

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560198

研究課題名(和文) ダイオード励起固体レーザを用いたドップラークローバル流速計の開発

研究課題名(英文) Development of Doppler Global Velocimetry using a DPSS laser

研究代表者

坂口 大作 (SAKAGUCHI, Daisaku)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70244035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーザシート2次元平面内で速度三方向成分を計測することができるドップラークローバル流速計(DGV：Doppler Global Velocimetry)を開発した。光源としてダイオード励起固体(DPSS:Diode-Pump Solid State)レーザを用い、従来複雑であった光学システムを簡素化した。開発したシステムは、微弱なドップラ信号をヨウ素の吸収特性曲線を伝達関数とすることで散乱光強度比として捉え、レーザシート面内を突き抜ける粒子の速度を検出するものであり、DPSSレーザおよびヨウ素セルを用いた光学システムを構築し、回転円盤による速度計測精度の検定を行った。

研究成果の概要(英文)：DGV (Doppler Global Velocimetry) with a DPSS (Diode-Pump Solid State) laser is successfully developed in this research. DGV is a system to measure velocity of particles crossing a laser sheet, by analyzing the scattered doppler shifted frequency of a light sheet. The light frequency shift is very weak because of the very low speed of the particles compared to the speed of light. In order to overcome this problem, an absorption line of the molecular iodine was used. The frequency shift as a function of the absorption line of the iodine cell can be traced back to particle velocity. The optical setup with the DPSS laser and the iodine cell was developed in this research and measurement accuracy of the velocity field from the rotating disc was confirmed. It is found that the DPSS laser is suitable laser source for DGV system because of its high stability and narrow line width, as a result, high measurement accuracy is obtained by this system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：レーザー ドップラー効果 流体計測

1. 研究開始当初の背景

ターボ機械には高効率化および運転流量範囲拡大が求められ、特に送風機や圧縮機などの減速流れ場では、低流量域で逆流を生じ、逆流域の発生を高精度に予測し制御することが運転範囲の拡大につながる。ターボ機械における逆流は3次元剥離となる場合が多く、詳細な流れ計測による理解が必要である。流体の速度を画像計測により計測するPIV(Particle Image Velocimeter)は、レーザの低価格化およびカメラの高性能化に伴い、一般的な計測手法として広まった。PIVによるレーザシート面内の速度分布は、数値解析結果と比較しやすく、大規模剥離渦挙動を計測できる3次元PIVシステムの確立が求められている。3次元PIVシステムとしては、2台のカメラを複眼として用いたもの、レーザシート光をスキャンするもの等が提案されているが、どの方法も2次元PIVシステムの拡張であり、システムが複雑かつ取扱いが難しく、ターボ機械の内部流れに適用することは難しい。

2. 研究の目的

本研究では、レーザシート面内で速度三方向成分を計測することを念頭に開発されたドップラークローバル流速計(DGV: Doppler Global Velocimetry)に着目する。DGVは、2000年初頭にNASA, DLR, ONERAおよびVKIなどを中心に開発が進められた計測手法である。光源としてガスレーザを用いた場合、狭線幅でかつ周波数が安定したレーザ光を得るために、高価かつ複雑なシステムが必要となり普及には至らなかった。

そこで本研究では、光源としてダイオード励起固体(DPSS:Diode-Pump Solid State)レーザに着目し、従来複雑であった光学システムを簡素化することを狙った。微弱なドップラ信号をヨウ素の吸収特性曲線を伝達関数とすることで散乱光強度比として捉え、レーザシート面内を突き抜ける粒子の速度を検出する。DPSSレーザおよびヨウ素セルを用いた光学システムを構築し、光源の波長安定性およびヨウ素の吸収特性曲線を示すとともに、回転円盤による速度計測精度の検定を行った。

3. 研究の方法

(1) 計測原理

DGVは流体中に混入した散乱粒子からの散乱光を検出する。光速、中心周波数のレーザ光に対して、散乱粒子はその速度の分だけドップラースhiftを生じる。Fig.1に示すように、ドップラースhiftは散乱粒子の速度、レーザ光源の入射方向および受光センサ(観測者)の位置によって変化する。また、Fig.2に示すように、レーザ光源を分割し3方向から入射することで、2次元平面内に速度3方向成分(2D3C)を得ることができる。

