

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

## 干渉縞を用いた動的濡れの観察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-04-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 李, 賀 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1541">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1541</a>

# 修士学位論文

干渉縞を用いた動的濡れの観察

平成 29 年度  
(2017年9月)

東京海洋大学大学院  
海洋科学技術研究科  
海洋システム工学専攻

李 賀

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 従来の研究.....	3
1.2.1 液滴形状による濡れの評価.....	3
1.2.2 干渉縞による濡れの評価.....	6
1.3 研究目的.....	7
第2章 実験原理.....	8
2.1 従来の研究における干渉縞生成原理.....	9
2.2 本研究における干渉縞生成原理.....	11
2.3 気液界面の傾斜角と干渉縞間隔の関係.....	14
第3章 実験装置.....	17
3.1 実験光学系.....	18
3.2 レーザ光.....	21
3.3 測定可能な角度の範囲.....	23
3.3.1 干渉縞の生成条件からの測定範囲.....	23
3.3.2 観察装置の条件からの測定範囲.....	26
3.3.3 測定可能範囲の検証.....	31
第4章 実験結果.....	47
4.1 実験概要.....	48
4.2 水とエタノールの観察実験.....	49
4.2.1 水液滴の静止状態の観察.....	49
4.2.2 エタノール液滴の静止状態の観察.....	55
4.2.3 エタノール液滴が濡れ広がる過程の観察.....	59
4.3 考察.....	65
第5章 結論.....	66
参考文献.....	68
謝辞.....	69
付録.....	70
写真から干渉縞を読み込むプログラム.....	70
間隔から傾斜角の計算を行うプログラム.....	73
ビームエキスパンダ.....	74

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

固体表面上での液体の濡れ広がりやすさは、濡れの際（接触線）で気液界面が固体表面となす角度（接触角）で評価されることが多い。固体表面の濡れ性がよい時には接触角は小さく、濡れ性が悪い時には接触角は大きい。水の接触角が 90 度より大きい場合は撥水性で、固体表面は水滴を弾く。90 度より小さい場合は親水性で水滴は濡れ広がる。Fig. 1.1 に親水性と撥水性の概略図を示す。このように液体と固体表面の接触角は固体表面の濡れ性の判断に重要である [1]。

固体表面の濡れ性は材質・表面性状によって異なる。例えば、蓮の葉は超撥水と言われるほど水滴をよく弾き落とすが、薔薇の花びらについて水滴は、水滴がついた花びらが風などに揺られ、多少振動したとしても落ちにくい。この水滴に対する反応の違いは、前者と後者の表面構造の違いによる。蓮の葉は表面の微細な凹凸により、その表面に存在している水滴が支えられることで優れた撥水性を示す。一方で、薔薇の花びらの表面も微細な凹凸を持っているが、薔薇の花びらの表面は蓮の葉とは異なる突起と突起先端構造を持っているため、超撥水性と高付着性の両方の性質を示し、その結果、その表面に存在する水滴は弾き落とされにくくなる[2][3]。これら植物の撥水性の違いから得られる知見は、自動車の窓ガラスにおける撥水性など、工学的応用に役立てられている[4]。

車のフロントガラスは雨滴による運転手の視界不良を防ぐために、ワイパーで雨滴を取り除いたり、撥水性を高めて、そもそも雨滴が付着しづらくしたりする。このような場合、ワイパーとガラス面の摩擦、水分による潤滑、それらに及ぼす濡れ性の影響等が重要である。

また、濡れ性の研究は海水に接する船体の防汚や建築物外壁の適切な塗料の選択に役立つ。人工関節やコンタクトレンズなどでもよい潤滑状態を得るのに重要である。農業において植物の葉の濡れ性は散布した農薬液滴の濡れの良さに関わる。

したがって、濡れ性を正しく評価することは多くの分野で重要である。

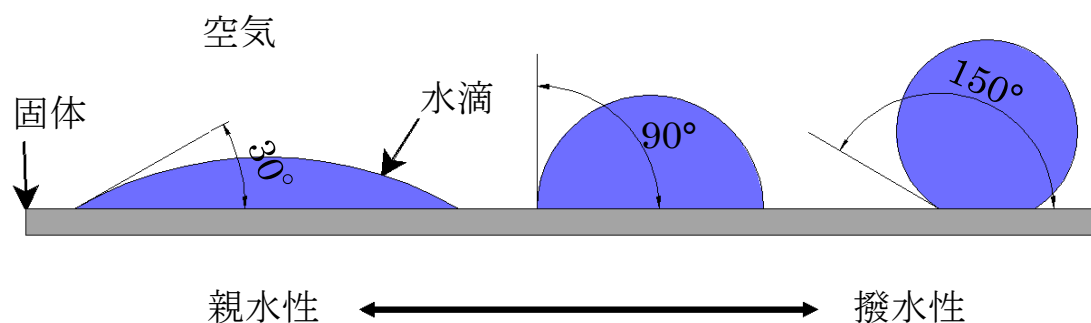


Fig. 1.1 濡れ性と接触角

## 1.2 従来の研究

現在接触角の測定方法にはいくつかあるが、よく使われる方法が二つある。一つは固体表面上の液滴形状を直接観察する方法であり、もうひとつは、干渉縞を利用する方法である。

### 1.2.1 液滴形状による濡れの評価

固体表面上に存在している液滴の固液界面と、固液界面の端点から延びる気液界面に対しての接線が成す角である接触角を濡れ性の評価に用いる。固体表面上の液滴を横方向から観察するのが接触角の最も簡単な測定方法である。横からの観察方法は Fig. 1.2 に示すように、液滴の横から直接に撮影した写真を用いる。 $\theta/2$ 法はよく使われる接触角の計算方法である。Fig. 1.3 のように  $\theta/2$ 法は横方向から見た気液界面形状を真円と仮定し、接触角  $\theta$ と、接触半径  $r$ 、着滴高さ  $h$ との間に次の関係があることを利用したものである[2]。

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{h}{r}$$

つまり、求める接触角は：

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$$

上の式を利用すると液滴と固体の接触半径と液滴の高さが分かれば、液滴の接触角は簡単に計算できる。



Fig. 1.2 液滴と接触角

液体全体が真円と仮定できない場合でも、接触線近傍だけでも円と仮定できれば接触線法が使える。Fig. 1.4 のように液滴端点近辺を球の一部とみなし、円弧上の点 L1, L2, L3 から円 O の中心 M を求め、点 L1 における円の接線を求めることができる。求めた円の接線と直線をなす角度が液滴左側の接触角となる。

しかし、この  $\theta/2$  法と接線法は適用条件がある。まずは観察液滴の形は真円（または接触線近傍が真円の一部）と仮定できなければならない。気液界面形状が真円と大きく乖離する場合は、接触角の測定が困難、あるいは、実際の接触角との誤差が大きくなる。Fig. 1.5 のように固体の表面の親水性が強く、接触角が非常に小さい場合、すなわち液膜状に薄く広がる場合には、接触線と頂点の判断が難しいことに加え、気液界面形状が真円と大きく乖離してしまう。

薄い膜の測定に他のいくつかの方法も測定することが難しい。例えば、液滴の横方向画像を使用するものとしては、カーブフィッティング法があるが、それは気液界面形状を真円や楕円と仮定するため、やはり  $\theta/2$  法と同様に薄膜状となった液滴の接触角測定では測定誤差が生じる[4]。

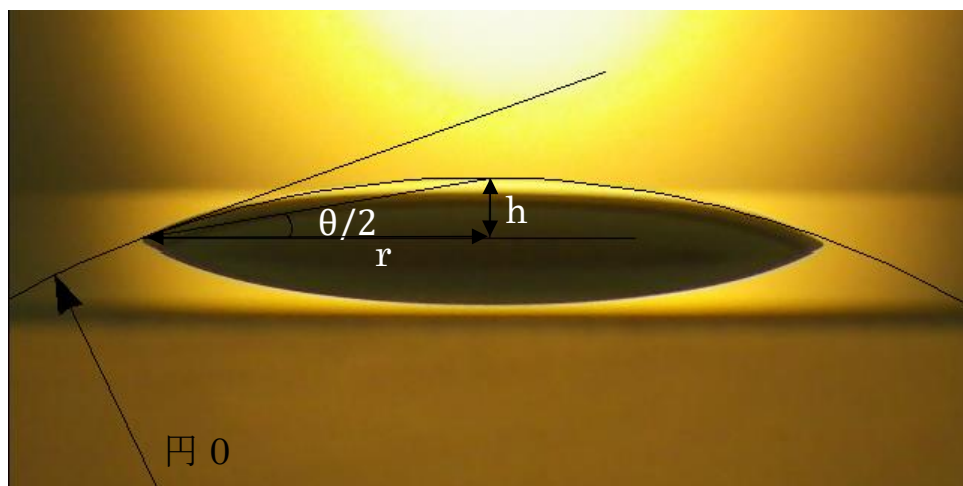


Fig. 1.3  $\theta/2$  法

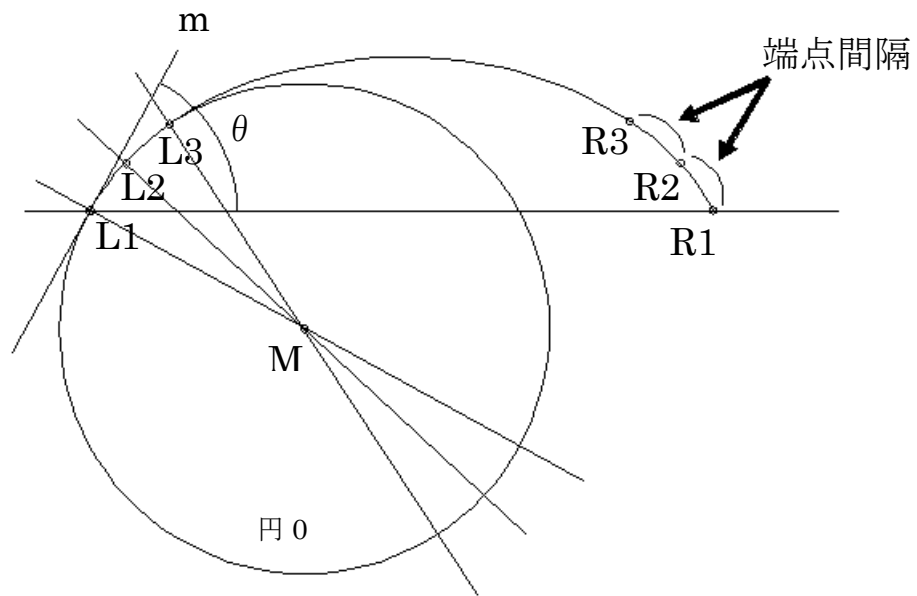


Fig. 1.4 接線法

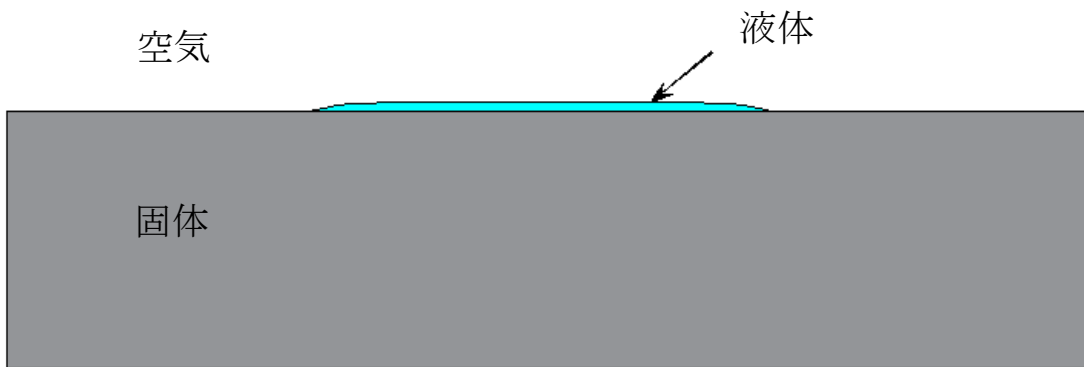


Fig. 1.5 固体表面の薄い液膜



## 1.2.2 干渉縞による濡れの評価

薄い膜による問題を解決するため、他の実験方法が提案されている。その手法の一つは干渉縞を利用する方法である。Fig. 1.6 は干渉縞を用いる研究の実験装置の一つである [5]。液滴の上からレーザ光を照射し、液滴の上の表面で干渉縞を作り、その干渉縞の間隔を利用して濡れを評価する。Fig. 1.7 に示すのはこの実験装置を利用した撮影した干渉縞である。上からの観察のため、観察範囲すべての接触線では接触角を評価できる。親水性を持っている固体表面の液滴の接触角も観察できる。しかし、従来の実施例ではレーザ光を対象に対して上方向から入射するため、対象上方において開放空間を確保しなければならないという制限がある。例えば、相対運動する二面間での濡れを評価することはできない。

また、評価できる接触角は数度以内と小さい。

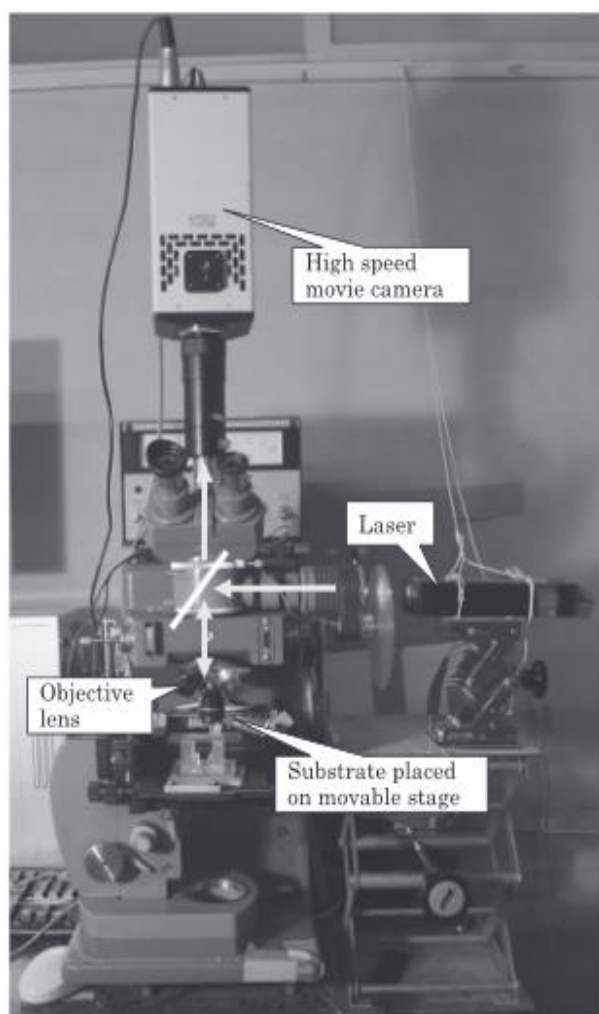


Fig. 1.6 従来の研究における実験装置 [5]

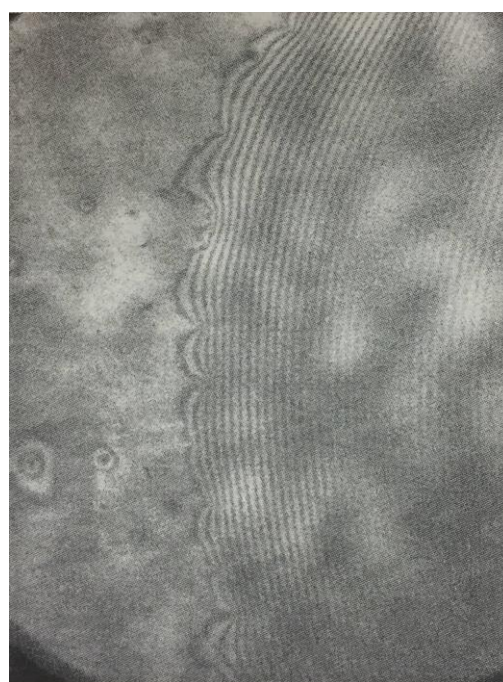


Fig. 1.7 液滴の干渉縞 [5]

### 1.3 研究目的

従来の研究における，レーザー光による干渉縞の方法は，主に液滴の上からレーザー光を照射し，気液界面で反射する光と，固液界面での反射する光とによる干渉縞を利用する．しかし液滴の上からレーザー光を照射する都合上，液滴の上に何かがあってはいけない．Fig. 1.8に示すような相対運動する二面での濡れを評価することはできない．

そこで本研究では，固体面の斜め下方からレーザー光を照射する方法を考案した．Fig. 1.9に実験装置の概略図を示す．レーザー光は液滴の斜め下から入射する．接触角が小さい場合は，固液界面で反射した光と気液界面で反射した光とによる干渉縞を捉えて，液滴の濡れを評価することができる．このことを実証するために，実験装置を製作し，水およびエタノールを用いて，濡れ広がり過程を観察すること目的とする．

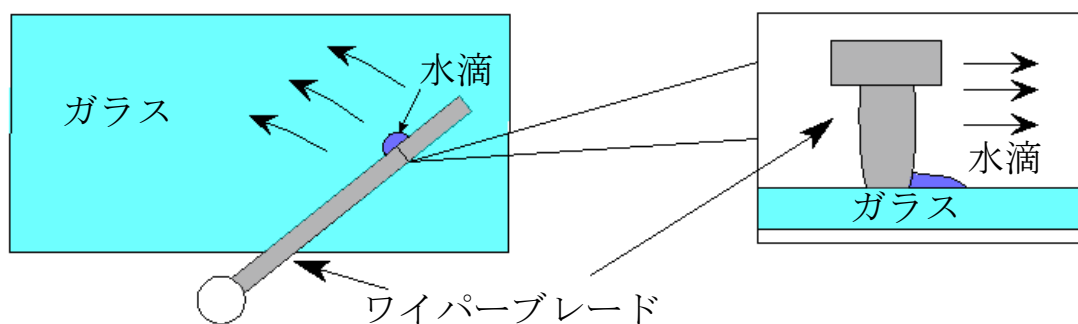


Fig. 1.8 ワイパーが拭く液滴

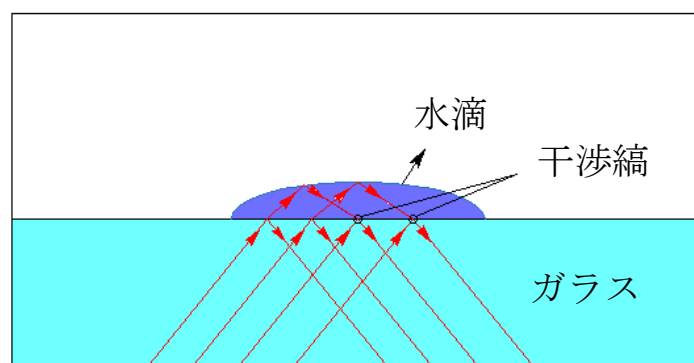


Fig. 1.9 斜め下からの入射

## 第 2 章 実験原理

## 2.1 従来の研究における干渉縞生成原理

干渉とは 2 つまたはそれ以上の波を重ね合わせてできた波の強度が、相互の位相差に応じて強めあったり弱めあったりする現象のことである[6]。光は波の性質を持っているためある条件で干渉の現象が発生する。同じ周波数と一定な位相差は干渉が発生する条件である。同じ屈折率の媒質中での位相差は光学距離である。光学距離  $L = \text{屈折率 } n \times \text{幾何距離 } l$  と表される。光の二つの道筋の光学距離の差を光路差という[7]。

従来の研究の干渉光路の模式図を Fig. 2.1 に示す。図のようにレーザ光は液体の上から入射する。入射されたレーザ光には固液界面で反射する光  $E_1$  と気液界面で反射する光  $E_2$  がある。この 2 つの光が C 点で重なることで干渉縞が形成される。Fig. 2.2 は干渉縞の間隔と気液界面の傾斜角の対応関係を示す。

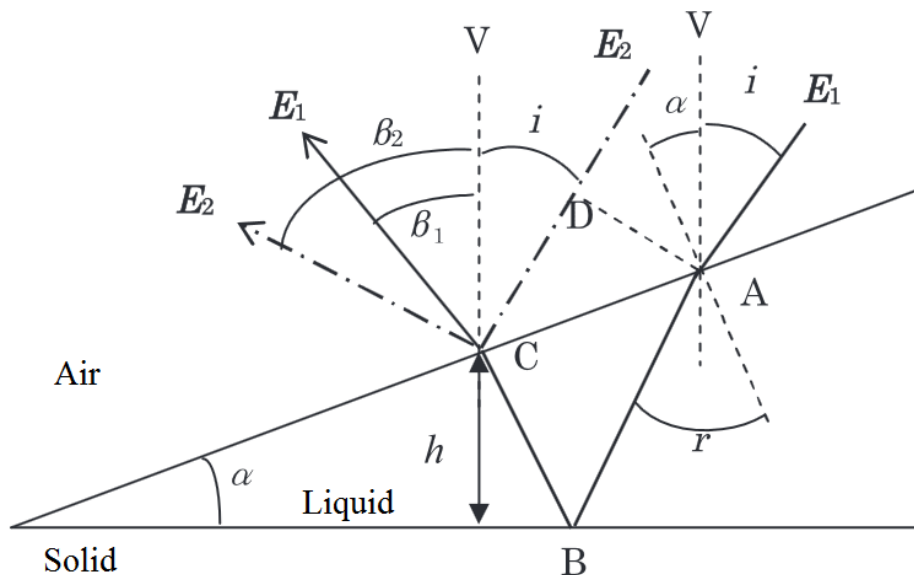


Fig. 2.1 干渉の光路模式図 [8]

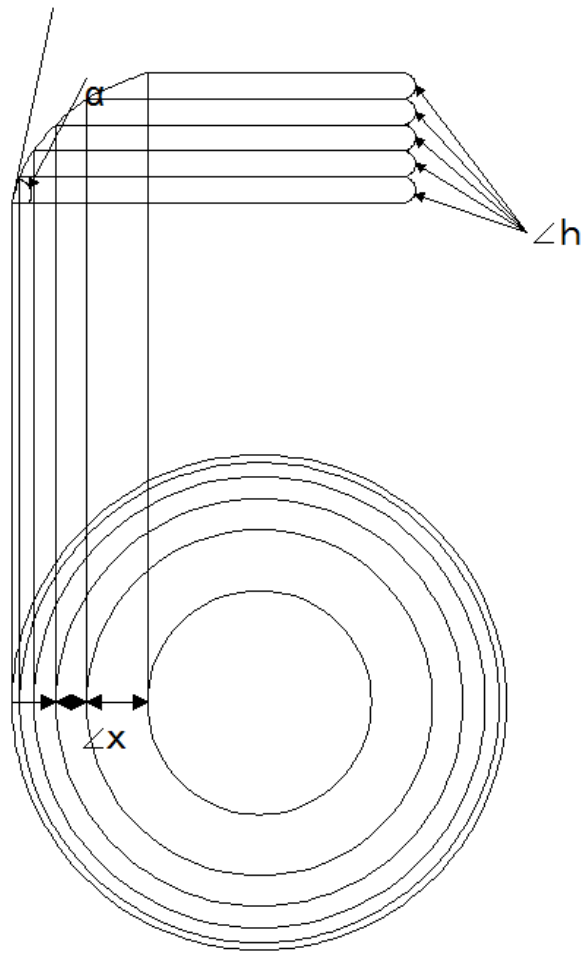


Fig. 2.2 干渉縞の間隔と気液界面の傾斜角との関係の模式図 [8]

