

3. 3. 4 動的パラメーターの研究

3. 3. 4. 1 研究課題全体の成果

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：研究課題全体の成果

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院理学系研究科	講師	井出 哲	ide@eps.s.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助教授	宮武 隆	miyatake@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	東原紘道	higashi@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	山下輝夫	tyama@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	大学院生	呉 長江	wuchang@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	大学院生	安藤亮輔	ando@eri.u-tokyo.ac.jp
工学院大学	教授	久田嘉章	hisada@cc.kogakuin.ac.jp
仏放射線防護・原子力安全研究所	研究員	青地秀雄	hideo.aochi@irsn.fr
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	堀川晴夫	h.horikawa@aist.go.jp
独立行政法人産業技術総合研究所	特別研究員	加瀬祐子	kasep@ni.aist.go.jp
独立行政法人防災科学技術研究所	研究員	福山英一	fuku@bosai.go.jp
独立行政法人産業安全研究所	研究員	吉見雅行	yoshimi.m@aist.go.jp

(c) 業務の目的

大都市直下に発生する地震による災害の軽減のために強震動シミュレーションの必要性が高まっている。断層近傍では震源モデルの影響が大きく、そのような場所での地震波を計算するためには震源のモデル化を可能な限りの知見を取り入れて行う必要がある。そこで震源での応力状態、破壊や摩擦すべりの物理を取り入れた震源過程、すなわち動学的地震モデルの研究を進める。モデルの記述に必要な動的モデルパラメーターを特定し、過去の実際の地震や今後予測される地震について推定することを通じて、強震動シミュレーションの断層モデル構築に役立てる。

本研究項目には3つの小分野がある。まず、基本的な動力学モデルを計算するために必要な震源物理の基礎研究、これを＜動力学モデルの基礎研究＞として区分する。それからその基礎研究から提案される各種動的パラメーターの決定可能性を検討し現実の地震について推定する研究、これを＜動力学モデルとデータ解析＞として区分する。さらに実際の強震動シミュレーションへの適用方法を検討する研究、＜動力学モデルと強震動予測＞であ

る。グループのメンバーはそれぞれの分野で最新の知見を得るとともに互いの議論によって動的モデルパラメーターへの理解を深める。

(d) 5 ヶ年の年次実施計画

- 1) 平成 14 年度：研究の開始。現時点での各小分野での問題点を認識し、これからの研究プランを作成した。そのために「動的断層モデルと強震動セミナー」を開催し集中して議論した。破壊のスケーリング、断層面の幾何学、破壊摩擦の構成則、動力学モデル作成、広帯域震源特性、擬似動力学シミュレーション、耐震設計との関連などについて研究が行われた。それらの研究は日本地震学会、アメリカ地球物理学会総会などにおいて発表された。
- 2) 平成 15 年度：それぞれの分野で研究を進めた。メキシコから三雲健教授を招聘し動的モデルシミュレーションについて議論した。断層破碎帯のモデルや階層アスペリティモデルの研究、個別の地震の解析と臨界すべり変位量の推定、強震動予測の為の応力条件設定法、擬似動力学モデル、近地地震波の特徴などについて研究が行われた。それらの研究は日本地震学会、震源数値計算ワークショップ（スロバキア）、アメリカ地球物理学会総会などにおいて発表された。
- 3) 平成 16 年度：研究の中間まとめと今後の計画の再検討。破碎帯モデルや階層アスペリティモデルの一般化、運動学的モデルの追加、運動学的モデルにおける不均質の特徴の抽出、それらの特徴を動力学モデルに導入する方法の開発など。そのための研究者招聘を予定している。また中間結果報告集会を企画し互いの抱える問題点を洗い出し計画の微調整を行う。
- 4) 平成 17 年度：それぞれの分野での研究の発展。基礎研究から得られた知見を観測データから裏付ける方法などについて考察する。またその知見の動力学シミュレーションに与える重要性を検討する。
- 5) 平成 18 年度：研究のまとめ。基礎研究、データ解析の結果を踏まえ動力学シミュレーションを強震動予測にどのように生かすことができるか検討し、研究計画のまとめとする。

(e) 平成 15 年度業務目的

本年度は昨年度の設定された問題を、動力学モデルの基礎研究、動力学モデルとデータ解析、動力学モデルと強震動予測のそれぞれの分野で個別に検討することを目的とする。基礎研究分野では断層の幾何形状の問題に破碎帯モデル、破壊の階層性の問題に不均質アスペリティモデルという新しいモデルの構成に取り組む。データ解析では主要な動力学パラメーターである臨界すべり変位量 D_c の推定例を増やすとともに新しい地震の解析も行う。また地震のスケーリングの問題として地震エネルギーの推定にも取り組む。強震動予測分野では動力学モデルに導入すべき応力の条件を活断層研究から推定するとともに動力学シミュレーションを簡便化する手法や特に断層近傍での強震動生成について考察する。

(2) 平成15年度の成果

(a) 業務の要約

本年度は動力学モデルの基礎研究、データ解析、強震動予測の3小分野のそれぞれで昨年度設定した問題について研究を行った。基礎研究として断層破碎帯のモデルと、階層構造をもつ不均質アスペリティのモデルがそれぞれ提案され、数値計算により最も基本的な性質が明らかになった。ともに破壊エネルギーが破壊の進展とともに大きくなる。データ解析では新たに4つの地震、1999年台湾集集地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城沖地震について臨界すべり変位量が推定された。2003年十勝沖地震については運動学的モデルを作成した。また地震エネルギーの推定により大地震と小地震のエネルギーバランスの類似性が指摘された。強震動予測では応力降下量の設定法や擬似動力学モデルにおいて現実の地震の条件により近づけるような改良に成功した。新たに近地波動場計算における Fling Step の効果も明らかになった。

(b) 業務の実施方法

< 動力学モデルの基礎研究 >

自然の断層は、断層面に直交（厚さ）方向に破碎された領域を伴っていることが多い。断層岩の観察結果によれば、その特徴はおおむね、ごく局在化した滑り面（fault core）とその周辺に広がる剪断変形により破碎された領域である破碎帯（damage zone）からなるというものである。断層破碎帯の生成要因と断層破碎帯が動的破壊過程に与える効果を新しい破碎帯モデルと境界積分法を用いたシミュレーションによって解明する。

断層の破壊過程のシミュレーションにこれまであまり考えられてこなかったことに震源の複雑さの階層構造が挙げられる。これは数値計算で取り扱うのが困難な問題の1つである。階層構造を持つ不均質のモデルを提案するとともにそのようなモデルが実際にどのように破壊するかを動力学的なシミュレーションで検証する。新たに不均質アスペリティモデルを作成する。

< 動力学モデルとデータ解析 >

強震動シミュレーションで短周期地震波の生成を研究する場合には、すべり時間関数の立ち上がり部分が重要であり、それに大きな影響を与えるのが摩擦パラメーターの1つである臨界すべり量 D_c である。近年多くの地震について運動学的モデルが詳細に求められている。最近の地震のうち1999年台湾集集地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城沖地震では運動学的モデルが詳細に決定されている。これらの地震について臨界すべり量 D_c の推定を行う。必要な有限差分法アルゴリズムの開発なども行う。また新たなイベントの波形解析も必要である。2003年には過去10年日本付近で発生した中で最大級の地震である2003年十勝沖地震が発生した。典型的な海溝巨大地震でこれまでにない良質のデータがとれたこの地震の地震波を解析し運動学的モデルを推定する。

臨界すべり変位量や破壊エネルギーなどのスケーリングを考えるには広いサイズ範囲での地震を対象に研究する必要がある。特に地震エネルギーを幅広い地震サイズにわたって決定することで動力学パラメーターのスケーリングに制約条件を与えることが出来る。大きさの大きく異なる地震を解析するには通常一般に公開されている地震波データより高品質の

データが必要になる。防災科学技術研究所の Hi-net の高サンプリング記録を特別に入手し地震エネルギーの推定法を適用する。対象は 2000 年鳥取県西部地震とその余震活動とする。

< 動力学モデルと強震動予測 >

強震動予測に動力学モデルを用いたシミュレーションを用いる際に問題点となるのは、応力場の不均質をどのように取り入れるかという点である。一様な応力場を仮定すると断層形状を考慮しても破壊過程はなめらかになり地震全体または個々のアスペリティのサイズが断層の大きさから経験的に予測されるものよりも大きくなる傾向⁷⁾がある。1995 年兵庫県南部地震及び上町断層系を例として現実的応力不均質の導入法を検討する。

完全な動力学シミュレーションは計算コストがかかるので簡便に計算する手法の開発が必要である。中村・宮武¹²⁾は細長い動的クラック問題の数値解から強震動シミュレーションのための近似式（疑似動力学震源モデル）を作成した。この近似式の有効性を検証するためにアスペリティの複数存在する不均質な横ずれ断層に応用し完全な動力学モデルと疑似動力学モデルの比較を行う。

ごく近地での強震動予測に重要な問題として永久変位（fling step）がある。2000 年台湾集集地震などで見られたように、地震の際、地表に断層が現れる場合、大きな永久変位を生じ、長周期成分が卓越する特徴的な強震動を生じる。このような強震動特性は、短周期成分が卓越する通常の地中で発生する地震とは大きく異なり、高層建築など周期の長い建物の耐震設計上、大きな問題となっている。この永久変位の性質についての研究を行う。

