

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2024 年 5 月 31 日

研究課題	衝撃や温度変化を可視化するメカノクロミック包装紙の開発	助成金額
		300 万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・若手研究助成	
ふりがな	すぎはら かおり	研究助成申請年度
研究者氏名	杉原 加織	2023 年度
所属機関	東京大学 生産技術研究所	研究期間
		2023 年 4 月 1 日～2024 年 3 月 31 日
役 職	准教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

<研究成果の目的>

力や温度変化により色を変えるメカノクロミックポリマーを用いて、衝撃や温度変化を数ミリの空間分解能で可視化するメカノクロミック包装紙を開発した(図1)。メカノクロミック材料という新素材をパッケージ分野に導入することで、これまでブラックボックスであった、製造→保管→顧客に配達→保管→使用の全過程で商品が経験する力や温度をマッピングするツールに応用する。医療製品、食品、壊れやすい絵画などを安全・安心に配送し、物品のロスや破壊を防ぎ環境に優しい社会構築に貢献する意義がある。

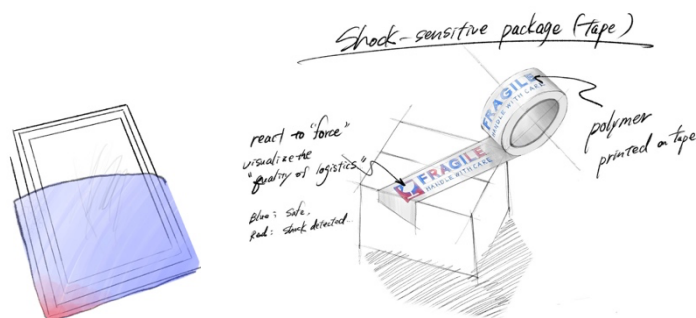


図1 温度や衝撃を数ミリ空間分解能で可視化する包装紙

<実験結果>

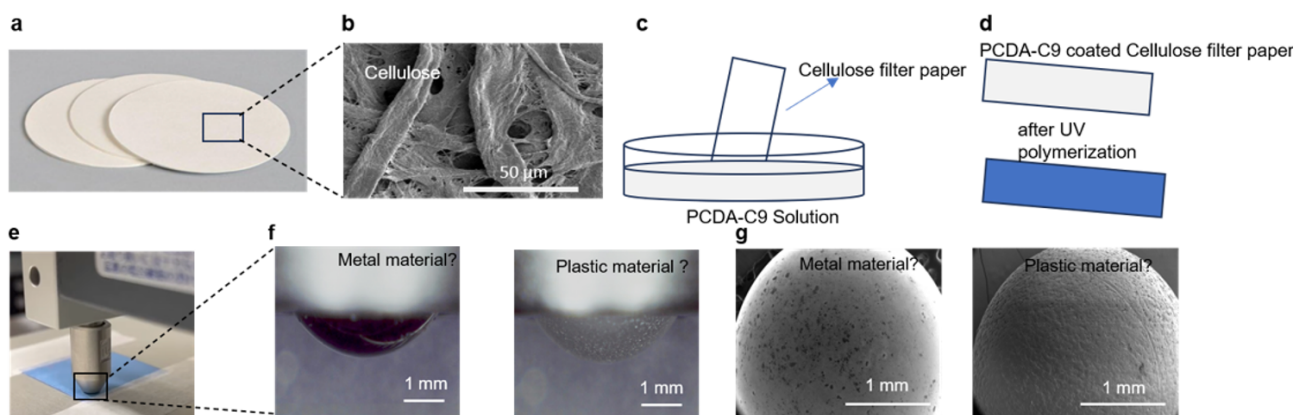


図2 メカノクロミックポリマーを紙に融合して、摩擦力を加えながら色の変化を観測

メカノクロミックポリマーが塗布された紙が力によってどのように色を変化させるのかを定量評価するために、モノマーである PCDA-C9 をセルロース製のろ紙に蒸着させ、摩擦試験機で力を加え、その色の変化をデジタルカメラでモニターした。この実験では、幅 1~50 μm のセルロース繊維からなる市販のセルロースろ紙を用いてサンプルを調製した (図 2ab)。まず、PCDA モノマーと C9 をクロロホルムに溶解した。セルロースろ紙を PCDA-C9 溶液に浸し、周囲条件下で 15 時間乾燥させた後、UV で重合させた。これらのサンプルを動的摩擦試験機で特性評価した。この測定器は、プローブの先端に固定したボールで垂直方向に点荷重をかけながら摩擦力を測定するもので、重りを変えることで垂直方向の力の強さを変えることができる (図 2e)。ボールにはステンレス鋼とポリプロピレンの 2 種類の材料を使用し、写真と走査型電子顕微鏡 (SEM) 像の両方から、ステンレス鋼の方がポリプロピレンよりもはるかに滑らかな表面であることが示された (図 2fg)。

