

非定常渦構造の特性解明およびそれに基づく 抜本的空気抵抗低減技術の開発

プロジェクト責任者

安木 剛 トヨタ自動車株式会社 車両C A E部

著 者

忠津 雅也^{*1}、山村 淳^{*1}、安木 剛^{*1}、加藤 千幸^{*2}、山出 吉伸^{*2}、鈴木 康方^{*2}、
廣川 雄一^{*3}、西川 憲明^{*3}、上原 均^{*3}、新宮 哲^{*3}

* 1 トヨタ自動車株式会社 車両C A E部

* 2 国立大学法人東京大学 生産技術研究所

* 3 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 22 年 4 月 1 日～平成 23 年 3 月 31 日

アブストラクト

2Box 車の空気抵抗は車両後流 (Wake) の影響があることが知られている。Wake 内の流れは非定常であり複雑な渦構造であるため、定常流解析もしくは実験によりその構造を解明することは困難であった。本研究では、地球シミュレータを用いた LES の高精度な計算を実施し、Wake 内の渦構造を解明する。2Box タイプの車両 (3 形状) の LES 計算から、それらの Wake 内の渦構造を比較することで、Wake 内の渦と車両の空気抵抗には相関がある事を確認し、その渦の形成には剥離した乱流境界層の不安定性が寄与していると推定した。

キーワード： 自動車、空力、非定常流れ、LES、空気抵抗、渦

1. 背景・目的

地球温暖化、化石燃料の枯渇問題により、自動車業界において、温室効果ガス (CO₂) 削減、燃料規制への対応が重要課題となっている。欧州では、2009 年 6 月に 2012 年からのフェーズインで全乗用車の CO₂ 排出量を 130g/km 相当とする規制が発行された。また、国内でも 2007 年 7 月の省エネ法改正により 2015 年度を目標達成年度とした乗用車等の新燃費基準 (2004 年度実績比で乗用車 23.5% 向上) が導入された。CO₂ 排出量低減には、自動車の走行抵抗としての空気抵抗低減は重要な課題である。しかし、従来の経験や実験に基づく手法による改善は限界になりつつある。

本プロジェクトは、地球シミュレータ上での数値計算と実験によって、自動車の走行時の空気抵抗発生メカニズムを解明することを目的とする。

2. 供試品

Case 1、Case 2、Case 3 の 3 形状を計算と実験の供試品とした。3 ケースは車両後部の形状以外は同一の形状である。図 1 に Case 1 の車両形状を示す。図 2 に 3 ケースの車両形状側面視を示す。

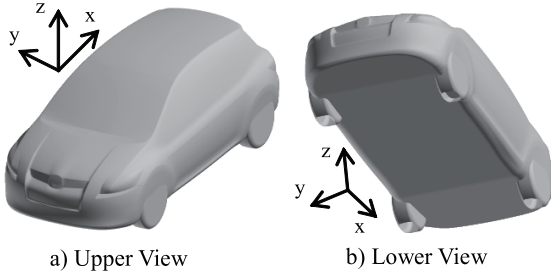


Fig.1 Car Model (Case 1)

