

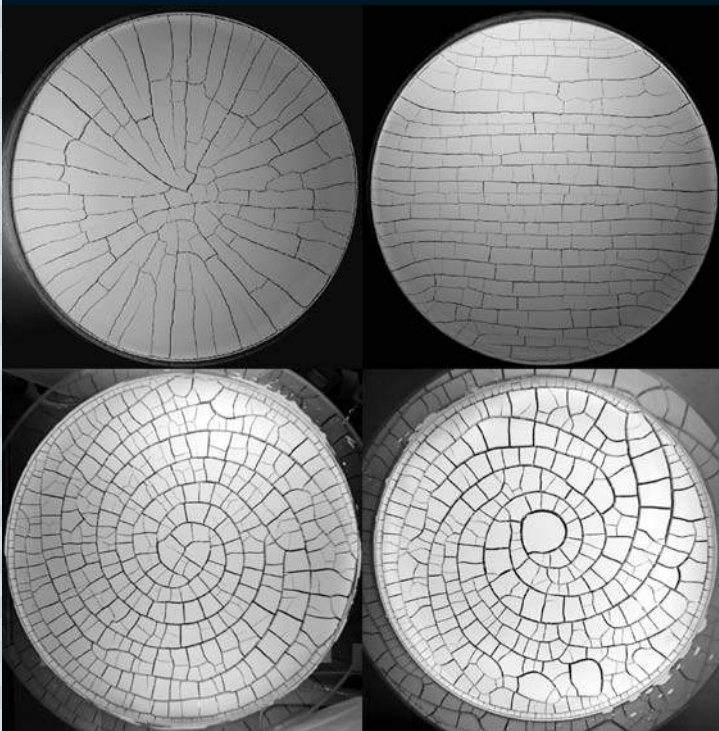
- 共鳴過程を制御する
- 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム
- ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用

NO.

3

2015 | VOL. 70

B U T S U R I
日本物理学会誌



ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用



中原 明生

日本大学理工学部



松尾 洋介

日本大学理工学部



大信田 丈志

鳥取大学大学院工学研究科

破壊とはいったん壊れたらもとには戻れないという意味で、まさに非平衡・非線形物理における不可逆過程の典型的な例である。どのような状況下で壊れるかなど、壊れる前はある程度予測し対応できても、いったん破壊が始まってしまうともう制御しきれない印象があった。そのため、これまでの破壊の制御の研究では、もっぱら破壊が起きないための制御に力点が置かれていた。

この解説では、最近の乾燥破壊の研究における高濃度固液混合液（ペースト）の記憶効果の発見と、それを利用した乾燥亀裂パターンの制御について紹介したい。ここでいう制御とは破壊を起こさせないための制御ではない。むしろ、積極的に破壊を起こさせる制御なのだが、その代わりに、いつ、どの位置に亀裂が発生し、その亀裂がどの方向に伝播すべきか、など、破壊の進展具合を事前に決めておくという制御である。このような制御が可能となるのは、乾燥前のペーストが経験したことが時間を隔てて乾燥後の亀裂に影響を与えるためであり、これをペーストの記憶効果と呼んでいる。

一連の研究では、まず、ペーストは塑性を持つゆえに揺れや流れなどの力学的な動きを記憶することが分かった。ペーストがどのような動きを記憶したかはペースト自体を顕微鏡などで直接観察しても見出すことは困難だが、ペーストを乾燥させると亀裂パターンとして容易に視覚化される。ペーストには「揺れの記憶」と「流れの記憶」という異なった種類の記憶が存在することが発見され、異なる記憶間の転移現象

も見出された。

ペーストの持つ記憶によって亀裂パターンが決まるということは、ペーストの記憶を書き換えれば亀裂パターンの形状を制御できることになる。特にペーストが記憶した流れの方向に平行に乾燥亀裂が伝播するということが、流線で表現できる亀裂パターンが作れることになる。こうして、通常干上がった沼地で見られる等方的なセル状亀裂パターンだけでなく、縞状、放射状、リング状、螺旋状、格子状などの様々な形状の亀裂パターンを作成することに成功した。

理論的には、高濃度のペーストが揺れを記憶するメカニズムは揺れによって生じた剪断変形を起因とする張力が塑性ゆえに残留し亀裂の進行しやすい方向を決定するとする数値モデルによって説明できる。他方、比較的濃度の低いペーストが流れを記憶するためには水中での粉粒子間の相互作用において引力が支配的である必要があることが実験によって示された。さらに、揺れや流れを記憶したペーストに超音波を照射することで過去の記憶を消去して異方的な亀裂パターンを等方的で一様な状態へと初期化できることも見出された。今後、ミクロ的には記憶を持つペーストの内部構造に迫ることによって、またマクロ的には異なる種類の記憶のメカニズムを両方とも説明できる理論を構築することによって、塑性流体のレオロジーの基礎論の構築と破壊の制御へのさらなる応用に向けて知見を深めていきたい。

—Keywords—

塑性変形：

塑性とは、小さな力に対しては固体として振る舞うような物体が、ある閾値以上の大きな力を受けると一種の粘性流体的な挙動に切り替わる性質を言う。切り替えの閾値を降伏応力と称する。液体側から言えば、応力が閾値を下回ると固化する性質が塑性である。純粋な弾性体の変形では、外力を取り除くと物体の形も自発的にもとに戻るのに対し、塑性がある固体では、外力を取り除いても戻らないような変形が生じ得る。これを塑性変形という。

1. はじめに

破壊とは日常生活でもよく体験する身近な現象であるが、扱いにくく難しい非線形非平衡現象の典型的な例となっている。それは、地震による災害や飛行機の金属疲労のようにいつでもどのように破壊が起きるか事前に予測することが難しいこと、そして、マクロな破壊は基本的には不可逆な現象なのでいったん破壊が起きてしまうともとは戻れず、初期亀裂の発生位置や形状やその伝播方向などの履歴に鋭敏に依存してその後の亀裂生成や最終的な亀裂パターンなどが様々に変化することからも分かる。

物理として破壊を研究する際にまず習うのはGriffith理論である。この理論では、亀裂が発生するのは亀裂の発生によって解放される歪みエネルギーのほうが亀裂の生成のために必要なエネルギー（亀裂の界面エネルギー）よりも大きくなったとき、と考える。¹⁾しかし、実際の亀裂の発生には物体内の欠陥や不純物の存在やマイクロクラックの空間分布などのミクロな不均一性の影響が無視できないので、マクロな物体に対していつでもどのように亀裂が発生するか正確に予測することは困難である。

いったんマクロな初期亀裂が発生してしまうと、様々な要因でその後の亀裂の生成や伝播方向などの挙動が変化するので、多くの場合破壊はランダムで確率的な現象としての扱いになってしまい、最終的にどこがどう壊れるかを正確に予測するのは難しくなる。例えば、衝撃破壊を例に挙げると、ガラスのコップを高いところから床に落とすと砕けて粉々になるが、1個のコップからどのようなサイズの破片が得られるかはコップの個性や落とし方の微妙な違いで毎回結果が異なる。しかし、だからといって、この場合何も予言できないわけではない。様々な研究により、結果的に得られた破片の集団としてのサイズ分布にはスケール則が成り立ち、平均サイズなどの特徴的なサイズで規格化すると破片集団のサイズ分布はある特定の関数（スケーリング関数）で記述されるなど、統計的な規則性があることが報告されている。²⁾

