

自動車の車体まわり流れに関する CFD の応用の現状

—乱流の取り扱いに関する比較検討—

Current Application of CFD on the Flow Around the Vehicle Body

—Evaluation of Turbulence Modelling—

小林 敏 雄*・鬼 頭 幸 三*・谷 口 伸 行*

Toshio KOBAYASHI, Kozo KITOH and Nobuyuki TANIGUCHI

本稿では、自動車の車体まわり流れに関する CFD の応用の現状を乱流の取り扱いと数値計算法に関する計算諸因子の面から分析するとともに、特に乱流の取り扱いに注目してバック・ステップ流れ場における検証をも含め、数種の取り扱いについて比較検討している。

1. ま え が き

現在、自動車の車体まわり流れに関する数値流体力学 (CFD) は、自動車技術全般にわたる計算機援用工学 (CAE) の積極利用の波の中で 5, 6 年前には考えられなかった速度で進展し、空力設計の中に取り入れられつつある。車体まわり流れへの適用から始まった CFD もエンジン・ルーム内流れ、車室内流れ・空調システム等とその応用範囲を拡大し、講演会場に写し出される CFD の華麗なアニメーションはテクノロジーを越えたアートの感じさを聴衆に与えている。

著者らは、すでに自動車の車体まわり流れに関する CFD について概観し、乱流の取り扱い (表 1)、数値計算法に関する計算諸因子 (表 2) 等の影響を理論面・実用面から系統的に解明することが必要であることを指摘した^{a)~c)}。本稿では、その後の公表論文の動向をも加えてこの分野の現状を概説するとともに、乱流の取り扱いの問題点とそれらがもつ限界をより明確に議論するため、バック・ステップ流れ場を対象にして標準 $k-\varepsilon$ モデル、非等方 $k-\varepsilon$ モデル、代数応力方程式モデル、LES、3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法の 5 種の取り扱いについて比較検討を行っている。

2. 自動車の車体まわり流れに関する

CFD の応用の現状

表 2 に、過去約 5 年間に公表された車体外部流れとエンジン・ルーム内・車室内流れに関する論文について乱流の取り扱いと数値解法、使用座標系、アルゴリズム、壁面境界条件、メッシュ数等との関係を示す。なお乱流の取り扱いについては表 1 にしたがって、非粘性流れ、レイノルズ方程式による解法、LES、直接解法、3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法等に分類する (乱

流の取り扱いの詳細については文献^{a)}参照)。表中の番号は引用文献の番号である。

表から、乱流の扱いはレイノルズ方程式にもとづく $k-\varepsilon$ モデルと 3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法が多いことがわかる。後者については論文発表者が比較的限定されていることを考慮すれば、現状では $k-\varepsilon$ モデルが主流であるといえよう。その他の取り扱いについては非粘性流れ、LES²⁵⁾に関する発表は少なく、もちろん直接解法はみあたらない。ここでは主として $k-\varepsilon$ モデルと 3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法による応用の現状を述べることにする。

— $k-\varepsilon$ モデル—

レイノルズ方程式による解法、いわゆる時間平均形乱流モデルの中では現在のところ、 $k-\varepsilon$ モデルが依然として主流である。応力方程式モデルについては代数応力方程式モデル (ASM) 記述による市販コードが若干発表

表 1 基礎方程式と乱流の取り扱い

Basic Eq.	Assumptions	Derived Eq.	CFD Methods
Navier-Stokes Eq.	Non-viscous Flow	Euler Eq.	-Euler Method
	Irrotational Flow	Laplace Eq.	-Panel Method
			-Vortex-Lattice Method
			-Boundary Layer Method
	Time Averaging	Reynolds Eq.	- $k-\varepsilon$ model -Low Reynolds No. $k-\varepsilon$ model -Anisotropic $k-\varepsilon$ model -Reynolds Stress model
	Space Averaging		-Large Eddy Simulation
			-Direct Simulation
	Others		-Quasi-Direct Simulation with 3rd Order Upwind Scheme

