

OpenFOAM を用いた自動車空力解析-並列化効率の検討-

Numerical Study of Car Aerodynamics with OpenFOAM - Research for Parallel Performance -

- 川島直大, 東理大院, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail:j4512620@ed.tus.ac.jp
山本誠, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail:yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp
児玉勇司, 横浜ゴム(株), 神奈川県平塚市追分 2-1, E-mail:kodama-yuji@hpt.ryc.co.jp
小石正隆, 横浜ゴム(株), 神奈川県平塚市追分 2-1, E-mail:koishi@hpt.ryc.co.jp
Naohiro Kawashima, Grad. School of Tokyo Univ. of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
Makoto Yamamoto, Tokyo Univ. of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
Yuji Kodama, The Yokohama Rubber CO.,LTD., 2-1 Oiwake, Hiratsuka-shi, Kanagawa
Masataka Koishi, The Yokohama Rubber CO.,LTD., 2-1 Oiwake, Hiratsuka-shi, Kanagawa

In recent years, low fuel consumption attracts much attention in the automotive industry from the viewpoint of environmental problems. The aerodynamic drag reduction of a car is one of the most important issues for low fuel consumption. However, the flow mechanism in a wheel house has not been clarified in detail. On the other hand, recently it is shown open-source CFD toolbox OpenFOAM is useful for engineering problems. However, it is not clear of computational performance. Therefore, the flows around a car are simulated by RANS using OpenFOAM, in order to investigate the computational performance. Two cases are computed; tire with wheel and tire without wheel. The simulation results confirm the parallelization performance. Additionally, the effect of wheel houses is clarified.

1. 緒言

自動車は主要な交通輸送手段であるが、近年の石油燃料の枯渇や地球温暖化への影響から自動車の低燃費化が求められている。自動車の燃費向上において空気抵抗の削減は重要な課題である。自動車の空気抵抗においてボディ形状の影響は大きい。ボディ形状はデザイン性や居住性から空力的に理想な形状を求めることは容易ではない。そこで、タイヤに注目する。タイヤは形状の変化が比較的容易であり、取り換えが可能なたま様な車種への汎用性が高いという利点もある。実験ではタイヤ付近やホイールハウス内の流れのメカニズムを解明することはコストや実験施設の問題から難しいが、CFD なら計算によって得られた結果を可視化することでそれが可能である。また、タイヤサイド部分の形状変化によって車両の抵抗低減が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

数値計算にはオープンソースである OpenFOAM を用いる。OpenFOAM は、多軸のスライディングメッシュを用いた計算や、自動並列計算が可能である。また、自動車における計算例もあり、その有用性が認められている⁽³⁾。しかし、自動車の空力解析においてクラスタマシンを用いてどれだけのパフォーマンスを示せるか不明である。

本研究では、OpenFOAM で自動車空力解析を行うにあたって、並列化の性能検討を行う。また、木村らの計算では考慮されていないホイールの有無による影響を調査する。そして、今後の新たなエコタイヤ開発の指針を得ることを目的とする。

2. 数値計算手法

本研究では、三次元非圧縮性乱流場を取り扱う。流れ場計算のソルバーにはオープンソースである「OpenFOAM」を用いる。支配方程式として、連続の式、ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルには Launder-Spalding (1974) の高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルを用いる。速度・圧力解法として、PISO 法と SIMPLE 法をミックスさせた PIMPLE 法を適用、時間項にはオイラー陰解法を適用する。空間離散化には接点中心有限体積法を用いており、方程式の全ての移流項には二次精度風上差分法、その他の項には二次精度中心差分法を採用する。また、格子生成には「Pointwise」を用いて非構造格子で空間を離散化する。

3. 計算対象及び計算条件

3. 1. 計算対象

図 1 にタイヤモデルを示す。本研究ではホイールの有無がホイールハウス内の流れに与える影響を調査するために、ホイールを壁面として付加したホイール付きタイヤ(w/ Wheel)と、ホイールを取り外したホイールなしタイヤ(w/o Wheel)の 2 ケースの計算を行う。また、本研究の計算に用いる車体形状を図 2 に示す。ここで、車体全長 $L = 1115 \text{ mm}$ 、車高 $H = 368 \text{ mm}$ である。

