Colored grid background oriented schlieren (CGBOS)法による 軸対称物体まわりの超音速流れ場に対する CT 密度計測

太田匡則¹⁾, 濱田健太²⁾, 前野一夫³⁾

Computed tomographic density measurement of supersonic flow field around axisymmetric model

Masanori OTA, Kenta HAMADA and Kazuo MAENO

ABSTRACT

The background oriented schlieren (BOS) technique is one of the visualization techniques that enable the quantitative measurement of density information in the flow field with very simple experimental setup. BOS requires only a background and a digital still camera and it can realize the quantitative measurement of density. In this report we propose the colored grid background image for BOS technique (CGBOS). The experiments were carried out in the 0.6 m × 0.6 m test section of supersonic wind tunnel at JAXA-ISAS. The measurement setup consisted of metal halide lamps, a colored grid background image and a digital still camera. A colored grid pattern was used as background image and density gradient in vertical and horizontal direction was obtained. The measurement result and prospect of CGBOS technique are reported.

Keywords : Background oriented schlieren, Computed tomography, Quantitative measurement

1. 緒 論

Background Oriented Schlieren (BOS)法は Meier^[1]によって提案された計測手法である。その原理はシュリーレン法と同様で、流体の密度変化によって生じる屈折率の変化を利用した計測法である。特徴は背景画像を利用して撮影を行う点で、従来のシュリーレン法で利用される並行光束を作り出すための凹面鏡やピンホール、カラーフィルタなど複数の光学装置が必要なく、適当な光源と背景画像、さらに撮影を行うカメラのみがあればよく、きわめて簡素な撮影系で計測を行うことができる。近年、BOS 法は風洞試験^{[1]-[3]}、ノズルからの噴流^{[3],[4]}、さらには実機スケールでの実験^{[5],[6]}など様々な計測対象へ適用されている。BOS 法の計測原理の概要を Fig. 1 に示す。背景画像からの光は計測対象の密度勾配によって実線の様に屈折し、破線で示した密度勾配が存在しない場合と比べて、背景画像が Δh のずれをもってカメラで撮影される。このずれ量は屈折率勾配の積分量と、背景画像と密度勾配までの距離 l_b 、密度勾配からカメラまでの距離 l_c 、カメラの焦点距離 f により式(1)のように表される^[2]。また、屈折率と密度の関係は式(2)で表される。ここで n は屈折率、 ρ は密度、 G は Gladstone-Dale 定数、 r は後に述べる背景画像のストライ

プと垂直な方向の座標である。これらの関係式から、BOS 法では従来のシュリーレン法と同様に密度の 1 階微分に対応した情報を得られることがわかる。さらには CCD カメラやデジタルカメラを用いて撮影を行い、適当な画像処理を行って撮影された背景画像のずれ量を求めることにより、密度情報を定量的に求めることが可能である点が BOS 法の大きな利点である。これまで定量計測には干涉計などを用いるのが一般的であったが、維持管理や調整に多くの手間がかかり、さらに非常に高価な光学装置であったため、計測できる大きさにも制約があったが、BOS 法では Fig. 1 に示すような簡素な計測系で定量的な計測が可能であるため、大型の計測対象に対しても安価に定量計測が実現でき、計測対象の大きさに制約がない点も利点の 1 つである。

本報告では比較的大型の風洞である JAXA-ISAS 所有の超音速風洞を利用し、背景画像にカラーグリッドパターンを用いた Colored Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) 法を新たに適用し、主流マッハ数 2.0

$$\Delta h = \frac{l_b f}{l_b + l_c - f} \frac{1}{n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r} dr \quad (1)$$

$$\frac{n-1}{\rho} = G \quad (2)$$

* 可視化情報全国講演会 (米沢 2009) にて発表, 原稿受付 2010 年 8 月 24 日

1) 正会員 千葉大学 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, E-mail: ota@faculty.chiba-u.jp)

2) 日立造船株式会社

3) 正会員 千葉大学 大学院工学研究科

の条件で行った計測結果について報告する. 今回実験に使用した超音速風洞のような比較的大型の風洞では運転時の振動などが原因で, 干渉計などを利用した定量計測の実現は困難であった. そこで本研究では, 新たに提案する CGBOS 法を大型風洞試験へ適用し, 定量的な密度計測と CT 計測の実現を試みた.

