

内容

1 はじめに.....	2
2 測定原理.....	3
3 実験内容.....	4
3.1 信号処理.....	6
3.1.1 ローパスフィルタ.....	6
3.1.2 ハイパスフィルタ.....	7
3.2 機器.....	8
3.2.1 光学式パーティカルカウンタ.....	8
3.2.2 電動で注射を押す機械.....	8
4 実験結果.....	10
4.1 ローパスフィルタ.....	10
4.2 ハイパスフィルタ.....	12
4.3 異物の判定法.....	13
4.4 0.8 μm のシリンジフィルタと 5 μm のシリンジフィルタを通した水の比較.....	14
4.5 200 μm の異物の信号.....	16
4.6 4 μm の異物の測定.....	18
5 考察.....	19
6 まとめ.....	20
謝辞.....	20

1 はじめに

船のディーゼルエンジンや発電機には潤滑油が必要不可欠である。その潤滑油の中に異物が混入しているとエンジンの部品が磨耗し故障の原因や寿命の低下に繋がる。そのため油中の汚損度を定期的に測定する必要がある。ISO4406 規格では潤滑システムや燃料システムに影響を及ぼす汚染物質は、4 μm 以上の異物でと定められている。

従来の異物測定機はサンプリングが必要であり、リアルタイム性に課題がある。そこでレーザーを用いて異物検出を行う光学式パーティカルカウンタが注目されている。光学式パーティカルカウンタを用いることでサンプリングが不要になりリアルタイム性の高い異物検出が可能である。国際的に用いられている汚染度等級は、ISO 等級 ISO4406-1999(JIS B9933) である。この汚染度コードは、オイル・パーティクルカウンタによって計数された粒子を、粒径と粒子数によって割り当て表示したものである。粒径 4 μm -100 μm という幅広い範囲を測定しなければならない。従来の測定機は 4 μm 以下の小さな異物の測定が可能であったが、光学式パーティカルカウンタでは 4 μm 以下の測定が難しい。

そこで本研究では、光学式パーティカルカウンタから得た信号に信号処理を行うことで、ISO4406 規格に対応する異物を検出する測定機のためのパルス計数手法の検討を行った。

2 測定原理

図 1 に光学式パーティクルカウンタの測定の様子を示す。断面積 $0.4\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ (= 0.24mm^2)の石英 CELL の中にレーザー光を照射して異物が混入した水を流す。レーザー光が異物に当たるとその異物により受光部に当たるレーザー光の光強度が減少する。それにより受光部の電圧が変化する。この電圧の変化を利用し異物の大きさを測定する。レーザー光の横幅は、ブラックセルを用いることで $400\ \mu\text{m}$ となっている。

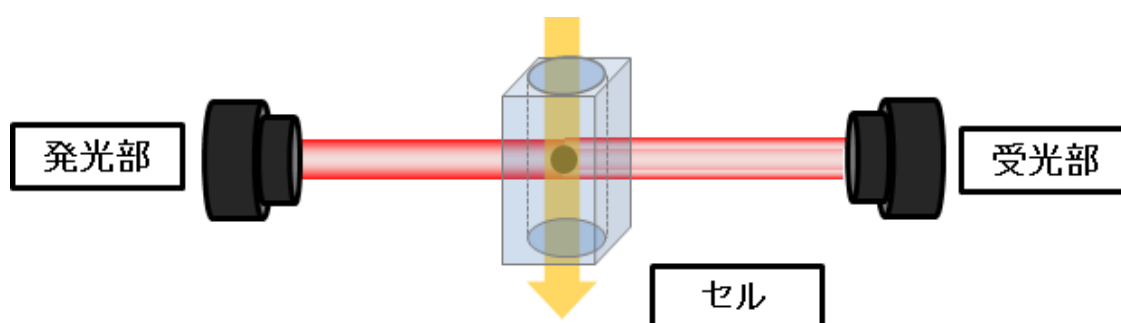


図 1 光学式パーティクルカウンタの異物の測定の様子

3 実験内容

図 2 に異物検出システムの概要図を示す。注射器にフィルタを取り付け、水をろ過する。今回の実験ではシリンジフィルタ ($0.8\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$) を通した水と、シリンジフィルタを通さない水、 $200\mu\text{m}$ の異物を混入させた水の 4 種類の水を測定し比較した。

異物が混入した水を、電動で注射器を押す機械を使用して流速 0.2ml/s でセルの中に通す。受光部のフォトダイオードで光強度を受光電圧に変換し測定して、AD 変換機 (DAQ) を用いて数値化した。このときのサンプリング周波数は 250kHz である。AD 変換によって得られた数値にローパスフィルタを掛け、ローパスフィルタを掛けた値にハイパスフィルタをかける。そしてハイパスフィルタの値の中でプラスの値が連続で 5 個以上ある場合を異物とみなす。そしてプラスの値の最大値を求めることで大きさを測定する。

