

# ペーストのメモリー効果を用いた乾燥破壊の制御の実験

中原明生、松尾洋介

日本大学理工学部

## 概要

粉と水を混ぜて作ったペーストを乾燥させると、干上がった沼地で見られるような空間的に等方的なセル状のひび割れ（亀裂）パターンが発生する。ところが、乾燥前にペーストを水平に揺すっておくと、ペーストはその塑性ゆえに揺すった方向を記憶し、乾燥時に発生する亀裂パターンは揺すった方向に依存した縞状パターンになることが実験的に得られた。我々は当初の実験では炭酸カルシウムなどの粉末を使い、縞状亀裂パターンの方向が揺すった方向に垂直であることを見出していた。ところが、最近、炭酸水酸化マグネシウムの粉末を用いた実験をしたところ、「ペースト中の粉の体積比」を減少させていくに従い縞状亀裂パターンの方向が初期振動の方向に対し垂直方向から平行方向へと転移する現象が観察された。縞状亀裂の方向が転移する現象のメカニズムを調べることにより、この転移がペースト内の「揺れの記憶」から「流れの記憶」への転移に基づいていることがわかった。

## Control of crack formation using memory effect of paste

Akio Nakahara, Yousuke Matsuo

Laboratory of Physics, College of Science and Technology, Nihon University

### Abstract

When we dry a paste, i.e., a mixture of powder and water, we obtain an isotropic and cellular crack pattern that is often observed on a dried pond. By vibrating the paste horizontally before it is dried, we find that the paste remember the direction of the initial vibration due to the plasticity of the paste, and in the drying process an anisotropic crack pattern appears, such as lamellar crack pattern, the direction of which depends on the direction of the initial vibration. First, we use calcium carbonate as powder to make paste, and find that the direction of lamellar cracks become perpendicular to the direction of the initial vibration. On the other hand, when we perform experiment using powder of magnesium carbonate hydroxide, we obtain a transition of the direction of lamellar cracks from perpendicular to parallel direction when compared to the direction on the initial vibration as we decrease the solid volume fraction of paste. By investigating the mechanism of the phenomenon, we find that the transition of the direction of lamellar cracks is induced by the transition of memory in paste from "memory of vibration" to "memory of flow".

## 1 はじめに

今回、久しぶりに交通流の研究会に参加します。前回参加したときは、粉体のパイプ流の実験のお話をしました。当時は交通流とパイプ流の関係が指摘されだした頃です。どちらの現象でも粒子の密度が

流れに大きな影響を与えているのは確かなので、パイプ流において粉体の密度を制御し、密度を増加させるに従い自由流から渋滞流への流れの転移がおきることを確認するとともに、 $1/f$  ゆらぎが転移点近傍にのみ発生することを見出しました。その際、粉体の周りの流体の効果を制御するために流体を空気

から水にし(すなわちパイプに水を詰め)、粉体として mm サイズの金属球を用いて再現性のよい実験をできるように工夫した覚えがあります [1]。

その後、興味は水中や濡れた粉のダイナミクスに移り、さらに粉のサイズもミクロン・サイズに小さくなって、現在コロイド・サスペンションを用いた破壊の実験をしております。コロイド・サスペンションや破壊と言うと、交通流とは無関係かと思われるかもしれませんが、実は、意外と関係があるのです。今回我々は高濃度のコロイド・サスペンション(ペースト)を事前に揺ることによってその後の乾燥させたときに発生する亀裂パターンの形状を制御できることを見出しましたが、この現象のメカニズムを解明していくと、揺ることによってペーストの内部に粉の渋滞構造が引き起こされ、ペーストの塑性ゆえにその構造がメモリーとして記憶されて、乾燥破壊時の亀裂パターンの制御へと応用されることがわかってきたので、その結果を報告したいと思います。

## 2 ペーストの揺れの記憶

まず最初に、炭酸カルシウムの粉末と水を混ぜ、ペースト(高濃度のコロイド・サスペンション)を用意します。このとき、ペースト内の粉の体積比 (solid volume fraction)  $\rho$  が  $\rho = 44\%$  の高濃度状態になるように調整しておきます。ペーストを円形容器に入るとその塑性ゆえ容器の中で一様には広がらないので、入れた直後 60 秒間だけ円形容器を回転方向に振動させて広げてから乾燥破壊をさせると、図 1(a) のような放射状の亀裂パターンを得ました。最初は円形の容器の影響で放射状亀裂が発生したと思いましたが、ふと考えを改め、水平方向に一方だけ揺すって乾燥破壊をさせたところ、発生する亀裂パターンは図 1(b) のような縞状亀裂になることがわかりました。すなわち、縞状亀裂の方向と初期に揺すった方向には垂直の関係があるのです。実際、図 1(a) の放射状亀裂においても、振り返って見れば、亀裂の方向と振動方向には垂直関係が成立することが見てとれます [2, 3]。

