

# 車両等に装備するためのポリカーボネート窓の 表面改質に関する研究（最終報告）

新中 新二\* 井上 成美\*\* 野尻 秀智\*\* 大越 昌幸\*\*

植田 博臣\*\*\* 岩井 和史\*\*\* 中村 先男\*\*\*

## Study on Surface Modification of Polycarbonate Windows for Vehicles (Final Report)

Shinji SHINNAKA\* Narumi INOUE\*\* Hidetoshi NOJIRI\*\* Masayuki OKOSHI\*\*

Hiroomi UEDA\*\*\* Kazufumi IWAI\*\*\* Sakio NAKAMURA\*\*\*

### 1. 緒言

有史以来人類はエネルギー資源を求め有効に利用する手段を考えてきた。石油や天然ガスなどを中心とした化石燃料はエネルギー密度が高く利用価値の高い生活資源として近代のエネルギー供給の中心的な役割を果たしてきた。しかし、ここ数10年来の環境汚染や資源枯渇の憂慮などの背景から、再生可能エネルギーや水素の利用に開発の中心が移っている<sup>[1]</sup>。自動車における電動化の流れもそのような背景から必然的なものである。また、Society5.0<sup>[2]</sup>のような政府主導のスマート社会実現の取り組みの中で、自動車は豊かな社会創造のためのコアシステムとしてさらに進化しようとしている。そして自動車は社会の共通のプラットフォームの中でさらにその価値が高まることが期待される。

ところで自動車の電動化の歴史にはいくつかの転換点があった。1970年代後半から1980年代半ばには、オイルショックや公害問題を発端として、石油代替エネルギーとしてのEV(Electric Vehicle)が競って開発された。また、新規モーターの開発とその制御による高効率化によって、課題とされた電池容量を補う形で駆動系が進化した。2000年代に入り、リチウムイオン電池が実用化され、高容量で軽量の電池が開発された。同時に感電や事故時のショートに対する安全性も高まった。本学においては、1990年代後半、先駆けてEVに適したモーターやその制御方法についての理論研究やそれを実証するための実車製作を行い<sup>[3,4]</sup>、自動車メーカーとの共同研究も活発に行われた。学術と実用化の両方を本学が担う形で電動化をけん引

していった。これらの研究はメディアでも大きく取り上げられ、本学EV研究の社会的認知度が高まった。そして、2010年代に入り、Teslaなどに代表されるEV専門メーカーが台頭し、Googleなどの巨大IT企業もこぞってEVとクラウドを接続するConnected Car構想やAIや自動運転をベースとしたさまざまな利便性やサービスが追及された。

我々は来るべく究極の低排出化の時代に先駆け、EVの軽量化による走行効率の向上やCO<sub>2</sub>排出量削減のため、車両窓の軽量化に取り組んできた。具体的には、無機ガラスをポリカーボネート(PC)樹脂に置き換えることを目的とし、PC表面の耐傷性を向上するためにシリコン樹脂を塗布し、さらに光化学改質という手法でシリコン表面の所定の深さを選択的にSiO<sub>2</sub>に改質することを検討した<sup>[5]</sup>。ここで使用するシリコン樹脂は、PC表面に液体の状態では塗布し、加熱硬化によりリジッドな保護膜を形成するものであり、一般にハードコートと称されている。

光化学改質の光源としては、波長200nm以下の真空紫外と呼ばれるものでF<sub>2</sub>レーザーやXeエキシマランプなどが用いられるが、いずれの場合も、シリコン樹脂がSiO<sub>2</sub>に改質される際に収縮を伴うため、引張応力が生ずる。SiO<sub>2</sub>の膜厚増加とともに応力が増大し、引張強度に達するとクラックが発生する<sup>[6,7]</sup>。また、加熱などにより基材が膨張すると、さらにクラックが生じやすくなるという問題があった。これらは本プロセス固有の問題ともとれるが、本研究を通して、メッシュマスクを使用してF<sub>2</sub>レーザーを照射し、さらに照射後の試料表面をスチールウールで擦るラビング処理を行うことによりクラックの発生を抑制できることを明らかにした。<sup>[8-13]</sup>

本研究は、神奈川大学工学研究所のプロジェクト研究として2014年10月～2019年9月に行われ、後半の3年間は、JSPS科研費16K06754の助成を受けて行なわれた。以下、5年間の研究成果をまとめる。

\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

2. 実験方法

2.1 PC 基板上へのシリコン樹脂の塗布

透明な PC 基板 (厚さ 3 mm, 大きさ 10 cm×15 cm) 上にディップコーティング装置 (SDI, MD-0408-S5) により, アクリル樹脂およびシリコン樹脂を積層して塗布した. アクリル樹脂とシリコン樹脂の塗布後は, 熱風乾燥炉 (ONDO, TD15-12M) により各々 125°C 60 min, 120°C 60 min の硬化処理を行った. さらに上記 PC 基板の長手方向の一部を切断し, 10×10 cm<sup>2</sup> の正方形の試料を得た. 硬化後の各層の厚さは, 光学干渉式膜厚計 (マミヤ OP, MSPA1000) により測定し, 各々約 4 μm であった.

