

位相最適化に基づく断層形状推定手法の開発

竿本 英貴¹・加瀬 祐子²・森 宏²・吉見 雅行¹・堀川 晴央²・阿部 信太郎²

¹正会員 博(工)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)

²非会員 博(理)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)

地震や累積的な断層運動は、地表に変位を生じさせる。この地表変位から地下の断層形状を推定するための技術を構築することは、強震動計算における震源設定や地震被害想定、都市計画等の観点からは重要な課題の一つである。断層形状を推定する従来手法として、断層関連褶曲理論(幾何学)に基づくバランス断面法を利用する方法と、半無限弾性論に基づく Okada のディスロケーションモデルを用いる方法がある。これらの手法は、褶曲が地表で確認できない場合や、共役断層等も含めて複数の断層が想定される場合には信頼性が高い断層形状を推定することは困難である。本研究では以上の欠点を補う手法として、有限要素法と位相最適化手法に着目し、これらに基づく断層形状推定手法を新たに提案する。本論文では、まず最適化手法の定式化について検討し、断層形状推定問題のための目的関数と制約条件を設定した。次いで、いくつかの計算例を通じて開発手法の精度検証を行った。これらの結果、開発手法は一定以上の精度で断層形状を推定できることを確認した。

Key Words: Active fault, Topology, Optimization, SIMP method, FEM

1. はじめに

地下の断層形状を推定する問題は、強震動計算のための震源設定や、地震被害想定を含む都市計画の観点からは極めて重要な課題の一つであり、より汎用的で精度の高い断層形状推定手法が必要である。断層形状を推定する手法は、断層関連褶曲理論(幾何学)に基づくバランス断面法を用いる方法^{1),2),3)}と半無限弾性体理論に基づく Okada のディスロケーションモデル^{4),5)}に大別できる。

バランス断面法に基づく断層形状推定手法は、断層運動で移動した領域と褶曲を構成するために使われる領域の体積が等しいという制約条件の下、モデル内で用いられるパラメータを最適化することになる。基本となる断層関連褶曲理論が簡明であることに加えて、計算量が比較的少なくすむこと、GUI に基づくバランス断面法専用のソフトウェア(例えば Midland Valley 社 MoveTM)が存在していることなどから、広く用いられてきた。例えば、岡村¹⁾は、バランス断面法を音波探査から得られる地下断面情報に適用し、海底活断層の認定に利用している。また、岡村と石山²⁾は、2004 年の中越地震震源域の地下構造にバランス断面法を適用し、伏在断層の存在を推定している。同様の手法で木村と岡村³⁾は宮城県北部地震震源域における伏在断層の推定を実施している。

他方、Okada のディスロケーションモデルに基づく方法は、褶曲が形成されるような長期的な変動というよりも、1 回の地震で生じる変位に焦点をあて、モデ

ルによって計算される地表変位が、別途 SAR(Synthetic Aperture Radar) 画像や GPS(Global Positioning System) 等で計測された結果に近くなるように地下の断層面と計算に必要なパラメータ(断層の傾斜角、走向、断層面のサイズ、滑り量とその方向)を推定することが多い。弾性体のグリーン関数を利用しているため、1 回あたりの計算時間は極めて短い。ただし、断層の形状は基本的には平面に限られるため、断層面を曲面として表現する場合には、曲面を平面の集合として近似し、各平面からの寄与を重ね合わせる必要がある。なお、Okada の方法もバランス断面法と同様にソフトウェアが整備されており^{6),7)}(Fortran サブルーチン, MATLAB[®] ファイル)、容易に利用することができる。例えば、Massonnet et al.⁸⁾は 1992 年に米国カリフォルニア州で起きた Landers 地震に対して計測された干渉 SAR 画像(地殻変動を表す)を、Okada モデルを通じて再現している。また、Atzori et al.⁹⁾は、2009 年にイタリア中部で発生したラクイラ地震を対象として、地震時の地殻変動を表す差分干渉 SAR データと GPS データの両方を満足するように Okada モデルを通じて断層面の滑り分布を検討している。なお、Okada モデルを用いる場合は、断層面の位置・形状はあらかじめ(震源分布等を検討して)定めておき、この断層面を用いて断層面上の滑り分布と地表の変位分布の関係性を議論する機会が多いようである。

以上のように 2 つの従来手法は、地表の変位を説明するためのツールとして広く用いられているが、いくつかの欠点がある。まず、バランス断面法については、そもそも地表付近で地層の褶曲構造が認められない場

合には利用できない上、地盤材料の物性分布については考慮できない。Okada モデルでは、半無限弾性体を仮定しているため、この仮定が成り立たない場合には適用範囲外である。また、平面ではない断層形状を考慮するには工夫が必要である上、バランス断面法と同様に地盤物性分布を考慮することができない。加えて、主断層に加えて副断層が存在している場合など、複数の断層を考慮する必要がある際には、パラメータの組み合わせ数が著しく増加するため、計測結果と整合するパラメータセットを探索するのは困難になる。

本研究では、これらの欠点を克服すべく有限要素法と位相最適化手法に基づく断層形状推定手法の開発を行う。有限要素法を用いることで、これまでに蓄積してきた地盤の物性に関する情報を取り込むことができる上、境界条件を変位制御や応力制御など自在に変更することができるという利点がある。加えて、後述する位相最適化手法と組み合わせることで、断層が複数存在する場合など自由度が高い複雑なケースにおいても原理的には推定可能となる。本稿では、まずは断層形状推定問題中に現れる最適化問題についての適切な目的関数と制約条件を構築する。次いで、目的関数に現れるパラメータ調整および得られる断層形状の解析メッシュに対するサイズ依存性を検討する。最後にいくつかの計算例を通じて、開発手法の性能を評価する。

なお、今回提案する手法は、工学的基盤以浅の詳細な地盤モデルを対象として行われる弾塑性変形解析ではなく、km オーダーのスケールを対象としていることに留意されたい。すなわち、本手法は、工学的基盤以浅の詳細な地盤モデルに対して深部から入力される断層変位（断層の傾斜角、工学基盤の変位分布等）の精度を向上させるためのツールとしての役割もある。