(c) 業務の成果

< 動力学モデルの基礎研究 >

安藤・山下¹⁾は断層破砕帯のシミュレーションでの最も単純な場合としてまず以下のようなモデルを構築した。2 次元無限等方均質弾性媒質中に、面内剪断型断層を 1 つ仮定する（主断層）。その周辺には地殻中の強度不均質をモデル化した、多数の微小弱面を主断層と平行に配置し、その弱面上での新たな破壊を許可する。主断層を自発的に破壊させて、微小亀裂および主断層の破壊の様子を調べる。最終的には主断層の分岐屈曲を考えるが本年度は予備的な結果として、主に以下のことが得られている。主断層周辺の微小破壊の幅は、主断層の破壊が成長し断層端周辺のプロセスゾーンが動的に拡大するのに伴って、破壊開始点から徐々に扇状に広がっていく。このような分布形状は、実際の余震分布にもしばしば観測されるものである。これは、この微小破壊が余震を起こす破壊の核になっている可能性を示唆している。また、ある微小弱面の初期配置条件の下では、主断層の破壊伝播速度は、S 波速度の 80% 程度に抑えられたが、この速度は、終端速度であるレイリー波速度より 10% 程度遅い値である。この現象は、微視的に見れば、微小亀裂が主断層の破壊を抑制した、負の相互作用の結果であるが、巨視的に見れば、破壊表面エネルギーが主断層の成長に伴って増加していると解釈できる。このことは、破壊エネルギーに現れるスケール依存性の要因を示唆している。

Aochi and Ide²⁾は境界積分法に繰り込みの方法を適用することで非常に小さな破壊から大地震までを統一的に数値計算することができる手法を開発した。臨界すべり変位量が

破壊領域のサイズに比例するような場合には破壊は一定速度で進展することが確認された。それと同時にこの比例関係が崩れると破壊は簡単にせん断波速度を超えたり、停止したりすることも明らかになった。これは破壊の進展が局所的な臨界すべり変位量に支配されていることを示唆する。さらに不均質構造のモデルとして階層構造を持つ円形アスペリティモデルを考案した。このモデルではアスペリティのサイズに臨界すべり変位量が比例し、さらにあるサイズのアスペリティ個数はサイズのべきに比例するというフラクタル的構造を持つ。このような条件で Aochi and Ide ²⁾ の手法で最小のアスペリティから破壊を始めると階層構造によって破壊がどこまで大きくなるかが決まる。最終的な破壊サイズとその個数の関係はやはりべき法則になるが、そのフラクタル次元は必ずしも仮定したものにならない。この次元はむしろアスペリティの連結方式の違いに支配されるということが理論計算から明らかにされた。モーメントレート関数は現実に観測される地震波のような不規則な立ち上がりを示す。詳細は本報告別項目に記す。

＜動力学モデルとデータ解析＞

臨界すべり量の推定には有限差分法による推定法 ⁴⁾ やすべり時間関数からの推定法 ¹⁰⁾ がある。Wu ¹⁴⁾ は有限差分法によりそれぞれの断層面上の応力履歴を計算し臨界すべり量を推定した。台湾集集地震の場合、推定された臨界すべり量は主に 2m から 5m まで変動する。一方、鳥取県西部地震では主に 0.5 m から 1.5 m、宮城沖地震では 0.8m から 2.3m となった。地震が大きいほど臨界すべり量は大きくなり、さらに、すべりが大きいほど臨界すべり量は大きくなることを確認された。

宮武他 ¹¹⁾ は 2001 年芸予地震について臨界すべり量の推定を行った。この際、特に数値シミュレーションを併用することで臨界すべり量の検出限界を確認しながら推定を行った。その結果芸予地震では臨界すべり量が一律に 75 cm と仮定して動的破壊シミュレーションを行うと芸予地震は発生できないことがわかった。また一律に 25 cm の場合と三雲法による場合とは地震波形などからは区別できないことがわかった。

井出 ⁵⁾ は 2003 年十勝沖地震の強震記録と海底地震計記録を収集し破壊過程のインバージョンを行った。この地震では破壊開始点から陸側に主な破壊が進展し、方位依存性が顕著であることがわかった。さらに特筆すべき点として局所的な破壊伝播速度がせん断波速度に非常に近いこと判明した。

井出他 ⁶⁾ は鳥取県西部地震の余震について地震エネルギーの推定を行った。推定には特別に収録された防災科学技術研究所 Hi-net の高サンプリング (1ksps) データを用いた。スペクトル比を用いたエネルギー推定法を適用し、一般に公開されている 100sps のデータと高サンプリングデータの解析結果を比較した。どちらのデータセットでも狭い帯域では地震エネルギーと地震モーメントの比が地震モーメントに比例することが示されるが、このトレンドは広範囲の地震モーメントとは調和的でないことも明らかになった。解析周波数帯の端では一般に小さなイベントのエネルギーを小さく、大きなイベントのエネルギーを大きく見積もる傾向がある。この効果を除くと地震エネルギーと地震モーメントの比は M0.5 程度の余震から M6.6 までマグニチュード差 6 くらいで 1 オーダー以上は変化していないことが示唆される。

〈動力学モデルと強震動予測〉

1995年兵庫県南部地震を例とした動力学シミュレーション⁸⁾ではすべり分布から破壊仮定を再現することは可能だが断層形状のみから再現することは困難であることがわかった。一様な外部応力場を仮定し、断層形状から推定される強度と応力降下量は、兵庫県南部地震のすべり分布から求めたものとは、震源付近において大きく異なる。そのため、活断層情報から考えられる範囲で断層のセグメンテーションを様々に仮定しても、破壊過程を再現することはできなかった。

想定される地震のすべり分布を仮定するため、関口他¹³⁾では、断層系の長期間にわたる平均的なすべり分布としての平均変位速度分布と、1回の地震あたりのすべり量を用いた。推定された上町断層系で想定される地震のすべり分布を用いて、動力学シミュレーションを行った⁹⁾。平均変位速度分布から推定されるすべり分布から求めた強度と応力降下量の分布からは、破壊開始点となり得る位置を何点か推測することができる。これらのどの位置を破壊開始点とするかによって、異なる破壊過程が得られた。また、地震のサイズと断層の大きさとの関係を加瀬他⁷⁾に比べ、より経験則に合うように改善した。

擬似動力学モデルの適用可能性の検討では、アスペリティが複数存在する不均質な横ずれ断層という問題を扱った。動力学モデルによる断層運動と断層近傍強震動の計算結果と比較した結果、破壊開始付近、停止端付近など破壊伝播の影響やアスペリティ周囲でのパラメータ値を変更すると今まで以上に動力学モデルに一致することがわかった。この過程で疑似動力学モデルの修正近似式を提案した。

Hisada and Bielak³⁾は地表断層のごく近傍の強震動特性を効率的にシミュレートし、震源パラメータの物理的な関係を調べるための理論的な手法を提案した。この手法では、表示定理において断層面積分を行う際、動的グリーン関数から静的項を分離して評価するものであり、観測点が断層面に近いことによって生じるグリーン関数の特異性（発散）を厳密に計算する。本手法を用いて Fling Step や Rupture Directivity Pulse を調べ、前者はグリーン関数の静的項が寄与し、断層面すべり方向で卓越し、一方、後者は動的項が寄与し、断層面直交成分が卓越することを確認した。従って、地表断層ごく近傍では、両者の影響により地震動の卓越方向は断層面に対して傾斜することになる。静的項は距離の2乗に逆比例して減衰するため、Fling Step は断層面から離れるに従って急激に小さくなり、Rupture Directivity Pulse のみが卓越することも確認した。

(d) 結論ならびに今後の課題

〈動力学モデルの基礎研究〉

安藤・山下¹⁾による断層破砕帯のシミュレーションでは主断層周辺の微小破壊の幅が破壊成長に伴い扇形に広がっていくことがわかった。これは巨視的に見れば、破壊表面エネルギーが主断層の成長に伴って増加していることを意味する。今後は、主断層の分岐、屈曲をモデルに取り入れる。また破壊伝播速度は、地震波放射の重要なパラメータなので、今後、破壊伝播速度によって放射される弾性波の特徴なども考察していく。

破壊エネルギーの増加は Aochi and Ide²⁾の研究でも指摘されている。またこの増加は階層構造を持つ円形アスペリティモデルでは異なる臨界すべり量（破壊エネルギー）を持つアスペリティの破壊と解釈される。断層破砕帯と円形アスペリティモデルはともに破壊エ

エネルギーの増加を説明するがその物理的意味は異なる。今後両者の関係なども検討する必要がある。円形アスペリティモデルにはフラクタル次元の変化など今後調べなければならない課題も多い。

〈動力学モデルとデータ解析〉

本年度は臨界すべり変位量の推定例を増やすことが出来た。これまでの研究とあわせると地震が大きいほど臨界すべり量は大きく、局所的にもすべりが大きいほど臨界すべり量は大きくなるという傾向がはっきりしてきた。これは動力学モデルから示唆される破壊エネルギーの増加と調和的である。但し、どの場合にも推定された臨界すべり変位量が可能な値の上限値であることに変わりはない。今後は下限値をどこまで推定することが出来るかが重要な研究対象となる。今年度新たに解析された 2003 年十勝沖地震は典型的な海溝巨大地震である。大都市に災害をもたらす危険のある海溝巨大地震の動的破壊過程はまだ不明な点が多い。この地震は今後の重要な研究対象になる。

地震エネルギーの推定から小さな地震も大きな地震も 1 つのスケーリングで説明できる可能性がより高くなった。これは大きな地震の破壊過程を支配する動力学パラメーターを小さな地震の解析から推定できる可能性を示唆する。これを検証するために今後は異なる環境条件での地震エネルギーの推定を行う予定である。

〈動力学モデルと強震動予測〉

平均変位速度の分布や 1 回の地震あたりのすべり量が動力学モデルシミュレーションにとって非常に重要であることが確認された。しかしこれらの情報が得られている断層系は少ない。活断層調査の進展に期待するとともに、このようなパラメーターが得られない断層系についても応力場の不均質を推定する方法を検討する必要がある。

擬似動力学モデルはさらなる修正近似式を適用することで今まで以上に動力学モデルに一致するようになった。今後もより具体的な問題設定において近似の妥当性を検討するとともにその定量化も必要になる。

断層運動の静的項と動的項の影響は震源近傍での地震動の卓越方向に影響することが明らかになった。これは運動学的な解析による知見であるが動力学モデルシミュレーションにも共通する性質であり、近傍の地震動特性の理解に欠かせない。

(e) 引用文献

- 1) 安藤亮輔, 山下輝夫:断層破碎帯の生成過程-断層面外破損のモデル化とシミュレーション-, 日本地震学会講演予稿集, B07, 2003.
- 2) Aochi, H. and Ide, S.: Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, No. 2, 10.1029/2003GL018708, 2004.
- 3) Hisada, Y. and Bielak, J.: A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol. 93, No. 3, pp. 1154-1168, 2003.
- 4) Ide, S., and Takeo, M.: Determination of constitutive relations of fault slip based

on seismic wave analysis, Journal of Geophysical Research, Vol.102, pp.27379-27391, 1997.

