

自動車室内の空調気流に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation on the Air Conditioning Flow in a Vehicle Passenger Compartment

小林 敏雄*・谷口 伸行*・小森谷 徹**
Toshio KOBAYASHI, Nobuyuki TANIGUCHI and Tohru KOMORIYA

1. ま え が き

近年、住居やオフィスビル等の室内空調が完備されてくるに伴い、自動車室内においても快適な空調空間を求める声が高まってきた。このため、車両開発当初から数値計算手法を利用して自動車室内の空調状態を予測しようとする試みが報告されている^{1)~4)}。しかし、これらの報告例については、検証実験の不足しているもの、または2次元形状室内について議論しているものが多く、複雑な自動車室内の空調気流に関するシミュレーションについては十分に議論されていない。

本研究では、工業的に広く利用されている標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて、自動車室内の空調モード（冷房、デフロスト）における熱を考慮していない流れ場をシミュレーションした。また、検証実験結果と比較することにより $k-\epsilon$ モデルの有効性を検討した。

2. 数 値 計 算 手 法

本研究では、空調時に形成される自動車室内気流に注目していることから、流れを3次元定常非圧縮性乱流とする。また、乱流を表すために標準的な $k-\epsilon$ モデルを用いた。

$$k\text{eq.} : \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \epsilon \quad (1)$$

$$\epsilon\text{eq.} : \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$G = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 $\nu_t (= C_\mu k^2 / \epsilon)$ は渦粘性係数である。 $k-\epsilon$ 方程式に現れる5つのモデル定数はLaunder-Spalding⁵⁾による推奨値で、表1の値を用いた。

複雑な自動車室内形状を表現するために、谷口ら⁶⁾の一般座標系有限体積法による計算手法を使用した。すな

わち、一般座標系を適用する際に、 k および ϵ の方程式に現れるベクトル表現できない生成項 G を速度の絶対値 $|U|$ の勾配により、

$$G \sim \nu_t |\text{grad}| U|^2 \quad (4)$$

と近似した。また、速度ベクトルの補間にはMalinらの方法⁷⁾に改良を加え、計算効率を落とさずに精度を保つようにした。対流項、拡散項にはハイブリッドスキームを、計算アルゴリズムにはPatankarらのSIMPLE法⁸⁾を使用した。

3. 模型実験の概要

計算結果を評価するために流れの可視化実験を行った。対象とした自動車室内は、図1のようなセダン系小型車の1/5スケールモデルであり、透明アクリル樹脂でできている。吹出し口はダッシュボード上に、また排出口はリヤウィンドウ下方に設定されている。

流れの計測には、3ビーム2次元LDAを後方散乱方式で使用し、信号処理器にBSA (Burst Spectrum Anal-

記 号

- H : 吹出し口の高さ
- u_j, u_s, v : 平均速度成分
- u', v' : X, Y 方向の擾乱速度成分
- U_0 : 吹出し平均速度
- y_w : 壁からの距離
- y^+ : 壁座標 $(= (C_\mu^{1/2} k)^{1/2} (y_w / \nu))$
- k : 乱れエネルギー
- k_0 : 吹出し口の乱れエネルギー
- ϵ : エネルギー散逸率
- ϵ_0 : 吹出し口のエネルギー散逸率
- ν : 動粘性係数
- ν_t : 渦粘性係数
- R_0 : レイノルズ数 $(= U_0 * H / \nu)$

表1 $k-\epsilon$ モデル定数

C_μ	σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2
0.09	1.0	1.3	1.92	1.44

*東京大学生産技術研究所 第2部

**受託研究員 (㈱スバル研究所)

研究速報

alyzer)を用いた。シーディング粒子は、中位径 $2\mu\text{m}$ のJIS規格11種(関東ローム)であり、サイクロン分離器によって $2\mu\text{m}$ 以上の粒子を取り除いた。本実験における計測断面当りの測定点数は、約700~1500程度であり、1つの測定点において1000個のシーディング粒子をアンサンブル平均することにより平均流と乱れ量を求めた。なお、流れが中央断面に対してほぼ左右対称になっていることを事前に確認した。

4. 結果と考察

4.1 計算条件

計算格子を図2に示す。モデル形状は前述の1/5車室内模型(図1参照)と同じである。特に吹出し口手前に、長さ40~50mm程度のストレートダクトを想定した格子を設けた。このダクト入口における U_0, k_0, ϵ_0 を一定として与え、排出口における圧力をゼロおよびその他の量を自由流出条件として設定した。また、壁面近傍の表現として壁法則を適用した。なお、室内は左右対称であることから、本計算では室内左側半分を計算対象とし、5000ステップまで計算した。

