

平成 27 年度
卒業研究報告

研究題目

多重反射セルの

光学シミュレーション

指導教員

由井四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

富岡直矢

平成 28 年 2 月 24 日提出

目次

第1章 序論	2
1. はじめに.....	2
2. 光の吸収.....	3
2.1 ランバート・ビアの法則.....	3
第2章 多重反射セル	4
1. 概要.....	4
2. 種類.....	5
2.1 White 型多重反射セル.....	5
2.2 Herriott 型多重反射セル.....	6
2.3 円形型多重反射セル.....	6
第3章 理論	7
1. シミュレーションソフトの作成.....	7
1.1 概要.....	7
1.2 原理.....	8
1.3 ロドリグの回転公式.....	9
2. シリンドリカルミラー.....	10
3. 干渉.....	11
3.1 干渉ノイズ.....	11
4. 多重反射セルでのビーム波の伝搬[4].....	13
5. 光の出射条件 [5].....	14
第4章 シミュレーションとの比較実験	15
1. 手法.....	15
2. 凹面鏡を用いた実験.....	16
2.1. 使用機器.....	16
2.2. 実験内容.....	16
2.3. 実験結果.....	17
3. シリンドリカルミラーを用いた実験.....	20
3.1. 使用機器.....	20
3.2. 実験内容.....	20
第5章 干渉ノイズ実験	22
1. 使用機器.....	23
2. 実験内容.....	23
3. 実験結果.....	24

第6章 まとめ.....	25
謝辞.....	26
参考文献.....	26

第1章 序論

1. はじめに

ガスは種類によって特定の波長の光を吸収するという性質をもつ。その性質を利用して

ガスの種類判別や濃度測定を行う光吸収分光法がある。光吸収分光法には問題点があり、光がガスを透過する距離(光路長)が短いと、測定時に発生するノイズによって測定信号が読み取れなくなることがある。光路長を長くすることでレーザーとガスの相互作用長が増え信号がノイズレベルを上回り、信号を読み取ることができるが、直線的に光路長を長くしようとするとその分大型の装置が必要になる。そこで装置の大型化を抑えるために多重反射セルを用いる。多重反射セルとは複数枚の鏡を向い合せて設置しその間でレーザーを多重反射させる装置である。それを利用することで光路長の増大と装置大型化の抑制ができる。しかし、任意の光路長を得るためには鏡をどのように設置し、何回反射させるかを計算する必要がある。

本研究では、長い光路長を得るためには、反射回数が多く、干渉ノイズが少ない反射パターンを導出しなければならない。そこでシミュレーションソフトを作成し、多重反射セル内の光線追跡を行う。

2. 光の吸収

2.1 ランバート・ビアの法則

ランバート・ビアの法則は物質による光の吸収を定式化したものである。図 1 のように分子数密度 N の気体に単色光が入射したとし、入射光束を $I_0(\lambda)$ とし、透過光束を $I(\lambda)$ 、ガス中を伝搬する距離を L 、 $\sigma(\lambda)$ を吸収断面積とすると、透過率は次式で表される。

$$\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \exp(-\sigma(\lambda)NL) \quad (1.1)$$

式(1.1)からわかるように L が大きくなれば透過率は小さくなる。これは、光路長が長いと吸収信号が大きくなることを意味する。

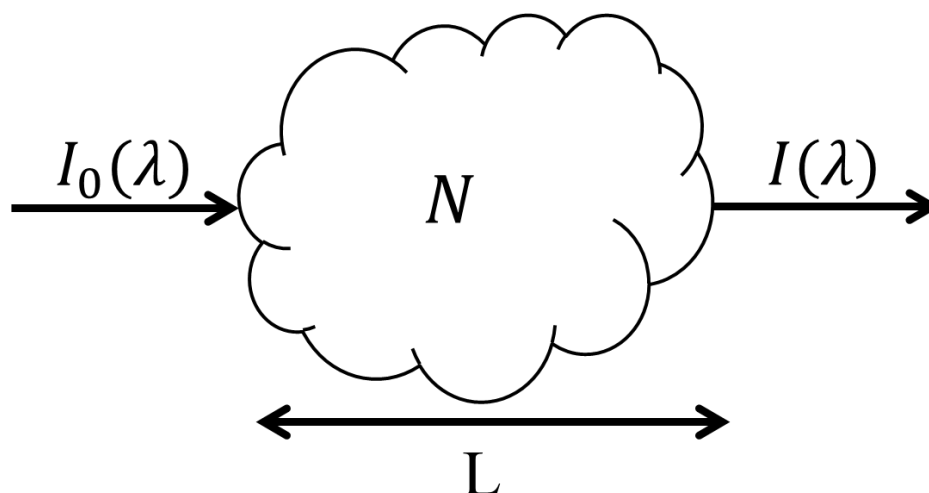


図 1 光の吸収

第 2 章 多重反射セル

ここでは本研究で使用した多重反射セルの概要および種類について説明する。本研究では設置が容易でかつ安定性が優れている Herriott 型多重反射セルを使用した。

1. 概要

多重反射セルとは水平面上に向い合せに設置させた複数枚の凹面鏡、または円形の鏡にレーザーを入射し、多重反射させることで実質的に光路長を長くすることができる装置で

ある。この多重反射セルはセル内の気体を高感度で検知するために用いられることが多い。

2. 種類

2.1 White 型多重反射セル

図2のように配置された多重反射セルを White 型多重反射セルという。White 型多重反射セルは 1942 年にジョン U・ホワイトによって提案された。[1]このセルは、同じ曲率半径を有する 3 枚の凹面鏡を用いて構成されている。凹面鏡 A と凹面鏡 B の角度を調整することで 反射回数を細かく調整することができ、光路長を変えることができる。しかし、実験機器の振動などによる安定性は Herriott 型多重反射セルと比べて劣っている。

