

機関番号：14602

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2010

課題番号：19740240

研究課題名 (和文) 非常に遅い変形過程における粉体のレオロジー

研究課題名 (英文) Granular rheology in slow deformation processes

研究代表者 狐崎 創 (KITSUNEZKI SO)

奈良女子大学・大学院人間文化研究科・准教授

研究者番号：00301284

## 研究成果の概要 (和文)：

粉体のペーストの乾燥破壊において応力と亀裂成長速度の測定を行い、亀裂成長が動的破壊の特徴を示し乾燥速度依存性があることを見つけた。間隙水圧と塑性変形を考慮した数理モデルの解析により亀裂成長と塑性緩和が競合して乾燥速度依存性が生じている可能性を示した。また澱粉ペーストの柱状節理状亀裂に関する研究をまとめるとともに、乾燥過程と破壊の微視的相互作用を調べるインバージョンパーコレーションモデルを提案した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Experiments on drying fracture in granular paste revealed that crack growth is dynamic fracture with drying rate dependence. Theoretical analysis indicated that competition between crack growth and plastic relaxation can cause such dependence. The studies on columnar joints of starch paste and an invasion percolation model with fracture processes were also reported.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,100,000	660,000	3,760,000

研究分野：非線形動力学

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、亀裂速度、塑性変形、レオロジー、粉体ペースト

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は粉体のレオロジーと破壊を調べることをテーマとしている。

研究開始当初、粉体の物理は気体状態から高密度の乾燥粉体に進み、固体状態での応力に様々な履歴現象が見つかった。研究対象は水などの流体を含む粉体に広がり、粉体

ペーストに短時間降伏応力以上の外力を与えておくと乾燥による破壊の仕方を制御できる現象が中原らによって発見され、非平衡統計力学でのガラス状態の長時間記憶の出現との関連が議論され始めていた。

一方、破壊現象はグリフィスによる基礎理論の確立以降は主に工学分野で破壊の防止を主な目的として金属やガラス、岩石のよう

な硬い素材を中心に進展してきたが、近年は高分子ゲルや粉粒体、生物の作る素材のようなソフトマターの破壊に対しても関心が広がってきた。同時に物理での非線形動力学の発展に伴い破壊が起きた後の亀裂のダイナミクスが研究されてきている。

このような背景の中で研究代表者は粉体中にできる断層形成過程や亀裂パターンの研究が行っていたが、粉体ペーストの乾燥破壊における亀裂進展が通常の物質に比べて極めて遅いことに興味を持った。ペースト中の亀裂成長に関してはコーヒーと水の混合物や澱粉を用いた初期の2~3の先行研究から定常成長することと粉により速度が大きく異なることが示唆されていたがコントロールされた条件での測定はなかった。

粉体は離散要素系であるがゆえに、すでに至る所破壊している物質でありその変形には摩擦や粘性による散逸が必然的に伴う。ミクロな統計力学的な立場からの研究とともに、このような物質におけるマクロなレオロジーと破壊の関係をj知ることが重要だと考え本研究をスタートした。

## 2. 研究の目的

粉体系における非常に遅い変形過程での破壊の動力学を調べ、摩擦と粘性の散逸メカニズムが粉体のレオロジーに果たす役割を実験および理論・数値計算を通して解明する。本研究の具体的な目的は以下の3つに分類できる。

第一に水などの流体を含む粉体ペーストにおいて乾燥収縮で生じる亀裂成長の特徴を調べ通常の物質の破壊と違いがあるかどうか実験を通して明らかにする。特に一様な薄層に生じる亀裂が準静的破壊なのか強い散逸を伴う動的破壊なのかを明らかにし、破壊条件や亀裂進展速度がどのように決まっているかを調べる。このような乾燥破壊は非常に遅い体積収縮によって発生するため、長い時間スケールで起きるレオロジー過程が遅い亀裂成長と相互作用している可能性がある。

第二に乾燥に伴うペースト内部の流体分布の変化とそれが亀裂形成に影響を与える影響を明らかにする。代表者は別に澱粉ペーストでの柱状節理状亀裂の形成に関して他の研究者と共同研究を行ってきたのでその成果をまとめるとともに、より一般に粉体の乾燥と変形の微視的過程を調べる数理モデルを作る。

