

実車を対象とした CFD によるミラー剥離現象の捕捉

Prediction of the flow separation around a side-mirror of a full vehicle by CFD

- 安保 慧, 本田技研, 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, Kei_Ambo@n.t.rd.honda.co.jp
- 吉野 崇, 本田技研, 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, Takashi_01_Yoshino@n.t.rd.honda.co.jp
- 寺村 実, 本田技研, 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, Minoru_Teramura@n.t.rd.honda.co.jp

Kei Ambo, Honda R&D Co., Ltd., 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi
Takashi Yoshino, Honda R&D Co., Ltd., 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi
Minoru Teramura, Honda R&D Co., Ltd., 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi

The high frequency aeroacoustic noise (over 1 kHz) is generated by the flow fluctuation around the side mirrors, and it is transmitted into the cabin through the side window glasses. In order to evaluate the aeroacoustic noise which generated around side mirrors, we should capture the precise flow separation of side mirrors in the first place.

In this research, our focus is to clarify the criteria of the wall resolved LES for predicting the precise flow separation by using simplified mirror model. Since this simplified model has the flow transition phenomenon, flow behavior of CFD is sensitively influenced by the mesh resolution. Furthermore, this wall resolved criteria were applied to the side mirrors of a full-scale vehicle by using the supercomputer K-computer. As results, we clarified the wall horizontal resolution is crucial to predict the precise flow separation observed around side mirrors.

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けた自動車のさらなる燃費改善に加え、自動車の高速化や高性能化に伴い走行安定性の向上や快適性の向上が求められており、この快適性向上のための一要因として車室内騒音の低減が求められている。この車内騒音では音源として、エンジンとその排気・動力伝達機構によるもの、タイヤやサスペンション振動によるロードノイズ、Heating, Ventilation, and Air Conditioning(HVAC)等の空調機器音、そして車両各部に存在する流れの剥離が起因となる風切音によるもの等へ分離する事ができる。近年、パワーブランドの電動化によるエンジン騒音の低下により、風切音に対しても静粛化が求められている。

風切音を低減するための技術課題の一つとして、車室内までの音の侵入経路の解明が挙げられる。筆者らの従来研究⁽¹⁾において、高周波風切音では、車外で発生した音波がガラスを通して車内へ伝達することを示した。つまり、車室内の高周波風切音は、その伝達経路や遮音性にも影響を受けるが、車外で発生する騒音源自体の強度に大きな影響を受けると考えられる。

本研究においては、風切音を対象にした際に、特に重要と言われているドアミラー⁽²⁾に着目する。Powell の渦音説では、空力音源は、物体近傍に生じる渦の運動に起因するとされている⁽³⁾。ドアミラーから発生する騒音源となりうる渦は、主に主流の変動成分、境界層の圧力変動、境界層剥離、および後流渦放出などの流れ現象に起因していると考えられる。特に、実車のドアミラーは車体から突出しているため、車体が静止している場合は、主流の変動成分は無視できる。さらに、後流渦放出はミラー表面で発生する境界層剥離に影響を受けることを踏まえると、音源を正確に予測するためには境界層の現象を把握することが重要となる。

CFD においても、境界層の圧力変動や剥離までの成長過程を扱うためには、境界層の粘性底層を十分に解像する LES(Wall resolved LES)が求められるが、境界層を解像するメッシュ要件については、十分には明らかにされていない。

そのため、境界層剥離を再現するメッシュ要件としての高精度クライテリアを構築し、実車ミラーにおける境界層剥離を予測することを目的とする。

2. 実車のミラーを対象とした CFD の技術課題

まず、境界層を解像していない LES による現状の剥離の予測精度を検証するために、実験と解析の比較を行った。

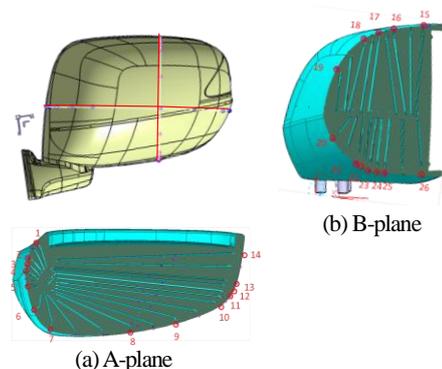
弊社所有の風洞において、FIT のミラーを対象としたミラー表面の C_p 分布を計測した。Fig.1,2 に光造形により製作した圧力孔の様子と、圧力孔位置を示す。

一方、CFD では、Tetra 要素を用いた 6000 万要素のメッシュを用いた。車体形状は、表面分解能 5mm で再現し、境界層メッシュは使用していない。また、タイヤや地面の境界条件は、静止状態である。Table.1 に示す計算条件に従って計算を実施した。ソフトウェアは、FrontFlow/Red(以下 FFR とする)を用いた。