## 2.2 本研究における干渉縞生成原理

本研究では液滴上方に開放空間を設けるために液滴の斜め下方からレーザ光を入射する、この際の干渉縞生成原理について説明する。

Fig. 2.3 は、液体とガラスがある接触角  $\beta$  を形成し、レーザ光は液体の斜め下方から入射したときの様子を模式的に示したものである。

平行光線  $E_1$  と  $E_3$  の A 点と H' 点の位相は同じであり、光  $E_3$  は C 点に達する時に光  $E_1$  は液体中を通して H 点に到着する。液体と空気の接触境界面の B 点で一部反射すると C 点で光  $E_3$  と干渉する。この中で  $\overline{HB} + \overline{BC}$  が光路差である。干渉するとき同位相の光波は強くなる（明線）が逆位相の光波（位相差 =  $\pi$ ）は弱くなる（暗線）。

次は干渉縞の明暗の条件を説明する：

$n_1, n_2, n_3$  はそれぞれ空気、ガラスと液体の屈折率

$L = \overline{HB} + \overline{BC}$  は光路差

$\alpha$  は光  $E_1$  が液体に入射する時のガラス平面となす角

$\beta$  は液体とガラスの接触角

$\gamma$  は光  $E_1$  が B 点で反射する光とガラス平面との角

$t$  は光が H' 点から C 点までかかる時間

$c_0$  は真空中の光速

$\lambda_0$  は真空中での波長

$\lambda$  は液体中での波長

$h$  は B 点とガラス表面の距離

スネルの法則から

$$n_2 \times \sin(90^\circ - \angle 1) = n_3 \times \sin(90^\circ - \alpha) \quad (1)$$

よって

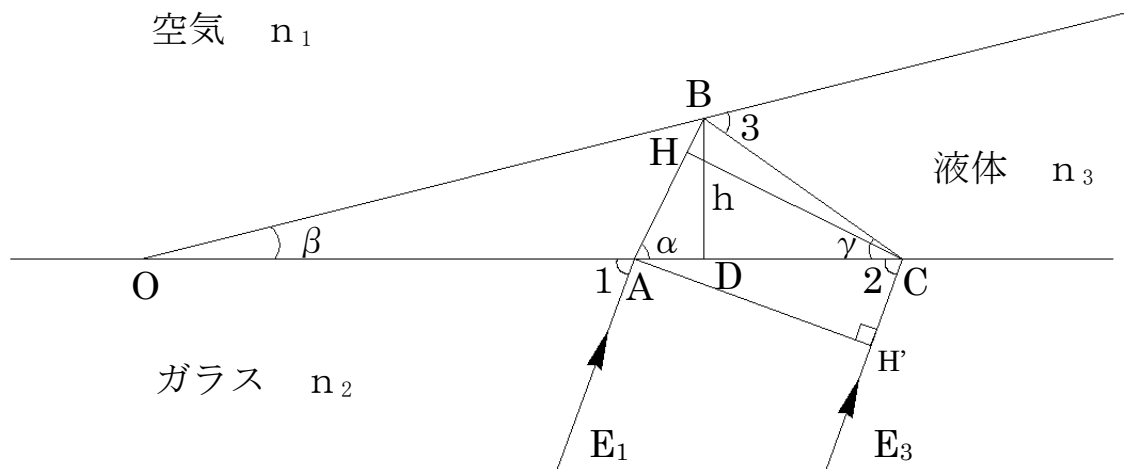


Fig. 2.3 下から入射する干渉縞生成原理

$$\cos \angle 1 = n_3 \times \cos \alpha \div n_2 \quad (2)$$

$E_1$  と  $E_3$  は平行光線から

$$\angle 2 = \angle 1$$

$$\overline{CH'} = \overline{AC} \times \cos \angle 1 \quad (3)$$

$$t = \frac{\overline{CH'} \times n_2}{c_0} \quad (4)$$

同時に光  $E_1$  が液体中を通る距離  $\overline{AH}$  は

$$\overline{AH} = t \times \frac{c_0}{n_3} \quad (5)$$

(2), (3), (4) を用いて (5) を変形すると

$$\overline{AH} = \overline{AC} \times \cos \alpha$$

三角関数から次の式が得られる

$$\overline{AD} = \frac{h}{\tan \alpha}, \quad \overline{DC} = \frac{h}{\tan \gamma}$$

よって,

$$\overline{AC} = h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right)$$

$$\overline{AH} = h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \times \cos \alpha \quad (6)$$

$$\overline{AB} = \frac{h}{\sin \alpha}$$

$$\overline{BC} = \frac{h}{\sin \gamma}$$

光路差  $L$  次のように表せる

$$L = \overline{AB} + \overline{BC} - \overline{AH}$$

$$= h \times \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \gamma} \right) - h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \times \cos \alpha$$

$$= h \times \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \gamma} - \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} - \frac{\sin \alpha}{\tan \gamma} \right)$$

$$= h \times \left( \frac{1 - \cos(\alpha + \gamma)}{\sin \gamma} \right)$$

ここで, 角  $\gamma$  は角  $\beta$  と角  $\alpha$  で表せる,

三角の角関係から以下の関係がある:

$$\alpha = \beta + \angle OBA, \quad \angle 3 = \beta + \gamma, \quad \angle OBA = \angle 3$$

よって,

$$\gamma = 180^\circ - 2 \times (90^\circ - \alpha + \beta) - \alpha = \alpha - 2\beta \quad \text{である.}$$

したがって,

$$L = h \times \left( \frac{1 - \cos(2\alpha - 2\beta)}{\sin(\alpha - 2\beta)} \right)$$

である.

液体中の光の波長と真空中の波長の関係が

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_3} \quad \text{である.}$$

二つ光線の光路差  $L$  は使用するレーザ光の液体中の波長の整数倍だと明線が, 半整数倍だと暗線である. つまり,

明暗条件:

$$\text{明線: 光路差 } L = m\lambda$$

$$\text{暗線: 光路差 } L = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$



### 2.3 気液界面の傾斜角と干渉縞間隔の関係

液体とガラスの接触角が  $\beta$  の時、光路と干渉概略図を Fig. 2.4 に示す。使う光の波長は  $\lambda_0$  であり、水の屈折率は  $n_3$  であり、液体中の波長は  $\lambda$  である。各種記号の意味を以下に示す。

$Y$  : 液体端点から  $m$  番目の明線(暗線)までの距離

$Y_1$  : 液体端点から  $m+1$  番目の明線(暗線)までの距離

$h, h_1$  : 光線  $E_1, E_2$  の気液界面反射位置における液滴高さ

$\alpha$  : 光線  $E_1$  と  $E_2$  が固液界面と通った、ガラス表面との角

$\gamma$  : 光線  $E_1$  と  $E_2$  が気液界面で反射した、ガラス表面との角

$x$  : 隣あう二つ明線(暗線)の間隔

液体中の光の波長  $\lambda$  と干渉縞の間隔と接触角の関係を以下のように導出する。

まずは液体中の光の波長：

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_3}$$

干渉縞の間隔  $x = (Y_1 - Y)$  である。

また、三角関数により、

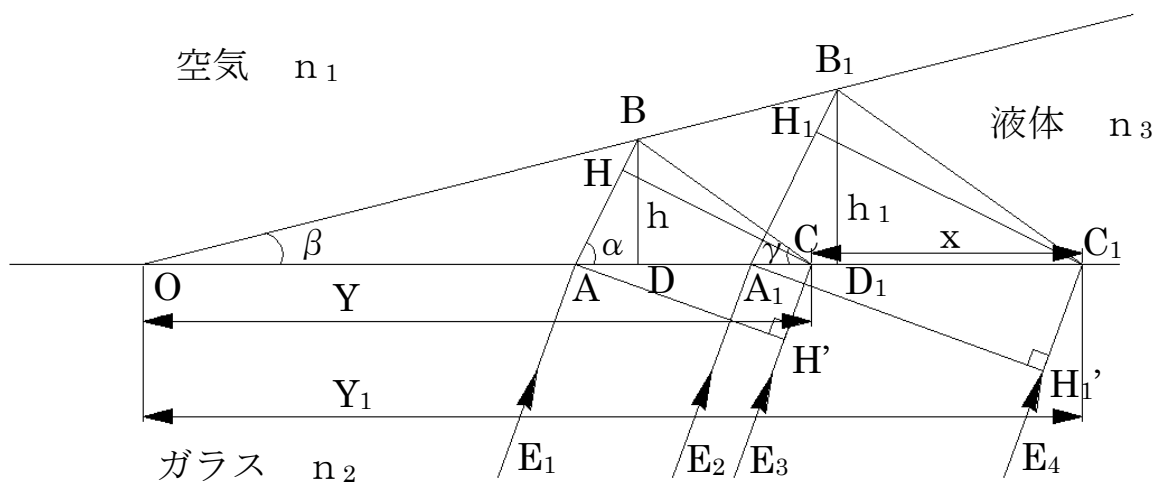


Fig. 2.4 干渉縞間隔と接触角の関係

$$\overline{AB} = \frac{h}{\sin \alpha}, \quad \overline{BC} = \frac{h}{\sin \gamma} \quad \text{の関係がある. 同様に } \overline{A_1B_1} = \frac{h_1}{\sin \alpha}, \quad \overline{B_1C_1} = \frac{h_1}{\sin \gamma}$$

光線  $E_1, E_3$  が  $A$  点と  $H'$  点で位相が同じであり, 光線  $E_2, E_4$  が  $A_2$  点と  $H_2'$  点で位相が同じである.

前と述べたと同じ  $\overline{AH}$  はガラス中で光線  $E_3$  が  $H'$  点から  $C$  点まで達する時, 光線  $E_1$  が水中で  $A$  点から進む距離である.  $\overline{A_1H_1}$  は同様である.

式 (6) から

$$\overline{AH} = h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \times \cos \alpha$$

同じように

$$\overline{A_1H_1} = h_1 \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \times \cos \alpha$$

暗線ができる仮定すると,

光線  $E_1$  が  $C$  点に到着した時に光線  $E_3$  との光路差  $L = m\lambda$  である.

すなわち,

$$\overline{AB} + \overline{BC} - \overline{AH} = m\lambda$$

$$\overline{A_1B_1} + \overline{B_1C_1} - \overline{A_1H_1} = (m+1)\lambda \quad \text{であり,}$$

よって,

$$\overline{A_1B_1} + \overline{B_1C_1} - (\overline{AB} + \overline{BC}) + \overline{AH} - \overline{A_1H_1} = \lambda \quad \text{である.}$$

したがって,

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \frac{h}{\sin \alpha} + \frac{h}{\sin(\alpha - 2\beta)} \quad \text{であり,}$$

$$\overline{A_1B_1} + \overline{B_1C_1} = \frac{h_1}{\sin \alpha} + \frac{h_1}{\sin(\alpha - 2\beta)} \quad \text{である.}$$

$$\overline{OD_1} = \frac{h_1}{\tan \beta}, \quad \overline{OD} = \frac{h}{\tan \beta} \quad \text{から}$$

$$\overline{DD_1} = \frac{h_1 - h}{\tan \beta} \quad \text{が分かる.}$$

$$\overline{DC} = \frac{h}{\tan \gamma} = \frac{h}{\tan(\alpha - 2\beta)},$$

$$\overline{D_1C_1} = \frac{h_1}{\tan \gamma} = \frac{h_1}{\tan(\alpha - 2\beta)}$$

干渉縞の間隔  $x = \overline{D_1C_1} - \overline{DC} + \overline{DD_1}$

$$\text{ゆえに, } x = \frac{h_1 - h}{\tan(\alpha - 2\beta)} + \frac{h_1 - h}{\tan \beta} \quad \text{である.}$$

よって,

$$h_1 - h = \frac{x}{\frac{1}{\tan(\alpha - 2\beta)} + \frac{1}{\tan \beta}} \quad \text{である.}$$

前の式から：

$$\begin{aligned} \lambda &= \overline{A_1 B_1} + \overline{B_1 C_1} - (\overline{AB} + \overline{BC}) + \overline{AH} - \overline{A_1 H_1} \\ &= (h_1 - h) \times \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin(\alpha - 2\beta)} \right) + (h - h_1) \times \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\tan(\alpha - 2\beta)} \right) \\ &= (h_1 - h) \times \left( \frac{1 - \cos(2\alpha - 2\beta)}{\sin(\alpha - 2\beta)} \right) \quad \text{であり,} \end{aligned}$$

よって,

$$h_1 - h = \frac{\lambda}{\frac{1 - \cos(2\alpha - 2\beta)}{\sin(\alpha - 2\beta)}} \quad \text{である.}$$

以下の関係が導ける：

$$\frac{x}{\frac{1}{\tan(\alpha - 2\beta)} + \frac{1}{\tan \beta}} = \frac{\lambda}{\frac{1 - \cos(2\alpha - 2\beta)}{\sin(\alpha - 2\beta)}}$$

$$\frac{x \times \tan \beta \times \tan(\alpha - 2\beta)}{\tan \beta + \tan(\alpha - 2\beta)} = \frac{\lambda \times \sin(\alpha - 2\beta)}{1 - \cos(2\alpha - 2\beta)}$$

したがって,

$$x = \frac{\lambda \times \sin(\alpha - 2\beta) \times [\tan \beta + \tan(\alpha - 2\beta)]}{[1 - \cos(2\alpha - 2\beta)] \times \tan \beta \times \tan(\alpha - 2\beta)} \quad (7)$$

である.

液滴の接触角  $\beta$ , 光の液体への入射角  $\alpha$ , 液体中の光の波長  $\lambda$  と干渉縞の間隔  $x$  の関係が導けた.

## 第 3 章 実験装置

### 3.1 実験光学系

Fig. 3.4 に実験装置の概略図を示す。この中でビームエキスパンダは細いレーザー光を任意の太さの平行光線に拡大する。ダブリズムはガラスであり、空気中に置いた場合、そこでレーザー光は全反射する。液滴はダブリズム上に載せ、下側からのレーザーを照射し、入射の反対側にカメラを設置する。横から見ると液滴の下側からのレーザーは液滴上の表面で反射し、ダブリズムと液滴の接触面に達し、その面で下側からのレーザーと干渉する。液滴上の表面と接触面の角により干渉縞の間隔は異なる。その干渉縞はカメラ 1 で観察する。

液体は固体表面を濡れた部分と濡れない部分を明確に観察するため、ダブリズムに入射する光の角度は特定な角度に設定する。入射光がガラスと空気の界面で全反射するがガラスと液体の界面では全反射しない状態にする。

ダブリズムの屈折率は空気より大きい。Fig. 3.1 のように、入射光が異なる屈折率の媒体を通過すると、屈折が起こる。Fig. 3.2 示すのは入射光のときの媒質の屈折率が屈折光のときの媒質の屈折率より大きいときのエネルギー反射率である。Fig. 3.3 は Fig. 3.2 との屈折率が反対の時のエネルギー反射率である。 $R_s$  は電場が入射面に垂直の場合 (s 偏光) の反射率であり、 $R_p$  は電場が入射面内にある場合 (p 偏光) の反射率である。スネルの法則により [6]、ガラスから空気に届く光はある角で全反射が発生する。液体の屈折率はガラスより小さいが空気より大きい。ある範囲の入射角で光はガラスと空気の界面で全反射するがガラスと水液滴の界面で全反射しない状態になる。

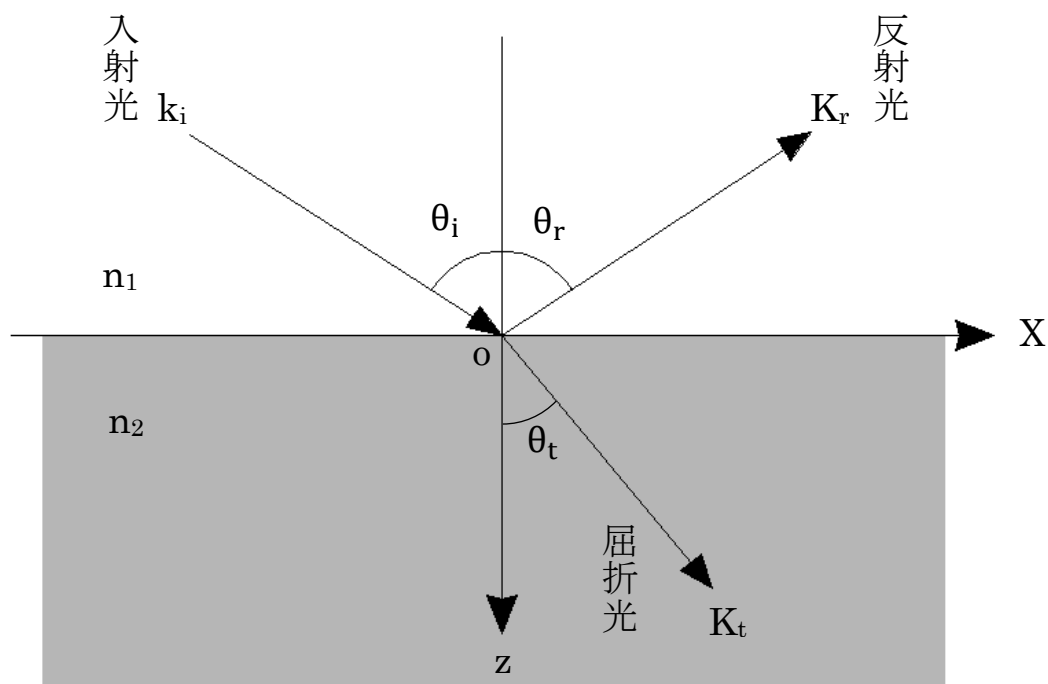


Fig. 3.1 境界面 (x-y 面) への一般角入射での反射と屈折 [6] に加筆

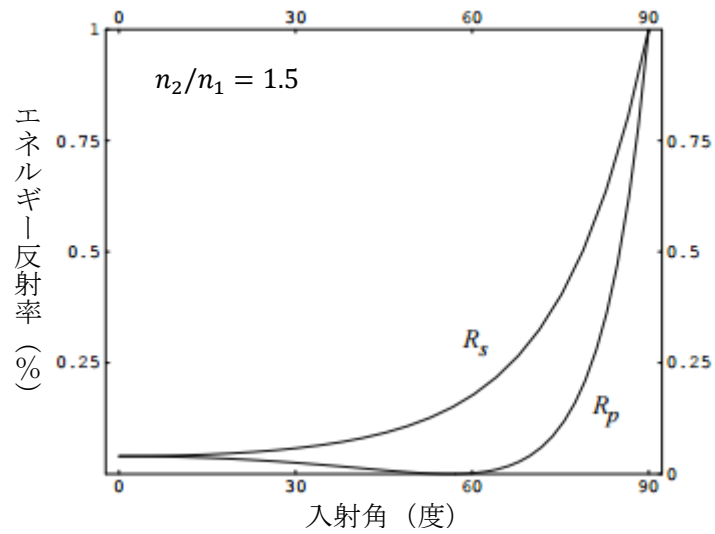


Fig. 3.2 エネルギー反射率 1 [6] に加筆

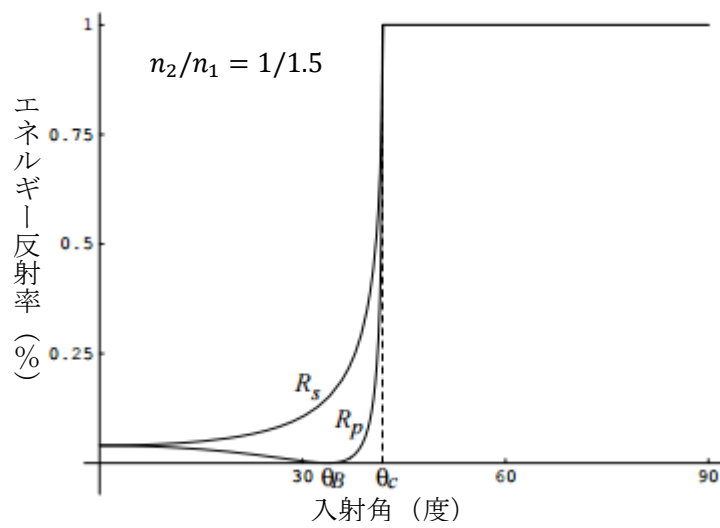


Fig. 3.3 エネルギー反射率 2 [6] に加筆

液滴の形を直接観察するためにカメラ 2 を置く. Fig. 3.4 の上面図のように, 照明とカメラ 2 は液滴の両側に置いている. 液滴の形をはっきり観察できるように照明とカメラ 2 と液滴は同じ水平面に設定する. 撮った液滴の形は  $\theta/2$  法や接線法など方法を利用し, 接触角を計算できる.

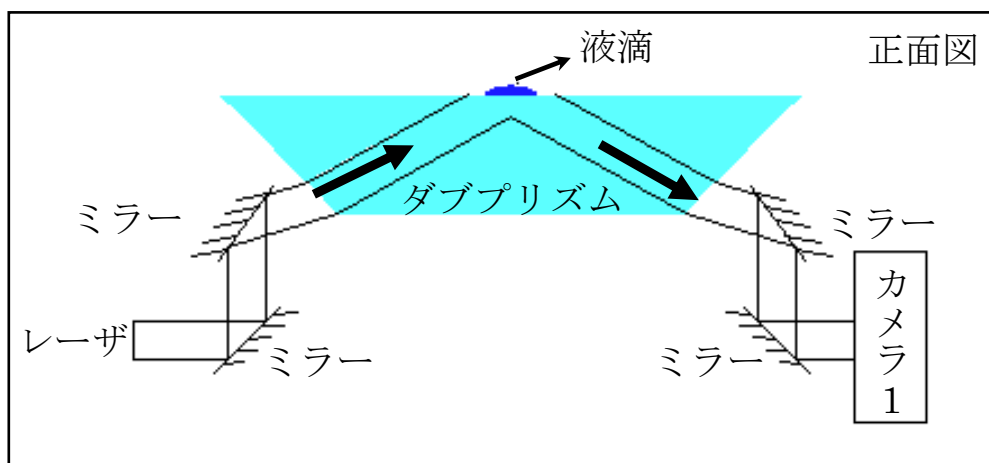
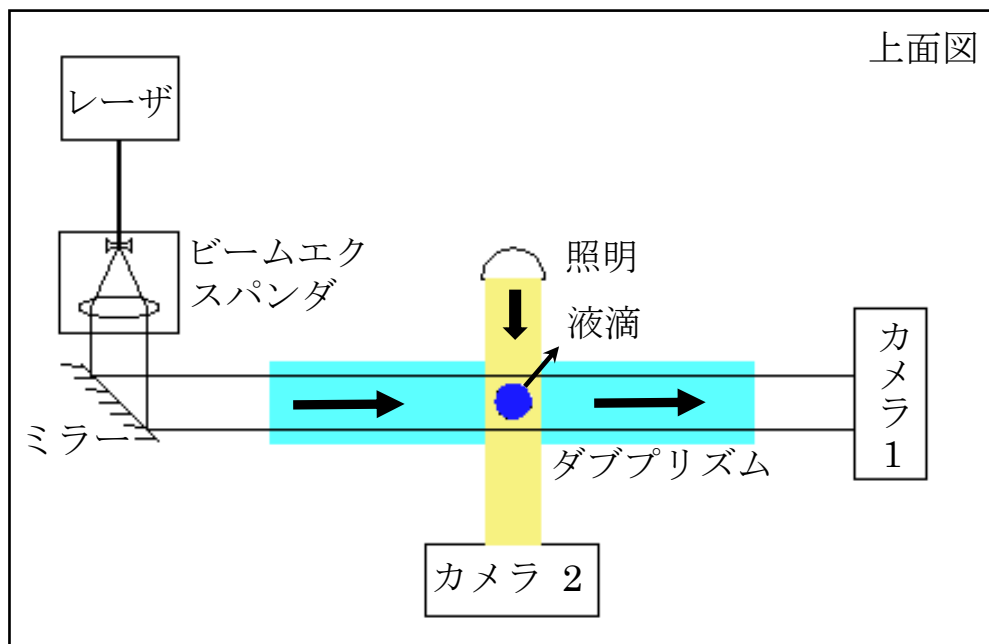


Fig. 3.4 実験光学系

### 3.2 レーザ光

実験光学系に用いたレーザ光を Fig. 3.5 に示す.