ではなぜこのような縞状亀裂が形成されるのでしょうか? 縞状亀裂の形成のためには、揺すられる際のペースト内の粉の体積比率が非常に高くペーストが塑性を持つ状態にしなければなりません。このことより、ペースト内に高密度で一様に分散していたコロイド粒子が初期振動の際に強制的にある種の渋滞

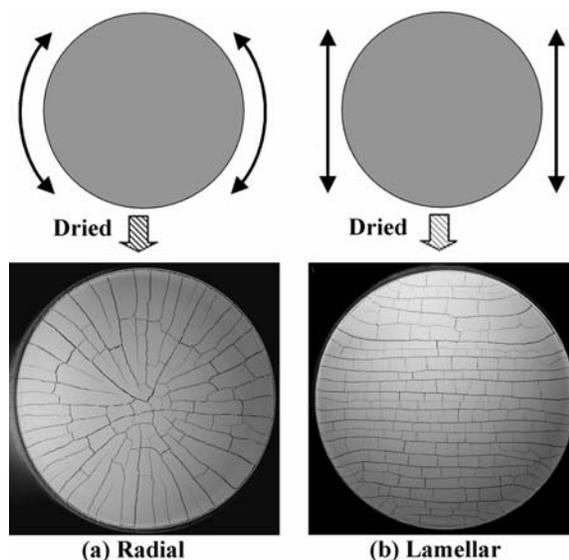


図 1: 異方的な亀裂パターン。粉は炭酸カルシウム。(a) 放射状 (b) 縞状(垂直縞)。円形容器の直径はともに 500mm [2, 3]。

玉突き構造へと移行すること、そして、その渋滞の縦波的な粗密構造が乾燥破壊という弱肉強食的な生きるか死ぬかの極限状態では「どこがより弱くて割れざるをえないか」の指針となってしまう、その結果揺すった方向に垂直に割れる縞状亀裂が発生するのです。

## 3 揺れの記憶から流れの記憶へ

では、ペースト内の記憶は常に揺すった方向を覚えるものであり、その結果発生する縞状亀裂の方向は常に揺すった方向に垂直になるのでしょうか? 最近、粉体として炭酸水酸化マグネシウムを用いてペーストを作り、炭酸カルシウムと同じ実験をしたところ、驚くべき結果を得ました。

図 2 では、粉密度の高いペーストと粉密度が中程度のペーストをそれぞれサイズの等しい正方容器に入れ同じ矢印の方向に水平に揺すってから乾燥破壊をさせました。図 2(a) と図 2(b) ではどちらも縞状亀裂を得たものの、粉密度が高い図 2(a) では縞状亀裂の方向が揺すった方向に垂直、一方、粉密度が中程度の図 2(b) では縞状亀裂の方向が揺すった方向に平行、と、粉密度を減少させていくと縞状亀裂の方向に垂直から平行への転移が見られました。

この縞状亀裂の方向の転移のメカニズムを解明するために、我々はペースト内の粉の体積比  $\rho$  と初期

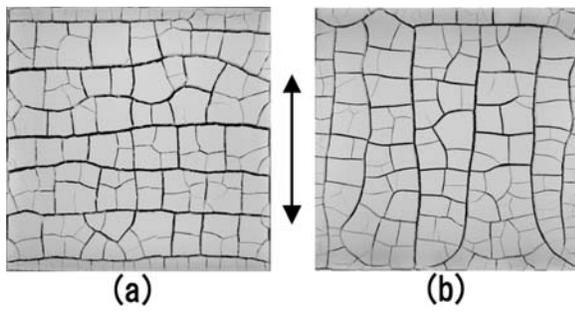


図 2: 縞状亀裂の方向の転移。粉は炭酸水酸化マグネシウム。初期振動の方向は矢印で示され、その加速度の大きさ  $4\pi^2 r f^2$  は  $2.4\text{m/s}^2$ 。正方容器のサイズはどちらも縦横 200 mm。(a) 垂直縞。粉の体積比は  $\rho = 12.5\%$ 。(b) 平行縞。粉の体積比は  $\rho = 6.7\%$  [4]。

