

自動車まわりの流れの数値シミュレーション

—LESと $k-\epsilon$ モデルによる解の比較—

Numerical Simulation on the Flow around a Road Vehicle

—A Comparison between Numerical Results of LES and $k-\epsilon$ Model—

小林 敏雄*・鬼頭 幸三*・森 西洋平*

Toshio KOBAYASHI, Kozo KITO and Youhei MORINISHI

1. ま え が き

自動車まわり流れの数値シミュレーションの論文が初めて出現した1982年の「車両設計におよぼす空気力学の影響に関する国際会議」以来、数値解法の比較、境界条件の検討等多くの報告がなされ、自動車まわり流れの数値シミュレーションに関する種々の問題点が徐々に解明されつつあるものの、乱流の取り扱いについては主として $k-\epsilon$ モデルに限られており、より高度な取り扱いであるLarge-Eddy-Simulation (LES) による計算例はほとんど公表されていない。またここ数年の傾向として流れに関する汎用ソフトウェアの流通と利用が急速に増加している。しかしながら数値シミュレーションに関する最適な選択についてはいまだ未解決な点が多く、一層の検討と計算例の蓄積が望まれている。

著者らは従来主として $k-\epsilon$ モデルを用いた解法について数値解法の差異の影響、境界条件の影響等を明らかにしてきた^{1)~3)}。本報では2次元車体まわり流れを対象に乱流の取り扱いとしてLESを試みるとともに、 $k-\epsilon$ モデルによる結果と比較検討する。すなわち車体表面における圧力分布、車体背後の後流における速度分布および k 分布におよぼす両者の影響を明らかにする。

2. 計算方法および計算条件

本報で用いる計算コードは乱流の取り扱いとして $k-\epsilon$ モデルを用いたコードAおよびLESを用いたコードBの2種である。計算対象として2次元ファーストバック型車体まわり流れを選び⁴⁾、両コードともに直交直線系による同一メッシュ分割を用いる。

コードAでは基礎方程式として時間平均化操作を施したナビエ・ストークス方程式(レイノルズ方程式)を用い、これを差分方程式に変換してHSMAC法によって解く¹⁾。空間に対して中心差分を、時間に対してEuler-Explicit型差分スキームを適用する。なお k 、 ϵ の輸送方

程式の対流項については風上差分を適用する。また車体表面および地面盤における境界条件には壁法則を用いる(表1)。

コードBではSGSモデルとしてSmagorinskyモデルを、減衰関数としてVan Driest型を用いる。空間離散化手法としてSchumannによる体積平均LESの概念にもとづいたコントロール・ボリューム法を採用する⁵⁾。基礎方程式を差分方程式に変換してコードAの場合と同様にHSMAC法によって解く。空間に対して中心差分を、時間に対してAdams-Bashforth型差分スキームを適用する。また車体表面および地面盤における境界条件として2層モデルを組み込んだ新しい概念による境界条件を採用していることが特徴である⁶⁾(表1)。なおこの境界条件の設定方法においては壁座標 y^+ は y^+ に関する非線形方程式を解くことによって求めている。

その他の境界条件、計算レイノルズ数、時間刻み、収束条件、数値定数等については表1に示すとおりである。なお計算はコードAでは解がほぼ定常とみなされる時間 T (ここでは $T \approx 13$)で、コードBでは初期条件の影響がほぼ消滅する T (ここでは $T \approx 10$)で打ち切っている。また初期値についてはコードAでは入口部における境界条件値を、コードBでは入口部における境界条件値に乱れ(乱数)を加算した値を用いる。

