

Jog の存在を考慮した flower 構造を伴う Riedel せん断帯の弾塑性有限変形解析

Elastoplastic finite deformation analysis of Riedel shear bands with flower structures considering jogs on strike-slip fault

豊田智大¹, 野田利弘², 山田正太郎¹, 山田翔太¹, 浅岡顕³

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科
- 2 名古屋大学・減災連携研究センター
- 3 地震予知総合研究振興会

概 要

横ずれ断層が変位すると、その上に堆積した表層地盤内には、flower 構造と呼ばれる花卉状のすべり面が発達し、地表面には雁行状の Riedel せん断が出現する。著者らはこれまでに、Riedel せん断の形成過程に及ぼす「材料不整」の影響について検討してきた。本稿では、「幾何不整」として jog と呼ばれる断層線の不連続性を考慮した解析により、imbricate duplex や P-shear といった特徴的なせん断帯が求解可能であることを示す。また、push-up jog/pull-apart において、共役な R-shear/R'-shear の一方が出現すること、これに対応して、flower 構造はチューリップ型/パームツリー型となることを確認した。さらに、模型寸法を変えた解析において、初期条件を適切に設定すれば、寸法によらず同様のせん断帯が得られることから、Riedel せん断が様々なスケールにおいて生じうることを確認した。

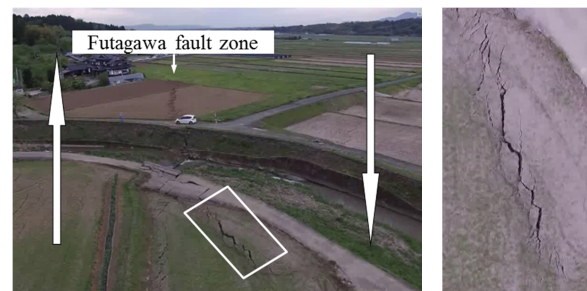
キーワード：横ずれ断層，Riedel せん断，flower 構造，jog，弾塑性

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

地下深部において横ずれ断層が変位すると、その直上の地表面には「Riedel せん断帯」¹⁾と呼ばれる雁行亀裂が出現することが知られている。図1は2016年熊本地震の際に布田川断層上(右横ずれ断層)で形成された Riedel せん断帯の一例であり、地表面には右雁行亀裂が出現していることが確認できる。このような亀裂帯の出現形態は、Woodcock and Fischer²⁾により系統的な分類がなされているほか、Tchalenko⁴⁾や Naylor⁵⁾による模型実験においても詳細な観察がなされている。また、Riedel せん断帯が地表面に出現するとき、地盤の内部では「flower 構造」と呼ばれる花卉状のすべり面が複合的に形成されることが知られている³⁾。

Riedel せん断帯は、先に示した布田川断層帯のような比較的小規模な破砕帯から、San Andreas 断層上のトランスバース山脈といった大規模なものまで、大小様々なスケールで生じる。前者は、断層の横ずれ変位の痕跡として断層位置の特定に用いられ、後者は断層変位が長期に亘り累積してできる断層変位地形として認識される。すなわち、Riedel せん断帯の発生機構の解明は、構造物近傍での断層



(a) 布田川断層帯 (b) 雁行亀裂
図1 熊本地震で出現した雁行亀裂²⁾

変位評価のみならず、変動地形学において観測された断層変位地形の形成過程の理解と将来的な地形変動予測にも有益な示唆を与える可能性が極めて高い。しかし、その発達過程については未解明な点が多い。

そこで、これまで著者らは、Riedel せん断の発生過程を数値シミュレーションにより再現することで、複雑な地下での変状および Riedel せん断帯の発生機構の解明を試みてきた⁶⁾。詳細は1.2で紹介するが、ここで特に強調しておきたいのは以下の2点である。

- ・ Riedel せん断のような変形の局所化を伴う非可逆的

な分岐・破壊現象は、弾塑性構成式において地盤材料の軟化現象が適切に表現されてはじめて解くことが可能となる現象であり、弾性材料や硬化材料に対して解析を行っても変形の局所化は生じ得ず、したがって Riedel せん断帯は解かれない。

- ・ Riedel せん断の発生過程には、地盤内における強度のバラツキ（材料不整）が重要な役割を果たす。横ずれ断層の断層線上に材料不整が存在する場合、flower 構造は材料不整をトリガーとして発達してゆく。

このように、上記の研究では、水平に一樣な均質地盤に初期「材料不整」の導入により Riedel せん断帯が数値解析的に再現できることを、弾塑性を考慮することの重要性とともに示してきた。これに対し、Woodcock and Fischer³⁾, Crowell⁷⁾, Mann et al.⁸⁾によれば、Riedel せん断帯の形成過程には、断層上の「幾何不整」すなわち jog と呼ばれる幾何学的バリアの存在が重要な役割を果たすとされている。jog の詳細については 1.3 で述べるが、本稿では、この jog の存在を境界条件として考慮した表層地盤の大規模 3 次元弾塑性変形シミュレーションにより、jog の存在が Riedel せん断の形成過程に与える影響について明らかにすることを目指す。Riedel せん断の数値計算の事例としては、Stefanov and Bakeev⁹⁾, Chemenda et al.¹⁰⁾などを挙げる事が出来るが、「jog」の影響を考慮した解析は著者らが調べた限り存在しない。

1.2 これまでの研究

Noda et al.⁶⁾では、地盤内の僅かな強度のバラツキ、すなわち「材料不整」がせん断帯の発生機構にどのような影響を与えるかについて検討した。その内容を以下に要約する。

横ずれ断層上の表層地盤で見られる分岐断層の生成過程について、右横ずれ断層線上に堆積した表層地盤に対応する図 2 のような数値モデルを用意する。底面の断層領域には、図中の紫色で示される位置に、非一樣な変形を生じさせるトリガーとなるよう、周囲に対して相対的に強度が高いまたは低い要素として「材料不整」を導入する。