3. 2. 計算領域

計算領域を図 3 に示す。車体を中心断面で対称として取り扱い、車体半分で計算を行う。計算領域は流れ方向×横方向×高さ方向に $9L \times 4H \times 4H$ とし、車体前後に十分な領域を確保する。一般に、ブロックage比は 4%以下であれば境界の影響を無視できる解が得られるとされているので、本計算では 3.1%とする。ホイール付きモデル、ホイールなしモデルでセル数はそれぞれ約 415 万セル、約 485 万セルである。

3. 3. 境界条件

本計算において、流入境界条件に、主流流速 30 m/s の一様流を与える。なお、流入気流は乱流であるとし、主流の 1%の乱れを与える。乱流レイノルズ数 $Re = 500$ として流入部の k, ϵ を設定する。流出境界は自由流出、中心断面は対称境界とし、その他は滑り境界としている。車体は滑りなし境界とし、壁関数を用いる。床面にはムービングウォールを設けてあり、主流と同じ速度を与えている。タイヤ内側側面にはスライディングメッシュ法を適用し、その他のタイヤ部分には速度境界条件を適用する。

3. 4. 並列化計算

ホイール付きタイヤ(w/ Wheel)のケースにおいて OpenFOAM を用いた計算における並列化の検討を行う。計算条件は上述の通りで、10 ステップの計算を行い比較する。計算機は Intel® Xeon® Processor X5460 を用い 2CPU、8 コアで構成され、4 ノード使用する。また、ノード内並列、ノード間並列による比較を行う。ノード間並列計算の場合の使用コア数は各ノードで均等になるように

している。つまり、ノード間並列計算において 8 コア使用の場合は、4 つのノードで各 2 コアずつを使用している。

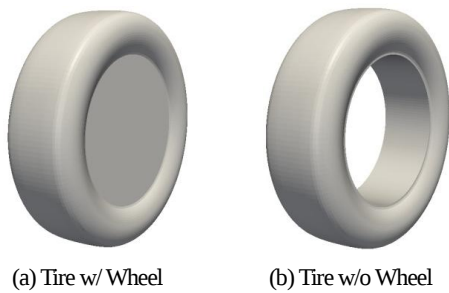


Fig. 1 Tire Model

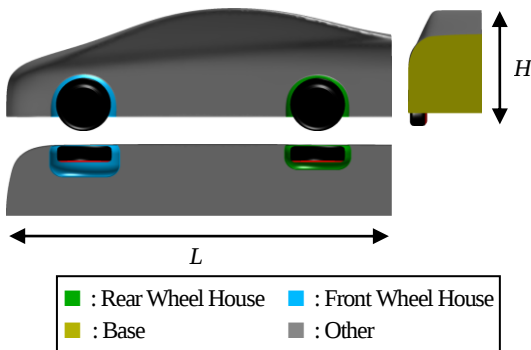


Fig. 2 Body Model

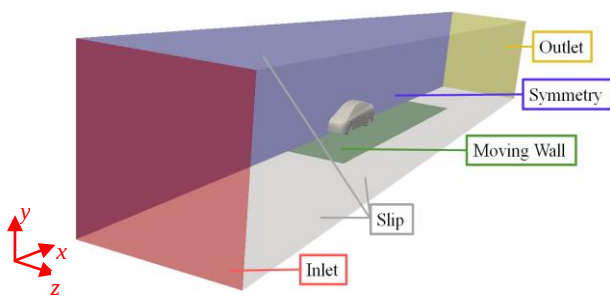


Fig. 3 Computational Domain and Boundaries

4. 結果及び考察

4. 1. 並列化効率

図 4, 図 5 に高速化率, 並列化効率を示す。それぞれノード内並列とノード間並列の結果を示す。高速化率 S , 並列化効率 E はそれぞれ式(1), 式(2)より算出する。

