

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04413

研究課題名(和文) 多波長レーザースペckルを用いた血管厚さと血流速さの同時計測に関する研究

研究課題名(英文) Study on simultaneous measurement of blood vessel thickness and blood flow velocity using multi-wavelength laser speckle

研究代表者

澤野 宏 (Sawano, Hiroshi)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：40514295

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)：本研究では、血管厚さと血流速さの同時計測の実現を目的として、複数の波長のレーザースペckル情報から、血管厚さと血流速さの情報を分離する方法を提案した。血管を模した流路を持つ血管厚さ計測原理評価実験装置を製作し、420nmと780nmの2波長レーザースペckルを用いた計測実験を実施した。実験結果から提案する計測方法により原理的に血管厚さと血流速さの同時計測が可能となることを明らかにした。さらに、780nmと850nmの2波長の赤外レーザースペckルを用いて同様の実験を行い、2波長の赤外レーザースペckルからでも血管厚さと血流速さの同時計測が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

血流は大切な生体情報であり、非侵襲で高精度な血流の計測は重要な役割を持っている。出力が小さく、透過性を持つ赤外レーザを照射することにより、人体に負荷をかけることなく血流の速度を計測することが可能である。血管の厚さを計測することが可能になれば、血管の閉塞などの情報を得ることができるが、レーザが血管まで到達すると、血管厚さと血流速さの両方の情報がスペckルに反映されるため、レーザースペckルによる血管厚さの計測は困難であった。本研究は2波長レーザを用いることで血管厚さと血流速さの両方の情報を同時に得ることを可能にするものであり、日常的な健康管理機器への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a method to separate blood vessel thickness and blood flow velocity information from laser speckle information of multiple wavelengths was proposed, for the purpose of realizing simultaneous measurement of blood vessel thickness and blood flow velocity. A blood vessel thickness measurement principle evaluation experimental device with a flow path that imitated a blood vessel was constructed, and a measurement experiment using two-wavelength laser speckles of 420 nm and 780 nm was conducted. From the experimental results, it was cleared that the measurement method proposed enables simultaneous measurement of blood vessel thickness and blood flow velocity in principle.

Furthermore, similar experiments were performed using two-wavelength infrared laser speckles of 780 nm and 850 nm, and it was shown that simultaneous measurement of blood vessel thickness and blood flow velocity is possible even from two-wavelength infrared laser speckles.

研究分野：機械工学

キーワード：血管計測 血管厚さ 血流 レーザースペckル 多波長計測 赤外レーザ

### 1. 研究開始当初の背景

日本において、2025年には高齢化率が30%に達することが予想されており(引用文献)、今後どのように医療・介護体制を整えていくかが重要な課題となっている。医療従事者の負担の増加や持病を持つ高齢患者の通院抑制といった問題が生じているため、在宅医療への需要がさらに増加すると予想される。在宅医療の重要性が高まる中、患者本人やその家族が使用する医療機器のニーズが高まっている(引用文献)。在宅医療において患者が自分自身で健康管理をするための検査が重要であり、その中でも血流情報を通じた検査の重要性は高い。日常的な検査のためには非侵襲での高精度な血管情報の計測が必要となる。

非侵襲で血流情報を得ることができる計測方法として超音波を用いた計測方法(引用文献)や光の持つ透過性を利用した計測方法がある。光を用いた計測方法の中でもレーザースペckルを用いた血管の情報の計測方法は、簡単な光学系の構成でありながら、計算に用いる画像の枚数や画素数を変えることで、空間分解能や時間分解能、外乱に対する安定性を調整できる。Speckleを利用した血管情報の計測の研究例は多く、歯科用の血流センサの開発(引用文献)や、血流速度の二次元センサを利用した眼底血流の計測評価に関する研究(引用文献)例が挙げられる。Speckleを用いた血管の情報の計測に関する研究や開発のほとんどが流動層の流速計測に関するものであり、血管の厚さに相当する流動層の厚さを推定する研究は少ない。これに対して血流の速さに当たる流動層の流速と血管の厚さに相当する流動層の厚さとの同時推定が可能になれば、血管の閉塞など重要な生体情報を得ることが出来ると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究ではレーザースペckルを用いた血流速さと血管厚さの同時計測の実現を目的として、複数の波長のレーザースペckル情報から血流速さに相当する流速と血管厚さに相当する流動層厚さの情報を分離する方法を提案した。

また、皮膚と血管を模擬した試料を作成し、レーザースペckル計測実験をおこなうことにより、レーザースペckルによる血流速さと血管厚さの同時計測の可能性を調べた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多波長レーザースペckルによる血流速さと血管厚さの同時計測方法

