

平成 30 年度卒業論文  
高速気液混相流の光学的計測

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科

15E1060 藤嶋海

15E1064 松岡駿

指導教員 河村良行

# 目次

第1章	緒言	1
第2章	実験装置について	2
2.1	装置概略図	2
2.2	見積・外注	3
第3章	本実験でを使用した装置	4
3.1	エアシリンダ	4
3.2	高速度カメラ	4
3.3	半導体レーザー	5
3.4	三次元モデリング加工機	6
3.5	データロガー	7
3.6	FFT アナライザ	7
第4章	空気のみによる実験	8
4.1	シャドウグラフ法	8
4.2	シュリーレン法	9
第5章	実験（水使用）	11
5.1	実験手順	11
5.2	実験結果（ノズル先端空気開放）	12
5.3	実験結果（ノズル先端水中開放）	14
第6章	フォトブリーチング実験	15
第7章	レーザードップラー法	17
第8章	散乱光の相互相関による流速測定	18
第9章	結言	26
	参考文献	27
	謝辞	28
	付録	29

# 第1章. 緒言

本研究における目標はボイド率が高くなると水中での音速が小さくなるという現象を利用して、衝撃波を観測することである。ここでボイド率とは流体の単位体積あたりに含まれる気泡の体積割合のことである。本実験は、エアシリンダに1MPaをかけて仕切り板で気液混相流(水+マイクロバブル)を押し出し、ノズルののど部より下流でどのような現象が起きているかを、光学的に観測するという実験である。

今年度は、実験装置の製作を行い、予備実験としてマイクロバブルを含まない水での実験をした結果、混相流が発生していたため、その流速の測定をすることを目標とした。

## 第 2 章. 実験装置について

### 2.1 装置概略

本実験で使用した装置の概略図を図 2.1 に示す。気液二相流をエアシリンダを用いて高速で押し出し、ノズルの出口付近で超音速流を生成し、その際にどのような反応が起きているのか、流速はいくら出ているのかを光学的に観測するために以下の装置を制作した。各設計図は付録に示す。

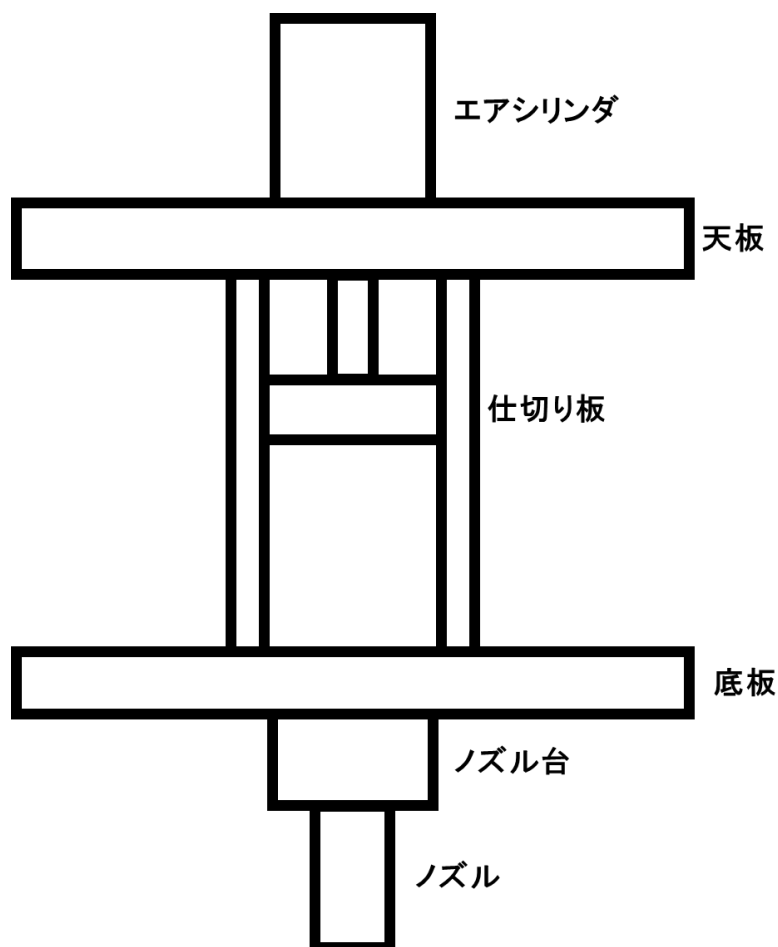


図 2.1 高速気液混相流発生装置概略

### 2.2 見積・外注

今回、実験を行うにあたって図で表した部品を外部の会社 2 社に見積をお願い

いた。その結果を表 2.1 に示す。

表 2.1 見積り比較表

	見積り比較	
	プロトラブズ	坂本電機
天板	20767 円	26580 円
仕切り板	12519 円	8520 円
底板	25394 円	25590 円
ノズル台	13470 円	19040 円
ジグ	15844 円	14230 円
計	87994 円	93960 円

以上の結果と納期の速さを考慮した末、私たちはプロトラブズに外注を依頼した。

ここで、プロトラブズについて少し紹介をする。

プロトラブズ合同会社は ICT による独自のデジタル・マニュファクチャリング・システムを活用し、射出成型および切削加工による試作や小ロット生産をオンデマンドで受託製造する会社である。この会社のサイトに 3DCAD データを送ると製造性解説付見積を平均 3 時間で提示、射出成形・CNC 切削加工パーツを数日で製造。最短 1 日納期も可能である。私たちの場合、ノズル以外の 5 つの部品を見積して貰ったが 1 時間かからず見積が出た。そこから外注をお願いして約 1 週間で届いた。高い精度で図面通りに再現されていた。

## 第 3 章. 本実験で使用した装置

### 3.1 エアシリンダ

エアシリンダは水または気液二相流を高速で押し出すために使用した。実験初期の頃は 3 気圧程度までしか扱ってはなかったが現段階では 10 気圧で使用している。付属のオートスイッチをオシロスコープと併用すればシリンダがどのくらいの時間で押し出せているか観測することができる。



図 3.1 エアシリンダ

### 3.2 高速度カメラ

砂原研究室から借りて使用。最大撮像速度 8000fps、最高シャッター速度 1/100000 秒。ノズルの内部で押し出された気液二相流がどのような現象を起こしているかを最大 125  $\mu$ s 間隔のコマ送りで見ることが出来る。



図 3.2 高速度カメラ (参照先 <http://plextor.jp/plexlogger/>)

### 3.3 半導体レーザー

実験室にあった半導体レーザー。光学観測する際の光源として使用。ダイヤルを回して明るさを調節できるので細かい調整も可能。トリガでの使用も可能なのでファンクションジェネレータから信号を送れば条件に見合ったパルスで実験が可能である。

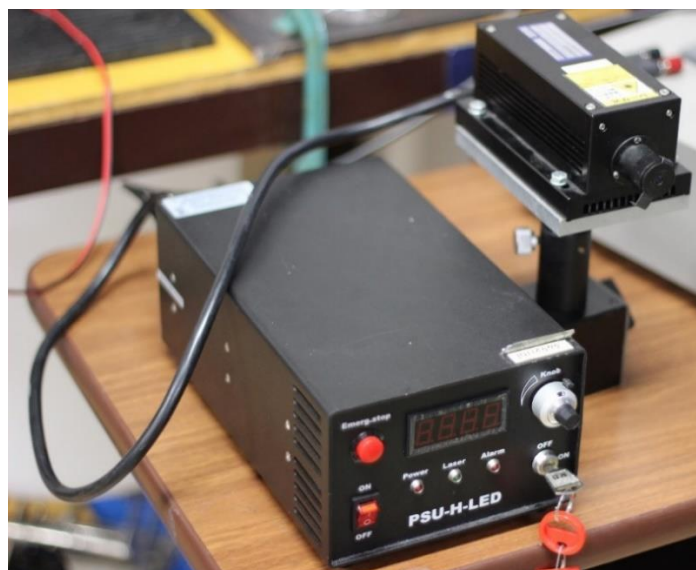


図 3.3 半導体レーザー

### 3.4 三次元モデリング加工機

私たちは、ノズルの加工に三次元モデリング加工機を使用した。自分たちが作った CAD データ通りに加工してくれるもので精度も良く、端面もきれいに仕上がる。今回はアクリル板の加工に使用したがアルミやその他の材料にも対応している。



図 3.4 三次元モデリング加工機

操作手順を以下に示す。

1. 各々が作成した 3DCAD データを「STL」で保存する。
2. 三次元モデリング加工機に接続しているパソコンの「MODEL500」のソフトを開き、CAD データを取り込む。
3. 材質、加工条件等を設定する。
4. 三次元モデリング加工機自体の電源を入れ、NC コードを選択する。
5. 作業台を移動させ、ドリルを装着する。
6. X, Y 軸のゼロ点を決め、次に Z 軸のゼロ点をセンサーモードを使って決める。
7. 準備が出来たらパソコンで加工を開始させる。



### 3.5 データロガー

相互相関係数を算出する際に用いた。最大 16 チャンネルで波形を見ることができ、ソフトを使えばより詳しく波形の特性を調べることができる。



図 3.5 データロガー

### 3.6 FFT アナライザ

相互相関係数を算出する際に使用。この機器の機能に相互相関係数を算出するプログラムが入っており、こちらが計算等をしなくても自動で算出してくれる。

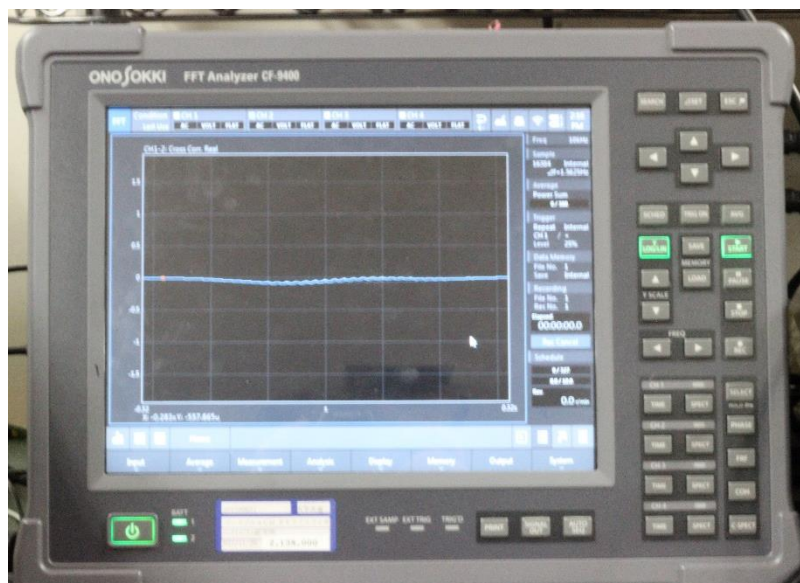


図 3.6 FFT アナライザ

## 第4章. 空気のみによる実験

### 4.1 シャドウグラフ法

まず、私たちは水を使わず空気で行った。その際、エアシリンダは用いず、ボンベからチューブを通して直接アクリル円筒に空気を流した。所謂、風洞実験である。この実験で私たちはまず、くびれ部が1 [mm] のノズルを用いてシャドウグラフ法で衝撃波が観測できるか実験した。

シャドウグラフ法は、光源(レーザー)による点光源を、顕微鏡レンズを用いて光を広げ凸レンズを2枚用いて平行光線にして観測物に当てる。凸レンズの焦点にナイフエッジ(カッターの刃)を置き、像を半分程度切ることによって空気の流れによる密度変化や温度による大気の密度変化をカメラで直接観察したり、スクリーン上に映し出したりして観察する。また、ナイフエッジを用いずに全ての光を観測する手法をシャドウグラフ法と呼ぶ [1]。

シャドウグラフ法での装置配置は次の図 4.1 の通りである。

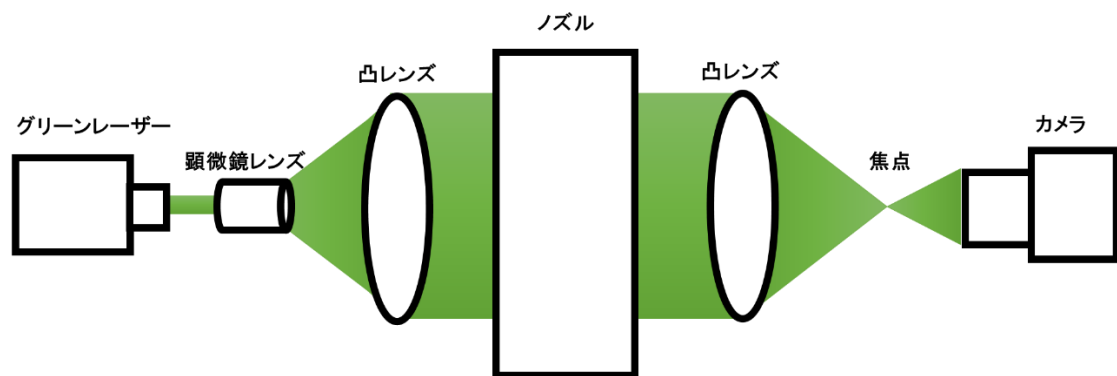


図 4.1 シャドウグラフ法概略

結果として、カメラに像を映し出すことはできなかった。原因として、ノズルのくびれ部から下の部分での圧力降下が大きかったことが挙げられる。そこでノズルをくびれ部分で半分に切ってくびれ部から直接大気上に出るようにした。その結果、像が確認できた。実際に観測できたものを次の図 4.2 に示す。