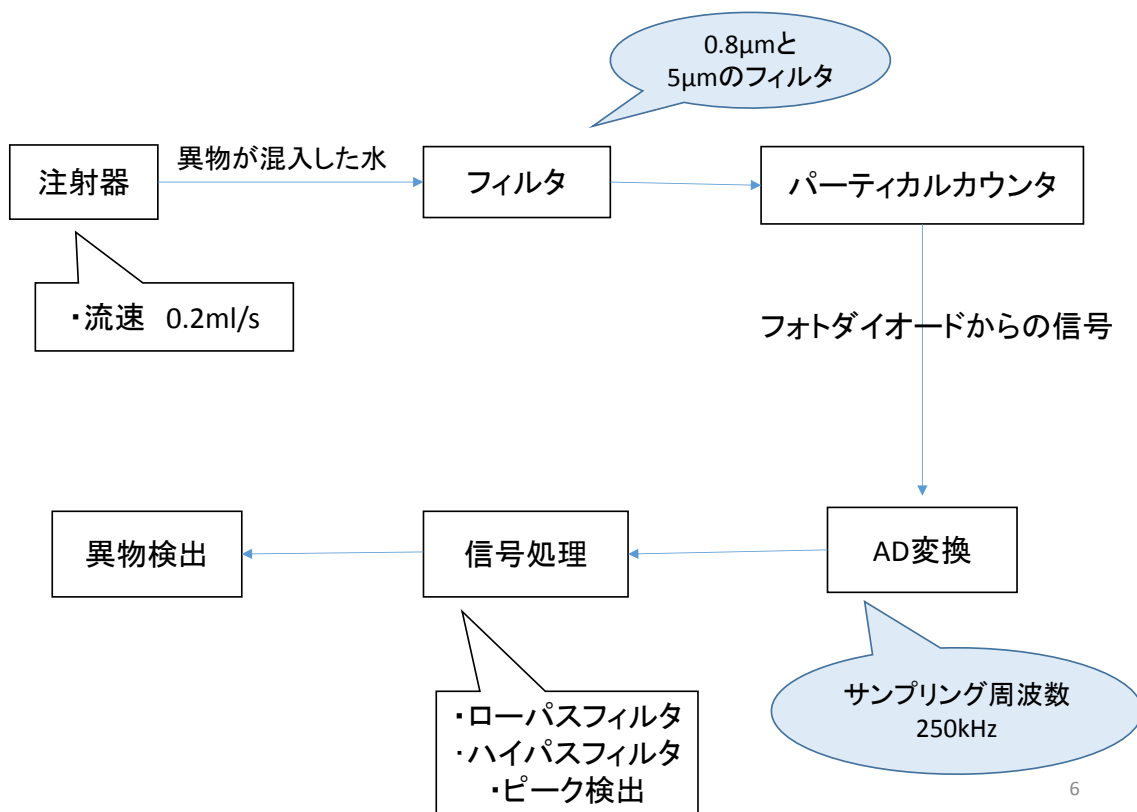


図 2 異物検出システム

3.1 異物を検出する際の信号処理

図 3 に異物を検出する際の信号処理の流れを示す。AD 変換された値にノイズを除去する目的からローパスフィルタをかける。ローパス値のオフセットを引く目的からハイパスフィルタをかける。ハイパスフィルタの処理はローパスフィルタをかけたデータの過去 100 点の最頻値を求める。そして移動平均の値から求めた最頻値を引く。200 μm の異物のパルスの構成点数が 13 点だったことから、4 μm の異物の場合これよりもセルの通過速度が速くなる。そのためハイパスフィルタをかけた後の値の中で正の値が連続で 5 点以上の点を異物とみなし、正の値の最大値を求めることで、異物の大きさを判断する。ローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、ピーク検出の信号処理のプログラミングは C 言語を用いた。

3.1.1 ローパスフィルタ

ローパスフィルタをかけることによって、AD 変換された値を平滑化している。これにより信号のノイズが低減される。

光強度を R_k として過去 t_L サンプル分の平均値をとる。

$$L_n = \begin{cases} \frac{\sum_{k=0}^n R_k}{n+1}, & \text{if } n \leq t_L \\ \frac{\sum_{k=n-t_L}^n R_k}{t_L}, & \text{if } n > t_L \end{cases}$$

今回の実験では t_L を 2 として 3 点の移動平均を用いた。移動平均の点数は擬似的な数値を作りシミュレーションを行うことで 3 点と定めた。

3.1.2 ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタをかけることにより、オフセット分を引く。

ローパス値から過去 t_H サンプル分のローパス値の最頻値 (*Mode*) を引く。

$$H_n = \begin{cases} L_n - \text{Mode}(L_0 \dots L_n) & \text{if } n \leq t_H \\ L_n - \text{Mode}(L_{n-t_H} \dots L_n) & \text{if } n > t_H \end{cases}$$

