# 砂層の剪断帯に与える粒径の影響:砂箱実験の例 Influences of grain size on shear zones of sand layers: An example of sandbox experiments

# 藤内智士\*・清水 知\*\* Satoshi Tonai\* and Tomo Shimizu\*\*

\*〒 780-8520 高知県高知市曙町 2-5-1 高知大学理工学部地球環境防災学科 \*\*〒 790-8571 愛媛県松山市二番町 4-7-2 松山市役所 \*Department of Global Environment and Disaster Prevention, Faculty of Science and Technology, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan \*\*Matsuyama City Hall, Matsuyama 790-8571, Japan

要旨:厚さが同じで粒径の異なる砂層に発達する剪断帯群の違いについて調べた.その結果,剪断帯は移動量の増 大とともに剪断ひずみ(移動量と幅の比)が大きくなっていくこと,粒径の大きい砂層の剪断帯ほど幅が大きく なりひずみ量は小さくなることがわかった.また,今回行ったクーロンウェッジの形成実験では,全体の変形の進 行にともなって新たな剪断帯ができていった.粒径が大きいほど新たな剪断帯ができていく間隔は大きいが,そ の影響は粒径が剪断帯の幅に及ぼす影響に比べると小さかった.このことも,粒径の大きな砂層にできる剪断帯 ほどひずみ量が大きくならない要因と考えられる.

Abstract: We investigated influences of grain size on shear zones developed in sand layers of the same thickness. The results show that the shear strain rates, which are defined by the ratio of the displacement to the width of the shear zones, increase with increasing the displacement and the shear zones in the coarser grain sand layers have the smaller shear strain rates because of their wider widths. In addition, the Coulomb's wedge experiments in this study developed multiple shear zones during their deformation. Although the coarser sand layers show larger interval of the shear zones, the influence is smaller than that on the width of the shear zones. Such deformation pattern also contributes to the suppression of the shear strain rates of the shear zones.

キーワード: 剪断帯, 断層, 褶曲, スラスト-褶曲帯, 砂層, 模型実験, 砂箱 Keywords: shear zone, fault, fold, fold-and-thrust belt, sand layer, analogue experiment, sandbox

#### 1 はじめに

地層に見られる変形構造の代表的なものとして断層 と褶曲がある. どちらも天然の地層中に普遍的に見ら れ,乾燥砂などの粉粒体を用いた実験でも比較的簡単 に作ることができる. 地層が未固結,すなわち粉粒体 層の場合には,断層や褶曲は主に粒子間のすべりが局 所化することでできる. そこで,本論文では,粉粒体 層にできる断層と褶曲をまとめて剪断帯と呼ぶことに する.

粉粒体層にできる剪断帯の形成過程には、単一粒子の 粒径・形・力学特性、粉粒体層の大きさ・形・応力状態・充填 率など、複数の因子が関わっている(例えば、Mühlhaus and Vardoulakis, 1987; Desrues and Viggiani, 2004). 例えば、粒子の形が剪断帯の構造や挙動に影響を与える ことが、形の異なる種子を用いた実験から報告されてい る(Mueth et al., 2000).また、粒子接触点での転がり 抵抗の違いが剪断帯内の空隙や粒子回転に影響を与える ことが自然砂を用いた実験(Oda and Kazama, 1998) や数値シミュレーション(Iwashita and Oda, 2000)か ら指摘されている.実際の粉粒体層の挙動はこれらの 因子が複雑に組み合わさっており、剪断帯の形成過程 については現在も未解明の部分がある.現状では、個々 の因子が与える影響を明らかにしていくことが重要で ある.

本研究では、粒径の違いが剪断帯に与える影響について、粒径の異なる砂層からクーロンウェッジを作る模

1



図 1: 実験装置の概念図. スケールは無視している.

