

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760317

研究課題名(和文)プローブ内の移動機構を不要とする高信頼走査型レーザドップラー速度計の開発

研究課題名(英文)Development of reliable scanning laser Doppler velocimeter without moving mechanism in its probe

研究代表者

丸 浩一 (MARU, Koichi)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：00530164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高信頼かつ小型で扱いやすいプローブをもつ速度分布計測装置の実現を目的として、プローブ内に移動機構を用いなくても測定点を走査できるレーザドップラー速度計の技術開発をおこなった。その成果として、走査型レーザドップラー速度計の速度方向識別方法および2軸走査方法を開発し、適用範囲の拡大が可能となった。また、空間光学系を用いた小型プローブの開発、および、集積化に向けた基礎検討を実施し、扱いやすい実用的な走査型レーザドップラー速度計の実現のための足掛かりを得た。

研究成果の概要(英文)：We studied a method for scanning laser Doppler velocimetry that doesn't require any moving mechanism in its probe to realize the equipment with a compact, reliable, and easily-handled probe for velocity distribution measurement. We developed techniques for directional discrimination and two-axis scanning. These techniques make it possible to apply the proposed velocimetry to various objects. In addition, we developed several types of miniaturized probes using free-space optics. We also investigated waveguide-type components for integration of the scanning laser Doppler velocimeter. As the results of the study, we have achieved the prospect of realizing an easily-handled scanning laser Doppler velocimeter for practical use.

研究分野：光計測工学

キーワード：計測工学 計測機器 速度計測 レーザドップラー速度計

1. 研究開始当初の背景

差動型レーザドップラー速度計 (Laser Doppler velocimeter; LDV) は、非接触、高空間分解能かつ高精度な速度計測方法として広く用いられている。その中でも、測定点を走査可能な LDV は、流路内などの速度分布を非侵襲かつ高精度に計測する方法として産業分野や医療分野に必須の技術である。しかし、これまでの走査型 LDV には小型化及び信頼性に関する重大な課題があった。さまざまな測定対象に対して汎用的に使えるようにするためには、小型のプローブを備えた扱いやすい装置が望ましいが、従来の殆どの走査型 LDV は空間光学系で構成された大型のものであり、ハンドリングしづらいものであった。また、従来の走査型 LDV では、入射光学系に機械的な移動機構を設けることが必須であった。したがって、従来の走査方法のままプローブを設けたとしても、プローブ内に移動機構が不可欠となるため、機械的衝撃に弱い、定期的なメンテナンスが必要、小型化に不向き、といった問題があった。

これらの問題を解決する手段として、研究代表者は、プローブ内に移動機構を設けなくても測定点を走査できる新方式の走査型 LDV を提案した[1,2]。本 LDV は、プローブに入力する光の波長を変化させることで測定点を走査するという新しいコンセプト (図 1) に基づく。そのための方法として、回折格子と波長可変レーザを用い、回折格子を備えたプローブと波長可変レーザを備えた本体を分離し、光ファイバや電気ケーブルで接続する。本方式では回折格子への入射光の波長を変化させることでビームを走査するため、プローブ内に移動機構が不要となる。たとえ波長可変レーザの内部に移動機構が必要であったとしても、波長可変レーザをプローブに収める必要が無い。このため、プローブ構造を単純化でき、プローブの小型化や高信頼化が可能となる。これまでに研究代表者は、プローブを模擬した光学系を構築し、提案方式により深さ方向[1]および横方向[2]に測定点を走査できることを実証してきた。

しかし、これまでの移動機構不要な走査型 LDV に関する研究は、定盤上に構築した光学系を用いた原理検討の段階であり、実際に小型プローブを作るまでには至っていなかった。また、一定方向の速度の「大きさ」は測定できるが、速度の「方向」が識別できないものであった。これまでのものも、流れの方向が決まっている流体の速度分布計測には十分利用できるが、例えば拍動による流速方向の変化や乱流での速度ベクトルを捉えたい場合には問題があった。さらに、1 台のプローブで走査できる方向が、深さ方向あるいは横方向のどちらかに限られていた。例えば流路断面内の速度分布の対称性に関する知見を得たいような場合には、1 台のプローブで深さ方向と横方向の両方向を走査できるように高機能化することが望ましい。

