



Title	ソフトマターにおける動的破壊挙動の理論的解析
Author(s)	長滝谷, 北斗
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105524
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 長 滝 谷 北 斗 ）	
論文題名	ソフトマターにおける動的破壊挙動の理論的解析
論文内容の要旨	
ゴムやゲルなどのソフトマター材料は自動車のタイヤからコンタクトレンズに至るまで、現代社会において極めて広範な役割を担っている。これらの材料を安全かつ効率的に活用するためには、材料内部における破壊挙動を深く理解し、その制御指針を確立することが不可欠である。破壊現象を扱う主要な学問体系である線形弾性破壊力学（LEFM）は、ガラスのような硬質材料の破壊を高い精度で予測してきた。しかし、ソフトマターの破壊においては、亀裂形状の先鋭化や亀裂速度が横波速度を超える超音速亀裂など、LEFM の予測から大きく逸脱する現象が数多く報告されている。 本論文では、これらソフトマター特有の破壊現象を解明するため、線形粘弾性体の運動を連続体力学に基づき厳密に解析した。亀裂形状の解析においては、比較的低速な進展領域に着目して慣性項を無視することで、動的な進展を静的な境界値問題へと置換する特有の変数変換が可能であることを示した。この解析の結果、粘弾性散逸に起因して、純弾性体には見られない複雑な冪則が亀裂形状に現れることが明らかとなった。これにより、亀裂先端の先鋭化は、亀裂進展速度や粘弾性特性に応じてこの冪則が変化するプロセスとして統一的に理解できる。また、亀裂前方のひずみ場には特有のプラトー領域が出現することも判明した。さらに、本解析で得られた厳密解は、P. G. de Gennes が提唱したスケーリング理論「粘弾性トランペット」と同一の冪則に従っており、本成果はスケーリング則を連続体力学の枠組みから再定義し、理論的基盤を与えるものである。 さらに、慣性項を含む厳密な解析により、線形粘弾性体からも超音速亀裂が生じることが確認された。亀裂速度が弾性波速度を超える際、マッハコーンが形成されることが確認された。加えて、超音速領域では亀裂面が激しく振動するという特異な挙動も明らかになった。以上の解析結果は、これまでの実験事実を物理的に矛盾なく説明するものであり、ソフトマターにおける動的破壊挙動の解明に向けた強固な理論的枠組みを提供するものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (長 滝 谷 北 斗)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	垂 水 竜 一
	副 査	教 授	尾 方 成 信
	副 査	教 授	中 村 篤 智
	副 査	教 授	大 槻 道 夫 (島根大学 総合理工学部)
	副 査	准教授	作 道 直 幸 (東京大学 大学院工学研究科)
論文審査の結果の要旨 ゴムやゲルに代表されるソフトマターは、優れた柔軟性と特異な力学物性から広範な産業分野で応用されているが、その破壊制御指針の要となる動的な破壊過程については未解明な点が多く残されている。本論文は、ソフトマターの破壊靱性向上に資する理論的基盤の構築を目的とし、亀裂進展時における動的な破壊力学特性を二次元連続体力学の枠組みから厳密に解析したものである。本研究の最大の特徴は、材料の変形速度に依存する粘弾性緩和の影響を考慮した線形粘弾性モデルを採用し、一定速度で伝播する定常亀裂進展状態に対して、亀裂とともに移動する座標系を導入した点にある。このアプローチにより、時間依存性の強い複雑な動的破壊現象を移動座標系における静的な境界値問題へと帰着させ、数学的に厳密な取り扱いを可能としている。主な研究成果として、亀裂進展速度の増大に伴い、亀裂形状を支配する幂乗則が三段階に遷移することを理論的に見出した点が挙げられる。特に、高速度域で顕著となる亀裂先端の先鋭化現象は、実験的に観測されている「速度ジャンプ現象」と密接に関連することを示唆するものであり、ソフトマターの靱性決定メカニズムを解明する上で重要な知見である。また、本解析結果は、P. G. de Gennesがスケーリング則を用いて提唱した予測に対し、連続体力学の立場から確固たる数学的証明を与えたものとして学術的に高く評価される。さらに、慣性項を考慮した動力学的解析においては、Wiener-Hopf法を用いることで亀裂速度に依存した亀裂形状の厳密解を導出している。これにより、亀裂速度が弾性波速度を超越する可能性を理論的に示すとともに、それに伴うマッハコーンの形成過程や亀裂速度の理論的上限値を明らかにした。以上の成果は、ソフトマターの動的破壊挙動に対して強固な理論的枠組みを提示するものであり、ソフトマター材料科学の発展に大きく寄与するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。			