型実験を行って調べた、粒径が粉粒体層の変形に与える 影響については、離散要素法(DEM)シミュレーショ ンを用いた研究(小早川ほか, 2019)や, 異なる粒径 のマイクロビーズを用いた模型実験の研究(山田ほか, 2006)がある.しかし、これらの先行研究では粉粒体 層全体の変形についての議論が中心で、個別の剪断帯 についての詳しい議論はされていない. 後述するよう に、本研究では写真データに加えて X線 CT 画像デー タを使うことで、剪断帯の発達過程を詳しく議論する. また、乾燥砂を用いたクーロンウェッジ形成では、変形 とともに複数の剪断帯ができていくことが知られてい る (例えば, Huiqi et al., 1992; 山田, 2006). 天然の 地層でも産状の似た複数の断層や褶曲がしばしば発達 しており、そのことが個々の剪断帯に与える影響につ いて考えることも重要である. このような複数の剪断 帯ができる条件での粒径の影響を考える点は、本研究 のもう一つの特徴である。

#### 2 手法

#### 2.1 装置と実験材料

粉粒体層を水平短縮させてクーロンウェッジを作る実 験装置には、壁を移動させて粒子層を短縮させる可動 壁モデル (moving-wall model) と、粒子層を移動させ て壁に衝突させる固定壁モデル (fixed-wall model) が あり、両者の実験結果はほぼ同じになるとされる (例 えば、Schreurs et al., 2006).本研究では、固定壁モ デルによる実験装置を作成した (図1).装置の容器は、 厚さ5 mm のアクリル板からなり、高さ 158 mm、奥 行き 118 mm、長さ 693 mm である.また、両側面の 内側に厚さ5mmのガラス板を取り付けて,砂層と容 器側面の間に発生する摩擦の影響を小さくした.

砂層は, 基底に敷いたシートをアクチュエータ (RSD302B, Misumi)の可動部と繋いで水平に引っ張 ることで移動させた.このアクチュエータは, 最大推 力 900 N で, 可動部の最大伸縮距離は 250 mm, 伸縮 速度を 0.5–50.0 mm/sec の間で調節でき,専用のアプ リケーションを使って PC 上で動きを制御できる.

砂層の下に敷くシートには,壁紙用のカッティング シート(711M/ホワイトM,中川ケミカル)を用いた. これ以降,単にシートと呼ぶことにする.このシート は片面が粘着質でその上に乾燥砂を敷き詰めて実験を 行った.粘着質の面は摩擦抵抗が大きいため,実験で できるクーロンウェッジの基底部では、シートと接した 砂粒子とその上の砂粒子との間で剪断がおこる.その 様子は実験中の観察でも確認できた.

実験には、粒径の異なる4種類の乾燥砂(珪砂2号, 珪砂3号, 珪砂4号, 珪砂6号)を用いた(図2).実 体顕微鏡による観察では、いずれの乾燥砂も石英と長 石を主体として雲母などの有色鉱物や岩片をわずかに 含み、球形度は中程度で円磨度は低い(図2).粒径 は、珪砂2号が3.6-6.0 mm,珪砂3号が2.3-3.9 mm, 珪砂4号が1.3-1.9 mm,珪砂6号が0.3-0.5 mm程度 である.実験で生じる変形を見やすくするために、砂 粒子を万年筆用の水性インキ(iroshizuku, PILOT)で 赤(INK-50-MO)あるいは青(INK-50-KJ)に着色し、 着色していない粒子と一緒に使った.



図 2: 実験に使った乾燥砂. (a) 珪砂 2 号, (b) 珪砂 3 号, (c) 珪砂 4 号, (d) 珪砂 6 号.