Fig. 3.5 HNL100L-JP 出典[9]

Table. 1 He-Ne レーザ光の仕様[9]

Item	wavelength	Power	1/e <sup>2</sup> Beam Diameter	Divergence
HNL100L-JP	632.8 nm	10.0 mW	0.68 mm	1.2 mrad

Polarization Ratio	LMS	Noise (RMS)	Operating Voltage	Operating Current
500:1	320 MHz	1.0%	3100 VDC	6.5 mA

干渉縞が生じやすい光の特徴として、スペクトル幅が短いこと、位相差が安定していることが挙げられる[6]. スペクトル幅が短い光源の代表例はレーザ光である. 中でも He-Ne レーザは単色性が良く(スペクトル幅が短く), 位相がよく揃っているので, 干渉が起き易い. また, He-Ne レーザにはランダム偏光と直線偏光の 2 タイプある. 本研究では直線偏光型を使用した. 理由として, ランダム偏光型の He-Ne レーザは時間によって偏光方向が変化



する光源だが、Fig. 3.2 と Fig. 3.3 示すように光が違う屈折率の媒質を通過する際、その光の偏光方向により、透過率、反射率が変化するので、結果として、安定した光量が得られないことがあるからである。また、レーザ出力に関しては、レーザポインタ程度の出力(0.5mW程度)でも干渉縞生成は可能だが、過去の論文では 10 数 mW の出力のレーザを使用していることから、10mW のものを選択した[10].

### 3.3 測定可能な角度の範囲

#### 3.3.1 干渉縞の生成条件からの測定範囲

まずは干渉縞の生成条件から測定可能な角度の範囲を計算する．液滴と空気の境界面で反射する光は液滴とガラスの接触境界面で液滴側にぬけ，気液界面で反射してくる光と干渉する．

Fig. 3.6 を示すように $\theta_a$ は空気とガラス全反射の臨界角であり， $\theta_w$ は水とガラス全反射の臨界角である．ダブルプリズムへの入射角の範囲は3.1節で述べた内容に基づいて， $\theta_a$ と $\theta_w$ の間である． $\theta_a$ と $\theta_w$ は $41.24^\circ$ と $61.48^\circ$ であり，ダブルプリズムの高さHは25mmである．観察目標の大きさは約10mmであり，観察範囲Lは13mmと設定する．

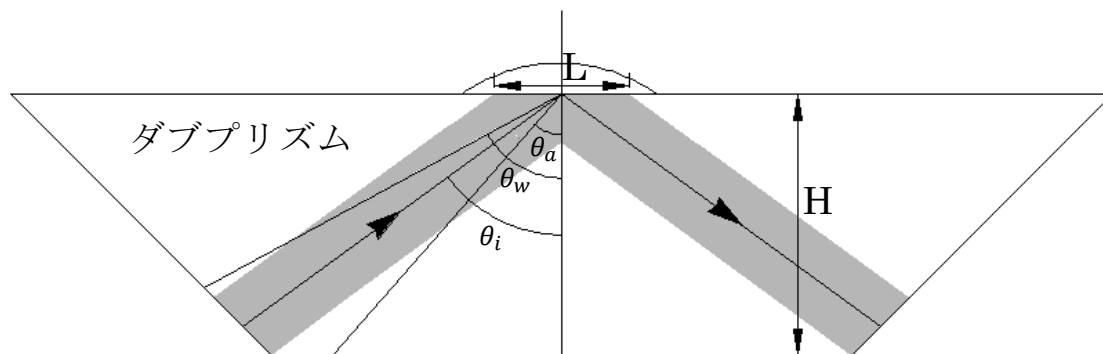


Fig. 3.6 ダブルプリズムへの入射角

観察できる気液界面の傾斜角の最大値を求める。まず観察範囲内で干渉縞生成できる条件を計算する。

光は水滴中の反射概略図は Fig. 3.7 ように示す。2.2 節の式 (6) から

$$\overline{AC} = h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \gamma} \right)$$

が分かる。式中の  $\overline{AC} = L$  は観察範囲である。

また、

$$\gamma = 180^\circ - 2 \times (90^\circ - \alpha + \beta) - \alpha = \alpha - 2\beta \quad \text{である}$$

よって、

$$L = h \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan(\alpha - 2\beta)} \right) \quad (8)$$

がある。

式 (8) からみると  $\beta$  は  $L$ ,  $h$  と  $\alpha$  に関する値である。  $\theta_i$  は  $\theta_a$  から  $\theta_w$  まで変化する。つまり  $\alpha$  は  $0^\circ$  から  $32.15^\circ$  まで変化する。水滴の高さの最大値を計算する。水滴の観察できる最大の大きさは  $13\text{mm}$ 、接触角は  $90^\circ$  と仮定すると水滴の高さは  $6.5\text{mm}$  となる。ガラス表面は超親水の場合、水滴の膜は非常に薄く  $0.001\text{mm}$  と仮定する。空気と水の境界面 B 点とガラス表面の距離  $h$  が  $0.001\text{mm}$  から  $6.5\text{mm}$  まで変化する。  $\alpha$  が  $0 \sim 30^\circ$  に変化するときの測定できる  $\beta$  の範囲を計算する。計算結果  $\beta$  の範囲は Fig. 3.8 を示す。

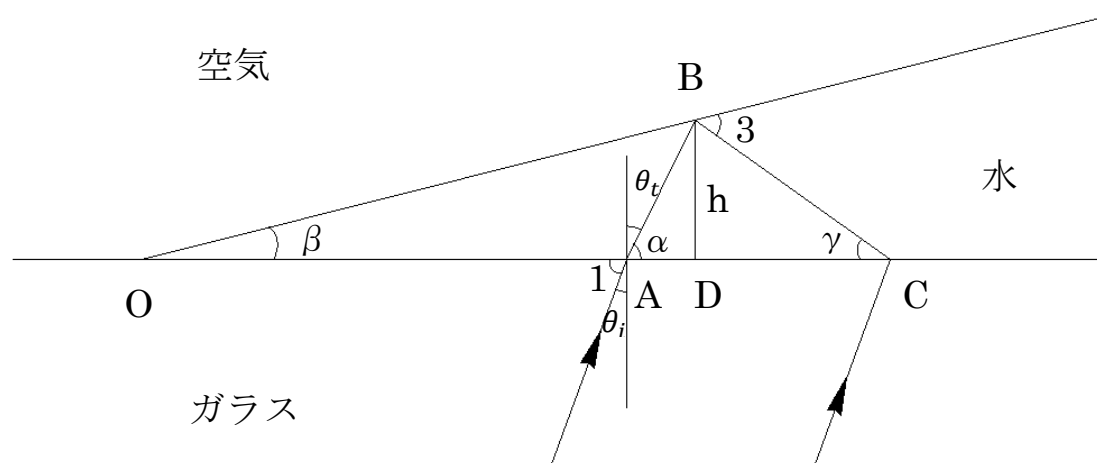


Fig. 3.7 光反射概略図

Fig. 3.8 から  $h = 6.5\text{mm}$ ,  $L = 13\text{mm}$  の時に  $\alpha$  が  $32.15^\circ$  になる時, 干渉縞生成できる  $\beta$  は  $33.49^\circ$  であることが分かる.

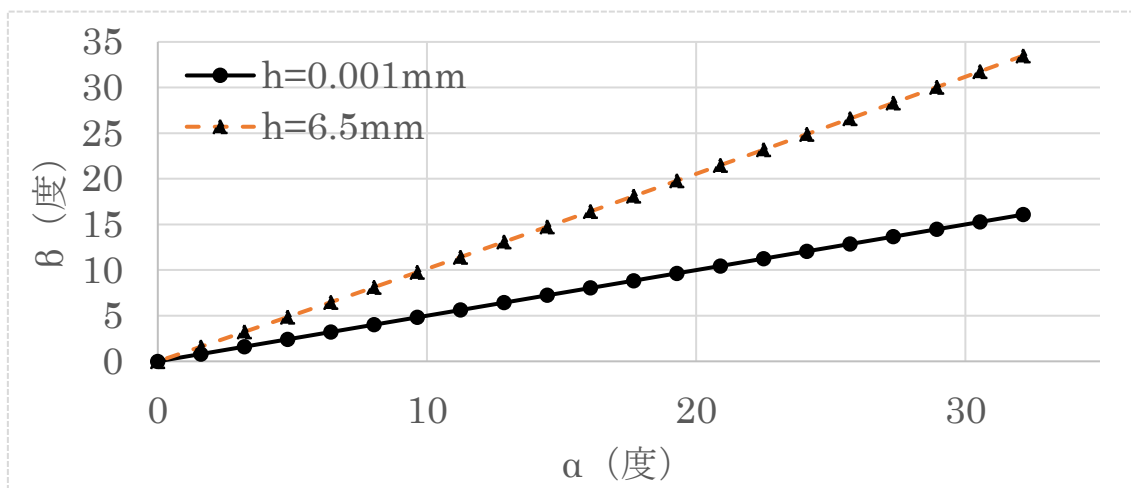


Fig. 3.8 干渉縞の生成条件から計算した  $\beta$  の測定範囲

### 3.3.2 観察装置の条件からの測定範囲

カメラの選定においては生成する干渉縞の撮影が可能であることを重視し、今回の干渉縞の観察に使用するカメラは Fig. 3.9 に示すものである。



Fig. 3.9 Nikon 1 V3 出典[11]

Table. 2 Nikon 1 V3 仕様[11]

有効画素数	1839 万画素
撮像素子	13.2×8.8mm サイズ CMOS センサー，ニコン CX フォーマット

カメラの画素数については，CCD の 1 画素のサイズを像側の分解能( $\Delta$ )の 1/2 以下になるようにすると，映る画像が 2 点分解したものを正しい位置関係で見ることができる。ここで，

1 画素サイズ

=撮像素子サイズ/有効画素数

= (13.2 × 8.8mm) ÷ (5232 × 3488)

= 2.5 $\mu$ m × 2.5 $\mu$ m

Fig. 3.10 は干渉縞が CCD に映す状態であり，CCD は区別できる一番小さい干渉縞の間隔は三つ撮像素子の距離である。ここで三つ撮像素子の距離は 5 $\mu$ m であり，つまり，区別できる一番小さい干渉縞の間隔は 5 $\mu$ m である。

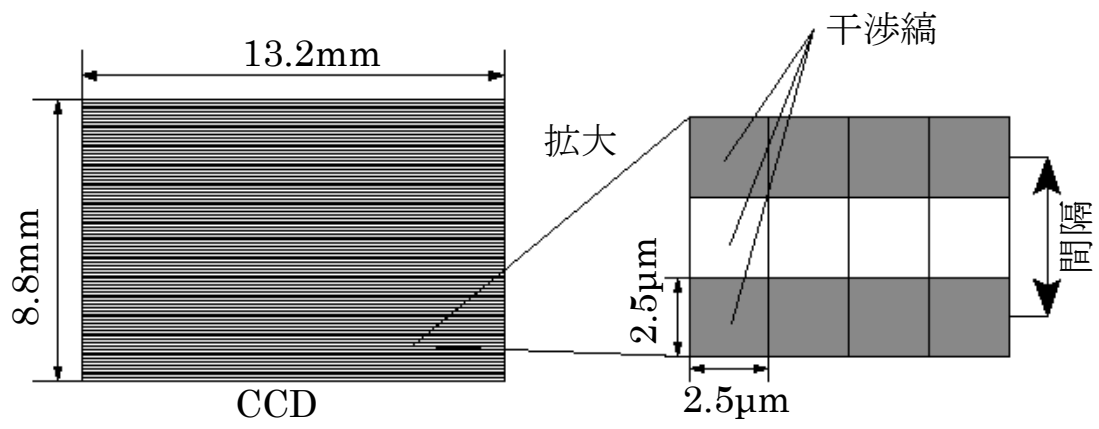


Fig. 3.10 CCD 撮像素子と干涉縞

しかし、水平面における干渉縞はミラーで反射して垂直方向に置く CCD に映す。実際の長さは CCD のところに到着する時に変化する。CCD に写る距離と実際の距離の関係を Fig. 3.11 を示す。この中で、L は実際の距離であり、H は CCD に写る距離である。L と H の関係は以下の式で求める。

式中の記号を説明する

$a_0$  : 入射光と垂直線の角

$n_1$  : 空気の屈折率

$n_2$  : ガラスの屈折率

ダブプリズムの斜辺は  $45^\circ$  であるから

$\angle 1 + 90^\circ = a_0 + 45^\circ$  がある

スネルの法則により、

$n_1 \times \sin \angle 1 = n_2 \times \sin \angle 2$  である。

$\angle 2 + \angle 3 = 45^\circ$  ,  $\angle 3 = \angle 4$

$L = \overline{AB}$ ,  $H = \overline{BD}$

よって、

$\angle 4 = \angle 5$ ,

光路左右対称のため、

$\overline{AB} = \frac{\overline{BC} \times \sin(\angle 5 + 45^\circ)}{\sin \angle 5}$  があり、

$\overline{BD} = \overline{BC} \times \sin(90^\circ - \angle 1)$  もわかる。

したがって、

$\overline{AB} = \frac{\overline{BD} \times \sin(\angle 5 + 45^\circ)}{\cos \angle 1 \times \sin \angle 5}$

角は値を代入すると

$$\overline{AB} = \overline{BD} \times \frac{\sin\left(90^\circ - \sin^{-1} \frac{n_1 \times \sin(a_0 - 45^\circ)}{n_2}\right)}{\cos(a_0 - 45^\circ) \times \sin\left(45^\circ - \sin^{-1} \frac{n_1 \times \sin(a_0 - 45^\circ)}{n_2}\right)}$$

$\overline{AB}$  と  $\overline{BD}$  の関係が分かる。

3.3.1 節から、入射光の角  $\alpha$  が最大値になる時、

$\alpha = 32.15^\circ$  ,  $a_0 = 49.69^\circ$  であり、

L と H の関係は

$$\overline{AB} = \overline{BD} \times \frac{\sin\left(90^\circ - \sin^{-1}\frac{1 \times \sin(49.69^\circ - 45^\circ)}{1.517}\right)}{\cos(49.69^\circ - 45^\circ) \times \sin\left(45^\circ - \sin^{-1}\frac{1 \times \sin(49.69^\circ - 45^\circ)}{1.517}\right)}$$

したがって、

$$L/H = 1.50$$

ここまで  $L$  と  $H$  の関係が導いた。

CCD のところで区別できる一番小さい干渉縞の間隔は  $5\mu\text{m}$  であるから、実際に区別できる干渉縞の最小間隔は  $7.5\mu\text{m}$  である。

2.3 節から導いた角と干渉縞間隔の式 (7) を利用し、値を代入すると  $\beta = 3.82^\circ$  である。

測定可能な最大角度  $\beta$  は  $3.82^\circ$  となる。



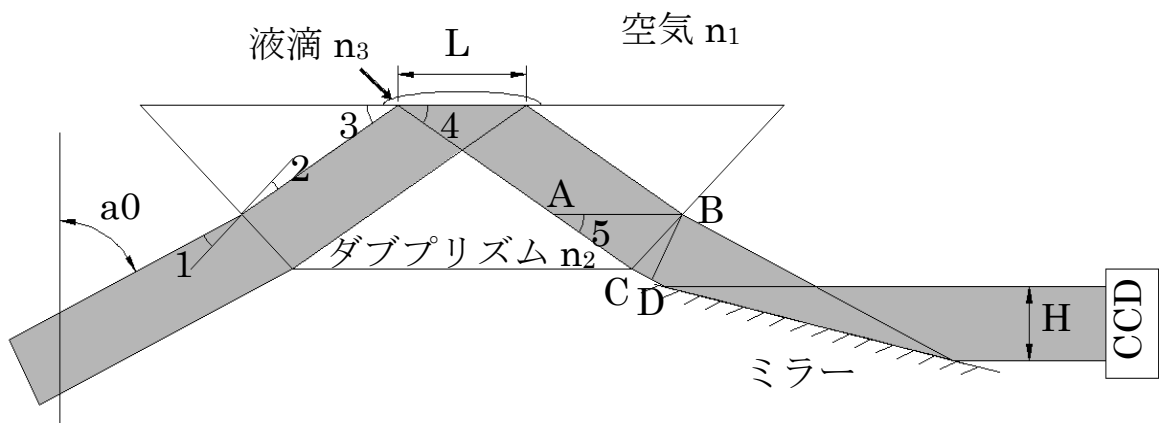


Fig. 3.11 観察距離と実際距離

### 3.3.3 測定可能範囲の検証

測定できる範囲を検証するためにダブリズム上にガラス板を置き、傾斜角度を調整した。

作る角  $\beta$  は三角関係に基づいて

$$\beta = \tan^{-1} \frac{h}{l} \quad \text{関係がある.}$$

$l$  を変化させないで  $h$  を調整する。  $\beta$  は  $1.5^\circ$  から  $0^\circ$  まで変化させる。  $0.1^\circ$  につき一枚の干渉縞を撮る。 これら 16 枚写真から干渉縞を分析する。

2.3 節に今回の干渉縞生成原理に基づいて計算式(7)を導いた。 その計算式は液滴の接触角  $\beta$  , 液体中を通りぬける光とガラスとの角  $\alpha$  , 液体中の光の波長  $\lambda$  と干渉縞の間隔  $x$  の関係である。

実際の実験中にその理論上の計算式が適用可能かどうか検証したい。

検証する方法はダブリズム上に既知の角度を作り、カメラ 1 でその角度による干渉縞を観察する。 写真から干渉縞の間隔を測定し、その値を計算式中に代入して傾斜角を求める。 最後に干渉縞により計算した角度と設定した角度とを比較する。 結果が一致すれば、今回の計算式が気液界面の角度の計算に適用することが証明できる。

まずは予備実験の実験装置を説明する。

Fig. 3.12 と Fig. 3.13 を示すのは楔の角度を設定できる実験装置の正面と側面概略図である。 次には図の中に装置と記号について説明する。

Fig. 3.12 中に角度  $\beta$  は三角形の角度であり、その二つ隣辺の長さ  $l$  と  $h$  分かれば、逆三角関数を利用して  $\beta$  は分かる。 二枚のスライドガラスを用いる。 一枚のスライドガラス 1 は三角形の斜辺として使われ、もうひとつは斜辺のスライドガラス 1 を傾斜させるため、鉛直線に沿って上下移動する。 斜辺のスライドガラスとガラス基板の間には液体を注入する。  $\beta$  は小さくなる過程で液体は外に漏れる。 上下移動のガラスが濡れないようにガラス基板のエッジと上下移動スライドガラス 2 は距離  $s$  だけ離れる。  $0^\circ$  から作業できるようにガラス基板をダブリズム上に置いた。 ガラス基板とダブリズム間の隙間の影響を消すため、ガラスとほぼ等しい屈折率をもつセダ油をその隙間に満たす[12]。

作った角度の大きさをコントロールするため、目盛りがある調整つまみ付きの Z 軸移動ステージを用いる。 Fig. 3.13 中に調整つまみの拡大図を示す。 つまみが一周回転すると  $0.5\text{mm}$  の上下距離を移動することが分かる。 言い換えれば、Z 軸移動ステージの調整精度は  $0.01\text{mm}$  である。

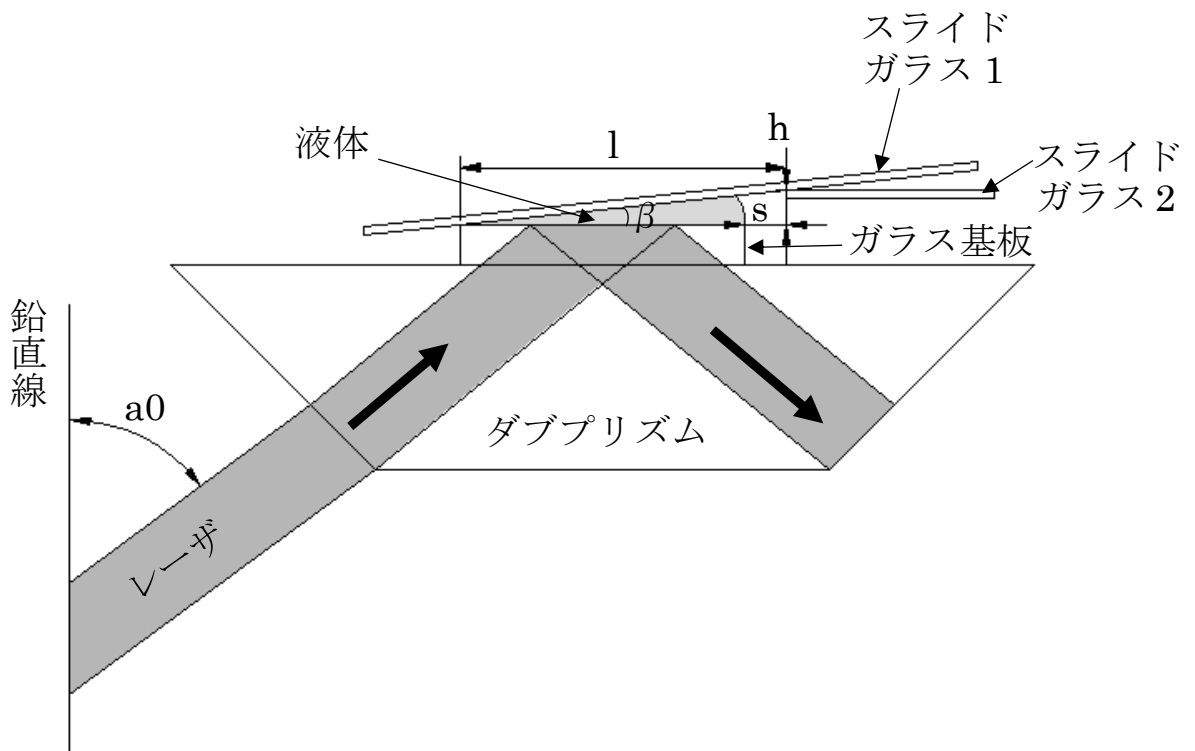


Fig. 3.12 傾斜角の調整装置 (正面概略図)

