

安全保障技術研究推進制度 令和5年度終了課題 終了評価結果

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：ナノ構造制御による高透明・赤外反射部材の創出
- (2) 研究代表者：東レ株式会社 宇都 孝行
- (3) 研究期間：令和元年度～令和5年度

2. 終了評価の実施概要

実施日：令和6年10月18日

場所：TKP秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

長岡技術科学大学 副学長・教授

井原 郁夫

産業技術総合研究所 上級執行役員 兼 エネルギー・環境領域
領域長

小原 春彦

東京科学大学 工学院 電気電子系 教授

梶川 浩太郎

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

国立感染症研究所 客員研究員

四ノ宮 成祥

科学技術振興機構 研究開発センター 企画運営室長、フェロー

中山 智弘

量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所

先端機能材料研究部長

八巻 徹也

情報通信研究機構 電磁波研究所 総括研究員

山本 真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

本研究では、複数の樹脂をナノメートルオーダーで高精度かつ任意に数百層積層したナノ積層技術の革新を進め、3種ナノ積層技術の研究・開発および耐久性・反射性能に優れた新規樹脂の研究・開発により、ガラス並みの透明度を維持したまま幅広い帯域の赤外線を反射できる全く新しい高透明・赤外反射部材を実現し、新規透明赤外線センサー部材への適用を目指す。

また、ここで構築した3種ナノ積層技術をもとに、極薄い素材でありながらゴムのような振動抑制機能を備えた薄膜制振部材や、任意の狙った波長の電磁波のみを選択に反射できる電磁波カット部材などの革新的新素材の研究・開発への展開も図る。

成果の概要

(1) 無色透明・赤外反射部材

- ・ 透明性と広帯域赤外反射性を両立する設計として、高屈折率樹脂（樹脂A）と中間屈折率（中間層）樹脂（樹脂C）と低屈折率樹脂（樹脂B）を（A／C／B／C） n （ n は整数）の構成で数百層積層する3種ナノ積層フィルム構成を設計した。
- ・ 樹脂Aと樹脂Bの屈折率差を大きくすることで赤外線反射率を高くすることと、樹脂Cの屈折率を樹脂Aと樹脂Bの中間の屈折率とすることで赤外線波長の $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 波長の高次反射を抑制（打ち消す）する樹脂設計を検討し、樹脂Aとして屈折率1.73（波長633nmにおける値。以降同様。）の高屈折率ポリエステル樹脂を、樹脂Cとして屈折率1.61の中間層ポリエステル樹脂を設計し、樹脂Bとして屈折率1.49の低屈折率アクリル樹脂を適用する異素材樹脂構成を構築した。
- ・ 1層の厚みが100nmオーダーの層を数百層積層する設計に対して、異素材流動シミュレーション技術と3種ナノ積層装置設計技術を確立することで、設計に対する厚み偏差が10%以内に収まる高精度積層技術を構築した。
- ・ ナノ積層流動における樹脂の相溶性と流動特性の評価方法を構築し、樹脂の組合せと流動モデルの関係を解明した。本結果を異素材樹脂積層時の樹脂構成と各樹脂の粘度関係に反映することで、フローマークが無く装置設計通りの高い精度で層厚みが制御されたフィルム製造を可能とした。
- ・ 異素材樹脂構成における異なる分子構造を持つ樹脂の積層による積層乱れと層間剥離の課題に対して、FedorovのSP値に着目した中間層樹脂設計を確立することで、高い積層精度と層間密着性を可能とした。
- ・ 上記技術を用いることで3種ナノ積層フィルムの製造に成功し、従来技術対比で圧倒的に広い赤外線反射帯域を持つ無色透明・赤外反射部材を実現した。

実用レベルの面積で3種ナノ積層フィルムを製造したことは世界初の成果である。

(2) 電磁波カット部材

- ・ 2種ナノ積層技術での薄膜・軽量・電磁波吸収の性能を維持しつつ、2種ナノ積層の課題であった低誘電体層と高誘電体層のレオロジー特性が大きく異なることが原因となり発生するフローマークの課題に対して、3種ナノ積層の中間層のレオロジー挙動の制御によりフローマークを大幅に抑制できることを見出した。
- ・ 低誘電体層・中間層・高誘電体層を交互に101層積層した電磁波カット部材の製造に成功し、5G帯域に対して十分な吸収性能を持つ電磁波カット部材を実現した。

(3) 薄膜制振部材

- ・ 2種ナノ積層による初期検討において、制振性能とハンドリング性の両立に技術的難度が高いことが判明し、本研究を停止した。

4. 終了評価の評点

A 相応の成果をあげた。

5. 総合コメント

3種のポリマーを積層して設計通りの光学特性を実現し、民生応用品の開発という観点では、初期の目標はほぼ達成された。また、提案実施者の特性を活かし、自社が保有している技術、ノウハウ、基礎的知見を結集して高度化できた。

一方で、副次的・間接的成果が少なかったことから、他機関との連携による学術的検討が望まれる。また、最初に構造ありきで考察が不十分に感じられた。

比較的若手の研究者による成果であることから、電磁波吸収の特性についてアカデミアと理論面の研究を進める等、基礎科学研究への波及と今後の発展が期待される。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

