自動車室内温熱環境数値モデルを用いた 換気風速・換気風向の影響評価* (運転席近傍の温度低減効果の検討)

若嶋 振一郎^{*1}, 川口 清司^{*2}
奥井 健一^{*3}, 岡野 孝広^{*4}

Numerical Analysis of the Ventilation Effect and Its Dependencies on the Inlet Flow Velocities and Directions of the Inlet Ventilation Duct Shin-ichiro WAKASHIMA^{*5}, Kiyoshi KAWAGUCHI, Ken-ichi OKUI and Takahiro OKANO

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Ichinoseki National College of Technology,
Takanashi, Hagisho-aza, Ichinoseki-shi, Iwate, 021-8511 Japan

In a car under summer solar radiation, it is well known that temperature become very high and is found to be over 90 degrees C on the top of the front dashboard and also air temperature around the driver's seat were over 65 degrees C. Thus, a ventilation system is one of the important ways for keeping comfortable thermal environment of a car cabin. In the previous paper, numerical model of the parking automobile under summer solar radiation have been developed. Numerical simulations were conducted and the temperature distribution was examined in cases with- and without- ventilation. Further, numerical results of the model were compared with the measurements conducted in summer using a sedan-type car. In this paper, we have conducted additional numerical simulations of the cases with ventilations and examined the ventilation effect and its dependencies on the inlet flow directions and velocities of the inlet duct for more efficient and smaller flow rate. The results show that temperature mitigation rate highly depends on the inlet flow directions, particularly at higher inlet flow velocity cases.

Key Words: Heat Transfer, Air Conditioning, Thermal Radiation, Solar Radiation, Automobile, Ventilation

1. 緒 論

一般に良く知られている事実であるが、夏期炎天下においては、屋外駐車時の自動車室内空間は非常に高温となり、過酷な温熱環境になる。また、その高温環境により、車室内に居る乳幼児や高齢者の熱中症なども毎年報告されており、深刻な問題となっている⁽¹⁾。さらに、高温湿潤気のために、運転席に乗り込んだ際のドライバーの不快感が非常に大きく、乗り込んでから暫く間はエアコンの空調効果も期待できない状態となることがしばしば見受けられる。

この状況に対して、従来はごく一部の自動車メーカーでソーラーベンチレーションシステムと呼ばれる太陽電池と電動モーターファンを併用した換気装置を取り付けていたが、導入コストやデザインといった問題点からほとんど一般化するには至っていない。より日常的には、日射を反射させるアルミ蒸着シートをダッシュボード上に設置したりしているが、車室内に設置する場合が多く、必ずしも温度上昇に防止効果があるとは言えないのが現状である。また、

駐車中にエンジンカーやハイブリッドカーのカーエアコンを動作させることは、都市温暖化問題、地球温暖化問題、エネルギー・資源枯渇問題の観点から好ましくない。一方、単純に自然換気のために窓ガラスを開けておくことも、防犯上の観点から現実的ではない。

以上の背景を踏まえ、駐車中においても、エンジンやバッテリー動力を必要とせずに車室内換気を行うことが可能になれば、駐車時あるいは運転開始時の車室内温熱環境の改善に大きく資することが可能となると言える。そこで本研究では、太陽エネルギーを利用し、駐車中でもエンジンやバッテリー動力を必要としない新しい換気装置を開発し、駐車時に利用することを目的としている。具体的には、太陽日射によって自動車内外に発生する温度差を熱源として冷媒タービンを駆動し、これにより換気ファンを回転させる新しい換気システムを検討している。

この換気システムの設計に先立ち、夏期の日射を受ける自動車室内に対して、どれだけの換気量・換気風向であれば、どれくらいの温度低減が可能となるか見積もる必要がある。前報^{(2),(3)}では、まず、日射を受ける自動車室内空間の状態を把握し、ある日射条件における車室内温度場(表面温度、空気温度)を再現するために、日射を強く受ける車室内温熱環境の数値モデル⁽⁴⁾⁻⁽¹³⁾の構築を行い、

