

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) 年度毎の実施業務の要約

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：

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する。対象地域は、讃岐山脈南縁西部区間および石鎚山脈北縁区間を予定している。

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する。また、得られた結果のまとめを行う。

(2) 令和 2 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。

令和 2 年度における業務は、用いる有限要素解析プログラムのプロトタイプ構築である。

プロトタイプ構築に先立ち、解析モデルの境界と断層面の距離を変化させて、モデル境界を断層面端部からどの程度遠ざければモデル境界の変位場への影響が小さくなるのかを検討した。この結果は、解析対象領域をどの程度の広くとるべきかという問いに答えるものである。結果、断層面端部とモデル端部の距離を50km程度よりも大きくした場合、モデル端部の断層変位への影響が十分小さくなることがわかった。

次いで、本プロジェクトにて作成予定の全断層面モデルを仮に設定し（防災科学研究所地震ハザードステーションJ-SHIS（以下、J-SHISと表記）の断層線位置の情報を基にして傾斜角を全断層について 90° と設定）、どの程度の計算規模・計算時間となるかを検討した。この計算規模についての検討の結果、現在保有しているワークステーション（AMD EPYC7601 64コア、512GBメモリ）およびこれまで用いてきた連立一次方程式の数値解法（直接法）を用いることで、実用的な計算時間内でシミュレーションが実行可能であることがわかった（約8分/回）。

作成した断層モデル（プロトタイプ）に対し、最大主応力方位を様々に変化させたケースについてシミュレーションを実施し、観測事実（すべての断層面が右横ずれ）と整合する最大主応力の方位範囲について検討した。この結果、最大主応力方位がN30WからN90Wの範囲内にある場合に全ての断層面が右横ずれすることを確認した。特に、N60Wと設定することで系の右横ずれ量の総和が最大化されることがわかった。

以上、今年度は当初計画したとおりの進捗であった。

（b）業務の実施方法

今年度の各種検討（断層面端部とモデル境界の距離、計算規模、最大主応力方位）について、平成29年度に開発したスケーリング則（松田式、（松田，1975））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（竿本，2018；竿本，2019）。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.5.5）上で実装した。

（c）業務の成果

1) FEMを用いた基礎検討

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1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° ）をモデル化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N45W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1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2）。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2～7 m程度、石鎚山脈北縁および石鎚山脈北縁西部で6～8 m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3に、図1中のLを20kmから80kmまで変化させた場合の地表での上下方向変位分布を示す。図3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4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3および図4に示した各ケースでは、どのケースも断層面は500 mピッチの三角形でモデル化している。

図5は、図3および図4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付近でピーク値（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。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7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N77E、讃岐山脈南縁西部区間の断層線の走向はN76E、石鎚山

脈北縁区間の断層線の走向は N74E、石鎚山脈北縁西部区間の断層線の走向きは N69E 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 8 は、図 7 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、310km×310km×40km の直方体領域であり、約 93 万個の 4 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。例えば、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、石鎚山脈北縁区間：岡田・他，1998、石鎚山脈北縁西部区間：後藤・他，1999。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 9）、 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 10 である。

図 10 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、縦軸の数値が正値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 10 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° (N30W) $\leq \theta \leq 0^\circ$ (N90W) の範囲でなければならないことがわかる。なお、 θ が -30° (N60W) 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（N77W と N83W）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 et al., 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 N60W と設定した場合の断層面上すべり分布を図 11 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 12 である。断層面が 1 枚の場合の変位分布形態は、図 2 に示すように断層中央部に対して対称となるが、図 12 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 2 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 13 は、図 12 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。

