23 ホログラフィー干渉計による円柱まわりの非定常流れの可視化

東北大連研 高山 和喜 伊藤 勝宏* 本田 睦

VISUALIZATION OF UNSTEADY FLOW OVER CYLINDER BY USING HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

K.TAKAYAMA*, K.ITO*, and M.HONDA*

Recently, we have developed a double exposure holographic interferometry and applied it successfully to the research on shock waves propagating in shock tube. In the present paper, it is attempted to apply the interferometry to the reflection and the diffraction of shock wave over a cylinder in a shock tube and the unsteady drag coefficient of the cylinder is discussed. The results obtained show a potentiality of the application of holographic interferometry to the quantitative analysis of transonic flow.

1. 緒 論

衝撃波を伴う物体まわりの流れは複雑であり、その可視化については、多くの研究がなされてきた。代表的な手法として、影写真法、シュリーレン法、マッハツェンダー干渉計法等が挙げられる[1]。

影写真法は、それぞれ密度の二次および一次の変動を記録するもので、流れの詳細を知るのは困難であり、一般には衝撃波の位置、形状をとらえるだけにとどまっている。マッハツェンダー干渉計法は、干渉縞の変位が直接密度分布を与え、定量的測定が可能であるが、レンズ観測窓ガラス等に高い精度が要求されるため、広い視野での観測、高いマッハ数域での衝撃波管実験には向かない。

近年、光源の固体レーザーの開発、進歩により、衝撃波の可視化にマッハツェンダー干渉計法に代わり、ホログラフィー干渉計が広く利用されている[2、3]。

本報では、円柱まわりの衝撃波の反射、回折過程を二重露光ホログラフィー干渉法により可視化し、定量的測定を行ない、実際上の重要さにもかかわらず、十分な説明がなされていない円柱まわりの非定常抗力に関する問題の一部を明らかにした。

* Institute of High Speed Mechanics, TOHOKU UNIVERSITY
2-1-1 Katahira Sendai JAPAN

2、実験

2、1 実験装置

実験には衝撃波管、低圧室長さ 7m、断面 60mm × 150mm、観測部視野直径 130 mm および高圧室長さ 1.5 m、直径 230 mm を用いた。試料気体には、空気、初期圧 103-10 KPa。駆動気体はヘリウム、隔膜はマイラー膜を用いた。試料気体初期圧と隔膜の厚さにより、入射衝撃波速度を調節する。これにより実現される入射衝撃波マッハ数は 1.3-2.6、この衝撃波背後に生ずる一様流マッハ数 0.7-1.15、円柱、直径 40mm に対するレイノルズ数は、 $[0.72 \sim 1.04] \times 10^6$ であった。

衝撃波速度は観測部直前におかれた 2 個の圧力変換器 (Kistler 603A) により検知した信号の時間差をカウンタにより計測し、求めた。実験の再現性は非常に良好であった [6]。

2、2 光学系

光学系は、一対のシュリーレン用放物面鏡、直径 300 mm、焦点距離 3 m、を基本とし、結像レンズ、さらに、参照光用平面鏡およびレンズ系より構成されている。

図 1 に光学系および実験装置を示す。ビームスプリッタ (透過率 60%) で物体光と参照光に分けており、物体光と参照光との光路差は、平面鏡 M を微動させて、可干渉距離以内の調節を行なう。レンズ L4 により、映像の前後で物体光と参照光の波面の傾き角を変化させることができる。光源は、ホログラフィー用ルビーレーザー (APOLLO LASER Inc, 22HD) を用い、光軸調整用 He-Ne レーザーと組み合わせられている。フィルムは、AGFA 10E75 シートフィルム、再生にはアルゴンイオンレーザーを光源とし、SS 級シートフィルムを用いた [7]。

Figure 1. Schematic of experimental arrangement

2. 3 二重露光ホログラフィー干渉計による計測法

第1回目の露光を衝撃波が測定部に到着する前に行なう。このとき、入射光の強度に比例する振幅透過率を持つように処理されたフィルムに物体光と参照光、

$$\Sigma_o = A_o(x, y) \exp[i \theta_o(x, y)] \exp[i \omega t] \quad (1)$$

$$\Sigma_r = A_r(x, y) \exp[i \theta_r(x, y)] \exp[i \omega t]$$

が到達し両者は干渉してその時間平均強度、

$$I_o = A_o^2 + A_r^2 + 2 A_o A_r \cos(\theta_o - \theta_r) \quad (2)$$

がフィルム上に記録される。ここに、添字 o , r はそれぞれ物体光、参照光をあらわし、 Σ は入射光、 A , θ はそれぞれの振幅と位相を、また ω は角振動数を示す。

次に同一フィルム上に第2回目の露光を現象と同期して行ない、新たに、

$$I_1 = A_1^2 + A_r^2 + 2 A_1 A_r \cos(\theta_1 - \theta_r) \quad (3)$$

を記録する。添字 1 は現象に同期した物体光をあらわす。同一フィルム上へ複数のホログラムを重ね合わせて記録できることが、ホログラフィーの特徴である。

このようにして得られたホログラムに再生光 Σ_{rc} を入射するとホログラムは回折格子として作用し、二つの波面 $I_o \Sigma_{rc}$, $I_1 \Sigma_{rc}$ が同時に再生され干渉し、両者の位相差が干渉縞として再生面にあらわれる。この位相差は現象前後の密度変化に伴う屈折率の変化によるものであり、次のような関係になる。

$$\begin{aligned} \theta_1 - \theta_o &= 2 \pi L (n_1 - n_o) / \lambda \\ &= 2 \pi K L (\rho_1 - \rho_o) / \lambda \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 L , λ , n , ρ , K はそれぞれ測定部奥行き、レーザーの波長、屈折率、密度、Gladstone-Dale定数である。

