

製品開発におけるOpenFOAMの適用 第1報

Application of OpenFOAM in Product Development Phase

川村 岳晴*	塩澤 博行*	佐野 正宏*	依田 隆志*
Takeharu Kawamura	Hiroyuki Shiozawa	Masahiro Sano	Takashi Yoda
清野 豊人*	狐塚 裕美*	萩原 美佐枝**	藤川 洋史**
Toyohito Seino	Hiroimi kitsunezuka	Misae Hagiwara	Hiroshi Fujikawa
坂本 匠**	金 永球**	易 穎培**	
Takumi Sakamoto	Eikyuu Kin	Yingpei Yi	

要 旨

車両部品は市場ニーズの拡大と共に製品形状や仕様が多様化してきており、CAE需要が増大している。更なる適用拡大に向けて、計算機については自社サーバの高性能化やクラウド等の外部リソースの利用といった選択肢が検討出来る。一方で、解析ソフトウェアについては商用ソフトウェアの高額なライセンス費が課題となる。これを抑制するために、オープンソースの流体解析ソフトウェア OpenFOAM の利用を検討した。本稿では現在、開発で OpenFOAM を活用している製品について、実験結果や商用ソフトウェアとの解析精度検証を実施した事例紹介を行う。

Abstract

The shape and the specifications of automotive products continue to be diversified in response to the expansion of market demands. This required significant reduction in program development time. As a result the demand for Computer-Aided Engineering (CAE) continues to increase. As CAE models become bigger in size, we can consider to utilize higher performance computer, or to use outside resource such as cloud-based computing technology, which requires in most cases to add more software solver licenses. In either case, license cost of the commercial software is very expensive. Calsonic Kansei has considered utilization of open source CFD software named OpenFOAM. In this report correlation study between OpenFOAM and experiment result is presented during the product development for Duct, HVAC, Defroster, Blower and Motor Fan applications. The study shows good agreement between the physical and the simulation results.

Key Words : CAE / CFD / OpenFOAM / Simulation

1. はじめに

近年、CAEは製造業において効率的な製品開発に必要なツールとして認知され、一定の普及レベルに到達している。ハードウェア性能向上に伴うCPU単価の低下もあり、CAE用のコンピュータを導入し開発業務を実施することが容易になった。2015年でムーアの法則は50年を迎えたが未だ健在であり、計算機性能は継続して高速化している。カルソニックカンセイにおいては、CAEニーズは現状よりも大規模で複雑、そして高速な

計算が求められている。このような背景の中で現状より大規模なCAE解析を実施するためには、解析ソフトウェアを利用する上で継続的に発生している高額なライセンス費が課題になる。一般的な商用解析ソフトウェアにおいてライセンス費は年々値上がり傾向にある。そこで、大規模計算を安価に運用する方策が求められている。

本稿ではその方策の一つとして、オープンソースの流体解析ソフトウェアであるOpenFOAMの利用を検討した。

* グローバルテクノロジー本部 実験研究センター CAE・MBEグループ
** CKE CAE解析チーム

2. OpenFOAM 概要と課題

OpenFOAM は STAR-CD の開発元として知られる英 Imperial College の Gosman lab. で開発され、世界的に著名なオープンソースの流体解析ソフトウェアである。簡易形状に対して精度検証を実施している事例は見られるが、実製品のような複雑形状に対する検証事例はあまりない。そのため、製品開発で利用するためには詳細に精度検証する必要性があり、国内の製造業で製品開発に用いているという報告はほとんどなかった。近年、国内の自動車メーカー各社において利用検討事例が報告されてきているが、製品開発に運用出来ているという報告はほとんどない(1)(2)。カルソニックカンセイでは、現在 CAE を活用して開発している製品について、OpenFOAM と実験結果、既存の商用ソフトウェア (Software S, Software F) による解析結果と精度比較を実施し、商用ソフトウェアの置き換えが可能かどうかを検証した。