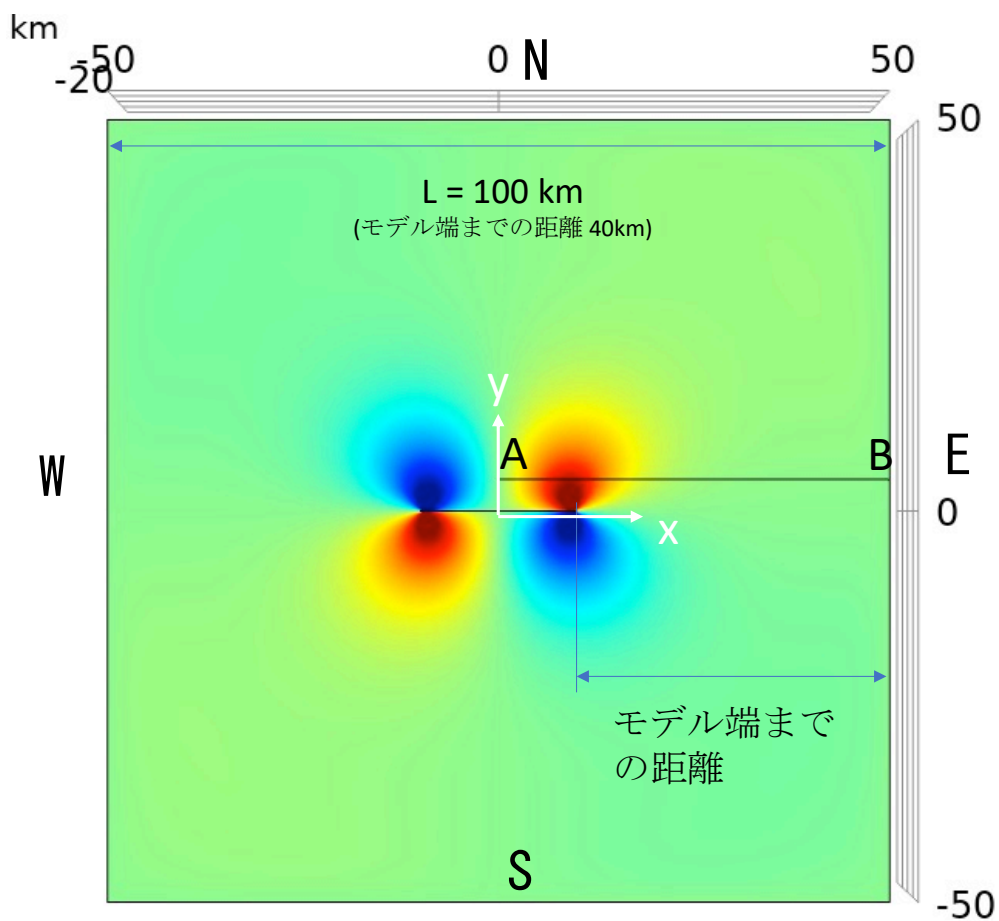


図1 モデル境界が断層変位に及ぼす影響を検討するための解析モデル
(L が 20km から 160km まで変化、最大主応力方位は N45W)

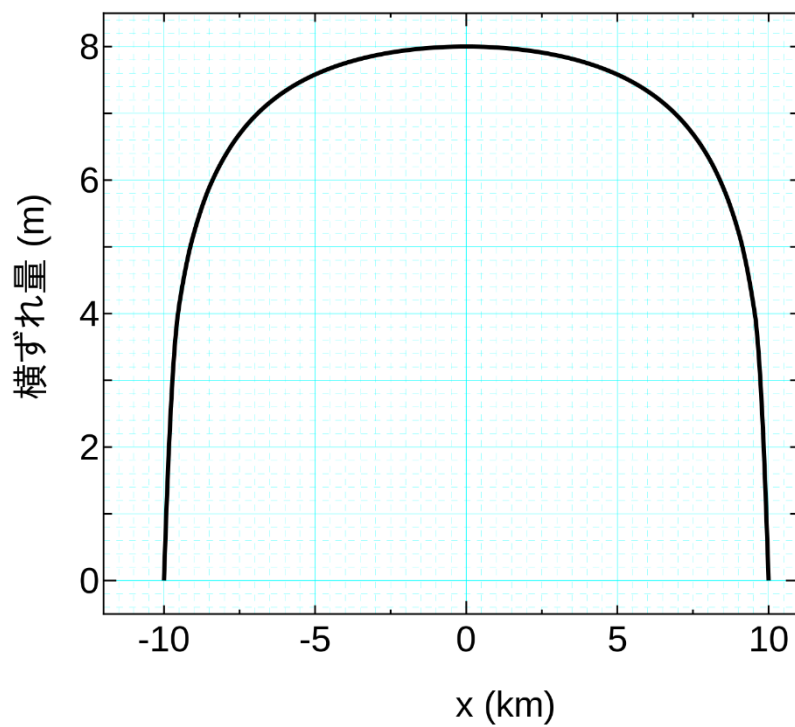


図2 断層線上の横ずれ分布 (断層線中央部で 8 m となるように調整)