今回の実験では t_H を大きくしすぎると他の異物のパルスが影響してしまうことから、 t_H を

100 として、過去 100 サンプル分のローパス値を用いた。

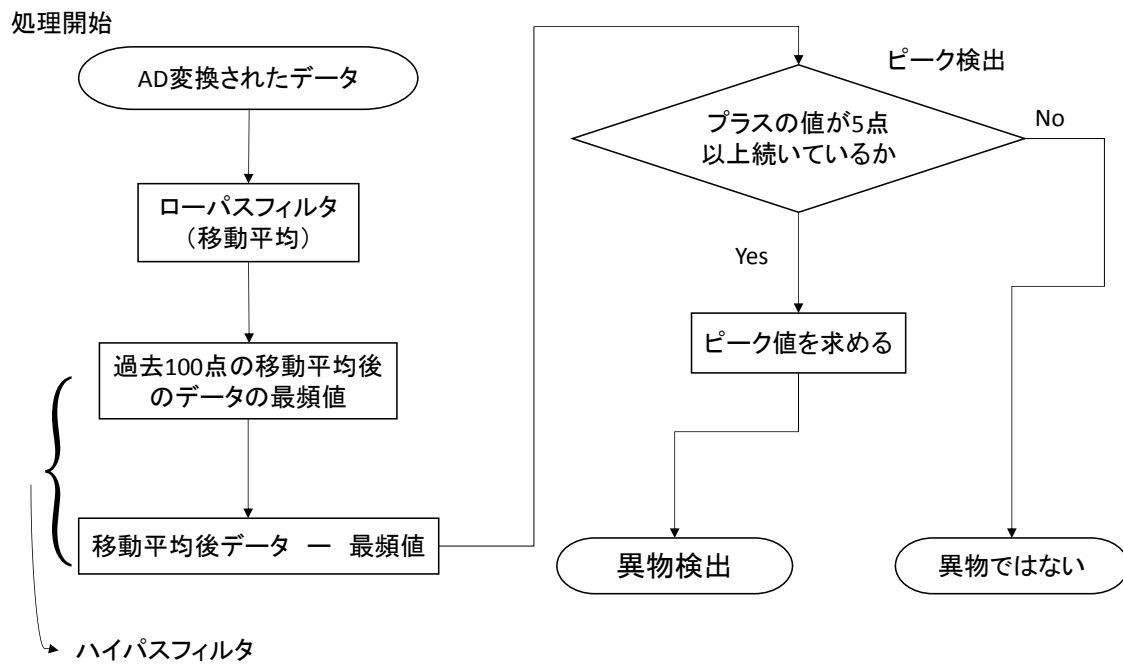


図 3 信号処理の流れ

3.2 機器

本研究で使用した機器および実験装置の構成について述べる。

3.2.1 光学式パーティカルカウンタ

ディテクタ

・シリコンピンフォトダイオード S5821 シリーズ 帯域幅 25MHz

受光感度 0.52 A/W

受光面サイズ $\phi 1.2$ mm

レーザー ADL-6507 5TU-1 波長 655nm

3.2.2 電動で注射を押す機械

ステッピングモータ PK243A1-SG10

FET SUP85N15-21

電源 sunhayato DK-910series

Arduino

図 3 は電動で注射を押す機械の回路図、図 4 は作成した電動で注射を押す機械である。

ステッピングモータを動作させる際に、Arduino を用いた。C 言語でプログラミングを行い、電源を入れると 1 分 30 秒ステッピングモータを正回転した後に 1 分 30 秒ステッピングモータを逆回転させ、停止するというプログラムを作成した。今回は水をシリンジフィルターに通すことからトルクの高いステッピングモータを使用した。

