

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：マルチスケール計算手法の開発

青地秀雄²（東大地震研）

井出哲（東大理）

宮武隆（東大地震研）

(1) 研究の背景と目的

(a) 摩擦・破壊法則パラメータのスケーリング

地震の破壊過程のスケーリングに関する議論では、断層パラメータ（摩擦法則ないし破壊法則中のパラメータ）がどうスケール依存するか（依存性の有無を含めて）が焦点である。摩擦・破壊法則の典型的な一例は剪断応力 τ がすべり Δu と共に低下するすべり弱法則である。これはすべりの進行中の剪断応力を 0 とした場合には、

$$\tau(\Delta u) = \tau_p (1 - \Delta u / D_c) H(1 - \Delta u / D_c) \quad (1)$$

と表示される。ここで、 τ_p は断層の剪断強度、 D_c は特徴的すべり弱法則距離、 H はヘビサイド関数である。スケーリングを議論する際には破壊エネルギー、

$$G_c = \frac{1}{2} D_c \tau_p \quad (2)$$

も良く使われる。マグニチュード 7 程度の地震では G_c は MJ/m^2 のオーダーであり（e.g., Ide and Takeo, 1997; Olsen et al., 1997）、一方室内岩石実験では $1\text{-}10^4 \text{J/m}^2$ のオーダーである（Scholz, 2002）。大地震と小地震で応力変化はあまり変わらないと思われるので、この違いは主に D_c の変化によるものと考えられる。

強震動予測に直接重要な地震サイズ（マグニチュード 6 強）のシミュレーションでは、すべり弱法則距離は断層面上どこでも数 10cm とすることが多い。室内岩石実験でのすべり弱法則距離は数ミクロンから数 10 ミクロンであるから、数 10cm のオーダーのすべり弱法則距離を採用することは、室内実験と自然地震の間にスケール依存性を既に考えていることを意味する。すべりが進行するにはすべり弱法則距離に応じた有限サイズの初期クラックが必要であり、すなわち、この考えでは、大きい地震には大きい準備過程が必要になる（Shibazaki and Matsu'ura, 1992）。

しかし、 G_c や D_c が断層面上一面ではほぼ同じ値を取る必然性はない。自然地震に対して直接的なパラメータの測定ができない以上室内実験スケールでは室内実験で得られるパラメータ（ミクロンオーダーのすべり弱法則距離）を使うべきだとする立場もある。すなわち破壊初期には小さな D_c ですべりの進行とともに最終的には大きな D_c になると考えることもできる。様々な物質の引っ張り破壊実験で観察される破壊面の進展とともに G_c が増大す

² 現在、フランス放射能・原子力安全研究所（IRSN）

る傾向 (R-curve) も、この考え方と調和的である。この場合破壊の初期過程は地震の大きさによらず同じであることになる。この地震発生メカニズムはしばしばカスケードモデル (Ellsworth and Beroza, 1995) とよばれる。

(b) スケーリングに関する数値計算の問題点

理論・数値計算研究の最近の進展によって断層近傍の強震動に与える影響がより細かに、物理モデルに基づいて議論されるようになった。様々な改良によって2次元から、3次元、さらに複雑な断層形状を考慮したり、各種構成法則や周辺応力場の影響を考慮したり、より現実的な地震破壊のシミュレーションが可能になってきている。しかしスケーリングに関しての研究はほとんどない。

先に述べたようにすべり弱体化距離に対応して必要な初期クラックサイズが決められる。すべり弱体化距離が数10cmの場合には1.5km程度の初期クラックが必要である。この場合、そのサイズ以下での微視的な破壊過程は無視される。すなわち、破壊の初期過程に関する詳しい描像を数値的に再現するのは困難を極め、言い換えれば、同じ枠組みで小地震を同時にモデル化することはできなかつた。ところで、自然地震のシミュレーションで、岩石実験のモデルパラメータを使うことは原理的に可能であるはずだが、すべり弱体化距離によって必要な解像度が決められるので非常に小さなすべり弱体化距離を用いた計算は計算コスト上不可能であった。そのためパラメータのスケール依存性、またはその有無自体を数値計算で調べることはなされてこなかった。

本研究では幅広い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。その第一段階としてこの論文では計算手法の開発とその妥当性の検証について述べる。