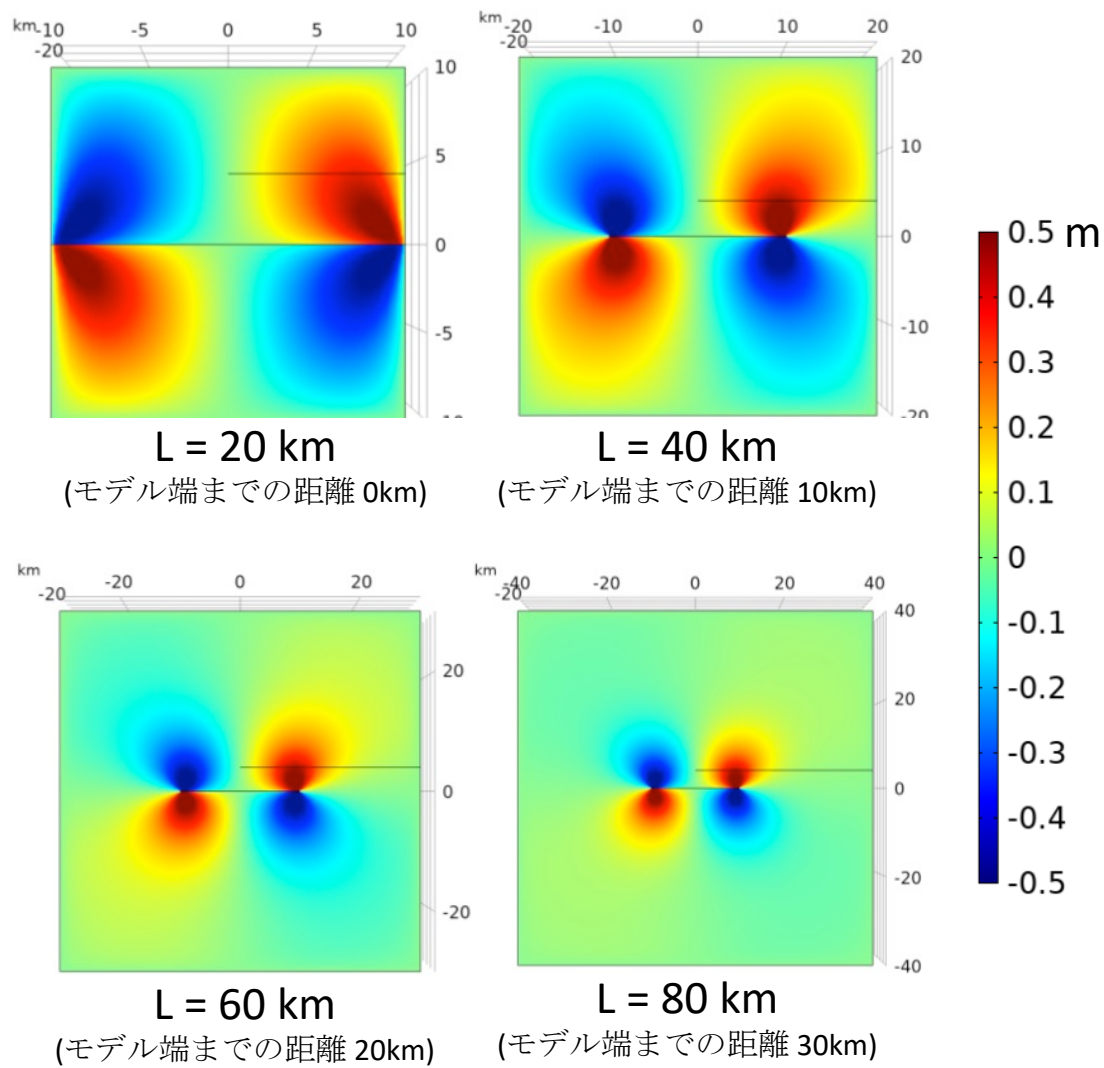


図3 地表変位の上下成分 (L=20、40、60、80km のケースについて)

