

# 特集 冬季換気損失低減に寄与する湿度コントロールシステムの開発\*

## Development of a Humidity Control System for the Reduction of Ventilation Heat Loss of HVAC Systems

平井伸一郎      片岡拓也      熊田辰己      後藤孝章  
 Shinichiro HIRAI      Takuya KATAOKA      Tatsumi KUMADA      Takaaki GOTO

Vehicles have been required to further save energy to cope with global warming issues. As a result of the improving efficiency of internal combustion engines in vehicles and the adoption of electric power trains, the engine heat previously used for heating the passenger compartment has decreased, and consequently additional heating energy may be necessary to maintain the thermal comfort of the passenger compartment in winter. This paper is concerned with a humidity control system that realizes a reduction of the ventilation heat loss by controlling the recirculation rate of the HVAC system to reduce the consumption of additional heating energy. For the recirculation control, a highly accurate humidity sensor is applied to monitor the possibility of fogging on the windshield. As a result of this control, the fuel consumption of hybrid vehicles has decreased and the maximum cruising distance of electric vehicles has increased.

**Key words** : Heat·fluid, Air Conditioner, Fuel Economy / Humidity Sensor, Heater

### 1. はじめに

近年、地球温暖化防止対策のためCO<sub>2</sub>排出規制が世界的に強化されており、自動車の省燃費化要求は益々強まっている。こうした背景の中、カーエアコンにおいても空調作動時の実用燃費向上の必要性が高まっており、夏季の冷房では、空調に使うエネルギーを低減させるためにエジェクタサイクルなどの新技術が開発されている<sup>1)</sup>。一方、エンジン排熱を利用している冬季の暖房では、内燃機関の効率向上により排熱が減少する傾向があり、車室内を快適に維持するために必要な暖房能力を得るために追加のエネルギーを使い、車両燃費が悪化するという問題が生じ始めている。この問題を解決するためには、暖房負荷を低減することが1つの方法である<sup>2)</sup>。

今回、暖房負荷を低減させるために、湿度センサを用いて内気循環率を増やし換気損失を低減するシステムを開発した。

本論文では、暖房負荷と燃費の関係、内気化による換気損失低減の可能性、湿度センサを用いた内気化システムの考え方と効果について述べる。

### 2. 暖房負荷が燃費・航続距離に与える影響

車両用空調では、暖房負荷が車両燃費に影響を及ぼすことが知られている。特にハイブリッド車（HV）のように燃費が良い車や、排熱が利用できない電気自

動車（EV）の場合は、暖房負荷が燃費（HV）や航続距離（EV）に大きな影響を及ぼす。

Fig. 1にHV車における暖房負荷の一例を示す。この図から、エンジン排熱では暖房負荷をまかなえず、冬季ほぼ全域で暖房のためにエンジンを稼働させ熱を創出する必要が生じ、車両の燃費が悪化することが分かる。

またFig. 2はEV車における暖房熱量と航続距離の関係の試算例を示している。走行に必要な電力を仮に125Wh/kmとし、暖房に使う熱量を全て電気ヒータでまかなったと仮定すると、暖房熱量が3kWのとき航続距離は空調OFF時と較べてほぼ半減する。

