

3. 3 三次元 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 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

中央構造線断層帯の四国陸域の断層区間を対象として、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等を入力とし、断層変位を複数のシナリオについて断層変位分布を検討する。なお、複数のシナリオに関する検討結果は、サブテーマ 4 におけるシナリオ設定と関連している。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 令和 2 年度：

中央構造線断層帯の四国陸域の断層区間を念頭において、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) 令和 3 年度：

令和 2 年度に作成したプログラムを改修し、四国地方の中央構造線断層帯の傾斜角に関する解析を実施した。

3) 令和 4 年度：

石鎚山脈北縁区間および石鎚山脈北縁西部区間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した。また、得られた結果を取りまとめた。

(2) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 4 年度に実施した業務の内容は、(1) スケーリング則の拡張、(2) 拡張したスケーリング則を用いた変位解析、(3) 断層面間の相互作用評価に大別できる。

これまで用いていた断層面上接線剛性に対するスケーリング則は、松田式に基づいて設定していたが、断層線長が 80km までしか対応させておらず、断層線長が 80km 以上については、80km のケースと同じ剛性値を設定していた。讃岐山脈南縁西部区間は断層線長が 100km を超えているため、これに対応できるようにスケーリング則を拡張した(松田式の外挿)。

拡張したスケーリング則を用いて変位解析を実施した結果、讃岐山脈南縁西部区間中央部ですべり量が1.4倍となった(5.9m→8.4m)。なお、スケーリング則の拡張は、令和2年度・令和3年度の結論(広域応力場の方位: N60° W、断層面傾斜角: ほぼ鉛直)について影響を及ぼすものではない。以上が令和4年度前半の成果である。

令和4年度後半は、断層面間の相互作用を評価するため、ある断層面が単位量ずれた際に他断層面に及ぼす影響を応力変動の観点から検討した。結果、断層面のオーバーラップ端で応力変動量が大きくなる領域を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

スケーリング則の拡張では、単一断層面の純横ずれを対象として、断層長を変化させつつ松田式を満たすように断層面上の接線剛性を調整し、接線剛性-断層長関係を断層長が5 kmから200kmの範囲で再構築した。得られた接線剛性-断層長関係を石鎚山脈北縁西部区間から讃岐山脈南縁東部区間にわたる全ての断層面に適用し、広域応力場をN60° W、断層面傾斜角を90° とした上で有限要素解析を実施して変位場を得た。プログラムのベース部は従来と全く同じであり(竿本, 2018; 竿本, 2019; 竿本, 2021)、今回は断層長が80km以上の場合でも対応できるように拡張した。

断層面間の相互作用については、オーバーラップしながら近接する2面間のうち、片方のみに単位すべりを与えたとき、他方の断層面上でどのような応力変動が生じるかを有限要素解析によって評価した。

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. 6.1)上で実装した。

(c) 業務の成果

1) 断層線長が80kmを超えるケースに対応するためのスケーリング則の調整

a) 松田式

松田式(松田, 1975)によれば、気象庁マグニチュード M_J と地表地震断層トレース長 L [km]の関係性および気象庁マグニチュード M_J と変位量 D [m]の関係性がそれぞれ次のように提案されている。

$$\log L = 0.6M_J - 2.9 \quad (1)$$

$$\log D = 0.6M_J - 4.0 \quad (2)$$

これらの式より、地表地震断層長 L [km]と地表地震断層の変位量 D [m]の関係は次式となる。

$$D = \frac{L}{10^{1.1}} \quad (3)$$

なお、松田式の適用範囲は関係式の作成に用いたデータセット(明治以降に生じた気象庁マグニチュードが6.2以上となる14の内陸地震)から、断層線長が10~80km程度までの断層について適用可能と推察できる。本研究では松田式を断層線長が80km以上のケースでも成り立つと仮定し、シミュレーションから得られる地表変位が松田式と整合するように断層面上の接線方向バネ剛性を決定する。

b) 松田式を満たす断層面上の接線剛性と断層長の関係

従来のシミュレーションでは、松田式を満たすように断層面上の接線方向剛性を設定していたが、上限を断層線長が 80km のケースまでに限っていた。松田式が断層線長 80km 以上のケースでも成り立つと仮定し、断層線長が 200km 程度までの接線方向剛性－断層線長関係を求める。

図 1 は純粋な横ずれ断層を模擬した有限要素モデルであり、これを用いて松田式が満たされる断層面上の接線方向剛性を検討する。なお、用いる初期応力場は $\sigma_1 = 30\text{MPa}$ 、 $\sigma_2 = 10\text{MPa}$ （深さ方向に一定）である。断層面は断層面上に最大せん断応力 10MPa が作用するように最大圧縮応力 σ_1 の軸に対して 45° 回転させている。断層線長 L を 5 km から 200 km まで約 10km 刻みで変化させた際に断層線中央部で得られる横ずれ変位量が式 (3) で表される関係を満たすように断層面上の接線方向バネ剛性 kt を決定する。なお、断層幅は断層線長 L に依らず深さ方向に 20km（傾斜角 90° ）と設定している。逆断層モデルではなく横ずれ断層モデルを用いて断層面上の接線方向剛性を調整することの理由は、松田式の元となったデータに横ずれ断層の事例（推定含む）が多いこと、2 軸圧縮によって断層面上にねらいのせん断応力を載荷しやすいことに依っている。なお、地殻のヤング率およびポアソン比は、それぞれ 45GPa、0.3 と設定した。

松田式を満たす断層面上の接線剛性は以下の手順で同定した。(1) まず断層線長を設定し、式 (3) にしたがって松田式から求まる最大変位 D を算出する。(2) 手順 (1) で設定した断層長を模した有限要素モデルを作成し (図 1)、断層面上の接線剛性を適当に仮定した上で応力場を作用させて断層線中央部での変位量 D^* を算出する。(3) D と D^* が一致するまで断層面上の接線剛性を修正する。手順 (1) から (3) を所望の断層長について実行することで、松田式を満たす接線剛性と断層線長の関係が得られる。

以上の手続によって得られた断層面上の接線剛性と断層線長の関係を示したものが図 2 である。図 2 の縦軸は断層面上の接線方向剛性値を、横軸は断層線長をそれぞれ示している。接線方向剛性は断層長と反比例の関係があることがわかる。本研究のモデルでは、断層線長が約 210km のケースで剛性がほぼゼロになる。これ以上断層線長が大きいケースでは松田式を満たすことができず、松田式の適用という観点からは一定の制約を与えると考える。

図 3 は、図 2 で示した関係を有限要素解析コード内で実装し、図 1 で示される有限要素モデルについて断層線長を 5 km から 200km の範囲で最大変位 D^* を算出し、松田式から求まる最大変位 D と比較した結果である。有限要素解析から求まる最大変位と松田式から求まる最大変位が一致しており、図 2 の関係を用いることで松田式を満足する有限要素解析が実施可能となることが確認できた。

2) 拡張したスケーリング則を用いた四国地方の中央構造線断層帯の変形解析

a) 昨年度結果との比較

本年度作成した拡張したスケーリング則を用いた変形解析結果と、昨年度の変形解析結果を比較した。解析に用いる有限要素モデルは、令和 3 年度業務で作成したもの (図 4) である。

図 5 は変位の上下成分について、従来の解析結果 (令和 3 年度に実施) とスケーリング

則を拡張した場合の結果を比較したものである。両者の解析条件はスケーリング則に基づく断層面上接線剛性のみを除いて全く同じであり、最大主応力方位は $N60^{\circ} W$ 、各断層面の傾斜角は 90° とした。得られる変位様式は両者ともにほぼ同じである。ただし、拡張したスケーリング則を用いた場合は、讃岐山脈南縁西部区間(本有限要素モデルでは断層長 104km)の変位レベルが増加している点、讃岐山脈南縁西部区間の端部での変位が強調されている点が昨年度の結果と異なる。

図 6 は、讃岐山脈南縁東部区間から石鎚山脈北縁西部区間までの全区間について、断層線上のすべり量分布を示したものである。拡張したスケーリング則を用いた結果は実線で、昨年度の結果は破線で示している。上述のとおり、讃岐山脈南縁西部区間の変位レベルが増加しており、昨年度結果の最大変位量が 5.9m (赤点線) だったのに比べ、拡張したスケーリング則を用いることが 8.4m (赤実線) まで変化が増加している。図中に併せて示している堤・後藤 (2006) の調査結果と比較すると、讃岐山脈南縁西部区間では拡張したスケーリング則を用いた場合よりも昨年度結果の方が変位模擬の程度が高いことが確認できる。このことは、松田式を断層長が 100km 程度の断層に適用することが不適切であることを示唆している。現時点では断層長が 80km を超える断層に対するスケーリング則をどのように設定すべきなのかについての指針が必要となる。Wesnousky (2008) では国外の活断層調査事例を含め、断層線長とすべり変位について 3 つのタイプのスケーリング則を提案している。1 つは松田式と同じタイプの線形関係、残りの 2 つは対数線形関係およびべき乗関係を設定している。これら 3 タイプの差異は断層長が大きくなればなるほど顕著になるが、断層長とすべり変位の関係が一義的に定まっていけないのは、主として断層長が 100km 以上の調査事例数が少ないことに依っている。国内で断層長が 80km を超える事例数は極めて限られるが、今回の検討のように長大な断層に対する変位スケーリング則についての研究を進めることは数値シミュレーションに基づく断層変位予測を実施する上で一定の意義がある。

3) 断層面間の相互作用についての検討

a) 相互作用の検討方法

図 7 は、断層面間の相互作用を評価するための手続きに関する説明図である。近接する 2 つの断層面について、一方に単位すべり (1 m) を与えたとき、他方の断層面上に生じた応力変動量を評価する。ここで、応力変動量は垂直応力の変動分 $\Delta\sigma$ とせん断応力の変動分 $\Delta\tau$ の大きさによって定義する $\left(\sqrt{(\Delta\sigma)^2 + (\Delta\tau)^2}\right)$ 。なお、解析ケースは、(1) 讃岐山脈南縁東部区間にのみ単位すべりを与えた場合、(2) 讃岐山脈南縁西部区間にのみ単位すべりを与えた場合、(3) 石鎚山脈北縁区間にのみ単位すべりを与えた場合、(4) 石鎚山脈北縁西部区間にのみ単位すべりを与えた場合、の 4 通りについて検討した。

図 8 は讃岐山脈南縁東部区間に単位すべりを与えた際の讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量を示したものである。線形破壊力学の知見 (Anderson, 2011) によれば、亀裂端部周辺の応力場は $1/\sqrt{r}$ (r は亀裂端部からの距離、ここでは断層線端部からの距離に相当) に比例することがわかっている。したがって、単位すべりを与えた断層線端部をもう一方の断層面へ正射影した領域で応力変動量が最大となることが期待される。図 8 において讃岐山脈南縁西部区間で帯状の応力変動領域が確認できるが、上述の破壊力学の知見

で解釈可能である。同様の現象が図 9、図 10、図 11 でも確認できる。

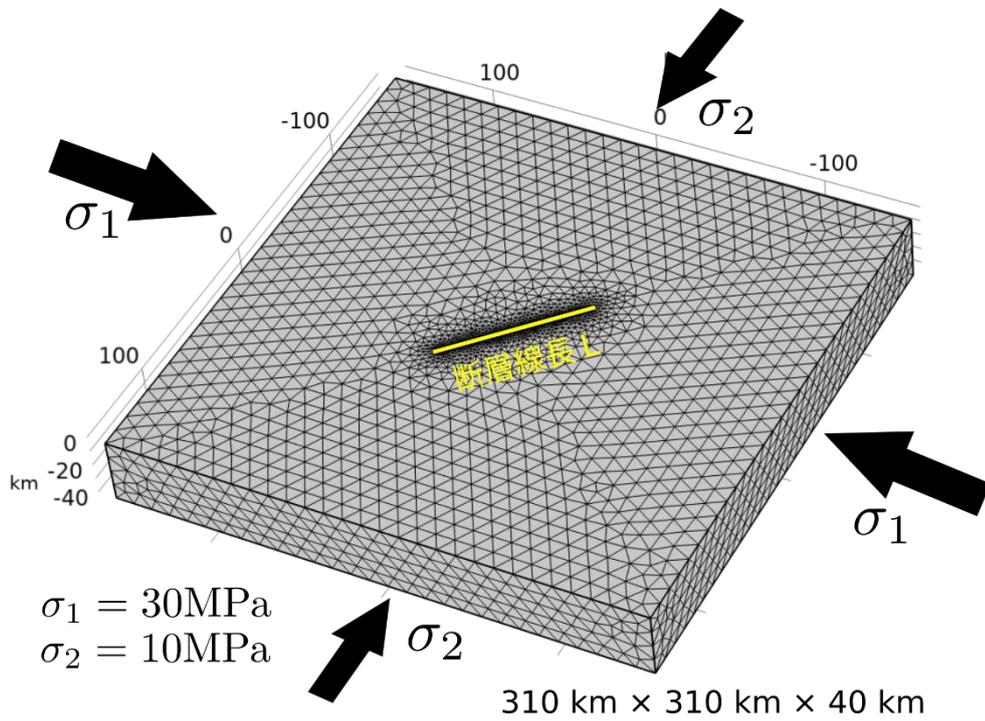


図1 四国地方の中央構造線断層帯に対する断層面モデル（J-SHIS の情報から作成（防災科学技術研究所，2022年3月29日閲覧））。

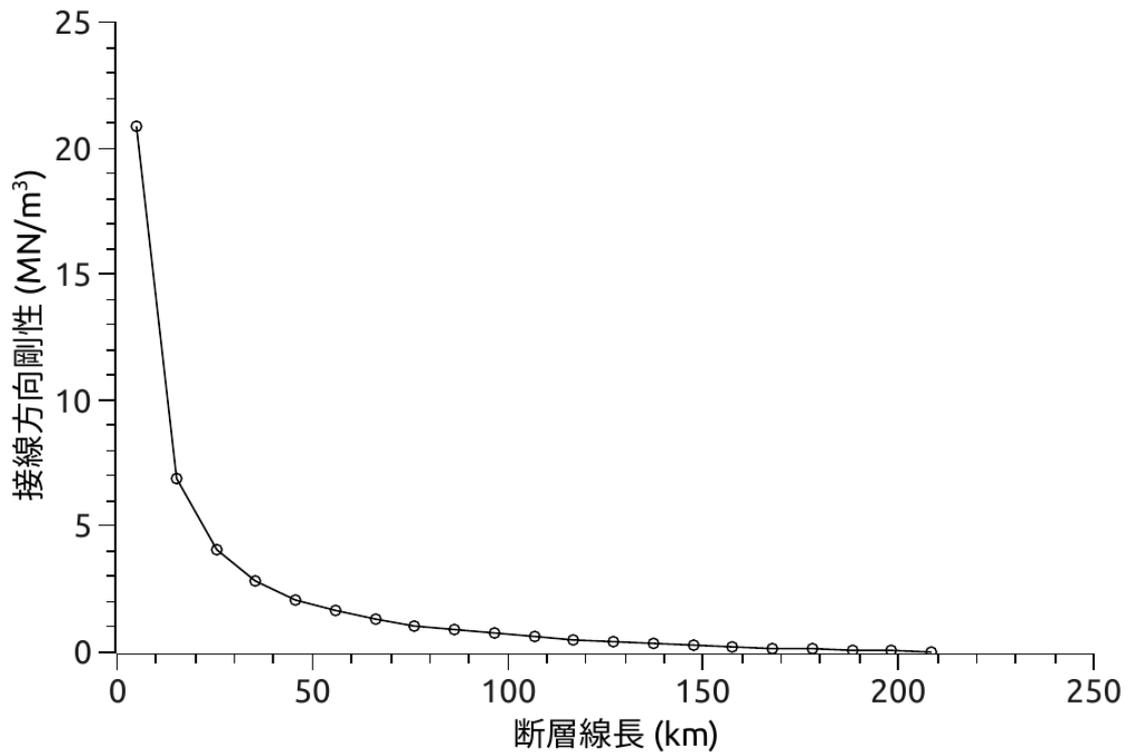


図2 松田式を満たす断層面上接線方向剛性と断層線長の関係。

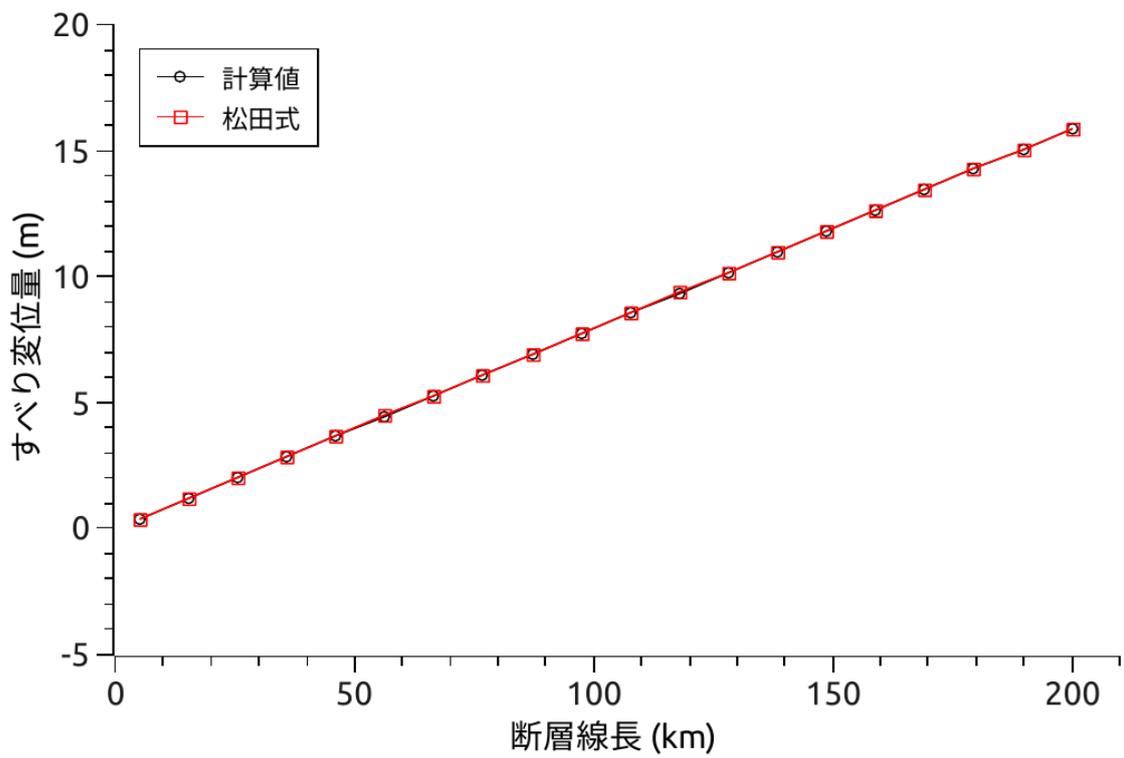


図3 図2の関係を実装した有限要素解析結果と松田式の比較。

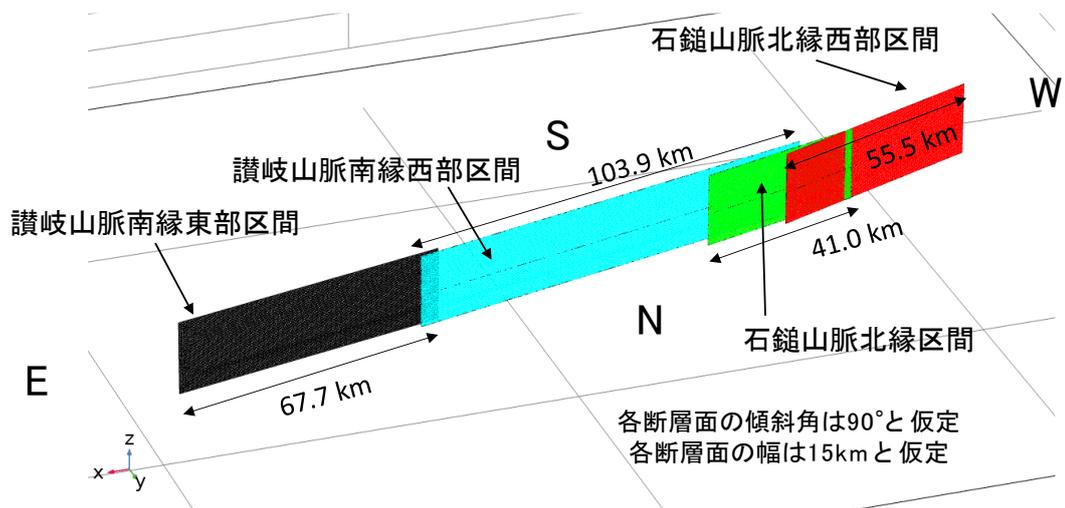


図4 四国地方の中央構造線断層帯に対する断層面モデル（令和3年度業務成果の一部）。

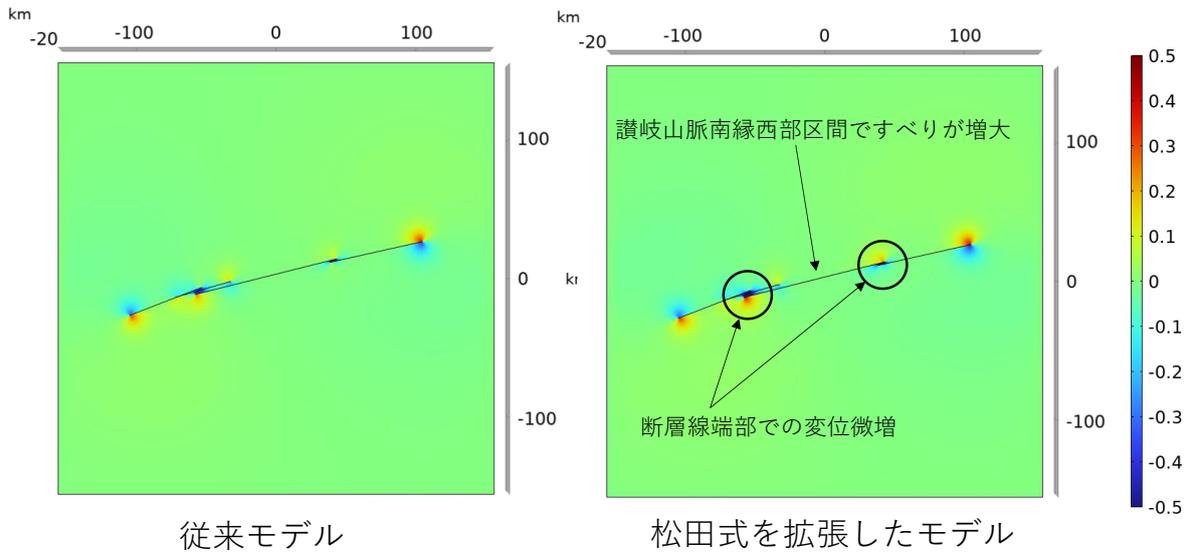


図5 従来の解析結果とスケーリング則（松田式）を拡張した場合の解析結果との比較（上下変位成分について）。

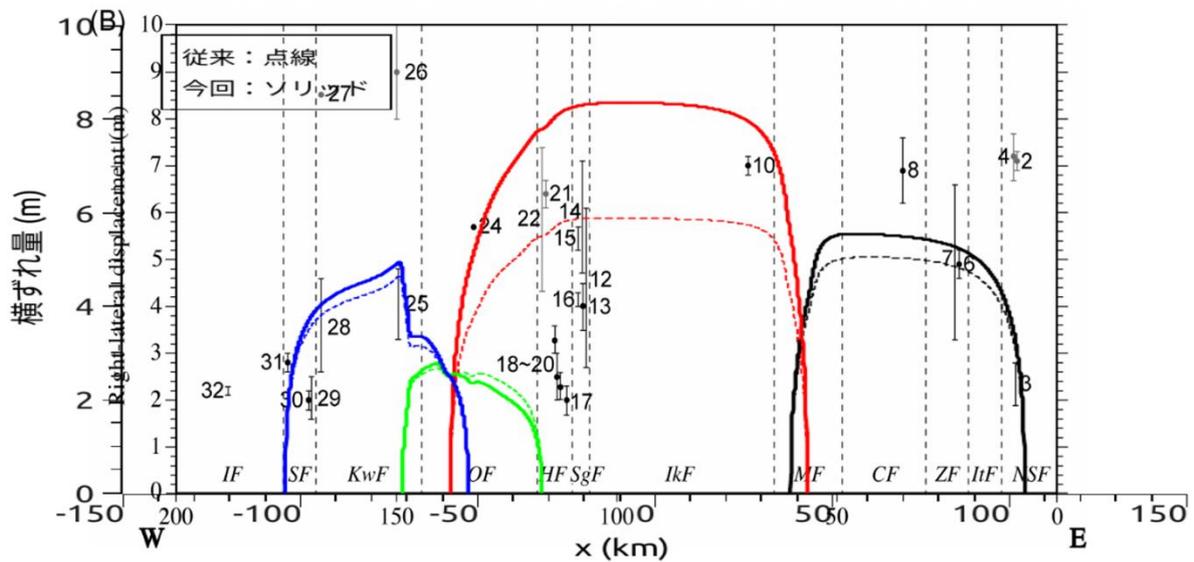


図6 従来の解析結果とスケーリング則（松田式）を拡張した場合の解析結果との比較（断層線上のすべり量（青線：石鎚山脈北縁西部区間、黄緑線：石鎚山脈北縁区間、赤線：讃岐山脈南縁西部区間、黒線：讃岐山脈南縁東部区間）について堤・後藤（2006）の調査結果と併せて表示）。

