209 スペックル法によるマッハ反射の密度計測と可視化

平原裕行(埼玉大), 村山篤史(埼玉大院)
川橋正昭(埼玉大)

Flow visualization and density measurement of Mach reflection by speckle method.

Hiroyuki HIRAHARA*, Atsusi MURAYAMA**
Masaaki KAWAHASHI*

* Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
Shimo-Okubo, 255, Urawa, Japan

**Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa

Abstract

The laser speckle method was applied to the density gradient measurement of Mach reflection of shock waves. Density gradient in the internal region behind the reflected shock wave was measured by this method, mainly. A shock tube and YAG laser were employed in the experiment. The reference and flow field images were recorded by a high resolution digital camera. The speckle photographs were processed by cross-correlation method by a computer. Displacement of speckle pattern was converted to the density by using a deflection angle-density gradient relation. The shock pattern was extracted from the intensity difference between a reference and flow field images.

1.はじめに

レーザースペックル法は、固体表面や、密度の高い散乱体によって散乱された光によって発生するスペックルパターンを利用して、固体の変位や、流体の速度計測、密度を計測する手法として広い範囲で利用されている光学計測法の一つである。著者らは、本手法を主として流体計測に利用してきたが、本報告では、密度計測法への応用とその拡張について検討したのでここに報告する。密度計測には、通常良く知られているシャドウグラフ法やシュリーレン法や干渉縞法があり、それぞれ密度の二次勾配、一次勾配、密度に比例する量が測定できる手法である。いずれもよく確立された手法であり、精度の高い手法として広く受け入れられている。ここで

用いた、レーザースペックルを利用した手法は、流れ場の中で形成される密度勾配による光の屈折を、スペックルの変位として記録し、これから密度情報を回復する手法である⁽¹⁾⁽⁴⁾。この手法は、レーザ光源にコヒレンシを必要としない点や、乱れた場でもある程度の計測が可能であるなど、干渉法とは異なった利点を有する手法である。この手法はこれまでに、ノズル噴流の密度場の計測に応用され⁽⁵⁾、その後、Erbeck and Merzkirch ら⁽⁶⁾は、等方性乱流の密度場の空間的相関の計測にこの手法が適用されている。また、Vitkin ら⁽⁷⁾、本手法を衝撃波によって加速された乱流場の計測に適用した。著者らはこれまでに、レーザースペックル法による密度計測を用いて、衝撃波のマッハ反射の密度場の計測を行なって

きた⁹⁾。本報告では、さらに計測精度の向上と密度分布の再生に改良を加えた結果について報告する。スペックル法により直接計測されるのは、密度の勾配であり、そのベクトル場がスペックル像から再生される。実験では、えられるスペックルグラムからその差画像を求める事により、密度勾配の大きな領域を可視化像として求める方法について示し、計測の改良点として、密度計測を行なうための最適スペックル径とデジタル画像の解像度との関係、密度勾配と実験光学系の配置の問題などについて検討し、得られた結果と数値解析の比較を行なって、本手法の妥当性について検討した。

2. 実験装置と計測手法

実験装置の概要を Fig.1 に示す。圧縮性流れの密度計測の例として、本報告では衝撃波のマッハ反射に本計測を適用している。実験装置本体は通常の衝撃波管で低圧部は $80 \times 80 \text{ mm}^2$ の正方形断面をしており、観測窓も同様に $80 \times 80 \text{ mm}^2$ である。観測部にはくさび角 10° または 45° の二次元くさびが置かれている。入射衝撃波のマッハ数は 1.2 から 1.6 の範囲で変化させた。実験光学系を Fig.2 に示す。YAG レーザーの光は、平行光線として観測部に入射させる。撮影側に焦点距離 f のレンズを観測部から $2f$ 離して置き、さらにレンズから $2f$ 離れたところにすりガラスを設置する。すなわち、観測部で密度変化によって生じた回折光は、このすりガラス上に再び結像する。屈折角は良く知られているように光の透過方向と垂直な密度の勾配を光の進行距離で積分した式で与えられる。すりガラスから距離 l 離れたところにカメラの焦点をあわせると l に比例して変位するスペックルの像を得ることができる。スペックルの変位角は密度勾配によって生じた同じであり、その変位は距離 l に比例する。密度計測を行なうためには、乱れの無い参照場のスペックルパターンを予め撮影しておく必要がある。これを基準画像とする。その後、マッハ反射の流れ場の撮影を行ない、2 枚の画像の相互相関を計算することにより、スペックルの変位量を求めることができる。

撮影には、デジタルスチルカメラ (Fujix505A, 130 万画素) を使用しており、デジタル画像を直接コンピュータに取り込むことで、基準画像と変調した画像の位置のずれをなくしている。

