

ペーストの中原効果に対する2つの巨視的モデル

Two macroscopic models for the Nakahara effect in pastes

○大信田 丈志, 鳥取大工, 鳥取市湖山町南 4-101, E-mail: <ooshida@damp.tottori-u.ac.jp>
OOSHIDA Takeshi, Tottori Univ., Koyama, Tottori 680-8552, Japan

Two models are proposed for mechanical memory effect in pastes observed by Nakahara *et al.* Though the models appear quite different from each other, both of them are consistent with Nakahara's observation. One of the models is based on continuum description of paste and memorizes the external forcing in terms of the natural metric resulting in residual tension. In the other model, constructed as a discrete model with masses, springs and volume-conserving cells, it is the stiffness of the spring that remembers the forcing and leads to an anisotropic fracture process.

1. はじめに

中原効果^(1,2,3)とは、ペースト（粉と水の混合物）の乾燥破壊実験で発見された力学的記憶効果である。ペーストを浅い容器に入れてそのまま静置乾燥させると、乾燥収縮による張力が水平面内で等方的に発生し、ペーストは不規則に割れる。ところが、ペーストを容器に注いだ直後に数十秒のあいだ加振してから乾燥させると、割れる方向がそろう。割れる方向は、詳しく言えば条件によって異なるが、最も基本的な「第1種中原効果（揺れの記憶）」においては、振動方向に垂直な亀裂が発生する。

加振してから乾燥亀裂が発現するまで1日以上時間が経過しており、加振の効果が時間を置いて現れるという意味で、中原効果は記憶効果の一種である。加振中に何か“記憶の書き込み”が起きているはずであるが、それは具体的には何だろうか？ 実験から確実に言えるのは、塑性が関与しているということである。

本講演では、加振の過程で生じていると思われる塑性流動に着目し、第1種中原効果の説明となり得るモデルをふたつ提案する。ひとつは、いかにも流体らしい連続体モデルで、弾塑性流体としてペーストを記述する。もうひとつは巨視的離散モデルとでも言うべきもので、体積に束縛のかかった離散要素モデルである。

2. 連続体モデル

連続体すなわち弾塑性流体モデル^(4,5)の鍵となるのは、

$$\partial_t g_{ij}^{\alpha} = -\nu g_{ij}^{\alpha} + \nu_* g_{ij}^{\alpha} \quad (1)$$

という式で、 g_{ij}^{α} はバネの自然長の逆数に相当するテンソル量である。ただし式(1)は Descartes 座標系ではなく移流座標系におけるテンソル式であり、 ∂_t は Lagrange 微分である。通常の弾性体の言葉で言えば、式(1)は応力緩和をあらわしていて、 ν は応力を担う粒子間結合の消滅頻度、 ν_* はその生成頻度と解釈できる。さらに、 ν あるいは緩和時間 $\tau = 1/\nu$ を、(無次元化した)歪みエネルギー ε の関数として

$$\nu = \nu(\varepsilon) \sim \begin{cases} +0 & (\varepsilon < \text{閾値}) \\ \text{有限} & (\varepsilon \gg \text{閾値}) \end{cases} \quad (2)$$

のように閾値的に切り替えることで塑性を表現する。歪みエネルギー ε が閾値を下回ると、 ν は (ν_* も) ゼロとなり、式(1)は $\partial_t g_{ij}^{\alpha} = 0$ という凍結量の式となる。直感的には、塑性をもつペーストでは、外力を除くと応力緩和の特徴時間 τ が無限大に発散するので、外力の効果が g_{ij}^{α} を通じて後日の乾燥亀裂に影響を及ぼすということが可能になる。具体的な系での解析結果は、加振による残留張力の出現を示し、中原効果と整合的である。具体的には、式(1)から

$$\partial_t \alpha = \nu(\varepsilon) \left(1 - \frac{2e^{\alpha}}{2+\varepsilon} \right) \quad (3)$$

という式が導出できて、正の α が残留することが示される。

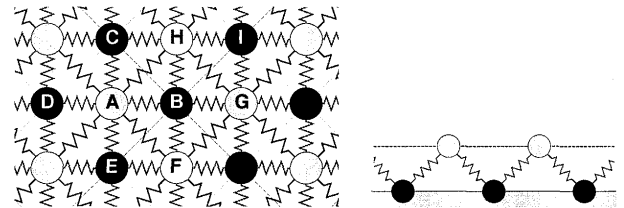


Fig. 1 Lattice configuration of the discrete model: top view (left) and side view (right). In this model, B, C, D, E, etc. are fixed on the bottom, while A, F, G, etc. can move under the constraint of constant cell volume.

3. 離散モデル

連続体理論は、 α すなわち“バネの自然長”に強く依存している。ほかの可能性をさぐるため、あえて自然長を用いない理論を構成してみる。記憶を担う変数は“バネ定数”である。ただし連続体モデルでこれをやろうとすると4階のテンソルを扱うことになって大変なので、離散要素的なモデルを考える。

ペーストは粉と水の混合物である。粉の役割を“バネ”すなわち変形に対する復元力としてとらえる。他方、水の役割は、粒子にとっての非圧縮の衣である。つまり、バネと体積排除効果を本質とするモデル化ができそうである。

具体的には、ペーストを多数の“細胞”の集合体と見なす。ちょうど泡に空気が詰まっているように、それぞれの細胞には水が詰まっており、しかも排水過程は非常に遅いので、短時間での挙動に関する限り、個々の細胞には体積一定という束縛がかかる。他方、細胞の表面は（粒子間結合の象徴としての）バネでできていて、その自然長はゼロであり、常に縮もうとしているものと考えられる。個々のバネの弾性エネルギーがある閾値を超えると、バネ定数の減少という形でエネルギーが解放される。このような方針で、バネの自然長を陽に含まない離散要素モデルを構築する。

図1のような系を具体的に構成し、加振外力を加えると、バネ AB やバネ AD が降伏し弱化する。これにより乾燥破壊の亀裂伝播に異方性が持ち込まれ、やはり中原効果の説明となり得る。

参考文献

- (1) 中原明生 & 松尾洋介, “乾燥破壊における粉体の記憶の実験”, 物性研究 **81-2** (2003), pp. 184–185.
- (2) A. Nakahara & Y. Matsuo, “Imprinting memory into paste and its visualization as crack patterns in drying process”, J. Phys. Soc. Japan **74** (2005), pp. 1362–1365.
- (3) A. Nakahara & Y. Matsuo, “Imprinting memory into paste to control crack formation in drying process”, J. Stat. Mech. 2006, P07016.
- (4) Ooshida Takeshi, “Continuum theory of memory effect in crack patterns of drying pastes”, Phys. Rev. E **77** (2008), 061501.
- (5) Ooshida Takeshi, “Three-dimensional residual tension theory of Nakahara effect in pastes”, submitted to J. Phys. Soc. Japan.