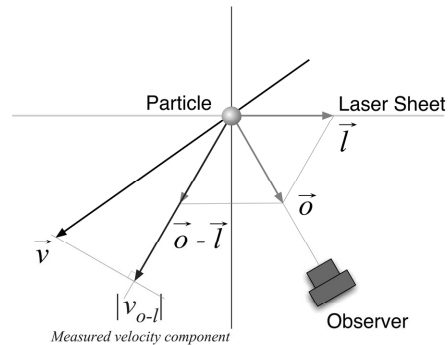


Fig.1 Determination of measured velocity component direction

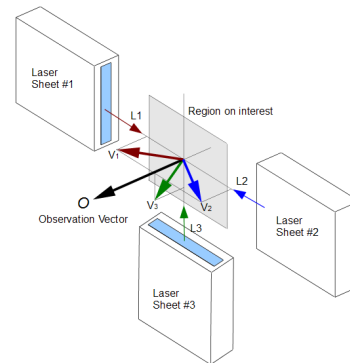


Fig.2 DGV system for 2 dimensional 3 components of velocity (2D3C)

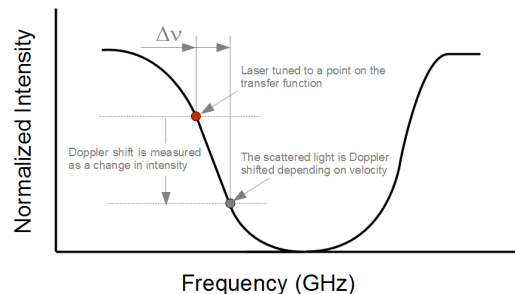


Fig.3 Absorption curve of molecular iodine as a transfer function

(2) ヨウ素セルの吸収特性曲線

光の速度に対して、散乱粒子の速度は著しく低いので、このドップラースhift量は微弱であり、Fig.3に示すようなヨウ素の吸収特性曲線を利用する。ヨウ素を充填・蒸発させたガラス容器(ヨウ素セル)に散乱光を通過させることで、僅かな周波数変化を大きな散乱光強度の変化となつて得ることができるようになる。ヨウ素の吸収特性曲線を伝達関数として利用するためには、レーザの線幅が狭く、波長安定性が高いことが必要とされる。一般にAr+レーザなどのガスレーザは、3.5GHz程度の線幅があり数十のモードが含まれている。エタロンなどの第2キャビティを用いて1つのモード(線幅約20MHz)を取り出すことができるが、モードホップと呼ばれる現象を生じてしまい、波長を安定化させることが非常に難しい。本研究で使用する中心波長532.32nm、光出力100mWのDPSSレーザ(Oxxius社製SLIM532)は、光学素子に

ペルチェ素子を用いた温度補償を設け、単一結晶共振器を同一パッケージに収めることで線幅 1MHz のレーザ光を安定発振できるという特徴を持つ。本研究では DPSS レーザの中心波長を Fig.3 に示すヨウ素吸収特性曲線の間中位置となるよう波長チューニングされたものを使用した。

4. 研究成果

(1) 検定用光学システム

ヨウ素の吸収特性曲線を検定するために、Fig.4 に示す光学系を構成した。レーザの発振周波数を僅かに変化させるために、超音波光変調器 (AOM : Acoustic Optical Modulator)を用いた。AOM は周波数可変のブラッグセルであり、ピエゾ印加電圧を変化させることで、回折光の周波数シフトを行うことができる。本研究では、270MHz ~ 430MHz の範囲で波長掃引を行った。AOM からの回折光は 50%ビームスプリッタにより分けられ、一方は参照用光出力 I_0 として、もう一方はヨウ素セルを通過した吸収光 I としてパワーメータにより計測される。ヨウ素セルは直径 40mm の円筒ガラスにヨウ素を封入して製作し、円筒ガラス外周には電熱線ヒータを取り付け、さらにヒータ外周にはテフロン製断熱部を設けている。電熱線ヒータは温度コントローラにより 80 ~ 110 の範囲で変化させ、ヨウ素の昇華を制御できるようにした。

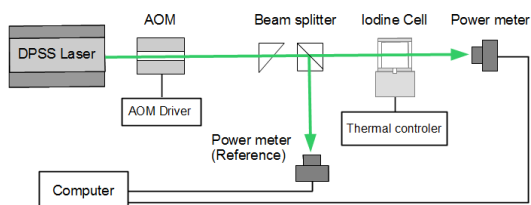


Fig.4 Optical setup for calibration of an iodine cell

(2) 吸収特性曲線および波長安定性

Fig.5 に実験によって得られたヨウ素吸収特性曲線を示す。横軸に AOM によって変化したレーザの相対周波数をとり、縦軸にヨウ素セルを通過した吸収光を参照光で無次元化した吸光度比を示している。パラメータはヨウ素セル温度であり、80 の場合および 100 の場合について示す。どちらの場合もレーザの相対周波数に対する吸光度比は強い直線関係を示し、粒子速度に換算して 0 ~ 60m/s の速度範囲で強い線形性を示した。また、ヨウ素セルの温度が 100 の場合、相関係数がより高く、吸光度比が小さな値を示している。すなわち、ヨウ素セルの温度を十分に上げることで、セル内のヨウ素が飽和蒸気圧まで昇華し、レーザ光の吸収が大きくなっていることを示している。実験では 100 以上ではほぼ同一の吸光度比となることを確認している。