3. 曲り管流れによる精度検証

社内で実施している流体解析を分析すると、大半が内部流れ計算である。そこで、まずは基本的な内部流れ形状を用いて精度検証を実施することにした。ここでは、曲率を有する角管流れ (3) について検証を実施した事例を紹介する。

3.1. 解析モデルと解析条件

Fig. 1 に示した曲り管を用いて計算を実施し、実験や商用ソフトウェアによる解析結果と比較を行う。解析条件は定常の非圧縮性流体とし、レイノルズ数は約 40,000 の乱流場、乱流モデルは SST $k-\omega$ を使用した。

3.2. 解析結果

Fig. 1 の SECT1 における速度分布は放物線状となり、SECT2 は曲率に伴い管壁の外側に向かう流れにより二次渦が形成され、最大風速の位置は曲率の内側方向へと移動する。SECT3 では、SECT2 で形成された二次渦がより顕著に確認出来るようになる。Fig. 2 に各断面の中心風速と断面風速分布を商用ソフトウェアと比較した結果を記載する。ここでの Y 軸は断面ごとに Fig. 1 の矢印で示す方向を示している。OpenFOAM の解析結果は実験結果と同様に流れ分布の特徴を再現することが出来ている。SECT3 の速度の絶対値は実験と乖離する部分もあるが、この部分は商用ソフトウェアも同様に予測出来ていない。OpenFOAM は実験の風速分布を定性的に再現出来ていることが分かった。

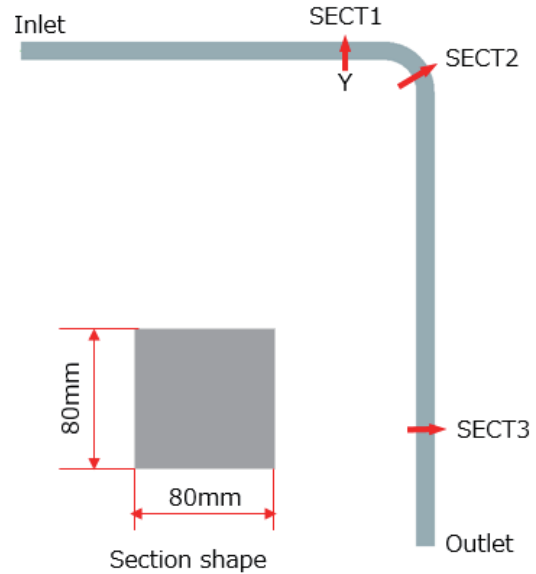


Fig. 1 Bent Pipe

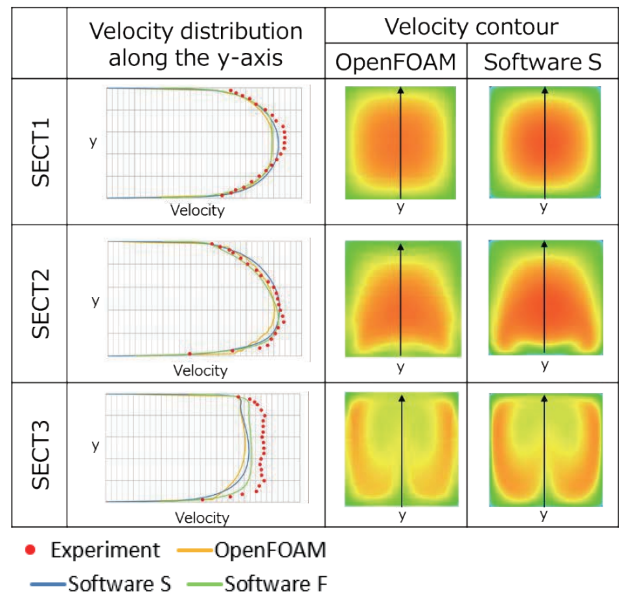


Fig. 2 Velocity Profile

4. ダクト通気抵抗解析への適用検討

実製品として空調用ダクトについて適用を検討する。同製品は送風機からの風を車室内に届けるために主にインストパネル内部に設置される。この空間はレイアウト制限が大きく、圧力損失をコントロールし各ダクトの配風量を決めるために CAE を活用した設計を行っている。ここでは、OpenFOAM による VENT ダクト通気抵抗解析への適用を検討する。

