

## 1. 序章

### 1.1 はじめに

私たちの生活は経済発展と共に豊かなものになってきている。その一方、エネルギー消費量の増加や産業発展に伴った、地球規模での環境汚染や環境破壊は深刻な問題となっている。その中でも、人間の呼吸器に直接的な害を与える大気汚染や海面上昇や気象変動などの間接的な害を与える地球温暖化が注目されている。その原因の1つとして、大気中の微量気体が挙げられる。そのため、微量気体の変動を観測することは、今後の地球環境問題を対処するにあたり非常に重要である。ここで微量気体とは、水蒸気、二酸化炭素、二酸化窒素、メタン、フロン、一酸化二窒素等を指す。

### 1.2 地球環境

#### 1.2.1 地球温暖化

太陽からの日射エネルギーは大気を通り地表面で吸収され、大気中へ赤外線が熱放射される。大気中には二酸化炭素やメタン等の赤外線を吸収する温室効果ガスがあるので、吸収された赤外線の一部は下方に放射され、地表面を温めることを温室効果という。また、人口増加によって人間活動が活発になり、経済発展、生産行為に伴ってエネルギー消費が増大する。このとき温室効果ガスが大気中に大量に放出され、地球全体を取り囲み、地球から大気への熱放散を妨げて地球全体の温度が上昇する。このような現象を地球温暖化という。

19世紀以降、地球の平均気温は0.3~0.6℃、海面は10~25cm上昇している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次評価報告書によれば、2100年の平均気温は温室効果ガスの排出量が最も少ない場合には平均1.8℃、最も多い場合には約4℃上昇し、海面水位は平均38.5cm上昇するといわれている。その結果、様々な分野が影響を受ける。例えば気候への影響、農業・食料供給への影響、水資源への影響、海面上昇の影響、人間の健康への影響等が挙げられる。

日本における気候変化について見ると、近年の日本全国の年間平均気温は上昇傾向にあり、都市化の影響を除いても過去 100 年間で 1.0℃上昇したと推定されている。また、都市部では都市排熱の影響も加わり急激な気温上昇が見られる。さらに、気温上昇に伴う都市部での集中豪雨の発生増加による、水害発生の増大も派生的に出現すると考えられる。しかし、通年では降水量は減少している。

温度上昇により起きる農業、食料への影響としては、病虫害の増加や水不足で穀物生産が大幅に減少し、世界的に深刻な食糧難を招く恐れがある。また、日本の米にも影響が出ると考えられる。北日本では増産になるものの南日本では高温障害のため減産になり、全体的に収穫量は減少すると予測されている。

水資源への影響としては、河川の年間変動パターンが変化して、降雪地域での融雪水と降水の合流に伴う、河川水量の増大による洪水や雨季の降水量の減少により、水資源分配用の既存インフラ施設を再設備する必要が発生している。

海面の上昇は、海水の熱膨張や氷河が融けることで起き、海水面より低地にある地域では、洪水の危険性が増大する。それに伴い沿岸地域の堤防の嵩上げや支持基礎の補強など対応すべき工事が発生する。

人間の健康への影響としては、熱ストレスによる心血管疾患や脳血管疾患を起こす人間の割合が増加している。一方、感染性疾患の代表例としてマラリアが挙げられ、アフリカを中心に現在 101 ヶ国で流行している。これらはいずれも温暖化による気象変動によるものと考えられる。

## 1.2.2 大気汚染

大気汚染とは、燃焼や破砕によって人為的に発生するガスや粉じんが大気を汚染することで、年々その原因物質は増加している。産業革命以前はほとんど問題にならなかったが、第二次世界大戦後の先進国では大量生産、大量消費によって硫黄酸化物、窒素酸化物等の燃焼生成物や合成化学物質が大気中に放出され、気管支や肺胞等の呼吸器、植物に悪影響を及ぼしている。さらに、これらの物質は大気中の水蒸気や酸素と反応することによって、硝酸や

硫酸となり、凝縮して雲の凝結核となって酸性雨として地上に降下し、湖沼の酸性化や建造物、文化財の劣化をもたらしている。酸性雨の被害は主にヨーロッパを中心に世界各国で確認されている。

### 1.3 ランバート・ビアの法則

光学的に計測する最も基本的な方式は直接吸収法である。この方法では、光が測定対象となる物質を透過する前後の光強度比を透過率として測定し、その透過率から測定対象の濃度を算出する。透過率は次式で示され

$$T = \exp(-\alpha(\lambda)l) \quad (1.1)$$

ここで  $T$  は透過率、 $\alpha$  は単位長さあたりの吸収率、 $l$  は光が伝播する光路長である。 $\alpha(\lambda)l$  は光学的厚さと呼ぶ。式(1.1)からわかるように光路長  $l$  の値を大きくすると透過率  $T$  の値は小さくなる。これは光路長が長いと吸収信号が増大することを意味する。また、 $\alpha$  は次式のようになり

$$\begin{aligned} \alpha(\lambda) &= \sigma(\lambda)N \\ &= \sigma(\lambda) \frac{N_a P}{RT} f \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで  $\sigma$  は吸収断面積、 $N$  は分子数密度、 $N_a$  はアボガドロ数、 $P$  は気体圧力、 $R$  は気体状態、 $T$  は温度、 $f$  は遷移の基底状態における存在確率である。

気体を構成する分子は全て化学結合した原子から構成され、これらの分子にある振動数を持った光を照射すると同じ振動数の化学結合を持った分子には、光を吸収して透過させないという性質がある。つまり照射する光の波長を変化させて観測を続けると、ところどころに光の吸収が起こり気体特有のスペクトル波形を得ることができる。このスペクトル波形のことを吸収スペクトルという。図 1.1 はある気体における吸収スペクトルを表したものである。図 1.1 からわかるように吸収スペクトルを大きく取得することは、微量気体を高感度に測定できる。

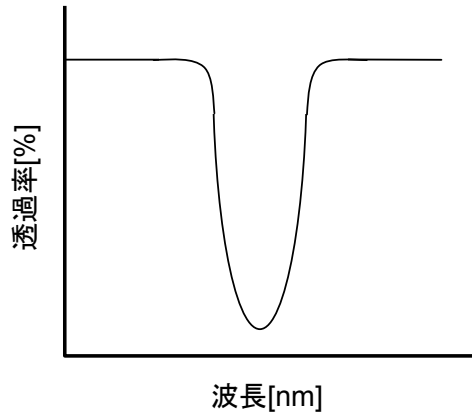


図 1.1 ある気体における吸収スペクトル

#### 1.4 目的

微量気体の測定方法の 1 つとして光学的手法が挙げられる。光学的手法とは、微量気体に光エネルギーを吸収させて透過率を測定するという方法である。特徴として、リアルタイム測定や広域測定、非破壊性が挙げられる。その中で高感度な測定方法として、吸収分光法が挙げられる。吸収分光法とは、特定の波長において気体分子が光を吸収するため、光強度が減少し、そのときの気体の吸収スペクトルを観測することにより、その気体の成分や濃度を測定するものである。また、測定の高感度化は、長い光路長により実現される。そこで、本研究は長光路を確保するための Herriott 型マルチパスセルの製作を目的とする。

## 2. マルチパスセルの概要

### 2.1 マルチパスセル

マルチパスセルとは、2枚の放物面鏡にレーザー光を多重反射させることによって長光路を確保する装置である。2枚の放物面鏡の間に微量気体を導入して、多重反射するレーザー光が微量気体を通過し、微量気体により減少した出射光の光強度を測定することによって、微量気体の成分と濃度を特定できる。図 2.1 にマルチパスセルを用いた微量気体の測定の様子を示す。

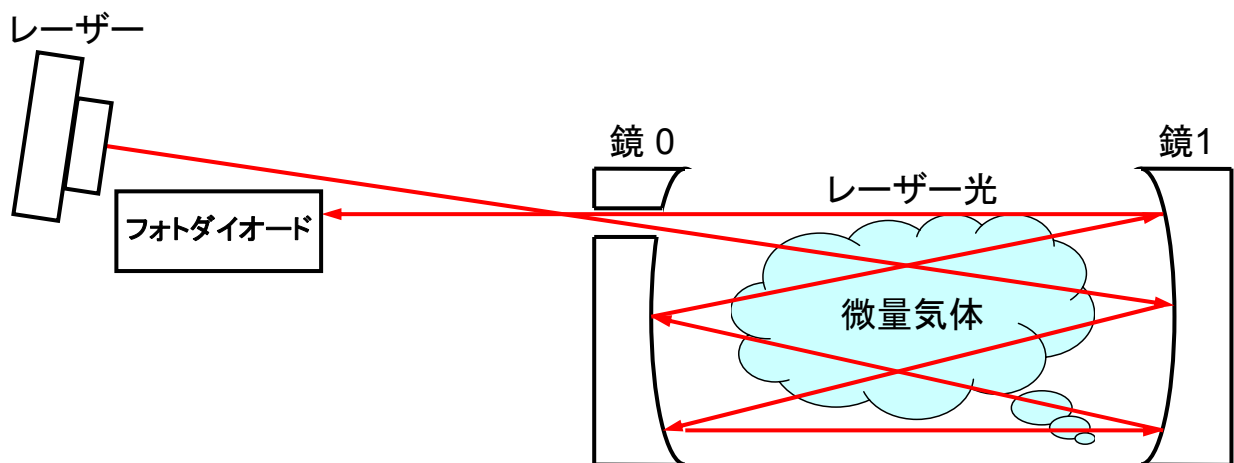


図 2.1 マルチパスセルを用いた微量気体の測定

### 2.2 Herriott 型マルチパスセルと White 型マルチパスセル

マルチパスセルには、Herriott 型マルチパスセルと White 型マルチパスセルが存在する。両者の原理は基本的に 2.1 節で述べた通りである。図 2.2 に Herriott 型マルチパスセルの基本構成を示す。Herriott 型マルチパスセルの特徴を以下に示す。

