

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04426

研究課題名(和文) 光空間エンコード化に基づくレーザドップラー3次元空間速度ベクトル分布計測法の開発

研究課題名(英文) Laser Doppler velocimetry for three-dimensional distribution measurement of velocity vectors based on optical spatial encoding

研究代表者

丸 浩一 (Maru, Koichi)

香川大学・創造工学部・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)：光空間エンコード化と差動型レーザドップラー速度計測技術を利用した3次元空間速度ベクトル分布計測方法を確立するための技術開発を実施した。その成果として、 $4 \times 4 \times 5$ の測定点を配置した実験系により提案手法で一速度成分の3次元速度分布計測が可能であることを実証した。また、速度ベクトルの各成分を計測するための測定系を開発した。さらに、集積化の基礎検討としてNb205/SiO2系材料を用いた入射用高効率グレーティングカプラの設計を行い、光学系小型化への見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の提案手法により、3次元空間内の精密な位置情報取得を可能としたファイバ光学系による扱いやすい3次元速度分布計測装置が実現できる。この結果、産業分野や医療分野等、様々な分野への貢献が期待できる。また、光学系を集積化することで、マイクロ流路等の微小領域で高精度に速度分布を計測するための超小型装置の実現が期待でき、創薬等に利用されるマイクロ流体デバイスの開発等に役立てることができる。

研究成果の概要(英文)：We studied the technologies to establish the method for measuring three-dimensional distributions of velocity vectors based on optical spatial encoding and differential laser Doppler velocimetry. We demonstrated the three-dimensional distribution measurement of a velocity component by developing a $4 \times 4 \times 5$ -channel experimental setup. We also developed the measurement system for measuring three velocity components for measuring velocity vectors. In addition, we designed Nb205/SiO₂-based input/output grating couplers with high optical efficiency for integrated waveguide devices.

研究分野：光計測工学

キーワード：計測工学 計測機器 速度分布計測 レーザドップラー速度計

1. 研究開始当初の背景

光を用いた非接触な速度分布計測は、流体を扱う産業や研究に必須の技術である。特に、流体の空間的挙動を把握するためには、3次元空間の速度ベクトル分布を計測する必要がある。しかし、これまでに広く用いられている粒子画像法等のカメラベースの速度分布計測方法は、主に正面から見た2次元面内の速度分布を計測対象としたものであり、3次元化のためのホログラフィックな手法やトモグラフィックな手法も提案されているものの、測定の高精度化などに課題があった。

研究代表者は、カメラを用いずに速度分布を計測する手法であり、原理的に高精度かつ空間分解能の高い計測が可能な差動型レーザドップラー速度計測技術に着目し、(A) 光空間エンコード化による複数点同時計測、(B) 波長可変レーザと回折格子を用いた非メカニカルな測定点走査、という手法を組み合わせた新方式の速度分布計測装置を開発した。手法(A)では、1次元方向に複数の測定点を配置し、各測定点に異なるバイアス周波数を割り当てて信号識別を行う光空間エンコード化により、各測定点の速度を同時計測しながら精密な位置情報を得る。手法(B)では、各測定点をもう1次元方向に非メカニカルに走査する。これらと組み合わせることで、2次元断面内の速度分布を高精度かつ稠密に計測可能とした。本方法により、従来のレーザドップラー速度分布計測装置で必要としていた大掛かりな光学系や機械的なビーム走査機構が不要となるため、信頼性の高い装置が実現可能となる。また、バイアス周波数生成のための周波数シフタとして、1チップ上に集積化したLiNbO₃位相シフタアレイを用いることで、ファイバ光学系による装置構成が可能となる。その結果、様々な状況下で手軽に速度分布を計測することが可能な、使い勝手の良い装置の実現が期待できる。

しかし、光空間エンコード化と差動型レーザドップラー速度計測技術を利用した速度分布計測に関するこれまでの研究は、2次元断面内の速度分布計測技術に留まるものであった。空間の速度分布をくまなく計測するためには、測定点分布の3次元化が必要である。また、これまでのものは1速度成分のみの計測を行うものであった。流体の挙動を正確に把握するためには、3速度成分からなるベクトルとしての速度計測が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、光空間エンコード化のコンセプトを発展させ、高精度で扱いやすい新たな3次元空間速度ベクトル分布計測方法を確立するための技術開発を目的とする。本研究のコンセプトを図1に示す。従来研究で検討してきた1次元方向に配置した測定点の光空間エンコード化手法を2次元に拡張するとともに、もう1次元方向に非メカニカル走査することで、3次元空間の速度分布を計測可能とする。さらに、3速度成分を組み合わせることで、速度ベクトルの計測を可能とする。本コンセプトに基づく技術開発を進めることで、3次元空間の速度ベクトル分布を高精度に計測できる使い勝手の良い装置を実現するための道筋を確立する。

