

## 自動車と流体力学：車体周り流れと空力特性

## Development of Vehicle Fluid dynamics : Flow around the Vehicle and Aerodynamic Characteristics

○炭谷圭二（トヨタ自動車），前田和宏（トヨタ自動車），一之瀬健一（トヨタ自動車）

Keiji Sumitani\* , Kazuhiro Maeda , Kenichi Ichinose

\* Vehicle Eng. Div., TOYOTA Motor Corporation, Toyota, Aichi 471-8572, Japan

On developing vehicle, aerodynamics and flow field around vehicle are developed from the stand of environment, safety and comfort. CD, concerning environment and fuel consumption, is developed by not only optimizing upper style but also smoothing under body flow. On safety, improving aerodynamics enhances driving stability, and restraining window soiling ensures visibility. For comfort, reducing all aerodynamic noise by optimizing shapes and structures helps comfort.

We use both wind-tunnel experiment and simulation CFD to analyze flow field and to develop vehicles.

## 1. はじめに

近年、自動車の高速化や高性能化が進み、環境問題対応や快適性向上の必要性が高まる中、車体周り流れの制御や空力特性の向上が重用視されてきている。また、自動車においては、車体周り流れに留まらずエンジンの燃焼や駆動系のオイル流れ、ラジエータやコンデンサの水流れ、ブレーキ冷却風流れ、エンジンルーム内の冷却風流れ、室内の空調流れ等、様々な流れが関係しており、流体力学は無くてはならないものとなっている。

本報においては、自動車における流体力学の関係と取り組みを紹介し、その中でも特に「空力」と分類される項目について詳細に述べる。

## 2. 自動車に関わる流体现象

流体を考えずに車は動かないと言えるほど、自動車にとって流体力学は重要なものとなっている。車に関わる流体としては、燃料、オイル、空気、ウォッシュ水、雨雪、冷却水、冷媒などがあり、流れ現象として、燃焼流れ（エンジン）、部品内オイル流れ・空気流れ（アブソバ、電子部品）、冷却風流れ（エンジン、モータ、ミッション、デフ、ブレーキ）、空調流れ（室内）、車体周り流れ（ホデー運動、空力特性、ウインドウ視界、ホデー汚れ）があり、車両開発の中でそれぞれ取り組みを実施している。

車体周り流れに関しては後述するとして、それ以外の流れに言及すると、エンジンに関わる流れの取り組みとしては、吸気系、噴射系、冷却系、排気系、燃焼系等、また、冷却での取り組みとしては、ラジエータ・コンデンサ、ブレーキ等、空調での取り組みでは、車内冷暖房、曇り防止、霜・雪解凍等、部品内流れの取り組みでは、アブソバ、バッテリー・インバータ・モータ冷却等があり（図1）、それぞれの開発においてシミュレーション（CFD）と実験解析、流れの可視化等を開発時期や狙いに応じて使い分けている。



図1 自動車に関わる流体现象

## 3. 車体周り流れへの取り組み

ここでは、車体周り流れについての取り組みについて紹介する。前節の内容は、それぞれの部品担当者が流れも担当するケースが多いが、ここで述べる車体周り流れへの取り組みは、いわゆる空力技術者が担当する内容である。

まず、車体周り流れへの取り組みの歴史を簡単に述べる。車が發明された直後、1900年ごろより速く走りたいという要求（動力性能向上）のため、空気抵抗低減の取り組みが行われた。そして、1940年代には既に抗力係数  $C_0=0.30$  の技術の車両が実現されていた。一方、この時代の低  $C_0$  車は横風受風時に走行安定性が損なわれることが指摘され、横風安定性向上への取り組みが同時に行われていた。

その後、車の急速な普及の時代となるが、居住性やスタイルが優先され、1960年代から1970年代の間は  $C_0$  低減が鈍化する時代となった<sup>1)</sup>。

