

技術論文

ルーバ通過時の空気流れに関する研究 Investigation of Air Flow passing through Louvers

中西 利和
Toshikazu Nakanishi
中村 保
Tamotsu Nakamura
渡邊 陽一郎
Youichirou Watanabe
半藤 勝正
Katsumasa Handou
木綿 隆弘
Takahiro Kiwata

車両のエンジンルーム外装の吸排気部に用いられるルーバ構造はデザイン、安全及び騒音低減等の目的として用いられるが、背反事象としてラジエータ等に必要の冷却空気の流れが阻害される。必要な機能を満たしつつ、空気通過時の圧力損失を極力低減するルーバ形状の設計指針を得るため、ルーバ角度という基本的なパラメータに対する、圧力損失の特性を風洞計測にて求めた。また CFD（数値流体解析）の適用にあたり、計測結果との検証を行った。さらに、圧力損失のメカニズムを検討するために、流れの可視化を LDV（レーザドップラ流速計）、及びスモークワイヤ法にて行った。この結果、CFD により、角度変化に対する圧力損失の変化を良好に再現できることがわかった。また、可視化によりルーバ間の剥離渦が観察され、これによる流路の縮小が圧力損失の要因の 1 つであることを明らかにした。

The structure of louvers installed in the air intake and exhaust unit in the exteriors of the engine compartment of the vehicles is used for design, safety, noise reduction and other purpose. However, on the other hand, the louvers obstruct the flow of cooling air required by the radiator and other components. To know pressure loss characteristics as a parameter of the louver angle, Wind Tunnel measurement was performed in an effort to obtain design direction for louver shapes that minimize pressure loss when air passes through louvers while satisfying necessary functions. CFD (Computational Fluid Dynamics) was applied after verifying the measurement results. Additionally, the mechanism of pressure loss characteristic was studied by visualizing the air flow using LDV (Laser Doppler Velocimetry) and smoke wire method. As a result, it was found that CFD could have good agreement with measurement of pressure loss characteristic against louver angle variations. Visualization of air flows showed separation vortices between louvers, indicating that narrowing the flow path caused by a separation was one of the reasons for pressure loss.

Key Words: ルーバ、CFD、通気抵抗、LDV、速度ベクトル、スモークワイヤ、共同研究

1. 緒論

ルーバ (Louver) はよろい板などと訳され、車両の外装の空気導入部、建物の目隠し用フェンス、エアコンの吹き出し口などに見られ、空気を通しつつ、異物・光の遮断、騒音の減衰や流れの偏向などに用いる 2 次元フィンが並んだものである (図 1)。車両では、外気導入部の外装に使用されるルーバには様々形状があり、空気導入と内部保護に役立っている¹⁾。そして、車両のルーバから導

入された空気は、エンジンなどの熱交換器の役割を果たす放熱器 (ラジエータ) の冷却に使われ、その冷却効率はルーバから導入される流れによって左右される。ルーバの圧力損失が減少出来れば、ファンの回転数を減らすことが可能となり、騒音の低減やエネルギーの節約にも繋がる。

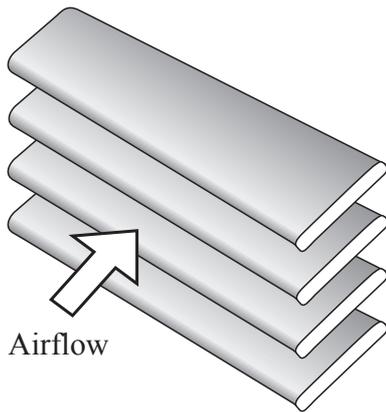


図1 一般的なルーバ形状

本研究では、車両などのエンジンルーム外装の吸排気部に用いられるルーバをモデル化した2次元形状の模型を作成し、ルーバを通過する空気の流れの特性を風洞を使用して調べた。実験では、ルーバを通過する際の空気の流れ易さの指標となる圧力損失の測定、スモークワイヤ法を用いたルーバ周辺流れの可視化実験や、ルーバ周辺の流れの剥離などをレーザドップラ流速計(LDV:Laser Doppler Velocimetry)を用いて計測した。さらに、実験と同じ条件でルーバ全体の流れ場を市販CFDコードのCFD++を用いた数値流体解析を行った。数値流体解析は、流れ場全体の挙動をつかむことが可能であり、実験では測定が困難な条件の解析や形状の変更が容易に行えるというメリットがある。本研究では、ルーバ形状の最適化のために、ルーバ通過時の流れの挙動を捉え、圧力損失の発生メカニズムを解析することで、空気通過時の圧力損失を低減するルーバ形状の設計指針を得るとともに、実験と数値流体解析の比較により、数値的な予測精度の検証を行う。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 風洞装置

