

# 自動車まわりの流れの数値シミュレーション

## — $k-\epsilon$ 乱流モデルによる数値解の比較例 —

Numerical Prediction of the Flow around a Road Vehicle

— Comparisons between Numerical Solutions based on the  $k-\epsilon$  Turbulence Model —

小林 敏 雄\*・鬼 頭 幸 三\*・谷 口 伸 行\*  
Toshio KOBAYASHI, Kozo KITO and Nobuyuki TANIGUCHI

自動車まわりの乱流の数値シミュレーションの試みが徐々に進められている。しかし解法上の選択が極めて多く、どの選択が最適であるかを知ることは容易なことではない。現状では同一計算対象について種々の要因の影響を系統的に明らかにしたデータが少ないことがこの問題を一層わかりにくくしている。本稿では現在実用レベルでは最も汎用性がある  $k-\epsilon$  乱流モデルにもとづく解法に注目し、数値解法ほかの諸条件が自動車まわりの乱流のシミュレーション結果におよぼす影響を例示する。

### 1. ま え が き

$k-\epsilon$  乱流モデルによって代表される 2 方程式モデルを用いたレイノルズ方程式にもとづく解法を自動車まわりの乱流の数値シミュレーションに適用した論文が比較的大きな国際会議に初めて出現したのは、おそらく 1982 年 6 月英国・ロンドンにおいて開催された車両設計協会による「車両設計におよぼす空気力学の影響」に関する国際会議、あるいは同年 12 月西独・ヴォルフスブルグにおいて開催されたフォルクスワーゲン社による「車両空気力学」に関する国際会議であったと思われる。これらの国際会議で発表された自動車まわりの流れのシミュレーションは、高度に洗練された風洞実験からみれば不満足な点が認められたにもかかわらず、従来とかく風洞実験が主体であった車両空気力学の分野に大きな衝撃を与えた。特にこれらの数値シミュレーション技術が自動車の高性能化に伴う風洞実験の増大、車両の開発期間の短縮化傾向に対する近代的武器として風洞実験の代案になりうるかについて強い関心が寄せられた。その後欧米を中心に精力的検討が進められ<sup>1)~6)</sup>、種々の報告が公表されつつあるものの、現在のところ初期の段階で指摘された自動車まわりの流れの数値シミュレーションの問題点がそれほど解消されていないのが現状である。

表 1 に主要文献の一覧を示す。表には数値解法、乱流モデル、座標系、次元、計算対象、メッシュ数などを列記してある。表から数値解法については差分法、有限体積法の適用が、また乱流モデルについては  $k-\epsilon$  モデルの採用が比較的多いことがわかる。さらに年代的にみれば

初期の論文が集中した 1982~3 年代に比べてその後の論文発表はそれほど多くないことがわかる。これは自動車もつ複雑な形状の取り扱い、また航空機とは異なり車体の背後に存在する大きな後流の取り扱いの困難さなどのためにシミュレーション技術が大きな壁に直面していること、あるいはまた数値シミュレーション技術もつ戦略的地位から数値解法ほかの細部が公表されにくくなっていることを示唆しているものと思われる。 $k-\epsilon$  乱流モデルにもとづく解法による問題点の存在を明確にするため、図 1 に一例としてファーストバック型 2 次元車体における上表面圧力分布を種々の解法によって計算した結果の比較を示す。図では本稿で特に注目する

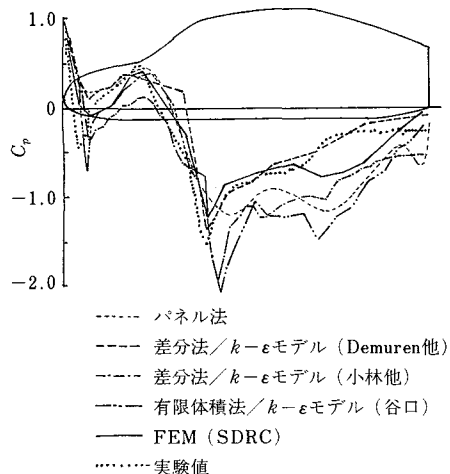


図 1 種々の解法による計算結果の比較

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

表 1 主要文献

(\* 1 FDM: 差分法, FVM: 有限体積法, FEM: 有限要素法,  
\* 2 2 D: 2次元, 3 D: 3次元, \* 3 (前後軸方向)×(上下軸方向)×(左右軸方向))

