

ジェットエンジン排ガス中の水蒸気分布計測と飛行機雲形成メカニズムの解明

大阪公立大学 大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻

小川 秦一郎

1. はじめに

航空輸送需要の増加に伴い、航空機から排出される温室効果ガスの削減は世界的な課題となっている。近年では、二酸化炭素（CO₂）の排出削減に加え、航空機エンジンから排出される水蒸気（H₂O）が形成する飛行機雲（Contrail）が気候変動へ及ぼす影響にも注目が集まっている^{1,2)}。巡航高度で排出された水蒸気は周囲の低温環境において氷晶を形成し、飛行機雲へと発達する。飛行機雲は太陽からの短波放射を反射する一方で、地表から放射される長波放射を吸収するため、その放射収支への影響は複雑であり、地球温暖化に寄与することが指摘されている。

一方、航空分野では持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）の導入や、将来的な水素航空機の実用化が進められている。しかし、これらの代替燃料を使用した場合でも燃焼により水蒸気は生成されるため、飛行機雲形成への影響を含めた環境評価が重要となる。現在の航空機排ガス評価はCO₂やNO_xを中心としており、排気ガス中の水蒸気量やその空間分布を高精度に計測し、飛行機雲形成へ結びつけた研究例は極めて限られている。また、大気環境を評価する際に用いられている全球気候モデルに入力可能な実験データも十分には整備されていないことが課題となっている³⁾。

本研究では、光学計測を用いてジェットエンジン排気ガスの密度分布を非接触で計測する手法を開発した。さらに、画像解析アルゴリズムを新たに開発し、小型ターボジェットエンジンを用いた排気ガスの密度分布を定量的に再構成し、計測精度の検証を行った。

2. 背景型シュリーレン法を用いた排気ガス計測手法の開発

小型ターボジェットエンジン排気ガスの密度分布を非接触で定量計測することを目的として、背景型シュリーレン法（Background-Oriented Schlieren, BOS 法）を用いた排気ガス計測手法を開発した。BOS 法では、排気ガス中の密度勾配に起因する光の屈折を背景パターンの変位量として撮影し、画像相関法によりサブピクセル精度で変位量を算出する。しかし、単視点BOS 法では、変位量から密度分布を求める際にこれまで研究開発してきた逆アーベル変換およびポアソン方程式を用いた画像解析アルゴリズムでは、中心軸付近において解析誤差が増大し、測定ノイズや中心軸付近のわずかなずれによって再構成精度が大きく低下するという課題があった⁴⁾。

そこで本研究では、流れ場を軸対称と仮定し、変位量と屈折率分布を直接関連付ける線型方程式を新たに導出するとともに、代数的再構成法（Algebraic Reconstruction Technique, ART）を用いた画像解析アルゴリズムを構築した。本アルゴリズムでは、画像相関解析によって得られた変位量分布を入力データとし、反復計算により屈折率分布を推定した後、Gladstone-Dale

の関係式を用いて密度分布へ変換することで、従来法より高精度な密度場再構成を実現した。さらに、密度分布を離散化した直接法を導入することで、逆アーベル変換で生じる積分誤差やノイズの蓄積を抑制し、高いノイズ耐性を有する画像解析手法を構築した。

開発した画像解析アルゴリズムの妥当性を検証するため、ジェットエンジン排気流れを模擬した数値データを作成し、従来の逆アーベル変換法との比較を行った。その結果（図 1）、急峻な密度勾配を有する流れ場に対しても、ART 法では理論値と相対誤差を約 0.05% まで低減できることを確認した。また、最大変位量の 1% に相当するガウスノイズを付加した条件においても、従来法では中心軸付近で最大約 13% の誤差が生じたのに対し、ART 法では最大誤差を 1% 未満に抑制でき、高いノイズ耐性を有することを明らかにした。さらに、再構成格子間隔の最適条件についても検討し、画像相関法で得られる変位データと同一の格子間隔を用いることで、解析精度と安定性が最も高くなることを確認した。

