

高感度定量密度計測法の開発と風洞試験

Development of high-sensitive density measurement technique and wind-tunnel test

大川 美祐子(千葉大・工)・太田 匡則(千葉大)・稲毛 達朗 (湘南工科大)・廣瀬 裕介(千葉大・院)・

門脇 大介(千葉大・院)・田島 滉大(千葉大・院)・矢作 祐輔(千葉大・院)

1. 序論

現在, 宇宙航空分野における産業は大きな転換期にあると言える. 宇宙産業ビジョン 2030¹⁾にもある通り, 宇宙産業は第四次産業革命を進展させる駆動力となりうるからである. 今後本格的に宇宙産業が発展していく過程において, 宇宙機, 航空機等の設計・開発は重要度を増していくと考えられる. それに付随して, 宇宙機や航空機等の周囲の超音速, 遷音速流れについて研究, 解明することも重要になっていくものと推測される. このような状況の中, 流体の定量的計測に対する需要が高まっている. 比較的新しい流れの定量的計測手法である, Background Oriented Schlieren (BOS) 法²⁾³⁾は, デジタルカメラと背景画像のみの非常に簡素な構成でも密度の定量的計測が可能であるため, その適用可能範囲は風洞試験のみならず, 実スケールまで非常に多岐にわたり, これまで定量的な密度計測を実現することが困難であった現象に対する計測についての報告も近年数多くなされている. BOS 法は簡素なセットアップで定量的計測が実現できる反面, 従来のシュリーレン法と比較すると計測感度が低い, 計測対象がぼやけた状態で計測されるため計測している現象に対する解像度が低い, などの欠点があった. 本研究ではこれらの BOS 法開発以来の欠点を克服し, 従来の BOS 法と比較して高感度かつ高精度な定量的密度計測を実現するためにダブルパス BOS 法を開発し, その実用性を検証するために理論解が既知である円錐模型周りの超音速流れ場を計測対象として, 超音速風洞における計測実験を試みた.

2. 実験原理

BOS 法の最も基本的な計測原理図を Fig. 1 に示

す. BOS 法では観測対象となる密度場をはさみ, 片側に背景画像, その反対側にデジタルカメラを設置する. 測定範囲内に密度変化が発生すると媒質の屈折率 n が変化する. 密度場を通る光束はこの屈折率変化により偏向角 ε [deg]で屈折し, デジタルカメラのセンサ上において Δh [mm] だけ元の位置からずれて到達する. この背景画像の移動量 Δh は, 屈折率勾配の光路方向の積分量と幾何学的パラメータとの関係として, 式 (1)で示される. なお, 屈折率 n と密度 ρ [kg/m³]の間に式(2)の関係式が成り立つ場合には密度に対する定量計測が可能となる. ここで G [m³/kg]は Gladstone-Dale 定数を, ρ_0 [kg/m³] および n_0 は測定対象場内における基準密度と屈折率を表す. 実験で得た画像をコンピュータ上で画像処理し, 撮影された背景画像の移動量を定量的に評価することによって密度に対する定量計測が実現される.

本研究で用いたダブルパス BOS 法の光学系配置図を Fig. 2 に示す. 基本的な構成はダブルパスシュリーレン法と同様であるが, デジタルプロジェクタを用

$$\Delta h = \frac{l_b f}{l_b + l_c - l_i} \cdot \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial n}{\partial R(x, y, z)} dl \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n &= \rho G + 1 \\ (n_0 &= \rho_0 G + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

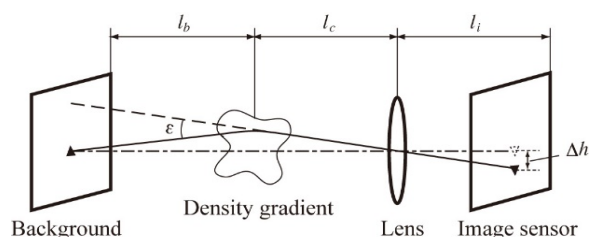


Fig. 1 基本的な BOS 法の原理図

いて、背景画像を投影する形となっている。デジタルプロジェクタ前方にレンズを設置し、凹面鏡(焦点距離 $f_1 = 2000\text{mm}$)ならびに絞り(Aperture)とで構成されるテレセントリック光学系によって背景画像がほぼ並行に観測部へ投影される。投影された背景画像の結像位置は任意の位置に調整する事が可能である。背景画像の結像位置よりも手前に平面鏡を設置し、観測部を2度通過した投影画像を、プロジェクタからの投影光軸上に設置したプリズムを通してデジタルカメラで撮影を行う。この時、デジタルカメラの焦点位置も任意の位置に設定できるため、投影された背景画像の結像位置とデジタルカメラの焦点位置を一致させることによって、背景画像と計測対象の双方に焦点を合わせて撮影する事が可能である。これにより BOS 法の発明以来克服できなかった課題で、背景画像と計測対象との間で生じるデフォーカスの問題を解決できる。また、投影光が観測対象を二度通過するため、従来の BOS 法よりも大きな移動量を得る事ができ、高精度かつ高感度な計測が実現できる。ダブルパス BOS 法によって得られる背景画像の移動量は Fig.3 のようになる。プロジェクタから投影された背景画像の結像位置と計測対象(本研究では風洞中心)との距離を l_b 、結像位置と平面鏡の距離を l_m と