2.2 メッシュマスクを使用した光化学改質

図 1 に実験概要を示す. X-Y 電動ステージ (シグマ光機, SGSP26-100XY) 上に試料を設置し, さらに試料上にステンレス製のメッシュマスクを密着させ, その上方 5 mm の位置より F<sub>2</sub> レーザー (Coherent, LPF pro 205) を照射した. このときレーザー出射口には, 開口が 10×10 mm<sup>2</sup> のステンレスマスクを装着し, 均一性のよい光路の中心付近のみにレーザー光を制限した. 光路には N<sub>2</sub> ガスを 5 L/min の流量で流し, 酸素をパージした. F<sub>2</sub> レーザーの単パルスフルエンスは 10 mJ/cm<sup>2</sup>, パルス繰り返し周波数は 10 Hz とした. メッシュマスクの開口長は, 50 μm, 150 μm, 300 μm, 1 mm, 5.5 mm の 5 種類とした. また, レーザー照射にあたり, 1 cm<sup>2</sup> 当たりの照射時間が所望の値になるように, X-Y 電動ステージを一定速度で走査し, 10×10 cm<sup>2</sup> の試料全体に均一にレーザー光を照射した. 図 2 に X-Y 電動ステージの走査方法を示す. レーザーのビームサイズは 10×24 mm<sup>2</sup> の矩形であり, 垂直方向はガウス分布, 水平方向はほぼフラットなビーム特性を有している. このビームを垂直水平ともに 10 mm に制限したため, 垂直方向の上下端が半値全幅 (FWHM) となるようなビームプロファイルを得た. また, 均一なレーザー照射が行われるよう垂直方向には一定速度で X-Y 電動ステージを走査し, 水平方向には過照射を避けるため高速で移動するように設定した. レーザーの照射後は, ASTM D1044 に従うテーパー摩耗試験, 耐熱性試験および光学顕微鏡によるクラックの観察を行った.

2.3 ラビング処理によるクラック抑制実験

レーザー照射により, シリコン樹脂の表面付近の深さ 1 μm に満たない領域が選択的に SiO<sub>2</sub> に改質されるが, 改質面の後処理による耐久性向上の検討として, スチールウールによるラビング処理を

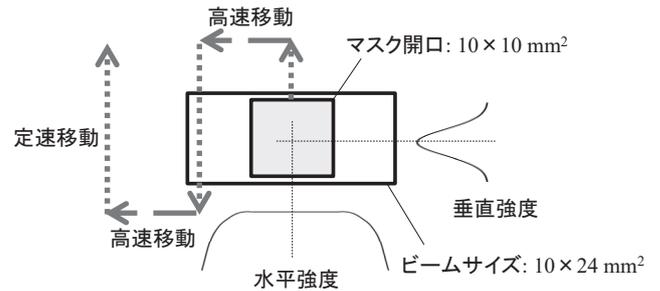


図 2 X-Y 電動ステージの走査方法<sup>[1]</sup>

行った. 図 3 にラビング処理の概要を示す. ロードセル上に試料を置き, その上に約 10 g のスチールウール (日本スチールウール, #0000) をはかり取り, 一様に広げた状態で荷重をかけた. この状態で所定回数往復させ擦傷操作を行った. 荷重は, 0.1~2 N/cm<sup>2</sup>, ラビング回数は 300 往復とした. この処理は, レーザー照射の後にを行った. なお, ラビング処理に使用した試料は, 図 4 に示すような厚さ 3 mm, 大きさ 5×5 cm<sup>2</sup> の正方形形状とした. この試料表面には前項 2.1 に示した方法によりアクリル樹脂およびシリコン樹脂を塗布し, さらに図 1 に示した構成におり F<sub>2</sub> レーザーを照射した. このとき X-Y 電動ステージに替えてロードセルとしたため, レーザー光の走査は行わず, レーザーの照射時間は, 15s, 30s, 60s, 90s, 120s とし, 合計 9 点の照射領域を設けた. さらに, ラビング処理による耐熱性の向上を評価するため, 100°C 3 h または 120°C 3 h の耐熱性試験を行い, 試験後の表面を光学顕微鏡により観察し, クラックの有無や形態を調べた.