さらに、実験計測に先立ち、画像の輝度および ISO 感度が変位量検出精度に及ぼす影響を評価した。その結果、高輝度かつ低 ISO 感度で撮影することにより画像ノイズを大幅に低減でき、安定したサブピクセル解析が可能となることを明らかにした。これらの結果をもとに撮影条件を最適化したところ、静止画像における変位量検出誤差の標準偏差は 0.042 pixel となり、ジェットエンジン排気ガス計測に十分な精度を有することを確認した。

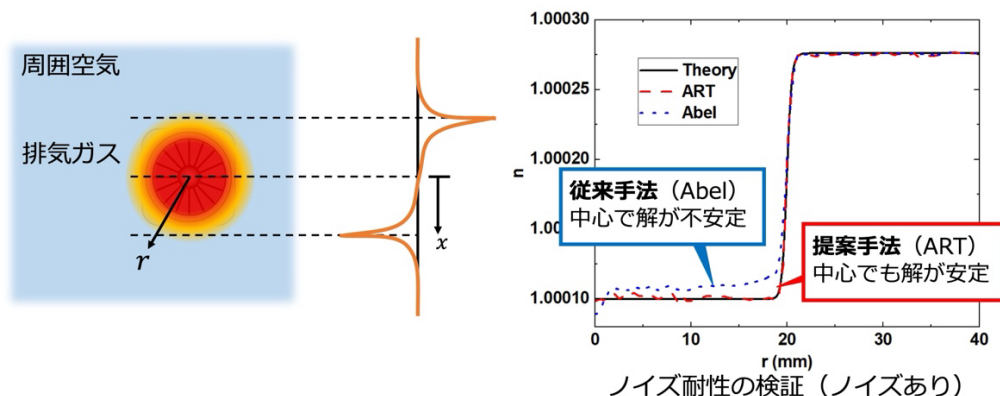


図 1 エンジンノズルから排出された模擬流れ場データを用いた画像解析アルゴリズムの検証結果

3. 排気ガスの密度分布の計測

開発した BOS 計測手法を小型ターボジェットエンジン (J-850 エンジン) の排気ガス計測へ適用し、エンジン回転数 70,000, 75,000 および 80,000 rpm における排気ガスの密度分布を計測した。まず、画像相関解析によって得られた変位量分布から、排気ガスと周囲空気との境界において大きな密度勾配が形成されていることを確認した。また、排気ガスは下流方向へ流れるにつれて周囲空気との混合が進行し、密度勾配が穏やかになる様子を定量的に可視化することに成功した。

再構成した平均密度分布（図 2）より、排気ガスの中心部は周囲空気よりも低密度であり、ノズル出口から下流へ進むにつれて噴流半径が拡大する様子を明らかにした。特に、エンジン回転数 75,000 rpm および 80,000 rpm では、70,000 rpm と比較して排気ジェットの拡散が顕著

となり、周囲空気との混合が促進されることが確認された。これは、エンジン回転数の増加に伴い噴流速度および運動量が増加し、せん断層の発達が促進されたためと考えられる。

さらに、瞬時密度分布の解析では、排気ジェット外縁部では平均場と同様の構造が得られた一方、中心軸付近では時間的な密度変動が観測され、排気流れの非定常性が示された。また、排気ガスと周囲空気との境界位置を密度分布から抽出した結果、回転数の増加に伴い噴流半径が下流方向へほぼ直線的に拡大することを確認した。この結果から、開発した計測手法により、ジェットエンジン排気ガスの密度分布だけでなく、排気ジェットの拡散特性や混合過程を定量的に評価できることが明らかとなった。

以上より、本研究で開発した背景型シュリーレン法と画像解析アルゴリズムを組み合わせた計測手法は、ジェットエンジン排気ガスの密度分布を高精度に可視化・定量評価できることを実証した。本成果は、従来の点計測では困難であった排気ガスの空間分布計測を可能とし、将来的には排気ガス中の水蒸気分布計測や飛行機雲形成メカニズムの解明、さらには航空機排気による環境影響評価への応用が期待される。