2. 断層形状推定問題の定式化

図-1 は、断層形状推定問題を定式化する際の仮定と状況を示している。まず、直線状の断層形状は求めるべきものであって現時点では未知である。地下応力によって断層がずれ動き、地表の変位ベクトルが計測されたとする。この地表変位を用いて直線状の断層形状を推定することになる。ここでは、地盤は弾性体と仮定する。また、地下応力（あるいは応力境界でのトラクション）はわかっているものとする。地表を除く変位境界は、地表の変位分布が十分小さくなる場所で設定する。以上の境界での仮定に加えて、断層領域では断層を除く地盤材料に比べて、剛性が小さくなっているものと仮定する。以上の仮定に関しては、これまでに得られている知見からある程度見積もることができ、決して非現実的な仮定ではない。例えば、地下応力に関しては、

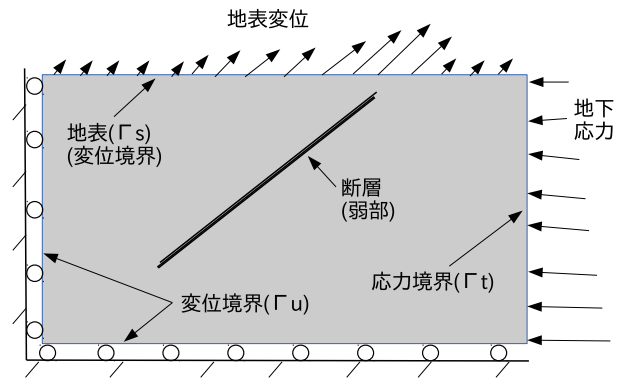


図-1 断層形状推定問題の問題設定を説明するための模式図

産総研等の研究機関が種々の応力測定法を用いて地下応力および主応力の方位を測定・集積してきており、これらの知見が利用できる¹⁰⁾。変位拘束については、断層から十分離れて設定することで問題はないと考える。地表変位については、地震時航空レーザー測量によって稠密な変位ベクトルが取得できること^{11),12),13),14)}や、同時代の地形面解析から累積変位ベクトルが求まることを考えれば、現実的な変位場を設定できる。

以上をまとめると、本研究における断層形状推定問題は、変形解析シミュレーションによって得られる地表での変位場が、別途地表で計測されている変位場とフィットするように地下の材料物性の分布形態（関数形態）を探索する問題であると言える。この問題は、10 個程度のパラメータを最適化する問題とは本質的に異なっていることに留意されたい。材料分布の「分布形態」自体を探索しており、最適化された関数形状が結果として直線状の断層のように見えることになる。この種の最適化問題は、位相最適手法と呼ばれ、最適化すべきパラメータの自由度が極めて大きいことが特徴である^{15),16)}。

位相最適化問題の数値解法として、均質化法に基づく解法¹⁷⁾、レベルセット法に基づく解法^{18),19)} SIMP 法²⁰⁾(Solid Isotropic Material with Penalization) 等が挙げられる。とりわけ、SIMP 法は実装が比較的容易であることから位相最適化の数値解法として広く利用されている^{20),21),22)}。本研究においてもこの SIMP 法を用いる。SIMP 法は、弾性係数などの材料定数を最適化する変数（設計変数）と関連づけることが特徴であり、弾性係数については次の関係が適用される。

$$D(\rho) = \rho^p D_0 \quad (1)$$

ここで、 ρ は設計変数（位置の関数 $\rho = \rho(x, y)$ ）であり、 $0 < \rho \leq 1.0$ の範囲の実数をとるように設定される場合が多い。 D_0 は基準となる材料の弾性係数テンソルであり、ここでは健全な状態における地盤の等方弾性係数

テンソルとなる． $D(\rho)$ は，有限要素法内で用いる場の弾性係数テンソルである．すなわち， $\rho = 1.0$ の場合はその位置における材料は断層領域ではない健全な地盤となり， ρ が 0.0 で材料は空隙と見なすことができる．本研究における ρ の下限は 0.01 と設定した． ρ のべき乗の指数 p は，通常 3.0 程度の数値が用いられる． ρ のべき乗とすることで， ρ が 0 から 1 の中間的な値をとりにくくなるように工夫されている．

SIMP 法を断層形状推定問題に適用すると，次の最適化問題が定義できる．

$$\text{minimize}_{\rho} \int_{\Gamma_s} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_s) \cdot (\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_s) d\Gamma_s \quad (2)$$

subject to

$$0.01 < \rho \leq 1.00 \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} : \boldsymbol{\varepsilon} = \rho^3 \mathbf{D}_0 : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} \text{ on } \Gamma_u \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \mathbf{t} \text{ on } \Gamma_t \quad (7)$$

式 (2) は，地表 Γ_s で計測された変位 \mathbf{u}_o とシミュレーションから得られる変位 \mathbf{u}_s の残差の 2 乗を最小化することを示しており，最適化問題の目的関数である．式 (3) は，設計変数 ρ の取りうる範囲を示している．式 (4) は，弾性体の構成方程式を示しており， $\boldsymbol{\varepsilon}$ は微小ひずみテンソル ($\frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$) である．また，式 (5) は応力の釣り合い式，式 (6) は変位境界条件，式 (7) は応力境界条件をそれぞれ表す．ここでは，上述の最適化問題を FEM ベースの汎用工学ソフトウェア，COMSOL Multiphysics® (COMSOL AB 社) 上で実装し，数値解を求めた．なお，上述の最適化問題は，順問題解析 → 随伴変数法に基づく感度解析 → 設計変数の増分を求めるための非線形計画問題の求解 (COMSOL 内では SNOPT²³) を利用)，という一連の処理を所定の解析停止条件が満たされるまで繰り返すことにより数値解を求める．随伴変数法に基づく感度解析を含む数値解法の一連の流れについては，近藤のフローチャート²⁴が詳しい．

3. 目的関数の再考とパラメータ調整

(1) プログラムの動作検証

図-2 に，動作検証用問題の問題設定を示す．モデル中央部に設定した直線状の断層 (長さ 500m, 厚さ 2m, 30 度傾斜) を地表の変位場 (別途計測されたと想定) と残りの境界条件 (ローラー支持，応力境界 ($\sigma_e = 30 \text{ MPa}$, 一様分布)) が既知であるとして探索する．なお，地表で計測される変位については，図-2 の断層形状を用いて順