4.1. 実験手法

ダクト単体の圧力損失性能はダクト前後にチャンバーを設置し静圧 (= 全圧) を測定する。

4.2. 解析手法

(1) 解析モデル 実験同様にダクトと助走空間の前後にチャンバー形状を設けた形状をモデル化した。

(2) 解析条件 計算は定常非圧縮性とし伝熱は考慮していない。空気の物性は実験時相当の温度における動粘度を与えた。乱流モデルは SST $k-\epsilon$ を用いた。比較対象となる商用ソフトウェアも同様の解析条件を与えた。

(3) 解析結果 Fig. 3 に示すように前項の曲り管と同様に内部流れの分布を商用ソフトウェアと比較する。ほぼ同等の結果を得ることが出来ていることを確認出来る。次に、各ダクトの圧力損失を比較する。Fig. 4 に示す風量と形状違いの2仕様を比較した結果は、商用ソフトウェアと同等であり、実験結果に対し $\pm 5\%$ 以内の精度を得られることが分かった。

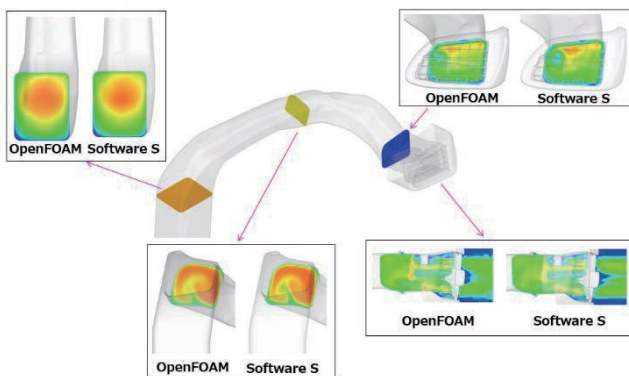


Fig. 3 Comparison of Software Performances (Velocity Distribution)

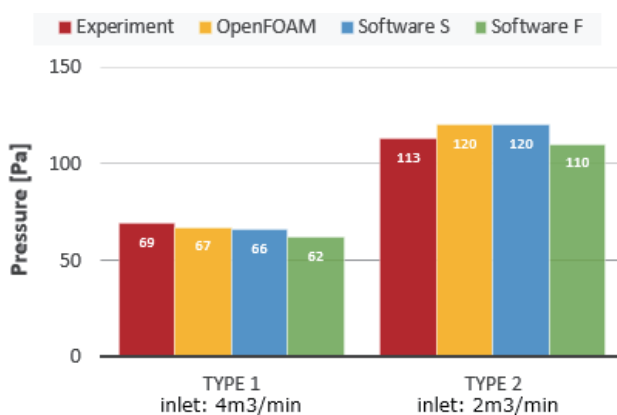


Fig. 4 Comparison of Software Performances (Pressure Drop)

5. HVAC 解析への適用検討

空調製品開発において、従来から CAE を多く利用している製品のついに HVAC がある (4)。本製品は、温風と冷風を混合し車室内に快適な風を送風することが目的であり、通気抵抗や温調性能を把握するために CAE が活用される。車用エアコンシステムの一つに頭寒足熱を目的とした VENT と FOOT 吹き出し口からの送風モー

