

令和 4 年 8 月 29 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03560

研究課題名(和文)ペーストの破壊：記憶を司る微視的構造と塑性変形の役割

研究課題名(英文) Fracture of paste: microstructures governing memory and roles of plastic deformation

研究代表者

狐崎 創 (Kitsunozaki, So)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：00301284

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)：粉体と液体を混ぜたペースト状の物質は、外から加えた摂動が記憶され、異方的な乾燥亀裂パターンが形成されるという特有の物性を示す。本研究では揺れや磁場の記憶を持つペーストの試料を作成条件を変えて系統的に調べ、大型放射光施設Spring-8のマイクロフォーカスX線CTを用いて3D画像を撮影した。画像解析の結果、外的な摂動の方向がペースト内部に異方的な粒子配列や粒子の方向として保存され、特に揺れの記憶では、粒子の密度揺らぎとして異方的な隙間構造が生じ、亀裂成長方向に影響を与えることがわかった。さらに数値的に異方的な隣接粒子配列を再現し、異方的な破壊特性と亀裂パターンの関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子密度が大きく測定や理論的解明が困難であったペースト状物質特有のレオロジーや破壊特性をミクロな構造から解明し、同時に乾燥途中のペースト内部の粒子や成長途中の亀裂をX線CTで可視化できることを示した。この結果は記憶効果の理解とともに、粒子構造の異方性から加えられた外力を推定する方法や、破壊特性の制御につながることを期待できる。

研究成果の概要(英文)：Paste-like mixtures of granular material and liquid exhibit the distinctive property of memorizing external perturbation and then forming anisotropic crack patterns. In this research we investigated samples of paste with such memory of shaking or a magnetic field, that were prepared in systematically chosen conditions, and obtained their 3D images by using micro-focus X-ray computerized tomography at the large synchrotron radiation facility Spring-8. Image analysis indicated that the direction of external perturbation is retained as the arrangement or directions of particles, in particular, density fluctuation forming the structure of interstices affects the direction of crack growth. We also reproduced anisotropic arrangements of neighboring particles numerically and revealed the relation between anisotropic fracture properties and crack patterns.

研究分野：非線形力学、パターン形成、ソフトマター物理学

キーワード：ペーストの破壊 記憶効果 塑性変形 レオロジー ソフトマター

1. 研究開始当初の背景

粉体微粒子と水などの液体が混合したペースト状の物質は固体体積分率の減少とともに液体的な状態から半固体の状態へと著しく物性が変化する。懸濁液の状態から降伏応力が発生し弾塑性流体へと変化するジャミング転移は近年精力的に研究がされているが、さらに固体体積分率が大きくなり塑性限界で半固体状態へと変化する過程は数値的な再現も実験的な測定も困難な状況であった。これに対して、近年の乾燥破壊の研究において研究分担者の中原らによって発見された様々は記憶効果は、弾塑性流体の状態でペーストに加わった揺れ、流れ、磁場などの摂動が粒子配置として記憶され、さらに塑性限界で自発的に発生する亀裂成長を支配するという、ペースト特有の物性が存在することを示していた。特に、揺れに関する記憶効果は、研究分担者の大信田らによって有限変形の弾塑性論が提案され、研究代表者らによって炭酸カルシウムペーストで応力異方性が実験的に確認された。さらに石松子ペーストや磁性ペーストでは揺れや磁場を記憶した状態での異方的な粒子配列をマイクロ X 線 CT (μ CT)を用いて直接観察できることがわかったため、その発展として本研究計画をスタートした。

2. 研究の目的

先行研究の結果に基づき、本研究計画では申請時に目的を以下のように設定した。

「ペースト中では外力や乾燥収縮で生じた塑性変形が亀裂成長を支配し、亀裂自身も新たな塑性変形を誘導する。このプロセスで何が起きているのかを、塑性限界近くのペーストの物性とともに見解する。

1. “ペーストの記憶”を担う粒子配列の微視的構造について、その性質と変化を解明する。
2. 塑性限界付近での降伏応力の変化と、乾燥および破壊過程による塑性変形を調べる。
3. 微視的な異方性が亀裂成長をどのように支配するか明らかにする。」

