

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

大地震サイクルと地震活動の関連を説明する物理メカニズムの提案

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

イ. 先行現象の発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ア. 日本列島域

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

ウ. 東海・東南海・南海地域

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

ア. 観測データによる先行現象の評価

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、地震活動が大地震のサイクルとの関連をもつためのシナリオをいくつか想定し、物理的なモデルを通してそこから期待される地震活動パターンを提案することで、観測データでのシナリオの検証ポイントをつくることを目標とする。本研究での入力側に想定される大地震サイクル起源のシナリオは、大きくわけて (a) 局所的な滑りもしくは広域的ローディング速度のゆらぎによる応力レベルの変化、(b) 中小の地震の相互作用によって、応力場が均質化し破壊が停止しにくい場が形成する、という本質的にことなるものが考えられ、それぞれの事態の進行に係る物理的メカニズムの理解を進める必要がある。一方で、出力側である地震活動、すなわち中小の地震の発生頻度が、応力等の地殻の物理状態をどう反映するかについてもメカニズムはよくわかっておらず、この面でも根本的な理解を進める必要がある。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要 :

平成 21 年度は、地殻活動のデータセットの信頼性を検討し、過去に先行変化として報告された観測事例やモデル、実験との整合性をどのように評価できるかを検討する。また、地震活動と地殻応力場の関係について、既存の理論の問題点を整理して、地震活動を物理的に理解するための理論的、概念的枠組みについての検討を始める。

平成 22 年度は、具体的な地殻活動の先行変化のパターンについて、定性的な物理モデルをつくり、データでの検証ができる可能性のあるポイントを検討する。

平成 23 年度は、モデルを定量的なものに発展させる。

平成 24 年度は、具体的な事例についてのデータとモデルの定量的比較を行う。

平成 25 年度は、解析例を増やしつつ、成果をとりまとめる。

(7) 平成 24 年度成果の概要 :

摩擦実験から提案された新しい構成則 (課題 1427, Nagata et al., 2012) を用いた地震発生の研究については、バネ-ブロックモデルによる前年度までの成果を出版した (Kame et al. 2012a,b)。

破壊成長抵抗の分布に階層的な不均質を与えた連続体中の RSF 断層のモデル (野田他, 2012; Noda et al., 2012) において、大地震が大きな準静的震源核形成を経ておこる回と、小地震の動的破壊によって核形成が代用される (cascade up による大地震) 回の両方が、1 つのシミュレーションの中で起こることを昨年度に見いだした。今年度は、低い破壊成長抵抗を設定した領域である小地震のパッチ (以下小ペ) の大きさをかえた複数のモデルを、それぞれ大地震が 20 回起こるまで走らせ、挙動の違いを調べた。小ペの大きさは、高い破壊成長抵抗を設定した領域である大地震のパッチ (以下大ペ) の臨界核サイズの 0.6 倍から 1.5 倍の範囲を試した (図 1)。小ペが大きい場合は、小さい地震は起こらず、小ペ内部にできる小さな核から始まる小地震は必ず cascade up して大ペ全体を破壊する大地震となる。一方、小ペが小さい場合は、小ペ地震から cascade up して大地震に発展することはできず、大地震の発生は大ペの高い破壊成長抵抗に見合った大きな臨界サイズまで大ペ内で準静的震源核が大きく成長するという準備過程を経てからのみおこる。小ペのサイズによる、大地震発生のための準備過程の変化は漸進的であり、小ペサイズが大きくなるにしたがって、cascade up でおこるものの割合が増え、大きな準静的核が先行するものが減る。また、この遷移的な範囲の条件下でのシミュレーションは、計算した範囲ではリミットサイクルには陥らず、次の回がどちらのタイプであるかを読むことはできない。

一方で、どちらのタイプの大地震であっても、繰替えし間隔は相当に一定で、しかも、小ペのない場合と大して変らなかった。このことは、cascade up が起きるためには、大ペがいまにも自分自身で大きな核形成を起こしそうなほど熟れた状態になっている必要があることを示唆する。そのような観点から個々のケースを詳しく観察すると、小ペが cascade up する場合は、cascade up せずに小地震でおわるケースに比べて小ペの核形成 (地震発生までの時間 t_f に反比例する加速で特徴付けられる) が始まる段階での大ペ全体での平均滑り速度が高いことが分かった (図 2)。ただし明確な閾値があるわけではない。さらに、小ペの単独地震から、あまり間をおかずに大核が先行する大地震がおこるケースが多くみられたが、そのような場合には、小ペ地震の余効滑りが異常に大きく、そのことが大核の開始を促している様子が見てとれた。これらの現象は、東北地震の数年前から、M9 破壊域内の広い範囲でおこっていた様々な変化と整合的である。これらの知見から、本震破壊の準静的な始まり部分ともいえる十分条件的だがスキップされやすい震源核とは別のコンセプトとして、広域な固着の剥れというものを、必要条件的ではあるが大地震の発生の切迫に対してある程度確定的な情報をもつ準備過程として検討すべきであると思われる (中谷, 2012)。

