

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03850

研究課題名(和文) 対向噴流のよどみ点領域における複雑流れが高ペクレ数物質混合に及ぼす影響について

研究課題名(英文) The effect of complex flow in the stagnation-point region of counter Jets on material mixing with high Peclet number

研究代表者

角田 博之 (TSUNODA, Hiroyuki)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10207433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：初年度に蛍光試料の調査と選定を行った。新規購入の赤色レーザーと既存のパルス発光緑色レーザーに吸収波長帯が適合した数種類の蛍光試料と光学フィルターを選定し、濃度と蛍光強度の関係を検定実験で調べた。緑色レーザーの故障のため第二年度は実験準備に留まったが、最終年度に、層流と乱流の場合について通常噴流の界面検出実験を行った。噴流と周囲流体に異なる蛍光染料を混ぜ、高速度カメラで各染料からの蛍光を撮影した。代用した緑色レーザーの光強度が劣るため、蛍光画像のコントラストが不十分であったが、層流噴流の界面検出は成功した。また、比較対象となる環状噴流の可視化実験を行い、その結果を講演発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スカラ場の濃度がゼロとなる境界で噴流の乱流域と非乱流域の界面を近似するという考え方は単純であり、過去に多く採用されている。しかし、ゼロへと漸近していく濃度場から濃度ゼロの境界線を取り出すことは困難であることから、実際にはしきい値が設けられ、それが曖昧さの要因となる。本研究手法では、噴流と周囲流体に発色が異なる二種類の蛍光染料を混入し、両染料からの蛍光画像を重ねることで、しきい値を設けなくとも両者の境界がより鮮明に得られることが期待できる。さらに、速度情報を同時取得する2色PLIF/PIV計測システムへの拡張も可能である。界面と速度場を同時計測した研究は世界的にも見当たらず、学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In the first year, several fluorescent dyes and optical filters with absorption wavelengths compatible with the newly purchased red laser and the existing pulse-emission green laser were selected, and the relationship between concentration and fluorescence intensity of selected dyes was investigated. Due to the failure of the green laser, the second year was limited to experimental preparation. In the final year of the project, interface detection experiments in a normal round jet were conducted for both laminar and turbulent flows. Different fluorescent dyes were mixed with the jet and ambient fluid, and the fluorescence from each dye was captured by a high-speed camera. Although the contrast of the fluorescence image was insufficient due to the low intensity of the substituted green laser, the interface of the laminar jet was successfully detected. For comparison, visualization experiments of annular jets were performed, and their results were presented in a scientific conference.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 噴流 対向噴流 よどみ点 乱流界面 パッシブスカラ PLIF

## 1. 研究開始当初の背景

工学的に重要な噴流・後流や壁乱流のような外部流れにおけるスカラ拡散問題を考える際、流れの幾何構造との関係に加え、渦有り乱流場と渦無し非乱流場を隔てる界面 (**Turbulent/ Non-turbulent Interface**, 以後 **TNTI** と略す) を通したスカラ輸送の理解が重要な課題となる。よく知られているように、TNTI ではコルモゴロフ長さ尺度と同程度の薄い層である粘性 superlayer が形成され、また、非乱流域は時には噴流中心あるいは壁近くの乱流コア域まで巻き込まれることがある。このため、界面を隔てるスカラ輸送の理解が乱流域と非乱流域の間での流体混合を考える上で重要となる。しかしながら、流れの幾何構造と TNTI との関係性を混合問題と関連付けて調べた研究はこれまでにない。例えば、界面がよどみ点付近にあって、そこでの流れ構造により界面が大変形を受けるとき、乱流と非乱流間のスカラ混合は噴流外縁の場合と異なると予想されるが、その詳細は明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では自由噴流と一様流が対向衝突する流れ (対向噴流) を研究対象流れに選び、噴流と一様流の間のスカラ物質の混合問題を調べる。Fig. 1 は対向噴流の平均流線である。Fig. 2 はスカラ物質の濃度等高線と速度ベクトルの瞬時場である。噴流が静止に至る平均よどみ点で流線は鉛直方向に分岐し、よどみ点付近の流れは双曲的構造をもつ。瞬時場によどみ点が存在し、且つ、その付近には乱流噴流と非乱流一様流との界面 TNTI が存在することから、ス