では、いったん発生してしまった亀裂のその後の伝播方向や形状などをその場で制御することは可能なのであろうか？ その成功例のひとつとして薄いガラス板の冷却破壊の実験がある。カバーガラスのような薄いガラス板を縦にして高温に加熱してから鉛直下向きに氷水にゆっくり挿入することで熱収縮破壊を起こさせるのであるが、冷却時の温度差と氷水への挿入速度を変化させることで、亀裂の形状を「亀裂の成長なし」から直線状亀裂、波形亀裂、枝分かれ状亀裂へと変化させることができることが報告されている。³⁻⁵⁾この実験ではあらかじめガラス板の下端にダイヤモンドカッターで傷をつけて初期亀裂の個数と発生位置を制御することにより結果に再現性を持たせ、それにより亀裂の形状が変化する条件を亀裂パターンの形態相図内の相境界線として定量的に示すことに成功している。

しかし、多くの場合いったん発生してしまった亀裂のそ

の後の進展をその場で制御することは至難の業だし、そもそも亀裂の発生位置を制御すること自体はもっと困難を伴う。それらの問題点を解決するための試みとして、この解説では、高濃度固液混合液（ペースト）の乾燥収縮破壊時に現れる亀裂に対し、ペーストの記憶効果を利用して亀裂の発生位置や伝播方向などを制御することにより最終的な亀裂パターンの形状を制御し、セル状、縞状、放射状、リング状、らせん状、格子状など様々な形状の亀裂模様を自由自在に作成する研究について説明する。^{6,7)}ここで記憶効果とは、ペーストが過去に体験した応力や歪みを記憶すること、そしてその記憶がその後の亀裂の発生や時間発展に影響を及ぼすことを言う。通常は過去の履歴や記憶に依存する性質があることは破壊の予測や制御にとって邪魔な効果なはずであるが、今回は逆にその効果を利用して破壊を制御しようという試みである。本来は固体の破壊を制御しようという工学的な試みのはずが、実はペーストの記憶効果を通して塑性流体のレオロジーというサイエンスの基礎研究と深く関連してくることに、気が付かれるであろう。以下、ペーストの記憶効果の実験の紹介とそのメカニズムについての理論的説明、さらには破壊や材料物性の制御への工学的な応用例について解説する。

2. ペーストの記憶を亀裂で視覚化

この章では、まず乾燥破壊について説明してから、塑性を持つ高濃度固液混合液（ペースト）が過去に受けた揺れの方向を記憶できること、そしてその記憶がペーストを乾燥させた時に現れる亀裂パターンの形状として視覚化されることを説明する。

2.1 揺れの記憶と垂直縞状亀裂

粉と水を混ぜて作った固液混合液を容器に流し込んで自然乾燥させると干上がった沼地などで見られる乾燥亀裂パターンを生じる。⁸⁾例えば、数ミクロン程度の大きさの炭酸カルシウムの粉を多めの水と混ぜて低濃度の混合液を用意し乾燥させると、図1でみられるような等方的なセル状亀裂パターンが得られる。このような乾燥亀裂パターンについては、厚さが数mmから数cm程度の固液混合液をゆっ

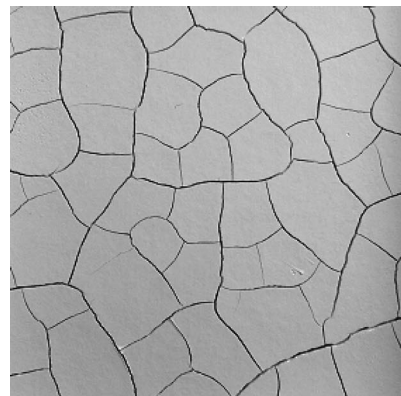


図1 低濃度の炭酸カルシウム・ペーストを乾燥させて得られる等方的なセル状亀裂パターン。図のサイズは縦横 50 mm。⁶⁾

くり乾燥させたときは、亀裂間の最終的な間隔は固液混合液の厚みに比例することが知られている。⁹⁾ 一方、乾燥が速いと下まで一様に乾くわけではないので深さ方向に乾燥勾配が生じる。例えば澱粉と水と混ぜて厚めの混合液を用意して乾燥させると、発生する亀裂の間隔は混合液の厚さではなく鉛直方向の乾燥勾配（柱状節理の場合は温度勾配）などに依存する長さで決まるようになり、しかもその亀裂構造は柱状節理という冷えたマグマが作る六角柱状の規則的な3次元構造とほぼ同じ構造が得られることが報告されている。乾燥破壊と急冷破壊の両方で柱状節理が得られるのはどちらも同じ収縮破壊であることから理解できる。¹⁰⁾

話を厚さが薄い固液混合液の乾燥破壊に戻そう。薄いのので亀裂パターンは上から見下ろして擬2次元的と見なせる。粉を多めの水と混ぜて乾燥させると前述の図1のような等方的なセル状亀裂パターンしか得られないが、ペーストと呼ばれる、粉を少なめの水と混ぜてどろっとした高濃度で高粘性でしかも塑性も持つ固液混合液を作り、厚さが10 mm程度になるように容器に流し込んで自然乾燥させたところ、初期外力の加え方に応じて図2のような様々な形状の規則的な亀裂パターンが得られた。

図2の実験においては、体積比44%の高濃度の炭酸カルシウムのペーストを用いた。ペーストの厚さは13 mm、円形容器の直径は500 mmで、室温低湿度で数日かけてゆっくりと自然乾燥させた。高濃度のペーストを容器に流し込んでも山なりになってしまい自発的には平らに広がらない

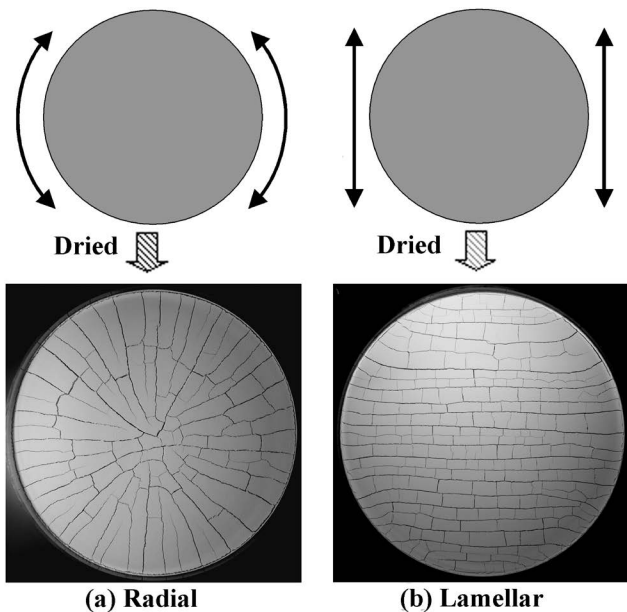


図2 ペーストの記憶効果を用いて作成した異方的で規則的な亀裂パターン。用いたのは高濃度（粉の体積比44%）の炭酸カルシウム・ペーストで、乾燥前のペーストの厚さは13 mm、円形容器の直径は500 mm。(a)放射状亀裂パターン。ペーストを容器に注ぎ込んだ直後に1分間ほど容器を水平面内の回転方向に振動させてから、振動を止め自然乾燥させた。(b)縞状亀裂パターン。ペーストを容器に注ぎ込んだ直後に1分間ほど容器を水平面内の一方方向に振動させてから、振動を止め自然乾燥させた。(a)と(b)ともに3日後に発生する乾燥亀裂の伝播方向は初期振動の方向に垂直となっている（揺れの記憶）。⁶⁾

