

令和元年6月5日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05473

研究課題名(和文)破壊現象の非平衡ダイナミクスと統計力学的性質

研究課題名(英文)Nonequilibrium dynamics and statistical properties of fracture phenomena

研究代表者

湯川 諭 (Yukawa, Satoshi)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20292899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：乾燥破壊に代表されるような内部応力が増加して破壊に至る現象を非平衡物理学の立場で理解するために、確率過程を用いてモデルを構築し、計算機シミュレーションにより研究をおこなった。モデルは二次元の格子上で構成され、応力の非等方的な再分配やエネルギー散逸、および破壊で生じた破片の形状、サイズ分布などを議論できる特徴があり、複雑な現象の理論的理解に適しているモデルになっている。シミュレーションの結果、平衡系の2次相転移で見られる臨界現象的な振る舞いが発見された。この系固有の特徴として臨界指数がパラメータと共に連続的に変わるような振る舞いが見られ、これらの成果を学会で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乾燥や体積収縮などによる内部応力の増加に伴い発生する破壊現象に対する簡単な確率モデルを構成できたことは学術的な意義がある。また今後の三次元への研究の展開や応力緩和の効果を考察する上でも使えるモデルとなっておりさらなる展開が期待できる。また、成果としての臨界現象的な振る舞いは、まだ完全に理解はできていないが、非平衡模型で臨界的振る舞いが出ること、またパラメータにより臨界指数が連続的に変わるように見えることなど、学術的に意義深い性質が発見された。この点はさらなる解析が必要である。社会的には直接影響のある成果はないが、この研究を通して破壊現象の理解が深まることで工学的応用などに繋がりたい。

研究成果の概要(英文)：In this project, I investigated fracture phenomena like the formation of a desiccation crack, which is caused by internal stress increment. In order to understand the nature of phenomena from the view point of the nonequilibrium physics, I made a stochastic model and simulated the model by computers. The model is constructed in a two dimensional square lattice. The following properties are imposed on the model: asymmetric redistribution of stress variables, energy dissipation and so on. In addition, we can discuss a fragment shape and fragment size distributions with the present model. This simple stochastic model enables us to discuss the complicated nature of fracture phenomena theoretically. As a result of the simulation, I found critical phenomena similar to ones observed in equilibrium systems. In this case, the critical exponent is varying as changing external parameters. These results were presented in the meeting of the Physical Society of Japan.

研究分野：非平衡統計物理学

キーワード：破壊現象 非平衡統計物理学 確率モデル 臨界現象

## 1. 研究開始当初の背景

破壊現象の統計物理学的研究は80年代、90年代から盛んに研究されるようになってきた。それまでは、材料工学の分野で網羅的、各論的に調べられていたが、統計物理学的研究の始まりにより、現象の統一的理解を目指して世界的に研究が行われるようになってきた。当時は、統計力学的な簡略化したモデルで調べられていたが、近年の計算機の発達にもない、よりミクロで第一原理的なところから、統計力学的に議論されるようになってきた。本研究では、近年のこの状況を踏まえ、現象をよりミクロなレベルからモデル化することでマクロな破壊挙動を再現するという立場で研究を行う。この結果、連続体の構成方程式などマクロな前提条件に依存しない現象の統計力学的理解が進むと思われる。このような立場の研究は、まだ始まったばかりであり世界的に見ても少数のグループでしか行われていない。