図 4.2 を見てもわかるように、シャドウグラフ法だと像がくっきりとは映っておらず少々見づらい。

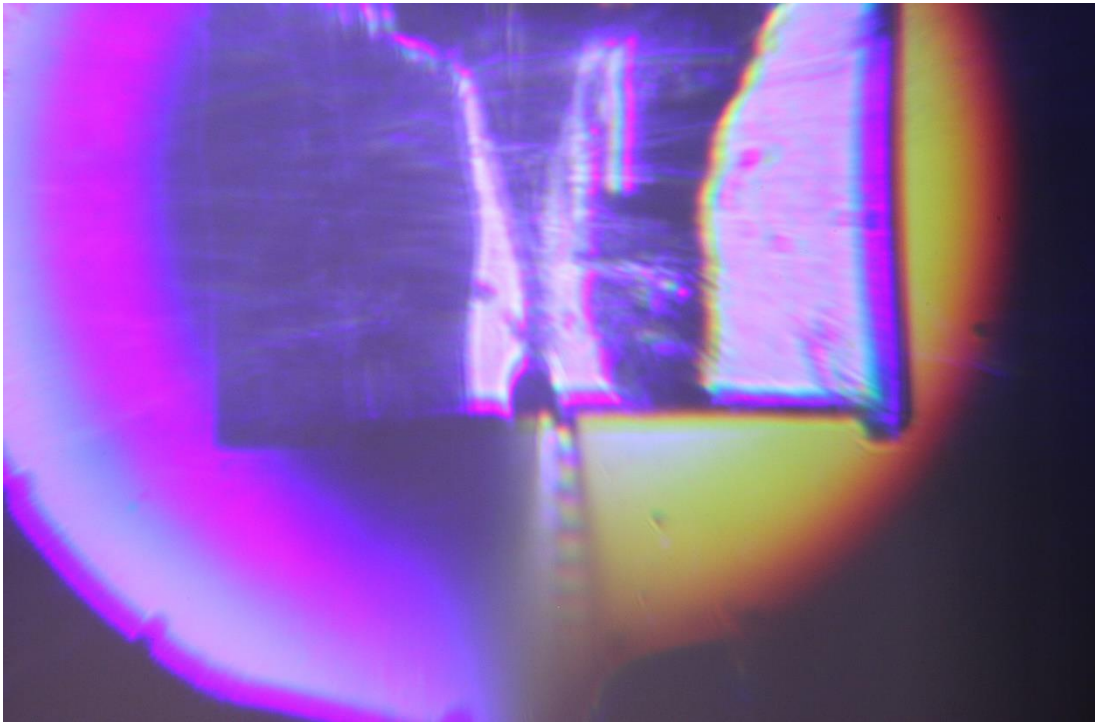


図 4.2 シャドウグラフ法による像

## 4.2 シュリーレン法

シャドウグラフ法でははっきりとした像が撮影できなかつたため、私たちはシュリーレン法で像を観測することにした。シュリーレン法とは先程のシャドウグラフ法においてナイフエッジを用いることでシャドウグラフ法より感度向上を計った手法である。その概略を次の図に示す。

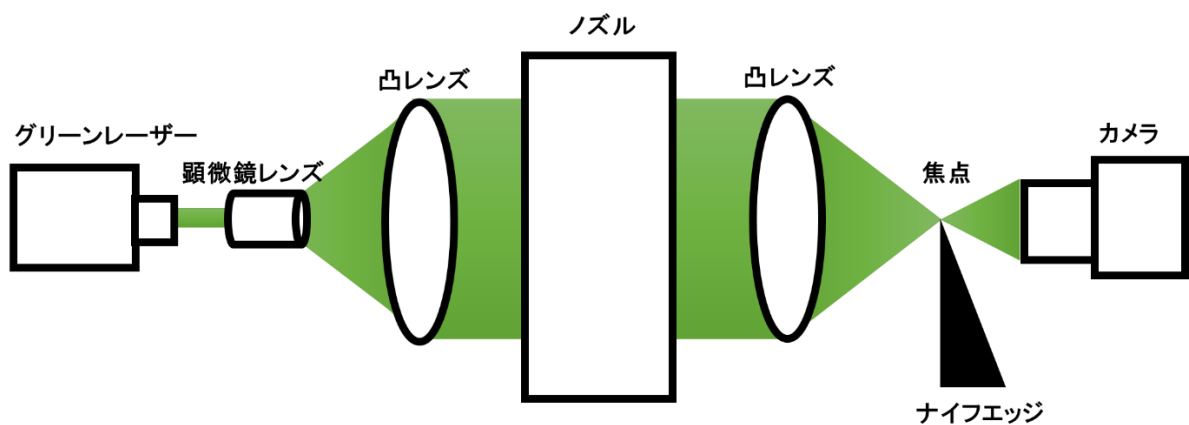


図 4.3 シュリーレン法概略

シュリーレン法で撮れた写真が次の図 4.4 である。

色収差は出ているもの、図 4.2 で示したものより像が鮮明に見て取れる。この像はダイヤモンドウェーブパターンと呼ばれるものである。

ダイヤモンドウェーブパターンは不足膨張噴流と呼ばれる、流れがノズル内で背圧(ノズルの下流における圧力)まで膨張しきれず、ノズルの出口圧力が背圧より高くなった状態の時に見られるものである [2]。

これは、スペースシャトルやロケットが離陸するときエンジンの噴出口付近で見られるものと同じものなので、衝撃波が観測できている状態になった。よって、次は実際に水を使って実験を行う。

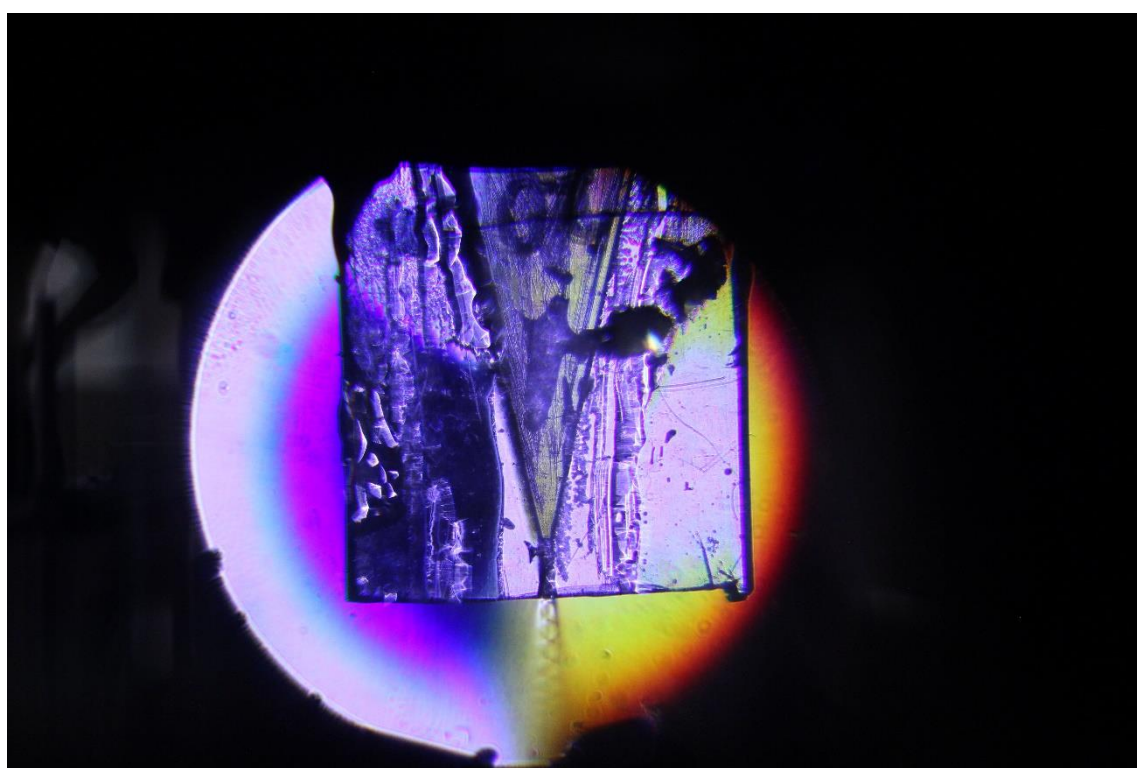


図 4.4 シュリーレン法による像

## 第5章 水を用いた実験

### 5.1 実験手順

現在は水槽に水を張ってノズルの先端を水面に付けてエアシリンダへ引き上げ方向に気圧をかけることで水を仕切り板の下あたりまで吸い上げてから、押し出し方向へ10気圧をかけて水を押し出している。

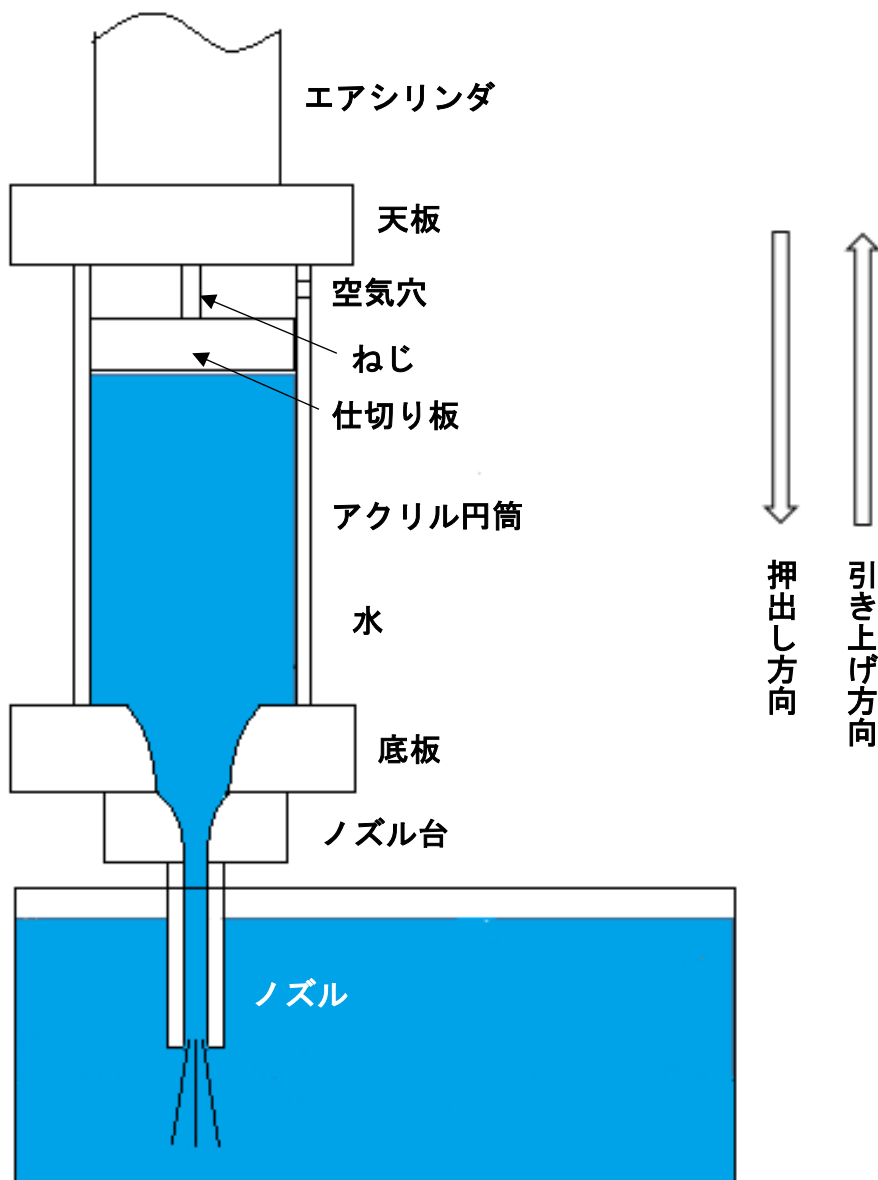


図 5.1 水槽を使った装置概略

水槽を制作する以前のノズルの先端が開放されていた状態では、ペットボトルからチューブを底板の穴へ繋いでペットボトルを仕切り板の上に置くことで圧力差を利用して水を入れていた。

