固体地球科学における光弾性技術利用のすすめ

吉岡直人

深田地質研究所

An invitation to using photo-elastic technique in solid earth sciences

YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨:光弾性技術はもともと,機械や構造物の応力解析に用いられた技術であったが,この 光弾性物質を使った実験が,地球科学の分野応用されはじめている.一つはすでに深田地質 研究所年報 No.10 で紹介したガウジ層内部の構造解析(「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」)であり,もう一つは砂山崩しの実験を,光弾性物質を使 った2次元の砂山で行い,その内部構造を解明する試みである.これらはいずれも筆者が行 ったものであるが,本稿ではそれらを紹介すると同時に,他の研究者による光弾性物質を使 った研究も併せて紹介し,光弾性技術を地球科学に応用する今後の可能性について考えてみ たい.

キーワード:光弾性,ガウジ,応力鎖,砂山崩し,固体地球科学

Abstract: The photo-elastic techniques were originally developed in the stress analysis of various machines and artificial constructions. These techniques have recently been applied to the solid earth sciences. An example is the stress analysis of the gouge layers under shear stress condition, which was already reported in the Annual Report No.10 of Fukada Geological Institute ("An analysis of the internal structure of gouge layers under shear stresses and a trial for prediction of slips" by Yoshioka and Sakaguchi). Another one is the sandpile experiments using photo-elastic materials. These examples were done by the author. In this paper, I will introduce experiments done by other researchers in addition to the experimental works done by myself and consider the possibility of applying the photo-elastic technique to solid earth sciences.

Keywords: photo-elasticity, gouge, stress chain, sandpile experiment, solid earth science

1. はじめに

光弾性技術はもともと、工学の分野で開発・ 使用されてきた応力解析の技術である. すなわ ち、さまざまな機械や、ビルディングや橋梁と いった人工構造物の模型を光弾性物質で作成し (あるいは構造物模型の表面に光弾性物質を塗 布し),これに偏光を当て,その模様の観察から 機械や構造物にかかる応力を解析する,といっ たことが行われてきたようである.

しかしながら,コンピュータの発達と,有限 要素法という有力な計算手法が発達したために, 光弾性物質を使った実験よりも,より安価に, 短時間で,しかも信頼性の高い結果が得られる ようになり、そのためこの技術は急速に使われ ることが少なくなった、という歴史があるよう だ.実際、私は光弾性物質を使用するに当り、 光弾性技術の教科書を探し求めたのだが、つい に古本屋でしかそれらを見つけることができな かった、という経験をした.そしてそのような 歴史が、すでにその教科書に書かれていた(山 崎・三浦、1997).もっとも、その教科書の著者 は、有限要素法との「共生」は成り立つものと 考えていたようではある.

光弾性実験のための実験装置についてもイン ターネットなどでいろいろ調べ,製造している 国内メーカーを探し,パンフレットなどを取り 寄せてはみたが,それらはいずれも大きなレン ズをいくつも並べたような,広い場所を必要と する,古色蒼然たる実験装置であり,値段も決 して安いものではなかった.

しかし,ある日,ある代理店が扱っているア メリカ製の光弾性解析装置が目に止まった.そ れは上に述べたような大型のものではなく,偏 光を発する光源と,カメラ,パソコンに内蔵さ れた解析プログラムからなる,いかにもスマー トなものであった.

しかし、その時点ではその時予定していた実 験(砂山を光弾性物質で模擬して作り、内部の 応力鎖構造を調べる)に適用できるかどうか不 安であったので、まず、実験で使えそうな光弾 性物質を見つけることから始め、それを代理店 に持ち込んで仮実験をしたあと、購入を決める という手順を踏んだ.

筆者はその後,この装置を使って砂山崩しの 実験を行い,内部構造を観察することに成功し たが(Yoshioka and Sakaguchi, 2008),これをガ ウジ層にせん断力を加えたときの解析にも応用 することができた.後者については深田研年報 No.10 に報告した(吉岡・阪口, 2009). 本報ではこれらの実験に加え,他の研究者が 行った光弾性実験の紹介も併せて行いたい.

