

様式 6

平成 18年度共同利用実施報告書(研究実績報告書)

1. 研究種目名 特定共同研究(A)
2. 課題番号または共同利用コード 2006-A-26
3. 研究課題(集会)名 和文：大都市圏地殻構造調査研究・断層モデル等の構築(3)動的モデルパラメータの研究
英文：
4. 研究期間 平成18年4月1日 ~ 平成19年3月31日
5. 研究場所 東京大学地震研究所
6. 研究代表者所属・氏名 東京大学・大学院理学研究科・井出哲
(地震研究所担当教員名) 宮武 隆
7. 共同研究者・参加者名(別紙可)
別紙1参照
8. 研究実績報告(成果)(別紙にて約1,000字A4版(縦長)横書)(別紙に作成)
別紙2参照
10. 成果公表の方法(投稿予定の論文タイトル、雑誌名、学会講演、談話会、広報等)

久田嘉章, 震源アスペリティーと震源近傍の強震動特性, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 平成18年11月

Kase Y., Day, S. M., Spontaneous rupture processes on a bending fault, Geophysical Research Letters, 平成18年5月

Miyatake, T., Kimura, T., An improvement of the fault boundary condition in a staggered grid FDM, Pure and Applied Geophysics, 平成18年9月

Yamada, T., Mori, J. J., Ide, S., Abercrombie, R. E., Kawakata, H., Nakatani, M., Iio, Y., Ogasawara, H., Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine, Journal of Geophysical Research, 印刷中

Ando, R., Scholz, C., Rupture dynamics and branch nucleation at kinks, AGU Fall Meeting, San Francisco CA (USA), 2006年12月15日

Ando, R., Yamashita, T., Effects of mesoscopic-scale fault structure on dynamic earthquake ruptures: dynamic formation of geometrical complexity of earthquake faults, European Geosciences Union General Assembly 2006, Vienna (Austria), 2006年4月3日

Aochi, H., Le-Puth, J., Ide S., Attempts at using a dynamic rupture source model for ground-motion simulations, Western Pacific Geophysical Meeting, Beijing (China), 2006年7月24日

久田嘉章, 震源モデルによる断層近傍の強震動評価, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉, 2006年5月16日

久田嘉章, 統計的震源モデルと半無限平行成層グリーン関数による高振動数強震動の計算法, 日本地震学会2006年度秋季大会, 名古屋, 2006年10月30日

Hisada, Y., An Efficient Method for Simulating Near-Fault Strong Motions at Broadband Frequencies in Layered Half-Spaces, Seismological Society of America, Annual meeting, San Francisco CA (USA), 2006年4月19日

Ide, S. Rupture behavior and seismic energy radiation on heterogeneous faults: 2D dynamic rupture simulation with fractal property,, Western Pacific Geophysical Meeting, Beijing (China), 2006年7月26日

井出哲・内出崇彦, すべりインバージョンの現在と可能性,, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉

2006年5月18日

加瀬祐子, 連動型地震におけるすべり量と断層長のスケーリング則, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉, 2006年5月14日

加瀬祐子, 連動型地震におけるすべり量と断層長のスケーリング則: 傾斜角による違い, 日本地震学会2006年度秋季大会, 名古屋

2006年11月2日

Kase, Y. Slip-length scaling in multi-segment rupture: Dependence on dip angle and stress condition, AGU Fall Meeting, San Francisco CA (USA), 2006年12月15日

木村武志・宮武隆, 破壊が走行方向に伝播するdipping faultにおける動的応力変化場の特徴(地表の影響を考慮した場合), 日本地球惑星科学連合大会, 千葉, 2006年5月15日

木村武志・前田直樹・宮武隆, 本震での破壊のディレクティビティと余震活動の関係, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉, 2006年5月16日

Matsuzawa, T., Segall, P., Numerical simulation of the transition from frictional weakening to thermal pressurization during earthquakes, AGU Fall Meeting, San Francisco CA (USA), 2006年12月14日

Matsuzawa, T., Takeo, M., Numerical simulation of the generation and thickening process of frictional melt layer considering Stefan condition, European Geosciences Union General Assembly 2006, Vienna (Austria), 2006年4月5日

備考

・研究成果を論文等で発表される場合、以下の形式の文章を謝辞等に記載して下さい。

(英語) This study was supported by the Earthquake Research Institute cooperative research program.