著 者	数値解法*1	乱流モデル	座標系	次元*2	計算対象	メッシュ数*3	備考
Markatos <sup>9)</sup> (1983)	FDM	$k-\epsilon$ モデル	直交直線	3 D 3 D	ファーストバック型 ノッチバック型	20×12×8 25×9×15	
Demuren ほか <sup>8)</sup> (1982)	FDM	$k-\epsilon$ モデル	直交直線	2 D 3 D	ファーストバック型 ノッチバック型	75×39 45×26×17	
Rastogi <sup>9)</sup> (1982)	FDM	$k-\epsilon$ モデル	直交曲線	2 D	ファーストバック型	30×35	SIMPLE 法
Hasse ほか <sup>10)</sup> (1983)	FVM	0 方程式モデル	—	2 D	ファーストバック型	<i>n.d.</i>	
Malin ほか <sup>11)</sup> (1985)	FVM	$k-\epsilon$ モデル	—	3 D 3 D	ファーストバック型 スクエアバック型	38×26×14 38×26×14	SIMPLE 法
Willoughby ほか <sup>12)</sup> (1985)	FDM	$k-\epsilon$ モデル	直交直線	準 3 D	冷却系を含む 車両前頭部	75×75	SIMPLE 法
小林ほか <sup>13)-17)</sup> (1985~86)	FDM	$k-\epsilon$ モデル	直交直線	2 D	ファーストバック型	141×69	SMAC 法
Rawnsley ほか <sup>18)</sup> (1986)	FVM	$k-\epsilon$ モデル	—	3 D 3 D 3 D	ファーストバック型 スクエアバック型 ノッチバック型	47×26×14 47×26×14 47×26×14	SIMPLE 法
谷口 <sup>19)</sup> (1986)	FVM	$k-\epsilon$ モデル	—	2 D 3 D	ファーストバック型 ファーストバック型	60×30 60×30×20	SIMPLE 法
Ecer ほか <sup>20)</sup> (1982)	FEM	0 方程式モデル	—	2 D	ファーストバック型	<i>n.d.</i>	

差分法および有限体積法のほかに、有限要素法、パネル法による解があわせて実験値と対比されている。小林・諸岡<sup>13)</sup>、谷口<sup>19)</sup>以外のデータはフォルクスワーゲン社の提供データ<sup>21)</sup>である。図から圧力分布の定性的傾向は概略一致しているものの、細部については数値解法間かなりの差異が認められることがわかる。これらの結果は計算結果の差異が数値解法そのものの差異によることはもちろんのこと、たとえ同一数値解法、同一乱流モデルを用いた場合であっても計算スキーム、メッシュ分割、境界条件の設定の差異によって得られる計算結果が大幅に異なってくることを意味している。したがって、これらのパラメータを最適に設定することが計算上大きな課題となる。現在のところこれらの問題点の解明は未だ十分ではなく、比較検討のための計算例の蓄積が一層要望されている<sup>22)-23)</sup>。

本稿では乱流モデルとして  $k-\epsilon$  乱流モデルを用いたレイノルズ方程式にもとづく解法に注目し、差分法および有限体積法の差異が 2次元車体まわりの流れの状態、特に車体表面圧力分布および後流構造におよぼす影響を例示する。さらにメッシュ分割、 $Re$  数の影響についても基礎的資料を提供する。

## 2. 数 値 解 法

### 2.1 数値解法 I (差分法)

差分法は流れの計算の分野では古くから最もよく使用されており、偏微分方程式を差分方程式で近似して解を求めるものである。この差分方程式は一意的に決定されるものではなく、解の精度がそれぞれ異なった差分形式が数多く提案されている。多くの場合直交直線座標系に適用されるこの手法は近年曲線非直交座標系にも適用され、その有効性と応用範囲を拡大しつつある。本稿では直交直線座標系を用いて差分計算を行い、空間に対して中心差分を、また時間に対して Adams・Bashforth 差分を適用する (なお  $k, \epsilon$  の輸送方程式の対流項については計算の安定のため風上差分を適用)、また計算アルゴリズムとして SMAC 法<sup>24)</sup>を用いる。

SMAC 法は A Simple Version of Marker and Cell Method の略記であり、別名 HSMAC 法とも呼ばれている時間進行形の陽解法である。SMAC 法の特徴は、SMAC 法の原形である MAC 法が圧力に関する Poisson 方程式を解くことによって連続の関係を評価しているのに対し、Poisson 方程式を解くかわりに圧力と速度とを同時に修正して連続の関係を満足させる点にある。