$$S = \frac{T_p}{T_s} \quad (1)$$

$$E = \frac{S}{n} \quad (2)$$

ここで、 T_s は単体実行時の計算時間、 T_p は並列実行時の計算時間、 n はコア数である。図 4, 図 5 から、ノード内並列よりノード間並列の方が高速化率, 並列化効率が良い結果を示している。しかし、ノード間並列の場合も 1 ノードで使用するコア数を増やすと並列化効率が落ちている。OpenFOAM は MPI を前提にした並列化であり、ノード内で使用するコア数を増やすと効率が格段に落ちることが分かる。高速化率は 16 並列で頭打ちになっており、限界であるといえる。さらにパフォーマンスを向上するためにはノードの増設やプログラムのチューニングが必要である。

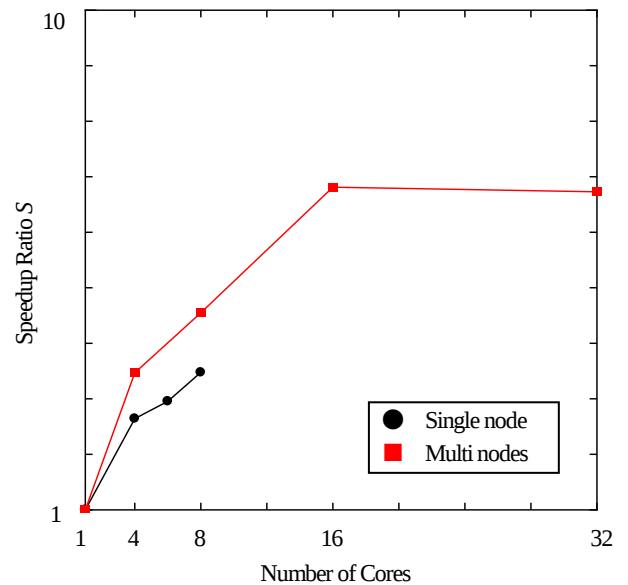


Fig. 4 Speedup Ratio

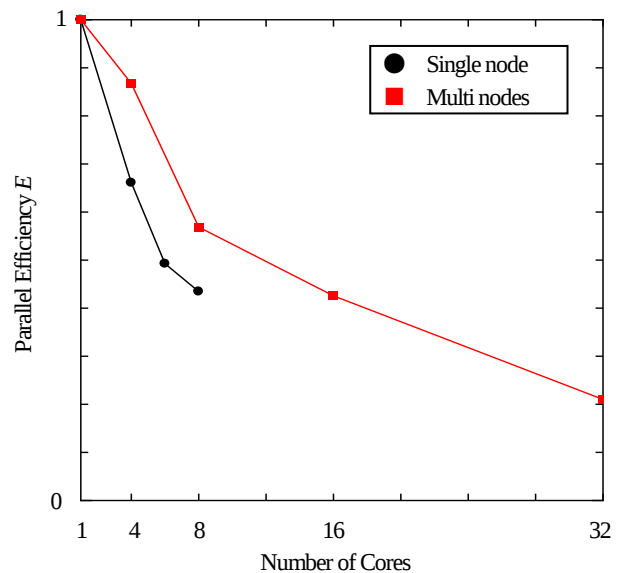


Fig. 5 Parallel Efficiency

4. 2. ホイール有無による比較

表 1 に各ケースにおける C_D 値を示す。トータルでホイールなしタイヤの方がホイール付きタイヤより抗力が大きくなっている。これはホイールなしタイヤはホイールがない中空部分下流に流れが衝突することで抗力が増加するためである。

図 6 にホイールハウスにおけるホイールなしタイヤとホイール付きタイヤの圧力差を示す。つまり、値がプラスならホイールなしタイヤの圧力が高く、値がマイナスならホイール付きタイヤの圧力が高くなる。ホイールハウス後方において、下方ではホイール付きタイヤの圧力が高く、上方ではホイールなしタイヤの圧力が高くなっている。ホイールハウス前方においてはホイール付きタイヤの圧力が高くなっている。

