

# 特集 自動車室内環境の日射シミュレーション

## Numerical Simulation of Insolation in an Automotive Cabin Environment

浅野秀夫  
Hideo ASANO

北田基博  
Motohiro KITADA

新聞 敦  
Atsushi SHINMA

武内裕嗣  
Hirotsugu TAKEUCHI

Comfort in an automotive cabin is affected by solar radiation much more than that in a residential room. To obtain the effects of solar radiation quantitatively under various condition is essential in creating comfortable cabin environment. First of all, this paper introduces a quantitative method, which simulates passenger heat amount given by sun light at various solar positions and intensities with a vehicle facing the sun in various directions.

Next, this paper introduces quantitative method, which simulates passengers thermal sensation, skin temperature and also heat amount given by sun light at various solar positions.

**Key words** : Air Conditioning, Computer Applications, Solar Isolation, Heat Flow Rate, Computational Fluid Dynamics(CFD), Amenity, Comfort

### 1. まえがき

地球規模の環境保護が最重要課題となりつつある今日、自動車室内環境の向上についても省資源化と無縁ではありえない。とりわけ温熱感を中心とした快適性向上にはエネルギー消費を抑制しつつ達成する技術の追究が肝要である。

それには、乗員の快適性を最も阻害する要因である、窓ガラスからの日射、車体壁からの輻射熱などの外的要因にいかに対応した空調制御を行うかがキーポイントになる。

これまで、日射と空調の両面から乗員快適性の実験的研究が多くなされ、近年では数値解析を利用する動きもある<sup>1)</sup>。一方輻射熱に関しては、一般建築物室内を対象にした研究<sup>2),3)</sup>が多い。しかし、自動車室内を対象として、日射と人体温熱感の面から定量的・分布的に快適性を研究されているものは極めて少ない。

そこで、各種条件下における、日射の影響を定量的に把握し、快適な自動車室内環境を確立することを目的として、乗員が日射により受ける熱量を、太陽の位置、強度、及び自動車の進行方向から計算する手法を確立した。

更に日射の人体内部への影響を温感に結び付けた乗員温感の予測手法を開発した。

### 2. 日射受熱量の計算手法

日射が自動車に対してどの方向からどれくらいの強さで照射しているかという太陽に関する情報の計算、

(社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術」Vol.52 No.3 (1999.3)より加筆転載

自動車室内のモデル化、及び日射を受ける部位の判定を組み合わせて、乗員が受ける熱量をシミュレーションする。

#### 2.1 日射情報の計算

日射には、太陽光が直接到達する直達日射と、大気圏で散乱されて到達する天空輻射がある。更に、ボンネット・インパネ・ルーフ等からの反射があるが、本報では、乗員への影響が最も強い直達日射のみを考慮した。

Fig.1中に示す仰角 $\theta$ ・左右角 $\phi$ ・日射強度 $I$ 、日射ベクトル $\mathbf{e}_s$ 、などは式(1)~(5)で表される<sup>4)</sup>。

$$\sin \theta = \sin \zeta \cdot \sin \delta + \cos \zeta \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (1)$$

$$\sin \alpha = \cos \zeta \cdot \sin t / \cos \theta \quad (2)$$

$$\phi = \alpha - \beta \quad (3)$$

$$I = I_0 P^{1/\sin \theta} \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_s = (\cos \theta \cdot \cos \phi, -\cos \theta \cdot \sin \phi, -\sin \theta) \quad (5)$$

$\theta$  : 仰角  $\zeta$  : 緯度  $\delta$  : 赤緯  $t$  : 時角

$\alpha$  : 方位角  $\phi$  : 左右角  $I$  : 日射強度

$\beta$  : 車両進行角(対南)  $P$  : 大気透過率

$I_0$  : 大気圏外日射量  $\mathbf{e}_s$  : 日射ベクトル

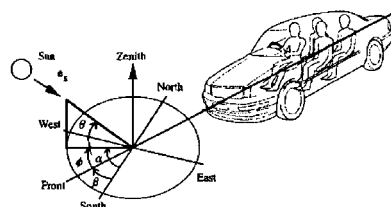


Fig.1 The axis of coordinates

2.2 自動車室内の日射解析用モデル

普通乗用車に4人が乗車していると仮定し、その室内部分のみを取り出し、検定マネキンJSAE-3DM相当の人体とシート、普通ガラス等の各表面に四辺形の面要素を作成する。(Fig.2)

