

方向性破壊と角柱構造

大阪府立大学 工学部 水口 毅¹

京都大学 理学部 西本 明弘

奈良女子大学 人間文化研究科 狐崎 創

早稲田大学 理工学部 山崎 義弘

明治鍼灸大学 医療情報学ユニット 青木伊知男

1 はじめに

破壊によって形成される亀裂のパターンには、ミクロなものからマクロなものまで、様々なものが存在する [1]。なかでも、干上がったダム底や田んぼに見られるひび割れは、地形学的なパターンと言ってもよいであろう。他に、地形学的な対象といえば、氷河のクレバスや諏訪湖をはじめとしたいいくつかの湖で見られる「御神渡り」なども考えられるであろう。目を宇宙に転ずれば、ここ数年で著しく発達した観測技術や探査手段によって、地形的な現象を地球外にも求めることができるようになってきており、まさに、現在、観測データが次々に蓄積されている文字通りのフロンティアと考えられる²。特に、最近ホットな研究対象として注目を集めている火星の表面には、クレーター、砂丘をはじめとして、様々な地形的な画像が報告されているが、その中には、亀裂によるものではないかと思われるセル状のパターンもある。また、木星の衛星エウロパには、ボイジャーによってその表面に無数の線状パターンがあることが知られていたが、ガリレイ探査計画によって得られた詳細な画像から、それらのパターンが氷の表面にできた亀裂であることが報告されている³。

こういった地形的な現象の中で、その美しさや不思議さで古くから研究対象になってきた現象の一つとして柱状節理がある。一般に柱状節理は玄武岩、安山岩などの火成岩に

¹ E-mail: gutchi@ms.osakafu-u.ac.jp

² 他の惑星や衛星上の地形パターンへのアプローチは、地球や衛星軌道、探査機などからのマクロな観測が最初でありきである。したがって、「パターン」から「そこで一体何が起こっている（いた）か」を知るといった問題が設定されやすい。こういった問題を考えるためには、様々なスケール／環境／物質にわたる諸現象を普遍的にとらえることが有用であると思われるが、これは地形学の目指す新しい方向の一つではないだろうか。

³ なかでも、サイクロイド状の亀裂パターン [2] は興味深い。日周潮汐力による氷の破壊の結果ではないかという説がある。

良くみられ、噴出した溶岩が冷えて固まる時に形成されると考えられている [3]. もっとも有名なものの一つに、北部アイルランドのジャイアント＝コースウェイがあるが、1694年に Foley が報告したイラストは 300 年あまりたった現在でもその不思議さを十分に伝えている. 柱状節理に関する研究は、主に、フィールドワークによる観測とモデルによる理論的な解析が多い. 露頭部分の詳細な観測によって、角度分布、角形分布や節理側面のすじ状の周期構造など、いくつもの興味深い性質が明らかにされているが、実験の困難さが、亀裂の三次元的な構造の把握を妨げており、理論との比較も十分とは言えない.

本稿は、粉体と液体の混合物の乾燥過程という、柱状節理の形成とはまったく異なる状況において、柱状節理と類似した亀裂の三次元パターンが生成されるという現象に関する報告である.

2 実験

粉体と流体の混合物を乾燥させることによって、混合物内部に亀裂が生じる現象は、古くから知られているが、Groisman らの実験によってその重要性が再認識されたと言えよう [4]. この混合物の比較的薄い層の乾燥に対して観測される亀裂(タイプ 1)は、深さ方向にほぼ一様な構造を持ち、亀裂生成に必要な応力集中は、主に容器や基板等と試料の収縮率の違いによるものとされている.

一方、Müller あるいは著者らによって注目された粉体と流体の組合せ(デンプン+水)では、上に述べたタイプ 1 の亀裂とともに、別の種類の亀裂(タイプ 2)も観測される [5][6]. このタイプ 2 は、タイプ 1 と異なり、三次元的な様相を呈することが明らかになっている. 玄武岩と異なり、材料が比較的脆いことから、サンプルを破壊して、その三次元的な構造を直接観察することが容易である. また、樹脂固化研磨法を用いた断面可視化、X線CTを用いたX線吸収率の分布の可視化、MRによる含水量測定など種々の測定方法によって三次元的な構造が精密に調べられるようになってきている. 本稿ではこのうち、MRを用いた含水量測定に関して簡単に述べる [6].

乾燥過程において含水量分布の変化は主に三つのステージに分けられる. 第一ステージは、乾燥開始から時刻 τ_1 までで、含水量に対応するグレイスケールは一様な値 c_1 でその変化はほとんど見えない. 第二ステージは、 τ_1 に含水量の変化が急激におき、短い時間の間にほぼ全体が c_2 になる. この時、断面によっては亀裂と思われる「筋」が入る場合があるが、これは、MR 外での観測結果と照らし合わせると、タイプ 1 の亀裂生成と考えられる. 第三ステージでは、グレイスケール c_2 が c_3 へ変わるが、この変化は c_1 から c_2 の変化に比べてゆっくりであること、上面から内部に変化のフロントが伝搬するという特徴を持つ. タイプ 2 の亀裂はこのステージで形成されているので、これらの特徴を具体的に見てみよう.

