

シャントシステムにおける脳脊髄液流速光計測システムの開発

Development of optical system for measuring velocity of cerebrospinal fluid in shunt system

電気電子情報通信工学専攻 雨宮 駿平

19N5100002B Shunpei Amemiya

1. はじめに

脳に起こる病気のひとつに、水頭症という病気が存在する。頭蓋骨と脳の間は、脳脊髄液と呼ばれる無色透明で純水と性質の似ている液体によって占められており、隙間を循環している。しかし、髄液を産出している脈絡叢や、髄液が吸収されるはずのくも膜顆粒に異常が発生すると、頭蓋内の髄液量が正常な量に対して多量もしくは少量になり、脳が水圧によって圧迫もしくは頭がい骨の内側に衝突してしまい、認知症や歩行障害など様々な症状が現れてしまう。この病気を水頭症という[1]。

この水頭症の代表的な治療法として、脳室から腹腔・心房へシャントチューブ(チューブ)を用いて新たな経路を作り、余分な髄液を流すシャント術(シャントシステム)が行われている。これにより歩行障害は9割の改善、認知障害や尿失禁は8割程度の改善が見込まれるといわれている。シャントシステムは途中に配置されている磁気式バルブを用いて磁器によって外部から段階的に髄液流量の調整を行うが、体内に埋め込まれていることから、この調整は医師の経験と勘によって行っているため、正確な流量調整が出来ていないのが現状である。

よって本研究ではレーザーを用いることでシャントシステム内を流れる髄液流量を非侵襲かつ直接リアルタイム測定する方法の確立を目的としている。

2. レーザを用いた流速測定の原理

本研究で流速測定をするために L2F(laser 2 focus velocimeter)法を用いて測定を行った。これは、レーザーの2点の焦点間を散乱体(異物)が通過した時間を測定して流速を求めるシステムである[2]。この L2F 法の原理について簡単に述べる。

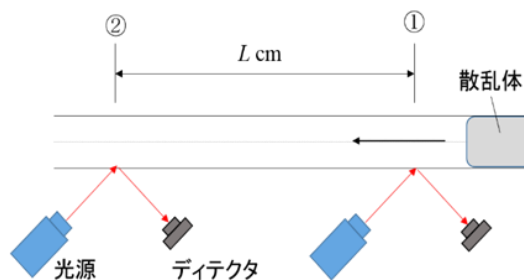


図 2.1 L2F 法の原理の簡略図

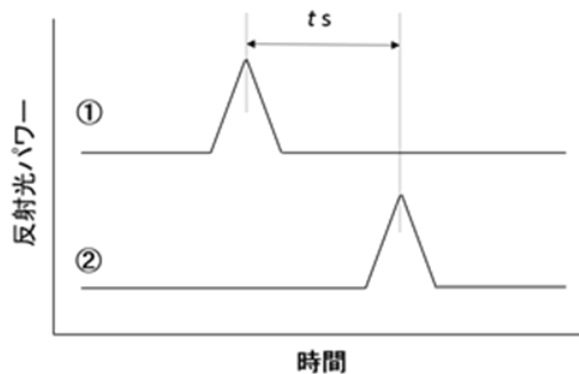


図 2.2 理想的な反応図

図 2.1 は本研究で実際に使用した L2F 法の簡略図である。一定で流れる液体に対して、異なった2つの点にレーザー光を照射し、それぞれの点における反射出力を測定する。このとき、流体とは異なった屈折率を持った散乱体(異物)が一定の速さで流れてくると、2つの測定点での反射出力は、流

れてきた散乱体の影響で図 2.2 のように変化すると考えられる。

2 つの測定点間の距離が L (cm), その平均時間が t (s) とすれば, 散乱体の速さ V (cm/s) は,

$$V = \frac{L}{t} \text{ (cm/s)} \quad (1)$$

で求めることが出来るため, これが流体自体の速さとして算出することが出来る。

3. 過去の流速測定

1981 年に発表された論文では, 図 3.1 のようなシャントバルブのリザーバーに放射線物質を注入し, 放射線量をモニターし, リザーバーからの放射性物質の流出量より髄液の流量を算出しているため, 髄液の流量を直接的に測定しているわけではなく, また放射性物質を用いるため, 人体への安全性に問題がある[3].



