

ヘレウス株式会社 ノーブライト事業部

## Noblelight Discovery

February | 2018

### 自動車塗装のカチオン硬化

Cationic Curing of Automotive Coatings

By Cynthia Templeman, Senior Engineer, Toyota Motor North America Research & Development

製造工場で最もエネルギー集約型の工程を用いるもののうち、代表的なものが自動車塗装工場である。アルゴンヌ国立研究 (ANL/ESD/10-6)、ミシガン工科大学 (Automobile Assembly Painting: Energy and Environmental Impacts (自動車組立塗装：エネルギーおよび環境影響) [John Sutherland])、その他による研究では、組立工場のための「物質変換」によるエネルギー消費および二酸化炭素排出の 50 ~ 70 パーセントが、塗料 (特に塗装向けのもの)、HVAC (暖房、換気、空調)、加熱に直接関連すると推定している。エネルギーおよび二酸化炭素排出以外にも、歴史的に見て塗装工場では大量の有機溶剤も使用している。

トヨタは、スリーウェット水性方式を実施することで、過去 15 年間にわたり塗装工場で使用される有機溶剤を体系的に減少させてきた。しかし、最先端の水性方式であってもやはりいくらかの有機溶剤が含まれている。そのため、トヨタでは、環境フットプリントをさらに減少させるための代替技術の調査を継続している。図 1 は、1999 年以降の有機溶剤使用量の減少を示すとともに、一つの代替技術の可能性、つまり UV 硬化 (紫外線硬化) の可能性も示している。

自動車塗装に関する UV 硬化の可能性を調査するため、トヨタは、Alec Scranton 博士とアイオワ大学の博士グループ (特に Beth Ficek Rundlett 博士と Cindy Hoppe 博士) と連携した。彼らとともに、どのようにカチオン UV 硬化がより

一般的なフリーラジカルを上回る利点をもたらし得るのかについて研究を行った。本研究は、米国特許 US8197911、8993042 および 9274429 の対象となっている。

#### 実験

自動車用途に用いられるカチオン UV 硬化の可能性を証明するため、多数の研究を行った。実験は、硬化系の様々な欠点を試験し、それらの克服を試みるよう考案された。材料については、購入し、受領時のままの状態で使用した。使用したモノマーおよびオリゴマー：3,4-エポキシシクロヘキシルメチル-3,4-エポキシシクロヘキサンカルボン酸、略して「CDE」 [Dow, Rahn, Synasia]; UVR6128 アジピン

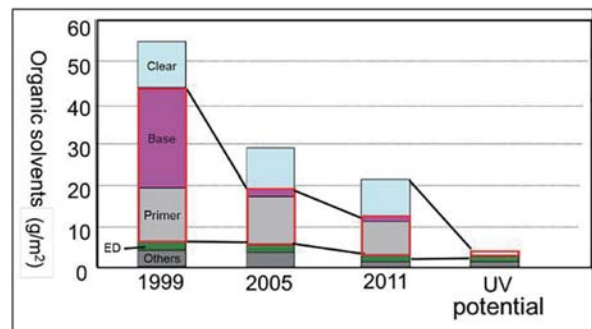


図 1：トヨタ塗装工場の材料での有機溶剤使用量の削減、および UV 硬化塗膜の実施による削減の可能性 [SAE 2014-01-1048 から修正]

酸ビス (3,4- エポキシシクロヘキシルメチル) [Dow]; 3,4- エポキシシクロヘキサンカルボン酸メチル [Dow]; 2-(3,4- エポキシシクロヘキシル) エチルトリメトキシシラン、略して「ECHETS」 [Sigma-Aldrich]; 3- エチル -3- ヒドロキシメチルオキシタン [東亜合成]; Capa 3031 ε - ポリカプロラク톤 [Perstorp]; 二酸化リモネン [Arkema]; 2- ブトキシメチル - オキシラン、すなわち「BMO」 [Sigma-Aldrich]; EPON 826 BPA 樹脂 [Hexion]; EPON 828 BPA 樹脂 [Hexion]; EPON 862 BPF 樹脂 [Hexion]; ビス [2-(3,4- (エポキシシクロヘキシル) エチル)] テトラメチルジシロキサン [Sigma-Aldrich]; Vikoflex 7190 エポキシ化亜麻仁油 [Arkema]; SILMER EPC DI-50 一酸化ビニルシクロヘキシル変性シロキサン [Siltech]; SILMER EPC J10 一酸化ビニルシクロヘキシル変性シロキサン [Siltech]; Lite 2513 HP エポキシ化カシューナッツ殻液 [Cardolite]