図 7 にそれぞれのケースのフロントタイヤ周りの流線を示す。それぞれ、上図が車体内側からホイールハウス内を見た図、下図が車体外側から見た図になっている。ホイール付きタイヤの場合、ホイールハウス下方に入った流れが後方で外から入ってくる流れと衝突することで巻きあがり、タイヤの回転によって前方へ流れ

ていく。そのため、ホイールハウス後方下部および前方に流れが衝突し、圧力が高くなる。ホイールなしタイヤの場合、そのような流れは見られない。図8にホイールなしタイヤにおけるフロントタイヤ中心断面の速度ベクトルを示す。主流上流方向からの視点である。また、カラーコンターは主流方向速度である。図から、タイヤ中空部分を通る流れは、主にホイールハウス内から外に向かう流れだということが分かる。図7(b)を見ると、タイヤ中空部分から外に出た流れとタイヤ外側の流れが衝突し、タイヤ後方上部からホイールハウス内に流れていく。この流れとホイールハウス内からの流れが衝突しながらホイールハウス後方上部に衝突するため、圧力が高くなることがわかる。

図9にそれぞれのケースにおけるリアタイヤ周りの流線を示す。それぞれ、上図が車体内側からホイールハウス内を見た図、下図が車体外側から見た図になっている。ホイールハウス後方では、フロントタイヤと同様に、タイヤ外側からホイールハウス内に入る流れとホイールハウス内から外に出ていく流れが衝突する付近で圧力が高くなり、その箇所がホイールハウスの有無によって変わるため、各ケースで圧力に違いが生まれることがわかる。ホイール付きタイヤのケースにおけるホイールハウス内の流れは、フロントタイヤと比べてリアタイヤでは大きな循環する流れは見られない。また、ホイール無しタイヤのケースにおけるホイールハウス内の流れは、フロントタイヤに比べて、タイヤ中空部分に複雑な渦を形成していることが分かる。これは、フロントホイールハウスよりリアホイールハウスの方が高さがあり、幅が小さいという形状が関係していると考えられる。リアホイールハウス上部とタイヤ上部との間のスペースがフロントホイールハウスより大きいので、ここに流れる流れが多くなるので違いが生まれる。しかし、ホイール付きタイヤはホイール無しタイヤのように中空部分から流れが抜け出せないため、ホイールハウス前方に衝突する流れがホイール無しタイヤより強くなる。そのため、ホイール無しタイヤよりホイール付きタイヤの方がホイールハウス前方の圧力が高くなると考えられる。

本計算によって、ホイールの有無によってホイールハウス内の流れは大きく変化することがわかった。ホイールを取り除いた場合、タイヤ中空部分からホイールハウス内の流れが外に抜けていくため、ホイールハウス内壁面に衝突する流れを弱める効果がある。ホイールハウス後方に当たる流れを弱めることは抗力を下げるためには良いが、ホイールハウス前方に当たる流れを弱めると抗力低減には逆効果であるため、結果的に C_D 値が全体で9 counts 増加した。

Table 1 Drag Coefficient

	Tire w/ Wheel	Tire w/o Wheel
Tire	0.050	0.054
Front Wheel House	0.013	0.016
Rear Wheel House	0.004	0.006
Base	0.150	0.151
Other	0.075	0.074
Total	0.292	0.301