Fig. 1 Optical setup of BOS.

2. 計測実験

本研究では宇宙科学研究所(JAXA-ISAS)所有の 60 cm × 60 cm の測定部断面積を有する超音速風洞において, 全長 270 mm, 直径 40 mm, 半頂角 20° の円錐型実験模型を用いて CGBOS 法による計測実験を行った. 超音速風洞の概略を Fig. 2 に, 実験模型の概略図を Fig. 3 にそれぞれ示す. 主流マッハ数は 2.0 である. 実験に用いた背景画像は Fig. 4 に示すようなカラーグリッドパターンである. 横方向にグリーン, 縦方向にレッドのストライプを配した画像となっている. この背景画像を用いる理由としては, 撮影された画像は色情報を基に横方向と縦方向のストライプパターンへと分離することができ, 分離されたストライプパターンを我々の研究グループでこれまでに開発している有限干渉縞画像解析の手法を応用することによって, 通風状態で撮影された実験画像 1 枚から画像解析を行うことが可能となるためである. この手法は LICT (Laser Interferometric Computed Tomography) 計測法^[7]における有限干渉縞画像解析の手法として開発してきたものである. LICT 計測法ではこれまでに開口端から放出される衝撃波によって誘起される非定常流れ場を 3 次元的に詳細に捉えることに成功している^[7].

他の BOS 法^{[1]-[4]}では背景画像としてランダムドットパターンを利用するのが一般的である. この方法では流れの無い状態で参照画像を撮影しておき, 流れのある状態で撮影した実験画像と比較する事により, 背景画像のずれ量を求めている. このずれ量の算出には PIV (Particle Image Velocimetry) 法で一般的に用いられている相互相関法が用いられている. このため, 風洞実験においては無風時と通風時の 2 枚の画像が必要となるが, CGBOS 法では無風時に撮影する参照画像が必要なく, 通風時に撮影した画像

のみから解析を行うことが可能である. CGBOS 法ではこの利点を生かして, 通風前後で実験模型の位置が大きくずれてしまう場合や, 動画撮影を行った場合にも実験画像 1 枚から解析を行うことができるので, 今後も様々な計測実験に対応できるものと期待される. ただし, これは本報告の計測対象である超音速流れのように, 擾乱を含む部分と含まない部分が撮影された領域に共存する場合のみで, 画像全体に擾乱を含むような場合は単一の画像のみから解析することはできない.

本報告では Fig. 5 のように, 背景画像 (Background) と実験模型中心の距離 l_b を 710 mm, 実験模型中心とカメラまでの距離 l_c を 5080 mm, カメラレンズの焦点距離 f を 482 mm として行った実験結果について報告する. 使用したカメラは CANON EOS kiss digital X で, 有効画素数は 3880 × 2690 である. 光源は風洞棟に導入されているハイスピードカメラ用メタルハライド HID-150W を使用した. 色情報を基に分離された横方向のストライプパターンからは通常のシュリーレン法で水平方向のナイフエッ

Fig. 2 JAXA/ISAS super sonic wind tunnel.

Fig. 3 Circular cone model.

Fig. 4 Colored grid background.

Fig. 5 Optical setup of BOS.

ジを用いて可視化を行った場合と同様に、垂直方向の密度情報を、縦方向のストライプパターンからは垂直方向のナイフエッジを用いた場合と同様に水平方向の密度情報をそれぞれ得ることができる。本報告ではそれぞれのストライプが約 10 ピクセルの幅で撮影されるように背景画像のグリッドパターンの大きさを決定した。これは画像解析において十分な精度を得るためである。また、本手法ではグリッドパターンの大きさよりも小さな現象を捉える事は困難であるが、撮影に用いるレンズや背景画像の解像度を計測対象に合わせて適宜変更することによって様々なスケールにおける計測にも対応できるものと期待される。