使用した光開始剤: UVI6976 トリアリールスルホニウムヘキサフルオロアンチモナート塩 [Dow]; Irgacure 250 (4-メチルフェニル)[4-(2-メチルプロピル)フェニル]トヨードニウムヘキサフルオロホスフェート [Ciba]; (トリルクミル)トヨードニウムテトラキス (ペンタフルオロフェニル) ボラート、すなわち「IPB」 [Rhodia]; ジアリールトヨードニウムヘキサフルオロアンチモナート、略して「IHA」 [Sartomer]

使用した顔料および添加剤: Monarch 880 カーボンブラック [Cabot]; Monarch 1300 カーボンブラック [Cabot]; TS6200 二酸化チタン [DuPont]; Tinuvin 123 デカン二酸、ビス (2,2,6,6- テトラメチル -1-( オクチルオキシ) -4- ピペリジニル) エステル、1,1- ジメチルエチルヒドロペルオキシドとオクタンとの反応生成物ヒンダードアミン光安定剤 [Ciba]; Tinuvin 384 オクチル 3-[3-(ベンゾトリアゾール -2- イル) -5-tert- ブチル -4- ヒドロキシフェニル] プロパノエート UV 吸収剤 [Ciba]; Lignostab 1198 4- ヒドロキシ -2,2,6,6- テトラメチルピペリジノキシラジカル光安定剤 [Ciba]

照射は、Oriel 社製の 200W 水銀キセノンアークランプ

表 1: ヘレウス社製 10 インチ UV コンペアー (光源 I-600、H バルブ) を用いて EIT 社製 PowerPuck で測定した照射エネルギーデータ

	Lamp H, Total Energy (J/cm <sup>2</sup> )			
	UVV 395~445 nm	UVA 320~390 nm	UVB 280~320 nm	UVC 250~260 nm
4 ft/min	3.627	4.240	3.572	0.896
10 ft/min	1.464	2.500	1.434	0.339
15 ft/min	0.957	1.806	1.045	0.261
20 ft/min	0.759	1.554	0.832	0.194
30 ft/min	0.465	0.906	0.498	0.118
40 ft/min	0.377	0.562	0.424	0.092

(波長範囲 250 ~ 700nm、典型的強度 56 mW/cm<sup>2</sup>)、またはヘレウス社製 10 インチ UV コンペアー (H バルブ、光源 I-600) により行った。表 1 は、EIT 社の PowerPuck によって測定したコンペアーの照射エネルギー量を示す。

使用した試験方法には、紫外線照射が行われなかったサンプル領域に発生する硬化の程度を判断するための標準試験計画、および独自の試験計画の両方が含まれる。試験方法については、示された結果と共に可能な限り説明する。加えて、光開始剤の活性並びに異なる顔料の硬化への影響を評価するために、示差走査熱量測定を用いた。25gf×11 秒の押し込みを有する Tukon 微小硬度試験機を用いてヌーブ硬さを測定した。サンプルの視覚および触覚評価並びに鉛筆硬度試験も用いた。膜厚は、BYK マイクロ - トリ - グロス μ または Fischerscope MMS を用いて測定した。

### 結果と考察

実験は、影部およびカチオン硬化反応を阻害する種の組み込みについて理解し、欠点を克服できるよう考慮した。

### 影部

アイオワ大学が実施した影部硬化に関する初期の研究には、異なるモノマーおよび光開始剤の入った透明セルへの底面からの一定時間の照射、および、(照射後) 暗反応の中で時間とともに「上方向に」生長するポリマー量の測定が行われた。アイオワ大学では、「初期条件」として、光が透過したところまでの距離を算出した。図 2 に本試験方法を用いた結果の一例を示す。

異なる材料とパラメータで行われた追加研究により、影部硬化はフィックの第二法則の拡散に従うことが示された。ここでは  $x$  = 影部硬化距離、 $D$  = 拡散係数、 $t$  = 時間とする。

$$x = \sqrt{\frac{4Dt}{\pi}}$$

さらに拡散定数は、ポリマーマトリックスへのモノマー拡散および生長速度に依存する反応拡散の両方に依存することが分かった。拡散および生長速度は通常、温度の上昇に伴って加速するため、サンプルの影領域への拡散に対する温度の影響を調査した。図 3 により、影部硬化の温度依存性が裏付けられた。



図 2: 時間経過に伴う透明セルの影部内への硬化の進行 (図内の番号は照射後の時間を示す) [CDE, 0.5 mol% IPB, 光照射: 56 mW/cm<sup>2</sup>, 照射時間: 5 分、環境: 大気、温度: 50°C]

