

断層変位に起因して生じる プルアパート構造についての有限要素解析

竿本 英貴¹

¹正会員 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門（〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7）
E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

地震時に活断層周辺で生じる地表変位を予測することは、変位が社会基盤施設に与える影響を考察する上で重要である。二つの横ずれ断層で挟まれる領域では、沈降場が生じるプルアパート構造がしばしば認められる。プルアパート構造についての個別事例報告は存在するが、その素過程については未解明な部分が多い。ここでは断層面配置および広域応力場を変化させ、プルアパート構造の沈降量や断層面上すべり量がどのように変化するのかを有限要素法により検討した。結果、断層面のオーバーラップが沈降量に対して感度が高い事、地表での沈降様式に主応力方向は強くは関連しないこと、沈降量が最大となる断層面配置と広域応力場についての定量的な知見等、プルアパート構造形成の現象解明に資する情報を得た。

Key Words: pull-apart, active fault, infrastructure, FEM, parametric study, optimization

1. はじめに

地震時に活断層周辺で生じる地表変位や強震動を把握しておくことは、これらが社会基盤施設に与える影響を考察する上で重要であることは論を俟たない。地震時の断層運動に伴う地表変形や生成される強震動を求めるためには、まずは震源断層の断層面を合理的に設定する必要がある。断層面の設定は、(1) 地表地震断層に対する現地調査、(2) 微小地震の活動が活発な地域であればそれらの観察、(3) 地形・地質情報に基づくトレンチ調査の計画・実行、(4) 地表での情報（例えば断層変位）と数値シミュレーションを統合した断層面推定など、いくつかの情報・手法を統合的に判断・活用して実施することが理想的である。当然ながら、種々の制約からこれらの情報全てが出揃っていることはほとんどない。本研究は上述の(4)に関連する研究であり、断層運動に伴って生じる地形であるプルアパート構造に焦点をあて、プルアパート構造を生成するような断層面配置および広域応力場についての知見を得ようとするものである。

図-1 は、プルアパート構造についての模式図を示している。2面の横ずれ断層で挟まれた領域が、断層運動に伴って（中心部付近の物質密度が小さくなり）沈降した構造を指す。大局的には一連と考えられる横ずれ断層が、一部で分離して雁行する場合、この構造が形成されることがあると考えられている。国内外でプルアパート構造はしばしば確認されている。例えば、糸魚川—静岡構造線断層帯に沿う諏訪盆地は、プルアパー

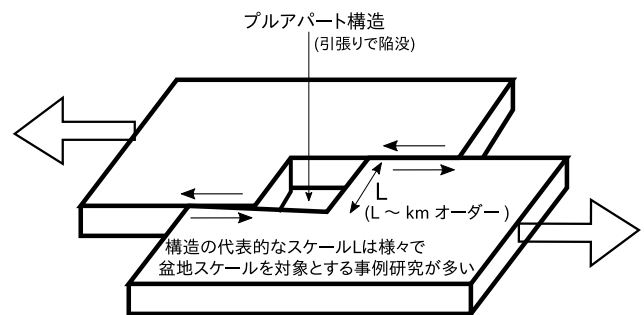


図-1 断層変位に起因して生じるプルアパート構造の模式図

ト盆地であるとして推定されており諏訪盆地周辺の断層帯のスリップレートを得るための地形調査が精力的になされている^{1)~3)}。また、四国の中央構造線沿い（池田断層と寒川断層の境界）にも幅 500 m 程度（図-1 中の L に相当）の小規模なプルアパートが推定されている⁴⁾。

以上のように、糸魚川—静岡構造線断層帯や中央構造線断層帯等、地震防災の観点から重要と考えられる長大な断層帯においてもプルアパート構造が確認されることから、プルアパート構造に関する基礎的な情報を把握しておくことは有用であると考えられる。

プルアパート構造の形態および形成過程に対する先行研究として、地形調査に基づくプルアパート形態分析・生成過程推察^{5),6)}、砂箱実験に代表されるアナログ実験との比較・検討に基づくプルアパート生成過程考察⁷⁾、数値解析によって実フィールドのプルアパート構造を説明しようとする研究^{8)~10)}の3つのアプローチに

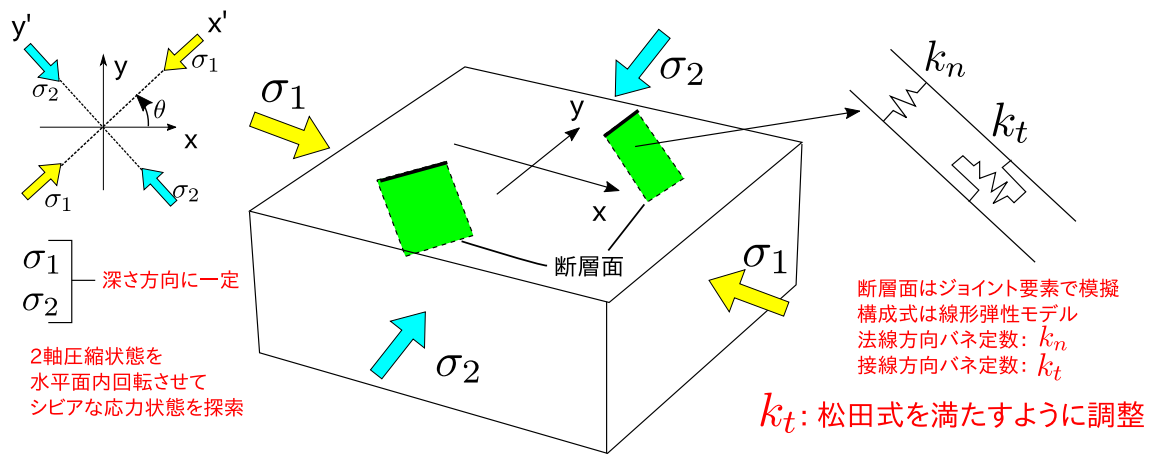


図-2 断層変位簡易評価手法の概要 (竿本, 2018²⁶⁾ より)

大別できる。これら既往の研究は、個別の断層系を対象とした場合や、実験や数値シミュレーションのケース数が多くはない等、個別事情または限られた条件下であるため、プリアパート構造に関して基礎的かつ系統的な知見を得難い状況にある。プリアパート構造を生成するためのテクニクセッティングや断層面間距離の影響を仔細に検討しておくことは、プリアパート構造周辺の活断層評価を行うための基礎情報として必要であると考えられる。

