

### 3. 4 動的破壊シミュレーションによる連動性評価

#### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 動的破壊シミュレーションによる連動性評価

(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	加瀬 祐子

(c) 業務の目的

地震時変位量や断層形状、速度構造等を考慮した動的破壊シミュレーションを実施し、それぞれの活動時の地震後経過時間に応じた震源モデルを推定する。その結果をもとに連動可能性とその条件を検討する。

(d) 3カ年の年次実施業務の要約

1) 平成 29 年度：

糸魚川－静岡構造線断層帯で近年生じた地震の震源過程に関する既存資料の収集整理をおこなった。主に 2014 年長野県北部の地震の震源モデルについての研究をまとめ、周辺断層との連動性を検討する上で必要な情報を整理した。

2) 平成 30 年度：

既存資料および前年度の調査結果を基に、動力的破壊シミュレーションのためのコード整備をおこなった。

3) 平成 31 年度：

既存資料および本課題で得られた成果を反映した動力的震源モデルを構築し、動力的破壊シミュレーションをおこなう。地震時変位量や活動履歴、テクトニック応力場を考慮してセグメントの応力降下量を変化させ、連動可能性とその条件を検討する。

#### (2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

動的破壊シミュレーションを基に、連動可能性とその条件を議論するためには、断層帯の置かれた条件を反映した動力的震源モデルを構築する必要がある。今年度は、各点の走向、傾斜角が滑らかに変化する断層面上での動力的破壊過程を差分法で計算するため、一般座標系を直交座標系に mapping する手法を用いて、シミュレーションに用いるコードを改良した。また、均質半無限弾性体中にある鉛直横ずれ断層、および、傾斜角 60° の正断層に、深さに依存する初期応力場が働く場合の破壊過程について、本事業で開発したコードでの計算結果が検証済のコードによる計算結果とよく一致していることを確認した。

(b) 業務の成果

1) 動力的破壊シミュレーションのためのコードの開発

3. 3 (2) (c) 2) vi)で示されたような各点の走向、傾斜角が滑らかに変化する断層面上での動力的破壊過程を差分法で計算するため、一般座標系を直交座標系に mapping した差分法コードの開発をおこなった。この手法は、2次元問題については井上(1996)、3次元問題で走向が変化する鉛直断層について Kase and Day (2006)、傾斜角が変化する断層について Kase (2010)、3次元一般断層について Zhang et al. (2014) が適用している。Zhang et al. (2014) では、速度-応力で定式化しているが、本業務では、変位で定式化し、Kase and Day (2006)、Kase (2010) と同様に、Ilan and Loewenthal (1976) の自由表面の定式化を断層面の定式化に応用することで、計算の安定性を向上させている。

3次元半無限均質弾性体中に断層面があるモデルを考える。自発的な破壊伝播過程を計算するためには、断層面の境界条件と地表面の自由境界条件を与えて、弾性体の波動方程式を解くことになる。断層面の境界条件としては、Coulomb の破壊条件とすべり弱法の摩擦構成則 (Ida, 1972; Andrews, 1976) を与える。破壊していない領域では、速度と traction のすべての成分が、断層面を挟んで連続である。剪断応力が静摩擦応力(静摩擦係数と法線応力の積)に達したところでは、すべりが始まり、traction のすべての成分と、速度の法線方向成分が断層面を挟んで連続、かつ、すべりと剪断応力はすべり弱法の摩擦構成則に従い、動摩擦応力(動摩擦係数と法線応力の積)まで低下する。

非平面の断層面を扱うため、直交座標系  $(x, y, z)$  中に断層面形状に沿った一般座標系  $(\xi, \eta, \zeta)$  を設定する (図 1)。すると、直交座標系  $(x, y, z)$  は、一般座標系  $(\xi, \eta, \zeta)$  の関数として

$$\begin{aligned}x &= x(\xi, \eta, \zeta) \\y &= y(\xi, \eta, \zeta) \\z &= z(\xi, \eta, \zeta)\end{aligned}$$

と表現されるので、空間偏微分オペレータは、

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{\partial \xi}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \zeta}\end{aligned}$$

と変換される。これらのオペレータを用いて、 $(\xi, \eta, \zeta)$  を直交座標系へ mapping し、波動方程式や traction を書き下すことによって、直交座標系で解くことができるようになる。

2) 動力的破壊シミュレーションのためのコードの検証

コードの検証のため、SCEC/USGS spontaneous rupture code verification project (Harris et al., 2009, 2011, 2018) で検証済のコードによる計算結果と比較した。