また、光開始剤の対イオンなどの配合成分の影響も調査した。図4に、同一のモノマーおよび硬化条件の2つの系の影部硬化の結果を示す。2つの光開始剤は類似した構造および光分解収率を有するが、対イオンの大きさが著しく異なる。IPBの対イオン（テトラキスペンタフルオロフェニルボレート）は、IHAの対イオン（ヘキサフルオロアンチモネート）よりもはるかに大きい。対イオン間の分離が大きいと活性カチオンの移動性があるため、生長速度の加速がもたされることが当技術分野ではよく知られている。本研究ではこの影響を確認した。より大きな対イオン（IPB）を有する系の方が、他方（IHA）よりも改善された影部硬化結果を示している。

図2～4の結果より、最適化された条件下では、重合は影部に向かってかなりの距離まで進むことが分かる。これらの初期研究は、固定ランプと透明セルに入れたモノマーサンプルを用いて行った。その後の研究は、より複雑な系での影部硬化の可能性の理解を深めるために行われた。照射装置としてHバルブを取り付けたUVコンベアを使用したマスク被覆領域への影部硬化距離を図5に示す。

図5のデータは、適切な条件下では広範囲での影部硬化が起こり得ることを裏付けている。異なる材料と20フィート（8.23メートル）/分の固定ライン速度を用いて追跡実験が行われた。図5のデータに基づき、材料が同じ場合、影部硬化の範囲は約27mmになると予想された。図6に追跡実験の結果を示す。

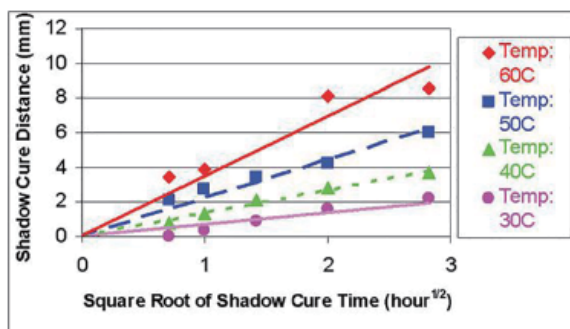


図3：影部硬化の温度依存性 [CDE、0.5 mol% IPB、光照射度：56 mW/cm<sup>2</sup>、照射時間：5分、環境：大気、温度：30~60℃変動]

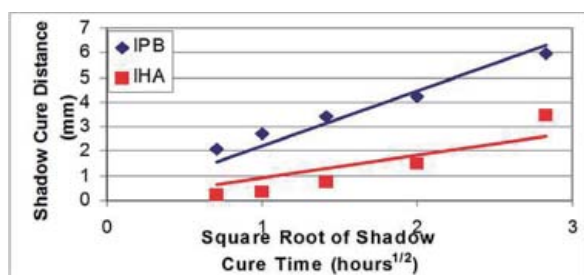


図4：光開始剤の対イオンが影部の硬化距離に及ぼす影響 [CDE、光開始剤濃度：0.75 mol%、光照射度：56 mW/cm<sup>2</sup>、照射時間：5分、環境：大気、温度：50℃]

図6に示すデータから、影部硬化の大部分が試験の最初の30分間に進行していることが分かる。また、CDEに類似した構造を有するが、脂環式エポキシ基間の鎖がより長いアジピン酸ビスが、図5に示すCDE単体またはCDE/BMO混合物と比較して、わずかに改善した「最終の」影部硬化距離を示したことも分かる。これは、CDEと比較してアジピン酸は柔軟性が増しており、BMOのグリシジル基と比較してより反応性の高い脂環式エポキシ基に起因している可能性が高い。さらに、最適化された条件と材料があれば、照射中に陰になっていた塗装領域を重合させるための十分な影部硬化が可能であることが推測できる。

#### UV吸収またはUV遮蔽化学種

自動車塗装においてより一般的に用いられる化学種を含有するUV硬化およびUV「影部硬化」塗膜の可能性を調査するため、モデル系に異なる顔料および添加剤を加えその影響を測定した。一般的な酸化チタン顔料だけでなく、Tinuvin 384 UV吸収剤、ヒンダードアミン光安定剤 Tinuvin 123、Lignostab 1198も選択した。Lignostab 1198は自動車用製品ではないが、モデル化合物として試験を行った。表2に、様々な照射条件で酸化チタン濃度を変えた顔料を添加した塗膜を硬化させた結果を示す。本試験は平面パネル上で行い、表面タック性、硬度および膜厚の評価は、被照射領域で行った（影領域ではない）。

