

# レーザー・ドップラー血流計の研究

## Research on the Laser Doppler Blood Flow Sensor

量子・物質工学科 中川（賢）研究室 奥村勉

### 1. はじめに

近年の医療分野におけるレーザーの応用には目覚ましい発展が見られます。1960年にレーザーの発振に成功するとすぐ、1961年には網膜剥離の手術にレーザーが使われ、最近ではレーシックや皮膚のシミ取りが一般的に行われるようになりました。また工業製品の加工、成形、研磨、測定などにも幅広くレーザーが応用されるようになってきています。本研究では、予防医療、生体異常の早期発見に有用となるレーザー血流計の開発を目的としていますが、市販されているレーザー血流計は価格や、取り扱い易さ、精度にまだ改善の余地があります。また、そのほとんどが据え置き型で日常的に使えるものではありません。そこで、以下の2点を中心に機能を改善し、一般に普及できるものを作製しようと考えています。

#### <遠隔医療>

本体は日常的に装着する事を考え、被験者の負荷となる液晶ディスプレイや、操作部分は持たせず、主に計測だけを行い、スマートフォンなどにwi-fiまたはbluetoothを介してデータを転送。ネットワークを介してリアルタイムに家族や、医師に測定データの異常等を知らせられるようにする。

#### <取り扱い易さ>

取り付け方を間違えると正確な測定ができない為、圧力センサーや温度センサーも併用し、取り付け指示は音声により行う。

レーザー・ドップラー血流計の基本原理は、1975年にMichael D.Sternによって報告され、1981年にはレーザー・ドップラーフローメトリー(LDF)という手法としてBonnerらによって提唱されました。この理論は、移動する散乱物質によって散乱された光が微少にドップラーシフトを受けることで、光の波長がシフトする事を検出するもので、基本的な装置は、図1のようにLD（レーザーダイオード）とPD（フォトディテクター）を組み合わせたものになります。

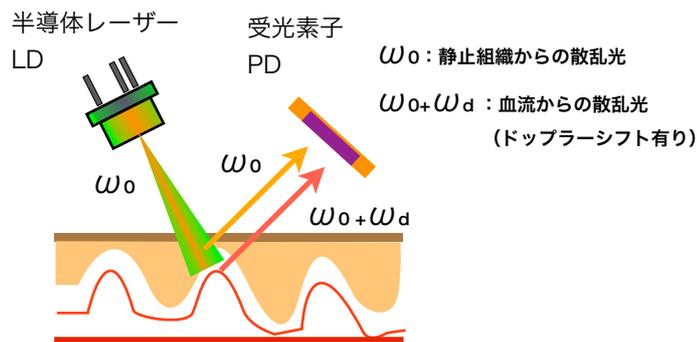
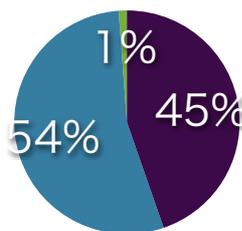


図1. 血流センサーの基本構成

### 2. 血流量

赤血球は、身体に存在する20兆個ともいわれる細胞に対して酸素や栄養素を運んでいる。直径は $8\mu\text{m}$ 、厚さが $2\mu\text{m}$ ほどの両面中央が凹んだ円盤状であり、中央の厚さは $1\mu\text{m}$ である。血液の中で赤血球が占める割合は40~50%である。



● 赤血球 ● リンパ ● 白血球、血小板

赤血球はシアル酸の外膜に覆われマイナスの電子を帯びていて互いに癒合することなく、血管内を快調に流れている。しかし、冷え性で瘀血をひきおこしている患者の血液の場合、もともとはマイナス電子を帯びていた赤血球が、酸化によってプラスの電荷をも帯び、コインを並べたように連なり（癒合）、その結果血流が悪くなる。また同時に身体でガードマン役を果たすはずの白血球が赤血球にとりかこまれるような形になって活動が阻害されている。つまり、瘀血になると

全身の組織への酸素供給も悪くなり、その結果新陳代謝も低下し、身体も冷え、免疫も低下する。健康な赤血球であれば、毛細血管を通過する時でも自由に変形しスムーズに通過するが、瘀血だとスムーズに通過しなくなる。この状態だと脳梗塞や心筋梗塞を引き起こす危険性が高くなる。

血流量とは一つの血管のある断面を単位時間に通過する血液の容積のことで、mL/minで表します。

断面積をSとすると、血流量Qは、血流速度Vと、断面積Sの積である $V \cdot S$ となる。 $Q=V \cdot S$

この速度は、太い動脈では、200~500mm/sec、毛細血管で、0.5~1mm/secとなっています。

動脈では、心臓の鼓動に同期して血流量は変化しますが、毛細血管中ではその変化は測定できないくらい微小なものとなっています。※Qの値は、太い血管ではVが遅くなり、細い血管では早くなるため一定となる。