ために、図2(a)のように容器を回転方向に1分間ほど揺すってペーストを平らにしてから回転を止め静止させて自然乾燥させたところ、放射状亀裂パターンを得た。

そこで、今度は回転方向ではなく、図2(b)のように一直線の方向に1分間ほどの短時間揺すってペーストを平らにしてから振動を止め自然乾燥させたところ、縞状亀裂パターンを得た。ここで、縞状亀裂の伝播方向が初期振動方向に垂直になっていることに注意しよう。図2(a)でも、放射状亀裂の伝播方向（半径方向）と初期振動方向（回転方向）は垂直な関係を満たしていることが確認できる。すなわち、ペーストは加えられた揺れの方向を記憶できるといふことと、揺れを記憶したペーストが乾燥した時に発生する亀裂の伝播方向は初期振動方向と垂直となることが見出された（ペーストの揺れの記憶効果）。この実験ではそもそも山なりのペーストを一様に広げるために揺すったのであり、その目的どおりその表面を目視や顕微鏡で見ても凹凸はなく外見上揺れの痕跡は見られない。ペーストはその内部に（後述のように塑性変形の形で）揺れの記憶を蓄えており、その記憶は乾燥破壊時に現れる亀裂パターンとして初めて視覚化されることが分かった。⁶⁾

2.2 ペーストの塑性

それでは、なぜ高濃度固液混合ペーストは揺れなどの過去の動きを記憶でき、またその記憶は乾燥亀裂パターンに影響を与えることができるのであろうか？ その答えを説明するためにはペーストの塑性について知っておく必要がある。前節で述べたように、粉と多めの水と混ぜた低濃度の炭酸カルシウム・ペースト（スラリー）は揺れを記憶できず等方的な亀裂パターンしか現れないが、一方、粉と少なめの水を混ぜた高濃度のペーストは揺れを記憶し揺れの方向に垂直な亀裂パターンが発生する。このことより粉と水を混ぜる比率が重要であることが分かる。

そこで、まず、粉と水を混ぜる割合を変化させたときのペーストのレオロジー特性に注目しよう。レオロジーとは物質の変形や流動性を表すためにビンガムが名付けた専門用語である。水のように剪断速度 $\dot{\gamma}$ [1/s]が剪断応力 σ [Pa]に比例するニュートン流体の場合はその流動性は $\dot{\gamma} = \sigma/\eta$ と表される。ここで、 η [Pa·s]は粘性率と呼ばれる。水に対し混ぜる粉の量を増やしていくと、最初はニュートン流体のまま徐々に粘性率が増加するのみだが、ペースト中の粉の体積比がある値を超えると塑性が出現し、ある閾値よりも大きな剪断応力を加えないとペーストが流動化しない（剪断速度が0から変化しない）。塑性を持つこの濃度では、いったん流動化してしまうと今度は応力を取り除いても自然に歪みゼロの状態に戻ることはない。この時の流動するしないの閾値のことを降伏応力 σ_Y [Pa]と呼ぶ。

塑性流体の最も単純なモデルはビンガム流体と呼ばれる。このモデルでは流体は正の降伏応力 σ_Y [Pa]>0を持つとし、剪断応力 σ が降伏応力 σ_Y を超えた時に生じる剪断速度 $\dot{\gamma}$ が式(1)や図3のように線形関係にあるとする¹⁾：

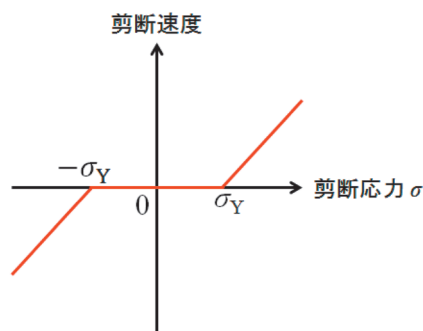


図3 ビンガム塑性. 剪断応力 σ の関数として剪断速度 $\dot{\gamma}$ を表現したときに、剪断応力の大きさが降伏応力 σ_Y よりも大きくなってはじめて流動化を始め、流動後の依存性は線形な関係とする。

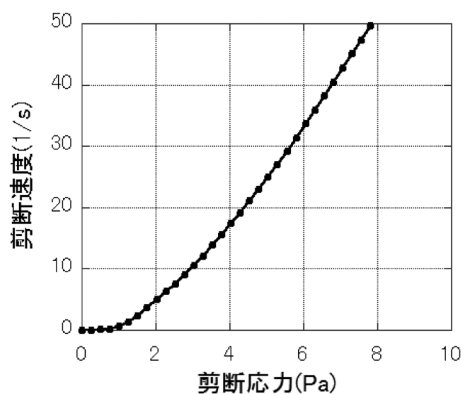


図4 炭酸カルシウム・ペーストのレオロジー測定. パラレル・プレートで挟んだペーストに剪断を加え、剪断応力を上げていった時に結果として得られる剪断速度を表示. 剪断速度が0から突然増加を始める時の剪断応力を降伏応力 σ_Y と呼ぶ. この図はペースト中の粉の体積比が40%の場合に該当し、●は測定データ、実線はグラフの近似直線. 図より降伏応力 σ_Y の値は1.0 Paと読み取れる。

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} 0 & (|\sigma| \leq \sigma_Y) \\ \pm \frac{|\sigma| - \sigma_Y}{\eta_p} & (|\sigma| > \sigma_Y). \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 η_p は正の定数である。

実際に実験で用いた炭酸カルシウムのペーストがビンガム流体のような塑性を持つのかレオロジー測定を行って調べるため、Anton-Paar社のレオメーターPhysica MCR301を使用し、パラレル・プレートで挟んだペーストに剪断応力を加え結果として得られる剪断速度を測定した。図4はペースト中の粉の体積比が40%と高濃度な、揺れを記憶し垂直縞状亀裂パターンを生成する場合に該当する。剪断応力 σ の値が1.0 Paを超えると剪断速度 $\dot{\gamma}$ の値が正の値になっていくので、降伏応力の値は $\sigma_Y = 1.0$ Paと読み取れる。

図4のようなレオロジー測定の結果をもとに炭酸カルシウムのペーストの降伏応力 σ_Y の値を粉の体積比 ρ の関数として実線で図示したのが図5である。体積比 $\rho = 25\%$ での点線は液性限界を表し、これ以下ではペーストの降伏応力は $\sigma_Y = 0$ Paとなって塑性を持たない単なる粘性流体と見なせる。粉の体積比 ρ が増加するにつれ降伏応力 σ_Y の値は単調増加するが、固液混合液の常として一点破線で表される塑性限界（ここでは体積比 $\rho = 54\%$ ）で発散することとなるため、それ以上の体積比では粉と水は一樣には混じら

