

平成 2 8 年 6 月 1 5 日現在

機関番号 : 5 2 6 0 5

研究種目 : 若手研究(B)

研究期間 : 2014 ~ 2015

課題番号 : 2 6 8 2 0 0 5 1

研究課題名 (和文) 微細矩形断面流路でのマイクロ衝撃波の干渉信号計測に関する実験的研究

研究課題名 (英文) Experimental Study on the Interferometric Signal Measurement of the Micro-shock waves in the narrow channel with the rectangular cross section

研究代表者

宇田川 真介 (UDAGAWA, Shinsuke)

東京都立産業技術高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号 : 4 0 4 6 9 5 8 1

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 2,900,000 円

研究成果の概要 (和文) : 微細流路内部での衝撃波の計測は、流れとセンサの代表スケールの違いによる測定の難しさから、ほとんど行なわれていない。本研究では、矩形衝撃波管内に衝撃波を発生させ、狭小流路内の衝撃波の伝播特性を実験的に明らかにする事を狙いとする。本研究の第一段階として主ピストンを分離式にし、駆動部の開口時間を従来型の85%程度まで大幅に短縮することに成功した。本研究の第二段階として、流路の断面形状を円形から矩形にし、複数の干渉計を構築して実験効率を向上させ、矩形断面の管内を伝播する衝撃波の計測を行うことができた。

研究成果の概要 (英文) : The measurement of the shock wave in the narrow channel is hardly performed because of the representative scale difference between the flow and the sensors. The aim of this study is to experimentally clarify the characteristics of the shock wave propagating in the narrow channel by generating the shock wave in the rectangular tube. As the first step of this study, the opening time of an improved main piston, which has the separated structure, is reduced about 85% compared with the conventional main piston. As the second step, the cross section of the shock tube is changed from circle to rectangular. Additionally, the measurement of the shock wave propagating in the narrow channel with rectangular cross section can be performed by using newly constructed several interferometers.

研究分野 : 熱流体工学

キーワード : 衝撃波 無隔膜型駆動部 非接触計測 レーザー干渉計 狭小流路 矩形断面流路

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年着目されている μm オーダーの流路内部での衝撃波を伴う高速流れについては、シミュレーションによる研究が盛んに行われているが、その計算の信頼性を裏付けるための実験は、流れとセンサの代表スケールの違いに起因する測定の難しさから、ほとんど行われていないのが現状であり、シミュレーションと比較し得る実験データの蓄積は極めて重要である。本研究では、流路幅が 1mm 以下の矩形衝撃波管内衝撃波を発生させ、狭小流路内の衝撃波の伝播特性を実験的に明らかにする事を狙いとする。またセンサ自体が擾乱源となるため、非接触計測法を適用して実験結果の信頼性を向上させ、既存の一般理論に対する補正項を実験結果から見出す事を目的とする。

(2) 近年、 μm オーダーの狭小流路内部での流れが注目されている。特に、流路内部において衝撃波を伴うような速い流れの代表として、マイクロ衝撃波が挙げられる。医工学分野においては、Needle-less Drug Delivery System[1]や体外からの結石破碎法[2]が盛んに研究され、実用段階にある。また、マイクロ飛行体などの超小型動力源として注目されているウルトラマイクロガスタービン(UMGT)の開発においては、過給機にウェーブロータを用いてサイクルの圧力比を大きくする方法が提案されている[3]。UMGTにおけるウェーブロータの断面寸法は 1mm 以下となるため、内部に発生するマイクロ衝撃波現象を把握することは、流量低下などの性能悪化を改善するためにも重要である。上述の様な微細管内に発生するマイクロ衝撃波の挙動は、一般的な衝撃波の理論と違った振る舞いをする事が理論的に知られている[4]。最近の研究傾向では、N-S 方程式と boltzmann 方程式によるマイクロ衝撃波のシミュレーション研究が盛んに行われている[5]。一方で Garen らは独自に無隔膜駆動部を有する小型衝撃波管とレーザー干渉計を開発し、衝撃波理論と狭小流路内部の衝撃波の違いを実験から定性的に明らかにしている[6]。微細流路中のマイクロ衝撃波に対する研究傾向は、数値シミュレーション的アプローチが多い。一方で実験的アプローチは、その物理量測定に関して流れとセンサの代表スケールの違いから極めて難しく、その装置構成のスケールに起因する測定の困難さのため非常に少ないのが現状である。さらに、設計ツールとしてよく用いられる N-S 方程式に対する数値流体力学(CFD)も、狭小流路流れにおいてはレイノルズ数 Re が小さく、またクヌッセン数 Kn が大きくなるため、これまでの高 Re および低 Kn 条件での流体実験から得られた知見を適用することが困難になると予測される。最近ではクヌッセン数 Kn の影響を考慮して、Boltzmann 方程式に対する CFD も盛んに行われているが、計算結果の精度を保証するための実験結果が極めて少なく、微細流路内部の