* 原稿受付 2007年4月5日。

^{*1} 正員、一関工業高等専門学校機械工学科(〒021-8511 一関市萩荘字高梨)。

^{*2} 正員、富山大学工学部機械知能システム工学科。

^{*3} 正員、富山大学工学部機械知能システム工学科名誉教授。

^{*4} 富山大学大学院理工学研究科。

E-mail: swaka@ichinoseki.ac.jp

換気有り・無しの場合での温度計測結果との比較を行って、その妥当性を検討し、開発した数値モデルが一定の予測精度を持っていることを確認した。

自動車室内全体の温熱環境改善という観点からは、助手席や後部座席のような複数の位置での評価を行うべきであり、また、温度だけでなく、ふく射量、車室内外の熱伝達量等も評価して行くべきであるが、本論文ではまず、換気有りの場合について、換気方向・換気風量の温度低減効果への影響に絞って検討を行った。さらに、もっとも自動車に乗り込む頻度の高いと考えられるドライバーに対する効果を考え、運転席温度についてのみ検討を行った。

具体的には、車室内前方および後方に換気ダクトをそれぞれ1つ設け、後方から一定風量の強制排気を行う換気状態を想定し、3通りの換気風量の場合に、それぞれ前方の空気流入ダクトからの空気流入方向および流速をパラメータとして換気の数値シミュレーションを行い、ドライバー頭部付近の空気温度低減効果に関して比較検討を行ったので、それらの結果を報告する。

2. 数値解析モデルおよび計算条件

2・1 解析モデルの概要 本研究で使用する数値モデルの詳細については前報⁽²⁾に述べたが、図1に本論文で用いた自動車室内の計算モデルを示す。太陽が南中時に水平・真南向きとなる駐車方向を想定した典型的な5人乗りセダン型乗用車の車室内を計算対象とし、図中に示した位置（フロントダッシュボード、リアダッシュボード）にそれぞれ空気流入ダクト（φ80mm、車室内開口部中心座標 $x=1.94, y=-0.65, z=0.02$ ）と空気流出ダクトを設置し、後部ダクト（φ100mm、車室内開口部中心座標 $x=0.21, y=0.5, z=0.0$ ）から換気流量に相当する流速で強制排気する場合の計算を行った。

2・2 基礎方程式および計算手法 本計算で用いた基礎方程式は、代表空気密度 $\rho_0=1.2[\text{kg/m}^3]$ 、代表空気温度 $T_0=300[\text{K}]$ として、有限体積法に基づくBousinnesq 近似非圧縮性 Navier-Stokes 方程式およびエネルギー式、および車室内外の表面熱収支式であり、速度と圧力のカップリングには SIMPLE 解法を用いている。その他、離散化手法・計算格子等に関しては前報に詳しく述べているので本報告では省略する。

2・3 計算条件

2・3・1 初期条件 初期条件は、まず、車室内空気および壁面温度を等温 $300[\text{K}]$ とし、車室内空気静止状態から計算を行い、時間変化が一定となるまで定常計算を行った。その計算結果を利用し、設定換気流量に相当する流速で後部流出ダクトから空気が強制排気されるとし、同時に前部の流入ダクトから

$T_{air,in}=315[\text{K}]$ の外気が自由流入するとして、車室内の壁面温度が定常になるまで計算を行った。

2・3・2 境界条件 境界条件については、境界メッシュの内外表面温度を表面熱収支から計算し、さらに内外表面温度差から厚さ方向の等価1次元熱伝導による熱損失を考慮した。ただし、ガラス、ルーフ、ピラーを除くダッシュボード、シート、床等は十分厚く比熱が大きいと考え、車室内外の熱伝導損失は無いものとした。

車室内外表面と空気（外気および車室内空気）との熱伝達については、外側表面に関しては、一般風 $3[\text{m/s}]$ 、外気温度 $306[\text{K}]$ 、空気密度 $1.2[\text{kg/m}^3]$ 、気圧 $101325.0[\text{Pa}]$ 、代表長さ $2[\text{m}]$ 、 Pr 数 $0.71[-]$ として、ガラス、ルーフ、ピラー表面に関してのみ強制対流乱流熱伝達式⁽¹⁴⁾より熱伝達率を求めた。それ以外の外表面は断熱とした。一方、内側表面と室内空気の熱伝達は、ダッシュボードやシート座面などの上向き面が主に高温になることから、基本的に上向き水平加熱面の自然対流熱伝達率と局所流速およびメッシュサイズに基づく局所 Re 数から求めた強制対流熱伝達率⁽¹⁴⁾の大きい方を用いることとした。

それ以外の境界条件としては、壁面はすべて無しとし、換気有りの場合には、前部流入ダクトの条件は自由流入、後部流出ダクトを速度固定境界条件とした。さらに、自動車各部の隙間流れとして、車内外の圧力差の平方根に比例する流速を一部のメッシュに与えた。

Fig.1 Schematic view of an automobile cabin (sedan type)