本研究では、吹き流し型低乱風洞（日本カノマックス製 S1803-2）を使用した。測定部断面は、1200mm×300mmであり、風速10m/sでの速度分布の非一様性は±1%以内、乱れ強さは0.3%以下である。図2にレーザドップラ速度計及びルーバ設置時の測定部の写真、図3にルーバ模型を流路に設置した概略図を示す。図中の×印は圧力の測定位置であり、ルーバ模型の上流側で合計6箇所、下流側で合計10箇所設けられている。ルーバ模型前後の圧力差は、ゲッチングン型マノメータで計測した。

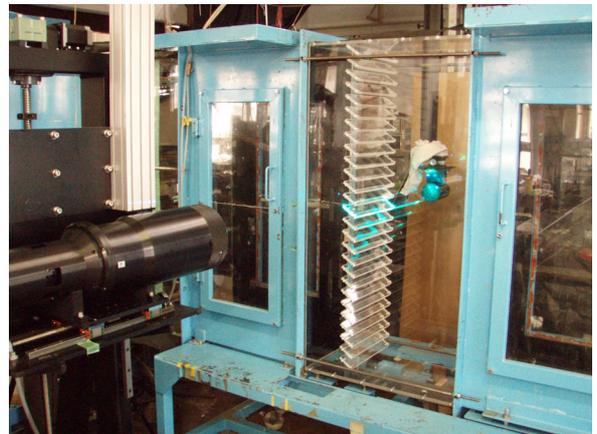


図2 風洞装置測定部

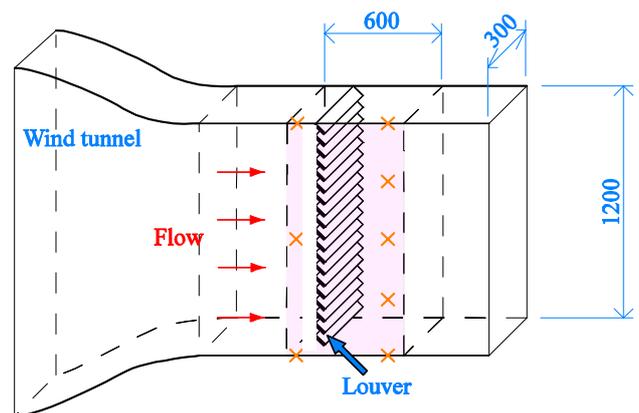


図3 風洞装置概略

2.2 供試模型

使用するルーバ模型は、平板型のルーバであり、その角度を変更したものを3種類用いた。図4にその形状を示す。角度は45°、35°、25°である。各角度において、下面への投影幅は50mmと共通であり、前面への投影に対して、隙間がないように配置、つまり前方から見て後方が見えないようにしてあるため、図のように角度が減少するにつれて、ルーバ間は狭まり総枚数が増加する。

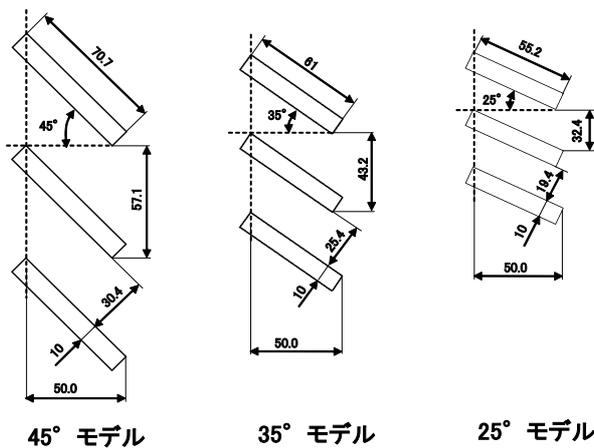


図4 ルーバ模型

2.3 レーザドップラ速度計装置

速度の計測手段として、大きく接触型と非接触型に分けられ、接触型としては、ピトー管やピラムと呼ばれる風車タイプ、又は熱線型が広く用いられている。非接触型としては、レーザドップラ速度計が知られているが、最近は画像処理によるPIV (Particle Image Velocimetry) も実用化されつつある。これらの風速計の中で、3次元の速度ベクトルを計測できるものは限られ、接触式では多孔ピトー管によるもの²⁾や熱線を回転させるもの³⁾がある。また非接触型ではLDVにおいてレーザビームを多軸化することで3次元速度ベクトルの計測が可能である。

