

3. 3 三次元有限要素法（FEM）による断層モデルの高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 三次元有限要素法（FEM）による断層モデルの高度化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所	主任研究員	竿本 英貴

(c) 業務の目的

糸魚川-静岡構造線断層帯を対象として、複雑な断層形状を反映させた三次元有限要素解析を実施し、断層面の相互作用を考慮した上で断層変位分布を明らかにする。すなわち、サブテーマ1で得られる断層面情報およびサブテーマ2で得られる広域応力場情報を入力とし、複数のシナリオについて断層変位分布を検討する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成29年度：

糸魚川-静岡構造線断層帯への適用を念頭において、複数の断層面を取り扱うことができる有限要素解析プログラムのプロトタイプを構築した。また、松田式を断層面上物性に反映させることにより、変位解析の信頼性を向上させる工夫を施した。

2) 平成30年度：

主としてサブテーマ1で得られる予定の断層面の地下形状に関する情報を解析プログラムに取り込み、断層帯の三次元有限要素メッシュを生成した。対象地域は、糸魚川-静岡構造線断層帯の北部区間および中北部区間とした。

3) 平成31年度：

中南部区間についても有限要素メッシュを生成するとともに、全業務期間を通じて作成した有限要素メッシュについて変位解析を実施し、断層面周辺の変位分布および断層面間の相互作用を明らかにする。また、得られた結果のまとめを行う。

(2) 平成30年度の成果

(a) 業務の要約

活断層周辺で地震時に地表で生じる変状を数値解析等の手法で予測することは、変状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。変形予測では、断層面形状、地下構造、広域応力場、岩盤材料特性、松田式に代表されるスケーリング則など様々な情報を積極的に統合・活用することが肝要である。

平成30年度における業務は、サブテーマ1およびサブテーマ2の結果が得られるまでの年度の前半における業務と、サブテーマ1および2の情報を得た後の年度の後半における業務に分けられる。年度前半では、中北部区間の牛伏寺断層周辺に推定されているスリッ

プパーティショニングを念頭において、有限要素解析によってスリップパーティショニングが発生しやすい条件について検討し、スリップパーティショニングが積極的に生じる断層形状および最大主応力の方位を明らかにした。年度後半では、平成29年度に作成したスケーリング則（松田式）を組み込んだ有限要素解析手法を糸魚川-静岡構造線断層帯の北部区間および中北部区間に適用する際に必要となる断層帯の三次元有限要素メッシュを生成した。断層面の位置および幾何学形状は、サブテーマ1の調査結果から得られた最新の知見を、また、北部区間・中北部区間における広域応力場はサブテーマ2の応力解析結果から得られた最新の知見をそれぞれ反映させた。最新の知見を反映させた有限要素モデルについて、最大主応力の方位についてのパラメトリックスタディーを実施し、最大主応力の方位を $N60^{\circ}W$ と設定することで、既往の調査結果から得られている断層変位のセンスと整合することを確認した。並行して、変位量について調査結果とシミュレーション結果の定量的な比較も実施した。結果、シミュレーションから得られる変位量は現地調査結果に比べて小さいことが確認された。この差異をなるべく小さくするため、なめらかな断層面を作成する等の試みを実施し、より現実を模擬するための検討を加えた。

(b) 業務の実施方法

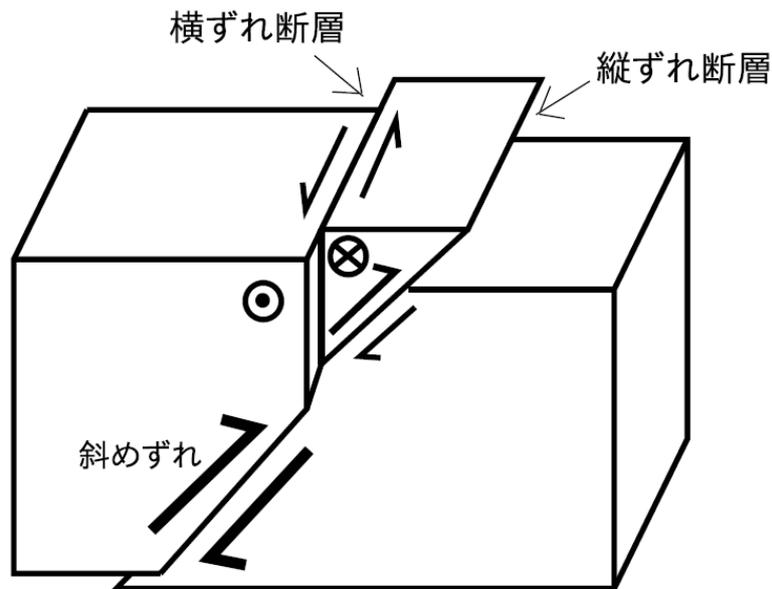
本年度前半におけるスリップパーティショニングについての発生条件検討および年度後半の北部区間・中北部区間の断層帯に関する変形シミュレーションの両方について、平成29年度に開発したスケーリング則（松田式）を組み込んだ有限要素解析手法を用いる。本手法は、複数のシナリオを検討するために1回のシミュレーションにかかる計算時間を可能な限り短くしていること、断層面上の物性にスケーリング則（松田式）を組み込み、現実的な変位分布が実現される工夫を施していることが特徴である。なお、シミュレーションに関する一連の手続きは、汎用有限要素解析プログラム（COMSOL Multiphysics, ver. 5.4）上で実装した。

(c) 業務の成果

1) FEMを用いたスリップパーティショニング発生条件についての検討

i) スリップパーティショニングに関する既往研究

断層変位のスリップパーティショニングは、図1に示す模式図によって説明されることが多い。すなわち、大局的には断層面上に斜めずれが生じると考えられる状況で、縦ずれが一方の断層面に、横ずれが並走するもう一方の断層面にそれぞれ生じて大局的な斜めずれを解消すると考えられている。また、スリップパーティショニングの事例として、国内では2016年熊本地震の地表地震断層の一部（西原村）でスリップパーティショニングが地表踏査によって確認されており（Toda et al., 2016）、この地点では右横ずれ（変位量：約1.5m）を伴う主断層と並走するように北西落ちの正断層（変位量：約2.0m）が分布することが報告されている。この他、国内では、糸魚川-静岡構造線活断層系の牛伏寺断層および松本盆地東縁断層のずれ変位関係がスリップパーティショニングで説明できるとする報告等（Ikeda et al., 2004；松多・他, 2007）がある。国外では、米国Owens Valleyで



大局的な斜めずれ変位を
地表近くの縦ずれ断層と横ずれ断層で変位を分配

図1 断層変位のスリップパーティショニングの模式図
(竿本, 2019 より引用)

の調査結果 (Wesnousky and Jones, 1994) および中国での Kokoxili 地震 (2001 年) に対する調査結果 (King et al., 2005) など、数例報告されている。なお、Toda らの報告と King らの報告は地表地震断層調査に基づいており、縦ずれと横ずれの同時出現が確認されている。一方、Wesnousky and Jones (1994) の報告では現地にて同時出現が確認されたわけではなく、活断層形態および地質調査に基づくスリップパーティショニングの推定である。また、Ikeda et al. (2004) の報告と松多・他 (2007) の報告は、ともに反射法地震探査結果から想定される断層面配置についてスリップパーティショニングを推定しているものであり、これらについても同時出現が地震時に確認されているわけではない。以上のように、断層変位のスリップパーティショニングの事例数は、正・逆断層や横ずれ断層単体の事例数に比べて極端に少ないため、スリップパーティショニングに対する知見や現象把握の程度は個別の逆断層や横ずれ断層の水準に達していないと考える。このような事情のため、スリップパーティショニングについて考察することは、一定の新規性を有する。また、実際に熊本地震時に発生したと推察されていることから、地震防災の観点からも一定の意義があると考えられる。

断層変位のスリップパーティショニングに関する数値シミュレーションは、国内において筆者の知る限り実施されていない。一方、国外で有限要素法に基づく弾塑性解析事例が一例 (Bowman et al., 2003) ある。Bowman et al. (2003) の研究では、San Andreas 断層とその周辺に存在する断層についての実際の変位様式およびチベット北東部の Haiyuan 断層とその周辺に存在する断層についての実際の変位様式の各ケースについて、弾塑性解析から得られる変位様式と比較する程度にとどまっており、スリップパーティショニングの発生条件については言及されていない。以上のように、数値シミュレーションの分野に

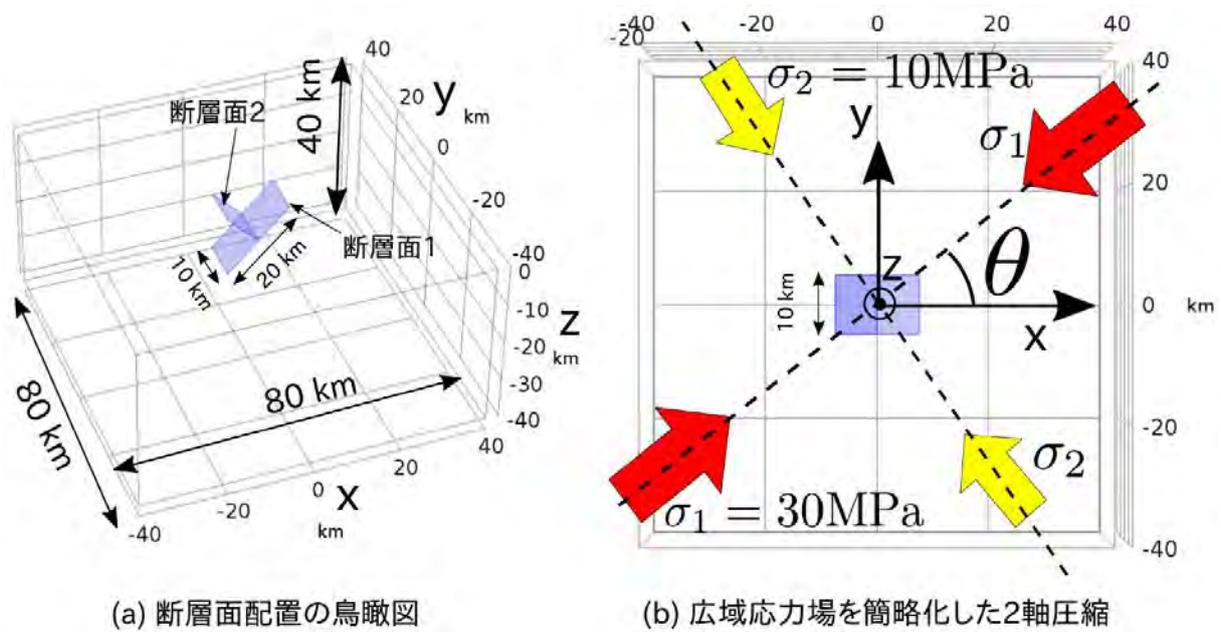


図2 スリップパーティショニング発生条件探索のための問題設定
(筈本, 2019 より引用)

においては、断層変位のスリップパーティショニングの事例数が少ないためか、これまでに解析の対象とされてこなかった。

ii) スリップパーティショニング発生条件探索のための問題設定

ここでは並走する2枚の断層面（これらは地下では一体化する）の傾斜角、2面が一体化する深さ、広域応力場の最大主応力方位をそれぞれ変化させ、スリップパーティショニングが発生しやすいパラメータの組を探索するとともに、得られたパラメータの組に対する断層面上のずれ変位および地表での変位様式について議論する。スリップパーティショニングの組み合わせとして、「逆断層と横ずれ断層の組み合わせ」および「正断層と横ずれ断層の組み合わせ」が考えられるが、ここでは牛伏寺断層と松本盆地東縁断層で推定されている「逆断層と横ずれ断層の組み合わせ」について検討する。

問題設定として、図2(a)に示すように、80km×80km×40kmの直方体（ヤング率：45GPa、ポアソン比：0.3）の内部に、スリップパーティショニングの模式図（図1）にある逆断層を想定した断層面1と横ずれ断層を想定した断層面2の2つの断層面からなるy字型の断層面を作成した。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、最大主応力 σ_1 および中間主応力 σ_2 をそれぞれ $\sigma_1=30\text{MPa}$ 、 $\sigma_2=10\text{MPa}$ とした。なお、最大主応力の大きさ30MPaは、野島断層の地下1000mでの応力値30MPa（池田・他，2001）を参考とした。なお、最大主応力の作用方向 θ はパラメータであり、x軸方向から反時計回りに 0° から 90° まで 15° 刻みで変化させている（図2(b)）。

y字型の断層面を拡大したものが、図3である。今回、断層面1（逆断層を想定）および断層面2（横ずれ断層を想定）の傾斜角（ ϕ_1 、 ϕ_2 ）はパラメータとしてそれぞれ変化させる。結局のところ、パラメータは「最大主応力の方位 θ 」、「断層面の交点を規定する長さ Δ 」、「断層面1の傾斜角 ϕ_1 」、「断層面2の傾斜角 ϕ_2 」の4つとなる。各パラメータの取りうる数値をまとめたものが、表1である。すべてパラメータについて総当たり計算を行うが、

