

3.3.13 強震動予測高精度化のための震源モデル、堆積盆地構造モデルの構築に関する研究

3.3.13.1 動力学的断層モデルに関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：動力学的断層モデルに関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
九州大学大学院理学研究院	助手	亀伸樹	kame@geo.kyushu-u.ac.jp
九州大学大学院理学研究院	助教授	竹中博士	takenaka@geo.kyushu-u.ac.jp
九州大学大学院理学研究院	大学院博士課程	大島光貴	kouki@geo.kyushu-u.ac.jp
九州大学大学院理学研究院	大学院修士課程	内田浩二	uchida@geo.kyushu-u.ac.jp
京都大学防災研究所	助教授	澤田純男	sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

(c) 業務の目的

運動学的震源インバージョンから得られた震源モデルによって構築されている強震動予測のための震源モデル高精度化の方法として、動力学的断層モデルに関する研究の推進を行う。ここでは、主に2つの研究項目を遂行する。ひとつ目は実強震記録などに基づいた震源インバージョンによるすべりの時空間分布の推定と、それにもとづく動力学的パラメータの推定に関する研究である。この手法を延長して、実記録から動力学的パラメータを直接推定する方法の構築を試みる。もうひとつは、動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播に関する研究である。これらは、これまで運動学的な枠組みによって議論されてきた断層モデルを、動力学的な条件、即ち物理的に整合するモデルに基づく震源像を構築し、より広帯域の震源モデル構築をめざすことを目的としている。

(d) 5カ年の年次実施計画

- 1) 平成14年度:運動学的震源モデルに基づく動力学的パラメータの推定方法の構築と実地震記録への適用を行った。また動力学モデルによる分岐断層上の破壊伝播シミュレーションを行った。
- 2) 平成15年度:巨大地震の運動学的震源モデルの構築と強震動シミュレーションを行った。長大断層の破壊では、破壊進展方向にディレクティブ効果による大きな地震動の領域が、前方に広がることを示した。また複雑な断層面形状が破壊進展に及ぼす影響評価、動的破壊モデルに基づく震源インバージョン手法の開発のための基礎的研究を行った。
- 3) 平成16年度:すべり分布及び動的な破壊による断層面分岐に関する研究をより具体的な地震について適用し、その方法論の検証を行う。また動的破壊モデルに基づいて、動的パラメータを直接推定する震源インバージョン法の

構築を平成 15 年度に引き続き行う。

4) 平成 17 年度: 動力学的パラメータと運動学的モデルの比較及び構造探査によって得られた断層面形状に基づく動的破壊モデリングをはじめめる。地殻内地震及びプレート境界地震の震源モデル構築方法についての研究をすすめる。

5) 平成 18 年度: 動的破壊を考慮した断層モデルの構築を行う。

(e) 平成 16 年度業務目的

昨年度行われた、2002 年アラスカ・デナリ地震を例にとり行われた巨大地震の運動学的震源モデルを例にとり、断層分岐形状が断層破壊過程とどのような関係にあるかを数値実験によって調べる。すなわち、昨年度までに行われた複雑な断層面形状が破壊進展に及ぼす影響を、実際に起きた地震に適用し、方法論の検証を行うとともに、破壊過程により、分岐断層の破壊の進展の仕方についての検証を行う。また平成 15 年度より継続している動的破壊モデルに基づく震源インバージョン手法の開発を継続する。

(2) 平成16年度の成果

(2-1) デナリ断層からトチュンダ断層への動的な破壊の乗り移り：断層分岐理論をテストする

亀伸樹（九州大学大学院理学研究院）

kame@geo.kyushu-u.ac.jp

竹中博士（九州大学大学院理学研究院）

takenaka@geo.kyushu-u.ac.jp

大島光貴（九州大学大学院理学研究院）

kouki@geo.kyushu-u.ac.jp

内田浩二（九州大学大学院理学研究院）

uchida@geo.kyushu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

本研究で我々は、2002年11月3日 Mw7.9 デナリ地震で生じたデナリ断層からトチュンダ断層への動的な破壊の乗り移りの解析を行った。本研究では、Poliakov et al.¹⁾ や Kame et al.²⁾ の分岐断層構造における破壊シミュレーションから示された「分岐断層上の破壊経路選択は、初期応力配向方向、分岐角度、分岐点における破壊速度の三つのパラメタによって決定される。」という断層分岐理論とそこで用いられた計算手法（境界積分方程式法）をデナリ地震に適用する。この理論によってデナリ地震における動的破壊の乗り移り過程を説明できるか否かを、二次元分岐断層モデルを用いた破壊シミュレーションによりテストする。その結果、例外的な一例を除く全てのパラメタ値に対して破壊面の乗り移りが再現された。

(b) 業務の成果

はじめに

デナリ地震は、2002年11月3日に中央アラスカで発生した Mw7.9 の地震である。この地震発生後に地表に現れた破壊面は、震央から東に向かいデナリ断層上を沿って観察されるが、トチュンダ断層との分岐点より東ではトチュンダ断層上にものみ観察される（図1）。また、余震は分岐点より東では、トチュンダ断層付近にものみ分布している（図2）。以上のことからデナリ地震において破壊はデナリ断層上を伝播し、分岐後デナリ断層上では停止し、トチュンダ断層へと乗り移ったと推定される。

断層分岐理論の概要

Poliakov et al.¹⁾ は破壊強度が摩擦すべり弱体化則 (Palmer and Rice³⁾ , Rice⁴⁾) に従うと仮定したモード（右横ずれ）の直線亀裂において、破壊面の動的な分岐に関する亀裂先端の応力分布を解析的に求めた。その結果、主断層に対する主圧縮軸の角度 ψ と破壊速度 V_r を変化させると、変化応力集中は異なるパターンを示した。Kame et al.²⁾ は、上の二つのパラメタと分岐角度 ϕ の三つのパラメタが、分岐構造において分岐点より先での破壊経路選択にどのように影響するのかを数値計算により調べた（図3）。まず、破壊速度一定の場合において、主断層に対する最大主圧縮軸の角度が大きくなるに従い、破壊が励起され