2・4 日射 夏の駐車自動車室内の温熱環境を決める大きな要因である日射については、本論文では、太陽からの直達日射および大気を透過することによる散乱日射のみを取り扱った。車両と日射方位の関係に関しては、浅野ら⁽⁴⁾に従い、日時および車両設置場所から、日射方位ベクトルを求めた⁽¹⁵⁾。車両に到達する日射量については、想定した日時における大気外水平面日射量 I_0 を求め、次いで日本の平均的な夏期大気透過率 ($P=0.7$) と太陽高度角から地表水平面到達日射

量を計算した。さらに、Erbsの直散分離を行い、それぞれ直達および散乱日射量を計算した⁽¹⁵⁾。

2・5 長波ふく射 本計算では、計算対象が比較的狭い車室内であることから、空気中に含まれる H_2O, CO, CO_2 などによるガスふく射は考慮せず、車内壁を散乱反射面と仮定して表面メッシュ同士間での灰色近似長波放射収支のみを考慮した。形態係数の導出については、面積積分(S2S)法を用いて求めた。車室外側のうける長波ふく射については、大気放射および自己からの射出長波ふく射のみを考え、天空温度より大気長波フラックスを簡易的に計算し、どの外側表面メッシュにも一様に当たると仮定した。

Table 1 Computational conditions

Cases	inlet	outlet flow rate [m ³ /h]
Case 1	free	50
Case 2	free	100
Case 3	free	150

3. 計算結果および考察

3・1 換気有りの場合の計算結果 以上で述べた数値モデルおよび計算条件を用いて、夏期における駐車自動車の車室内温熱環境の数値シミュレーションを行い、運転席前部に空気流入ダクト(自由流入)を設け、表1に示すように後部流出ダクトから一定流量で強制排気する場合(Case 1,2,3)を想定し、それぞれ定常計算を行った。

図2は計算で得られた代表的な車室内表面温度分布(Case 3)を示す。これは、図1に示したようにフロントダッシュボード、リアダッシュボードにそれぞれ空気流入ダクト(φ80mm、車室内開口部中心座標 $x=1.94, y=-0.65, z=-0.02$)と空気流出ダクトを設置し、後部ダクト(φ100mm、車室内開口部中心座標 $x=0.21, y=0.5, z=0.0$)からCase 3の換気流量150 m³/hに相当する流速約5.3m/sで強制排気する場合である。この時、空気流入ダクトの平均風速は約1.65 m/sであった。この図から、換気有りの場合でも、フロントダッシュボードおよび、リアダッシュボード(リアパネル)上の表面温度が高く、およそ360[K]程度の高温となっていることが判り、表面温度に関しては日射の有無の影響が非常に大きい。また、日射のあたったフロントシート座面などもかなりの高温となっており、335~345[K]程度まで温度上昇している。また、日射のあたらないフロント足元表面なども換気有りの場合には室内気流の存在により、比較的高い温度分布を示すことが判った。

図3は、Case 3の場合の y - z 断面の車室内空気温度および速度ベクトルを示す。この結果から、車室内は強い温度成層を形成しているものの、流入ダクトおよびドア隙間からの流入空気により、室内下部ではそれほど明確な温度成層は見られないことが判る。

Fig.2 Interior surface temperature distributions (Case 3)

Fig.3 Cross sectional Air temperature distributions and velocity vectors (Case 3)

Fig.4 A schematic of inlet airflow directions

3・2 換気方向および流入速度に対する依存性

3・2・1 流入ダクトの方向への依存性

次に、流入ダクトの車室内側入り口において流入空気の風向を変化させた場合の比較計算を行った。温度低減効果

の評価点としては、運転席中心線上のドライバー頭部付近2点($x=1.6[m]$, $y=-0.35[m]$, $z=0.07[m]$ および $0.17[m]$)の空気温度とした。また、流入ダクト口での風向は図4に示すように前節で述べた水平方向(No.0)と運転席バックシートを 3×3 のエリアに分割し、流入ダクト口中心から各エリア中心を向く9通りの合計10通りで比較を行った。

