

自動車まわりの乱流の数値シミュレーション

——第2報 実験との対比——

Numerical Prediction of the Turbulent Flow around Road Vehicles

—2nd Report Comparison with Experiment—

小林 敏雄*・諸岡 秀行*

Toshio KOBAYASHI and Hideyuki MOROOKA

1. はじめに

前報では二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、静圧分布の計算結果が西独 VW 社の相似形状をもつ二次元車体モデルによる車体上部表面圧力の測定結果と定性的にみてもよく一致することを示した¹⁾。本報においては数値予測結果と実験結果を詳しく対比し、本プログラムの性質を考察する。まず、流れ場を蛍光ミニタフト法によって可視化し、速度ベクトルの方向の比較を試み、次に車体全表面の静圧分布、車体後流の速度分布、乱れ分布の定量的比較を行う。更に予測結果に及ぼす数値定数の影響について考察を加える。

2. 速度ベクトルの方向

蛍光ミニタフト法は Crowder らによって開発されたもので、蛍光染料によって染色された微細な繊維素をタフトとして利用し、紫外線光源によってタフトから蛍光を放射させて微細なタフトの運動を鮮明に観察しようとする方法である²⁾。タフトの質量が軽いため流れに対する追従性が極めてよいこと、タフトが微細なため流れを乱すことが少ないという特徴をもつ³⁾。ここではこの方法を用いてタフトグリッドを構成して比較的広い空間の断面内速度ベクトルの方向を可視化する。

図1に実験装置の概略を示す。風洞は400mm×400mmの吹口をもつゲッチンゲン型回流風洞で、測定部は900mm(測定部開放)である。風洞測定部に供試模型を水平に設置し、風洞上壁面と地面との間に垂直に太さ約0.148mmのナイロン糸を張り、その糸にミニタフトを取り付ける。供試模型はAudi 200の開発の基礎形状となった二次元モデルと相似形をなし、車長228mm、車高67mm(相似比1:17.5)である。ミニタフトは直径約30 μ m、長さ約15mmのナイロン単繊維である。紫外線ストロボスコープ(2000J、閃光時間5/100秒)2台を模型の斜め上方に設置し、余分な可視光線をしゃ断する

ためのフィルタ(Exciter Filter)を被せ蛍光発光効果を高める。ストロボスコープの発熱に対しては圧搾空気によって空気冷却を行う。撮影方法はいわゆる紫外線撮影法でカメラレンズに紫外線を除去するフィルタが取り付けられる。

図2に可視化写真を示す。実験条件は平均風速:25m/s、レイノルズ数:1.1×10⁵(車高を代表長さとする)、撮影条件はf5.6、1/30秒、ASA1600である。図において車体後方の逆流域の存在が観察される。

図3は前報の細分メッシュ(Case 2, 141×69の不等間隔メッシュ、数値定数・境界条件については表1参照。以下この計算条件を、標準ケースと呼ぶ)の場合の断面

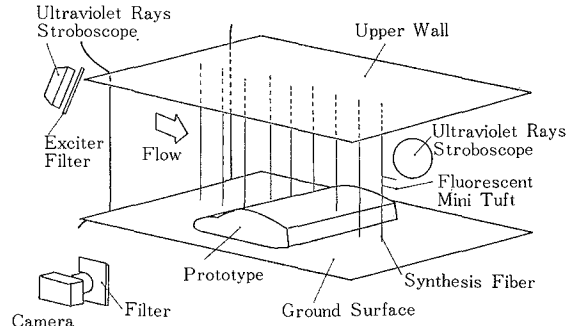


図1 蛍光ミニタフト法による可視化実験

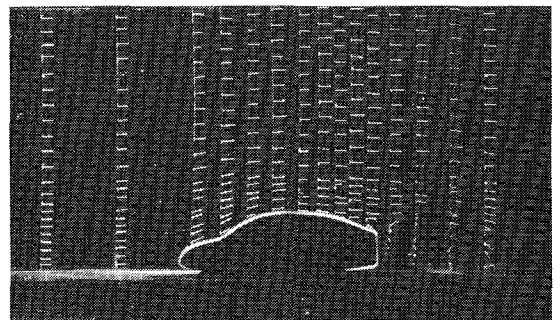


図2 ミニタフトによる流れの方向 ($Re=1.1 \times 10^5$)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