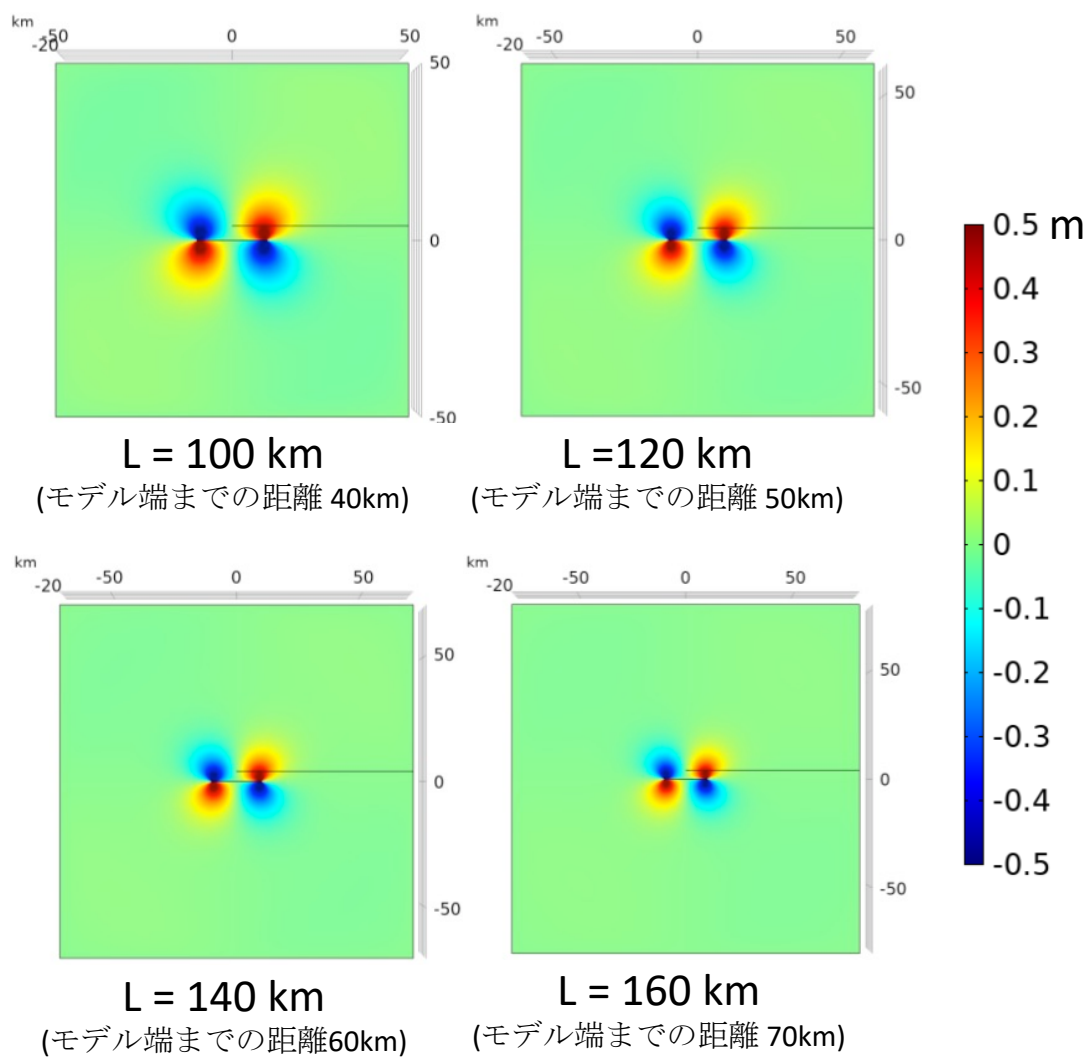


図 4 地表変位の上下成分 ($L=100$ 、 120 、 140 、 160 km のケースについて)

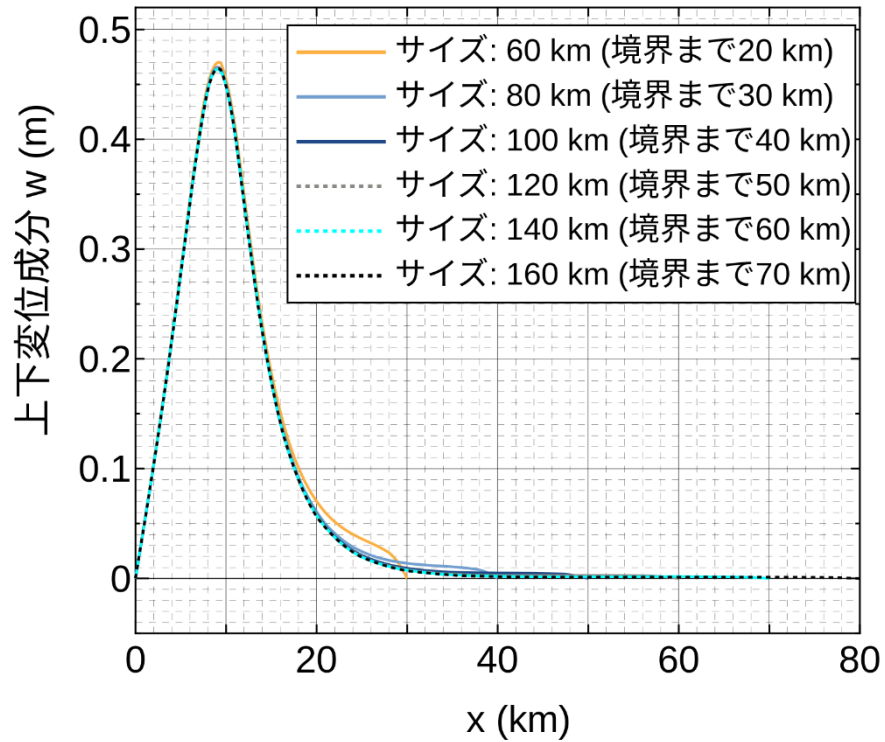


図5 ライン A-B 上の上下変位成分分布
($L=60、80、100、120、140、160$ km の各ケースについて表示)