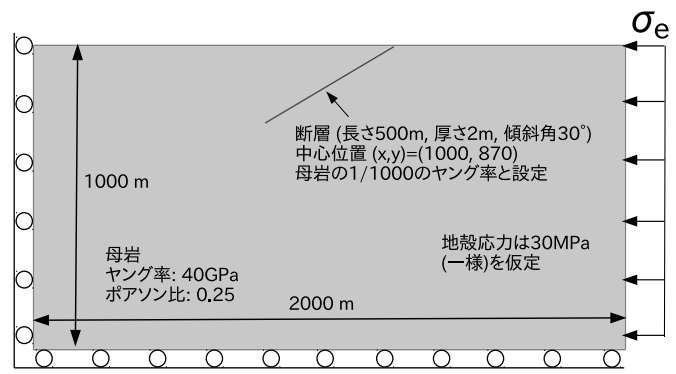


図-2 動作確認用問題の問題設定

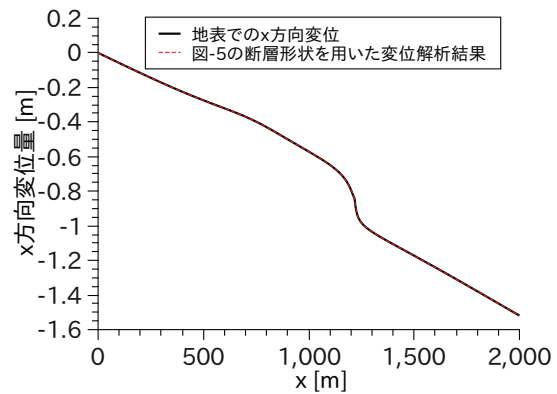


図-3 地表での x 方向変位 (地表で計測された変位と仮定)

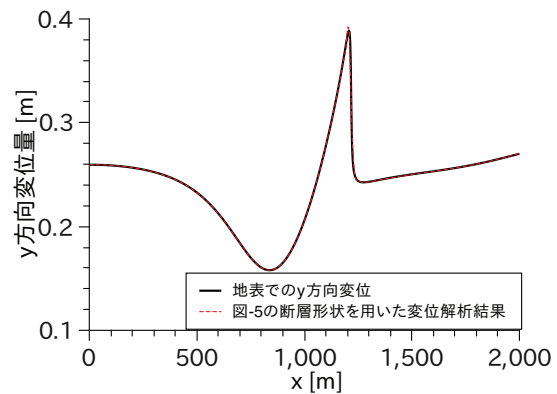


図-4 地表での y 方向変位 (地表で計測された変位と仮定)

問題を一度解いて地表での変位を求め，これを LiDAR 等の計測で得られた変位であると想定する (図-3 と図-4 中の実線)．

図-5 は，図-3 と図-4 の x, y 各方向変位成分を入力とし，式 (2) の目的関数を用いて断層形状を推定した結果 (有限要素サイズ: 10m グリッド) であり，設計変数 ρ の分布を示している．図中の黒色領域が推定された断層を表している．地表から地下に向けて，断層が低角

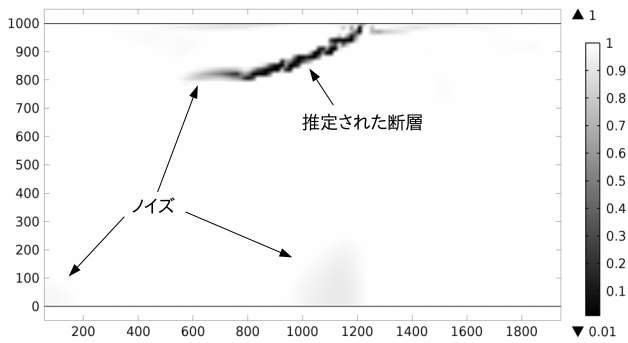


図-5 式 (2) で表される目的関数を用いた場合の推定結果 (メッシュサイズ: 10m グリッド)

の傾斜角で直線状に伸びている様子は、図-2 に示した正解が持つ特徴と概ね整合する。また、断層の長さについても概ね推定できている。一方で、断層が無いはずの領域においても設計変数が 1.0 を下回る領域 (図中のノイズ) も散見される。驚くべき事に、図-5 に示すノイズを含む断層形状を用いて順解析を実施して得られる地表での変位場は、入力に用いた変位場と極めてよく一致する (図-3 と図-4 中の破線)。この結果は、式 (2) で表される目的関数を最小化する (地表変位をマッチさせる) という意味においてプログラムは正しく動作していることを示している。ところが、得られた解は正しい解ではなく、解の一候補が選ばれたと解釈できる。以下、より真の解に近い解を得るための改良案を提示する。

(2) 目的関数の再定義

弾性体の境界値問題は応力の釣り合い式と構成式、そして変位境界および応力境界で完全に閉じており、これ以上の拘束を付与することはできない。設計変数 ρ の下限については、断層岩と母岩の材料試験からより適切な数値を定めることは可能であるが、ノイズが出現するのを強く抑制するほどの拘束力はないと思われる。ここでは、拘束条件ではなく目的関数を改良して真の解が探索できるようになることを目指す。この方針は、目的関数に適切な項 (正則化項と呼ばれる) を付加し、より良い性質を有する最適解を求めようとする方法論 (正則化) と同じ考え方である。正則化は、パターン認識や機械学習の分野で過学習を避ける有効な方法として用いられる場合が多い^{25),26)}。広く用いられる正則化項として、ティホノフの正則化項 (重みを設計変数の 2 乗和にかけたもの) や Lasso 正則化項 (重みを設計変数の絶対値和にかけたもの) が挙げられる。

