

平成 24 年度

卒業研究報告書

研究題目

マルチパスセルの製作と
反射点確認方法の検討

富山高等専門学校

電子制御工学科 大島凌

指導教官 由井四海

平成 25 年 3 月 1 日 提出

目次

1. はじめに	1
2. マルチパスセルの概要	2
2.1 マルチパスセルについて	2
2.2 マルチパスセルの種類	2
3. Herriott 型マルチパスセルの構成	3
4. Herriott 型マルチパスセルの入射条件	5
5. 反射点可視化装置の製作	6
5.1 可視化の必要性について	6
5.2 反射点可視化装置の構成	6
5.3 反射点可視化装置の問題点	7
6. Web カメラによる反射点の可視化と認識	8
6.1 Web カメラの特性	8
6.2 Web カメラによる反射点可視化方法	9
6.3 反射点の画像認識	10
7. 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの製作	14
7.1 非点収差 Herriott 型マルチパスセルについて	14
7.2 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの構成	17
7.2.1 鏡を歪ませる固定具の製作	17
7.2.2 鏡を歪ませる固定具を回転させる機構の製作	18
7.2.3 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの組立と入射条件	19
7.3 非点収差 Herriott 型マルチパスセルのスポットパターン	20
8. まとめ	23
9. 課題	23
参考文献	24
付録	25

1. はじめに

気体の濃度測定方法にレーザーなどの光学を用いる吸収分光法がある。その感度は単純に半導体レーザーから発する光線の光路長を長くすればするほど、気体と光線の接触体積を増え高い精度が期待できるが、そのためには、装置の全長が長くなりすぎてしまうという問題がある。光線の光路長を長くとりつつ、装置の大型化を抑えるためには、マルチパスセルという水平面上に向かい合うように置かれた複数枚の球面鏡に光線を入射し、多重反射させることで実質的に長光路を確保する装置を利用することで、光線の光路延長と装置の大型化抑制を実現できると思われる。しかし、任意の光路長を得られたことを確認するためには、光路長の測定方法を考える必要がある。そこで、Herriott型マルチパスセルを使用することで波長1000nmの不可視光線を多重反射させた際の光路長が任意の長さになることを光線が反射する回数によって確認する方法を検討する。

また、Herriott型マルチパスセルを応用し、Herriott型マルチパスセルよりも光線の反射点が鏡面全体にむらなく広がったスポットパターンを得られる非点収差Herriott型のマルチパスセルを製作する。これによりさらに多く光線の反射点を増やす試みをする。

2. マルチパスセルの概要

2.1 マルチパスセルについて

マルチパスセルとは、水平面上に向かい合うように置かれた複数枚の球面鏡に光線を入射し、多重反射させることで実質的に長光路を確保する装置である。この光線の多重反射による長光路を利用した吸収分光法によって、マルチパスセルはおもにセル内の気体検知に用いられることが多い。

2.2 マルチパスセルの種類

水平面上に互いに向かい合うように置かれた3枚の球面鏡に光線を入射する方式のマルチパスセルをWhite型マルチパスセルという。3枚の球面鏡を使用することにより、光路の細かい調整ができ光路長を任意に変更できる。

一方、水平面上に置かれた対面する2枚の球面鏡に光線を入射する方式のマルチパスセルをHerriott型マルチパスセルといい、反射回数を細かく選定することはできないものの、前述したWhite型マルチパスセルよりも構成が簡単で光路調整がしやすいため、本研究ではHerriott型マルチパスセルを製作することとした。

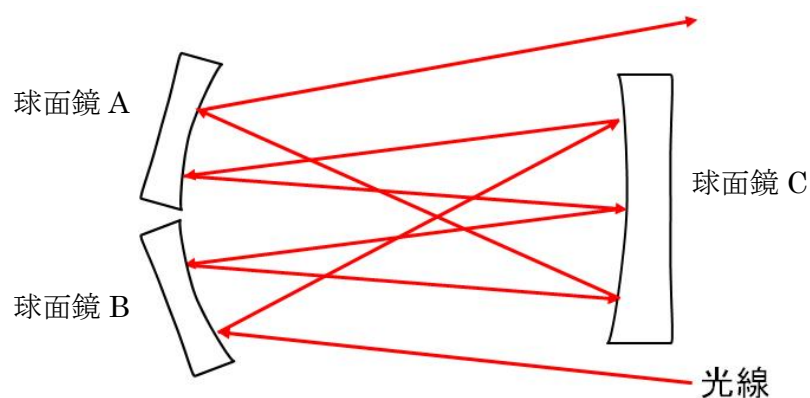


図1 White型マルチパスセル概略図

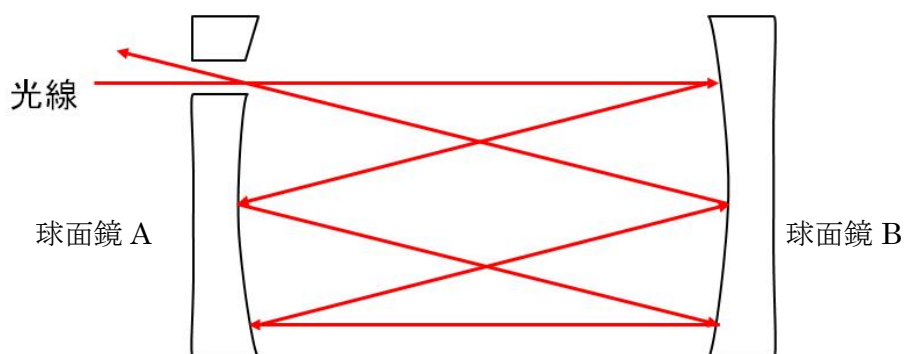


図2 Herriott型マルチパスセル概略図

3. Herriott 型マルチパスセルの構成

図3に本研究で使用したマルチパスセルの概略図、表2に主要構成部品について示す。また、表1に使用した半導体レーザーについて示す。図1に示したようにHerriott型マルチパスセルは、球面鏡Aに穴をあけて光線を入射するが、本研究ではロッドミラーを使用して波長1000nmの光線を入射させる。また、高反射率を得るため実験に使用するミラー1とミラー2は鏡面が誘電体多層膜のものを使用する。

表1 外部共振器型半導体レーザー

メーカー	型番	仕様
Sacher Lasertechnik Group	TIGER	波長1000nm

表2 主要構成部品

部品名	メーカー	型番	仕様
ロッドミラー	エドモンドオプティクス・ジャパン	54098-G	アルミコート、直径5mm
ミラー1	ソーラボジャパン	CM750-500-E03	誘電体E03コート
ミラー2			曲率半径1m、焦点距離500mm

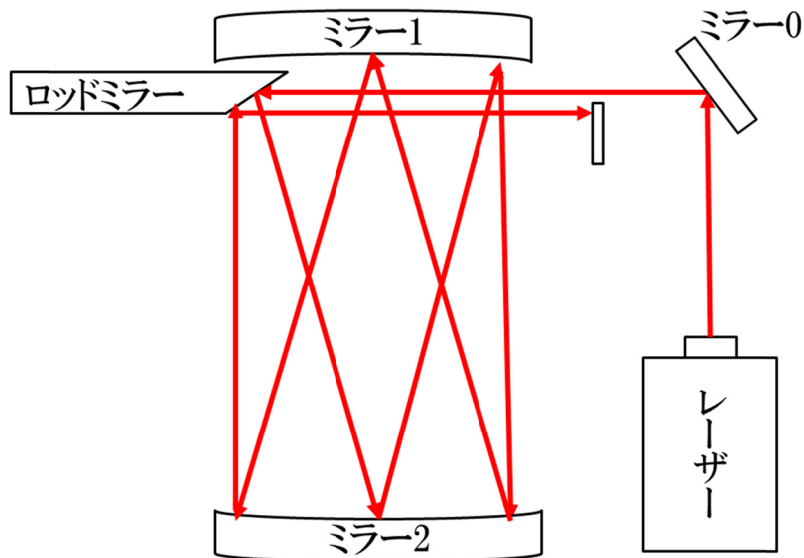


図3 マルチパスセル概略図

以下の図で Herriott 型マルチパスセルの理論式を示す。ただし、鏡面距離を D 、曲率半径を R 、横軸方向を x 、縦軸方向を y とし、鏡面上の反射点の座標位置 (x, y) は $(\text{Cos}\theta_x, \text{Cos}\theta_y)$ で表される。

