

平成26年度

# 卒業研究論文

研究題目

光学式パーティクルカウンタにおける  
計測条件の検討

富山高等専門学校

電子情報工学科 牧 拓未

指導教官 由井四海

平成26年3月12日 提出

# 目次

1.背景.....	2
2.実験内容 .....	3
2-1.光学式油中異物検出装置の測定原理.....	3
2-2.塩化ビニールの測定結果.....	4
2-3.理論値の導出.....	6
2-4.塩化ビニールのシミュレーション結果.....	16
2-5.ISO 規格に沿った異物粒子のシミュレーション結果.....	17
3.計測条件の検討 .....	27
3-1.ISO 規格に基づく測定条件.....	28
3-1-1.サンプリングレート計算方法.....	28
3-1-2.サンプリングレート計算結果.....	30
3-2-1.量子化ビット数計算方法.....	32
3-2-2.量子化ビット数計算結果.....	32
4.考察.....	33
5.まとめ.....	34

## 1.背景

現在、航空関連、電力関連等の幅広い分野で潤滑油が油圧制御システムなどで用いられている。メンテナンスが困難で耐久性を求められる主軸・減速機系統や、繊細で複雑なコントロールが要求される油圧制御システムでは、潤滑油中の数  $\mu\text{m}$  単位の微小な異物が機械故障に影響を及ぼすことから、潤滑油の監視技術注目がされている。渡来の潤滑油分析のように時間がかかる。また振動にも弱い。そこで即時に直接潤滑油を監視できる光学式パーティクルカウンタが機械の品質向上、延命、稼働率に貢献のため期待されている。光学式パーティクルカウンタはまだ精度の高い測定が難しい。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。しかし、ISO 等級に基づくと粒径  $4\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$  という幅広い範囲を測定しなければならない。そこで、この規格に準拠するような計測条件の検討を行う。実際に異物粒子の理論値の導出を行いその値を用いてサンプリングレート、量子化ビット数の検討も行う。

## 2.実験内容

### 2-1.光学式油中異物検出装置の測定原理

図1のように、セルの中に水と異物を入れてレーザー光を照射する。レーザー光が異物に当たることにより受光部の光の強度が減少する。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。

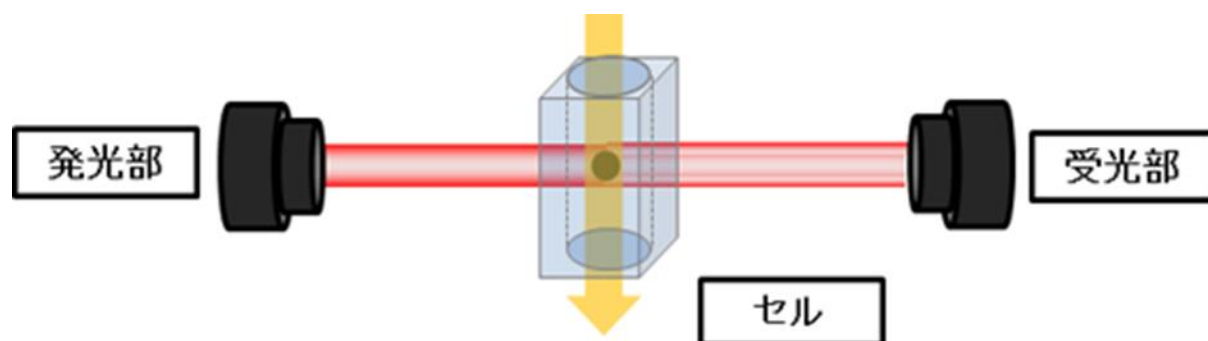


図1 異物の測定原理

最初にこの装置の異物の大きさを正しく測れているかを確認するために次のような実験を行う。測定する異物として塩化ビニールの粒子（以下、粒子）を用意し立体顕微鏡を用いて大きさを測定する。粒子の直径は目測で約0.2mm～0.5mmであり、形は球に近かった。そこで式①を考え、受光部の電圧の変化によってレーザー光の面積と異物の面積の割合を計算した。

$$\text{電圧の変化の割合} = \frac{\text{異物の面積}}{\text{レーザー光の面積}} \cdots \text{①}$$

式①によって、異物の面積を計算することができるため粒子の直径を求めることができる。これによって、実際に装置が粒子の直径を測定できているかを確認した。

さらに、レーザーの光量を半分にした場合、測定結果にはどのように影響が出るかを調べた。光量を半分にする際、ND フィルターを用いた。

## 2-2.塩化ビニールの測定結果

図 2 は粒子にレーザー光を照射した際の受光部で測定された電圧の時間変化を示したものである。式①で計算した結果、粒子の直径は 0.18mm になった。

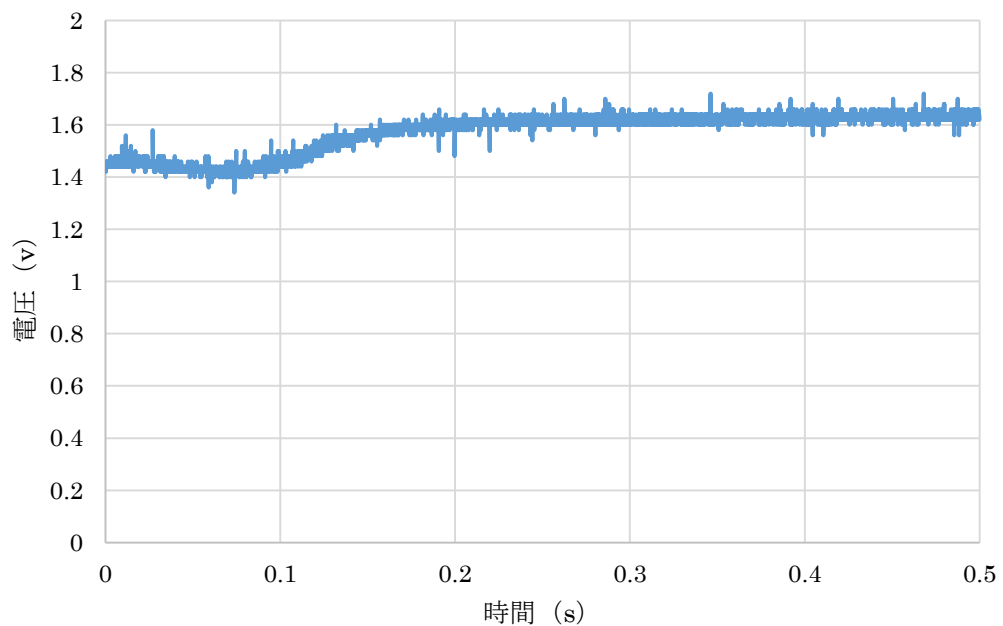


図 2 受光部での電圧変化

また、2回目以降も同様に測定し、計算を行った。結果は2回目が0.22mmとなった。粒子は目測で直径約0.2mm~0.5mmであったので、同程度の粒子の直径を測定できた。

