気体力学に関する C A F V システムの開発 (L I F を用いた流れ場の 3 次元的計測)

名古屋大学 工学部 藤本哲夫 新美智秀 熊崎裕之 清水紀宏*

Development of CAFV System for the Gas Dynamics
(Three-Dimensional Measurement of the Flow Field using LIF)

Tetsuo FUJIMOTO , Tomohide NI-IMI
Hiroyuki KUMAZAKI and Norihiro SHIMIZU

CAFV(Computer Aided Flow Visualization) system for the gas dynamics has been developed and is applied to analyze three dimensional structures of the flow field that is visualized using laser induced fluorescence of I_2 seeded in Ar. The flow field is visualized by many laser sheets and photographed two dimensionally by a high sensitive vidicon camera. These image data are stored up in a personal computer in order to record three dimensional information on the entire flow field. For the purpose of suppressing the noise, an image datum is an average of many frame data. From the image data, the visualized pictures at arbitrary cross sections (CT; Computer Tomography) are reproduced on the monitor by the personal computer. The propriety and effectiveness of this system are verified through the results applied to two flow fields, i.e., the free jet expanding into the vacuum chamber and an interacting flow field between the skimmer and the free jet.

1 はじめに

コンピュータやデジタル画像処理技術の進歩に伴い、近年これを用いた流れ場の可視化 (CAFV; Computer Aided Flow Visualization) システムの開発が活発でその報告も多い。本研究は、コンピュータと高感度ビジコンカメラを一体化し、レーザ誘起蛍光法を用いて可視化した流れ場を対象として、その構造を 3 次元的に解析するシステムの開発を行った。すなわち 2 次元のレーザシートにより可視化した画像の蓄積から、3 次元データを構築するものである。さらに、このデータからコンピュータにより任意断面における画像 (CT; Computer Tomography) の再生を可能にした。また、レーザシートとカメラの位置制御からデータ入力、転送までの一連の操作を、コンピュータを用いて自動化し高速化を行った。本報では、本システムをオリフィスを通して真空中へ膨張する超音速自由噴流の流れ場、および分子線の初段として重要な超音速自由噴流とスキマの干渉した流れ場に適用してその有効性を検証した。

2 CAFV システム

2-1 システム構成 図 1 に CAFV システムの構成を示す。レーザシートを流れ場に入射し、レーザ誘起蛍光 (LIF; Laser Induced Fluorescence) により可視化した流れ場は、レーザシート面に垂直に設置された高感度ビジコンカメラ (浜松ホトニクス; C1000) によって撮像される。カメラにはベローズと望遠レンズ (200mm, F2.5) が組み合わされており、ほぼ等倍の画像が得られる。撮像画像は、蛍光強度に従って、8 bit、256 階調 (0 (黒) ~ 255 (白)) に量子化され、画像データとしてリアルタイムにビデオフレームメモリ (浜松ホトニクス; C1900) に転送される。この画像は、モニタによって観察できる。

また、この画像データは、同メモリに一旦記憶された後に、ホストコンピュータ（PC9801 VM、記憶容量5 Mbyte）へ転送され、加算平均して雑音を除去し、最終データとしてコンピュータ内に記憶する。これらのデータは、任意の処理後にXYプロッタ、モニタ、またはディスプレイに出力される。

対象となる流れ場の撮像は、多くの切断面について行われ、これらのデータを得るまでの一連の操作がホストコンピュータにより自動化されている。

2-2 ソフトウェア

2-2-1 システム用ソフトウェア 本研究で開発したCAFVシステムにおけるデータ記憶、画像処理までの一連のフローチャートを図2に示す。

実験を始める前に、取り込むべき画像データの大きさ、レーザシートの移動量（切断面間距離）、および各切断面の加算回数を設定する。画像データの大きさは、縦横の画素数 256×256 、 256×512 、 512×512 の3種類から選択できる。なお画像データの1画素当りの実長は、垂直方向が 0.0200mm 、水平方向が 0.0188mm である。レーザシートの移動量は、 $75\mu\text{m}$ と $38\mu\text{m}$ から選択でき、画像データの大きさにより32または64枚の切断面画像をホストコンピュータ内にデータとして取り込むことが可能である。また、画像の加算回数は1～255回の間で任意に設定できる。本研究では、加算回数は50回に設定した⁽¹⁾⁽²⁾。以上の設定の後、ホストコンピュータ内への画像データの記憶まで自動化されている。この自動化ルーチンではまずレーザシートをデータ取り込み位置まで移動させ、次にビジコンカメラをレーザシートの移動量だけ等距離を保つように移動させる。この後、ビジコンカメラによる切断面の撮像→ビデオフレームメモリによる画像の記憶→ホストコンピュータへの画像データの転送→ホストコンピュータ内での画像データの加算が行われる。この操作が始めに設定した加算回数だけ繰り返され、平均化された後に次の切断面について同じ一連の操作が繰り返される。

Fig.1 CAFV system

2-2-2 画像処理用ソフトウェア 本研究では、以下のような2つの画像処理用ソフトウェアを作成した。

a 任意断面の画像の再生 これは図3に示すように、取り込んだ多くの切断面画像から、この面に垂直な断面の画像をモニタ上に再生するソフトウェアである。このソフトウェアは、物体の存在する流れ場、特に物体等の物理的条件により可視化不可能な断面の可視化に非常に有効である。これにはレーザシートの位置と画像データとの対応が精度よく行われねばならないが、ホストコンピュータによるこれらの制御により可能にした。

b 蛍光強度の分布 蛍光強度の分布は、本システムの検証に用いたLIF法によって可視化された超音速自由噴流の流れ場においては、衝撃波の位置や密度分布などを知る上で非常に重要なものである。切断面の蛍光強度を定量的に得るために、切断面の任意の鉛直及び水平線に沿った蛍光強度分布の表示と、切断面全体の蛍光強度分布を知るための等高線または疑似カラー表示のソフトウェアを作成した。等高線と疑似カラー表示のソフトウェアにおいては、画像の蛍光強度の任意の値の間を8分割し、各強度に対応する領域の境界を線によって、または各領域を色でそれぞれ表示した。このソフトウェアは、任意断面の再生画像にも適応が可能である。

