地震の動的破壊パラメータ

防災科学技術研究所*

福山 英一

Parameters for Earthquake Rupture Dynamics

Eiichi FUKUYAMA

National Research Institute for Earth Science and Disaster
Prevention, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

(Received April 9, 2008; Accepted July 7, 2008)

Recent progress on our understanding of earthquake rupture dynamics based on seismological observations is reviewed. One of the most important advances is the physical understanding of breakdown process that occurs at the propagating rupture front of earthquakes. The parameters such as breakdown stress drop, slip-weakening distance and fracture energy, which control the progress of dynamic rupture propagation, have now been able to be estimated. Fracture energy and hence slip-weakening distance are found to be scale dependent. To achieve such scale dependence, several different physical processes might microscopically develop, one of which dominates depending on the environmental situation at the source. Then its macroscopic behavior becomes quite simple and seems to be modeled with a single law.

Key words: Slip-weakening distance, Fracture energy, Supershear rupture, Earthquake rupture dynamics

§ 1. はじめに

地震の破壊が進展している時、破壊フロントにおいて破壊が加速するか減速するかは、Griffith の破壊条件 [Griffith (1920)] のように、破壊が進展する際に破壊フロントにおいて単位時間あたりに消費される破壊エネルギーと破壊フロントへ単位時間あたりに供給される歪エネルギーのバランスでコントロールされる [Freund (1972)]。この 2 つのエネルギーの需給が平衡状態にある時、破壊は一定速度で伝播する。破壊フロントにおいて消費されるエネルギーが大きい場合は、破壊は減速し、最後には停止してしまう。逆に、破壊フロントに供給されるエネルギーが過剰な場合は、破壊伝播は加速し、ついには、終端速度に達してしまう。ここで言う終端速度とは、面外破壊 (anti-plane rupture) の場合は S 波

速度、面内破壊 (in-plane rupture) の場合は P 波速度である [Burridge (1973)]。つまり、破壊フロントにおけるエネルギー収支を調べることで、破壊の進展の具合を規定することができる。

クラック先端で応力降下が発生するような、理論クラック [Kostrov (1964)] (Griffith クラックと呼ばれることもある) の場合、クラック先端の無限小の幅の領域に応力が集中するため、そこでの応力値は発散し無限大となる。そこで、クラックの進展に必要なエネルギーを見積もるためには、表面エネルギーを定義する必要がある [例えば, Kostrov and Nikitin (1970)]。表面エネルギーは、表面エネルギー密度 (2γ) を、クラック先端を囲む積分路で積分する量として定義される [例えば, Kostrov and Das (1988)]。 2γ は破壊が進展し新たに単位面積の断層面を作るのに必要なエネルギーであり、係数 2 は上面と下面の 2 つの面が同時につくられることによる。

ところが、実際は破壊フロントにおける応力値は有限であり、破壊フロントの有限長の領域において応力集中が起こる (この領域を cohesive zone と呼ぶ)。それゆえ、cohesive zone を含むように積分することでクラックによって消費されるエネルギーを見積もることができる。このエネルギーは Griffith の理論クラックにおける表面エネルギーと等価な量である [Palmer and Rice (1973)]。

このような破壊フロントにおける応力の振る舞いを記述したモデルは、slip-weakening model と呼ばれる [Ida (1972)]。slip-weakening model においては、破壊の振る舞いは Fig. 1 に示すような slip-weakening curve によってコントロールされ、breakdown stress drop ($\Delta\sigma_b$) と slip-weakening distance (D_c) といったパラメータによって特徴づけられる (Fig. 1)。 $\Delta\sigma_b$ は、peak stress σ_y と residual stress σ_f との差で定義され、 D_c は σ_y から σ_f へ応力が降下するのに要するすべり量として定義される (Fig. 1)。

Fig. 1. Schematic illustration of slip-weakening curve: the stress variation (σ) as a function of slip (Δu). Fracture energy (G_c) is defined as the integration of this curve. σ_y , σ_i , σ_f , D_c and D are peak stress, initial stress, residual stress, slip-weakening distance and final slip, respectively.

*〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

さらに、slip-weakening curve に沿って剪断応力をすべり量 0 から D_c まで積分した量は破壊エネルギー (fracture energy, G_c) と呼ばれ (Fig. 1), G_c は以下のように定義される.

$$G_c = \int_0^{D_c} (\sigma(\Delta u) - \sigma_f) d\Delta u \quad (1)$$

本論文では、 $\Delta\sigma_b$ や D_c , G_c といったパラメータが、実際の観測データからどのように推定されたかを概観する. さらに、エネルギー収支のバランスが崩れ、S 波速度を超えて破壊伝播 (supershear rupture) した場合に関しても触れておく.