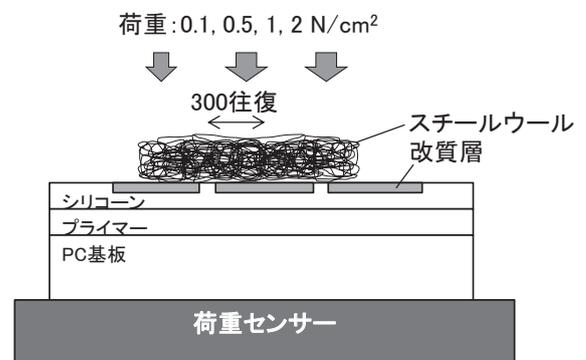


図 3 ラビング処理の概要<sup>[9]</sup>

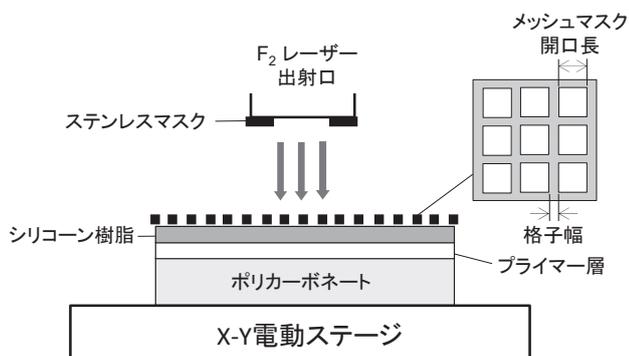


図 1 実験概要

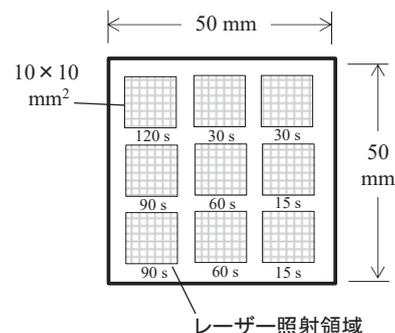


図 4 ラビング処理の概要

2.4 光改質による帯電防止性の付与

車両用窓材としての一機能として帯電防止性を評価した。一般的な窓材のソーダ石灰ガラスと同程度の帯電圧が得られれば、車両窓としての実用性に問題はないものとした。帯電圧の制御方法として、波長 172nm の Xe エキシマランプ、および波長 222nm の KrCl エキシマランプを使用し、試料表面の導電性を制御した。試料は前項 2.1 にて作製したものと同一の基板とした。上記のエキシマランプを基板に照射した試料、および比較のためソーダ石灰ガラスと合成石英基板の帯電圧を比較した。Xe エキシマランプは SiO<sub>2</sub> 形成と SiO<sub>2</sub> に誘起される欠陥に起因して形成される導電パス、KrCl エキシマランプは SiO<sub>2</sub> の形成なしに、表面に誘起される -OH 等の親水基や、内部に形成される未結合欠陥による電荷移動に伴う帯電圧の低下を期待した。試料をスピンドーター (MIKASA, MS-B150) により 3000 rpm にて回転させ、回転開始から 30 s 後に試料上方 50 mm の位置において、デジタル静電気探知機 (サンハヤト, EG-1) にて帯電圧を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 メッシュマスクによる耐摩耗性および耐熱性の評価

耐摩耗性の評価は、テーバー摩耗試験 (ASTM D1044) により行った。2 個一対の摩耗輪を試料表面に荷重をかけて設置し、この状態で試料を所定回数回転させ、試験前後の光学的なヘイズ (Haze) の変化を評価するものである。図 5 にテーバー摩耗試験の結果を示す。縦軸には、摩耗輪の回転が 1000 cycle のときの試験前後の Haze 変化 ( $\Delta H_{1000}$ ) を示す。数値が低いほど、傷付きによる Haze 上昇が少なく優れた耐摩耗性を示す。レーザー照射時間がゼロ、すなわちレーザーを照射しない場合の  $\Delta H_{1000}$  は約 7% であった。これは SiO<sub>2</sub> が形成されないシリコン樹脂のみの表面の耐摩耗性を示している。これに対し、レーザー照射時間の増加に伴い  $\Delta H_{1000}$  は一旦低下し 15~30 s 程度の照射時間において最小値を示したが、その後照射時間の増加とともに  $\Delta H_{1000}$  が高くなる傾向を示した。メッシュマスクの開口サイズに関わらず同様の傾向となったが、特にメッシュマスクを使用しない場合が顕著であり、次いで 5.5mm の開口の場合に  $\Delta H_{1000}$  の上昇がやや低く、メッシュの開口サイズがさらに小さな場合には Haze 上昇は低く抑えられた。光改質により得られる SiO<sub>2</sub> の膜厚は、レーザー照射時間の増加とともに増すことがわかっており、