(a) FIT (b) Pressure hole

Fig.1 Vehicle shape for measurement



(a) A-plane (b) B-plane

Fig.2 Measurement plane (a)A-plane, (b)B-plane

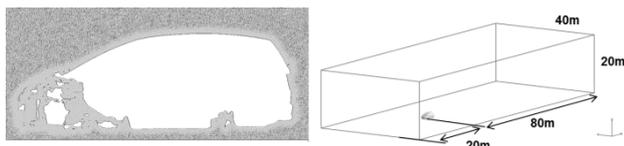
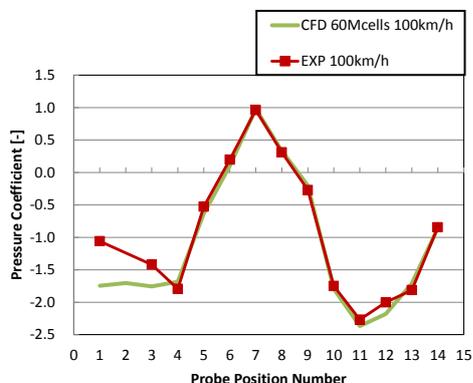


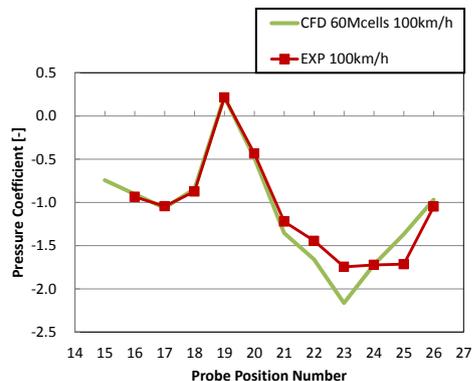
Fig.3 Mesh and calculation domain

Table1. Calculation conditions

Software	FFR
Cells number	60,573,984
Length [mm]	3,900
Velocity [m/s]	27.7 (100km/h)
Reynolds number	7.17×10^5
Time step [sec]	8.0×10^{-5}
SGS turbulence model	Smagorinsky-Lilly ($C_s=0.15$)
Time marching method	1st order Euler
Spatial discretization	2nd order CD (5% 1st upwind is blended in convection terms)
P-V coupling method	SMAC method
Boundary conditions	FIT body : log-law Ground : Slip & log-law
Integration time of evaluation [sec]	0.160



(a) A-plane



(b) B-plane

Fig.4 Cp distribution on FIT

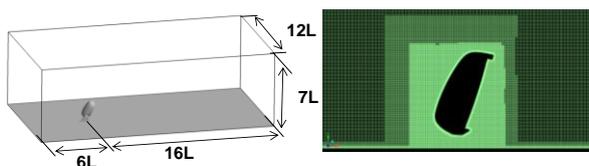


Fig.5 Calculation domain of mirror component

Table2. Calculation conditions

Software	Fluent
Cells number	154,634,169
Length L [mm]	149.1
Velocity [m/s]	27.7 (100km/h)
Reynolds number	2.84×10^5
Time step [sec]	3.6×10^{-6}
SGS turbulence model	WALE
Time marching method	2nd order NITA
Spatial discretization	2nd order BCD
P-V coupling method	Fractional step method
Boundary conditions	Mirror : Non slip wall Ground : Non slip wall
Integration time of evaluation [sec]	0.072

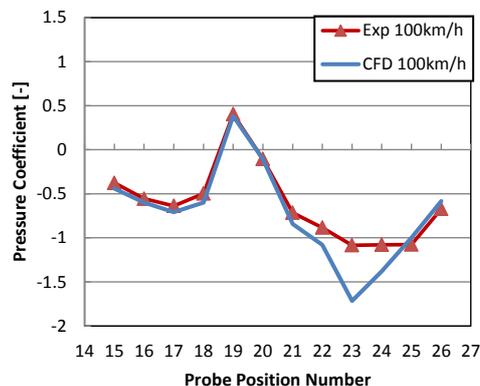


Fig.6 Cp distribution of B-plane on mirror component

計測と LES により得られた C_p 分布を Fig.4 に示す。縦軸が C_p であり、横軸が圧力センサーの計測箇所を示している。A-plane の 1 番から 3 番、および B-plane の 21 番から 26 番において、LES と実験との不一致箇所が存在することを確認した。

さらに、この C_p 分布が再現できない問題が、車体特有の現象であるかを切り分けるために、ミラー単体モデルを用いて、剥離現象の把握を行った。Fig.5 にミラー単体を対象とした計算領域を示し、Table.2 に計算条件を示す。ミラー表面に対して垂直方向に境界層を $y^+ \approx 1.5$ から解像する境界層メッシュを用いた 1.5 億要素の計算を Fluent を用いて実施した。ミラー単体実験で取得した C_p 分布との比較を Fig.6 に示す。境界層メッシュを用いた垂直方向の解像やソルバーに関わらず、実車におけるミラーの C_p 分布と同様に境界層剥離の再現が難しいことが確認できた。

