

重合格子法を用いた自動車の床下流れ解析

加藤由博，堀之内成明，科野佐代子

Numerical Investigation of Aerodynamics of Vehicle Underbody with Overset Grid System

Yoshihiro Kato, Nariaki Horinouchi, Sayoko Shinano

要 旨

近年，自動車の空気抵抗を低減するために，車体の上面形状だけでなく，床下形状の改善も検討されるようになってきている。しかし，床下の凹凸全体を平滑化するという対策は現実的ではないため，まず，どの部分の形状を改善すると効果的であるかを調べるのが有効であると考えられる。そこで，本報告で，計算流体力学（CFD）により，床下に取り付けられた流れの障害物の位置に対する空気抵抗の変化を調べ，どの部分の床下形状を改善すれば効果的であるかを検討する。

自動車まわりの形状は複雑であるため，複数個の構造的な格子を重ね合わせる「重合格子法」を用いて計算を行う。計算対象は，床下が平坦なセ

ダン形状を考え，流れの障害物として角柱状の突起物を床下の各部に取り付ける。この際，重合格子法を用いているため，突起物まわりの格子の重合位置を変更するだけでケーススタディが可能である。

解析の結果，前輪軸部に突起物がある場合や，後輪軸の後方に突起物がある場合に空気抵抗が大きくなる傾向があることが明らかになり，その場合の流れの様子を詳細に調べることができた。これらの結果から，空気抵抗を小さくする床下形状の方向が推定され，床下形状を効果的に改善するための情報を得ることができた。

Abstract

Numerical Investigation of Aerodynamics of Vehicle Underbody with Overset Grid System.

Recently, the shapes of not only upperbodies but also underbodies of vehicles have been improved in order to reduce aerodynamic drag of vehicles. Since it is impossible to flatten the whole underbody, we need to find an effective method to reduce the drag by partial refinement of underbody shape. In this study, using computational fluid dynamics (CFD), we have investigated the relation between the locations of the obstacles attached to the underbody and the change in drag and obtained a good way of drag reduction.

Because the shape of a vehicle is very complicated, we have employed an overset grid system. We noted a notch-back-type vehicle with a flat underbody, in which square-section cylinders are set at various locations on the underbody as obstacles. In the case studies, we can change the location of the obstacle easily using the overset grid system. Computational results reveal that the drag tends to increase when the obstacle is located around the front axle or behind the rear axle. The results suggested the underbody shape for smaller drag and made it possible to obtain an effective way of improving the underbody shape.

キーワード

自動車，空気力学，空気抵抗，流体力学，シミュレーション，流量・流速，圧力，重合格子法

1. はじめに

自動車の空気抵抗を小さくすることは、高速走行時の燃費の低減などに有効とされている。空気抵抗の小さい車両を設計するためには、その形状と空気抵抗の大きさとの関係を知らなければならないが、一般には、ルーフ後部の傾斜角の影響¹⁾が大きいと考えられており、上面形状と空気抵抗の関係には十分な注意が払われる。

近年、空気抵抗をより小さくするため、上面形状だけでなく、床下の形状の最適化も望まれている。全体を平滑化すれば空気抵抗は減少するが、構造物が多数あり、現実的には不可能に近い。そこで、床下の凹凸の中で、どの部分が空気抵抗の増加にどの程度影響しているかを調べることににより、効率的に形状を改善したいという要求がある。

通常、空気抵抗などの空気力は風洞実験によって測定されるが、流れ場の空間的な分布を捉え、空気力が発生するメカニズムまでを明らかにすることは難しい。特に、床下形状を対象とする場合、車体と地面との狭い間の流れを調べなければならないため、さらに実験的測定が困難になる。このため、流れ場の任意の位置での物理量を容易に提示できる計算流体力学 (CFD) による解析が望まれている。本研究では、CFDを自動車まわりの流れに適用し、床下形状が空気抵抗にどのように影響するかを調べ、その時の流れの様子を解析することを試みる。

CFDによる流れ解析の一つの問題点は、格子生成が困難なことであるが、本研究では、Chimera法^{2, 3)}を基礎とした「重合格子法」を採用することにより格子生成の労力を低減する。重合格子法は、複数の構造格子を重ね合わせ、各格子で計算をする際に他の格子から必要なデータを受け取って計算を進める方法である。この計算方法は、複雑な手続きが必要となるものの、移動する物体まわりの流れ解析⁴⁾や複雑形状まわりの流れ解析^{5, 6)}に有効なため、近年の解析対象の複雑化に伴い、適用例が多くなってきている。ここでは、Henshawら⁷⁾のように、重合格子法を積極的に用いて、多数かつ多重に重なり合う格子系でも計算可能なシステムを構築し、自動車まわりの流れ解析に適用

する。

本研究報告では、まず、今回用いたCFDの手法と、重合格子法による自動車まわり格子生成方法を紹介する。続いて、平坦な床下のセダン形状の車両に対して様々な位置に床下の流れの障害物を付けて流れ場の解析を行い、空気抵抗の増加の様子を調べる。空気抵抗と床下の圧力分布に関しては、実験データと照合し、計算精度を確認する。これらの解析により、空気抵抗が増加する原因を流れの様子から明らかにし、空気抵抗の小さくなる床下形状の方向を検討する。