4.2 冷房モード

吹出し口をINLET-1に設定した空調モードを冷房モードとする。吹出し R_e 数は8000(実車吹出し風速 2.4m/s 相当)であり、1ケース当りの計算は、FACOM VP-100にてCPUタイム約1.6時間を要した。

図3は、実験と計算による前席ヒップ・ポイントの車幅方向断面(図1の断面C)に垂直な速度成分(u 成分)の分布を比較したものである。搭乗者に涼感を与える平均風速が $1.5\sim 2.1\text{m/s}^9$ であることから、車両開発初期に

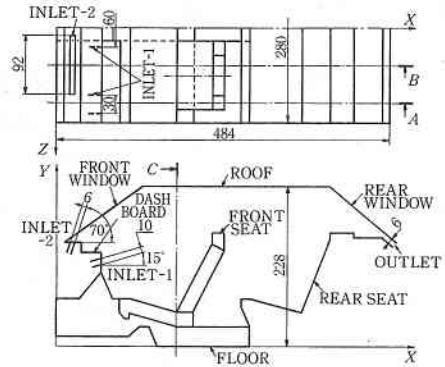
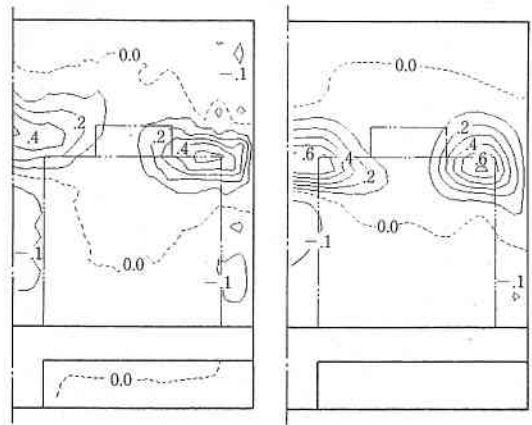
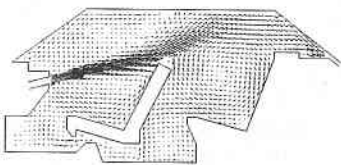


図1 自動車室内モデルの概略図 (セダン系小型車1/5スケールモデル)

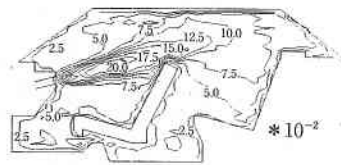


(a) 実験結果 (b) 計算結果

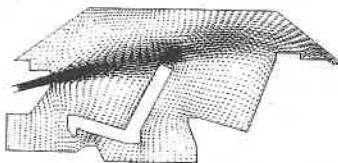
図3 断面Cに垂直な速度分布の比較(冷房モード)



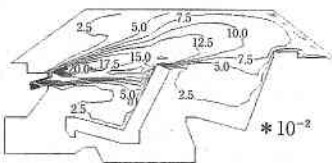
(a) 実験結果



(a) 実験結果 $((u'^2 + v'^2)^{1/2} / U_0)$



(b) 計算結果



(b) 計算結果 $((4k/3)^{1/2} / U_0)$

図4 断面Aにおける平均風速ベクトルの比較(冷房モード)

図5 断面Aにおける乱れ分布の比較(冷房モード)

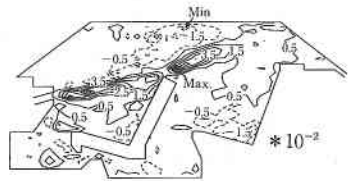


図6 実験によるX, Y方向の乱れ量の差

$\left\{ \begin{array}{l} \text{実線は} \geq 0, \\ \text{破線は} < 0 \text{を表す} \\ \text{Max.} = 9.38 * 10^{-2} \\ \text{Min.} = -3.94 * 10^{-2} \end{array} \right\}$

