

可変ミラーを用いた光波面制御

電子工学専攻 植田研究室 水野 克彦

1.背景、目的

今日、天文、産業応用分野において、光波面を制御することが重要な課題となってきた。光波面を制御することによって光波面の乱れや収差が抑えられ、天文分野においては精度のよいデータ、産業応用分野においては微細な加工が可能になると期待されている。レンズの特性などによる定常的な波面の乱れや収差であれば無収差レンズや非球面レンズなどの光学機器を用いることにより小さくすることも可能である。しかし、光波面の乱れ量が時間的に変動する場合にはそれだけでは非常に困難である。そのため、様々な場所で時間依存する乱れにも追従できる光学機器の研究が行われている。現在、代表的なものとして PZT、静電気力を利用した可変ミラー、液晶光学素子を用いた空間位相変調素子などがある。しかし、これらを用いた補正システムは高価かつ複雑な制御システムが用いられており、コンピュータによる複雑な計算も必要である。本研究ではピストン、熱を利用した可変ミラーによる光波面制御システムの構築を目的としている。

2.曲率可変ミラーを用いた光波面制御

2-1 曲率可変ミラーの構造と変形特性

本研究室で考案された曲率可変ミラーは金コーティングされたシリコンウェハ(30mm,t0.5mm)をミラーとして用い、背後に設置されているピストンを移動させることにより内部に満たされているエタノールを媒体としてミラー面を凸面に変形することができるものである。曲率可変ミラーの写真を図 1 に示

す。



図 1：曲率可変ミラー

この曲率可変ミラーを図 2 のようにモデル化して考えると、ピストンの移動距離とミラーの曲率半径には次のような関係が成立する。

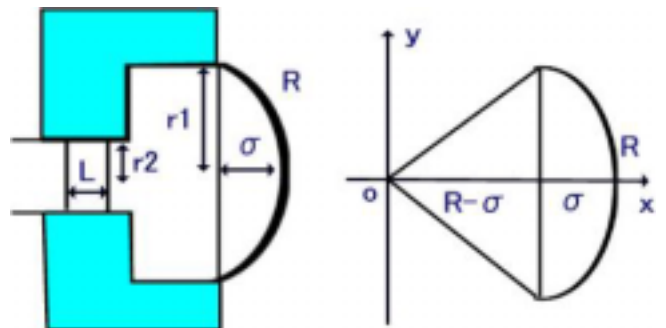


図 2：曲率可変ミラーのモデル図

$$L = \frac{1}{r_2^2} \left(\frac{2}{3} R + \frac{1}{3} \sqrt{R^2 - r_1^2} \right) (2R^2 - 2R\sqrt{R^2 - r_1^2} - r_1^2)$$

これはピストンの移動による体積変動が全てミラーの曲率変動に寄与したものととして式を導出した。また、この曲率可変ミラーのピストンの移動距離と曲率半径の関係を既知の曲率半径を持つミラーとの比較により求めた。その結果を図 3 に示す。先の理論の結果も同図に載せる。この結果からこの曲率可変ミラーでは曲率半径 600mm まで再現できることを確認することができた。

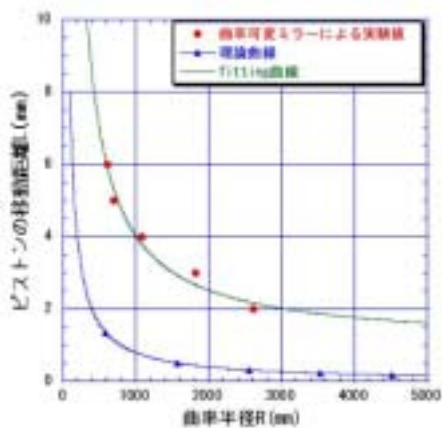


図 3 : 曲率半径とピストンの移動距離の関係

実験結果が理論曲線と異なるのはミラーが Oリングで止められているため完全な凸面状に変形ができていないこととピストンを移動させたにもかかわらずミラーが平行移動し、曲率変動に寄与しない部分が存在することが原因であると考えられる。

