

二次精度中心差分による開水路乱流の直接数値シミュレーション

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. 緒論 近年の計算機の発達により、乱流モデルを要しない直接数値シミュレーション (DNS) が様々な流れ場の予測・解析に適用されつつある。特に、差分法に基づく DNS は従来のスペクトル法によるものに比べその適用範囲が大きく広がることが期待され、精力的な研究が行われている¹⁾⁻³⁾。差分法の適用性を高める要素のひとつとして、差分ステンシルをできるだけ狭めることが考えられるが、本研究では、数値粘性を伴わない二次精度中心差分を用いた開水路乱流の DNS を行い、その予測精度の確認及び自由水面が乱流構造に及ぼす影響について考察を行う。

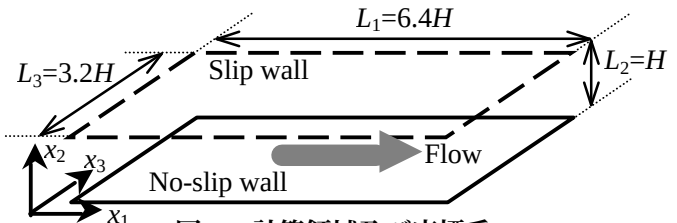


図-1 計算領域及び座標系

力的な研究が行われている¹⁾⁻³⁾。差分法の適用性を高める要素のひとつとして、差分ステンシルをできるだけ狭めることが考えられるが、本研究では、数値粘性を伴わない二次精度中心差分を用いた開水路乱流の DNS を行い、その予測精度の確認及び自由水面が乱流構造に及ぼす影響について考察を行う。

2. 数値解析手法 非圧縮性流れ場の支配方程式として、連続の式及び Navier-Stokes 方程式を用いた。変数配置は staggered 格子系を採用し、空間微分項は二次精度中心差分⁴⁾により近似した。時間進行は、対流項及び粘性項に二次精度 Adams-Bashforth 法を用い、SMAC 法を適用した。図-1 に計算領域及び座標系を示す。境界条件は主流及びスパン方向に周期条件を、壁面及び水面でそれぞれ粘着、すべり条件を与えた。壁面摩擦速度と水深を基準とした Reynolds 数は 180、計算格子数は $80 \times 80 \times 80$ とした。これは Nagaosa and Saito¹⁾による同種の DNS とほぼ等価な空間解像度を有する。この結果、格子間隔は $\Delta x_1^+ = 14.4$ 、 $\Delta x_2^+ = 0.4-3.6$ 、 $\Delta x_3^+ = 7.2$ 、時間刻みは $\Delta t^+ = 0.018$ となり、Courant 数の最大値は 0.1 以下の十分安定した計算が行われた。初期条件には層流分布に弱い擾乱を足し合わせたものを与え、速度場が十分発達するまで計算を行った。その後、粘性時間でおおよそ 2500 に渡る時空間平均により各種乱流統計量を評価した。以下では摩擦速度と動粘性係数を用いて無次元化された結果を示す。

3. 考察 図-2 に各種乱流統計量を、図-3 に Reynolds 垂直応力及び乱流エネルギー k の収支をそれぞれ Kim *et al.*(1987)⁵⁾による平行平板間流れの DNS データと比較した結果を示す。平均流速分布はほぼ水面まで対数則が成立する。自由水面をすべり面近似した今回の DNS では、平行平板間流れ同様に $x_2 = H$ の位置で速度勾配がゼロとなるが、図-2(b)に示すように、その漸近挙動には大きな差異があり、水深の半分以上の領域に影響が及ぶ。このため、渦動粘性係数の分布にも大きな相違が生じる (図-2(c))。また、乱れ強度は水面近傍で強い非等方性を有し、それらの和である k は水面でわずかに増加する。自由水面の存在によって水面近傍で k は減少し、散逸率 ε は増加する^{6), 7)}という主に実験結果から指摘されている傾向と、本研究も含めた DNS 結果^{2), 8)}に見られる傾向 (k は微増、 ε は減少)の相違については、乱流モデルの発展を考える上でも今後更なる検討が必要である。

一方 Reynolds 垂直応力の収支においては、自由水面の影響は水深の 20%程度の領域においてのみ見られ、壁面近傍では平行平板間流れと定量的にもほぼ一致する。 $\overline{u_2 u_2}$ の収支において散逸項がかなり過小評価されており、他の項も平行平板間流れの結果から多少のズレが見られるが、これは $\overline{u_2 u_2}$ の収支は他の成分に比べて全体に値が低く、今回用いた格子の解像度の限界が露見したものと思われる。このズレは k の収支にはほとんど影響せず、従来の計算結果^{1)-3), 8)}と比較したところ、二次モーメントに関しては本研究で用いた格子解像度、計算手法でほぼ妥当な結果が得られた。より高次の統計量について検討を加えるには、格子解像度の向上が必要である。

