モアレ干渉法による自然対流温度場の計測*

石原 勲^{*1}, 村上 巧^{*2}, 南 秀一^{*3}Temperature Measurement of Natural Convective Field
Using Moiré Interferometry

Isao ISHIHARA, Takumi MURAKAMI and Syuichi MINAMI

Optical interferometers, such as the Mach-Zehnder interferometer, have often been used to measure the temperature of transparent fluids. In this paper, we utilize a Moiré interferometer in which a conventional interferometer is combined with the Moiré technique. By applying a fringe scanning technique to this Moiré interferometer, a new fringe analytical system is obtained and the fringe analysis is automated with the aid of a personal computer. The temperature field of the air around a vertical heated plate under natural convection is measured and compared with the theoretical solution. The temperature measured using this system is in good agreement with the theoretical one. It is verified that this optical system is applicable for measuring the temperature of transparent fluids.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Boundary Layer, Mach-Zehnder Interferometer, Moiré Interferometry, Temperature Measurement, Digital Image Processing, Fringe Scanning

1. 緒 論

透明な流体の二次元温度場を計測する方法として従来からマッハ・ツェンダ干渉計などの光干渉法が用いられてきた。これによって二次元温度場を定性的に表すことは容易ではあるが、得られた干渉縞から温度として定量化するのは通常、人手によって行われ、面倒な作業で、しかも高い精度を得にくいのが実状である。

本研究では、得られた干渉縞の解析に定量的で高精度な測定が可能な干渉法の一つである、モアレ干渉法を応用した。このモアレ干渉法は、横関⁽¹⁾によって示された干渉縞計測法に用いる干渉計にモアレ

技術を採用したものである。さらにこれにTVの走査線を用いた縞解析技術である縞走査法も組み合わせた新井ら⁽²⁾の提案した新しい縞解析法も導入した。

これらによって、従来純粋に光学的技術によって解析が行われてきた分野に、計算機による情報処理技術を組み合わせることにより、高速・高精度で空間的に高分解能な干渉縞の自動解析が可能となる。

新井ら⁽³⁾はこの計測法を二次元ノズル内の気体の密度場測定に使用しているが、温度場計測への適用性については報告されていない。

本報では、鉛直加熱平板周りの自然対流場を測定対象として、その温度分布を計測した。その結果、温度の測定値は理論値とよく一致し、本計測法の温度測定への適用性が確かめられた。

2. 記 号

* 原稿受付 1997年2月20日。

^{*1} 正員、関西大学工学部 (〒564 吹田市山手町3-3-35)。^{*2} 三菱重工業(株)高砂製作所 (〒676 高砂市荒井町新浜2-1-1)。^{*3} THK(株) (〒141 東京都品川区西五反田3-11-6)。

Gr_x : 局所グラスホフ数 $= g \beta \Delta T \cdot x^3 / \nu^2$

h_x : 熱伝達率

I : 光強度

k : 空気の熱伝導率

L_h : 加熱部の長さ

n : 空気の屈折率

Nu_x : 局所ヌセルト数 $= h_x x / k$

p : 圧力

Pr : 空気のプラントル数

T : 温度

x : 鉛直方向座標

y : 水平方向座標

β : 空気の体膨張係数

λ : 波長

ΔT : 温度差 $= T_w - T_a$

ν : 空気の動粘性係数

ϕ : 位相

ϕ : 位相差

添 字

a : 周囲

w : 伝熱面

x : 局所

3. 実験装置と伝熱面

実験装置は図1に示すように光学系、画像処理装置と伝熱面から構成されている。光学系にはHe-Neレーザを光源としたマッハ・ツェンダ干渉計が用いられた。干渉縞の画像はCCDカメラの素子上に投影され、フレームメモリ(512x512画素, 8bit階調)に取り込まれてパーソナルコンピュータで処理される。光学系の有効視野は直径約65mmで、空間分解能は x, y 方向ともに0.134mmである。

Fig.1 Experimental apparatus

伝熱面は高さ60mm、幅63mm、厚さ8mmの銅平板で、その裏面に薄膜電気ヒータが取り付けられ通電加熱される。そして伝熱面内部の表面近くには、表面温度測定のために、熱電対が埋め込まれている。この伝熱面が光路内に鉛直に設置される。

4. 温度計測方法

4.1 モアレ干渉縞の位相量 図1のマッハ・ツェンダ干渉計の参照光路のミラーM1を微小角回転させると、回転角に応じた波面収差が発生し、図2の左にみられるような直線格子状の有限幅干渉縞が得られる。この干渉縞を基準縞とする。つぎに干渉計の試験光路内に設置された鉛直平板を加熱すると、参照光路と試験光路の間に光路差が生じ、図2の右に示す変形基準縞が得られる。これらの2枚の縞画像から位相差を求める。

