

令和元年6月6日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18938

研究課題名(和文)イメージインテンシファイア残光を利用した全く新しい非定常流速測定法の確立

研究課題名(英文) Development of Unsteady Velocity Measurement using Afterglow of an Image Intensifier

研究代表者

河内 俊憲 (Kouchi, Toshinori)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40415922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで困難とされてきた超音速流における流速の非定常計測を可能にする新しい手法の確立を自指した。まず低速流で、研究の根幹となるアイデアの確認を行い、提案するアイデアで流速が計測できることを確認できた。しかしながら、超音速流れにこの手法を適用する際、低速流で問題となった点がさらに顕著になり、残念ながらこれを解決するには至らなかった。その一方で、計測に使用する粒子の新たな生成手法の開発に成功した。新手法で生成された粒子を用いれば、これまでより詳細な流速場の計測が可能になると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で立証できたアイデアや計測に使用する新たな粒子発生法をさらに発展させることができれば、航空機やロケットなどの高速で飛翔する物体周りの流れや超音速燃焼を行うエンジン内の流速を比較的安価に高精細に非定常計測できるようになると期待される。これにより航空機やエンジンの効率や安全性を高めることが可能となる。またこの計測方法は、非定常観測に高フレームレートを要求するマイクロ流れへの適用も可能で、これら分野への展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Unsteady velocity measurements in supersonic flows is very challenging topics. I developed new measurement system which is able to measure unsteady velocity using a continuous laser light and an image intensifier. First, I applied the measurement system to low speed wind tunnel experiments to confirm that my new idea is correct or not. The present data well agreed with the previous ones. Therefore, I conclude that my new measurement system has an enough potential to measure unsteady velocity-field. However, the developed system cannot measure the velocity in supersonic flow, because measurement uncertainty became increased compared to that in the low speed experiments. Unfortunately, I cannot improve this within the term of this project. In addition to confirm my idea being correct, I developed new generation method of tracer particle using velocity measurement. This particle has potential to reveal much detail flow structure in highly turbulent flows.

研究分野：高速流体力学

キーワード：先端レーザー計測 PIV 超音速混合・燃焼 スクラムジェット

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

米国の X-51 計画に代表されるように、国内外においてスペースプレーン用の超音速燃焼を行うエンジンの研究・開発が進められている。このエンジンの実現には、燃料の迅速な混合が不可欠で、超音速流中における噴流の非定常挙動を知る必要がある。このエンジン内の流動現象や燃料混合メカニズムの解明に向け、低速流れで発展してきた光学計測を超音速流に適用し、流れ場の詳細な情報を得ようという試みがなされている。研究代表者もこのような背景を受け、これまで様々な光学計測を用いてエンジン内の流動現象の解明を試みてきた。しかしながら、低速流で発展してきた手法では、超音速流において混合メカニズムを解明する上で非常に重要な非定常データを計測することは困難である。

超音速流では、流れの特性時間が数ミリ秒以下と非常に短く、非定常計測が極めて難しい。研究代表者が知る限り超音速流における流速の非定常計測は、Wernet らのグループの研究例しかない。超音速流では、少なくとも数 MHz のデータレートが非定常計測に必要で、これは主に光源となるレーザの発振間隔に依存する。Wernet らは、レーザ専門家が特別に組み上げた MHz で発振するパルスバーストレーザを用いて速度の非定常計測を行っているが、このようなレーザをレーザの専門家以外の方が単独で製作することは不可能で、極めて汎用性に乏しく、当該分野の発展を妨げている。そこで本研究では、これまで困難とされてきた超音速流における流速の非定常計測を可能にする新しい手法の確立を目指した。この計測方法は、非定常観測に高フレームレートを要求するマイクロ流れへの適用も可能で、これら分野への展開も期待できる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまで困難とされてきた超音速流における流速の非定常計測を可能にする新しい計測法の確立を目指した。具体的には、流れにトレーサ粒子を添加し、その粒子の軌跡から流速を計測する計測法に、微弱光を検出・増強するイメージ・インテンシファイアの残光を組合せ、トレーサ粒子の軌跡とその輝度値の変化から、流れの特性時間が短い流れ場でも非定常に流速を算出するという世界初の試みである。