- ・光源は平行光であり、入出射光の位置が同じである
- ・鏡 1 を動かすことができ、光路長の調整が容易である
- ・光路長は鏡の間隔と反射回数に依存する

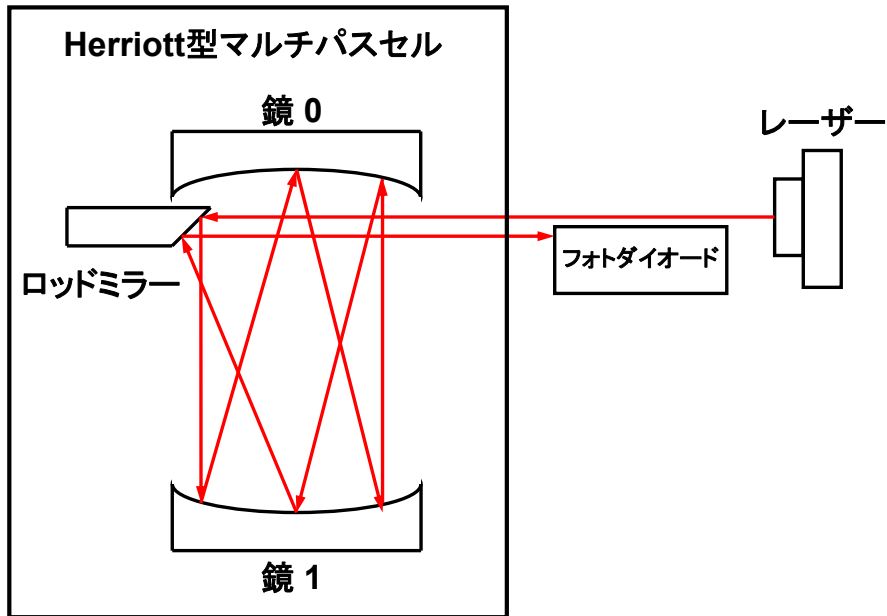


図 2.2 Herriott 型マルチパスセルの基本構成

図 2.3 に White 型マルチパスセルの基本構成を示す。White 型マルチパスセルの特徴を以下に示す。

- ・ 反射回数を選択することができ、光路長を任意に変えることができる
- ・ 光路の調整が Herriott 型に比べて困難である

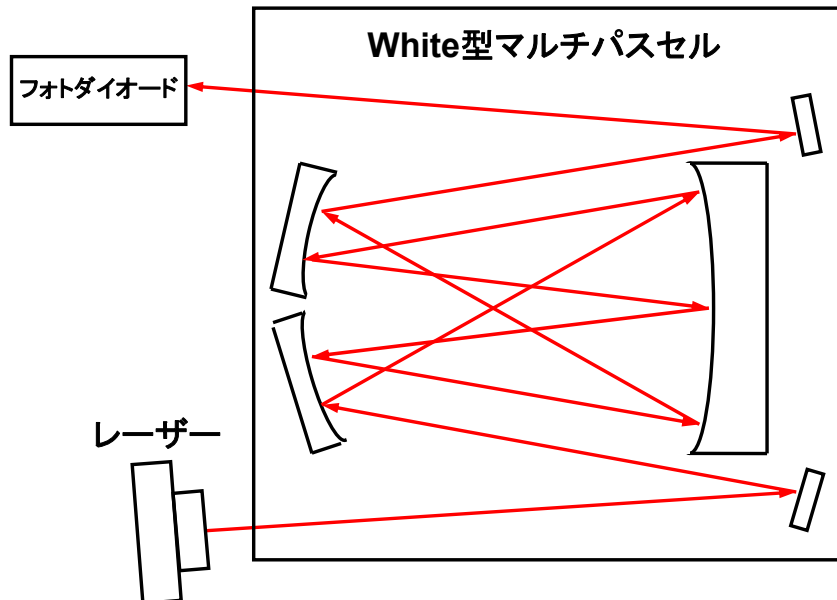


図 2.3 White 型マルチパスセルの基本構成

### 2.3 放物面鏡の座標系

図 2.4 に鏡の座標系を示す。x 軸は  $x_0$  方向に向いている。z 軸は 2 つの鏡の中心を通る。y 軸は両軸に対して垂直である。また、鏡 0 にある座標  $(x_0, 0, 0)$  は入出射口の位置を表している。

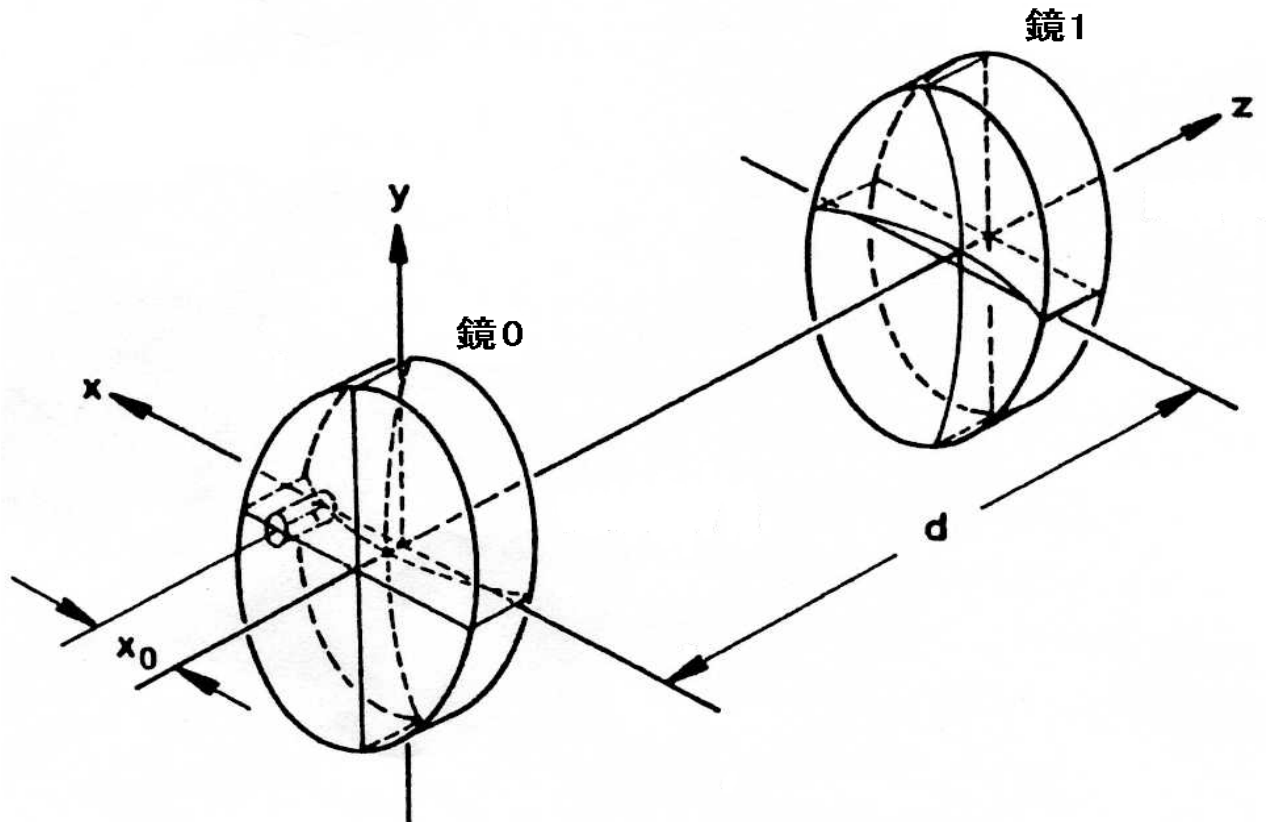


図 2.4 放物面鏡の座標系

### 3. Herriott 型マルチパスセルの製作

#### 3.1 放物面鏡

図 3.1 に放物面鏡を示す。放物面鏡とは、放物面の内側を鏡面とした鏡である。放物面鏡はその焦点から出た光は全て平行光線となり、平行に入射した光は焦点に集まる性質をもっている。Herriott 型マルチパスセルに使用する放物面鏡は市販のものである。放物面鏡の仕様を表 3.1 に示す。使用した放物面鏡の基板の表面には金属膜として金コート、保護膜として一酸化ケイ素が施されている。鏡に金コートを施すことによって、レーザーの波長が 0.7~0.8  $\mu\text{m}$  において 94%以上、0.8~2  $\mu\text{m}$  において 97%以上の平均反射率が得られる。また、保護膜は金属膜の酸化を防ぎ、耐久性を向上させる効果がある。

