

論文・解説

11

空調エネルギーの消費量を低減する防曇窓技術の開発

Development of Antifogging Window Technology to Reduce Energy Consumption for Air Conditioning

前田 哲爾^{*1} 桂 大詞^{*2} 増岡 宏明^{*3}
Tetsuya Maeda Daiji Katsura Hiroaki Masuoka
落合 洸矢^{*4} 杉本 哲也^{*5}
Hiroya Ochiai Tetsuya Sugimoto

要約

マツダは2030年までに生産する全ての車に電動化技術を搭載する予定であり、電動化に向けた取り組みが加速している。しかし、電動化に伴って熱源が不足するため、低エネルギーで快適な空調を実現することが課題である。中でも、窓の曇りを避けるための換気により、冬場の空調に使用しているエネルギーのおよそ半分を損失している。そこで、低エネルギーで曇りを防ぐことが可能な吸水性樹脂を塗布した防曇窓に着目した。防曇窓は窓の曇りを避けるためのエネルギーを削減し、冬期の航続距離を向上させることができる。本研究では、新規に吸水性能をもった有機無機ハイブリッド防曇材料を作製し、防曇性能と耐久性を両立させた防曇材料を開発した。また、開発した防曇窓による航続距離向上効果を試算する計算モデルを開発し、世界各地域における航続距離向上効果を評価したので報告する。

Abstract

Mazda aims to equip all its vehicles with electrification technology by 2030 and accelerates efforts to achieve it. However, this electrification shift is accompanied by the problem of managing heating demand with minimal energy consumption. A significant portion of the energy required for heating is used to prevent fogging. To address this, we focused on developing antifogging windows coated with water-absorbing material, which can reduce fogging while consuming less energy. The antifogging windows not only lower the energy needed for fogging prevention but also improve the driving range during winter. In this study, we prepared a new organic-inorganic hybrid material with water-absorbing properties and developed an antifogging window that combines effective fogging prevention with durability. Additionally, we established a calculation model to estimate the impact of the antifogging window on driving range improvement and assessed their effect on driving range across various global regions.

Key words : Air conditioning/Comfort, Window coating, Antifogging, Organic-inorganic hybrid material

1. はじめに

エネルギー問題への注目が高まる中、マツダは技術開発の長期ビジョン「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」に基づき、2030年までに生産する全ての車に電動化技術を搭載予定である。しかし、電動化に伴って熱源が不足する問題が顕著になり、エネルギー消費を抑えながら快適な空調システムの実現が急務である。内燃機関の車では、エンジンの排熱を利用した空調が可能であった。しかし、電動車は電気ヒーターによる空調が必

要であり、電気エネルギーの消費増加により、航続距離を低下させている⁽¹⁾。

自動車の前面窓は、安全な運転を担保するために、どのような環境でも高い透明性を維持することが求められる。しかし、急激な温度や湿度の変化により、窓表面に微小な水滴が付着し、光を散乱させて曇りが発生することがある (Fig. 1)。これまでの自動車では、外気の冷たい空気をヒーターで加熱し、窓に乾いた温風を送ることで曇りを防いでいる。ヒーターによる防曇手法は、冬場の空調に使用するエネルギーのおよそ半分を損失してい

*1,2,4,5 技術研究所
Technical Research Center

*3 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

る⁽²⁾。そのため、エネルギー消費を抑えながら、効果的に防曇が可能な防曇窓技術が求められている。

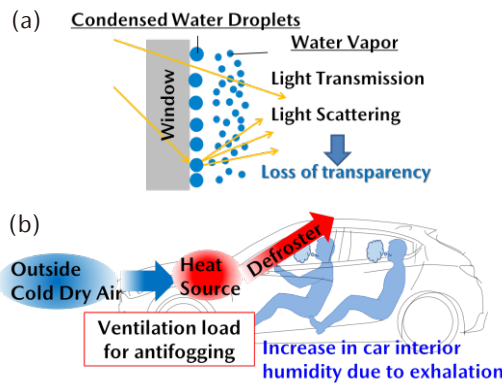


Fig. 1 (a) Mechanism of Window Fogging, (b) Image of Ventilation Load for Antifogging