解析には、著者らが開発した地盤の動的/静的水～土骨格連成弾塑性有限変形解析コード **GEOASIA**¹¹⁾を用いている。本手法は土骨格と間隙水からなる 2 相系材料に対応しているが、本稿では 1 相系解析の結果についてのみ記す。また、材料の構成式には **SYS Cam-clay model**¹²⁾を用いている。この構成式は骨格構造概念に着目した“土骨格の”弾塑性構成式であるが、適切なパラメータ設定（本稿の 2.1 で詳細に述べる）により、岩盤のような脆性的な応力ひずみ関係を表現することができる。計算により得られた最終的なせん断ひずみ分布を図 3 に、図 3 の A-A' 断面におけるせん断ひずみ分布を図 4 に、せん断ひずみ分布の等数値面を図 5 に示す。図 3 においては、地表面における変形の局所化（Riedel せん断帯の出現）が確認でき、また、図 4、図 5 においては、地盤内で 3 次元に広がる花弁状のすべり面である「flower 構造」が複合的に形成される様子が確認できた。ただし、これらの変状は、強度について(a)弱点

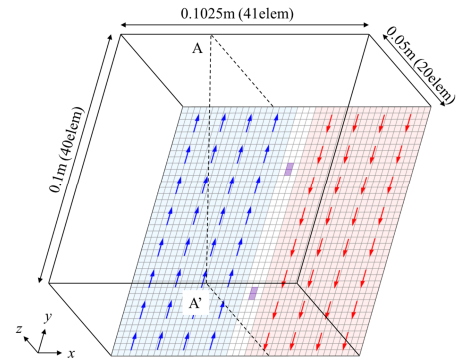
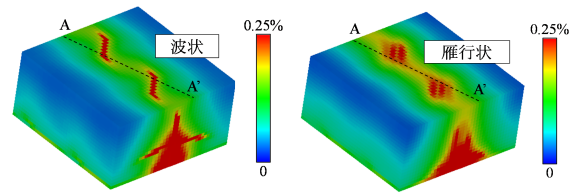
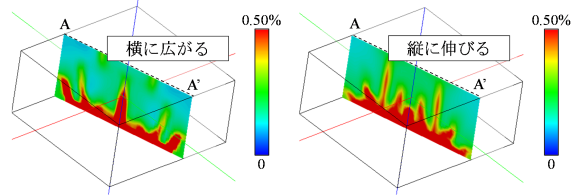


図 2 有限要素メッシュと境界条件（材料不整）



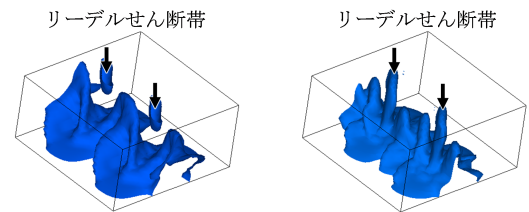
(a) 弱点を入れた場合 (b) 強点を入れた場合

図 3 せん断ひずみ分布⁶⁾



(a) 弱点を入れた場合 (b) 強点を入れた場合

図 4 せん断ひずみ分布の A-A'断面図⁶⁾



(a) 弱点を入れた場合 (b) 強点を入れた場合

図 5 せん断ひずみの等数値面⁶⁾

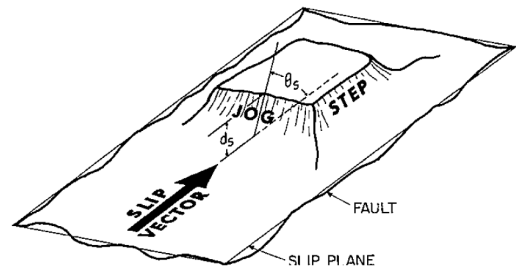


図 6 断層面のすべり面からの逸脱

を設置した場合と(b)強点を設置した場合で異なる。このことは、地盤の内部状態の僅かな違いが付随断層の発達メカニズムおよび変形領域や地表面での変形量に強く影響することを意味する。なお、この論文では、不整の分布の与え方に関する更なる系統的な検討も実施しているが、不整を入れた点を起点に flower 構造が発達し、不整の直上で右斜めのせん断帯が出現するという点は、不整の入れ方によらず共通する。

1.3 Jog とは

横ずれ断層の断層線が直線であることは極めて稀である。すなわち、断層面は決して平滑ではなく、実際には屈曲やオフセットといった、図6のような「断層面のすべり面からの逸脱」を含んでいる。このような逸脱箇所は「jog」と呼ばれており、その存在は分岐断層の形成過程に重大な影響を及ぼす。

例えば、図7はステップを含む左横ずれ断層であるが、図の奥側のように jog が両側から引かれる場合には、引張応力場の下で正断層的に図8(a)のような負の flower 構造が形成されて局所的な陥没を生じる。一方、図の手前側のように jog が両側から押される場合は、圧縮応力場の下で逆断層的に図8(b)のような正の flower 構造が形成されて局所的な隆起を生じる。構造地質学の分野では、前者のような引張性 jog は「pull-apart」、後者のような圧縮性 jog は「push-up」と呼ばれる。図9はモンゴルの Bulnay 地震の際に生じた左横ずれ断層上の典型的な断層地形であり、走行方向に bulge と呼ばれる小高い丘と depression と呼ばれる窪地が交互に規則的に連なる様子が確認できる。

なお、Woodcock and Fischer³⁾によれば、このような jog には、2つの独立した断層の接合部など、図6のように断層線の不連続性（走行方向の非一様性）が明確に存在する jog と、断層線の僅かな凹凸やゆがみに起因して生じる potential jog の2種類がある。このような視点で見ると、1.2の先行研究で考慮されたのは後者の不整にあたり、たとえ断層が直線であっても、走行方向に非一様な変形が生じることを示すものであったといえる。これに対し、本稿では、前者のように明確に jog の存在が認められる条件の下で、これらの pull-apart および push-up を模擬した不連続な断層変位場を境界条件として考慮した弾塑性有限変形解析を実施する。これにより、横ずれ断層における jog の存在に起因した特徴的な付随断層構造の形成過程を数値的に再現することを目指す。

2. はじめに

ここではまず、jog の存在を考慮した弾塑性変形解析により、jog の存在が Riedel せん断および flower 構造の形成過程に与える影響について把握することを試みる。

