

数値解析による車両床下流れの研究

学位論文内容の要旨

地球規模の CO₂ 排出低減の動きが強まっており、交通においても自動車燃費の一層の向上が要請されている。車両設計においては車両の空気力学的抗力係数 C_D のさらなる低減が課題である。乗用車の場合、長年にわたって数多くの研究開発が行われ、 C_D 低減に関する車両の外形形状の最適化、車体まわりの流れ場の把握が積極的に進められてきた。現在は、外形形状に比べて比較的研究開発が進んでいなかった床下流れがより注目され、一層の低 C_D 化に向けて車輪回転、移動地面の影響等、床下流れ場の解析が望まれている。

一方、現在多くの乗用車メーカーでは例外なく、車両の初期開発段階における空気力学的性能(空力性能)の検討や特定部位の流れ場の解明において、数値流体力学(CFD)が積極的に利用されている。過去、現在ともに標準 $k-\varepsilon$ モデルの適用が中心であるが、空力性能の開発が高度化するにつれて、高度乱流モデルである LES(large eddy simulation) を適用し、CFD による空力性能の予測を高精度化することが要望されている。

本研究は、まず車両空気力学の分野における CFD の予測精度を検討し、標準 $k-\varepsilon$ モデルを含めた RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) モデルの限界を明らかにするとともに、LES の有用性を明示すること、次に数値解析によって車両床下形状と床下流れ、車体背後のウエーク流れとの関係を解明し、空気力学的抵抗が少ない車体設計の観点から工学的・工業的に有用な知見を得ることを目的としている。本研究の内容は、

第 1 章においては、本研究の背景、車両空気力学の歴史について述べ、特に車両床下流れに関する従来の研究の概観及び残された課題、車両空気力学における数値解析(数値流体力学)の適用の現状を分析し、本研究の目的とその構成を示している。

第 2 章においては、数値流体力学の手法を概観し、特に本研究の計算において使用する LES(large eddy simulation)、応力方程式モデル(Reynolds Stress Model, RSM) 及び標準 $k-\varepsilon$ モデルに関する数値解析手法について詳述している。また、本研究において使用する計算コード FrontFlow/red (FFR) の特徴について述べている。

第 3 章では、床下形状の主要要素であるタイヤハウス、中央排気管部、リアサスペンション部のそれぞれの特徴を現した模擬床下形状を用い、床下流れ場の再現に大きな影響を与える乱流モデル及び床下形状の選定のための予備的な検討を行なっている：

a) まず、ASMO(Aerodynamisches Studien Modell) 車体形状を用い、車両空気力学の分野において現在主流となっている RANS モデル(ここでは標準 $k-\varepsilon$ モデル及び応力方程式モデル)について、RANS モデルの可能性とそれらの限界を調べている。

b) 次に、床下流れと車体背後のウエーク流れとの干渉に及ぼす床下形状要素の影響、平坦床下形状との比較、さらに床下形状要素を複数組み合わせた場合の影響を調べ、車体の空気力学的抗力係数

(C_D) に及ぼす影響、床下流れ場の特徴と床下形状要素の関係等を把握し、本研究の方向付けに関する基礎的なデータを求めている。

第4章においては、第3章において明らかにされた RANS モデルの限界をより詳細に調べ、あわせて RANS モデルよりも上位モデルである LES の可能性を追求している。即ち、平坦床下形状をもつ ASMO 車体を用いて、LES 及び RANS モデルの代表である標準 $k-\varepsilon$ モデルに関する CFD 予測精度に関する基礎的な検証を行ない、特に実用上重要となる格子依存性等の観点から LES 及び標準 $k-\varepsilon$ モデルそれぞれの有用性と限界を明らかにしている。これらにより、車両空気力学特性の評価における LES 数値解析の手法を確立している。

第5章においては、実車設計に使うレベルの実際の形状に近い車体形状を対象とし、排気管部、燃料タンク、後輪車軸及びスペアタイヤ収納部を模擬した「準複雑床下形状」モデルを設定し、LES を用いて平坦床下形状との差異、車輪回転及び風洞床面との相対速度の影響を調べ、準複雑床下形状における床下流れと車体背後のウエーク流れとの干渉、車輪回転、風洞床面との相対速度との相互作用を明らかにしている。また、過去の文献、ボルボカーにおける考察から車体 C_D 値についても検討を加え、空力性能設計の初期段階における代替床下形状としての「準複雑床下形状」モデルを用いた設計法の妥当性を確認するとともに、車両の床下形状設計に関する工学的・工業的に有用な知見を提供している。また、併せて従来手法である標準 $k-\varepsilon$ モデルに対する優位点を明らかにした。