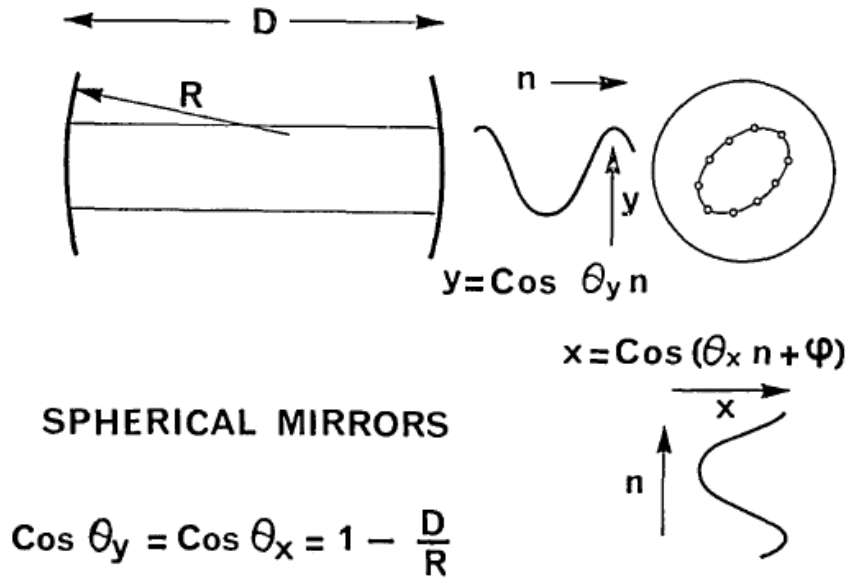


図 4 Herriott 型マルチパスセルの理論式

4. Herriott 型マルチパスセルの入射条件

反射点可視化装置を使用し、光路の調整を行う。Herriott 型マルチパスセルに光線を入射するにあたり、入射角度、鏡面角度等の初期調整を行った。図5にHerriott型マルチパスセルに光線を入射する際の見取り図を示す。

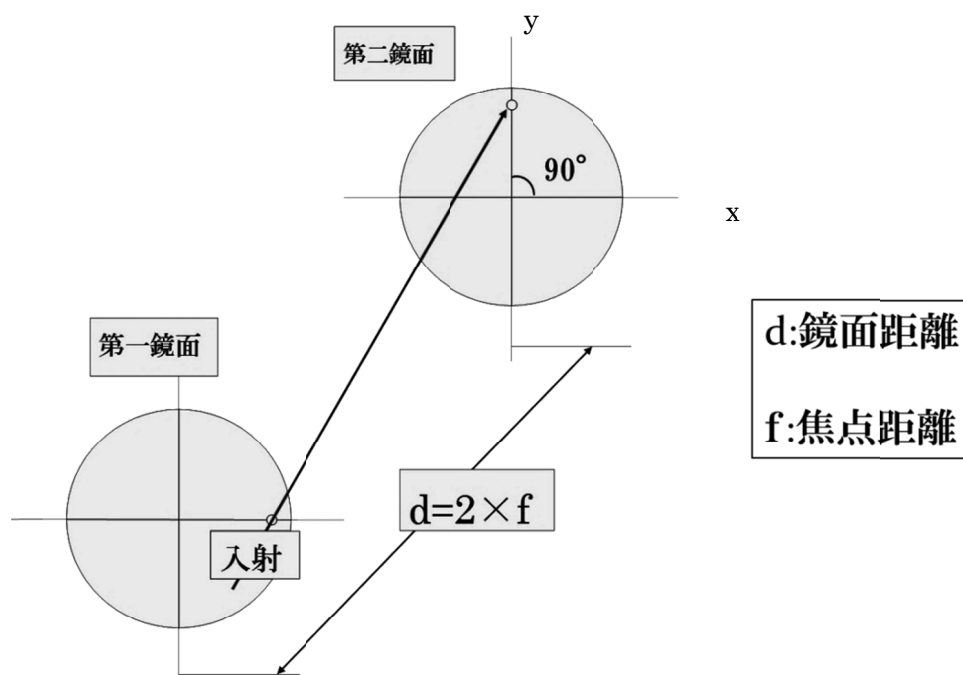


図5 マルチパスセル入射法の見取り図

図5にも示したように鏡面距離を d 、焦点距離を f で表し、第二鏡面の x 軸から約 90° の鏡面上部に最初の反射点が現れるときの鏡面距離は以下の式で表される。

$$d = 2f$$

上記の式より表2の鏡を使用した場合の鏡面距離を求めると以下ようになる。

$$d = 2 \times 500 \times 10^{-3} = 1 \text{ [m]}$$

よって、鏡面距離 1m で反射点が第二鏡面の x 軸から約 90° の鏡面上部に現れるように入射角度、鏡面角度等の調整を行った。

5. 反射点可視化装置の製作

5.1 可視化の必要性について

可視光線とは、電磁波のうち人間の目で見える波長のことを言う。人間の可視光線は一般に360～830nmと言われており、本研究で使用する半導体レーザーの波長は1000nmであることから、この光線を直接視認することはできない。そのため、Herriott型マルチパスセルに光線を入射させる際の鏡面角度等の調整が困難であった。

5.2 反射点可視化装置の構成

1000nmの光に反応するディテクターカードを細長く切り、丸型プレートに取り付けて3つの軸で支える。これを図3のミラー2の鏡面前にて高速回転させる装置を製作した。図6に反射点可視化装置の概略図を、図7に鏡面距離を約900mm、露光時間を0.5秒に設定して撮影した反射点可視化装置使用時の模様を示す。この装置により図7に示すように光線が高速回転するディテクターカードに反応して反射点の存在を確認できた。その結果鏡面角度や光線の入射角度等の調整が容易になり、Herriott型マルチパスセルに光線を入射させる作業を簡易的に行うことが可能となった。表3にこの時使用したディテクターカードについて示す。

表3 ディテクターカード

メーカー	型番	仕様
VisualizeIR	IR-CD	適応帯域内ピーク波長1000nm

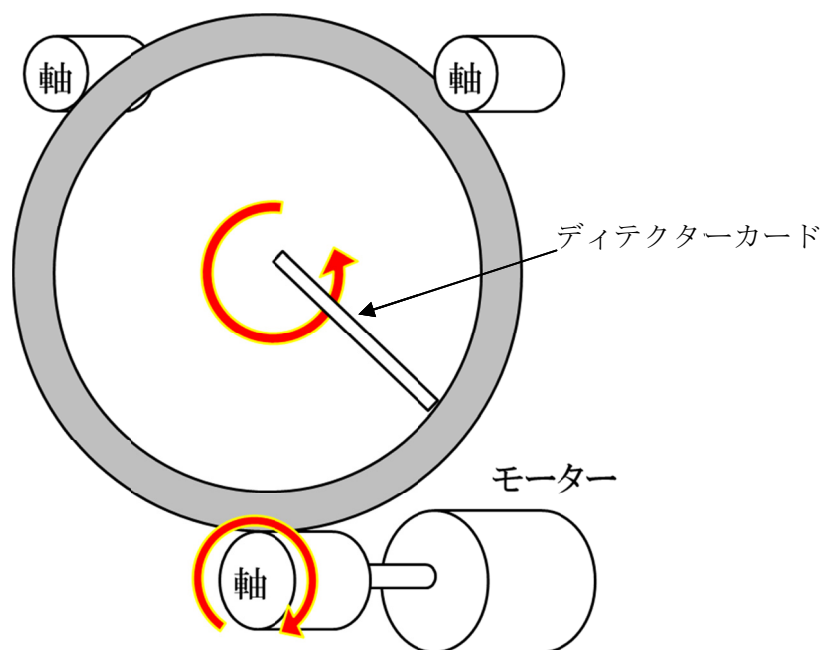


図6 反射点可視化装置概略図

5.3 反射点可視化装置の問題点

この装置ではディテクターカードを高速回転することによる残像効果を利用して反射点を可視化しているため、反射点の数を正確に確認することは困難であった。

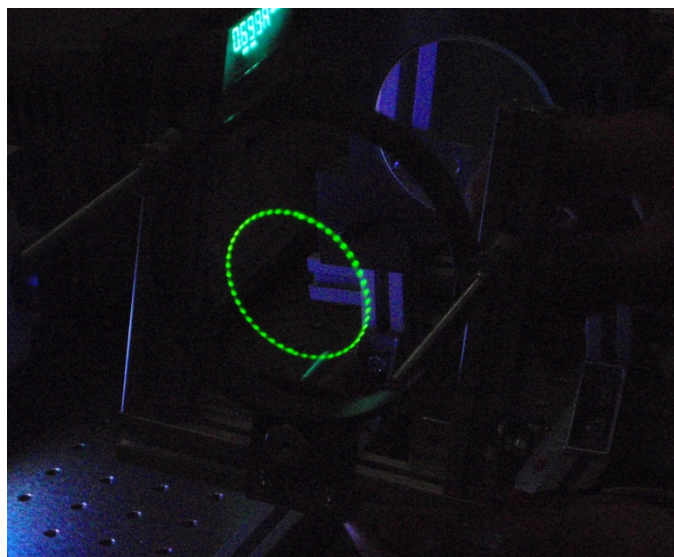


図7 反射点可視化装置使用時の模様(露光時間0.5秒)

6. Webカメラによる反射点の可視化と認識

6.1 Webカメラの特性

図8と表4に本研究で使用したWebカメラについて示す。このカメラの撮影素子であるSi系の半導体受光素子は、受光感度のピークが波長900nm～1000nmである。そこで、波長1000nmの光線の反射点をWebカメラによって画像化することで、人間の目では視認することのできない反射点の確認が可能となる。

