

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760141

研究課題名(和文) PDV法を用いた衝撃波/境界層干渉流れの速度計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of planar doppler velocimetry system of shock-wave/boundary layer interaction

研究代表者

小野 大輔 (Ono, Daisuke)

北九州市立大学・国際環境工学部・講師

研究者番号：20549894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、PDV(Planar Doppler Velocimetry)法を用いた衝撃波/境界層干渉流れの速度計測システムを提案し、一定断面積矩形ダクト内の衝撃波/境界層干渉流れの速度計測に適用することでその有用性について検証した。実験では、衝撃波部分における急激な速度変化やその下流の再加速領域をうまく捉えることができた。さらに、実験により得られた速度分布は数値シミュレーション結果と定量的に良い一致を示し、本計測システムが衝撃波/境界層干渉流れの速度計測に有効であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In the present work, the velocimetry system of a shock-wave/boundary-layer interaction using PDV (Planar Doppler Velocimetry) method is suggested and the effectiveness of the measurement system is verified by applying to measure the velocity field of a shock-wave/boundary-layer interaction in a constant area duct. In the experimental result, a velocity jump at a normal shock wave and a reacceleration region can be captured well. Additionally, the measured velocity distribution agrees quantitatively with the computed one and it is found that the present system is useful for the velocity measurement of a shock-wave/boundary-layer interaction.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：PDV法 流速計測 衝撃波/境界層干渉流れ

1. 研究開始当初の背景

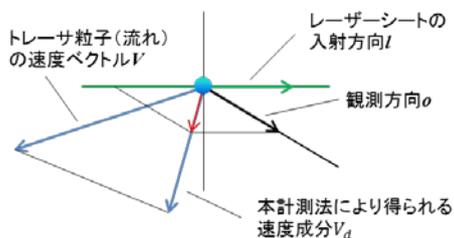
衝撃波／境界層干渉流れは、超音速インテーク、エジェクタ、ノズルやディフューザなど様々な流体機器において見られ、機器の性能に大きな影響を及ぼすことが知られている。したがって、従来からその流動構造に関する研究が数多く行われてきた。例えば、超音速インテーク内の衝撃波／境界層干渉流れ（遷音速ディフューザ流れ）では、衝撃波により三次元的な縦渦が誘起されることが数値解析により明らかにされている。しかしながら、こうした流れ場に適した速度（ベクトル）計測技術がないため、実験的な裏付けは得られていない。その他の衝撃波／境界層干渉流れにおいても、様々な手法で流動構造の解明が試みられているものの、衝撃波近傍の速度計測は行われていないのが現状である。したがって、こうした流れ場に適した速度計測技術の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

高速流れの速度計測法として粒子画像追跡法（PIV法）やレーザードップラー流速計（LDV法）が広く普及しているが、こうした手法を衝撃波／境界層干渉流れに適用すると、衝撃波により生じる急激な速度変化にトレーサ粒子が追従せず、衝撃波近傍の速度計測が困難となる。こうした問題点に対して、本研究では、PDV法（Planar Doppler Velocimetry）を用いた速度計測システムを提案する。PDV法による速度計測システムの開発を行い、一定断面積矩形ダクト内の衝撃波／境界層干渉流れの速度計測に適用する。さらに、数値解析と比較することにより計測結果の定量性を検証し、衝撃波／境界層干渉流れの速度計測技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)PDV法 PDV法は、流れ場に混入させたトレーサ粒子にレーザー光を照射し、その散乱光の周波数変化量（ドップラーシフト量）から流れの速度を計測する手法である。図1に示すように、計測したドップラーシフト



$$\Delta v = v_0 \frac{(o-l) \cdot V}{c} = v_0 \frac{V_d}{c}$$

Δv :ドップラーシフト量 v_0 :レーザの周波数
 c :光速

図1 ドップラーシフト量と速度ベクトルの関係

ト量から、レーザの入射方向 l と観測位置 o で決まる方向 $(o-l)$ の速度成分を得ることができる。速度計測の基本的な原理は、LDV法と同じであるが、PDV法ではドップラーシフト量の計測にヨウ素セル（ヨウ素の吸収特性曲線）を用いる点に大きな特徴がある。図2に示すようにトレーサ粒子からの散乱光をヨウ素セルを通して観測することで、微小なドップラーシフトを散乱強度の違いとして CCD などの撮像素子で計測できるため、速度の面的可視化が可能となる。また、散乱強度を計測すればよいためトレーサ粒子の粒径を PIV 法よりも小さくでき、衝撃波を通過する際の粒子の追従性を大幅に改善することが可能である。