ついでであるが、slip-weakening model とよく対比されるモデルとして、rate- and state-dependent friction model [例えば、Dieterich (1979), Ruina (1983), Marone (1998) など] がある. このモデルは、低速すべり ($\sim \mu\text{m/s}$ 程度) 摩擦実験結果をもとにしたモデルで、地震サイクルのシミュレーションによく用いられる [例えば、Tse and Rice (1986), Kato and Hirasawa (1997)]. 本論文では、地震時の coseismic なすべりを扱うが、その場合、rate- and state-dependent 摩擦則は slip-weakening 摩擦則のように振る舞うことが知られている [Okubo and Dieterich (1986), Cocco and Bizzarri (2002)]. ただし、rate- and state-dependent friction law において、Dieterich (1986) が導入した高速すべり速度域での cut-off の影響 (つまり、original の rate- and state-dependent law の対数関数の引数に '+1' 項が追加されている) であるという指摘もある [Ohnaka (2006)]. 本論文では slip-weakening model を基に議論する.

§ 2. Breakdown Stress Drop

Quin (1990) は、Archuleta (1984) によって得られた 1979 年 Imperial Valley 地震の最終すべり (slip) 分布と破壊伝播時間 (rupture time) 分布を用いて、境界要素法 (boundary element method) [Das (1980), Quin and Das (1989)] により、dynamic stress drop ($\sigma_i - \sigma_f$) と strength excess ($\sigma_f - \sigma_i$) の分布を求め、asperity の性質を議論した. ここで、 σ_i は initial stress である. Quin (1990) は、rupture time を固定して、すべり分布やすべり速度分布に fit するように dynamic stress drop を試行錯誤的に求めた.

Miyatake (1992) は、Quin (1990) の方法を改良し、最終変位分布から static stress drop を求め、この量を σ_i の分布と仮定し、Mikumo and Miyatake (1978) による有限差分法 (finite difference method) により動的破壊の計算を行った. その際、破壊開始条件は波形インバージョンから求められた rupture time とし、破壊開始の際の応力から σ_f を推定した. これらの計算においては、 D_c につい

ては何も言及されていないが、数値計算のために連続体を離散化する事で必然的に生じる有限長の grid interval から決められる D_c が暗黙のうちに仮定されていると考えられる.

Fukuyama and Mikumo (1993) は、1990 年伊豆大島近海地震の動的破壊過程を iterative waveform inversion により解析した. 動的破壊計算によって得られる震源時間関数の形を用いて、非線形波形インバージョンにより rupture time と slip の分布を求め、Miyatake (1992) の方法により stress drop と strength excess を求め、さらにそこで得られた震源時間関数を用いて非線形波形インバージョンを行う、といった操作を逐次繰り返し、波形の残差が減少しなくなるまで続けた. これにより、strength excess と stress drop の分布を得て、strength excess の大きい場所と余震活動の不活発な場所が対応していることを示した. ここでも、有限長の grid interval から決められる D_c を暗黙のうちに仮定していると考えられる.

これらの先駆的な研究は、波形インバージョン解析から求められる rupture time の分布には $\Delta\sigma_b$ に関する情報が含まれていることを示唆しており、 $\Delta\sigma_b$ が破壊伝播の性質をコントロールするパラメータの一つであることがわかる.

§ 3. Slip-weakening Distance

Slip-weakening model は、Ida (1972) によって提唱され、Andrews (1976) や Day (1982) などにおいて、数値計算によりその性質が示された. 実験室においては Okubo and Dieterich (1986) や Ohnaka *et al.* (1986) により、高速すべりの際に重要な役割を示すことが示された.

Ohnaka and Yamashita (1989) は model II クラック (破壊伝播方向とすべり方向が平行な 2 次元クラック) を用い、実験を説明するような slip-weakening law を用いて D_c の解釈を行った. さらに Ohnaka and Shen (1999) は実験データの解釈から D_c と地震の大きさとの関係を示唆した.

また、先に述べたように、Cocco and Bizzarri (2002) は、rate- and state- dependent friction law [Dieterich (1979), Ruina (1983)] においても、高速すべり時には slip-weakening law と似た振る舞いを示すことを示した.

