

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04018

研究課題名(和文)空間エンコード化と非メカニカル走査を用いたレーザドップラー稠密断面速度分布計測

研究課題名(英文)Laser Doppler velocimetry for dense cross-sectional velocity distribution measurement using spatial encoding and non-mechanical scanning

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) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：小型・高信頼なプローブを備えた高精度かつ稠密な2次元断面速度分布計測手法の確立を目的として、非メカニカル測定点走査と空間エンコード化による複数点同時計測を併用したレーザドップラー速度計の技術開発を行った。その成果として、測定点を稠密化し測定点数を48とした装置を開発した。また、測定自動化・高速化のための信号取得・処理系を開発した。さらに、光学系を小型化したプローブを開発するとともに、光導波路を用いた集積化の基礎検討を実施し、装置実用化の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：To establish a method for measuring a two-dimensional cross-sectional velocity distribution precisely and densely with a compact and reliable probe, we studied laser Doppler velocimetry using a combination of non-mechanical scanning and simultaneous multipoint measurement based on spatial encoding. We developed a technique for dense velocity distribution measurement with 48 measurement points and a signal acquisition/processing system for automated and high-speed measurement. In addition, we investigated a miniature probe using compact bulk optics and a waveguide-based integrated probe.

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

光を用いた非侵襲な速度分布計測は、流体を扱う産業や研究に必須の技術である。特に、流路断面内全体の速度分布をくまなく測定したい場合には、速度方向に対して垂直な2次元断面内の速度分布計測が必要である。しかし、これまで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手法は、主に正面からみた速度分布を計測対象としたものであり、高精度かつ稠密な断面速度分布計測は難しかった。また、様々な状況下で手軽に使用できるようにするためには、小型で高信頼なプローブを備えた使い勝手の良い装置が望ましいが、従来の殆どの速度分布計測手法は大掛かりな光学系や機械的なビーム走査機構を必要とした扱いづらいものであった。

これらの問題を解決するため、研究代表者らは、差動型レーザドップラー速度計を応用し、小型かつ高信頼なプローブをもつ新方式の断面速度分布計測手法を提案した[1]。本手法は、(A)空間エンコード化による複数点同時計測と、(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を組み合わせた新コンセプトに基づく(図1)。手法(A)では、複数の測定点に異なるバイアス周波数を割り当てることで空間エンコード化し、各測定点の位置情報を得る。空間エンコード化はレーザドップラー振動計に適用例があり[2]、ひとつの受光器で高速な速度分布計測が可能となるが、2次元断面内に測定点を稠密に配置しようとした場合、多数の周波数シフトが必要となってしまう。そこで本コンセプトでは、各測定点は横方向のみの1次元に配列し、深さ方向には手法(B)を用いて各測定点を非メカニカル走査することで2次元断面内の速度分布を計測する。差動型レーザドップラー速度計の原理を用いて流路断面に垂直な速度成分を高精度に測定する。本コンセプトにより、現実的な周波数シフト数で稠密な2次元断面内の速度分布計測が可能となる。また、測定点走査のみを用いる方法に比べ、短い測定時間で速度分解能の高い計測が可能となる。さらに、大掛かりな光学系や機械的なビーム走査機構は不要であるため、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。周波数シフトには1チップ上に集積化した電気光学位相シフトアレイを用いることで、ファイバ光学系による扱いやすい装置が実現できる。

これまでに研究代表者らは、プローブを模擬した光学系を構築し、本コンセプトにより2次元断面速度分布計測ができることを実証した[1,3]。しかし、これまでの研究は、定盤上に構築した光学系を用いた原理実証の段階であり、プローブが小型であるとは言い難かった。また、これまでの原理実証では測定点数として16までの光学系を扱ってきたが、実際の精密断面速度分布計測に用いるには十分に稠密な測定点分布であるとはいな

かった。さらに、これまでの原理実証では断面速度分布が計測できるかどうかの主眼を置いており、実際の計測システム運用では測定の自動化・高速化が必要となる。

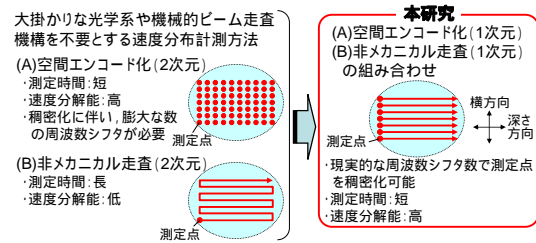


図1 本研究のコンセプト

2. 研究の目的

本研究では、小型で高信頼なプローブを備えた高精度かつ稠密な2次元断面速度分布計測手法の確立を目的として、空間エンコード化による複数点同時計測と非メカニカル測定点走査を併用したレーザドップラー速度計の技術開発を推進する。具体的には、以下の研究課題を実施する。

