

再帰反射型可視化計測法の実規模衝撃波現象への適用

3CEMM062 永山 生耀 指導教員 水書 稔治

Application of Retroreflective Visualization Method to Large-Scale Shock Wave Phenomena

by

Ibuki NAGAYAMA and Toshiharu MIZUKAKI

Abstract

In the present research, a point diffraction interferometer (PDI) is planned to be employed for the quantitative visualization of large-scale shock wave phenomena, such as wake turbulence generated by aircraft. PDI utilizes a spherical wavefront generated by point diffraction as an ideal reference for measurement. This approach eliminates the accuracy constraints associated with reference optics in conventional interferometry. The PDI method can obtain quantitative density information applying to flow fields. To generate reference beam, the PDI method utilizes pinhole plate. The pinhole plate is made of photographic film and drilled by femtosecond laser. The pulse width of a femtosecond laser is significantly shorter than the characteristic time required for heat diffusion within the material. As a result, the absorbed energy is utilized for processing before it can be thermally conducted to the surrounding regions, effectively suppressing the formation of a heat-affected zone. This characteristic enables high-precision microfabrication compared to conventional thermal processing methods. This report describes the design and evaluation experiments of RR-PDI.

Keywords: Point Diffraction Interferometer, Retroreflective Method, Under Expansion Jet

1. まえがき

飛行中の航空機の後方では、主翼の翼端やフラップなどの動翼の端部から発生する渦によって乱気流が生じる¹⁾。この乱気流を後方乱気流といい、発生時の強度は航空機の重量に比例し、速度に反比例することが知られている²⁾。機体各部から発生した複数の渦は、機体の十分後方（スパンの数倍）で2本の渦に収束した後、時間の経過とともに減衰・消失する³⁾。後続の航空機がこの2本の渦に遭遇すると急激な高度低下によって墜落に至る恐れがあるほか、機体に損傷を受ける可能性がある^{4,5)}。したがって光学的可視化計測を通じ後方乱気流の挙動を解明することで離着陸時の飛行安全の向上や離着陸間隔の短縮による空港容量の拡大が期待される。

そこで本研究では、野外における流体现象の定量的可視化計測の実現を目的に、点回折干渉計 (Point Diffraction Interferometer, PDI) と再帰反射型光学系を組み合わせた新たな光学系を構築し、その計測精度を評価することを最終目標としている。本報では、PDIに必要な点回折素子（ピンホール加工の施された半透明板）を試作し、基礎実験として、再帰反射型点回折干渉計による不足膨張噴流の可視化実験結果を報告する。

2. 実験・解析方法

2.1 可視化光学系

PDI は共通光路型の干渉計であり Smartt⁶⁾らにより提案された。Fig.1 に PDI 光学系の概略を示す。PDI 光学系は測定部を通過した物体光を点回折素子 (Point Diffraction Device, PDD) 上に集光させることで干渉縞を得る。したがって PDI 光学系は PDD を除き、既存の Shadowgraph 法や Schlieren 法の光学系と同様の光学素子の配置である⁷⁾。このため Mach-Zehnder 干渉計をはじめとする従来の光路分離型の干渉計に比して光学系の構成が単純かつ、高精度な光軸合わせが不要である⁸⁾。

Fig.2 に PDD による干渉縞生成の概略を示す。PDD は半透明状の基板の中心に小孔を有した構造となっている。PDD に入射した物体光の一部は小孔によって回折し球面波となる⁹⁾。この球面波が PDI における参照光となる¹⁰⁾。一方、物体光の大部分は小孔周囲の半透明部を通過する。この参照光、物体光が互いに干渉することで PDI は干渉画像を取得する。干渉縞は等密度線を表しており、干渉縞を横切る毎に一定量密度が変化する。屈折率 n が ($n-n_0$) 変化したとき、光路長 s は測定部の奥行きが L の場合 $L(n-n_0)$ 変化する。したがって、Gladstone-Dale 定数 K を用いて、密度変化に対する干渉縞の本数 N を表すと