第6章においては、本研究の結論並びに車両空力設計に対する指針を述べている。

本研究では、車体まわりの流れ場の再現について標準 $k-\varepsilon$ モデルを含めた RANS の限界が示され、車両空気力学特性の評価における LES の有用性が明白にされるとともに、低 C_D 車体設計の観点から、車両床下形状と床下流れ、車両背後のウエーク流れとの関係に関する有用な知見が提供されたと考える。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 島 伸 行

副 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 准教授 坪 倉 誠

学 位 論 文 題 名

数値解析による車両床下流れの研究

地球規模の CO_2 排出低減の動きが強まっており、交通においても自動車燃費の一層の向上が要請されている。車両設計においては車両の空気力学的抗力係数 C_D のさらなる低減が課題である。乗用車の場合、長年にわたって数多くの研究開発が行われ、 C_D 低減に関する車両の外形形状の最適化、車体まわりの流れ場の把握が積極的に進められてきた。現在は、外形形状に比べて比較的研究開発が進んでいなかった床下流れがより注目され、一層の低 C_D 化に向けて車輪回転、移動地面の影響等、床下流れ場の解析が望まれている。

本研究は、まず車両空気力学の分野における CFD の予測精度を検討し、標準 $k-\varepsilon$ モデルを含めた RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) モデルの限界を明らかにするとともに、LES の有用性を明示すること、次に数値解析によって車両床下形状と床下流れ、車体背後のウエーク流れとの関係を解明し、空気力学的抵抗が少ない車体設計の観点から工学的・工業的に有用な知見を得ることを目的としている。

本研究の内容は、以下の 6 章にまとめられている。

第 1 章においては、本研究の背景、車両空気力学の歴史について述べ、特に車両床下流れに関する従来の研究の概観及び残された課題、車両空気力学における数値解析(数値流体力学)の適用の現状を分析し、本研究の目的とその構成を示している。

第 2 章においては、数値流体力学の手法を概観し、特に本研究の計算において使用する LES(large eddy simulation)、応力方程式モデル(Reynolds Stress Model, RSM) 及び標準 $k-\varepsilon$ モデルに関する数値解析手法について詳述している。また、本研究において使用する計算コード FrontFlow/red (FFR) の特徴について述べている。

第 3 章では、床下形状の主要要素であるタイヤハウス、中央排気管部、リアサスペンション部のそれぞれの特徴を現した模擬床下形状を用い、床下流れ場の再現に大きな影響を与える乱流モデル及び床下形状の選定のための予備的な検討を行なっている。床下流れと車体背後のウエーク流れとの干渉に及ぼす床下形状要素の影響など床下流れ場の特徴と床下形状要素の関係等を把握し、本研究の方向付けに関する基礎的なデータを求めるとともに、RANS モデルの限界を調べている。

第 4 章においては、第 3 章において明らかにされた RANS モデルの限界をより詳細に調べ、あわせて RANS モデルよりも上位モデルである LES の可能性を追求している。即ち、平坦床下形状をもつ ASMO 車体を用いて、LES 及び RANS モデルの代表である標準 $k-\varepsilon$ モデルに関する CFD 予測

精度に関する基礎的な検証を行ない、特に実用上重要となる格子依存性等の観点から LES 及び標準 $k-\varepsilon$ モデルそれぞれの有用性と限界を明らかにしている。これらにより、車両空気力学特性の評価における LES 数値解析の手法を確立している。

第 5 章においては、実車設計に使うレベルの実際の形状に近い車体形状を対象とし、排気管部、燃料タンク、後輪車軸及びスペアタイヤ収納部を模擬した「準複雑床下形状」モデルを設定し、LES を用いて平坦床下形状との差異、車輪回転及び風洞床面との相対速度の影響を調べ、準複雑床下形状における床下流れと車体背後のウエーク流れとの干渉、車輪回転、風洞床面との相対速度との相互作用を明らかにしている。また、過去の文献、ボルボカーにおける考察から車体 C_D 値についても検討を加え、空力性能設計の初期段階における代替床下形状としての「準複雑床下形状」モデルを用いた設計法の妥当性を確認するとともに、車両の床下形状設計に関する工学的・工業的に有用な知見を提供している。また、併せて従来手法である標準 $k-\varepsilon$ モデルに対する優位点を明らかにした。

第 6 章においては、本研究の結論並びに車両空力設計に対する指針を述べている。

以上のように本論文では、車両空気力学特性の評価における LES の有用性が明白にされるとともに、低 C_D 車体設計の観点から、車両床下形状と床下流れ、車両背後のウエーク流れとの関係に関する有用な知見が提供されおり、機械工学と自動車工学の発展に寄与するところ大であるといえる。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。