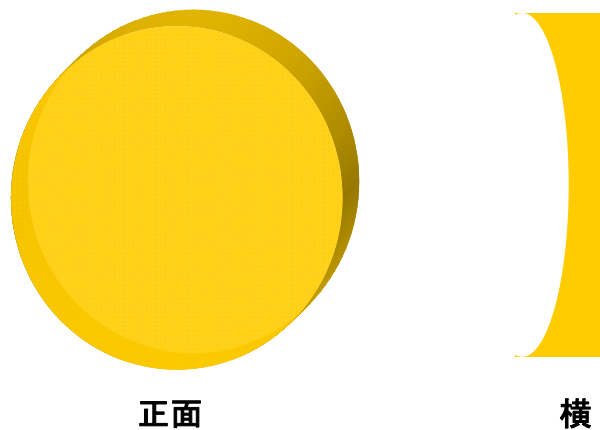


図 3.1 放物面鏡

表 3.1 放物面鏡の仕様

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 型番          | Edmund 32066566-G |
| 外径 Dia      | 108.0 + 1.5/-0 mm |
| 焦点距離 f      | 647.7 mm          |
| 焦点距離公差      | ±1%               |
| コバ厚 ET      | 19.1 mm           |
| コバ厚公差       | 0 -10%            |
| 面精度         | 1/8 $\lambda$     |
| 表面品質(キズ-ブツ) | 60 - 40           |



### 3.2 ロッドミラー

ロッドミラーとは、ロッドレンズの一方の端面を  $45^\circ$  にカット研磨し、その面に金属膜を蒸着した小型の鏡である。また、金属膜の面が楕円形状になっており、正面開口は円形である。金属膜としてアルミコートが施されている。アルミコートは可視光線～近赤外線まで使用される最も標準的な金属膜である。平均反射率は波長  $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$  において 85%以上である。また、保護膜には一酸化ケイ素が施されている。

図 3.2 にロッドミラーを示す。本研究では、ロッドミラーを使用してマルチパスセルにレーザー光を入射させた。ロッドミラーは市販のものを使用した。表 3.2 にロッドミラーの仕様を示す。



図 3.2 ロッドミラー

表 3.2 ロッドミラーの仕様

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 型番          | Edmund 54098-G    |
| 外径 Dia      | 5.00 mm           |
| 全長 L        | 10.0 mm           |
| 基板          | BK7               |
| 角度公差        | $45^\circ \pm 10$ |
| 外径公差        | 0 -0.03 mm        |
| 全長公差        | $\pm 0.1$ mm      |
| 表面品質(キズ-ブツ) | 40 - 20           |

### 3.3 パワーメーター

パワーメーターとは、フォトダイオードで受光した光強度を測定する装置である。また、パワーメーターは光強度が電圧として出力されるため、可変抵抗値よりフォトダイオードによる光励起値を求め、光出力に換算する必要がある。

図 3.3 にパワーメーターを示す。本研究では、マルチパスセルから出射するレーザー光の強度を測定するためにパワーメーターを使用した。フォトダイオードには Hamamatsu 製の S2387 - 1010R を用いた。表 3.3 にフォトダイオードの仕様を示す。表 3.3 の受光感度は波長 633nm の場合である。

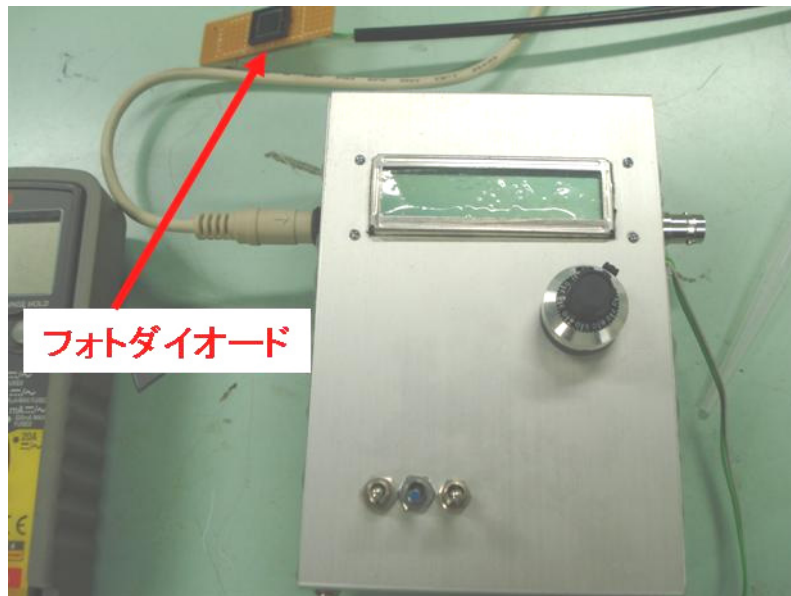


図 3.3 パワーメーター

表 3.3 フォトダイオードの仕様

|                                   |             |
|-----------------------------------|-------------|
| 型番                                | S2387-1010R |
| 感度波長範囲                            | 320~1100nm  |
| 受光感度 ( $\lambda = 633\text{nm}$ ) | 0.37A/W     |

### 3.4 He-Ne レーザー

He-Ne レーザーとは、安定な連続発振をし、かつ可視波長(633nm)での発振が可能な気体レーザーの1つである。He-Ne レーザーはレーザー媒質として He が 90%、Ne が 10%の混合気体を封じたレーザー管と、その両端に平行に取り付けられた 2 枚の反射鏡および、レーザー管に放電を与えるための電源から構成されている。図 3.4 に He-Ne レーザーの構造例を示す。この気体に 1~3kV の電圧を加えるとグロー放電が生じ、約 5mA の電流が流れる。レーザー管の両端には光学研磨ガラスが角度  $\theta_B (= \tan^{-1} n_G)$  ( $n_G$  はガラスの屈折率) で接着または融着されている。この角度はブリュースタ角と呼ばれ、これにより紙面内の直線偏光に対する反射率が 0 になり、反射損失のない偏光のみを発振させることができる。出力は 0.5mW ~10mW 程度である。これ以上の出力を得ようとする、レーザー管の熱膨張によって、両端面の鏡の平行度が失われてしまうため、出力は約 10mW 程度が限界である。