2波長のレーザースペckル情報から血流速さと血管厚さの情報を分離することによる、血流速さと血管厚さの同時計測方法の原理を図1に示す。長波長レーザと短波長レーザでは透過性に違いがあり、一般に長波長レーザは透過厚さが大きいのに対して短波長は透過厚さが小さい。このレーザの波長による透過厚さの違いを利用した皮膚厚さに相当する静止層厚さの計測方法が提案されている(引用文献)。流動層を透過してその奥の静止層まで届く長波長のレーザを用いた場合、そのSpeckleの時間変化には流動層厚さと流速の両方の情報が含まれる。一方、流動層の奥の静止層まで届かない短い波長のレーザを用いた場合、そのSpeckleの時間変化には流速の情報のみが含まれ、流動層厚さの情報は含まれない。

そこで、まず、短波長のレーザースペckルの時間変化から流速の情報を推定する。次に、長波長のレーザースペckルの時間変化から流速の情報を差し引くことにより、流動層厚さの情報を得ることができ、レーザースペckルによる流動層厚さと流速の同時計測が可能となる。

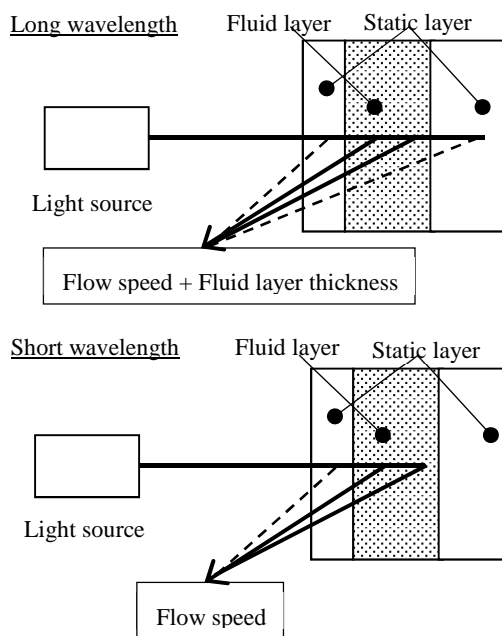


図1 多波長レーザースペckルによる血流速さと血管厚さの同時計測の原理

#### (2) 血流速さと血管厚さの同時計測実験方法

提案する血流速さと血管厚さの同時計測方法の有用性を評価するため、流動層厚さと流速によるSpeckle変化の評価実験をおこなった。本研究では、生体を模擬する試料として、厚さの異なる流路を設けたポリエチレン製の試料を製作した。生体を模擬する試料としてポリプロピレンが用いられた研究例が報告されている(引用文献)が、ポリプロピレンとポリエチレンは光学特性が似ていることから、本研究ではポリエチレンを用いた。

スペックル変化の評価実験装置の構成を図2に示す。異なる流動層厚さの流路を持つ試料を製作し、表面にポリエチレン製のカバープレートに接着剤で貼り付けた。カバープレートの厚さは3 mmであり、これは流動層の手前の静止層厚さに相当する。実験では、試料に流体を流した状態でカバープレートの手前からレーザー光を照射する。試料で散乱された光をCMOSカメラにより測定する。CMOSカメラは正反射となる角度から30°だけ角度を持たせて設置した。

実際に製作した評価実験装置の外観を図3に示す。ビーカーからポンプを用いて流体を吸い上げ、流速を調整して試料に供給する。試料を通過した流体はビーカーへと排出され、再度利用される。流体には水道水を用いた。光源、試料、CMOSを遮光性のエンクロージャの中に配置することで、外部からの光の流入を抑制した。

本研究ではスペックル変化を評価するために平均輝度変化を用いた。dtの時間間隔で撮影したスペックル画像において、ピクセル毎に輝度の差を求め、全ピクセルの輝度差の絶対値の合計をピクセル数で除することで平均輝度変化を算出した。