本研究では、「断層領域の面積 (3 次元問題では体積) は、解析領域全体の面積に比べて十分小さい」という事実に基づいた正則化項を提案する。すなわち、なるべ

く少ない断層領域によって計測された変位場をうまく再現することができるように目的関数を改変する。なお、断層領域の総面積がなるべく小さくなるようにすることは、健全な地盤領域をなるべく増やす (最大化すること) と同義である (Maximize $\int_{\Omega} \rho d\Omega$, Ω は解析領域全体)。以上のことを考慮して、式 (2) で定義した最小化すべき目的関数を次のように再定義する。

$$\text{minimize } \int_{\Gamma_s} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_s) \cdot (\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_s) d\Gamma_s - \alpha \int_{\Omega} \rho d\Omega \quad (8)$$

上式において、第 2 項が新たに付与した項であり、 α は重み係数である。この α にゼロ以上の小さい数値を設定することで、地表変位をマッチさせる特長を有したまま、島状のノイズを除去できると考えられる。次に α についてのパラメトリックスタディーを行い、適切な値を検討した。

(3) 重み α についてのパラメトリックスタディー

図-6 から図-10 に α を変化させた場合の断層形状推定結果を示す。なお、各ケースにおいて、有限要素メッシュは図-5 を求める際に使用したもの (10m グリッド) と同じである。

$\alpha = 1.0 \times 10^{-6}$ の場合 (図-6) では、 $1200 \leq x \leq 1600$ の地表付近で島状のノイズが多く確認され、正則化項は十分に機能していないことがわかる。また、断層の最深部においても真の解にはない屈曲が確認できる。当然ながら、深くなればなるほど地表の情報は反映されにくくなるため、地下深部での正確な断層形状の推定は困難になる。最深部で屈曲する現象は、 $\alpha = 5.0 \times 10^{-6}$ の場合 (図-7) においても確認できる。ただし、 $\alpha = 1.0 \times 10^{-6}$ のケースで地表付近にて確認された島状のノイズは消失しているため、 α を大きくすることで、意図したとおりに正則化が機能しているものと考えられる。 $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ のケース (図-8) では、島状のノイズは除去され、断層最深部での屈曲も抑制されている。加えて、推定された断層が直線状であり、他のどのケースよりも真の解に近いことがわかる。本論文における以降の解析では、常に $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ と設定する。 $\alpha = 5.0 \times 10^{-5}$ のケース (図-9) では最深部での屈曲が解消されていることが確認できる。一方で、地表近傍での断層形状は傾斜が急になっており、この点が真の解とは異なっている。 $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ のケース (図-10) では、推定された断層形状は断層中央部で鉛直方向に段差が生成されており、真の解とは大きくことなっている。しかしながら、 $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ で得られた断層形状を用いた順解析結果ですら、地表の変位を一定以上の精度で再現し得る。入力した地表での y 方向変位成分と $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$

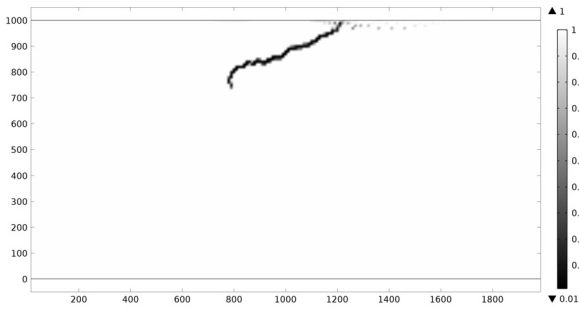


図-6 $\alpha = 1.0 \times 10^{-6}$ とした場合

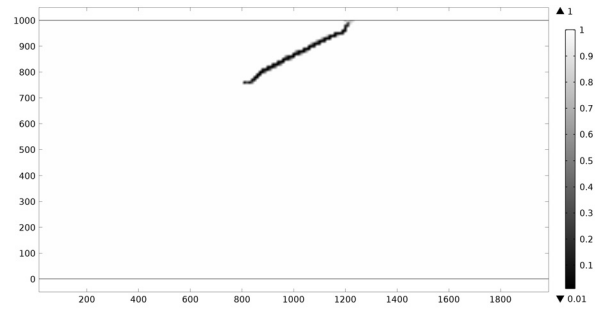


図-9 $\alpha = 5.0 \times 10^{-5}$ とした場合

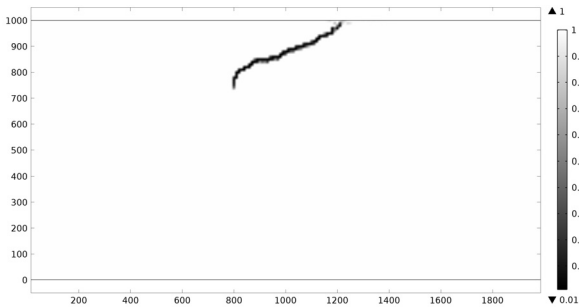


図-7 $\alpha = 5.0 \times 10^{-6}$ とした場合

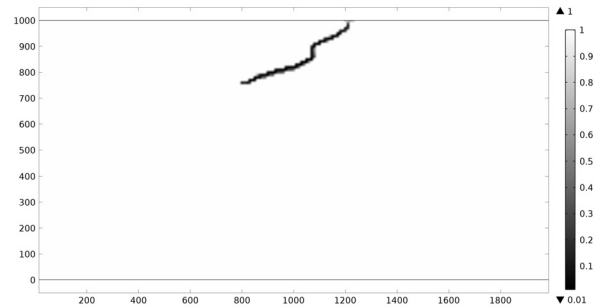


図-10 $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ とした場合

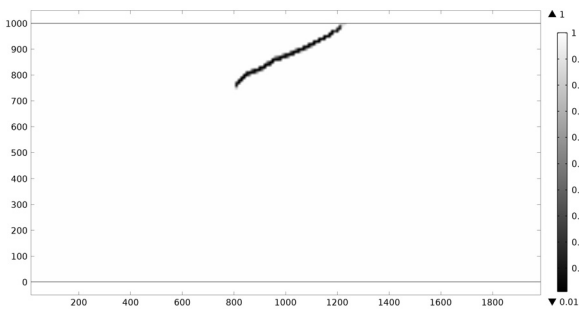


図-8 $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ とした場合

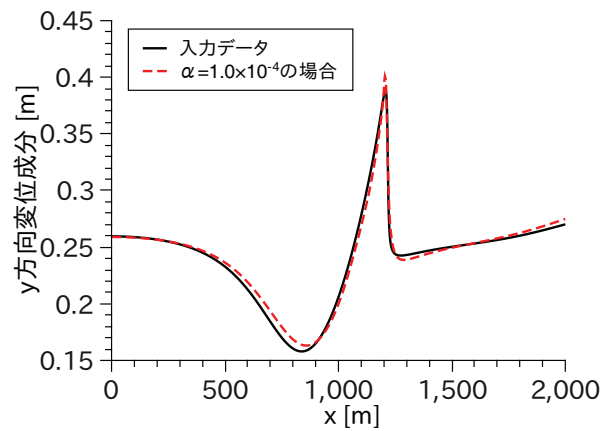


図-11 入力した地表での y 方向変位成分と $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ として得られた断層形状 (図-10) を用いた順解析から得られた地表での y 方向変位成分の比較