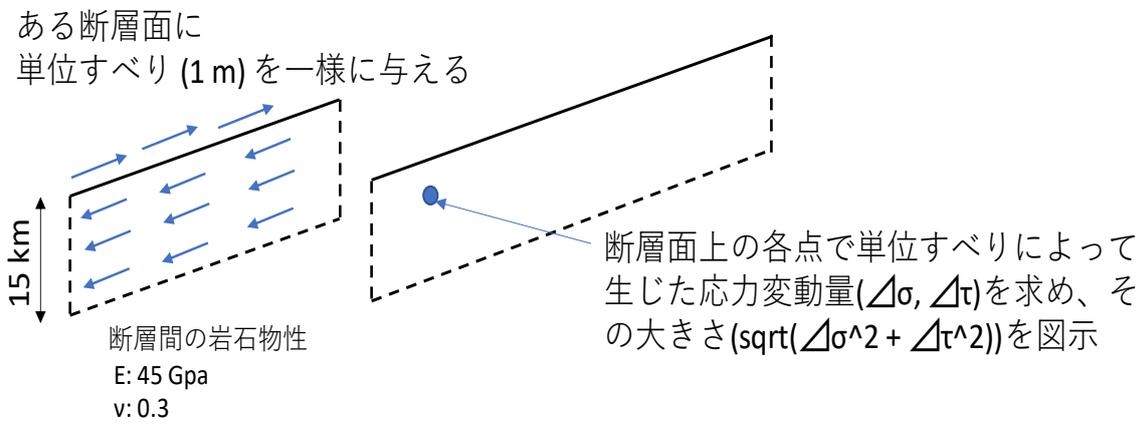


図7 近接する断層面の相互作用評価方法 (一方の断層面に単位すべりを一様に与えた後、他方の断層面上の応力変動量を算出)。

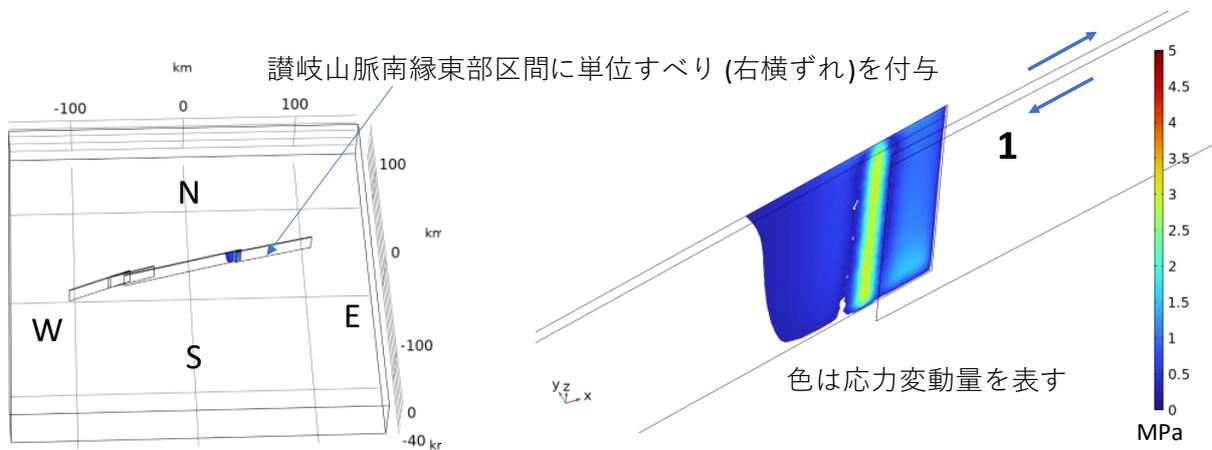


図8 讃岐山脈南縁東部区間に単位すべりを付与した場合に讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

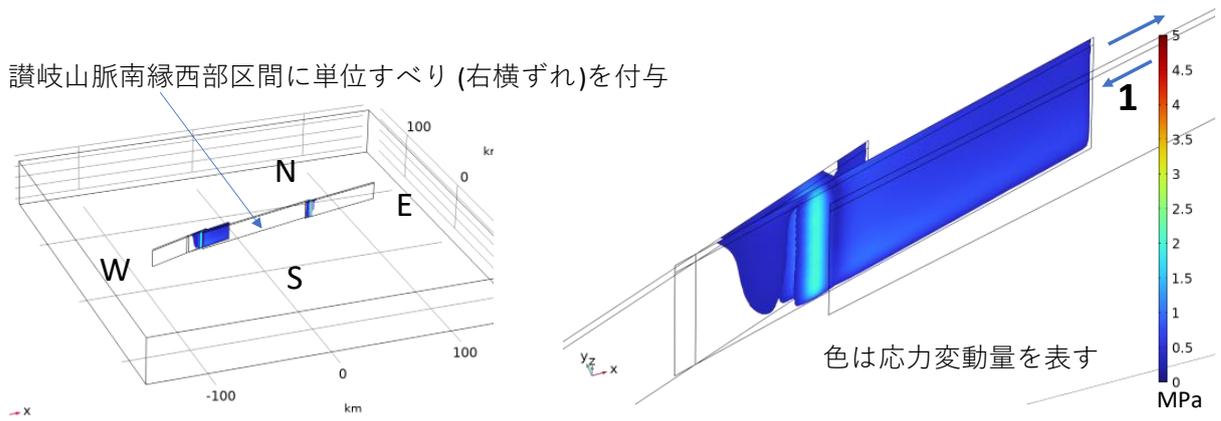


図9 讃岐山脈南縁西部区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁区間で生じる応力変動量。

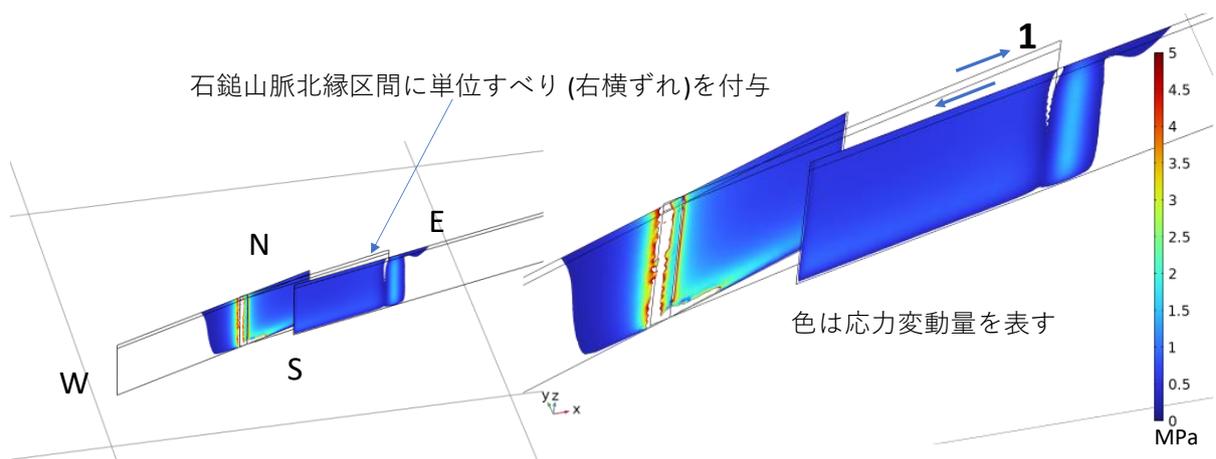


図10 石鎚山脈北縁区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁西部区間と讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

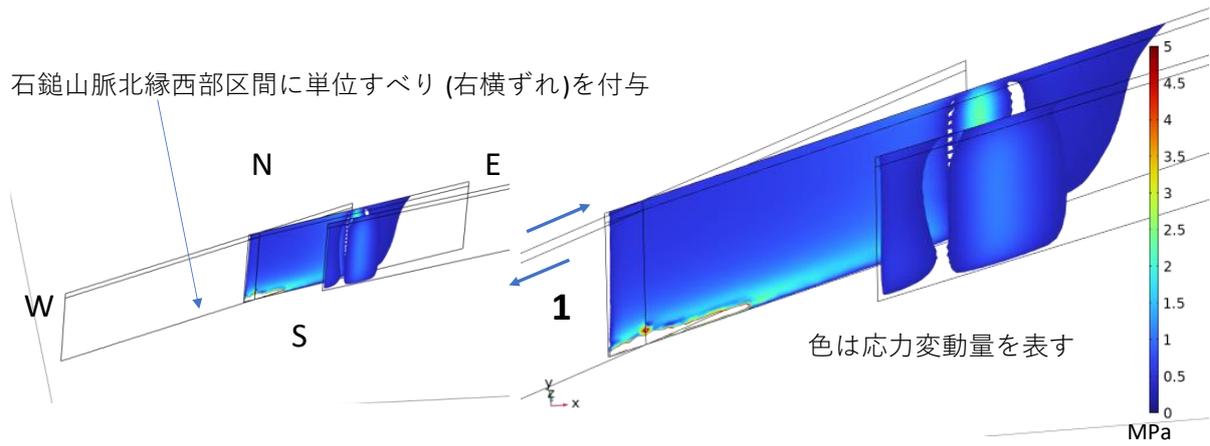


図 11 石鎚山脈北縁西部区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁区間と讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

(d) 結論

令和4年度は、(1)断層線長が80kmを超える断層面へのスケーリング則(松田式)の拡張、(2)断層面間の相互作用の評価、の2点についての検討を実施した。本業務を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

- 断層線長が80km以上のケースで松田式が成り立つことを仮定する場合、断層線長が200km程度までが数値シミュレーションの観点からは限界であった。
- 昨年度実施した活断層MTLのすべり量分布(80km以上の断層帯では一定の剛性値を設定)に対する解析結果は、80km以上の断層線長についても松田式が成り立つとして今年度実施した解析結果よりも変位分布の模擬の程度が高い。
- 断層面間の相互作用については、断層線端部周辺の応力変動量を通じて評価した。評価結果自体は、破壊力学の知見を用いて解釈可能である。

(e) 引用文献

Anderson, T. L., 破壊力学 基礎と応用 第3版, 栗飯原周二(監訳), 金田重裕・吉成仁志(訳), 森北出版, 2011.

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.

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), 75, 4, I_25-I_35, 2019.

竿本英貴, 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, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 77, 4, I_14-I_23, 2021.

堤 浩之・後藤秀昭, 四国の中央構造線断層帯の最新活動に伴う横ずれ変位量分布, 地震第2輯, 59, 2, 117-132, 2006.

Wesnousky, S. G., Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture, Bull. Seism. Soc. Am., 98, 4, 1609-1632, 2008.

(3) 令和2年度～令和4年度の成果

(a) 業務の要約

三次元FEMによる断層モデルの高度化では、四国陸域の讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間を対象として、まずは有限要素メッシュを構築した。ついで、各区間の傾斜角と解析対象領域の最大主応力方位で代表される広域応力場についてのパラメトリックスタディーを実施した。得られたシミュレーション結果と既往の調査結果や中央構造線断層帯に沿う中・小縮尺の地形との比較を通じて、各区間の断層面傾斜角についての北傾斜仮説を棄却する知見が得られた。3カ年の各年度における主な成果は以下のとおりである。

令和2年度は、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四国地方の中央構造線断層帯に適用できるように改変することが主たる業務であった。中央構造線断層帯に対応できるように有限要素プログラムを改変し、境界条件の影響確認、計算時間、最大主応力方向など、シミュレーションに関連する基礎的な項目についての検討を行った。

令和3年度は、年度前半で有限要素メッシュに最新の調査結果に関する知見を組み込むようメッシュ生成プログラムを改変し、地下任意深さでの断層面の折れ曲がりを表現可能とした。年度後半は、四国地方の中央構造線断層帯の傾斜角を設定するにあたっての重要な2つの仮説（北傾斜仮説、高角仮説）について、力学的な検討を実施した。具体的には、有限要素解析を用いてどちらの仮説が合理的であるのかを、既往研究で提案されているモデルを参考にして作成した3つの有限要素モデルに対する変位解析により検討した。これらのモデルについて傾斜角や最大主応力方向を様々に変化させたパラメトリックスタディーを実施した結果、北傾斜仮説を棄却する知見が得られた。

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。

令和4年度に実施した業務の内容は、（1）スケーリング則の拡張、（2）拡張したスケーリング則を用いた変位解析、（3）断層面間の相互作用評価に大別できる。年度前半で（1）と（2）について検討した結果、松田式を断層線長が100km以上の断層に適用するのは不適切であるとの結論が得られた。年度後半は、断層面間の相互作用を評価するため、ある断層面が単位量ずれた際に他断層面に及ぼす影響を応力変動の観点から検討した。結果、断層面のオーバーラップ端で応力変動量が大きくなる領域を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

本業務では、四国陸域の讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間にわたる全ての地盤の静的な変形解析について、平成29年度に構築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活用した。本手法は、複数のシナリオを検討するために1シミュレーションあたり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（竿本，2018；竿本，2019；竿本，2021）。有限要素解析で用いる断層面配置は、サブテーマ1から得られる調査結果の知見を反映させたモデルである。また、広域応力場については、サブテーマ2から得られる知見を参考に設定した。なお、本業務を通じて得られる定量的な知見（広域応力場の方位、断層面傾斜角度）は、サブテーマ4の動的破壊計算の計算条件設定の基礎情報の一部となる。

(c) 業務の成果

1) 有限要素解析を用いた基礎検討と有限要素メッシュ（プロトタイプ）の作成（令和2年度実施）

a) 断層面端部とモデル境界の距離が断層変位に及ぼす影響について

図12は、モデル境界部が断層変位に及ぼす影響を検討するための計算モデルおよび条件を示したものである。断層面（断層長20km、幅15km、傾斜角 90° ）をモデル領域中央部に走向がx軸に沿うように設置しており、この断層面がピュアな右横ずれを生じるように最大主応力方位を $N45^\circ W$ とした。モデル化した直方体領域の一辺の長さLを20kmから160kmまで20km刻みで変化させて、図12中のラインA-B上（地表面）での上下変位分布を各ケースについて抽出した。なお、ラインA-Bは断層線に平行であり、5km北側（ $y=5$ ）にステップしている（A： $x=0$ ，B： $x=L/2$ ）。各Lについて、断層面中央部における横ずれ量が8mとなるように断層面上物性を調整している（図13）。断層面上での横ずれが8mとしている理由は、トレンチ調査等で1回の右横ずれ量が讃岐山脈南縁東部および讃岐山脈南縁西部で2～7m程度、石鎚山脈北縁および石鎚山脈北縁西部で6～8mであったと推定されていることに依る（地震調査研究推進本部 地震調査委員会，四国地域の活断層の長期評価（第二版），2017）。

図14に、図12中のLを20kmから160kmまで変化させた場合の地表での上下方向変位分を示す。図14でLが20kmや40kmのケースでは、Lが80kmのケースに比べてモデル境界の影響が変位分布に強い影響を与えていることがわかる。本検討ではこのようなことが生じないように断層面端部とモデル境界の距離をどの程度取れば問題ないのかということをも明らかにするのが目的である。

図15にはLが100kmから160kmのケースをそれぞれ示している。Lが100kmよりも大きい場合、断層面端部に生じている変位量の大きい領域はモデル境界まで及んでいないことが見て取れる。ここで、図14および図15に示した各ケースでは、どのケースも断層面は500mピッチの三角形でモデル化している。

図16は、図14および図15の各ケースにおいて、ラインA-B上の上下変位成分をラインに沿って示したものである。x=10kmの位置が断層面端部であり、L=20kmのケースでは変位成分がx=10kmでゼロになることが確認できる。また、他のケースにおいてもx=10でピーク値（約0.47m）をとるが、x>10のピーク以降の領域ではLの値に応じて変位分布が異なっていることがわかる。図17より、例えばLが60kmのケースでは、x=30kmの位置にモデル境界が設定されるためx=30kmで変位成分がゼロとなる。Lが120kmよりも大きい場合については、ほぼ同じ変位分布形態を呈していることがわかる。以上の検討結果より、L=120km（断層面端部からモデル境界までの距離50km）以上と設定することで、モデル境界が断層変位に及ぼす影響は十分小さくなると結論づけられる。四国陸域内の全断層面を

考慮する以降の解析では、断層面端部とモデル境界の距離は 50km 以上離すように設定した。この結果、四国全域を含む直方体の一辺の長さは 310km となる。直方体の一辺の長さを 310km と設定することで、讃岐山脈南縁東部区間の東端から解析モデル東端までの距離と石鎚山脈北縁西部区間の西端から解析モデル西端までの距離がそれぞれ約 51km となる。

b) 全断層面を設定した場合の計算規模・計算時間に関する検討

最終年度における業務計画では、ほぼ四国全域にわたる断層面をモデル化して取り扱う必要があるため、計算規模が大きくなることが予想される。このため、現時点で保有しているワークステーションの計算能力並びに用いる予定の連立一次方程式の数値解法(直接法)で四国全域にわたる有限要素モデルを実用的な計算時間で取り扱うことができるかどうかについては、重要な検討事項となる。仮に、計算規模が膨大で実用的な計算時間とならない場合、ワークステーションの増強やより効率的な連立一次方程式の解法の実装など、業務計画が大幅に変更される可能性がある。

図 18 は計算規模・計算時間についての検討を実施するための断層面モデルであり、今回のプロジェクトで取り扱う予定の断層面を全て含んでいる(讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間)。ここで、各断層面は J-SHIS に収録されているデータ(特に断層線の緯度経度情報)を参考にして作成している。各断層面の傾斜角は簡単のため、全て 90° と仮定した。また、各断層の幅も全て 15km と仮定した。なお、各断層面上端は地表面まで到達している設定としている。讃岐山脈南縁東部区間の断層線の走向は $N77^\circ E$ 、讃岐山脈南縁西部区間の断層線の走向は $N76^\circ E$ 、石鎚山脈北縁区間の断層線の走向は $N74^\circ E$ 、石鎚山脈北縁西部区間の断層線の走向きは $N69^\circ E$ である。このモデルでは、石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間がわずかに交差しているのが特徴である。

図 19 は、図 18 に対応する有限要素メッシュを示している。モデル化領域は、 $310\text{km} \times 310\text{km} \times 40\text{km}$ の直方体領域であり、約 93 万個の四面体 2 次要素から成っている。断層面の領域は、一辺の長さがほぼ 500m である 3 角形 2 次要素から成っている。このモデルに対応する連立一次方程式の自由度は、約 405 万次元となる。今回示した有限要素メッシュに対しては、1 回あたりのシミュレーション時間は約 8 分であり、実用的な計算時間となった。したがって、現行のシステムおよび数値解法で十分対応可能であり、ワークステーションの増強や連立一次方程式解法の刷新の必要性はないと判断した。

c) 右横ずれを生じさせる広域応力場の範囲についての検討

今回モデル化の対象となる全ての断層は、右横ずれしていることが現地調査からわかっている。各断層帯について、ずれの様式が右ずれであることを示した調査結果は、次のとおりである。讃岐山脈南縁東部区間：岡田(1970)；岡田・堤(1997)、讃岐山脈南縁西部区間：岡田(1968)；岡田(1970)；岡田(1973)、石鎚山脈北縁：岡田・他(1998)。これを受けて、有限要素解析においても全ての断層面に右横ずれが生じる広域応力場をまずは検討しておく必要がある。ここでは、最大主応力方位をパラメータ θ として(図 20)、 θ を -90° から 90° まで 15° 刻みで変化させた。各 θ について有限要素解析を実施し、各断層線上の横ずれ量の平均値を θ とともにプロットしたものが図 21 である。

図 21 は θ を横軸に、各断層面の横ずれ量の平均値を縦軸にとってプロットしたもので、

縦軸の数値が正值である場合は右横ずれを、負値である場合は左横ずれをそれぞれ示している。図 21 より、讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間の全ての断層面が右横ずれとなる θ の範囲は -60° (N30° W) $\leq \theta \leq 0^\circ$ (N90° W) の範囲でなければならないことがわかる。なお、 θ が -30° (N60° W) 程度で右横ずれが最大化される。