同一面上での地震間応力作用を検討できる高精度のフィールドデータとして、南アフリカ鉱山の既存断層上で活発に起っている微小地震 (AE) の面状クラスタ (課題 2402) の中で、比較的大粒 ($M_w 0$) の地震が 10 分間隔で 2 個隣接して起こった例について、相対震源決定を行い、震源分布を詳細に調べた。1 つ目の $M_w 0$ 地震発生前の震源分布と 2 つ目の $M_w 0$ の余震域から推定された破壊域・破壊開始点の位置関係から、1 つ目の $M_w 0$ は、既存弱面のブランチにぶつかって停止し、2 つ目の $M_w 0$ はブランチ

チの部分から破壊が始まったことが示唆された。ブランチがバリアとして作用し、1つ目の Mw 0 の発生でブランチに集中した応力によって、2つ目の Mw 0 が誘発されたと考えられる。1つめの Mw 0 後には、2つ目の Mw 0 の破壊開始点周辺に AE が集中する様子も見られたが、これらの AE レートや積算モーメントが2つ目の M0 の開始に向かって加速する傾向は見られなかった。一方、1つめの Mw 0 の 17 日前には、その破壊開始点付近でやや大粒の Mw-1.0 の地震が発生しており、地震波の解析からその破壊域を推定すると、1つめの Mw 0 の破壊開始点もこの Mw-1.0 の破壊端に位置していることが分かった。なお、1つめの Mw 0 以前から、Mw0 の破壊開始点付近で多くの AE が発生していたが、比較的大粒の M-1.0 が起こったということ以外に、微小 AE の破壊開始点への集中や活動度の活発化がおこった様子はみられなかった。

大地震が発生するメカニズムとして、大地震前に応力場が均質化し、破壊が停止しにくい場が形成されるという仮説に基づく研究も引き続き進めた。昨年度までの研究で、複雑で非連続な変形を扱える離散要素シミュレーションによって応力場の均質化は捉えられていたものの、均質化が生じても必ずしも大規模な断層運動につながらない場合も見られた。そのため、均質化に加えてどのような条件が大規模な断層運動に必要なかを検討することとした。大規模な断層運動が起きるということは、それまでの連続的な変形ができなくなり、変形様式の分岐が起きているのだからとの観点から、数値実験での断層運動が生じる直前に特化した解析を行った結果、断層運動が開始する領域付近での変位が、周りのほぼ一様な変位よりも小さくなり、更に局所的な領域で変位の向きがローディングとは無関係にばらつく現象が生じるといった分岐現象を確認することができた。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
堀 高峰・阪口 秀, 2012a, 大きな破壊への準備過程：数値実験にもとづく考察, 地球惑星科学連合 2012 年合同大会, SSS29-P05.
堀 高峰・阪口 秀, 2012b, 大きな破壊に向けた準備過程並びに変形から破壊への移行過程, 日本地震学会 2012 年秋季大会, P2-74.
Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2012a, Effects of a revised rate- and state-dependent friction law on aftershock triggering model, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.028, in press.
Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2012b, Earthquake cycle simulation with a revised rate- and state-dependent friction law, Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2012.11.029, in press.
直井誠・中谷正生・Joachim Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・Thabang Kgarume, Gilbert Morema・Sifiso Khambule・Thabang Masakale・宮川幸治・渡邊篤志・森谷祐一・村上理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山地下 1km 深における多点 AE 観測と 2 つの M0 級地震に関連する AE 活動, 2012 年日本地球惑星科学連合大会, SSS28-07, 2012 年 5 月 24 日, 幕張メッセ, 千葉
中谷 正生, 2012, 地震発生物理と前兆現象, 日本地震学会 2012 年秋季大会特別シンポジウム「ブループリント」50 周年-地震研究の歩みと今後, S-06.
野田博之・中谷正生・堀 高峰, 2012, 速度・状態依存摩擦則で支配される断層における階層アスペリティの地震サイクルシミュレーション, 日本地震学会 2012 年秋季大会, A31-07, 函館, Oct. 16-19, 2012.
Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori, 2012, Earthquake sequence simulation of a multi-scale asperity model following rate and state friction - occurrence of large earthquakes by cascade up vs. own nucleation, AGU 2012 Fall meeting, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

Nagata et al. 2012 の摩擦則の効果については、一度棚上げとした、連続体での核形成の問題を再検討してまとめる。階層的アスペリティの RSF 地震サイクルは、現在までの結果をまとめるとともに、小ペの単独地震の頻度を支配する要因を理解すること(大ペの臨界サイズがもっと小さい場合の計算をするために、計算規模の拡張が必要)、人工的に外的擾乱を与えて、その応答性からアスペリティの広

