

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14839

研究課題名（和文）ゴム材料強靱化のための材料設計指針の確立

研究課題名（英文）Construction of guiding principles of materials design for tough rubbers

研究代表者

久保 淳（Kubo, Atsushi）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：40760335

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ゴム材料のき裂進展における速度転移現象（外力負荷量がある閾値を超えた際にき裂進展が急激に加速される現象）のメカニズムを解明することを目的として、有限要素法（FEM）解析および数理モデル解析をおこなった。FEM解析においては、き裂進展のシミュレーションにより、転移エネルギー（速度転移を発生させるために必要な引裂きエネルギー）を評価した。材料の力学パラメータを系統的に変化させて解析を実施することで、転移エネルギーへの影響因子を明らかにした。理論モデル解析では、FEM解析で得られた描像に基づき、き裂先端近傍の力学状態から転移エネルギーを推定するための関係式を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂進展速度転移現象はゴム材料の寿命と非常に密接に関連しており、速度転移を引き起こす「転移エネルギー」が大きいほどき裂が進展しにくく、疲労や摩耗に強いということが知られている。つまり転移エネルギーの大きいゴム材料を開発すれば、製品の強靱化・長寿命化が実現できる。本研究では、弾性や粘性といった既知の力学パラメータと転移エネルギーの関係性を明らかにした。本研究の成果により、転移エネルギーを向上する（つまり、ゴム材料を強靱化する）ための材料設計指針が得られ、材料開発における大幅なコスト削減および製品の長寿命化による環境負荷の低減などの効果が期待される。

研究成果の概要（英文）：We conducted a series of finite element method (FEM) analyses and mathematical-model analyses for the purpose of revealing the mechanism of the “velocity transition” phenomenon in crack propagation (an abrupt acceleration of crack propagation beyond a critical external load) in rubber-like materials. The FEM simulation of crack propagation were performed to obtain the relationship between the known material parameters (e.g., elasticity, viscosity) and the transition energy (i.e., the critical tearing energy to induce the velocity transition). A series of FEM simulations with systematically varied material parameters revealed the determining factors for the transition energy. A mathematical model was constructed on the basis of the FEM results, where the transition energy was estimated as a function of the mechanical state at the crack tip.

研究分野：材料力学

キーワード：ゴム 破壊力学 き裂進展 有限要素法

### 1. 研究開始当初の背景

ゴム材料の強靱化は産業上きわめて有用な課題である。例として、自動車用タイヤを考えると、素材となるゴム材料を強靱化することで、長寿命化や薄ゲージ化による環境負荷の低減や経済的コストの削減といった効果が期待される。

ゴム材料の靱性と関連した現象として、き裂進展における「速度転移」現象が挙げられる [1]。速度転移現象とは、き裂を有するゴム材料に対して外力負荷（引裂きエネルギー）を与えたときに負荷の大きさがある閾値を超えると、き裂進展が急激に加速される現象である (図 1 左)。速度転移を引き起こす閾値となる引裂きエネルギーを転移エネルギーと呼び、材料固有の物性値である。転移エネルギー以上の負荷の下ではき裂進展が急速に進むため、転移エネルギーは材料の実効的な耐荷重に相当する。言い換えれば、ゴム材料の強靱化のためには、転移エネルギーの大きなゴムを開発すれば良い (図 1 右)。そのためには、材料の転移エネルギーが他の機械的特性（弾性、粘性など）とどのような関係にあるのかを明らかにすることが必要である。転移エネルギーに対する影響因子となる物性を明らかにすることで、ゴム材料を強靱化するための材料設計指針を得ることができる。

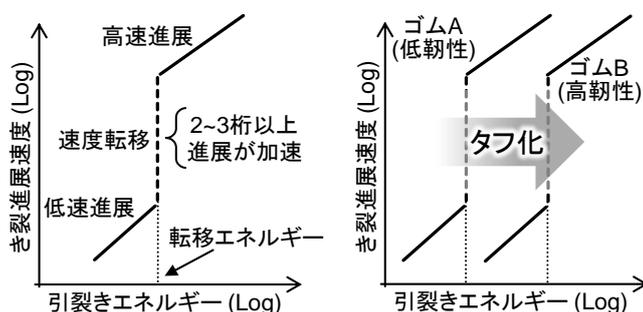


図1: ゴム材料での典型的な引裂きエネルギーとき裂進展速度の関係。低速・高速進展の二領域からなり (左), 速度転移点での引裂きエネルギー (転移エネルギー) が高いほど、靱性が高い (右)。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、シミュレーションおよび理論モデル解析によってゴム材料のき裂進展における速度転移現象の詳細を明らかにし、強靱化のための実用的な材料設計指針を提示することである。まず、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) によるき裂進展シミュレーションによって速度転移挙動への影響因子となる材料物性を明らかにし、その結果を踏まえて、転移エネルギーを推定するための理論モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 転移エネルギーへの影響因子特定のための FEM 解析

これまでに当グループで確立したシミュレーション手法 [2] に従って、FEM によるき裂進展シミュレーションを実施する (図 2)。まず、短冊状ゴムシート試験片に対して一定量のひずみを与えて固定した後、端部に予き裂を導入する。自発的に進展するき裂の進展速度を計測する。引裂きエネルギーは負荷したひずみから計算できるので、負荷するひずみの量を様々に変化させて同様のシミュレーションを実施することで、引裂きエネルギーとき裂進展速度の関係 (図 1) および転移エネルギーが得られる。