4. 結論 二次精度中心差分を用いた開水路乱流の DNS を行い、その予測精度、問題点の検討を行った。今回用いた格子数では、高次の統計量の評価には解像度が問題となるが、二次モーメントの予測に関してはほぼ妥当な結果が得られた。数値粘性を伴わず、差分ステンシルの狭い二次精度中心差分に基づく DNS が workstation レベルで実行できることの意義は大きく、より境界条件の複雑な流れ場への応用が期待される。

キーワード 直接数値シミュレーション、開水路乱流、二次精度中心差分

連絡先 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 Tel & Fax. 078-803-6011)

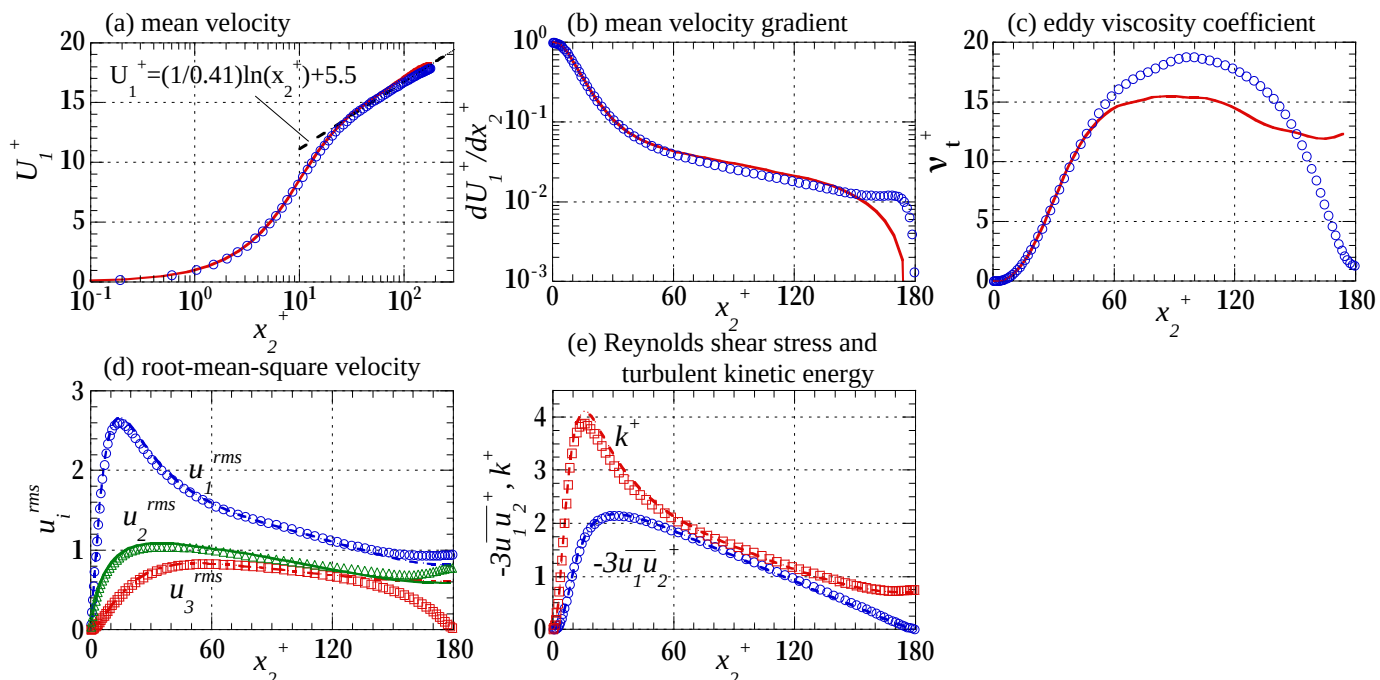


図-2 開水路流と平行平板間流れの乱流統計量の比較, $\circ, \triangle, \square$; 開水路流, —, ---, - - -; 平行平板間流れ

