

車体の近接走行時の空力特性に関する研究 (車体形状の影響について)

小川 和彦[†], 青山 一樹^{††}

Investigation on Aerodynamics of Vehicles Running in Close Proximity
(Influence of Body Shape)

OGAWA Kazuhiko[†], AOYAMA Kazuki^{††}

Abstract

Aerodynamic characteristics between two vehicles running parallel at very close distance are discussed in this paper. In case of a truck passing a passenger car like a sedan, a hatchback or a minivan type vehicle, measurements of the aerodynamic drag, side force and yawing moment were performed by a wind tunnel. From the result of the measurements and numerical simulations, the following conclusions became clear. As for a side-force, the force acted in the direction which pushed out the passenger car outside from the truck as the truck approached the passenger car. As the truck caught up with the passenger car, the direction of the side-force became reverse. When the front of the truck reached at the front of the passenger car, the side-force which pushed the passenger car to the truck became maximum. As for the yawing moment, the interesting characteristics became clear.

Key Words: Automobile, Fluid Dynamics, Computational Fluid Dynamics, Traffic Environment, In Close Proximity

[†] 大阪産業大学 工学部 交通機械工学科 教授

^{††} 大阪産業大学 全学教育機構 テクニカルセンター 講師

草稿提出日 10月21日

最終原稿提出日 12月3日

1 緒言

自動車の安全な走行については、ASV（先進安全自動車）技術やACC（アダプティブ・クルーズ・コントロール）技術が進んではいるが、横風を受ける場合や、追い越しなど別の車両が近接して走行する場合に対しては、まだあまり研究がなされていない。特に、高速道路において他車を追い越す場合、車体周りに発生する剥離渦などの影響により、走行が不安定となり危険性が予測される。したがって、近接走行時の車体の空力特性の解明は重要と考える。

複数車両の近接走行時の空力特性に関する研究¹⁾はよく知られており、特に乗用車がトラック、バスに近接した時の車体の抵抗係数やモーメント係数の変化が詳細に報告されている²⁾。しかしながら、車体周りの圧力変化や流れの状況については明らかでない。

過去に大型バスと軽ライトバンが前後に直列走行する場合³⁾や併進走行する場合の研究⁴⁾が散見されるが、系統的に相対位置を変化させて考察はなされていない。また鈍い物体の基本的な形状に関する研究、例えば柱体群まわりの流れの研究など^{5), 6)}もあるが、構造物本体の振動などを考慮するなど、本研究のような自動車走行時の扱いとは大きく異なる。

本研究では、近接して平行に走行している二台の車両のうち、後続車両が先行している車両を追い抜く状態を想定した。先行する車両の車体形状は基本的なセダン、ハッチバックおよびミニバンの3車種として、トラックのようなほぼ直方体に近い形状の後続車両がそれぞれの先行車両を追い抜く場合を想定し、その空力特性を実験と数値解析から明らかにする。

2 空力特性に関する実験装置と方法

2.1 風洞装置と模型

Fig. 1は実験に使用した回流式風洞を示す。測定部は開放式で、高さ1m、幅1m、長さ2mであり、実験時の風速は20m/sとした。風洞測定部の前にはメッシュの整流板を設けて、一様流にしている。実験には、セダン、ハッチバック、ミニバン型の乗用車模型およびトラック模型を使用した。**Table. 1**に模型の寸法を示す。

実験では自動車模型を二台用い、六分力天秤に取り付けた乗用車模型を測定車、トラック模型を非測定車とし、トラック（非測定車）が乗用車（測定車）を追い抜く状態を想定している。**Fig. 1**の上部に二台の自動車模型を配置した地面板を示す。模型は四隅を棒状のステーで約20mm地面板から離して固定している。なお、地面板の端部の底面側はくさび状の面取りを施し、乱流境界層の成長を抑えている。

Fig. 2に模型の配置を示す。水平面上における測定車（同図右下の車両）の中心を原点とし、右方向を車両進行方向（前後方向）として、 X 軸およびそれに直角な方向（左右方向）に Y 軸を定義する。なお、 X 座標は追い越す車両である非測定車の中心が測定車の中心より後方にある場合を負、前方にある場合を正とし、 Y 座標は同図のように車両進行方向の左手にある場合

を正とする。また、無次元化された抗力係数 C_D は、抗力が気流方向に作用する場合を正、横力係数 C_S は車両進行方向に対して右方向に作用する場合を正、ヨーイングモーメント係数 C_M は原点水平面上の反時計回りを正とする。なお、二つの車両の相対位置については、非測定車の中心座標を (X, Y) 、測定車の全長を L 、幅を W として、車両の前後間隔および横間隔をそれぞれ無次元化された X/Y および Y/W で表す。

