レーザホログラフィー干渉法による三次元温度場計測* (光偏向の数値シミュレーションとその測定誤差の補償)

加 藤 征 三^{*1}, 丸 山 直 樹^{*1}

Three-Dimensional Temperature Measurement by Laser-Holographic Interferometry (Numerical Simulation of Light Deflection and Its Quantitative Compensation for Measurement Error)

Seizo KATO and Naoki MARUYAMA

A numerical simulation is performed on the deflection characteristics of the incident measuring light rays passing through the thermal boundary layer developing along an isothermally heated flat plate. The additional fringe order shift and fringe position displacement due to light deflection are calculated, and compensation for the deflection measurement uncertainty is made by analyzing the fringes of real holographic interferograms. The validity of this compensation is confirmed by experiment on the combined free and forced convection flow field in the thermal entrance region of a horizontal rectangular duct with a constant wall temperature.

Key Words: Laser Holography, Temperature Measurement, Light Deflection, Measurement Error, Thermal Entrance Region

1. は じ め に

著者らは先に、温度境界層が発達する方向にレーザを照射して得られるホログラフィー干渉じまから熱伝達の三次元温度場を計測する方法を開発し、これを壁温一定の水平正方形等温管内の温度助走区間に適用して、自然・強制複合対流場においてもそれが有用であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、ホログラフィー干渉法を三次元温度場の定量計測法として確立するには測定誤差の要因を明らかにし、それを自動補償するシステムを構築することが望まれている。温度計測誤差の主要因として、干渉計の測定光が屈折率変化の生じている温度場を通過する際に生ずる光の偏向がある。

この光偏向は光学的計測法では不可避な現象であり、これによって干渉じまのしま次数やしま位置に付加的なシフトが生じて測定誤差になる。とくに温度こう配が急な壁面近傍では大きく偏向されるので、壁面近くの温度や熱伝達率の算定には光偏向による誤差補償が必要である。光偏向の度合いは対流場の温度分布、すなわち屈折率変化によるので、レンズなどの挿入によって一様には補償できず、干渉じまを撮影する TV

カメラレンズの焦点位置によって光偏向による干渉じま次数やしま位置のシフト量が異なってくる。つまり、平均的に温度測定精度を高めるには干渉じまを記録するカメラレンズの焦点位置をあらかじめ問題に応じた適切な位置に設定する必要があると思われる。

本研究では、レーザホログラフィー干渉法による温度計測法の定量的精度をさらに向上させる目的で、光偏向の数値シミュレーションを行い、光偏向による干渉じま次数としま位置のシフト量を算出してこれからの測定誤差の補償を試みる。ここでは、対流伝熱場として基本的な等温加熱平板上に発達する温度境界層を考え、そこを通過する測定光の偏向経路と干渉じまを撮影するカメラレンズの焦点位置の差異による計測誤差を検討する。また、著者らが行っている水平正方形等温加熱管内に発達する自然・強制複合対流場の三次元温度場に対して得られる干渉じまパターンをカメラレンズの焦点位置を種々変化させて撮影し、得られた干渉じまパターンから干渉じま解析法によって温度および熱伝達率を算出して実験的検証を行うと共に、適切な干渉じまの補償方法と最適撮影位置など、温度計測に与える測定誤差を定量的に評価する。

* 原稿受付 平成3年3月18日。

^{*1} 正員、三重大学工学部(〒514 津市上浜町1515)。

2. 光偏向の数値シミュレーション

2.1 計算手法 ここでは図1に示すような等温の二次元平板上に発達する温度境界層を考え、境界層を通過する測定光の偏向経路の数値シミュレーションを行う。温度境界層は、これまで著者らが対象としている強制・自然複合対流が生じている程度のレイノルズ数範囲を考えると、先端からの距離 x における温度境界層厚さ δ_T は式(1)により表すことができる⁽³⁾。

$$\delta_T/x = C \cdot Pr^a \cdot Re_x^b \quad \dots\dots\dots (1)$$

(C, a, b : 定数, Pr : プラントル数, $Re_x = U_1 \cdot x / \nu$: レイノルズ数)。この温度境界層を任意の高さ z_k で平板と平行に入射した光線は、式(2)で示される全しま次数シフト量 S_k を受ける⁽¹⁾⁽²⁾。

$$S_k = (1/\lambda) \sum_{j=1}^n (\Delta n_j \cdot \Delta x_{k,j}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(λ : 測定光線の波長, $\Delta x_{k,j} = x_{k,j} - x_{k,j-1}$: 境界層を n 個の等間隔の微小層の層に分割したときの j 番目の微小層における光路長, $\Delta n_j = n_1 - n_j$: j 番目の微小層の自由流に対する屈折率差)。なお、式(2)を直線経路をとる理想測定光に適用する場合の S_k を S_{sk} と、また偏向を伴う測定光に対する場合を S_{dk} とそれぞれ置くことにする。