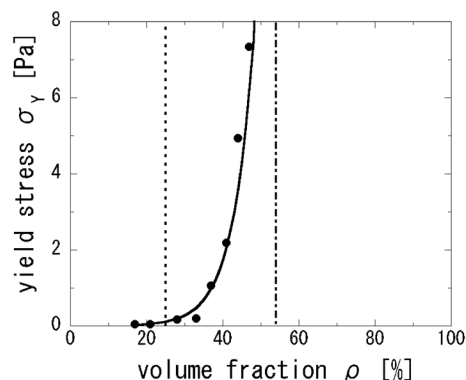


図5 炭酸カルシウム・ペーストの降伏応力 σ_Y をペースト中の粉の体積比 ρ の関数として実線で表示. 点線は液性限界、一点破線は塑性限界. 降伏応力以上の剪断応力を受けた時にペーストは塑性流動を起こす。⁶⁾

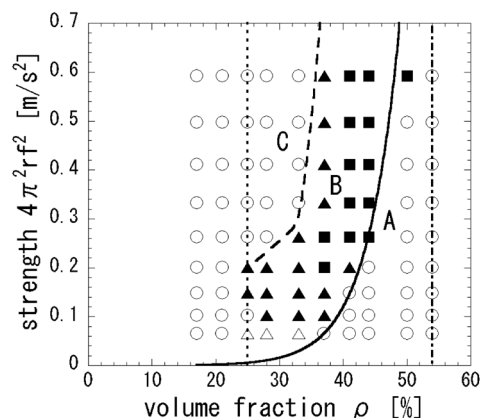


図6 炭酸カルシウム・ペーストの乾燥亀裂パターンの形態相図. 横軸はペースト中の粉の体積比 ρ [%], 縦軸は水平加振によりペーストを入れた容器にかかる加速度の最大値 $4\pi^2 r^2$ [m/s²]. ○は等方的なセル状亀裂パターン, ■は揺れを記憶した結果得られた垂直縞状亀裂パターン, ▲はセル状亀裂と垂直縞状亀裂の混合パターン, △は容器サイズが200 mm四方ではセル状亀裂パターンだが300 mm四方にすると混合パターンとなるものを表す. 体積比 $\rho = 25\%$ の点線と体積比 $\rho = 54\%$ の一点破線はそれぞれ液性限界と塑性限界に対応する. 実線は降伏応力曲線と呼ばれ、加振によってペーストの底面に加わった剪断応力の大きさが図5で得られたペーストの降伏応力と同じになるラインである. 降伏応力曲線以下の領域Aではペーストは容器に対して動いていないので記憶のないセル状亀裂パターンのみが発生する. 破線は領域B（揺れの記憶による垂直縞状亀裂パターン）と領域C（ペーストが流れてしまい動きを記憶できなかったセル状亀裂パターン）との間の境界を示すガイドラインを表す。⁶⁾

ず乾いてほろほろになった粘土のような半固体状態となる。以上のことから、炭酸カルシウムのペーストが塑性流動をできるのは液性限界 $\rho = 25\%$ と塑性限界 $\rho = 54\%$ の間にある時に限られることが分かる。

2.3 揺れを記憶する条件：実験事実

ペーストが揺れを記憶する条件を特定するために、ペーストのレオロジー特性と外力の大きさの両方を系統的に変化させて乾燥亀裂パターンを調べる実験を行った。具体的には、ペースト中の粉の体積比 ρ [%]と水平加振によりペーストを入れた容器にかかる加速度の最大値 $4\pi^2 r^2$ [m/s²]をパラメーターとして、乾燥後発生する亀裂パターンを図6のように形態相図として表示した。ここで、 r は加振の振幅であり $r = 15$ mmに固定し、周波数 f は可変とした。

ペーストを入れる容器は一辺200 mmの正方形であり、

一容器あたりに粉360gを用い、体積比に応じて混ぜる水の量を調節した。ペーストを容器に流し込んだ直後1分間水平加振させてから振動を停止し、室温で自然乾燥させて得られた亀裂パターンの形状を調べた。

図6において液性限界と塑性限界に挟まれた領域ではペーストは塑性流動しその動きを記憶することが可能となるが、この領域はさらに詳しくはA, B, Cと3領域に分かれる。領域AとBの境界は、図5の降伏応力曲線(実線)を重ねてみると見事に一致する。加振によってペーストに加わった剪断応力の値がペースト自身の持つ降伏応力と同じになるラインである。剪断応力が降伏応力よりも小さくなる領域Aではペーストは動けないので等方的なセル状亀裂パターンしか生じない。一方、剪断応力が降伏応力を適度に超える領域Bではペーストは揺れを体験してその動きを記憶し、乾燥時には初期振動の方向とは垂直な方向に乾燥亀裂が伝播する垂直縞状亀裂パターンが得られる。さらに加振を強くしたり、粉の体積比を下げて領域Cになるとペーストは流れたり乱れたりするので記憶能力を喪失し再びセル状亀裂パターンしか生じなくなる。

以上、塑性を持つ高濃度固液混合溶液(ペースト)が揺れによって「降伏応力よりも適度に強い剪断応力」を受けた時はペーストは自分が体験した揺れの方向を記憶することができること、そしてその揺れの記憶は亀裂パターンとして視覚化され、その時発生する亀裂の伝播方向は初期振動方向と垂直な関係になっていることが示された。どれくらい長い時間記憶が持続するか調べるために、ペーストを揺すった直後に容器にフタをして一ヶ月間乾燥を止め濡れた状態を維持したことがある。一ヶ月後にフタを開けて乾燥させたところ数日で乾燥亀裂が発生したが、その時に亀裂が伝播した方向はまさに一ヶ月前に揺すった方向に垂直であったことから、ペーストの記憶は最低一ヶ月以上残留することが確認された。

3. 揺れの記憶の数理モデル：残留張力理論

ペーストの記憶はどこにどのような形で存在しているのだろうか？ 説明すべき実験事実は、揺れが記憶されるか否かの境界(図6のAB境界)が降伏応力曲線に一致することと、亀裂の方向が揺れに垂直になることである。これらの実験事実を説明できる理論として、加振によって生じた塑性歪みによって発生する張力が記憶の正体であるとする理論が提案されている。

ペーストを揺るとペースト層の内部に図7で見られる剪断変形を引き起こし、図8に模式的に示すような変形が生じる。境界の影響で非一様な剪断が発生して張力が生じる機構に関する準線形解析¹¹⁾をまず紹介する。他方、非線形解析¹²⁾によると、一様な剪断から張力が生じる機構もある。実際には両方の機構が働いていると考えられる。

