

# 特集 マトリックス IR センサシステムの開発\*

## Development of the Matrix Infrared Sensor and Climate Control System Using this Sensor

片岡 拓也

熊田 辰己

Takuya KATAOKA

Tatsumi KUMADA

Drivers and passengers always tend to require more comfortable climate control in vehicles. This paper is concerned with the development of a newly developed infrared sensor measuring surface temperatures at six separate locations, and an advanced climate control system that incorporates this sensor. In a conventional systems using an air temperature sensor and solar radiation sensor, climate conditions are usually controlled according to the thermal load. It is believed that more comfortable climate control will be realized by using the infrared sensor to monitor passenger's surface temperature. The sensor consists of a lens, an IC with six thermopiles, a circuit and a case, and was developed to measure cabin-interior surface temperature accurately even under severe outside environmental conditions. The HVAC system controls the outlet air temperature and the mode individually for each seat according to the measured temperatures. Even though, a passenger may get in a vehicle from a very hot or cold environment, the system estimates the passengers' thermal conditions from the measured temperature and controls the HVAC to adjust the climate condition of each passenger appropriately and quickly. This proposed control system realizes a pleasant thermal feeling of climate control for the passenger.

**Key words:** Climate control, Air conditioning, Thermal comfort, Sensing, Infrared sensor

### 1. まえがき

自動車室内の温熱快適性向上のために、様々な空調機器の改良が行われてきている。HVAC システムは、初期の車室内全体を対象としたものから、個々の座席の吹き出し口温度を独立にコントロールできるものへと発展してきている。

一方、空調装置は初期のマニュアル操作からオートエアコンに発展しており、吹き出し口、モード、風量、吹き出し温度を自動で制御している。これらの制御には、内気温度センサのほかに、外気温センサや日射センサ、更に湿度センサなども用いられてきめ細かに制御されている。

しかしながら、これらの制御は、車両熱負荷と乗員温熱感の推定を基にした制御であり、最新の4席独立制御エアコンの効果を最大限に引き出し、乗員の快適性を向上させるには、新たな検知手段が必要と考えられる。

本論文では、赤外線温度センサの車両用空調制御への応用に関して述べる。まず初めに、シングル IR センサにより車両熱負荷をフィードバックした空調制御方法とその応用について述べ、次に、マトリックス IR センサを用いた乗員の状態をフィードバックした空調制御について述べる。

### 2. 赤外線センサ

赤外線センサは、温度センサ、熱画像認識、人体検知、夜間暗視カメラなどの目的で様々な分野で用いられている。自動車分野では、画像処理と組み合わせたナイトビューシステムやドライバモニタリングシステム<sup>1) 2)</sup>への研究と応用がアクティブセーフティの向上のために盛んに行われている。

Table 1 に赤外線センサの主な検知方式と用途を示す。この中で、サーモパイルは簡単な構造で精度良く温度検知ができるため、放射温度計として良く使われる。

Fig. 1 にサーモパイル方式の赤外線センサの基本構造を示す。サーモパイルは、2種類の異種金属を接続し、一方

Table 1 Sensing methods and applications of infrared sensors

Methodology		Applications
Thermal type	Thermopile	Thermometer
	Pyroelectric element	Sensitivity switch
	Bolometer	Radiation meter Thermograph
Quantum type	Photodiode Phototransistor	Color sensor
	Photoconductive tube	Illuminometer
	Photocell	

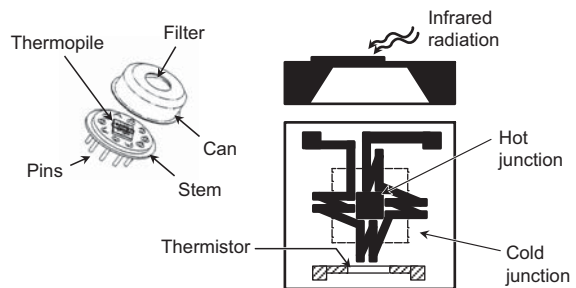


Fig. 1 Structure and principle of thermopile infrared sensors

\* Reprinted with permission from SAE paper 2008-01-0835 © 2008 SAE International

