

令和 5 年 9 月 26 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02359

研究課題名(和文) 大擾乱光波の複眼型波面解析に着眼した背景型シュリーレン法によるサブmm望遠可視化

研究課題名(英文) Long-distance-flow visualization with sub-millimeter resolution by using background-oriented schlieren

研究代表者

水書 稔治 (Toshiharu, Mizukaki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80433910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：実機航空機まわりの流れ場の可視化計測を実現させるため、望遠計測時における大気擾乱による空間分解能の低下を補償光学系で改善可能であることを実証した。模擬大気擾乱現象により空間分解能が低下した衝撃波現象に対し、影写真法および背景型シュリーレン法を適用する際に、可変形鏡とシャックハルトマン型波面センサで構成した補償光学系と融合させることで、空間解像度が10倍程度以上に改善させることに成功した。さらに、これら補償光学型望遠可視化計測光学系による野外における実規模現象の計測を実現させるため、移動可能な可搬型システムとし、初期的な計測での計測画像改善に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実機航空機周囲で発生する流れ場の光学的可視化計測では、対象現象を解析するに足る空間分解能に対して、往々にして大気擾乱による低下が卓越する。このため、フリード長と呼ばれる、大気擾乱に対して有効なレンズ口径の最大値が決定される。本研究の成果は、計測画像の光波に波面補償を施し、大気擾乱下においてもフリード長を増大させ、野外における望遠可視化計測の空間分解能に改善を実現した点に、大きな学術的意義がある。後方乱気流など、実機航空機まわりの流れ場のリアルタイム高精度計測が実現すれば安全を担保した上での高密度離着陸スケジュールの実現など、空港周辺での航空機運航の安全と効率化に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：To visualize the flow field around aircrafts or high-speed projectiles, improvement of special resolution of visualized images under strong atmospheric turbulence has been achieved in this research. Combining shadowgraph or background-oriented schlieren method with adaptive optics consisted of deformable mirror and Shack-Hartmann wavefront sensor, special resolution of shock related phenomena has been successfully improved more than ten times under simulated atmospheric turbulence. Moreover, the long-range visualization optics developed here was arranged as small as possible to carry out field experiment. Preliminary experiment for field experiment has been succeeded.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：衝撃波 補償光学 背景型シュリーレン法 BOS 翼端渦

1. 研究開始当初の背景

次世代超音速機実用化の鍵であるソニックブーム（衝撃騒音）低減，航空交通管制における離発着間隔短縮のため後方乱気流の挙動解明は，航空需要増大に対応するための重要課題である．一方，これら現象は，大気乱流や温度勾配などの影響を受け，数値解析と室内（ラボ）実験のみで完全な解明が困難で，実機実験が不可欠である．流れの可視化は流体計測の強力な手法だが，野外（フィールド）における遠距離・高空間分解の可視化計測は，ラボ実験と同様な光学系の構築が現実的に不可能なことから，大気じょう乱による画像ゆらぎが大きいことから，低い空間分解能にとどまっている．最大の原因は，大気じょう乱（上昇気流など）が観測者に伝播する光波面を連続的に不規則にゆがめることである．大気じょう乱によるレンズの空間分解能は，フリード数と呼ばれる特性数で決まり，地表では口径 7cm 以上の望遠レンズは空間分解能が頭打ちとなる．この限界を打ち破る革新的な定量的可視化計測法が航空技術跳躍のための重要課題の解明・克服に必要である．

2. 研究の目的

本研究の目的は，強い大気じょう乱中を伝播した光波を波面補償（波面復元）し，それを背景型シュリーレン法（BOS 法）で計測することで，大強度光学じょう乱を克服し，空間解像度が 1 mm を超える超解像可視化計測を世界ではじめて実現することである．

申請者らは，背景型シュリーレン法（BOS 法）と波面補償光学系とを融合させた新しい望遠可視化計測法（A0-BOS 法）を実現させた．この成果を基盤とし，実環境の大強度大気じょう乱への適応を目指すと同時に革新的な高空間分解を目指す（図）．まず，波面補償の制御則と波面センサの詳細設計を決定するため，これまで困難であった地表近傍での大気じょう乱の新しい評価法を確立する（到来角の安定）．次に，独自設計の波面センサを製作し，これまでの波面センサでは原理的に不可能であった大強度波面ゆがみを計測可能とし，高品位な波面復元を実現する（複眼型波面計測）．復元された波面は，高精細な画像取得をすることで，革新的な空間分解能の定量的可視化計測を実現する．さらに，サブスケール実験により，実機現象への適用可能性を評価する（高空間分解能計測）．