これらの比較から、ミラー周りの剥離が一致しない流れ現象は、車体の影響に依らず存在し、ミラー単体の形状に起因する現象と考えられる。そのため、ミラー表面の局所的な流れ現象を再現するために必要となる解析クライテリアを、基礎的なミラーモデルを用いて検討を行う。

3. 基礎的なミラー形状における剥離再現クライテリアの構築

3.1. テストによる流れ現象の確認

ミラー単体においても同様の現象が発生していることから、Fig.7 に示す等価 Re 数 ($Re=2.4 \times 10^5$) となる基礎的なモデルを用いて、剥離再現性に関するクライテリアを構築する。

モデルは、加藤らにより研究⁴⁾が行われ、2010 年に自動車技術会⁵⁾でも取り扱っている基礎的な形状のミラーを用いる。その際の結論においても、十分な剥離の捕捉には至っていない。

まず、弊社風洞において、入口流速をパラメーターとして Re 数を変化させた際のミラー表面の C_p 分布の計測を行った。Fig.8 にテスト結果を示す。Re 数が 2 倍増加する間にミラー表面の流れの分布が変化することを確認した。つまり、今回対象としている FIT のミラーおよび、基礎的なミラーにおける Re 数が層流から乱流に状態変化する遷移 Re 数近傍の現象であることが確認できた。

率, ν は動粘性係数である.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

しかし, 計算前においてミラー後流における散逸率が未知なため, η は何らかの手法により推定する必要がある.

湯ら⁽⁹⁾は, 乱流場を均質等方的であると仮定すると, 流れ場の代表長さ L と η の間に式(3)の関係が成り立つとしている.

$$\frac{L}{\eta} = Rem^{\frac{3}{4}} \quad (3)$$

ここで, Rem は乱流レイノルズ数, u' は乱流変動速度, u は代表速度, TI は乱流強度となり, 式(4),(5)の関係が成り立つ.

$$Rem = \frac{\sqrt{u'^2}L}{\nu} \quad (4)$$

$$u' = TI \cdot \bar{u} \quad (5)$$

上式により TI を同定する事ができれば, Rem に対応した η を算出して空間メッシュサイズを計算前に見積もることができる.

本研究においては, 星野らにより行われたミラー後流の PIV 計測から得られた実験データ⁽¹⁰⁾を用いて乱流強度 TI を 0.1 と定めた.

これらの境界層メッシュおよび空間メッシュ分解能の見積もり手法に基づいて解析用のメッシュ作成を行う.

3. 3. Wall resolved LES の計算条件

メッシュの作成は, ANSYS 社の TGrid を用いて境界層および空間メッシュを作成した. この際, 境界層の成長率は 1.1 倍と定めた. 作成したメッシュを Fig.9 に示す. 境界層は, Prism 要素, 空間は Hexa 要素で構成され, 両者の接合に Tetra 要素を用いた.

基礎的なミラーの計算では, 表面分解能を式(1)の層流境界層 δ_B に対して設定し, 空間分解能は式(3)のコルモゴロフスケール ($\eta=0.037\text{mm}$)に対してミラー後流で約 54 η とした.

Table2.に評価を行った 5 条件を示す. ミラーの層流境界層厚さに対して水平方向の分解能を $1/1 \delta_B$ から $1/4 \delta_B$, 垂直方向の分解能を $1/20 \delta_B$ と $1/40 \delta_B$, 時間分解能 Δt を計算時のクーラン数が 1~4 となるように調整した. メッシュ数としては, 総じて億単位となり, 基礎的なミラー形状に対しても大規模な計算が必要となる. また, 境界層の層数は, 境界層高さが同じになるように調整している. なお, 壁面水平方向の分解能を同じにした条件における壁面垂直分解能 $1/20 \delta_B$ と $1/40 \delta_B$ の比較において, 計算は実施したが, 結果に差がなかったため, ここでは割愛した.

計算条件を Table3.に示す. 乱流モデルに関しては, WALE を用いており, LES によりモデル化される渦粘性が式 (6) から(9)のように定義される⁽¹¹⁾. なお, C_w は WALE のモデル定数であり, 0.325 を用い, k はカルマン定数 0.4, d は壁面高さである.