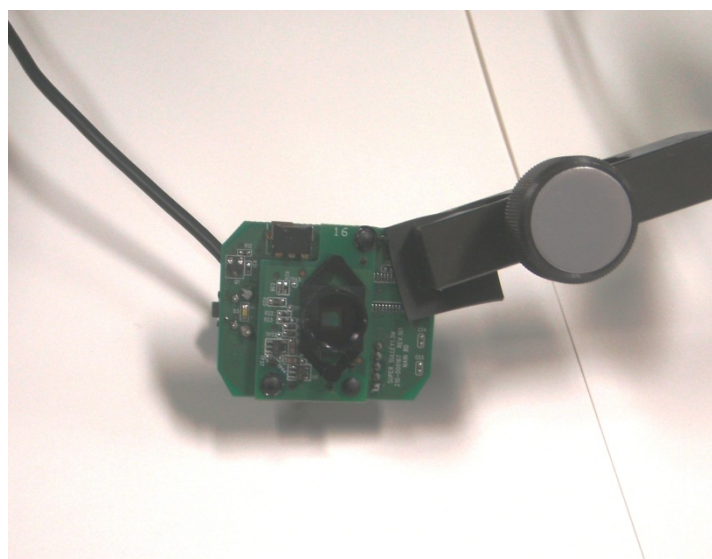


図8 Webカメラ

表4 Webカメラ

メーカー	型番	仕様
ロジクール	Qcam S7500 QCAM-130XH	有効画素130万ピクセル

6.2 Webカメラによる反射点可視化方法

実験にあたり、図9と表5に示すバンドパスフィルターをWebカメラのレンズに取り付けた。これにより、Webカメラの画像から波長1000nm帯域以外の光を取り除くことができ、後の画像認識において反射点の認識が容易になる。図10に本研究のWebカメラを配置したマルチパスセル概略図を示す。Webカメラは図10のようにしてミラー1の鏡面上の反射点を撮影することとした。

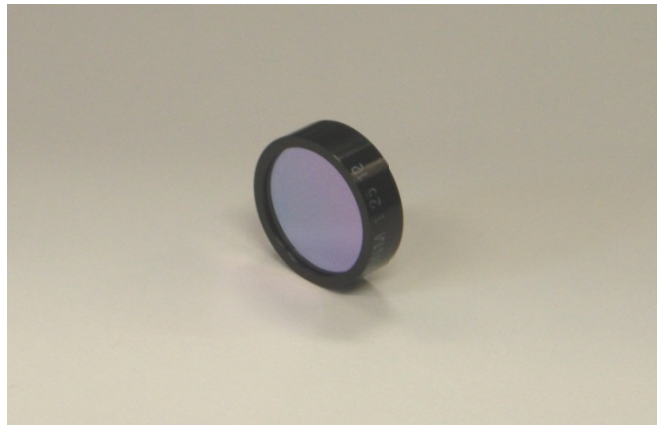


図9 バンドパスフィルター

表5 バンドパスフィルター

メーカー	型番	仕様
エドモンドオプティクス・ジャパン	65782-L	中心波長1000nm

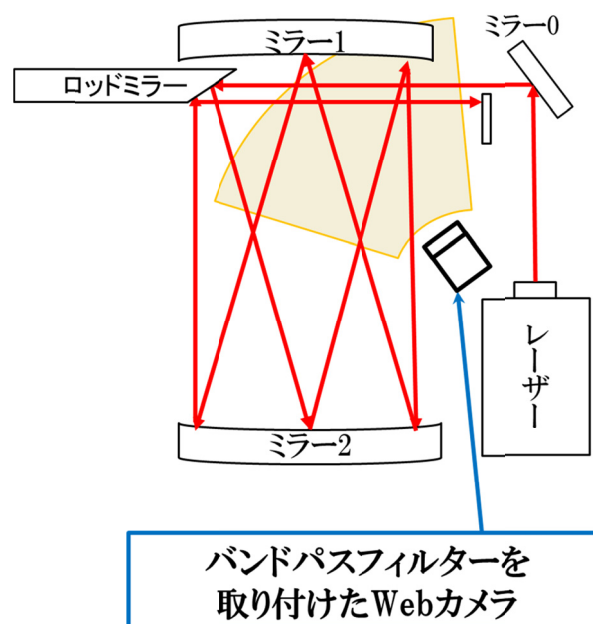


図10 Webカメラの配置概略図

6.3 反射点の画像認識

前頁6.2の方法で撮影されたWebカメラ画像を図11に示す。このWebカメラ画像をパソコンに取り込み、NI Vision Assistant ソフトを用いて画像の加工と点数解析を行う。まず、ノイズを取り除くため、画像の平滑化と点の収縮加工をする。次に、画像の2値化を施し、最後に加工後の画像(図19)を粒子解析にかける。図20に鏡面距離970mmのときの反射点認識結果を示す。また、加工経過の一連の模様を図16から図19に示す。認識結果は図11の画像から目視で反射点の数を数えた時と同値の53点を示しており、反射点の数を正確に認識できている。なお、これ以外の反射点の数でも、同様に加工前の画像から目視で反射点の数を数えた時と同値の結果を得られた。

使用したNI Vision Assistant ソフトは、加工と認識の設定を保存しておけるので、Webカメラの設定・調整と画像の集録を行えば、あとは加工と反射点の数の認識を自動で行うことができる。このシステムの流れの概略を図21に示す。

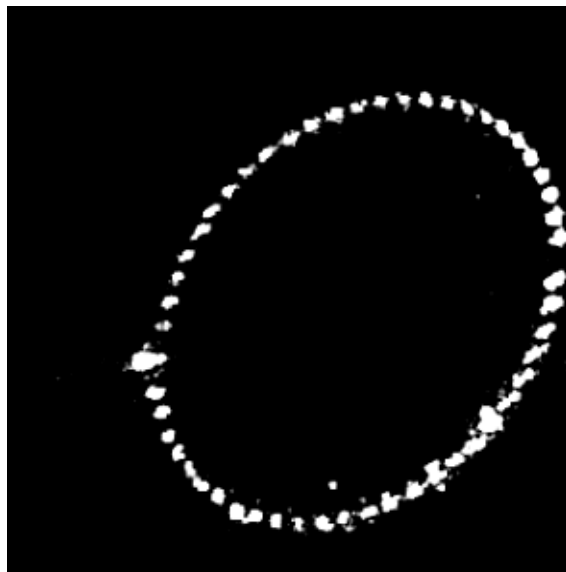


図 11 Web カメラ画像



図 12 加工経過 1(HSL明度抽出)



図 13 加工経過 2(平滑ローパスフィルタ)

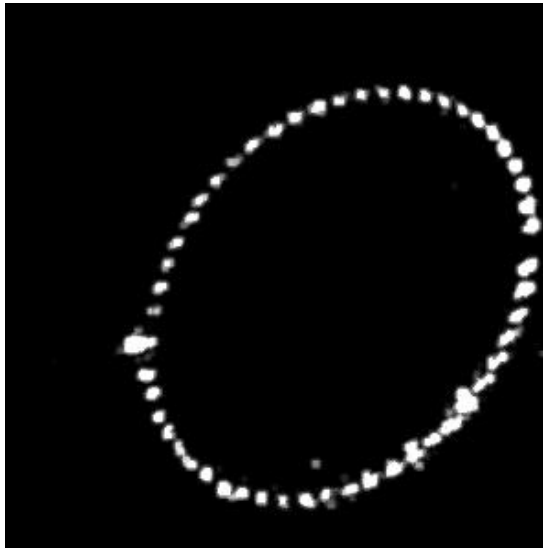


図 14 加工経過 3(適正オープン)



図 15 加工経過 4(中央値平滑化)

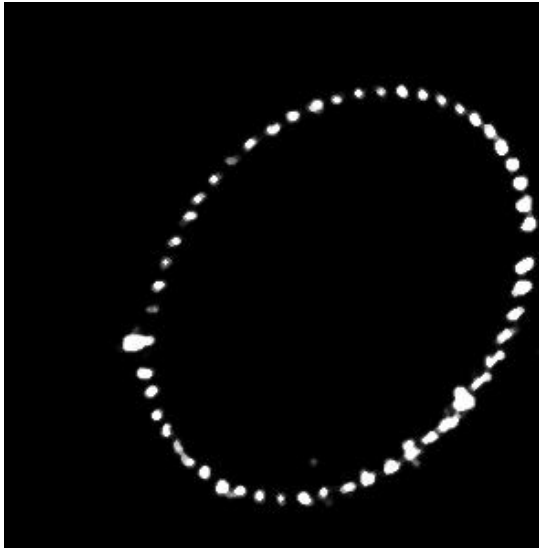


図 16 加工経過 5(ルックアップテーブル 2 乗)



図 17 加工経過 6(オープン)

