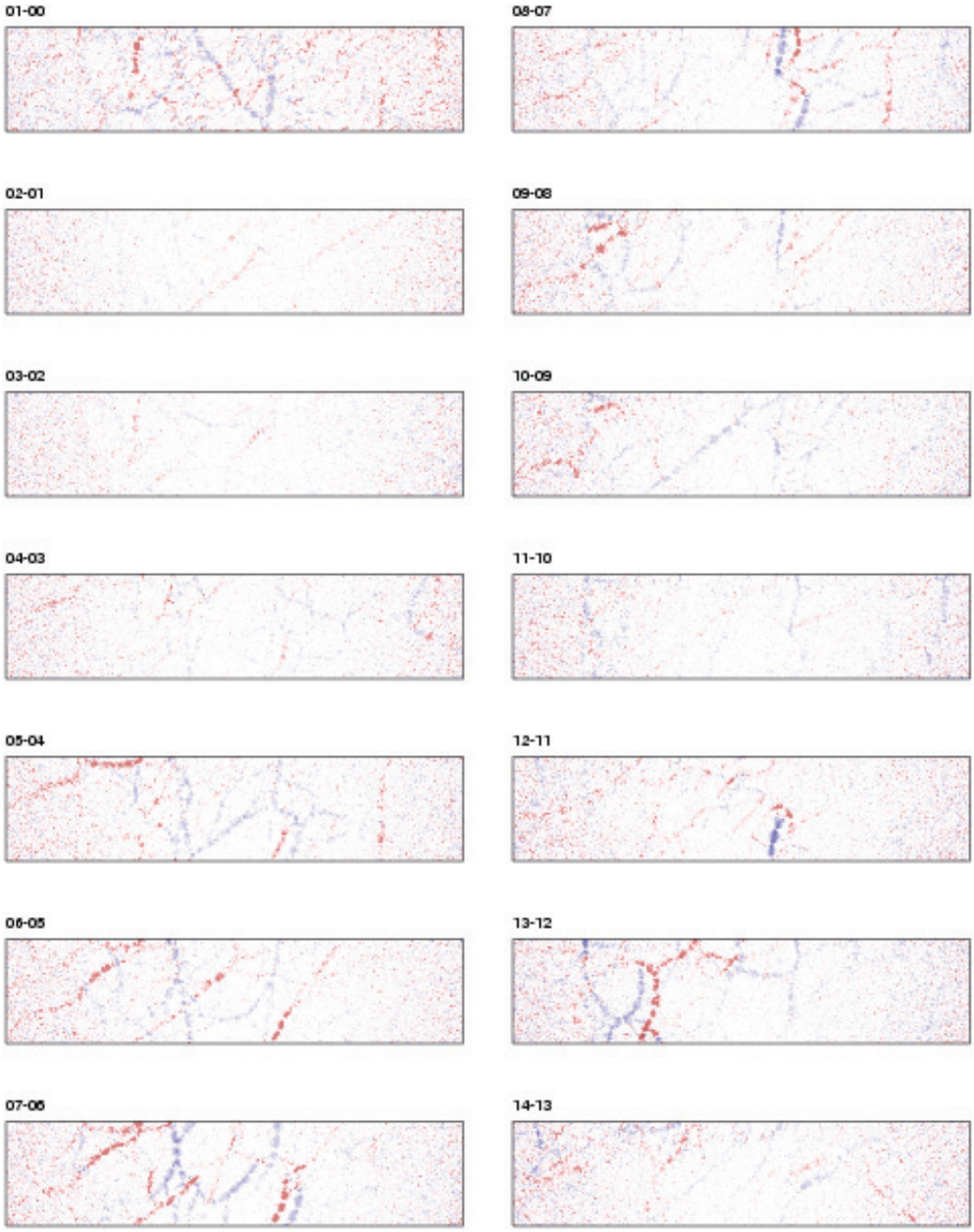

図 11　各ステップに於ける応力鎖の強度変化.

によるせん断実験で見たとおりである．すなわち，せん断力がかかる以前の状態では，断層に垂直な方向の柱が発達し，垂直力を支持している．このとき，この力を支えるのに寄与しているのはすべての粒子ではなく，柱を構成しているごく一部の粒子であり，このためこれらの粒子にはかなり高い力が加わっていると見るべきである．多くの粒子はこれらの柱の間で，かなりの自由度で動くことさえも可能であろう（図8参照）．このような構造にせん断力が徐々に加わると，垂直力とせん断力の合力の方向に徐々に柱の構造が移行していくのではない．当初から存在していた垂直方向の柱構造があまりにも強いために，この構造を残したまま変化せざるを得ない．このため，新たにできる柱の方向は，極端に低角（図9から示唆される，水平方向からの角度は 30 度程度）となる．せん断力の増加はこの方向に強い柱を形成し，当初から存在していた垂直方向の柱に徐々にとって替わるのである．

ではこのような斜めの柱が回転し始めて，ダイレイタンシーを引き起こすにはどのくらいの数の柱が必要であろうか？ここで垂直力を N，水平力を T とし，せん断力を支える柱の本数を n とする．水平方向からθ傾いた柱にはせん断力の分力として $T\cos\theta$ がかかり，柱を回転させる方向の分力として $T\sin\theta$ の分力が働く．この分力の垂直成分が垂直力 N にうち勝ったときに回転が可能となるので，結局

$$nT\sin\theta\cos\theta = N$$

が成り立つとき，ダイレイタンシーが始まるということになる．摩擦係数 $\mu = T/N = 0.7$ とし，$\theta = 30^\circ$ とする（$\theta = 60^\circ$ としても同様）と，$n = 3.3$ となる．すなわち，3本ないし4本の柱ができれば，それで上盤の重量を支えることが可能になるのである．（これは上盤全体を剛体と見做せる場合の話である．）

