

不安定成層下におけるロールセル対流について

豊田裕也（トヨタ自工）、益田重明（慶大理工）、

Roll-cell convection in unstably-stratified boundary layer

* H.Toyoda and S.Masuda **

*Toyota Motor Co.

**Dept. Mech. Eng., Keio University

ABSTRACT

Numerical simulation of roll-cell convection in unstably-stratified boundary layer has been performed. Assuming incompressible Newtonian fluid with constant properties, the steady equations of continuity, momentum and energy have been solved simultaneously by using the finite volume method under constant heat-flux condition. Momentum thickness Reynolds number at upstream boundary is 76 and both with and without artificial disturbance are tried. Growth of disturbance, spanwise pitch of streamwise vortices and interference between adjacent vortices are examined based on the velocity vector and vorticity maps. Mechanism of successive induction of vortices is explained by using buoyant production of streamwise vorticity.

Key Words: Roll-cell convection, stratified boundary layer, body force instability

1. 序論

壁温が主流より高い不安定成層境界層では、流れ方向に軸を持つ縦渦列が発生する場合があります、ロールセル対流と呼ばれている。遠心力不安定や、コリオリ力不安定と並んで、外力型不安定の典型的な例であり、大気観測・理論的研究¹⁾、モデル実験²⁾などが行われて来たが、発生条件、縦渦のピッチやアスペクト比、セル内の流速や温度分布の詳細、物質輸送など未解明の点が多い。本研究では速度場と温度場の3次元構造の詳細、縦渦の発生状況、攪乱の増幅、複数縦渦の干渉の状況について、有限体積法を用いて解析した。その際、特定の攪乱を与えない「自然攪乱」と、スパン方向に局所的に温度勾配を与えた「人工攪乱」の2種類について解析した。

2. 数値解析法

平板に沿って発達する Blasius 境界層を考え、途中 ($x = 0$) から壁面を等熱流束加熱する。計算領域は $0 \leq x \leq 0.4\text{m}$, $0 \leq y \leq 0.15\text{m}$, $-0.105 \leq z \leq 0.105\text{m}$ 、流入条件は $x=0.5\text{m}$ で Blasius 解を $U_\infty=0.3\text{m/s}$ において有次元化して代入した。流出条件は大気開放、上部境界に対称条件、スパン方向に周期境界条件、壁面条件を滑りなし等熱流束条件とした。熱流束 q_w を任意に変化させた。

非圧縮性、ニュートン流体、物性値一定、密度変化は

ブジネスク近似に従うと仮定すると、支配方程式は、

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p - \frac{Gr}{Re^2} \mathbf{j}T + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{Pr Re} \nabla^2 T \quad (3)$$

Pr, Re, Gr プラントル数、レイノルズ数、グラスホフ数で代表値は平板長さ、主流速、壁面と主流の温度差とした。レイノルズ数は $Re=7 \times 10^3$ で一定とした。

3. 解析結果

図1に温度差 $\Delta T = 60\text{K}$ とし、特定の攪乱を与えずに得られた断面内温度分布と速度ベクトル分布の一例を示す。スパン方向にほぼ等間隔にロールセルが発生していることが分かる。

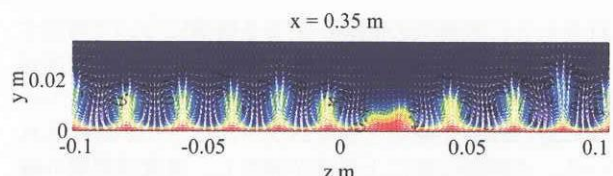


図1 自然攪乱の場合の断面内温度と速度ベクトル ($\Delta T=60\text{K}$, $x=0.35\text{m}$)

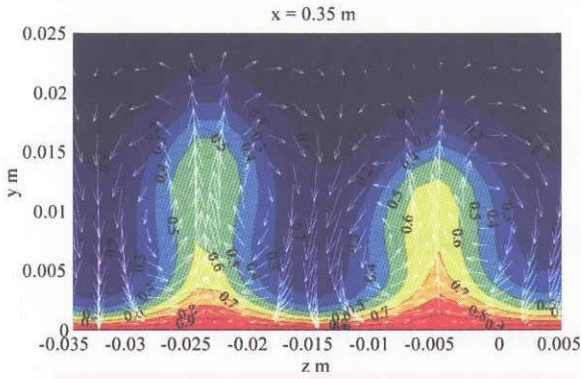


図2 図1の拡大図

図2は図1の一部を拡大したもので、約0.02mのピッチで互いに反転する縦渦対が認められ、上昇流の部分が高温、下降流の部分が低温となっている。縦渦の上端は基礎流れの温度境界層外縁付近に位置している。この人工攪乱を加えない場合に自然に発生するピッチを「自然ピッチ」と呼ぶことにする。