近年、地震波形のインバージョン解析から求められた震源時間関数から、slip-weakening distance (D_c) を求める試みがなされている. Ide and Takeo (1997) は、波形インバージョンによって求めた断層面上でのすべり時間関数を求め、弾性体内の亀裂における応力とすべり量の関係は線形であり、一方が時空間において完全に記述されれば、他方は一意に決まる [例えば、Kostrov and

Das (1988)] ことを利用し、応力の時空間関数を求め、すべり時間関数と応力時間関数から Fig. 1 のような slip-weakening curve を推定し、1995 年兵庫県南部地震の D_c を 0.5~1 m と推定した。

しかしながら、波形インバージョンにおいては、未知パラメータの数を減らし安定的にインバージョン解析を行うために、震源時間関数を三角形の重ね合わせ [例えば, Hartzell and Heaton (1983)] で表現した multi time window 法や, cosine 関数 [Ji *et al.* (2002)], Gauss 関数 [Bouchon *et al.* (1997)], B-Spline 関数 [Ide and Takeo (1997)] などで表現した single time window 法と、あらかじめ震源時間関数の形状をある程度仮定をすることが多かった。Piatanesi *et al.* (2004) は、震源時間関数の形状の違いは、計算される地震波形にはあまり大きな影響を与えないものの、応力の見積りに少なからぬ影響を与え、結果として D_c の推定に影響を与えることを指摘している。つまり、観測された地震波形を十分よく説明する震源モデルであっても、仮定した震源時間関数の形状に D_c の推定値が依存してしまう事があるので、震源時間関数がどの程度、観測データに拘束されているかの吟味は重要である。

Mikumo *et al.* (2003) は、弾性体内亀裂の応力—すべりの関係を用いずに、すべり時間関数から D_c を近似的に推定する方法を提案した。すべり時間関数においてすべり速度が最大になるすべり量を D_c' と定義し、破壊伝播が比較的スムーズであれば、 D_c' は D_c を誤差 50% 程度の精度でうまく近似しているとした [Fukuyama *et al.* (2003)]。この推定法に対しては、Spudich and Guatteri (2004) が、時間的なフィルター操作により推定値が過大評価される問題点を指摘している。また、Yasuda *et al.* (2005) も、震源時間関数が推定される要素が有限の面積を持つことによる空間的な平滑化効果により過大評価されることを指摘している。

上記の問題点があるにもかかわらず、 D_c' を用いた推定法は、非常に簡便にすべり弱化距離を推定できるため、推定には 50% 程度の誤差が含まれている [Mikumo *et al.* (2003)] ことを考慮しても、実験室で測定された D_c (0.01~0.1 mm のオーダー) [例えば, Marone (1998)] と、地震波形から推定された D_c (0.1~1 m のオーダー) [例えば, Ide and Takeo (1997), Olsen *et al.* (1997)] との間には、十分大きな開きがあるので、実際の地震において slip weakening distance はどの程度であるかを議論するためには D_c' は有用である。Fukuyama and Mikumo (2007) は、2000 年鳥取県西部地震 (M_w 6.6) と 2002 年 Denali 地震 (M_w 7.8) において断層近傍で得られた地震波形を用いて D_c' 法により、観測データからより直接的に slip-

weakening distance を推定し、地震規模依存性があることを示している。

§ 4. Fracture Energy

Guatteri and Spudich (2000) は、限りある周波数領域の波動を使う限り D_c と $\Delta\sigma_b$ との間には trade-off があり、cohesive zone の長さが識別できるような高周波数の波動を使わない限り、観測される地震波形からは区別がつかないことを指摘している。Tinti *et al.* (2005) はこの考えを踏襲し、式 (1) の関係から D_c と $\Delta\sigma_b$ を用いて見積もれる G_c が観測から安定的に求めることのできるパラメータであるとしている。さらに、彼女らは、 G_c は fracture energy ではなく breakdown work と呼ぶべきであるとしている。なぜなら、 G_c は状態を示す量 (エネルギー) ではなく、破壊が進展する際に必要な仕事量であるからである。

