

日本機械学会論文集(B編)  
49巻442号(昭58-6)

資料

## ウォラストンプリズムを用いたシュリーレン干渉計による 平板の強制対流熱伝達率の測定\*

藤田 尚毅\*\*, 坪内 為雄\*\*\*  
Naotake FUJITA, Tameo TSUBOUCHI

**Key Words:** Forced Convection, Heat Transfer, Schlieren Interferometer, Flat Plate, Measuring Method, Wollaston Prism, Double Refraction

### 1. 緒 言

加熱物体まわりの温度場を光学的に可視化する方法は、その性質から多くの利点を有するために、熱伝達率を求めるための有効な手段として広く使われている<sup>(1)</sup>。このなかでも特に、干渉法は現象を定量的に測定することに適している。しかしながら、強制対流熱伝達率の定量的測定への応用は、自然対流の場合に比べて少ないようである。最近、他の干渉計と比べて取扱い操作が簡単で、比較的安価に装置を組めるということから、ウォラストンプリズムを用いたシュリーレン干渉計が使用されるようになってきており、垂直平板<sup>(2)(3)</sup>や密閉空間<sup>(4)(5)</sup>の自然対流熱伝達率の測定、あるいは軸対称プラズマの温度測定<sup>(6)</sup>などに適用されている。この方法はウォラストンプリズムを通過した光線が複屈折により2方向に分割される性質を利用するものであるが、分割された2光線間距離が小さいために、M-Z干渉計に比べて耐震性があり、送風機や非常実験用加振機などの振動源が近くにある場合でも、防振にあまり気をつかわずに使用できるという利点がある。また口径の大きなシュリーレン鏡を用いることにより、広い面積を一度に測定することができる。

従来の方では、通常、分割された2光線間距離を微小にして測定部を通し、干渉を生じさせているのであるが、ここでは逆に、測定部を通過した後に光を分割し、その2光線間距離を温度境界層厚さ以上になるようにし、さらに装置を簡略化して、流れに平行な平板からの強制対流熱伝達率の測定に適用したので、その方法および結果について報告する。

### 2. 測定原理

干渉計は通常は、一つの光源から出た光を適当な方法により二つに分け、ある光路差をもたせて再び重ね合わせたときに起こる光の干渉を観察する装置のことである<sup>(7)</sup>が、本報告に用いた装置では測定部後方で光を2分割し、異なった位置を通った光どうしを重ねて干渉を起こしている。光を分割するためには複屈折性を有するウォラストンプリズムを使用している。このプリズムは偏光プリズムの一種で、水晶の光学的に等しい2個の直角プリズムを斜辺が共通になるように、かつ互いの光軸が直角になるようにはり合わせたものである。

本干渉計の原理図を図1に示す。あらかじめ直線偏光されている平行光線が現象Pを通過した後に、焦点距離 $f_2$ のおう面鏡 $M_2$ にて焦点され、焦点付近に置かれたウォラストンプリズムWPに入射する。入射光がWPを通過するときに常光線と異常光線とに分割されるのであるが、プリズムのくさび角を $\theta$ とすると、分割された2光線間距離 $\Delta H$ は次のように表される。

$$\Delta H = \alpha_0 f_2 \div 2(n_e - n_o)\theta f_2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで $n_e$ 、 $n_o$ はそれぞれ異常光線および常光線の屈折率である。いま、図において現象Pのbおよびc点

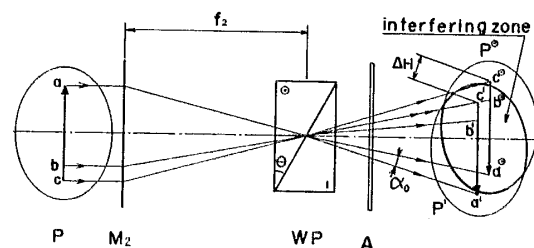


図1 干渉計測定原理

\* 原稿受付 昭和57年5月25日。  
\*\* 正員, 岩手大学工学部 (☎020 盛岡市上田4-3-5)。  
\*\*\* 名誉員, 正員, 東北学院大学 (☎985 多賀城市中央1-13-1)。

