

高感度定量密度計測法の開発と風洞試験

山岸雅人, 田島 滉大 (千葉大学融合理工学府),
長谷川 漣, 小澤 直輝 (千葉大学工学部),
廣瀬祐介 (サレジオ工業高等専門学校機械電子工学科),
稲毛達郎 (湘南工科大学機械工学科), 太田匡則(千葉大学融合理工学府)

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

Masato Yamagishi, Kota Tajima
(Graduate School of Science and Engineering, Chiba University),
Ren Hasegawa, Ozawa Naoki (Faculty of Engineering, Chiba University)
Yusuke Hirose (Aerospace Engineering Course, Tokyo Salesian College of Technology)
Tatsuro Inage (Department of Mechanical Engineering, Shonan Institute of Technology)
Masanori Ota (Graduate School of Science and Engineering, Chiba University)

Abstract

BOS 法は従来のシュリーレン法等と比較して、安価で定量的な密度計測が可能であることから近年注目されている。一方で、測定感度の低さと原理上避けられないデフォーカスが問題となっている。本研究ではこの二つの問題を同時に解決する Double-Pass BOS 法を開発し、衝撃波を含む模型周りの密度計測を行うことを目的とする。風洞実験により、従来の BOS 法と比較してデフォーカスの改善により模型境界層付近の密度変化を捉えることに成功した。

1. 緒言

2020 年 12 月大きな話題となった小惑星リュウグウよりサンプルを入手することに成功したはやぶさ2はH-IIA ロケット26号機より打ちあげられたものである。この大きな進歩に多くの人々が注目しているように年々宇宙への関心は高まっている。そして、超音速や遷音速域における流体の可視化計測は、航空機や宇宙機の開発において重要な要素である¹⁾。流れ場の理解のために、光学的な可視化手法が古くから用いられており、シュリーレン法やシャドウグラフ法が一般的であるが、これらの手法では高感度な計測が可能である反面、定量的な密度計測は困難である。

近年、Background Oriented Schlieren (BOS)法

が Meier により開発された²⁾。この手法は計測対象の密度変化に伴う光の屈折により生じる背景画像の歪みを画像解析によって評価することで、定量的な密度計測が実現できる。定量的計測が可能であるが他の可視化手法と比較して計測感度が低いことと、背景画像と計測対象の両者にピントを合わせることが難しいという欠点がある。

そこで本研究では、BOS 法の計測精度の向上を目的として Double-Pass BOS 法³⁾を開発した。Double-Pass BOS 法は従来の BOS 法の原理を基にし、より高感度な計測を行うことのできる手法である。これまでに、背景画像と計測対象の両者にピントを合わせた撮影に成功し、従来の BOS 法と比べ感度の高い計測を実現した。

本研究では JAXA/ISAS の遷音速風洞における模型近傍を含む領域における非定常現象の計測へ Double-Pass BOS 法を適用した。

2. 計測手法

2.1 BOS 法

BOS 法の原理図を Fig. 1 に示す。通常の BOS 法では計測対象となる密度場をはさんで片側に背景画像、反対側にカメラを設置する。計測領域内に密度変化が生じると光学屈折率 n が変化する。密度場を通る光束は屈折率が変わったことにより偏向角 $\varepsilon[\text{deg}]$ で屈折し、歪められた状態でカメラに記録される。この時の移動量 Δh mm は次の(1)式で表される。また、屈折率 n と密度 ρ kg/m³ の関係式は(2)式で表される。なお、 G m³/kg は Gladstone-Dale 定数を表しており、 ρ_0 kg/m³ は計測対象場内における基準密度を表す。各光学機器の距離や計測対象場の気体密度等の情報と背景画像の歪み量から密度変化を定量的に計算することが可能である。

$$\Delta h = \frac{l_b f}{l_b + l_c - f} \cdot \frac{1}{n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r(x, y)} dl \quad (1)$$

$$n = \rho G + 1 \quad (n_0 = \rho_0 G + 1) \quad (2)$$

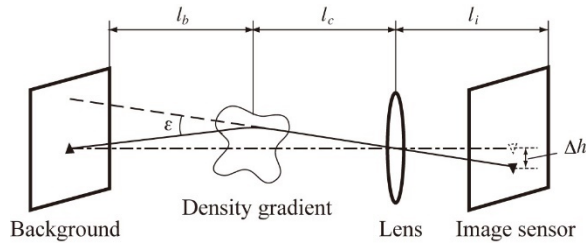


Fig.1 Principle of BOS method

2.2 Double-Pass BOS 法

Fig. 2 に Double-Pass BOS 法の光学系のセットアップを示す。Double-Pass BOS 法は従来の BOS 法と原理は同じで、密度変化を背景画像の歪み量として捉え定量的に計測を行う可視化手法である。Double-Pass BOS 法ではプロジェクタから投影された光束を計測対象となる密度場を 2 度通すことによって高感度な画像を得ることができる。さらに、プロジェクタを