そして、1973年の第一次オイルショック以降、燃費の観点より空気抵抗低減の重要性が再認識され、また、車両の高性能化による最高速向上の要求とそれに伴う空力面での走行安定性考慮の必要性が拡大した。さらに快適性の観点で空力騒音の低減、安全の観点からウインドウ視認性確保のための水流れ、ウインドウホデーの汚れ、着雪への取り組みがされるようになった。車両の高速化および高性能化が著しい近年では、更に必要性が拡大している状況である。

車体周り流れへの取り組みとして考慮している内容としては、環境・燃費（空気抵抗）、走行安定性（揚力、横力、ヨーイングモーメント）、快適性（空力騒音、ウインドストップ、風巻き込み）、安全（ウインドウ視界、水流れ、ワイパー浮き、雪付き着水）などがある（図2）。

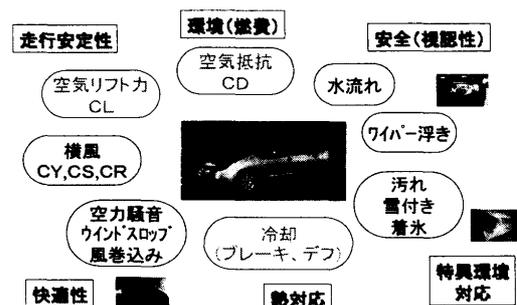


図2 車体周り流れの取り組み項目

4. 空気力への取り組み

4-1. 空力特性

車両に加わる空気力は、車両の前後、左右、上下の各軸方向の力と各軸周りのモーメントで表され、これらを総称して空力六分力と呼ぶ(図3)。

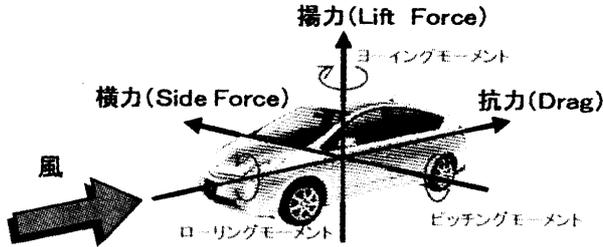


図3 空力六分力

通常、空気力は無次元化して表され、式(1)に示す前後方向の抗力係数(C<sub>D</sub>)、同様に左右方向の横力係数(C<sub>S</sub>)、上下方向の揚力係数(C<sub>L</sub>)で表す。ここで、抗力係数C<sub>D</sub>については、空気抵抗係数と称する場合も多いため、以降「抗力」を「空気抵抗」と表記する。

モーメントについても無次元化した表記を行い、式(2)に示す前後軸周りのローリングモーメント係数(C<sub>RM</sub>)、同様に左右軸周りのピッチングモーメント係数(C<sub>PM</sub>)、上下軸周りのヨーイングモーメント係数(C<sub>YM</sub>)で表す。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A} \quad (1)$$

$$C_{RM} = \frac{M_{RM}}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A \cdot WB} \quad (2)$$

ここで、F：各軸方向の力、M：各軸周りのモーメント、ρ：空気密度(kg/m<sup>3</sup>)、V：相対風速(m/s)、A：前面投影面積(m<sup>2</sup>)である。

これらの空力特性は車両の運動に関係しており、その項目は概ね表1に示す通りである。

表1 空力六分力の影響

| 空力六分力                        | 関係する項目         |
|------------------------------|----------------|
| 空気抵抗係数 C <sub>D</sub>        | 燃費, 最高速度, 加速性能 |
| 揚力係数 C <sub>L</sub>          | 直進安定性, 横風安定性   |
| 横力係数 C <sub>S</sub>          | 横風安定性          |
| ローリングモーメント係数 C <sub>RM</sub> | 横風安定性, 操舵時の安定性 |
| ヨーイングモーメント係数 C <sub>YM</sub> | 横風安定性          |
| ピッチングモーメント係数 C <sub>PM</sub> | 直進安定性, 横風安定性   |

4-2. 空気抵抗低減の取り組み

はじめに空気抵抗が車両に与える影響について述べる。

最も重要な特性の一つであるC<sub>D</sub>値は、燃費や最高速度、加速性能に大きな影響を及ぼす。燃費に関しては、走行抵抗の一つとして空気抵抗があげられ、これによる消費仕事W<sub>aero</sub>は式(3)にて表される。

$$W_{aero} = \int_0^t \frac{1}{2} \rho V_{(t)}^2 \cdot C_D \cdot A \cdot V_{(t)} dt \quad (3)$$

