様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月 ２８ 日現在

機関番号： ３２６６５
研究種目： 基盤研究(B)
研究期間： 2010～2014
課題番号： ２２３４０１１２

研究課題名（和文） 塑性流体のレオロジーを用いた破壊の制御

研究課題名（英文） Control of crack formation using rheology of plastic fluid

研究代表者
中原　明生（NAKAHARA, Akio）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：６０２９７７７８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　15,400,000円

研究成果の概要（和文）：高濃度固液混合材料（ペースト）は揺れや流れなどの力学的な外場を記憶し、その記憶は乾燥時に現れる亀裂の進行方向に影響を与える。ペーストの記憶効果のメカニズムを解明し、破壊の制御への応用を目指したところ、流れの記憶の形成のためには粒子間の相互作用が主に引力である必要があることが分かった。力学的な外場だけでなく、磁性ペーストは磁場を記憶し、磁場の記憶も亀裂の進行方向に影響を与えることも分かった。ペーストに鉛直振動を加えることで揺れを局在化させ、亀裂の発生位置も制御できるようになった。外場を記憶したペーストに超音波を照射して記憶を消去し、材料物性として均質で破壊しにくい状態にすることにも成功した。

研究成果の概要（英文）：Densely packed colloidal suspension, called paste, remembers the direction of mechanical motion, such as vibration and flow, and, if the paste is dried, its memory is visualized as the direction of crack propagation. In this project, we tried to reveal the mechanism of memory effect of paste and applied the memory effect to control crack formation.
We found that the attractive force between particles is necessary for the memory of flow. Magnetic paste remembers the direction of the magnetic field and the desiccation cracks run along the magnetic field. By applying a vertical vibration to the paste, we came to control the position of crack formation by localizing the area of horizontal vibration. Finally, we succeeded in erasing the memory of external field in paste by applying ultrasonic waves to the paste. As the paste becomes more homogeneous, irradiation of ultrasonic waves to a paste increases the breaking strength of the paste.

研究分野： 統計物理学

キーワード： 破壊の制御　レオロジー　メモリー効果　パターン形成　コロイド

１．研究開始当初の背景

(1) 近年時折報道される集中豪雨による土砂の崩壊や地震による破壊などは、もしそれらを予測し制御できれば損害を最小限に抑えられる可能性のある極めて重要な問題である。本研究開始数年前に研究代表者により「塑性流体であるペーストは流れや揺れなどの外場を記憶し、その記憶はペーストを乾燥破壊させれば亀裂パターンとして視覚化される」という現象が発見された（2005～2006 年)。この現象を利用すると、ペースト内の記憶を書き換えることによって亀裂の伝播方向を制御する、という工学的な応用ができる可能性も研究代表者により提案された。本研究では、ペーストの記憶形成のメカニズムを解明するとともに、ペーストの流れや揺れなどの記憶効果を利用することにより具体的な破壊の新制御法の開拓を目指すことにした。

(2) 本研究グループの「ペーストを力学的に揺すって記憶を刷り込ませて破壊を制御する」というアイデアは世界的にも斬新なものであり、我々の研究に続いて「ペーストに電場をかけて破壊を制御する」研究を始めたインドのグループの研究（2007 年）と一緒にアメリカ物理学会発行の Physics Today 誌の 2007 年 9 月号にて紹介されるとともに、国際粘土会議でも基調講演の招待講演をすることとなった。その後フランスのグループも磁性体ペーストに磁場を加えて破壊を制御することに成功し(2008 年)、外場を利用した破壊の制御法の研究が世界的に流行し始めた。我々の研究成果はその先駆けとなったものであり、新分野を切り開いたものと自負している。

２．研究の目的

(1) 本研究においては、塑性流動をするペーストが「揺れ」と「流れ」を記憶するメカニズム、および、「揺れの記憶」から「流れの記憶」への転移現象を実験・理論・シミュレーションの３手法を通して解明し、破壊の制御へと発展させていくことを目指した。

(2) 「揺れの記憶」は粒状粒子で構成されるペーストが幅広く持つ普遍的な性質であるのに対し、「流れの記憶」は帯電していない板状粒子で形成されるペーストが主に持つ特殊な性質であることが予備実験により分かっていた。「流れの記憶」の発現に必要な要因は粒子の形状なのか粒子間の相互作用なのかきちんと調べる必要がある。具体的には、様々な形状・サイズ・分布の粒子を用い、またペーストに微量の塩を添加し、電離イオンによる遮蔽効果（塩析効果）を利用して粒子間の相互作用の強度を調整することによって、粒子の形状・サイズ・分布・相互作用が記憶の形成や転移現象に及ぼす影響について調べる。