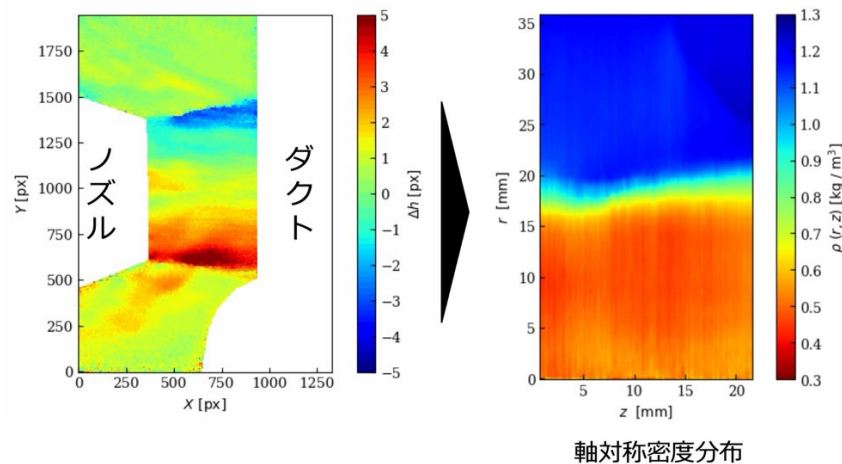


図 2 小型ターボジェットエンジンの排気ガス密度分布（エンジン回転数 70,000 rpm）

4. 大気中における排気ガス特性の評価

ココナッツ油由来のバイオ燃料⁵⁾を用いた小型ターボジェットエンジンを対象として、排気ガス成分(CO, CO₂, NO)の計測結果をもとに、航空機運航時および待機中における排気ガスの環境特性を評価した。まず、国際民間航空機関(ICAO)が定める Landing and Takeoff (LTO) サイクルを用いて、離陸、上昇、進入および地上走行(Taxi/Idle)の各運航形態におけるCO₂およびNO排出量を評価した。その結果(図3)、CO₂およびNOともTaxi/Idle段階が総排出量の大部分を占めることが明らかとなった。これは、推力設定は低いものの運転時間が他の運航形態と比較して著しく長いためであり、空港周辺の大気環境を評価する上で地上走行時の排出量が重要であることを示している。また、バイオ燃料を20~50%混合することでNO排出量が低減し、特にB20およびB50条件では従来燃料と比較して高い排出削減効果が確認された。一方、CO₂排出量は燃料混合率による変化は比較的小さく、燃料消費量や運転条件の影響を強く受けることが明らかとなった。

さらに、実験で取得した排気ガス濃度、排気温度および排気速度を基に排気質量流量を算出し、ガウシアンブルームモデルを用いて排気ガスの大気拡散解析を実施した。中立大気条件を仮定し、排気口から下流 10 m 地点における CO、CO₂ および NO 濃度を予測した。その結果、CO 濃度は 183~239 mg/m³ の範囲で推移し、燃料混合率との明確な相関は認められなかった。一方、CO₂ 濃度はエンジン回転数の増加に伴って上昇する傾向を示し、燃料混合率の影響は比較的小さいことが確認された。これに対して NO 濃度はバイオ燃料混合率の増加に伴い大きく低減し、100,000 rpm では従来燃料の 0.802 mg/m³ から B50 では 0.517 mg/m³ まで低下し、約 36%の削減効果が得られた。これは、バイオ燃料混合により燃焼温度および高温反応領域が低減し、サーマル NO 生成が抑制されたためと推測される。

以上より、ココナッツ油由来バイオ燃料は、小型ガスタービンエンジンの燃焼性能を維持しながら、空港周辺および近傍大気中の NO 濃度を効果的に低減できることを明らかにした。また、LTO サイクル評価と大気拡散解析を組み合わせることで、排気ガスの発生から大気中への拡散までを一貫して評価できる解析手法を確立し、航空機排気による環境影響評価に有用な基礎データを取得した。