このように、燃費の良いHV車やEV車では暖房負荷の低減が、燃費向上や航続距離向上に不可欠であることがわかる。

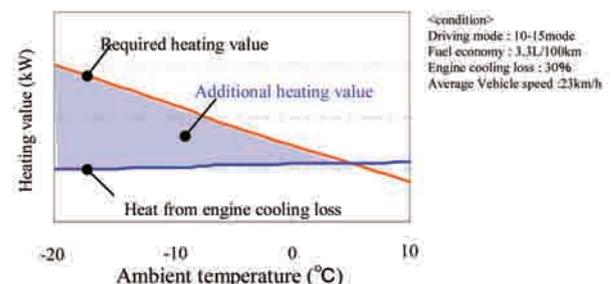


Fig. 1 Thermal Load and Heat Supply

\*（社）自動車技術会の了解を得て、「自動車技術会論文集」No.154.10より一部加筆して転載

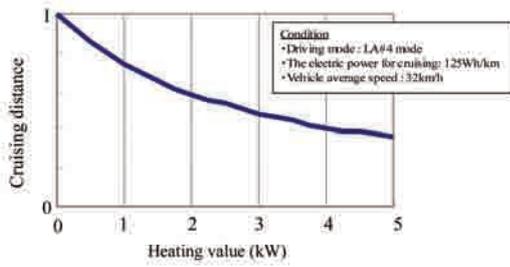


Fig. 2 Relation Between Heating Value and Cruising Distance

### 3. 暖房負荷と換気損失

暖房時の熱の使われ方を Fig. 3 に示す。エンジンから発生した熱は、排気及び冷却損失として放出され、冷却損失の一部が暖房に使われる。暖房時の熱負荷は、一般的に車室内から車体表面への車体伝熱や換気損失、ダクト等の熱ロスがあげられ、そのうち換気損失は全体の6割以上の割合を占める。

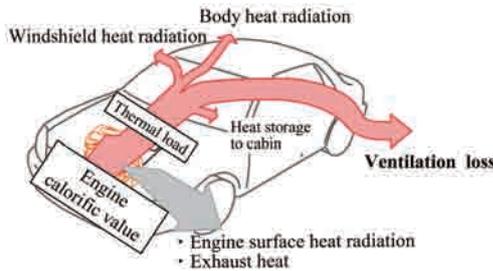


Fig. 3 Schematic of Heat Flow

車室内温度は、車室内の発熱量と車体伝熱、換気量のバランスから式 (1) のように表される。

$$T_{cabin} = (Q_H + Q_P) / (AK + \rho C_p V_a) + T_{out} \quad \dots (1)$$

ここで、 $T_{cabin}$ ：車室内温度 (°C)、 $A$ ：車室表面積 (m<sup>2</sup>)、 $K$ ：車体の熱通過率 (W/m<sup>2</sup>・K)、 $Q_H$ ：暖房熱量 (W)、 $Q_P$ ：補器および乗員放熱 (W)、 $\rho$ ：空気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $C_p$ ：空気の比熱 (J/kg・K)、 $V_a$ ：換気風量 (m<sup>3</sup>/s)、 $T_{out}$ ：外気温度 (°C) である。

この関係式より、車室内温度  $T_{cabin}$  を維持したまま、暖房熱量  $Q_H$  を低減させるためには、車体断熱などによる熱通過率  $K$  の低減及び換気風量  $V_a$  の低減が有効であることがわかる。本研究では、換気損失に着目し、これを低減することで車両燃費を向上させるシステムを検討した。

### 4. シミュレーションによる換気損失低減効果検討

冬季、換気を行う主目的は窓ガラスの曇り防止であることは知られている。そこで窓ガラスに曇りを発生させない範囲で換気量を低減できるポテンシャルを調査するため、換気量と窓曇りの関係を簡易的なシミュレーションで検討した。

まず、車室内の絶対湿度  $X_{cabin}$  (kg/'kg) は外気の絶対湿度  $X_{out}$  (kg/'kg) と換気風量、乗員の呼吸と発汗に伴う蒸発水分量  $W$  (kg/s) でバランスするため、乗員数を  $M$  とすると  $X_{cabin}$  は次式で求まる。

$$X_{cabin} = \frac{\rho_{out} V_a X_{out} + MW}{\rho_{cabin} V_a} \quad \dots (2)$$

次に、車室内温度と外気温度、車速、ガラスの物性値より求めたガラス表面温度  $T_g$  から、ガラス表面の相対湿度  $RHW$  (Relative Humidity of Windshield) を次式で算出する。

$$RHW = \frac{RH_{cabin} * P(T_{cabin})}{P(T_g)} \quad \dots (3)$$

ここで  $RH_{cabin}$  は  $X_{cabin}$  と  $T_{cabin}$  より求めた相対湿度、 $P(T_{cabin})$  は車室内温度  $T_{cabin}$  における飽和水蒸気圧、 $P(T_g)$  はガラス温度  $T_g$  における飽和水蒸気圧である。

次に乗員数と外気湿度をパラメータにとり、窓曇りが発生する  $RHW=100\%rh$  にならない最小換気量を試算した。

Fig. 4 に乗員数、外気湿度に対し、窓曇りを生じない最大内気循環率と換気損失低減効果の関係を示す。ここで、内気循環率は全風量と最小換気量の差であり、内気循環率とは全風量に占める内気循環量の割合を示している。