第三に乾燥した粉体と流体を含む粉体を比較し、摩擦、粘性散逸、凝集力の有無がどのように変形と破壊の過程を変えるかを調べる。

以下に述べるように本研究ではペーストの亀裂成長に関して興味深い特徴が見つかり流体を含むペーストを主な対象と定めたため、結果的に上記の第一、第二の目的が中心となった。

## 3. 研究の方法

- (1) 粉体ペーストの乾燥破壊過程を調べる実験を行い亀裂の成長速度を測定した。一定温度で低湿度に保った空気中で質量をモニターしながら試料を乾燥させる。亀裂形成過程を一定時間間隔で撮影し、撮影画像を開発したプログラムで処理して個々の亀裂の成長速度を計測した。空気の対流強度や透湿性のあるセロハンフィルムを変えることで乾燥速度をコントロールした。粉体としては主に炭酸カルシウムの微粉末を用い、水を混ぜて攪拌・真空脱泡して作ったペーストの薄層を試料として用いた。また水にグリセリンを混ぜることで間隙流体の粘性の影響を調べた。
- (2) 粉体ペーストが破壊する際の状態を調べるために、乾燥に伴うペーストの厚さの変化をレーザー変位計で測定し、ペースト層内に発生する応力を板ばねの変位測定から見積もった。この他、外からの引っ張りによるペーストの破壊と乾燥破壊の違いや、ペーストの亀裂進展に伴って破断面に形成される plumose structure と呼ばれる羽毛状の模様の特徴を調べた。
- (3) ペーストの変形、破壊過程における間隙水圧と粘性・塑性の効果を理論的に考察した。亀裂パターンの研究に使われてきたバネ切りモデルとよばれる弾性体モデルにこれらの効果を組み入れた数理モデルを提案し解析的・数値的方法によって亀裂進展メカニズムを調べた。
- (4) 柱状節理状の亀裂構造の形成に関する共同研究では、土壌中の水分移動モデルとバネ切りモデルを組み合わせることで現象が数値的に再現できることがわかった。そこで初期の粉体の乾燥過程における弾性場と流体場の相互作用に関して、パーコレーションモデルに基づく数理モデルを作り、数値計算を行って乾燥初期の空気の侵入過程と破壊の微視的な関係を調べた。

なお(2) の plumose structure の特徴を調べる実験と、(3)のパーコレーションモデルの数

値計算は指導する大学院生との共同研究である。

#### 4. 研究成果

ペーストの乾燥破壊で生じる亀裂の成長は通常の固体に比べて非常に遅いが動的破壊の特徴を示し、その速度は破壊時点の乾燥速度によって決まることがわかった。実験結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 一定環境下で亀裂はほぼ定常成長しており、亀裂の成長速度に非線形な乾燥速度依存性がある。乾燥を止めるとその間成長を停止することから、長時間の乾燥履歴による物性の変化ではなくその時の乾燥速度に応じた速度で成長していることがわかる。
- (2) グリセリンを混ぜて粘性をあげると同じ乾燥速度でも亀裂速度が顕著に遅くなる。これは亀裂成長が粘性散逸の影響を強く受ける動的破壊であることを示唆している。
- (3) 厚さと応力の測定から亀裂が最初に形成される時点でペーストは capillary 状態であることがわかる。層内に発生する応力は含水量の関数として決まり、乾燥速度にはよらない。従って、乾燥速度は応力の増加率を決めている。
- (4) 破断面にできる羽毛状の模様は乾燥初期にできた亀裂ほど明瞭で、乾燥後のペーストに外力をかけて破断したときに生じる脆性破壊では全く形成されない。またペーストに外力として引っ張りを加えても乾燥破壊と同様の亀裂形成は生じない。

以上の実験結果はペーストの乾燥破壊では収縮によって発生した応力そのものよりも応力の増加率で亀裂成長が決まっていることを示唆している。理想的な粘弾性体層に生じた亀裂は、破壊までに層内に蓄えられた弾性エネルギーに駆動されるから、応力の増加が止まっても亀裂成長が止まることはない。従って、亀裂速度の乾燥速度依存性はペーストが単純な粘弾性体でないことを示している。

