

論文・解説

10

車室内の三次元流動場解析技術とステレオ PIV 計測

Investigation of CFD Accuracy by Comparison with Stereo PIV in a Simplified Cabin Model

伊藤 和樹^{*1} 清水 圭吾^{*2} 研井 暁^{*3} 中村 優佑^{*4}
Kazuki Ito Keigo Shimizu Akira Togii Yusuke Nakamura
吉田 真^{*5} 浮田 英治^{*6} 井上 実^{*7}
Makoto Yoshida Eiji Ukita Minoru Inoue

要約

車室内では、気流が内装部品に衝突することで複雑な三次元流れ場を形成する。乗員快適性と環境性能に影響を与える空調性能の効果的な開発のためには、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析による詳細流れ場の理解が必要である。著者らは、簡易車室内モデルを対象にステレオ PIV (Particle Image Velocimetry) 法により複数断面の速度三成分を取得し積層することで、車室内の複雑な三次元流れ場を定量的に可視化した。更に、CFD 解析では RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 及び LES (Large Eddy Simulation) による異なる二つの乱流モデルを用いて車室内の流れ場を予測し、ステレオ PIV 法により得られた結果との比較から気流の時系列的な変動に伴う拡散をとらえることが CFD 予測精度において重要であることを明らかにした。

Abstract

Air-conditioning airflow forms a complicated three-dimensional flow field in the passenger compartment. For the effective development of air conditioning performance, which affects occupant comfort and environmental performance, it is necessary to understand the detailed flow field through CFD analysis. In this study, the three-component velocity of multiple cross sections was acquired and layered using the stereo PIV method for a simple vehicle cabin model. This enabled the quantitative visualization of a complicated three-dimensional flow field in the passenger compartment. Furthermore, CFD analysis was performed using two different turbulence models, RANS and LES, to predict the flow field inside a simple vehicle cabin model, and the results were compared with the visualization results obtained by the stereo PIV method. As a result, it became clear that capturing the diffusion caused by the time-series fluctuations of the airflow is important for the accuracy of CFD predictions.

Key words : Heat • fluid, Air conditioner, Air conditioning/comfort, Computational fluid dynamics, PIV, Stereo PIV method

1. はじめに

車室内では空調の使用により、気流がシートやトリムなどの内装部品に衝突することで、複雑な三次元流れ場を形成している。この複雑な三次元流れ場を理解し、乗員快適性向上と空調負荷低減による燃費・電費向上を両立するために、開発初期段階から CFD を用いて車室内の流れ場を精度よく予測し、効果的な空調性能を開発することが求められている。

CFD による車室内流れ場の予測に関しては、Paul Dancă

ら⁽¹⁾により、市販車両の詳細なルーバー形状からの吹き出しに着目した CFD 解析が行われている。ルーバーから放出された気流流速及び乗員頭頂部の速度場に対して、PIV と RANS による定常解析が行われた。このように、車室内流れ場の予測においては、RANS による定常解析が用いられることが多い。一方で、時間変化に伴う時系列の流れ場を予測するために LES を用いた非定常解析に関する研究事例も報告されている⁽²⁾。このように CFD 解析では、各解析モデルにおける車室内流れ場の予測に対する特性を理解し、目的に応じて使い分けることが求められる。

*1,5~7 装備開発部
Interior & Exterior Components Development
Dept.

*2~4 技術研究所
Technical Research Center

一方、車室内の複雑な流れ場の把握には、高い空間分解能が得られる PIV による可視化が効果的であり、過去に多くの研究がなされている。Ozeki, Yang ら⁽³⁾⁽⁴⁾ 及び加藤ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾ による研究では、車室内の気流性状の把握と CFD 解析の予測精度検証のため、簡易的な 1/2 標準車モデルを用いている。インストールメンタルパネルにあたる部位に設けられた吹き出し口から気流が吹き出すベントモード及び乗員足元にある吹き出し口から気流が吹き出すフットモードの 2 仕様で PIV 計測を行っている。また、Huera-Huarte ら⁽⁷⁾ は、市販車両における車室内流れ場の計測技術を構築し、PIV による SUV 車両内の流れ場の定量評価を行った。これらの既往研究においては、いずれも二次元平面内の流速二成分から求めることができる車室内流れ場の結果を用いて議論している。車室内における複雑な流れ場を把握するためには、三次元的に流れ場を計測することが望ましいが、現状では、多数の二次元平面の速度分布から複雑な流れ場を推測するに留まっている。

