

神戸大学大学院 正員 中山 昭彦  
 神戸大学大学院 学生員 ○横嶋 哲

1. 結論

レイノルズ平均方程式による乱流計算法が一般的流れに応用されるには、壁関数に頼らない低レイノルズ数乱流モデルが必要である。近年多くのモデルが提案され、DNS データを用いてモデルの検証、係数の調整が行われた結果、単純境界流れに対し高精度の予測が可能となった。しかしこれらを開水路流の計算に応用する際の問題点は不明である。自由水面が乱流に及ぼす影響は乱れエネルギーの減衰等が指摘されているが<sup>1)</sup>、定量的には解明されていない。Komori et al.<sup>2)</sup>による DNS では水面に垂直方向乱れは減衰するが、水平方向乱れが増加し、乱れエネルギーは逆に増加している。異方が強まることは確かだが、水面近傍の乱流諸量に関する信頼できるデータの不足のため導入すべき仮定や境界条件の取り扱いに議論の余地がある。そこで本研究は単純開水路を対象とし、まず低レイノルズ数流れにおいて、近年開発された2方程式低レイノルズ数乱流モデルを用いて計算を行い、DNS データ、実験との比較によりモデル及び水面境界条件の違い、水面の減衰効果の考慮が予測性能にどのように影響するか詳細な検討を行った。次にその結果を受けて高レイノルズ数流れの計算を行い、実験との比較により低レイノルズ数乱流モデルの開水路流に対する予測精度、問題点等を検討した。

2. 修正モデル基礎式と計算法

検討するモデルは壁面漸近挙動を精度良く再現する Kawamura & Kawashima<sup>3)</sup>による  $k-\tilde{\epsilon}$  モデル(KK)、壁面漸近挙動は忠実に再現しないが、内層外層に渡り柔軟な予測性がある Wilcox<sup>4)</sup>による低レイノルズ数  $k-\omega$  モデル(WL)、減衰関数が壁面摩擦速度や壁までの距離に依存しないため、複雑流れ場への応用が期待される島田、長野<sup>5)</sup>による  $k-\tilde{\epsilon}$  モデル(SN)である。これらの基礎式は参考文献に詳しくあるのでここでは修正部分のみ記述する。いずれのモデルも渦粘性近似

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i) - 2/3 \cdot k \delta_{ij} \quad (1)$$

を用いるが、開水路流では水面で圧力、せん断応力ともゼロとなるにも拘らず、速度勾配は有限となる現象をこのモデルで再現するには渦動粘性係数  $\nu_t$  が水面でゼロとなる必要がある。実験<sup>7)</sup>によればこの  $\nu_t$  の減衰はレイノルズ数、フルード数に影響されないので本計算では  $\nu_t$  を求める際に式(2)で表される減衰関数  $f_s$  を乗じた。

$$f_s = 1 - \exp\{(y-h)/0.2h\} \quad (2)$$

$h$  は水深である。また、境界条件を表-1 に示す。数値計算は表-2 に示す条件で、仮定した初

表-1 境界条件

<b>&lt;壁面境界条件&gt;</b>	
$U_1 = 0, U_2 = 0$	(3)
$k = 0, \tilde{\epsilon} = 0$	(4)
$\omega = 2500\nu/k_R^2, k_R < 5$	
$k_R$ : 粗度高さ	
$\omega = 6\nu/\beta x_2, x_2^+ < 2.5$	(5)
<b>&lt;水面境界条件&gt;</b>	
<b>運動学的条件</b>	
$\partial h / \partial t + U_1 \partial h / \partial x_1 = U_2$	(6)
<b>動力学的条件</b>	
$p_h = 0, \tau_h = 0$	(7)
添字 $h$ は水面上の物理量を意味する	
<b>乱流諸量に関する条件</b>	
$\partial k / \partial x_2 = 0$	(8)
• symmetry B.C.	
$\partial \epsilon / \partial x_2 = 0, \partial \omega / \partial x_2 = 0$	(9)
• dissipation B.C. <sup>9)</sup>	
$\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / 0.07 h \kappa$	(10)
$\omega = \beta^{*-1/2} k^{1/2} / 0.07 h \kappa$	

表-2 計算条件

期値と流入条件を用い2次元非定常計算を行い収束解を算出した。

	Komori et al. <sup>2)</sup> DNS(1993)	瀬津 <sup>7)</sup> による実験(1977)	Nezu & Rodi <sup>8)</sup> Exp.(1986)
レイノルズ数	$Re_\tau = u_\tau h / \nu = 160$	$Re_h = U_m h / \nu = 30000$	$Re_h = U_m h / \nu = 23000$
フルード数	$Fr = U_m / \sqrt{gh} = 0.0735$	$Fr = U_m / \sqrt{gh} = 0.43$	$Fr = U_m / \sqrt{gh} = 0.077$
計算格子	不等間隔 30 × 45	不等間隔 40 × 120	不等間隔 40 × 120

3. 計算結果と考察

計算結果の平均流速、乱流エネルギー、散逸率を内層表示したものを図に示す。図-1 は Komori et al.<sup>1)</sup>によるキーワード 低レイノルズ数乱流モデル、開水路流、自由水面効果

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部建設学科・(078)803-1420・(078)803-1050