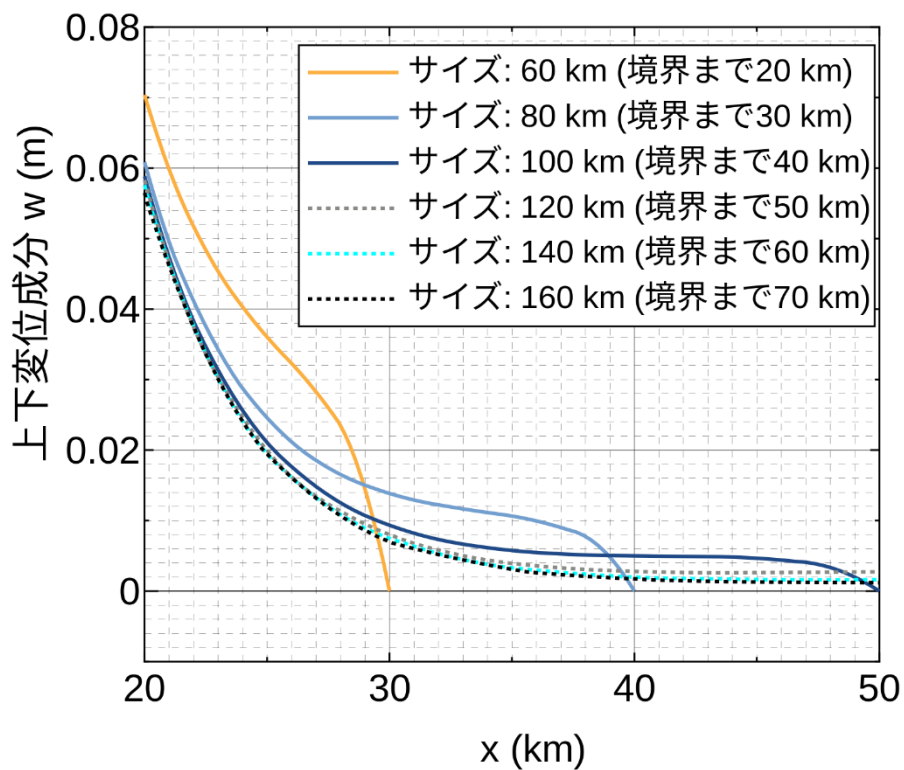


図6 ライン A-B 上の上下変位成分分布 (図5) の拡大図
($20 \text{ km} \leq x \leq 50 \text{ km}$ の範囲)