内速度ベクトルの計算結果をタフトと同様のイメージに表示したものである。図は図2の実測結果と定性的によく一致しているものと思われる。特に逆流域の存在、その位置を乱流計算によって評価できるように思われる。

3. 車体まわりの静圧分布

供試模型の全周にわたって40個の静圧孔(内径1mm^φ)を設ける。図4に静圧孔の位置を示す。静圧孔はその前方の静圧孔の影響を避けるためスパン方向に±25mmの間隔で千鳥格子状に分散させている。圧力の基準値としては主流中のピトー静圧値 p_{∞} を選ぶ。測定された表面静圧 p は

$$c_p = 2(p - p_{\infty}) / \rho U^2$$

で整理される。ここに、 ρ : 空気密度、 U : 主流速度。

図5に静圧分布の実測値を示す。実験条件は $U = 27.5$ m/s、レイノルズ数 $= 1.2 \times 10^5$ である。図にはVW社による実車大模型(二次元)の実験値を併記する⁴⁾。本実験

結果はVW社の実験結果と車体後半部で異なる性質を示しているが、これは主として実験レイノルズ数の相違により車体後部での剥離の状態が異なるためと予想される。

図6に数値予測結果を実測値と対比して示す。両者は定性的にはよく一致しているが、車体後半部の上表面および車体背面で数値予測結果は実測値より低い c_p 値をもつ。このことは c_p の分布から圧力抵抗を算出する場合に数値予測値は実測値より高く見積ることになる。たとえば標準ケースでの c_D, c_L の予測値はそれぞれ、0.39, -0.14 であるのに対して実測値は、それぞれ 0.20, -0.16 である。

4. 後流の速度分布

数値予測法をより微視的に評価するために車体後方の流速分布を熱線風速計(DISA 55型)で測定する。プローブはI型で、センサ部は直径5 μ m、有効長さ1mmの

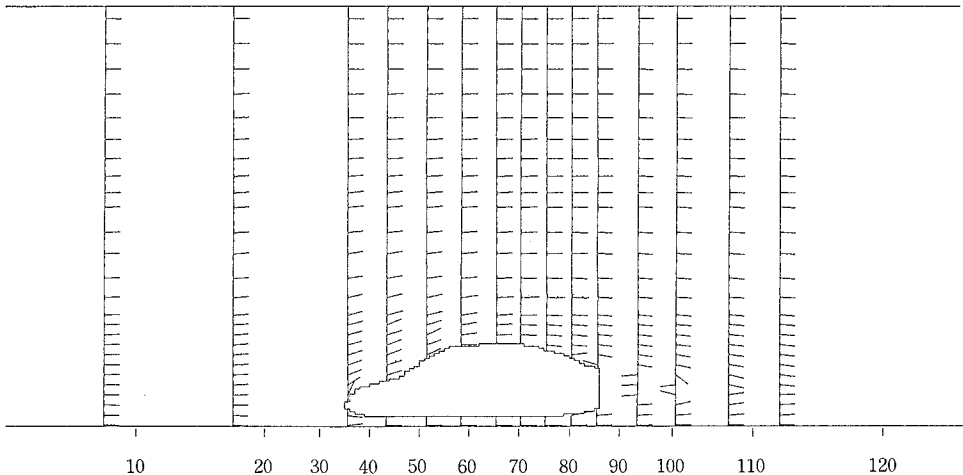


図3 流れの方向の数値予測結果(標準ケース $Re = 2.2 \times 10^6$)