2.1 解析条件

Noda et al.⁶⁾と同様、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model¹²⁾

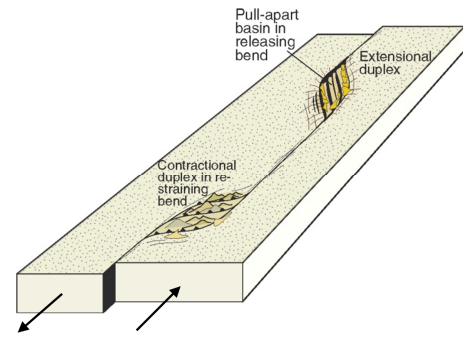


図7 横ずれ断層の jog¹³⁾

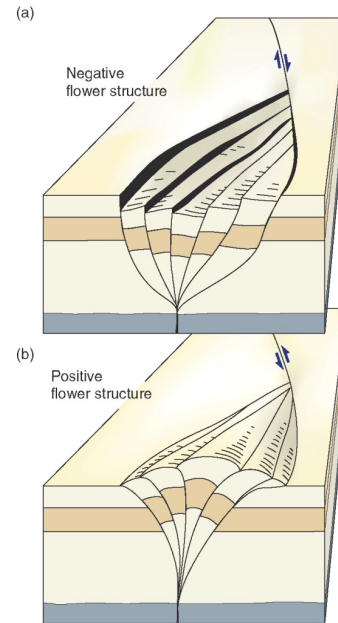
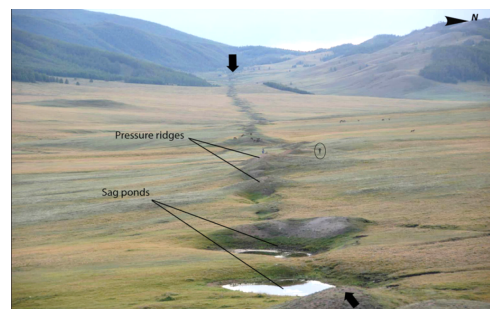
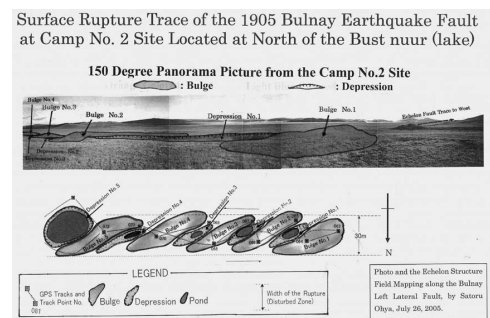


図8 flower 構造¹⁴⁾



(a) ブルネイ断層¹⁵⁾



(b) bulge と depression の連なり¹⁶⁾

図9 Bulnay 断層上の断層地形

を搭載した地盤の変形解析コード **GEOASIA**¹¹⁾を用いる。なお、本稿に示す結果は、いずれも間隙流体の存在は考慮しない一相系条件での解析である。

2.1.1 解析条件

図 10 のような 3 次元直方体メッシュ (要素数 : 32800) を用いる。ここで、y 方向を横ずれ断層の走向方向にとり、z 軸を鉛直上向きにとる。寸法は Noda et al.⁶⁾ と同一のものを用いる。模型のスケールは、上田¹⁷⁾による模型実験に準拠して高さ 5cm とする。ただし、模型底面においては、鉛直変位を固定した上で、図 11 に示すような屈曲した (直線でない) 断層領域を設定し、その両側の節点に y 方向の強制変位 (変位速度 : $\dot{\delta}=10^{-6}\text{m/s}$) を与える。これにより、領域 A では引き離されて pull-apart の応力場が、領域 B では圧縮されて push-up の応力場がそれぞれ表現されることとなる。側面については、y-z 面では摩擦なし条件を与え、x-z 面では周期境界を設定することで、走行方向に周期的に連なる無限領域を想定した。

2.1.2 材料定数と初期条件

SYS Cam-clay model の材料定数は、Noda et al.⁶⁾に倣い、表-1 のとおり設定する。土の骨格構造の初期状態は、最も簡単な状態として過圧密のみを考え、一様な間隙比 ($e_0=0.57$) を与えた。このとき、地盤内における初期時刻での鉛直土被り圧、間隙比、過圧密比の分布は図 12 のようになる。ここではとくに、鉛直下向きの自重により、初期過圧密比は土被り圧に応じて図 12(c)のように鉛直方向に非一様に分布することとなる。以上の条件の下で、SYS Cam-clay model は三軸排水せん断時に図 13 のような応答を示す。すなわち、材料は正のダイレイタンスにより顕著な塑性膨張を示す超過圧密土である。SYS Cam-clay model は本来土質材料を対象に提案された構成式だが、比体積を十分に小さく (極めて稠密になるような) 材料パラメータを設定することで、ピーク強度発現後に著しい軟化を示す、岩盤材料のような脆性的な応答を模擬できる。なお、図 13 の応答は模型の中央深さの拘束圧下における土の応答であり、横軸のせん断ひずみ ε_s は Euler ひずみ \mathbf{e} を用いて次式で定義している。

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2}{3} \mathbf{e}' \cdot \mathbf{e}'}, \quad \mathbf{e}' = \mathbf{e} - \frac{1}{3}(\text{tr} \mathbf{e})\mathbf{I} \tag{1}$$

ここに、

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} - (\mathbf{F}\mathbf{F}^T)^{-1}) \tag{2}$$

であり、 \mathbf{I} は恒等テンソル、 \mathbf{F} は変形勾配テンソル、上付き T は転置作用素を表す。

2.2 解析結果

図 10 に示した模型について、解析終了段階におけるせん断ひずみ分布を図 14(a)に示す。また、この模型寸法を要素数は変えずに y 軸方向に 2 倍、3 倍に拡大することによ

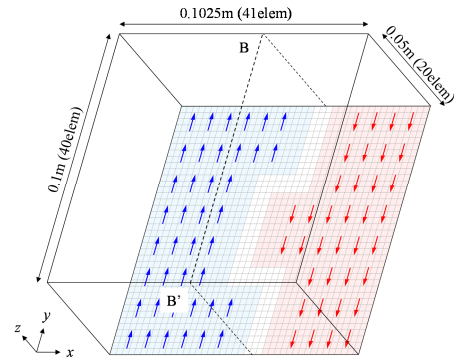


図 10 有限要素メッシュと境界条件 (幾何不整)