以上の背景のもと、ここでは3次元有限要素解析を用いて、断層面間距離および断層面周辺の主応力方向をそれぞれ変化させ、これらの違いがプリアパート構造や変位様式にどのように影響するのかを715ケースにおよぼパラメトリックスタディーを通じて系統的に調べた(第2節)。また、パラメトリックスタディーに加えて、多目的最適化アルゴリズムを援用することで、プリアパート構造に見られる沈降が最大化される断層面配置や、断層面上の横ずれ成分を最大化しつつプリアパート構造の沈降を生じさせる断層面配置など、自由に断層面配置を設定できる数値シミュレーションの特性を活かした情報取得に努めた(第3節)。なお、今回の検討と既往の研究との主たる違いは、検討するケース数が圧倒的に多いこと、主応力の方向をシミュレーションに取り込んでいることが挙げられる。

土木分野ではこれまでに有限要素法や個別要素法等、様々な数値解析手法によって様々な初期条件および境界条件の下で地表変位に関する知見を得るための研究がなされてきた^{11)~25)}。これらは正・逆断層または横ずれ断層を対象とする場合に限られており、プリアパート構造を対象とした数値シミュレーションは著者の知る限り実施されていない。この意味において、本研究は一定の新規性を有すると考える。

2. プリアパート構造に対するパラメトリックスタディーのための問題設定と解析条件

(1) FEMによる断層変位簡易評価方法の概要

ここでは、断層面配置を様々に変化させて数多くのFEM解析を実施するため、1回あたりの計算時間を短くすることが肝要である。また、断層変位解析にあたっては、広域応力場情報を考慮しつつ、解析結果として得られる変位量が松田式^{27),28)}(断層線の長さ地震時ずれ量が比例するとする経験則)等に代表される観測事実と整合的である必要がある。このような観点のもと、著者は下記(a)から(f)の要件を満たす断層変位の簡易評価手法を提案している²⁶⁾(図-2)。

- (a) 設定するパラメータの数をなるべく少なくすること
- (b) 計算時間をなるべく少なくすること
- (c) 複数の断層面をシミュレーションに導入すること
- (d) 広域応力場の設定方法を簡素化すること
- (e) 広域応力場の影響を導入し、断層系の変位量の総和を最大にする応力条件を探索すること
- (f) シミュレーションから得られる地表変位が松田式に代表される観測事実と整合的であること

これらの詳細は既報に譲るが、下記(1)から(4)の特徴がある。

- (1) 断層面上の構成関係は線形弾性と仮定する(要件(a), (b)への対処)
- (2) 断層面はジョイント要素によって表現する(要件(c)への対処)
- (3) 解析モデルは2軸圧縮応力で模擬される造構応力場下にあると仮定し深さ方向への変化は考えない。ただし、主軸方向は変更できる(要件(d), (e)への対処)
- (4) 断層面上の接線方向バネ剛性は、松田式(スケーリング則)を満たすように決定する(要件(f)への)

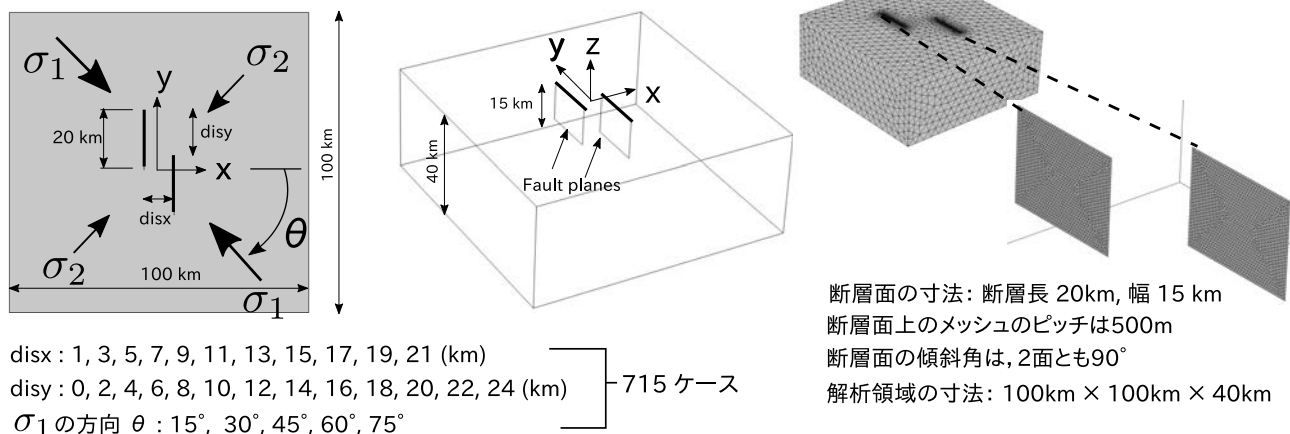


図-3 プルアパート構造に対するパラメトリックスタディーのための問題設定

対処)

ここでは、変形終了時の変位分布のみを、松田式を援用しつつ静解析に基づいて高速に求めることを目指している。また、初期応力分布についても2軸圧縮という仮定で簡単化している。すなわち、提案する簡易評価手法では応力に関する正確な状態を設定することはせず、せいぜい地殻応力の主方向と地表地震断層の変位量の関係性を求めるまでで止めている。この結果、次節で示すパラメトリックスタディーの1ケースあたりの計算時間は約100秒程度となっており、十分な数の解析ケースからなるパラメトリックスタディーが実施可能となる。

(2) パラメトリックスタディーの問題設定と解析条件

問題設定として、図-3に示すように、100km × 100km × 40kmの直方体(ヤング率: 45 GPa, ポアソン比: 0.3)の内部に、プルアパート構造の模式図(図-1)にある横ずれ断層(2面、傾斜角は2面とも90°)を設定する。直方体の解析領域には、広域応力場を簡略化した2軸圧縮状態を設定しており、最大圧縮応力 σ_1 および σ_2 をそれぞれ $\sigma_1 = 30$ MPa, $\sigma_2 = 10$ MPaとした。最大圧縮応力の大きさ30 MPaは、池田ら²⁹⁾によって計測された野島断層の地下1000mでの応力値(30 MPa)を用いた。今回、最大圧縮応力の作用方向 θ はパラメータであり、x軸方向から時計回りに15°から75°まで、15°刻みで変化させている(5通り)。最大主応力方向 θ の他、図-3中で示す断層面間のステップ幅(disx)、オーバーラップに関連する距離(disy)をパラメータとして設定した。なお、断層面間のオーバーラップは、断層長が20kmの今回のケースでは(20.0 km-disy)として得られる。ステップ幅disxについては、1kmから21kmまで2km刻みで変化させた11通り、disyについては0km

表-1 有限要素解析で用いる材料物性

パラメータ名	数値
地殻のヤング率 (GPa)	45
地殻のポアソン比 (-)	0.3
断層面上の法線方向剛性 (N/(m · m ²))	1.21 × 10 ¹¹
断層面上の接線方向剛性 (N/(m · m ²))	5.21 × 10 ⁶