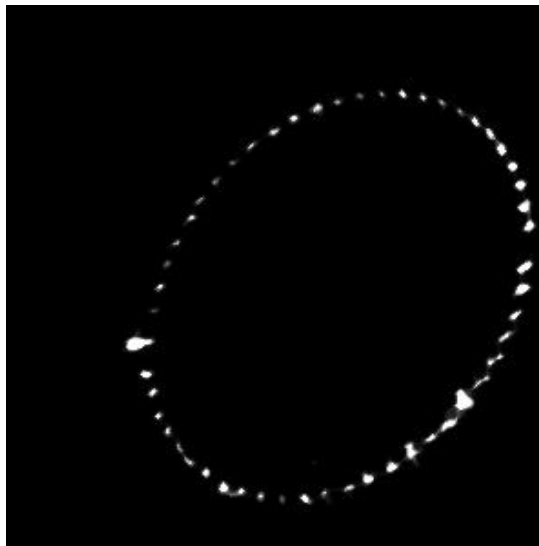


図 18 加工経過 7(収縮)

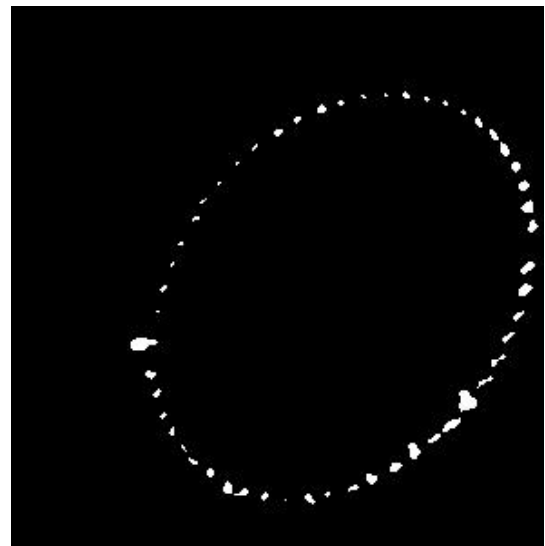


図 19 加工経過 8(2 値化)

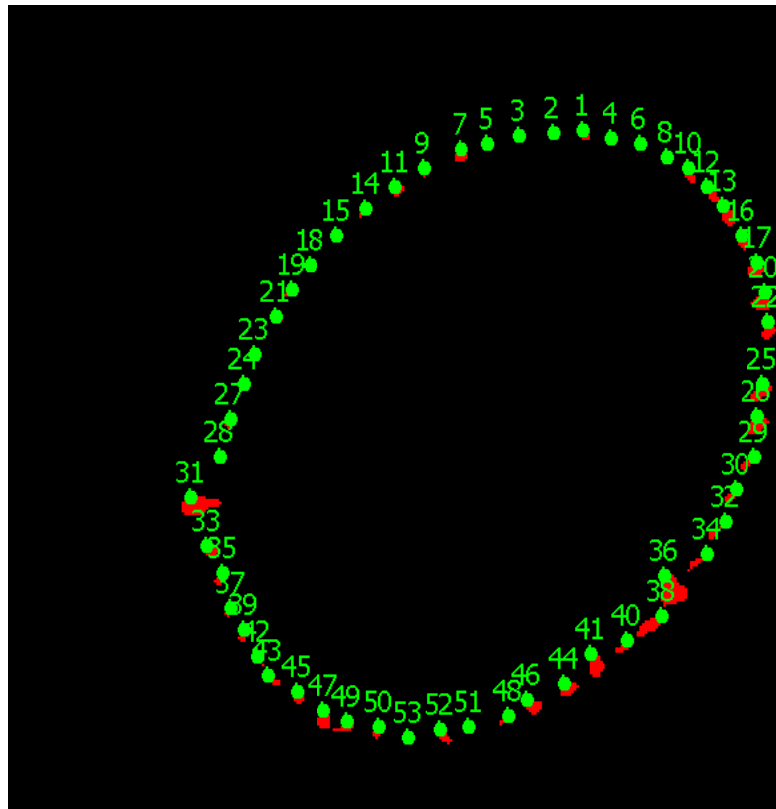


図20 反射点認識結果

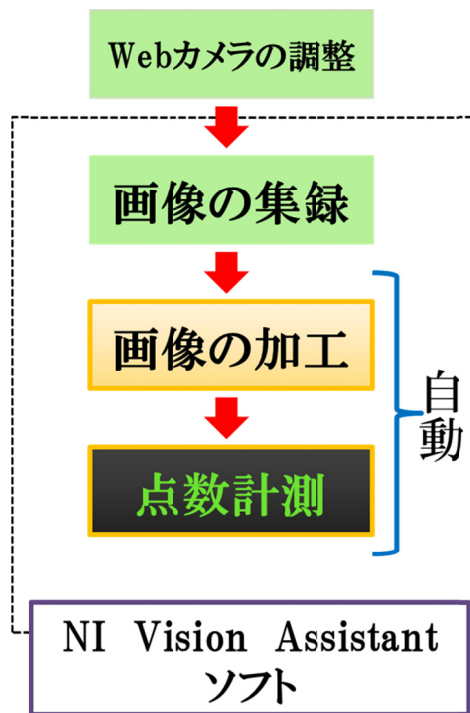


図21 反射点認識システムの流れ図

7. 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの製作

7.1 非点収差Herriott型マルチパスセルについて

Herriott型マルチパスセルでは、6.3で撮影したWebカメラ画像(図22)のように反射点が円形に並ぶ。これにより反射点数が増えると反射点どうしが接し点数の認識が困難になる。一方で非点収差Herriott型のマルチパスセルならば、反射点は図23に示した論文例のように鏡面全体を使用して反射することができることから更なる多重反射を見込める。そこで、既に製作したHerriott型マルチパスセルの構成を利用して非点収差Herriott型マルチパスセルを製作した。

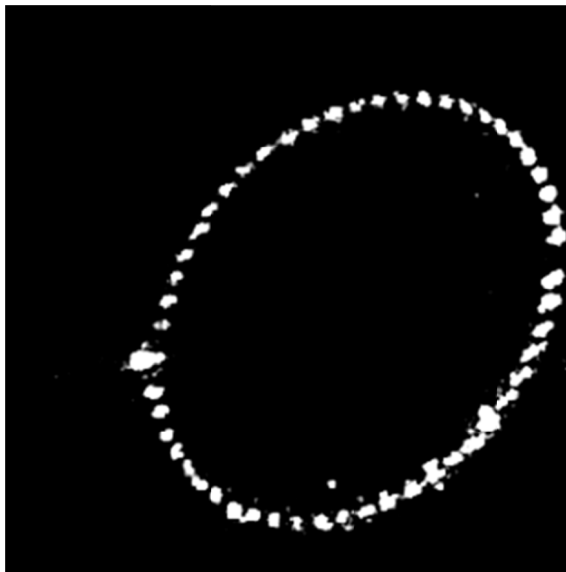


図22 Herriott型マルチパスセルによって作り出されるスポットパターン

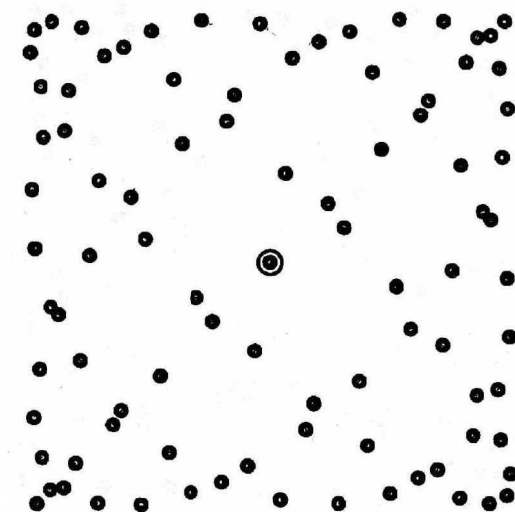


図 23 非点収差 Herriott 型マルチパスセルのスポットパターン(※1)

※1(J.B.McManus, P.L.Kebabian, and M.S.Zahniser: Astigmatic mirror multipass absorption cells for long-path-length spectroscopy, APPLIED OPTICS/Vol.34,No.18/20 June 1995)

図 24 に非点収差 Herriott 型マルチパスセルの理論式を示す。ただし、鏡面距離を D 、曲率半径を R 、横軸方向を x 、縦軸方向を y とし、鏡面上の反射点の座標位置 (x, y) は $(\text{Cos}\theta_x, \text{Cos}\theta_y)$ で表される。この理論式より非点収差 Herriott 型マルチパスセルを製作するには鏡の曲率半径が X 軸方向 (R_x) と Y 軸方向 (R_y) で異なる必要があるとわかる。そこで、既に製作した Herriott 型マルチパスセルの構成(図 3)をそのまま使用し、ミラー 2 を縦軸方向に歪ませることで非点収差 Herriott 型マルチパスセルを製作する。なお、非点収差 Herriott 型マルチパスセルに用いるミラーは、Herriott 型マルチパスセルのミラーとは別のものを使用することとし表 6 に使用するミラーについて示す。また、図 25 に曲率半径の概略図を示し、図 26 に球面鏡を縦軸方向に歪ませる時の横断面図を示す。図 26 の左が鏡を歪ませる前の断面、右が鏡を歪ませたときの断面となっており、鏡を歪ませることで縦軸方向の曲率半径が小さくなり、横軸方向の曲率半径との間に差異が生じる。