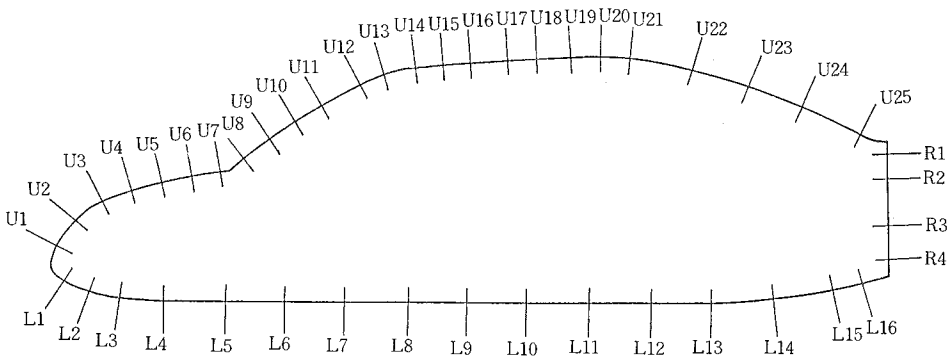


図4 圧力測定孔

研 究 速 報

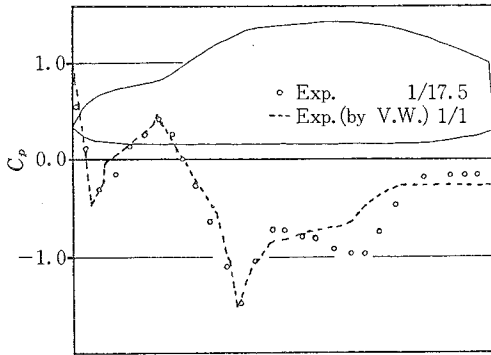


図 5 静圧分布の実測値 ($Re=1.2 \times 10^5$)

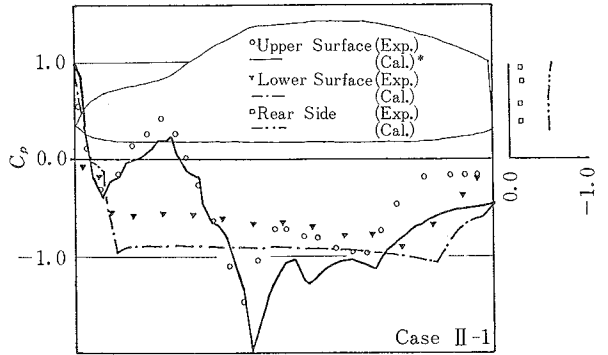


図 6 静圧分布の予測値と実測値 (標準ケース $Re=2.2 \times 10^6$)

表 1 計算条件

ケース	数 値 定 数					境界条件
	c_μ	c_1	c_2	σ_1	σ_2	
標準ケース		1.44	0.1728			前報の
ケース A	0.09	1.2	0.1512	1.0	1.3	ケース II-1
ケース B		1.6	0.1872			と同じ

タングステン線である。センサの出力信号はリニアライザによって線形化され、流速の時間平均値と変動流速の RMS 値が算出される。プローブをセンサ部が車体模型のスパン方向および地面と平行になるように挿入し、模型の中央断面の平均速度 $\sqrt{u^2 + v^2}$ と乱れ強さ $\sqrt{u'^2 + v'^2}$ を測定する⁵⁾。本報における熱線風速計データの平均化時間は後流測定の場合は 3 秒、主流の場合は 0.1 秒である。

図 7 に平均速度および乱れの実測値と数値予測結果とを示す。図において平均速度、乱れともに後流部分を除く範囲で実測値は良い一致を示す。しかし、本報の乱流計算プログラムでは後流部分での定量的予測が不十分なように思われる。

5. 数値定数の影響

前述の車体表面圧力分布における車体後半部および車体背面での不一致と後流域での速度ベクトルの不一致とを考え合わせプログラムの改善が必要となる。本研究では境界条件、計算格子、数値定数、乱れの一様性を主対象としてプログラムの改善を図るものであるが、本報では数値定数の予測結果に及ぼす影響、特に乱流エネルギー散逸率 ϵ に対する輸送方程式中の 2 つの数値定数 c_1, c_2 (前報における式(10)を参照) の影響を考察する。 c_1, c_2 は一般に線形関係をもつため本報でも連動させて変化させることにする。表 1 に計算条件を示す。ケース A は標

