E107 大型トラック空力開発への小型風洞実験方法の検討*

山口 進作[○] 飯塚 彰 (いすゞ自動車(株)), 河合 一男 福田 亮 ((株)いすゞ中央研究所)
民部 俊貴 ((学)工学院大学大学院) 飯田 明由 (豊橋技術科学大学)

On the Study of Experimental Method for Aerodynamics of Heavy-Duty Trucks with a Small Wind Tunnel

Shinsaku YAMAGUCHI, Akira IIZUKA, Kazuo KAWAI, Ryo FUKUDA
Toshitaka MINBU and Akiyoshi IIDA

ABSTRACT

In order to modify aerodynamic properties of automobiles, wind tunnel experiments and numerical simulation have been conducted in industries. However, aerodynamic properties of heavy-duty trucks are not clearly. Because of the Reynolds number dependency of the flow around large vehicles. In this paper, we discuss the Reynolds number dependence of the flow around a heavy-duty truck and estimation method of aerodynamic properties with a small wind tunnel. In the case of actual flow around a truck, the flow is transit and the Reynolds number is over the critical numbers. To simulate this critical flow in a small wind tunnel, we introduce the turbulence grid. The flow fields around truck with and without turbulence grid are visualized with the PIV. The flow fields of the truck in the grid turbulence are almost the same as that of the critical Reynolds number.

Keywords: Visualization, Wind Tunnel, Aerodynamics, Heavy-Duty Truck,

1. 結 論

近年、自動車の燃費向上はユーザの利便性のためだけでなく、地球温暖化(CO₂削減)や化石燃料の枯渇などの対策として有効なことから、自動車の空気抵抗低減に関する研究開発は以前にも増して重要になっている。

大型トラックは高速道路を利用した長距離輸送に用いられる機会が多く、走行抵抗に占める空気抵抗の割合が高い。そのため、燃費を向上する上で空気抵抗の軽減は効果的な手段と言える。

大型トラックの空力開発では、コンピュータシミュレーション(CFD: Computational fluid Dynamics)が盛んに活用されているが、風洞実験による確認は未だ不可欠な状況である。特に、キャビン前面のコーナーサイドやルーフ前端などの曲面を通過する流れの状態が空力性能に大きく影響するため、これら曲面における流れの予測技術が特に重要となる。

大型トラックの風洞実験は、国内に大型トラックの実車による空力性能の評価が可能な超大型風洞が存在しないため、Reynolds 数を合わせた実験が難しいという問題がある。特に、前述したキャビン各部の曲面による流れは、Reynolds 数依存性が高く、開発初期に行う基本形状

スタディの段階から大型模型風洞実験により Reynolds 数を一致させておく必要がある。しかしながら、形状変更が頻繁に繰り返されるため、現実には実験効率の良い小型模型風洞実験に頼らざるを得ない。

図1の模式図に示すように、トラックのような Bluff Body 周りの流れでは、臨界 Reynolds 数を超えると抵抗が急激に低下する現象が知られている⁽⁴⁾。これまでの経験から、トラック周りの流れは、臨界 Reynolds 数以上となることが多い。

Fig.1 Relation of the drag coefficient to Reynolds Number

一方、小型模型を用いた風洞実験では、Reynolds 数は、臨界 Reynolds 数以下となる場合が多く、小型模型実験では、実車を模擬することは難しい。コストや実験のやり易さを考えると小型風洞を用いた実験が必要であり、大型風洞における高レイノルズ数流れを小型風洞中において模擬することが望まれている。

本報では、小型模型風洞実験において、トラック周りの流れを模擬することを目標として、乱流格子を用いた風洞実験結果を示す。

2. 実験方法

実験には図2に示すようなトラックのキャビンを単純化したモデルを使用した。Reynolds 数依存性を明らかにするため、大小2種類の風洞を使用した。また、風洞主流の乱れ強さを変えることにより、主流乱れの影響について調べた。