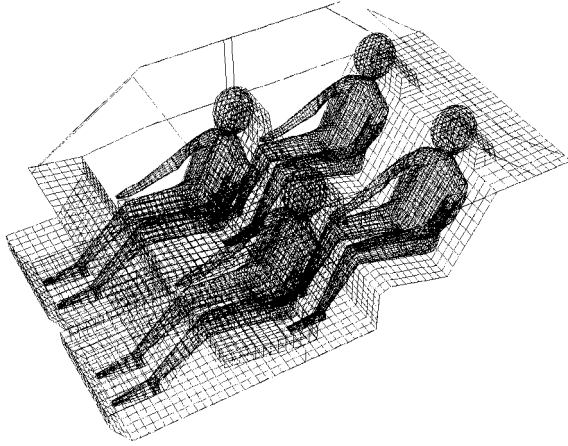


Fig.2 Surface mesh of automotive cabin

2.3 受熱量分布計算

日射が、自動車室内のどの部分に照射しているかを対向判定と障害物判定により求め、その強度を照射角、ガラスの減衰等を考慮し算出する。

2.3.1 対向判定

日射ベクトル  $e$  が  $(1, 0, 0)$  となるようにモデル全体を座標変換し、変換後の各要素面の法線ベクトルが式(6)を満たしていれば要素と日射は対向していると判定できる。

$$e_{ix} < 0 \tag{6}$$

$e_{ix}$  : 要素  $i$  の法線ベクトルの  $X$  成分

2.3.2 障害物判定

対向判定で座標変換された要素  $(i)$  と要素  $(j)$  の間に式(7)が成り立ち、かつ要素  $(i)$  の中心点と要素  $(j)$  の4隅点の間に式(8)が成り立つ時、つまり日射側から見て要素  $(j)$  が手前にあり、要素  $(j)$  の作る4辺形内に要素  $(i)$  の中心点がある場合に要素  $(j)$  は障害物であると判定できる (Fig.3)

$$C_{jx} - C_{ix} < 0 \tag{7}$$

$$\vec{C}_{ijm} \times \vec{C}_{ijn} > 0 \tag{8}$$

$(m,n)=(1,2)(2,3)(3,4)(4,1)$

$C_{jx}, C_{ix}$  : 要素  $j$  要素  $i$  の中心点の  $X$  座標

$J_m, J_n$  : 要素  $J$  の4隅点

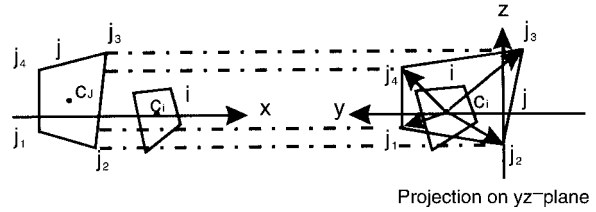


Fig.3 Discrimination of insolation

2.3.3 ガラス透過率

日射はガラスを通して車室内に侵入するが、ガラスに対する入射角により日射の減衰度合いは大きく異なる。このため、照射される部分のガラスによる減衰を考慮する。Fig.4に示すガラスの透過率特性を式(9)で表し、各要素  $(i)$  がどのガラス要素  $(j)$  を通して日射が受けているかは、2.3.2項の障害物判定を利用する。

更に、要素への入射角を考慮し、要素  $(i)$  が受ける日射受熱量 (以下、受熱量と呼ぶ)  $Q$  を式(10)で求める。

$$i = F(\lambda_i) \tag{9}$$

$$Q_i = i \cdot I_i \cdot A \cdot \sin \gamma_i \tag{10}$$

$i$  : 透過率,  $\lambda$  : ガラス入射角,  $Q$  : 日射受熱量  
 $A$  : 要素面積,  $\gamma$  : 要素入射角