本研究においては、ルーバ間の速度ベクトルを計測するにあたり、接触型のプローブを50mm×20mm程度の傾斜した空間に入れることが困難であり、また、入れることができたとしてもプローブ自身が流れに影響を及ぼすと考えられる。よって、非接触型の3次元LDV装置による計測を行うこととした。

研究で使用するLDVは、アルゴンレーザを利用して流

速を遠隔測定する装置である。プローブ内のレンズの焦点位置の3次元流速(速度ベクトル)を測定できる。プローブからビームが同一焦点に向かって放出され、トレーサから放出される微小な粒子にレーザ光が反射し、粒子速度によるドップラ効果を利用して速度を計測する。またトラバース装置によりプローブを3次元に平行移動できる。計測系を図5に示す。

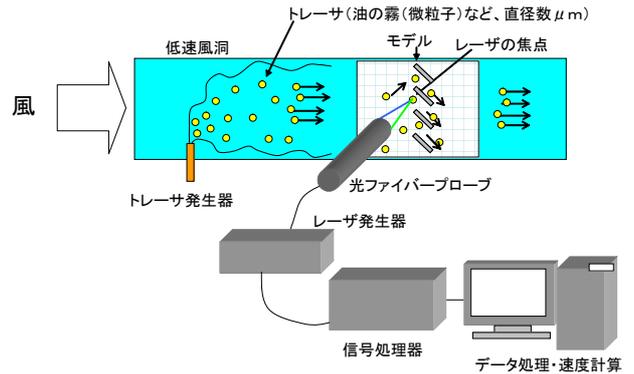


図5 LDV装置計測系

(計測原理)

LDVは、図6に示すように、2本のレーザビームを交差させることで、明暗のあるフリンジパターンを生成し、このフリンジを粒子が通過する時の散乱光をプローブ内の受光部で感知する。2本のビームで1次元の計測を行うので、3次元計測においては、周波数の違う3色の光(緑、青、紫)の計6本のビームを使用する⁴⁾⁶⁾。粒子径が比較的大きいため、前方散乱が強くなり、それを受光することで計測感度の向上が期待できるので、プローブと反対側にコーナキューブを設置し、その反射光を利用し前方散乱をプローブにて計測するようにしている。

このフリンジ間隔(d_f)は光の波長と交差角の半分で決まり、次式で表される。

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\kappa)} \quad (1)$$

- d_f : フリンジ間隔
- λ : 波長
- κ : 交差角の半分

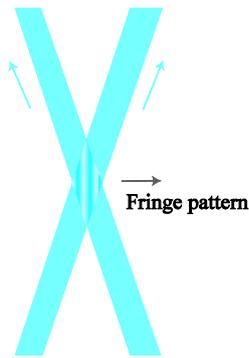


図6 ビーム交差によるフリンジ

また、この時のドップラ周波数 (f_d) は粒子の速度 U に対して、次のように求められる。

$$f_d = \frac{U}{d_f} \quad (2)$$

(周波数シフトによる正負速度の計測)

フリンジ間隔が計算され、フリンジに対するドップラ周波数が計測できれば、速度が求まるが、これでは、速度の絶対値がわかるだけで、その正負はわからない。このため、本LDV計測においては、ブラッグセル(Bragg cell)という音響光学変調機を使用し、片方のビームに“シフト”をかけて周波数を若干変化させている⁴⁾⁶⁾。これにより逆流の計測が可能となる。図7にこのシフトの考え方を示す。シフトをかけることで、ある範囲の負の速度域においてもドップラ周波数は速度と1対1に対応してい