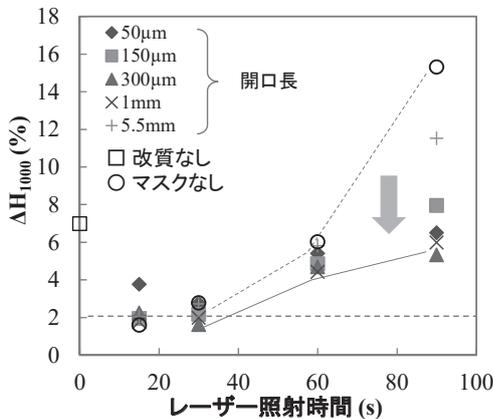


図 5 テーバー摩耗試験の結果<sup>[11]</sup>

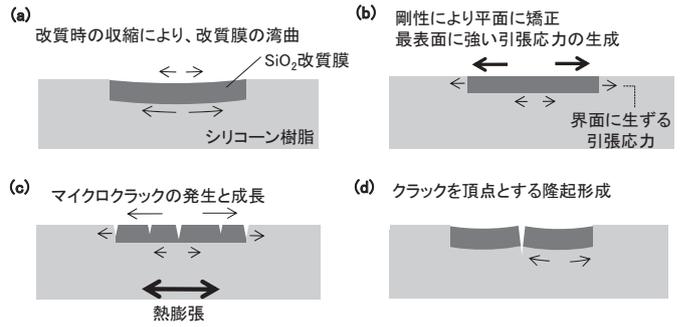


図 6 クラック発生メカニズム<sup>[9]</sup>

レーザー照射時間が 30 s のときに SiO<sub>2</sub> の膜厚は約 600 nm で、90 s では 1 μm 程度であった。SiO<sub>2</sub> の膜厚の増加とともに、 $\Delta H_{1000}$  は単調に低下するものと期待したが、レーザー照射時間が 15~30 s のときに最小値を示す結果となった。これは、膜厚の増加とともに改質膜中に生ずる引張応力が增大するため、この応力が耐摩耗性を低下させる要因になっているものと考えられる。メッシュマスクの開口サイズが大きな場合、より大きな引張応力が生ずることとなり結果的に改質層にクラックが生じやすくなるものと考えられる。さらに、耐熱性試験として 100°C 3 h の熱処理を行うと、照射時間 15s の試料を含め、すべての試料においてクラックが発生した。

以上のように硬質の SiO<sub>2</sub> が厚いと耐摩耗性も向上すると期待したが、逆に耐摩耗性が低下することが明らかとなった。以上の結果を踏まえ、図 6 に示すようなクラック発生メカニズムを考察した。シリコン樹脂が F<sub>2</sub> レーザー照射によって SiO<sub>2</sub> に改質する際には、シリコン樹脂中の有機成分が解離するとともに酸化脱離により膜の収縮が起こる。その後酸素原子との再結合により SiO<sub>2</sub> が形成されるものの全体的には収縮による引張応力が内在するものと考えられる。このとき、図 6 (a) に示すように、改質膜は湾曲しシリコン樹脂との界面において大きな引張応力が生ずる。しかし、実際にはシリコン樹脂の剛性により変形が妨げられ、図 6 (b) に示すように薄い SiO<sub>2</sub> 膜は平面に矯正される結果、最表面に引張応力が生ずることとなる。この状態で、熱膨張により基板が伸びたり、摩耗輪等で擦