六分力の測定は、 $-2.6 \leq X/Y \leq 0.6$ 、 $1.24 \leq Y/W \leq 1.82$ の範囲で行った。ただし、横間隔すなわち車両間の距離 H については、 $H=15, 40, 60\text{mm}$ の4種類とした。なお、Fig.2は前後間隔 $X/L=-1.4$ 、横間隔 $Y/W=1.82$ ($H=80$)の状態を示す。

Table.1 Model Size

	Sedan	Hatchback	Minivan	Truck
Length	256mm	256mm	256mm	460mm
Width	112mm	112mm	112mm	136mm
Height	74mm	100mm	110mm	140mm

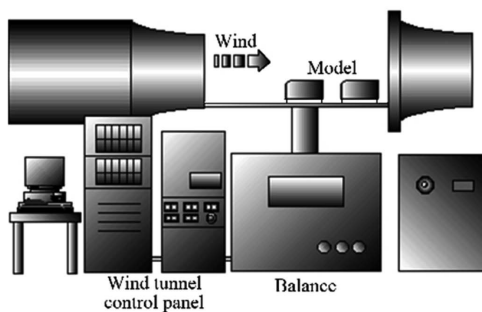


Fig. 1 Wind Tunnel and Experimental device

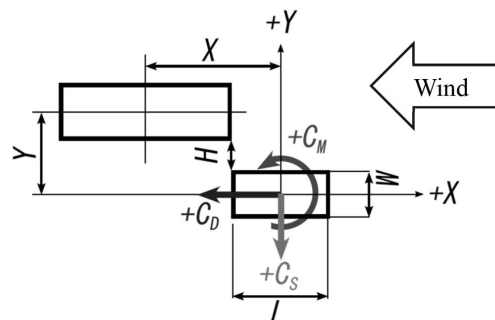


Fig. 2 Geometry of two vehicle models

風洞断面に対するブロックゲージ比は1.25%、実験時の速度は 20m/s 、模型全長 L を代表長さとしたレイノルズ数は約 3.4×10^5 である。また、実験結果を詳細に考察するため、数値解析を行った。数値解析には三次元熱流体解析システムSCRYU/Tetra Ver.12 (ソフトウェアクレイドル社製)⁷⁾を用いた。乱流モデルは標準 $K-\epsilon$ モデルを使用し、車体近傍と後流領域ではメッシュサイズをとくに小さく設定した。解析時の要素数は約150万である。