ゆえに再生像における縞次数と密度の関係は、

$$N = K L (\rho_1 - \rho_o) / \lambda \quad (5)$$

また、干渉縞の傾き、間隔および種類は参照光レンズ L を現象前後でわずかに変位させることにより、選択される [7]。

2. 4 供試モデル

供試モデルは円柱、直径40mm。モデルはアクリル観測窓ガラスに視野を乱さないようにとりつけられた。

3. 結果と考察

第2図に、同一初期条件下で異なる撮影時期に得た無限干渉縞写真を示す。入射衝撃波マッハ数 $M_s = 2.6$ 。入射衝撃波が円柱に沿って伝播する時、その傾き角が臨界遷移角以上の場合には、円柱上での衝撃波の反射形態は正常反射であり(写真a)その後傾き角の減少に伴いマッハ反射に移行する[8]。それ故、反射形態がマッハ反射となる写真b, c, dでは、衝撃波三重点、マッハステム、滑り線がみられる。

資料気体初期状態、入射衝撃波速度より入射衝撃波後面の状態が求められ、反射衝撃波速度よりその後流の状態が求められる。反射衝撃波の減衰が早い初期過程を除いては、反射衝撃波の速度変化は小さく、反射衝撃波後流より円柱よどみ点の圧力、密度の決定が可能となる。干渉縞は等密度線に対応し、干渉縞写真の縞次数はすべて定まるから、よどみ

Figure 2. Shock reflection and diffraction over cylinder

点の密度と(5)式を用いて円柱上の密度分布が求められる。これより、初期過程を除いては反射衝撃波の速度変化は小さいので円柱上で等エントロピー流れを仮定することが可能となり、圧力分布が決定される。しかし、滑り線を横切ってエントロピーは変化するため、滑り線とマッハステム間の圧力分布はマッハステムの速度より求める。

以上の方法により求めた圧力分布を第3図に示す。縦軸は試料気体初期圧に対する圧力比、横軸はマッハステムの到達位置、実線は数値計算の結果を示す。なお、数値計算は変数分割法によるLax-Wendroff法[11]を用いた。実験結果と数値計算結果は定性的にはよく一致している。実験値の方が5%—10%大きいのは、数値解での人工粘性による衝撃波の記述のあいまいさに起因するものと考えられる。

圧力分布より、次のように定義される抗力係数 C_d が求められる[10]。

$$C_d = (2/D\rho U^2) \int P(x,y)dy \quad (6)$$

ここに、 D 、 P 、 U 、 ρ はそれぞれ円柱の直径、円柱表面の圧力分布、入射衝撃波背後の粒子速度および密度、また積分の範囲は円柱の周上である。第4図に $MS = 1.3$ および 2.6 について、その結果をしめす。縦軸は C_d 横軸は無次元時間 tU_s/D 、ここに、 t 、 U_s は時間、および衝撃波速度。黒丸は本実験値、実線は数値計算の結果および破線は、Heilig[10]による圧力測定からの実験曲線を示す。Heiligは円柱に複数の圧力変換器を分布させ、直接圧力測定による非定常抗力係数の実験的決定を試みた。入射衝撃波が円柱前面に沿って伝播する時、抗力係数はその伝播と共に増大し極大となる。衝撃波が円柱後面に回り込むにつれて抗力係数は減少し、時間の経過と共に定常流における値に漸近する。

以上の比較より、圧力分布をホログラフィー干渉計法による密度分布測定から決定するという本報の手法は有効である。

Figure 3. Pressure profile

4. 結論

衝撃波管内に置かれた円柱まわりの非定常流れをホログラフィー干渉計法により観測し、本方法が短時間現象の定量的測定法として有力な手法となることを示した。例として衝撃波の反射・回折による円柱の非定常抗力を明らかにした。

終わりに、本研究に対し、熱心な協力と助力を惜しまなかった、小野寺 収助手、小島 英則技官に謝意を表する。また実験には、本研究所付属工場の諸氏の協力を得た。数値計算に関し、鈴木 充博士の有益な助言を得た。ここに付記し、それぞれ謝意を表する。

文 献

- [1] G.Ben-Dor and I.I.Glass, J.F.M.,vol.92(1979)
- [2] Jean-Charles Vienot, Holography,Laser Handbook,vol.2(1972)
- [3] W.Koeckner, Pulsed Holography,Laser Handbook,vol.3(1979)
- [4] Stollery J.L. and Stalker R.J.,Proc.14thISST&W(1984)
- [5] Squire I.C.,Aeron.J.(1983)
- [6] Takayama K.,Proc.SPIE,vol.298(1983)
- [7] Takayama k. & Watanabe w.,Mem IHSM,vol.45(1980)
- [8] Takayama k. & Sasaki m.,RIHSM,vol.46(1983)
- [9] Baker W.E.,Explosions in AirTexas Univ.Press(1973)
- [10] Heilig W.,Proc.12th ISST&W(1980)
- [11] Suzuki M. & Hond M.,Mem IHSM,vol.48(1983)
- [12] Suzuki M. & Honda M.,ibid,vol.48(1983)