研究速報

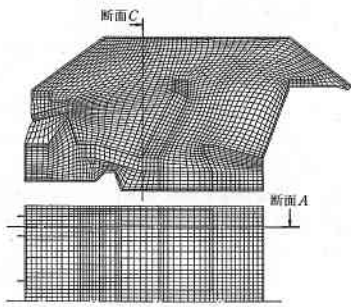
ベンチレータからの風向や風量を定めるうえで、この断面内の風速分布がひとつの設計指標になる。図中の破線は風速ゼロの線であり、正の値は前席から後席へ、負の値は後席から前席へ向かう流れを表している。この図から、吹出し口より後席へ向かった気流は、ルーフ下方および前席シートの間より前方へ戻って来る様子がわかる。計算結果では、風軸上の最大風速や左右からの流れが干渉する前席シート中央付近において実験結果と異なっているが、定性的にはこの断面内の風速分布の様子を良くシミュレーションできていることがわかる。

次に、図4は外側吹出し口断面(図1の断面A)における平均風速ベクトルを比較したものである。吹出し口より出た気流は前席シートに当たり、上下に一对の渦をつくる。さらに、ルーフに当たったのち後席上に大きな渦が形成される。計算結果では後席にできる渦がやや弱くなっているが、定性的には実験結果と良く一致していることがわかる。

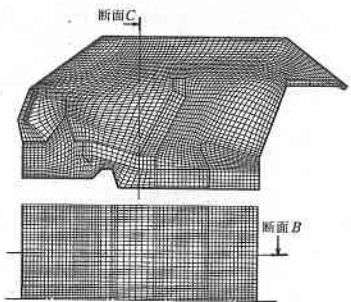
また、図5は、X、Y方向の乱れ分布状態を比較したものである。本実験は2次元計測のためX、Y方向の乱れ量しか測定できない。そこで、計算では乱れが等方であるという仮定より、 $(4k/3)^{1/2}/U_0$ にて乱れ分布を求めた。両結果は壁面近傍および吹出し口からの風軸上を除

きほぼ一致しており、標準k-εモデルでも十分適用できることがわかる。また、図6は実験によるX、Y方向の乱れ量の差 $(\overline{u'^2})^{1/2} - (\overline{v'^2})^{1/2} / U_0$ を示したものであるが、風軸の存在する吹出し口近傍およびはく離の生じている前席シート上部において、乱れは非等方であるが、その他の領域においてはほぼ等方であることがわかる。

以上のことより、フロアーやフロントウィンドウ近傍等の流れの遅い領域においては、壁法則の適用には難点がある。今後、温度場の数値解析等壁の影響が顕著になると思われる場合には、低レイノルズ型モデル等を採用することも必要である。また、風軸上やはく離域等の乱れの非等方性が強い領域の流れ場には、非等方k-εモデルやASM (Algebraic Stress Model) 等のさらに高次の乱流モデルの検討が必要であろう。

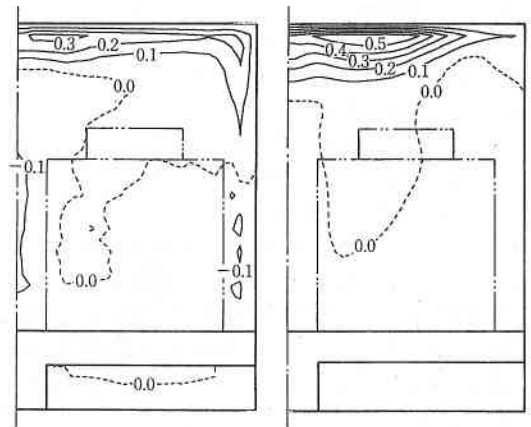


(a) 冷房モード (55*51*24)



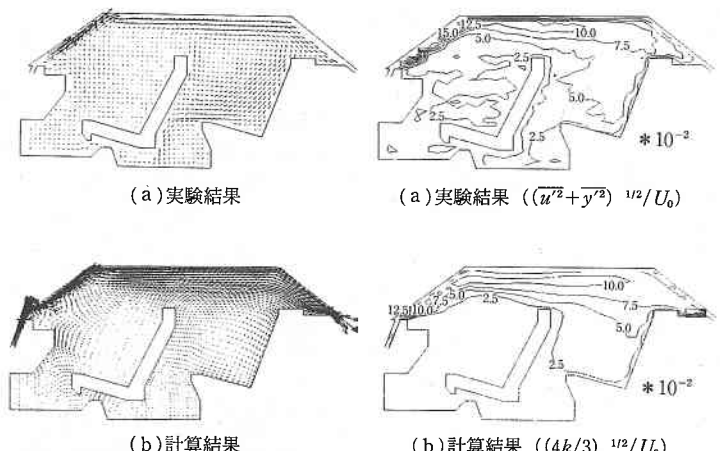
(b) デフロストモード (65*55*30)

