

TSUBAME 共同利用 平成 29 年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 解析的壁関数を用いた格子ボルツマン法による高レイノルズ数乱流解析コードの開発  
 英文: Development of Lattice Boltzmann Method with Analytical Wall Function for Higher Reynolds  
 number Turbulent Flow Simulations

利用課題責任者: 須賀 一彦  
 First name Surname: Suga Kazuhiko

所属: 大阪府立大学  
 Affiliation: Osaka Prefecture University  
 URL: <http://www2.me.osakafu-u.ac.jp/htlab/>

#### 邦文抄録

格子ボルツマン法(LBM)を用いて航空機周りに見られる高レイノルズ数乱流の解析を行うために、LBM に壁関数法を組み合わせた解析を検討した。壁関数法で得られた壁面せん断応力と実際の壁面せん断応力が合致するように、壁面に滑り速度を与えて解析を行った。手法評価のために、D3Q27 多緩和時間格子ボルツマン法を用いて摩擦レイノルズ数2,000のラージ・エディ・シミュレーションを行い、壁関数法には対数測を用いる標準壁関数法と、剥離・再付着流れにも適用可能な解析的壁関数法を用いた。標準壁関数法で得られた結果は対数速度分布と良く合致することは確認されたが、壁面近傍の過大な圧力・速度変動により解析的壁関数法では正しく壁面せん断応力が見積もることができなかった。

#### 英文抄録

To simulate high Reynolds number turbulent airfoil flows by the lattice Boltzmann method, a wall-function method is introduced to the LBM. To impose the wall-shear stress determined by the wall-function, a slip velocity is imposed to the wall. For the validation, large eddy simulation of turbulent channel flow at friction Reynolds number of 2,000 is carried out by the D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method. For the wall function, we test the standard wall-function and the analytical wall-function. It is found that the standard wall-function successfully works while the analytical wall function does not provide precise wall-shear stress due to the overpredicted pressure and velocity fluctuations at the wall adjacent cells.

*Keywords: Lattice Boltzmann method, turbulence, standard wall-function, analytical wall-function large-eddy-simulation*

#### 背景と目的

近年の格子ボルツマン法(LBM)の目覚ましい発展により、高いレイノルズ数の乱流解析においても高精度で安定に解析することが可能になった。しかし、等間隔格子の使用を前提とする格子ボルツマン法では、壁面近傍の乱流を詳細に解析するためには膨大な解析格子が要求されるために、壁関数法などの導入が望まれる。壁関数法はこれまで、レイノルズ平均モデルを用いた差分法に用いられていたが、近年では計算機能力の向上とともに、より高精度なラージ・エディ・シミュレーションにも組み合わせも検討されている。また、乱流境界層での対数壁法則を前提する標準壁関数は、衝突・剥離流れなどの工学的な流れ場で予測精度が大きく下がるために、解析的壁関数法[1]をはじめとして多くの汎用的な壁関数法が提案されてきた。

しかし、格子ボルツマン法に壁関数モデルを組み合わせた解析例は少なく、解析的壁関数法などの高度な壁モデルの導入には未だ多くの検討が必要である。そこで本課題では、標準壁関数法に加えて解析的壁関数法などの高度な壁モデルを格子ボルツマン法に導入する方法に関して検討を行った。

#### 概要

計算密度が高く並列計算に適したLBMは、その解析精度や妥当性向上の為に多くの研究が行われ、目覚ましい発展を遂げてきた。特に、乱流解析においては、高い精度で安定に解析が可能である衝突演算モデルや、乱流モデルを用いた解析手法、高い精度を持つ局所細密格子法などが提案されてきた。しかし、LBM は等間隔格子を用いるために、船舶や航空機周りなどの高い

レイノルズ数を対象とする乱流解析においては、壁面近傍の格子解像度の不足は原理上避けることができない。そこで、本課題では、これまで有限差分・体積法などの乱流解析で広く用いられてきた壁関数法を格子ボルツマン法に組み合わせることで、LBM による高いレイノルズ数乱流解析を可能とすることを目的とする。さらに本研究では、壁面近傍の流れに対数則を仮定する標準的な壁関数法に加えて、解析的に積分した運動量式を用いることで剥離・再循環・衝突流れを含む複雑な流れ場を汎用的に扱える解析的壁関数法を用いる。

有限差分法・体積法においては、壁関数法で求められる壁面せん断応力は、そのまま差分式に代入することができる。しかし、密度分布関数の時間発展を解く格子ボルツマン法は、壁関数法で得られた壁面せん断応力を直接導入することができない。そこで、図1に示すように、壁面隣接点の速度  $u_{p1}$ ,  $u_{p2}$  とせん断応力  $\tau_w$ , 粘性係数  $\mu$  を用いて壁面の疑似的な滑り速度  $u_{wp}$  を算出し、LBM へと導入する。滑り速度  $u_{wp}$  は

$$u_{wp} = \frac{4u_{p1} - u_{p2} - 2\Delta \frac{\tau_w}{\mu}}{3}$$

と与えられ、バウンスバック法を用いて LBM に導入する。開発した手法の評価を行うために、摩擦レイノルズ数 2,000 のチャンネル乱流ラージ・エディ・シミュレーションを行った。壁面垂直方向には 100 点の計算格子を設定し、乱流モデルにはスマゴリンスキーモデル[2]を用いた。解析は D3Q27 多緩和時間格子ボルツマン法[3]を用いた。