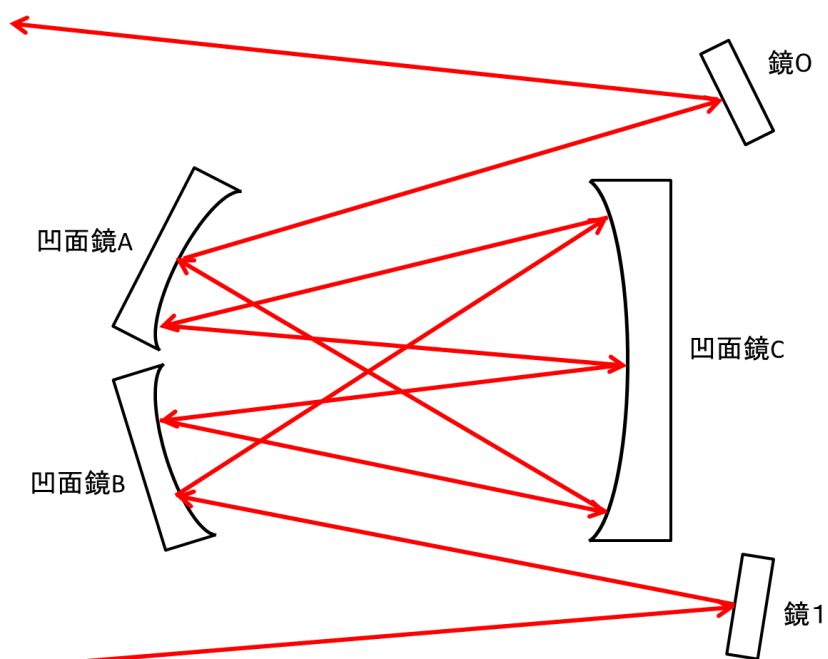


図 2 White 型多重反射セル

2.2 Herriott 型多重反射セル

図3のように配置された多重反射セルを Herriott 型多重反射セルという。Herriott 型多重反射セルは1965年にドナルド・R・ヘリオットとハリーJ.シュルテが発表した。[2]このセルは同じ曲率半径を有する2枚の凹面鏡を用いて構成されている。片方のミラーに入射するための穴があげられている。反射回数は White 型多重反射セルとは異なり、2つの凹面鏡間の距離で調整することができる。ミラー間の距離は容易に調整することができるが、反射回数はミラー間の距離に依存する。実験機器の振動による安定性は White 型多重反射セルよりも優れている。

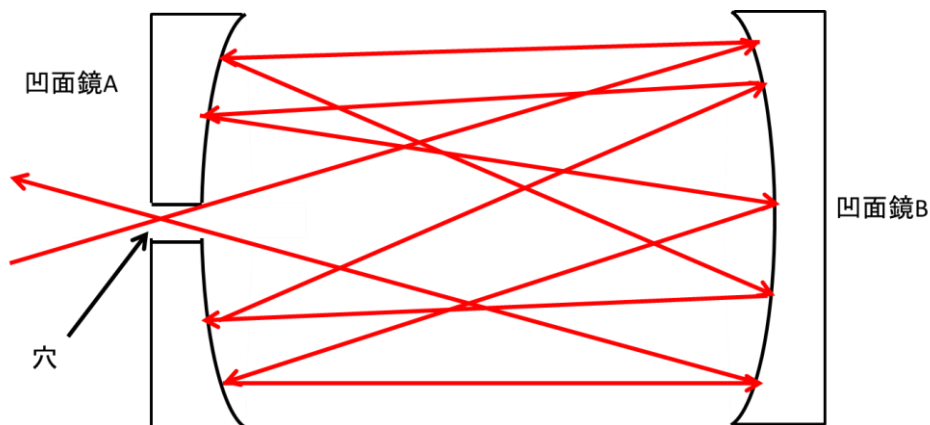


図3 Herriott 型多重反射セル

2.3 円形型多重反射セル

図4のような多重反射セルを円形型多重反射セルという。円形型多重反射セルは1994年にトーマとその共同研究者によって開発された。[3]反射回数はビームの入射角を調整する

ことで変化させることができる。このセルも実験機器の振動に対する安定性が優れている。

しかし、円形で内側に反射面があるという、特殊な鏡を使用しなければならない。

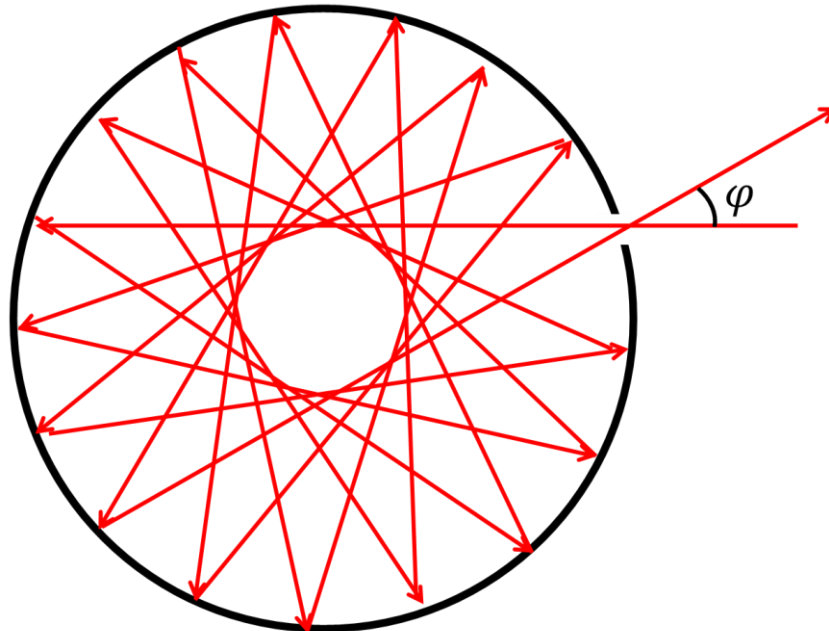


図 4 円形型多重反射セル

第 3 章 理論

1. シミュレーションソフトの作成

1.1 概要

本研究のシミュレーションは凹面ミラーまたはシリンドリカルミラーを用いた Herriott 型多重反射セルを想定し、光線追跡を行い、ミラーの反射点を導出する。光を入射させる側のミラーを前面ミラー、光を当てる側のミラーを後面ミラーと呼ぶこととする。開発環境は LabVIEW2010 と Scilab を用いた。図 5 に多重反射セルの座標系を示す。

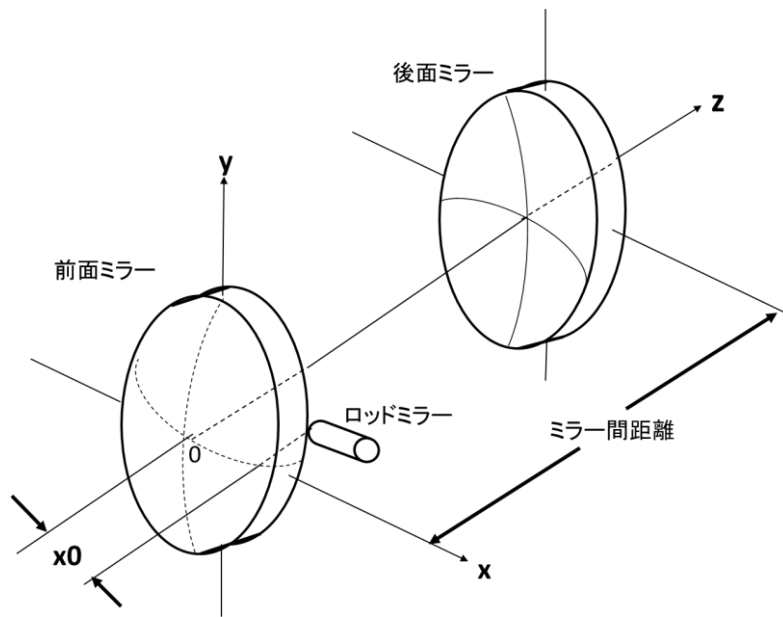


図 5 多重反射セルの座標系

1.2 原理

凹面鏡は球状の鏡の一部で、次の式のように表すことができる。

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (3.1)$$

ここで R は凹面ミラーの曲率半径である。

光線の始点の座標を (x_0, y_0, z_0) 、光線の終点の座標 (x_1, y_1, z_1) とすると片方のミラーからもう他方のミラーに向かう直線の方程式は媒介変数 t を用いて表すと以下の式で表すことができる。