初めに、均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層に、深さに依存する初期応力場がはたらく場合の破壊過程 (図 2 a; Harris et al., 2009 の TPV8) について、比較をおこなった。比較対象としては、Harris et al. (2009) の検証に参加した Kase and Kuge (2001) のコードを用いた。本事業のコードでの計算結果 (図 2 b の赤点線) は、比較対象のコー

ドでの計算結果（図 2 b の黒線）とよく一致している。

次に、均質半無限弾性体にある傾斜角  $60^\circ$  の正断層に、深さに依存する初期応力場がはたらく場合の破壊過程（図 3 a ; Harris et al., 2009 の TPV10）について、比較をおこなった。比較対象としては、Harris et al. (2009) の検証に参加した Kase (2010) のコードを用いた。本事業のコードでの計算結果（図 3 b の赤点線）は、比較対象のコードでの計算結果（図 3 b の黒線）とよく一致している。

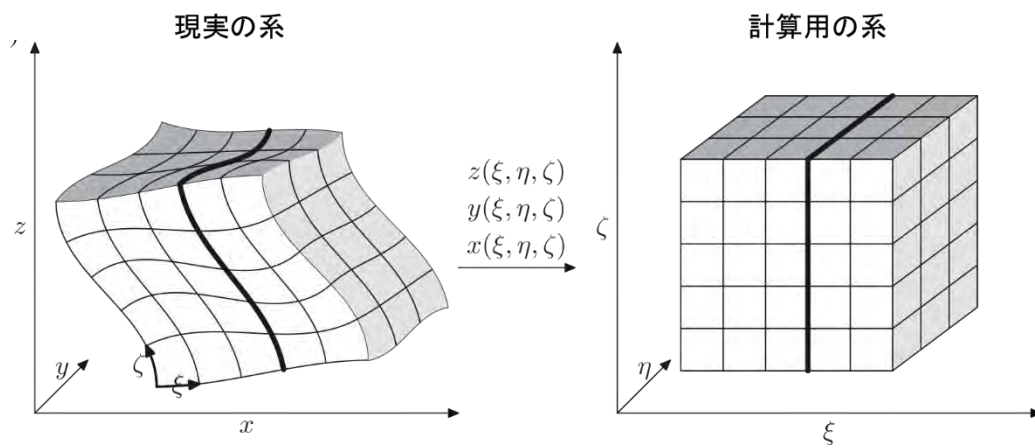


図 1 座標系の mapping のイメージ図。Zhang et al. (2014) に加筆。

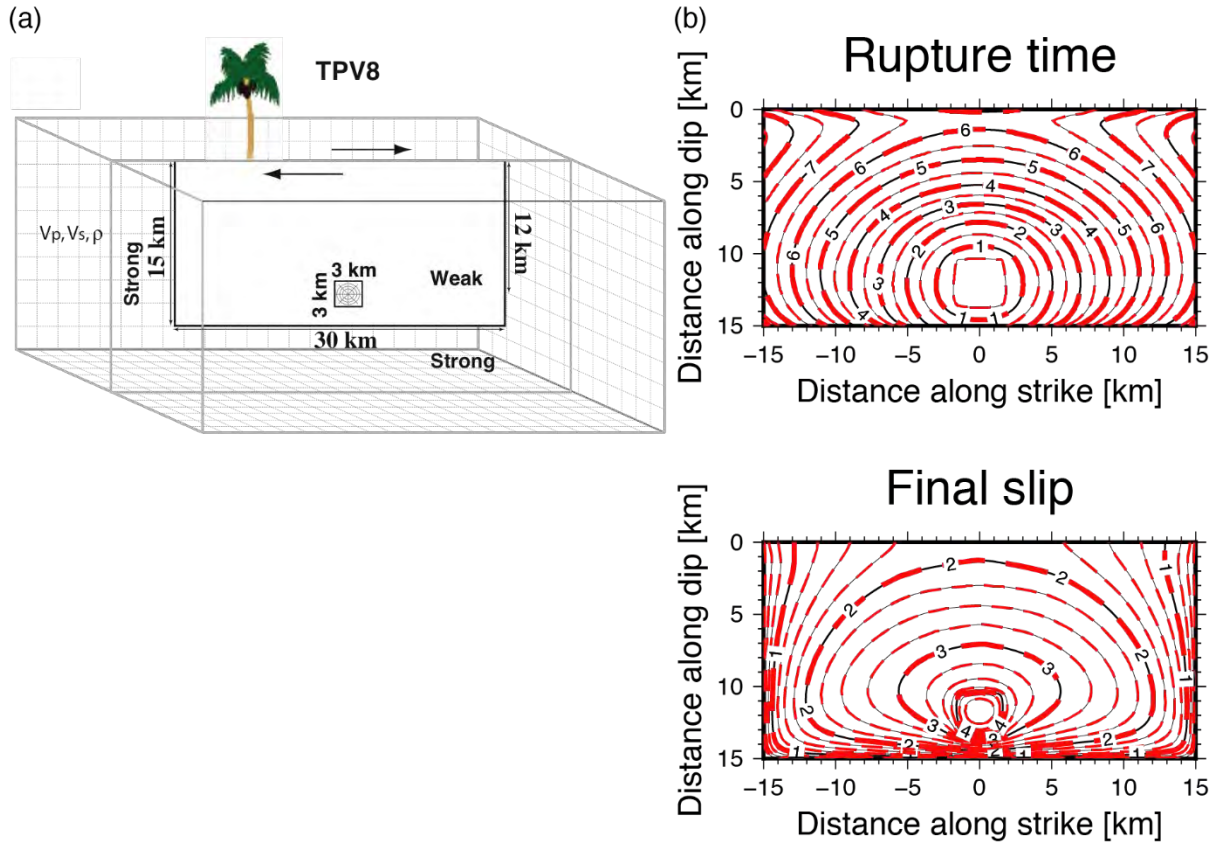


図2 (a) 均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層に、深さに依存する初期応力場がはたらくモデル (Harris et al., 2009)。(b)破壊時刻 (上) と最終すべり量 (下) の比較。黒線は Kase and Kuge (2001) のコードでの計算結果、赤点線は本事業のコードでの計算結果。

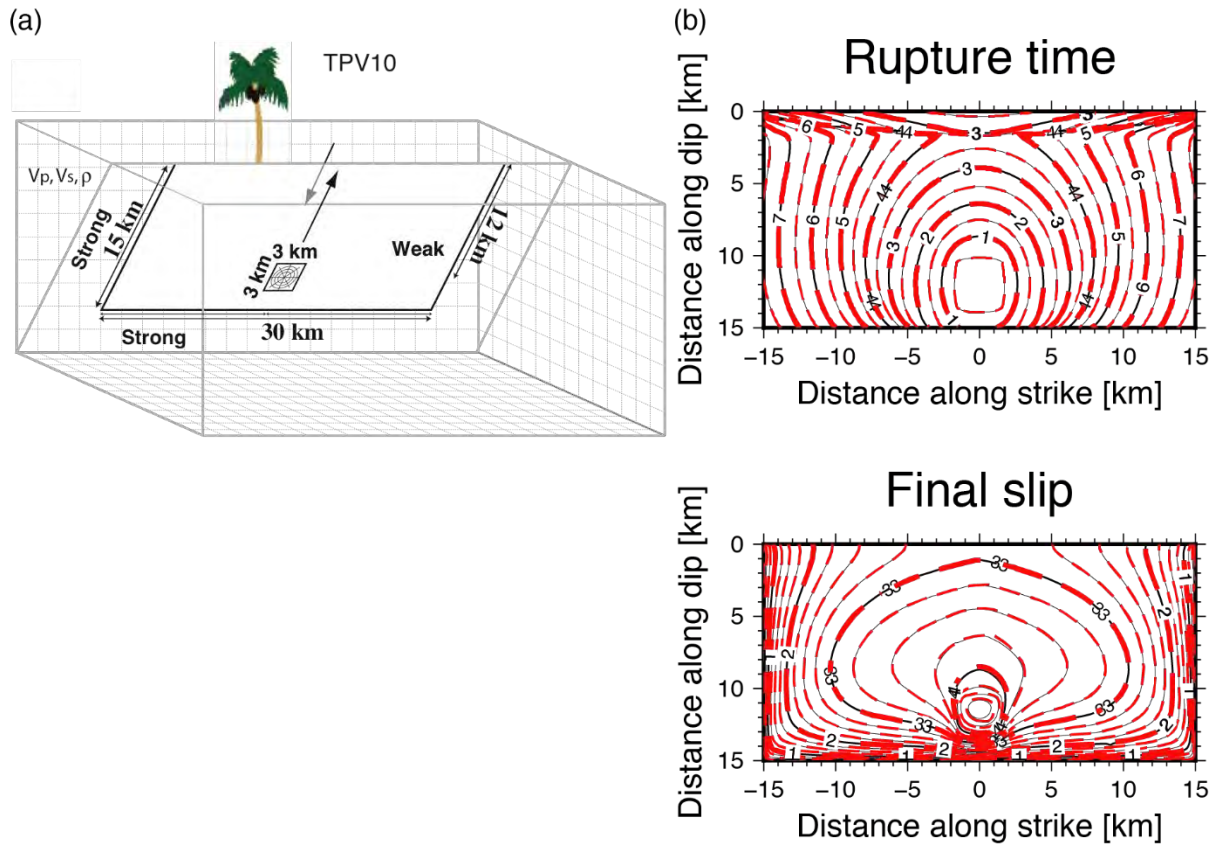


図3 (a) 均質半無限弾性体にある傾斜角  $60^\circ$  の正断層に、深さに依存する初期応力場がはたらくモデル (Harris et al., 2009)。 (b) 破壊時刻 (上) と最終すべり量 (下) の比較。黒線は Kase (2010) のコードでの計算結果、赤点線は本事業のコードでの計算結果。