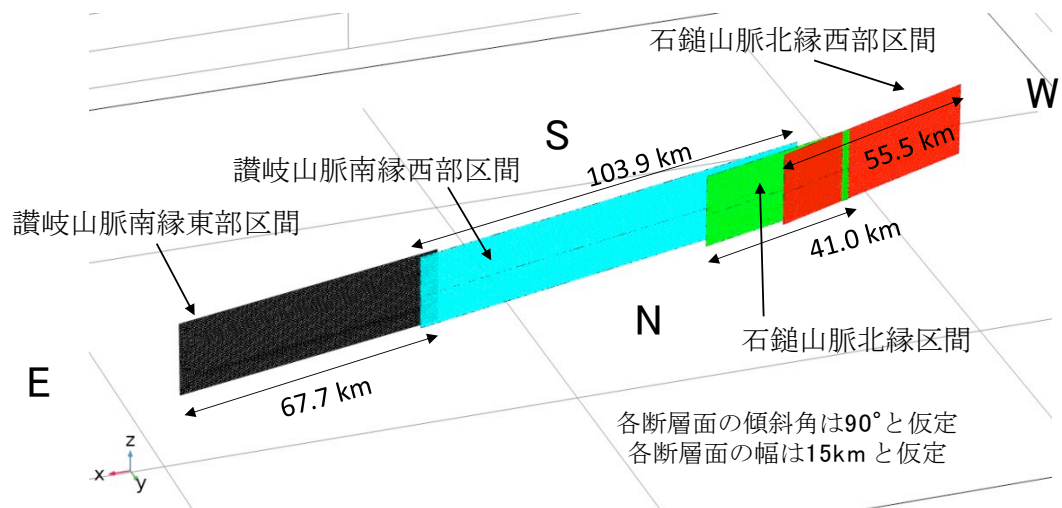


図7 計算時間検討用の断層面モデル（J-SHIS の情報から作成）

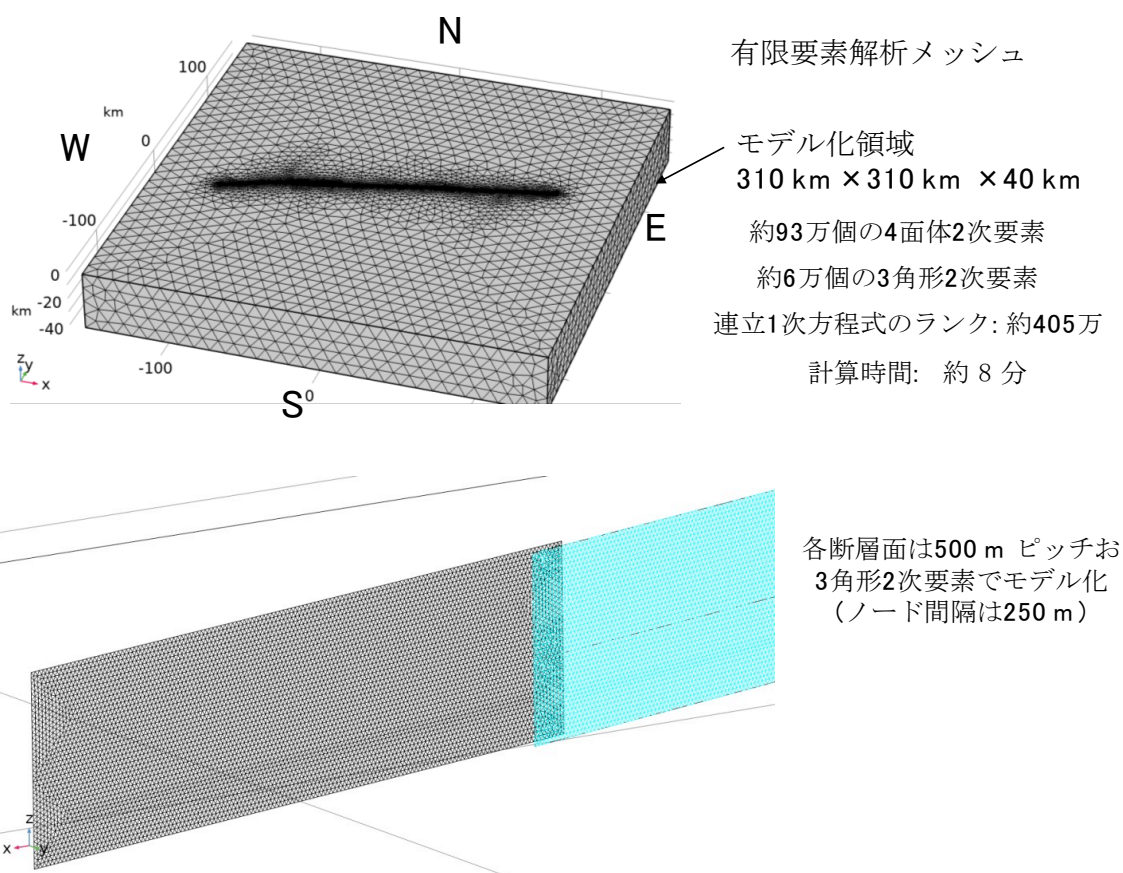


図8 図7の断層モデルに対する有限要素メッシュ

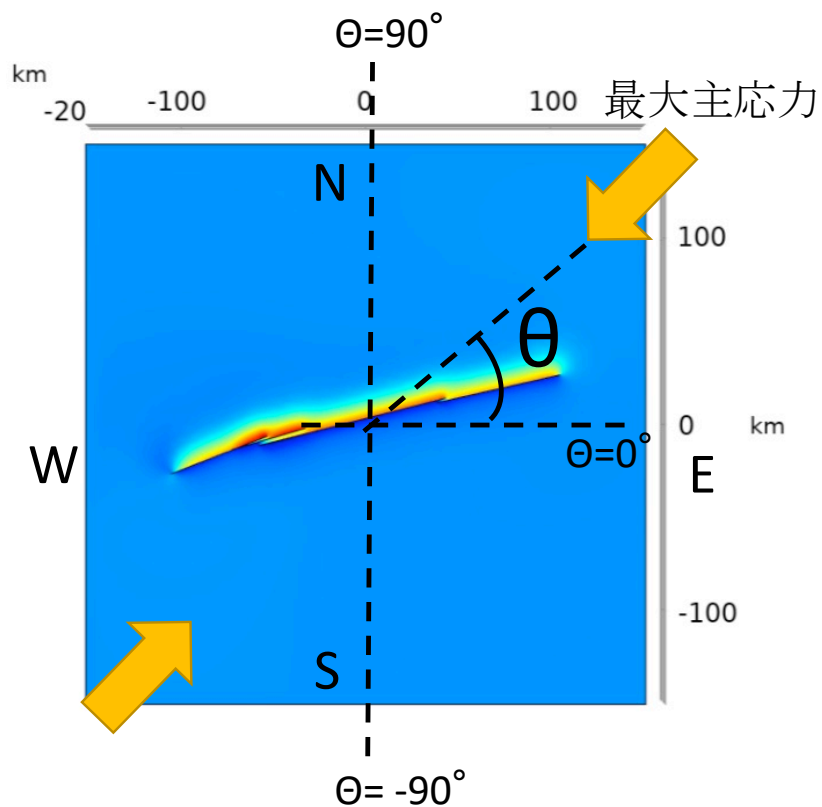


図 9 最大主応力の方位に関するパラメータ θ (-90° から 90° まで 15° 刻みで変化)