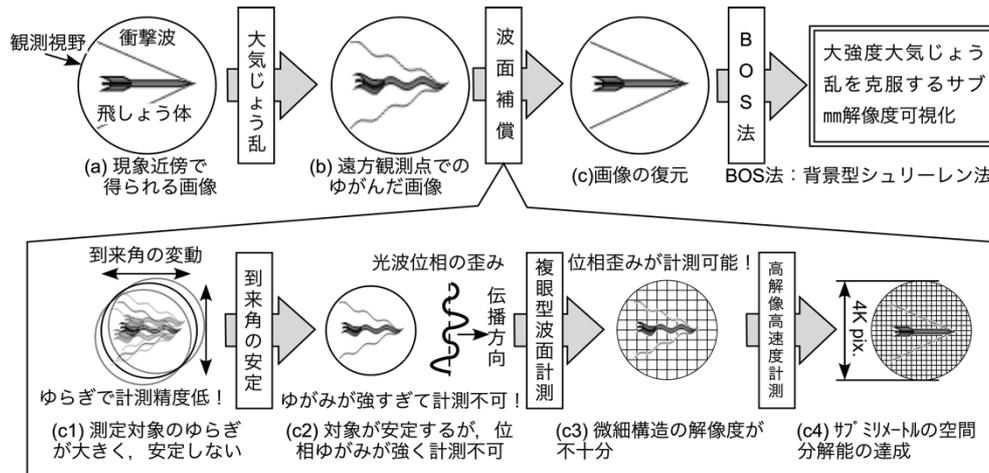


図. 波面補償による空間分解能の向上

3. 研究の方法

・背景型シュリーレン法（BOS 法）

Fig.1 に BOS 法の基本構成を示す．BOS 法は，流れ場中での屈折率分布を，現象背後に設置された背景の移動量分布として記録する可視化手法である．1 回の測定につき，現象を含まない基準状態である参照画像，現象を含めた状態の測定画像の 2 種類の画像を取得する．背景画像から撮像素子に至る際に通過する現象内の光路に発生した屈折率勾配によって光線に偏角が与えられ，画像の一部に微量の移動が観測される．この偏角を背景画像の移動量から推算し，密度分布の再構成を行う．偏角 ϵ は，背景と現象間の距離を Z_D ，背景とレンズ間の距離を Z_B ，結像レンズの焦点距離を Z_i ，媒質の初期状態の屈折率を n_0 ，現象による屈折率変化を n ，現象の視線方向の奥行きを Z_0 とすると，以下の式から求められる．

$$\epsilon = \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\delta n}{\delta y} dz$$

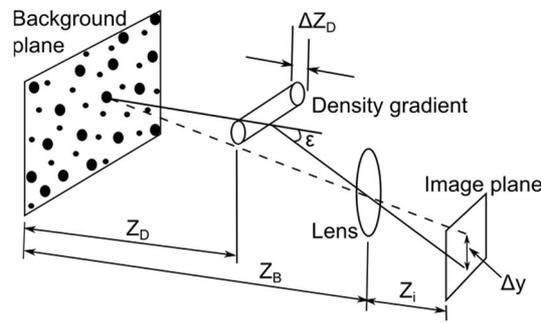


Fig.1 Principles of the BOS method.

BOS 法は、1999 年に Meier によって考案され、その後、ロータブレードの干渉計測や超音速流れ、爆発現象など、様々な屋外での流体现象の可視化に適用されてきた。また、2010 年には圧縮性渦輪の可視化に適用した例が報告されている。本研究課題では、目的に示したように、実環境下での後方乱気流可視化への BOS 法の適用に向けた空間分解能改善が目標である。本成果報告では、成果の一例として、不足膨張噴流の可視化計測での空間分解能向上を示す。具体的には、室内実験において、大気位相盤で強い大気じょう乱環境を模擬した上で、可視化計測系に波面補償光学系を融合させ、空間分解能を大幅（10 倍以上）に改善した。

4. 研究成果

(1) 空間解像度向上のための波面補償基本構成

Fig.2 に天体観測における補償光学系の基本構成を示す。補償光学系では、大気揺らぎの影響を受けて乱れた光の波面を波面センサにより計測し、その乱れを打ち消す形に変形鏡を変形させ、それにより補正された像を計測する。