の端を加熱または冷却して他方の端と温度差を生じるようにすると起電力が生じる。熱電対はこの良く知られた熱起電力効果を利用して、サーモパイルはこの熱電対を直列に多数つなげ、微小な赤外線により生じた温度差を検知する。

対象物から放射された赤外線は、サーモパイルの温接点に集められる。必要に応じて、外乱光をカットするフィルタ、集光性を向上するためのレンズなどが用いられる。その結果として生じる温接点と冷接点の温度差が起電力を生じ、この起電力を増幅し放射エネルギーを検知する。対象物の温度は、この放射エネルギーと冷接点温度より、ステファンボルツマンの式から求めることができる。

Fig. 2に10℃、25℃、40℃の物体からの放射エネルギースペクトラムをプランクの放射法則に基づいて計算した結果を示す。外気-10℃から40℃の下での着衣表面温度は概ね0℃から40℃の範囲で変化し、そのピーク波長は9～11μmである。これより、車室内空調制御に用いるためには7～13μmを中心として検知すれば良いことが分かる。

### 3. 赤外線センサの検知性能と制御の可能性

赤外線センサは住宅空調、自動車用空調で既に使われている。これらの例では検知対象は室内の広い範囲であり、空調負荷の検知に用いられるのが一般的である。一方、温熱快適性の観点からは、乗員の生理量を検知して制御するのが理想であり、従来からその可能性が検討されてきた<sup>3)・5)</sup>。

Table 2に赤外線センサを用いて表面温度を検知する対象と、そのうれしさ、およびセンサに求められる要求性

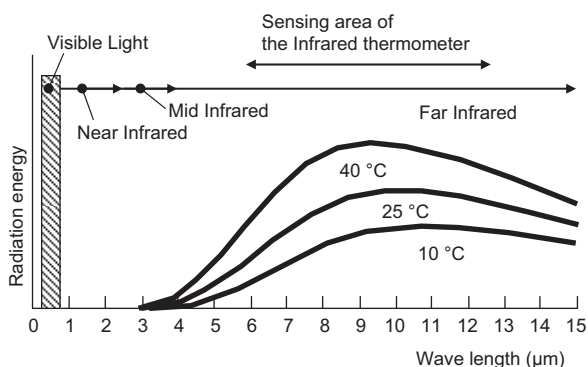


Fig. 2 Radiant energy distribution and measuring area of infrared thermometers

Table 2 Application of infrared sensors for vehicle climate control

Object	Interior	Passenger's clothing	Passenger's skin	Glass
Expected benefit	Thermal load in passenger compartment	Thermal state and conditions of passenger	Thermal state and sensations of passenger	Fogging (w/ humidity sensor)
Required accuracy	±1.0 to 2.0 K	±1.0 to 2.0 K	±0.3 to 0.7 K	Depends on purpose
Required resonance	0.7 to 1 m	0.1 to 0.3 m	0.02 to 0.03 m	0.1 to 0.3 m

能をまとめる。IRセンサによるガラス温度検知と湿度検知を組み合わせることで、窓曇り防止制御ができる可能性がある。

車室内温熱環境の制御への応用に関しては、熱負荷検知、着衣温度検知、皮膚温検知の三つの使い方が考えられる。

赤外線センサが乗員を含む車室内の広い範囲の壁面温度を検知するときは空調負荷を予想することができる。そのため、赤外線センサは内気センサや外気センサ、日射センサの代わりに空調制御に用いることができる。この応用例は次の章で述べる。

更に、IRセンサは乗員の表面温度を直接検知可能であるため、乗員の温熱状態検出が期待される。乗員はその大部分を着衣に覆われており、表面温度検出には着衣表面と皮膚の2通りが考えられる。ここではまず、皮膚温検知の場合と着衣表面温度検知の場合を比較する。

