

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 27 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：

エラストマーの二軸変形下の応力のひずみおよび時間に対する依存性、および周期的大ずり変形下のずり応力と法線応力差のひずみおよび時間に対する依存性、について定量的なデータを取得し、得られたデータをもとに応力に対するひずみ効果と時間効果の分離性について基礎的検討を行うことを目標とする。

(II)エラストマーにおける亀裂進展モデルの構築技術：

エラストマーのき裂進展速度 (v) の転移現象に伴う v およびき裂先端の形状の変化を定量的に追跡する技術を確立するとともに、PIV 法による先端近傍でのひずみ場およびひずみ速度場を定量する技術についても予備的な検討を行うことを目標とする。

ポリマー種および充填剤の種類および量により粘弾性の非線形度を変化させた試料群について測定を行い、課題 I で材料の粘弾性の非線形度を定量し、課題 II でき裂進展現象に及ぼす非線形粘弾性の影響を明らかにすることを目的とする。

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：

エラストマーの荷重の印加過程および解放過程で生じる応力-ひずみ挙動のヒステリシス（マリンズ効果）を、自作装置を用いて種々の二軸伸長変形（等二軸伸長，平面伸長）と一軸伸長変形で調べた。H-NBR/シリカ充填系でフィラー量を変量した試料群についてデータを取得できている。周期的大ずり変形については測定に必要な円柱状試料を作製できた段階である。

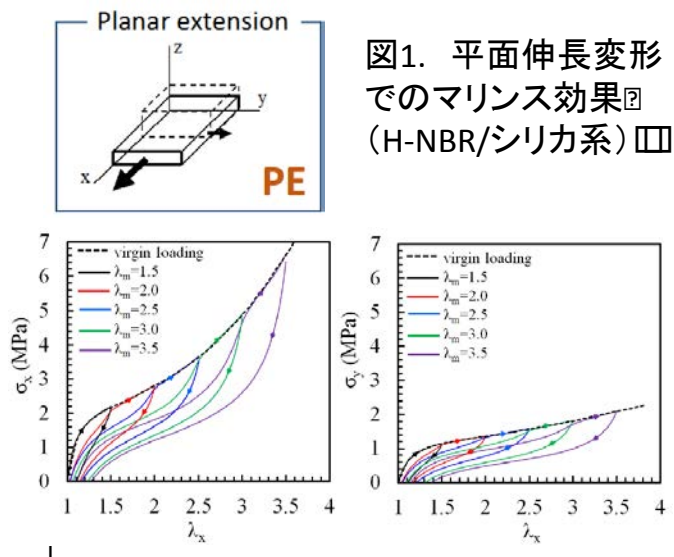
(II)エラストマーにおけるき裂進展モデルの構築技術：

エラストマーのき裂進展速度 (v) の転移現象に伴う v およびき裂先端の形状の変化を定量的に追跡し、形状変化を材料の非線形弾性によって理論的に説明することに成功した。異なるエラストマー系（H-NBR/シリカ充填系およびSBR/カーボンブラック充填系）について統一的に解釈できている。PIV 法によって、先端近傍でのひずみ場およびひずみ速度場を定量する手法を確立した。

2-2 成果

(I)エラストマーの非線形粘弾性測定技術：

H-NBR/シリカ充填系でフィラー量を変量した試料群について、等二軸伸長 (EB)，平面伸長 (PE)，一軸伸長変形 (U) のマリンズ効果のデータを取得することに成功した (図 1)。研究開発責任者



が知る限り、二軸変形、特に異方的な二軸変形（平面伸長）でマリンス効果を調べた先行研究はない。繰り返し試験の最大伸びを変えながら各変形でマリンス効果を調べ、エネルギー損失

(D_u)の変形モードおよび変形量依存性を明らかにした。 D_u は変形量とともに大きくなり、同じ伸びで比較すると $EB > PE > U$ の順に大きくなった。また、各変形で荷重印加後の力学異方性を調べたところ $U > PE$ の順で有為な異方性が認められ、フィラーの高次構造に異方性が生じていることがわかった。興味深いことに、貯蔵エネルギー