そこで、本研究では、車室内流れ場に速度三成分を計測可能なステレオ PIV 法⁽⁸⁾ を適用することで、車室内における三次元流れ場を可視化する。得られた三次元流れ場の可視化結果から、CFD 解析の乱流モデルの違いによる解析精度の比較、及び対象流れ場におけるモデルの有効性を検証することを目的とする。

2. 計測手法

2.1 簡易車室内モデルの概要

流れ場の可視化に用いた簡易車室内モデルの寸法を Fig. 1 に示す。簡易車室内モデルは厚さ 3mm の透明アクリル板を用い、1400mm×600mm×700mm と実車の 1/2 スケールで製作した。また、モデル内にアクセスできるように側面の一部を開閉できる構造としている。

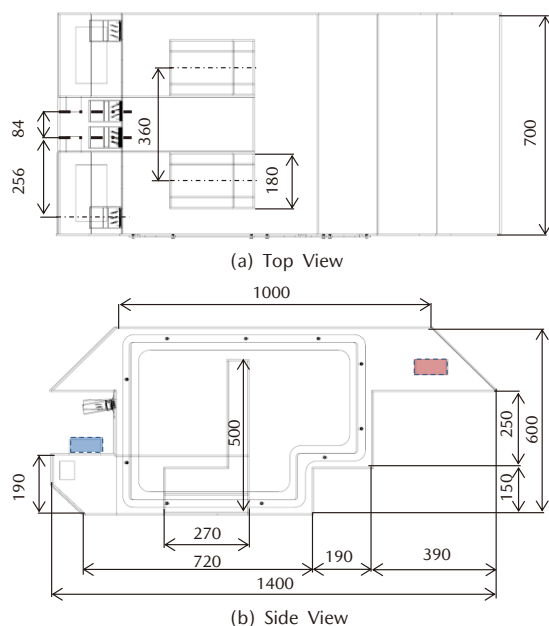


Fig. 1 Size of Cabin Model

2.2 空調設定

簡易車室内モデルは、蛇腹状のダクトを介して HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) から 4 か所の吹き出し口 (27mm×64mm) に向けて連結した。吹き出しモードはベントモードとした。総風量は、 $0.075\text{m}^3/\text{s}$ [$270\text{m}^3/\text{h}$] となるように定電圧で送風機を制御しており、実車における最大風量相当を再現している。流出口は外気導入 (以下, Fresh) を模擬した流れ場とするため、車室内後方の左右に 50mm×100mm の開口をそれぞれ設けた。また、内気循環 (以下, REC) を模擬する流れ場も再現できるように、車室内前席左側の足元に 100mm×180mm の開口を設けている。

2.3 ステレオ PIV 法による可視化手法

Fig. 2 に、ステレオ PIV システムの概要を示す。可視化領域は、ダクトからの吹き出しを含む簡易車室内モデルの前席とした。レーザーを水平断面に照射し、レーザー断面を通過する煙の挙動を上方から 2 台のカメラで撮影した。カメラには CCD カメラ (KATO KOKEN 社製 USB3.0 高速度カメラ k-8USB) を用いた。レーザーには、ダブルパルスレーザー (Beamtech Optronics 社製 New Vlite-200, パルス幅: 6ns ~ 8ns, 繰り返し 15Hz) を用いた。それぞれトラバース装置に固定し、上下方向に並行移動可能とした。レンズには、Nikon 社製 NIKKOR Z 50mm f/1.2 S を用いた。ダクトから吐出する煙には、オイルミストを用いた。発煙装置 (KANOMAX 社製 煙発生装置 Model 8304, 平均粒子径: $0.3\mu\text{m}$ ~ $1.0\mu\text{m}$) を用い、ホースを介して HVAC へ挿入することで、任意の濃度で煙を吐出可能とした。キャリブレーションには、10mm ピッチで等間隔にドットが印字された校正板 (KATO KOKEN 社製 二層式片面波型タイプ校正板) を用いた。2 台のカメラでそれぞれドットパターンを撮影し解析することで、物体座標と画像座標を関連づけた。前席の座面高さから上方に 5mm の位置を基準面とし、基準面から 10mm ピッチで合計 40 断面のデータを取得した。