流れの予測精度や信頼性の向上のための実験データの蓄積は急務である。

(3) 応募者は、これまでに開発・評価した 2 つのピストンを用いた空気作動式の無隔膜型駆動部を用い、9 気圧の初期圧力で内径 2 及び 3mm の管内を伝播する衝撃波の伝播特性を、実験的に明らかにしてきた[7]。しかし上述の駆動部は、実験再現性は極めて優れているものの、主ピストンの作動速度が遅く、衝撃波の形成距離の増大に大きく影響する事がわかった。衝撃波の減衰を実験的に明らかにするためには、主ピストンの作動速度を増大させて衝撃波形成距離を短くする必要があるため、図 1 に示すように主ピストンを分離式にし、衝撃波管入口とピストン先端に磁石を設けるといった改良を行った[8, 9]。外側のハウジングを運動させ、内側のピストンに衝突させて運動量を伝達させる方法で、主ピストンの作動速度が大幅に向上した。しかしガラス製の円管内を伝播する衝撃波を計測するとき、内径 1mm 以下の衝撃波管に対しては、従来のレーザーによる非接触計測法の適用が困難であることがわかった。

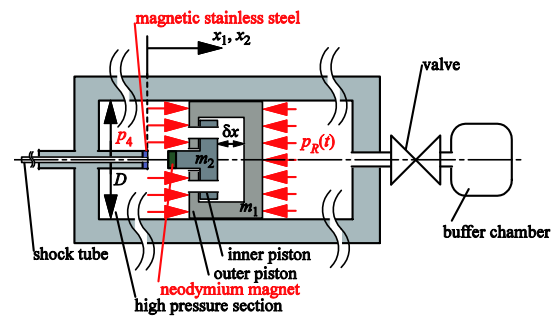


図 1. 空気作動式高速作動弁概略図

2. 研究の目的

(1) これまでの研究における問題点は、図 2 に示すような従来の He-Ne レーザーを用いた干渉計で内径 1mm 以下の管内を伝播する衝撃波の測定を行うとき、ビーム径を絞るのに限界があり、またガラス管自体が拡散レンズの働きを持つため、光学系の配置が複雑になって調整が極めて困難になり、得られる信号に再現性がなくなってしまうことや、得られる信号の S/N 比が極めて小さく、測定が困難ということである。

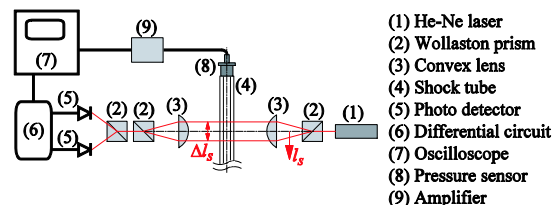


図 2. 従来の非接触計測法概略図

そのため、流路の断面形状を円形から矩形にすることで、ガラス管自体が持つ拡散レンズ

の作用を排除し、複数の干渉計を構築することで実験効率を向上させ、空間分解能の高い測定が可能になり、高出力レーザーによって得られる信号のS/N比を大きくすることができると考えた。

そこで本研究ではこれまでの知見を生かし、複数の He-Ne レーザーを用いて複数の干渉計を構築し、長さ 1000mm、流路幅 500 μ m 程度の矩形管衝撃波管内を伝播する衝撃波の非接触な測定方法を確認して実験結果の信頼性を向上させ、得られた実験結果と既存の一般理論との比較から、一般理論に対する補正項を実験結果から見出す事を目的とする。