3.1 準線形解析

図8のように、容器に固定した座標系を設定し、水平方

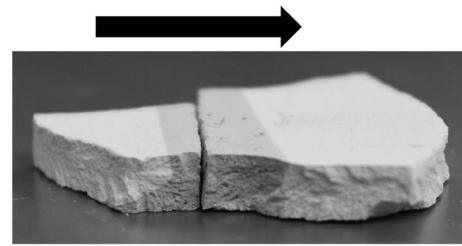


図7 揺れを体験したペーストの内部変形の可視化。ペーストの厚みは8.8mm。白い炭酸カルシウム・ペーストを上から見て縞状になるように黒い活性炭の粉末と混ぜて着色しておくことにより、ペーストの断面に見える柱状の模様が揺れによってどう変形するか観察した。揺れの初期段階におけるペーストの内部変形を見るためにペーストを水平右方向に急進させそして急停止させたところ、ペーストの上層部では大きな変形は見られなかったが、ペーストの下層部では有意な剪断変形が見られた。

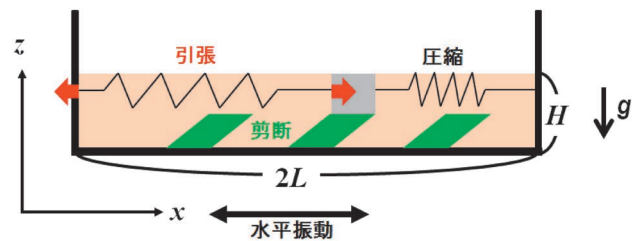


図8 ペーストを揺すった時に生じる変形の模式図。水平振動により、上層部に引張と圧縮が、下層部には剪断変形が生じ、それらが塑性によって残留すると考えられる。

向にx軸、鉛直上向きにz軸をとる。ここで、ペーストの厚さHはペーストの水平サイズ2Lに対して十分薄く $H \ll L$ なので薄膜近似(浅水近似)が成り立ち、ペーストの動きは主に水平方向に限られる。加振による慣性力を $F_x = F_x(t)$ とすると、変位場 $X = X(x, z, t)$ の運動方程式は、応力場を $\sigma = (\sigma_{xx}(x, z, t), \sigma_{xz}(x, z, t))$ として

$$D \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

と書ける。ここで、Dは粘性係数とHに依存する定数である。圧力は法線応力 σ_{xx} に含めてある。続いて、ラメの弾性定数を λ と μ として、法線応力と剪断応力を

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial X}{\partial x} + c \right), \quad (3)$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial X}{\partial z} - \beta \right) \quad (4)$$

のように表す。ここで $c = c(t)$ は乾燥収縮を表す既知関数である。式(4)は線形Maxwell型の弾塑性分解¹⁾であり、塑性歪み $\beta = \beta(x, z, t)$ は、Bingham塑性の式(1)と同じ

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \begin{cases} 0 & (|\sigma_{xz}| \leq \sigma_Y) \\ \pm \frac{|\sigma_{xz}| - \sigma_Y}{\eta_p} & (|\sigma_{xz}| > \sigma_Y) \end{cases} \quad (5)$$

という式でモデル化できるとする。¹¹⁾

方程式(2)-(5)をy方向の変位や応力も含むように拡張し、適当な境界条件を課して加振過程と乾燥過程の計算を行う。まず加振過程では $F_x(t)$ は周波数fの正弦加振、 σ_Y は有限な定数、また $c=0$ とする。そのあとの乾燥過程では $\sigma_Y \rightarrow +\infty$ とし、 $c(t)$ を時間とともに増大させる(離散要

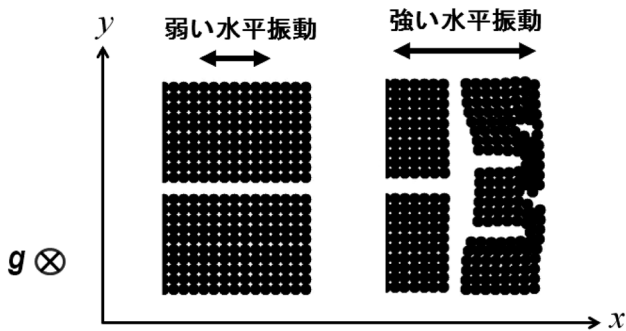


図9 準線形解析に基づくシミュレーション結果. 強い水平振動を体験した場合は乾燥亀裂は水平振動に垂直な方向に進行する. この図は大槻氏のご好意による.

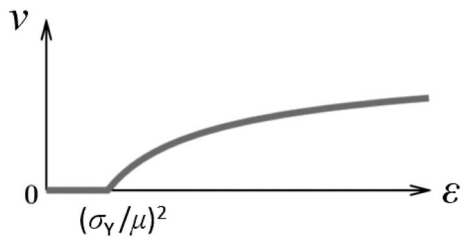


図10 塑性の緩和時間表示. 式(6)の応力緩和の時間スケールの逆数 ν を μ で無次元化した弾性歪みエネルギー ϵ の関数として表現している. σ_y は降伏応力. 弾性歪みエネルギーは剪断応力の2乗に比例するため, 図3のビンガム塑性の場合 $\nu(\epsilon)$ の関数形は平方根曲線をシフトしたものになる.

素的に言えば, 乾燥収縮をばねの自然長の減少としてモデル化する). 収縮の結果, 法線応力 σ_{xx} または σ_{yy} が閾値を超えると亀裂が生じるものとして, 連続体の方程式を離散化して行った乾燥破壊のシミュレーション結果を図9に示す. 上から見た容器形状はわざと $L_x < L_y$ の長方形にしてあるので, 加振が弱くて記憶を持つに至らない場合は x 方向の亀裂が生じる, ところが, 強い振動を加えた場合は振動方向に垂直な y 方向に亀裂が進行するという, 実験で見られる記憶の異方性と整合的な結果が得られた.

3.2 揺れを記憶する条件: 理論的説明

記憶が残るか否かの境界は降伏応力曲線で決まる. このことを見るため, 式(4)と式(5)を組み合わせ,

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \nu(\epsilon) \left(-\beta + \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (6)$$

という緩和方程式の形にする. ここで $\nu(\epsilon)$ は緩和時間の逆数で, 弾性歪みエネルギー $\epsilon \propto \sigma_{xz}^2$ の関数として図10のように与えられ, $|\sigma_{xz}| > \sigma_y$ に対しては ν は正の有限値, $|\sigma_{xz}| < \sigma_y$ に対してはゼロとなる. 加振が弱いと(図6の領域A) ν は最初から最後までゼロなので何も記憶されない. 加振が強く $\nu > 0$ になると, 図8の下層部で塑性変形が起き, β は $\partial X / \partial z$ に追従して時々刻々と変化する. 続いて振動を止める時のことを考えよう. もし振動を止めても $\nu > 0$ のままなら(図6の液性限界よりも低濃度側), 式(3)と式(6)に従い, 系は応力ゼロの状態に緩和してしまう. しかし塑性があると応力が緩和し終わる前に $\nu = 0$ となり β の値が凍結される. これと底面の粘着条件から, X も動けなくなり, 系のどこかに張力 $\sigma_{xx} > 0$ が残ることになる.