3. 実験結果

前節の Fig. 4 に示したカラーグリッドパターンを背景画像に用いて撮影された CGBOS 画像を Fig. 6 に示す。流れの向きは図中左から右の方向である。円錐物体先端部から生じた衝撃波と肩部からの膨張波など、物体まわりに生じた密度変化により背景画像がわずかに歪んでいる様子が確認できる。この画像を、色情報を基にグリーン、レッドにそれぞれ分離したものが Fig. 7 と Fig. 8 である。物体先端部付近を拡大したもので、グリーンのストライプは、模型の上側では密度（屈折率）勾配の向きから、衝撃波付近では横方向の縞が上方向に、膨張波付近では下方向に移動している。また、レッドのストライプは衝撃波付近では縦方向の縞が左方向に、膨張波付近では右方向に移動していることがわかる。我々の研究グループがこれまでに開発した LICT 計測法における有限干渉縞画像の解析手法を応用して、Fig. 7 のストライプパターンの移動量を Fig. 6 で示した領域全体で求め、グレースケールで表示したものが Fig. 9 である。上方向への最大移動量を階調値 255、下方向への最大移動量を階調値 0 として画像全体の移動量を画像化したものである。比較のために水平方向のナイフエッジを設置して撮影した、通常のシュリーレン画像を Fig. 10 に示す。衝撃波や膨張波の形状が Fig. 9 と良く一致して

いる。同様の手順で Fig. 8 の縦方向のストライプパターンの移動量をグレースケールで表した図が Fig. 11 である。図中左方向への最大移動量を階調値 255、右方向への最大移動量を階調値 0 として画像化したもので

Fig. 6 CGBOS image taken through Mach 2 flow.

Fig. 7 Green channel of CGBOS image.

Fig. 8 Red channel of CGBOS image.

ある．垂直方向のナイフエッジを設置して撮影した通常のシュリーレン画像を Fig. 12 に示す．衝撃波や膨張波を捉えることが出来ている．CGBOS 法によって得られる背景画像の移動量を示す画像 (Fig. 9, Fig. 11) は，式(1)からもわかるように屈折率勾配の積分量を画像化したものであり，通常のシュリーレン法によって得られる画像と同様に，密度の1階微分に対応した画像が得られる．本報告の範囲では，全てのストライプパターンについてその中心位置を求め，流れの様な部分を基準として解析領域全体にわたって縞移動量を算出している．このため，ランダムドットパターンを用いる他の一般的な BOS 法のように背景画像の移動量を求めるための参照画像は必要ない．解析の

結果, Fig. 9 では移動量の最大値が約5ピクセルであった．

画像解析によって求められた背景画像の移動量からは式(1)に表されるように，屈折率勾配の積分量が投影データとして求められる．本実験で使用した円錐型模型は軸対称であるため，Fig. 9 から求められた流れに水平な方向の移動量と，Fig.10 に示した流れに垂直な方向の移動量から得られた2方向の移動量を投影データとして，ART (Algebraic Reconstruction Technique) による CT 再構成を行った．今回使用した模型は軸対称であるため，1つの投影データから3次元流れ場の密度情報をCT再構成によって求めることができる．再構成によって密度勾配の3次元分布が得られるので，これを適宜積分することによって

Fig. 9 Calculated vertical displacement of horizontal green-stripe image (Fig. 7).

Fig. 11 Calculated horizontal displacement of vertical red-stripe image (Fig. 8).

Fig. 10 Conventional schlieren image (Horizontal knife-edge)

Fig. 12 Conventional schlieren image (Vertical knife-edge)

流れ場全体の密度分布を得る事ができる。積分の方法には陽解法的に直接積分する方法と陰解法的に行列式を解いて密度分布を求める方法が考えられるが、本報告では逐次近似法によって陰解法的に、再構成された密度勾配分布から3次元の密度分布を取得した。円錐模型中心軸断面における密度分布の等密度線図と円錐模型表面近傍の密度分布を Fig.13 に示す。流れ場の密度を一樣流の密度で除した無次元密度分布 (ρ/ρ_∞) を表している。模型先端部から生じた衝撃波や模型肩部から生じている膨張波を定量的に捉えることができています。衝撃波よりも上流側にやや低密度の領域が現れているが、これは ART による再構成と最終的な密度分布を求める際の逐次近似計算の誤差の影響が表れているものであると考えられる。Venkatakrishnan らの報告^[2]と同様に、理論値として Cone Tables^[8]から算出された衝撃波背後における密度値と CGBOS 法によって求められた密度値をプロットしたものを Fig.14 に示す。模型先端から 12mm の位置において、模型表面から一樣流に垂直な方向の密度変化を、模型先端部を原点として模型中心軸となす角度についての密度変化として表したものである。模型の半頂角 20° から衝撃波角である 37.8° までの無次元密度分布を表している。CGBOS 法によって得られた値は Fig.14 においては理論値との相対誤差は最大で約 4% であった。シュリーレン画像 (Fig. 10, 12) と比較すると衝撃波が厚くなっているが、これは撮影された画像から、CT 再構成計算時にデータ数を減らして計算を行っていることと、最終的に密度を得るための逐次近似計算による影響が表れたものと考えられる。撮影された画像は 3880×2690 ピクセルであり、