(3) 理論的には、これまでの研究で弾性体に塑性変形を加えて「揺れの記憶」の形成メカニズムを説明することに成功しているものの、「流れの記憶」のメカニズムは未だ理論的には解明されていない。粒子の形状や粒子間相互作用をパラメーターとしたコロイド・サスペンションのレオロジーのシミュレーションをおこない、揺れや流れなどの外場がコロイド・サスペンション中の構造変化や記憶の形成に及ぼす効果を解明する。

(4) これまでの研究ではペーストの揺れ（水平振動）や流れの記憶効果を用いて亀裂の伝播方向を制御していたが、亀裂の発生位置までも制御することは困難であった。本研究では鉛直加振という新たな外場を加える手法を用い、鉛直加振によって生じたファラデー波の形状に応じて水平振動を局在化させることで、亀裂の発生位置制御まで可能にしていく。

(5) ペーストが印加された電磁場などの記憶を持つことができるか調べる。力学的な外場とは違い、電磁場は直接粒子自体に力を及ぼすので、力学的な外場の記憶と電磁場的な外場の記憶は性質が異なる可能性がある。実際に、もし電磁場の記憶効果があれば破壊の制御にも応用できるか検討する。

(6) すでに外場を記憶したペーストに対し、その記憶を消去できるか研究する。当初は加熱して熱揺らぎで記憶を消去する手法を想定したが、過熱をおこなうと均一に乾燥させることが難しいため、超音波照射による内部振動で記憶を消去できるか調べる。

(7) もし超音波照射により記憶の消去が可能であれば、特定の方向に割れやすいということはなくなるので、材料物性自体が破壊しにくくなることが期待される。このように、記憶の消去を利用した工学的な応用を探索する。

(8) 以上、これら様々な視点から解析して、塑性流体の記憶効果のメカニズムを解明していくとともに、工学的な破壊の制御法の開発へと発展させていく。

３．研究の方法

(1) 本研究の実験では、粉と水を一定の比率に混ぜて高濃度固液混合材料であるペーストを用意し、揺れや流れや磁場などの外場を短期間体験させることで、その後外場を停止し乾燥させた時に発生する亀裂の形状にどのような影響があるか調べた。

(2)「流れの記憶」の発現に必要な要因は粒子の形状なのか粒子間の相互作用なのかきちんと調べるため、粒子の形状を固定し、粒子

間の相互作用を変化させた時の影響を調べる実験をおこなった。具体的には、本来流れを記憶しない粒状で帯電した炭酸カルシウム・ペーストに対し、塩化ナトリウムを添加し塩析効果を利用して炭酸カルシウム粒子同士のクーロン斥力を遮蔽することによって、このペーストが揺れだけでなく流れも記憶できるようになったか調べた。

(3) ペーストに流れを記憶させるときのミクロな描像を知るためには、コロイド・サスペンションのシミュレーションが有効である。ただ、この手法は粒子間の相互作用や粒子と流体との相互作用を同時に解かなければならない大変さがある。具体的には、OCTA や KAPSEL などのコロイドのオープンソースのシミュレーターを用い、粒子の数密度や剪断速度や粒子間の相互作用を変化させることによって、剪断下でのコロイド・サスペンション中の構造変化や記憶の形成に及ぼす効果を解明する。

(4) 亀裂の発生位置の制御のためには、鉛直加振機を用い、鉛直加振によって生じたファラデー波の形状に応じて節の位置にて水平振動を局在化させることで、亀裂の発生位置の制御を試みる。

(5) 磁性を持つγ型酸化鉄（III価）の粒子を水と混ぜたペーストを用い、直流電磁石（ヘルムホルツ・コイル）によって定常直流磁場を短時間印加する影響が乾燥亀裂パターンにどう影響をするか、実験をおこなった。

(6) 揺れを記憶する炭酸カルシウム・ペーストに対し、短時間超音波を照射し、その後乾燥させて発生する亀裂パターンの形状を調べることで、揺れの記憶が超音波照射で消去できるのか実験をおこなった。照射する超音波は 37ｋHz、71kHz、102ｋHz の３種類を用意し、超音波の音圧は可変パラメーターとしてその大きさを調整することにより、それぞれの周波数に対しどの程度の音圧の超音波を照射すれば過去の記憶を消去できるのか調べた。

(7) 超音波照射により揺れの流れの記憶が消去できるのであれば、乾燥破壊しなくとも、ペーストが特定の方向で割れやすくなることもなくなるので、材料物性としても破壊強度が増加し壊れにくい固液混合材料を作成できたことになる。その効果を確認するために、セメントに振動を加えて特定の方向に割れやすくしたものに対し、その後速やかに超音波照射を加えることによって破壊強度が増加していないかを、引っ張り試験機を用いた３点曲げ法にて測定し、超音波照射の影響を見積もった。