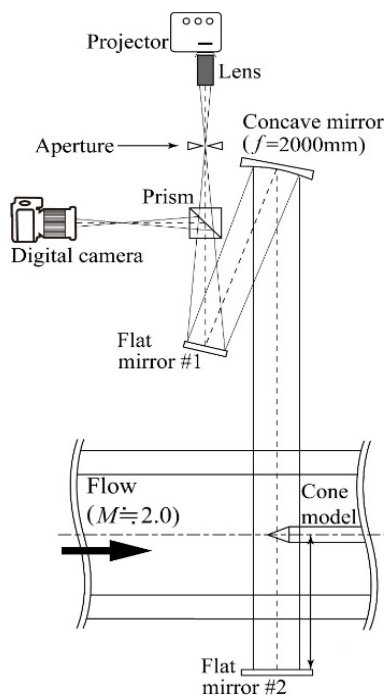


Fig. 2 ダブルパス BOS 法の光学系配置

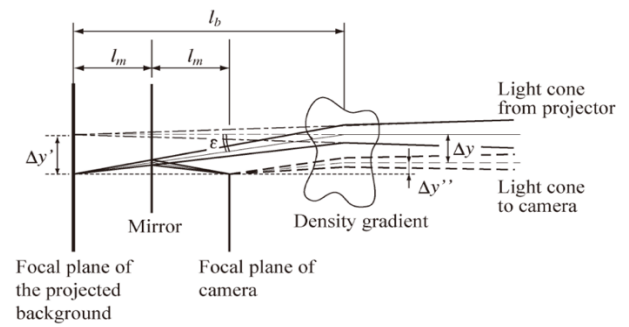


Fig. 3 ダブルパス BOS 法による移動量

$$\Delta h = 2l_m \frac{f_2}{f_1} \frac{1}{n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r(x, y)} dl \quad (3)$$

すると、デジタルカメラで得られる背景画像の移動量は凹面鏡とデジタルカメラのレンズの焦点距離をそれぞれ f_1, f_2 とすると式(3)のようになる。

3. 実験装置・条件

本研究では、JAXA/ISAS 相模原キャンパスの超音速風洞を使用して実験を行った。実験模型は半頂角 20° 、直径 40mm の円錐模型を使用した。超音速風洞の運転条件は、マッハ数 2.0, 総圧 210kPa , 壁面静圧 26.6kPa , 一様流密度 0.56kg/m^3 である。背景画像は Fig. 4 に示すように、横方向に緑色、縦方向に赤色のストライプを配したカラーグリッドパターンを使用した。一枚の撮影画像から色情報を基に、水平方向と垂直方向それぞれのストライプパターンに分離し、水平方向のストライプパターンからは垂直方向移動量、垂直方向のストライプパターンからは水平方向の移動量を取得できる。

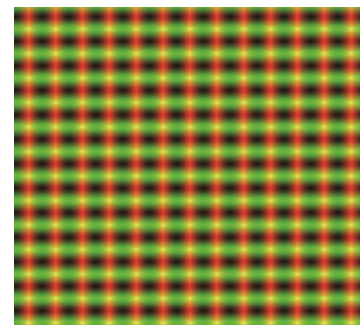


Fig. 4 色格子背景画像 (Colored-Grid pattern)