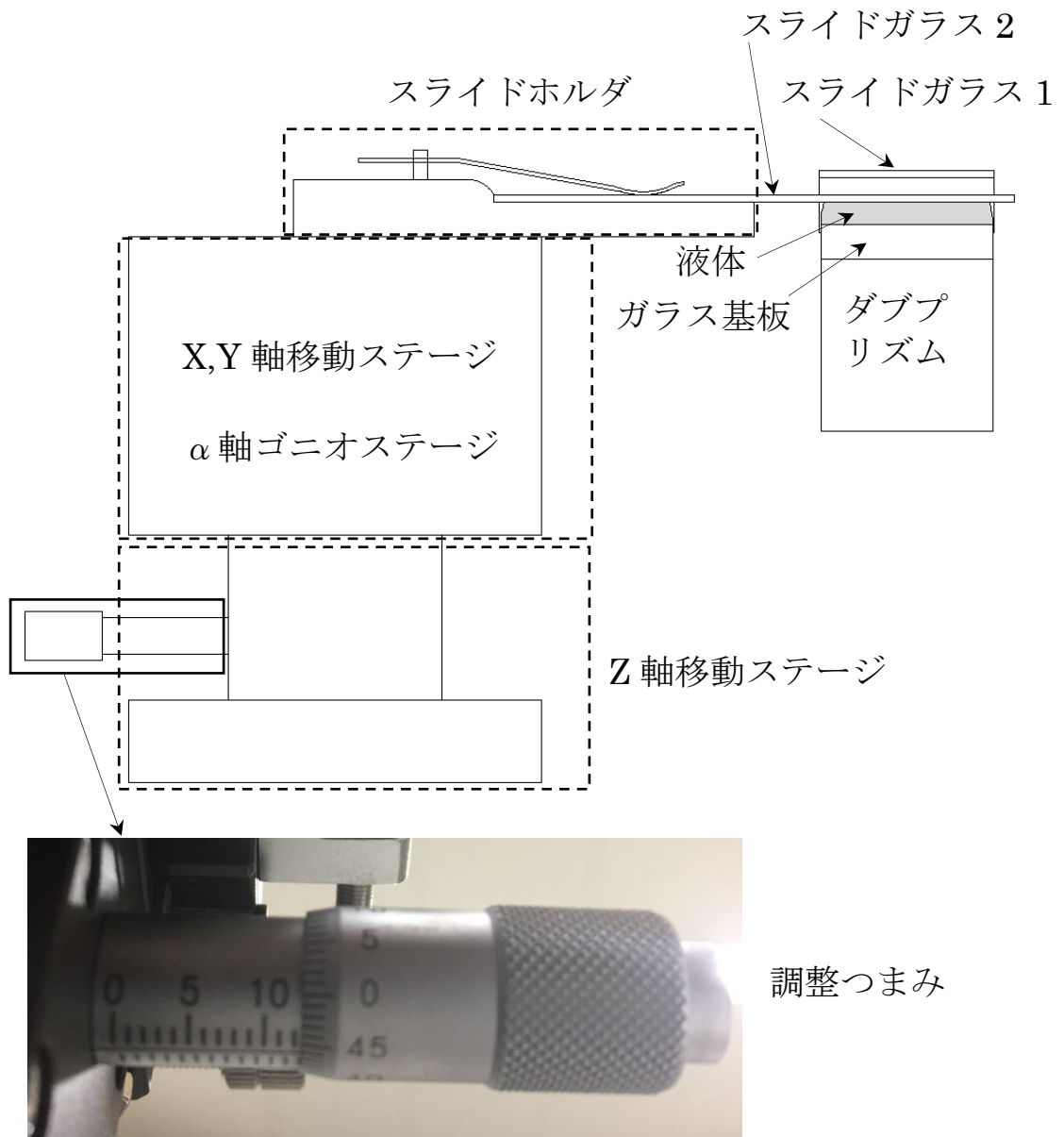


Fig. 3.13 傾斜角の調整装置 (側面概略図)

本研究では、水とエタノールを対象として実験を行う。予備実験でも傾斜スライドガラスとガラス基板の間の液体は水とエタノール二種類を使って検証する。

まずは水を用いる実験である。Fig. 3.14 を示すのは今回選んだ蒸留水 (Wako 043-16785) である。

まず、 $h$  は 0 の時の Z 軸移動ステージの調整つまみの目盛を確認する。1 の長さを測定し、 $\beta$  は  $1.5^\circ$  の  $h$  の高さを計算する。

$\beta$  は  $1.5^\circ$  から  $0^\circ$  までに  $0.1^\circ$  毎に変化させる。Fig. 3.15 から Fig. 3.30 はこの変化する過程をカメラ 1 で撮った写真である。写真と写真の拡大図から  $\beta$  により生成する干渉縞が見える。

Table 3 は角と測定間隔と計算間隔の関係である。Table 3 に基づいて Fig. 3.31 が得られる。Fig. 3.31 は設定角度と間隔の関係である。 $\beta$  が  $1.2^\circ$  から  $0.2^\circ$  の間で測定間隔と計算間隔の値はほぼ一致する。 $0.1^\circ$  の時、計算値と測定値は大きな差があり、その原因は隙間が小さくなると、毛管力の影響でスライドガラスとガラス基板が引き付けあったためと思われる。Fig. 3.30 は  $\beta$  が  $0^\circ$  の時の干渉縞を示している。その干渉縞と前の干渉縞と大きな違いは間隔の並び方向であり、 $0^\circ$  の時の干渉縞は縦で並んでいるがほかのは横で並んでいる。つまり、上のスライドガラスの傾斜方向が変わっている。二つ面の間の液膜が完全に均一になっていなかったためと思われる。

以上により水が傾斜スライドガラスとガラス基板の間に満たす時に  $0\sim 1.2^\circ$  の範囲で計算式は適用することが判断できる。

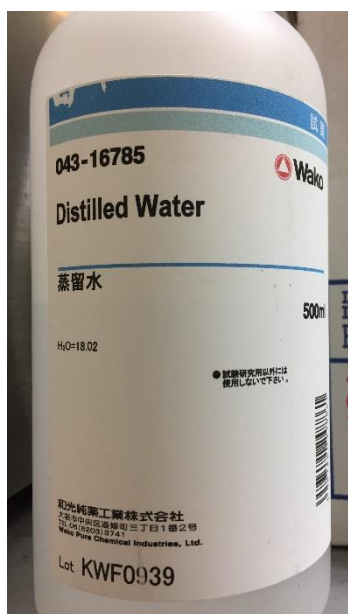


Fig. 3.14 実験用蒸留

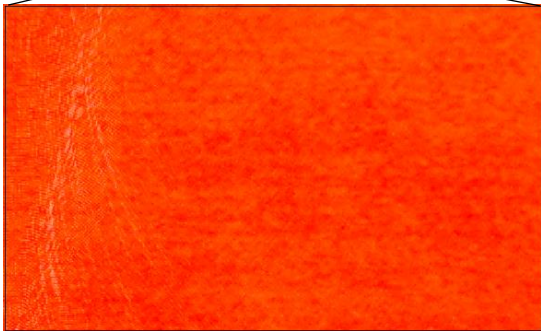
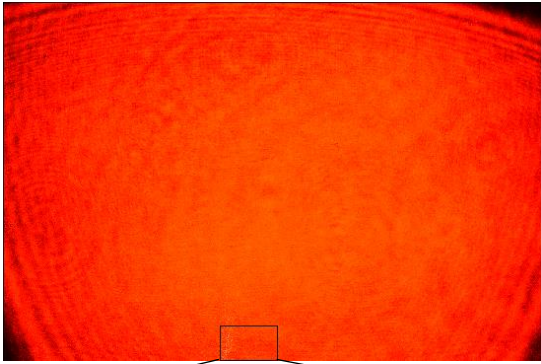


Fig. 3.15  $\beta$  は  $1.5^\circ$

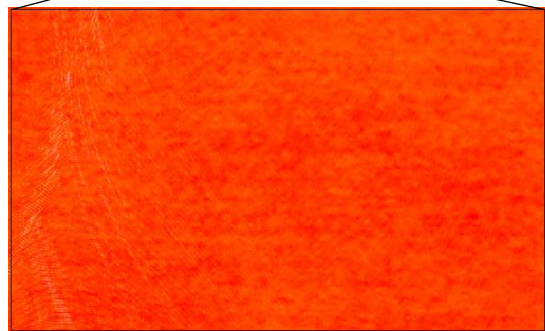
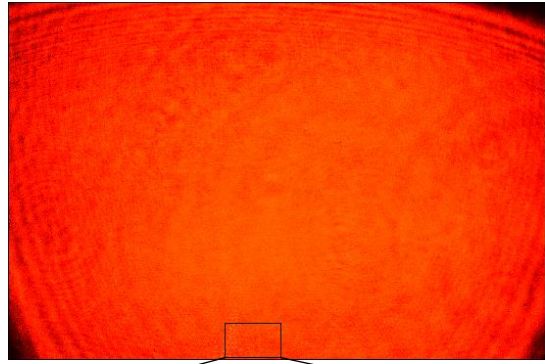


Fig. 3.16  $\beta$  は  $1.4^\circ$

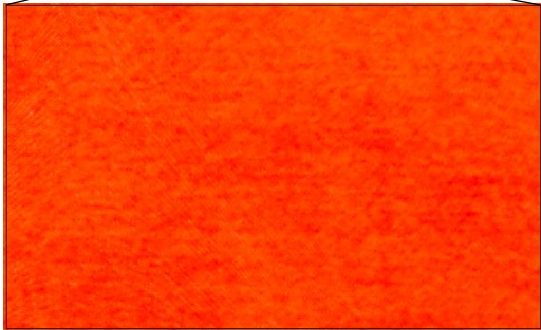
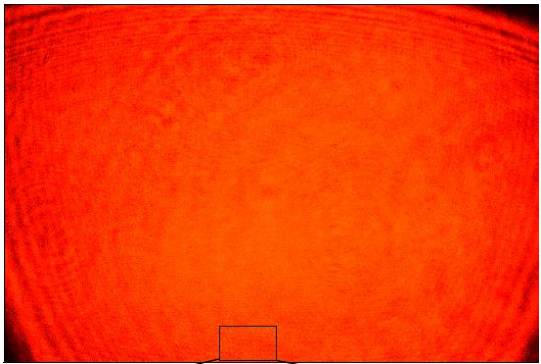


Fig. 3.17  $\beta$  は  $1.3^\circ$

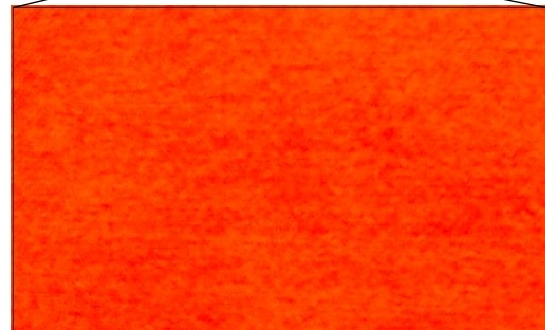
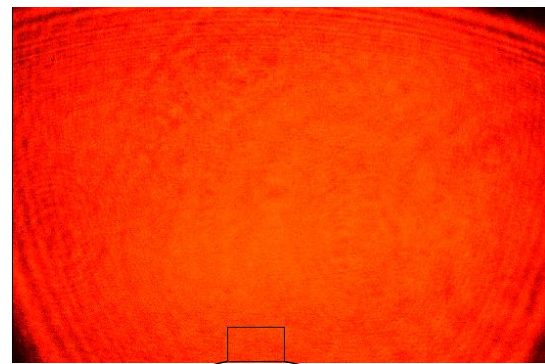


Fig. 3.18  $\beta$  は  $1.2^\circ$



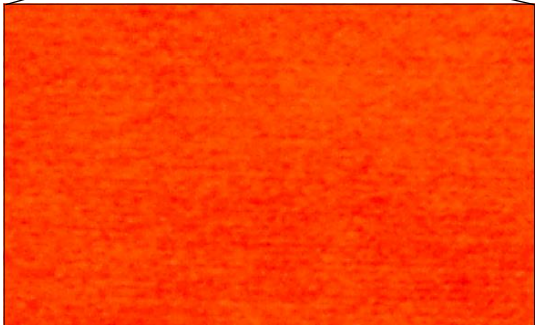
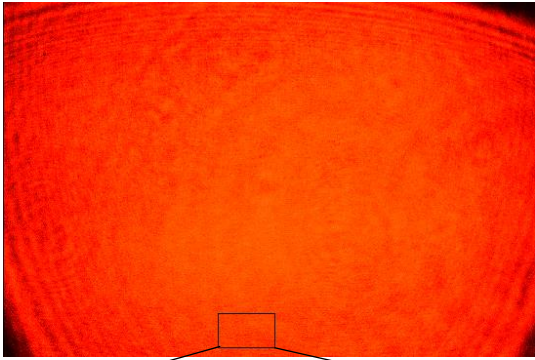


Fig. 3.19  $\beta$  は  $1.1^\circ$

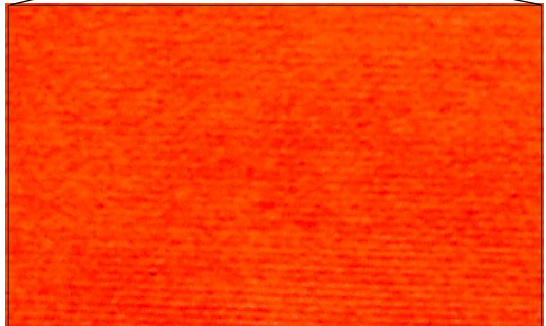
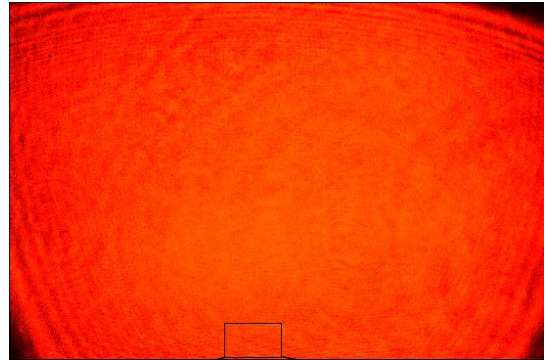


Fig. 3.20  $\beta$  は  $1.0^\circ$

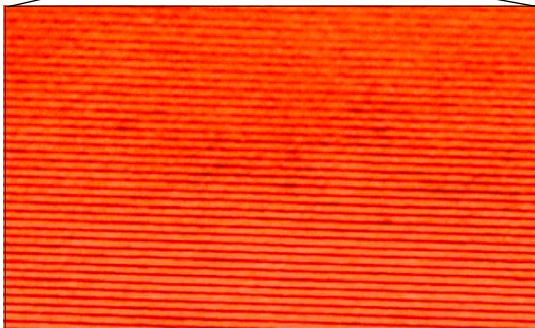
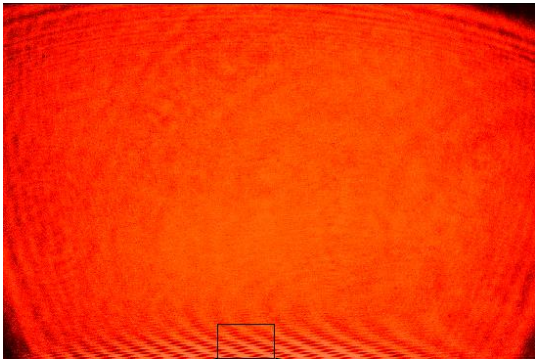


Fig. 3.21  $\beta$  は  $0.9^\circ$

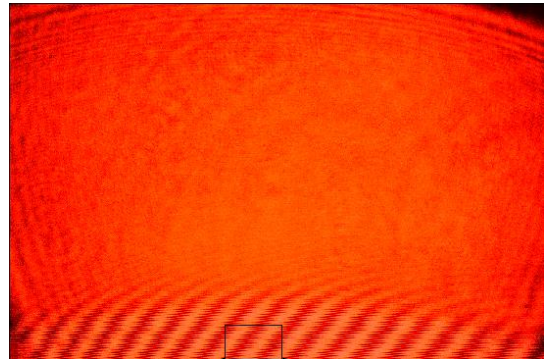


Fig. 3.22  $\beta$  は  $0.8^\circ$



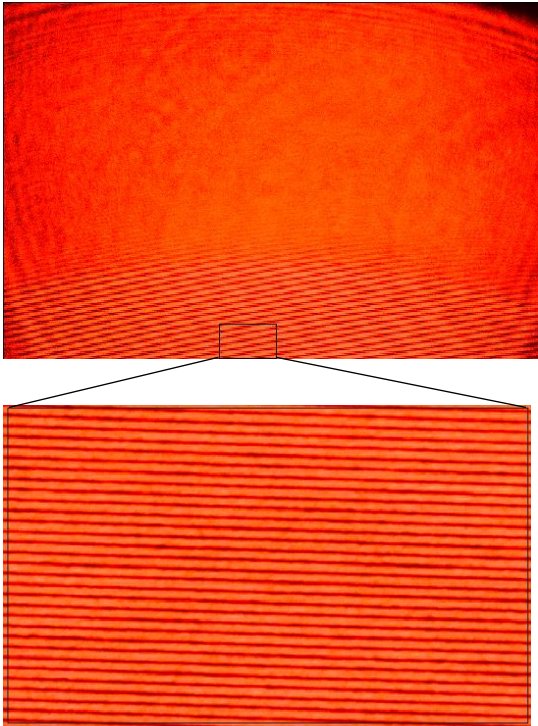


Fig. 3.23  $\beta$ は $0.7^\circ$

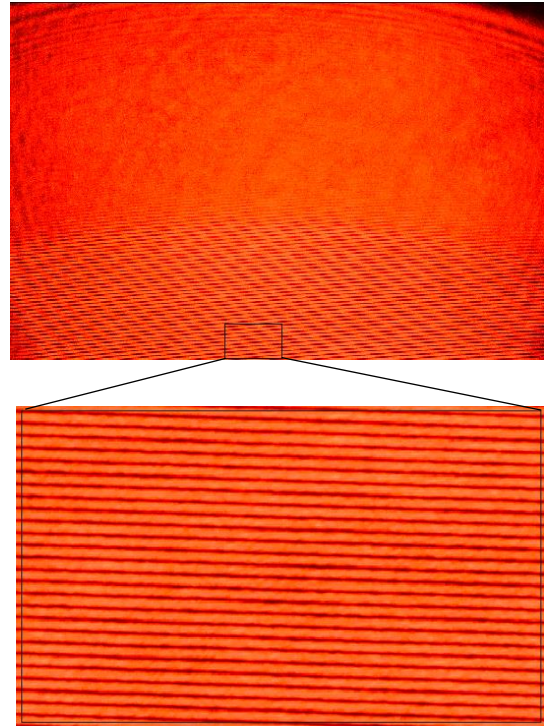


Fig. 3.24  $\beta$ は $0.6^\circ$

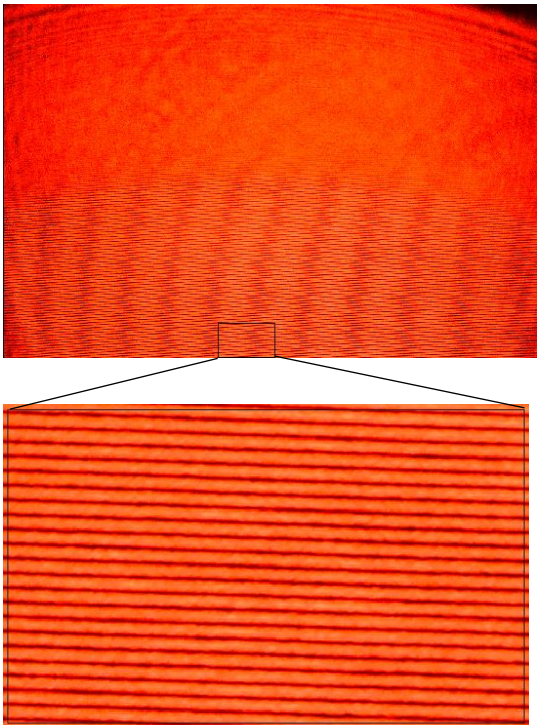


Fig. 3.25  $\beta$ は $0.5^\circ$

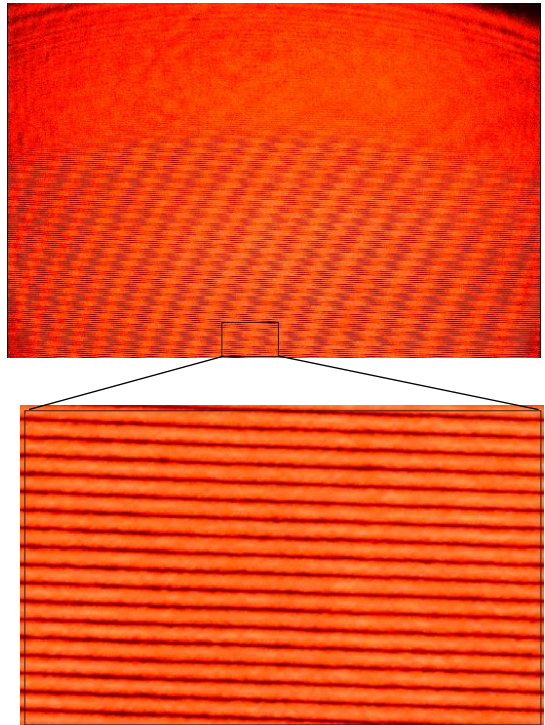


Fig. 3.26  $\beta$ は $0.4^\circ$



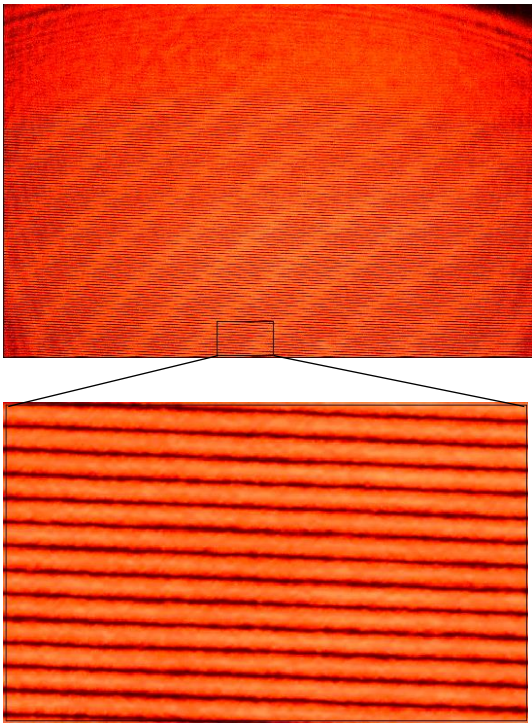


Fig. 3.27  $\beta$  は  $0.3^\circ$

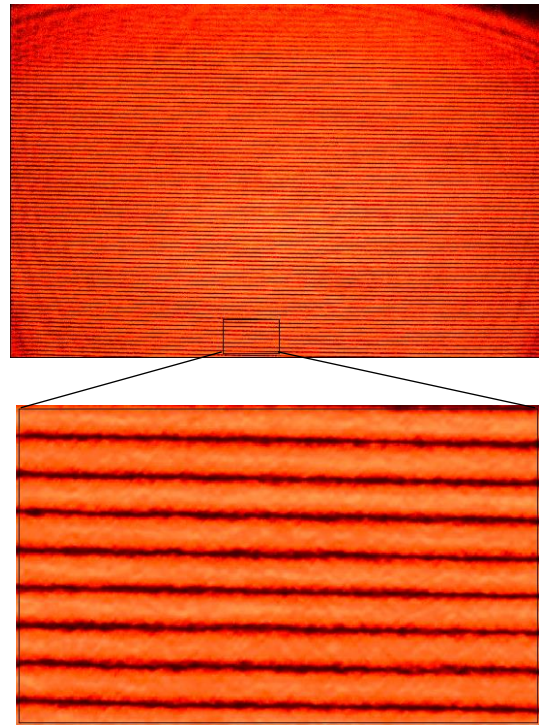


Fig. 3.28  $\beta$  は  $0.2^\circ$

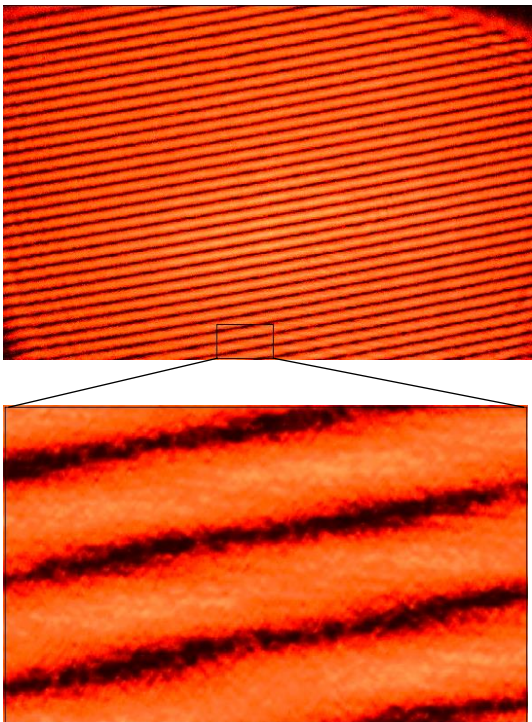


Fig. 3.29  $\beta$  は  $0.1^\circ$

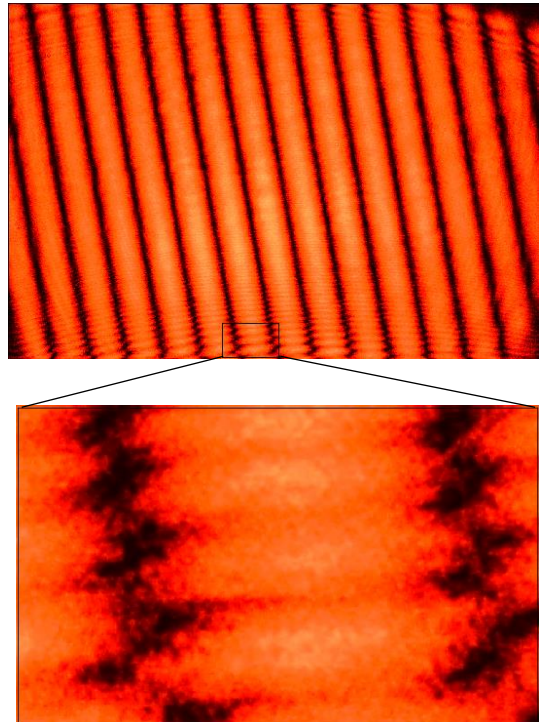


Fig. 3.30  $\beta$  は  $0^\circ$

Table 3 傾斜角と測定間隔と計算間隔関係 (水)