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

表 2 数値解法等計算諸因子と主要発表論文一覧

計 算 対 象: 車体外形・ エンジンルーム・ 車室内流れ 風速の取り扱い 非粘性流れ	数 値 解 法				座 標 系				非構造 格子	アルゴリズム			境 界 条 件 (壁面)		メッシュサイズ	
	FDM	FVM	FEM	他	直交系	BFC				SIMAC	SIMPLE 系	他	壁法則	他		
						速度表示	反変表示	共変表示								
		6, 13 16-18 20, 22-25 27-29 34, 40, 41 45-47 48, 49		19 26		6 16(2D) 24(2D) 27, 28 33, 34 41, 45 49	16, 18 20 46	17 40, 47	23 (ゼロノイズ 2D)	24 25	6 13(SCRYU) 17(FUENT) 16, 18(FLOW 3D) 22, 24 27, 28 34, 40 41, 45 45-47	20(PISO)	16-18 22-24 40, 46 47, 49	20 (すべりなし) 28, 29 (すべりあり)	43: 50×56×16 16: 136864要素 17: 67×23×39 18: 96×54×30 20: 121×71×47 (Ahmed モデル) 22: 150×65×45 34: 92×45×61 40: (最大) 65×55×30 41: 90×34×47 (半モデル) 45: 2566 ノード, 2405 要素 52: 261×53×37	23: 7000要素 24: 180×90 25: 328×150 27: 34000 28: 57×41×23 45: 96×50×53 46: 80×50×30(半モデル) 49: 140×32×30
	他	30, 31 (0 方程式 モデル)	15 (混合長 モデル)	19 26 50	52				15 (四角形 反一次要素)		15 (FIDAP)					
類似直線解法 (K-K スキーム)	1- 5 7-12 14, 32, 33 35-39 42, 44 48, 51					1- 5 7-12 32, 33 35-39 42, 44 48, 51	14				48, 51 1- 5 7-12 14, 22 33, 35-39 42, 44 48, 51 36 (すべりなし) (MAC)		1- 6 7-12 32, 33 35-39 42, 44 48, 51 36 (すべりなし) (MAC)	1- 6 7-12 32, 33 35-39 42, 44 48, 51 36 (すべりなし) (MAC)	1- 6: (最大) 171×97×78 7-12: (最大) 130×83×85 14: 150×70×75 32: 約500,000 33: 144×53×59 35: 78×59×53 36: 約300,000(半モデル) 37: 117×61×39 38: 139×89×87 39: (最大) 171×99×78 42: 約1,300,000 44: 189×131×80 48: 84×65×62 51: 213×95×88 52: 329×150×12	
LES	25				25(2D)								25 (壁モデル)		25: 329×150×12	
直接解法																
備 考	21(滑流解) 52(small)								21				21		21: 20115ノード, 39412要素 50: (最大) 63×28×42	

されているにもかかわらず、論文発表レベルではほとんどない。また流れ場別 $k-\epsilon$ モデル定数の設定 (ゾーン・モデリング)⁴⁾、低レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデル⁵⁾、非等方 $k-\epsilon$ モデル⁶⁾ 等による取り扱いもほとんどみられない。

数値解法としては有限体積法 (FVM) が主流であり、有限要素法 (FEM) については市販コードが比較的流通しているにもかかわらず、論文レベルでは少なく、しかも混合長理論どまりとなっている。座標系は、従来直交系や境界適合座標系 (BFC) で直交形速度表示、共変形速度表示のものが主流であったが、BFC で反変形速度表示や非構造格子によるものが、若干ではあるが、現れつつある。アルゴリズムについては SIMPLE 系が多い。壁面計算境界条件についてはほとんどが壁法則を用いている。使用メッシュ数は 3 次元計算で最大 40-50 万メッシュである。

図 1 は乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデル、数値解法として FVM を用いたゼネラル・モーターズ (GM) の計算例²⁰⁾ であり、車両に類似した形状 (いわゆる Ahmed 形状) における後部傾斜角と抗力係数 (Cd), 圧力係数 (Cp) との関係である。図から、 ΔC_d (傾斜角零における Cd 値との差異) は、臨界形状付近では実験値と計算値とは一致しないこと、背面垂直部の圧力 C_{p-base} については実験値はある傾斜角においてピーク値をもつが、計算では傾斜角に対して単調増加の傾向をもつことがわかる。これらの結果は $k-\epsilon$ モデルでは、剥離流れの再現が難しいことを示唆している。

図 2 はフォードと市販コード FLUENT/BFC のソフトハウスによる計算例であり、ノッチバック車両の後流の様子¹⁷⁾ を示したものである。数値解法は FVM, 乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを採用している。実験値と計算値との比較については、Cd 値/Ci 値ともに良好である。

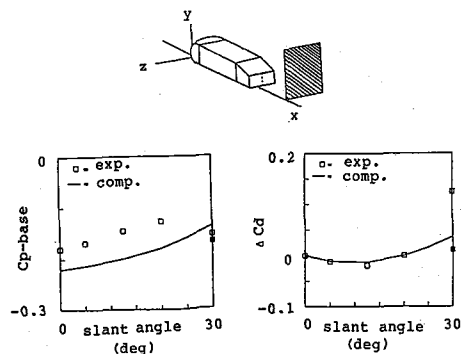


図 1 Ahmed 形状における後部傾斜角と ΔC_d , C_{p-base} との関係 (黒印は臨界傾斜角より大きい傾斜角における実験値; メッシュ数: 121×71×47)

