

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03652

研究課題名（和文）破壊のパターン形成と分布法則の普遍性

研究課題名（英文）Pattern formation of fracture and universality of distribution laws.

研究代表者

湯川 諭（Yukawa, Satoshi）

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20292899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：破壊現象にみられる模様や破片分布の統計的性質を理解するため、計算機シミュレーションを用いて研究を行った。主な研究対象として、マスクメロンのマスク形成過程でみられるような球殻上のひび割れと、繊維で補強されたセラミック材料のような複合材料の引っ張りにおける破壊を調べた。その結果、おなじ球殻上の破壊でも急速に破壊が起きた場合とゆっくりと割れた場合で質的に破壊の様相が異なること、また複合材料を強化している繊維の長さスケールが、分布法則を支配していることなどを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

球殻上の破壊現象に対して、叩いて急に破壊される場合とゆっくりと準静的に破壊される場合で、破片の分布関数や分布関数のスケール則とよばれる性質にあらわれる冪指数などの様相が質的に異なることが明らかになったこと、複合材料の破壊現象で現象を支配する長さスケールが内部構造に起因するスケールであることが明らかになったことは学術的に意義深い。これらの社会に対する直接的な意義はまだ薄い破壊現象の理解が進んだ先には産業応用などへの可能性がある。

研究成果の概要（英文）：To understand the statistical properties of patterns and fragment distribution observed in fracture phenomena, we conducted research using computer simulations. The primary subjects of our study were the cracks observed on spherical shells, such as those seen in the pattern formation process of musk melons, and the tensile failure of composite materials, such as fiber-reinforced ceramic materials. Our findings revealed that even in the fracture of the same spherical shell, the nature of the fracture qualitatively differed depending on whether it occurred rapidly or slowly. We also discovered that the length scale of the fibers reinforcing the composite materials governs the distribution laws.

研究分野：非平衡統計物理学

キーワード：破壊現象 分布関数のスケールリング

1. 研究開始当初の背景

破壊現象は日常的によく目にする現象であり、破壊現象を理解することは工学的に極めて重要な課題である。工学的に破壊現象を理解することで、破壊の制御やより強靱な材料また構造の作成が可能になり実社会への影響も大きい。このような観点から様々な応用的研究が世界的に行われている。一方、理学的な観点からも破壊現象の理解は極めて重要である。例えば日常目にするような泥が乾燥にともないひび割れていく現象や、経年変化による塗装のひび割れ、マスクメロンにみられるマスクの形成原因となるひび割れ、巨視的なスケールに目を向けると氷天体の表面にみられる氷のひび割れなど、直接工業的な応用に繋がらないかもしれない多数の現象が存在する。これらは素材も大きさのスケールも時間的なスケールもまったく異なる現象であるが、理学的な観点から見ると現象としては本質的に同一と見なせ、理学的な破壊現象の理解の重要性を示している。

また研究開始当初は、粉と水を混ぜたペーストを乾燥させたときにできる二次元的な破壊のパターンにおいて、発生した破片の面積の分布関数に動的スケールリング則とよばれるあたらしい法則が存在する事が報告者らの研究によって発見された直後であった。この法則は、ある時刻の破片の面積分布関数と異なる時刻の面積分布関数が無関係ではなく、分布関数の変数を面積からその時刻の平均値でスケールしたものに切り直すことにより二つの異なる時刻の分布関数が完全に一致するという法則であり、現在の破片面積の分布関数から過去および未来の分布関数の様子が完全に分かるということを示している。また分布関数の関数形から、応力の時間的な変化や破壊が起きるときの素過程の情報が得られるということが分かっていた。当時はこの分布法則の普遍性が二次元の乾燥破壊現象を超えて拡張されるのか、またより詳細な統計法則の解明が期待されていた。

本研究ではそのような状況を踏まえ、破壊現象の理学的な理解を目指して研究を行うことを計画した。特に工学的な研究では重要視されていなかった破壊の統計的性質に着目し、統計力学的な視点からの研究を行うことを目指した。研究開始当初、このような統計的性質に着目した研究は報告者の研究を含む複数の先行研究はあったものの完全に理解されているとは言いがたく、研究する余地は残されており、より深い破壊現象の統計的性質の理解を目指して研究を行った。

2. 研究の目的

破壊現象の非平衡統計物理学的理解を深めるため、さまざまな破壊現象に対して物理モデルを構築し、数値シミュレーションおよび解析的計算によってさまざまな統計法則の発見および解明を行う。特に、破片サイズの分布関数にみられる動的スケールリング則のような性質の普遍性を理論的に明らかにすること、パターンの形やスケールそのものから現在の環境条件および過去どのような履歴を経てきたかを理論的に明らかにすることを目的とする。また、ここで得られた成果を地球物理的な対象や工学的な対象に対し応用できるかたちで明確にし、他分野との相互発展を目指す。