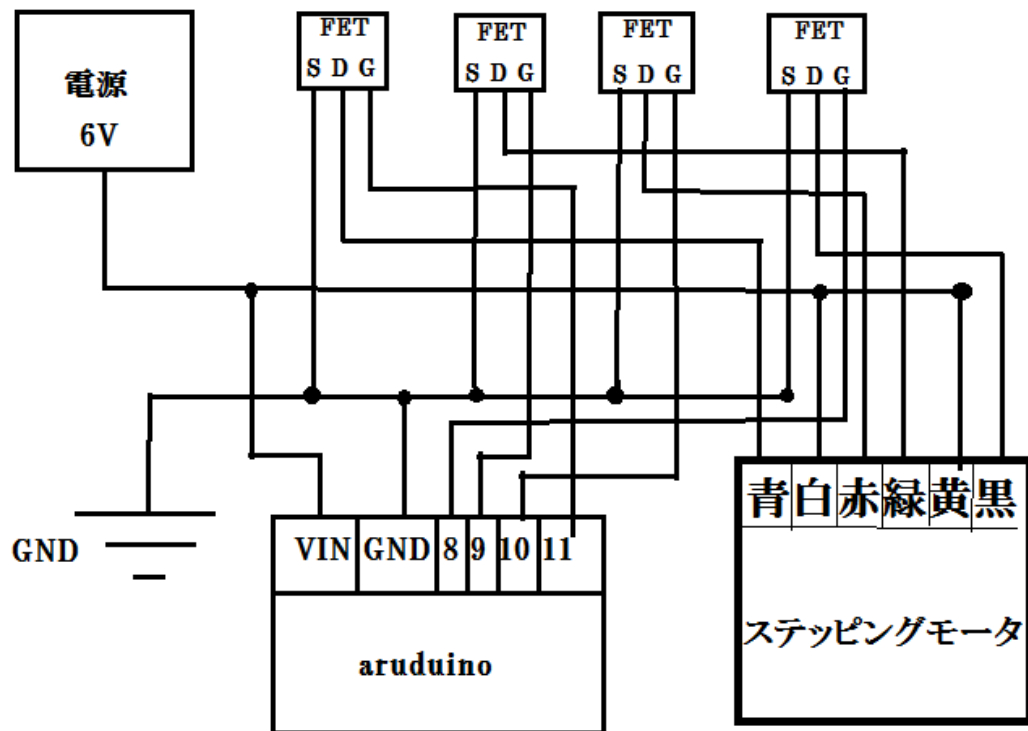


図 3 回路図

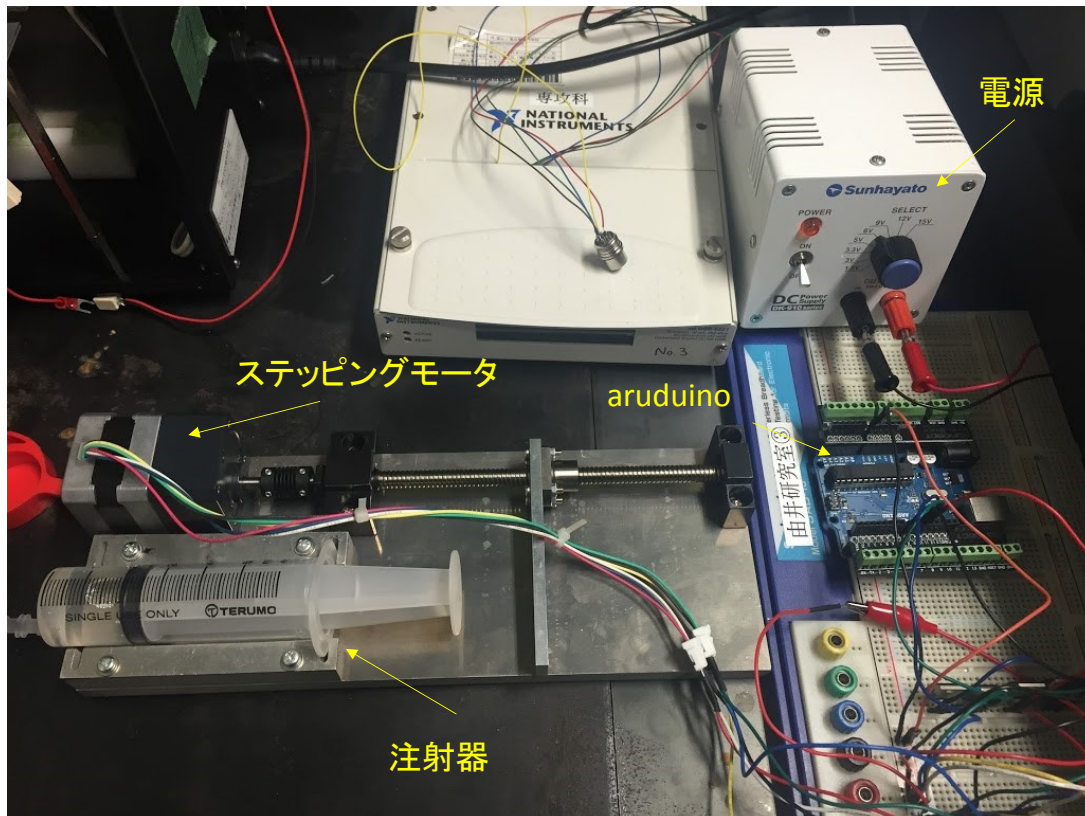


図 4

4 実験結果

4.1 ローパスフィルタ

図 4 にローパスフィルタをかける前、図 5 にローパスフィルタをかけたあとのシリンジ
フィルタに通していない水を測定したグラフを示す。図 4 を見ると 0.6V~0.8V の間のノイ
ズが多いことが分かる。それに対して図 5 のローパスフィルタをかけた後では、ノイズの
幅が減少していることが分かる。このことからローパスフィルタをかけることによりノイ
ズが低減している。

今回の実験では下記の式の R_k を 2 として、3 点の移動平均を行った。

$$L_n = \begin{cases} \frac{\sum_{k=0}^n R_k}{n+1}, & \text{if } n \leq t_L \\ \frac{\sum_{k=n-t_L}^n R_k}{t_L}, & \text{if } n > t_L \end{cases}$$

