

神戸大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻 学生員 ○横嶋 哲
 神戸大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻 正会員 中山 昭彦

1. 緒論

壁乱流の数値予測には DNS, LES, RANS のいずれによっても多大な計算負荷を伴う。粘着壁近傍の乱れは粘性スケールで整理できるが、壁上のせん断の有無によらない別のスケールも存在する。これは壁の法線方向運動の抑制効果（ブロッキング）によるもので、主に連続性を満たすように働く圧力の効果であり、影響は粘性効果より広範囲に及ぶと推察される。ここでは法線方向圧力勾配は接線方向に比べて小さく、圧力の法線方向解像度は速度場に比べて粗くてもよいと考えられる。本研究ではこのような特性を利用した壁乱流計算の効率化手法を提案し、予測性能、効率化性能の検証を行う。

2. 壁面近傍の瞬時流れ場の特性

緒論で述べたような特性が実際どの程度成立するのかを調べるため、粘着面（底面）及びすべり面（水面）から構成される開水路等流（Fig. 1）の DNS を $Re_\tau=100, 180$ の条件で行った。 $Re_\tau=180$ の場合の粘着面近傍の瞬時圧力変動分布及び圧力勾配の RMS 値分布を Figs. 2, 3 にそれぞれ示す。Fig. 2 より圧力変動が粘着面から粘性スケールで 10 以内の領域ではほぼ一定値をとることがわかる。すべり面近傍でも同様の圧力変動分布が観察され、Fig. 3 からそれが統計的にも成立することが確認できる。また、このスケールは $Re_\tau=100$ の場合にもほぼ同程度であった。

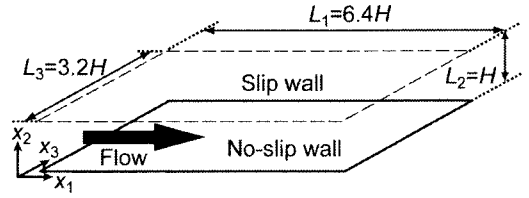


Fig. 1 Flow configuration of open-channel flow.

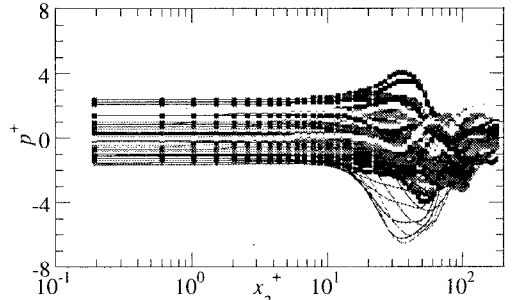


Fig. 2 Instantaneous pressure profile ($Re_\tau=180$).

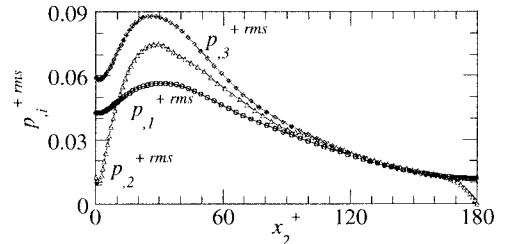


Fig. 3 Profiles of RMS pressure gradient fluctuations ($Re_\tau=180$).