5)井出哲：強震計と海底地震計を用いた 2003 年十勝沖地震の震源過程解析－高速破壊は S 波速度を超えたか？，日本地震学会講演予稿集，TP24，2003.

6)井出哲，松原誠，小原一成：Hi-net 1k sps データを用いた地震エネルギーの推定：2000 年鳥取県西部地震の余震活動について，日本地震学会講演予稿集，B29，2003.

7)加瀬祐子，堀川晴央，関口春子，佐竹健治，杉山雄一：地質学的情報を用いた地震破壊過程の推定：上町断層系への応用，地球惑星関連学会 2002 年合同大会予稿集，S040-011，2002.

8)加瀬祐子，関口春子，杉山雄一，石山達也，堀川晴央，佐竹健治：活断層情報から推定した断層モデル・応力場での六甲・淡路断層系の動的破壊過程：兵庫県南部地震との比較，日本地震学会講演予稿集，P18，2003a.

9)加瀬祐子，関口春子，石山達也，堀川晴央，佐竹健治，杉山雄一：活断層情報から推定した不均質応力場中の動的破壊過程のシミュレーション：上町断層系・生駒断層系への応用，活断層・古地震報告，Vol.3，pp.261 - 272，2003b.

10)Mikumo, T., Olsen, K.B., Fukuyama, E. and Yagi, Y.: Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.93, pp.264-282, 2003.

11)Miyatake, T., Yasuda, T. and Yagi, Y.: The dynamic rupture process of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake, EOS Trans. AGU, , 2003

12)中村洋光，宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式，地震，Vol.53，pp.1-9，2000.

13)関口春子，加瀬祐子，堀川晴央，石山達也，佐竹健治，杉山雄一：活断層情報を用いた想定地震の不均質すべり・応力分布の推定，活断層・古地震報告，Vol.3，pp.273-284，2003/11

14)Wu, C.: Estimation of fault geometry and slip-weakening parameters from waveform inversion and application to dynamic ruptures of earthquakes on a bending fault, Ph. D Thesis, Univ. of Tokyo, 2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
Ando, R., Tada, T., and Yamashita, T.	Dynamic evolution of a fault system through interactions between fault segments	Journal of Geophysics Research	平成 16 年 (in press)
Aochi, H. and Ide, S.	Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture	Geophys. Res. Lett., 31(2), 10.1029/2003GL018708	平成 16 年
Hisada, Y. and Bielak, J.	A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered	, Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol. 93, No. 3, pp.1154-1168	平成 15 年

	Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity		
Ide, S.	Fracture surface energy of natural earthquakes from the viewpoint of seismic observation	Bull. Earthquake Research Institute, 78, 1, 59-66	平成 15 年
Ide, S., Beroza, G. C., Prejean, S.G., and Ellsworth, W.L.	Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings	Journal of Geophysical Research, 108, doi:10.1029/2001JB001617	平成 15 年
加瀬祐子, 関口春子, 石山達也, 堀川晴央, 佐竹健治, 杉山雄一	活断層情報から推定した不均質応力場中の動的破壊過程のシミュレーション：上町断層系・生駒断層系への応用	活断層・古地震報告, 第 3 号, 261 - 272	平成 15 年
宮武隆, 吉見雅行, 寺坂美紀	強震動シミュレーションのためのすべり速度時間関数の近似式(2)不均質な横ずれ断層への応用と改良式	地震 2, 第 56 巻, 125-139	平成 15 年
吉見雅行, 宮武隆, 東原紘道	震源近傍の特定地点に特定の周期帯の波を卓越させる地震断層モデルー全無限等方均質弾性体における検討一	土木学会応用力学論文集 Vol. 6、799-808	平成 15 年

口頭発表

著者	題名	発表先	発表年月日
安藤亮輔, 山下輝夫	断層破碎帯の生成過程：断層面外破損のモデル化とシミュレーション	日本地震学会, 京都	平成 15 年 10 月 6 日
青地秀雄, 井出哲	Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture	日本地震学会, 京都	平成 15 年 10 月 6 日
加瀬祐子, 関口春子, 杉山雄一, 石山達也, 堀川晴央, 佐竹健治	活断層情報から推定した断層モデル・応力場での六甲・淡路断層系の動的破壊過程：兵庫県南部地震との比較	日本地震学会, 京都	平成 15 年 10 月 6 日
井出哲	強震計と海底地震計を用いた 2003 年十勝沖地震の震源過程解析ー高速破壊は S 波速度を超えたか？	日本地震学会, 京都	平成 15 年 10 月 8 日

井出哲, 松原誠, 小原一成	Hi-net 1k sps データを用いた地震エネルギーの推定 : 2000 年鳥取県西部地震の余震活動について	日本地震学会, 京都	平成 15 年 10 月 6 日
井出哲, 青地秀雄	Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture	米地球物理学会 (AGU) 秋季大会、アメリカ・サンフランシスコ	平成 15 年 12 月
Miyatake, T., Yasuda, T., and Yagi, Y.	The dynamic rupture process of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake	米地球物理学会 (AGU) 秋季大会、アメリカ・サンフランシスコ	平成 15 年 12 月 8 日
Miyatake, T., Yasuda, T., and Yagi, Y.	The rupture process of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake	Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Source Dynamics, Bratislava, Slovakia	平成 15 年 9 月 1 日
Kase, Y., Sekiguchi, H., Ishiyama, T., Horikawa, H., Satake, K., and Sugiyama, Y.	Simulation of dynamic rupture processes on active faults, within heterogeneous stress fields	Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Source Dynamics, Bratislava, Slovakia	平成 15 年 9 月 1 日

(g) 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 16 年度業務計画案

今年度もこれまでどおり 3 つの小分野、動力学モデルの基礎研究、動力学モデルとデータ解析、動力学モデルと強震動予測のそれぞれで研究を進展させる。さらに今年は全体研究計画の中間まとめを意識する。

基礎研究として昨年度提案された 2 つのモデル、破砕帯モデルと不均質アスペリティモデルはまだごく基本的な性質が明らかにされたに過ぎないので今年はさらに詳細な研究を進める。破砕帯モデルの主要な目標は主断層の分岐、屈曲をモデルに取り入れることである。また破壊伝播速度によって放射される弾性波の特徴なども考察していく予定である。不均質アスペリティモデルについてはそのフラクタル的な性質がモデルの振る舞いにどのように影響するかについて考察する。主要な目標はフラクタル次元の効果を明らかにすることである。さらに地震波形の統計的特徴についても考察する予定である。データ解析では主要な動力学パラメータである臨界すべり変位量と破壊エネルギーの推定

例を増やす。特に臨界すべり変位量についてはその下限を推定する方法を開発する必要がある。これまでに解析した地震も含めいろいろな地震を用いて手法の開発を行う。さらに基礎研究から破壊の階層性の重要性が指摘されたのでそれを効果的にデータから解析する手法の開発も行う。地震エネルギーについてはケーススタディを増やして環境条件の変化を議論することを目標とする。

強震動予測では平均変位速度の分布や1回の地震あたりのすべり量が動力学モデルシミュレーションにとって非常に重要であることがわかってきた。しかし、これらの情報が得られている断層系は少ないのでこのようなパラメーターが得られない断層系についても応力場の不均質を推定する方法が必要になる。この方法を検討する。擬似動力学モデルは現実的な断層モデルへの適用を目指す。過去に蓄積されている不均質断層モデルを用いて強震動予測を実践する。

上記にあげた計画の実現の為に不均質断層モデルの統計的性質や擬似動力学モデルに詳しい海外研究者を招聘する。またそれぞれの課題について積極的に学会、ワークショップなどで講演し議論を深める。本年度は具体的には WPGM（西太平洋地球物理学会、ハワイ、8月）、ESC（ヨーロッパ地震学会、ポツダム、9月）、AGU（米国地球物理学会総会、サンフランシスコ、12月）などの国際学会、ACES（地震シミュレーションに関する APEC 国際協力、7月、北京）などのワークショップでの講演を予定している。国内でも5月の地球惑星科学合同大会、10月の日本地震学会などに参加予定である。また、それぞれの小分野での研究が進展してきたので当研究課題内の中間まとめとして年度末に小集会を開く予定である。

3. 3. 4. 2 地震の放射エネルギーと断層破壊エネルギーとの関係

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：地震の放射エネルギーと断層破壊エネルギーとの関係

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
メキシコ国立自治大学地球物理研究所	教授	三雲健	
独立行政法人防災科学技術研究所	研究員	福山英一	fuku@bosai.go.jp

(2) 平成15年度の成果

(a) Abstract

The seismic radiation energy and its relation to the fracture energy on subdivided fault segments are directly estimated from the results of kinematic waveform inversion and dynamic modeling for two different types of earthquakes, one being a shallow crustal earthquake, the 2000 western Tottori, Japan, and another an in-slab event, the 1999 Oaxaca, Mexico. The procedure incorporates the spatial distribution of slip, critical slip-weakening distance, stress drop, and strength excess. The results show that the seismic energy density radiated from major asperities on the fault are nearly the same for the two earthquakes, while the fracture energy density on the in-slab fault are appreciably larger than that for the crustal fault, suggesting higher strength in the in-slab fault zone.

(b) Introduction

The seismic energy radiated from earthquake source may be one of the fundamental parameters for understanding the dynamic rupture on the fault. To estimate the radiated seismic energy, numerous studies have been made to date, based not only on teleseismic waves by integrating outgoing energy flux with correcting for path attenuation effects and site response but also on regional data without these effects^{1), 2), 3), 4), 5)}.