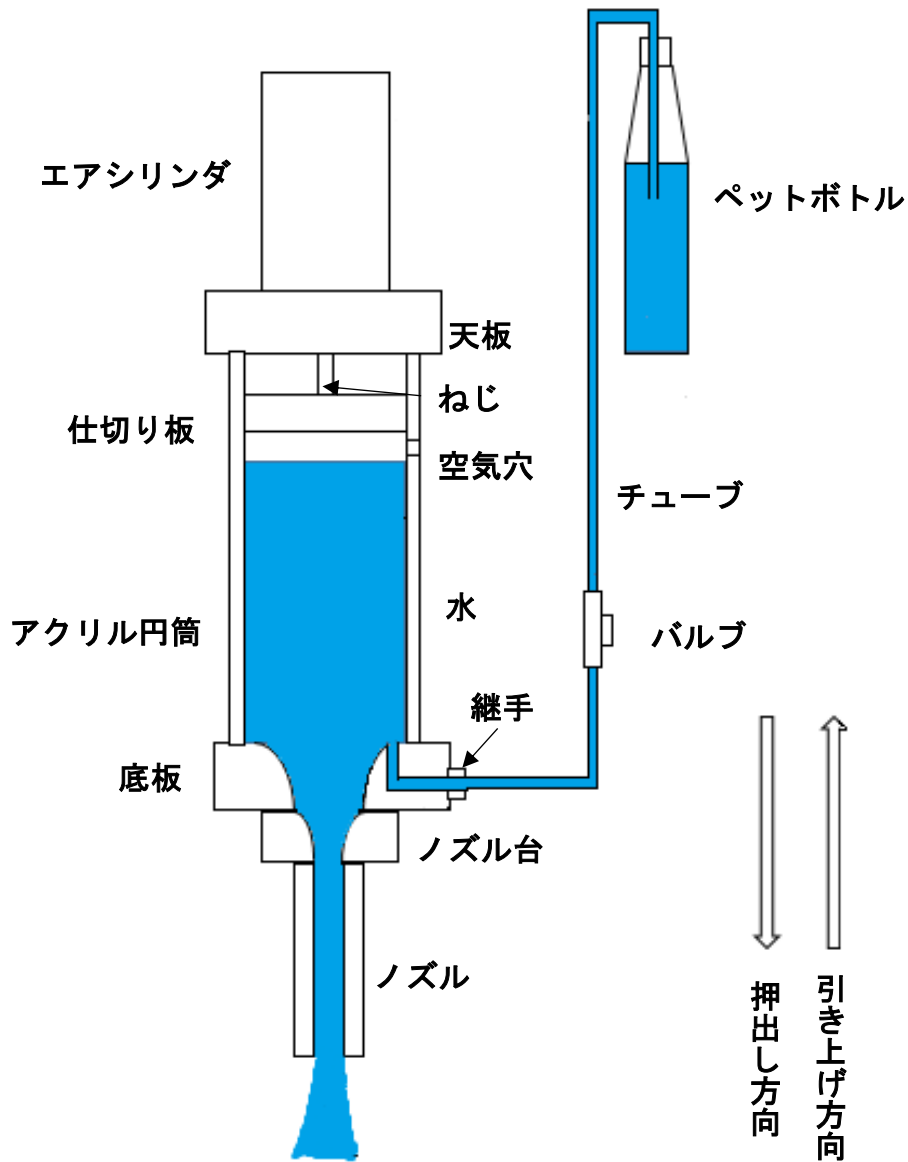


図 5.2 装置概略

## 5.2 実験結果（ノズル先端空気開放）

高速度カメラを使用して圧力を 10 気圧かけて水を押しだした時のノズル内の水の流れの撮影を行った。





図 5.3 1000fps シャッタースピード open で撮影したノズル内部の写真

図 5.3 の光源は電気スタンドを使用しノズルから離して撮影を行ってみたところノズルのくびれ部分から上部と下部では水の写り方に違いがあることが分かる。上部では透明になっており下部では水が白く濁っている。このことから、ノズルのくびれ下部では水に泡が混ざっている状態だと考えられる。また、白く濁っている部分でも逆 U 字型に透明な部分があるので、一旦水だけに戻ってからまた泡混じりの水の流れになっているのだと考えられる。そして、逆 U 字部から下の部分では逆 U 字部から上の部分に比べると流れが不均一に見えることから速度の変化が起こっているのだろうと思われる。最後に、ノズルのくびれ部分で泡が右側からのみ発生しているのでノズルの制作時に左右の亚克力板の長さが不均一になっている可能性がある。

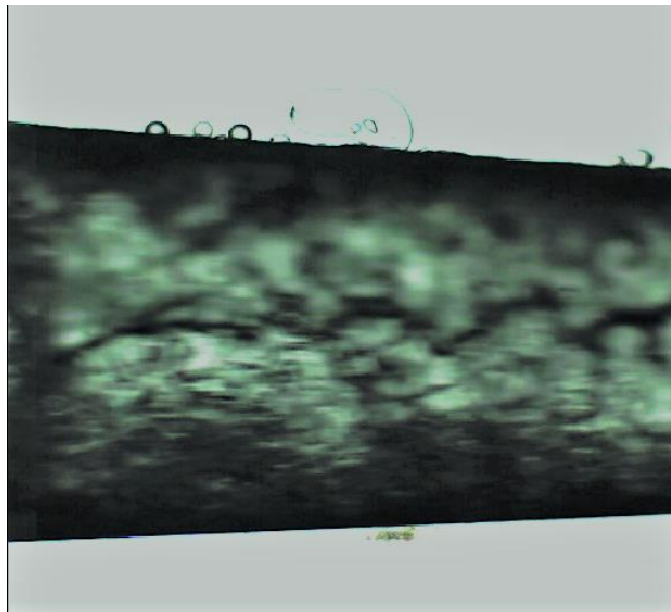


図 5.4 4000fps シャッタースピード 1/100000 で撮影したノズル内の写真

図 5.4 の光源はハロゲンランプを使用し接写リングを使用してノズルのど部から 13.1mm のところの撮影を行ったところ、ノズル内では空気を含んだ水が流れているはずだがノズルの先端が解放されている状態の実験では、泡が細か過ぎたのか光量が足りなかったのか泡をはっきりと確認することができなかった。ノズル先端が空気中に解放されているために水が空気を取り込み易いのではないかと考えられたため、水槽を制作しノズル内が水で満たされる状態で実験をすることになった。

### 5.3 実験結果（ノズル先端水中開放）

高速度カメラを使用して圧力を 10 気圧かけて水を押し出した時のノズル内の水の流れの撮影を行った。

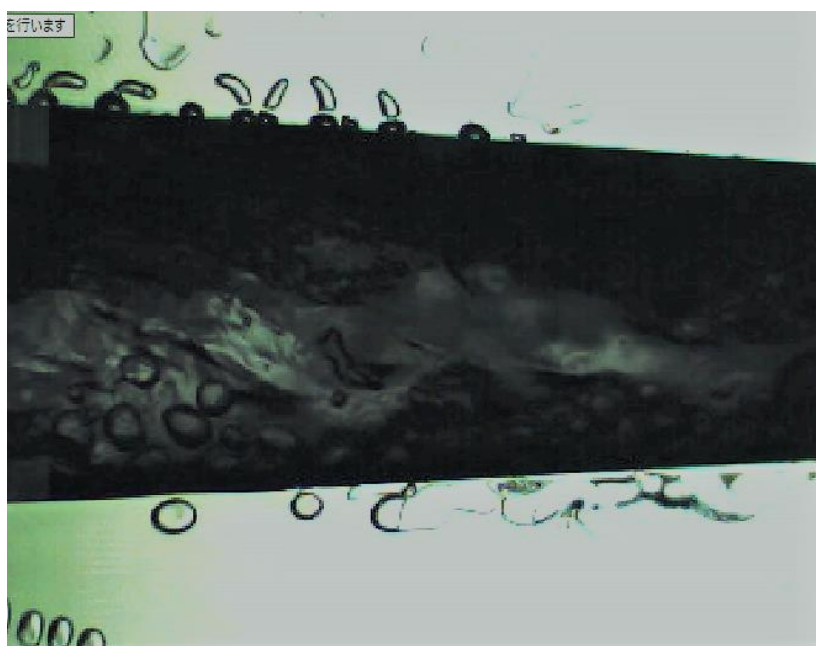


図 5.5 4000fps シャッタースピード 1/100000 で撮影したノズル内部の写真

図 5.5 の光源はハロゲンランプ, 高速度カメラは接写リングを使用してノズルのど部から 13.1mm のところの撮影。ノズルが空気中に開放されていた状態と比べ泡が大きくなっているのか、はっきりと泡が写っている。しかし、泡の移動距離を追えない上、水の流れが全体的に暗すぎるため光源の場所を再調節してから今後は実験を行いたい。



## 第6章 フォトブリーチング法による計測

水槽を用いて実験を撮影した結果、泡を確認することはできるようになったが水の流れが速すぎる上に泡の流れが不均一であったため泡の移動距離を調べることができなかつたので、流速の計算は行えなかつた。よって、フォトブリーチング法というものを使用することにした。フォトブリーチング法とは、蛍光染料を溶かした水溶液に 490nm 近傍のレーザーを照射することで蛍光染料の許容光量を飽和させ、蛍光能力を消失させて光を当てたときに一部だけ蛍光しない部分を作ることである [3]。

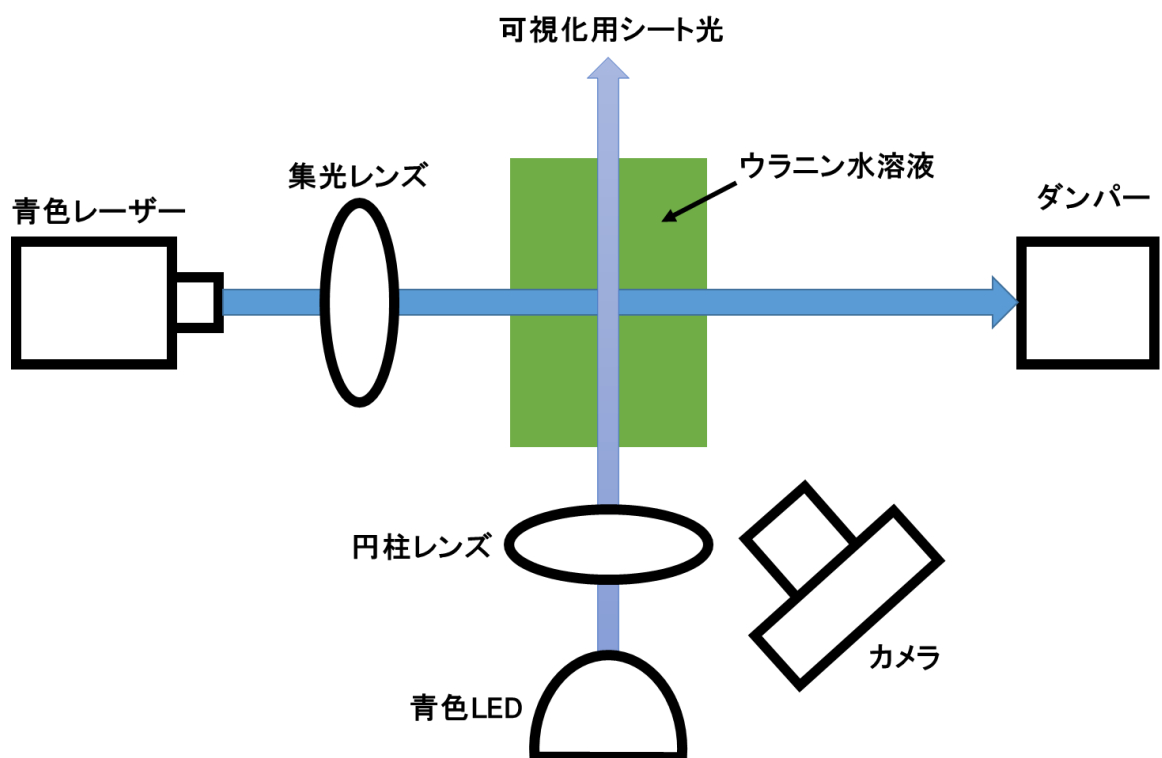


図 6.1 フォトブリーチング予備実験用装置概略

実際に実験で使用できるかどうかを確認するために予備実験を行った。研究室に 490nm 近傍のレーザーがなかったため 445nm のレーザーで代用して図 16 のような装置で実験を行ったところ蛍光しない部分を作り出すことができた。図 6.2 にその模様を示す。静止状態の流体だが、蛍光しない部分が沈んで行き数秒すると拡散し見えなくなるのが確認できた。また、レーザーを照射する時間によって蛍光しない部分が拡散されてしまうまでの時間に変化があることがわかった。(具体的には、照射する時間が長いほど拡散までの時間が長い)



図 6.2 フォトブリーチング画像

実際の実験では高速で動く流体で使用するので、流体でも利用できるか確認をするためにノズルへウラニン水溶液を上から流してその流体相手にブリーチングできるか実験を行った。しかし、流体相手ではレーザーの照射時間が足りないのか、蛍光しない部分が流れるのが速かったのか、カメラで捉えることはできなかった。