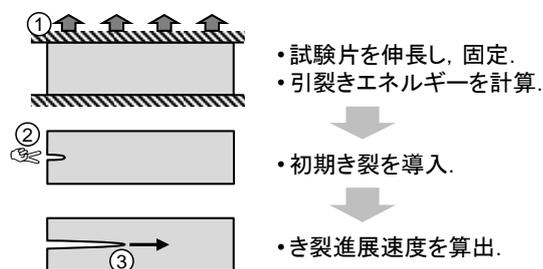


図2: FEMによるき裂進展解析のプロセス。ひずみを様々に変化させてこのプロセスを繰り返すことにより、転移エネルギーを求めることができる。

さらに材料の力学特性 (弾性、粘性) を系統的に変化させてこの一連のシミュレーションを実施することで、材料の粘弾性特性と転移エネルギーの関係が得られる。本研究では基礎的な知見を確立するために、特に比較的単純な材料特性のモデルに対して重点的にシミュレーションを行う。

## (2) 転移エネルギー推定のための理論構築

FEM 解析では、き裂が進展してゆく過程におけるき裂先端の力学状態の変化 (き裂先端近傍の各要素の応力・ひずみの時間変化) を詳細に把握することができる。ここでは、FEM 解析によって得られた結果に基づいて、次の2種類の理論モデルを構築する: (i) き裂先端の力学挙動と材料特性 (主に粘弾性) の関係を定式化する; (ii) き裂先端の力学状態から転移エネルギーを推定する。

## 4. 研究成果

### (1) 転移エネルギーへの影響因子特定のための FEM 解析

材料の粘弾性特性を系統的に変化させき裂進展シミュレーションを実施した。例として、粘弾性モデルにおけるガラス状態の弾性率  $E_1$  を系統的に変化させた際のひずみとき裂進展速度の関係を図3に示す。引裂きエネルギーひずみと正の相関があるため、この結果から、ガラス状態での弾性率が大きいほど転移エネルギーが大きい、すなわち高速進展が生じにくいということが分かった。この他にも、準静的負荷に対する弾性率や、粘弾性応答の時定数などを変化させ、各物性パラメータと転移エネルギーの関係を導いた。その結果、各物性パラメータと転移エネルギーの間の相関関係は、本研究と独立に提案された理論モデル[3]と定性的に整合することが分かった。この結果は本研究の妥当性を示唆している。

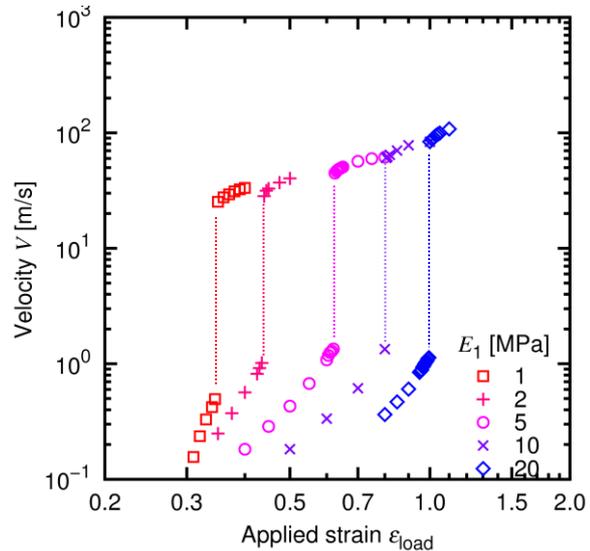


図3: 材料の粘弾性特性 (ガラス状態の弾性率  $E_1$ ) を変化させたときのひずみとき裂進展速度の関係。破線は転移エネルギーを表す。

### (2) 転移エネルギー推定のための理論構築

① FEM シミュレーションの結果を精査することにより、き裂先端のひずみの時間変化が急激な荷重変化に対する粘弾性応答として表せることが示唆された。急激な荷重変化をステップ的に増加する応力として定式化し、き裂先端における特徴的な力学応答を再現することに成功した。  
② き裂の先端がある要素に到達してからその要素が破壊に至る過程をモデル化し、き裂進展速度と転移エネルギーの関係を導出した。転移エネルギーの評価に特化することで、数理モデルの構成の大幅な簡略化が可能となり、転移エネルギーを簡便に推定するための枠組みを構築することに成功した。

### (3) 他材料への応用可能性

近年の研究動向として、ゴム材料に限らずゲルなどの様々なソフトマターにおいても靱性に関する研究が進んでおり、様々な種類の材料において同様の速度転移現象が確認されている[4,5]。また、シミュレーション・理論解析からは、一般に粘弾性材料であれば速度転移現象が生じるとということが示唆される。すなわち、速度転移現象はソフトマターにおける一般的・普遍的な現象であると考えられる。本研究で得られた知見は広範なソフトマターの靱性の議論に適用可能であり、様々な材料に対する強靱化のための材料設計指針となることが期待される。

### (4) 本成果の対外発表の予定

本研究成果に関連して、これまでに国内学会での口頭発表 1 件をおこなった。また、学術論文 (国際誌) 1 件を現在投稿中、2 件を現在執筆中である。

## 参考文献

- [1] Morishita et al., *Phys. Rev. E* **93** 043001 (2016).
- [2] Kubo and Umeno, *Sci. Rep.* **7** 42305 (2017).
- [3] Sakumichi and Okumura, *Sci. Rep.* **7** 8065 (2017).
- [4] Murai et al., *Polymer* **178** 121686 (2019).
- [5] Liu et al., *Polymer* **181** 121782 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保淳, 梅野宜崇
2. 発表標題 ゴムのき裂進展速度ジャンプ機構の検討：有限要素法および数値モデル解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------