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij} S_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (6)$$

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}) \quad (7)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2}(\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3}\delta_{ij}\bar{g}_{kk}^2 \quad (8)$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

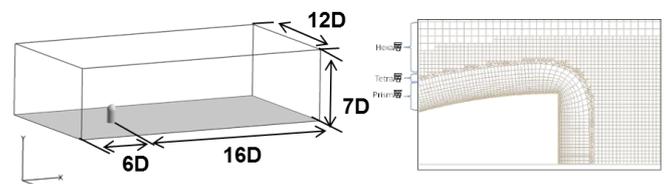


Fig.9 Calculation domain and mesh

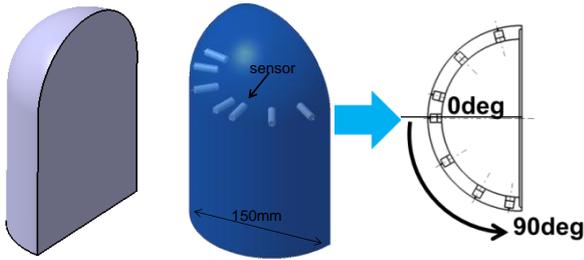


Fig.7 Simplified mirror

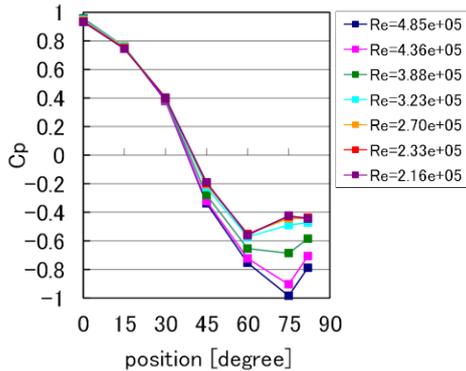


Fig.8 Cp distribution of simplified mirror

3. 2. メッシュ解像度の見積もり手法

一般的に, 境界層を解像するメッシュの要件としては粘性底層 $y^+ \leq 5$ を表現することが必要とされ, すべりなし境界条件を与えるためには, 粘性底層内に節点が数点必要とされているが⁽⁶⁾, 遷移近傍の現象を取り扱う際は, Fig.4.6 の C_p 分布から分かるように壁垂直方向に対するメッシュ分解能だけでは, 捕捉が困難であることを確認した.

そこで, 本研究では, 剥離現象と直接関連するミラー表面の境界層の分解能に着眼し, 壁面垂直分解能に加え, 壁面水平方向の分解能, および水平方向に影響を受ける時間分解能クーラン数 ($C = u\Delta t/\Delta x$) をパラメータとして評価を行う. 武藤ら⁽⁷⁾は式 (1) に示す計算式により, 球の層流境界層厚さ δ_B を計算し, 境界層厚さに対して垂直方向の分解能を $1/20 \delta_B$ とするメッシュを用いて, 遷移領域の抵抗値を計算している.

$$\delta_B = 3 \times \sqrt{\left(\frac{D_p/2}{u_0}\right)\nu} \quad (1)$$

本研究においても同様に, 式(1)を用いてミラーの層流境界層厚さを見積もり, その厚さに対する分解能をパラメータとして境界層メッシュに適用した. ミラーにおける代表長さ D_p , 流速 U_0 , 動粘性係数 ν から見積もられた境界層厚さ δ_B は, 0.3072mm である.

一方, 境界層剥離後の流れやミラー後流に影響を与える空間のメッシュ分解能は, ミラーの境界層メッシュに依らず固定化して検証を行った. 空間メッシュは, 渦が分子粘性により熱エネルギーへ散逸される乱流の最小スケールであるコルモゴロフスケール η を導入して, 空間分解能を η により正規化した無次元化指標を用いる.

松本らは, GS-SGS 間エネルギー輸送への Reynolds 項の寄与がコルモゴロフスケールの 30 倍以上の場合に支配的になることを明らかにしている⁽⁸⁾. 本研究における LES の SGS モデルとして, 渦粘性モデルを用いていることから, ミラー後流領域においては, コルモゴロフスケールの 30 倍以上のメッシュを用いることが妥当である.

コルモゴロフスケールは, 式(2)で表される. ここで, ε は散逸

Table.2 Calculation case

Case	Vertical resolution	Horizontal resolution	Time resolution	Cells number
H1/1_V1/20	$\frac{1}{20} \delta_B (y^+ \approx 1.5)$	$\delta_B (x^+ \approx 31.0)$	$C \approx 1$	116,173,839
H1/2_V1/40	$\frac{1}{40} \delta_B (y^+ \approx 0.8)$	$\frac{1}{2} \delta_B (x^+ \approx 15.4)$	$C \approx 2$	172,794,085
H1/2_V1/40_t1/2	$\frac{1}{40} \delta_B (y^+ \approx 0.8)$	$\frac{1}{2} \delta_B (x^+ \approx 15.4)$	$C \approx 1$	172,794,085
H1/4_V1/40	$\frac{1}{40} \delta_B (y^+ \approx 0.8)$	$\frac{1}{4} \delta_B (x^+ \approx 7.7)$	$C \approx 4$	390,225,832
H1/4_V1/40_t1/4	$\frac{1}{40} \delta_B (y^+ \approx 0.8)$	$\frac{1}{4} \delta_B (x^+ \approx 7.7)$	$C \approx 1$	390,225,832