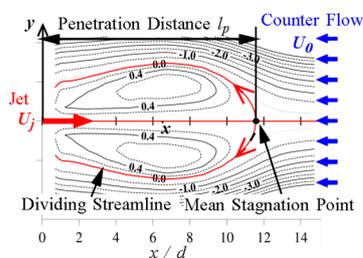


Fig. 1 対向噴流の平均流線模式図

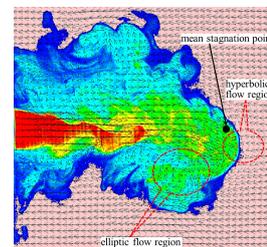


Fig. 2 対向噴流の瞬時濃度等高線と速度ベクトル図

カラ拡散は流れの幾何構造と TNTI の両方の影響を受けると考えられる。本研究では以下の 2 つを研究目的とする。(1) 速度場ならびに 2 種類の蛍光試料の濃度場を同時計測可能な 2 色 PLIF/PIV 計測システムを開発する。そして、流れの局所幾何構造を識別するとともに、二物質のスカラ境界を検出する。(2) 検出した幾何構造とスカラ境界の情報を利用して速度場と濃度場の条件付抽出を行い、境界線での速度場の統計的特性からスカラ境界と TNTI との関係性を調べる。

## 3. 研究の方法

乱流域と外部非乱流域の界面 TNTI を乱流域に含まれるスカラ場の濃度がゼロとなる境界で近似するという考え方は単純であり、多くの実験的研究で採用されている。しかし、緩やかにゼロへと漸近していく濃度場から境界線を取り出すことは困難であり、実際にはしきい値以下になる境界線で近似することになる。本研究では TNTI の検出精度を高めるために、噴流と対向一様流に発色が異なる二種類の蛍光染料 A, B を混入し、それらの濃度を異なるカメラで同時計測する 2 色 LIF 法を採用する。2 台のカメラで得た物質 A, B の蛍光画像を重ねることでしきい値を設けなくとも両者の境界がより鮮明に得られると期待できる。Fig. 3 に示すように 3 台のカメラを用いた 2 色 PLIF/PIV 計測システムの開発を目指す。

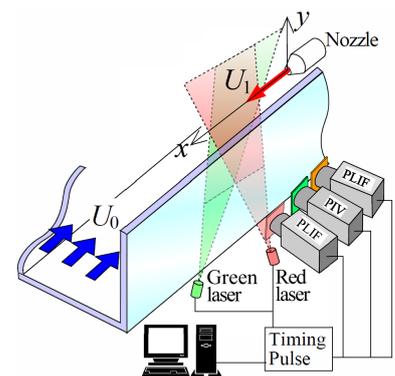


Fig. 3 2色 PLIF/PIV 計測システムの構想図

## 4. 研究成果

### (1) 蛍光試料の選定と蛍光強度の検定実験 (研究一年目の成果)

#### ① 蛍光試料の選定

一年目の研究においては、2 色 PLIF システムの完成を目指した。そのために、2 台のレーザー光源の選択と光源波長に適合した吸光波長帯を有する蛍光染料の選定を行った。2 台のレーザーの 1 台には、PIV への拡張を考え、現

有設備の高出力パルス発光緑色レーザー光源（波長 532nm）を使用する。もう 1 台のレーザーには、緑色レーザーと発光波長帯が大きく異なることを条件として、連続発光赤色レーザー（波長 638nm）を選定し、新規購入した（カトウ光研（株）製、KLD-III-U）。

次に、両レーザーに適合した蛍光試料の選択を行った。安全性・水溶性・低温度依存性などを考慮して、3 種類の蛍光試料、Rhodamine 6G（以後、R6G と略す）、SufoRhodamine 101（以後、SuR と略す）、および、Cy5(Cyanine5 carboxylic acid, 以後、CY5 と略す) に絞った。これらの励起波長スペクトル分布と蛍光波長スペクトル分布をそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。それぞれの励起スペクトルピーク波長は、530 nm, 580 nm, 645 nm 付近にある。R6G と

