

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03483

研究課題名（和文）背景型シュリーレン法の波面補償に着眼した超解像望遠可視化計測

研究課題名（英文）Long-Range Flow Visualization with High-Spatial Resolution by Background-Oriented Schlieren Method Combined with Adaptive Optics

研究代表者

水書 稔治（Mizukaki, Toshiharu）

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）：背景型シュリーレン法に補償光学系を接続させ、強い大気じょう乱を通過した光波の波面補正を実現することで、風洞実験では再現が困難なソニックブームあるいは後方乱気流の発達・伝播を、実機周りで解明できる可視化計測法を創生した。まず、地表近傍の大気じょう乱特性を把握のため、簡便な装置で計測実施・評価する独自の手法を確立させた。その結果をもとに、地表近傍の大気じょう乱による光波面ゆがみを補正可能な補償光学系を設計・製作した。この補償光学系を、背景型シュリーレン法を基盤とする可搬型可視化光学系に接続させ、光学系の空間周波数特性（MTF）の4倍向上を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。これらの課題解決には現象の詳細把握が不可欠だが、これらは風洞実験などの縮尺実験では詳細な再現ができず、また、大気乱流や温度勾配などの影響を受け、可視化計測では空間解像度が低いものとならざるを得なかった。本研究の成果は、この限界を打ち破る革新的な定量的可視化計測法の端緒である。前述の現象が詳細に解明されることで、日本の航空科学および航空産業の重要課題の解明・克服に寄与でき、次世代超音速機の実現、航空交通の効率化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：To obtain quantitative fluid dynamical information on phenomena that are not reproduceable in wind tunnels, including sonic boom, quantitative visualization method that is able to visualize the flow around aircrafts with high spatial resolution has been studied. The light including information on the flow field will be distorted through atmospheric turbulence at an observer. Firstly, to determine specification of new adaptive optics, the authors have developed a laser scintillation measurement system for the atmospheric turbulence near ground using relatively simplified equipment. Secondary, base on the characteristics of the atmospheric turbulence near ground, an adaptive optics for background-oriented schlieren (BOS) that is able to visualize large-scale fluid dynamical phenomena around aircrafts, has been developed and merged to the BOS. Finally, the authors have successfully made spatial resolution improved by four times.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：流れの可視化計測 補償光学 大気じょう乱 背景型シュリーレン法 接地層 衝撃波 実機実験 レーザシンチレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

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(図1)は、航空需要増大に対応するための重要課題である。これらの課題解決には現象の詳細把握が不可欠だが、これらは風洞実験などの縮尺実験では詳細な再現ができず、また、大気乱流や温度勾配などの影響を受け、可視化計測では空間解像度が低いものとならざるを得なかった。この限界を打ち破る革新的な定量的可視化計測法が創成できれば、前述の現象が詳細に解明が可能となり、日本の航空科学および航空産業の重要課題の解明・克服に寄与でき、次世代超音速機の実現、航空交通の高効率化が期待できる。