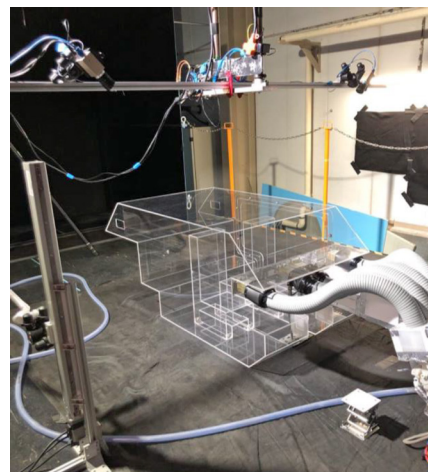


Fig. 2 Stereo PIV System

2.4 ステレオ PIV 結果の処理方法

解析ソフトウェアには、Flow Expert 2D3C (KATO KOKEN 社製) を使用した。解析アルゴリズムは、直接相互相関法を用いた。また、各計測断面におけるベクトル算出点は 5mm 格子で総格子数は約 51600 点、検査領域は 32pixel×32pixel、探査領域は主流方向を 15pixel、その他の方向は 10pixel とした。PIV 解析結果を csv 形式で出力し、Plot3D 形式に変換し、二次元断面上の速度三成分を積層することで三次元空間データを構築した。可視化結果の分析には、オープンソースのソフトウェアである ParaView を用いた。一断面あたり 500 枚の画像を撮影し、PIV 解析後、時間平均処理を施した。そのため、本稿で示す結果は時間平均場で議論する。

3. 解析手法

CFD における RANS 及び LES による数値解析条件を Table 1 に示す。いずれの解析も有限体積法を用いた。RANS では Realizable k-εモデルを用い、LES では WALE Sub-Grid Scale モデルの乱流モデルをそれぞれ用いた。Table 2 に計算条件を示す。LES において時間刻みは 0.0001 秒であり、定常解析の結果を初期値として 5 秒間の計算を行った。また、速度の平均値の算出には、計算が安定した後の 4 秒間を用いた。

Table 1 Numerical Calculation Method

		RANS	LES
Time Treatment		Steady	Unsteady
Turbulence Model		Realizable k-ε	LES WALE SGS
Discretized Scheme		Second order upwind	
Mesh Size [mm]	Cabin	3.0	3.0
	Super Fine Area	1.0	1.0
	Fins	0.5	0.5
Number of Mesh		24835000	24835000

Table 2 Numerical Conditions

	RANS	LES
Time step [sec]	—	0.0001
Density [kg/m ³]	1.184	1.184
Viscosity [Pa·s]	1.855	1.855
Inlet [m ³ /s]	0.075	0.075

Fig. 3 に、使用したモデルの車室内領域における計算格子を示す。計算格子はポリヘドラル格子を用い、車室内の格子サイズは、前席近傍が 3.0mm、後席近傍を 5.0mm とした。また、ダクトからの気流が通過すると考えられる吹き出し口から乗員の頭部、腹部に向かう領域は

1.0mm～2.5mm で細密化した。そして、吹き出し口内部のフィン近傍は 0.5mm であり、フィン間は境界層とポリヘドラル格子を合わせ 15 程度の格子を配置している。