番号	高さ h (mm)	調整つまみ値	設定角度 (度)	測定間隔 ( $\mu\text{m}$ )	計算間隔 ( $\mu\text{m}$ )
1	0.965	10.755	1.500		21.191
2	0.901	10.819	1.401		22.612
3	0.837	10.883	1.301		24.252
4	0.773	10.947	1.202	31.44	26.164
5	0.709	11.011	1.102	34.69	28.422
6	0.645	11.075	1.003	36.85	31.129
7	0.581	11.139	0.903	35.46	34.433
8	0.517	11.203	0.804	41.09	38.558
9	0.453	11.267	0.704	45.95	43.848
10	0.389	11.331	0.604	53.54	50.881
11	0.325	11.395	0.505	63.59	60.686
12	0.261	11.459	0.406	80.8	75.301
13	0.197	11.523	0.306	107.61	99.416
14	0.133	11.587	0.207	169.22	146.744
15	0.069	11.651	0.107	473.31	281.876

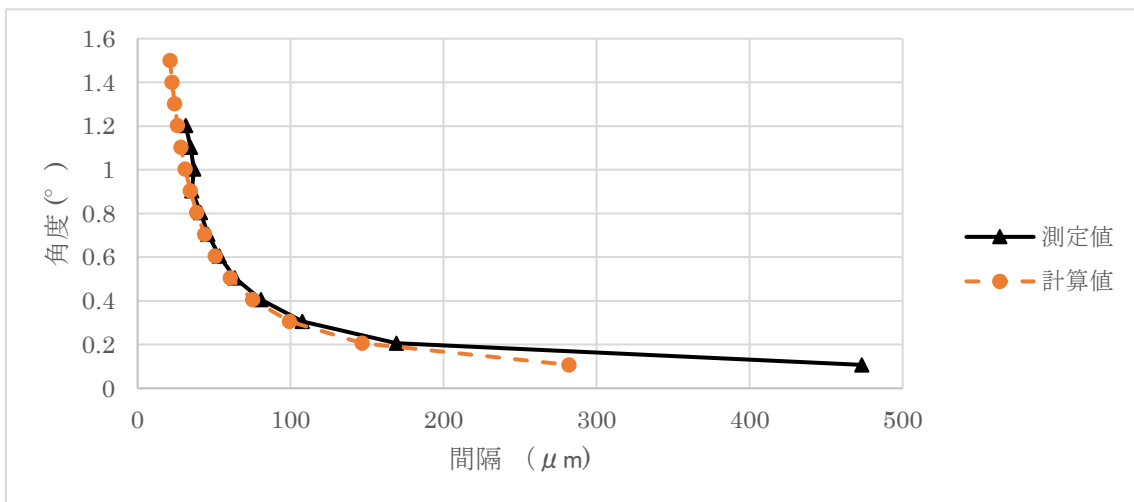


Fig. 3.31 傾斜角と間隔の関係 (水)

エタノール液滴を観察することも実験の内容である。

使用するエタノールは Fig. 3.32 に示すものである(Ethanol(99.5) Wako 054-00466)。水の場合と同様、 $\beta$  は  $1.5^\circ$  から  $0^\circ$  までに  $0.1^\circ$  で変化させる。Fig. 3.33 から Fig. 3.48 はこの変化する過程にカメラ 1 で撮った写真である。写真と写真の拡大図から  $\beta$  により生成する干渉縞が見える。水の場合と違いは  $1.1^\circ$  より大きい場合、干渉縞の間隔はほぼ区別できない状態になる。

Table 4 は設定角度と測定間隔と計算間隔の関係である。Table 4 に基づいて Fig. 3.49 が得られる。Fig. 3.49 中の点線は計算間隔と設定角度の関係であり、実線は測定間隔と設定角度の関係である。図から  $\beta$  は  $1.1^\circ$  から  $0.2^\circ$  の間で測定間隔の値と計算間隔の値はほぼ一致する。 $0.1^\circ$  と  $0^\circ$  の場合は水の場合と同じ、干渉縞が傾く。

以上によりエタノールが傾斜スライドガラスとガラス基板の間に満たす時に計算式は  $0 \sim 1.1^\circ$  の範囲で適用することが判断できる。

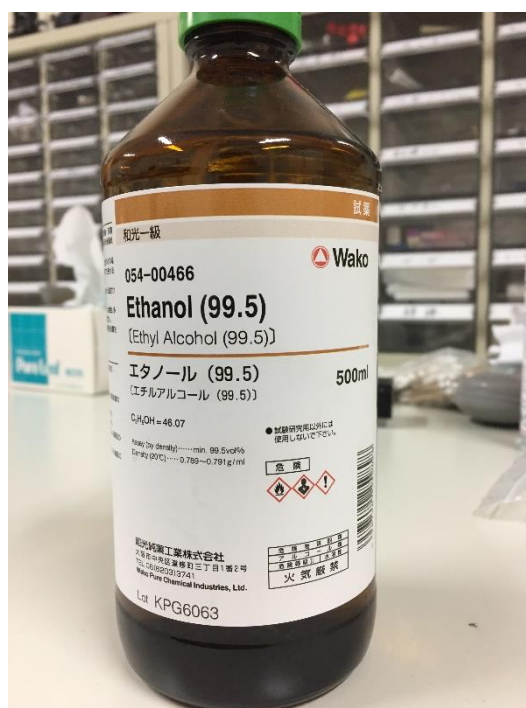


Fig. 3.32 実験用エタノール



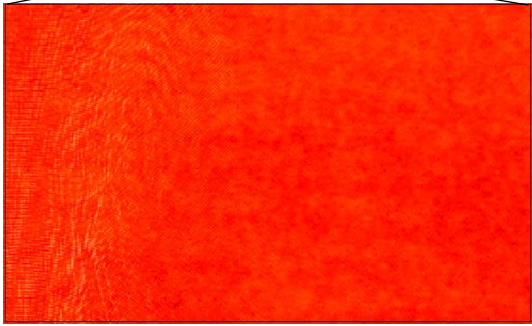
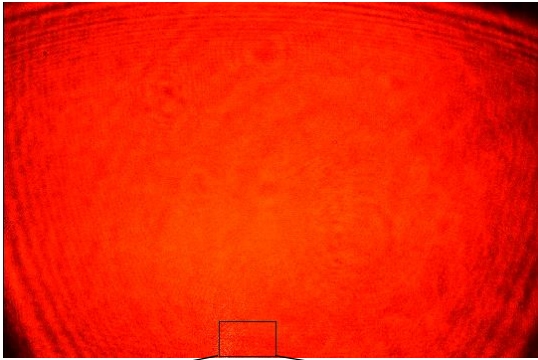


Fig. 3.33  $\beta$  は  $1.5^\circ$

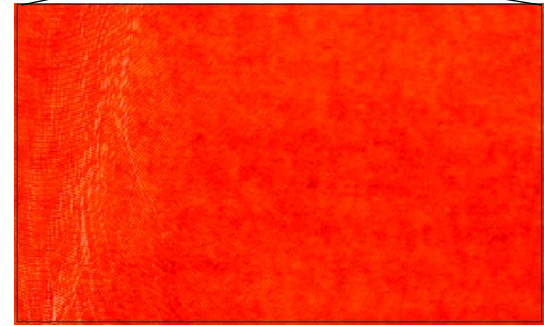
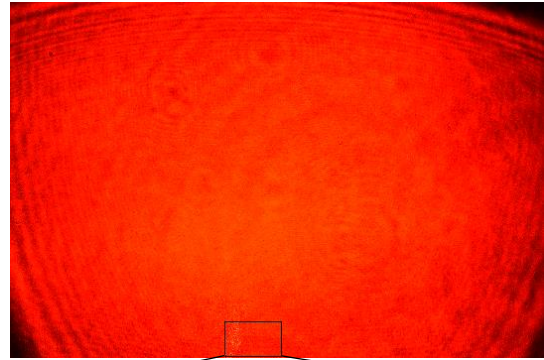


Fig. 3.34  $\beta$  は  $1.4^\circ$

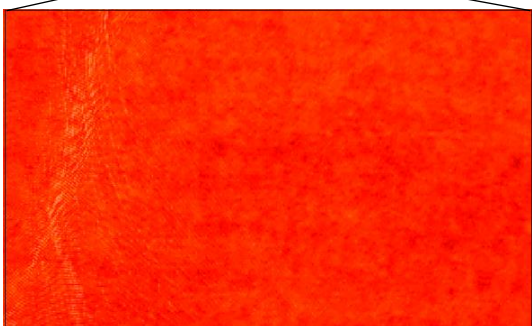
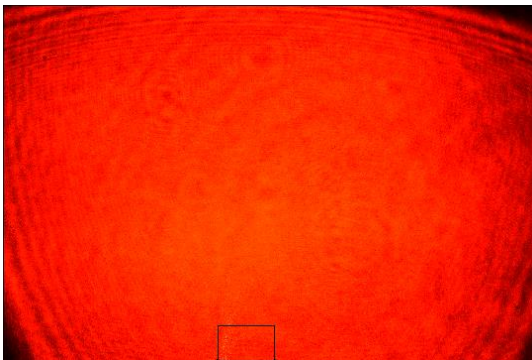


Fig. 3.35  $\beta$  は  $1.3^\circ$

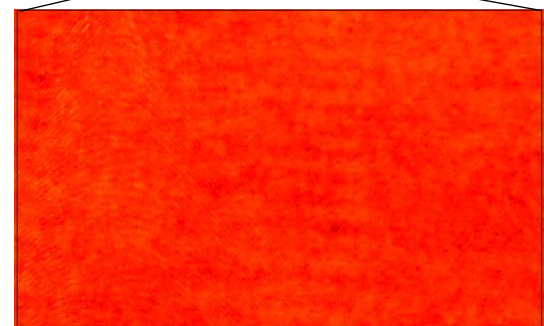
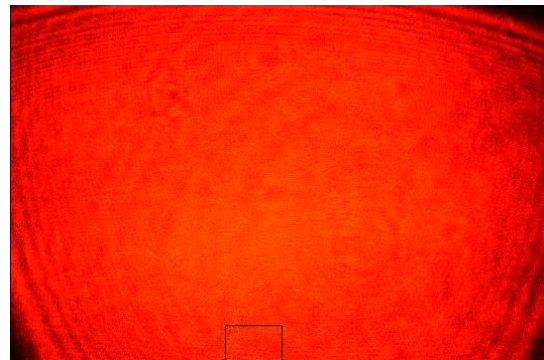


Fig. 3.36  $\beta$  は  $1.2^\circ$

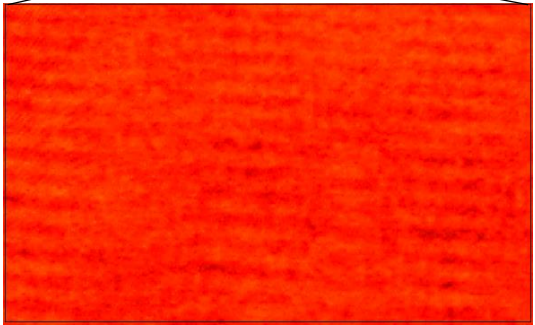
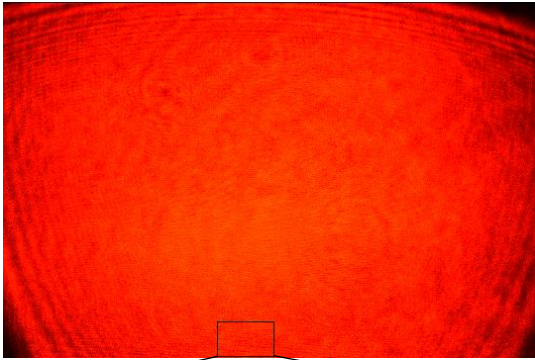


Fig. 3.37  $\beta$  は  $1.1^\circ$

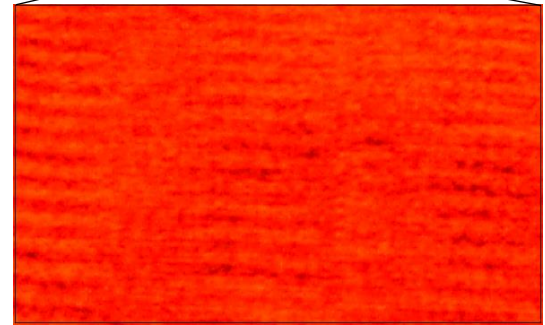
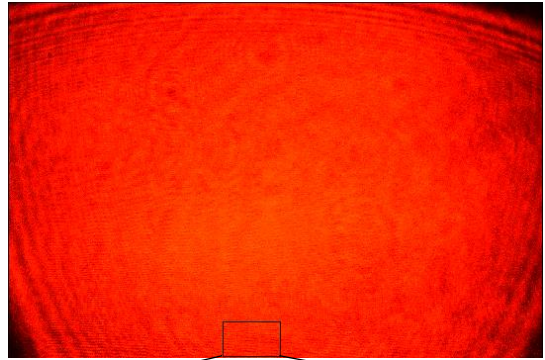


Fig. 3.38  $\beta$  は  $1.0^\circ$

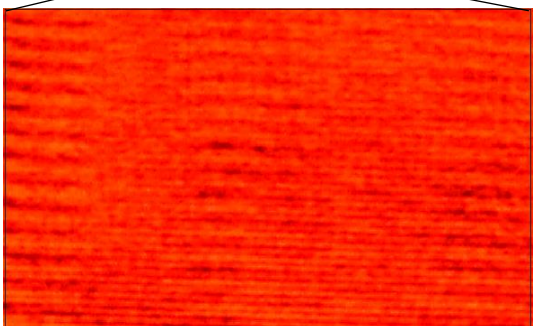
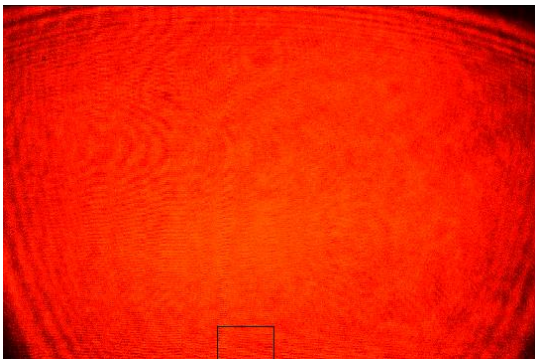


Fig. 3.39  $\beta$  は  $0.9^\circ$

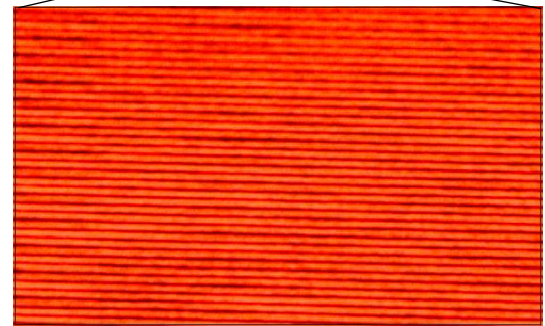
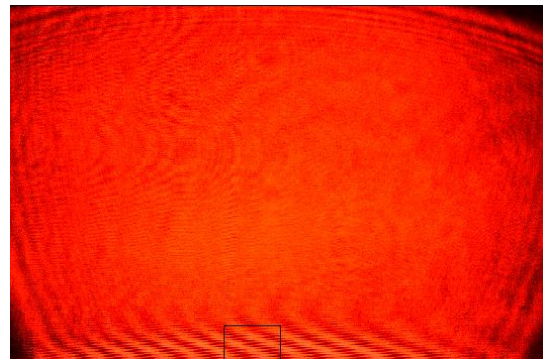


