ホログラフィー実時間干渉法による 物質伝達率分布の可視化*

土方 邦夫^{*1}, 三松 順治^{*2}

The Visualization of the Distribution of the Mass Transfer Rate by Real-time Holographic Interferometry

Kunio HIJIKATA and Jyunji MIMATU

The distribution of the mass transfer rate has been visualized by holographic interferometry. The real-time surface displacement of the naphthalene plate caused by the sublimation in the flow field was measured, from which the real-time distribution of the heat transfer coefficient was estimated. At first, the validity of this method and its accuracy were checked by using a laminar boundary-layer flow on the flat plate. Then this method was applied to backward-facing step flow in ducts with various shapes. It is clarified that this method applicable to the measurement of the mass transfer coefficient in various flow fields having a duct wall. The visualized distribution of the mass transfer rate for backward facing step flow correlated well with the frequency of high level turbulence spots.

Key Words: Mass Transfer, Flow Visualization, Forced Convection, Separation, Holographic Interferometry, Backward-facing Step Flow

1. 結 論

工業的な熱輸送現象の利用では、流れ場を構成する壁面の熱伝達率分布が必要であるが、直接的にその二次元的分布を求めることは困難である。現在までには、感温液晶による壁面温度分布の可視化から求める方法⁽¹⁾、熱・物質アナロジーを仮定し物質伝達率分布から推定する方法⁽²⁾⁽³⁾などが行われてきている。また、最近の新しい手法として、昇華性物質を浸透させたゴムで構成した壁面の変化をホログラフィー二重露光法により測定し、物質伝達率分布を可視化測定する方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾も行われている。しかし、精度良くかつ手軽に二次元分布を測定することは困難であり、また、ホログラフィー二重露光法では、物質伝達率分布の時間変化を捉えることは本質的に不可能である。

本研究では、流れ場中の昇華性物質で作成した壁面の昇華量分布をホログラフィー実時間干渉法を用いて時間的に連続して測定することで物質伝達率分布を可視化測定し、熱伝達率分布を推定する。昇華物質としては、物質の手軽さ、安全性、測定温度での昇華率な

どを考慮の上でナフタリンを使用した。

まず、本可視化法の妥当性と精度を、く形管路内の平板境界層流れにより検証し、その後、平板流れの物質伝達率の変化が激しい領域およびステップ部下流の流路形状を一部変更した3種類の後方ステップ流の再付着領域に適用し、それら結果を比較することで、各流れ場の現象と壁面による影響を明らかにする。

2. 実 験 装 置

実験装置の概略を図1に示す。測定媒体である空気は、浮き子式流量計により流量を測定された後、横61 mm×幅10 mmの二次元ノズルより噴出され、後方ステップ流を形成する。ステップ高さは調整可能であり、平板流れでは零に、後方ステップ流では15 mmに設定し実験を行った。後方ステップ流では、図2に示す、3方向開放流路(a)、上壁開放流路(b)、管内流路(c)の3種類の下流形状で実験を行った。管内流路の場合は、厚さ5 mmの亚克力製上壁を通して直接壁面変化を測定している。ホログラフィー干渉測定では、光路長の変化のみが問題となるので、このような測定が可能であり、サーモピュアなどの赤外線温度計を用いた測定の場合のような複雑な更正是必要でない。流量は、ノズル幅およびステップ高さを代表長さ

* 平成元年11月17日「熱工学講演会」において講演、原稿受付平成元年5月8日。

^{*1} 正員、東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 准員、東京工業大学大学院。

ナフタリン壁面の位置変化の測定は、ホログラフイー実時間干渉法（光源として Ar レザー、波長 0.5145 μm を使用）を用いて光学的に行い、変化量は波長の半分の間隔ごとの等変化量線の干渉じまとして表されている。各流量条件化で空気を流している状態で、ホログラフイー干渉法の基準となる壁面の三次元位置を撮影記録し、その後、参照光により再生し実時間の像と干渉させ、各時間間隔後の変位量分布をカメラで撮影記録した。ナフタリン表面の反射率は、圧力可視化実験⁽⁶⁾の壁面表面のアルミはくよりもはるかに小さいので、明りょうな干渉じまが得られ難く、しかもこの干