(1) 無色透明・赤外反射部材

- ・ 透明性の指標である可視光線透過率は88%であり、目標の80%以上を達成した。
- ・ 赤外線反射性能の指標である赤外線反射帯域は850nm～1700nmであり、目標の850nm～1600nmの目標を達成した。
- ・ 赤外線反射性能の指標である赤外線反射率はフィルム1枚では90%であ

り、目標の95%以上を達成出来なかった。また、2枚貼りとすることで赤外線反射率は98%となり目標を達成できることも確認した。

(2) 電磁波カット部材

- ・ 電磁波カット帯域は28GHz～30GHzであり、目標の3～30GHzの高周波領域（5G帯域）に帯域を備えることを達成した。
- ・ 電磁波カット性の指標である電磁波減衰量は28GHz～30GHzの最大吸収ピークで-40dBであり、目標の-30dB以下を達成した。
- ・ 成型性の指標である成型前フィルム対比面倍率は最大面倍率1.2倍と目標の1.2倍以上の目標を達成した。

(3) 薄膜制振部材

- ・ 制振性能の指標である損失係数 η 0.5以上（20℃～40℃）の目標と、ハンドリング性の指標である厚み1mm以下の目標に対して、技術的難度の高さからペンディングした。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- ・ 薄膜制振部材の創成には至らなかったが、3種交互積層フィルムの創出に成功した点で、初期目標は概ね達成されている。
- ・ 3種多層膜の製造技術を確立した点は評価できる。制振性は得られなかったが、ミリ波カットは実現した。
- ・ 部材の設計としては達成に近い。ただし、他への波及やサイエンスという意味では物足りない。
- ・ 無色透明・赤外反射部材、電磁波カット部材の開発については達成したものの、薄膜制振部材は途中での方針転換により諦めてしまったのは非常に残念であるが、一定の成果はあったと判断する。

6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

(1) フローマーク抑制の新知見

従来の知見からは積層乱れの一種であるフローマークを抑制するためには最表層の樹脂粘度を内層の樹脂粘度よりも低くすることが分かっていたが、3種ナノ積層フィルムにおいては、最表層に位置する樹脂Aの粘度だけではなく、内層に位置する樹脂B、樹脂Cの粘度の大小関係もフローマークに影響する知見を得た。

(2) 新規光学性能発現の新知見

3種ナノ積層技術は当初は可視光を透過し赤外線を反射する光学性能を目的として開発していた。しかし、研究の過程で斜め方向からフィルムに入射したP波の可視光を反射する特性を付与できることを新規に発見した。研究当初はフィルム面方向における屈折率（面方向屈折率）について設計を行ってい

たが、更にフィルム厚み方向の屈折率（厚み方向屈折率）制御に着目した新規屈折率設計を行った。この新知見の屈折率設計は斜め方向においてはあえて可視光に高次反射を発生させるコンセプトであり、P波の可視光を反射することが出来る。これは赤外線を反射しながら、正面方向は透明であり、斜め方向は反射により半透明／ミラー調となるユニークな光学特性である。この新知見の詳細なメカニズム検討や用途検討は引続き研究を進めていく。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・ ノウハウに属する多くの知見があった。
- ・ 可視光 P 波反射が確認されるなどの新しい発見はあるが、目立った副次的効果は見られない。
- ・ 視野角を制御できる技術は、計画時に想定していなかった成果といえる。
- ・ 3 層積層において有用な副次的効果があった。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

特になし

【個々の委員によるコメント】（間接的成果）

- ・ 本研究プロジェクトは限定された企業の技術開発なので、他の者へ派生した成果は見られない。

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

2 種ナノ積層技術による無色透明・赤外反射部材は研究が進められおり、当社含む一部の企業からは製品が上市されている。一方で、無色透明を維持できる赤外線反射帯域は 850 nm～1200 nm が光学理論上の限界であり、赤外線反射性能は限界に達していた。本研究で創出した 3 種ナノ積層技術が従来の赤外線反射帯域の限界を大きく超えたことは特筆すべき内容である。

2 種ナノ積層技術は工業化レベルに技術が進歩しているが 3 種ナノ積層技術は工業化例が無い。本研究で実用レベルの面積で 3 種ナノ積層フィルムを製造したことは世界初の成果である。今後研究を進めていくことで工業化を達成することが出来れば、3 種ナノ積層技術による高機能フィルムを世界に先駆けて展開することが出来る。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

