

平成 27 年 3 月 31 日

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：破壊機構の分子解明プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 26 年度

研究開発課題名：

印象派物理学によるタフポリマー開発の指導原理の構築

研究開発機関名：

お茶の水女子大学

研究開発責任者

奥村 剛

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

本研究では、タフポリマー開発企業の開発に深く関係した、複合材料、高分子シート材料、多孔体の破壊、及び高分子材料の粘性散逸の問題等に関し、印象派物理学の手法に基づき、ある種の極限に着目することで枝葉末節を排して物理的本質をシンプルに導き出すことを目指す。このような例を通して、トライアル・アンド・エラーで主導されてきた企業での研究開発に現れるような「泥臭い」現象にも、シンプルな法則が転がっていることを示し、物理原理を理解した上での開発遂行の幅広い可能性を多角的に示す。プロジェクト内のチーム間交流によって積極的にテーマを展開していくことも検討していく。

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) 天然複合材料の強靱化機構の解明

本年度は、これまで、代表者が展開してきた、真珠層、クモの巣、ロブスターの外骨格などの天然材料の強靱性に関するレビュー論文を、企業研究者を含めた広い読者層を持つ国際論文誌 MRS bulletin に、招待を受けて投稿した。真珠層強靱化機構については、2次元のネットワークを使ったシミュレーション計算と(Aoyanagi & Okumura, Phys. Rev. E 2009)、有限要素法を使ったモデルでの計算(Hamamoto & Okumura, Adv. Eng. Mater. 2013)を、ベースとした研究を行った。具体的には、2次元ネットワークモデルのプログラムを改良し、非線形な応力ひずみ関係を仮定した計算ができるようにした。この他、Aoyanagi & Okumura, Phys. Rev. Lett. 2010 をベースとした、クモの巣の強靱化機構における非線形効果に関する研究についても検討した。

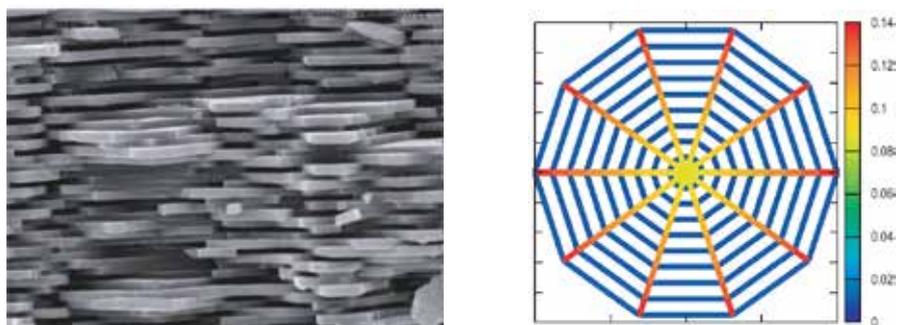


図1 : (左) 真珠層の断面図 ; Katti 教授撮影。(右) クモの巣モデル ; Aoyanagi & Okumura, Phys. Rev. Lett. 2010 より転載。

(2) 高分子シート材料の破壊機構の解明

高分子シート材料については、50 cm角程度の大きさで厚みが数ミリ程度のポリマーフォームシート(積水ライトロン; 緩衝材として広く一般に流通している)を使って、マクロな観点からの破壊強度・靱性について調べてきている(Shiina, Hamamoto & Okumura, Europhys. Lett. 2006, Kashima & Okumura, ACS Macro Lett. 2014)。これらの研究をベースに以下の研究を行った。

(A) 強塑性ポリマーシートの特異的な破壊機構の解明: 50 cm x 10 cm程度の大きさのフィルム材料に数ミリから数センチ程度の亀裂を入れ、伸張した時に、どのように亀裂が進展するかを観察した。

(B) 高分子フォーム固体の破壊機構の解明： ラバー系材料に関しては、破壊エネルギーと破壊速度の間にスケーリング法則が見つかっている (Gent, Langmuir 1966 など)。本年度は、ブリジストンとも協力して、我々が研究してきた高分子フォーム固体 (Shiina, Hamamoto & Okumura, Europhys. Lett. 2006, Kashima & Okumura, ACS Macro Lett. 2014) でこの法則が成立するか調べた。

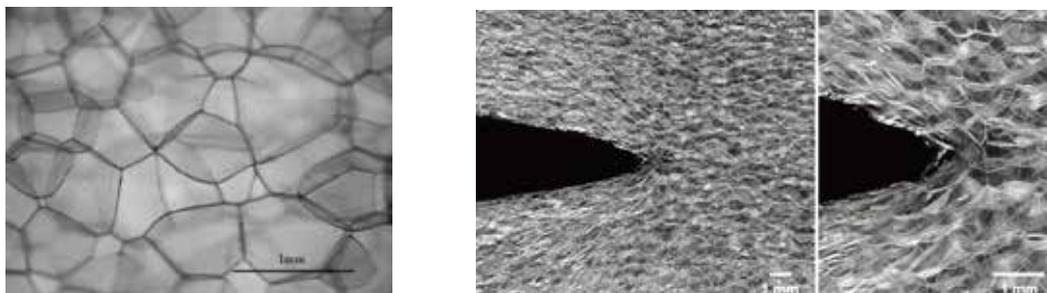


図 2 : (左) 高分子フォーム固体の拡大図 (右) と亀裂先端部の様子 (右), Shiina, Hamamoto & Okumura, Europhys. Lett. 2003 と Kashima & Okumura, ACS Macro 2014 より転載。