$$N = \frac{KL(\rho - \rho_0)}{\lambda} \quad (1)$$

したがって、一本の干渉縞前後の密度変化は

$$\Delta\rho = \frac{\lambda}{KL} \quad (2)$$

と表される。

Fig.3に本実験のPDI光学系の概要を示す。光源であるHe-Neレーザ（波長 632.8 nm, 出力 5 mW, THORLABS HNL50LB）から発せられたレーザ光は、空間フィルタ SF で位相を整え拡大され、Schlieren 鏡（直径 100 mm, 焦点距離 1000 mm）で平行光となり測定部を通過する。測定部には先細ノズル（出口径 3 mm, 曲率半径 11 mm）が設置され、ノズル先端から不足膨張噴流が形成される。測定部を通過した物体光は平面鏡あるいはレトロリフレクタで反射し測定部を通過後、Schlieren 鏡で集光する。Schlieren 鏡の焦点位置には PDD が設置され、半透明基板を通過する光束が物体光となると共に、一部が小孔により回折し球面波として参照光となり干渉縞を生成させる。PDD は写真フィルム（板厚 135 μm , Fujifilm across 100）に対しフェムト秒レーザ（波長 515 nm, 最大繰り返し周波数 1 MHz, LIGHT CONVERSION 社 CARBIDE）を照射しレーザアブレーションすることで小孔を施し製作した。フェムト秒レーザ（ $<10^{-13}$ 秒）は固体の熱緩和時間（ $<10^{-12}$ 秒）に比して短いパルス幅を有するため被加工材料を比熱的に飛散させることができる¹¹⁾。このため従来の熱的加工法と比較して熱影響部を最小限に抑え高精度な微細加工が可能である¹²⁾。干渉縞は高速度ビデオカメラ（2592 pix. \times 2048pix., フレームレート最大 7500 fps, KATO KOKEN k8-USB）で記録する。

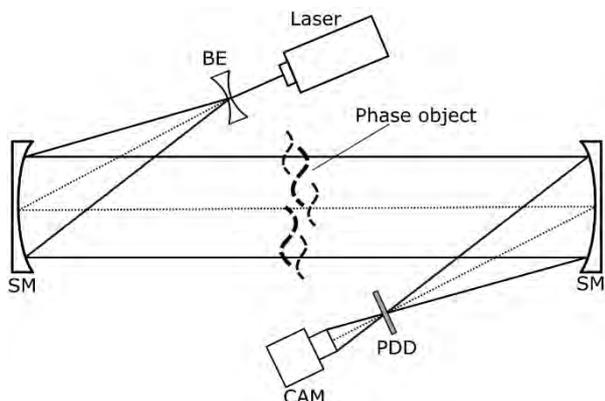


Fig.1 The principle of the PDI system.; BE: Beam expander, SM: Schlieren mirror, PDD: Point diffraction device, CAM: Camera.

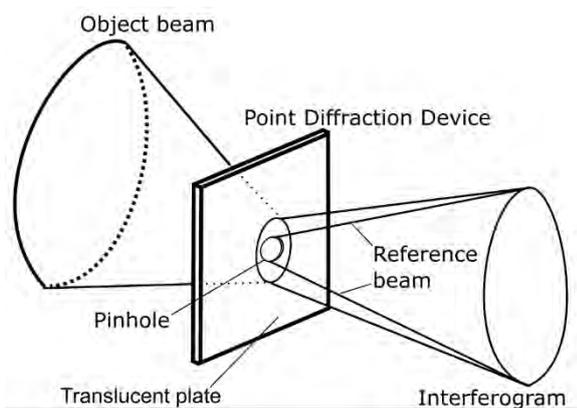


Fig.2 Schematic of reference beam generation.

