

No.4

RANS 法による回転場の乱流数値解析

市川正明（慶大院），益田重明，小尾晋之介（慶大理工）

RANS-simulation of turbulent flows with system rotation

M.Ichikawa, S.Masuda, and S.Obi

Department of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

A RANS simulation of a turbulent channel flow with spanwise rotation has been reported. The primary interest is to see whether the effects of rotation can be reproduced correctly by simply adding the rotational terms to the existing model equations explicitly to the governing equations with modifications of neither the model itself nor the model constants. The simulated mean and turbulent quantities have been compared with experimental and DNS data.

Key Words: turbulence model, rotating channel flow, second momentum closure

1. 序論

コリオリ力や遠心浮力が作用する回転場における乱流伝熱現象を解明することは、ガスタービンの動翼に代表される回転機器の冷却システムの開発・設計にとって非常に重要である。回転場の伝熱問題を扱った最近の研究例^{[1][2]}では、両体積力の効果が、低速回転のモデル実験により明らかにされている。しかし、パラメータ範囲は実機よりはるかに小さい(図1)。このギャップを実験的に埋めることは非常に困難であり、数値解析に期待が寄せられている。本研究はその手始めとして、既存の乱流モデルに回転による陽的な付加項のみを加え、低速回転領域で予測計算を行い、DNS データとの比較をし、計算手法を確立することを目的としている。

2. 支配方程式

計算対象は図2に示す様にスパン方向の軸の周りに一定角速度 Ω で回転する、平行平板間の十分発達した二次元、定常、非圧縮性の乱流(回転チャンネル乱流)である。支配方程式として、質量保存、運動量保存、レイノルズ応力の輸送方程式、散逸方程式を連立させる必要があるが、紙面の都合上、詳細は文献[1]に譲る。平均流に関して書き下すと、以下になる。

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} \quad (1)$$

レイノルズ応力の輸送方程式にはコリオリ力項

$$R_{ij} = -2\Omega_i \left(\varepsilon_{ijk} \overline{u_k u_j} + \varepsilon_{jlk} \overline{u_k u_l} \right) \quad (2)$$

が付加される。これらの方程式系を閉じるために、この項以外については Launder-Shima モデル(LS モデル)を適用した。モデルの詳細については文献[3]を参照されたい。なお、回転により再配分項にも付加項が加えられている。

3. 結果及び議論

本計算によって得られた平均速度分布及びレイノルズせん断応力 \overline{uv} をDNSデータ^[4]と図3,4に示す。図3より、平均速度場が、非回転時には中心線で対称となっているのに対して、回転が増すにつれて非対称性を有するようになっていく様子が、予測されている。レイノルズせん断応力も、高回転時には低圧側でほとんど0になってしまう様子や、高圧側で回転数の増加に伴って \overline{uv} も増大していくが、ある回転数以上になると減少する様子が定量的に予測できている。一方で図5より垂直成分は定性的な一致をみせたものの、非回転時にはモデルの性能として、やや過剰に見積もる傾向がある^[5]のに対し、回転数の増加に伴い、より小さく見積もられる傾向がみられた。

次に図6にさらに回転数を上げた場合の平均速度場をDNS データ^[5]と共に示す。本計算では平均速度分布が対称となり、レイノルズ応力成分もすべてほぼ0となった。即ち流れがチャンネル全域で層流となると予測されたが、これは同条件でのDNSの結果に相反している。

以上の結果より、乱れに対して負の寄与をしている成分が本計算では過剰に働いているのではないかと考えられた。そこで、図7より高圧側での乱れの散逸率 ε を見ると、確かに本計算では散逸を過剰に見積もっていることがわかる。前述のように本計算ではLSモデルを適用しているが、陽的な回転項を追加しただけで、その他の変更は施していない。乱れの散逸率に回転の影響を付加することで、改善できるのではないかと考えられる。また割愛するが、バジェットを見たところレイノルズ応力成分への散逸の配分も適切に行われていないことがわかった。平均速度場を求める際には、回転数に制限があるものの、レイノルズ応力として \overline{uv} が適切に与えられればよいが、温度場を予測する際に、乱流熱流束の算出にはレイノルズ垂直応力の予測精度が高いことが求められるので、この問題は放置できない。改良の指針として散逸率 ε

に対する回転の効果と、その配分を適切に与えることが必要であると考えられる。

4. 結論

静止場における既存の乱流モデルを陽的な回転項を付加するだけで回転場を使用すると、垂直応力が過小に見積られる傾向がある。特に高圧側での回転軸方向成分に顕著に表れる。その結果、高回転時にはDNSに比べて再層流化が早まる傾向が見られる。原因は散逸率の過大評価にあると思われ、回転場に固有の散逸率の非等方性を