3. 実験結果と考察

Figure 1 consists of three vertical flow visualization images arranged horizontally, labeled $t=36s$, $t=56s$, and $t=76s$ from left to right. Each image shows a turbulent wake developing from a leading edge at the top. To the left of the first image, a vertical arrow points upwards, labeled "Flow Direction", and the text "Leading Edge" is at the top. To the right of the images is a vertical scale bar with a horizontal line at the top, labeled "0" at the bottom and "20 (mm)" at the top. The images show a progression of the wake's growth and mixing over time.

図 3 平板流れの物質伝達率分布

の物質伝達率分布の可視化結果を、以下に示す。

図3は、平板流れの物質伝達率分布の可視化写真の一例 ($Re_n=3100$ の場合) である。写真の上端が平板先端であり、流れ場の中心線上の結果であり、ホログラフィー基準像撮影後の時間変化が示されている。平板先端部の物質伝達率の良い領域で干渉じまが密になっている。また、時間経過に従い干渉じまが下流方向に移動していることから、昇華による壁面の等変位線が下流に移動していることがわかる。

図3の写真の干渉じまの中心およびエッジ部分の流れ方向距離を読み取り、各時間後のしま次数、すなわち基準面からの変化量 (シンボル) を熱・物質伝達アナロジーを仮定し、 Nu_x の実験式より計算したナフタリン昇華量 (曲線) と比較した結果を図4に示す。また、可視化された物質伝達率分布から各流れ方向距離における Nu_x を計算し比較したのが図5である。図6に、 $Re_n=1900, 3100, 4400$ の3条件の可視化測定結果を、流れ方向距離 (x) を代表長さとする Re_x を用いて整理した結果を示す。これらの処理の過程で、ナフタリン基盤面の振動の影響およびナフタリン面の先端部が有限の厚さを持つために存在する約2mmのはく離泡の影響を取り除いた。

図4～図6より、可視化結果の各データ点は経験式

図5 局所熱伝達率分布

図6 熱伝達経験式との比較

から計算された曲線近傍に集まっており、物質伝達率分布が比較的精度良く可視化されていることがわかる。平板の先端部分で可視化の精度があまり良くないのは、干渉じまが過密になり各しまの位置を読み取る時の誤差が大きいためである。また、下流部分で精度があまり良くないのは、基準面からの壁面の変化量が少ないため、対応する零次付近の干渉じまの流れ方向位置が、外乱を受け大きく変化するからであると考えられる。

図7に、平板流れの先端から十分に離れた領域の、物質伝達率分布の可視化結果 ($Re_n=4600$) を示す。流路の中心部ほぼ全域で一定間隔の縦じま状の干渉じまが存在している。これは、流路中に一定間隔の渦構造が存在し、物質伝達が高い部分と低い部分がスパン方向に交互に存在するためであると考えられる。

図8に、3方向開放流路の噴出口直後、ノズルの側壁下流の結果を示す。低 Re_n ($Re_n=1400$) の場合、物質伝達の良い領域は、ノズルの側壁直後から下流方向に行くに従いその領域が内側に傾いた円状の領域であ

図7 下流部の物質伝達分布

図8 ノズル側壁近傍の物質伝達率分布

り、ノズルの側壁部分のせん断層で生じる乱れの影響のため物質伝達が高いことに対応している。高 Re_n ($Re_n=5400$) の場合、このだ円領域の干渉じまの本数が増加し、より物質伝達率が良くなり、その向きが流れ方向へ変化するのが観察された。

3・2 後方ステップ流の物質伝達率の可視化 後方ステップ流の各形状流路を用いて、ステップ高さ 15 mm, $Re_n=7900$ ($Re_n=12000$) の場合について、再付着域の物質伝達率分布を可視化した結果を示す。写真上端が、ステップから 50 mm, 下端が 110 mm, 横幅がほぼノズル幅に対応し、再付着域が可視化されている。また、各図に対応する領域の圧力変動可視化結果を示す。圧力変動可視化写真中の明暗は、流れ場の壁面近傍に存在する乱れに対応しており、この乱れの出現位置と形状とを物質伝達率可視化結果と比較、考察する。