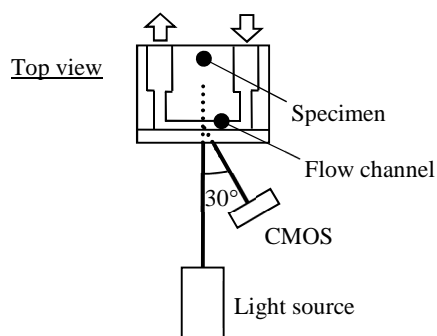


図2 実験装置の構成

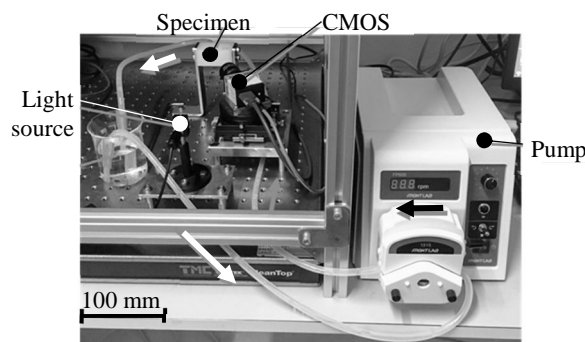


図3 実験装置の外観

#### 4. 研究成果

##### (1) 多波長レーザースペックルによる血流速さと血管厚さの同時計測原理の検証

本研究で提案する血流速さと血管厚さの同時計測方法の原理的な有用性を検証するため、420 nmと780 nmの2波長のレーザー光源を用いて流動層厚さと流速によるスペックル変化の評価実験をおこなった。流動層厚さの異なる試料を用い、流速を0.1 m/sから0.45 m/sまで変化させてレーザーを照射することで、流動層厚さ0.4, 1.0, 1.2, 1.8 mmにおけるスペックルパターンを取得した。実験条件を表1に示す。

表1 原理検証実験の実験条件

流体	水道水
流速	m/s 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45
流動層厚さ	mm 0.4, 1.0, 1.2, 1.8

波長420 nmのレーザーにより得られた流動層厚さおよび流速と平均輝度変化の関係を図4(a)に、波長780 nmのレーザーにより得られた流動層厚さおよび流速と平均輝度変化の関係を図4(b)にそれぞれ示す。

波長420 nmの時、流動層厚さ1.2 mmと1.8 mmではスペックル変化は流動層厚さの影響を受けておらず、流速に対してほぼ線形の関係が得られた。一方、流動層厚さ1.0 mm以下になると、スペックル変化が流動層厚さの影響を受け、流動層厚さ0.4 mmではその影響が特に大きい。流動層厚さ1.0 mm以下では、流動層厚さによりスペックル変化に違いが生じていることから、レーザー光が流動層を透過し、流動層の奥の静止層まで到達したものと考えられる。

波長780 nmのレーザースペックルにおいて、流動層厚さ0.4 mmでは流速に伴う平均輝度変化の違いが小さかったものの、他の流動層厚さでは、流速の増加に伴い平均輝度変化が大きく変化した。流動層厚さが大きいほど流速に対する平均輝度変化の増加も大きく、流動層厚さと流速の両方がスペックル変化に影響を与えていることが分かる。

上記の実験結果を元に流速と流動層厚さの推定式を導出し、流速と流動層厚さの同時推定の試行を行った。実際の流速および流動層厚さと推定によって得られた流速および流動層厚さの関係を図5に示す。流速と流動層厚さの実測値と推定値の相関係数を計算した結果、流速の推定における相関係数は0.740、流動層厚さの推定における相関係数は0.598だった。この結果から流速と流動層厚さの推定に関して正の相関が得られており、複数波長のレーザースペックルによる流動層厚さと流速の同時推定が可能であることが分かった。その一方で、推定の精度に問題があり、推定の精度を向上させることが今後の課題であることを示した。