ここで、ρ：空気密度(kg/m<sup>3</sup>)、V：車速(m/s)、C<sub>D</sub>：空気抵

抗係数、A：前面投影面積(m<sup>2</sup>)、t：時間(s)である。

走行抵抗には、この他、質量が関係する加速抵抗、タイヤの転がり抵抗と質量が関係する転がり抵抗、路面の傾斜が関係する勾配抵抗がある。平均的な乗用車において、全走行抵抗による消費仕事のうち空気抵抗による消費仕事の占める割合は、国内10・15モード走行で約10%、欧州NEDCモード走行で約20%である。つまり、空気抵抗を10%低減すると、それぞれのモード走行において1%、2%の燃費低減が可能となる。

式(1)および式(3)からも判るように、空気抵抗は速度の2乗に比例して大きくなるため、高速走行時は特に重要である。平坦路での定常走行時は空気抵抗と転がり抵抗のみとなるが、その関係は60km/h前後を境にして高速になるほど空気抵抗が大きくなる(図4)。このため、100km/h定常走行時の燃費は、空気抵抗10%改善により4%~5%も改善される。また、最高速度に関しても影響が大きく、空気抵抗10%低減で最高速度は6km/h程度向上する。但し、この寄与度は車両のエンジン特性やトランスミッション特性等でも変化する。

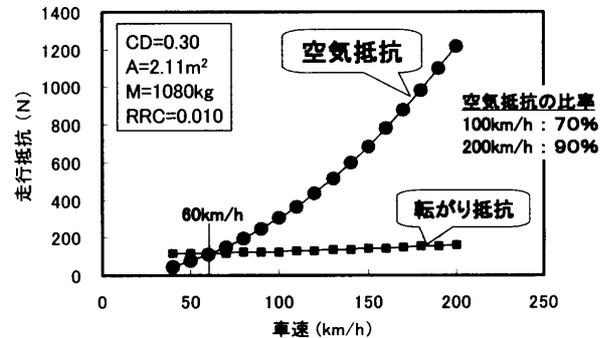


図4 定地走行における走行抵抗の内訳

次に車両における抗力係数低減について述べる。

いろいろな物体の抗力係数C<sub>D</sub>を比較すると図5のようになる。自動車のC<sub>D</sub>はショーカーの0.2からトラックの0.9程度まで幅があり、いわゆる鈍い物体に属する<sup>2-4)</sup>。

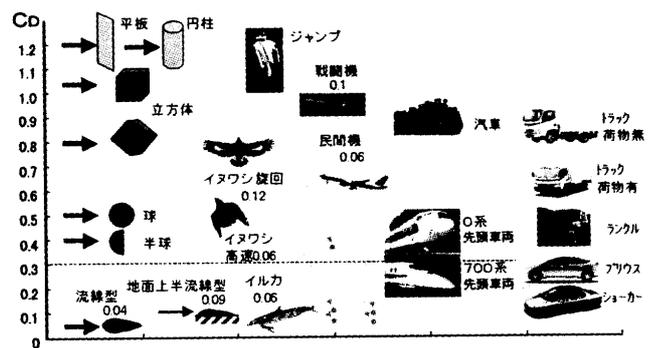


図5 いろいろな物体のC<sub>D</sub>

乗用車のC<sub>D</sub>は年々低減してきており、その推移を図6に示す。オイルショック以降の精力的な技術開発の成果もあり、1980年代には当時限界と言われていたC<sub>D</sub>=0.30の壁を破る車も出てきた。しかし、近年は減少割合が小さくなってきている。

このようなC<sub>D</sub>低減に用いられた技術を、当社の車両LS430(セルシオ)を例にとり紹介する。現在のLS430は、C<sub>D</sub>=0.25を達成し、燃費や動力性能(最高速)の向上に貢献している。