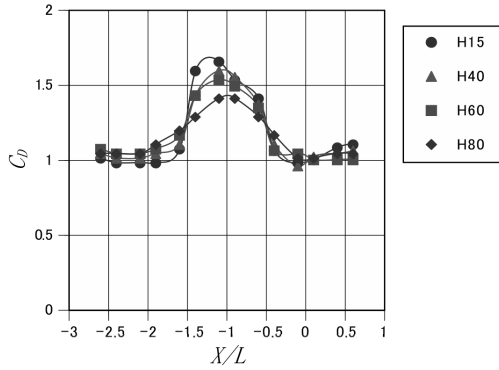


Fig. 3 Effect of Y/W on Coefficient of Drag

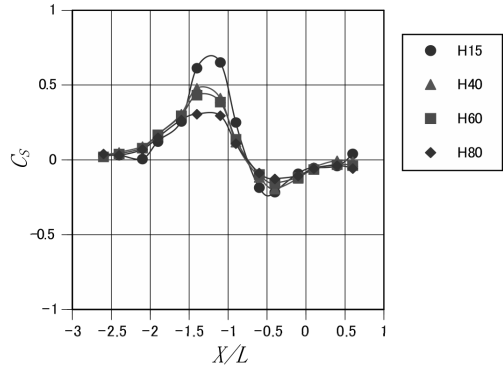


Fig. 4 Effect of Y/W on Coefficient of Side Force

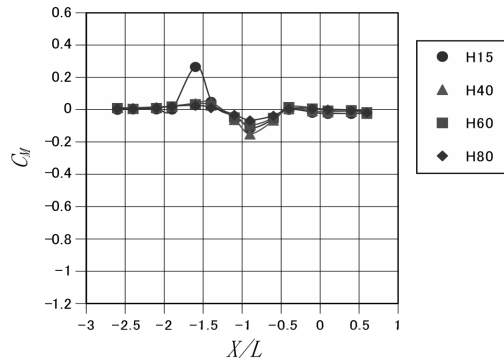


Fig. 5 Effect of Y/W on Coefficient of Yawing Moment

3 二つの車体の前後の相対位置が空力特性に及ぼす影響

3.1 横間隔の影響について

セダンの場合の実験結果について、Fig. 3に抗力係数、Fig. 4に横力係数、Fig. 5にヨーイングモーメント係数を表す。いずれにおいても横間隔が小さいほど空力係数に及ぼす影響が大きい。 $X/L = -1.0$ 付近で抗力係数のピークが生じ、 $X/L = -1.4$ 前後で横力係数のピークが生じる。また、 $X/L = -0.9$ 程度でヨーイングモーメント係数のピークが生じている。このことは、後述のFig. 6～Fig. 8に表すハッチバック、ミニバンの結果においても $-1.5 \leq X/L \leq -1.0$ の範囲で横力係数のピークが生じ、 $X/L = -0.9$ 付近でヨーイングモーメント係数にピークが見られるなど、同様の傾向を示す。

$H = 15$ は、実際の車体の幅を考慮すると双方の車体のドアミラーが触れ合う距離とほぼ同じで、最も接近した場合を想定している。 $H = 15$ については、近接走行により最も相手の車体の影響が大きく表れると考えられ、この場合について考察を行うことにした。また、Fig. 6～Fig. 8に示すように実験結果とCFD解析結果がほぼ同様の傾向を示すことから、以下では横間隔を $Y/W = 1.24$ ($H = 15$)として各空力係数に及ぼす影響を考察する。

3.2 抗力への影響について

Fig. 6に抗力係数に相対位置が及ぼす影響を表す。実験結果と次章で述べる数値解析の結果は、比較的一致している。抗力係数 C_D に相対位置が大きく影響するのは、 $-1.5 \leq X \leq -0.5$ の範囲であることがわかる。セダンの場合は、 $X/L=-1.1$ 付近、ハッチバックおよびミニバンの場合は $X/L=-1.4$ 付近にピークが見られる。セダンの場合、 $X/L=-1.1$ ではセダンのリア部にトラックのフロント部がさしかかるような位置関係にあり、トラックのフロント部からの剥離流れのために、セダンの後部の流れがより乱れが大きく低圧になり、その結果抗力が増すものと推測できる。ハッチバックやミニバンの場合、車体の天井部が後部まで及ぶため、セダンの場合よりは中心間距離 X が長くなり、 $X/L=-1.4$ 付近で同様のことが発生しているものと推測できる。

3.3 横力への影響について

Fig. 7より、横力係数については、3種類の車体について大きな差は見られない。また、実験結果と数値解析結果は非常に良く一致している。ハッチバックおよびミニバンの場合、実験結果および数値解析結果で共に $X/L=-1.4$ でピークを示し、測定車をトラックから離れさせる作用として横力が最大となり、トラックが測定車に近づくと横力係数が小さくなるが、測定車とトラックの先頭が並ぶ $X/L=-0.4$ で負の値として大きくなり、横力は測定車をトラックに接近させる方向（図の上方）に作用する。

$X/L=-1.4$ では測定車後部がトラックの前部と並ぶ状態にある。数値解析結果は次章で述べるが、Fig. 9 (a) の $X/L=-1.4$ の場合のように、トラックが測定車に近づくとトラックの前部の圧力が上昇し、車体が右側（図の下方）に押し出される方向の横力が大きくなったと考えられる。同様のことは、セダン、ハッチバックの場合も生じる。ただし、ミニバンはセダンより

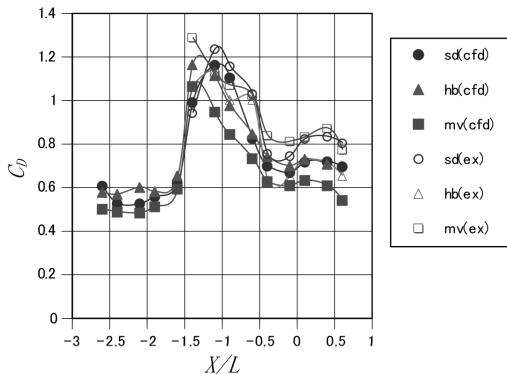


Fig. 6 Effect of X on Coefficient of Drag (H=15)

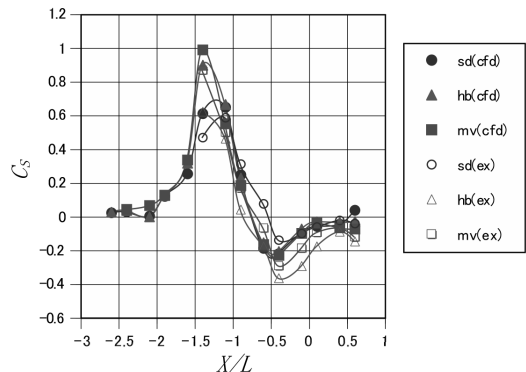


Fig. 7 Effect of X on Coefficient of Side Force (H=15)