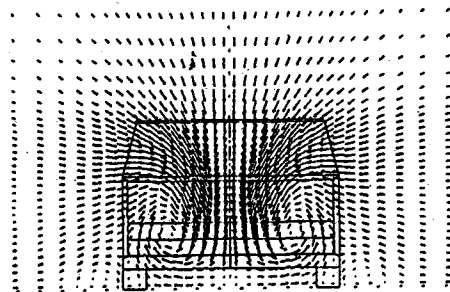


図 2 ノッチバック車両の後流の様子 (メッシュ数: 67×23×29)

すなわち実験 Cd 値 0.38/計算 Cd 値 0.38, 実験 Ci 値 0.48/計算 Ci 値 0.54 である。一方、図 3 はジャガーと市販コード Harwell-Flow3D のソフトハウスによる計算例¹⁸⁾ であり、車体上面部の圧力分布を示したものである。数値解法は FVM, 乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを採用していることは図 2 と同様である。図 3 の圧力分布につ

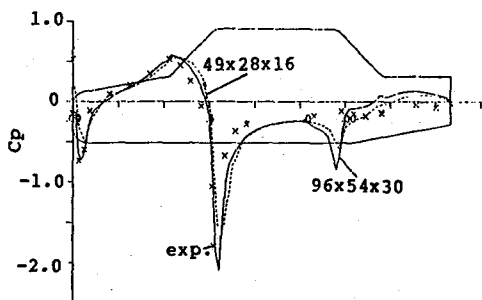


図3 ノッチバック車両の表面圧力分布

いて実験値と計算値とは比較的良好に一致しているように見えるが、 C_d 値で比較すると実験値が0.156に対して、計算値が細メッシュで0.319である。図2と図3では計算対象が同じでないため厳密な比較が困難であるが、同じ数値解法、乱流モデル、さらに同程度のメッシュ数を採用しているにもかかわらず、 C_d の実験値と計算値の比較については大きな差異が現れている。

図4は非構造格子(ヴォロノイ分割)による計算例²³⁾である。数値解法としてFVM、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いており、あわせてBFCによる結果と対比している。非構造格子を用いることによって全域にわたって予測が改善されている。特にBFCによる解では車両前端付近の格子が特異点をもつ領域においてピークがみられるが、ヴォロノイ分割による方法ではこれが改善されている。

—3次精度風上スキームを用いた疑似直接解法—

この解法は、通常の直接解法で必要とされる $Re^{9/4}$ 程度の膨大なメッシュ分割²⁾で計算がなされているわけではないが、乱流モデルを用いずに形式上直接解法によってナビエ・ストークス方程式を解いているため、疑似直接解法と呼ばれているものである。特徴はナビエ・ストークス方程式の対流項に3次精度風上スキーム、いわゆる河村スキーム¹⁾を適用することにある。人工粘性を含まない中心差分と比較して、この種の奇数次精度の対流項風上スキームは計算上の安定をもたらすものの、高次の打ち切り誤差による解の挙動については未だ明らかにされていない。メッシュの大きさより細かい流れの変化を人工拡散によってモデル化する考え方は、精度を必要とする解析においては慎重に取り扱うべきと思われる。

この疑似直接解法はメッシュ依存性が強い特徴をもつ。これは、適切な解を求めるためには実験値等の参照値が常に必要であることを意味している。また乱流解析のための基礎的な流れ場、たとえば二平行平板間流れ、円管・矩形管内流れ、バック・ステップ流れ等において乱流量が実験値と対比・報告されていない。したがって、乱流量が主要な役割を果たす流れ場へのこの手法の適用には一層の検討が必要であろう。

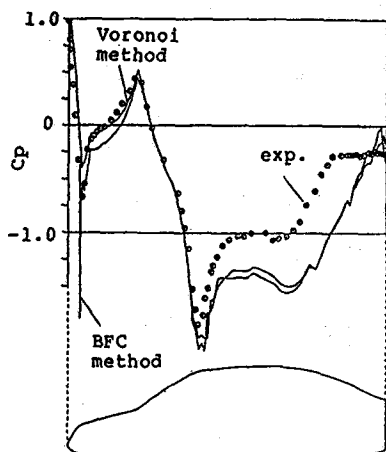
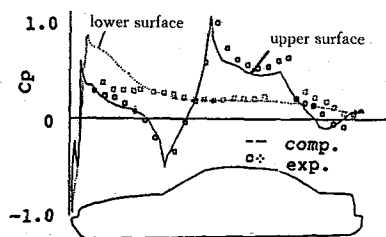