3. 研究の方法

いくつかの破壊現象を対象に研究を行う。研究の方法として共通している部分は、(1)数理モデルの構築、(2)計算機シミュレーションによる非平衡破壊現象の再現、(3)理論的考察、からなる。以下ではサブテーマに関して上記の視点から研究方法をまとめる。

(1) 曲率をもった二次元面上の破壊現象

二次元の収縮破壊現象における曲率の効果を調べるため、球面および球殻上の破壊現象を調べた。数理モデルとして対象となる形状の上に計算点を確率的に分布させ、この点を代表点とする Delaunay 格子を作成、さらに Voronoi 分割をすることで破壊現象を調べる試料を構成した。Delaunay 格子を形成するボンド上に切れる線形ばねと切れない線形ばねを二本並列に配置し、切れるばねはある程度伸びると、ある破壊条件のもと破断させる。また球殻内部には圧力媒体が存在し、この圧力媒体の圧力を増加させて球殻を変形させる。これが破壊の駆動力として振る舞う。この圧力の作用を、三角格子面上に外向き法線方向の力として表現し、圧力増加を時間の線形関数として表した。また運動は過減衰の運動方程式にしたがって時間発展させた。これは準静的な圧力増加による破壊をモデル化している事になり、衝撃破壊による球殻破壊の先行研究とは異なる点である。いくつかのパラメータを変更しながらシミュレーションを行い、結果をパーコレーション理論に基づくクラスター解析、および破片サイズ分布をとそのスケールリングを詳細に調べた。

(2) 複合材料の破壊現象

複合材料の破壊現象における統計的な性質を調べるため、二次元系の一軸伸張に伴う破壊現象を調べた。対象となる二次元系を三角格子で表現し、規則的に配列した切れないばねと、その間をうめるランダムな破壊閾値をもつ切れるばねで複合材料を表現した。切れるばねは、ばねの歪みがある閾値以上になると切れ系から取り除かれる。二次元系の上下は、負荷が掛けられ一軸的に伸張させる。また伸張と直交する方向には周期境界条件を課し、シミュレーションを行った。伸張は準静的に行い、微小な変位を上下に加えて、その後力学平衡位置を探索し格子点を移動させ系を緩和させる。これを繰り返し、全体の歪みが0から1になるまで計算を行った。系に内在する複合材料の長さスケールを様々に変えながらシミュレーションを行い、結果を破壊現象の統計的性質でよく調べられる有限サイズスケーリングの手法を用いて解析した。

4. 研究成果

(1) 曲率をもった二次元面上の破壊現象

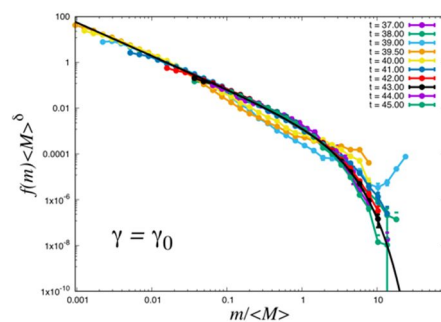
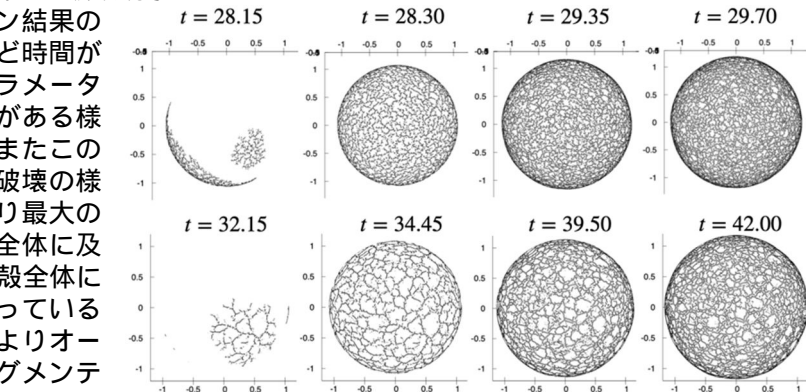
右図はシミュレーション結果の一例である。横に行くほど時間が経過している。上下でパラメータが違い、破壊進展に差がある様子を見ることができる。またこの様子の詳細な解析から、破壊の様子が、亀裂が局所的であり最大の繋がっている破片が球殻全体に及ばない「ダメージ相」、球殻全体に亀裂が広がり最大の繋がっている破片が球殻全体の大きさよりオーダーとして小さい「フラグメンテーション相」という破壊の質的な変化が発生することが分かった。またこの破壊の様相の切り替わりをパーコレーション理論に習い「臨界点」と呼ぶことにする。