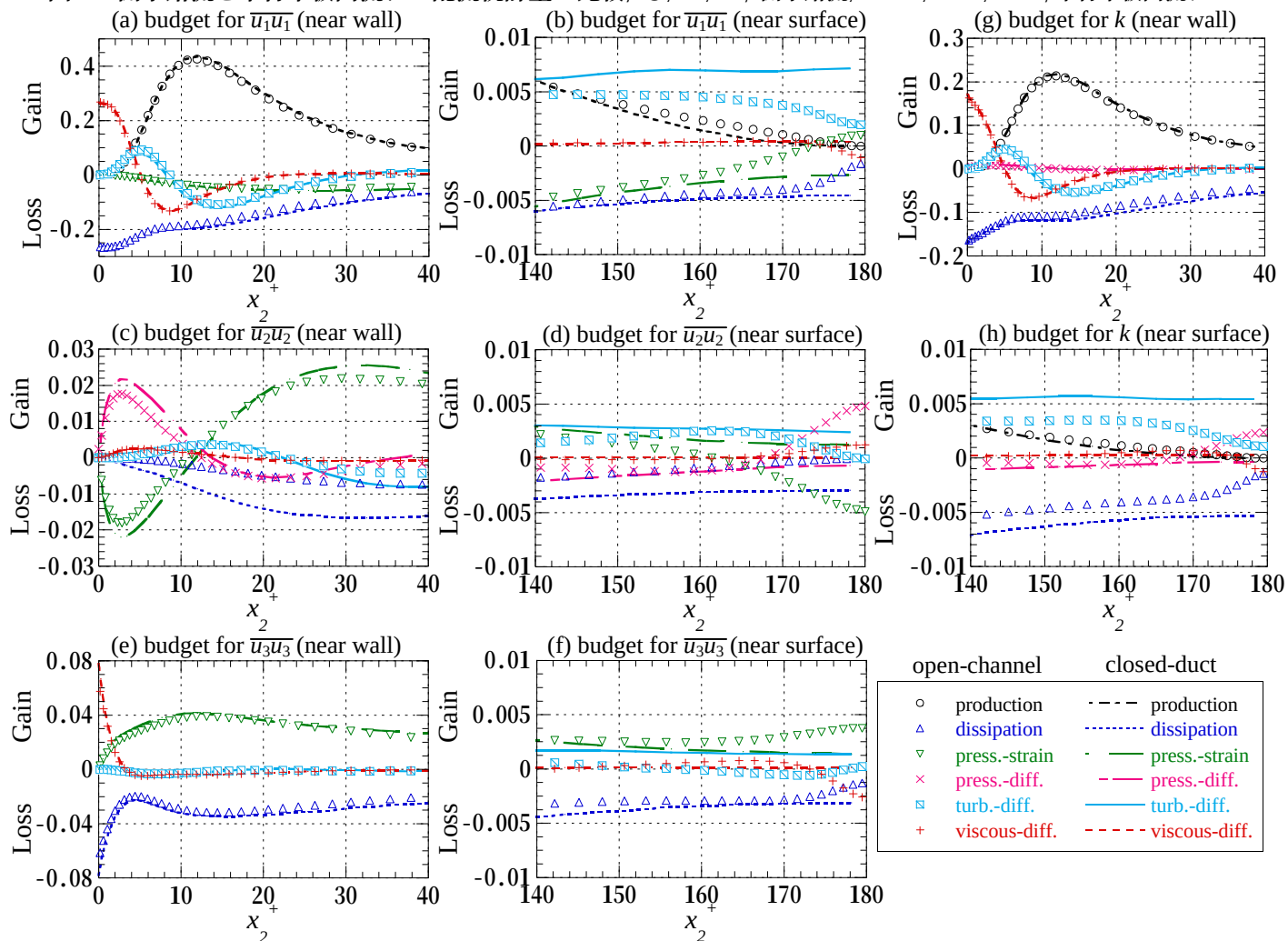


図-3 開水路流と平行平板間流れの Reynolds 応力及び乱流エネルギー収支の比較

参考文献 1) Nagaosa, R. and Saito, T., *AIChE. J.* **43**, 2393, 1997. 2) 山本, 功刀, 芹澤, 第 13 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, B02-4, 1999. 3) 林, 大本, 矢北, 平川, *水工学論文集* **44**, 593, 2000. 4) 梶島, *日本機械学会論文集 B 編* **60**-578, 2058, 1994. 5) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., *J. Fluid Mech.* **177**, 133, 1987. 6) Nezu, I. and Nakagawa, H., *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, 1993. 7) 河原, *土木学会 水工学に関する夏季研修会講義集*, A-1, 1992. 8) Handler, R. A., Swann Jr, T. F., Leighton, R. I. and Swearingen, J. D., *AIAA J.* **31**, 1998, 1993.