Abercrombie and Rice (2005) は、 $G' (= (\Delta\sigma - 2\sigma_a)D/2)$ という量を導入した。ここで、 $\Delta\sigma$ は static stress drop, σ_a は apparent stress ($= \mu E_s / M_o$)、 μ は rigidity, E_s は radiated energy, M_o は seismic moment, D は total slip であり、いずれのパラメータも、観測された地震波形を用いて推定可能な量である。この式の意味するところは、応力降下によって開放された strain energy ($\Delta\sigma D/2$) から地震波動として放射された radiated energy ($\sigma_a D = E_s$) を引いたものが、fracture energy (G') であるということである。ちなみに、dynamic stress drop と static stress drop が等しい場合、つまり、overshoot や undershoot が起きない場合は、 G' は G_c と等しくなる。彼女らは、観測データからすべり量 D [m] と G' [MJ/m^2] の関係を求め、これらが正の相関関係にある ($G' = 5.25 \times D^{1.28}$) ことを示している。Rice (2006) は、層間流体の thermal pressurization と flash heating の影響を考慮したモデルに基づいた理論計算により、Abercrombie and Rice (2006) の経験式がうまく説明できる事を示している。そこで得られる slip-weakening curve は scale independent であり、このモデルでは、 D_c という概念は存在していない。

G_c もまたスケール依存性がある事が指摘されている [例えば, Ohnaka (2003)]。実験室で測定される G_c は $10^1 \sim 10^3 \text{ J}/\text{m}^2$ [例えば, Wong *et al.* (1982)] であるのに対し、実際の地震では、 $10^6 \sim 10^8 \text{ J}/\text{m}^2$ [例えば, Aki (1979), Tinti *et al.* (2005), Mikumo and Fukuyama (2006)] といった推定がなされている。最近の高速剪断試験機を用いた実験によると、 G_c は $\sim 10^6 \text{ J}/\text{m}^2$ [Mizoguchi *et al.* (2007)] という報告がある。すべり量による依存性 (地震のスケールリング則を合わせて考えると、地震の規模依存性) があり、室内実験の条件を地震すべりの条件に近づける

事でこのギャップは埋められそうである。

Ide and Aochi (2005) は、断層面の不均質形状を G_c の分布と関係づけ、multi-scale simulation により、fractal 分布する G_c のモデルを用いることにより、いろいろなスケールで地震の発生と成長の再現を行うことが出来る事を示した。

このように、 G_c は地震の動的破壊過程をコントロールする重要なパラメータである。しかしながら、物質固有のパラメータではなく、スケール依存性があるということは、その背後で働いている微視的な観点からの物理法則はどうなっているのか、という疑問を引き起こさせる。微視的には単一の物理法則ではなく、複数の物理法則が複雑に働いており、巨視的に見たらひとつの物理法則で説明できるような状況も十分想定されるであろう。

§ 5. Supershear Rupture

破壊フロントにおいて、消費される破壊エネルギーと供給される歪エネルギーのバランスが崩れ、歪エネルギーの供給過剰になると、破壊は終端速度で伝播する。Burridge (1973) や Andrews (1976) は、理論的考察や数値計算により、S 波速度を超える破壊伝播 (supershear rupture) の存在の可能性を指摘した。Fukuyama and Olsen (2002) は、asperity 領域を通過する際、supershear rupture が一旦励起されると、asperity 通過後もしばらくは supershear rupture が継続する場合があることを数値実験により指摘した。Dunham *et al.* (2003) は、supershear rupture 励起のためには、P 波によって励起される daughter crack の存在が重要であることを指摘した。

一方、Archuleta (1984) は 1979 年 Imperial Valley 地震の断層近傍の強震記録を用いた断層破壊過程の解析から supershear rupture をはじめて確認した。その後、1992 年 Landers 地震 [Olsen *et al.* (1997)], 1999 年 Izumit 地震 [Bouchon *et al.* (2002)], 2001 年 Kunlun 地震 [Bouchon and Vallée (2004)], 2002 年 Denali 地震 [Dunham and Archuleta (2007)] と、主要な横ずれ断層の地震において、supershear rupture の報告がなされるようになった。また、実験室においても、supershear rupture を再現する実験が行われ、その存在が確認された [Rosakis *et al.* (1999)]。

supershear rupture で破壊が伝播するためには、破壊先端における静的なエネルギーバランスと動的なエネルギーバランスが一時的にでも崩れる必要がある。つまり、長い時間スケールにおいては (破壊エネルギー) > (歪エネルギー) であるが、短い時間スケールにおいて一時的に (破壊エネルギー) < (歪エネルギー) となり、エネルギーの供給過剰状態が一時的に作り出される必要がある。このような状態変化を起こすための一つの可能