(2) 数値計算手法

計算には Fukuyama and Madariaga (1995, 1998) の境界積分方程式法を用いる。境界積分方程式法の特徴を生かして、グリッドの正規化を繰り返すことで、異なるスケールの破壊現象 (小さい破壊から始まり大きい破壊に成長する) を扱えるようにする。離散化した境界積分方程式として、等方一様無限弾性媒質中における、断層面グリッド (i, j) 、タイムステップ k における応力 τ^{ijk} は、断層面上のすべり速度履歴 V^{lmn} と各グリーン関数 (カーネル) $P^{(i-l)(j-m)(k-n)}$ の和として書かれる。

$$\tau^{ijk} = -\frac{\mu}{2V_s} V^{ijk} + \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l,m} P^{(i-l)(j-m)(k-n)} V^{lmn} \quad (3)$$

ここで、 μ は剪断弾性定数、 V_s はS波速度である。すべり速度 V^{lmn} は、正方グリッド $(\Delta s \times \Delta s)$ 、各時間ステップ幅 Δt で一定であるとした。カーネル $P^{(i-l)(j-m)(k-n)}$ の対称性から、FFT (高速フーリエ変換) を用いて上式を評価すると効率よい。

今、図1に模式的に示すように、グリッドの大きさを変えること (正規化、繰り込み) を考える。この手法ではすべり速度の時空間変化のみについて正規化すればよい。物理的にモーメントが保存しなければならないので、正規化した後のグリッドサイズ $\Delta s'$ と時間ステップ幅 $\Delta t'$ を用い

て、正規化した後のすべり速度 $V_*^{ijk'}$ は、

$$V_*^{ijk'} \Delta s'^2 \Delta t' = \sum_{i,j,k} V^{ijk} \Delta s^2 \Delta t \quad (\text{ただし、総和は正規化に該当する } (i, j, k) \text{ の組}) \quad (4)$$

を満たさなければならない。計算上の断層面グリッドは 64×64 であり、各スケールでタイムステップ 240 まで計算し、空間グリッド、タイムステップ幅がそれぞれ 4 倍ずつで移行するように設定する (図 1、表 1 参照)。前ステップの計算が、震源周りの 16×16 グリッド領域に、タイムステップ 60 まで式(4)によって繰り込まれる。

(3) 断層パラメーター

表 1 に断層パラメーター及びシミュレーションで用いるモデルパラメーターをまとめる。断層面上で一様でない摩擦・破壊法則として、すべり弱化距離が破壊の成長と共に大きくなるモデルを考える。モデルの中では、断層面上の各点の震源からの距離 L として、先験的に与えることができよう。すなわち、

$$D_c = \alpha \times L \quad (5)$$

本研究では $\alpha = 0.0025$ を仮定する。

各次のシミュレーションを通して (表 1 参照) 弾性定数 $\mu = 32.4 \text{ GPa}$ 、P 波速度 6.0 km/s 、S 波速度 3.46 km/s とする。初期応力はシミュレーションのスケール、断層の場所に寄らず 3 MPa 一様と仮定する。

シミュレーション 次数	1	2	3	4	5	6	7
断層の大きさ	25.6m	102.4m	409.6m	1.6km	6.5km	26.2km	105.0km
計算継続時間	7.92ms	31.7ms	0.13s	0.51s	2.03s	8.11s	32.4s
グリッドサイズ	0.4m	1.6m	6.4m	25.6m	102.4m	0.41km	1.6km
時間ステップ	0.033ms	0.133ms	0.533ms	2.133ms	8.533ms	0.034s	0.14s
すべり弱化距離	0.1mm	0.4mm	1.6mm	6.4mm	25.6mm	0.1m	0.4m
断層強度	5MPa	5MPa	5MPa	5MPa	50MPa	5MPa	5MPa
クラック半径	1.5m	6.0m	24.0m	96.0m	384m	1.5km	6.1km
マグニチュード	0.41	1.47	2.63	3.83	5.03	6.23	7.44

表 1 各スケールのシミュレーションで用いたモデルパラメーター。強度はスケールによらないが、すべり弱化距離が、破壊の進展と共に成長していく。値は示したクラックサイズでの代表値。マグニチュードは、各シミュレーションのタイムステップ 240 における値であり、破壊は終了していないことに注意。