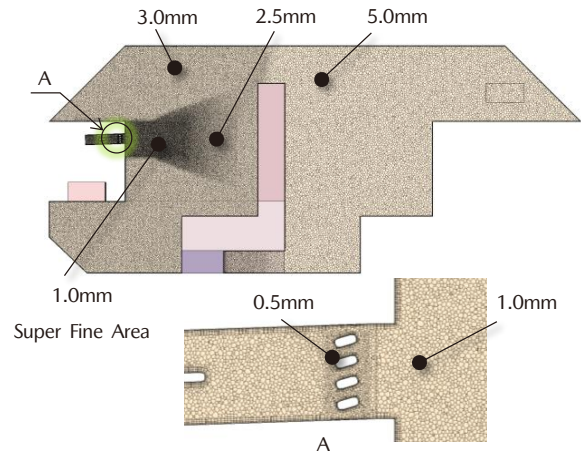


Fig. 3 CFD Model of Simple Cabin

4. ステレオ PIV 法による可視化結果

4.1 ステレオ PIV 可視化結果

Fig. 4 に、ステレオ PIV 計測により得られた Fresh 及び REC モードにおける 6.0m/s～9.0m/s の速度等値面を示す。また、Fig. 5, Fig. 6 に Fresh 及び REC モードの流線を示す。Fig. 4 及び Fig. 5 に示す Fresh モードの等値面と流線は、簡易車室内モデル右半分の撮影した煙の挙動が不鮮明であったため、左右対称の流れ場であると仮定し、左半分の結果を中央で反転し示した。

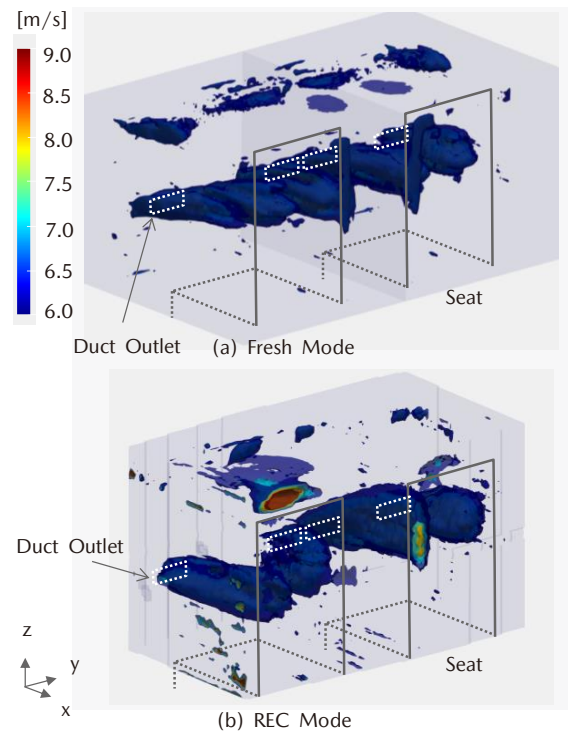


Fig. 4 Iso-Surface in Stereo PIV Method

Fig. 4 から、Fresh, REC モードともにダクト出口から流速の高い気流が生じていることが分かる。これは、Fig. 5, Fig. 6 に示す流線のコンターが赤色となる高風速領域からも見て取れる。また、Fresh モードに着目すると、Fig. 5(b) からシート座面上や天井付近など壁に衝突した流れが旋回し、渦を形成している様子が分かる。また、Fig. 5(c) から、流速の高い気流の周囲に旋回する流れが生じている。