天井部が長く側面積が大きいため、横力はセダンより大きくなる。

3. 4 ヨーイングモーメントへの影響について

Fig.8よりセダン、ハッチバック共に最大値となり、で最小値（負の最大値）となる。また数値解析結果、実験結果共にミニバンのヨーイングモーメント係数の変動が大きく、ハッチバック、セダンの方が小さい。

$X/L=-1.6$ でヨーイングモーメント係数が最大になる原因としては、次章で述べるがFig.9 (a)で見られるように測定車の左側後方にトラックの前面の高い圧力を受け、測定車の向きを進行方向から反時計回りのモーメントが発生すると考えられる。また $X/L=-0.9$ で最小値になる原因もFig.9 (b)で見られるように測定車の左側前方にトラックの前面の高い圧力を受け、測定車に対して時計回りのモーメントが発生すると考えられる。

$X/L=-0.4$ はトラックと測定車のフロントが並ぶ状態であり、 $X/L=-0.6$ はリア部が並ぶ状態にある。この間は測定車の左右の圧力分布はほぼ均一で圧力差が小さく、モーメント係数は小さい。

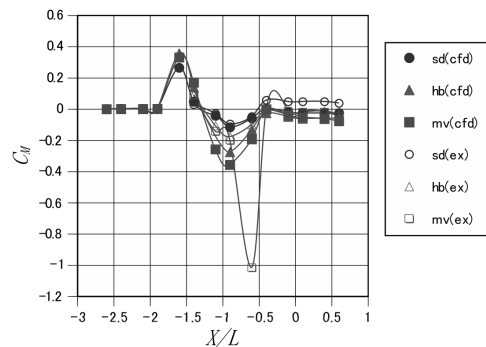


Fig. 8 Effect of X on Coefficient of Yawing Moment (H=15)

4 数値解析による相対位置の空力特性に及ぼす影響の考察

4. 1 数値解析について

次に車体周りの流れの状況を考察するために、各車体のモデルについて数値解析を行った結果を示す。数値解析に用いたコードはSCRYU/Tetra⁽⁷⁾であり、三次元非定常解析とした。計算においては、車体に向かう風速を実験と同じ20m/sとした。解析領域は、車体長さ方向に関して車体中心から車体上流側 2L、車体下流側 5Lとし、車体に垂直方向は 5W、高さ方向は 5Hとした。

境界条件については、入口条件を実験と同じ風速 20m/sとし、出口条件は大気圧 $1.0 \times 10^5 Pa$ とした。レイノルズ数 Re は代表長さを車体長さとして、 3.4×10^4 である。流れ場は四面体セルで構成し、セル数は約150万である。計算の収束判定条件については、残差を 10^{-4} とした。セ

ル数については、約200万セル～40万セル程度の範囲で変化させ、横力係数値が数パーセント程度の差異の範囲内となるのが80万セル程度であることを確認し、余裕をもって約150万セル程度になるように設定した。また時間発展については、SCRYU-Tetraで用意されている2次精度陰解法を選択し、時間ステップについては、CFL条件を考慮して $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ (s)とした。

4.2 解析結果について

4.2.1 抗力係数について

Fig.9 (a) およびFig.9 (b) に大型のトラックと、それに追い越される小型のミニバンとの横方向の間隔 $Y/W=1.24$ ($H=15$) の場合について、数値解析による圧力分布、速度ベクトル、渦度分布を示す。ミニバンの場合、Fig.6の数値解析結果において抗力係数 C_D が $X/L=-1.4$ 付近でピークとなるが、これはFig.9 (a) の $X/L=-1.4$ の場合の圧力分布の結果から、ミニバンの車体後部の圧力が明らかに低くなっていることによる。二つの車体の後部と前部がちょうど並んだ状態であり、トラックの角から剥離した流れが小型車の後ろに流れ、その影響で圧力が低下したために抗力が最大になったと考えられる。3.2節において、抗力係数 C_D に相対位置が大きく影響するのは、 $-1.5 \leq X/L \leq -0.5$ の範囲であると述べたが、渦度分布について $X/L=-0.4$ の結果と $X/L=-0.6$ の結果を比較すれば、ミニバンの角部からの渦度の発生の仕方が異なっていることがわかる。 $X/L=-0.4$ では、トラックとミニバンの前部が並ぶために、ミニバンの前部の左角部からの剥離は非常に小さく、渦度変化はあまり見られないが、 $X/L=-0.6$ ではミニバン角部から剥離渦が発生し、渦度変化が大きいため圧力分布に影響を及ぼす。したがって、 $X/L=-0.5$ 付近が抗力係数の激しい変化を起こす境界になっていると思われる。