#### 2.2 実験手順

まず、容器の底にシートを敷き、それを固定壁の底に あけた高さ 2 mm のスリットから取り出してアクチュ エータの可動部と繋ぐ.次に、シートの上に乾燥砂を 敷く. その際,一定の高さから砂粒子を自由落下させ ることで、できるだけ均質に敷き詰めるように注意し た。砂層の厚さは全部で 19-34 mm にし、そのうち下 部層は粒径の大きな粒子がスリットに引っ掛かること によるクーロンウェッジの変形の乱れを避けるため珪砂 6号とし、上部層を実験ごとに粒径の異なる珪砂を使っ て敷き詰めた. 試行の結果, 下部層を層厚 5-10 mm に すると上部層粒子のスリットへの引っ掛かりを完全に 取り除くことができた(表1).また,実験中の変形を 観察しやすいように、上部層は着色した砂粒子として いないものとを交互に敷き詰めて厚さ5mm 程度の層 模様を作った。砂粒子を敷き詰め終わったら、アクチュ エータによってシートを水平方向に引っ張り、容器内 の砂粒子を固定壁に衝突させてクーロンウェッジを作 る. 本研究では、シートの水平変位速度を 0.5 mm/sec で統一し,総変位量は 250 mm とした. これは,変形

前と変形後の砂層の長さをそれぞれ  $l_0$  および lとして 水平短縮  $E = 100 \times (l_0 - l)/l_0$  を定義すると E = 36%にあたる(表 1).ただし、Exp2024 は剪断帯のデータ をより多く取得するために変位量を 300 mm (水平短 縮で 43%)まで変形した(表 1).アクチュエータの発 進時および停止時の加速度は十分小さく、これによる 実験の影響は無視できるとした.

変形の様子は写真で連続撮影して記録した.写真は, デジタル一眼レフカメラ(本体:NIKON D5600,レン ズ:AF-S DX Nikkor 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR) を砂箱側面から 90 cm の距離に固定して,シートの引張 方向に平行する鉛直断面を撮影した.撮影間隔は,シー ト変位量で 0.6 mm ごとあるいは 50 mm ごととした (表 1). 一枚の写真データのサイズは,縦が 2000 pixel で横が 2992 pixel である.

実験の一部は、写真の撮影と並行して X 線 CT を測 定した(表1).高知大学海洋コア総合研究センターに 設置されている X 線 CT スキャナ(PRIME Aquilion, TOSHIBA)を用いて、シートの引張方向に直交する 0.5 mm 間隔のヘリカル型式で測定した.1回の実験に 対して、シート変位量で 50 mm ごとに複数回の測定を

Exp. No.	Upper sand layer (Quartz sand)	Lower sand layer (Quartz sand)	Total (upper + lower) layer thickness (mm)	Sheet displacement (mm)	Shortening (%)	Photo interval (mm)	X-ray CT interval (mm)
2017	No. 2	No. 6	30 (20 + 10)	250	36	0.6	-
2019	No. 2	No. 6	26 (16 + 10)	250	36	0.6	—
2021	No. 2	No. 6	34 (24 + 10)	250	36	50	50
2016	No. 3	No. 6	23 (15 + 8)	250	36	0.6	_
2018	No. 3	No. 6	24 (15 + 9)	250	36	0.6	_
2024	No. 3	No. 6	22 (17 + 5)	300	43	50	50
2011	No. 4	No. 6	23 (14 + 9)	250	36	0.6	_
2014	No. 4	No. 6	20 (12 + 8)	250	36	0.6	—
2022	No. 4	No. 4	29 (19 + 10)	250	36	50	50
1956	No. 6	No. 6	22 (14 + 8)	250	36	0.6	_
2013	No. 6	No. 6	19 (11 + 8)	250	36	0.6	_
2020	No. 6	No. 6	20 (10 + 10)	250	36	50	50

表 1: 実験データ.

行った.得られた CT データからシート引張方向に直 交するスライス画像を 512 × 512 voxel のサイズで再 構成した DICOM ファイルを作った.本研究では測定 範囲を 169.5 × 169.5 mm としたため,画像表示した際 の 1 pixel は約 0.33 mm 四方に相当する.再構成した CT 画像の画素値は、あらかじめ測定しておいた標準試 料の CT 値にもとづき、空気の値を-1000、水の値を 0 として正規化した HU (Hounsfield Unit)単位の整数 値を用いた.画像処理ソフトである OsiriX (ニュート ン・グラフィックス)を用いて DICOM ファイルから 3 次元データを作成し、観察および解析を行った.