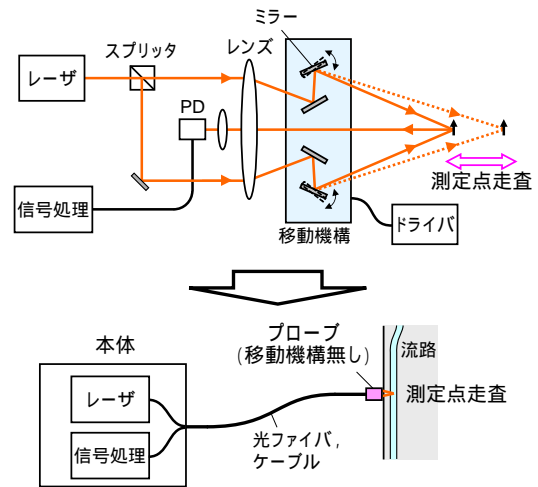


図 1 本研究のコンセプト

2. 研究の目的

本研究は、高信頼かつ小型で扱いやすい速度分布計測手法の確立を目的として、移動機構をプローブ内に用いなくても測定点を走査できる LDV を実用化するための技術開発を推進し、従来の走査型 LDV での問題点を解決した実用的な走査型 LDV の実現を目指したものである。具体的には、以下の研究課題を検討する。

- (1) 速度方向識別化：流れの方向が変化する測定対象への適用を目的として、1 次元および 2 次元速度ベクトル識別方法を開発する。移動機構を用いた走査型 LDV における速度ベクトル識別の試みは既になされているが [3]、本研究では移動機構を不要とした走査型 LDV に速度ベクトル識別性能を付与するという新たな試みを行う。
- (2) 2 軸走査型 LDV の開発：提案する走査方式の高機能化を目的として、プローブ内に移動機構が不要であるという特長を保持したまま 1 台のプローブで深さ方向と横方向の両方向を走査できる「2 軸走査方法」を開発する。
- (3) ミニチュアプローブ開発：定盤上に構築した光学系による原理検討の段階を一步進め、実際に小型筐体化したミニチュアプローブを開発する。
- (4) 集積化走査型 LDV の基礎検討：将来的な超小型化への展開を模索するための基礎研究として、光導波路を用いた集積化走査型 LDV の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 速度方向識別化

1 次元速度方向識別方法を開発する。周波数シフトを用いたヘテロダイン方式による 1 次元速度方向識別方法の実験用光学系を構築する。周波数シフトは本体に備え、偏波保持光ファイバ (Polarization-maintaining fiber; PMF) でプローブに接続することで、プローブ内に周波数シフトが不要となり、小

型・高信頼なプローブという本研究の提案手法における特長を保持できる．回転体ターゲットを測定対象とし，方向識別性能や測定精度を調べる．

また，2次元速度ベクトル識別方法を開発する．2次元速度ベクトル識別のための方式を提案するとともに，実験用光学系を構築し，性能評価を行う．

### (2) 2軸走査型 LDV の開発

1台のプローブで深さ方向と横方向の両方を走査できる2軸走査方法を開発する．これまで別々に実現してきた深さ方向走査用と横方向走査用の光学系を組み合わせ，入力光の偏波方向を切り替えることで光路を切り替えるというアイデアを追加する．このための2軸走査用光学系を構築し，性能を検証する．

また，1次元速度方向識別方法を2軸走査方法に応用し，ヘテロダイン方式による2軸走査型 LDV の速度方向識別化を行う．

さらに，2次元的速度分布計測を可能とする走査方法の開発を試みる．

### (3) ミニチュアプローブ開発

深さ方向走査用ミニチュアプローブの製作を行う．実装作業台を構築して光学部品を実装し，問題点を抽出する．また，より高機能な小型プローブの開発を行う．

### (4) 集積化走査型 LDV の基礎検討

将来的な超小型化への展開を模索するための基礎研究として，光導波路を用いた集積化走査型 LDV の設計と特性シミュレーションを行う．特に，光導波路を用いた集積化 LDV に必要となる導波路-空間結合系を設計し，測定点近傍の電界分布のシミュレーションを通じて速度計測性能などを見積もる．