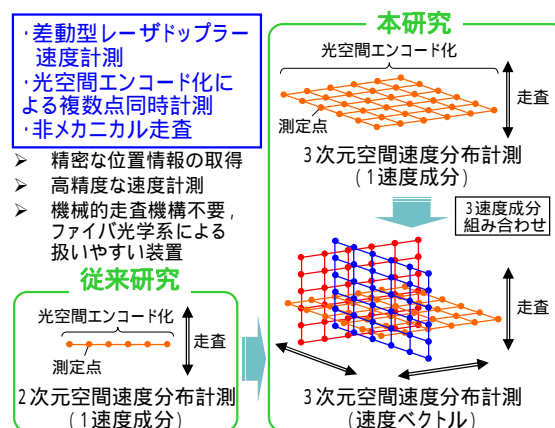


図1 本研究のコンセプト

3. 研究の方法

(1) 3次元空間速度分布計測技術の開発

これまでに検討してきた2次元断面内の速度分布計測方法を3次元空間に拡張するための技術(1速度成分)を開発する。

(2) 速度ベクトル分布計測技術の開発

3次元空間内の各測定点の速度を3速度成分からなるベクトルとして高精度に計測するための技術を開発する。

(3) 光学系集積化の基礎検討

将来的な装置の超小型化に向けた基礎検討として、光学系の高密度化に適する光導波路技術を用いた集積プローブ素子の設計と特性計算を行う。

4. 研究成果

(1) 3次元空間速度分布計測技術の開発

従来研究で検討してきた1次元の光空間エンコード化を2次元に拡張し、2次元面内に配置した各測定点の速度を計測するための光学系を検討した。原理検証のため、ふたつの4チャネ

ルビームアレイを交差配置することで測定点数を **16** とした実験系 (図 2) を構築した。本実験系では、波長可変レーザからの出射光を偏波面保存スプリッタで分岐し、**LiNbO₃** 位相シフターアレイと信号発生器を用いてゼロダイン変調により周波数シフトしたふたつのビームアレイ **A, B** を生成する。ビームアレイ **A, B** を格子状に交差させることで **2** 次元に分布した測定点を形成する。各測定点でのバイアス周波数が異なるように各ビームの周波数シフト量を調整することで、**2** 次元配置した測定点の光空間エンコード化を行う。具体的には、ビームアレイ **A** の *i* 番目の周波数シフトを f_{A_i} 、ビームアレイ **B** の *j* 番目の周波数シフトを f_{B_j} としたとき、ビームの交差によって生成された測定点 (*i, j*) にバイアス周波数 $|f_{A_i} - f_{B_j}|$ が割り当てられる。各測定点に割り当てられるバイアス周波数を区別できるように各ビームの周波数シフト量を調整することで、単一の受光器のみで **2** 次元配置した測定点の信号識別が可能となる。本実験系では、ビームアレイ **A** の 4 本のビームの周波数シフトを **-4.8, -3.6, -2.4, -1.2 MHz**、ビームアレイ **B** の周波数シフトを **0.2, 0.4, 0.6, 0.8 MHz** とした。

深さ方向に移動可能な回転ターゲットを測定対象として測定したビート信号スペクトルの例を図 3 に示す。回転ターゲットの回転速度は **-2.0, 0, +2.0 s⁻¹** とした。実験の結果、**2** 次元面内に配置した **16** 測定点すべてに対応したスペクトルが確認できた。また、回転に応じてピーク周波数がシフトし、各測定点の回転速度が計測可能であることを確認した。