を通った光線がプリズムに入射し、分割されて  $b^1$  と  $b^0$ 、および  $c^1$  と  $c^0$  になり、その結果  $b^0$  と  $c^1$  が一致したとすると、検光子 A により偏光方向をも一致させることにより、干渉を起こすことができる。ウォラストンプリズム・シュリーレン干渉法を用いた研究のほとんどは、分割された 2 光線間距離  $\Delta H$  を微小にとり、その間の密度差を干渉じま移動量として生じさせる方法をとっており、この方法を特に differential-interferometer<sup>(3)(6)</sup> あるいは shearing-interferometer<sup>(8)</sup> と称している。これらの方法では、温度場の場合においては干渉じま移動量は直接、温度こう配を表すことになる。しかし、 $\Delta H$  に対して温度境界層厚さが薄くなると、前述の方法では誤差が大きくなるので、強制対流などで熱伝達率を定量評価する場合には不適である。これに対し、本実験では、プリズム角を従来使用されているものより大きくすることにより、 $\Delta H$  の平板垂直方向成分の大きさが温度境界層厚さ  $\delta_t$  より大になるようにした。その結果、分割された 2 光線は測定光になる部分と参照光になる部分とが完全に分かれて、測定部を通るのと同じことになり、平板境界層内圧力が一定ならば、干渉じま移動量は M-Z 干渉計の場合のように、周囲との温度差に相当することになる。しかし、この場合でも、2 光線ともほとんど同一測定場を通ることになるので、装置や現象に振動が含まれている場合でも、この振動が 2 光線に同時に感じることになり、結果として装置に与える振動の影響は、他の微調整を必要とする干渉計に比べて非常に小さくなる。

温度境界層内の干渉じま概略を図 2 に示す。自然対流においては、干渉じま移動量あるいは、しま次数から温度分布を求めて外そうにより温度こう配を求める手順がよく用いられるが、ここでは温度境界層厚さ  $\delta_t$  が自然対流に比べて薄いので、壁面上での干渉じまこう配から直接熱伝達率を得る方法を採用した。無次元干渉じま移動量  $\Delta N (= \Delta S_w / S_f)$  と温度  $T$  (K) との関係は<sup>(9)</sup>

$$\Delta N = (n_a - 1) \frac{Z_l}{\lambda_0} \frac{T - T_a}{T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $T_a$ : 周囲空気温度,  $Z_l$ : 光路方向試片加熱部長さ,  $\lambda_0$ : 光線の波長,  $n_a$ : 温度  $T_a$  における空気の屈折率である。実験条件が決まると、 $n_a, Z_l, \lambda_0$  は一定になるので

$$(n_a - 1)(L/\lambda_0) = K \quad (\text{一定}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおき、式(2)を伝熱面に垂直な方向  $y$  に微分すると

$$\frac{1}{T_a} \frac{dT}{dy} = - \frac{K}{(K - \Delta N)^2} \frac{d(\Delta N)}{dy} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)が温度こう配と干渉じまこう配との関係で、右辺の負号は  $\Delta N$  が  $y$  方向に減少することを表している。また、壁面上の温度こう配から熱伝達率  $\alpha$  を算出する式は次のようになる。

$$\alpha = -\lambda_w \left( \frac{dT}{dy} \right)_w \frac{1}{(T_w - T_a)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\lambda$  は空気の熱伝達率、添字  $w$  は壁面上を表す。温度差を  $\Delta T = T_w - T_a$  として式(4)、(5)より

$$\alpha = \lambda_w \frac{T_a K}{(K - \Delta N_w)^2} \left\{ \frac{d(\Delta N)}{dy} \right\}_w \frac{1}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

干渉じまの壁面上でのこう配を得るために、図 2 に示すように干渉じま間隔  $S_f$ 、壁面上での干渉じま移動量  $\Delta S_w$ 、壁面上干渉じま接線ともとの干渉じまとの交点 (c 点) の壁面からの距離を  $\Delta Y$  とすると

$$\left\{ \frac{d(\Delta N)}{dy} \right\}_w = \frac{(\Delta S_w / S_f)}{\Delta Y} \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表すことができ、式(6)、(7)から

$$\alpha = \lambda_w \frac{T_a K}{(K - \Delta N_w)^2} \frac{(\Delta S_w / S_f)}{\Delta Y} \frac{1}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、壁面における干渉じま移動量は式(2)、(3)より

$$\Delta N_w = \frac{\Delta S_w}{S_f} = K \frac{\Delta T}{T_w} \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるから、式(8)は簡単化されて

$$\alpha = \frac{T_w}{T_a} \frac{\lambda_w}{\Delta Y} \quad \dots\dots\dots (10)$$

したがって、試片表面温度および周囲空気温度が求まれば、干渉じまパターンから  $\Delta Y$  を求めるだけで、従来シュリーレン干渉計で測定する際に必要であった、光線の波長、光路方向加熱部長さ、プリズム角、屈折率、焦点距離、プリズム設定位置などに無関係に熱伝達率を求めることができる。