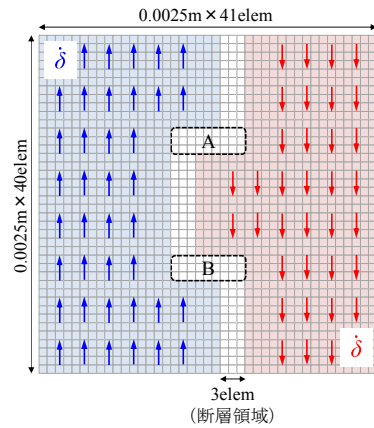
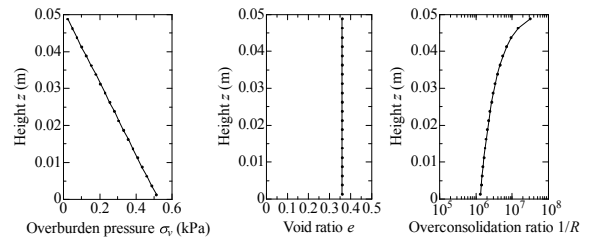


図 11 模型底面の境界条件

表 1 材料定数 (弾塑性体)

<弾塑性パラメータ>	
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.0150
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.0002
限界状態定数 M	1.0
NCL の切片 N	1.7
ポアソン比 ν	0.3
<発展則パラメータ>	
正規圧密土化指数 m	2.0
<物性値>	
土粒子の密度 ρ^s (g/cm ³)	2.65



(a) 土被り圧分布 (b) 間隙率分布 (c) 過圧密比分布

図 12 地盤の初期状態

り push-up と pull-apart の間隔を変えた模型の解析結果を同図(b), (c)にそれぞれ示す。

2.2.1 等倍模型 (走行方向の模型寸法倍率 : $\alpha=1$)

等倍模型について、図 14(a)のように push-up 側の地表面においてせん断帯の出現が確認できる。そして、同図のせん断帯は、緑色で示された大域的なせん断帯が赤色で示さ

れた局所的な雁行状のひずみを内包する「fractal」な形態をとっている（走行方向に「周期境界」を入れた計算であるため、緑色の大域的なせん断帯は模型の手前側と奥側に周期的に連なる）。Riedel せん断帯の自己相似的な発生機構については Tchalenko⁴⁾や Barton, C. C. and Larsen, E.¹⁸⁾により言及されているほか、上田¹⁷⁾は豊浦標準砂・石膏・水を混合して作成した模擬岩盤を対象とした模型実験を実施し、模型底面において図 15 のような 1 次オーダーのせん断帯の形成後に 2 次オーダーのせん断帯が形成されることを確認しているが、本稿の解析結果はこの実験事実と極めて類似している。なお、複数の瓦 (horse) を積み重ねたようにも見えるこの多重構造は「duplex」と呼ばれる³⁾。

2.2.1 2倍模型（走行方向の模型寸法倍率： $\alpha=2$ ）

2倍模型について、図 14(b)の地表面の変状を見ると、不連続に連なる Riedel せん断を互いに接続するように伸びるせん断帯が、図 16 のように Riedel せん断とは逆向きに、かつ二次的に形成されていることがわかる。このような亀裂は、熊本地震の際に生じた図 1(b)のせん断帯にも見て取れる。Naylor et al.⁵⁾は模型実験において同様の現象を確認しており、これを「P-shear」と呼んでいる上田¹⁷⁾もまた、模型実験により同様の現象を確認しているが、P-shear は乾燥砂地盤には出現せず、模擬岩盤においてのみ形成されることを確認している。このことから、本稿の解析により P-shear の出現を再現できたのは、材料を著しい軟化挙動を示す超過圧密土としたことで模擬岩盤の脆性的な応答を正確に捉えることが出来たためであると考えられる。

2.2.2 3倍模型（走行方向の模型寸法倍率： $\alpha=3$ ）

3倍模型について、図 14(c)をみると、pull-apart 側の地表面では走向方向に対して高角のせん断帯が引張により主動的に形成され、push-up 側の地表面では走向方向に対して低角のせん断帯が圧縮により受動的に形成されることが確認された。これについて、更に詳細な検討を加えたい。図 17 は図 14(c)の上面図を白黒表示したもので、地表面のせん断帯上の地点 A~C において解析により得られた主応力方向を併記してある（ただし、圧縮を正として、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力を表しており、地表面は平面応力状態にあるため中間主応力 σ_2 は鉛直方向に作用する）。Riedel せん断には傾斜の異なる 2 種類のパターンがあり、1つは R-shear、もう 1つは R'-shear と呼ばれるが、谷らの論文群によれば、(A) R-shear が走向となす角 θ_R は、 σ_1 軸が走向となす斜交角度 ψ と有効内部摩擦角 ϕ' を用いて

$$\theta_R = \psi - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right) \tag{3}$$

と表され¹⁹⁾、(B) R'-shear は R-shear と共役な関係にある²⁰⁾。そこで、図 17 中の各地点での主応力に対して(A)(B)より R-shear と R'shear の向きを推定すると、表-2 の値となる。これを図 17 に併記すると、R-shear は黄線、R'-shear は緑線となる。ここで、有効内部摩擦角 ϕ' は（1 相系解析であるため）限界状態定数 M より次式で算定した。

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6+M} = \frac{3}{7} \therefore \phi' = 25.4^\circ \tag{4}$$

特定した R-shear と R'-shear の位置を解析結果と比較すると、push-up 側における高角なせん断帯の角度は R-shear に概ね一致し、pull-apart 側における低角なせん断帯の角度は R'-shear に概ね一致していることがわかる。この結果は、jog の応力場、すなわち push-up と pull-apart の違いが、互いに共役なせん断面の片方を選択的に誘発する因子となっている可能性を示唆するものである。

また、同図からは、破断面が直線ではなく、S 字曲線となっていることが確認でき、これは Riedel せん断が生じた後に二次的に発生する、図 18 のような splay-shear および outer-shear の形成が解かれていることを意味している。