(8) 以上、これらの実験手法、およびシミュレーション法を用いて、本研究を行い、その結果について解析した。

４．研究成果

(1) 本研究においては、塑性流動をするペーストが「流れ」を記憶するメカニズムを実験とシミュレーションから調べるとともに、亀裂の発生位置の制御、磁場の記憶の亀裂への影響の有無、超音波照射による記憶の消去や材料の破壊強度増加、まで、様々なアプローチで高濃度固液混合材料であるペーストの記憶効果とその工学的応用に挑んだ。

(2) 粉と水を混ぜて作ったある種のペーストが流れを記憶するメカニズムを解明するため、流動下でのレオロジー測定と顕微鏡観察を組み合わせた実験をおこなうとともに、ペーストを水平加振して記憶を生じさせ、その記憶を乾燥亀裂パターンとして具現化する実験をおこなった。今までのような単純な水と粉の混合系だけでなく、塩化ナトリウムや界面活性剤を添加したペーストを用いて実験をおこない、添加物による粒子間相互作用の変化に伴って記憶効果が変化することを見いだした。具体的には、水中で粉の粒子が帯電する粒状の炭酸カルシウムの粒子で構成されるペーストは単体では「流れの記憶」を持たないことが分かっていたが、これに塩化ナトリウムを加えてクーロン斥力を遮蔽すると「流れの記憶」を持つようになることを見出し、「流れの記憶」には粒子の形状ではなく粒子間の相互作用が本質的であることがわかった。

(3) 帯電していないレナードジョーンズ型コロイド粒子で構成されるペーストが流れを記憶できる現象を説明するためにオープンソースでコロイド・シミュレーターとして汎用性のある OCTA と KAPSEL を用い、一様剪断流のシミュレーションを行ったところ、流れに平行なネットワーク構造の形成が見られ、流れの記憶の要因を示すことができた。

(4) 容器に入れたペーストを鉛直加振すると、振幅や振動数などの加振条件に応じて縞状や格子状などの定在波（Faraday waves）が発生する。短時間ペーストに鉛直加振を加えた後加振を止めてペーストを乾燥させると、生じる乾燥亀裂パターンは鉛直加振時に発生した Faraday waves と同じ模様になっていることが分かった。亀裂の発生位置と Faraday waves の空間構造との関連を画像解析によって調べたところ、Faraday waves の節の位置に亀裂が生じやすくなっていることが確認された。ではなぜ節の位置に亀裂が生じやすくなっているのであろうか？本研究では比較的薄いペーストの乾燥破壊を扱っているため、亀裂は水平面内に擬二次元的に発生する。すなわち、鉛直加振によってペースト内に記憶と言われる構造ができたと

しても、鉛直方向の構造は破壊に関与せず、水平方向の構造のみが亀裂の発生に影響を与えることになる。今回の鉛直加振で生じたFaraday waves の節こそがペーストが水平方向に大きく揺れた位置にあたるので、水平方向の揺れを局在化させることによって亀裂の発生位置を制御できることとなった。本研究の結果Faraday waves の節の位置を調整して亀裂の発生位置をも制御できるようになったので工学的に大きな応用が期待される。

(5) 磁性酸化鉄ペーストが短時間でも印加された磁場を記憶し、その後磁場印加を停止し乾燥させた時に発生する亀裂の伝播方向が磁場に平行になることがわかった。磁性ペーストが磁場を記憶するための条件として、磁場により引き起こされる応力がペーストの降伏応力よりも強くならなければならないこともわかった。また、磁場を記憶した際に亀裂が磁場印加方向に平行に伝播するメカニズムを解明するために磁場を記憶した試片に対しX線CTスキャンを試みたところ、ペースト中の酸化鉄粒子が磁場の方向に平行に解列していることが観察され、その構造が塑性により凍結されたことが破壊にも影響を与える磁場の記憶効果の要因であることが示された。

(6) 外場をすでに記憶したペーストに対し超音波を照射したところ、ペーストの記憶が消去され、その後乾燥させた時に現れる亀裂パターンが等方的なセル状パターンになることがわかった。超音波の照射でペーストの記憶を消去できるということは、記憶のメカニズムを解明する上での大きなヒントになるだけでなく、工学的にも固液混合材料としてのペーストの異方構造を超音波照射で消去することによって均一で壊れにくい材料を作成する手法の開拓へと幅広い応用が期待できる

(7) 実際に超音波照射が固液混合材料の物性の均一化や破壊強度の応用に利用できないかセメントを用いて実験したところ、振動を受けた後に超音波照射を受けたセメント試片の破壊強度が増加していることが３点曲げ法により確認された。

(8) 以上、様々な視点から解析して、塑性流体の揺れや流れや磁場の記憶効果のメカニズムを解明するとともに、鉛直加振や超音波照射を通じて亀裂の発生位置制御や破壊強度の増加へと工学的な破壊の制御法をさらに汎用的な手法へと発展させることに成功した。