アルゴリズムの主要部は次のとおり：

- (1) 運動方程式から速度  $u, v, w$  を求める。
- (2) これらの速度は必ずしも連続式を満たしているとは限らないので、 $u, v, w$  および圧力  $p$  を同時に修正して連続式を許容誤差内で満たすまで繰り返し計算を行う。
- (3) 新しく求められた速度  $u, v, w$  を用いて  $k, \epsilon$  の輸送方程式を解く。
- (4) 時間ステップを進め、(1)に戻る。

2.2 数値解法II (有限体積法)

有限体積法は計算領域をいくつかの小領域に分割してそれぞれについて積分を行い、離散化を計るものである。また分割メッシュを座標軸方向に沿って与え、離散式を階差の形に導出しているため、有限要素法的な性質と差分法のそれとを兼ね備えている。本稿では計算アルゴリズムとして SIMPLE 法<sup>26)</sup>を用いる。まず離散化についてやや詳細に説明<sup>11)</sup>を加える：

計算領域を座標軸に沿って有限体積をもつ小領域 (セル) に分割し、各セル内に代表点を定める (図2では点  $P$ )。このセルは6個の面  $e, w, n, s, t, b$  で隣接セル  $E, W, N, S, T, B$  と接している。すなわち  $\xi$  の正方向の隣接セルを  $E$ 、同負方向のそれを  $W$  とし、 $\eta, \zeta$  方向についてはそれぞれ  $N, S$  および  $T, B$  とする。Patankar・Spalding による方法では速度ベクトル  $\vec{v}$  を射影成分  $(u, v, w)$  に分け、 $u$  を面  $e$  上に点  $P-E$  方向成分として、また面  $w$  上に点  $W-P$  方向成分として定義する。 $v, w$  についても同様に定義する。すなわち速度はセル面上で、その他のスカラー量はセル内の代表

点で定義する。さてスカラー量  $\phi$  は一般に

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}\phi - \Gamma \text{grad}\phi) = S \quad \dots\dots(1)$$

で表される。ここに  $\Gamma, S$  : 場所、時間の関数となるスカラー量、式(1)をセル  $P$  について体積分すれば

$$\int_{vol} \frac{d\phi}{dt} dv + \int_A \vec{J}_A \cdot \vec{d}\vec{n} - \int_{vol} S dv = 0 \quad \dots\dots(2)$$

が得られる。ここに  $vol$  : セル体積、 $A$  : 境界面積、 $\vec{n}$  : 境界面の法線ベクトル、 $\vec{J}_A = (\vec{v}\phi - \Gamma \text{grad}\phi)_A$  : 境界面における総流束、式(2)の第1項、第3項はセル内で  $d\phi/dt, S$  がそれぞれ一定値をもつものと仮定して積分する。また第2項は  $\vec{J}, \vec{n}$  を各面で一定と仮定して面  $e, w, n, s, t, b$  それぞれにおいて積分する。 $\vec{J}$

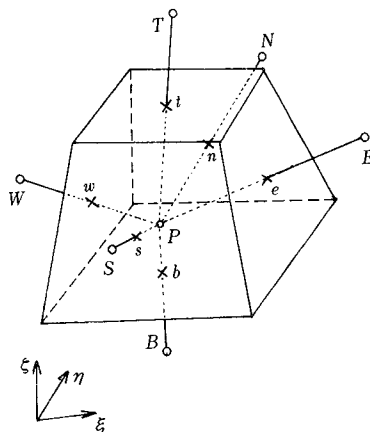


図2 有限体積法におけるセルの定義

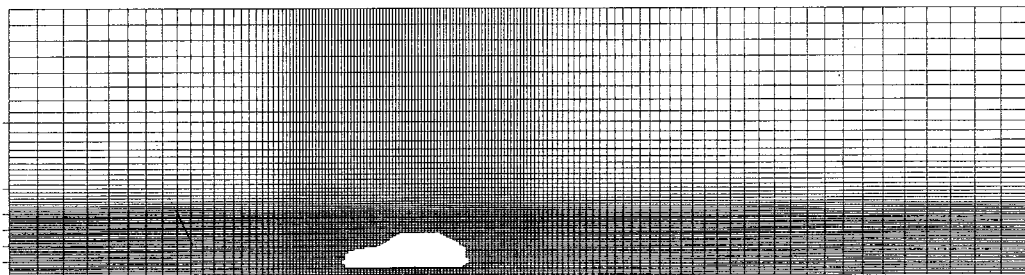


図3 メッシュ分割 (差分法)