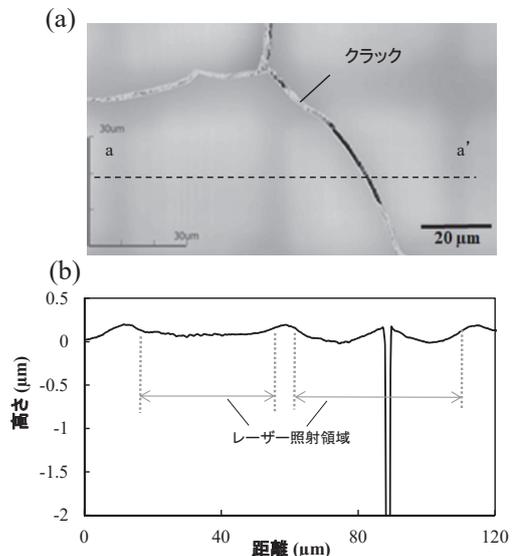


図 7 クラック周辺の起伏プロファイル<sup>[9]</sup>

られたりすると、図 6 (c)のように最表面にマイクロクラックが生ずる。さらに、マイクロクラックが成長し SiO<sub>2</sub>を貫通するとクラック周辺の応力が解放され、図 6 (d)に示すようにクラック周辺が隆起することとなる。図 7に、触針式の段差測定器（ブルカー、DEKTAK XT）にて測定したクラック周辺の起伏プロファイルを示す。図 7(a)は試料の上方から観察した光学顕微鏡写真であり、図中の薄い領域がレーザー光を照射した改質部である。クラックは、改質領域間の未改質領域から改質領域内に生じている。図 7(b)は、図 7(a)中の a-a'線に沿った起伏プロファイルを示したものである。この結果によれば、クラックを頂部として表面が隆起しており、クラックの深さは 2 μm 以上で、確実に改質層（SiO<sub>2</sub>改質膜）を貫通していることが明らかである。他に生じたクラックを複数測定した結果、すべてのクラックが改質層を貫き、クラック周辺が隆起していることが確認できた。これらの結果は図 6 (d)の考察を裏付けるものであり、耐熱性試験で生ずるクラックを抑制するためには、図 6(b)に示した最表面に生ずる引っ張り応力を低減することが重要であると考えられる。

3.2 スチールウールラビング処理によるクラック抑制効果

図 8 にラビング処理の有無における耐熱性試験後の試料表面の光学顕微鏡観察像を示す。レーザー照射時間の長さにかかわらず、ラビング処理を行わない場合にはクラックが発生したが、ラビング

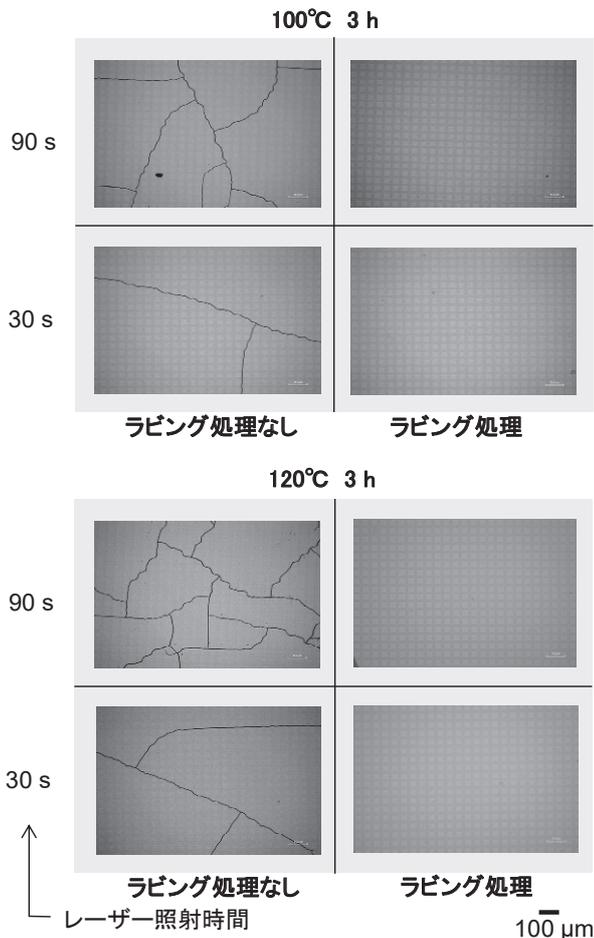


図 8 ラビング処理の有無による耐熱性試験後の試料表面の光学顕微鏡観察像<sup>[9]</sup>

表 1 ラビング処理時の荷重とクラック抑制効果<sup>[12]</sup>  
(a) 照射時間：30 s SiO<sub>2</sub>膜厚：620 nm

Load (N/cm <sup>2</sup> )	100°C			120°C		
	50 μm	300 μm	No mesh	50 μm	300 μm	No mesh
0	×	×	×	×	×	×
0.1	×	×	×	×	×	×
0.5	○	○	×	○	×	×
1	○	○	○	○	○	○
2	○	○	○	○	○	○

(b) 照射時間：90 s SiO<sub>2</sub>膜厚：1040 nm

Load (N/cm <sup>2</sup> )	100°C			120°C		
	50 μm	300 μm	No mesh	50 μm	300 μm	No mesh
0	×	×	×	×	×	×
0.1	×	×	×	×	×	×
0.5	○	×	×	×	×	×
1	○	○	×	○	×	×
2	○	○	○	○	×	×