3. 研究の方法

揺れの記憶効果と磁場の記憶効果を中心に、ペースト内の粒子配列の直接観察を行った。先行研究より系統的な実験を広視野かつ高解像度で行うために、大型放射光施設 SPring-8 へ申請を2回行い、2018年度後期と2019年度後期にビームライン BL20B2 で μ CT の利用が認められた。揺れの記憶効果を調べるために用いたのは、記憶効果を示すことが明らかになった石松子（ヒカゲノカズラの花粉）のペーストであり、造影剤として塩化セシウム、ゲル化剤として少量の寒天を混ぜた。奈良女子大学の研究室において、固体体積分率、加振強度を決めて作成したペースト層を、寒天が固まらない高温環境で乾燥し、初期～亀裂形成が起きるまでのどこかの乾燥段階で温度を下げて固めた測定サンプル作成した。多数のサンプルを SPring-8 に持ち込み、独自に開発した生検パンチの円筒の刃を取り付けた治具で垂直に切断し、 μ CT で内部の粒子配置の3D データを得た。また磁場の記憶については研究分担者の中原の研究室で、磁場を印加後に乾燥させた磁性粒子のペーストを測定試料として作成した。またこれらの μ CT 用の測定試料と同じ作成条件で、どのような亀裂が形成されるかを実験的に調べるとともに、レオメーターを用いてペーストの物性測定を行った。一連の測定は、研究協力者の水口毅氏、松尾洋介氏、西本明弘氏らの協力を得て行った。得られた実験データは画像解析を行って解析し粒子配列の統計的な特徴を調べた。また離散要素法数値計算を行って実験結果との比較を研究分担者とともに行った。これらの数値解析と数値計算は研究代表者と西本氏が担当した。

この他、国際共同研究としてハンガリーの Ferenc Kun 博士らとともに、異方的な破壊条件を持つ系での乾燥亀裂パターン形成について数値モデルを用いた研究を、研究分担者の中原らとともに進めた。また関連して、研究代表者の研究室では大学院生とともにパラフィンを用いた冷却収縮に伴う亀裂形成の実験を開始している。

4. 研究成果

揺れの記憶の実験では、弾塑性を持つペーストに、水平振動によって降伏応力以上の歪応力が加わった場合に、乾燥後に異方的な亀裂が形成されることが知られている。亀裂は塑性限界付近まで乾燥した際に生じ、乾燥前に加えた振動に対して垂直な方向に伸びる平行亀裂が形成される。 μ CT で得られたデータの画像解析から、記憶効果を示す条件で作成した試料では、大きな歪み応力がかかるペースト下層部分を中心に、粉体粒子の配列に次の2種類の異方性が加振直後から生じていることがわかった。

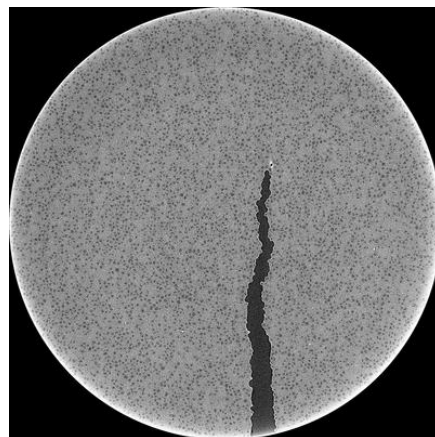


図 1: ペースト中を成長する乾燥亀裂の μ CT 画像の一断面。石松子粒

第一に、水平面内で加振方向で隣接粒子が減り垂直な方向で増える。これはごく短距離の異方性で、液晶分子の配向などで用いられる方向秩序変数として定量化できる。今回、離散要素法を用い数値計算により、弾性反発力で相互作用する粒子系に単純せん断を繰り返し与えることで定性的に再現できることがわかったため、粒子同士の衝突が原因で形成されたと考えられる。この結果は、ペーストに加えられたせん断変形の履歴を粒子配置から読み取ることができる可能性を示している。