図 9 に示す 3 方向開放流路の場合、物質伝達率が高いのは、図中の矢印で示す再付着領域のノズル両側壁

面下流付近の 2 箇所であり、それ以外では再付着領域の中心部が比較的物質伝達が高い。これは、図 8 で示したノズル側壁面下流部分の乱れが大きい所で物質伝達率が高いことと対応し、ノズル両側壁で生じた乱れが再付着面に到達したためであると考えられる。

図 10 に示す上壁開放流路の場合、干渉じまは横方向に平行になり、流れ方向に複数個存在し、図中矢印で示した中心線をはさんだ 2 箇所で波打っており、同じ流れ方向距離ではこの部分でわずかに物質伝達が低下している。これは、乱れが流路に対して決まった位置関係をとるため、乱れが存在する時間割合が比較的小さい領域の物質伝達率が低下するためと思われる。

図 11 に示す管内流路の場合、干渉じまは間隔が広く、壁面近傍で低下する直線状の分布であり、流れが流路全域で激しく混合されており物質伝達率が測定範囲であまり変化していないことを示している。また、側壁面近傍で明確に物質伝達が低い領域が存在し、これは周囲の壁面の影響で壁近傍で乱れが押えられ、物

物質伝達率分布

物質伝達率分布

圧力変動分布

図 9 3 方向開放流路

0 10 20 (mm)

圧力変動分布

図 10 上壁開放流路

図 11 管内流路

質伝達率が低下するためであると考えられる。

また、ステップ高さを逆方向に設定してステップ近傍域の上壁面の物質伝達率分布の可視化結果を図 12 に示す。干渉じまは、ある流れ方向距離に、横方向に飛び飛びに生じ、物質伝達率が高い領域と低い領域が交互に存在することを示しており、ノズル端部のはく離域下流に存在する乱れの三次元的構造への変化に伴い、上壁近傍の管内に大きな縦渦的渦構造が生じているためと思われる。

本研究では、各時間後の可視化結果を示しただけにとどまったが、より高精度の実験を行えば本手法により、これら写真から物質伝達率(熱伝達)分布の時間変化を得ることが可能になると考えられる。

4. 結 論

物質伝達率分布をホログラフィー実時間干渉法により可視化測定し、以下のような結論を得た。

(1) 本研究で開発した物質伝達率の可視化法の妥当性を管内平板流れを用いて検討し、熱・物質伝達の

図 12 上壁面の物質伝達率分布

アナロジーから求めた物質伝達率分布と良く一致することを示した。

(2) 通常の方法では、測定が困難である物質伝達率が急激に変化している領域の物質伝達率分布を捉えることが可能であることを示した。同時に、本手法では、物質伝達率分布の変化が緩やかな領域で誤差が生じやすく改善の必要があることを示した。

(3) 後方ステップ流の再付着領域の物質伝達率分布を可視化し、噴出後の流路形状による分布の変化およびその分布が乱れの存在頻度と関連することを示した。

終わりに、本研究の光学測定についてご助言いただいた慶応大学、菱田公一講師に感謝する。本研究は、文部省科学研究補助金の試験研究(2)62850038の補助を受けて行われたものであり謝意を表する。

文 献

- (1) 横堀・ほか2名, 機論, 49-441, B (1983), 1029.
- (2) 福井・森下, *Journal of the J. S. M. E.*, 65-525 (1962), 1480.
- (3) 熊田・ほか3名, 機論, 51-469, B (1985), 3041.
- (4) Kapur, D. N. and Macleod, N., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17 (1974), 1151.
- (5) Grosse Wilde, H. and Uhlenbusch, J., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21 (1978), 677.
- (6) 上方・三松, 機論, 53-491, B (1987), 1986.