On the other hand, recent kinematic waveform inversion and dynamic modeling of the rupture process enabled us to estimate the slip and stress change distributed on the fault for a number of large to moderate-size earthquakes. Accordingly, it is now possible to get into direct estimate of seismic energy radiated from the fault by incorporating all the above information^{6), 7)}. In the present paper, we are estimating the seismic radiation energy, and discuss its relation to the fracture energy on the basis of a dynamic slip-weakening model, for two different types of earthquakes.

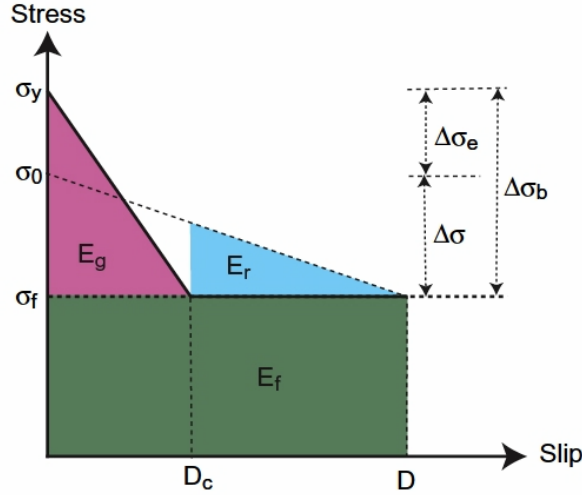


Figure 1. Fracture energy and seismic radiation energy on a unit area of the fault, under a simple dynamic slip-weakening behavior (modified from Andrews, 1976a, b).

Energy Balance on the Fault under a Simple Slip-Weakening Model

Now, we consider a heterogeneous fault surface, where the slip distribution has been estimated on divided subfaults from kinematic waveform inversion and the distribution of the resultant dynamic and static stress changes and the strength excess has been calculated from dynamic modeling. The rupture in this case propagates either spontaneously or at a nearly constant velocity. We assume here a simple slip-weakening constitutive relation for dynamic rupture on each subfault, as shown in Figure 1. The initial stress σ_0 at this point increases up to the yield stress σ_y as the rupture front approaches this point, and is assumed to decrease linearly with ongoing slip to the dynamic friction level σ_f ^{(8), (9)}. The slip at this point is defined as the critical slip-weakening distance D_c , and the final slip on this subfault is D . In this case, $\Delta \sigma = \sigma_0 - \sigma_f$ is the dynamic stress drop, $\Delta \sigma_e = \sigma_y - \sigma_0$ is called the strength excess, and $\Delta \sigma_b = \sigma_y - \sigma_f$ is defined as the breakdown stress drop. If we also define the final stress σ_s , then $\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_s$ is the static stress drop. In the present case, however, we simply assume $\sigma_s = \sigma_f$, then $\sigma_s = \Delta \sigma$ for the dynamic rupture process lasting for quite a short duration. In addition, if we consider the average shear stress σ_a working during the faulting process, then $\sigma_a = (\sigma_0 + \sigma_f) / 2$. Now let us consider the energy balance on each subfault with an area A . If the potential energy W (strain energy plus gravitational energy) drops to $W - \Delta W$, where ΔW is the strain energy drop during the dynamic faulting process, which is given by $\Delta W = \sigma_a DA$ ^{(10), (11)}. The energy balance on this subfault may be given by,

$$W = E_r + E_f + E_g \quad (1)$$

, where E_r is the radiated seismic energy, E_f is the frictional energy loss during the faulting, and E_g is the fracture energy, which is the the surface energy to be work done on this subfault⁽¹²⁾. We have $E_f = \sigma_f DA$ in the case when σ_f does not change

rapidly during this process, and $E_g = (\sigma_y - \sigma_f)DcA / 2$, as shown in Figure 1. From Eq. (1), we have

$$\begin{aligned} E_r &= \Delta W - E_f - E_g = (\sigma_0 + \sigma_f)DA/2 - \sigma_f DA - (\sigma_y - \sigma_f)DcA/2 \\ &= \Delta \sigma DA/2 [1 - (1+S)Dc/D] \end{aligned} \quad (2)$$

where $S = \Delta \sigma_e / \Delta \sigma = \Delta \sigma_b / \Delta \sigma - 1$ is called the stress jump factor¹³⁾. Equation (2) is essentially the same as given by Archuleta⁶⁾, but somewhat different from Eq. (6') given by Kanamori and Heaton¹²⁾ because they have finally omitted E_g . The ratio of the seismic radiation energy E_r to the fracture energy E_g can be written as,

$$\begin{aligned} E_r / E_g &= (\Delta \sigma DA/2) [1 - (1+S)Dc/D] / (\Delta \sigma_b DcA/2) \\ &= [(1+S)Dc/D] - 1 \quad - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

and the ratio of the seismic radiation energy E_r to the strain energy drop ΔW is given by,

$$E_r / \Delta W = [1 - (1+S)Dc/D] / (1 + 2\sigma_f / \Delta \sigma) \quad (4)$$

Equation (3) means that the ratio E_r/E_g is a function only of S and Dc/D and can be estimated from the results of dynamic calculations, and the seismic energy radiated from each subfault can also be estimated from Eq. (2) if the final slip and dynamic stress drop have been determined. These situations may be understood also from Figure 1. On the other hand, the ratio E_r/W , which corresponds to the seismic efficiency, may not be easily estimated unless the absolute value of σ_f is known from any other information. Archuleta⁶⁾ argued that if the rupture velocity is less than the Rayleigh wave speed, then $S > 1.77^{14)}$, and that D must be greater than $2.77 Dc$ for any subfault to radiate seismic energy. Although this assumption is valid for a 2D inplane shear crack extending over a homogeneous fault plane, it may not necessarily be applicable to the case of a rupture propagating on a heterogeneous fault with a finite dimension located in a 3D half-space or more realistic crust and upper mantle structure. Also, the results from laboratory experiments of dynamic rupture propagating on a frictional surface indicate appreciably smaller S -values^{15), 16)}. For these reasons, we do not put any pre-constraints on S , but instead simply assume $E_r > 0$. Under this assumption, an allowable condition is $Dc/D < (1+S) - 1$.

Apparent Slip-Dependence of Critical Slip-Weakening Distance

The critical slip-weakening distance Dc has so far been estimated for several earthquakes through various techniques¹⁷⁾. Recent studies^{18), 19)} estimated this dynamic parameter from the time of peak value in the slip-velocity functions on the fault, which have been obtained from kinematic waveform inversion in the frequency range between 0.05 and 0.5 Hz, with corrections through dynamic rupture calculations taking into considerations of some numerical tests²⁰⁾. It was also shown that the estimated Dc -values, with uncertainties of about 30 %, appear to be dependent on local maximum slip D . We call this in term of apparent slip-dependence of the critical

slip-weakening distance. In this case D_c/D scatters in a rather wide range, $0.27 < D_c/D < 0.56$ for the 2000 Tottori, Japan earthquake¹⁸⁾, and $0.25 < D_c/D < 0.60$ for the 1999 Oaxaca, Mexico earthquake¹⁹⁾. A similar estimate of $D_c/D \sim 0.63$ was also obtained for the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake²⁰⁾. The above apparent slip-dependence of D_c suggests a scale-effect of the critical slip-weakening distance. Up to this time, there are much arguments as to whether such scale-effects are real or D_c is almost constant on a single fault within the accuracy of its estimate. It has been shown, however, that this type of scale-dependence might be interpreted by the roughness of fault surface, as suggested by laboratory experiments^{21), 22), 23)} and by field surveys of natural faults^{24), 25)}, in which D_c was found to be distributed as a fractal-like structure of the fault roughness and hence is expected to scale with slip. An increase of D_c and the fracture energy with rupture propagating distance keeping such a scaling relation is also suggested by theoretical and numerical approach^{26), 27)}.

(c) Fracture Energy and Radiated Seismic Energy

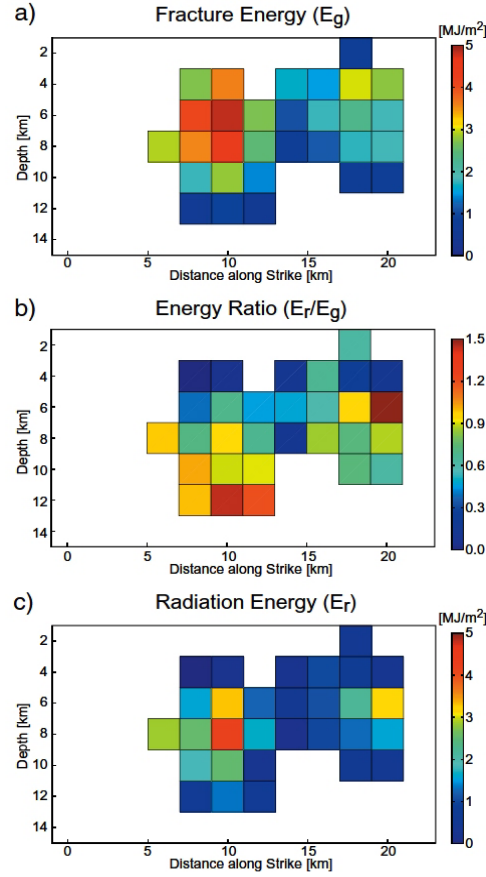


Figure 2. Distribution of the estimated energy densities on the fault for the 2002 Tottori, crustal earthquake. (a) fracture energy density E_g/A , (b) the ratio of the radiated seismic energy density to the fracture energy density E_r/E_g , (c) seismic energy density radiated from each subfault, E_r/A .