4. 実験結果

ダブルパス BOS 法によって撮影された画像を Fig. 5 に示す. Fig. 3 において, $l_b = 1166\text{mm}$, $l_m = 583\text{mm}$ とした場合のものであり, 風洞中心に設置された円錐模型位置に, カメラの焦点と投影された背景画像の結像位置を合わせて撮影したものである. 背景画像と円錐模型を非常に鮮明に捉える事ができている事がわかる. Fig. 5 の画像から算出した背景画像の垂直方向移動量の分布図を Fig. 6 に示す. カラーバーに示すように, 水平方向のストライプパターンが下方方向に移動した場合を正としている. 比較のため, 従来のテレセントリック光学系を利用した BOS 法によって撮影された画像を Fig. 7 に, 同図から背景画像の垂直方向移動量を算出したものを Fig. 8 に示す. ここでは上方方向への移動量を正としている. これはダブルパス BOS 法では, 背景画像を投影しているため, 従来の BOS 法とは移動方向が逆になるためである. Fig. 7 と Fig. 5 とを比較すると, 従来の BOS 法では円錐模型の輪郭がぼやけており模型境界を鮮明に捉えることができていない. また, 円錐模型先端から生じた衝撃波もダブルパス BOS 法と比較して厚みがある状態で撮影されていることがわかる. これは, 従来の BOS 法では計測対象である円錐模型よりも遠い位置にある背景画像にカメラの焦点を合わせた状態で撮影を行うため, 背景画像よりも手前にある計測対象がぼやけた状態で撮影されるためである. これは従来の BOS 法では避ける事ができない問題であり, 特に大型の風洞では背景画像と実験模型との距離が大きくなるためその影響が顕著になる. また, Fig. 6 と Fig. 8

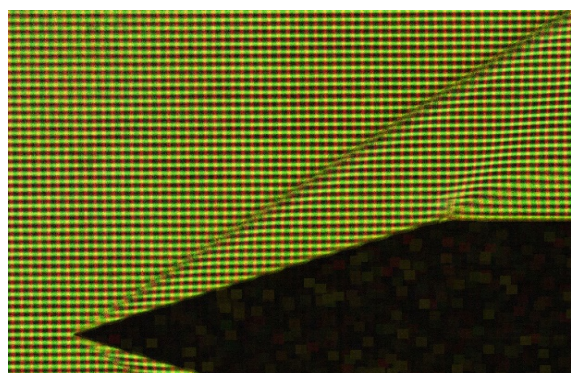


Fig. 5 ダブルパス BOS 法による CGBOS 画像
($l_m = 583\text{mm}$, $l_b = 1166\text{mm}$)

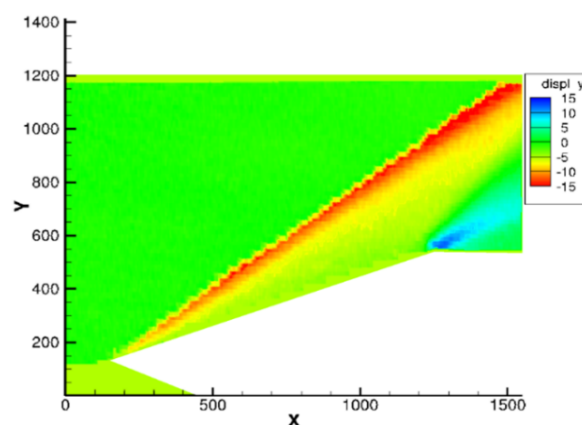


Fig. 6 ダブルパス BOS 法による背景画像の
垂直方向移動量(単位:pixel)

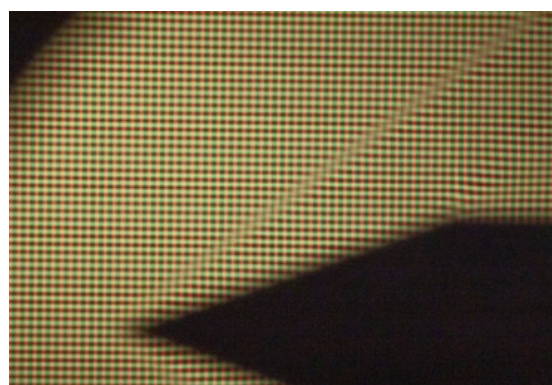


Fig. 7 従来の BOS 法による CGBOS 画像
($l_b = 795\text{mm}$)

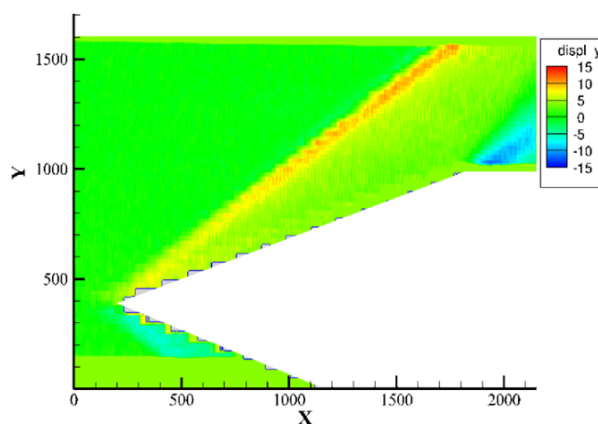


Fig. 8 従来の BOS 法による背景画像の垂直方
向移動量(単位:pixel)