る。このシフト分は信号処理段階で差し引かれる。シフトとフリンジパターンとの関係を図8に示す。シフトをかけることで、フリンジの様子は、シフトをかけたビームから、かけないビームへシフト分の周波数で移動し、粒子の速度に対して、シフト分のドップラ周波数を付加させることになる。つまり、粒子が逆の方向に流れたとしてもシフト周波数を超えない範囲での計測が可能となる。

本研究においては、 u , v , w , 3方向それぞれの主流の速度、逆流速度を考慮して、シフト及び測定周波数範囲を設定した。

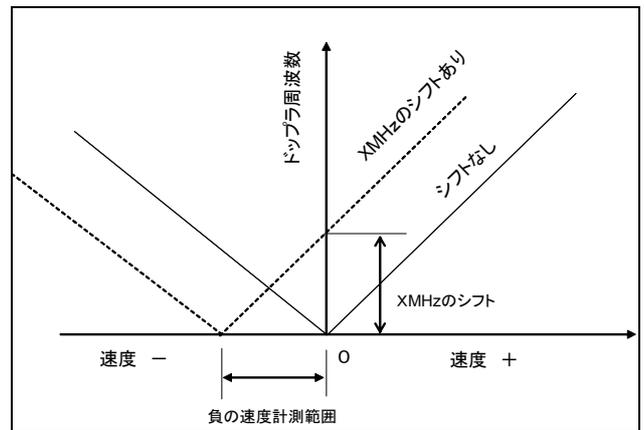


図7 シフトの概念

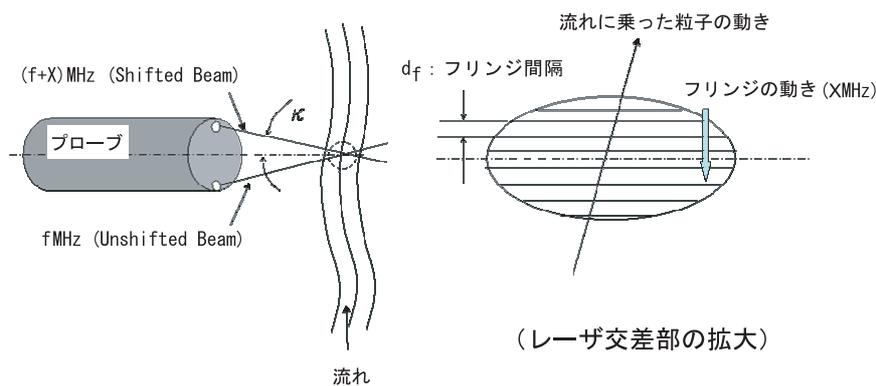


図8 フリンジパターンの動き

(トレーサ量の適正化)

計測において、散乱光を発生させるトレーサと呼ばれる油脂系の微小粒子の効果的な投入が重要な要因である。トレーサ発生装置はラスキン式の噴霧器であり、圧力、ノズル設置位置などの最適化により、計測部に十分な粒子が得られるような設定を行った。図9はレーザの計測部への集光状況であるが、計測部内部にトレーサが十分にある場合、このようにレーザ光を肉眼で見ることができる。

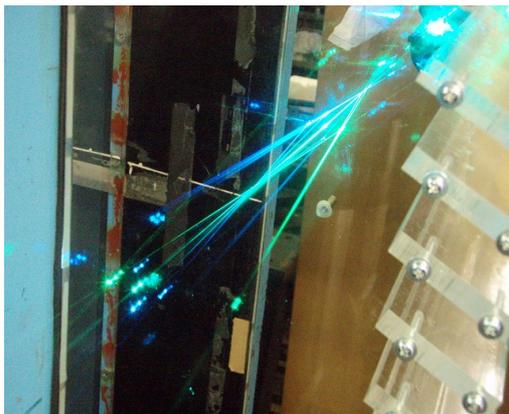


図9 レーザ光集光状況

3. シミュレーション (CFD) による解析

3.1 CFD モデル

CFDは、ルーバの構成、風洞の流れの状況が2次元であることを考え、2次元の解析モデルとした。これにより、計算時間の短縮やメッシュのコントロールのやり易さにおいて大きなメリットがあった。構成式は圧縮性N-S方程式であり、乱流モデルとしてk- ϵ 2方程式モデルを使用した。解析ソフトとして、市販のCFDソフトである「CFD++」(シーエフディプラスプラス)を用いた⁷⁾。

