

# 乾燥破壊での亀裂の伝播

奈良女子大学・大学院人間文化研究科 狐崎 創 (So Kitsunезaki)  
Graduate School of Human Culture,  
Nara Women's University

## 概要

ゆっくりした乾燥に伴って生じる粉体ペーストの破壊の伝播速度を炭酸カルシウムとコーンスターチの2種類のペーストで測定し、乾燥速度に対する依存性、グリセリンを混ぜた場合の変化、試料の厚さ依存性を調べた。ペーストは柔らかい塑性体の状態で割れ亀裂は逐次的に生成し、個々の亀裂はほぼ一定の速度でゆっくり成長する。両ペーストとも亀裂速度は乾燥が遅くなると減少するが、その範囲と試料の厚さ依存性に著しい違いがあることがわかった。

## 1 Introduction

乾燥にともなうペーストの亀裂 (mud crack) は土壌や塗装の表面などに日常生活至るところで観察でき、破壊が作るパターン形成の問題として昔から興味を持たれてきた。微粒子と流体の混合物であるペーストは懸濁液状態でレオロジー的で、乾燥が進むと多孔質の固体に変化することからその物性は単純ではない。破壊現象でも粉の種類や混合によるパターンの変化、厚い試料で生じる柱状節理様の亀裂形成、初期の加振によって破壊パターンが変化する記憶効果など特有の現象が見つかっている [5, 8, 6, 9, 11, 13]。

本稿では準2次元的な乾燥破壊で個々の亀裂の成長速度を調べた実験を報告する。

容器にペーストを流し入れ一定の厚みの水平な層を作って乾燥させると図1のようなタイル状の亀裂パターンができる。以下ではコーンスターチなどで現れる3次元的な破壊 (Type II または secondary crack) と区別して Type I crack とよぶことにする [2, 10]。破壊の原因は底面が固定境界であるために乾燥に伴う試料の収縮で弾性応力が発生することであり、表面にほぼ垂直な面を持つ亀裂が逐次入ってT字型に交わり、最終的に厚さにおおよそ比例するサイズのタイルができる。このようなパターンの特徴は試料を線形弾性体とみなし適当な破壊条件を仮定した数値モデルで再現できる [4]。

一方、個々の亀裂の形成過程については実は基本的なメカニズムがわかっていない。Type I crack ではパターンの形成に要する時間と個々の亀裂の成長速度には直接の関係はなく亀裂の生成は間欠的に起こる。個々の亀裂の成長を観察すると、通常の弾性体では一様な圧縮応力状態で成長を開始した亀裂は加速して高速破壊に至るのに対して、ペーストの乾燥破壊での亀裂進展は目で追えるほど遅い。よって何らかのメカニズムで乾燥収縮に併せて亀裂が準静的に成長しているか、解放された弾性エネルギーを散逸しながら定常成長が実現しているか、のいずれかと推測されるがこの点に答える実験はまだ行われていない。



図 1: 炭酸カルシウムの乾燥破壊

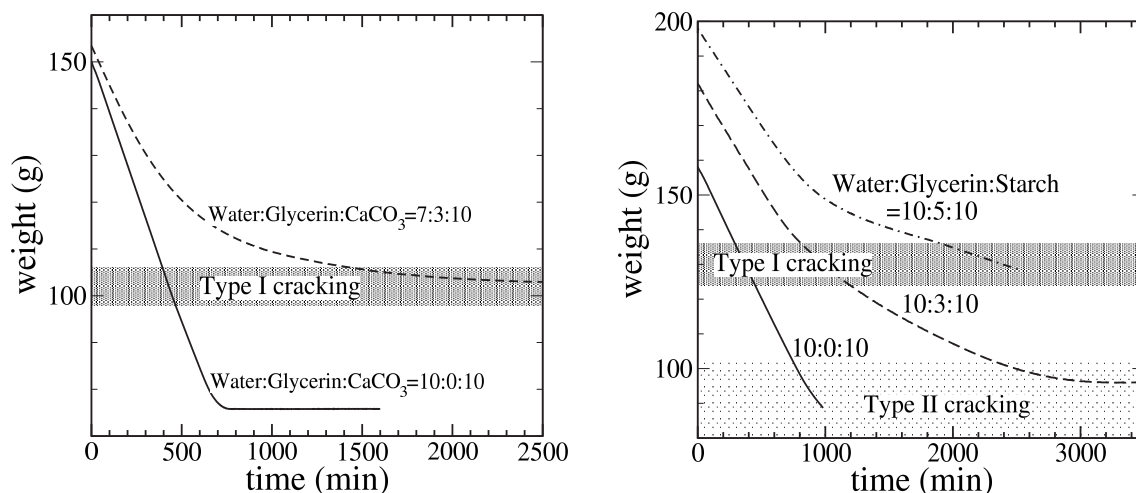


図 2: 質量の時間変化 (左: 炭酸カルシウム、右: コーンスターチ)