2. 他研究者による光弾性実験の例

2.1 土質力学における例

筆者の知る限りにおいてもっとも古い例は, 土質力学を扱う分野において,やはり粒状体の 内部構造を扱ったものである(Matsuoka, 1974). 光弾性物質で作った丸棒を重ね合わせて,これ に一面せん断試験や,2軸圧縮試験を行ったよ うである.35年以上も前にようなことが行われ ていたとは驚くべきことである.ただ当時の技 術レベルの問題かどうかはよく分からないが, 内部の構造は見えてはいるが,柱の数が多すぎ て,上記の2つの試験の違いがあまり明瞭に区 別されない.また,統計的な処理も行われた形 跡はない.

その後,この光弾性技術を利用した研究が土 質力学の分野で発展したかどうかは,寡間にし て分からない.

2.2 地震学における例

プラスチック (ポリエステル) の一種である Homalite という物質を使った実験が行われてき た. (Rosakis, et al., 1999, Xia et al., 2004, Lu et al., 2007, Biegel et al., 2008). この物質は非常に高い 光学的な性質 (ultra-high optical quality) をもつ 板であるという. すなわち, Homalite の板に力 を加えて応力を生ぜしめると, 応力の差に応じ て透過光に複屈折が生じ, 偏光板を通して見る と模様が見えるのである. この性質を利用して, 動的な応力変動の様子を, 高速のカメラで観察 する. たとえば, Xia et al. (2004)や Biegel et al. (2008)で紹介されている実験は, 厚さ 1cm, 1 辺約 15cm の正方形の板に, 水平方向から 25° 程度の角度をもった切り込みを入れ、これを模 擬断層とし、上下方向に力を加える.つまり1 軸圧縮試験である.切り込みの角度が25°程度 であるから、上下から押しても容易に滑りは生 じないが、断層の中央部分に電気ショックを与 えると、そこから破壊が断層上に広がり、同時 に発生した波動の広がりも認められるというの である.その一例を図1に示す.

図1の左上から右下に走る斜めの線が模擬断 層である.上図は断層上の圧力が7MPaの場合, 下図は15MPaの場合である.いずれも破壊開始 から28μs後である.いずれにしても,偏光を





図 1 Homalite を使った破壊実験の例. (Xia *et al.*, 2004 からの引用)

使って応力の異なりを白黒の濃淡の違いで観察 し、断層運動の詳細を実験室で眼で見えるよう にしたものである.

2.3 物理学における例

アメリカのノースキャロライナ州に Duke 大 学という大学があるが、この中の Department of Physics & Center for Nonlinear and Complex Systems という部門の Robert Behringer という教 授の研究室は、粉粒体の物理学を専門としてお り、多くの若手研究者を輩出して、夥しい数の 論文を書いている.その中に、光弾性物質を使 った実験を行ったものがいくつかある.1999年 にすでに光弾性物質を使った砂山に関する論文 を書いているから (図2)、残念ながら我々が世 界最初の、光弾性による砂山実験を行ったとは 言えない.

光弾性物質を使った砂山実験の論文は、いず れもアメリカ物理学会の会誌 Physical Review E に掲載されているもので(Vanel *et al.*, 1999, Geng *et al.*, 2001),彼らの関心は、砂山の作成履歴が 砂山の内部構造に及ぼす影響ということらしい. すなわち、円形のテーブルの上に、雨のように 砂を降らせて作った円錐形の砂山では、底面に かかる圧力分布は中心部で一番高くなるという、 常識的な結果をもたらすが、テーブルの中心に 集中的に砂を落下させて砂山を形成すると、砂



図2 世界初の砂山の光弾性写真. (Vanel *et al.*, 1999 からの引用)

山頂点の真下では圧力が低くなる.このこと自体は実験をとおして以前から知られていたが (Jotaki and Moriyama, 1979),この原因を光弾性物質を使った実験で求めようというのである.

この他にも彼らは光弾性物質を使った実験 をいろいろ行っている.たとえば、円筒の中に 砂を入れ、真中に細いもう一つの円筒を入れて、 これを回転させると、二つの円筒に挟まれた砂 層には、Quette shear flow という複雑な流れが生 じるが、この砂層に生じる応力鎖を光弾性で見 る実験である(Howell *et al*, 1999).