温熱快適性は、ASHRAEによって、「その温熱環境に満足を示す心の状態」として定義されており、快適性は心理状態、感覚として表される<sup>6)</sup>。この感覚は皮膚近くの温度受容体と視床下部にある深部温度受容体の生理信号を総合しているものと考えられているが、その信号は人体の熱的な状態に基づいている。人体の熱的な状態に影響を与えるのは、空気温度、放射温度、気流、湿度、着衣量、そして代謝量であり、これは温熱6要素と呼ばれる。人間は恒温動物であり、代謝によって生成する熱を周囲の環境に放熱しつつ、常に体温を一定の範囲に制御している。人体から環境へは、対流、放射、蒸発によって放熱をしている。環境温度が低下し皮膚温との差が広がると、皮膚からの対流と放射による放熱を減少させるため、血管収縮により皮膚温を低下させる。そして、環境温度が上昇すると、血管拡張により皮膚温が上昇し、適度な放熱を維持する。これらの血管運動が皮膚温の変化をもたらす。

そのため、温冷感 は平均皮膚温と相関が強いと言われている。一方、SET\*とPMVは温熱環境を評価する良く知られた温熱指標であるが、これらは温熱6要素に影響される。Fig. 3にGAGGEらの2ノードモデル<sup>7)</sup>で計算したSET\*と平均皮膚温との関係を示す。作用温度を-10℃から40℃、風速を0.1 m/sから1.0 m/s、湿度を20から80% RHに様々な条件で計算しているのにもかかわらず、両者の相関は十分に良い。高温域でバラツキが生じているのは、湿度変化が着衣表面温度に反映され難いことを示している。

一方、同様に2ノードモデルで計算された、着衣表面温度 T<sub>cl</sub>をSET\*とFig. 4で比較する。作用温度、風速、湿度を様々な条件で計算しているのにもかかわらず、両者の相関は十分に良い。高温域でバラツキが生じているのは、湿度変化が着衣表面温度に反映され難いことを示している。

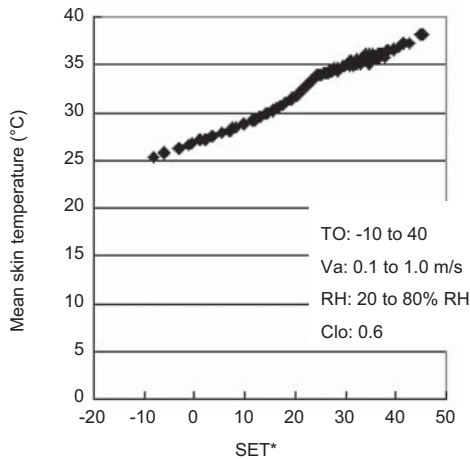


Fig. 3 Relation between SET\* and mean skin temperature (Clo = 0.6)

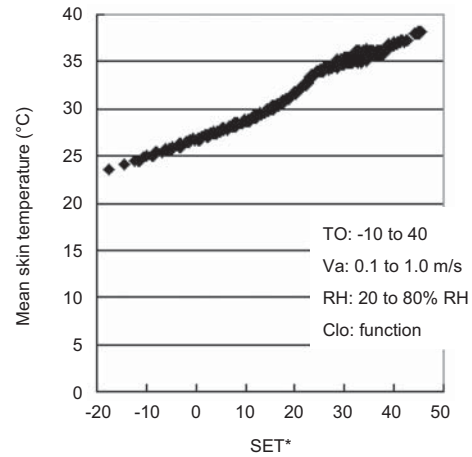


Fig. 5 Relation between SET\* and mean skin temperature (Clo: function of ambient air temperature, with a deviation of  $\pm 0.2$ )

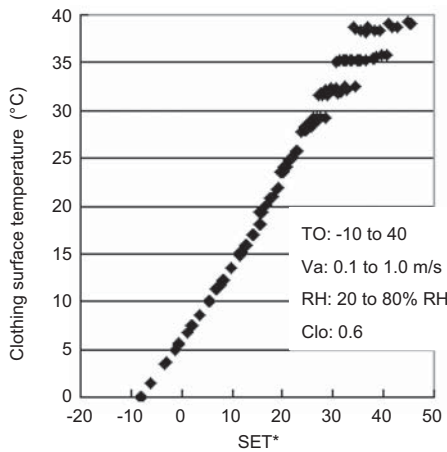


Fig. 4 Relation between SET\* and clothing surface temperature (Clo = 0.6)