既往の文献で、四国地域の広域応力場についての報告が様々な手法に基づいてなされている。例えば、微小地震の震源メカニズム解より、四国中東部の主応力軸の方位は、北西－南東から西北西－東南東方向と求められている（木村・岡野，1992）。また、四国中央部の佐々連鉱山における応力解放法による地殻応力測定結果（2地点分）によれば、最大主応力方位は、ほぼ東西圧縮（N77° W と N83° W）と報告されている（西日本地殻応力調査班，1980）。これらの他、四国西部の佐田岬半島ではボアホールブレイクアウトの結果に基づいて最大主応力方位が N85W と推定されている（Onishi・他，2016）。以上から、四国地域の広域応力場は、ほぼ東西圧縮であると推察できるため、数値シミュレーションから求まる範囲は既往の知見と整合的であると言える。

d) 断層変位についての既往調査結果との比較

今回作成した解析モデルについて、最大主応力軸を N60° W と設定した場合の断層面上すべり分布を図 22 に示す。計算結果から、讃岐山脈南縁東部区間で最大 5.2m 程度、讃岐山脈南縁西部区間で最大 6.2m 程度、石鎚山脈北縁西部区間で最大 4.8m 程度のすべり（ネット値）が算出された。これらのすべり分布から右横ずれ成分を抽出し、断層線に沿って右横ずれ量をプロットしたものが、図 23 である。断層面が 1 枚の場合の変位分布形態は、図 13 に示すように断層中央部に対して対称となるが、図 23 の各断層面については対称となっていない。この結果は近接する断層面間の相互作用の結果、対称性が喪失したためと考える。とりわけ、石鎚山脈北縁西部区間の分布形態は、石鎚山脈北縁区間と断層面が交差するため、図 13 と比べて分布形態が大きく異なっていることがわかる。

図 24 は、図 23 で示した各断層面上の右横ずれのピーク値と、中央構造線断層帯全体に対して調査された最新活動に伴う横ずれ変位量分布（堤・後藤，2006）を比較した結果である。石鎚山脈北縁西部区間ではシミュレーションから得られたピーク値 4.8m は、調査結果に比べてわずかに大きいように見える。また、石鎚山脈北縁区間ではシミュレーションから得られたピーク値が実測結果に比べて小さくなる傾向が確認できる。差異が生じる明確な原因は不明であるが、断層面の交差部が存在する等、断層面間の相互作用が存在しているためと推察できる。石鎚山脈北縁西部区間および石鎚山脈北縁区間を除く断層帯については、調査結果と概ね整合的である。石鎚山脈北縁区間については、近隣断層面との連結性等を考慮し、現地調査結果をより説明できる断層面モデルを今後検討する必要がある。同様に、他の断層面についても来年度以降に得られる最新の調査結果を断層面モデルに反映させる必要がある。

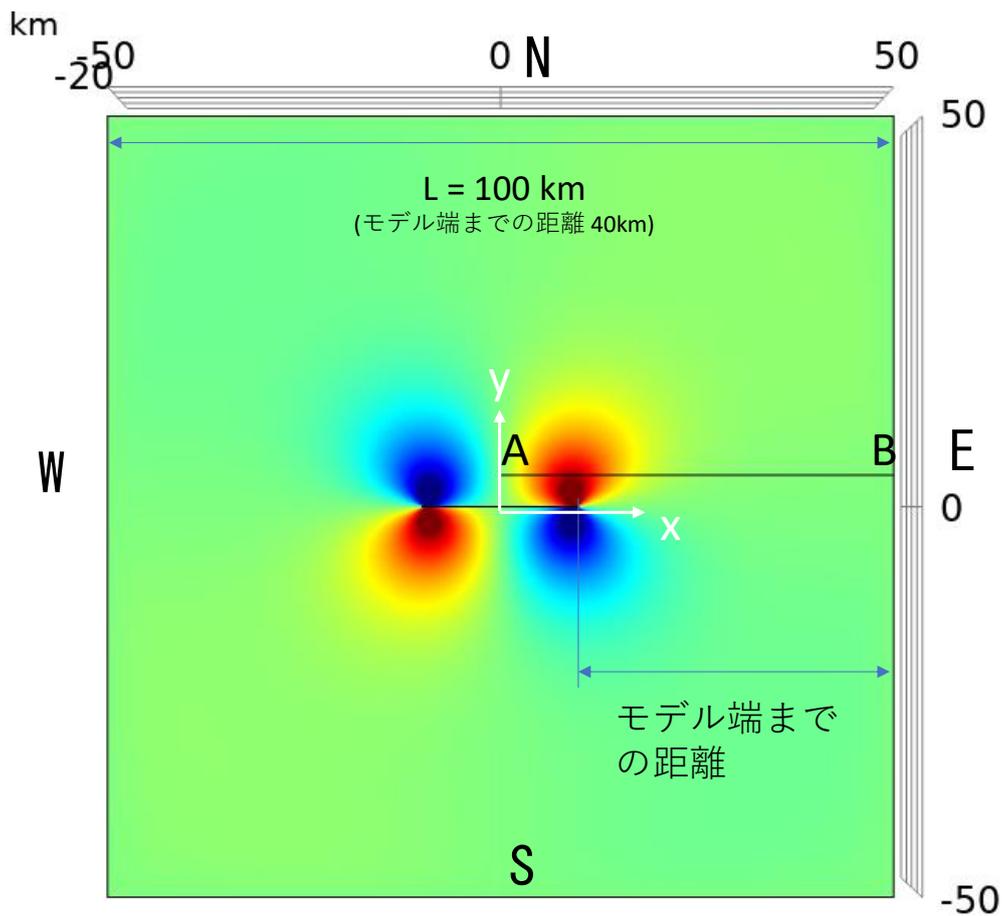


図 12 モデル境界が断層変位に及ぼす影響を検討するための解析モデル (Lが 20km から 160km まで変化, 最大主応力方位は N45° W)。

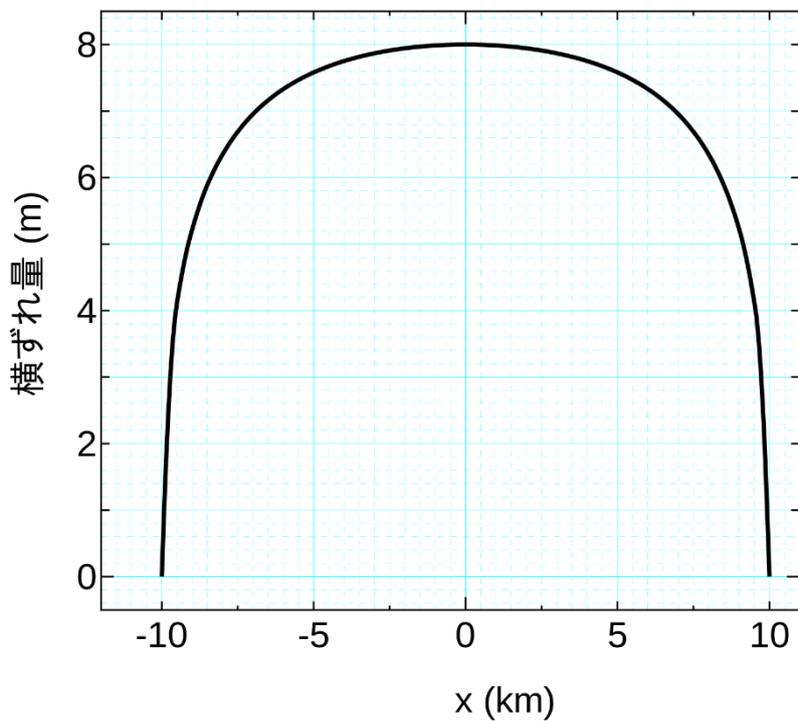


図 13 断層線上の横ずれ分布 (断層線中央部で 8 m となるように調整)。

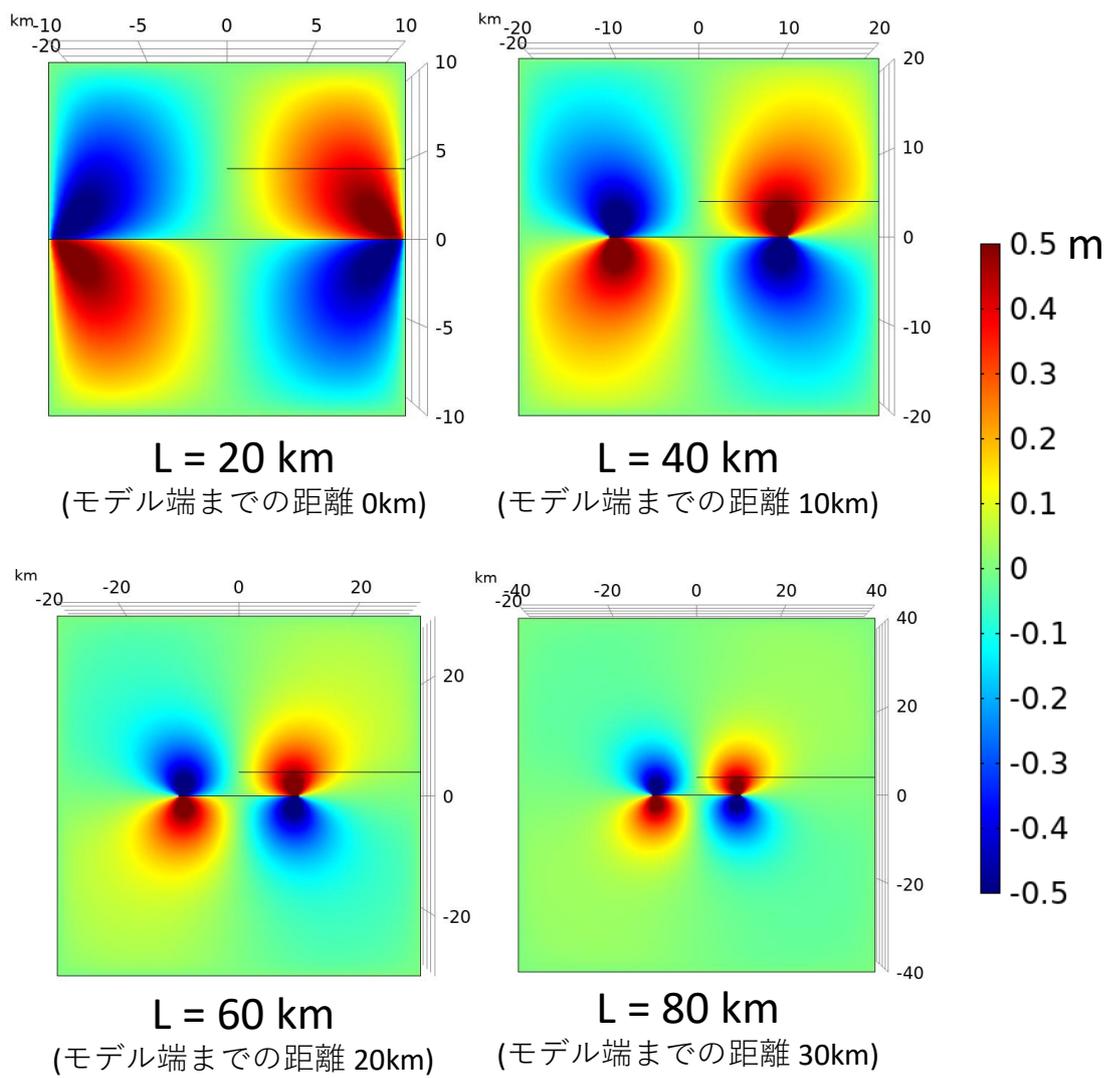


図 14 地表変位の上下成分 (L=20, 40, 60, 80km のケースについて)。

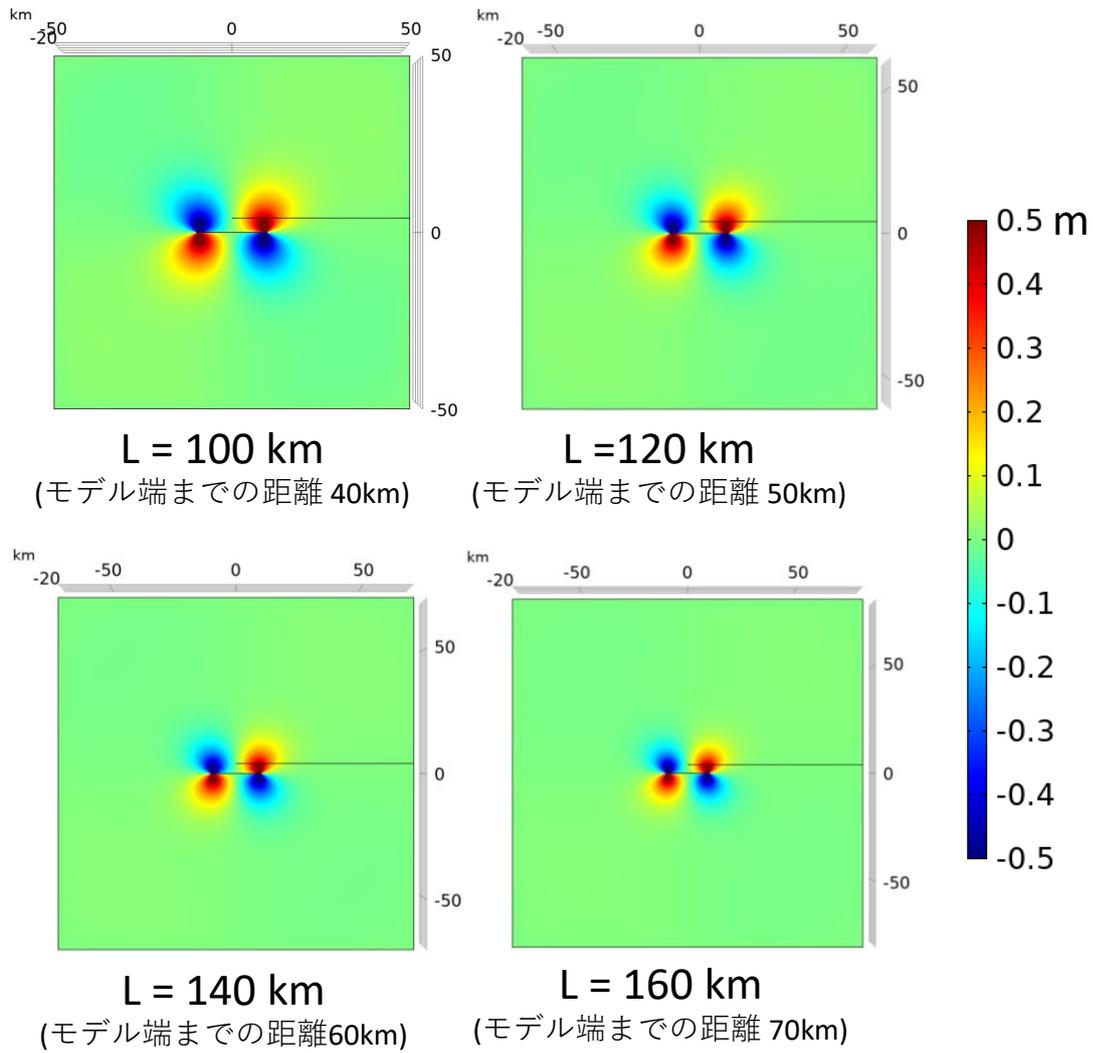


図 15 地表変位の上下成分 (L=100, 120, 140, 160km のケースについて)。

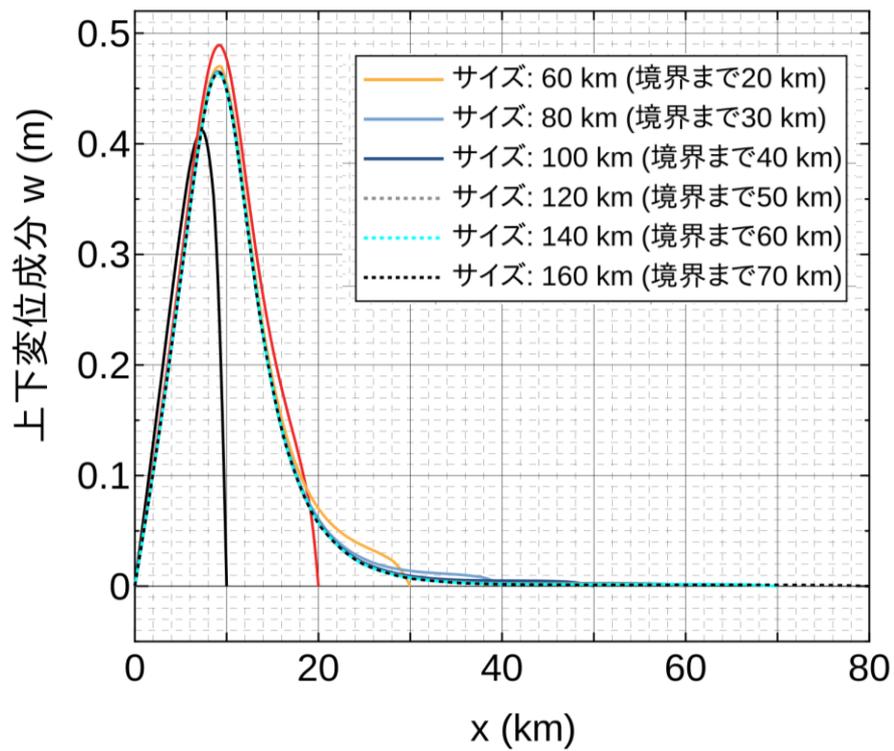


図 16 ライン A-B 上の上下変位成分分布
($L=20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160$ km の各ケースについて表示)。

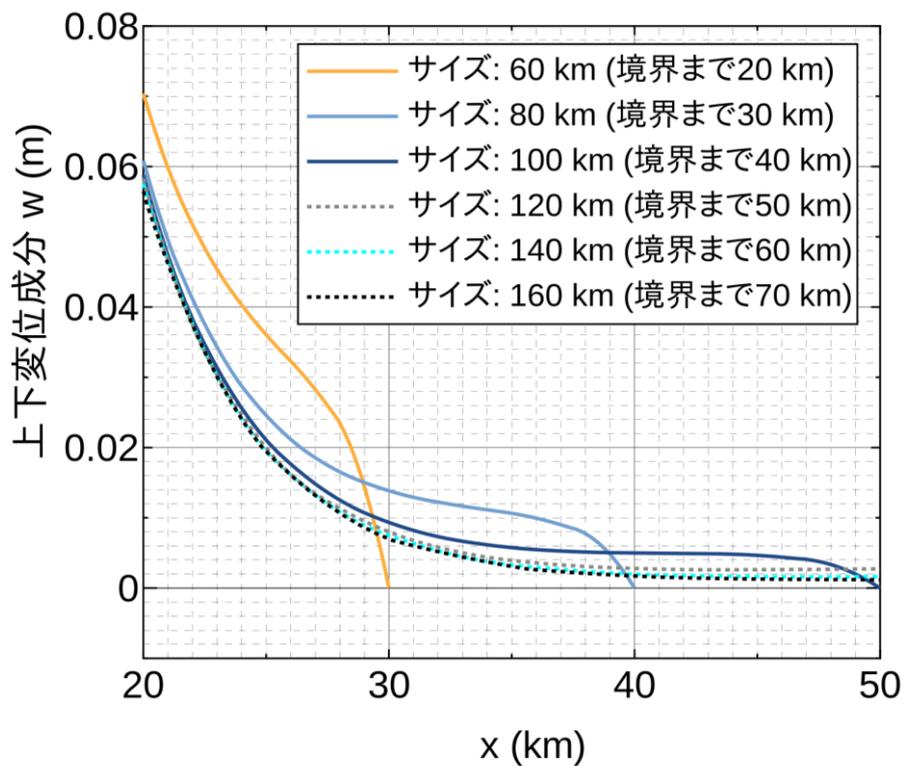


図 17 ライン A-B 上の上下変位成分分布 (図 16) の拡大図
($20 \text{ km} \leq x \leq 50 \text{ km}$ の範囲)。