この結果から、低外気温度時 -5°C において、外気湿度が高い 80%rh の領域でも内気循環率を約 50~80% まで高められ、換気損失を 1.2~2.2kW 低減できるポテンシャルがあることが分かる。以上より、これまでの換気による無駄な熱量を削減でき、暖房負荷を低減できる可能性があることを確認した。

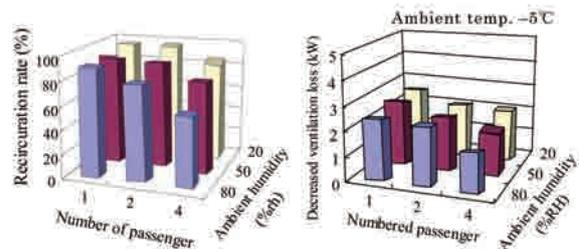


Fig. 4 Recirculation Rate and Ventilation Loss According to Ambient Humidity and Number of Passengers

前述の換気損失低減ポテンシャル検討は、車室内温湿度及びガラス表面の温度が均一、という解析条件に加え、温湿度の検出誤差が無い、制御に伴う誤差や時間遅れが無いという理想状態を仮定した試算結果である。

実際の車両では、センサ誤差や制御遅れ、ガラス表面の温湿度分布があるため、曇りに対して余裕をとることが必要とされる。この余裕が大きいと換気損失低減効果が減少してしまうため、高精度な温湿度検知と制御技術を実際の車両の温湿度環境下で実現する必要がある。そのため、この検知技術と制御技術について検討した結果を以下に述べる。

## 5. 窓曇り検出技術検討

### 5.1 窓曇り検出方式

窓曇りを検知する方法としては、主に光学式、湿度センサ式の2つが挙げられる。光学式は、一般的には窓曇りの発生有無をガラス表面での光線の反射の変化を用いて検知するものである。この方式では、窓曇り発生を精度良く検知できる半面、窓曇りの発生に対して余裕をもった制御が困難であるという欠点がある。一方、湿度センサを用いてガラス近傍の湿度を検出できれば、窓曇りが発生しない範囲で内気循環率を制御することが可能となり、さらにガラス表面温度を検出できればより制御効果を高められる。そこで、本システムでは車室内の温湿度と窓ガラス表面温度を検出して窓の曇り易さを判定する方式を採用した。

### 5.2 搭載位置

車室内の温湿度検出位置は窓の曇り易さの判定精度に影響を与える。Fig. 5はセンサの湿度検知精度がRHWに与える影響の搭載位置による違いを湿り空気線図上で示した例である。この例は、外気温0℃時に車室内温度25℃に暖房している車室を想定しており、ガラス表面温度は4.4℃、ガラス近傍空気温度は7.4℃と仮定している。また、湿度センサ誤差は相対湿度 $\pm 5\%rh$ と仮定する。この図より、湿度センサを内気温センサ位置などの車室内温度と同じ温度の位置に設置した場合は内気センサ位置での $\pm 5\%rh$ の検知誤差がガラス表面でのRHWに換算すると $\pm 20\%rh$ に拡大する。このため、大きな安全率を見込んで制御する必要があり換気損失低減効果が大きく目減りする。一方、ガラス近傍の空気温度が低い場所で検知すると、 $\pm 5\%rh$ が $\pm 6.5\%rh$ に

拡大するだけで済み、RHW検出精度が維持でき、制御効果を発揮できる。従って、温湿度検出位置は窓ガラス近傍位置に設定することとした。

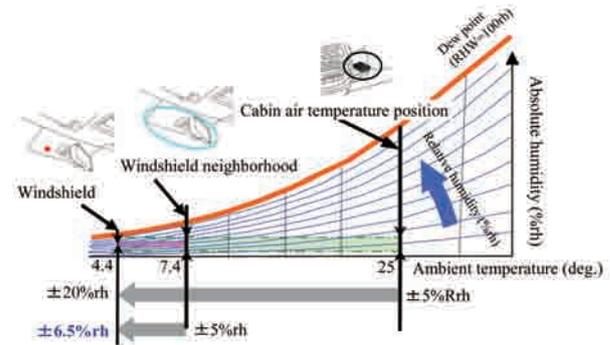


Fig. 5 Influence of Humidity Sensing Position for Accuracy of RHW

次に、窓ガラスにおける最適な設置位置を検討した。視界を妨げる曇りが発生しない範囲で内気化するため、センサ設置場所はフロントウィンドシールドの最も曇り易い場所に設置するのが好ましい。窓曇りに関する要因のうち、曇り分布に影響するのは、車室内の温度、風速、湿度分布と車外の風速分布が考えられる。そのため、最も曇り易い場所を決めるため、窓の曇り易さをシミュレーションで検討した。