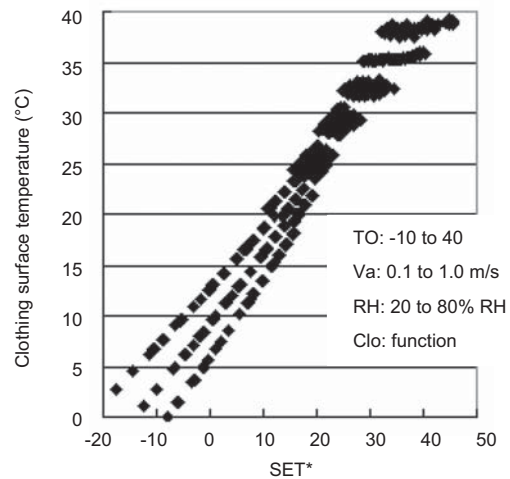


Fig. 6 Relation between SET\* and clothing surface temperature (Clo: function of ambient air temperature, with a deviation of  $\pm 0.2$ )

Fig. 3 および Fig. 4 は着衣量 0.6clo での相関であるが、着衣量が変化した場合の相関を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。自動車乗員の着衣量は季節(外気温)に応じて平均値が 0.6 から 1.0 まで変化し、 $\pm 0.2$  のバラツキがあると仮定している。着衣量が変化すると相関が悪化する傾向にあるが、全体として相関は保たれている。

Figs. 3-6 から分かるように、着衣温度は SET\* の変化に対して皮膚温の 2.6 倍のゲインで変化しており、赤外線センサの検知精度への要求スペックにとって有利である。

また、皮膚温は、眼鏡や眉、ひげ、頭髮に覆われている部分では検知できないこと、顔の位置が良く動くことを考えると、いつでも誰でも皮膚温検知を可能にするためには分解能の良いセンサと画像処理を必要とする。

そのため、従来は熱負荷検知による制御が実用化されてきたが、皮膚温検知による制御は研究レベルでしか行われていなかった。本論文では、以上の考察に基づき乗員着衣温度検知による空調制御を実現したので紹介する。

#### 4. シングル IR センサによる空調制御

まず、熱負荷検知を主な目的としたシングル IR センサとその制御について述べる。ここでは一つのサーモパイルを持つセンサをシングル IR センサと呼ぶ。また、四つ以上のサーモカップルを持つ IR センサを、マトリックス IR センサと呼ぶことにする。Fig. 7 にセンサの写真を示す。センサ構造はほぼ Fig. 1 と同じである。このセンサは Fig. 8 に示すようにインパネに埋め込まれ、Fig. 9 に示すドライバを中心とした運転席を検知領域としている。検知領域内には、ドライバのほか、ドアトリムとサイドウィンドウガラス、天井などが入っている。

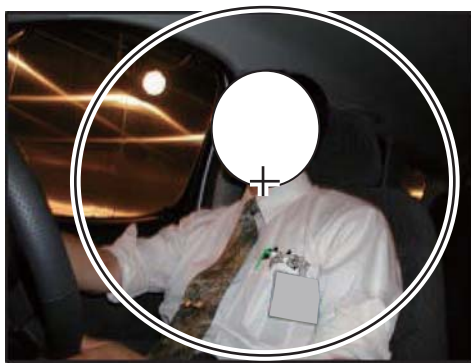
従来のオートエアコンは内気温度センサ、外気温度センサ、日射量センサの三つのセンサ出力と温度設定値から空調負荷を推定し室温を制御している (Fig. 10)。IR センサでは、ガラス、日射のあたる内装部位、天井、乗員の 4 部



Fig. 7 Single Infrared sensor



Fig. 8 Sensor equipped on an Instrument panel



(A photo of a vehicle with right hand drive)

Fig. 9 Measuring area of the sensor (right hand drive vehicle)

位の表面温度で内気温度，外気温度，日射量を推定する。  
従来のオートエアコンでは目標吹き出し温度  $TAO$  を次の式で決めていた。

$$TAO = K_{SET}T_{SET} - K_R T_R - K_A T_A - K_S T_S + C \dots (1)$$

ここで  $T_{SET}$  は設定温度， $T_R$  は室内空気温度， $T_A$  は外気温度， $T_S$  は日射量である。 $K_{SET}$ ， $K_R$ ， $K_A$ ， $K_S$  はゲイン， $C$  は定数である (Fig. 10)。