- (1) 測定点分布の稠密化：実際の精密断面速度分布計測への適用を目的として、測定点分布の稠密化技術を開発する。
- (2) 測定の自動化・高速化：流速変化がある測定対象への適用を目的として、測定の自動化・高速化方法を開発する。
- (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実証の段階を一步進め、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) 光学系集積化の基礎検討：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、光学系の集積化技術を開発する。

3. 研究の方法

- (1) 測定点分布の稠密化：空間エンコード化した測定点数の増加方法として、非対称プッシュプル方式を適用する。複数のフォトダイオード(PD)を用いて、各測定点をそれぞれの受光器に割り当てる方法を検討するとともに、光学系改良を行う。
- (2) 測定の自動化・高速化：高速デジタルを導入し、測定を自動化・高速化するための信号取得・処理系を開発する。
- (3) ミニチュアプローブ開発：小型化した光学系の設計、構造設計を行い、試作評価を実施する。
- (4) 光学系集積化の基礎検討：光導波路を用いた集積化素子に用いる各エレメントの基本設計を行う。また、グレーティングカプラ素子を組み込んだ集積化プローブの光回路設計、および、素子試作に向けた条件探索を行う。

4. 研究成果

- (1) 測定点分布の稠密化
空間エンコード化による複数点同時計測

と非メカニカル測定点走査を組み合わせた速度分布計測装置について、測定点数を従来の16から48に増加することで測定点を稠密化した装置の開発を実施した。図2に装置構成を示す。全体構成は、波長可変レーザを備えた本体と回折格子等の光学系で構成したプローブから成る。波長可変レーザからの出射光からふたつの48chビームアレイを生成する。波長可変レーザは3台用い、それぞれ16点を受け持つ構成とした。これにより、測定点当たりの光パワーを増加し、各測定点の高感度な測定を可能とした。LiNbO₃ (LN)位相シフタアレイを用いてセラドイン変調することで一部の光波を周波数シフトする。各位相シフタはファンクションジェネレータからの電圧ランプ波により駆動する。偏波保持 (PM) ファイバアレイを通してプローブに導入し、回折格子からの回折光を測定点へ入射する。横方向 (y 軸方向) に配置した複数の測定点に異なるバイアス周波数を与えることで空間エンコード化を行う。また、波長を変化させて回折格子からの回折角を変化させることで深さ方向 (z 軸方向) に各測定点を走査する。これらを組み合わせることで2次元速度分布計測が可能となる。48chのうちの24chを非対称プッシュプル動作させることで、限られた位相シフタ数とファンクションジェネレータ数で測定点数を48chまで増加した。測定点からの散乱光は、3本のマルチモードファイバで受光し、本体に配置したアバランシェフォトダイオード (APD) に導入する。APDからの電圧信号をデジタルオシロスコープで計測する。本構成では、各測定点からの散乱光を3台のAPDに割り当てることで測定点数の増加に対処した。マルチモードファイバでの受光位置の最適化を行うことで、48chすべての計測を可能とした。

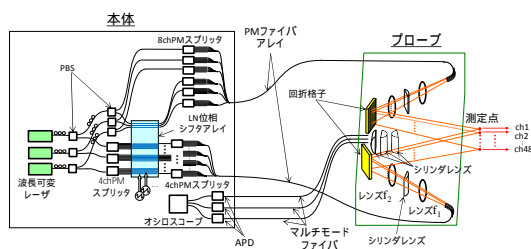


図2 装置構成

まず、z 軸方向に移動可能な垂直に配置した回転ターゲットを計測対象とし、2次元の測定点分布の計測実験を行った。各測定点のバイアス周波数は、0.2 ~ 2.4 MHz および 2.8 ~ 5.0 MHz までの 0.2 MHz 間隔とし、これを y 軸方向に沿って2セット配置した。波長 1530 ~ 1560 nm の範囲を 5nm 間隔で変化させて測定した測定点分布を理論値とともに図3に示す。測定位置は理論値とよく一致し、48点すべての測定点分布を計測することが可能であった。チャンネル番号に応じて y 軸方