#### 3 結果

本研究では、それぞれの珪砂を用いて3回ずつ計12 回の実験を行った(表1).その結果、同じ珪砂を用い た実験はほぼ同じ変形が観察されたことから実験の再 現性があると判断した.以下、実験結果をまとめる.

全ての条件で、シートを水平方向に引っ張り、砂層 を固定壁に押し付けるとクーロンウェッジができた(図 3).また、変形の進行とともにウェッジが大きくなっ ていく様子がみられた.図3の左列は、シートを250 mm引っ張った後の写真画像である.色の異なる砂層 を目印として変形の様子を観察できる.目視および連 続写真で観察された主な変形機構は、砂粒子間で起こ る摩擦すべりと転がりすべりであった.これらの変形 はウェッジ内部の限られた場所に集中して起こり、その 結果、複数の剪断帯ができていく様子がみられた.こ れらの剪断帯を、主に傾斜の方向と角度にもとづいて3 種類に分類した(図3e,j).ひとつは、シートの直上に 見られるシートとほぼ平行の剪断帯で、デタッチメン ト(detachment)と呼ぶことにする.2つ目は、シート を引っ張る方向(図3の右方向)に傾いているもので、 これをフロンタルスラスト帯 (frontal thrust zone.以下,FT) と呼ぶことにする.3つ目の剪断帯は,FT と は反対方向 (図3の左方向) に傾斜しているもので,こ れをバックスラスト帯 (back thrust zone.以下,BT) と呼ぶことにする.

それぞれの剪断帯ができて発達していく過程は、粒 径の違いに関係なくほぼ共通していた.デタッチメント は、クーロンウェッジの形成開始とほぼ同時にできて、 シートの移動とともにクーロンウェッジの先端方向に延 びていった.FTとBTは、クーロンウェッジの成長と ともに新しいものができていった.一つのFTができ てから次のFTができるまでのシート移動量は変形の 後期ほど長い.新しいFTとBTはクーロンウェッジの 先端部にでき、両者に挟まれた部分が隆起した.また、 一つのFTに対して複数のBTができることもあった.

図3の右列は、同左列とほぼ同じ領域のX線CT画 像である.X線の吸収率を表すCT値がクーロンウェッ ジ内で不均質に分布しているのがわかる.CT値の違い の原因は、剪断帯で起こるダイレーションによるかさ 密度の変化である.剪断帯でダイレーションが起こっ ていることは、珪砂2号および珪砂3号の層では目視 で確認できた.また、全ての実験において、変形とと もにクーロンウェッジ部を含む砂層全体の体積の増加が 認められた.さらに、実験の前後で砂粒子自身の破壊 や摩耗は認められなかった.以上のことより、周囲に 比べてCT値が低い部分は、ダイレーションが起こっ た剪断帯だと判断した.



図 3: (左列) 実験結果の写真.(a) 珪砂 2 号 (Exp2021),(b) 珪砂 3 号 (Exp2024),(c) 珪砂 4 号 (Exp2022),(d) 珪砂 6 号 (Exp2020).(e) 珪砂 6 号の結果に剪断帯を描き込んだもの.(右列) X 線 CT 画像. CT 値が相対的に低い部分が剪断帯 に対応する.(f) 珪砂 2 号 (Exp2021),(g) 珪砂 3 号 (Exp2024),(h) 珪砂 4 号 (Exp2022),(i) 珪砂 6 号 (Exp2020).(j) 珪砂 6 号の結果に剪断帯を描き込んだもの.

#### 4 考察

#### 4.1 先行研究との比較

実験の結果をもとに、粒径の違いが剪断帯の変形に 与える影響について考えていく.前述したように、今回 の実験で見られる剪断帯は、デタッチメント、フロンタ ルスラスト帯 (FT),およびバックスラスト帯 (BT) の3種類がある(図3).この特徴は、先行研究で報告 されている乾燥砂を用いたクーロンウェッジと共通し ている(例えば、山田、2006;Schreurs et al., 2006). また、それぞれの剪断帯ができていく大局的な流れも、 これらの先行研究が報告しているものとほぼ同じであ る.一方で、個別の剪断帯では、粒径による変化が見 られた.そこでこの論文では、変化が最も顕著であっ た FT の形成過程に絞って考察を進めることにする. 以下の考察では、まず、一つの FT の変形過程に注 目する.次に、粒径の違いが FT に与える影響に注目 する.