2.1 風洞設備

大型風洞は財団法人鉄道総合技術研究所殿の米原風洞技術センター大型低騒音風洞(以降、大型風洞と記す)である。大型風洞における実験では同施設に付帯する密閉式測定部を用いた。小型風洞はいすゞ自動車(株)の研究用風洞(以降、小型風洞と記す)である。小型風洞の測定部は3/4 開放式である。

2.2. 模型

実験には大型トラックキャビンの上半分を縮小して簡略化した模型を用いた。模型は大小2つの風洞の大きさに則した2体(以降、夫々大型模型、小型模型と記す)である。図2に大型模型の略図及び寸法を示す。小型模型は大型模型の寸法を1/2に縮小したものである。これらの模型はルーフ前端部分の曲率半径(以降、R と記す)が変更可能な構造であり、図1の点線が着脱の境界線である。また、幅方向の中心線上には、表面圧力計測用の圧力孔を設けた。Reynolds 数は式(1)により算出した。

$$Re = \frac{U \cdot L \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

ここで、 Re : Reynolds 数、 U : 風速[m/s]、 L : 模型の全長[m]、 ρ : 密度[kg/m³]、 μ : 粘性係数[Pa·s]である。

Fig.2 Basic Cabin Model

2.3. 小型風洞への模型の設置

模型と6分力天秤を接続するインターフェイスにより、風洞の測定部床面と模型底面の隙間を10[mm]とした。境界層による影響は複雑なため、大型模型、小型模型共、同一の隙間で実験を行った。

2.4. 乱流格子

文献(5)を参考に小型風洞で乱流格子の実験を行った。実験に使用した乱流格子は線径φ2[mm]、格子間ピッチ20[mm]であり、これを風洞の吹出口に敷設した。敷設前の乱流強度が0.7[%]であるのに対し、敷設後は1.7%に増加した。乱流強度は、模型を設置していない測定部の模型先端に一致する位置で、熱線流速計により測定した。

3. 実験結果

3.1. Cd 値と表面圧力分布の計測結果

図3に大型風洞及び小型風洞において取得したトラックキャビン模型のCd 値を示す。大型風洞で取得したCd 値はReynolds 数の増加に対して急激に低下し、その後、安定している。この結果から臨界 Reynolds 数は 1.5×10^6 付近に存在すると推定される。また、臨界 Reynolds 数付近の不安定な実験条件であることに加え、ルーフ前端部分の組付け精度などの影響により、特に低いReynolds 数領域におけるCd 値のばらつきが大きい。一方、小型風洞に乱流格子を敷設する前の状態におけるトラックキャビンのCd 値はReynolds 数が低く、臨界 Reynolds 数を越えた状態のCd 値が取得できていない。これに対して、乱流格子を敷設した場合には、Reynolds 数の増加に伴ないCd 値が緩やかに低下する傾向を示している。

図4は大型模型の幅方向中心線上に配設した圧力孔で取得した圧力係数の分布図である。この図よりCd 値が急激に低下する臨界 Reynolds 数(1.5×10^6)付近では、ルーフ前端部の曲率部分に顕著な負圧のピーク($C_p \approx -3.5$)が発生していることが分かる。

図5は乱流格子を敷設した場合の小型模型の圧力係数分布図である。この図より Reynolds 数が高くなるにつれてルーフ前端部の曲率部分に負圧が発生し始め、Reynolds 数 1.1×10^6 程度で負圧のピーク($C_p \approx -3.5$)を

Fig.3 Drag Coefficient of the Basic Cabin Model

生じていることが分かる。

乱流格子を敷設した小型風洞における小型模型の C_d 値及び圧力分布は、大型風洞における大型模型の臨界 Reynolds 数を越えた実験結果と良く一致している。

Fig. 4 Pressure Distribution on the Large Basic Cabin Model

Fig. 5 Pressure Distribution on the Small Basic Cabin Model with Turbulence Grid

3.2 PIV による流れの可視化

乱流格子を敷設した小型風洞において、小型模型周りの流れ場を PIV (Particle Image Velocimetry) により計測した。

図 6 に PIV における計測領域を示す。計測面は模型幅方向の中心断面である。使用した PIV 計測システムはダブルパルス方式であり、2 次元流れを捕捉するタイプである。実験では 2 枚 1 組の画像を 500 回撮影し、組毎の分析結果を平均化して流れ場の数値データとした。これらを基にベクトル図などの可視化画像を描画する。