を比較すると、ダブルパス BOS 法の方が模型先端からの斜め衝撃波をより大きな移動量として鮮明に捉えることができています。

ダブルパス BOS 法と、従来のテレセントリック BOS 法で得られた、模型表面から 7mm 上方の位置における背景画像の垂直方向移動量のプロットを Fig. 9 に示す。従来のテレセントリック BOS 法と比較するとダブルパス BOS 法ではより大きな移動量として計測できていることがわかる。また、Fig. 10 は Fig. 9 のデータから密度勾配の積分量として算出し、理論値との比較を行ったものである。黒の実線が Cone Table から求められた理論値で、衝撃波の位置で急峻に立ち上がっていることがわかる。従来のテレセントリック BOS 法ではこの急峻な変化を捉えきれないが、ダブルパス BOS 法では劇的な改善とまではいかないものの、計測精度を向上させることができたといえる。Fig. 5 に示すようにダブルパス BOS 法では衝撃波に

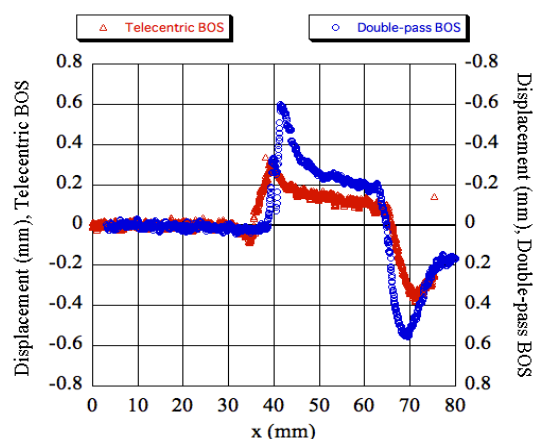


Fig. 9 模型表面から 7mm の位置での移動量

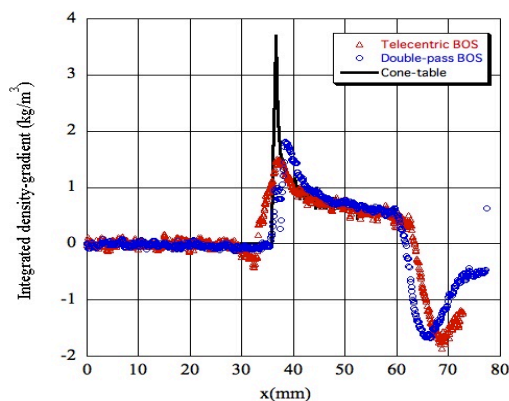


Fig. 10 模型表面から 7mm の位置での密度勾配の積分量

よる急峻な変化を撮影する事ができているが、現状では画像処理の段階でこの変位を捉えきれないため、今後は画像処理方法の改善も行う予定である。

5. 結言

ダブルパス BOS 法を開発し、大型の超音速風洞における計測に適用して円錐模型周りの定量的密度場計測を行い、理論値との比較を行った。ダブルパス BOS 法では模型位置にカメラの焦点を合わせつつ、背景画像も鮮明に撮影することができ、BOS 法の発明以来の問題点であった、計測対象と背景画像との間に生じるデフォーカスを克服する事ができた。さらに得られる背景画像の移動量も大きくすることができ、BOS 法の計測精度と感度を向上させる事ができた。その他の利点としては、ダブルパス BOS 法ではプロジェクタからの投影光を利用するため、光源の明るさを有効活用でき、高速度カメラによる撮影にも有効である事が挙げられる。一方、欠点としては撮影できる範囲が凹面鏡の直径に制限される事や、背景画像を完全に平行に投影することが困難であり、計測光が2度観測部を通過する際のズレが生じる可能性があることなどが挙げられる。今後はダブルパス BOS 法における幾何学的パラメータと計測される密度勾配との関係をさらに検証する予定である。

7. 参考文献

- 1) 宇宙産業ビジョン 2030「内閣府ホーム|宇宙政策|宇宙産業ビジョン 2030 について」
<<https://www8.cao.go.jp/space/vision/mbrlistsitu.pdf>>
- 2) G.E.A. Meier. Computerized background-oriented schlieren. Experiments in Fluids, 2002
- 3) F. Leopold, J. Simon, D. Gruppi, H.J. Schäfer. Recent improvements of the background oriented schlieren technique (BOS) by using a colored background, 12th International Symposium on Flow visualization, German Aerospace Center, Gottingen, Germany, September 10-14, 2006
- 4) K.Kurihara, K.Ishikawa, Y.Ishimoto, D.Aoki, T.Inage and M.Ota, Increase of sensitivity for CGBOS by double pass imaging, 2018