このように、粒状体を扱う分野では、光弾性 物質を使った模擬実験は、その内部構造を直接 観察できるので、有力な武器になりそうである. 以下に、われわれが行った、光弾性物質を使っ た実験を紹介する.

3. 光弾性物質による砂山崩しの実験

3.1 研究の動機

実際の砂を使った砂山崩しの実験は物理学の 分野では 1980 年代後半から 1990 年代初頭にか けて多く行われていたようである(たとえば, Jaeger *et al.*, 1989, Held *et al.*, 1990, Rosendahl *et al.*, 1993, 1994,). これは,有名な Bak *et al.*(1987) の"自己組織化臨界現象(Self-organized Criticality, SOC と略)"という概念に刺激を受けた研究者 たちが,セルラーオートマトンという,計算機 上での砂山モデルだけではなく,実際の砂を使 った実験を行ってみようという動機からだった と思われる.

私たちも実際の砂を使った砂山崩し実験を行った(Yoshioka, 2003)のだが、砂山の崩れ方は 砂粒の大きさと、砂山を受ける皿の大きさの比 で大きく変わることが見出されたのである.す なわち,砂粒の粒径が皿の直径に比べて 1/100 以上のときは、一度に崩れる砂の量の頻度分布 は確かにべき乗則にしたがい、SOC 的になるの だが、その比が 1/100 以下になると、崩れ方は 周期的になり、大きさも一様となる.私たちは これを"固有地震 (characteristic earthquake, CE と略)"的と呼ぶことにした.

砂粒の粒径と受け皿の大きさの比によって, このような変化があること自体は知られていた のだが,問題はなぜこのようなことが起きるか, その背後にある物理である.シカゴ大学のグル ープはこれに一つの解釈を試みている(Liu *et al.*, 1991, Nagel, 1992).ここで詳しく述べる紙面 の余裕はないが,この説明はわれわれを納得さ せるものではない.

通常の地震は、グーテンベルグ・リヒター則 で示されるように規模別頻度分布はべき乗則に したがい、SOC 的であるが、プレートの沈み込 み帯で起きる巨大地震は CE 的である.そして 上述のように、この二つの現象が砂山の崩れ方 でも観測されるのである.地震と砂山でのこの 類似性に着目したわれわれとしては、砂山の力 学をよりよく理解することによって、地震の問 題への理解を深めたいと考えるのである.砂山 のナダレは表層の問題ではあるが、大きいナダ レは砂山の内部構造に大きく影響されている可 能性がある.よってこれを調べることによって この問題に迫ろう.これが光弾性物質を使った 砂山崩し実験を行うに至った動機である.

3.2 光弾性物質と実験装置

光弾性をよく示す物質としては、寒天やゼラ チン、エポキシ樹脂などが知られているが、私 たちの実験ではポリウレタンで作られたPSM-4 と名付けられたシートを採用した.これは米国 の Vishay Intertechnology グループの Measurements Group, Inc. が製造販売している 光弾性物質である. Young 率は4 MPa と小さく (弾性ゴム程度),自重のみによって光弾性の性 質を発揮することが期待できる. この材料は厚 さ 1/4 インチ (6.35 mm), 10×20 インチ (254 ×508 mm)の板状で販売されているので,これ を購入して,直径9 mm および 12 mm の刳り抜 き用治具を作成し,ボール盤で1つ1つ刳りぬ いて円盤状の模擬砂を作成した.

このようにして作成した"砂"を1つずつ数 を数えながら、2枚の透明な壁の間(壁間は 7 mm)に落として砂山を形成する.砂と壁の摩 擦をなくすため、砂には薄く細かいパウダーを 塗布してある.

こうして形成した2次元の砂山に偏光を当て,

逆側からカメラで撮影し、コンピュータに取り 込んで処理をする. このシステムは米国 StressPhotonics 社の GFP1200 で行った. 1 つの 状態に対して 16 枚の写真を撮り、合成するとい うシステムであるので、16 枚の写真を撮りきる のに 15 秒ほどを要する. このため、同じ光弾性 と言っても、2.2 で紹介した動的なシステムと は異なる.