図5～9には、換気風量 Case3 の条件において、それぞれ換気風向 No.1, 3, 5, 7, 9 の場合の入り口ダクトからの流線を示す。換気風向 No.1 の場合には、ほぼ吹出風向が水平であるため、高温となったフロントダッシュボードからの上昇気流に影響を受け、車室内上層にそのまま向かう流れとなっている。一方、No.3 および No.5 の場合には、車室内をほぼ対角に排気ダクト側に流れており、あまり運転席上層空気との混合などは見受けられない結果となった。No.7 の場合は、ダクト入り口風向により、一旦、シート座面に向かって下方に空気が吹き出すため、高温となったフロントダッシュボードからの上昇気流に影響をうけて、運転席上層に到達するまでに比較的に長いパスを通る結果となった。また、横方向の広がりも大きく、同じダクト口径であっても、広い範囲に冷却効果を示すと考えられる。さらに、No.9 の場合には、一旦下向きとなった気流が室内中心部に到達してしまい、そのまま天井に向かって吹き付けている結果となった。

表2, 3, 4にはそれぞれ換気風量 Case1, 2, 3 における運転席頭部付近2点の空気温度を示す。全体的な傾向として、換気風量にほぼ比例した温度低減効果が見られ、最も温度低減効果が大きいのは Case 3 の場合であった。Case 1, 2 の場合は空気流入ダクトからの流量が隙間流れの流量に比べて比較的小さいため温度低減効果が小さかったと考えられる。また、Case3 の中でも、最も温度低減効果が高いのは、No.7 あるいは No.8 の方向の場合に、上述の温度評価点の空気温度が下がる結果となった。これは、高温フロントダッシュボードからの自然対流に合流しないように、低温の流入空気をやや下向きに吹き付けることで、運転席頭部付近まで低温空気が到達しやすくなったためと考えられる。

3・2・2 流入ダクトにおける流速への依存性 さらに、同じ換気流量で、流入ダクト直径を変化させて、流入空気風速を変化させた場合の比較計算を行った。換気風量は Case 1～3 とし、風向は No.7 の場合を想定した。また、隙間流れの係数 c は、各 Case で固定とし、入口流速で温度低減効果の評価点としては、運転席中心線上のドライバー頭部付近($x=1.6[m]$, $y=-0.35[m]$, $z=0.07[m]$)の空気温度とした。

Fig.5 Streamlines from inlet duct (Case 3, Inlet direction No.1)

Fig.6 Streamlines from inlet duct (Case 3, Inlet direction No.3)

Fig.7 Streamlines from inlet duct (Case 3, Inlet direction No.5)

Fig.8 Streamlines from inlet duct (Case 3, Inlet direction No.7)

Fig.9 Streamlines from inlet duct (Case 3, Inlet direction No.9)

Table 2 Air temperatures at different inlet duct directions (Case 1)

Direction	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.07) [K]	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.17) [K]
0	329	331
1	322	323
2	323	324
3	324	324
4	322	323
5	323	323
6	323	323
7	324	327
8	322	323
9	322	323

Table 3 Air temperatures at different inlet duct directions (Case 2)

Direction	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.07) [K]	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.17) [K]
0	326	328
1	323	323
2	325	326
3	326	326
4	324	323
5	325	324
6	325	325
7	323	323
8	323	323
9	324	323

Table 4 Air temperatures at different inlet duct directions (Case 3)

Direction	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.07) [K]	Air Temp. (1.6, -0.35, 0.17) [K]
0	326	327
1	323	323
2	324	326
3	326	326
4	324	323
5	325	324
6	325	325
7	323	322
8	323	323
9	324	323

図10は、それぞれ換気風量 Case 1~3 において、各流入風速における評価点空気温度をまとめたものである。この結果から、基本的にはどの換気風量の場合でも、空気流入ダクトでの入口風速が大きくなるにつれ、評価点での温度低減効果が大きくなっていることが判る。また、風速 2 m/s 付近で、一旦流速に対する変化が小さくなっているが、これは、室内気流との balan

スによるものと考えられる。さらに、換気風量 Case 3 の場合に最も風速に対する比例割合が大きい結果となった。これは、吹出風速の増大とともに、流入空気へのフロントダッシュボードの高温面からの自然対流の影響が小さくなり、周囲空気と混合せずに運転席まで到達して最終的にドライバー頭部付近の温度評価点に到達するためと考えられる。

しかし、入口ダクト口径を小さくして流速を増すことは、換気に必要な動力を増やすことになるため、運転席全体の空気温度低減を図る場合は、同じ換気流量でも、低い入口流速で複数の流入ダクトから外気を導入する方法が効果的であると考えられる。また、今回は強制排気の場合の計算を行ったが、逆に外気を強制的に流入させる場合には、高温ダッシュボードからの自然対流の影響をあまり受けなくなると考えられることから、このような風速に対する変化とは異なる様子を示すと考えられる。