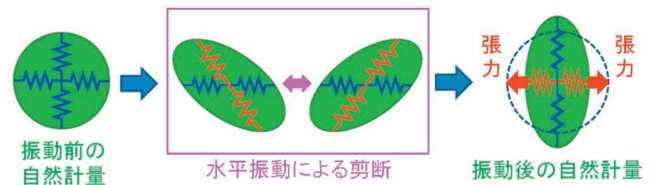


図11 剪断の非線形効果の模式図. 図の楕円は塑性歪み(自然計量テンソル)を示す. 剪断 σ_{xz} の2次の効果として, z 方向のバネが引き伸ばされ, そのために, x 方向のバネの自然長の減少に相当する塑性変形($\alpha > 0$)が起きて張力が生じる.

3.3 非線形解析

引張に直接起因する張力では, X の x に関する非一様性が本質的であり, 加振を止めた際に $\partial X / \partial x > 0$ となる領域に限って亀裂が初期振動に垂直に進行することになる. しかし実験では, 多くの場合, 最後に引っ張られたか圧縮されたかによらず全領域で一様に垂直縞が観察される(図2). この難点は, 弾塑性モデルに剪断の非線形効果を取り入れることで解消される.

物質としてのペーストの等方性を仮定し, その構成方程式が $\nu \rightarrow 0$ で等方的な弾性体に帰着することを要請する. この要請を満たす構成方程式の中で, 有限変形の効果を最も単純な形で含むものを採用する. 塑性歪みを表す量はテンソルとなり, その成分のひとつは β で, 他の成分に由来する項が式(3)の右辺に付け加えられる. その付加項(から係数を除いたもの)を α とすると, 水平方向の自然長にあたる量は $\exp(-\alpha)$ の形で表せる. 式(6)に対応して, α の緩和の式はおおまかに言って

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \tilde{\nu}(\epsilon, \alpha) \left(-\alpha + \frac{\sigma_{xz}^2}{2\mu^2} \right) \quad (7)$$

のような形で書ける(2次元の場合).¹²⁾

式(7)には σ_{xz}^2 が含まれ, これは加振中いつでも正である. そのため, いったん $\nu > 0$ になると, α は正の方向に向かう(直感的には図11のようなことが起きる). 続いて加振を止めると α はゼロに向かって緩和を始めるが, 緩和が終わる前に $\nu = 0$ となり, α は正の値に凍結される. これにより, 領域全体で x 方向の張力が残留し, 図2のような亀裂パターンが生じることが説明できる.

3.4 記憶の書き換え実験

前節で, 非線形解析を行うと最後に引っ張られたか圧縮されたかによらず全領域で一様に垂直縞が得られることが説明できた. では, 非線形解析の結果だけで揺れの記憶は説明できるのであろうか? この疑問の解明のために, 事前にある方向の揺れを記憶したペーストに対し全く違う方向に追加で揺すって記憶を書き換える実験を行った. 追加で揺する回数を変化させて何周期分の揺れを体験すると新しい方向の揺れを記憶できるか実験したところ, 追加で2周期分以上の揺れを体験すれば追加の振動方向に対し全領域で垂直に亀裂が伝播することが分かり, 非線形解析が成立していることが再確認された. 一方, ペーストに体験させる追加の揺れが2周期未満の場合は, 追加の揺れを止め

たタイミングに引っ張りを受けていた領域のみで追加の揺れに垂直な亀裂が見られた。すなわち、揺れを記憶する過程の初期段階では準線形解析で示されるメカニズムが成立すること、そして、2周期分以上の揺れを体験した後は非線形解析で示されるメカニズムが支配的になることが分かった。

4. 流れの記憶と流線に沿った亀裂パターン

2章でペーストが揺れを記憶すること、3章でそのメカニズムの説明をした。しかし、実はペーストによっては揺れだけでなく流れも記憶することが分かったので紹介する。

4.1 流れの記憶と平行縞状亀裂

2章で紹介した炭酸カルシウム・ペーストは揺れしか記憶できず、いったん流れてしまうとペーストの動きとは無関係な等方的な亀裂パターンしか得られなかった。言い換えれば、炭酸カルシウム・ペーストの記憶効果は、図6の領域B（「揺れ」の領域）に限られていた。ところが、炭酸水酸化マグネシウムや炭素やカオリンなどのペーストは揺れだけでなく流れの方向も記憶できることが報告された。例えば、炭酸水酸化マグネシウムの粉と水を混ぜて用意したペーストは高濃度の状態で揺すられ地震のような揺れを体験すると炭酸カルシウムと同様に揺れの方向を記憶し、その後乾燥させた時に発生する亀裂は図12(a)のように初期振動の方向に垂直に伝播する。ところが、同じ炭酸水酸化マグネシウムの粉を多めの水と混ぜ塑性は維持する程度の中濃度の状態で揺ると、ペーストは液状化を起こして流れが生じるが、いったん流れが生じると今度は流れの方向を記憶し、その後発生する乾燥亀裂は図12(b)に示されたように流れの方向に平行に伝播することが分かった。⁷⁾ 以上の実験結果より、「揺れの記憶」から「流れの記憶」への転移は乾燥破壊という現象を通じて垂直縞状亀裂から平行縞状亀裂への転移として視覚化されるのが分かる。そして、流れの記憶の形成に際しても塑性が必要なことは、ペーストの組成が液性限界以下の低濃度の際は揺れも流れ

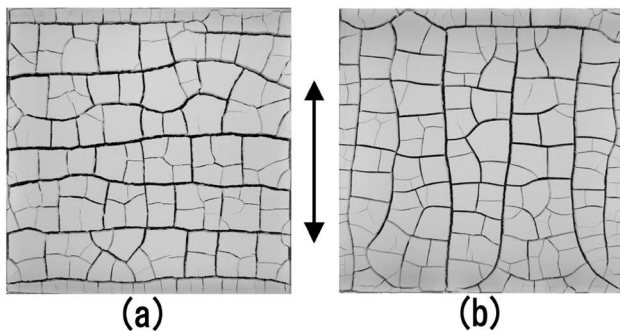


図12 揺れの記憶から流れの記憶への転移。対応する乾燥亀裂パターンは垂直縞から平行縞へと転移している。図中の矢印は初期振動の方向を表す。容器のサイズは200 mm 四方である。(a) 高濃度(粉の体積比が $\rho=12.5\%$)の炭酸水酸化マグネシウム・ペーストの揺れの記憶。初期振動方向に垂直に乾燥亀裂が伝播している。(b) 中濃度(粉の体積比が $\rho=6.7\%$)の炭酸水酸化マグネシウム・ペーストの流れの記憶。初期振動によって発生した流れの方向に平行に乾燥亀裂が伝播している。⁷⁾

解説 ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用

も記憶できないことから確認できる。

ここで「揺れの記憶」と「流れの記憶」の違いを明確にしよう。図13のような形状の容器を作成し、(a)には高濃度の炭酸カルシウムのペーストを、(b)には中濃度の炭酸水酸化マグネシウムのペーストを入れ、矢印の方向に揺すってから静止させ乾燥した。揺れを記憶した(a)では亀裂はすべて初期振動に対し垂直に伝播した。一方、流れを記憶した(b)では容器ごとに亀裂の伝播方向が異なったが、これは初期振動によって引き起こされた流れの方向が場所によって異なったためで、亀裂の伝播方向はどこでも流れた方向に平行であった。結果としてこの結果から、揺れの記憶と流れの記憶が本質的に異なることが分かる。