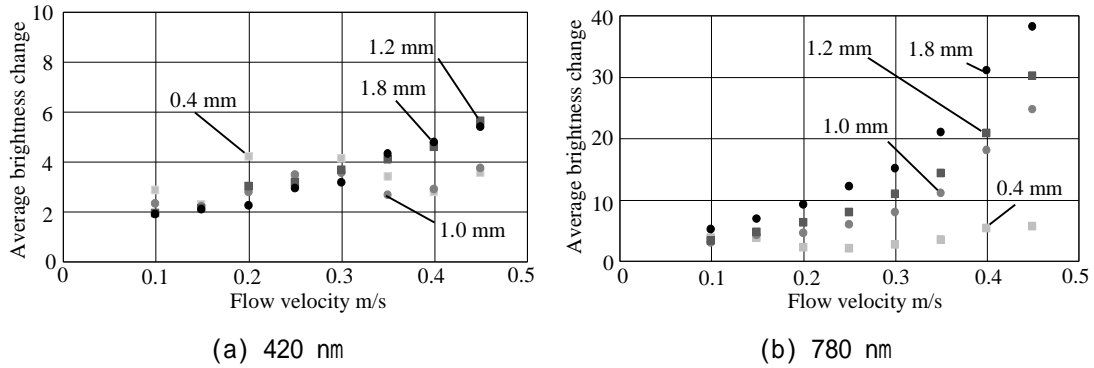


図4 流動層厚さ，流速とスペックル平均輝度変化の関係

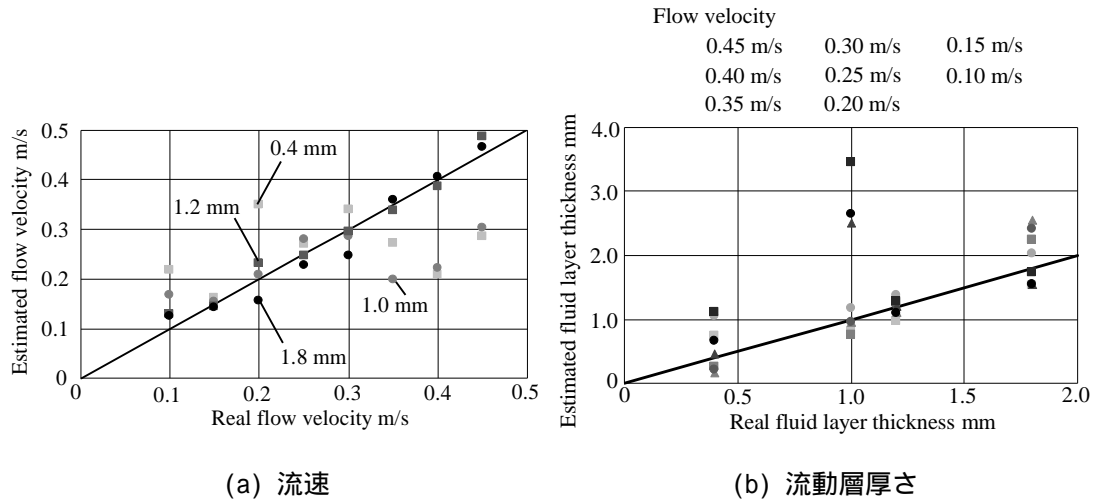


図5 流速および流動層厚さの推定結果

(2) 2 波長の赤外レーザースペックルによる血流速さと血管厚さの同時計測方法の検証

(1)の実験では 420 nm と 780 nm の 2 波長のレーザースペックル情報を用いた場合において血流速さと血管厚さの同時計測方法の検証を行った。しかしながら，420 nm のような短波長のレーザー光はエネルギーが大きく，日常的に皮膚に照射するには適さない。実用性を確保するためには長波長の可視光または赤外レーザーを用いた推定手法が必要であるものと考えられる。また，この研究では流動層厚さ 0.4 mm から 1.8 mm の範囲で推定手法の検証を行っており，特に血管径の計測において重要となる動脈の径から考えると計測対象とする流動層厚さが小さい。

そこで，780 nm と 850 nm の 2 波長赤外レーザースペックルを用いて流動層厚さと流速の情報を分離する方法について検証を行った。実験条件を表 2 に示す。試料の流動層厚さを 3.0 mm から 5.0 mm とし，流速を 0.1 m/s から 0.8 m/s まで 0.1 m/s 刻みで変化させてレーザーを照射することで，スペックルパターンを取得した。

表 2 2 波長赤外レーザースペックル計測実験の実験条件

流体	水道水
流速	m/s 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
流動層厚さ	mm 3.0, 4.0, 5.0

波長 780 nm のレーザーにより得られた流動層厚さおよび流速と平均輝度変化の関係を図 6 (a) に，波長 850 nm のレーザーにより得られた流動層厚さおよび流速と平均輝度変化の関係を図 6 (b) にそれぞれ示す。

780 nm と 850 nm どちらの波長においても，単調増加とはなっていないものの，流動層厚さと流速それぞれの増加に伴う平均輝度変化の増加がみられた。このことから，780 nm と 850 nm どちらの波長においても平均輝度変化は流動層厚さと流速両方の影響を受けることが分かる。ここで流動層厚さは照射するレーザーの波長の影響を受けにくく，平均輝度変化と比例的な関係にあり，流速の変化は照射するレーザーの波長の影響を受けるものと仮定することで，2 波長のレーザースペックル情報から流速と流動層厚さの情報を分離する方法を求めた。

実際の流速および流動層厚さと推定によって得られた流速および流動層厚さの関係を図 7 に示す。流速と流動層厚さの実測値と推定値の相関係数を計算した結果，流速の推定における相関係数は 0.754，流動層厚さの推定における相関係数は 0.511 だった。

この実験結果より，2 波長の赤外レーザースペックルからでも流動層厚さと流速の同時推定が

可能であることを明らかにした。しかしながら、実測値に対して推定値のばらつきが大きく、推定の精度は低い。そのため、平均輝度変化の計算において平均化に使用する画像の枚数等に検討を加え、推定精度を向上させることが今後の課題であることを示した。