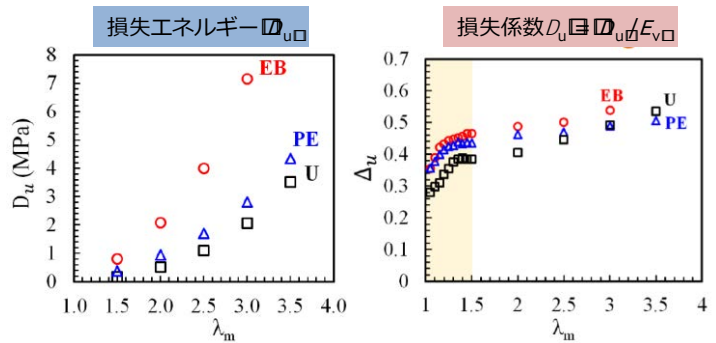


図2 各変形下の D_u および D_u/σ_m の λ_m 依存性

と D_u の比で定義する損失係数(Δ_u)は変形モード依存性が小さく、特に大変形域では Δ_u は変形量にも対してもほとんど依存しないことがわかった(図2)。この単純な特徴の物理的理由は現在のところ不明であるが、エラストマーの材料設計のうえでは貴重な知見である。

(II)エラストマーにおけるき裂進展モデルの構築技術:

H-NBR/シリカ充填系およびSBR/カーボンブラック充填系について、き裂進展速度(v)を引裂エネルギー(Γ)の関数として測定すると同時に、き裂の先端形状を観察し線形破壊理論の予測する放物線形状からのずれ(δ)を評価した(図3)。弱非線形弾性を取り入れた破壊理論(WNLT)に基づき、 Γ を線形弾性率と二次非線形弾性率の比でスケールした量を用いて δ を整理すると、 v の不連続転移に伴う δ の変化をエラストマーの種類によらずうまく整理できることがわかった(図4)。エラストマーの種類によらず説明できたことはこの解析の物理的妥当性を支持しており、 v の不連続転移には非線形弾性の寄与が大きいことを示している。

Crack tip images

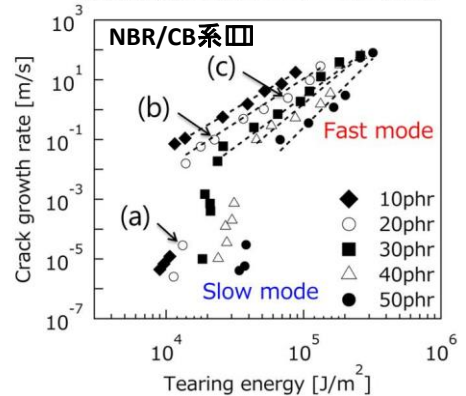
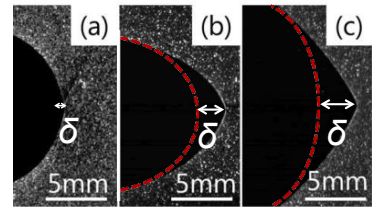


図3 亀裂進展速度と亀裂先端形状

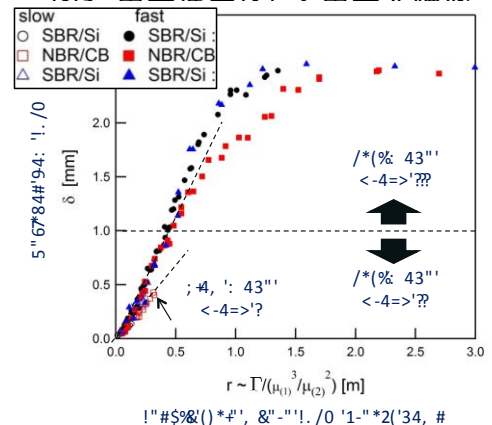


図4 亀裂先端形状の放物線からのずれと線形弾性率/二次非線形弾性率の比でスケールされた引裂エネルギーGの関係

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:

前項で述べたようにマリンス効果による損失係数が伸長変形モードにほとんど依存しないという予想外の単純な性質をさらに確かめるため、ずり変形によるマリンス効果を調べる必要がある。ずり変形によるマリンス効果の測定は当初目標にも挙げられていたが、現在のところ測定に必要な円柱状試料の作製ができた段

階である。当該測定を迅速に行い、マリンス効果の変形モード依存性について明確な結論を得たい。また、フィラー充填系エラストマーに特有のペイン効果（動的粘弾性における強いひずみ振幅依存性）との関連性についても、同一試料を用いた検討が望まれる。

(II)エラストマーにおけるき裂進展モデルの構築技術：

v の不連続転移に伴う δ の Γ 依存性について WNLT によって解釈することに成功したが、 δ が 1mm を超えると同理論から逸脱してくることが複数のエラストマー系で共通して観察されている。この原因として、試料厚みの効果（本実験の試料厚みが 1mm であったこと）もしくはさらなる高次の非線形弾性効果、が考えられる。試料厚みを変化させた実験を行い、この原因について調べる必要がある。

PIV 法によってき裂近傍のひずみ場の定量ができるようになった。しかし、ひずみ場の情報を v の転移現象の解釈にどのように有効に取り込めるかは現在のところ検討中の課題である。

3. アウトリーチ活動報告

特になし