窓の曇りを低エネルギーで防ぐ方法として、車両下部は内気循環によって最小限のエネルギーで暖房し、車両上部は外気導入で窓曇りを防ぐ、内外気2層HVACユニットが報告されている⁽²⁾。内外気2層HVACユニットは、低エネルギーで空調性と防曇性能を実現可能な技術だが、外気と内気が別々の流路を必要とし、部品数の増加やHVACユニットの大型化を引き起こし、小型車種への搭載が制限される可能性がある。

著者らは、HVACユニットの大型化を避けながら、低エネルギーでの防曇を実現する方法として、防曇窓に注目した。防曇窓は窓表面に付着した水滴の状態を制御することで曇りを防ぐ技術である。今回、防曇性能と耐久性を両立させた防曇材料を開発し、更に開発した防曇材料による航続距離の向上効果を予測するモデルを構築した。本論文では、開発した防曇材料の概要と、モデルによる効果試算結果を報告する。

2. 防曇材料の種類

防曇材料は、(1) 親水性防曇材料、(2) 撥水性防曇材料、(3) 吸水性防曇材料の三種類存在する (Fig. 2)。

Type	Hydrophilic material	Water-repellent material	Water-absorbing material
Image			
Examples	TiO ₂ , Surfactants	Fluorinated polymers	PVA, PAA
Advantage	High antifogging performance	Freeze resistance	High antifogging performance Freeze resistance
Disadvantage	Freezing below zero temperatures Limited use in dark places	Low antifogging performance	Low scratch resistance

Fig. 2 The Advantages and Disadvantages of Three Types of Antifogging Materials

親水性防曇材料は、材料表面の水接触角が小さく、水滴が表面に濡れ広がり、薄い水膜を形成して光の散乱を防ぐ方法である。例えば、酸化チタンは、紫外線照射後に材料表面の水酸基濃度が上昇し、優れた防曇性能を示すことが報告されている。しかし、酸化チタンが親水性を発現するには、紫外線照射が必要なため、日光が当たらない暗所では疎水性になり、防曇性能を示さない⁽³⁾。更に、親水性防曇材料上に形成される水膜は、氷点下で凍結するため、透明性が著しく損なわれ、氷点下に晒される環境での利用が制限される。

次に、撥水性防曇材料は、結露した水滴を自重で滑落させて防曇する方法である。ナノスケールの表面凹凸と低表面エネルギーを組み合わせ、固体表面の水の接触角が150°以上である超撥水性を発現する材料の報告例がある⁽⁴⁾。しかし、超撥水性は、材料表面の微小な凹凸形状に起因する例が多く、製造が複雑であり、大面積化が困難という欠点がある。そのため、撥水性材料の防曇材料としての用途は限られている。

最後に、吸水性防曇材料は、結露した水滴を材料中に吸水して防曇する方法である。吸水性防曇材料中に吸収された水は、材料-水間の強い水素結合によって凍結しにくい状態で存在する。本取り組みでは、氷点下でも高い防曇性能を示しながら、大面積化も比較的容易な吸水性防曇材料について着目した。

3. 吸水性防曇材料開発

3.1 吸水性防曇材料の開発方針

吸水性防曇材料の代表例は、ポリビニルアルコール (PVA) 等の親水性ポリマーを透明材料表面に塗工する手法である。しかし、親水性ポリマーは、耐傷付き性が低く、長期の使用により透明性や防曇性能が低下する課題がある。防曇材料の耐傷付き性向上の検討が多数報告されているが、一般的に防曇性能と耐傷付き性能はトレードオフの関係である。例えば、樹脂の硬度を高くして耐傷付き性を向上させるために、親水性ポリマーにナノ粒子を添加する報告例があるが⁽⁵⁾、ナノ粒子を添加すると、ポリマー中の吸水サイトが減少するため防曇性能が低下する。