Fig. 3.40  $\beta$  は  $0.8^\circ$



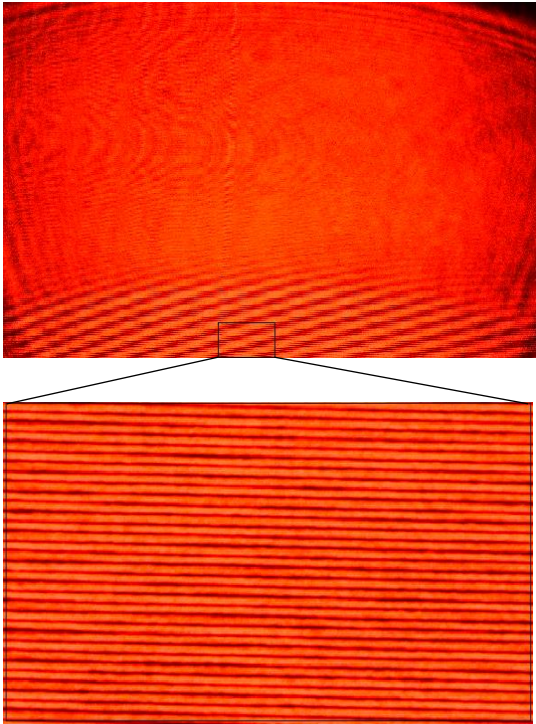


Fig. 3.41  $\beta$  は  $0.7^\circ$

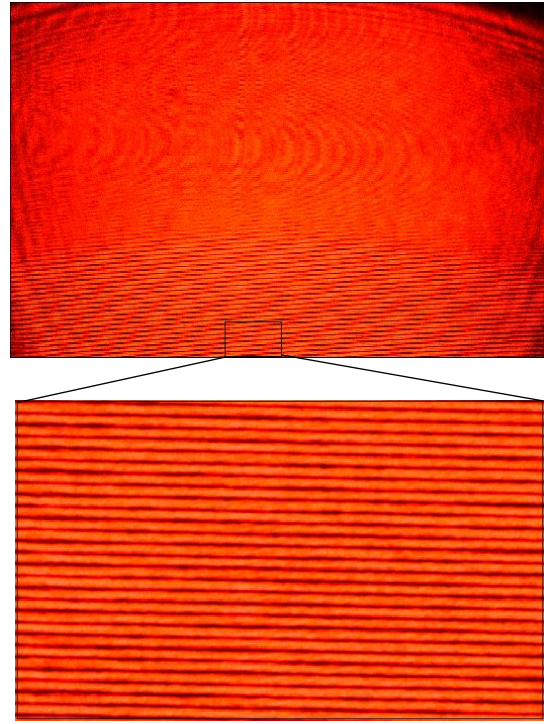


Fig. 3.42  $\beta$  は  $0.6^\circ$

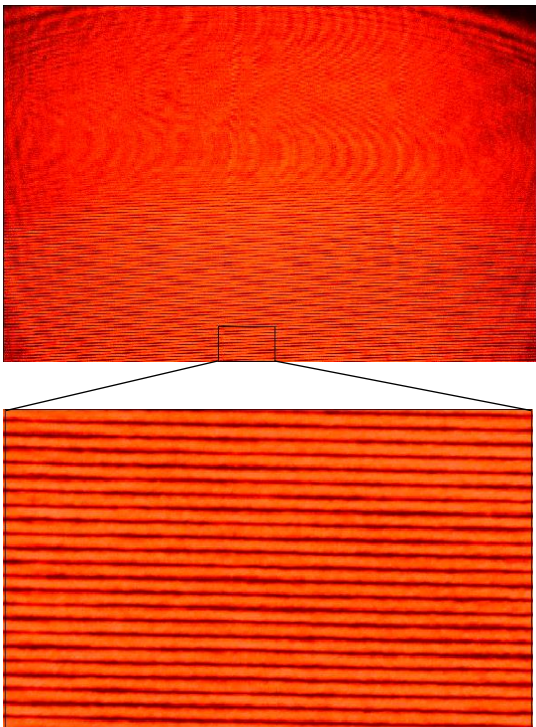


Fig. 3.43  $\beta$  は  $0.5^\circ$

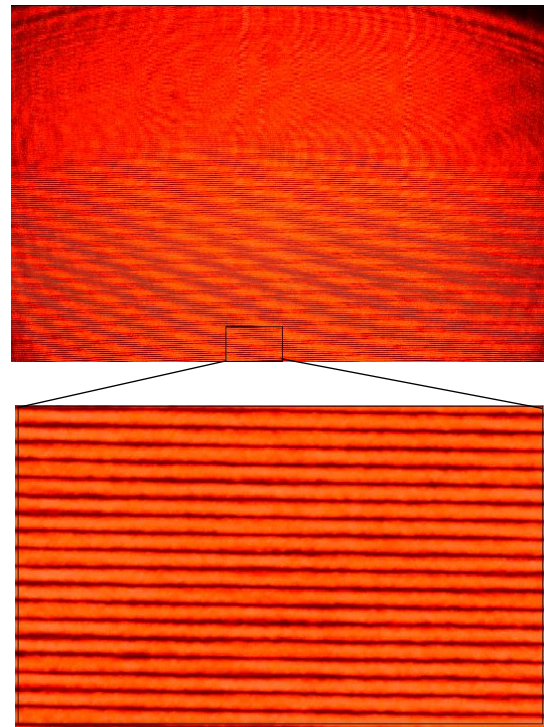


Fig. 3.44  $\beta$  は  $0.4^\circ$



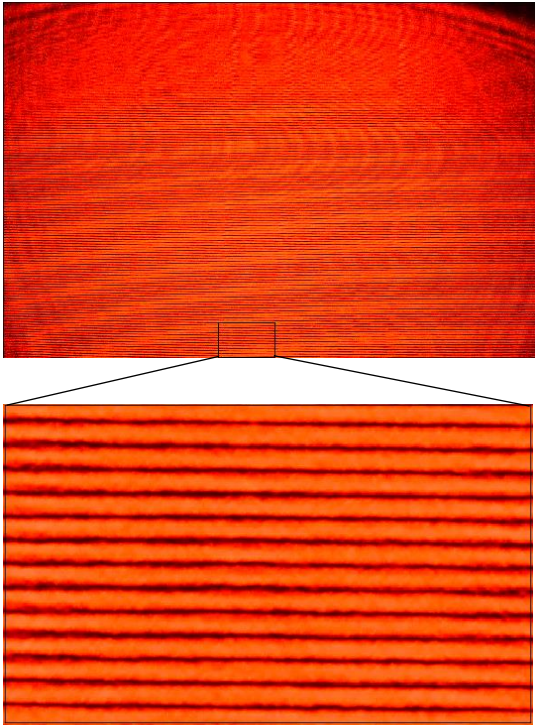


Fig. 3.45  $\beta$  は  $0.3^\circ$

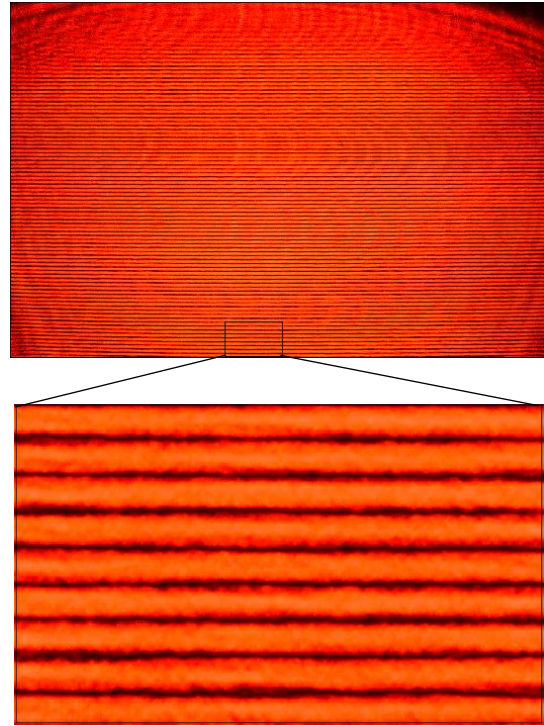


Fig. 3.46  $\beta$  は  $0.2^\circ$

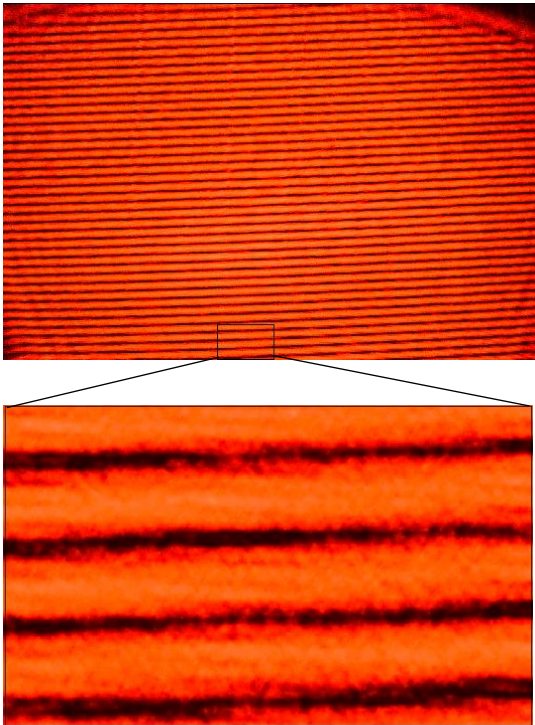


Fig. 3.47  $\beta$  は  $0.1^\circ$

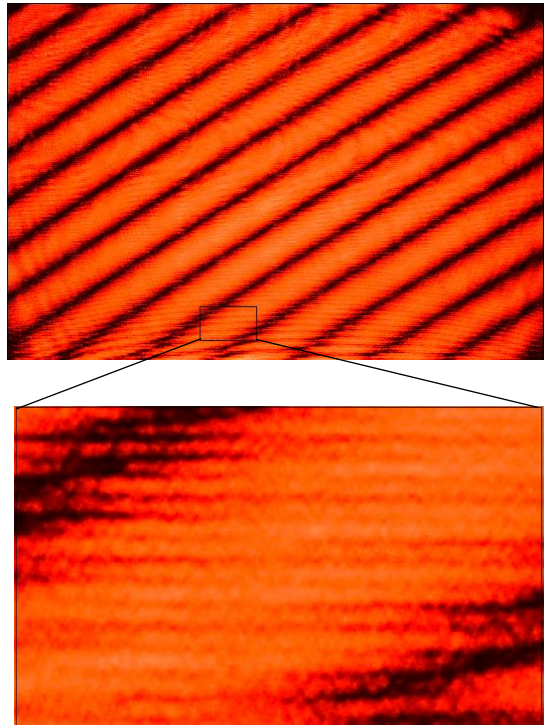


Fig. 3.48  $\beta$  は  $0^\circ$

Table 4 傾斜角と測定間隔と計算間隔関係 (エタノール)

番号	高さ (mm)	調整つまみ	設定角度 (度)	測定間隔 ( $\mu\text{m}$ )	計算間隔 ( $\mu\text{m}$ )
1	0.965	10.76	1.500		19.348
2	0.901	10.824	1.401		20.652
3	0.837	10.888	1.301		22.157
4	0.773	10.952	1.202		23.910
5	0.709	11.016	1.102	30.09	25.982
6	0.645	11.08	1.003	33.68	28.465
7	0.581	11.144	0.903	36.45	31.496
8	0.517	11.208	0.804	38.48	35.278
9	0.453	11.272	0.704	44.67	40.130
10	0.389	11.336	0.605	52.18	46.580
11	0.325	11.4	0.505	63.25	55.571
12	0.261	11.464	0.406	78.5	68.975
13	0.197	11.528	0.306	103.16	91.089
14	0.133	11.592	0.207	162.99	134.490
15	0.069	11.656	0.107	364.04	258.410

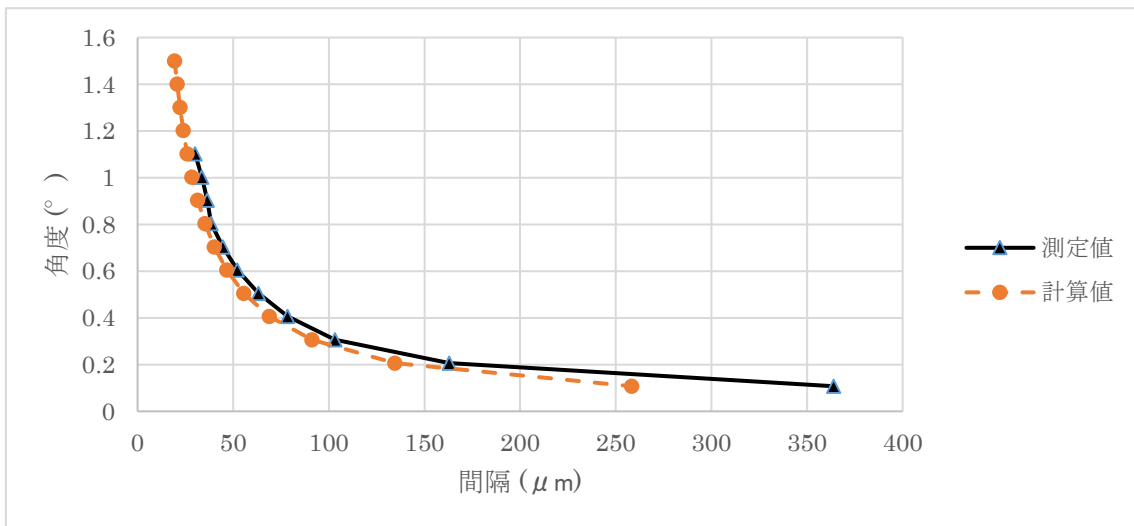


Fig. 3.49 傾斜角と間隔の関係 (エタノール)



水の場合 Fig. 3.17 と Fig. 3.18 示すように  $\beta$  が  $1.3^\circ$  の時に写真から干渉縞がはっきりと区別できなくなる.  $1.2^\circ$  の時は写真から干渉縞がぎりぎり区別できる. ここまでの観察結果から干渉縞が見える  $\beta$  の最大値は  $1.3^\circ$  より小さい. よって, 観察できる最大角度は  $\beta < 1.3^\circ$  であることが分かる.

エタノールの場合 Fig. 3.36 と Fig. 3.37 示すように  $\beta$  が  $1.2^\circ$  の時に写真から干渉縞は区別できなくなる. 水の場合と比べ, エタノールの場合に観察できる範囲は  $0.1^\circ$  が狭くなる. よって, エタノールの場合, 観察できる最大角度は  $\beta < 1.2^\circ$  であることが分かる.

## 第 4 章 実験結果

#### 4.1 実験概要

予備実験から水とエタノールの場合に置いて  $1.3^\circ$  と  $1.2^\circ$  より小さい角度が観察できることが分かっている。実験は蒸留水 (Wako 043-16785) とエタノール(Ethanol(99.5) Wako 054-00466)の液滴を用いて、以下の実験を行った。

実験一：水液滴の静止状態の観察

実験二：エタノール液滴の静止状態の観察

実験三：エタノール液滴濡れ範囲広がる過程の観察

以降、それぞれの実験内容の詳細について述べる。

## 4.2 水とエタノールの観察実験

3.3 節の結果から 2.3 節に導いた式 (7) は水とエタノールの気液界面の傾斜角が観察できる範囲で干渉縞間隔を利用して計算できることが確認した。次は三つの実験である。温度は 27.3°C であり、湿度は 76% である。

### 4.2.1 水液滴の静止状態の観察

Fig. 4.1 はマイクロピペットを用いて液滴を作る過程である。Fig. 4.2 から Fig. 4.5 までの a はカメラ 1 (Nikon1V3) を撮った写真であり、b はカメラ 2 (Optio WG-2) 撮った写真である。その中で a はカメラ 2 が横から撮った写真であり、b はカメラ 1 が下から撮った干渉縞である。

カメラ 2 による撮った写真から見ると水滴の形ははっきり観察できる。このような場合水滴とガラス表面の接触角や気液界面の角度は 1.2 節に述べた  $\theta/2$  方法を用いて計算できる。Fig. 4.6 示すのは  $35\mu\text{L}$  の蒸留水液滴の接触角である。3.3 節の結果から今回の干渉縞法の測定できる範囲は  $1.3^\circ$  より小さい角である。 $35\mu\text{L}$  の蒸留水の接触角は  $12.8^\circ$  であり干渉縞法では測定できないはずである。

しかし、実験結果から見ると、カメラ 1 による撮影結果には縞が見える。Fig. 4.7 の液滴中の光反射概略を見ると気液界面で反射する光は濡れ範囲全体に届かず。Fig. 4.7 上図で言えば、下側にのみ干渉縞をつくるはずで、確かに観察できる。干渉縞は濡れ範囲全体に生じないはずである。

Fig. 4.8 は回折光強度分布の概略であり [12]、カメラ 1 はフレネル回折像生成できる範囲中である。Fig. 4.9 は回折光を作る実験である。実験の中で鉄棒の直径は  $0.73\text{mm}$  である。カメラ 1 撮った写真から見ると鉄棒の影は真っ黒ではない。影の中と影の外はいくつかの縞が現れる。Fig. 4.8 のフレネル回折像強度分布を参照すると Fig. 4.2~4.5 のようにあらわれる干渉縞は回折光によるものと判断でき、計算式 (7) による傾斜角の計算は適用できない。

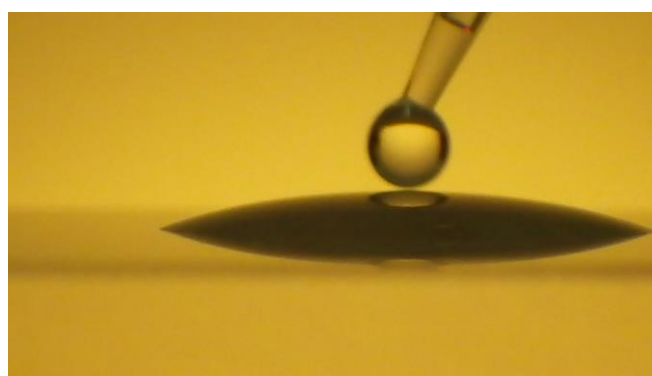


Fig. 4.1 マイクロピペットを用いて液滴を作る

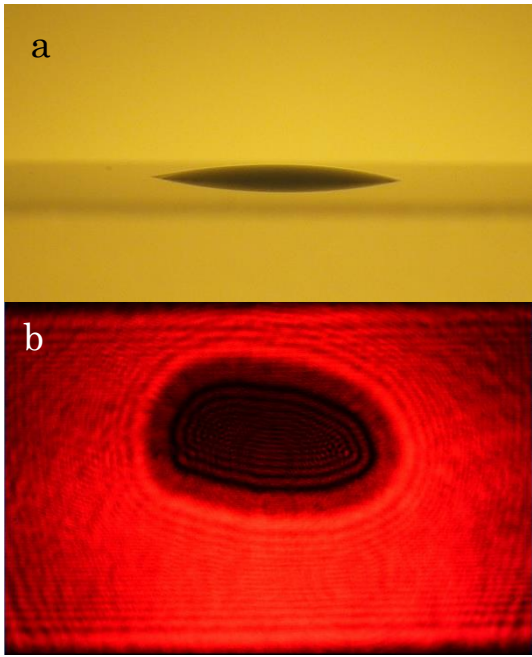


Fig. 4.2 水  $5\mu\text{L}$

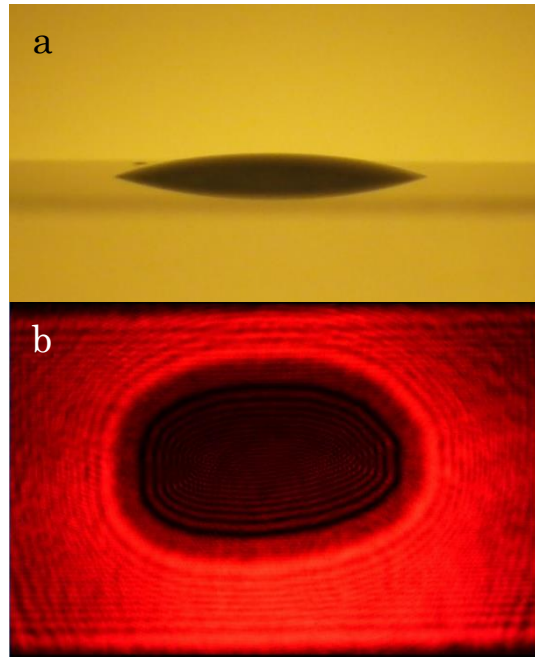


Fig. 4.3 水  $15\mu\text{L}$

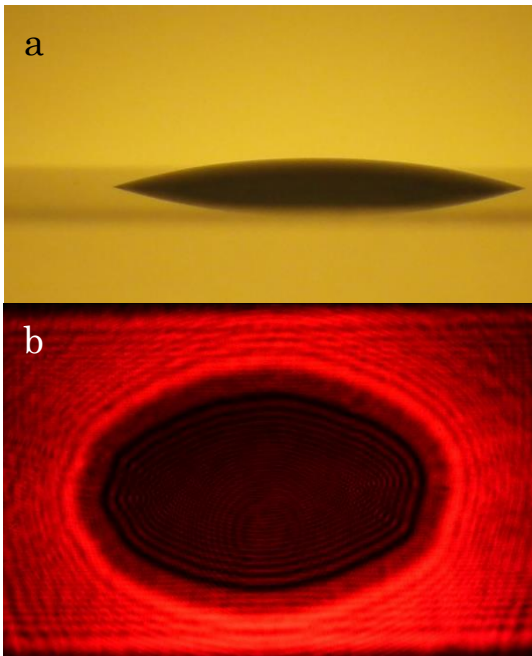


Fig. 4.4 水  $25\mu\text{L}$

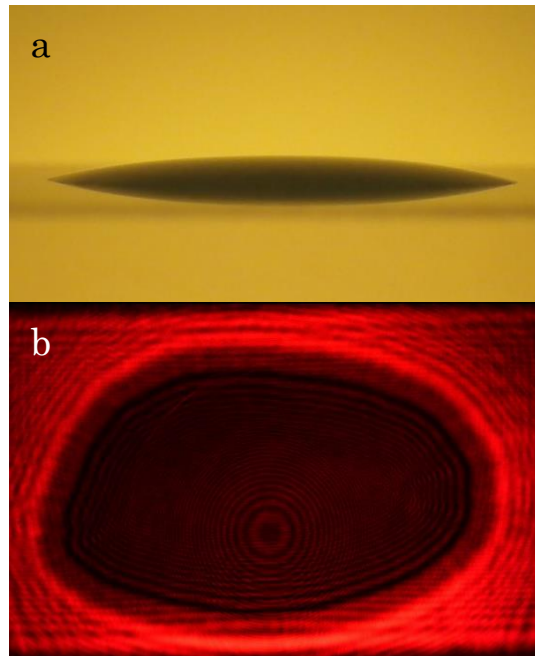


Fig. 4.5 水  $35\mu\text{L}$

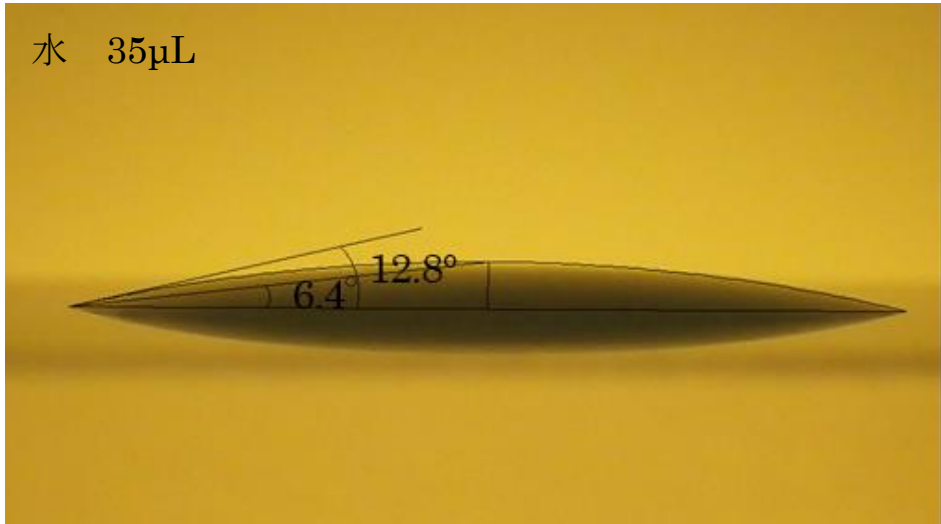


Fig. 4.6 水滴の接触角

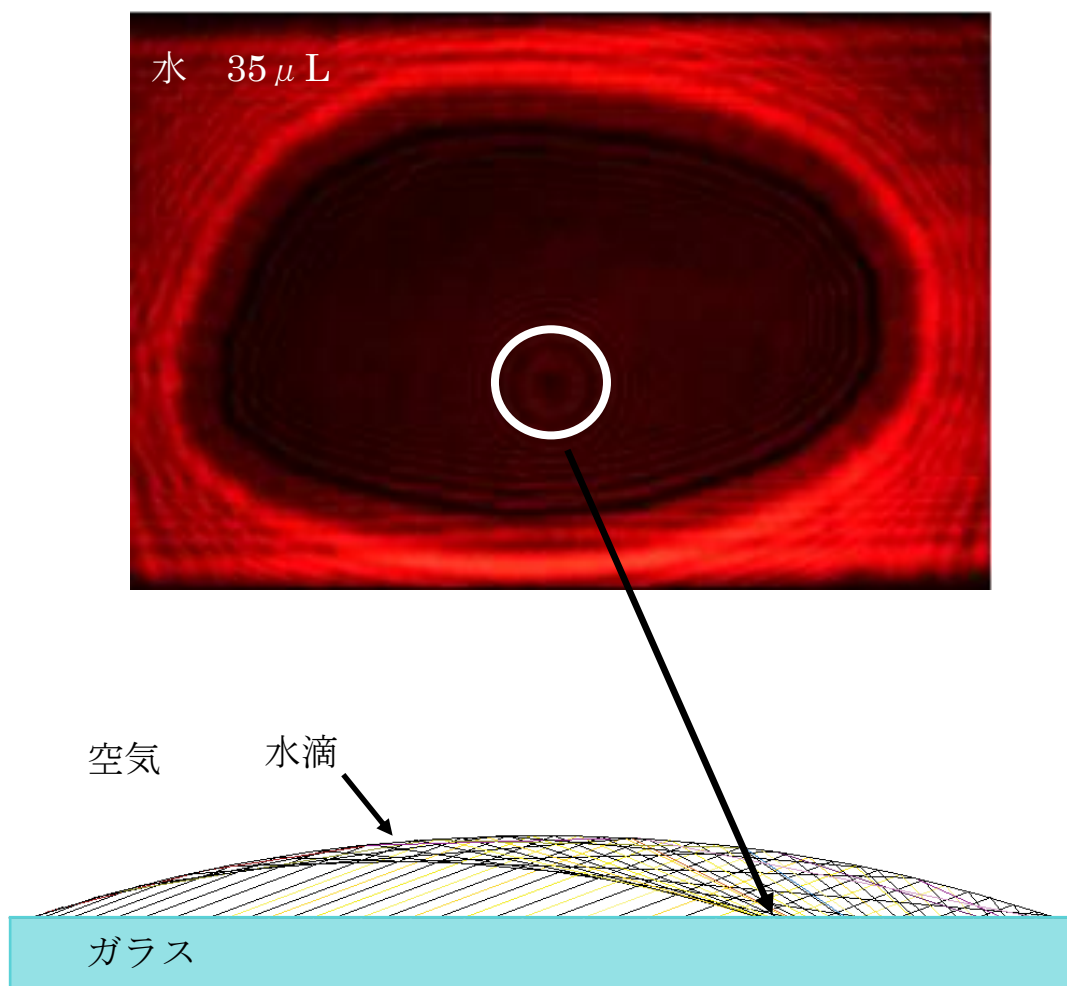


Fig. 4.7 液滴中の反射

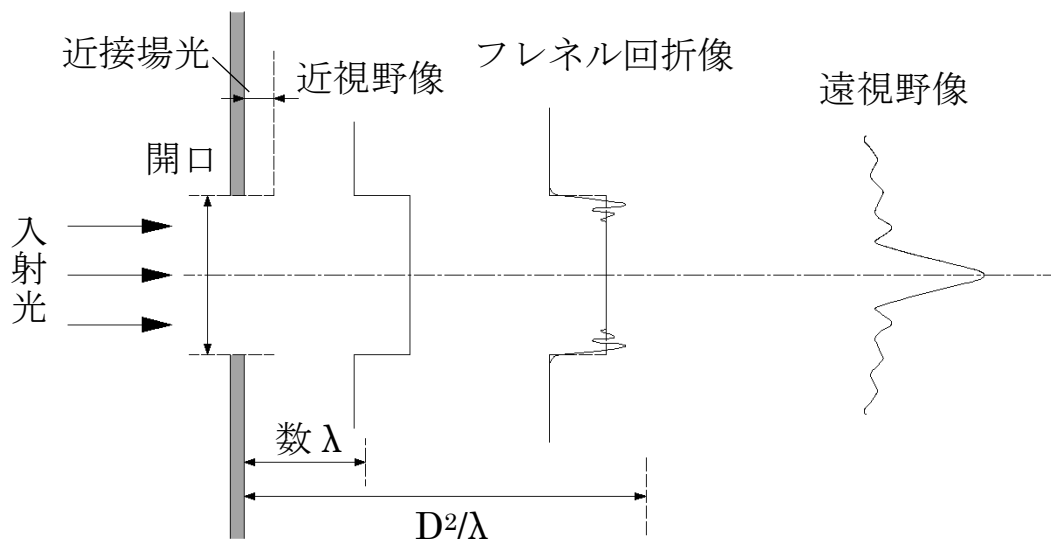


Fig. 4.8 回折光強度分布の概略[12]