## 第7章 レーザードップラ法による計測

次に、泡の散乱光を利用してレーザードップラ流速計というものを作ることにした。ビームスプリッタとミラーを使用して、レーザーを2本に分け光路差を与え、泡の散乱光を光検出器で受光することで計測する。まずは予備実験として机上で回転体相手に光路（図7.1）を試作し実験したところ、波形を確認出来なかったのが断念した。原因として考えられるのは、使用しているレーザーが光路差によって可干渉距離を超えてしまい、干渉が出てこなかったからではないかと考えられる。

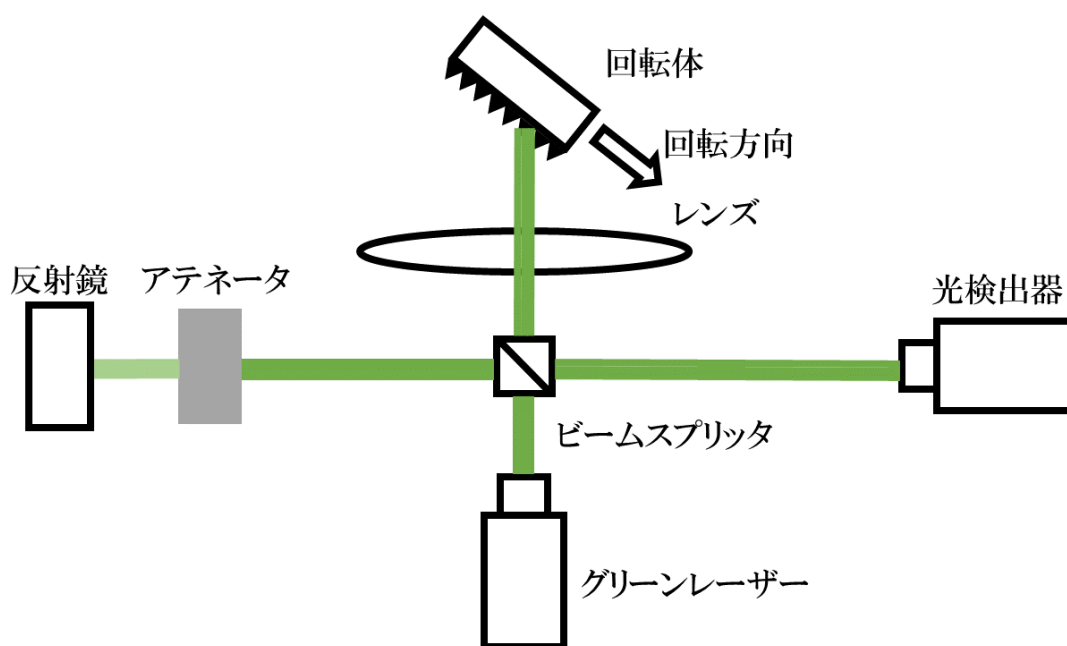


図 7.1 レーザードップラ流速計予備実験概略

## 第 8 章 相互相関

実験方法を以下に示す。

混相流にレーザー光を当て、その散乱光を光検出器で測定を行い、測定データから相互相関を取り流速の計算を行う。今回は、流れの上下二点でどれだけ時間のずれがあるのかを測定したいので、ウェッジ板でレーザーを上下で二股に分け、また、測定の精度を上げるためにレンズでレーザーを集光しレーザー同士の距離を短くしている。加えて、光検出器での散乱光の検出を容易にするためにフレネルレンズで散乱光を集光している。図 8.1 に概要を示す。

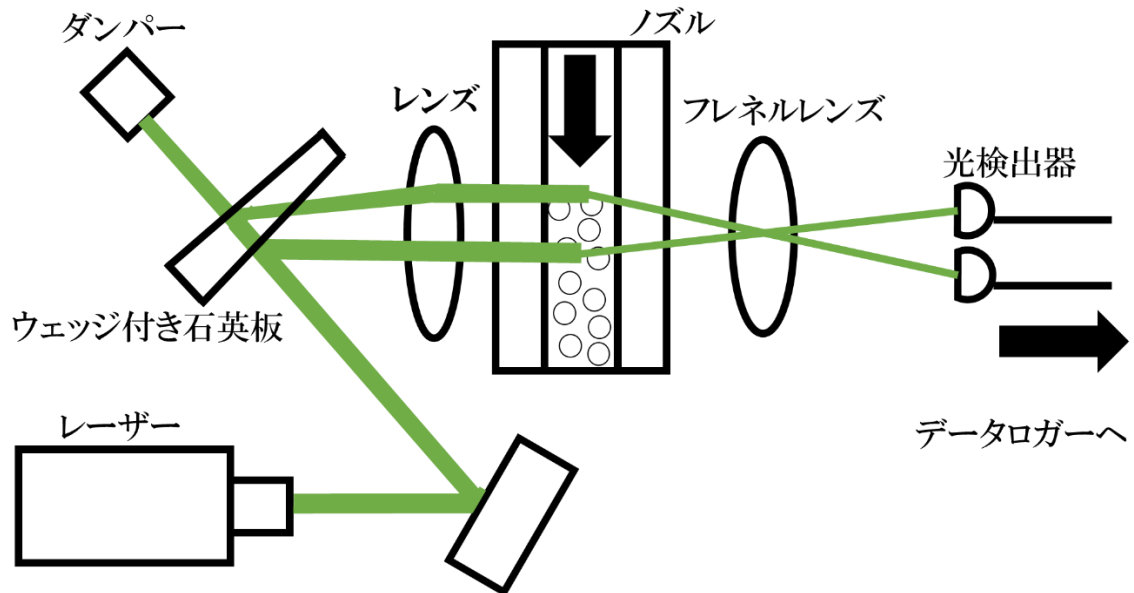


図 8.1 散乱光による相互相関を使用した流速測定概要

また、今回計測に使用した相互相関の計算方法を以下に示す。

- データ数が  $a_n$ 、 $b_n$  個あるデータを A、B とする
- データ A はそのままデータ B を  $\Delta t$  だけずらし、

$$\sum_{n=1}^{5000} (a_n + b_{n+\Delta t}) = a_1 \times b_{1+\Delta t} + a_2 \times b_{2+\Delta t} + \dots + a_n \times b_{n+\Delta t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を用いて、積の和を求める

- $\Delta t$  を変えていき、積の和が 1 番大きい値になった時の  $\Delta t$  が相互相関係数となる

今回は $\Delta t$ を0~1000 $\mu s$ 、 $n$ を5000 $\mu s$ で計算を行った。

実際に実験で測定した散乱光の波形を図に示す。測定結果から計算した相互相関のグラフを図に示す。この実験方法で得られたデータではグラフに示す通り最大値がはっきりとしていないため相関がとれていないことになる。

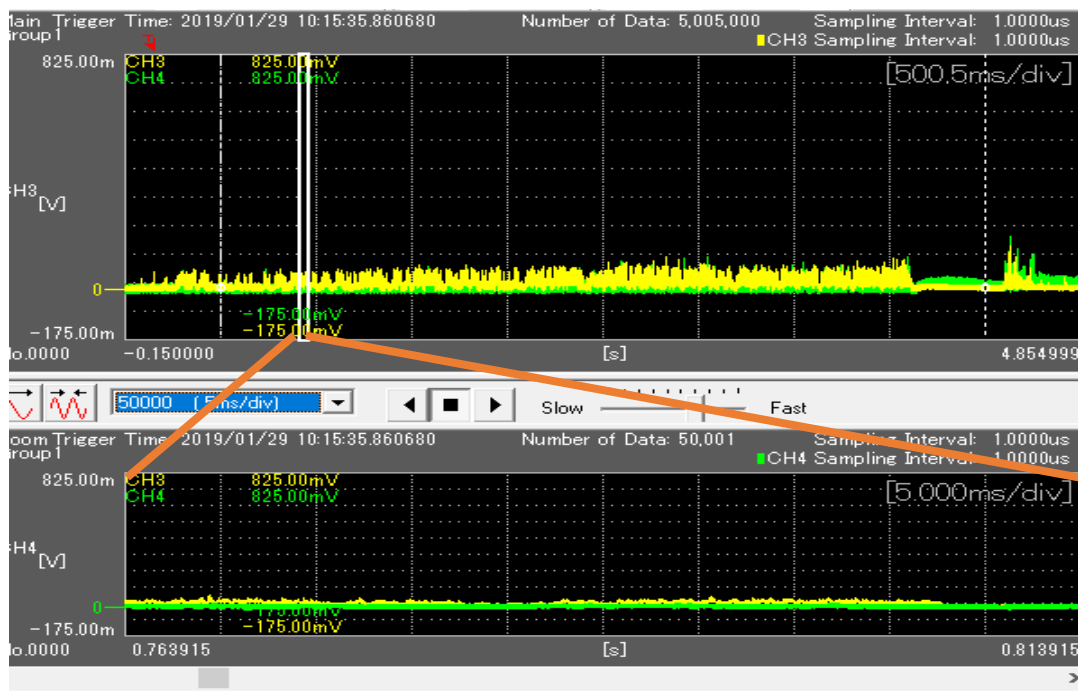


図 8.2 データロガーで測定したデータ

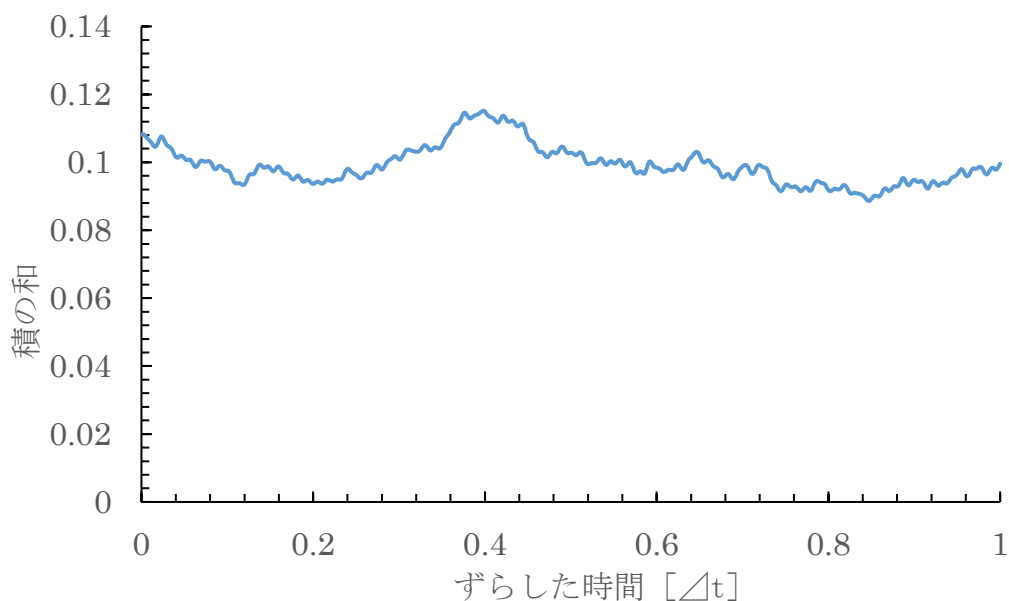


図 8.3 相互相関関係

前回の実験では相関を取ることができなかつたため、データを安定化させるために透過光が光検出器に入らないように装置の改良を行った。装置の概要を図に示す。前回の装置から改良した点は、ビームスプリッターを入れることでレーザーの透過光が光検出器に入らなくなり、純粋に散乱光のみの測定を行えるようにしたことである。

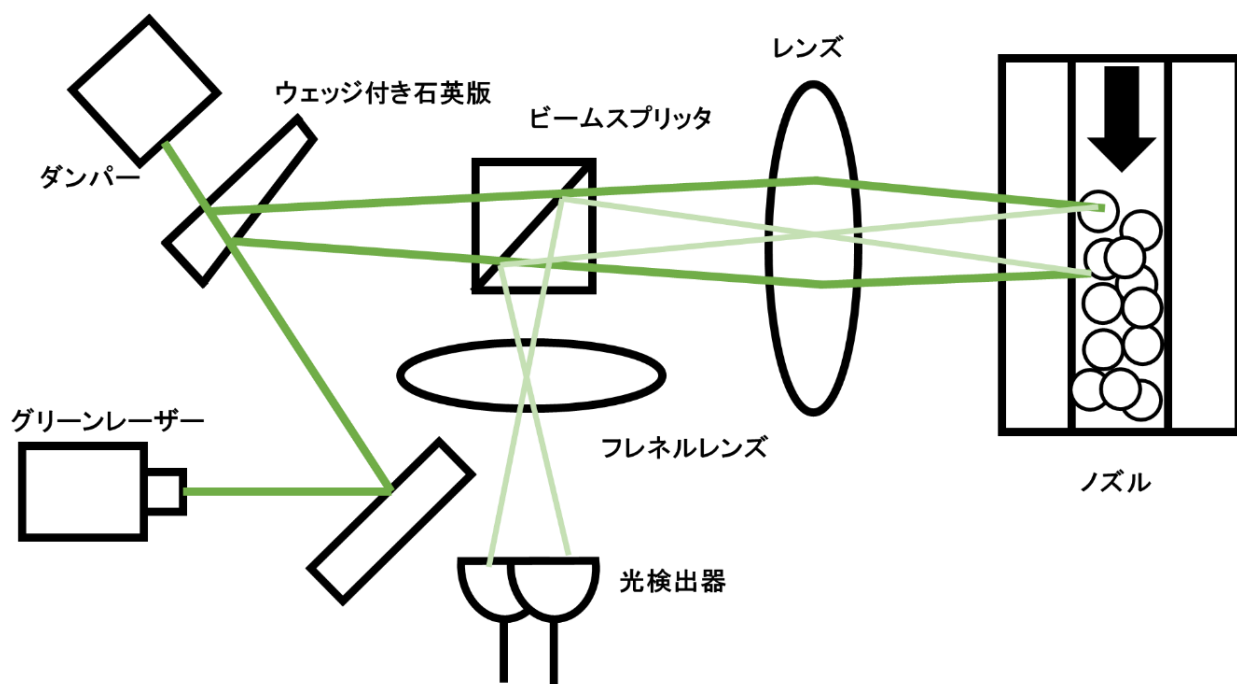


図 8.4 改良した流速測定装置概要

改良した装置で測定した結果のグラフを図 8.5 に示す。前回のグラフよりも安定しているようには見えただが、最大値がはっきりとしていないため、相関はとれていないことになる。