このままのデータ数では再構成における計算容量が大きすぎるため、それぞれの方向について 1/5 のデータ数として再構成を行った。BOS 法では背景画像に焦点を合わせ、焦点深度を大きくするためにレンズの絞りを絞った状態で撮影を行うため、背景画像よりも手前にある現象が僅かながらぼやけた状態で撮影される。この影響も表れているものと考えられる。流れ場全体における密度分布を Fig. 15 に示す。円錐物体表面近傍の密度分布を等密度線で、3つの流れに垂直な断面における密度分布を疑似カラー表示によって示している。超音速流中の物体まわりに生じた衝撃波や膨張波を3次的に捉えることができています。

Fig. 14 Comparison of normalized density behind the shock

Fig. 13 Reconstructed normalized-density distribution on central plane (contour) and normalized-density distribution near the body surface.

Fig. 15 Reconstructed 3D density field.

4. 結 論

本報告では背景画像にカラーグリッドパターンを利用した CGBOS 法を提案し, 軸対称模型まわりの超音速流れ場の定量的密度計測を試みた. CGBOS 法では, 通風状態で撮影された 1 枚の画像から, 色情報を基に分離されたグリーンとレッドの 2 つのストライプパターンを得る事ができる. それぞれのストライプパターンは有限干渉縞画像解析の手法を適用することにより, 水平方向のストライプパターンからは流れに垂直な方向の密度勾配の積分量が, 垂直方向のストライプパターンからは流れに水平な方向の密度勾配の積分量が定量的に求められる. 本手法により, これまで困難であった大型の風洞における定量的な密度計測が可能となった.

さらに画像解析によって得られた定量的密度情報を投影データとして, ART による CT 再構成を行うことによって超音速流れ場全体に対する定量的 3 次元計測を実現することができた.

謝 辞

本研究の遂行にあたり, 宇宙科学研究所の安部隆士教授をはじめ, 風洞委員会, 風洞技術員の方々にご協力をいただいた. ここに謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) G. E. A. Meier : Computerized background-oriented schlieren, *Exp. Fluids*, Vol.33 (2002) pp.181-187.
- 2) L. Venkatakrisnan and G. E. A. Meier, Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique. *Exp. Fluids*, Vol.37 (2004) pp.237-247.
- 3) F. Leopold, J. Simon, D. Gruppi and H. J. Schäfer : Recent improvements of the background oriented schlieren technique (BOS) by using a colored background, *Proc. 12th International Symposium on Flow Visualization*, German Aerospace Center (DLR), Göttingen, Germany, ISFV12-3.4 (2006), pp.1-10.
- 4) E. Goldhahn and J. Seume : The background oriented schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field, *Exp. Fluids*, Vol.43 (2007) pp.241-249.
- 5) K. Kindler, E. Goldhahn, Friedrich Leopold and Markus Raffel : Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements, *Exp. Fluids*, Vol.43 (2007) pp.233-240.
- 6) 若林邦彦, 黒田英司, 石川弘毅, 保前友高, 松村知治, 中山良男 : 大規模な水素/空気混合気体の爆発により発生する爆風の可視化, 平成 17 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2006), pp.323-324.
- 7) M. Ota, T. Koga and K. Maeno : Interferometric computed tomography measurement and novel expression method of discharged flow field with unsteady shock waves, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.44, No. 42 (2005) pp.L1293-L1294.
- 8) J. L. Sims : Tables for supersonic flow around right circular cones at zero angle of attack, NASA SP-3004.