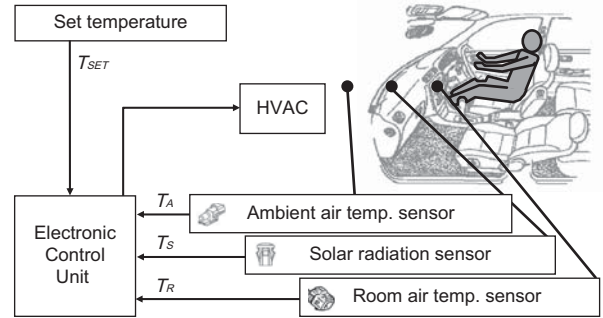


Fig. 10 Conventional climate control system

IR センサで熱負荷を検知する場合の制御では，これを次のように変換する。

$$TAO = K_{SET}T_{SET} - K_I T_I + C \dots (2)$$

ここで， $T_I$  は IR センサの検知温度， $K_I$  はゲインである。  
式 (1) は次のように変形できる。

$$TAO = K_{SET}T_{SET} - K_I \left( \frac{K_R}{K_I} T_R + \frac{K_A}{K_I} T_A + \frac{K_S}{K_I} T_S \right) + C \dots (3)$$

$$= K_{SET}T_{SET} - K_I (F_R T_R + F_A T_A + F_S T_S) + C \dots (4)$$

ここで  $F_R$ ， $F_A$ ， $F_S$  はゲインの比を表す。

この式より，IR センサの検出値を  $F_R T_R + F_A T_A + F_S T_S$  と室内空気温度，外気温度，日射量を代表する表面温度をある割合ずつ検出するようにすれば良いことが分かる。

Fig. 11 は外気温度変化時の車室内各部位表面温度，Fig. 12 は日射量変化時の車室内各部位表面温度変化を示している。外気温度変化時はガラス温度と天井が，日射変化時には日射が直接当たるトリム等の内装とガラス温度が

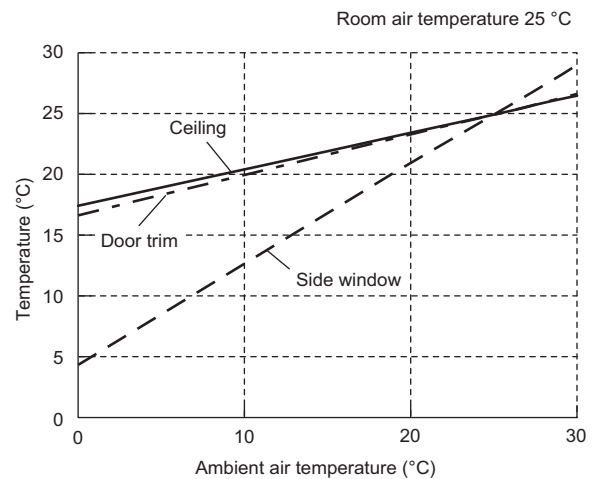


Fig. 11 Interior surface temperature sensitivity with changes in ambient air temperature

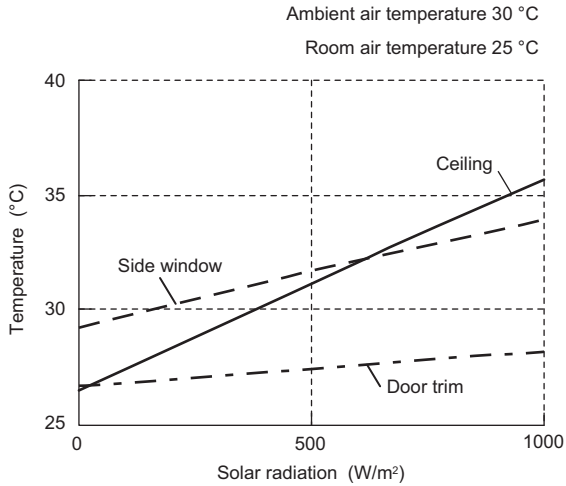


Fig. 12 Interior surface temperature sensitivity with changes in solar radiation

相関が高いことが分かる。このことから、内気温と相関が高い乗員表面や内装、外気温や日射と相関が高い天井、トリム、ガラスが IR センサの視野に入り、それぞれの面積割合が式 (1) と式 (4) が等価になるように含まれていれば良い。