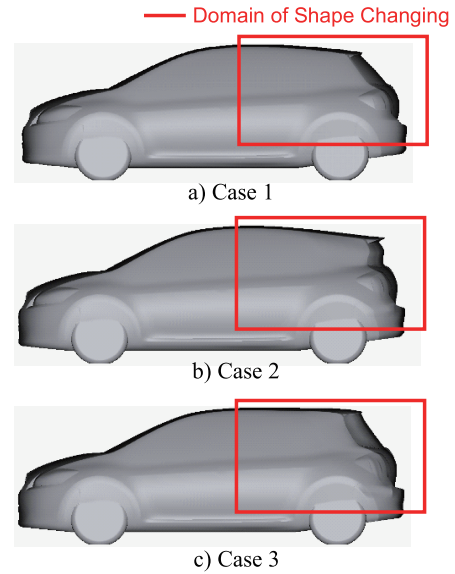


Fig. 2 Car Models of Side View

3. 計算手法

計算には、東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターにおいて開発された LES 流体計算ソルバー FrontFlow/blue ver.5.2 を用いた。FrontFlow/blue は有限要素法を用いた流体計算ソルバーであり、運動方程式の計算に時間と空間を二次精度で計算する Crank Nicolson 法、圧力方程式の計算に Fractional Step 法を使用している。また、格子解像度を下回る流体運動の評価 (サブグリッドスケールモデル) には、Dynamic Smagorinsky Model を使用した。

本プロジェクトでは計算要素数約 5000 万の計算に、地球シミュレータの 16 ノードを用いて 35 時間程度の計算を実施した。また、計算要素数約 4 億の計算に、地球シミュレータの 32 ノードを用いて 50 時間程度の計算を実施した。

4. 計算条件

計算領域に付与した境界条件を表 1 に示す。計算領域を図 3 に示し、計算格子を図 4 に示す。計算格子の最小要素幅は約 1[mm] とした。

Table 1 Calculation Condition

Reynolds Number	2.5×10^5 [-]
Dynamic Viscosity Coefficient	1.54×10^{-5} [m ² /s]
Characteristic Length	1.876 [m]
Term of Time Averaging	from 18.3[sec] to 36.6[sec]

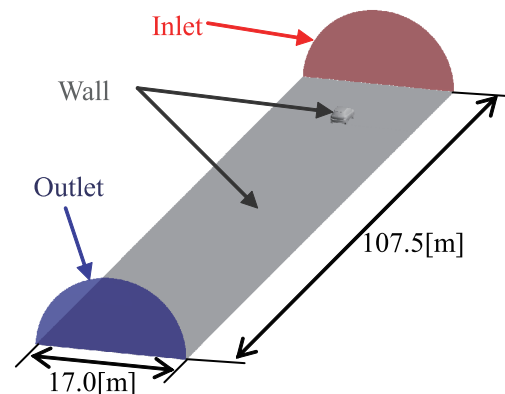


Fig. 3 Calculation Domain

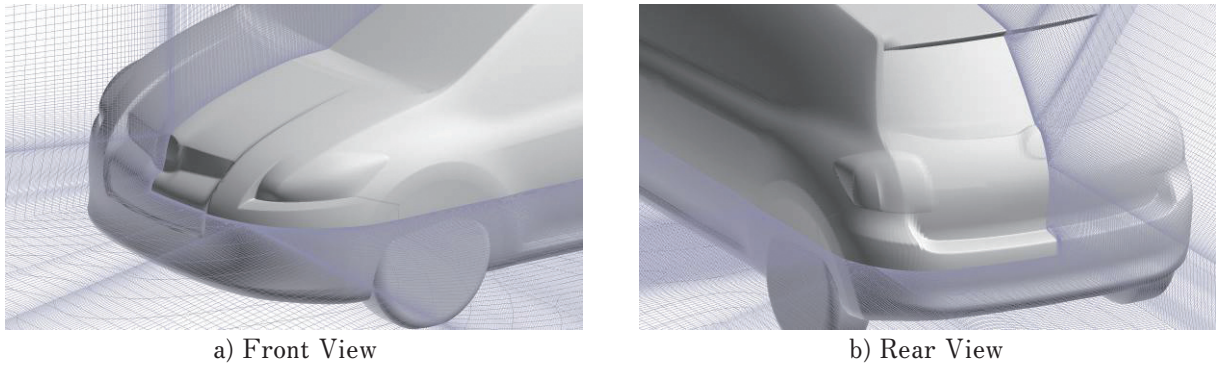


Fig. 4 Vertical Section of Finite Element (Case 1)