性は、動的破壊伝播過程において、thermal pressurization [Lachenbruch (1980), Mase and Smith (1985), Rice (2006)] や melting [Hirose and Shimamoto (2003, 2005), Di Toro *et al.* (2004)] などによる動摩擦抵抗の急激な低下により、応力降下量が増大し、一時的に供給される歪エネルギーが増大するといったメカニズムが考えられる。

§ 6. まとめと展望

これまで述べてきたように、 $\Delta\sigma_b$ や D_c 、 G_c といった地震の動的破壊伝播をコントロールするパラメータの推定が、実際の地震に対しても可能となってきた。観測から推定される D_c や G_c は、従来、実験室において測定されてきた値とは有意に異なり、スケール依存することが指摘されてきた。最近の、より実際の地震発生場に近い環境における室内実験結果は、観測から推定される値に近い値が得られている事からも、これらのパラメータのスケール依存性の存在は間違いない。

では、どのような物理化学過程が、このような動的破壊現象を支配しているのだろうか？ 一つの可能性として、巨視的にみたら単一の支配法則に乗っているように見えても、微視的には、複数の現象によってコントロールされ、地震発生の環境によってそのいずれかが卓越しているような状況が考えられる。

近年の構造地質学的な研究より、地震時に大きなすべりが生じる領域の厚さは、きわめて薄く 1 cm 以下であることが知られている [例えば、Chester and Chester (1998), Sibson (2003), Biegel and Sammis (2004)]。この場合、 G_c は非常に狭い領域に存在することになる。一般に G_c は破壊面をつくるのに必要なエネルギーと定義されている [例えば、Kostrov and Das (1988)] が、microscopic には粒子 (分子) 同士の結合を切るエネルギーに他ならず、結合が切られると、粒子は自由に振動する事が出来るようになり熱が発生する (熱力学第 1 法則)。そこで、 G_c の大部分が熱にかかわるとすると、そこでの温度上昇は数千度まで達する [例えば、Aki (1979)]。この温度上昇は岩石の融点をはるかに超えているので、容易に熔融 (melting) が起こり、強度の急速な低下をもたらす [Hirose and Shimamoto (2003, 2005)]。しかしながら、断層帯が十分水で満たされていた場合は、断層帯で発生した熱は間隙水圧 (pore pressure) の上昇にも使われ、thermal pressurization を引き起こすことも出来る [例えば、Rice (2006)]。これらの物理現象は、すべりによって断層面が摩耗し断層ガウジ (fault gauge) が生成されることによる強度低下 [例えば、Matsu'ura *et al.* (1992)] とともに、動的破壊のメカニズムを考える上で

は重要な役割を果たしていると思われる。

今後、破壊の微視的なメカニズムを $\Delta\sigma_b$ や D_c , G_c との関係において説明していく必要があろう。とくに、地震観測データの解析から得られるパラメータの推定と、理論モデルを用いたその解釈、さらには、実験室における高速摩擦実験などによる検証と、さまざまな側面からお互いに連携をとりつつ、動的破壊現象を説明していく必要があろう。