ペーストの乾燥破壊で亀裂の速度を定量的に測定した報告はわずかである。A. Groisman と E. Kaplan はコーヒーパウダーと水の混合物を調べ、亀裂速度は  $0.5 \sim 2.0 \text{ mm/min}$  の範囲で (1) 個々の亀裂についてほぼ一定だが、(2) 同時刻に割れた亀裂でもばらつきが大きいことを報告している [3]。一方、コーンスターチと水のペーストを用いた G. Muller と T. Dahm の実験結果では (1),(2) の特徴は同じだが速度が数  $\text{mm/s}$  ~ 数百  $\text{mm/s}$  と桁違いに大きい [7]。

これら先行研究は環境が変動する室温での乾燥実験でサンプル数も少ない。以下では炭酸カルシウムとコーンスターチの 2 種のペーストについて、温度一定の環境で亀裂形成の様子を撮影し、画像解析により亀裂の速度を測定した。上記の (1),(2) を確認するとともに、容器に蓋をする、グリセリンを混ぜる、試料を厚くするという 3 通りの方法で乾燥速度を変え亀裂速度依存性を調べた。

## 2 実験方法

実験に用いたのは炭酸カルシウム粉末 (密度  $2.72 \text{ g/cm}^3$ 、平均粒子径  $1.5 \mu\text{m}$ ) と、コーンスターチ粉末 (密度  $1.55 \text{ g/cm}^3$ 、粒子径  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ) である。粉末と水をスターラを使ってよく混ぜてペーストを作り、円形のポリスチレンシャーレ (直径  $14 \text{ cm}$ ) または正方形のアクリル容器 (一辺  $12 \text{ cm}$ ) に入れ電子天秤で質量を計測しながら乾燥させる。粉と水のペーストは重量比  $1:1$  で作る。グリセリンを入れる場合は、炭酸カルシウムペーストで水:グリセリン:粉体の重量比を  $(1-x):x:1$  として  $x$  を変化させたが、コーンスターチペーストは攪拌が難しいため  $1:x:1$  の混合比率を用いた。

図 2 に乾燥開始後の質量の時間変化の例を示す。容器を入れた実験装置内は保温ランプと温度コントローラで  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  に保ち、除湿機を連続運転して除湿する。湿度はコントロールしないが概ね一定で、質量の減少率は亀裂形成の間ほぼ一定である。

炭酸カルシウム、コーンスターチとも体積含水量 ( $\equiv (\text{流体の体積}) / (\text{流体} + \text{粉の体積})$ ) が 50% 前後で破壊が始まる。グリセリンを混ぜると、炭酸カルシウムではこの値がやや減少するがコーンスターチではほとんど変化しない。その後、5% 程度の減少の間にタイル状の亀裂パターン (Type I crack) が完成する。Type I crack 形成後もペーストの収縮は続くが、炭酸カルシウムでは完全に乾燥しきるまで亀裂間隙が開いていくだけである。一方、コーンスターチではかなり乾燥が進んでから表面から底へ向かう 3 次元的な破壊 (Type II crack) が始まる。

本実験では Type I crack の形成の過程を試料の真上から撮影した。炭酸カルシウムの亀裂はデ

デジタルカメラ (Canon EOS20D) を用いてインターバルタイマーで 10 ~ 60 秒間隔で静止画像を撮影し、亀裂の幅が狭く速度が速いコーンスターチの亀裂は LED 白色ライトによる透過光を用いてハイビジョンビデオカメラ (Canon HDV10) で動画撮影をした。

画像の最小解像度は約 0.1mm である。従って画像解析で捉えられるのは真の亀裂の先端よりやや後ろの亀裂間隙が開いた部分以降であるが、試料の厚みに比べて比較的長い亀裂は大きく間隙が開くので先端速度が測定できる。