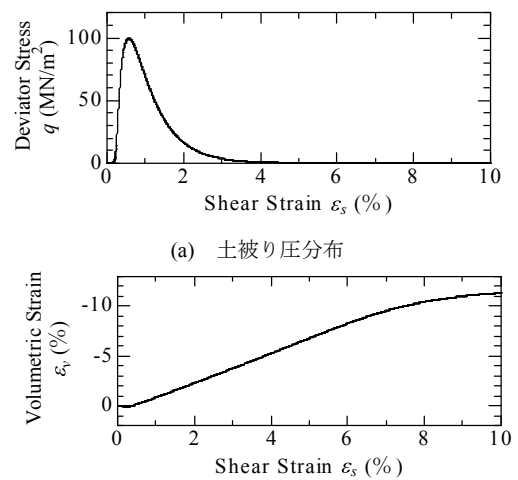


図 13 排水三軸せん断時の応答

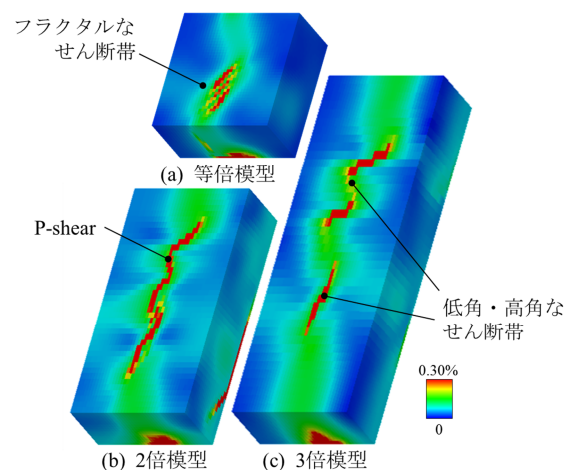


図 14 せん断ひずみ分布

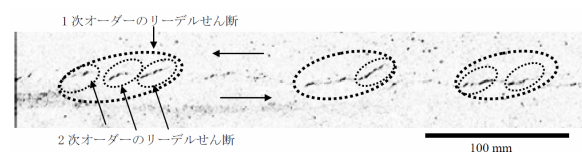


図 15 フラクタルなせん断帯の出現¹⁷⁾

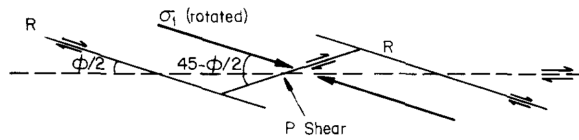


図 16 P-shear⁵⁾

以上のように、jog の存在を考慮した数値解析により、フラクタルなせん断帯 (1 次の Riedel せん断内に発達する 2 次の覆瓦状構造：imbricate duplex)，P-shear，共役な R-shear・R'-shear といった、特徴的な付随断層の出現形態が解かれることを明らかにした。なお、これらの変状は「材料不整」を入れた解析⁶⁾においては確認されておらず、jog の存在を考慮することで初めて解かれると考えられる。

加えて、duplex や P-shear のような二次的なせん断帯は、一次的な変形履歴を記憶可能な弾塑性解析によってのみ解かれうる現象である点を強調しておきたい。弾性体による解析結果については 3.4 に示す。

2.2.3 Flower 構造について

代表的に図 14(b)の 2 倍模型のケースについて、flower 構造の発達過程を図 19 に示す。同図のフェーズ(a)~(b)にかけて、push-up 側では 1 枚のすべり面が鉛直方向に延伸してゆくのにに対し、pull-apart 側では jog を挟んで 2 枚のすべり面が花弁状に発達してゆく。その後フェーズ(c)では、フェーズ(b)で深部から延伸したすべり面が地表面近傍まで到達すると同時に、地表面側からもせん断ひずみが局所的に出現する。この現象は低拘束圧条件下でのスプレー現象に類似している。最終フェーズ(d)では、これらのすべり面が互いに結合し、複合的・三次元的なすべり構造が形成される。

一般に flower 構造は、pull-apart 側 (transtension 場) では、図 8(a)のように起点から水平に広がるチューリップ構造になり、push-up 側 (transpression 場) では、図 8(b)のように起点から鉛直に伸びるパームツリー構造になると言われている⁵⁾が、図 19 のフェーズ(a)~(b)からも分かるように、解析結果はこのような断層近傍での変形初期におけるすべり面の進展の仕方の特徴の違いをよく捉えている。

3. 模型および jog の幾何形状が Riedel せん断の形成過程に与える影響

3.1 jog の幅を変えた計算

前章の等倍模型、2 倍模型、3 倍模型について、断層領域の幅を $D=7.5\text{mm}$ 、 12.5mm 、 17.5mm と段階的に変えて解析を行った。各断層幅に対応する模型底面の境界条件を図 20 に、解析における地表面における解析終了段階でのせん断ひずみ分布を図 21 に示す。図 21 より、断層幅 D が大きいほど(1)せん断帯の幅は広がり、(2)独立した Riedel せん断しか出現しなくなる。(2)について更に言及すれば、等倍模型 ($\alpha=1$) においては幅 $D=17.5\text{mm}$ より大きくなる

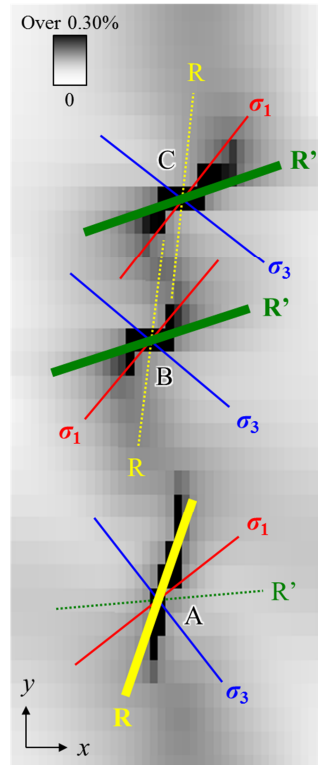


図 17 主応力方向

表 2 内部摩擦角より予測される R-shear, R'-shear の角度

	主応力方向		せん断の方向	
	σ_1	σ_3	R-shear	R'-shear
A	52.4	-37.6	19.7	85.1
B	40.2	-49.8	7.4	72.9
C	38.8	-51.2	6.1	71.6

* 走行方向に対する時計回りの角度(deg)を表す

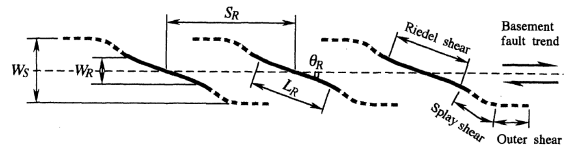


図 18 Splay shear および Outer shear の形成¹⁹⁾

と duplex は消滅し、2 倍模型、3 倍模型 ($\alpha=2, 3$) においても、幅 $D=17.5\text{mm}$ より大きくなると P-shear は出現しなくなる傾向がある。一方、 $\alpha=2, 3$ においては、($\alpha=3$ では幅 D の増大により push-up 側でせん断帯が出現しなくなる点を除き) pull-apart 側で高角なせん断帯、push-up 側で低角なせん断帯が生じるという点は共通しており、その角度も α や D によらずほとんど変化しないことが確認できる。