Table.3 Calculation conditions

Software	Fluent
Diameter [mm]	72
Velocity [m/s]	50.0 (180km/h)
Reynolds number [-]	2.46×10^5
Time step [sec]	2.0×10^{-6} (H1/1_V1/20)
SGS turbulent model	WALE (Cw=0.325)
Time marching method	2nd order NITA
Spatial discretization	2nd order BCD
P-V coupling method	Fractional step method
Boundary conditions	Mirror : Non slip wall Ground : Non slip wall
Integration time of evaluation [sec]	0.072

3.4. Wall resolved LES の計算結果

計算時間は、最も要素数の多い3.9億要素において、約1000並列で3週間ほどかかる。

Fig.10 に計算で得られた C_p 分布を示す。層流境界層厚さに対して、水平分解能が1/2倍,1/4倍と細くなるに従い、実験で得られた C_p 分布に近づくことが確認できた。しかし、水平分解能が細くなる際に、時間分解能を変化させない場合は、クーラン数が1よりも大きくなり、 C_p 分布において、さらなる改善には至らない。一方、水平分解能を1/2にした条件においては、クーラン数を1にした際の改善効果は低いが、水平分解能を1/4倍にした条件においてクーラン数を1にした場合は、実験値を再現できることを確認した。

Fig.11 は、速度勾配テンソルの第二不変量Qを可視化している。Fig.11(a)のようにメッシュが粗い場合は、剥離に伴う渦構造が3次元的な挙動を示すのに対して、メッシュ分解能を向上するに従い、Fig.11(b)からFig.11(c)のように2次元的な剥離の挙動となる。そのため、十分な水平方向のメッシュ分解能と時間分解能を与えることで、遷移近傍の現象を正確にとらえられるようになる。

以下に、今回明らかになった Wall resolved LES に必要となる境界層解像クライテリアを示す。

- 1.垂直方向分解能： $1/40 \delta_B$
- 2.水平方向分解能： $1/4 \delta_B$
- 3.時間進行分解能：境界層内クーラン数 $C \approx 1$

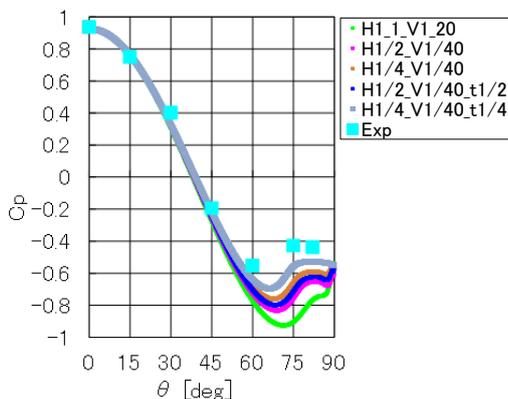
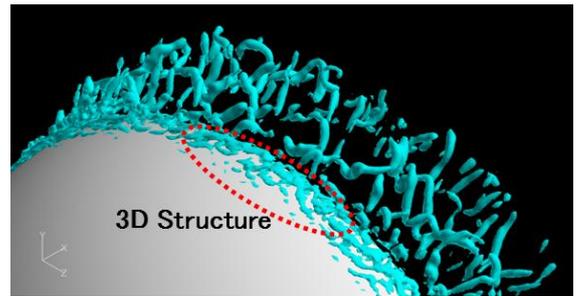
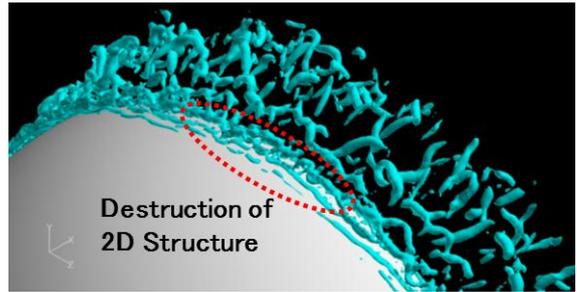