補償光学系は 1953 年に Babcock により提案され、1980 年代に 3.6 m 望遠鏡の回折限界を達成したことをきっかけに、ハワイのすばる望遠鏡のような主要な望遠鏡の必須装置として使用されるようになった。その後、眼底イメージングや自由空間通信などに応用されてきたが、空港の滑走路のような舗装路面上の強い大気じょう乱下に適用するための研究はあまり進められていない。そのため、本研究課題では、強い大気じょう乱下においても使用可能な補償光学系を設計し、流体现象の可視化計測に適用した。

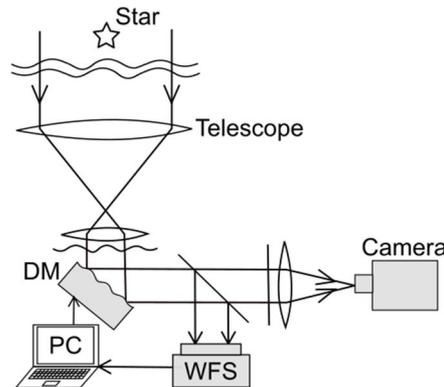


Fig.2 Basic configuration of Adaptive Optics in Astronomical Observations. DM: Deformable Mirror. WFS: Wavefront Sensor.

(2) BOS 法による不足膨張噴流の可視化実験

Fig.3 に不足膨張噴流の概略を示す。不足膨張噴流とは、ノズルの出口圧力 P_e より背圧 P_b が低い場合に、タンク内の高圧な空気がノズル出口までに十分に膨張できず、ノズル出口で急激に膨張することにより発生する現象である。

Fig.3 に示すように、ノズルの出口圧力 P_e と背圧 P_b の比により、様々な形状のセル構造が形成される。Fig.3(a) の場合、ノズル出口から膨張波 ab が発生し、噴流境界で圧縮波 bc として反射される。これをくり返すことにより、図に示すようなセル構造が形成される。 P_e と P_b の比が大きくなり不足膨張の程度が大きくなると、膨張波は強くなりその分圧縮波も強くなる。その結果 Fig.3(b) に示すように、圧縮波の一部が重なり合うようになり、内部に衝撃波が形成される。さらに P_e と P_b の比が大きくなると、Fig.3(c) に示すような衝撃波となる。ee' の部分では、マ

ツハディスクと呼ばれる，垂直衝撃波に近い形状の衝撃波が形成される．de と d' e' の部分はバレル衝撃波であり，ef はバレル衝撃波の中心線からの反射波である．ここでは，模擬大気じょう乱下において BOS 法による不足膨張噴流の可視化計測の際に，これらセル構造に対する波面補償による空間分解能の向上を評価した．

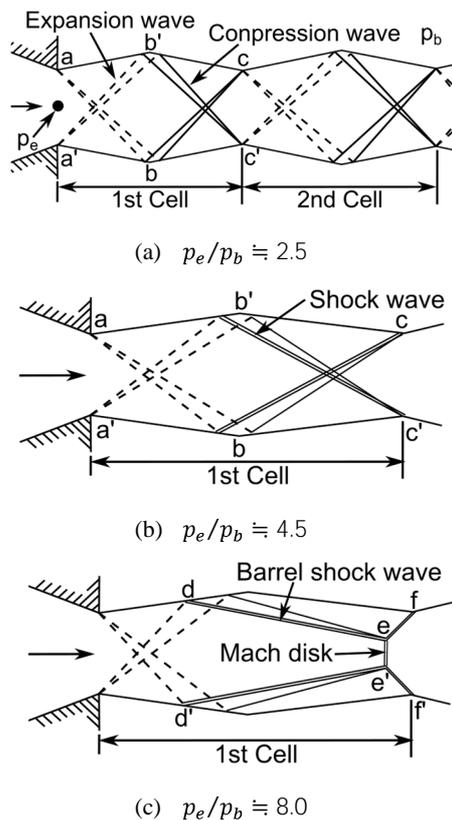


Fig.3 Cell structure of under-expansion jet.

