

# 自動車まわりの乱流の数値シミュレーション

## ——第3報 境界条件の影響——

Numerical Prediction of the Turbulent Flow around Road vehicle

——3rd Report Effects of Boundary Conditions——

鬼頭 幸三\*・小林 敏雄\*

Kozo KITO and Toshio KOBAYASHI

### 1. ま え が き

第1報では2次元車体まわりの乱流を $k$ - $\epsilon$ 乱流モデルを用いて数値予測するプログラムを開発し<sup>1)</sup>、第2報では数値予測結果と実験結果とを詳細に対比して本プログラムの性質を考察した<sup>2)</sup>。本報においては種々の境界条件の影響を系統的に調べることによって本プログラムの改善に必要な基礎資料を求めることを目的とする。まず、計算対象領域の入口部における乱流エネルギー $k$ 、乱流エネルギー散逸率 $\epsilon$ 値の設定方法に考察を加える。次に渦動粘性係数 $\nu_t$ 、 $k$ および $\epsilon$ について種々の境界条件の取り扱いを検討する。すなわち無すべりの条件、自由すべりの条件の影響を明らかにするとともに補助式の適用および線形化の良否を考察し、これらの境界条件の取り扱いが主として車体表面の圧力分布におよぼす影響を検討する。また壁面付近の諸乱流量の分布について検討を加える。

### 2. 境 界 条 件

境界条件として計算対象領域の入口部では一定値を、同出口部では一様流出の条件、同上面部では自由すべりの条件を課し、一方車体まわりおよび地面盤では固定壁の条件を設定する。本報においては主として計算対象領域入口部における $k$ 、 $\epsilon$ 値の設定方法および固定壁における $\nu_t$ 、 $k$ 、 $\epsilon$ の境界条件の取り扱いを考察の対象とする。すなわち、

(a)入口部における $k$ 、 $\epsilon$ 値( $k_{in}$ 、 $\epsilon_{in}$ )には Laufer の実測値<sup>3)</sup>を標準値( $k_{in}=3.2 \times 10^{-3}$ 、 $\epsilon_{in}=7.4 \times 10^{-4}$ )に選び、それぞれの10倍値および0.1倍値を設定する(表1のケース a1~a3)。

(b)固定壁における $\nu_t$ の境界条件には無すべりおよび自由すべりの条件を選び、さらに壁面近傍領域における $\nu_t$ の線形化を考察する(表1のケース b1~b3)。ここに、 $\nu_t$ の線形化とは次の意味をもつ：高レイノルズ数域を対象とした通常の乱流モデルから計算される $\nu_t$ を壁面近傍の低レイノルズ数域にそのまま適用することは適切ではなく、低レイノルズ数を考慮したモデルが必要と

なる。しかし、この場合モデルがより複雑となるため、便宜上壁面に隣接するメッシュにおける $\nu_t$ と同メッシュに外接するメッシュにおける $\nu_t'$ とが線形の関係をもつものと仮定し、壁面上で $\nu_t$ 零の条件下で $\nu_t$ を $\nu_t'$ から直接求める。

(c)固定壁における $k$ 、 $\epsilon$ の境界条件にはそれぞれ無すべりおよび自由すべりの条件を選び、さらに補助式適用の良否を考察する(表1のケース c1~c8)。補助式の適用は前述の $\nu_t$ の線形化と同様の意味をもつ。混合長理論から導出される $k$ 、 $\epsilon$ に関する補助式は次式で表される。

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\chi d)$$

$$k = C_\mu^{-1/2} \chi^2 d^2 (\partial U / \partial d)^2$$

ここに、 $C_\mu$ ：数値定数、 $\chi$ ：カルマン定数、 $d$ ：壁からの距離、 $\partial U / \partial d$ の算出には便宜上1/7乗則を適用する。

使用する基礎方程式、計算手法、計算対象、主要変数の定義などは第1報と同様である。なお、メッシュ分割として第1報のケース2(141×69、不等分割メッシュ)

表1 境界条件

ケース	$U, V$	$k$	$\epsilon$	$\nu_t$	$k_{in}, \epsilon_{in}$
a1		自由すべり	補助式適用	線形化	Laufer 実験値
a2					同10倍値
a3					同0.1倍値
b1	壁面に平行方向の速度: 1/7乗則, 同垂直方向の速度: 零	自由すべり	補助式適用	線形化	Laufer 実験値
b2				無すべり	
b3				自由すべり	
c1		無すべり	無すべり	線形化	Laufer 実験値
c2		自由すべり	自由すべり		
c3		無すべり	自由すべり		
c4		自由すべり	無すべり		
c5		無すべり	補助式適用		
c6		自由すべり			
c7		補助式適用			
c8		補助式適用	無すべり		