### 3. 測定原理

半導体レーザーより生体組織に照射された光は、生体の静止組織により後方散乱しPDで検出される。この時の散乱光の周波数は元の周波数を保ったままである。一方、血管中を移動する赤血球などの血球細胞から反射した光は、その移動速度に応じた微小のドップラーシフト $\Delta f$ を受けることになる。静止組織から散乱した周波数と、この変調周波数 $f + \Delta f$ の干渉によって、差周波 $\Delta f$ がビート信号として観測される。

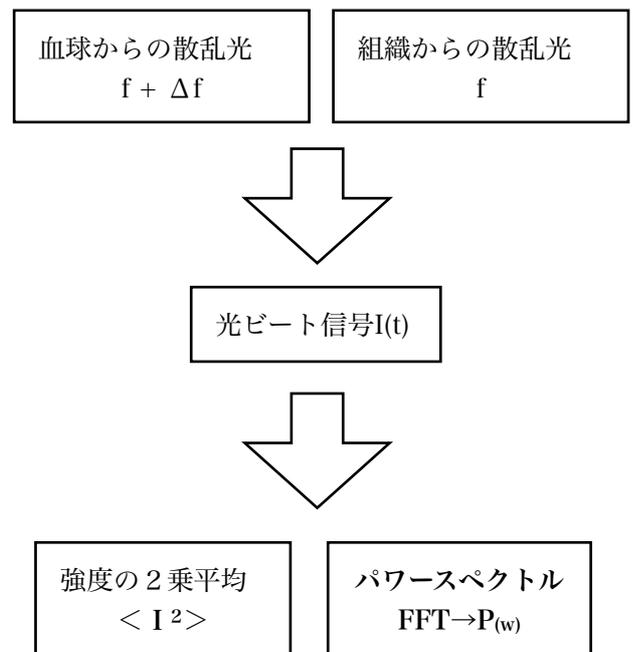
変調周波数 $\Delta f$ は、元の光の周波数 $f$ よりも非常に遅い。例えば波長 $\lambda = 780\text{nm}$ の光の周波数は $f=c/\lambda$ より385THzであり、通常のPDの応答速度を超えています。それに対して光ビート周波数 $\Delta f$ は血球細胞の移動速度にもよるが、せいぜい数kHz~数10kHzであり、通常のPDで十分応答できる周波数帯域である。観測されるPDの出力は、DC信号に $\Delta f$ の強度変調信号が重畳されたような波形となる。

このビート信号を解析する事によって血流量を算出する。ただし、算出された値は相対的なものであって、生体組織内からどれぐらいの割合で光が散乱するかは、体の部位や、組織の構造によっても異なるので注意が必要である。

### 4. 血流量の計算

まずビート信号 $I(t)$ をFFT変換し、パワースペクトルを求める。変調周波数は10KHz程度なので、0-10KHzの範囲で周波数の重み付けを行い、積分し、一次モーメントを求める。次に、レーザーパワーに依存しないようにレーザーの出力強度で規格化する。

→図2.