向位置が変化し、波長変化に応じて z 軸方向に測定点走査されることを確認した。研究代表者らが従来開発した16チャンネルの装置[3]と同等の測定範囲で測定点を稠密化可能であることを確認した。

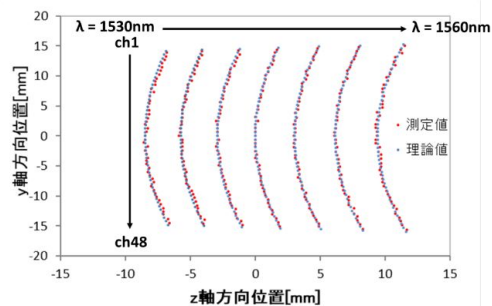
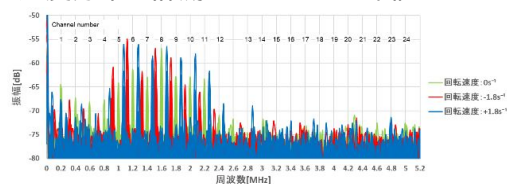
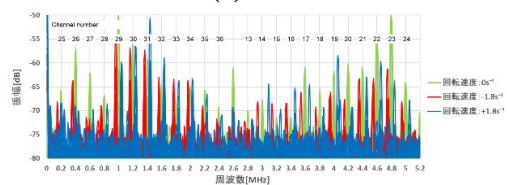


図3 測定点分布

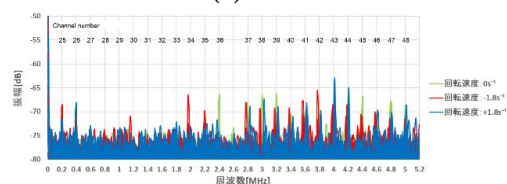
次に、2次元速度計測性能を検証した。回転ターゲットを一定速度で回転させたときの各チャンネルに対応するビート周波数を計測し、ドップラー周波数シフトを求めた。z 軸方向位置を調節しながら、各チャンネルのビート信号を計測した。波長を 1530 ~ 1560 nm、回転速度を -1.8, 0, 1.8 s⁻¹ として測定した。波長 1545 nm でのビート信号スペクトルを図4に示す。各チャンネルのバイアス周波数近傍で回転速度に応じたビート信号が観測された。また、ドップラー周波数シフトは理論値とよく一致し、3台のAPDを用いることで48点の速度分布を計測できることを確認した。



(a) PD1



(b) PD2



(c) PD3

図4 ビート信号スペクトル, 波長 1545 nm

(2) 測定の自動化・高速化

測定自動化・高速化のための信号取得・処理系の開発を行った。構成を図5に示す。3台のAPDを高速デジタイザに接続する。デジタイザからのデータをPCに取り込み、LabVIEWソフトウェアを用いて信号処理を行う。

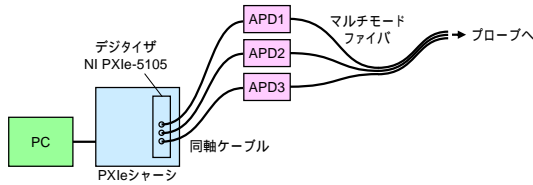


図5 信号取得・処理系の構成

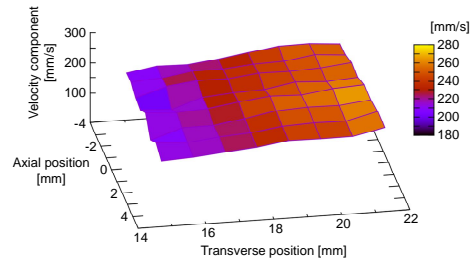
信号処理方法として、まず、取り込んだ各 APD からの電圧時系列データの高速フーリエ変換 (FFT) を行うことでビート信号スペクトルを求める。次に、ビート信号スペクトルから各測定点のピークを検出し、対応する振幅およびビート周波数を算出する。ドップラービート信号はバーストデータであるため、ピークのノイズ/信号判定およびデータ平均化処理を行った後、ビート周波数から各測定点の速度を算出し、リアルタイム表示およびデータ保存を行う。

