

ペーストへの流れの刷り込みと乾燥記憶破壊

日本大学 理工学部 中原 明生¹, 松尾 洋介

ペーストを事前に揺すってから乾燥させると、乾燥過程において発生する亀裂は「事前のペーストの揺すり方」に依存したパターンとなる。当初、ペーストは「揺れの方向」のみを記憶すると思われていたが、その後の実験により、記憶にはいくつかのタイプがあり「流れの方向」を記憶するという別のメカニズムも存在することがわかった。ペーストに「流れの方向」を刷り込むことによって、様々な流線形の亀裂パターンを制御して自在に作成できるようになった。

1 はじめに

粉と水を混ぜて作ったペースト（高濃度のコロイド・サスペンション）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。このペーストを乾燥前に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 [1]。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 [1, 2]。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 [3]。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ので、報告する。

2 揺れの記憶

まず最初に、ペーストの「揺れの記憶」について説明する。炭酸カルシウムの粉末と水を混ぜてペーストを用意し、ペースト内の粉の体積比 (solid volume fraction) ρ が $\rho = 44\%$ の高濃度状態になるように調整しておく。このペーストを入れた容器を水平方向に一方向だけ揺すってその後乾燥させたところ、発生する亀裂パターンは縞状亀裂になることがわかった。そして、縞状亀裂の方向と初期に揺すった方向には常に垂直の関係があり、ペーストが「揺れの方向」を記憶していることがわかった [1, 2]。

ではなぜこのような縞状亀裂が形成されるのであろうか？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なければならない。

¹E-mail: nakahara@phys.ge.cst.nihon-u.ac.jp

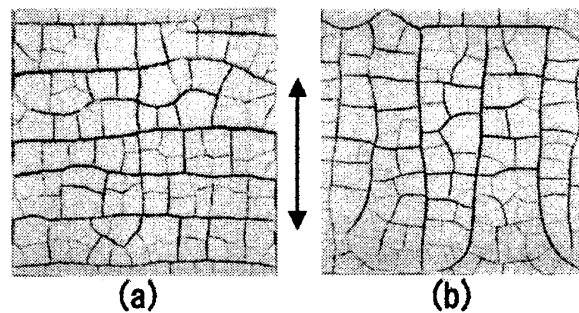


図 1: 縞状亀裂の方向の転移。粉は炭酸水酸化マグネシウム。初期振動の方向は矢印で示され、その加速度の大きさ $4\pi^2rf^2$ は 2.4m/s^2 。正方容器のサイズはどちらも縦横 200 mm。(a) 垂直縞。粉の体積比は $\rho = 12.5\%$ 。(b) 平行縞。粉の体積比は $\rho = 6.7\%$ [3]。

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非弾性衝突させられ、その際生じる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」の判断基準となってしまう、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と考えられる [1, 2]。

3 揺れの記憶から流れの記憶へ

最近、粉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、驚くべき結果を得た [3]。

図 1 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同時に水平に揺すってから乾燥破壊をさせた。図 1 (a) と図 1 (b) ではどちらも縞状亀裂を得たものの、粉密度が高い図 1 (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 1 (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 ρ と初期振動の加速度 $4\pi^2rf^2$ (r は振幅、 f は振動数) をパラメーターとした亀裂パターンの形態相図を作成した。図 2 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)、で表わしてある。 $\rho = 4\%$ 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実線は領域 A (セル状亀裂・揺れない・記憶なし) と領域 B (垂直縞・揺れる・記憶する) を分けるという役割を果たす。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 を分けるが、その線を引く際の基準は、初期に揺すったときのペーストの流動性を観察したときに領域 B では揺すった方向に揺れが生じ、領域 C では揺

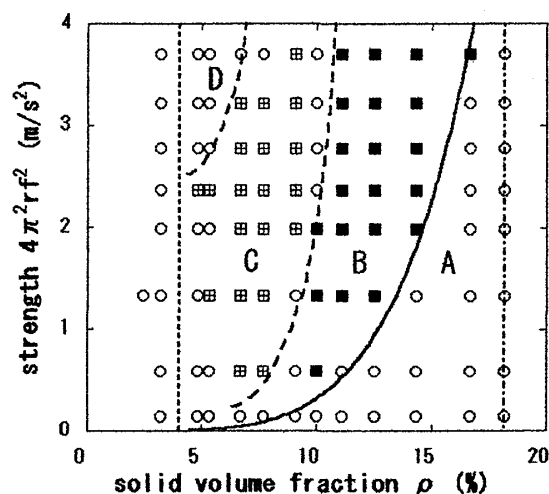


図 2: 亀裂パターンの形態相図。粉は炭酸水酸化マグネシウム。横軸は粉の体積比 ρ 、縦軸は初期振動の加速度 $4\pi^2rf^2$ 。○: 等方的なセル状亀裂、■: 垂直縞、田: 平行縞 [3]。

すった方向に流れが生じ、領域Dでは乱流が生じた、と区別する。

図2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ある。ところが、領域Cの中密度状態で揺すっ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る。我々は、この時、初期振動時の領域Cでのペーストの流動性として一方向に流れが生じていたことに注意する必要がある。このことより、領域Cは（平行縞・流れる・記憶する）、領域Dは（セル状・乱れる・記憶喪失）と整理できるのである。

図1と図2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ういう記憶の発現を示唆しているのだろうか？我々はこれまでの考察と図3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実証した。図3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すった方向に平行に割れているわけではないこと、正しくは、揺すっ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る。

4 流れの記憶のメカニズム

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」もできるのであるだろうか？その違いは粉の性質の違いにある。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がある。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

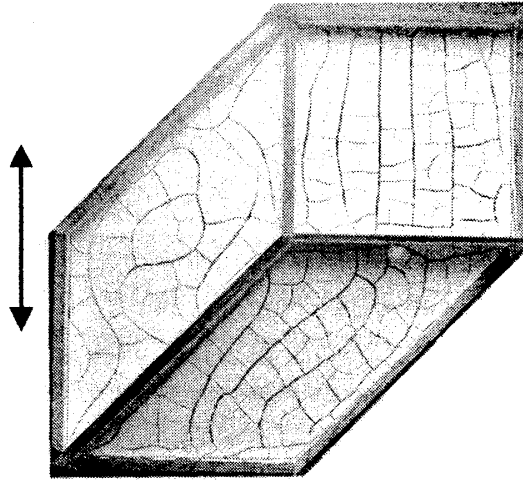


図 3: 相図内の領域Cで出現する「新たな記憶」が「流れの記憶」であることを突き止めた実験。粉は炭酸水酸化マグネシウム。亀裂パターンの方向は、揺すった方向ではなく、正しくは初期振動によって発生した流れの方向に平行であることがわかる [3]。

トと呼ばれるネットワーク構造を作り出す。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。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ない。

また、それぞれの粉を比較すると形状の違いもある。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るが、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う。

以上の結果を総合的に考えよう。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非弾性衝突が作る揺れの方向に垂直な縦波的な粗密構造のみである。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存在でき、しかも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られる [3]。

参考文献

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