用い背景画像を投影することで通常の BOS 法では実現できなかった模型周りと両方にピンポイントを合わせることが可能となるという利点がある。また、理論式は凹面鏡の焦点距離 f_1 とカメラの焦点距離 f_2 、および Fig. 2 に示す l_m を用いて式(3)で表される。ここで l_m は移動量を決める重要なパラメータである。プロジェクタより投影された背景画像は凹面鏡の焦点距離に依存するある位置で集光する。その位置より平面鏡を計測対象側に置く。その距離が l_m であり、平面鏡の位置を動かすことで、移動量 Δh を一定の範囲内で任意の大きさに設定することが可能である。

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

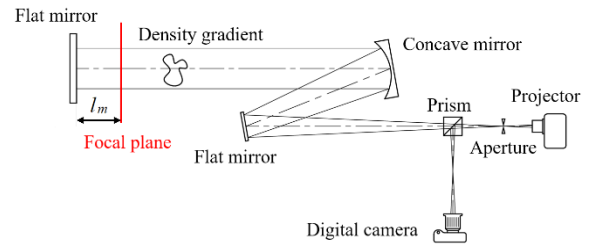


Fig. 2 Optical setup for Double-Pass BOS method

3. 実験内容

本研究で使用した Double-Pass BOS 法の光学系概略図を Fig.3 に示す。独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所本部 (JAXA/ISAS) 相模原キャンパスに設置してある吹き下し式遷音速風洞内に模型を設置して実験を行った。実験模型は直径 40 mm で模型先端から 172mm の位置に噴流用のストレートノズル (φ 4mm) が設けられている円錐模型である。ノズル入口部にはバルブピンが設置されており、これをサーボモータによって開閉することが可能である。実験模型には風洞外部に設置した圧縮空気ボンベから空気を供給しており、レギュレータ圧力は 0.8 MPa とした。サーボモータは風洞外部から制御しており、風洞の通風中にバルブピンの開閉動作を行うことが可能である。背景画像は水平方向に緑色、垂直方向に赤色のストライプパターンを配置した

ものである。遷音速風洞のマッハ数は 1.3 とした。

遷音速風洞の通風が開始されて静定状態となった後に模型内部のサーボモータを作動させてバルブピンを解放し、噴流を発生させる。撮影にはハイスピードカメラ Phantom Flex4K を使用し、撮影速度 938fps、解像度 4096×2304 pixel で計測を行った。模型を中心軸周りに 6deg ずつ回転させて、同様の計測を繰り返し、模型周りの流れ場の多方向投影データを取得した。また、多方向投影データから ART 法を用いて三次元密度データを取得した。³⁾

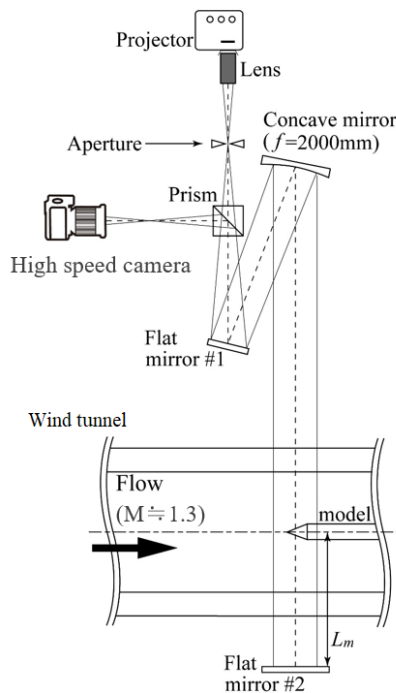


Fig. 3 Experimental setup

4. 実験結果

風中に撮影された画像を Fig.4 に示す。秒数 t はサーボモータが作動してから経過時間である。画像周縁部は凹面鏡の鏡径外部の領域であるため黒く映っており、画像下部は模型である。背景画像と計測対象である模型(噴流)の両方にピントを合わせた画像を撮影出来ている。一様流の方向は図中左から右であり、噴流の様子を確認できる。また、通風を行う前に撮影した画像を参照画像として背景画像の垂直方向移動量[pixel]を求めたものを Fig.5 に示す。上方向の移動量は赤く、下方向の移動量は青く表示されている。前述の膨張波を上流部で、壁面に