\*東京大学生産技術研究所 第2部

を、数値定数としては Launder らの推奨値<sup>4)</sup>( $C_\mu=0.09$ ,  $C_1=1.44$ ,  $C_2=0.1728$ ,  $\sigma_1=1.0$ ,  $\sigma_2=1.3$ )を用い、レイノルズ数  $Re=2.2 \times 10^6$  (代表長さ : 車高), 収束計算に用いる SMAC 法における時間ステップの刻みとして 1/100, 連続式を満たす許容誤差として 1/100 を選んでいることを付記しておく。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 入口部における $k, \epsilon$ 値の影響

図 1 に、2次元車体上表面の圧力分布におよぼす入口部における  $k, \epsilon$  値 ( $k_{in}, \epsilon_{in}$ ) の影響を示す (ケース a1 ~ a3)。ここに、 $C_p=2(P-P_\infty)$ ,  $P_\infty$  = 一様流中の無次元圧力。図から、 $k_{in}, \epsilon_{in}$  として Laufer の実測値の 10 倍値あるいは 0.1 倍値を選んでも、上表面の圧力分布にはあ

まり大きな差異が生じないことがわかる。

#### 3.2 $\nu_t$ の境界条件の影響

図 2 に、2次元車体表面の圧力分布におよぼす  $\nu_t$  の無すべり条件, 自由すべり条件および線形化の影響を示す (ケース b1 ~ b3)。図から、上表面の圧力分布についてはあまり大きな差異が生じないが、一方下面の圧力分布は境界条件の影響を受けやすいことがわかる。下面の圧力分布は車体床下部と地面盤間のメッシュ数に強く依存するものと予想される。今後メッシュ数を増大させることによって図に示される下面圧力分布の傾向を確認することが必要であると思われる。表 2 に抗力係数  $C_D$  および揚力係数  $C_L$  を示す。ここに、 $C_D$  および  $C_L$  はそれぞれ車体の前後方向および上下方向に働く圧力差を前面投影

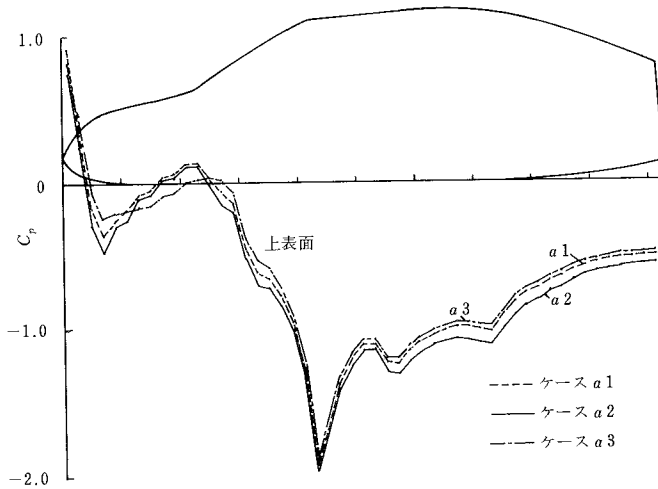


図 1 車体表面の圧力分布におよぼす  $k_{in}, \epsilon_{in}$  の影響

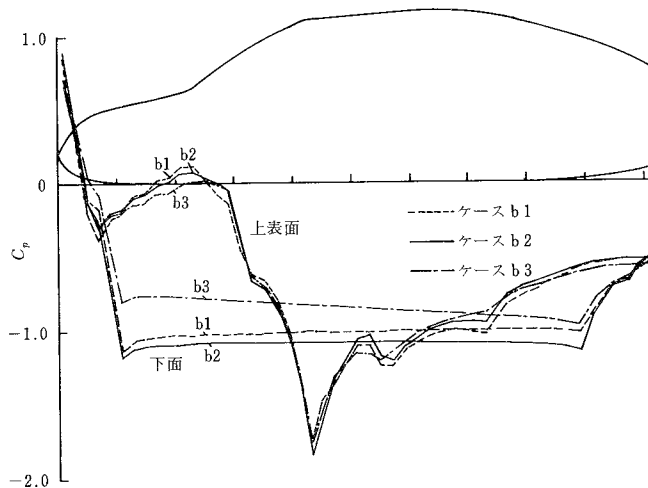


図 2 車体表面の圧力分布におよぼす  $\nu_t$  の境界条件の影響

研 究 速 報

表2  $C_D$  および  $C_L$  (ケース b1~b3)

ケース	$C_D$	$C_L$
b1	0.417	-0.808
b2	0.427	-1.13
b3	0.475	-0.363

表3  $C_D$  および  $C_L$  (ケース c2, c4~c8)