(和文) 本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。

・特定共同研究Bについては、プロジェクト終了年度に冊子による報告書の提出が必要です。

・研究成果について、本所の談話会、セミナー、「広報」での発表を歓迎いたします。

別紙 1

所属機関	役職	氏名
東京大学大学院理学系研究科	講師	井出哲
東京大学大学院理学系研究科	特別研究員	安藤亮輔
東京大学大学院理学系研究科	特別研究員	松澤孝紀
東京大学大学院理学系研究科	特別研究員	山田卓司
東京大学地震研究所	助教授	宮武 隆
東京大学地震研究所	教授	山下輝夫
工学院大学	教授	久田嘉章
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	加瀬祐子
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	堀川晴央
独立行政法人産業技術総合研究所	研究員	吉見雅行
独立行政法人防災科学技術研究所	研究員	福山英一
独立行政法人防災科学技術研究所	研究員	呉長江

別紙 2

研究成果

概要

動的な地震破壊と強震動の振る舞いを調べるために、理論計算、データ解析、応用計算の 3 つのアプローチで研究を進めた。理論計算では断層系の成長プロセス、複雑な断層系での破壊連鎖スケーリング、フラクタル断層形状などの幾何学的影響や流体の影響の検討などが行われた。データ解析では新しいマルチスケールインバージョン法を適用し、初めてひとつの地震の破壊成長を始まりから終わりまで分析できた。マクロスケールでの地震エネルギーのスケーリングとあわせると、地震の破壊成長は様々なスケールで相似的に進行するという可能性が強い。応用としてマルチスケール不均質を強震動計算に結びつけることもできるようになった。短周期の強震動源として理論や解析に見られる小スケールでの不均質が重要であることも示唆される。断層の動的破壊と強震動生成は広いスケール範囲で同じように進行するプロセスの集合として統一的な見方が可能である。

各論

以下に本研究項目で実施している 3 つの小分野について、さらに小項目ごとに研究の成果を述べる。

< 動力学モデルの基礎研究 >

断層形状の非平面性と地震サイクル・スケーリング

断層形状の非平面性が地震サイクルと地震時の動的破壊に与える効果の理論的研究として、波状形状をした断層の屈曲部分に発生する二次的断層のモデル化を行った。このモデルから地震の繰り返しによって屈曲部分の応力は解放されず逆に蓄積される事がわかった。この応力の蓄積により二次的断層が生じる事が確かめられた(図 1)。さらに、この二次断層の形成で断層が平坦化することにより、地震時の滑り量がその形成以前より顕著に増加する。これは滑り量と断層長のスケーリングを考えるとときに重要な結果である。

スケーリングについては実際にセグメントからなる断層運動の連動性を考慮した数値実験を行い議論した。断層系全体の長さが長いほどすべり量は増えるが、複数のセグメントに分かれている場合は、その増え方は緩慢である。また傾斜角は緩いほど断層系の長さとともにすべり量は増え続ける傾向がある。さらに縦ずれではすべり量が飽和しやすい、など断層系の形状やすべり方向によってスケーリングが変わり得ることがわかった。