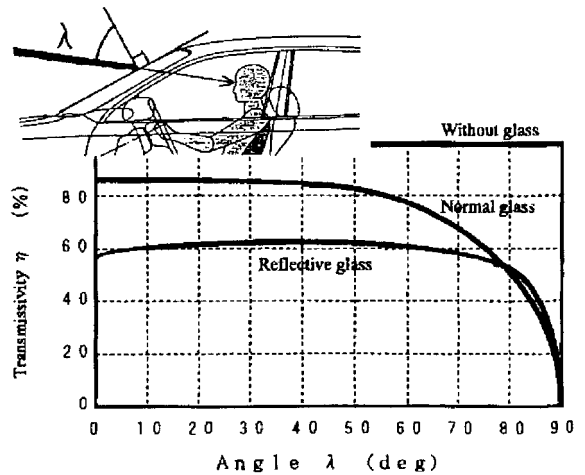


Fig.4 Transmissivity of glass

3. 日射のシミュレーション結果

3.1 実測値との検証

以上により得られた計算結果に対して、実験との比較検証を行った (Fig.5)

実験は、赤外線ランプにて  $1 \text{ kW/m}^2$  の模擬日射を自動車に照射し、乗員各部位の受熱量を熱流束センサ

で測定した。更にこの測定値に、頭部、胴部、足部の熱吸収率0.9, 0.5, 0.5を乗じている。

$$Q_{Total} = Q_{Head} + Q_{Body} + Q_{Foot} \quad (11)$$

計算結果は、受熱量の数値・傾向ともに実験値と良く一致しており、計算手法が良好であることが確認できた。

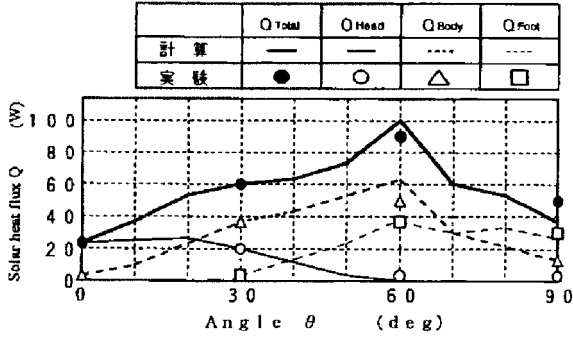


Fig.5 Relations between  $\theta$  and Q

Fig.6は単位面積あたりの受熱量の分布図であり、仰角60°の計算例であるが、頭部はルーフの影になり、胸部から下半身に日射が当たることが明確に表示される。

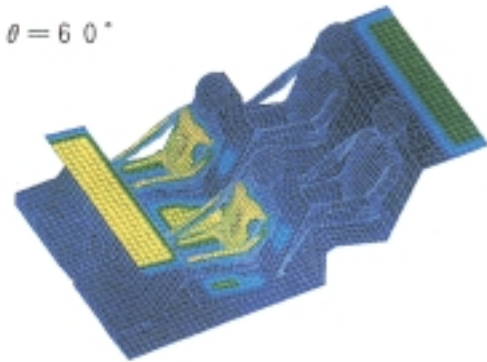


Fig.6 Calculation result ( $\theta = 60^\circ; \phi = 0^\circ$ )

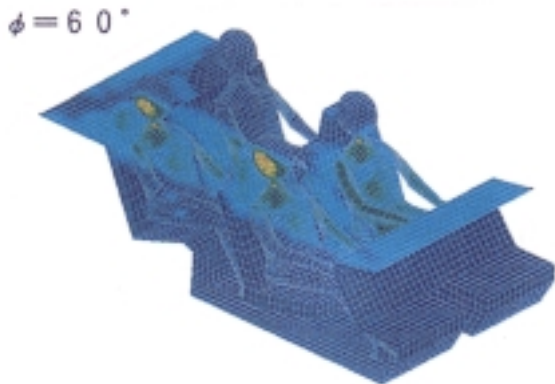


Fig.7 Calculation result ( $\theta = 30^\circ; \phi = 60^\circ$ )