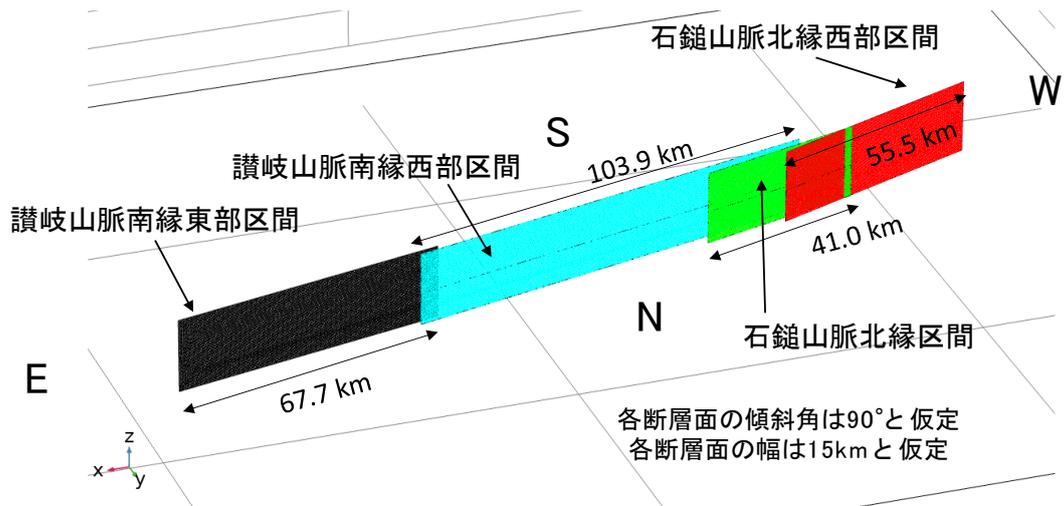


図 18 計算時間検討用の断層面モデル (J-SHIS の情報から作成)。

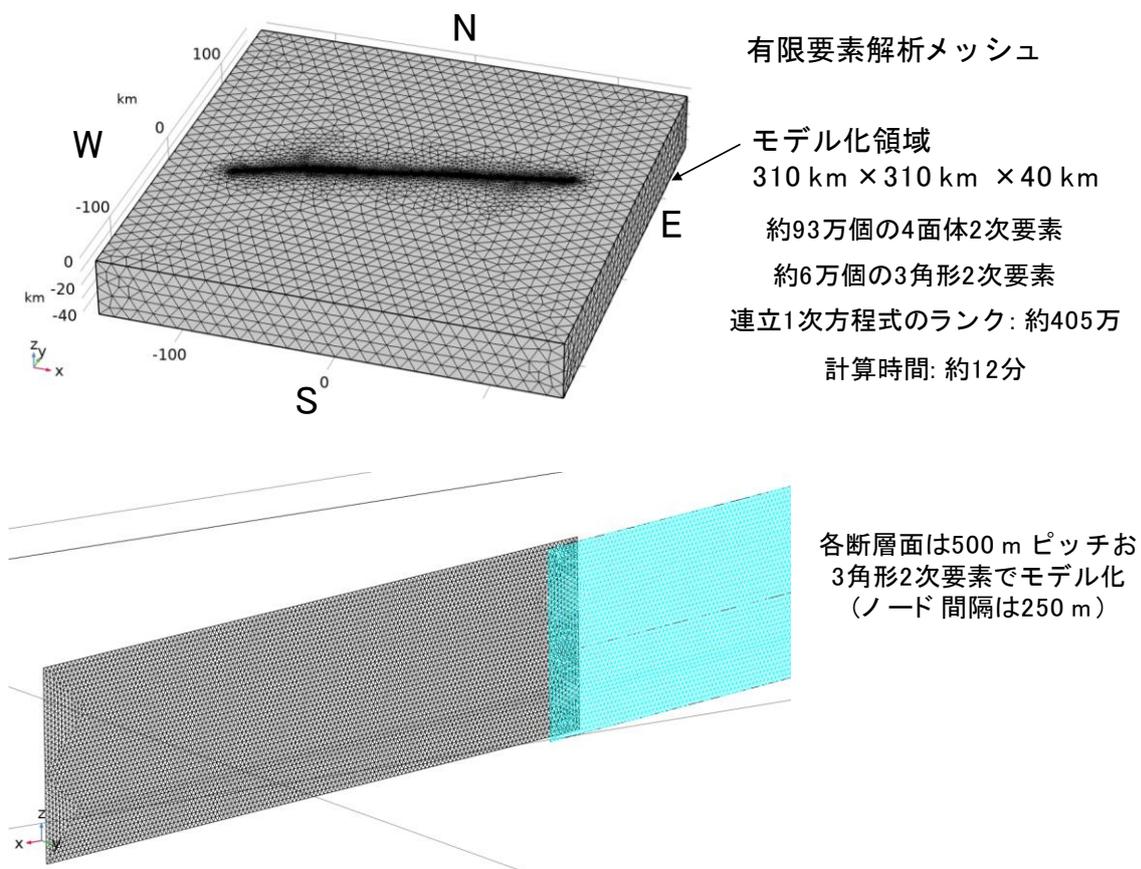


図 19 図 18 の断層モデルに対する有限要素メッシュ。

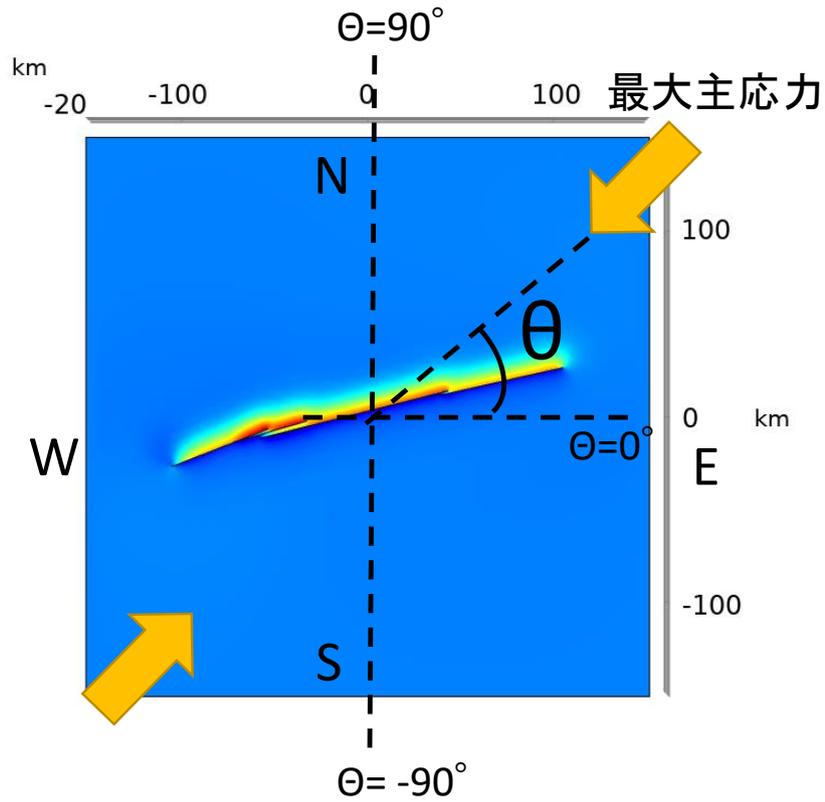


図 20 最大主応力の方位に関するパラメータ θ (-90° から 90° まで 15° 刻みで変化)。

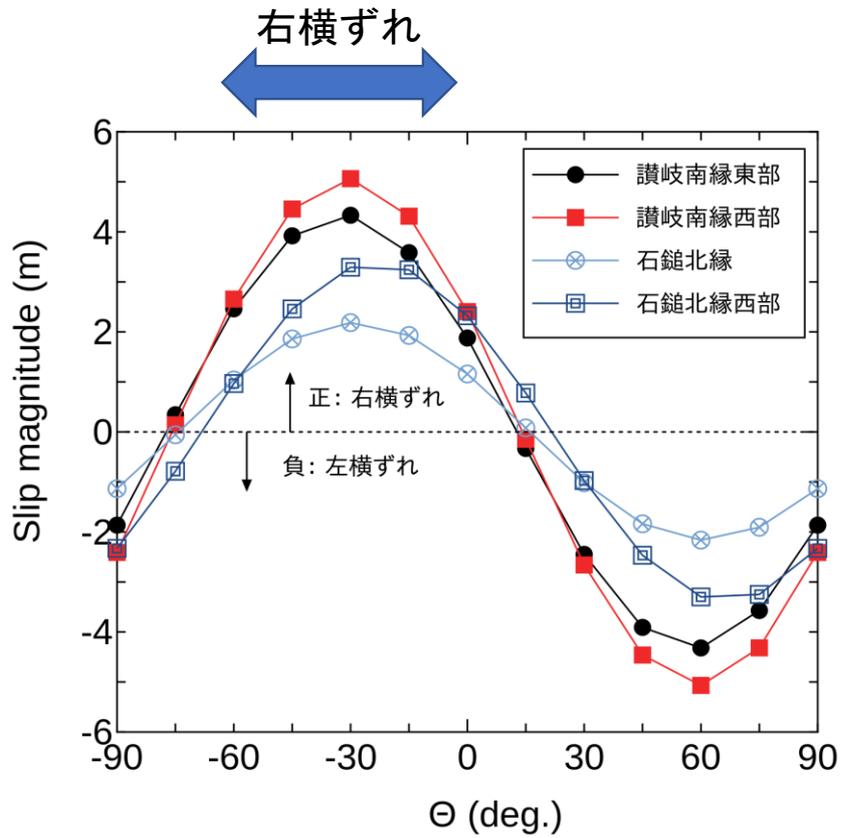


図 21 全ての断層面に右横ずれが生じる θ の範囲 ($-60^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$)。

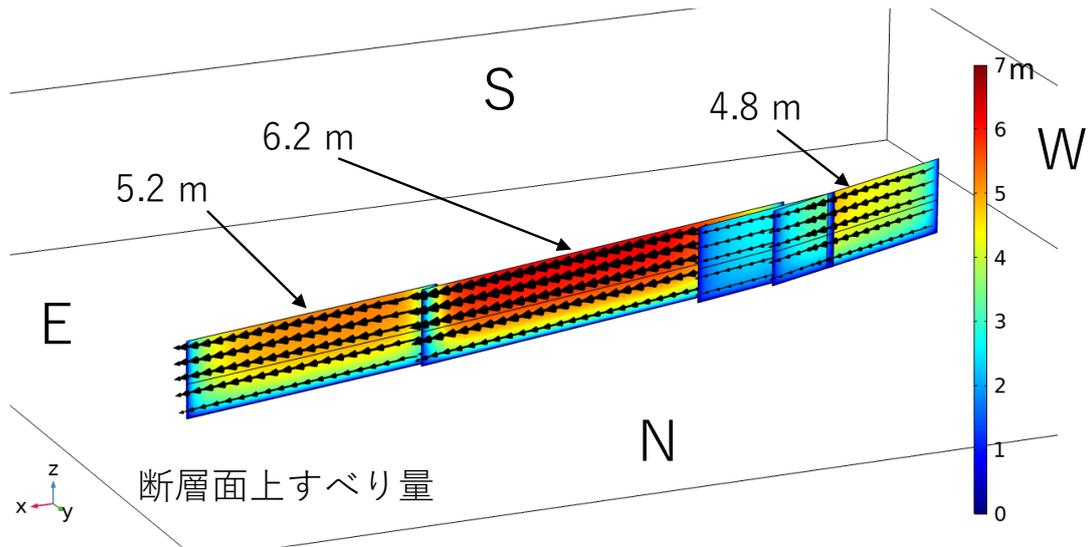


図 22 最大主応力方位を $N60^{\circ}W$ とした場合における各断層面上でのすべり量（ネット値）分布。

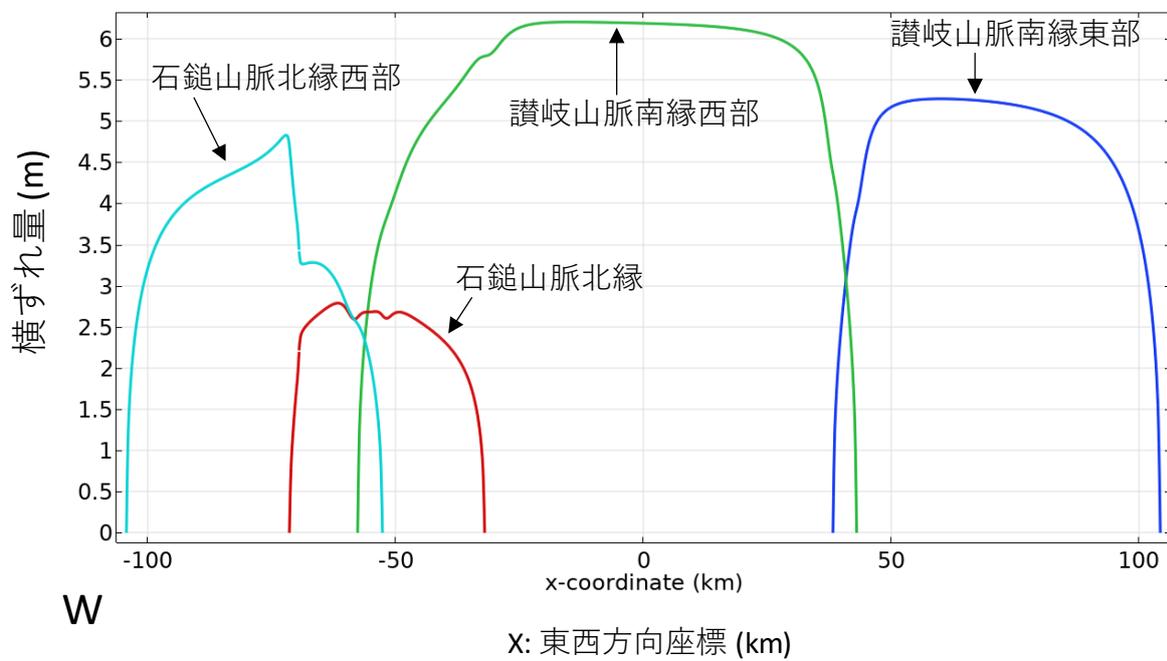


図 23 地表での断層線に沿う右横ずれ量の分布様式（最大主応力方位： $N60^{\circ}W$ ）。

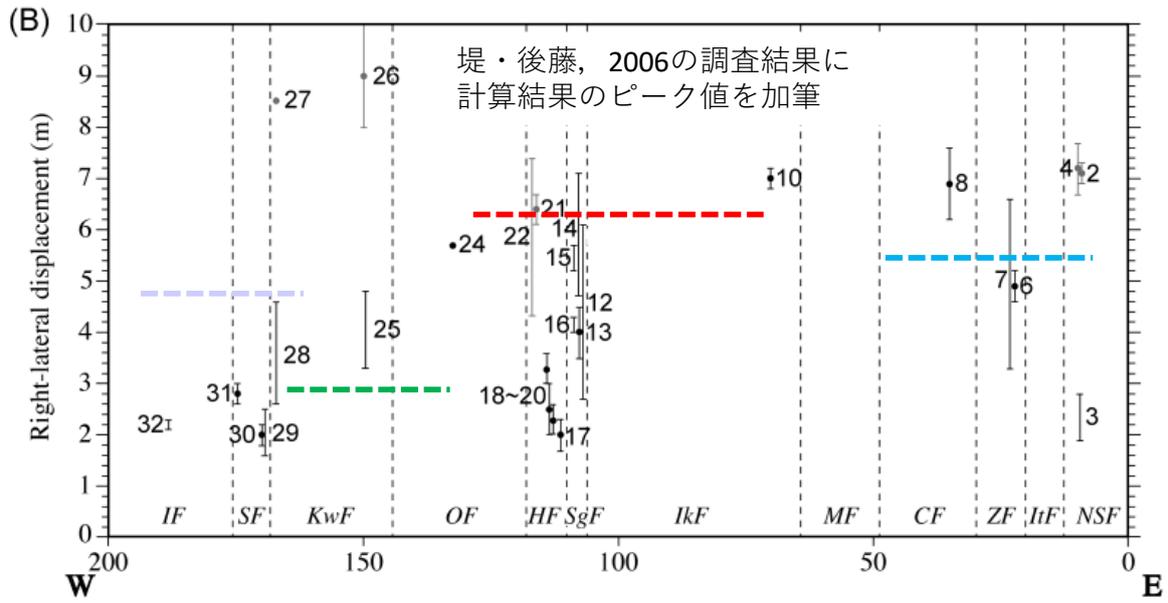


図 24 図 23 の右横ずれ量分布のピーク値（水色点線：石鎚山脈北縁西部区間、緑点線：石鎚山脈北縁区間、赤点線：讃岐山脈南縁西部区間、青点線：讃岐山脈南縁東部区間）と既往調査結果（堤・後藤, 2006）との比較。

2) 四国地方の中央構造線断層帯に対する三次元有限要素メッシュの高度化および北傾斜仮説・高角傾斜仮説の検討（令和3年度実施）

a) 有限要素メッシュの高度化

図 25 は計算規模・計算時間についての検討を実施するための断層面モデルであり、今回のプロジェクトで取り扱う予定の断層面を全て含んでいる（讃岐山脈南縁東部区間、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、石鎚山脈北縁西部区間）。ここで、各断層面は J-SHIS に収録されているデータ（特に断層線の緯度経度情報）を参考にして作成している（防災科学技術研究所、2022 年 3 月 29 日閲覧）。図 25 は、各断層面の傾斜角を全て 90° と設定した場合について図示している。また、各断層の幅も全て地下 15km までと設定した。なお、各断層面の上端は地表面まで到達している設定としている。讃岐山脈南縁東部区間の断層線の走向は $N77^\circ E$ 、讃岐山脈南縁西部区間の断層線の走向は $N76^\circ E$ 、石鎚山脈北縁区間の断層線の走向は $N74^\circ E$ 、石鎚山脈北縁西部区間の断層線の走向は $N69^\circ E$ である。このモデルでは、石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間がわずかに交差しているのが特徴である。今年度は、昨年度作成したプロトタイプの有有限要素メッシュについて、全ての区間に対して地下の任意深さで断層面の折れ曲がりを追加できるようプログラム改変を実施した。後に示すように、この機能を用いて北傾斜仮説を検討するための有限要素モデルを作成している。

図 26 は図 25 に対する有限要素メッシュであり、断層面を含む $310\text{km} \times 310\text{km} \times 40\text{km}$ の直方体領域についてモデル化したものであり、約 93 万個の四面体 2 次要素から成っている。なお、断層面の領域は、一辺の長さがほぼ 500m である三角形 2 次要素から成っている。このモデルに対応する連立一次方程式の自由度は、約 405 万次元となる。図 26 で示した有限要素メッシュに対しては、1 回あたりのシミュレーション時間は約 12 分であり、実用的な計算時間となることを確認している。

b) 中央構造線断層帯の北傾斜仮説および高角仮説に対する既往研究

四国地方の中央構造線断層帯の傾斜が北傾斜であるとする仮説は、主として 1996 年に実施された反射法地震探査で得られた地層分布に対する解釈に基づいている（伊藤・他、1996; Ito et al., 1996）。彼らは、徳島県脇町から国道 193 号線を北上して香川県側の領家花崗岩分布域に至る 15.5km の測線を設定し、測線に沿って反射法地震探査、重力探査、比抵抗探査を実施している。彼らは探査結果をもとに、三波川変成岩類／和泉層群と領家花崗岩類の境界としての中央構造線（以下、物質境界 MTL）と、活断層としての中央構造線（以下、活断層 MTL）の関係を議論している。反射法地震探査結果の解釈より物質境界 MTL の傾斜は深度 5 km 程度までは北に $30 \sim 40^\circ$ 傾斜していることを指摘しており、活断層 MTL は物質境界 MTL から分岐した断層が地表近傍で高角化しているとする仮説（図 27、以下、北傾斜仮説）および活断層 MTL は物質境界 MTL と独立して高角断層として存在している仮説（図 28、以下、高角仮説）を提示している。

Kawamura et al. (2003) は、伊藤らの反射法地震探査の測線を北側に延長した測線に対する反射法地震探査を実施しており、15km 程度までの深度に対する反射断面を得ている。反射断面の解釈結果より、伊藤らの解釈にある物質境界 MTL から繋がる北傾斜の地層境界面の存在を示唆している。また、2002 年四国-瀬戸内海横断地殻構造探査の成果（Ito et al., 2009）においても物質境界 MTL の北傾斜を示すと考えられる解釈が提示されている。

以下に示す本事業内での検討は、「活断層 MTL」が北傾斜しているか高角なのかを力学的な観点から検討する内容であり、物質境界 MTL に関する議論ではないことに留意されたい。

c) 仮説検討のための 3 種類の有限要素モデル

北傾斜仮説および高角仮説を検討するため、ここでは図 29 から図 31 に示す 3 種類のモデル (Model-01、Model-02、Model-03) を用意した。

図 29 に示す Model-01 は、伊藤・他 (1996) および Ito et al. (2009) での解釈図をトレースすることで作成したもので、物質境界 MTL とそれに付随する副断層を模擬している。両断層面ともに傾斜角は 30° 程度であった (解釈図のトレース結果)。このモデルは、断層面を物質境界 MTL とその副断層のみで構成した際、どのような断層変位が生じるのかを検討する目的で作成している。すなわち、活断層 MTL が物質 MTL と一致しているケースと考えることができる。なお、広域応力場の最大主応力方向は南北方向から東西方向まで 15° 刻みで変化させおり、各ケースについてシミュレーションを実施している。

図 30 に示す Model-02 は、広域応力場の最大主応力方向と活断層 MTL の傾斜角を様々に変化させた場合の変位様式を検討するものである。最大主応力方向は、 $N45^\circ W$ 、 $N60^\circ W$ 、 $N75^\circ W$ 、東西圧縮 ($N90^\circ W$) の 4 ケースを、活断層 MTL の傾斜角は 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 80° 、 85° 、 90° の 7 ケースを設定しており、合計 28 ケースのシミュレーションを実施している。シミュレーションから得られる変位分布 (特に上下変位分布) と地形の起伏・既往調査結果で得られている地表変位様式を比較することで、合理的な活断層 MTL の傾斜角を推定しようとするものである。

図 31 に示す Model-03 は、物質境界 MTL から活断層 MTL が分岐して地表近傍で高角化したケースを模擬するもので、伊藤・他 (1996) の提案されている仮説の一つと対応する。なお、Model-03 についても、Model-02 同様、広域応力場の最大主応力方向についてのパラメトリックスタディーを実施している ($N45^\circ W$ から東西圧縮、4 ケース)。また、地下の物質境界 MTL の傾斜角についても 40° の場合と 45° の場合を検討している。

d) 各モデルの上下変位分布と地形の起伏との比較

図 32 から図 34 は、図 29 で示した Model-01 に対する上下変位分布を示している。図 32 は、最大主応力方向を南北方向としたものであり、物質境界 MTL を模した主断層と副断層で区切られる領域がポップアップしている状態が確認できる。当然ながら、主断層・副断層ともに断層面上でのすべり変位様式はピュアな逆断層で確認される変位様式となっている。図 33 は、最大主応力方向を $N45^\circ W$ と設定した場合の上下変位分布を示している。断層面上の変位様式はピュアな逆断層状態ではなく斜めずれを呈する状態となっているが、図 32 と同様に主断層と副断層で区切られる領域はポップアップしていることが確認できる。図 34 は、最大主応力方向を $N60^\circ W$ と設定した場合の上下変位分布を示している。図 32 や図 33 に比べて斜めずれの成分が大きくなって上下変位成分が相対的に小さくなっているものの、依然として主断層と副断層で区切られた領域はポップアップしていることがわかる。また、図 33 や図 34 で確認できるように、主断層近傍の隆起よりも副断層近傍の隆起が卓越していることが見て取れる。以上のように、今回実施したパラメトリックスタディーの範囲では Model-01 はどのような最大主応力方向に対しても主断層と副断層で区切られる領域がポップアップする結果となった。物質境界 MTL を模した主断層とその副断

層と考えられる断層で区切られる領域全体のポップアップは既往研究で確認されていない上、地形の起伏と調和しないと判断できる。Model-01 に対するパラメトリックスタディーから、Model-01 で示した断層面配置は力学的な観点からは不合理と結論できる。

図 35 から図 37 は、図 30 で示した Model-02 について N60W の方向に最大主応力を载荷した場合に対する上下変位分布を各傾斜角 (30°、60°、90°) について示している。図 35 は、全ての断層面の傾斜角を北傾斜 30° と設定した場合に対応する上下変位分布である。全ての区間で断層線の北側で隆起が、断層線の南側で沈降が生じており、典型的な逆断層に見られる変位様式 (上盤隆起、下盤沈降) となる。この傾向は今回設定したいくつかの最大主応力方向に依らず確認できる。図 37 は断層面の傾斜角を 90° とした場合であり、断層線端部を除いて上下変位は認められない (ピュアな横ずれ)。

図 38 は、図 35 で示した上下変位分布 (北傾斜 30° のケース) を地理院地図 (陰影起伏図) に重ねて表示したものである。Model-02 で北傾斜 30° と設定した場合、燧灘近傍で最大隆起が確認されるため、海域が隆起することになる。ところが、実際は海域となっているため地形の起伏と調和しない。同様に、断層線の南側では沈降する変位様式となるが、この点についても実際の地形の起伏と調和しない。以上、Model-02 についてのパラメトリックスタディーより、断層面傾斜角を低角の北傾斜と設定した場合、上下変位分布様式が地形の起伏と調和しないことがわかった。この結果も活断層 MTL に対する北傾斜仮説を棄却するものである。