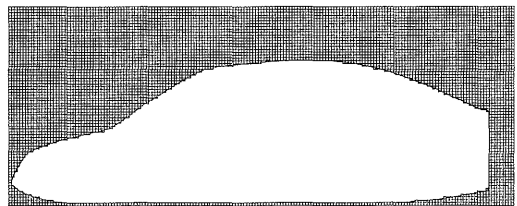


図1 メッシュ分割

*東京大学生産技術研究所 第2部

表 1 計算条件

計算因子	コード A	コード B
乱流の取り扱い	k - ϵ モデル	LES
車体形状	2次元ファーストバック型 (図 1)	←
形状近似	階段状近似 (図 1)	←
計算領域	$l_1 \doteq 2.0l, l_2 \doteq 3.3l$ $h_1 \doteq 4.5h, h_2 \doteq 0.14h$	←
メッシュ分割	直交直線系 ⁽¹⁾ 329×150 (車体: 170×50)	← 329×150×12 (車体: 170×50×12)
アルゴリズム	HSMAC	←
変数の定義	スタガード型	←
スキーム (時間) (空間)	Euler-Explicit型 中心/風上差分	Adams-Bashforth型 中心差分 ⁽³⁾
境界条件 (入口部) (出口部) (上面部) (車体表面・地面盤)	$U=1.0, V=0$ $k=3.2 \times 10^{-3},$ $\epsilon=7.1 \times 10^{-4}$ Zero-gradient free-slip, $V=0$ 壁法則 ⁽²⁾ $u^+ = (1/\kappa) \ln(Ey^+)$ $y^+ = (c_\mu^{1/2} k)^{1/2} (y/\nu)$ $\tau_\omega/\rho = (c_\mu^{1/2} k)^{1/2} (u/u^+)$ $\epsilon = c_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\kappa y)$ k : free-slip	$U=1.0, V=W=0$ ← U : free-slip $\langle V \rangle = 0$ ⁽⁴⁾ 壁法則 (2層モデル) $u^+ = y^+ \quad (y^+ < y_c^+)$ $= (1/\kappa) \ln(Ey^+) \quad (y^+ \geq y_c^+)$ $\tau_\omega/\rho = U_\tau (u/u^+)$
レイノルズ数 Re	3.0×10^6	←
時刻	0.25/1000	1/1000
収束条件	1/100	←
数値定数	$c_\mu=0.09, c_1=1.44, c_2=1.92, \sigma_1=1.0,$ $\sigma_2=1.3, \kappa=0.4, E=9.025$	$C_s=0.1, \kappa=0.4, E=9.025$
(記号) l_1 : 入口距離, l_2 : 出口距離, l : 車長, h_1 : 上面部クリアランス, h_2 : 床下クリアランス, h : 車高 τ_ω : 壁における剪断応力, $Re = U\ell/\nu$ 注1) 車体近傍は等間隔で車体から離れたところは不等間隔のメッシュ。 注2) k 方程式における生成項および ϵ 項: それぞれ $(\tau_\omega/\rho)(u/y), c_\mu k^2(\rho/\tau_\omega)(u/y)$ 。 注3) 25time-stepごとにQUICKスキームを適用。 注4) $\langle \rangle$: 面内における平均値, span wise方向: cyclic.		

3. 計算結果および考察

図 2 に車体の上下表面における圧力分布 C_p におよぼす 2 種の計算コードの影響を示す。図には参考のため計算条件と同一のレイノルズ数における実験値 (1/2.5 の模型を使用) をあわせて示してある⁴⁾。また LES による結果は 1000time-step 間における平均値を用いている。図から上下表面の場合ともに、コード A (k - ϵ モデル) による結果とコード B (LES) によるそれとは車体後部を除き比較的よく一致していることがわかる。計算値と実験値

との比較については定性的には一致しているものの、ボンネットと前面ガラスとの境界部、ルーフ前縁部、車体後部等において差異が認められる。これは乱流の取り扱いの影響等のほかに形状の差異 (計算上では車体形状を階段状に近似している) の影響のためと思われる。

図 3 および図 4 にそれぞれ後流における速度分布および k 分布を示す。図では車体後端、車体後端から $0.25l, 0.50l$ における計算値を示してある。ここに l : 車長。図から速度分布、 k 分布ともに地面盤付近を除き、LES による結果と k - ϵ モデルによるそれとは比較的よく一致して

