

(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) 計画期間中(平成 21 年度~25 年度)の成果の概要 :

摩擦実験の結果をより正確に記述できる新しい摩擦則(課題 1427, Nagata et al., 2012)を用いたバネ-ブロックモデルによるシミュレーションによって, 断層の固着(強度)の低下は, プレスリップよりもずっと早い時期からおこり, また, その規模も非常に大きいことが示された(Kame et al., 2012a). また, 今年度は, 新しい摩擦則が, 連続弾性体中におかれた断層上での震源核形成に及ぼす影響についてのシミュレーション結果の整理を行った(Kame et al., 2013a,b). 新摩擦則は, 従来の2種類の代表的摩擦則による予測(拡大するクラック状の震源核 vs 一定幅の狭いパルスとして移動しながら滑り速度を増す震源核)の中間的なふるまいを示した(図 1). 新構成則の, 核形成時程度の滑り速度におけるふるまいからは, ほぼパルス状の振舞いが期待されるが, 実際には, 滑り領域の集中度はそれほど極端にはならず, 核形成時程度の滑り速度における実験室での摩擦挙動からは, パルス状の非常に狭い震源核が期待されるという最近の議論(e.g., Ampuero and Rubin, 2008)は必ずしも正しくないことが示された. また, 応力擾乱に対する地震活動の応答性に関しても, 新しい摩擦則でバネ-ブロックモデルによるシミュレーション(Kame et al., 2012b)を行ったところ, 余震等のトリガ率は従来より二倍程度高くなることが示された. この過程で, 新摩擦則では, 応力擾乱による地震サイクルへの影響が必ずしも, 時計の進み/遅れとして近似できないことが明らかになったが, 初期状態の異なる多数のバネ-ブロックモデルに同一の応力擾乱履歴を与えることにより, 地震活動の発展を数値的に追って予測することは, 従来の摩擦則を用いた場合と同様に可能である. しかし, 実際に観測される余震のトリガ率は, 摩擦則による予測より二桁程度高く, この点を解消するには, 断層の法線応力が被り圧より二桁程度小さいと考える等, かなり根本的な変更が必要である.

上述のトリガモデルは, ある程度大きな地震が, それよりずっと小さい多数の地震群の活動に与える影響を念頭においている. 一方で, トルコの北アナトリア断層等の例のように, 大きな地震の発生が, 同一の断層上系のとなりあったセグメントを順に壊していくという例も知られている. このような事象における小地震の活動を詳細に解析できる例として, 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の面状クラスタ(課題 2402)の中で, 比較的大粒(M_0 , 破壊域 20m)の地震が 10 分間隔で 2 個隣接して起こった例について, その前後の超微小地震の震源分布を詳細に調べた(Naoi et al., 2012). この地震の周辺では, $M-4$ 程度までの定常的微小地震によって, 断層面の形状がジヨグやブランチといった不規則構造まで含めて詳細に描かれ, また各 M_0 の破壊域はその余震分布から正確に推定できる. 1 つ目の M_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_0 はそのブランチから破壊開始し, 1 つ目の M_0 の破壊域の隣接領域を破壊した. さらに, 1 つ目の M_0 の破壊開始点は, 17 日前におこったやや大粒の $M-1.0$ 破壊端に位置していた. この事例は, 同程度の地震の相互作用は, 破壊端への応力集中が主要な要因であることを示唆している. また, 地震の破壊開始や停止が断層の幾何学的不規則点でおこることが多いことと整合的であり, 大地震の連動・続発の問題に関して決定論的なモデリングの有効性を示唆している.

一方で, 小さな地震が大きな地震をトリガするかという問題は, 特に地震先行現象の捕捉による大地震発生の予測の可能性にとって根本的な問題である. 仮に, 大きな地震のアスペリティが, アスペリ