図 39 は、図 31 で示した Model-03 に対する上下変位分布を示している。同図は、各断層面の傾斜角について地下 1 km 以浅で 90°、地下 1 km 以深では 40° と設定したケースに対応する。Model-02 で示した上下変位分布の特徴と同じく、断層線北側では隆起が、断層線南側では沈降が確認される。この上下変位分布を地理院地図 (陰影起伏図) と重ねて示したものが図 40 であるが、Model-02 に対する議論と同様に燧灘での隆起がシミュレーション結果では確認されるなど、地形の起伏と調和しない結果となっている。なお、この傾向は地下 1 km 以深での断層面傾斜角を 45° と設定した場合も同様の結果が得られている。

既往研究で提案された活断層 MTL の北傾斜仮説と高角仮説を、有限要素解析によって力学的な観点から検討した。今回検討した 3 種類の断層面モデルからは、いずれの場合も北傾斜仮説を棄却する結果が得られた。このような知見は、多数の数値シミュレーションを実施することでのみ得られる知見であり、断層面配置に関する仮説の検証に数値シミュレーションが有効であることを示している。次節では、断層線上すべりの上下変位量と水平変位量の比に着目することで、活断層 MTL の傾斜角に関する考察を加える。

e) 断層線上すべり量分布 (Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間を対象として)

図 41 から図 46 は、Model-02 における讃岐山脈南縁西部区間の断層線上でのネットスリップ量・上下/水平変位比を各傾斜角 (30°、45°、60°、80°、85°、90°) について示したものである。ネットスリップ量の大きさについては、最大主応力方向に対する依存性が図 41(a) から図 46(a) の全てのケースについて確認できる。断層面傾斜角が 60° 程度までは (図 41-図 43)、最大主応力方向を N45° W と設定するケースでネットスリップ量が大きくなることがわかる。断層面傾斜角が 70° 程度から鉛直の範囲では、最大主応力方向を N60° W と設定することでネットスリップ量が最大化されることが確認できる。傾斜角が

30° の場合 (図 41(a)) は、最大主応力方向を N45° W とすることで、8 m 程度のネットスリップが算出されている。また、傾斜角が 90° の場合 (図 46(a)) では最大主応力方位を N60° W とすることで 6 m 程度のネットスリップが算出されている。最新活動にともなう変位量に関する調査結果 (堤・後藤, 2006) によれば、讃岐山脈南縁西部区間の一部である池田断層に対する断層変位量 (右横ずれ) は、徳島県三好郡東みよし町山口で 7.0 ± 0.2 m と報告されている。また、同区間の一部である寒川断層に対する断層変位量 (右横ずれ) は、四国中央市寒川町で 4.7~7.1 m と報告されている。ネットスリップ量に対するシミュレーション結果は上述のとおり最大主応力方位依存性が認められるものの、調査結果程度の変位量が傾斜角と最大主応力方向の多くの組み合わせに対して確認できるため、変位量の大きさのみでは傾斜角と最大主応力方位に関する考察が困難となることに留意されたい。

一方、断層変位の上下変位成分と水平変位成分の比 (以下、上下/水平比) については、傾斜角に対する依存性が大きく、傾斜角に対する考察を加えるのに適した量であると考えられる。例えば、傾斜角が 30° の場合 (図 41(b))、全ての最大主応力方位について上下/水平比が 0.4 以上となっていることがわかる。他方、傾斜角が高角になればなるほど上下/水平比は小さくなっており、傾斜角が 90° の場合は、断層線端部を除く領域で上下/水平比は最大主応力方向に依らずほぼゼロとなっている。したがって、上下/水平比に対する調査結果が得られれば、北傾斜仮説・高角仮説に対する議論が進展するものと考えられる。

現時点では上下/水平比に対する測定結果は報告されていない。ただし、讃岐山脈南縁東部区間の平均変位速度 (推定値) が報告されており (地震調査研究推進本部, 2017)、父尾断層に対して上下: 0.6 m/千年、水平: 6 m/千年とされる。したがって、父尾断層では上下/水平比は 0.1 と推察できる。この比率が讃岐山脈南縁西部区間にそのまま適用できるかどうかは不明であるが、比較対象の一つと考えられる。上下/水平比が 0.1 程度となるケースは、傾斜角が 85° から鉛直の範囲に限られる (図 45(b)、図 46(b))。すなわち、今後のトレンチ調査等で上下/水平比が計測されてその値が 0.1 に近い数値であった場合、断層面はほぼ鉛直に近いと考えることができる。なお、30° で北傾斜する場合の上下/水平比は最大主応力方位に依らず 0.4 以上であるため (図 41(b))、上下/水平比が 0.4 以下のケースであれば高角仮説が支持される。

以上、活断層 MTL の断層面傾斜角に対する北傾斜仮説・高角仮説を力学的な観点から検討するため、3 種類のモデルを用意して有限要素解析を用いたパラメトリックスタディーを実施した。今回検討した範囲内では、北傾斜仮説は棄却できると考える。高角仮説を積極的に支持するシミュレーション結果は出ていないものの、父尾断層に対する平均変位速度の上下/水平比 (0.1) とシミュレーション結果の比較から、活断層 MTL の傾斜角が高角である可能性が示唆された。今後のトレンチ調査等による上下水平比の測定に期待したい。以上の検討は、様々に断層面を配置して主応力方向を変化させることができる有限要素解析によってのみなされることを強調しておく。

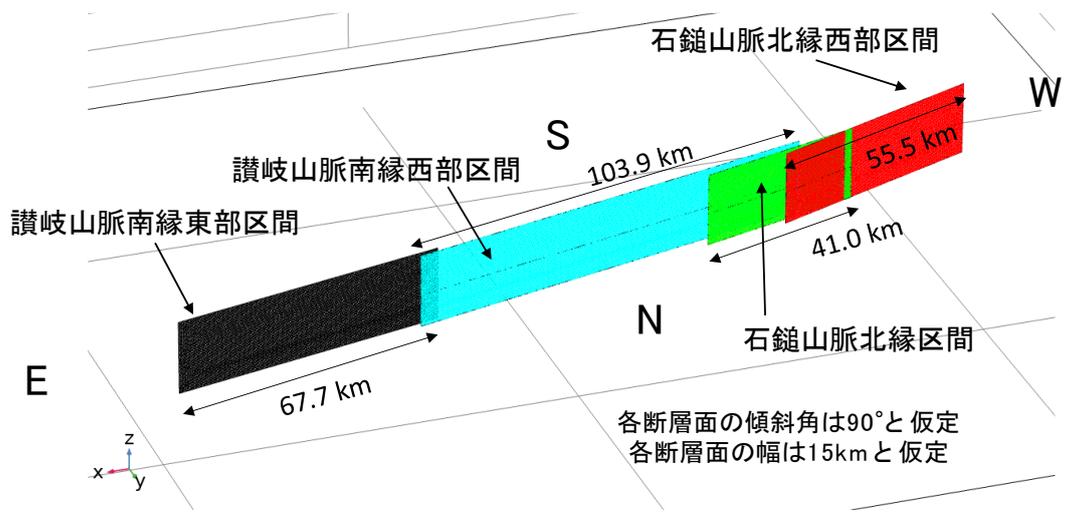


図 25 四国地方の中央構造線断層帯に対する断層面モデル（J-SHIS の情報から作成（防災科学技術研究所、2022 年 3 月 29 日閲覧））。

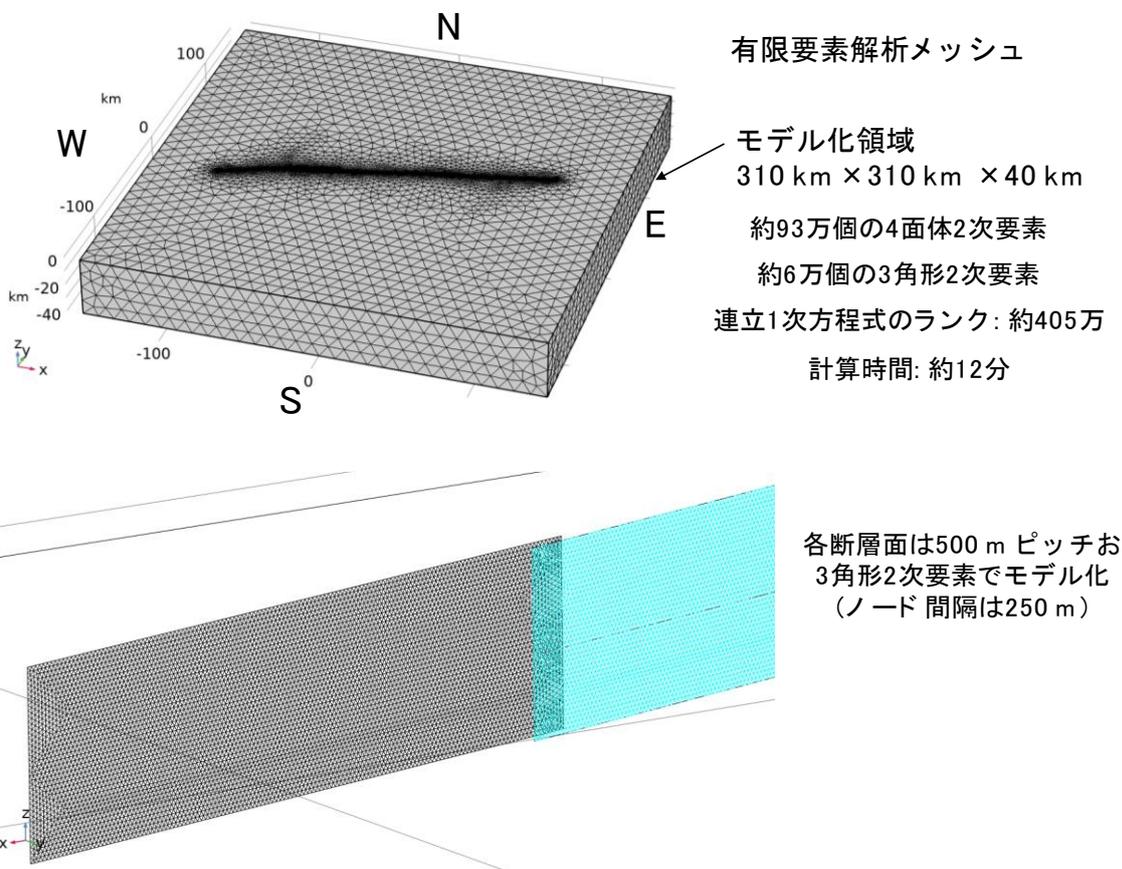
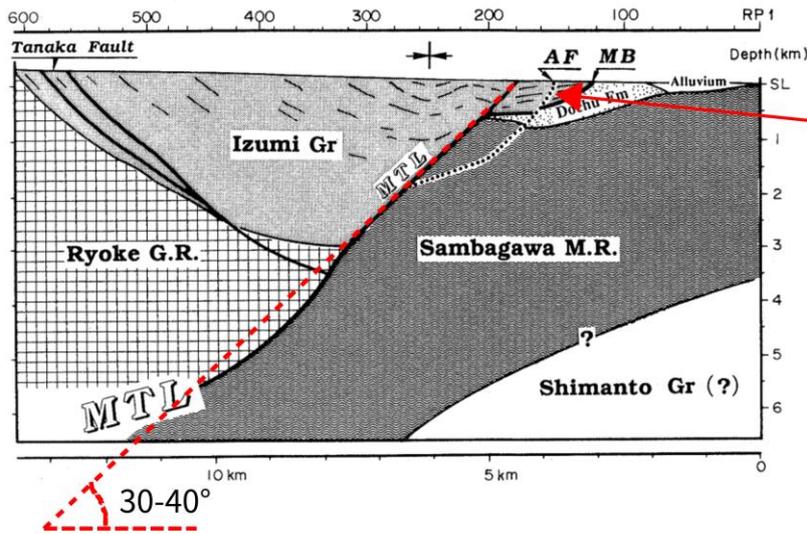


図 26 図 25 の断層帯モデルに対する三次元有限要素メッシュ。

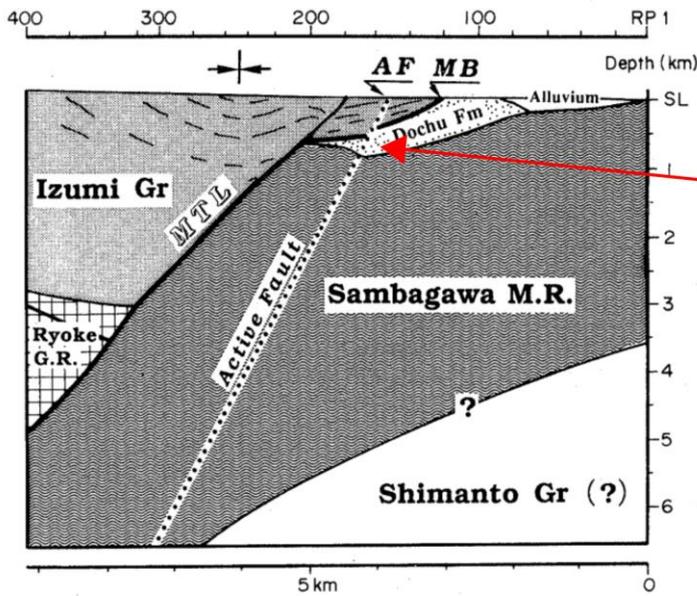


物質境界MTLから派生した
分岐断層としての活断層MTL
(黒点線)

白抜きMTL: 物質境界MTLを指す
AF: 活断層MTLを指す

Fig. 16. Interpretation of the sub-surface structure of MTL suggesting that the active fault MTL splays off the material boundary MTL.

図 27 物質境界 MTL から分岐して地表近傍で高角化した活断層 MTL についての仮説
(伊藤・他、1996 に加筆)。



物質境界MTLと独立して存在する活断層MTL
(黒点線)

白抜きMTL: 物質境界MTLを指す
AF: 活断層MTLを指す

Fig. 17. Interpretation of the sub-surface structure of MTL proposing that the active fault MTL is formed independently on the material boundary MTL.

