

(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：

（和文）実験・理論的アプローチによる断層ダイナミクスの高度化

（英文）Advancing the fault dynamics: laboratory and theoretical approaches

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震の災害誘因の即時予測手法の高度化（重点研究）

ア. 地震動の即時予測手法

(5) 本課題の5か年の到達目標：

物理モデルによる地震発生予測や先行現象の物理的理解への貢献を念頭に、以下A-Hのサブテーマを進める。

A. 非常に長時間のヒーリングと非常に低速での滑りの実験により、延性域から断層浅部にわたる摩擦素過程の交代を調べる。

B. 固着の剥れ-震源核という中短期予測で重要なステージを中心に、摩擦状態発展則の違いの地震サイクルへの影響を探る。また、動的弱화가地震サイクルに与える影響を調べる。

C. 巨視的な物性不均質をもつ地殻中の巨視的に曲がった断層のモデル計算によって、構造がコントロールする地震発生の局面の抽出を試みる。

D. 数値・数値モデルで、温度や間隙水圧と滑りの相互作用の理解を深化する。

E. OFCモデルのような本質的に離散的なシステムが、GR則のような幅広いサイズの地震からなる活動を産み出すメカニズムを明らかにする。

F. 地震破壊エネルギーの地震サイズ依存性のメカニズムを理解するために、ガウジ層で数ミクロンから数mという広い範囲のDcが見つかっているガウジ層の摩擦において、長短のDcに対応する状態変化の物理的実体を探る。

G. マントルウエッジ程度までの条件での岩石の流動則を確立し、地震発生への影響を検討する。

H. 地震の即時予測を超早期化する可能性のあるP波前重力波について、新たな手法による信号検知の向上と信号利用の方向性を検討する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

サブテーマA-Hについて、下記のように実験と理論研究を連携して行う。

A. (1-3年目)三軸試験機で石英ガウジの圧力溶解ヒーリングを非常に長時間まで行う。長い滑り距離と低い滑り速度の実験ができる回転式試験機の試料アセンブリ、計測制御系を改良する。(3-5年目)アルバイトガウジ、板状鉱物の長時間固結実験。回転試験機においては、非常な低速を含む様々な速度の実験から、ヒーリングと剪断弱化メカニズムの関係を探る。

B. (1-2年目)RSF発展則としてNagata則を使ったサイクル計算を行い、Slip lawやAging lawの結果と比較する。(3-5年目)動的弱体化が震源核形成に与える影響をサイクル計算で調べる。

C. (1-3年目)不均質構造中での断層破壊計算手法をサイクル計算に実装する。(4-5年目)沈み込む高剛性プレートと低剛性付加体からなる付加体地震サイクルモデル計算を行い、構造がコントロールする地震発生の局面を抽出する。

D. (1-3年目)滑りと温度や間隙水圧の相互作用を、連続体やBKモデルなどの断層運動計算モデルに組込む。また、現在これらの効果を含まない方程式系の数理解析で行っている断層滑りモードの統一解析にこれらの効果を組込む。また、熱弾性を考慮した摩擦の時間発展を計算する手法を開発する。(4-5年目)シミュレーション、数理解析から、これらの相互作用の、前震から本震、あるいはゆっくり地震から高速地震の遷移条件を含む地震サイクルの様々な局面への影響を抽出する。

E. (1-3年目)離散的な地震活動モデルを連続体モデルに近づけていって、どこでGRが出なくなるかを探る。(3-5年目)上記の一連のモデルで、応力場、強度場の特徴や時間発展を調べる。

F. (1-3年目)熱活性化の時間依存ヒーリングと、時間に依存しない機械的過圧密による強度獲得が共起するガウジ実験データを、音波透過率の変化も参考にしてモデル化する。透明セル式回転試験機で機械的過圧密を再現するための予備実験を行う。また、透明セル式回転試験機で過去に見られた10m程度の長大Dcが発現する条件を調べる。(3-5年目)透明セル式試験機のシステム改修を行い、上記長大Dcの滑り弱化中の個別粒子追跡により具体的なメカニズムをさぐる。また、1mm程度のDcをもつ機械的過圧密の解消過程も個別粒子追跡で調べる。

