

バックステップ乱流のLES

岡本 健 (13116645)

指導教官 森西洋平 助教授

卒業研究発表会 2005年2月22日

1 緒言

はく離・再付着を含む流れは、油圧機器、伝熱機器、翼周りの流れなど様々な分野で見られ、流れを伴う機械や装置ははく離・再付着によって性能が大きく変化する。そのため、これらの流れを理解することは工業応用上重要である。本研究では、はく離・再付着を含む流れ場として、バックステップ乱流を取り上げる。この流れ場は形状が単純であり、はく離点がステップ角部で固定されることから、過去にも実験と数値解析の両面から多くの研究対象として選ばれている。また、我々の研究室ではクエット・ポアズイユ型バックステップ乱流の実験的研究が行われているが、この流れ場に対する数値解析の報告は見られない。

そこで本研究では、クエット・ポアズイユ型の数値解析に先立ち、まずはポアズイユ型バックステップ乱流の数値解析を行い、実験と比較、考察を行うことを目的とする。また、描画プログラムにより流れ場の可視化を行い、流れ構造を理解することも目的とする。

2 数値解析手法

2.1 LESにおける基礎的事項

LESでは、流れ場の空間的な格子平均を取り、小さなスケール(Subgrid Scale, SGS)の運動は乱流の種類に依存せず普遍的であるという統計理論に着目し、このSGS成分のみに乱流モデルを導入する手法である。そして、モデル化されたSGS成分を大きなスケール(Grid Scale, GS)の運動成分に繰り込むことにより、GS量のみ直接計算を行う。

2.2 LESにおける基礎方程式

まず、GS成分とSGS成分に分離するため、流れ場にフィルター化操作を施す。 ϕ を物理量とすると、フィルター化操作は次式で定義される。

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x - x') \phi(x', t) dx' \quad (2.1)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.2)$$

$G(x)$ はフィルター関数であり、 $\int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx = 1$ を満たす関数である。

非圧縮性流体の基礎方程式にこのフィルター化操作を施すと、フィルター化されたLESの基礎方程式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

ここで、上式中の τ_{ij} は、SGS応力といい、

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.5)$$

と定義され、この τ_{ij} に乱流モデルを導入する。

Table 3.1: 平板チャネル乱流の計算条件

計算領域 $L_x \times L_y \times L_z$	$4H \times 2H \times 2H$	
格子数 $N_x \times N_y \times N_z$	$40 \times 50 \times 40$	
格子解像度	Δh_x^+	30.0
	Δh_y^+	3.00 ~ 21.0
	Δh_z^+	15.0
レイノルズ数 $Re_\tau (= \frac{u_\tau H}{\nu})$	300	
時間刻み幅 Δt	0.0025	

2.3 SGSモデル

本研究ではSGSモデルとして、小林によって提案された、Smagorinskyモデルを基本として流れ場のコヒーレント構造によってモデル定数が自動的に定まるモデル(Coherent-structure Smagorinsky Model, CSM)を用いる。

このモデルでは、基本的なSmagorinskyモデルと同様にSGS応力に渦粘性モデルを導入する。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2C \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (2.6)$$

CSMでは、次のように定数 C を決定する。

$$C = C_1 |F_{CS}|^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

$$F_{CS} = \frac{Q}{E}, \quad C_1 = 0.05 \quad (2.8)$$

$$E = \frac{1}{2} \mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \Big|_2 \quad (2.9)$$

ここで、 F_{CS} はコヒーレント構造関数であり、第二不変量 Q を速度勾配の大きさ E で規格化して定義される。モデル定数 C_1 は、一様等方性乱流およびチャネル乱流における*a priori*テストによって最適化されている。このモデルでは、基本的なSmagorinskyモデルでの計算に加え、GS量の渦度を計算するだけで良いため、非常に簡便である。

2.4 離散化手法

空間離散化法には、コロケート格子を用いた2次精度中心差分を用いるが、局所的に数値不安定を起こす場合にはその部分にQUICKスキームを適用し、安定化を図る。時間進行法は3次精度Runge-Kutta法を用いる。

3 検証計算

CSMを導入したLESの計算コードの信頼性を確認する目的で、平板チャネル乱流を解析対象とした検証計算を行い、その結果をDNSデータと比較し、考察を行う。ここでは計算結果として主流方向平均速度分布、および各方向の乱流強度分布について示す。DNSと比較すると、 U^+ および u'^+ はDNSデータよりも大きな値を示し、 v'^+ 、 w'^+ はDNSデータよりも小さな値を示している。これは、森西らのLESにおける差分精度と格子解像度の影響に関する報告によれば、比較的低解像度の2次精度中心