3.1 模型の高さを変えた計算

代表的に前章の等倍模型について、模型高さを 5cm から 2.5cm に変更した場合の解析結果を図 22 に示す。この計算では、push-up 側で duplex を生じることなく、1 本の明瞭なせん断帯が生じており、また、pull-apart 側においてもひずみの局所化を確認できる。

このように、模型高さを小さくすると明瞭なせん断帯が生じやすくなる理由の 1 つは、模型底面と地表面の距離が

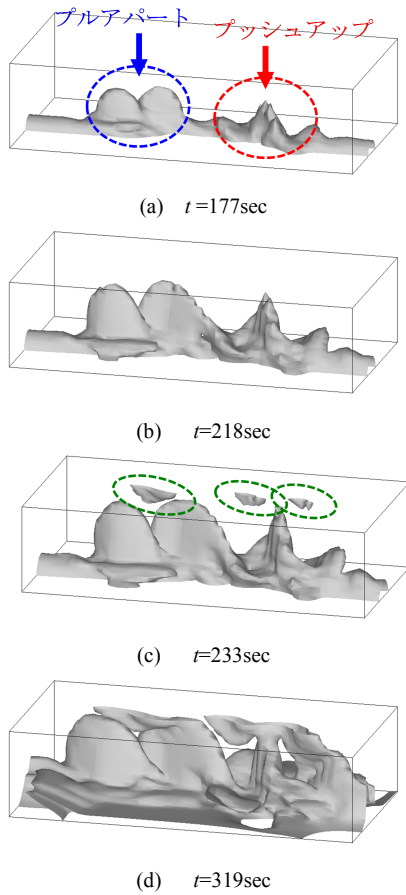


図19 排水三軸せん断時の応答

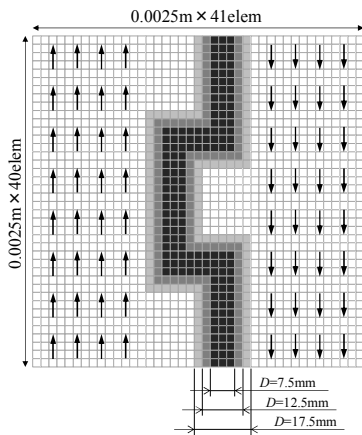


図20 断層幅 D を変える

近くなるため、jogの形態が直接地表面の変形に影響することに起因する。すなわち、2.2.1の高さ5cmの計算では、push-upおよびpull-apartによる変形が互いに干渉した帰結として、地表面に複雑なせん断帯を呈するのに対し、本節の高さ2.5cmの計算では、push-up上の土塊とpull-apart上の土塊がそれぞれ独立にせん断されてゆくため、むしろ2.2.3の3倍模型のように、低角なせん断帯と高角なせん断帯がそれぞれ形成されることとなる。もう1つの理由として、模型高さが小さいほど模型底面における拘束圧が小さくなり、底面過圧密比が大きくなる事が挙げられるが、これについては次項で述べる。

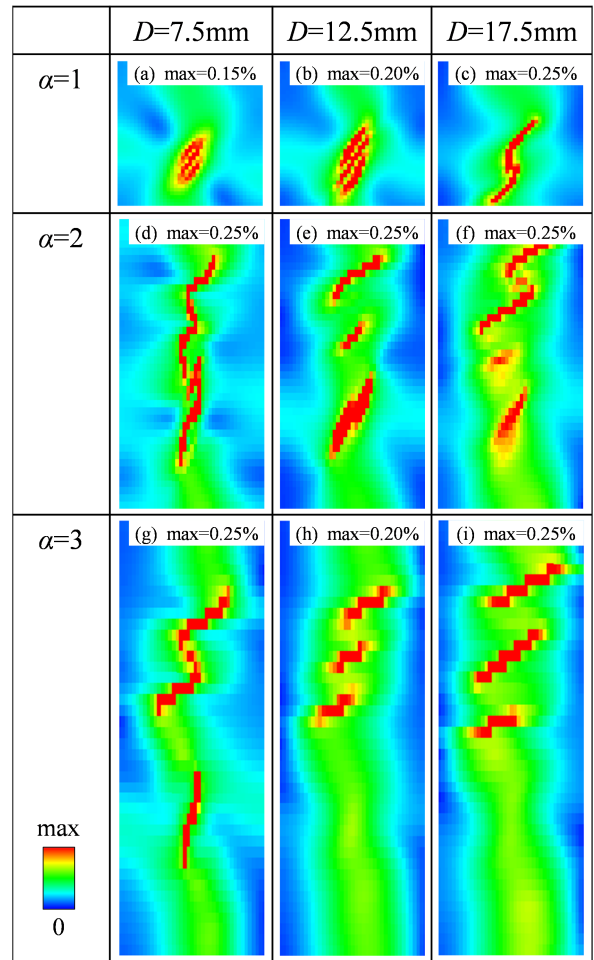


図21 断層幅 D を変える

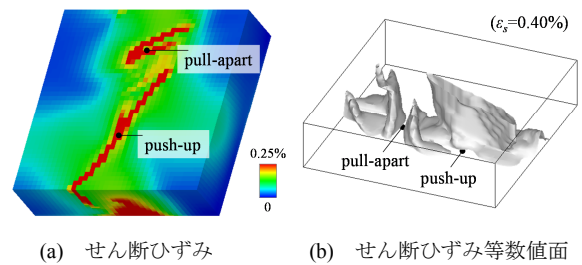


図22 模型高さを変えた検討

3.2 寸法効果に関する検討

前章の等倍模型の解析終了段階におけるせん断ひずみ分布を図23(a)に再掲するとともに、この模型を基準として模型全体の寸法と変位速度を10倍、100倍、1000倍と相似的に拡大した表3の模型について、解析結果を図23(b)~(d)に示す。

同図より、寸法の大きい模型では、地表面に単一のRiedelせん断しか生じないことがわかる。これは、寸法の大きい模型では土被り圧の増加により材料が正規圧密状態に近づくため、材料の挙動は延性的に、軟化の程度は小さくなり、地表近傍での分岐を伴うsplay現象が生じにくくなったことに起因すると考えられる。事実、底面の過圧密比が基準模型と等しくなるように模型の間隙比を調整