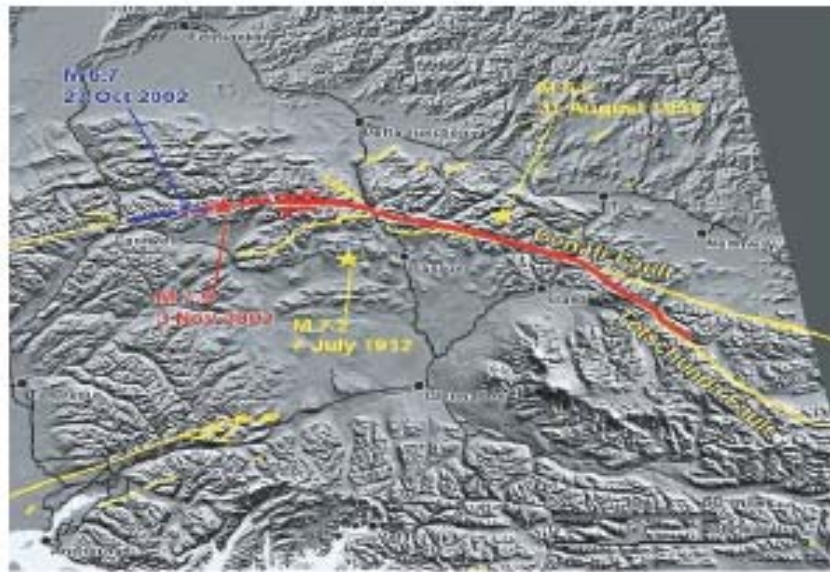


Figure 1 : Rupture path, solid line, of the M_w 7.9 Denali earthquake. A star towards the left of center of the figure marks the epicenter of the 3 November 2002 event [Figure courtesy: Alaska Division of Geological and Geophysical Surveys]

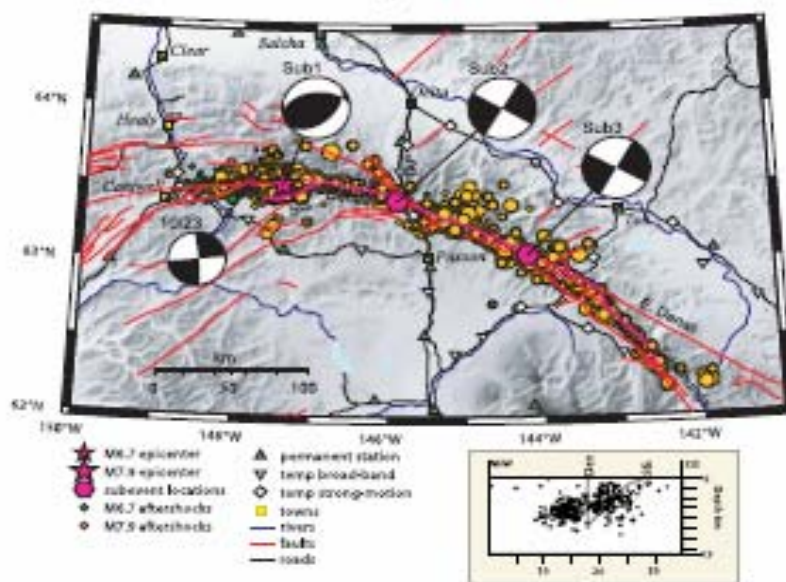


Figure 2 : Aftershocks of the M_w 7.9 event, from Eberhart-Phillips *et al.* [2003], also showing three sub events during the rupture.

る分岐断層の角度は、圧縮側($\varphi > 0$)から引張側($\varphi < 0$)へと変化した。これは最大主圧縮軸の角度の変化に伴い、右横ずれに適した範囲が変化するためである。また分岐角度が小さな場合には、互いに破壊を抑制しあう破壊面の相互作用が強いため、分岐後に破壊はどちらか片方においてのみ成長した。しかし破壊速度が大きな場合は相互作用が小さくなるため、分岐後に両断層において成長し続ける結果となった。

デナリ地震におけるパラメタの決定

デナリ地震の破壊の乗り移りの解析に用いる三つのパラメタは次のように設定する。まず、デナリ断層付近のデナリ断層に対する最大主圧縮軸の角度を求めたものとして次のものが挙げられる。Nakamura et al.⁵⁾は断層・火山地形の地質学的指標を用い、デナリ断層とトチュンダ断層の分岐点付近では主圧縮軸の角度は約 75 度であると推定した。また Ratchkovski and Hansen⁶⁾は、分岐点からいずれも西に 100 ~ 400km 離れた領域の最大・最小主圧縮軸の角度を、応力テンソルインバージョンにより求めた地震のメカニズム解から求めた。その結果、デナリ断層とトチュンダ断層の分岐点付近での主圧縮軸の角度を約 73 度であると推定した。最近では Ratchkovski⁷⁾が地震波形から得られたメカニズム解より約 80 度であると推定した。これらより、本研究では最大主圧縮軸の角度 ψ を 70 度と 80 度の二つの場合についてシミュレーションを行う。

次にデナリ地震におけるデナリ断層とトチュンダ断層の分岐点付近における破壊速度を求めた研究には次のものが挙げられる。Kikuchi and Yamanaka⁸⁾はデナリ地震全体における平均的な破壊速度は S 波速度の 80% 程度であると推定した。Eberhart-Phillips et al.⁹⁾は強震動記録のインバージョンより、デナリ地震は図 2 に示す三つのサブイベントからなり、そしてデナリ断層とトチュンダ断層の分岐点からそれぞれ西に 125km, 50km でおきたサブイベント 2 とサブイベント 3 の間の破壊速度は約 3.5km/s であったと推定した。また Ellsworth¹⁰⁾はサブイベント 2 の約 20km 西での破壊速度は約 $0.8C_s$ (C_s は S 波速度) であると推定した。これらより、本研究では分岐点における破壊速度 v_f を $0.8C_s$ を目安に様々な値でシミュレーションを行う。

最後に、Savage and Lisowski¹¹⁾による中央アラスカの地図によると、トチュンダ断層はデナリ断層の引張側に 15 度傾いている。よって分岐角度は $\varphi = -15^\circ$ と設定する。

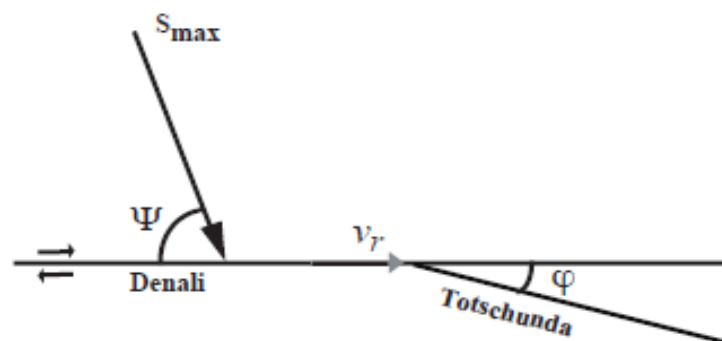


図 3 : Fault geometry used in the model along with the associated parameters.