2. 重合格子法による自動車まわりの流れ解析

2.1 支配方程式および離散化

重合格子法の個々の格子についての流れ場の計算方法は、通常の単一の格子の場合と同様である。本節では今回用いた流れ場の計算手法を説明する。

自動車まわりの流れは非定常非圧縮性流れとみなすことができ、次の連続の式とNavier-Stokes方程式が支配方程式となる。

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \vec{u}. \quad (2)$$

ここで、

$$= \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^t$$

$$\cdot \Delta = \nabla^2$$

$$\cdot t: \text{時間}$$

$$\cdot \vec{u} = (u, v, w)^t: \text{速度ベクトル}$$

$$\cdot p: \text{圧力}$$

$$\cdot Re = LU/\nu: \text{レイノルズ数}$$

$$\cdot L: \text{代表長さ}$$

$$\cdot U: \text{代表速さ}$$

$$\cdot \nu: \text{動粘性係数}$$

とする。物理変数は $\vec{u}$ と p であり、これらの空間分布の時間履歴を求めることを目的とする。 $\vec{u}$ の算出には式(2)を用いるが、 p については、式(1)と式(2)から得られる圧力に対する次のPoisson方程式を用いる。

$$\Delta p = -\nabla \cdot \{(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}\} - \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (3)$$

$$D \equiv \nabla \cdot \vec{u}. \quad (4)$$

式(3)の右辺第2項は、連続の式(1)を満たすための補正項である。

基礎式(2)(3)を数値的に解くために、差分法に基づき離散化する。離散化には格子点上で物理量を定義するレギュラー格子を用いる。また、非直交・不等間隔の格子を扱うため、式(2)(3)を一般座標変換して用いる。空間の差分には2次精度中心差分を用いているが、速度場の方程式(2)の対流項の差分には、次式で示される3次精度風上差分⁸⁾を用いる。乱流モデルは適用しない。

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x}\right)_i \approx u_i \frac{u_{i-2} - 8(u_{i-1} - u_{i+1}) - u_{i+2}}{12\delta x} + |u_i| \frac{u_{i-2} - 4u_{i-1} + 6u_i - 4u_{i+1} + u_{i+2}}{4\delta x}. \quad (5)$$

時間に関しては、式(2)をCrank-Nicolson法を用いて離散化し、対流項を局所線形化した次の式を用いる。は一般座標変換された演算子を意味し、 n は時間ステップを意味する。

$$\frac{\vec{u}^{n+1} - \vec{u}^n}{\delta t} + \frac{1}{2} \left\{ (\vec{u}^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}^{n+1} + (\vec{u}^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}^n \right\} = -\vec{\nabla} p + \frac{1}{Re} \frac{\Delta \vec{u}^{n+1} + \Delta \vec{u}^n}{2}. \quad (6)$$

また、式(3)は次のように離散化する。この時、条件 $D^{n+1} = 0$ を用いることにより、連続の式(1)は陰的に満たされる。

$$\Delta p = -\vec{\nabla} \cdot \left\{ (\vec{u}^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}^n \right\} + \frac{\vec{D}^n}{\delta t}. \quad (7)$$

離散化を施した式(6)(7)が与えられると、これらを数値的に解いて計算していく。時間ステップは、式(6)(7)を交互に解くことで進められる。つまり、速度場 $(\vec{u}^n)$ から、式(7)により圧力場 p を求め、次に式(6)より次の時間ステップの速度場 $(\vec{u}^{n+1})$ を求めていく。この時、各時刻において、各格子点上の未知量の関係式は疎な係数行列を持つ連立1次方程式となる。この解法にはSOR法とBi-CGSTAB法⁹⁾を併用する。基本的には、SOR法を用いるが、格子の歪みが大きい場合には、係数行列の対角要素の値が小さくなり、SOR法では収束が遅くなるため、Bi-CGSTAB法を用いる。これらの解法においては、Multi-Color Ordering^{10, 11)}によるベクトル化が施され、ベクトル計算機により高速に計算することが可能になっている。

2.2 重合格子法を用いた計算法

自動車のような複雑な形状の物体まわりに一つの構造格子だけで格子生成する場合、格子の歪みが大きくなることや、一部分の格子の影響が他の部分にも及ぶことなどの問題点がある。これらの問題を解消するために、計算領域を複数個の格子で覆う重合格子法を適用する。

格子を複数用いて計算する場合、格子間のデータの受け渡しが必要となる。重合格子法では、格子間に重なり部分を設け、その部分で、データが他の格子から空間的に補間される。このようにすると、各格子間で格子点や格子面を一致させる必要はなく、それぞれの格子をかなり独立して格子生成することが可能になる。

補間法は計算空間において、次式で示される多重線形補間を用いる¹²⁾。

$$f_P = (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)f_{i,j,k} + \xi(1-\eta)(1-\zeta)f_{i+1,j,k} + (1-\xi)\eta(1-\zeta)f_{i,j+1,k} + \xi\eta(1-\zeta)f_{i+1,j+1,k} + (1-\xi)(1-\eta)\zeta f_{i,j,k+1} + \xi(1-\eta)\zeta f_{i+1,j,k+1} + (1-\xi)\eta\zeta f_{i,j+1,k+1} + \xi\eta\zeta f_{i+1,j+1,k+1}. \quad (8)$$

式(8)は、点 P 上の物理量 f_P が格子セルの各頂点の量 $f_{i,j,k}$ などから補間されることを示している。ここで、 $0 \leq \xi, \eta, \zeta \leq 1$ であり、これらは点 P がセル内のどの位置にあるかを示す値である。この ξ, η, ζ を補間係数と呼ぶ。

Fig. 1に円筒まわりの重合格子の例を示す。図の点は、相手の格子から補間によってデータを与えられる点を表している。また、計算に無関係な点を含む格子線は表示していない。本計算では、式

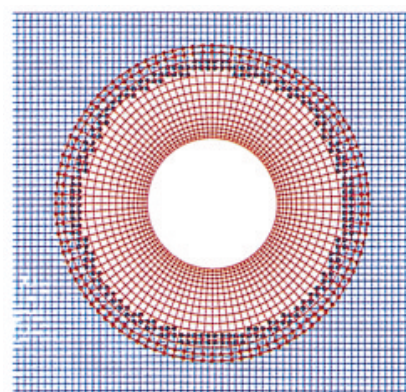


Fig. 1 Overset grid for a cylinder.