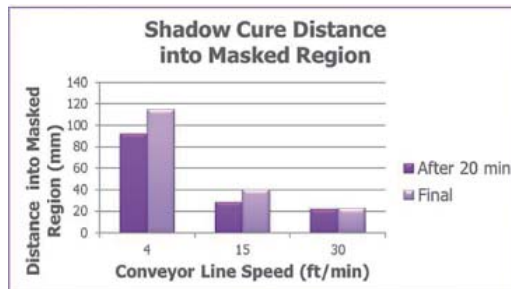


図5：照射の20分後および「最終」時間（硬化が最大距離に達する時間で、それぞれの速度で25分から90分の間で変化する）にマスク被覆領域に向けて重合が進む距離 [CDE:BMO = 重量で70:30、0.75 wt% 固形分 UVI6976、未乾燥塗膜の厚さ50 μm、周囲ブース温度20℃および相対湿度約30%、光量測定については「実験」セクションを参照]

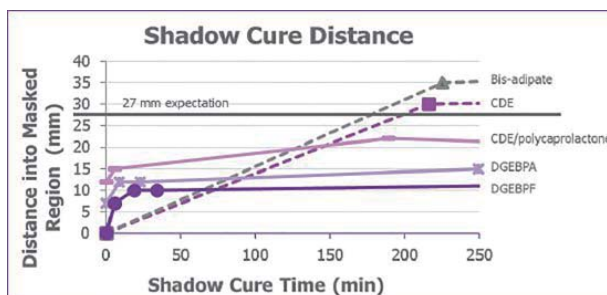


図6：時間経過に伴いマスク被覆領域に向けて重合が進む距離、各種モノマー混合物 [0.75 wt% 固形分 UVI6976、未乾燥塗膜の厚さ50 μm、周囲ブース温度20℃および相対湿度約35%、光量測定については「実験」セクションを参照]

表2の結果は、低濃度（1～3重量パーセント）では酸化チタンは塗膜の硬化を阻害しなかったことを示している。塗膜は照射時間内にタックフリーとなり、全て3Hの高い硬度を有した。6重量パーセントの添加では、タックフリーまでの時間が30分と長くなったが、最終的な塗膜は添加量の少ない塗膜と同等の硬さを有した。一定の酸化チタン濃度に関し照射時間を短縮すると、予想通りタックフリーまでの時間が長くなるが、塗膜の最終的な硬度はより高くなる。「暗反応」より多くの重合を進行するようにすると、活性種の捕捉が起こりにくくなり、より高い反応率の達成が可能になる。それによって硬度が増す（CDEモノマーは硬い塗膜を形成する）ことが推測される。

表3は同様のデータを示すが、酸化チタンの代わりに他の添加剤を添加した塗膜に関するデータを示している。

UV吸収剤やヒンダードアミン光安定剤（HALS）など、耐候性能を改善するための添加剤を含有する塗膜の硬化は、例えば酸化チタンを含有する塗膜よりも困難であることを、表3のデータは示している。本来UV吸収剤は、照射時間中、光開始剤と競争する。ただし、この競争にもかかわらず、Tinuvin 384 UV吸収剤を用いた塗膜は照射時間内にタックフリー表面に達し、硬い塗膜が得られた。しかし、HALSを組み込む場合には、塗膜の硬化に対してより大きな影響を与えるようである。Tinuvin 123を添加したときには、著しい硬化阻害が観測され、タックフリーな表面が得られるまでに96時間かかる。しかし、最終の塗膜は、Tinuvin 384や酸化チタンを含んだものと同じ硬度に到達した。このことから、反応速度が遅い場合であっても、最終の反応率はほとんど同じである。Lignostab 1198を含有する塗膜は全く硬化しなかった。

表2：異なる濃度で酸化チタンを添加したUV硬化塗膜の特性

[CDE、0.5 mol% IPB、光照度：50 mW/cm<sup>2</sup>、照射時間及び環境は表に示す]

TiO <sub>2</sub> 濃度 (wt%)	暗反応時の温度 (°C)	照射時間 (分)	タックフリーまでの時間 (時間)	鉛筆硬度	平均膜厚 (μm)
1.0	50	5	0	3H	40.8
	25		0	3H	46.2
3.0	50		0	3H	37.5
	25		0	3H	34.9
6.0	50		0.5	3H	33.8
	25		0.5	3H	26.6
3.0	25	1	2	4H	31.0
		2	1	4H	38.4
		3	0.5	4H	38.0
		4	0.5	5H	54.9
		5	0	6H	52.8

表3：耐候性添加剤を含有するUV硬化塗膜の特性

[CDE、0.5 mol% IPB、光照度：50 mW/cm<sup>2</sup>、表に示す通りの照射時間及び環境]

添加剤	添加剤濃度 (wt%)	暗反応時の温度 (°C)	照射時間 (分)	タックフリーまでの時間 (時間)	鉛筆硬度	平均膜厚 (μm)
Tinuvin 384 (UV Absorber)	1.0	25	5	0	6H	25.6
Tinuvin 123 (HALS)				96	5H	26.5
Lignostab 1198 (HALS)				--	--	--