また抗力係数 C_D は $X/L=-1.4$ 付近でピークとなるが、 $X/L=-1.4$ の圧力分布とその前後の $X/L=-1.1$ および $X/L=-1.6$ の圧力分布を比較すると、 $X/L=-1.4$ の場合に限り、トラックの前部とミニバン後部が並ぶため、トラックの右前方角部の圧力の低い部分がミニバン後部の圧力を低下させる原因となり、 $X/L=-1.4$ の場合に抗力がピークとなったと考えられる。

4.2.2 横力係数について

Fig.7の横力係数については、ハッチバック、ミニバンの実験および数値解析で共に $X/L=-1.4$ でピークとなり、トラックが測定車に近づくにつれ横力係数が小さくなるが、測定車とトラックの先頭が並ぶ $X/L=-0.4$ で負の値として大きくなる。

横力係数が $X/L=-1.4$ の場合に最大となることについて、以下のように考えられる。Fig.7のミニバンを例にとれば、 $X/L=-1.4$ では測定車であるミニバンの後部がトラックの前部と並ぶ状態にあり、トラックの前部の圧力が高いため、ハッチバックの左側面の圧力が上昇し、横力が大きくなることがわかる。この時、ミニバンの車体後部はトラックから離れて外側へ押し

だされる方向に力が作用し，その影響でミニバンの前部はトラックの前部に侵入しようとする傾向にある。

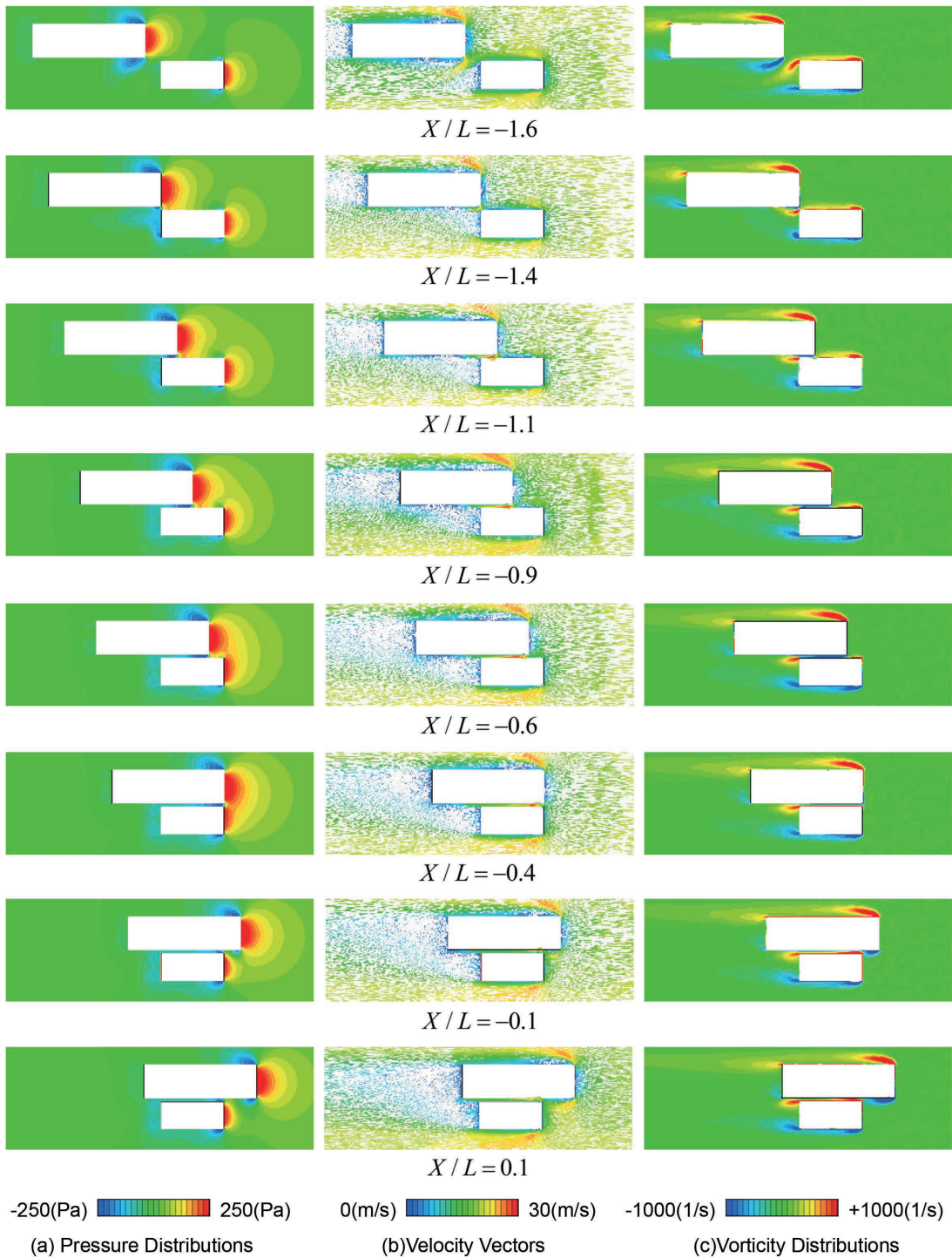


Fig. 9 (a) Results of Numerical Analysis (mv, H=15, X/L=-1.6~0.1)

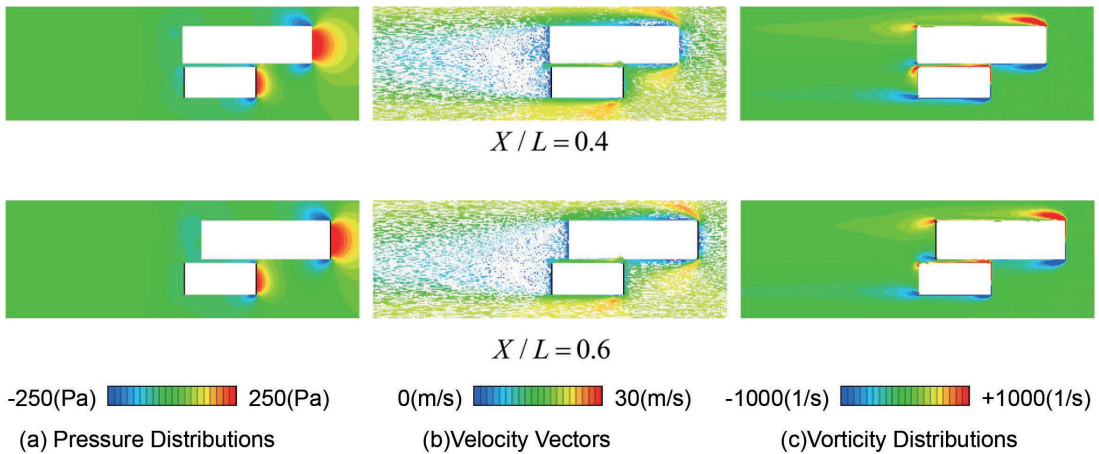


Fig. 9 (b) Results of Numerical Analysis (Pressure Distributions) (mv, H=15, X/L=0.4,0.6)