今回擬似的な数値を乱数などを用いて作成し、シミュレーションを行うことで移動平均
の点数を変えた場合の異物の検討を行った結果、3 点の移動平均とした。

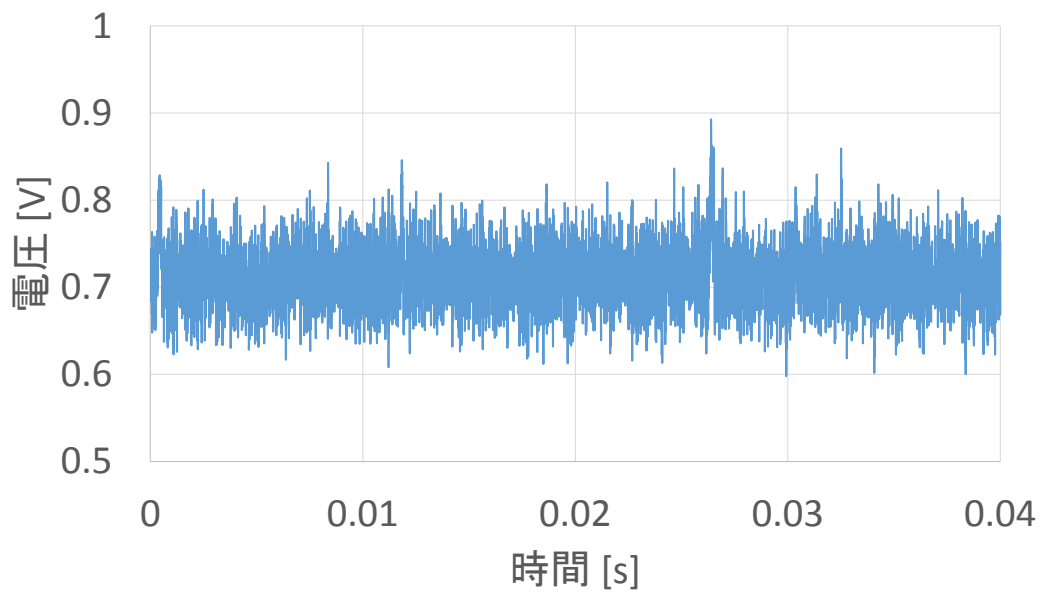


図4 ローパスフィルタをかける前

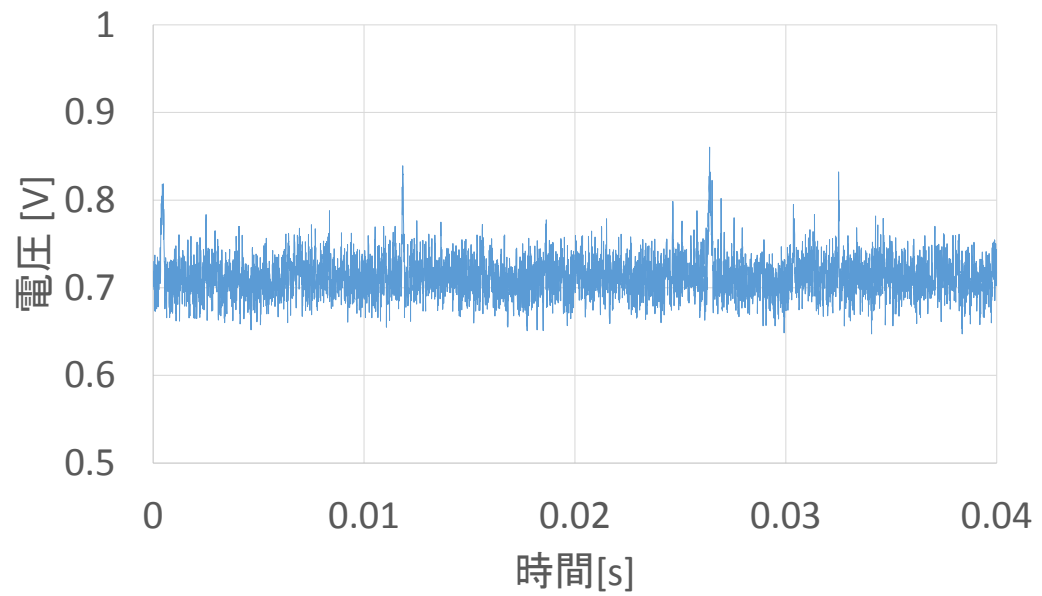


図5 ローパスフィルタをかけた後

4.2 ハイパスフィルタ

図6にハイパスフィルタをかける前とかけた後を比較したグラフを示す。ハイパスフィルタをかける前では、データの規準が0.7V付近だが、ハイパスフィルタをかけたあとでは、オフセット分が引かれていることがわかる。これにより0V以上の点がどれだけ連続しているかを求めることで異物検出を行うことができ、0以上の点のピーク値を求めることで異物の大きさを測定することができる。

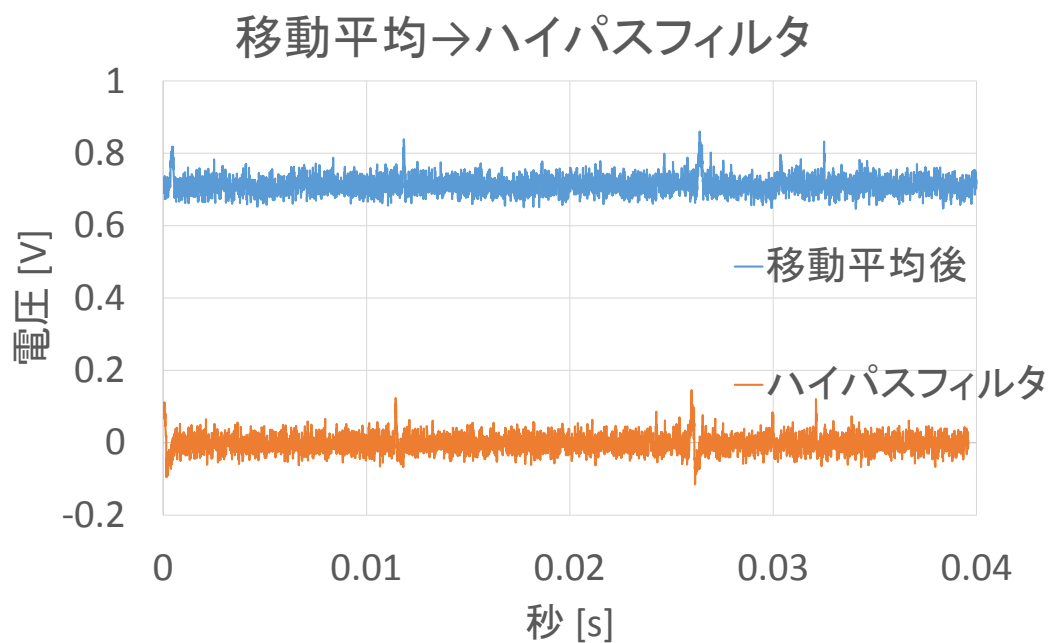


図6

4.3 異物の判定法

図 7 に $200\ \mu\text{m}$ の異物が通過した時の信号を示す。 $200\ \mu\text{m}$ の異物が通過したときのパルスは 0 以上の点が 13 点で構成されている。このことから、仮に $200\ \mu\text{m}$ よりも小さな異物が通過したとすると、山の大きさは光強度の変化が小さくなることから図 7 よりも小さくなり、異物の大きさが小さくなるとレーザー光を通過する異物の通過時間も大きな異物が通るよりも短くなることから、パルスの構成点数も少なくなるということが予想できる。この結果から信号処理のピーク検出を行う際に異物であると判断するパルスの構成点数を 5 以上とした。