車室内の温湿度分布解析にはFig. 6に示す計算モデルを用い、湿度を含む流れを計算した。モデルの形状は一般的なセダンとした。吹き出し口は、冬季を想定し、FOOT, サイドFACE, DEFに設置した。湿度は、各吹き出し口から外気相当の湿度が流入するほか、乗員の口から呼気、人体の表面から発汗相当の水分放出を考慮した。

車室外は同様に車体周りの流れを数値計算し、フロントウィンドシールド外側の熱伝達率を計算した。計算にはいずれもSTAR-CDを用い、標準乱流モデルを用いた。

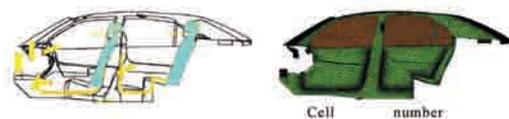


Fig. 6 Simulation Model and Computational Elements in the Cabin

計算した車室内側のガラス表面温度分布及び露点温度分布をFig. 7に示す。フロントウィンドシールド周辺部は、車外風速が速く、DEFからの温風到達性が悪いいため温度が低くなる。また車室内の露点分布は、車室内の風流れが前方から後方に向いているため、湿度は

後方に向かって高くなることと、フロントウィンドシールド上では大きな分布が無いことが分かる。Fig. 8には試みに、内気循環率を変化させた場合の窓曇りの変化を示す。内気率が増加し車室内の湿度が上昇すると共に車両後方から窓が曇り始め、フロントウィンドシールドでは、4隅と周辺部から窓曇りが始まることと分かる。

以上の検討より、センサ設置位置は曇りやすいフロントウィンドシールド周辺部とし、センサ自身が視界の妨げにならないルームミラー周辺部とすることとした。

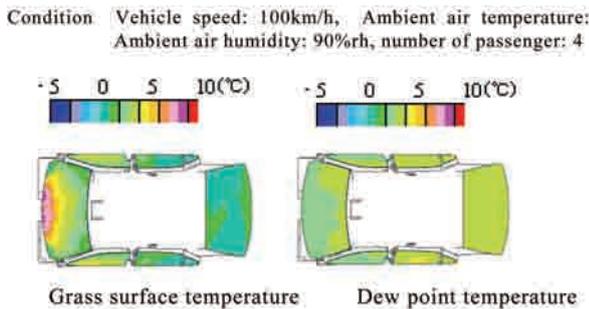


Fig. 7 Grass Surface and Dew Point Temperature Distribution

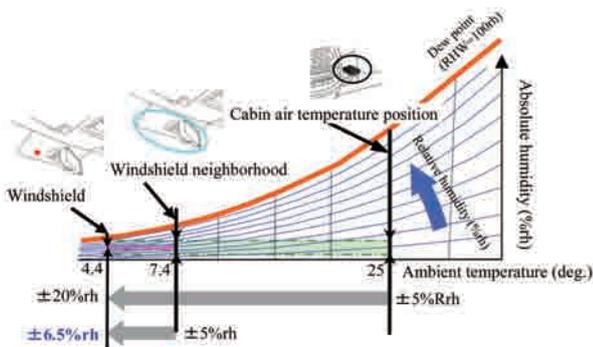


Fig. 8 Fogged Area of Windshield and Wwindows

### 5.3 温湿度センサ

以上の検討を踏まえ開発した温湿度センサの概要を以下に示す。湿度センサは冬季の換気損失低減を狙いとしているため、雰囲気温度が $-20^{\circ}\text{C}$ まで湿度検知可能で且つ急速な窓曇り発生に対応できる高応答な静電容量式を採用した。また、高精度な窓曇り検出に不可欠なガラス温検出部は、サーミスタと窓ガラス表面を軟質の熱伝導材料と硬質の熱伝導材料の積層構造により高精度、高応答な検出を実現した (Fig. 9)。