として得られた断層形状 (図-10) を用いた順解析から得られた地表での y 方向変位成分の比較をしたものが図-11 である。断層形状が真の解と多少異なっても、地表の変位様式を十分な精度で再現し得ることがわかる。当然ながら、最も推定精度が高い $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ のケースでは、入力した地表変位分布と順解析から得られる地表変位分布は極めてよく一致する。

図-12 に $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ として推定した断層形状と真の解を比較したもの (拡大図) を示す。真の解 (グレーの直線) 周辺に本手法によって推定された断層 (黒色領域) が分布していることがわかる。完全な直線ではなく、わずかに波打った形状となつてはいるが、高い精度で

断層形状が推定できていると言えよう。また、断層の長さについてもほぼ真の解と同程度となっていることがわかる。

以上、正則化項の重み α についての検討を行った。なお、式 (8) で定義した目的関数を用いた場合、図-6 から図-10 で示した各推定結果には再現性があり、何度解析してもほぼ同じ断層形状に収束することを確認している。

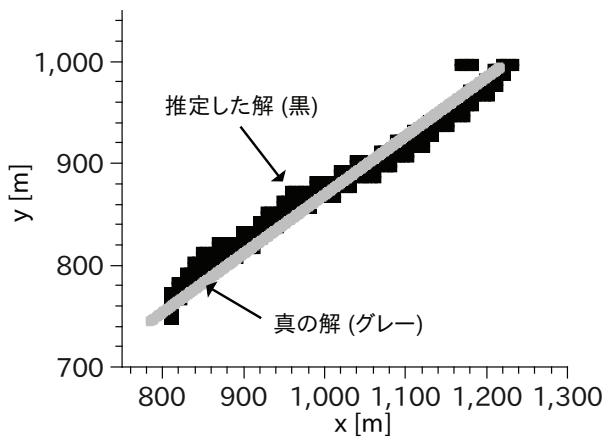


図-12 $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ の断層形状推定結果と真の解の比較

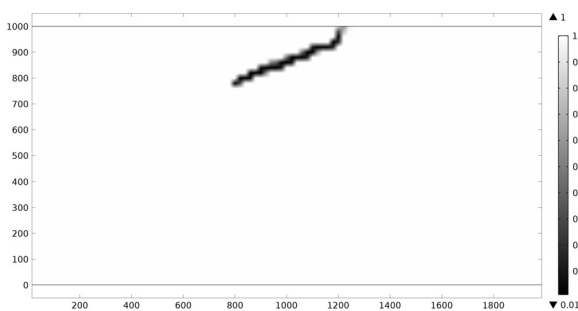


図-13 1要素のメッシュサイズが20.0m 四方の場合

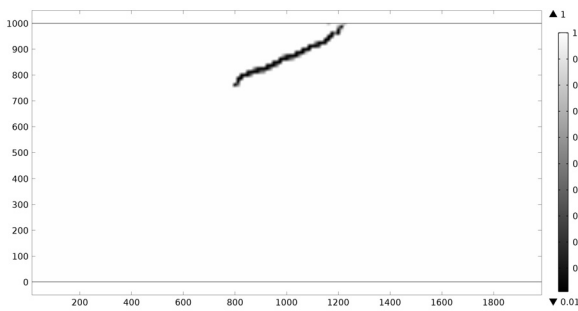


図-14 1要素のメッシュサイズが12.5m 四方の場合

(4) 開発手法のメッシュサイズ依存性について

α のパラメトリックスタディー時には、1つの要素が10m 四方の要素サイズとした。ここでは、1つの要素のサイズを5m 四方、7.5m 四方、10m 四方、12.5m 四方、15m 四方、20m 四方と変化させた場合に推定される断層形状がどのように変化するかを検討し、開発手法のメッシュサイズ依存性について考察する。

図-13 から図-16 に要素サイズを変化させた場合に得られた断層形状を示す。要素サイズが、20.0m 四方(図

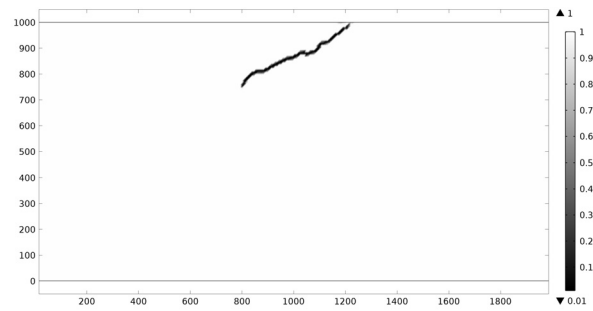


図-15 1要素のメッシュサイズが7.5m 四方の場合

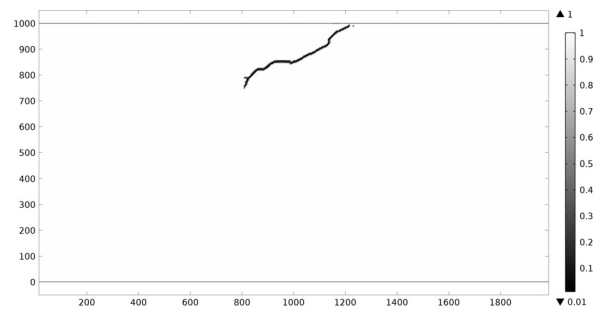


図-16 1要素のメッシュサイズが5.0m 四方の場合

-13) から7.5m 四方(図-15)までは、概ね真の解に近い特徴を有する結果が得られており、本手法のメッシュ依存性は強くは出ていないと言える。要素サイズが5.0m 四方の場合には、推定された断層形状は大局的には直線のようなものであるが、屈曲が目立つ。この結果は、メッシュを細かくすることが必ずしも正解に近づくわけではないことを示唆しており、理想的には解像度毎に最適な重み α を適用することが望ましい。ここでは α の調整を10m 四方のメッシュで行ったため、これに近い12.5m 四方のケースと7.5m 四方のケースで真の解に近い推定結果が得られていると考えられる。以上の検討から、ある解像度で調整した α を用いた場合、その解像度よりも粗い解像度ではメッシュサイズ依存性は強く出ていないと判断できる。 α を調整した解像度よりも細かい解像度を用いる場合は、上述の結果を念頭に入れておく必要がある。