## 4. 研究成果

### (1) 速度方向識別化

流れの方向が変化する測定対象への適用を目的として，まず，光ヘテロダイン方式を取り入れた1次元速度方向識別方法を開発した．図2(a)に本走査型 LDV の構成を示す．波長可変レーザからの光を偏波ビームスプリッタ (Polarization beam splitter; PBS) で分岐し，2本の PMF を経由してプローブに入力した．このとき，一方の光を音響光学変調器 (Acousto-optic modulator; AOM) により周波数シフトし，干渉光の周波数にバイアスをかけることで速度方向を識別した．AOM は本体に備えることで，小型・高信頼なプローブという特長を保持できる．

本方法の原理実証のため，図2(b)に示すプローブを模擬した光学系を用いて実験をおこなった．2台の AOM を用いることで，プローブに入力する一方の光の周波数を 500 kHz シフトした．ビート信号の振幅が最大となるように回転ターゲットの位置を調整し，

波長に対する測定点の位置を測定した結果，波長変化により光軸方向に測定位置を走査できることを確認した．また，回転速度の変化にしたがって，スペクトルピークでのビート周波数が 500 kHz を中心にシフトし，回転方向によってシフト方向が反転した．このことから，本構成を用いることで速度方向識別可能であることが確認できた．

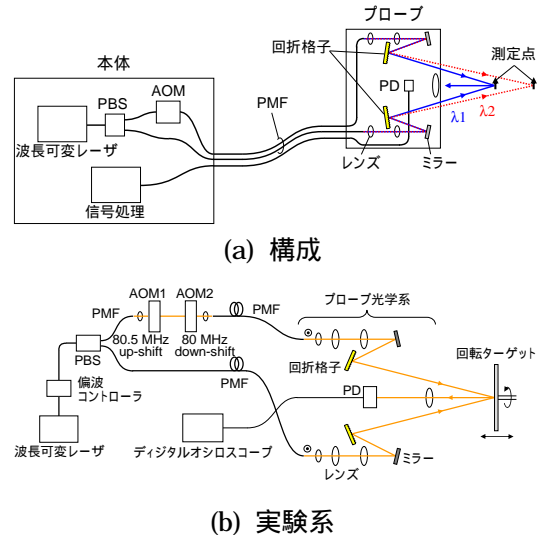


図2 速度方向識別化した走査型 LDV

次に，2方向から光を検知し，直交検波を用いることにより2次元速度ベクトルを識別する方法を開発した．レーザからの出射光をコリメータで集光し，PBSにより平行偏波と垂直偏波に分離した．平行偏波を測定対象に照射し，測定対象からの散乱光を2方向からそれぞれ2枚のレンズを用いて受光した．垂直偏波を参照光として各方向の受光系に入力した．ビームスプリッタ，1/4波長板，偏光子を組み合わせた直交検波をおこなう構成を各方向の受光系に配置した．1/4波長板を用いることで，ふたつのフォトダイオード (PD) に入射する参照光の位相に 90度の差異を与え，各 PD で受光した参照光と測定対象からの信号光のビート信号における位相ずれから速度方向を識別した．また，ビート信号の周波数から2次元速度ベクトルの速度成分の大きさを算出した．実験用光学系を構築し，回転ターゲットを測定対象として測定を実施した結果，2次元速度ベクトルが計測可能であることを確認した．

### (2) 2軸走査型 LDV の開発

本研究課題では，まず，1台のプローブで深さ方向と横方向の両方を走査できる2軸走査方法を開発した．検討した光学系を図3に示す．深さ方向走査用光学系と，ダブリズムを用いた横方向走査用光学系をプローブ内で組み合わせる構成とした．ここで，プローブ内に PBS を設置し，入力光の偏波方向を切り替えることで光路を切り替えた．実験用光学系を構築し，回転ターゲットを用いた実験を行った結果，偏波方向の切り替えによ