3.3 砂山の内部構造

このシステムで採取した砂山内部構造の写真 を図3に示す.これは、100 cmの長さの台の上 に、2500 個の粒子を、山の頂点部分(図の右側. 柱で固定してある.)に1つずつ落下させて作っ たものである.図の黒い部分が応力が大きい部



図3 光弾性物質を使って作った2次元の砂山の光弾性写真. 台の長さは 100 cm. 右端は柱で固 定. 2500 個の粒子からなる. 黒い部分が応力の大きい部分.

分である.

粒子の数がふえるにしたがって、山は崩壊を 繰り返しながら成長し、その内部には図に示さ れているように、強い柱が形成されてゆく.山 の中心部(右側)の底辺付近では、アーチ状の 構造がいくつも重なっているように見える.山 は柱状の応力鎖によって支えられ、柱の間にあ る粒子は、山の構造を支えることに寄与してい ない.すなわち、一部の粒子だけが構造を維持 するのに貢献している.表面付近では、斜面に 平行な方向の応力鎖が発達し、その上の粒子を 支えている.

3.4 定量的解析

このように、砂山内部の構造を可視化するこ とに成功した.しかしながら、このような画像 は構造を直感的に把握するには適してはいるも のの、このままでは定量的に議論するには向い ていない.

そこでこれらの図を基にして,定量的な解析 を行うべく,このための研究を科学研究費に「砂 山の臨界状態の解明から地震の予測法を探る試 み」という研究課題として提案申請した(基盤 研究(C)).幸いにもこれが認められ,平成21 年度から3年間この研究を行うことが可能となった.

図3に示した画像は 512×384 のピクセルか ら成る. 各ピクセルは光の明るさに対応した数 値を持っている. これを EXCEL のデータとし て吐き出すツールは GFP1200 に備えられてい る. ただし, バージョン 2007 以前の EXCEL では 256 列しか収容できないため, バージョン を 2007 以降にする必要がある.

EXCEL に吐き出した数値データを, さらに 一般の数値データとして書き出し, 形式を整え て保存した.現在までに撮られた画像データは すべてこの形式で保存されている.

このデータから,解析に不必要な部分(砂山 以外の部分,図3の左上の部分など)を除外し, 砂山で指定した値以上の値を持つピクセルだけ を取り出したものが,図4の上図に示されてい る.

隣り合うピクセルが指定した値以上の値を持 つ場合,それらを一まとめにしてクラスターと





図4 上:不必要な部分を取り除き,指定した値 以上のピクセルを描き出したもの.下:隣接す るピクセルが指定した値以上の場合,塊(クラ スター)として認識し,各クラスターを,同じ 面積の円(赤色)で表したもの.

して認識させる.大きなクラスターは数十個の ピクセルからなる.このようにして自動的にク ラスターとして判別したものを,そのクラスタ ーと同じ面積を持つ円で近似する.図4の下図 の赤丸は,このようにして描いたものである.

次の作業は隣り合う円が近い場合,その2つ の円は互いに力を及ぼしあっており,柱構造を 形成していると判断して,その円の大きさに応 じた太さの柱で結ぶ.図5の青色で描いたもの がこの柱構造である.また左上の図は,この柱 の太さと向きを考慮して描いたローズダイアグ ラムである. 60度の方向の柱が発達しているこ とがわかる.

これは砂山内部のすべての柱を対象におこな った統計であるが、今後は、表層部分や、底に 近い部分、頂点の直下の部分などに分けて、統 計をとり、比較するなどの工夫が必要となるか もしれない.

今後も様々な試みをする予定であるが、「砂 山」についてはとりあえずここまでとする.



Y100HC-2_29_cr070

図5 図4の下図に描いた円のうち,指定した距離内にあるものを,円のおおきさに応じた柱(青色)で 結んだもの. 左上は,この柱の太さと向きを考慮して描いたローズダイアグラム. 60度の方向の柱が発 達していることがわかる.

4. 光弾性物質によるせん断実験

4.1 光弾性物質

光弾性物質によるせん断実験については、すでに吉岡・阪口(2009,深田地質研究所年報第10号)において述べているので、ここでは主にこの実験で使った光弾性物質の特性について述べる.実験装置については同年報第10号の図6を参照されたい.