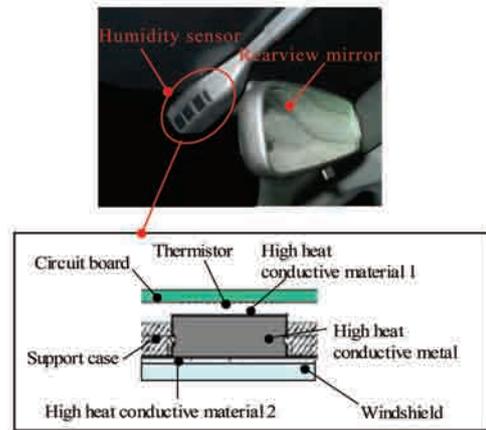


Fig. 9 Sensor Appearance Mounted on the Front Windshield and Structure of Glass Temperature Sensing Part

## 6. システム制御技術検討

冬季に内気循環率を向上させる制御は、窓が曇りやすくなる可能性を伴う制御であるため、HVACの綿密な制御が必要とされる。本システムでは、前述の温湿度センサの諸信号を空調用ECUに入力し、HVACの各種アクチュエータを作動させ換気損失低減を実現する。

システム制御の基本フローチャートをFig. 10に示す。まず、温湿度センサ及びガラス温度センサ信号よりガラス表面相対湿度RHWを算出する。このRHWが100%rhとなるときに窓曇りが発生するが、センサ誤差などを考慮し窓曇りに対して余裕のあるRHWの値を目標値にして内気循環率を算出し吸い込み口ドアを制御する。窓曇り危険度の高い場合は、内気化制御は行わない上に、外気モードでも湿度の急変などで窓曇りが発生しそうな場合には、吹出口モードや風量を制御し窓曇りの発生を防止する。本システムにより、窓曇りを発生させることなく内気循環を最大化し換気損失を低減することが可能となる。

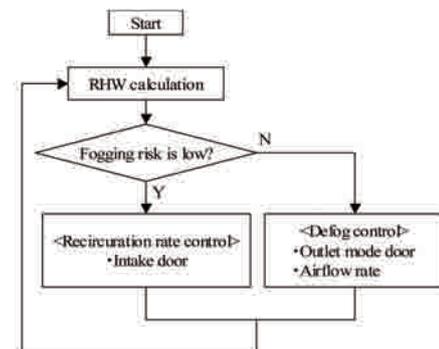


Fig. 10 Control Flow of HVAC System

### 7. システム効果の確認

本システムを実車に適用し確認試験を実施した。試験車両は排気量1.8Lのハイブリッド車両を用いて実施した。評価条件は、外気温度 $-5^{\circ}\text{C}$ で乗員1名にて実施した。

本システム有無によるRHW及び内気循環率の時間変化をFig. 11に示す。本結果より、RHWを100%以下と窓曇りの無い範囲で制御することで、内気循環率を最大80%まで増加できることを確認した。

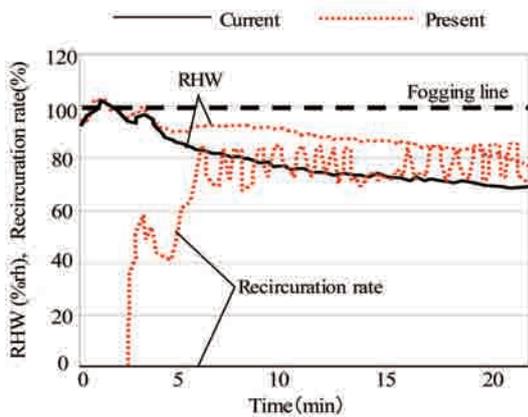


Fig. 11 The Comparison of RHW and Recirculation Rate

この制御時の暖房熱量と車室内温度の変化をFig. 12に示す。内気循環率の増加により従来の外気導入モードに対し暖房負荷が走行平均で0.8kW (30%) 削減できている。その結果、エンジン冷却水の放熱を低減し、早期に室温を上昇させることが可能となり、室温 $20^{\circ}\text{C}$ 到達時間を約4分短縮し、暖房感をより向上させることができた。