(4) 計算結果

小さい破壊の種（数mの大きさ・1mm以下のすべり）が、加速することなしにほぼ等速破壊速度で成長し、大きな地震（数10kmの大きさ・1m以上のすべり）に至る計算結果を示す。第一次（最小スケール）シミュレーションの始め（タイムステップ1）では、有限領域（表1に示したクラックサイズ）に応力0の摩擦なしクラックが現れたものとして破壊を開始している（図2左）。それを引き続いて第二次（図2右）、第三次（図3左）とスケールを上げていき、第七次（最大スケール）まで計算した（図3右）。第一次シミュレーションでは、初期有限クラックの影響が見られる（広がり早い）が、第二次以降はシミュレーション結果が安定して酷似する。応力、すべり速度のスナップショットでは、スケール及び空間パターンが変わらないことに注意されたい。もちろん、破壊の進展とともに総すべり量はスケール依存している。そして興味深いのは、破壊伝播速度が変わらないことである。Dcが空間均一な場合の破壊核形成理論が破壊伝播速度の加速を暗示するのとは異なる。破壊の進展とともにDcが自発的に大きくなるような場合には、ある固定したDcに対応する臨界クラックというものもはや存在せず、すべての過程が連続でスケールアップされている、と言える。

ところで、スケールアップして前段階のシミュレーション結果を繰り込む場合に、仮定したすべり・応力構成関係が、繰り込んだすべり関数に対して成り立っているかどうかが大変である。例として、図4に、第二次から第三次へ、第六次から第七次へ繰り込んだ場合の比較を示す。まず両者の比較で、顕著な違いがないことから、各段階で安定に繰り込まれてスケールアップされていることが確認できる。一方、グリッドの各点を比べると、破壊の中心に行くにしたがって、すべり始める際の応力集中が見かけ上弱く、すべり弱化率がなだらかになり、最終的に見かけ上長いDcを見積もっている。これは繰り込みという操作が、すべり関数・応力の空間平滑化という効果を持っていることから納得できる。仮定により、地震モーメントの発生率が保存されている。また各点でも開放されるエネルギーGcは変わらない。平滑化がおこるのは中心付近の初期段階だけである。などの点から、各段階で引き継がれた後の破壊伝播過程には影響がないと言えるであろう。

さらに、図5には、図4と同じ段階のすべり関数の比較を示す。繰り込んだ後のすべり関数は、16個の小さい断層上でのすべり関数の平均になっていることが確認できる。最後に、モーメント開放レート関数を比較する（図6）。正規化された関数は、スケールによらず一定であることがわかる。ここでも地震破壊のスケールアップ性が保たれている。

地震が最終的にどのような大きさになるかは、このシミュレーション結果では考慮されていないが、破壊が進む先でのエネルギー収支（応力と断層強度の関係）による。言い換えれば、応力の不均質が存在して、エネルギー収支がくずれれば、このシミュレーションのどの段階で停止しても構わない。この意味では、小さい地震と大きい地震の始まりには違いがない。しかしながら、破壊核形成理論が言うように、大きい地震に発展するためには、あらかじめ大きい領域で応力が集中していなければならないだろう。

(5) 平成15年度の研究計画

計算手法について細部の検討を行うとともに、異なるスケールアップ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を行う。

引用文献

- 1) Fukuyama, E., and R. Madariaga: Rupture dynamics of a planar fault in a 3D elastic medium: Rate- and slip-weakening friction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, *88*, 1-17, 1998.
- 2) Fukuyama, E., and R. Madariaga: Integral equation method for plane crack with arbitrary shape in 3D elastic medium, *Bull. Seism. Soc. Am.*, *85*, 614-628, 1995.
- 3) Ide, S., and M. Takeo: Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *Journal of Geophysical Research*, *102*, 27379-27391, 1997.
- 4) Olsen, K. B., R. Madariaga, and R. J. Archuleta: Three-dimensional dynamic simulation of the 1992 Landers earthquake, *Science*, *278*, 834-838, 1997.
- 5) Scholz, C. H.: The mechanics of earthquake and faulting - 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002.
- 6) Shibazaki, B, and M. Matsu'ura: Spontaneous processes for nucleation, dynamic propagation, and stop of earthquake rupture, *Geophys. Res. Lett.*, *19*, 1189-1192, 1992.
- 7) Ellsworth, W. L., and G. C. Beroza: Seismic evidence for an earthquake nucleation phase, *Science*, *268*, 851-855, 1995.