以上の計測法では相関をとることが出来なかつた為、本実験よりも簡単な予備実験を行うことで、相互相関を利用した流速の測定ができるかどうかを確かめることにした。予備実験の概要を図 8.7 に示す。泡の代わりに光散乱体として回転体を使用した。回転体には散乱光からパターンが出るように白色の光散乱体に適当な間隔で黒線を入れている。

回転体の散乱光による相互相関実験から計測した波形を図 8.8 に示す。上下で電圧に差はあるものの、同じ様な波形をとっていることがわかる。

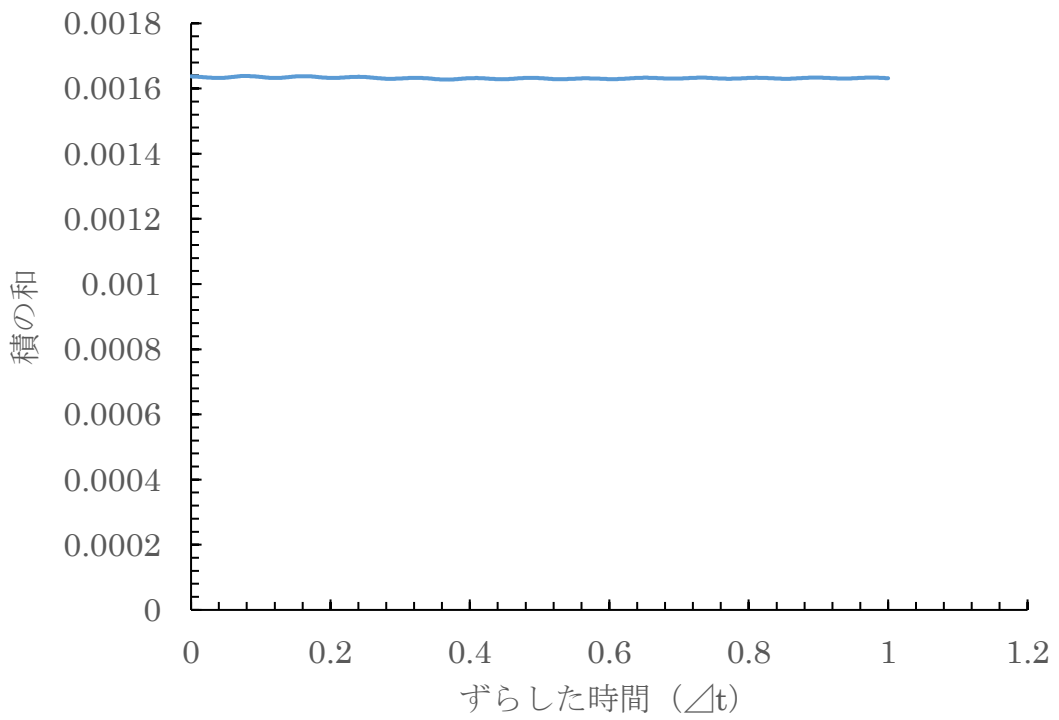


図 8.5 相互相関関係

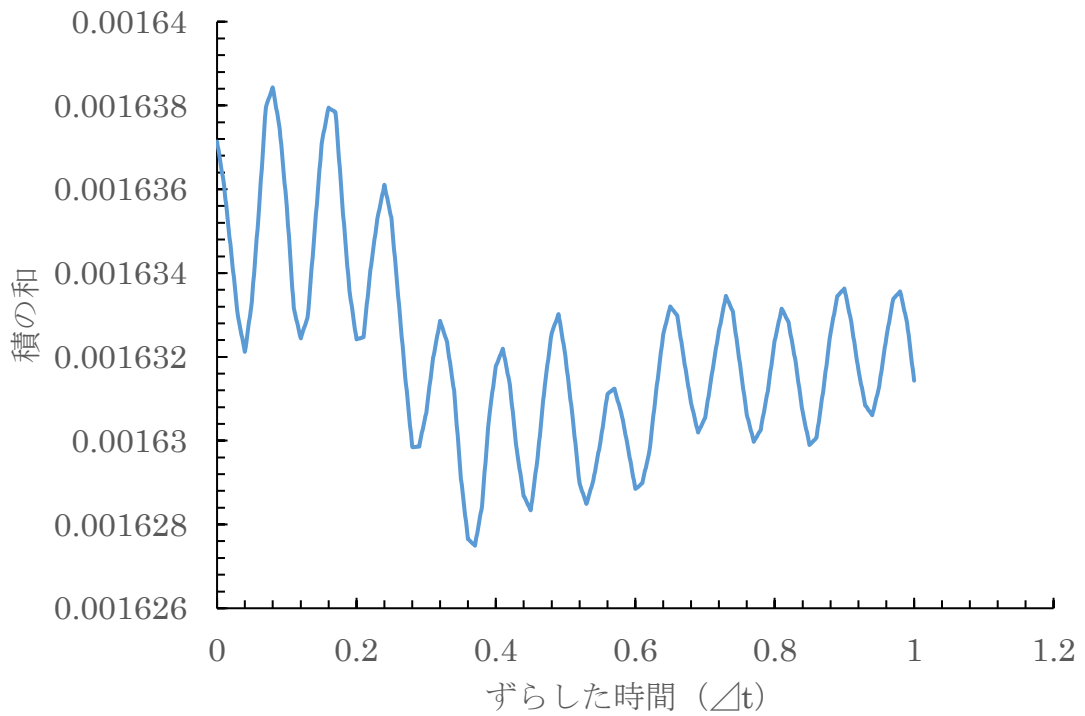


図 8.6 相互相関関係 (図 8.5 拡大図)