○:クラックなし ×:クラック発生

表 2 ハードコート周辺材料の線膨張率

材料	線膨張率 (ppm/°C)
PC樹脂	70
アクリル樹脂	70 - 80
シリコーン樹脂	25 - 30
SiO <sub>2</sub> (石英ガラス)	0.5

処理を行った場合には 100°C、120°Cのいずれの耐熱性試験温度においても、クラックが完全に抑制されていることが明らかである。表 1 にラビング処理時の荷重とメッシュマスクの有無と開口長、およびレーザー照射時間をパラメータとしたクラック抑制効果についてまとめる。表 1 (a)の結果によれば、レーザー照射時間が 30 s の場合、100°C、120°Cともに、メッシュマスクの有無にかかわらず 1 N/cm<sup>2</sup>以上の荷重でラビング処理を行うことによりクラックが抑制できることを示している。また、表 1 (b)に示すようにレーザー照射時間が 90 s の場合、メッシュマスクの開口長を 50 μm に小さくした場合は 100°Cのときには 0.5 N/cm<sup>2</sup>以上、120°Cでは 1 N/cm<sup>2</sup>以上の荷重でクラックが抑制できた。また、メッシュマスクを使用しない場合は、100°Cにおいては 2 N/cm<sup>2</sup>の荷重でクラックが抑制できたが、120°Cでは抑制できなかった。以上のように、ラビング処理時の荷重が大きいほど、メッシュマスクの開口長が小さいほどクラック抑制効果が高く、SiO<sub>2</sub>改質層の厚さが厚いほど、あるいは耐熱性試験の温度が高いほど、より大きな荷重をかけなければならないことが明らかとなった。図 9 にラビング処理前後の試料表面の AFM (原子間力顕微鏡) による観察像を示す。図 9 (a)はシリコーン樹脂の塗布後、図 9 (b)はレーザー光を 30 s 照射後、図 9 (c)は荷重 1 N/cm<sup>2</sup>によるラビング処理後である。併せて表面の起伏の最大値 R<sub>max</sub>および Haze を示した。シリコーン樹脂の塗布後は極めて平坦な表面が形成されており Haze も低い。これに対し、レーザーを照射すると、表面に若干の凹凸が生じ Haze もわずかに高くなった。さらにラビング処理後は、最大 50 nm 程度の筋状のテクスチャー

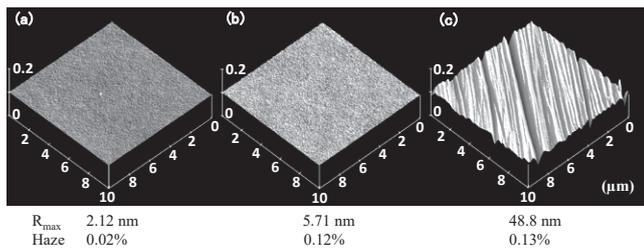


図9 試料表面のAFMによる観察像<sup>9)</sup>

構造が形成されたが、Hazeはラビング処理前とほとんど変わらず、窓材としての透明度にほとんど影響していない。すなわち光学特性に影響しない幅・深さ共に概ね200nm以下の微細な溝が形成されている。このテクスチャー構造の形成により、表面の長さは、より長くなっており、加熱状態においては、(線膨張率) × (長さの増加分) だけ伸長するものと考えられる。

表2にPC基板を構成するハードコート周辺材料の線膨張率を示す。シリコン樹脂、アクリル樹脂、PC樹脂のいずれも数10ppmオーダーの線膨張率を有するのに対し、SiO<sub>2</sub>は0.5ppmと2桁小さい。したがって、大きな引張応力が生ずるSiO<sub>2</sub>表面に筋状のテクスチャーを形成することで、加熱時に表面のみを積極的に伸長させた結果、特に加熱時の応力緩和に寄与したと考えられる。

### 3.3 光改質後の帯電性の評価結果

PCの抵抗率は10<sup>16</sup>Ωcm程度であり電気的には絶縁性を示すため、車両用の樹脂窓として使用した場合、帯電が生じやすくごみや塵が付着しやすいという実用上の懸念がある。また、表面に塗布されるシリコン樹脂やアクリル樹脂も導電性は有していない。一方、従来のガラスもまた導電性は有していないが、樹脂材料表面に比較して帯電性は低く、ごみや塵の付着の点で窓材としての実用性が問題になることはなかった。一般に使用されるソーダ石灰ガラスの抵抗率は10<sup>10-12</sup>Ωcm程度であり、良好な導電性を有しているとは言えないが、帯電を防止するという目的では樹脂窓材においても同程度の導電性は付与する必要がある。ここで10<sup>10</sup>Ωcm以上の抵抗率を安定的に測定するのは難しいため、抵抗率測定に代えて帯電圧を測定することで帯電防止性を評価した。