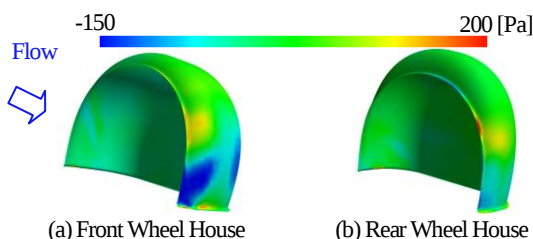


Fig.6 Pressure Difference between Tire w/ Wheel and Tire w/o Wheel

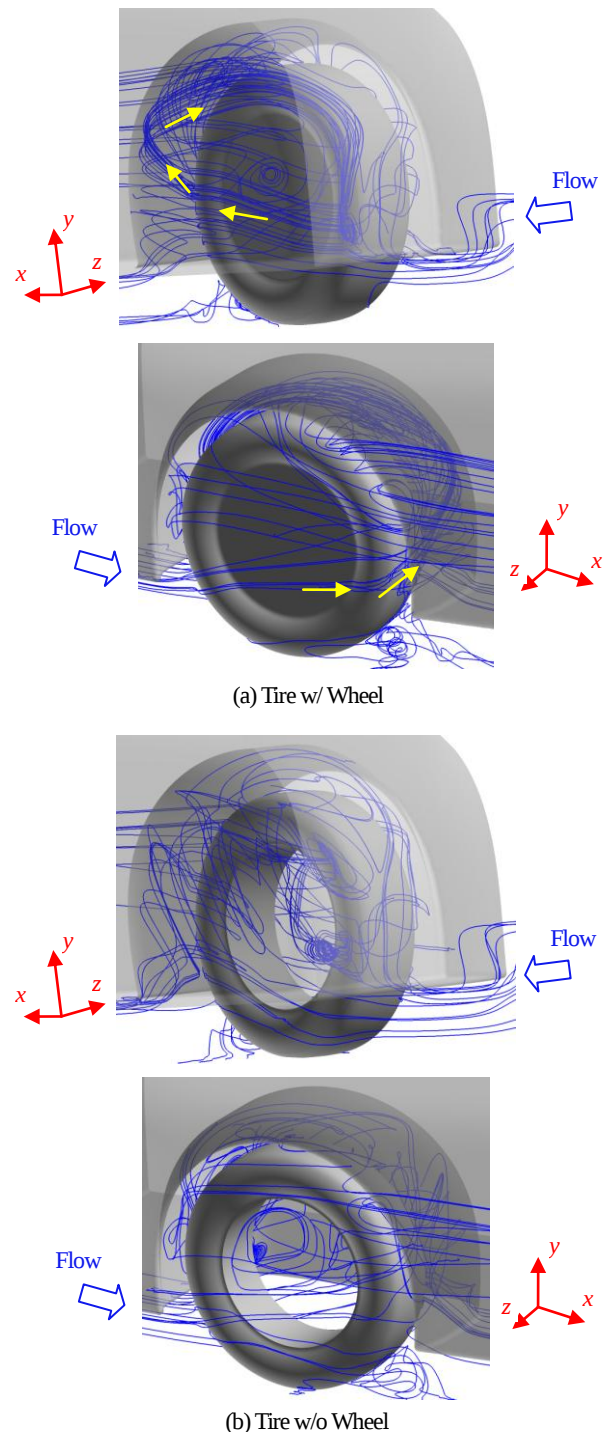


Fig.7 Streamlines around Front Tire

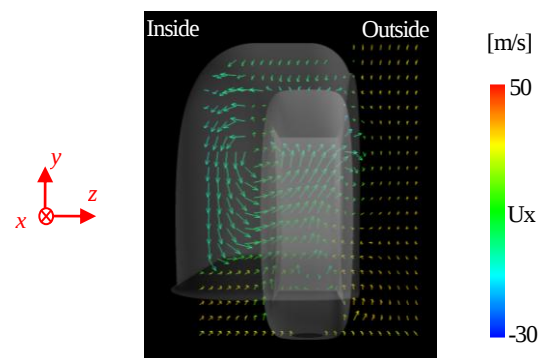


Fig.8 Velocity Vector around Front Tire w/o Wheel

6. 結言

並列化効率の検討及び、ホイールの影響調査のため、ホイール付きタイヤとホイールなしタイヤを付加した車体での計算をOpenFOAMを用いて行い、以下の知見を得た。

- OpenFOAMにおける並列計算はMPIを前提にしてあり、ノード内並列ではパフォーマンスが落ちる。
- 本研究室の計算機状況におけるノード間並列では、16 並列までが実用的である。
- ホイールは、ホイールハウス内の流れに大きな影響を及ぼす。
- ホイールを取り除いた場合、ホイールハウス内の流れがタイヤ中空部分から外に流れる。
- ホイールを取り除くことでホイールハウス壁面に衝突する流れが弱められ、結果として抗力が9 counts増加した。