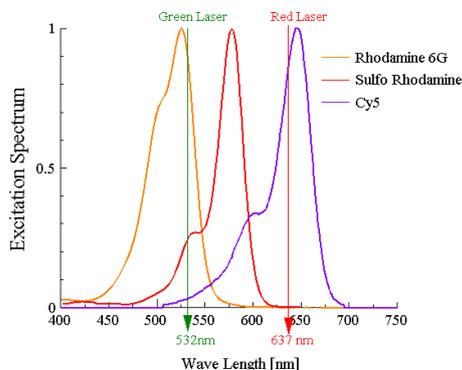


Fig. 4 蛍光試料の励起スペクトル分布

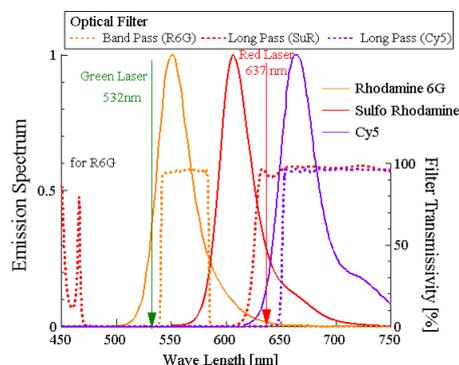


Fig. 5 蛍光試料の蛍光スペクトル分布

SuR は緑色レーザー光で、Cy5 は赤色レーザー光でそれぞれ励起されることが分かる。特に、R6G は赤色レーザー光で全く励起されず、Cy5 は緑色レーザー光でほとんど励起されないという特徴がある。蛍光スペクトルピーク波長は、それぞれ、550 nm, 605 nm, 665 nm となっており、特に、R6G と Cy5 は蛍光スペクトル分布の重なりが少なく、蛍光画像の分離が容易になると予想される。それぞれの蛍光試料からの蛍光画像をカメラで撮影する際の光学フィルタについても選定を行った。Fig. 5 にはフィルタの光透過曲線も描かれており、R6G 用バンドパスフィルタは R6G の蛍光を主として透過し、SuR や Cy5 からの蛍光の透過率は低い。SuR 用ロングパスフィルタと Cy5 用ロングパスフィルタは R6G からの蛍光を透過しないように選定した。

## ② 蛍光強度の検定実験

次に、3 種類の蛍光試料について、濃度と蛍光強度との関係を調べる検定実験を行った。緑色レーザーのみ、赤色レーザーのみ、両レーザー併用の 3 種類で励起したときの蛍光画像をカメラで撮影して、蛍光強度と濃度との関係を調べた。Fig. 6 にその結果を示す。R6G と SuR は緑色レーザーで励起したときに強く蛍光し、赤色レーザーでは全く蛍光せず、両方を併用しても緑色単独と変わらないことが分かる。一方、Cy5 は赤色レーザーで励起したときに強く蛍光し、緑色レーザーでも僅かな蛍光を有する。強い蛍光を発するときの濃度と蛍光強度の関係はほぼ線形であり、それらの傾きを図中に示している。傾きの大きさは蛍光染料の入射レーザーに対する蛍光感度を表し、SuR が最大で、Cy5 は他の 2 つに比べて傾きが小さい。例えば、縦軸の値が 100 の蛍光強度を得るためには、R6G は約 0.14 mg/L、SuR は約 0.11 mg/L、Cy5 は約 0.43 mg/L の濃度が必要であり、Cy5 は質量比で約 4 倍の染料を要することが分かった。蛍光染料の選定を行う上で、導入コストも重要な要素である。同じ分量の蛍光染料を用意するのに、SuR は R6G の約 340 倍のコストがかかり、さらに、Cy5 は SuR の約 500 倍のコストを要する。上で述べた蛍光感度を考慮して、コスト/性能比で比較すると、同じ蛍光強度を得るために Cy5 は SuR の約 2000 倍ものコストを要するという結果となった。また、Cy5 は粉体での購入ができず、1 mg/mL の水溶液単位で購入せざるを得ないというデメリットもある。