域的剥れを評価できないか等，観測への示唆を目指した研究に発展させることを検討する．離散要素法による複雑な系での大破壊の条件についても，これまでの考察をまとめる．実際の地震データでの隣接地震間の相互作用の検証については，南アのデータを中心に例を増やして観察の一般性を検討してまとめる．

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 中谷正生・加藤尚之・加藤照之・加藤愛太郎

他機関との共同研究の有無：有

海洋研究開発機構 堀高峰・阪口秀

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5763

e-mail：nakatani@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中谷正生

所属：東京大学地震研究所

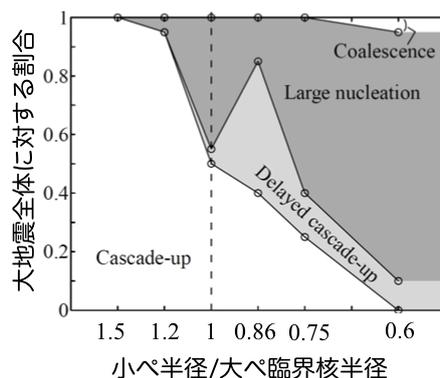


図1．小ペの大きさが大地震の準備過程に与える影響．

小ペが小さい場合は，ほとんどの地震が，大ペ自体の震源核が大きく成長することで発生する (Large Nucleation) が，小ペが大きくなるにつれて，大ペ自体の震源核が成長するより先に小ペで地震が起こり，そのまま大ペ全体を壊してしまう (Cascade-up) で起こるケースが増える．Delayed cascade-up は，小ペ地震が一旦収束したあとすぐに，小ペと大ペの境界から動的破壊が起こり大地震になる中間的なケースで，大きな準静的震源核の先行がスキップされるという点で本質的に Cascade-up の一種である．なお，大ペ内で時々起こる過渡的なゆっくり滑りの前線が合体して地震にいたる Coalescence のケースもあるが，大ペの臨界サイズを極端に大きく設定しない限りは例外的な現象である．

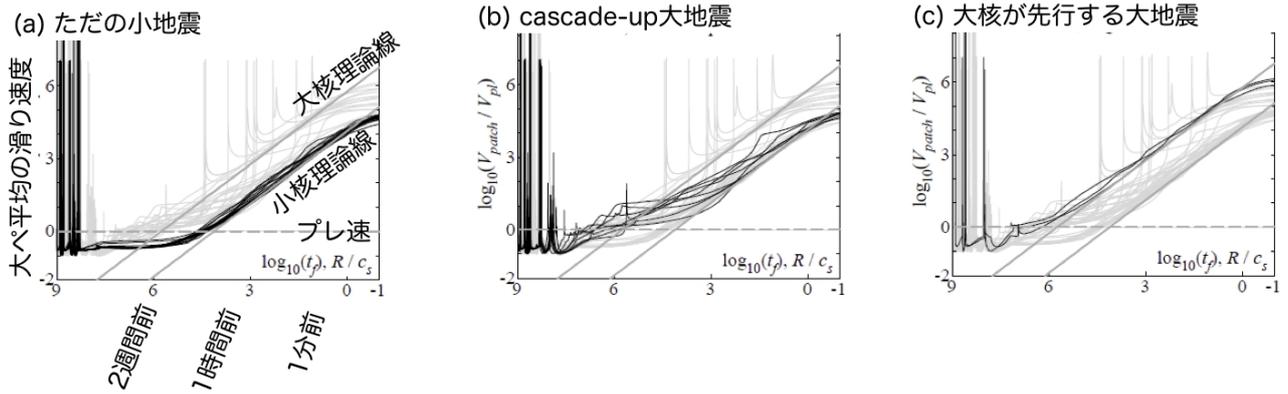


図2．地震パターンと大ペ平均滑り速度の加速．

ひとつのシミュレーションでおこった地震について，その発生パターン別に，地震発生までの大ペ全体での平均滑り速度の変遷を，地震発生までの時間 t_f に対してみたもの．核形成がはじまると， $1/t_f$ で加速していくが，小ペ内での核形成と大ペ内での核形成は，このプロットで振幅が違うトレンド（理論線）にのる．地震発生のパターン別を示した．薄いグレーの線は，そのパターン以外のもの．(a):cascade-up しない小地震の場合．(b):cascade-up でおこる大地震の場合． $1/t_f$ での震源核成長は，(a) の場合と同じく小ペ内での核形成であるが，震源核成長が始まる前のレベル（たとえば， $t_f=2$ 週間あたり）が (a) の場合より明らかに高い傾向がある．このレベルは，(c) 大核が先行する大地震の場合と同程度である．なお，このシミュレーションでの大地震の繰替えし，間隔は 16-19 年程度である．