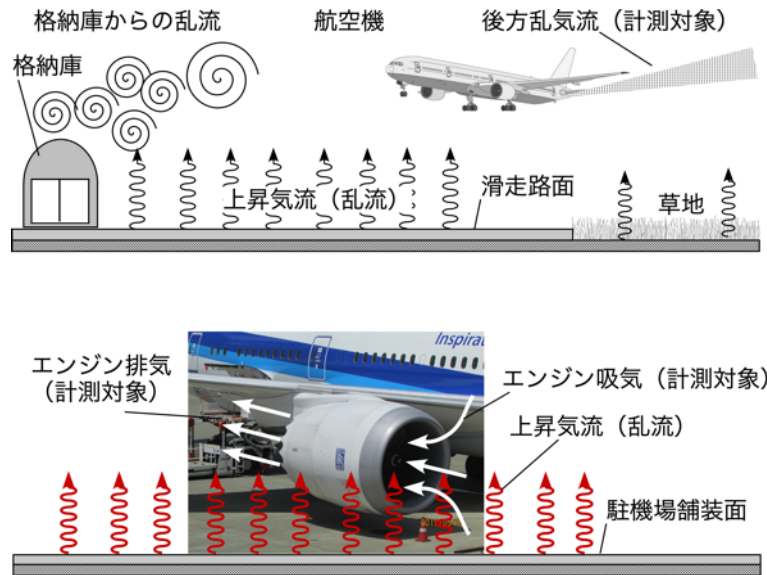


図1. 実機周りの流れ場計測にとっての外乱要因

2. 研究の目的

野外での流れの光学的可視化では、高空間分解を求めて大口径望遠レンズを用いると、大気じょう乱による画像ゆがみで空間分解能が制限され、高精度で安定な計測ができない。研究代表者は、野外での望遠可視化計測に取り組み、背景型シュリーレン法(BOS法)で爆風圧分布の可視化計測を世界ではじめて実現した。また、大気じょう乱でゆがんだ画像の復元(波面補償)に成功している。これらの成果から、本研究では、飛行する実機周りで発生する衝撃波や後方乱気流を高空間分解で取得可能な望遠可視化計測法創成の端緒として、大気じょう乱による画像ゆがみを波面補償で復元した後、BOS法を適用し、定量的かつ空間分解能を向上させた可視化計測法を世界に先駆け実現することが目的である(図2)。

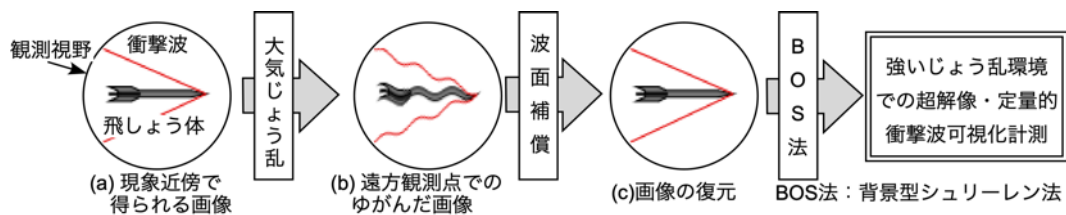


図2. BOS法と補償光学系の接続による超望遠可視化計測法の概念

3. 研究の方法

(1) 大気じょう乱構造の解明と大気位相盤の製作

大気じょう乱の光学的特性を実験室で再現するため、地表近傍の大気じょう乱特性を明らかにした後、大気位相盤を製作する。大気じょう乱の構造は、光のゆがみの強度分布および周波数特性を、望遠光学系とシーイング測定装置を使用したフィールドワークで明らかにする。

(2) 超解像望遠 BOS 法の創成

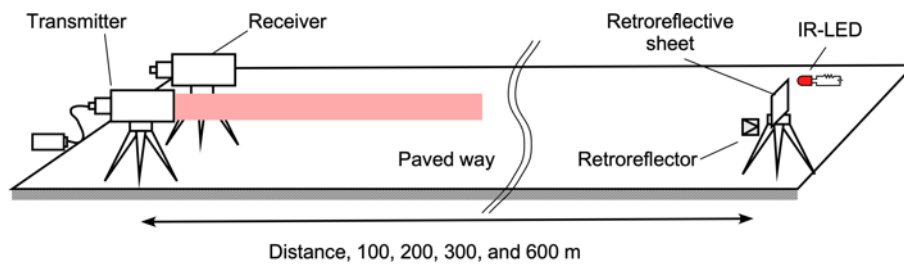
超解像望遠 BOS 法の中心機器の超解像望遠 BOS 光学系(望遠光学系と波面補償光学系で構成)を独自開発する。上記(1)で製作した大気位相盤を組み込むことで、大気じょう乱による光波のゆがみを室内実験で模擬する。室内実験で精度検証後、野外実験で超解像望遠計測を実証する。

4. 研究成果

(1) 大気じょう乱構造の解明と大気位相盤の製作

本研究が計測対象として想定している実機航空機周囲を高空間分解能で実現するには、光波が通過する大気じょう乱の特性を把握し、大気じょう乱が光波に与える波面ゆがみの強度の程度を評価することで、与えられた波面ゆがみを補正するに足る能力を有する補償光学系の設計・製作が不可欠となる。補償光学は赤外線天文学の分野で開花した分野であるが、本研究で想定される大気じょう乱は、日中かつ舗装路面上のそれであり、赤外線天文学が扱う大気じょう乱と比すると2桁以上のオーダーで強いこと（大強度大気じょう乱）が想定され、赤外線天文学の知見はそのまま適用できない。そこで本研究では、レーザシンチレーション計測等を日中の舗装路面上で行い、その結果から室内実験において大気じょう乱を模擬するための大気位相盤の設計と、発生する波面ゆがみに対応可能であり、かつ可搬な補償光学系を設計・製作した。

