

ボリュームレンダリング法の車室内空調設計への適用

An Application of Volume Rendering Visualization Technique to the HVAC Design in a Vehicle Cabin

小野謙二 日産自動車 総合研究所 〒238-0056横須賀市夏島町1, kj-ono@mail.nissan.co.jp

松本秀樹 NEC情報システムズ 〒213-0012 川崎市高津区坂戸3-2-1, matumoto@ssd.nis.nec.co.jp

姫野龍太郎 理化学研究所 情報環境室 〒351-0198和光市広沢2-1, himeno@postman.riken.go.jp

Kenji ONO, Nissan Research Center, 1, Natsushima-cho, Yokosuka-shi, 237-0056, Japan

Hideki MATSUMOTO, NEC Informatec Systems, 3-2-1, Sakato, Tkatsu-ku, Kawasaki-shi, 213-0012, Japan

Ryutaro HIMENO, RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, 351-0198, Japan

The thermal flows in a vehicle cabin were visualized to get the flow images using a volume rendering technique for the flow prediction at the early stage of the vehicle design. The flow computation is based on a Cartesian mesh method to reduce the turnaround time of the analysis period. An *RVSLIB* library developed by NEC is used for the flow visualization in remote environment. The time sequential images of the flow behavior is converted to the MPEG1 movies and observed. The visualization results told us that the differences of the thermal environment in the vehicle cabin under various conditions. It was found that the present system could predict the temperature distribution in the cabin within 40 hours that is useful for the interior design.

1. はじめに

車室内の熱環境は、乗員の快適性をはじめ運転者のストレスや視認性などの安全性の観点からも重要な設計項目となっている。この車室内の熱環境は日射や輻射熱、それにエアコンユニットからの空調風が支配要因であり、多くの研究が従来行われてきた[1]。この熱環境に大きく影響するガラス面を含むエクステリアと空調の吹き出し口のレイアウトを含むインテリアのデザインは、車両開発の初期段階で決まることが多い。このため、開発初期において車室内の熱環境を予測することが重要となる。一方で、開発初期段階でのデザインは精密でないものも多い。この初期段階におけるCFDの活用例を考えると、多くの形状案の絞り込みや性能の相对比较に用いられることが多い。したがって、評価は定量的でなくともよく、定性的な判断が短時間のうちにできれば良い。このような背景の下で、本報では車両開発の初期段階で車室内の熱環境の概要を把握することを目的とした計算法と可視化法について報告する。

2. 解析モデル

車室内の熱環境を検討する場合には、エアコン吹き出し口の配置や方向、そこから吹き出す流量の配分などが設計パラメータとして考えられる。また、運転者だけでなく様々な乗員配置における温度分布も検討される。これらの検討項目を開発の初期段階で網羅するためには、デザインの検討サイクルに比べて解析のサイクルが十分に短くなくてはならない。一般に、三次元の実問題を扱う流体解析においては複雑な形状を取り扱うことが多く、解析に必要な計算格子の作成に多くの時間を費やすことになる。本研究ではこの格子生成の問題を解決するために、直交格子による形状近似のモデル化を行う[2]。これにより解析サイクルが短くなり、設計上流での解析検討が可能となる。剥離が大きく影響する流れに直交格子近似を適用するのは問題が

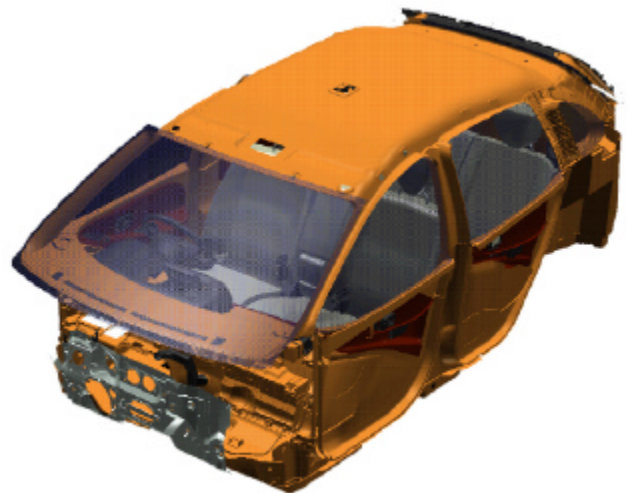
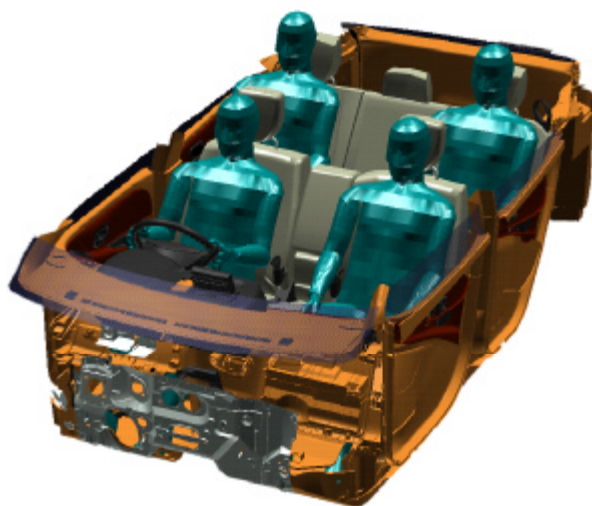