謝 辞

井出 哲氏および関口春子氏のコメントは有益でした。

文 献

- Abercrombie, R. E. and J. R. Rice, 2005, Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening?, *Geophys. J. Int.*, **162**, 406-424.
- Aki, K., 1979, Characterization of barriers on an earthquake fault, *J. Geophys. Res.*, **84**(B11), 6140-6148.
- Andrews, D. J., 1976, Rupture velocity of plane strain shear cracks, *J. Geophys. Res.*, **81**(32), 5679-5687.
- Archuleta, R. J., 1984, A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake, *J. Geophys. Res.*, **89**(B6), 4559-4585.
- Biegel, R. L. and C. G. Sammis, 2004, Relating fault mechanics to fault zone structure, *Adv. Geophys.*, **47**, 65-111.
- Bouchon, M., 1997, The state of stress on some faults of the San Andreas system as inferred from near-field strong motion data, *J. Geophys. Res.*, **102**(B6), 11731-11744.
- Bouchon, M., M. N. Toksöz, H. Karabulut, M.-P. Bouin, M. Dietrich, M. Aktar, and M. Edie, 2002, Space and time evolution of rupture and faulting during the 1999 Izmit (Turkey) earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 256-266.
- Bouchon, M. and M. Vallée, 2003, Observation of long supershear rupture during the magnitude 8.1 Kunlunshan earthquake, *Science*, **301**, 824-826.
- Burridge, R., 1973, Admissible speeds for plane-strain self-similar shear cracks with friction but lacking cohesion, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **35**, 439-455.
- Chester, F. M. and J. S. Chester, 1998, Ultracataclasite structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California, *Tectonophysics*, **295**, 199-221.
- Cocco, M. and A. Bizzarri, 2002, On the slip-weakening behavior of rate- and state-dependent constitutive laws, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi: 10.1029/2001GL013999.
- Das, S., 1980, A numerical method for determination of source time functions for general three-dimensional rupture propagation, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **62**, 591-604.
- Day, S., 1982, Three-dimensional finite difference simulation of fault dynamics: Rectangular faults with fixed rupture velocity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 705-727.
- Dieterich, J. H., 1979, Modeling of rock friction – 1 Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, **84**(B5), 2161-2168.
- Dieterich, J. H., 1986, A model for nucleation of earthquake slip, in "Earthquake Source Mechanics", ed. by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, Maurice Ewing Series, **6**, AGU, Washington, D.C., 37-47.
- Di Toro, G., D. L. Goldsby, and T. E. Tullis, 2004, Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates, *Nature*, **427**, 236-239.
- Dunham, E. and R. J. Archuleta, 2004, Evidence for a supershear transient during the 2002 Denali Fault earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, S256-S268.
- Freund, L. B., 1972, Energy flux into the tip of an extending crack in an elastic solid, *J. Elasticity*, **2**, 341-348.
- Fukuyama, E. and T. Mikumo, 1993, Dynamic rupture analysis: Inversion for the source process of the 1990 Izu-Oshima, Japan, earthquake ($M = 6.5$), *J. Geophys. Res.*, **98**(B4), 6529-6542.
- Fukuyama, E. and T. Mikumo, 2007, Slip-weakening distance estimated at near-fault stations, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L09302, doi:10.1029/2006GL029203.
- Fukuyama, E. and K. B. Olsen, 2002, A condition for supershear rupture propagation in a heterogeneous stress field, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2047-2056.
- Fukuyama, E., T. Mikumo, and K. B. Olsen, 2003, Estimation of the critical slip-weakening distance: Theoretical background, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1835-1840.
- Griffith, A. A., 1920, The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, **A221**, 163-198.
- Guatteri, M. and P. Spudich, 2000, What can strong-motion data tell us about slip-weakening fault-friction laws?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 98-116.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton, 1983, Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1553-1583.
- Hirose, T. and T. Shimamoto, 2003, Fractal dimension of molten surfaces as a possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylytes, *J. Struct. Geol.*, **25**, 1569-1574.
- Hirose, T. and T. Shimamoto, 2005, Growth of a molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting, *J. Geophys. Res.*, **110**, B05202, doi:10.1029/2004JB003207.
- Ida, Y., 1972, Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *J. Geophys. Res.*, **77**, 3796-3805.
- Ide, S. and H. Aochi, 2005, Earthquakes as multiscale dynamic ruptures with heterogeneous fracture surface energy, *J. Geophys. Res.*, **110**, B11303, doi:10.1029/2004JB003591.
- Ide, S. and M. Takeo, 1997, Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, **102**, 27 379-27 391.
- Ji, C., D. J. Wald, and D. V. Helmberger, 2002, Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 1192-1207.
- Kato, N. and T. Hirasawa, 1997, A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law, *Phys. Earth Planet. Int.*, **102**, 51-68.
- Kostrov, B. V., 1964, Selfsimilar problems of propagation of