$$x = x_0 + x_b \times t \quad (3.2)$$

$$y = y_0 + y_b \times t \quad (3.3)$$

$$z = z_0 + z_b \times t \quad (3.4)$$

ここで (x_b, y_b, z_b) は方向ベクトルである。

式(3.2),(3.3),(3.4) を式(3.1)に代入することで、ミラーと光線の交点を求めることができ、反射点を求めることができる。

方向（入射）ベクトル、反射点、曲率半径を定めることで反射ベクトルを求めることができる。反射点から凹面鏡を一部とした球の中心に向かうベクトルを軸に、入射ベクトルを 180°回転させることで反射ベクトルを求めることができる。ベクトルの回転にはロドリグの回転公式を用いる。反射点、反射ベクトルの導出を繰り返すことで光線追跡ができる。

1.3 ロドリグの回転公式

図6にベクトルの有限回転の概略図を示す。入射ベクトルを \vec{r} ,反射ベクトルを \vec{rr} とすると、図6より \vec{rr} は以下のように示すことができる。ここで、 $\Phi = 180^\circ$ とする。

$$\vec{rr} = \vec{ON} + \vec{NV} + \vec{VQ} \quad (3.5)$$

ここで右辺の各項について

第1項

$$\vec{ON} = \vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{r}) \quad (3.6)$$

第2項

$$\vec{NV} = \vec{NP} \times \cos \Phi = \vec{NP} \times \cos 180^\circ = -\vec{NP}$$

$$\vec{NP} = \vec{OP} - \vec{ON} = (\vec{r} - \vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{r}))$$

$$\vec{NV} = (\vec{r} - \vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{r})) \quad (3.7)$$

第3項

$$\overrightarrow{VQ} = -(\vec{r} \times \vec{n}) \times \sin\Phi = -(\vec{r} \times \vec{n}) \times \sin 180^\circ = 0$$

(3.8)

式(3.5)に式(3.6)、式(3.7)、式(3.8)を代入する

すると以下の式を得ることができる。

$$\vec{r}\vec{r} = \vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{r}) + (\vec{r} - \vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{r})) \quad (3.9)$$

式(3.9)より入射ベクトルから反射ベクトルを求めることができる。

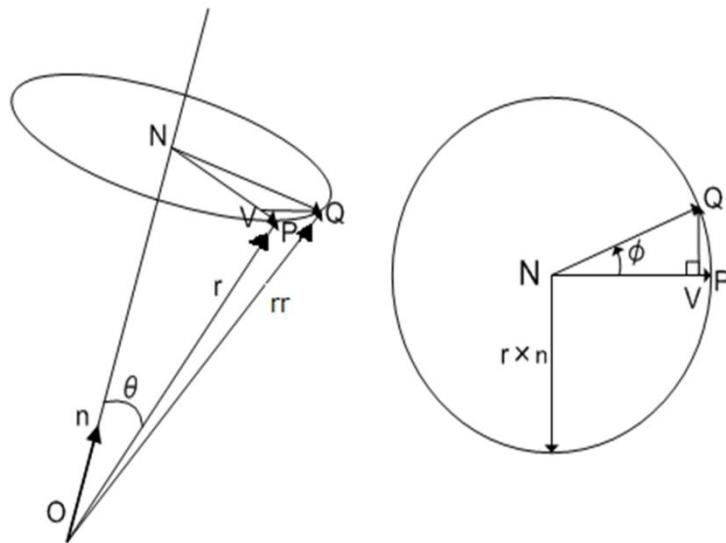


図 6 ベクトルの有限回転

2. シリンドリカルミラー

シリンドリカルミラーは反射面が楕円形の鏡である。この鏡を用いることにより反射

パターンが不規則になるのではないかと考える。さらに x 軸と y 軸で曲率半径が異なるため鏡の回転角度によっても反射パターンが変わるため、後面ミラーは z 軸を中心に回転できるものとする。図7にシリンダリカルミラーを用いた多重反射セルでの座標系を示す。

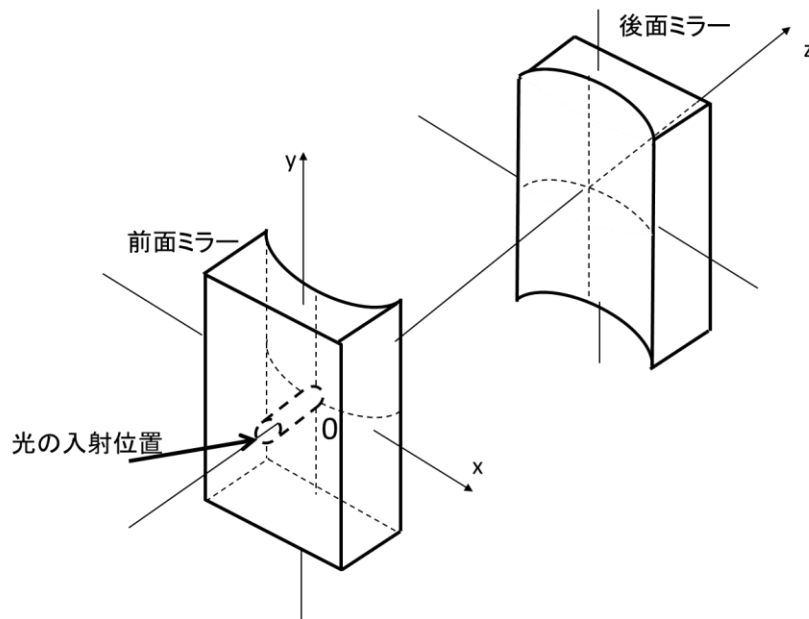


図 7 シリンダリカルミラー多重反射セルの座標系

3. 干渉

多重反射セル内において、反射点が密であった場合、反射点どうしで干渉が起こり、ノイズが発生するのではないかと考えた。

3.1 干渉ノイズ

光には波動性と粒子性が備わっており、干渉とは光の波動性による現象である。同じ波

長をもつ波の位相のずれによって振幅に影響を与える。同位相の場合、山と山、谷と谷が重なりあって振幅が2倍になる。逆位相の場合、山と谷が重なり合い弱めあう。図8はその様子を示している。干渉ノイズとはこのように光が干渉しあうことで発生する。一般的に干渉ノイズは一定の周期をもっていることが知られている。光線を窓板に通すと干渉ノイズが発生する。実際にレーザーと光検出器の間に窓板を設置する場合と設置しない場合で実験を行った。図9に測定結果を示す。波長の変化に伴い高強度が大きく変動していることがわかる。