表6 非点収差型マルチパスセル用ミラー

メーカー	型番	仕様
SIGMA KOKI	TCA-50C08-10000	アルミコート、曲率半径10m、焦点距離10m

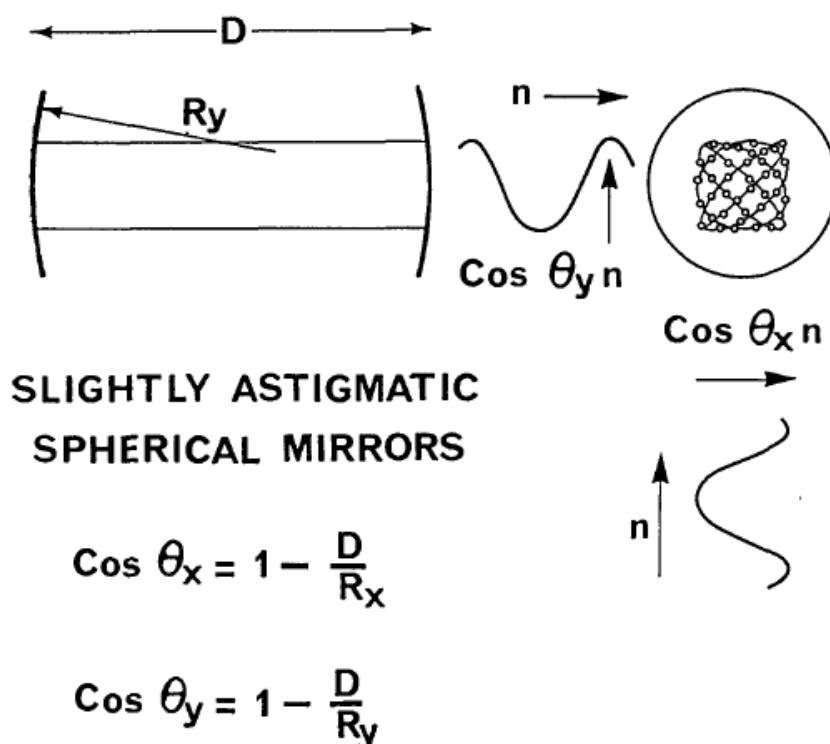


図 24 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの理論式

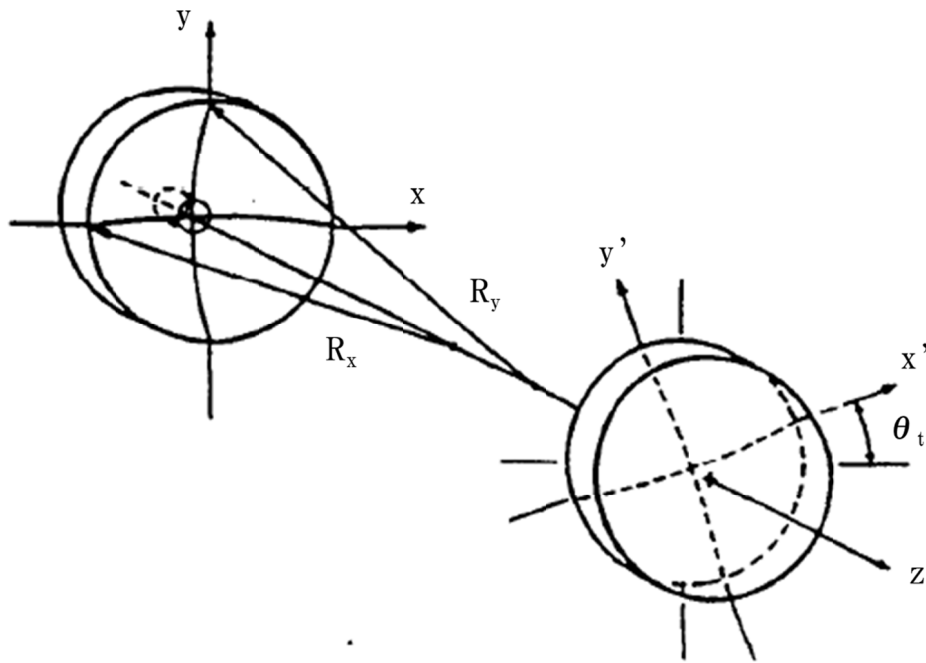


図25 曲率半径の概略図

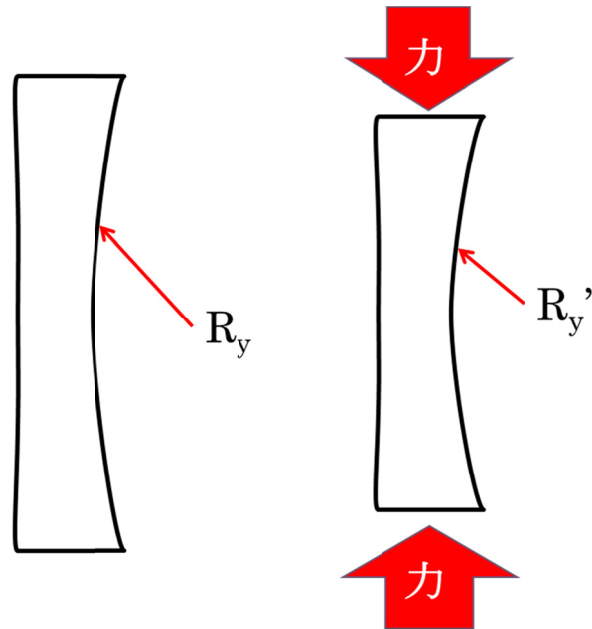


図26 球面鏡の横断面図

7.2 非点収差Herriott型マルチパスセルの構成

7.2.1 鏡を歪ませる固定具の製作

X軸方向とY軸方向の曲率半径が異なることで非点収差が生じるため、一方向に鏡を歪ませる固定具の製作を行った。図27にその固定具を示す。鏡の受け具をねじで締めることでY軸方向のみに力を加える。これにより、Y軸方向の曲率半径はX軸方向の曲率半径よりも小さくなり、非点収差Herriott型のマルチパスセルができる。

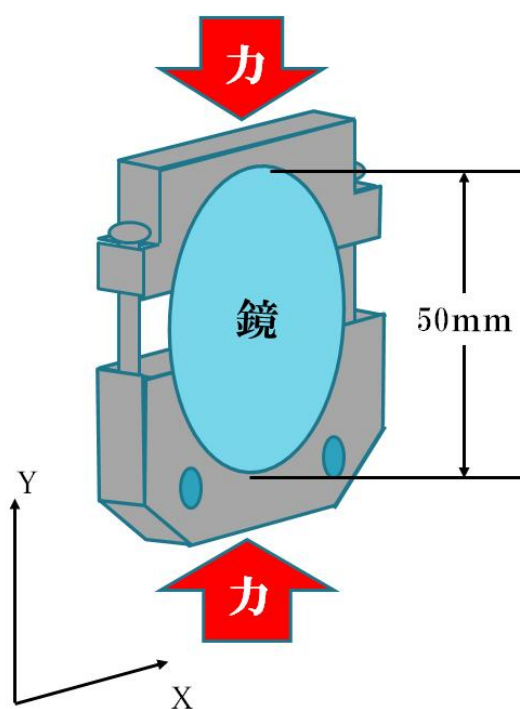


図27 鏡を歪ませる固定具

鏡をねじで締め続けたところ、鏡裏面に亀裂が生じた。そのため、鏡をねじで締めて縮ませられるY軸方向の径長は4mmが限界であった。よって、鏡のY軸方向の直径は50mmから46mmまで縮ませることができる。鏡に亀裂が生じた際の様子を図28に示す。