そこで、有機無機ハイブリッド材料に着目し、防曇性能と耐傷付き性の両立を目指した。有機無機ハイブリッド材料は、有機材料と無機材料の両方の特性を組み合わせることで、従来にない特性をもった材料として近年注目されている。例えば、無機成分の高い機械強度と、有機成分の機能付与の両立が可能である。今回、有機成分で吸水性機能を発現し、無機成分で高い耐傷付き性を付与可能な、有機無機ハイブリッド材料の実現をねらった。なお、目標の吸水性能はベンチマークなどから吸水率12wt%以上とした。

3.2 吸水性防曇材料調整方法

メタクリロイル基をもったシリコン樹脂（無機成分）、親水基をもったアクリレート（有機成分）、光重合開始剤、溶剤、表面調整剤を混合した光硬化性塗料を調整した。本塗料を基材（ガラスまたはアクリル樹脂）に、バーコーターまたはスピコーターで塗布し、60°Cで10分間乾燥した。その後、積算露光量 4000mj/cm² で硬化500mW/cm² のメタルハライドランプで硬化させ、基材表面に吸水膜が形成された防曇材料を得た。

3.3 開発した防曇材料の評価結果

開発した防曇材料の吸水性能を定量的に測定するために、基材上に形成しない自立膜を作製して吸水率を測定した。吸水率は、30°C大気圧下 20% RH から 95% RH の重量変化を測定し、式(1)で算出した。開発した防曇材料の吸水率は 17wt%であり、目標の吸水率 12wt%以上を実現した。(Table 1)。以上の結果から、空気中の水分を材料中に吸収して、防曇可能であることを明らかにした。

$$\text{Water uptake (wt\%)} = \frac{W_{95\%RH} - W_{20\%RH}}{W_{20\%RH}} \times 100 \quad (1)$$

W_{95%RH} : 30°C 95% RH に 1-2 時間放置後の自立膜重量

W_{20%RH} : 30°C 20% RH に 1-2 時間放置後の自立膜重量

Table 1 Antifogging and Mechanical Properties of the Developed Material and a PVA Film

Sample	Water uptake [wt%]	Scratch Resistance [-]	Recovery rate [%]
Developed material	17	1.4	93
PVA	27	0.5	41

比較として、汎用的な親水性ポリマーである PVA を測定した。PVA の吸水率は 27wt%であり、開発した防曇材料より、吸水率が高い結果となった。PVA は、架橋構造を形成しておらず、吸水膨潤が容易に起こるため、吸水率が高いと考える。しかし、PVA は柔らかい布で擦るだけで表面に微小な傷が付いてしまうため、実用的な耐久性が低い。

そこで、耐傷付き性を定量評価するために、ガラス基板上に約 10μm の膜厚で作製した防曇材料について、ナノスクラッチ試験を実施した (Fig. 3)。本試験は、三角錐形状の圧子を用いてサンプルに荷重をかけながらスクラッチする。そして、スクラッチ前 (pre-scratch) と後 (post-scratch) の形状とスクラッチ中 (ramped-scratch) の変形を記録する。得られたプロファイルから、傷付き難さの指標として傷抵抗値 (Scratch resistance) を式(2)で算出した。

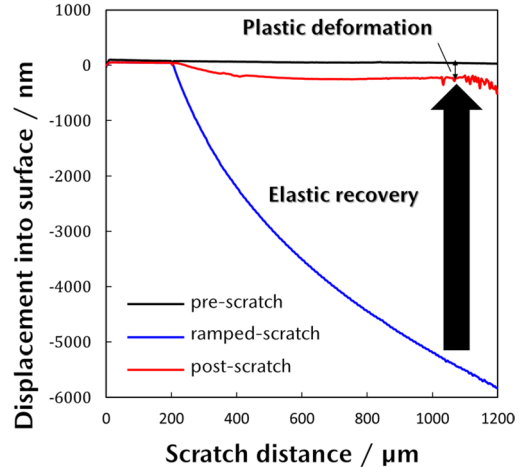


Fig. 3 Scratch Profiles of the Developed Material

Scratch resistance

$$= \log \frac{\text{test load (N)} \times 10^{-9}}{2.5981 \times (\text{plastic deformation depth})^2 \text{ (m)}^2}$$

$$= \log \frac{\text{test load (N)} \times 10^{-9}}{\text{contact area (m}^2\text{)}} \quad (2)$$