Fig.4 に実験系の概略を示す．半導体レーザー (Thorlabs, S1FC635, $\lambda = 635 \text{ nm}$) のビームをシングルモードファイバ (Thorlabs, P5-630A-PCAPC-1, コア直径 $125 \mu\text{m}$) を通して L1 ($f = 150 \text{ mm}$, $\phi = 50.8 \text{ mm}$) に入射させ，平行光を形成し，L2 ($f = 500 \text{ mm}$, $\phi = 50.8 \text{ mm}$) に入射させる．次に，L3 ($f = 200 \text{ mm}$, $\phi = 25.4 \text{ mm}$) を用いて再度平行光を形成し，可変形鏡 (Thorlabs, DM140A-35-UP01) に入射させる．最後に，ビームスプリッタ (Thorlabs, CCM1-BS013/M, 1:1) により，一方は波面センサ (Thorlabs, WFS20-5C) に，他方は L4 ($f = 75 \text{ mm}$, $\phi = 25.4 \text{ mm}$)，L5 ($f = 300 \text{ mm}$, $\phi = 25.4 \text{ mm}$) を通過後 CMOS カメラ (AVT MAKO U-130B) に結像させ，画像を取得した．背景画像は，カメラと光学的に共役な関係となるように，L2 の焦点距離である 500 mm の位置に配置した．ここでの光学的に共役な関係とは，レンズの焦点距離の位置に焦点位置や光学素子を配置することにより，その位置で同一の光波面が得られる位置のことである．不足膨張噴流は，背景画像と L2 の中間にあたる，L2 から 250 mm の位置で発生させた．音速ノズルは，出口直径 $D = 3 \text{ mm}$ ，スロートから平行部長さ 21 mm のものを使用した．ここでは，貯気層の圧力を P_0 ，大気圧を P_b とし，圧力比 $P_0/P_b = 5.0$ で不足膨張噴流を発生させた．発生には窒素ガスを使用し，貯気層の圧力は，接続した圧力計により測定した．また，L2-L3 間に大気位相盤を配置し，屈折率構造定数 $C_n^2 = 5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ の大気じょう乱を模擬した．Table.1 に実験条件を示す．大気位相盤 (Phase Plate, PP)，および波面補償 (Wavefront Correction, WC) の有無を，それぞれ ON, OFF と示した．

Fig.5 に可視化計測結果を示す．Fig.5(a) は，参照画像である．Fig.5(b) は，大気位相盤 (模擬大気じょう乱) を機能させ，補償光学系による波面補償を行わない状態である．参照画像と比較すると大きな差異はないが，背景画像にコントラストがなくなり，空間解像度が低下していることがわかる．Fig.5(c) は，大気位相盤を作動させた状態で，補償光学系による波面補償を施した状態の画像である．波面補償が施されることで，大気位相盤による空間分解能はもとより，参照画像を上回る空間分解能が達成され，測定対象である不足膨張噴流の細部構造まで明瞭に確認できている．別途実施した空間分解能チャート (USAF 1951) による測定では，空間分解能の改善が 10 倍以上であることを確認した．

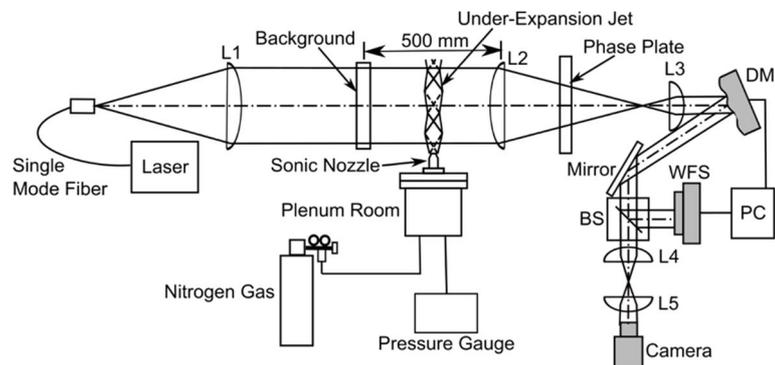


Fig.4 Visualization experiment of under-expansion jet by AO-BOS system. DM : Deformable Mirror. WFS: Wavefront Sensor. BS : Beam Splitter.