図4 ヴォロノイ分割による計算例

図5 疑似直接法による計算例
(メッシュ数: 171×97×78)

この手法では数値解法として有限差分法 (FDM)、座標系はBFCで直交形速度表示、壁面境界条件は無すべりの条件が用いられることが多い。最近ではBFCで反変形速度表示のものが発表されている。使用メッシュ数は論文に公表された範囲では80-130万メッシュである。

図5は疑似直接法による日産自動車の最近の発表例²⁾である。メッシュ分割としてマルチ・ブロック構造を用いているのが特徴である。図は3ボックス・クーペについてその車体表面圧力分布の時間平均値を示しているが、実験値との比較は良好である。すなわち実験 C_d 値0.214/計算 C_d 値0.232、実験 C_l 値-0.052/計算 C_l 値-0.232となっている。3ボックス・セダンについての別の計算例については実験 C_d 値0.291/計算 C_d 値0.295、実験 C_l 値0.277/計算 C_l 値0.255と発表されている。これらの結果から、3次精度風上スキームの適用の是非に関する議論は別として、本手法は C_d 、 C_l 値の予測、特に C_d 値の予測についてはかなりの精度で実験値を再現しうるようである。

図6は、計算コードNAGAREを用いた疑似直接法によるマツダの計算例³⁾である。手法的には日産自動車のそれと同様である。図では計算対象として車両に類似した形状 (Ahmed 形状) を用いている。 C_d 値等に

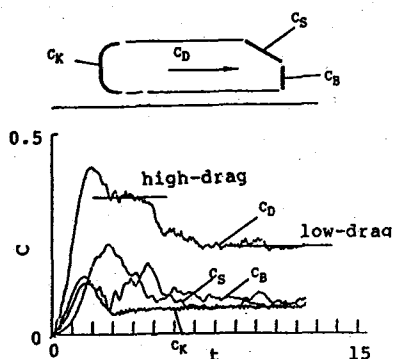


図6 疑似直接解法による高 C_d 値と低 C_d 値の存在
(メッシュ数: $130 \times 83 \times 85$)

関する実験値との比較は日産自動車の場合の結果とほぼ同程度であり、比較的良好である。図は Ahmed の実験で明らかにされた臨界形状における高 C_d 値と低 C_d 値の存在を数値的に再現したとしている。しかし現状では計算上えられた高 C_d 値が初期値の影響も含めて3次精度風上スキームによる計算過程の遷移現象によるものか、物理現象を正しく把握したものかは、さらに検討が必要であろう。

3. 数種の乱流の取り扱いに関する比較検討

前章では自動車の車体まわり流れ場に関する CFD の応用の現状とその問題点について述べた。複雑な形状をもつ車体まわりの流れ場について、乱流の取り扱いに関して定量的比較を行うことはやや困難と考えられるため、ここでは信頼できる実験値が入手でき、剝離、循環等を含む複雑な流れ場の一例としてバック・ステップ流れ場を選び、計算メッシュ、入口流入条件等に関して同一の計算条件下で数種の乱流の取り扱いについて比較検討を行っている。

—検討対象モデル—

検討対象モデルとして次の5種を選んだ。

- ① 標準 $k-\varepsilon$ モデル
- ② 非等方 $k-\varepsilon$ モデル
- ③ 代数応力方程式モデル (ASM)
- ④ LES
- ⑤ 3次精度風上スキームを用いた疑似直接解法

—LESの優位性—

まず、格子平均モデルと呼ばれる Large Eddy Simulation (LES) の計算精度からみた現状での優位性を示し、LES による結果を本章における比較検討のための参照値とすることにする。図7および8にバック・ステップ流れにおける主流方向平均速度 U および乱流エネルギー k に関する LES 計算結果¹⁾を示す。図の計算では、流れ場によって変動する Smagorinsky 定数¹⁾、人

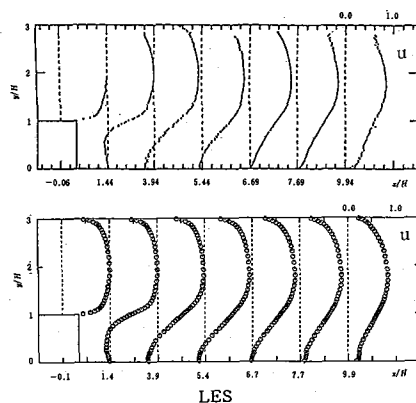


図7 バック・ステップ流れ場における LES 計算結果
(主流方向平均速度, メッシュ数: $230 \times 50 \times 20$)