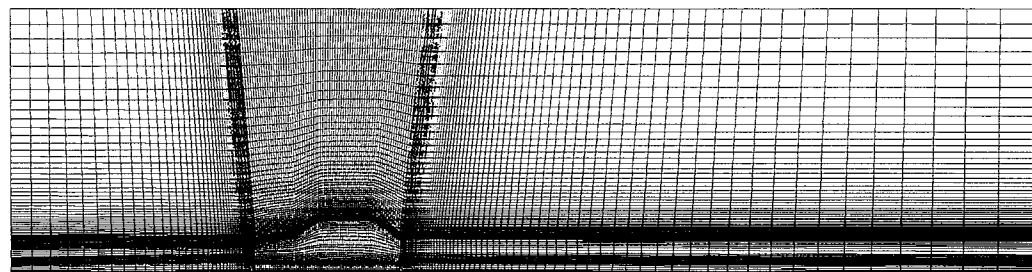


図4 メッシュ分割 (有限体積法)

は近接セルにおける諸量によって補間される。ここでは対流流束  $\vec{v}\phi$  を風上補間で、また拡散流束  $\Gamma \text{grad}\phi$  を中心補間で近似する。これらの積分によって式(2)は

$$a_p \phi_p = \sum a_{NB} \phi_{NB} + b \quad \dots\dots (3)$$

の階差式に変換される。ここに  $NB: E, W, N, S, T, B$  のいずれか 1 つを選ぶ、 $a_p, a_{NB}, b$  : 係数、式(3)は正規等間隔セルの下では差分法による階差式と等価である。なおベクトル量に関する方程式についても上記に類似した手法によって離散化される。

SIMPLE 法は Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation の略記であり、圧力結合方程式による半陰解法である。アルゴリズムの主要部は次のとおり：

- (1) 運動方程式から速度  $u, v, w$  を求める。
- (2) 連続式から導出される圧力補正式を用いて圧力補正量  $\delta p$  を求める。
- (3) 圧力補正量  $\delta p$  を用いて速度補正式から新しい速度  $u, v, w$  を求める。
- (4)  $u, v, w$  を用いて  $k, \epsilon$  の輸送方程式を解く。

(5) 連続式を許容誤差内で満たすまでステップ(1)~(4)を繰り返す。

### 3. 計 算 条 件

流れ場として風洞内の 2 次元車体まわりの乱流を想定する。表 2 に数値解法として用いる差分法および有限体積法それぞれの場合について車体形状の輪郭近似、計算領域、メッシュ分割、標準メッシュ数、境界条件、数値定数および計算  $Re$  数を示す。

### 4. 結 果 お よ び 考 察

#### 4.1 数値解法の差異の影響

図 5 に車体表面の圧力分布におよぼす本稿における数値解法の差異の影響を示す。図では差分法 (FDM) の場合には  $Re=2.2 \times 10^6$  における結果を、また有限体積法 (FVM) の場合には  $Re=1.0 \times 10^6$  における結果を示している。圧力係数  $c_p$  は  $c_p=2(p-p_\infty)$  で定義する。ここに  $p_\infty$  : 一様流中における無次元圧力。なおここでは、これら  $Re$  数の差異は大きな影響を与えないものと考え (4.2 節参照)、両者を比較する。図から両数値解法によ

表 2 計算条件

(\* 1  $l_1$  : 計算領域入口部, 車体前端間の距離,  $l_2$  : 同出口部, 車体後端間の距離,  $h_1$  : 同上面部, 車体屋上間の距離,  $h_2$  : 地上高,  $l$  : 車長,  $h$  : 車高; \* 2 代表長さ : 車高, 代表速度 : 入口速度)