$X/L=-1.1$ および $X/L=-0.9$ の場合もトラック前部の高い圧力の影響を受けているが、ミニバンとトラックが重なる部分があり、この細い隙間部分の流れは流速が大きく低圧となる。しかし、 $X/L=-1.4$ の場合はそのような低圧部がなく、左側面全体にかかる力は $X/L=-1.4$ の場合に最大となる。同様のことは、セダン、ハッチバックの場合も生じる。

またFig. 9 (a) の $X/L=-0.4$ の圧力分布図から、ミニバンの左側面全体がトラックと接近しているため低圧にさらされ、ミニバンに対しては左向き（図では上方向）の力が作用し、車体がトラックに接触していく方向に力を受けることになり、危険である。

4. 2. 3 ヨーイングモーメント係数について

Fig. 8のヨーイングモーメント係数については、三種類の車体共に $X/L=-1.6$ で最大値となり、また三種類の車体共に $X/L=-0.9$ で最小値（負の最大値）となった。Fig. 9 (a) の $X/L=-1.4$ の圧力分布図ではミニバンの車体の左側後部はトラックの前面の高い圧力を受け、 $X/L=-1.6$ の場合より反時計回りのモーメントが大きいように見える。しかし、 $X/L=-1.4$ の場合、車体が接近しているために抵抗の少ないミニバンの車体右側に気流が容易に流れるため、ミニバン右側後方に強い負圧が生じており、時計回りのモーメントを発生させることになる。これらが打ち消しあうため、 $X/L=-1.4$ ではなく $X/L=-1.6$ でヨーイングモーメント係数が最大になったと考えられる。 $X/L=-1.6$ では、ミニバンの前部がトラックの進行方向に侵入させようとする力が大きく危険である。