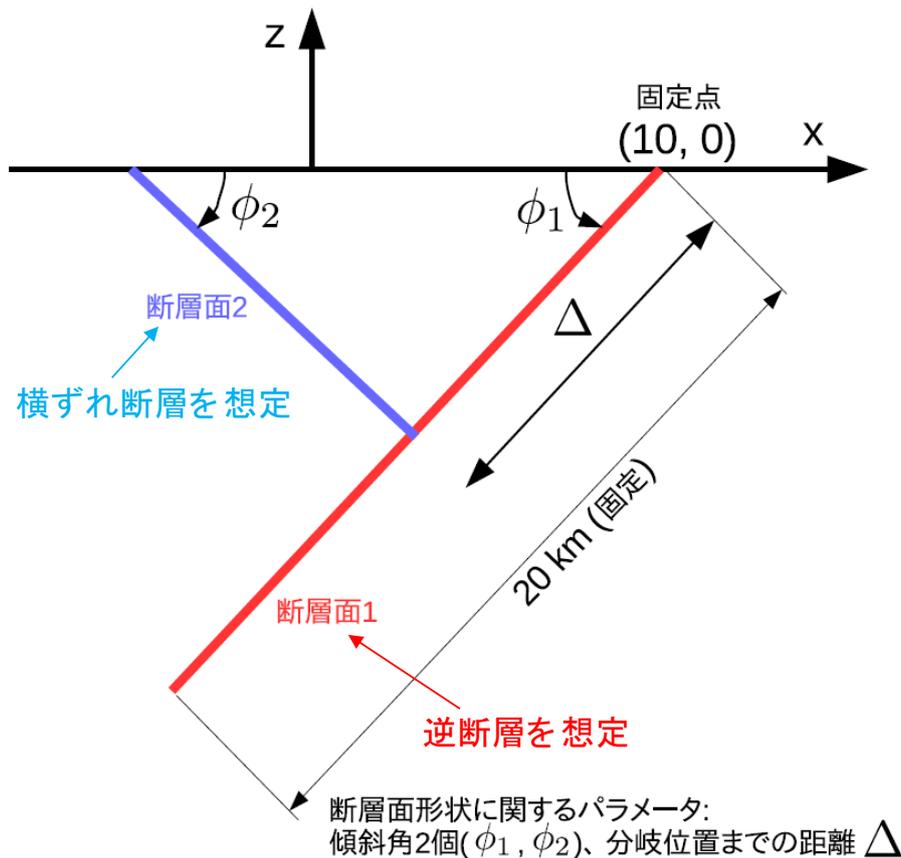


図3 y字型の断層形状を規定する3つのパラメータ(ϕ_1 , ϕ_2 , Δ)
(竿本, 2019より引用)

表1 パラメータ θ , Δ , ϕ_1 , ϕ_2 の
取りうる範囲

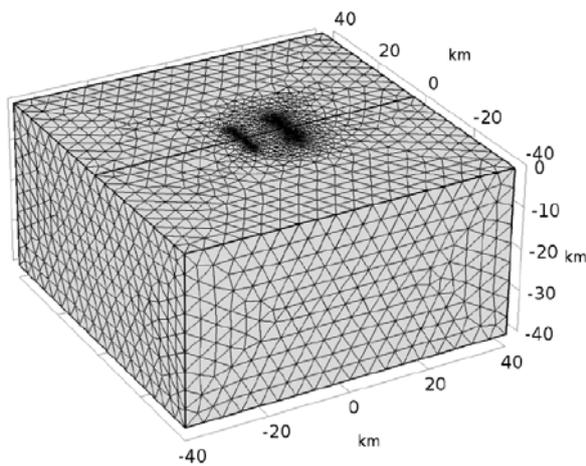
パラメータ名	数値
最大主応力方位 (θ)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
断層分岐位置 Δ (km)	5, 10, 15, 20
断層面1の傾斜角 ϕ_1 (°)	30, 45, 60, 75, 90
断層面2の傾斜角 ϕ_2 (°)	30, 45, 60, 75, 90, 100

表2 地殻および断層面の物性

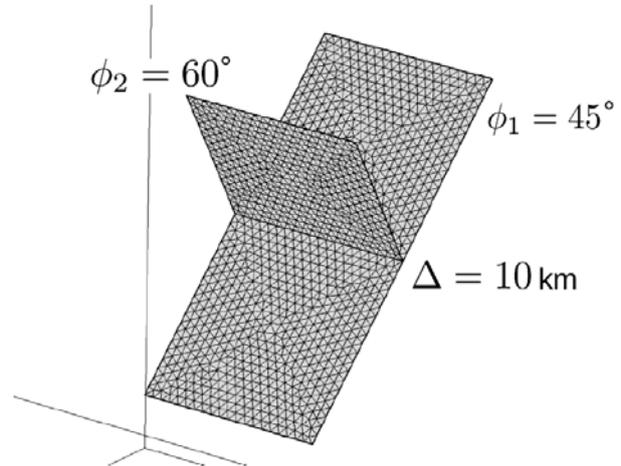
パラメータ名	数値
地殻のヤング率 (GPa)	45
地殻のポアソン比 (-)	0.3
断層面上の法線方向剛性 ($N/(m \cdot m^2)$)	1.21×10^{11}
断層面上の接線方向剛性 ($N/(m \cdot m^2)$)	1.04×10^7

$\phi_1=90^\circ$ の場合は ϕ_2 の範囲は 75° までとした。なお、4つのパラメータの組み合わせ総数は、784 ケースとなる。スリップパーティショニングは、一方の断層面の傾斜角が 90° と想定される場合が多いようであるが、今回は傾斜角 90° に限らず様々なケースについて検討する。これら4つのパラメータに加え、有限要素解析では地殻のヤング率、ポアソン比、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。これらの数値をまとめたものが表2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(松田, 1975; 松田・他, 1980)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、既発表の文献(竿本, 2018)を参照されたい。

図4に、 $\Delta=10\text{km}$ 、 $\phi_1=45^\circ$ 、 $\phi_2=60^\circ$ と設定した場合の有限要素メッシュを示す。直方体は約10万個の四面体2次要素で作成している。また、各断層面は500mピッチの3角形2次要素で分割することで作成している。一連のパラメトリックスタディーでは、4つの



約10万個の4面体2次要素



各断層面を500 m ピッチで分割

図4 作成した有限要素メッシュの一例 ($\Delta = 10 \text{ km}$, $\phi_1 = 45^\circ$, $\phi_2 = 60^\circ$)
(竿本, 2019 より引用)

パラメータ (θ , Δ , ϕ_1 , ϕ_2) 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® (ver. 5.4) 上で実装・実行した。

iii) スリップパーティショニング強度の定義

本報告では、スリップパーティショニングの強弱と先に示したパラメータの関係を議論することが重要である。したがって、シミュレーション結果を示す前にスリップパーティショニングの強弱の程度を示す指標を定義しておく。定性的ではあるが、断層面1で一定レベル以上のずれ変位が算出されたとしても、断層面2でずれ変位がほとんど生じていなければ、断層面1のみが活動したように見えるため、スリップパーティショニングは生じていないと考える。また、最大主応力を x 軸に沿って設定した場合も断層面1と2はともに逆断層となるため、この場合においても逆断層と横ずれのスリップパーティショニングが生じたとは言えない。以上の考えの下、ここでは断層面1の平均ずれ変位ベクトルの z 方向成分と断層面2の平均ずれ変位ベクトルの y 方向成分の積を、スリップパーティショニングの強度を示す指標 I_{sp} として次の式で定義する。

$$I_{sp} = |d1z| |d2y| \quad (1)$$

ここで、 $d1z$ は断層面1上の平均ずれ変位ベクトルの z 方向成分を、 $d2y$ は断層面2上の平均ずれ変位ベクトルの y 方向成分を表している。本報告では、この指標 I_{sp} の値が大きければ大きいほどスリップパーティショニングが生じやすいと考える。以下では、今回定義したスリップパーティショニング強度 I_{sp} と各パラメータの関係性について議論する。

iv) スリップパーティショニング強度と各パラメータの関係性について

図5に、スリップパーティショニング強度 I_{sp} と断層面形状を規定する各パラメータについての関係性を示す。各パラメータの意味は図2および図3に示すとおりであり、それぞれ、 θ :最大圧縮応力の作用方向、 Δ :2つの断層面の交差点を規定する距離、 ϕ_1 :断層

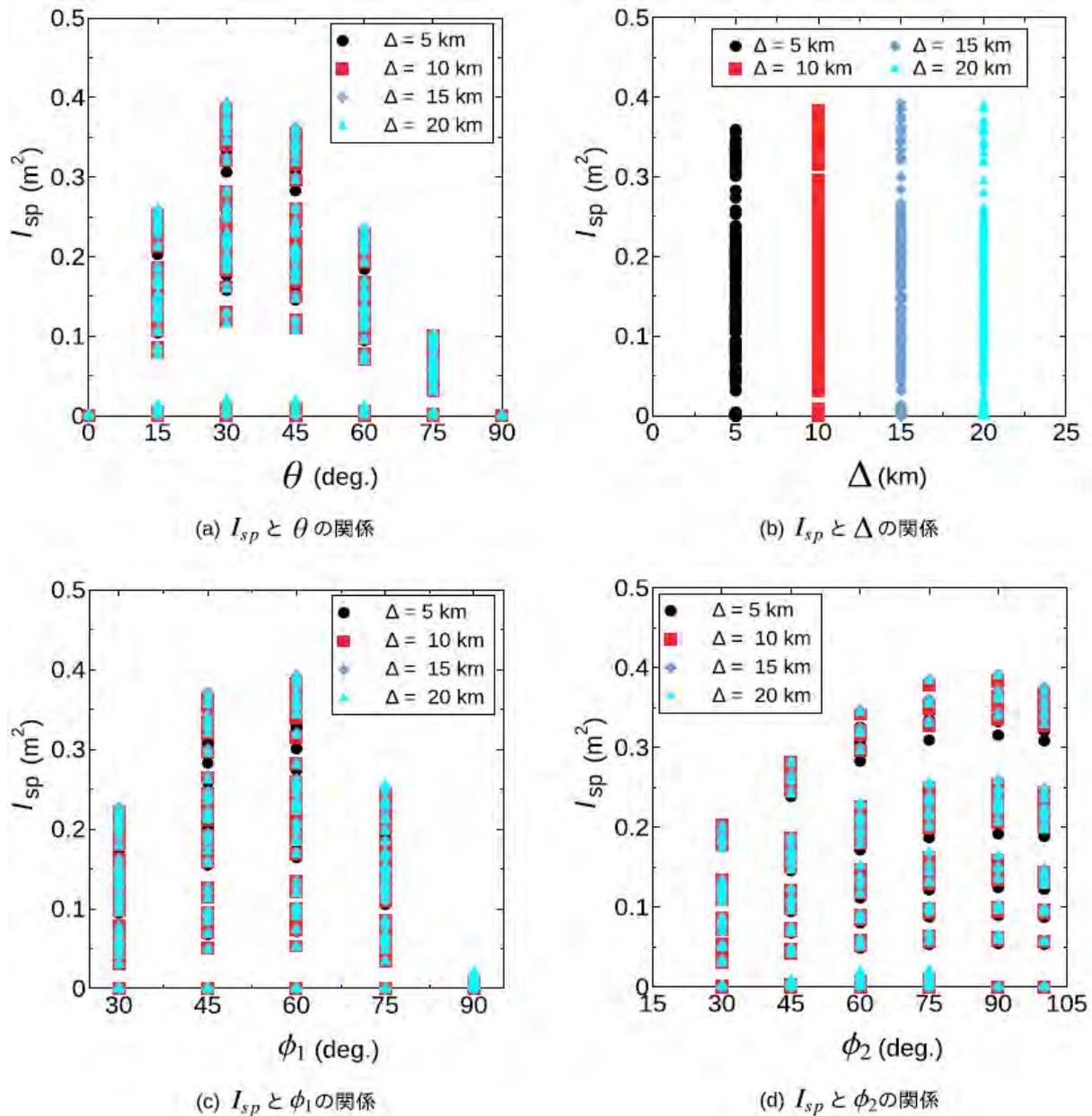


図5 スリップパーティショニング強度 I_{sp} と各パラメータとの関係性
(筈本, 2019 より引用)