から24kmまでの13通りとした。これらのパラメータの総当りの結果として、合計で715ケース(5 × 11 × 13)の有限要素解析を実施することになる。

有限要素解析では、地殻のヤング率とポアソン比に加え、断層面上の法線方向剛性および接線方向剛性が必要となる。これらの物性値をまとめたものが、表-1である。なお、断層面上の法線方向剛性については母岩と同程度となるように、接線方向剛性については、松田式を近似的に満たすようにそれぞれ設定している。断層面上剛性の設定の詳細については、既報²⁶⁾を参照されたい。

図-3中では、有限要素メッシュの一例も示しているが、直方体は約16万個の4面体2次要素で、断層面は2834個の3角形2次要素でそれぞれ構成している。一連のパラメトリックスタディーでは、3つのパラメータ(θ , disx, disy)をセットすると自動的にパラメータを反映させた有限要素メッシュを作成するが、断層面はパラメータの数値によらず常に500mピッチの3角形2次要素で分割する設定とした。なお、一連の有限要素解析は、汎用工学シミュレーションソフトウェアCOMSOL Multiphysics®上で実装・実行した。

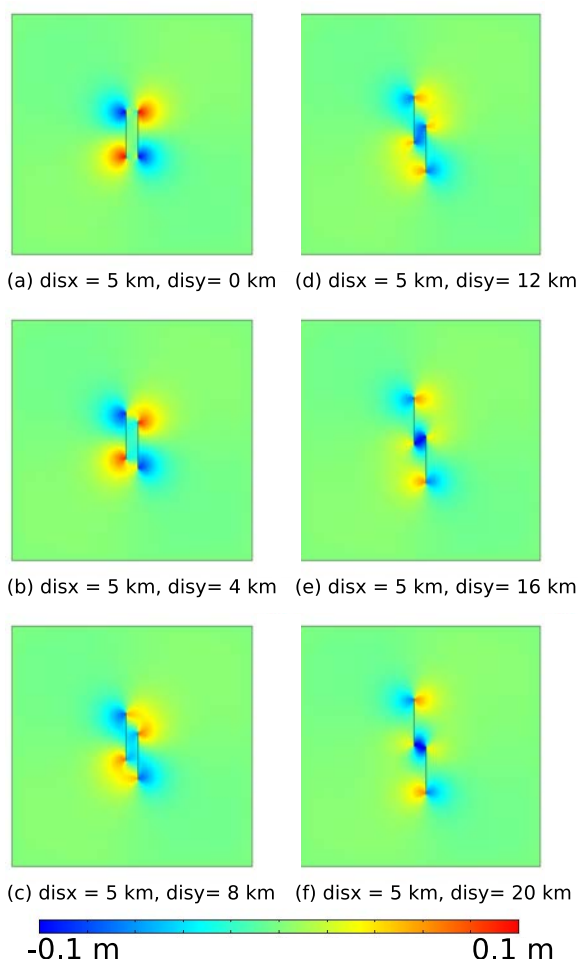


図-4 地表変位鉛直成分の分布 (disx = 5 km, $\theta = 15^\circ$, 色は成分の大きさを表す: 青:-0.2 m, 赤:0.2 m)

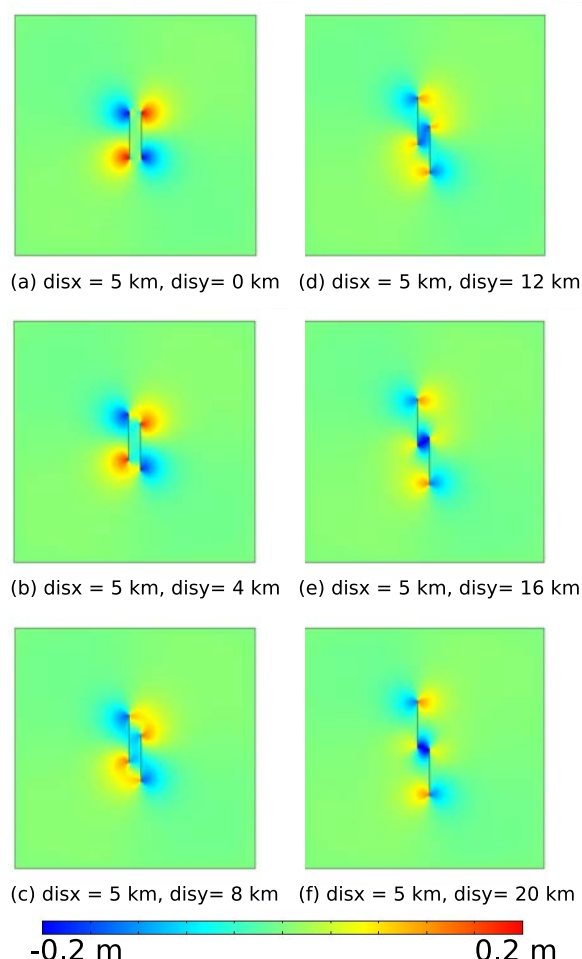


図-5 地表変位鉛直成分の分布 (disx = 5 km, $\theta = 45^\circ$, 色は成分の大きさを表す: 青:-0.2 m, 赤:0.2 m)

(3) パラメトリックスタディーの結果と考察

図-4は、ステップ幅 disx が 5 km で最大主応力方向 θ が 15° のケースについての地表面における変位の鉛直成分分布を、図-5は、ステップ幅 disx が 5 km で最大主応力方向 θ が 45° のケースについての地表面における変位の鉛直成分分布をそれぞれ示している (青: 沈降, 赤: 隆起)。なお、各図において、(a) から (f) はパラメータ disy が 0 から 20 km まで 4 km 刻みで変化している。図-4(a) と図-5(a) や、図-4(b) と図-5(b) など、両図で同じアルファベットに対応する変位鉛直成分の分布様式はほぼ同じである。ここでは紙面の都合上、 $\theta = 15^\circ$ のケースと $\theta = 45^\circ$ のケースのみしか表示していないが、 $\theta = 60^\circ$ のケースと $\theta = 75^\circ$ のケースにおいても、変位鉛直成分の分布様式は、図-4 や図-5 とほぼ同じである。以上から、地表の沈降様式は (変位量の大小は変化するが) 断層面の配置に強く依存しており、最大主応力方向には強くは依存していないことがわかる。ここでは、隆起・沈降に着目して分布図を示したが、断層面上のすべり変位は、2つの断層面ともにピュアな左横ず

れであることに留意されたい。また、変位の大きさについては、図-5に示す $\theta = 45^\circ$ のケースが最も大きく、 θ が 45° から離れるにしたがって変位の大きさは小さくなる。この変位の大きさの大小については、 $\theta = 45^\circ$ のケースが最も断層面に他の θ に比べて大きなせん断応力を作用させ、結果として相対的に大きなすべりを生じさせるためである。