数値計算手法

動的破壊伝播シミュレーションには、Kame et al.²⁾と同様の二次元境界積分方程式法を用いる。境界積分方程式法では亀裂によるトラクションの増分は亀裂上の滑り履歴の観点から記述される(例えば、Cochard and Madariaga¹²⁾)。この手法の利点として、破壊面の形状に制限が無く、計算領域が断層面上に限られることがあげられる。デナリ断層は、長く破壊が走り、深さ方向には有限であるため、二次元でモデル化することはできない。従来、三次元における分岐構造の破壊伝播シミュレーションが行われてきた(例えば Aochi et al.^{13),14)}, Aochi and Fukuyama¹⁵⁾, Oglesby^{16),17),18)})。しかし三次元では十分細かなグリッドを用意することが出来ないため、破壊速度 Vr の動的な分岐への影響を調べるのが困難である。そのため本研究では二次元で考える。本研究では、Ida¹⁹⁾ や Palmer and Rice³⁾の提唱した摩擦すべり弱化学を用いる。そしてクーロン摩擦則を導入し、断層上のせん断破壊強度が常に法線応力に比例するように定式化する。本研究では長さの基準として破壊が停止しているときのすべり弱化学領域の長さ R_0 をとる(例えば Palmer and Rice³⁾, Rice⁴⁾)。

自発的破壊シミュレーションにさきがけて、静的平衡状態にある初期亀裂を配置する。その大きさを Lc/R_0 よりわずかに大きくする。ここで Lc は、Andrews²⁰⁾で導入された破壊エネルギー平衡から求めた亀裂の最小臨界長さである。これにより、初期亀裂両端での応力集中の度合いがピーク強度を超えるため破壊が開始する。その後、各時間ステップにおいて亀裂先端での応力を求め、本研究における構成則に従い、破壊の成長・停止を判定していく。また自発的破壊シミュレーションにおいて分岐点での破壊速度 Vr の変化は、破壊開始点を分岐点に近づけたり遠ざけたりすることにより起こしている。その意味で、本シミュレーションは、破壊過程全体ではなく、分岐点付近での破壊経路選択のみに注目していることに注意が必要である。

結果

前々章で設定したデナリ地震のパラメタを用いて、デナリ地震における破壊の乗り移りが再現されるか検証する。まず、 $\Psi = 70^\circ$, $\varphi = -15^\circ$ に固定し、 $Vr = 0.6, 0.8Cs$ と変化させたときの破壊経路について調べる。図4～5はそれぞれの場合におけるデナリ断層とトチュンダ断層面上でのすべり速度を示す。

$$\Psi=70^\circ, \nu_r = 0.6c_s, \varphi = -15^\circ$$

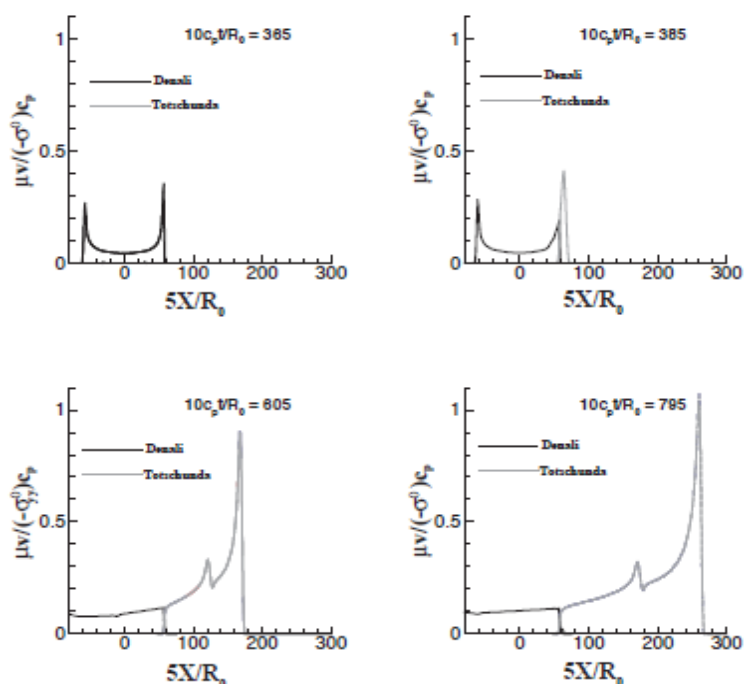


図 4 : Plot of slip velocity along the Denali and Totschunda fault segments for $\Psi = 70^\circ$, $V_r = 0.6c_s$ case. Slip velocity variation along Totschunda is projected on the Denali fault.

Totschunda fault begins at $5X/R_0 = 58$. V_r , C_s , R_0 , μ , ν , $-\sigma_{yy}^0$ and C_p represent rupture velocity near the branching point, S-wave speed of the medium, size of the slip-weakening zone, shear modulus of the medium, slip velocity, initial normal compressive stress and P-wave velocity of the medium respectively.

V_r が $0.6c_s$ と $0.8c_s$ の場合には、分岐後にデナリ断層上のすべり速度は時間と共に大きく減少している(図4と5)。これは分岐後のデナリ断層の破壊停止を意味する。つまり破壊はデナリ断層上を伝播し、分岐点より先ではデナリ断層上では破壊停止し、トチュンダ断層上のみを伝播する結果となった。これは $\Psi = 70^\circ$ と主圧縮軸が主断層であるデナリ断層に対して高角度であり、分岐断層であるトチュンダ断層のほうが破壊に適していることと、 $\varphi = -15^\circ$ と分岐角度が小さいために互いに破壊を抑制しあう破壊面の相互作用が強いことから説明できる。以上のように、この二つの場合にはデナリ地震における破壊の乗り移りが再現された。