ドがあり、各吹き出し口からの温度が目標値を満足するように HVAC ユニット内部構造を検討している。

ここでは、同モードにおいて実験と商用ソフトウェアとの結果比較を行った事例を紹介する。

5.1. 実験手法

実車搭載時の HVAC ユニットには2種類の熱交換器 (冷風を生成する Evaporator, 温風を生成する Heater Core) が設置され、主にエンジンの熱源を利用して熱交換が行われている。今回は冷風と温風を簡易的に模擬するために、冷風は低温室からブロウを用いて HVAC 内部へ導入させる。温風は H/C を一定温度で通水させることで生成し、温冷風の混合状態を再現する。各吹き出し口での温度は熱電対にて測定する。

5.2. 解析手法

(1) 解析モデル 解析空間はブロウ出口から各吹き出し口までとした。温調特性を決める幾つかのドアにおいては実験と同角度とした。

(2) 解析条件 計算は定常流れとし対流熱伝達を考慮する。空気は温度の関数として各物性値を与える。乱流モデルは standard $k-\epsilon$ を使い、乱流プラントル数は定数として与えた。壁面からの熱伝達は雰囲気温度を加味した熱抵抗として考慮している。熱源である熱交換器は単体実験で測定された圧損と発熱量を関数として与える。比較対象となる商用ソフトウェアも同等の解析条件を与えた。

(3) 解析結果 各吹き出し口からの出口温度を実験結果と比較すると、Fig. 5 に示すように $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内となっている。また、Fig. 6 および Fig. 7 に示すように風速や温度分布については、商用ソフトウェアとほぼ同等の結果を得ることが出来た。