従来の実験では、デジタルオシロスコープを用いて、各 APD からの電圧信号を個別に測定していたため、48ch の測定点に対応するビート周波数を全波長範囲で測定するためには時間がかかっていたが、本信号取得・処理系を用いることで、48ch の測定点同時計測および信号データ処理の自動化が可能となり、また、全波長範囲の計測を速やかに行うことが可能となった。

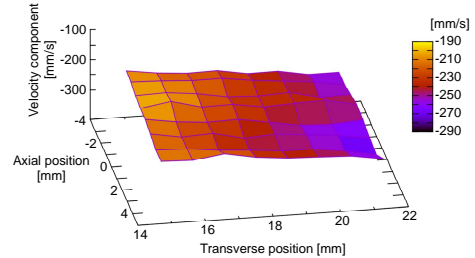
(3) ミニチュアプローブ開発

定盤上に構築した光学系による原理実証の段階から一歩進め、測定点数を 8 とした小型プローブの設計および試作を行い、2 次元断面速度分布が計測可能かどうかを確認した。コリメートレンズと集光レンズの焦点距離をそれぞれ 10 mm および 72 mm として光学系を従来よりも小型化した。回折格子による非点収差を低減するため、レンズ間に焦点距離 100 mm のシリンダレンズを挿入した。8×8cm² のアルミ板上にプローブ光学系を実装した 2 本の PM ファイバアレイで本体とプローブを接続した。各測定点は、バイアス周波数を 0.2 ~ 1.6 MHz の範囲の 0.2 MHz 間隔とすることで空間エンコード化した。測定点からの散乱光は、2 枚のシリンダレンズを用いてマルチモードファイバ端に集光し、本体側の APD に導入した。

回転ターゲットを測定対象として速度計測実験を実施した結果、各測定点に対応したビート信号が観測され、回転に応じてビート周波数がシフトし、各測定点の速度計測が可能であることを確認した。波長範囲を 1530 ~ 1565 nm で変化させ、回転速度±2.0 s⁻¹ の速度分布計測を行った結果を図 6 に示す。6.8×6.0 mm² の範囲の速度分布計測が可能であることを確認した。



(a) 回転速度 2.0 s⁻¹

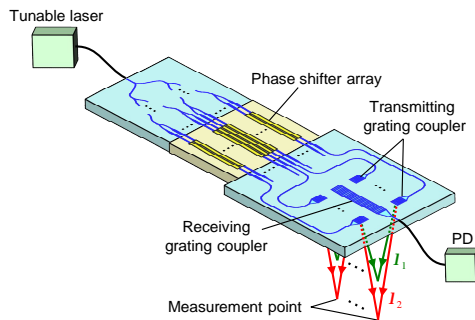


(b) 回転速度 -2.0 s⁻¹

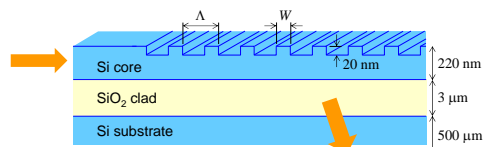
図6 小型プローブによる速度分布計測結果

(4) 光学系集積化の基礎検討

将来的な超小型化への展開のため、図 7 に示す速度分布計測用集積プローブを提案した。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。位相シフタアレイを用いて各ビームをゼロダイン変調し、互いに異なる周波数だけシフトしたのち、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力された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、基板に平行な方向に整列した複数の測定点を形成し、各測定点とバイアス周波数を一対一対応させた空間エンコード化により各測定点の速度を同時計測する。また、波長を変化させてグレーティングカップラからの回折角を変化することで、各測定点を深さ方向に走査する。



(a) 全体構成

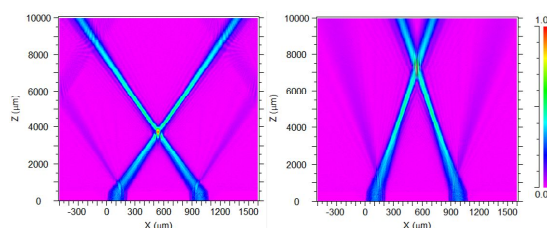


(b) グレーティング構造

図7 速度分布計測用集積プローブの構成

Si コア層の厚さを 220 nm, グレーティング深さを 20 nm として出射用グレーティングの設計を実施した. レンズ等を用いることなくグレーティングカプラからの光を測定位置に集光するため, 出射光分布の振幅をガウス分布, 位相分布を放物面とするように格子周期 Λ と凸部長さ W をチャープさせた. グレーティングカプラから測定位置までの距離を約 5 mm と想定し, 空気中での出射角が約 5° となるように設計した.