図3は、光量を半分にして粒子にレーザー光を照射した際の受光部で測定された電圧変化を示したものである。

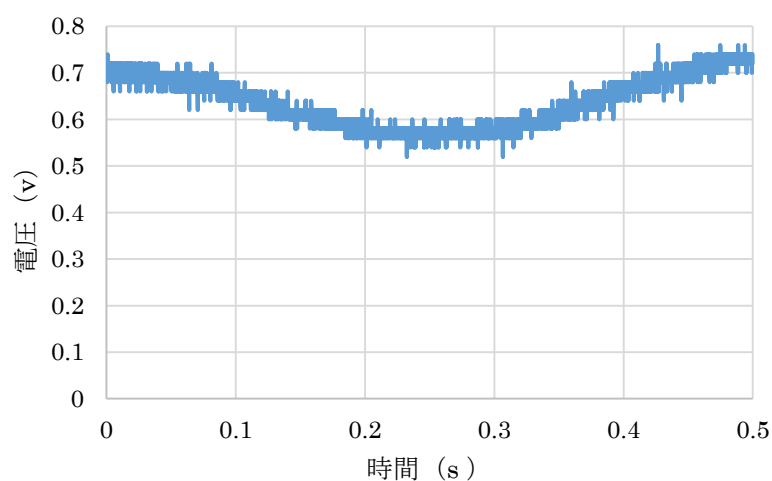


図3 光量を半分にして測定した電圧変化

測定した結果、粒子の直径は0.17mmとなり、目測と同程度の大きさとなった。しかし光量を半分に減らした際、レーザー光が粒子を照射したにも関わらず受光部の電圧が変化しないことがあった。これは、光が弱くなったため受光部側に電圧の変化がされにくくなったためである。

今回の実験では、装置が目測と同程度まで測定でき、レーザー光の光量を増やすほど受光部で電圧の変化を検知できることを確認できた。

### 2-3.理論値の導出

2-2 での実験でおおよそこの光学式油中異物検出装置で粒径を測ることができていることを確認した。次に、実際に測定した電圧変化と異物の大きさの関係が正しいかどうかを考察するために参考となるシミュレーションを行う。まず、計算がしやすいようにするため、異物、レーザー光をともに正四角形と仮定した。

粒子の流速は、現実的に存在しうる範囲をもとに仮定して行った。

流量 (Q)と水の流れるところの断面積 (A) と流速 (V)の関係

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$Q : 0.803\text{ml/} \quad A:36 \times 10^{-6}$$

$$\text{ゆえに、} V=223.1\text{mm/sec}$$

条件は以下のようにした。

粒子の直径 (D)

$$\cdot 0.2\text{mm} \quad \cdot 0.4\text{mm} \quad \cdot 0.5\text{mm}$$

の三種類の大きさを想定する

レーザー光の直径 (r)

$$\cdot 1\text{mm}$$

粒子の流速(v)

$$\cdot 223.1\text{mm/sec}$$

異物の粒径が 0.2mm の場合は以下のような計算となる。

異物の発光部に対する面積の割合：0.04

電圧減少、上昇時間：0.9msec

電圧停滞時間：3.6m 秒

シミュレーション結果は以下のようなになった。

図 3、図 4 に今回の計算結果をグラフにて示す。

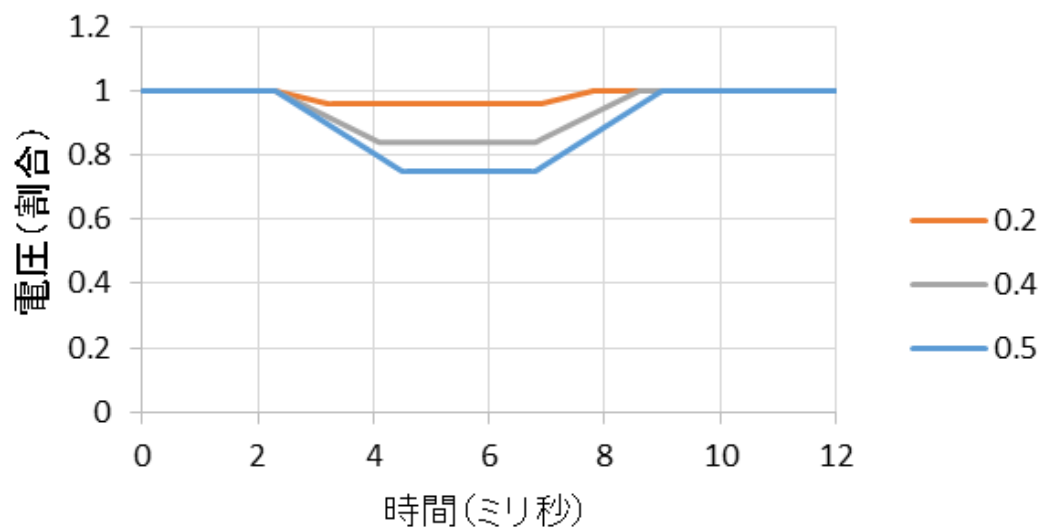


図 3 電圧変化の理論値 (レーザー光直径 1mm 固定)



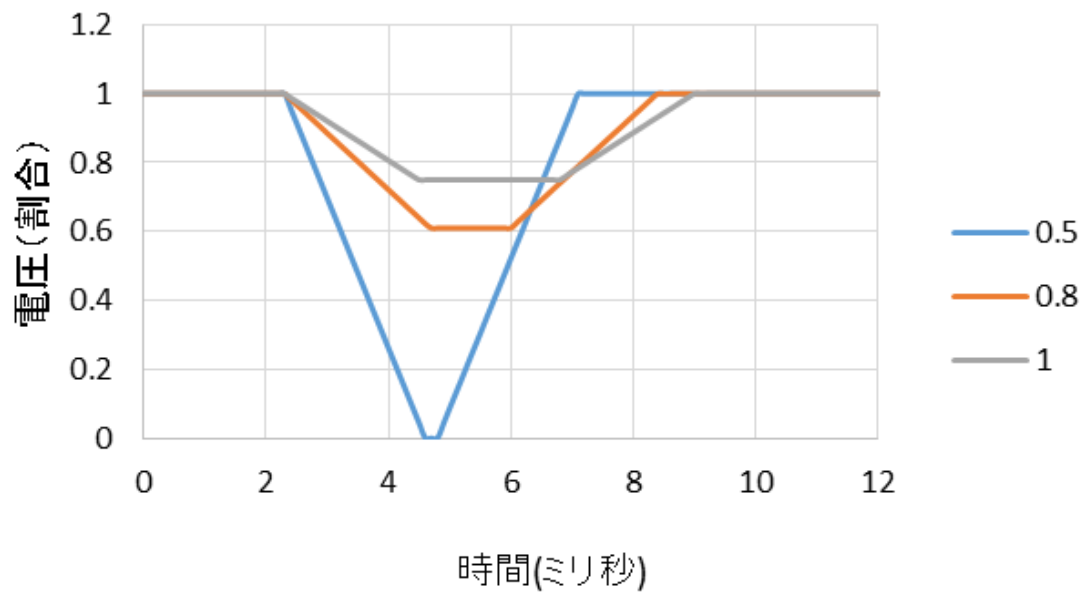


図 4 電圧変化の理論値 (粒子直径 0.5mm 固定)