$Vr = 0.9Cs$ の場合には、トチュンダ断層と比べると小さいが、分岐後にデナリ断層上においても有意なすべり速度が見られる(図6)。このことから、分岐後も両断層において破壊は励起され、継続する結果となった。これは高速伝播による波動の効果により、主断層においても破壊を励起するほどの応力の高い領域が出現したためだと考えられる。以上の

$$\Psi=70^\circ, v_T = 0.8c_s, \varphi = -15^\circ$$

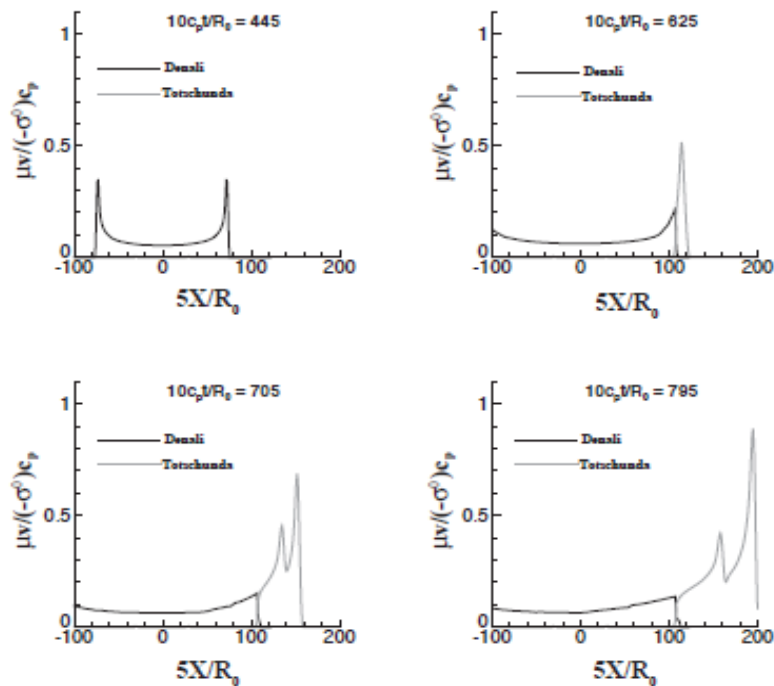


図5 : Plot of slip velocity along the Denali and Totschunda fault segments for $\Psi = 70^\circ$, $Vr = 0.8Cs$ case. Slip velocity variation along Totschunda is projected on the Denali fault. Totschunda fault begins at $5X/R_0 = 108$.

ように、この場合にはデナリ地震の破壊の乗り移りとは異なる破壊経路が選択された。

次に最大主圧縮の角度を $\Psi = 80^\circ$ の場合について考える。この場合には最大主圧縮が主断層に対してさらに高角度となるため、分岐断層が主断層にくらべてより破壊に適することになる。その結果、 Vr が $0.6Cs$ と $0.8Cs$ の場合はもちろん、さらに $\Psi = 70^\circ$ では両断層で破壊が継続した破壊

速度の大きな場合においても、分岐点より先ではデナリ断層上では破壊停止し、トチュンダ断層上のみを伝播した(図7)。

$$\Psi=70^\circ, v_r = 0.9c_s, \varphi = -15^\circ$$

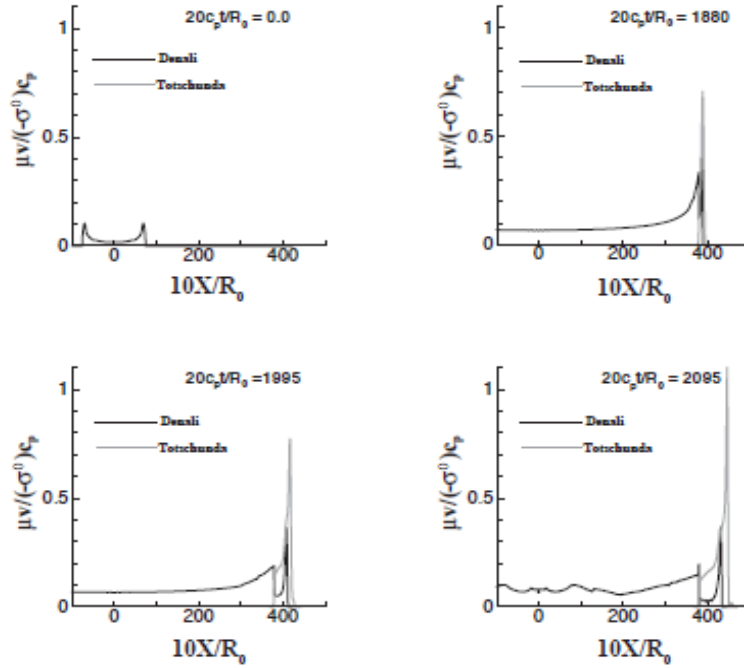


Figure 6 : Plot of slip velocity along the Denali and Totschunda fault segments for $\Psi = 70^\circ$, $Vr = 0.9Cs$ case. Slip velocity variation along Totschunda is projected on the Denali fault. Totschunda fault begins at $10X/R_0 = 380$.

$$\Psi=80^\circ, v_r = 0.87c_s, \varphi = -15^\circ$$

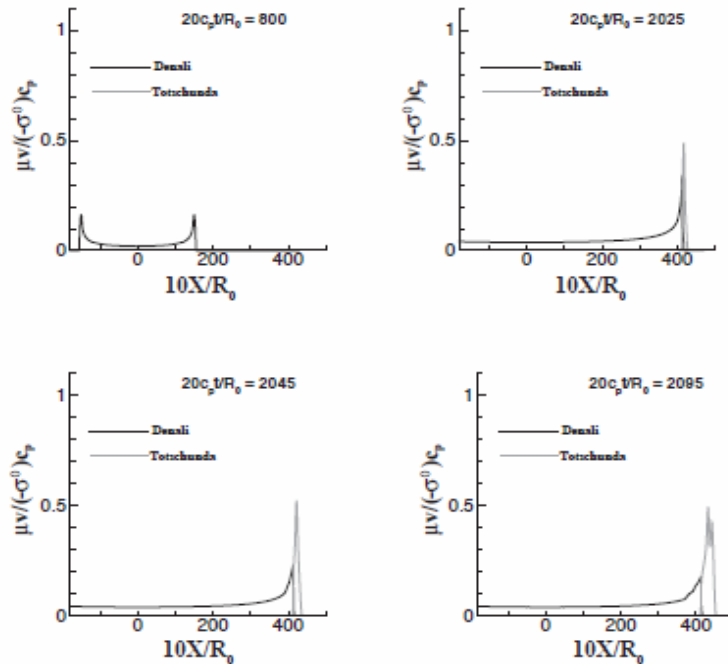


Figure 7 : Plot of slip velocity along the Denali and Totschunda fault segments for $\Psi = 70^\circ$, $Vr = 0.87Cs$ case. Slip velocity variation along Totschunda is projected on the Denali fault. Totschunda fault begins at $10X/R_0 = 414$.