撮影画像は二値化して容器の壁付近を除いて画像解析する [1]。まず亀裂パターン形成後の画像を細線化して亀裂骨格を抽出した後

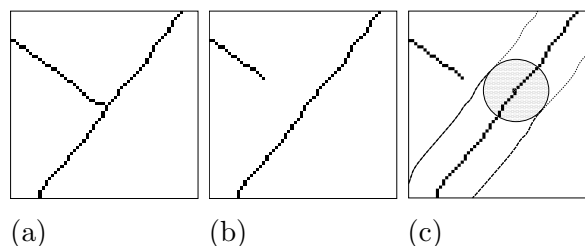


図 3: 画像解析の例 (亀裂骨格の一部)

(図 3a)、交差角を判定して結節点で細線を切断し個々の亀裂に分ける (図 3b)。このようにして作った骨格上の各画素について半径約 1mm の近傍領域の輝度変化を一連の実験画像について調べ適当な閾値で亀裂の形成時刻を判定する。抽出した亀裂骨格の画素数は細線化の手法に依存するため、亀裂の長さの判定には半径約 1mm の円で覆われる近傍領域の面積から換算した距離を用いた (図 3c)。破壊時刻のデータから速度を求めるために、亀裂骨格のそれぞれの地点で亀裂に沿って 25mm の区間をとり最小自乗法で速度を求めた。

### 3 実験結果

図 1 と同じ実験での破壊時刻の解析結果の一例を図 4 に示す。個々の亀裂は破壊開始直後と境界 (容器の壁や他の亀裂) の近くで遅くなる以外はおおよそ一定の速度で伸びる。また先行の研究結果と同様に亀裂ごとの速度のばらつきはかなり大きい。亀裂パターンができる間の温度及び乾燥速度はほぼ一定なので、これは個々の亀裂の境界条件や破壊条件の違いを反映していると思われるが原因は明らかでない。このため現段階では実験データから読み取れる定性的傾向を中心に報告したい。

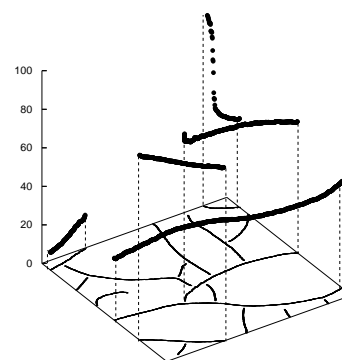


図 4: 破壊時刻の解析 (縦軸は画像番号)

以下、図 5 ~ 7 では亀裂形成時の体積含水量の減少速度を横軸として、個々の亀裂の平均速度をプロットしたグラフを炭酸カルシウムペースト (左) とコーンスターチペースト (右) について並べて示す。グラフのエラーバーは 1 本の亀裂の成長速度の標準偏差を表す。ただし最小自乗法フィッティングが悪い部分 (主として開始点付近や境界など一定速度にならない場所) を除くためその値は統計処理の閾値にある程度依存する。

図 5 は円形シャーレに隙間を開けて蓋をのせ蒸発を遅くした結果である。粉 80.0g に等量の水を混ぜてペーストを作り、隙間の間隔と除湿機の送風を調整することで乾燥による収縮速度をコントロールした。左右のグラフを一見してわかる顕著な違いは炭酸カルシウムに比べてコーンスターチペーストの亀裂速度が約 1000 倍程大きいことである。一方、両ペーストともに亀裂速度は乾燥速度の減少とともに小さくなり、亀裂形成時の乾燥速度が 0 なら亀裂速度も 0 に近づく。実際、炭酸カルシウムの場合は 1 本の亀裂が数分かかって延びるので途中で完全に密閉して蒸発を止めて亀裂が止まる様子を観察することもできる。

図 6 はグリセリンを加えて蒸発を遅くした結果である。ペーストに入れる粉の量はすべて同じ 80.0g で蓋をせず乾燥させる。乾燥が進むと水だけが蒸発してグリセリンの割合が増えるので破