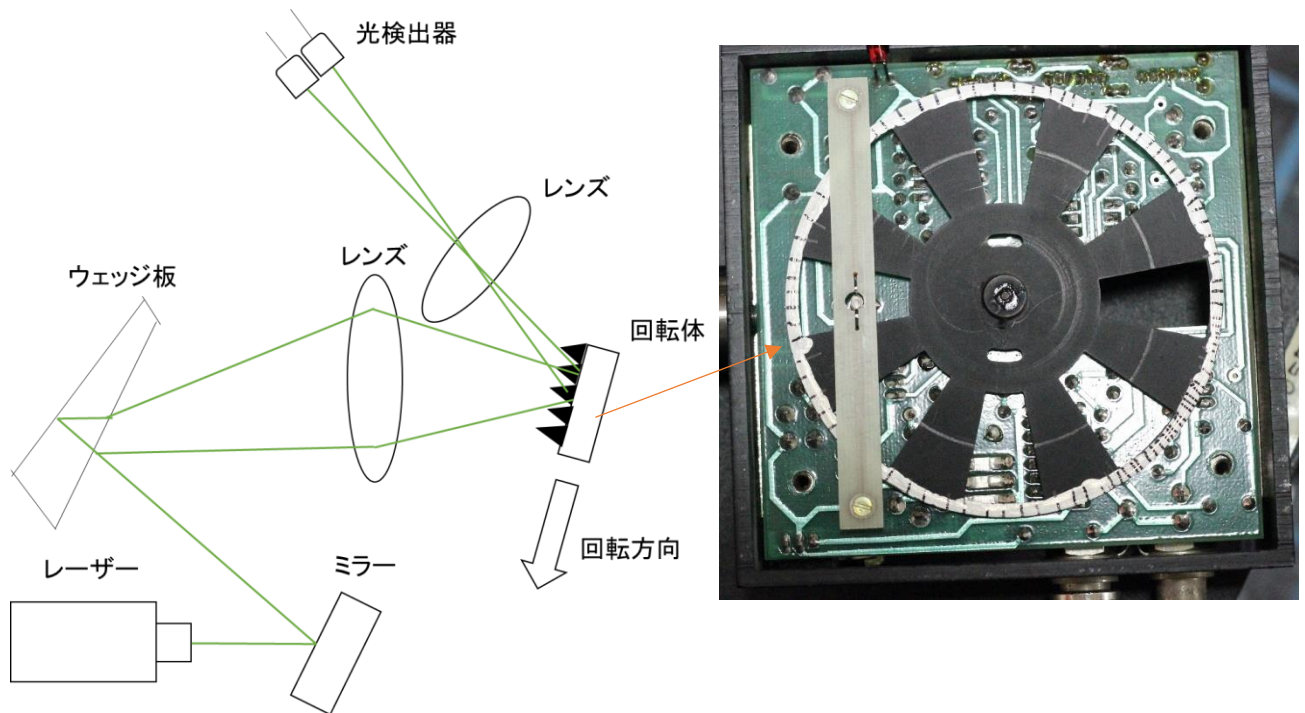


図 8.7 回転体の散乱光による相互相関実験概要

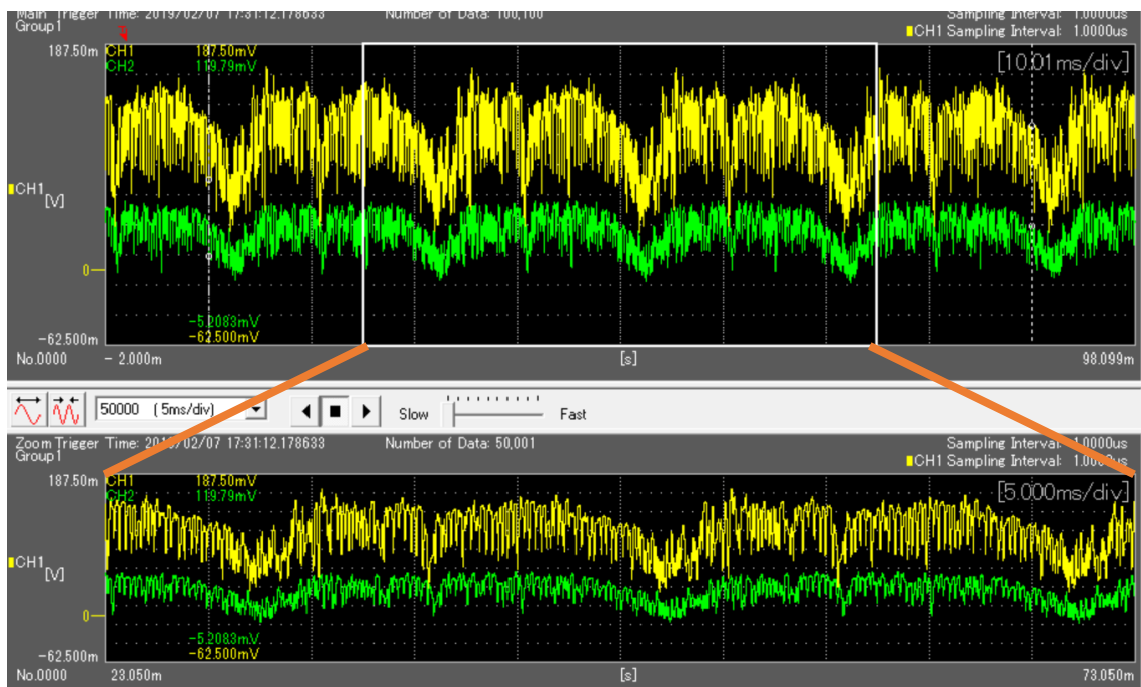


図 8.8 データロガーで測定した波形  
測定結果から計算し作成したグラフを図 8.9 に示す。



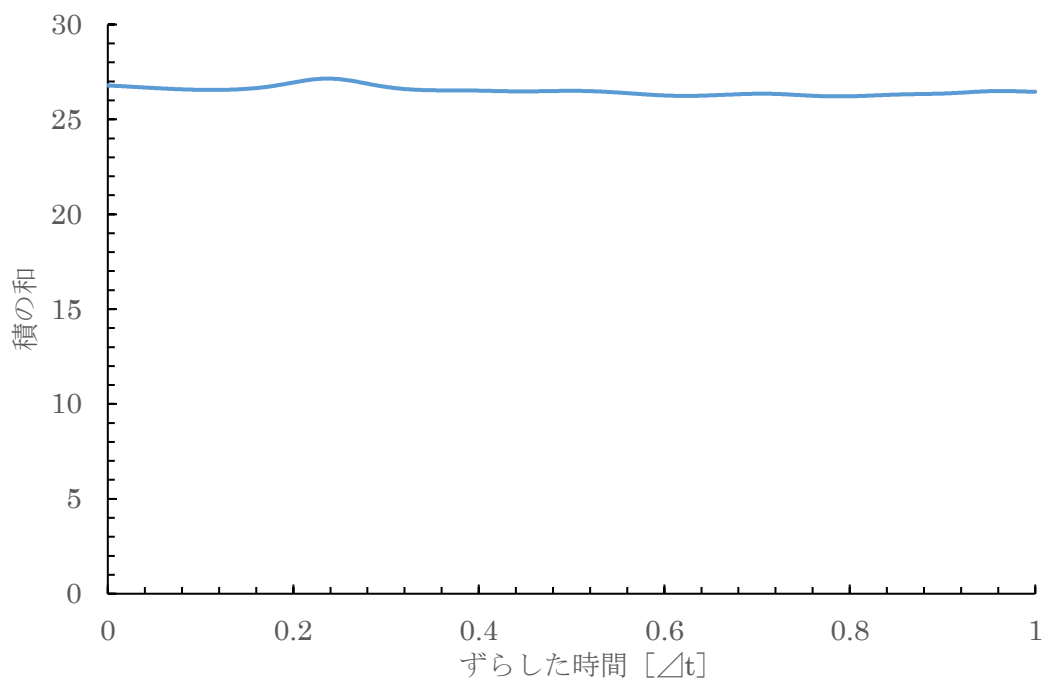


図 8.9 相互相関関係

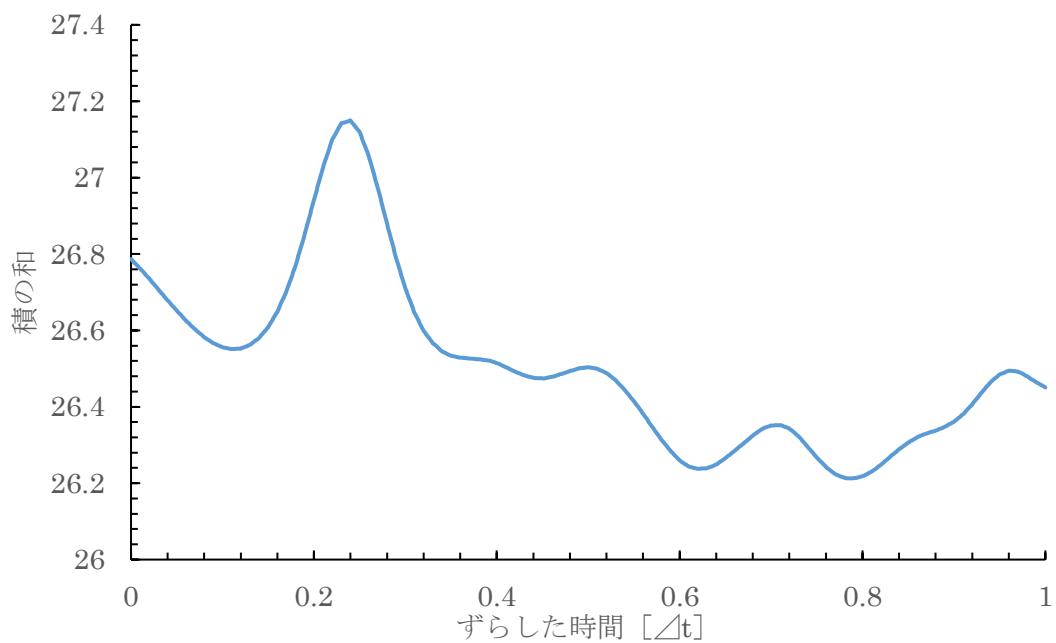


図 8.10 相互相関関係 (図 8.9 拡大図)

グラフから小さいながらも最大値をとっていることがわかる。相関をとれているかの確認をするため、回転体の回転数を増減させてそれに対応して最大値が横にずれるかの確認を行ったところ、回転数に対応して最大値が横にずれるのを確認できた。

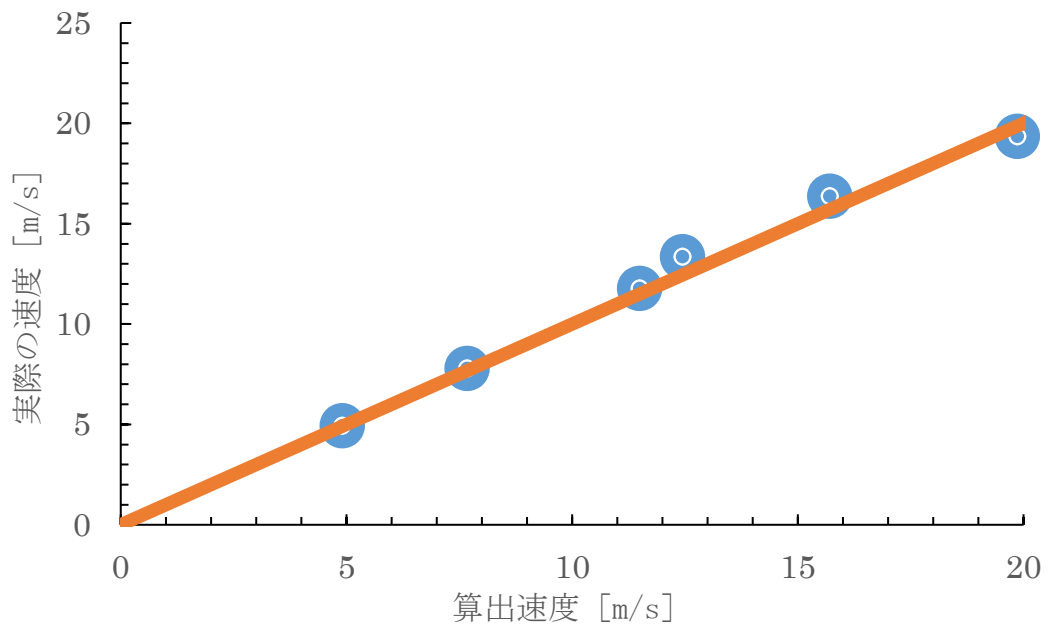


図 8.11 実際の速度と算出速度の関係

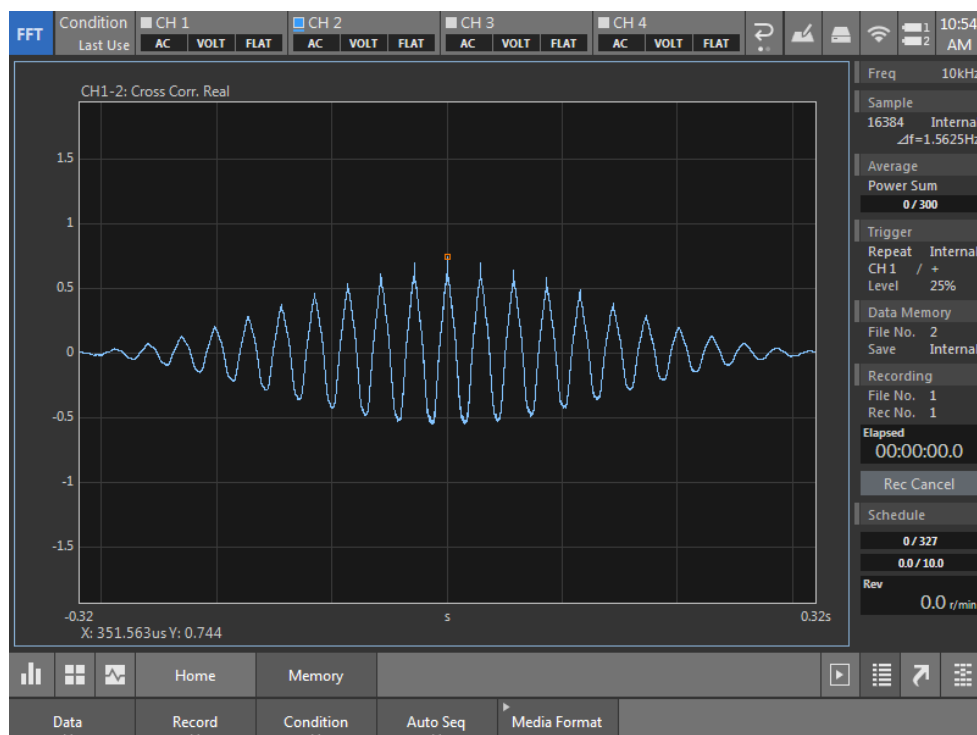


図 8.12 FFT アナライザの相互相関機能で測定した波形

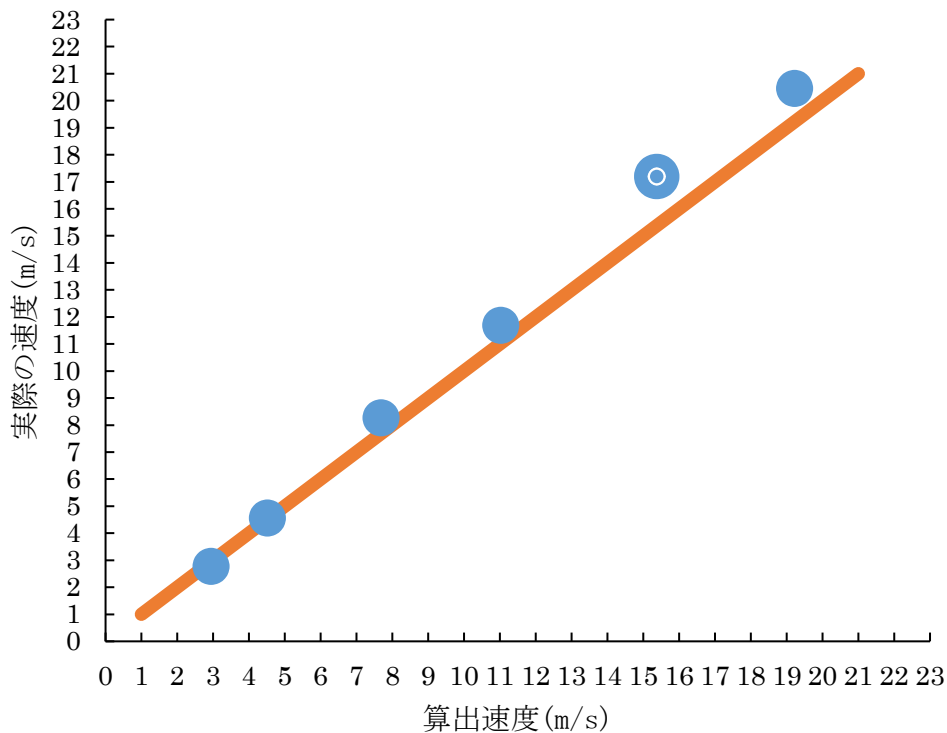


図 8.13 FFT アナライザの相互相関機能により算出された相関係数から計算した速度と実際の速度

実際の速度と測定結果から算出した速度をグラフにまとめたものを図 8.11 に示す。また FFT アナライザでも同様の実験を行った。その結果を図 8.13 に示す。算出速度が実際の速度と一致した場合  $y=x$  のオレンジのグラフと算出速度の青い点が一致する。今回はレーザー同士の距離を 3mm で校正を行った結果実際の速度とほぼ一致した。

今回の回転体の散乱光による相互相関実験の結果から散乱光を利用した速度の測定は本実験でも使用することができるものだと考えられる。しかし、図 8.9 のグラフを見れば分かる通り最大値はとても小さいものであることから測定器具などの改良が必要である。

## 第 8 章 結言

第 5 章でも記述しているが、気液二相流を用いなくても水だけでもノズルのくびれ部でキャビテーションが起き、衝撃波が観測できることが分かった。また、ノズルの出口が大気中なのか水中なのかで泡の見え方や大きさが変わることもわかった。流速測定についてはフォトブリーチング分子タグ法で観測を試みた。静止しているときは実際にブリーチングが起きていることを観測できたが、流れが生じると観測できず、本実験では活用できないと判断した。また、散乱光から相互相関を利用して速度を計測する方法を開発した。