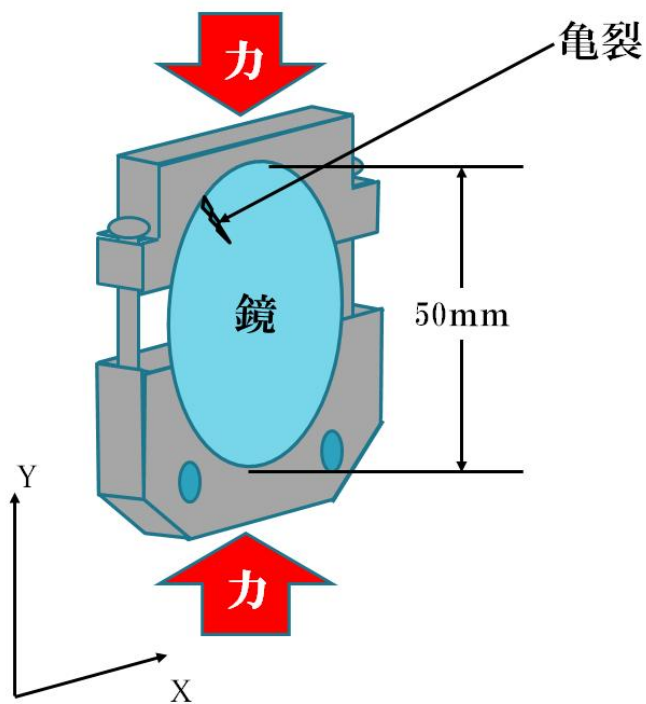


図28 鏡に亀裂が生じた様子

7.2.2 鏡を歪ませる固定具を回転させる機構の製作

鏡の曲率半径がX軸方向(R_x)とY軸方向(R_y)で異なり、鏡の角度によってもスポットパターンは変わるので、反射鏡を歪ませる固定具全体を回転できる機構を製作した。

7.2.3 非点収差Herriott型マルチパスセルの組立と入射条件

図31に7.2.1と7.2.2で製作した非点収差Herriott型マルチパスセルの部品組立図を示す。鏡を歪ませる固定具と回転円板をねじ穴で固定する。それを、回転円板受け具にはめ込む。このとき、回転円板受け具の上部と下部は回転円板がスムーズかつガタつきなく回転できるだけの間隔を空けて固定する。

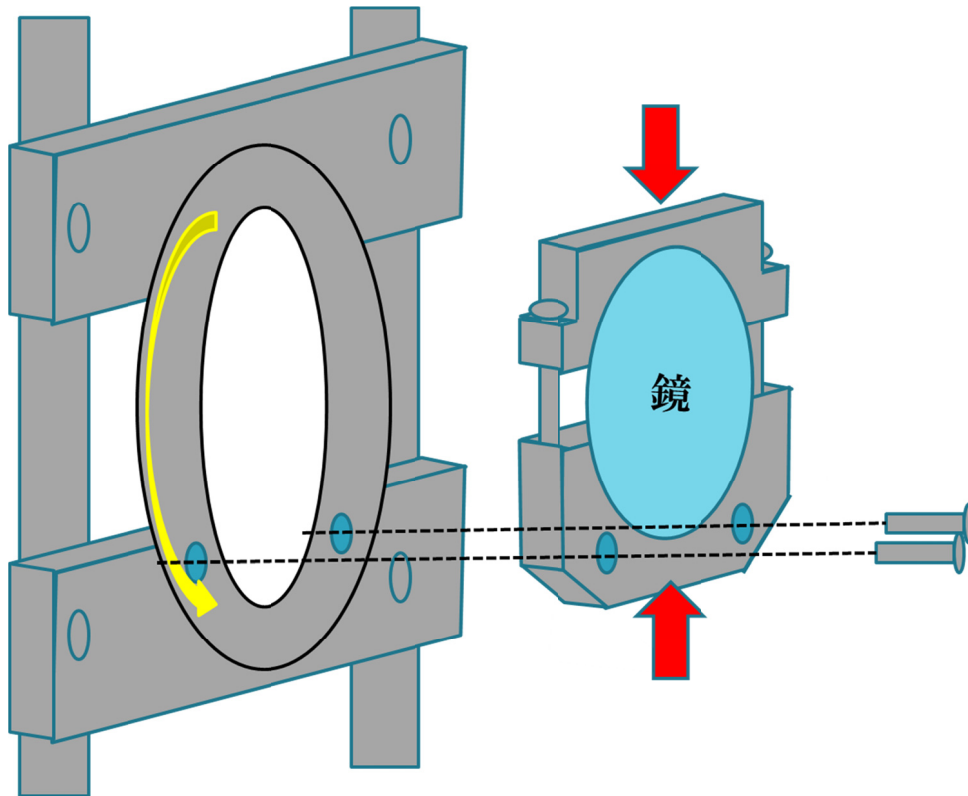


図31 非点収差Herriott型マルチパスセルの部品組立概略図

そして、4のHerriott型マルチパスセルの入射条件と同様に鏡面距離を d 、焦点距離を f で表し、第二鏡面の x 軸から約 90° の鏡面上部に最初の反射点が現れるときの鏡面距離は、以下の式で表される。(図5参照)

$$d = 2f$$

上記の式より表7の鏡を使用した場合の鏡面距離を求めると以下ようになる。

$$d = 2 \times 10 = 20 \text{ [m]}$$

よって、鏡面距離20mで反射点が第二鏡面の x 軸から約 90° の鏡面上部に現れるように入射角度、鏡面角度等の調整を行った。ただし、実際に鏡面距離20mを確保するのは容易ではないため、第二鏡面が20m先に存在すると仮定し、鏡面距離1m地点での光路の位置を想定して調整を行った。

7.3 非点収差 Herriott 型マルチパスセルのスポットパターン

非点収差 Herriott 型マルチパスセルの動作確認に用いる光線は波長 532nm の可視光線を使用した。使用した可視光線の緑色レーザーについて表 7 に示す。また、非点収差 Herriott 型マルチパスセルの概略図を図 32 に示し、ミラー1 を第一鏡面、ミラー2 を第二鏡面とする。第二鏡面上の反射点を撮影するために使用した一眼レフデジタルカメラについて表 8 に示す。

表7 緑色レーザー

メーカー	型番	仕様
LightVision Technologies.Corp	JPN-1-3(A4)APC	波長532nm

表8 一眼レフデジタルカメラ

メーカー	型番	仕様
Nikon	D5100	有効画素1620万ピクセル

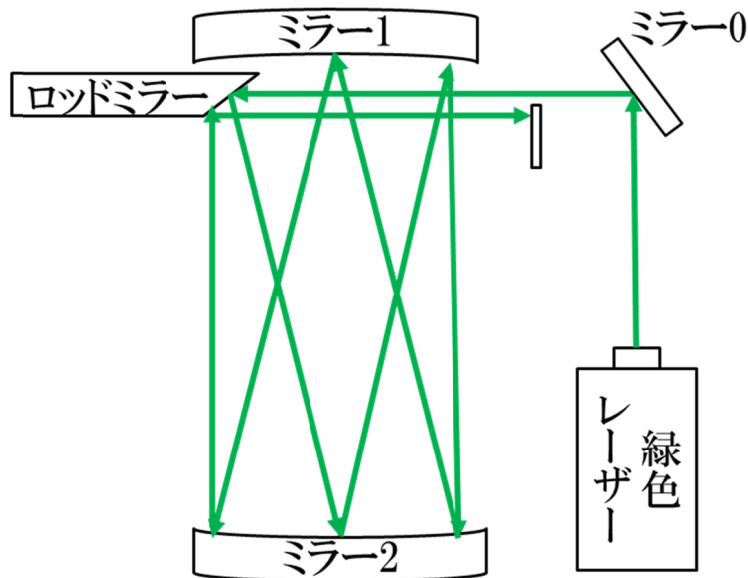


図 32 非点収差 Herriott 型マルチパスセルの概略図

非点収差 Herriott 型マルチパスセルは、Herriott 型マルチパスセルとは異なり、鏡面距離が変わると、鏡面上には様々なスポットパターンが生じる。鏡を歪ませる固定具によって鏡を圧縮・非圧縮した際の各々の第二鏡面側のスポットパターン（鏡面距離 50cm）を以下の図 33 と図 34 に示す。また、論文(※2)に記載されているパターン例と製作した非点収差 Herriott 型のマルチパスセルの第二鏡面側スポットパターン（a: 鏡面距離 75cm , b: 鏡面距離 67cm）を以下の図 35、図 36、図 37、図 38 に示す。

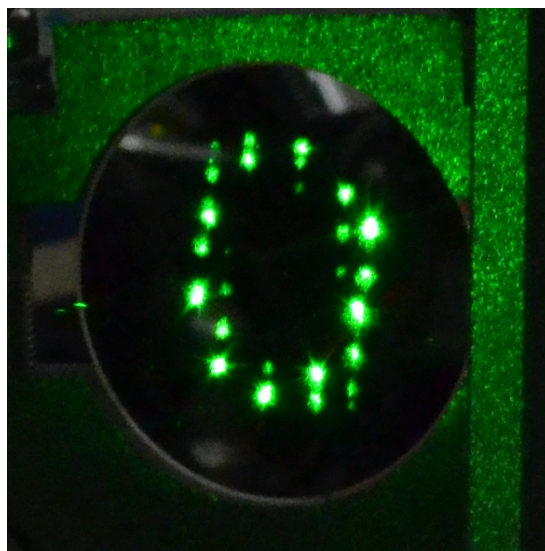


図 33 非点収差 Herriott 型のマルチパスセルのスポットパターン(圧縮)