面1の傾斜角、 ϕ_2 :断層面2の傾斜角である。図5の(a)から(d)の各図より、単一パラメータを固定したとしても、他のパラメータとの組み合わせによって I_{sp} は大きく変化することがわかる。なお、各図には784 ケース全てについてプロットしている。 I_{sp} と θ の関係(図5 (a))および I_{sp} と ϕ_1 の関係(図5 (c))では、ピーク位置が他のパラメータに比べて明確であり、今回検討したパラメータの中では感度が高いと言える。一方、 I_{sp} と Δ の関係(図5 (b))は明瞭なピークが確認できない上、 Δ の違いによって I_{sp} の分布形態がほとんど変化していないため、感度が低いと言える。 I_{sp} と ϕ_2 の関係(図5 (d))では、 ϕ_2 は I_{sp} に対して一定の感度があるが、 ϕ_1 ほど急峻なピークを有していないことがわかる。また、各関係から、 θ が 30° または 45° の場合かつ ϕ_1 が $45^\circ \sim 60^\circ$ の範囲かつ ϕ_2 が $75^\circ \sim 100^\circ$ の範囲である場合に I_{sp} が大きくなることが予想される。

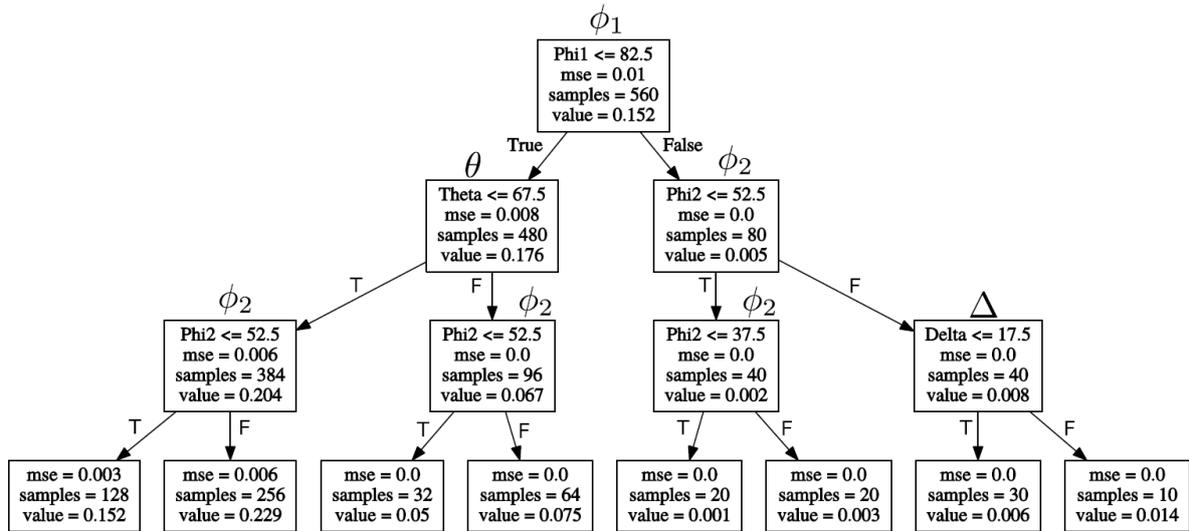


図6 各パラメータの Isp に対する回帰木 (3 階層)
(筈本, 2019 より引用)

図6は、各パラメータの Isp に対する回帰木を描いたものであり(作図には Scikit-learn と Graphviz を利用)、数値シミュレーション全ケースから得られた Isp を効率的に説明するにはどのパラメータについてどのような分岐を設定すれば良いかということを確認することができる。なお、ここでは Isp がほぼゼロとなる $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ のケース(全 224 ケース)を除いている。ツリー構造の上部にあるパラメータほど Isp についての寄与度が高いと言えるため、回帰木は図5で示した Isp と各パラメータの感度の表現方法の一つと考える。図6より、まずは ϕ_1 が 82.5° よりも小さいかどうかについて分けることで、効率的に Isp を分類可能となる。ここでの効率的な分岐の設定とは、分岐後の各グループについて平均二乗誤差 (mean squared error: mse) を求め、mse の合計が最小となるように設定する。なお、誤差はグループの平均値を真値とした場合に対する誤差を指す。また、分岐のしきい値 ($\phi_1 \leq 82.5^\circ$ の 82.5°) は、パラメトリックスタディーの刻みの中間値となっており、より正確な分岐のしきい値が必要な場合はパラメトリックスタディーの刻みを細かくする必要がある。Isp の平均値が大きくなる集団(最下段左から2番目、mse: 0.006、サンプル数: 256、Isp の平均値: 0.229)は、 $\phi_1 \leq 82.5^\circ$ True \rightarrow $\theta \leq 67.5^\circ$ True \rightarrow $\phi_2 \leq 52.5^\circ$ False \rightarrow というパスを経てグルーピングされており、 ϕ_1 、 θ 、 ϕ_2 の順で寄与度が高いことがわかる。なお、 Δ については Isp が大きくなる集団を選定する際には現れておらず、 ϕ_1 、 θ 、 ϕ_2 に比べて寄与度は小さいと言える。回帰木を用いた検討からも図5の目視から得られた感度と同じ結果をより体系的に得ることができた。今回のパラメトリックスタディーより、 θ が 30° 程度、 ϕ_1 が 60° 程度、 ϕ_2 が 90° 程度となると、スリップパーティショニング強度が大きくなることが示された。

v) 縦ずれと横ずれの変位量比

各断面層上で平均的なずれ変位量が算出されているため、縦ずれ量と横ずれ量の比を求めることができる。地表地震断層の現地調査では縦ずれと横ずれの変位量が計測されるた

表3 Isp の上位 30 位についての断層面上平均ずれ変位量および変位量の比（横/縦）
（筈本，2019 より引用）

順位	縦ずれ $ v_{1z} $ (m)	横ずれ $ v_{2y} $ (m)	$ v_{2y} / v_{1z} $
1	0.683	0.575	0.842
2	0.687	0.568	0.827
3	0.686	0.563	0.820
4	0.694	0.554	0.798
5	0.683	0.561	0.822
6	0.684	0.552	0.807
7	0.673	0.559	0.830
8	0.643	0.579	0.900
9	0.671	0.553	0.824
10	0.676	0.544	0.805
11	0.644	0.569	0.884
12	0.643	0.566	0.881
13	0.546	0.664	1.216
14	0.639	0.567	0.888
15	0.642	0.563	0.877
16	0.549	0.656	1.193
17	0.682	0.527	0.773
18	0.645	0.553	0.857
19	0.549	0.650	1.184
20	0.637	0.559	0.877
21	0.682	0.521	0.763
22	0.640	0.554	0.866
23	0.555	0.639	1.152
24	0.641	0.553	0.862
25	0.546	0.648	1.187
26	0.547	0.637	1.165
27	0.679	0.512	0.754
28	0.538	0.645	1.198
29	0.680	0.510	0.751
30	0.687	0.501	0.729

め（例えば Toda et al., 2016；縦ずれ：約 2.0m、横ずれ：約 1.5m）、今回得られた計算結果についてもこれらを整理しておくことは重要である。また、ずれ変位量はトレンチ調査で得られる平均変位速度と関連するため、この観点からも変位量を整理しておく意義がある。表3に、Isp が大きい上位 30 位について、断層面上での平均変位量の成分およびそれらの比を示す。ここで、 v_{1z} は断層面 1 上での平均変位ベクトルの z 方向成分であり、縦ずれ変位量に相当する。また、 v_{2y} は断層面 2 上での平均変位ベクトルの y 方向成分であり、横ずれ変位量に相当する。なお、断層面上の平均ずれ変位量の大きさについては、松田式に基づいて剛性を決定しているため、各断層面上でのずれ変位ベクトルのノルムは 1.0m 程度（断層長 10km の約 1/10000）となる。表1より、スリップパーティショニング強度が大きいケースの多くについて、横ずれ変位量と縦ずれ変位量の比は 0.8 から 0.9 の範囲内にあることがわかる。変位量の比が 1.0 を上回る場合がいくつかあるが、これらのケースでは、 $\theta = 45^\circ$ という共通事項がある。 $\theta = 45^\circ$ の場合は y 方向に沿って鉛直に配置された断層面 2 について理想的な横ずれを生じさせやすい応力状態であるため、横ずれ変

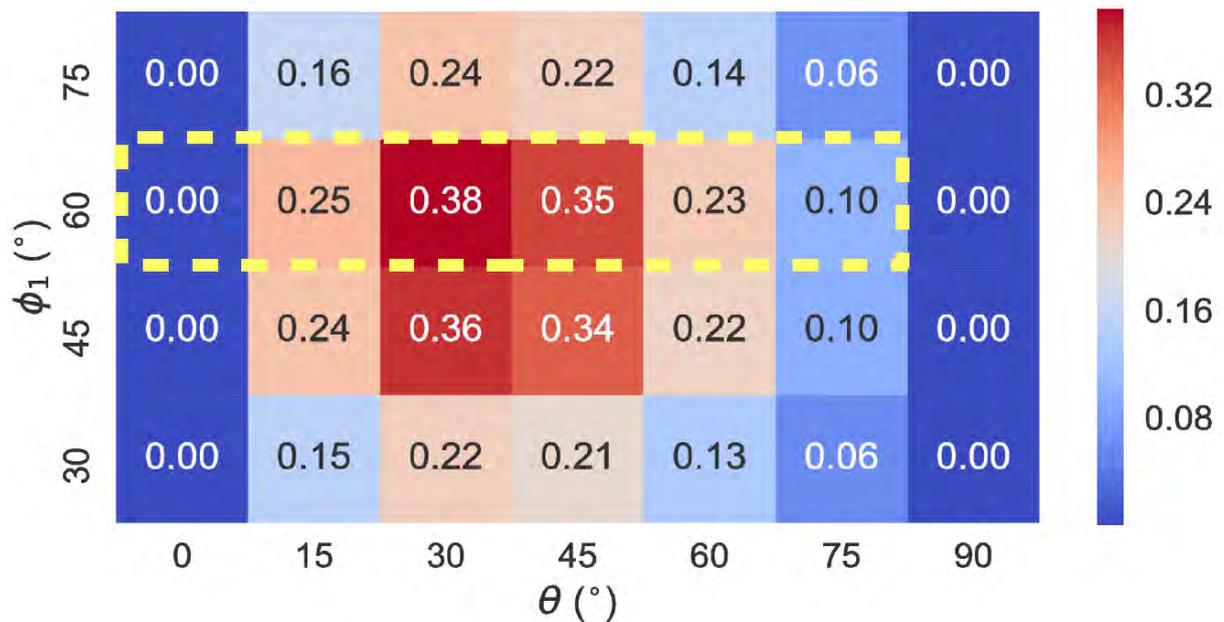


図7 $\Delta=10\text{km}$ 、 $\phi_2=90^\circ$ のケースにおける I_{sp} と θ および ϕ_1 の関係
(色は I_{sp} の大きさ (m^2) を表す。竿本, 2019 より引用)

位置と縦ずれ変位量の比が 1.0 を上回るものと解釈できる。断層面 2 に横ずれを積極的に生じさせるパラメータの組み合わせが最もスリップパーティショニングを生じさせる組み合わせではないことに留意されたい。

本研究で得られた縦ずれと横ずれの変位量の比に関する知見は、現地調査時にスリップパーティショニングが疑われる場合に、スリップパーティショニングかどうかを判断するための基礎情報として活用できると考える。

vi) 断層面上のずれ変位分布

図 7 は、 $\Delta=10\text{km}$ 、 $\phi_2=90^\circ$ のケースにおいてスリップパーティショニング強度 I_{sp} を θ (横軸) と ϕ_1 (縦軸) の関数として示したものであり、色は I_{sp} の大きさを示している。これまでに示したように、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi_1=60^\circ$ 周辺で I_{sp} が大きくなっているのが確認できる。紙面の都合上、全 784 ケースについての断層面上ずれ変位分布および地表での変位分布を示すことは困難であるため、ここでは $\Delta=10\text{km}$ かつ $\phi_2=90^\circ$ のケースのうち、 $\phi_1=60^\circ$ に固定して θ を変化させた際の断層面上のずれ変位分布および地表での変位分布を示す(図 7 の黄色破線内のケース)。

図 8 に、図 7 の黄色破線内のケースに対応する断層面上でのずれ変位分布を示す。図 8 (a) は、断層線に直交する方向に最大圧縮軸が配置される ($\theta=0^\circ$) ため、傾斜角が 90° である断層面 2 においては、ほとんど変位を生じていない。他方、断層面 1 では横ずれ成分が全くない逆断層成分のみが確認できる。 θ を増加させるにつれて、断層面 2 で横ずれ成分が増加していく様子がわかる。一方、断層面 1 上では逆断層成分のみであった状態から横ずれ成分が生じ、結果として断層面 1 において斜めずれが確認されるようになる。なお、 $\theta=45^\circ$ 時に断層面 2 上での横ずれ成分が最大となる。ただし、スリップパーティショニング強度 I_{sp} が最大となるのは、 $\theta=30^\circ$ (図 8 (c)) の場合である。また、図 8 (b) から図 8 (f) における断層面 1 および断層面 2 の横ずれのセンスは同じであり、両断層ともに「右横