4. 数値解析例

ここでは、断層が複数条存在している場合や、地表近くに断層が確認できず伏在的な場合など、より断層形状推定が困難である場合に対して本手法が適用できるかどうかを検討する。

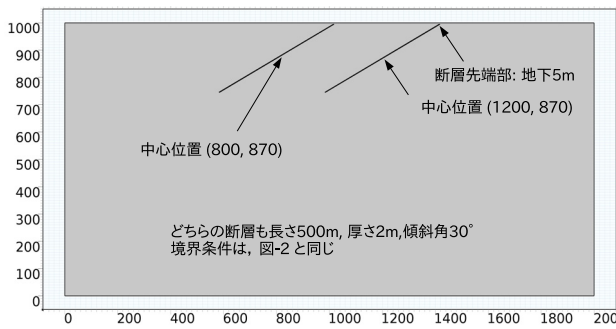


図-17 断層が2条存在する場合の問題設定

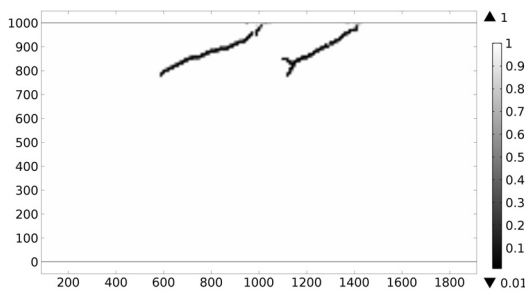


図-18 断層が2条存在する場合に対する断層形状推定結果

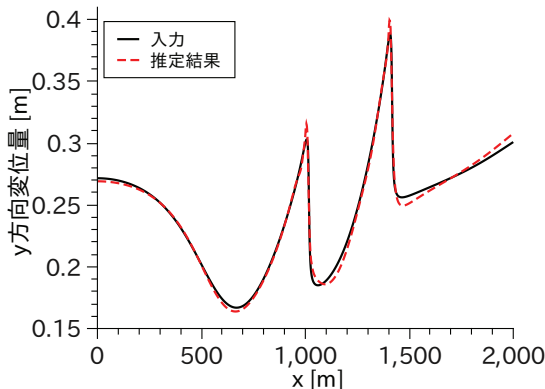


図-19 断層が2条存在する場合に対する地表変位の比較

(1) 断層が2条存在する場合

図-17 に、断層が2条存在する場合に対する問題設定を示す。傾斜角 30° 、長さ 500m、厚さ 2m の断層を2条平行に設置した場合であり、各断層の線端部は地表近く(地下 5m)まで到達している。断層領域のヤング率とポアソン比、そしてモデルの境界条件は、図-2 の設定と同じである。

図-18 に断層形状推定結果を示す。2条の断層とも、低角の傾斜角で地下に直線的に伸びている様子わかる。また、断層下端の位置も入力したものと比べてほぼ等しいことがわかる。ただし、中心位置が (1200, 870)

の断層(右側の断層)の下端は分岐しており、真の解とは異なっている。この結果は、地下深くになるにつれて感度が取りにくいことと2条同時に探索しているため、解の探索過程における片方の断層形状がもう一方に影響を及ぼし、場合によっては真の解に近づけるための修正が十分に行えないことに依っているものと推察できる。図-18 の推定された断層形状を用いて地表変位を求め、入力と比較したものが図-19 である(y 方向変位のみ比較)。右側の断層最深部が分岐するなどの違いがあるものの、地表での変位は十分な精度で再現されていることがわかる。なお、x 方向変位については、本ケースのみならず他のケースにおいても差異が検出できない程に極めて高い精度で再現されていた。変位分布の様式が x 方向変位分布よりも複雑なためか、y 方向変位をマッチさせるほうが難易度が幾分か高いようである。

以上の検討から、本手法は、断層が複数条ある場合においても、「断層は複数存在する」という先見情報を解探索過程で考慮しなくとも、一定以上の精度で断層形状を探索することができたと言える。

(2) 断層の傾斜角が低角で伏在的である場合

図-20 に、傾斜角が低角 (30°) の伏在断層を想定した場合の問題設定を示す。断層の物性およびモデルの境界条件は、図-2 で用いたものと同じである。ただし、断層先端の位置が図-2 の場合は地表付近であったのに対し、今回は地下 105m としている。図-21 に、推定した断層形状を示す。真の解が直線なのに対し、わずかに屈曲している ($800 \leq x \leq 1000$ の領域) もの、概ね直線的であることがわかる。また、断層先端位置(地下 105m 程度)と断層最深部位置(地下 650m 程度)についても、一定以上の精度で推定されていることがわかる。加えて、地表変位についても十分な精度で再現されていることから(図-22)、本手法は、傾斜角が低角の伏在逆断層の場合においても、一定以上の精度を達成していると判断した。当然ながら、断層位置を地下深くに設定していくにつれて、断層形状推定のための地表変位レベルも小さくなるため、推定の難易度は高くなる。

(3) 断層の傾斜角が高角で伏在的である場合

一般に断層の傾斜角が高角の場合、地表で変位が現れる領域は狭い範囲となり、x 方向の変位分布の情報量が少なくなる。したがって、低角の逆断層にくらべ、高角の逆断層の方が探索の難易度は高い。

