

縞状熱源から発生する熱対流の数値シミュレーション
Simulation of thermal convection induced by stripe-pattern heat source

○小川 雄也¹, 小紫 誠子²
*Yuya Ogawa¹, Satoko Komurasaki²

Abstract: To investigate effects of zebra stripe pattern on keeping the body temperature low under a strong sunshine, a thermal convective flow induced by stripe-pattern heat source is simulated. In this computation, a cylinder having a stripe-pattern heat source on its surface is used as zebra's torso. The incompressible Navier-Stokes equations are solved using a finite differential method. The temperature in the black part of zebra stripe pattern, is higher than the white part, which become the heat sources on the cylinder surface. As the result of computation, temperature field of the developed thermal convective flow and heat flux from the cylinder surface are obtained.

1. 緒論

シマウマの縞模様の役割は未だよく分かっていない。Larisonらは環境要因と縞模様との関連性を解析した結果、気温と縞模様との間に何らかの関係がある可能性を示した。ここでは縞パターンによる放熱効果で、高温域に生きるシマウマの体温の上昇を抑えるという仮説を支持している。これは黒と白の縞が表面に温度差をつくり、より複雑な渦構造をもつ熱対流を生じさせ、その結果冷却効果を促進するという考えに基づいている。

本研究ではこの仮説に基づき、シマウマの胴体を円柱と見立て、縞状熱源となる条件を与えることで、熱対流の数値シミュレーションを行い、熱源が縞状であることによる放熱効果について調べる。

2. 計算方法

2.1 支配方程式

本計算では支配方程式として 3 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とエネルギー方程式を用いる。

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

非圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T - T_0)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{(\text{Re} \cdot \text{Pr})} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

$$\mathbf{x} = (x, y, z), \quad \mathbf{v} = (u, v, w)$$

2.2 計算条件

半径 $R = 15.0$ の円柱から半径 $r_0 = 0.2$ の円柱 (シマウマの胴体とみなす) を除いた領域を計算領域とする ($-15.0 \leq x, y \leq 15.0, 0 \leq z \leq d, d = r_0 \times 2 \times \pi$).

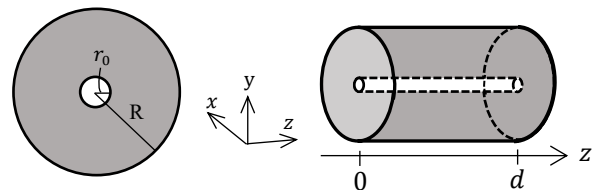


Figure 1. Computational domain

初期条件は $u = v = w = 0.0, T = 20.0$

$z = 0, d$ においては周期境界条件を課す。

レイノルズ数 $\text{Re} = 5000.0$, プラントル数 $\text{Pr} = 0.713$, 体積膨張率 $\beta = 0.001$, 重力 $g = 9.8$, 基準温度 $T_0 = 20.0$ とした。

境界条件では $u = v = w = 0.0$

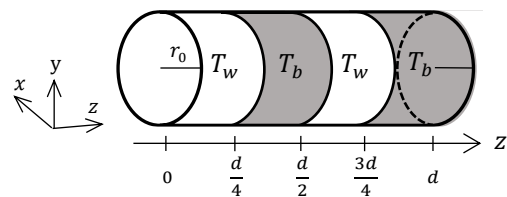
圧力 p は境界の法線方向微分が 0.0 ,

遠方境界では温度 $T = 20.0$ とする。

円柱表面では以下の条件を課す。

① 縦縞

$$T_w = 35.0, \quad T_b = 38.0$$



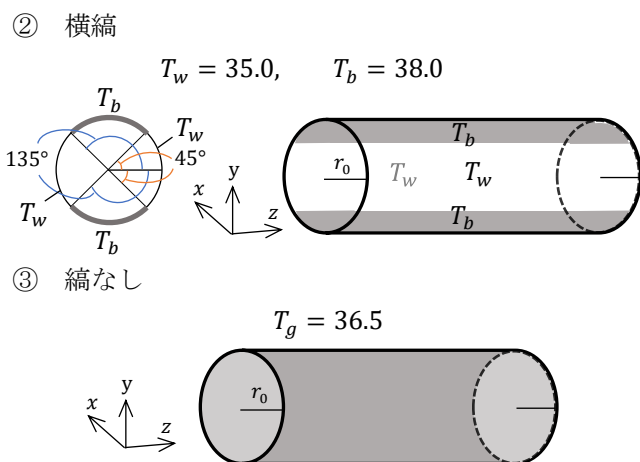


Figure 2. Boundary condition in each case

2.3 数値解析法

支配方程式はフラクショナルステップ法を用い圧力ポアソン方程式を導いて解く．数値計算のための離散化については差分法を用いる．移流項には 3 次精度上流差分，その他の空間微分には 2 次精度中心差分を適用する．時間積分においてはオイラー陽解法を用いる．またO型格子をz方向に並べた 3 次元格子を用い，方程式を一般座標変換して解いた．格子分割数は $81 \times 50 \times 50$ とした．