断層面が 1 面のみの変位分布は、断層線の両端部付近で隆起・沈降がペアかつ変位量が断層線端部に対して対称的となる (例えば図-4(f)、図-5(f) のモデル中央部付近以外の断層線端部)。したがって、隆起・沈降がペアとなって現れる変位様式以外の変位分布については、断層面間の相互作用を受けていると言える。この観点からは、図-4 と図-5 で示した (a) から (f) のケースで相互作用が存在している。

プリアパート構造の形成という観点からは、モデル中央部付近で沈降が生じていることが必要であるが、図-4 と図-5 の (d), (e), (f) のケースでモデル中央部に明瞭な沈降が確認できる。一方、断層面が完全にオーバー

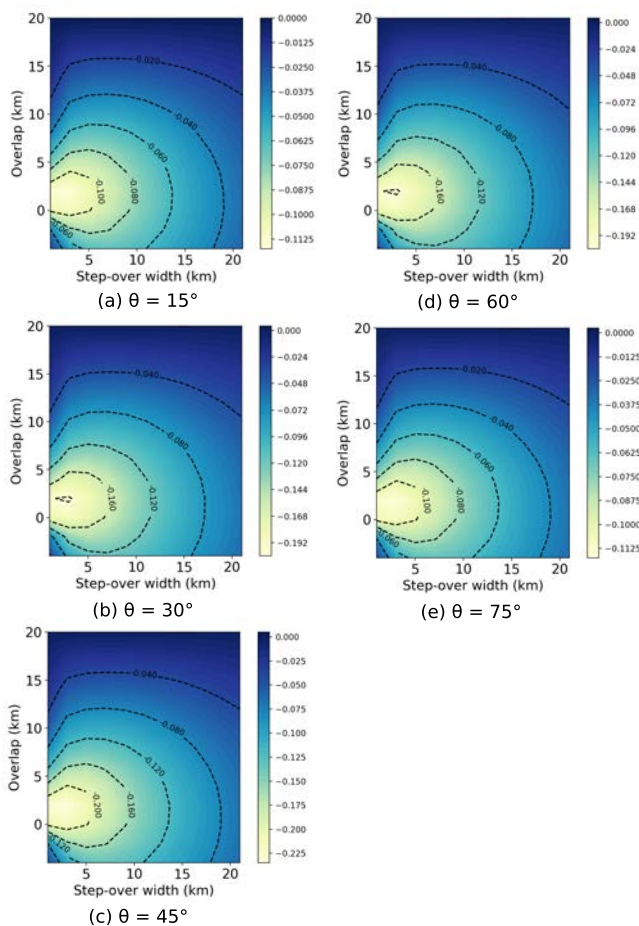


図-6 モデル中央部での沈降量の比較 (明るい色ほど沈降量が大きい)

ラップしている (a) のケースについては、モデル中央部での沈降は確認できず、プリアパート構造は生じていない。モデル中央部における沈降量と $disx$ や $disy$ の関係については後で結果を示すが、ある条件下でプリアパート構造の特徴である沈降場が、本手法で模擬できていることの意義は大きい。以下、どのような条件下で沈降量が大きくなるのかについて検討する。

図-6(a) から (e) は、すべての解析ケースに対するモデル中央部における沈降量を最大主応力方向 θ 毎に示したもので、横軸は断層面間のステップ幅 ($disx$)、縦軸は断層面間のオーバーラップ (20.0 km- $disy$)、色はモデル中央部における沈降量を表す。なお、色が明るいものほど沈降量が多い。いずれの θ についても、横軸のステップ幅 ($disx$) が 3.0 km、縦軸のオーバーラップ (20.0 km- $disy$) が 2.0 km のとき、モデル中央部での沈降量が最大となる。また、断層面のオーバーラップが極端に大きい場合 (例えば 20 km)、ステップ幅の大きさによらずほとんど沈降は生じていないことがわかる。沈降量に対してステップ幅とオーバーラップの感度が同じであれば、図-6(a) から (e) 中の等沈降量線 (黒点線)

は円形になるが、各図ではオーバーラップの変化方向に蜜に等沈降量線が描かれている。このことは、オーバーラップの沈降量に対する感度は、ステップ幅の沈降量に対する感度よりも大きいことを示している。

715 ケースからなるパラメトリックスタディーを通じて得られた結果を以下にまとめる。

- 断層面間のオーバーラップが極端に大きい場合、最大主応力方向に依らずモデル中央部での沈降量は小さくなった。
- ステップ幅が 3.0 km、オーバーラップが 2.0 km のとき、モデル中央部での沈降量が最大主応力方向に依らず大きくなった。
- 地表変位の鉛直成分分布の様式は、断層面配置の影響を強く受け、変位の大きさは最大主応力方向に依存している。
- モデル中央部の沈降量に対するオーバーラップの感度は、ステップ幅のそれよりも大きい。

今回のパラメトリックスタディーでは、断層面傾斜角を 90° に固定していた。以下ではこの制約を緩め、プリアパート構造の特徴である沈降に加えて断層面上の横ずれに着目し、沈降量が最大化される断層面配置および断層面上の横ずれ成分が最大化される断層面配置についてそれぞれ検討する。

3. 沈降量を最大化する断層面配置と横ずれ成分を最大化する断層面配置

(1) 多目的最適化問題の設定

パラメトリックスタディーでは、断層面の傾斜角を 90° に固定していたが、ここでは $90^\circ \pm 10^\circ$ の範囲内で変化させる。このとき、仮に傾斜角を 4 通りとした場合でも解析ケースは 16 倍になるため、効率的ではない。ここでは様々な分野で広く用いられる多目的最適化アルゴリズムの一つである NSGA-II³⁰⁾ と有限要素解析を組み合わせ、沈降量を最大化する断層面配置から横ずれ成分を最大化する断層面配置までを系統的かつ効率的に求め、得られた断層面配置の特徴について議論する。NSGA-II では異なるパラメータの組を持つ個体群を評価し、各個体にランク付けを行い、ランクに基づいて親個体を選択し、評価が高くなると考えられる子個体を生成する。この手続きを所定の計算世代数分実施することで、より良いパラメータ探索を行う。なお、NSGA-II アルゴリズムの詳細については、すでに多くの文献^{30)–32)} が存在しているため、それらを参照されたい。

有限要素解析に用いるモデルおよび解析条件は、図-3で示したものと同一であり、傾斜角が異なる ($90^\circ \pm 10^\circ$)。また、 $disx$ と $disy$ の数値を以下のように変更し