G. (1-2年目)固体圧式変形試験機の改修を行い、実験品質の向上をはかる。(2-5年目)海洋地殻物質およびマントル物質のレオロジー則を実験と理論で拡充する。母岩流動の断層運動への影響を地震発生のさまざまな局面で調べる。

H. P波前重力波については、新規の観測方法を開発している物理系のグループの必要に応じて信号強度の理論的評価を行う。

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

熱・流体・空隙生成相互作用に基づいて、ゆっくり地震と高速地震という見かけは異なる2つの地震を統一的に扱うということを近年の課題としている。両地震は一次相転移として理解できることを既に報告しているが、本年はそれらの違いを滑り開始時の亀裂面上の流体圧 p_0 と空隙率 ϕ_0 の値のみで説明できることを明らかにした。バネ-ブロックモデルで一回の地震の滑り量 u_f としてエネルギーバランスをあらわす関数 $F(u_f)$ が p_0 と ϕ_0 をパラメタとして含む形で書き下せる。ゆっくり地震と高速地震の境界で $F(u_f) = 0$ 及び $dF(u_f)/du_f = 0$ という2本の方程式が満たされるということから、 p_0 - ϕ_0 平面上で高速地震とゆっくり地震を分ける境界となる曲線の解析表現を得ることに成功した。その曲線は数値計算の結果をよく説明している(図1)。この結果は、ゆっくり地震を生じ易い条件は大きい p_0 と小さい ϕ_0 だということを示すが、流体の流れが低空隙率によって阻害されることによって流体圧が高くなって滑りが安定的になると定性的に理解される。

マントルウエッジ程度の超高压下での岩石の流動則を求めるために、含水石英岩(メノウ)をもちいて最高温度1000°C、封圧1.5 GPaで最長3日間にわたる超低速変形実験を実施し、得られた試料の動的再結晶組織を画像解析により定量化した(Nakakoji & Shimizu, 2024, AGU)。この手法は、天然の石英変形組織から過去の地殻応力を推定するためにも有用である。また、石英の高温レオロジーを確立するための実験にもちいる固体圧試験機で、高精度に差応力を計測するための内部摩擦補正機構(Shimizu, 2024)を検証した。試料のかわりに高純度金属(ニッケル、モリブデン)を使用した校正実験を封圧300 MPaで行い、応力精度がよいガス圧試験機による実験結果と比較した。また、様々な圧媒体物質を試験するとともに、新たな液体セルを開発し、内部摩擦の低減による応力精度向上に成功した。

脆性塑性遷移領域における石英多結晶体剪断実験試料の変形組織（滑り面角度、粒子の長軸方位分布）から、Noda (2021)の運動学的モデルを用いて塑性変形の寄与の割合を定量化した。結晶塑性変形が重要となる実験条件において、温度の増大とともに塑性変形の寄与が増大している事が確かめられた(Miyazoe+, 2024日本地質学会)。