5. 計算結果

計算結果の空気抵抗係数 (C_D 値) 時刻暦を図5に示す。区間 A では C_D 値が安定したと判定し、以降の計算結果はこの時間平均した流れ場を分析した。実験結果も同様に、計測結果が安定した区間において平均した。

表2に C_D 値を示す。表2から Case 1 に比べて Case 2 の C_D 値が小さく、Case 3 の C_D 値が大きくなっていることがわかる。

図6に同断面の圧力分布を示し、図7に車両中央断面の流速分布を示す。

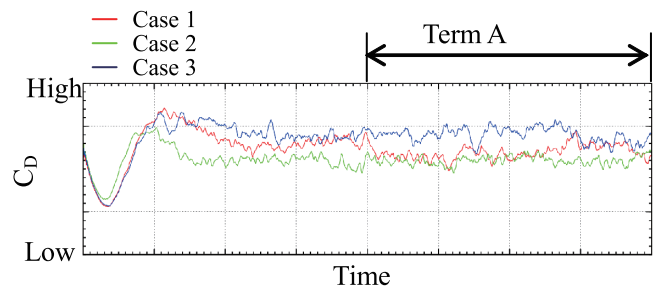


Fig. 5 C_D Time History of Calculation

Table 2 Drag Coefficients

	Drag Coefficients
Case 1	0.269
Case 2	0.260
Case 3	0.290

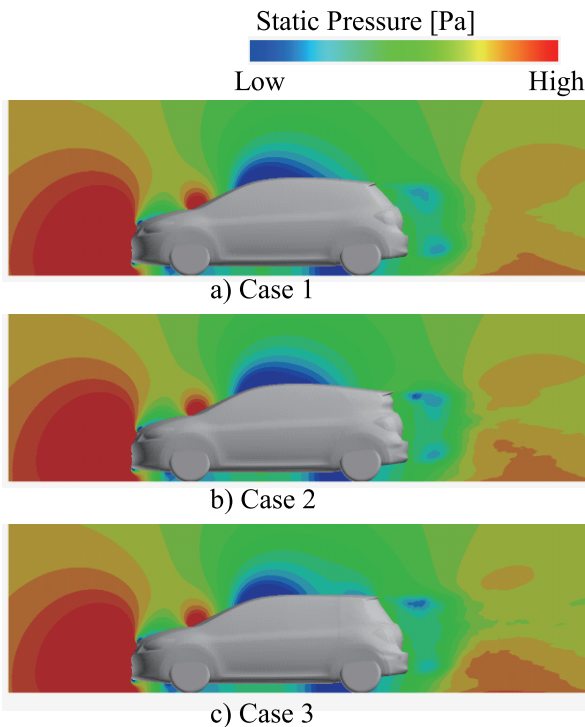


Fig. 6 Static Pressure Distribution at Center Plane

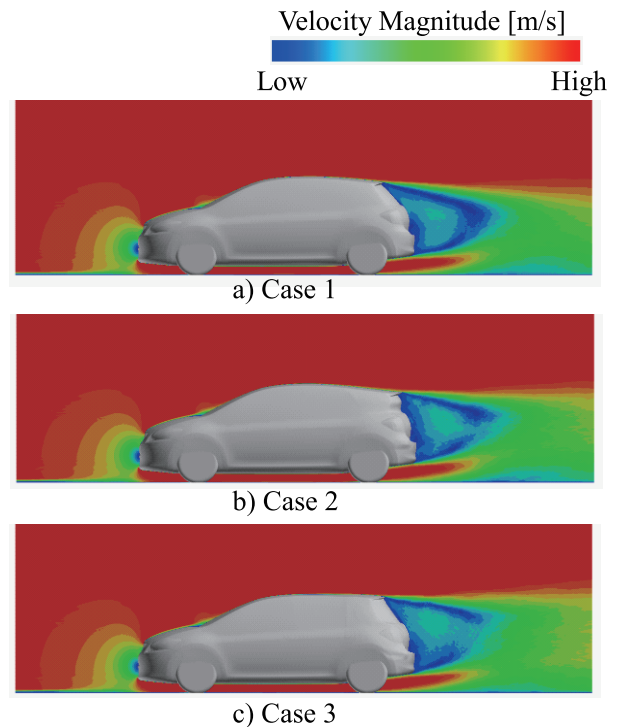


Fig. 7 Velocity Magnitude Distribution at Center Plane