また $X/L=-0.9$ で最小値（負の値としては最大）になる原因は以下のように考えられる。Fig. 9 (b) の $X/L=-0.9$ の場合は、トラックの前部がミニバンの中央付近に達した状態であり、

トラック前部の高い圧力の影響がミニバンの前側の左側面に及ぶ一方、ミニバンの後部の左側面は、トラックとの間の非常に早い流れのために低圧にさらされる。したがって、ミニバンの後部をトラックの車体に接触させようとする向きのモーメント、すなわちミニバンの車体には時計回りのモーメントが作用する。このことが $X/L=-0.9$ で時計回りの大きなモーメントが生じた原因である。また、渦度分布の結果から、 $X/L=-0.9$ の場合、ミニバンの左側（図では上側）側面の前方は自身の前方角部からの反時計回り（赤色）の渦層にさらされるものの、後方はトラックの前方角部からの時計回りの渦層（青色）にさらされており、ミニバンの車体全体として時計回りの渦層にさらされると考えられ、このことからこの位置で時計回りのモーメントが最大になることが理解できる。トラックがミニバンに追いつき ($X/L=-1.4$)、追い越していくにつれて ($-1.4 \geq X/L \geq -0.9$)、次第に反時計回りのモーメントが減少し、トラックの前部がミニバンの中央付近に達した時、時計方向の最大のモーメントが生じることがわかる。当然、二つの車体が離れるに従いモーメントはゼロに近づいていく。

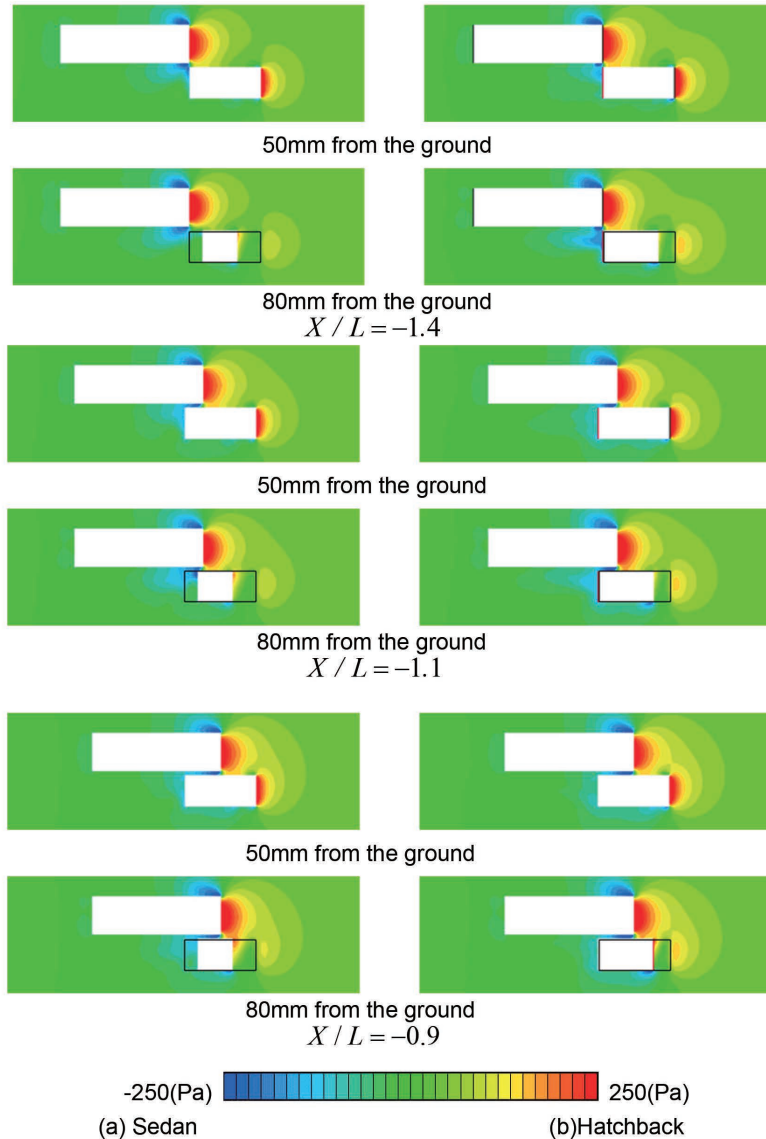


Fig.10 Pressure Distributions of Sedan and hatchback

4.3 数値解析結果からの車体形状の影響の考察

Fig.7の横力の結果では、三車種共に $X/L = -1.4$ 付近にピークがあるが、セダンの値はミニバン、ハッチバックよりも小さい。これは、車体側面の面積の大小による。また、Fig.8のヨーイングモーメントの結果では $X/L = -1.6$ 付近にピークが見られる。三車種共にピークが現れる位置はほぼ同じであるが、やはりセダンの値は他の車体より小さい。 $X/L = -0.9$ の場合は、三車種共に負の最大値となるが、この場合もセダンの値の絶対値は小さい。