(2) また本研究のアイデアを実験的に確認している際の失敗から、衝撃波や大小様々な渦が存在する高速流体中において流速を計測するのに適した超微細なトレーサ粒子をアセトンから生成できることを発見した。そこでこの粒子を風洞に均一に添加し、瞬時流速場を精度よく計測する手法の確立もあわせて目指した。

3. 研究の方法

計測には、光源の発振間隔の問題を考える必要のない連続レーザを用いる。連続レーザはパルスレーザに比べて、瞬時の光量が極めて小さい。この光量の不足は微弱光を検出するイメージ・インテンシファイアにより増強する。一般にイメージ・インテンシファイアでは「残光」が生じるため、単純に用いても非定常計測は行えないけれど、本研究で提案する計測法ではこの残光を利用する。図 1 に示すように、イメージ・インテンシファイアを用いて粒子の流跡線を得ると、露光中の残光により露光開始位置の輝度値が終了時のそれと比べて高くなる。そのため、粒子の始点と終点がどちらか判別が可能となる。また残光特性を把握できれば、流跡線内の輝度値分布から、複数時刻における粒子の位置を知ることが可能となり、1本の流跡線から複数時刻の速度ベクトルが算出可能で非定常計測が可能となる。このアイデアを立証するため、本研究では“計測システムの構築”と“解析プログラムの開発”を柱として研究を進めた。また研究の過程で、流れに添加する粒子のシーディングが問題となり、アセトンを凝縮させることで微小な粒子を気流中に均一に生成することが可能であることが分かった。そこでこれのアセトン凝縮粒子の計測への使用可能性に関しても、既存の PIV を用いて検討した。

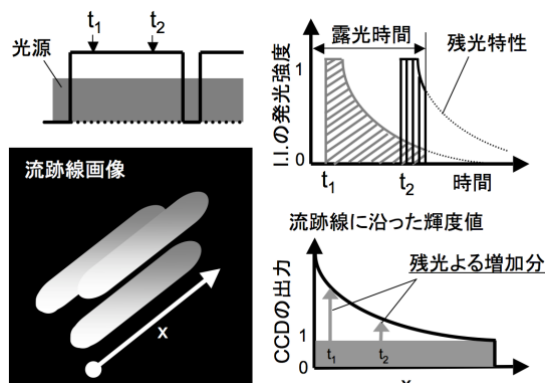


図1 イメージ・インテンシファイアを用いた計測アイデアの概念図

分布から、複数時刻における粒子の位置を知ることが可能となり、1本の流跡線から複数時刻の速度ベクトルが算出可能で非定常計測が可能となる。このアイデアを立証するため、本研究では“計測システムの構築”と“解析プログラムの開発”を柱として研究を進めた。また研究の過程で、流れに添加する粒子のシーディングが問題となり、アセトンを凝縮させることで微小な粒子を気流中に均一に生成することが可能であることが分かった。そこでこれのアセトン凝縮粒子の計測への使用可能性に関しても、既存の PIV を用いて検討した。

4. 研究成果

(1) **計測システムの構築** まず計測装置の構築を行った(図2)。計測には CCD カメラを使用し、可視化用レンズの背後にイメージ・インテンシファイアが組み込まれている。レーザには出力 1 W の DPSS レーザを用い、シート光学系により幅 50 mm、厚さ 0.5 mm のレーザシートを風洞出口に入射させる。風洞の主流速は 7 m/s で超音速流れではないけれど、これにより本アイデアが実現可能か調べた。トレーサ粒子はオイルミストを風洞上流で気流に添加することで供給している。図3に本計測装置で得られた流跡線画像を示す。図3aが物体を何も挿入していない