図3に大強度大気じょう乱特性実験の概要を示す。計測では、日本大学理工学部習志野キャンパス・交通総合試験路（千葉県習志野市）を利用した。計測距離を100 m、200 m、300 m、および600 mと変化させ、大気じょう乱の指標である屈折率構造定数 C_n^2 を次の3つの手法で評価した。①カセグレン型望遠鏡（有効口径127 mm、焦点距離1250 mm）を利用したレーザ光送信器（Transmitter）からHe-Neレーザ（633 nm、出力0.2 mW）を反射器（Retroreflector, Retroreflective sheet）に照射し、反射光強度の時系列変化を受信器（Receiver）で画像計測し、光強度の分散を計測、②赤外LED（IR-LED、波長870 nm、直径5 mm、弾丸型LED）の像の位置ゆらぎから到来角変動を計測、③超音波風速計（3成分風速計、データレート10 Hz）で取得される大気温度履歴から算出した温度構造定数に基づいた推算、である。得られた結果の一例を図4および図5に示す。計測結果から、日中の舗装路面上の大気じょう乱の程度は $C_n^2 = 10^{-14} \sim 10^{-13}$ であり、赤外線天文学で扱う大気じょう乱の100倍程度強いことが示された。この値に基づき室内実験で大気じょう乱を模擬するための大気位相盤（不均一密度の樹脂円盤）を設計・製作した（図6）。



Distance, 100, 200, 300, and 600 m
図3. 大強度大気じょう乱計測

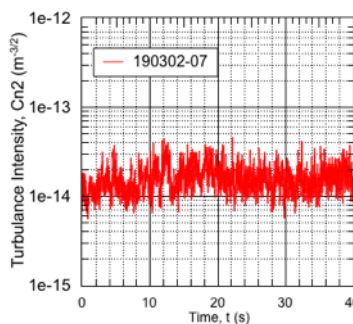


図4. レーザシンチレーション計測による C_n^2 の測定

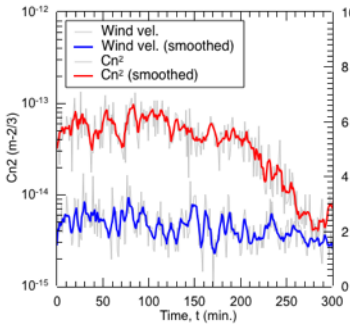


図5. 超音波風速計による C_n^2 の測定結果（赤）および風速（青）

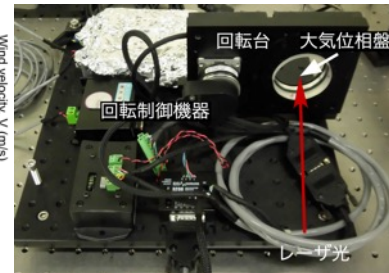


図6 取得した C_n^2 から製作した大気位相盤と回転ステージ

(2) 超解像望遠 BOS 法の創成

上記（1）で得た大気じょう乱特性に基づき、波面ゆがみを検知するセンサと、そのゆがみと逆相形状を形成できる可変形鏡（Deformable mirror）を用いることで、波面ゆがみを修正（波面補償）する光学系（補償光学系）を設計した。まず、波面ゆがみの検出には Shack-Hartmann 型波面センサ（SHWFS）を採用した。従来の波面センサは、強い大気じょう乱を想定していない。そのため、研究では既製品の波面センサはほぼ利用できない。そこで、要求性能を満たす SHWFS をマイクロレンズアレイ（MLA）と産業用 CMOS カメラを組み合わせ自作し、併せて波面ゆがみの検出プログラムを自作した。次に、波面センサと可変形鏡を接続させ、閉ループ制御とし、波面補償を実現する補償光学系を完成させた（図7）。

図8に製作した補償光学系による波面補償実験結果の一例を示す。補償光学系の測定部（図7、TS）に大気位相盤を挿入し、透過するレーザ光（635 nm、1.2 mW）に本研究での測定対象が受けると想定される大気ゆらぎを与えた。波面ゆがみを与えられたレーザ光は、可変形鏡（DM、