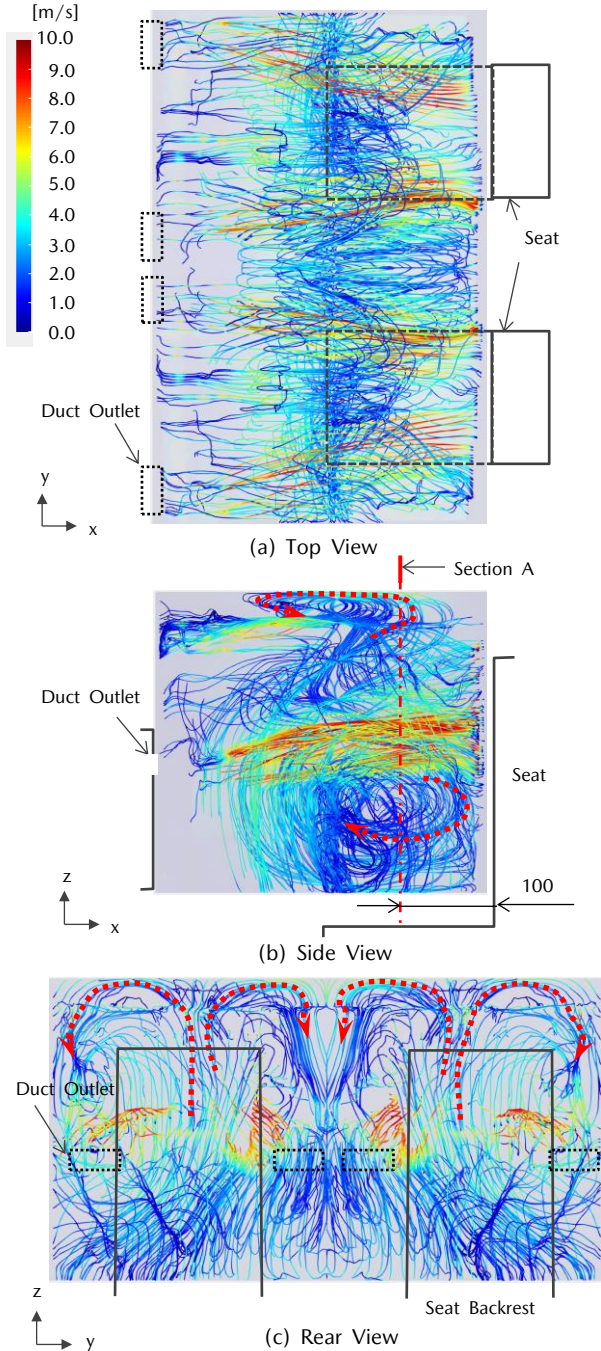


Fig. 5 Streamlines in Fresh Mode Obtained by Stereo PIV

一方、Fig. 6 に示す REC モードでは、車室内の流れ場は、左右非対称であり複雑な流れ場を形成していることが分かる。特に、右側の席から左側の席へ左右方向の流

れが発生し、流れの複雑性を強めている。これは、REC モードを模擬するために設置した吸い込み口が、前席左側の足元にあることから生じるものと考えられる。

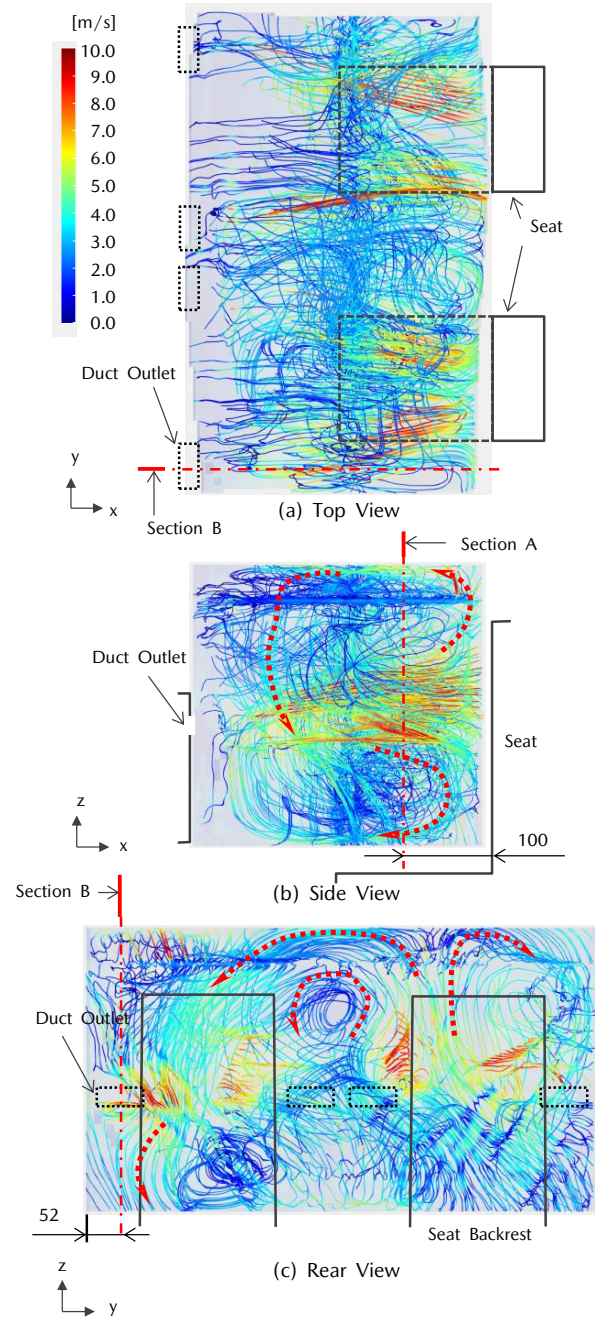


Fig. 6 Streamlines in REC Mode Obtained by Stereo PIV

4.2 CFD 解析結果との比較

Fig. 7 に、Fresh モードにおける各解析で得られた速度分布を示す。速度分布は、Fig. 5(b) に示した乗員着座位置にあたる A 断面とした。(a) から (c) の全ての速度分布において、Y 方向にダクト出口から吹き出す気流に相当する 4 つの高風速領域が存在する。これらの気流は、同一の高さに形成されている。また、気流の拡散について各解析結果の速度分布を比較すると、(a) PIV 及び (b) LES では 3.0m/s ~ 6.0m/s の領域で周方向に広く拡散し、