Since the distribution of maximum slip D , dynamic stress drop σ and the strength excess $\Delta \sigma_e$ has been estimated for these earthquakes^{18), 19)}, the radiated seismic energy and its ratio to the fracture energy can be estimated incorporating D_c/D on each subfault through Eqs. (2) and (3), although $\Delta \sigma_e$ is somewhat less well resolved than σ in the numerical calculations. Figure 2 shows the distributions of (a) the fracture energy density E_g/A , (b) the ratio of the radiated seismic energy to the fracture energy E_r/E_g , and (c) the radiated seismic energy density E_r/A , for the case of the Tottori earthquake. Several subfaults with $\Delta \sigma < 0$ or $D_c < 40$ cm have been excluded due to its poor resolution (Fig. 16 in Mikumo et al.,¹⁸⁾). In this case, $\Delta \sigma$ ranges between 0.6 and 8.5 MPa while $\Delta \sigma_e$ ranges between 0.5 and 4.5 MPa. It can be seen that E_g/A ranges between 3 and 5 MJ/m^2 in the high slip and large

stress-drop zone (Fig. 8, Mikumo et al.,¹⁸⁾), and that E_r/A in this zone is in the range between 2 and 4 MJ/m². It is to be noted here that E_r/A is somewhat less than E_g/A on almost all subfaults except at several segments, taking account of the uncertainty in the estimated D_c -values. If we integrate these energies over 30 major subfaults with a dimension of 2 km x 2 km, $\Sigma E_g = 2.4 \times 10^8$ MJ, $\Sigma E_r = 1.6 \times 10^8$ MJ, and its ratio $\Sigma E_r / \Sigma E_g = 0.67$. The last one suggests that the seismic energy radiated from the major part of the fault is about two third of the fracture energy spent to break that part of the fault. The spatial pattern of E_r/A may be compared with that estimated from an envelope inversion analysis of high frequency (1–8 Hz) seismic waves, which indicates higher energy radiated from the southeastern deeper part of the fault²⁶⁾.

Similar estimates are also shown in Figure 3 for the case of the 1999 Oaxaca earthquake, where subfaults with $\Delta \sigma < 0$ or $D_c < 40$ cm are also not included¹⁷⁾. In this case, $\Delta \sigma$ ranges between 2.2 and 12.5 MPa and $\Delta \sigma_e$ ranges between 1.2 and 14.7 MPa. The results show that E_g/A in two high slip and large stress-drop zones (Figs. 3 and 4 in Mikumo and Yagi¹⁷⁾) ranges between 9 and 13 MJ/m², while E_r/A in these zones is in the range between 2 and 5 MJ/m². Again in this case, E_r/A is considerably smaller than E_g/A on almost all subfaults except on several segments. It should be mentioned, however, that the calculated seismic energy density E_r/A goes down to slightly negative values on several subfaults around the right bottom segments in Figure 3. This comes from large $\Delta \sigma_e$ and hence large S -values, probably because the propagating rupture reached the upper fault edge there. Since these cases may be artifact, E_r/A in these subfaults is assumed to be zero. The total energies over 100 major subfaults with a dimension of 2.5 km x 2.5 km are,

$$\Sigma E_g = 3.1 \times 10^9 \text{ MJ}, \quad \Sigma E_r = 6.5 \times 10^8 \text{ MJ}, \quad \text{and its ratio } \Sigma E_r / \Sigma E_g = 0.21.$$

Comparing these energies in the two types of earthquakes, the fracture energy density on the major fault segments of the Oaxaca, in-slab earthquake is nearly twice that in the Tottori, crustal earthquake. This difference might be attributed to somewhat higher strength of the in-slab fault than that of the shallow crustal fault. On the other hand, the seismic energy density radiated from the major fault segments are almost the same. It should be noted, however, that the ratio E_r/E_g is mostly less than 1.0 and does not exceed 1.5 on many subfaults in the two earthquake faults. The total fracture energy over the fault and the seismic energy radiated from there are much larger in the Oaxaca earthquake than in the Tottori earthquake. This is simply due to a larger fault size (60 km x 40 km) of the former earthquake than the latter (24 km x 15 km). It is interesting to note that the ratio of the fracture energy to the seismic radiation energy is somewhat larger in the in-slab earthquake than in the crustal one.

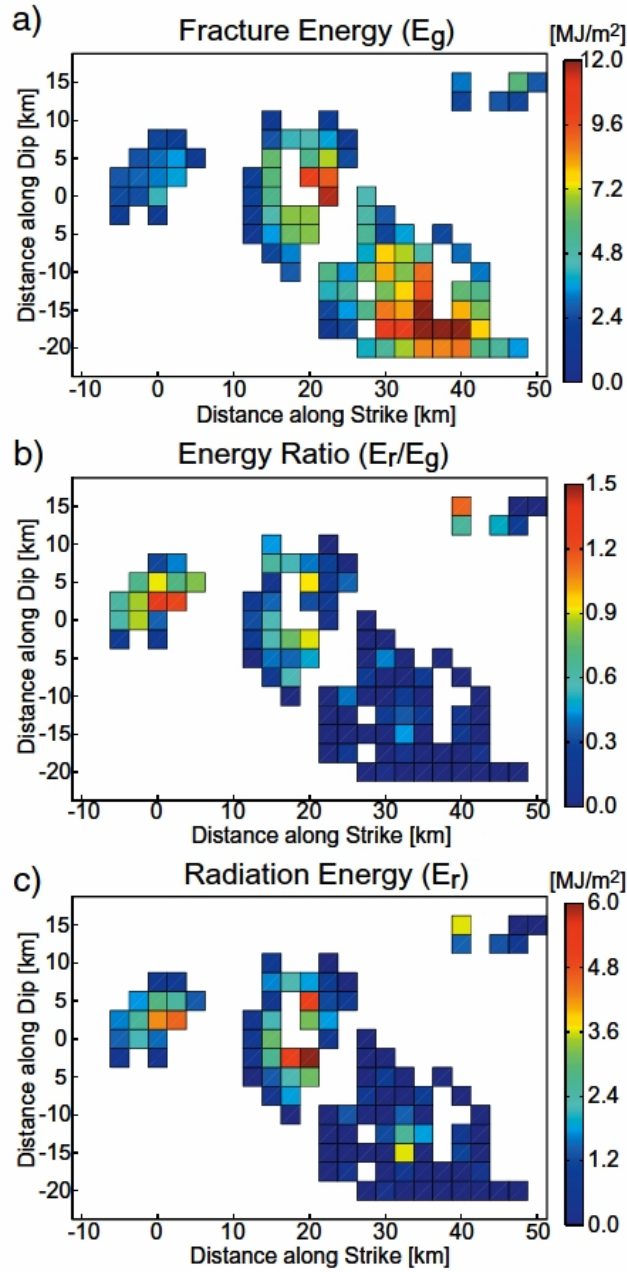


Figure 3. Distribution of the estimated energy densities on the fault of the 1999 Oaxaca, Mexico in-slab, normal faulting earthquake. The same explanations apply as in Figure 2. For blank subfaults, there are no reliable data available.

(d) Conclusions

We have estimated the seismic energy radiated from the fault and its ratio to the fracture energy there, considering the energy balance on subdivided fault segments under a simple slip-weakening model. These energies have been calculated for the 2000 Tottori, Japan, crustal earthquake and the 1999 Oaxaca, Mexico, in-slab

earthquake, from the distribution of slip, dynamic stress drop, strength excess, with apparent slip-dependence of the critical slip-weakening distance, all of which have been obtained from previous kinematic waveform inversion and dynamic rupture modeling. It was found that the seismic energy radiated from major asperities (high slip and large stress-drop segments) ranges between 2 and 5 MJ/m², about the same for the two different types of earthquakes, while the fracture energy to break the in-slab fault needed about twice that on the crustal fault. This might be attributed to higher strength of the in-slab fault, leading to smaller ratio of the seismic radiation energy to the fracture energy. The ratio is mostly less than 1 on many subfaults both for the two types of earthquakes analyzed here. (Submitted to short notes in bulletin of the seismological society of America, February, 2004)

(e) References

- 1) Kanamori, H., Haukson, E., Hutton, L.K. and Jones, L.M.: Determination of earth-quake energy release and ML using TERRAScope, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.83, pp.330-346, 1993.
- 2) Singh, S.K. and Ordaz, M.: Seismic energy release in Mexican subduction zone earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.84, pp.1533-1550, 1994.
- 3) Choy, G.L. and Boatwright, J.L.: Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, J. Geophys. Res., Vol.100, pp.18, 205-18,228, 1995.
- 4) McGarr, A.: On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip, J. Geophys. Res., Vol.104, pp.3003-3011, 1999.
- 5) Ide, S. and Beroza, G.C.: Does apparent stress vary with earthquake size?, Geophys. Res. Lett., Vol.28, pp.3349-3352, 2001.
- 6) Archuleta, R.: Critical slip weakening distance and nonradiating fault areas, Seism. Soc. Am., Meeting Abstract, 284, 2001.
- 7) Pavreau, P. and Archuleta, R.: Direct energy modeling and application to the 1979 Imperial Valley earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.30, No.5, pp.1198, 2-1-2-4, 2003.
- 8) Andrews, D.J.: Rupture velocity of plane strain shear crack, J. Geophys. Res., Vol.81, pp.5670-5687, 1976.
- 9) Andrews, D.J.: Dynamic plane-strain shear rupture with a slip-weakening friction law calculated by a boundary integral method, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.75, pp.1-21, 1985.
- 10) Knopoff, L.: Energy release in earthquakes, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., Vol.7, pp.44-52, 1958.
- 11) Kostrov, B.V.: Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock, Izv. Earth Phys. Vol.1, pp.23-40, 1974.