MEMS 型可変形鏡、アクチュエータ数 12×12 、応答周波数 8 kHz 、) で反射することで波面補償を実現する。ただし、閉ループ制御であるため、初回の反射では波面補償されない。反射されたレーザー光が半透明鏡 (HM) で波面センサ (WFS、CMOS 素子: $1440 \text{ pix.} \times 1080 \text{ pix.}$ 、マイクロレンズアレイ 47×35 個、レンズピッチ $150 \mu\text{m}$ 、レンズ焦点距離 3.7 mm) に導入され、波面ゆがみの情報が取得された後、波面ゆがみに対する逆位相の波面が DM で形成される。補正された波面情報が WFS で再度検出され、繰り返し補正により、波面ゆがみを最小化させる。波面補償後のレーザー光をスクリーンに投影し、補正効果を確認した。図 8 左列は大気位相盤通過前のレーザー光、同中央列は、波面ゆがみを受けたもの、および同右列は波面補償されたもの、である。図から、本光学システムにより、大気じょう乱を受けた波面の復元が達成されていることが示された。本研究では、この光学系を基盤とし、野外実験に利用可能な可搬型光学系を設計・試作した。

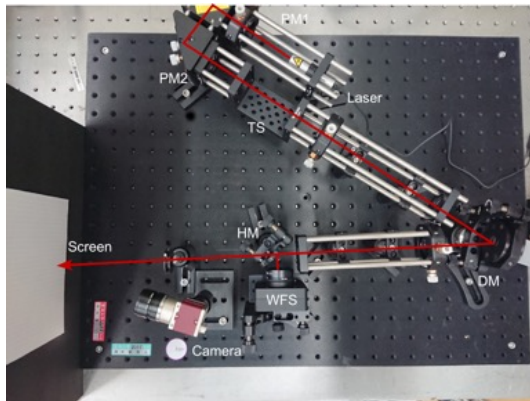


図 7. 自作波面センサを組み込んだ補償光学系。PM, 平面鏡; TS, 測定部; DM, 可変形鏡; HM, 半透明鏡; WFS, 波面センサ。

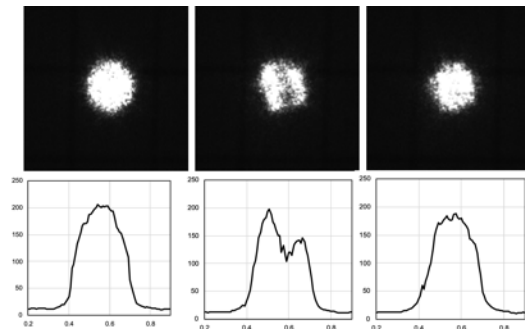


図 8. 波面補償検証実験結果(上段, レーザビーム状況; 下段, 強度分布). ゆがみを受ける前(左); ゆがみを受けた後(中央); 波面補償後(右).

図 7 の光学系を基盤とした可搬型補償光学系を図 9 に示す。可変形鏡 (DM) および波面センサ (WFS) を $300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ のプレートボード上に構成し、望遠鏡 (カセグレン型望遠鏡、有効径 208 mm 、焦点距離 2080 mm) を取り付けるための望遠鏡ステージを含め、 $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ (望遠鏡は含まず) の光学系とした。望遠鏡は、図中の白色破線部分に取り付けられる。望遠鏡からの観測光は、平面鏡 (L) により平行光となり、DM に入射する。光束は DM で反射された後、ビームスプリッタ (BS) で計測用カメラと波面センサ (WFS) に向かうものに分割される。図 10 に本光学系を用いた空間分解能計測実験の結果の一例を示す。空間分解能は、実験装置から距離 535 m の位置に自作の空間分解能テストチャート (1951USAF ターゲットチャート) を設置した。テストチャートの計測画像を 169 fps で計測し、 5000 枚の静止画を記録した後、輝度値の平均画像を取得し、テストチャートのストライプ画像のコントラスト比が 0.3 以上を判読可能として評価した。その結果、補償光学系の作動時には、空間解像度が 2 段階 (4 倍) 改善されることが確認できた。このことから、地上近傍における強い大気じょう乱環境下においても、適切な補償光学系を設計することで、超望遠可視化計測が実現可能であることが示された。