Fig.6 はレーザの発振周波数を一定とし約 20 秒間に亘って計測された吸光度比の時間

履歴である。上段が DPSS レーザの場合、下段はエタロンを用いてモノモード発振を行った Ar+レーザの場合を示す。DPSS レーザは標準偏差が $0.338e-3$ と非常に小さな値を示しレーザの発振周波数が安定していることを示している。粒子速度へ換算した場合の計測誤差は 0.064m/s となり、Ar+レーザの場合と比較して約 1/20 にノイズが低減されている。本検証により得られた伝達関数および波長安定性の結果から、DPSS レーザが DGV 光源として非常に適していることが確認された。

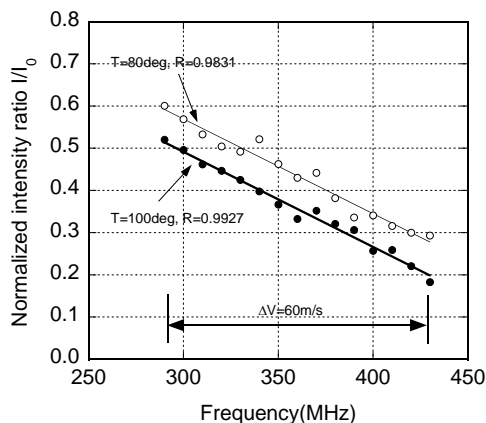


Fig.5 Calibration of a transmission curve of the iodine cell

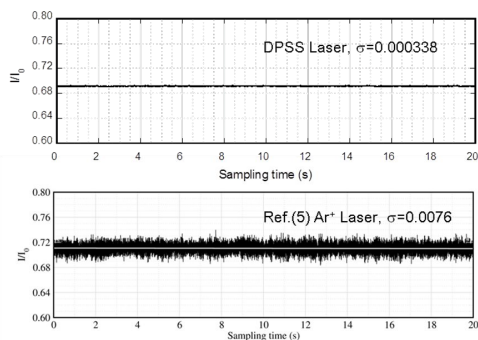


Fig.6 Frequency stability of the DPSS-DGV system (Iodine cell temp. T=100 °C)

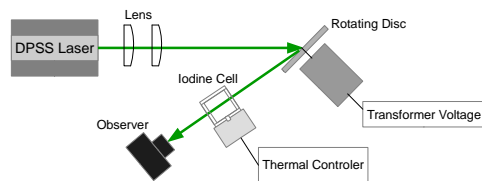


Fig.7 Experimental set-up for the measurement of the surface speed of rotating disc

(3) 回転円盤による速度計測精度の検定

Fig.7 に回転円盤による速度 1 方向成分の計測システムのレイアウトを示す。シリンドリカルレンズによりシート状に伸ばされたレーザ光を円盤の半径方向に照射し、円盤からの散乱光を CMOS カメラで計測した。円盤

最大回転数 10 万 rpm のモータを用い、変圧器により回転数を制御し一定回転数で回転させた CMOS カメラとして有効画素数は 2416 万画素のレンズ交換式一眼レフレックスタイプデジタルカメラを用いた。計測の際、ノイズを低減させるためにシャッタースピードおよび ISO 感度の調整を行い、ヨウ素セルの温度は 100 に設定した。

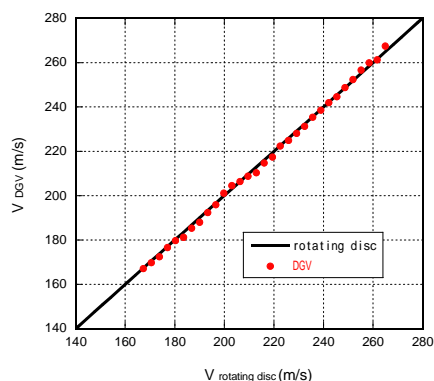


Fig.8 Correlation between DGV measurements result and velocity of rotating disc surface

Fig.8 は DGV の計測結果および回転円盤の周速度の相関を示す。縦軸は、ヨウ素セルを通して得られた回転円盤表面での散乱光強度を Fig.5 の伝達関数を用いて速度に換算し、横軸は回転円盤の回転数より算出された半径方向の周速度分布である。両者の速度は良好な一致を示し、約 170~260m/s の範囲で標準偏差は 1.069m/s であり、高い精度で計測することができた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

坂口大作, 谷尾優樹, 壽智史, 村上京士郎, 半導体励起固体レーザを用いたドップラグローバル流速計システムの構築, 日本機械学会九州支部第 70 期総会・講演論文集, 査読無, Paper No.131, pp.1-2 (2014)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 大作 (SAKAGUCHI, Daisaku)
長崎大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 7 0 2 4 4 0 3 5