Table.1 Experimental conditions

	PP	WC
Reference	OFF	OFF
Config. 1	ON	OFF
Config. 2	ON	ON

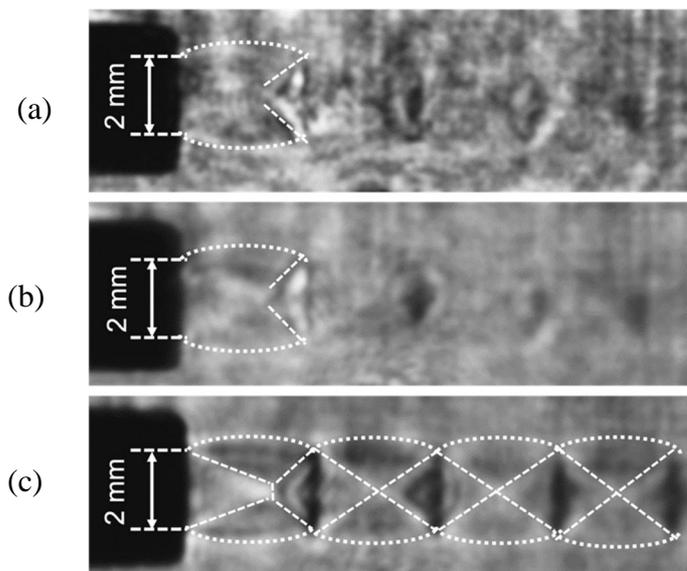


Fig.5 Comparison of visualized images by BOS method with and without adaptive optics under simulated strong atmospheric turbulence. (a) reference, (b) without wave correction, (c) with wave correction.

(3) まとめ

本研究課題では、補償光学系を流れの光学的可視化計測と融合させ、強い大気じょう乱環境下においてもサブミリメートルの空間分解能で野外における実機航空機周囲の流れ場計測を実現することを目指し研究課題に取り組んできた。サブテーマとして、複眼型波面センサの補償光学系への実装・調整、精度検証実験（室内・野外実験）、並列解析による可視化画像解析の高速化への検討、を設定し、3ヶ年度にわたり、取り組んできた。その結果をまとめると、以下となる。

については、概ね計画通りであり、サブミリメートルに至る空間分解能の達成ができた。また初期段階で、要素機器としては十分な性能を発揮しているが、光学系の一部として組み込まれた際に、光学系の他の部分に由来する収差の影響で、複眼型波面センサの作動範囲を超える収差が発生しており、光学系全体の最適化の必要性が判明した。そのため、光学系レイアウトを収差の低減を目的に改善し、複眼型波面センサの性能を発揮できる範囲に低減を達成した。

については、大気位相盤を光学系に組み込むことで、模擬大気じょう乱を定量的に評価し、本研究課題の主眼である波面補償を適用した際の可視化精度向上の評価方法を確立させた。大気位相盤は、天文分野の研究において、観測画像の大気ゆらぎの模擬用に広く用いられている。一方、野外における検証実験は、室内における精度検証を更に進める必要が見いだされたこと、光学系を可搬化するための小型化が上記で示した収差の増大をもたらしたため、光学系の最適化検討が不可欠となり、一部達成にとどまった。

については、本研究課題の期間内での高速化は達成できなかったが、改良の見通しを得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 下野駿, 木下慶隆, 吉富勇貴, 近藤美由紀, 水書稔治, 大屋真
2. 発表標題 光路往復型レーザシンチレーション計測における反射方式による屈折率構造定数評価への影響
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉富勇貴, 峰崎岳夫, 早野祐, 大屋真, 水書稔治
2. 発表標題 可搬型補償光学系による地表近傍光学計測での空間分解能
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉富勇貴, 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎岳夫, 大屋真
2. 発表標題 模擬大気じょう乱下での衝撃波可視化に対する波面補償の効果
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水書稔治
2. 発表標題 航空機周囲の流体现象可視化に向けた強い大気擾乱の屈折率構造定数計測
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤美由紀, 峰崎岳夫, 水書稔治
2. 発表標題 補償光学型BOS 法による模擬大気じょう乱下における空間分解能の向上
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎兵夫
2. 発表標題 模擬大気じょう乱下における背景型シュリーレン法の空間分解能の向上
3. 学会等名 第17回補償光学研究開発のための情報交換会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎兵夫
2. 発表標題 補償光学型BOSによる望遠可視化計測の空間分解能の向上
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎兵夫
2. 発表標題 流れの望遠可視化計測における波面補償による空間分解能の向上
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎兵夫
2. 発表標題 波面補償による望遠可視化計測の空間分解能の向上
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤美由紀, 水書稔治, 峰崎兵夫
2. 発表標題 補償光学系の適用による望遠BOS法の空間分解能向上
3. 学会等名 第18回補償光学のための情報交換会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下野駿, 近藤美由紀, 遠藤侑己, 峰崎岳夫, 水書稔治
2. 発表標題 接地境界層での大気じょう乱計測に対するDIMMの精度検証
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻水書研究室
<https://www.mzkklab.com/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	峰崎 岳夫 (Minezaki Takeo) (60292835)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	太田 匡則 (Ota Masanori) (60436342)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授 (12501)	
研究分担者	大屋 真 (Oya Shin) (80399287)	国立天文台・TMTプロジェクト・特任准教授 (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関