図 3.1 シャントバルブ

1983 年の論文では, 図 3.2 に示した体内に気泡を発生させるデバイスを埋め込み超音波によって測定する方法を用いているため, 体内に埋め込むため侵襲測定で, 装置が大掛かりという問題点がある[4].

以上の点から非侵襲かつ直接リアルタイム測定することが可能なデバイスの開発が必要となる。

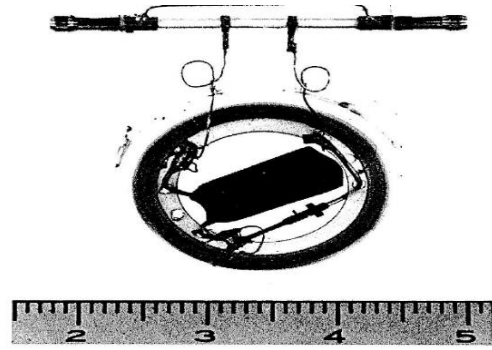


図 3.2 気泡発生装置

4. シャントチューブ内の流速測定

L2F 法を用いて, シャントチューブに直接レーザー光を照射し流速測定を行った. 測定系を図 4.1 に示す. 光源として赤外線レーザーを用いレーザー光をコリメートレンズを通してハーフミラーによって2つに分岐させチューブに直接レーザーを照射し流速を求めた. 髄液の代わりに水を用いてリザーバーに注射器で空気塊(1 cm)を挿入した. 測定結果を図 4.2 に示す. 流速調整はシリンダーの水圧とシャントバルブの2つによって調節した. 上流部と下流部の2点間の距離は 11.3 cm とした.

この結果とシャントシステムによる流出量と目視によるものと比較することで再現性を確認した. 流れ出した流量から算出した流速 V' は次式で求めた.

$$V' = \frac{100A}{\pi r^2 t} \text{ (cm/s)} \quad (2)$$

(A: 流れ出した流量 (g), r: チューブの内半径 (mm), t: 空気が上流から下流までを通り過ぎるまでの時間 (s))

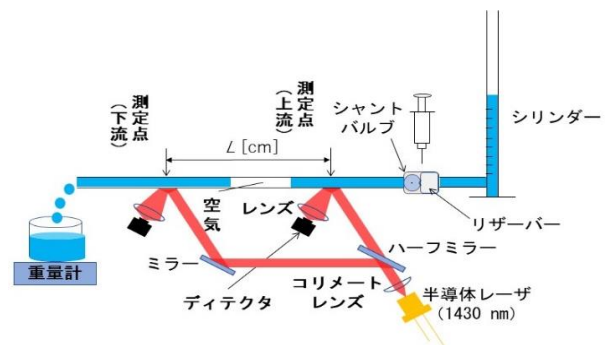


図 4.1 流速測定系 (以前まで)

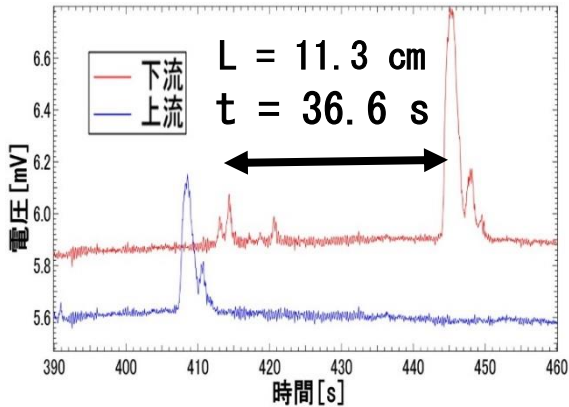


図 4.2 流速測定結果

縦軸が時間で横軸が電圧となる。赤色が上流部、青色が下流部となり、2つの波形が立ち上がったところの時間差は 36.6 s となり 2 点間の距離は 11.3cm なので流速は 0.31cm/s と求まりシャントシステムからの流出量と一致した。