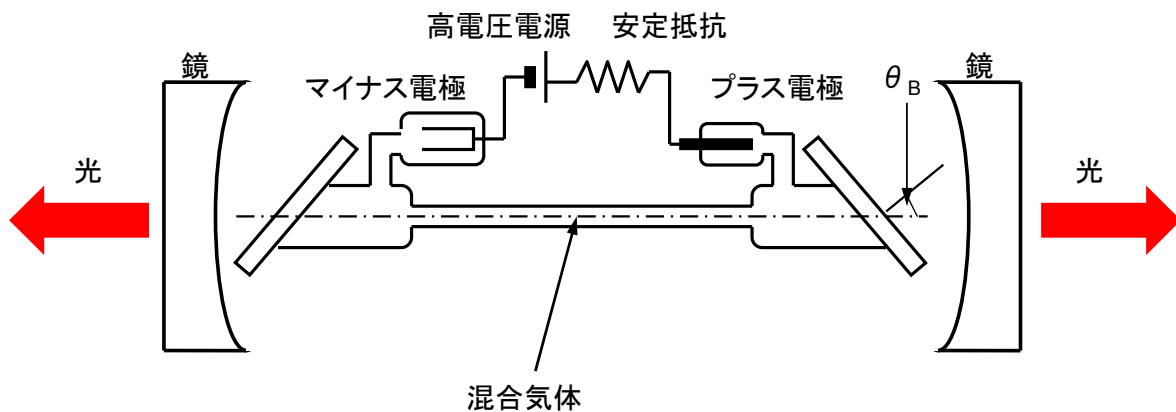


図 3.4 He-Ne レーザーの構造例

### 3.5 Herriott 型マルチパスセルの構築

図 3.5 に構築した Herriott 型マルチパスセルの外観を示す。ロッドミラーが付いている放物面鏡を鏡 0 として、もう片方の放物面鏡を鏡 1 とする。

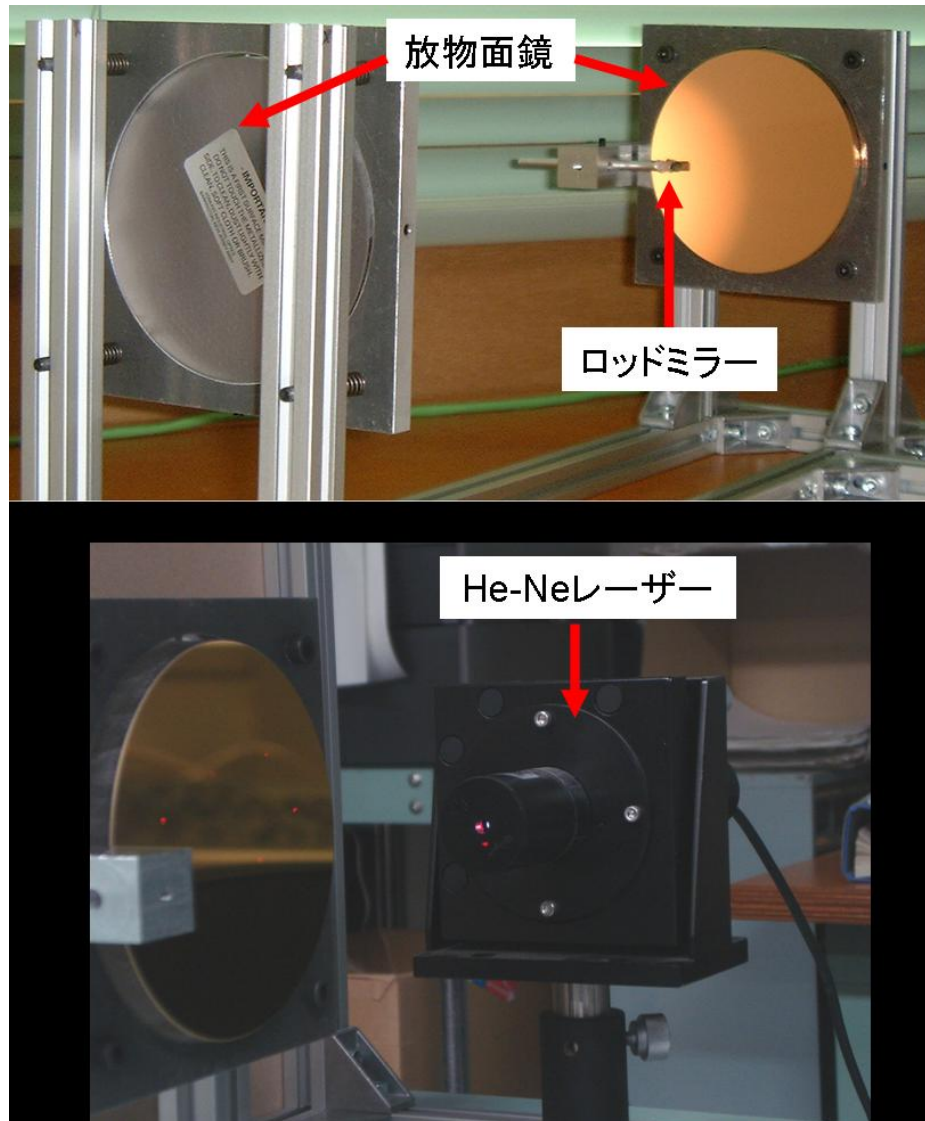


図 3.5 Herriott 型マルチパスセルの外観

#### 4. 反射点と総光路長の変化

鏡の間隔を変えたとき反射点と総光路長がどのように変化するか理論式を用いて、Excel 上でシミュレーションを行なった結果を示す。図 4.1 は反射の様子を表したものであり、偶数回目の反射は鏡 0 で奇数回目の反射は鏡 1 で行なわれる。

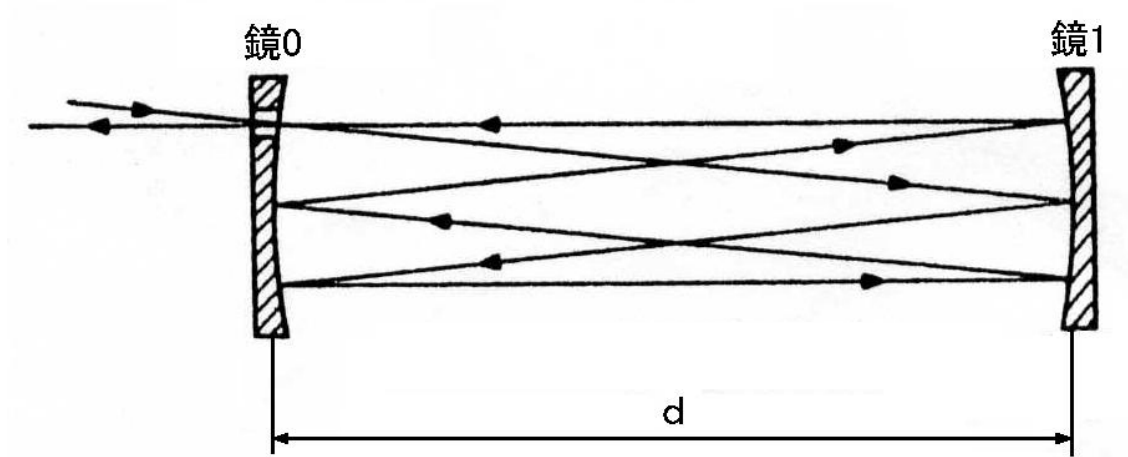


図 4.1 反射の様子

##### 4.1 反射点の導出

図 4.2 に示す焦点距離  $f$  の薄肉レンズを通る近軸光線を考える。近軸光線とは対称軸 ( $z$  軸) からの傾きが十分小さく、 $\sin \theta \cong \tan \theta \cong \theta$  と置き換えられる光線のことである。円筒座標の対象軸を  $z$  軸とし、軸からの距離を  $r$  とし、光線の傾き  $dr/dz$  を  $r'$  とすれば、出射光線 ( $r_{out}, r'_{out}$ ) と入射光線 ( $r_{in}, r'_{in}$ ) を次式で関係づけることができる。

$$r_{out} = r_{in} \quad (4.1)$$

$$r'_{out} = r'_{in} - \frac{r_{in}}{f} \quad (4.2)$$

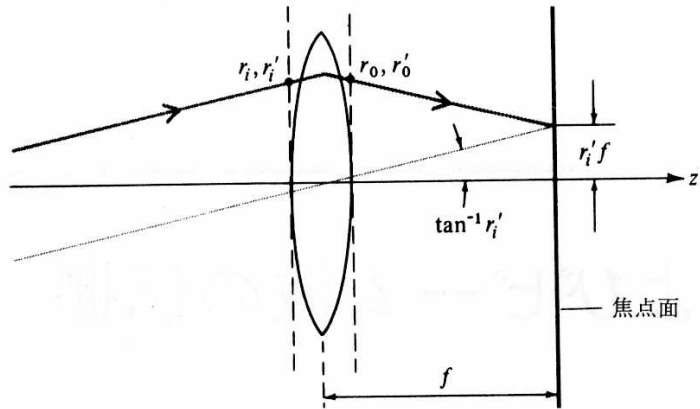


図 4.2 薄肉レンズによる光線の偏向

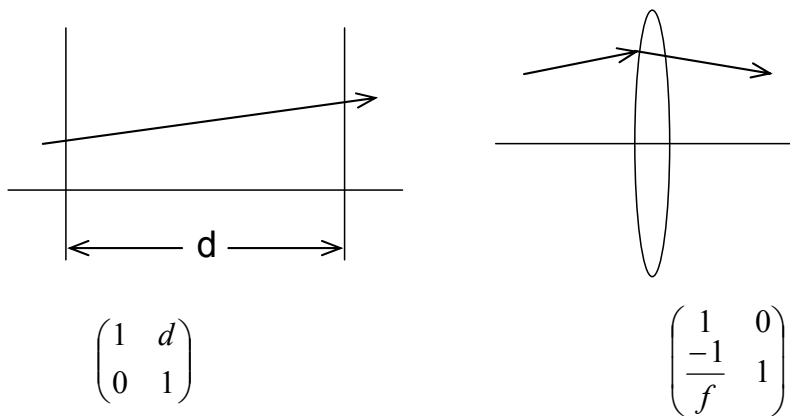
ただし、式(4.1)は薄肉レンズの定義に基づくものであり、また式(4.2)はレンズの中心を通る場合、傾きが  $r'_{in}$  のまま変わらない光線（図 4.2 参照）を考えることにより導かれる。

式(4.1)と式(4.2)は行列の積の規則を用いて次のように書き直すことができる。

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

これをレンズ行列という。ただし  $f$  の符号は凸レンズのとき正、凹レンズのとき負をとるものとする。

同様に図 4.3 に平行平板と薄肉レンズを示す。



平行平板の光線行列

薄肉レンズの光線行列

図 4.3 平行平板と薄肉レンズ

図 4.4 より、一様媒質で満たされた長さ  $d$  の直線部分の後方に、焦点距離  $f$  の薄肉レンズが続いているときの光線の伝搬を考える。式(4.4)は薄肉レンズの光線行列と平行平板の光線行列の積で導くことができる。

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

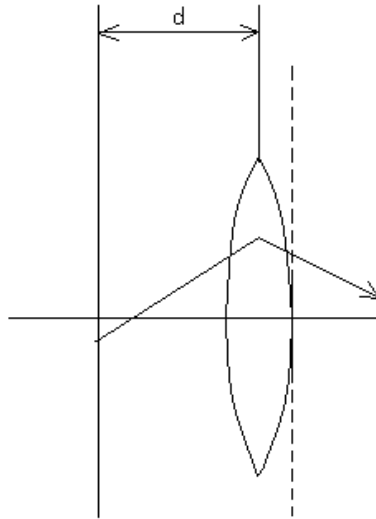


図 4.4 薄肉レンズと平行平板の関係

図 4.5 は光線が焦点距離  $f$  のレンズのあとに距離  $d$  だけ進む一連の繰り返しを表している。  
 (図 4.5 に示したレンズの焦点距離は全て同じものとする)

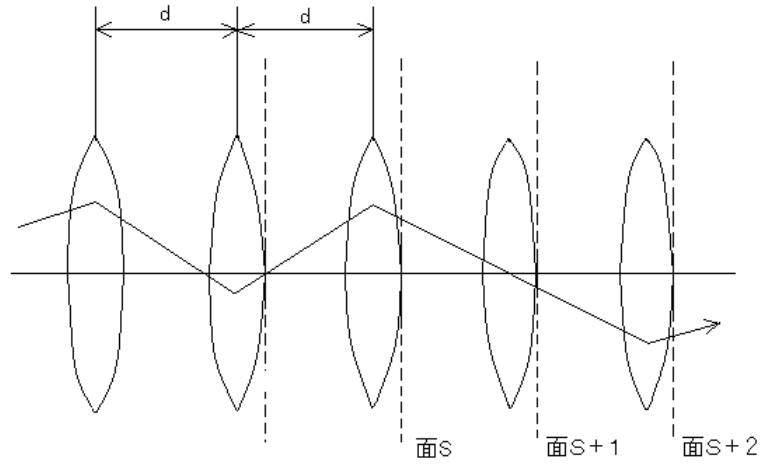


図 4.5 2 倍周期レンズ列の光線行列

$s$  番目の面と  $(s+1)$  番目の面にはさまれた部分は式(4.5)のようになる。

$$\begin{pmatrix} r_{s+1} \\ r'_{s+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_s \\ r'_s \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