以上の結果から、温度低減効果は基本的に換気風量に比例するが、実際の換気風量の範囲では、換気風速、換気風向を最適化したとしても 10~20K 前後の温度低減に留まることが判った。夏期屋外の非常に強い日射条件で換気無し車両の場合には 70℃程度まで室内気温が上昇する⁹⁾ことに対し、この温度低減は決して十分とは言えないため、さらなる温熱環境の改善のためには、熱線反射ガラスの採用や物理的に日射遮蔽を行った場合の効果の検討も合わせて行う必要があると考えられる。

Fig.10 Air temperatures at different inlet duct flow velocities

4. 結 論

夏期炎天下における屋外駐車時の自動車室内の温熱環境改善のため、換気数値シミュレーションを行って、空気流入ダクトにおける風向、風速についてパラメータスタディを行い、入り口空気流入ダクトにおける風向および風速への依存性を調べた。

温度低減効果の評価点として、運転席中心線上のドライバー頭部付近の空気を対象にした場合、流入換気ダクトが単一の場合には、運転席座面に向かって下方に向かう風向の場合の温度低減効果が高くなる結果が得られた。また、一定換気風量のもとで、流入ダクト口径を変更することで流入ダクトでの風速を変更させた場合には、ほぼ風速に比例して評価点の空気温度が低減される結果が得られたが、風速約2m/s程度で、温度変化が小さくなる結果となった。

文 献

- (1) Abe, Y., T. Inoue, H. Sugano, M. Harada, N. Watanabe, K. Tanaka and M. Tanaka, "Heat Stroke in a Car Cabin (in Japanese)", *Popular Medicine*, Vol.196(1997), pp.111-116, Nippon Hyoronsha Co., Ltd. Pub.
- (2) Wakashima, S., K. Kawaguchi, K. Okui and T. Okano, "On Development of a Numerical Thermal Environment Model of a Parking Automobile under Summer Solar Radiation", *Trans. of the Society of Automotive Engineers of Japan*, (Submitted).
- (3) Wakashima, S., K. Kawaguchi, K. Okui and T. Okano, "Temperature Measurements of a Parking Automobile under Summer Solar Radiation", *Journal of Japan Solar Energy Society*, Vol.33, No.1(2007), pp.57-64.
- (4) Asano, H., M. Kitada, A. Shinma and H. Takeuchi, "Numerical Simulation of Insolation in an Automotive Cabin Environment", *Trans. of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.52 No.3 (1998), pp.58-64.
- (5) Kataoka, T., K. Kafo, T. Kumada and Y. Mizuno, "New Technology of Climate Control Comfort in Passenger Compartments", *DENSO Technical Review*, Vol.10, No.1 (2005), pp.58-63.
- (6) Takeda, H., M. Ishikawa and K. Ikeda, "Evolution of Climate Control for More Comfortable Passenger vehicle Compartments", *Toyota Technical Review*, Vol.54, No.2 (2006), pp.58-63.
- (7) Matsunaga, K., "Evaluation of the thermal environments in vehicles", *Trans. of Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol.78, No.1(2004), pp.5-11.
- (8) Matsunaga, K., and T. Mochida, "Radiation Panel Heating System Installed in a Car and Thermal Comfort", *Trans. of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.34, No.1 (2003), pp.121-126.
- (9) Koori, I., "Numerical Simulation Technologies for Climate Control (in Japanese)", *Trans. of Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol.78, No.1 (2004), pp.13-20.
- (10) Komoriya, T., "Prediction method of passenger's thermal sensation with numerical simulation of air flow in an automobile passenger compartment", *Trans. of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.27, No.2 (1996), pp.90-95.
- (11) Fujita, A., J. Kanemaru, H. Nakagawa and Y. Ozeki, "A Practical Method of Numerical Simulation to Predict Thermal Environment Conditions of Car Cabin", *HONDA R&D Technical Review*, Vol.11, No.2(1999), pp.89-98.
- (12) Kataoka, T., and Y. Fusada, "Evaluation of Thermal Environment in a Vehicle Compartment Using a Model of Human Thermal System", *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.628 (1998), pp.4261-4266.
- (13) Kataoka, T., and Y. Nakamura, "Prediction of Thermal Sensation based on Simulation of Temperature Distribution in a Vehicle Cabin", *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.640(1999), pp.4092-4099.
- (14) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Data Handbook : Heat Transfer*, (1979), The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (15) Japan Society of Solar Energy ed., *New Solar Energy Handbook*, (2000).