結果、PVA 膜と比較して、開発した防曇材料のほうが、傷抵抗値が約 3 倍高かった (Table 1)。また、式(3)でスクラッチの変形に対する回復率を算出すると、開発した防曇材料：93%、PVA：41%であった。

Recovery rate

$$= \left(1 - \frac{\text{Depth into surface at post-scratch (nm)}}{\text{Depth into surface at ramped-scratch (nm)}} \right) \times 100 \quad (3)$$

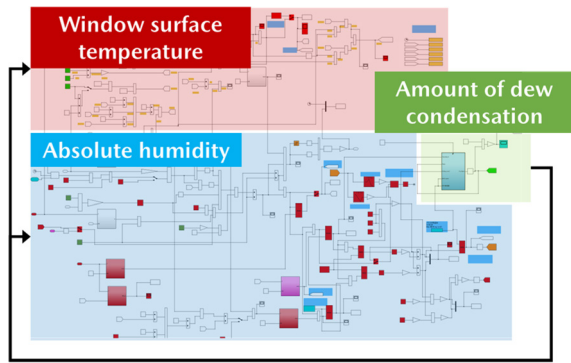
以上のナノスクラッチ試験の結果により、開発した防曇材料はシリコン樹脂骨格の特徴である柔軟性によって、スクラッチに対する回復が可能になったため、高い耐傷付き性を有していると考えられる。

4. 防曇窓の効果試算モデル

4.1 結露量算出モデル

防曇窓は、外気導入走行を短縮することで空調エネルギーを削減できる。そこで、開発した防曇材料を塗工した防曇窓による空調エネルギー削減量を定量的に試算するために、内気循環/外気導入制御による窓表面への結露量変化が算出可能なモデルを Simulink® で構築した。モデルの特徴を次に示す。

【1】本モデルは、①車内の水蒸気量：車内の水蒸気の出入り（乗員の呼吸、換気量等）を考慮して水蒸気量を算出、②窓表面温度：熱貫流の式に基づいて環境条件から表面温度を算出、③上記①②から算出したパラメーターで窓表面に結露する量を算出、というフローで計算する (Fig. 4)。



Feedback control based on condensation amount

Fig. 4 Simulink® Model to Simulate Condensation Amount

【2】防曇材料は飽和吸水量を超えて吸水することができず、飽和吸水量以上の結露が発生すると、防曇材料表面に水滴が発生して、曇りが生じる。そのため、防曇材料表面に発生する曇りを抑制するために、防曇材料の吸水量が所定値に達すると、内気循環→外気導入に切り替えて、防曇材料中の水分を除去する必要がある (Fig. 5)。本モデルで上記の制御を考慮するために、防曇材料中の吸水量が閾値に達すると内気循環から外気導入に切り替えるように構築した。