次に、**3** 次元空間内の速度分布計測を可能とすることを目的として、回折格子および **2** 枚のシリンダレンズを組み合わせたビームアレイ走査用入射光学系を設計し、測定点数を **4 × 4 × 5** とした **3** 次元速度分布計測用実験系 (図 4) を構築した。前述の方法により、**2** 次元面内に配置した各測定点にバイアス周波数を与えて光空間エンコード化を行った。また、波長変化に応じて回折格子での回折角を変化させることで、残りの **1** 次元方向に非メカニカルに各測定点を走査した。ファイバアレイから出射した各ビームアレイは、焦点距離 **40 mm** の球面レンズおよび焦点距離 **500 mm** のシリンダレンズを通過後、回折格子に入射した。回折格子は、焦点距離 **250 mm** のシリンダレンズを通過後、回転ターゲットに照射した。ターゲット表面での散乱光を集光し、アバランシェフォトダイオード (APD) で受光した。波長可変レーザからの出力光の波長を **1537–1553 nm** の範囲において **4 nm** 間隔で変化させて測定点を走査した。

回転ターゲットの回転速度を **-2.0, 0, +2.0 s⁻¹** としてビート信号スペクトルを測定した結果、**+2.0 s⁻¹** について測定点数 **80** のうちの **74** 点、**-2.0 s⁻¹** について **73** 点でのビート信号が計測可能であった。ビート信号周波数と測定点に対応するバイアス周波数の差としてドップラー周波数シフトを求め、速度の横方向成分を求めた結果 (図 5)、測定値と理論値はほぼ一致し、**3** 次元速度分布計測が可能であることを実証した。

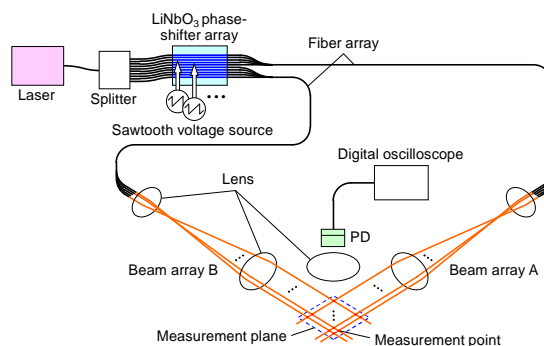


図 2 2次元速度分布計測用実験系

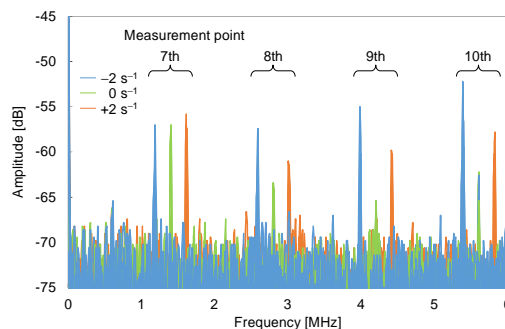


図 3 ビート信号測定結果例

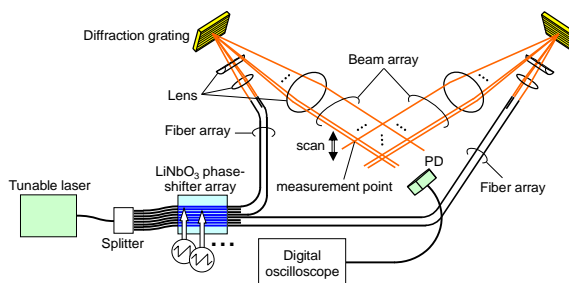
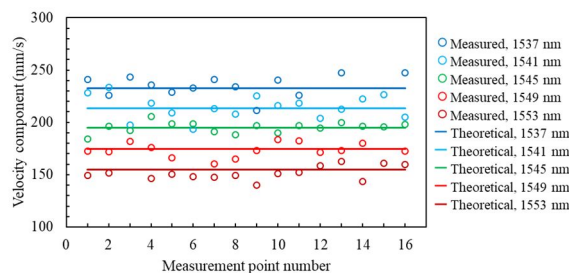
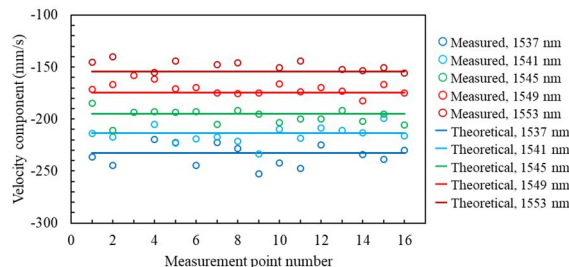


