

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：車体構造用樹脂強靱化プロジェクト

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：

構造用樹脂材料と複合材料の強靱化のための

ボトムアップ型マルチスケール解析

研究開発機関名：

国立大学法人東京大学

研究開発責任者

梅野 宜崇

# 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

■目標1：構造用高分子材料のマルチスケール解析手法の確立および高精度な材料構成式構築

本機関において作成したポリカーボネートの粗視化粒子モデルを用いて変形・破壊シミュレーションを実施する。温度、分子量、変形様式などを変化させた多様な条件での変形・破壊挙動を精査することで、構造用高分子材料の破壊現象の分子論的に理解する。また、粗視化シミュレーションによって、実験での取得が困難な真応力-真ひずみ関係を導き出し、高精度な連続体構成式の構築を行う。

■目標2：プログラム共通課題 G1-2「亀裂進展機構の解明」への取り組み

昨年度までに実施していた、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) 解析に基づいたゴムの動的亀裂進展シミュレーション手法を発展させ、高分子材料全般に対する実用的な破壊挙動予測ツールとして確立する。具体的には、転移エネルギー予測の定量性の改善および対象材料の拡張を目指す。

## 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

(1) 構造用高分子材料のマルチスケール解析手法の確立および高精度な材料構成式構築

ポリカーボネートを対象として粗視化モデルによる変形・破壊シミュレーションを実施した。4種類の変形様式の下でひずみ速度と降伏応力の関係を調べた結果、ポリカーボネートの降伏挙動は引張負荷変形の様式に応じて2種類の傾向に類別され、降伏挙動が主として変形時の引張応力の三軸性によって支配されることが明らかとなった (Fig. 1)。また、破壊挙動に対する分子量の影響を調べた結果、降伏応力には分子量の影響はほとんどみられなかったものの、降伏後の塑性変形領域では分子量の増大に伴って応力の増加が確認された。今後は、以上の解析で得られた応力ひずみ曲線をもとに構成式を構築する予定である。

(2) プログラム共通課題 G1-2「亀裂進展機構の解明」への取り組み

粗視化モデル解析と並行し、プログラム共通課題 G1-2「亀裂進展機構の解明」の一環として、ゴムの動的亀裂進展の FEM 解析を実施した。昨年度の段階でゴムの動的亀裂進展挙動における重要な不連続的現象である「低速-高速モード転移」を定性的に再現することに成功していたが、モード転移エネルギーの定量的評価の精度が課題であった。本年度はこの問題を解消するため、メッシュ分割を細密化した構造モデルによる大規模解析を実施した。Pure-Shear 型の試験によってひずみ負荷量に対する亀裂進展速度を算出した結果、メッシュ分割数を増やすことで転移エネルギー評価の定量性が改善することがわかった。

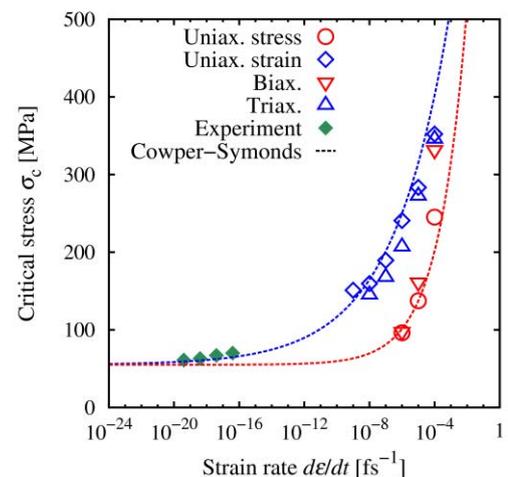


Fig.1: 多軸変形時の降伏応力とひずみ速度の関係。赤および青で示した点はそれぞれ二軸以下および三軸応力が作用する条件に対応している。実験値は次の文献を参照した：C. Bauwens-Crowet et al., *J. Mater. Sci.*, **9**, pp.1197-1201 (1974)。

また、ゴム材料以外の構造用高分子（樹脂等）への適用を視野に、試験方法の拡張を行った。初期亀裂導入後に一定ひずみ速度で伸長を与える **dynamic pure shear** 試験を採用し、ひずみ負荷量に対する亀裂長および進展速度を調べた。解析により得られた亀裂進展速度とひずみ負荷量の関係を Fig.2 に示す。モード転移点は両試験方法でよく一致しており、**dynamic pure shear** 型の有用性が示された。

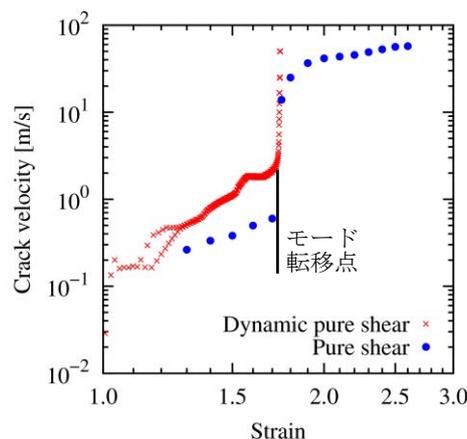


Fig.2: Pure shear 試験および Dynamic pure shear 試験の FEM 解析で得られた亀裂進展速度と投入ひずみ量の関係。

## 2-2 成果

ボトムアップマルチスケール解析では、粗視化粒子シミュレーションによる引張試験によって、ひずみ速度・温度・変形様式に関する統一的な知見を得た。また、分子量の増大による絡み合い状態の発現を再現することができ、絡み合い状態にあるポリカーボネートの真応力-真ひずみ

関係が得られた。この結果に基づいて FEM シミュレーションのための連続体構成式の構築が可能である。また、多様な条件での変形シミュレーション結果を総合することによって、ポリカーボネートにおける破壊挙動をつぶさに知ることができ、共通課題 G1-1 へも貢献することができる可能性がある。

亀裂進展の FEM シミュレーションについては、本解析手法に関する特許を出願した。また、今年度新たに実施した解析では、メッシュを細密化した構造モデルによる大規模計算を実施することにより、ゴムの動的亀裂進展における低速-高速モード転移点を定量的にもよく再現することに成功した。また、これまでの固定された荷重下での亀裂進展速度を計測する pure shear 試験に加え、動的に増加する引張負荷の下での亀裂進展挙動を観察する dynamic pure shear 試験法を模擬した解析を実施した。新たな試験法を採用することにより、樹脂など、ゴム以外の高分子材料に対しても亀裂進展の FEM 解析を実施することが可能である。

粗視化粒子モデル解析によるポリカーボネートの構成式の構築と、FEM 亀裂進展解析手法の樹脂材料への応用展開を統合することによって、マルチスケール解析が完成されつつある。

## 2-3 新たな課題など

上に掲げた両課題とも概ね順調に進行している。粗視化粒子モデル解析については、現在までに一種類の材料（ポリカーボネート）のみを検討してきた。今後は、ポリカーボネート固有の現象と一般的な現象を明確化するために、比較対象となるアクリル樹脂等に対しても粗視化粒子モデル構築を行う。

FEM による動的亀裂進展解析については、樹脂材料の挙動を適切に再現する材料構成式の構築が必要である。特に、ゴム材料の解析では無視してきた塑性変形の影響を記述するモデルが必要である。

## 3. アウトリーチ活動報告

亀裂進展の FEM シミュレーションについて、これまでに本機関で実施した一連の研究成果が Nature 姉妹紙である Scientific Reports に掲載された。