また、式(4.5)を方程式の形に書き換えると

$$r_{s+1} = Ar_s + Br'_s \quad (4.6)$$

$$r'_{s+1} = Cr_s + Dr'_s \quad (4.7)$$

となる。 $A, B, C$  および  $D$  は式(4.5)における行列の要素であり、次のように表される。

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= d \\ C &= -\frac{1}{f} \\ D &= 1 - \frac{d}{f} \end{aligned} \quad (4.8)$$



式(4.6)を変形すると

$$r'_s = \frac{1}{B}(r_{s+1} - Ar_s) \quad (4.9)$$

となり、また(s+1)番目の面の場合

$$r'_{s+1} = \frac{1}{B}(r_{s+2} - Ar_{s+1}) \quad (4.10)$$

と置くことができる。式(4.10)に式(4.7)と式(4.9)を代入することによって、

$$\begin{aligned} \frac{r_{s+2} - Ar_{s+1}}{B} &= Cr_s + \frac{Dr_{s+1} - ADr_s}{B} \\ BCr_s - ADr_s + Ar_{s+1} + Dr_{s+1} - r_{s+2} &= 0 \\ r_{s+2} - (A + D)r_{s+1} + (AD - BC)r_s &= 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

となる。これはレンズ導波路中の階差方程式を表している。

式(4.8)より

$$AD - BC = 1 - \frac{d}{f} + \frac{d}{f} = 1 \quad (4.12)$$

となる。式(4.11)は次のようになる。

$$r_{s+2} - 2br_{s+1} + r_s = 0 \quad (4.13)$$

ただし

$$b = \frac{1}{2}(A + D) = \left(1 - \frac{d}{2f}\right) \quad (4.14)$$

式(4.13)は $r'' + Gr = 0$ という形の微分方程式と等価な差分方程式を表しており、微分方程式の解は $r(z) = r(0)\exp\pm i\sqrt{G}z$ で与えられる。微分方程式を解くと

$$r_s = r_0 e^{isq} \quad (4.15)$$

となる。ここで $z$ は $s$ 、 $\sqrt{G}$ は $q$ に対応している。

また、一般解は  $\exp(is\theta)$  と  $\exp(-is\theta)$  の 1 次結合によって与えられる。

$$r_s = r_0(Y \cos s\theta + Z \sin s\theta) \quad (4.16)$$

と表すこともできる。(  $q$  は任意定数なので、  $\theta$  とおくことができる)

式(4.15)を式(4.13)に代入すると

$$r_0 e^{i(s+2)q} - 2br_0 e^{i(s+1)q} + r_0 e^{isq} = 0 \quad (4.17)$$

となり、さらに  $r_0 e^{isq}$  で割ると

$$e^{2iq} - 2be^{iq} + 1 = 0 \quad (4.18)$$

となる。ここで  $e^{iq}$  を  $X$  とおくと

$$X^2 - 2bX + 1 = 0 \quad (4.19)$$

$$X = b \pm i\sqrt{1-b^2} = e^{\pm i\theta} \quad (4.20)$$

となる。ただし

$$\cos\theta = b \quad (4.21)$$

とする。式(4.20)はオイラーの公式に基づいていることがわかる。オイラーの公式で表すと

$$\begin{aligned} e^{\pm i\theta} &= \cos\theta \pm i\sin\theta = b \pm i\sin\theta \\ e^{i\theta} \cdot e^{-i\theta} &= b^2 + \sin^2\theta \\ \sin^2\theta &= 1 - b^2 \\ \sin\theta &= \sqrt{1-b^2} \end{aligned} \quad (4.22)$$

となる。また、式(4.14)と式(4.21)の関係より

$$\cos\theta = \left(1 - \frac{d}{2f}\right) \quad (4.23)$$

となる。式(4.16)より  $r_s = r_0$  にするためには、  $s = 0$  とすると  $Y = 1$  となる。したがって、

$$r_s = r_0(\cos s\theta + Z \sin s\theta) \quad (4.24)$$

となる。

式(4.24)を式(4.9)に代入し計算していくと  $Z$  が求められる。

$$Z = \frac{\frac{Br'_0}{r_0} + A - \cos \theta}{\sin \theta} \quad (4.25)$$

また、式(4.16)と同等な表し方として次のように表せる。

$$r_s = r_{\max} \sin(s\theta + \alpha) \quad (4.26)$$

ただし  $r_{\max} = r_0 / \sin \alpha$  である。式(4.26)は加法定理を用いて整理していくと

$$r_s = r_0 \left( \sin s\theta \frac{1}{\tan \alpha} + \cos s\theta \right) \quad (4.27)$$

ここで式(4.24)と式(4.27)に注目すると、 $Z = \frac{1}{\tan \alpha}$  ということがわかる。

次に光線の安定性条件を求める。式(4.20)より、二乗根内が正でないとき光線がレンズからはずれて不安定になるので、光線の安定性条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} 0 &\leq 1 - b^2 \\ b^2 &\leq 1 \\ -1 &\leq b \leq 1 \\ -1 &\leq 1 - \frac{d}{2f} \leq 1 \\ 0 &\leq d \leq 4f \end{aligned} \quad (4.28)$$

$A=1$ ,  $B=d$ ,  $\sin\theta = \sqrt{1-b^2}$ ,  $\cos\theta = b = \left(1 - \frac{d}{2f}\right)$  を式(4.25)に代入すると

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{\frac{dr'_0}{r_0} + 1 - 1 + \frac{d}{2f}}{\sqrt{1-b^2}} \\
 &= \frac{2f \frac{r'_0}{r_0} + 1}{\sqrt{\frac{4f}{d} - 1}}
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

となる。

また、 $Z = \frac{1}{\tan\alpha}$  より

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\tan\alpha} &= \frac{2f \frac{r'_0}{r_0} + 1}{\sqrt{\frac{4f}{d} - 1}} \\
 \tan\alpha &= \frac{\sqrt{\frac{4f}{d} - 1}}{2f \frac{r'_0}{r_0} + 1}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

となる。

式(4.27)に式(4.30)を代入し、レーザー光が  $N$  回反射した時の反射点を導出することができる。

$$\begin{aligned}
 r_s &= r_0 \left( \cos s\theta + \frac{2f \frac{r'_0}{r_0} + 1}{\sqrt{\frac{4f}{d} - 1}} \sin s\theta \right) \\
 r_s &= r_0 \cos s\theta + \sqrt{\frac{d}{4f - d}} (r_0 + 2fr'_0) \sin s\theta
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

反射点は座標上に示すので、 $x$  と  $y$  の式を以下に示す。

$$\begin{aligned} x_n &= x_0 \cos N\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}}(x_0 + 2fx'_0)\sin N\theta \\ y_n &= y_0 \cos N\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}}(y_0 + 2fy'_0)\sin N\theta \end{aligned} \quad (4.32)$$

ここで、 $(x_n, y_n)$  は  $n$  回反射後の反射点の位置、 $(x_0, y_0)$  は入射光の位置、 $(x'_0, y'_0)$  は入射光の傾き、 $\theta$  は入射角、 $d$  は鏡の間隔、 $f$  は焦点距離、 $N$  は反射回数である。また式(4.23)を変形すると、

$$\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{d}{2f}\right) \quad (4.33)$$

となる。

また、入射光の傾き  $(x'_0, y'_0)$  と鏡の間隔  $d$  は次式で示される。

$$\begin{aligned} x'_0 &= -\frac{x_0}{2f} \\ y'_0 &= \frac{x_0}{2f} \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$d = 2f\left(1 - \cos\frac{N-2}{2N}\pi\right) \quad (4.35)$$

式(4.35)は入射した光が  $n$  回反射した後、必ず出射するときの鏡の間隔を表したものである。

上記で示した式(4.32)～式(4.35)を用いると反射点の位置を特定することができる。

## 4.2 総光路長の理論式

光路長とは、レーザー光が鏡から鏡へ反射したときのレーザー光の長さであり、式で示すと、

$$L_n = \sqrt{d^2 + (x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \quad (4.36)$$

となる。ここで、 $L_n$  は  $n$  回目に反射したときの光路長である。また、総光路長は反射した回数分の光路長を合計したものであり、式で示すと、

$$L = \sum_{n=1}^N L_n$$
$$L = Nd + \frac{x_0^2}{4f - d} \quad (4.37)$$

となる。

## 4.3 光の出射条件

### 4.3.1 図による光の出射条件の説明

2.1 節でも述べたように Herriott 型マルチパスセルでは 2 枚の放物面鏡の間隔と反射回数に関係がある。ここでは、その関係について説明する。

図 4.6 は 2 枚の鏡を重ね合わせ、1 枚の鏡として見たときの反射点の位置を表したものである。図 4.6 より鏡の間隔を広げることによって、反射点がずれる様子がわかる。例えば、ある鏡の間隔において反射回数 6 回(図 4.6 では●)でレーザー光は入出射する。このとき反射点は楕円状に位置して、入射した位置から 1 周することになる。しかし、鏡の間隔を広げることによって反射回数が 6 回以上となり、レーザー光は出射されずに入射した位置から反射点がずれる。(図 4.6 では●から□へずれる)このとき、レーザー光は入射した位置から出射するまで反射を繰り返し、反射点はずれながらも 1 周することになる。