図10に今回のCFDモデルの概要を示す。風洞条件を2次元的に再現するため、上下寸法は1200mmと風洞と同じにした。よってルーバの数は実験と同じである。境界条件として、入り口は速度入力、出口は圧力条件である。上下、及びルーバ部はNo-Slipの壁条件とした。

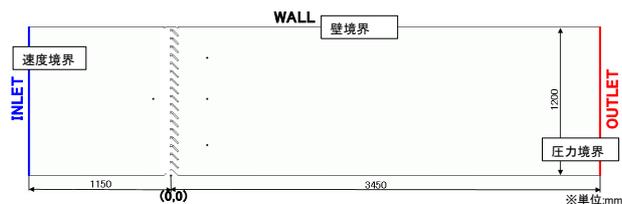


図10 2次元CFDモデル

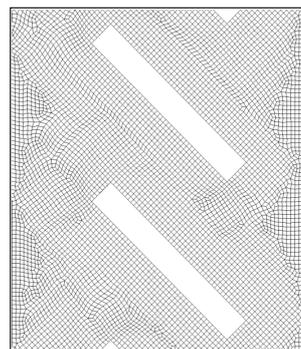


図11 ルーバ部メッシュ

ルーバ部のメッシュを図11に示す。ルーバ間のメッシュ生成においては、ルーバ間の流れが抵抗に影響することを考慮し、四角形(Quad)メッシュを用いた。これにより、ルーバ表面に流れに沿ってメッシュを置くことができるので、三角形メッシュ(Triangle)に比べ、高い精度が期待できる。

また、このような場合メッシュサイズとして問題となるのが、壁近傍をどの程度の大きさとするかである。流体力学的には、壁近傍の流れは粘性効果により粘性底層、対数領域と区分され、本来CFDにおいてもその現象を再現するためのメッシュを配置せねばならない。ただし、その場合、粘性底層までの解像度を得ようとすると、 10^{-5} mのオーダーとなり、解析上実用的ではない。このためCFDにおいては、壁法則を用いて対数領域に最初のメッシュを置くことで、直接的に粘性底層の流れを解かず流れを表す手法が用いられる。この指標として無次元距離 y^+ (ワイプラス)が用いられ、これを対数領域にすることが目安となる⁸⁾。今回は y^+ が40以下となるようなメッシュサイズを設定し、ルーバ近傍で1.5mm程度とした。また渦の生成も考え、ルーバ間を同程度のメッシュとした。

4. 実験及び計算結果と考察

4.1 圧力計測結果

圧力計測の結果と、CFDの結果を図12に示す。圧力はルーバ前方の圧力と後方の上部計測点の差圧が最も顕著なので、代表的にこの圧力を比較した。横軸にルーバ前方での風速、縦軸は基準圧力で無次元化した圧力差である。

この計測結果から、圧力差は速度のほぼ2次関数となっており、ルーバ通過流れにおいても一般的な流れに対する抵抗の特性をもっていることがわかった。また、角度が小さくなる、つまりルーバの流れに対する角度が浅くなると、圧力差が小さくなる傾向にある。前面に投影した隙間がないように設置するので、角度が小さくなると断面におけるルーバの占める面積は増加し、流路はせばまる(図4参照)。これにもかかわらず、大幅に圧力差が小さくなる結果となった。図13に、5m/sにおける45°の圧力差を基準とした各ルーバの圧力差の比を示す。圧力差は25°において、43%まで低下する。

CFDの結果も計測と同様な傾向を示しており、図12に示す圧力差の絶対値におけるCFDと計測の差は5m/sにおいて13%程度である。また、図13に示すように45°を基準とした比においては、2%(62%と64%)程度の差であり、今回実施したCFDがルーバ間の特性の違いを良好に再現していることがわかる。