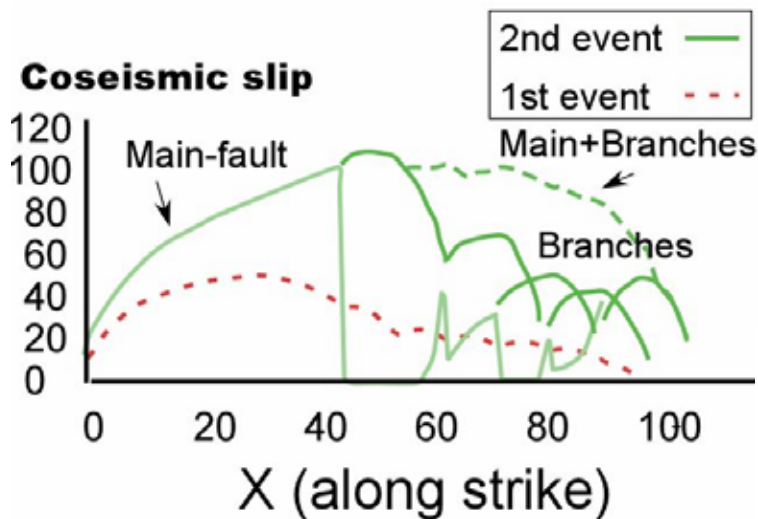


図1：ブランチを持つ断層のすべり量分布。最初のイベント（赤）では壊れないブランチが地震の繰り返しで破壊する（緑）様子。

断層のフラクタル形状と動的破壊

従来の研究ではモデル領域サイズに依存した狭いスケールでの断層形状しか議論されていなかった。そこでこれまでに開発してきた境界積分法と繰り返し込みの手法^{1,2)}を用いて幅広いスケールでの破壊伝播のシミュレーションを行った。断層は2次元媒質中のフラクタル図形で表され、それぞれの凸凹に比例するように破壊エネルギー分布を与える。一点から始まった破壊は次々に大きなスケールの凸凹を破壊していく。統計的自己相似的な破壊は断層形状のフラクタル次元が1のときにしか実現しないが、破壊停止時に計算される地震波エネルギーは任意のフラクタル次元について地震モーメントと比例関係にあり、幾何的相似性を示唆する。すなわち、破壊停止時に計算されるマクロパラメータだけでは破壊進行中の相似性を推定することはできない。これは広帯域での強震動生成にとって重要な問題である。

地震動的破壊への水の影響

間隙水が断層面の摩擦すべりによって加熱・膨張し、その摩擦力を減少させる効果が、地震の破壊核形成過程から動的すべりにまでの幅広いすべり速度の範囲において、どのような影響を及ぼすかを調べるため、数値計算手法を開発するとともに、シミュレーションを行った。間隙水の加熱の影響が存在する場合とない場合を比較すると、加熱の影響が存在する場合には0.05 mm/s 程度の低すべり速度ですべりの加速が開始する(図2)。これはSegall and Rice³⁾が指摘したように、間隙水の加熱は破壊核形成過程の後半において、すでに影響をもつことを意味する。また、この低速度での効果は、動的すべり(～1 m/s)の開始時間を早め、最終すべり量および最大すべり速度も増加させることが示された。

