

軽度脱水検知のための極末梢循環血流量センサ

崇城大学工学部機械工学科

野上 大史

1. はじめに

暑熱環境下において、水分摂取を怠るとヒトは容易に危機的な脱水状態に陥る。軽度の脱水状態（見た目にはわからない隠れ脱水；体重のおよそ2%の水分を損失した状態）であれば、水分を補給すれば速やかに回復するにも関わらず、「作業に熱中していた」、あるいは「複数人で作業しており水分摂取がしにくかった」、「終業後の一杯を楽しみにしていた」などにより、毎年のように脱水症状に起因する事故が起こっている。脱水に起因する事故を失くすため、軽度の脱水状態で起る血流不全の検知を目的とし、スマートウォッチなどに内蔵可能な毛細血管網を対象とした高感度レーザドップラ血流センサを開発する。

2. レーザドップラ血流センサの高感度化への取り組み

レーザドップラ血流センサとは、光のドップラ現象を用いた血流量計測方法である¹⁾。図1にレーザドップラ血流計測方法の原理図を示した。レーザ光を生体内に照射すると、レーザ光は散乱を繰り返しながら、生体内へと進入する。血管内を流れる赤血球にレーザ光が散乱された場合には、その速度に応じてドップラシフトを生じ周波数が変化する。このドップラシフトした散乱光と静的組織で散乱されたドップラシフトしていない光が、受光部ではうなり信号として検出することが出来る。このうなり信号をFFTにかけ、血流量演算式を適用することで、血流信号を測定する²⁾。

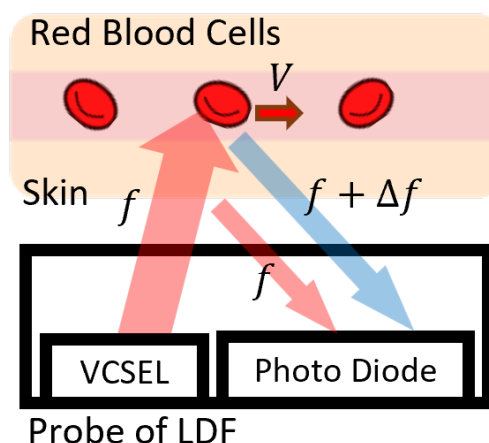


図1. レーザドップラ血流計測方法の原理図

市販されているレーザドップラ血流計は、1つの光源と1つの受光部で構成される。また、その測定深さが1～3mm程度としており、細動脈領域の血流量を測定していることが予測される。実際に測定した信号では、明瞭な脈波信号を測定することが出来る。

本研究では、光源 1 つと小面積の受光部、大面積の受光部でセンサ光学部を構成する（図 2）。光源と小面積の受光部の距離を最小距離となるように設計し、大面積の受光部はそれよりも離れた位置とする。小面積の受光部で表層近傍の遅い流れを検出することを目的とする。大面積の受光部で従来のレーザドップラ血流量センサと同じ細動脈領域の信号を検出する。表層近傍と細動脈領域の血流量を同時に測定することで、末梢から起こる血流不全を段階的に測定できると予想している。

3. レーザドップラ血流量センサの作製方法および試作

試作コストを抑えるため、単純な構造としている。シリコンウエハ上に電極パターンを形成し、ベアチップのレーザ、小面積のフォトダイオード（PD）、大面積の PD のみから光学部は構成される。その光学部をプリント基板に実装し、センサ光学部と PCB の電極部とのワイヤボンディングを行う。外枠の金属カバーや、上面のカバーガラスは接着剤により固定する（図 3）。