(c) 結論ならびに今後の課題

我々は、Poliakov et al.¹⁾と Kame et al.²⁾の分岐断層における破壊経路選択が主圧縮軸配向、分岐角度、分岐点における破壊速度の三つのパラメタによって決定されるという断層分岐理論を、デナリ地震においてテストした。我々は Kame et al.²⁾ に従い、デナリ地震における動的な破壊の乗り移りを、二次元分岐断層モデルにおける破壊経路が自己選択されるモード型亀裂の自発的成長としてモデル化して、境界積分方程式法により解析した。また、断層面上の破壊強度は、クーロン摩擦型の滑り弱化則に従うと仮定した。結果、 $\psi = 70^\circ$, $Vr = 0.9Cs$ の場合には、分岐後に破壊はデナリ断層とトチュンダ断層の両方を伝播し、実際のデナリ地震とは異なる破壊経路となったが、この例外的な場合を除いた全ての場合において、デナリ地震におけるデナリ断層からトチュンダ断層への破壊の乗り移りが再現された。

分岐点付近の破壊経路選択に限定した解析ではあるが、分岐断層理論を現実の断層系へと適用し、その有効性を検証できた。しかし、地震発生前に将来発生する地震破壊経路を予測することを実現するには克服すべき課題が残る。我々は地中での断層面の形状を正確に知っているとは言い難い。これに関しては、断層構造探査により地下断層の形状情報の精密化が期待される。また、我々の研究は断層系を取り巻く初期応力状態、特に分岐点付近の応力主軸方向を知ることが需要であることを主張している。これらの応力の方向には、その地域のテクトニックな応力だけでなく、以前にその断層系で発生した地震の効果も含めなければならない。なぜなら、この効果により強い局所的応力の偏向がもたらされる可能性があるからである。したがって、地殻応力状態の詳細の解明が必用とされる。そのような応力不均質が存在する場合には、破壊速度に依存する分岐点における破壊経路の選択は、ある程度のあいまいさを残してしか決定できない可能性がでてくる。しかしながら、地震危険度評価に貢献するためにはこのような研究を推進していくことは重要である。

我々がここに示した解析は二次元であり、現在のコンピュータの能力を用いて分岐点付近の滑り弱化過程の性質を十分なグリッド分解能を達成することが可能な例である。しかしながら、二次元モデルはやむを得ない近似解であることに留意する必用があろう。破壊の動的な乗り移りに関しては Aochi and Fukuyama¹⁵⁾ で用いられたモデルで示された少なくとも二つの三次元的性質が重要な役割を果たすであろう。一つは、破壊速度の深さ方向の分布であり（一般的に、破壊速度は地殻浅部では遅い。これは堆積層や地殻浅部における帯水状態の違いによる。）もう一つは破壊先端の不規則な形状であろう（三次元モデルでは破壊面の前線が同時に分岐点に到着しないであろう）。今後の三次元モデルの展開と実際の野外調査の事例解析により、三次元的性質がどれだけ重要か示していく必用があろう。

(d) 引用文献

- 1) Poliakov, A. N., Dmowska, R. and Rice, J. R.: Dynamic shear rupture interactions with fault bends and off-axis secondary faulting, *Journal of Geophysical Research*, 107, (B11), 2295, doi: 10.1029/2001JB000572, 2002.
- 2) Kame, N., Rice J. R., and Dmowska, R.: Effects of pre-stress state and rupture velocity on dynamic fault branching, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), cn: 2265, doi: 10.1029/2002JB002189, pp. ESE 13-1 to 13-21, May 2003.

- 3) Palmer, A. C. and Rice, J. R.: The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay, *Proceedings of Royal Society of London A.*, 332, pp.527--548, 1973.
- 4) Rice, J. R.: The mechanics of earthquake rupture in *Physics of the Earth's Interior*, Proc. International School of Physics 'Enrico Fermi', pp555--629, ed. Dziewonski, A.M. and Boschi, E., Italian Physics Society and North-Holland Publ. Co., 1980.
- 5) Nakamura, K., Plafker, G., Jacob, K. H., and Davies, J. N.: A tectonic stress trajectory map of Alaska using information from volcanoes and faults, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 55, 89, 100, 1980.
- 6) Ratchkovski, N. A., and Hansen, R. A.: New constraints on tectonics of interior Alaska: Earthquake locations, source mechanisms, and stress regime, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, pp.998- 1014, 2002a.
- 7) Ratchkovski, N. A.: Change in stress directions along the central Denali fault, Alaska after the 2002 earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, 30(19), 2017, doi: 10.1029/2003GL017905, 2003.
- 8) Kikuchi, M. and Yamanaka, Y.: Source rupture processes of the central Alaska earthquake of Nov. 3, 2002, inferred from teleseismic body waves (the 10/23 M6.7 event), EIC Seismological Note No. 129, revised 5 November 2002. Available from the Earthquake Information Center, University of Tokyo, at http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/021103AL-e.html.
- 9) Eberhart-Phillips, D., Haeussler, P. J., Freymueller, J. T., Frankel, A. D., Rubin, C. M., Craw, P., Ratchkovski, N. A., Anderson, G., Carver, G. A., Crone, A. J., Dawson, T. E., Fletcher, H., Hansen, R., Harp, E. L., Harris, R. A., Hill, D. P., Hreinsdóttir, S., Jibson, R. W., Jones, L. M., Kayen, R., Keefer, D. K., Larsen, C. F., Moran, S. C., Personius, S. F., Plafker, G., Sherrod, B., Sieh, K., Sitar, N., and Wallace, W. K.: The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event, *Science*, 300, pp.1113-1118, 2003.
- 10) Ellsworth, W. L., Çelebi, M., Evans, J. R., Jensen, E. G., Nyman D. J., and Spudich, P.: Processing and modeling of the pump station 10 record from the November 3, 2002, Denali fault, Alaska earthquake, Preprint For 11th International Conference On Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Berkeley, CA, Jan. 7-9, 2004.
- 11) Savage, J. C., and Lisowski, M.: Strain accumulation along the Denali fault at the Nenena river and Delta river crossings, Alaska, *J. Geophys. Res.*, 96, pp.14481-14492, 1991.
- 12) Cochard, A. and Madariaga, R.: Dynamic faulting under rate-dependent friction, *Pure and Applied Geophysics*, 142, pp.419-445, 1994.
- 13) Aochi, H., Fukuyama, E., and Matsu'ura, M: Spontaneous rupture propagation on a non-planar fault in 3D elastic medium, *Pure Appl. Geophys.*, 157, pp.2003--2027, 2000a.
- 14) Aochi, H., Fukuyama, E., and Matsu'ura, M.: Selectivity of spontaneous rupture propagation on a branched fault, *Geophys. Res. Lett.*, 27, pp.3635--3638, 2000b.
- 15) Aochi, H., and Fukuyama, E.: Three-dimensional non-planar simulation of the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 107 (B2), cn: 2035, doi: 10.1029/2000JB000061, pp. ESE 4-1 to 4-12, 2002.
- 16) Oglesby, D. D., Archuleta, R. J., and Nielsen. S. B.: The three-dimensional dynamics of dipping faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90: pp.616-628, 2000.