図 28 物質境界 MTL から独立した高角な活断層 MTL についての仮説
(伊藤・他、1996 に加筆)。

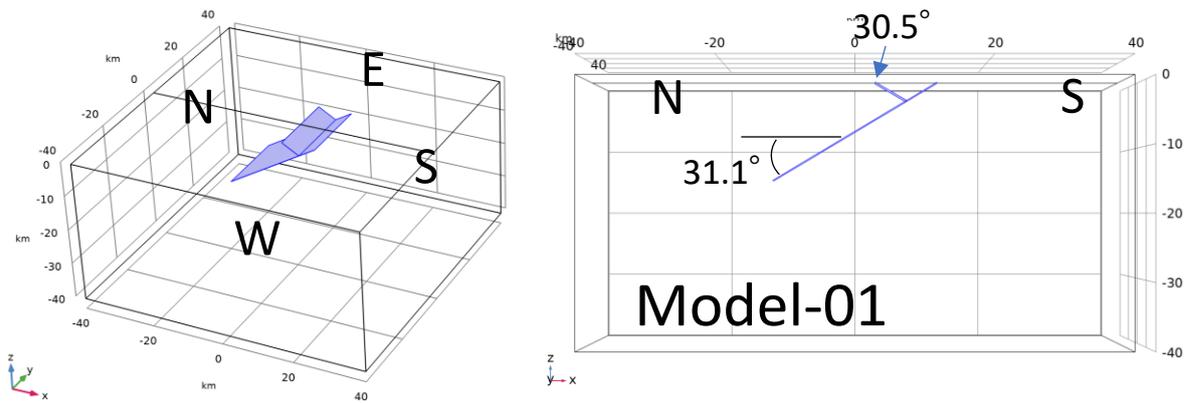


図 29 Model-01：物質境界 MTL とそのバックスラストを模擬したモデル
 (伊藤・他 (1996) の解釈図をトレースして作成)。

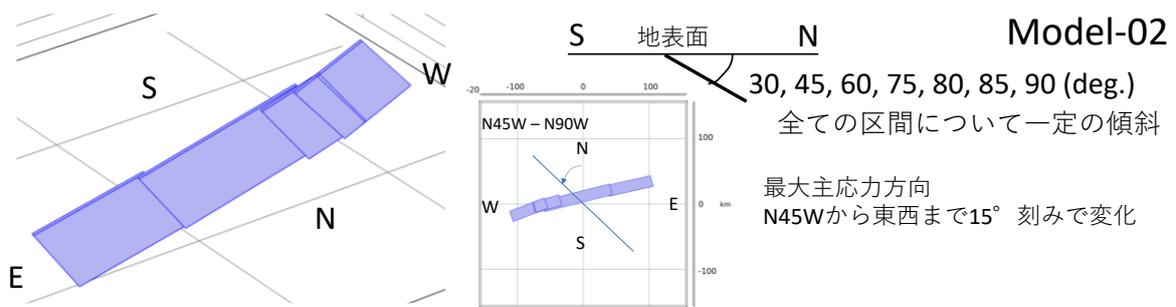


図 30 Model-02：広域応力場の最大主応力方向と活断層 MTL の傾斜角を変化させたモデル。

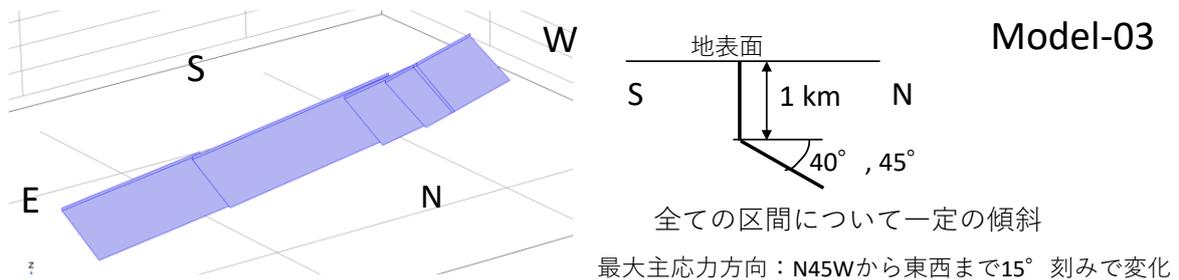


図 31 Model-03：活断層 MTL が地表近傍で高角化（地下 1 km まで鉛直）したモデル。

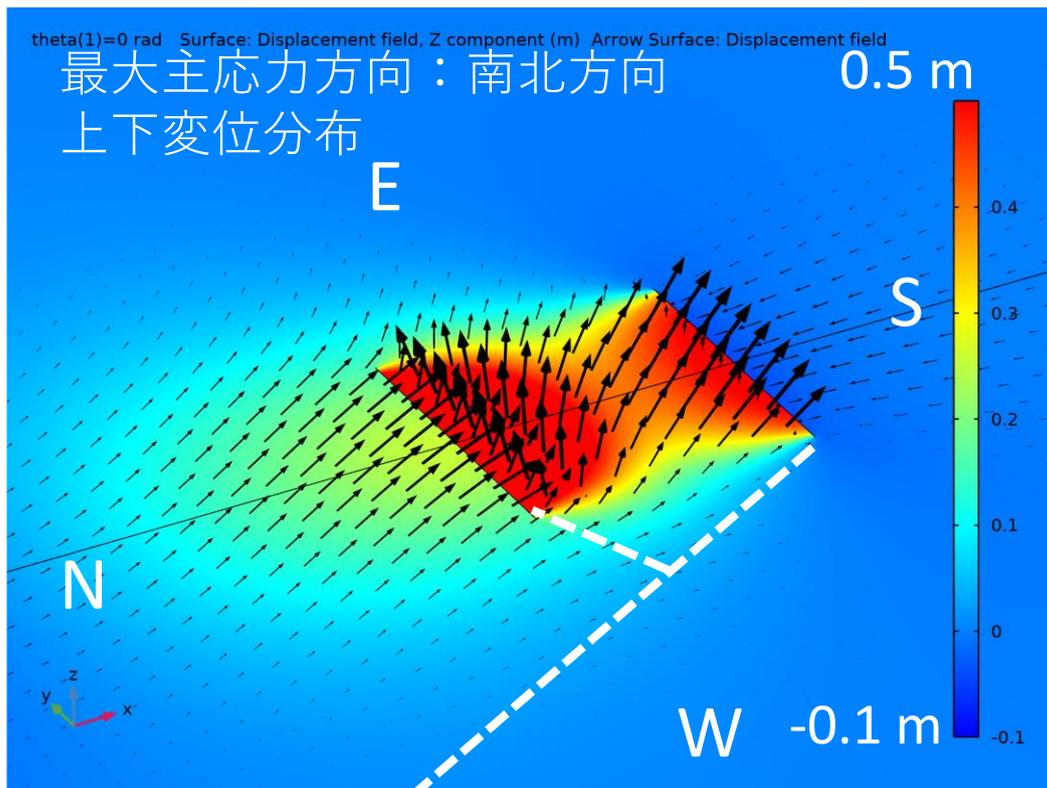


図 32 Model-01 の上下変位分布（最大主応力方向：南北方向）。

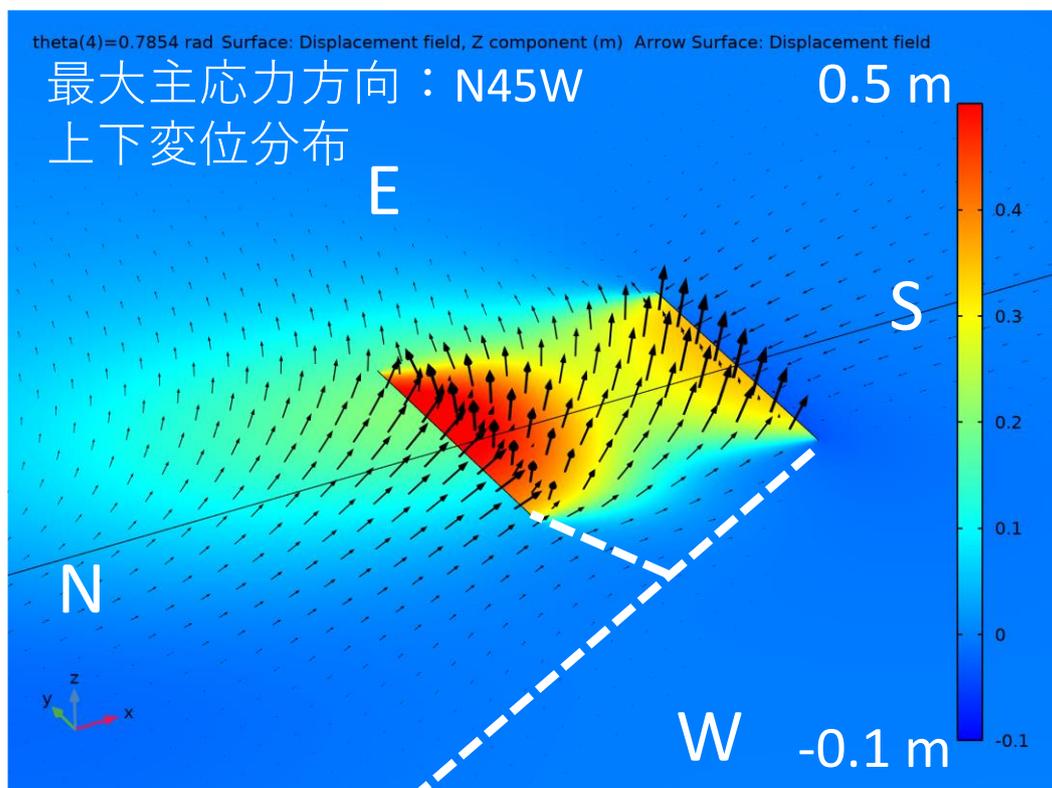


図 33 Model-01 の上下変位分布（最大主応力方向：N45° W）。

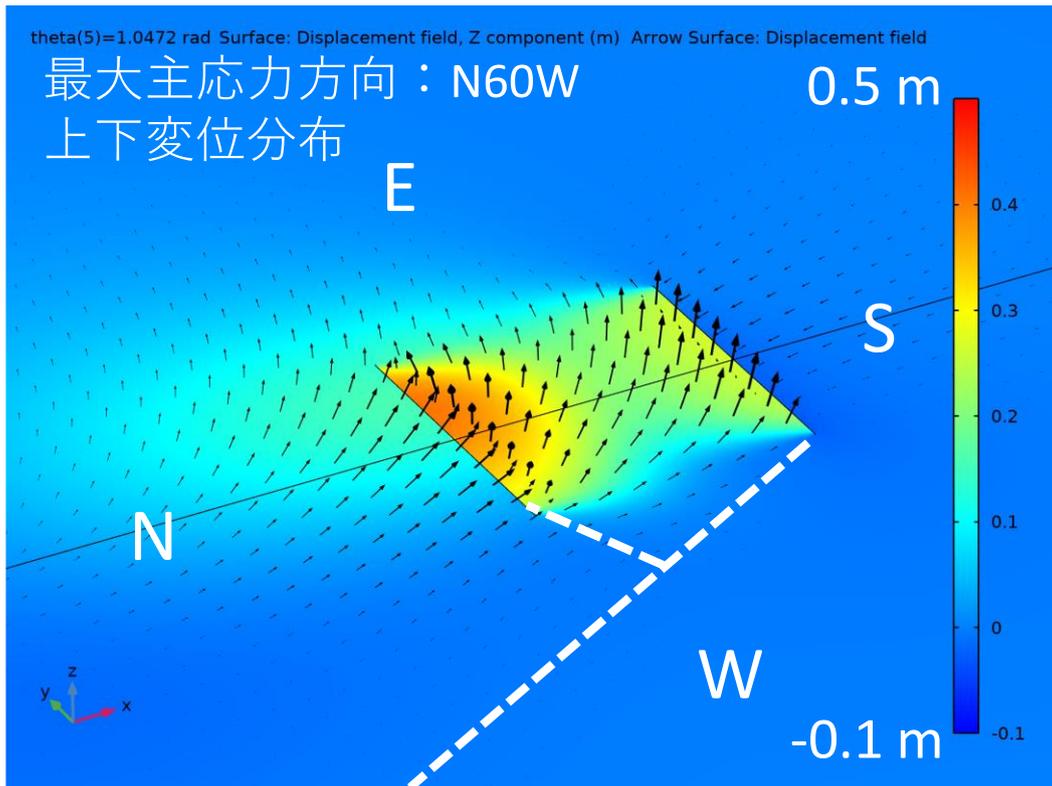


図 34 Model-01 の上下変位分布（最大主応力方向：N60° W）。

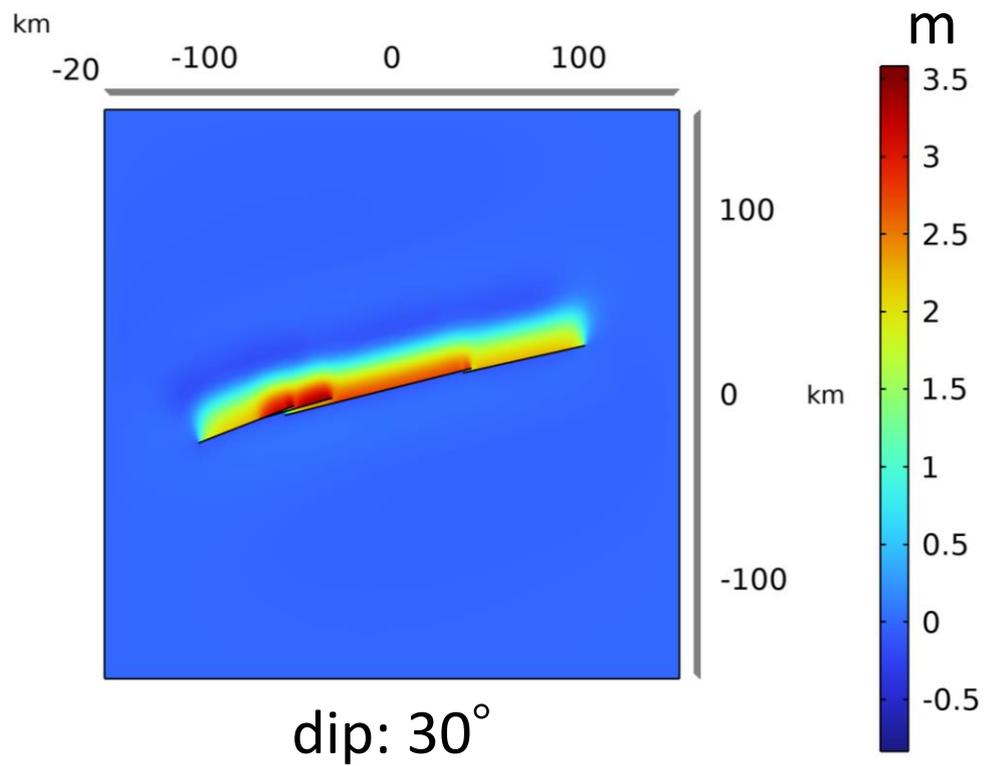


図 35 Model-02 の上下変位分布（傾斜角：30°、最大主応力方向：N60° W）。

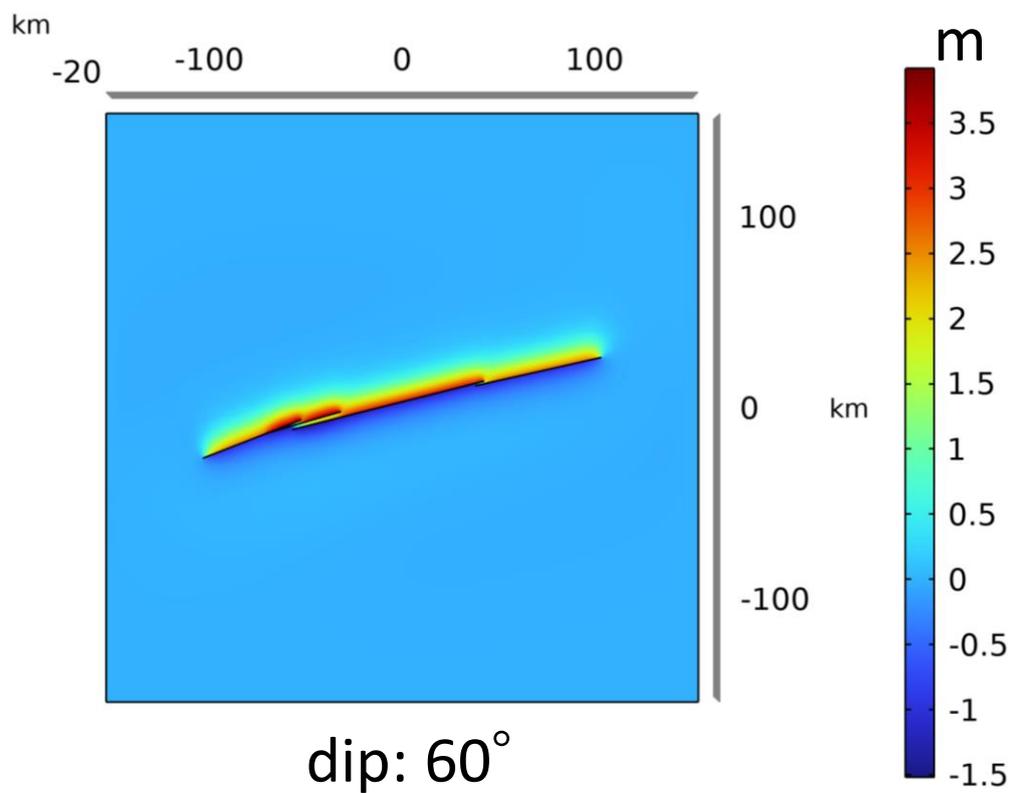


図 36 Model-02 の上下変位分布（傾斜角：60°、最大主応力方向：N60° W）。

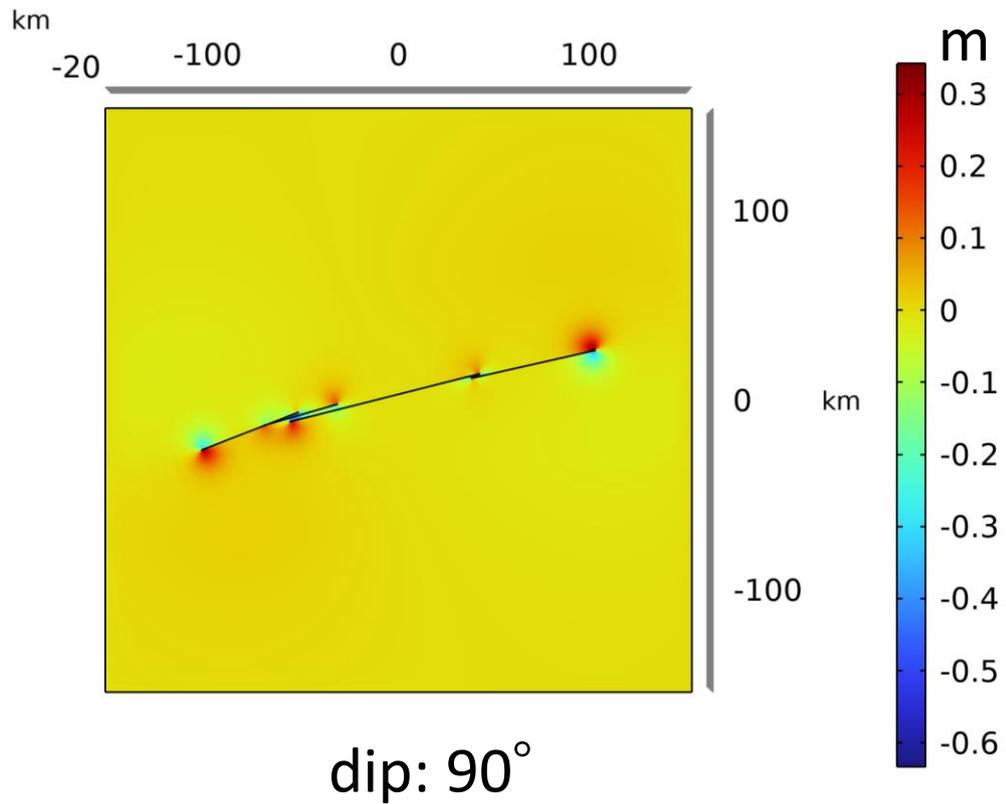


図 37 Model-02 の上下変位分布（傾斜角： 90° 、最大主応力方向： $N60^\circ W$ ）。

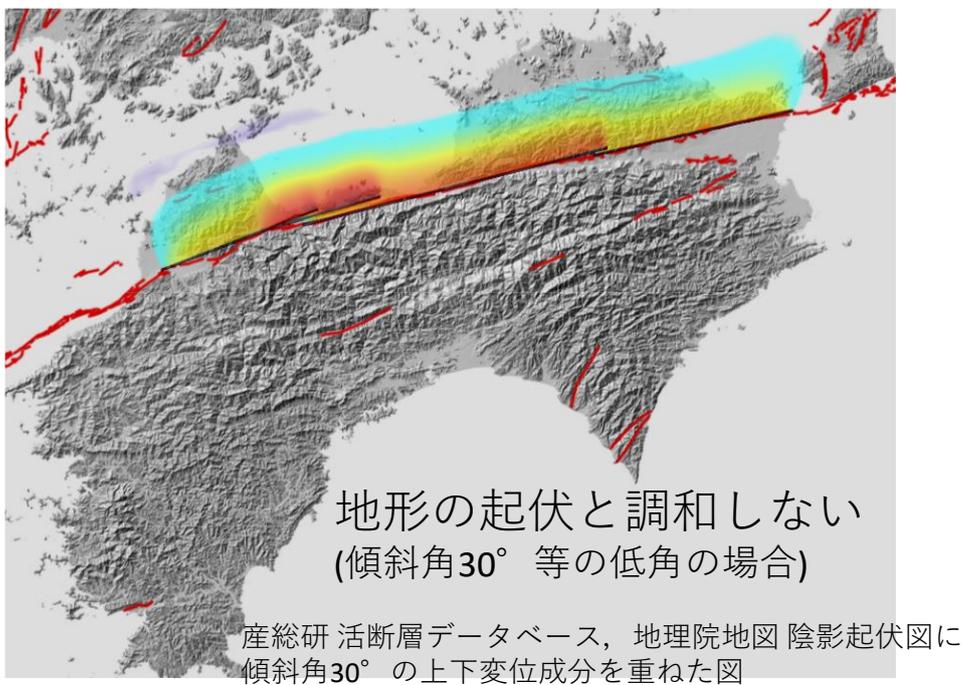


図 38 Model-02 の上下変位分布（図 35）を地理院地図（陰影起伏図）を重ねたもの（傾斜角： 30° 、最大主応力方向： $N60^\circ W$ ）。背景は活断層データベース（産業技術総合研究所）により作成。

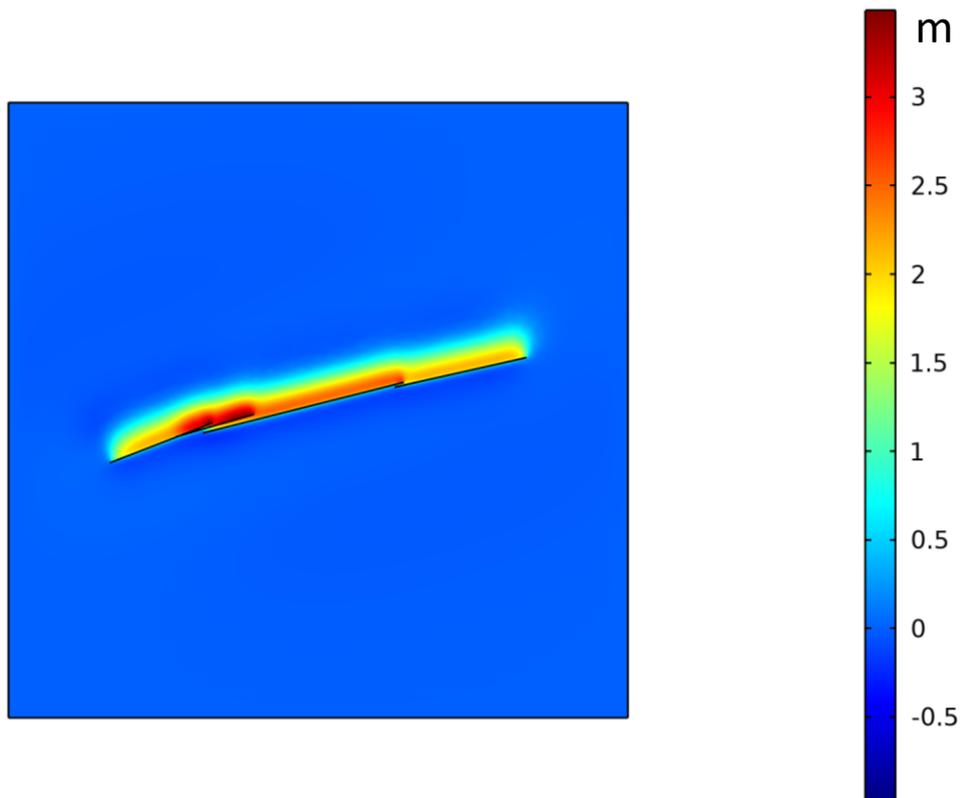


図 39 Model-03 の上下変位分布
 (傾斜角： 90° (1 km 以浅)、 40° (1 km 以深)、最大主応力方向： $N60^\circ W$)。

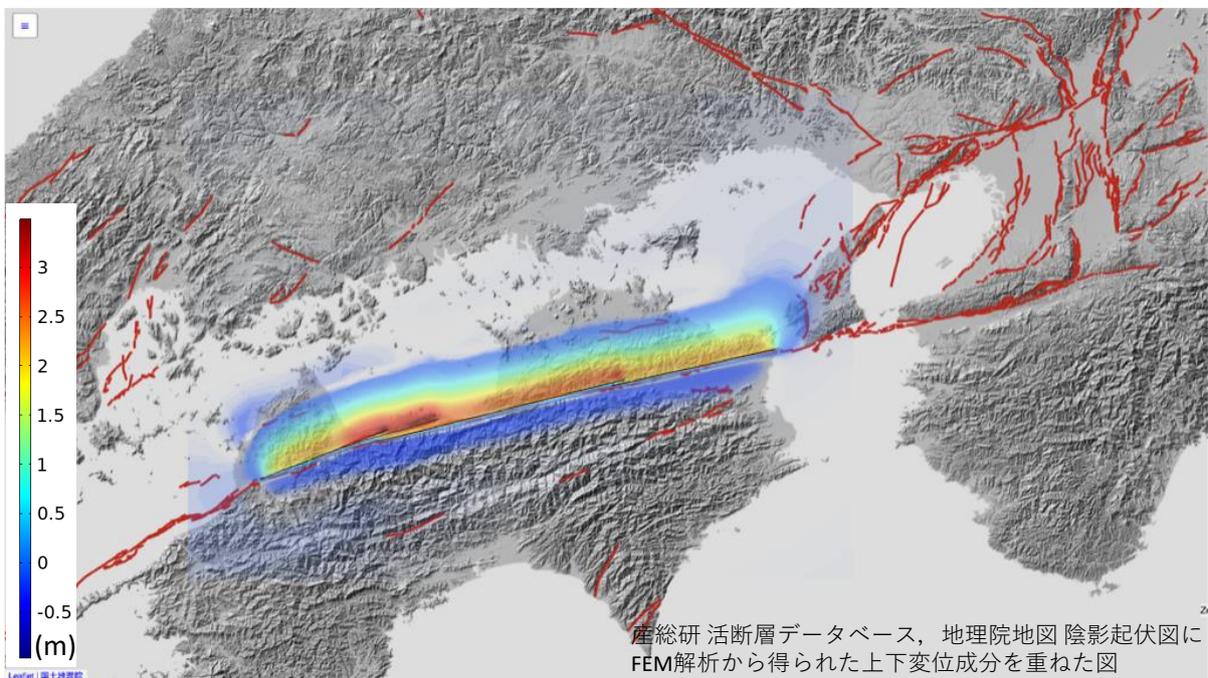
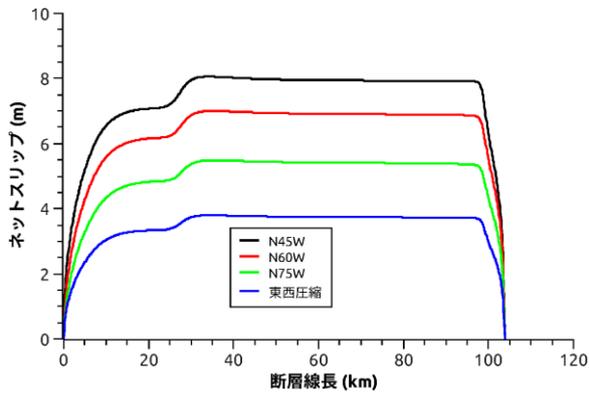
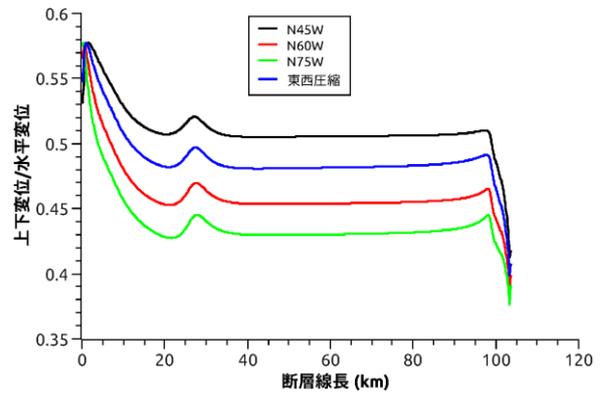


図 40 図 39 の上下変位分布を地理院地図 (陰影起伏図) に重ねたもの
 (傾斜角： 90° (1 km 以浅)、 40° (1 km 以深)、最大主応力方向： $N60^\circ W$)。背景は活断層データベース (産業技術総合研究所) により作成。

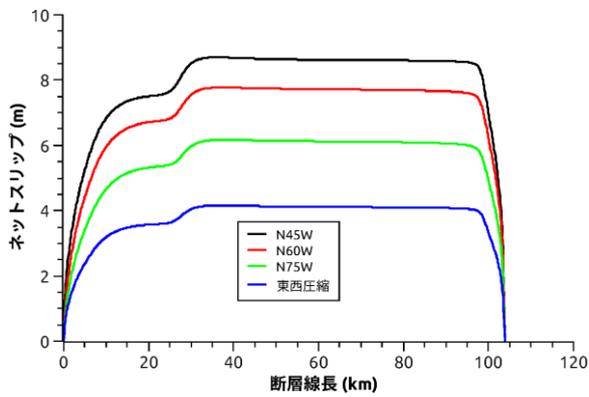


(a) 断層線上ネットスリップ

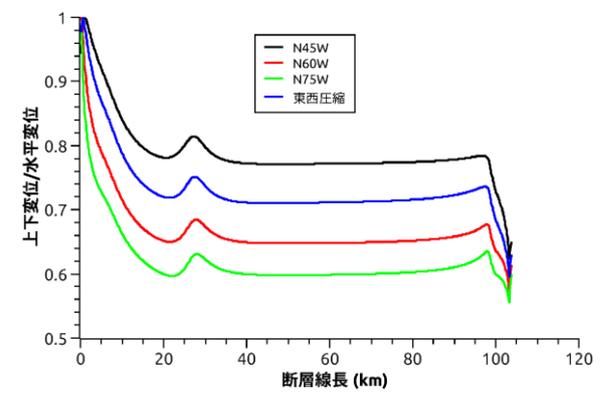


(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 41 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間(北斜角 30°)の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。