図13で揺れの記憶と流れの記憶の違いを示したが、どちらも容器を揺すっているのに図13は純粋に流れだけの記憶とは言えないのではないかと指摘があった。そのため、容器を揺すらず、長い長方形容器を用いてペーストを片側からもう一方の側へ方向に流すだけの実験も行ったところ、この場合も乾燥亀裂は流れの方向に平行に伝播することが確かめられた。

4.2 流れを記憶する条件：実験事実

特定のペーストのみ流れを記憶できるのであれば、流れを記憶するための条件を調べる必要がある。そのため、揺れと流れの両方を記憶する炭酸水酸化マグネシウムのペーストに対し、図6と同様な手法で乾燥亀裂パターンの形態相図(図14)を作成した。降伏応力曲線(実線)の下側に位置する領域Aでは剪断応力が降伏応力よりも小さくなるためペーストは動けず、その結果等方的なセル状亀裂パターンしか生じない。剪断応力が降伏応力を適度に超える領域Bでは炭酸カルシウム・ペーストのように炭酸水酸化マグネシウム・ペーストは揺れを体験してその動きを記憶し、初期振動とは垂直な方向に亀裂が伝播する垂直縞状亀裂パターンが得られる。さらに加振を強くしたり、粉の体積比を下げると領域Cになるとペーストは一方方向に流れ、流

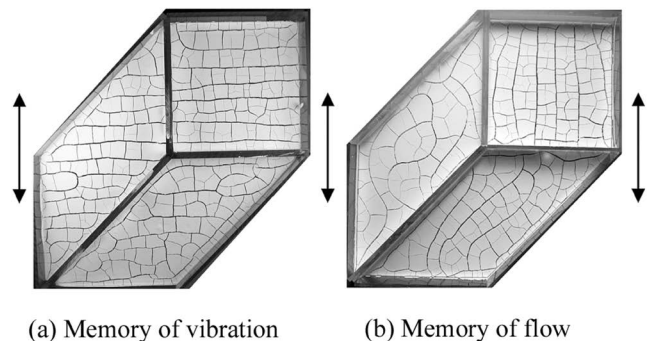


図13 揺れの記憶と流れの記憶の違い。(a)と(b)ともに、正方形容器は200 mm 四方、それと隣り合う平行四辺形容器の小さい方の角度は45度。矢印は初期振動方向を表す。(a) 高濃度の炭酸カルシウムのペーストの揺れの記憶と垂直縞状亀裂。亀裂の伝播方向はどの容器のどの場所でも初期振動方向と垂直となる。(b) 中濃度の炭酸水酸化マグネシウムのペーストの流れの記憶。流れの方向はペーストの表面に振りかけた炭素粉末の動きで可視化。各容器の各場所によってペーストが流れた方向は異なるが、亀裂の進行方向はどこでもその場所での流れの方向に平行となっている。

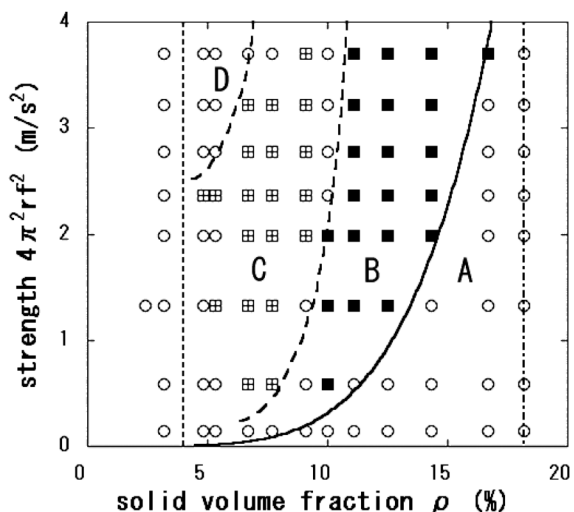


図14 炭酸水酸化マグネシウムの乾燥亀裂パターンの形態相図。横軸をペースト中の粉の体積比 ρ [%], 縦軸を水平加振により容器にかかる加速度の最大値 $4\pi^2rf^2$ [m/s^2]として、亀裂パターンを表示。○は等方的なセル状亀裂パターン、■は揺れを記憶した垂直縞状亀裂パターン、田は流れを記憶した平行縞状亀裂パターンを表す。体積比 $\rho=4\%$ の点線と体積比 $\rho=18\%$ の一点破線はそれぞれ液性限界と塑性限界に対応する。実線はレオロジー測定によって得られた降伏応力曲線である。二本の破線は領域B(揺れの記憶)と領域C(流れの記憶)、および領域Cと領域D(乱流によるランダム亀裂構造)との間の境界を示すガイドラインである。⁷⁾

れの記憶に起因する平行縞状亀裂が得られる。炭酸カルシウム・ペーストでは流れると何も記憶しないのに対し、炭酸水酸化マグネシウム・ペーストは流れると流れを記憶するのが図6と図14の比較から分かる最大の違いである。しかし、さらに領域Dのようにペーストを激しく揺るとペーストの流れは乱れてしまい、再びセル状亀裂パターンしか生じなくなる。

4.3 流れの記憶における粒子間引力の役割

なぜ特定のペーストのみ流れを記憶できるのであろうか？ 流れを記憶できないペーストとできるペーストの違いは、水中で粉粒子が帯電しているか否かにある。実際に、流れを記憶できない炭酸カルシウムのペーストでは水中で粉粒子が正に帯電している。そこで、流れを記憶できない炭酸カルシウムのペーストに塩を添加して Cl^- イオンによって粉粒子間の長距離クーロン斥力を遮蔽したところ、炭酸カルシウムのペーストが流れを記憶できるようになることが実験で確認された。流れを記憶するためには粒子間引力の存在は不可欠であり、通常粉粒子間には短距離引力が働いている。粒子間引力の必要性を示すために、ペーストに界面活性剤を添加して粒子間引力を抑えたところ、どのペーストも流れを記憶できなくなった。以上の実験結果より、流れの記憶の形成にはクーロン斥力は邪魔であり、粒子間引力が必要であることが示された。¹³⁾

では、流れの記憶はどのように形成されているのであろうか？ その解釈であるが、短距離粒子間引力のみが存在する状況下では比較的低い濃度でも粉粒子のネットワーク構造が形成可能となる。この希薄なネットワーク構造が流れの中で墨流的に引き伸ばされた状態のまま塑性によ

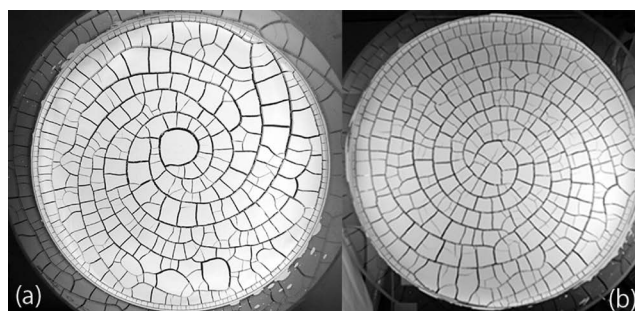


図15 炭酸水酸化マグネシウムの螺旋状亀裂パターン。円形容器の直径は500 mm。中濃度ペーストを容器に流し込んだ直後に容器に半径15 mmの公転運動を与えた。公転の向きは(a)は時計回り、(b)は反時計回りである。ペーストは容器の公転運動を止めた後のペーストが静止するまでの螺旋状流れの方向を記憶し、その流れの方向に平行に亀裂が伝播している。