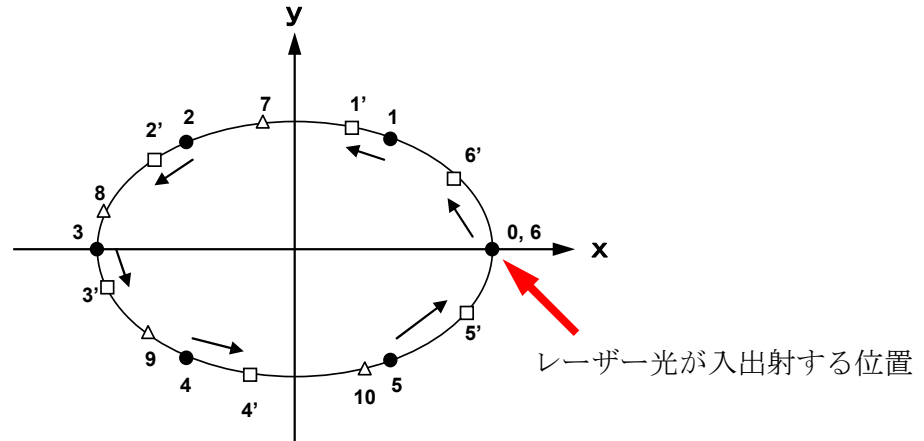


図 4.6 反射点がずれる様子

レーザー光が  $N$  回反射した後に再び入射した位置から出射するとき  $(x_0, y_0) = (x_n, y_n)$  となる必要がある。そのときの条件は次式で示される。

$$N = 2(2j + 1) \quad (4.38)$$

ここで、 $N$  は反射回数、 $j$  は楕円上に対する反射点の周回数である。式(4.38)と図 4.6 より反射点を 1 周させる ( $j=1$ ) とレーザー光が入出射する最低の反射回数が 6 回ということがわかる。

#### 4.3.2 光の出射条件の説明

式(4.32)の上式からも入射点と出射点の一致が分かる。例えば反射回数が 6 回るときで証明すると以下のようなになる。

$$x_6 = x_0 \cos 6\theta + \sqrt{\frac{d}{4f - d}} (x_0 + 2fx'_0) \sin 6\theta \quad (4.39)$$

ここで注目するのは式(4.39)の第 2 項目の  $x'_0$  である。この  $x'_0$  に式(4.34)を代入すると第 2 項目が 0 になることが分かる。次に、第 1 項目の  $\theta$  に式(4.33)を代入すると次式になる。

$$x_6 = x_0 \cos 6 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{d}{2f} \right) \quad (4.40)$$

式(4.40)の  $d$  に式(4.35)を代入すると次式になる。

$$x_6 = x_0 \cos 6 \cos^{-1} \left\{ 1 - \left( 1 - \cos \frac{N-2}{2N} \pi \right) \right\} \quad (4.41)$$

反射回数が6回なので、式(4.41)の  $N$  に6を代入し、式を整理すると次式になる。

$$\begin{aligned} x_6 &= x_0 \cos 2\pi \\ x_6 &= x_0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

式(4.42)より、入射点と出射点が一致するということが証明できる。

#### 4.4 鏡面上の反射点と光路の軌跡

##### 4.4.1 シミュレーション方法

式(4.32)～式(4.35)を用いると反射点の位置を特定することができる。ここでは反射回数を6回、10回、14回と変更して Excel 上でシミュレーションを行なった。反射回数6回の際の条件は入射光の位置  $(x_0, y_0) = (0.04, 0)$ 、焦点距離  $f = 0.6477\text{m}$ 、鏡の間隔  $d = 0.6477\text{m}$  とした。反射回数10回と14回では、鏡の間隔  $d$  はそれぞれ  $0.8950\text{m}$ 、 $1.007\text{m}$  に変えた。本実験で使用する放物面鏡の直径が  $10\text{cm}$  なので、放物面鏡の面積を有効に利用するために入射光の位置を  $(x_0, y_0) = (0.04, 0)$  とした。

##### 4.4.2 シミュレーション結果

シミュレーションの結果を図4.7～図4.15に示す。図4.7、図4.10、図4.13は鏡0と鏡1を重ねて1枚の鏡として見たときの反射点を表したものであり、これらの図から反射点は楕円状に位置していることが分かる。図4.8、図4.11、図4.14はマルチパスセルを上から見た光路の軌跡を表したものであり、図4.9、図4.12、図4.15はマルチパスセルを横から見た光路の軌跡を表したものである。これらの反射点は反射回数が増加すると、レーザー光がマルチパスセルから出射するまで、ずれていくことがわかる。また、反射回数を6回、10回、14回と変更したときの総光路長は式(4.37)を用いて求めた。反射回数6回の際の総光路長は  $3.89\text{m}$  となり、10回、14回の際の総光路長はそれぞれ  $8.96\text{m}$ 、 $14.11\text{m}$  となった。



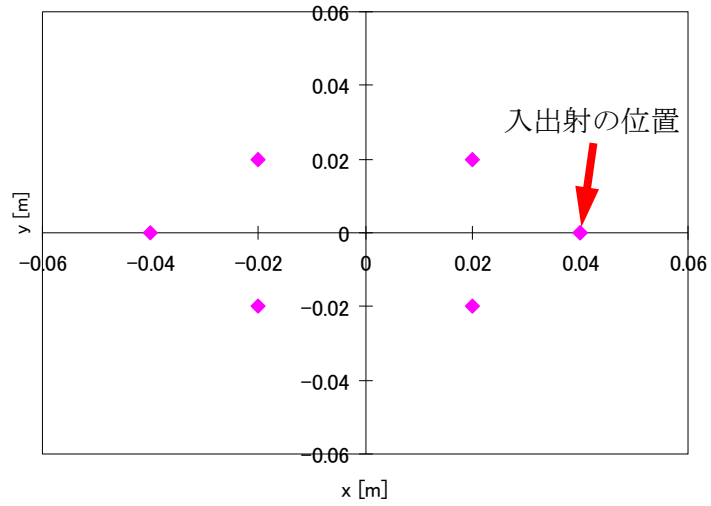


図 4.7 反射回数 6 回の反射点

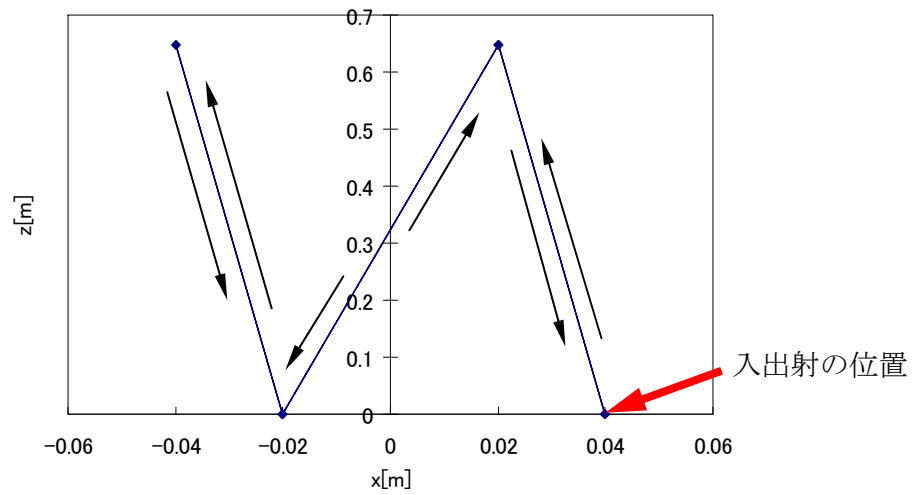


図 4.8 上から見た光路の軌跡 (反射回数 6 回)

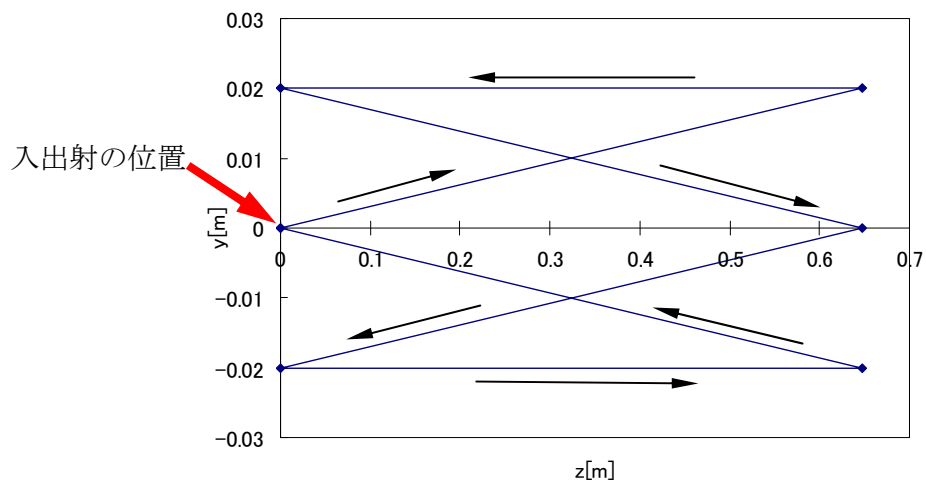


図 4.9 横から見た光路の軌跡 (反射回数 6 回)

