

## 【研究開発】

# 電子機器の冷却に関する三次元熱流動解析 のプログラム開発

— 研究開発の中間報告（平成 6 年度） —

Program Development for Analysis of Electronic Equipment  
Cooling by Three-Dimensional Thermal Flow

能登 勝久\* 中島 健

神戸大学工学部 機械工学科

## 1 目的

平成 5 年度までに、電子機器の冷却に関する三次元熱流動伝熱で、伝熱が抑制または促進することの一部を、著者が初めて見出した。この伝熱抑制を扱った従来研究は、現在も著者以外にはない。本年の平成 6 年度は、一枚の加熱板に関して、電子機器の冷却の三次元の流動と熱移動での伝熱抑制と促進をより明確にするために、数値計算結果の三次元可視化法の開発を、目的にした。

## 2 数値解析の概要

### 2.1 解析モデル

解析モデルは、無限空間中に厚さの小さい正方形の板が設置されているとした。この板を加熱した。この板の加熱方法は、等熱流束条件である。板は鉛直姿勢である。座標系は、左手系の三次元直角座標で、 $X$  は鉛直上向、 $Y$  は伝熱面に垂直な水平、 $Z$  は伝熱面に沿う水平方向。

この板から自然対流が発生する。この自然対流は定常状態の三次元現象と考えられる。この自然対流によって、加熱板、よって電子機器内の加熱部が、自然放冷される。

### 2.2 基礎方程式系

この現象は三次元の連続の式、浮力項をもつ三次元の非線形の Navier-Stokes 方程式、三次元の非線形の温度方程式、三次元連続の式で定式化した。

\*E-mail: [noto@mech.kobe-u.ac.jp](mailto:noto@mech.kobe-u.ac.jp), Fax: 078-803-1131,  
Phone: 078-803-1109 (dial in), 078-881-1212, ext.5309.

## 2.3 数値解析

これらの基礎方程式系の数値解析には、著者が既に開発した『外側境界設定法』と『形状変換法』を導入した。『形状変換法』によって、極大と極小のアスペクト比の伝熱板周囲の自然放冷の計算が可能になった。ここにアスペクト比は、板幅/板高さ。

ベクトル・ポテンシャルを導入し、差分法で、基礎方程式系の諸式を、離散化した。離散化スキームは、数値的に最も安定な中心差分とした。離散化した方程式群の数値解法は、3DSOR法を基本とした。

# 3 本開発の必然性

## 3.1 速度ベクトルによる可視化の欠陥

XY 面、YZ 面、ZX 面の三面上の各々の速度ベクトル図で、三次元現象の流れ模様を、明確に知ることは極めて困難だった。速度ベクトルは、確かに各点の流れ情報を与える。しかし、速度ベクトルで着目する点の流れ情報と、その点に隣接する点の流れ情報の関連を把握するためには、次の二項目が必要である。

- (a) 隣接点は、X, Y, Z の三方向に存在する。そのため、隣接点のそのまた隣接点と、広領域の流れ場の把握のためには、多数の各断面上の速度ベクトル図が、必要である。
- (b) 上記の流れ場の把握は、人間の想像力に依存する。さらにその想像力には、個人差もある。

よって、速度ベクトル図は、点情報を与えることのみが、確かで、三次元現象の流れ模様の把握には、不適當であることが、分かる。

## 3.2 三次元流線とその立体表示による可視化

そのため、点情報でなく、流れの線情報が必要になる。流体力学で、線情報として、流線、流跡、流脈がある。本研究では、流れを定常状態と、想定しているため、流線、流跡、流脈の三物理量は、全く同一になる。ここでは、それらを、「流線」と呼ぶことにする。よって、三次元対流場の流線を、各点の速度ベクトルから、求めることに、問題は帰着した。

言い換えれば、三次元流線の計算法を開発し、次に、三次元流線の立体表示法を開発する必然性がある。それらの開発を試みた。その結果、4 項のように、それらの開発に成功した。