図 4 2次元速度分布計測用実験系



(a) 回転速度 **+2.0 s⁻¹**



(b) 回転速度 **-2.0 s⁻¹**

図 5 横方向速度成分測定結果

(2) 速度ベクトル分布計測技術の開発

速度ベクトルを計測するための **LabVIEW** および **デジタル** を用いた測定系の開発を行った。本研究では、速度ベクトル計測用光学系からの **3** 速度成分の測定信号を模擬するため、高速デジタルに接続した **3** 台の **APD** からの測定データを使用した。測定データは **LabVIEW** ソフトウェアを用いて信号処理を行った。各測定データを高速フーリエ変換し、ビート信号スペクトルを求め、各測定点に対応する周波数帯域の範囲でピークサーチを行った。ピーク値からビート信号周波数を求め、各測定点の速度を算出した。その結果、**80** 個の測定点の各測定点からの信号を模擬した測定データについて、各測定点での **3** 速度成分を自動的に算出することが可能となった。

(3) 光学系集積化の基礎検討

Nb₂O₅/SiO₂ 系材料を用いた導波路におけるビーム入出射用グレーティングカップラの高効率化の検討を行った。

まず、断面速度分布計測用集積プローブ (図 6) に用いるグレーティングカップラの設計を実施した。本集積プローブでは、波長可変レーザからの光をスプリッタで分岐し、ふたつのビームアレイを生成する。位相シフトアレイを用いることにより各ビームを周波数シフトしたのち、出射用グレーティングカップラから出射する。一対の出射用グレーティングカップラから出射した **2** 方向のビームの交差位置での速度を計測する。複数のカップラ対を設けることで複数の測定点を形成し、各測定点を同時計測する。また、波長を変化させることによりグレーティングカップラからの回折角を変化させ、各測定点を基板垂直方向に走査する。

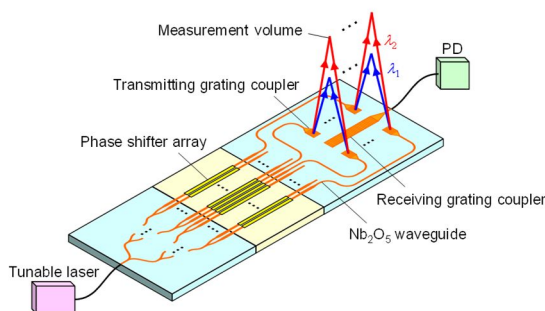


図 6 断面速度分布計測用集積プローブ

図 7 にグレーティングカップラのモデルを示す。空気側から **Nb₂O₅** コア層、**SiO₂** クラッド層、**Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層、**Si** 基板で構成する。**Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層をマルチレイヤ化し、各層厚を最適化することで高効率なグレーティングカップラとする。本研究では、**Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層を **1** 層ずつ **5** 層まで増やしたときの出射光パワーを調べた。

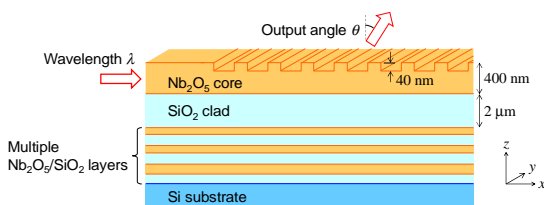
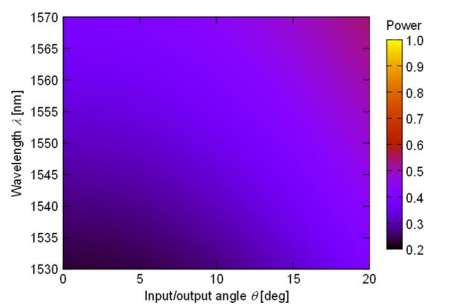


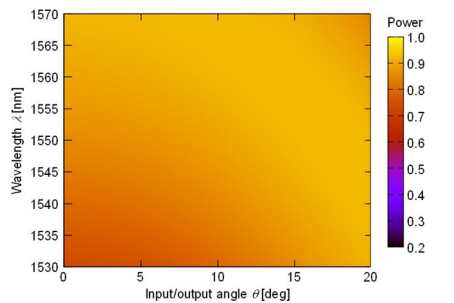
図 7 グレーティングカップラモデル

製造を容易にするためには、受光用および出射用グレーティングカップラに同じ層構造を用いることが望ましい。出射用グレーティングカップラからの光は傾斜して出射されるのに対して、受光用グレーティングカップラでは光をほぼ垂直に受光するため、広い入射角度範囲で高効率となる構造が求められる。また、ビーム走査に使用する全波長域で高効率であることが求められる。本研究では、入射角 0° – 20° 、波長 **1530–1570 nm** での入射光パワーを調べた。



