

# 曲率可変ミラーを用いた波面変化特性の測定と評価

電子工学科 植田研究室 水野克彦

## 1. 研究背景

レーザー、光の世界においてはいろいろな分野に関する研究がすすめられてきた。しかし、どの分野の研究においてもどうしても避けることができない問題点がある。それは、空気や光の性質そのものによる光の質、つまりクオリティの低下である。この原因となるのが空気の対流による光の波面の乱れや使用する光学機器による収差の存在である。これらの乱れを完全にゼロにすることはできない。収差だけを考えると、無収差レンズを使用すれば収差ゼロで光を透過することができる。しかし、空気による乱れは空気を取り除く以外にゼロにする方法がない。また、空気は対流しているため刻一刻とその乱れに変化がある。これでは、いくら収差を補正しようと精度のよい光学機器を使用しても意味がない。そこで、これらの乱れをできるだけ小さくする方法が考えられた。空気や光学機器による乱れなら、反対の効果を光に与えれば効果が打ち消しあうはずである。

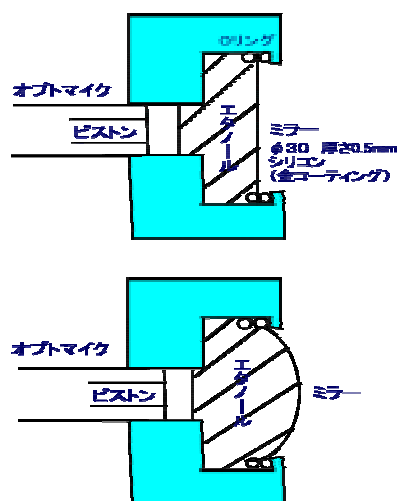
ここで考えられたのがその乱れの変化に対応する光学機器である。空気による乱れの変化に伴って、光学機器を変化させればいいのである。その変化に対応する光学機器で考えられているのが可変ミラーである。そして、その可変ミラーを用いての波面コントロールの研究が行われるようになったのである。

## 2. 曲率可変ミラー

前述したように、可変ミラーを用いれば収差、空気の擾乱を補正することが可能になると考えられる。また、収差の補正については、複数存在する収差のその複合量が小さくなるよう

に補正することが現実的かつ最適だと考えられていることもわかっている。

本研究では曲率可変ミラーを用いて収差補正ではなく光波面の曲率を操作することを試みた。使用した曲率可変ミラーは下図のようになっている。



反射面はシリコンに金コーティングを施されたのが用いられ、30となっていてリングで挟むようになっている。

また、そのミラーの後部にオプトマイクがついていて、モーターが回転することによってピストンが前後する仕組みとなっている。このピストンを使い、ミラーとの間に力の伝達のために入れたエタノールを介してミラーの曲率を変化させるのである。ピストンの移動量とミラーの曲率半径の関係式は次のようになる。

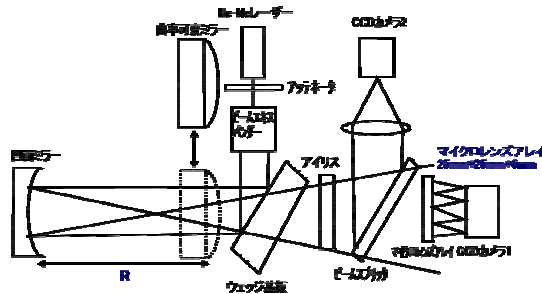
$$L = \frac{1}{l_2^2} \left( \frac{2}{3}R + \frac{1}{3}\sqrt{R^2 - r_1^2} \right) (2R^2 - 2R\sqrt{R^2 - r_1^2} - r_1^2)$$

$L$ :ピストンの移動距離

$r_1$ :ミラーの半径,

$r_2$ :ピストン断面の半径

### 3. 曲率可変ミラーの特性測定



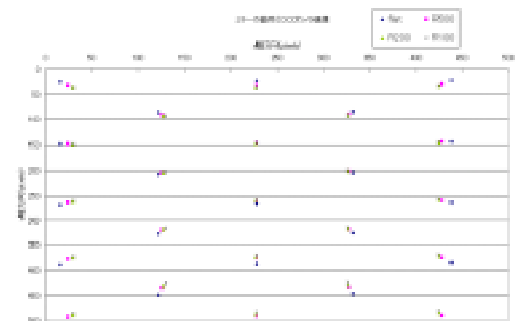
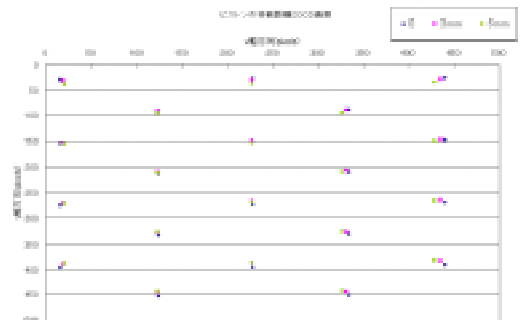
実験系は上図のようになっている。