数値解法		差 分 法	有 根 体 積 法
車体形状		2次元ファーストバック型	
輪郭近似		階段状近似	車体形状に適合した直線近似
計算領域・メッシュ分割		図 3 $l_1^* \approx 2.6l, l_2 \approx 4.4l$ $h_1 \approx 6.3h, h_2 \approx 0.23h$	図 4 $l_1 \approx 1.5l, l_2 \approx 4.0l$ $h_1 \approx 5.0l, h_2 \approx 0.22h$
標準メッシュ数		141×69 (車体 : 40×22) 車体近くのメッシュは縦横比 1 対 2 の等間隔メッシュ、車体から離れたところでは、メッシュ幅が等比級数的に増加する不等間隔メッシュ	180×90 (車体 : 84×22) 車体形状に適合したメッシュ
境界条件	入口部	$U=1.0, V=0, k=3.2 \times 10^{-3}, \epsilon=7.1 \times 10^{-4}$ (文献 26 参照)	
	出口部	一様流出	一様流出, $p=0$
	上面部	自由すべり条件, $V=0$	入口部に同じ
	車体境界・地面盤	壁面に平行方向速度 : 1/7 乗則, 同垂直方向速度 : 零, $k$ : 自由すべり条件, $\epsilon = c_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\kappa y), \kappa$ : カルマン定数, $y$ : 壁からの距離。	壁面に平行方向速度 : 壁法則による, $\tau_w/\rho = (c_\mu^{1/2} k)^{1/2} u/u^+, u^+ = (1/\kappa) \ln(Ey^+), y^+ = (c_\mu^{1/2} k)^{1/4} y/\nu, E$ : 定数, $k$ : 自由すべり条件 ( $k$ の輸送方程式の生成項 $G = (\tau_w/\rho)(u/y), \epsilon = k^2(\rho/\tau_w)(u/y), \epsilon$ : 差分法に同じ
数値定数		$c_\mu=0.09, c_1=1.44, c_2=0.1728, \sigma_1=1.0, \sigma_2=1.3$ (文献 27 参照)	$c_\mu=0.09, c_1=1.44, c_2=0.1728, \sigma_1=1.0, \sigma_2=1.22$
$Re$ 数 *2		$2.2 \times 10^6$	$1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^6, 2.1 \times 10^6$

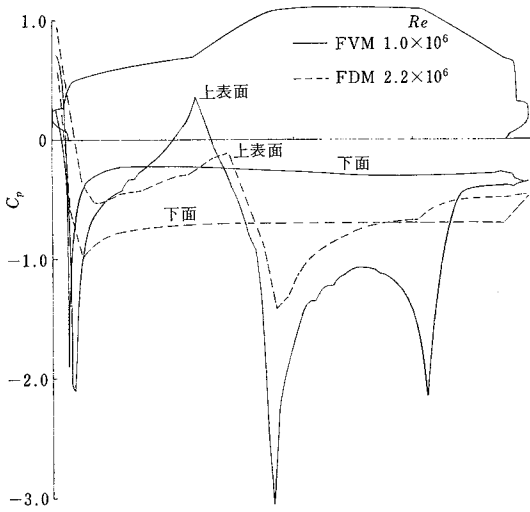


図5 圧力分布におよぼす数値解法の差異の影響

る  $C_p$  分布の定性的傾向はほぼ一致するものの、定量的にみれば次に示す差異が認められる：

- (i) 車体ルーフの前後端など角部における圧力のピーク値については有限体積法がより鋭いピーク値を与える。
- (ii) 車体下面の圧力分布については差分法がより低い  $C_p$  値を与える。

上記(i)の結果は、有限体積法では角部において車体表面により沿って流れ、はく離が発生しにくくなっていることを意味する。現在本車体形状に関する実験結果を得ていないため厳密な考察は困難であるが、本車体形状と類似した形状をもつ図1に示される上表面圧力分布からみても有限体積法はやや過大に鋭いピーク値を再現しているように思われる。一方差分法ではこれとは逆に車体形状の角部において有限体積法と比べてあまり強いピーク値はあらわれていない。本稿における両数値解法による計算例ではメッシュ分割が異なっており、特に有限体積法では境界適合座標系を用いている。また計算条件、差分形式等も同一ではない。特に有限体積法では運動方程式、 $k$ 、 $\epsilon$ の輸送方程式ともに対流項には風上補間を適用し、また $k$ 、 $\epsilon$ の輸送方程式の生成項 $G$ を近似して計算を行っている。これらのことから図5に示される  $C_p$  分布の差異が通常差分法と有限体積法との差異にもとづくものであると簡単には断定することはできない。次に上記(ii)の結果については差分法の場合には有限体積法の場合と比べて床下流れの平均流速がより大きくなっていることを示すものと思われる。

図6に車体背後の後流におよぼす数値解法の差異の影響を示す。計算条件は図5と同一である。図(a)および(b)はそれぞれ車体後端、後端から0.25  $l$ 、0.5  $l$  下流 ( $l$ ：車長)における主流方向速度 $U$ の分布および乱流