- 12) Kanamori, H. and Heaton, T.H. : Microscopic and macroscopic physics of earthquakes, in *GeoComplexity and Physics of Earthquakes*, ed. J.B. Rundle, D.L. Turcotte, and W. Klein, AGU Geophys. Monog. Vol.120, pp.147-163, 2000.
- 13) Das, S. and Aki, K. : A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol.50, pp.643-668, 1970.
- 14) Fukuyama, E., Mikumo, T. and Olsen, K.B. : Estimation of the critical slip-weakening distance: Theoretical background, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.1835-1840, 2003.
- 15) Ohnaka, M. and Yamashita, T. : A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong-motion source parameters, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.4089-4104, 1989.
- 16) Ohnaka, M. and Kuwahara, Y. : Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure, *Tectonophysics* Vol.175, pp.197-220, 1990.
- 17) Ide, S. and Takeo, M. : Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis., *J. Geophys. Res.*, Vol.102, pp.27,379-27,391, 1997.
- 18) Mikumo, T., Olsen, K.B., Fukuyama, E. and Yagi, Y. : Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.264-282, 2003.
- 19) Mikumo, T. and Yagi, Y. : Slip-weakening distance in dynamic rupture of in-slab normal-faulting earthquakes, *Geophys. J. Int.*, Vol.155, pp.443-455, 2003.
- 20) Zhang, W., Iwata, T., and Irikura, K. : Heterogeneous distribution of the dynamic source parameters of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, B5, ESE4-1- ESE4-14, 2003.
- 21) Okubo, P. G. and Dieterich, J.H. : Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.5817-5827, 1984.
- 22) Ohnaka, M. and Shen, L-f. : Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupture surface, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, pp.817-844, 1999.
- 23) Ohnaka, M. : A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, B2, ESE6-1- ESE6-23, 2003.
- 24) Scholz, C.H. and Aviles, C.A. : The geometry of faults and faulting, in *Earthquake Source Mechanics*, ed. S. Das, J. Boatwright and C.H. Scholz, AGU Geophys. Monog., Vol.37, pp.147-155, 1986.
- 25) Power, W.L., Tullis, T.E., Brown, S.R., Boitnott, G.N. and Scholz, C.H. : Roughness of natural fault surfaces, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.14, pp.29-32, 1987.
- 26) Andrews, D.J. : Rupture calculations with dynamically-determined slip-weakening friction, submitted to *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2003.
- 27) Aochi, H. : Numerical study on multi-scaling earthquake rupture, accepted for

publication, Geophys. Res. Lett, 2003.

28) Nakahara, H. : Envelope inversion analysis for high-frequency seismic wave energy radiation by using Green functions in a depth-dependent structure - The Western Tottori, Japan, earthquake (Mw6.6) -, presented at 2003 IUGG meeting in Sapporo, Japan, 2003.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Mikumo, T. and Fukuyama, E.	Seismic radiation energy and its relation to fracture energy on earthquake faults	アメリカ地震学会雑誌 (BSSA) 投稿中	平成 16 年 (予定)

(g) 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. 3. 4. 3 地震破壊のマルチスケール性に関する数値的研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：地震破壊のマルチスケール性に関する数値的研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院理学系研究科	講師	井出 哲	ide@eps.s.u-tokyo.ac.jp
仏放射線防護・原子力安全研究所	研究員	青地秀雄	hideo.aochi@irsn.fr

(c) 業務の目的

本研究では、地震破壊現象の数値にわたる幅広い時空間スケールを扱える計算手法を開発し、地震の成長過程におけるスケーリングの違いが破壊過程やそれに伴う強震動生成にどのような効果を持つかを検証する。

(d) 5 年の年次実施計画

- 1) 平成 14 年度：マルチスケール計算手法の開発。
- 2) 平成 15 年度：計算手法について細部の検討を行うとともに、異なるスケーリングの場合の計算例を示す。従来の震源核モデルとの対比を行う。さらに不均質性についての考察も行う。どのように不均質を導入すべきかの検討、実際に導入しての計算など行う。
- 3) 平成 16 年度：アスペリティ分布のフラクタル次元 D と地震活動、大地震の発生確率に関するシミュレーション。
- 4) 平成 17 年度：不均質アスペリティモデルのパラメータを地震波や地震活動のデータから制約する方法の検討。
- 5) 平成 18 年度：地震破壊のマルチスケール性が動力学シミュレーションや強震動予測に与える影響を検討する。

(e) 平成 15 年度業務目的

まず、平成 14 年度に開発を始めたマルチスケール計算手法（境界積分方程式法＋繰り込み法）について手法の正当性を検証する。その上で断層面上に不均質（アスペリティ）を導入し、破壊過程が確率的、統計的にどのように変わりうるかを調査する。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

繰り込み法と境界積分方程式法を用いた新しい計算手法を、動的地震破壊過程の数値シミュレーションのために提案した。今年度取り組んだ本質的な問いは、「不均質な特徴的すべり距離 D_c （あるいは、破壊エネルギー G_c ） の場のもとで小さい地震がどのように大きい地震に成長していくか？」である。まず D_c が震源距離 L にべき係数 β で比例して大きくなる場合を調べた。 $\beta = 1$ の時、一様な初期応力場の下で破壊が一定破壊速度で伝播していくことを数値的に示すことに成功した。この結果は G_c と D_c の地震サイズに対するスケーリング則を満たしているが、スケール依存する破壊核形成過程は必要としていない。 β

$\neq 1$ の場合には破壊面先端でのエネルギーバランスを保とうとするために、すべり速度と破壊速度が破壊の成長につれて変化する。 $\beta < 1$ の場合には破壊が S 波速度を超えるまでに加速し、 $\beta > 1$ の場合には自然に破壊が停止する (Aochi and Ide, GRL, 2004) ¹⁾。

引き続いて、アスペリティで D_c (G_c) がアスペリティサイズに比例するように、かつそのサイズの頻度分布はフラクタル的になるように一様乱数によって不均質場を断層面上に発生させ、最小サイズのアスペリティで始まった破壊がどのような確率で大きくなるかを数値的に調べた。

(b) 業務の実施方法

平成 14 年度報告書ならびに論文 ¹⁾ において詳細した繰り込み法と境界積分法を用いた計算手法を用いる。繰り込み前後で空間グリッドサイズ、時間ステップ刻みが変わっても同一現象を一様に追跡できることが必要である。繰り込み前後の破壊速度、すべり速度、地震モーメント解放レート、すべり-応力構成曲線に注意する。プログラムは Sun Solaris 上で fortran90 で開発し、計算は複数台の Sun Solaris サーバー (最大 12CPU) 上で行う。

破壊の構成則として、すべり弱化型の法則を導入する。二つの基本パラメータは、 D_c (臨界すべり弱化距離)、 $\Delta \tau_b$ (破損応力降下量) と呼ばれる。 G_c (破壊エネルギー) は $(D_c \times \Delta \tau_b)/2$ で定義され、破壊サイズに依存することが知られている。破壊による応力変化がスケール依存しないとすれば、 G_c のスケール依存性は D_c のスケール依存性と言いかえることができる。本研究ではこの考えに基づいて、常に一様な応力場を仮定し、 D_c の空間不均一性を考える。

まず、 D_c が震源距離 L に依存して増大する場合 ²⁾ を考える。これは Andrews も述べているように、破壊の進展とともに破壊フロント周辺の塑性領域が増大することによって D_c が自発的に大きくなるか、もともと D_c が空間に不均一に分布し小さい D_c 領域で始まった破壊が確率的に大きくなるか (本研究) という物理的背景が考えられる。理論的には D_c が L に比例すれば、破壊が自己相似的に大きくなりうるであろう。本研究では、べき係数 β で D_c が L に依存すると一般的に考え、様々な β の値を考える。 $\beta = 1$ の場合は、平成 14 年度報告書において既に報告したように、我々の新しい計算手法によって破壊が自己相似的に伝播していくことを数値的に確認することが可能である。 $\beta \neq 1$ の場合に、どのように破壊伝播が影響をうけるかを考えた ¹⁾。

我々の新しい手法が、小さい破壊がどのように大きく成長していくのかを追跡するのに妥当だと確認した後に、 D_c の空間不均一分布を確率的に生成して地震発生場に近いものを考える。ここでは離散化したアスペリティモデルを考える。半径 L に比例する D_c をもったアスペリティをフラクタル的に空間ランダムに発生させる。ただし問題を単純化するために、 L は最小サイズのものを基準に 2 のべき乗の大きさのものを 7 段階考える (2L, 4L, 8L, 16L, 32L, 64L)。バックグラウンド (アスペリティに含まれない断層部分) の D_c は最大サイズのアスペリティが持つ D_c の更に 2 倍と仮定する。扱う断層サイズは最小サイズのグリッドを基準に 4096x4096 (各段階では 64x64 の断層面、3 回まで破壊進展に応じて繰り込む) である。ちなみに、各サイズのアスペリティが中心で完全に重なったときは、 D_c 分布は震源距離に対して階段状になり、先に行った D_c が L に比例する場合の離散化した状態になる。

この時には、 D_c 分布が連続ではなく階段上にステップすることによる若干の擾乱があるものの、大概には先で見たように自己相似的に破壊伝播していくことが確かめられる。

ここでは、より一般的に各サイズのアスペリティ数はフラクタル的に $-D$ のべき乗則にならって発生させ、空間ランダムに分布させる。以下では $D=2$ の場合に全般的な密度を変えて不均質場を生成する。たとえば高密度の場合、最小サイズのアスペリティは16384個存在し、サイズが大きくなる毎に順に4096個、1024個、256個、64個、16個、4個となる。なお断層サイズ(4096x4096)に対して周期境界条件を課す。比較のために密度が $1/2$ の場合(最小サイズのアスペリティ8192個)、 $1/4$ の場合(同4096個)を考える。破壊は最小サイズのアスペリティで始まるものとし、系の発展は考慮にいれない。すなわち高密度アスペリティ分布の場合には16384回、独立にそれぞれの最小アスペリティで破壊を開始させ、個々の破壊がどこまで大きくなりえるかを考える。