成果の論文発表・口頭発表等

1)論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
青地秀雄	The role of fault geometry in numerical simulation of earthquake rupture	地震研彙報	平成 14 年 12 月投稿
井出哲	On fracture surface energy of natural earthquakes from viewpoint of seismic observations	地震研彙報	平成 15 年 1 月投稿

2)口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
青地秀雄	地震の動的シミュレーション：非平面構造、動的破壊伝播、強震動	東京大学地震研究所第 802 回談話会、東京	平成 15 年 1 月 24 日
青地秀雄	北アナトリアン断層における非平面断層構造を考慮した地震の動的シミュレーション：イズミット地震からマルマラ海へ	海洋技術研究所深海研究部セミナー、横須賀	平成 15 年 2 月 4 日
青地秀雄	1999 年イズミット（トルコ）地震：非平面断層構造、動的破壊過	大大特：動的断層モデルと強震動セミナー、箱根	平成 15 年 2 月 6 日

	程、強震動		
井出哲	地震のエネルギーと動的破壊過程	大大特：動的断層モデルと強震動セミナー、箱根	平成15年2月5日
井出哲	地震のエネルギーの空間分布とスケーリング	研究集会「地震の始まり方と終わり方」京都	平成15年2月24日
井出哲	On Scaling and Spatial Variation of Energies of Earthquakes	California Institute of Technology, Seismological Laboratory Seminar	平成15年3月7日

図版

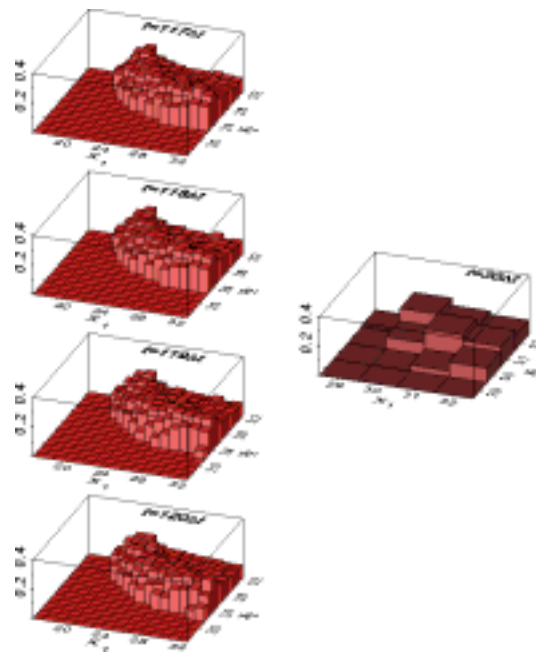


図 1 空間グリッド・時間ステップ繰り込みの模式図。図では、 16×16 の空間グリッド・4つの時間ステップから、それぞれグリッド・ステップを4倍にして、 4×4 の空間グリッド・一時間ステップに繰り込んでいる。