Fig.10の左列に (a) セダン, Fig.10の右列に (b) ハッチバックの数値解析による圧力分布を示す。地面から50mm付近 (実車ではタイヤ上端付近) の圧力分布に大きな違いは見られないが、地面から80mm付近 (実車ではキャビン中央付近) の圧力分布に差違が見られる。

セダンは、車体後端までキャビンが至らないため、トラック前方からの流れを受ける面積が小さくなるとともに、キャビン後方の負圧領域が小さくなる。このため、セダンの横力、ヨーイングモーメントのピーク値が他の車体より小さくなる。ハッチバックとミニバンでは、車体後端付近までキャビンが続くため、トラック前方からの流れを受ける面積が大きくなり、横力とヨーイングモーメントの変化は近似した傾向を示す。

5 結言

本研究ではセダン、ハッチバック、ミニバンの3つの車種について、トラックが近接してきた場合の危険性について実験と数値解析から検討した。測定車の全長を L 、測定車とトラックそれぞれの中心位置の X 軸方向の距離を X として結果をまとめると以下ようになる。なお、横方向の車体の間隔は、双方の車体のドアミラーが触れ合う距離とほぼ同じ程度の最も接近した場合 ($Y/W=1.24$, $H=15$) を想定した。この場合が近接走行により最も相手の車体の影響が大きく表れる。

まず、抗力の変化は直接車の走行の安全性には関与しないが、横力とヨーイングモーメントについては、二つの車体が近接走行した際、車体同士が接触する方向に作用するため、非常に危険である。

横力については、測定車がセダン、ハッチバック、ミニバンの3車種いずれの場合も、トラックが後方から測定車に近づくにつれ、トラックから測定車を外側へ押し出す方向に横力が作用し、測定車後部がトラックの前部と並ぶ状態の $X/L=-1.4$ 付近でピークとなり、外側へ押し出される横力が最大となる。この場合、測定車はガードレールあるいは3車線のような道路ではさらに外側の車線を走行する車体と接触する危険がある。

しかし、その直後その横力は徐々に減少して負の方向へと大きくなり、トラックと測定車の先頭が並ぶ $X/L=-0.4$ 付近で負の値として最大となる。測定車をトラックに引き付け接触させる危険性が予見される。

次に、ヨーイングモーメントについては、トラックが後方から測定車に近づくにつれ、3車種いずれの場合もトラックが測定車の後部に並ぶ少し手前の $X/L=-1.6$ 付近で最大値となり、測定車をトラックの前方へと侵入させようとする方向にモーメントが作用する。

しかし、その直後にモーメントは徐々に減少して負の方向へと大きくなり、 $X/L=-0.9$ 付近で三種類の車体共に負の最大値となった。この場合、測定車の後部をトラックに接触させようとするモーメントが最大となり、危険性が予見される。

参考文献

- 1) 自動車技術会編：自動車技術ハンドブック基礎・理論編，自動車技術会，(1991) ， p.202.
- 2) Robert K. H.: Aerodynamics of Passenger Vehicles in Close Proximity to Trucks and Buses, SAE Paper, 730235
- 3) 西坂周二郎：前後に直列に走行する自動車の空気力学的影響，自動車技術会学術講演会前刷集，1996-964 (1996) ， p.17.
- 4) 横内元治：複数自動車の並進走行時の空気力学的影響－軽ライトバンと大型バスの場合，自動車技術会学術講演会前刷集，1994-942 (1994) ， p.157.
- 5) 高森浩治，西村宏昭，谷地義人，岡崎充隆，“2棟の高層建築物の空力相互作用”，日本建築学会大会学術講演概要集（関東）(2001)， p.173-174.
- 6) Appupillai Baskaran and Ahmed Kashef, “Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques” , Engineering Structures, Vol. 18, No. 11, (1996), p.861-875.
- 7) ソフトウェアクレイドル：非構造格子系汎用三次元熱流体解析システム, SCRYU-Tetra, <http://www.cradle.co.jp/products/scryutetra.html>, (2016)