(2) 本研究の特色は、微細流路内部を伝播する衝撃波の非接触な測定を行い、その伝播特性を実験的に明らかにしようとするところであり、得られた結果を基に理論式に対する補正項を求めようとする事にある。また応募者は流路幅 500 μ m、長さ 1000mm の衝撃波管を、ガラス平板やアクリル平板を用いて作製し、衝撃波管壁面からの熱的な影響を評価する方法の確立を目指している。微細流路内部の衝撃波の伝播特性が明らかになり、一般理論に対する補正項を得られれば、シミュレーション結果に対する信頼性の裏付けが可能になり、シミュレーションが UMG 或マイクロ飛行体の設計・開発ツールの 1 つとして大いに活用されることが予想される。さらに一般理論に対する補正項を実験結果から求めることができれば、壁面の摩擦や熱の影響を定量的に扱うことができ、学術的に価値が高いものになると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 1 年目には、研究計画の第一段階として、図 3 に示すような 2mm の流路幅を持つ矩形断面衝撃波管の作製を行う。極めて平滑なアクリル板 2 枚の間に、金属製の薄板を挟み込んで外部から固定するもので、本研究でパラメータとして扱おうとする流路幅及び壁面材料を容易に変更できるシンプルな構造である。試験気体がリークするのを防ぐため、流路幅に影響がないように各部品にガスケット用の溝を設ける。衝撃波は紙面上の左右方向へ伝播させるもので、衝撃波伝播方向の長さは 1000mm である。

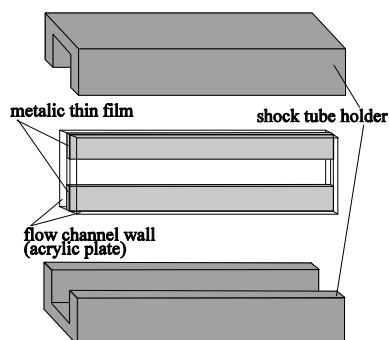


図 3. 矩形断面流路概略図

この衝撃波管を、これまでの研究で開発・評価してきた無隔膜型高圧部に接続するに当たり、駆動部側に接続用アダプターを設けるなどの改良を施す。これによって、従来のガラス管自体が持つ拡散レンズの作用を排除することができる。図 4 に矩形断面衝撃波管を用いた衝撃波計測システム概略図を示す [1]。衝撃波管端部には、管端部への衝撃波の到達を計測するための圧力センサを設置する。高圧部においてはシート状の平行光を用いて主ピストンの作動速度を計測し、その中心軸から衝撃波の進行方向に向かって x 隔ててレーザー差動干渉計を設置する。圧力センサと干渉計からの信号及び主ピストン作動速度計測信号は全てオシロスコープに取り込まれる。 x をパラメータとすることで衝撃波伝播の時間変化を定量的に求めることができ、過去に行った円管での実験結果との比較を行って結果の整合性を確認し、実験の妥当性を評価することができる。

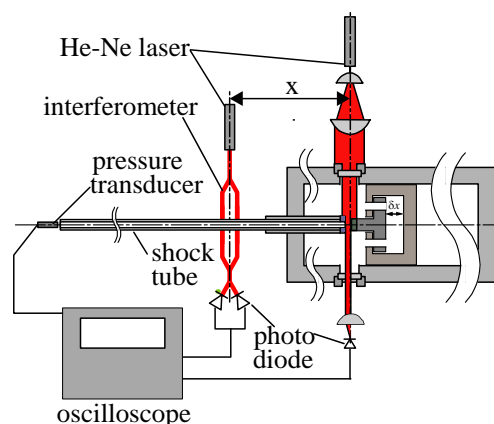


図 4. 衝撃波測定システム

(2) 2 年目には、図 5 に示すような He-Ne レーザーを用いて複数のレーザー干渉計を構築し、流路幅 2mm の衝撃波管の管軸方向に沿って等間隔に配置して衝撃波の測定を行う。