速度・状態依存摩擦則で用いられる強度発展則は、実験で知られる三つの正典的な挙動(速度ステップに続いて滑りの指数関数でおきる強度変化の特性滑り距離 D_c が速度ステップの大きさや正負によらないこと、定常状態の強度がすべり速度の対数に負の線形依存をすること、純粋な時間効果としての対数ヒーリングが定常滑り強度の対数速度依存性と同一大きさで存在すること)を全て再現すべく、様々なものがheuristicに提案されてきたのだが、いまだにあちら立てればこちら立たずであることが広く認識されている。多くの発展則に共通している、強度の変化レートがその時々滑り速度 V と摩擦面の強度 Φ (内部状態変数と等価)だけの関数であるという仮定のみを先験的制約として、三正典から発展則を演繹することを試みた。まず、真に時間依存のヒーリング挙動(Aging lawに近い発展則を要求)と、速度ステップにおける挙動(Slip lawを要求)を V - Φ 空間の全領域にわたって両立する発展則は数学的にありえないと言える。しかし、速度ステップ実験で探られていてSlip lawに確定している定常すべり近辺(Φ が定常滑り強度 $\Phi_{ss}(V)$ に近い)と、ほぼ静的な接触でのヒーリング実験でAging law的な発展であることが確定している Φ が $\Phi_{ss}(V)$ よりずっと低い領域の間に実験で探られていない領域があることに着目し、この未探索の中間領域においてAging lawとSlip lawを Φ と $\Phi_{ss}(V)$ の差に応じて切替えることで(そしてその場合に限り)、既存の実験で挙動が押えられている V - Φ 空間の全域で三正典を満足できることを示した。こうして提案された新たな発展則は、既存の速度ステップ実験の範囲を大きく超える非常に大幅な減速ステップに対しては速度ステップ正典を守れず、まず純粋時間ヒーリングの効果で非常に短い滑り距離の間に強度がかなり増加し、その後は既存の速度ステップ試験で見られる程度の D_c で指数関数的に定常状態まで遷移することが予想されるので、そのような実験ができれば当否を検証できる。なお、Kato & Tullis (2001)のcomposite lawもAging lawとSlip lawの切替えであるが、切替えを V によって行うせいで、定常滑りの速度依存性に関する正典が満たせていない(Sato+, 2025)。

RSFの発展則の一つであるNagata lawはAging lawとSlip lawの中間的な性格をもち(Kame+, 2015)、Aging law、Nagata law、Slip lawという三つの発展則を一つの系列と捉えることが可能である。動的な地震サイクルシミュレーションにおける断層運動の不安定化から震源核形成の過程が、これらの発展則にどう依存するかを調べた。Nagata lawでは、滑り速度パルス状の伝播による地震性パッチへの剥がれの侵入からAging law的なコンパクトな加速フェーズへの遷移が見られる。この加速フェーズでは地震モーメント速度が $1/t_f$ (t_f は破壊までの時間)でスケールされる。地震発生時点での剥がれ域サイズ、高速滑り域サイズ、および後者の前者に対する割合はどれもSlip lawに近いほど小さくなる(Kaneki & Noda, 2024, SSJ)。

前計画で、速度・状態依存摩擦に従う断層が粘弾性体中におかれた場合のサイクルシミュレーションから、母岩流動による応力緩和が速い場合には、断層は永久固着になるという新たな地震-非地震の遷移を見出し(Miyake & Noda, 2019EPS)、さらに、強度の低い粘土鉱物は速度強化であることから期待される、断層の固着(速度弱化)域は定常滑り域より摩擦強度が高いという強度コントラストによって、この傾向が助長されることを示した(山本・野田2022SSJ)。この現象を数理的に理解するために、速度強化域、速度弱化域の平均すべり速度、平均剪断応力を変数とした2自由度のバネ・ブロック・ダッシュポットによる粗視化モデルを構築し、これが連続体モデルでの永久固着条件を定量的によく再現することを確認した。さらにと粗視化モデルの支配方程式の検討と流れ場解析によって、粘性の役割が大きくなる(母岩の粘弾性緩和時間が短くなる)につれて、地震-永久固着の遷移は、鞍点がHopf分岐(従来から知られていた、完全弾性体媒質中でも起きる地震-非地震性すべりの挙動変化に相当)を起こす不安定渦点に近付いて地震の発生サイクルを消してしまうHomoclinic分岐として理解できることを示した。また、永久固着となる条件の近似解析表現も得られた。粘弾性緩和時間は固着域のサイズが大きいほど短いため、地震発生域深部で脆性から延性へ遷移するにつれ、大きい地震から先に起こらなくなることが予想される。これはそのような深さでGR則の b 値が大きくなるという観察(Spada+, 2013)と調和的である(Noda & Yamamoto, 2024EPS)。

新たな試みとして、摩擦面の粗さの消長により摩擦強度が変化する摩擦則(Aochi & Matsu'ura, 2002)を速度状態依存摩擦構成則に「近代化」し、1自由度バネ・ブロックモデルの安定性解析および動的な地震サイクルシミュレーションを行った。滑り速度によってHopf分岐の臨界性が変化する複雑な挙動や、地震サイズと破壊エネルギーが相関する結果が得られ