# 4 開発内容の概要

## 4.1 三次元流線の計算

一本の流線の求め方を述べる。

- A-1 : 2.3 項の計算で求めた、各格子点の速度ベクトルの値と、各格子点の位置座標を、読み込む。

- A-2 : 流体粒子を投入する任意点  $P_0$  の座標  $(X_0, Y_0, Z_0)$  を決める。投入位置は、格子上でなくてもよい。
- A-3 : 点  $P_0$  の速度ベクトル  $(U_0, V_0, W_0)$  を、点  $P_0$  を取り囲む、周囲の 8 格子点の速度ベクトルを、補間して、求める。
- A-4 : 無次元時間の微小間隔  $\Delta t$  の値を決める。(4.2 項参照。)
- A-5 : 点  $P_0$  の流体粒子は、 $\Delta t$  時間後に、点  $P_1$  に到達する。
- A-6 :  $\Delta t$  が微小なため、点  $P_1$  の座標  $(X_1, Y_1, Z_1)$  は、次式になる。

$$(X_1, Y_1, Z_1) = (X_0 + U_0\Delta t, Y_0 + V_0\Delta t, Z_0 + W_0\Delta t) \quad (1)$$

- A-7 : 粒子を投入してから、 $n\Delta t$  時間後の、流体粒子の到達位置を、点  $P_n$  とすれば、その座標  $(X_n, Y_n, Z_n)$  は、次式になる。

$$(X_n, Y_n, Z_n) = (X_{n-1} + U_{n-1}\Delta t, Y_{n-1} + V_{n-1}\Delta t, Z_{n-1} + W_{n-1}\Delta t) \quad (2)$$

- A-8 : 式 (2) によって、投入粒子の軌跡位置の下記の時系列データが、求まる。

$$P_0, P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, P_n, P_{n+1}, \dots, P_m \quad (3)$$

- A-9 : 上記 A-8 で求めた時系列値が、三次元流線の位置になる。

## 4.2 時間ステップ $\Delta t$ の値の選定

無次元の時間間隔値  $\Delta t$  は、小さければ、小さいほど、流線位置の精度は良くなる。しかし値  $\Delta t$  が小さいほど、粒子投入位置から、最終到達位置までの領域内に存在する、粒子点の個数が増大する。そのため、計算に長時間を要する。よって、精度が良く、しかも計算時間が少ない、時間間隔  $\Delta t$  の最適値を決定する必要がある。三次元流線の計算以前に、 $\Delta t$  の値の選定を、理論的に決めることは、極めて困難である。そのため、種々の  $\Delta t$  値で、4.1 項の計算を実行し、その結果を考察して、 $\Delta t$  の値を決定するのが、適正な方法である。

時間間隔  $\Delta t = 1.0, 1.0 \times 10^{-1}, 1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-4}$  の五種類で、4.1 項の計算を、種々の条件 (修正グラスホフ数、板アスペクト比、粒子投入位置) で、実行した。

その結果、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-2}$  での、粒子軌跡は、同一だった。 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-1}, 1.0$  での結果は、上記の軌跡と異なった。 $\Delta t$  の値が大きいほど、上記軌跡との差異は大きくなった。よって、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$  と選定した。

また、 $\Delta t$  の値が小さいため、点  $P_{n-1}$  と点  $P_n$  の間を、直線で結び、その直線を、流線と見なしても良いことも分かった。

## 4.3 三次元流線の立体表示

得られた一本の流線を、XYZ 系の座標で、面  $X = 0$ 、面  $Y = 0$ 、面  $Z = 0$  に、投影し、この三図面で、流線模様を把握することが、考えられる。しかし、この方法では、三面の記されている、それぞれの流れ情報を、想像・類推で、把握する必要が生じる。