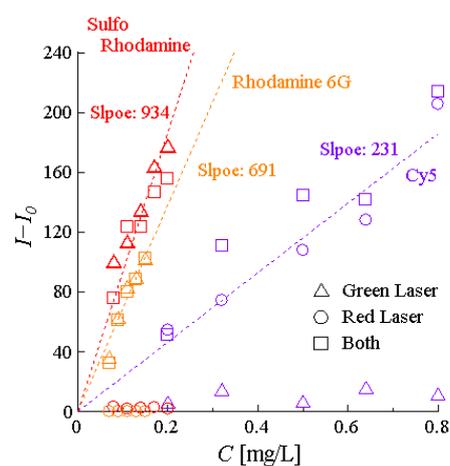


Fig. 6 蛍光試料の濃度と蛍光強度の関係

以上の結果から、本研究目的である噴流の TNTI 検出に用いる 2 種類の蛍光染料を決定した。R6G と Cy5 の組合せは励起・蛍光スペクトルの分離という観点では最適である (Fig. 4 と Fig. 5 参照)。しかしながら、後述するように、噴流実験では毎分 1 L 程度の流量で染料を噴出することから、相当量 (数 L) の染料水溶液を用意する必要がある。この場合、Cy5 の利用はコスト面や利便性から極めて非現実的であることから、R6G と SuR の組合せを採用することに最終決定した。

## (2) 環状衝突噴流の可視化実験 (比較対象実験) (研究二年目の成果)

噴流実験での使用を予定していた高出力パルス発光緑色レーザー光源が故障し、その修理依頼を購入業者に出して、修理不可という結果がでるまでに時間がかかったことから、二年目の研究ではその期間を利用して、噴流実験向けの準備と比較対象実験の遂行を行った。

比較対象実験では、一年度に新規購入した赤色レーザーを用いて環状衝突噴流の可視化実験を行った。本研究課題である対向噴流は対向一様流と噴流との衝突流れであるのに対し、環状衝突噴流は固体壁への衝突流れである。どちらも衝突によるよどみ点が存在するが、衝突面での流れの挙動は大きく異なる。また、環状噴流の初期発達領域では平均流れによどみ点が生じることが知られ、この意味では対向噴流に近い流動特性を有する。これらのことから、比較対象の流れとして環状衝突噴流を選んだ。実験では、可視化だけでなく、PIV法による速度測定や衝突面の圧力分布測定などを行い、得られた結果は噴流による壁面加熱や冷却の問題を理解する上で非常に有用であったことから、国内学会において研究発表を行った。

## (3) 噴流の TNTI の検出実験 (研究三年目の成果)

### ① 実験装置と実験方法

三年目の研究では、高出力パルスレーザーの代用として、出力が劣る連続発光緑色レーザーを使用して、噴流 TNTI 検出を行う実験を行った。Fig. 7 は噴流実験装置および測定システムの概略図である。実験には 250 mm×250 mm×500 mm のアクリル製縦型水槽を使用し、実験に先立ち、水槽を R6G 水溶液で満たす。水槽上部から噴流用ノズル (内径 4 mm ステンレスパイプ) を挿入し、ヘッドタンクから供給される SuR 水溶液を鉛直下向きに噴出して噴流を形成する。ヘッドタンク高さを調整して噴出流量を変化させることで、噴流レイノルズ数  $Re$  を制御し、 $Re \approx 1900$  の層流噴流 (噴出流量 0.35 L/min) と  $Re \approx 6000$  (噴出流量 1.1 L/min) の乱流噴流を得た。水槽の対向する側壁を通して緑色レーザーと赤色レーザーのシート光を両者が同一面となるように照射し、レーザー軸に直交する側壁を通して 2 台の対向する高速度カメラで噴流と周囲流体が発する蛍光画像を撮影した。カメラ#1 のレンズ前方には R6G からの蛍光を透過するバンドパスフィルタを装着して周囲流体のみを撮影できるようにし、一方、カメラ#2 のレンズ前方には SuR からの蛍光を透過するロングパスフィルタを装着して噴流流体のみを撮影できるようにした。タイミングパルス発生器を用いて両カメラの撮影の同期をとった。なお、使用したカメラはモノクロであるため、蛍光画像の色情報は利用できず、蛍光強度情報が画像の濃淡として現れる。

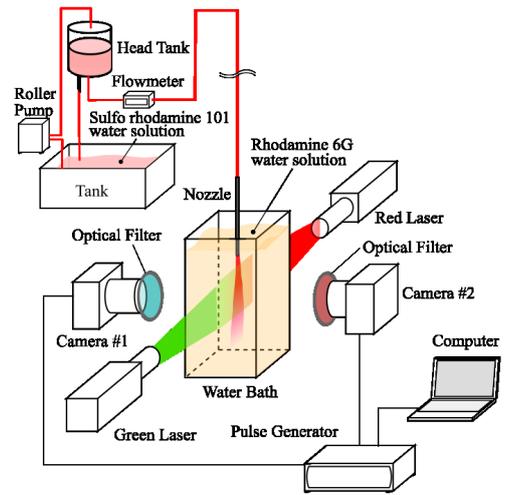


Fig. 7 噴流実験装置概略図

### ② 界面検出の画像処理方法

Fig. 8 の上段 (a) 図に、鉛直下向き噴流の TNTI を模式的に示した図を示す。噴流は TNTI を通して周囲流体を噴流中に巻き込みながら発達する。レイノルズ数が大きくなるほど TNTI は複雑化し、噴流幅に相当するような大スケール変動から、サブミリオーダーの小スケール変動までを含んだ極めて入り組んだ形状を持つことが知られる。