図8の14を見るとたしかにその程度の数の柱が形成されているように見える．重要なことは，たとえ多くの柱が形成されていたとしても，最終的にダイレイタンシーを引き起こすのに必要な柱の数は数本で十分である，ということである．そしてこの数本の柱が断層全体の強度を決めるのである．

このことはさまざまなガウジ層に対して行ったせん断実験の結果からも間接的に支持されている．石英砂にわずかの大理石砂を混合した場合，強度は飛躍的に向上した．これは大理石砂をかなり含む柱が，数は少なくても数本形成され，その柱が支配的になったと考えれば説明がつく．さらに，大理石砂の全体に占める割合は5%と少なくとも，大理石砂だけからなる帯状の部分を作った場合，すべてが大理石砂の場合とほぼ同じ強度が得られた，という事実は，このような構成では必ず大理石砂だけからなる柱が確実に数本以上できていることを考えると，十分納得される．

図4と図5から，ガウジ層のせん断強度は，回転半径に逆比例する，ということが言えそうである．すなわち，回転半径が小さいものほど強度が大きい．図12は，回転半径と強度（スティックスリップを起こす直前の，水平力 T／垂直力 N）の関係を示したものである．粒度分布がフラクタル分布をする石英砂（qsf）は，回転半径が著しく小さくなる（すなわち，柱の長さが短くなる）が，これを除いては物質に依らずほぼ回転半径によって強度が定まるように見える．

回転半径は，層厚とガウジの粒度分布に依存して自己組織化的に決まるので，強度もこれらに依存して決定されると考えてよいだろう．

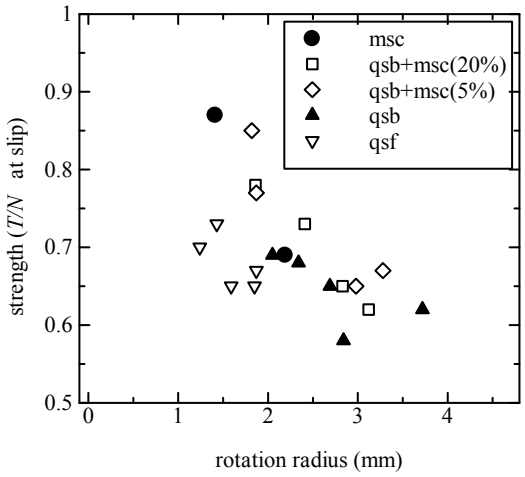

図 12　回転半径とせん断強度（スティックスリップを起こす直前の、水平力 *T*／垂直力 *N*）.

このように，ガウジ層を有する断層に，せん断力が加わったとき，どのようなプロセスを経て最終破壊に至るかが明らかとなった.

実際の断層はかなり幅の広い破砕帯を持つものが多く，その内部構造は一様ではない．むしろ，スケールの違いはあるにしても，ここで見たような不均一さをもつものであると考えてよいのではないか．実際，破砕帯で行われるボーリング調査などの報告によれば，かなりグサグサな部分と，硬い部分が混在しているようである．であるとすれば，ここで明らかとなったようなプロセスが破壊に至る過程で進行することも十分あり得ることである.

本稿で得られた知見は，断層を透過する波動の変化（Yoshioka and Sakaguchi, 2006）とあわせて，断層のすべりを予測する上で有用なものであると思われる.

謝辞

本研究は科学研究費補助金，研究課題番号 14340134（平成 14－17 年度）と 18340134（平成 18－19 年度），および平成 18 年度三菱財団自然科学研究助成金の援助を受けて行われた.

参考文献

Duran, J. (2000), Sand, Powders and Grains; An Introduction to the Physics of Granular Materials, Springer-Verlag, New York and Berlin.

村山朔郎. (1990): 土の力学挙動の理論, 技報堂出版.

Oda, M. and Konishi, J. (1974); Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear, Soils and Foundations, 14(4) 25-38.

Schanz, T. and Vermeer, P.A. (1996): Angle of friction and dilatancy of sand, Geotechnique, Vol. 46, 1, 145-151.

Shibata, T. and Karube, D. (1965): Influence of the variation of the intermediate principal stress on mechanical properties of normally consolidated clay, Proceedings of the Sixth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 1, 359-363.

Yoshioka, N. (2003): A sandpile experiment and its implication for self-organized criticality and characteristic earthquake, *Earth, Planet and Space, 55*, 283-289.

Yoshioka, N. and Sakaguchi, H. (2006): An experimental trial to detect nucleation processes by transmission waves across a simulated faults with a gouge layer, in *Advances in Geosciences*, Vol.1 Solid Earth (eds. W-H. Ip, and Y-T Chen), World Scientific, 105-116.

Yoshioka. N. and Sakaguchi, H. (2008): Looking into a sandpile by photo-elasticity and discrete element method, in *Advances in Geosciences*, Vol. 13, Solid Earth (ed. K. Satake), World Scientific, 281-290.