

## 乾燥破壊における磁性ペーストが磁場を記憶するための条件

### Condition for the memory effect of magnetic paste in desiccation crack formation

○内田恭輔<sup>1</sup>, 松尾洋介<sup>2</sup>, 出井裕<sup>3</sup>, 中山寛士<sup>4</sup> 狐崎創<sup>5</sup>, 大信田丈志<sup>6</sup>, 中原明生<sup>7</sup>

\*Kyosuke Uchida<sup>1</sup>, Yousuke Matsuo<sup>2</sup>, Hiroshi Izui<sup>3</sup>, Hiroshi Nakayama<sup>4</sup>, So Kitsunozaki<sup>5</sup>, Ooshida Takeshi<sup>6</sup>, Akio Nakahara<sup>7</sup>

It has been found that a paste has a memory of external forces, which can be visualized as a morphology of desiccation crack patterns. Memory effect is applied to control crack formation, because, when the paste has a memory of vibration, desiccation cracks run in the direction perpendicular to the direction of the initial vibration. Here we succeeded in controlling the morphology of crack patterns by using a memory of magnetic paste on "magnetic field". Using a paste of iron oxide we experimentally studied the condition for the memory effect of magnetic field and found that the memory of magnetic field is induced not only by a magnetization but also by the plastic deformation of the network of iron oxide particles in the paste.

#### 1. 緒言

近年、ペーストの乾燥破壊時に発生する亀裂を制御する研究はサイエンスとしての面白さから工学的な応用を含めて注目されている。ペーストを加振しないでその状態のまま乾燥させると、等方的なセル状の亀裂パターンが発生するのだが、事前にペーストを水平に加振すると、ペーストは加振した方向を記憶し、その後静止させて乾燥した時に発生する亀裂のパターンは、初期に揺すった方向に依存した縞状パターンとなる<sup>[1]</sup>。またペーストが乾燥しきるまで磁場をかけ続けることによっても亀裂が制御できる可能性が報告されている<sup>[2,3]</sup>。そこで我々は、ペーストに短時間だけ磁場を印加し「磁場のメモリー効果」を発生させ亀裂を制御することを試みた。具体的には、乾燥後の亀裂を入りやすくするため<sup>[4]</sup>に磁性を持つ酸化鉄  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の粉に磁性を持たない酸化鉄  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の粉をブレンドする。それを純水に混ぜてペースト状にし、シャーレに流し込み、直流電磁石を用いて一様な磁場を 3 秒間流し、磁場印加を止めてペーストを 3-4 日かけて自然乾燥させる。その結果磁場の強さやペーストにおける粉の体積比率によって磁場のメモリー効果が起こる場合と起こらない場合があった。そこで、縦軸に磁場の強さ、横軸にペースト全体における粉の体積比率をとり、乾燥亀裂パターンの形態相図を作成し、磁場のメモリー効果が起こる条件を特定した。本研究では、磁場のメモ

リー効果が起こるメカニズムの解明を進めている。

#### 2. 実験装置・材料・手順

本実験に用いた実験装置は直流電磁石、直流電源、円形容器 ( $\phi 86$  mm, アクリル製)、純水である。実験手順を説明する。まず、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (関東化学, 磁性あり, 密度  $5.24\text{g/cm}^3$ ) の粉を  $1\text{cm}^3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (和光純薬, 磁性なし, 密度  $5.24\text{g/cm}^3$ ) の粉を  $4\text{cm}^3$  を混ぜ純水を加えペースト状にし直流電磁石のコイルの間にセットしたアクリル円形容器に注ぐ。そして直流電磁石を用いて Fig.1 の Z 軸方向に 3 秒間磁場かける。

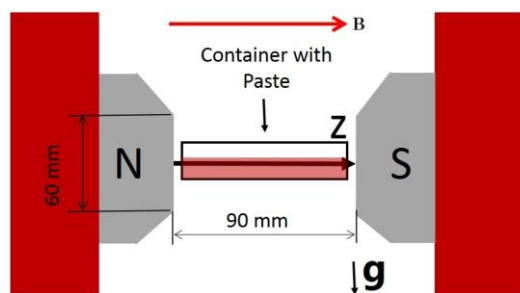


Fig.1 Schematic illustration of paste under magnetic field  
そして、磁場を止め乾燥破壊させる (平均 3-4 日)。

#### 3. 実験結果

ペースト中の粉全体の体積比率は次式で定義する。

$$\text{粉全体の体積比率}[\%] = \frac{\text{粉の体積}}{\text{粉} + \text{水の体積}} \times 100 \quad (1)$$

また、粉全体における  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の比率は次式で定義され今回は 20% に固定する。

日大理工・院 (前)・航空<sup>1</sup>, 日大理工・研究員<sup>2</sup>, 日大理工・教員・航空<sup>3</sup>, 日大習志野高校 (現宮崎日大高校)・教員<sup>4</sup>, 奈良女子大・物理<sup>5</sup>, 鳥取大・工<sup>6</sup>, 日大理工・教員・一般物理<sup>7</sup>

$$\text{粉における}\gamma\text{の割合}[\%] = \frac{\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{の体積}}{\text{粉全体の体積}} \times 100 \quad (2)$$