この欠陥を除去するために、面  $X = 0$ 、面  $Y = 0$ 、面  $Z = 0$  で囲まれる領域内に、三次元流線を立体的に描く必然性がある。そのため、三次元流線の立体像の作成法を開発した。以下、簡単に述べる。まず、三次元流線の立体像の、面  $X = 0$ 、面  $Y = 0$ 、面  $Z = 0$  への各投影図を、二次元画面上に描いた。次に、上記の各投影図を合成して、三次元流線の立体像を、二次元画面上に作成した。

#### 4.4 プログラミング

上記の計算と作図を具体化するために、フローチャートを作成し、それに基づいて、計算と作図プログラムを、下記のように開発した。

##### (a) 『三次元流線の計算プログラム』

4.1 項では、簡単化のため、一本の流線の計算法を述べたが、プログラムでは、複数個の流体粒子が、それぞれ異なる位置に投入しても、計算を可能にした。

4.1 項では、投入粒子が、時間が経てば、どのように流れるかを対象にした。上記と逆に、投入粒子が、どういう経路を、辿って、投入位置に、到達したかも、4.1 項の発想で、可能である。そのため、投入粒子の過去の軌跡を求めることも、プログラムで、可能にした。

本プログラムで、【流線データ】が得られる。

##### (b) 『伝熱板近傍の三次元流線の立体表示プログラム』

『三次元流線の計算プログラム』で得た、複数個の粒子の、伝熱板近傍の軌跡の立体像、および面  $X = 0$ 、面  $Y = 0$ 、面  $Z = 0$  への各投影図を、同時に描くプログラムを、開発した。

##### (c) 『伝熱板から遠方域までの三次元流線の表示プログラム』

一個の粒子の、伝熱板から十分に遠方域までの軌跡を、面  $X = 0$ 、面  $Y = 0$ 、面  $Z = 0$  に投影した図を、描くプログラムを、開発した。

これらに類する市販のソフトウェアはない。

数値計算を実行し、電子機器の冷却の伝熱抑制と促進が特定可能な、三次元熱流動解析と作図プログラムが、開発できた。

#### 4.5 計算の具体的な手順

**B-1:** 昨年度開発の『三次元自然対流の計算プログラム』で、計算し、全格子点の速度ベクトル値を、生成する。この全格子点でのベクトル値を、【速度データ】と呼ぶ。

**B-2:** 全格子点の位置座標と、【速度データ】を、MT にメモリーする。

**B-3:** 本年度開発の『三次元流線の計算プログラム』で、MT に記憶されている【速度データ】を、ファイルヘデータ転送し、このデータを使って計算し、【流線データ】を生成する。

B-4: 【流線データ】を、MT にメモリーする。

B-5: 本年度開発の『伝熱板近傍の三次元流線の立体表示プログラム』、または『伝熱板から遠方域までの三次元流線の立体表示プログラム』で、【流線データ】を作図する。その結果、三次元流線の立体表示図が得られる。

#### 4.6 計算実行前の予備検討

4.5 項に記載の計算実行に先だて、下記事項を、予め検討し、明らかにした。

- (a) 収束判定のクライテリオン、
- (b) 収束回数の低減法、
- (c) 計算結果に与える格子数の影響、
- (d) 計算結果に与える表面温度勾配近似の影響。