表 3 模型の寸法

模型	模型高さ H	载荷速度 δ
等倍 (基準)	5cm	10^{-6} m/s
10 倍	50cm	10^{-5} m/s
100 倍	5m	10^{-4} m/s
1000 倍	50m	10^{-3} m/s

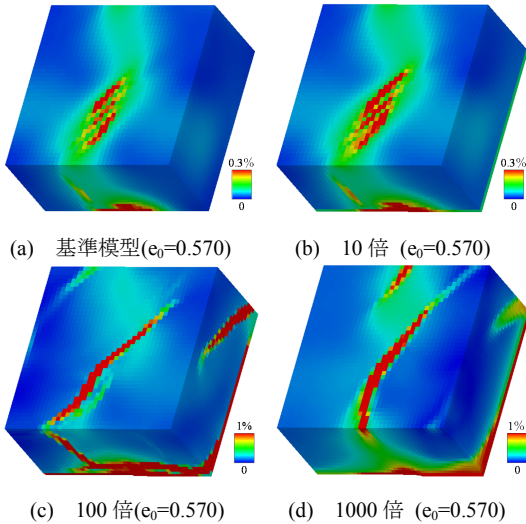


図 23 せん断ひずみ分布 (比体積一定)

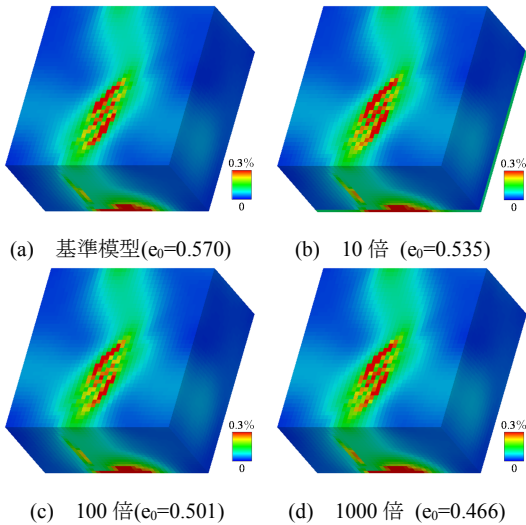
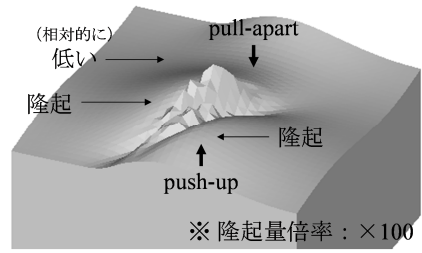


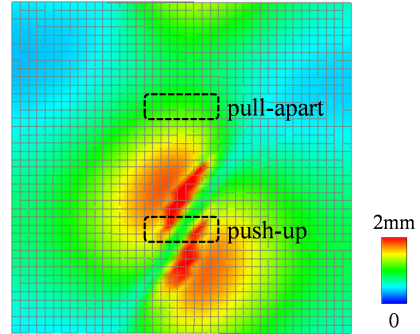
図 24 せん断ひずみ分布 (底面過圧密比一定)

した図 24 の解析では、いずれのスケールにおいても基準模型の場合と同様のせん断帯が出現する。この結果は、Riedel せん断が「さまざまなスケールで生じる」という意味でのフラクタル性を裏付けるものである。なお、図 23 の計算を jog を設けずに直線の断層領域を設定して解析すると、寸法 10 倍以上の模型では、材料不整の有無にかかわらず変形の局所化は起こらず、せん断面も出現しない⁹⁾。このことから、寸法の大きい模型でせん断帯の出現を解くには、jog の存在を考慮して解くことが重要であったといえる。

また、代表的に図 24(c)の模型について、計算終了段階における地表面での隆起量分布を図 25 に示す。同図より、



(a) 地表面の変状



(b) 隆起量分布

図 25 地表面での変形状態

表 4 材料定数 (弾性体)

<弾性パラメータ>	
弾性係数 E (kN/m ²)	0.1×10^7
ポアソン比 ν	0.35
弾性体密度 ρ^s (g/cm ³)	2.65
初期静止土圧係数 K_0	1.00

push-up での隆起は解かれているが、pull-apart においても push-up ほど顕著ではないが隆起が生じていることが分かる。これは、pull-apart における幾何的な質量欠損をせん断による材料の塑性膨張が上回ったことによる。

3.3 弾性体および正規圧密条件とした場合の解析

ここでは、2.2.2 で解いた 2 倍模型について、材料を弾性体または弾塑性体であっても正規圧密土 (硬化材) であれば、せん断帯の出現が解かれなことを確認することにより、変形の局所化を解く上で弾塑性体の軟化 (過圧密) が必要不可欠であることを示す。

3.3.1 等方弾性体の解析

材料のみ表 4 に示す等方弾性体とし、その他の条件は 2.2.2 と同一の条件で解析を行った場合について、解析結果を図 26 に示す。同図において、底面に jog を入れているにもかかわらず、地表面において変形の局所化は生じていないことがわかる。このように、弾性体の解析では底面幾何不整の影響が埋もれてしまうのだが、これは底面に材料不整を入れた場合も同様である (結果は割愛する)。

3.3.2 弾塑性体 (硬化材) の解析

メッシュ・境界条件は 2.2.2 と同一の条件とし、材料についても、初期間隙比を $e_0=0.78$ (非常に緩い、底面は正

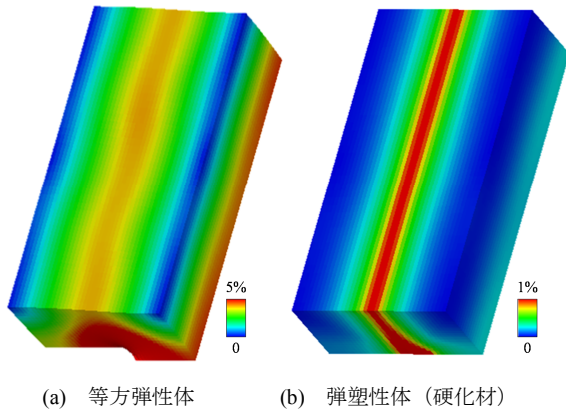


図 26 せん断ひずみ分布

規圧密状態になる)と与える点以外は表1と同一にした場合について、解析結果を図26(b)に示す。同図において、等方弾性体の場合と同様、弾塑性体であるにもかかわらず、走行方向の非一様な変形は出現しないことが確認できる。これは、弾性体と同様、正規圧密状態にある土の解析においては、軟化に伴う不安定化を生じることなく変形が進行するため、分岐による変形の局所化もまた生じ得ないことと対応する。

