52 加熱鉛直正方形板からの3次元
熱流動のシミュレーションによる可視化

能登勝久^o、山本和順、中島 健（神戸大学）

VIZUALIZATION OF 3D THERMALFLOW FROM A HEATED, VERTICAL SQUARE PLATE
BY NUMERICAL SIMULATION

K. NOTO*, K. YAMAMOTO*, AND T. NAKAJIMA*

The present visualization shows the limiting streamline vector, the velocity vector, the isotherm, the local Nusselt number, and the wall shear stress for the 3D thermal flow from a heated, vertical square plate by solving numerically the 3D Navier-Stokes equations and the 3D energy equation using the vector potential.

1. 緒言

広い空間内に厚さのきわめて小さい、有限高さ、有限幅の正方形の平板が鉛直に設置されている。この平板の表面温度が周囲の空気温度より高くなるように、この平板を加熱する。この平板の周囲には、自然対流が発生する。発生したこの自然対流は、3次元熱流動現象である。本現象は、より基礎的な現象である。しかしこの伝熱板からの3次元自然対流は、昔からどのような流れになるか？といわれて来た⁽¹⁾。現在でも、未解明のままである。したがって、本研究では、この3次元流れを数値解析し、その結果を可視化した。本論文ではその要点を述べる。

2. 物理モデル

物理モデルと座標系をFig.1に示す。十分に広い空間に、伝熱板が設置されている。板の高さは比較的小さいため、熱流動は定常の層流状態である。板の表面と周囲流体の温度差は比較的小さいため、温度依存性の物性値には、Boussinesq近似が適用できる。伝熱板表面温度を空間的にも時間的にも等温条件とした。伝熱板の縦横比

Fig. 1 Physical Model

* Department of Mechanical Engineering, Kobe University, Nada, Kobe 657, JAPAN

γ を 1.0 にする。伝熱平板は X-Z 面で重力方向に対して、自由に角度 α を変化できるようにした。

3. 数値解析

3.1 座標

伝熱板から発生する自然対流が、どの位置まで及ぶのかは、計算をする以前には不明である。そのため、外側境界を無限遠の位置に置いた。無限遠位置座標を座標変換して有限量の値にした。これによって、本計算では、無限に広い空間内に設置された伝熱板からの 3次元の自然対流を扱うことが可能である。

3.2 基礎方程式

本問題を支配する方程式系は、3次元の連続の式、浮力項を持つ 3次元 Navier-Stokes 方程式、および 3次元 energy 方程式である。これらを、ベクトル・ポテンシャルを導入して変形し、さらに座標変換した。

3.3 離散化およびアルゴリズム

基礎方程式系は主に中心差分で離散化し、境界条件に含まれる 1階微分を 3点式で離散化した。3次元SOR法で数値解析した。Fig.1の領域 I の 3次元格子のを計算座標空間で、基礎方程式系を連立させて数値計算を行って、その後、物理座標空間に変換する。

3.4 計算条件

流体は空気、板幅を代表長さにしたグラスホフ数 Gr は 80 および 800 である。グラスホフ数は次式で定義される。

$$Gr = (2L)^3 g \beta (\theta_w - \theta_\infty) / \nu^2$$

ここに L: 板幅の 1/2、g: 重力加速度、 β : 流体の体膨張係数、 θ_w : 伝熱板の表面温度、 θ_∞ : 伝熱板から十分に離れた領域の空気温度、 ν : 流体の動粘性係数である。

板の姿勢は Fig.1 の板の傾斜角度 α を、 0° 、 15° 、 30° 、 45° とした。ベクトルポテンシャルのソレノイダル条件の許容誤差を 4×10^{-2} とし、本計算の全体の収束の許容誤差を 1×10^{-3} とした。

3.5 可視化

得られた数値データから、限界流線、板近傍の速度ベクトル、局所ヌセルト数、および局所壁面渦度を求めた。これら、および等温線を、別に作成した作図プログラムで可視化した。

4. 結果および考察

4.1 局所ヌセルト数

Fig.2 に $\alpha = 0^\circ$ の Gr=80 および 800 の局所ヌセルト数 Nu の分布を示す。なお局所ヌセルト数を物理実験で可視化することは困難である。局所ヌセルト数は次式になる。

$$\begin{aligned} Nu &= 2Lh/\lambda \\ &= 2(-\partial \Theta / \partial Y)_Y=0 \end{aligned}$$