これらの現象をさらに理解するため、図7に示すこれら添加剤の構造を考察した。

図7に示す通り、Tinuvin 384 はベンゾトリアゾール系 UV 吸収剤であり、UV 照射により励起されると、フェノール性水素が引き抜かれ、隣接する窒素に付加する。従って、窒素は生長する活性種を直接阻害することはできず、硬化は正常に進行することができる。Lignostab 1198 は、ラジカル型のピペリジン誘導体である。カチオン性活性種などの強酸が存在する場合、その酸は窒素と直接相互作用する。これにより、活性種の生長が効果的に妨げられる。表3で示したように、Lignostab 1198 を含有する塗膜は硬化しなかった。Tinuvin 123 もピペリジン誘導体であるが、窒素に立体障害を与える長鎖の炭素水素を有している。従って、

カチオン性活性種が窒素と相互作用することは、Lignostab 1198 の場合よりも少なくなる。Tinuvin 123 を含有する塗膜については著しい阻害が見られたが、最終的に塗膜は以前に試験した塗膜と同じ硬度まで硬化した。

### 欠点克服の新たな方法

UV 硬化のいくつかの欠点を克服するための方法を、自動車塗装への利用を考慮に入れて、数種類検討した。開発した方法の一つは、光開始剤と他の可能性のある UV 吸収剤との間の競争を回避する方法である。「多層硬化」と呼ばれるこの方法の例をいくつか図8に示す。

図8の例から、カチオン性活性種は、別々にコーティングされた光開始剤を含まない塗膜の層の中に拡散できる十分な

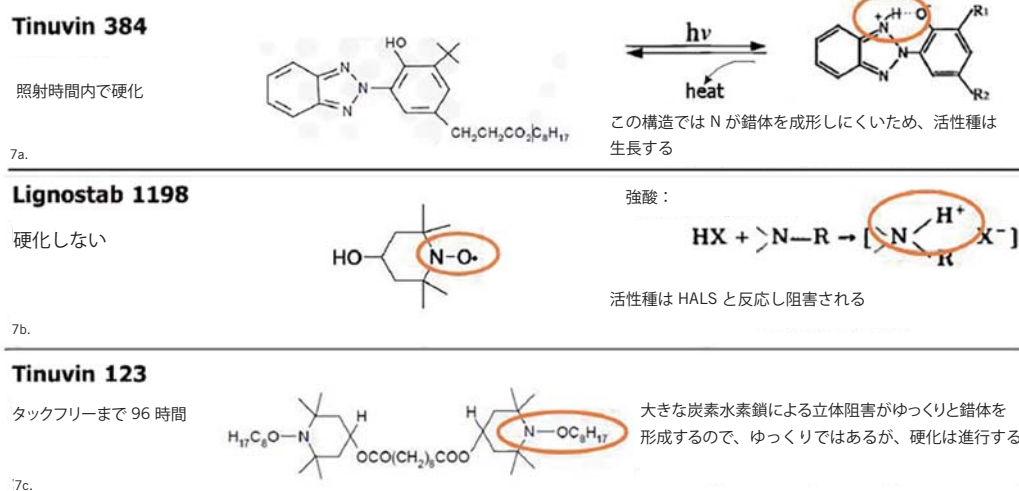


図7：添加剤の構造および添加剤が UV 硬化に及ぼす影響に関する仮説 [7a：Tinuvin 384、7b：Lignostab 1198、7c：Tinuvin 123]