本研究では、計算結果の精度検証を目的として同一供試品を用いた実験も実施した。図8に車両表面上の圧力測定孔位置を示す。図9に計算結果と実験結果を示す。計算結果と実験結果が概ね一致していることを確認した。

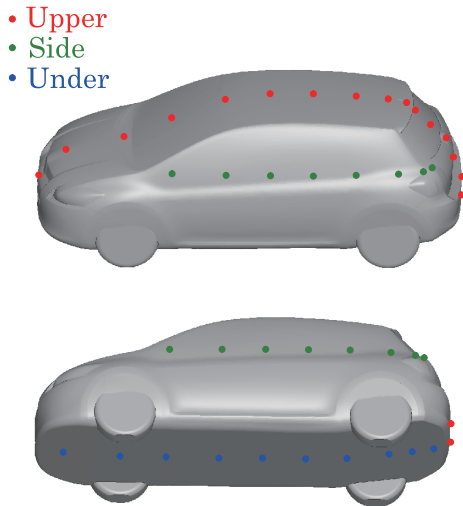


Fig. 8 Static Pressure Measurement Point

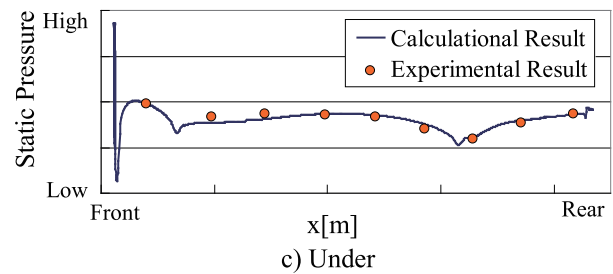
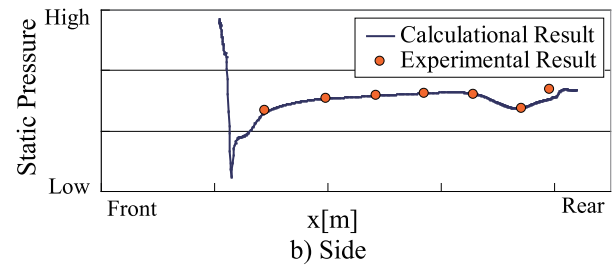
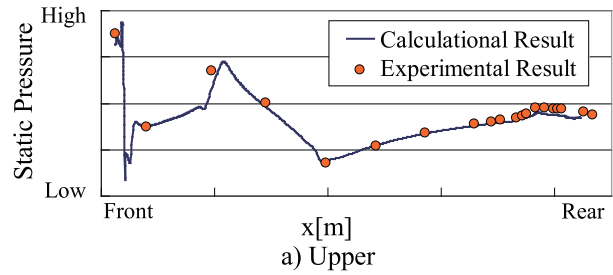


Fig. 9 Static Pressure on Vehicle's Surface Points (Case 1)

6. 考察

車両先端から任意 x 位置までの車両の C_D 値積分値分布を図10に示す。図10から、車両背面開始位置から $+x$ 方向に進むに従って、 C_D 値に差が生じていることがわかる。このことから、以降は車両後流について考察する。車両後端近傍の車両中央断面静圧分布を図11に示す。図11から、3ケース共に車両後方に静圧が極小となる領域が2箇所ずつ存在していることがわかる。