(5)の5点差分スキームを用いているため、境界端の2層の格子点が補間されるようにしている。

このような、データの補間に関する情報は、計算の実行前に生成しておく必要がある。具体的には、以下のような処理を行う。

- ・各格子点を、差分式により計算される点、補間される点、境界条件を与える点、計算に関係しない点、の何れかに分類する。
- ・補間される点である場合、どの格子のどのセルから補間されるかを求め、その補間係数を求める。

このとき、補間される点が、相手の格子の補間される点を頂点に含む格子セルから補間されると、データの更新がされなくなり計算の進行が成り立たなくなる。このため、補間される点は計算される点から補間されるように点を分類する必要がある。

3次元形状の例として、楕円体まわりの重合格子をFig. 2に示す。まず、胴体部分の水色の格子面の前後に別の格子面を張り合わせて物体表面を生成する。次に、そこから適当に外部へ格子を生成し、背景の矩形格子と重ね合わせる。このようにすると、他の格子との関係や、外側の制約条件が緩いため、容易に格子生成することができ、歪みが小さい、直交性の良い格子を生成することができる。

2.3 自動車まわりの格子生成法

自動車の外形は非常に複雑であるため、格子生成の労力が大きい。このため、重合格子法の特徴

を利用して、一連の作業をシステム化し、自動格子生成する方法を考える。

計算領域をFig. 3のように分割し、15個の格子を重合させて、車体まわりの計算空間を構成する。まず、ボデー、フロント、リア部分とパッチ部分の格子でタイヤの無い表面格子を作成し、後でタイヤまわりの格子をはめ込む。

Fig. 4に実際の格子生成の過程を示す。実際の自動車の形状はFig. 4(a)のようにCADデータとして与えられているが、ここでは、車体の基本的な形状についての空力解析を目的とするため、細部を簡略化して形状を単純化する。このために加工したCADデータをFig. 4(b)に示す。後の段階で扱い易いように、このデータは、線要素のみで構成されている。また、これには、タイヤまわりやバンパーまわりの格子生成を自動化するために、タイヤハウスを埋める線や形状を代表する基準線などが追加されている。

Fig. 4(b)までのデータが生成されれば、以下はプログラムの実行によって自動的に格子生成がなされる。まず、車体形状表面を覆うように格子生成し、タイヤの無い表面格子を作成する (Fig. 4(c))。タイヤまわりの格子は、タイヤハウス、タイヤ、車軸の3つで1セットとして扱い、これらを表面格子にはめ込むことにより車体形状を完成させる。Fig. 4(d)にこの物体表面部分の格子を示す。以下、Fig. 2の楕円体の例のように、表面格子から外方向に格子生成をして、背景の格子と重ね合わせる。背景は、少ない格子点数で計算領域を広く取るた

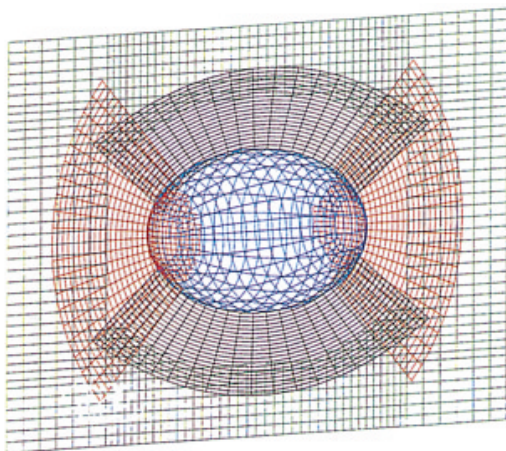


Fig. 2 Overset grid for a ellipsoid.

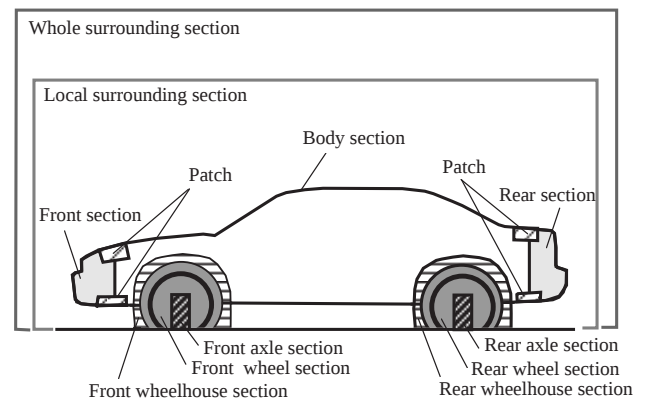


Fig. 3 Configuration of overset grid system.

めに2重にする。完成した格子全体の様子をFig. 5に示す。

格子の完成後，格子間のデータの受け渡しの情

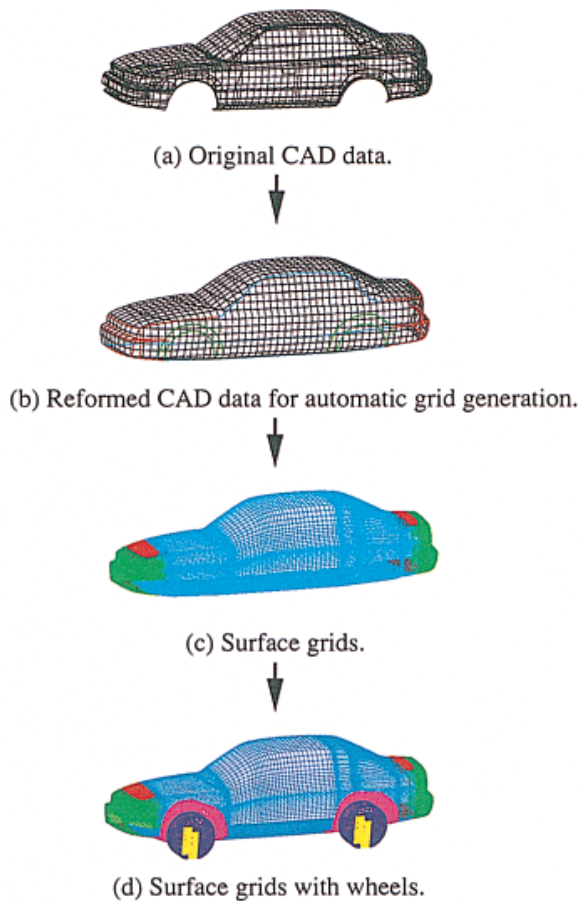


Fig. 4 Process of grid generation.

