

高分子シートに生じる亀裂進展の速度ジャンプ現象の 普遍性について

共同研究者：お茶の水女子大学 野原 葵
研究代表者：お茶の水女子大学 奥村 剛

破壊現象は材料の開発や安全性評価につながる現象として研究が行われてきたが、その代表的なものに亀裂進展がある。この亀裂進展に関しては、ゴム材料において、亀裂の進む速度があるひずみで一万倍近くまで急激に速くなる速度ジャンプ現象が実験的に知られている[1]。

本研究の主題となるこの速度ジャンプ現象についてまず説明する（図1参照）。一定のひずみに伸長したゴムシートに切り込みを入れると、試料が十分に長ければ、亀裂進展速度が一定速度に達する。この亀裂進展速度が、ひずみが大きいほど速くなることは直感的にも想像できであろう。しかし、ゴムにおいては、ある臨界ひずみを境にその速度が千倍から一万倍もジャンプすることが知られている。この現象が速度ジャンプ現象とよばれ、このジャンプを制御することで、強靱な材料の効率的な開発が期待できるため、ゴムの開発の指針として使われてきたが[2]、長く、理論的説明が存在しなかった。

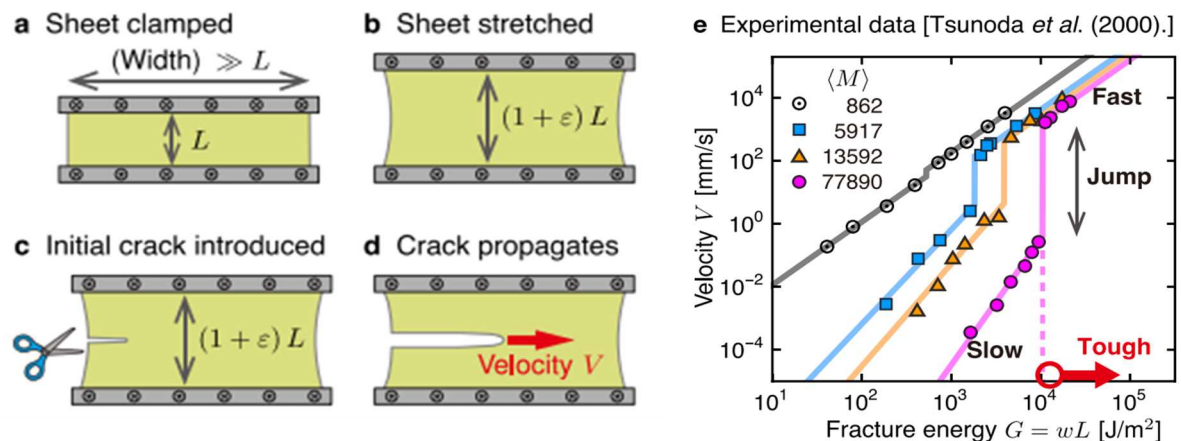


図 1：静的境界条件による速度ジャンプの説明の図（文献[4]より転載 CC BY 4.0）

しかし、2017年には、速度ジャンプ現象がシミュレーション[3]や解析理論[4]によって再現された。代表者らによる解析理論[4]では、速度ジャンプの起源が亀裂先端でのガラス化であることが解明された。この起源については、さらに、実験・理論・数値計算の観点からの複合的研究によって検証が進んだ [5]。これらの結果は、ガラス化を起こす粘弾性材料であれば、非ゴム材料でも速度ジャンプが観測される可能性を示唆している。

上に説明した速度ジャンプ現象の実験は、ひずみを一定に保って亀裂進展を観察するために静的境界条件による方法ともいえる。この方法では、一枚のシートを切り裂くと、図1eに示したような速度とひずみのグラフ上の一点が得られる。どのひずみでジャンプが起こるか調べるには、何枚ものシートを切り裂いて、速度とひずみのグラフを得る必要がある。