ティサイズに比例した大きな静的破壊エネルギーをもつ (Kato 2012, 課題 1702,1427) としても, 小さな地震の動的破壊が, 大きな地震のアスペリティの破壊核を代用するカスケード成長がおこれば, 準静的には小さな震源核しかできていない段階で, 大地震をおこすことが可能だからである. 大きな破壊成長抵抗をもつ大きなアスペリティ(以下大ペ) の中に, 破壊エネルギーの低い小さな領域 (小アスペリティ, 以下小ペ) を設定した, 断層モデルにおいて, テクトニックな载荷で地震サイクルが繰返すシミュレーションを行って, 大地震の始まり方として, 大きな準静的震源核と小地震からのカスケードのどちらがおこりやすいかを検討した (Noda et al., 2013a, d; 中谷, 2012, 2013a,b). 小ペが大きい場合は, 小さい地震はおこらず, 小ペ内部にできる小さな核からはじまる小地震は必ず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, 小ペ地震がカスケード成長して大地震に発展することはできず, 大地震の発生には必ず大きな準静的震源核が先行する. 小ペサイズが大ペの臨界核サイズと同程度の場合は, 大地震は, 大きな核ができてはじまることもあれば, 小地震からカスケード成長する場合もあり, 小ペが大きいほどカスケード成長による大地震の割合が高くなる. しかし, 小地震が小地震で終わるか, 大地震にカスケードするかは, 大ペの準備状況に強く依存する. 我々のシミュレーションでは, 応力蓄積の段階はサイクルの半分程度までで, それ以降は, 大ペの周縁部から広域にわたって, プレート速度よりはずっと遅いクリープによって固着の剥れが進み, 最終的な加速する震源核は, その広域な剥れの中のどこかで形成をはじめ. 広域な剥れは, ゆきつもどりのスロースリップイベント的な複雑な進行をみせ, そのゆく末を予測することは不可能とおもわれる. しかし, 十分に剥れている状態になれば, たとえ小地震でトリガしても, それが大地震に発展することはなく, つまり, 固着の剥れを, 大地震発生の必要条件とみることができる. このことは, 2011 年東北沖地震の数年前から測地的に観測されていた震源域のプレートカップリング率の低下 (Ozawa et al., 2012) と符号する. さらに, シミュレーションでは固着の剥れが進んだ状況で小地震がおこり, それがカスケードしなかった場合には, 異常に大きい余効滑りをもつ現象がみられ (図 2), これも東北沖地震の前に観測されている (Suito et al., 2011). 本年度は, 仮想的な小地震に対する大ペの反応をみることで固着の剥れによる大ペの危険度を定量化するための数値実験を行った (Noda et al., 2013c).

直前の大きな準静的震源核は, スキップされうるので大地震条件ではないが, 小ペの大きさに応じた確率で発現するので, 地震発生の予測にとって依然有力な現象である. 測地的に直接観測された例はないにしろ, Bouchon et al. (2013) は, プレート間大地震のほとんどに, 本震に向かって加速する前震活動が伴うことをみつけた. 一方で, プレート内地震においては, そのようなケースがほとんどないこともあきらかにしている. 本年度は, 摩擦則とそれに支配される震源核成長のスタイルによっては, 震源核の大きさが断層の载荷速度に正の依存性をもちうることを次元解析とシミュレーションによって示した (Noda et al. 2013b,e).

上述のような, 震源核や固着の剥れは, 大地震で破壊する断層がゆっくりとではあるが既に壊れ始めているというタイプの準備過程である. これとは根本的に違う準備過程として, 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も考えられる. 我々は, 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を行い, 大規模な断層運動の前に応力場が均質化することを見いだしたが, 均質化が生じて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後半では検討した. 大規模な断層運動が起きるといことは, 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はずだとの観点から, 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, 周りのほぼ一樣な変位よりも小さくなり, さら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が起きる場合があることを確認できた. 今後はこうした現象について, 断層運動を生じる室内実験や地殻を対象とした実観測で検証する必要がある.

- (8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので, 平成 25 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2013a, Effects of a newly incorporated stress-weakening term in a revised RSF on earthquake nucleation, Proceedings of 13th International Conference on Frac-

ture, S20, 004, 1-9.

- Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2013b, Earthquake nucleation on faults with a revised rate- and state-dependent friction law, *Pure Appl. Geophys.*, DOI 10.1007/s00024-013-0744-0, 9 pages.
- 中谷正生, 2013a, 見逃しも空振りもありつつ 階層的アスペリティにおける大地震の準備過程 (invited), 気象庁地震火山部談話会, 東京.
- 中谷正生, 2013b, 地震発生物理と前兆現象, 日本地震学会モノグラフ 2「ブループリント」50周年—地震研究の歩みと今後, 2012年秋季大会特別シンポジウム実行委員会篇, 30-39.
- Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, 2013a, Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up - Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities, *J. Geophys. Res.*, 118, doi: 10.1002/jgrb.50211.
- Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, 2013b, A slower fault may produce a smaller preseismic moment rate: Non-1/tf acceleration of moment rate during nucleation and dependency on the background slip rate, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4850-4854, doi: 10.1002/grl.50962.
- Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori, 2013c, Ripening of a seismogenic patch and the increased triggerability by a small rupture (invited), AGU Fall Meeting, S52A-05, San Francisco CA, USA.
- 野田博之・中谷正生・堀 高峰, 2013d, 階層アスペリティモデルにおける地震の始まり方の多様性 (invited), SSS29-12, 地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 千葉.
- 野田博之・中谷正生・堀 高峰, 2013e, 震源核の加速が 1/tf より遅いと, 長期的滑り速度の遅い断層ほど地震直前のモーメント解放速度が小さくなる可能性, 日本地震学会秋季大会, A22-04, 神奈川県民ホール, 横浜.