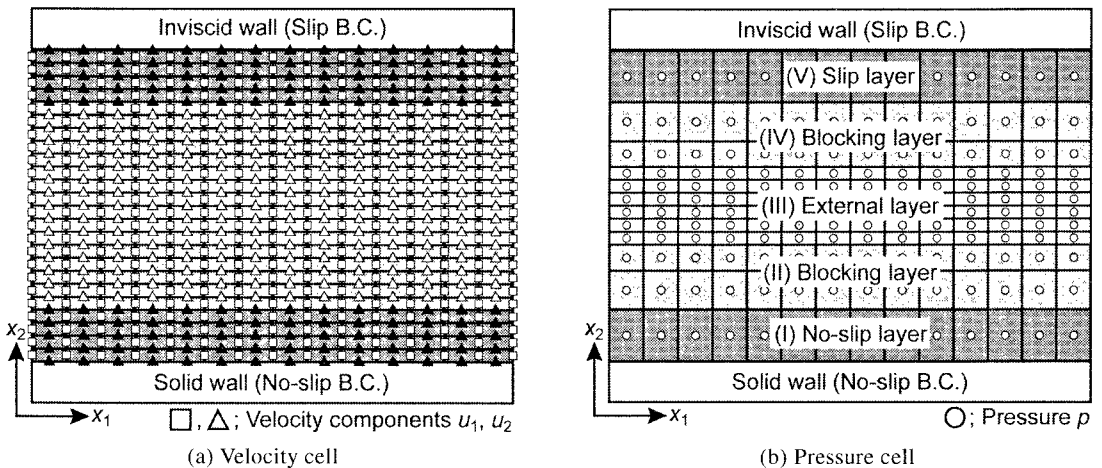


Fig. 4 Arrangement of positions of velocity components and pressure.

3. 数値計算法

開水路等流を対象に前章で見られた圧力特性を考慮し、 $\partial p / \partial x_2$ がゼロとみなせる領域を境界条件に応じそれぞれ「粘着層」及び「すべり層」、ゼロではないが変化が小さい領域を「ブロッキング層」、それ以外の領域を「外部層」とする。ここで粘着層及びすべり層の圧力を法線方向に一点で代表し、またブロッキング層で圧力定義点を粗視化しても計算精度はそれほど低下しないと予想され、一方で計算負荷の大部分を占める圧力算出に要する労力を低減できる。粗視化された圧力場用のセル（圧力セル）と速度場用のセル（速度セル）を完全に独立にすると保存量を数値的に保存することが困難となるので、本報では Fig. 4 のように x_2 方向に隣接する速度セルを複数個結合して圧力セルを生成した。詳細は文献 1) を参照されたい。

4. 検証及び考察

$Re_\tau=180$ の開水路等流を対象に予測精度、効率化性能の評価を行う。なお圧力の Poisson 方程式の解法には SOR 法を用いる。Run1 は $64 \times 64 \times 64$ の通常の DNS で、Run4 は速度セルは Run1 と等しいが、圧力定義点を粘着層、すべり層及びブロッキング層で粗視化することで圧力セルの格子数を $64 \times 32 \times 64$ に半減させたものである。Fig. 5 に Run1, Run4 による乱流統計諸量を、Kim et al.(KMM)²⁾ のチャンネル流 DNS 及び著者ら(YN)³⁾ の開水路等流 DNS 結果と併せて示す。底面近傍での乱流エネルギー収支や、それより二桁程度オーダーが低いすべり面近傍の水深方向 Reynolds 垂直応力収支も精度よく再現されている。その他の統計量や瞬時構造の再現性についても両者に有意な差は見られず、一方で Run4 の計算負荷は Run1 の 20% 程度にまで抑えられた。今回は速度セルを複数個結合することで圧力セルを作成したため、圧力セルの分布はあまり滑らかでない。反復計算においてその影響は決して小さくないと考えられ、この点が改良されれば更なる効率化が期待できる。

5. 結論

境界近傍の流れ特性を利用した非圧縮性流体数値解法の効率化手法を提案し、その基本性能の評価を行った。検証例では、本手法は予測精度をほとんど損わずに計算負荷を大幅に低減することが確認された。ここでは DNS への適用例を示したが、本手法は高 Reynolds 数流れの LES や RANS 法に対しても応用可能であると考えられ、CFD の汎用化を進める上で有用な手法となり得る。

参考文献

- 1) 横嶋, 中山, 第 14 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (<http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/jscfd/cfd14/program1.html>), B05-4, 2000.
- 2) Kim, Moin and Moser, *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, 133, 1987.
- 3) 横嶋, 中山, 応用力学論文集, Vol. 3, 753, 2000.