4. おわりに

4.1 本論文のまとめ

横ずれ断層上に堆積した表層地盤内における付随断層構造の形成過程を、「jog」の存在を境界条件として考慮した比較的大規模な3次元弾塑性有限変形解析によって解き、以下の結論を得た。

- 「jog」の存在を考慮することで、imbricate duplex (覆瓦状構造) や P-shear, 低角・高角なせん断面といった、特徴的な付随断層構造の形成過程を再現できた。
- push-up jog/pull-apart jog では、それぞれ低角/高角なせん断帯の形成が解かれ、その角度が R-shear/R'-shear に一致し、flower 構造の発達形態もまた、鉛直に伸びるパームツリー型/水平に広がるチューリップ型になることを確認した。
- 寸法効果について検討し、模型底面の過圧密比を統一すれば、本稿で試したあらゆるスケールにおいて同様のせん断帯の形成が相似的に解かれることを確認した。この結果は、Riedel せん断が「あらゆるスケールにおいて生じる」という意味での fractal 性を裏付けるものである。

4.2 今後の課題

- 3.3 で示したように、本計算では push-up 側における隆起は解かれたものの、pull-apart 側における沈下は解かれず、むしろ隆起を生じた。これは本稿において、脆性材料の応答を超過圧密土として表現したため、pull-apart 環境下における質量欠損をせん断に伴

る著しい塑性膨張が上回ったことによる。これを解決するためには、脆性的な材料の応答をより正確に記述する新たな構成式を導入する必要があると考えられる。

- 本稿で用いた **GEOASIA** は水～土骨格連成問題として定式化されているため、間隙水の存在条件下で解析を行えば、push-up・pull-apart における coseismic なすべり・postseismic なすべり¹³⁾といった表層地盤の変形における時間依存現象のメカニズムまで解明できる可能性が高い。ただし、現行の過圧密材料の構成式では等体積条件下で軟化は生じ得ないため、新たに構造概念¹²⁾を導入して解析を行う必要がある可能性がある。
- 付随断層構造の形成に係る一連の現象を一貫して説明するためには、jog を境界条件として作為的に与えるのではなく、材料不整等の非一様性に起因して jog そのものが出現する過程も含めて解く必要がある。これに関連して、今回は主断層の変位は境界条件として与えたが、主断層の運動も含めて一貫して解くことができれば、主断層の破壊による波動の伝播まで解くことができるようになる。
- その他、横ずれ断層に限らず、正断層と逆断層の変形問題にも適用してゆきたい。

謝辞

本研究の数値解析は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムを利用して実施した。また、科学研究費補助金(基盤研究(A):課題番号17H01289)の補助を受けた。

参考文献

- Riedel, W.: Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. zentral-blatt für mineralogie, geologie und paleontologie B, pp.354-368, 1929.
- 国土地理院: 平成28年熊本地震に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>, 2017閲覧.
- Woodcock, N. H. and Fischer, M.: Strike-slip duplexes, Journal of Structural Geology, 8, pp.725-735, 1986.
- Tchalenko, J. S.: Similarities between shear-zones of different magnitudes, Geological Society of America Bulletin, Vol.81, pp.1625-1640, 1970.
- Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpesteijn: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states, Journal of Structural Geology, Vol.8, No.7, pp.737-752, 1986.
- 野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡顕: 横ずれ断層に伴う表層地盤のリーデルせん断帯の形成に及ぼす材料的初期不整の影響, 土木学会論文集 A2, 71(2), I_463-I_474, 2015.
- Crowell, J. C.: Sedimentation along the San Andreas Fault, California, Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation, Vol.19, pp.292-303, 1974.
- Mann, P., Hempton, M. R., Bradley, D. C. and Burke, K.: Development of pull-apart basins, The Journal of Geology, Vol.91, No.5, pp.529-554, 1983.
- Stefanov, Y. P. and Bakeev, R. A.: Deformation and fracture structures in strike-slip faulting, Engineering Fracture Mechanics, Vol.129, pp.102-111, 2014.

- 10) Chemenda, A. I., Cavalié, O., Vergnolle, M., Bouissou, S. and Delouis, B.: Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system, *Comptes Rendus Geoscience*, Vol.348, Issue 1, 2016, pp.61-69, 2016.
- 11) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 12) Asaoka, A., et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 13) Scholz, C. H.: *The mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge University Press, 2nd edition, pp.168-173, 2010.
- 14) Fossen, H.: *Structural geology*, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- 15) Rizza, M., Ritz, J.-F., Prentice, C., Vassallo, R., Braucher, R., Larroque, C., Arzhannikova, A., Arzhannikov, S., Mahan, S., Massault, M., Michelot, J.-L., Todbileg, M. and ASTER Team: Earthquake geology of the Bulnay fault (Mongolia), *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.105, No.1, pp.72-93, 2015.
- 16) 大矢暁: モンゴルに地震断層を追う, *地質ニューズレター*, Vol.617, pp.24-40, 2006.
- 17) 上田圭一: 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の3次元変形過程—ヘリカル X 線 CT を用いた断層変位実験による検討—, *電力中央研究所研究報告*, N08039, 2009.
- 18) Barton, C. C. and Larsen, E.: Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca Mountain, southern Nevada, *Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, pp.77-84, 1985.
- 19) 谷和夫, 上田圭一, 阿部信太郎, 仲田洋文, 林泰幸: 野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造, *土木学会論文集* Vol.568, III-39, pp.21-39, 1997.
- 20) 谷和夫, 上田圭一, 阿部信太郎, 仲田洋文, 林泰幸: 野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造, *土木学会論文集* Vol.568, III-39, pp.21-39, 1997.
- 21) 小山良浩, 谷和夫: 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, *土木学会論文集* Vol.750, III-39, III-65, pp.171-181, 2003.

(???? ?? ?? 受付)