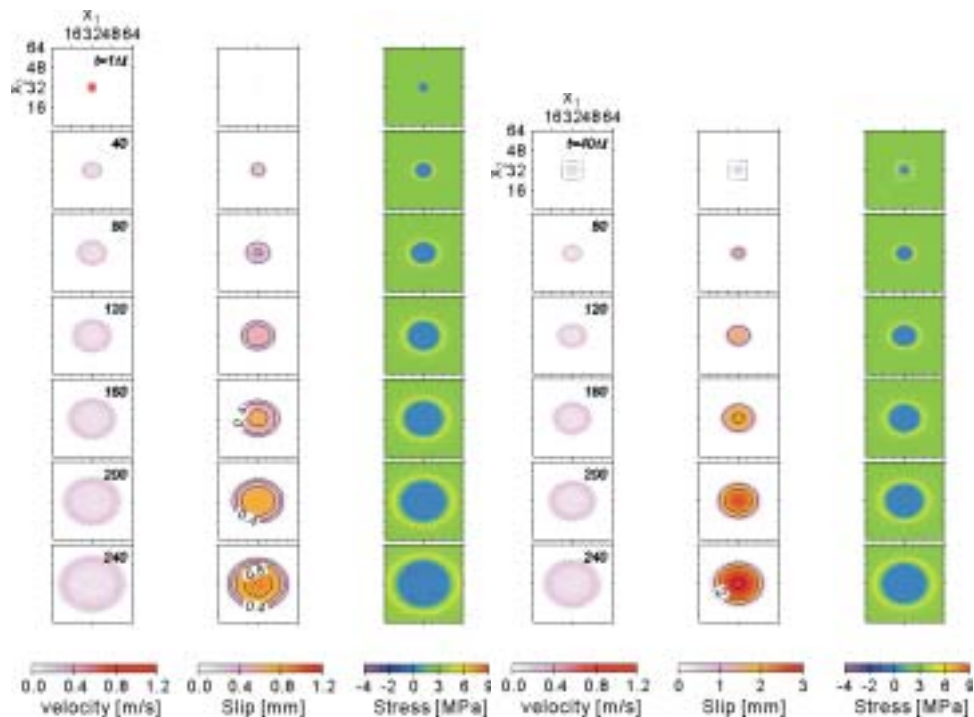


図 2 計算結果。第一次(最小スケール)シミュレーションと、それからスケールアップして始めた第二次シミュレーション。変位のスケールが変わっていることに注意。すべり速度、剪断応力のスケールは変わらない。断層面の大きさはそれぞれのグリッドサイズで規格化されている(軸はグリッド番号、以下の図でも同じ)。右図タイムステップ 40 内の小枠は、前スケールのシミュレーション領域を表す。

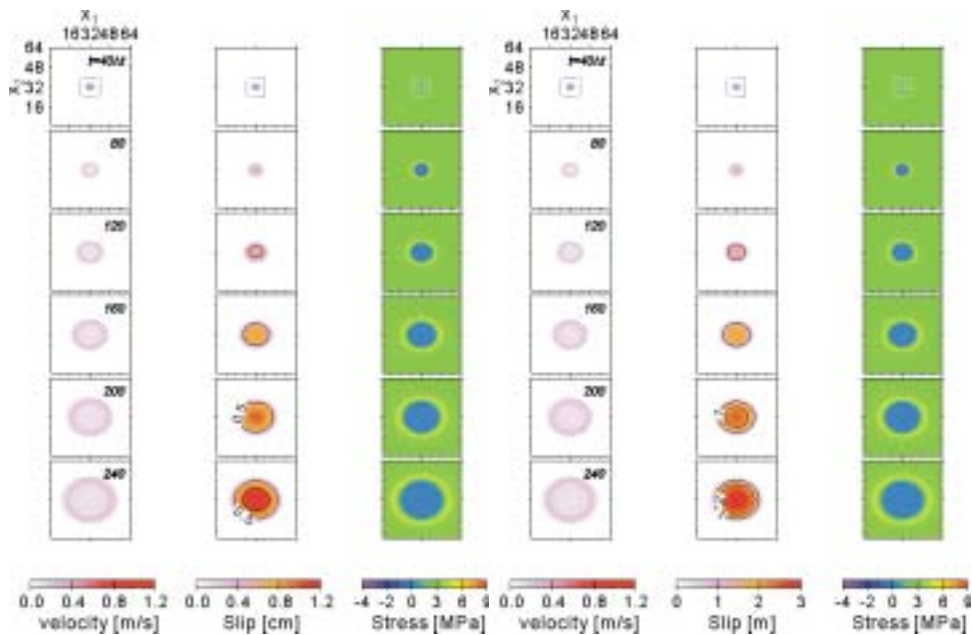


図 3 第三次と第七次（最大スケール）シミュレーションのスナップショット。最大スケールの破壊電波過程も第一次（最小スケール）の破壊過程から始まっている。剪断応力は初期設定により不変。すべり速度がスケールに依存しないことに注意。破壊伝播速度もスケールによらず一定で推移する。