5. 豚の皮を介した状態での流速測定

実際にはシャントチューブは体内に埋め込まれており鎖骨付近の下を通る。シャントチューブが皮膚下にある場合でも測定可能か検証をするために豚の皮を介しチューブ内の流速測定を行った。

測定系を図 5.2 に示す。測定系では、光源として 847 nm の半導体レーザを用いて光ファイバーによりレーザ光を二つに分岐させ、レーザ光をコリメートレンズに通しコリメートし厚さ 2 mm の豚の皮を介したシャントチューブに照射し、Si フォトディテクターで反射光を検出した。信号が微小のため I-V アンプで増幅しデータロガーで読み取った。2 点間の距離は 3.5 cm となり流速の調整はシャントバルブによる 5 段階調整とシリンダーによる水圧によって行った。空気塊のサイズは 1 cm とし図 5.1 のようにシャントバルブのリザーバーに注射器によって挿入し測定を行った。

システムの実用性を高めるために以前までの測定系(図 4.1)と比較すると、レーザ光の分岐をハーフミラーから光ファイバーに変更したことで、2 点間の距離を 11 cm から 3.5cm に短縮すること

にした。これにより 2 点間の距離を短縮することでシステムのコンパクト化に成功した。

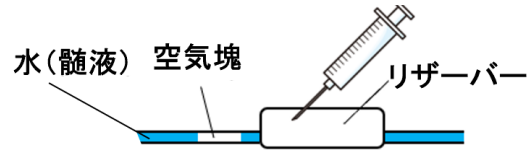


図 5.1 空気塊の挿入様子

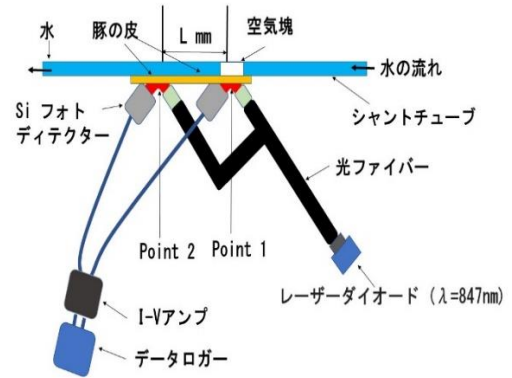


図 5.2 流速測定系(本年度)

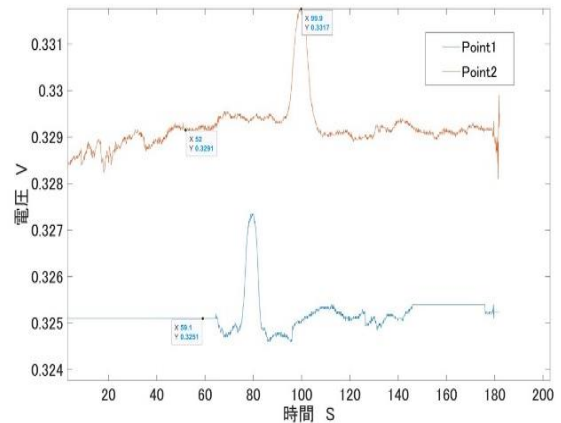


図 5.3 豚の皮を介した流速測定結果

図 5.3 に豚の皮を介した流速測定結果の一例を示した。図の縦軸は電圧を示しており、横軸が時間を示している。青色の波形が上流部を示しており、赤色の波形が下流部を示している。測定における 2 点間の距離を 3.5 cm と設定し、上流部と下流部のそれぞれの電圧波形が立ち上がった部分は空気塊が通過したところを表している。図を見ると、時間差は 40.8 s とわかる。以上の条件を(1)式に代入すると、

$$\frac{3.5 \text{ cm}}{40.8 \text{ s}} = 0.15 \text{ cm/s} \cdot \cdot \cdot (3)$$

