

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：破壊機構の分子的解明プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 27 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：

国立大学法人お茶の水女子大学

研究開発責任者

奥村 剛

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

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やっかいな現象にも、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、共通課題に直接的に貢献していく。

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

この研究項目では、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研究を進めることで多様な複合材料の強靱化機構を明らかにしてタフポリマーの開発に貢献してきた。東レが開発を進める透明樹脂にも密接に関係を持つ。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 (Aoyanagi & Okumura, Phys. Rev. E 2009) と、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てきており、非線形な応力ひずみ関係を仮定した場合の強靱化について調べてきた。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てきた。

(2) 高分子シート材料の破壊機構の解明

本研究項目は、G1-2の共通課題に直結する研究であり、種々の高分子シート材料を用いた破壊実験遂行してきた。G1-2 共通課題検討会でも何度も成果を発表し、さらに、タイヤゴムの強靱化機構の解明も目指してブリジストンとも個別のミーティングを持ちながら研究を進めてきた。本研究開発責任者は、緩衝材として広く一般に流通しているポリマーフォームシートを使って、マクロな観点からの破壊強度・靱性について調べてきており (Kashima & Okumura, ACS Macro Lett. 2014 など)、これらの研究をベースに以下の研究を展開してきた。

(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てきたが、これに対するシミュレーションと理論的考察を進めてきた。

(B) 高分子フォーム固体の破壊機構の解明： フォームサイズの異なる二種類の高分子固体フォームについて、破壊エネルギーと破壊速度の間のスケーリング法則を実験的に調べてきた。さらに、これらの試料のレオロジーについて調べることで、物理的解釈を得てきた。

(3) 多孔性材料の破壊機構の解明

本研究項目においては、ネットワークモデルを含む多孔性物質全般の強靱性や力学的性質をユニークな観点から調べることで、プロジェクト内の企業研究者に示唆を与えてきた。G1-2 共通課題に直結する研究を展開し、G1-2 共通課題検討会でも何度も成果を発表してきており、ブリジストンとの個別

ミーティングも持ちながら研究を進めてきた。(A)については三菱樹脂からサンプル提供を受けて研究テーマの検討を進めた。多孔性材料は、三菱樹脂や旭硝子で開発している多孔性の高分子シートや東レが開発を進める透明樹脂に深く関係する。

(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やゴムやプラスチック材料を使い、微細加工技術も利用して、力学特性について研究を進めてきており、特許申請も検討してきた。さらに、H27年度より、三菱樹脂よりサンプルの提供を受け、実験を検討してきた。

(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 (Murano & Okumura, J. Phys. Soc. Jpn. 2014 など)、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。H27年度は、区分的非線形性を導入した拡張モデルによる計算で見出したスケーリング法則のクロスオーバーの論文を投稿した。また、H27年度より、新しいテーマとして、ブリジストンのゴム開発に深く関係する(2)Bに対応するき裂進展の動力学に関するネットワークシミュレーションも本格的に進めてきており、G1-2共通課題にさらに直接に貢献してきた。

(4) 高分子薄膜における粘性散逸機構の解明等

本研究項目では、タフポリマー開発の基礎となる高分子材料の挙動に関連したテーマのなかで、本研究開発課題のキーワードである印象派物理学の実践の例として、分かり易くインパクトのある研究について取り組み、タフポリマー開発に関わる研究者に印象派物理学の手法の有用性を多角的に示す。

(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： 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てきた。一連の研究から発展したヘレショウセル中での粉体の抵抗法則の研究も展開してきた。

(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。開毛管に関する研究について、追加実験を行うとともに、テクスチャー表面での液滴の形状変化に関する実験も進めてきた。

2-2 成果

(1) 天然複合材料の強靱化機構の解明

真珠層、クモの巣、ロブスターの外骨格などの天然複合材料の強靱性に関して、俯瞰的な物理原理を明らかにすることに成功した。クモの巣の研究については Phys. Rev. Lett. 誌に以前発表した論文に対する、より明確な議論を完成させた。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、これまでの計算結果を検討し、現実にもみられる非線形性が力学的に優位であることを見出した。

(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てきているが、この実験に対するシミュレーション、理論的研究を進め、応力集中の影響をほとんど受けないことを見出した。

(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フォームサイズの異なる試料についても見出した。さらに、これらの材料についてのレオロジー的な性質の一部を明らかにした。

(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については、伸長の物理的メカニズムを明らかにした。三菱樹脂のサンプルについても、G1-2 共通課題に即した実験の検討を行い、き裂進展速度が非常に高速の領域で見られることを見出した。

(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：非線形なネットワークモデルにおける応力集中のスケーリング法則のクロスオーバーについて明らかにした。G1-2 共通課題に対応するネットワークシミュレーションでは、亀裂進展速度に上限と下限があることを見出した。また、物理的な本質をより明確につかむためにネットワークモデルをさらに単純化したシンプルモデルの検討も始め、成果を得つつある。

(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、バブルの破裂・融合についても粘性に支配された領域の研究が進んだ。粉体の研究についても、高分子のガラス転移に関連した着眼から研究を進め、試験的な結果が出始めた。

(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：開毛管を使った混合デバイスの有用性について明らかにした。微細加工表面上での液滴の形状変化についての研究を進め、物理的メカニズムの一部を明らかにした。

2-3 新たな課題など

G1-2 の共通課題が明確になったことに合わせ、これに直接的に貢献するために、G1-2 共通課題に直結するネットワークのシミュレーションに特に力を入れるため (3) -B に新しく二つテーマを立ち上げて成果を上げてきた。さらに、(2) -B の実験研究を強化し、また、三菱樹脂のサンプルの実験も開始した。なお、これらの新しいテーマの設定に合わせて、研究項目 (5) タイヤゴムの強靱化機構の解明は、(2) -B、(3) -B に発展統合した。

3. アウトリーチ活動報告

- 1) お茶の水女子大学で高校生・高校教員等を対象とした少人数制のプレミナールを行った。
- 2) 真珠層、クモの巣、ロブスターの外骨格などの天然複合材料の強靱性に関するレビュー論文を MRS bulletin 誌に発表した。
- 3) クモの巣の研究について、Phys. Rev. Lett. 誌に以前発表した論文に対する補足説明を Erratum として同誌に発表した。
- 4) 非線形ネットワークモデルにおける応力集中のスケーリング則に関する論文を、J. Phys. Soc. Jpn 誌に発表した。
- 5) 開毛管を使った混合デバイスに関する論文を Sci. Rep. 誌に発表した。
- 6) いくつかのテーマにおいて、物理学会等で発表した。