り、走査方向を深さ方向と横方向に切り替えることができることを確認した。

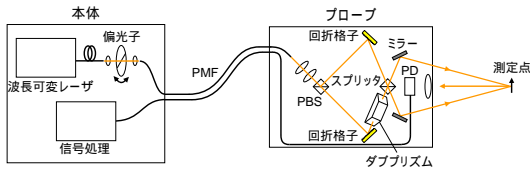


図3 2軸走査型LDV

次に、AOMを用いた速度方向識別方法を適用することで速度方向識別化した2軸走査型LDVを開発した。2軸走査型LDVへのAOMの適用に向けて、まず、本体とプローブ間の伝送路を1本とした深さ方向走査型LDVを開発した。波長可変レーザーからの光をPBSで分岐し、2台のAOMで周波数シフトした後、PMFに各周波数シフト光を偏波方向が直交するように入射し、プローブに導入した。プローブ内では、PBSを用いて再び偏波を分離した。実験の結果、測定点走査と速度方向識別が同時に可能であることを確認した。そこで次に、2本のPMFで本体とプローブを接続し、使用する光ファイバを本体側で切り替えることで走査方向を切り替える2軸走査型LDVの実験系を構築した。回転ターゲットを用いた実験の結果、深さ方向と横方向の走査が可能となり、さらに、速度方向識別が可能であることを確認した。

続いて、深さ方向と横方向の2次元的速度分布計測を可能とする走査型LDVを開発した。検討したLDVの構成を図4に示す。波長可変レーザーからの光波をビームスプリッタによって分岐し、6チャンネルのビームアレイをふたつ生成した。ふたつのPMFアレイを経由してプローブに導入したビームアレイを測定位置に入射し、横方向に整列した複数の測定点を形成した。ここで、本体側にLiNbO<sub>3</sub>位相シフタアレイを備え、一方のビームアレイをゼロダイン変調し、各ビームを互いに異なる周波数だけシフトさせることで、横方向測定位置を識別した。また、回折格子を用い、波長を変化させて回折格子での回折角を変化することで、各測定点を深さ方向に非メカニカルに走査した。原理検証の結果、2次元的速度分布の計測が可能であることを確認した。

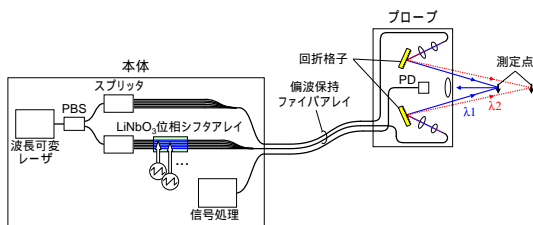


図4 2次元速度分布計測用LDV

さらに、2次元速度分布計測を可能とする走査型LDVについて、測定点数の増加方法の検討を実施した。本LDVでは、周波数シフトのバリエーションを増やすことで、位相

シフタおよび位相シフタを駆動するための信号発生器のリソース増加を伴うことなく測定点数を増加する方法を検討した。まず、位相シフタを直列に接続する方法を検討した。原理検証実験の結果、4種類の周波数のみで測定点を8個に増加可能となり、信号発生器数のリソース低減が可能となった。続いて、一方のビームアレイのみでなく、もう一方のビームアレイを構成する一部のビームも周波数シフトすることによりプッシュプル動作させる方法を検討した。原理検証実験の結果、9個の位相シフタで測定点を16個に増加可能となり、信号発生器だけでなく位相シフタのリソースを抑えながら測定点数の増加が可能となった。

### (3) ミニチュアプローブ開発

本研究課題では、まず、深さ方向走査用ミニチュアプローブの開発を行った。市販の小型回折格子、ミラー、レンズを用いた場合の走査型ミニチュアプローブの設計を行った。入射光学系に小型レンズを利用し、レンズの組み合わせを最適化することで、フットプリント寸法6cm×6cmと小型化したプローブの実装を行った。本プローブを用いて回転ターゲットを用いた実験を行った結果、測定点走査可能であることを確認した。また、小型化しないタイプと同様の速度計測性能が得られることを確認した。