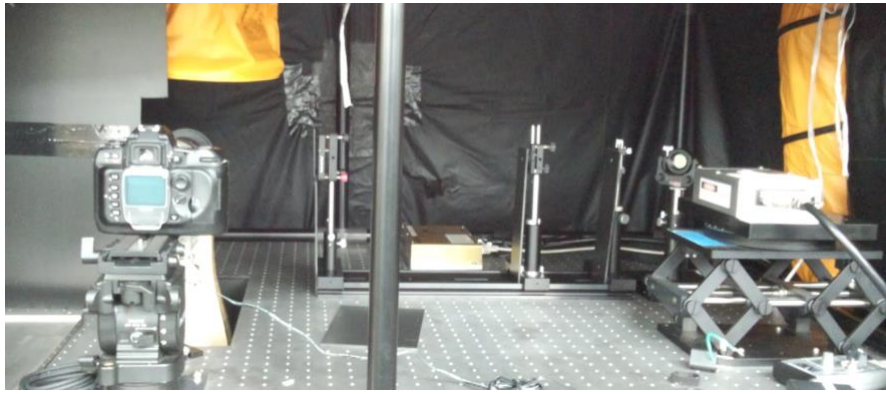


図2 計測状況の外観（写真はプロトタイプの計測装置で一眼レフカメラを使用）

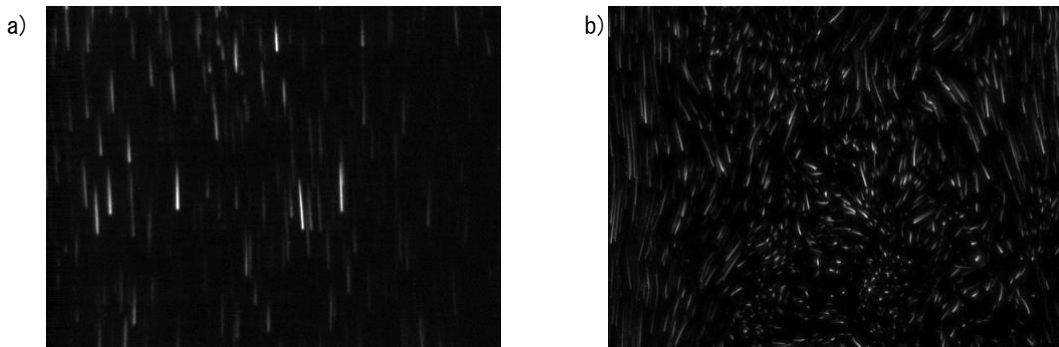


図3 計測で得られた典型的な流跡線画像

単なる風洞気流で得られた流跡線図で、図3bが風洞出口下流に円柱を設置し、その下流の流れを計測した流跡線画像である。なおこれら画像を撮影する際に、カメラの露光タイミングとイメージ・インテンシファイアのゲートタイミングを適切に調整する必要があり、図3は調整後に得られた最適と思われる画像である。これら図から分かるように、予想していた通り、粒子の奇跡は流れ星のように尾を引き、粒子の始点と終点がはっきり分かる。この彗星の長さからイメージ・インテンシファイアのゲート時間から流速の計測が可能である。

(2) 解析プログラムの開発 次に図3で得られた画像から流速を算出するプログラムの開発を行った。図4は一つの流跡線に着目し、輝度値を流跡線に沿って抜き出した分布図である。ここで一つの大きな問題が生じた。図より分かるように、輝度値ははじめ急峻ではあるものの、瞬時にはピークに達することなく、ある広がりを持って増加している。そのため、粒子が光り始めた真の始点、また同じく終点がどこかはっきりしない。そこでこれらに関しては熱線風速計で計測した速度データと比較することで、検討した。図中の赤、青、黒の水平線は、それぞれピーク輝度値の3%、5%、10%値に当たり、この水平線と流跡線分布との交点をそれぞれ始点と終点として速度算出を行った。50本の流跡線から速度を求め、平均流速と速度変動強度を計測したところ、3%位置では 7.8 ± 0.7 m/s、5%位置では 7.2 ± 0.6 m/s、10%位置では 6.7 ± 0.6 m/s となった。他方で熱線風速計による計測値は 7.2 ± 0.2 m/s で、速度変動強度に関してはどのケースも過大評価しているものの、5%位置を選ぶのが妥当であると分かった。