本研究では、図左側の噴流流体に SuR 蛍光染料水溶液、図右側の周囲流体に R6G 蛍光染料水溶液を用い、Fig. 7 に示した通り、レーザーシート光を照射することでそれぞれ異なる色で発色させ、2 台のカメラでそれぞれの蛍光画像を同時撮影することで両者を可視化する。なお、(a) 図では便宜上噴流側と周囲流体側の色分けが明確で界面 TNTI が明瞭であるが、実際には、2 種類の染料が界面付近で分子的に混合することで、色の変化が緩やかとなり、両者を隔てる境界線は不明瞭となる。画像処理で界面を検出するために、上段 (a) 図の黒点線で示す通り、ある  $x$  位置において半径  $r$  方向に沿って、噴流側染料と周囲流体側染料からの蛍光強度の変化を調べる。その結果を模式的に示したのが中段

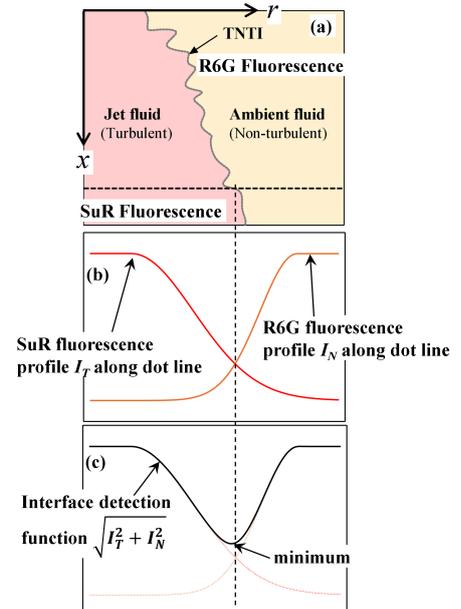


Fig. 8 界面検出画像処理法説明図

(b) 図である。界面 TNTI 付近でそれぞれの蛍光強度は緩やかに（指数的に）ゼロ値へと減衰する。従来の TNTI 検出手法で定義が曖昧なしきい値を設ける必要があったのは、図で模式的に示したように、TNTI 付近で蛍光値がステップ的に変化しないことが要因である。いま、SuR 蛍光で得られた変化曲線を  $I_T(x, r)$ 、R6G 蛍光で得られた変化曲線を  $I_N(x, r)$  とおくと、次式で定義される TNTI 検出関数  $I_{TN}(x, r)$  を考える。

$$I_{TN}(x, r) \equiv \left[ \{I_T(x, r)\}^N + \{I_N(x, r)\}^N \right]^{1/N} \dots\dots\dots ①$$

Fig. 8 の下段 (c) 図に  $N = 2$  の場合の検出関数を模式的に示している。TNTI を隔てて、 $I_T(x, r)$  と  $I_N(x, r)$  のどちらも緩やかに減衰することから、 $I_{TN}(x, r)$  はある  $r$  位置で極小値をとる変化曲線となる。本研究では、極小値をとる  $r$  位置をこの  $x$  断面においての界面位置  $R_{TN}(x)$  とみなす。

### ③ 界面検出結果

Fig. 9 と Fig. 10 に層流噴流と乱流噴流の場合にそれぞれ得られた TNTI 検出結果の例を示す。なお、これらの結果は 100 枚の画像を撮った中の一枚である。また、層流噴流の場合の界面は、渦有り流れである噴流流体と渦無し流れである周囲流体の間の界面であり、TNTI という用語は適切ではないが、便宜上、TNTI と表す。図では 3 枚の可視化写真を並べており、左から周囲流体を形成する R6G からの蛍光画像を撮影するカメラ #1 で得た画像、噴流流体を形成する SuR からの蛍光画像を撮影するカメラ #2 で得た画像、そして、(2) で説明した手法で両画像から TNTI を検出した結果の画像である。ここで、TNTI の画像は、 $I_{TN}(x, r)$  の等高線として表しており、極小画素値を黒色の等高線としている。