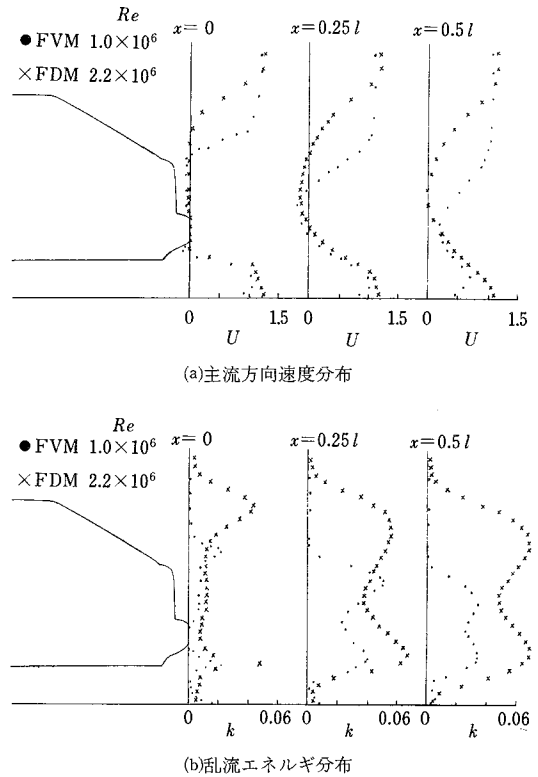


図6 車体背後の後流におよぼす数値解法の差異の影響

エネルギー $k$ の分布を示している。図から速度分布について両数値解法による計算結果の間に次の差異が認められる：

- (i) 地面盤付近では差分法がより大きい速度を与える。
- (ii) 車体後部の傾斜面の背後において差分法がより大きい速度欠損領域を生じさせる。

上記(i)の結果は図5の下面  $C_p$  分布の結果と対応するものであり、(ii)の結果は有限体積法では後流が小さくなることを示し、また有限体積法の場合の角部における  $C_p$  分布の傾向を裏付けるものである。

次に $k$ の分布について両数値解法による計算結果の間では定性的傾向が大略一致している。すなわち後流の速度勾配の極大値に対応して $k$ の分布にも2つのピーク値があらわれる。定量的にみれば差分法は全般に $k$ をより大きく評価する傾向にあることが特徴である。

#### 4.2 メッシュ分割および $Re$ 数の影響

図7に車体床下面と地面盤との間のメッシュ数の影響を示す。図では差分法の場合について同メッシュ数が標準の5メッシュ(表2参照)から10メッシュに変化させた場合に車体上下面の圧力分布にあらわれる変化を例示している。図からこのメッシュ数の変化が上面の圧力分布におよぼす影響はほとんどないこと、一方下面の圧力分布に対しては密なメッシュほど  $C_p$  値を小さくする傾

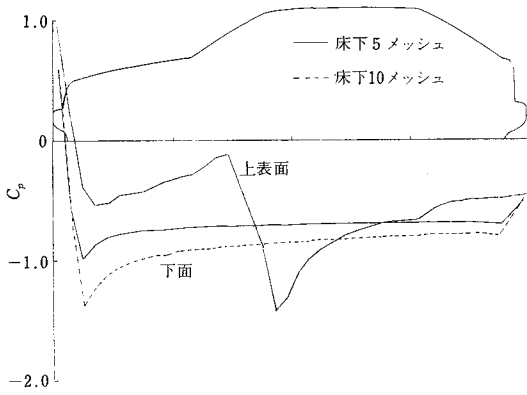


図 7 圧力分布におよぼすメッシュ分割の影響 (差分法)

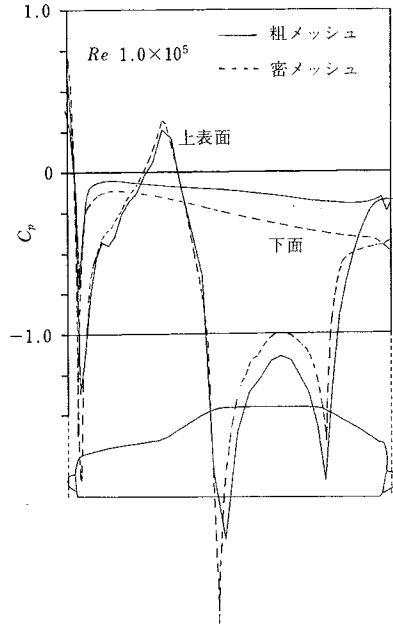


図 8 圧力分布におよぼすメッシュ分割の影響 (有限体積法)