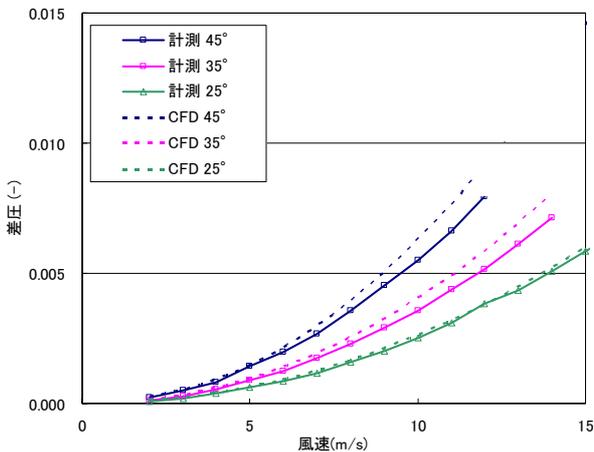


図12 各ルーバの圧力損失

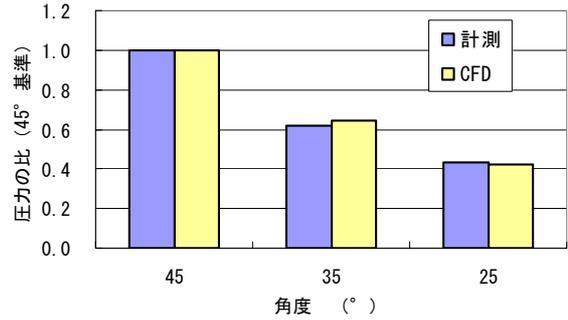


図13 圧力損失の低下割合

4.2 可視化結果

このルーバの圧力損失に対する流れの現象を調べるために、LDVによる速度ベクトルの計測、及び微風速におけるスモークワイヤ法による流れの可視化により、ルーバ周りの流れを調べた。さらに、CFDによる速度ベクトルの表示を行なった。

①LDVを用いた速度ベクトル計測による可視化

図14、15にLDVによる速度ベクトルを示す。風速は5m/sでほぼ中央のルーバを計測したものである。図より、ルーバ先端からの剥離とその後の渦の様子が明確に表れている。また角度が大きくなるとその渦が大きくなっている様子が見られる。これらから、流れに対しての角度が大きくなると剥離による渦によって流路が狭まることでルーバ間の速度が上昇し、その圧力損失により、圧力差が大きくなっているものと考えられる。

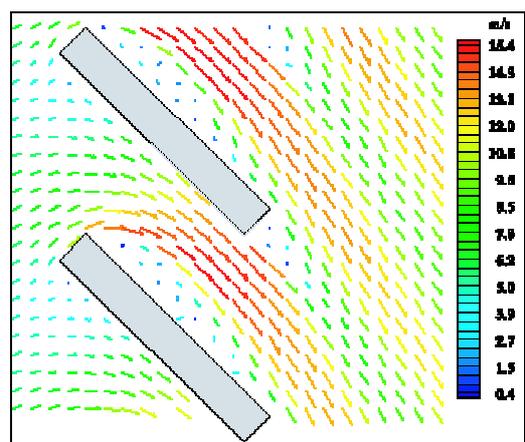


図14 速度ベクトル (45°)

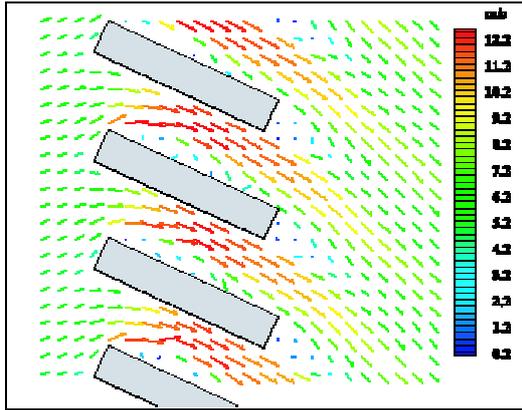


図 15 速度ベクトル (25°)

②スモークワイヤによる可視化

速度計で流れ場全体を計測するには時間がかかるため、剥離や乱れの様子、後流渦の周期性などをスモークワイヤ法による可視化観察で確認した。流れの可視化は、流路内に張ったφ0.2mmのステンレスワイヤに電圧を掛けて、その発熱による熱でワイヤに塗布した流動パラフィンから発生する煙の筋をデジタルビデオカメラで撮影した。本実験では、定性的な流れの状態を把握する目的で、煙が拡散しない程度の0.2m/sにて可視化を行なった。図16, 17にその結果を示す。