第二に、粒子密度に揺らぎが生じて加振方向に垂直に伸びた粒子密度が小さい“隙間構造”ができる。この隙間は粒子の3D画像の distance map の相関として定量化でき、加振方向に粒子直径の3-5倍の幅を持つことがわかった。このような異方的な隙間構造は乾燥過程でも保存され、亀裂の成長方向に直接影響を与える。本研究では、図のようにペースト中で成長しつつある乾燥亀裂の先端部分を切りとって3次元的に可視化することに成功し、亀裂が乾燥前に加振によってできた隙間の一つに沿って成長している証拠を得た。また可視化された亀裂先端の形状は不安定な成長が起きていることを示唆しており、ペーストの乾燥破壊で特有に観察されている plumose 構造の発達と関連していると推定される。隙間構造の形成メカニズムは現在数値的な研究を継続中である。

このように石松子ペーストの揺れの記憶を調べることで、研究目的の 1. および 3. はかなり達成することができ、成果は論文として既に出版されている。一方、研究目的 2 については、歪みゲージを用いた応力測定を試みたが、石松子ペーストでは発生する応力が小さく、応力異方性の検出が困難であったため今後の課題として残った。

磁場の記憶効果については、 μ CT の測定により磁性ペーストでも印加された磁場の方向と個々の磁性粒子の方向の異方性と相関があることが明らかになった。この測定結果を受けて、国際共同研究をしているハンガリーの Ferenc Kun 博士らのグループが数値シミュレーションを行っている。また同グループが中心になって実施した共同研究で、破壊条件の異方性と形成される亀裂パターンの異方性の関係も数値的に明らかになった。