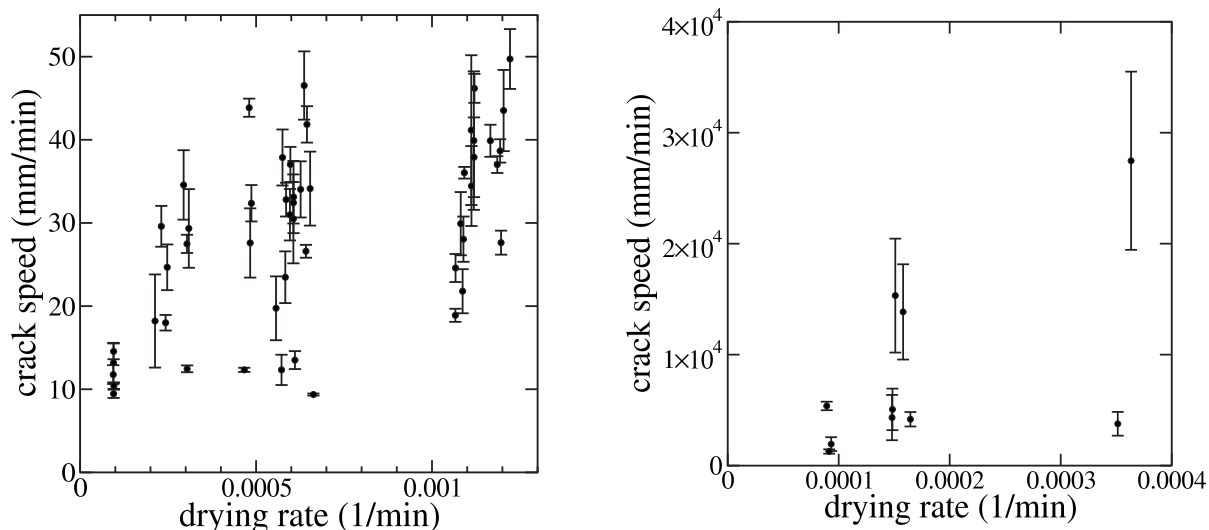


図 5: 亀裂速度の蒸発速度依存性：蓋をした場合（左：炭酸カルシウム、右：コーンスターチ）

壊時の蒸発速度は小さくなり、間隙流体の粘性が水に比べてかなり大きくなっていると期待できる。図の横軸の減少率はグリセリンを含む体積含水量で、ペースト作成時に混ぜたグリセリンの量を粉に対する重量パーセントで10%, 20%, ... と記載している。0%のデータは図5と同じある。グラフから明らかなようにグリセリンの増加とともに亀裂速度は減少する。ただしこれは乾燥速度減少の寄与も含むためグリセリンの効果を見るには図5と比較する必要がある。この比較においてははっきりした差が確認できるのは炭酸カルシウムペーストのデータで、グリセリンを加えた場合に乾燥速度の減少から期待される以上に大きく亀裂速度が低下している。

図7は一定の大きさの正方形の亚克力容器を用いペーストの量を変えた結果である。データの下に書き込んだ数字は乾燥後の単位面積あたりの質量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) でペーストの厚さに比例している。同条件で蓋なしで乾燥させているため単位時間当たりの蒸発量はほぼ等しいが、試料が増えると相対的に体積含水量の減少速度は減少する。亀裂速度の厚さ依存性はやはり図5と比較して判断する必要があるが、明らかにコーンスターチのペーストでは厚さの増加関数であるのに対し、炭酸カルシウムペーストは乾燥速度減少の寄与を除いても一定かむしろ減少関数であることがわかる。

