

令和元年6月20日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17779

研究課題名(和文) 乾燥亀裂における破片形状と破壊過程の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study for fragment shape on desiccation crack patterns and its fracture process

研究代表者

伊藤 伸一 (ITO, Shin-ichi)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：10756331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：粘土などのペーストを乾燥させると表面に亀裂のパターンが生じる。この乾燥亀裂パターンに対して、本研究課題は、パターンに現れる破片の形状とその破片の破壊過程の関係を明らかにすることを目的として、(i) コロイド懸濁液の乾燥破壊実験、(ii) 亀裂パターンのシミュレーションモデルの開発、(iii) 乾燥亀裂における破片生成過程の統計モデリングを実施した。これらの研究結果により、破片形状と破片の破壊過程の関係の定量化を可能にし、実験で得られた破片形状の統計法則の物理的起源を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

破壊を特徴づける量として破片の統計法則はしばしば計測されるが、それはその破壊がどのようなものだったかが、統計法則に現れる為である。既存研究では、破片のサイズに関する統計法則がよく調べられるが、実際の壊れ方は破片のサイズだけでなく、破片の形状にも依存する。しかしながら、破片形状と壊れ方を定量的に論じる研究は少なく、本研究は破片形状と壊れ方を定量化することで、破片形状の統計法則からその物質が受けた力や晒された環境の履歴情報を抽出・解明する方法論の創出のための基盤研究となる。

研究成果の概要(英文)：When drying paste such as clay, surface crack pattern can be observed. For this "desiccation crack pattern", this project aims at uncovering relation between shape of fragments in the crack patterns and the elementary process of fracture. This project is composed of following three subjects: (i) experiments of desiccation crack patterns using colloidal suspension, (ii) development of numerical simulation model that reproduces the desiccation crack patterns, and (iii) statistical modeling of fragmentation process in desiccation crack patterns. The results obtained by this project enabled us to quantify the shape of fragments in the crack patterns and the elementary process of fracture and revealed the origin of the statistical law observed in experiments.

研究分野：データ同化、ベイズ統計、統計物理、計算物理

キーワード：乾燥亀裂 統計則 形状 確率過程 フェーズフィールドモデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

物体の衝突破壊、泥のような粉-水混合ペーストの乾燥亀裂など、破壊の現象はさまざまであるが、破壊現象において破片サイズ分布は、破壊を特徴づける量としてよく計測される。それはその破壊がどのようなものだったかが、分布の関数形に現れる為である。例えば、層厚の薄い擬2次元的な乾燥亀裂パターンの破片サイズ分布は、時間発展と共に変化するが、破片サイズを平均サイズでスケールした変数で分布をとると時間に依らない不変分布が得られる、という動的スケーリング則が観測され、その不変分布の関数形を特徴づける指数が乾燥のさせ方を特徴づけるパラメータに依存する事が応募者の研究によって明らかになっている。しかし、破片サイズ分布は大きさのみを観測する為、破片の形状に関する情報は失われている。特に、乾燥亀裂パターンにおいて、破片分割過程はカスケード的に進んでいく為、破片形状は破片内部の応力分布を決定し、応力分布は破壊過程を決定づけ、それによって次の破片形状が決定される。つまり、“破片形状” - “応力分布” - “割れ方” は互いに密接に相関するので、破片形状に関する情報は破壊過程を特徴づける決定的な要素と言える。しかしながら、これまでの先行研究において、破片形状を考慮に入れた破壊の研究はあまり行なわれていなかった。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、破壊現象における破片の形状と破片の破壊過程の関係を明らかにする事である。破壊の統計学における先行研究では、破片の大きさに注目した研究は多く存在するが、破片形状に注目した研究は皆無に近い。破片形状は破片の破壊過程に影響し、その破壊によって破片形状は変化する。従って、破片形状と破壊過程の関係を明らかにする事で、破壊の予測や制御に資する知見を得る事ができると期待される。本研究では、乾燥破壊に代表される収縮破壊における破片形状と破壊過程の関係を理論的に明らかにする事を主要な目的とする。