最大流速は (a) PIV で 9.0m/s, (b) LES では 8.5m/s である。一方, (c) RANS は気流の拡散領域が狭く, 最大流速は 11.9m/s と高風速を保ちながら乗員着座位置まで到達していることが分かる。

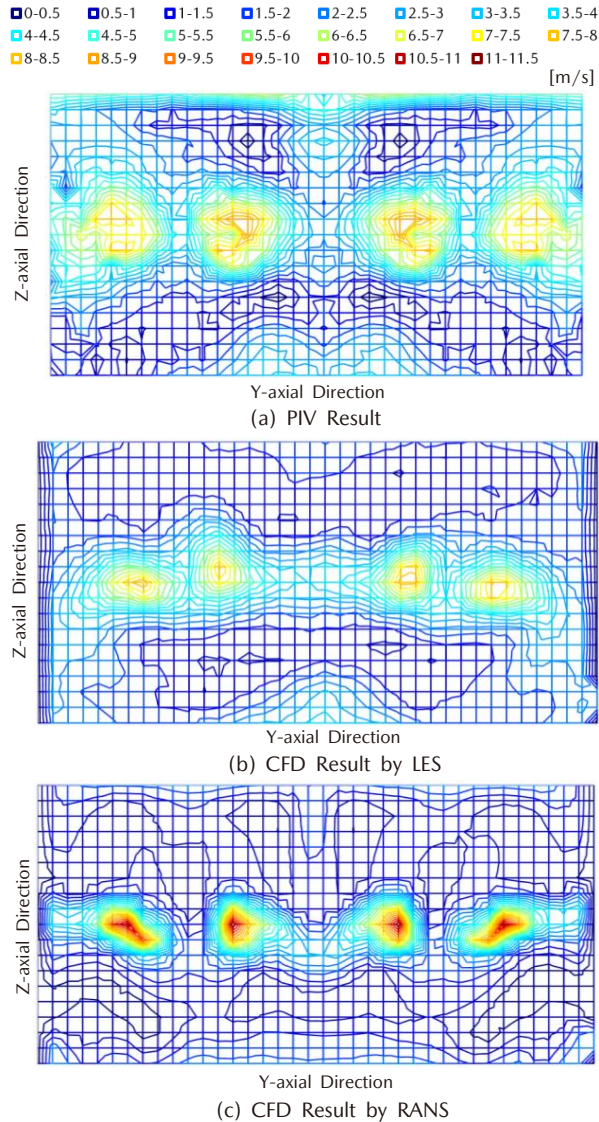


Fig. 7 Velocity Distribution in Fresh Mode at Section A

Fig. 8 に, REC モードにおける各解析で得られた速度分布を示す。速度分布は, Fig. 6 (b) に示した乗員着座位置にあたる A 断面とした。A 断面では, (a) PIV, (b) LES 及び (c) RANS とともに左外側のダクト出口から吹き出す気流は, その他 3 所気流とは異なり, やや低い位置に形成している。これは, 流れ場全体が, 流出口に吸い寄せられることで下方向へ向かう流れ場を形成しているためと考えられる。また, 気流の拡散に着目すると, (a) PIV 及び (b) LES では 3.0m/s~4.5m/s の領域にかけて周方向に広く拡散し, 最大流速は (a) PIV で 8.9m/s, (b) LES では 8.6m/s である。しかし, (c) RANS は Fresh モードと同様に気流の拡散している領域が狭く, 最大流速は 11.3m/s と乖離が見られる。