この装置で、当初は上で述べた砂山実験で使 用した「砂 (PSM-4)」を用いて実験を行った. その結果の一例を図6に示す. せん断実験では せん断力を載荷する前にかなりの垂直荷重をガ ウジ層に対してかける必要がある. 図6に示し



図6 PSM-4 を用いて行ったせん断試験の結果の一例.

た試験では,約1.3 kgの錘をかけている. これ を見ると,ほぼすべての粒子が光っており,ど こに強い力が加わった柱が形成されているのか が判然としない.

光弾性の教科書にも書いてあることなのだが、 実は円形の物質に上下から力を加えると、内部 には図7に示されるような複雑な、フリンジと 呼ばれる縞模様ができる.応力は中心部で一番 高くなっている.

光弾性によってできる模様は、力が加わると 光の振動方向によって位相差ができるために生 じる現象であるが、この位相差が波長を超える とまた見かけ上同じ色に戻ってしまう.だから 右に示されているカラーバーはそのままでは使 えないのである.

この複雑な現象が図6に示したガウジ層内部 の一つひとつの粒子で起こっており、もはやど こに強い柱ができているかが判然としなくなっ ているわけである.

そこで, Measurements Group, Inc. が販売して いる, もう一つの固体光弾性物質である PSM-1 を採用した. この物質の Young 率は 2.5GPa で あり, 硬いプラスチックと同程度の硬さである. これを用いて行ったせん断試験結果の一例を図 8に示す. 応力鎖の構造が明瞭である.



図7 1つの円形ディスクに大きな力を加えた場合に できる模様 (フリンジ).



図8 PSM-1を用いて行ったせん断試験の結果の一例.

4.2 定量的解析

この場合も「砂山」のときと同じように,解 析に必要なガウジ層の部分だけを取り出し,指 定した大きさ以上の値を持つピクセルのみを抽 出する.そして隣り合うピクセルが指定した値 以上の値を持つ場合,それらを一まとめにして クラスターとするところは,砂山の場合と同じ である.

ただし、せん断試験の場合の写真では、砂山 の場合に比べて、1 つの粒子が画面に占める面 積の割合が大きいので、1 つのクラスターを構 成するピクセルの数が非常に大きくなる、とい う問題がある.これを避けるために、「粗視化」

s0425-1_09 cr080



図9 粗視化、クラスター化(黒色のピクセル)を 経て、同じ面積の円(赤色)を描いたもの.





図 10 下:図9の円を鎖でつなぎ、上:鎖の方向と大 きさを考慮してローズダイアグラムを描いたもの.

を行ってから、クラスターの自動判別を行った. 「粗視化」というのは、上下左右隣り合う4つ のピクセルを1つのピクセルとみなすことであ る.そのピクセルの持つ値は、元の4つのピク セルの値の平均値とする.この新たなピクセル に対してクラスターの自動判別を行い、そのク ラスターの面積と同じ円を描いたのが図9であ る.

図 10 の下図は、このようにして描いた円のう ち、一定の近さ以下にあるものどおしを線で結 んだものである.ただし、ある値以下の面積の 円は省いてある.「砂山」のときと同じように、 線、すなわち応力鎖の太さは、結ぶ円の大きさ に応じて決められる.

この応力鎖向きと大きさを考慮して描いたの が図10の上図である.

またこのようにして描いたローズダイアグラ ムを、一連の試験での変化を見るために並べた のが図11である.これは年報第10号の図9と ほぼ同じであるが、各ローズダイアグラムは、 一連の試験の最大値で規格化しているところが 違っている点である.

またこれもすでに年報第 10 号で紹介したこ とであるが、一連の応力増加過程の各段階で、 応力鎖がどのように変化したかを、各図の差を とることによって知ることができる.この例を 示したのが図 12 である.上が変化前の応力鎖の 図、下が変化後の図であり、真ん中の図が両者 の差をとったものである.赤い部分が応力が増 えた部分、青い部分が応力が減った部分である. この間、どのような変化が起こったかは明瞭で ある.この真ん中の図を並べて、一連の試験の 中で、応力鎖がどのように変化していったかを 目で追うことができる(年報第 10 号、図 11 参 照).