#### 4.2 一つのフロンタルスラスト帯 (FT) の変形過程

FTの形状の特徴を調べるために, FTの幅w(以下,幅wとする)とFT沿いの砂粒子の移動量d(以下,移動量dとする)を測定した.写真とCT画像を 重ねた画像を作ることで,着色した砂粒子で作った層 を目印として変形の様子がわかり,同時にCT画像よ り剪断帯の分布がわかる(図4).幅wは,低CT値領 域で認定したFTの幅について最大値と最小値を測り, その平均値とした(図5, 6, 7, 8).移動量dは,色 を付けた砂層の底面部でFT沿いの砂粒子の移動量を



図 4: (a) デジタル写真と CT 画像を重ねた図. 赤い部分は インキで色付けした砂層,青い部分は低 CT 領域(剪断帯) に,それぞれ対応する.(b) 剪断帯の幅 w と移動量 d の定義.

測った(図4b).

今回の一連の実験で観察された FT について,活動 初期と新しい FT ができた後の 2 つの時期で幅 w と移 動量 dを測り,それぞれ横軸と縦軸にとってプロット したのが図9である.ここで剪断ひずみ  $\gamma = d/w$  を定 義すると,全ての FT はできた直後は剪断ひずみ  $\gamma$  が 小さく,移動量 dが増えるにつれて幅 w と剪断ひずみ  $\gamma$  がともに大きくなっていく(図9).言い換えると, 今回の実験でできた FT について,幅 w は移動量 dに 比べて増える割合が小さいという特徴が認められた.

#### 4.3 粒径の違いが FT に与える影響

次に粒径による違いを考える。写真やCT画像を見ると、粗粒な砂層ほど幅 w は厚い傾向がある(図3,9)。

粒径の違いによるクーロンウェッジ内にできる剪断 帯の変化については、山田ほか(2006)が指摘してい る.彼らは、層厚が同じ場合は大きな粒径の粉粒体層 ほど変形に関与する粒子数が減少するため、ひずみが 局所化しにくくなり、断層数が減ると考えた.また、こ の際に、剪断帯(彼らの論文では"剪断面")の幅は 粒径の数倍から10倍程度であるとしている.今回の実 験で求めた剪断帯の形成時の幅と粒径の比は、珪砂2 号(平均粒径 4.8 mm)で 3.8–4.3 倍、珪砂 3 号(平均 粒径 3.1 mm)で 3.3–5.5 倍、珪砂 4 号(平均粒径 1.6 mm)で 5.1–6.8 倍、珪砂 6 号(平均粒径 0.4 mm)で 4.8–16.5 倍であり、先行研究で示されている範囲にほ ぼおさまっている.粒径が大きな層ほど形成時の幅と 粒径の比が小さいが,これは今回の実験で砂層の下部 を珪砂 6 号に統一したことと,FT が底部のデタッチ メントから伝播してできていくことが影響しているの かもしれない.あるいは,平均粒径以外の因子,例え ば,粒径分布,粒子の形,砂層の間隙率が影響してい る可能性もある.粒径以外の因子が剪断帯の幅に与え る影響については今後より詳しい研究が必要であるも のの,今回の実験において粒径が大きいほど剪断帯の 幅が大きいという定性的な結果は変わらない.この傾 向は,山田ほか(2006)の粒径の異なるマイクロビー ズを用いて作ったクーロンウェッジの図でも確認でき る.また,幅 wの大きな剪断帯ほど剪断ひずみ  $\gamma$  を大 きくするために必要な移動量 d は大きくなり,これが 粒径の大きな砂層ほど剪断ひずみ  $\gamma$ が小さくなる要因 の一つと考えられる.