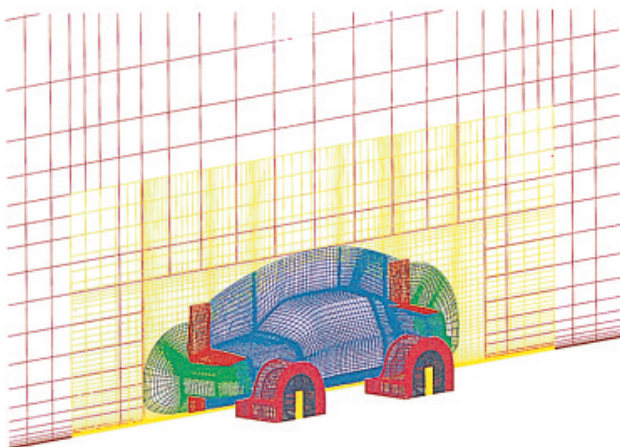


Fig. 5 Whole view of generated grids.

報を生成する。この自動車まわりのように複雑な格子系に対しても補間するセルや補間係数を高速に求めることが可能になっており，重合格子特有の複雑な手続きは自動化されている。

3. 自動車の床下流れ解析への適用

3.1 計算対象

本研究では，次のようなケーススタディを行い，床下流れの障害物の位置により，空気抵抗がどのように変化するかを調べる。

まず，床下が平坦な形状の計算を実施し，次に，流れの障害物として断面が50mm × 50mmの角柱を床下面の4箇所それぞれに突起物となるように付加して計算を行い，その違いを比較する。Fig. 6にその位置と寸法などを示す。以下，計算ケース名を次のようにする。

- ・ ケースA：突起物なし
- ・ ケースB：前輪の前方
- ・ ケースC：前輪の間
- ・ ケースD：後輪の間
- ・ ケースE：後輪の後方

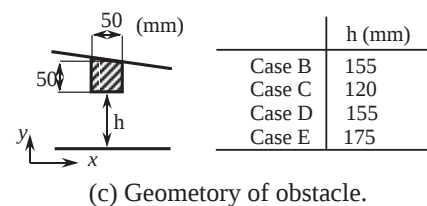
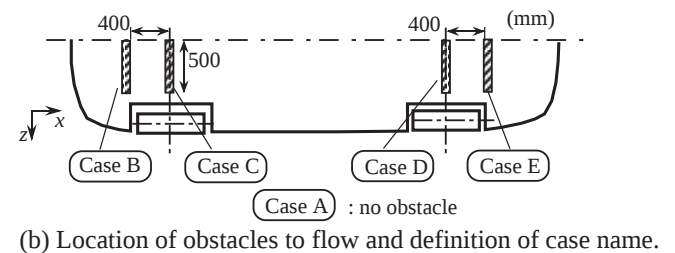
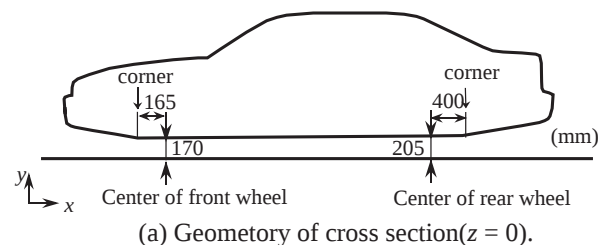


Fig. 6 Specification of object shape.

計算はケースAの格子 (Fig. 5) に各突起物部分の格子を重合させて実施する。このように、重合させる突起物の格子の位置を変化させているだけであるため、ケース間で格子の違いによる計算精度への影響は非常に小さい。

計算する際の主な条件は次のとおりである。

- ・レイノルズ数: 2.0×10^6
- ・ハーフモデル (流れ場は車体の左右で対称になるものと仮定し、中心断面より片側の領域のみで計算する。)
- ・実走行条件 (タイヤは回転し、地面は車体に対して移動している。)

ここでは、代表長さを1mとし、代表速度を走行速度としている。この場合、上記のレイノルズ数は30m/sで走行していることに相当する。また、計算領域の外縁までの距離は、およそ、車体の前方に15m、後方に50m、上方に20m、側方に20mとしている。

3.2 突起物の位置による空気抵抗の変化

各ケースの時間平均流れ場を求め、車体表面の圧力を積分することにより空気抵抗係数 C_D を算出する。空気抵抗係数は次のように空気抵抗の無次元量として定義される。

$$D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (9)$$

- ・ D : 車体全体に加わる空気抵抗
- ・ ρ : 空気密度
- ・ A : 代表面積 (各ケースとも 2.051m^2)

床下に突起の付いていないケースAを基準とした、各ケースの C_D の増加の割合

$$(C_D - C_{D(\text{Case A})}) / C_{D(\text{Case A})} \quad (10)$$

をFig. 7に示す。ここで、比較に挙げた実験データは、計算と同一形状の5分の1のスケール模型の風洞実験により得られたものである。実験は、移動地面板を用いており、レイノルズ数は 4.0×10^5 である。