結果および考察

図2に摩擦速度で無次元化した平均速度分布を直接数値解析のデータ[4]と比較した結果を示す。なお、標準壁関数・解析的壁関数の2つの壁関数を導入して解析を行ったが、解析的壁関数法を用いた解析では数値

振動が生じ、正しい解を得ることができなかったので、標準壁関数法の結果のみを示している。標準壁関数で得られた結果は、DNS と非常に良い一致を示していることが確認できる。図3と図4にそれぞれ速度・圧力変動強度分布を示す。図3より、壁面近傍では壁面垂直方向やスパン方向に大きな速度変動が生じていることが確認できる。さらに、図4より圧力変動に関して非常に大きな値を予測してしまうことが確認できる。解析的壁関数法は瞬時の速度・圧力を薄層近似した運動量式に代入し壁面せん断応力を求めるが、過大な速度・圧力変動のために、解析的壁関数法では正しく壁面せん断応力が見積もれなかったと考えられる。

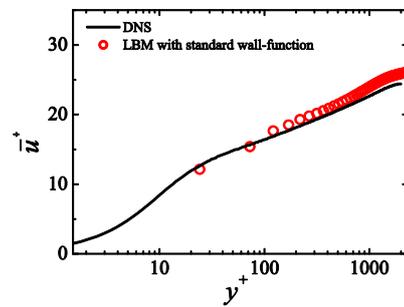


図2 平均速度分布

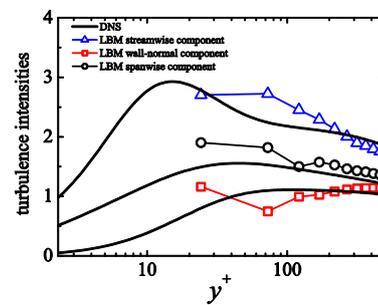


図3 壁面近傍の乱流強度分布

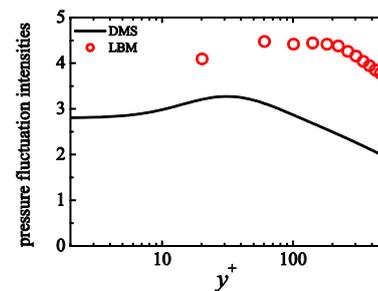


図4 圧力変動強度分布

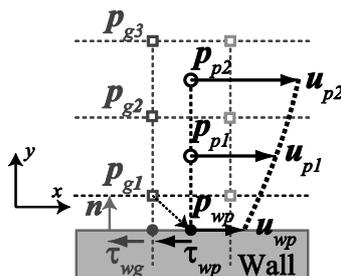


図1 壁面隣接セルの速度・圧力

### まとめ、今後の課題

格子ボルツマン法(LBM)を用いて航空機周りに見られる高レイノルズ数乱流の解析を行うために、LBM に壁関数法を組み合わせた解析を検討した。壁関数法で得られた壁面せん断応力を LBM に導入するため、壁関数で得られた壁面せん断応力と実際の壁面せん断応力とが合致するように、壁面に滑り速度を与えて解析を行った。手法評価のために、D3Q27 多緩和時間格子ボルツマン法を用いて摩擦レイノルズ数2,000のラージ・エディ・シミュレーションを行い、壁関数法には対数測を用いる標準壁関数法と、剥離・再付着流れにも適用可能な解析的壁関数法を用いた。標準壁関数法で得られた結果は対数速度分布と良く合致することは確認されたが、壁面近傍では圧力・速度変動は過大に見積もってしまうことが確認された。また、解析的壁関数法を用いた解析では数値振動が生じてしまい LBM への導入には課題が残った。今後は、数値振動を抑える方法の検討や、壁面せん断応力の導入方法に問題がないか詳細に調べる必要がある。

### 参考文献

- [1] K.Suga, T.J.Craft and H.Iacovides, An analytical wall-function for turbulent flows and heat transfer over rough walls. *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 27, pp852-866, 2006.
- [2] J.Smogorinsky, General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.91, pp.99-164, 1963.
- [3] Suga, K. et al., A D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for turbulent flows, *Compt. Math. Appl.*, Vol.69, No.6, pp.518-529, 2015.
- [4] Hoyas, S. and Jimenez, J., Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to  $Re = 2003$ . *Phys. Fluids* 18 (1), 011702, 2006.