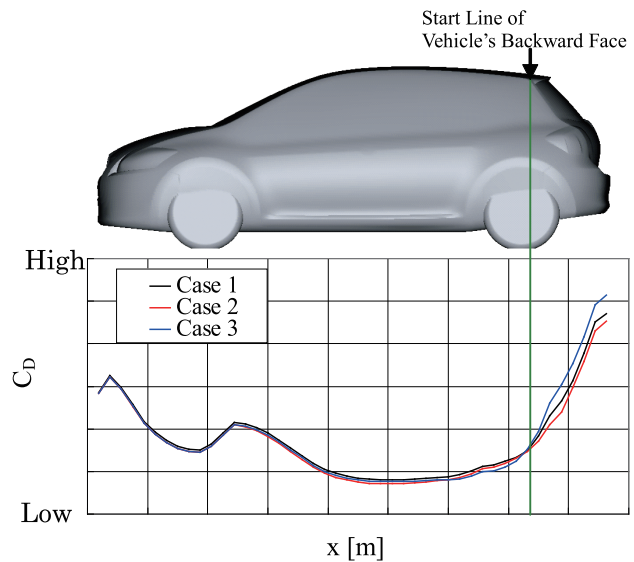


Fig. 10 Integral of Drag Coefficient from Vehicle's Front Tip

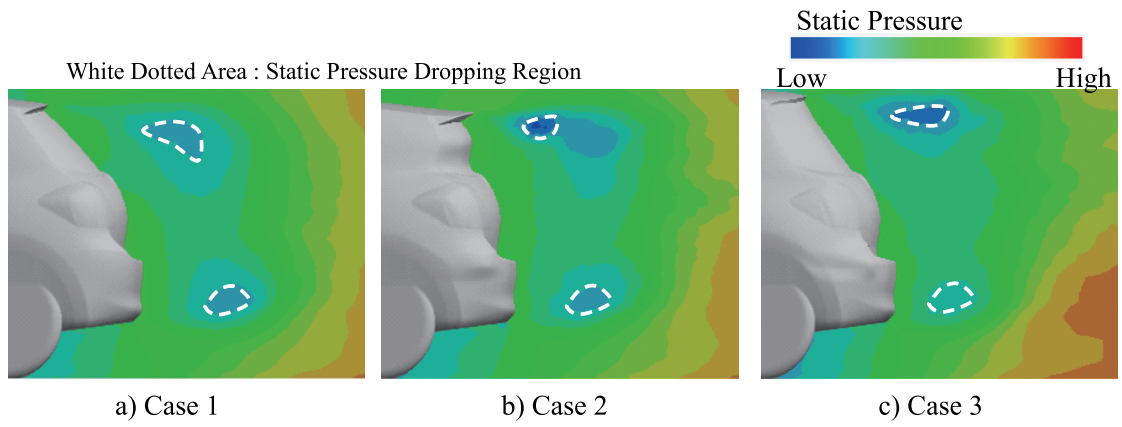


Fig. 11 Static Pressure Distribution at Center Plane

車両後端近傍の車両中央断面の速度勾配テンソル第2不変量であるQ値分布と流線を図12に示す。Q値が正值の領域は、渦が存在する領域である。図12から図11に示した圧力低下領域近傍に渦が存在することがわかる。他の断面で図12と同様に渦中心を特定し、渦中心をつないだ結果を図13に示す。図13から3次元空間では、環状に渦中心が存在していることがわかる。