グラフの X 軸は時間変化、Y 軸は電圧減少の割合を示す。

図 3 は、レーザー光直径を 1mm と固定して、粒子直径を 0.2mm、0.4mm、0.5mm としてそれぞれ電圧変化を示した。

図 4 は、粒子直径を 0.5mm と固定して、レーザー光直径を 0.5mm、0.8mm、1mm としてそれぞれ電圧変化を示した。

次に、レーザー光と異物を球体と仮定して計算を行う。その際、シミュレーションは積分を用いて行う。本研究で用いられる光学式パーティクルカウンタで測定される電圧変化の割合と時間変化を求める。

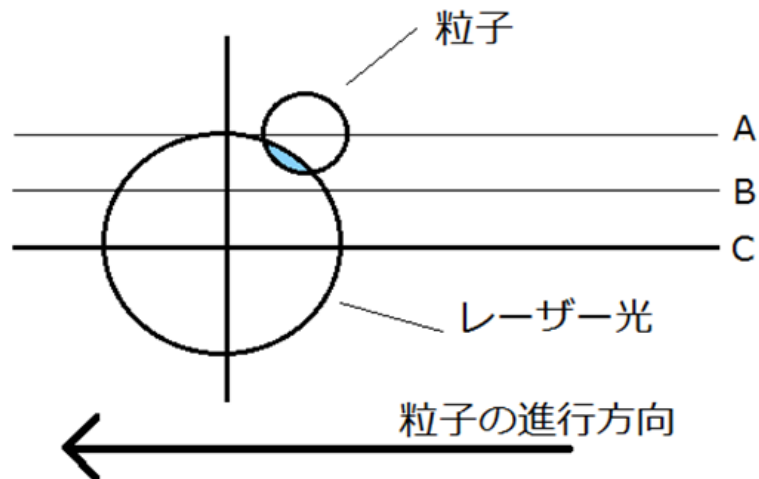


図5 シミュレーション概要

図5のようなシミュレーションにて理論値の導出を行う。Aは、粒子がレーザー光の半径上を通過する場合である。Bは、粒子がレーザー光の半径の半分的位置を通過する場合である。Cは、粒子がレーザー光の中心を通過する場合である。以上のように粒子がレーザー光を通過するパターンを3つ仮定した。

粒子半径を0.2mm、レーザー光の半径0.5mmとする。

・A(レーザー光の半径上を通る)の場合

図6に計算の概要を図示する。

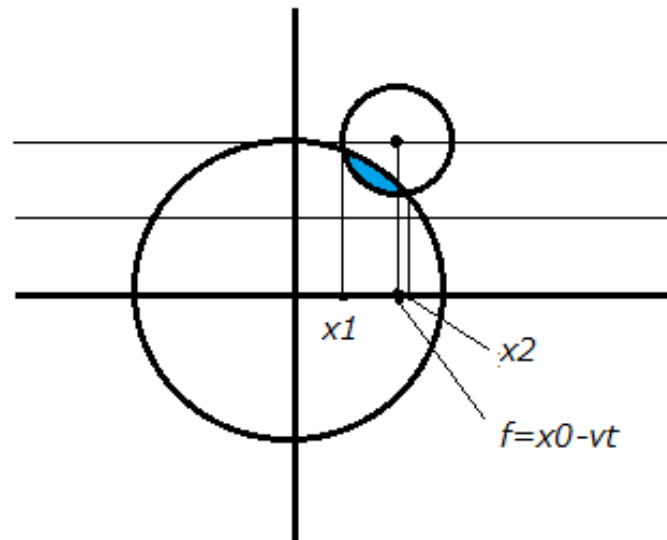


図6 Aを通る場合の概要

レーザー光の半径を  $R$  とする。また、異物の半径を  $r$  とする。

異物がレーザー光に接する時間を  $t$  とする。レーザー光と異物が重なった時間を  $0$  とする。

異物がレーザー光に触れた際の中心の  $x$  座標を  $x0$  とする。

陰になっている部分の上の式： $x^2 + y^2 = R^2 \dots \textcircled{2}$

下の式： $(x - f)^2 + (y - l)^2 = r^2 \dots \textcircled{3}$

これらの式を、 $y$  の形に変形する。

陰になっている部分の上の式： $y = \sqrt{R^2 - x^2} \dots \textcircled{4}$

下の式： $y = -\sqrt{r^2 - (x - f + vt)^2} + l \dots \textcircled{5}$

故に以下のような面積計算式を計算することができる

$$2 \int_{f-r}^{\varphi} \sqrt{r^2 - (x - f)^2} dx + 2 \int_{\varphi}^R \sqrt{R^2 - x^2} dx \dots \textcircled{6}$$

・B(レーザー光の半径の半分を通る)の場合

以下のように計算の概要を図示することができる。

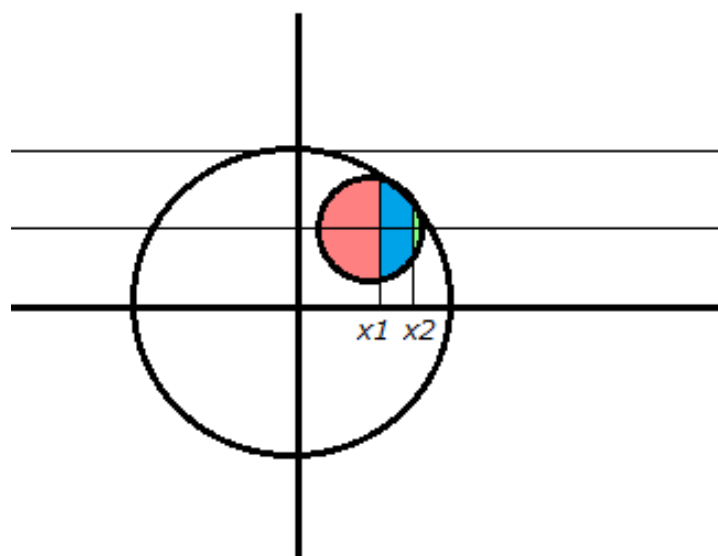


図7 Bの場合の計算の概要

レーザー光の半径を  $R$  とする。また、異物の半径を  $r$  とする。

異物がレーザー光に接する時間を  $t$  とする。レーザー光と異物が重なった時間を  $0$  とする。

異物がレーザー光に触れた際の中心の  $x$  座標を  $x_0$  とする。

図7のように3つの式に分けることができる。

ピンク色を 1 とすると、この範囲における面積計算式は以下のようになる。

$$2 \int_{x_0-r}^{x_1} \sqrt{r^2 - x^2} dx \cdots \textcircled{7}$$

青色を 2 とすると、この範囲における面積計算式は A の場合と同様になる。

緑色を 3 とするとこの範囲は粒子がレーザー光を通過し始めた当初は発生しないため計算に含む必要がない。しかし粒子がレーザー光に入りきる間に計算に含む必要がある。

以上 3 つの式を考慮すると B の場合の面積計算式は次のようになる。

$$2 \int_{x_0-r}^{x_1} \sqrt{r^2 - x^2} dx + \int_{x_1}^{x_2} (\sqrt{R^2 - x^2} - l + \sqrt{r^2 - (x - f + vt)^2}) dx + \\ 2 \int_{x_2-f}^f \sqrt{r^2 - x^2} dx \cdots \textcircled{8}$$