次に、高機能な小型プローブ開発として、(2)で検討した2次元的速度分布計測を可能とする走査型LDVの小型プローブを開発した。小型レンズを用いた光学系を設計し、フットプリント寸法8cm×8cmとしたプローブの実装を行った。本プローブの光学系写真を図5に示す。実験の結果、本プローブを用いることで2次元的速度分布計測が可能であることを実証した。

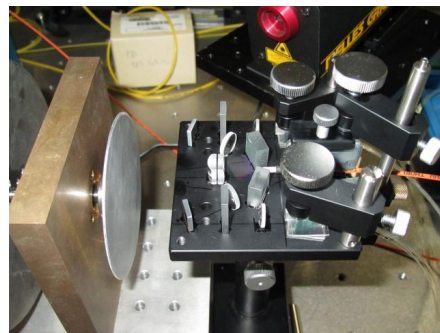


図5 2次元速度分布計測用走査型LDV小型プローブの光学系写真

### (4) 集積化走査型LDVの基礎検討

本研究課題では、光導波路を用いた集積化LDVに必要な導波路-空間結合系の原理検討をシミュレーションにより実施した。まず、導波路-空間結合系の設計として、スラブ導波路レンズとシリンダレンズを組み合わせた構造を提案し、本構造からの出射光のシミュレーションを行った。シミュレーションには、2次元および3次元ビーム伝搬法

(Beam propagation method; BPM) を用いた。スラブ導波路レンズおよびシリンダレンズの曲率半径をそれぞれ 235  $\mu\text{m}$  および 99  $\mu\text{m}$  としてシミュレーションを行った結果、スラブ導波路入力端からおよそ 3.5 mm の距離において縦・横方向とも集光可能であることを確認した。また、差動型 LDV を想定し、本構造をふたつ用いて 2 方向からビームを照射した場合の交差部での電界分布を計算した結果、定在波を伴った測定体積の生成が認められ、本構造を用いて速度計測が可能であることを確認した。

次に、Si 導波路の利用を想定し、回折格子を導波路型グレーティングに置き換えた導波路 - 空間結合構造の検討を行った。有限差分時間領域 (Finite-difference time-domain; FDTD) 法によるシミュレーションを行った結果、波長変化により導波路グレーティングからの出射光の伝搬方向を走査可能であることを確認した。

今後の展望として、本研究で提案した走査型 LDV のコンセプトに基づくと、プローブ内の移動機構が不要となるため、小型・高信頼なプローブを備えた走査型 LDV の実現が期待できる。走査型 LDV のプローブ内に移動機構が無くなることによる実用上の恩恵は大きく、非接触、高空間分解能、高精度、速度分布計測可能という元来の差動型の走査型 LDV の特長に、以下のメリットが加えられる。

- (a) 移動機構が無くなることでプローブの小型化が容易となる。
  - (b) 耐衝撃性に優れ、衝撃による光軸ずれや破損が生じにくい。
  - (c) 経時変化に応じた位置校正や磨耗部品の交換・潤滑などの、移動機構に起因するプローブのメンテナンスが不要となるため、取り外しが容易にはできない場所への埋め込みにも適する。
  - (d) 本体側の光源や信号処理系を交換することで、機能拡張等に柔軟に対応できる。
- この結果、医療分野や産業分野へのさまざまな貢献が期待できる。一例として、医療分野において、高信頼で小型なプローブをもつ扱いやすい血流計測用走査型 LDV が実現すれば、基礎研究から臨床診断までのさまざまな状況下で血流速度分布が計測でき、循環器系疾患の新しい診断・治療法につなげられることが期待できる。

#### <引用文献>

- K. Maru, "Axial scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change without moving mechanism in sensor probe," *Opt. Express*, Vol. 19, No. 7, pp. 5960-5969, 2011
- K. Maru, T. Fujiwara, and R. Ikeuchi, "Nonmechanical transverse scanning laser Doppler velocimeter using

wavelength change," *Appl. Opt.*, Vol. 50, No. 32, pp. 6121-6127, 2011

K. A. Shinpaugh and R. L. Simpson, "A rapidly scanning two-velocity-component laser Doppler velocimeter," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 6, pp. 690-701, 1995

