

# 接地面形状を考慮したタイヤモデル周りの流動解析

Numerical simulation of incompressible flow around a tire model with tire's deformation

- 稲垣 祐貴, 京工繊大院, 〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail : m7623004@edu.kit.ac.jp  
 田尻 恭平, 京工繊大, 〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail : tajiri@kit.ac.jp  
 田中 満, 京工繊大, 〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail : mtanaka@kit.ac.jp  
 西田 秀利, 京工繊大, 〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail : nishida@kit.ac.jp  
 Yuki Inagaki, Dept.of Mechanophysics,Kyoto Inst.Tech., Matsugasaki,kyoto,606-8585,JAPAN  
 Kyohei TAJIRI, Dept.of Mechanophysics,Kyoto Inst.Tech., Matsugasaki,kyoto,606-8585,JAPAN  
 Mitsuru TANAKA, Dept.of Mechanophysics,Kyoto Inst.Tech., Matsugasaki,kyoto,606-8585,JAPAN  
 Hidetoshi NISHIDA, Dept.of Mechanophysics,Kyoto Inst.Tech., Matsugasaki,kyoto,606-8585,JAPAN

Tires are one of the important parts making up automobiles. In recent years, the air resistance of tires attracting attention in order to reduce the air resistance of automobiles. In order to reduce the air resistance of a tire, it is necessary to understand the flow phenomena around the tire. In this study, incompressible flow analysis around a tire model considering deformation due to vehicle weight was performed. The results for the present tire model were compared with the results for the tire model without deformation. As a result, it was found that the vortex structures agreed well with each other, but drag and lift coefficients increase by considering deformation of the tire due to the weight of the vehicle.

## 1. 緒言

自動車は様々な用途において私達の生活に欠かせないものである。近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇などの影響により自動車の低燃費化が推進されている。低燃費化の為に必要な要素は多岐に渡るが、特に高速走行時において、走行抵抗の大半は空気抵抗<sup>(1)</sup>が占める。その為空気抵抗の削減は低燃費化のために重要である。自動車の空気抵抗は、ボディ部分による影響がおおよそ4割を占めている<sup>(2)</sup>が、空気抵抗を削減するためのボディ部分の形状についての研究は既に進んでおり、発展の余地は少ない。そこで近年注目されているのが、タイヤの空気抵抗の削減である。タイヤ周りの流動解析については、川島ら<sup>(3)</sup>や児玉ら<sup>(4)(5)</sup>によってすでに先行研究が行われている。そしてそれらの先行研究ではタイヤを真円として扱っている。しかし実環境ではタイヤは地面からの垂直抗力や、空気抵抗、遠心力といった様々な力を受けて変形する。したがって、より正確にタイヤ周りの流れの研究を行うためにはタイヤの変形を考慮する必要がある。本研究では、そういった変形を考慮したタイヤモデル周りの流動解析を行うことを検討した。しかし自動車やタイヤの種類、走行速度、路面状況、タイヤの空気圧などといった変形に寄与する条件を全て考慮することは非常に難しい。そこで比較的検討が易しいタイヤが地面から受ける垂直抗力のみを考慮したモデルを考えた。その上で変形を考慮しない場合と比較することにより、タイヤの変形が周囲流体に与える影響を2次元流動解析で調査した。

## 2. シームレス仮想境界法

タイヤ周りの流れを低コストで正確に計算する為に、格子生成が容易なデカルト座標上でシームレス仮想境界法<sup>(6)</sup>を用いた。二次元非圧縮性流れは連続の式、ナビエ・ストークス方程式により表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i \quad (2)$$

ここで  $u_i$  は速度成分であり、 $p$  は圧力である。また、 $F_i$  は移流項、粘性項を含む流束項であり、次のように表される。

$$F_i = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

また  $G_i$  はシームレス仮想境界法における外力項を示している。シームレス仮想境界法では、仮想境界上および内部の速度条件を満たす為に、仮想境界に隣接する流体側の格子点及び仮想境界内部の格子点においてナビエ・ストークス方程式に外力項が加えられる。仮想境界に隣接する流体側の格子点においては仮想境界上での速度条件を満たすように、仮想境界上における速度条件から内挿により速度を求め、その格子点においてナビエ・ストークス方程式に付加すべき外力項の値を算出する。仮想境界内部の格子点においては、その格子点上での速度条件を満たす速度となるように外力項の値を算出する。外力項  $G_i$  は次のように表される。

$$G_i^n = -F_i^n + \nabla p^n + \frac{\bar{U}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{U}_i^{n+1}$  は速度条件より求められた速度である。