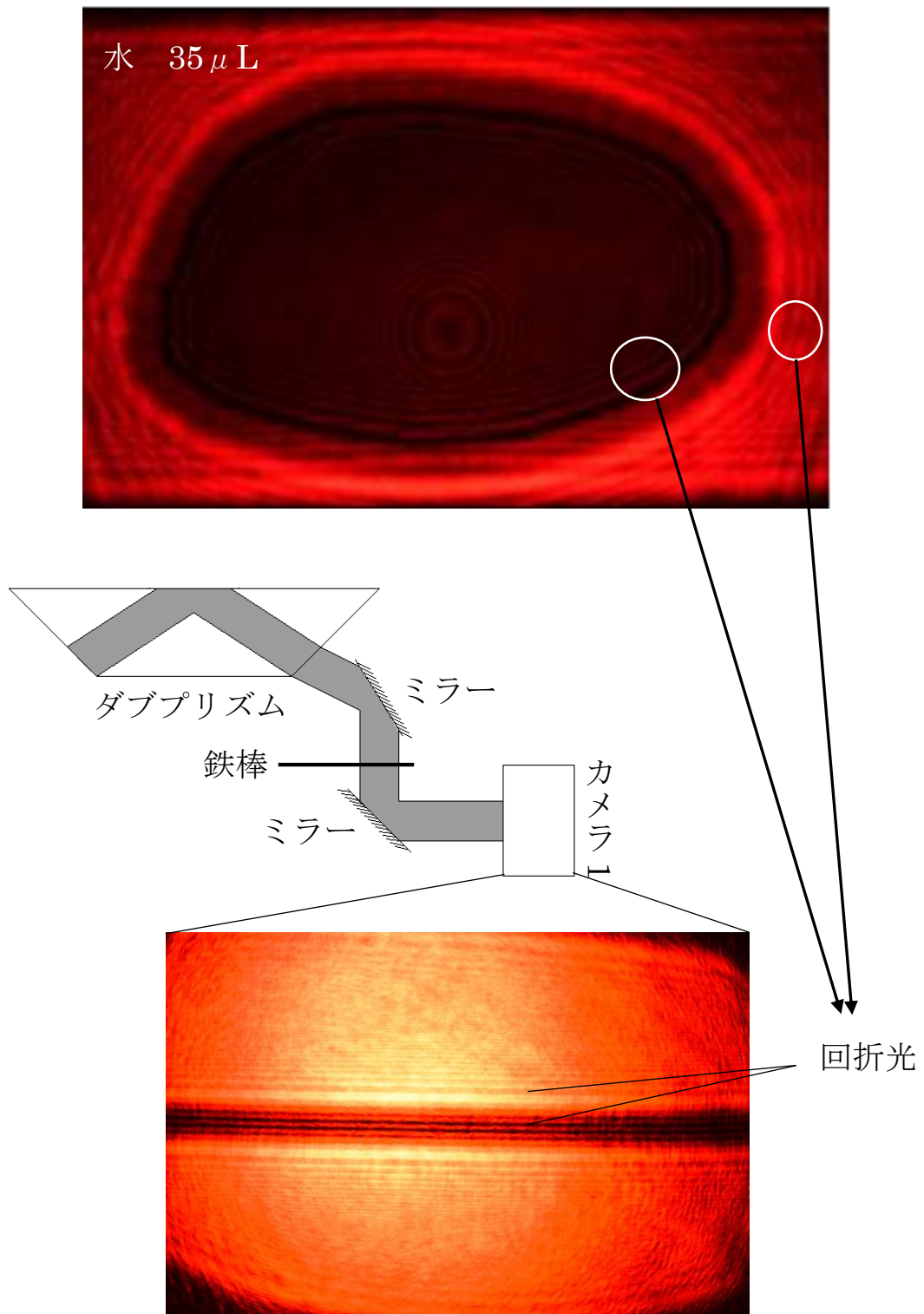


Fig. 4.9 回折光の実験

#### 4.2.2 エタノール液滴の静止状態の観察

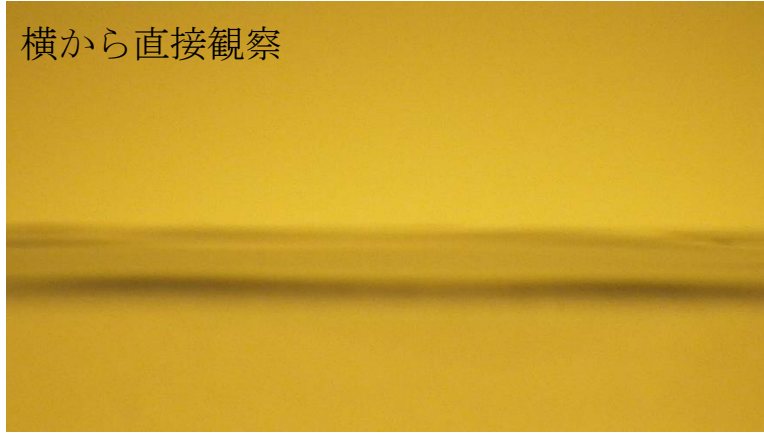
エタノール液滴を使う実験の場合、エタノールはガラス表面を厚く濡れ広がる。

エタノールは薄い膜の状態になるため、少しだけの体積で濡れ範囲は観察範囲を超える。今回の実験では  $25\ \mu\text{L}$  のエタノールをマイクロピペットを用いてダブリズム上に滴下している。Fig. 4.10 は今回の実験結果写真である。上はカメラ 2 で撮った横から直接観察した写真であり、下はカメラ 1 撮った干渉縞の写真である。カメラ 2 による写真からはエタノールの形は観察できない。カメラ 1 による写真には干渉縞が見える。

エタノールの実験は濡れのエッジから気液界面の角度を計算して分析した。エタノール液滴中心近くの形を計算した。

Fig. 4.11 の縦線に沿った干渉縞の間隔を利用するため、プログラム（付録）を用いて干渉縞の明るさを読み込む。Fig. 4.11 から干渉縞の間隔を測り、式(7)を利用して気液界面の傾斜角を計算する。Fig. 4.12 は気液界面の角度の分布である。液滴の中心は  $0^\circ$  のため、 $0^\circ$  は液滴中心でした。Fig. 4.13 は角度の情報を元にして計算した。気液界面形状である。図より、エタノール液滴は中心近くほど厚く、はじに近づくほど厚くなることが分かる。

横から直接観察



干渉縞

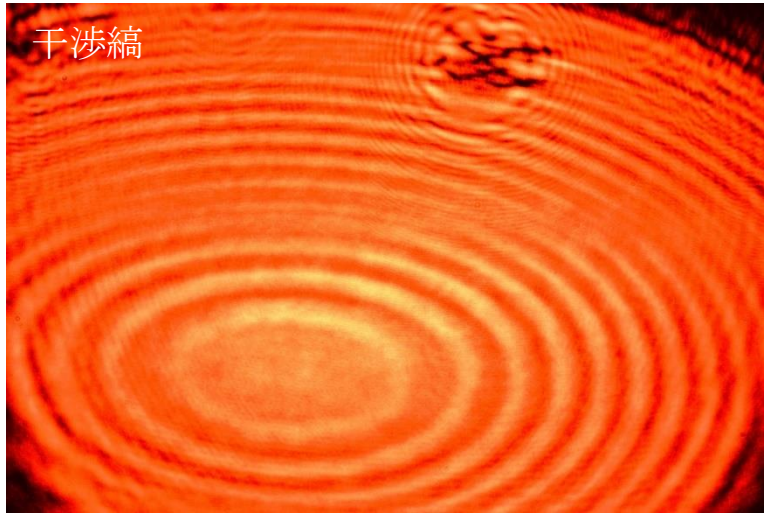


Fig. 4.10 エタノール液滴中心の近くの観察

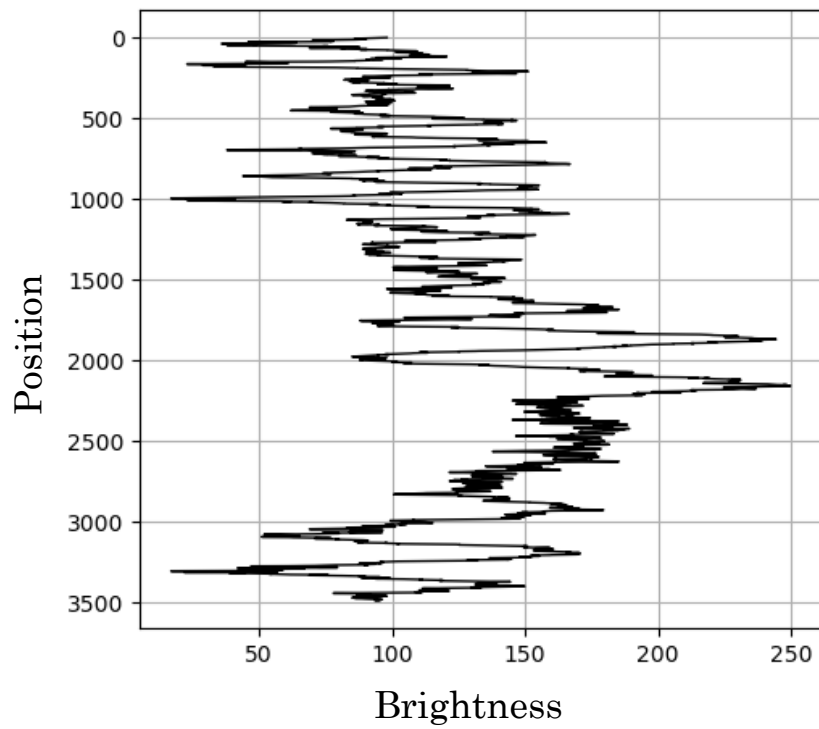
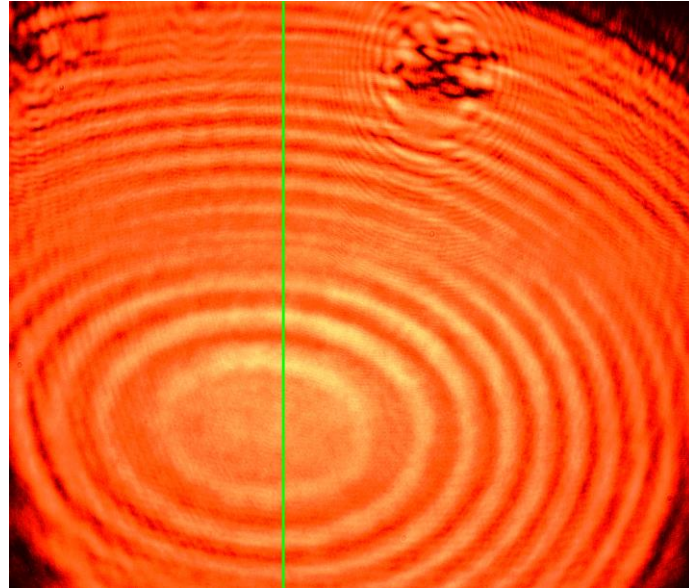


Fig. 4.11 プログラムによる干渉縞の読み込み

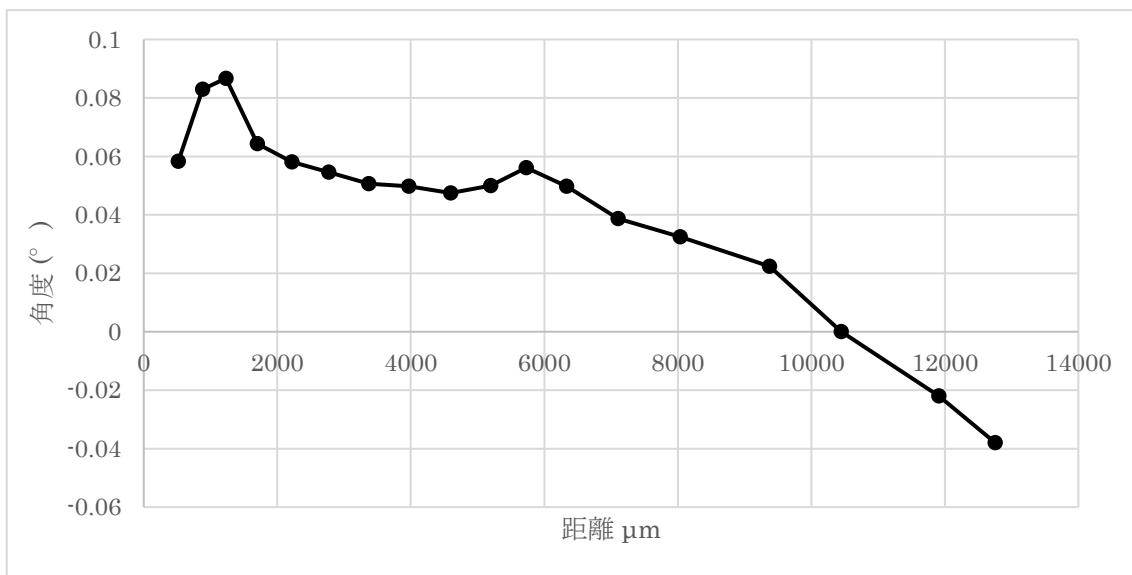


Fig. 4.12 気液界面角度の分布

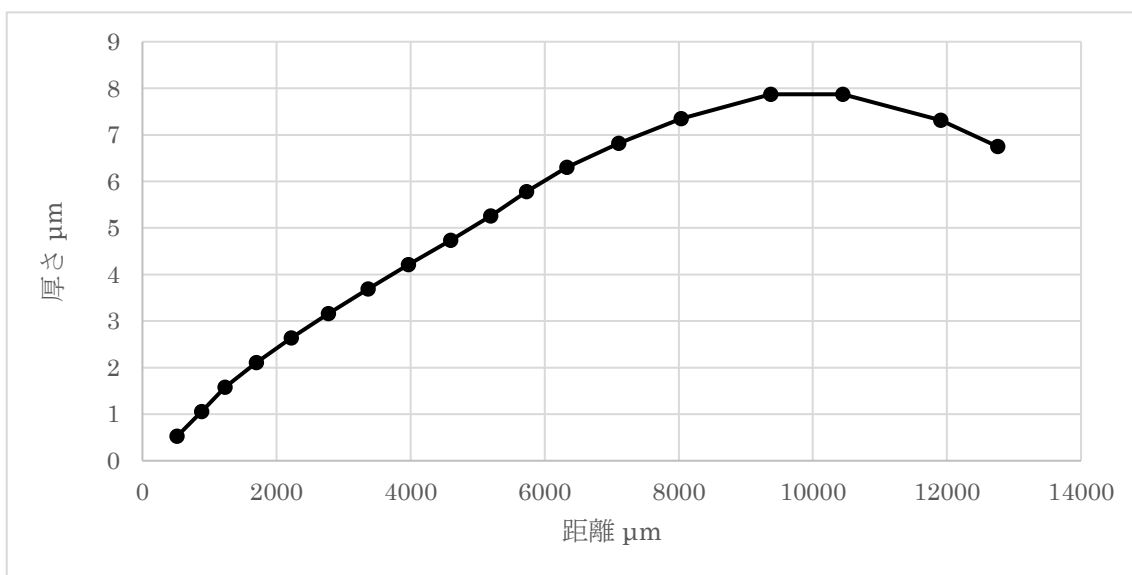


Fig. 4.13 気液界面形状

#### 4.23 エタノール液滴が濡れ広がる過程の観察

35  $\mu$ L のエタノールを利用し実験を行う。Fig. 4.14 は撮り始めの 0 s から 9 s までのエタノール液滴が濡れ広がる過程である。写真から時間の往道に伴いエタノール液滴の濡れが移動しているのが分かる。同時に液体表面での反射により生成する干渉縞も変わる。時間変化に伴い変化する干渉縞を利用して計算するとエタノール液滴が濡れ広がる過程での気液界面の変化がわかる。

Fig. 4.15, Fig. 4.16 と Fig. 4.17 を示すのは 0s, 4s と 8s のときの干渉縞である。Fig. 4.15, Fig. 4.16 と Fig. 4.17 中で上の写真中の縦直線は分析した場所を示す。下の図はその直線のところの明るさ分布である。明るいピークは明線であり、暗いピークは暗線である。そのピーク間の距離が分かれば、干渉縞の間隔は測れる。

Fig. 4.18 は気液界面の角度の分布である。Fig. 4.19 は気液界面形状である。Fig. 4.19 から濡れ接触線からの距離は長くなるにつれてと液膜の厚さはだんだん厚くなったことが分かる。0s と 4s を比較すると、気液界面が全体的に移動しているが、4s と 8s では、接触線近傍のみ移動量が大きいことが分かる。



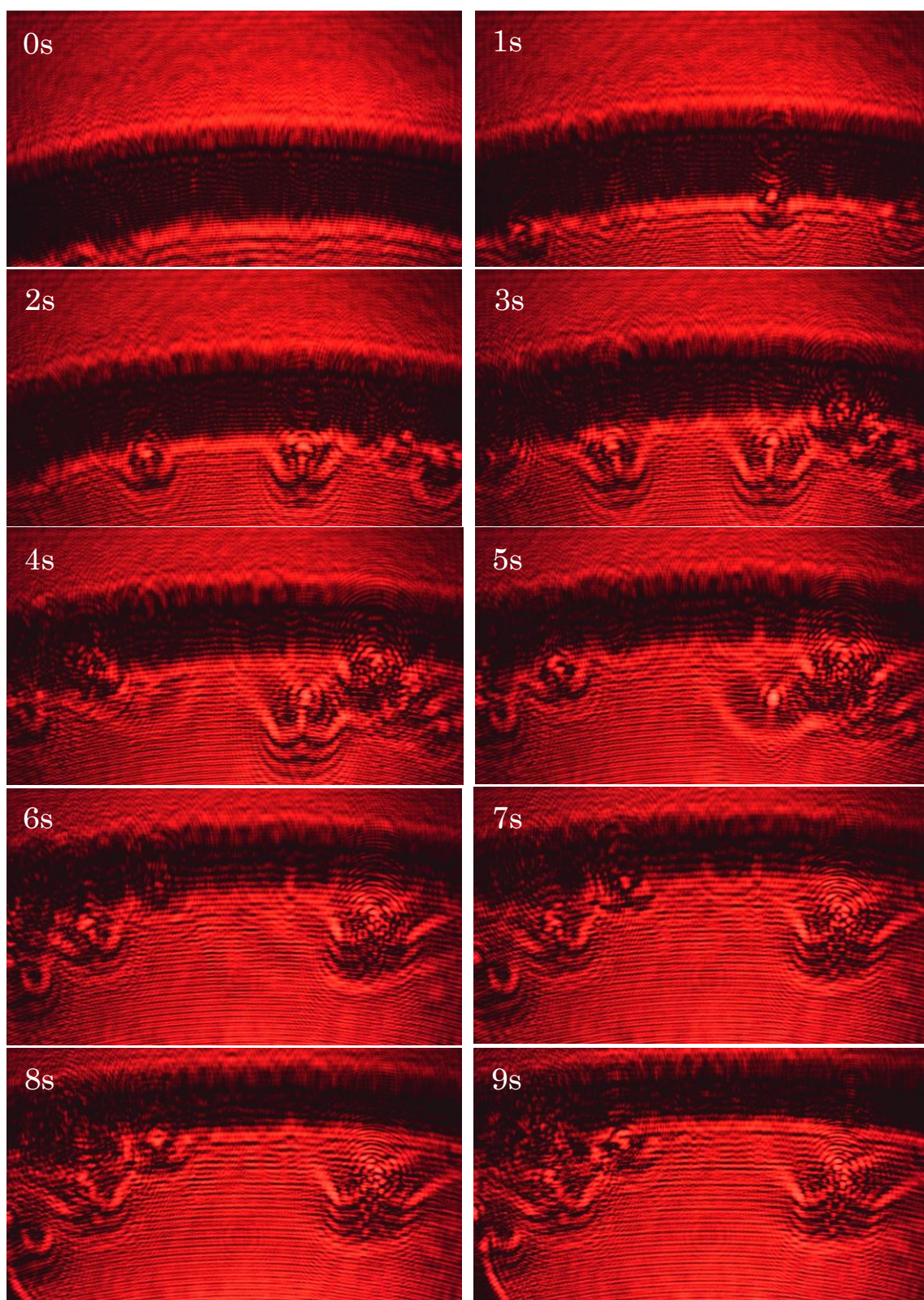


Fig. 4.14 エタノール液滴濡れ範囲広がる過程

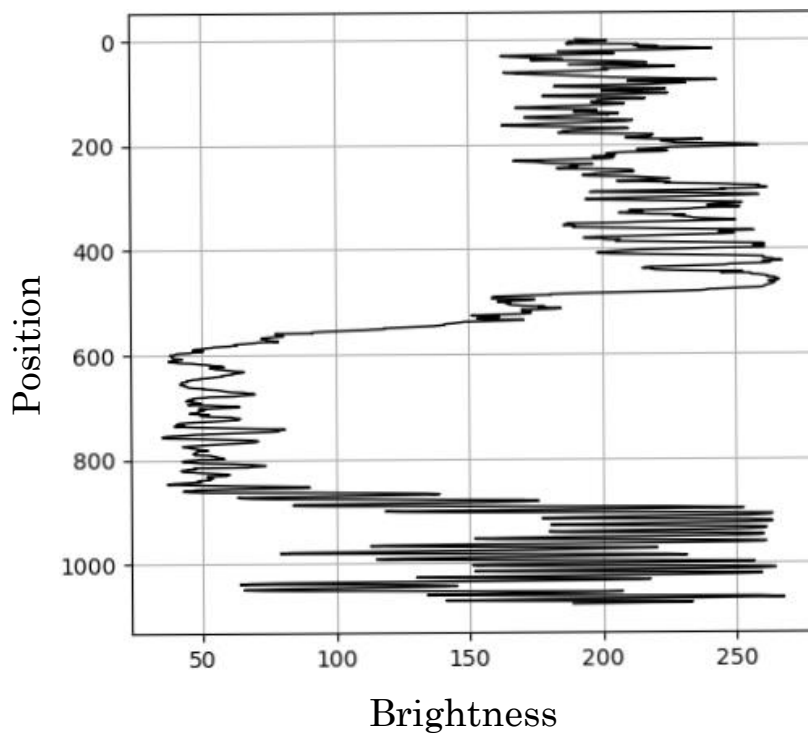
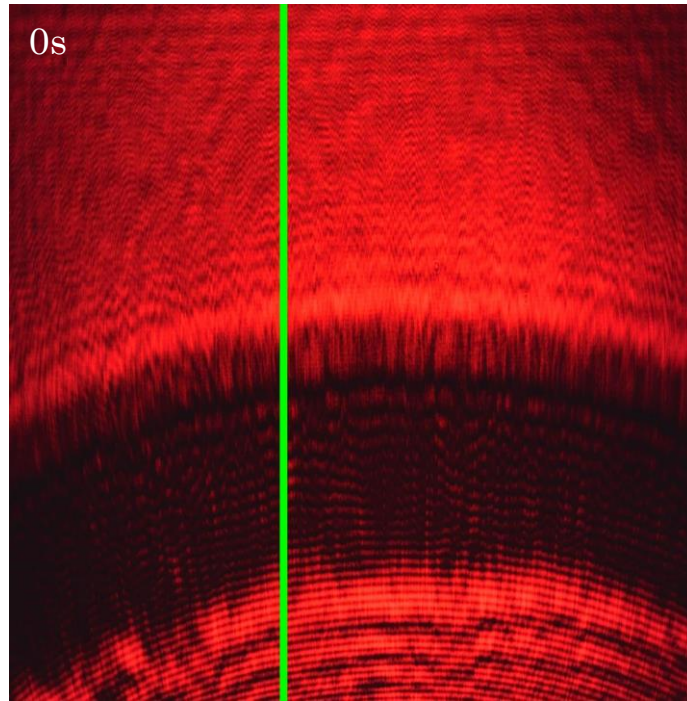