- ・ 600 層にわたる積層法で特性を出している。
- ・ 中間層 C 層の樹脂設計に関して、実験結果を示すことで、一定の設計指針を示したことは評価できる。

- ・ 3種のポリマーをナノレベルで積層する技術は特筆すべき成果である。
- ・ 流動性材料の積層技術という意味で新たな学術性を提起している。

6-5. 論文（投稿中のものも含む），学会発表等
論文0件、学会発表2件。

6-6. 特許（出願中のものも含む）
出願中17件（うち3件PCT出願）。

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）

- ・ 特許出願は少なくない。一方で、ノウハウとして確保している技術が主になっているものと考えられる。
- ・ 多数の特許を出しており、日本の競争力向上に寄与したと考える。
- ・ 論文などの成果発表は極めて少ない。
- ・ ノウハウに近い成果に着目していて、論文のための研究に注力していない。
- ・ 中間評価で大学などとの連携を示唆したが、実現していない。
- ・ 英文の学術論文として成果を世に出すことが望ましい。
- ・ 学会発表が2件にとどまっており、今後に期待する。

6-7. 科学技術への波及効果

（1）無色透明・赤外反射部材

- ・ L i d a rセンサーに適用することによって、L i d a rセンサーが発する赤外線を反射または外部からの赤外線ノイズをカットでき、L i d a rセンサーの性能向上や新機能創出に貢献できる。
- ・ 自動車のフロントガラスや建物の窓に貼ることによって、明るさを維持しながら車内／室内の温度上昇を抑制することができるため、省エネに貢献できる。今回研究を行った3種ナノ積層フィルムは従来技術以上の赤外線反射機能を持つため、高い省エネ効果が期待できる。また、既に量産されている薄膜金属層を設けた遮熱フィルムは電波を遮蔽するため、窓に遮熱フィルムを用いた場合は室内でスマートフォンなどの通信機器の通信が阻害される課題が存在している。3種ナノ積層フィルムは金属を用いていないため、通信を阻害しない利点を持つ。
- ・ 今回の研究では赤外線反射を目的としたが、層厚みを制御することによって可視光を反射することが可能であり、金属を用いずに金属のように光を反射するミラーフィルムを製膜することが出来る。ポリマーから構成されるフィルムであり複雑形状に成形することが出来るため、意匠材料に用いることが出来る

(2) 電磁波カット部材

- ・ 自動車の衝突防止レーダーやバイタルセンサー等のミリ波を用いるセンシング機器に適用することによって、自己中毒によるセンシング性能低下を防止することや、ノイズ源となる障害物に貼ることによって、検知対象を正しくセンシングすることが出来る。
- ・ スマート工場などのミリ波通信量の多い通信環境において、本部材を用いて異なる通信間を遮蔽することによって混線を防止することが出来る。
- ・ ミリ波センシング機器／ミリ波通信機器に適用することで、ミリ波の発信及び受信の指向性を高めることが出来る。

【個々の委員によるコメント】(発展性と波及効果)

- ・ 製品化につながる課題であり、発展性と波及効果はある。
- ・ 透明・センサー遮蔽材料の可能性を示しており、相応の発展性は認められる。
- ・ 光学特性を自在に制御したフィルムはさまざまな分野への波及効果が期待できる。
- ・ ライダーや断熱ガラスなどへの波及が期待される。
- ・ 電磁波カット部材については、赤外線カットフィルムなど今後の商業利用の可能性はあるが、さらなる発展性などについては検討を要する。
- ・ 社内の開発そのもので、社内での展開の他はあまり想定されていない。
- ・ 発展性については説明があったが、目標性能から予測される範囲、すなわち事前に想定されるものであり、それらの端緒にも至っていない。成果の波及効果にかかる期待も大きくなっていない。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

定期的に連絡会を行い、プロジェクト全体の進捗状況を確認した。また、3種ナノ積層フィルム、電磁波カット部材の各々の研究進捗について、隔月で研究所長による進捗状況のフォロー会議を開催し、研究方針や進め方について協議、適正化した。

【個々の委員によるコメント】(効率的な研究実施体制とマネジメント)

- ・ 研究実施体制については単独の企業提案であり特に問題はない。
- ・ 要求物性に合わせたフィルム材料の開発部隊と、積層技術開発部隊とが共に分厚い。日本企業でないと達成できない成果を挙げた。
- ・ 製造部門と解析部門の密接な協力がみられる。
- ・ 効率的には実施されているが、学際性は弱い。
- ・ 中間評価でのコメント「大学等との連携を深めることにより学術的な検討を進める」が踏まえていない。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）

- ・ 集積されていた知見の支援を得て、幾多の問題を解決した。
- ・ 研究テーマについては取捨選択して研究リソースを振り分けている点は評価できる。
- ・ 制振性能が上がらないことへの対応がなされていないが、光学的性能の向上への対応については相応の対応がなされている
- ・ 制振膜の未達成についての対応が不明確。
- ・ 薄膜制振部材について、途中での方針転換により諦めてしまった点、界面制御の問題も整理が深まっていない点など、問題に対する対処が十分だったとは判断できない。

6-10. 経費の効率的な執行

当初の計画では連絡会を東レ株式会社滋賀事業場で開催することとしており、東レ株式会社三島工場からの出張旅費を予算化していたが、Web会議を活用することで旅費の削減を実施した。

また、本研究に用いる樹脂の一部については、東レ株式会社で生産原料として購入しているルートを活用することで、標準的な市況価格よりも安価に入手した。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

- ・ 経費は効率的に執行している。
- ・ 特に問題なし。