2-2 曲率可変ミラーを用いた光波面制御

先に示した特性をもつ曲率可変ミラーを用いた曲率補正の実験系を図 4 に示す。

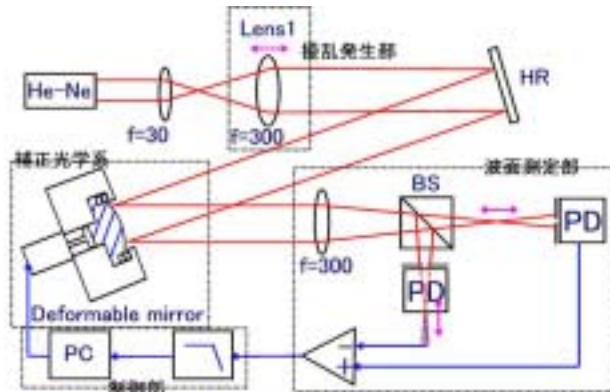


図 4 : 曲率可変ミラーを用いた光波面制御実験

今回の実験では Lens1 を光軸に平行移動させることによって光波面の曲率変動を促した。本研究で考案したものとしてフォトディテクタ(PD)を 2 つ使用した波面測定部がある。波面測定部に入射した光はレンズを通過し、ビームスプリッタで 2 つに分けられ集光する。図のよ

うに PD を集光点の前後に置き、平行光が入ってきたときにこれらの PD の電位差がゼロになるように設定する。Lens1 の移動によって入射する光が曲率を持つと集光点の位置が移動し PD に電位差が生じる。このようにして生じた電位差が電気回路、パソコンを経る事によって制御信号に変換され曲率可変ミラーに送られる。本研究では PD の電位差がゼロ、つまり波面測定部に入射する光波面が平行光になるよう補正を行った。曲率補正実験結果を図 5 と図 6 に示す。

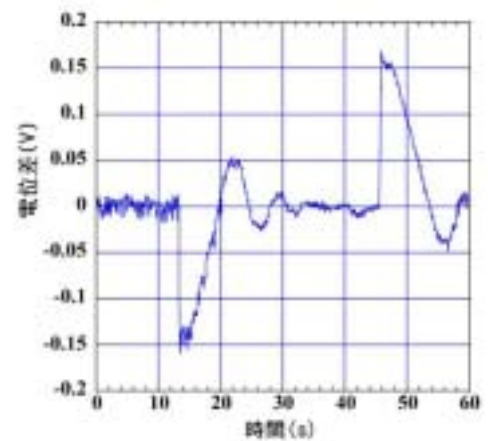


図 5 : 一方向単一変動に対する曲率補正結果

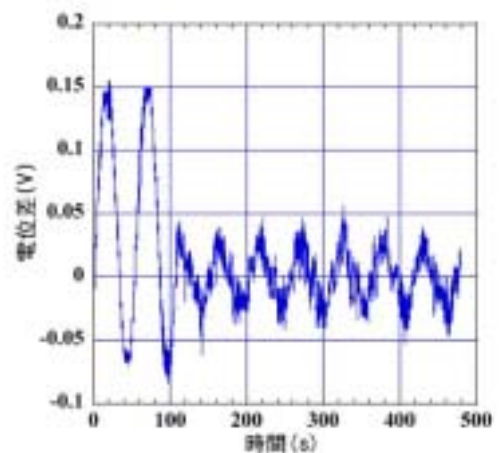


図 6: 連続往復変動に対する曲率補正結果

図 5 ではレンズの移動を一方向に 1 回動かし、それによる光波面の曲率変動を曲率可変ミラーで補正した。この時のレンズの移動距離は

10mm である。測定開始後 13,46 秒における急峻な電位差変化はレンズ移動に伴うものであり、その後曲率可変ミラーで電位差、つまり光波面の曲率変動が補正されていることがわかる。この時の補正に必要な時間は 10 秒であった。また、図 6 はレンズの移動を連続的に往復させたときの結果である。測定開始から 100 秒までは制御を行っていないため、レンズ移動による曲率変動をそのまま表している。その後制御を開始することによりレンズ移動による曲率変動が抑圧されていることがわかる。この時の抑圧利得は 2.75 であった。今回構築したシステムにおいて抑圧利得を決定するものは変動振幅、変動中心、変動周波数の 3 つである。先の 2 つを一定にし変動周波数のみを変化させ抑圧利得の変化を測定した。その結果を図 7 に示す。この結果から 23mHz 以下で抑圧利得 2.0 以上、35mHz で抑圧利得 1.0 となることが確認できた。

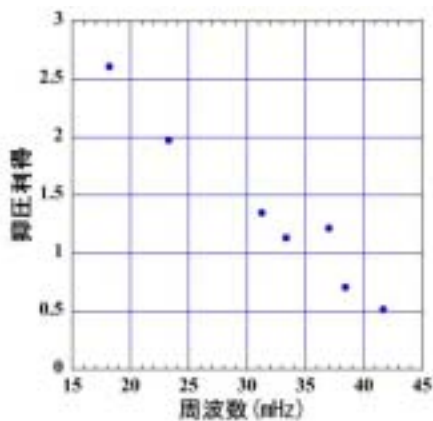


図 7：変動周波数と抑圧利得の関係

3. 熱可変ミラーを用いた光波面制御

3-1 熱可変ミラーの構造と変形特性

本研究では 2 つ目の可変ミラーとしてバイメタルを利用した熱可変ミラーを作製した。熱可変ミラーの構造を図 8 に示す。バイメタルは熱を入力することによって曲がる性質を持つ