設計したチャープ化グレーティングカプラの出射光電界分布を有限差分時間領域法 (FDTD 法) およびビーム伝搬法 (BPM) を用いて計算した. 0.87 mm 離れたふたつのグレーティングカプラからの出射光計算結果を図 8 に示す. 波長 1530 ~ 1560 nm での測定位置シフト量は 3.5 mm であり, 波長変化により深さ方向への測定点走査が可能であることを確認した. また, グレーティング凹凸部の座標を丸め込むことで描画装置の分解能による制限を模擬し, 出射光のビーム伝搬を計算した結果, 丸め込み量 100 nm 程度までは大きな出射光劣化はみられず, 既存のプロセス技術で作製可能である見通しを得た.



(a) 波長 1530 nm (b) 波長 1560 nm
図 8 出射光計算結果

Si 光導波路を用いた集積型プローブの設計として, チャープ化グレーティングカプラ素子を組み込んだプローブ部の光回路設計を実施した. 自作プログラムを用いて素子入力部 ~ 出射用グレーティングカプラの導波路設計を行い, CAD ソフトウェアを用いてレイアウトを確認した.

さらに, 異なる材料系での検討として, Nb_2O_5 導波路を用いたチャープ化グレーティングカプラの設計を実施した. 図 7(b) の Si コア層の代わりに厚さ 400 nm の Nb_2O_5 コア層とした場合のチャープ化パラメータを設計し, FDTD 法および BPM により出射光のビーム伝搬を計算した結果, 波長を 1530 ~ 1570 nm で変化させたとき, 出射角が 11.3° ~ 7.9° の範囲で変化することを確認した.

< 引用文献 >

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, pp. 135-138, 2014

Y. Fu, M. Guo, and P. B. Phua,

"Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementations, and signal analyses," *Appl. Opt.*, Vol. 50, pp. 1280-1288, 2011

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

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 4 件)

K. Maru, H. Watanabe, K. Yamashita, R. Matsuda, K. Nakatsuhara, "Proposal and design of integrated probe based on silicon photonics for laser Doppler cross-sectional velocity distribution measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.* (in press), 2018, 査読有

K. Maru, S. Katsumi, R. Matsuda, "Nonmechanical compact probe for cross-sectional velocity measurement based on differential laser Doppler velocimetry," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 88, 045001 (7 pages), 2017, 査読有
DOI: 10.1063/1.4979563

K. Maru, "Nonmechanical scanning laser Doppler velocimetry for distribution measurements of two-dimensional velocity vectors based on optical quadrature detection," *Appl. Opt.*, Vol. 55, pp. 10174-10179, 2016, 査読有
DOI: 10.1364/AO.55.010174

K. Maru, R. Sato, Y. Kamioka, "Laser Doppler two-dimensional velocity measurement using optical quadrature detection," *Opt. Eng.*, Vol. 54, 124101 (6 pages), 2015, 査読有
DOI: 10.1117/1.OE.54.12.124101

[学会発表] (計 23 件)

内堀 慎太, 武田 正行, 西澤 武志, 中津原 克己, "導波路型光スイッチに向けた Nb_2O_5 -MZI における消光比向上の検討", 応用物理学会春季学術講演会, 2018

渡辺 寛史, 丸浩二, "速度分布計測用 Si 集積型レーザドップラープローブの光学系設計", 第 3 回機能性材料を用いた微細構造デバイス研究グループ研究発表会, 2017

内堀 慎太, 武田 正行, 西澤 武志, 中津原 克己, " Nb_2O_5 導波路を用いた液晶装荷 MZI 型光スイッチの理論特性と製作プロセスの検討", 光エレクトロニクス研究会, 2017

K. Maru, K. Yamashita, H. Watanabe, R. Matsuda, K. Nakatsuhara, "Proposal of Si-based Integrated Probe for Laser Doppler Cross-sectional Velocity Distribution Measurement," 22nd