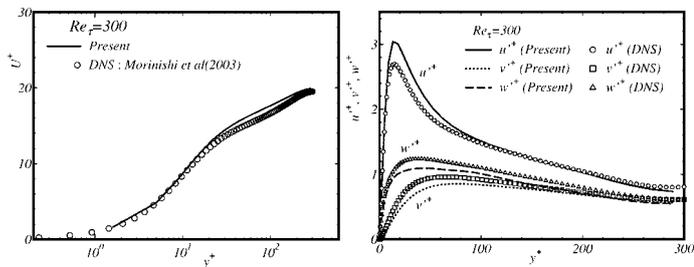


Fig. 1: 主流方向平均速度分布 Fig. 2: 乱流強度分布

Table 4.1: バックステップ乱流の計算条件

計算領域 $L_x \times L_y \times L_z$	36H × 3H × 2H	
格子数 $N_x \times N_y \times N_z$	260 × 80 × 10	
格子解像度	Δh_x	12.0 ~ 120
	Δh_y	3.00 ~ 21.0
	Δh_z	60.0
レイノルズ数 $Re_\tau (= \frac{u_\tau H_1}{\nu})$	300	
時間刻み幅 Δt	0.0005 ~ 0.0010	

差分法を用いた LES では、 U^+ 、 u'^+ は DNS データよりも大きな値を示し、 v'^+ 、 w'^+ は DNS データよりも小さな値を示すことが報告されている。今回の結果の挙動は、この挙動と一致しており、今回用いた格子解像度では妥当な結果であると言える。

4 バックステップ乱流の計算結果

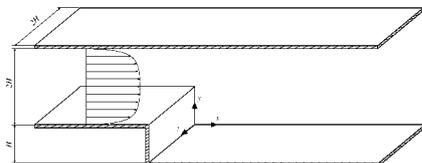


Fig. 3: Backward-facing step flow

4.1 再付着距離

まず、バックステップ乱流の重要な特性値の1つである再付着点を検討する。可視化した平均流れ場のベクトル線図から、壁面最近傍点の流速の符号が変化する点を再付着点と見なして、再付着点を特定する。壁面近傍の主流方向ベクトルの矢印の向きが変わる点は約 7.5H であり、小林氏らの実験では 6.5H と予測されている。この原因として、アンサンブル平均の計算時間が十分に取れていない、格子解像度が低いことが挙げられる。

次に、瞬時流れ場の流線図より予測される再付着点は、平均場のベクトル線図より予測した再付着点の前後約 1.0H の領域内で時間的に変動していることが確認できる。

4.2 流速分布

$x/H = 0 \sim 10$ の断面での主流方向平均速度分布を図 4 に示す。図には比較のため、Kasagi & Matsunaga(1995) の実験データも併せて示す。これらを比較すると、全体的に比較的良好一致

を示すが、アンサンブル平均のための計算ステップが充分でないため、変動の強いせん断層内の挙動を定常的に表すまでには至っておらず、実験データよりも逆流領域がより下流側まで広がっていることが分かる。これも、再付着点と同様に、アンサンブル平均のための時間ステップを充分取れば、より実験データと近い値になると思われる。

次に、 $x/H = 0 \sim 30$ の断面での主流方向平均速度分布を図 5 に示す。図中には本研究室で行われている実験データも併せて示す。これらを比較すると、今回の計算結果はやや小さな値を示しているが、全体的に妥当な結果であると言える。

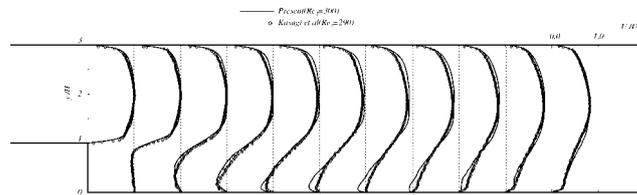


Fig. 4: 主流方向平均速度分布 ($x/H=0-10$)

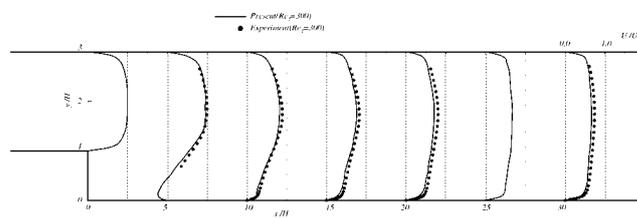


Fig. 5: 主流方向平均速度分布 ($x/H=0-30$)

5 結言

- 平板チャネル流を解析対象として検証計算を行い、妥当な結果が得られ、計算コードの信頼性が確認できた。
- 流速分布を実験データと比較し、比較的良好一致を示したが、せん断層内の分布はアンサンブル平均のための計算時間が充分必要であることが分かった。
- 再付着距離が時間的に変動する挙動を確認することができた。

参考文献

- 小林宏充, コヒーレント構造を基にした SGS モデル, 第 18 回数値流体力学シンポジウム講演論文, (2004), 1-10.
- 森西洋平, 玉野真司, 仲村栄祐, 熱的壁面境界条件が異なる非圧縮性チャネル乱流の数値解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 69 巻, 682 号, (2003), 1313-1320.
- 森西洋平, 市川明洋, 奥村隆, 中林功一, 壁乱流の LES における差分精度と格子解像度の影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 66 巻, 647 号, (2000), 1750-1757.
- J.K.Eaton, J.P.Johnston, A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment, AIAA JOURNAL, vol.19, NO.9, (1991), 1093-1100.
- N.Kasagi, A.Matsunaga, Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow, Int.J.Heat and Fluid Flow, vol.16, (1995), 477-485.