

プログラム名：超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現

PM名：伊藤 耕三

プロジェクト名：タイヤ薄ゲージ化プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

タフポリマー開発のためのエラストマーの非線形粘弾性

および亀裂進展機構の解析

研究開発機関名：

国立大学法人京都工芸繊維大学

研究開発責任者：

浦山 健治

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

### (I) エラストマーの非線形粘弾性測定技術：

エラストマーのサイクルひずみ試験における顕著なひずみ軟化現象（マリンス効果）およびマリンス効果によって生じる構造異方性を様々な変形モードを用いて調べ、印加するひずみ場の異方性による効果を明らかにする。

### (II) エラストマーにおける亀裂進展モデルの構築技術：

エラストマーの亀裂進展速度の転移現象に伴う速度と亀裂先端の形状の変化を定量し、理論的な解釈を与える。速度転移が生じる引裂エネルギーのしきい値を支配する材料パラメータを明らかにする。粒子画像流速計測法（PIV）法によって亀裂の先端近傍でのひずみ場を定量し、速度転移との関連性を明らかにする。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

#### (I) エラストマーの非線形粘弾性測定技術：

エラストマーのマリンス効果を自作の装置を用いた様々な二軸および一軸伸長変形で調べ、散逸エネルギーのひずみ量および変形モード依存性を明らかにした。また、様々な変形モードでサイクルひずみをうけた後のエラストマーについて、変形によって生じた構造ダメージとその異方性を評価する手法を確立した。

#### (II) エラストマーにおける亀裂進展モデルの構築技術：

異なるゴム種とフィラー種を用いた様々なエラストマーの亀裂進展速度の転移現象を調べ、材料の弱非線形弾性を考慮した破壊理論を用いて、亀裂先端の形状の変化を解析した。速度転移が生じる引裂エネルギーのしきい値を様々な材料パラメータを用いて整理し、その支配因子を考察した。PIV法によるひずみ場の解析手法は確立したが、速度転移現象との関連づけについては検討段階にある。

### 2-2 成果

#### (I) エラストマーの非線形粘弾性測定技術：

エラストマーのマリンス効果を均等二軸伸長（EB）、平面伸長（PE）と一軸伸長（U）で調べ、荷重-除荷重曲線から散逸エネルギー（ $D$ ）と入力エネルギー（ $\mathcal{W}$ ）を評価し、その比である散逸因子  $\Delta (=D/\mathcal{W})$  に着目した解析を行った。様々な変形モードとひずみ量で得られた  $\Delta$  のデータを、ひずみテンソルの第一不変量（ $I_1$ ）を用いて整理すると、変形モードによらない1本の曲線が得られることがわかった（図1）。小さなひずみ域で  $\Delta$  がひずみ量とともに増加する挙動は、フィラーが形成する網目状の高次構造がひ

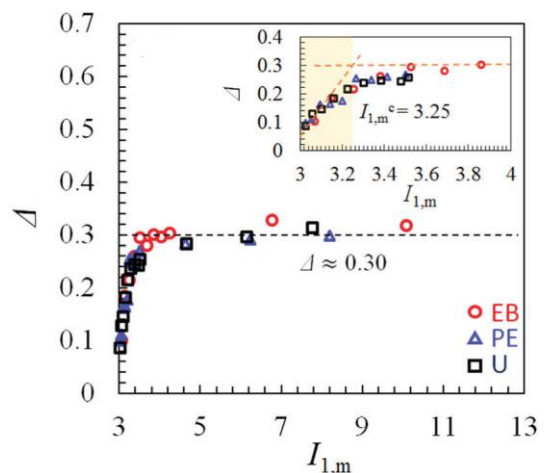


図1. SBR/シリカエラストマーの $\Delta$ の $I_1$ 依存性

ずみによって破壊されていく過程を反映している。一方、高ひずみ域では $\Delta$ は一定値になり、その値はフィラー量とともに大きくなった。これは、高ひずみ域では入力エネルギーに対してある一定の割合のエネルギーが散逸されるという単純な特徴があることを示しており、タイヤの燃費などの設計の上で有益な知見である。 $\Delta$ の値が一定になる挙動は、高ひずみ域の散逸の支配因子がフィラーとゴムマトリックス間の摩擦などに由来することを示唆している。

種々の変形モードでサイクル試験を行ったシート状試料から様々な角度で切り出された短冊状試料について、一軸伸長の応力-ひずみ挙動を未変形試料の同挙動と比較することにより、サイクルひずみ下の構造破壊による散逸エネルギー ( $D$ ) を算出した。異方的な変形下では  $D$  に明確な方向依存性が観察され、荷重を除いた後の構造に異方性が生じていることが示された。

## (II) エラストマーにおける亀裂進展モデルの構築技術：

種々のエラストマーの亀裂進展速度の転移現象を調べ、転移に伴う亀裂先端の形状の変化を放物線形状からのずれ量を用いて評価した。このずれ量の引裂エネルギー依存性は、材料の二次の非線形弾性率の線形弾性率に対する相対的な大きさを考慮した破壊理論を用いると、ゴム種やフィラー種に関係なく、同じスケールで整理できることがわかった。これは、亀裂先端の形状には材料の弾性の非線形性の寄与が大きいことを示している。

様々なエラストマーについて異なる温度雰囲気下で上記の測定を行い、速度転移が生じる引裂エネルギーのしきい値 ( $\Gamma_c$ ) のデータを集積した。得られた  $\Gamma_c$  のデータ群は、

材料の靱性 ( $W$ ) に二次の非線形弾性率 ( $\mu_2$ ) と線形弾性率 ( $\mu_1$ ) から成る因子を乗じた量に対して、線形に変化した (図 2)。これは、 $\Gamma_c$  の向上には靱性だけでなく弾性の非線形度を高くすることが有効であることを示しており、亀裂が進展しにくいエラストマー材料の設計指針として有益な知見である。

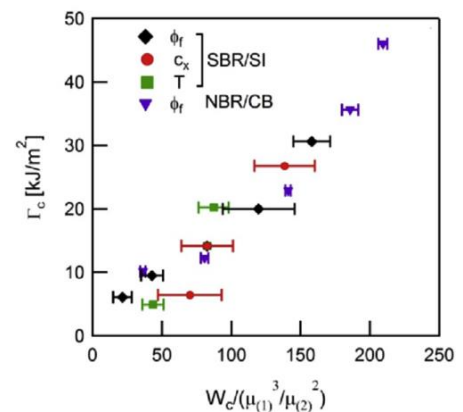


図 2. SBR/SI, NBR/CB エラストマーの  $\Gamma_c$

### 2-3 新たな課題など

#### (I) エラストマーの非線形粘弾性測定技術：

様々な伸長ひずみのマリンズ効果のデータは集積されたが、高せん断ひずみ下の当該測定については予備実験の段階であり、信頼できるデータを得るに至っていない。試料の治具への固定法に問題があることはわかっており既存治具の改良により、この問題に対処する予定である。

#### (II) エラストマーにおける亀裂進展モデルの構築技術：

PIV 法による亀裂近傍のひずみ場の定量化は既に確立しているが、進展速度の転移現象との関連づけは検討中である。転移の各領域、つまり slow mode 域と fast mode 域のひずみ場に特徴的な差異が存在するかどうかを焦点とした解析を進める予定である。

## 3. アウトリーチ活動報告

特になし