3. 研究の方法

本研究は破片の形状と破片の破壊過程の関係を明らかにするために、実験-シミュレーション-統計モデリングの3つの方法を総合的に用いて理解を深める。本研究は以下の3つの課題に基づく。

課題(I)：乾燥破壊実験

粉体-水混合ペーストを用いた乾燥破壊実験を行ない、実際の破片形状の統計則を計測する。図1のような実験系を設定し、乾燥亀裂パターンが進展していく様子をデジタルカメラでインターバル撮影する。その際、ペーストの質量をPCへリアルタイムに送信し記録することで、パターンの時間発展と対応するペーストの質量変化を同時に計測する。一般に乾燥亀裂パターンは実験室の湿度によって進行速度が異なるため、パターンの時間発展を実経過時間によって測るためには湿度の厳密なコントロールが必要となり非常に難しい。そこで、実経過時間の代わりに、ペーストの質量変化を時間の経過を測る量として用いる。破壊は水が蒸発し水の体積が減少し収縮することで発生するので、十分に遅い水の蒸発であれば水の体積変化とパターンの時間発展の系統的な振る舞いは対応づけられると考えられる。これを仮定すると、ペーストの質量変化を時間の経過を測る量として採用することができ、異なるサンプルに対しても統計量の時間発展を定量的比較が可能になる。この実験系を用いて、複数回の実験を行い、得られた写真の画像解析を行なう事で、破片の形状を取得し統計分布を構成する。画像解析では、ImageJを用いた背景ノイズ除去・二値化・クラスタリングを行なうことで、破片形状情報を抽出し時系列データとして取得する。使用する粉体は、先行研究が充実していてレオロジー特性及びそのマイクロ形状が良く知られている炭酸水酸化マグネシウムを用いる。この実験データは後の課題(II)および(III)との比較に用いられる。

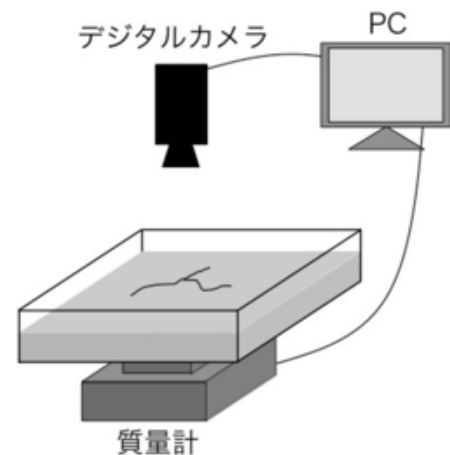
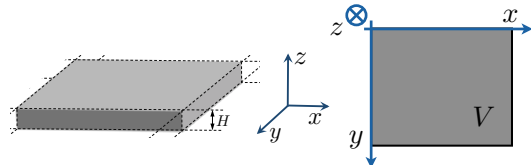


図1: 亀裂パターンの時間発展を撮影する実験系。

課題(II)：連続体による乾燥収縮亀裂モデルの開発

実験との比較のため、粘弾性連続体による乾燥収縮亀裂シミュレーションモデルを開発する。既存の亀裂を伴うシミュレーションモデルでは、亀裂が進展する方向に制限を与えてしまう可能性があり、本研究の目的である破片形状と割れ方の関係を不明瞭にしてしまうことが

考えられるため、自然な形で亀裂進展を表現するモデルが必要である。本研究では、構造材料分野などで用いられる、フェーズフィールド法による乾燥収縮亀裂のモデル化を行なった。フェーズフィールド法は、系が持つ弾性エネルギーや表面エネルギーなどを統合した全エネルギーをフェーズフィールドと呼ばれる亀裂を表現するオーダーパラメータ場の汎関数として表現し(図2)、その全エネルギーが減少する方向に変位場やオーダーパラメータ場を時間発展させ、亀裂進展を物理的に自然な形で表現可能とする計算手法である。フェーズフィールド法は、亀裂を場の関数として与えるため、亀裂生成が原理的に場の離散化などの計算スキームに依存することがなく、自然な亀裂進展を扱えるため、本研究の目的の達成のために最適な計算手法である。