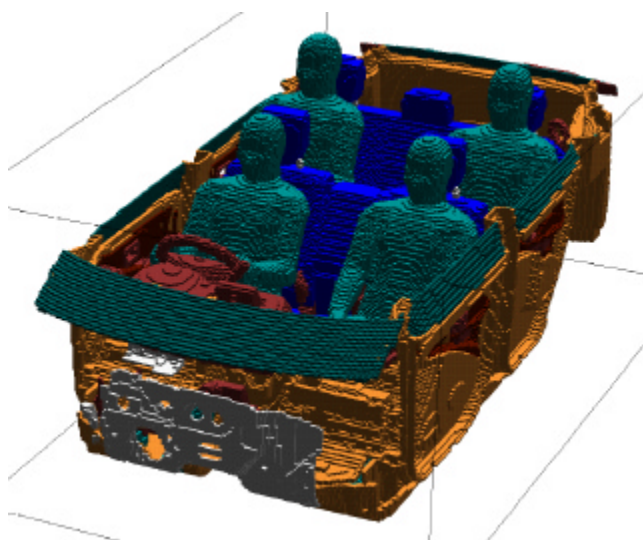
Fig. 1 The shape of the cabin of a production vehicle. This rendered image consists of over 1 million polygons.

あるが、今回の解析は比較的速度の低い領域で空間部分の流れと温度分布の傾向把握が目的であるため上記の影響は小さいと考えられる。

本解析の一つに利用した生産車の形状モデルをFig.1に示す。車室内の形状はほぼ再現されている。この形状データは最初にソリッドモデラーのIDEAS/Masterで作成される。その後解析モデルを作成するために三角形要素(ポリゴン)に変換されている。次に、この形状データを直交格子上に投影して形状を再現するとFig.2ようになる。この例では車室内を10mm幅のボクセルで覆っている。総計算メッシュ数は $171 \times 349 \times 141$ の約840万点である。ポリゴンから直交格子への形状の投影は、単に対応するボクセルの中にポリゴンがあるかどうかで判定している。この方法の長所は、決して格子生成に失敗することがなく、処理の全自動化が可能な点である。複雑な形状を扱う場合には



(a) Geometry model with four occupants.



(b) Voxel model with 10mm in size.

Fig. 2 An original geometry model and generated voxel model. For convenience, the upper part of the cabin is invisible.

この点が非常に重要なポイントになる。このボクセルモデルの作成は内製のソフトウェアを用い、作成するのに要した時間はPentium3 600MHzのノートPCで約90秒である。

3. 計算方法と可視化方法

計算法は3次元の非定常非圧縮のNS方程式を有限体積法を用い、スタガード格子上で離散化して解く[3]。対流項にはQUICKスキームを用い、Fractional Step法に従って解いている。時間積分にはEuler陽解法を用いた。温度計算にはエネルギー方程式に非圧縮性の仮定を適用して得られたパッシブスカラーの移流拡散方程式を用いている。

可視化にはNEC製の可視化ライブラリRVSLIB[4]を利用した。RVSLIBはソルバー中から呼び出し、計算と同時に可視化処理ができるライブラリである。予め設定したパラメータに従って画像イメージを出力する。このため解析規模によらず出力データ量はほぼ一定で非常に小さく、ネットワーク経由での解析結果の可視化に適している。今回の計算はローカルのPCでモデルの作成を行い、ISDN回線経由で接続したSX5/2CPU上で計算と可視化を行っている。時系列のイメージはMPEG1ムービーに変換した後、ネットワーク経由で転送し、結果を評価した。