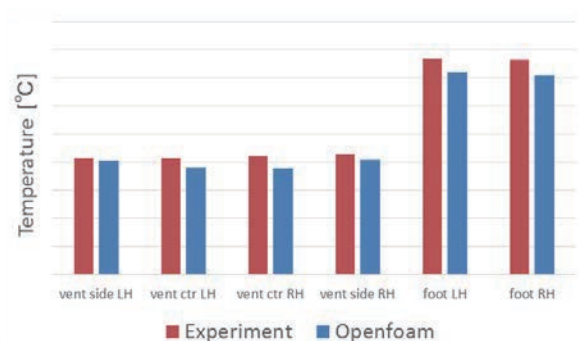


Fig. 5 Outlet Temperature

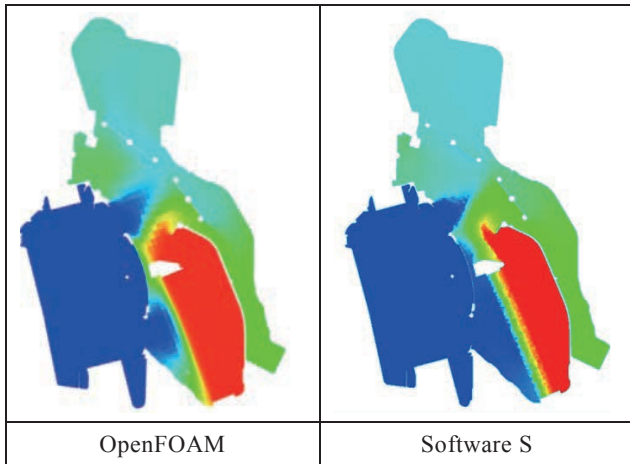


Fig. 6 Temperature Distribution

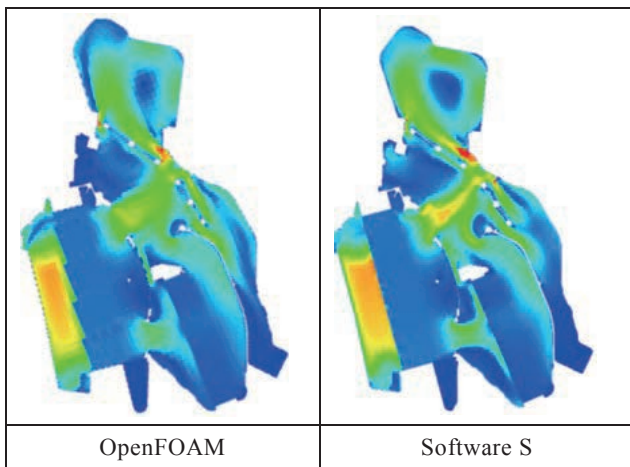


Fig. 7 Velocity Distribution

6. Windshield 窓晴れ解析への適用検討

HVAC を利用した空調機能の一つに windshield の窓曇りを除去するための defroster がある。窓曇れパターンと窓近傍風速との関係には相関があることが知られているため、windshield 風速分布を窓曇りの代替指標とし、製品開発プロセスで CAE を活用している (5)。また最近では HUD(Head Up Display) の高品質化に伴うインストパネル内部のレイアウト制限等もあり CAE の重要性が高まっている。

今回、OpenFOAM 解析精度検証用に実車模擬試験を実施し、windshield 内側近傍風速を測定し比較を行った。

6.1. 実験手法

通常 defroster ダクトの上流に HVAC ユニットがあるが、今回は精度検証を目的とするため Fig. 8 に示すような小型チャンバーを設け、windshield 近傍風速分布を測定した。

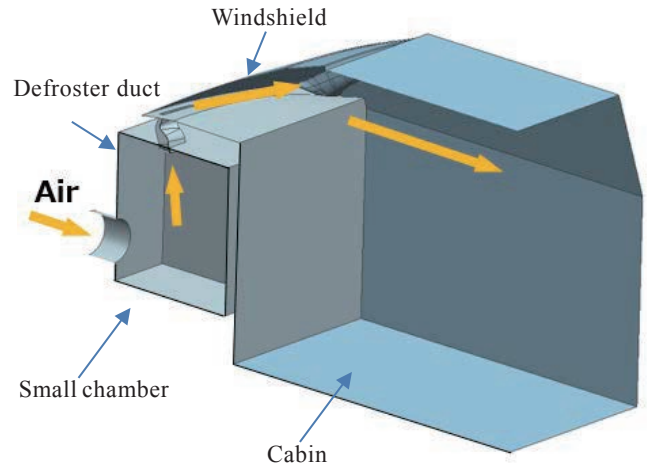


Fig. 8 Verification Small Chamber Model (Half Clipped View)

6.2. 解析モデルと解析条件

解析モデルは実験同等の空間を作成し、windshield 風速分布を確認する。計算は定常非圧縮性流れとし、乱流モデルは SST $k-\omega$ を用いた。

6.3. 解析結果

Fig. 9 は windshield から 5mm の風速分布である。実験結果と解析結果で、傾向が一致していることが分かる。Fig. 10 に windshield 上の全ての測定点における解析と実験間の誤差を示す。この結果から誤差範囲は概ね $\pm 2\text{m/s}$ 以内であることが確認出来た。

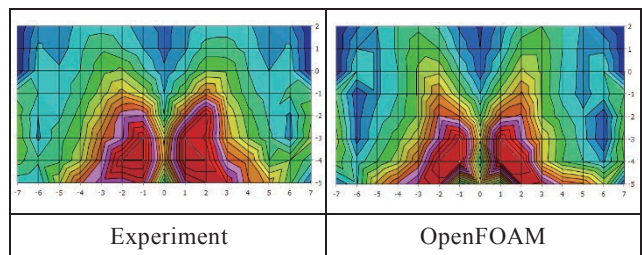


Fig. 9 Velocity Distribution

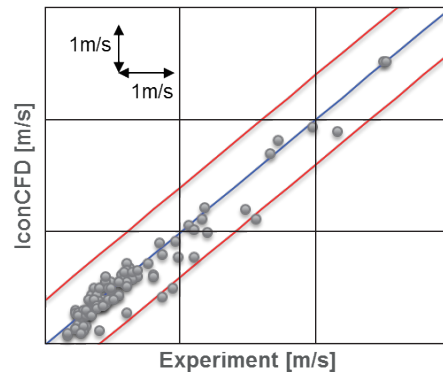


Fig. 10 Error Range of Velocity Between Experiment and OpenFOAM

7. 空調用ブロワ解析への適用検討

回転機器はファンやコンプレッサー、分離機のように様々な存在するが、何れも流体と回転機器間でエネルギー交換を行っている。そのため、流体力と相互作用する部位の形状によって性能が決まる。例えばファンの場合、ブレード枚数や配置等によって動作点や効率が大きく変わる。これらの特性を把握するためにCAEを活用している。