Microoptics Conference (MOC2017), 2017
稲森翔, 木村豪, 武田正行, 西澤武志, 中津原克己, "Nb₂O₅ 導波路を用いた DBR 共振器の導波特性評価", 第 2 回集積光デバイスと応用技術研究会, 2017
稲森翔, 榊原健太郎, 落合俊弘, 木村豪, 武田正行, 中津原克己, "可変波長フィルタのための Nb₂O₅ を用いた導波路型 DBR の基礎検討", 光エレクトロニクス研究会, 2017
内堀植太, 渋谷隆延, 武田正行, 中津原克己, "Nb₂O₅ 導波路を用いた FLC 装荷フェーズドアレイ型光スイッチの基礎検討", 光エレクトロニクス研究会, 2017
榊原健太郎, 稲森翔, 武田正行, 中津原克己, "可変波長フィルタのための強誘電性液晶装荷 Nb₂O₅ 導波路の検討", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017
中津原克己, "強誘電性液晶を用いたシリコンフォトニクスデバイス", スマートインフォメディアシステム研究会 (SIS), 2017
吉岡祐亮, 丸浩二, "速度分布計測用 Si 集積型プローブに用いるグレーティングカプラの設計", 第 2 回機能性材料を用いた微細構造デバイス研究グループ研究発表会, 2016
吉田優樹, 勝見俊亮, 松田亮輔, 丸浩二, "測定点稠密化レーザドップラー速度計を用いた二次元速度分布測定", 第 2 回機能性材料を用いた微細構造デバイス研究グループ研究発表会, 2016
稲森翔, 榊原健太郎, 武田正行, 山本宗継, 中津原克己, "液晶装荷可変波長フィルタのための Si₃N₄ を用いた導波路型 DBR 共振器の波長特性", 光エレクトロニクス研究会, 2016
勝見俊亮, 吉岡祐亮, 中津原克己, 丸浩二, "速度分布計測用集積プローブに用いるグレーティングカプラの設計", 平成 28 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2016
松田亮輔, 勝見俊亮, 吉田優樹, 丸浩二, "2 次元断面速度分布計測用レーザドップラー速度計の測定点稠密化", 平成 28 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2016
W. Kanakubo, K. Nakatsuhara, M. Takeda, "Fundamental operation of a phased array switch using ferroelectric liquid crystal claddings," OECC/PS2016, 2016
稲森翔, 榊原健太郎, 加藤亜希文, 武田正行, 山本宗継, 中津原克己, "DBR 構造を用いた FLC 装荷 Si₃N₄ 導波路型共振器の基礎検討", 光エレクトロニクス研究会, 2016
丸浩二, "非メカニカルレーザドップラー断面速度分布計測技術", 電子情報通信学会総合大会, 2016
金久保渉, 武田正行, 中津原克己, "FLC 装荷フェーズドアレイ型光スイッチのスイッチング動作", 電子情報通信学会総合大会, 2016
榊原健太郎, 武田正行, 砂田和紀, 加藤亜希文, 山本宗継, 中津原克己, "可変波長フ

イルタのための Si₃N₄ コア層グレーティング導波路の製作", 電子情報通信学会総合大会, 2016

金久保渉, 武田正行, 中津原克己, "FLC 装荷フェーズドアレイ型光スイッチの製作と特性評価", 第 3 回集積光デバイスと応用技術研究会, 2016

② 榊原健太郎, 武田正行, 砂田和紀, 加藤亜希文, 山本宗継, 中津原克己, "可変波長フィルタのための Si₃N₄ グレーティング導波路の製作プロセスの検討", 第 3 回集積光デバイスと応用技術研究会, 2016

② 勝見俊亮, 松田亮輔, 丸浩二, "空間エンコード化し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", 機能性材料を用いた微細構造デバイス研究グループ研究発表会, 2015

③ 丸浩二, 勝見俊亮, 松田亮輔, "レーザドップラー断面速度分布計測用小型プローブの試作", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015

〔図書〕(計 2 件)

K. Maru, CRC Press, Advances in imaging and sensing, Chapter 6, "Cross-sectional velocity distribution measurement based on fiber-optic differential laser Doppler velocimetry," 2016, 283 ページ (pp. 121-140)

K. Maru, Y. Fujii, CRC Press, Optical imaging devices: new technologies and applications, Chapter 8, "Laser Doppler velocimetry technology for integration and directional discrimination," 2016, 238 ページ (pp. 189-206)

〔その他〕

ホームページ等

<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

(2) 研究分担者

藤井 雄作 (FUJII, Yusaku)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号: 80357904

中津原 克己 (NAKATSUHARA, Katsumi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号: 70339894