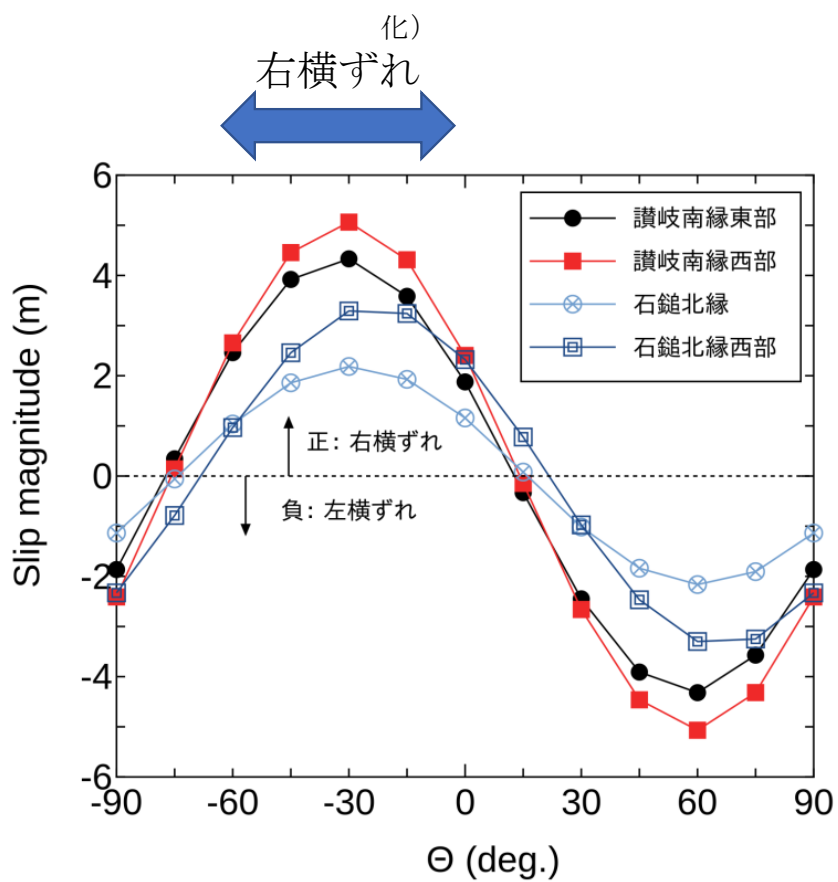


図 10 全ての断層面に右横ずれが生じる θ の範囲 ($-60^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$)