・C(レーザー光の中心を通る)の場合

以下のように計算の概要を図示することができる。

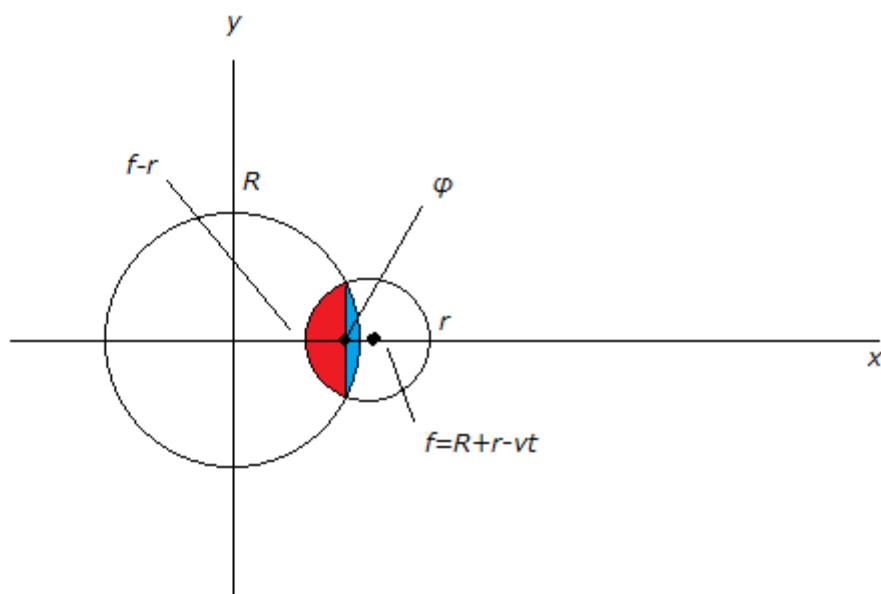


図8 Cの場合の計算の概要

レーザー光の半径を  $R$  とする。また、異物の半径を  $r$  とする。

異物がレーザー光に接する時間を  $t$  とする。レーザー光と異物が重なった時間を  $0$  とする。

次の二つの式が同時に成り立つと交点( $\phi$ )を求めることができる。

$$\phi^2 + y^2 = r^2 \cdots \textcircled{9}$$

$$(\phi - f)^2 + y^2 = r^2 \cdots \textcircled{10}$$

これを計算した結果が次のようになる。

$$\phi = \frac{f^2 + R^2 - r^2}{2f} \cdots \textcircled{11}$$

面積を求める式は図 8 のようになるため 2 つの式に分けて計算を行う。

$$2 \int_{f-r}^{\phi} \sqrt{r^2 - (x-f)^2} dx + 2 \int_{\phi}^R \sqrt{R^2 - x^2} dx \cdots \textcircled{12}$$



## 2-4.塩化ビニールのシミュレーション結果

結果は図9のようなグラフで表される。

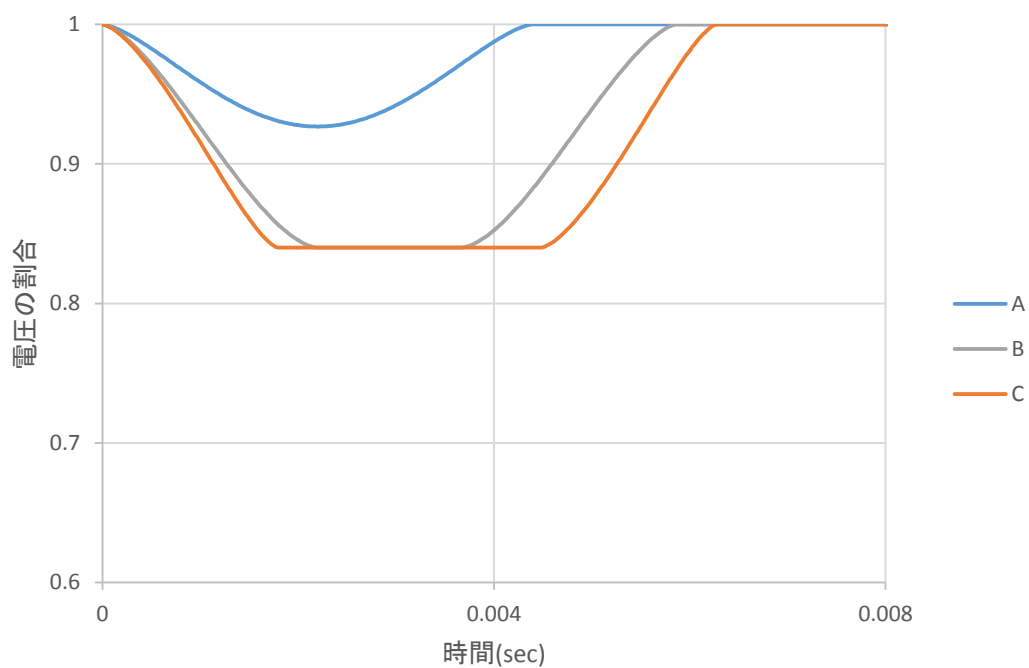


図9 塩化ビニールの積分の理論値

電圧変化の割合が最も小さいのはAの場合となり、最も大きいのはCの場合となった。

また異物粒子がレーザー光に照射される時間がAは短い。

## 2-5.ISO 規格に沿った異物粒子のシミュレーション結果

ISO 規格の粒径 4 $\mu$ m-100 $\mu$ m の範囲で光学式パーティクルカウンタを用いて測定を行う

とどのような値が検出され、グラフが作成されるかを理論的に計算する。

計算に用いた値は以下のとおりである。

レーザー光(半径) : 100 $\mu$ m

粒子(半径) : 2 $\mu$ m、25 $\mu$ m、50 $\mu$ m

流速 : 100mm/sec、220mm/sec、400mm/sec

レーザー光半径は固定し、粒子半径は ISO 規格に基づき 3 通り仮定した。レーザー光半径を固定することによって、流速を変えた際の測定結果に影響がでないようにする。

計算方法は、塩化ビニールの粒子の大きさを測定した際の理論値の導出方法と同様のやり方で行う。

以下に、シミュレーションした際の結果を示す。

図 10 に流速を 100mm/s、レーザー光半径 100 $\mu$ m、粒子半径 2 $\mu$ m と仮定した際の計測される電圧変化を示す。縦軸は電圧変化の割合を示し、横軸は異物粒子がレーザー光を通過する時間変化を示す。

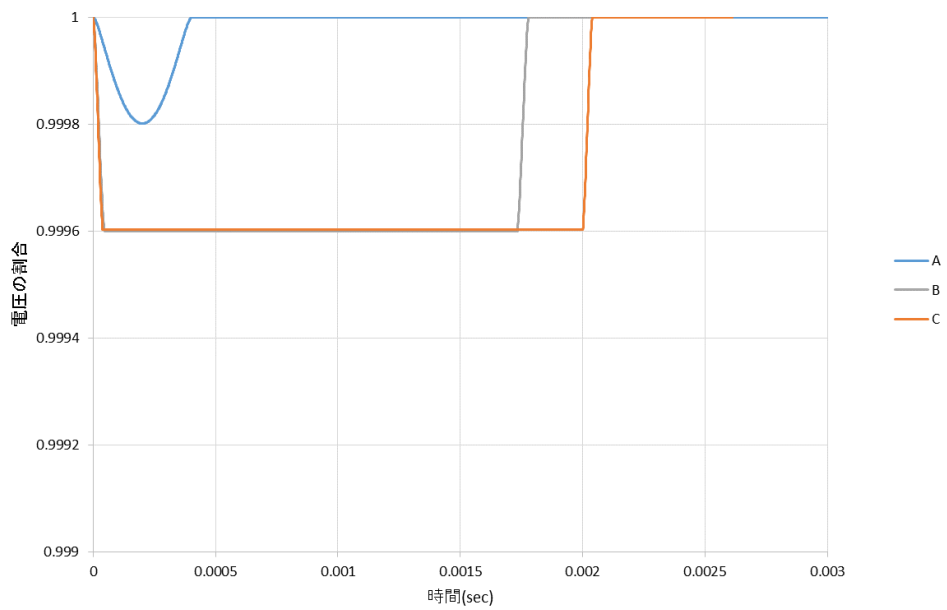


図 10 レーザー光半径 100 $\mu$ m 流速 100mm/s 粒子半径 2 $\mu$ m

図 11 に流速を 100mm/s、レーザー光半径 100um、粒子半径 25um と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