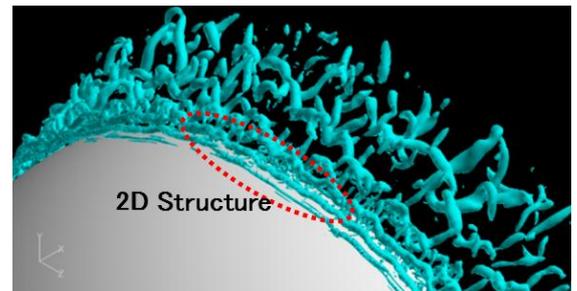
Fig.10 C_p distribution



(a) H1/1_V1/20



(b) H1/4_V1/40



(c) H1/4_V1/40_t1/4

Fig.11 Second invariant of velocity gradient

3.5. Re 数スイープ評価

つぎに、層流剥離を捕らえたメッシュ分解能を用いて、Re 数を変化させた際の遷移現象の状態変化の再現性について検証を行う。

Table.4 に示すように動粘性係数を調整することで Re 数を変化させた。メッシュや主流流速は同じ条件で計算を行う。

Fig.12, 13 に遷移前後の Re 数における C_p 分布の比較と、抵抗値を示す。本研究により新しく構築した境界層解像クライテリアを元に計算した結果では、 C_p 分布の変化を正確にとらえることができている。さらに、抵抗値では、Re 数変化による遷移現象が Re 数 3.21×10^5 あたりで起きていることが確認できる。これは、風洞テストで得られた Fig.8 の結果でも同様の Re 数で遷移が開始していることが確認できるため、精度良く現象の再現ができていると判断することができる。

Table.4 Reynolds sweep

Reynolds number	Kinematic viscosity ν [Pa·s]
4.93e+04	7.30e-05
2.46e+05	1.46e-05
3.21e+05	1.12e-05
4.80e+05	7.50e-06

となる。Fig.15 の解析結果によると、B-plane 断面において 23 番から 26 番までの分布が一致することが確認でき、基礎的なミラーで構築したクライテリアが有効であることを実証した。その際の圧力計測点 23 番から 26 番までの流れの比較を Fig.16 に示す。実験で取得した C_p 分布と一致する流れ場 Fig.16(b)においては、剥離距離が大きくなり、最大流速が低くなっていることが確認できる。

このように、境界層メッシュの分解能向上により、境界層内の局所的な流れ現象に変化が生じ、剥離時の流速などの挙動に影響を与えることを明らかにした。

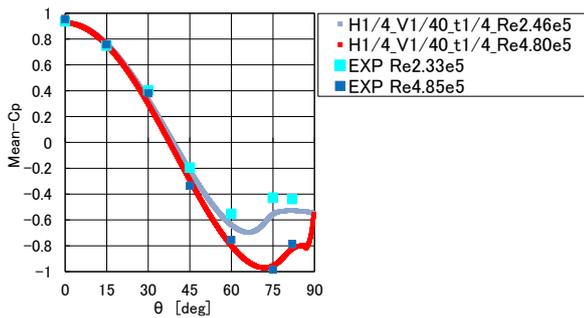


Fig.12 Cp distribution

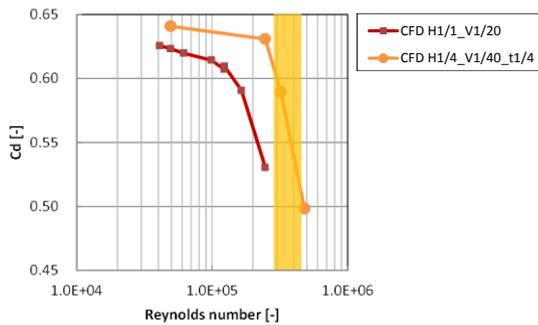


Fig.13 Cd profile

3. 6. 乱流モデルによる影響

メッシュ分解能や時間分解能により、剥離の再現性が向上することが確認できたが、メッシュ分解能は境界層の解像度と乱流モデルに影響を与えるため、影響因子の明確化はできていない。そこで、乱流モデルが及ぼす影響について考察を行う。

計算に用いている WALE モデルは、式(6)から(9)で示される乱流渦粘性を計算時に用いる。特に、式(7)においては、壁面距離 d または、セル体積 V から算出されるセル長さにより L_s が影響を受ける。ここでは、メッシュが粗い条件と細かい条件の 2 ケースについて WALE モデル定数 C_w を 0 と設定することで、乱流モデルの影響について検証を行う。

Fig.14 にミラー表面の C_p 分布を示す。乱流モデルの乱流渦粘性の値を 0 とした際も、メッシュが粗い条件における改善は見られず、メッシュ分解能が支配的であると判断できた。

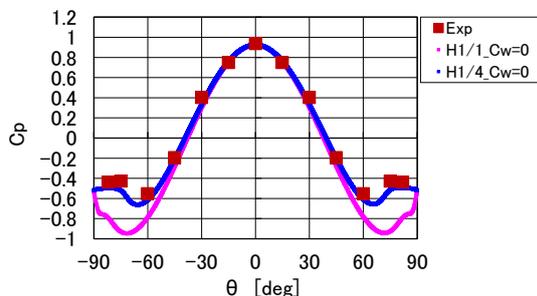


Fig.14 Cp distribution

4. 実車ミラーへの適用

3 章で明らかにした境界層解像クライテリアを用いて、FIT のミラー単体モデルの解析結果(Fig.6)に対する検証を行う。計算領域や計算条件は、同様の条件を用いた。境界層メッシュは、Table.5 に示す分解能で実施し、従来の分解能においては、1.5 億要素であったが、クライテリアを適用することで 4.2 億要素の計算メッ