図-23 に、断層の傾斜角が高角 (60°) で伏在的である場合の問題設定を示す。この問題は、上述の理由で今回試した問題のうちで最も探索の難易度が高いと考

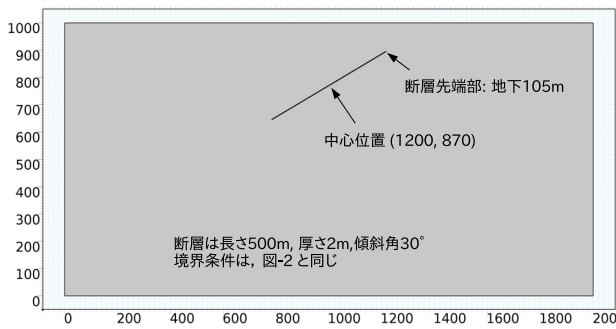


図-20 断層の傾斜角が 30 °で先端部が地下 105m の場合の問題設定

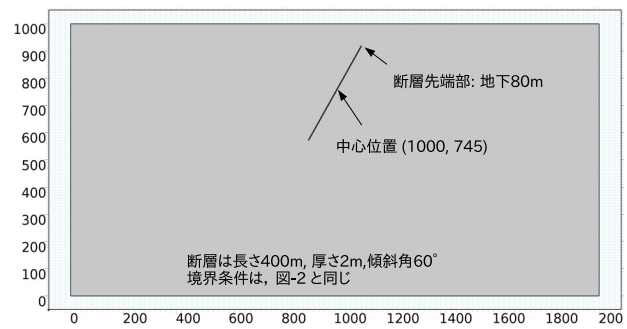


図-23 断層の傾斜角が 60 °で先端部が地下 80m の場合の問題設定

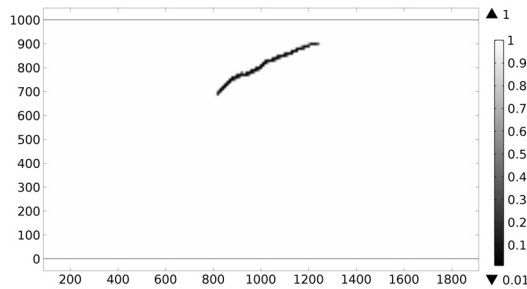


図-21 断層の傾斜角が 30 °で先端部が地下 105m の場合に対する断層形状推定結果

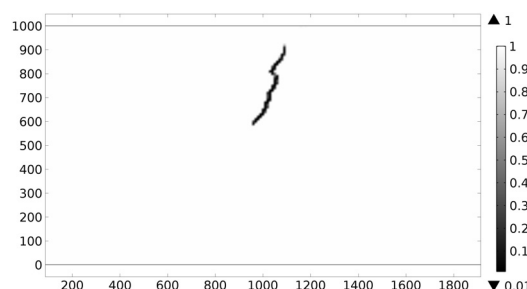


図-24 断層の傾斜角が 60 °で先端部が地下 80m の場合に対する断層形状推定結果

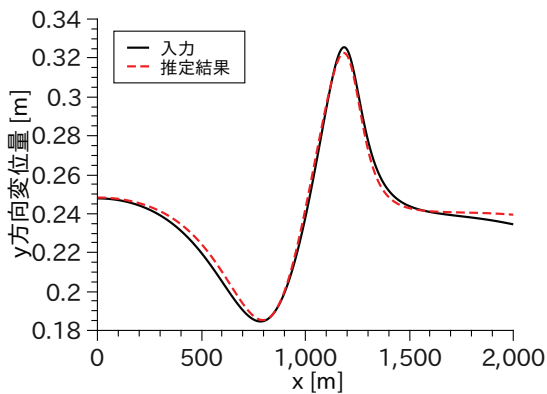


図-22 断層の傾斜角が 30 °で先端部が地下 105m の場合に対する地表変位の比較

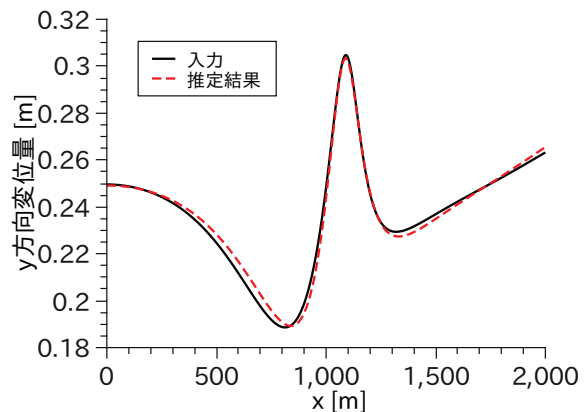


図-25 断層の傾斜角が 60 °で先端部が地下 80m の場合に対する地表変位の比較

えられる。図-24 は、図-23 で示した問題に対する断層形状推定結果である。断層の先端部の位置(地下 80m 付近)と、最深部の位置(地下 550m 付近)は、真の解の位置関係とほぼ一致しており、本問題に対しても提案手法は、対応可能であることがわかる。ただし、得られた解は、完全に直線的な断層ではなく、 $y = 800m$ 付近で断層の走向方向に直交する方向に 30m 程度のジャンプが認められる。この現象は、推定した解が図-12 で確認されたように真の解周辺に波打って現れる特性が、

地表変位の情報量の減少が原因となり助長されたものと推察できる。なお、地表変位については他のケース同様、十分な精度で再現されている(図-25)。傾斜角が 60 °のケースでは、断層先端部を地下 100m とすると解を探索することができず、地下 80m 程度が限界であった。今回の取り組みでは、地表に現れる変位量のレベル(別途計測したと想定)が 30cm 程度となっていることを考慮すれば、本手法は十分な断層形状推定能力を

有していると言えよう。

5. まとめと今後の展望

断層運動に起因する地表変位場から，位相最適化手法と有限要素法を組み合わせることで地下の断層形状を推定するための手法を開発した．本研究を通じて得られた知見は以下のとおりである．