て凍結されることによって、その後の乾燥過程では記憶した流れの方向に沿って亀裂が伝播しやすくなる、と想像できる。

ペーストが流れを記憶できるということは、流線に従った亀裂パターンを自由自在に作れることを意味する。実際に、螺旋状の流れをペーストに加えることによって図15のように螺旋状亀裂パターンをも作成できるようになった。

5. 最新の研究状況

揺れの記憶にせよ流れの記憶にせよ、これまでの章で説明してきたのは亀裂の伝播方向の制御であり、亀裂の発生位置までを制御するものではなかった。ところが、ペーストに鉛直方向の振動を加えることによって発生位置までも制御できるようになった。鉛直加振によってペーストの表面にはFaraday波が発生するが、Faraday波の節の位置で水平振動が顕著になるなどの揺れの局在化が引き起こされ、そのため割れやすい位置までも制御できるようになるのである。格子状のFaraday波を発生させることにより、格子状の亀裂パターンも作成できるようになった。¹⁴⁾

また、揺れや流れを記憶したペーストに対し、短時間超音波を照射することでその後発生する乾燥亀裂の形状を等方的でセル状なものにすることに成功した。記憶に起因する亀裂の異方性を消去できたことはペーストの記憶を消去できたことを示唆しているので、今後超音波照射で材料物性的に一様で均質な割れにくい素材に仕上げることが可能になるなど、工学的な応用が幅広く期待される。¹⁵⁾

6. おわりに

破壊という現象は、壊れる前は物理で予測して対応できても、いったん破壊が始まってしまうと制御しきれない印象があった。しかし今回、高濃度固液混合液(ペースト)が揺れや流れなどの動きを記憶しその記憶が亀裂パターンとして視覚化できることと、その記憶を操作することで破壊の制御が容易に行えるようになったことで、理学として身近な塑性流体のレオロジーにはまだ未知なる謎が隠されていることを実感するとともに、工学的な応用に向

けて固体の破壊制御の研究の重要性を再確認することができた。

最後に、これまでの研究を推し進めるにあたって、破壊や塑性流動の分野における共同研究をはじめ、いろいろな方々のご理解、ご支援、ご協力をいただいた。この場をお借りして感謝の念を表したい。

参考文献

- 1) G. A. Maugin: *The Thermodynamics of Plasticity and Fracture* (Cambridge, Cambridge, 1992).
- 2) L. Oddershede, P. Dimon and J. Bohr: *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 3107.
- 3) A. Yuse and M. Sano: *Nature* **362** (1993) 329.
- 4) Y. Hayakawa: *Phys. Rev. E* **49** (1994) R1804.
- 5) S.-I. Sasa, K. Sekimoto and H. Nakanishi: *Phys. Rev. E* **50** (1994) R1733.
- 6) A. Nakahara and Y. Matsuo: *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 1362; *J. Stat. Mech.: Theory Exp.* (2006) P07016.
- 7) A. Nakahara and Y. Matsuo: *Phys. Rev. E* **74** (2006) 045102(R).
- 8) L. Goehring, A. Nakahara, T. Dutta, S. Kitsunozaki and S. Tarafdar: *Desiccation Cracks and their Patterns* (Wiley, New York, April 2015) in press.
- 9) A. Groisman and E. Kaplan: *Europhys. Lett.* **25** (1994) 415.
- 10) 西本明弘, 水口 毅, 狐崎 創: *日本物理学会誌* **64** (2009) 758—デンプン柱状節理.
- 11) M. Otsuki: *Phys. Rev. E* **72** (2005) 046115.
- 12) Ooshida T.: *Phys. Rev. E* **77** (2008) 061501; *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 104801.
- 13) Y. Matsuo and A. Nakahara: *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 024801.
- 14) H. Nakayama, Y. Matsuo, Ooshida T. and A. Nakahara: *Eur. Phys. J. E* **36** (2013) 1.
- 15) 中原明生, 松尾洋介, 伊藤丸人, 米山瞭汰: *特願* 2014-038777 (2014) —超音波照射による固液混合材料の異方構造の消去.

著者紹介

中原明生氏: 専門は統計物理学と連続体物理学. 主に実験的手法で, パターン形成, 粉粒体のダイナミクス, 渋滞流, 塑性流体のレオロジー, 破壊や材料物性の制御の研究に携わってきた.

松尾洋介氏: 専門は観測の理論, 珈琲, 破壊. 深入り(煎り)するほど興味がある.

大信田丈志氏: 専門は流体物理学. 人間の感覚により近いスケールでの「万物の理論」に興味がある.

(2014年6月12日原稿受付)

Memory Effect of Pastes and Its Application to Control of Crack Formation

Akio Nakahara, Yousuke Matsuo and Ooshida Takeshi

abstract: Desiccation cracks are familiar phenomena producible by drying a mixture of water and colloidal particles of a few microns in diameter. When the mixture is so dense that it has plasticity, it is called a paste. Here we show that, using memory effect of pastes, we can predetermine the morphology of the cracks so that the desiccation crack pattern becomes strikingly anisotropic. By the word “memory” we mean that mechanical treatment (such as “vibration” or “flow”) applied to the paste, before the drying process starts, is somehow imprinted in the paste and determines how the cracks should be formed later. It is demonstrated experimentally that plasticity is essential to the memory effect. There are at least two types of memory effects: the first type is referred to as the memory of vibration, and the second type as the memory of flow. A possible theoretical clarification of the memory of vibration is given by the so-called residual tension theory, in which plastic deformations of an elasto-plastic fluid layer, associated with residual tension, account for the anisotropic crack pattern.

日本物理学会誌 第70巻 第4号 (2015年4月号) 予定目次

巻頭言

学術会議と物理学会……………岡 真

現代物理のキーワード

ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—……………安田 修

交流

ボイジャー1号探査機, 太陽圏境界を越え星間空間に入る……………鷺見治一

……………鷺見治一

解説

形状可変な境界としてのシワ(リンクル)構造の展開……………大園拓哉

……………大園拓哉

感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー……………田中文彦

……………田中文彦

最近の研究から

微粒子の熱放射における共振器量子電磁気学的効果……………立川真樹, 小田島仁司

……………立川真樹, 小田島仁司

実験技術

“実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフト

ウェア ALPS……………藤堂眞治

JPSJの最近の注目論文から 12月の編集委員会より

……………安藤恒也

ラ・トッカータ

アメリカでの就職活動記……………堀内俊作

アメリカさすらい滞在記……………村瀬孔大

大学界ニュース

第2回湯浅年子賞「金賞」: 坂東昌子氏……………東島 清, 森 初果

第2回湯浅年子賞「銀賞」: 関口仁子氏……………酒井英行

2014年度文化功労者: 佐藤勝彦氏……………横山順一

追悼

松原武生先生を偲んで……………米沢富美子

新著紹介