ケース	$C_D$	$C_L$
c2	0.555	-0.963
c4	0.484	-0.999
c5	0.421	-0.811
c6	0.421	-0.811
c7	0.440	-0.645
c8	0.476	-0.272

面積と流入速度の動圧との積で無次元化したものである。したがって、 $C_D$ ,  $C_L$  の算出に際して壁面摩擦は無視している。下面の圧力分布の影響を直接受ける  $C_L$  が当然のことながら境界条件によって大きく変化していることがわかる。

3.3  $k$ ,  $\epsilon$  の境界条件の影響

本計算範囲において  $k$ ,  $\epsilon$  の境界条件について得られた結果は次のとおりである。

(i)  $\epsilon$  の補助式を用いない場合には  $\epsilon$  の境界条件にかかわらず  $k$  の境界条件が重要な役割を果たす。すなわち、 $k$  が無すべりの条件の場合 (ケース c1, c3) 解は発散し、自由すべりの条件の場合 (ケース c2, c4) 計算が収束する。

(ii)  $\epsilon$  の補助式を用いる場合 (ケース c5~c8) には  $k$  の補助式を用いる場合も含め  $k$  の境界条件にかかわらず計算が収束する。

上記の結果 (i) における自由すべりの条件は壁面近傍において  $k$  一定とみなす実験的事実に対応しうるものであり、また結果 (ii) については補助式の導出に際してこの実験的事実が用いられていることなど  $k$  の条件が組み入れられていることと強い関連があると思われる。

図3に、収束解が得られる場合 (ケース c2, c4~c8) について車体の上表面および下面の圧力分布を示す。図で

は、2次元模型による計測値 (縮尺 1 : 17.5,  $Re = 1.1 \times 10^5$ , 第2報参照) を併記してある。図から、上表面圧力分布については  $\epsilon$  の補助式を用いる場合 (ケース c5~c8) には  $C_p$  分布の差異が比較的少ないこと、補助式を用いる場合には補助式を用いない場合 (ケース c2, c4) と比べて予測値が実測値により近づくことがわかる。すなわち、 $\epsilon$  の補助式は  $k$  の境界条件に左右されないほどの強い影響を上表面  $C_p$  分布に与え、予測の改善をもたらす。下面の圧力分布については  $\epsilon$  補助式を用いる場合計算ケース間において比較的大きな差異が生じている (車体床下部と地面盤間のメッシュ数が下面圧力分布におよぼす影響については3.2節の場合と同様検討課題である)。表3に  $C_D$  および  $C_L$  を示す。なお、2次元模型による実測の  $C_D$  および  $C_L$  はそれぞれ 0.20 および -0.56 である。表から、境界条件を適切に選定すれば  $C_D$  の場合と比べて  $C_L$  は実測値を再現しやすい傾向にある。また、ケース c8 は  $C_L$  を過小評価する傾向が認められる。図4および表3に示される計算結果は定量的にみて決して十分なものではない。特に、車体後部上表面圧力分布については body-fitted-coordinates による車体形