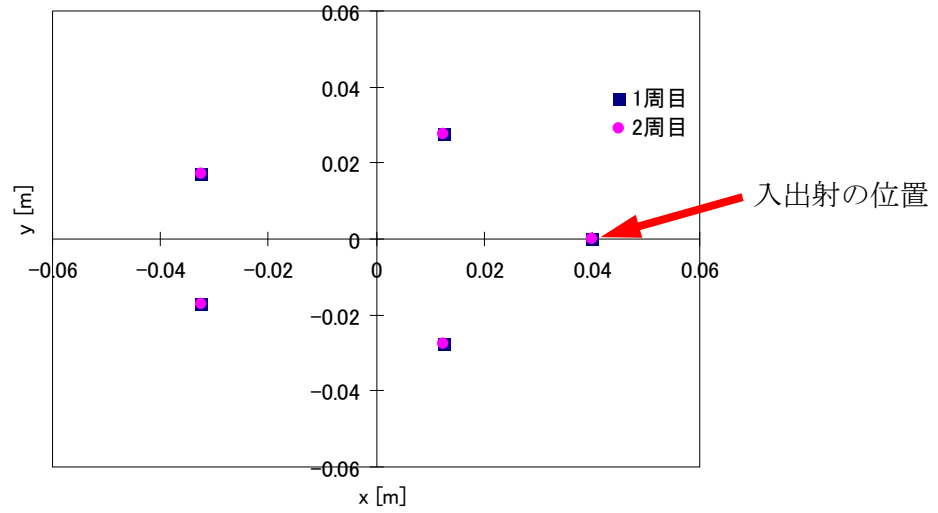


図 4.10 反射回数 10 回の反射点

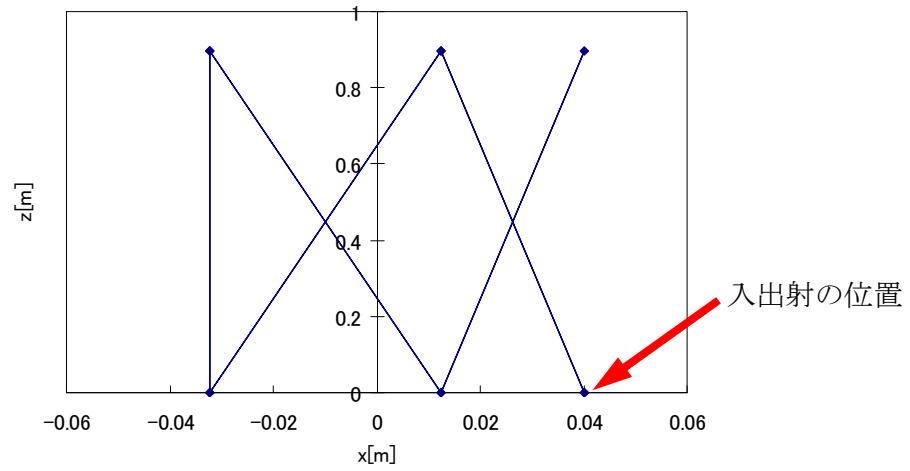


図 4.11 上から見た光路の軌跡 (反射回数 10 回)

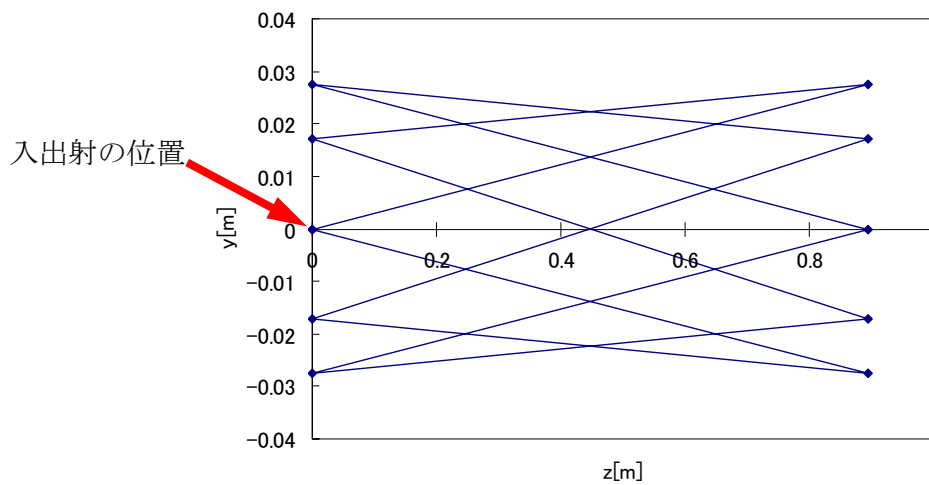


図 4.12 横から見た光路の軌跡 (反射回数 10 回)

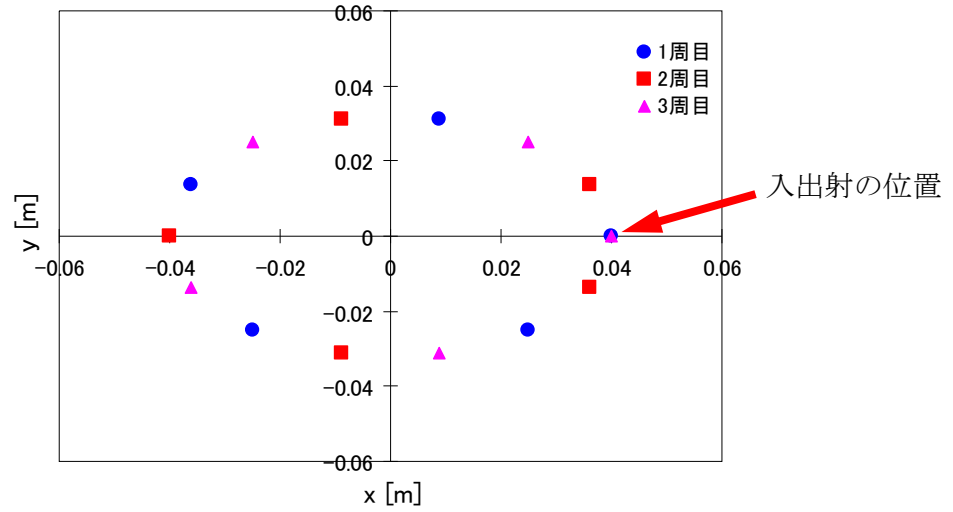


図 4.13 反射回数 14 回の反射点

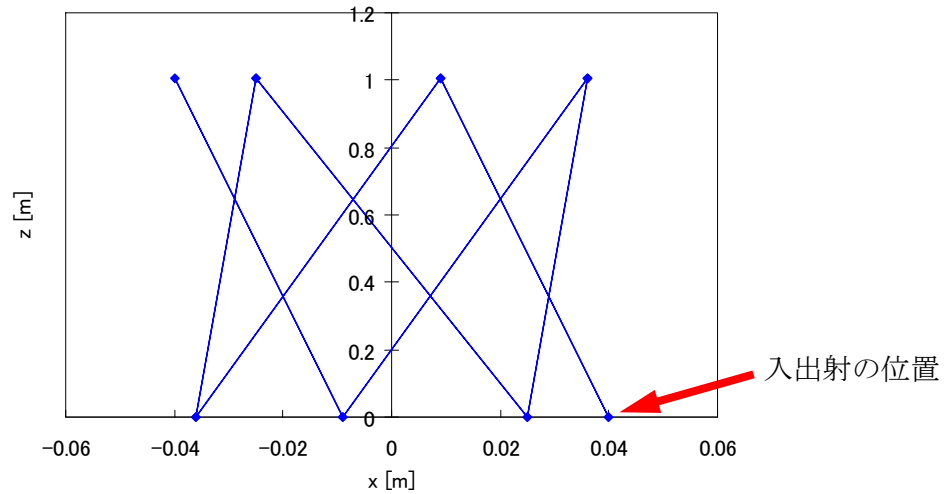


図 4.14 上から見た光路の軌跡 (反射回数 14 回)

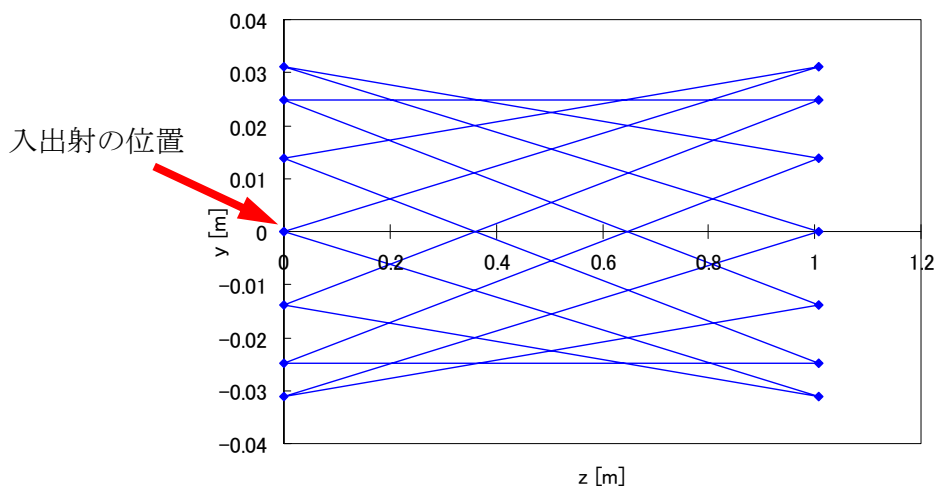


図 4.15 横から見た光路の軌跡 (反射回数 14 回)