図10に波長172nmおよび222nmのエキシマランプを照射した場合の積算光量に対する帯電圧の測定結果を示す。ランプを照射しない状態でのPC試料表面の帯電圧は4.4kVと測定された。この値はソーダ石灰ガラスの0.1kVや合成石英板の0.7kVに比較して高く、極めて帯電しやすいことを示している。合成石英板に172nmのエキシマ照射を行い2J/cm<sup>2</sup>の積算光量を与えると帯電圧は0.1kVに低下した。これに対し、PC基板の場合9J/cm<sup>2</sup>の照射により、ソーダ石灰ガラスとほぼ同等の帯電圧に低下した。また、波長222nmのエキシマ照射の場合は、2J/cm<sup>2</sup>程度の照射により1kV以下に帯電圧が低下したが、その後積算光量を増しても、帯電圧の低下は認められなかった。

波長172nmや222nmのエキシマ光は、試料表面に-OH基を導入し、水滴接触角を低下させ濡れ性を改善するために使用される。また、157nmのF<sub>2</sub>レーザーや172nmのランプ光などの真空紫外光は、シリコン樹脂表面をSiO<sub>2</sub>に改質する目的で使用することができ

る<sup>13)</sup>。さらに、真空紫外光の照射は石英ガラスに欠陥を誘起することでも知られており<sup>14)</sup>、このとき生成する欠陥は、Si-OHの生成や酸素欠乏、酸素過剰欠陥がある。そしてこれらの欠陥は電流パスを形成し、また電気的な耐圧を低下させるため、半導体デバイスでは問題となる。しかし樹脂窓のような用途では、積極的に欠陥を導入し、微小な電流パスを形成できた結果、ソーダ石灰ガラスと同等程度の帯電防止性が得られたものと考えられる。

波長172nmのエキシマランプと波長157nmのF<sub>2</sub>レーザーにおいて、照射エネルギーが同じであれば得られるSiO<sub>2</sub>の膜厚や耐摩耗性は同程度であることがわかっている<sup>15)</sup>。したがって、比較的大きな表面への照射を考えた場合、エキシマランプを使用できる可能性が高まる。エキシマランプを照射する際にメッシュマスクを使用しても、帯電性の低下はメッシュマスクを使用しない場合と違いなく、9J/cm<sup>2</sup>程度のエキシマ照射により帯電圧は0.1kV程度に低下することが追加の実験で明らかとなった。これは、エキシマランプの場合はマスクの格子直下にも光が回り込むことにより、電気的なパスができるためと考えられる。

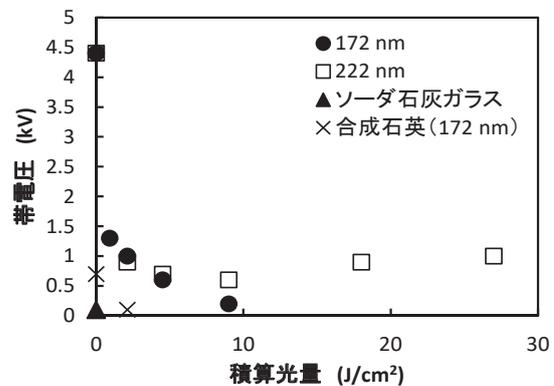


図10 エキシマランプ照射による帯電圧の測定結果

## 4. 結言

PC基板上にハードコートとしてコーティングしたシリコン樹脂に、波長200nm以下の真空紫外光を照射し、シリコン樹脂の一部をSiO<sub>2</sub>に光化学的に改質した。このとき形成されたSiO<sub>2</sub>改質層により、PC表面の耐摩耗性は格段に向上し、1000 cycleのテーパー摩耗試験におけるHaze変化(ΔH<sub>1000</sub>)は2%以下を達成し、国連欧州委員会が提唱する自動車の窓ガラスにおける安全認証規格UNECE#43<sup>16)</sup>における運転視界にかかる窓材の規格Class Lを満たした。また、メッシュマスクを使用して真空紫外光を照射することにより改質層中に生ずる応力を低減し、加えてスチールウールによるラビング処理を行うことにより耐摩耗性と同時に耐熱性をも向上できることを見出した。さらに、真空紫外光の照射により誘起される光化学改質はSiO<sub>2</sub>の形成のみならず、SiO<sub>2</sub>中への欠陥導入をもたらし、その結果、ソーダ石灰ガラスと同等の帯電防止性が得られることも明らかにした。