粒径が大きく剪断帯の幅 wが相対的に大きな砂層で あっても、変形とともに剪断ひずみγは増していくの で、短縮量が大きくなれば剪断ひずみの大きな剪断帯 ができそうである.しかし、そうはならなかった.そ の主な原因は、今回の実験では複数の剪断帯ができる 変形が起こったためと考えた。FT は形成後,変形とと もに剪断ひずみγが大きくなっていったが、新たなFT ができた後はほとんど変形しなくなった。一つの実験 では、後からできる FT ほど移動量 dが大きくなり、最 終的な剪断ひずみγも大きくなった(図9).本研究で は、珪砂6号と珪砂4号で行った実験でできたFTの 多くは剪断ひずみγが5を超えた(図 9).一方で,珪  $砂 2 号および珪砂 3 号の層では、 \gamma が 5 を超える FT$ はできなかった(図9). 粒径が大きな層ほど剪断帯が 厚くなることは、その剪断帯が大きな剪断ひずみを達 成するのに必要な移動量が大きくなることを意味する. それに対して, FT ごとの移動量 d は粒径による変化 がそれほどない。その結果、粗粒の砂層は今回の実験 におけるシート引張量の範囲では,FTの剪断ひずみγ が大きくなる前に新たな FT ができたのである. つま り、今回行ったような砂層の厚さを一定にしたクーロ ンウェッジを作る実験では、一つの FT がある程度変形 した段階で新たな FT ができていく変形様式が, 個別 の剪断帯のひずみ量に制約を与えたと言える。一つの 剪断帯のひずみが蓄積して新たな剪断帯の形成へと移 行していく仕組みや、その仕組みにおける粒径の効果 についてより詳しく明らかにすることは今後の課題で ある.



### Exp2021: quartz sand No. 2 (upper, 24 mm) and No. 6 (lower, 10 mm)

図 5: 珪砂 2 号を用いた実験結果の例(Exp2021). 左列は写真,中列は CT 画像,右列は CT 画像にデータをとった剪断帯 をトレースしたもの,をそれぞれ示す.写真の左上にはシート変位量と水平短縮率を示している.



### Exp2024: quartz sand No. 3 (upper, 17 mm) and No. 6 (lower, 5 mm)

図 6: 珪砂3号を用いた実験結果の例(Exp2024).見方は図5と同じである.



## Exp2022: quartz sand No. 4 (upper, 19 mm) and No. 6 (lower, 10 mm)

図 7: 珪砂 4 号を用いた実験結果の例 (Exp2022). 見方は図 5 と同じである.



## Exp2020: quartz sand No. 6 (upper, 10 mm) and No. 6 (lower, 10 mm)

図 8: 珪砂 6 号を用いた実験結果の例 (Exp2020). 見方は図 5 と同じである.



図 9: 剪断帯の幅 w と移動量 d. 各プロットの横に伸びる棒は、測定した剪断帯幅の最大値と最小値を示す. 右の写真はプロット A, B, C のデータを取った剪断帯である.

#### 5 まとめと今後の課題

厚さが同じで粒径の異なる砂層に発達する剪断帯の 分布と様子を調べた.その結果,剪断帯は移動量の増 大とともに剪断ひずみが大きくなっていくことがわかっ た.このとき,粒径の大きい砂層では剪断帯の幅が大 きくなるため,剪断帯ごとのひずみ量は小さくなる.ま た,今回行ったクーロンウェッジの形成実験では,全体 の変形の進行にともなって新たな剪断帯ができていっ た.粒径が大きいほど,新たな剪断帯ができる間隔は 大きいが,その影響は粒径が剪断帯の幅に及ぼす影響 に比べると小さい.このことも,粒径の大きな砂層に できる剪断帯のひずみ量を小さくする効果を与えるこ とがわかった.