(a) 反射層 1 層

設計手順として、まず **Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層を **1** 層とし、入射角度 10° 、波長 **1550 nm** での **Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層膜厚を最適化した後、反射層を追加していき各層厚を順番に最適化した。反射層が **1** 層の場合と **5** 層の場合の入射光パワー分布を図 8 に示す。**Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層数を増加することで出射光パワーが向上できることを確認した。



(b) 反射層 5 層

次に **3** 次元速度分布計測用集積プローブに使用するためのビーム入出射用グレーティングカップラの高効率化検討を実施した。本集積プローブでは、**3** 次元的に測定点を分布させるため、断面速度分布計測用集積プローブよりも深い角度での出射が求められる。本研究では、受光用グレーティングカップラの入射角度を 0° – 10° 、出射用グレーティングカップラの出射角度を 40° – 50° と想定して、【手順 A】上層から順番に設計、【手順 B】上側 **5** 層、下側 **5** 層をそれぞれ設計した後に組み合わせ、【手順 C】**1** 層ずつ交互に設計、の **3** 種類の **Nb₂O₅ / SiO₂** 反射層多層化手順を検討した。シミュレーションの結果、手順 **C** が最も入射効率が高い結果が得られた。手順 **C** での入射光パワー分布を図 9 に示す。想定し

図 8 入射光パワー分布 (断面速度分布計測用)

た入射角度および波長の全範囲で良好な入射光パワーを得られることを確認した。

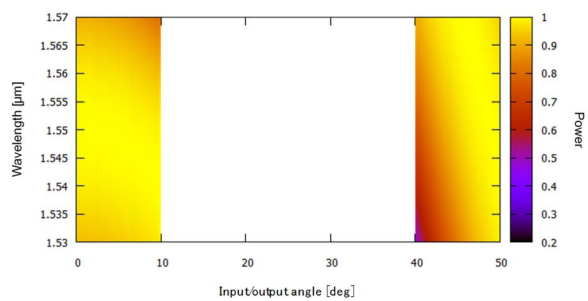


図 9 入射光パワー分布
(3次元速度分布計測用)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Maru	4. 巻 485
2. 論文標題 Two-dimensional spatially encoded cross-sectional velocity distribution measurements based on coherent bias-frequency encoding and wavelength-division multiplexing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Opt. Commun.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2020.126740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Maru, Y. Hashimoto, S. N. A. B. Abd Ghafar	4. 巻 60
2. 論文標題 Two-dimensional distribution measurement of in-plane velocity component using bias-frequency spatial encoding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Opt. Eng.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.OE.60.3.034108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Maru, Y. Yoshida, M. Yukinari, R. Kimura	4. 巻 26
2. 論文標題 Differential laser Doppler velocimetry for cross-sectional velocity distribution measurements using 48-channel spatial encoding and nonmechanical scanning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Opt. Rev.	6. 最初と最後の頁 487-492
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-019-00544-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Maru	4. 巻 19
2. 論文標題 Design of transmission-type refractive index sensor, based on silica planar lightwave circuit using combination of refractive angle and phase measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s19194095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Maru, Y. Yamamoto, K. Nakatsuhara
2. 発表標題 Nb205-based grating coupler employing multiple Nb205/SiO ₂ layers in integrated probe for cross-sectional velocity distribution measurement
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山地陽翔, S. N. A. B. Abd Ghafar, 丸浩一
2. 発表標題 空間エンコード化と波長走査を組み合わせた3次元速度分布計測方法
3. 学会等名 令和3年度SICE四国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Maru
2. 発表標題 Velocity distribution measurements based on differential laser Doppler velocimetry
3. 学会等名 30th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM '20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yukinari, K. Maru
2. 発表標題 Simultaneous cross-sectional velocity distribution measurements using laser Doppler velocimeter employing 7 × 8 spatial encoding
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Doi, K. Maru, K. Nakatsuhara
2. 発表標題 Design of chirped focusing grating coupler in Nb205-based integrated probe for laser Doppler cross-sectional velocity distribution measurement
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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