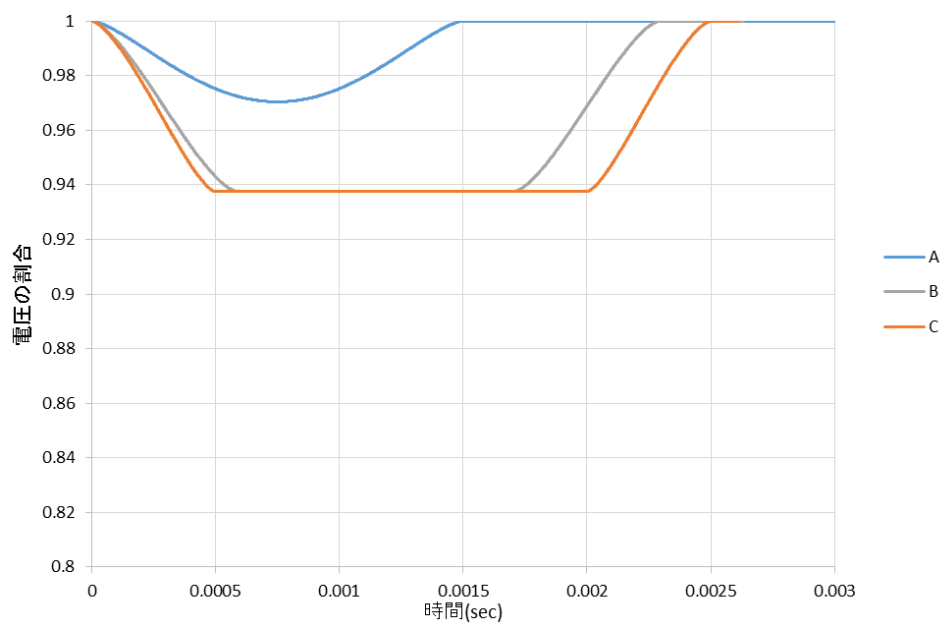


図 11 レーザー光半径 100um 流速 100mm/s 粒子半径 25um

図 12 に、流速を 100mm/s、レーザー光半径 100 $\mu$ m、粒子半径 50 $\mu$ m と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

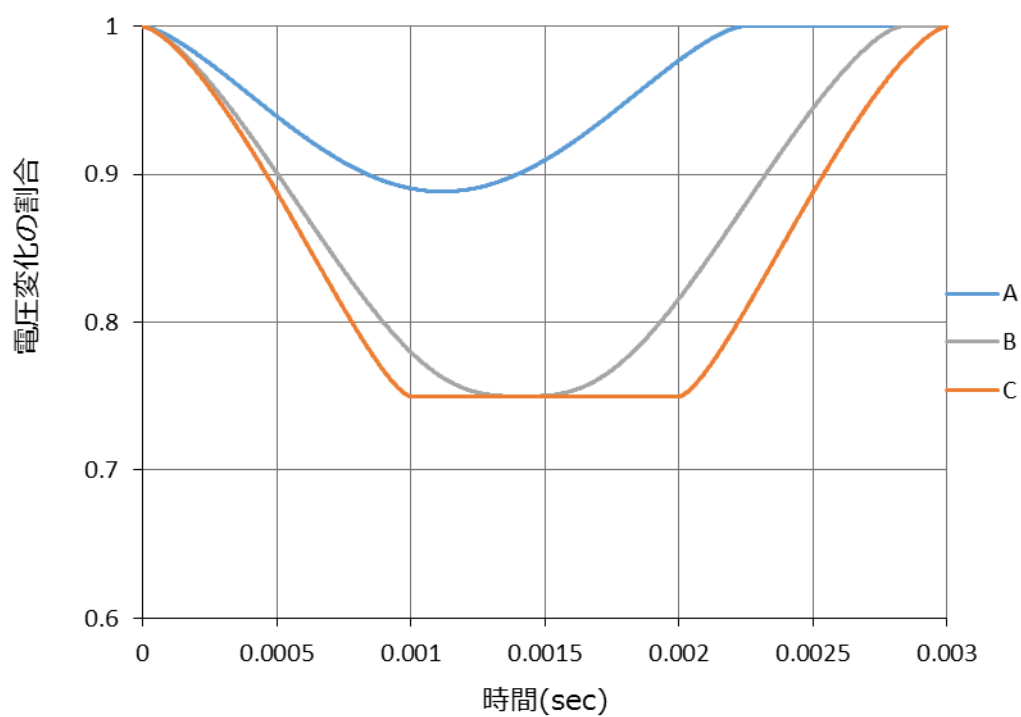


図 12 レーザー光半径 100 $\mu$ m 流速 100mm/s 粒子半径 50 $\mu$ m

図 13 に、流速を 220mm/s、レーザー光半径 100 $\mu$ m、粒子半径 2 $\mu$ m と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

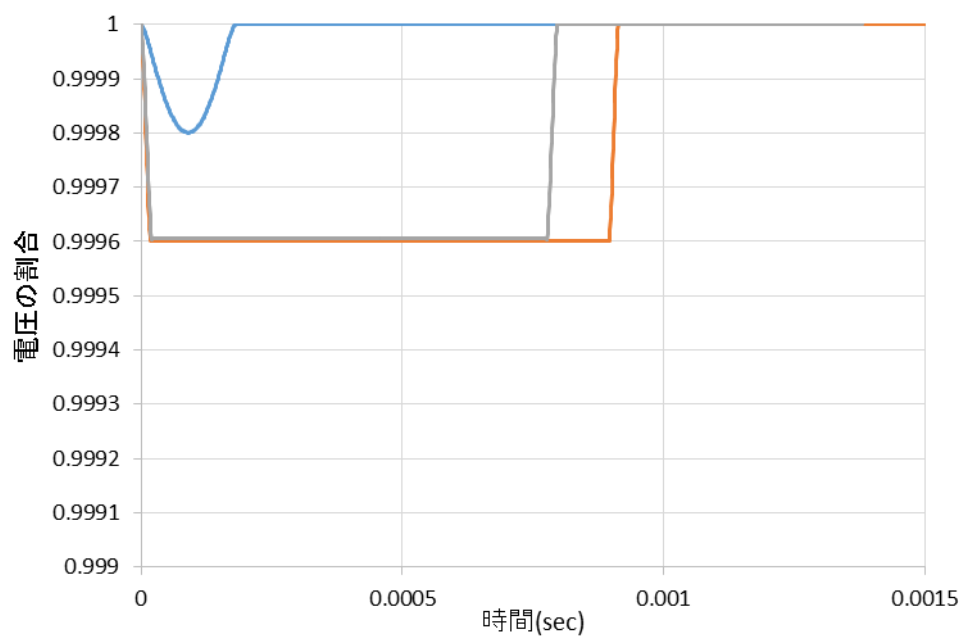


図 13 レーザー光半径 100 $\mu$ m 流速 220mm/s 粒子半径 2 $\mu$ m

図 14 に、流速を 220mm/s、レーザー光半径 100 $\mu$ m、粒子半径 25 $\mu$ m と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