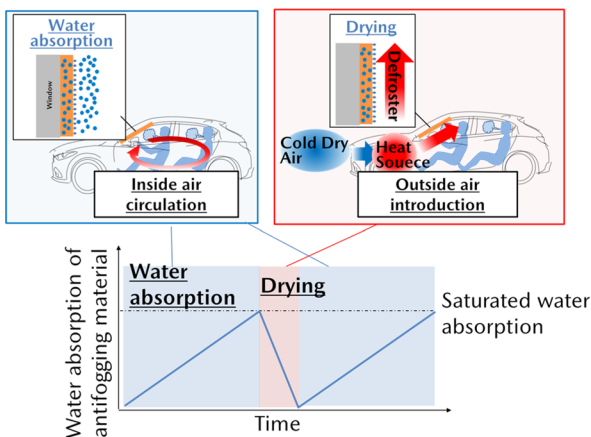


Fig.5 Image of Inside/Outside Air Switching Control

4.2 空調エネルギー算出モデル

車室内の熱モデルを作成して、車内外の熱移動量から空調エネルギーを算出した。車内外の熱移動量は、空気の流れに伴う熱移動量と車内の各部材の熱抵抗と熱容量を考慮し、その熱回路を1Dシミュレーションツールである Simcenter™ Amesim™ Software を用いてモデル化した。また、本モデルで防曇窓搭載時の空調エネルギー削減効果を算出する際、外気導入時は車内への投入エネルギーの一部が後方から排出されるが、内気循環中はその一部が回収されると仮定し、車室内への投入エネルギーから上記回収分のエネルギーを差し引いたものを空調エネルギーとして評価した。

算出した空調エネルギーから、エネルギー消費効率

(COP) ≒ 1.2 を前提として、式 (4) で EV 走行での航続距離を算出した。

Driving range

$$= \frac{\text{Battery power amount for driving}}{\text{Power consumption in mode driving} + \text{Air conditioning energy}} \quad (4)$$

5. 効果試算結果

構築したモデルで下記の3条件で航続距離を試算した。
 ①外気導入率 100%走行、②温湿度センシングによる内外気制御、③防曇窓搭載。①について、内外気切り替え制御がない前提で、外気導入率 100%で試算した。②について、現状車種では、温湿度センサーによって、車室内の湿度と窓の表面温度から、曇りリスクを判定して、内外気制御をおこなっている。そこで、実車実験で得られた内外気混合割合のデータを使用して試算した。③について、防曇窓搭載時に想定される内外気制御について、構築した結露量算出モデルにより試算した。①～③の条件で算出した内外気割合の経時変化から、構築した空調エネルギー算出モデルにより、必要な空調エネルギー及び航続距離を算出した。試算に用いた解析条件を下記に示す。

- キャビン内の空気重量：5Kg (= 約 4m³)
- モード走行での交流電力量消費率：145Wh/km
- 駆動用バッテリー総電力量：35.5kWh
- 乗車人数：2人
- 車速：50km/h 定常
- 走行時間：30分走行
- 外気温湿度：-10°C, 90% RH
- ブロア段数：MAX
- COP：約 1.2
- 防曇材料の飽和吸水量：0.23mg/cm²
(開発した防曇材料が膜厚 10μm 時の飽和吸水量)

暖房 OFF 時の航続距離が 256km とすると、①外気導入率 100%走行の場合、航続距離が 173km まで低下する結果を得た (Fig. 6)。また、②温湿度センシングによって 183km まで回復し、更に③防曇窓搭載によって 201km まで回復する結果を得た。この結果から、冬場の航続距離は内外気混合割合に大きく影響していることが分かり、防曇窓搭載によって航続距離の大幅な向上が期待できる。

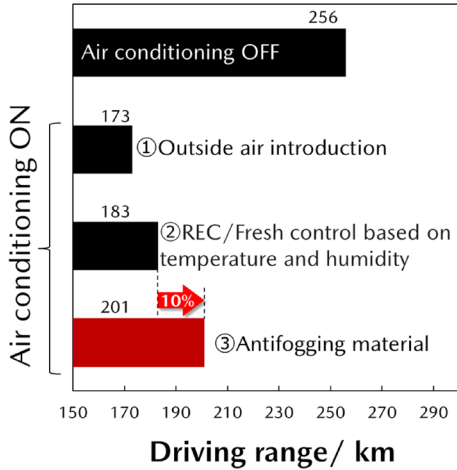


Fig.6 Simulation Results of Driving Range

空調に必要なエネルギーは、気象条件（温度、湿度等）に大きく依存する。そのため、車両を使用する地域によって、防曇窓の効果の実感が大きく異なる可能性がある。そこで、世界各地域における温度湿度の気象データを収集し、各条件の出現頻度を防曇窓搭載による航続距離向上率に重みづけした（Table 2）。更に、乗車人数の発生頻度も重みづけした。なお、防曇窓搭載による航続距離向上率は、②温湿度センシングの航続距離を基準として、そこから、③防曇窓搭載時の航続距離の向上量の割合を計算した。