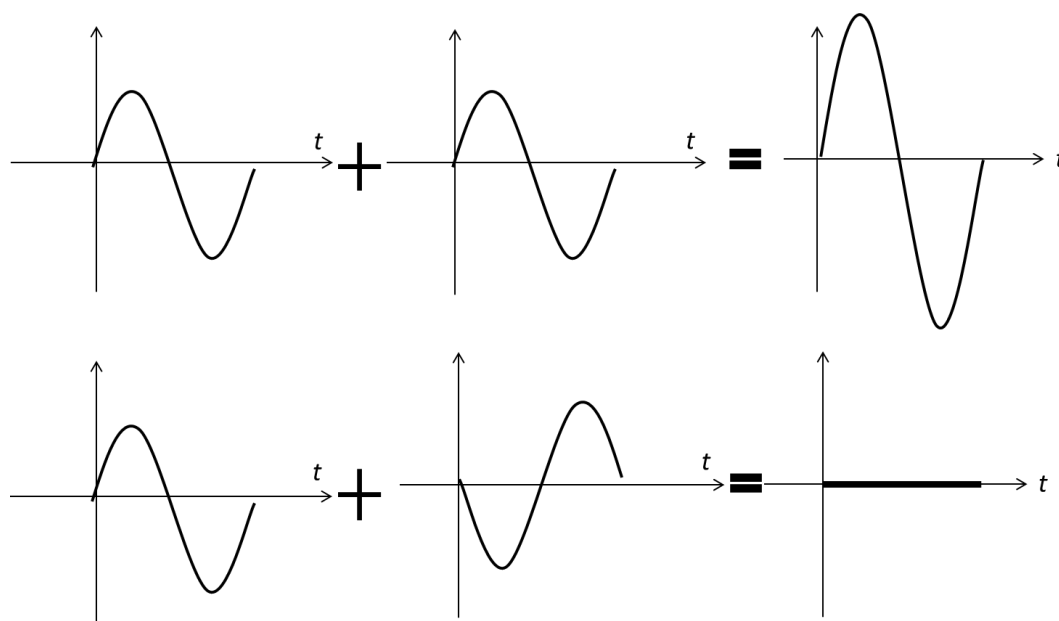


図8 光の干渉の例

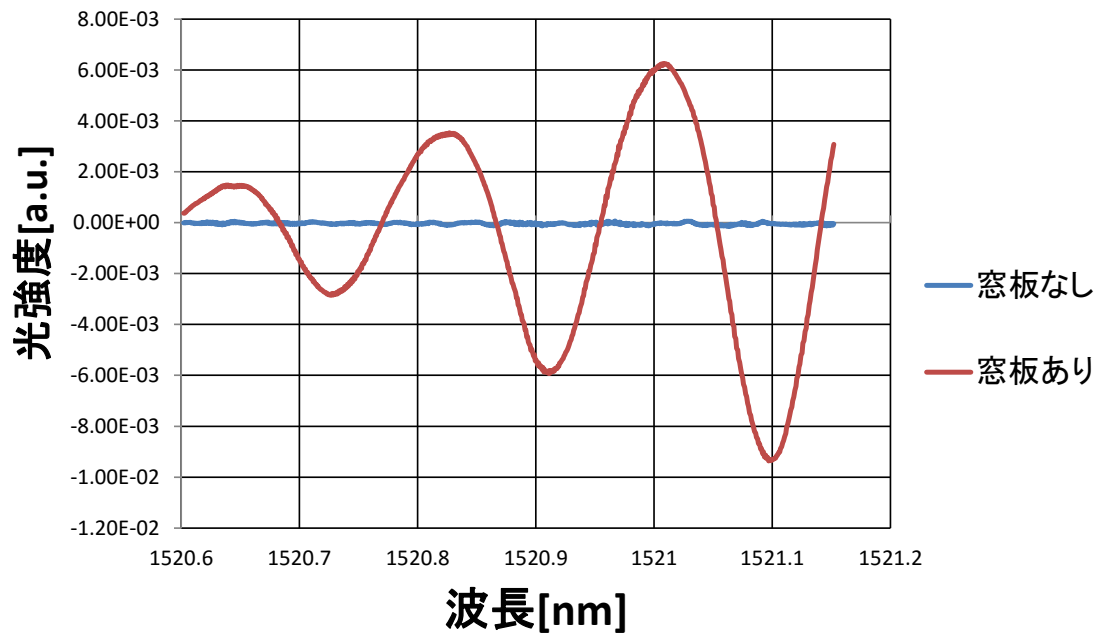
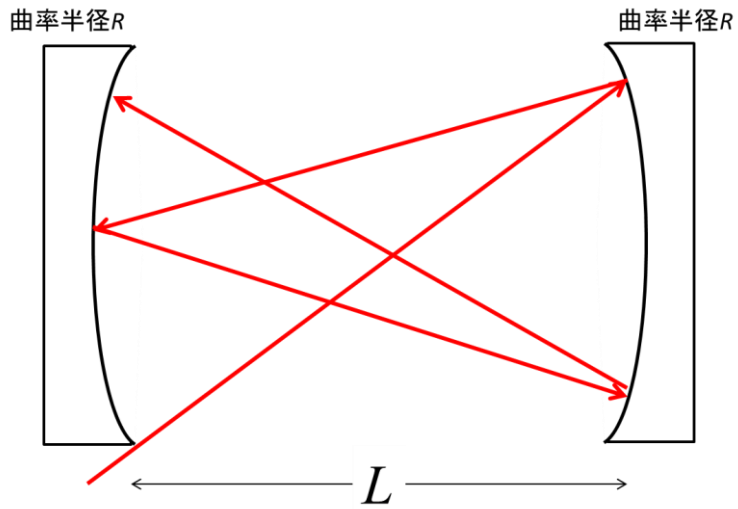