- 17) Oglesby, D. D., Archuleta, R. J., and Nielsen. S. B., Dynamics of dip-slip faulting: Explorations in two dimensions, J. Geophys. Res., 105:13, pp.643-13,653, 2000.
- 18) Oglesby, D. D., and Day, S. M.: The effect of fault geometry on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, Geophys. Res. Lett., 28, pp.1831-1834, 2001.
- 19) Ida, Y., Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, J. Geophys. Res., 77, pp.3796-3805, 1972.
- 20) Andrews, D. J., Rupture velocity of plane strain shear cracks, J. Geophys. Res., 81, pp.5679-5687, 1976.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Bhat, H., Dmowska, R., Rice, R. and Kame, N.	Dynamic slip transfer from the Denali to the Totschunda faults, Alaska: testing theory for fault branching	Bulletin of the Seismological Society of America 94, S202-S213, 2004.	Dec. 2004
内田浩二 亀 伸樹	分岐断層力学モデルの地震波放射	地震、第57巻 377-385, 2005.	2005年2月
Kame, N.	Quasi-static Modeling of Non-planar Crack Growth With/without Open Kinks	American Geophysical Union Fall Meeting	16, Dec. 2004
Uchida, K., and Kame, N.	Seismic Wave Radiation of Dynamic Rupture in Branched Fault Modeling	American Geophysical Union Fall Meeting	16, Dec. 2004
亀 伸樹	断層面形状の複雑化を考慮に入れた地震破壊ダイナミクスの理論的研究	日本地震学会秋季大会	2004年 10月09日
内田浩二 亀 伸樹	分岐断層力学モデルの地震波放射	日本地震学会秋季大会	2004年 10月09日
Bhat, H., Dmowska, R., Rice, R. and Kame, N.	Dynamic slip transfer from the Denali to the Totschunda faults, Alaska: testing theory for fault branching,	地球惑星科学合同大会	2004年 5月12日

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-2)動的破壊モデルによる震源インバージョン手法の開発

澤田純男（京都大学防災研究所）

sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

地表で観測される強震動記録を用いた震源断層の破壊過程を推定する手法として、断層の破壊動力学に基づく拘束条件を導入した推定手法について考察した。動力学に基づく拘束条件を導入することにより高解像度な震源像が推定されるが、各要素の破壊開始時に滑り変位に対する鋭敏性が存在するため、計算時間を要する逆解析手法の適用を余儀なくされていた。本業務ではこの鋭敏性を回避することを目的として、集約動的パラメタと称する破壊開始時刻を加えた新たなパラメタ群を推定変数として導入して、鋭敏性を含まない逆問題の定式化に成功した。また、設定した観測点配置と断層面との位置関係で得られるパラメタの解像度を知るために、パラメタ数を徐々に増やす手法を提案し、適切な解像度で震源像を得ることを可能とした。提案した逆解析手法は従来の動力学に基づくインバージョン手法と比べて計算時間を約 1/100 倍に短縮することに成功した。

(b) 業務の成果

概要

近年、地震計網の充実と共に強震動記録を用いた断層破壊過程の推定が様々な地震について実施されている。推定された破壊過程は、入力地震動の構成要素の一つである震源モデルの構築に有用である。しかしながら、現在広く実施されている推定手法は運動学に基づいて断層の滑り分布を推定する手法であり、時空間平面上で平滑化フィルタを施した滑り分布に基づく震源像が得られている。これは、耐震設計に有用な周波数帯域である比較的短周期成分を含む入力地震動が生成可能なほど高解像度なものではない。本業務では、動力学に基づく拘束条件を導入することで平滑化フィルタを用いない震源破壊過程の推定手法について考察した。推定するパラメタとして新たに集約動的パラメタを提案し、それを用いることで鋭敏性を回避し、従来の手法と比較して計算時間を大幅に短縮させた動力学に基づくインバージョン手法の構築に成功した。

逆問題の定式化

動力学に基づく断層破壊の支配方程式として、波動方程式から導出される境界積分方程式¹⁾(BIE)と断層の摩擦構成則を用いる²⁾。

$$T_{\alpha}^{ijk} = T_{I\alpha}^{ij} - \frac{\mu}{2V_S} V_{\alpha}^{ijk} + \sum_{lm\beta} \sum_{\tau < k} B_{\alpha\beta}^{lm\tau} V_{\beta}^{lm\tau}, \quad (1)$$

$$D_{\alpha}^{ijk} = 0 \quad \text{for } T_{\alpha}^{ijk} < T_{\rho\alpha}^{ij},$$

$$T_{\alpha}^{ijk} = \begin{cases} -\frac{T_{\rho\alpha}^{ij} - T_{r\alpha}^{ij}}{D_{C\alpha}^{ij}} \cdot D_{\alpha}^{ijk} + T_{\rho\alpha}^{ij} & D_{\alpha}^{ijk} < D_{C\alpha}^{ij} \\ T_{r\alpha}^{ij} & D_{C\alpha}^{ij} \leq D_{\alpha}^{ijk} \end{cases} \quad \text{for } T_{\rho\alpha}^{ij} \leq T_{\alpha}^{ijk}. \quad (2)$$

ここで、 D_α^{ijk} , V_α^{ijk} , T_α^{ijk} は断層の滑り変位、滑り速度、表面力であり、 (i, j) は断層面上の位置、 k は時刻、 α は成分を表す。また、 B は過去の滑り速度が対象時刻の表面力に与える影響を表す係数である。 $T_{l\alpha}^{ij}$, $T_{p\alpha}^{ij}$, $T_{r\alpha}^{ij}$ は初期表面力、降伏表面力、残留表面力を表し、 $D_{C\alpha}^{ij}$ は滑り弱化距離を表す。 v_s , μ はせん断波速度、せん断剛性である。