今後の展望として、OpenFOAMを用いた計算の速度を向上するためにはノードを増設するか、プログラムやコンパイラのチューニングが必要であるといえる。また、ホイールの検討については、ホイールハウス内から外へ出る流れを抑制することが考えられる。また、RANSは大規模な渦や小さい渦を捉える事が苦手なため、LESとの比較も必要だと考えられる。

参考文献

- (1) 木村, 鈴木, 山本, 児玉, 小石, タイヤ周りの流れ場におけるディンプルの効果に関する数値的研究, 第 25 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, A05-3 (2011).
- (2) 児玉, 小石, タイヤによる自動車の空気抵抗低減技術に関する研究, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D06-1 (2012)
- (3) Islam, M., Decker, F., Villiers, E., Jackson, A., Gines, J., Grahs, T., Gitt-Gehrke, A., Comas, J., Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development, SAE Paper 2009-01-0333, (2009)

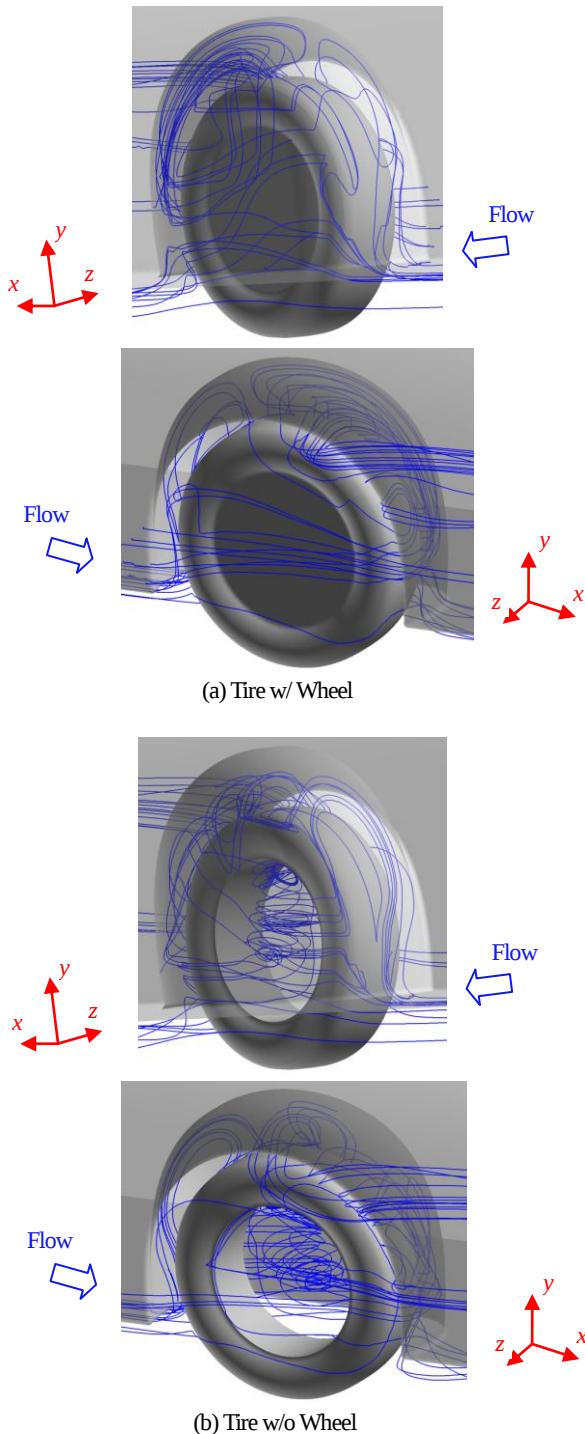


Fig.9 Streamlines around Rear Tire