図 9 干渉ノイズがある例

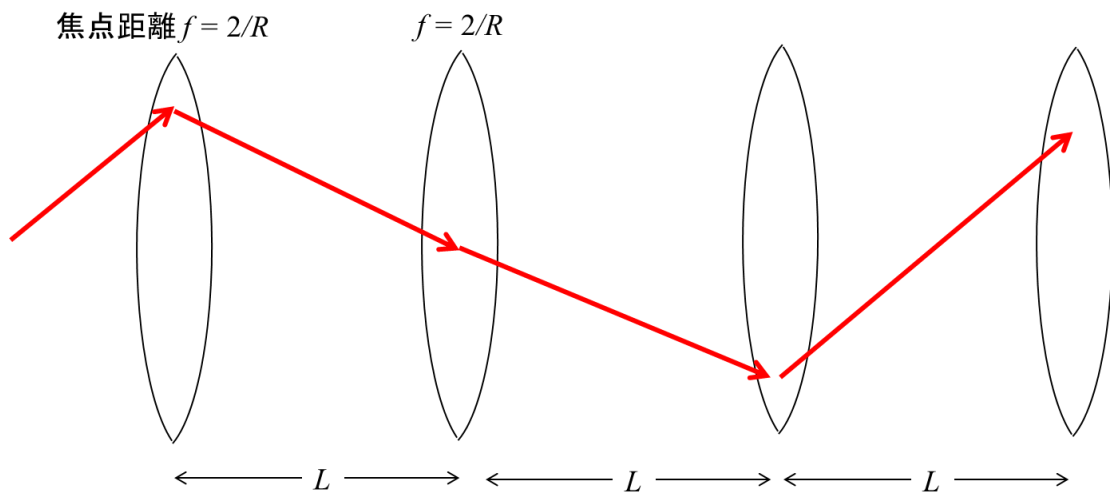
4. 多重反射セルでのビーム波の伝搬[4]

曲率半径 R で間隔 d で配置されている球面ミラー中を往復するビームの伝搬は焦点距離 f の薄肉レンズが間隔 d ずつ隔てて並んでいるところを通るビームの伝搬と同等である。[1]

球面ミラーの中を光が多重反射して進むこととレンズを無限に並べたレンズ系を光線が通過することと等価である様子を図 10 に示す。



(a)



(b)

図 10 薄肉レンズを無限に並べた時と等価な例

5. 光の出射条件 [5]

Herriott 型多重反射セルでは同じ曲率半径の 2 枚の凹面鏡を用いた場合、ミラー間距離によって反射回数が定まる。その関係式を式(3.10)に示す。ここで d はミラー間距離、 R は曲率半径、 M は任意の自然数、 N は反射回数である。反射回数とは前面ミラーと後面ミラ

一の反射点を合わせた数のことで、必ず偶数である。図 11 に式(3.10)を用いて反射回数とミラー間距離の関係を示す。

$$d = R \left\{ 1 - \cos \left(2\pi \frac{M}{N} \right) \right\} \quad (3.10)$$

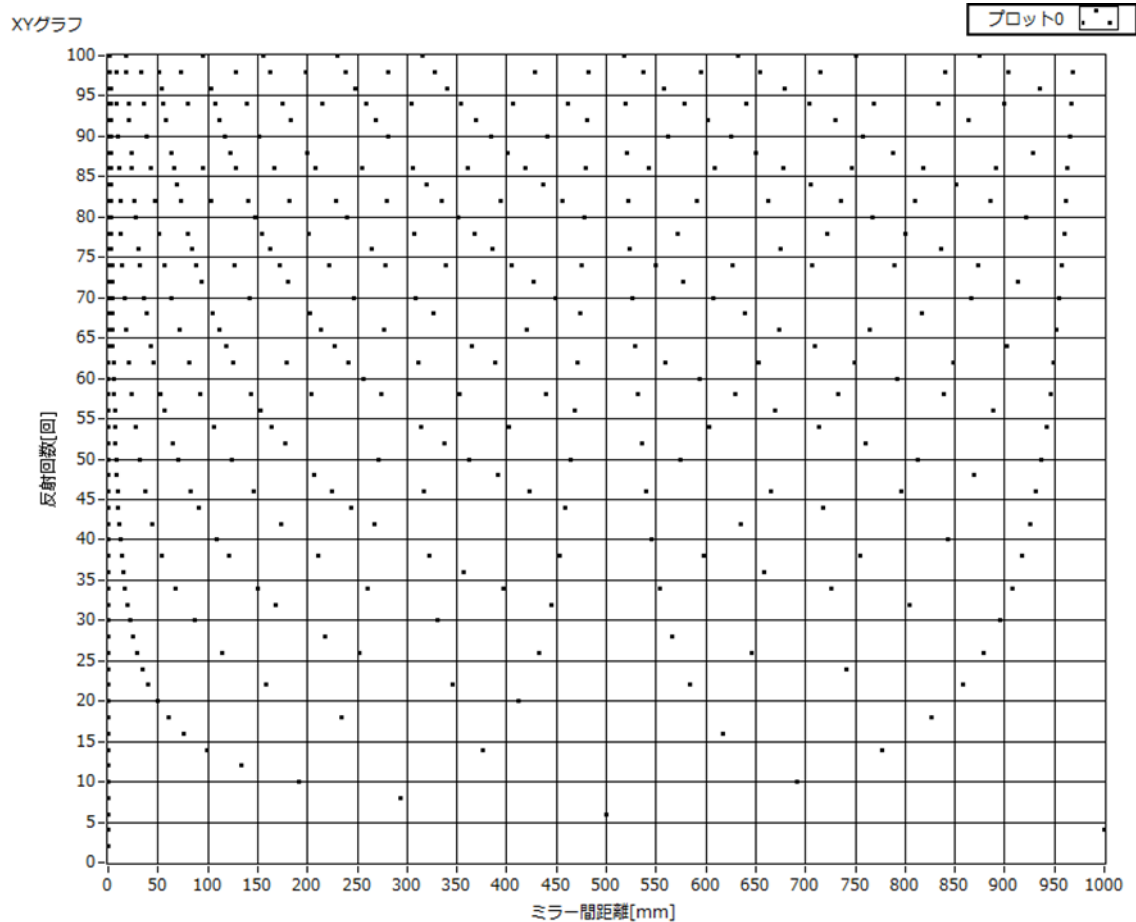


図 11 ミラー間距離と反射回数の関係

第 4 章 シミュレーションと実験の比較

1. 手法

シミュレーションで計算した反射点の検証を行うため、シミュレーションと同じ条件で

実験装置を構成する。最初に、作成したシミュレーションソフトで適当な初期条件を与え、同じ条件で実験を行い、結果が同じであるか確認する。今回の実験では光源に DPSS レーザーを用い、凹面鏡、シリンドリカルミラーは誘電体多層膜が施されている。鏡の反射点を目視で確認し、シミュレーションでの反射点と比較検討を行う。シリンドリカルミラーを用いた多重反射セルでも同様の実験を行う。

2. 凹面鏡を用いた実験

2.1. 使用機器

表 1 に凹面鏡での実験での使用機器を示す。

表 1 使用機器

名称	型番	仕様	メーカー	個数
凹面鏡	CM750-500-E02	φ 75mm 400-750nm Radius of curvature 1000mm E02 Dielectric	THORLABS	2
DPSSレーザー	JPS-1-3(A4)APC	Wavelength 523nm Output Power 0.6mW Beam divergence 1.15mrad Beam diameter 3.5mm	秋月電子	1
ロッドミラー	TS45° ロッドミラー2MM	2mm	Edmund optics	1