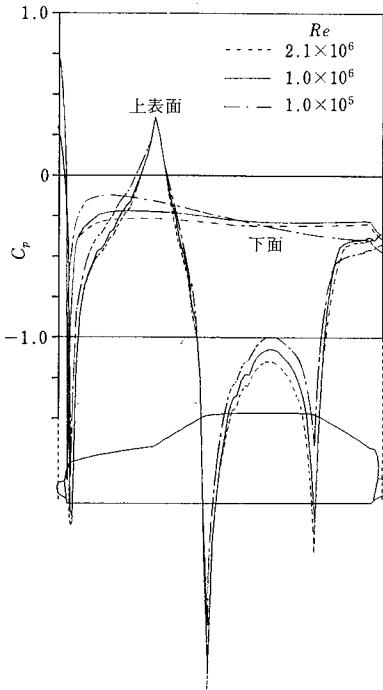


図 9 圧力分布におよぼす Re 数の影響 (有限体積法)

向にあることがわかる。

図 8 は計算領域全域にわたってメッシュ数を変化させた場合車体表面の圧力分布におよぼす影響を示したものである。図では有限体積法の場合について標準メッシュ (表 2 参照) を仮に密なメッシュとし、これに対して粗いメッシュ (100×50 (車体: 42×15)) を設定している。図から上表面の圧力分布については場所によって様子が異なるが、密なメッシュほど鋭いピーク値をもちやすい  $c_p$  分布となること、また下面の圧力分布については図 7 に示される傾向と同様に密なメッシュほど  $c_p$  値を小さくする傾向にあることがわかる。

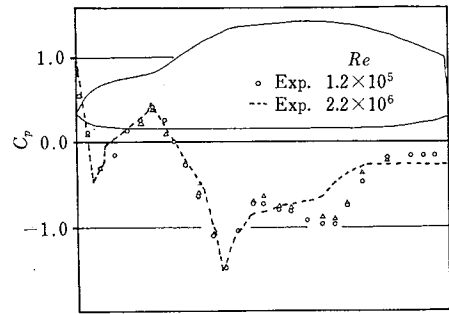


図 10 圧力分布におよぼす Re 数の影響 (2次元車体)

図 9 に有限体積法の場合について車体表面の圧力分布におよぼす  $Re$  数の影響を示す。図では  $Re=1.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$  および  $2.1 \times 10^6$  の場合を例示する。図から上下表面の圧力分布ともに本計算  $Re$  数間では定量的な差異が認められるものの、定性的にはほぼ同一の傾向にあることがわかる。しかし実験では  $Re$  数が  $10^5$  のオーダーの場合と  $10^6$  のオーダーの場合とでは物体表面におけるはく離の様相が異なり、 $c_p$  分布に定性的な差異があらわれる。図 10 に 2次元車体 (図 1 に示す車体形状と同一の車体形状) について車体上表面の圧力分布におよぼす  $Re$  数の影響<sup>14)</sup> を例示する。図の  $Re=2.2 \times 10^6$  の場合の実験結果は実車大の模型を、また  $Re=1.2 \times 10^5$  の場合は縮尺 1/17.5 の模型を用いて得られたものである。図 11 に 2次元翼について翼面の圧力分布におよぼす  $Re$  数の影響<sup>28)</sup> を例示する。図 10 および 11 から 2次元車

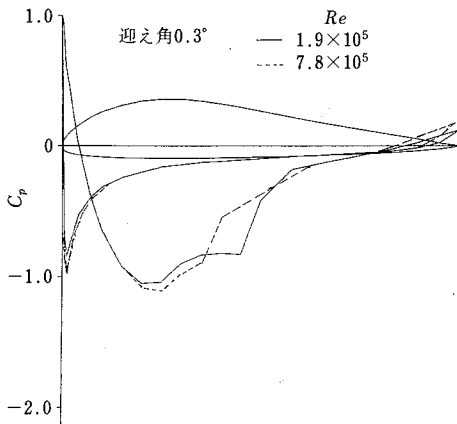


図 11 圧力分布におよぼす  $Re$  数の影響 (2 次元翼)

体の場合ルーフ中央付近から後部において、また 2 次元翼の場合翼背面の後半部において  $Re$  数によって定性的に異なった  $C_p$  分布が認められる。したがって、現段階における計算では実験であられる  $Re$  数の差異による上記の傾向変化を再現していないように思われる。