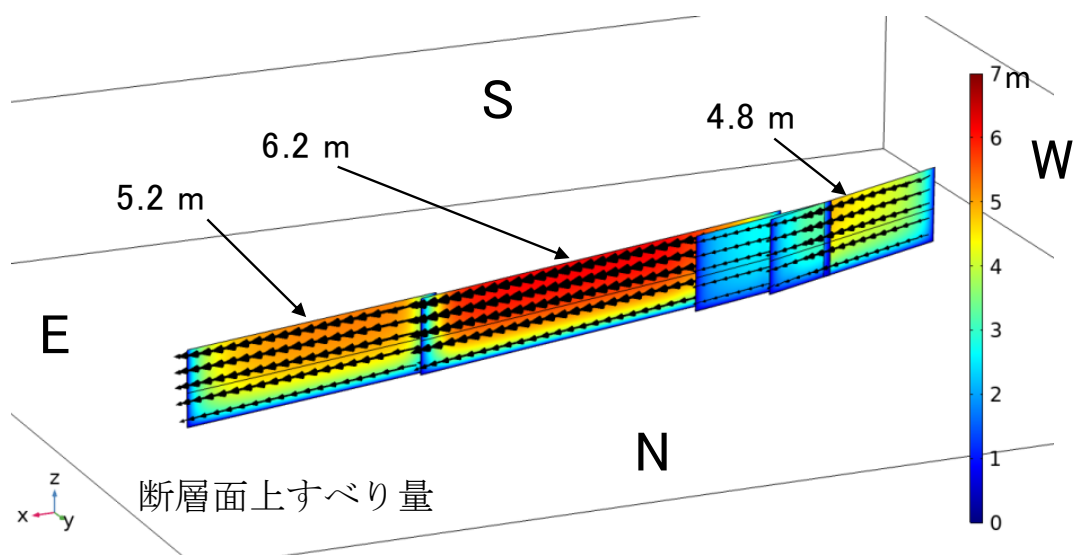


図 11 最大主応力方位を N60W とした場合における各断層面上でのすべり量（ネット値）分布

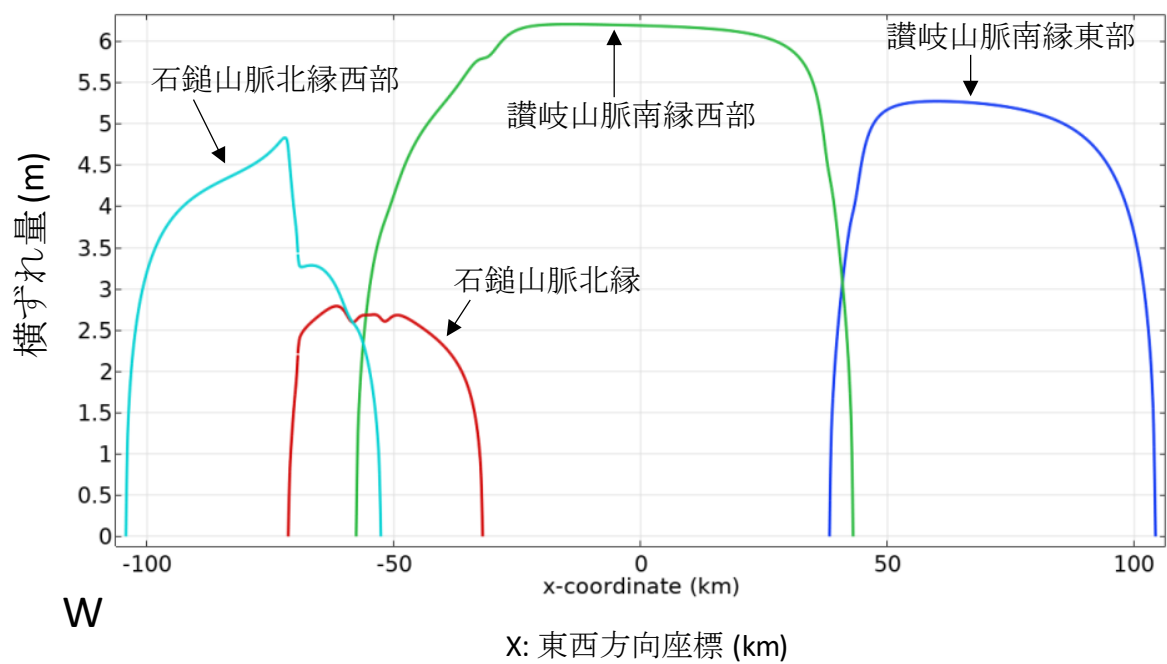


図 12 地表での断層線に沿う右横ずれ量の分布様式（最大主応力方位：N60W）

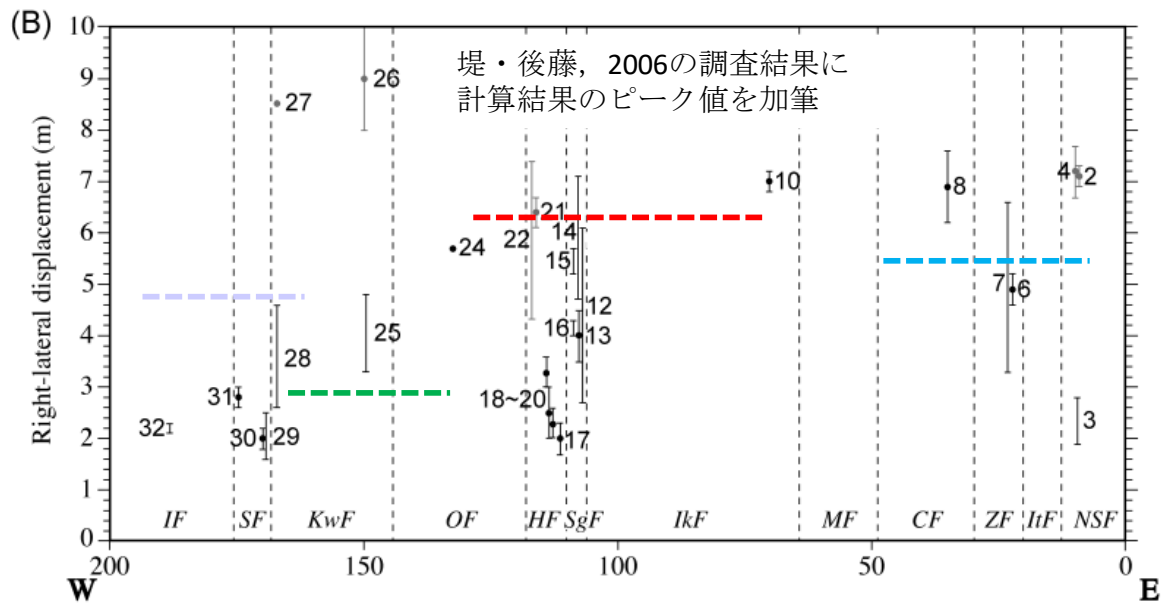


図 13 図 12 の右横ずれ量分布のピーク値と既往調査結果（堤・後藤，2006）との比較

(d) 結論ならびに今後の課題

以上、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 N30W から N90W 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、N60W 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 N60W 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。

今回実施した範囲内では、有限要素解析から求まる右横ずれのオーダーは、現地調査結果と概ね整合的であったが、調査結果をより説明し得る断層面設定や広域応力場設定を各サブテーマと連携して検討していくのが今後の課題となる。

(e) 引用文献

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.
- 岡田篤正, 阿波池田付近の中央構造線の新期断層運動, 第四紀研究, 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ー徳島県市場町でのトレンチ調査ー, 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ー愛媛県西条市飯岡地区のトレンチ調査のまとめー, 活断層研究, 17, 106-131, 1998.
- 木村昌三・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, No. 40, 187-195, 1992.
- 後藤秀昭・中田 高・奥村晃史・池内 啓・熊原康博・高田圭太, 中央構造線活断層系・重信断層の変位地形と活動履歴, 地理学評論 Ser. A, 72, 4, 267-279, 1999.
- 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ー逆断層と横ずれ断層の組み合わせ例ー, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 75, 4, I_25-I_35, 2019.
- 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(金剛山地東縁ー由布院)の長期評価(第二版), 2017.
- 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.
- 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.
- 防災科学研究所 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp> (2020年10月22日閲覧)
- 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.