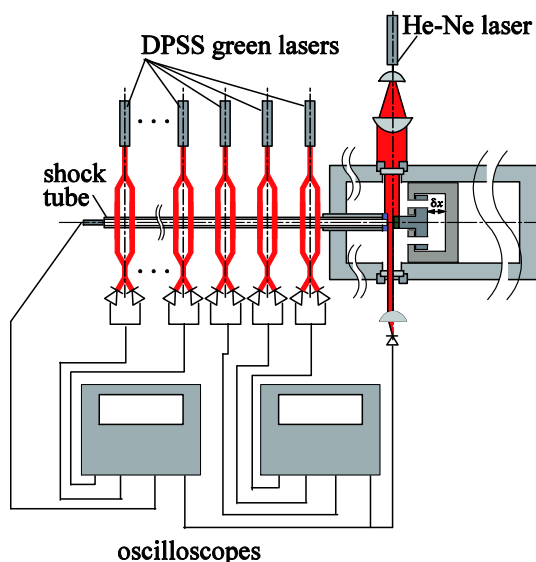


図 5. 改良型衝撃波測定システム

これにより図4に示される x をパラメータとせず実験を行えるため、実験効率の向上を図ることができ、図4の測定システムで得られた結果との比較によって測定方法の妥当性を確認し、測定方法を確立させる。また、本研究で確立する計測法の適用範囲を明らかにするとともに、 μm オーダーの衝撃波管内を伝播する衝撃波の一般理論からの乖離を実験から定量的に評価し、その結果から一般理論に対する補正項を求める。

(3) その後、研究計画の第二段階として、作製した $500\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$ の流路幅を持つ衝撃波管を、流路幅をパラメータとして衝撃波の測定を行う。レーザー差動干渉計から得られる干渉信号の強度は、理論的に流路幅、レーザー光強度、レーザー波長に依存するため[2]、衝撃波の測定にあたっては第一段階で確立された測定方法の適用範囲の下限の目安として、流路幅 $500\mu\text{m}$ 程度までが妥当であると考えられる。しかし現実問題として実験からその適用範囲を把握する必要があるため、予備実験からパラメータとしての流路幅の範囲を決定して衝撃波の計測を行う必要がある。パラメータとしての流路幅の範囲を決めた後、パラメトリックな測定から mm オーダー以下の衝撃波管内を伝播する衝撃波の一般理論からの乖離を実験的に評価し、その結果から一般理論に対する補正項を求めることができる。微細矩形断面衝撃波管内部の衝撃波の伝播特性が実験的に明らかになり、一般理論に対する補正項を得られれば、シミュレーション結果に対する信頼性の裏付けが可能になり、シミュレーションがUMGTやマイクロ飛翔体の設計・開発ツールの1つとして大いに活用されることが予想される。さらに一般理論に対する補正項を実験結果から求めることができれば、壁面の摩擦や熱の影響を定量的に扱うことができ、学術的に価値が高いものになると考えられる。

本研究計画の第一段階において行われる「矩形断面衝撃波管の作製と衝撃波の計測」に、今後の研究の展開が大きく左右される。なお、研究期間内に「微細矩形流路内を伝播する衝撃波の非接触計測」が達成できなかったとしても、微細矩形断面衝撃波管の製作ができ、衝撃波の伝播を測定できれば、これまでの実験結果との比較に値する貴重なデータとなるため、微細矩形断面衝撃波管の作製と衝撃波のレーザー差動干渉計による非接触測定までを本研究の到達目標の最低条件としたい。

4. 研究成果

(1) 図1に示される、これまでに定性的に評価を行ってきた、改良した無隔膜駆動部における主ピストンを、図6に示すような極めて単純なモデルで表わし、これに対して以下に示すような運動方程式を導出した。

$$x_2(t) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \frac{\pi D_1^2}{4m_1} p_4 \left\{ \frac{1}{2} t^2 - \tau^2 \left(\frac{\tau}{t} + e^{-t/\tau} - 1 \right) \right\}$$

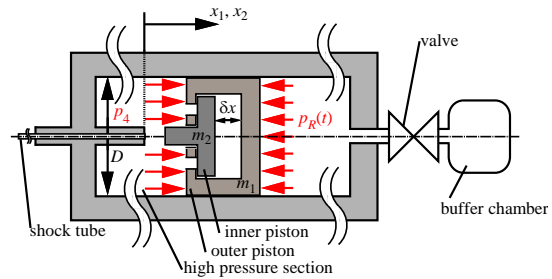


図6. 改良した駆動部の単純モデル

(2) 改良した無隔膜駆動部の単純モデルによる運動方程式の解と、実際の作動特性を比較して評価を行なうため、図4に示すような主ピストンの運動を計測する光学系を構築し、主ピストンの運動軌跡の測定を行った。

