206 自動車タイヤの空力における回転影響の検討

Investigation of a rotational effect on aerodynamics of automobile tire

正 中島 卓司 (広島大学)

山下 芳弘 (広島大学)

松田 修明 (広島大学)

Takuji NAKASHIMA (Hiroshima Univ.)

Yoshihiro YAMASHITA (Hiroshima Univ.)

Syumei MATSUDA (Hiroshima Univ.)

正 鬼頭 幸三 (鬼頭幸三事務所)

正 坪倉 誠 (北海道大学)

Kozo KITOH

Makoto TSUBOKURA (Hokkaido Univ.)

Key Words: Aerodynamics, Large-Eddy Simulation, Sliding mesh, Automobile tire

1. はじめに

現在、燃費や走行安定などの性能向上を目的として、自動車の空力に関する様々な検討が加えられている。しかし、車両設計においてはデザインや居住性など空力以外の要素の重要性が高く、空力特性改善は容易ではない。このため、近年ではデザインや居住性に関係しない車両床下の空力特性改善が注目されている¹⁾。車両床下流れを構成する要素の中でもタイヤが作り出す流れ場はしばしば注目されており、孤立したタイヤの空力特性に関しては多くの研究^{2),3)}がなされてきた。さらに、タイヤ周り流れと床下流れが干渉し合うことによる車両の空力特性への影響⁴⁾や、タイヤのトレッドパターンの再現による車両全体の空力特性予測精度の向上⁵⁾など、様々な研究例が報告されている。このように、タイヤが生じる空力特性の把握は重要な課題であるといえる。

そこで本研究では、自動車タイヤの空力特性、なかでもその回転影響に注目し、これを明らかにするため Large-Eddy Simulation を用いた回転タイヤ回りの乱流場解析を実施した。現在の自動車空力の数値解析では、タイヤ回転の再現法として、一般に回転速度をタイヤ表面の境界条件として与える手法(以下、「速度境界条件法」と称する)が用いられている。しかし、この速度境界条件法では、スポークタイプのホイールなど周方向に非一様な形状が回転する現象を直接再現できない。著者らのグループは先の研究⁶⁾でホイールに開口部を有する回転タイヤの周囲流れの数値解析を行い、その開口部を閉じた擬似的な条件によって予測精度が改善されることを報告した。本研究ではこれをより直接的に検証するため、ホイール開口部の周囲をタイヤとともに回転移動する座標系で取扱い、静止系による解析領域との界面で解析格子の接続情報をスライドさせる手法(以下、「スライディング格子法」と称する)による解析も実施した。これにより、ホイール形状の回転がタイヤ周囲流れに与える影響を調査した。

2. 解析対象および条件

本研究では、Waschle ら²⁾によって風洞実験が行われた 1/3 スケール、孤立状態の Formula 1 用タイヤを対象とした。その形状を Fig.1 に示す。図のように、同タイヤは溝の無いトレッド面を有し、ホイールのディスク部は5箇所の開口部をもつスポークタイプとなっている。また、ブレーキディスク、ハブおよび回転軸固定用のステーも解析対象として含む。なお、タイヤ直径 D は 215.8mm、トレッド幅は 80.0mm である。

Waschle ら²⁾は風洞実験において、風速 45.0m/s の一様流を作用させ、同速度で移動するムービングベルト上にタイヤを配置しており、本解析でもこれを模擬した解析を行った。

Fig. 1 Schematic view of the objective tire.

3. 解析手法

3-1 基礎方程式

Large-Eddy Simulation による乱流モデリングを施すため、基礎方程式には空間フィルタ操作を施した非圧縮性の Navier-Stokes 方程式系を用いた。SGS 乱流モデルには標準 Smagorinsky モデルを用い、モデル定数 C_s は 0.15 とした。

3-2 数値解析手法

解析には、節点中心法による非構造格子有限体積法を用いた流体解析ソフトウェアである FrontFlow/Red-Aero を使用した。空間離散化スキームには、2次精度中心スキームを用いたが、解析安定化のため運動量対流項には1次精度風上成分を5%付加している。速度-圧力間のカップリングアルゴリズムには SMAC アルゴリズムを用い、時間積分法には2次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。

3-3 解析領域と境界条件

解析にあたり、Fig.2 左図に示す矩形流路を解析領域として与え、流路床面上に解析対象のタイヤを配置した。入口境界には一様な主流流速 $U_0 = 45.0\text{m/s}$ を与え、出口境界は自由流出条件とした。床面は主流と同速度 U_0 で移動する壁面とし、その他の側面はすべり壁とした。回転するタイヤ表面の条件については、次項で述べる。いずれの境界面でも摩擦応力は対数則に基づく壁面モデルによって算出した。

Fig. 2 Computational domain (left) and a magnified view around the objective wheel(right).