(9) 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

(10) 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 :

(11) 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

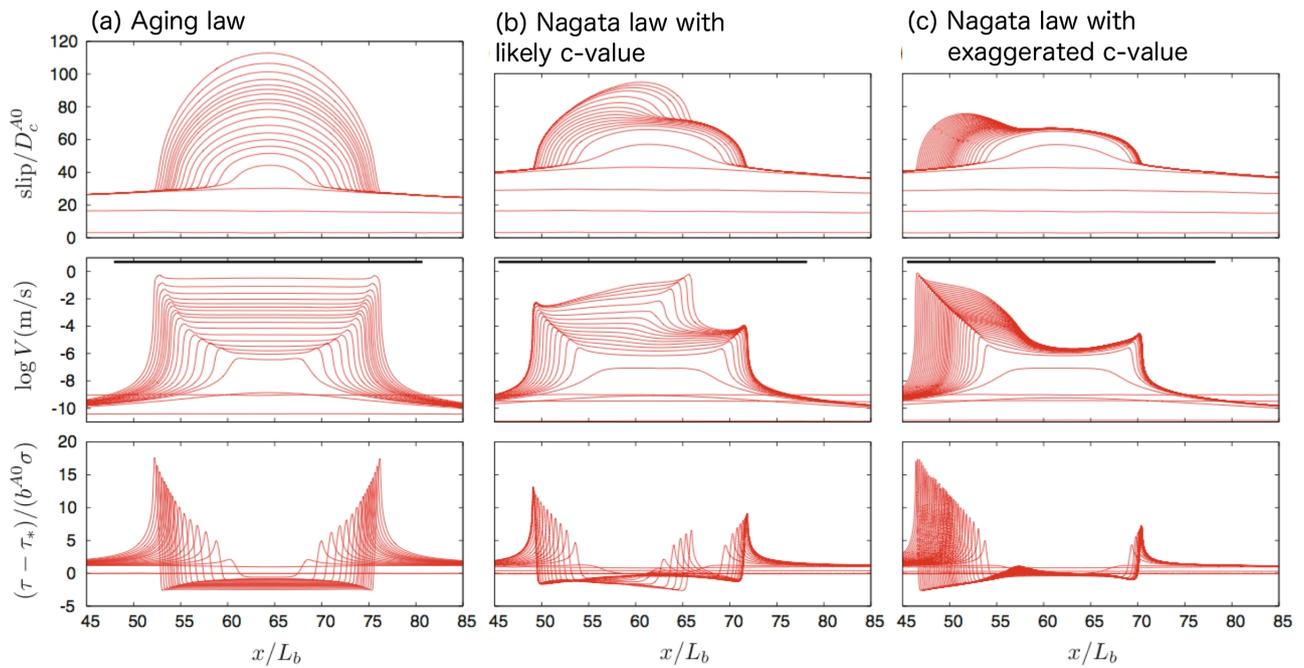


図1．修正された摩擦則の震源核形成に対する効果 (Kame et al., 2013b) ．

弾性体中にある断層に対する载荷をゆっくりと増していくと、ゆっくりとした滑りの集中域 (震源核) が自発的に形成・発展してゆく．上段からそれぞれ、滑り、滑り速度、断層面での剪断応力の分布をスナップショットで示した．中段に示した水平太線の長さは、Aging law の場合に期待される臨界核サイズの近似式 (Rubin and Ampuero, 2005) による． a) 摩擦則として Aging law を用いた場合．震源核はクラックのように拡大しながら発展してゆく． b) 応力弱化的項を加えた Nagata 則の場合．途中までは、a) と同様のクラック的拡大をするが、片端では成長が止まる． c) Nagata 則での応力弱化的項を室内実験でみられるより大きく仮定した場合．クラック的成長から、パルス伝播的スタイルへの移行がより早い段階でおこる．それでも、パルス内での滑り速度の集中度合いは、Slip law でみられる (Ampuero and Rubin, 2008) よりは、ずっと穏やかである．

