

ゴムの亀裂進展速度ジャンプのメカニズム解明 とタフ化への指針の構築

東京大学 作道 直幸



作道直幸氏

ゴムなどのソフトマテリアルにおいて、亀裂進展の速度が1 mm/s未満の低速から1,000 mm/s以上に急激に高速化する「速度ジャンプ」現象が知られている。速度ジャンプの抑制は、ゴム材料の耐亀裂性・耐摩耗性の向上につながるから、その理解と制御は工学的に重要である。例えば、ゴム材料の耐亀裂性・耐摩耗性が向上すれば、自動車等のタイヤを十分な耐久性を保ったまま薄くすることが可能になり、重量の低減による低燃費性、原材料の削減による省資源性、生産時の消費エネルギーの低減につながる。しかし、その発生メカニズムは1950年代にこの現象が認識されて以来の謎であり、広く受け入れられているメカニズムはなかった。

受賞者は、この問題を解決するために本質を抽出した厳密に解ける数学モデルを構築し、この数学的な解析解を用いて速度ジャンプの起源とゴム材料のタフ化への指針を明らかにした。通常の有限要素法 (FEM) などの数値シミュレーションでは、材料シートをメッシュ状の小領域に分割し、小領域同士が粘弾性模型で相互作用する。受賞者は、まず材料シートを格子化して格子の頂点と頂点を結ぶ辺の部分に粘弾性模型を置いた格子モデルを考えた。そして、格子モデルを亀裂進展問題に特化させて、亀裂進展部分の格子点のみを自由度として粗視化するというアイデアを着想した。この粗視化によりモデルが簡単になり、数学的に解くことができる。粗視化格子モデル中の粘弾性模型として最も単純なVoigt模型 (バネとダッシュポットの並列) を採用すると速度ジャンプは起きず、これにもう一本のバネを加えた三要素Zener模型を採用すると速度ジャンプが生じることを数学的に厳密に証明した。三要素Zener模型は、ゴムの持つ重要な性質である「ガラス化」の効果を取り込んだ最も簡単な模型である。ガラス化とは、ゴムを極端に速く変形すると (貯蔵) 弾性率が千倍ほど大きくなる (固くなる) 現象である。ゴムは熱運動 (ブラウン運動) する高分子鎖の網目からできているために柔らかいが、熱運動よりも速く変形すると鎖が剛直な棒のように振る舞い、プラスチックのように固くなる。受賞者はこの粗視化格子モデルに基づいて、ゴムの速度ジャンプの起源が亀裂先端部

のガラス転移に由来することを明らかにした。さらに、速度ジャンプが発生するときの破壊エネルギーの臨界値の数学的な表式を求めることでゴム材料のタフ化 (耐亀裂性・耐摩耗性向上) への指針を与えた。本研究の原著論文は、日刊工業新聞、ゴムタイムス、自動車タイヤ新聞などのゴム関連の業界紙を含む新聞紙上報道5紙、科学雑誌2紙、Yahooニュースなどのwebメディアに多数取り上げられるなど大きな注目を集めた。

さらに、受賞者は企業との産学連携研究により、粗視化格子モデルの帰結の妥当性をSBR, NBR, BRなどのさまざまな合成ゴムを用いて実証した。同時に、実験に即した物性パラメーターを用いた有限要素法 (FEM) による速度ジャンプの数値シミュレーションとの比較により、粗視化格子モデルをFEM計算のモデルから速度ジャンプの本質だけを抜き出したミニマルモデルであることを正当化した。今後、粗視化格子モデルの結果に基づいて、実験に即したパラメーターでFEM数値シミュレーションを行うことで、より現実に即したゴム材料のタフ化への指針を与えることが出来ると期待される。

本研究からゴムに限らず様々な粘弾性固体において速度ジャンプが生じることが示唆される。実際、最近になって、ゲルや樹脂など粘弾性を持つさまざまなソフトマテリアルでも観測例が報告されつつある。本研究やそれを拡張した数学モデルが、どこまで普遍的に亀裂進展の本質をとらえられるのかを探ることは、今後の重要な課題である。今後の研究で明らかにされていく、さらなるタフ化への指針によって、さまざまな新規タフポリマー材料の開発が効率的に進むことが期待される。

共同研究や議論を通じて有益な助言やご指導を頂いた、お茶の水女子大学の奥村剛教授、青柳裕子博士、富澤多香子氏、産業技術総合研究所の武居淳博士、東京大学の久保淳博士、梅野宜崇教授、京都工業繊維大学の浦山健治教授、東京工業大学の中嶋健教授、(株)ブリヂストンの角田克彦博士、森下善広博士、三菱ケミカル(株)の樹神弘也博士に深く感謝いたします。また、本研究成果を日本ゴム協会で発表することを勧めて頂いた山形大学の井上隆名誉教授に深く感謝いたします。