この一連の研究の流れの中で、時間の経過とともに内部応力が増加し破壊に至る破壊現象、特に乾燥破壊現象に代表されるような二次元系の破壊現象に関して、研究代表者の過去の研究により動的スケールリング則と呼ばれる新たな法則が発見されていた。動的スケールリング則とは、破壊にもない生成される破片の面積の分布関数におけるある種の対称性である。通常は時々刻々と破壊が進行していくために、面積分布関数全体は低面積側に時間的にシフトしていき関数形が変わっていくが、その面積分布関数をその時刻での平均面積で規格化した面積の関数として書き直すことで、すべての時刻に対する面積分布関数が完全に一致し一つの関数形で表現できるという性質がこの動的スケールリング則と呼ばれる対称性である。この動的スケールリング則の存在が確立すれば、現在の破片の分布から将来どのように割れるかが完全に統計的に予測できるため、動的スケールリング則は極めて重要な性質である。ただ研究開始当初は、動的スケールリング則は、最低限の要素を組み込んだ乾燥破壊現象の粘弾性連続体モデルの数値計算および空間構造などを仮定しない非常に簡単な確率モデルでのみ確認されており、乾燥破壊現象でおきるさまざまな効果を考慮したとき動的スケールリング則がどうなるかは明らかではなかった。

## 2. 研究の目的

研究開始当初の目的は、破壊現象を非平衡物理学的、統計力学的な立場から理解しようというものであった。特に、破壊現象の素過程の一つと考えられる結晶粒界の非平衡条件下での運動をコンピューターシミュレーション、および現象論的なモデルから理解したいと考えていた。またそれに加え最終的なマクロな破壊現象における統計則についても研究を行うことを目的としていた。そこではこれまでに知られている破壊破片の形状に関する経験的な統計則に対し、コンピューターシミュレーションによる理解を目指すことを目的としていた。

本研究ではこの目的の後半に重点を置き、マクロな破壊現象における統計則を解明することを目的に研究を行った。特に動的スケールリング則をより詳細に理解するため、これまでにモデルに取り入れられていなかったさまざまな要素を取り入れたときに動的スケールリング則がどうなるか明らかにすることを最大の目標とした。

## 3. 研究の方法

本研究ではこれまでの粘弾性連続体モデルや空間構造を仮定しない確率モデルでは取り扱えない現象による効果を明らかにするため、破壊現象の統計力学モデルであるファイバーバンドルモデルを参考に、乾燥破壊現象の空間構造を取り入れた確率モデルの構築とその基本的な性質の解明を行った。また二次元の乾燥破壊現象のマクロな破片パターンの統計法則に関連する周辺分野の問題として、河川ネットワークにおけるパターンのマクロな統計則に関連してデータ解析を行った。

以下に乾燥破壊現象に対する空間構造を取り入れた確率モデルの研究に関して、(1)モデルの詳細、および(2)数値計算上のアルゴリズムと解析方法に関して具体的に述べる。

(1) モデルの詳細。二次元の乾燥破壊現象を表現するモデルとして、正方格子上的確率モデルを構成した。初期の破壊によって生じる亀裂核生成は正方格子上的格子点をつなぐボンドが破断することで表現し、亀裂の進展は、破断ボンドが連続的に繋がって破断していくことで表現する。各ボンドには、内部応力を表現する変数として一自由度の「ストレス」変数を導入した。これは連続体モデルの応力に相当するものを簡略化した表現である。各ボンドは破壊に対する閾値を持っており、ボンドのもつストレス変数が閾値を超えるとボンドは破断する。破断に至ると、破壊で発生したストレスがまわりのボンドに異方的に再分配される。またエネルギー散逸の効果として、再配分するストレスを一定割合で小さくするようにした。再分配によりストレス値がボンドの閾値を超えると、そのボンドは破断され、この効果により連鎖的なボンドの破壊が発生しうる。またストレスの異方的な等分配により、亀裂の直線的な進展を表現することができる。定常的に各ボンドの持つストレス変数を増加させることで、乾燥による内部応力の増加を表現することとした。

(2) 数値計算上のアルゴリズムと解析方法。上で構成したモデルを数値シミュレーションにより評価した。シミュレーションでは格子サイズを決め、ボンドの破断閾値を乱数で与えてから、ストレス変数を時間的に増加させた。実際は、破断にいたるボンドを先に決めるイベント駆動型のアルゴリズムで計算を行う。さらに、破片サイズ分布を調べるために破断した格子に対してクラスター解析を行い、クラスターのサイズ分布などの物理量を計算した。また解析では、モデルが本質的にボンドパーコレーションのモデルとおなじ事を利用して、パーコレーション現象としての解析も行った。この結果パーコレーションモデルとしての臨界現象的な性質がある事がわかったので、システムサイズを系統的に変えながらシミュレーションを行い、また乱数の効果を消し去るために各システムサイズで多数のサンプリングを行った。この作業により非常に多くの計算時間がかかった。