を散逸率方程式上でいかに表現するかが今後の課題であると思われる。

参考文献

[1]Yamawaki. et al. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 23 (2002), 186
 [2]Willet. et al. *Trans. ASME J Heat. Transfer*, 124 (2002), 1
 [3]島 機論, 55-516, B (1989), 2198
 [4]Andersson. et al. *J. Fluid Mech.*, 254 (1993), 163
 [5]Lamballais et al. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 17 (1996), 324

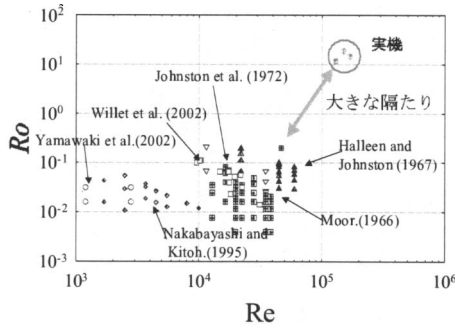


図1 パラメータ範囲

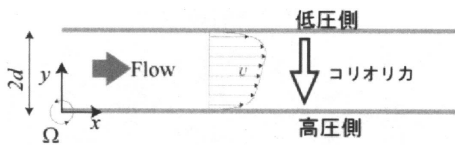


図2 回転チャンネル

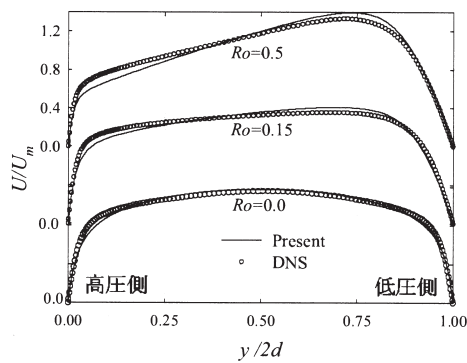


図3 平均速度分布 Re = 5,800, Ro = 0 - 0.5

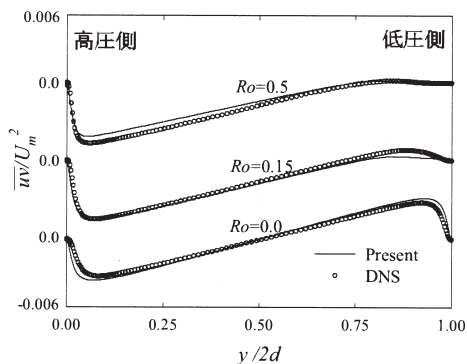


図4 レイノルズせん断応力 Re = 5,800, Ro = 0 - 0.5

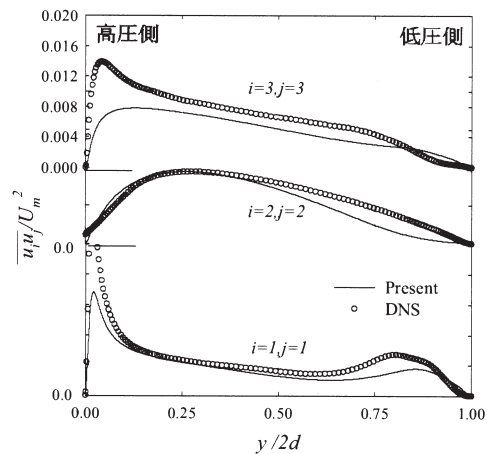


図5 レイノルズ垂直応力 Re = 5,800, Ro = 0.5

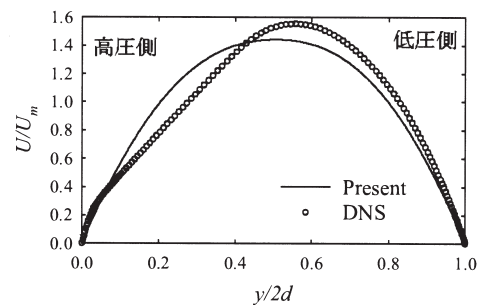


図6 平均速度分布 Re = 5,000, Ro = 1.5

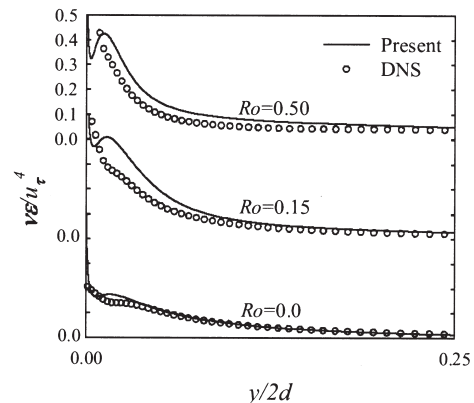


図7 高圧側の乱流エネルギーの散逸率 Re = 5,800, Ro = 0 - 0.5