#### 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 9 件)

K. Maru, "Laser Doppler cross-sectional velocity distribution measurement combining 16-channel spatial encoding and non-mechanical scanning," *Opt. Commun.*, Vol. 349, pp. 164-170, 2015, 査読有, doi: 10.1016/j.optcom.2015.03.068

K. Maru and T. Hata, "Nonmechanical cross-sectional scanning laser Doppler velocimeter with directional discrimination of transverse velocity component," *Opt. Eng.*, Vol. 54, No. 1, 017102 (6 pages), 2015, 査読有, doi: 10.1117/1.OE.54.1.017102

K. Maru and T. Hata, "Directional discrimination for fiber-optic non-mechanical scanning laser Doppler velocimeter using single transmission path," *Optik*, Vol. 125, No. 20, pp. 6312-6314, 2014, 査読有, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.08.010

K. Maru and K. Watanabe, "Fiber-optic laser Doppler velocimeter with non-mechanical scanning of spatially encoded points for cross-sectional velocity distribution measurement," *Proc. SPIE*, Vol. 9203, 920314 (7 pages), 2014, 査読有, doi: 10.1117/12.2060179

K. Maru and K. Fujimoto, "Demonstration of two-point velocity measurement using diffraction grating elements for integrated multi-point differential laser Doppler velocimeter," *Optik*, Vol. 125, No. 5, pp. 1625-1628, 2014, 査読有, doi: 10.1016/j.ijleo.2013.09.034

K. Maru and K. Watanabe, "Cross-sectional laser Doppler velocimetry with nonmechanical scanning of points spatially encoded by multichannel serrodyne frequency shifting," *Opt. Lett.*, Vol. 39, No. 1, pp. 135-138, 2014, 査読有, doi: 10.1364/OL.39.000135

丸浩一, "非メカニカル走査型レーザドップラー速度計", *光アライアンス*, Vol. 24, No. 6, pp. 12-16, 2013, 査読無,

<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019688000>  
K. Maru and T. Hata, "Axial non-mechanical scan in laser Doppler velocimeter using single diffraction grating," *Opt. Rev.*, Vol. 20, No. 2, pp. 137-140, 2013, 査読有, doi: 10.1007/s10043-013-0020-7  
K. Maru and T. Hata, "Nonmechanical scanning laser Doppler velocimeter for cross-sectional two-dimensional velocity measurement," *Appl. Opt.*, Vol. 51, No. 34, pp. 8177-8183, 2012, 査読有, doi: 10.1364/AO.51.008177

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~maru/>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

丸 浩一 (MARU, Koichi)  
香川大学・工学部・准教授  
研究者番号：00530164

### 〔学会発表〕(計6件)

丸浩一, "空間エンコーディングされた測定点の非メカニカル走査によるレーザドップラー断面速度分布計測", 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-PA6-5, 2014年9月19日, 北海道大学(北海道・札幌)

K. Maru and K. Watanabe, "Fiber-optic laser Doppler velocimeter with non-mechanical scanning of spatially encoded points for cross-sectional velocity distribution measurement," *SPIE Optics + Photonics 2014*, 9203-40, Aug. 19, 2014, San Diego (United States)

畑隆弘, 東育誠, 丸浩一, "速度方向識別可能な走査型レーザドップラー速度計の検討", 2013年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会, Ga-2, 2013年7月27日, 香川大学(香川・高松)

T. Hata and K. Maru, "Non-mechanical scanning laser Doppler velocimeter with directional discrimination using single transmission path," *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013)*, WPF-17, July 2, 2013, Kyoto (Japan)

畑隆弘, 丸浩一, "波長変化による走査型レーザドップラー速度計における横方向走査方法の検討", 平成24年度電気関係学会四国支部連合大会, 7-7, 2012年9月29日, 四国電力総合研修所(香川・高松)

丸浩一, 畑隆弘, "移動機構不要な走査型レーザドップラー速度計の速度方向識別化", 2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会, 13a-PA1-10, 2012年9月13日, 愛媛大学・松山大学(愛媛・松山)

〔その他〕  
ホームページ等