振動の加速度をパラメータとした亀裂パターンの形態相図を作成しました。図 3 において、等方的なセル状亀裂は、縞状亀裂のうち亀裂の方向が初期振動の方向に垂直なのは（垂直縞）、平行なのは田（平行縞）で表わしてあります。 $\rho = 4\%$  にて上下に鉛直に引かれた点線直線は液性限界（それ以下では降伏応力 0 の粘性流体）、 $\rho = 18\%$  にて上下に鉛直に引かれた一点鎖線直線は塑性限界（それ以上では半固体）を表わします。

実線はペーストの降伏応力と初期振動の加速度の大きさが同じになるところを表わし、降伏応力以下ではペーストが流動化しないことから結果的に領域 A（揺れない・記憶なし）と領域 B（揺れる・記憶する）を分けるといふ役割を果たします。また、二つの破線はそれぞれ領域 B と C および領域 C と D を分けますが、その線を引く際の基準は、初期に揺らしたときのペーストの流動性を観察したときに領域 B では揺らした方向に揺れが生じ、領域 C では揺らした方向に流れが生じ、領域 D では乱流が生じた、と区別しています。

図 3 に示された炭酸水酸化マグネシウムの相図より分かることは、まず、領域 B の高密度状態で揺らするとペーストは揺れを記憶しその後乾燥破壊で発生する縞状亀裂の方向は炭酸カルシウムの結果と同様に初期振動の方向に垂直となることです。ところが、領域 C の中密度状態で揺らした場合は亀裂の方向と初期振動の方向が平行な関係になります。我々は、この時、初期振動時のペーストの流動性として一方に流れが生じていたことに注意する必要があります。このことより、領域 C は（流れる・記憶する）

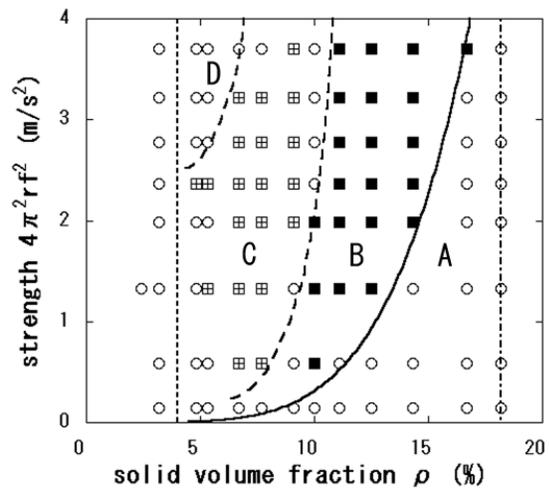


図 3: 亀裂パターンの形態相図。粉は炭酸水酸化マグネシウム。横軸は粉の体積比  $\rho$ 、縦軸は初期振動の加速度  $4\pi^2 r f^2$ 。○：等方的なセル状亀裂、⊥：垂直縞、田：平行縞 [4]。

領域 D は（乱れる・記憶喪失）と整理できるのです。

では、図 2 と図 3 で得られた新たな縞状亀裂パターンの出現はいったいどのような記憶の発現を示唆しているのでしょうか？我々はこれまでの考察と図 4 に示す実験により、領域 C に現れたこの記憶は揺れの記憶ではなく流れの記憶であることを突き止めました。図 4 では容器の形として正方形のもの以外に二つの平行四辺形の容器も用意し、しかも揺る方向に対してそれぞれの平行四辺形が別の方向を向くように配置しました。乾燥破壊時に発生する亀裂パターンをよく見ると、平行四辺形の容器内に発生した亀裂は揺らした方向に平行に割れているわけではないこと、正しくは、揺らした際に生じた流れの方向に平行に亀裂が走っていることを見出すことができます。

ではなぜ炭酸水酸化マグネシウムのペーストは炭酸カルシウムのペーストと違って、揺れの記憶だけではなく流れの記憶もできるのでしょうか？その違いは粉の性質の違いにあります。まず、コロイド・サスペンションとしての水中での粉粒子間に働く力の違いです。どちらの粉もファン・デル・ワールス力が働き、その引力が粉を引き合わせ粉の密度が比較的高い時にペーストと呼ばれるネットワーク構造を作り出します。そのため、一定の密度以上ではどちらのコロイド・サスペンションも塑性を持つのです。ところが、炭酸カルシウムの粒子は水中で帯電しクーロン斥力をも及ぼしあうので、中低密度では