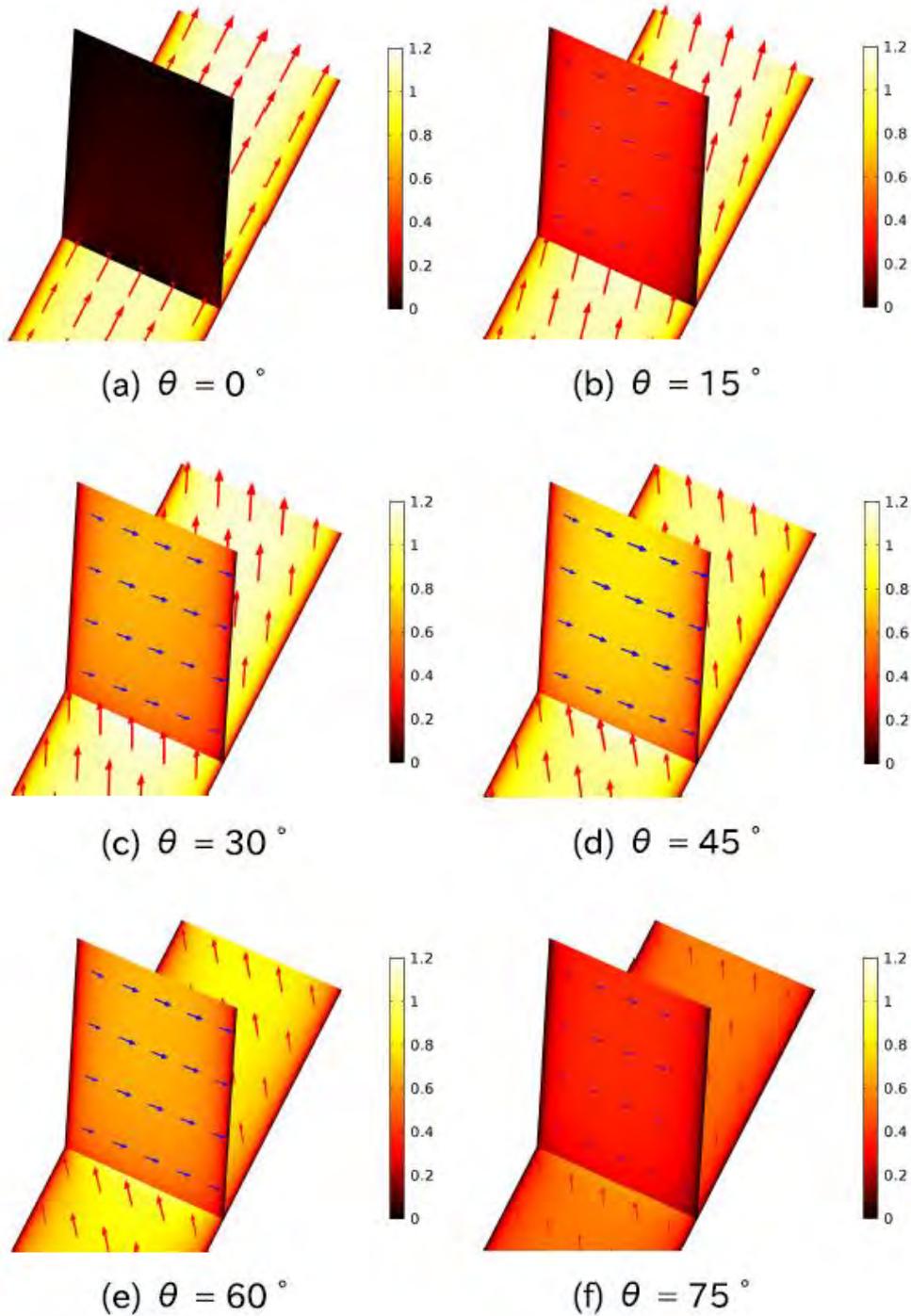


図8 断層面上ずれ変位の分布様式 (竿本, 2019 より引用)

($\Delta=10$ km、 $\phi_1=60^\circ$ 、 $\phi_2=90^\circ$ 、色は変位 (m) の大きさを表す)

ずれ」となる。なお、スリップパーティショニングの特徴の一つと考えられている変位の分担については、断層面間の距離が小さい場合 (~ 2 km) に顕著に見られた。変位量の分担状況や断層面間の相互作用の詳細については、別の機会に報告したい。 θ を変化させる図8 (a)から図8 (f)の一連の結果は、主応力軸を $x-y$ 面内で回転させた場合そのものであるが、主応力回転が断層面上の変位の方向・大きさに影響を及ぼしていることは明らかである。この結果は、仮に断層面形状および地表でのずれ分布が確定した場合に、断層面

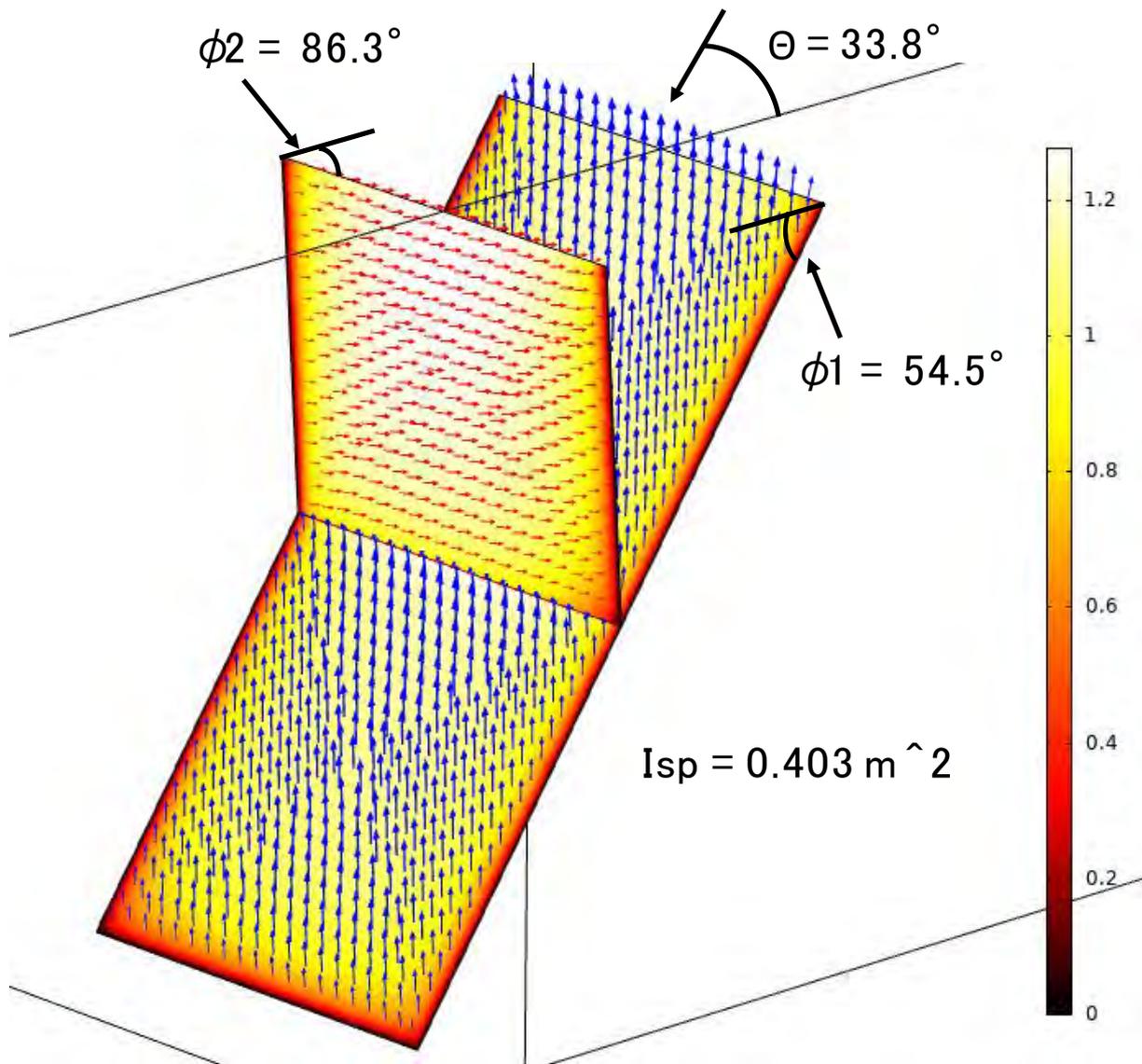


図9 I_{sp} が最大となるときのパラメータ ($\phi_1=54.5^\circ$ 、 $\phi_2=86.3^\circ$ 、 $\theta=33.8^\circ$)

周辺の最大圧縮主応力の方向を逆問題として推察可能となることを示唆している。一般に、断層面周辺の応力場を高い精度で取得することは困難であるため、主応力を回転させるなどのパラメトリックスタディーは社会基盤施設への断層変位の影響を考察する上で一定の意義があると考えられる。

これまでのパラメトリックスタディーより、 $\phi_1=60^\circ$ 、 $\phi_2=90^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ 付近でスリップパーティショニング強度 I_{sp} が大きくなることがわかっている (図7)。しかしながら、パラメトリックスタディーではパラメータの刻みの大きさ程度の精度までしか考察することができないため、最も I_{sp} が大きくなるパラメータの組は探索できていない。これに対し、図9は $\Delta=10\text{km}$ のケースについて、最適化解析 (ベイズ最適化) を用いて I_{sp} を最大化するパラメータの組を探索した結果を示している。 $\phi_1=54.5^\circ$ 、 $\phi_2=86.3^\circ$ 、 $\theta=33.8^\circ$ のとき、 I_{sp} の最大値 0.403m^2 が得られた。パラメトリックスタディーで得られた I_{sp} の値 0.38 に対して約 1.06 倍となっており、よりスリップパーティショニング強度が大きい。

今回の取り組みでは主応力の回転のほか、多くのパラメータの組について断層面上ずれ

変位と地表での変位様式等、実に多くの情報を得ることができた。しかしながら、得られた全ての情報を効率的に活用できたとは言い難い。多くの結果を効率的に解析・解釈し、重要な知見・特徴を抽出するためのデータマイニング手法について今後検討する必要がある。

vii) スリップパーティショニング発生条件探索についてのまとめ

逆断層と横ずれ断層の組合せについて、スリップパーティショニングが発生しやすいと考えられる条件を有限要素法によって探索した。得られた結果は以下のとおりである。

1. 断層面上の平均ずれ変位を用いてスリップパーティショニング強度を定義した。
2. スリップパーティショニング強度が大きくなるパラメータの組を見出した。
($\theta=30^\circ$ 、 $\phi_1=60^\circ$ 、 $\phi_2=90^\circ$)
3. スリップパーティショニング強度に対する各パラメータの感度に関する知見を得た。
(ϕ_1 と θ の感度が高い)
4. 断層面上の縦ずれ変位量と横ずれ変位量の比を調べた結果、スリップパーティショニング強度が大きいケースのほとんどは、その比が0.8から0.9程度であった。

2) 糸魚川—静岡構造線断層帯の北部区間・中北部区間の断層面モデルの作成およびFEMによる変形解析

i) サブテーマ1とサブテーマ2で得られた知見を統合した断層面モデル

図10にサブテーマ1および2の知見を統合した断層面モデルの詳細を示す。北部区間には神城断層および松本盆地東縁断層北部が、中北部区間には松本盆地東縁断層南部—牛伏寺断層—岡谷断層群および諏訪湖南岸断層群がそれぞれ配置される。神城断層は、図10中の断層面①、②、③、④で表されており、断層面①と②からなる神城1、断層面③と④からなる神城2に細分される。断層面⑤と⑥は松本盆地東縁断層北部を、断層面⑦は松本盆地東縁断層南部—牛伏寺断層—岡谷断層群に相当する。断層面⑧と⑨は、諏訪湖南岸断層群をそれぞれ表す。断層面①と②、③と④、⑤と⑥の各ペアは、それぞれ地下でキンク（折れ曲がり）を有する構造）となっており、図10下段右の断面図が①と②および③と④の断面を、図10下段中央の断面図が断層面⑤と⑥のペアに対応する断面図である。断層面⑦から⑨は全ての断層面について傾斜角が 80° であり、地下での断面図は図10下段左のとおりである。いずれの断層面も東落ちであり、各断層面の地下下端の深さは15kmと設定している。地表面における断層線端部の位置はそれぞれ、断層面①（断層長18.4km）：北端（ 36.789079° 、 137.905755° ）—南端（ 36.664632° 、 137.849278° ）、断層面③（断層長16.5km）：北端（ 36.658987° 、 137.85825° ）—南端（ 36.541295° 、 137.839537° ）、断層面⑤（断層長24.6km）：北端（ 36.531295° 、 137.85765° ）—南端（ 36.356748° 、 137.900219° ）、断層面⑦（断層長42.6km）：北端（ 36.346517° 、 137.92048° ）—南端（ 36.057010° 、 138.052998° ）、断層面⑧（断層長7.7km）：北端（ 36.052846° 、 138.05231° ）—南端（ 36.008215° 、 138.093596° ）、断層面⑨（断層長5.0km）：北端（ 36.008215° 、 138.09360° ）—南端（ 35.993147° 、 138.134708° ）である。断層面①の北端から断層面⑨の南端までの南北方向長さは、約110kmである。ここで、各断層面の色は作成した面を区別するために色付けしているものであり、色に断層面区別以外の意味はない。以上のように断層線の位置は緯度・経度で管理しているが、有限要素解析を実施する際には、球面メルカトル座標