$$\mathcal{F}[u, \phi] = \int dV [f^{\text{Elastic}}(u, \phi) + f^{\text{Barrier}}(u, \phi)]$$

u : 変位ベクトル場 f^{Elastic} : 弾性エネルギー密度
 ϕ : オーダーパラメータ場 f^{Barrier} : 表面エネルギー密度

図2: エネルギー汎関数に基づくフェーズフィールドモデリングの概念図。

生成が原理的に場の離散化などの計算スキームに依存することがなく、自然な亀裂進展を扱えるため、本研究の目的の達成のために最適な計算手法である。

課題(III) : 確率モデルによる破壊の現象論的モデルの構成

破片形状の統計量の時間発展を表現する理論を構築する。破壊は弾性パラメータや表面エネルギー場などのミクロな不均一性がマクロな破壊パターンに寄与するため、ミクロな量を直接マクロな統計則へ結びつけるのは困難である。そこで本研究では、Ito et.al (2014)で提案されている、破片が破壊されるまでにかかる時間(寿命)をポアソン過程に組み込んだ確率モデルにより乾燥亀裂の現象論的モデルを構築する。このモデルには破片サイズ・形状を引数として与えたときの破片の寿命の関数形が必要になるが、それを得るために本研究では破片形状を網羅的に与えた粘弾性モデルの有限要素法計算を行い、破片形状と寿命の関係をj得る。その関係を図3に示すような分布関数の従うマスター方程式に組み込み、破壊過程を抽象化した現象論的な破壊のモデルを構築する。

分布関数のマスター方程式

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -Q_{\text{out}} + Q_{\text{in}}$$

P (破片サイズ, アスペクト比, 凹凸度, ...) : 破片形状の諸量の分布関数

Q_{out} : 自分が割れる事で流出する存在確率

Q_{in} : 他が割れる事で流入する存在確率

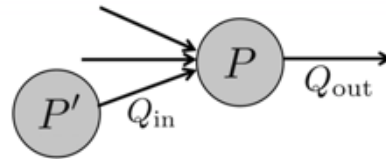


図3: 破壊過程を抽象化した確率モデルによる破壊の現象論的モデル。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果を3. 研究の方法であげた課題ごとにまとめる。

課題(I) : 乾燥破壊実験

課題(I)では、乾燥亀裂パターンが発展していく様子をデジタルカメラでインターバル撮影し、得られた写真の画像解析を行ない、個々の破片の形状をピクセルデータとして収集した。得られたピクセルデータを慣性モーメントに基づく解析により評価し、各破片のアスペクト比を分布データとして収集した。この分布関数の評価をペーストの質量変化ごとに行なうことで、アスペクト比分布の時間発展を得ることができた。その結果として、アスペクト比の平均値は等方的(0.5)ではなく白銀比(~0.7)に近いこと、アスペクト比分布は時間不変であることが示唆された。

課題(II) : 連続体による乾燥収縮亀裂モデルの開発

課題(II)では、課題(I)で得られた実験データと比較するためのシミュレーションモデルを開発した。既存の亀裂を伴うシミュレーションモデルでは、亀裂が進展する方向に制限を与えてしまう可能性があったが、本研究により新規に開発されたフェーズフィールド法による乾燥収縮亀裂のモデル化法により、物理的に自然な形で亀裂進展を扱うことができるモデルを開発することができた。このモデルのシミュレーションによって得られる亀裂パターンの時