2.2. 実験内容

図 12 に実験構成図を示す。光源として波長が 523nm の DPSS レーザーを使用し、ロッドミラーを用いて多重反射セル内に光線を入射させる。入射した光線が再びロッドミラー

に反射しセル内から出射した反射パターンを実験結果として採用する。その時の反射点をカメラを用いて撮影する。対面する凹面鏡は互いに平行に設置されているものとする。

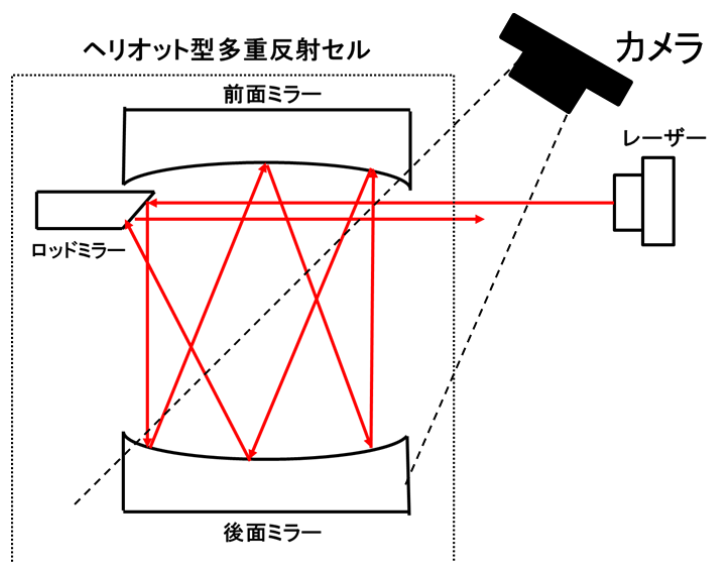


図 12 実験構成図

2.3. 実験結果

実験パラメータを、入射光の位置座標(0,30)、曲率半径 1000mm、ミラー間距離は 952.4mm、鏡の直径は 75mm として、シミュレーションと実験を行った。シミュレーションの結果を図 13,図 14 に示す。このシミュレーション結果はロッドミラーから入射し、再びロッドミラーから出射したものを採用している。黒い点は反射点の中心で、赤い点は半径 1mm のビームが入射した場合の輪郭、青い線は凹面鏡の枠を示している。実験結果を図 15 に示す。鏡に映った反射点をカメラで撮影し、反射点のみを抽出した。反射点の数はシミュレーションと実験のどちらも 66 回であることと、円形に分布していることからシミュレーション

結果と実験結果は同様であることがわかる。

式(3.10)に今回の結果を当てはめた。

$$d = 1000 \left\{ 1 - \cos \left(2\pi \frac{M}{66} \right) \right\} \quad (4.1)$$

Mは任意の自然数であるため、反射回数が66回であるミラー間距離が複数あるということ

になる。ここでM=16であるとき

$$d = 1000 \left\{ 1 - \cos \left(2\pi \frac{16}{66} \right) \right\} \quad (4.2)$$