### 3.2 車両進行角・着座位置による違い

同一の日射条件においても、車両進行角、及び乗員の着座位置により日射の当たり方が異なる。一例として、左右角の違いによる計算結果をFig.7に示す。計算は仰角を30°に固定し、日射量を1kW/m<sup>2</sup>とした。

Fig.7に見られるように前席乗員と後席乗員とは、受熱量の差異が大きいがわかる。この結果を温熱感に最も影響を与える頭部の受熱量にてまとめ、Fig.8に示す。例えば、Fig.8中の運転席乗員Aの受熱量が左右角30°で低下しているのは、ピラーの影響によるものと思われる。

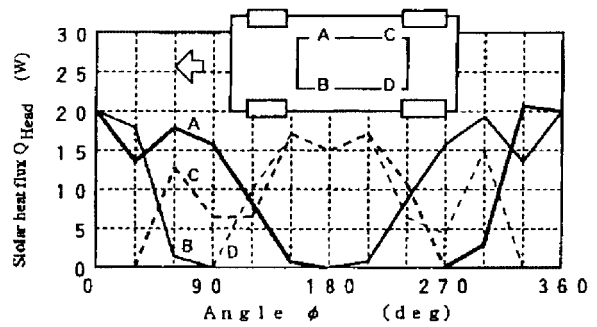


Fig.8 Relations between  $\phi$  and  $Q_{Head}$

### 3.3 場所・日時による違い

本シミュレーションの特長のひとつに任意の場所、日時における受熱量が計算予測できるという点がある。そこで、例として北海道陸別町2月午後3時、についてシミュレーションを行った結果をFig.9に示す。相当な低温が予想されるが、頭部のみの受熱量が高く、温感の低下が懸念される状況であることが、机上において予測可能であることを示している。

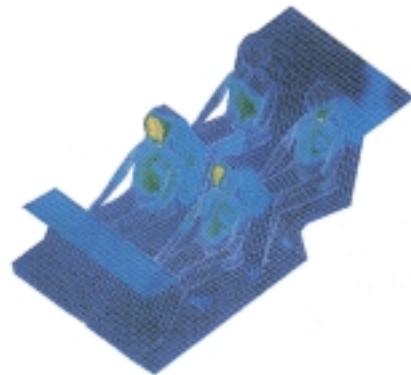


Fig.9 Calculation result (Hokkaido Rikubetsu town)

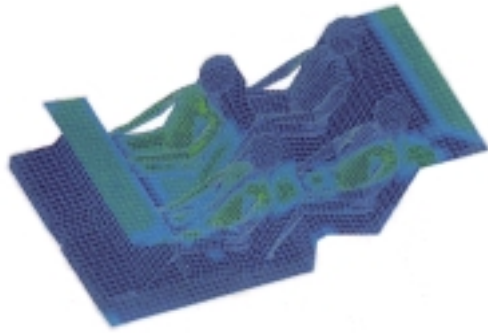


Fig.10 Calculation result (Reflective glass)

### 3.4 ガラス透過率の影響

Fig.4に示した各種ガラス特性の違いにより、受熱量に差異が生じる。

Fig.10に4面に熱線反射ガラスを配置したモデルでの計算結果を示す。Fig.6の普通ガラスの場合と比較して、全般的に受熱量が低減している。

## 4.日射から温感への展開

以上、日射の乗員への受熱量分布のシミュレーション手法を開発できた<sup>5)</sup>。

引続いて、その受熱量が乗員にどのような温感をもたらすのか、推定する手法を開発する。

そのために、まず人体がどのように温感を知覚するのか、基本的な部分から考察する。

### 4.1 温感の知覚と調節のメカニズム

人体の温熱感の発生メカニズムを生理学的に見てみると、温感Fig.11に示すように、全身の温熱的快適性と部分温感の2つがある。

全身の温熱的快適性(全身温感)は、視床下部付近の血流温度を検知する温受容器等から脳に伝えられ、決定される。また、部分温感は、皮膚温を検知する皮膚部にある冷覚、温覚によって決定されるといわれている。そして、この血流温度は、冷、温覚からの信号により、調節され、最終的に脳に流入する血流温度を適正に保っている。