#### 4. 研究成果

まずどのように亀裂が進展するか、破壊パターンとして得られた結果を図1に示す。横に内部応力  $\sigma_{ex}$  の増加にともなう時間発展が示されており、上の列はエネルギー散逸のパラメーター  $\alpha$  が小さい場合、下の列は散逸パラメーター  $\alpha$  が大きい場合を表している。切れたボンドは白い色で表され、ボンドの色の違いは繋がったボンドが作るクラスターの違いを表している。亀裂が直線的に進行すること、破壊の初期は系全体に広がった繋がったクラスターが一つしか存在しないことなどが図から確認できる。またさまざまな大きさや形状をもつクラスターの存在が確認でき、破片のサイズ分布や形状分布などに関しても議論可能であることがわかった。

図1から内部応力の増加に伴い、系全体に広がっていたクラスターがある時なくなることがわかる。これはパーコレーション現象として今の現象を理解することが可能である事を示唆している。よってパーコレーション現象としての解析を行った。図2には、パーコレーション強度とパーコレーション感受率を、内部応力を横軸に取り表示した。異なる色のデータは散逸パラメーターの違いを表す。図1で見たように散逸パラメーターが大きいほど小さな内部応力で破壊にいたるが、それが定量的に示された。この感受率の発散的振る舞いから、破壊に至る現象は臨界現象として理解できることがわかる。このようなパーコレーション的振る舞いの存在を明らかにしたことは、これまでに知られていない新しい成果である。臨界現象として理解可能なら、臨界現象としての解析も可能であると考え、有限サイズスケリングによる解析を試みた。その結果の一例を図3に示す。右が、パーコレーション強度のスケリング、左が感受率のスケリング結果である。これら有限サイズスケリングの解析から、臨界指数を求めることができ、それらを散逸パラメーターの関数としてプロットしたのが図4である。ここでは主要な臨界指数である秩序変数(パーコレーション強度)の臨界指数  $\beta$ 、相関長の臨界指数  $\nu$ 、感受率の臨界指数  $\gamma$  を表示した。また同時に、内部応力の臨界値を散逸パラメーターの関数としてもとめ、それ

