

高分子ゲルの破断面に現れる規則的パターン

田中良巳 京都大学人間環境研究科

深尾浩次 京都大学総合人間学部

宮本嘉久 京都大学総合人間学部

関本謙 京都大学基礎物理学研究所

1 はじめに

高分子ゲルとは、高分子でできた3次元の網目構造が多量の溶媒を含んだものである。例えば、寒天やゼリーなどが身近なゲルの例である。この例からも分かるように、ゲルは容易に大変形し、かつこのときの弾性率は溶媒を含まない一般のゴムに比べてもかなり小さい。このような系は従来の破壊研究の視野の外であった。我々はゲルの破壊実験を行い、破断面に2種類の規則的なパターンが生じることを見いだした[1]。これらのパターンは特徴的な大きさが、数 mm ～数 cm に及ぶ様なマクロなものであり、破断速度を変えることによって二つのパターンの間の転移が見られる。さらに直接観察から、亀裂の先端に沿ってある基本構造が存在し、パターンはこれによって生じることが解った。このような構造の形成は、亀裂進行線方向に関する一様性の破れを意味し、3次元破壊の本質の一つと考えられる。

2 実験

実験には、一般的な化学ゲルであるアクリルアミドゲルを用いた。破壊に用いた試料は、各辺の長さが5 cm、5 cm、10 cmの角柱状である。試料の一つの側面に、長軸と垂直に切り目（深さ3 mm）を入れ、これを開いていくこと（mode I型の変形）によって破壊を行う。切り目を開く速度を実験的に変えることによって、いろいろな破壊速度が実現できる。また、ゲルは透明であるので、破壊速度が遅いときには進展中の亀裂先端を実体顕微鏡で直接観察することが可能である。

3 スケールパターンとリバーパターン

図1は典型的な破断面の例であり、破壊の進展方向は、どちらも図の上から下である。左が破断速度の遅いとき、右が破断速度の速いときに生じるパターンであり、その形からそれぞれスケールパターン（ウロコ模様）、リバーパターンと名付ける。これらのパターンは、破壊速度が約0.5 cm/sの時を境にして入れ換わる。ただし、この付近の破壊速度においては、スケールとリバーが入り混じった乱れた破断面が得られる。

いずれの場合もゲルの破断面は、段違いの面からなる。破断面のパターンはこの段差の部分が作る模様である。

破壊速度が遅いときのスケールパターンを生じている破断面を図1の水平方向に切って、破断面の段差の形を観察した。段差の形は本質的には、2種類しかない（図2）。一つは、図2の左側に示したような、付け根に切れ込みを持ったもの。もう一つは切れ込みを持たないもの。これら是一对の破断面において、ちょうど噛み合うように存在している（ポジ・ネガの関係）。直接観察によって、進展中の亀裂先端に図

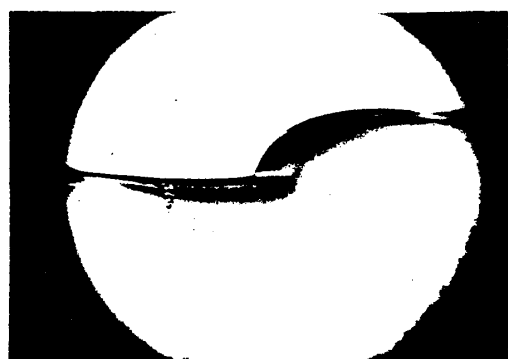


1cm

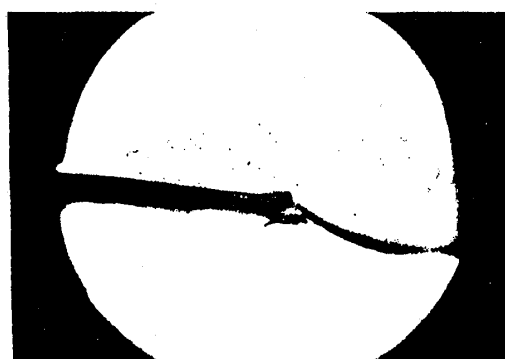


1cm

図 1: ゲルの破断面。左は破断速度が 0.026cm/s の時 (スケールパターン) 右は破断速度が 2.3cm/s の時 (リバーパターン)。破壊の進展方向はどちらも上から下である。