$C_D=0.25$  達成のために、ルーフからトランクにかけて圧力回復できるような形状を最適化、局所での剥離を抑制するよう徹底したボデー表面のフラッシュフェス化、ラジエーター周りのダクト化による通気抵抗低減等を実施。更に、図7に示すように、見えない床下まで平滑構造を徹底して織り込み、卓越した  $C_D$  と  $C_L$  を達成した。その開発においては、デザイナーと早期からの協業作業を行い、CFD による流れの解析と風洞実験、実走行実験を繰り返して局所最適化を進めた。

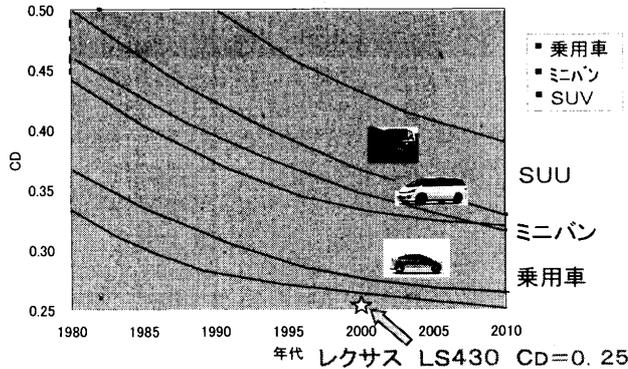


図6 自動車  $C_D$  の年代推移

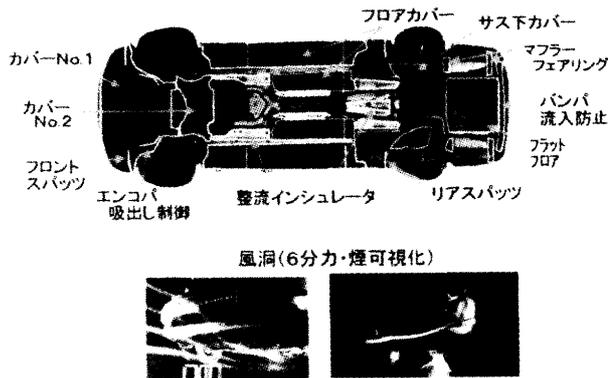


図7 床下流れの整流

乗用車の中には、2ボックスモーターのように構造上トランク面を持たず圧力回復が困難であったり、全高および全幅に対し全長が短いために後部の絞り形状が織り込めず、後流の圧力回復不足や背面受圧面積が大きい等のハンデを背負った車型もある。こういった車型に対しては、徹底した床下平滑化やフラッシュフェス化等に加え、床下後部の切り上げ構造や車両後端部の最適化により気流を収束させて圧力回復を行う手法が必要である。弊社の ES<sup>3</sup> ( $C_D=0.23$ )<sup>5)</sup>、プリウス ( $C_D=0.26$ ) などがその適用事例である。

4-3. 走行安定性への取り組み

表1にも示す通り、高速での直進安定性や横風安定性には、 $C_L$  や  $C_S$ 、 $C_M$  等が大きく関係する。また、各空力係数のフロント軸とリア軸とのバランスも重要である。

$C_L$  改善のためには、フロント下部を球形形状にしたり、後部の圧力回復のためのウェッジシェイプや床下平滑構造の織り込み等が有効である。 $C_L$  については、図8に示すように  $C_D$  と背反する領域があるため、如何に  $C_D$  と  $C_L$  を両立させるかが課題となる。

横風安定性については  $C_M$  や  $C_S$  が影響するが、1ボックス車やミニバン等は乗用車に比べて横面積が大きいので、特に重要である。通常、横風を受風すると車体周りの圧力分布は対称性

を欠き、フロント風上側では正圧、フロント風下側では負圧となる。この圧力と着圧点から車両回転中心までの距離との積によりヨーイングモーメントが発生する。フロント風上側の正圧は圧力係数で1以上にはならないが、フロント風下側のそれはマイナス3程度にもなるため、風下側の流れ制御が特に重要である。この対応技術としては、フロントウィンドウ傾斜角や角部丸み形状の最適化、車体後部におけるキック形状等がある。図9はフロントウィンドウ傾斜角の影響を調べた事例である。