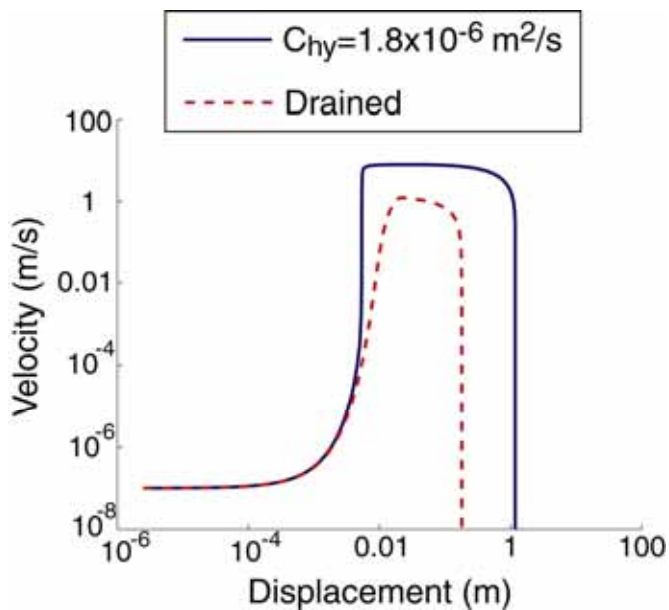


図2：間隙水の影響がない場合(波線)とある場合(実線)のすべり速度変化。

< 動力学モデルとデータ解析 >

マルチスケール震源インバージョン法の適用

昨年度開発したマルチスケール震源インバージョン法を実際の地震（新潟県中越地震）に適用した⁴⁾。2つの異なる大きさの余震の波形を経験的グリーン関数として用い、水平成層を仮定した理論的グリーン関数とあわせて3つの異なるスケールで観測方程式を構築する。それらをマルチスケール観測方程式に繰り込み、ベイズ式インバージョンでマルチスケールモデルを求めた。予想通りマルチスケールインバージョンは従来の方法より誤差の小さなモデルを求めることができた。得られたモデルでは破壊開始直後から複雑な破壊が方向を変えながら進展していく様子がみられる。すべり速度、破壊伝播速度とも大きく、ゆっくり破壊ではないことを示している。これは破壊が自己相似的に成長するモデルと調和的である。さらに同様の研究を進めるために Parkfield 地震、福岡県西方沖の地震についても予備解析を行った。

微小地震のスケーリング

南アフリカの金鉱山で発生する微小な地震の地震波をごく近傍で観測・解析し、地震エネルギーのスケーリングを研究した。地震エネルギーの推定のためにそれぞれの地震のモーメントテンソルを推定し、断層面の幾何構造を調べた。さらに、断層面の幾何に起因する地震波放射パターンの違いを補正した上で、これらの微小地震の放射エネルギー計算し、地震の動学的パラメータのひとつである地震モーメント規格化エネルギー(Scaled energy)を求めた。これらはより大きな地震と同程度の値となった。但しマグニチュード6以下の地震では規格化エネルギーのばらつきは大きく、これは地震発生環境が様々であることを表しているのかもしれない。⁵⁾