3-4 タイヤ回転の取り扱いと解析格子

解析領域は Fig.2 右図に緑色で示した界面で分割された 2 領域として作成し、スライディング格子法による解析ではホイール内側の領域において回転座標系に基づく解析を行った。解析格子には解析領域のほぼ全域で四面体格子を用いたが、スライディング界面近傍には六面体格子を構造的に配置した。これは、スライディング格子法による解析において、領域界面を挟んだ有限体積間の離散関係式を与える際の補間計算精度を向上するためである。また、速度境界条件法による解析でも同一の解析格子を使用し、分割領域の界面は通常の解析格子界面と同様に扱った。なお、解析格子の節点数はおよそ 150 万点、要素数はおよそ 840 万要素である。

タイヤの回転速度は、主流速度に相当する一定角速度 ω ($=2U_0/D$) とした。速度境界条件法による解析では、タイヤの回転部位について、回転による接線方向速度を持った壁面境界として扱った。従って、境界法線方向速度は無視している。一方、スライディング格子法による解析では、静止系領域内の回転部位（トレッド面等）については、同様に壁面境界として回転移動速度を与え、回転座標系による解析領域内の回転部位は、座標系に対する相対速度が零の壁面境界とした。

4. 解析結果

解析結果として、Table 1 にスライディング格子法(Sliding M.)と速度境界条件法 (R.B.C.) による解析で得られた各空力係数の比較を示す。抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L とともに、スライディング格子法の解析結果が、実験値とのより良い一致を示している。これは、ホイール開口部の回転影響をより正確に再現したことによる効果である。

このことは、Fig.3 に示したタイヤ後流の主流速度分布の比較からも明らかである。速度境界条件法による解析結果では、ホイール形状の非対称性に起因すると考えられる左右非対称な後流分布が顕著である。一方、スライディング格子法による解析結果では、トレッド中央に対して左右対称に近い流れ場となっている。Waschle らの実験計測結果²⁾によれば、回転する同タイヤの後流はほぼ左右対称な分布となっており、ここで示したスライディング格子法による解析結果に近い分布であるといえる。このことから、開口部の回転が後流構造に影響を与えており、その再現の有無によって空力係数の予測精度にも影響していると考えられる。

5. 結言

本研究では、回転する自動車タイヤ単体を対象とし、周囲乱流場の Large-Eddy Simulation を実施して、その空力特性を検証した。特にホイール形状の回転影響に着目した評価を行い、タイヤ単体での空力特性に対しては、ホイール開口部の形状が回転することによる影響が有意であることを示した。

謝 辞

本研究は、平成 19 年度 NEDO 産業技術研究助成事業「自動車空力設計イノベーションのための次世代非定常空力シミュレータの開発」の助成により実施した。本研究における数値解析は、東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ SR11000 を利用して実施し、数値解析の基盤となる流体解析ソフトには、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「RSS21 革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」の成果である FrontFlow/red を利用した。解析対象としたタイヤ形状については、IVK/FKFS の Prof. Viedemann および Dr. Kuthada より提供を受けた。ここに記して、謝意を表する。

Table 1. Comparison of aerodynamic coefficients

		Coefficient	Error
C_D	Exp. ²⁾	0.566	—
	Sliding M.	0.550	-0.016
	R.B.C.	0.487	-0.079
C_L	Exp. ²⁾	0.315	—
	Sliding M.	0.280	-0.035
	R.B.C.	0.231	-0.084

Fig. 3 Streamwise velocity distributions on vertical cut-planes.

参 考 文 献

- 1) Kitoh, K. *et al.*, Aerodynamic Design of the Vehicle Underbody: Reviews and Several New CFD Computations, Proc. FISITA 2006 World Automotive Congress, F2006M046, pp.1-11, 2006.
- 2) Waschle A. *et al.*, Flow around an Isolated Wheel – Experimental and Numerical Comparison of Two CFD Codes, SAE Paper no.2004-01-0445, 2004.
- 3) McManus, J. and Zhang, X., A Computational Study of the Flow Around an Isolated Wheel in Contact With the Ground, J. Fluid Eng., vol.128, Issue 3, pp.520-530, 2006.
- 4) Regert, T., and Lajos, T., Description of flow field in the wheelhouses of cars, Int. J. of Heat and Fluid Flow, vol.28, Issue 4, pp. 616-629, 2007.
- 5) Lounsbury, T. H. *et al.*, The Effects of Detailed Tire Geometry on Automobile Aerodynamics – a CFD Correlation Study in Static Conditions, SAE Paper no.2009-01-0777, 2009.
- 6) 柳原隼ら, 回転する車輪周りの流れの LES, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.44-08, pp.19-22, 2008.