た. $disx = 5 \text{ km}$ で固定, $15 \text{ km} \leq disy \leq 25 \text{ km}$. ここで $disx$ を固定した理由は, 諏訪盆地を想定したことによる. また, $disy$ の範囲は, 前章のパラメトリックスタディーの結果から, 沈降量が小さい過度なオーバーラップ部分は避けて設定した. 以上から, 今回の最適化問題は, プルアパート構造の特徴である地盤沈降と断層面上の横ずれ量の2項目を目的関数(両者とも最大化)として, 断層面の傾斜角(2面分), 最大主応力方向, 断層面間のオーバーラップ量を決定する2目的4変数の多目的最適化問題として, 以下のとおり表される.

$$\begin{aligned}
 & \text{maximize} \quad (w_c, d) \\
 & \text{subject to} \quad \mathbf{F}(\mathbf{u}, \mathbf{f}; \theta, \phi_1, \phi_2, disy) = \mathbf{0} \\
 & \quad 15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ \\
 & \quad 80^\circ \leq \phi_1 \leq 100^\circ \\
 & \quad 80^\circ \leq \phi_2 \leq 100^\circ \\
 & \quad 15 \text{ km} \leq disy \leq 25 \text{ km}
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで, w_c はモデル中央部での沈降量の大きさを, d は2つの断層面上横ずれ量の大きさの平均値をそれぞれ表し, これらの量を最大化されるべき目的関数と設定する. $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ は, 有限要素解析における力の釣り合いを表し, $\mathbf{u}$ は変位ベクトル, $\mathbf{f}$ は初期応力から生成される力, θ は最大主応力方向, ϕ_1 は $x < 0$ の領域に配置した断層面の傾斜角, ϕ_2 は $x > 0$ の領域に配置した断層面の傾斜角, $disy$ はオーバーラップ関連量(図-3中で明記)をそれぞれ表している.

NSGA-IIの実装では, オープンソースのライブラリ Platypus³³⁾ を利用した. 最適化解析では NSGA-II のパラメータである個体数および計算世代数をそれぞれ 50 とし, 合計で 2500 回の有限要素解析を実施した. パラメトリックスタディーでは, パラメータの刻みが固定されておりパラメータの取りうる値が離散的であったのに対し, 最適化アルゴリズムでは小数点以下も含む実数値としてパラメータ値が定まることに留意されたい.

(2) 多目的最適化結果から得られる断層面配置

図-7 は, 横軸にモデル中央部での沈降量の大きさ w_c を, 縦軸に断層面上の横ずれ量の平均値 d をとり, 計算世代数の第1世代と第50世代(最終世代)における各個体をそれぞれプロットしたものである. グラフの右上にプロットがくればくるほど, その個体の評価は高い. 第1世代ではプロットがランダムであったのに対し, 第50世代では各個体があるライン上に並んでいるように見える. 計算世代数が増加するにつれて, このラインの形状が次第に明らかになってくるが, 第45世代程度でこのラインはほぼ形成されており, 第45世代以降はラインの形状に大きな変化はなかった. 言い換えれば, 第45世代以降, このライン上に存在する個体

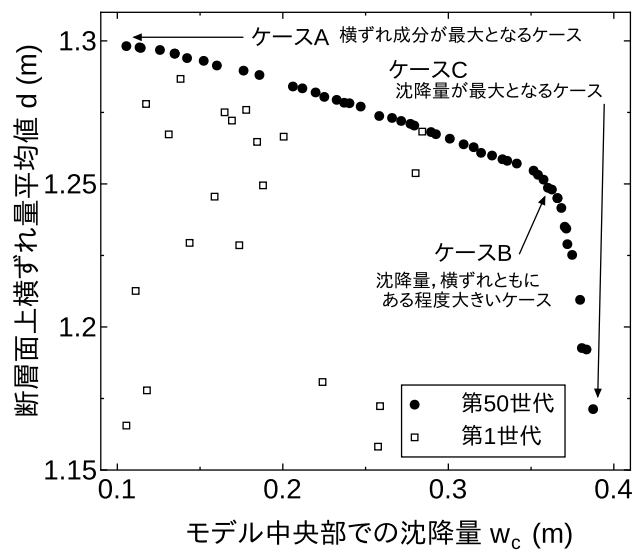


図-7 プルアパート構造に対するパラメトリックスタディーのための問題設定

表-2 ケース A,B,C に対応するパラメータの組

パラメータ	ケース A	ケース B	ケース C
主応力方向 θ	44.93°	42.07°	34.48°
傾斜角 ϕ_1	86.84°	99.96°	99.91°
傾斜角 ϕ_2	92.79°	80.63°	80.00°
disy	24.90 km	15.01 km	15.07 km

以上に評価が高い個体を生成することはできなかったと言える. 第45世代以降で得られたこのラインはしばしばパレートラインと呼ばれる. また, パレートライン上の個体は非劣解(着目している個体がライン上の他個体よりも劣っていない)とそれぞれ呼ばれている. ここで得られたパレートラインの形状からわかるように, 横軸の沈降量を大きくするには縦軸の横ずれ量の平均値が小さくなる傾向がある. すなわち, モデル中央部における沈降量と断層面上の横ずれ量にはトレードオフが存在することを示している. この結果は, 多目的最適化によってパレートラインを求めることで初めてわかる知見であることに留意されたい.

図-7中で示したケース A は, 沈降量は小さいが, 断層面上の横ずれは最も大きくなるケースである. ケース C は, 断層面上の横ずれは小さいが, モデル中央部での沈降量が最大となるケースである. ケース B は, 一定以上の沈降量と横ずれ量を有するケースである. これらの各ケースに対するパラメータの組をまとめたものが表-8である. $y = -50 \text{ km}$ のモデル端部から y 軸に沿って断層面を観察すると, ケース A は, モデル中心部に向かって2面の断層面が「V字型」に落ち込む形態