また、流れの制御事例としては、弊社の1ボックス車両に採用された”エアロリット”がある。これは、フロントバンパ裏にダクト構造を有し、横風受風時のみフロント風下側の流れを積極的に剥離させ、負圧を低減してヨーイングモーメントを小さくするものであり、横風が無い時は剥離をさせないため  $C_D$  を悪化させない<sup>6)</sup>。

乗用車においても  $C_M$  や  $C_S$  は重要であり、パッケージ検討の段階より、フロントとリアの形状バランスや局所形状最適化による圧力制御等を行っている。

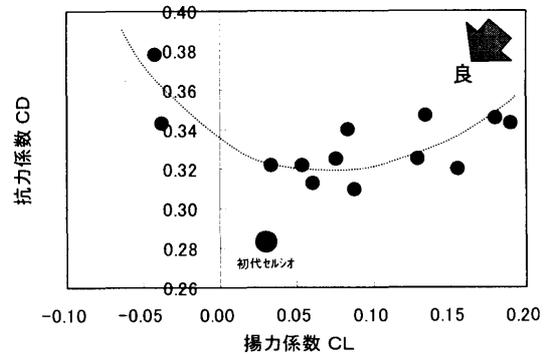


図8  $C_D$  と  $C_L$  との関係事例

横風時の移動量

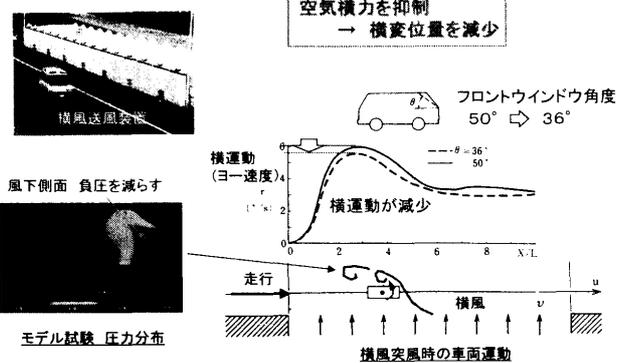


図9 横風安定性検討事例

5. 空力騒音への取り組み

5-1. 背景

近年、車両の静粛性は大幅に向上してきており、車内騒音のレベルはこの20年間で約10dB(A)も低減されている。これは、主としてエンジンノイズやロードノイズにおける騒音低減が大きく、相対的に空力騒音が顕在化してきている。車室内騒音が大きいと、乗員の快適性が損なわれ、質感が低下する。また、長時間の走行では疲労の増大にもつながるため、空力騒音低減は新型車の開発において重要な課題のひとつとなっている<sup>7)</sup>。自動車の空力騒音改善には、発生源である空力現象とボデー側遮音性能の両方が重要であるが、本報では発生源の空力現象に絞って述べる。

5-2. 空力騒音の種類と対策方法

自動車が行くと、図 10 に示すように車体周りのいろいろな部位から空力騒音が発生する<sup>8)</sup>。自動車で行う空力騒音は、広帯域音と狭帯域音とに大別され、いわゆる風切音は前者、笛吹き音や共鳴音等は後者に属する。

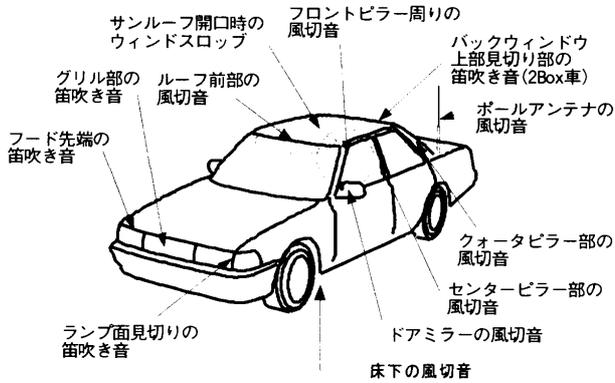


図 10 車体周りで発生する空力騒音<sup>5)</sup>

広帯域音である風切音の音源には、単極音源と2重極音源、4重極音源がある。自動車ではホテが剛であり、速度域も低マッ数域であることを考慮すると、2重極音源が最も重要である。この2重極音源の評価は式(4)に示すLighthill-Curleの式で行える<sup>9-10)</sup>。

$$\rho - \rho_0 = \frac{1}{4\pi c^3} \int_S \frac{\partial}{\partial t} P_i \left( y, t - \frac{r}{c} \right) \frac{x_i}{r^2} dS(y) \quad (4)$$