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 10 件）

① 中原明生、松尾洋介、大信田丈志、ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用、日本物理学会誌、査読有、７０巻、３月号、2015、pp. 179-187、http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2015/03/703.html

② S. Kitsunezaki, Cracking Condition of Cohesionless Porous Materials in Drying Processes, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 87, 2013, 052805-1 ～ 052805-10, http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.87.052805

③ H. Nakayama, Y. Matsuo, Ooshida, T. and A. Nakahara, Position control of desiccation cracks by memory effect and Faraday waves, Euro. Phys. J. E, 査読有, Vol. 36, 2013, 1-1～1-13, http://dx.doi.org/epje/i2013-13001-8

④ Y. Matsuo and A. Nakahara, Effect of interaction on the formation of memories in paste, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 81, 2012, 024801-1～024801-8, http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.024801

⑤ A. Nakahara and Y. Matsuo, Control of crack pattern using memory effect of paste, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, Vol. 319, 2011, 012014-1～012014-10, doi:10.1088/1742-6596/319/1/012014

⑥ So Kitsunezaki, Crack growth in drying paste, Advanced Powder Technology, 査読有, Vol. 22, 2011, 311-318 doi:10.1016/j.apt.2011.03.006

〔学会発表〕（計 84 件）

① 中原明生、破壊に見る記憶、2014 年度日本物理学会科学セミナー「非平衡の世界－凝縮系から地震、経済、生命まで」、平成２６年８月７日、東京大学駒場キャンパス（東京）、招待講演

② A. Nakahara, Control of desiccation crack patterns using memory effects of paste and Faraday waves, 13th International Conference on Continuum Media and Discrete Systems, 平成２６年７月２４日、Salt Lake City (USA), 招待講演

③ A. Nakahara, Memory of paste and its

application to control the direction and the position of desiccation cracks, 7th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems, 平成２５年７月２３日，Barcelona (Spain).

④ A. Nakahara, Memory of plastic fluid and its application to control pattern formation of desiccation cracks, The International Workshop on Physics of Granular Flows, 平成２５年６月２６日、京都大学基礎物理学研究所（京都）、招待講演

⑤ A. Nakahara and Y. Matsuo, Memory of vibration and flow in colloidal suspension visualized as desiccation crack patterns, 1st International Workshop on Wetting and Evaporation: Droplets and complex fluids, 平成２５年６月１９日, Marseille (France).

⑥ A. Nakahara and Y. Matsuo, Role of interaction in the formation of memories in paste, American Physical Society March Meeting 2012, 平成２４年２月２９日, Boston (USA).

⑦ A. Nakahara, H. Nakayama and Y. Matsuo, Position control of desiccation cracks by using memory effect of paste and vertical vibration, International Conference on Unifying Concepts in Glassy Physics V, 平成２３年１２月１３日, Paris (France), 招待講演

⑧ A. Nakahara, Control of crack pattern using memory effect of paste, 12th International Conference on Discrete Systems and Continuum Media, 平成２３年２月２４日, Kolkata (India), 招待講演

⑨ A. Nakahara, H. Nakayama and Y. Matsuo, Memories of paste visualized as desiccation crack patterns, The International Workshop on Recent Progress in Physics of Dissipative Particles, 平成２２年１１月２５日, 基礎物理学研究所（京都）、招待講演

〔図書〕（計１件）
Lucas Goehring, Akio Nakahara, Tapati Dutta, So Kitsunezaki and Sujata Tarafdar, Wiley-VCH, Desiccation Cracks and their Patterns: Formation and Modelling in Science and Nature, 2015, pp. 207-266.

〔産業財産権〕

○出願状況（計２件）

① 名称：材料混合法
発明者：中原明生、松尾洋介、伊藤丸人、米山暸汰
権利者：中原明生、松尾洋介、伊藤丸人、米山暸汰
種類：特許
番号：PCT/JP2015/055604
出願年月日：平成２７年２月２６日
国内外の別： 国外

② 名称：超音波照射による固液混合材料の異方構造の消去
発明者：中原明生、松尾洋介、伊藤丸人、米山暸汰
権利者：中原明生、松尾洋介、伊藤丸人、米山暸汰
種類：特許
番号：特許願 2014-038777 号
出願年月日：平成２６年２月２８日
国内外の別： 国内

〔その他〕
ホームページ等
http://www.phys.ge.cst.nihon-u.ac.jp/~nakahara/text/project.html

６．研究組織
(1)研究代表者
中原　明生（NAKAHARA, Akio）
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号：６０２９７７７８

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

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

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

松尾　洋介（MATSUO, Yousuke）
日本大学・理工学部・研究員
研究者番号： ４０６１１１４０

(3)研究協力者
中山　寛士（NAKAYAMA, Hiroshi）