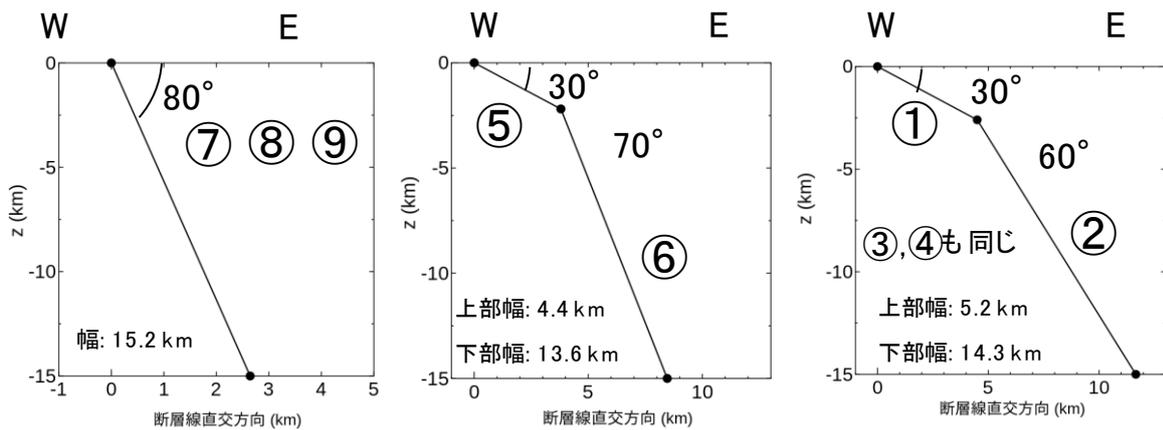
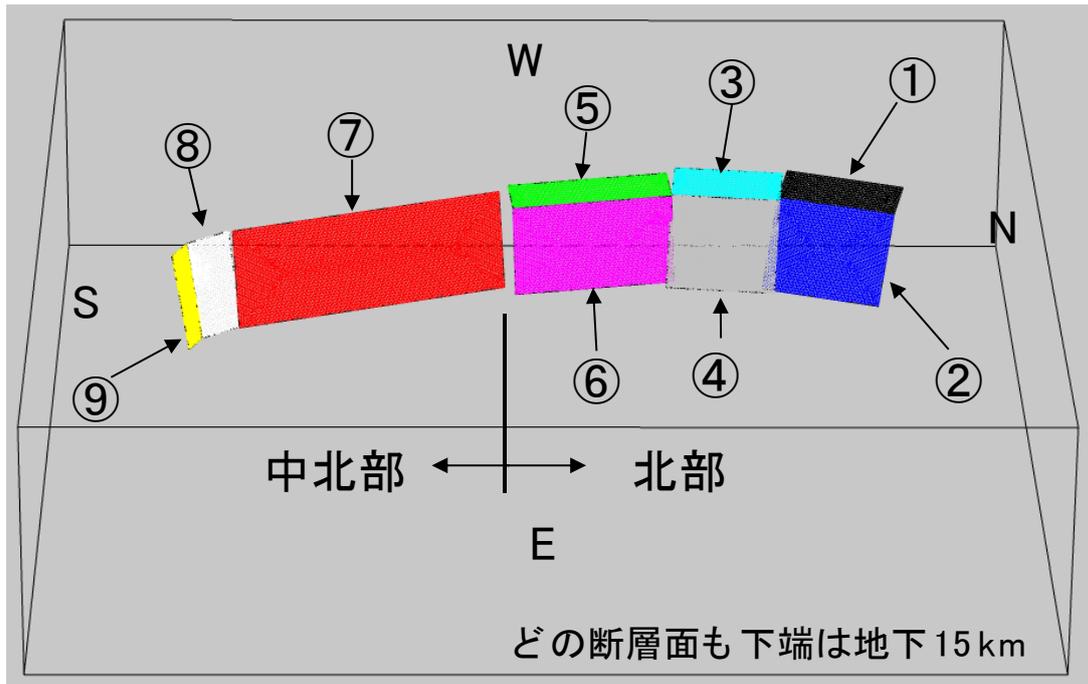


図 10 糸魚川—静岡構造線断層帯 北部区間・中北部区間の断層面モデル
断層面①、②、③、④は神城断層を、断層面⑤と⑥は松本盆地東縁断層北部を、断層面⑦は松本盆地東縁断層南部—牛伏寺断層—岡谷断層群を、断層面⑧と⑨は諏訪湖南岸断層群をそれぞれ示す。

(EPSG3857) に変換した後に適切な点を原点にとって断層面①から⑨が解析モデルのほぼ中央部に位置するように調整している。

ii) 北部区間・中北部区間に対する有限要素メッシュ

図 11 は、図 10 の断層面①から⑨に対する有限要素メッシュを示したものである。東西 150km、南北 150km、深さ方向に 40km の直方体のほぼ中央部に断層面①から⑨をセットしている。x-y-z 座標の原点は、緯度：36.3921316679°、経度：137.9871225° の地表面とした。直方体を構成する 4 面体 2 次要素の総数は約 52 万、断層面を構成する 3 三角形 2 次要素の総数は約 2 万である。以上の要素数を用いた結果、今回作成した有限要素メッシュでは、約 226 万点 (変位評価点での未知変位の数に相当) の連立一次方程式に帰着する。

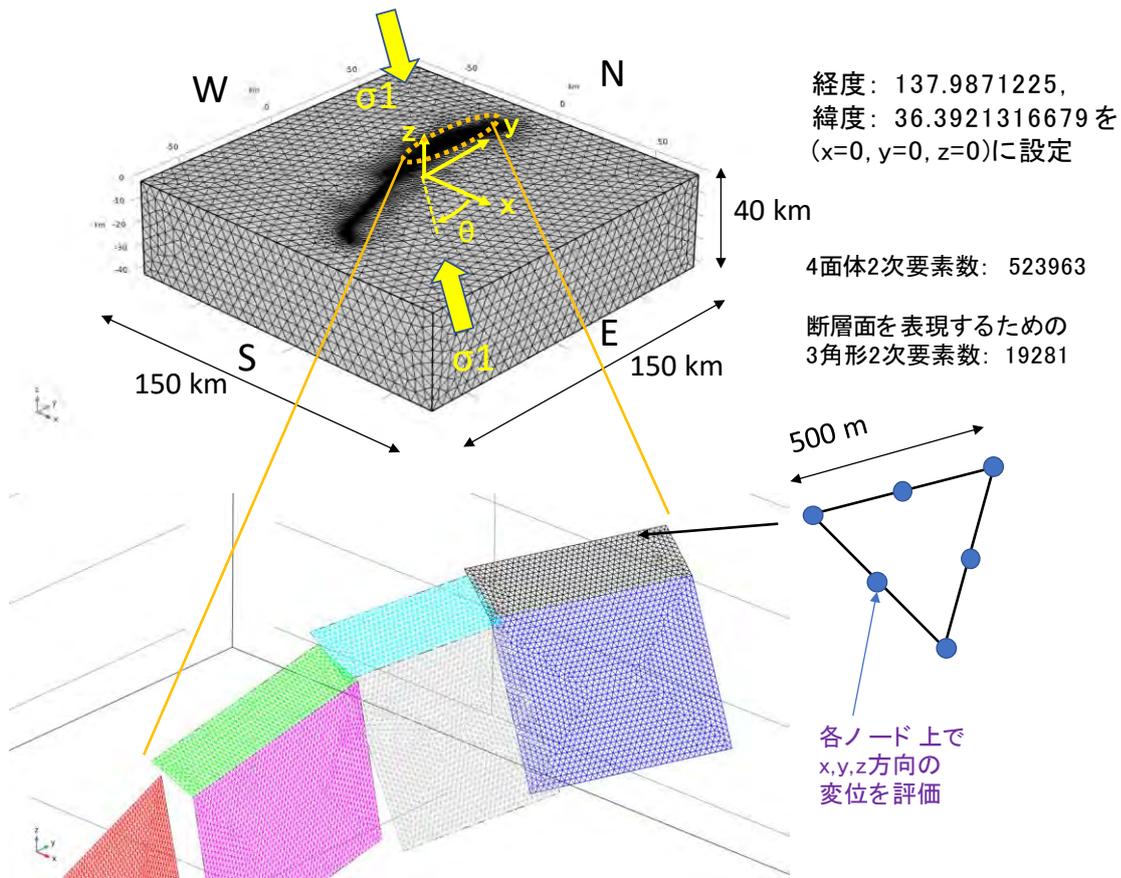


図 11 糸魚川—静岡構造線断層帯 北部区間・中北部区間に対する有限要素メッシュ

ここで、断層面を構成する3角形2次要素は1辺の長さが500mとしており、変位評価は250m間隔で実施することができる。なお、広域応力場についてはサブテーマ2から最大主応力方位が「北西—南東」と得られているため、これに対応させる。今回の検討では、東西方向(x軸方向)から5°刻みで最大主応力軸を時計回りに回転させ、回転角が60°となるまでの各ケースについてパラメトリックスタディー(全13ケース)を実施している(図11中の θ)。また、断層面上の接線方向剛性は各断層面の断層線長に対応する剛性値は松田式を満たすように各断層面について設定している。

iii) 最大主応力方位と断層面上すべり分布の関係について

図12は、最大主応力の方位 θ を0°から60°まで変化させた場合の断層面上すべり分布を示したもので、色はネットスリップの大きさを表している(青:0m, 赤:2.5m)。 θ が増加するにつれて、各断層面上でのすべり分布が様々に変化していることが見て取れる。とりわけ、断層面⑦(松本盆地東縁南部—牛伏寺—岡谷断層群)上でのすべり変位分布の変化は顕著であり、 $\theta=60^\circ$ の場合に変位レベルが著しく小さくなることがわかる。牛伏寺断層における調査結果から、左横ずれが大変卓越していることがわかっている(例えば、近藤・他, 2006)ため、横ずれレベルが小さい θ が0°のケースおよび60°のケースは最大主応力の方位としては不適切であると考え。左横ずれセンスが最大となる $\theta=30^\circ$ のケースを拡大表示したものが、図13である。図13に対するずれ変位分布において、以下に挙げる3点から $\theta=30^\circ$ のケースが糸魚川—静岡構造線断層帯の北部区間・中北部区間の最大主応力方位として適切であると考え。(1)牛伏寺断層を含む断層面⑦において