た(Norisugi and Noda, 2024, SSJ)。

断層の離散化に三角形転位（区分的に一定の変位ギャップ分布）を使用した場合、その重心でトラクションを評価すると数値誤差が収束しない事を発見した。これを是正する多点評価法及び数値誤差の推定・補正法を見出した。いずれの方法でも、数値精度の大幅な改善が期待できる(Noda, 2024, submitted to EPS)。

摩擦面における不均質が熱弾性効果で自発的に成長する「熱弾性不安定」の効率的な数値計算手法を作成した。摩擦が温度弱化を示す場合について、中-高速摩擦実験でみられる動的弱化の試料サイズ依存性を数値計算で再現した(Noda, 2024, JpGU)。

地震の大きさは非常に広範囲にわたり、大きい地震ほど発生頻度が低いというGR則が成り立つが、そのメカニズムはわかっていない。多数の破壊要素からなる系を一様に载荷していき、どこかの要素の応力がその要素の強度に達したら壊れて自らの応力を隣接要素に分配し、そこでまた応力が強度を超えれば更に隣へと連鎖反動的に一つの地震イベントが成長するというOFCモデル(Olami+, 1992)は、1つの要素だけが壊れる最小地震から全系が連鎖して壊れる最大地震までGR則に従う複雑でカオスな地震活動を産み出す。既往研究で、OFCモデルが複雑性を産み出す肝は、外側境界でだけエネルギーの散逸が大きいという不均質性の存在で、実際、周期境界条件を課して散逸を均一にすると1要素のみが壊れる小地震だけがばらばらと起き続けるつまらない活動になることが知られている。そこで、周期境界条件のOFCモデルに一箇所だけ散逸量の違う要素を導入するという、最も単純かつ強さを自由に与えられる不均質性を導入して挙動を調べた。不均質が強い場合には様々な大きさの破壊が起きてGR則が成り立ち、不均質が弱い場合には完全均質な場合と同じく小地震のみがばらばらと起き続けたのは既往研究から想像できる通りだが、不均質が中程度の場合には、系サイズの1/3前後が破壊する3つの大地震が毎回全く同じ破壊域で順に繰り返す周期的な挙動となることが発見された(図2)。不均質の強さに応じて固有地震の繰り返し挙動とGR則の成り立つ複雑な挙動が相転移するこの系は、GR則のメカニズムを理解する重要な手掛かりになりそうだ(Otani & Kame, 2024)。

おおむね計画通りに実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

岩石の流動則やそのメカニズムの解明、摩擦と塑性変形の共存を試料組織から分析する方法を編み出したこと、母岩の粘弾性緩和にとまなう断層の永久固着化が理論的にしっかりと位置づけられたことは、地震発生層深部のモデリングおよび天然試料の読み取りに重要な貢献であり、1(3)、2(1)、2(2)アに資する。また、断層面の粗さの消長をとりこんだ摩擦則は、これまで取り組みの難しかった破壊エネルギーと地震サイズのスケーリングの問題に対する新たなアプローチで、OFCモデルの相転移の発見とともに、1(3)、2(2)イの新たな展開につながる可能性がある。また、摩擦発熱による動的弱化のスケール依存性は、3(2)に新たな視点をもたらす可能性がある。地震発生における流体の役割の重要性はゆっくり滑りと通常地震の両方を含む活動の観測事例からも強く示唆されており、熱・流体・空隙生成相互作用について見通しの良い理論ができたことは1(3)、2(1)、1(5)、2(2)に貢献する。このような知見は、地学条件から地震ハザードの地域性を推察することに役立つだろう。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Otani, T. and N. Kame, 2024, Emergence of self-organized criticality and phase transition in the Olami-Feder-Christensen model with a single defect, *Physical Review E*, 110:054129, doi:10.1103/PhysRevE.110.054129, 査読有, 謝辞無

Noda, H. and M. Yamamoto, 2024, Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast, *Earth Planets, and Space*, 76:155, doi:10.1186/s40623-024-02100-w, 査読有, 謝辞有