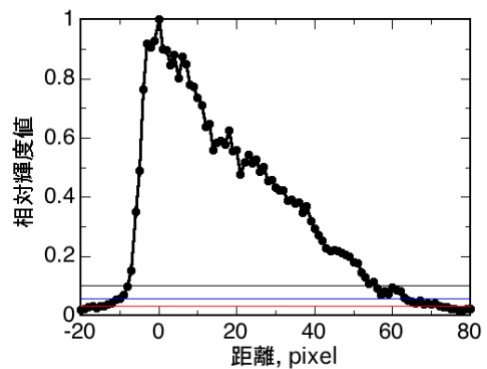


図4 流跡線内の輝度値の変化

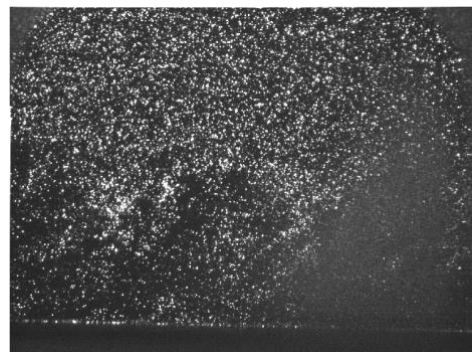


図5 窓の汚れによる粒子のぼやけ

(3) 超音速風洞への適用と問題点 このように本アイデアで、流速が計測可能であることが分かったので、本計測システムを超音速風洞に適用した。

しかしながら、超音速風洞への適用に際し、以下の二つが問題となり、超音速流れでは正確な計測は残念ながら行えなかった。

- a) 流跡線の始点・終点のさらなる広がり：流速の増加に伴い、低速実験でも見られた流跡線の輝度値の広がりがさらに顕著となった。超音速流れへの適用が、研究実施期間の2年目（最終年度）であったため、1年ではこれを解決することは出来なかった。
- b) 窓の汚れ：本研究で用いた超音速風洞が 10 mm×10 mm と小さかったため、粒子が窓に付着し汚れ、通風開始からごく短い時間で粒子がぼやけ計測ができなくなった（図 5）。これに関しては、(4)で述べるようにオイルミストをトレーサーして添加するのではなく、アルコールや有機溶剤を気流に添加し、それを凝縮させることでトレーサー粒子を生成し、添加することで解決できた。

(4) アセトン凝縮粒子を用いた流れの可視化

窓の汚れは粒子が窓に付着することにより生じる。実験で失敗を重ねるうちに、アセトン蒸気を気流に添加すると大気吸込み式の超音速風洞では、通風による加速に伴い気流静温が低下し、蒸気として添加されていたアセトンが凝縮し、微小な粒子となることを発見した。これが、この問題を解決する手法として使える。壁面近傍では、粘性の作用により、流速が低くなる。そのため壁面近傍では粒子であったアセトンが再度ガス化し、窓を汚さない。このアセトン凝縮粒子を用いて、超音速流れの可視化を行った。その結果を図 6 に示す。図 6 ではマッハ 2 の超音速主流中に流れに垂直に音速で燃料噴射を行なっている。図より、噴流上流の乱流境界層、噴射に伴う衝撃波、また噴流内に形成される大規模乱流構造が可視化されていることが分かる。

この方法の場合、先に図 3 でみた粒子数より遥かに多くの粒子が画像上に存在しており、一つの粒子を識別することができず、流跡線を追いかけることができない。これは凝縮によって生成される粒子数が多すぎるためである。粒子数をアセトン蒸気の添加濃度を变化させることでコントロールし、本研究への適用を試みた。添加濃度を 10% から 1% まで減少させたところ、画像の輝度値が低下し、粒子数が減っていることが分かった。しかしながら、その粒子数でも依然として粒子数密度が高すぎて、残念ながらアセトン凝縮粒子は本計測には適していないことが分かった。