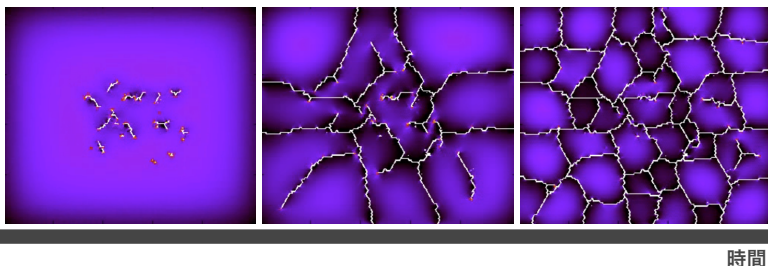


図4: フェーズフィールドシミュレーションによる亀裂パターンの時間発展。

間発展は実験で得られる亀裂パターンと良い一致が得られた(図4)。

課題(III)：確率モデルによる破壊の現象論的モデルの構成

課題(III)では、破片サイズ・破片の短軸の長さとの長軸の長さの比(アスペクト比)を網羅的に変えたシミュレーションから(図5)、破片形状が破壊の素過程に及ぼす影響を調べた。その結果、アスペクト比と破片が破壊されるのに必要な閾値応力が関連付けられ、その閾値応力は第1近似として短軸長さと長軸長さの調和平均と破片サイズの積の関数で表現できることがわかった。この関係を用いて、乾燥収縮によって内部応力が增大していく過程に破片形状に依存した破壊の素過程を組み合わせることで、乾燥収縮破壊の第1近似統計モデルを構築した。この統計モデルにより、破片サイズ分布は平均サイズでスケールリングすると時間に依存しない不変分布へ収束するという性質(動的スケールリング則)を持つこと、さらに、動的スケールリング則が成立する間は、アスペクト比分布が不変であることが示される。この結果は、課題(I)で得られた実験結果と整合する。

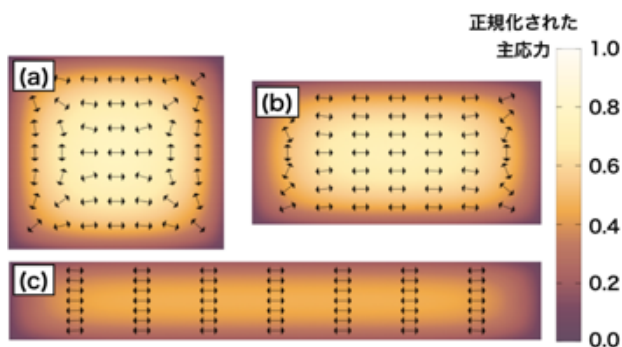


図5：破片内部に発生する応力の破片のアスペクト比依存性。矢印は各点での主応力方向。

これら課題(I)～(III)で得られた成果は、国内外の学会・研究会で公表され、現在論文による公表準備中である。

これら課題(I)～(III)で得られた成果は、国内外の学会・研究会で公表され、現在論文による公表準備中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Shin-ichi Ito, Hiromichi Nagao, Takashi Kurokawa, Tadashi Kasuya, and Junya Inoue, Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models, *Physical Review Materials*, in press.

[学会発表] (計 8 件)

1. Shin-ichi Ito, Akio Nakahara, and Satoshi Yukawa, Model Selection Based on Bayesian Inference that Uncovers Fundamental Dynamics of Desiccation Crack Patterns, American Physical Society March meeting 2019, Boston, MA, 3/2019.
2. Shin-ichi Ito and Satoshi Yukawa, Morphological properties of surface crack patterns due to volumetric shrinkage, American Geophysical Union, 12/2018.
3. Shin-ichi Ito and Satoshi Yukawa, Desiccation crack patterns based on phase-field modeling and their statistical properties, The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM2018), 11/2018.
4. 伊藤伸一, 長尾大道, 糟谷正, 井上純哉, 大規模データ同化に基づく鉄鋼材料組織予測と計測デザイン, 統計関連学会連合大会, 2018年9月.
5. 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, 2018年3月.
6. Shin-ichi Ito and Satoshi Yukawa, Statistical Modeling for Desiccation Cracking Based on Shape-Dependent Fragmentation Process, American Physical Society March meeting 2018, LA, 3/2018.
7. 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, 2017年9月.
8. 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, 統計関連学会連合大会, 2017年9月.

[その他]

ホームページ: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/ito/>

6. 研究組織

(2) 研究協力者

中原明生 (NAKAHARA, Akio)

湯川諭 (YUKAWA, Satoshi)

※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。