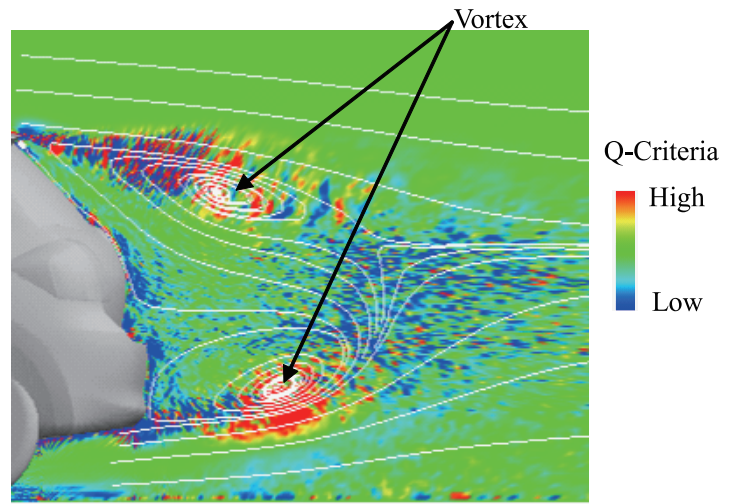


Fig. 12 Q-Criteria Distribution and Stream Lines at Center Plane (Case 1)

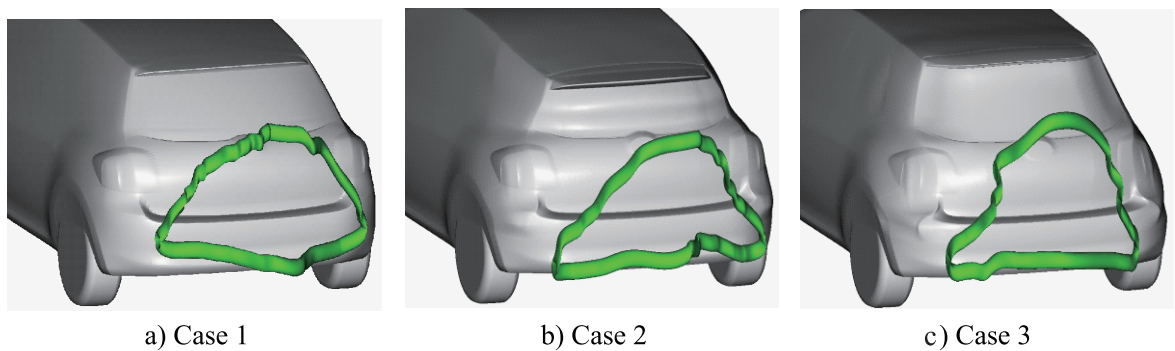


Fig. 13 Vortex Ring in Vehicle's Wake

渦が流体中に存在する場合、周囲の流体は渦によって速度を誘起される。渦と誘起速度との関係は Biot-Savart の関係式で表される。(1) 式より、渦による周囲の流体への誘起速度は渦の循環量と周囲の流体と渦との距離によって定まる。

$$\text{Biot-Savart's Relation : } u(\vec{x}) = \frac{\Gamma}{4\pi} \int \frac{(\vec{x} - \vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|^3} dl \quad (1)$$

ここに、 \vec{x} は渦の周囲の流体任意位置座標ベクトル、 \vec{x}' は渦中心位置座標ベクトル、 l は渦の長さ、 Γ は渦の循環量、 $u(\vec{x})$ は渦による \vec{x} での誘起速度である。

車両後流に形成している渦輪の循環量と車両背面との距離を測定した。測定位置を図 14 に示す。循環量と渦輪と車両背面との距離の測定結果を表 3 に示す。

循環量と C_D 値を図 15 に示し、渦輪と車両背面との距離と C_D 値を図 16 に示す。図 15 から渦輪の循環量が増加するに従って C_D 値が増加していることがわかる。図 16 から、渦輪が車両背面に近づくに従って C_D 値が増加していることがわかる。

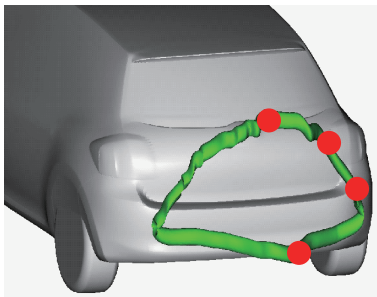


Fig. 14 Measurement point of Circulation and Distance between Vortex Ring and Vehicle's Backward Face (Case 1)