例えば、寒い場合は動脈に近い静脈に血液が流れ、温度の高い動脈と熱交換することで血流温度を上昇させている。逆に、暑い場合は、皮膚表面近くの静脈に流れ、外部との熱交換で冷やされ、血流温度を低下させている。

このような人体の体温調節は、生命維持のために行われるわけであるが、日射がこの体温調節機構にどのような影響を与えるかについて調査した。

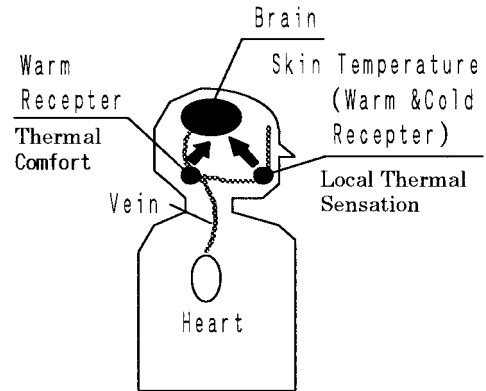


Fig.11 Sensory mechanism of thermal comfort

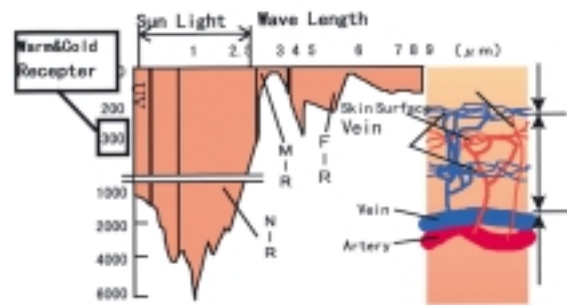


Fig.12 Solar transmissivity of skin

### 4.2 日射の皮膚温への作用メカニズム

日射の皮膚への透過性を見てみると、Fig.12に示すように、日射の波長域では、皮膚表面からの浸透深度が、1000 ~ 6000 μmと冷覚、温覚の存在する300 μmよりもかなり深い。

このため、愛知医科大学小川名誉教授の知見によると、日射が皮膚に照射しても、冷覚、温覚への直接の刺激による血流温度調節が活発とならず、皮下組織で血流温度が日射受熱量の蓄積で上昇した時点で初めて温感中枢が知覚する、すなわち全身温感が上昇したと判断される。

以上をまとめると、日射は皮膚の特定部分に照射されるが、照射された皮膚部位の部分温感より、全身温感を緩やかに上昇させると考えられる。

従って、皮膚表面温度すなわち皮膚温は、表皮・真皮・皮下組織の熱量と静脈・動脈の血流温度調節及び外気との熱バランスに支配される。

## 5. 皮膚温と温感の実験解析

以上のように、皮膚温と温感の間には複雑かつ多様な要因が介在するが、総合的に見て、両者の間に強い

相互関係があることがわかる。

5.1 皮膚温と温感の相関関係

Fig.13は、被験者280人による人間の温感と周囲温度の関係を示し、また、Fig.14は同様に人間の温感と頭部皮膚温の関係を示したものである<sup>6)</sup>。