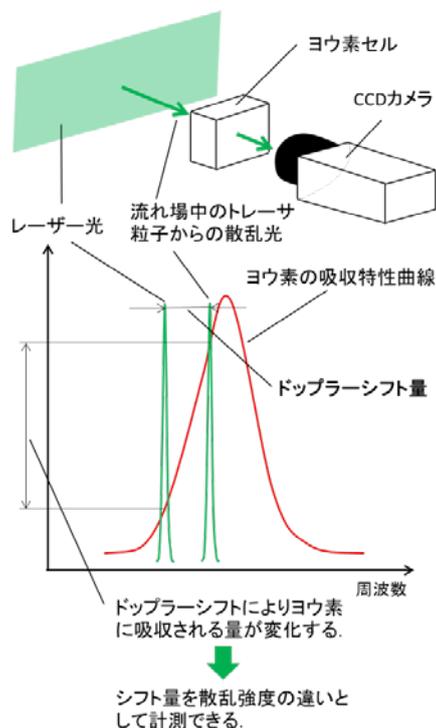


図2 ドップラーシフトの計測方法

(2)測定部 測定部の奥行き幅は 20mm で、スロート高さ 8.5mm、設計マッハ数 1.5 のラバルノズルに長さ 34.35mm、高さ 10mm の断面積一定の矩形ダクトを接続したものを用いた。また、測定部側壁には $\phi 1$ の静圧孔が流れ方向に 13mm 間隔で開けられており、半導体型圧カトランスデューサ（Kulite, XCS-062-25SG）を用いて静圧測定を行った。

(3)速度計測システム インジェクションシター（NP Photonics, SI-2000）により狭帯域化された Nd-YAG レーザ（Continuum, SLI-10）から発振したレーザビームを測定部に上流から下流方向に向かって入射させる。図3に示すように、トレーサ粒子からの散乱光はレンズ L1 によって集光され、ビームスプリッター BS1 によりヨウ素セル IC を通過する光路としない光路に分割される。分割された光路は、ビームスプリッター BS2

で再び重ね合わされるが、ミラーM1の位置を調整し光軸をずらすことにより、1台のCCDカメラ(BITRAN, BU-50LN)上にヨウ素セルを通過した場合としない場合の散乱光を記録することができる。これら散乱光の強度の比からヨウ素セルにおける吸収率を算出し、あらかじめ計測しておいたヨウ素の吸収曲線からドップラーシフト量を求め流速を得る。本研究では、こうした解析はLabVIEWを用いて行った。

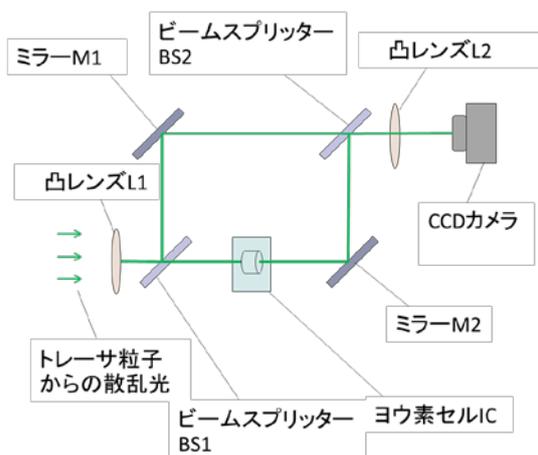


図3 速度計測システム

(4) ヨウ素セル PDV法では、ヨウ素セルの本体とコールドフィンガー部の温度を個々に制御する必要がある。ヨウ素セル本体はニクロム線を用いたジュール加熱により設定温度に対して $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度で温度制御した。コールドフィンガー部には固体のヨウ素が封入されており、その温度はセル内のヨウ素の飽和蒸気圧(吸収線の形状)に大きく影響する。したがって、本研究では、小型恒温槽を用いて設定温度に対して $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で精密な温度制御を行った。