- shear cracks, *Appl. Math. Mech. (PMM)*, **28**, 1077-1087.
- Kostrov, B. V. and S. Das, 1988, *Principles of Earthquake Source Mechanics*, Cambridge Univ. Press, New York, 286 pp.
- Kostrov, B. V. and L. V. Nikitin, 1970, Some general problems of mechanics of brittle fracture, *Arch. Mech. Stos.*, **6**, 749-776.
- Lachenbruch, A. H., 1980, Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion, *J. Geophys. Res.*, **85**, 6097-6122.
- Marone, C. J., 1998, Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **26**, 643-696.
- Mase, C. W. and L. Smith, 1985, Pore - fluid pressures and frictional heating on a fault surface, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 583-607.
- Matsu'ura, M., H. Kataoka, and B. Shibazaki, 1992, Slip-dependent friction law and nucleation processes in earthquake rupture, *Tectonophys.*, **211**, 135-148.
- Mikumo, T. and E. Fukuyama, 2006, Near-source released energy in relation to fracture energy on earthquake faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 1177-1181.
- Mikumo, T. and T. Miyatake, 1978, Dynamical rupture process on a three-dimensional fault with non-uniform frictions and near-field seismic waves, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **54**, 417-438.
- Mikumo, T., K. B. Olsen, E. Fukuyama, and Y. Yagi, 2003, Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 264-282.
- Miyatake, T., 1992, Reconstruction of dynamic rupture process of an earthquake with constraints of kinematic parameters, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 349-352.
- Mizoguchi, K., T. Hirose, T. Shimamoto, and E. Fukuyama, 2007, Reconstruction of seismic faulting by high-velocity friction experiments: An example of the 1995 Kobe earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01308, doi:10.1029/2006GL027931.
- Ohnaka, M., 2003, A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture, *J. Geophys. Res.*, **108** (B2), 2080, doi:10.1029/2000JB000123.
- Ohnaka, M., 2006, Reply to "Comment on 'Earthquake cycles and physical modeling of the process leading up to a large earthquake'", *Earth Planetes Space*, **58**, 1529-1531.
- Ohnaka, M. and L.-F. Shen, 1999, Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces, *J. Geophys. Res.*, **104**(B1), 817-844.
- Ohnaka, M. and T. Yamashita, 1989, A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong motion source parameters, *J. Geophys. Res.*, **94**(B4), 4089-4104.
- Ohnaka, M., Y. Kuwahara, K. Yamamoto, and T. Hirasawa, 1986, Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities, in "Earthquake Source Mechanics", ed. by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, *Maurice Ewing Series*, **6**, AGU, Washington, DC., 13-24.
- Okubo, P. G. and J. H. Dieterich, 1986, State variable fault constitutive relations for dynamic slip, in "Earthquake Source Mechanics", ed. by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, *Maurice Ewing Series*, **6**, AGU, Washington, D.C., 25-35.
- Olsen, K. B., R. Madariaga, and R. J. Archuleta, 1997, Three-dimensional dynamic simulation of the 1992 Landers earthquake, *Science*, **278**, 834-838.
- Palmer, A. C. and J. R. Rice, 1973, The growth of slip surfaces in the progressive failure of overconsolidated clay, *Proc. R. Soc. Lond., A*, **332**, 527-548.
- Piatanesi, A., E. Tinti, M. Cocco, and E. Fukuyama, 2004, The dependence of traction evolution on the earthquake source time function adopted in kinematic rupture models, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L04609, doi:10.1029/2003GL019225.
- Quin, H., 1990, Dynamic stress drop and rupture dynamics of the October 15, 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Tectonophys.*, **175**, 93-117.
- Quin, H. R. and S. X. Das, 1989, A hybrid boundary integral equation method for the computation of source time functions for 3-D rupture propagation, *Geophys. J.*, **96**, 163-177.
- Rice, J. R., 2006, Heating and weakening of faults during earthquake slip, *J. Geophys. Res.*, **111**, B05311, doi: 10.1029/2005JB004006.
- Rosakis, A. J., O. Samudrala, and D. Coker, 1999, Cracks faster than the shear wave speed, *Science*, **284**, 1337-1340.
- Ruina, A., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, **88**(B12), 10359-10370.
- Sibson, R. H., 2003, Thickness of the seismic slip zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1169-1178.
- Spudich, P. and M. Guatteri, 2004, The effect of bandwidth limitations on the inference of earthquake slip-weakening distance from seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 2028-2036.
- Tinti, E., P. Spudich, and M. Cocco, 2005, Earthquake fracture energy inferred from kinematic rupture models on extended faults, *J. Geophys. Res.*, **110**, B12303, doi: 10.1029/2005JB003644.
- Tse, S. T. and J. R. Rice, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, **91**, 9452-9472.
- Wong, T.-F., 1982, Shear fracture energy of Westerly granite from post-failure behavior, *J. Geophys. Res.*, **87**(B2), 990-1000.
- Yasuda, T., Y. Yagi, T. Mikumo, and T. Miyatake, 2005, A comparison between D_c -values obtained from a dynamic rupture model and waveform inversion, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14316, doi:10.1029/2005GL023114.