Sato, D. S., M. Nakatani, and R. Ando, 2025, Reconciling aging and slip state evolutions from laboratory-derived canons of rate-and-state friction, *Geophysical Journal International*, 240, 1855-1899, doi:10.1093/gji/ggae464, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

- 大谷哲人・亀 伸樹, 2024, Emergence of self-organized criticality and phase transition in the Olami-Feder-Christensen model with a single defect, 日本地震学会2024年度秋季大会, S08-24
- 大谷哲人・亀 伸樹, 2024, Olami-Feder-Christensenモデルに自己組織化臨界現象をもたらす対称性の破れ, 地球惑星科学連合大会2024大会, SSS05-P09
- Noda, H., 2024, Thermoelastic instability and temperature-weakening friction cause sample-size dependency of dynamic weakening in high-velocity friction experiments, JpGU Meeting 2024, SCG40-17
- Noda, H., 2024, Simulation on sample-size dependency of dynamic weakening of friction due to thermoelastic instability and local temperature-weakening, Seismological Society of Japan 2024 Fall meeting, S12-01
- Noda, H., 2024, Sample-size dependency of dynamic weakening by thermoelastic instability and temperature-weakening friction, AGU24 Annual meeting, S42B-08
- Norisugi, R. and H. Noda, 2024 (Outstanding Student Presentation Award), Multi-scale rate- and roughness-dependent friction realizes a variety of seismic-aseismic transitions, Seismological Society of Japan 2024 Fall meeting, S08-07
- Norisugi, R. and H. Noda, 2024, Multi-scale rate- and roughness-dependent friction realizes a variety of seismic-aseismic transitions, AGU24 Annual meeting, S42B-09
- Kaneki, S. and H. Noda, 2024, How the choice of an evolution law for an RSF fault affects the acceleration and localization behaviors of preseismic slip: Insight from dynamic earthquake cycle simulation, JpGU Meeting 2024, SSS05-P13
- Kaneki, S. and H. Noda, 2024, Diverse preseismic creep behavior of an RSF fault realized by choice of an evolution law: Insight from dynamic earthquake cycle simulation, Seismological Society of Japan 2024 Fall meeting, S08-P01
- Miyazoe M., K. Okazaki, and H. Noda, 2024, Contribution of plastic deformation estimated from microstructures after deformation experiment on quartz aggregates, JpGU Meeting 2024, SSS05-15
- Miyazoe, M., H. Noda, and K. Okazaki, 2024 (Outstanding Student Presentation Award), 石英多結晶体剪断実験の回収試料を用いた塑性変形割合の定量化, The 131th Annual Meeting of the Geological Society of Japan, T10-P-11
- 佐藤大祐・中谷正生・安藤亮輔, 2024, 室内実験の典型的挙動に基づく速度状態依存摩擦則におけるAging lawとSlip lawの調停, JpGU Meeting 2024, SSS05-09
- 河野葉子・鈴木岳人, 2024, 熱・流体相互作用と速度状態依存摩擦則に基づく亀裂端伝播速度の解析, 日本地震学会2024年度秋季大会, S08P-17
- Shimizu, I., 2024, Steady-state microstructures of quartz: Evaluation of stress states in deformation experiments using Kumazawa-type apparatus, Symposium in honor of Holger Stünit
- Nakakoji, K. and I. Shimizu, 2024, Steady-state microstructures of wet quartz in dislocation creep: change of recrystallized grain shapes with temperature, strain rate, and confining pressure, AGU24 Annual meeting, T01-34

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和7年度実施計画の概要：

高密度粉体層としての地震断層の強度回復メカニズムに関して、透明セル式回転試験機で熱可塑性樹脂を粉体試料として用いた実験を行い、時間依存の粒子間結合強化と幾何学的な粒子再配置によるコンパクションという二つの効果の峻別をめざす。

ゆっくり地震と高速地震の統一的な扱いに関して、熱・流体・空隙生成相互作用については理解がある程度進んだので、次の段階として、これに加えて速度状態依存摩擦則等の現実的な摩擦則の効果を取り入れる。