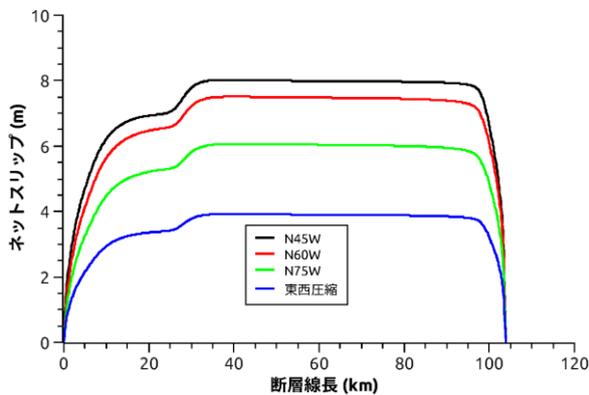


(a) 断層線上ネットスリップ

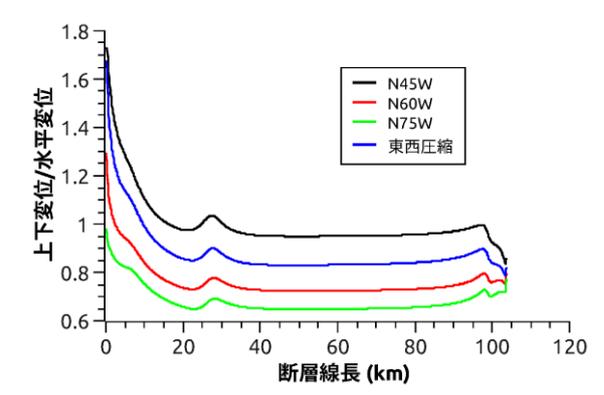


(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 42 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間(北斜角 45°)の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。

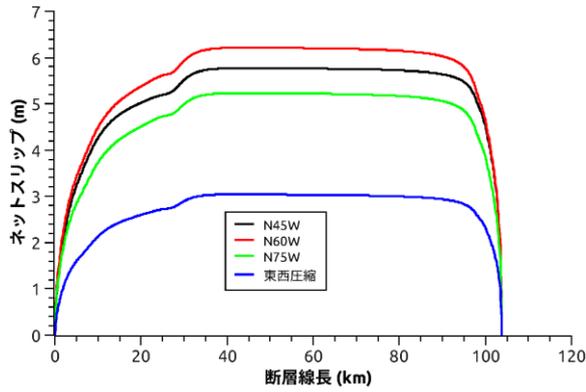


(a) 断層線上ネットスリップ

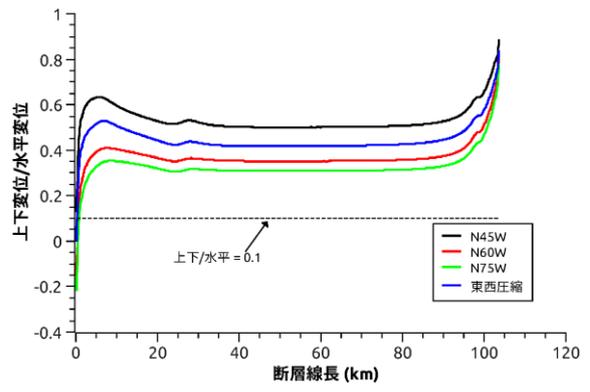


(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 43 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間(北斜角 60°)の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。

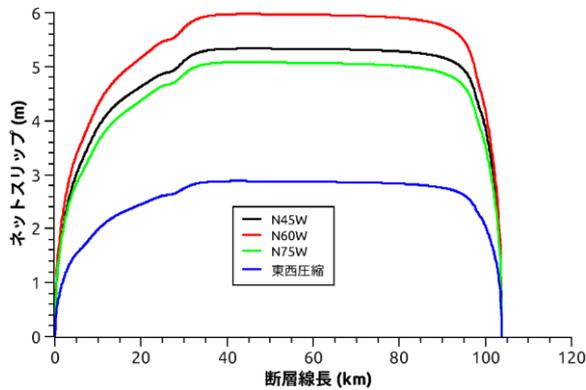


(a) 断層線上ネットスリップ

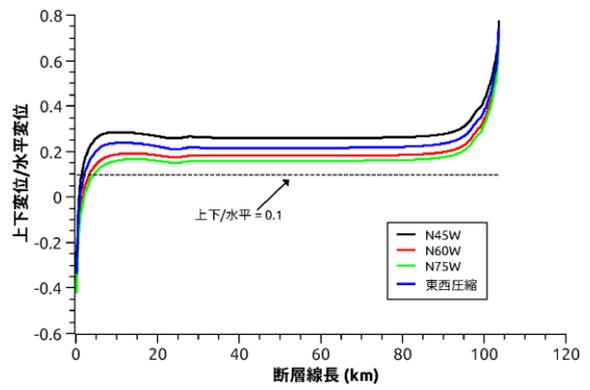


(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 44 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間（北斜角 80° ）の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。

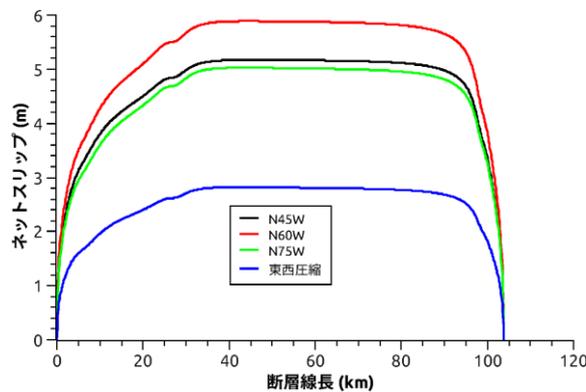


(a) 断層線上ネットスリップ

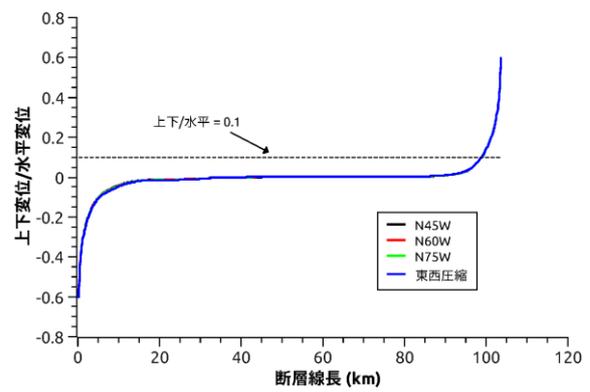


(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 45 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間（北斜角 85° ）の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。



(a) 断層線上ネットスリップ



(b) 断層線上の変位比(上下変位/水平変位)

図 46 Model-02 の讃岐山脈南縁西部区間（傾斜角 90° ）の断層線上でのネットスリップ量(a)と上下変位と水平変位の比(b)。

3) 松田式の適用範囲の検討と断層面間相互作用の評価（令和4年度実施）

a) 断層線長が80kmを超えるケースに対応するためのスケーリング則（松田式）の調整
松田式（松田，1975）によれば、気象庁マグニチュード M_J と地表地震断層トレス長 L [km] の関係性および気象庁マグニチュード M_J と変位量 D [m] の関係性がそれぞれ次のように提案されている。

$$\log L = 0.6M_J - 2.9 \quad (1)$$

$$\log D = 0.6M_J - 4.0 \quad (2)$$

これらの式より、地表地震断層長 L [km] と地表地震断層の変位量 D [m] の関係は次式となる。

$$D = \frac{L}{10^{1.1}} \quad (3)$$

なお、松田式の適用範囲は関係式の作成に用いたデータセット（明治以降に生じた象庁マグニチュードが6.2以上となる14の内陸地震）から、断層線長が10~80km程度までの断層について適用可能と推察できる。本研究では松田式を断層線長が80km以上のケースでも成り立つと仮定し、シミュレーションから得られる地表変位が松田式と整合するように断層面上の接線方向バネ剛性を決定する。

b) 松田式を満たす断層面上の接線剛性と断層長の関係

従来のシミュレーションでは、松田式を満たすように断層面上の接線方向剛性を設定していたが、上限を断層線長が80kmのケースまでに限っていた。松田式が断層線長80km以上のケースでも成り立つと仮定し、断層線長が200km程度までの接線方向剛性—断層線長関係を求める。

図47は純粋な横ずれ断層を模擬した有限要素モデルであり、これを用いて松田式が満たされる断層面上の接線方向剛性を検討する。なお、用いる初期応力場は $\sigma_1 = 30\text{MPa}$ 、 $\sigma_2 = 10\text{MPa}$ （深さ方向に一定）である。断層面は断層面上に最大せん断応力10MPaが作用するように最大圧縮応力 σ_1 の軸に対して45°回転させている。断層線長 L を5kmから200kmまで約10km刻みで変化させた際に断層線中央部で得られる横ずれ変位量が式(3)で表される関係を満たすように断層面上の接線方向バネ剛性 kt を決定する。なお、断層幅は断層線長 L に依らず深さ方向に20km（傾斜角90°）と設定している。逆断層モデルではなく横ずれ断層モデルを用いて断層面上の接線方向剛性を調整することの理由は、松田式の元となったデータに横ずれ断層の事例（推定含む）が多いこと、2軸圧縮によって断層面上にねらいのせん断応力を載荷しやすいことに依っている。なお、地殻のヤング率およびポアソン比は、それぞれ45GPa、0.3と設定した。

松田式を満たす断層面上の接線剛性は以下の手順で同定した。(1) まず断層線長を設定し、式(3)にしたがって松田式から求まる最大変位 D を算出する。(2) 手順(1)で設定した断層長を模した有限要素モデルを作成し（図47）、断層面上の接線剛性を適当に仮定した上で応力場を作用させて断層線中央部での変位量 D^* を算出する。(3) D と D^* が一致するまで断層面上の接線剛性を修正する。手順(1)から(3)を所望の断層長について実行することで、松田式を満たす接線剛性と断層線長の関係が得られる。

以上の手続によって得られた断層面上の接線剛性と断層線長の関係を示したものが図 48 である。図 48 の縦軸は断層面上の接線方向剛性値を、横軸は断層線長をそれぞれ示している。接線方向剛性は断層長と反比例の関係があることがわかる。本研究のモデルでは、断層線長が約 210km のケースで剛性がほぼゼロになる。これ以上断層線長が大きいケースでは松田式を満たすことができず、松田式の適用という観点からは一定の制約を与えると考える。

図 49 は、図 48 で示した関係を有限要素解析コード内で実装し、図 47 で示される有限要素モデルについて断層線長を 5 km から 200km の範囲で最大変位 D^* を算出し、松田式から求まる最大変位 D と比較した結果である。有限要素解析から求まる最大変位と松田式から求まる最大変位が一致しており、図 48 の関係を用いることで松田式を満足する有限要素解析が実施可能となることが確認できた。

c) 拡張したスケーリング則を用いた四国地方の中央構造線断層帯の変形解析

本年度作成した拡張したスケーリング則を用いた変形解析結果と、昨年度の変形解析結果を比較した。解析に用いる有限要素モデルは、令和 3 年度業務で作成したもの（図 50）である。

図 51 は変位の上下成分について、従来解析結果（令和 3 年度に実施）とスケーリング則を拡張した場合の結果を比較したものである。両者の解析条件はスケーリング則に基づく断層面上接線剛性のみを除いて全く同じであり、最大主応力方位は $N60^\circ W$ 、各断層面の傾斜角は 90° とした。得られる変位様式は両者ともにほぼ同じである。ただし、拡張したスケーリング則を用いた場合は、讃岐山脈南縁西部区間（本有限要素モデルでは断層長 104km）の変位レベルが増加している点、讃岐山脈南縁西部区間の端部での変位が強調されている点が昨年度の結果と異なる。

図 52 は、讃岐山脈南縁東部区間から石鎚山脈北縁西部区間までの全区間について、断層線上のすべり量分布を示したものである。拡張したスケーリング則を用いた結果は実線で、昨年度の結果は破線で示している。上述のとおり、讃岐山脈南縁西部区間の変位レベルが増加しており、昨年度結果の最大変位量が 5.9m（赤点線）だったのに比べ、拡張したスケーリング則を用いることが 8.4m（赤実線）まで変化が増加している。図中に併せて示している堤・後藤（2006）の調査結果と比較すると、讃岐山脈南縁西部区間では拡張したスケーリング則を用いた場合よりも昨年度結果の方が変位模擬の程度が高いことが確認できる。このことは、松田式を断層長が 100km 程度の断層に適用することが不適切であることを示唆している。現時点では断層長が 80km を超える断層に対するスケーリング則をどのように設定すべきなのかについての指針が必要となる。Wesnousky（2008）では国外の活断層調査事例を含め、断層線長とすべり変位について 3 つのタイプのスケーリング則を提案している。1 つは松田式と同じタイプの線形関係、残りの 2 つは対数線形関係およびべき乗関係を設定している。これら 3 タイプの差異は断層長が大きくなればなるほど顕著になるが、断層長とすべり変位の関係が一義的に定まっていないのは、主として断層長が 100km 以上の調査事例数が少ないことに依っている。国内で断層長が 80km を超える事例数は極めて限られるが、今回の検討のように長大な断層に対する変位スケーリング則についての研究を進めることは数値シミュレーションに基づく断層変位予測を実施する上で一定の意義がある。

d) 断層面間の相互作用についての検討

図 53 は、断層面間の相互作用を評価するための手続きに関する説明図である。近接する 2 つの断層面について、一方に単位すべり（1 m）を与えたとき、他方の断層面上に生じた応力変動量を評価する。ここで、応力変動量は垂直応力の変動分 $\Delta\sigma$ とせん断応力の変動分 $\Delta\tau$ の大きさによって定義する $\left(\sqrt{(\Delta\sigma)^2 + (\Delta\tau)^2}\right)$ 。なお、解析ケースは、(1) 讃岐山脈南縁東部区間にのみ単位すべりを与えた場合、(2) 讃岐山脈南縁西部区間にのみ単位すべりを与えた場合、(3) 石鎚山脈北縁区間にのみ単位すべりを与えた場合、(4) 石鎚山脈北縁西部区間にのみ単位すべりを与えた場合、の 4 通りについて検討した。

図 54 は讃岐山脈南縁東部区間に単位すべりを与えた際の讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量を示したものである。線形破壊力学の知見（Anderson, 2011）によれば、亀裂端部周辺の応力場は $1/\sqrt{r}$ （ r は亀裂端部からの距離、ここでは断層線端部からの距離に相当）に比例することがわかっている。したがって、単位すべりを与えた断層線端部をもう一方の断層面へ正射影した領域で応力変動量が最大となることが期待される。図 54 において讃岐山脈南縁西部区間で帯状の応力変動領域が確認できるが、上述の破壊力学の知見で解釈可能である。同様の現象が図 55、図 56、図 57 でも確認できる。