周囲温度は温感の要因の一部であるが、頭部皮膚温の方が的確に温感を表していることがわかる。

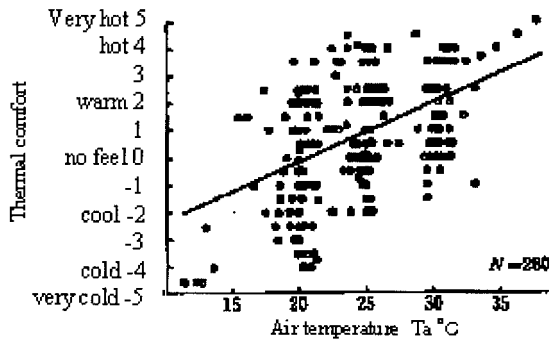


Fig.13 Relations between thermal comfort and Ta

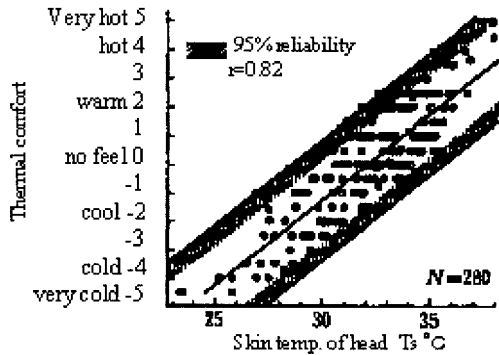


Fig.14 Relations between thermal comfort and skin temp. of head

5.2 中立温感を得る気流・温度特性

空調により日射の影響を排除し、中立温感を得るのに必要な気流・温度特性を、実験により把握した。実験方法としては、被験者が中立温感を得る気流速度を選択する方法とした。被験者は、健康な21歳から60歳までの男女20人(青年男性8人、青年女性4人、高齢者男性4人、高齢者女性4人)に3回ずつの測定を行った。

測定結果 Fig.15, 16)に示すように、男性の場合、青年と高齢者を比較すると高齢者は特に、31~32の気流温度が高い場合、日射量変化に対する気流速度の変化は少ない。

この結果は、生理学的見地から見た多くの研究<sup>7)</sup>と比較すると「高齢者は温度受容器の数が青年に比べ少ないため、日射量変化に一般的に敏感ではない」と同様な傾向が見られた。

また、性別の差を見てみると「青年では男性に比べ女性は皮膚温度が上がりやすく、温度・日射変化に強い」ことも同様の実験結果から得られた。以上より、日射量に対する気流速度が明確化でき、気流を煩わしいと感じない領域で、日射の影響を排除できる特性が明らかになった。

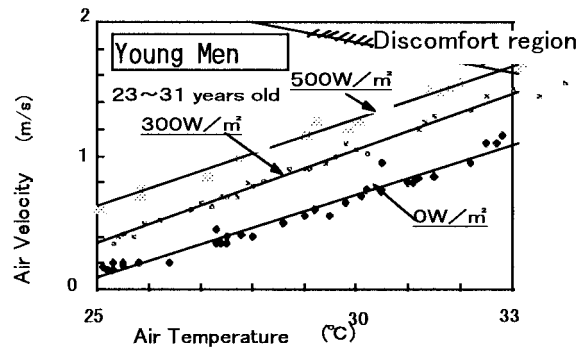


Fig.15 Comfort region (Young men)

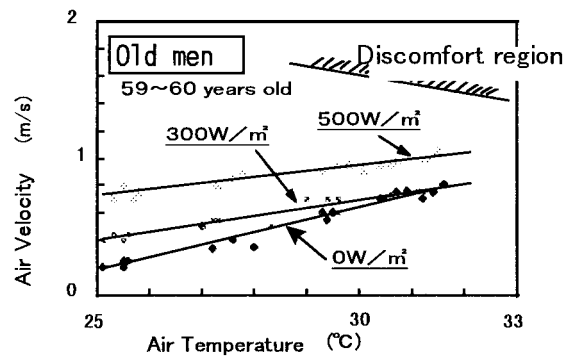


Fig.16 Comfort region (Old men)

6.1 バス室内の空調解析用モデル

形状としては、観光バスの運転席及び乗客席第1列の合計5席分の室内空間を想定した。日射解析用車体表面計算格子と熱流れ解析用に室内空間にも計算格子を作成した。(Fig.17)