密度計測の精度は、スペックルサイズ λ と λ に依存して変化するスペックル写真上の変位 δ によって決定される。 λ と δ の最適な関係を決定する事は非常に重要なことである。また、スペックル写真は、スペックルとデフォーカスの影響で、流れ場の明確な可視化像が得られない

3. 実験結果と考察

3-1 スペックル写真と可視化像

実験により得られたスペックル像の一例を Fig.3 に示す。Fig.3(a),(b) はそれぞれ、基準スペックル写真および衝撃波が反射しているところの写真である。Fig.3(b) のスペックル写真には衝撃波、マッハ衝撃波、反射衝撃波などは観察することはできず、ほとんどランダムパターンとなる。Fig.4 はこのスペックル像を拡大したものである。今回の実験では、スペックルサイズは、平均して 8 ピクセル程度である。流れ場全体の大きさに対するスペックルの変位をなるべく小さくして、計測上の空間精度を確保する必要がある。このサイズをより小さくすることは可能である。また、相互相関法によりスペックルの変位を計算する場合、サブピクセルの計算が比較的容易である。本解析では、画像の輝度分布から画像パターンのずれを最小二乗法により関数近似する手法を取りいれており、良好な結果が得られている。Fig.3(a) と (b) の画像の強度差をとると Fig.5 のような画像を得ることができる。この画像は、変調を受けたスペックルの様子を確認することができるとともに、衝撃波のような密度の不連続を抽出することができる。

3-2 密度勾配の計測

計測結果を Fig.6 に示す。密度勾配のベクトルは Fig.5 と同様にして求めた画像に重ねあわせたものを示した。くさび角 $\theta = 10^\circ, 45^\circ$ 、衝撃波マッハ数は $M_s = 1.2, 1.6$ の場合である。入射衝撃波、マッハ衝撃波および反射衝撃波による回折角は、現在測定対象としている密度勾配に対して非常に大きいため、測定結果には現われていない。反射衝撃波とマッハ衝撃波で囲まれた領域の密度勾配は、衝撃波の反射形態を決定するのに非常に重要な要素であると考えられる。特に、衝撃波マッハ数が低い場合はそれが顕著となる。実験結果は、内部領域での密度の勾配を良好に測定できており、ベクトルの方向も、三重点付近でマッハ衝撃波の方向に向かうベクトル、くさび頂点付近で、くさび頂点に向かって密度が

増加する様子などが明確に測定できている。マッハ数が増加するにしたがってベクトルの大きさは全体的に大きくなり、これは定性的に予測される現象と一致する。これらのベクトルから、代表的な部分の回折角を求めた結果、反射衝撃波背後の領域において、回折角はおおよそ $0.5 \sim 0.7 \times 10^{-4}$ ラジアンであり、これはこれまでの数値計算の結果とも良い一致を示している。

4. まとめ

レーザースペックル法による密度計測を行ないマッハ反射の密度計測を行ない良好な結果が得られ、本手法が密度計測を行なう上で有効であることが明らかとなった。また、スペックル写真から衝撃波や密度勾配の大きな領域を画像抽出する方法を示し、この方法が解析上有用であることを示した。

おわりに、本研究は文部省科学研究費(No.08305006)の補助を受けて行われた。関係各位に謝意を表す。

参考文献 (1)Merzkirch, W., "Flow Visualization", Academic Press, 1987, 60. (2)Adrian, R.J., "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., 1991, 261-304. (3) Speckle Metrology, Shirohi, R.S., 1993. (4)川橋, レーザースペックル法, 流れの可視化, Vol.7, No.25, pp.14-19, 1987. (5)Wernekinck, U., Merzkirch, W., "Speckle Photography of Spatially extended Refractive-Index Fields", Applied Optics, Vol.26, No.1, 1987, 31-32. (6)Erbeck, R., Merzkirch, W., "Speckle photographic measurement of turbulence in an air stream with fluctuating temperature", Exp. in Fluid, Vol.6, 1988, 89-93. (7) Vitkin, D, Merzkirch, W., Fomin, N., "Quantitative visualization of the change of turbulent structure caused by a normal shock wave", Journal of Visualization (in print) (8) HIRAHARA, H., KAWAHASHI, M., "Density Filed Measurement of Mach reflection of Shock Waves by Laser Speckle Method", Proc. of SPIE, Optical Technology in Fluid, Thermal, and Combustion Flow III., 1997, pp.238-245

Fig.1 Shock tube

Fig.2 Optical arrangement

Fig.3 Speckle photograph

Fig.4 Enlarged Speckle pattern in images

Fig.5 Extracted flow pattern from speckle photographs
 $\theta=10^\circ$, $Ms=1.6$

(a) $\theta=10^\circ$, $Ms=1.2$

(b) $\theta=10^\circ$, $Ms=1.6$

(c) $\theta=45^\circ$, $Ms=1.2$

(c) $\theta=45^\circ$, $Ms=1.6$

Fig.6 Density gradient vector maps