1mm



1mm

図 2: スケールパターンに存在する 2 種類の段差 (どちらも下側がゲル)。左側のタイプには付け根に切れ込みがある。これらは、ポジ・ネガの関係にある。

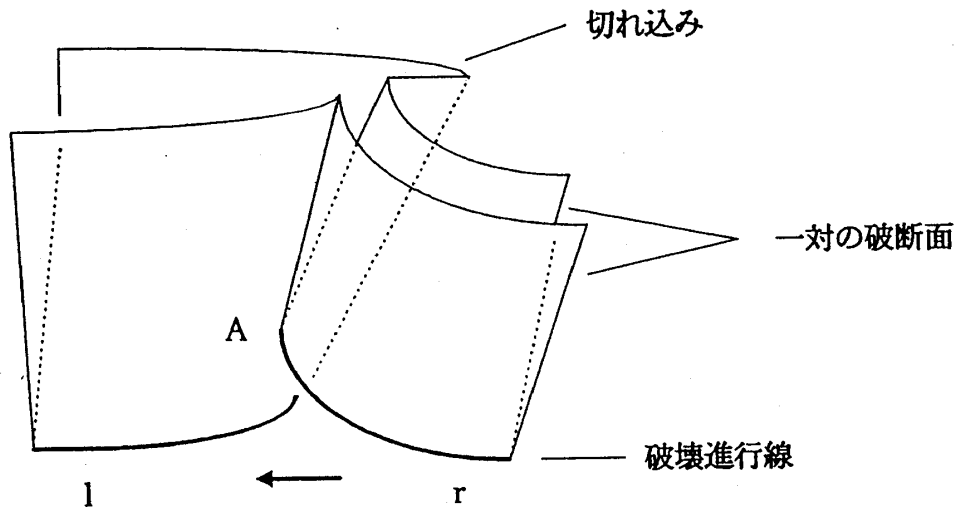


図3: 亀裂の先端に生じる構造=τ-構造。これは、亀裂進行線の切断部分である。すなわち、破壊進行線の右側部分rは端点Aをもち、左側部分lとはつながっていない。lは切れ込みの先端とつながっており、Aはlが先に進展してできた破断面上にある。τ-構造は破壊の進展に伴って図中に←で示した方向に動く。

3に示したような構造が生じ、これが破断面に上に述べたような段差を残すことがわかった。ただし、図はreference space(relaxed state)に近い状態での形を描いており進展中の亀裂先端では大変形している。以降、この亀裂先端の構造をτ-構造と呼ぶことにする（これによってできる亀裂の形が、ギリシャ文字のτに似ているので）。

τ-構造の特徴的な点は、亀裂進行線がそこで切断されていることである。進行線の右側の部分rは、端点Aをもち、左側の部分lとはつながっていない。lは切れ込みの先端線につながっている。破壊途中でこのような構造が自発的に生じ、安定性を保って進展するのである。

図1(a)のスケールパターンにおいて線（段差）はどちらか斜めに傾いているが、これはτ-構造が破壊の進展にともなって矢印に示した方向（切り込みの反対側）に動くことによる。この性質から、亀裂先端でのτどうしの2体衝突がしばしば起こる。この様なときも、対消滅したり、合体してより複雑な他の構造ができたりはしない。どちらか一方のみが生き残るか、または、互いに通過するかである。図1(a)における線の交差部分は、この通過の跡である。

一方、リバーパターンができるような破壊速度が速い条件では、顕微鏡下で進展中の亀裂先端を詳細に観察することは不可能である。破壊が完了した破断面を見ると、段差はギザギザした荒れたものであり、図2の様な特徴的な形はない。このことから、破断速度が大きくなるとτ-構造が不安定化するものと思われる。

4 まとめ

ゲルの破壊で見えたものを一口にまとめると、τ-構造の形成（亀裂進行線の切断）とその安定性及び不安定化、ということになる。そして、これらの背景にあるのは、亀裂先端が線状でありこれに沿う亀裂の形状の変化が許されることである。いうなれば、破壊の3次元性である。従来、あまり積極的に議論されてこなかった破壊の3次元性であるが、少なくともゲルにおいては、これに由来する明快な規則性を持った現象が存在することを紹介した。そして、我々が日常目にする複雑な破壊の多くも、上の意味で3次元的である様に思える。

現在のところ、本稿で述べた現象に対する物理的な説明には至っていない。特に、ゲルの特異な力学的性質（柔らかく大変形可能、多量の溶媒の含むこと等）がどのような役割を果たしているか。この点は、ソフトマテリアルの破壊という少々目新しいテーマにつながるとともに、ゲルの破壊が、3次元破壊一般の特徴をどの程度表しているかを知る上でも重要である。ゲルが一般的な3次元破壊のモデル系としての意味を持ちえるならばなお幸いである

参考文献

- [1] Y.Tanaka, K.Fukao, Y.Miyamoto H.Nakazawa and K.Sekimoto J.Phys.Soc.Jpn (1996) vol.65,2349