ここで、 $\rho - \rho_0$ : 空気密度変化、 $P_i$ : 物体表面の瞬時圧力、 $y$ : 音源座標、 $r$ : 音源～観測点間距離、 $S$ : 音源面積である。式(4)において、 $P$ は流速 $U$ の2乗に比例するとして次元解析を行うと、2重極音源のパワーは $U$ の6乗、マッ数の3乗に比例することが分かる。実際、低騒音風洞にて実車の空力騒音を測定すると、音のパワーは風速の5.7乗から6乗の範囲にあることが確認されている。

風切音で特に重要な部位は、ドアミラーを含むフロントピラー周りやウィンドシールドガラス上部等であり、形状開発には特に注意を払っている。開発においては、試作車の無い初期の段階ではCFDや風切音予測ツールを活用して進め、試作車ができた段階では低騒音風洞を用いた評価検討を行っている。

現状ではCFDで直接音波を計算することは非常に困難であるため、代用値として乱流エネルギーを用いて車両全体にわたる空力騒音発生源の検討を行っている(図11)。

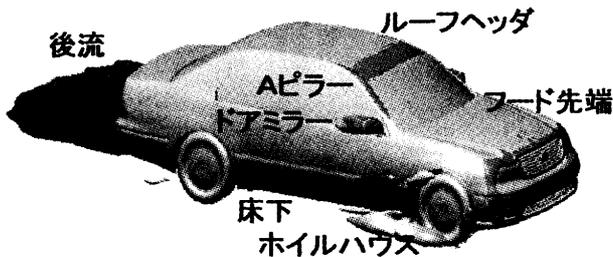


図 11 CFDによる空力騒音発生源の検討事例

実車による低騒音風洞を用いた検討例が図12である。ここではフロントピラー部の段差形状に注目して検討を行った。これによると、フロントピラー部段差は小さく、その平面位置は内側に

ある方が風切音は小さい結果となっている。しかしながら、ワッシャ液のサイドウィンドウへの回り込みやフロントピラーの視界妨害等も関係するため、これらを考慮して開発する必要がある。

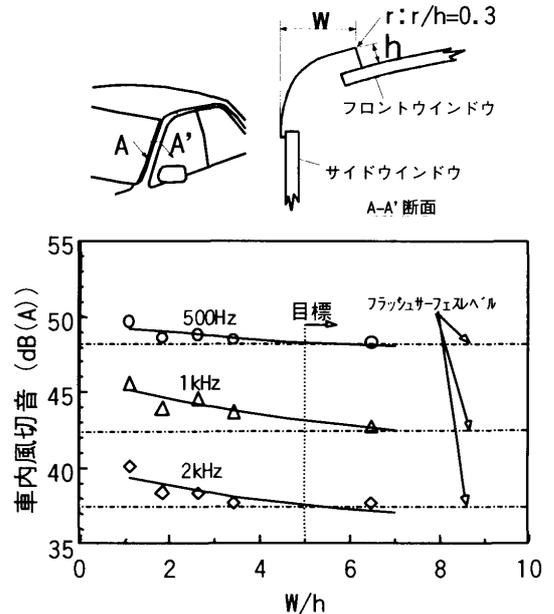


図 12 フロントピラー部段差による風切音の変化

狭帯域音には、ポール状のアンテナで発生するカルマン渦音やヘッドランプ周り、ウィンドウ周りで発生するキャビテーション、サンルーフを開けた時に発生するウィンドスロップ等がある。これらの開発は、通常非圧縮性乱流モデルを用いた定常CFDでは行えないため、実験検討によるところが多いが、これらを解くCFD検討は研究的に行っている。