この可視化からも、微風速ではあるが、LDVの計測結果と同様にルーバ先端から剥離がおきており、45°の場合の剥離が大きいことが観察される。



図 16 スモークワイヤ画像 (45°)

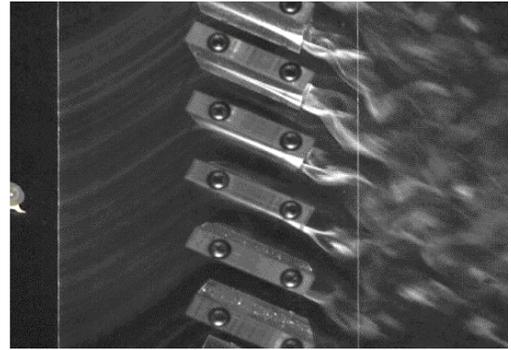


図 17 スモークワイヤ画像 (25°)

また、スモークワイヤ法の特長として、広範囲の流れ場を把握することが可能である。図18にルーバを含む下流域の様子を示す。ルーバ通過後の流れは下方に大きく偏向され、上方は逆流している様子が観察された。

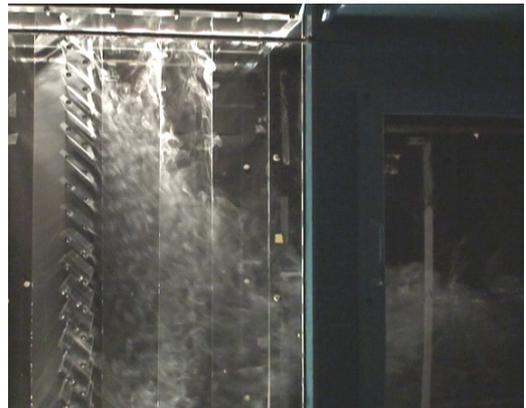


図 18 全体のスモークワイヤ画像 (45°)

③CFDによる可視化

CFDによる速度ベクトルは、空間を等分割した表示とした。図19, 20に見られるように、LDV及びスモークワイヤと同様にルーバ先端で剥離し、その後に渦を生じていることがわかる。また計測の傾向と同様に角度が小さくなるに従い、渦は小さくなる様子が見られる。

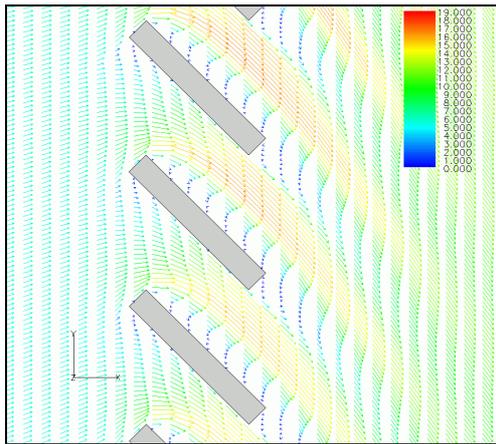


図 19 CFDによるベクトル図 (45°)

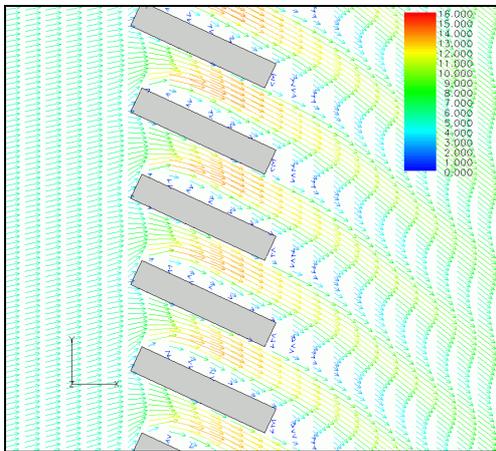


図 20 CFDによるベクトル図 (25°)

全体の流れの様子を図 21 に示す。図 18 のスモークワイヤ法による可視化画像と同様に、ルーバ通過後の流れは下方に偏向され、実験系全体のマクロ的な流れ場も CFD により再現していることがわかる。