式(1)、(2)から応力項を除去し、差分近似 $V_\alpha^{ijk} = (D_\alpha^{ijk} - D_\alpha^{ijk-1}) / \Delta t$ を用いて滑り速度を滑り変位に置き換えると次式を得る。

$$\begin{aligned} D_\alpha^{ijk} &= 0 && \text{for } T_\alpha^{ijk} < T_{p\alpha}^{ij}, \\ D_\alpha^{ijk} &= f_{a\alpha}^{ij} \left(D_\alpha^{ijk-1} + \frac{2v_s}{\mu} \sum_{lm\beta} \sum_{\tau \leq k-1} B_{\alpha\beta}^{lm\tau} (D_\beta^{lm\tau} - D_\beta^{lm\tau-1}) \right) + f_{b\alpha}^{ij} && \text{for } D_\alpha^{ijk} < D_{C\alpha}^{ij}, \\ D_\alpha^{ijk} &= D_\alpha^{ijk-1} + \frac{2v_s}{\mu} \sum_{lm\beta} \sum_{\tau \leq k-1} B_{\alpha\beta}^{lm\tau} (D_\beta^{lm\tau} - D_\beta^{lm\tau-1}) + f_{c\alpha}^{ij} && \text{for } D_{C\alpha}^{ij} \leq D_\alpha^{ijk}. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $f_{a\alpha}^{ij}$, $f_{b\alpha}^{ij}$, $f_{c\alpha}^{ij}$ は時刻 k に依存しない定数で、次式で表現される。

$$f_{a\alpha}^{ij} = \frac{\frac{\mu}{2v_s\Delta t}}{\frac{\mu}{2v_s\Delta t} - \frac{T_{C\alpha}^{ij}}{D_{C\alpha}^{ij}}}, \quad f_{b\alpha}^{ij} = \frac{\frac{T_{0\alpha}^{ij} - T_{C\alpha}^{ij}}{\mu}}{\frac{\mu}{2v_s\Delta t} - \frac{T_{C\alpha}^{ij}}{D_{C\alpha}^{ij}}}, \quad f_{c\alpha}^{ij} = \frac{2v_s\Delta t}{\mu} T_{0\alpha}^{ij}. \quad (4)$$

$f_{a\alpha}^{ij}$, $f_{b\alpha}^{ij}$, $f_{c\alpha}^{ij}$ は動的応力降下量 $T_{C\alpha}^{ij} = T_{p\alpha}^{ij} - T_{r\alpha}^{ij}$ と静的応力降下量 $T_{0\alpha}^{ij} = T_{l\alpha}^{ij} - T_{r\alpha}^{ij}$ とを用いて表現される。式(3)は時刻 k の滑り変位を陽に与える関係式であり、その値は T_p , D_C と f_a , f_b , f_c の値に依存する。すなわち、 T_p , D_C および f_a , f_b , f_c の値が与えられれば、断層面に発生する滑り変位を計算することができるため、 T_p , D_C および f_a , f_b , f_c の値を観測から推定すればよい。

しかし、破壊開始を支配するパラメタの降伏表面力 T_p はその値の微小変化に対して鋭敏な滑り変位の変化を引き起こす。例えば、破壊が生じていない要素の降伏表面力の値を徐々に小さくすれば、ある値を境にして突然滑り変位が発生する。このような滑り変位の鋭敏性は降伏表面力に対する評価関数の不連続を引き起こすため、降伏表面力を直接推定するならばランダムサーチ法などの時間を要する逆解析手法を適用せざるを得ない。

そこで本業務では降伏表面力に替えて破壊開始時刻 t_1 を推定変数に用い、式(3)の破壊開始の判定に破壊開始時刻を用いる。破壊開始時刻はその値の微小変化に対して滑り変位の変化が滑らかであるため、偏微分を要する逆解析手法が適用可能となる。また、式(3)、(4)から次式の関係式が導出される。

$$f_{b\alpha}^{ij} = -\frac{1}{\frac{\mu}{2v_s\Delta t} - \frac{T_{C\alpha}^{ij}}{D_{C\alpha}^{ij}}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \sum_{lm\beta} \sum_{\tau \leq t_\alpha^{ij}-1} B_{\alpha\beta}^{lm\tau} (D_\beta^{lm\tau} - D_\beta^{lm\tau-1}), \quad (5)$$

$$f_{c\alpha}^{ij} = T_{C\alpha}^{ij} - \frac{2v_s}{\mu} \sum_{lm\beta} \sum_{\tau \leq t_\alpha^{ij}-1} B_{\alpha\beta}^{lm\tau} (D_\beta^{lm\tau} - D_\beta^{lm\tau-1}). \quad (6)$$

f_a , f_b , f_c は式(4)、(5)、(6)を用いて全て破壊開始時刻 t_1 、滑り弱化距離 D_C 、動的応力降下量 T_C を用いて表現される。また、滑り変位の方向が断層上で一定かつCMT解により既知であると仮定すれば、そのパラメタの絶対値のみが未知変数である。従って、 t_1 , D_C , T_C の絶対値を動力学に基づく震源インバージョン手法の推定変数とし、このパラメタを集約動的パラメタと呼ぶ。

地表面波形は表現定理を用いることで断層の滑り変位とグリーン関数により計算されることから、断層の滑り変位を式(3)により与えれば表現定理を介して集約動的パラメタから直接地表面波形を計算できる。すなわち、以下の観測方程式が得られる。

$$u = h(x) + v. \quad (7)$$

ここで、 x は集約動的パラメタから成る推定ベクトル、 v は誤差ベクトル、 u は地表面波形から成る観測ベクトルである。本業務では観測ベクトルに Wavelet 変換を施した加速度波形の Scalogram と変位波形とを用いて、共役勾配法により集約動的パラメタの推定を行う。

数値解析例

図 1 に数値解析例に用いた断層と観測点の配置を示す。断層分割数を 8×8 とし、応力降下量の大きいアスペリティ領域を断層中央付近に設定する。

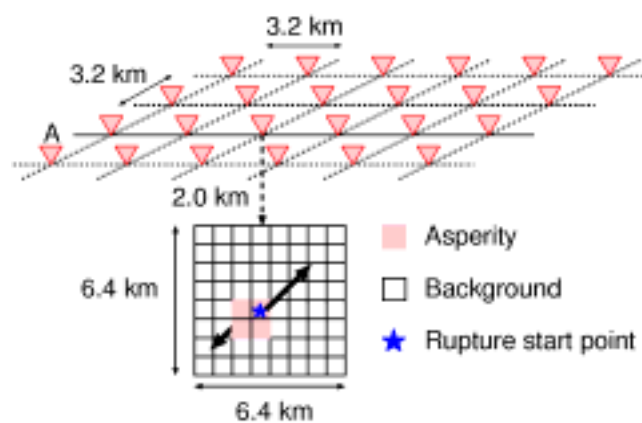


図 1 : 数値解析例に用いた断層と観測点の配置

式(7)を用いた逆解析では鋭敏性が除去されているものの、その非線形性により解が局所的最適解に陥る可能性が高い。そこで、集約動的パラメタが一定値と仮定する領域を小断層とし、その小断層数を段階的に増加させながら推定した。各段階における解を次の段階の初期値として用いることで段階的に分解能を増加させたパラメタ推定が可能となる。図 2 に推定された動的応力降下量分布を示したが、小断層数の増加に従い真値をよく再現することが確認できる。