## 参考文献

- 1) 山本健 [超音波の光学的可視化] 圧電応用研究室 小林理研ニュース NO.88-2  
[http://www.kobayasi-riken.or.jp/news/newstop/news\\_Frame\\_1back.htm](http://www.kobayasi-riken.or.jp/news/newstop/news_Frame_1back.htm)
- 2) 檜村秀男 [k- $\epsilon$  乱流モデルを用いた適正膨張超音速噴流の数値解析] 北九州工業高専  
研究報告第47号 (2014)  
[http://library.kct.ac.jp/content/files/ResRep47/7S\\_Kashimura\\_p45.pdf](http://library.kct.ac.jp/content/files/ResRep47/7S_Kashimura_p45.pdf)
- 3) 細川茂雄・富山明男・水本博貴 [フォトブリーチング分子タグ法によるエネルギー収支  
の評価] 日本機械学会論文集(2011)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/77/784/77\\_784\\_2263/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/77/784/77_784_2263/_pdf/-char/ja)

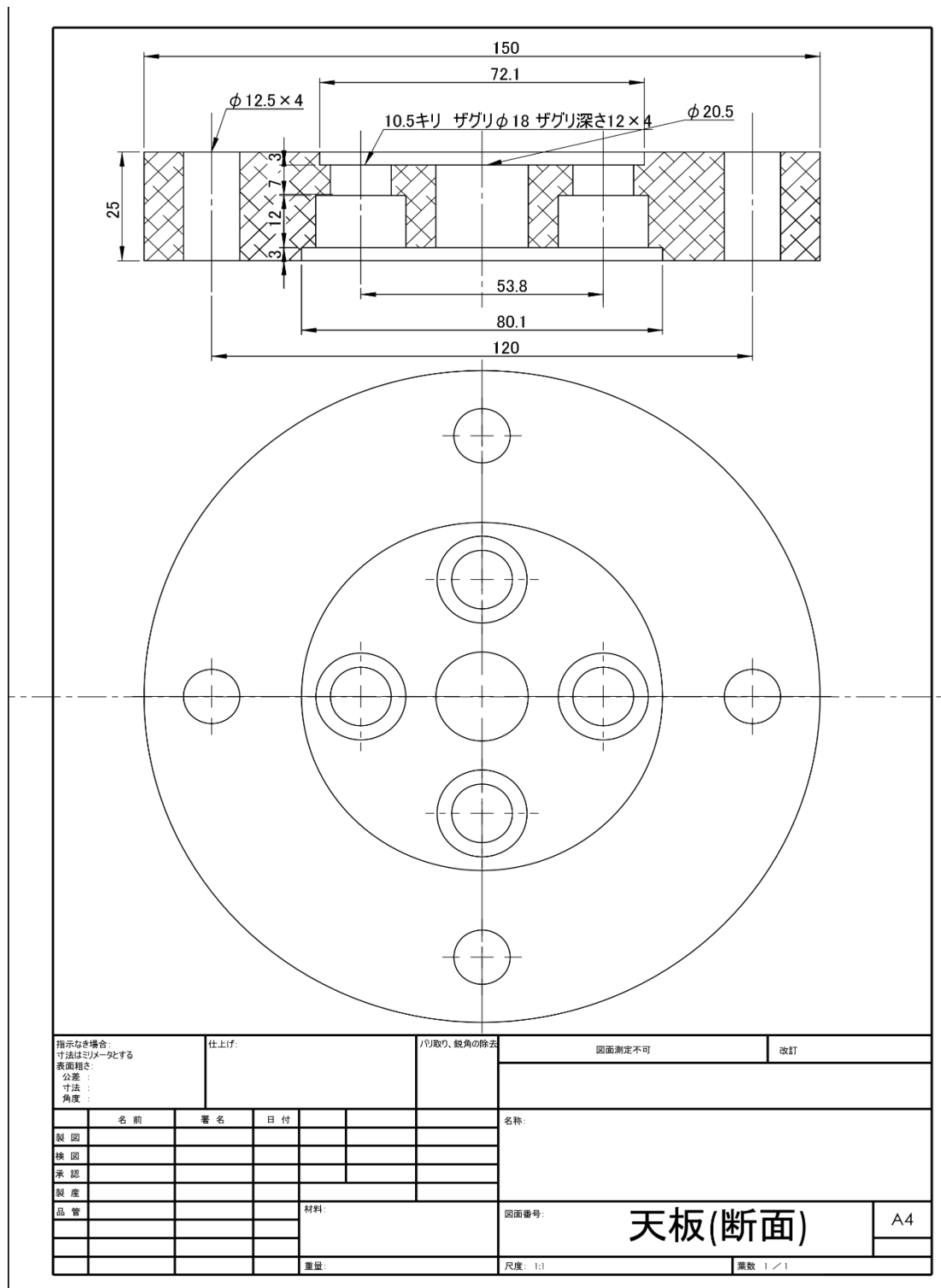
謝辞

本研究を行うにあたり、河村良行教授をはじめ、機械科の先生方にはお世話になりました。特に、江頭竜准教授、砂原賢治准教授、天本祥文准教授のご指導、ご鞭撻のおかげでここまで実験を行うことが出来ました。また、高曽徹先生のご教授のおかげで定量的な実験データを計測することが出来ました。ここに感謝の意を表します。

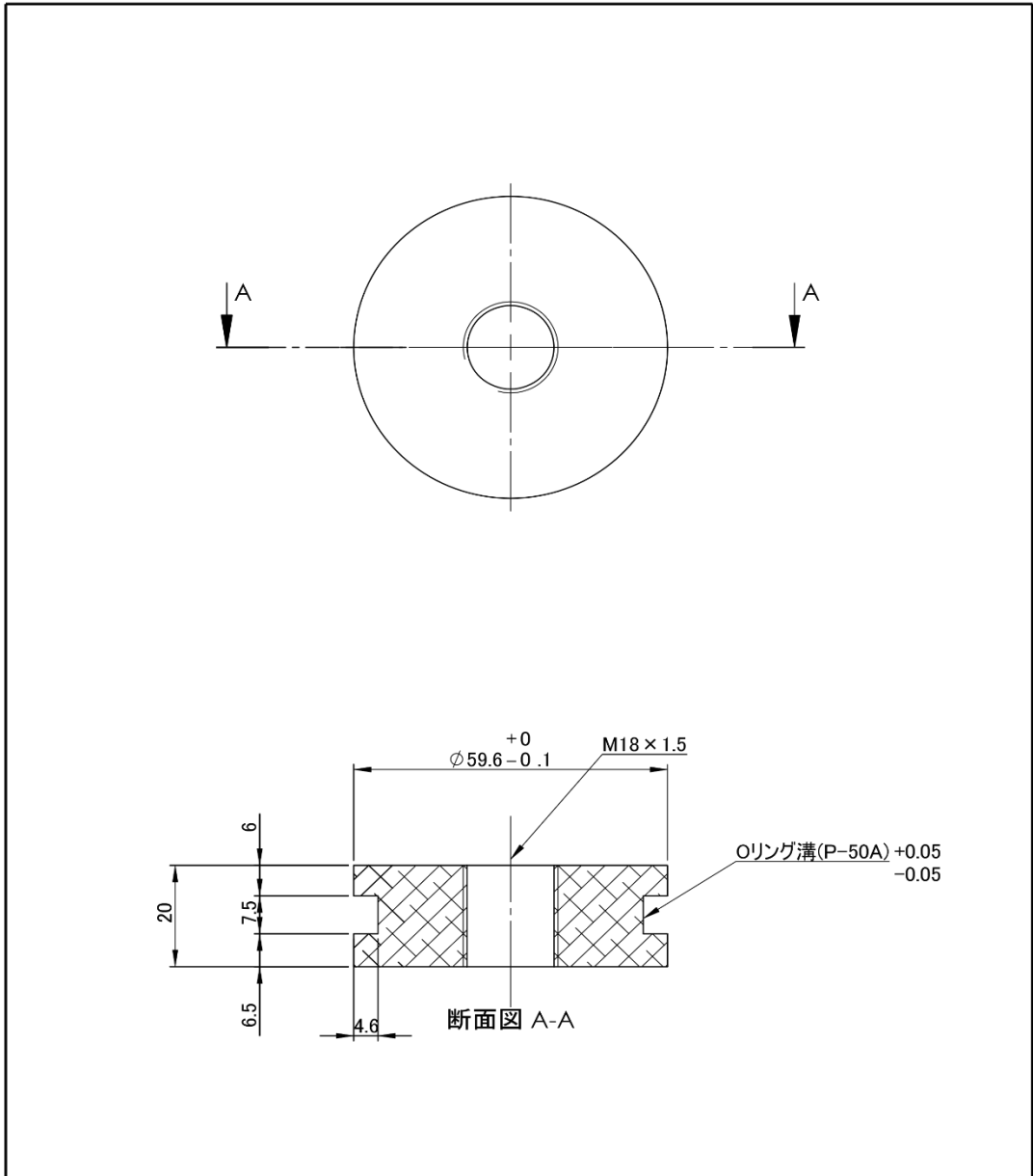
また、モノづくりセンター、工作センターの職員の皆さまには工作機械の扱い方を教わったり実際に加工をお願いしたりと大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

## 付録

以下に第2章で記述した装置の各部品的设计図を示す。



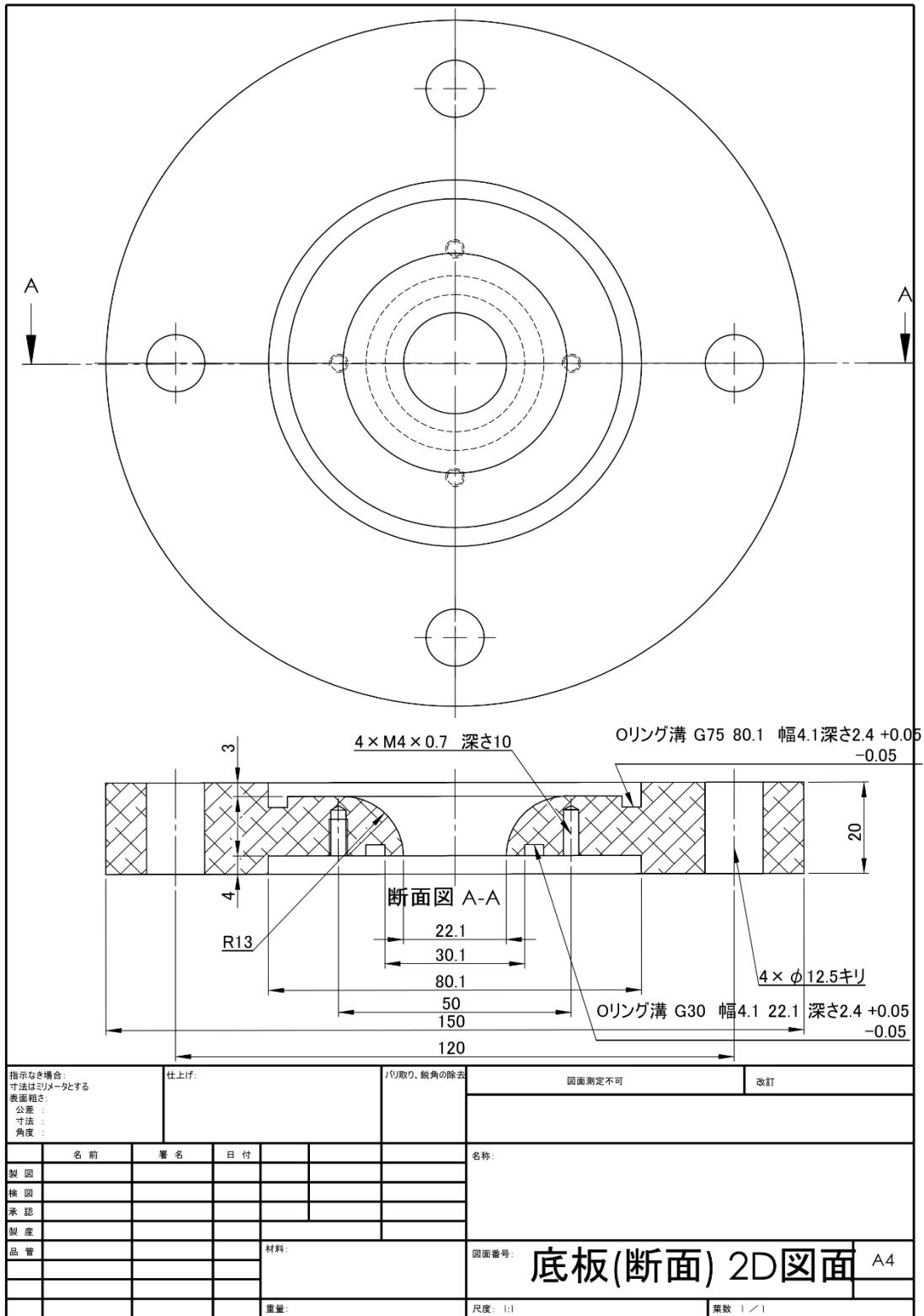
付録図1 天板



指示なき場合: 寸法はミリメートルとする 表面粗さ: 公差: 寸法: 角度:		仕上げ:	バリ取り、鋭角の除去	図面測定不可	改訂
製図	名前	署名	日付	名称:	
検図					
承認					
製産					
品管				材料:	図面番号: <b>仕切り板</b>
				重量:	A4
				尺度: 1:1	葉数 1/1