Fig. 4.15 0s のときの干渉縞



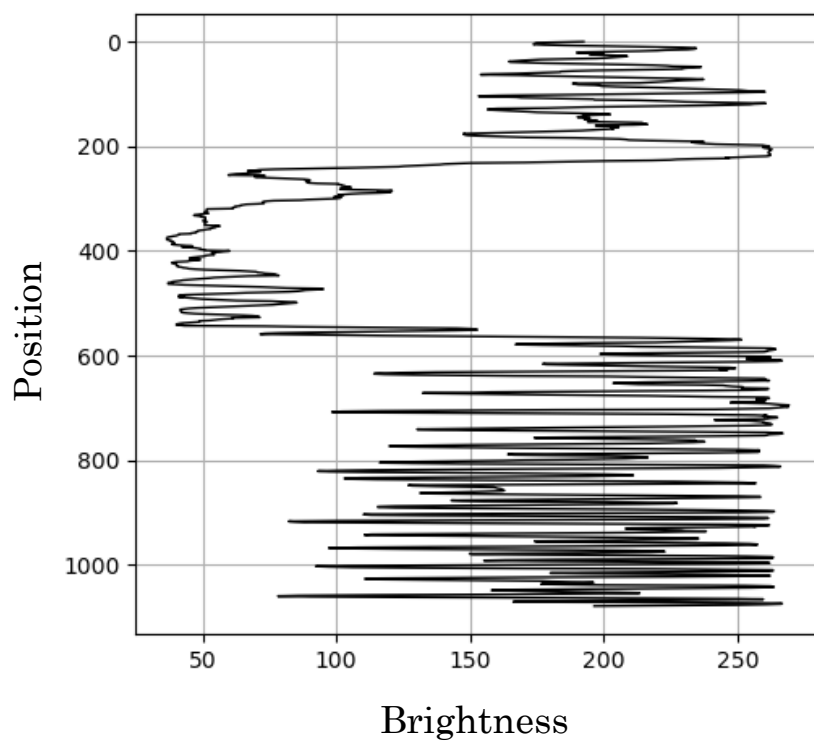
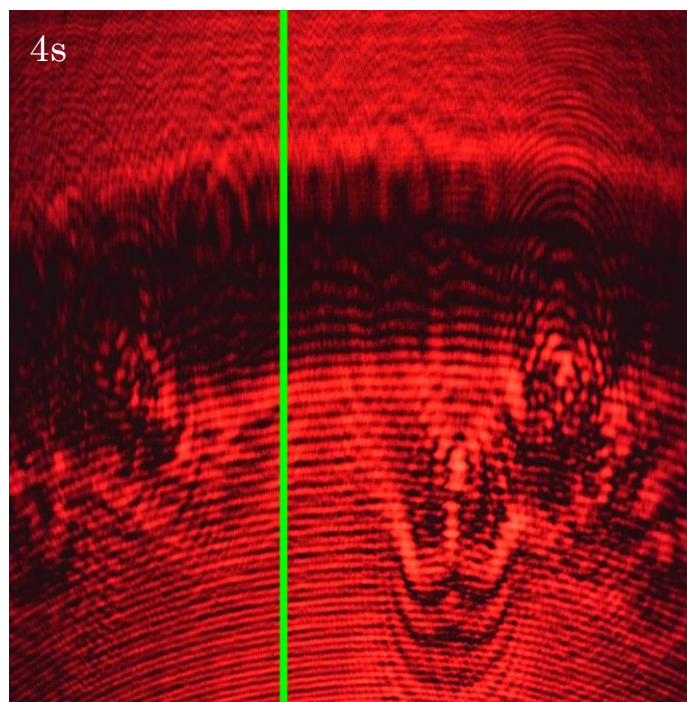


Fig. 4.16 4s のときの干渉縞

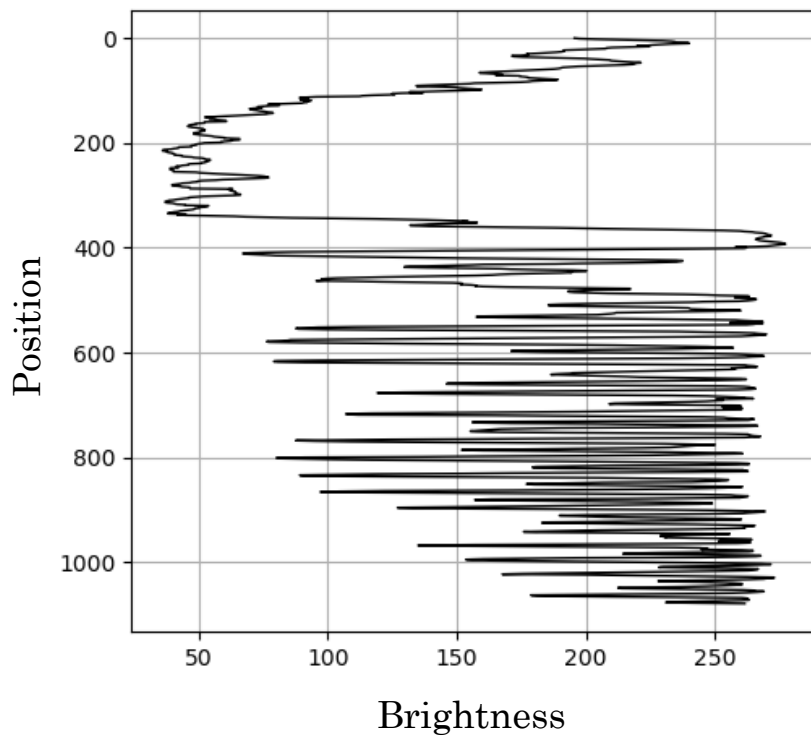
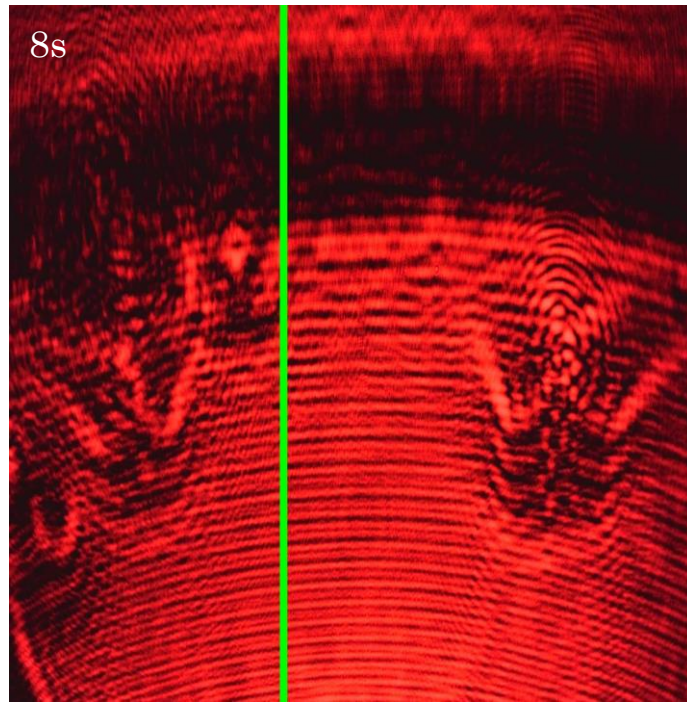


Fig. 4.17 8s のときの干渉縞

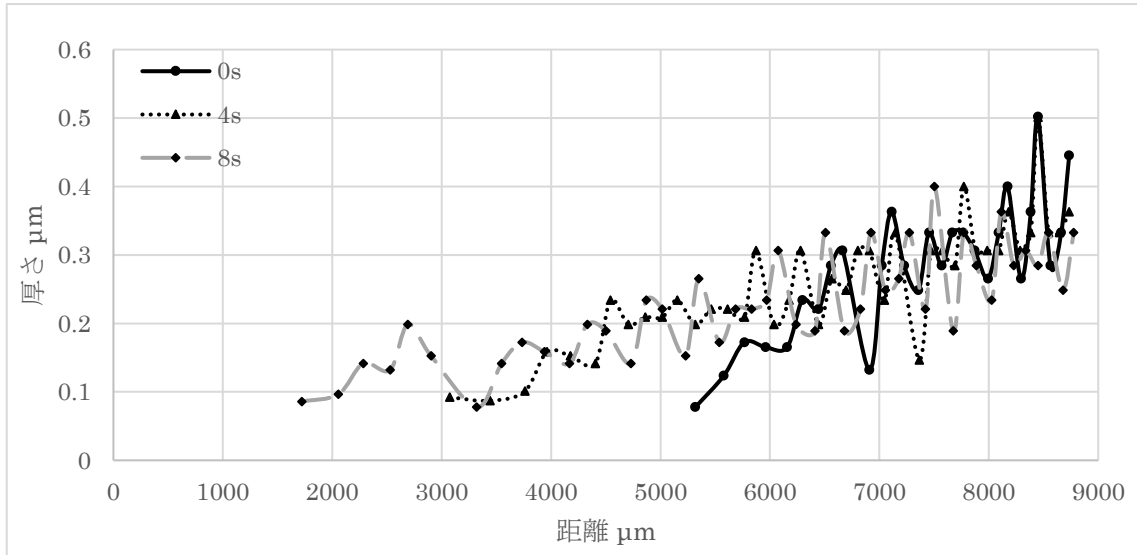


Fig. 4.18 気液界面の角度の分布

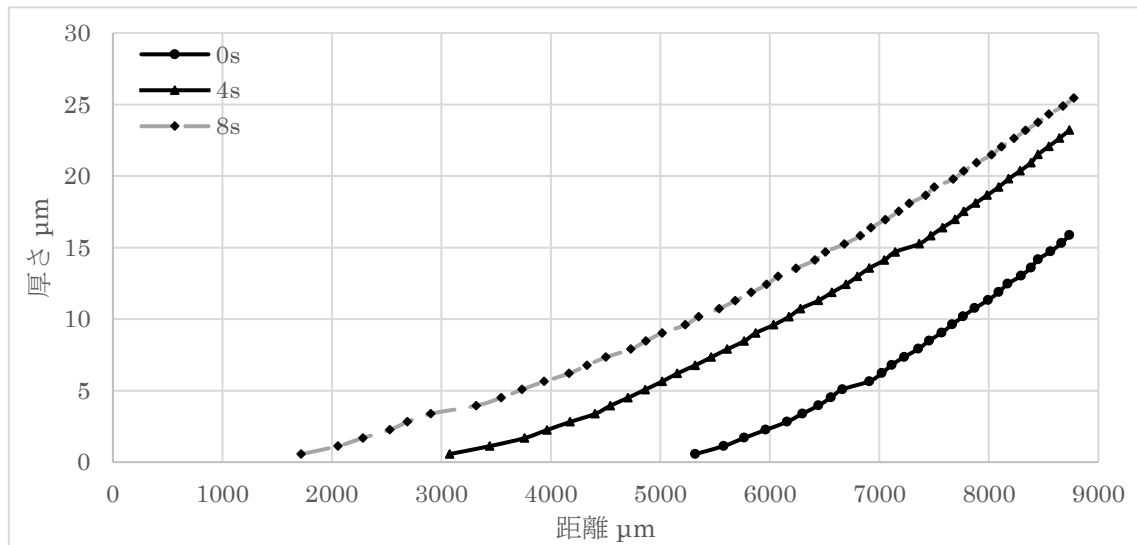


Fig. 4.19 接触線近傍の気液界面形状の時間変化

### 4.3 考察

実験は水液滴の静止状態の観察，エタノール液滴の静止状態の観察とエタノール液滴濡れ広がる過程の観察を行った．結果として水の場合，接触角度が大きすぎて気液界面の形状が観察できなかった．エタノールの場合は静止状態と動的濡れ広がる過程が観察できた．

実験装置は薄く広がる液滴の観察の場合に使えることが分かった．

一方，エタノールの観察実験結果が液膜の厚さ数  $\mu\text{m}$  から  $26\mu\text{m}$  まで観察はできた．また，材料表面の濡れ性評価に重要なマクロ的接触線近傍に濡れの良い系においては，極めて薄い先行膜が存在することがある．この膜は厚さが数  $\text{nm}$ ～数  $\mu\text{m}$  を有する非常に薄い[13]．本実験装置を用いれば，この先行膜の観察を行うことが可能と考えられる．

## 第 5 章 結論

I.斜め下からの照射レーザによる干渉縞法により気液界面の傾斜角を測定する装置を開発した.

II.エタノール液滴が動的に濡れ広がる挙動を観察できた.

III.エタノール液滴中心近くの観察結果：液膜の厚さは中心部ほど厚く，中心から離れると徐々に薄くなっている．変化の割合は中心に近づくほど緩やかになる．

IV.エタノールが濡れ広がる際の接触線付近の観察結果：時間が経過するにつれて，接触線が移動する様子を捉えることができた．0s と 4s を比較すると，気液界面が全体的に移動しているが，4s と 8s では，接触線近傍の移動量が大きい．一方，接触線から離れると，あまり移動量は小さいことが分かった．

## 参考文献

- [1] 福山 紅陽, “撥水性の評価法”, 表面技術, 60.1 (2009) 21-26.
- [2] 恩田 智彦, “フラクタル表面の超撥水・超親水現象”, 電学論 A, 116 卷 12 号, 平成 8 年 1041-1046.
- [3] Daisuke Ishii, Hiroshi Yabu and Masatsugu Shimomura, “Novel Biomimetic Surface Based on a Self-Organized Metal-Polymer Hybrid Structure”, Chem.Mater., Vol.21, No.9 (2009) 1799-1801.
- [4] 辻井 薫, “超撥水と超親水-その仕組みと応用- 初版”, 産業図書株式会社(2009).
- [5] 山崎 吉一, 香川 昌純, 仮屋 崎侃, 逢坂 昭治, “レーザー干渉縞による液膜の接触角と厚さの測定 (追補)”, 福岡大学工学集報, 第 83 号, 2011 年, 73.
- [6] 日本分光学会, 光学実験の基礎と改良のヒント 第 1 刷, 講談社(2009)
- [7] 光の干渉、回折 – RAVCO  
[http://www.ravco.jp/cat/view.php?cat\\_id=4815](http://www.ravco.jp/cat/view.php?cat_id=4815)
- [8] Akira Kariyasaki, Yoshikazu Yamasaki, Masazumi Kagawa, Tohru Nagashima, Akiharu Ousaka and Shigeharu Morooka, Measurement of Liquid Film Thickness by a Fringe Method, Heat Transfer Engineering, 30(1-2): 2009, 28-36.
- [9] ソーラボジヤパン HP/He-Ne レーザ : 赤  
[http://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1516](http://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1516)
- [10] F.J. Westlake, A. Cameron, “A Study of Ultra thin Lubricant Films Using an Optical Technique”, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers(Conference Proceedings 1964-1970), 182(37), (1967) 75-78.
- [11] Nikon HP/ ニコンイメージング | レンズ交換式アドバンスカメラ | Nikon 1 V3 - 概要  
<http://www.nikon-image.com/products/acil/lineup/v3/>
- [12] 左貝 潤一, 光学機器の基礎, 森北出版株式会社 (2013)
- [13] 上野 一郎, “固液気 3 相境界線近傍流体挙動の可視化”, 可視化情報, Vol.33 No.129, 2013.4, 8-13.
- [14] 平等 拓範, “レーザービーム品質測定の基礎”, レーザー研究, 第 26 巻第 10 号, 1998 年 10 月, 723-729.

## 謝辞

本論文を着手してから完成するまでに、御助言を頂いた田中健太郎准教授に厚く御礼申し上げます。また研究、論文の修正、発表に関してお忙しいにもかかわらず有益な御協力を頂きました。非常に感謝します。

岩本勝美教授と藤野俊和准教授には研究に関して様々な御助言、御指摘をして頂きました。深く感謝しております。

また、機械設計研究室の井上君と浅野君、その他の学生にも多くの協力を頂きました。感謝しています。ありがとうございました。



## 付録

### 写真から干渉縞を読み込むプログラム

本プログラムは干渉縞の写真から干渉縞の明るさを取り出して折れ線グラフを作る。折れ線グラフ中のピークは干渉縞である。二つピークの距離は隣の干渉縞の間隔である。プログラムの実行環境は Python 3.6 である。

```
import numpy as np
import cv2
import matplotlib.pyplot as plt

img_1 = cv2.imread('DSC_0891.JPG') #read figure

#Create a window on display
windowName = '01'
cv2.namedWindow(windowName,cv2.WINDOW_NORMAL)
cv2.imshow(windowName,img_1)

cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows("01")

data_id = 'DSC_0891.JPG'
data_path = "."
out_name = "sj_"
wfile = data_path+ out_name + data_id.replace(".JPG",".csv")

# Load an color image in RGB
img = cv2.imread(data_id)
# convert image to RGB color for matplotlib
#img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_RGB)

# adjust image size
adjHeight, adjWidth = img.shape[:2]
print('changed image size:(Height)',adjHeight,'(Width)', adjWidth)
```

```

# Read pixel values
w_posLine = adjWidth*2/5

posH = np.zeros(adjHeight)
brightness = np.zeros(adjHeight)
brightness_r = np.zeros(adjHeight)
brightness_g = np.zeros(adjHeight)
brightness_b = np.zeros(adjHeight)
for i in range(adjHeight):
    posH[i] = i
    brightness_r[i] = img[i,w_posLine,0]    #red
    brightness_g[i] = img[i,w_posLine,1]    #green
    brightness_b[i] = img[i,w_posLine,2]    #blue
    brightness[i] = np.sqrt(img[i,w_posLine,2]**2
+img[i,w_posLine,1]**2+img[i,w_posLine,0]**2)

#file output
fw = open(wfile, "w")
fw.writelines('posH,brightness ¥n')
#for i in range(nirg):
for i in range(adjHeight):
    x_char = repr(posH[i])
    y_char = repr(brightness[i])
    outline = x_char + ',' + y_char + '¥n'
    fw.writelines(outline)
fw.close()

plt.figure(figsize=(10,3))
ax1=plt
#ax1.plot(posH,brightness,'bo')
ax1.plot(posH,brightness_r,'r-', linewidth=1) #, label='Pressure analytical, linewidth=3'
ax1.plot(posH,brightness_g,'g-', linewidth=1)
ax1.plot(posH,brightness_b,'b-', linewidth=1)
ax1.title("Brightness")
ax1.grid(True)

```

```

plt.figure(figsize=(10,3))
ax1=plt
ax1.plot(posH,brightness,'k-', linewidth=1)
ax1.title("Brightness-b")
ax1.grid(True)

#Line
img = cv2.line(img,(int(w_posLine),0),(int(w_posLine),adjHeight),(0,255,0),20)

# new image size
magH = 1.751
magW = 1.
size = (int(adjHeight*magH), int(adjWidth*magW))
print('Magnified image size:(Height)',size[0],'(Width)',size[1])
# create new image
newImg = cv2.resize(img, size)

plt.figure(figsize=(12,5))
ax2=plt.subplot(1,2,1)
ax2.imshow(newImg)

ax3=plt.subplot(1,2,2)
ax3.plot(brightness,posH,'k-', linewidth=1) #, label='Pressure analytical, linewidth=3'
ax3.invert_yaxis()
ax3.set_title('Brightness')
ax3.set_xlabel('Brightness')
ax3.set_ylabel('PosH')
ax3.grid(True)

cv2.imwrite('new'+data_id, newImg)

```

## 間隔から傾斜角の計算を行うプログラム

2.3 節からの計算式(7)を利用して、干渉縞の間隔から気液界面の傾斜角の計算を行う。プログラム運行環境は Excel VBA である。

```
Sub a()
```

```
Dim f0, n, f, a, b, x0, x, z, i As Double
```

```
f0 = Cells(2, 3) #wavelength of light in air
```

```
n = Cells(3, 3) #liquid refractive index
```

```
f = f0 / n / 1000 #wavelength of light in liquid
```

```
Cells(4, 3) = f
```

```
a = (Cells(5, 3)) / 180 * 3.14159
```

```
x0 = Cells(7, 3) #fringe width
```

```
i = 3.14159 / 180 * 0.0001 #variation
```

```
b = 3.14159 / 180 * 0.0001 #initial value
```

```
Do While Abs(x - x0) > x0 / 1000 And b < 1.57
```

```
b = b + i
```

```
x = f * Sin(a - 2 * b) * (Tan(b) + Tan(a - 2 * b)) / ((1 - Cos(2 * a - 2 * b)) * Tan(b) * Tan(a - 2 * b))
```

```
Loop
```

```
Cells(6, 3) = b / 3.14159 * 180 #calculated angle
```

```
Cells(8, 3) = x #calculated fringe width
```

```
End Sub
```

## ビームエキスパンダ

ミラーによる反射やレンズによる屈折を用いてビーム光が平行状態になるよう光学調整を行うことをコリメートと言ひ、また、平行状態に調整されたビーム光をコリメート光と呼ぶ[6]。本研究ではレーザの照射範囲なるべく広い範囲を作り、コリメート光で、かつ、適切な径をもつレーザ光が必要であった。従って、ビーム径の拡大及びコリメート光を得るための装置であるビームエキスパンダを光学系に組み込んだ。

ビームエキスパンダは、コリメート光をコリメート光のままで一定の倍率に拡大するために設計されたレンズ系で、凹レンズと凸レンズの組み合わせと、凸レンズ同士の組み合わせが有る[6]。後者は入射光が反転する。Fig. 5.1, Fig. 5.2 において右側のレンズが同じならば、同じ変換倍率を得るとき前者はレンズ間距離を短くできる[6]。本光学系では、空間的制限により、凹レンズと凸レンズを組み合わせたビームエキスパンダを採用した。

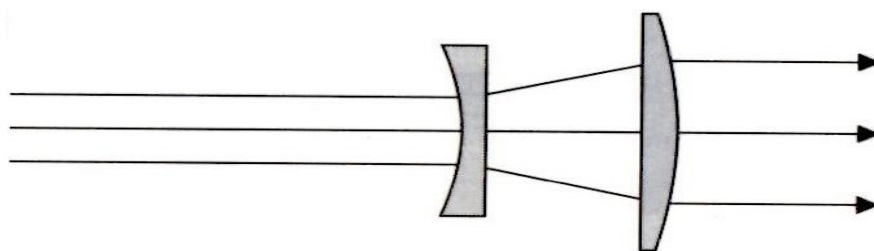


Fig. 5.1 凹レンズと凸レンズを組み合わせたビームエキスパンダ 出典[6]

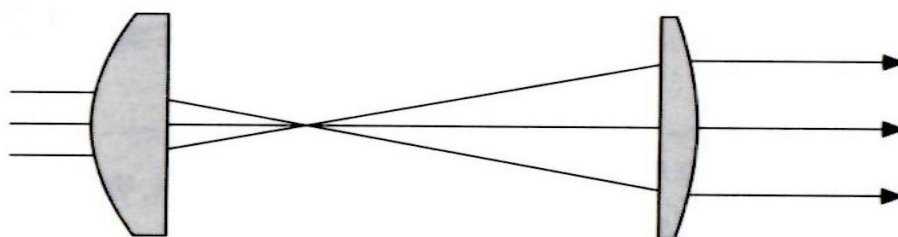


Fig. 5.2 2枚の凸レンズを組み合わせたビームエキスパンダ 出典[6]

次に本光学系のビームエキスパンダで使用するレンズの組み合わせを決める。本光学系で得たいレーザー光のビーム径は反射ミラーの直系である 25.4mm, また, レーザ光源から出力されるレーザー光径は一般的なビーム径の指標とされるピーク強度値から  $1/e^2$ (13.5%)に落ちたときの強度 ( $1/e^2$  Beam Diameter) [14]で 0.68mm である。従って,

$$\frac{25.4\text{mm}}{0.68\text{mm}} = 37.35 \text{ 倍}$$

の変換倍率をもつビームエキスパンダを構成すればよい。ビームエキスパンダの変換倍率, 全長を決めるには, 次の二つの式から求めることができる[6].

$$\text{全長} = f_1 + f_2$$

$$\text{変換倍率} = \frac{f_2}{f_1}$$

$f_1$  : 凹レンズの焦点距離

$f_2$  : 凸レンズの焦点距離

以上より, レンズの組み合わせは焦点距離-6mm の両凹レンズ, 焦点距離 200mm のアクロマティックレンズとした。すなわち,

$$\text{全長} = -6 + 200 = 194\text{mm}$$

$$\text{変換倍率} = \frac{200}{6} = 33.33\text{倍}$$

となり, 直径  $0.68 \times 33.33 = 22.66\text{mm}$  のレーザー光が対物レンズに入射することになる。