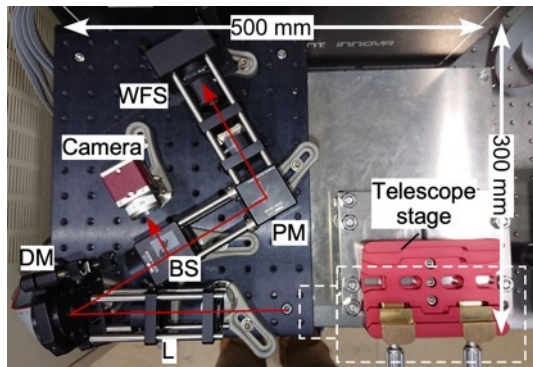


図 9. 可搬型補償光学系。PM, 平面鏡; L, レンズ; DM, 可変形鏡; BS, ビームスプリッタ; WFS, 波面センサ

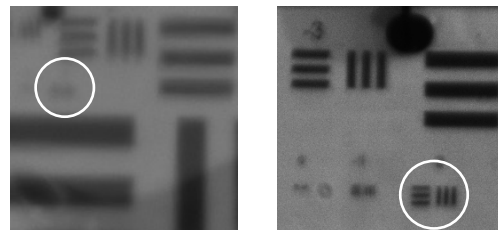


図 10. 野外(距離 535 m)での空間分解能計測結果。白色円内が同一ターゲット。補償光学系作動前(左); 同作動後(右)。

本研究の目的は、地表近傍の強い大気じょう乱環境下で衝撃波に代表される高速な熱流体現象を背景型シュリーレン法 (BOS) により、高空間分解での可視化の達成である。野外におけ

る衝撃波発生手法として、可搬であること、比較的強い衝撃波を発生可能であること、任意の時刻に発生可能であること、および、計測機器と同期可能であることが重要である。そこで、本研究では、これらの要件を満たすために、微小爆薬（アジ化銀 10 mg ペレット）をレーザ起爆させ、任意の時刻に球状衝撃波を発生可能な衝撃波発生装置を製作した（図 11）。ランプ励起のパルス Nd:YAG レーザ（波長 1064 nm、出力 100 mJ）を光源とし、光ファイバ（マルチモード）でレーザ光を伝送し、光ファイバ他端に接着したアジ化銀ペレット（ AgN_3 、円筒形、直径 1.5 mm、長さ 1.5 mm、昭和金属工業社製）を起爆する。起爆信号は信号発生器（SG）とし、BOS 計測用カメラのトリガ信号も兼ねる。発生する球状衝撃波の可視化画像例を図 12 に示す。

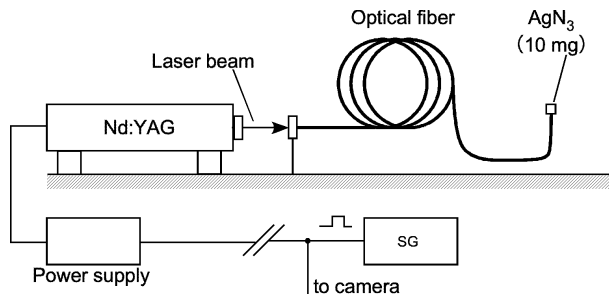


図 11. 微小爆薬を衝撃波エネルギー源とした衝撃波発生装置.

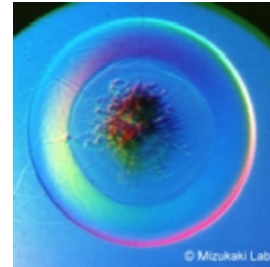


図 12. 色分解カラーシュリーレン法による球状衝撃波の可視化画像例.

(3) まとめ

地表近傍の強い大気じょう乱環境下で衝撃波に代表される高速な熱流体現象を背景型シュリーレン法（BOS）により、高空間分解での可視化計測法を実現するための端緒として本研究課題を展開してきた。本研究課題の成果をまとめると：

- ・地上近傍の大気じょう乱を評価するため、独自のレーザシンチレーション計測法を考案し、じょう乱の程度が天文学で標準的なじょう乱の 100 倍以上であることを明らかにした。
- ・大気じょう乱計測結果に基づき独自の補償光学系を設計・試作し、波面補償を達成した。
- ・野外への持ちだし可能な程度に小型化した可搬型補償光学系を製作した。
- ・野外環境下における空間分解能測定実験結果から、補償光学系により空間解像度が 4 倍程度改善が見込める。
- ・野外における衝撃波発生装置として、微小爆薬のレーザ起爆による発生装置を製作した。この装置は、今後の BOS 野外実験で利用する。