リファレンス用として、凹面の  $R=200$ 、 $500$ 、flat を用意した。これらのミラーは曲率可変ミラーから距離  $R$  の位置に置き、測定位置における反射光の波面が曲率可変ミラーの位置で凸面ミラー反射したものと同じになるようにした。

測定方法として、マイクロレンズアレイを用いて、それぞれの位置のレンズを通った光を集光させ、その集光点を CCD カメラで撮影した。ここで、レーザー光をビームエキスパンダーで広げた（直径 25mm 以上の円）ことにより、ビーム幅より CCD カメラの受光部（縦 3.6mm、横 4.8mm）が小さくなってしまったという問題が生じてしまった。

このままでは、ビームの異なる部分を測定することになってしまい、CCD カメラに入射してくる光の入射角度が変わってしまうことになる。ミラーは理想的には中心から放射状に等価的に変化しているので、中心からの距離によって波面の変化が異なるということになる。これでは測定結果を互いに比較することはできない。本研究では flat ミラーを基準として使用することにより、その解決を試みた。CCD カメラをもう 1 台使用し、アイリスで絞った光が

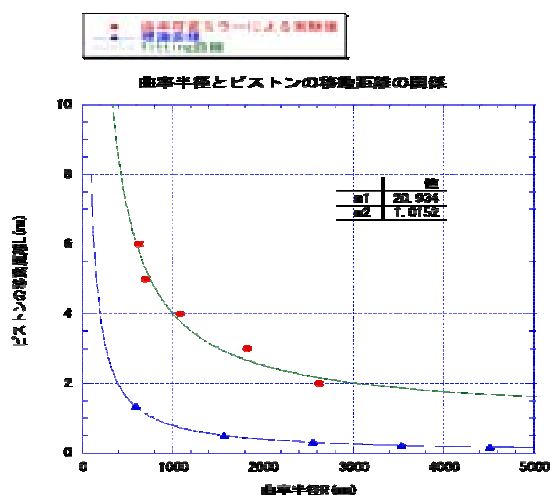
CCD 上で点を結ぶようにし、最初に flat ミラーを使用してその点の位置をモニター上にマークをつけ、他の曲率のミラーや曲率可変ミラーを使用するとき集光点が基準となる flat ミラーと同じ位置にくるように調節する。このようにすれば、どんなときでもアイリスを通る光はコリメートされた光ということになる。つまり、ミラーの角度、高さを操作することによってアイリスを通る光を flat ミラーで反射した光と同じにしてしまうということである。この光を測定する CCD カメラの画面内に入るようにすれば、比較できる画面を映し出すことができる。そのコリメートされた光の近辺は反射ミラーの形状の特徴がでていいるからである。このようにした光をマイクロレンズアレイに通し、CCD カメラで映像を撮った。市販のミラーを使用したときの結果と、曲率可変ミラーの結果を次に示す。（上：市販ミラー、下：曲率可変ミラー）



ピストンの移動距離が大きくなるほど曲率半径が短くなることを考慮にいと、これらの結果より、両方とも曲率半径が短くなるほど光軸方向に点が集まっていることがわかる。ここで問題になってくるのが、ピストンの移動量と曲率半径の関係である。まず、市販のミラーを使用したときの曲率半径とポイント間距離の関係式を求めると次のようになる。

$$\Delta l = 23.831 * 137 \frac{1}{R/2 + 340}$$

この式を用いて曲率可変ミラーのポイント間距離から曲率半径を求める。求めた曲率半径とピストンの移動距離の関係を右上図に示す。青い曲線は理論曲線を示す。

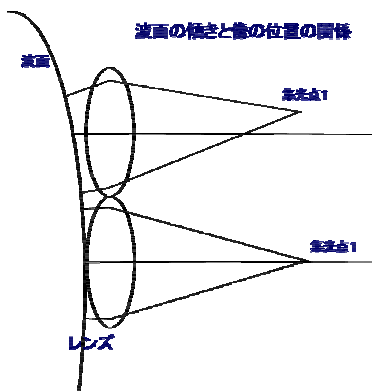


この結果のピストンの移動距離が小さい区間に注目すると、明らかにピストンが移動して力を加えているのにミラーの曲率に変化が小さいことがわかる。これは、ミラーをはさむようにして置いた O リングが影響しているからだと考えられる。確かにピストンの移動距離が小さいときもミラー方向に力が働いている。しかし、その力がミラーの曲率変化には働かず O