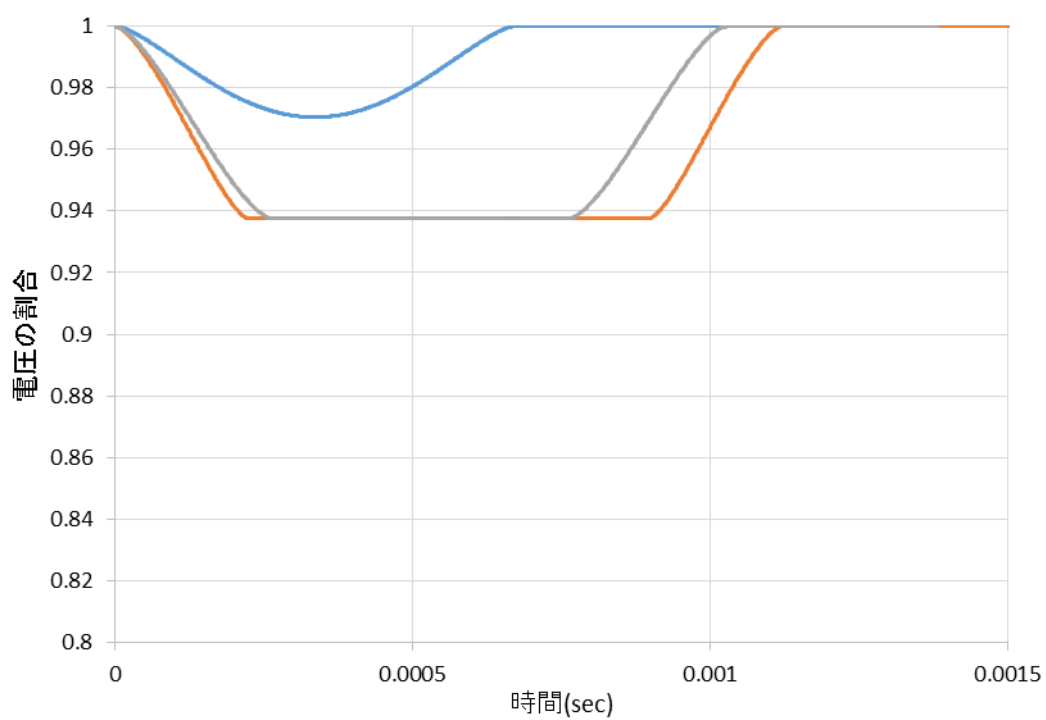


図 14 レーザー光半径 100 $\mu$ m 流速 220mm/s 粒子半径 25 $\mu$ m

図 15 に、流速を 220mm/s、レーザー光半径 100um、粒子半径 50um と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

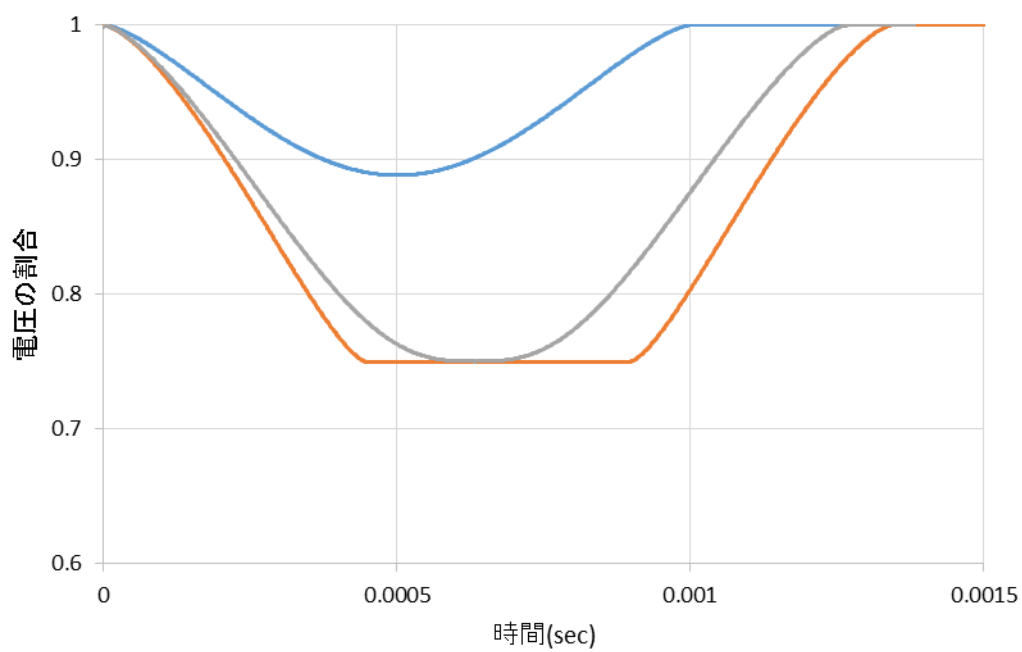


図 15 レーザー光半径 100um 流速 220mm/s 粒子半径 50um



図 16 に、流速を 400mm/s、レーザー光半径 100um、粒子半径 2um と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

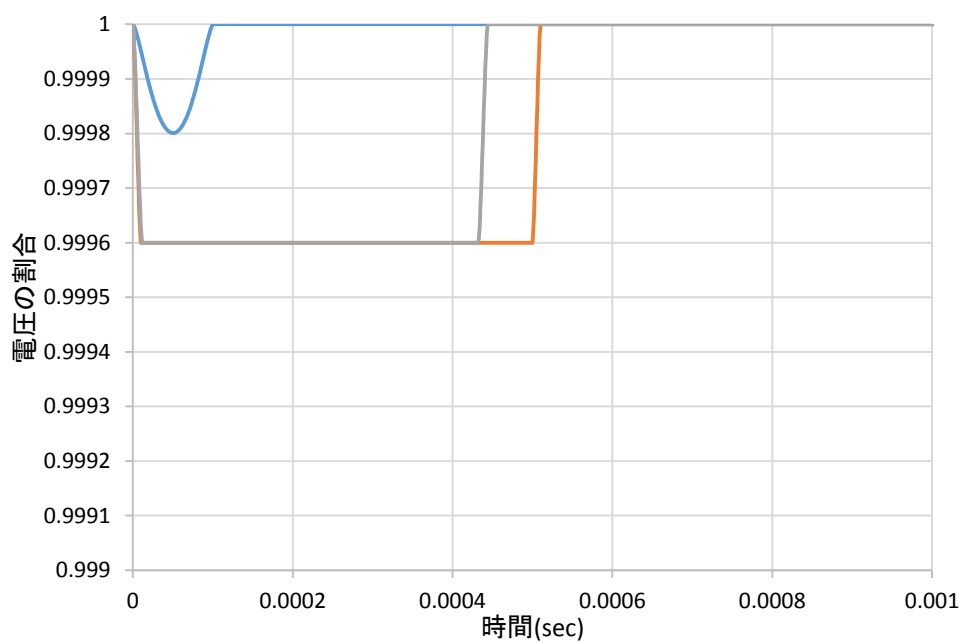


図 16 レーザー光半径 100um 流速 400mm/s 粒子半径 2um

図 17 に、流速を 400mm/s、レーザー光半径 100um、粒子半径 25um と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