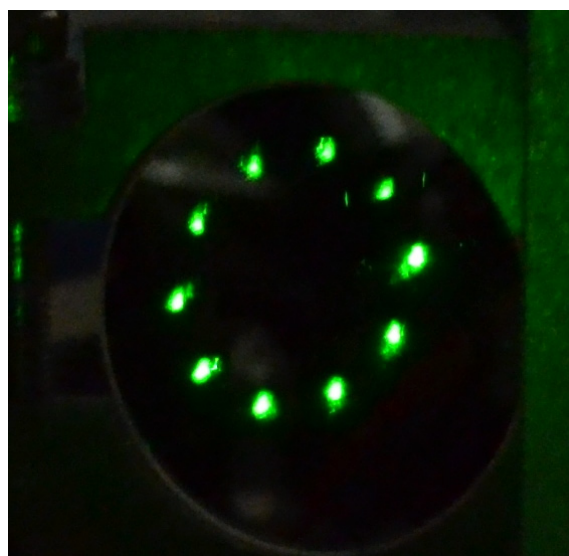


図 34 非点収差 Herriott 型のマルチパスセルのスポットパターン(非圧縮)



図 35 スポットパターン a (※2)



図 36 製作したマルチパスセルのパターン a

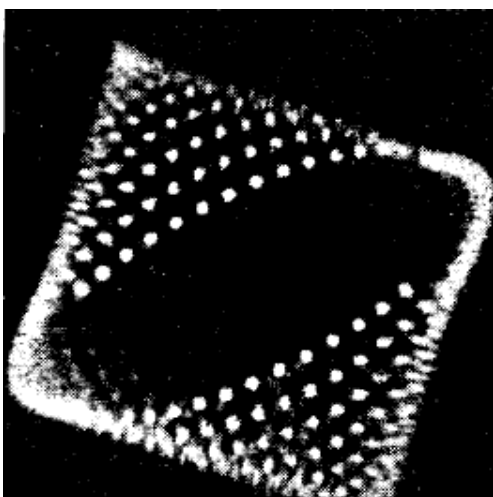


図 37 スポットパターン b (※2)

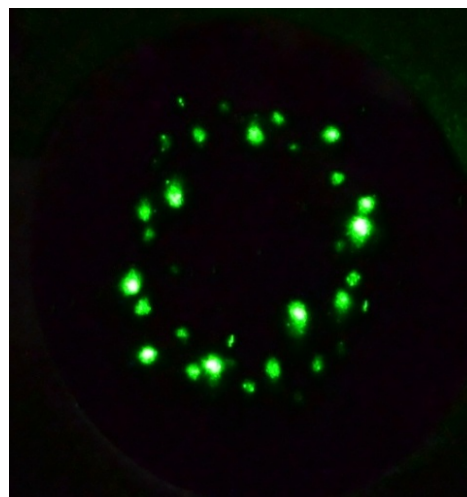


図 38 製作したマルチパスセルのパターン b

※2(Folded Optical Delay Lines: Donald R. Herriott and Harry J. Schulte, APPLIED OPTICS /Vol.4,No.8/August 1965)

鏡の圧縮(図 33)・非圧縮(図 34)を比較すると、圧縮しているスポットパターンが、鏡が歪むことにより非圧縮のスポットパターンに比べ反射点が増えていることがわかる。

また、製作した非点収差 Herriott 型マルチパスセルによってできたスポットパターンは、論文中(※2)の非点収差型 Herriott 型マルチパスセルの特徴的なスポットパターンと同様のものであった。

8. まとめ

Herriott型マルチパスセルおよび、Herriott型マルチパスセルに光線を入射するための、鏡面角度調節用反射点可視化装置を製作した。光線の反射点の数をバンドパスフィルター付属のWebカメラにより確認することができた。これにより、任意の光路長の確保を確認することが可能となった。また、NI Vision Assistant ソフトを用いたWebカメラ画像の反射点自動認識ができた。

また、Herriott 型マルチパスセルの構成を応用し、非点収差 Herriott 型のマルチパスセルを製作した。

9. 課題

非点収差 Herriott 型のマルチパスセル製作における鏡を歪ませる固定具の改良および最適化。非点収差 Herriott 型のマルチパスセルの各部品を波長 1000nm の光線仕様に変更可能にし、その反射点を画像認識システムによって点数計測できるようにする。

参考文献

- 1) J.B.McManus, P.L.Kebabian, and M.S.Zahniser: Astigmatic mirror multipass absorption cells for long-path-length spectroscopy, APPLIED OPTICS/Vol.34,No.18/20 June 1995
- 2) J.Barry McManus: Paraxial matrix description of astigmatic and cylindrical mirror resonators with twisted axes for laser spectroscopy, APPLIED OPTICS/Vol.46,No.4/1 February 2007
- 3) Folded Optical Delay Lines: Donald R. Herriott and Harry J. Schulte, APPLIED OPTICS/Vol.4,No.8/August 1965

付録

非点収差 Herriott 型マルチパスセルのスポットパターン例

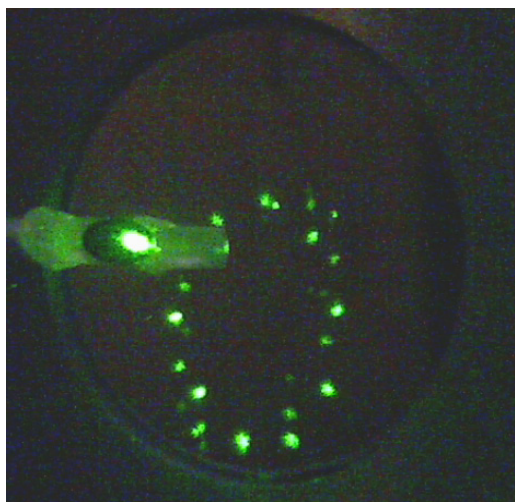


図 39 鏡面距離 50cm(第一鏡面)圧縮時

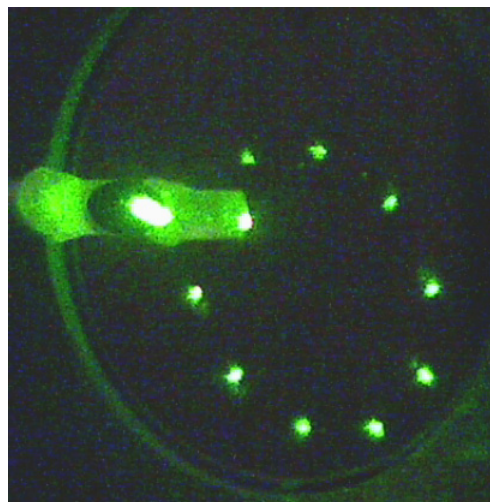


図 40 鏡面距離 50cm(第一鏡面)非圧縮時

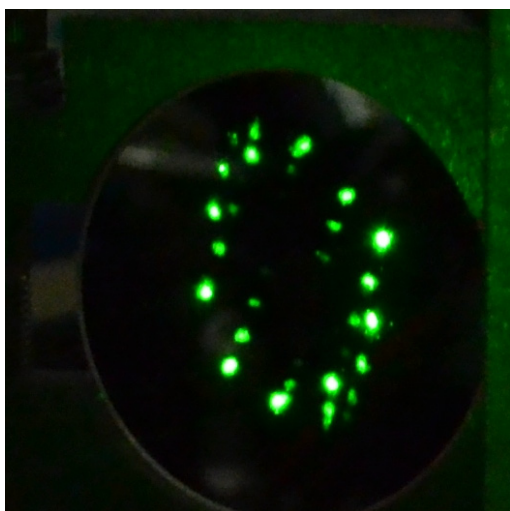


図 41 鏡面距離 70cm(第二鏡面)

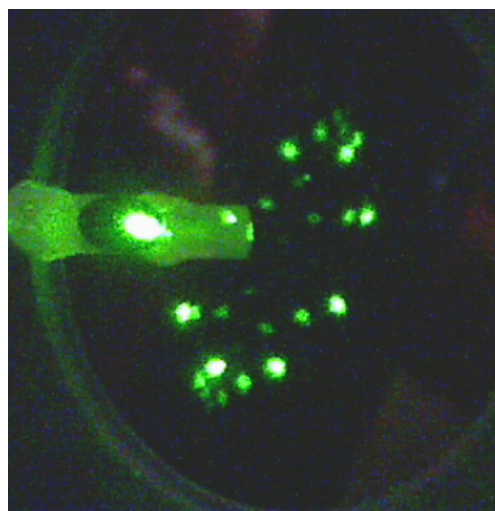


図 42 鏡面距離 70cm(第一鏡面)