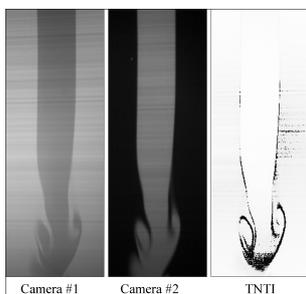


Fig. 9 界面検出実験結果（層流噴流）

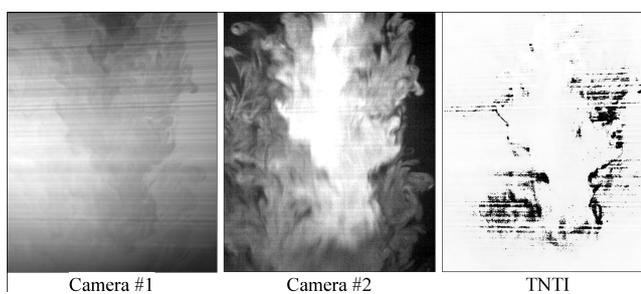


Fig. 10 界面検出実験結果（乱流噴流）

まず、層流噴流の場合には、比較的良好に TNTI を捉えていることが分かる。カメラ #1 の画像は噴流部が影になり、カメラ #2 の画像は周囲流体が影となっており、カメラ #1 の画像を色反転したように見える。ただ、カメラ #1 の噴流部の影はカメラ #2 に比べて若干薄くなっている。この要因は後述する。層流噴流界面付近での蛍光染料の分子混合の進行が遅いことから、良好に界面を検出できたといえる。

乱流噴流の TNTI は部分的に検出されているが、全体的にノイズが大きく、明瞭な線として現れていない。この原因は、カメラ #1 の画像から分かるように、周囲流体を捉える画像のコントラストの低さにある。噴流部の流体は黒色の影として撮影されるべきであるが、実験画像では若干の発光があったため、周囲流体との識別が不鮮明となった。このコントラストの劣化と TNTI 付近で蛍光染料の分子混合が大きいことが TNTI 検出の不完全さとなった。本来、実験での使用を予定していた高出力緑色レーザーの故障のため、出力が低いレーザーで代用せざるを得なかったことが主因であるが、Fig. 5 で示したカメラ #1 用のバンドパスフィルタの選定ミスも要因の一つと考えられる。Fig. 5 から分かるように、本実験で採用したバンドパスフィルタは SuR の蛍光スペクトルと一部重なっており、R6G の蛍光だけでなく、SuR の蛍光も僅かであるが透過する。このため、カメラ #1 で撮影された周囲流体の R6G 蛍光画像に噴流流体からの SuR 蛍光が重なり、コントラストが悪化したと言える。SuR の蛍光が全く透過しない、50 ~ 100 nm 程度だけ低波長側にシフトしたバンドパスフィルタを使用することでこの問題は解決可能と予想される。

今後の課題として、通常噴流の TNTI 検出を再実験し、バンドパスフィルタの透過波長帯を見直すことで、コントラストの向上を図り、乱流噴流の TNTI 検出精度を高める。また、噴流流体と周囲流体の双方の蛍光試料液にトレーサ微粒子を混入させることにより、TNTI 検出だけでなく、PIV 法による速度測定にも取り組む。噴流流体可視化用カメラには噴流中のトレーサ粒子だけが写り込み周囲流体中の粒子は映り込まない。一方、周囲流体用カメラには噴流中の粒子が写り込まない。これを利用して、乱流域と非乱流域でそれぞれ条件付けした速度統計量を算出することができる。また、TNTI で検出した界面の形状だけでなく、界面の移動速度が求められると期待され、TNTI を通した運動量輸送の理解に大変有用な知識を得ることができる。通常の噴流に対する実験の終了後、当初計画通り、対向噴流の TNTI 検出実験に取り掛かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田形 友寛, 角田 博之
2. 発表標題 壁面に衝突する環状噴流における流れ場の特性
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤 佑志, 角田 博之
2. 発表標題 環状衝突噴流の壁面圧力分布に及ぼすノズル内外径比の影響
3. 学会等名 関東学生会第63回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------