Table.5 Calculation case

Case	Vertical resolution	Horizontal resolution	Time resolution	Cells number
CFD H1/1	$\frac{1}{40} \delta_B$	δ_B	$C \approx 1$	154,634,169
CFD H1/4	$\frac{1}{40} \delta_B$	$\frac{1}{4} \delta_B$	$C \approx 1$	424,417,814

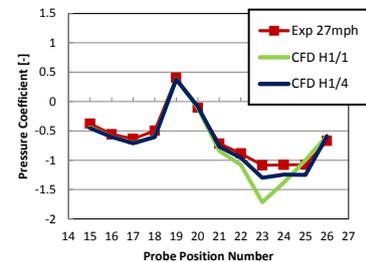


Fig.15 Cp distribution of B-plane

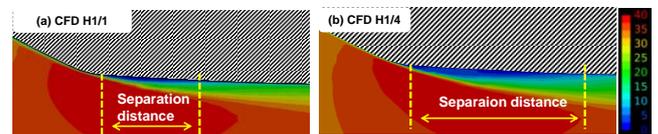


Fig.16 Mean x velocity around probe point 23-26

5. 実車への適用

FIT の単体ミラーへの適用により効果が確認できたことから、合わせて実車での検証を行った。車体および L/R ミラーを含む解析を実施するためには、メッシュ数が非常に大きくなるため、実車の計算には、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して計算を実施した。

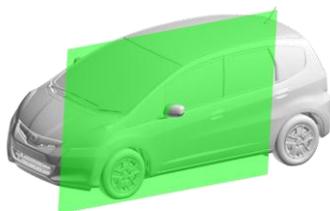
数十億点以上のメッシュ数を用いた解析を可能にするために、FFR ではリファイン機能を実装している⁽¹²⁾。この機能は、比較的粗い格子をまず用意し、これのセルエッジを 2 等分することで、セル数を自動で 8 倍にする技術である。例えば 2 章 Table.1 で実施した 6000 万点の格子を初期メッシュとすると、1 回目のリファイン機能により 4 億 8000 万点の格子ができ、2 回目のリファイン機能を作用させると 38 億 4000 万点の格子を作ることができる。本解析では、上記例と同様 2 回のリファイン作業により、最終格子を作成した。

また、車体表面全体への境界層メッシュの適用は、メッシュの品質に影響を与えることから、Fig.17 に示すようにミラー表面のみ境界層メッシュを作成した。ミラー表面の分解能は、クライテリアを満たすように、壁水平方向の分解能を 0.2mm とし、車体表面は、1mm とした。

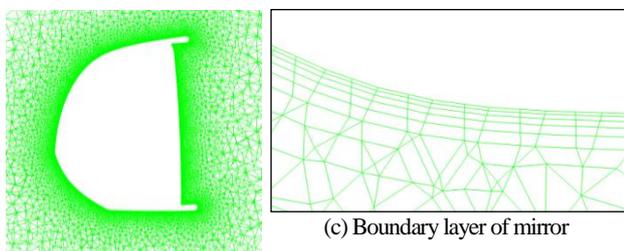
計算条件を Table.6 に示す。ソフトウェアは、FFR の弱圧縮性ソルバーを用いており、36,864 並列で計算を行った。

ミラー表面の C_p 分布を Fig.18, 19 に示す。Fig.18 A-plane においては、圧力孔の位置 1 番から 3 番までのミラーと車体間の分布に関して、6000 万要素では再現できなかったものが、実験値と合う方向に改善された。さらに、Fig.19 B-plane においては、23 番から 26 番の C_p 分布が一致することを確認した。

以上のことから、境界層剥離を再現するメッシュ要件として、境界層解像クライテリアを構築し、実車ミラーに適用したところ境界層剥離を精度良く予測することが可能となった。



(a) FIT body surface



(b) B-plane of mirror

(c) Boundary layer of mirror

Fig.17 Mirror mesh with boundary layer on FIT

Table.6 Calculation conditions on Kei computer

Software	FFR (weak compressible)
Cells number	5.5 billion (only mirror: 1.7billion)
Length [mm]	3900
Velocity [m/s]	27.7 (100km/h)
Reynolds number	7.17×10^5
Time step [sec]	1.0×10^{-6}
SGS turbulence model	Smagorinsky-Lilly ($C_s=0.15$)
Time marching method	1st order Euler
Spatial discretization	2nd order CD (5% 1st upwind is blended in convection terms)
P-V coupling method	SMAC method
Boundary conditions	FIT body : log-law Ground : Slip & log-law
Integration time of evaluation [sec]	0.052