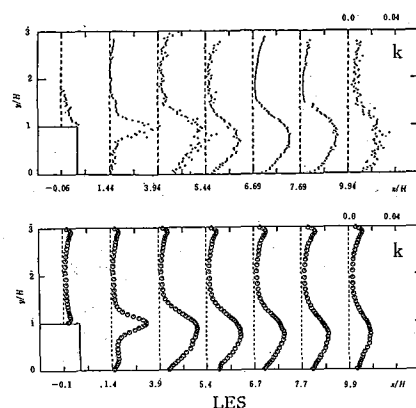


図8 バック・ステップ流れ場における LES 計算結果
(乱流エネルギー)

工的壁面境界条件^{k)}による LES 改良モデルが用いられている。図から、計算値と実験値とはよく一致しており、LES は平均速度場はもちろんのこと、乱流量をも高い精度で再現しうることがわかる。

—一次検討—

ここでは、標準 $k-\varepsilon$ モデル、非等方 $k-\varepsilon$ モデルおよび ASM について一次検討を行う。図9に、これらの数値手法による流線図および非等方性の一端を示すレイノルズ応力の垂直成分の差異 $\overline{u'u'v'v'}$ の等値線図¹⁾を示す。図から、再付着距離 h については実験値とほぼ一致する LES データが $h=7.1H$ であるのに対し、標準 $k-\varepsilon$ モデル、非等方 $k-\varepsilon$ モデル、ASM の場合にはそれぞれ $6.0H$ 、 $6.2H$ 、 $6.45H$ である (H =ステップ高さ)。次に $\overline{u'u'v'v'}$ については非等方 $k-\varepsilon$ モデルと ASM との間に差異がみられる。 $\overline{u'u'v'v'}$ が、非等方 $k-\varepsilon$ モデルでは速度勾配の大きいせん断層に集中しているのに対して、ASM では広く分布しており、LES の結果に近い分布を示している。

表 3 ASM におけるレイノルズ応力

$\overline{u_i u_j} = k \left[\frac{2}{3} \delta_{ij} + \frac{(1 - C_2) (P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P) + \phi_{ijw}}{(C_1 - 1) \varepsilon + P} \right]$	
$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$	$\varepsilon_{ij} = \delta_{ij} \frac{2}{3} \varepsilon$
$\phi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} (\overline{u_i u_j} - \delta_{ij} \frac{2}{3} k) - C_2 (P_{ij} - \delta_{ij} \frac{2}{3} P)$	
$C_1 = 1.8, C_2 = 0.6, P = P_{kk}/2$	

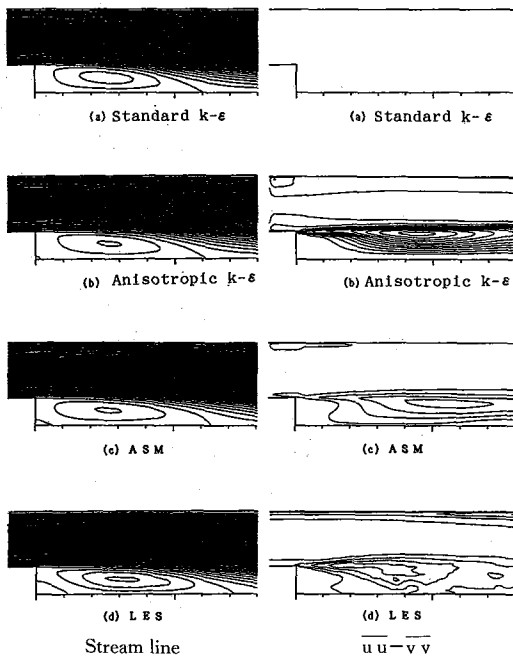


図 9 標準 k-ε モデル, 非等方 k-ε モデルおよび ASM に関する一次検討結果

—アプリオリテスト—

再付着距離と非等方表現の点からみて, やや良好な結果を示す ASM に注目することにする. レイノルズ方程式による表式化の中で, 最も重要な箇所の一つは当然のことながらレイノルズ応力の表現方法である. 図10および11は, LES による平均速度分布を用いて標準 k-ε モデルおよび ASM (表 3)^{m)} の場合について, それぞれレイノルズせん断応力 \overline{uv} を計算したもの^{l)} である. なお ASM については, 壁面近傍における垂直応力を効果的に減衰させる wall reflection termⁿ⁾ を考慮して計算している. 両図から, LES の結果と比較して \overline{uv} は, 標準 k-ε モデルの場合には過大評価されているのに対して, ASM の場合には比較的よく一致している. このことは, 標準 k-ε モデルにおける過粘性表現について検討の必要があることを示唆している.