Table 3 Circulation and Distance between Vortex Ring and Vehicle's Backward Face

	Circulation [m ² /s]	Distances between Vortex Ring and Vehicle's Backward Face [m]
Case 1	50.5	0.384
Case 2	41.7	0.469
Case 3	52.0	0.319

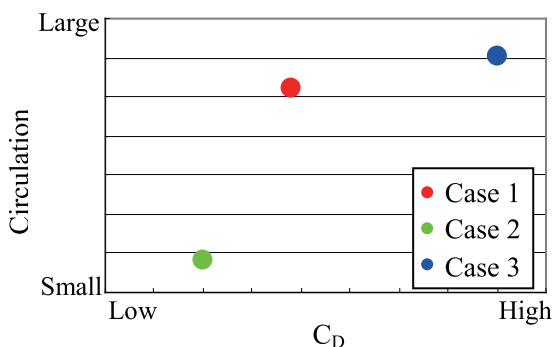


Fig. 15 Circulation and C_D

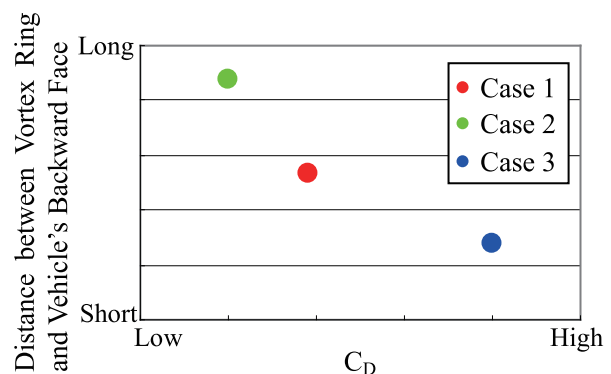


Fig. 16 Distance between Vortex Ring and Vehicle's Backward Face and C_D

車両中央断面ルーフ後端近傍圧力分布を図17に示す。図17からルーフ後端で剥離した乱流境界層は、剥離直後に渦核を形成し移流、その後巻き上がりながら強い渦を形成し、時間経過と共に散逸していることがわかる。

