

藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦)

2025 年 5 月 26 日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 明彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 富山高等専門学校

職 名 准教授

氏 名 経田僚昭



【提出書類】

(1) 研究実施概要報告書（本紙）

添付書類（A4 版 3 枚以内）：研究状況を示す写真等の資料

(2) 収支報告書

添付書類：助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合：支払一覧表と支払部門担当者確認署名

(1) テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

次世代型レーザー血流計による血流動態の 3D 非侵襲イメージング

(2) 本研究の期間

(西暦) 2024 年 4 月 ～ 2025 年 3 月

(3) 本研究の目的

本申請課題は、非侵襲で血管内の血流速度を多点同時に絶対値で計測する血流計を開発することを目的とする。そのワンパス計測の結果に基づく血流分布画像を生成し、血流の異常を伴う病理全般の早期診断に資する次世代型光血流計を開発する。例えば、四肢抹消部の毛細血管閉塞を伴う糖尿病は神経系への養分供給不良によって切断の処置が施される。癌は早期発見によって 5 年生存率が上がる。血流画像によって医師と患者に血流速度の絶対値情報を提供する本血流計は早期診断サポートし、患者の Quality of life を向上させる。

我々は、本申請課題で構築する技術を Two-beam Multipoint Laser Doppler Velocimetry (MLDV) と名付け、2 つのビームの重ね合わせ領域を計測領域として、血管内に照準を合わせ、位置の異なる複数点同時に赤血球からの血流速度に依存する信号を取得する。ミクロな血流の動的な変動とマクロな視点での病理とを関連づける計測技術の開発を行う。

(4) 本研究の概要

血流観測において、ある特定の血管と一点の血流速度を評価するよりも、血管周囲にある組織を包括した観測ができれば血管状態の把握に貢献する。具体的には、血管形走行画像化できれば血液がどこに供給されているか（静脈の場合はどこから血液が戻ってくるか）を把握できる。LDV は従来、計測点 1 点の流速計測方法として知られている。2 本のレーザービームの交差点を計測点とするためである。一方で我々は計測領域を拡大させた MLDV の開発を進めている。MLDV の計測領域拡大には(1) 送光系、(2) 受光系、(3) 信号取得系の三項目で望ましい計測領域に合わせた設計をする必要がある。まず(1) 送光系については直径 1 mm 程度のレーザービームを拡大させ、拡大させたレーザー光の重ね合わせによって実現できる。次に(2) 受光系については計測領域全体から放出される光信号を受けるための受光レンズの大径化と受光部となる光ファイバーの多点化が必要になる。多点化した光ファイバーの配置がそのまま計測領域のサイズを決める。(3) 信号取得系で満たすべき要件は光ファイバーの計測点数だけの信号増幅器を用意することにある。以上の取り組みによって血流計の基本計測原理である LDV を基に、多点化し、血流画像の構築を可能とする。本申請課題では流体力学分野で配管等の流速計測に貢献してきた LDV 流速計測方法を血流計測に応用し、血液に含まれる赤血球からの信号取得と多点計測への取り組みを行った。動物血液を用いた模擬血管（透明アクリル流路）からの信号取得を行うことで LDV が血流計として機能することを確認し、計測領域拡大への取り組みを一年かけて実施した。

さらに、従来の LDV 技術で確立させた手法の一つである光変調器の導入を本申請課題での MLDV にも導入させた。レーザー交点に形成される干渉縞を通過する粒子（血流計測の場合は赤血球のように血液に含まれる固体成分）が放つ散乱光の周波数成分から粒子通過速度（≒流速）を得る。すなわち、散乱光の周波数成分は流速に依存するが粒子通過の方向の情報を持たない。交差する二本のレーザー光に対して、一本のみに周波数変調をかけることで 2 本のレーザー光の波長をわずかにずらすことができる。ずれた波長の 2 本のレーザーの重ね合わせによって一方向

に動く干渉縞を形成することができる。そうすると、散乱光に含まれる周波数成分は、干渉縞の移動速度に対する粒子移動の相対速度に依存し、速度の絶対値と方向の両方の情報を得ることができる。光の変調には Acoustic Optical Modulator (AOM)を用いることとして、光源からのレーザー光を入力、出力をゼロ次光（変調なし）と一次光（変調あり）の2本とすることでこれら光の組み合わせによって MLDV での計測領域を形成した。

以上により、AOM を導入した変調光と無変調光の同時形成、計測領域の拡大と多点計測、血流への応用を LDV に実装させることが本研究テーマで根幹となる新規技術である。最後に挙げた血流計測への応用は実際に動物血液を用いた流速計測によって確認した。

(5) 本研究の内容及び成果

MLDV の計測領域拡大に向けた取り組みのうち、(1) 送光系、(2) 受光系、(3) 信号取得系の三項目について成果の詳細を記載する。

(1) 送光系 本申請課題で構築した LDV の送光系拡大の概要を Fig. 1 に示す。光源から出力されたレーザー光を2本に分け、ロッドレンズでレーザー光を拡げる。シリンダリカルレンズで一旦集光させた後に、焦点より後方に凸レンズを置くことで拡大したレーザー光は拡がりながら交差する。扇状に拡がったレーザー光の交差領域が本申請課題で構築した MLDV の計測領域を形成する。