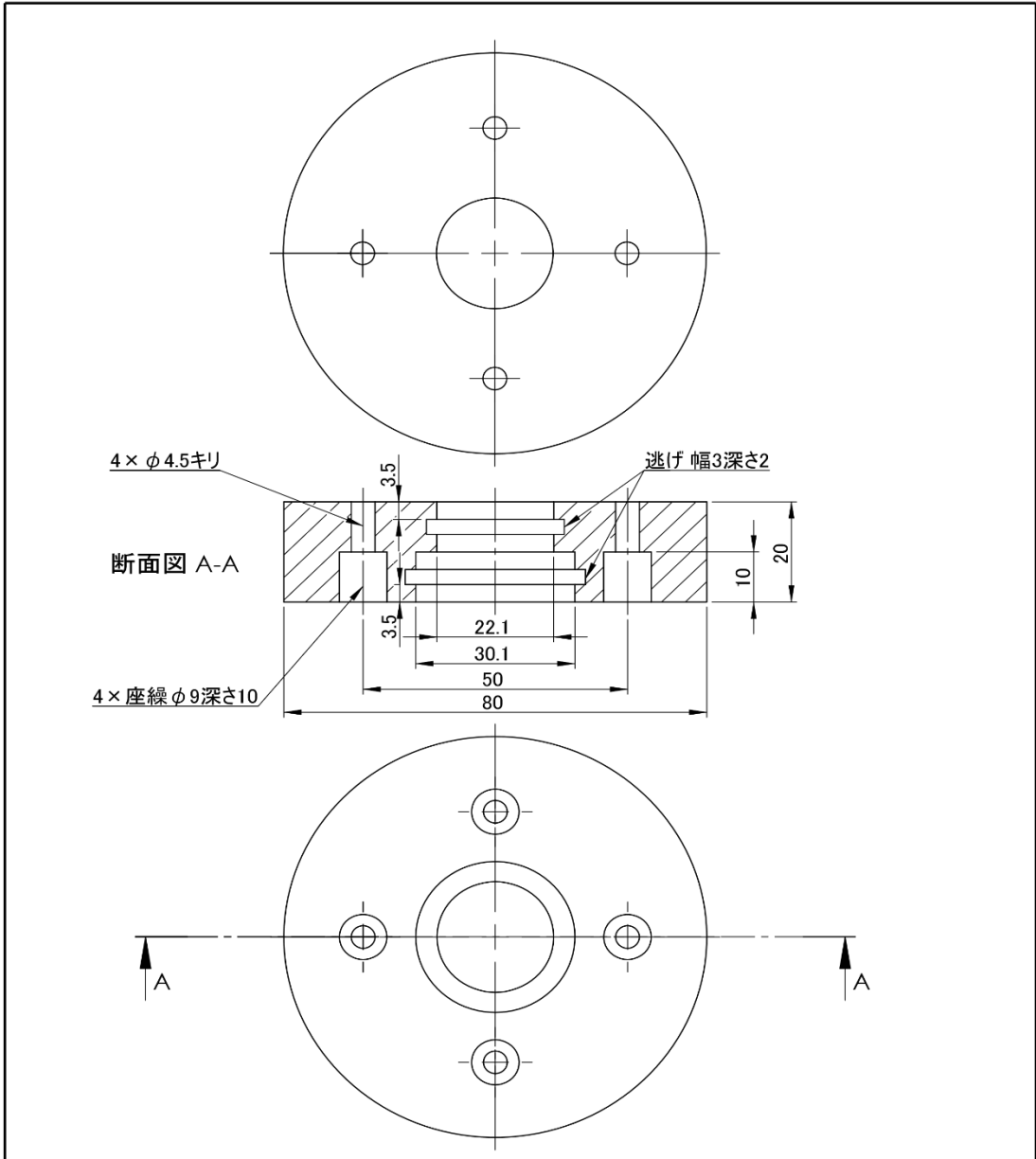
付録図 2 仕切り板





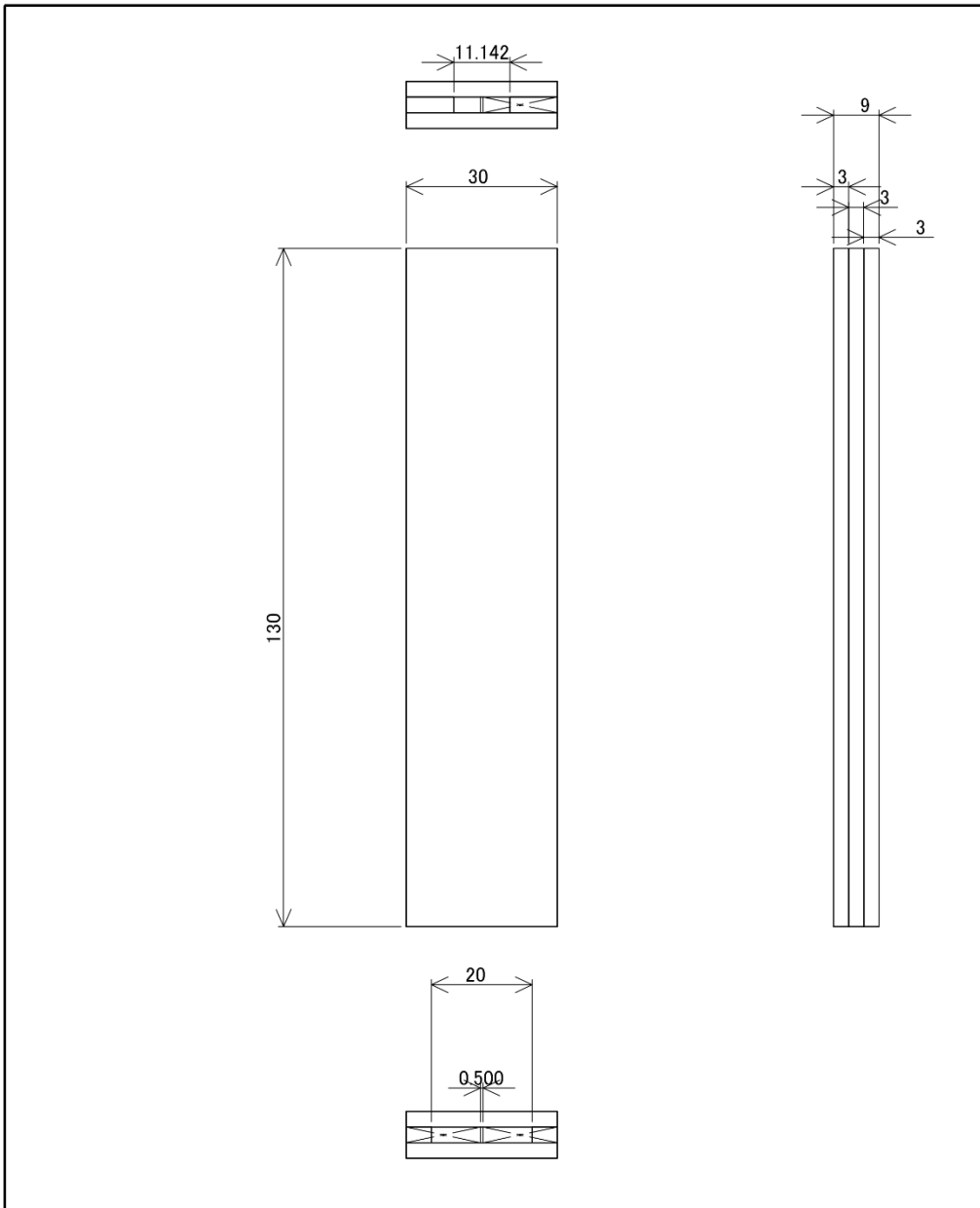
指示なき場合: 寸法はミリメートルとする		仕上げ:	凡例取り、鋭角の除去		図面測定不可	改訂
表面粗さ: 公差: 寸法: 角度:						
製図	名前	署名	日付		名称:	
検図						
承認						
製産						
品管				材料:	図面番号: 底板(断面) 2D図面 A4	
				重量:	尺度: 1:1	葉数 1/1

付録図 3 底板



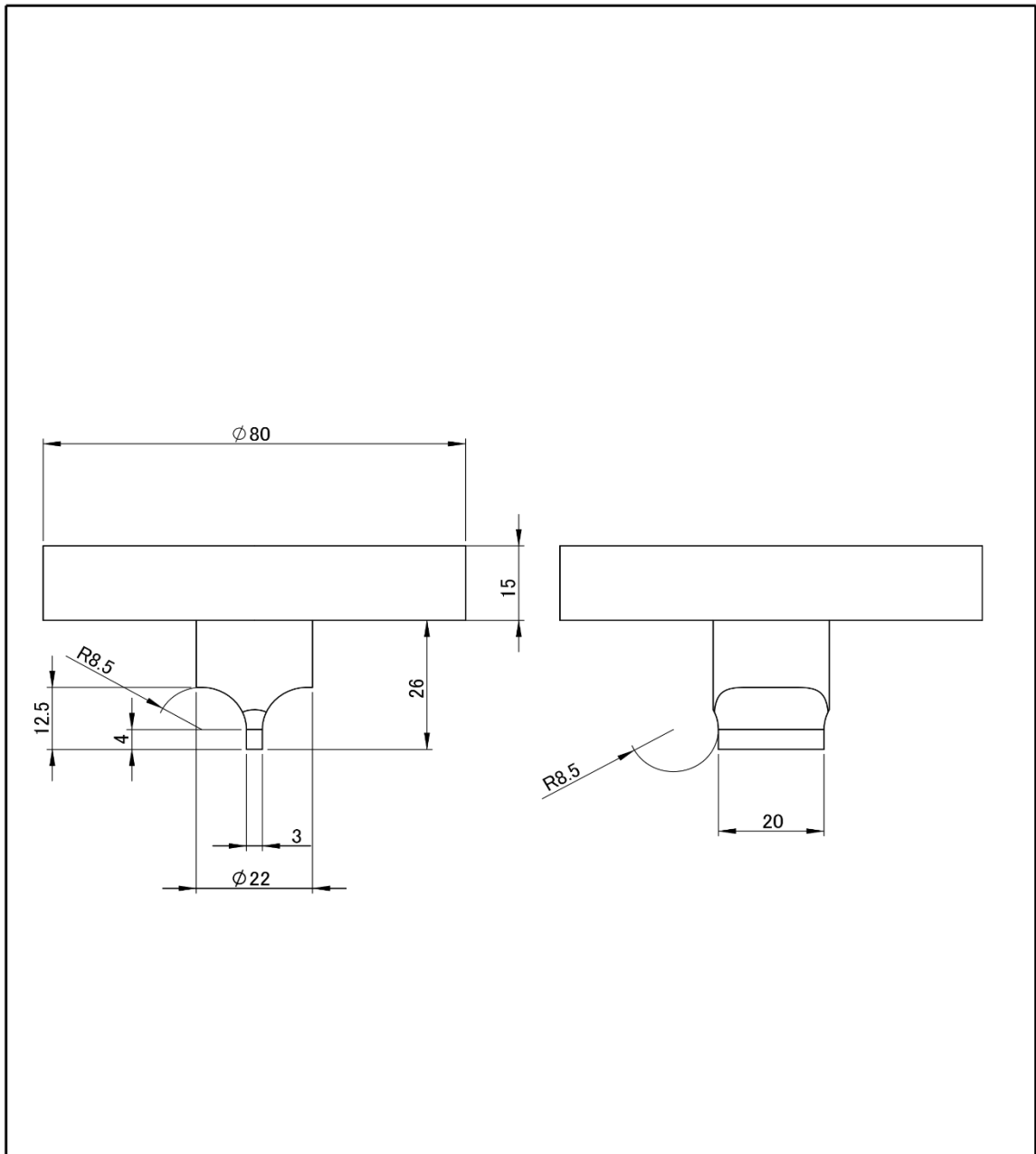
指示なき場合: 寸法はミリメートルとする 表面粗さ: 公差: 寸法: 角度:		仕上げ:	バリ取り、鋭角の除去	図面測定不可	改訂
名前	署名	日付		名称:	
製図				図面番号: <b>ノズル台 2D図面</b> A4	
検図					
承認					
製産					
品管			材料:	重量:	
				尺度: 1:1	葉数: 1 / 1

付録図 4 ノズル台



指示なき場合: 寸法はミリメートルとする		仕上げ:		バリ取り、鋭角の除去		図面測定不可		改訂	
数値精度: 公差: 寸法: 角度:									
名前		署名		日付		名称:			
製図									
検図									
承認									
製産									
品管				材料:		図面番号:		ノズル A4	
				重量:		尺度: 1:1		頁数 1/1	

付録図 5 ノズル



指示なき場合: 寸法はミリメートルとする 表面粗さ: 公差: 寸法: 角度:		仕上げ:	バリ取り、鋭角の除去		図面測定不可	改訂
製図	名前	署名	日付		名称:	
検図						
承認						
製産						
品管				材料:	図面番号:	ジグ 2D図面
				重量:	尺度: 1:1	A4
					葉数: 1/1	

付録図 6 ジグ