解析ソフトは、当社内で使用実績のあるSTAR-CDを使用した。総メッシュ数約12万点、全計算時間は約6時間である。計算の流れをFig.18に示す。

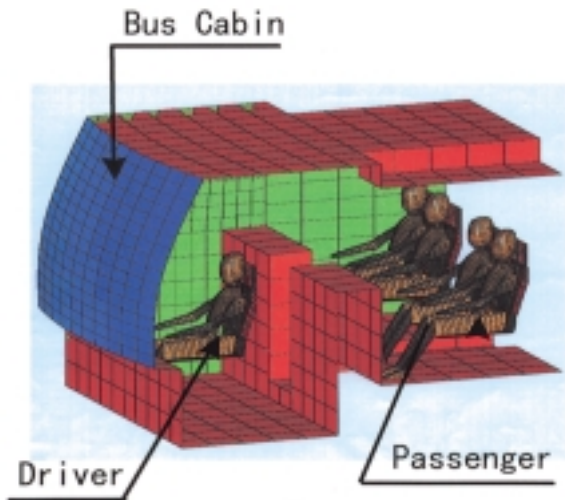


Fig.17 Surface mesh of bus cabin

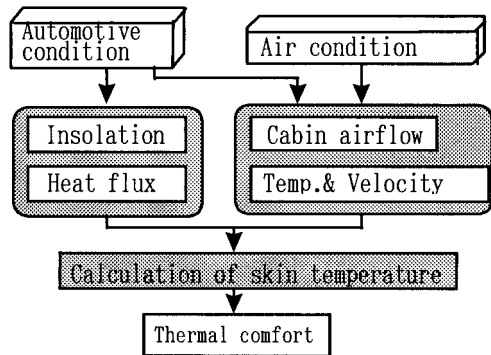


Fig.18 Calculation flow of thermal comfort

6.2 実測値との検証

計算精度を検証するために、気流温度、速度の測定結果と比較した結果、誤差 ± 10% で実験結果を推定可能であることがわかった (Fig.19)

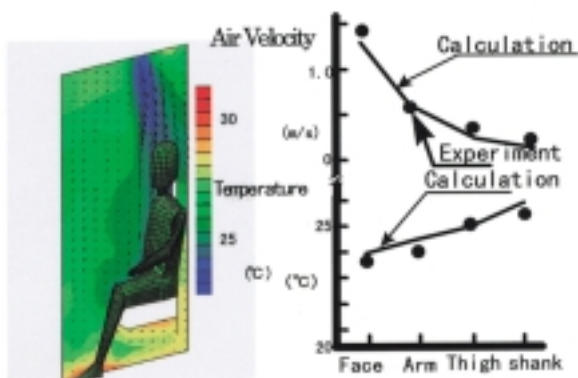


Fig.19 Temp. and velocity distribution

7. 温感のシミュレーション結果

7.1 実測値との検証

また、日射受熱量については、誤差 ± 4% 以内で推定可能となった。以上、シミュレーションにより、気流温度、速度、日射受熱量の推定が可能になったので、次に皮膚温度、温感の検証をした。皮膚温度、温感の推定には、人体熱モデルを考え、バス空調条件にて、高齢者・性別の差として、基礎代謝量<sup>7)</sup> 着衣量<sup>7,8,9)</sup> 高齢者・性別ごとの各部位の温感式を与え検証した (Table 1)。

Table 1 condition

|             | basal metabolism (W/m <sup>2</sup> ) | cloth(clo) |
|-------------|--------------------------------------|------------|
| Young men   | 41.4                                 | 0.56       |
| Young women | 37.8                                 | 0.26       |
| Old men     | 39.2                                 | 0.66       |
| Old women   | 36.0                                 | 0.30       |

1clo = 0.18[m<sup>2</sup>・h・kcal<sup>-1</sup>]

衣服の熱抵抗を表わす実用単位。冬衣の標準的な組合せが 1clo。

結果としては、皮膚温度・温感は、Fig.20 に示すように、各部の温感はほぼ一致しており、定常時の温感を推定可能である。また、同一空調条件において、下半身の冷えにより、青年男性と高齢女性に全身温感 0.2 ランクの差がみられた。