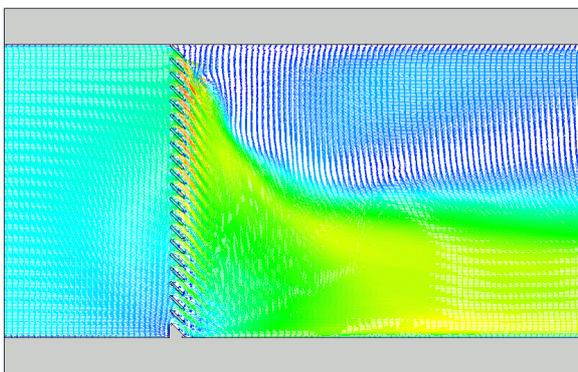


図 21 CFDによる全体ベクトル図 (45°)

5. 結論

本研究により、ルーバを通過する流れに関して、以下の知見を得ることができた。

- (1) ルーバ角度に対して通気抵抗は大幅に変化し、今回の場合、角度が 20° 変わることによって圧力損失は半分以下になる。
- (2) LDV 等の可視化実験で、この角度による流路抵抗の変化は、ルーバ先端からの剥離渦によるルーバ間の流路の狭まりによると考えられる。
- (3) CFD は今回のような形状において良好に流れの挙動を予測可能であり、設計ツールとしての有用性が確認できた。

6. 謝辞

今回の研究にあたり、実験、データ解析などご協力いただいた、元金沢大学学生の田中高志 様、CFD モデル作成に協力いただいた、(株)メイテックフィルダーズ 中井桜 様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢部充男, 中田国昭: “油圧ショベルの騒音低減”, KOMATSU TECHNICAL REPORT Vol.45, No.2, pp.12-23 (1999).
- 2) 小林正和, 久永直人: “多孔ピトー管による流速測定法”, KOMATSU TECHNICAL REPORT Vol.37, No.127, pp.3-14 (1991).
- 3) 中西利和: “エンジンルーム内流れ解析 (第 2 報)”, KOMATSU TECHNICAL REPORT Vol.45, No.2, pp.33-45 (1999).
- 4) TSI, Inc., FIND for Windows Version 1.4, Reference Manual, TSI Incorporated, St. Paul, MN, USA, 2000.
- 5) TSI, Inc., Model 9230 COLORLINK Plus Multicolor Receiver, Instruction Manual, TSI Incorporated, St. Paul, MN, USA, 1999.
- 6) TSI, Inc., Model 0833 5-Beam Fiberoptic Probe, Instruction Manual, TSI Incorporated, St. Paul, MN, USA, 2001.
- 7) 伊藤敦, 中西利和 他: “並列計算機による数値流体解析 (CFD) の高速化”, KOMATSU TECHNICAL REPORT Vol.51, No.156, pp.8-14 (2005).
- 8) 荒川忠一: 数値流体工学, 東京大学出版会

筆者紹介



Toshikazu Nakanishi
なか にし とし かず
中西利和 1986年、コマツ入社。
 現在、特機事業本部 技術研究所所属。
 博士（工学）。



Tamotsu Nakamura
なか むら たもつ
中村保 1975年、コマツ入社。
 現在、特機事業本部 技術研究所所属。



Youichirou Watanabe
わた なべ よういちろう
渡邊陽一郎 1982年、コマツ入社。
 現在、監査室所属。



Katsumasa Handou
はん どう かつ まさ
半藤勝正 1970年、コマツ入社。
 現在、コマツゼネラルサービス（株）所属。



Takahiro Kiwata
き わた たか ひろ
木綿隆弘
 現在、金沢大学 工学部 機能機械工学科
 流体工学研究室所属。 准教授。
 博士（工学）。

【筆者からのひと言】

本研究はコマツの全社的な産学連携プロジェクトの中で金沢大学との共同研究として実施されたものであり、会社、大学からの全面的なバックアップを得る事で効率的に進めることができた。企業と大学の立場の違いから、研究課題以外にも色々と解決せねばならない問題があり、本社や大学の事務局の方々にはお世話をかけた。しかし、大学という自由な雰囲気の中で先生、学生の方々と接することができ、有意義な時間を過ごす事ができた。企業の開発設計者も、たまには会社を離れて、大学などの外部研究機関との交流を持つことは、知識を得るだけではなく、柔軟な発想やモチベーションを高めるために良いことではないだろうか。今後とも積極的にこのような共同研究を実施していきたいと思う。