各測定光は順次微小温度境界層と交差するが、このとき各界面で透過波と反射波に分離される。本計算においては、界面前後の屈折率からスネルの法則によって屈折波の角度を算出するが、そのとき全反射条件が満足されるときのみ界面において反射し、他は屈折するものとした。したがって、図2に示す3種の経路のいずれかをとる。なお、図2中 T および N はそれぞれ測定光線と界面との交点における界面の接線および法線であり、水平線 H からの角度 γ は界面の微係数より求められる。

数値計算としては、任意の高さ z_k の測定光線が図2の経路のいずれかに従うと判定しながら微小層と

図1 平板上の温度境界層とステップ法によるしま解析

交差する位置および角度を順次算出し、テストセクションを通過する間に受ける全しま次数シフト量 S_{sk} および S_{dk} を算出する。また、テストセクション出口 $x = L$ (平板全長) における測定光の高さ方向の全偏向量 Δz_k および全偏向角度 α_k を計算する。 Δz_k と α_k は実際に撮影記録される干渉しまパターンのしま次数とし、また位置を修正補償するために後に用いる。

計算条件としては、3章で述べる水平正方形等温加熱管内に発達する自然・強制複合対流場の実験結果と比較検討するため、流入温度を $T_1 = 288$ K、レイノルズ数を $Re_L = 12\,000$ 、平板長を $L = 300$ mm とし、平板後端 $x = L$ における境界層厚さ δ_{TL} を正方形管路の水力直径 $d_h = 20.0$ mm に対して $\delta_{TL}/d_h = 1/3, 1/2, 2/3$ 、すなわち $\delta_{TL}/L = 1/45.0, 1/30.0, 1/22.5$ の3種類に、また平板壁温 T_w と自由流温度 T_1 との温度差 $\Delta T = T_w - T_1$ を 35 K と 55 K の2種類に変化させて、光偏向経路の数値シミュレーションを行った。なお、各微小層の屈折率 n_k は高さ z の一次関数と第一近似することにした⁽⁴⁾。

2.2 計算結果と考察 図3は上記の方法によって数値シミュレーションされた光偏向経路の一例を示す。壁面に近い光線ほど偏向は著しく、 $Re_L = 12\,000$ 、 $\Delta T = 55$ K に対する最大の偏向量、偏向角度および光偏向による付加的しま次数シフト量はそれぞれ $\Delta z_{\max}/L = 2.7 \times 10^{-3}$ 、 $\alpha_{\max} = 4.4 \times 10^{-3}$ rad、 $\Delta S_{d\max} = 0.76$ にも達し、光偏向による測定誤差の補償が必要であることが推察される。

図2 測定光線の経路パターン

図4は光の偏向を伴う場合の各測定光線が受ける全しま次数シフト量 S_{dk} を、光偏向がない理想測定光が受ける全しま次数シフト量 S_{sk} と比較して示す。横軸は無次元測定光高さ $\eta_k = z_k/\delta_{TL}$ であるが、この無次元表示を用いると S_{sk} は温度境界層厚さ δ_{TL} の変化に対しては独立で温度差 ΔT のみに依存する。光偏向を受ける場合、 S_{dk} の変化傾向は理想光の場合と同様であるが、各測定光線 η_k に対しては S_{sk} より小さくなっており、とくに温度境界層が薄い場合 ($\delta_{TL}/L=1/45.0$) には壁面近傍では5%以上小さく、温度に換算して3 K以上理想光より過小に算出されてしまうことには注意を要する。

図5はテストセクション出口の平板後端での測定光の全偏向量 $\Delta Z_k = \Delta z_k/L$ および全偏向角度 α_k の分布を示す。平板壁面に近い測定光ほど多数の微小境界層と交差し、また、屈折率差の大きい場を通過するため、全偏向量、全偏向角度共に増加している。すなわち、加

図3 測定光の偏向経路の数値シミュレーション

図4 干渉じま次数シフト量分布の比較 (S_{sk} : 理想測定光, S_{dk} : 偏向を伴う実際測定光)