はじめに、図1のCCDカメラの素子面上に投影された基準縞と変形基準縞の画像をフレームメモリに取り込み、その輝度データをコンピュータに入力する。そして、それぞれの画像におけるモアレ縞をコンピュータの内部で発生させ、位相分布を計

Fig.2 Input pictures and calculation of phase difference

Fig.3 Virtual gratings

算すると、温度変化前（均一温度場）の位相分布 $\phi_b(x,y)$ と温度変化後（加熱温度場）の位相分布 $\phi_a(x,y)$ とを求めることができる。これらの位相分布から、温度変化による位相変化量 $\phi(x,y)$ は図 2 に示すように変化前の位相分布から変化後の位相分布を減じた式(1)として求めることができる。

$$\phi(x,y) = \phi_a(x,y) - \phi_b(x,y) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

この位相演算は図 3 に示す TV の走査線を利用した仮想格子を用いることによって行う⁽⁴⁾。この仮想格子は走査線 4 本を 1 組と考え、これと干渉縞を重ね合わせてモアレ縞を発生させ、新井ら⁽²⁾による以下の演算によって位相分布を求める。

一般にモアレ縞の透過光強度分布は次式で表される。

$$I(x,y)_m = A(x,y) + B(x,y) \cos[\phi(x,y) + m\pi/2] \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $A(x,y)$ 、 $B(x,y)$ はモアレ縞画像の各部分での色むら、反射むら、照明むらを表す係数である。そして式(2)において、これらの係数を消去して、位相分布の情報を得るためにつぎの演算を行う。

$$F_1(x,y) = I_0(x,y) - I_2(x,y) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$F_2(x,y) = I_1(x,y) - I_3(x,y) \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} [F_2(x,y)/F_1(x,y)] \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで $I(x,y)$ の添字の 1, 2, 3 は 0 よりも $\pi/2$, π , $3\pi/2$ だけ位相が異なっていることを示す。この方法では位相の異なる 4 種類のモアレ縞が必要であるが、図 3 に示す仮想格子である走査線一本分をずらすことによって発生するモアレ縞の位相が $\pi/2$ ずれる性質を利用して、一枚の撮影画像から位相の異なる 4 種類のモアレ縞を作ることができる。本法は、これを利用して図 2 の ϕ_a と ϕ_b を計算する。

4・2 位相量の温度への変換 測定温度場内の任意の位置での温度、圧力、屈折率をそれぞれ $T(x,y)$, $p(x,y)$, $n(x,y)$ とし周囲空気の温度、圧力、屈折率を T_a , p_a , n_a とする。

4・1 で得られた位相変化量 $\phi(x,y)$ は 1 波長 (λ) に対して 2π (rad) に対応するので、密度変化による光路差は次式のようになる。

$$\Delta L(x,y) = \lambda \cdot \phi(x,y) / (2\pi) \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

また光路差は屈折率に幾何学的距離を乗じたものの差で得られ、温度場内の任意の位置での屈折率分布は

$$n(x,y) = n_a - \Delta L(x,y) / L_h \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

となる。ここで L_h は加熱区間の光路長を示す。He-Ne レーザの波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ の標準空気（炭酸ガス 0.03% を含む $T_s = 288.15 \text{ K}$, $p_s = 101.325 \text{ kPa}$ の乾燥空気）の屈折率を $n_s = 1.000276519$ とすると、 n_a は次式で表される。

$$n_a = (n_s - 1)(T_s/T_a)(p_a/p_s) + 1 \quad \cdots \cdots (8)$$

測定場の温度は Gradstone-dale の法則から、圧力が変わらないとすると

$$T(x,y) = (n_a - 1) / [n(x,y) - 1] \cdot T_a \quad \cdots \cdots (9)$$

によって求められる。

上述の演算は、加熱による熱的な影響を受けない伝熱面下端から約 9.4 mm 下部の周囲空気温度を基準温度 T_a として、鉛直上向きに進める。

実際には、加熱領域の末端の影響(end effect)によって計測上誤差が生じる。そこで鉛直平板の両側面にも加熱面と等しい温度場の境界層が発生しているものとして L_h の補正を行っている⁽⁵⁾。