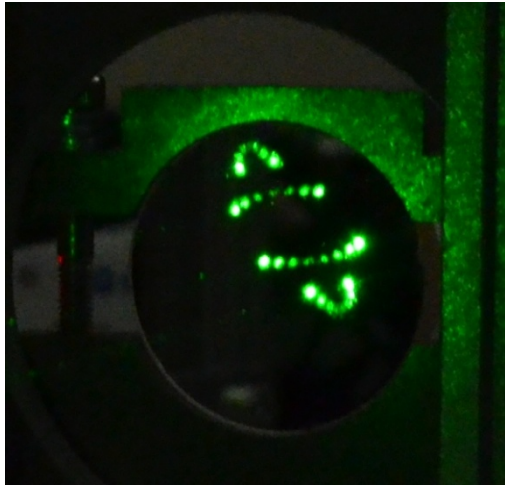


圖 43 鏡面距離 74.5cm(第二鏡面)

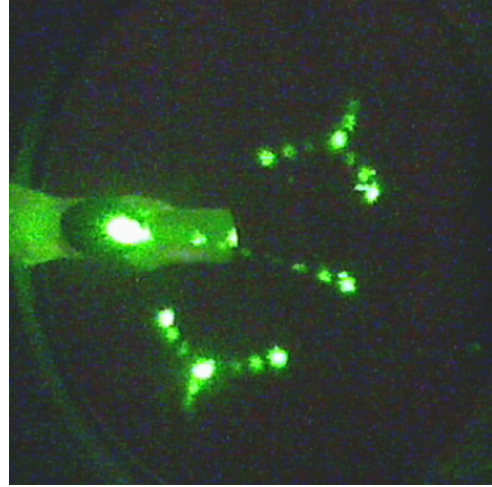


圖 44 鏡面距離 74.5cm(第一鏡面)



圖 45 鏡面距離 76cm(第二鏡面)

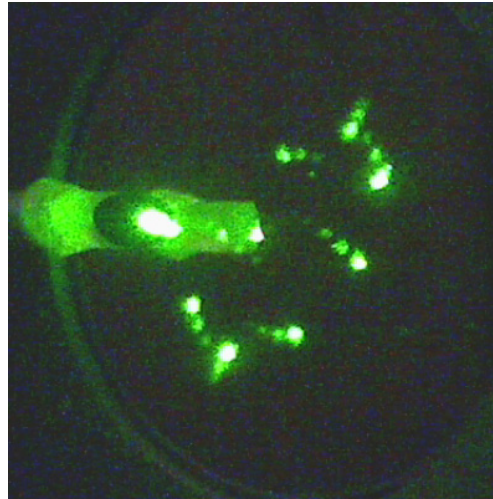


圖 46 鏡面距離 76cm(第一鏡面)

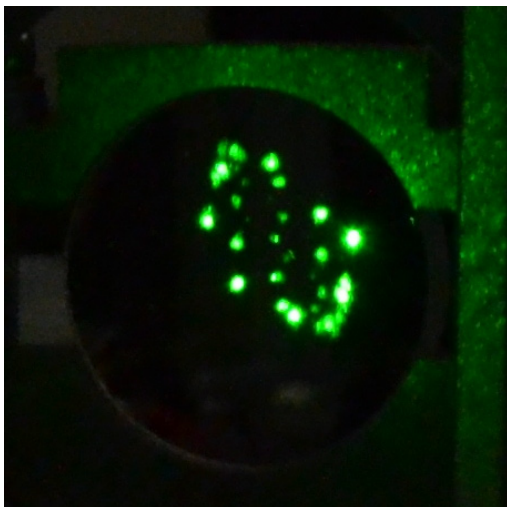


圖 47 鏡面距離 80cm(第二鏡面)

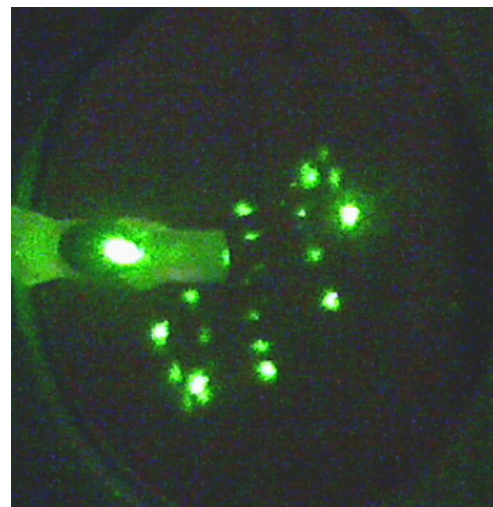


圖 48 鏡面距離 80cm(第一鏡面)

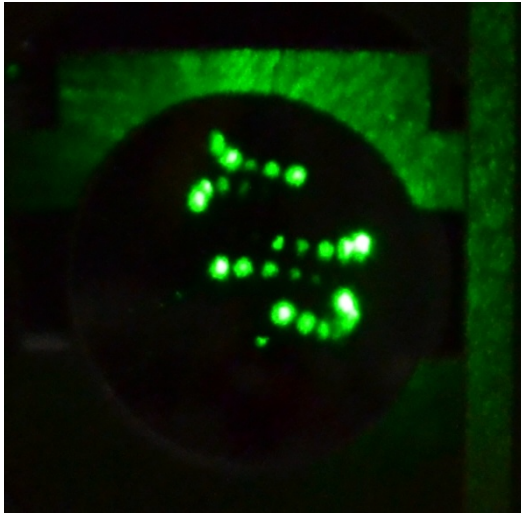


图 49 鏡面距離 94cm(第二鏡面)

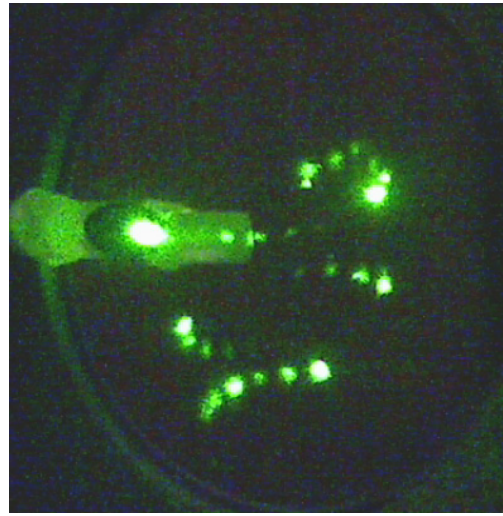


图 50 鏡面距離 94cm(第一鏡面)



图 51 鏡面距離 100cm(第二鏡面)壓縮時

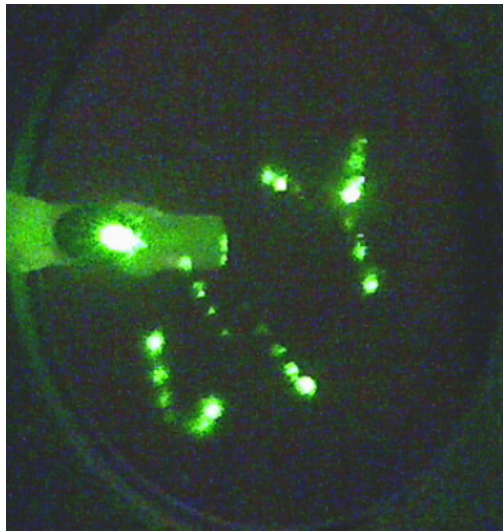


图 52 鏡面距離 100cm(第一鏡面)壓縮時

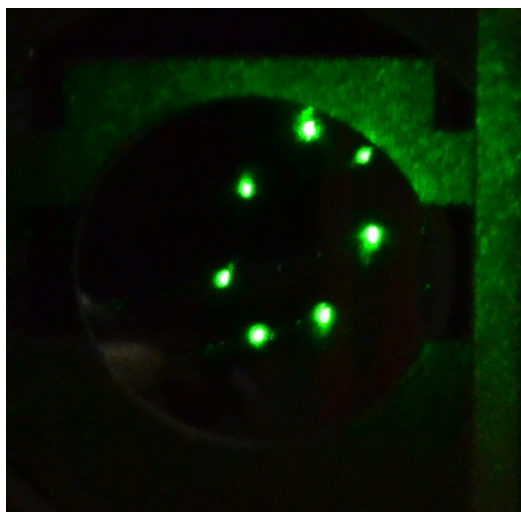


图 53 鏡面距離 100cm(第二鏡面)非壓縮時

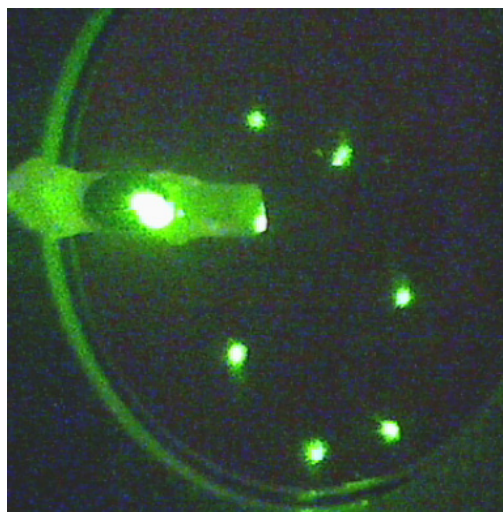


图 54 鏡面距離 100cm(第一鏡面)非壓縮時