熱平板壁面近傍を通過する測定光線の偏向は大きく、 Δz_k や α_k を算出して干渉じま次数シフト量やしま位置を補正する必要があることがわかる。なお、図5において $\eta_k < 0.25$ の平板近傍で、とくに $\delta_{TL}/L \geq 1/45.0$

図5 平板後端における各測定光線の総偏向量 ΔZ_k および総偏向角度 α_k

図6 しま次数シフト量の修正による温度分布の変化および光偏向による温度誤差

図7 光偏向によるカメラ撮影時の干渉じま位置の変位

のより薄い境界層に対して ΔZ_k と α_k が直線より偏位してばらつきが見られるが、これは図2(b), (c)のパターンが図2(a)のパターンに比較してより多く出現するためであり、今後境界層の分割数などに工夫を加える必要があると思われる。

図6は図4の理想光と実際光による全しま次数シフト量 S_{sk} と S_{dk} より求められた温度分布 ($\delta T_L/L = 1/45.0$ の場合)を示す。図6中の無次元温度 θ_{sk} と θ_{dk} はそれぞれ前述の S_{sk} と S_{dk} から Gladstone-Dale 式を用いて計算される温度 T_{sk} と T_{dk} を次式のように無次元化したものである。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{sk} &= (T_{sk} - T_1) / (T_{ws} - T_1) \\ \theta_{dk} &= (T_{dk} - T_1) / (T_{ws} - T_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T_{ws} は理想光による全しま次数シフト量 S_{sk} の分布から得られる壁面温度 ($T_{ws} = T_w$) である。なお、次式で定義される無次元温度 θ_{ck}

$$\theta_{ck} = (T_{ck} - T_1) / (T_{ws} - T_1) \dots\dots\dots (4)$$

の温度 T_{ck} は、従来より光偏向による付加的な干渉じまシフト量を修正するのに用いられる式⁽⁴⁾

$$\Delta S_k = n_1 \lambda L / (12 w^2) \dots\dots\dots (5)$$

(w : 干渉じま幅) によって修正したしま次数シフト量 S_{ck}

$$S_{ck} = S_{dk} + \Delta S_k \dots\dots\dots (6)$$

から求められた温度である。なお、式(5)は平板後端での総偏向角度 α_k を用いると

$$\Delta S_k = n_1 L \cdot \tan^2 \alpha_k / (12 \lambda) \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、理想光のしま次数シフト量 S_{sk} より求められた温度 θ_{sk} が評価基準と考えられるから、これと光偏向を受けた場合の実際光のしま次数シフト量 S_{dk} より算出される温度 θ_{dk} および従来の修正式(6), (7)による温度 θ_{ck} との温度差異 $\Delta \theta_{dk} = \theta_{dk} - \theta_{sk}$ および $\Delta \theta_{ck} = \theta_{ck} - \theta_{sk}$ も図示してある。図6において実線で示す θ_{sk} の温度分布が理論的に合理的なものであるから、光偏向のある実際光で得られる干渉じま次数シフト量 S_{dk} から計算される温度の値 θ_{dk} にはかなりの誤差が含まれ、偏向が大きい壁面近傍や温度差の大きい場合には5%以上にもなる。この

図8 カメラ焦点位置が干渉じま位置変位に及ぼす影響

誤差を従来の修正式(6), (7)によって補正すると、本計算条件範囲内で全くしない場合に比べ約50%精度が向上するがいまだ十分でなく、 S_{dk} を正確に算出する必要があることがわかる。

次に、光偏向を受けた測定光によって生ずる干渉じまを撮影する場合のしま位置の変位を考えてみる。図7はTVカメラレンズで干渉じまを撮影する場合の結像面におけるしま位置の変位の様子を示す。その変位 $\Delta Z_{Tk} = \Delta z_{Tk} / L$ は図7に示すような幾何学的条件から算出されるが、その結果を図8に示す。この変位量はカメラ撮像面位置 x_f に依存しており、偏向角度が大きくなる壁面近傍の測定光線ほどしまの変位が大きくなっている。また、この分布は正負に分布しており、最適なカメラ撮像面位置 $(x_f)_{op}$ が存在することを示唆している。したがって、加熱条件によって最適な撮像面位置 $(x_f)_{op}$ にカメラレンズの焦点を合わせると、平均的に良好な精度で温度を算出することができる。しかし、測定光の高さにより光偏向による温度計測精度が異なるので、本計算法を逐次的に繰返す自動補償システムを構築して、精度の高い温度の算出を行うのが実用的にも合理的と思われる。