このグラフによると、ケースC, Dでは、 C_D の増加の割合はよく一致している。一方、ケースBでは計算の方が若干増加の割合が大きく、ケースEでは、実験の方が大きい。このような C_D が増加する性質と流れ場の関係、計算と実験との差については後

で考察を行う。

3.3 床下面圧力分布

床下面の圧力分布についても実験データと比較した。時間平均された中心断面上の圧力係数 C_p の分布をFig. 8に示す。実線が計算、点が風洞実験による分布である。

前後の両方の車軸付近で床下の形状が折れ曲がっているため、突起物の無いケースAでも、 C_p に2箇所の負のピークが現れる。突起物がある他のケースでは、その2箇所のピークに加えて、突起物による急激な変化が見られる。

計算と実験を比較すると、ケースA～Cでは、計算の方が後方にあるピークが小さくなっている。ケースD, Eでは、突起がその付近にあるため、このような違いは見られず、全体的によい一致を示している。この、ケースA～Cの後方のピークの違いは、次のような計算手法の性質が原因となって生じていると考えられる。

まず、3次精度風上差分スキームを用いていることによる数値粘性の影響があることが挙げられる。この数値粘性は車体の床下面での境界層を実際よりも厚く発達させる効果があり、この影響でかど部に流れが沿いにくくなるため、圧力のピークが小さくなると考えられる。次に、レギュラー格子による計算方法であるため、流量の保存が完全に満たされていないことが考えられる。流量の保存性は、外部流れにとってはあまり影響がない場合も多いが、管内流れのような内部流れには影響が

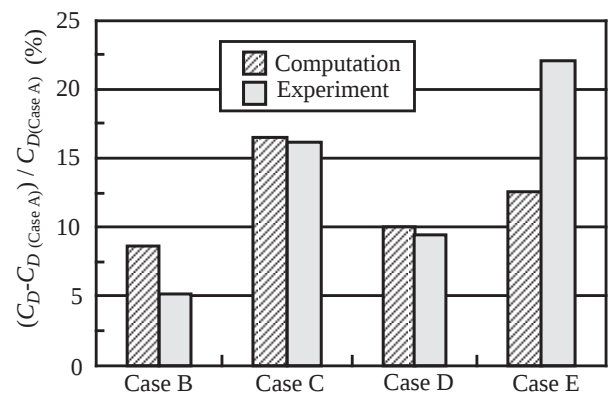


Fig. 7 Drag increase related to location of obstacles in underbody.

大きくなる。今回の計算では、自動車の床下で狭い部分を通過する流れになっているため、部分的に内部流れの性質があり、流量の保存の影響が大きくなると考えられる。さらに、ハーフモデルで計算をしていることも原因として考えられる。形状が対称であっても非定常的には流れは中心断面を横切る。このような場合に、ハーフモデルで計算するとそれを抑制してしまい、流れが中心断面でよどむような効果が現れ、圧力を高めに見積もる場合があると考えられる。

中心断面での圧力分布は以上の様子であったが、中心断面以外の圧力分布を見るために、計算結果

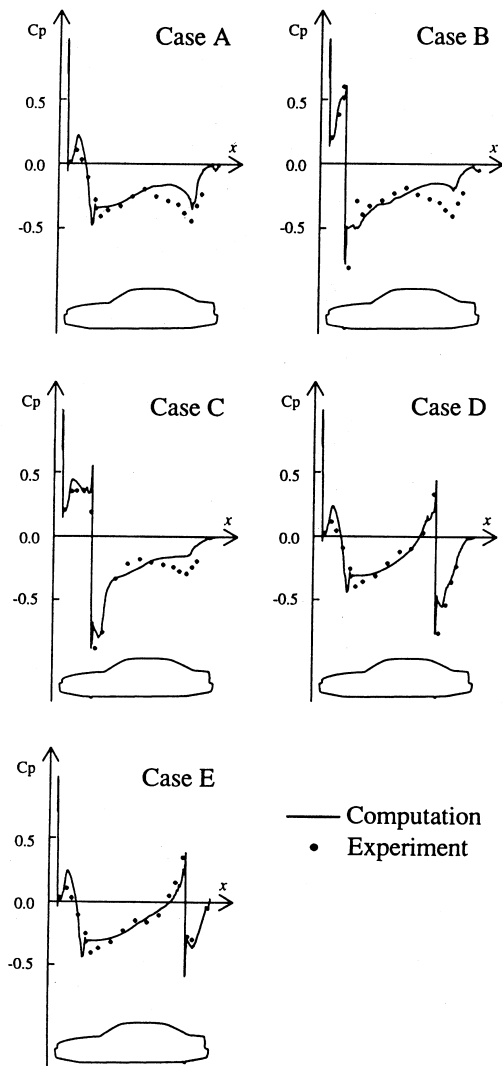


Fig. 8 Comparison of C_p distribution on central plane($z = 0$) of underbody.

により得られた床下面上の C_p のカラーマップをFig. 9に示す。それぞれ、上半分にケースAを、下半分にケースB～Eが示されている。これらにより、突起物前後の圧力が変化している様子など、床下の流れの障害物の影響を知ることができる。

3.4 空気抵抗増加の要因

今回の計算のように、平坦な床下に突起物が付く場合、突起物自身が受ける空気抵抗分と、突起物により流れ場が変化し、車体自身の空気抵抗が変化する分により全体の空気抵抗が変化する。このような突起物の空気抵抗への影響を流れの様子を詳しく調べることにより検討する。

まず、突起物自身が受ける空気抵抗は、突起物前後の圧力差を調べることにより比較することができる。Fig. 10は、突起物前面と後面の C_p の表面積分平均値の差を示したものである。これによると、突起物が前方にあるほど差は大きい傾向にある。これは突起物後方に発生する渦が突起物の後面圧を低下させることによるため、突起物下面を過ぎる流速が大きいほど圧力差が大きくなるものと考えられる。突起物が後方にある場合は、車体床下面での突起までの境界層が厚く発達し、突起物の前方に循環領域が大きく形成される。その結

