

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○横嶋 哲  
 神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 中山 昭彦

1. はじめに

工学的に広く用いられる実用的乱流モデルとして Reynolds 平均方程式と渦粘性仮定を用いる 2 方程式モデルが挙げられる。複雑な境界形状、境界条件に対応するため、相似則に頼らない、壁面まで適用可能なモデルが近年数多く提案されているが、それらの性能評価は十分ではない。本研究では代表的な 2 方程式モデルの汎用性を、モデル検証によく用いられる段落ち流れを対象として評価する。

2. 検証対象とする 2 方程式モデルと検証ケース

本研究では、2 方程式モデルの代表である  $k-\epsilon$  型モデルと汎用性で優れているとされる  $k-\omega$  型モデルより評価の高いものについて詳しく検証した(表-1)。また、検証ケースとしては  $Re$  数、拡大比の異なる 3 種類の開水路段落ち流れ(表-2)を取り上げた。各モデルおよび DNS、実験の詳細は参考文献を参照されたい。

3. 検証結果に対する考察

図-1 にケース DNSL の  $x_1/H_s=1$  ( $x_1, x_2$  はそれぞれ主流、鉛直方向座標,  $H_s$  はステップ高さ)における平均流速  $U_1$  の分布を示す。SKE, LOW, LOP モデルは DNS の傾向を捉えているが、TEV, LEK, LEN モデルは床面近傍で過剰な逆流が見られる。図-2 は同ケースの  $x_1/H_s=3$  における Reynolds せん断応力  $-u_1u_2$  の分布であるが、TEV, LEK, LEN モデルは  $x_2/H_s < 1$  での過大予測が激しい。また、図-3 はケース EXPN の  $x_1/H_s=2$  における  $U_1$  の分布であるが、図-1 と同様の傾向が見られる。図-4 にケース EXPJ における  $x_1/H_s=6.58$  の再付着点直前での  $-u_1u_2$  の分布を示す。下流ではいずれも計測結果に近い分布を得るが、LEN モデルは  $x_2/H_s=1$  付近で DNS データからのずれが大きい。これは、LEN モデルは剥離・再付着流における再付着点の予測精度を改善するため、散逸率  $\epsilon$  の生成を標準値より一様に約 3% 増強しており、下流で等流化が進むにつれその影響が表れたものと推察される。図-5~7 にそれぞれのケースでの平均流流線を示す。LEN モデルはいずれのケースでも再付着点位置の予測は安定しているが、循環の中心位置はステップに近く、再付着点位置の予測精度のみで剥離・再付着流へのモデルの適用性は判断できない。また、LEK モデルは 3 ケースを通じて再付着距離はかなり短く、循環域での乱流諸量の予測精度にも問題点が見られる。SKE モデルは妥当性を欠く壁関数を用いているにも係わらず、再付着距離が短い点を除けば循環域の予測結果は良好であり、壁面まで適用可能なモデルが必ずしも予測結果を改善するとは限らない。一方、ケース DNSL では LOW が、ケース EXPN では LOP モデルの結果が良好であり、低  $Re$  数  $k-\omega$  モデルの有用性が示唆される。低  $Re$  数モデルの開発では、乱流諸量の壁面漸近挙動を忠実に再現することで、従来のモデルに比べてモデル式が複雑になり計算負荷は増大するものの、その適用範囲は大きく広がると期待されてきたが、壁近傍流れの予測は主流域である高  $Re$  数領域の計算に適切な境界条件を壁関数に代わって与えることができれば良いことを本検証結果は示している。低  $Re$  数  $k-\omega$  モデルは減衰関数が壁面までの距離に依存しないため、複雑な境界形状への適用も容易であり、また遷移流のような流れ場全体の  $Re$  数が低い場合にも対応できるなど、壁面までの距離が支配的なパラメータとなる低  $Re$  数  $k-\epsilon$  モデルや 2 層モデルに比べて汎用性が高いと結論づけられる。

