

壁垂直軸周りの回転を与えたチャンネル乱流における乱流ヘリシティの生成と輸送

1. 背景

乱流とは代表的な流体の速度 U と長さスケール L の積が粘性 ν と比べたときの比(レイノルズ数 $Re = UL/\nu$)が大きい場合に起こる流体のカオス的な振る舞いをする渦のことである。乱流は、我々の生活の周りの空気や水の流れから宇宙に至るまで様々なスケールで現れ、乱流を伴う流体運動の予測は、例えば天気予報や飛行機周りの流体の流れの予測など様々な分野で役立っている。しかし、乱流を伴う大規模な流体運動には例えば空気の1mm程度の渦から台風のような100kmの渦が存在し、これらの直接計算(DNS)はコストが大きく計算することが不可能なので、計算コストを下げるために小スケールの乱流のモデル化が行われている。乱流モデルには主に2つあり、一つは流体の速度場 \mathbf{u} を平均場 $\mathbf{U} = \langle \mathbf{u} \rangle$ と揺らぎ $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{U}$ に分解し、揺らぎの部分を平均場を使って近似し、平均場のみの方程式系を計算するRANS(Reynolds-averaged numerical simulation)でもう一つは小スケールをより大きいスケールで近似するLESである。本研究ではRANSモデルの改良を行う。

地球の自転など回転を伴う場合、流体は回転の影響を受ける。例えば、台風の渦巻き構造はコリオリ力によって発生する。RANSモデルに回転の効果を取り入れるために速度 \mathbf{u}' と渦度 $\boldsymbol{\omega}' = \nabla \times \mathbf{u}'$ の内積の統計平均 $\langle \cdot \rangle$ で表される乱流ヘリシティ $h = \langle \mathbf{u}' \cdot \boldsymbol{\omega}' \rangle$ という物理量に着目する。この乱流ヘリシティは、右螺旋が強いと正、左螺旋が強くと負の値を示す。(図1)

この乱流ヘリシティの生成・輸送モデリングは従来は圧力の効果を見逃して近似されていた¹⁾が、近年、圧力の効果によるヘリシティの生成輸送機構の優位性が確認された²⁾ため、乱流ヘリシティの生成輸送機構の物理的妥当性について再考察する必要がある。

2. 目的

本研究では、従来の乱流ヘリシティの生成輸送機構の物理的妥当性について考察し、乱流モデル(RANS)の改良を行う。将来的に高レイノルズ数の計算結果を得るためにLESを用いた。

3. 手法

図2のような2枚の平行壁の間を流れるチャンネル流を考え、これに壁垂直方向を回転軸とした系回転を加え、乱流ヘリシティを生成させた。(チャンネル中央を原点とする。)

式(1)の乱流ヘリシティの方程式の各項の寄与を調べた。

$$\frac{Dh}{Dt} = P - \chi_h + \nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{turb}} + \nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{pres}} + \nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{visc}} + r \quad (1)$$

(P :生成項、 χ_h :粘性散逸項、 $\nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{turb}}$:乱流拡散項、 $\nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{pres}}$:圧力拡散項、

$\nabla \cdot \mathbf{t}_{\text{visc}}$:粘性拡散項、 r :コリオリ力による輸送項)

4. 結果

図3のように、乱流ヘリシティ h は、左右で反対称に分布し、 $y < 0$ では壁際で正、壁から離れたところで負になった。図4を見ると、壁際で生成項と圧力拡散項が正のヘリシティの生成に寄与し、チャンネル中央付近では圧力拡散項が負のヘリシティの生成に寄与していることがわかった。

1) N. Yokoi, A. Yoshizawa, "Statistical analysis of the effects of helicity in inhomogeneous turbulence," Physics of Fluids A: Fluid Dynamics 5,p.464, 1993.

2) E. Deusebio, E. Lindborg, "Helicity in the Ekman boundary layer," J.Fluid Mech, 755, p.654, 2014.

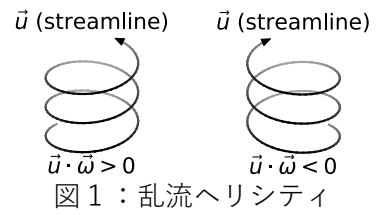


図1: 乱流ヘリシティ

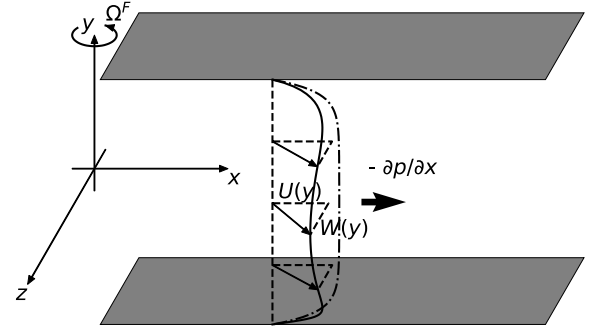


図2: 壁垂直軸周りの回転を与えたチャンネル乱流

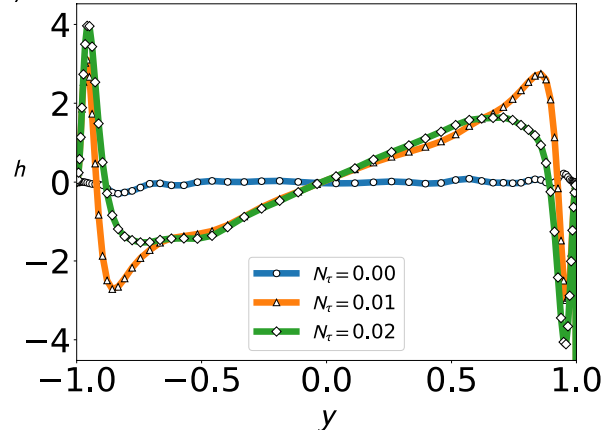


図3: 乱流ヘリシティの分布

ここで、 $N_\tau (\propto |\Omega^F|)$ は系の回転パラメータ

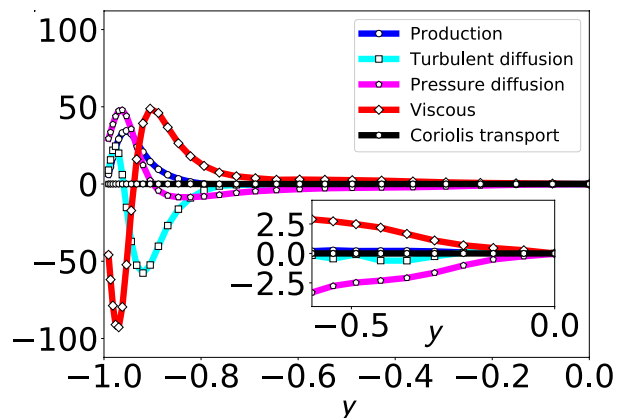


図4: 乱流ヘリシティの方程式の各項の寄与

($y < 0$)($N_\tau = 0.01$)(色は式(1)と対応する)

内枠はチャンネル中央付近の拡大図