Fig. 13 および Fig. 14 はこのようにして実現した制御の外気温補正および日射補正効果を従来制御と比較したものである。IR センサによる制御では従来の制御とほぼ同等の制御が可能となる。

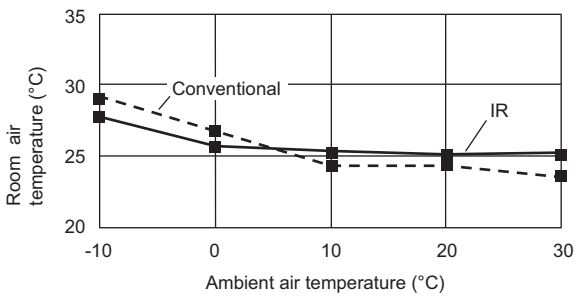


Fig. 13 Results of ambient air temperature correction

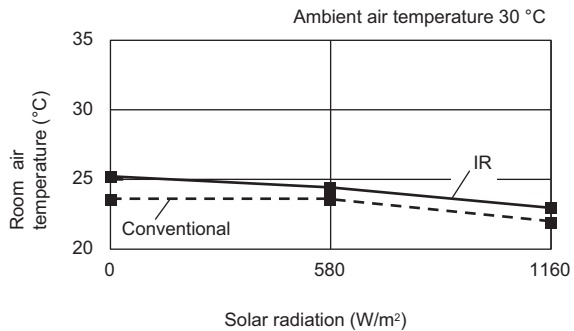


Fig. 14 Results of solar radiation correction

## 5. マトリックス IR センサ

次に、新しく開発したマトリックス IR センサについて述べる。マトリックス IR センサは、一つのセンサで6箇所の温度を独立に検知できる。Fig. 15 にセンサの写真を、Fig. 16 にセンシングエレメント周辺の断面図を示す。一つのセンサに一つのサーモパイルチップが用いられている点はシングル IR センサと同じであるが、このサーモパイルチップ上に6組の温接点と冷接点が設けられている。広角度に分布する対象物から放射された赤外線がこの六つの温接点に集中させるため、レンズが用いられている。また、意匠上の見栄え向上のために樹脂製のカバーで覆われている。

Fig. 17 にこのセンサの検知領域を図示する。最大の視野角は 118° である。この図はセンサのサーモパイルに水平な面の検知領域を示している。Fig. 18 に、実車でこのセンサ



Fig. 15 Matrix infrared sensor

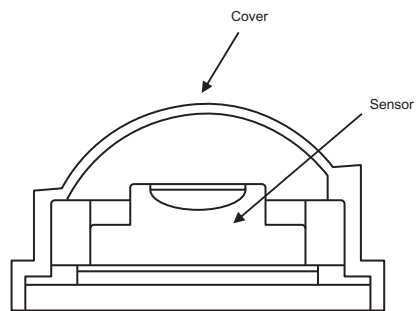


Fig. 16 Cross sectional view around the sensing element

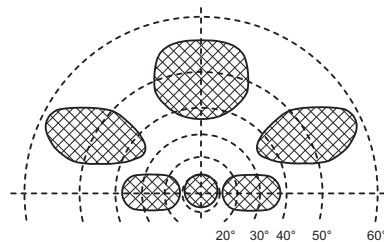


Fig. 17 Sensing area of the matrix infrared sensor

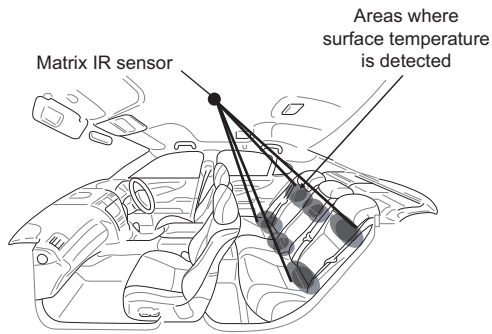


Fig. 18 Installation position and measuring areas of the Matrix IR sensor



Fig. 19 Sensor installed in a vehicle

取り付け位置とセンサの視野対象範囲を図示する。このセンサは、一つのセンサで後席左右乗員とシート中央部の上下2点ずつの温度を検知する。Fig. 19には実車でのセンサ搭載状態の写真を示す。