### 3. 実験装置および方法

ウォラストンプリズムを用いたシュリーレン干渉法

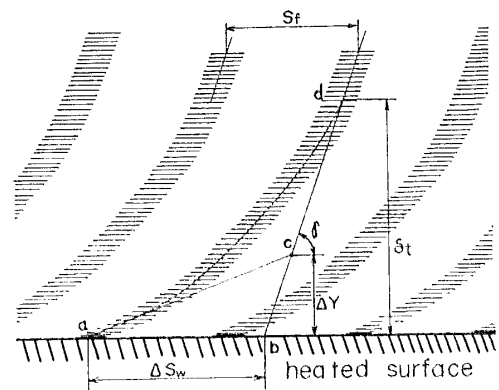


図 2 干渉じま概略

の測定回路は数種の方法が報告されているが、ここでは光源として直線偏光をしているレーザ光を用いることにより、偏光子を省略することができたので、通常の対向法シュリーレン装置にプリズム1個と検光子1枚を加えただけの最も簡単な組合せとした。これら2個の光学要素をまとめて受光部側に設置することにより、光源側にもプリズムや偏光子を設置しなければならない場合より、操作する上で非常に有利になる。本装置は気流中の衝撃波を観察している Merzkirch<sup>(10)</sup>の方法に近い組立であるが、偏光子は省略されており、本装置と同一の構成による強制対流熱伝達率の測定はほかに知見しない。干渉装置の概略を図3に示す。この装置は2枚のおう面鏡を用いるシュリーレン装置において、ナイフエッジの位置に図のようにウォラストンプリズム WP と検光子 A を置くことにより干渉装置としたものである。プリズムを光路方向に前後させることにより、干渉じま間隔および傾きを変えることができる。また光学要素の相対位置が多少ずれても、干渉じまが失われるようなことはない。測定に供したプリズムは、1辺約8mmの立方体で、くさび角 $\theta = 15^{\circ}21'$ であり、使用した光線(He-Ne ガスレーザ)の波長に対する常光線と異常光線の屈折率の差は $(n_e - n_o) = 0.009054$ である。また、使用したおう面鏡は風胴および実験室の大きさの都合上、光源側に口径200mm(焦点距離 $f_1 = 2000$ mm)、受光部側に口径150mm( $f_2 = 1500$ mm)のものを用いた。干渉じまの撮影には60×90mmのブローニフィルム(ASA 200)およびポラロイドフィルムを用い、レンズシャッターにより1/500秒で露光した。

強制対流の実験に使用した風胴は絞り比1/16、ノズル出口口径300×300mmの密閉形回流風胴で、風速は約5~24m/sの間で変化できる。主流速度の測定はピトー管とゲッチングン形マンオメータにて、乱れは定温度形熱線風速計で行った。主流の乱れ度は流速 $u = 10$  m/sのとき、rms値で0.3%以下であった。測定

部は断面が300×300mmの正方形ダクトになっており、その両側には厚さ10mmの亚克力板を張り、さらに光線の通過する部分には200×200mm、厚さ10mmの光学ガラスがはめ込まれている。

熱伝達測定用平板は伝熱面を厚さ3mmの銅板で作成し、その大きさは長さ400mm、幅40mmである。平板前縁には長さ20mm、くさび角30°のペークライト製の非加熱部が取付けてあり、わずかに負の迎え角を有している。平板加熱には幅5mm、厚さ50 $\mu$ mのステンレスリボン線をアスベスト紙に巻き付けて銅板裏側から取付けた。できるだけ平板表面が等温になるように、前方で密に後方で粗に巻いてある。平板の温度は $\phi 0.1$ mmのCC熱電対を銅板の裏側から取付け、平板中心線上で前方から50mm間隔で8対、片面に2対の計10箇所測定した。平板表面温度の不均一性は実験中を通じて( $\Delta T$ が最大で35°C)0.2°C以下であった。