3 可視化実験装置と実験方法

CAFVシステムの検証に用いた実験装置の概略を図4に示す。本研究で用いた流れ場は、試料気体（アルゴン）をヨウ素と貯気室で混合し、オリフィス（直径 $D = 0.504\text{mm}$ ）を通して真空槽内で膨張させ、超音速自由噴流を形成させたものである。また、超音速自由

噴流と干渉させるスキマは、オリフィスと同軸上に設置し、スキマ先端からオリフィスまでの距離は 1.84mm である。なお、スキマはジュラルミン製で中実である。可視化は、ヨウ素のレーザ誘起蛍光現象（レーザ波長 510nm 近傍）を利用し、OFF-RESONANT⁽³⁾の状態で行った。このため蛍光強度は流れ場の密度にほ

Fig.2 Flow chart of software for system

Fig.3 Schematic model for reproduced picture in arbitrary cross sections

ば比例する⁽⁴⁾。

使用したレーザは、発振波長の可変な色素レーザと、その励起用光源のエキシマレーザである。レーザ光は光ファイバを通して真空槽近傍まで伝送され、ビームコリメータを用いて直径35mmの平行光にされた後円筒面レンズによりシート状にされる。このレーザシートの幅は約10mm、厚さは0.3mmである。

4 実験結果および考察

4-1 超音速自由噴流 図5にモニタに映し出された超音速自由噴流の写真とその構造模式図を示す。

図6, 7に超音速自由噴流のオリフィス中心軸を含む断面の流れ場全体の蛍光強度の等高線及び疑似カラー表示を示す。両図から、蛍光強度の変化の激しいたる形衝撃波と垂直衝撃波が確認できる。図6中に示したオリフィスと垂直衝撃波の位置は、オリフィス中心軸上の蛍光強度の変化からコンピュータを用いて計算した結果であり、垂直衝撃波の位置はAshkenasとSherman⁽⁵⁾の結果とよく一致した。

図8は、図5の圧力比(P_s/P_b)122の場合の超音速自由噴流の流れ場をオリフィス中心軸を含む面に平行な64の切断面について、画素数256×256、レーザシートの移動量75 μ mでデータを取り込み、切断面に垂直な種々の断面の可視化画像を再生したものである。なお図(a)~(c)は、それぞれ図5の下に示したa~cの矢印の断面を再生したものである。これらの図から、オリフィス近傍(図8(a))において密度の高い円形の領域が下流に向かってしだいに大きくなり、たる形衝撃波が観察されるようになる(図8(b))ことがわかる。さらに下流では、たる形衝撃波と噴流境

(a) Visualized image ($P_s/P_b=122$)

(b) Flow field structure

Fig.4 Experimental apparatus
for flow visualization

Fig.5 Flow field of free jet

界の間の領域のみが密度が高いために明るく、その内側は膨張によって密度が低下しているために暗くなる（図 8 (c)）。

4-2 超音速自由噴流とスキマが干渉した流れ場 図 9 は、レーザシートがスキマとオリフィスの中心軸を通る場合の、モニタに表示された可視化画像の写真、およびその構造模式図である。図 9 (a) から、スキマ前方に離脱衝撃波が形成されている様子がわかる。

図 10 は、図 9 (a) に矢印で示された断面の再生画像、およびその構造模式図である。図 10 (a) から、中心部にスキマ、その外周に離脱衝撃波、さらにその外周にはたる形衝撃波を観察することができる。また、図 10 (a) には、図 10 (b) に斜線で示した蛍光のない領域が 2 カ所観察される。図 10 (b) の斜線部 A はビジコンカメラの死角領域、斜線部 B はレーザシートがスキマにより影になる部分に対応する。

Fig.6 Fluorescence intensity
contour lines of free jet

Fig.7 Fluorescence intensity
color contour lines of free jet

(a)

(b)

(c)

Fig.8 Reproduced pictures of free jet

(a) Visualized image ($P_s/P_b=173$)

(b) Flow field structure

(a) Reproduced picture

(b) Flow field structure

Fig.9 Interacting flow field

between free jet and skimmer

Fig.10 Reproduced picture of interacting flow field

between free jet and skimmer

5 おわりに

気体力学に関するCAFVシステムを開発し、2つの流れ場にこのシステムを適応した。その結果から、蓄積した2次元画像データによる任意断面の可視化画像の再生、蛍光強度分布の表示において、本システムの妥当性および有効性が検証された。また、本システムは、LIF以外の可視化手法とも組み合わせることが可能であり、その応用範囲は広いものと考えられる。

なお本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究[A]）の援助を受けたことを付記する。

6 文献

- (1) 藤本, 新美, 熊崎, 流れの可視化, Vol.7, Suppl., (1987), 19.
- (2) 藤本, 新美, 熊崎, 機論, No.88-0191A, 掲載予定.
- (3) 藤本, 新美, 長田, 流れの可視化, Vol.7, No.26, (1987), 325.
- (4) McDaniel, J.C., Phys. Fluids, 25(7), (1982), 1105.
- (5) Ashkenas, H. and Sherman, F.S., Proc. 4th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn., 2(1966), 84.