(5) 数値シミュレーション 計測結果の妥当性を評価するため、2次元圧縮性ナビエ-ストークス方程式を支配方程式とした数値シミュレーションを行った。乱流モデルには $k-\omega$ SSTモデルを用いた。対流項の離散化ではセル界面の数値流束をRoeのFlux Difference Splittingで求めるが、その際に計算セル界面の左右の物理量を流束制限関数にvan Albada limiterを用い、MUSCL法により計算した。上記の手法を用いることでスキームはTVD化され、対流項は空間3次精度で評価される。また、粘性項の評価には空間2次精度の中心差分法を、時間積分には時間2次精度の3段階ルンゲ-クッタ法を用いた。

4. 研究成果

(1) ヨウ素の吸収線 ヨウ素の吸収線計測では、散乱光の検出には2個のフォトダイオードを用い、製作したヨウ素セルを通過したものとそうでないもの同時に計測し、ヨウ素

の吸収率を算出した。本実験に用いたレーザーの波長可変範囲において、線幅が約1.2GHzの2本の吸収線が観測され、これらのピークが1110, 1111に相当することが他の文献との比較から明らかになった。速度計測には吸収線1110を用いた。さらに吸収線の計測は日をまたいで繰り返し行い、吸収線形状が外気の温度等の実験条件に左右されないことを確認した。

(2) 数値シミュレーション

壁面静圧の測定結果から衝撃波直前マッハ数が1.45であることが明らかになり、設計マッハ数1.5とほぼ等しいことを確認した。さらに、数値シミュレーションにより得られた壁面静圧分布は、実験結果と良い一致を示し、本数値シミュレーションが流れ場をうまく再現できていることを確認した。

(3) 速度計測

トレーサ粒子として凝縮した水蒸気の微粒子、線香の煙(平均粒径 $1\mu\text{m}$ 以下)を用いて一定断面積矩形ダクト内における衝撃波/境界層干渉流れの速度計測を行った。流れ場への影響を避けるため相対湿度30~40%で実験を行ったが、水蒸気の凝縮粒子では散乱光強度が小さく、速度分布を得ることができなかった。いっぽう、線香の煙では、十分な散乱光強度を得ることができ、垂直衝撃波部分における速度の急激な変化やその下流の再加速領域をうまく捉えることができた。さらに、実験で得られた速度分布は、壁面におけるレーザー光の反射やトレーサ粒子の散布ムラなどの影響によりやや実験値にばらつきがあるものの、上述の数値シミュレーション結果と概ね良い一致を示し、本計測システムが衝撃波を伴う流れ場の速度計測に有効であることが分かった。

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)

①Taishi Oka, Daisuke Ono, Yoshiaki Miyazato
Study of Shock Trains and Pseudo-Shock Waves in Constant Area Ducts
AIAA paper, 2014-0949, 2014, pp.1-8.

URL:

<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2014-0949>

(査読あり)

②Daisuke Ono, Taro Handa, Mitsuharu Masuda
Three-Dimensional Normal Shock Wave /Boundary-Layer Interaction in a Diffuser,
Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME, Vol.135, No.4, 2013, pp.1-8.

doi:10.1115/1.4023657

(査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

①日高 陽平, 大田 卓弥, 大山 祐哉, 大池 亜斗夢, 小野 大輔, 宮里 義昭
干渉計を用いた遷音速ディフューザ流れの
非定常密度場の可視化
可視化情報, Vol.33, Suppl.No.2, pp.173-174,
2013.9, 会津大学.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

研究室ホームページ

<http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/~ono12/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 大輔 (ONO, Daisuke)

北九州市立大学・国際環境工学部・講師

研究者番号：20549894