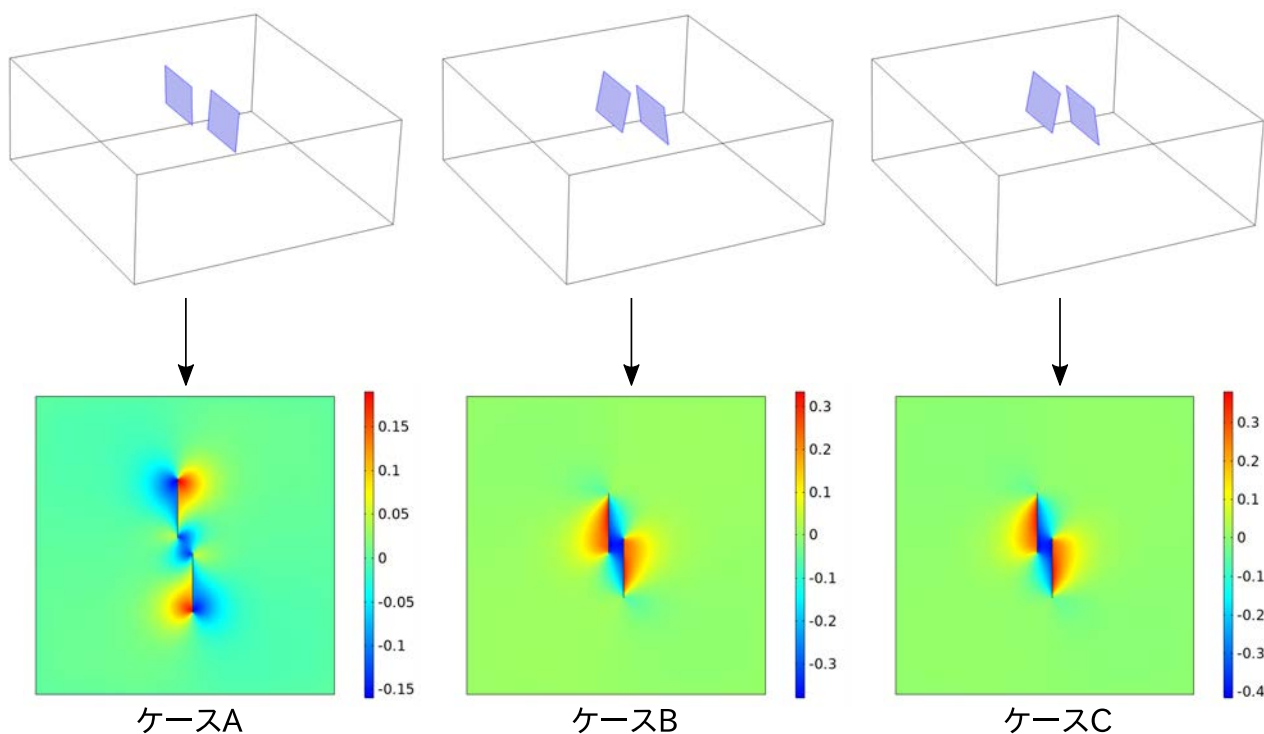


図-8 ケース A ($\theta = 44.93^\circ$), ケース B ($\theta = 42.07^\circ$), ケース C ($\theta = 34.48^\circ$) の断層面配置と対応する地表での鉛直変位分布

を, ケース B と C は「ハの字型」の形態を呈する。また, 最大主応力方向 θ については, ケース A と B はほとんど変わらないが, ケース C のみ小さい値となっている。ケース B と C の断層面の傾斜角とオーバーラップはほぼ同じであり主応力方向が大きく異なる。これは, 主応力方向 θ を小さくしてより縦ずれ成分を大きくし, モデル中央部が 2 つの断層面それぞれの下盤側となるようにすることで, より大きな沈降量を生成したものと解釈できる。

ケース A, B, C の断層面配置と, これらに対応する地表での鉛直変位分布をそれぞれ示したものが図-8 である。ケース B とケース C の断層面配置はほぼ同じであることから, 得られる変位分布様式も似通っていることがわかる。この傾向は, 図-4 と図-5 の比較 (断層面配置が同じで主応力方向が異なる) で得られた結果に対応する。ケース A の V 字型の断層面配置は, 傾斜角が 2 面とも 90° に近いが, ケース A で断層面を 90° とした場合に比べてわずかに断層面上の横ずれ量の平均値 d が大きくなる程度 (1 mm 程度大きい) の差異しかない。

次に図-7 のパレートライン上のケース A からケース C に向かって最適化した各パラメータがどのように変遷するのかを調べた。パラメータの遷移を確認することで, 断層面配置が「V 字型」, 「ハの字型」となる境界を検討することができる。

図-9 から図-11 は, パレートライン上の解について,

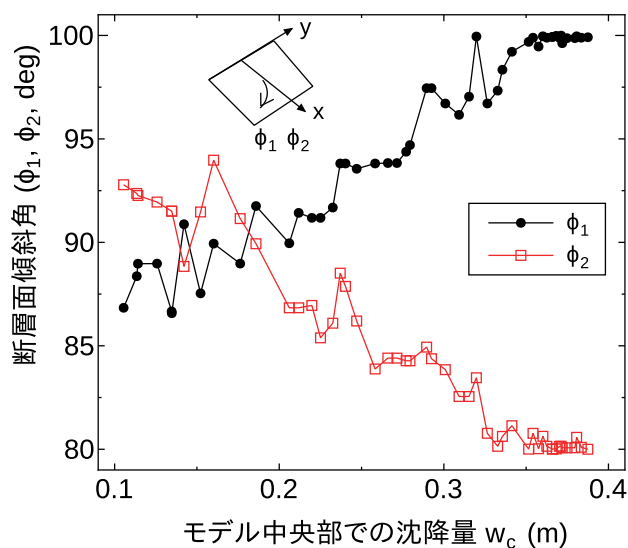


図-9 パレートラインに沿うパラメータの遷移: (沈降量と断層面傾斜角の関係)

w_c の増加とともに各パラメータがどのように変化するかを示したもので, 図-9 はモデル中央部での沈降量 w_c と断層面傾斜角の関係, 図-10 は沈降量と最大主応力方向 θ の関係, 図-11 は沈降量と $disy$ の関係をそれぞれ表している。

図-9 より, 断層面配置が「V 字型」となるのは, w_c が 0.15 m よりも小さい領域であり, パレートライン上

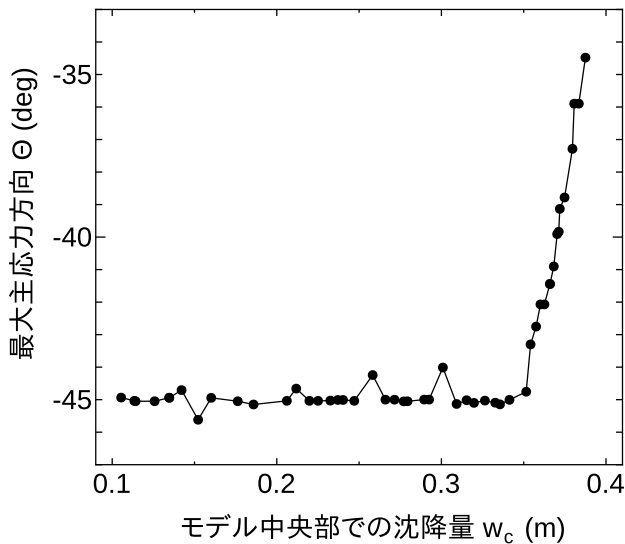


図-10 パレートラインに沿うパラメータの遷移：(沈降量と最大主応力方向の関係)