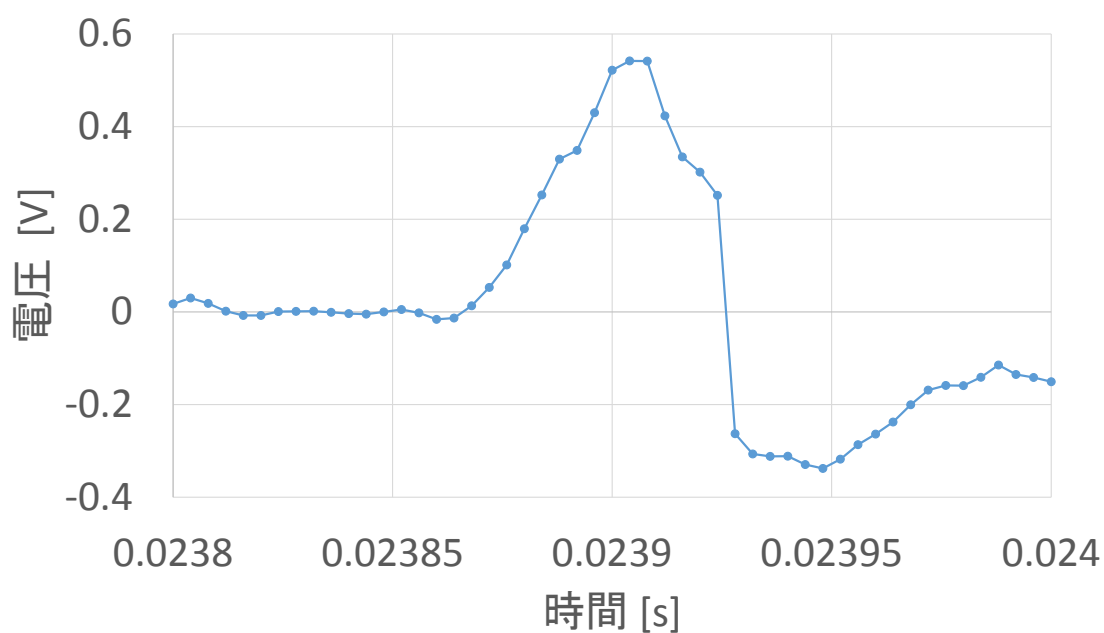


図 7

4.4 0.8 μm のシリンジフィルタと 5 μm のシリンジフィルタを通した水の異物の個数の比較

0.8 μm のフィルタと 5 μm のフィルタの異物の個数の比較を行った。表 1 は 0.8 μm のフィルタを通した水、5 μm のフィルタを通した水を測定した 4 つのデータに信号処理を行って、異物の個数を測定した結果である。また図 8 は 0.8 μm のフィルタと 5 μm のフィルタを通した水を測定し信号処理を行いピーク検出を行った際のピーク値のヒストグラムである。0.8 μm シリンジフィルタを通すと 0.8 μm 以下の異物だけが残った水になり、5 μm のシリンジフィルタを通すと 5 μm 以下の異物が残った水になる。通常は 5 μm のシリンジフィルタを通した水の方が異物の個数が多くなっている。表 1 をみると 5 μm のフィルタを通した水の方が異物の個数が多くなっていることがわかる。このことから 5 μm 以下の一部の異物は測定できていると言える。しかし異物の個数が多いことからノイズの部分も異物とみなしている。従って正しい異物の個数とは言えない。これはノイズの除去が不完全であるために正しい異物の個数が測定できないといえる。

	Data1	Data2	Data3	Data4
0.8 μ m	37555個	37529個	37576個	37501個
5 μ m	42327個	44016個	44326個	44440個