#### 4 議論

以上に述べた実験はまだデータの精度の向上が必要であるが議論のためにこれまでで明らかになってきた点をまとめておく。

(共通点) 炭酸カルシウムとコーンスターチのペーストは共に

C0: 割れ始めの体積含水量は50%前後であり、

亀裂速度には以下の特徴がある。

C1: 音速に比べてかなり遅い。

C2: 境界の影響で遅くなる部分はあるが個々の亀裂については概ね一定である。

C3: 温度と収縮速度が一定でも亀裂ごとの値のばらつきが大きい。

C4: 乾燥速度が下がると0に減少する。

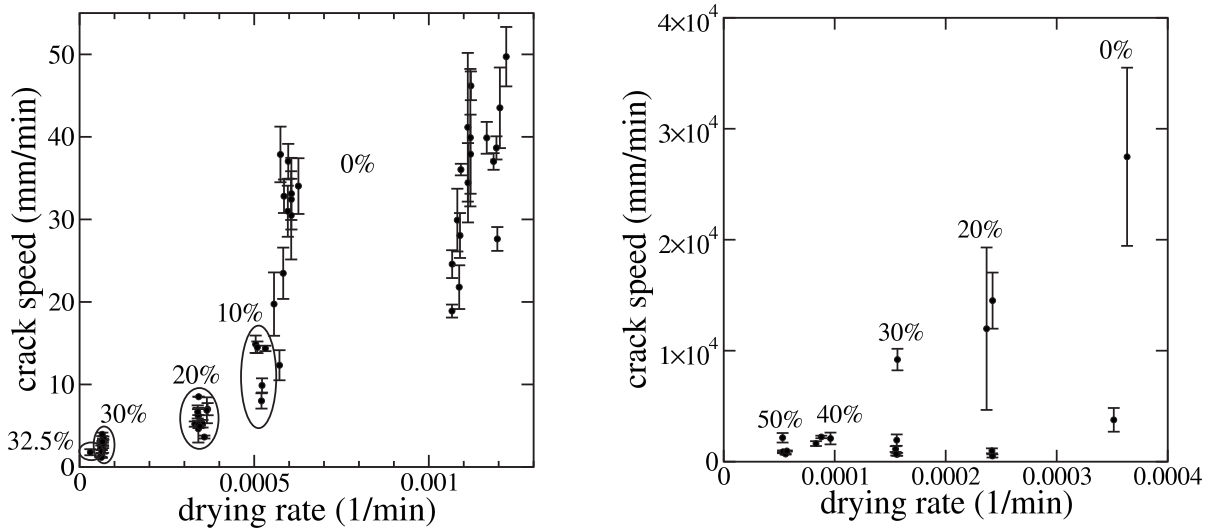


図 6: 亀裂速度の蒸発速度依存性：グリセリンを加えた場合

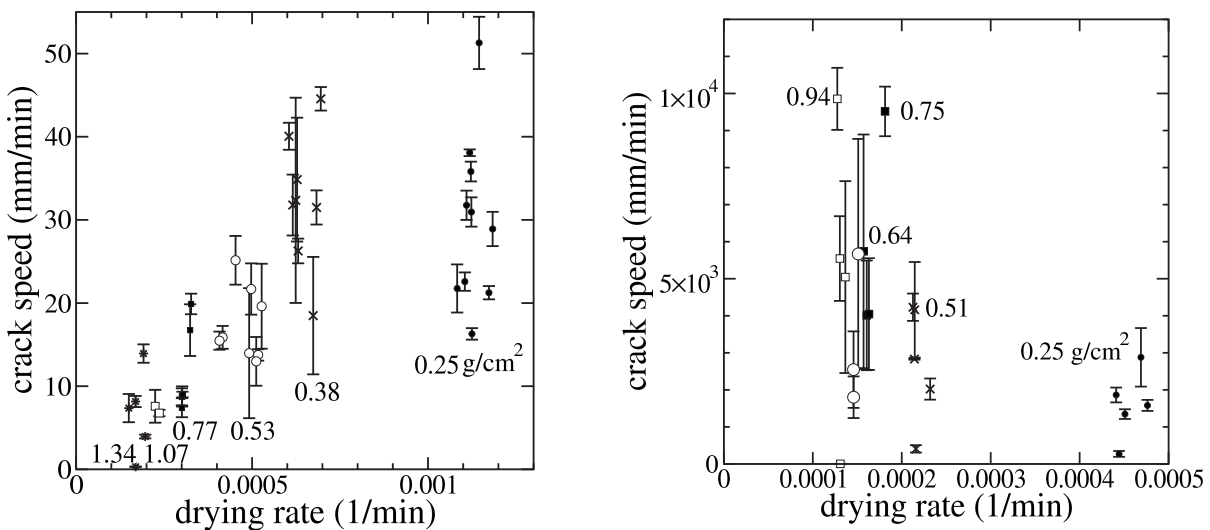


図 7: 亀裂速度の蒸発速度依存性：厚さを変えた場合

(相違点) 一方、両ペーストの亀裂速度には定量的かつ定性的に著しい相違がある。

D1: 炭酸カルシウムの 0~50mm/min に対しコーンスターチは  $10^3$  倍程度早い。

D2: ペーストの厚さに対して炭酸カルシウムはほぼ一定か減少するが、コーンスターチは増加関数になる。

(その他) また炭酸カルシウムペーストでのみ確認できている点であるが、

E1: グリセリンを混ぜると亀裂速度が減少する。

C0 はペーストの破壊がかなり軟らかい塑性体の状態で起きていることを示している。実際、破壊直後に取り出して衝撃を与えるとペーストは容易に流動化して亀裂を修復する。また図 8 は乾燥破壊後の炭酸カルシウムペーストの亀裂面のパターンである。このような羽毛状の模様 (plumose structure) は、コーンスターチペーストや一般の土壌、溶岩にできる柱状節理などでも確認されているが [7, 12]、完全に乾燥した後のペーストに力をかけて割った際には滑らかな面しか現れない。