## 3. 計算条件

本研究では Fig.1 のように計算領域を設定した。タイヤモデルは、変形による影響を比較する為に地面に沿って変形しているものと、変形していないものの2通りとする。タイヤモデルの中心と地面との距離  $L$  は変形を考慮しないモデルでは  $L = D/2$  とし、変形を考慮するモデルでは  $L = D/2 \times 0.963$  とした。このとき代表長さ  $D$  は、タイヤモデルの変形に影響されない真円部の直径を表す。また、タイヤモデルは最外形での接線方向速度が1となるような角速度で反時計回りに回転している。ただし、地面に沿って変形している面のみ、変形部での平均  $x$  方向速度  $u_{ave} = 0.982$  及び  $v = 0$  を与えた。このタイヤモデルが回転により前進していく状況を相対的に再現する為に、周囲流体には  $u_{ave} = 0.982$  を与えた。また、レイノルズ数は100とした。境界条件に関して、地面での圧力は地面に対する法線方向の運動方程式より評価されるノイマン条件、速度は  $u_{ave} = 0.982$  を与えた。流入境界に関しては、圧力は地面と同様のノイマン条件、速度は  $u_{ave} = 0.982$  の一様流固定とし、流出境界では圧力はゾンマーフェルト放射条件<sup>(7)</sup>、速度は線形外挿により評価した。

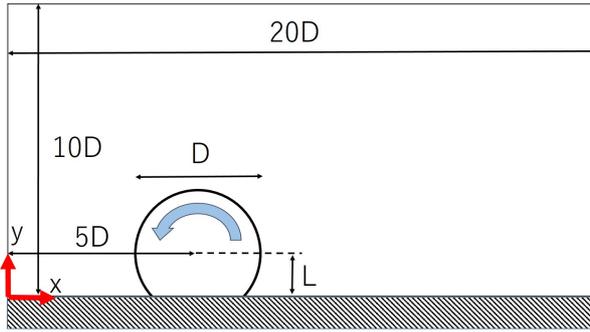


Fig. 1: Computational domain.

### 3.1 計算結果

Figures 2, 3 は、無次元時間 200 における渦度分布と圧力分布について、変形させたタイヤモデル、変形させていないタイヤモデルそれぞれの計算結果を示している。タイヤモデル上方から後方に向けて発生している渦は先行研究 (8) とも定性的に一致しており、良好な結果であると確認できる。またこれら 2 つの結果を比較すると、計算領域全体では定性的に非常に近い結果を示していることが確認でき、タイヤモデルの変形は周囲流体に大きな影響を及ぼさないことがわかる。

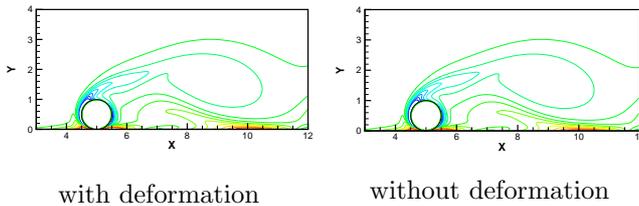


Fig. 2: Vorticity countour near the tire model.

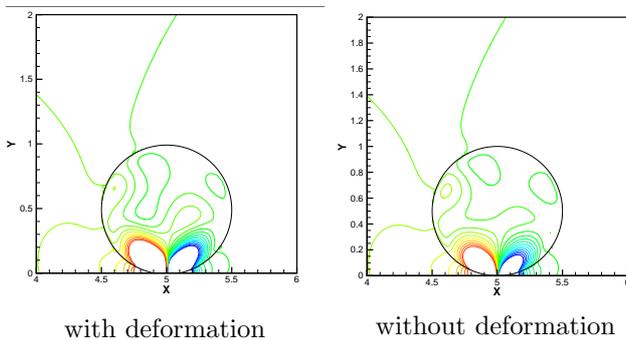


Fig. 3: pressure countour near the tire model.