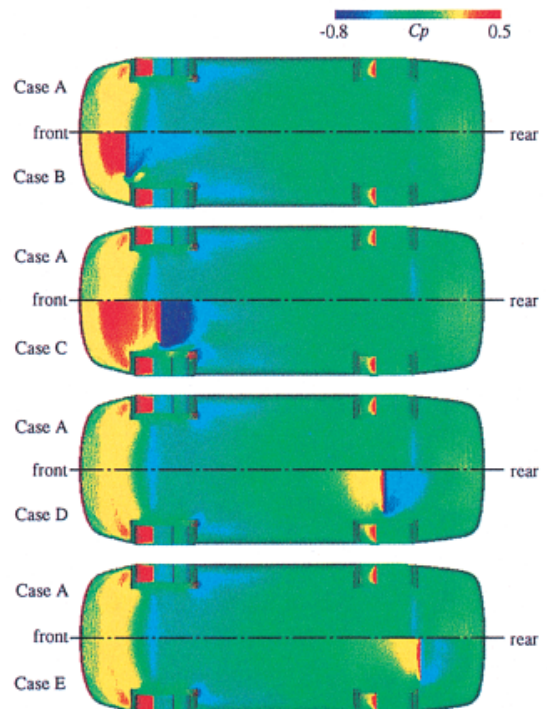


Fig. 9 Comparison on C_p distribution on underbody.

果，突起物前面のよどみ点の高さが低くなることで，突起物による流路の縮小が緩和され，流れがあまり増速しなくなる。このために，前面と後面の圧力差が小さくなり，受ける空気抵抗も小さくなる。

ただし，ケースBとCを比較すると，突起物とタイヤの位置関係によりケースBでは側方に流れが逃げるため，突起物下面の流れはあまり速くならず，この場合はケースCよりも圧力差が小さくなる。これらのことから，突起物が受ける空気抵抗が最も大きいのは，突起物がケースCの前輪の間にある場合で，この部分に流れの障害物があると，空力的に不利であることが推測される。

次に，車体自身が受ける空気抵抗を，背面圧力の大きさを比較することにより調べる。Fig. 11に時間平均された背面上の C_p の等高線を示す。また，定量的に背面圧を調べるために，車体背面上の C_p を前方投影面積について積分平均した値をFig. 12に示す。まず，Fig. 12により背面の上部の C_p の平均値を比較すると，ケースBからEのどの場合も，ケースAより小さくなっており，この部分では突起物による流れの変化がすべてのケースで空気抵抗の増加の要因になっている。これは，Fig. 11から，各ケースで，中心断面付近の圧力がケースAよりも低下しているためであることがわかる。特に，ケースEでの圧力の低下が大きくなっている。また，バンパ部分では，ケースB，EはケースAよりも C_p が低くなるものの，ケースC，Dでは高くな

っており，この部分では，一概に突起物による流れの変化が空気抵抗の低下の原因になっているとは言えないことがわかる。ここでも，ケースEの圧力が最も小さくなっており，空気抵抗を増加する効果が大きいことがわかる。

この様子を速度場から調べるために，車体後部

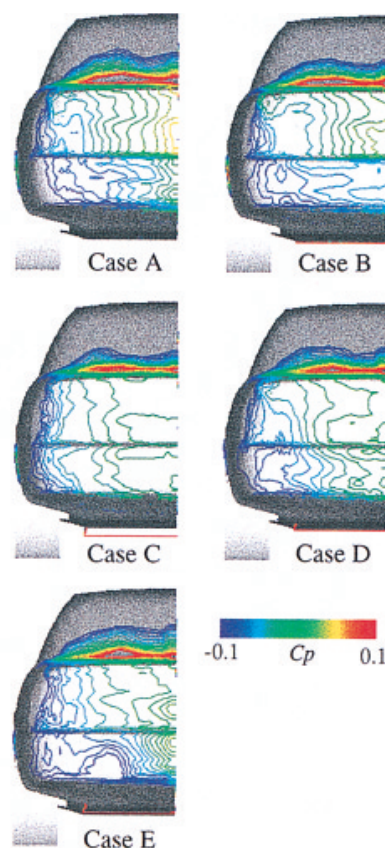


Fig. 11 Time averaged pressure distribution on back surface. (Contours of C_p , dividing indicated range into 20.)

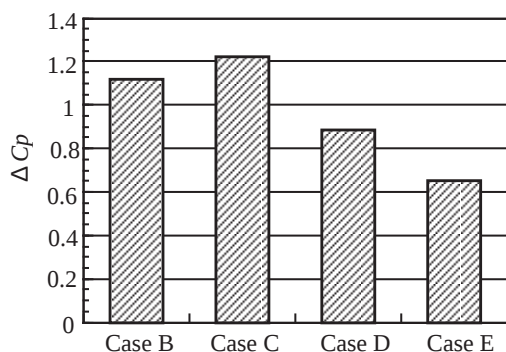
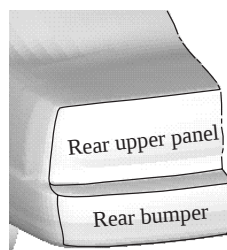


Fig. 10 Comparison of ΔC_p : difference of averaged C_p on front surface and C_p on rear surface of obstacle.



	Rear upper panel	Rear bumper	Total
Case A	-0.101	-0.620	-0.327
Case B	-0.153	-0.631	-0.360
Case C	-0.185	-0.241	-0.212
Case D	-0.191	-0.440	-0.302
Case E	-0.317	-0.686	-0.478

($\times 10^{-1}$)

Fig. 12 Averaged C_p on each surface.