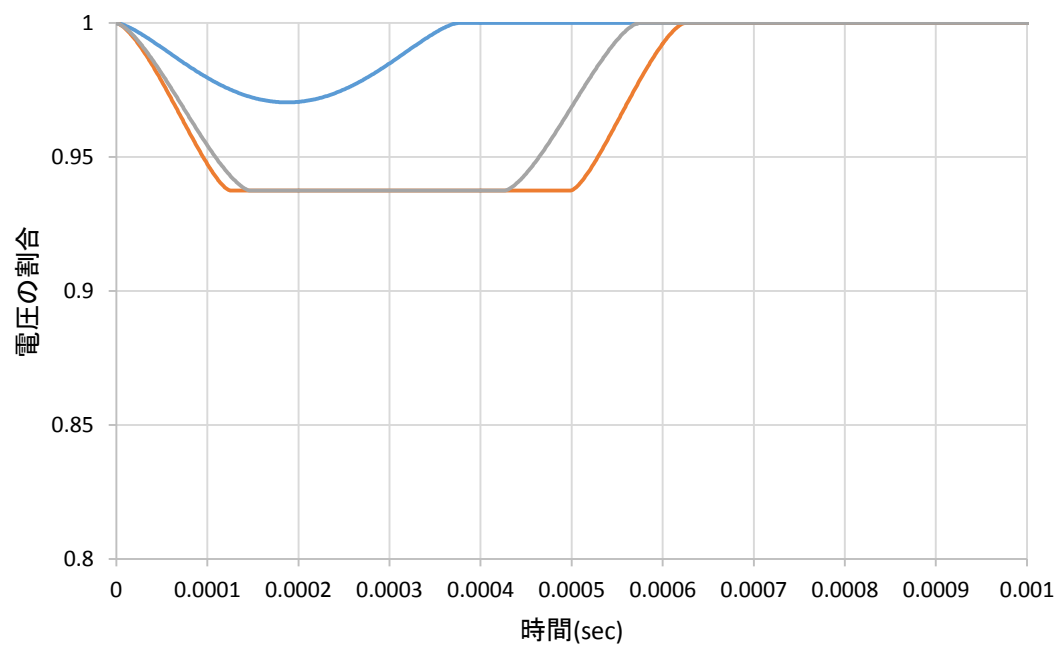


図 17 レーザー光半径 100um 流速 400mm/s 粒子半径 25um

図 18 に、流速を 400mm/s、レーザー光半径 100um、粒子半径 50um と仮定した際の計測される電圧変化を示す。

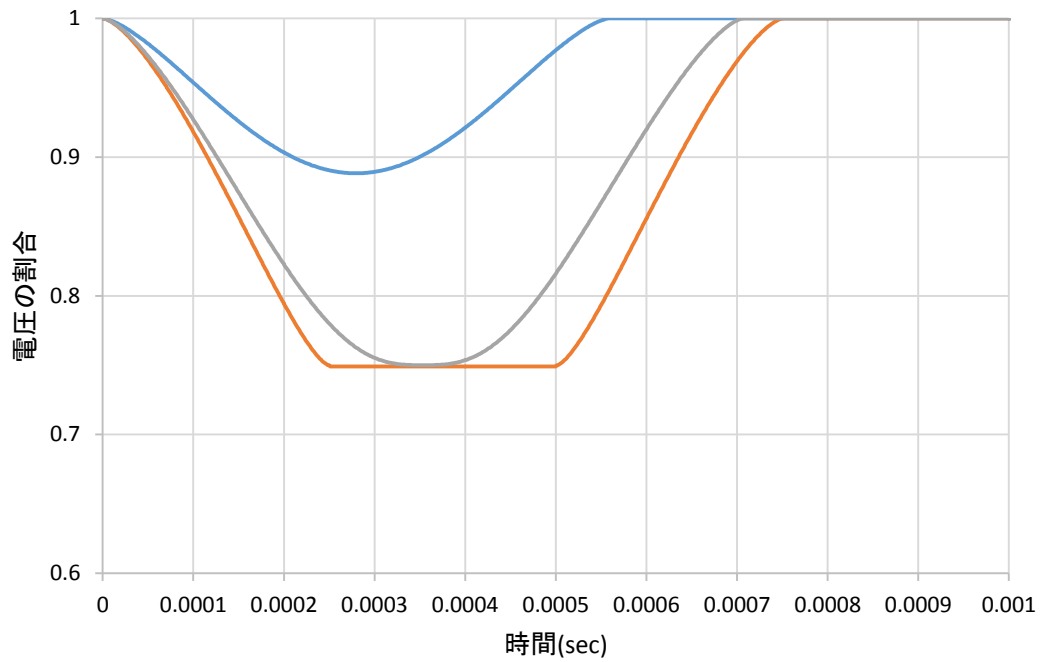


図 18 レーザー光半径 100um 流速 400mm/s 粒子半径 50um

粒子半径が小さいほど、電圧変化が小さいことが確認できた。また異物粒子がレーザー光を通過する時間は流速に反比例する。異物粒子がレーザー光に入りきっている場合は、電圧変化は一定である。レーザー光に入りすぐにすぐに出る場合は一定とはならない。

### 3.計測条件の検討

アナログ信号をデジタル信号にする際、AD変換を行う必要がある。

AD変換を行う際の流れは、

アナログ入力→標本化→量子化→符号化→デジタル出力

である。

サンプリングレート、量子化ビット数を双方大きくするほど誤差の少ない値を測ることができる。しかし、サンプリングレートと量子化ビット数はトレードオフの関係にある。

双方を非常に大きくすることは難しい。

そのため今回の測定対象となる電圧の特性にあったサンプリングレートと量子化ビット数を備えるADコンバータを選択する必要がある。

### 3-1.ISO 規格に基づく測定条件

測定条件は、粒子半径の測定誤差±10%を許容範囲とする。光学式パーティクルカウンタにおける測定誤差が一般的に5~20%であり、ISO4406による測定される個数の誤差が5~10パーセントであったため、このような測定条件とした。