特に、高齢者女性は、下腿部の皮膚温が低いにもかかわらず温感は、青年男性よりも暖かめにあるという温感特性もシミュレーションできている。

8.まとめ

自動車室内の日射受熱量解析手法と皮膚温からの温感解析手法及び自動車室内空調の空気流れ解析を組み合わせた、乗員の日射に対する温感数値シミュレーション手法を開発した。

この手法により、自動車においては、乗員の快適性向上と省資源を両立する効果的な空調制御の指針が得られ、同様に観光バスにおいては乗客の高齢化・個人差の拡大に合わせた適切な空調制御の指針が得られる。

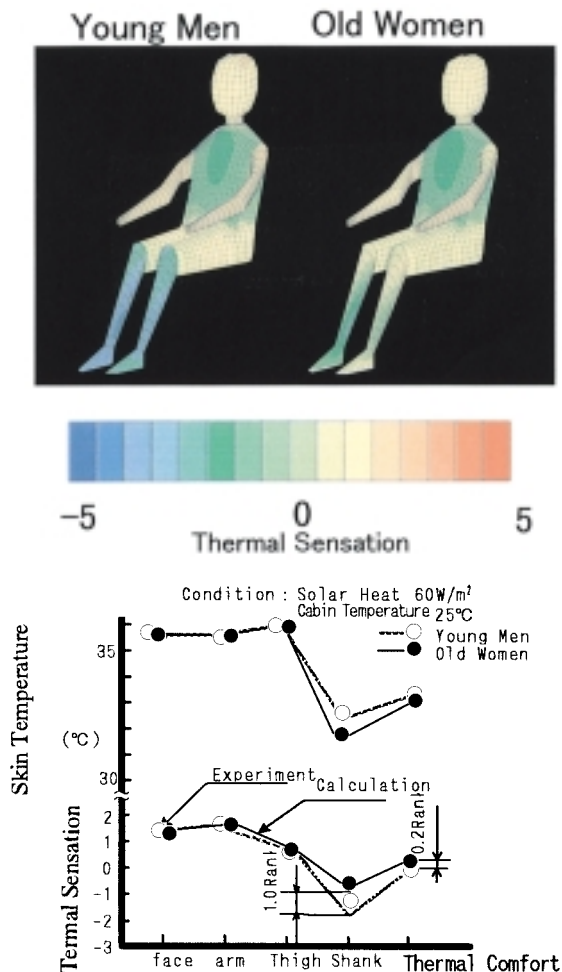


Fig.20 Calculation result of thermal comfort and skin temp.

### 9. あとがき

皮膚温・温感推定の部分には実験値を入れたが、今後、サンプリング数の増加により精度向上させるとともに非定常時の温感解析を進める。

最後に、本研究にあたり、検証実験の被験者になられ、ご協力いただいた関係各位及び生理学的見地からご指導いただいた愛知医科大学の小川名誉教授に厚く御礼申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) 小森谷：自動車技術会学術講演会前刷集, 924079, (1992)
- 2) 尾関他：第5回計算力学シンポジウム講演論文集, P.131(1991)
- 3) 松島他：第6回熱工学シンポジウム講演論文集, P.51, (1993)
- 4) 井上：空気調和ハンドブック, P121(1991)
- 5) 新聞, 浅野：自動車技術会学術講演会前刷集, 9436404, (1994)
- 6) 田中, 北田他：自動車技術会学術講演会前刷集, 912212(1991)
- 7) 中山昭夫：温熱生理学, P.35(1983)
- 8) 宮沢他：日本家政学会誌, Vol.46, P.447(1995)
- 9) 岩重他：日本家政学会誌, Vol.46, P.455(1995)

#### <著者>



浅野 秀夫  
(あさの ひでお)

冷暖房事業部  
エアコン仮想設計システムツールの開発に従事。



新聞 敦  
(しんま あつし)

冷暖房事業部  
エアコン強度振動解析要素技術の開発に従事。



北田 基博  
(きただ もとひろ)

冷暖房事業部  
エアコン流れ解析要素技術の開発に従事。



武内 裕嗣  
(たけうち ひろつぐ)

冷暖房技術4部  
工学博士  
特殊車両用空調の開発・設計に従事。