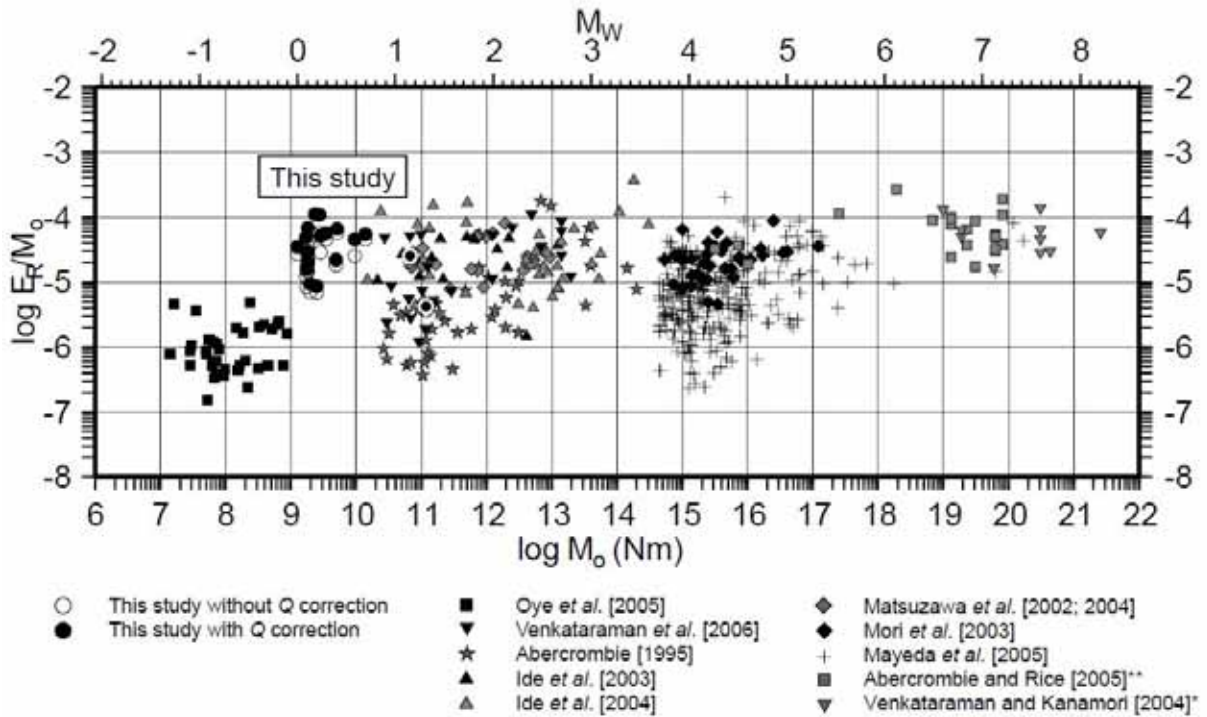


図3：様々な地震についての規格化エネルギーの比較。丸印が今回の研究で得られた値。

< 動力学モデルと強震動 >

マルチスケール不均質モデルを用いた地震動予測

理論・解析から重要性が示唆されるマルチスケール性が強震動生成にどのような意味を持つか検証する。動的モデルでは境界積分法を用いていたが、現実的な地殻構造の内部を伝播する波動の計算には有限差分法が適している。そこで境界積分法と有限差分法を組み合わせるマルチスケール震源からの地震波の生成を計算した。Ide and Aochi²⁾のパッチモデルからの地震波は一見より単純な震源同様のオメガ二乗則に従うようなスペクトルを持つ。このような計算によって広帯域で動的に自然な震源からの地震波を計算することが可能になった。

差分法による強震動シミュレーションの改良

現在、強震動などの地震波動計算において多く用いられている食い違い格子を使った差分法の断層境界条件には断層近傍強震動を扱う場合に問題があった。それは食い違い格子の性質に由来するもので、応力とすべりの両方を満足するように境界条件を実現できないというものであった。この問題を解決すべく改良法を提案し亀裂伝播問題に応用してその有用性を示した。

また昨年度、新潟県中越地震と芸予地震の地震波形インバージョンの結果を調べた結果際に負の応力降下量の場所で破壊伝播が遅くなっていることを示した。この性質が一般的に成り立てば、強震動シミュレーションにも有用である。そこで今年度はさらに地震を追加して、Landers地震、Imperial Valley地震などについても動的モデルを作成した。これらの地震でも同様の関係が得られた。

震源アスペリティーと震源近傍の強震動

震源近傍の強震動の特徴のひとつは、断層破壊の進行方向で発生し、やや短周期帯域で卓越する指向性パルス波である。近年断層近傍の強震動計算に良く

用いられる入倉レシビ⁶⁾では、経験則よりアスペリティー（震源における強い地震動を発生する部分）を2個程度仮定した単純な震源モデルを用いてパルス波を生成させている。さらに短周期波の発生源もアスペリティーに集中させる。このような単純化した震源モデルで破壊の進行方向だけでなく、逆方向の震源近傍の複雑な強震動がどこまで再現可能なのは良く検証されていない。また短周期波の発生源はアスペリティーではなく、その周辺部である場合も報告されている。そこで1994年ノースリッジ地震を用いてこれらの問題を検討した。入倉レシビを用いると周期1秒以上では、破壊の進行方向の指向性パルス波は非常に良く再現するが、震央近傍の複雑な強震動は再現できなかった。一方、短周期発生源の空間分布は周期1秒以下の短周期波動生成にはあまり影響しないことがわかった。⁷⁾

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年までの研究で理論・解析・応用と異なるアプローチで進めてきたそれぞれの研究に不均質性やスケールという共通の問題があることが浮かび上がってきた。今年度はそれをより意識した研究がそれぞれのアプローチで進められた。