表 1 異物の個数

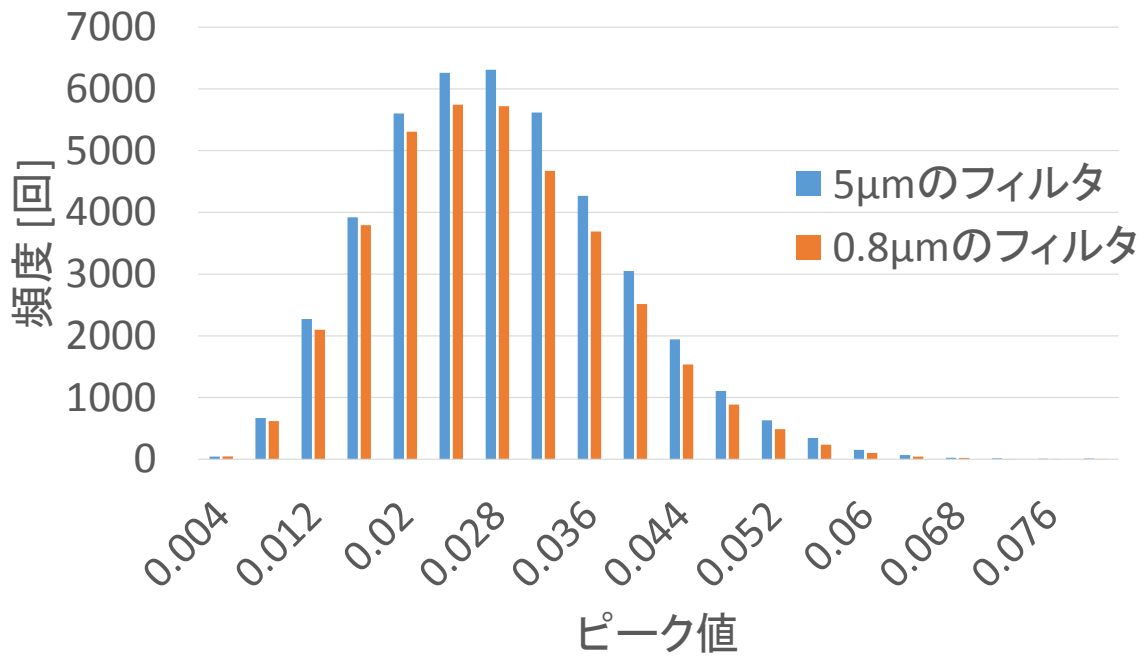


図 8

4.5 200 μm の異物の信号

図 9 は 0.8 μm のシリンジフィルタを通した水、図 10 は 0.8 μm のシリンジフィルタを通した後に 200 μm の塩化ビニールを入れた水を測定したグラフである。図 8 を見ると異物と思われるパルスがない。それに対して、図 9 では約 5.6V と約 3.8V に異物と思われるパルスがでていることがわかる。0.8 μm のシリンジフィルタを通してから 200 μm の異物を入れて測定したので、この信号が 0.8 μm 以下の異物の信号または、200 μm の異物の信号であると言える。図 8 から 0.8 μm のフィルタを通した後は異物と思われる信号がでていないことから、図 9 のパルスは 200 μm の信号だと言える。200 μm の信号が約 5.6V と約 3.8V の 2 つ出力されているが、これは違う大きさの異物ではなく、200 μm の異物がレーザー光を通過する際に完全にレーザー光に入りきらずレーザー光にかすって通過した場合だと考える。