(c) 結論ならびに今後の課題

糸魚川－静岡構造線断層帯北部～中南部区間を対象としたシミュレーションをおこなうため、各断層面の走向と傾斜角を反映できるように、一般座標系を直交座標系にmappingする手法を用いて、シミュレーションに用いるコードを改良した。コードの検証として、均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層、及び傾斜角 $60^\circ$ の正断層に、深さに依存する初期応力場がはたらく場合の破壊過程について、SCEC/USGS spontaneous rupture code verification project (Harris et al., 2009, 2011, 2018) で検証済のコードによる計算結果と比較し、本事業で開発したコードでの計算結果がよく一致していることを確認した。

実際に、糸魚川－静岡構造線断層帯北部～中南部区間を対象としたシミュレーションをおこなうためには、コードの検証が更に必要である。来年度は、非平面の断層面上での破壊過程についての検証をおこなった上で、他サブテーマの成果を反映したシミュレーションをおこない、破壊過程や連動性について考察する。

謝辞：図はGeneric Mapping Tool version 5.4.4 (Wessel et al., 2013) で作成しました。

(d) 引用文献

- Andrews, D.J., Rupture velocity of plane shear cracks, *J. Geophys. Res.*, 81, 5679–5687, 1976.
- Harris, R.A., M. Barall, R. Archuleta, E. Dunham, B. Aagaard, J.P. Ampuero, H. Bhat, V. Cruz-Atienza, L. Dalguer, P. Dawson, S. Day, B. Duan, G. Ely, Y. Kaneko, Y. Kase, N. Lapusta, Y. Liu, S. Ma, D. Oglesby, K. Olsen, A. Pitarka, S. Song, and E. Templeton, The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise, *Seism. Res. Let.*, 80, 119–126, doi:10.1785/gssrl.80.1.119, 2009.
- Harris, R.A., M. Barall, D.J. Andrews, B. Duan, S. Ma, E.M. Dunham, A.-A. Gabriel, Y. Kaneko, Y. Kase, B.T. Aagaard, D.D. Oglesby, J.-P. Ampuero, T.C. Hanks, and N. Abrahamson, Verifying a computational method for predicting extreme ground motion, *Seism. Res. Let.*, 82, 638–644, doi:10.1785/gssrl.82.5.638, 2011.
- Harris, R.A., M. Barall, B. Aagaard, S. Ma, D. Roten, K. Olsen, B. Duan, D. Liu, B. Luo, K. Bai, J.-P. Ampuero, Y. Kaneko, A.-A. Gabriel, K. Duru, T. Ulrich, S. Wollherr, Z. Shi, E. Dunham, S. Bydlon, Z. Zhang, X. Chen, S.N. Somala, C. Pelties, J. Tago, V.M. Cruz-Atienza, J. Kozdon, E. Daub, K. Aslam, Y. Kase, K. Withers, and L. Dalguer, A suite of exercises for verifying dynamic earthquake rupture codes, *Seism. Res. Let.*, 89, 1146–1162, doi:10.1785/0220170222, 2018.
- Ida, Y., Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *J. Geophys. Res.*, 77, 3896–3805, 1972.
- 井上智広, 動力学的モデルによる断層近傍の強震動分布予測, 東京大学修士論文, 1996.
- Ilan, A. and D. Loewenthal, Instability of finite difference schemes due to boundary conditions in elastic media, *Geophys. Prospect.*, 24, 431–453, 1976.

- Kase, Y. and K. Kuge, Rupture propagation beyond fault discontinuities: significance of fault strike and location, *Geophys. J. Int.*, 147, 330-342, 2001.
- Kase, Y. and S.M. Day, Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophys. Res. Let.*, 33, L10302, 2006.
- Kase, Y., Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 473-481, 2010.
- Wessel, P., W.H.F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe, Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, 94, 409-410, doi:10.1002/2013E0450001, 2013.
- Zhang, Z., W. Zhang, and X. Chen, Three-dimensional curved grid finite-difference modelling for non-planar rupture dynamics, *Geophys. J. Int.*, 199, 860-879, doi:10.1093/gji/ggu308, 2014.