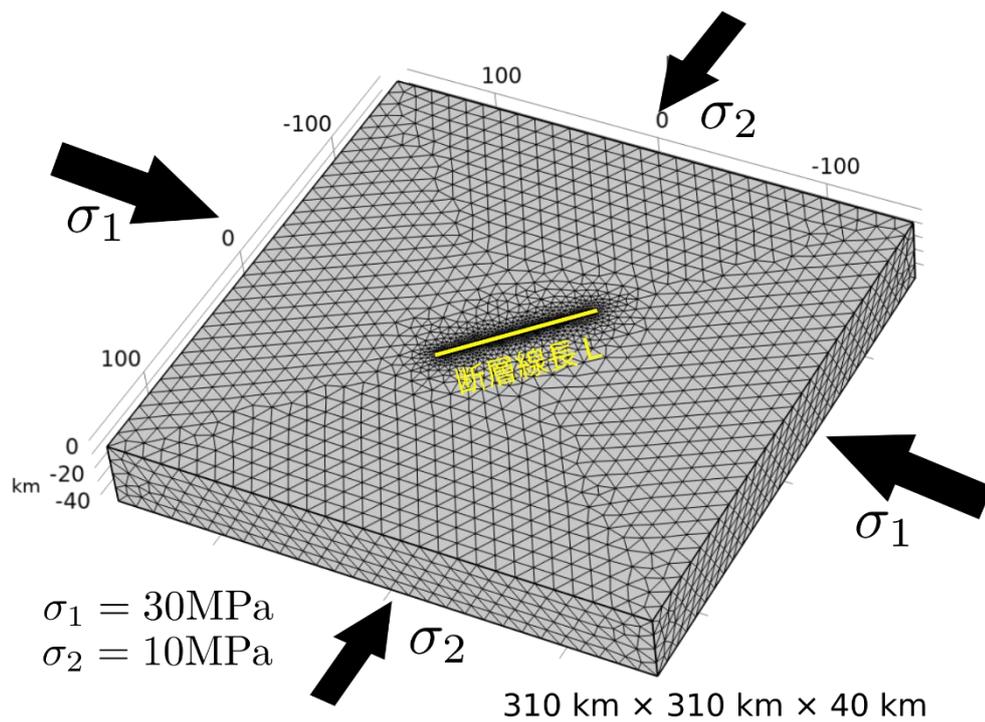


図 47 四国地方の中央構造線断層帯に対する断層面モデル（J-SHIS の情報から作成（防災科学技術研究所、2022 年 3 月 29 日閲覧））。

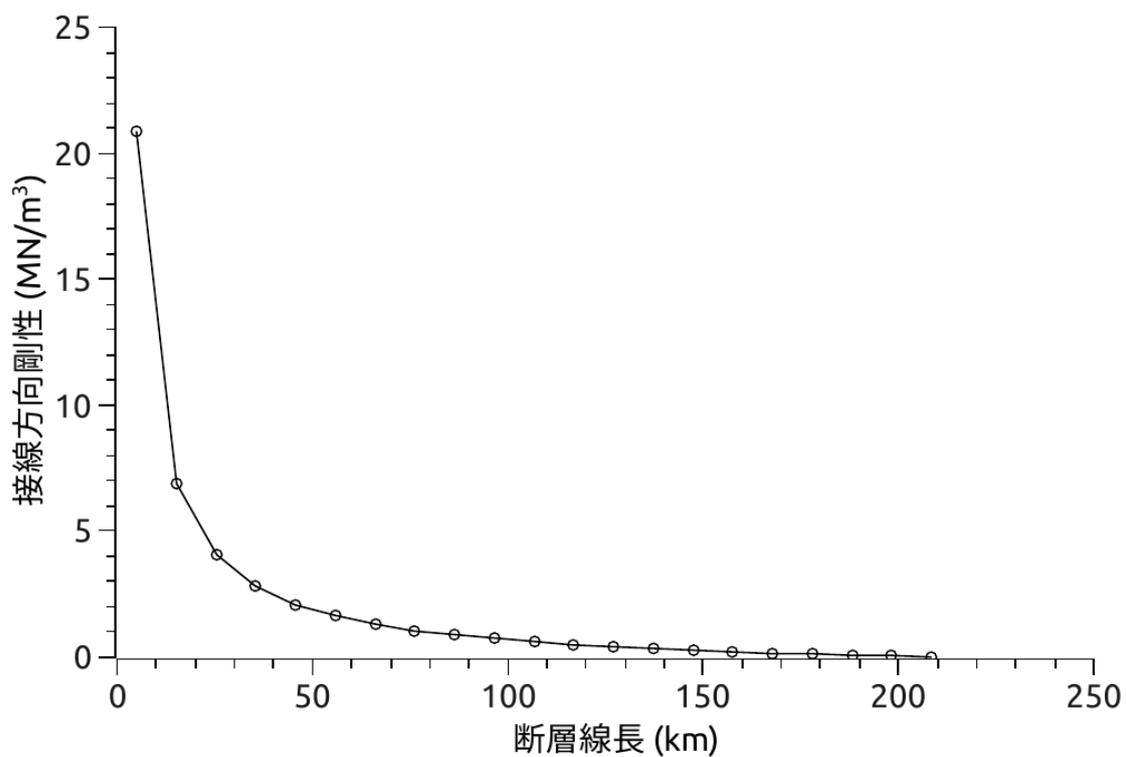


図 48 松田式を満たす断層面上接線方向剛性と断層線長の関係。

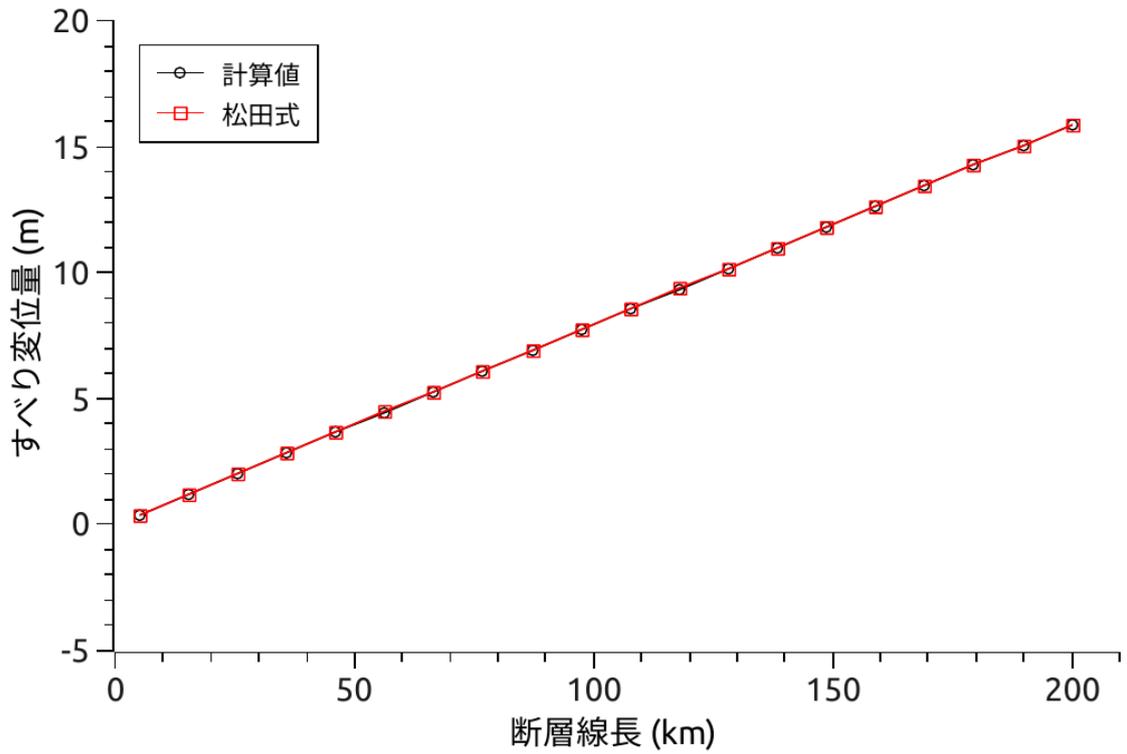


図 49 図 2 の関係を実装した有限要素解析結果と松田式の比較。

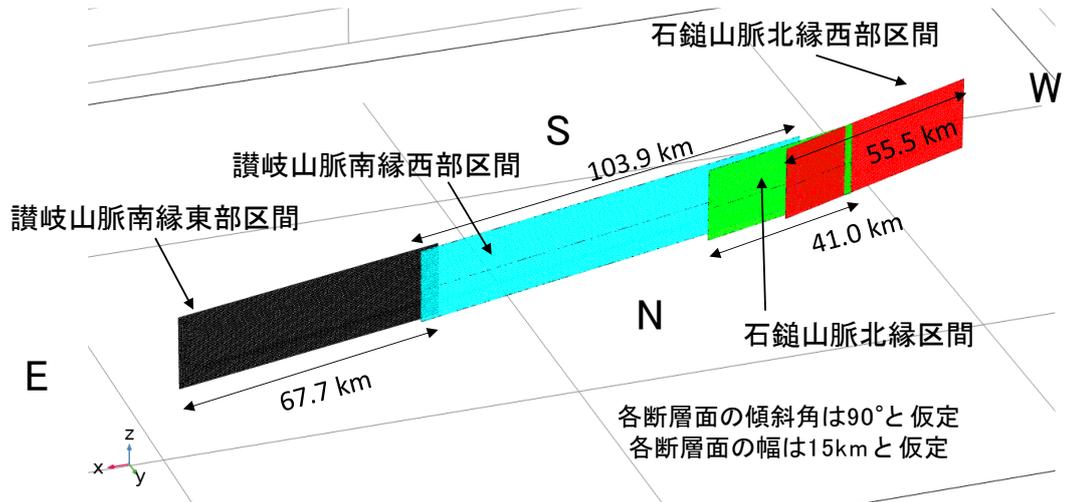


図 50 四国地方の中央構造線断層帯に対する断層面モデル（令和 3 年度業務成果の一部）。

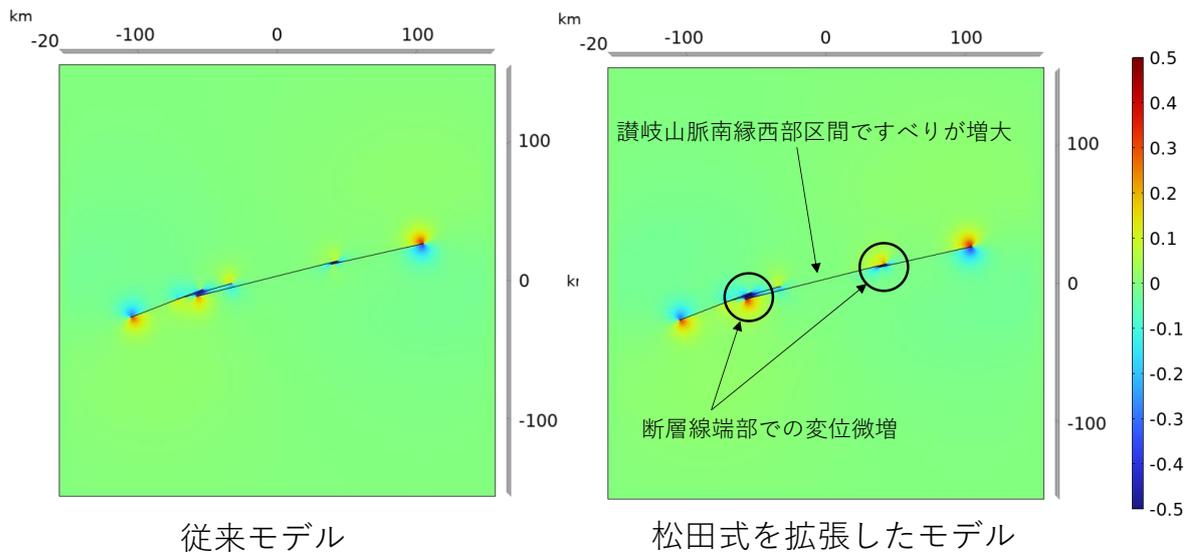


図 51 従来の解析結果とスケーリング則（松田式）を拡張した場合の解析結果との比較（上下変位成分について）。

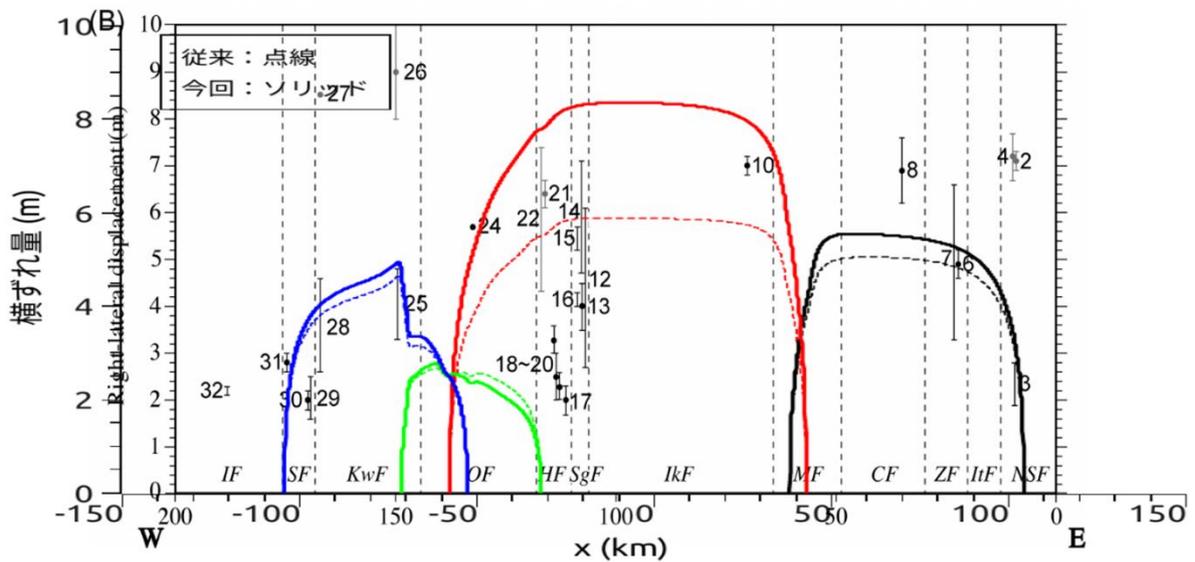


図 52 従来の解析結果とスケーリング則（松田式）を拡張した場合の解析結果との比較（断層線上のすべり量（青線：石鎚山脈北縁西部区間、黄緑線：石鎚山脈北縁区間、赤線：讃岐山脈南縁西部区間、黒線：讃岐山脈南縁東部区間）について堤・後藤（2006）の調査結果と併せて表示）。

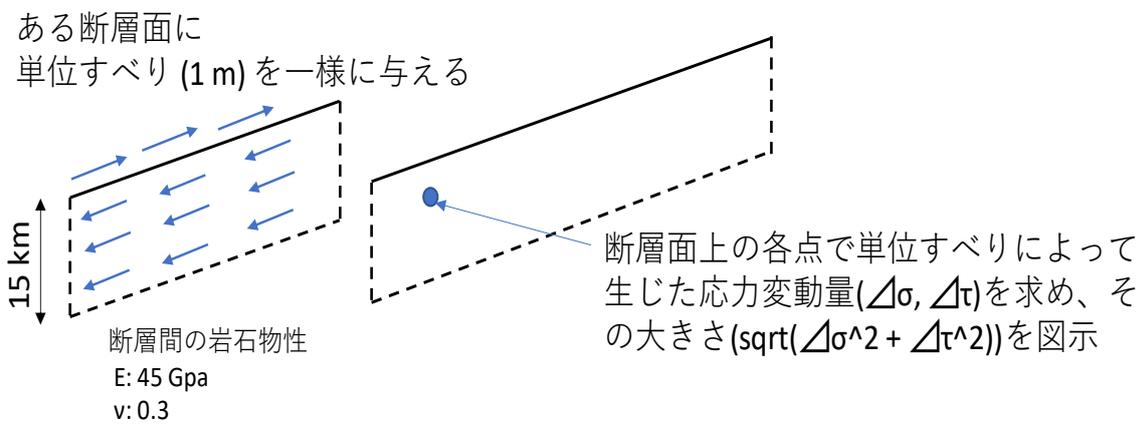


図 53 近接する断層面の相互作用評価方法 (一方の断層面に単位すべりを一様に与えた後、他方の断層面上の応力変動量を算出)。

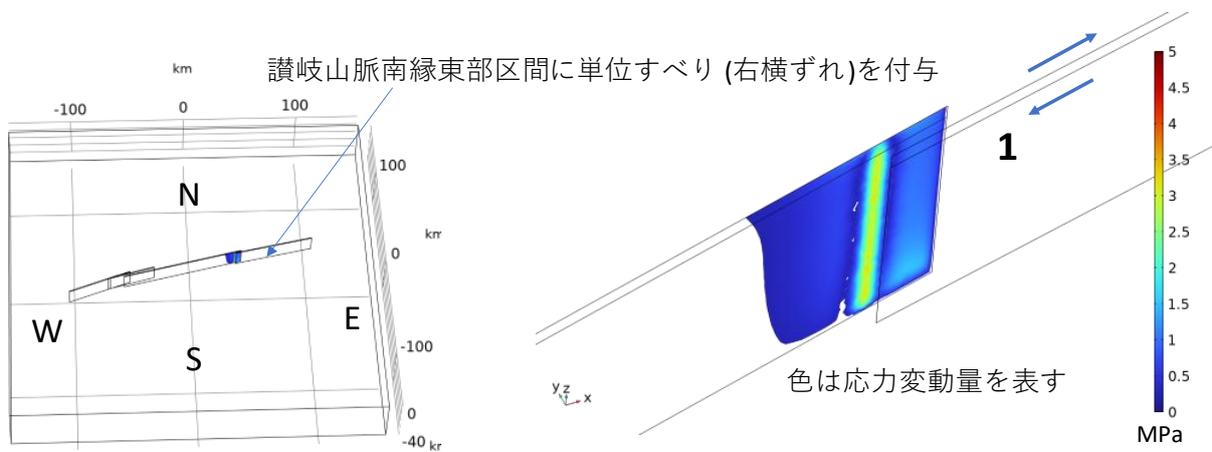


図 54 讃岐山脈南縁東部区間に単位すべりを付与した場合に讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

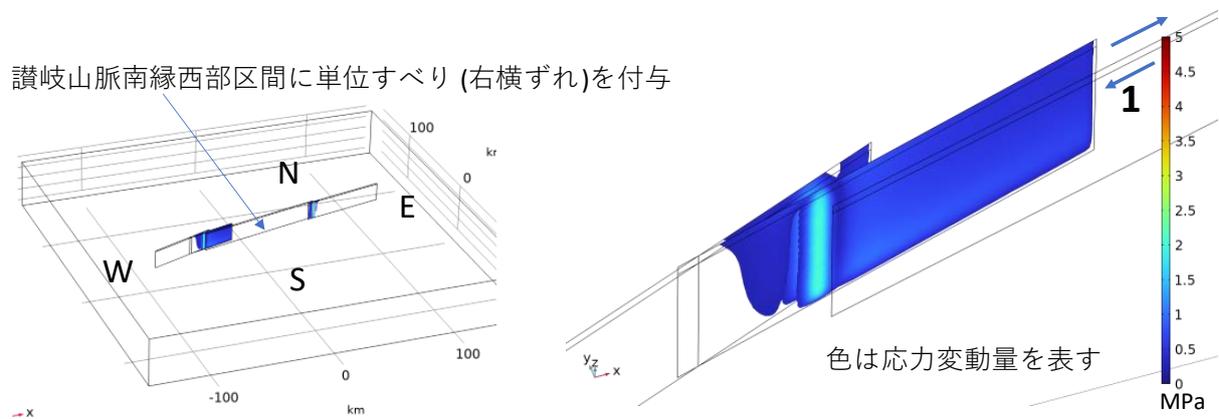


図 55 讃岐山脈南縁西部区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁区間で生じる応力変動量。

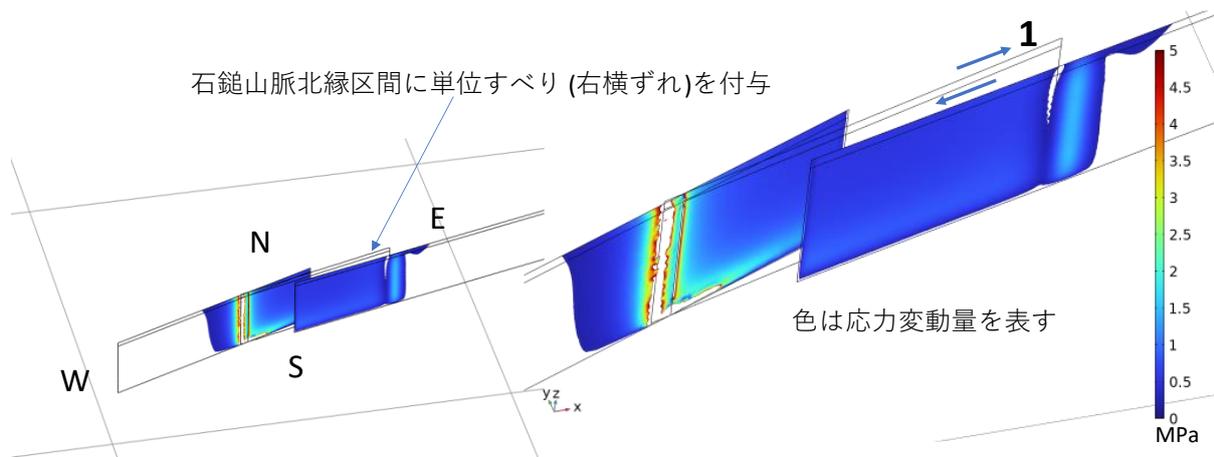


図 56 石鎚山脈北縁区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁西部区間と讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

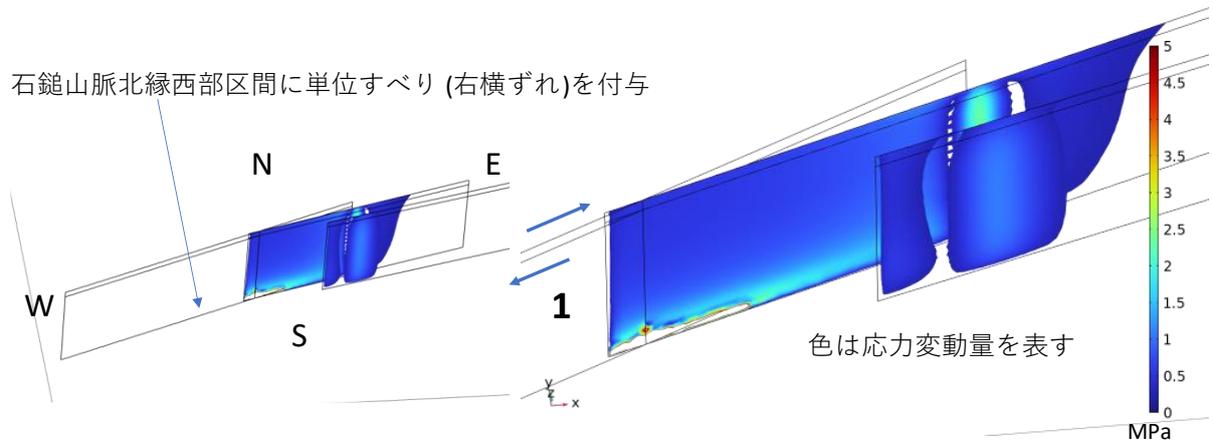


図 57 石鎚山脈北縁西部区間に単位すべりを付与した場合に石鎚山脈北縁区間と讃岐山脈南縁西部区間で生じる応力変動量。

(d) 結論ならびに今後の課題

令和2年度の前半では、有限要素解析を実施するにあたっての基礎的な項目についての検討を行った。今回の検討を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

- 断層面端部とモデル境界の距離を50km程度以上とすることで、モデル境界が断層変位に及ぼす影響が小さくなることを確認した。
- 既往の断層面情報（J-SHISに収録）を参考にして、本プロジェクトで考察する予定の全ての断層面を含む有限要素モデルを作成し、計算規模と計算時間について検討した。結果、ワークステーションの増強や連立一次方程式の解法の効率化は必要ないことがわかった。
- 最大主応力方位を変化させて合理的な広域応力場についての検討を行った。結果、最大主応力の方位が $N30^{\circ}W$ から $N90^{\circ}W$ の範囲内にある場合、全ての断層面が右横ずれとなることがわかった。なお、 $N60^{\circ}W$ のとき、断層面の右横ずれが最大化される。
- 今回構築した解析モデルに $N60^{\circ}W$ 方向に最大主応力を設定した場合に得られた右横ずれ量のピーク値は、既往の調査結果と比較して概ね整合的であった。

令和3年度は主として活断層MTLの北傾斜仮説・高角仮説に対する検討を三次元有限要素法によって実施した。今回実施した業務内容および得られた知見は、以下のとおりである。

- 解析対象となる区間についての三次元有限要素メッシュを生成した。また、断層面の任意深度で折れ曲がり点を設定できるようにプログラムを高度化した。
- 活断層MTLの傾斜角についての2種類の仮説（北傾斜仮説・高角仮説）を検討するための3種類の断層面モデルを作成し、変位解析を実施した。
- 今回実施した仮説検討の範囲内では、北傾斜の場合の変位様式は地形の起伏と調和しないことが明らかとなった。結果、北傾斜仮説は棄却できると判断した。
- 高角仮説を積極的に支持するシミュレーション結果は出ていないが、上下／水平比に着目することで活断層MTLの傾斜角を高い精度で推定できることを示した。

令和4年度は、(1)断層線長が80kmを超える断層面へのスケーリング則（松田式）の拡張、(2)断層面間の相互作用の評価、の2点についての検討を実施した。本業務を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

- 断層線長が80km以上のケースで松田式が成り立つことを仮定する場合、断層線長が200km程度までが数値シミュレーションの観点からは限界であった。
- 令和3年度に実施した活断層MTLのすべり量分布（80km以上の断層腸では一定の剛性値を設定）に対する解析結果は、80km以上の断層線長についても松田式が成り立つとして今年度実施した解析結果よりも変位分布の模擬の程度が高い。
- 断層面間の相互作用については、断層線端部周辺の応力変動量を通じて評価した。評価結果自体は、破壊力学の知見を用いて解釈可能である。

讃岐断層南縁西部区間での変位解析結果で確認したように、断層線長が 80km を超える場合に対するスケーリング則の設定が今後の課題である。まずは断層線長とすべり変位の関係性を、理論・実験・数値解析等の様々な観点から検討することが必要と考える。

(e) 引用文献

Anderson, T.L., 破壊力学 基礎と応用 第3版, 栗飯原周二(監訳), 金田重裕, 吉成仁志(訳), 森北出版, 2011.

防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp> (2022年3月29日閲覧).

伊藤谷生・井川猛・足立幾久・伊勢崎修弘・平田直・浅沼俊夫・宮内崇裕・松本みどり・高橋通浩・松澤進一・鈴木雅也・石田啓祐・奥池司郎・木村学・國友孝洋・後藤忠徳・澤田臣啓・竹下徹・仲谷英夫・長谷川修一・前田卓哉・村田明広・山北聡・山口和雄・山口覚, 四国中央構造線地下構造の総合物理探査, 地質学雑誌, 102, 346-360, 1996.

Ito, T., T. Ikawa, S. Yamakita, and T. Maeda, Gently north-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, southwest Japan, Tectonophysics, 264, 51-63, 1996.

Ito, T., Y. Kojima, S. Kodaira, H. Sato, Y. Kaneda, T. Iwasaki, E. Kurashimo, N. Tsumura, A. Fujiwara, T. Miyauchi, N. Hirata, S. Harder, K. Miller, A. Murata, S. Yamakita, M. Onishi, S. Abe, T. Sato, and T. Ikawa, Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002, Tectonophysics, 472, 124-134, 2009.

地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 中央構造線断層帯(金剛山地東縁-由布院)の長期評価(第二版), 2017.

Kawamura, T., M. Onishi, E. Kurashimo, T. Ikawa, and T. Ito, Deep seismic reflection experiment using a dense receiver and sparse shot technique for imaging the deep structure of the Median Tectonic Line (MTL) in east Shikoku, Japan, Earth, Planets and Space, 55, 549-557, 2003.

木村晶三・岡野健之助, 四国の中央構造線およびその周辺地域についての地震学的考察, 地質学論集, 40, 187-195, 1992.

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.

西日本地殻応力調査班, 応力解放法による地殻応力測定(1) 四国・佐々連鉱山, 地震予知連絡会報, 23, 155-159, 1980.

岡田篤正, 阿波池田付近の中央構造線の新时期断層運動, 第四期研究, 7, 1, 15-26, 1968.

岡田篤正, 吉野川流域の中央構造線の断層変位地形と断層運動速度, 地理学評論, 43, 1, 1-21, 1970.

岡田篤正, 四国中央北縁部における中央構造線の第四紀断層運動, 地理学評論, 46, 5, 295-322, 1973.

岡田篤正・堤 浩之, 中央構造線活断層系父尾断層の完新世断層活動-徳島県市場町でのトレンチ調査-, 地学雑誌, 106, 5, 644-659, 1997.

- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・安藤雅孝：中央構造線活断層系岡村断層の完新世断層活動
—愛媛県西条市飯岡地区のトレンチ調査のまとめ—，活断層研究，17，106-131，1998.
- Onishi, K., N. Nishizaka, Y. Ishikawa, T. Nayuki, T. Tanaka, K. Ando, T. Oouchi,
T. Ito, Estimate of the initial rock stress by performing a comprehensive
evaluation using the results of several techniques, Proceedings of The 7th Civil
Engineering Conference in the Asian Region (CECAR 7), 2016.
- 産業技術総合研究所 活断層データベース，<https://gbank.gsj.jp/activefault/index>
(2022年5月16日閲覧).
- 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)，75，4，I_25-I_35，
2019.
- 竿本英貴，断層変位に起因して生じるプリアパート構造についての有限要素解析，土木学
会論文集A1(構造・地震工学)，77，4，I_14-I_23，2021.
- 堤 浩之・後藤秀昭，四国の中央構造線断層帯の最新活動に伴う横ずれ変位量分布，地震第
2輯，59，2，117-132，2006.
- Wesnousky, S. G., Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake
Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the
Process of Earthquake Rupture, Bulletin of the Seismological Society of America,
98, 4, 1609-1632, 2008.