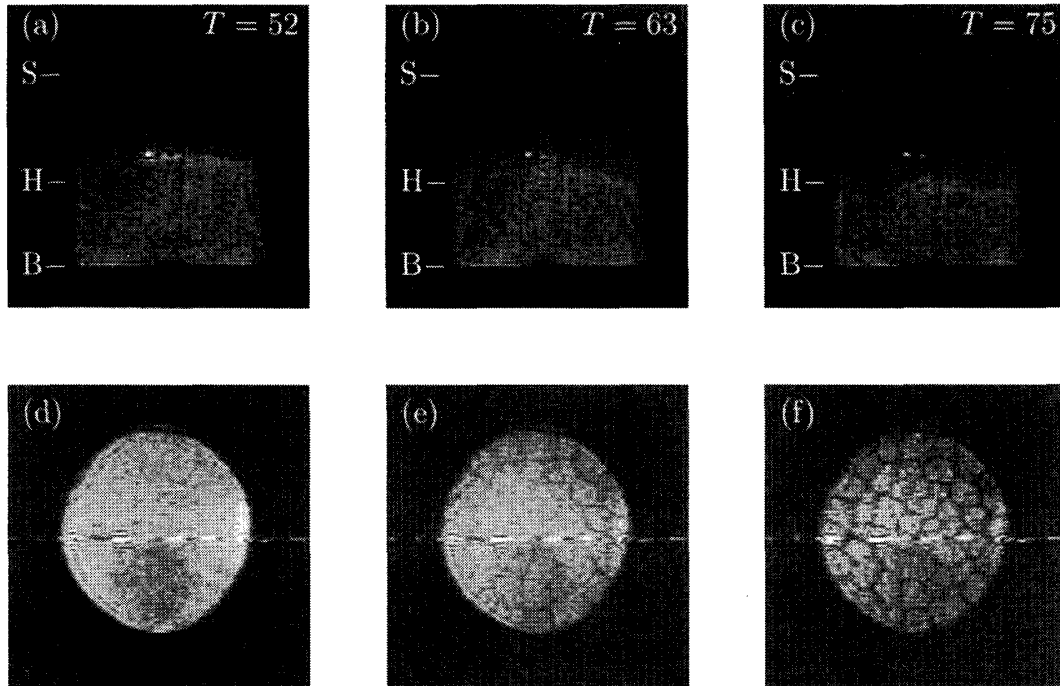


図 1: 初期サイズ直径 28.5[mm]× 高さ 27[mm] の円柱型サンプル中の含水量の垂直方向の分布の時間発展 (a)(b)(c) と、ある決まった深さにおける含水量の水平断面の時間発展 (d)(e)(f). それぞれ、左から順に、第三ステージの開始から $\tau = 51, 63, 75$ 時間後. (a)(b)(c) で、フロントより下では、ほぼ一定値 c_3 であり、フロントより上では、比較的滑らかに c_2 まで変化する. “S”, “B” はサンプルの表面と底面の位置を, ”H” は (d),(e),(f) の断面の位置それぞれ表す.

図 1 (a)(b)(c) は、第三ステージに入ってから含水量分布のスナップショットを時系列順に示したものである. 含水量のフロントが、表面 “S” から内部に向かってゆっくりと伝搬していく様子がわかる. このとき、サンプル表面から一定の深さでの含水量の水平分布の各時刻のスナップショットが (d)(e)(f) である. $\tau = 63$ あたりでちょうど、垂直分布でいう「肩」が、その深さを通過するが、その時に、多角形セルパターンが形成されていることがわかる. 異なる深さでの含水量分布の時間変化を追っても、特徴的なサイズは変わるが、同様の多角形セルパターンが肩の通過後に観測されることがわかる.

この、含水量分布のフロントが多角形的なセル構造をなしているという事実は、亀裂先端の位置と含水量フロントの位置に相関があることを示唆している. また、垂直分布の関数形と照らしあわせて考えれば、タイプ 2 の亀裂が乾燥に際して排水口の役割を果たしていることも考えられる.

本実験で得られたこれらの三次元的な亀裂のパターンに対して、いくつかの疑問がすぐに浮かぶ. たとえば、セルの特徴的な長さ、角形分布、亀裂の先端の配位、位置などであるが、これらに対する理論的なアプローチは今後の課題である.

3 おわりに

本稿で述べた乾燥過程による亀裂と柱状節理とは、形成するための物理的プロセスが異なるだけに、単純な比較は難しい。たとえば、柱状節理の形成の主な要因は、火成岩の冷却過程で生じる熱応力とされているが、その形成において、割れ目が「排熱口」の役割りを有意に果たすかは疑問である。熱応力による破壊現象に関しては、ガラス、セラミックなどの様々な物質での研究が盛んであり [7]、これらとの関係も興味深い。

参考文献

- [1] Hirata, M., Shizen (Japanese) (1967); Walker, J., Sci. Am. **255** (1986) 178.
- [2] Hoppa, G.V. et al. Science **285** (1999) 1899.
- [3] Folley, S., Philos.Transact., **212** (1694) 170; Aydin, A. & Degraff, J.M., Science **239** (1988) 471; E.A.Jagla and A.G.Rojo, Phys. Rev. E **65** (2002) 026203.
- [4] Groisman, A. & Kaplan, E., Europhysics Letters **25** (1994), 415; Kitsunozaki, S, Physical Review E **60** (1999), 6449; Leung, K. & Neda, Z., Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 652; Shorlin, K.A. et al., Phys. Rev. E **61** (2000) 6950; Nakahara, A. private communication.
- [5] Müller, G., J. Volcanology and Geothermal Research, **86** (1998), 93; Müller, G., J. Geophys. Res. **103** (1998), 15239.
- [6] Mizuguchi, T. et al., Bussei Kenkyu (Japanese) **71** (1999) 684; Powders and Grains:2001 (2001) 55.
- [7] Yuse, A. & Sano, M., Nature **362** (1993) 329; Hayakawa, Y., Phys. Rev. E **50** (1994) 1748; Bahr, H.-A. et al., Fracture Mechanics of Ceramics **11** (1996) 507; Ronsin, O. & Perrin, B., Europhysics Letters **38** (1997) 435; Korneta, W. et al., Phys. Rev. E **57** (1998) 3142.