研究速報

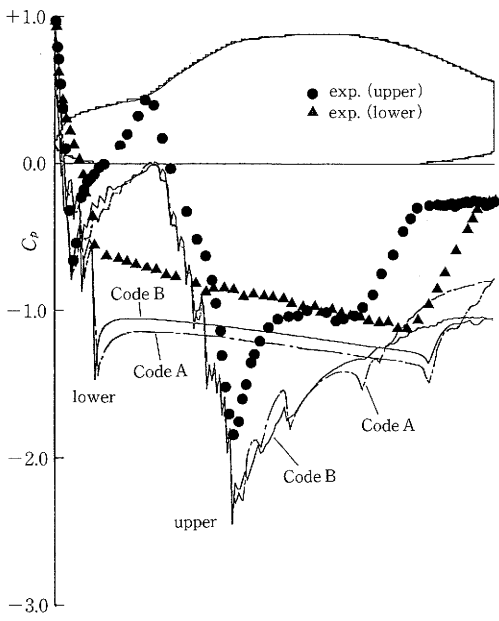


図2 車体の上下表面における圧力分布

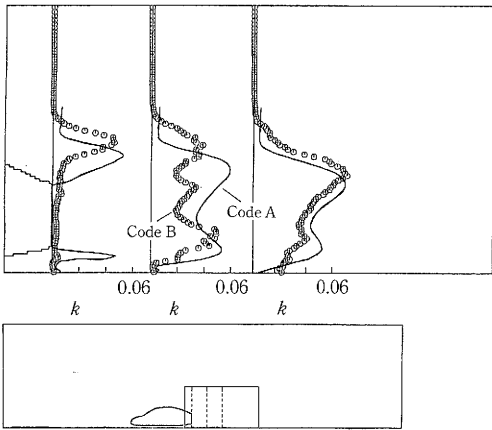


図4 後流におけるk分布

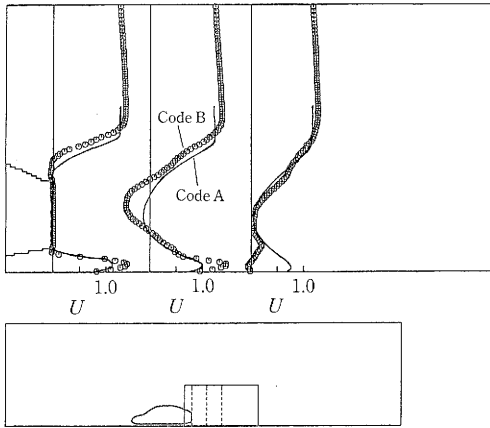


図3 後流における速度分布

$U=1.0 \rightarrow$

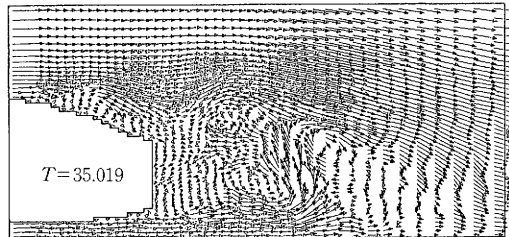
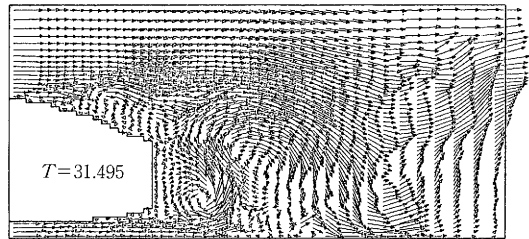
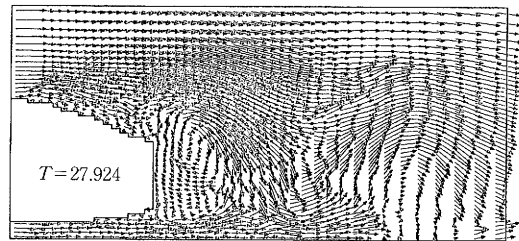


図5 LESによる速度ベクトルの時間変化

いることがわかる。本計算対象のような車体後部からの離れを伴う流れにおいても、乱流の取り扱いが異なる2種のコードによって計算された k のレベルがほぼ同等であること、さらにLESにおいても k - ϵ モデルでみられるような k のピーク値が再現されていることは興味あることと思われる。しかしながら本報におけるLES計算では計算の都合上、統計量を得るための平均化時間が十分ではないこと、またメッシュ分割が十分に密ではないこと等課題を残しており、さらに検討が必要である。なお

研究速報

地面盤付近の車体後端部ではLESは k のピーク値を示していない。これは、車体後部上表面でははく離を伴う大きな渦が発生しており、本計算に用いた比較的粗なメッシュがこれを捕らえているのに対し、車体後部下面では平行平板間流れにみられる壁面乱流構造による小さな渦が乱流エネルギー生成に対して支配的であり、本計算ではこれを捕らえるほど密なメッシュになっていないことによると思われる。

図5にLESによる速度ベクトルの時間的变化を示す。図では便宜上 $141 \times 69 \times 12$ (車体: $51 \times 29 \times 12$) の粗なメッシュ分割を用いている。図から車体背後の後流は渦の生成・消滅過程に似た現象を再現していることがわかる。LESはこのような非定常流を再現しうる手法として期待されるものと思われる。またこのように時間に依存する後流が車両の空力特性にどのような影響を与えるかについては今後の課題であろう。

4. あ と が き

本報では2次元車体まわり流れを対象にしてLESによる計算結果と k - ϵ モデルによるそれとを比較検討した。その結果本計算範囲では次のことがわかった:

(1) 車体の上下表面における圧力分布については、それぞれLESによる結果と k - ϵ モデルによるそれとは車体後部を除き比較的よく一致する。

(2) 車体背後の後流の速度分布、 k 分布についても、それぞれLESによる結果と k - ϵ モデルによるそれとは地面

盤付近を除き比較的よく一致する。

しかしながら本報におけるLES計算では計算の都合上、統計量を得るための平均化時間が十分でないこと等の課題を残しており、一層の検討が必要である。さらに

(3) LESは非定常流れを再現しうる手法として期待できる。

今後LESについては上記平均化時間の課題のほかに適切なメッシュ分割による計算、境界適合座標系(BFC)による表現等、より精度の高い計算を行う必要がある。また k - ϵ モデルによる計算についてはBFCによる表現はもちろんのこと、非等方性モデルの導入等が必要であると思われる。

終わりに本研究に対して有益なご討論をいただいた本所NST研究グループの各位に対して心から謝意を表す。また図2に用いた実験値は西独VWのR. Buchheim博士のご提供によるものである。記して謝意を表す。

(1988年10月31日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林・諸岡, 日本機械学会論文集, B51-466 (1985), 1962
- 2) K. Kitoh, T. Kobayashi ほか, Computational Mechanics '86, (1986), VII-77
- 3) K. Kitoh, T. Kobayashi ほか, Proc. 18th ISATA, Paper 88142, (1988)
- 4) R. Buchheim ほか, VDI Berichte, 537 (1984), 261
- 5) 森西・小林, 生産研究, 41-1, 72 (1989)