左横ずれが最大化されること、(2) サブテーマ 1 の調査（文部科学省研究開発局・国立研

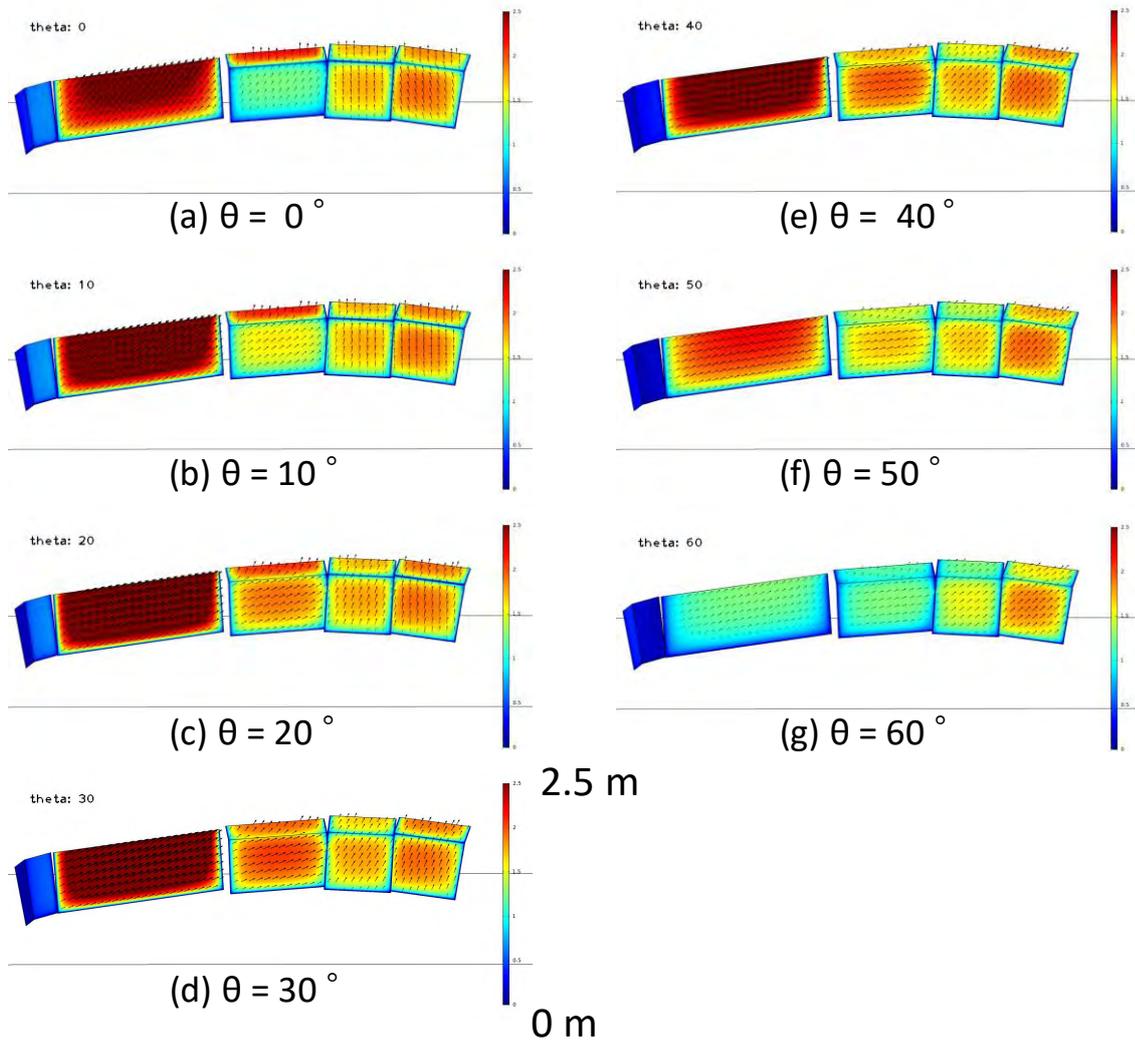
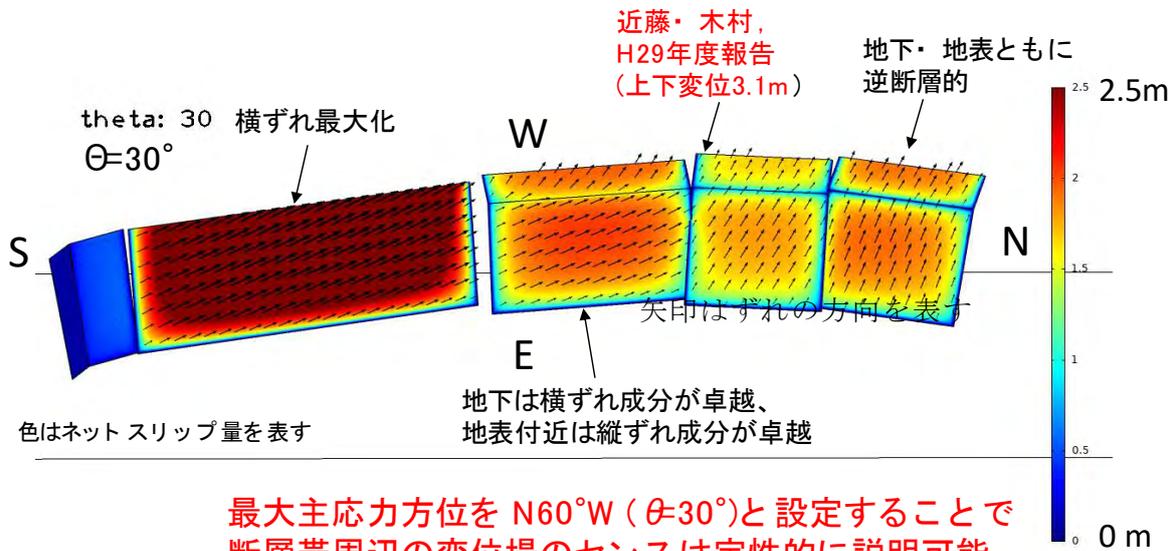


図 12 最大主応力方位 θ と断層面上すべり分布の関係
色はネットスリップの大きさを表す（青：0 m，赤：2.5 m）。



最大主応力方位を $N60^{\circ}W$ ($\theta=30^{\circ}$) と設定することで
断層帯周辺の変位場のセンスは定性的に説明可能

図 13 既往調査結果と整合的なすべり変位センス ($\theta = 30^{\circ}$ 時)

究開発法人産業技術総合研究所，2018）で得られた変位センス（逆断層）と整合的であること、(3) 神城断層での地表地震断層に対するトレンチ調査結果（勝部・他，2017）から得られた結果（逆断層）と整合的であること。

以上の検討によって、今回設定した断層面モデルについて最大主応力の方位を $\theta = 30^\circ$ （N60° W）と設定することで、断層帯周辺でこれまでに得られている調査結果を定性的ではあるが、ずれ変位センスを説明可能であることが示された。また、断層面⑤と⑥の変位センスが地下では横ずれ成分が卓越しているものの、地表付近では逆断層成分が卓越することが特徴である。なお、変位レベルについての定量的な比較・検討は、パラメトリックスタディーから得られた地表変位分布を示した後で述べる（(2)-v）。

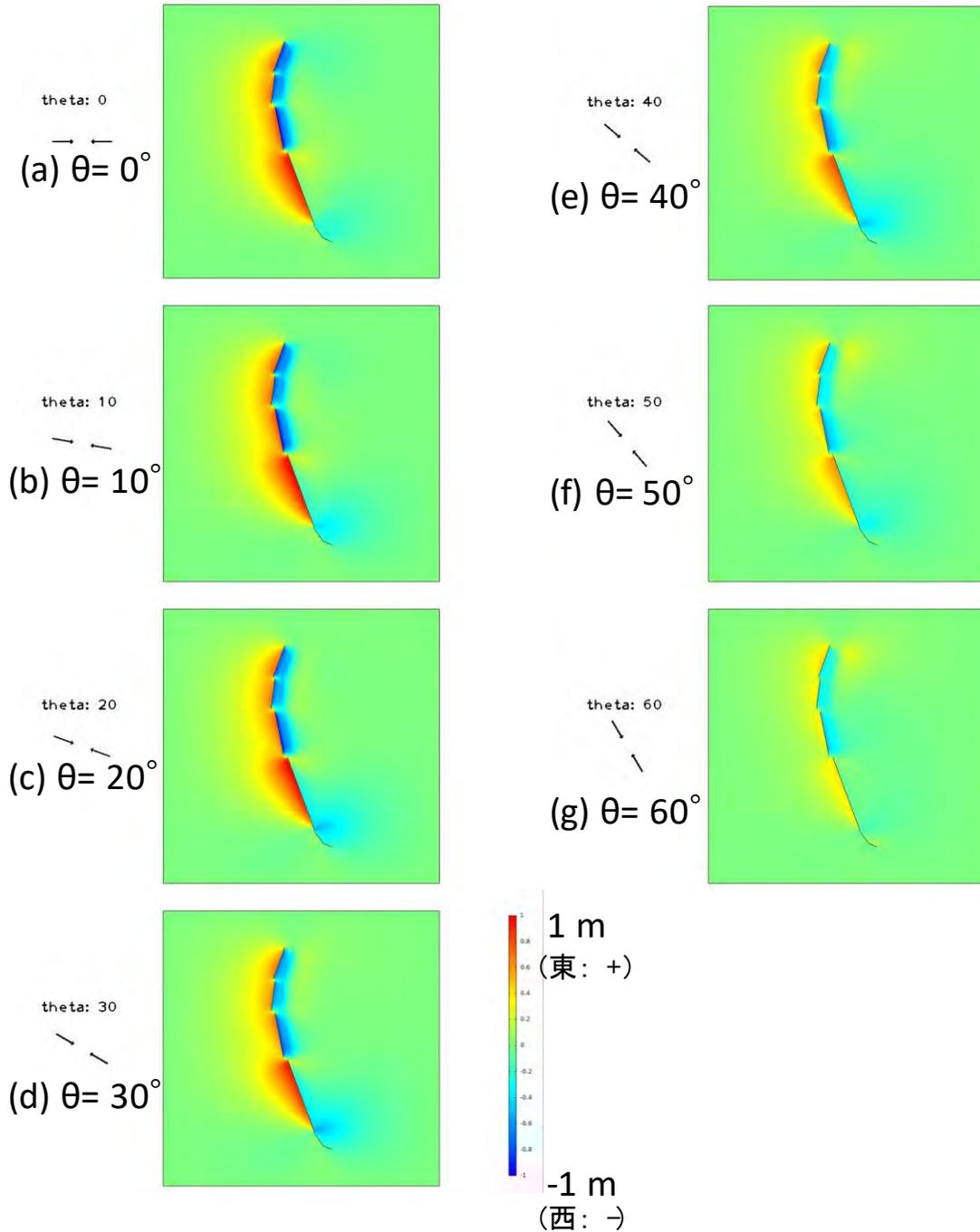


図 14 最大主応力方位と地表面変位分布（東西成分）の関係

iv) 最大主応力方位と地表面における変位分布の関係について

図 14 は、最大主応力方位を $\theta = 0^\circ$ から 60° まで変化させた際の地表面における水平方向の変位分布をそれぞれ示している。一連の断層帯の断層線は基本的には南北方向であるため、東西圧縮 ($\theta = 0^\circ$) に近ければ近いほど地表面変位の東西成分の差異は顕著となる。当然ながら、断層線東側の上盤側が西へ（青色）、下盤側が東（赤色）へ変位する。 θ の増加に伴って、地表面における東西成分のレベルは小さくなっていくことが確認できる。この結果は図 12 でネットスリップのレベルが $\theta = 60^\circ$ で小さくなることを反映している。