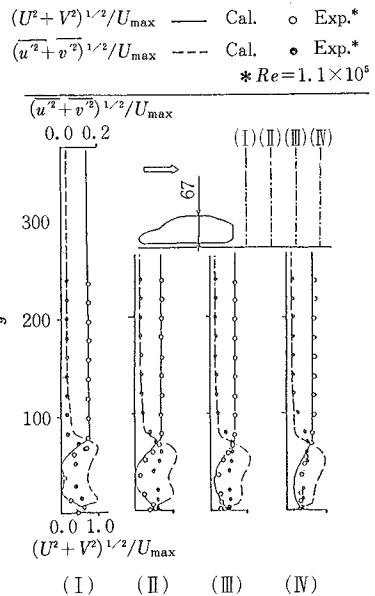


図 7 車体後流の流速・乱れ分布 (標準ケース $Re=2.2 \times 10^6$)

準ケースよりも c_1, c_2 を小さく選定した場合であり、ケース B は逆に大きく選定した場合である。図 8 に後流域の平均速度に及ぼす c_1, c_2 値の影響を、図 9 に乱れに及ぼす c_1, c_2 値の影響を示す。ケース A の場合、図 8 に示すように平均速度の分布は実測値に極めて良好に一致する。しかしながら乱れの分布はケース A もケース B も標準ケースより改善するようにはみえない。したがって単純に数値定数を変更させただけではこの種の乱流場の予測が大幅に改善されることは望めないように思われる。したがって、渦動粘度 ν_T の非等方性を何らかの形で考慮する必要がある。

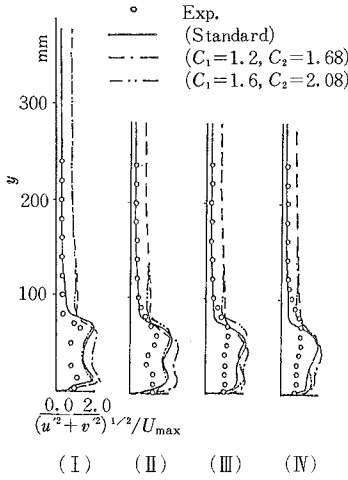


図 8 平均速度分布に及ぼす数値定数の影響

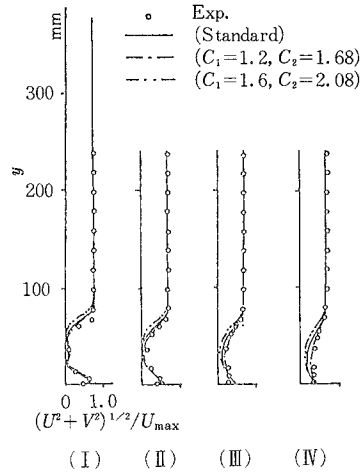


図 9 乱れ分布に及ぼす数値定数の影響

6. ま と め

二次元車体モデルまわりの流れに関して $k-\epsilon$ モデルによる数値予測結果と風洞実験結果との対比を試み、次の結論を得た。

- (1) 車体周囲の静圧分布において数値予測結果と実験結果とは定性的に良い一致をみた。しかし、車体後部のルーフ面上および車体背面では両者の差は比較的顕著に存在する。
- (2) 車体背後の後流部の平均速度、乱れ分布に関して数値予測結果は必ずしも実験結果と合致しない。
- (3) 乱流エネルギー散逸の輸送方程式中の数値定数を変更させることにより後流部の平均速度分布は改善されるが乱れの分布は改善されない。

なお、本研究の数値計算の部分は、本所選定研究費によることを付記する。また、二次元車体モデルの作製にあたり、試作工場古屋七郎助手より、蛍光ミニタフト法の実施にあたって航空宇宙技術研究所石田洋治室長より助言を得た。記して感謝する。

(1985年10月30日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林・諸岡, 生産研究, 36-12 (1984), 520
- 2) Crouder, J. P., Proc. Int. Symp. on Flow Visualization 2 (1980), 612
- 3) 佐賀・小林・湊, 流れの可視化 5-Suppl (1985), 87
- 4) Schmidt, W.・Buchheim, R., Proc. Int. Symp. on Vehicle Aerodynamics (1982)
- 5) 狩野・小林, 機械学会論文集 51-464 B 編 (1985), 1166