このセンサは、車室内空調が安定している定常時には対象物温度を $\pm 1$ ℃の精度で検出することができる。Fig. 20にクールダウン過渡時のセンサ検出温度と対象物温度を比較する。条件は外気30℃、日射1000 W/m<sup>2</sup>で車室内初期温度は50℃である。これから、クールダウンの厳しい条件下でも検知温度誤差は $\pm 3$ ℃以内に収まっている。

次にこのセンサを用いた制御について述べる。Fig. 21にシステムの概要を示す。マトリックスIRセンサで検知された6箇所の温度はエアコンECUに送られ、その情報を基にエアコンECUは4席独立エアコンと後席用クーラを制御する。このマトリックスIRセンサでは、3章で述べたように従来より温感に近い制御が可能であるが、ここでは後席乗員の熱履歴制御について述べる。

Fig. 22に熱履歴制御を行う場面を示す。夏の暑い車外から空調の効いている車室に乗り込んだ場合、それ以前から乗車していた人と比べて身体は暑いので、それに応じて空調を強めかけると快適性は向上する。冬にも同じような場合がある。

IRセンサは、乗車した乗員の温度を検知し、その表面

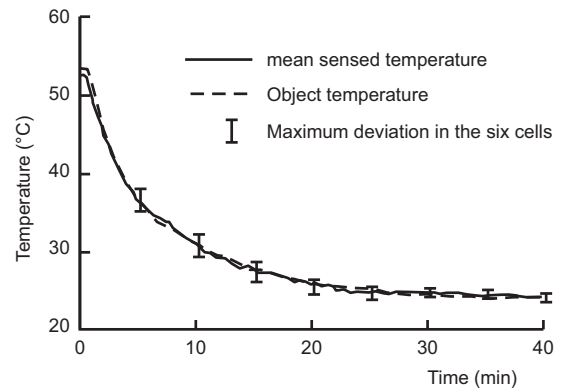


Fig. 20 Comparison of the sensor transient condition

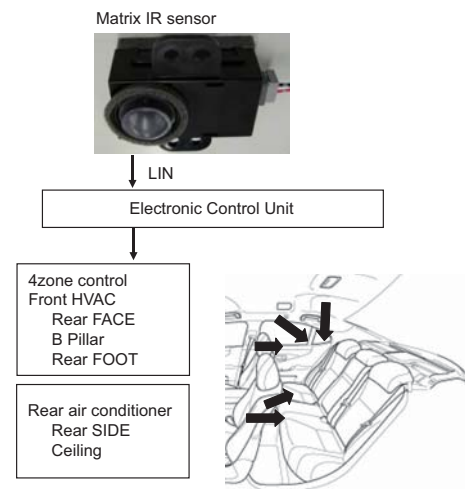


Fig. 21 Overview of the system

温度が低い時は空調を暖かめ、高い時は涼しめに制御する。Fig. 23に後席乗員乗車時の制御の変化を示す。IRセンサのある場合はより暖かめに制御していることが分かる。このときの乗員の温冷感変化をFig. 24に示す。IRセンサ