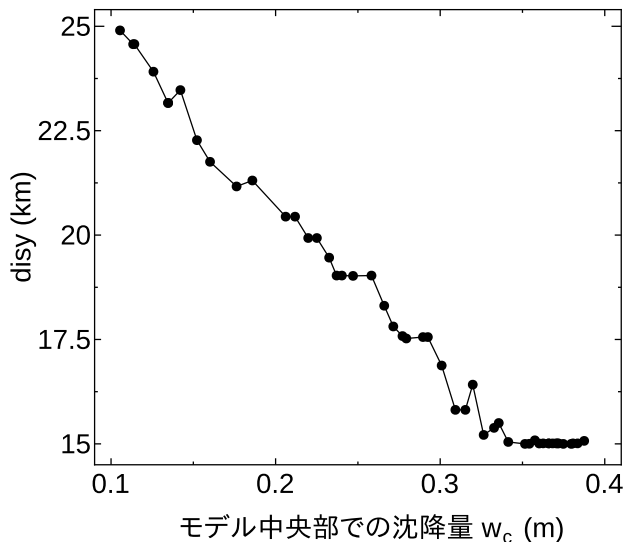


図-11 パレートラインに沿うパラメータの遷移：(沈降量とdisyの関係)

の解のほとんどは「ハの字型」であった。プルアパート構造の特徴である、沈降量と横ずれという2つの目的関数については、断層面を「ハの字型」に設定して斜めずれを生じさせるケースが理にかなっているようである。なお、既往研究で用いられるプルアパート構造の断層面は、「ハの字型」ではなく、傾斜角が 90° と設定している場合が多い^{5),6),8)-10)}。あまりに逆断層成分が大きくなるような「ハの字型」配置は考え難いとしても、 90° からわずかに異なる傾斜角で「ハの字型」となるケースは、横ずれ・沈降が生じるという観点からは否定されるものではないと考える。もちろん、今回プルアパート構造の特徴として設定した沈降量と断層面上

横ずれ量といった目的関数の他に、プルアパート構造の本質を表す目的関数や制約条件を追加して、NSGA-IIを適用することで、取りうる断層面配置の範囲をより限定することは可能であると考えられる。

図-10は、沈降量と最大主応力方向 θ の関係を示している。 w_c が0.35 mよりも小さい領域ではほぼ $\theta = 45^\circ$ となっていることがわかる。これは 45° とすることで、断層面上のせん断応力が増大するためである。なお、断層面形状を「y字型」のように複雑にして、スリップパーティショニングを生じさせやすい主応力方向を調べた事例^{34),35)}では 35° 程度と報告されているなど、常に断層線に対して 45° の方向から主応力を作用させるケースが適切であるとは限らないことに留意されたい。 w_c が0.35 mよりも大きい領域で急激に大きくなる理由の1つは、 θ を除く他のパラメータが探索範囲の上下限に達していることによる(図-9, 図-10, 図-11の $w_c \geq 0.35$ mの領域で各パラメータが一定値となっている)。沈降を大きくするために制御可能なパラメータが θ のみであったため、 w_c が0.35 m以上の領域で急激に大きくなったものと解釈できる。パラメータの上下限值については引き続き検討し、より現実的なパラメータ範囲とすることが今後の課題の1つである。

図-11は、沈降量とdisyの関係を示している。両者の間にはほぼ線形関係が認められ、沈降量の増加に伴って、disyはほぼ一定の傾きで減少する。disyについても傾斜角と同様、 $w_c \geq 0.35$ mの領域では下限値15 kmに達していることがわかる。

以上の検討から、NSGA-IIを用いたパレートライン探索によって、プルアパート構造に見られる沈降と断層面上の横ずれ量をそれぞれ最大化するような断層面配置・主応力方向についての知見を効率的に求めることができた。また、パレートラインの形状を確認することで、沈降と断層面上の横ずれ量の間には、トレードオフの関係が存在することが推察された。プルアパート構造に対する目的関数や制約条件、パラメータの取りうる範囲については引き続き検討し、より適切なものを設定することが今後の課題の1つである。

4. まとめと今後の展望

プルアパート構造についての基礎的な知見を得ることを目的として、一連のパラメトリックスタディーおよび多目的最適化解析を実施した。本研究を通じて得られた結果は以下のとおりである。

1. 断層面間のオーバーラップが極端に大きい場合、最大主応力方向に依らずモデル中央部での沈降量は小さくなった。
2. モデル中央部での沈降量が最大主応力方向に依ら

ず大きくなるステップ幅とオーバーラップの存在が見出された。

3. 地表変位の鉛直成分分布の様式は、断層面配置の影響を強く受け、変位の大きさは最大主応力方向に依存している。
4. モデル中央部の沈降量に対するオーバーラップの感度は、ステップ幅のそれよりも大きい。
5. 多目的最適化結果より、プリアパート構造の特徴である沈降場と断層面上の横ずれ量についてトレードオフが存在することが示唆された。
6. 多目的最適化結果より、断層面配置が「ハの字型」であっても、一定レベルの横ずれと沈降を生じさせることが可能であることが示唆された。

今後は、本研究で用いた手法 (NSGA-II と FEM の組み合わせ手法) を、諏訪盆地などの実際の地域に適用し、対象地域の断層面モデルの高度化に努める。また、最適化解析に必要な目的関数・パラメータに関する情報を整備しつつ、断層が進展する過程を模擬できるように、コードの拡張も併せて進める。