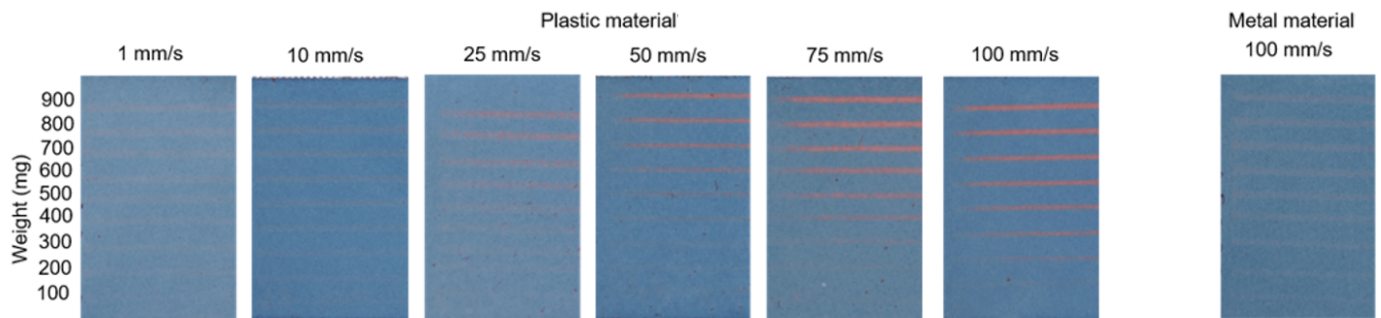


図 3 摩擦試験機テストの結果

30 mm×60 mm の PCDA/C9 を塗布したろ紙をステージに貼り付け、所定の垂直荷重と速度でプローブを左から右に 1 回走査した。ポリプロピレンの場合、1 mm/s の一定速度で重量を 100 mg~900 mg の間で変化させると、すべての重量 (図 3 の 1 mm/s) の走査線において青色から赤色への微妙な色の変化が観察された。走査速度が速くなるにつれて、特に垂直荷重が高い場合に色の変化が明瞭になった (図 3)。ステンレス鋼の場合、最高速度 (100 mm/s) では、最大荷重 (900 mg) でも色の変化はほとんど見られなかった (図 3)。このことは、材料の表面粗さが摩擦、ひいては色の変化に大きく影響することを裏付けている。

これらの画像を解析することで、どのくらいの力を印加するとどの程度の色の変化が起こるのか、というカリブレーションを得ることができる。現在その定量化を進めているところである。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

以上の実験結果を元に、メカノクロミックポリマーを作成することができる。メカノクロミックポリマーを塗布した包装紙で物体を包み、様々な衝撃や熱を与えた後、包装紙の色の分布を三次元的に観測する。本研究で使用するポリマーは可逆性がなく、一度赤くなるとその色を保持するため、衝撃や色のヒストリーを可視化する。これらの結果を従来の温度計や落下衝撃検知シールと比較することで、メカノクロミック包装紙のメリット・デメリットを調べるのが次の課題である。将来的には、製造から配達までの全過程で商品が経験する力や温度をマッピングするパッケージを開発し、医療製品、食品、壊れやすい絵画などを安全・安心に配送し、物品のロスや破壊を防ぎ環境に優しい社会構築に貢献する意義がある。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

学術論文 (6)

1. Mechanical properties of polydiacetylene multilayers studied by AFM force spectroscopy
Zheng, J.; Galluzzi, M.*; **Sugihara, K.***
J Phys Chem B, DOI:10.1021/acs.jpcc.4c02128
2. Nanoscopic force sensitivity of polydiacetylene 2D layered composites with guest molecules
Das, B.; Shioda, N.; Yagi, S.; Oaki, Y.; **Sugihara, K.***
Adv Mater Interfaces 2024, 11, 2300745.
3. Dual nano-friction force microscopy/fluorescence microscopy imaging reveals the enhanced force sensitivity of polydiacetylene by pH and NaCl
Zheng, J.; Jo, S.; Chen, J.; Das, B.; Juhasz, L.; Cabral, H.; **Sugihara, K.***
Anal. Chem. 2023, 95 (30), 11335-11341.
4. The role of lipid composition in the antimicrobial peptide double cooperative effect
Hou, Y.; **Sugihara, K.***
Langmuir 2023, 39 (24), 8441-8449.
5. Development of a desktop mask charger
Ikawa, T.; Fujita, K.; Kiuchi, S.; Li, M.; Kushima, A.; Takase, H.; Das, B.; Morita, M.; Todo, H.; Pennington, M.; **Sugihara, K.***
Heliyon 2023, 9 (4), e15359.
6. Colorimetric transition pathway mapping in polydiacetylene by hyperspectral microscopy
Chen, J.; Zheng, J.; Hou, Y.; **Sugihara, K.***
Chem Commun 2023, 59 (25), 3743-3746.

招待講演 (下記他全 15)

1. Mechanochromic polymer, polydiacetylene, for force-, bio-sensing applications (invited)
ENS-UTokyo Workshop (2024.03.24, Paris)
Kaori Sugihara
2. 力を検知して発光するメカノクロミック生体膜 (invited)
生体膜デザインコンファレンス (2024.01.31, Tokyo)
Kaori Sugihara