車室内の温度分布の可視化には、温度の空間的な分布を直感的に把握できるボリュームレンダリング法を使用した。ボリュームレンダリングを用いた可視化では、対象の流れ場あるいは温度場の様子を特徴的に可視化できるように、予め画角やカラーマップ、透過率などのパラメータを決める必要がある。したがって、類似の流れでない限りはパラメータサーベイを含めて、二度の計算を行うことになる。またこれらのパラメータの決定には、少々経験が必要となる。

4. 解析結果

今回の検討では、Fig.3に示すような車室内にある4つの空調吹き出し口の吹き出し速度を変えた場合の車室内の温度分布の変化を調べた。車室内の初期温度は45℃で前方

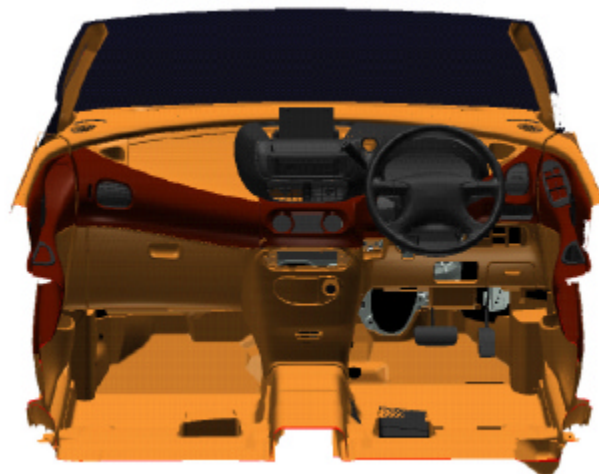


Fig. 3 The instrument panel and four ventilating openings viewed from rear seat. Two openings locate at center and the openings of the rest locate both sides.

4カ所から15℃の冷風が吹き出す場合の流れの時間的な変化を計算した。なお、今回の計算では日射と輻射の影響は考慮せず、エアコン吹き出し口からの強制対流による影響のみを考慮している。吹き出し口の平均径 $L_0=0.07(m)$ 、代表風速 $V_0=5(m/s)$ を基準にして計算した流れ場のレイノルズ数は約 2×10^4 程度、ペクレ数は 1.4×10^4 程度である。時間刻み Δt は格子幅を基準にしたクーラン数を0.1として計算した。境界条件は壁面で粘着条件と断熱条件を与

Table 1 Specified velocities for each computed cases.

Opening location	Case A	Case B
Left	4 m/s	8 m/s
Center left	7 m/s	5 m/s
Center right	7 m/s	5 m/s
Right	4 m/s	8 m/s

え、外部境界で対流出条件としている。空調風の吹き出し位置で流れの方向と風速を与え、車室内の対流の様子を計算した。Table1 の二つのケースについて温度分布の傾向を比較した。CaseA では両側の吹き出し口よりも車体中心側の二つの吹き出し口の風速が大きく、CaseB ではその逆に設定している。また、全風量はCaseBの方が多くなるようにしている。流れの様子は実時間で15秒程度まで計算した。

Fig. 4, 5に示す結果を比較すると、車室内の全体的な傾向として冷却風の風量の多いCaseBの方が全体的に温度が低くなっていることが判る。レンダリングに用いたカラーマップは、最も温度の高い45℃のときは透明でこれより少し温度が下がると赤色になるように設定している。温度が下がるに従い、黄色、黄緑、水色、青色と変化する。動画からは両側の吹き出し口から吹き出した気流が車体中心側に向かって大きな循環流を形成している様子が観察できた。また、吹き出す冷却風の流量の差によって、時間的な温度変化にも違いが表れている。以上に示すように吹き出し風速の違いにより車室内の温度分布の傾向をシミュレートできることが判る。

プログラムはCとFortran77で書かれており、ベクトル化率は99.6%、SX5(2CPU、理論ピーク性能8GFLOPS)上での実効性能は3.7GFLOPSである。使用メモリは約840万セルの場合、流れと温度の計算に約666MB、RVSLIBを利用すると1704MB必要になる。RVSLIBの使用に多くのメモリ容量を必要としているが、これは倍精度で格子点座標のデータを保持しているためである。単精度にすれば単純に使用メモリ量は半減し、約1200MB程度になる。さらに直交格子の利用を前提とすれば座標値を記憶するための配列は不要になるので、使用メモリは大幅に減少する。計算時間は実時間で15秒の計算(約30000ステップ)を動画の作成も含めて約36時間かかった。CaseA, Bの場合、流れの計算時間と可視化時間(30ステップ毎に実施)の比は約2:1であった。動画の作成にはSGI Onyx2上のプログラムdmconvertを利用した。これはファイル群をmpegムービーに変換するプログラムで、パラメータ設定により比較的きれいなmpegムービーを作成できる。1000個のイメージファイル群からムービーを作成すると、Onyx2 1CPU(MIPS R10000 250MHz)を用いて約30分かかった。最初の1000枚のファイル群のサイズは約350MBで、作成したmpegムービーは約7MBとなり、ISDN回線経由ではダウンロードに10分程度かかる。