#### 4. 実験結果および考察

図4に得られた干渉じま写真の例を示す。平板表面に見える突起は平板前縁からの距離 $x$ を知るために平板側面に取付けた $\phi 0.3$ mmのニクロム線である。プリズムにより2分割された光線のずれ量が平板半影となって現れている。半影となるのは2光線のうち一方の光線だけがフィルム面まで到達し、他方は試片によりさえぎられるからであり、本影は2光線とも試片によりさえぎられてできた影である。得られた干渉じまは平板に対して斜めになっているが、これは二重像のずれ量を平板垂直方向にできるだけ大きくする必要があるので、M-Z干渉計のように干渉じまを平板に対して垂直にすることはできない。干渉じまの傾き角 $\gamma$ (図2)を変えても理論的に式(4)は成立するが、 $\gamma$ を小さくしすぎると干渉じまが平板と交わる位置が不明確になる。本実験での実際の $\Delta H$ の大きさは、前述の値と式(1)により約7.2mmになり、図4の場合

では平板垂直方向のずれ量 $\Delta H_v$ は5mm程度であり、干渉じま移動の状態からも、 $\Delta H_v$ は温度境界層厚さ以上の大きさになっていることがわかる。

温度と干渉じま移動との関係を調べるために、壁面上のしよ移動量 $\Delta S_w/S_f$ と式(2)から求めた移動量を図5で比較した。本実験の範囲では両者はよく一致しており、このことから逆に、流れ方向に不等温な平板のときでも、平板上の干渉じま移動量を測ることにより、表面温度

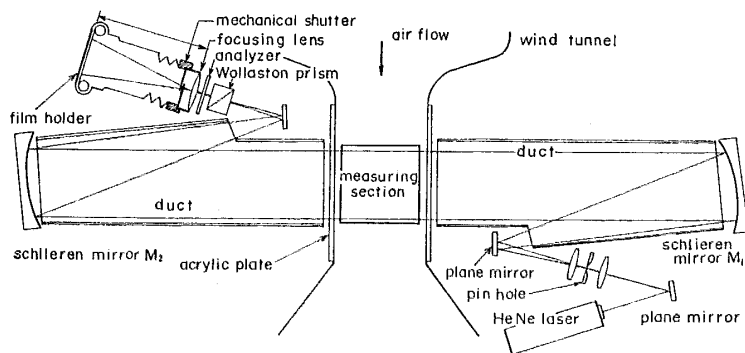


図3 干渉装置概略

分布を求めることもできる。同様に境界層内の温度分布について調べたのが図6である。同時に、 $\phi 25 \mu\text{m}$  CC 熱電対を平板垂直方向に移動させて測定した結果をも合わせて示す。実線は従来の理論結果<sup>(1)</sup>であるが、いずれも熱伝達率を求めるのに重要な平板表面近傍ではよく一致している。加熱平板上を通過した光線は、平板上の急な温度こう配により屈折させられて、境界層内温度分布の評価に影響を与えるが、干渉じまこう配から熱伝達率を求めている本実験の範囲内では、平板前縁近傍を除いてはその影響は小さい。熱伝達率の測定に最も大きい影響を与えるのは $\Delta Y$ の測定、すなわち干渉じまこう配のとり方と、もとの干渉じま位置の設定の仕方である。特に境界層外の干渉じまは壁面近傍のそれよりも幅が広いので、プリズムはり付け面の平面度が良くない場合は、非加熱時にも干渉じまにゆがみが生じて誤差の要因となる。これに対しては同一のフィルムにより2, 3枚印画紙に焼き付けて個々に測定した後と比較した。この測定値どうしの差は最大で20%程度であった。

図7には干渉じまこう配から平板上の局所熱伝達率を求めた結果を、ヌセルト数  $Nu (= \alpha x / \lambda)$  とレイノルズ数  $Re (= ux / \nu)$  との関係で示す。実線は従来の理論値<sup>(1)</sup>である。物性値は主流温度における値をとった。平板前縁付近で光線の屈折の影響による熱伝達率の若干の低下がみられるが、 $Re < 10^5$  では層流の結果に一

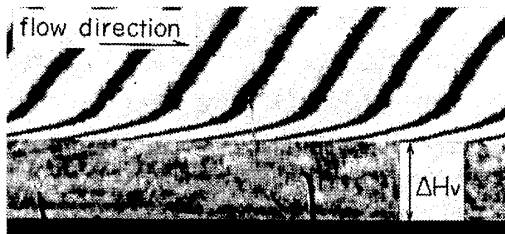


図4 干渉じま写真 ( $u = 8 \text{ m/s}$ ,  $\Delta T = 19.5^\circ\text{C}$ )