車両における窓ガラスの樹脂化は、窓ガラス自体の軽量化に貢献するだけでなく、外装パネルの樹脂化とともに一体成形が可能になるなど、車両生産工程の簡略化やこれに伴うコスト低減をもたらし得る。また、プラスチックならではのデザインの自由度や加工の

容易性においても、新しい可能性が期待されている。

本研究のような、光化学改質法を適用した PC 窓材は、車両の EV 化や自動運転技術の醸成と相まって、これからの低炭素社会に資する革新的な製品として、新しい価値を発揮するものと期待される。

本プロジェクトの遂行にあたり、工学研究所技術職員の萩原健司氏、金子信悟氏にご協力いただいた。ここに謹んで謝意を表する。また本プロジェクトへの参画を許諾いただいた(株)レニアス代表取締役の前田導氏、ならびに社長 赤尾太郎氏に感謝する。

#### 参考文献

- [1] 藤野純一, 日比野剛, 榎原友樹, 芦名秀一, 低炭素社会に向けたエネルギー選択に関する考察, 地球環境, **12** (2), 171-178 (2007).
- [2] 日本国政府広報オンライン, <https://www.gov-online.go.jp/cam/s5/>
- [3] 新中新二, 計測・制御から見たセンサレス・トランスミッションレス電気自動車の開発, 計測と制御, **40** (11), 809-812 (2001).
- [4] 新中新二, 竹内 茂, 永久磁石同期モータを利用したセンサレスベクトル制御駆動・トランスミッションレス電気自動車の開発, 電気学会論文誌 D, **125** (12) 1129-1139 (2005).
- [5] Y. Nojima, M. Okoshi, H. Nojiri and N. Inoue, Formation of Transparent SiO<sub>2</sub> Protective Layer on Polycarbonate by 157 nm F<sub>2</sub> Laser for Lightweight Automobile Window, Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 072703-1-072703-4 (2010).
- [6] K. Iwai, S. Honda, Y. Nojima, M. Okoshi, N. Inoue and H. Nojiri, Formulation and Application of Transparent Protective Layer on Polycarbonate with VUV laser, Proc. 79th Laser Materials Processing Conf., 133-137 (2013).
- [7] 大越昌幸, フッ素レーザーにより形成されたポリカーボネート上の透明硬質膜のクラック抑制, 電気学会論文誌 C **135**, 1071-1074 (2015).
- [8] H. Nojiri and M. Okoshi, Crack suppression of silica glass formed by zoned F<sub>2</sub> laser-induced photochemical surface modification of hard silicone thin film coating on polycarbonate, Jpn. J. Appl. Phys. **55** 122701-1-122701-6 (2016).
- [9] H. Nojiri and M. Okoshi, Surface texturing effect on crack suppression of SiO<sub>2</sub> film formed by F<sub>2</sub> laser-induced photochemical surface modification of silicone on polycarbonate under heat resistance test, Jpn. J. Appl. Phys. **56** 085502-1-085502-7 (2017).
- [10] 野尻秀智, 大越昌幸, フッ素レーザーにより形成した自動車用樹脂窓の耐熱試験下でのクラック抑制, レーザー学会誌 **45** 646-651 (2017).
- [11] 野尻秀智, 大越昌幸, 光化学表面改質法により形成した自動車用樹脂窓の耐摩耗性向上, レーザー学会誌 **46** 527-531 (2018).
- [12] 大越昌幸, 野尻秀智, 真空紫外フッ素レーザーによるシリコンハードコート表面改質と自動車用樹脂窓への応用, 光アライアンス **29** (12), 38-41 (2018).
- [13] 野尻秀智, 岩井和史, 中村先男, 井上成美, 大越昌幸, 萩原健司, 植田博臣, 新中新二, 光化学表面改質法によるポリカーボネート上ハードコート膜の超硬質化, プラスチック成形加工学会誌 **30** (1), 30-36 (2018).

[14] 生田順亮, 菊川信也, 日野啓吾, 峯松敏資, 小島宏, 真空紫外光用合成石英ガラス, Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd., **53**, 31-35 (2003).

[15] 新中新二, 井上成美, 大越昌幸, 野尻秀智, 植田博臣, 岩井和史, 中村先男, 車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究 (3), 神奈川大学工学研究, **1** 128-129 (2018).

[16] UNECE regulations No. 43, Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials and their installation on vehicles Rev.3 (2012).