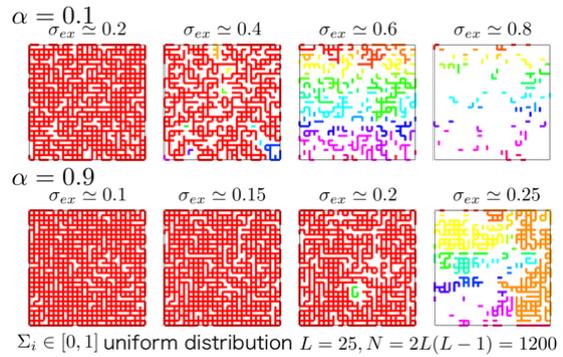


図1 破壊の時間発展とクラスター形状

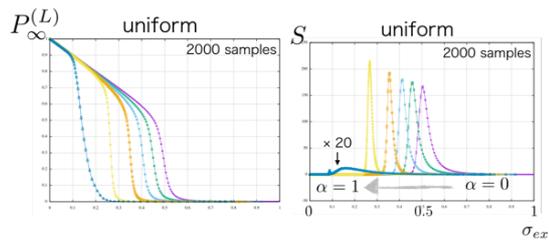


図2 パーコレーション強度と感受率

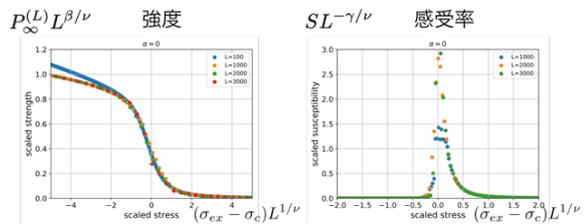


図3 パーコレーション強度と感受率の有限サイズスケリング

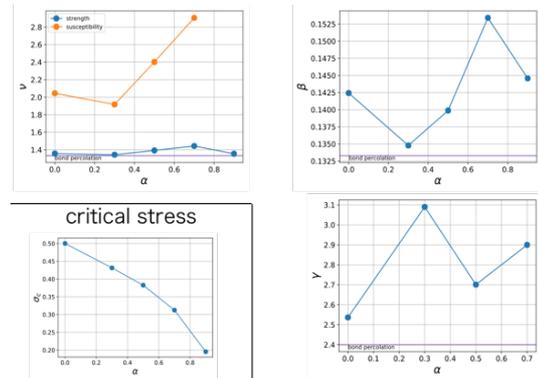


図4 臨界指数の散逸パラメーター依存性と臨界応力の散逸パラメーター依存性

このような非平衡統計物理学的な確率モデルで臨界現象を示すモデルは幾つかあるが、この確率モデルのように臨界指数が、制御パラメーターである散逸パラメーターを変えることで連続的に変化するようなモデルはあまり例がなく、このような現象の存在を示したことは非常にインパクトがある成果である。ただ図4をみてもわかるように、臨界指数の変化が系統的ではなく、さらなる研究が必要である。また、今回構成した二次元的な乾燥破壊の確率モデルは単純なモデルであり、まだ乾燥破壊の最低限の要素しか組み込まれていない。例えば、今回局所的な応力緩和の最低限の寄与として、切れたボンドのまわりの生存ボンドに異方的にストレス変数を再分配する事を行ったが、本来このストレス変数の再分配は弾性体の応力緩和として理解すべき問題である。この観点からモデルを改良することは重要な今後の課題である。また、主たる目的であった動的スケーリング則の頑健性に関連して、現在のモデルで研究することはかなわなかった。このモデルを手がかりにすると、動的スケーリング則に影響を与えうるさまざまな他の効果を系統的に調べることが可能であり、それらは今後の課題として残る。さらにモデルの潜在的な能力として高次元への拡張なども簡単であるため、乾燥破壊現象だけではなく体積収縮で発生する柱状節理現象への適用などさまざまな展開が期待できる。

また二次元の乾燥破壊現象のマクロな破片パターンの統計法則に関連する周辺分野の問題として、河川ネットワークにおける河川パターンのマクロな統計則に関連してデータ解析を行った。乾燥破壊現象で見られる亀裂の分岐角度分布に相当する、河川の合流角度分布をしらべ普遍的な角度が存在することを見いだした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Satoshi Yukawa, Takeru Watanabe, and Kenji Hara, Bifurcation Angle Distribution in the Japanese River Network, Journal of the Physical Society of Japan (査読あり), vol. 88, 024901, (2019), DOI:10.7566/JPSJ.88.024901

〔学会発表〕（計5件）

- ① 湯川諭、乾燥破壊現象の確率モデル、日本物理学会秋季大会、2018年
- ② 伊藤伸一、湯川諭、フェーズフィールド法に基づく乾燥亀裂シミュレーションとその統計的性質、日本物理学会第73回年次大会、2018年
- ③ Shin-ichi Ito, Satoshi Yukawa, Statistical Modeling for Desiccation Cracking Based on Shape-Dependent Fragmentation Process, American Physical Society March Meeting, 2018年
- ④ 伊藤伸一、湯川諭、乾燥収縮破壊の破片形状依存性と統計的モデリング、日本物理学会秋季大会、2017年
- ⑤ Satoshi Yukawa, A fiber-bundle-like model for the desiccation crack, 7th Hungary-Japan Bilateral Workshop on Statistical Physics of Breakdown Phenomena, 2016年

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。