Satoshi YOKOJIMA and Akihiko NAKAYAMA

表-1 検証対象とした 2 方程式乱流モデル

type	model	authors and reference	key
$k-\epsilon$	standard	Launder & Spalding <sup>1)</sup>	SKE
	low- $Re$ -number	Kawamura & Kawashima <sup>2)</sup>	LEK
		Nagano & Shimada <sup>3)</sup>	LEN
	two-layer	Lakehal & Rodi <sup>4)</sup>	TEV
$k-\omega$	low- $Re$ -number	Wilcox <sup>5)</sup>	LOW
		Peng <i>et al.</i> <sup>6)</sup>	LOP

表-2 開水路段落ち流れ

	key	$Re_{H_s}$	$Fr_{H_1}$	expansion ratio
Le <i>et al.</i> DNS <sup>7)</sup>	DNSL	5100	0.0	1.2
Nakagawa & Nezu Exp. <sup>8)</sup>	EXPN	5150	0.23	1.33
Jovic Exp. <sup>9)</sup>	EXPJ	37000	0.0	1.2

$$Re_{H_s} = U_{1max} H_s / \nu, Fr_{H_1} = U_{1max} / (gH)^{1/2}, \text{各量は上流で評価}$$

#### 4. おわりに

本研究では、 $Re$  数、拡大比の異なる段落ち流れにおいて、評価の高い2方程式モデルの汎用性の評価を行った。講演時には、境界形状の異なる他の流れ場での結果も併せて報告する予定である。

**参考文献 1)** Launder & Spalding: *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, **103**, 456, 1974. **2)** Kawamura & Kawashima: *Proc. Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transf.*, P.I.1, 1994. **3)** Nagano & Shimada: *Phys. Fluids*, **8**(12), 3379, 1996. **4)** Lakehal & Rodi: *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.*, **67&68**, 65, 1997. **5)** Wilcox: *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc. La Canada, 1993. **6)** Peng, Davidson & Holmberg: *J. Fluids Eng.*, ASME, **119**, 867, 1997. **7)** Le, Moin & Kim: *J. Hydr. Res.*, **330**, 349, 1997. **8)** Nakagawa & Nezu: *J. Hydr. Res.*, **25**, 679, 1987. **9)** Jovic: *Eng. Turbulence Modeling and Experiments 2*, 509, 1993.

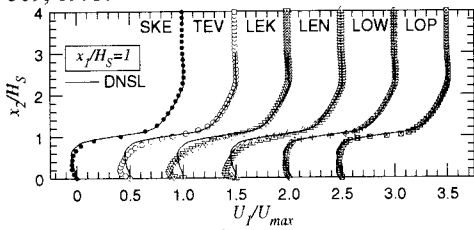


図-1 平均流速  $U_1$  (case DNSL)

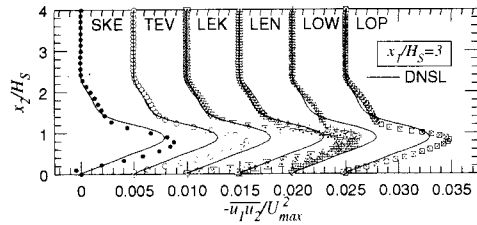


図-2 Reynolds せん断応力 (case DNSL)

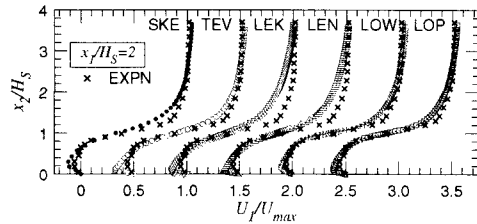


図-3 平均流速  $U_1$  (case EXPN)

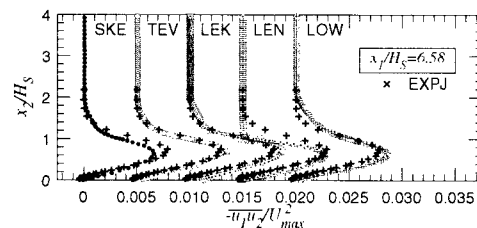


図-4 Reynolds せん断応力 (case EXPJ)