寒冷地域の代表としていくつかの都市をピックアップし、航続距離向上率を試算した結果を Fig. 7 に示す。航続距離向上率の年間平均での期待値は、オスロ：6.1%であるのに対し、北京：4.2%であった。これにより、地域（気象条件とその頻度の違い）によって実効果が約 1.5 倍変わることを見出すことができた。これまで、寒冷地域ほど効果が高いと定性的に予測していたが、定量的な議論はできていなかった。今回、各地域の気象条件ごとに向上効果を試算できるようになったことで、各地域における防曇窓技術導入のコスト対効果を定量的に議論できるようになった。

Table 2 Weighting of Driving Range under Each Condition

Annual average of the driving range improvement						
Weather conditions	-15°C × 10%RH	-15°C × 30%RH	-15°C × 50%RH	...	10°C × 70%RH	10°C × 90%RH
Number of passengers	1	1	1	...	5	5
Frequency of appearance (P)	P ₁	P ₂	P ₃	...	P ₂₉₉	P ₃₀₀
Driving range improvement (X)	X ₁	X ₂	X ₃	...	X ₂₉₉	X ₃₀₀
P × X	P ₁ X ₁	P ₂ X ₂	P ₃ X ₃	...	P ₂₉₉ X ₂₉₉	P ₃₀₀ X ₃₀₀

↓ weighting

$$P_1X_1+P_2X_2+P_3X_3+\dots$$

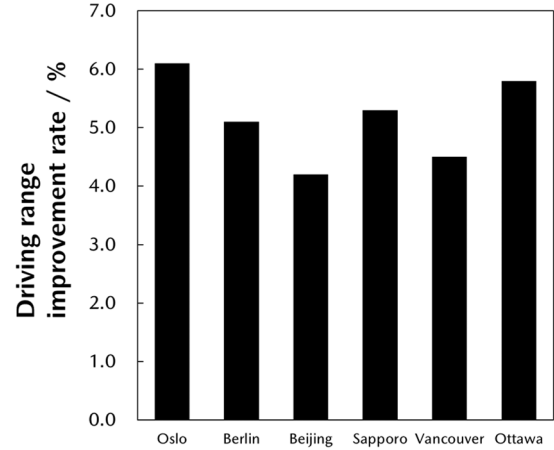


Fig. 7 Expected Value of Driving Range Improvement Rate in Each Region

また、防曇窓の効果が高い条件を検討するために、頻度が 1%以上（最低 3 日間／年以上）、かつ効果が高い気象条件を抽出し、ピックアップした寒冷地域での航続距離向上率を試算した。結果、どの地域でも約 12%の向上を確認できた。

6. 実車での効果検証結果

開発した防曇窓の航続距離向上効果を実証するため、実車（PHEV、EV モード）のウインドシールドの車内側に、アクリル樹脂を基材とした開発した防曇材料のフィルムを貼り付け、下記の 3 条件で電力使用量を測定し、航続距離向上率を導出した。

- ①空調 Auto モード（5. 効果試算結果の②温湿度センシングによる内外気制御に相当）
- ②フィルムが曇り始めるまで 100%内気循環⇄ 5 分間 100%外気導入の手動切り替え（5. 効果試算結果の③防曇窓搭載に相当）
- ③ 75%内気循環（フィルムが試験中に曇らない条件）

その他の実験条件を下記に示す。

- ・車両：CX-60 PHEV
- ・乗車人数：2 人
- ・車速：50km/h 定常
- ・走行時間：EV モード、約 40 分走行
- ・外気温湿度設定：0°C、60% RH
- ・防曇材料の飽和吸水量：0.23mg/cm²