粗さの消長モデル(Aochi and Matsu'ura, 2002)を強度則として組み込んだ速度状態依存則に従う断層挙動について、余効滑り等を含むサイクル全体の挙動を調べる。また、破壊エネルギーのスケールリングを生み出す他の摩擦構成則と比較する。

熱弾性不安定のシミュレーションに関して、より詳細なパラメータスタディを行う。試料サイズに加えて、室内実験で確認されている滑り弱体化距離の垂直応力依存性等についても検討する。

単一不均質をもつOFCモデルで見い出された複雑挙動と周期挙動の相転移がどうやって起きているのか、相境界近傍でのふるまいに着目してメカニズムの考察を深める。

令和6年度の結果について論文文化を進める。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中谷 正生（地球計測系研究部門）, 亀 伸樹（数理系研究部門）

他機関との共同研究の有無：有

清水 以知子（京都大学理学研究科）, 野田 博之（京都大学防災研究所）, 鈴木 岳人（高千穂大学人間科学部）, 桑野 修（海洋研究開発機構）, 永田 広平（気象大学校）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(13) 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

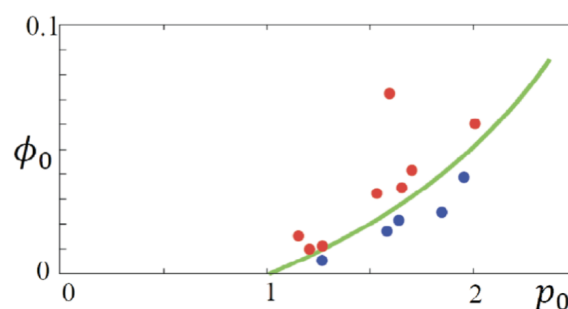


図1. 滑りの安定性の滑り開始時の断層流体圧 p_0 および空隙率 ϕ_0 への依存性(鈴木・私信)

赤丸は数値実験で高速滑りが生じた場合。青丸は数値実験でゆっくり滑りが生じた場合。緑の曲線は両者を分ける条件の解析近似式。

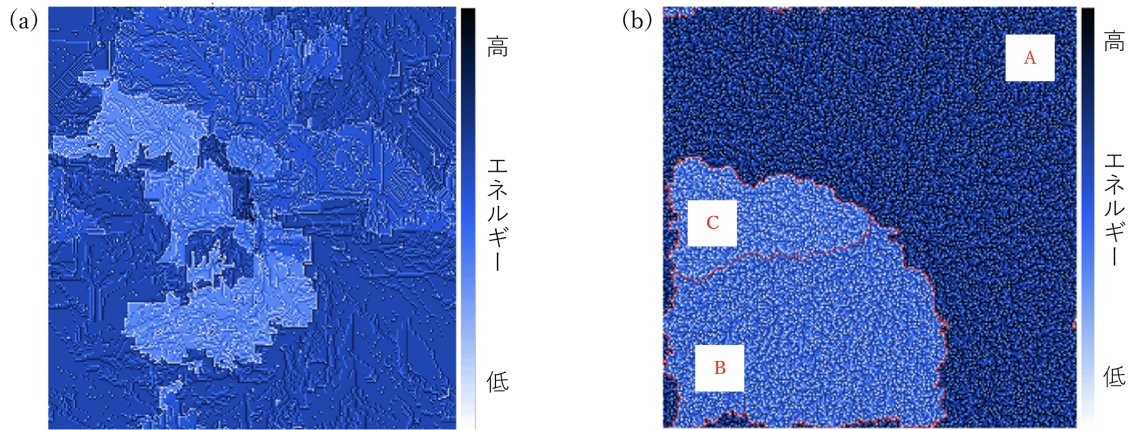


図2. 周期境界条件のOFCモデルに散逸量が他と異なる要素(不均質)を1箇所だけ導入した新モデルのふるまい(亀・私信)

この例では不均質要素は中央に置いたが、その位置は重要ではない。色の薄いところが最近地震が発生した部分。(a)強い不均質を導入した場合。様々な大きさの地震が発生しGR則が再現される。(b)中程度の強さの不均質を導入した場合。3つの大地震A, B, Cだけが周期的に繰り返す。