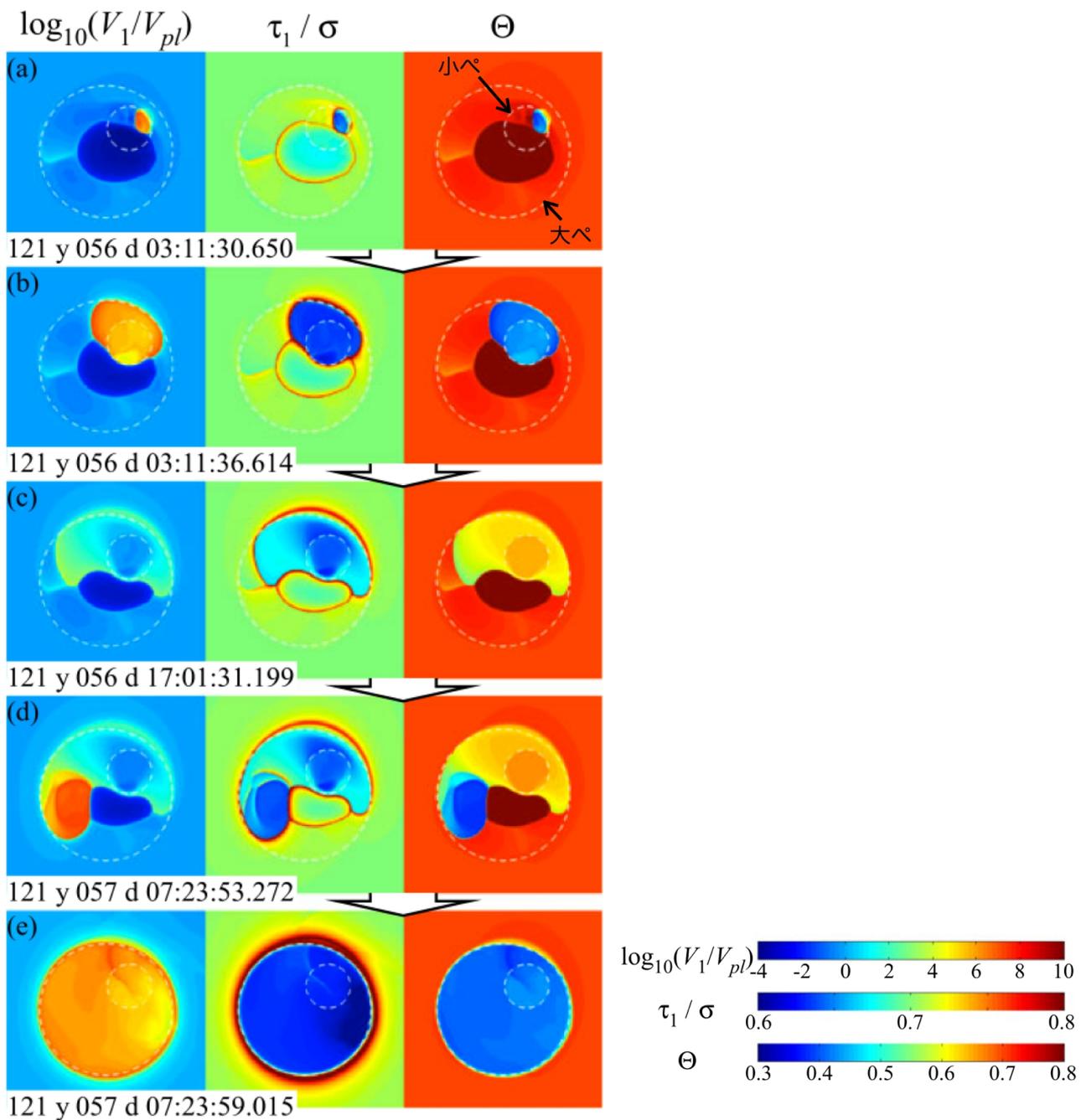


図2. 階層的アスペリティモデルにおける地震サイクルシミュレーション (Noda et al., 2013a) からのスナップショット。左列から、滑り速度、剪断応力、断層強度 (state, Nakatani, 2001) の空間分布。小ペのサイズを大ペの臨界震源核サイズ程度に設定した場合で、大ペ地震の約半数程度が小地震からのカスケード成長でおこり、残り半数は、大きな準静的震源核の形成を経ておこる。ここに示したケースでは、大ペ内広域にわたって固着が剥れている段階 (a) で小ペの独立地震 (b) が発生した。その余効滑りは、異常に大きく (c)、小ペ地震の 14 時間後には、余効滑り域から、大きな準静的震源核 (d) が発達・加速し、大ペ地震 (e) が発生した。なお、時間は大ペ地震が Mw6 程度とした場合のスケールで示してあるが、これを Mw8 とすれば、時間スケールも 10 倍にして読みかえることができる。