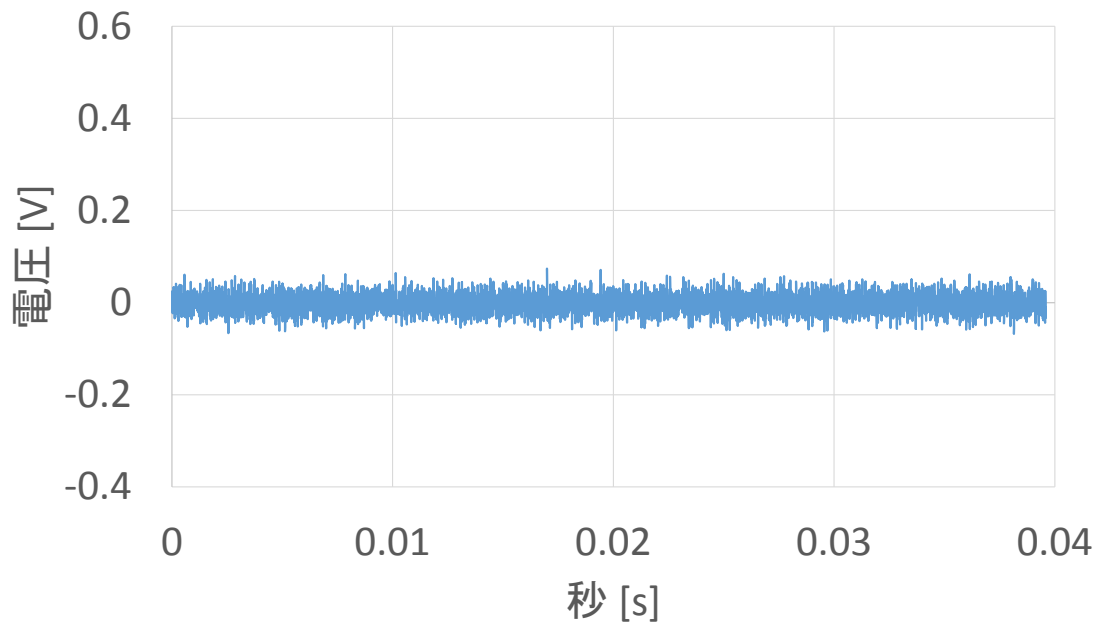


図 9

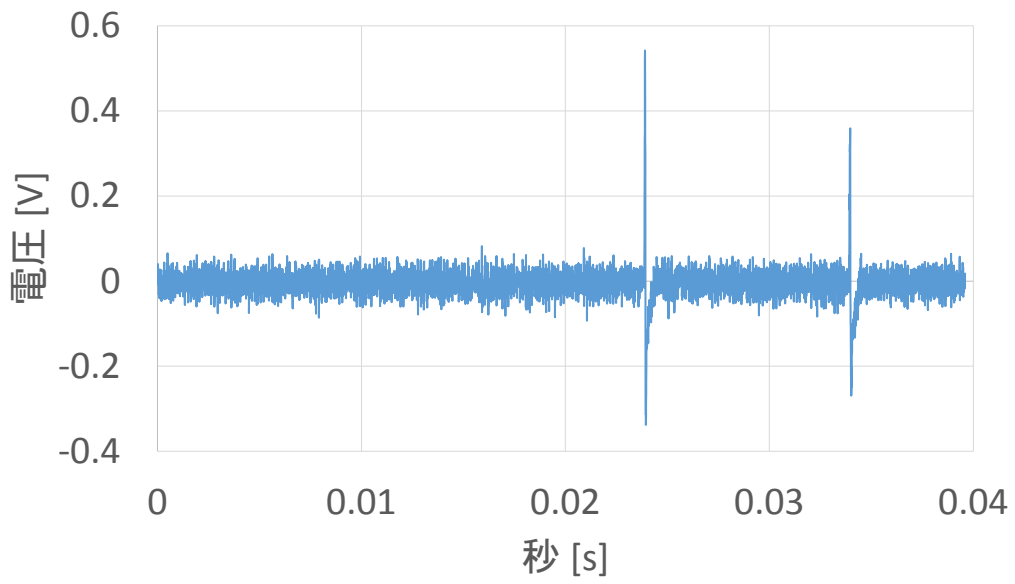


図 10

4.6 4 μm の異物の測定

図 11 は 5 μm のフィルタを通した水を測定した結果の一部である。これを見ると・
0.04V~0.04V にノイズの帯があることが分かる。

フォトダイオードの電圧の変化の割合は

$$\text{電圧変化の割合} = \frac{\text{異物粒子の面積}}{\text{レーザー光の面積}}$$

という式から、電圧の変化の割合は、異物の直径の 2 乗に比例するということが分かる。

200 μ の異物の電圧値は図 10 から約 0.54V とすると、4 μm の異物の電圧値の理論値を計算すると、約 0.2mV になる。従って 0.2mV の信号を読み取るにはノイズレベルを 0.2mV 以下にしなければならない。しかし、図 10 は 5 μm 以下の異物が混入している水なので 0.2mV の信号はノイズ部分に埋もれていることが分かる。このことから 4 μm 以下の異物を検出するにはノイズの低減が重要であるということが分かる。

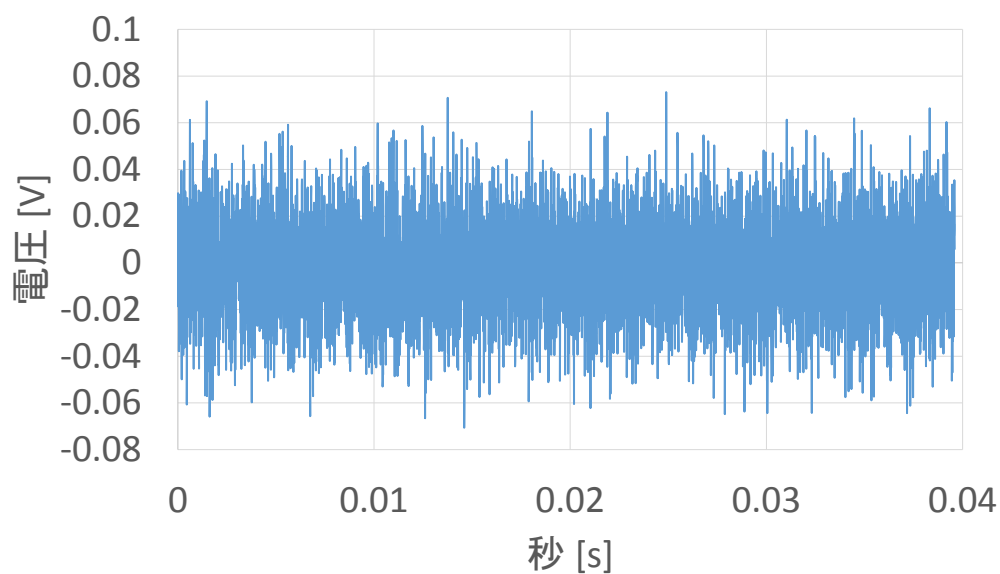


図 11

5 考察

今回の信号処理の方法では $4\mu\text{m}$ の異物の個数や大きさを検出することはできないということが分かった。しかし 0.2mV 以下までノイズを抑えることができれば $4\mu\text{m}$ の異物を検出できることが分かった。 $4\mu\text{m}$ の異物を検出するにはノイズの低減が必要であることから、信号処理ではなくハードウェアの部分を改善する必要がある。ノイズが発生する原因として、フォトダイオードそのものによるノイズ、レーザーの揺らぎによるノイズ、フォトダイオードアンプによるノイズが考えられる。これらを改善するにはディテクターの種類を変えてみるや、レーザーをより高品質のものに換えるなどである。

6 まとめ

光学式パーティクルカウンタにおけるパルス計数手法の検討をおこなった。200 μm の異物のパルスを検出しそのパルスのピーク値から、4 μm の異物の信号の理論値を計算することで4 μm の異物の信号がノイズに埋もれているということが分かった。0.8 μm のシリンジフィルタと5 μm のシリンジフィルタを通した水の測定結果を比較すると5 μm のシリンジフィルタを通した水のほうが異物の個数が5000個近く多かったことから、5 μm 以下の異物の信号は計測できているが、ノイズの部分も異物としてカウントしていることから、4 μm までの異物の個数を測定するには0.2mV以下までノイズを抑える必要があることがわかった。信号処理によってノイズレベルを0.2mVまで抑えるのは難しいことから、ディテクターの種類を変えるなどの方法を取りS/Nがどのように変化するかを検討するなどハードウェアの面での改善が必要である。

謝辞

本研究を通して1年間ご指導ならびに様々な経験をする機会を与えていただきました。国立富山高等専門学校、由井四海准教授に尽きせぬ深謝の念を捧げます。