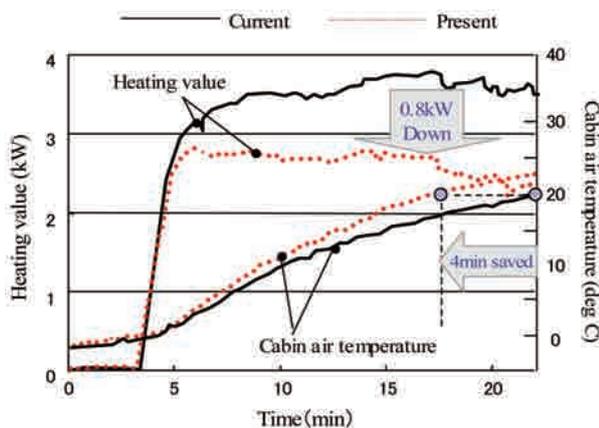


Fig. 12 Comparison of Heating Value and Cabin Air Temperature

本システム適用の結果、HV車両においては、暖房熱量を低減することで、暖房のために無駄なエンジン稼働時間を抑制することが可能となり、冬季実用燃費が4%以上向上することが確認できた。(Fig. 13)

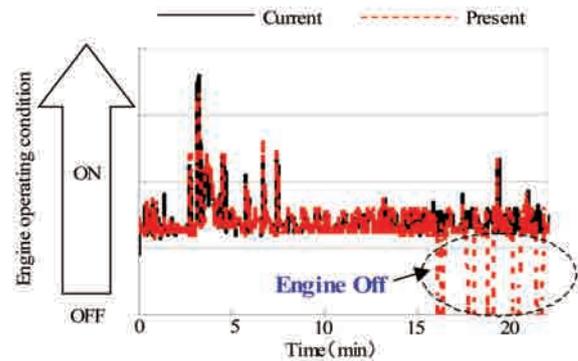


Fig. 13 Comparison of Engine Operating Condition

また、本試験結果の暖房負荷低減結果とFig. 2の電気自動車の暖房熱量と航続距離の関係より、本システムの適用することで電気自動車の航続距離は約8%程度向上すると考えられる。(Fig. 14)

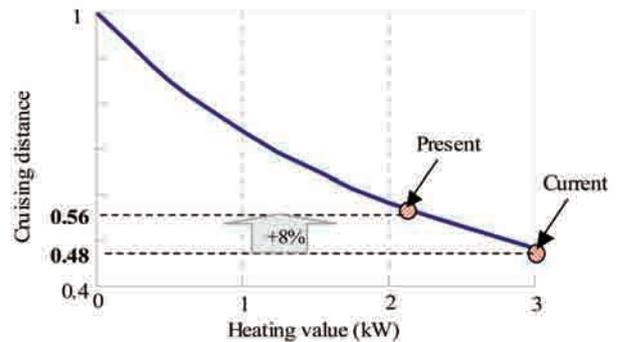


Fig. 14 Improvement in the Cruising Distance of Electric Vehicles

### 8. むすび

湿度センサとガラス温度センサで窓の曇り易さを検知し、窓が曇らない範囲で内気循環率を向上させ冬季の換気損失を低減するシステムを開発した。本システムを実車に搭載して評価した結果、暖房負荷低減効果およびハイブリッド車の実用燃費向上効果が確認できた。また、電気自動車でも航続距離向上効果が見込める可能性があることがわかった。

本システムは'11年発売されたトヨタ自動車CT200hに採用された。

<参考文献>

- 1) 武内他：エジェクタサイクルの製品化，デンソー  
テクニカルレビュー，Vol.4, No.1, p.18-23 (2005)
- 2) 宮嶋他4名：内外気2層エアコンユニット，デンソー  
テクニカルレビュー，Vol.4, No.2, p.30-35 (1999)
- 3) 藤原他：3章空気調和の基礎，カーエアコン，東京，  
東京電気大学出版局，2009，P.35-50

<著 者>



平井 伸一郎  
(ひらい しんいちろう)  
熱機器開発1部  
車室内空調製品の開発に従事



片岡 拓也  
(かたおか たくや)  
熱機器開発1部 工学博士  
車室内快適性製品の開発に  
従事



熊田 辰己  
(くまだ たつみ)  
熱エレクトロニクス開発部  
車室内空調用センサ開発に  
従事



後藤 孝章  
(ごとう たかあき)  
トヨタ自動車(株)  
内装設計部  
空調商品開発シナリオ立案と  
具現化