解析のターンアラウンドを考えると、ボクセルモデルの作成と計算パラメータの入力などを含めても実質的に40時間以内で1サイクルが終了する。

5. まとめ

車両開発初期の適用を考えた熱流解析と可視化システムを提案し、車室内の熱流れ解析に適用した。この結果、以下の点が明確になった。

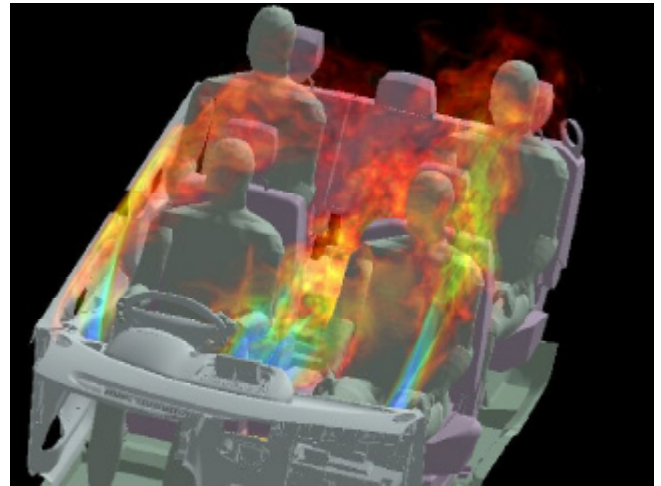
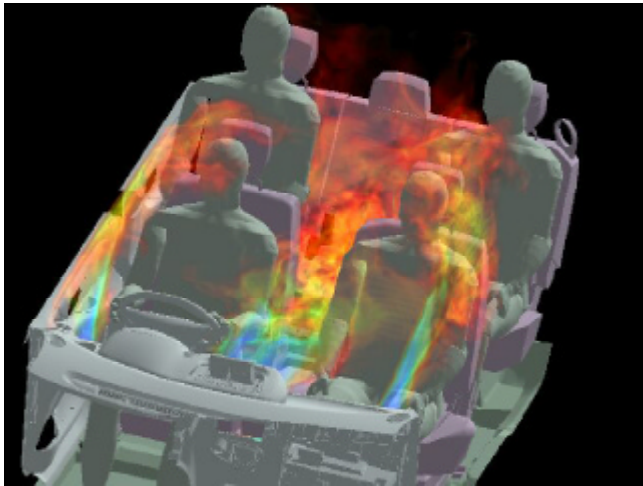
ボリュームレンダリング法を用いた可視化により、車室内の空間的な温度分布の様子を直感的に把握できるようになった。

RVSLIBを用いて可視化処理し、mpegムービーを作成する手順と具体的な所要時間を示した。

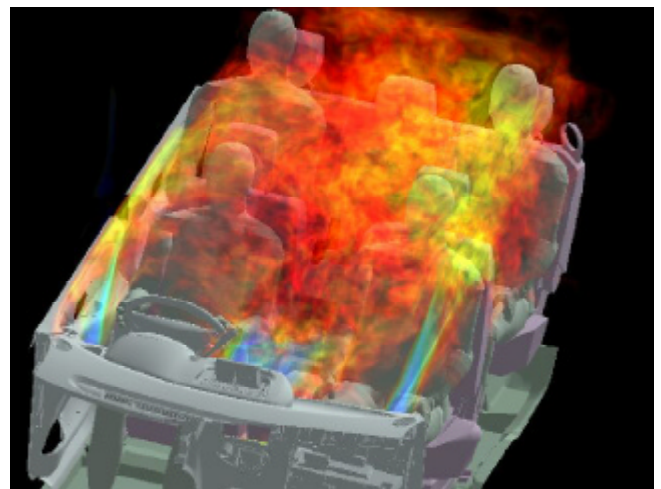
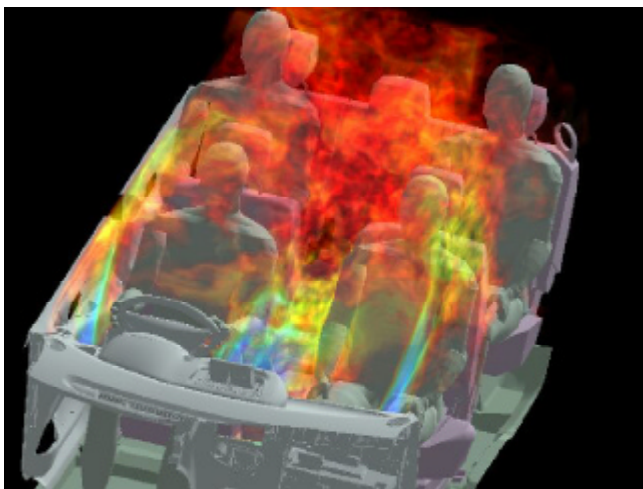
計算時間は、モデル作成と入力設定を含めても40時間以内で解析検討が可能であり、開発初期段階での有効な性能評価ツールとなることが判った。