まずは、遠心ファンに対してOpenFOAMの検討を行う。遠心ファンは高い静圧特性で送風出来るため空調用ブロワとして用いられている。ここでは、特定流量時の入口静圧について実験や商用ソフトウェア間で精度比較を行う。

7.1. 実験手法

実験はブロワ単体の送風口にダクトを付けて実施し、流量と差圧、回転速度を測定する。

7.2. 解析手法

(1) 解析モデル Fig. 11に示すように吸い込みがあるブロワ上部に一定の大きさの空間を設定し、吹き出し口には延長ダクトを設けた。

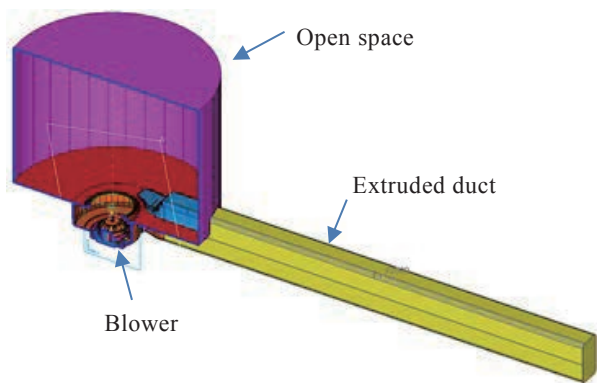


Fig. 11 Analysis Model

(2) 解析条件 計算は定常非圧縮性流れとし、翼の回転はMRF法により回転領域に運動量を与える。比較対象となる商用ソフトウェアも同様の解析条件を与えた。

(3) 解析結果 Fig. 12に示した入口静圧を確認すると、OpenFOAMの結果は実験値と約10%の乖離はあるが、商用ソフトウェアとほぼ同等の結果である。

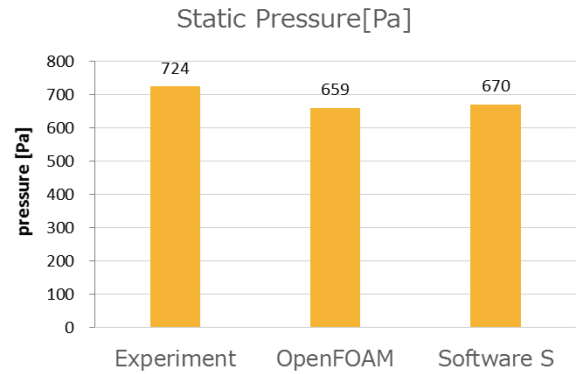


Fig. 12 Static Pressure

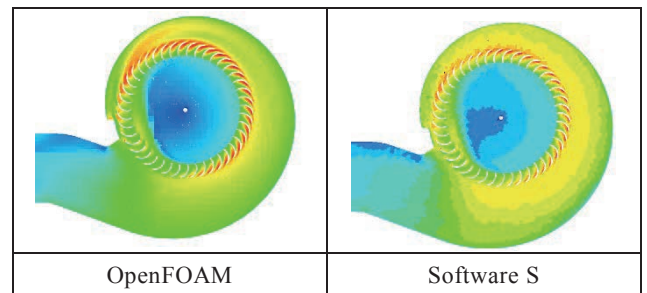


Fig. 13 Velocity Distribution

8. モーターファンへの適用検討

軸流ファンであるモーターファン（ラジエータ放熱用ファン）にて検討を行い、ファン効率について実験や商用ソフトウェアとの精度比較を行う。

8.1. 実験手法

モーターファンはシュラウドと組みつけた状態で風洞に取り付け、風量(Q)と静圧差(P)、回転数(N)、トルク(T)を測定し、これらの測定結果からファン効率(ϕ)を

$$\phi = \frac{P \times Q}{2\pi \times N \times T}$$

にて算出する。

8.2. 解析モデルと解析条件

実験同様にシュラウドを組みつけた状態とし、前後に一定領域の開放空間を設けた状態とする。解析条件は前項のブロワ同様の条件とした。

8.3. 解析結果

流量違いで3仕様の計算を実施した。ファン効率はFig. 14およびFig. 15に示すようにOpenFOAMの結果は実験とは約10%乖離するが、流量変化に伴うファン効率の傾向は再現しており、商用ソフトウェアと同等の結果が得られることが確認出来る。