C4 から乾燥を止めると亀裂の成長も止まることがわかったが、これは必ずしも破壊が準静的に進んでいることを意味しない。特にコーンスターチの場合、亀裂の伝播にかかる1秒程度の間の水の蒸発量は $1\text{cm}^2$  当たり数  $\mu\text{g}$  程度と極めてわずかだから試料全体の収縮に併せて亀裂が進む状況は想像し難い。また炭酸カルシウムペーストでは亀裂速度が乾燥速度に対して上に凸の関数になっていて準静的破壊から期待される比例関係がなく、E1 は亀裂速度が粘性に依存する可能性を示唆している。



図 8: 羽毛状の模様

炭酸カルシウムペーストは静電相互作用をする微粒子からなる典型的なコロイドであるのに対し、コーンスターチは帯電していない比較的大きな粒子からなる濡れた粉体である。D1、D2 の相違の原因はこのような微視的な相互作用の違いに求められるべきかもしれないが、コーヒー粉を用いた実験 [3] では亀裂速度はむしろ炭酸カルシウムペーストの値に近いことを思い出すと単純に結論が出せない。この点を明確にするにはまだ多くの種類のペーストでデータを蓄積する必要がある。

以上のようにペーストの破壊は現段階では明解な結論が出せていない点が多い。しかし上記に挙げた特徴は通常の弾性体の破壊とは著しく異なり、従来ほぼ固体状態で起きると素朴に考えられてきたペーストの破壊に対してレオロジー的物性や多孔質としての性質が強く関与していることを示していることは明らかであろう。

## 5 謝辞

本実験では装置の作成など準備段階を奈良女子大学複雑系の物理学研究室の青木美智子氏と共同で行っています。また現在研究は継続中ですが、中原明生氏、水口毅氏、西本明弘氏、占部千由氏には議論をして頂きありがとうございました。なお本研究は科研費 (19740240) の助成を受けています。

## 参考文献

- [1] 画像解析にはソフト ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) 上で作ったプログラムを用いた。
- [2] L. Goehring and S. W. Morris. Experimental investigation of the scaling of columnar joints. *Phys. Rev. E*, Vol. 74, p. 036115, 2006.
- [3] A. Groisman and E. Kaplan. An experimental study of cracking induced by desiccation. *Europhys. Lett.*, Vol. 25, No. 6, pp. 415–420, 1994.
- [4] S. Kitsunozaki. Fracture patterns induced by desiccation in a thin layer. *Phys. Rev. E*, Vol. 60, No. 6, pp. 6449–6464, 1999.
- [5] T. Mizuguchi, A. Nishimoto, S. Kitsunozaki, Y. Yamazaki, and I. Aoki. Directional crack propagation of granular water systems. *Phys. Rev. E*, Vol. 71, p. 056122, 2005.
- [6] G. Müller. Starch columns: Analog model for basalt columns. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. B7, pp. 15239–15254, 1998.
- [7] G. Müller and T. Dahm. Fracture morphology of tensile cracks and rupture velocity. *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, No. B1, pp. 723–738, 2000.

- [8] A. Nakahara and Y. Matsuo. Imprinting memory into paste and its visualization as crack patterns in drying process. *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 74, No. 5, pp. 1362–1365, 2005.
- [9] A. Nakahara and Y. Matsuo. Transition in the pattern of cracks resulting from memory effects in paste. *Phys. Rev. E*, Vol. 74, p. 045102(R), 2006.
- [10] A. Nishimoto, T. Mizuguch, and S. Kitsunezaki. Numerical study of drying process and columnar fracture process in granule-water mixtures. *Phys. Rev. E*, Vol. 76, No. 1, p. 016102, 2007.
- [11] A. Toramaru and T. Matsumoto. Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment. *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, p. B02205, 2004.
- [12] R. Weinberger. Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments. *J. Struct. Geol.*, Vol. 21, pp. 379–386, 1999.
- [13] 伊藤寛之, 宮田雄一郎. マッドクラックのパターン形成実験. *地質学会誌*, Vol. 104, No. 2, pp. 90–8, 1998.