図2 計算格子と出力断面位置



(a) 実験結果 (b) 計算結果

図9 断面Cに垂直な速度分布の比較 (デフロストモード)



(b) 計算結果

図7 断面Bにおける平均風速ベクトルの比較 (デフロストモード)

(b) 計算結果 $((4k/3)^{1/2} / U_0)$

図8 断面Bにおける乱れ分布の比較 (デフロストモード)

研究速報

4.3 デフロストモード

吹出し口をINLET-2に設定した空調モードをデフロストモードとする。本計算においては、特に吹出し風がフロントウィンドウおよびルーフに沿って流れることから、壁面からの無次元距離 y^+ が100を超えないようにフロントウィンドウ壁面に格子を集中させた。吹出し R_e 数は7100(実車吹出し風速3.5m/s相当)であり、計算時間は、FACOM VP-100にて、CPUタイム約2.7時間を要した。

図7は、前席シートほぼ中心位置(図1の断面B)における平均風速ベクトルを比較したものである。デフロスタ口がフロントウィンドウに沿った2次元形状のスロット吹出し口のため、冷房モードのような3次元噴流に比べコアンダ効果により、噴流が壁面付着噴流となりやすい。計算結果ではこの傾向が比較的明確に再現されており、実験結果とも良く合致している。また、後席にできる渦はやや弱くなっているものの、室内全体の気流の様子は良く一致している。

また、図8は乱れ分布を比較したものである。フロントウィンドウおよびルーフに沿って流れるデフロスタ吹出し風上の乱れ量は実験結果とほぼ一致しているが、フロア付近の流れの遅い領域においては実験結果との差が生じており、壁法則の適用が難しいことがわかる。

デフロストモードは、ウィンドウの防曇性ばかりでなく快適性の面からも検討が必要である。図9は、前席搭乗者の顔面位置における車幅方向断面(図1の断面C)に垂直な速度成分(u 成分)の分布を比較したものである。搭乗者の顔に当たる温風を極力少なくする上からもこの断面内の風速分布を検討しなければならない。実験結果では、壁面付着噴流が車幅方向にサイドウィンドウまで広がっているが、計算結果ではこの傾向がやや弱い。しかし、全体的な風速分布の様子は実験結果と良く一致している。

以上のように、壁面付着噴流となりやすいデフロストモードにおいても、標準 $k-\epsilon$ モデルにより定性的な流れ場を予測することが可能であり、設計初期における空調気流の検討に十分適用できる。

5. あとがき

標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた一般座標系有限体積法により、熱を考慮しない場合の自動車室内流れの数値シミュレーションを行った。さらに、計算結果と実験結果とを比較することにより以下のことを得た。

- 1) 高 R_e 数から低 R_e 数までの複雑な流れ場が存在する自動車室内流れに対して、Launder-Spaldingによる標準的な $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いても、定性的な流れ場および乱れ量を把握することができる。
- 2) ただし、風速の遅い壁近傍領域においては、乱れは等方であるが壁法則の適用には難点がある。温度場の数値解析等壁の影響が顕著になるとと思われる場合には、低レイノルズ型モデルを用いることも一つの手法と考えられる。
- 3) さらに、吹出し口近傍等の乱れの非等方性が強い領域の流れを予測したい場合には、非等方 $k-\epsilon$ モデルやASM等のさらに高次の乱流モデルが必要であろう。

最後に、模型実験に御協力いただきました(株)スバル研究所計測グループの金子誠氏に感謝の意を表します。

(1990年10月16日受理)

参考文献

- 1) T. Komoriya, SAE Technical Paper Series, 890312 (1989)
- 2) 原, ほか1名, 流れの可視化, Vol. 7, NO. 26 (1987)
- 3) 山本, ほか1名, 流れの可視化, Vol. 9, NO. 34 (1989)
- 4) 須賀, 第27回伝熱シンポジウム講演論文集 (1990)
- 5) 谷口, ほか3名, 日本機械学会論文集B, 55-518 (1989)
- 6) B.E. Launder and D.B. Spalding, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3 (1974)
- 7) S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Co., New York (1980)
- 8) M.R. Malin, ほか3名, Proc. 2nd Int. Symp. Ship Viscous Resistance (1985)
- 9) 浅海, ほか1名, 自技会47年学術講演前刷り集, 81 (1972)