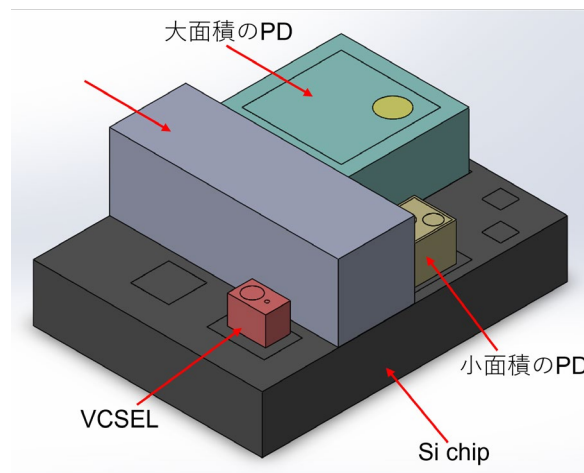


図 2．本研究で試作するセンサ光学部

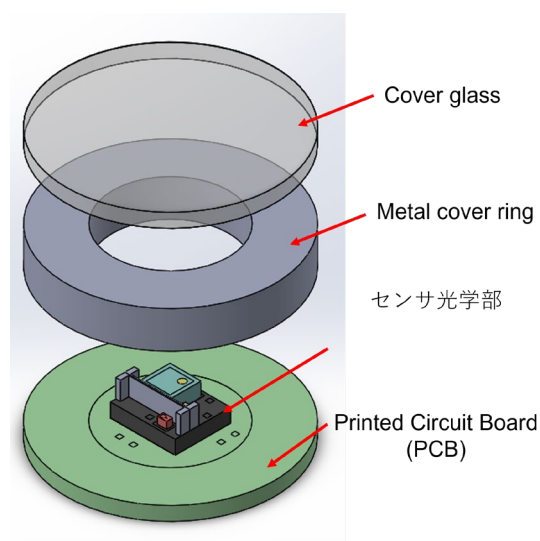


図 3．センサの試作方法

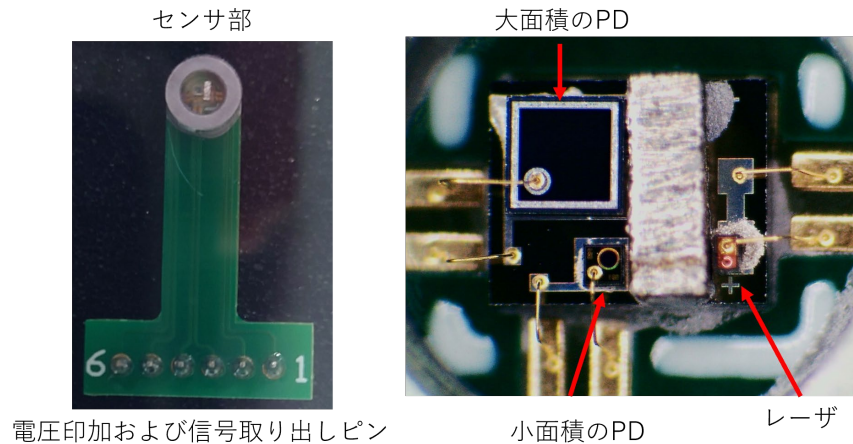


図 4．試作したセンサ部（左）および光学部の拡大図（右）

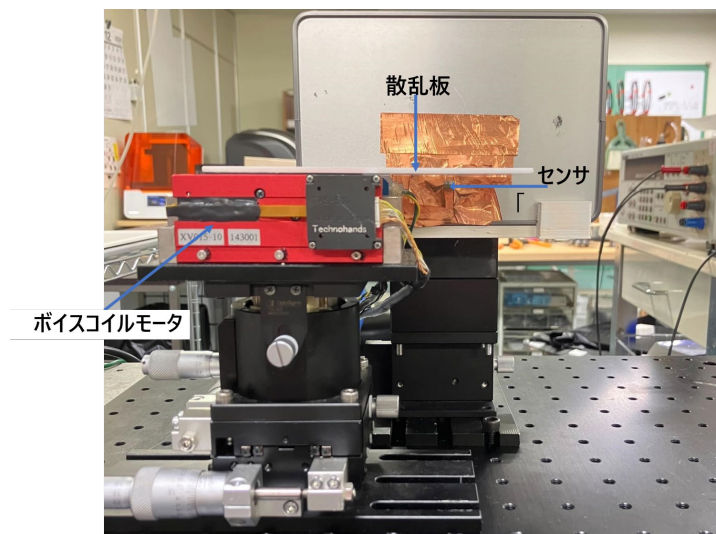
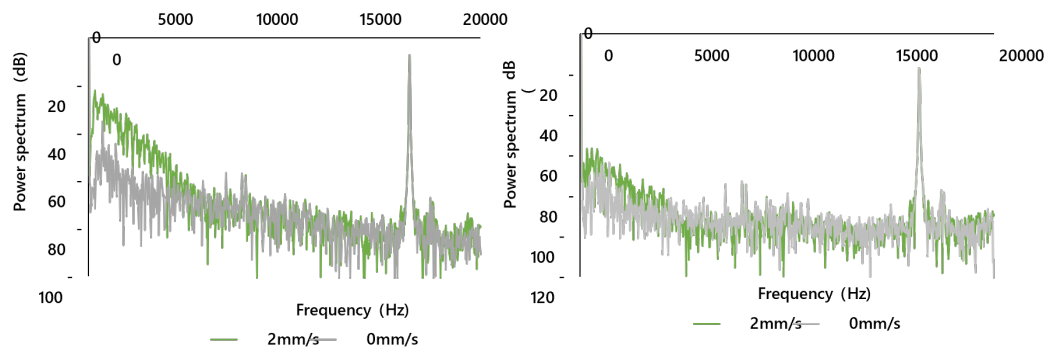