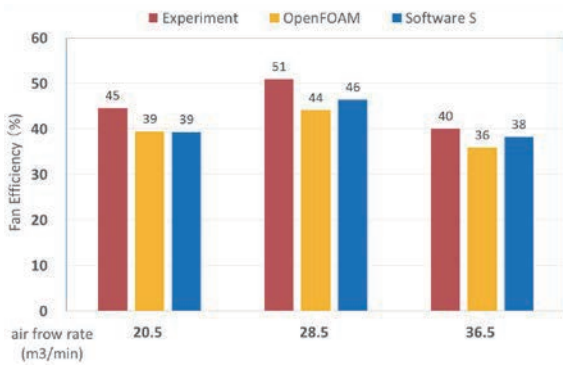


Fig. 14 Fan Efficiency

Air flow rate 20.5m3/min

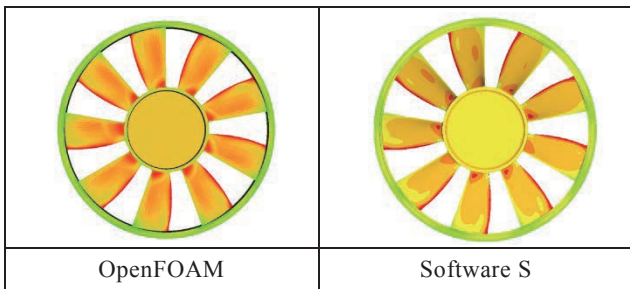


Fig. 15 Static Pressure Distribution

9. おわりに

本稿ではCAEを活用している製品について、OpenFOAMと実験結果、既存の商用ソフトウェアの解析結果と精度比較を実施した。その結果、商用ソフトウェアと同等の解析精度を得られていることが分かり、製品開発に用いることを可能とした。今後は、既存手法を高速化・精度向上し、適用領域も拡大していく。

最後に、本活動に関してご協力を頂いた関係各位について、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 平間 悠也, 他:自動車室内温熱環境予測におけるOpenFOAMの実用性, 空気調和・衛生工学会論文集, 2014
- (2) 鈴木 芳雄, 他:OpenFOAMを用いたHVACシミュレータ, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.150-11, 2011
- (3) MEASUREMENT OF FLOW RATE IN SQUARE-SECTIONED DUCT BEND, JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS 49, 2, pp.301-311, Warsaw 2011
- (4) 王 偉民, 他:カーエアコン温調特性シミュレーション, CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW vol.5, 2008

- (5) 小暮 正幸, 他:デフロスタ性能シミュレーション, CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW vol.4, 2007



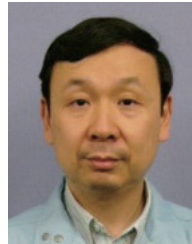
川村 岳晴



塩澤 博行



佐野 正宏



依田 隆志



清野 豊人



狐塚 裕美



萩原 美佐枝



藤川 洋史



坂本 匠



金 永球



易 穎培