ASM における次の検討項目は, 乱流エネルギー k, 同

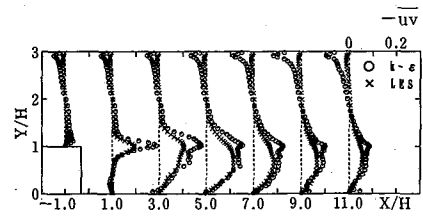


図10 標準 k-ε モデルにおけるレイノルズ応力

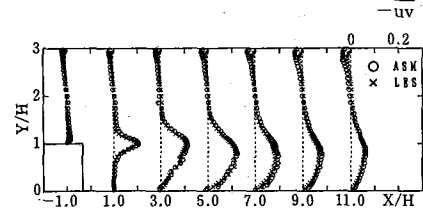


図11 ASM におけるレイノルズ応力

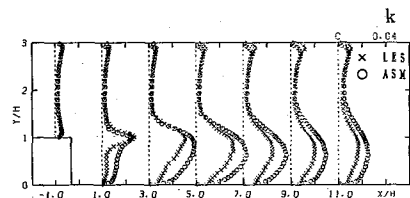
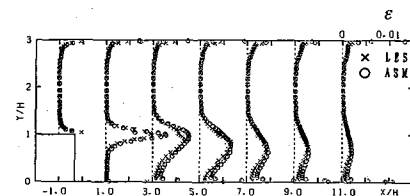
図12 ASM における乱流エネルギー
($C_s = 0.22$)

図13 ASM における乱流エネルギー散逸率

散逸率 ε をいかに正しく計算しうるかである. すなわち, k, ε 方程式の妥当性である. 図12および13は, 図10および11の場合と同様に LES の結果を用いて ASM の場合の k, ε を計算したもの^{o)} である. 両図から LES の結果と比較して, k 方程式の場合には再循環流領域において k は過大評価されていること, ε 方程式の場合には ε は比較的よく予測されており, 急拡大直後においてやや大きく評価されている程度であることがわかる. すなわち, k 方程式の表式化に対して何等かの修正が必要である.

—修正 k 方程式を用いた ASM—

k 方程式に関する上述の欠陥に対しては, 同方程式の拡散項に ε の拡散の影響を考慮した吉澤モデル(表 4)^{p)} を用い, モデル定数を最適化することによって再循環領域における乱流エネルギー k の拡散挙動を比較的よく予

測できる⁹⁾。これらの修正により再付着距離の予測もあわせて改善されている ($h=6.8H$)。すなわち、乱流拡散の適切な表現が再付着距離の改善に対して重要であることがわかる。

—比較検討—

図14および15に、それぞれ LES, 修正 k 方程式を用いた ASM, 標準 k - ε モデルおよび 3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法⁹⁾における主流方向平均速度 U およびレイノルズ応力 \overline{uv} の分布を示す。なお計算メッシュについては前 3 者は同一メッシュを、疑似直接解法の場合はより細かなメッシュ ($251 \times 101 \times 20$) を用いている。図から、まず主流方向平均速度については再循環領域および再付着点付近を除き、LES, 修正 k 方程式を用いた ASM, 標準 k - ε モデル間では、差異はほとんど

表 4 吉澤モデル

$$C_{kk} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - C_{k\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k^3}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right)$$