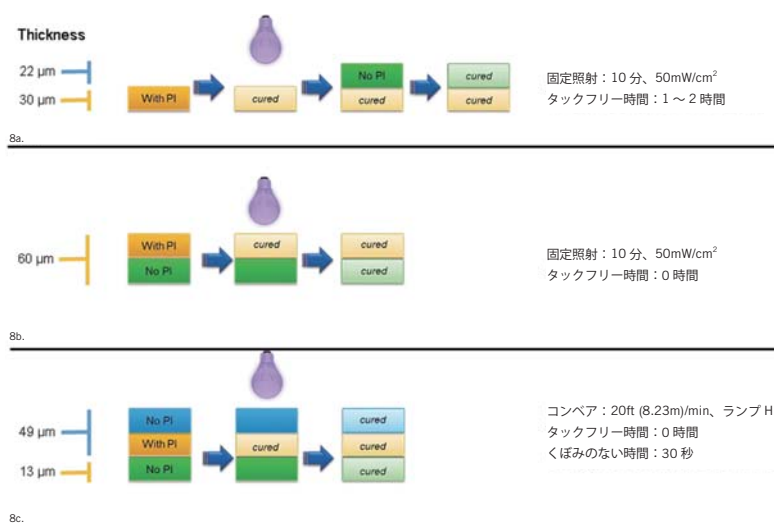


図8：1層のみに存在する光開始剤 (PI) で多層の塗膜を硬化するための構造例

8a：最下層 CDE 70 wt%、BMO 29 wt%、IPB 1 wt%、最上層 CDE 70 wt%、BMO 30 wt%。

8b：最下層 CDE 70 wt%、BMO 30 wt%、最上層 CDE 70 wt%、BMO 29 wt%、IPB 1 wt%。

8c：最上層および最下層 UVI6128 53.1 wt%、Vikoflex 7190 42.2 wt%、二酸化リモネン 4.7 wt%、中間層 UVR6128 85.5 wt%、Vikoflex 7190 9.3 wt%、UVI6976 5.2 wt%。[全ての事例に関し周囲実験室条件]

可動性を有していることが分かる。図 8a と 8b に示す事例については、「くぼみのない」時間は記録されなかったが、図 8c から、この生長が妥当な時間内に起こることが分かる。UV 硬化の欠点を克服するために開発したもう一つの方法は、「光開始剤の事前活性化」と呼ばれる。この方法では、光開始剤をプロピレンカーボネートなどの不活性溶媒に溶かし、その後その溶液に UV 照射を行う。モノマーは存在しないため、溶液中で重合は生じない。その後、事前に活性化された溶液の一部をモノマー溶液に加え、二液型塗装系などを用いて混合する。活性種はモノマーと密に混和され、そのため、基材に塗布した後に塗膜に照射する必要はない。これにより、影部の問題が回避される。

事前に活性化された溶液について更なる理解を得るため、アイオワ大学にて示差走査熱量測定を用いた研究が実施された。図 9 にその結果を示す。

図 9 の結果から、事前に活性化された光開始剤は照射後、長時間にわたり活性状態を維持することが分かる。これは、

組立工場での照射すら不要かもしれないことを意味する可能性がある。光開始剤を事前に活性化することに関する別の概念としては、塗布前に光開始剤をモノマーおよび他の成分と混合する前に配管内で光開始剤に照射することが挙げられる。これにより、塗布後に塗膜に照射する必要もなくなるだろう。この方法に関し考慮すべき事項は、湿度を制御する必要性である。アイオワ大学では、図 9 の結果に基づき、モノマー塗膜に事前に活性化された溶液を噴霧しても、予想通りの重合が得られなかったことが分かった。噴霧中の研究室の高湿度（相対湿度 65 ~ 70 パーセント）により、活性種が不活性化されたものと仮定される。

### アルカリ成分による阻害

湿度およびアルカリ成分がカチオン UV 硬化に及ぼす影響についてさらに理解しようと努めた。ある実験では、RadTech 2008 の議事録で Zhigang Chen 博士（元ノースダコタ州立大学在籍）が公表した方法に類似した方法で、疎水性モノマーを組み込むことで塗膜に湿気が侵入するのを妨げるよう試みた。それぞれ 5 種類の異なる配合物の 2 枚

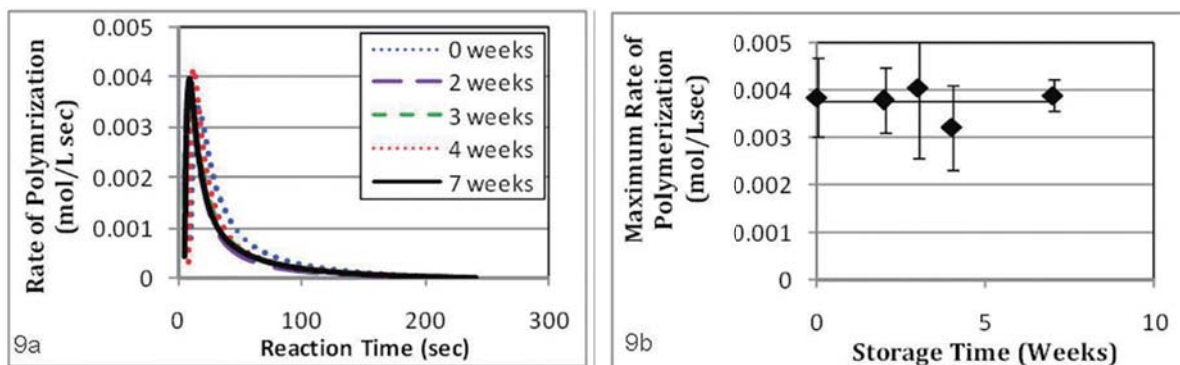


図 9：事前活性化光開始剤の反応性。

9a：25℃で種々の時間保管された事前活性化光開始剤をモノマーに加えたサンプルにて測定された重合速度。

9b：各保管時間の最大重合速度のまとめ。[10 ~ 15mg の BTS モノマーに 5 μl の事前活性化光開始剤溶液を加える（モノマーの上に滴下する）、Perkin-Elmer 社 DSC-7 にて 50℃で一定に保った反応温度]