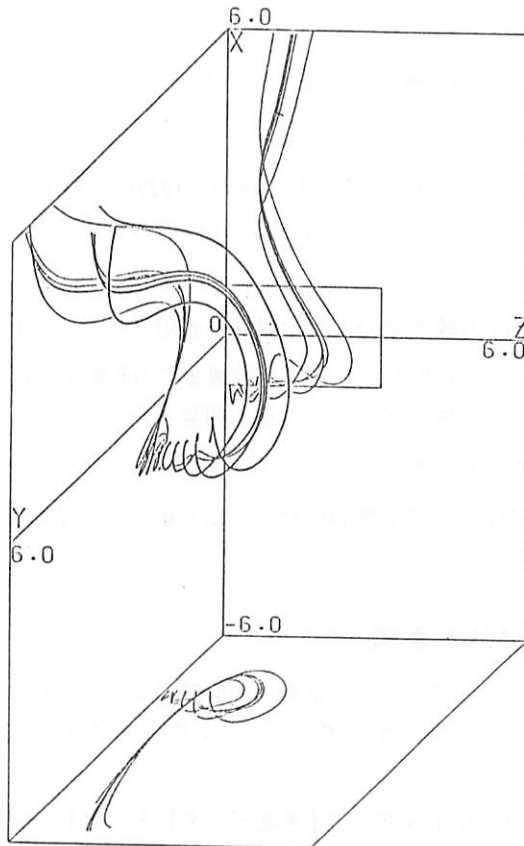


図 1: 三次元流線の立体表示の可視化例

#### 4.7 計算結果と考察

得た三次元流線の立体表示の一例を前頁の図 1 に示す。本計算の全ての三次元立体表示図の流線は、速度ベクトル図のベクトル方向と、対応していることが、確認できた。よって、三次元流線の計算と作図の方法の正しさの必要条件が、満足された。

三次元流線で、臨界アスペクト以上では、伝熱板の中央域に、巨大な渦が発生していることが、分かった。この巨大渦の挙動や大きさなどは、速度ベクトル図では、分からなかった。この巨大渦が、板上部に速度欠損と温度低下を、更に、板面上に局所ヌセルト数の Cat Eyes を、発生させることも、分かった。一方、臨界アスペクト比以下では、巨大渦が発生しないことも、分かった。上記の事柄は、電子機器の冷却に関して、重要な知見を与える。

#### 4.8 開発内容の有効性

開発した『三次元流線の計算プログラム』、『伝熱板近傍の三次元流線の立体表示プログラム』、『伝熱板から遠方域までの三次元流線の立体表示プログラム』によって、伝熱板の近傍域や、遠方域の、三次元気流の様子が、一目瞭然に、分かるようになった。本方法は、本報告で対象にした流れ以外にも、適用可能で、今後の発展性が、期待できる。

### 5 研究発表

(平成 6 年 4 月以降)

- (1) NOTO,K., YAMAMOTO,Y. and NAKAJIMA,T., 『Augmentation and Suppression of Heat Transfer in the Three-Dimensional Natural Convection from a Square Plate with Uniform Surface Heat Flux』, Proc. 10th International Heat Transfer Conference, Vol.5, 1994, pp.531-536.
- (2) 能登 勝久, 『自然および共存対流』, 日本伝熱学会誌「伝熱研究」, Vol.2, No.4, 1994, pp.25-26.
- (3) NOTO,K. KIYOTA,T. and NAKAJIMA,T., 『Convergence with the Vector -Potential Method for Three-Dimensional Natural Convection』, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.43, 1994, pp.197-203.
- (4) NOTO,K. and NAKAJIMA,T., 『Suppression of Natural Convective Heat Transfer Due to Three-Dimensional Thermal Flow』, Proc. International Symposium on Heat Mass Transfer, 1994, pp.67-72.
- (5) 能登 勝久・清田 隆・佐藤 輝・中島 健, 『自然対流熱伝達の三次元熱流動による劣化』, 日本伝熱学会主催「第 31 回日本伝熱シンポジウム」(於:札幌), Vol.1, 1994 年 5 月, pp.220-222.

- (6) 能登 勝久・佐藤 輝・中島 健,『三次元自然対流の熱流動による熱伝達の抑制－板アスペクト比が大きいときの二次元渦－』,日本機械学会主催「北九州地方講演会」(於:北九州),1994年11月,pp.182-184.
- (7) 能登 勝久・佐藤 輝・清野 和雄・中島 健,『三次元自然対流の熱伝達の抑制に関する研究－板アスペクト比が大きいときの巨大渦の発生－』,日本伝熱学会主催「第32回日本伝熱シンポジウム」(於:山口),1995年5月,pp.449-450.
- (8) 能登 勝久・清野 和雄・中島 健,『三次元自然対流の伝熱の促進と抑制』,日本機械学会主催「平成7年度熱工学講演会」(於:大阪),1995年11月,印刷中.
-