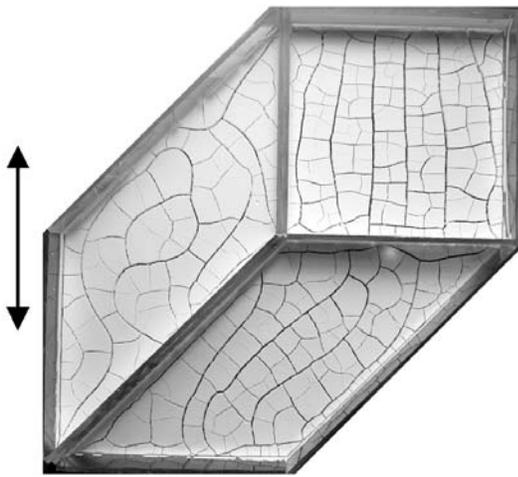


図 4: 相図内の領域 C で出現する新たな記憶が流れの記憶であることを突き止めた実験。粉は炭酸水酸化マグネシウム。亀裂パターンの方向は、揺すった方向ではなく、正しくは初期振動によって発生した流れに方向に平行であることがわかる [4]。

粉粒子同士が反発してしまいネットワークを組むことができません。

また、それぞれの粉を比較すると形状の違いもあります。炭酸カルシウムの粉は球状なので高密度に詰め込むことができますが、炭酸水酸化マグネシウムの粉は板状なので、中密度でもカードハウス状のスカスカなネットワーク構造を組めてしまいます。

これらのことを総合的に考えると、炭酸カルシウムの粉は高密度でのみネットワークを組んで記憶を保持できるので、可能な記憶方式は高密度で揺らされた時の渋滞を作る揺れの方向に垂直な縦波的な粗密構造のみですが、一方、炭酸水酸化マグネシウムは高密度で同様に揺れの方向に垂直な縦波的な粗密構造を作るだけでなく、中密度でもスカスカなネットワーク構造が流れに引き伸ばされた上に板状粒子の配向も流れに平行に揃うことによって流れに平行な粗密構造を作ることができるので、このマイクロな構造の転移がペーストの記憶の転移と乾燥破壊時の亀裂方向の転移を生んだと考えることができます。

## 4 流れの記憶の応用

ペーストが流れを記憶できるようになったので、さっそくこの現象を応用して、様々な亀裂パターンが意図的に作成できるようになりました。その典型的な例が、図 5 に示す螺旋パターンです。このような螺旋パターンはどのようにすれば作成できるので

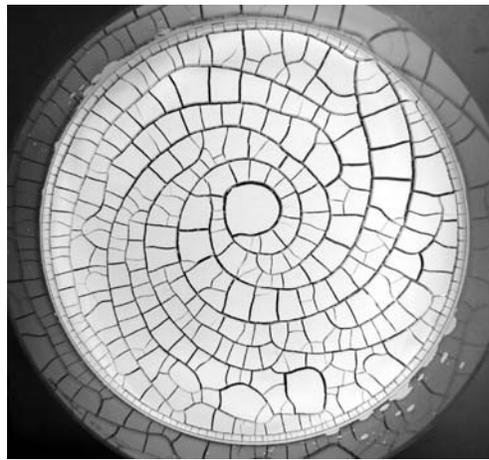


図 5: 螺旋状亀裂パターン。粉は炭酸水酸化マグネシウム。円形容器の直径は 500mm。作成方法は [4] を参照。

しょうか？その答えは参考文献 [4] に書いてあるので、興味のある方はご覧になってください。

## 5 まとめ

以上、ペーストを事前に揺ることにより、乾燥破壊時の亀裂パターンを制御できるようになりました。この制御法にはペーストのメモリー効果が大きな役割を果たしていますが、ここでは事前にペーストを揺ることによってペースト内にある種の渋滞を引き起こさせてマイクロな不均一構造を作ることが記憶の形成要因になっているのです。また、揺れの記憶だけではなく流れの記憶もできるということは、セル状・縞状・放射状だけではなく、リング・螺旋などの流線で表わされる任意の曲線状の亀裂パターンも作成できることを意味するので、この手法による破壊の制御の応用に汎用性があることが示されました。

## 参考文献

- [1] A. Nakahara and T. Isoda, Phys. Rev. E **55** (1997) 4264.
- [2] A. Nakahara and Y. Matsuo, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1362.
- [3] A. Nakahara and Y. Matsuo, J. Stat. Mech. (2006) P07016.
- [4] A. Nakahara and Y. Matsuo, Phys. Rev. E, **74** (2006) 045102(R).