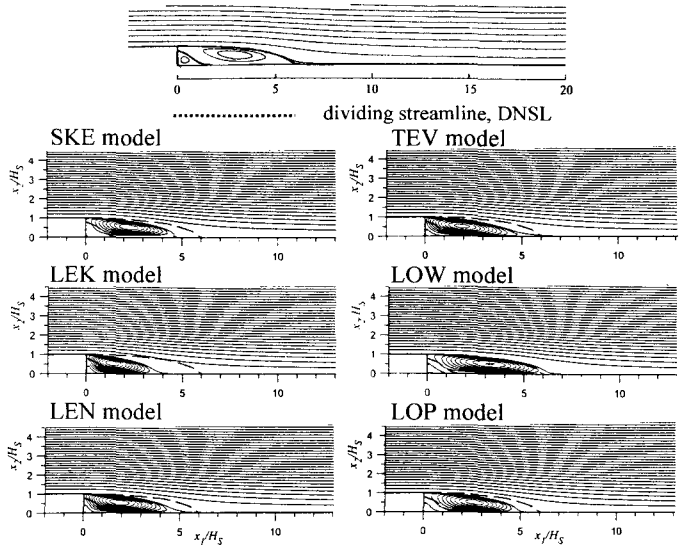


図-5 平均流線の比較 (case DNSL)

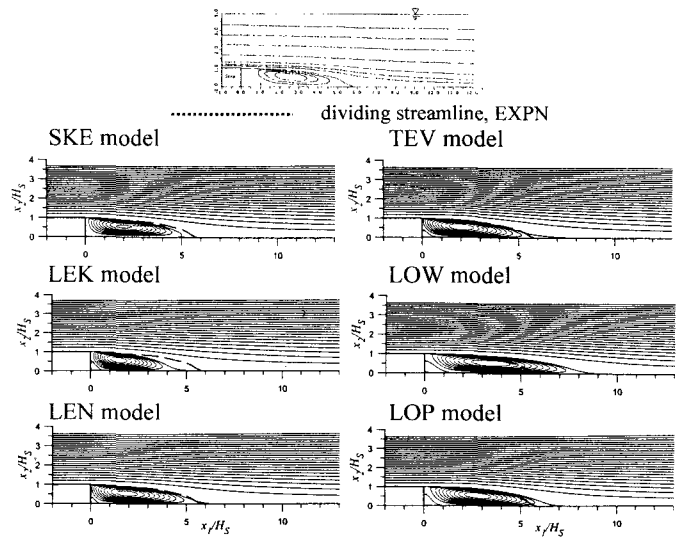


図-6 平均流線の比較 (case EXPN)

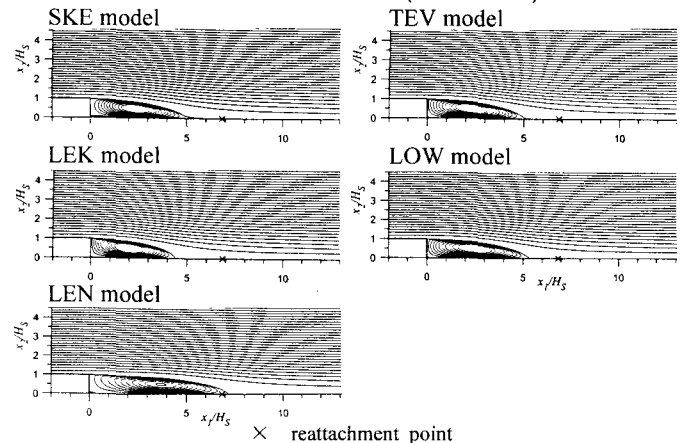


図-7 平均流線の比較 (case EXPJ)