(3) 多孔性材料の破壊機構の解明

(A) 多孔シートの破壊機構の解明： 孔を規則的に配置した紙のシートを使い、破壊強度や力学特性について研究を進めた。

(B) ネットワークモデルを使った多孔性物質の強靱化機構の解明： これまでに、ネットワークモデルを使って、多孔性物質のシミュレーション研究を行い (Aoyanagi & Okumura, J. Phys. Soc. Jpn. 2009, Murano & Okumura, J. Phys. Soc. Jpn. 2014) 穴のサイズと破壊強度の間のスケーリング法則を確立してきた。さらに、区分的非線形性を導入して拡張モデルによる計算では、スケーリング法則のクロスオーバーを見出してきている。

(4) 高分子薄膜における粘性散逸機構の解明

(A) ヘレシウセル中の液滴動力学における散逸機構の解明： タフポリマーの強靱性を解き明かすキーの一つとなる高分子液体薄膜内部の粘性散逸機構に着目して、液滴やバブルの動力学に関する研究を進めた。

(B) 微細加工表面における濡れ現象における粘性散逸機構の解明： フナムシの足の表面にある微細構造による吸水の動力学 (Tani, Okumura et al. PlosOne, 2014) や、開毛管によるポンプの要らない混合デバイスの基礎理論とデバイス開発などの、テクスチャー表面の濡れ性についての研究も行ってきた。本年度は、開毛管に関する投稿中の論文について、レフェリーコメントを受けた追加実験を行って、論文を再投稿した。この他、液滴の転移現象に関する実験も進めた。

(5) タイヤゴムの強靱化機構の解明

この項目は、(2) (B) の研究と密接に関係し、この研究を通して、ブリジストンチームと定期的なミーティングを行い、ブリジストンチームとの共同研究を進めた。

(6) その他

(4) (5) の研究は、一般の人にも馴染み深い現象であり、参加企業の研究者等に印象派物理学の実例としてインパクトを持って周知できるものであり、新しい研究の方向性を理解していただくための格好の対象である。このカテゴリの研究として、粉粒体の研究も検討した。

2-2 成果

(1) 天然複合材料の強靱化機構の解明

MRS bulletin 誌 (IF5.667) の論文は、レビューコメントを反映して改訂し、論文がアクセプトされた (4月1日オンライン公開済)。3つの招待講演等でもこの内容について触れて、成果の周知に努めた。真珠層強靱化機構における非線形効果の研究については、真珠層がある種の適合化された非線形性を採用していることが示せたので、今後、論文に成果をまとめていく。

(2) 高分子シート材料の破壊機構の解明

(A) 強塑性ポリマーシートの特異的な破壊機構の解明: 塑性の極めて強いこの物質の破壊形態が従来の破壊力学の常識を破るものであることを示し、物理学会等で成果を報告した。

(B) 高分子フォーム固体の破壊機構の解明: 破壊エネルギーと破壊速度の間にポリマー材料に関して見つかっているものと同様のスケーリング法則を発見し、国際会議や物理学会などで発表した。

(3) 多孔性材料の破壊機構の解明

(A) 多孔シートの破壊機構の解明: 孔を配置した紙を使った実験では、いくつかの物理量に関し、スケーリング法則を発見し、理論的考察も進んだ。

(B) ネットワークモデルを使った多孔性物質の強靱化機構の解明: 結果をまとめて論文誌に投稿した (論文審査中)。

(4) 高分子薄膜における粘性散逸機構の解明

(A) ヘレショウセル中の液滴動力学における散逸機構の解明: 液滴に働く粘性抵抗の研究では、困難を克服し、高分子液薄膜の厚みをレーザー距離計によって測定することに成功した。この成果は、国際会議や物理学会等で発表した。パプルの破裂についても粘性に支配された領域の研究が進み国際会議や物理学会で発表した。

(B) 微細加工表面における濡れ現象における粘性散逸機構の解明: 開毛管を使った混合デバイスに関する論文は改訂第2版を Sci. Rep. 誌 (IF5.578) へ再投稿した (4月8日アクセプト済)。

(5) タイヤゴムの強靱化機構の解明

(2)(B) の項目を参照。今後、薄くて丈夫なタイヤの開発の開発指針を導くことを目指していく。

(6) その他

イタリアで行った講演では、講演後、特に選ばれて、Phil. Mag. 誌への論文投稿を招待された。

2-3 新たな課題など

ブリジストンとも連携しながら進めているポリマーフォーム固体の実験に関連しては、三菱樹脂から多孔性物質のサンプルの提供を受けた実験を検討することになった。また、ポリマーフォーム固体の実験結果の物理的解釈に向けてネットワークモデルによるシミュレーション研究を開始することになった。パラフィルムの破壊に関連したネットワークモデルのシミュレーションも開始する。

3. アウトリーチ活動報告

本年度の国内の3つの招待講演はいずれも異分野や企業の研究者グループからの招待であり、これらは、アウトリーチ活動にもなった。