

論文の概要

1 申請者

防衛大学校 野尻 秀智

2 論文題目

真空紫外光を用いた軽量・耐衝撃性プラスチック窓材の実用化に関する研究

3 論文の概要 (博士: 400 字~2,000 字程度)

近年、地球温暖化防止のためのグローバルな取り組みの重要性が増している。1994 年発効の気候変動枠組条約は、CO₂ を中心とした温室効果ガスの削減を目的としたものであり、京都議定書やパリ協定を経て、世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つという長期目標が掲げられている。日本においては、2030 年度に 2013 年度比▲26.0% (2005 年度比▲25.4%) とした CO₂ の具体的な削減目標が設定され、脱石炭化の潮流も鑑みながら、削減目標の達成に向けて精力的な取り組みがなされつつある。特に、CO₂ の全排出量の 20% は車両からのものとされており、世界的にも自動車の電動化 (EV) へのシフトが急速に進んでいる。そこで、電気自動車の航続距離をガソリン車並みにするために、車体の軽量化のための革新的な技術が希求されている。

本研究では、波長 157 nm の真空紫外フッ素 (F₂) レーザーが誘起する光化学反応を基に、次世代型の電気自動車用樹脂窓を開発し、実機に実装した際の問題点を学術的に解決するとともに、量産化のためのエキシマランプの利用の有効性を実証して、樹脂窓の実用化に資する成果を得ている。さらに、本手法で作製した樹脂窓材に、IoT (Internet of Things) デバイスを含む種々の機能を集積するための、窓材表面への超撥水性発現の新規手法を見出し、窓材のスマート化のための基礎的成果を述べている。

次世代型の電気自動車用樹脂窓材として、耐衝撃性が高く、透明で軽量なポリカーボネート (PC) がその有力な候補とされている。しかし、PC は耐摩耗性が低いため、その表面保護膜としてシリコン樹脂が予めコーティングされることが一般的である。このシリコンが施された PC においても、自動車用窓材として使用するには、耐摩耗性は不十分である。そこで、F₂ レーザーの照射によりシリコン樹脂表面をシリカガラス (SiO₂) に改質して、シリカガラスに匹敵する耐摩耗性を有する PC 窓材を実現してきた。そして、この PC 窓材を、実際の電気自動車に適用し過酷な環境下で長時間使用すると、SiO₂ 改質層にクラックが発生する懸念があり、その抑制方法を見出すことが学術的にも重要であることを認識した。

この問題を解決するために、まずメッシュマスクを使用しレーザーの照射エリアを細分化した。これにより、SiO₂ の膜厚を 1 μm 以上に増してもクラックが生じないように抑制することができた。F₂ レーザーによる光改質においては、シリコン樹脂が SiO₂ に改質する際に膜厚が 15% 程度収縮し、レーザーの照射条件やメッシュマスクの種類に依存しないことがわかった。すなわち改質時に生じた内部応力が膜厚の増加と共に増大し、クラックの原因になっ

ていると想定された。このことは、 SiO_2 改質層に生ずる応力の計算結果からも裏付けられた。

メッシュマスクを使用することにより内部応力の増加を低く抑えることができたが、耐熱性試験において、メッシュマスクの有無やメッシュの開口サイズに関わらずクラックが発生した。そこで、クラック周辺の起伏プロファイルをレーザー顕微鏡により測定し、最表面に生ずる引張応力が耐熱性試験時に生ずるクラックの要因であると推定した。そして、最表面の引張応力を低減するために、スチールウールで表面を擦る「ラビング処理」を行うことが効果的であることを見出した。原子間力顕微鏡 (AFM) による観察の結果、ラビング処理後の表面には可視光の波長より短い、ナノメートルサイズの一次元的な微細周期構造が形成され、その微細構造の深さはラビング処理時の荷重に依存することがわかった。さらに、ラビング処理時の荷重を大きくすることにより、より高い温度においてクラック抑制効果が得られることを明らかにした。そして、 120°C の耐熱性を有し、かつ 1000 cycle のテーバー摩耗試験においてデルタヘイズが 2%以下の耐摩耗性を有し、耐候性にも優れた PC 製の窓材が得られることを示した。

本手法を、量産車の窓材として利用するためには、 SiO_2 改質層の特性は保持したまま、処理時間（改質時間）を短縮し、 1 min/m^2 の処理速度とすることが不可欠と考えられる。そこで、 F_2 レーザーに代えて、波長 172 nm の Xe エキシマランプの利用の有効性を調べた。その結果、エキシマランプを用いる場合は、ハードコートの種類に制限があるものの、 SiO_2 改質層の機械的物性は維持できることが判明し、かつ上記処理時間を達成できる見通しを得た。

さらに、PC 窓材のスマート化のために、 SiO_2 微小球の単層整列と ArF エキシマレーザー（波長 193 nm）の照射により、シリコンゴムシート上に周期的な微細隆起構造を形成し、超撥水性を付与できることを見出した。本手法は、PC 上に施されたシリコン樹脂上に塗布した薄膜状シリコンゴム表面にも適用可能であり、この場合にも水滴接触角が 150° を超える超撥水性を発現させることができた。周期的微細隆起構造が形成したシリコンに、 F_2 レーザーを一樣照射することにより表面の硬度化が期待できるが、 SiO_2 の表面自由エネルギーにより、現状では撥水性が低くなる。車体内側の PC 樹脂窓裏面に本手法を適用することは有効と考えられるが、車体外側の窓材として利用するためには、微小球径の最適化、疎水性官能基による化学修飾も検討の余地があると考えられる。

以上、本論文で得られた成果は、化学気相成長法による薄膜形成プロセスのように、真空装置を必要とせず、耐候性・密着性の高い SiO_2 透明硬質膜を広い面積で形成可能としている。したがって、急速に進展している自動車の EV 化を高度に実現するための、車体の軽量化に資するものである。

4 キーワード

「真空紫外光」，「光化学表面改質」，「自動車用樹脂窓」，「ポリカーボネート」，「シリコン」，「 SiO_2 」，「クラック抑制」，「量産化」，「超撥水性」