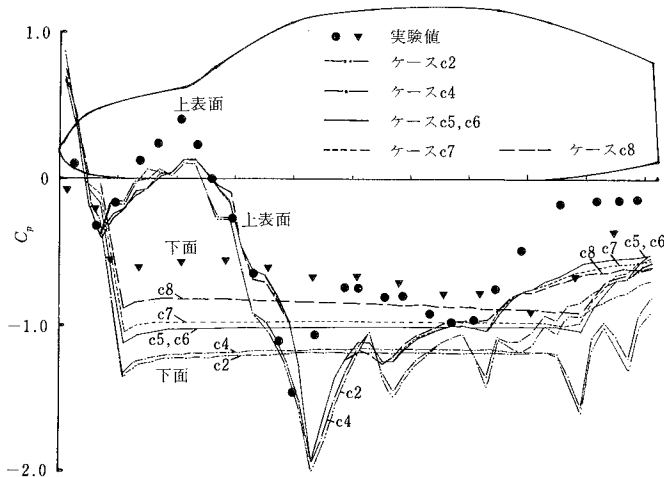


図3 車体表面の圧力分布におよぼす  $k$ ,  $\epsilon$  の境界条件の影響

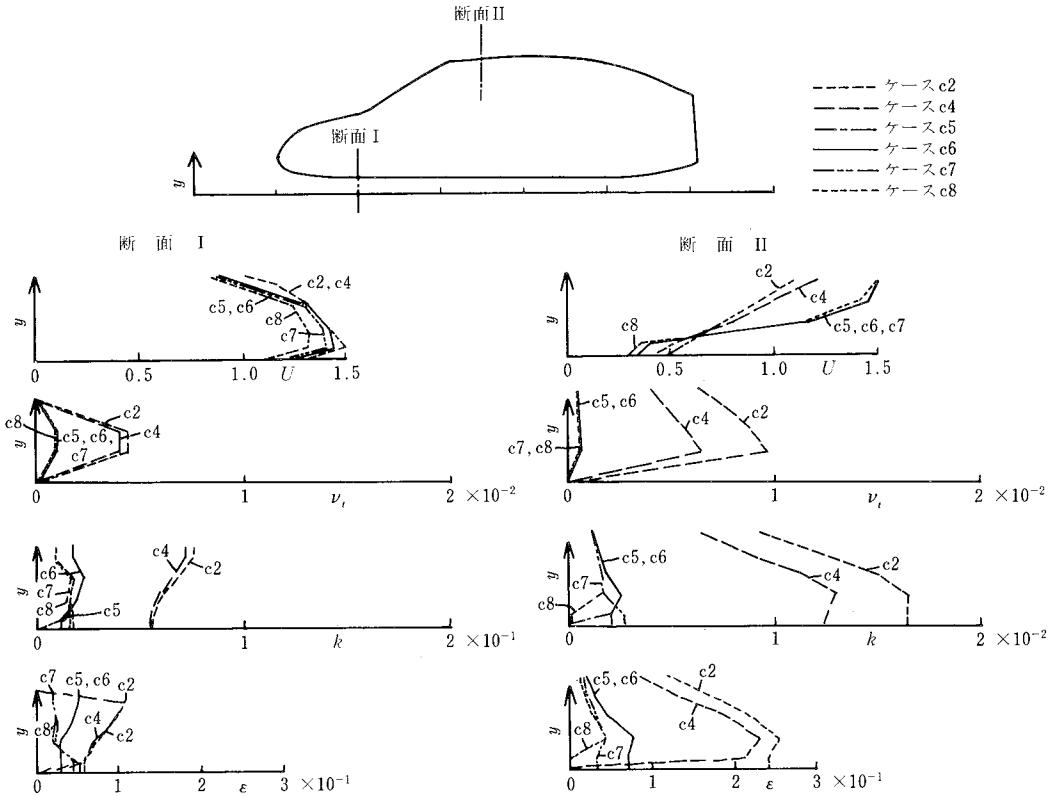


図4 車体下面および車体上表面における  $\nu_t, k, \epsilon$  の分布

状のより正確な表現、はく離域に適した乱流モデルなどの導入によって一層改善することが必要である。

図4に、車体下面(車体前端部から約0.2車長の距離における断面:断面I)および車体上表面(車体前端部から約0.5車長の距離における断面:断面II)における  $\nu_t, k, \epsilon$  の分布を示す。図には流れ方向の平均速度  $U$  の分布を併記してある。図から、断面I, IIの場合ともに  $k, \epsilon$  の分布についてケースc2とc4, ケースc5とc6, ケースc7とc8がそれぞれ壁面近傍を除き類似した傾向を示すことがわかる。これらの傾向は定性的には図3に示される傾向と一致している。また、 $\nu_t$  の分布については  $\epsilon$  の補助式を用いる計算ケース間では差異が少ない。

4. あとがき

本報では2次元車体まわりの流れを対象として種々の境界条件の影響を調べて次の結論を得た。

- (1) 計算領域入口部における  $k, \epsilon$  値について: 車体上表面の圧力分布におよぼす影響は比較的小さい。
- (2) 固定壁における  $\nu_t$  の境界条件について: (i) 車体上表面の圧力分布におよぼす無すべり/自由すべりの条件および線形化の影響は比較的小さい。(ii) 車体下面

の圧力分布におよぼすこれらの影響は大きい。

- (3) 固定壁における  $k, \epsilon$  の境界条件について: (i)  $\epsilon$  の補助式を用いない場合収束解を得るためには  $k$  が自由すべりの条件をもつことが必要である。(ii)  $\epsilon$  の補助式を用いる場合には  $k$  の境界条件にかかわらず収束解が得られる。(iii)  $k, \epsilon$  の補助式の適用によって予測の改善もたらされる。(iv) 車体下面の圧力分布におよぼす  $k, \epsilon$  の境界条件の影響は車体上表面の圧力分布の場合に比べて比較的大きい。

本研究に対して有益なご討論をいただいた本研究所NST研究グループの各位に対して心から謝意を表す。また、本研究の一部は本研究所選定研究費によること、計算は東京大学大型計算機センターHITAC M280Hシステムを用いて行ったことを付記する。

(1986年5月24日受理)

参考文献

- 1) 小林・諸岡, 生産研究, 36-12 (1984), 520.
- 2) 小林・諸岡, 生産研究, 38-1 (1986), 50.
- 3) J.Laufer, NACA Rep. 1174 (1954).
- 4) B.E.Launder and D.B.Spalding, Computer Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3 (1974), 269.