$$d = 1000 \{ 1 - 0.04758 \}$$

$$d = 1000 \times 0.9524$$

$$d = 952.4180 \cong 952.4$$

今回の実験でのミラー間距離と一致していることから、出射条件を満たしていることがわかる。

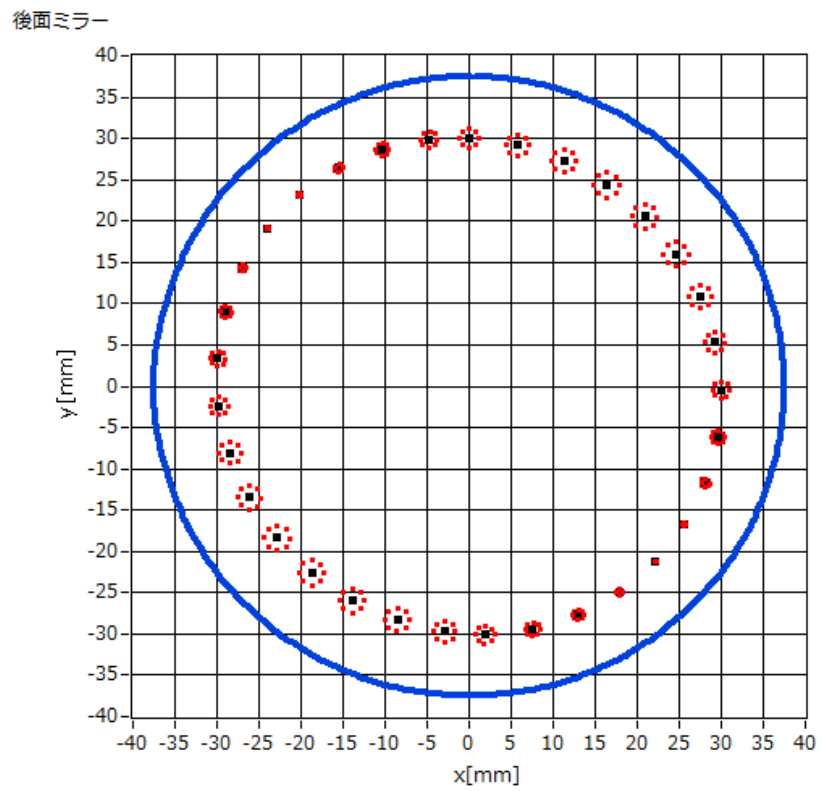


図 13 シミュレーション結果

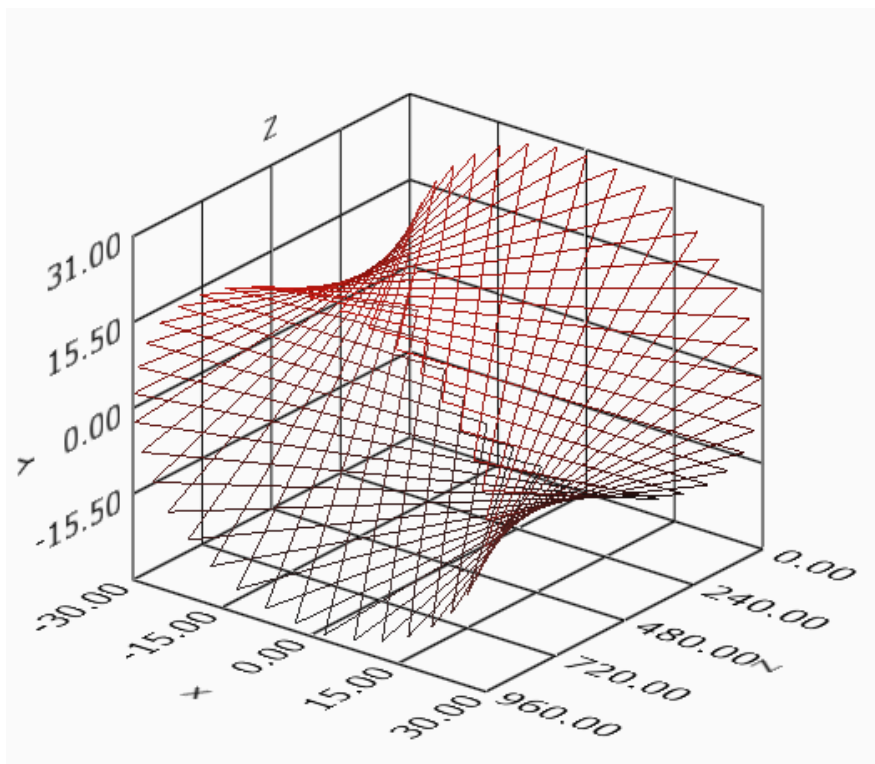


図 14 セル内での光線の様子

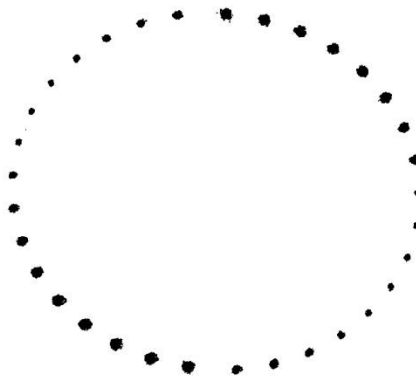


図 15 凹面ミラー多重反射セルの実験結果

3. シリンドリカルミラーを用いた実験

3.1. 使用機器

今回の実験で使用した機器を表 2 に示す。

表 2 使用機器

シリンドリカルミラー	SCC-50.8-254.3-C	N-BK7 Dielectric 500~650nm square 50.8mm Radius of curvature 254.3mm	Laser Optics	2
------------	------------------	---	--------------	---

3.2. 実験内容

実験構成図を図 16 に示す。シリンドリカルミラーA の中心にある、直径 2mm の穴からレーザーを入射させる。反射点の確認方法は凹面鏡を用いた実験と同じ方法である。レーザーとカメラは凹面鏡での実験と同じものを使用した。

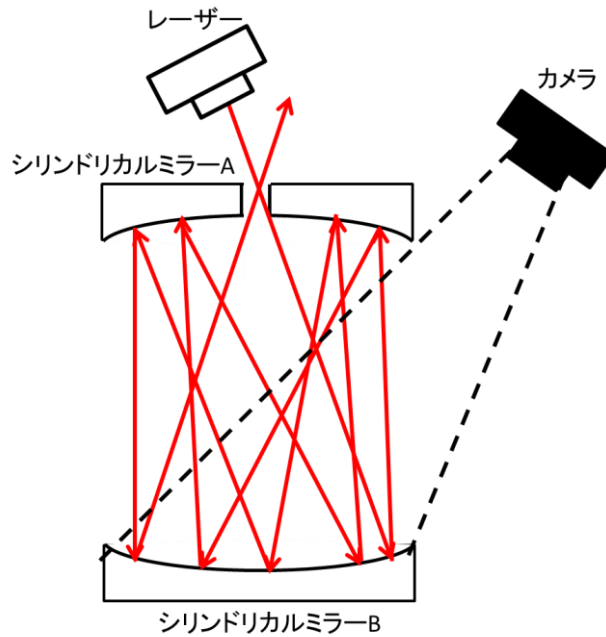


図 16 実験構成図

3.3. 実験結果

実験パラメータは、入射位置の座標(5,-4)、x 軸方向の曲率半径は 254.3mm、シリンダリカルミラーB の回転角度 16°、ミラー間距離 299mm、としてシミュレーションと実験を行った。シミュレーション結果を図 17 に示す。実験結果を図 18 に示す。反射パターンが同様であることがわかる。反射パターンが同様であるということは、光線追跡を行うことができていていると思われる。反射回数はシミュレーション結果の方が多いことから、光線の出射させる条件について改良が必要であると分かった。

後面ミラー

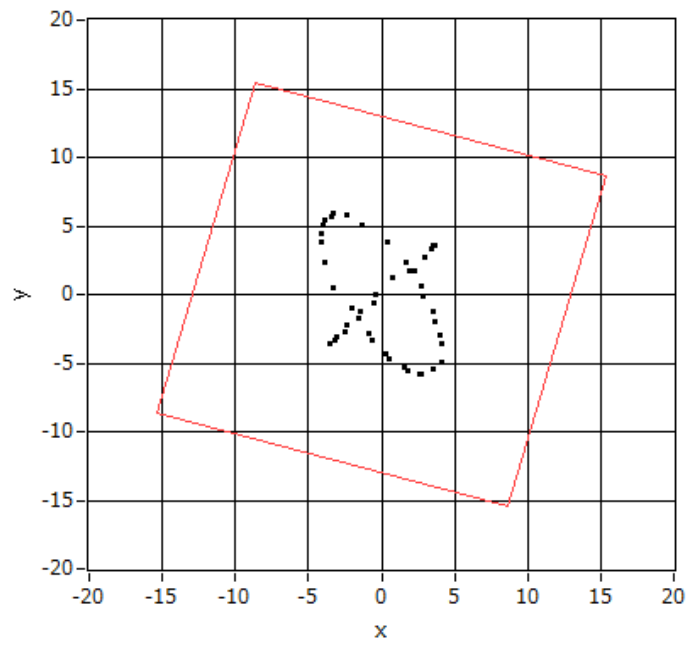


図 17 シミュレーション結果

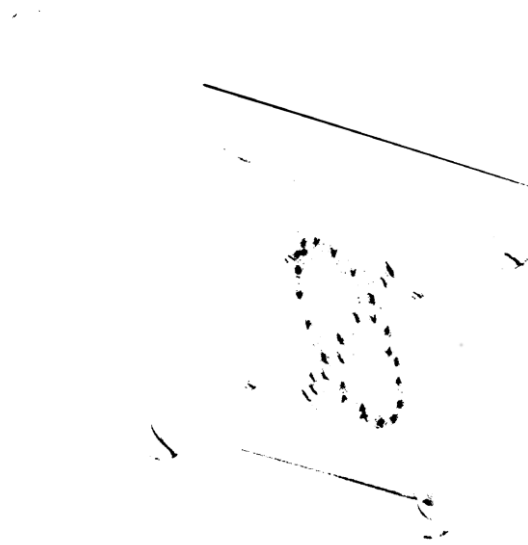


図 18 実験結果

第 5 章 干渉ノイズ実験

ここでは多重反射セル内でおこる可能性がある干渉ノイズについて実験を行い確認する。

1. 使用機器

この実験で使用した機器を表3に示す。

表3 使用機器

名称	型番	仕様	メーカー	個数
凹面鏡	CM508-150-E-4	φ50.8mm Wavelength 1280-1600nm Radius of curvature 300mm E04 Dielectric	THORLABS	2
レーザー	NLK1S5GAAA	Wavelength 1520nm Output Power 32.9mW Beam diameter 1.2mm	NTTエレクトロニクス	1
LDドライバー	LDC2002C	Range 0~200mA 20mA/V DC to 250kHz	THORLABS	1
フォトダイオード	PDA20CS-EC	InGaAs Wavelength 800~1700nm Active area φ2.0mm Amplifier GBP 60MHz	THORLABS	1
ファンクション・ジェネレータ	AFG3102	amplitude 20mV _{p-p} ~ 10V _{p-p} 1mHz~50MHz optical resolution 0.1mV _{p-p}	テクトロニクス	1
オシロスコープ	MSO6034A	Bandwidth 300MHz	Agilent Technologies	1