これに対して、代表者らは、シートを引っ張りながらひずみを大きくしていく際の亀裂進展速度を観察する動的境界条件による方法で実験を行った。その結果、非ゴム材料においても速度ジャンプが起こることを示した[6]。この動的な方法では、一枚のシートを引き裂く過程で、一挙に速度とひずみのグラフが得られるため、非常に効率的である。

この動的な方法には、実は、さらにメリットがある。実は、文献[6]で速度ジャンプを検出したのと同じ材料を使い、静的な方法で実験を行った先行研究[7]では、速度ジャンプが観測されなかったのである。この原因は、静的な実験では、一定ひずみを与える準備時間の間に、緩和の効果でジャンプが覆い隠されてしまったと考えられる。一方、動的な方法では、緩和の効果を抑えることができたために速度ジャンプが観測できたと考えられる。

ただし、これらの研究[6, 7]で用いた高分子材料は、燃料電池のセパレータに使われる多孔性のポリマーで、ありふれた高分子材料ではない。一方、ありふれた非ゴム高分子材料で速度ジャンプ現象が確立されれば、ゴム材料の強靱化に速度ジャンプ現象が役立ってきたように、多くの高分子材料の強靱化に速度ジャンプ現象が役立つ可能性がある。

そこで本研究では速度ジャンプ現象の普遍性の確立を目指して生活に身近な非ゴム材料を用いて動的亀裂進展法による破壊実験を行うことを目的とした。そして、身近な非ゴム材料の典型ともいえる、食品用ラップフィルムをサンプルとして使い速度ジャンプ現象が起こることを発見した[8-11]。実は、文献[6, 7]で用いた非ゴム系材料では速度ジャンプは明確に観察されたが、ジャンプ時のひずみやジャンプ前後の速度にはサンプル依存性があり再現性に問題があった。しかし、本研究ではこれらの量に関して非常に再現性の良いデータが得られた。さらに、速度とひずみのグラフが軸の再規格化によって実験条件によらない普遍的マスターカーブに収斂することも見いだされた。この結果は、この場合の速度ジャンプ現象がひずみに支配されていること、さらに、亀裂に沿った変形を特徴づける小さな長さスケールが存在することを示唆している。

一方、本サンプルの粘弾性測定の結果からは、ガラス転移が確認されこの意味では理論と整合した。しかし、しかし、理論が仮定している単純な粘弾性特性を持っているわけでもないため、ある意味当然ではあるが、理論から予測される定量的な性質との不整合も明らかとなっている。

今後、さらに、異なるタイプのありふれた非ゴム材料での速度ジャンプ現象の系統的な実験を積み重ねるなどして、理論の発展につなげ、強靱な高分子材料の開発のツールとしての速度ジャンプ現象を確立していきたい。

なお、本研究の主な内容は研究代表者の研究室の大学院生野原葵氏との共同研究であり、詳細は文献[11]にまとめられている。

参考文献

- [1] K. Tsunoda, JJC. Busfield, CKL. Davies, and AG. Thomas, *J. Mater. Sci.* 35 (2000).
- [2] Y. Morishita, K. Tsunoda, and K. Urayama, *Phys. Rev. E* 93 (2016).
- [3] A. Kubo and Y. Umeno, *Sci. Rep.* 7 (2017).
- [4] N. Sakumichi and K. Okumura, *Sci. Rep.* 7 (2017).
- [5] A. Kubo, N. Sakumichi, et al., *Phys. Rev. Mater.* 5 (2021).
- [6] T. Tomizawa and K. Okumura, *Polymer* 173 (2019).
- [7] A. Takei and K. Okumura, *MRS Commun.* 2018.
- [8] 口頭講演, 野原葵, 奥村剛, 日本物理学会第79回年次大会(北大), 2024/09/16-19
- [9] 口頭講演, 野原葵, 奥村剛, 日本物理学会2025年春季大会(オンライン), 2025/03/18-21
- [10] 口頭講演, 野原葵, 奥村剛, 日本物理学会第80回年次大会, 広島大学, 2025/9/16-19
- [11] Aoi Nohara and Ko Okumura, Universality in the velocity jump in the crack propagation observed for food-wrapping films for daily use (under revision):
<https://arxiv.org/abs/2509.09347>