5. 実 験

実験は、4・1 で述べたように仮想基準格子（図 3）のピッチと干渉縞のピッチ間隔が等しくなるように調整した後、試料平板を加熱する前に、基準縞画像（図 2 の左の写真）を CCD カメラによりフレームメモリ内に取り込む。そして、加熱後定常状態になったことを確かめてから、変形基準縞画像（図 2 の右の写真）を取り込み上述の演算処理を行い温度分布を得る。画像の取り込み時間は 1/60 s である。

なお、周囲空気温度は $T_a = 26.7^\circ\text{C}$ で伝熱面温度を $T_w = 46.5^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 19.8 \text{ K}$) として実験を行った。

6. 実験結果と考察

6・1 温度分布 図 4 は得られた温度データ

を20等分して、それを等温線で表示したものである。温度分布を見やすくするため、y方向には2倍に拡大してある。ただしデータ数が多いので、ここではx方向には1/10に間引いて描いている。

伝熱面近傍では等温線間隔が密になっており、温度勾配が大きく、遠方では周囲温度に漸近する様子が示されている。伝熱面下端はシャープ・エッジでないため、温度境界層が下方に広がっているのが見られる。低温領域で等温線が乱れているが、これはミラーの周辺部で光強度が弱いことに起因していると考えられる。また温度の計算方向が下部から鉛直上方に進めているので、ミラーのきずやごみなどのために下部で計算誤差が生じると、それが下流まで伝播しているのが一部に見られる。

Fig.4 Isotherms around a heated plate

Fig.5 Temperature profiles

Fig.6 Comparison of temperature profile between experiment and theory

図4のデータから $x = 10, 20, 30, 40$ mmでのy方向の温度分布を示したのが図5で、yの測定範囲は100画素=13.4 mmである。yの大きい範囲で上述のように温度の凹凸があるものの、全体的には伝熱面温度から周囲温度への連続した滑らかな温度分布が示されている。

このデータと境界層方程式の厳密解⁽⁶⁾とを比較するために、無次元化して示したのが図6である。この結果、温度計測値が理論値とよく一致しており、本モアレ干渉法の温度測定への妥当性が確認された。

なお温度測定精度は、モアレ干渉法による縞間隔の測定精度が $\lambda/40$ 以上が可能とされている⁽³⁾ので、本計測システムに当てはめると0.1 K程度となる。

6・2 熱伝達率 得られた温度分布から伝熱面近傍の温度データを用いて温度勾配を求め、次式で熱伝達率を算出する。

$$h_x = -k(dT/dy)_{y=0}/(T_w - T_a) \quad \dots\dots\dots(10)$$

図7は熱伝達率をヌセルト数とグラスホフ数の関係で示したもので、測定されたデータすべてを表示している。グラスホフ数の小さい範囲で、ヌセルト数の実験値が理論値よりやや低い値を示している。これは、理論では境界層が伝熱面先端から発生・成長すると仮定しているのに対して、実験に供

した伝熱面の下端がシャープ・エッジでないため、図4から分かるように、境界層が $x=0$ で既にある程度の厚さを持っているからである。このような境界条件の違いを考慮すると、実験値は理論値とよく一致しているといえる。

Fig.7 Heat transfer coefficient

7. 結 論

自然対流下の鉛直加熱平板周りの温度場の測定にマッハ・ツェンダ干渉計を用い、得られた干渉縞の解析にモアレ技術と縞走査技術を組み合わせ、さらにパーソナルコンピュータの援用によって温度の自動計測が可能となり、瞬時に二次元温度場の測定ができた。また温度測定の結果から、温度分布の可視化表示や熱伝達率の算出が容易にできる。

実験の結果、伝熱面周囲の温度分布さらには熱伝達率は理論値とよく一致し、本計測法の温度測定への適用の妥当性が示された。

謝 辞

本研究を行うに際し、本学・勝田勝太郎名誉教授にはご丁寧に指導を頂いた。また工学部新井泰彦助教授から光学系ならびに干渉縞解析について適切な助言を頂いた。記して心から感謝する。

文 献

- (1) 横関, 光学, 12-6(1983), 501-509.
- (2) 新井・ほか2名, 光学, 20-2(1991), 86-91.
- (3) 新井・倉田, 光学, 15-5(1986), 402-406.
- (4) 矢田貝・出澤, 応用物理, 47-4(1978), 370-375.
- (5) R.J.Goldstein: Measurements in Heat Transfer(2nd ed.), (1976), 27-284, McGraw-Hill.
- (6) J.A.Adams and D.F.Roger, Computer-aided Heat Transfer Analysis, (1973), 281-295, McGraw-Hill.