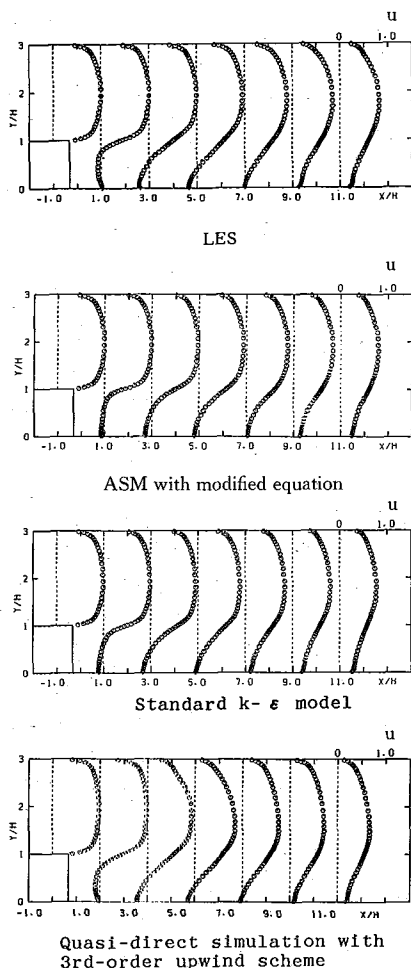


図14 主流方向平均速度に関する比較

みられないことがわかる。疑似直接解法の場合にはより細かいメッシュにもかかわらず、前 3 者とはやや異なった分布を示すとともに、メッシュ依存性をも暗に示しているが、4 者間には概略大きな差異はないといえよう。すなわち、平均速度場でもって乱流の取り扱いを比較検討することは困難と思われる。次に k , \overline{uv} 等の乱流量については、それぞれ前 3 者は定性的にはほぼ類似した分布をもつが、疑似直接解法の場合にはこれらとはかなり異なった挙動を示す。すなわち、疑似直接解法は乱流量を正しく再現していないことがわかる。修正 k 方程式を用いた ASM と標準 k - ε モデルについては、 k , \overline{uv} とともに再循環領域において前者が LES により近い分布を示していることがわかる。これらの結果から、バック・ステップ流れ場における限定された計算例からではあるが、修正 k 方程式を用いた ASM を含め、種々の理論的背景をもつ応力方程式モデルの有用性がみられる。

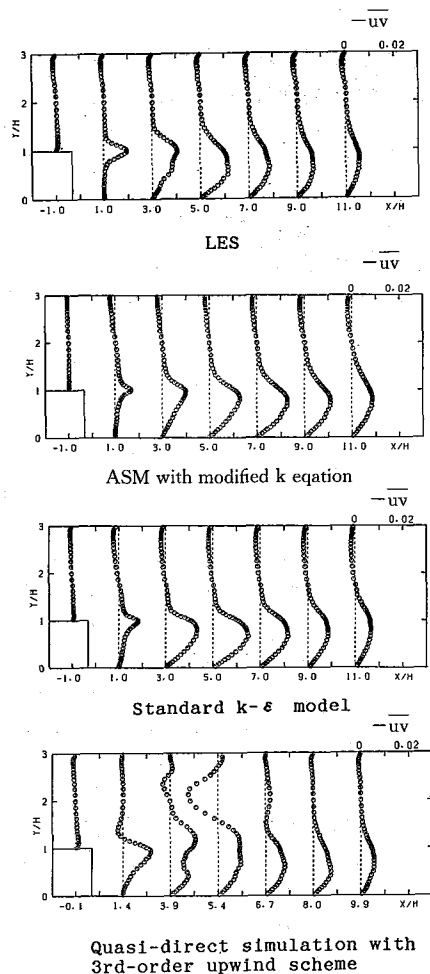


図15 レイノルズ応力に関する比較

4. あとがき

以上、自動車の車体まわり流れに関する CFD の応用の現状とその問題点を概説するとともに、同分野における乱流の取り扱いに関する議論を補完するため、バック・ステップ流れ場を対象として数種の乱流の取り扱いについて比較検討を試みた。その結果、この分野における乱流の取り扱いの現状については概略次のようにまとめられよう。

- ① 現在、標準 $k-\epsilon$ モデルが主流である。このモデルは種々の乱流モデルの中では利便性が比較的高いが、剝離、循環等を含む車体まわりの流れ場を再現することは困難である。主な原因の一つとして渦粘性の仮定によるレイノルズ応力の表現の不適切さが挙げられる。
- ② 比較的多く公表されている 3 次精度風上スキームを用いた疑似直接解法については、限定された利用者によって多用されているが、この手法は、高次の打ち切り誤差による解の挙動については未だ明らかにされておらず、メッシュ依存性が強い。また乱流量を正しく再現しえないようである。
- ③ 標準 $k-\epsilon$ モデルより高次の乱流モデルについては、この分野における適用例はほとんどない。剝離、循環等を含む複雑な流れ場の一例としてのバック・ステップ流れ場における検証から、LES は計算精度の点からみて、これらの流れ場の再現に対して現状では最も有用である。レイノルズ方程式による解法のレベルでは、ASM の場合レイノルズ応力は比較的正しく表現される。同モデルにおいて k 方程式の拡散項を修正する取り扱いが有用であり、今後応力方程式モデル系による発展も期待される。

(1992年10月22日受理)