また、この測定誤差は面積にすると19%程度の誤差となる。

#### 3-1-1.サンプリングレート計算方法

サンプリングレートとは、一秒間に実行するサンプリング処理の回数のことである。以下にサンプリングレートの計算式を示す。

$f$ : サンプリングレート

$t$ : 秒間隔

$$f = \frac{1}{t} \cdot \cdot \cdot \textcircled{13}$$

秒間隔は測定される面積の誤差が0~19%である時間をもとに定めた。

図 19 の矢印は C のサンプリングレートを導出する際の秒間隔を示している。

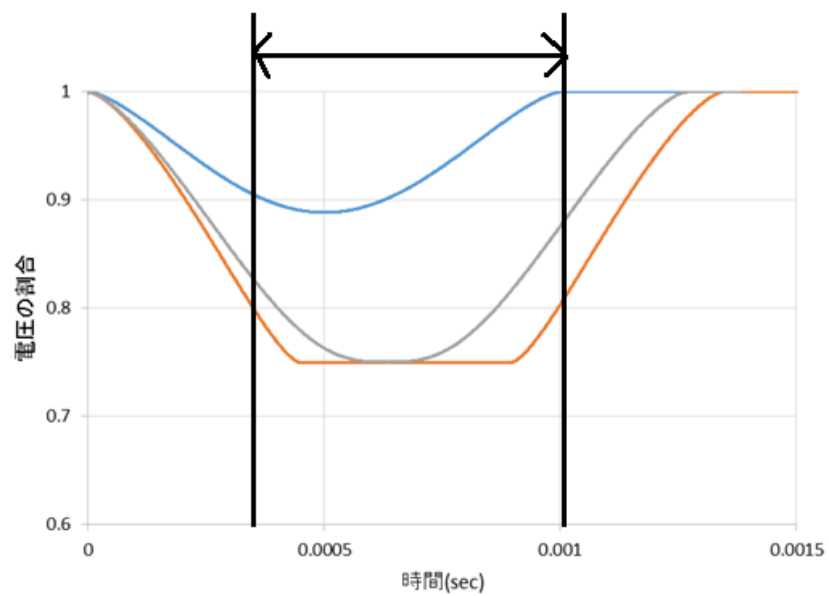


図 19 サンプリングレート導出の際に用いた秒間隔(C の場合)

### 3-1-2. サンプルングレート計算結果

以下に粒子半径の許容誤差 10 パーセントに対して必要なサンプルングレートを表に示す。

表 1 サンプルングレート計算結果

粒子半径/粒子通過点	A	B	C
2um	3220kHz	292kHz	252kHz
25um	916kHz	234kHz	213kHz
50um	656kHz	200kHz	351kHz

サンプルングレートは通過点がレーザー光半径上から中心に近づくほど下がる傾向にある。また、異物が大きいほどサンプルングレートが下がる傾向もある。しかし C の場合、サンプルングレートは粒子半径 2um と 25um に比べると 50um が最も大きくなった。50um の C の場合、ほかのパターンと比べるとレーザー光に入りきっている時間が短いため、誤差 0~19%の時間が短くなる。

これにより粒子半径 50um の C の場合、サンプルングレートが大きくなった。

図 20 に、流速 100mm/sec、粒子半径 50um のサンプリングレートの変化を示す。サンプリングレートを大きくするほど電圧変化の割合の誤差が少なくなっていることが確認できる。しかし、サンプリングレートは秒間隔の誤差をもとに計算している。故に誤差を無くすことはできない。

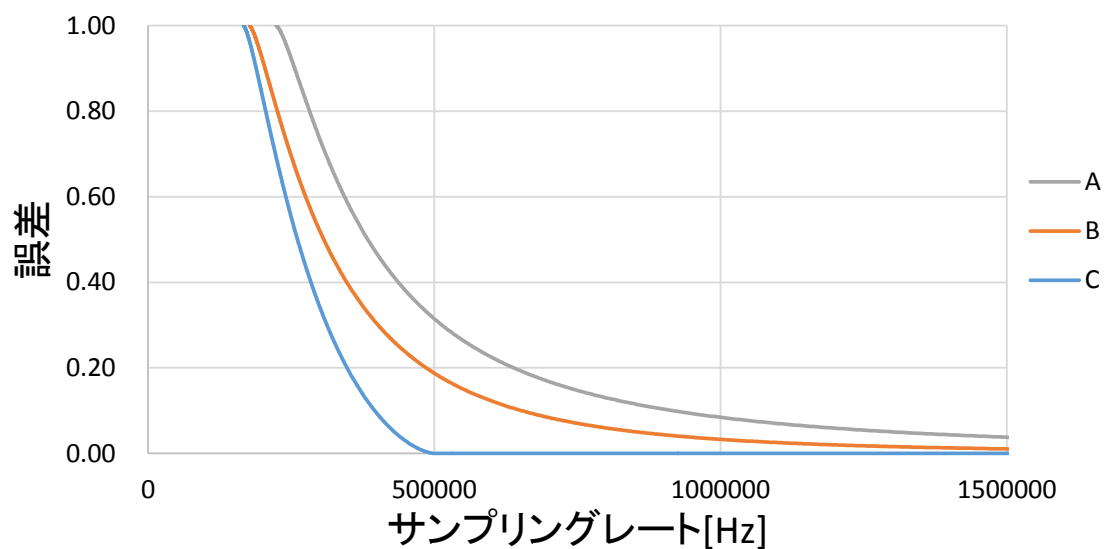


図 20 流速 100mm/sec 粒子半径 50um のサンプリングレートの変化



### 3-2-1.量子化ビット数計算方法

量子化ビット数は、電圧変化を何段階に区切るかという段階数を示す。16ビットの場合、 $2^{16}$ であり 65536 段階となる。本研究は誤差 0~19%の電圧変化の割合の差を求めることにより算出した。

### 3-2-2.量子化ビット数計算結果

以下に粒子半径の許容誤差 10 パーセントに対して必要な量子化ビット数を表に示す。

表 2 量子化ビット数計算結果

粒子半径/粒子通過点	A	B	C
2um	15bit	14bit	14bit
25um	8bit	7bit	7bit
50um	6bit	5bit	5bit

中心を通る場合、レーザー光の半径の半分を通る場合を測定する際、14ビット以上の量子化ビット数が必要である。粒子がレーザー光に入りきる場合、量子化ビット数は一定になる。

仮定したすべてのパターンを測定できるようにする際、15ビット以上の量子化ビット数が必要となる。

#### 4.考察

本研究で計算した許容範囲内での測定が可能な値は以下のようになった。

サンプリングレート・・・3230kHz

量子化ビット数・・・15bit

双方の範囲を対応する AD コンバータは存在するが、一般的な AD コンバータに比べると高性能であるため、処理の回数が増えてしまう。そこでサンプリングレートを下げることとを考察した。

サンプリングレートは粒子がレーザー光を通過する時間と反比例する。これより流速を下げることによってサンプリングレートが下がると考えた。しかし、この方法には問題がある。それは粒子の流速を下げることによってレーザー光を通過する際直線的ではなくなる可能性がある。直線的でなくなると受光部での光の強弱が変わり、測定結果に誤差が出てしまう。

## 5.まとめ

光学式パーティクルカウンタの測定原理に基づき、測定結果の理論値の導出を行った。

その際レーザー光の半径は固定し、粒子通過点、粒子半径、粒子流速を3パターン仮定した。そして導出した理論値を用いてサンプリングレート、量子化ビット数に対する検討を行った。

今後は、今回の研究結果を踏まえ粒子の流速を下げた際の測定結果に及ぼす影響を検討する。

## 謝辞

本研究を通して1年間丁寧なご指導、様々な経験をさせていただきました。丁寧な指導をしてくださった国立富山高等専門学校<sup>1</sup>の由井四海教官、大竹由紀子教官に深く感謝いたします。