図 15 は、最大主応力方位と地表面変位の上下成分の関係を示したものである。 θ によら

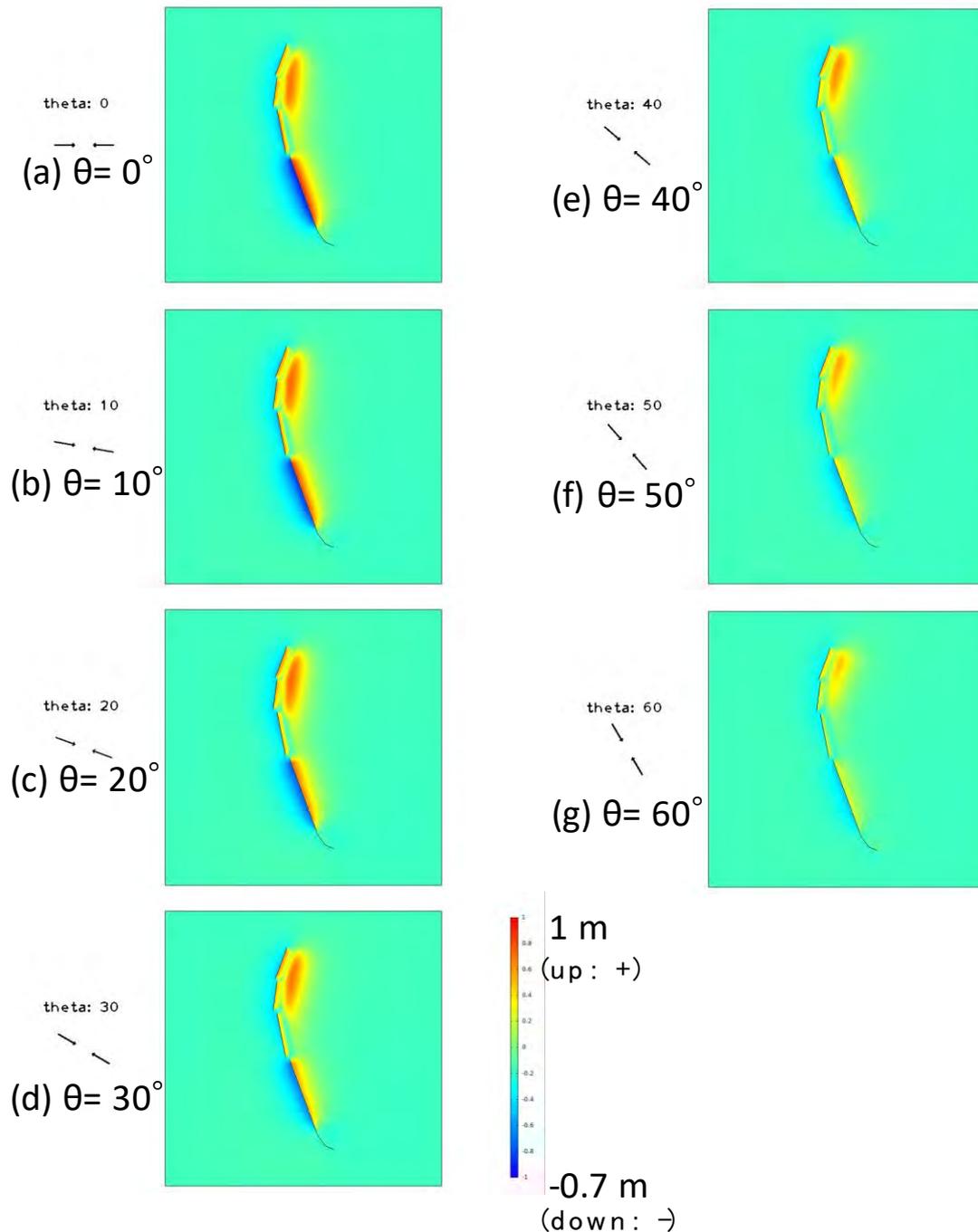


図 15 最大主応力方位と地表面変位分布（上下成分）の関係

ず神城断層（断層面①～④）の東側に、隆起する領域が生じていることがわかる。この結果は断層面地下で設定した折れ曲がり起因するもので、結果として神城断層の地表地震断層で確認された逆断層の変位センスと断層線東側に存在する山地を表現することに成功している。以上の結果からも断層面①から④における地下での折れ曲がりの設定は妥当であると判断できる。図12から図15で示した最大主応力方位と各種変位分布の検討を経て、今回設定した断層面形状は調査結果から得られている変位センスを定性的ではあるが説明可能と言える。以下では実際に計測された変位レベルとの比較を通じ、今回の断層面設定がどの程度信頼できるのかを検討するとともに、より現実の変位レベルに近くなるような

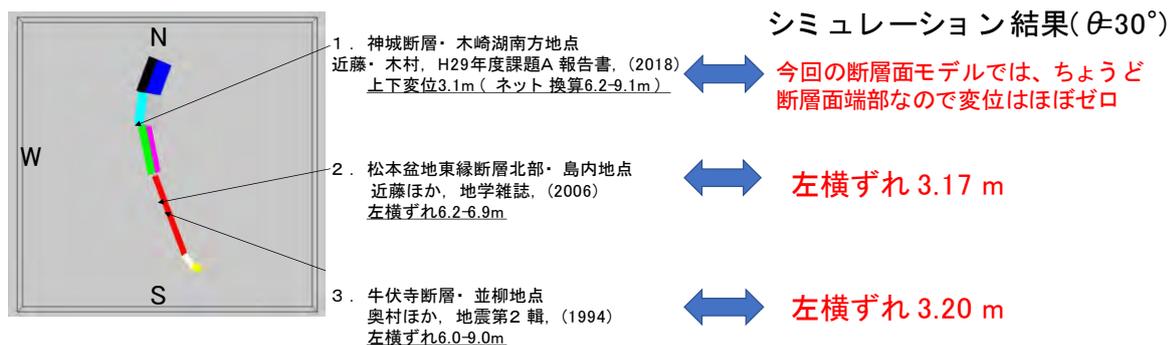


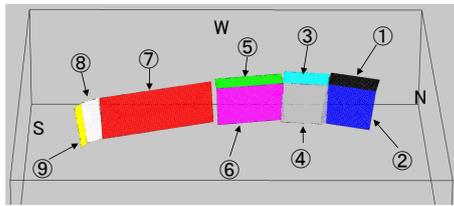
図 16 既往研究で報告されたすべり変位の計測結果とシミュレーション結果の比較
断層面改変を試みた結果について述べる。

v) 既往研究で報告されたすべり変位の計測結果とシミュレーション結果の比較

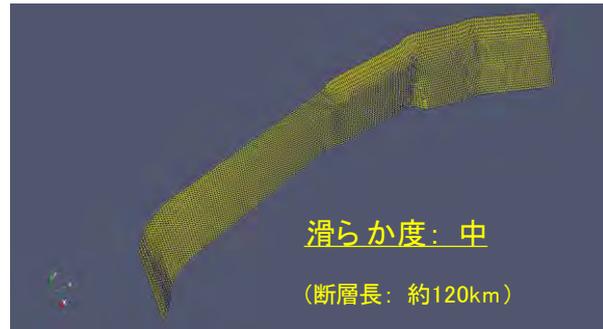
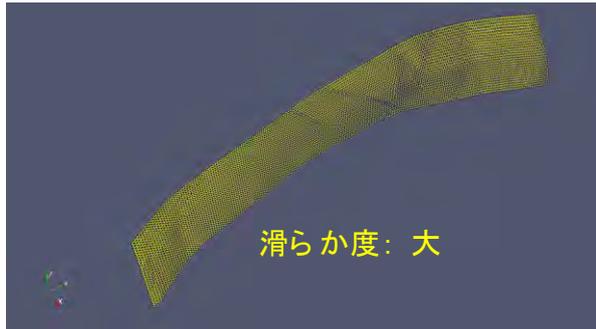
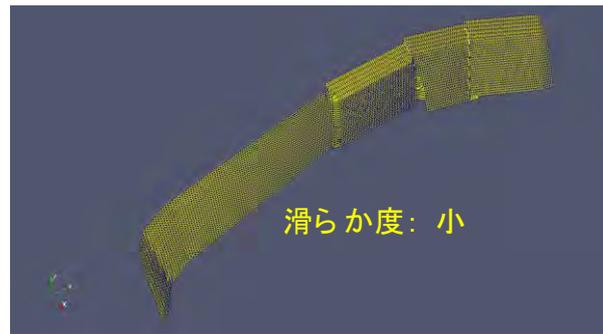
図 16 は、既往研究で報告されたすべり変位計測結果（3 地点）と、対応する地点におけるシミュレーション結果をそれぞれ示したものである。図 16 中の地点 1 は、本プロジェクト内でサブテーマ 1 の一環として実施された調査結果（文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所，2018）に基づくものであり、神城断層の南に位置する木崎湖南方地点にて 3.1m の上下変位が計測されている（傾斜角を推定してもとめたネットスリップ量は 6.2-9.1m）。また、地点 2 での変位量は松本盆地東縁断層北部・島内地点のもので左横ずれ 6.2-6.9m が計測されている（近藤・他，2006）。地点 3 の牛伏寺断層・並柳地点では左横ずれ 6.0-9.0m と報告されている（奥村・他，1994）。この 3 地点以外でも調査された事例はいくつかがあるが、ここでは最大変位量と考えられるものを対象とした。

これらの 3 地点に対応する位置でのシミュレーション結果（ $\theta=30^\circ$ のケース）は、図 16 右段に示すとおりである。地点 1 については、今回の断層面モデルではちょうど神代断層南端に位置するため変位レベルはほぼゼロであった。地点 2 に対しては、シミュレーション結果は、左横ずれ 3.17m、地点 3 に対しては左横ずれ 3.20m という結果になった。現地調査結果によれば、6.0~9.0m 程度となっているため、シミュレーション結果の 2~3 倍程度の変位量が計測されていることになる。本シミュレーションでは断層面上の物性を松田式に基づいて設定しているため、断層セグメントが長大にならない限り算出される変位量が大きくなることはない。したがって、現地調査から得られる変位レベルにシミュレーション結果をより近づけるためには、断層面を長大化する必要がある。断層面の長大化方法として様々な方法が考えられるが、ここでは図 10 で示した 9 つの断層面を滑らかに接合することによって断層面を長大化することを試みる。以下に断層面の長大化方法と長大化した断層面を用いたシミュレーション結果を示す。

点群から滑らかな面を作成する Poisson reconstruction 法 (Kazhdan et al., 2006) によって一体化した滑らかな断層面を生成



松田式を近似的に満たすように物性を調整しているため 断層線を長大にする必要がある



今回は滑らか度が「中」のモデルについて検討
(計算規模は、一体化前のモデルと同程度)

図 17 Poisson Reconstruction 法によって作成した滑らか度の異なる長大化モデル

vi) 現地調査結果を説明するための断層面長大化の試み

断層面①から⑨を滑らかに接合するには、補間法に関する知見が必要となる。各断層面を構成する有限要素メッシュはすでに作成しているため、各断層面を構成する点群データはすでに把握している。また、各断層面の法線に関する情報もすでに把握している。点群データに対する補間方法はコンピュータグラフィックスの分野で活発に研究されており、広く用いられる補間法として Poisson Reconstruction 法 (Kazhdan, 2006)、Radial Basis Function 法 (Carr, 2001; 金井, 2004)、Multi-level Partition of Unity 法 (Ohtake, 2003) 等が挙げられる。ここでは点群の位置データおよびその位置での法線データの両方を利用する Poisson Reconstruction 法によって滑らかで長大な断層面を作成することとした。この手法によれば、点群データのみならず面の法線についても滑らかに変化させて接合することが可能となる。また、同手法は滑らかな度合いを調整するパラメータを有しており、このパラメータを変更することで、様々なモデルについて検討することが可能となる。

図 17 に滑らか度を大・中・小と変化させた場合の一体化・長大化した断層面メッシュをそれぞれ示す。滑らか度が小のケース (図 17 右上) では、既存の断層面形状が明瞭に確認でき、滑らかな一体化モデルというよりも、断層面間を直線的に一体化した状態となっているのが確認できる。一方、滑らか度が大のケース (図 17 左下) では、断層面①から⑨を最小二乗的に滑らかに連結した結果となっており、オリジナルの点群と比べて一連の断層面形状が大きく変更されていることがわかる。また、滑らか度が大のケースでは神城断層

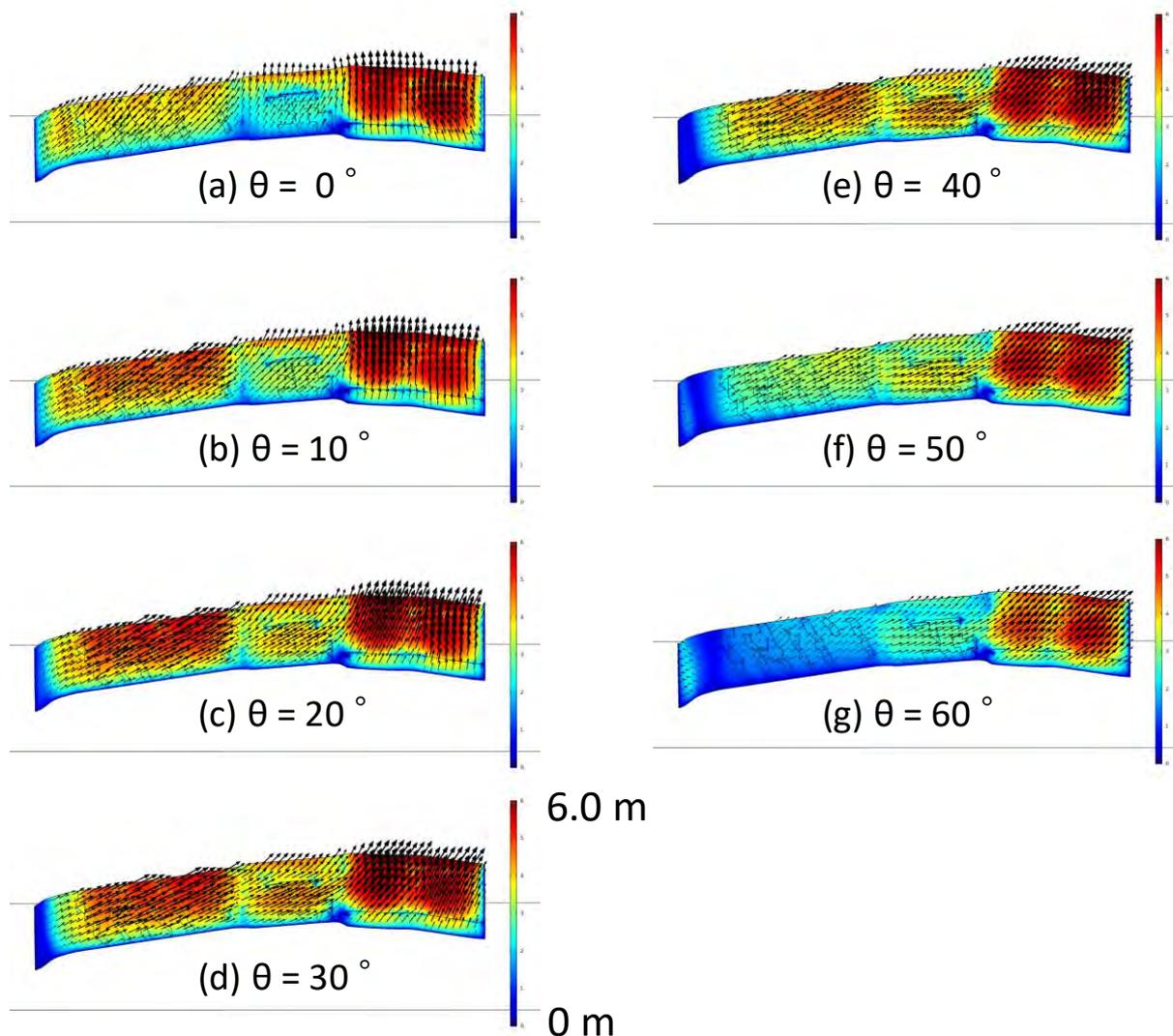


図 18 最大主応力方位 θ と断層面上すべり分布の関係
(一体化モデル、断層線長 119.3km)