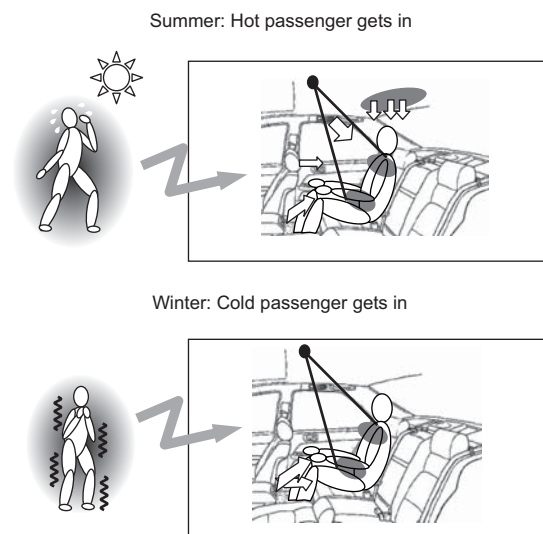


Fig. 22 Illustrations of thermal history control

<参考文献>

- 1) Toyofuku, K., Iwata, Y., Hagsato, Y., Kumasaka, T.: "The "Night View Systems" Using Near-Infrared Light" , SAE paper 2003-01-0018 (2003).
- 2) Aoki, N.: "Perspectives For Head-up Display" , 11th World Congress on ITS NAGOYA AICHI2004 Proceedings (2004).
- 3) Tanaka, H., Kitada, M., Taniguchi, Y., Ohno, Y., Shinagawa, T., Aoki, H.: "Study on Car Air Conditioning System Controlled By Car Occupants Skin Temperatures Part II: Development of a New Air Conditioning System" , SAE paper 920170 (1992).
- 4) Taniguchi, Y., Aoki, H., Fujikawa, K., Tanaka, H., Kitada, M.: " Study on Car Air Conditioning System Controlled By Car Occupants Skin Temperatures Part I: Research on a Method of Quantitative Evaluation of Car Occupants Thermal Sensations by Skin Temperatures" , SAE paper 920169 (1992).
- 5) Hirota, M., Nakajima, Y., Saito, M., Satou, F., Uchiyama, M.: "Thermoelectric infrared imaging sensors for automotive applications" , Quantum Sensing and Nanophotonic Devices. Edited by Razeghi, Manijeh; Brown, Gail J. Proceedings of the SPIE, Volume 5359 (2004), pp. 111-125.
- 6) Olesen, B.W., Brager, G.S.: "A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004" , ASHRAE Journal August 2004 (2004), pp. 20-26.
- 7) Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y.: "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response" , ASHRAE Trans., 77 (1) (1976), pp. 247-262.

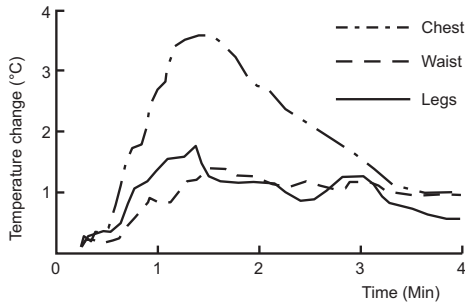


Fig. 23 Temperature change over time with thermal history control activated

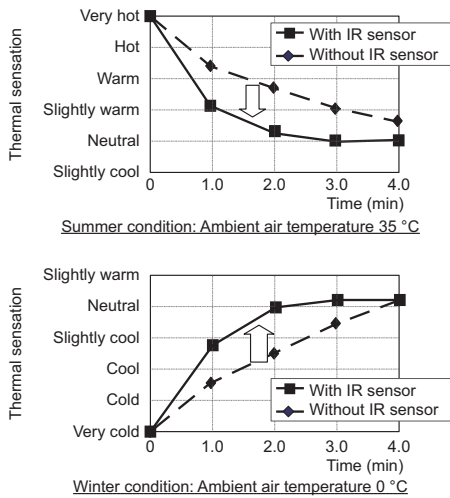


Fig. 24 Effects of thermal history control

のない場合は制御変化が無く、温感回復までに4分以上かかるが、ある場合は2分で回復していることが分かる。

6. むすび

以上で、自動車用赤外線温度センサの概要と、空調熱負荷検知による空調制御、乗員着衣表面温度検知による空調制御への応用例について述べた。

乗員着衣表面温度検出による空調制御は、従来の内気温度センサと日射センサを用いた空調制御と比べると、各席乗員まわりの空気温度、風速と乗員の状態を反映できる点で優れており、特に乗員が乗車したときの温熱状態を検知することで、乗員を早く快適な状態にできることが示された。

赤外線センサに関しては、今後も快適性向上への応用と、更には、乗員皮膚温度検知による乗員の温熱快適性を基準とした空調制御への応用が期待される。

シングル IR センサの開発においては Melexis Microelectronic Systems の、マトリックス IR センサの開発においては日本セラミック株式会社の協力を得た。ここに記して深く感謝する。



<著 者>



片岡 拓也  
(かたおか たくや)  
冷暖房開発1部 工学博士  
車室内快適性に関する製品開発



熊田 辰己  
(くまだ たつみ)  
熱エレクトロニクス開発部  
空調用各種センサの開発