また、小断層数が 4×4 と 8×8 との場合において推定値が似ており、この断層と観測点配置では 8×8 の小断層に対して解像度が不足していることが示されている。すなわち、段階的に解を推定する手法ではその問題設定が保証する解像度を予め知る必要がなく、適切な解像度で解が得られる。

この数値解析例では、推定変数 192 個に対して要した計算時間は約 60 時間である。従来の研究³⁾では推定変数 32 個に対して 8CPU、37 日を要しており、およそ 100 倍の高速化が達成された。これは、鋭敏性の除去により偏微分を要する逆解析手法が適用できたためである。

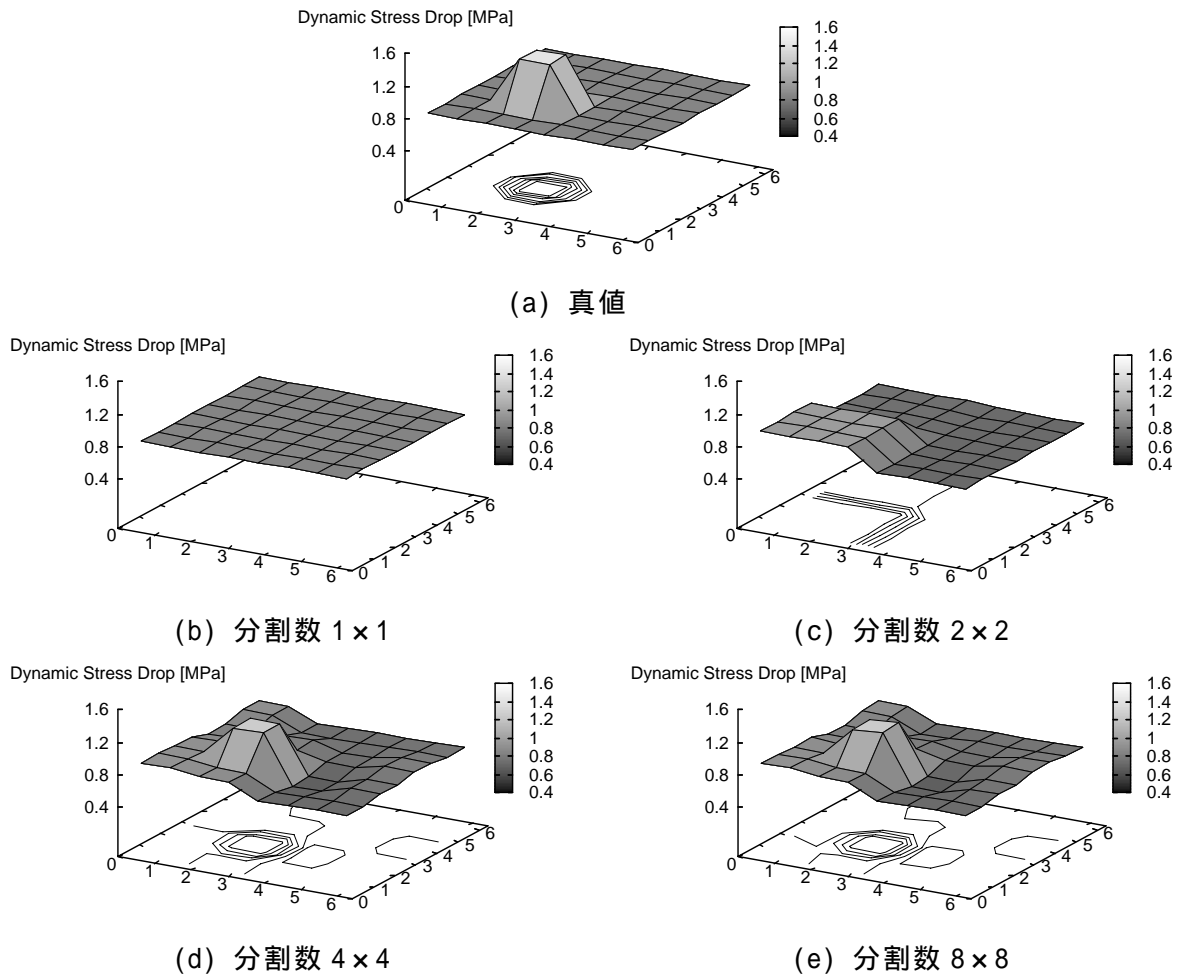


図 2 : 段階的に推定された動的応力降下量

(c) 結論ならびに今後の課題

本業務では、新しい動力学に基づく震源インバージョン手法を開発した。推定変数として集約動的パラメタを提案し、集約動的パラメタを推定変数とすることで鋭敏性を除去した。数値解析例を用いてその有用性を示し、特に推定変数値を一定とする領域数を段階的に増加させることで局所的最適解を避けながら推定できることを示した。また、鋭敏性の除去により偏微分を用いる逆解析手法の適用が可能となり、推定時間の大幅な短縮が達成された。

(d) 引用文献

- 1) Fukuyama, E. and Madariaga R.: Rupture dynamics of a planar fault in a 3D elastic medium: rate- and slip-weakening friction, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.88, pp.1-17, 1998.
- 2) Ida, Y.: Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, J. Geophys. Res., Vol.77, pp.3796-3805, 1972.
- 3) Peyrat, S. and Olsen K. B.: Nonlinear dynamic rupture inversion of the 2000 Western

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
後藤浩之 澤田純男	拡張カルマンフィルタによる震源動力学的パラメータの直接インバージョンの試み	地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会	平成 16 年 5 月 12 日
後藤浩之 澤田純男	フィルタリングアルゴリズムによる震源動力学的パラメータの直接インバージョンの試み	日本地震学会 2004 年秋季大会	平成 16 年 10 月 10 日

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 17 年度業務計画案

これまでに得られた分岐断層に関する理論的動的破壊モデルを、平成 16 年度の探査で得られた近畿圏の活断層への適用を検討する。最近の震源モデル情報をもとに、地殻内地震、及びプレート境界地震の震源モデル構築法についての研究をすすめ、近畿圏における強震動予測のための震源モデル化策定方法を検討する。そのためには、3.2、3.3等で得られている活断層、地殻構造及びプレート境界に関する不均質性情報を活用した震源モデル構築方法を検討する。