

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540452

研究課題名(和文)ペーストと破壊の相互作用

研究課題名(英文) Interaction of paste and fracture

研究代表者

狐崎 創 (Kitsunozaki, So)

奈良女子大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00301284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：固体微粒子と液体からなる懸濁液の多くは乾燥とともに降伏応力が生じて塑性流体となり、その後塑性限界付近で亀裂を生じる。亀裂成長への塑性の影響、記憶効果で生じる異方性、乾燥によって破壊が生じる条件、を解明する目的で研究を行った。理論的には、乾燥と破壊を非線形弾性格子上のインベーションパーコレーションとして統一的に扱う数理モデルを提案し破壊が生じる条件を示した。また実験では圧縮試験を行うとともに、典型的なシアシックニング流体である澱粉ペーストにも記憶効果があることを見い出した。またそれを利用して、澱粉ペーストに炭酸カルシウムペーストとは定性的に異なる亀裂速度の層厚依存性があることを確かめた。

研究成果の概要(英文)：Drying changes slurries of fine solid particles and liquid to plastic fluids with appearance of finite yield stresses and generally creates cracks in the vicinity of the plastic limit. The purpose of this research is to clarify the effect of plasticity to crack growth, the anisotropy of material properties induced by the memory effect, and the fracture condition of drying paste. A mathematical model based on invasion percolation on a nonlinear elastic lattice was proposed to understand drying and cracking in a unified manner and the fracture condition was given theoretically. We carried out compression tests in experiments and found the memory effect for starch paste, which is one of typical shear thickening fluids. We also confirmed the dependency of crack speed on the layer thickness for starch paste, which was qualitatively different from that for calcium carbonate paste.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：乾燥破壊 亀裂成長速度 塑性変形 ペーストの記憶効果 レオロジー 粉体の力学 パターン形成
非線形動力学

1. 研究開始当初の背景

乾燥亀裂は泥やペンキなどで日常的にみられる現象であるが、間隙流体の蒸発に伴い液体から固体へと物性が変化する途中で生じる破壊は、通常の固体材料や化学ゲルなどとは異なる以下のような特徴を持つことがわかってきた。

- (1) ペーストでは非常に遅い亀裂成長が起こり、塑性変形と相互作用している可能性がある。研究代表者は、炭酸カルシウムペーストを使った実験で、塑性限界付近のまだ柔らかい状態で遅い亀裂成長が生じ、その速度は乾燥速度に依存して決まることを見出した。数理モデルの解析から、これらの特徴は大域的な塑性緩和と亀裂成長の競合で説明できることがわかったが、亀裂速度と物性を同じペーストで測定した例がなく検証が困難であった。また、先行研究の一つに、澱粉ペーストを用いた実験があり炭酸カルシウムペーストに比べて数百倍亀裂速度が大きく、特徴が異なることが示唆されていたが、実験条件が十分にコントロールされていないという問題点があった。
- (2) 乾燥前の液体的な状態のペーストに振動などの外力を短時間加えると、乾燥後に方向性のある亀裂が優先的にできる。この記憶効果は研究分担者の中原らによって発見され、塑性を持つペーストに降伏応力以上の外力を加えたときに生じることがわかり、連携研究者の大槻、研究分担者の大信田によってマクロな理論が提案されるなど、国内外で関連する研究が進められた。近年はペーストの種類や条件によって異なるタイプの記憶があることが見つかったこともあり、記憶の正体や異方的な亀裂が生じるまでの過程を解明する手掛かりが求められた。
- (3) ペーストの多孔質物性が亀裂の発生やパターン形成に影響する。これらはコロイドやゲルの破壊条件に関する工学的な研究や、連携研究者の水口、研究協力者の西本、および研究代表者による澱粉ペーストの柱状節理亀裂の研究など多くの事例でわかってきた。一方、乾燥による破壊の基礎的な物理過程に関する理解はなお不十分で、乾燥破壊の条件が多孔質物性とどのように関連しているかを議論することができなかった。

2. 研究の目的

本研究は、ペーストの乾燥破壊の物理的なメカニズムを物性測定と理論を通して解明することを目的としている。背景で述べた3点に対応して以下の目的で研究を進めた。

- (1) これまで調べた炭酸カルシウム以外のペースト、主として澱粉ペーストに対して乾燥破壊実験を行い、破壊条件と亀裂成長速度を調べるとともに、破壊時の弾塑性応答の物性データを得る。異なるペーストの亀裂成長の特徴を定量的に比較することで乾燥破壊のメカニズムを理解する。
- (2) 振動によってペーストに生じる物性の異方性を測定し、破壊物性との関連を明らかにすることで、記憶効果の解明への手掛かりを得る。
- (3) 亀裂の成長過程と乾燥過程がどのような相互作用をしているかを理論的に考察し、ペーストが乾燥により破壊する条件を解明する。