< 動力学モデルの基礎理論 >

理論的アプローチでは断層の幾何学について、さらに踏み込んだ研究が進められた。まず一回の破壊だけでなく地震サイクルとして地震がどのように振舞うかという新しい切り口が提案された。すなわち断層の動的破壊の様子は地震サイクルを繰り返すことで変化し、副断層などの複雑なシステムを生成する。これはどのような地震も地質的な時間を経た断層形成プロセスの結果としての断層システムで発生している事実から重要であり、今後より研究されるべき課題である。そのような複雑な断層システムにおいて地震はセグメント構造を乗り移る破壊となる。この破壊がどのように伝播するかは様々な条件で動的シミュレーションを実行して検討することができる。今回はとくにすべり量の飽和に着目し、断層の傾斜角が大きい場合とすべり方向が縦ずれの場合にはすべり量の飽和がおきやすいことを突き止めた。それ以外の要素も含めた一般化にはさらなる研究が必要である。セグメント構造の類は様々なスケールで存在することもわかっている。このような複雑さを扱うのに適しているのがマルチスケール不均質断層のシミュレーションである。今年度は大スケールで見た破壊の相似性が小スケールでの破壊の相似性とは必ずしも関係しない例として、断層フラクタル次元と地震エネルギーの関係を示した。このことから地震の動的破壊の完全な理解のためにはデータ解析分野でもマルチスケールな解析法が必要であるといえる。動的破壊の支配要素としては幾何学以外の要素も考えられる。その中で今年度は断層に普遍的に存在するであろうと考えられる流体の影響を考えた。数値計算を用いて流体の加熱・膨張によって破壊開始が早められすべりの最大速度も大きくなることを確かめた。より複雑な条件での計算は今後の課題である。

< 動力学モデルとデータ解析 >

データ解析はスケールを最重視して進められた。マクロスケールでのスケール研究では地震エネルギーの相似スケールを扱った。現時点でも断層近傍で微小地震の観測ができる南アフリカの鉱山を対象に小スケールでの相似スケールの破綻の有無を検証したが、逆に大きな地震の類似性が明

らかになり相似スケーリングの破綻は見出せなかった。しかし理論研究で述べたようにマクロスケールだけでは成長過程のスケーリングを議論することはできない。そのために本研究では昨年度からマルチスケール波形インバージョン法を開発してきた。今年度はその手法を実データに適用することができた。対象にした新潟県中越地震では地震開始直後から高速で複雑な破壊が始まっていることがわかった。これは地震破壊の自己相似性を示唆する。しかし地震破壊の相似性は統計的にしか議論できない性質のものなので、結論に近づくにはさらにケーススタディを必要とする。これは今後の課題である。

< 動力学モデルと強震動 >

強震動を計算するための技術的な開発と特定の要素に着目した2つのアプローチで進められた。理論・解析で示唆されるマルチスケールの震源像を取り入れるためにはこれまで独立に行われていた理論的動力学シミュレーションと波動伝播シミュレーションを融合させる必要があった。本年度動力的マルチスケールモデルから強震動までを一連として計算する体制が整ったが、応用は今後の課題となった。アスペリティや負の応力降下領域は動的破壊過程を支配する要素であり、従って強震動生成にも重要である。アスペリティは長周期波動の生成に支配的な影響を持つことが実データや数値計算で示されたが、一方短周期波動は断層面上の位置の違いがあまり影響しないという結果が得られた。この短周期波動の物理的実体はマルチスケールモデルに見られるような断層面の幾何学その他による不均質の結果生じるすべりの加速・減速であろう。強震動の物理的理解のために定量的な比較が今後必要となる。

(e) 引用文献

- 1) Aochi, H., and Ide, S., Numerical study on multi-scaling earthquake rupture, *Geophysical Research Letters*, 31, 10.1029/2003GL018708, 2004.
- 2) Ide, S. and Aochi, H., Earthquakes as multiscale dynamic rupture with heterogeneous fracture surface energy, *Journal of Geophysical Research*, 110, 10.1029/2004JB003591, 2005.
- 3) Segall P., J. R. Rice, Does shear heating of pore fluid contribute to earthquake nucleation?, *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JB004129, 2006.
- 4) Uchide, T., and Ide, S., Development of Multiscale Slip Inversion Method and Its Application to the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, submitted, 2006.
- 5) Yamada, T., Mori, J. J., Ide, S., Abercrombie, R. E., Kawakata, H., Nakatani, M., Iio, Y., and Ogasawara, H., Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine, *Journal of Geophysical Research*, in press, 2006.
- 6) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲: 将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ, 京都大学防災研究所年報, 第46号B, 2003.
- 7) 久田嘉章: 震源アスペリティーと震源近傍の強震動特性, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, CDROM, 2006.