図 11 応力鎖の向きの変化を示すローズダイ アグラム群.





S0425-1_08



図 12 06 と 08 の応力鎖の構造(上と下)と、その 差(中).06 から 08 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.

5. おわりに

これまで筆者が行ってきた実験を中心にして, 光弾性という技術を用いて何ができるかを紹介 してきた.「砂山」といい,「ガウジ層」といい, 粒状体の力学挙動を扱うものであったが,これ に限らず,2.2 で紹介したように,断層の近傍 での破壊や波の伝搬を可視化したものもある.

今後,どのような地球科学の分野で応用が可 能だろうか.たとえば、やはり粒状体の応用と して、付加体の形成過程を可視化することや、 斜面の安定性や崩壊過程の解明などにも、装置 を工夫することによって、利用出来ないだろう か.

これらはほんの一例であるが、アイデア次第 でまだまださまざまな方面で応用が効きそうな 気がする.

謝辞

本研究は科学研究費補助金,研究課題番号 21540442(平成21-23年度)の援助を受けて 行われた.

参考文献

- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987): Selfrganized criticality: An explanation of 1/f noise, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 381-384.
- Biegel, R. L., Sammis, C. G, and Rosakis A. J. (2008): An experimental study of the effect of off-fault damage on the velocity of a slip pulse, *J. Geophys. Res.*, 113, B04302.
- Geng, J., Longhi, E., Behringer, R. P., and Howell, D.
 W. (2001): Memory in two-dimensional heap experiments, *Phys. Rev. E, 64*, doi: 10.1103/Phys RevE.64.060301.

Held, G. A., Solina, D. H., Keane, D. T., Haag, W. J.,

Horn, P. M., and Grinstein, G (1990): Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile, *Physical Rev. Lett.*, *65*, 1120-1123.

- Howell, D. W., Behringer, R. P., Veje, C. (1999) Stress fluctuations in a 2D granular couette experiment: A continuous transition, Phys. Rev. Lett., 82, 5241-5244.
- Jaeger, H. M., Liu, C-h., and Nagel, S. R. (1989): Relaxation at the angle of repose, *Phys. Rev. Lett.*, *62*, 40-43.
- Jotaki, T., and Moriyama, R. (1979): On the bottom pressure distribution of the bulk materials piled with the angle of repose, *J. Soc. Powder Technol. Jpn.*, 60, 184-191.
- Liu C-h, Jaeger, H. M. Nagel, S. R. (1991): Finite-size effects in a sandpile, *Phys. Rev. A*, 43, 7091-7092.
- Lu, X., Lapusta, N., and Rosakis, A. J. (2007): Pulse and crack-like rupture in experiments mimicking crustal earthquakes, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*,104, 18931-18936.
- Matsuoka, H. (1974): A microscopic study on shear mechanism of granular materials, *Soils and Foundations*, 14, 29-43.
- Nagel, S. R. (1992): Instabilities in a sandpile, *Reviews of Modern Physics*, 64, 321-325
- Rosakis, A. J., Samudrala, O. and Coker, D (1999): Cracks faster than the shear wave speed, *Science*, *284*, 1337-1340.
- Rosendahl, J., Vekic, M., and Kelly, J. (1993): Persistent self-organization of sandpiles, *Phys. Rev. E*, *47*, 1401-1404.
- Rosendahl, J., Vekic, M., and Rutledge, J. E. (1994): Predictability of large avalanches on a sandpiles, *Phys. Rev. Lett.*, 73, 537-540.

- Vanel, L., Howell, D., Clark, D., Behringer, R. P., and Clement, E. (1999): Memories in sand: Experimental tests of construction history on stress distributions under sandpile, *Phys. Rev. E*, 60, R5040-R5043.
- Xia, K., Rosakis, A. J. and Kanamori H. (2004): Laboratory earthquakes: The sub-Rayleigh-tosupershear rupture transition, *Science 303*, 1859-1861
- 山崎良一, 三浦基弘 (1997): 光弹性実験構造解 析, 日刊工業新聞社
- 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. (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.
- 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第 10 号, 109-121.