2. 実験内容

多重反射セル内で干渉ノイズが起こっているのかどうか実験を行った。実験構成図を図19に示す。干渉が起こると波長によって光強度が大きく変動すると考えられるため、レーザーにランプ信号を送り、波長を変化させながら測定を行った。レーザー光はロッドミラーを使用して、セル内に入射し、再びロッドミラーから出射したレーザー光を光検出器で測定し、オシロスコープで表示した。多重反射セル内で干渉ノイズが起こっているのか確認するため、多重反射セルを使用しなかった場合でも測定し、反射回数は4回、102回、134回で測定した。レーザーの温度と電流はコントローラによって安定化されている。

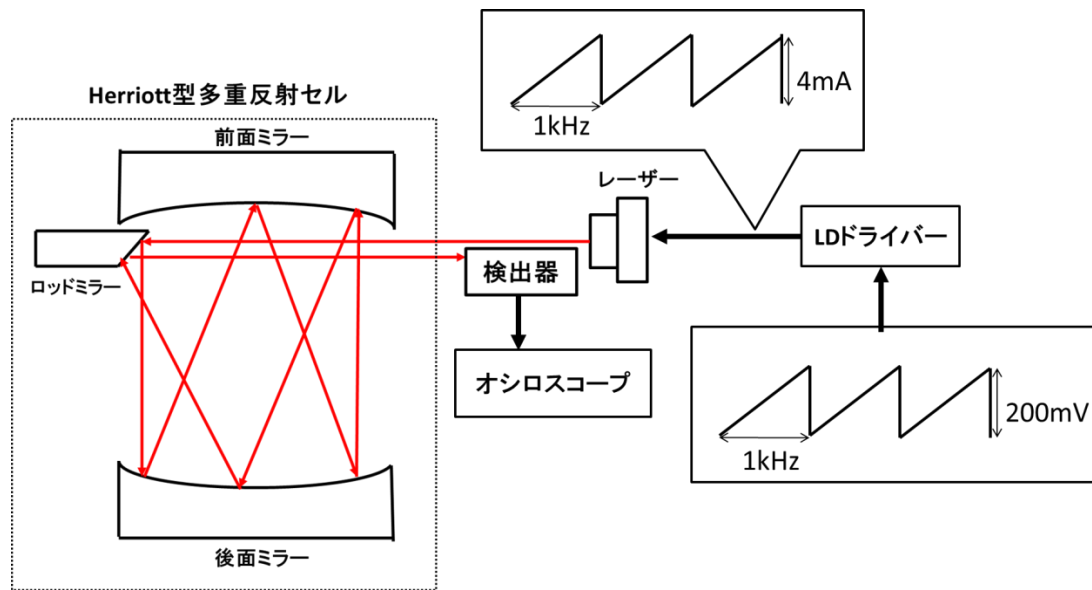


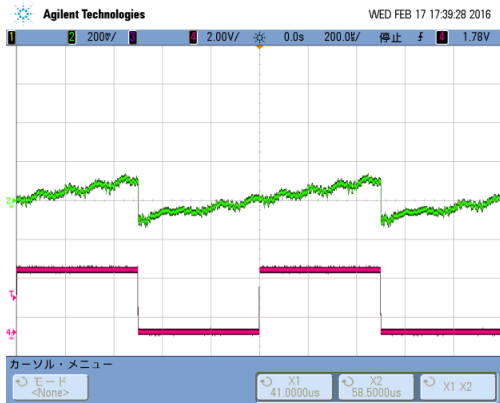
図 19 実験構成図

3. 実験結果

実験結果を図 20 に示す。この結果から、反射回数が多い場合一定周期のノイズが発生していることがわかる。図 20 の(a)を見ると、ノイズが発生していないことから、(c),(d)のノイズは多重反射セル内で発生していることがわかる。さらに、(b)にもノイズが発生していないことから、反射回数が多い場合にのみ、ノイズが発生するものと考えられる。



(a)多重反射セルなし



(b)反射回数 4 回



(c) 反射回数 102 回

(d) 反射回数 134 回

第 6 章 まとめ

Herriott 型多重反射セルおよび、シリンドリカルミラーを用いた多重反射セルにおいて光線追跡を行い、反射点を計算するシミュレーションソフトウェアを作成した。Herriott 型多重反射セルの場合でシミュレーションと同じ条件で実験を行った結果、反射回数は同様に、反射パターンが類似した結果を得られることができた。シリンドリカルミラーでの多重反射セルの場合でのシミュレーションと実験結果は反射パターンのみ類似している結果となった。多重反射セルにおいて反射回数を増加させた場合で実験を行い、多重反射セル内で干渉ノイズが発生しているのかを検証した。多重反射セル内かつ反射回数が多い場合のみ干渉ノイズが発生していることを確認した。

謝辞

本研究を行うにあたり、常に適切なご指導をしてくださいました富山高等専門学校電子情報工学科の由井四海准教授及び、実習工場の技官の方々、専攻科の方々に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] White, John (1942). "[Long Optical Paths of Large Aperture](#)". *Journal of the Optical Society of America* **32** (5): 285
- [2] Herriott, Donald; Schulte, Harry (1965). "[Folded Optical Delay Lines](#)". *Applied Optics* **4** (8):
- [3]Thoma (1994). "A multiple-reflection cell suited for absorption measurements in shock tubes". *Shock Waves* **4**: 51.
- [4]G.Durry , T.Danguy , I.Pouchet : “Open multipass absorption cell for in situ monitoring of stratospheric trace gas with laser diodes” , *Applied Optics* ,41,424-433-2002
- [5]Amnon Yariv (1997). *Optical Electronics in Modern Communications* 5th edition .Oxford University Press. (ヤリーヴ 多田邦雄・神谷武志(訳) (2000). ヤリーヴ光エレクトロニクス 基礎編 丸善株式会社)
- [6]大津元一 (1994). 現代光学 I 光の物理的基礎 朝倉書店
- [7]大津元一 (1994). 現代光学 II 光と量子 朝倉書店
- [8]西原浩 (2000). 新世代光学シリーズ 光・電磁波光学 株式会社オーム社