単純モデルから導かれた微分方程式の解析解の比較を図7に示す。

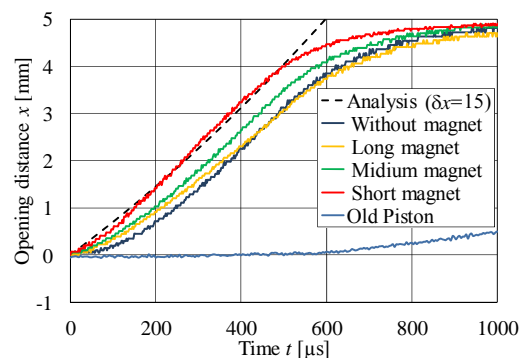


図7. 単純モデルと主ピストン測定結果

高圧部初期圧力が 0.9MPa の実験結果では、主ピストンの運動が動き始めから 4mm 程度まで単純モデルとよく一致することがわかる。内側ピストン内部の磁力が小さくても大きくても、実験結果と理論値の乖離はより顕在化する傾向があることがわかった。実験結果と解析解の不一致は、単純モデルにおいて摩擦を一切無視したことが主な原因であると考えられる。また、単一の主ピストンの結果と比較すると、分離型機構を持つ改良型主ピストンは85%程度の開口時間の短縮が達成できていることがわかった。このことから、主ピストンの開口過程は、摩擦なしの単純モデルで予測できることがわかった。さらに主ピストンの開口が、本研究で対象とする内径 2mm 以下の衝撃波管に対し、適切な速度であることが明らかにされた。ここで得られた成果により、主ピストンの運動に関してその運動を数式によって表現できた。これによって、本研究で開発した2つのピストンを有する超小型衝撃波管用の無隔膜型駆動部の設計・製作段階においてある程度の性能を予測できるため、コスト及び時間の大幅な削減を可能にした。

また、将来的な普及段階において、ここで得られた成果が大きな一助となることが期待できる。

(4) 駆動気体に900kPaのHe、試験気体に100kPaの空気を用い、図5に示す改良型衝撃波計測システムによって衝撃波管入口から管軸方向に測定位置を変えながら計測を行った。衝撃波管内計はこのとき1.7mm、2.2mm、2.7mmである。これにより、図8に示すような管軸方向に沿ったマッハ数分布の、管内径の影響を得た。

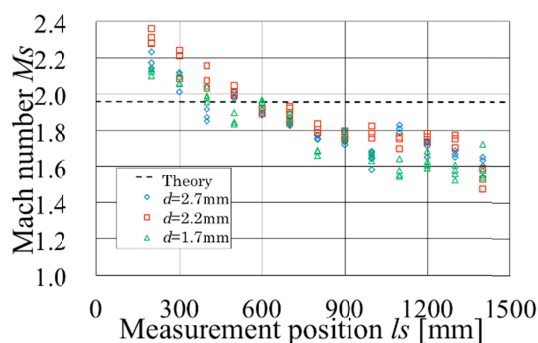


図8. 管軸方向に沿ったマッハ数分布

衝撃波の伝播は、理論的には管軸方向の距離に依存せず一定の値を示すが、実験では衝撃波が管入口から徐々に減速していく様子が得られた。また主ピストンの開口時間が従来のように長い場合、衝撃波の加速過程が観察できるが、改良した主ピストンを用いると加速過程が観察できていないことから、主ピストンの開口時間が極めて短いことがわかる。さらに衝撃波管入口付近から600mm程度まで、実験値が理論値を超えていることが観察できる。これは本研究で用いている衝撃波管が断面収縮型に近い構造をしているため、高圧部の断面積と衝撃波管の断面積の比が、衝撃波マッハ数を強める作用をしているためだと推察される。これを考慮に入れ、衝撃波減衰理論と断面収縮理論を重ね合わせたものと、衝撃波管内径が1.7mmのときの実験結果を以下の図9に示す。衝撃波管内径が1.7mm以上の場合、乱流境界層の理論値に近い結果を示し、図9の1.7mmの衝撃波管では、層流境界層の理論値に近い結果を示すことが観察された。このことから、上述の条件と同一に1.7mm以下の衝撃波管を用いて実験を行なう場合、発達する境界層は層流境界層になると予測できる。