3. 研究の方法

実験および理論的手法を併用して研究を進めた。

目的(1)のために乾燥破壊における亀裂の成長速度を測定する実験を行った。実験では温度や乾燥速度を制御した環境中で亀裂成長を撮影して画像解析を行う。従来の方法に改良を加え、亀裂速度が大きい澱粉ペーストの亀裂にも利用できる方法を開発し、亀裂速度の厚さ依存性や乾燥速度依存性を調べた。また、引張圧縮試験機を導入して亀裂が形成される体積分率付近でのペーストの変形特性を測定した。

目的(2)は、記憶効果があることが確認されているペーストを用いて半固体のサンプルを多数作成し、引張圧縮試験を用いて破壊に至るまでの物性の異方性の検出を試みる測定を行った。また(1)、(2)ともに、必要に応じて研究分担者の中原の所有するレオメーターを用いて、破壊より前の柔らかい塑性流体の状態でのレオロジー測定を行った。

目的(3)は理論研究として、新しい数理モデルを提案して、数値計算と解析を行った。従来から工学的に使われてきた理論は、多孔質の乾燥条件と線形弾性体の破壊条件を別々に使い、乾燥と亀裂の相互作用は平均的な圧縮を考慮することに留まっていた。本研究では乾燥と破壊を空気の侵入プロセスとして同等に扱う視点で理論を構築した。

4. 研究成果

本研究では初年度前半に、引張圧縮試験機を購入して物性測定の方法を確立した上で実験を進めることを計画していた。しかし、東日本大震災に伴う交付決定の遅れ、実験で要求される精度を満たすための試験機の改造、納品までの各種手続きの遅れなどが重なったため、実際の試験機の納品が初年度末にず

れ込んだ。そのため計画を変更し、次年度以降に予定した目的(3)の理論的研究を実験的研究に優先する方針としたため、(1),(2)の計画はやや遅れることとなった。

(1) ペーストの亀裂成長に関しては実験により以下の成果を得ることができた。これらの成果は物理学会等で発表済みである。ただし、レオメーター測定や追加実験が必要であるため、論文発表には今後いくらか時間を要する。

固体微粒子として炭酸カルシウム、塩を添加した炭酸カルシウム及び炭酸水酸化マグネシウム、澱粉などを使って水とのペーストを作り、乾燥破壊の実験を行った。分担者の中原らによる降伏応力の測定データ、および、球面の治具を用いた圧縮試験の結果から、いずれのペーストも亀裂が現れるのは塑性限界近傍の含水量であることを確認した。

澱粉ペーストの特徴である速い亀裂成長を調べるために、記憶効果と電気的な測定による破壊検出を利用して、破壊過程を高速連写する方法を開発した。この方法で測定したところ、澱粉ペーストでは亀裂速度が厚さに対して増加し、炭酸カルシウムペースト等とは逆の依存性を持つことを確認できた。これは澱粉ペーストでは塑性緩和が起こりにくいことに対応していると推測される。

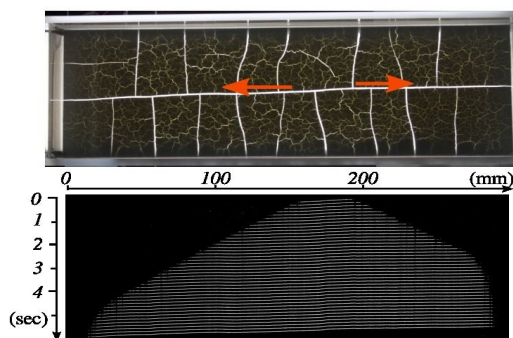


図1 透過光で撮影した澱粉ペーストの乾燥後の亀裂パターン(上図)と、測定で捉えた初期亀裂の時間発展の様子を時間をずらして並べた画像(下図)。

(2) 記憶効果に関する実験は以下の進展がみられたが、異方的な物性検出に関しては実験が難航している。

これまで炭酸カルシウム等の粘土の成分からなるペーストで主に見つかった記憶効果が、澱粉ペーストでも生じることがわかった。学生の協力も得て相図を作成した結果、炭酸カルシウムペーストと本質的に同じ“揺れの記憶”であることが明らかになった。この成果は