②の条件での走行開始 5 分後の状態を Fig. 8 に示す。防曇材料フィルムを施工した部分が防曇性を示すことを確認できた。

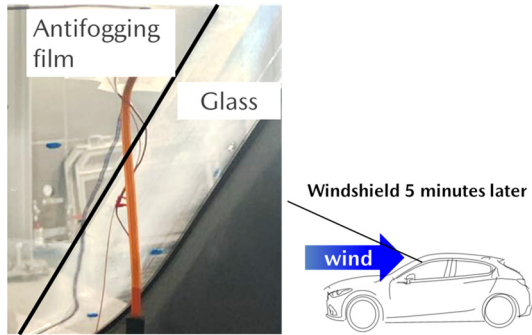


Fig. 8 Experiments on an Actual Vehicle Equipped with the Developed Antifogging Material

更に、走行時の電費を測定した結果、①に対する②の航続距離向上率は約8%であった。効果試算モデルで予測した結果は約10%であり、この予実差については、走行電力消費率やCOPがモデル計算と実車で差異があったためだと考える。一方、①に対する③の航続距離向上率は約11%であった。②のモードでは、走行開始後に急激に湿度が上昇し、防曇材料が短時間で飽和吸水量に達する。そのため、100%外気導入を複数回作動させることになり、過剰な換気がエネルギーロスの要因になった可能性がある。一方で、③のモードでは車内の水蒸気量が急激に上昇しないため、防曇材料が飽和吸水量に達することがなかった。その結果、100%外気導入を抑えることができ、換気によるエネルギーロスを最小限に抑えられたと考える。以上により、適切な内気循環率の設定が乾燥のための外気導入を最小限に抑え、高い効果を発揮することが実車検証により確認できた。

7. おわりに

空間効率を損なうことなく、冬季の航続距離を向上することが可能な防曇窓について、材料開発と効果試算を行った。

今回、有機無機ハイブリッド材料に着目することで、従来の防曇材料より高度に吸水機能と耐傷付き性を両立可能な新たな防曇材料を開発した。本材料は、傷に対する回復性をもっていることで、吸水機能と耐傷付き性を高いレベルで両立していることを確認した。

開発した防曇窓について、自動車における効果を、定量的に試算するために、航続距離の向上効果を予測するモデルを開発した。開発したモデルの特徴として、実使用環境下での窓表面の結露量の予測が可能であり、防曇材料中の吸水量に応じて、内気外気の切り替え制御を考慮する。本モデルを基に、効果を試算したところ、 -10°C 、90% RH、乗車人数2人の環境下では、航続距離が温湿度センシングによる内外気制御で183kmに対して、防曇窓搭載によって201kmまで向上する結果を得た。また、寒冷地域の代表地域をピックアップし、年間の気象条件で重みづけした航続距離向上率を試算した

結果、航続距離向上率の年間平均での期待値は、オーストリア：6.1%、北京：4.2%であることを定量的に予測できた。更に、開発した防曇窓を実車に搭載し、航続距離向上効果を検証した。結果、約10%近くの航続距離の向上が可能であることを確認できた。

参考文献

- (1) 田中 寛之：国際標準言語を用いたEV車キャビン熱モデルの開発（第1報）、自動車技術会学術講演会予稿集（2019）、20195337
- (2) 吉野 悦郎：車両空調用小型高性能内外気2層送風機の開発、自動車技術会論文集、Vol.47, No.2, pp.573-578（2016）
- (3) Rong Wang: Photogeneration of highly amphiphilic TiO_2 surfaces, *Advanced Materials*, Vol.10, No.2, pp.135-138（1998）
- (4) Ziqi Sun: Fly-Eye Inspired Superhydrophobic Anti-Fogging Inorganic Nanostructures, *Small*, Vol.10, No.15, pp.3001-3006（2014）
- (5) Chao-Chin Chan: Preparation of Nanosilica/polyacrylate Antifog Coatings on Polycarbonate Substrates, *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol.22, No. 1, pp.153-162（2019）

■ 著 者 ■



前田 哲爾



桂 大詞



増岡 宏明



落合 洸矢



杉本 哲也