(5) アセトン凝縮粒子を用いた超音速流れ場での超高精細瞬時速度場計測

アセトン凝縮粒子は、イメージ・インテンシファイアを用いた流跡線による速度計測には適さない。しかしながら、その粒径の小ささと数の多さから、超音速乱流場の瞬時速度場を計測することに適している可能性がある。そこで研究の最後として、アセトン凝縮粒子を既存のパルスレーザを用いた PIV に適用し、その可能性に関して検討した。図 7 にその結果を示す。図よりかなり精細に速度場を捉えられていることが分かる。特に衝撃波前後の速度差を見ると、ほぼ 1 ベクトル間隔程度で速度不連続を捉えており、驚異的な結果といえる。アセトン凝縮ナノ粒子を使用した場合、既存の粒子に比べて境界層などの渦領域（おそらく面外方向速度が存在する領域）において、速度を算出する際の画像相関がうまく取れなかったり、粒子が存在する領域と存在しない領域のコントラスト差に起因するエラーなどまだまだ解決すべき点は多い。しかしながら図 6 や 7 で見たように、アセトン凝縮粒子はスクラムジェット燃焼器内のような衝撃波と乱流境界層が干渉し、複雑な流れを形成するような流れ場の速度場をかなり高精細かつ高精度に計測できる可能性を秘めていることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① **T. Kouchi, S. Fukuda, S. Miyai, Y. Nagata, S. Yanase, Acetone-condensation Nano-particle Image Velocimetry in A Supersonic Boundary Layer, AIAA-2019-1821, 査読無, 2019, pp. 1-13.**
DOI: [10.2514/6.2019-1821](https://doi.org/10.2514/6.2019-1821)

〔学会発表〕（計 5 件）

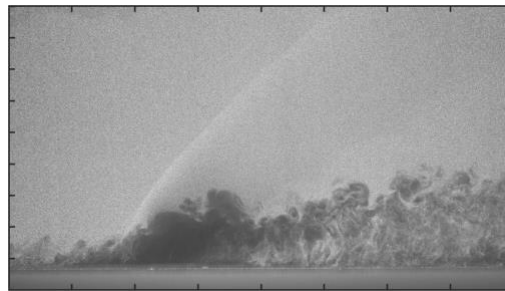


図 6 アセトン凝縮ナノ粒子による超音速流中に噴射された噴流が形成する流れ場の可視化。

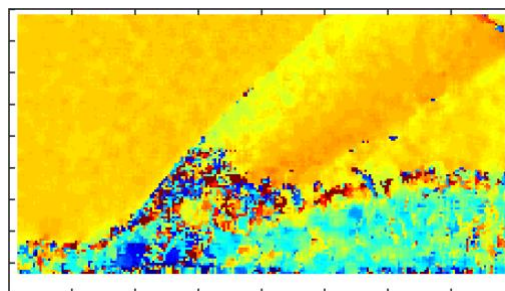


図 7 アセトン凝縮ナノ粒子による超音速流中に噴射された噴流が形成する流れ場の PIV。

- ① 河内俊憲, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, アセトン凝縮ナノ粒子を用いた超音速流れの速度計測, 第51回流体力学講演会/第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2019年7月3日, 東京(発表決定).
- ② 河内俊憲, 凝集ナノ粒子を用いた超音速流れの可視化と速度計測, 平成30年度航空宇宙空力シンポジウム, 2019年1月25日, 湯田.
- ③ T. Kouchi, S. Fukuda, S. Miyai Y. Nagata, S. Yanase, Acetone-condensation Nano-particle Image Velocimetry in A Supersonic Boundary Layer, AIAA Scitech 2019 Forum, Jan. 7, 2019, San Diego, USA.
- ④ 河内俊憲, 福田征弥, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 凝集ナノ粒子を用いた超音速境界層の可視化, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2018年7月6日, 宮崎.
- ⑤ 河内俊憲, 吸込み式超音速風洞で使用可能な観測窓の汚れない凝集ナノ粒子を用いた境界層の可視化とPIV, 平成29年度航空宇宙空力シンポジウム, 2018年1月26日, 天童.

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:
ローマ字氏名:
所属研究機関名:
部局名:
職名:
研究者番号(8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:
ローマ字氏名:

※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。