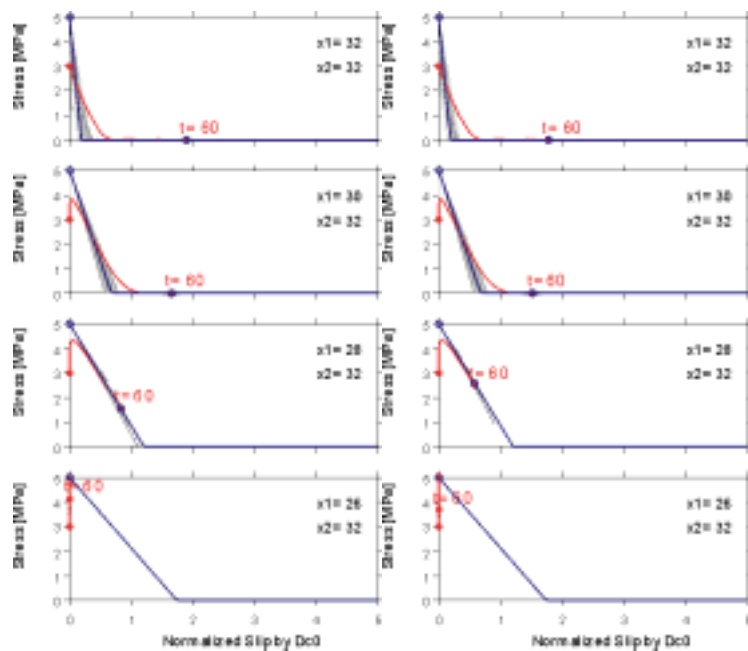


図 4 繰り込みに伴うすべり・応力構成関係の比較（左：第二次から第三次、右：第六次から第七次）。第三次、第七次シミュレーションにおいて、式(3)により仮定された構成関係は青線（枠右隅はそれぞれのグリッド位置）。それに対し、第二次、第六次シミュレーションで得られた構成関係が灰色で示され（グリッドが小さいため、対応するグリッドが複数存在する）それを第三次、第七次シミュレーション用に繰り込んだときの見かけの構成関係(式(2))が赤線で表されている。

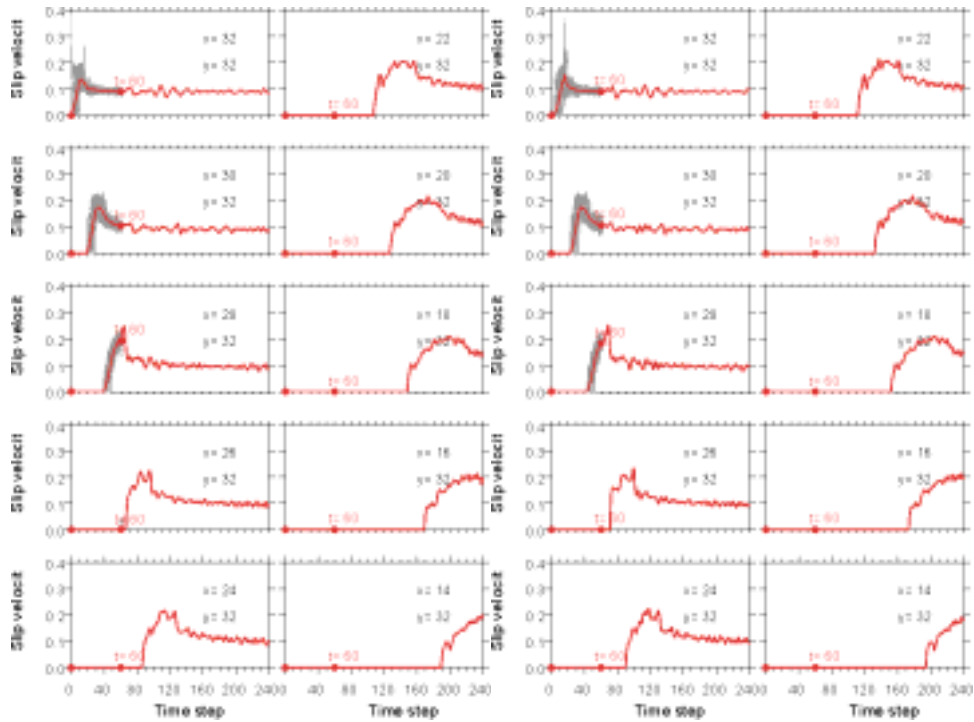


図 5 繰り込みに伴うすべり速度関数の比較。赤線は第三次・第七次シミュレーションのすべり速度関数、灰色は繰り込む前の第二次・第六次シミュレーションの結果。時間ステップ60までが初期過程として繰り込まれる。

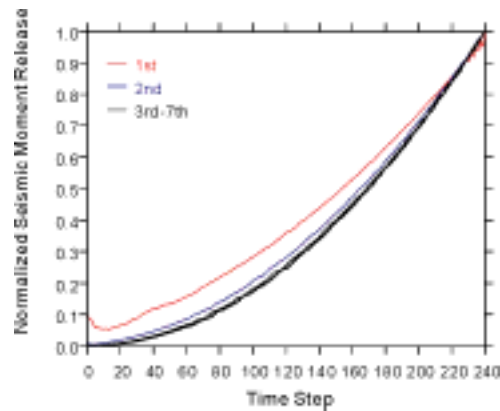


図 6 正規化したモーメント開放レート関数の比較。第一次（最小スケール）の第一時間ステップで、有限クラックから破壊を強制的に始めた影響がしばらく見られるが、第三次以降はほとんど関数の発展の仕方が同じであり、スケールによらない。