参考文献

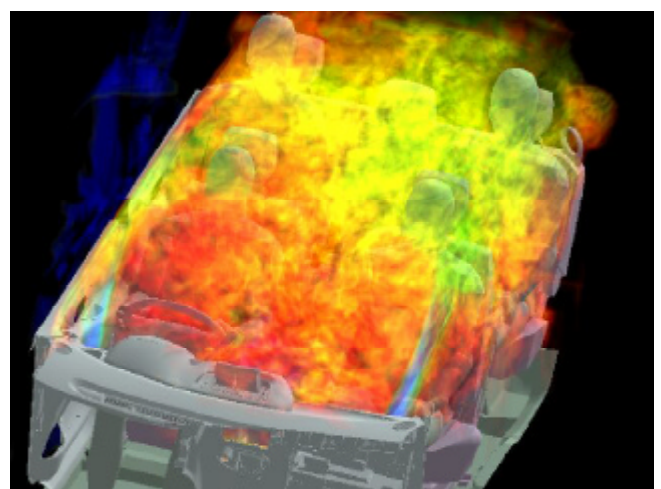
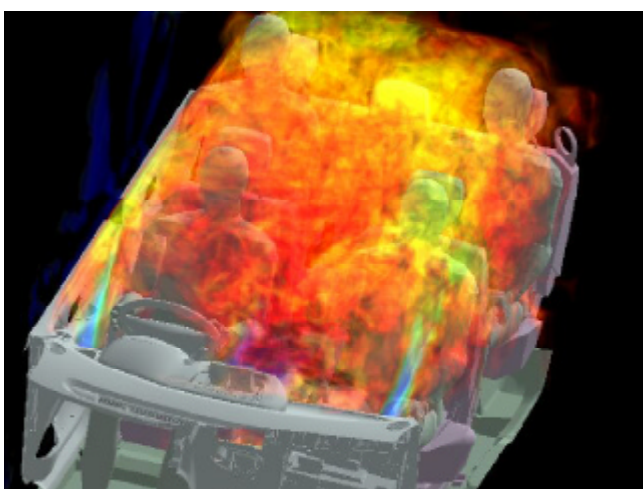
- [1]自動車技術会、車室内環境技術専門委員会編、"自動車空調総合技術レビュー2000、" <http://www.jsae.or.jp/techdoc/tech32.html>
- [2]Ono, K., et. al., "Applications of CFD using voxel modeling to vehicle development," Proc. of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference FEDSM99-7323(1999).
- [3]Ono, K., et al., "Prediction of Cooling Flow Rate through the Front Grille Using Flow Analysis with a Multi-Level Mesh System," FISITA World Automotive Congress Proceeding Paper F2000H201(2000).
- [4]杉原ほか、"大規模シミュレーション向けのリアルタイム可視化システムRVSLIB," 第13回数値流体力学シンポジウム(1999)234.



(a) The temperature distribution after 5 seconds from the initial state. Click this figure, then you'll find a sample movie.



(b) The temperature distribution after 10 seconds from the initial state.



(c) The temperature distribution after 15 seconds from the initial state.

Fig. 4 The temperature distribution in the cabin for case A.

Fig. 5 The temperature distribution in the cabin for case B.

The thermal flow behavior in the passenger compartment is demonstrated. In these rendering images, the color shows the temperature scale. The color for the highest temperature, i.e. 45 degrees, is transparent. If the temperature is slightly low from the highest temperature, the color becomes red. The color of blue corresponds to the lowest temperature, i.e. 5 degrees.