1) で述べた亀裂速度の測定で直線的な亀裂を作るために利用された。また、研究分担者らによって記憶効果を利用して亀裂生成位置を制御する研究が行われた。

異方性の検出のため、研究分担者の中原らとともに、板ばねによる応力測定、曲げ試験による弾性および破壊特性の測定と統計的な解析を試みたが、サンプル誤差が大きく、期待された結果が得られないことがわかった。現在は方法を変えて検出を試みている。

(3) 乾燥過程における亀裂形成の理論に関しては、乾燥と破壊を統一的に扱った数理モデルを、変形を考慮した非弾性格子上のインベーションパーコレーションとして提案した。このモデルは粘弾性体とみなせる多孔質中で間隙液体の蒸発で負圧が増加する過程の熱力学を基礎とし、非線形弾性を導入して要素間に凝集力がない系を考慮することで、乾燥過程と同時に破壊過程を再現する。数値計算によって、通常のインベーションパーコレーション(系全体での乾燥)から、1次元的なインベーション(破壊)への転移が、粒子径、系の不均一性、弾性率などの変化で起こることが明らかになった。このような転移は、散逸を考慮した上で自由エネルギーに対してGriffith理論と類似の考え方を適用することで説明でき、破壊条件を決める1つの無次元量を与える。この成果は国際会議等で報告し、論文として発表した。

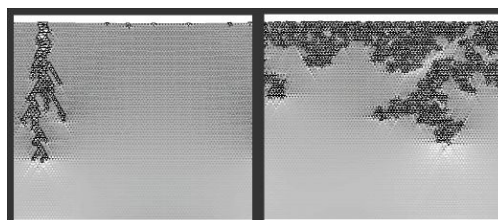


図2 蒸発が上の自由面から起きるペースト層の断面に対応する数値計算の結果。非線形弾性格子上のインベーションパーコレーションを用いると、系の不均一性が大きくなると、空気の急激な一次元的侵入(破壊に対応、左図)から、漸進的な面的侵入(通常の乾燥に対応、右図)への転移が起きることがわかる。

その他、本研究の一環として国内外の研究者との議論および成果発表を行った。特に研究代表者が参加した日印二国間共同研究および日洪二国間共同研究の外国人研究者の来日等に合わせて研究交流を行った他、研究分担者らとともに奈良女子大学および鳥取大学での研究会を主催した。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

狐崎 創、Cracking condition of cohesionless porous materials in drying processes、Physical Review E、査読有、87巻、2013、052805-1-10、DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052805

中山 寛土、松尾 洋介、大信田 丈志、中原 明生、Position control of desiccation cracks by memory effect and Faraday waves、European Physical Journal E、査読有、36巻、2013、1-1 - 1-13、DOI: 10.1140/epje/i2013-13001-8

中原 明生、松尾 洋介、Control of crack pattern using memory effect of paste、Journal of Physics: Conference. Series、査読有、319巻、2011、012014-1-10、DOI:10.1088/1742-6596/319/1/012014

[学会発表](計7件)

佐々木 ありな、中原 明生、松尾 洋介、狐崎 創、澱粉ペーストの揺れの記憶、日本物理学会 第69回年次大会、2014年03月30日、東海大学

狐崎 創、澱粉ペーストの乾燥破壊における亀裂成長、日本物理学会 第69回年次大会、2014年03月28日、東海大学

狐崎 創、中原明生、松尾洋介、澱粉ペーストの Type I 亀裂、日本物理学会 2013年秋季大会、2013年9月25日、徳島大学

狐崎 創、Fracture condition of drying paste、1st International Workshop on Wetting and evaporation: Droplets of pure and complex fluids、2013年6月17日、Polytech'Marseille Engineering School, Marseille, France

狐崎 創、ペーストの乾燥過程での破壊条件、日本物理学会 第68回年次大会、2013年3月27日、広島大学

狐崎 創、Drying crack in cohesionless porous materials、The international symposium "Self-organization and emergent dynamics in active soft matter"、2013年2月19日、京都大学

狐崎 創、弾性変形を伴うペーストの乾燥過程(II)、日本物理学会 2011年秋季大会、2011年9月24日、富山大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.complex.phys.nara-wu.ac.jp/~kitsune/paper/paper.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

狐崎 創 (KITSUNEZAKI, So)
奈良女子大学・研究院自然科学系・准教授
研究者番号:00301284

(2)研究分担者

中原 明生 (NAKAHARA, Akio)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号:60297778

大信田 丈志 (OOSHIDA, Takeshi)
鳥取大学・工学研究科・助教
研究者番号:50294343

(3)連携研究者

大槻 道夫 (OTSUKI, Michio)
島根大学・総合理工学研究科・講師
研究者番号:30456751

水口 毅 (MIZUGUCHI, Tsuyoshi)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号:80273431