図 7 に乱流格子を敷設した場合 (a) と敷設していない場合 (b) の PIV 計測結果を示す。Reynolds 数の大きさは遷移 Reynolds 数よりも小さな 1.1×10^6 である。乱流格子を取り付けた場合、流れの剥離が抑制されていることがわかる。この流れ場は臨界 Reynolds 数付近の流れに近いと考えられる。このように主流に乱れを与えた場合、実質的に Reynolds 数を大きくすることができる。

図 8 に Reynolds 数に対する流速ベクトル及び流線の変化を示す。低域の Reynolds 数では剥離流れであり、定常的な渦が観測される。この定常的な渦は Reynolds 数の増加と共に縮小し、中心を風上方向へ移している。Reynolds

数 8.3×10^5 では小型模型の上方流れが付着流れに転じている。

図 9 に各 Reynolds 数における無次元流速分布を示す。低い Reynolds 数では剥離流れであり模型上方の流速は低い。Reynolds 数 8.3×10^5 では図 8 に示したように流速ベクトルとしては付着流れであるが、流速分布図では模型上面近傍に低い流速が存在している。

以上のことから、トラックキャビン模型の臨界 Reynolds 数近傍における C_d 値の急激な低下や顕著な負圧のピークが発生する原因は、R 部分の流れが剥離から付着に転ずることによると言える。また、剥離・再付着流れを小型風洞で模擬する場合、主流の乱れ強度を制御する方法が有効であることが確認できた。

Fig. 6 PIV Experimental Setup

(a) Without TG (TI=0.4%) (b) With TG (TI=1.7%)
Fig. 7 Velocity Vectors Around a Small Model in Small Wind Tunnel at $Re=1.1 \times 10^6$ (PIV Measurement)

4. まとめ

乱流格子により乱流場を生成させた小型風洞では、2 倍以上高い Reynolds 数における模型周りの流れを再現できる可能性を示した。これにより大縮尺小寸法の模型と比較的小型の風洞であっても、実物大の実験をある程度精度良く予測できると考えられる。

今後はスケール模型風洞実験への乱流格子法の適用に向けて、複合した形態や縮尺の違う模型に有効な格子の設定方法について調べていく必要がある。

参 考 文 献

- (1) 山口進作ほか：乱流格子による Reynolds 数の増幅効果検討，自動車技術会学術講演会 No. 109-00 20070366(2007)
- (2) 山口進作ほか：大型トラック箱尺模型の風洞試験条件，自動車技術会学術講演会 No. 112-00 20005442(2000)
- (3) 石原裕二ほか：乗用車箱尺模型風洞試験における Reynolds 数の影響，自動車技術会学術講演会前刷集 No. 117-4 20045536(2004)
- (4) Kevin R. Cooper : The effect of Front Edge Rounding and Rear-edge Shaping on the aerodynamic drag of Bluff Vehicles in Ground Proximity, SAE Paper 850288
- (5) Wiedemann B. Ewald : Turbulence Manipulation to Increase Effective Reynolds Numbers in Vehicle Aerodynamics AIAA Journal Vol.27 NO.6 JUNE 1989
- (6) 南田秀治，乱流風洞，ながれ 21(2002)409-418 AIAA Journal Vol.27 NO.6 JUNE 1989
- (7) 飯田明由ほか，低騒音乱流風洞の開発，日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集，2004.11.25-26，北九州.

Fig. 8 Velocity Vectors Around a Small Model (PIV Measurement)

Fig. 9 Velocity Contour Around a Small Model (PIV Measurement)