部分の地下の折れ曲がりが消滅しており、このモデルを用いた変形解析では神城断層東部の山地を形成するための隆起がモデル化できないことがわかっている。今回の検討では、地下の折れ曲がりを有し、一定レベル以上の滑らかさを有している滑らか度中（図 17 右下）のモデルについて有限要素解析を実施した。なお、一体化した断層面モデル（滑らか度：中）の地表における断層線の長さは、断層線に沿う距離計測で約 120km（119.3km）であった。一体化した断層面上の接線方向剛性については、断層線長を 119.3km とした場合に対応する接線剛性（ $1.18 \times 10^6 \text{N}/(\text{m m}^2)$ 、松田式を満たすように算出）を、断層面上に一様に設定している。

図 18 は最大主応力方位 θ （定義は図 11 中に記述）を東西方向から 5° 刻みで時計回りに回転させた際の一体化した断層面上でのすべり変位分布（色はネットスリップ量を表す）を示している。図 18 は図 12 に対応しており、大局的な変位分布様式は一体化前の断層面モデルと大きくは変わらない。 $\theta = 30^\circ$ 程度で牛伏寺断層付近で左横ずれが最大化されることも図 12 と同様である。ただし、ネットスリップ量が断層面上剛性の低下にともなって

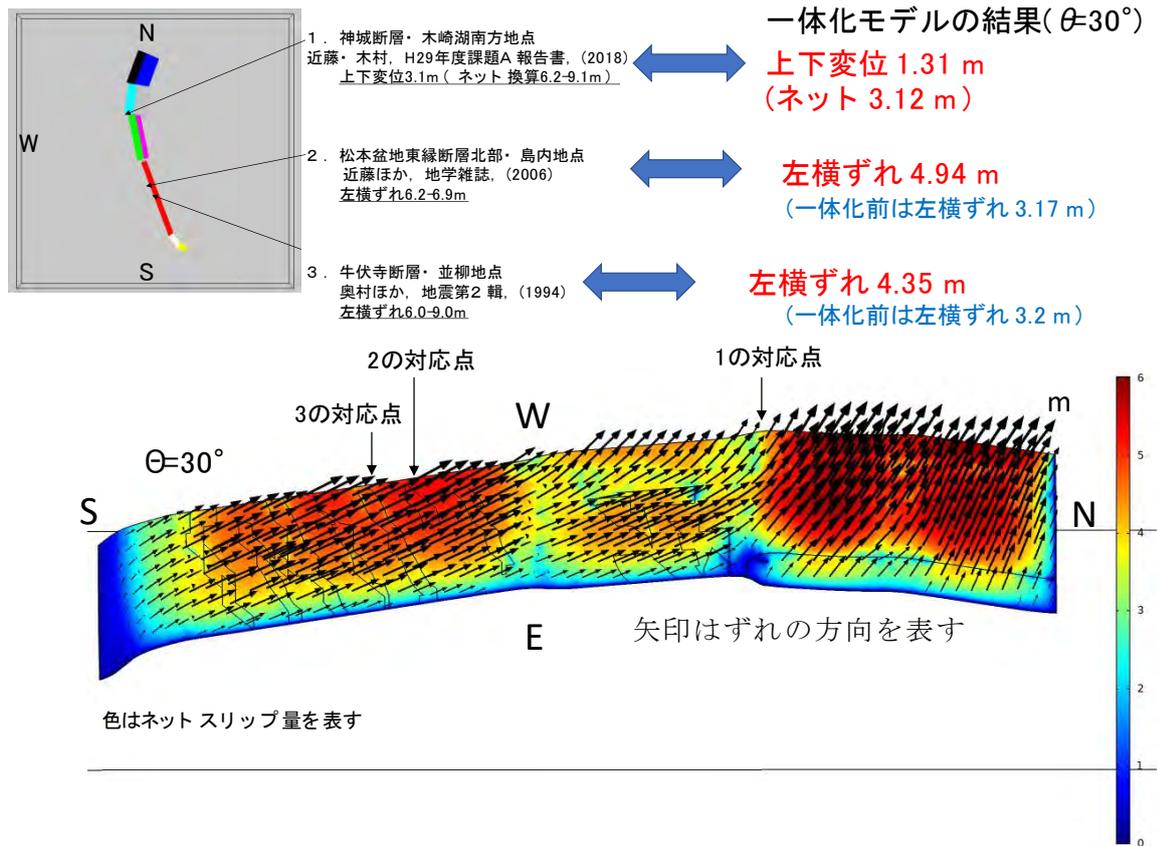


図 19 既往研究で報告されたすべり変位の計測結果とシミュレーション結果の比較
(滑らかな一体化断層面モデルに対する結果)

大きくなっていることに留意されたい (レンジが 0.0~6.0m)。

図 19 は、一体化した断層面モデルに対して $\theta=30^\circ$ とした場合に対するすべり変位分布図を拡大したもので、図 16 で示した既往の調査結果との変位比較結果も合わせて示している。一体化したモデルによって、地点 1 では変位レベルがほぼゼロであったものが、上下変位 1.31m となり、一体化する前の結果よりも改善されていることがわかる。なお、地点 1 における変位のセンスは一体化した断層面モデルに対するシミュレーション結果でも逆断層的であり、一体化前の特徴は失われていない。ただし、変位レベルについては依然として計測結果よりも小さいため、今後はこの差異を小さくするための検討に着手する。地点 2 では横ずれ量 3.2m が 4.9m となり、より実測結果に近くなった。同様に地点 3 においても、一体化前の結果よりもより実測結果に近い横ずれ量となって改善されていることが確認できる (3.2m が 4.4m)。以上のように断層面を一体化してスケーリング則を適用することで断層面を一体化する前よりも実測値に近い結果を得ることはできたが、計測結果の変位レベルは実測結果よりも数 m 程度小さい。今後、より実測結果を模擬するための方策・工夫が必要となるが、この点については断層面形状の再考、断層面上物性の再考などが現時点で挙げられる。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成30年度前半では、牛伏寺断層周辺で推定されている断層変位のスリップパーティショニングに焦点を当て、y字型の断層面について784ケースにおよぶパラメトリックスタディー

を実施した。この結果、最大主応力の作用方向は断層線との交角が 60° 程度かつ逆断層の傾斜角が 60° 程度かつ横ずれ断層の傾斜角が 90° 程度するとき、スリップパーティショニングが発生しやすいことがわかった。さらに最適化解析（ベイズ最適化）により正確な数値を算出した（断層線との交角 56.2° 、逆断層の傾斜角 54.5° 、横ずれ断層の傾斜角 86.3° ）。断層変位のスリップパーティショニングに関する数値解析事例はほとんどないため、今回の取り組みによってスリップパーティショニングが生じやすいと考えられる断層面配置についての知見が得られた。

平成30年度の後半では、サブテーマ1およびサブテーマ2で得られた調査結果・解析結果を統合的に勘案し、糸魚川―静岡構造線断層帯の北部区間・中北部区間に対応する断層面モデルを作成した（図10、断層面①から⑨）。作成した断層面モデルについて有限要素解析メッシュを生成し、広域応力場をパラメータとした有限要素解析を実施した。解析の結果、最大主応力方位を $N60^\circ W$ （北西―南東）と設定することで、既往の調査結果から得られている変位センスを定性的に説明可能であることがわかった。定量的な比較も併せて実施した結果、現地調査から得られている変位レベルは、シミュレーション結果の2～3倍程度となっていた。より現実的な変位分布にするように、断層面①から⑨を滑らかに接合してスケールング則を適用することで変位レベルを計測結果に近づける方法を検討した。結果、断層面①から⑨を個別にモデル化した場合よりも計測結果に近づいた。しかしながら、まだ改良の余地があるため、断層面形状および断層面上物性について他サブテーマと連携しながら、より現実的な断層面モデルを作成することが課題として残っている。平成30年度までの進捗は当初の計画どおりであり、本年度は糸魚川―静岡構造線断層帯の北部区間・中北部区間の断層面のモデル化およびそれらの有限要素メッシュ作成を実施した。今後は上記の課題対応に加え、他サブテーマと連携を取りながら断層面のモデル化を南部に拡大していく。

(e) 引用文献

- Bowman, D., G. King, and P. Tapponnier, Slip partitioning by elastoplastic propagation of oblique slip at depth, *Science*, 300, 16, 1121-1123, 2003.
- Carr, J., R. Beatson, H. Cherrie, T. Mitchel, W. Fright, B. McCallum, and T. Evans, Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions, *SIGGRAPH*, 67-76, 2001.
- Ikeda, Y., T. Iwasaki, H. Sato, N. Matsuta, and T. Kozawa, Seismic reflection profiling across the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line at Matsumoto, Central Japan, *Eearth Planets Space*, 56, 12, 1315-1321, 2004.
- 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, 2001.
- 金井 崇・高橋成雄, 最新コンピュータグラフィックス -基礎から応用まで-, 画像電子学会誌, 33, 4B, 612-619, 2004.
- 勝部亜矢・近藤久雄・谷口 薫・加瀬祐子, 2014年長野県北部の地震(Mw6.2)に伴う地表地震断層の分布と変位量, *地質学雑誌*, 123, 1, 1-21, 2017.

- Kazhdan, M., M. Bolitho, and H. Hoppe, Poisson surface reconstruction, Symposium on Geometry processing, 61-70, 2006.
- King, G., Y. Klinger, D. Bowman, and P. Tapponnier, Slip-partitioned surface breaks for the Mw 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China, Bull. Seismol. Soc. Am., 95, 2, 731-738, 2005.
- 近藤久雄・遠田晋次・奥村晃史・高田圭太, 糸魚川-静岡構造線活断層系・松本盆地東縁断層南部に沿う左横ずれ変位地形, 115, 2, 208-220, 2006.
- 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, 28, 3, 269-283, 1975.
- 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, 55, 795-855, 1980.
- 松多信尚・池田安隆・東郷正美・今泉俊文・佐藤比呂志・戸田茂・田力正好・加藤一・石山達也・井川猛・松本反射法地震探査グループ, 糸魚川-静岡構造線活断層系北部・松本地域における反射法地震探査, 東京大学地震研究所彙報, 82, 45-55, 2007.
- 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所, 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」平成29年度成果報告書, 114p, 2018.
- Ohtake, Y., A. Belyaev, M. Alexa, G. Turk, and H. P. Seidel, Multi-level partition of unity implicits, ACM Transactions on Graphics, 22, 3, 463-470, 2003.
- 奥村晃史・下川浩一・山崎晴雄・佃栄吉, 糸魚川-静岡構造線活断層系の最近の断層活動—牛伏寺断層・松本市並柳地区トレンチ発掘調査—, 地震第2輯, 46, 425-438, 1994.
- 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), 74, 4, I_59-I_71, 2018.
- 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), 印刷中(2019.2.17受理), 2019.
- Toda, S., H. Kaneda, S. Okada, D. Ishimura, and Z.K. Milton, Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, Earth Planets Space, 68, 188, doi:10.1186/s40623-016-0560-8, 2016.
- Wesnousky, S.G., and C.H. Jones, Oblique slip, slip partitioning, spatial and temporal changes in the regional stress field, and the relative strength of active faults in the Basin and Range, western United States, Geology, 22, 11, 1031-1034, 1994.