参考文献

- a) 小林・鬼頭, ながれ, 9-4 (1990), 229.
- b) T. Kobayashi & K. Kitoh, SAE paper 920338 (1992).
- c) 小林, 自動車技術会学術講演会前刷集 (Proc. JSAE)901 (1990), 7.
- d) R.K. Avva, et al., AIAA paper 88-0611 (1988).
- e) V.C. Patel, et al., AIAA J., 23-9 (1985), 1308.
- f) S. Nishizawa, et al., AIAA J., 25-3 (1987), 414.
- g) 吉澤, 機械学会誌, 93-862 (1990), 764.
- h) T. Kawamura & K. Kuwahara, AIAA paper 84-0340 (1984).
- i) Y. Morinishi & T. Kobayashi, Proc. 1st Engineer. Turbulence Modelling & Exp. (1990), 279.
- j) 森西・小林, 機械学会論文集, B57-540 (1991), 122.
- k) 森西・小林, 機械学会論文集, B55-511 (1989), 615.
- l) 小林・富樫, 機械学会講演論文集 920-68 (1992), 36.
- m) W. Rodi, ZAMM, 56 (1976), 219.
- n) M.M. Gibson & B.F. Launder, J. Fluid Mech., 86 (1978), 491.
- o) 小林・富樫, 機械学会講演論文集 920-78 (1992), C452.
- p) A. Yoshizawa, Physics Fluid, 27 (1984), 279.
- q) 小林, 未発表
- 1) 姫野ほか, 機械学会論文集, B53-486 (1987), 356.
- 2) R. Himeno, et al., SAE paper 900319 (1990).
- 3) 西川ほか, 自動車技術, 43-4 (1989), 94.
- 4) 佐藤ほか, 第 3 回数値流体力学シンポジウム (Proc. CFD-3) (1989), 547.
- 5) 姫野ほか, Proc. CFD-2 (1988), 511.
- 6) 橋口, Proc. CFD-1 (1987), 363.
- 7) 河口・橋口, Proc. CFD-2 (1988), 499.
- 8) 橋口・河口, Proc. CFD-2 (1988), 495.
- 9) M. Hashiguchi, et al., AIAA paper 87-1386 (1987).
- 10) 河口・橋口, Proc. CFD-3 (1989), 543.
- 11) 橋口・河口, Proc. JSAE 891 (1989), 111.
- 12) 農沢ほか, Proc. JSAE 892 (1989), 137.
- 13) 栗山, Proc. CFD-2 (1988), 503.
- 14) S. Shiroyama & K. Kuwahara, Proc. 2nd Inter. Conf. on Super Computig Application in the Automotive Industry (Proc. CRAY-88) (1988), 293.
- 15) M. Engelman, SAE paper 870563 (1987).
- 16) C.T. Shaw, SAE paper 880455 (1988).
- 17) W. Pien & B.J. Hutchings, Proc. CRAY-88 (1988), 233.
- 18) C.T. Shaw & S. Simcox, Proc. CRAY-88 (1988), 219.
- 19) R. Stricker & A. Dick, Proc. CRAY-88 (1988), 99.
- 20) T. Han, AIAA J., 27-9 (1989), 1213.
- 21) 平野・川原, Proc. CFD-3 (1989), 539.
- 22) 谷口ほか, 機械学会論文集, B55-518 (1989), 3026.
- 23) 谷口ほか, 機械学会論文集, B55-513 (1989), 1324.
- 24) K. Kitoh, et al., Proc. 18th ISATA (1988).
- 25) 小林ほか, 生産研究, 41-1 (1989), 60.
- 26) R. Buchheim, et al., ATZ, 91-11 (1989), 3.
- 27) 花岡・青木, Proc. JSAE 892 (1989), 141.
- 28) 栗山, Proc. JSAE 882 (1988), 539.
- 29) F.N. Rossi & J.P. Lagassi, Proc. CRAY-88 (1988), 203.
- 30) 知名・柳本, 自動車技術, 41-12 (1987), 1376.
- 31) 知名・亀山, Proc. JSAE 871 (1987), 57.
- 32) 小森谷・一沢, Proc. JSAE 901 (1990), 369.
- 33) 西川ほか, Proc. JSAE 901 (1990), 381.
- 34) 加藤ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 1. 117.
- 35) 下野園・藤谷, Proc. JSAE 902 (1990), 1. 121.
- 36) 中川ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 153.
- 37) 堀之内ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 157.
- 38) 河口・橋口, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 161.
- 39) 島崎ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 177.
- 40) 小森谷ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 201.
- 41) 村井ほか, Proc. JSAE 902 (1990), 2. 181.
- 42) 塩沢ほか, Proc. JSAE 911 (1991), 347.
- 43) 浅野・片桐, Proc. JSAE 912 (1991), 2. 173.
- 44) 小野ほか, Proc. JSAE 912 (1991), 2. 177.
- 45) 加藤・栗山, Proc. JSAE 912 (1991), 2. 181.
- 46) 石田・北岸, Proc. JSAE 912 (1991), 2. 193.
- 47) 谷口ほか, Proc. JSAE 912 (1991), 2. 197.
- 48) Y. Ishida, et al., SAE paper 910310 (1991).
- 49) K. Minato, et al., SAE paper 910314 (1991).
- 50) L. Larsson, et al., SAE paper 910595 (1991).
- 51) T. Nouzawa, et al., SAE paper 920202 (1992).
- 52) K. Matsunaga, et al., SAE paper 920339 (1992).