車体境界および地面盤付近で壁法則を適用する場合壁近傍の最適なメッシュ分割は  $Re$  数の大きさと密接な関係にある。すなわち計算によって求められる壁座標  $y^+$  (壁近傍第 1 メッシュ, 表 2 参照) が  $Re$  数に依存し,  $Re$  数によっては  $y^+$  が壁法則で定義される  $y^+$  の範囲に存在しなくなることがある。図 9 の計算例では 3 種の  $Re$  数に対して同一のメッシュ分割を用いている。  $Re=1.0 \times 10^6$  の場合には  $y^+$  が  $30 \leq y^+ \leq 100$  の範囲に存在するが,  $Re=2.1 \times 10^6$  の場合には  $y^+$  がやや大きく  $y^+ \approx 100 \sim 200$  の範囲に,  $Re=1.0 \times 10^5$  の場合には  $y^+$  が小さく  $y^+ \approx 12 \sim 30$  の範囲に存在している。これらの結果は当然のことながら  $y^+$  がメッシュ分割に依存することを意味し, したがって境界条件として壁法則を使用する限り, メッシュ分割の粗密の影響を  $y^+$  と独立して議論することが困難であることを示唆している。

## 5. あとがき

乱流モデルとして  $k-\epsilon$  乱流モデルを用いたレイノルズ方程式にもとづく解法に注目し, 差分法および有限体積法による数値シミュレーション結果の対比を試みた。さらにメッシュ分割,  $Re$  数が 2 次元車体まわりの流れの状態におよぼす影響を例示した。本稿で用いた差分法および有限体積法はともに現在のところ比較的ノウ・ハウが蓄積されている数値解法である。もちろん本稿における計算結果はそれぞれの数値解法において種々の計算条件を最適にして得られたものではない。それにもかかわらず両者による計算結果には大きな差異があることは明白である。今後, 数値解法, 計算スキーム, 乱流モデ

ルの選択, メッシュ分割, 境界条件の設定などの諸問題を含め, 自動車まわりの流れの数値シミュレーション技術の改善に向けて一層の地道な努力が必要であることが痛感される。

終りに本稿における比較計算は本所内に設けられた「車両等の空気力学に関する研究委員会」のワーキング・グループ作業の一環として行われた。また本所 NST 研究グループの各位から有意義なご討論をいただいた。ここに記して謝意を表する。(1986 年 9 月 30 日受理)

## 参 考 文 献

- 1) W.Schmidt and R. Buchheim, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
- 2) R. Buchheim and H. Roehe, VDI Berichte, 537 (1984), 261
- 3) B. Wagner, VDI Berichte, 537 (1984), 661
- 4) D. Hammond, Jr., SAE Paper 850473 (1985)
- 5) G.H. Bibbins and W.W. McVinnie, SAE Paper 850475 (1985)
- 6) W. Schmidt, Dornier Post, 2/83 (1983)
- 7) N.G. Markatos, Int. J. of Vehicle Design, SP 3 (1983), 387
- 8) A.O. Demuren and W. Rodi, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
- 9) A.K. Rastagi, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
- 10) W. Hasse and W. Seibert, Aerodynamics of Transportation II, ASME, FED 7 (1983), 21
- 11) M.R. Malin ほか, Proc. of 2nd Internat. Symposium on Ship Resistance, (1985), 16:1
- 12) D.A. Willoughby ほか, SAE paper 850282 (1985)
- 13) 小林・諸岡, 日本機械学会論文集, B 51-466 (1985), 1962
- 14) 小林・諸岡, 生産研究, 38-1 (1986), 50
- 15) T. Kobayashi ほか, Computational Mechanics '86, (1986), VII-77
- 16) 鬼頭・小林, 生産研究, 38-8 (1986), 406
- 17) 鬼頭・小林, 自動車研究, 8-11 (1986), 443
- 18) S.M. Rawnsley and D.G. Tatchell, SAE paper 860217 (1986)
- 19) 谷口, 東大機械工学研究報告, 21 (1986), 89
- 20) A. Ecer, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
- 21) U. Seiffert and R. Buchheim, 私信による, (1986)
- 22) 小林・村上, 生産研究, 36-12 (1984), 502
- 23) 小林・鬼頭, 自動車技術, 40-4 (1986), 435
- 24) C.W. Hirt and J.L. Cook, J. Compu. Phys., 10 (1972), 324
- 25) S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (1980), Hemisphere Pub. Corp.
- 26) J. Laufer, NACA Rep. 1174 (1954)
- 27) B.E. Launder and D.B. Spalding, Computer Methods in Appl. Mech. and Eng., 3 (1974), 269
- 28) 筒井, 私信による, (1986)