いくつか定量的な解析を行い破片サイズの分布関数の関数形の詳細など分かったことがあるが、ここでは動的スケーリング則に関して調べた結果を述べる。右図は、横軸に破片サイズをそれぞれの時刻の平均サイズで割ったものを取り、縦軸を平均サイズのべき乗でスケールしたものを取った。ダメージ相、フラグメンテーション相それぞれでうまくスケールされており、球面上の球殻破壊でも動的なスケーリングが成立することが分かる。また、臨界点直上ではすこしスケーリングの性質がずれていることも分かり、系の臨界性が分布関数に影響を与えていることが分かった。

さらに様々な解析を行った結果、この系に対して以下のことが分かった。まず、先行研究で知られているさまざまな普遍性クラスの観点から見ると、この系は二次元バルク系と同じ普遍性クラスに属しており、曲率の効果がはっきりとは現れていない。またこれは三次元球殻系の衝撃破壊とは明らかに異なる普遍性クラスに属しており、準静的破壊が曲率の効果を打ち消し二次元のバルク系と同じ状況を生み出していると思われる。この結果、より定量的に普遍性クラスの移り変わりを調べる必要がある事が分かった。またこの系はさまざまな実在系に適用可能であり、この観点からも更なる研究が必要である。

(2) 複合材料の破壊現象

右図は、試料を伸張させたときの有限の歪みにおけるスナップショットであり、左は歪みが小さい領域、右は歪みが大きい領域に対応する。つながれているばねを表示しており、左右のスナップショットでこの瞬間に切れたばねの数は等しいが、歪みが大きい領域

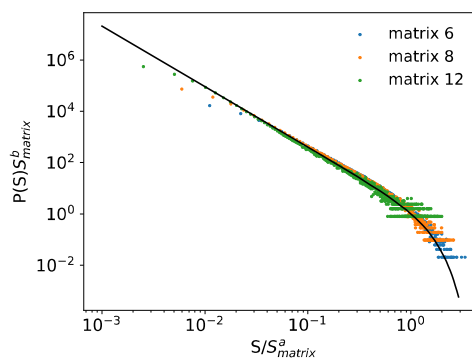


のものは開放される応力が左の状況と比較して大きいことがわかった。これらの振る舞いは系の巨視的な振る舞いにも表れ、歪み応力曲線においては、左では非線形ではあるがなめらかな応

力挙動を示し、右では不連続な応力挙動を示すことが分かった。

基本的な統計的性質として、微小な伸張歪みを加えた際の破壊イベントサイズ(切断されたボンドの数)の分布を調べた。その結果は、複合材料の内部に配置した切れないばねの間隔できまる特徴的な量で完全にスケールされることが分かった。従来の確率的な破壊モデルでは系のサイズがさまざまなスケールを支配することが知られているが、このモデルでは、そのスケールを内部構造のスケールが上書きしておりこれはこれまでにない振る舞いである。

さらに統計的性質を調べた結果さまざまな事が分かったが、特筆すべきなのは、パーコレーション理論を参考に定義した亀裂成長ながさと応力降下間の統計則にある。基本的には、亀裂成長ながさと応力降下量には正の相関がある。ここで亀裂成長ながさが長く応力降下量大きい領域で、べき的な依存性が見つかった。さらにこの依存性は内部構造の特徴的な長さスケールに依存しており、その依存性が界面粗さ指数をつかったスケールリングで完全に消失することが分かった。本来界面粗さ指数は十分に長い界面に対して定義されるべきものではあるが、この内部構造の特徴的長さスケールは非常に短くそのようなスケールリングが期待できない状況である。そのような状況にもかかわらず界面粗さ指数がでてきたことは非常に興味深く、さらなる研究が必要である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Haruka Noguchi, Satoshi Yukawa	4. 巻 2312
2. 論文標題 Fracture process of composite material in a spring network model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2312.11798
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2312.11798	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Haruka Noguchi, Satoshi Yukawa
2. 発表標題 Fracture process of composite material in spring network model
3. 学会等名 STATPHYS 28（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口遥佳、湯川諭
2. 発表標題 Spring-Networkモデルを用いた複合材料の破壊過程の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruka Noguchi, Satoshi Yukawa
2. 発表標題 Fracture of composite materials with Spring-Network model
3. 学会等名 MRM2023/IUMRS-ICA2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤伸一, 中原明生, 湯川諭
2. 発表標題 乾燥亀裂パターンの動的統計則に現れる相転移的性質
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤倉雅人, 湯川諭
2. 発表標題 球殻の膨張破壊における統計的性質
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤倉雅人, 湯川諭
2. 発表標題 球殻の膨張破壊におけるスケーリング則
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------