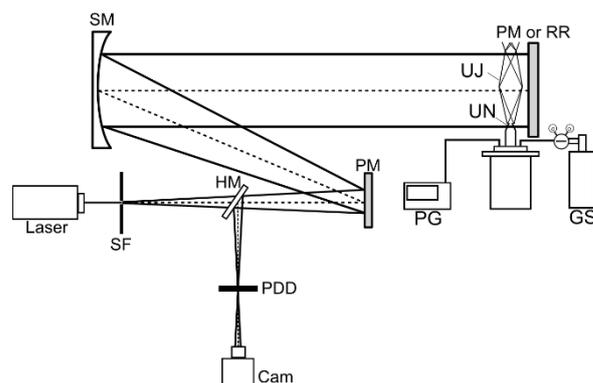


Fig.3 Visualization setup of under expansion jet by using a point diffraction interferometry.; SM: Schlieren mirror, PM: Planer mirror, RR: Retroreflector, HM: Half mirror, SF: Spatial filter, Cam: Camera, PG: Pressure gauge, GS: Gas cylinder, UN: Under expansion nozzle, UJ: Under expansion jet.

2.2 数値計算法

再帰反射型 PDI により取得した密度分布と比較し、可視化精度を評価するために不足膨張噴流の数値解析を行った。数値解析には熱流体解析ソフトウェア（ANSYS 社 Fluent）を用いた。基礎方程式には Navier-Stokes 方程式、時間積分には 1 次風上差分法を用いた。Fig.4 に解析モデルを示す。解析モデルはノズル出口部から下流に軸方向 45 mm, 9 mm の自由空間を設け、2 次元軸対称とした。解析モデル左端を流入条件、右端を流出条件とし、初期条件として圧力を与えた。また、ノズル出口を境界として上流側は窒素、下流側には空気を設定した。計算格子に非構造格子を用い、格子間隔は 70 μm とした。

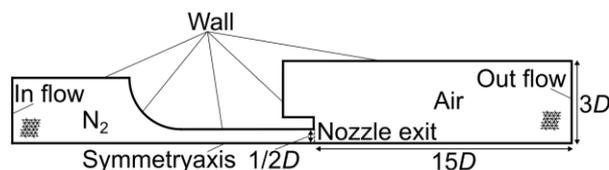


Fig.4 Computational domain.

3. 実験結果および考察

Fig.5 にノズル前後圧力比 $p_0/p_e=8.0$ (-)における不足膨張噴流の可視化結果を示す。可視化画像の上部は平面鏡反射型 PDI による可視化結果を、下部はプリズム反射型 PDI による可視化結果を示している。両可視化結果に共通してノズル出口部から扇状に広がる干渉縞が確認できる。これはノズル内において十分に膨張されなかったことによる膨張波による干渉縞である。一方でプリズム反射型 PDI と比較して、平面鏡反射型 PDI の方が縞の次数が増加していることが確認された。この差異は、プリズム反射型 PDI において測定領域を光が 1 回通過するのに対し、平面鏡反射型 PDI では同じ測定領域を 2 回通過するためである。

Fig.6 にノズル前後圧力比 $p_0/p_e=8.0$ (-)における不足膨張噴流の可視化結果と数値解析結果を示す。Mach ディスク、樽状衝撃波、反射衝撃波および三重点などの不足膨張噴流特有の内部構造を取得した。また、膨張波によ

発表会参加者のみ閲覧を許可します。無断配布を厳禁します。

って発生したノズル出口から広がる扇状の干渉縞を取得した。

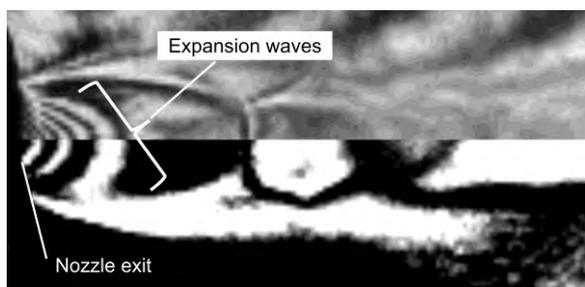


Fig.5 Comparison of Planer PDI visualization and Retroreflective PDI visualization ($p_0/p_c=8.0$ (-)).