カルマン渦音低減には、よく知られているようにアンテナ表面に螺旋状の小突起をつけたり、アンテナの長手方向に溝をつける、あるいはテンプル状のくぼみをつける等の対処がされている。

キャビテーションは図13に示すように下流側からの圧力の帰還擾乱機構を壊すことが有効であるため、図14に示すように前端と後端の段差をつけたり、角部に丸みをつけることが有効である<sup>8)</sup>。

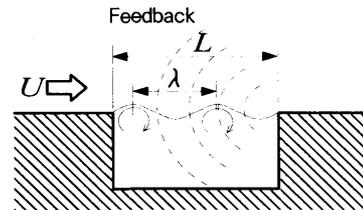


図 13 キャビテーション

- ① 3次元的な凹凸をつけ、流れの2次元性を壊す。
- ② 角部に丸みをつける。
- ③  $\pm h/L$ を大きくとる。
- ④ キャビティ容積を調整する。(無くすのがベスト)
- ⑤ 下流側表面を乱反射構造にする。
  - ・凹凸をつける。
  - ・溝を作る。
  - ・ザラザラにする。など

図 14 キャビテーションの対策手法<sup>8)</sup>

ウインドスロップはサンルーフ開口部のキャビティと車室内空間のヘルムホルツ共鳴との連成であり、車速 40km/h から 80km/h 程度の車速域で発生することが多い。対策の方向としては、開口部の渦放出周波数と車室内空間の共鳴周波数とを離す、開口部後端からの帰還擾乱を無くす、開口部前端からの渦放出形態の2次元性を弱める、車室内の隙間を多くする、などが挙げられる。一般的には図 15 に示すようなサンルーフ開口部前端に設置されるデフレクタにより流れを飛ばし、開口部後端に流れが当たらないようにして帰還擾乱の影響を弱める手法がとられている。

図 16 はデフレクタ高さの影響を示したものであるが、ある高さ以上になるとウインドスロップは低減するが、デフレクタから発生する風切音は大きくなる。このため、開発においては両者のバランスに留意して進めることが重要である。

デフレクタ以外では、サンルーフ後端形状の工夫により上流からの渦が後端部にて剪断されるのを弱め、帰還擾乱を抑制すること等も行っており、このような手法は風切音との背反は少ない(図 17)。

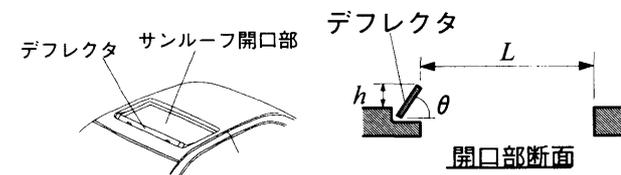


図 15 サンルーフのデフレクタ

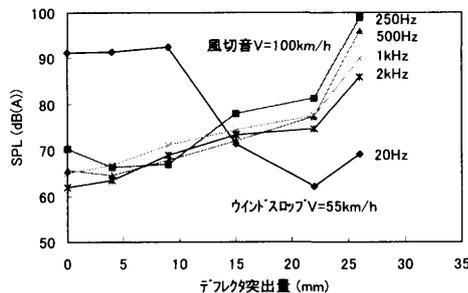


図 16 デフレクタ高さによるウインドスロップと風切音の変化

棚形状の検討

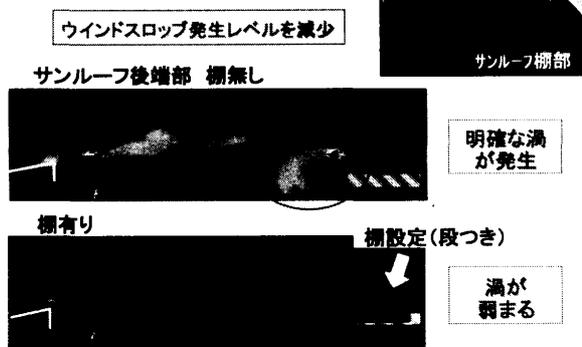


図 17 サンルーフ後端部形状による渦剪断の制御

6. その他の取り組み

空力特性や空力騒音以外にも、快適性の観点からオープンカーにおける風の巻き込み制御(図 18)、安全性の観点からドアミラー鏡面への水滴付着抑制(図 19)、ウォッシュ液や雨水のサイドウ