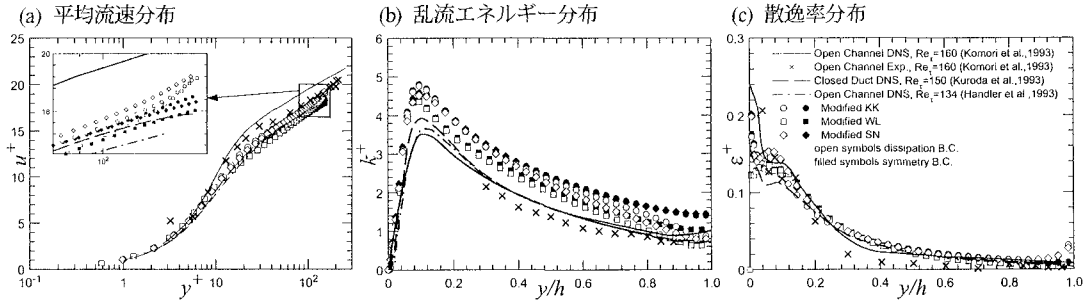


図-1 Komori et al.<sup>2)</sup>による DNS 結果との比較

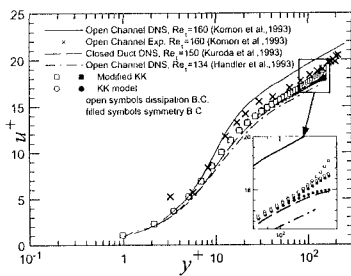


図-2 平均流速分布における減衰関数  $f_s$  の効果

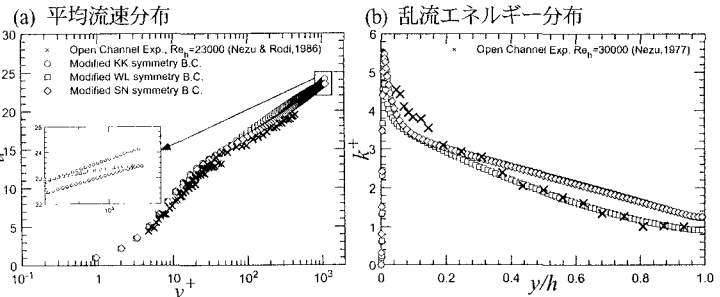


図-3 福津<sup>7)</sup>, Nezu & Rodi<sup>7)</sup>による実験結果との比較

DNS との比較であるが、平均流速はいずれも DNS に比べて低いが実験結果には近い予測を得た。Komori et al.<sup>1)</sup> による開水路 DNS と Kuroda et al.<sup>8)</sup> による閉管路 DNS との比較では、水面の有無により平均流速に大きな差がみられる。これが、水面の存在が壁面近傍の流れに影響を与えることを意味するのかどうかについては現在検討中である。乱流エネルギーの予測はいずれも DNS に比べて高く、同様の指摘が開水路段落ち流れにおいてもされている<sup>10)</sup>。一方散逸率については壁面近傍で DNS に比べて低くなっている。これは壁面近傍での散逸率の過小評価によって乱流エネルギーが過大予測され、それが水面近くまで拡散されたため、断面全体に渡って乱流エネルギーの予測が DNS に比べて高くなった可能性が考えられる。図-2 に水面近傍の  $v_i$  の減衰を考慮した場合としない場合の比較を示す。減衰を考慮した場合には水面極近傍まで流速勾配が有限値をとるといって開水路流の特性の再現が確認できた。また境界条件として散逸境界条件を用いた場合に、水面近傍で乱流エネルギーが減少し、散逸率が増加するという指摘<sup>1)</sup>を再現できるが、DNS の傾向と異なり、今後の検討課題である。図-3 は対称境界条件で減衰を考慮した計算結果と福津<sup>7)</sup>, Nezu & Rodi<sup>7)</sup>による実験結果との比較であるが、平均流速分布に関しては SN モデルが、乱流エネルギー分布については WL モデルが最も実験結果に近い予測を得た。いずれのケースでも、これまで重要視されてきた散逸率の壁面漸近挙動の再現性は本研究においては殆ど予測に影響せず、その結果、式が簡素で計算の安定性も高い WL モデルの有用性が改めて確認され、複雑境界を有する流れへの応用が期待される。

参考文献

1)河原,東京大学土木工学科,水工学シリーズ 92-A-1,1992. 2)Komori,Nagaosa,Murakami,Chiba,Ishii & Kuwahara,*Phys. Fluids A* 5,p.115,1993. 3) Kawamura & Kawashima,*Proc. Int. Symp. on Turb. Heat and Mass Trans.*,P.I.1.1, 1994. 4)Wilcox :*Turbulence Modeling for CFD*,DCW Industries,Inc.,1993. 5)島田・長野,第 8 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, p.341,1994. 6)Naot & Rodi,*J Hydraulics Div.,ASCE*,**108**.No.HY8.,p.948,1982. 7)Nezu & Nakagawa:*Turbulence in Open-Channel Flows*,IAHR -Monograph,Balkema,1993. 8)Kuroda,Kasagi & Hirata,*Proc. 9th Symp. on Turb. Shear Flows*,p.8.4.1, 1993. 9)Handler,Swan Jr,Leighton & Swearingen,*AIAA J.*,**31**,p.1998,1993. 10)福知・中山,水工学論文集,**42**,p.625,1998.