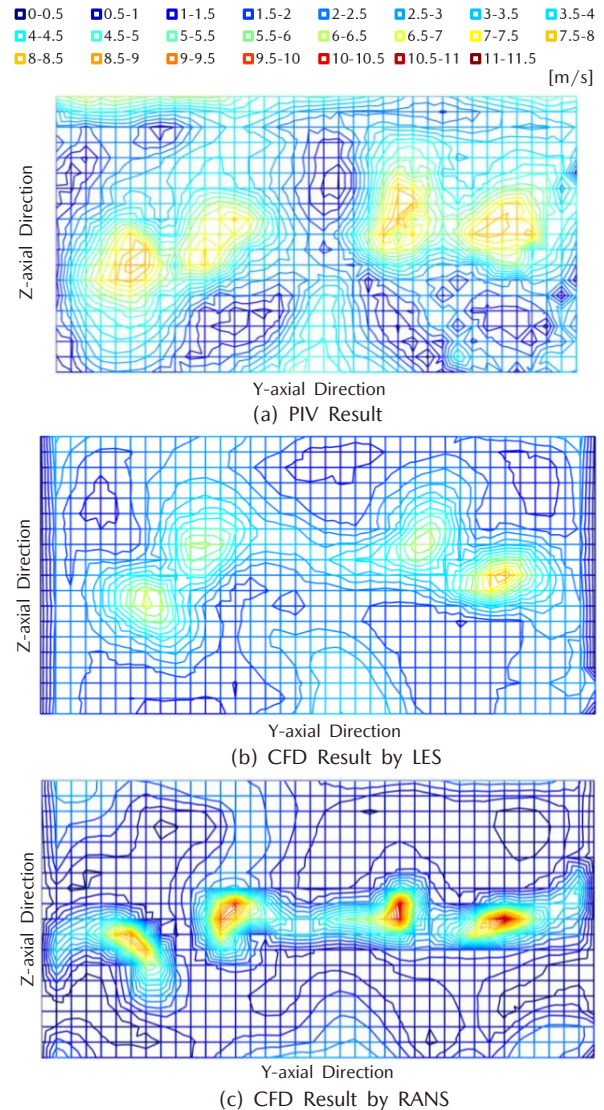


Fig. 8 Velocity Distribution in REC Mode at Section A

4.3 乱流エネルギーによる比較

ダクトから吹き出した気流の挙動は, 乗員やシートバックへ干渉し車室内に広がっていくため, 車室内流れ場の形成において非常に重要である。前節で示した, 乱流モデルの違いによる気流の拡散性について, その要因を調査するために乱流エネルギーの比較を行った。

Fig. 9 に, 各解析で得られた乱流エネルギー分布を示す。乱流エネルギー分布は Fig. 6 に示す B 断面とした。Fig. 9(a) に示す PIV 結果より, ダクト出口近傍において乱流エネルギーの高い領域が存在していることが分かる。Fig. 6 の流速の高い気流の位置と一致し, ダクトから吹き出す気流の変動がダクト出口近傍で顕著であることを示している。CFD 解析結果では, LES において PIV 結果と同様, ダクト出口近傍の乱流エネルギーの高い領域を確認できる。一方, RANS では, 吹き出した気流による乱流エネルギーの高い領域は, シートバックに到達するまで, ほぼ一定の値をとる。また, その絶対値は PIV や LES の結果と比較して小さい。つまり, LES では, 微小な渦

の挙動まで解像することにより、RANSと比べ、吹き出した気流の変動を再現していると考えられる。この変動の再現の有無が、前節で示した気流の拡散領域の差異に影響していると考えられる。