#### 4.5 反射点の観測

製作した Herriott 型マルチパスセルを動作させ、実際に反射点を観測した。図 4.16 に 6 回反射したときの反射点を示す。図 4.16 は 2 枚の放物面鏡の間にポリエチレンフィルムを設置して、そこにレーザー光を透過させたものである。反射点はシミュレーションのようにきれいな楕円状として現れなかったが、シミュレーションと同じ条件でレーザー光を反射させることによって、6 点の反射点を観測することができた。図 4.16 では、楕円が傾いているが、これはロッドミラーの傾きが原因と考えられる。



図 4.16 6 回反射したときの反射点

## 5. ポリエチレンフィルムの透過率

### 5.1 実験概要

この実験では、2枚の放物面鏡の間に物質が存在すると透過率が大きく減少することを確認するために、微量気体の代わりにポリエチレンフィルムの透過率を求めた。図 5.1 に測定概略図を示す。

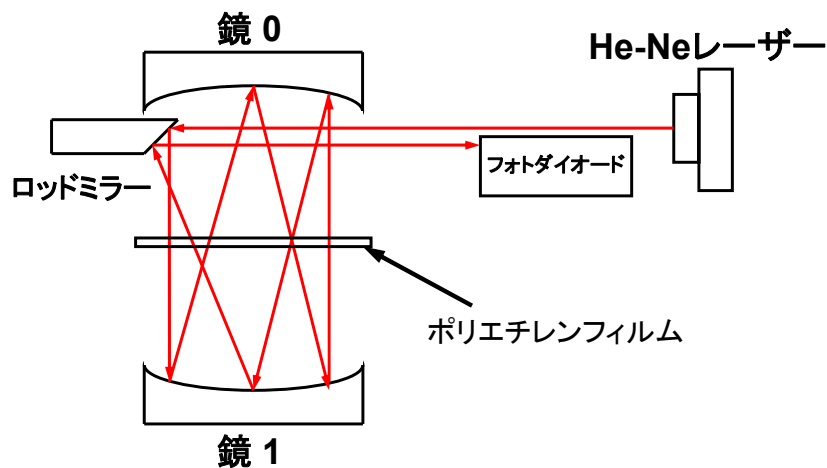


図 5.1 測定概略

### 5.2 測定方法

- 1) 2枚の放物面鏡の間に縦 20cm、横 15cm、厚さ  $10\mu\text{m}$  のポリエチレンフィルムを設置し、波長 633nm の He-Ne レーザーを発振させ、パワーメーターを用いて出射光の出力を測定した。このとき、反射回数を 0 回、6 回、10 回、14 回、18 回、22 回、26 回の順に変更した。また、パワーメーターの抵抗値を  $10\text{k}\Omega$  とした。
- 2) 2枚の放物面鏡の間にポリエチレンフィルムを設置せずに、1) と同様に電圧を測定した。
- 3) 1)、2) の測定結果から電流を求めた。
- 4) 3.3 節の表 3.3 より波長 633nm の He-Ne レーザーに対するフォトダイオードの受光感度は  $0.37\text{A/W}$  なので、求めた電流値を  $0.37\text{A/W}$  で割り光強度を求めた。

### 5.3 測定結果

測定結果を表 5.1、表 5.2、図 5.2 に示す。光源として使用した He-Ne レーザーは出力が小さいため、反射回数 26 回までしか光強度を測定できなかった。図 5.2 より実測値に対して、ポリエチレンフィルムを設置していない場合の鏡の反射率は 88% に近似でき、ポリエチレンフィルムを設置した場合の鏡の反射率 80% に近似できた。

ポリエチレンフィルムを設置していない場合の光強度とポリエチレンフィルムを設置した場合の光強度を比較すると、光強度が約 8% 下がった。したがって、ポリエチレンフィルムの透過率は約 90.9% ということがわかる。また、測定結果より反射回数に伴って、透過率が減少することがわかる。

表 5.1 ポリエチレンフィルムなしの場合の測定データ

| ポリエチレンフィルムなし |        |       |        |         |       |
|--------------|--------|-------|--------|---------|-------|
| 反射回数         | 抵抗[kΩ] | 電圧[V] | 電流[mA] | 光強度[mW] | 透過率   |
| 0            | 10     | 4.27  | 0.427  | 1.154   | 1.00  |
| 6            | 10     | 1.665 | 0.167  | 0.450   | 0.390 |
| 10           | 10     | 1.078 | 0.108  | 0.291   | 0.252 |
| 14           | 10     | 0.7   | 0.070  | 0.189   | 0.164 |
| 18           | 10     | 0.53  | 0.053  | 0.143   | 0.124 |
| 22           | 10     | 0.205 | 0.021  | 0.055   | 0.048 |
| 26           | 10     | 0.051 | 0.005  | 0.014   | 0.012 |

表 5.2 ポリエチレンフィルムありの場合の測定データ

| ポリエチレンフィルムあり |        |       |        |         |       |
|--------------|--------|-------|--------|---------|-------|
| 反射回数         | 抵抗[kΩ] | 電圧[V] | 電流[mA] | 光強度[mW] | 透過率   |
| 0            | 10     | 4.27  | 0.427  | 1.154   | 1.000 |
| 6            | 10     | 0.909 | 0.091  | 0.246   | 0.213 |
| 10           | 10     | 0.39  | 0.039  | 0.105   | 0.091 |
| 14           | 10     | 0.176 | 0.018  | 0.048   | 0.041 |
| 18           | 10     | 0.16  | 0.016  | 0.043   | 0.037 |
| 22           | 10     | 0.11  | 0.011  | 0.030   | 0.026 |
| 26           | 10     | 0.092 | 0.009  | 0.025   | 0.022 |

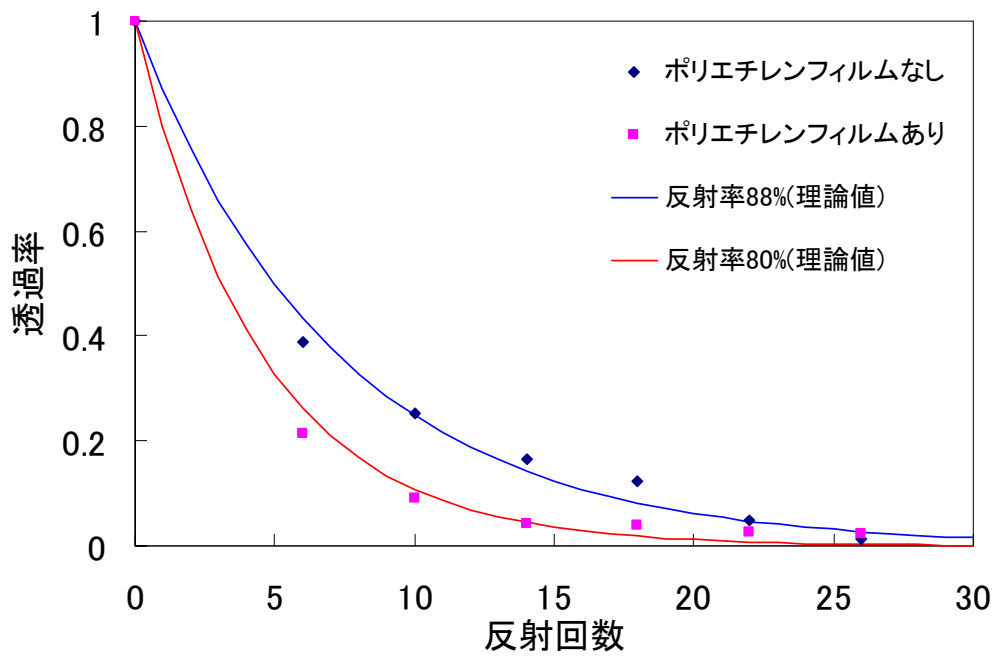


図 5.2 レーザーとポリエチレンフィルムの透過率

## 6. まとめ・課題

本研究では Herriott 型マルチパスセルの製作と動作確認を行なった。動作確認を行なう前に反射点と総光路長の理論式を導出し、シミュレーションを行なった。動作確認では、レーザー光がシミュレーション通りに反射することが確認できた。また、微量気体の代わりにポリエチレンフィルムの透過率を求めた。このとき反射回数に伴って、透過率が減少することが確認できた。今後の課題として、波長可変半導体レーザーを使用することにより、吸収スペクトルを取得し、微量気体の濃度測定を行なう。

## 7. 参考文献

- [1] Amnon Yariv : Optical Electronics in Modern Communications, Oxford University Press, 1971
- [2] J. Altmann, R. Baumgart, C. Weitkamp. Two-mirror multipass absorption cell. Applied Optics. vol.20.995.1981
- [3] 竹内 延夫 : 地球大気分光リモートセンシング, 学会出版センター
- [4] 平田 照二 : わかる半導体レーザーの基礎と応用, CQ出版社
- [5] 日本環境学会編集委員会 : 新・環境科学への扉, 株式会社有斐閣

## 8. 謝辞

本研究を行なうにあたり、終始変わらぬご指導をして頂いた、本校電子制御工学科の由井四海教員、実習工場の技官、専攻科生の方々に心から感謝致します。