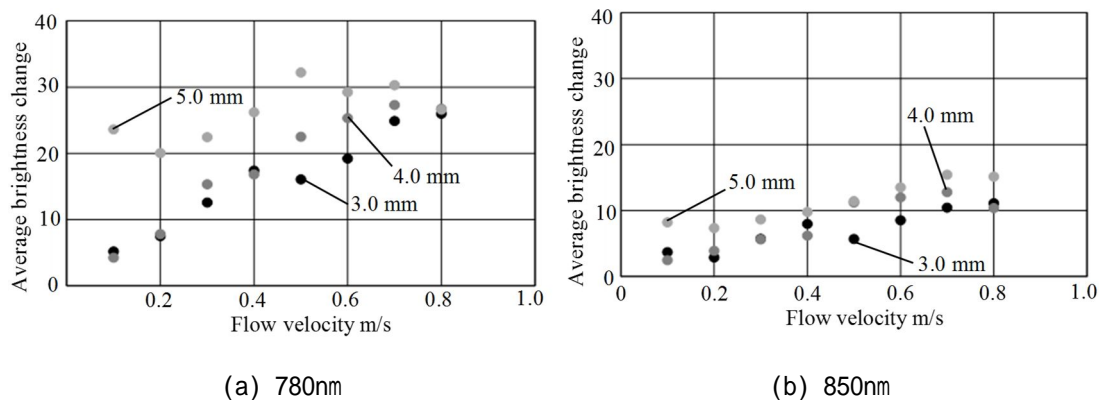


図6 赤外レーザスペckルにおける流動層厚さ、流速とスペckル平均輝度変化の関係

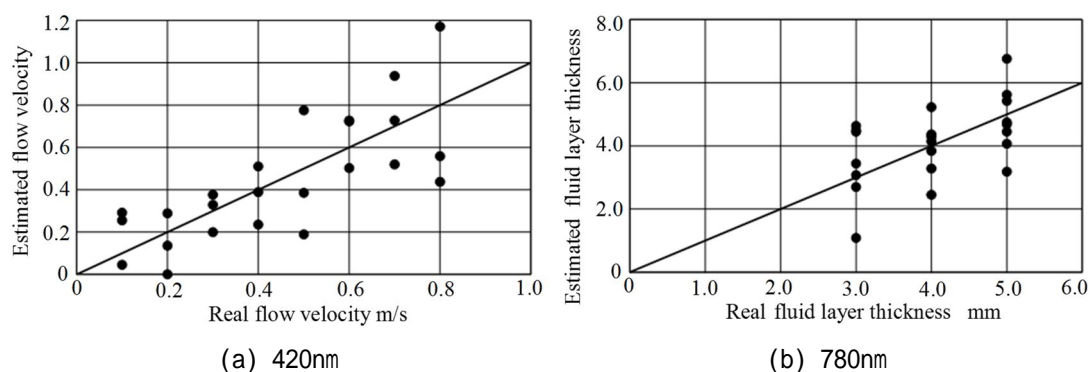


図7 2波長赤外レーザスペckルを用いた流速および流動層厚さの推定結果

#### <引用文献>

前田 浩利, 在宅医療のニーズの高まりの社会的背景と在宅医療がもたらす医療のパラダイムシフト, 26巻, 2015, 3-13

厚生労働省, 在宅医療における医療機器等ニーズ調査 報告書, 2013

J.C. Hartman, D.A. Olszanski, T.G. Hullinger and M.N. Brunden, In vivo validation of a transit-time ultrasonic volume flow meter, Journal of Pharmacological and Toxicological Methods, 31巻, 1994, 153-160

大久保 昌和, 松本 敏彦, 成田 紀之, 飯島 守雄, 小林 久純, 伊藤 誠康, 中庭 敏博, 藤居 仁, 歯科用血流画像化装置の開発, 日本補綴歯科学会誌, 42巻, 1998, 754-759

玉置 泰裕, レーザースペckル血流計を用いた眼底血流の評価, 日本レーザー医学会誌, 18巻, 1997, 17-21

松村 隆弘, 向川 康博, 松下 康之, 八木 康史, 多波長スペckル相関を用いた層構造の深さ推定, 情報処理学会研究報告, 23巻, 2013, 1-6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 澤野 宏, 鬼沢 紳太郎, 飯田 将史, 小檜山 俊介	4. 巻 20
2. 論文標題 レーザーベッセルを用いた流動層厚さと流速の同時推定に関する基礎研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 165-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.20.165	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0件

〔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
---------	---------