リングを押しつぶす力、ミラーの平行移動、不完全な円のミラー変形になっていると考えられるということである。つまり、理論ではピストンの力はすべてミラーの曲率を綺麗に円形に変化させる力になっているが、実験では移動距離が短いうちはその力がミラーの変形以外にも働いていると考えられるというわけである。その差がこのグラフ上でピストンの移動距離が小さい部分にあらわれていると考えられる。

#### 4. マイクロレンズアレイ

先ほど、どちらの場合も曲率半径が短くなるほど光軸にポイントが集まっていると記述した。しかし、次の点を考えると反対の現象が起きているということになる。それはレンズに対して斜めに波面が入射したときに集光点がどのようになるのかという点についてである。このような場合、次ように集光することがわかってる。



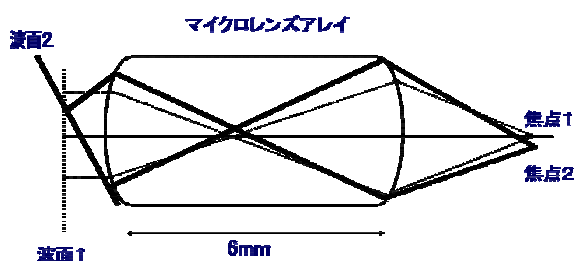
本研究の場合では、マイクロレンズアレイをマイクロレンズの集まりだと考えると、それぞれのマイクロレンズにレンズ方向からある角度斜めになった波面が入射したと考えられ、上図のように集光すると考えられる。しかし、実験結果はそれとは反対の光軸方向に集光点が集まっている。

このことから、マイクロレンズアレイには他の

現象をもたらす原因があるということが考えられる。

マイクロレンズアレイに入る波面の曲率と集光点距離の関係を調べたところ、曲率半径が短くなるほど集光点がレンズに近づくことがわかった。このことから曲率半径が短くなるほど CCD カメラ上では、光がより集まっていると考えられる。この原因の1つとして、マイクロレンズアレイ内で1回光が集光している、ということが挙げられる。

マイクロレンズアレイによる波面と集光点の関係



このような現象が起きていると考えたときにマイクロレンズアレイのレンズの焦点距離がいくつなのかを見積もってみる。R=100mm ミラーのときのマイクロレンズアレイに入射する光の波面の曲率半径は R=390mm となる。実験結果から  $y=11.58\text{pixel}$ 。

$1\text{pixel}=7.3\mu\text{m}$  より  $y=0.0845\text{mm}$  となる。また、 $L=6\text{mm}$  とし、 $z=30\text{mm}$  ということ考慮に入れて計算をすると、 $f_1=3.3\text{mm}$ 、 $f_2=2.5\text{mm}$  となる。それぞれ、入射側、出射側レンズの焦点距離である。但し、これはマイクロレンズアレイ内が屈折率  $n$  の物体で満たされているときである。この結果を使って他の曲率半径を持つミラーの場合にどうなるかを計算する。すると、 $R=200$  のとき  $y=0.074\text{mm}=10.12\text{pixel}$ 、 $R=500$  のとき  $y=0.0534\text{mm}=7.31\text{pixel}$  と求めた。実験より  $R=200$  のとき  $y=10.17\text{pixel}$ 、 $R=500$  のとき  $y=7.576\text{pixel}$  となった。この2

つの結果を比較すると計算結果と測定結果が非常に似ていることがわかる。よって、このマイクロレンズアレイは  $f_1=3.3\text{mm}$ 、 $f_2=2.5\text{mm}$  の組み合わせレンズと同じ働きをすることがわかった。

この計算では光の集光に寄与するのは2枚のマイクロレンズのみで、マイクロレンズアレイ内は一様という条件で行っている。また、マイクロレンズアレイの表面に直接曲率がなくても、マイクロレンズアレイ内に同等の働きをするような屈折率分布が存在していても、このような動作をする。

これらは光がマイクロレンズアレイ内で1回集光しているという仮定のもとで行った理論である。つまり、実験結果と条件付きの理論計算が似ているというわけである。

この結果の妥当性を確認するためにはマイクロレンズアレイのレンズの曲率を測定しなければならない。

以上のように考えれば理論的に説明できることがわかった。しかし、この考え方が妥当なのかを調べることが課題として残っている。

## 5. まとめ、今後の課題

実験結果より、曲率可変ミラーを使用することにより、ある曲率を持つミラーで反射した光と同等の光をつくることができることがわかった。また、平面波をある一定範囲であるが、任意の曲率をもつ波面に変化することができることがわかった。

今後の計画としては、マイクロレンズアレイの曲率の測定、曲率を持つ光を任意の曲率を持つ波面(平面波など)へ変化できるようにする。また、同時にコンピュータ制御することである。