の垂直断面上の速度ベクトルをFig. 13に示す。図は、中心断面上とそこから側方へ300mm離れた断面上でのベクトル図である。これらによると、各

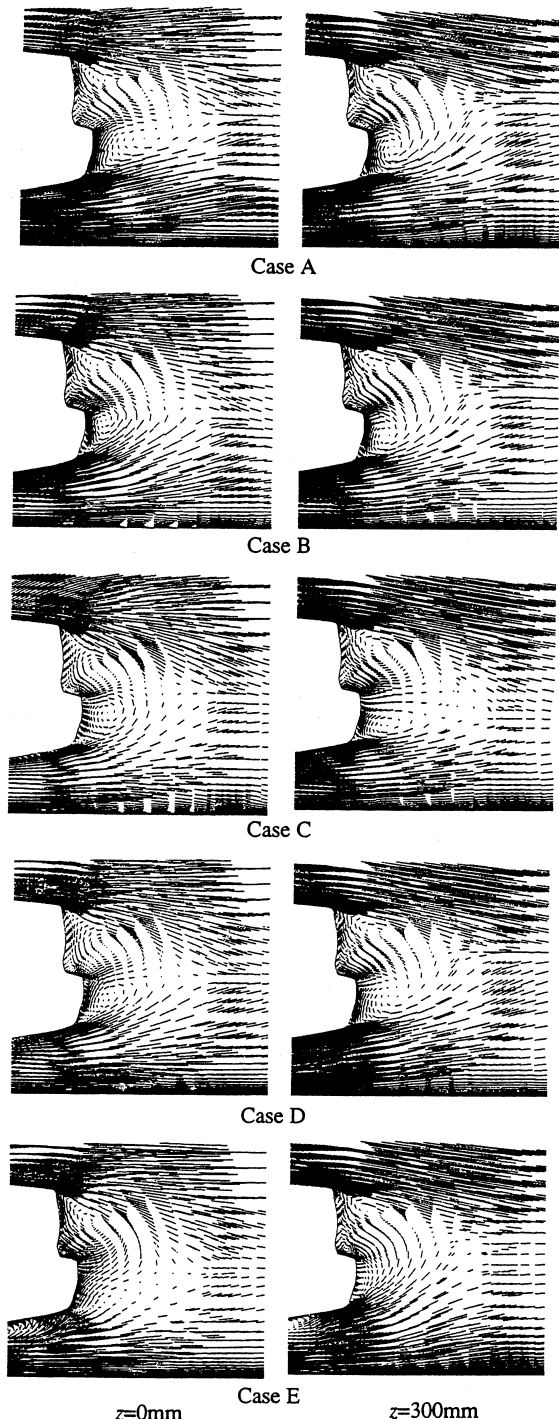


Fig. 13 Time averaged velocity vectors in wake on two sections. (z : distance from central plane.)

ケースともかなり後流の様子が異なっていることがわかる。まず、ケースEでは、床下から背面に流れが出るときに、その直前に突起物があるために、流れが押し下げられて、増速されていることがわかる。このため、背面への巻き上がりが大きく、他のケースよりも背面の圧力を小さくする原因となっていると考えられる。その他のケースでは、流れは乱されことなく背面へ流出している。このような場合、主に、流れが床下から後流域へ出るときの流速がこの巻き上がりの様子を決定すると思われる。この部分の流速は、流出する流量として比較できる。Fig. 14に前輪と後輪の間を通過する流量の時間平均値を示す。図では、ケースAの前輪の間の流量を1とした割合で表示してある。これによると、特に、ケースCでは後輪間の流量が小さく、背面への流出速度が小さくなると考えられる。Fig. 13に見られるようにバンパー背面で強い渦が形成されておらず、これが、バンパー部分の圧力があまり低下しない原因となっている。また、ケースBとDと比較すると、後輪間の流量はほぼ等しいが、Fig. 12でのバンパー部分の圧力はBの方が小さくなっている。これは、Fig. 13などで見られるように、ケースBでは中心断面付近で、巻き上がり渦が比較的強いため、この部分で圧力低下が大きくなったことが原因であると考えられる。ただし、このように中心断面付近で巻き上がり渦が強くなることは、流れ場としてやや不自然である。これは、ハーフモデルによる対称条件により、中心断面付近で流量が集中する影響が渦を強める効果になってしまったものと考えられる。Fig. 7でケースBの C_D が実験よりも大きい理由は、このようにケースBのバンパーの背面圧を低く見積もってしまったためであると考えられる。

以上のような突起物が受ける空気抵抗と背面の圧力の変化がFig. 7の空気抵抗の増加に反映されることになる。ケースCは車体背面圧力はあまり低いものの、突起物が受ける空気抵抗が大きいために、 C_D が大きい。ケースEでは突起物が受ける空気抵抗はあまり大きくないものの、背面の圧力低下が大きいため、ケースCの次に C_D が大きくなる。実験では、ケースEの C_D が最も大きい、この違いは、計算では、数値粘性などの理由に

より、突起物による効果が弱まったことによるものと考えられる。ケースBでは、突起物の抵抗はCに次いで大きく、背面圧もEに次いで大きいにもかかわらず、 C_D は他よりも小さくなっている。これは、突起物が斜面上に付加されていることにより、前方から形状を投影した場合の突起物の突出面積が小さくなるために、突起物の空気抵抗が C_D の大きさにあまり反映されなかったことが原因であると考えられる。

4. まとめ

車体の床下に流れの障害物となるような角柱状の突起物を様々な位置に付加した場合の流れをCFDにより解析し、空気抵抗の大きさを比較した。その結果、空気抵抗が増加する傾向とその要因について次のようなことが明らかになった。