図 12 干渉じま撮影焦点位置が伝熱面平均ヌッセルト数に及ぼす影響および干渉じま修正の効果

出されるしま次数シフト量 S_{dk} に対する理想光のしま次数シフト量 S_{sk} の補正量 $\Delta S_k = S_{sk} - S_{dk}$, およびしま位置の変位量 Δz_{rk} を用いて修正された干渉じまから求められた平均ヌッセルト数である。また, Nu_e はエネルギーバランスから算出される平均ヌッセルト数であり, ここでは評価基準値と考えられる。図 12 から明らかなように, Nu_1 は Nu_e とかなり差異があり, 従来行われている式(5)のみによる干渉じまの修正では不十分で, カメラ撮像面位置によってもばらつきが大きい。一方, 本報告で述べた方法による修正の場合にはかなり改善され, Nu_2 は Nu_e にほぼ一致するようになり, カメラ撮像面位置によるヌッセルト数の基準値からのばらつき ΔNu も, $\Delta T = 35$ K の場合には最大 $\Delta Nu_1 \approx 0.5$ が $\Delta Nu_2 \approx 0.2$ に軽減されている。したがって, 本論文で提案した光偏向経路の数値シミュレーションによるカメラ撮像面位置を含む光偏向に起因する干渉じまの誤差補償は, 本干渉じま解析から算出される管内平均熱伝達率がエネルギーバランスから実験的に求められる熱伝達率にばらつきも少なくほぼ一致する結果を与えることができ, 実験的にも妥当なものであることが確認された。

4. 結 論

レーザホログラフィー干渉法による三次元温度場計測の測定精度向上を阻害する要因として, 測定光が温度場を通過する際に生ずる光偏向による干渉じま次数の付加的シフト量と干渉じま位置の変位量があることを指摘し, 光偏向による干渉じまの定量的誤差補償法について検証した。本論文ではまず基本的な等温二次元平板上に発達する温度境界層を取り上げ, 境界層の発達する方向に入射させた測定光の偏向経路に関する数値シミュレーションを行い, 光偏向による干渉じま

次数シフト量と干渉じま位置の変位量を求値し, 光偏向が温度測定誤差に及ぼす影響は壁面近傍ではかなり大きく修正の必要があること, 干渉じま撮影用カメラレンズの撮像焦点位置にも留意すること, 本計算法によってほぼ満足できる補償が可能であること, などを明らかにした。また, 水平正方形等温加熱管内助走区間の複合対流場の実験を行って, 平均ヌッセルト数を干渉じま解析とエネルギーバランスから求値, 比較した結果, 本論文で述べた干渉じまの修正法が合理的なものであることが検証された。なお, 本報で提案する光偏向による干渉じまの誤差補償法は以下の手順である。

(1) 撮影された干渉じまから測定対象とする温度場の概略を推察し, それに対する屈折率分布を仮定する。

(2) スネルの法則に従って伝熱場を通過する測定光の経路をステップ法に従って逐次算出し, テストセクション出口の総偏向角度ならびに総偏向量を求める。

(3) それより干渉じまパターンの位置ならびにしま次数を理想光に対するものへ修正する。

(4) 修正された修正しま次数シフト量ならびにしま次数の位置よりステップ法により温度分布を算出する。

なお, 本手法では対象とする温度場の概要を推測する必要があるが, 実験より干渉じまパターンが得られるので近似的に仮定でき, これに基づく光偏向シミュレーションで算出される干渉じまパターンから再度修正すれば, 逐次的に近似精度を上げることができる利点がある。

本研究は, 文部省科学研究費補助金(一般研究C)ならびに中部電力基礎技術研究所研究助成金を受けたことを付して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 加藤・丸山, 機論, 54-505, B (1988), 2654.
- (2) Kato, S. and Maruyama, N., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2-3 (1989), 333, Elsevier.
- (3) Eckert, E. R. G. and Drake, R. M. Jr., *Analysis of Heat and Mass Transfer*, (1979), 281, McGraw-Hill.
- (4) Hauf, W. and Grigull, U. (Irvine, T. F. Jr. and Hartnett, J. P., ed.), *Advances in Heat Transfer*, 6 (1970), 133, Academic Press.
- (5) Kato, S. and Maruyama, N., *Proc. SPIE's 1991 Int. Sympo. Opt. Appl. Sci. Eng. Laser Interferom. IV: Comput. Aid. Interferom.*, 1553 (1991), 298.