インドウへの回り込み抑制、雪上路におけるリコンビネーションランプへの雪付着抑制等にも取り組んでおり、乗員の快適性と安全性を向上させている。

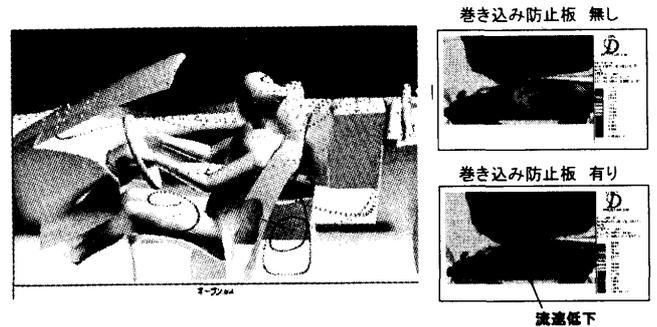


図 18 オープンカーにおける風の巻き込み制御

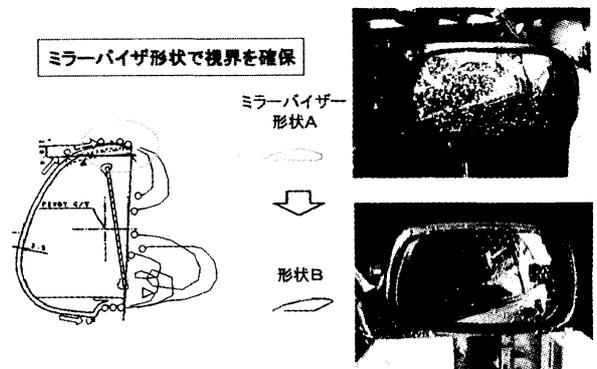


図 19 ドアミラー鏡面への水滴付着制御

7. おわりに

自動車に関わる流れ現象について、いろいろな事例を交えて開発の現状を述べてきた。

人や環境にやさしい車づくりを進めていくことが自動車メーカーの使命である。今後も、空力技術者として空力特性を向上させることにより、低燃費・省動力(環境)、走行安定性向上・視界確保(安全性)、低空力騒音(快適性)に貢献できるよう開発を進めていきたい。

引用文献

- (1) 小林, 鬼頭: 自動車のデザインと空力技術 第1章, 朝倉書店, 1998
- (2) 東昭: 生物の飛行-その精緻なメカニズムを探る, 講談社, 1979
- (3) 東昭: 生物の泳法-バクテリアからヒトの泳ぎまで, 講談社, 1980
- (4) 牧野光雄: 流体抵抗と流線型, 産業図書, 1991
- (5) Yuji Tanigawa, Kazuhiro Maeda: Aerodynamic Development of the Ultra Low Fuel Economy Vehicle (Motor Show Car), 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 19-02, 2002
- (6) Keiji Sumitani, Minoru Yamada: Development of "Aero Slit" - Improvement of Aerodynamic Yaw Characteristics for Commercial Vehicles, SAE Technical Paper 890372, 1989.
- (7) 炭谷, 加藤, 各務: 実走行時の空力騒音, No. 9708 JSAE SYMPOSIUM, 1997

- (8) 炭谷：自動車のデザインと空力技術 第6章第3節, 朝倉書店, 1998
- (9) M. J. Lighthill : On Sound generated aerodynamically, Proc. Roy. Soc., A211, 564-587, 1952.
- (10) N. Curle : The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, Proc. Roy. Soc., A231, 505-514, 1955
- (11) 富山, 前田, 中村：車両運動特性力学モデルによる最適空気揚力設定法の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 112-00, 2000
- (12) 前田, 小林, 勝間田：車両まわりの流れ場解析 - 第1報 流れの解析手法の開発 -, 自動車技術会論文集, No. 45, 1990