以上のことから、本研究課題により、実機航空機周囲で発生する熱流体現象をこれまでにない高空間分解能で可視化計測するための端緒としての、地上近傍の強い大気じょう乱中での補償光学系の設計製作手法の創成と初期的実験による空間解像度の改善が確認できた。研究期間終了後も、BOS 法と接続させた衝撃波計測実験を進め、その結果を基に各分野への適応研究を展開する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 T. Mizukaki, M. Ohta
2. 発表標題 CT Visualization of High-Speed Unsteady Flow Field by using High-Speed-Background-Oriented Schlieren.
3. 学会等名 第50回流体力学講演会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水書稔治, 佐藤匠, 早川芳仁, 松崎伸一
2. 発表標題 Background-Oriented Schlieren法による飛しょう体周囲の衝撃波計測
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉富勇貴, 水書稔治
2. 発表標題 補償光学系を適用による航空機周囲の流体可視化の高精度化研究
3. 学会等名 航空宇宙流体科学サマースクール
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 七海沙也加, 水書稔治
2. 発表標題 背景型シュリーレン法による実規模現象の望遠可視化精度改善への取り組み(進捗報告)
3. 学会等名 第12回補償光学研究開発のための情報交換会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉富勇貴, 水書稔治
2. 発表標題 補償光学系を適用による航空機周囲の流体可視化の高精度化研究.
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 七海沙也加, 榎並京次郎, 吉富勇貴, 峰崎岳夫, 早野裕, 大屋真, 水書稔治.
2. 発表標題 補償光学型BOS法のためのシンチレーション計測による接地境界層の大気じょう乱評価
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤匠, 太田匡則, 水書稔治
2. 発表標題 背景型シュリーレン法による高速熱流体現象の3次元温度分布計測
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉富勇貴, 榎並京次郎, 七海沙也加, 峰崎岳夫, 早野裕, 大屋真, 水書稔治
2. 発表標題 補償光学型BOS法光学系の試作と空間分解能向上の確認
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎並京次郎, 水書稔治
2. 発表標題 AOによる航空機周囲の熱流体現象の高精度可視化計測に向けた取組
3. 学会等名 第11回補償光学研究開発のための情報交換会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 吉富勇貴, 水書稔治
2. 発表標題 実機で発生する後方乱気流特性解明のための補償光学による超望遠高精度可視化計測
3. 学会等名 航空宇宙流体科学サマースクール2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉富勇貴, 榎並京次郎, 近藤美由紀, 峰崎兵夫, 早野裕, 大屋真, 水書稔治
2. 発表標題 大規模流体現象の超解像望遠可視化計測に向けた可搬型補償光学系の設計
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉富勇貴, 榎並京次郎, 大柿克汰, 水書稔治
2. 発表標題 背景型シュリーレン法の波面補償に着目した超望遠高精度可視化計測 : 可搬型補償光学装置による波面補償に向けた検討
3. 学会等名 2019年度第1回東海大学総合科学研究所シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitomi, Yuki Enami, Kyojiro Oya, Shin Hayano, Yutaka Minezaki, Takeo Miura, Noriaki Mizukaki, Toshiharu
2. 発表標題 Application of Adaptive Optics for flow visualization in Open-Air
3. 学会等名 16th Asian Congress of Fluid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyojiro Enami, Shin Oya, Yutaka Hayano, Takeo Minezaki, Noriaki Miura, Toshiharu Mizukaki
2. 発表標題 Preliminary experiment with conventional adaptive optics for flow visualization in open-air with high-resolution
3. 学会等名 The 15th Asian Symposium on Visualization (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sato, T. Ota, M. Mizukaki, T.
2. 発表標題 3D-Reconstruction of Density Field for High-Speed and High-Temperature Flow using Background-Oriented Schlieren
3. 学会等名 The 2nd Pacific2019 Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	三浦 則明 (Miura Noriaki) (30209720)	北見工業大学・工学部・教授 (10106)	

6. 研究組織（つづき）

	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	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	大谷 清伸 (Ohtani Kiyonobu) (80536748)	東北大学・流体科学研究所・特任准教授 (11301)	