図 5．ボイスコイルモータと散乱板を用いた定速度評価装置

図 4 に、試作したセンサ部および光学部の拡大図を示す。プリント基板より、レーザの印加、小面積の PD、大面積の PD の信号を取り出すことができる。ベアチップのレーザと小面積の PD が最短距離となっており、小面積の PD から離れたところに大面積の PD が配置されている。センサ光学部からそれぞれプリント基板へとワイヤボンディングでの配線が行われていることが確認できる。

4. レーザドップラセンサの動作検証

ボイスコイルモータで散乱板を一定速度で動作させ、センサ信号を評価する（図 5）。PD の信号は、血流量センサの用の専用のフィルタ回路を通して計測する。大面積の PD では、容易にドップラ信号の検出が可能である。一方で小面積の PD は受光量が小さくなるため、システムノイズにドップラ信号が埋もれてしまう可能性があった。実際にこれまでのフィルタ回路を通して小面積の PD を計測した場合には、ノイズに埋もれてしまい、速度変化を検出することができなかった。ゆえに、小面積の PD 用に、オペアンプの選定、帰環抵抗値を変更するなどの改良を行っている。



大面積のPD の測定結果

小面積のPD の測定結果

図 6 . 0mm/s、2mm/s での FFT アナライザでの測定結果

図 6 に FFT アナライザでの測定結果を示す。大面積の PD および小面積の PD、どちらにおいても、0mm/s から 2mm/s において信号変化が見られる。この結果より、レーザドップラセンサとして機能していることがわかる。また、大面積 PD の方が小面積の PD よりも変化が大きくなっており、信号差が発生していることがわかる。測定深さ領域が変わったことにより信号差が発生している可能性もあるが、一方で、小面積の PD のセンサの感度が大面積の PD のセンサの感度より低下しており、ドップラ信号の強度が低下している可能性もある。現状では、どちらが理由であるかは断定できない。

5. まとめ

本研究では、軽度脱水検知で起こる末梢循環不全を検出可能なレーザドップラ血流量センサの開発を行っている。小面積の PD でのドップラ信号の取得が困難であったが、フィルタ回路のオペアンプおよび帰還抵抗値を変更することで、ドップラ信号の取得に成功した。1つの光源で速度領域の早い大面積の PD での測定、速度領域の遅い小面積の PD での測定可能性が示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(公) 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Stern, M. D., Lappe, D. L., Bowen, P. D., Chimosky, J. E., Holloway Jr, G. A., Keiser, H. R., & Bowman, R. L. (1977). Continuous measurement of tissue blood flow by laser-Doppler spectroscopy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 232(4), H441-H448.
- 2) Bonner, R. F., Clem, T. R., Bowen, P. D., & Bowman, R. L. (1981). Laser-Doppler continuous real-time monitor of pulsatile and mean blood flow in tissue microcirculation. *Scattering techniques applied to supramolecular and nonequilibrium systems*, 685-701.