(1) $Gr=80$

(2) $Gr=800$

Fig.2 Local Nusselt Number ($\alpha=0^\circ$)

(1) $\alpha=15^\circ$

(2) $\alpha=30^\circ$

(3) $\alpha=45^\circ$

Fig.3 Local Nusselt Number ($Gr=800$)

(1) $Gr=80$

(2) $Gr=800$

Fig.4 Limiting Streamline Vector ($\alpha=0^\circ$)

(1) $\alpha=15^\circ$

(2) $\alpha=30^\circ$

(3) $\alpha=45^\circ$

Fig.5 Limiting Streamline Vector ($Gr=800$)

ここに、 h :局所熱伝達率、 λ :流体の熱伝導率、 $\Theta = (\theta - \theta_{\infty}) / (\theta_w - \theta_{\infty})$ 、 θ :温度、 $Y=y/L$ である。 $\alpha=0^\circ$ では、分布が左右対称になる筈であって、Fig.2に示すように、数値計算結果は左右対称になって、数値計算の正しさの必要条件を満足した。

グラスホフ数80では、Fig.2(1)のように、伝熱板のほぼ中央に局所ヌセルト数の最小値が存在する。最大値は、下端の左右の両端位置に存在する。すなわち伝熱板の中央部では、伝熱板から周囲の空気へ熱が逃げ難く、伝熱板の周辺部で熱がよく逃げ、特に伝熱板の左右の両下端から熱が最もよく逃げる事がわかる。板の表面温度を上昇させて、グラスホフ数が800になれば、Fig.2(2)のように、局所ヌセルト数の最小値の位置は伝熱板の後縁に近づく。

4.2 伝熱板を傾斜させたときの局所ヌセルト数

次に、Fig.2(2)の伝熱板を回転させて傾けたときの、局所ヌセルト数分布をFig.3に示す。局所ヌセルト数の最小値の位置が、角度 α によって変化する様子がわかる。 $\alpha=45^\circ$ の分布も左右対称になる筈で、数値計算結果は左右対称の分布を示し、数値計算の正しさの必要条件を満足した。

4.3 限界流線ベクトル

物体表面からの距離を0に近づけた限界の流線を限界流線という。Fig.2の条件に対応する限界流線をFig.4に示す。 $y/L=0.158$ の断面上のXおよびZ方向速度の合速度ベクトルを示した。なおFig.4(1)とFig.4(2)の合速度ベクトルの尺度は同一である。Fig.4(1)の $Gr=80$ では、全域でほぼx方向のベクトルであるが、伝熱板後縁近傍ではやや対称面の方に向いている。 $Gr=800$ では、Fig.4(2)のように、速度は $Gr=80$ のときより大きくなる。 $Gr=800$ の加熱板の上方では、Xが増大するほど、速度ベクトルが増大し、ブルームの特性が現れた。

この自然対流では、伝熱平板の周囲の空気が加熱板方向に吸い寄せられ、この加熱板から立ち昇るブルームを発生する。しかしFig.4のように、伝熱面上の限界流線ベクトルは上向きである。伝熱平板の外側で、ベクトルは吸い込まれる方向を持つ。

4.4 伝熱板を傾斜させたときの限界流線ベクトル

Fig.4(2)の伝熱板を回転させて傾けたときの、限界流線の変化をFig.5に示す。 $\alpha=15^\circ$ ではFig.5(1)、 $\alpha=30^\circ$ ではFig.5(2)の限界流線ベクトルになる。 $\alpha=45^\circ$ ではFig.5(3)のように対称分布になる。伝熱平板の中央領域では、限界流線ベクトルは、板が傾斜しても常に上向きの方向を持つことが特徴の一つであることがFig.5でわかった。

5. 結 論

無限に広い空間内に設置された有限高さ、有限幅の板厚の小さい加熱板からの3次元自然対流を3次元数値解析し、3次元の熱流動現象を可視化した。

文 献

1. S.Kakac, W.Aung, and R.Viskanta (edited), "Natural Convection", Springer-Verlag(1985).