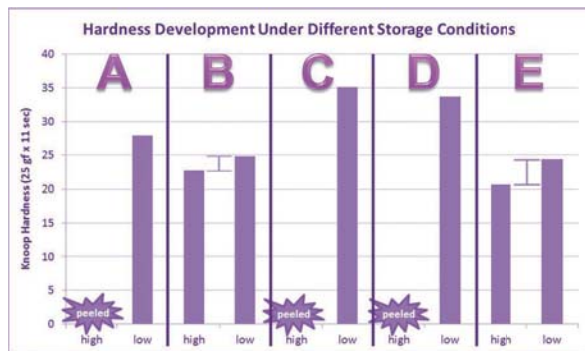


図 10：高湿度または低湿度のいずれかで 1 週間パネルを保管した後のヌープ硬さ  
[全て UVI6976 を 3 wt% 含有、H バルブを搭載したコンベア内で 20 フィート (8.23 メートル) / 分で硬化]

- A : CDE
- B : CDE: ポリカプロラクトン=重量で 95:5
- C : CDE: ポリカプロラクトン:Slimer EPC DI-50 =重量で 90:5:5
- D : CDE: ポリカプロラクトン:Slimer EPC J10 =重量で 90:5:5
- E : CDE: ポリカプロラクトン:Lite 2513HP =重量で 90:5:5]

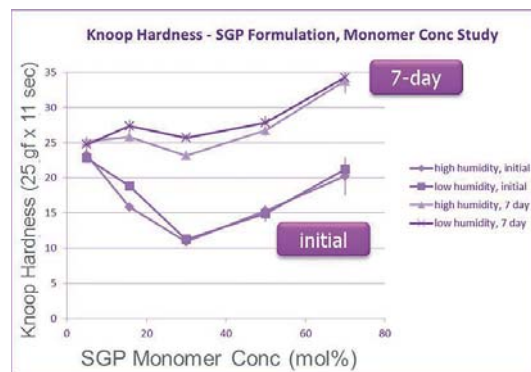


図 11：高湿度または低湿度のいずれかで保管当初および 1 週間後のソルゲル前駆体 (SGP) 濃度に応じたヌープ硬さ

[UVI6976 4 wt%、二酸化リモネン 10 wt%、グラフに示す通りの ECHETS 濃度、配合の CDE バランス、H バルブを搭載したコンベア内で 20 フィート (8.23 メートル) / 分で硬化]

のパネルを準備し、それらを硬化させ、その後1週間デシケーターまたは制御された湿度環境（温度20℃、相対湿度50%）のいずれかにてパネルを保管した。1週間の保管後、パネル上でヌープ硬さを測定した。その結果を図10に示す。

図10の結果から、CDEに付加された反応性希釈剤の一部には、湿気遮断効果があるであろうということが分かる。サンプルBとEは、高湿度と低湿度の両方の保管条件の後、同等の硬度を示した。サンプルA、C、Dは全て、高湿度保管条件では剥離し、試験不可能だった塗膜がもたらされた。いくつかの成分を配合物に添加することによって、配合物の耐湿性を高めることができることが理解できた。

また、塗膜内で湿気を利用する方法も研究した。多くのグループが、影部で架橋結合する手段を追加するため、あるいは場合によっては材料に新たな機能を追加するための方法として、UV硬化性配合物にゾルーゲル前駆体を組み込んでいる。湿気による阻害を克服する手段としてこれらの材料を考察した。様々な量のゾルーゲル前駆体（SGP）ECHETSを用いて一連の配合を準備し、初期の硬度および1週間後の硬度について塗膜の測定を行った。そして再度、デシケーターまたは相対湿度50パーセントの制御環境にて塗膜を保管した。図11に結果を示す。

図11のデータから、ゾルーゲル前駆体は、湿気による阻害から塗膜を効果的に保護することが分かる。低湿度で保管されたサンプルと比較して、高湿度で保管されたサンプル間に硬度の違いは見られない。

最後に、顔料表面処理がカチオンUV硬化に及ぼす影響を研究した。2種類のカーボンブラック顔料（Monarch 880およびMonarch 1300）を配合に組み込んだ。一方には酸性表面処理を施し、他方にはアルカリ性表面処理を施した。硬化への影響を把握するため、フォトDSC（TA計器Q100）を使用した。図12に結果を示す。