今回の実験を通して得られた知見は、砂層にできる 剪断帯の断片的な性質である上に定性的でもある.よ り詳しく、そして定量的な理解に向けての課題をいく つかあげる.1. 粒径が剪断帯の幅に影響する仕組み を理解する必要がある.経験的に数倍から10倍と言わ れているが、その仕組みはよくわかっていない.また、 粒子の粒径以外の性質が剪断帯の変形過程に与える影 響も調べる必要がある.2.一つの剪断帯のひずみに ついて,空間変化および時間変化を詳しく調べる必要 がある.この論文では剪断帯内部のひずみは均質とし て議論を進めたが,厳密にはそうではない.また実験 の連続写真からは,剪断帯は移動量が増えるのに伴っ てひずみが起こる領域が局所化していくように見える (図 10).3.新しい剪断帯ができる過程や仕組みを理 解することも重要である.

上記した課題に答えを出していくことは、粉粒体層 の変形に関する普遍的な理解につながる。また、地質 学の分野では、堆積層や未固結物体で起こる剪断過程 の理解への貢献や、粉粒体を用いた模型実験における 適切な実験材料の選定や地質学的解釈の向上に活かさ れると期待する。

#### 謝辞

X線 CT 画像の撮影には,高知大学海洋コア総合研 究センターの松崎琢也氏,岡林 徹氏,柳本志津氏を はじめ技術職員の方々にお世話になりました.本研究 を進めるにあたり,海洋研究開発機構の廣瀬丈洋博士,



図 10: 剪断帯のひずみが進行していく過程.本論の他の図と シート引張方向を揃えるために写真を垂直軸に反転させてい る.(a)剪断帯形成の初期段階.剪断帯の幅に対して移動量 が小さいため褶曲に見える.(b)剪断帯形成の中期段階.剪 断帯の幅と移動量の比(剪断ひずみ γ)が増している.また, ひずみが剪断帯の下部に集中している.(c)剪断帯形成の後 期段階.剪断ひずみがさらに大きくなっている.

高知大学海洋コア総合研究センターの新井和乃博士,矢 生晋介博士に有益な議論をしていただきました.また, 匿名の査読者と担当編集委員の津江保彦氏のご指摘に より本稿は改善されました.以上の方々に感謝いたし ます.

#### 参考文献

- Desrues, J., and Viggiani, G., 2004, Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28, 279–321.
- [2] Huiqi, L., McClay, K. R., Powell, D., 1992, Physical models of thrust wedges. In McClay, K. R. ed.,

Thrust tectonics, Chapman and Hall, London, 71–81.

- [3] Iwashita, K., and Oda, M., 2000, Microdeformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method. Powder Technology, 109, 192–205.
- [4] 小早川昔離野,宮井慎一郎,辻 拓也,田中敏嗣, 2019,密詰め乾燥粉粒体層における平板掘削の大規 模 DEM シミュレーション(粒子サイズの影響). 粉体工学会誌,56,211-217.
- [5] Mueth, D. M., Debregeas, G. F., Karczmar, G. S., Eng, P. J., Nagel, S. R., and Jaeger, H. M., 2000, Signatures of granular microstructure in dense shear flows. Nature, 406, 385–389.
- [6] Mühlhaus, H. B., and Vardoulakis, I., 1987, The thickness of shear bands in granular materials. Géotechnique, 37, 271–283.
- [7] Oda, M, and Kazama, H., 1998, Micro-structure of shear band and its relation to the mechanism of dilatancy and failure of granular soils. Géotechnique, 48, 465–481.
- [8] Schreurs, G., Buiter, S. J. H., Boutelier, D., Corti, G., Costa, E., Cruden, A., Daniel, J., Hoth, S., Koyi, H., Kukowski, N., Lohrmann, J., Ravaglia, A., Schlische, R. W., Withjack, M. O., Yamada, Y., Cavozzi, C., Delventisette, C., Brady, J. A. E., Hoffman-Rothe, A., Mengus, J., Montanari, and D., Nilforoushan, F., 2006, Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. Geological Society, London, Special Publication, 253, 1–27.
- [9] 山田泰広,2006,付加体形成過程のモデル実験.地 質学雑誌,112 補遺,153–159.
- [10] 山田泰広,兼田 心,松岡俊文,2006,地質構造 形成過程のアナログモデル実験における材料物性の 影響.材料,55,452-457.