0.15 cm/s と求められる。また目視による流速測定と、シャントシステムからの流速測定を確認することで、再現性の確認ができた。

豚の皮を介すことによってチューブからの反射出力が小さくなり、豚の皮からの直接反射光が混ざってしまい S/N 比が低下してしまうため、豚の皮がある場合とない場合と比較すると、10 倍程度反射光強度が異なるが、豚の皮を介した状態でも流速測定が実現できたことが分かった。

次に本測定の中で流速が最も早いものと、遅いものをそれぞれ図 5.4 と図 5.5 に示す。

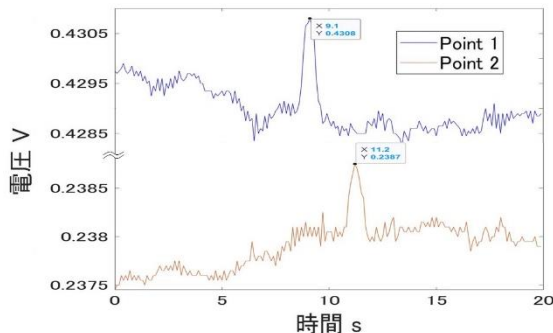


図 5.4 最も速い流速測定結果

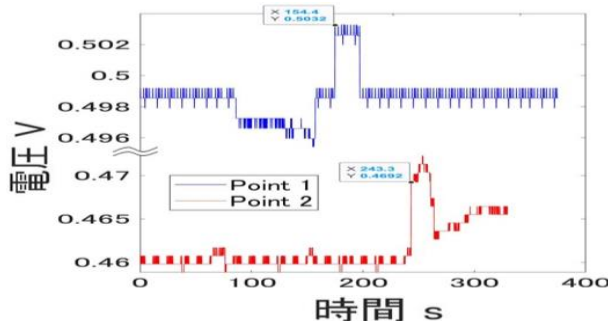


図 5.5 最も遅い流速測定結果

それぞれ 2 点間の距離は 3.5 cm となり図 5.4 の時間差は 2.1 s となり図 5.5 は 88.9 s となった。以上の条件を式(1)に代入すると

$$\frac{3.5 \text{ cm}}{2.1 \text{ s}} = 1.67 \text{ cm/s} \cdot \cdot \cdot (4)$$

$$\frac{3.5 \text{ cm}}{88.9 \text{ s}} = 0.039 \text{ cm/s} \cdot \cdot \cdot (5)$$

と求まり、0.039 cm/s から 1.67 cm/s の範囲まで流速測定できることを確認した。この結果は、一般的な水頭症患者の流速 0.05 cm/s から 1.4 cm/s をカバーできたことを示している[4]。

6. 総括

引継ぎ以前は L2F 法の流速測定結果がシャントシステムからの流出量と比較し 10 %程度の誤差を生じてしまう結果であった。そこでシステムの実用性を高めるためにデータロガーや Si フォトディテクターの導入やレーザ光の分岐をハーフミラーから光ファイバーに変更するといった測定系の大幅改善により、2 点間の距離を 11 cm から 3.5 cm に短縮することができ、誤差を無くすことに成功した。また、一般的な水頭症患者は、鎖骨付近にシャントチューブが埋め込まれていることから、豚の皮(2 mm)を介した状態でも流速測定を行い、0.039 cm/s から 1.67 cm/s の範囲まで流速測定できることを確認した。これにより一般的な水頭症患者の流速 0.05 cm/s から 1.4 cm/s をカバーできた。今後は、臨床実験に向けた入出力部一体化を目指していきたい。

参考文献

- [1] 佐藤修 『水頭症ハンドブック』 (ぼどる文庫, 2002) pp.10-19.
- [2] レーザ計測ハンドブック編集委員会 『レーザ計測ハンドブック』 (丸善株式会社, 1993) pp. 193-194.
- [3] 角家暁, 伊藤正太郎, 久保田紀彦, 前田敏男 『脳脊髄液短絡路内の流量について』 (Neurol Med chir (Tokyo)21,565~571,1981)
- [4] M. Hara, *et al.*, Journal of neurosurgery **58**, 557 (1983)