図12の結果から、両方のカーボンブラック顔料が発熱ピークが最大となる時間（顔料なしの配合よりも長い誘導時間に影響を及ぼすが、アルカリ性顔料は酸性顔料に比べてほぼ2倍の時間を有することが分かる。同様に、発熱量から、酸性顔料の配合が顔料なしの配合とほぼ同量の発熱量であることが分かり、これらの系では反応率が類似していることを示している。ただし、アルカリ性顔料を用いた配合では、他の2つの系と比較して半分以下の発熱量を示している。この結果は、この配合では反応率がかなり低いことを示している。

## 結論

自動車塗装を考慮したカチオンUV硬化に関連する研究結果を示した。UV硬化により、自動車塗装工場における工程の長さやエネルギー消費の両方の大幅な削減の機会が提供される。配合の中には、有機溶剤の使用を著しく削減できるもの、または使用をなくすことのできるものがある。

それらを通じて、カチオンUV系において重合が進行する長寿命の活性種には、特に配合が最適化されている場合、事前に紫外線を照射されなかった領域においてもかなりの距離を硬化させる可能性があることが分かった。また、一般的に塗膜の耐候性を改善するための添加剤は、カチオン重合過程を阻害するため、配合中には最適な材料を選択するよう注意しなければならないことも分かった。多層硬化の採用や光開始剤の事前活性化など、一部のUV硬化の欠点を克服するために評価した新しい方法をいくつか示した。最後に、湿度またはその他アルカリ種がカチオンUV硬化に及ぼす影響を調査し、阻害効果を軽減する方法をいくつか示した。

## 謝辞

アイオワ大学 Alec Scranton 博士、Beth Ficek Rundlett 博士、Cindy Hoppe 博士に、本プロジェクトに対するご尽力を感謝いたします。

また Toyota North America、R&D の Jason Stark 氏にも本プロジェクトに対するご支援を感謝いたします。

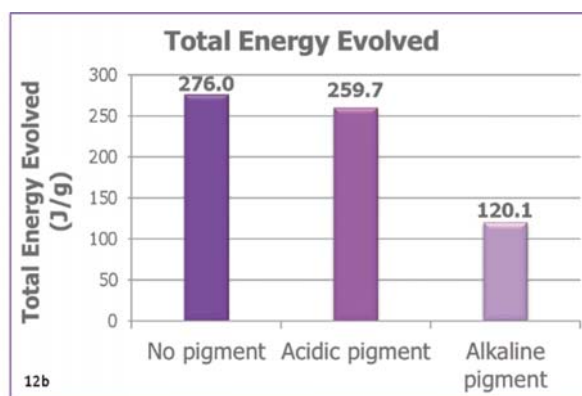
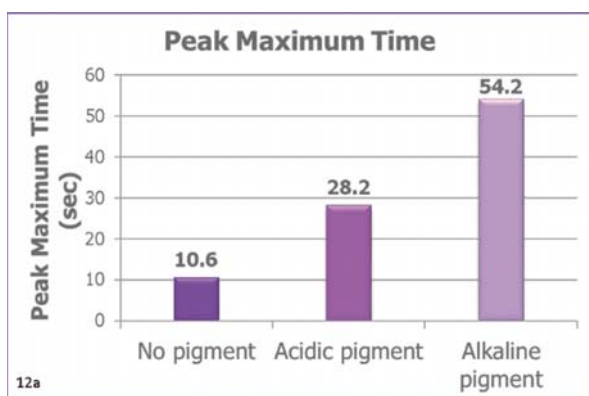


図12：顔料を含有しない配合、または酸性表面処理を施した顔料もしくはアルカリ性表面処理を施した顔料を含有する配合に関する示差走査熱量測定（DSC）の結果

12a：3種類の配合の発熱ピークが最大となる時間

12b：3種類の配合の発熱量。[顔料なし：CDE 92.15 wt%、ポリカプロラクトン 4.85 wt%、UVI6976 3 wt%、顔料あり：CDE 88.5 wt%、ポリカプロラクトン 4.7 wt%、UVI6976 2.9 wt%、顔料 4 wt%。25℃でなど温に保持して反応]

ヘレウス株式会社  
ノーブルライト事業部

〒112-0012  
東京都文京区大塚2-9-3  
住友不動産音羽ビル2F  
Tel: (03)6902-6600  
Fax: (03)6902-6625  
uvp.hkk@heraeus.com  
www.heraeus-noblelight.jp

\* 本論文は、RadTech NA が発行する UV+EB Technology, Quarter 1,  
Vol. 3, No. 1, 2017 に掲載されたもので、許可転載を得たものである。  
[www.uvebtechnology.com](http://www.uvebtechnology.com)