謝辞: 本研究は、文部科学省 科学技術基礎調査等委託事業「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究 (課題 A)」ならびに「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」の一部として実施しました。また、産業技術総合研究所 近藤久雄 博士と東京大学 三宅弘恵 博士より、プリアパート構造の事例について有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤森孝俊：活断層からみたプリアパートベイズンとしての諏訪盆地の形成，地理学評論，Vol.64，No.A-10，pp.665-696，1991。
- 2) 田力正好，杉戸信彦，澤祥，谷口薫，廣内大助，松多信尚，佐藤善輝，石黒聡士，安藤俊人，内田主税，坂上寛之，隈元崇，渡辺満久，鈴木康弘：糸魚川-静岡構造線活断層帯中部，諏訪盆地北東縁の変動地形とその認定根拠，および変位速度分布，活断層研究，No.27，pp.147-168，2007。
- 3) 澤祥，谷口薫，廣内大助，松多信尚，内田主税，佐藤善輝，石黒聡士，田力正好，杉戸信彦，安藤俊人，隈元崇，佐野滋樹，野澤竜二郎，坂上寛之，渡辺満久，鈴木康弘：糸魚川-静岡構造線活断層帯中部，松本盆地南部・塩尻峠および諏訪湖南岸断層群の変動地形の再検討，活断層研究，No.27，pp.169-190，2007。
- 4) 後藤秀昭，中田高：四国の中央構造線活断層系一詳細断層線分布図と資料一，総合地誌研究叢書，35，広島大学総合地誌研究資料センター，p.69，2000。
- 5) Aydin, A. and Nur, A.: Evolution of pull-apart basins and their scale independence, *Tectonics*, Vol.1, No.1, pp.91-105, 1982。
- 6) An, L.J.: Maximum link distance between strike-slip faults: observations and constraints, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.150, No.1, pp.19-36, 1997。
- 7) McClay, K. and Dooley, T.: Analogue models of pull-apart basins, *Geology*, Vol.23, No.8, pp.711-714, 1995。
- 8) Katzman, R., ten Brink, U. S., Lin, J.: Three-dimensional modeling of pull-apart basins: Implications for the tectonics of the Dead Sea Basin, *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, Vol.100, No.B4, pp.6295-6312, 1995。
- 9) Bertoluzza, L. and Perotti, C.R.: A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: implications for the Permian tectonics of the Southern Alps (Italy), *Tectonophysics*, Vol.280, No.1, pp.185-197, 1997。
- 10) Liu, Y. and Konietzky, H.: Particle-Based Modeling of Pull-Apart Basin Development, *Tectonics*, Vol.37, No.1, pp.343-358, 2018。
- 11) Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B.: Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 562-580, 1994。
- 12) 谷 和夫：ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション，地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 215-222, 1994。
- 13) Anders, M. and Hori, M.: Three-dimensional stochastic finite element method for elasto-plastic bodies, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 51, No. 4, pp. 449-478, 1999。
- 14) 鬼塚信弘，伯野元彦，堀 宗朗，岩下和義，鈴木崇伸：逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション，土木学会応用力学論文集，Vol. 3, pp. 577-584, 2000。
- 15) 鬼塚信弘，堀 宗朗，岩下和義，鈴木崇伸：基盤の逆断層運動の数値実験における地盤変形の解析，土木学会応用力学論文集，Vol. 4, pp. 459-466, 2001。
- 16) 竿本英貴，吉見雅行，国松 直：横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程に関する DEM シミュレーション，土木学会地震工学論文集，第 28 巻 (CD-ROM, ISSN: 1880-4624), 2005。
- 17) Johansson, J. and Konagai, K.: Fault induced permanent ground deformations: experimental verification of wet and dry soil, numerical findings' relation to field observations of tunnel damage and implications for design, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.27, No.10, pp.938-956, 2007。
- 18) Lin, M.-L., Chung, C.-F. and Jeng, F.-S.: Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip, *Eng. Geol.*, Vol.88, No.1-2, pp.70-89, 2006。
- 19) 谷山 尚：横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯—DEM による解析—，土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.48-494, 2008。
- 20) 中川英則，堀 宗朗：非線形スペクトル確率有限要素法を用いた地表地震断層のシミュレーション，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 2, pp. 225-241, 2011。
- 21) Albertz, M. and Lingrey, S.: Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 1. Structural analysis, *Tectonophysics*, Vol.576-577, pp.133-149, 2012。
- 22) Mitsuhashi, Y., Hashimoto, G., Okuda, H., Uchiyama, F.: Fault displacement simulation analysis of the Kamishiro fault earthquake in Nagano prefecture using the parallel finite element method, *Model Design and Simulation Analysis*, pp.102-109, 2016。
- 23) 澤田昌孝，羽場一基，堀 宗朗：断層変位評価のための高性能数値解析手法の開発，土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.1.699-1.710, 2017。
- 24) 羽場一基，園部秀明，澤田昌孝，堀 宗朗：断層変位評価への高性能数値解析手法の適用に関する検討，土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.1.821-1.830, 2017。
- 25) 澤田昌孝，羽場一基，堀 宗朗：地表地震断層に伴う実地震を対象とした高性能計算による地表面断層変位評価，土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp.1.627-1.638, 2018。

- 26) 竿本英貴：松田式を考慮した FEM による断層変位評価とその上町断層系への適用，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74, No.4, pp.I.59–I.71, 2018.
- 27) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震第 2 輯，Vol. 28, No. 3, pp. 269–283, 1975.
- 28) 松田時彦，山崎晴雄，中田高，今泉俊文：1896 年陸羽地震の地震断層，東京大学地震研究所彙報，Vol. 55, pp. 795–855, 1980.
- 29) 池田隆司，小村健太郎，飯尾能久，新井崇史，小林健太，松田達生，島田耕史，田中秀実，富田倫明，平野聡：1995 年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査，防災科学技術研究所研究報告，第 61 号，pp.141–153, 2001.
- 30) Deb, K., Pratap, A. Agarwal, S., Meyarivan, T: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, Vol.6, No.2, pp.182–197, 2002.
- 31) 相吉英太郎，安田恵一郎：メタヒューリスティクスと応用，電気学会，2007.
- 32) 電気学会進化技術応用調査専門委員会：進化技術ハンドブック 第 I 巻 基礎編，近代科学社，2010.
- 33) Hadka, D.: Platypus -multiobjective optimization in Python, <https://platypus.readthedocs.io/en/latest/> (2020 年 4 月 8 日 閲覧).
- 34) 竿本英貴：FEM による断層変位のスリップパーティショニング発生条件の探索—逆断層と横ずれ断層の組み合わせ例—，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75, No.4, pp.I.25–I.35, 2019.
- 35) 地震調査研究推進本部：活断層の評価に関する調査研究「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」平成 30 年度 成果報告書，2019. (https://www.jishin.go.jp/database/project_report/active_fault_research/, 2020 年 4 月 9 日 閲覧)

PARAMETRIC STUDY ON GROUND SURFACE DEFORMATION FORMING PULL-APART STRUCTURE CAUSED BY FAULT MOVEMENT

Hidetaka SAOMOTO

The prediction of surface ruptures during an earthquake is important to consider the hazard assessment on the social infrastructure. Two strike-slip faults sometimes produce a pull-apart structure in the region sandwiched by the faults, resulting in a subsidence field. Although there are individual case reports on pull-apart structures, the fundamental mechanism and features of the pull-apart structure are still unclear. Using the finite element method, I thus conducted a parametric study by changing tectonic stress setting, step-over distance, and overlap of faults (715 cases in total) to reveal the relationship between the above parameters and the magnitude of subsidence in the pull-apart structure. The notable results are: (1) An extremely large overlap cannot produce intense subsidence irrespective of the magnitude of step-over, (2) The direction of principal stress affects the magnitude of the subsidence, but it does not affect the displacement pattern of the ground surface, (3) The sensitivity of overlap to the subsidence is larger than that of the step-over to the subsidence, and (4) The NSGA-II optimization algorithm successfully detects each tectonic setting: one for subsidence maximization and the other for the strike components maximization.