次に縦渦列の発生機構を調べるために、渦度方程式の流れ方向成分を考える。

$$\frac{D\xi}{Dt} = (\xi \cdot \nabla)u + \frac{1}{Re} \nabla^2 \xi - \frac{Gr}{Re^2} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

左辺第3項の浮力による渦度生成に着目すると、図3に示すように、①微小振幅のスパン方向温度非一様性が、②浮力による渦度生成により、③渦度の流れ方向成分を生み出し、④これによる up-wash と down-wash が、⑤スパン方向温度分布を強める結果、縦渦列へと成長することが定性的に説明できる。

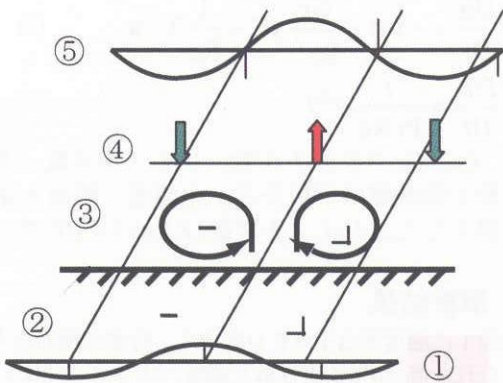


図3 渦度方程式から見た縦渦生成

これをもとに縦渦列の間隔が決まる機構について考察する。図4は(x,y,z)=(0,0,0)の位置の主流より10K温度が高い点熱源を置いた場合の下流での渦度と速度ベクトル(上)及び浮力生成項と速度ベクトル(下)が比較されている。点熱源位置に上昇流が発生し、温度境界層外縁付近で反転し縦渦の形態を形成する。縦渦領域は高渦度領域に一致している。これを一次渦とすると、その両脇

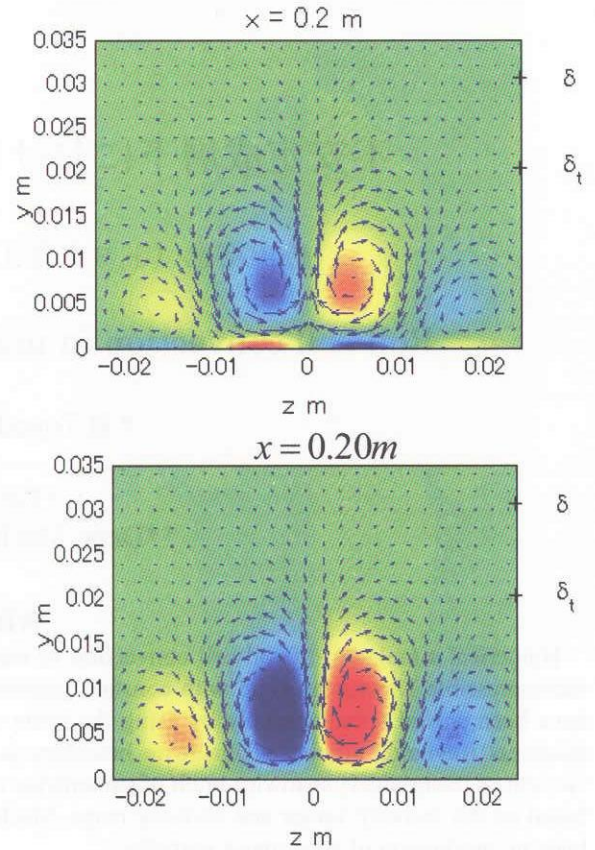


図4 単独点源攪乱を与えた場合の渦度(上)と渦度生成項(下) ($\Delta T_p = 10\text{K}$)

に新たな渦対(二次渦)が形成される。形成された縦渦列の間隔は同一条件で人工攪乱を与えない場合の自然ピッチに近い。この時渦度生成項を見ると一次渦の脇に生成項が分布しており、これが二次渦の発生を促したものと考えられる。

なお、紙面の関係で省略するが、自然ピッチより広い間隔の複数攪乱を与えた場合には、一次渦の間に新たな二次渦が発生すること、逆に攪乱の間隔が狭い場合には一次渦同士が合体が見られた。

4. 結論

- 1) 点熱源により発生した一次渦対の脇に二次渦対が誘起され、この時の渦列のピッチは自然攪乱の場合に現れる「基本ピッチ」に近い。
- 2) 基本ピッチ以外の攪乱を加えると縦渦の合体や分裂が起こる。
- 3) 縦渦の高さは温度境界層厚さ程度、横縦比は1:1程度である。
- 4) 発生メカニズムは渦度方程式中の浮力生成項により説明できる。

参考文献

- 1) D.Etling, R.A.Brown, Boundary-Layer Meteorology 65(1993) p215.
- 2) 滝本, 林, 松田, 機論(B)(1982)48-435号 p2295.