$$\text{血流量} \propto \frac{K \int f P(f) df}{\langle I^2 \rangle}$$

図2. 血流量の算出手順

## 5. 実験方法

実験は図3,4の構成で、前腕、手のひらの角度を変えて行った。パワースペクトルを図5に示す

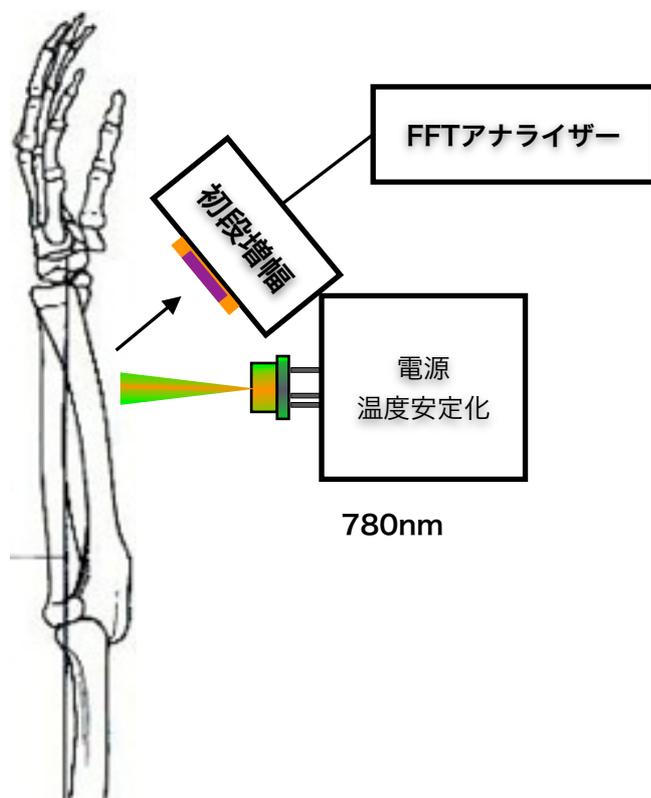


図3 レーザーと前腕（垂直）

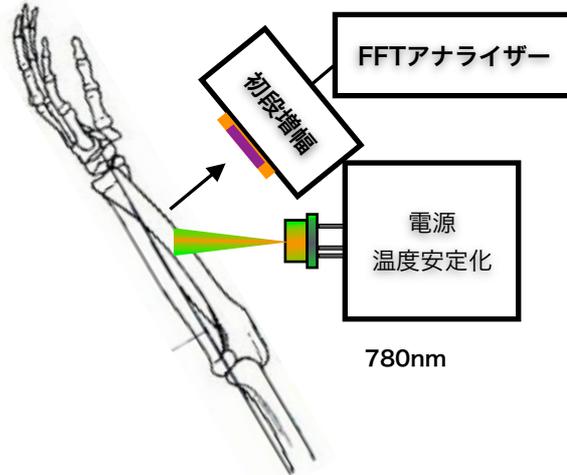


図4. レーザーと前腕（30°）

dBV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

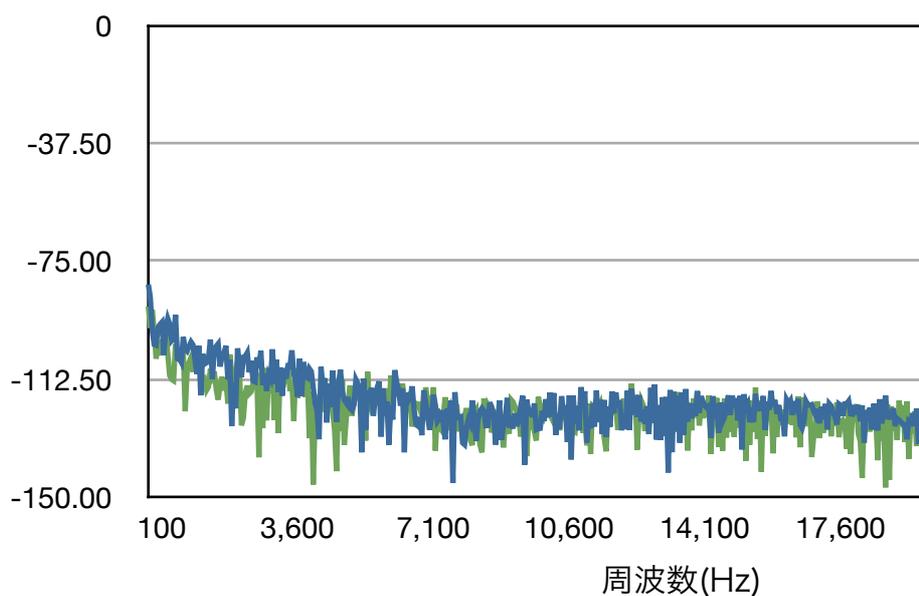


図5. パワースペクトル

## 6. まとめ

毛細血管を流れる血流の速度は毎秒数mmオーダーである。  
横軸であるドップラーシフト周波数は血球の速度に対応し、縦軸であるパワーは血流の量に対応している。  
血流量とはそれぞれの血球の速度と血球の数の積の総和であるので、うなり信号のパワースペクトルを求めて周波数をかけて積分することにより血流量が求まります。

最後に、てのひらでも同様の計測を行った結果を表1に示す。

前腕 (垂直)	前腕 (30°)	てのひら (垂直)	てのひら (30°)
3.0	3.9	3.6	3.8

表1. 計算結果

(参考文献)

- (1)郷間 雅樹, 森 俊太郎, 伊藤 敦也, 橋本 晋弥, 石原 博幸, 立石 潔, 木村 義則  
小型レーザー血流センサーの開発
- (2) Tsuyoshi Miyata, Tetsuo Iwata, Tsutomu Araki  
ゲート動作アバランシェフォトダイオードを用いた高感度反射型パルスオキシメータ
- (3)Ingemar Fredriksson, Carina Fors and Johannes Johansson Department of Biomedical Engineering,  
Linköping University  
Laser Doppler Flowmetry - a Theoretical Framework
- (4)Andrei E. Lugovtsov\*, Alexander V. Priezzhev and Sergei Yu. Nikitin Physics Department of M.V.  
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992, Russia, Leninskye Gory 1, str.2  
Red blood cells in laser beam field: calculations of light scattering