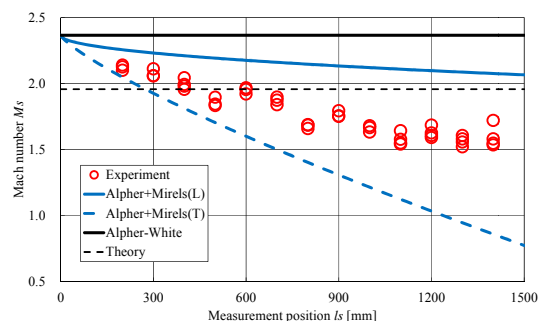


図8. 衝撃波減衰及び断面収縮理論との比較

(6) 図3に示すような矩形断面を有する衝撃波管を製作し、改良した無隔膜型駆動部と接続した。現状では管の接続部分からガスのリークが存在するため厳密な衝撃波計測には至っていないが、500μmの流路幅を持つ衝撃波管では、図5の改良型衝撃波計測システムによって衝撃波が検出できる事まで確認できた。これによって、当初の最低到達目標が達成できた。本研究で得られた成果は極めてオリジナリティが高く、現在のところ国内・国外を通じて類を見ない。同じような小直径管内の衝撃波に関して実験的研究を行っている報告も見受けられるが、圧力トランスデューサを用いた接触計測を行っているため、今後の展開に関しては、報告者が用いているレーザー作動干渉計による非接触計測が主流になると予測される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

小出輝明、真志取秀人、宇田川真介、山田裕一、産業技術高専 航空宇宙工学コースでの流体分野の実験に関する総括と改善、高専教育、査読有、第38号 (in CD-ROM, 収録ファイル名 055_論文 053)、2015、pp.306-311、

小出輝明、宇田川真介、真志取秀人、産業技術高専 航空宇宙工学コースでの流体分野の実験実習の検証、実践教育、査読有、Vol. 29, No. 1, 2014、pp. 74-79、

〔学会発表〕(計10件)

S. Udagawa, W. Garen, T. Inage, M. Ota, K. Maeno, Behavior of the Shock Wave Propagating in the Small Diameter Tube, Proceedings of the 30th International Symposium on Shock Waves, pp.423-425, Tel Aviv, Israel, July, 2015.

S. Udagawa, T. Inage, M. Ota, K. Maeno, An Experimental study on the Shock Wave in Air-filled Small Diameter Tube, Proceedings of the 30th International Symposium on Space Science and Technology, 2015-e-61, Kobe, Japan, July, 2015.

伊藤拓海、木村紘章、白井碧都、小山礼央、稲毛達朗、渡邊紘、島川陽一、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、軸対称模型周りにおける非定常衝撃波の SP-BOS 法を用いた定量密度計測、平成 27 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 2B1-2、熊本大学、2015、

森田大、稲毛達朗、山下健一郎、石塚康平、安田愁斗、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、ソレノイドを用いた列車模型射出機構の高速化および模擬実験による微気圧波計測、平成 27 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 2B1-6、熊本大学、2015、

伊藤拓海、木村紘章、白井碧都、小山礼

央、稲毛達朗、渡邊紘、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、大気中へ放出される衝撃波現象の BOS 計測に用いる画像処理の自動化、実験力学会 2015 年次講演会、講演論文集 D201、pp. 243-246、2015、

森田大、稲毛達朗、山下健一郎、石塚康平、安田悠斗、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、ソレノイドによる射出装置を用いた高速列車モデルのトンネル突入時の高速化、実験力学会 2015 年次講演会、講演論文集 B206、pp. 192-195、2015、（優秀講演賞受賞）

宇田川真介、齊藤修平、四方茂人、中島遼、高岡大輔、稲毛達朗、太田匡則、前野一夫、小直径管内を伝播する空気駆動による衝撃波の挙動について、平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (in USB)、No. 2C1-1、伊香保温泉 ホテル天坊、2015、

四方茂人、高岡大輔、齊藤修平、中島遼、稲毛達朗、宇田川真介、衝撃波管端から放出される燃焼ガスの全圧計測、平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (in USB)、No. P-05、伊香保温泉 ホテル天坊、2015、

森田大、稲毛達朗、山下健一郎、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、ソレノイドによる射出装置を用いた高速列車トンネル突入時に発生する微気圧波伝播過程の計測、平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (in USB)、No. P-11、伊香保温泉 ホテル天坊、2015、

伊藤拓海、稲毛達朗、渡邊紘、山崎渉、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、衝撃波を含む非定常超音速流れ場の三次元密度計測に用いる CT 再構成計算の高速化、平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (in USB)、No. P-20、伊香保温泉 ホテル天坊、2015、

6 . 研究組織

(1)研究代表者

宇田川 真介 (UDAGAWA, Shinsuke)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづく

り工学科・准教授

研究者番号：4 0 4 6 9 5 8 1