- ・突起物が受ける空気抵抗は、突起物が前方にある場合に大きく、後方に位置するにつれて小さくなる。これは、突起物が後方にあるほど車体下面の境界層が厚く発達し、突起物下面において流れの絞りが緩和され、突起物背面の渦が弱まるためである。ただし、前輪の間にある場合と、それよりも前方にある場合を比較すると、タイヤの影響により、前輪間にある場合の方が空気抵抗は大きくなる。
- ・突起物が後輪の後方にある場合、突起物によって流れが押し下げられて増速するため、背面への流れの巻き上がりが大きくなる。その

結果、背面の圧力が大きく低下し、空気抵抗が増加する。

- ・後輪間を通過する流量が少ない場合には、床下から背面に出る流速が小さいため、バンパー面での巻き上がり渦が弱くなり、空気抵抗は小さくなる。

また、計算結果を実験結果と比較することによって、計算での空気抵抗の予測において、次のような問題点があることがわかった。

- ・計算スキームの数値粘性が大きいことにより、境界層が床下面で実際よりも厚く発達する傾向がある。その結果、後方に突起物がある場合に、突起の影響が小さくなり、空気抵抗を小さく予測してしまう傾向がある。
- ・前輪前方に突起がある場合、空気抵抗を実験よりも大きく見積もっている。この理由は背面の中心断面付近に発生する強い渦の影響であると判断される。これは、ハーフモデルで計算していることが原因であろうと考えられる。

以上一連の解析により、床下形状を最適化して空気抵抗を低減する場合、(i)前輪間にある流れの障害物の空気抵抗を小さくすること、(ii)後輪の後方の形状を平滑にし、背面に流出する流れの巻き上がりを抑えること、(iii)後輪間を通過する流量を少なくすること、が効果的であると結論される。

最後に、本研究を進めるにあたり、ご協力ならびに実験データの提供をしていただきましたトヨタ自動車(株)第3実験部の関係各位に感謝いたします。

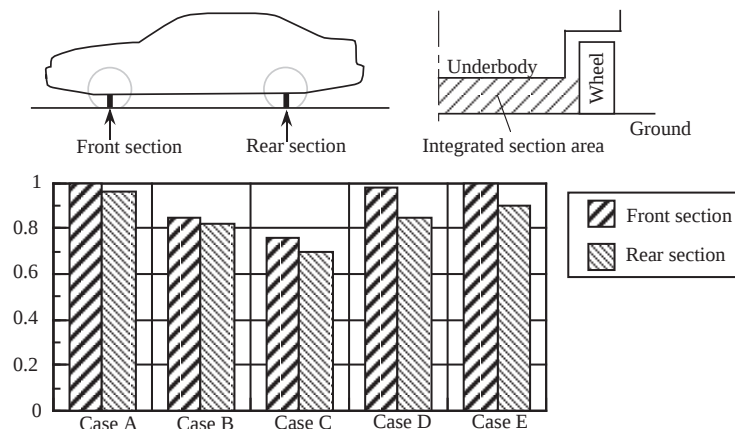


Fig. 14 Comparison of flow mass between wheels. Normalized by flow mass of front section of Case A.

参考文献

- 1) 堀之内成明, 小林信雄, 前田和宏 : "空力基礎実験モデルまわりの流れ解析", 自動車技術会学術講演前刷集, 902-2(1990), 157
- 2) Benek, J. A., Steger, J. L. and Dougherty, F. C. : "A Flexible Grid Embedding Technique with Application to the Euler Equations", AIAA Pap., No.83-1944,(1983)
- 3) Benek, J. A., Buning, P. G. and Steger, J. L. : "A 3-D Chimera Grid Embedding Technique", AIAA Pap., No.85-1523, (1985)
- 4) 小川隆申, 藤井孝藏 : "高速車両トンネル内走行時の流れ場の三次元粘性計算", 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-22, (1994), 203
- 5) Buning, P. G., et al. : "Numerical Simulation of the Integrated Space Shuttle Vehicle in Ascent", AIAA Pap., No.88-4359-CP, (1988)
- 6) 黒田眞一, 藤井孝藏 : "エンジン付きスペースプレーン全機形状まわりの流れの数値シミュレーション", 航空宇宙技術研究所特別資料SP-19, (1992), 81
- 7) Henshaw, W. D. and Chesshire, G. S. : "Three-Dimensional Overlapping Grid Generation Techniques", Research Report LA-UR-95-3436, (1995), Los Alamos National Laboratory
- 8) Kawamura, T. and Kuwahara, K. : "Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness", AIAA Pap., No.84-0340, (1984)
- 9) Van der Vorst, H. A. : "Bi-CGSTAB : A Fast and Smoothly Converging Variant of Bi-CG for then Solution of Nonsymmetric Liner Systems", SIAM J. Sci. Stat. Comput., 13-2(1992), 631
- 10) Poole, E. L. and Ortega, J. M. : "Multicolor ICCG Method for Vector Computers", SIAM J. Numer. Anal., 24-6(1987), 1394
- 11) Doi, S. and Hoshi, A. : "Large-Numbered Multicolor MILU Preconditioning on SX-3/14", Intern. J. Computer. Math., 44(1992), 143
- 12) Horinouchi, N., Kato, Y., Shinano, S. and Tagayashi, Y. : "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System", SAE Tech. Pap. Ser., No.950628, (1995), 8p.

著者紹介



加藤由博 Yoshihiro Kato

生年：1964年。

所属：数理・情報研究室。

分野：自動車の空力解析，および非圧縮性流体解析に関わる数値計算手法の研究。

学会等：日本機械学会会員。



堀之内成明 Nariaki Horinouchi

生年：1961年。

所属：数理・情報研究室。

分野：自動車の空力解析，および非圧縮性流体解析に関わる数値計算手法の研究。

学会等：日本応用数理学会，情報処理学会，自動車技術会会員。



科野佐代子 Sayoko Shinano

生年：1966年。

所属：数理・情報研究室。

分野：非圧縮性流体解析に関わる可視化手法の研究。