Figure 4 は無次元時間 180 から 220 における変形させたタイヤモデル、変形させていないタイヤモデルそれぞれの抗力係数  $C_D$  と揚力係数  $C_L$  を示している。また Tab.1 は  $C_D$  と  $C_L$  の平均である  $C_{Dmean}$ ,  $C_{Lmean}$  及び振幅である  $C_{Damp}$  と  $C_{Lamp}$  を示している。 $C_D$  と  $C_L$  は次式で

与えられる。

$$C_D = \frac{-2 \int_O (G_x - u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_i}{\partial t}) ds}{\rho_0 U_0^2 D} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{-2 \int_O (G_y - u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_i}{\partial t}) ds}{\rho_0 U_0^2 D} \quad (6)$$

ここで、 $O$  はシームレス仮想境界法において外力を付加する領域を表す。また、 $G_x$ ,  $G_y$  は  $x$  方向,  $y$  方向の外力項を表す。これをみると、 $C_D$ ,  $C_L$  共に、変形させたタイヤモデルの方が、変形させていないモデルに対して高いことがわかる。そこで、Fig.5 のような、地面から  $y$  方向に半格子分だけ進めた  $y = \Delta y/2$  上におけるタイヤモデル近傍の圧力推移を確認した。これをみると、タイヤモデルの接地面前後の圧力差が、変形を考慮したタイヤモデルの方が大きいことがわかる。これにより、変形させたタイヤモデルでは  $C_D$ ,  $C_L$  値が増大していることが考えられる。

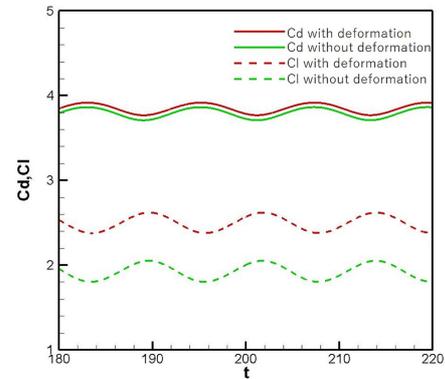


Fig. 4: Time history of drag and lift coefficients.

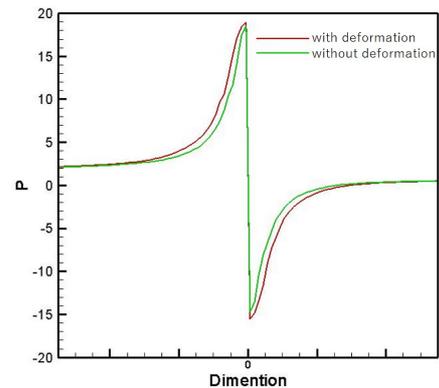


Fig. 5: Pressure distributions at  $y = \Delta y/2$ .

Tab. 1: Comparison of characteristic quantities.

	$C_{Dmean}$	$C_{Lmean}$	$C_{Damp}$	$C_{Lamp}$
with deformation	3.84	2.85	0.155	0.235
without deformation	3.78	1.92	0.161	0.255

### 3.2 結言

本研究では、シームレス仮想境界法を用いて、接地面形状を考慮したタイヤモデル周りの2次元流動解析を行い、タイヤモデルの変形による解析結果の差異について調べた。その結果、定性的な変化は見られないが、接地面形状を考慮したタイヤモデルでは  $C_D$ ,  $C_L$  が増大することがわかった。

### 参考文献

- (1) 炭谷圭二, 前田和宏, 一之瀬健一, 自動車と流体力学: 車体周り流れと空力特性, 日本流体力学会誌「ながれ」, 23 巻 6 号, (2004), 445-454.
- (2) 前田和宏, 自動車における空力開発と取り組み動向, 日本風工学会誌, Vol.36, No.3, (2011), 242-249.
- (3) 川島直大, 山本誠, 児玉勇司, 小石正隆, OpenFOAM による自動車空力の数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.13-33, Paper ID 0304, (2013).
- (4) 川島直大, 山本誠, 児玉勇司, 小石正隆, OpenFOAM を用いた自動車空力解析-並列化効率の検討-, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, Paper ID A09-5, (2013).
- (5) 児玉勇司, 小石正隆, 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, Paper ID D06-1, (2012).
- (6) H, Nishida, and K, Sasao., Incompressible Flow Simulations Using Virtual Boundary Method with New Direct Forcing Terms Estimation, Proc. IC-CFD2006,(01996),pp. 185-186
- (7) 川上 弘二, 西田 秀利, 里深 信行, 過渡-流れ関数表示非定常非圧縮性流れ解析における流出境界条件の検討, 日本機械学会論文集 B 編, 574 号 60 巻, (1994).
- (8) S, Pirozzoli, P, Orlandi, and M, Bernardini., The fluid dynamics of rolling wheels at low Reynolds number, J. Fluid Mech, (2012), 496-533.