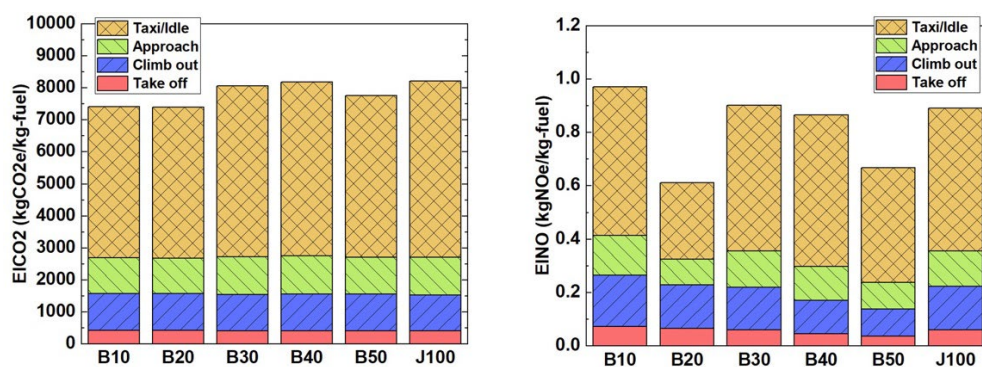


図 3 ココナッツ由来バイオ燃料の混合割合の違いによる排気ガス特性評価

9. まとめ

本研究では、背景型シュリーレン法（BOS 法）を用いたジェットエンジン排気ガスの非接触計測手法を開発するとともに、画像解析アルゴリズムの高度化により、排気ガスの密度分布を高精度に定量計測する手法を構築した。さらに、小型ターボジェットエンジンを対象とした燃焼試験を実施し、排気ガス成分の計測結果を基に LTO サイクルにおける排出量評価およびガウシアンブルームモデルによる大気拡散解析を行うことで、空港周辺および近傍大気中における排気ガスの環境特性を評価した。

その結果、開発した BOS 計測手法により、ジェットエンジン排気ガスの密度分布および噴流の拡散挙動を高精度に可視化できることを実証した。また、ココナッツ油由来バイオ燃料を用いることで、燃焼性能を維持しながら NO 排出量および大気中 NO 濃度を低減できることを明らかにした。これらの成果は、航空機排気の空間分布を高精度に把握する新たな光学計測技術を確立するとともに、持続可能な航空燃料（SAF）の環境性能評価に有用な基礎データを提供するものである。

今後、本研究で構築した光学計測・解析技術は、ジェットエンジン排気ガス中の水蒸気分布や飛行機雲形成過程の解明、さらには航空機排気による気候影響評価への応用が期待される。また、排気ガスの三次元密度場計測や水蒸気濃度との同時計測、実機エンジンへの適用などを進めることで、より高精度な環境影響評価が可能になると考えられる。さらに、バイオ燃料の噴霧・蒸発特性や燃焼器内の混合過程を詳細に評価し、CO 排出量の低減と NO 排出量の抑制を両立できる燃焼技術の開発を進めることが今後の重要な課題である。これらの研究を発展させることで、次世代航空エンジンの低環境負荷化およびカーボンニュートラル社会の実現に貢献することが期待される。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) U. Schumann, J. Strom, R. Busen, R. Baumann, K. Gierens, M. Krautstrunk, F. P. Schroder, J. Stingl, “In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 101, no. D3, pp. 6853-6869, 1996.
- 2) Ulrich Schumann, “Influence of propulsion efficiency on contrail formation,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 391-401, 2000.
- 3) Andrew Gettelman, Chieh-Chieh Chen, Charles G. Bardeen, “The climate impact of COVID-19 induced contrail changes,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21, no. 12, pp. 9405-9416, 2021.
- 4) Yuya Hirayama, Shinichiro Ogawa, “Axisymmetric background-oriented schlieren measurement for cylindrical combustion flow in micro-rocket torches,” *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 2, 2025.
- 5) Shinichiro Ogawa, Koichi Mori, Yasuaki Maeda, “Study on Combustion Characteristics of Coconut SAF Using Micro Jet Engine,” *International Journal of Gas Turbine, Propulsion Power Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 15n5tp06, 2024.