以下 Fig. 2 にペーストの形態相図と相図中の 3 種類の記号における亀裂パターンの写真を示す。

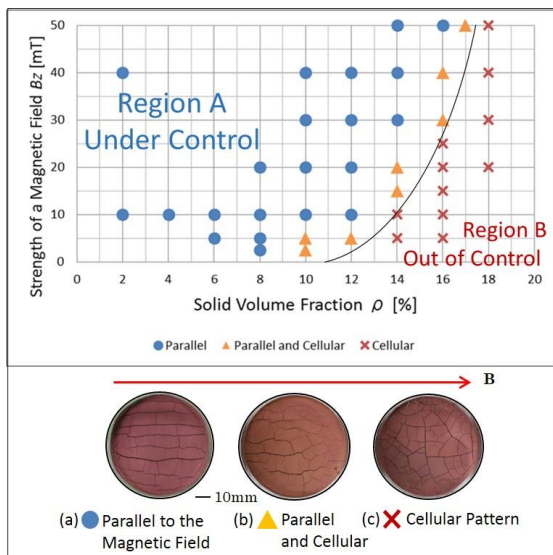


Fig.2 Morphological phase diagram of crack patterns

Fig.2 の結果から、磁場の強さと体積比率によって、ペーストがかけた磁場の方向を記憶し、亀裂パターンの制御が可能の時と不可能な時があることがわかった。●の部分には磁場の方向に平行な亀裂パターンが得られた。すなわち磁性ペーストが磁場を記憶し、その記憶に従って磁場方向に平行に亀裂が伝播する現象（メモリー効果）により、磁場によって亀裂方向が制御されたことが確認できた。一方で、×はメモリー効果が起こらず、等方的なセルパターンとなった箇所である。▲の箇所はメモリー効果による平行縞と等方的なランダムな亀裂が混在した。同じ体積比率でもかける磁場を強くするとメモリー効果を生じさせることが出来た。これはペーストの塑性が大きいので、小さい磁場をかけてもペースト中の  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  塑性変形による粒子配置が完全に変わらなかったが、強い磁場によって配置を変化させることができたためであると考えられる。ここで領域 A と領域 B の間に境界線を引くと単調増加関数的な曲線になる。この境界線の決定には磁場と言う外力と塑性と言う保持力の大小関係が関係していると考え、ペーストの降伏応力の測定を試みた。測定

方法は  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の粉と水を混ぜてペーストにし、レオメーターを使って、ペーストを平行円盤でサンドイッチしながらせん断応力をかけて得られたせん断速度を測定し、ペーストが流動化するときのせん断応力（降伏応力）を見積もった。結果は Fig.3 に示す。

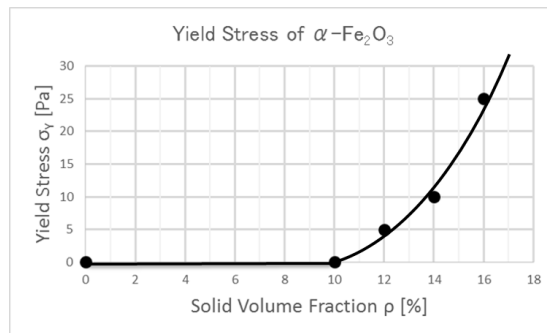


Fig.3 Yield stress obtained by Rheological measurement

Fig.3 を見ると曲線が Fig.2 の相図の境界線に近い形になっていることがわかる。今後は磁場によってペーストにどれくらいの応力が加わっているのかを具体的に測定して Fig.2 と Fig.3 の結果と比較し、磁場によるメモリー効果が発生するメカニズムを解明していく。

#### 4. まとめ

磁性を持つ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  と磁性を持たない  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の混合ペーストに短時間磁場をかけたところ、磁場に平行に亀裂が進行したのでメモリー効果が起き亀裂方向が制御できることが分かった。また、亀裂パターンの形態相図を作成することで混合ペーストにおいて亀裂が制御できる領域を特定することができた。

#### 参考文献

- [1] A. Nakahara and Y. Matsuo, "Imprinting memory into paste and its visualization as crack patterns in drying process", J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1362.
- [2] L. Pauchard et al., "When a crack is oriented by a magnetic field," Phys. Rev. E **77** (2008) 021402.
- [3] A. T. Ngo et al., "Do Directional Primary and Secondary Crack Patterns In Thin Films Of Maghemite Nanocrystals Follow a Universal Scaling Law", J. Phys. Chem. B **112** (2008) 14409.
- [4] 2012 年度日本大学理工学部卒業論文「磁性流体のメモリー効果と乾燥破壊制御」内田 恭輔, 柴崎 純