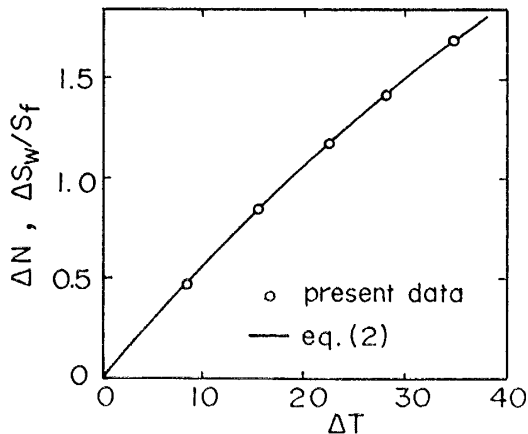


図5 壁面上の干渉じま移動量と温度差との関係

致しており、また  $Re = 10^5$  付近から乱流に遷移していく過程も、瞬間的状態としてとらえられている。

## 5. 結 言

装置の組立が簡単で、光学調整も他の干渉装置に比べて容易であることから、最近自然対流の分野で熱伝達率の測定に用いられている、ウォラストンプリズムを用いたシュリーレン干渉計を改良し、流れに平行な平板の強制対流熱伝達率の測定に適用した。このことにより、次のような特徴をもたせることができた。

(1) 装置の組立が従来のものと比較して簡単である。その結果、光学調整が簡便化された。

(2) プリズムの複屈折により、分割される2光線間距離を温度境界層厚さ以上にとったので、従来のシュリーレン干渉法の熱伝達率測定と異なる評価法が採用でき、干渉じまこう配から直接熱伝達率を求めることができた。

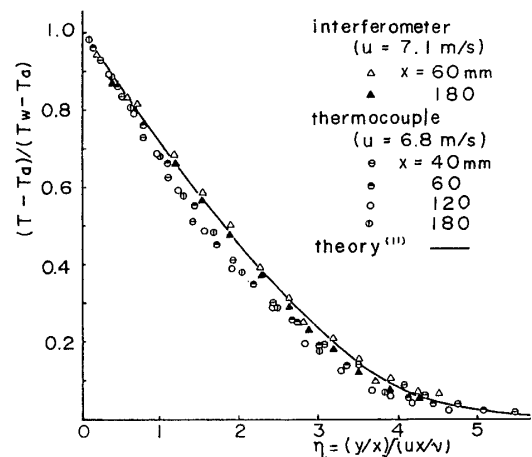


図6 境界層内温度分布 ( $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ )

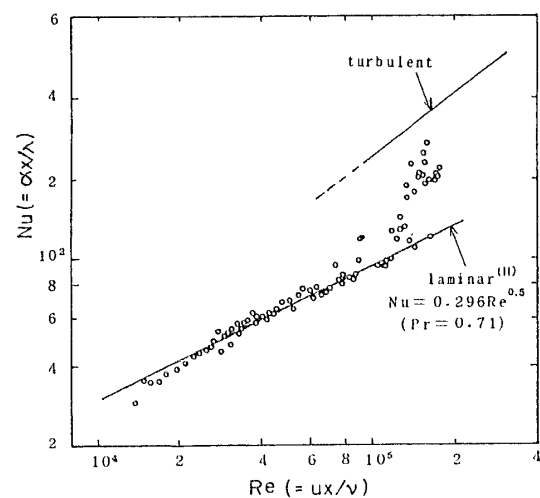


図7 流れに平行な平板の局所熱伝達率分布

(3) 2 光線間距離は境界層厚さの程度であるので、装置の物理的振動による影響が少なく、かつ測定に対する時間的遅れがないので、振動を含むような非定常現象に対しても適用できる。

#### 文 献

- (1) Hauf, W. and Grigull, V., *Advances in Heat Transfer*, 6 (1970), 133, Academic Press.
- (2) Sernas, V. and Fletcher, L. S., *Trans. ASME, Ser. C*, 92-1 (1970), 202.
- (3) Black, W. Z. and Carr, W. W., *Rev. Sci. Instrum.*, 42-3 (1971), 337.
- (4) Oertel, H. Jr. and Bühler, K., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21 (1978), 1111.
- (5) Flack, R. D., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 101-4 (1979), 648.
- (6) Lamb, J. D. and Schreiber, P. W., *ARL*, 66-0222 (1966).
- (7) 谷・ほか 2 名, 流体力学実験法, (昭 52), 95, 岩波書店.
- (8) Merzkirch, W. F., *Appl. Opt.*, 13-2 (1974), 409.
- (9) Jacob, M., *Heat Transfer*, II (1957), 580, John Wiley & Sons.
- (10) Merzkirch, W. F., *AIAA J.*, 3-10 (1965), 1974.
- (11) 甲藤, 伝熱概論, (昭 45), 65, 養賢堂.