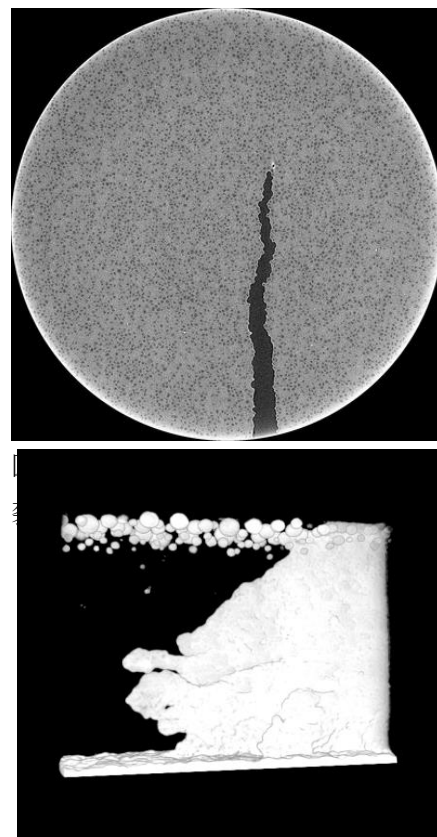


図 2: 乾燥亀裂先端の 3D 画像。白

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 So Kitsunozaki, Akihiro Nishimoto, Tsuyoshi Mizuguchi, Yousuke Matsuo, Akio Nakahara	4. 巻 105
2. 論文標題 X-ray computerized tomography observation of Lycopodium paste incorporating memory of shaking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 44902(1-11)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.105.044902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Roland Sztatmari, Zoltan Halasz, Akio Nakahara, So Kitsunozaki and Ferenc Kun	4. 巻 17
2. 論文標題 Evolution of anisotropic crack patterns in shrinking material layers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 10005-10015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D1SM01193F	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akio Nakahara, Tomoki Hiraoka, Rokuya hayashi, Yousuke Matsuo and So Kitsunozaki	4. 巻 377
2. 論文標題 Mechanism of memory effect of paste which dominates desiccation crack patterns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A	6. 最初と最後の頁 20170395(1-13)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2017.0395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 中原明生、内田恭輔、笹川将、松尾洋介、狐崎創、フェレンツ・クン、ルーカス・ゲーリング、水口毅
2. 発表標題 磁性ペーストの記憶と亀裂形成への影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中原明生
2. 発表標題 Morphological diversity in crack pattern of dried colloidal suspension induced by memory effect
3. 学会等名 日本分子生物学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 狐崎創、西本明弘、中原明生、松尾洋介、水口毅
2. 発表標題 揺れの記憶を持つ石松子ペーストの μ X CT(II) 異方的構造の解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚香乃子、狐崎創
2. 発表標題 冷却によるパラフィンの亀裂の準静的な成長と分岐について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 狐崎創、西本明弘、河原敏男、中原明生、松尾洋介、水口毅
2. 発表標題 揺れの記憶を持つ石松子ペーストの μ X-CT観察
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akio Nakahara, Yousuke Matsuo, So Kitsunezaki, Ferenc Kun and Lucas Goehring
2. 発表標題 Controlled crack patterns produced by memory effect of paste
3. 学会等名 ACCMS: International Conference on Materials Genome (ICMG-2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akio Nakahara
2. 発表標題 Transition in the crack pattern resulting from the memory effect of paste, Fracture and Geomorphology: Osaka workshop for nonequilibrium physics
3. 学会等名 Fracture and Geomorphology: Osaka workshop for nonequilibrium physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原明生, 笹川将, 内田恭輔, 松尾洋介, 狐崎創, Ferenc Kun, Lucas Goehring
2. 発表標題 磁性ペーストのメモリー効果と破壊制御のメカニズム
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akio Nakahara
2. 発表標題 Memory of paste and its effect to control crack formation
3. 学会等名 Nottingham Trent University Seminar of joint research: Royal Society / JSPS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 So Kitsunezaki, Chika Yamanaka
2. 発表標題 Dynamics of a solidification front made by invasion of fluid with a different temperature
3. 学会等名 Nottingham Trent University Seminar of joint research: Royal Society / JSPS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kitsunezaki
2. 発表標題 Dynamics of a solidification front made by invasion of fluid with a different temperature
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling(Osaka) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Nakahara
2. 発表標題 Memory effect of paste and its mechanism to remember vibration, flow and magnetic field
3. 学会等名 9th Hungary Japan Bilateral Workshop on Statistical Physics of Breakdown Phenomena (Univ. of Debrecen) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Nakahara
2. 発表標題 Mechanism of controlled crack formation by memory effect of clay paste
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling(Osaka) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Nakahara, T. Hiraoka, R. Hayashi, Y. Matsuo and S. Kitsunozaki
2. 発表標題 Mechanism of memory effect of paste which controls crack formation
3. 学会等名 International Conference on Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations(Univ. of Tokyo) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中原明生、平岡智輝、林緑也、松尾洋介、狐崎創
2. 発表標題 ペーストのメモリー効果のメカニズム解明実験
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Nakahara
2. 発表標題 Non destructive analysis to investigate the memory effect of magnetic paste
3. 学会等名 Okinawa Workshop on Fracture Dynamics and Structure of Cracks (HAS JSPS Joint Research Project) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原明生、平岡智輝、林緑也、松尾洋介、狐崎創
2. 発表標題 ペーストのメモリー効果のメカニズム解明のための記憶の書き換え実験
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大信田丈志
2. 発表標題 横変位相関の符号持続長の密度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

論文・発表リスト http://www.complex.phys.nara-wu.ac.jp/~kitsune/paper/

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
研究分担者	大信田 丈志 (Ooshida Takeshi) (50294343)	鳥取大学・工学研究科・助教 (15101)	
研究分担者	中原 明生 (Nakahara Akio) (60297778)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	

	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
研究協力者	西本 明弘 (Nishimoto Akihiro)	関西大学・人間健康学部・非常勤講師 (34416)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	松尾 洋介 (Matsuo Yousuke) (40611140)	日本大学・理工学部・非常勤講師 (32665)	
研究協力者	水口 毅 (Mizuguchi Tsuyoshi) (80273431)	大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授 (24405)	
研究協力者	大槻 道夫 (Michio Otsuki) (30456751)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授 (14401)	

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		
英国	ノッティンガム大学(Lucas Goehring博士)		
ハンガリー	科学アカデミー原子核研究所 (Atomki) Prof. Ferenc Kun		