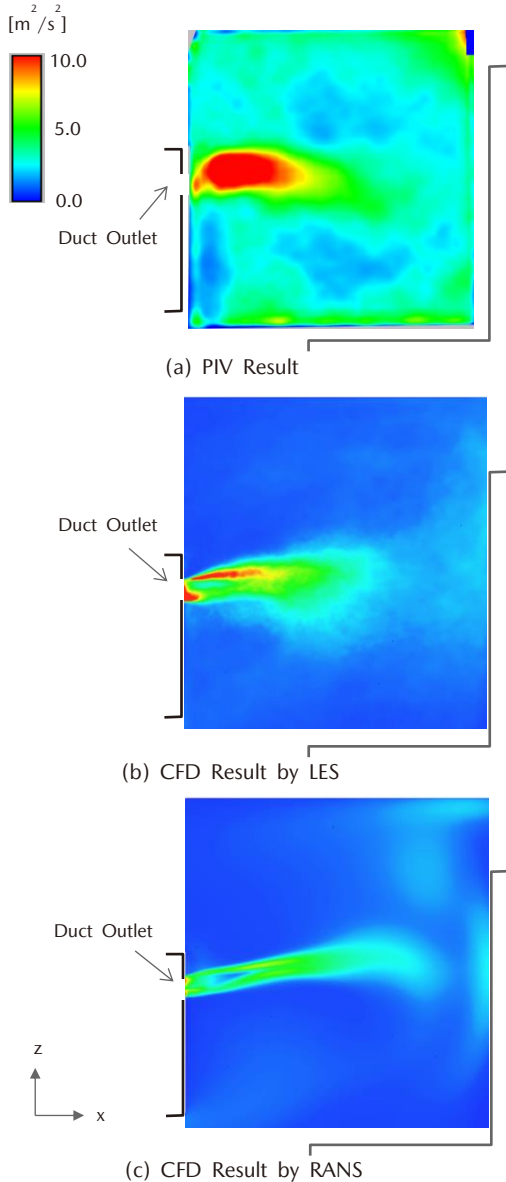


Fig. 9 Turbulence Energy Distribution in REC Mode at Section B

5. おわりに

車室内の複雑な三次元流れ場を理解し、効果的な空調性能開発を行うために、ステレオ PIV 法を用いて簡易車室内モデル内の三次元的な流れ場の可視化を行った。そして、RANS による定常解析及び LES による非定常解析から得られた予測結果との比較を行った。

・簡易車室内モデルの流れ場を対象に、ステレオ PIV 法で計測し、得られた速度分布を積層することで、車室内の複雑な三次元流れ場に対して定量的な可視化に成功した。そして、REC モードでは、前席左側に設置した吸

い込み口に気流が引き寄せられることで、左右方向の流れが誘起され、Fresh モードと比較し、より複雑な流れ場を形成することが分かった。

・ダクトから吹き出す気流においては、PIV からダクト吹き出し直後に乱流エネルギーが増大し拡散する様子が確認できた。RANS と比較し、LES ではこの現象を精度よく再現していることが確認できた。

・車室内の複雑な流れ場を精度よく予測するためには、ダクトから吹き出す気流の時系列的な変動に伴う拡散を LES によりとらえることが有効といえ、今後、モデルベース開発に活用する。

なお、ステレオ PIV 法による一連の研究は、広島大学次世代自動車技術共同研究講座・空気力学研究室の設備を用いて実施されたものであり、研究の進行に際して多大なるご協力をいただいた中島卓司准教授に心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Paul Dancă et al.: Experimental and numerical study of the flow dynamics and thermal behavior inside a car cabin: Innovative air diffusers and human body plumes interactions, Energy Reports 8, 992–1002 (2022)
- (2) 酒井 雅晴：大規模 LES 解析による車室内流れの再現と飛沫感染症防止技術の検討, HPCI システム利用研究課題 利用報告書 (2022)
- (3) Yoshiichi Ozeki et al.: Ventilation Characteristics of Modeled Compact Car Part 1 Airflow Velocity Measurement with PIV, SAE Technical Paper 01-0732 (2008)
- (4) Yoshiichi Ozeki et al.: Ventilation Characteristics of Modeled Compact Car Part 3 Airflow Velocity Distribution with Foot Mode, SAE Technical Paper 01-1065 (2010)
- (5) 東京大学生産技術研究所加藤研究室：キャビン模型内の換気効率測定実験報告書, 自動車技術会 車室内環境技術委員会委託研究 (2006)
- (6) 東京大学生産技術研究所加藤研究室：キャビン模型内の換気効率測定実験報告書, 自動車技術会 車室内環境技術委員会委託研究 (2008)
- (7) F.J. Huera-Huarte et al.: DPIV Measurements of the HVAC Aerodynamics Inside a Passenger Car, SAE Technical Paper 36-0214 (2014)
- (8) 西野 耕一：3次元 PIV の実現に向けて, 可視化情報学会誌, Vol.20, No.77, pp.113-119 (2000)

■著者■



伊藤 和樹



清水 圭吾



研井 暁



中村 優佑



吉田 真



浮田 英治



井上 実