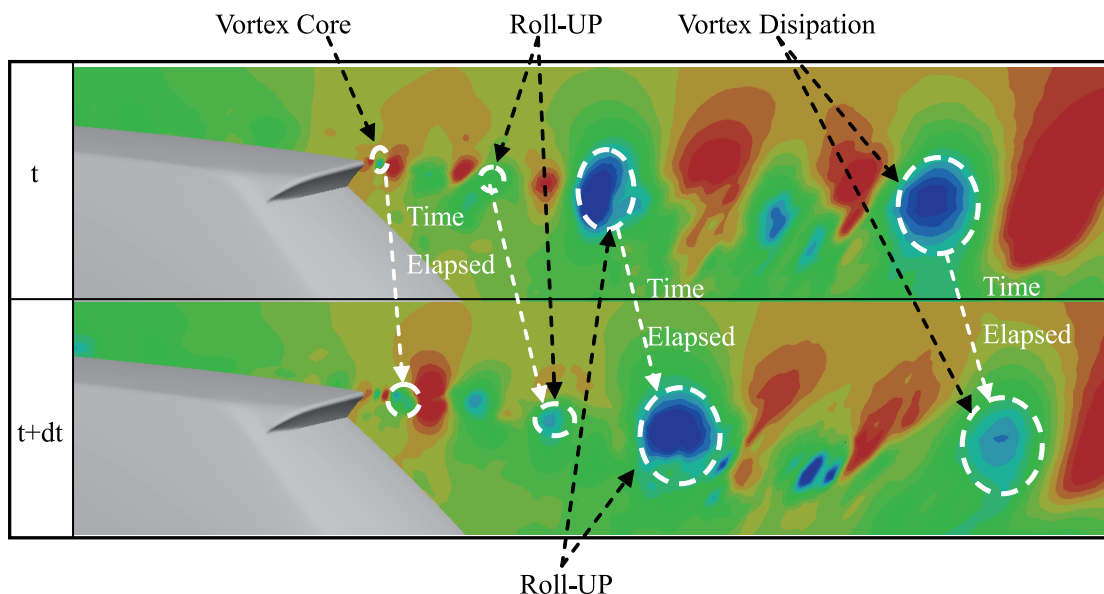


Fig. 17 Static Pressure Distribution at Center Plane near Roof End Region

ルーフ後端で剥離した乱流境界層の線形安定性解析¹⁾を実施した。線形安定性解析の結果、剥離した乱流境界層の変動増幅率が大きくなるに従って速く巻き上がると予想した。線形安定性解析の座標系は、車両中央断面ルーフ後端を原点とし、主流方向をX軸とした。線形安定性解析の座標系を図18に示す。線形安定性解析結果を図19に示す。図19から安定性が高くなるに従って C_D 値が低くなることを確認した。

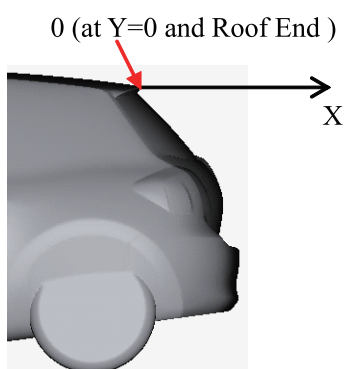


Fig. 18 Coordinate for Linear Stability Analysis (Case 1)

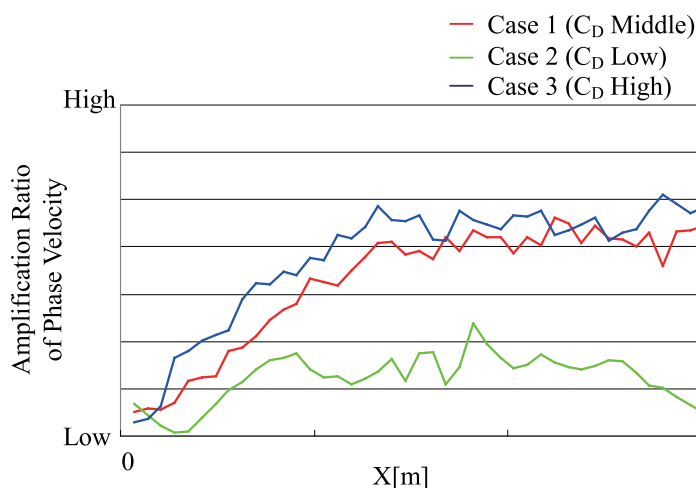


Fig. 19 Linear Stability Analysis Result

7. 結論

数値計算と実験によって、自動車の走行時の空気抵抗発生メカニズムの分析を実施した。

分析の結果、車両後流の渦と車両の空気抵抗には相関がある事を確認し、その渦の形成には剥離した乱流境界層の不安定性が寄与していると推定した。

謝 辞

本プロジェクトの推進に際して、独立行政法人海洋研究開発機構地球シミュレータセンター 渡邊 國彦氏に御指導、御助言を頂いた。計算コード FrontFlow/blue は、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの開発」プロジェクトの一環として、東京大学生産技術研究所で開発されたものである。

ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Zhuang, M., Kubota, T. and Dimotakis, P. E., " Instability of Inviscid, Compressible Free ShearLayers" , *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 10 (1990), pp.1728-1733.
- 2) 中山, 高光, 安木, 前田: 車両外板の見切りが空気抵抗に及ぼす影響の研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No153-10, p.1-6, (2010)
- 3) 忠津, 山村, 安木: 2Box 車の空気抵抗低減に関する研究 (第 1 報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No.47-11, p.7-12, (2011)