発達した境界層の様子を確認出来る。また、ノズル付近で大きな移動量(弓状衝撃波)が見られる。そして、それらを基に CT 再構成を行った結果を Fig. 6 に示す。流れ場の密度を一様流の密度($\rho_0=1.74\text{kg/m}^3$)で除した密度比で表している。Fig.6 は遷音速流れと噴流が干渉することによって生じる弓形衝撃波からなる高密度場($\rho/\rho_0 = 1.18$)を表示したものである。

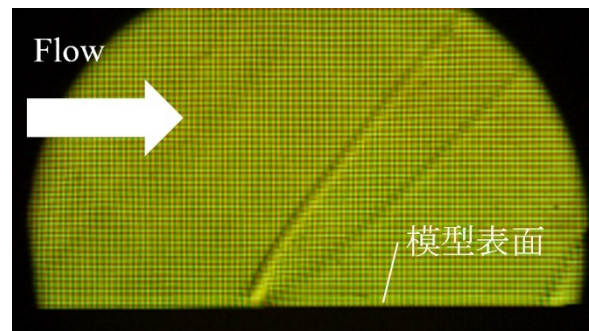


Fig. 4 Shot image ($t = 65\text{msec}$)

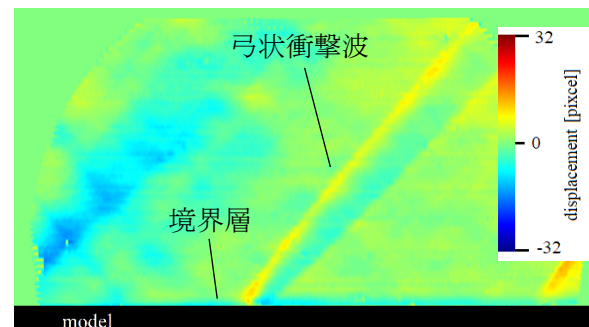


Fig. 5 The vertical displacements obtained from Double-Pass BOS images ($t = 65\text{msec}$)

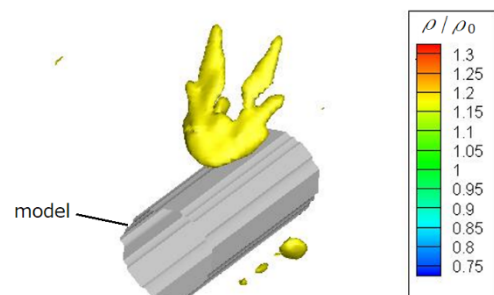


Fig. 6 Reconstruction image ($t = 65\text{msec}$)

5. まとめ

Double-Pass BOS 法を用いて遷音速風洞における模型回りの流れの計測を行った。提案手法では模型と背景画像の両方にピントを合わせることができ、かつ移動量を比較的自由に設定することが可能である。その為、従来の BOS 法と比較してより高精度な計測を模型近傍でも実現できるものと期待される。従来の BOS 法と比較して光学系が若干複雑になる為、適用範囲は風洞試験や実験室規模での高精度な計測に限られる。また、完全に平行に投影することは困難であり、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。

謝辞

本研究で実施された風洞実験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が大学共同利用設備として提供する高速気流総合実験設備にて行われました。

(課題番号 W18-005)

参考文献

- (1) Carlson, H. W. Correlation of sonic-boom theory with wind-tunnel and flight measurements. *NASA Technical report*, 1964, NASA TR R-213.
- (2) Meier GEA. Computerized background-oriented schlieren. *Exp. Fluids* Vol. 33, 2002, pp 181-187.
- (3) Y. Hirose, K. Ishikawa, Y. Ishimoto, T. Nagashima, M. Ota, S. Udagawa, T. Inage. K. Fujita, H. Kiritani, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai, The quantitative density measurement of unsteady flow around the projectile, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization (JFCM)*, (2018).