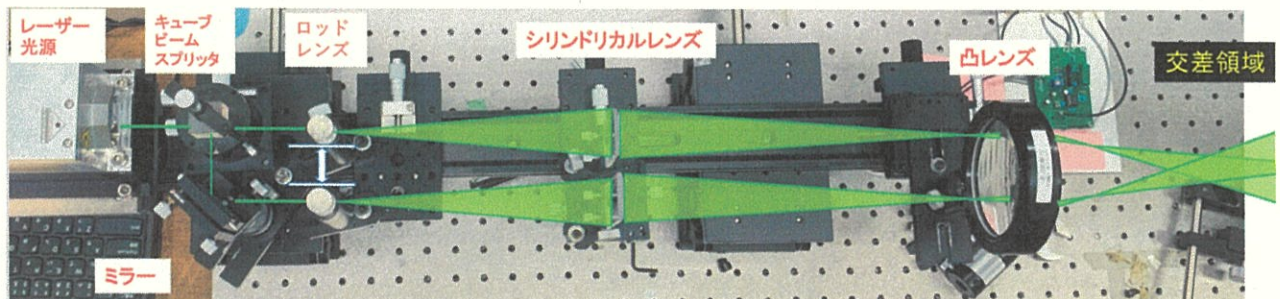


Fig. 1 構築した MLDV の概要（送光系の拡大）

(2) 受光系 受光レンズには直径 150 mm の凸レンズを用意して、本光学系に充てた。送光系で形成した交差領域受光系と交差領域を網羅するレンズ系を用意する必要がある、比較的大径のレンズを本申請課題で使用する事とした。

(3) 信号取得系 Avalanche Photo Diode (APD) を、信号取得系を構成する素子として整備した。交差領域で形成された干渉縞を通過する粒子はその移動速度 (v) と干渉縞幅 (d) の比となる周波数 ($f_d = v/d$) を含むドップラー周波数を有する。すなわち干渉縞から放たれた散乱光を受光し、信号として解析することで粒子移動速度を求めることができる。受光レンズを介して、交差領域と一対一関係にある位置に光ファイバーを設置し、片端で受光した光を他端へ伝送する。コネクタを APD に直接繋げることで光信号を電気信号に変換し、A/D ボードによってデジタル信号に変換し、周波数解析を行なった。APD で出力された電気信号はアンプで増幅され、フィルターを介して A/D ボードに接続される。光ファイバーはコア系 0.23 mm を 8 x 8 で配置している。計測点数だけの APD を必要とし、アルミケースに収めた一連の信号取得系を整備した。Fig. 2 には今回整備したアンプケースの一部を示す。

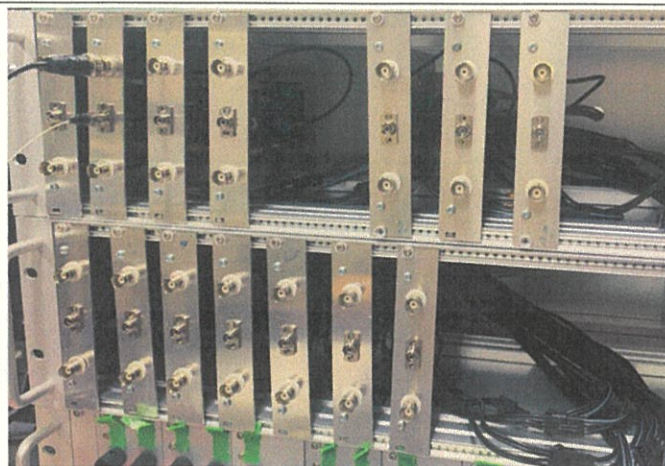
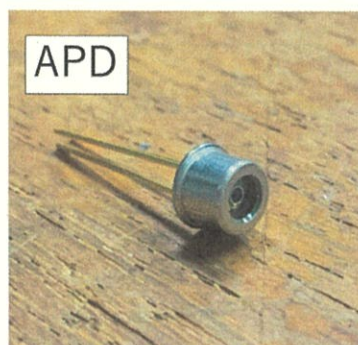


Fig. 2 整備したアンプケースの写真

(6) 本研究の考察

一片を 1.4 mm とする矩形流路に周期的な血流変化を与え、流速分布を得た。代表的な 4 点の計測結果を Fig. 3 に示す。64 点の光ファイバーのうち、4 点を選択した。各点で得られた流速は時間変動を伴うものであるが、その時間平均を得て流路幅を横切るようにプロットすると流速分布の空間変化を得ることができた。流路中心付近で流速が大きく、壁面に行くほど流速が低下する。流速分布が得られると、流速の面積分によって流量の情報を得ることができる。(4) 本研究の概要に記した通り一点計測よりも多点計測のメリットは血管走行のイメージングまでを可能にすることにあるが、流速と走行を把握できれば流量の導出までを可能として血流量を絶対値で示すことができる。以上、本申請課題での取り組みによって LDV の多点計測に対する基礎技術を確立できた。

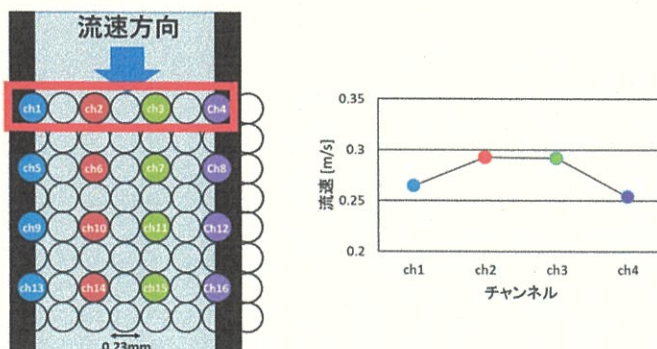


Fig. 3 計測結果 (流速分布)

(7) 共同研究者 (所属機関名、役職、氏名)

金城学院大学, 教授, 安東嗣修

富山高等専門学校, 准教授, 秋口俊輔

(8) 本研究の成果の公表先

【投稿予定】

流体工学全般の研究成果が集まる国際会議発表講演と国際雑誌への投稿に向けて準備をしている。

[注] この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。