(c) 業務の成果

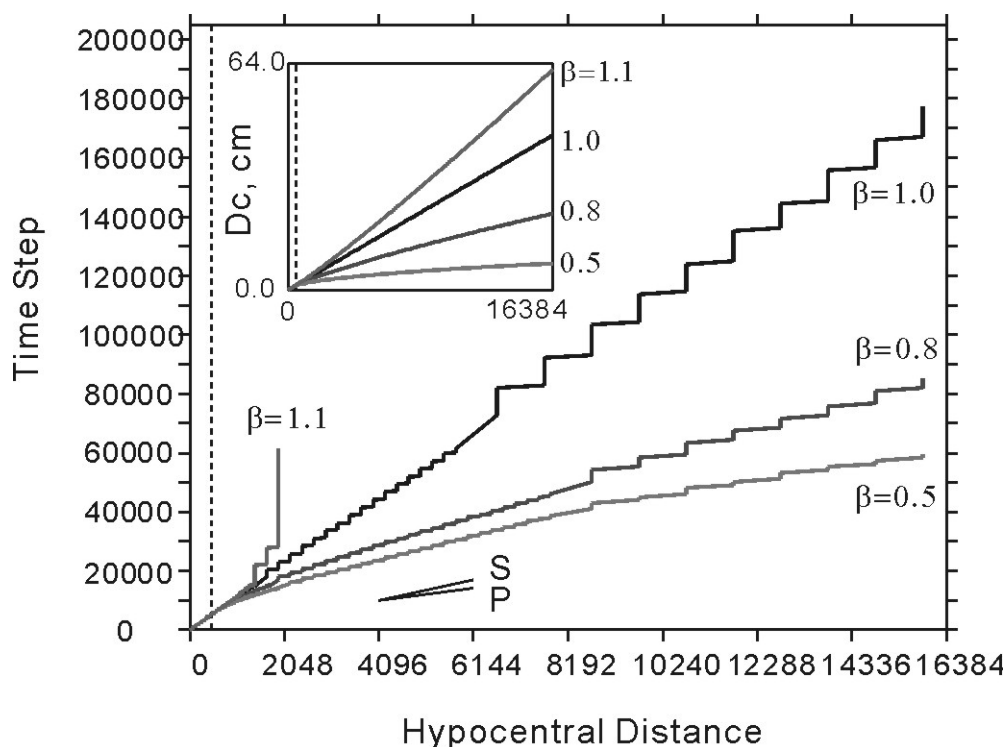


図1 異なる β に対する破壊伝播の比較。線は、面内剪断方向の破壊面の進展を表す。両軸ともに最小スケールの空間格子サイズと時間刻みで規格化されている。各場合の D_c は図中左上に示されている。点線位置は480グリッドに対応し、これよりも小さい震源距離 L では D_c は L に比例するとし、これを超える距離で L の β べき乗であるとした。(Aochi and Ide, 2004 より)

まず最初に、 D_c がべき係数 β で震源距離 L に比例して増大する前半の結果を示す。図1は異なる β に対して、どのように破壊面が進展していくかをあらわしている。ただし、最小シミュレーションスケールで480グリッドまでは D_c が L に比例する(すなわち破壊が相似

的に進展する）と仮定している。図 1 から明らかなように、 β が 1 より大きい場合には、必要とされる破壊エネルギーの増大に、破壊が供給できるエネルギーが追いつかず、破壊面の進展は減速しやがて停止する。逆に β が 1 より小さい場合には、供給されるエネルギーが破壊の進展とともに過剰になり、破壊速度が加速される。 $\beta=0.5$ の場合には、S 波速度を超える破壊速度まで加速されることが認められた。 $\beta=0.8$ の場合には、レイリー波速度で破壊速度が飽和して相似的に見られるが、実際には、代わりにすべり速度が増大しているので、相似的な破壊進展とはみなすことができない。いずれの場合にも、応力場は至る所で一様であることを注記しておく。そのような場で Dc の L 比例とその破綻が破壊の加速・減速・停止を自然に再現できることは注目に値する。一般になされる動的破壊のシミュレーションは、グリッドサイズが固定、Dc がスケール依存しない（本研究での $\beta=0.5$ に近い）とされることが多いため、観測事実とは逆に S 波速度を超える破壊速度が簡単に再現されてしまう。このことから、断層破壊面の性質（Dc）は実際にスケール依存していることが示唆され、Dc の空間不均一が複雑な地震破壊現象を生成していることがうかがわれる。ここまでの結果は、論文¹⁾に詳細されている。

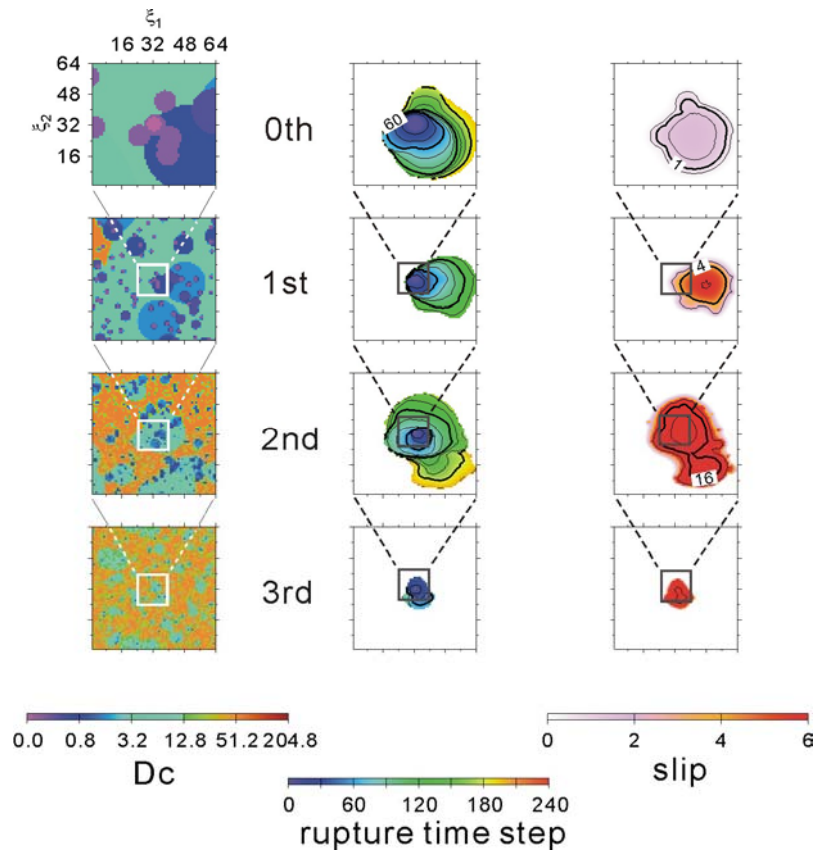


図 2 シミュレーション結果（その 1）。3 回繰り返し込んだ後、破壊が自然に止まる例（M4.9、図 6 に震源時間関数が示される）。左図から、各シミュレーションステップでの Dc 空間分布、破壊時間、総すべり量である。Dc とすべり量は一樣に正規化されている。破壊時間を表す時間刻みは各シミュレーションステップでの量に対応する。

次に、ランダムにアスペリティを発生させて不均一場を生成した後半の結果を示す。たとえば高密度アスペリティ分布の場合に発生する破壊の模様を図 2、図 3 に示す。断層面

上の D_c (アスペリティ分布) が各シミュレーションステップの縮尺に対応して左図に示される。なお、すべりの方向は ξ_1 の方向に固定されている。図 2 はある程度成長し自然に停止する場合、図 3 は最大サイズのアスペリティを壊し、更に破壊進展して系全体を破壊しつくす場合である。 D_c の空間不均一分布によって、破壊過程が時空間的に非常に複雑になる。破壊伝播の指向性も一様ではなく破壊進展に伴ってその方向が変わる。破壊面形状自体も不規則に進展する。破壊開始点 (震源) が常に現象としてのアスペリティ (すべり量大) になるとは限らない。自然地震で観測されるこれらの現象は、シングルスケールの従来のシミュレーション手法では詳細に再現することが難しかった。これらの要素が、地震波励起過程に影響するだろうことが容易に考えられる。

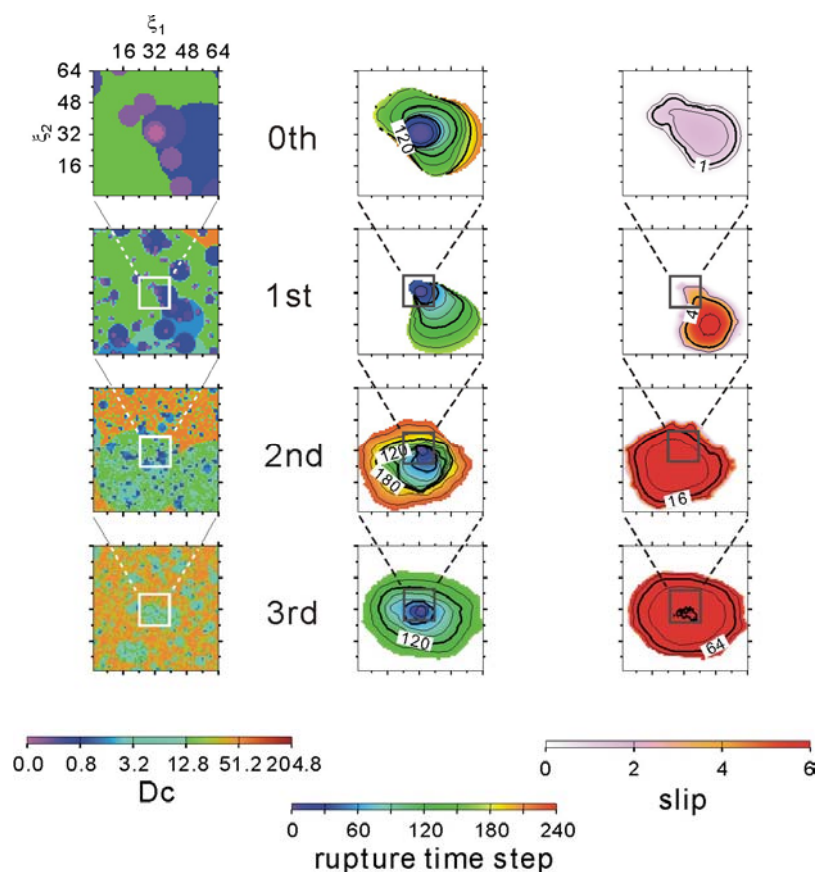


図 3 シミュレーション結果 (その 2)。3 回繰り込んでもなお破壊が止まらずに進展し、モデル領域全体を壊す例。シミュレーション内の最終時刻での参考マグニチュードは 6.1 であり、この震源時間関数が図 6 に示されている。