数理モデルによる解析では、一様乾燥を仮定してもペースト中で塑性変形が起きるならば、亀裂成長と塑性緩和が競合して亀裂速度に乾燥速度依存性が生じる可能性があることを示した。

- (1) ペースト内部の粉体は乾燥とともに増加する負の間隙水圧によって破壊し、亀裂形成時のペーストはまだ液体と固体

の中間的な状態にある。間隙水圧と塑性変形を考慮してバネモデルをもとに自由エネルギーと散逸関数を構成し、一様乾燥するペーストの薄層中の亀裂進展に対する粘塑性をもつ弾性体の基礎方程式を導出した。このモデルでは Griffith 理論と組み合わせることで亀裂先端での破壊条件が自然に導出できる。

- (2) 得られた方程式は単調に間隙水圧が増加する場合に定常進行解をもつ。特に降伏応力が無視できる場合には Winner-Hopf 法で解析解を求めることができ、応力増加率が閾値を超えると亀裂が成長し、その速度は応力に対して増加関数になっていることが示せる。また Bingham 型の構成方程式で降伏応力がある場合にも亀裂速度を理論的に推定できることを数値計算で確認した。

澱粉ペーストでは固い底の上で収縮することで生じる準2次元的な亀裂以外に、内部の収縮率の差で多角形の柱状の亀裂が3次元的に形成される破壊が見ついている。これは空気が粉体内部に侵入した乾燥後期に表れる破壊であり粉体粒子間にできた水の架橋による凝集力が原因と考えられる。収縮率の差は粉体内部の含水量の違いによって生じるが、共同研究で数理モデルを作成し数値計算した結果、このような含水量の違いは多孔質内の水と水蒸気の移動が非線形拡散によって生じることがわかった。

乾燥初期には、乾燥と亀裂はペースト内の粉体にとってともに粒子間隙に空気が侵入する過程である。乾燥と亀裂の関係を弾性変形する格子上的インバージョンパーコレーションとしてモデル化し数値計算した結果、乾燥による不均一性が破壊を誘導し亀裂による応力集中が乾燥を促進するという結果が得られた。

#### 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9件)

- ① 狐崎創、Crack Growth in Drying Paste、Advanced Powder Technology、査読有、22巻、2011年、印刷中につき未定
- ② 狐崎創、ペーストの乾燥破壊とレオロジー、表面、査読無、48巻、2010年、343~354
- ③ 狐崎創、Crack Growth and Plastic Relaxation in a Drying Paste Layer、Journal of the Physical Society of

Japan、査読有、79 巻、2010 年、124802

- ④ 狐崎創、ペーストの乾燥による亀裂成長とパターン形成、粉体工学会誌、査読有、46 巻、2009 年、664~670
- ⑤ 狐崎創、Crack Propagation Speed in the Drying Process of Paste、Journal of the Physical Society of Japan、査読有、78 巻、2009 年、064801
- ⑥ 西本明弘、水口毅、狐崎創、デンプン柱状節理、日本物理学会誌、査読有、64 巻、2009 年、758~762
- ⑦ 西本明弘、水口毅、狐崎創、Numerical Study of Drying Process and Columnar Fracture Process in Granule-water Mixtures、Physical Review E、査読有、76 巻、2007 年、016102

[学会発表] (計 4 件)

- ① 伊藤華子・狐崎創、弾性変形を伴うペーストの乾燥過程について、日本物理学会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学  
(※東日本大震災のため未開催・発表扱)
- ② 狐崎創、Drying-Rate Dependence of Crack Speed in a Thin Layer of Paste、The 18th European Conference on Fracture、2010 年 8 月 30 日、Dresden, Germany
- ③ 狐崎創、ペーストの乾燥破壊における断面パターン、日本物理学会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学
- ④ 狐崎創、ペーストの乾燥破壊での亀裂進展のメカニズム、日本物理学会、2009 年 9 月 28 日、熊本大学

[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

<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・大学院人間文化研究科・准教授

研究者番号：00301284