3. 熱流束

熱流束とは単位時間あたりに単位面積を流れる熱エネルギー量を示すものである．これは熱の流れる方向の温度勾配に比例するため，温度差が大きいほど値が大きくなる．本研究では放熱効果を表す一つの指標として，この値を各ケースで比較する．Figure 3. のグラフでは円柱表面付近の熱流束の時間変化を表している．

4. 可視化結果と考察

Figure 3. に計算で得られた温度場を示す．①②③は，投影方向をx軸正の方向にとり，y軸に関して同じ角度だけ少し回転させて表示した図である．

各図において左から順に $t = 20$ 秒， $t = 140$ 秒の時の $T = 21.0$ の等温面を表している．右のグラフは熱流束の時間変動を示し，横軸が $t = 0 \sim 140$ 秒の時間軸，縦軸が円柱表面付近の熱流束を表している．画像は Clef3D を用いて作成した．

Figure 3. ①②③の図より，①縦縞の場合には他の②③と比べて，流れ場や温度場の発達の様子が大きく異なることが明らかである．また①は熱流束の時間変動も大きい．①の縦縞型の熱源によって熱対流の流れ場がより複雑化していることが考えられる．

5. まとめ

縞状熱源を表面に配置した円柱から発生する熱対流の数値シミュレーションを行い，温度場や熱流束の解析を試みた．その結果熱源が縦縞状であることにより，流れ場がより複雑な構造となり，熱流束の時間変動もより大きくなった．

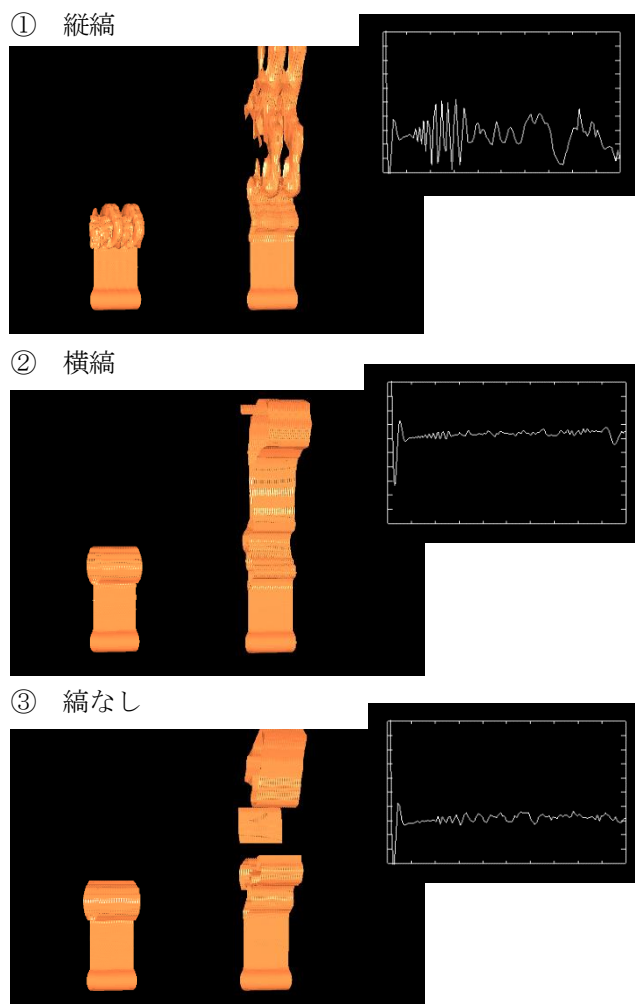


Figure 3. Time development of an isosurface and time history of heat flux on the cylinder surface

参考文献

[1] 河村哲也：数値シミュレーション入門，サイエンス社(2006).
 [2] 河村哲也：流体解析 I，朝倉書店(1996).
 [3] 高見穎郎・河村哲也：偏微分方程式の差分法，東京大学出版会(1994).
 [4] Brenda Larison, Ryan J. Harrigan, Henri A. Thomassen, Daniel I. Rubenstein, Alec M. Chan-Golston, Elizabeth Li, Thomas B. Smith : How the zebra got its stripes: a problem with too many solutions, Royal Society Open Science(2015).