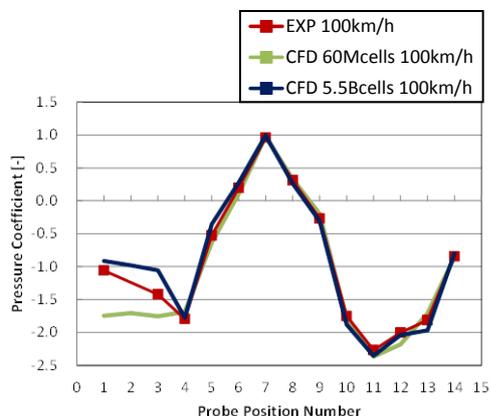


Fig.18 C_p distribution of A-plane

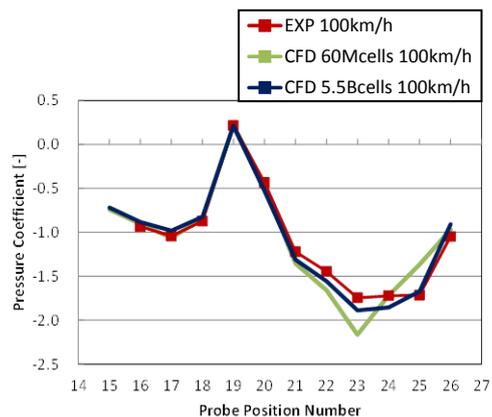


Fig.19 C_p distribution of B-plane

6. 結論

境界層剥離を再現する境界層を解像するクライテリアを構築し、実車ミラーに適用したところ、以下の結論を得た。

実車を対象とした wall resolved LES によるミラー剥離の再現において、基礎的なミラーで検証を行った遷移 Re 数近傍の現象を再現する表面メッシュ分解能を実車ミラーに適用することで、境界層剥離現象の高精度な予測が可能となることを示した。

特に、ミラー表面の壁面水平方向の分解能が重要であることを明らかにした。

また、メッシュ変化による解像度と乱流モデルの相互影響を切り分けるため、乱流モデルのモデル定数 C_w を 0 として評価を行った結果、乱流モデルの影響は少なく、メッシュ分解能の影響が支配的であることを示した。

7. 謝辞

本研究のクライテリア構築にあたり、神戸大学 坪倉誠教授、理化学研究所 大西慶治氏から多大な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。また、「京」を用いた実車の計算に尽力頂いた本田技術研究所 北村史郎氏にも謝意を表す。

本論文の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものである (課題番号:hp140011)。

8. 参考文献

- (1) 安保, 森下, 吉野, 寺村, "実車における車内騒音低減に向けた風切音のガラス透過メカニズムの解明," Honda R&D Technical Review, Vol.25 No.2(2013)
- (2) 炭谷, 前田, 一之瀬, "自動車と流体力学: 車体周り流れと空力特性," ながれ, Vol.23(2004), pp.445-454.
- (3) Powell, A. "Theory of vortex sound," Journal of the Acoustical society of America, Vol.36, pp.177-195(1964)
- (4) 王, 加藤, "ドアミラー周りの非定常流れの LES 解析と流体音の予測," 第 18 回数值流体力学シンポジウム, B3-2(2004)
- (5) 社団法人自動車技術会, "ここまでできる流体騒音解析," 2010 年春季大会フォーラム, (2010)
- (6) 梶島, "乱流の数値シミュレーション," 株式会社養賢堂, pp.151(1999)
- (7) M. Muto, M. Tsubokura, N. Oshima, "Negative Magnus lift on a rotating sphere at around the critical Reynolds number," Physics of Fluids, 24(1):014102(2012)
- (8) 松本, 福島, 志村, 小林, 店橋, 宮内, "高レイノルズ数乱流の GS-SGS 間エネルギー輸送," 第 24 回数值流体力学シンポジウム, C9-4(2010)

- (9) 湯, 大宮(編), 三宅(編), 吉澤(編), "第 10 章 4 節 固気混相乱流の直接数値計算," 乱流の数値流体力学-モデルと計算法, 財団法人東京大学出版会, pp.483 (1998)
- (10) 星野, 吉野, 福地, 寺村, "ラージスケール PIV 計測技術の開発," Honda R&D Technical Review, Vol.22 No.2(2010)
- (11) F. Nicoud, F. Ducros, "Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor. Flow," Turbulence, and Combustion, 62(3) 183-200, (1999)
- (12) K. Onishi, M. Tsubokura, "Optimized preprocessing of tens of billions of grids in a full-vehicle aerodynamic simulation on the K-computer," International Vehicle Aerodynamics Conference 2014, C1385 008, pp.149-158(2014)