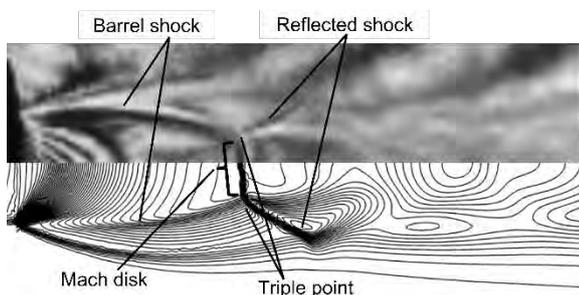


Fig.6 Comparison of PDI visualization and numerical analysis ($p_0/p_c=8.0$ (-)).

4. まとめ

本報告では、屋外環境での干渉計測の実現を目指し、点回折干渉計 (PDI) に再帰反射光学系を組み込んだ光学系を設計した。そして、その基礎的検証として、不足膨張噴流の可視化実験を実施した。屋外での干渉計測を可能にするため、PDI を活用した再帰反射光学系による流体可視化手法を適用した。今後は、視野の拡張を目的としてレトロフレクトシートを組み込んだ光学系の構築を進め、屋外環境における計測を通じて光学系の評価を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、H30-R9 年度文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)基礎基盤研究「先端

ビームによる微細構造物形成過程解明のためのオペランド計測」JPMXS0118070187,天田財団一般研究開発助成(課題番号 AF-2022233-B3, AF-2018203-A3) 及び大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本梅治, 鈴木義男: 新しい航空気象, 株式会社クライム気象図書出版, 2009.
- 2) 吉原貴之, 藤井直樹, 瀬之口敦: 航空管制における新たな後方乱気流区分の導入に係る動向, 日本信頼性学会誌信頼性, Vol.41, No.3 (2019) pp.164-169
- 3) 仁科武雄: 図解 パイロットに必要な航空気象, 成山堂書店, 2016.
- 4) 奥野善則, 又吉直樹: 大型航空機の後方乱気流が小型機に与える影響に関する研究, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 2008.
- 5) 小松原健史, 加来信之: 出発航空機から発する後方乱気流の観測, 電子航法研究所研究発表会講演概要 平成 17 年度 (第 5 回) 電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.11-11_4, 2005.
- 6) Smartt, R.N. and Steel, W.H.: Theory and Application of Point-Diffraction Interferometers, Japan J. appl. Phys., Vol.14, pp.351-355(1975)
- 7) Numata, D. and Ohtani, K.: Application of Point-Diffraction Interferometer to Unsteady Shock Wave Phenomena, Paper # 99, 15th International Symposium on Flow Visualization, Minsk, Belarus (2012)
- 8) 樫谷賢士: PDI 法による衝撃波管翼型流れの試験気体の影響に関する研究, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, No.685, pp. 34-41 (2011)
- 9) Wang, D. and Liang, R.: Point Diffraction Interferometry, Intech Open (2017)
- 10) 沖ほか: PDI 法による流れ場の定量解析に向けた予備実験, 可視化情報, Vol. 29, Suppl., No.2, pp. 325-326 (2009)
- 11) 橋田昌樹: フェムト秒レーザーによる材料のナノアブレーション. プラズマ・核融合学 会誌 = Journal of plasma and fusion research, Vol. 94, No. 5, pp. 244-247, 05 2018.
- 12) 藤田雅之, 橋田昌樹: フェムト秒レーザー加工. J. Plasma Fusion Res, Vol. 81, pp. 195-201, 2005.