これらのシミュレーションから各破壊現象のマグニチュードが計算でき、それを頻度分布で表したのが図 4 である。合計 16384 回の動的破壊シミュレーションが行われた。ちなみに、旧式の Sun Solaris の CPU (350/400 MHz) を 5 個用いて計算は 2 週間以上かかった。最小マグニチュード 1.3 は最小アスペリティの 1 つに対応する。マグニチュード 5.7、6.1 と表されるイベントは断層面の端まで破壊が停止せずに達してしまった場合 (図 3) であるが、便宜上最終タイムステップのすべり量と破壊面積によりマグニチュードを計算した。これらの例外を除くと、マグニチュードの違いほぼ 4 桁にわたって頻度はべき法則にしたがって減少することがわかる。傾きを最尤法によって求めると 1.06 となる。図 5 には中密

度、低密度の場合の頻度分布図を示す。密度の減少とともに大きなイベントが現れる頻度が減る。しかしながら頻度分布図自体は依然べき法則で近似でき、傾きはそれぞれ 2.2、2.8 となる。仮定したアスペリティのサイズ-個数統計ではこの傾きは 1 であり、シミュレーション結果は必ずしもこの値にならない。この現象を理解するにはアスペリティの接続具合を統計的に考える必要がある。各レベルのアスペリティが 1 つ上位のアスペリティと連結する確率、各レベルのアスペリティ同士で連結する確率を考えるとこれらの傾きの違いが理解できる (Ide and Aochi、準備中)。

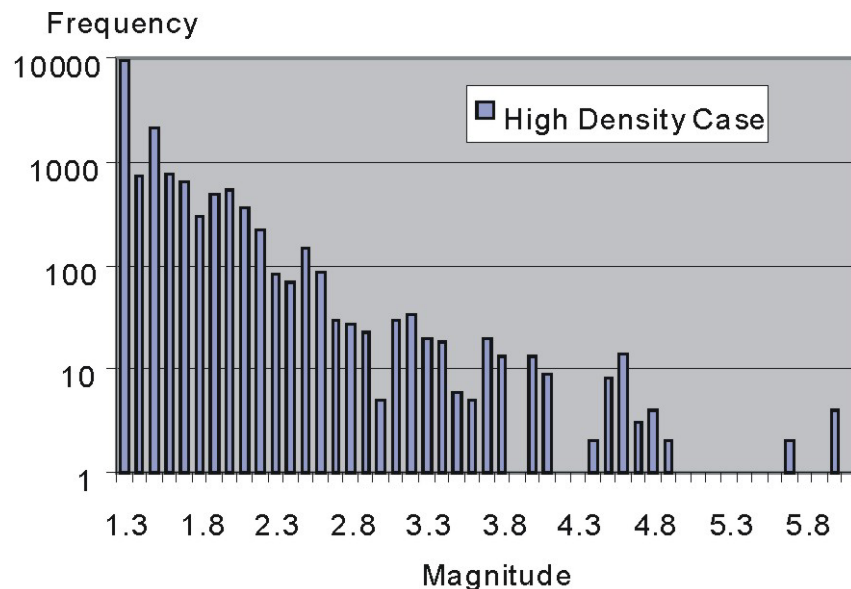


図 4 高密度アスペリティ分布の場合のマグニチュード別出現頻度分布。
シミュレーションの合計回数は 16384 回 (最小アスペリティの個数に相当)
である。分布の傾きを求めるとほぼ 1 に求まる。

これらの現象の興味深い側面として、異なるマグニチュードのイベントにおける地震モーメント解放レートを図 6 に示す。マグニチュードの違いにかかわらず、最小アスペリティから始まるという破壊の初期過程は同じであり、その後の進展は Dc の空間分布による。すなわちカスケード的破壊進展を示すごとく、地震モーメント解放レートを並べても最終マグニチュードに依存するような立ち上がりの差は有意に認められない。

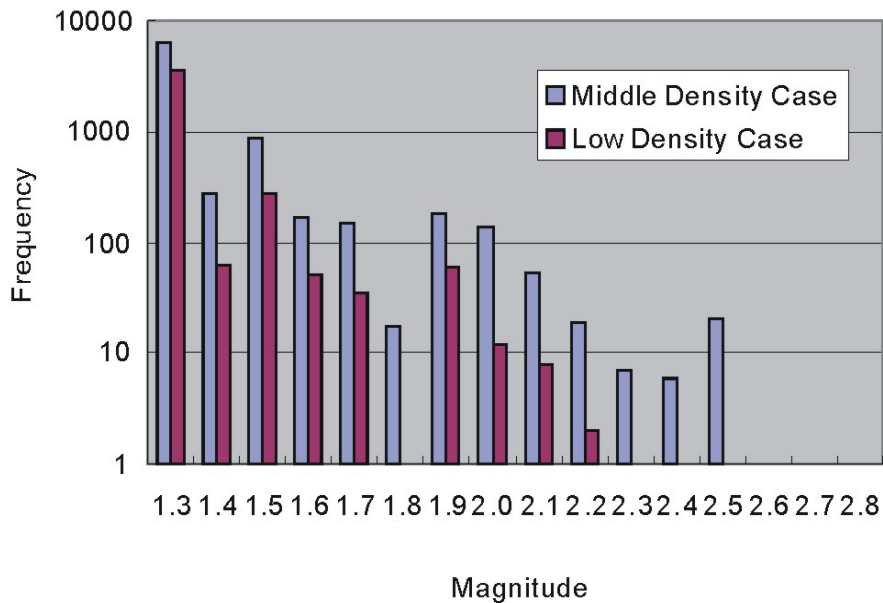


図5 中密度、低密度アスペリティ分布の場合のマグニチュード別出現頻度分布。シミュレーション回数はそれぞれ 8192 回、4096 回である。傾きはおおよそ 2、3 に近づく。

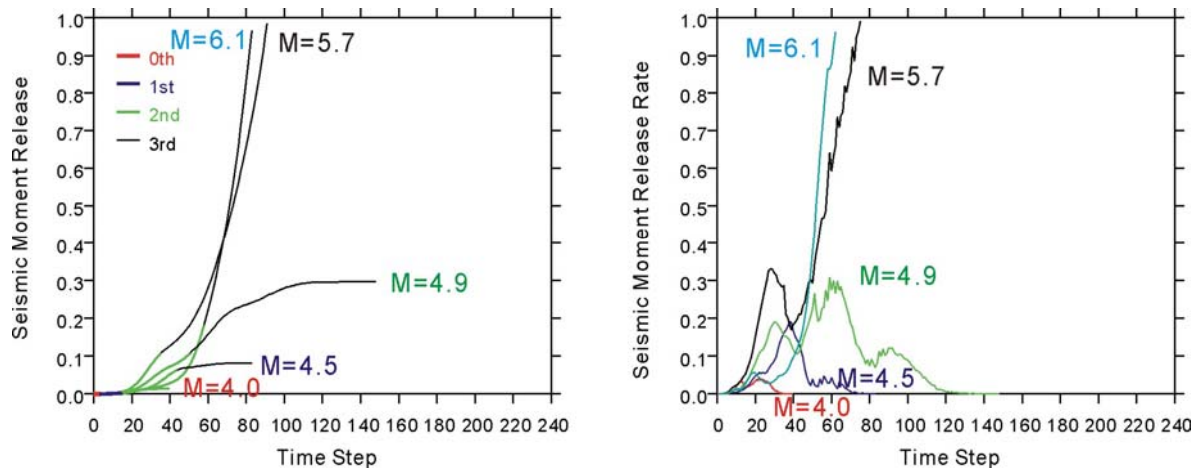


図6 マグニチュードの異なる5つのイベントに対する地震モーメント解放関数とそのレート（震源時間関数）。時間刻みは3回繰り返し込んだ後のシミュレーションでの時間刻み（最小スケールのシミュレーションの64倍）に対応する。縦軸も適当に正規化してある。左図での色の違いは各シミュレーションステップに対応し、右図での違いは各イベントの違いである。

(d) 結論ならびに今後の課題

繰り返し込み法と境界積分方程式法を組み合わせた計算法は幅広いスケールにわたる破壊現象をシミュレーションするのに妥当かつ非常に有益であることがわかり、 D_c が震源距離 L に伴って増大する場合を数値的に解析することに成功した。

スケール依存するアスペリティのランダム分布における D_c の空間不均一性については、これから益々調べていかなければならない。現在までのところ、アスペリティ密度の違い

が引き起こす破壊の頻度分布の違いが、アスペリティの連結性という統計的解釈によって説明できることがわかった。今後は、異なる D の影響、あるいは系が進化していく場合の地震活動を調べる必要があろう。断層面の不均一性の違いが地震活動、あるいは大地震の発生確率にどのように影響をしているかを調べていく予定である。

(e) 引用文献

- 1) Aochi, H. and Ide, S.: Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture, Geophys. Res. Lett., Vol.31, No.2, 10.1029/2003GL018708, 2004.
- 2) Andrews, D. J.: Rupture propagation with finite stress in antiplane strain, J. Geophys. Res., Vol.81, pp.3575-3582, 1976.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Aochi, H. and Ide, S.	Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture	Geophys. Res. Lett., 31(2), 10.1029/2003GL018708	平成 16 年 2 月
青地秀雄, 井出哲	Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture	米地球物理学会(AGU)秋季 大会、アメリカ・サンフラ ンシスコ	平成 15 年 12 月

(g) 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 16 年度業務計画案

平成 15 年度に得られた多数のアスペリティ分布による Dc 不均一場のシミュレーション結果は、WPGM（西太平洋地球物理学会、ハワイ、8 月）、ESC（ヨーロッパ地震学会、ポツダム、9 月）などの国際学会の他、ACES（地震シミュレーションに関する APEC 国際協力、7 月、北京）などのワークショップで発表する予定である。上で述べた確率的裏づけを理論的に確立し（Ide and Aochi、準備中）、更にパラメーター D（フラクタル次元）の影響を深く調べていく予定である。