1. 弾性体の応力釣り合い式を拘束条件に持つ最適化問題として断層形状推定問題を定式化した．
2. 地表の変位をマッチさせる条件に加え，断層領域が解析領域全体に比べて小さいという条件（正則化項）を目的関数に付与することで推定精度を高めた．
3. 正則化項の重みについてのパラメータスタディーを行い，高い精度で断層形状を推定するための数値を求めた（今回は $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ ）．
4. メッシュのサイズを変化させ，断層形状推定結果のメッシュサイズ依存性を検討した．結果，本手法ではメッシュサイズ依存性は強く出ていないと判断した．
5. いくつかの数値解析例を通じて本手法の精度と限界を確認した．

今後は，LiDAR データや反射法探査から得られる変位場など，フィールドで得られる観測結果に対して本手法を適用する．

参考文献

- 1) 岡村行信: 音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定—fault related fold, growth strata 及び growth triangle の適用—, 地質調査所月報, 第 51 巻, 第 2 / 3 号, pp.59–577, 2000.
- 2) 岡村行信, 石山達也: 2004 年新潟県中越地震震源域での地質構造を用いた伏在断層モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, No.5, pp.17–28, 2005.
- 3) 木村治夫, 岡村行信: 2003 年宮城県北部地震震源域の 3 次元地質構造に基づいた伏在断層モデルの構築, 活断層・古地震研究報告, No.9, pp.65–78, 2009.
- 4) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1435-1154, 1985.
- 5) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040, 1992.
- 6) Okada, Y.: Program to calculate deformation due to a fault model DC3D0DC3D, http://www.bosai.go.jp/study/application/dc3d/DC3Dhtml_E.html (2014 年 7 月 14 日閲覧)
- 7) Beauducel, F.: Okada: Surface deformation due to a finite rectangular source, <http://www.ipgp.jussieu.fr/~beaudu/matlab.html#Okada> (2014 年 7 月 14 日閲覧)
- 8) MASSONNET, D., ROSSI, M., CARMONA, C., ADRAGNA, F., PELTZER, G., FEIGL, K., RABAUTE, T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364, pp.138–142, 1993.
- 9) Atzori, S., Hunstad, I., Chini, M., Salvi, S., Tolomei, C., Bignami, C., Stramondo, S., Trasatti, E., Antonioli A., Boschi, E.: Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake central Italy), GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.36, L15305, doi:10.1029/2009GL039293, 2009.
- 10) 産総研 地殻応力場データベース: <https://gbank.gsj.jp/crstress/index.html>(2014 年 6 月 29 日閲覧)
- 11) Borsa, A. and Minster, J. B.: Rapid Determination of near fault earthquake deformation using differential LiDAR, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.102, No.4, pp.1335–1347, 2012.
- 12) Krishnan, A. K., Nissen, E., Saripalli, S. and Arrowsmith, R.: Change Detection Using Airborne LiDAR: Applications to Earthquakes, Experimental Robotics Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.88, pp.733–743, 2013.
- 13) Mukoyama, S.: Estimation of ground deformation caused by the earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the geomorphic image analysis of high resolution LiDAR DEMs, J. Mt. Sci., DOI: 10.1007/s11629-011-2106-7, 2011.
- 14) 竿本英貴, 丸山正, 近藤久雄: RBF 補間と GA を用いた LiDAR データからの地震時地表変位抽出手法の開発, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, p.L161–L168, 2014.
- 15) Eschenauer, H.A., Olhoff, N.: Topology optimization of continuum structures: A review, Appl. Mech. Rev. 54(4), pp.331–390, 2001.
- 16) 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善, 2013.
- 17) Bendsøe M.P., Kikuchi, N.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer methods in applied mechanics and engineering, 71, pp.891–909, 1988.
- 18) Wang, M.Y., Wang, X., Guo, D.: A level set method for structural topology optimization, Computer methods in applied mechanics and engineering, 192, pp.227–246, 2003.
- 19) Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Takezawa, A.: A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface energy, Computer methods in applied mechanics and engineering, 199(45), pp.2876–2891, 2010.
- 20) Bendsøe M.P., Sigmund, O.: Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer, 2002.
- 21) Tcherniak, D.: Topology optimization of resonating structures using SIMP method, Int. J. Numer. Meth. Engng, 54, pp.1605–1622, 2002.
- 22) Srinivas, V.S.S., Ananthasuresh, G.K.: Analysis and Topology Optimization of Heat Sinks with a Phase-Change Material on COMSOL Multiphysics Platform, Proceedings of the COMSOL Users Conference, Bangalore, 2006.
- 23) Gill, P.E., Murray, W., Saunders M.A.: SNOPT: an sqp algorithm for large-scale constrained optimization, SIAM review, Vol.47, No.1, pp.99–131.
- 24) 近藤継男: トポロジー最適化法による最適設計計算—流体関連分野での応用の試み—, <http://mathsoc.jp/publication/tushin/1504/1504kondoh.pdf>, 日本数学会秋季総合分科会, 2010. (2014 年 7 月 2 日閲覧)
- 25) 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋: わかりやすいパターン認識, オーム社, 2007.
- 26) 赤穂昭太郎: カーネル多変量解析—非線形データ解析の新しい展開, 岩波書店, 2008.

Fault shape detection based on topology optimization technique

Hidetaka SAOMOTO, Yuko KASE, Hiroshi MORI, Masayuki YOSHIMI, Haruo
HORIKAWA and Shintaro ABE

Determining the accurate shape of active fault is an important subject from the viewpoint of both hazard mitigation and urban planning. Traditionally, the methods for that purpose are roughly categorized into two types. One is based on the fault-related fold theory consisting of some fundamental deformation patterns such as the layer-parallel slip, the flexural slip, and the inclined shear, the other is based on the inversion with the Okada model using Green's function defined on a semi-infinite elastic body. Understandably, the fault-related fold theory is not applicable if the geological fold cannot be recognized at the ground surface. Also, the use of the Okada model is limited only to semi-infinite elastic body formed by a single material. In order to avoid these drawbacks, we have developed a novel inversion system by coupling the FEM with the topology optimization. We first define a set of mathematical programming for fault shape detection with a special regularization, and then perform parameter adjustment of the objective function to be minimized. Finally, the precision of proposed system is confirmed through some numerical examples. The results show that the system successfully detect the fault shape without any predefined information even if multiple faults exist.