ている。先の実験と同様のシリコンウェハミラーを用いバイメタルをミラーの背部全面に接着した。このように接着することによりミラーを凹面に変形させることができる。

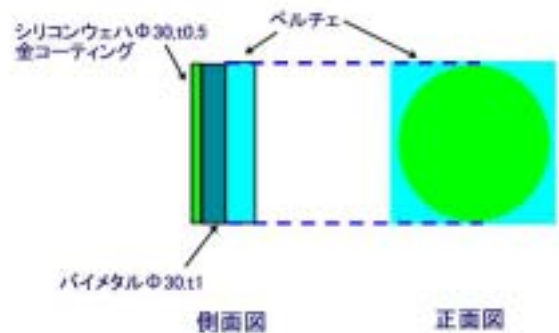


図 8：熱可変ミラーの構造

また熱入力、冷却デバイスとしてペルチエを使用した。バイメタルを円盤型にしたときの温度と中心部のへこみ量の関係は式 1 となる。本研究で用いたバイメタルの大きさ(30mm t1.0mm)で計算すると式 2 のような結果を得る。

$$D = \frac{K\Delta T d_1^2}{4t} \quad (1)$$

$$D = 3.3\Delta T(\mu m) \quad (2)$$

K:湾曲係数,D:変位量,t:バイメタルの厚さ,d_1:バイメタルの外径, T:温度変位

ミラーの中心部のへこみ量とミラーの曲率半径の関係を図 9 のようにモデル化すると式 3 が得られ、グラフは図 10 のようになる。

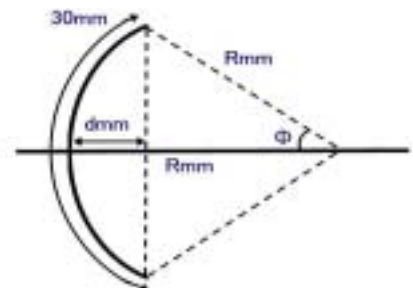


図 9：曲率半径とへこみ量のモデル

$$d = R(1 - \cos \frac{2700}{\pi R}) \quad (3)$$

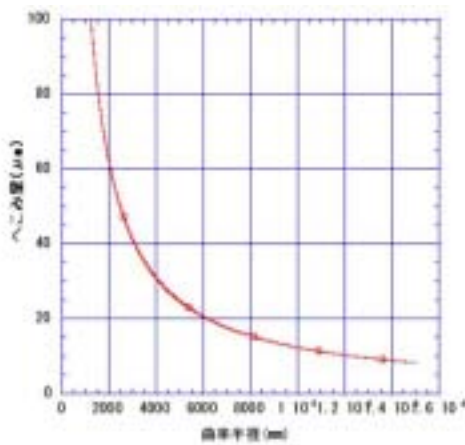


図 10：曲率半径とへこみ量の関係

この熱可変ミラーに熱を入力したときのミラーの表面形状を、flat ミラーを用いたマイケルソン干渉計で観測した。その結果を図 11 に示す。

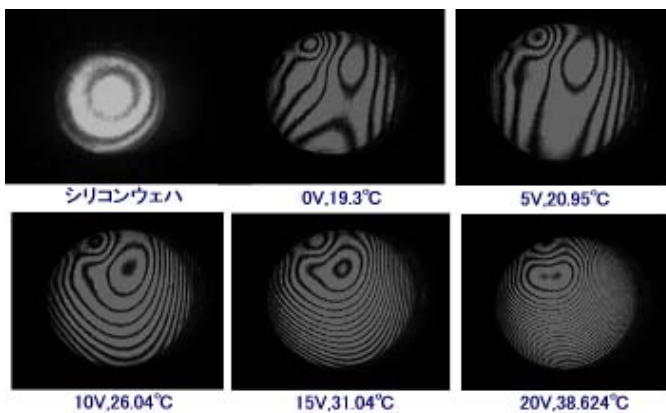


図 11：バイメタルの各温度時の干渉縞

この図から概ね円状にミラーが変形していることがわかる。また、温度を上昇させることにより干渉縞の間隔が短く、つまりミラーの曲率半径が小さくなっていることがわかる。ここで、この干渉縞の数からミラーのへこみ量を計算した。その結果を図 12 に示す。今回、実験系内でビーム径を 12mm に切り出したため、ミラーの大きさではなく光が当たっている部

分のみを考慮に入れて計算を行った。この結果からバイメタルの温度とへこみ量に線形の関係が成り立っていることがわかる。

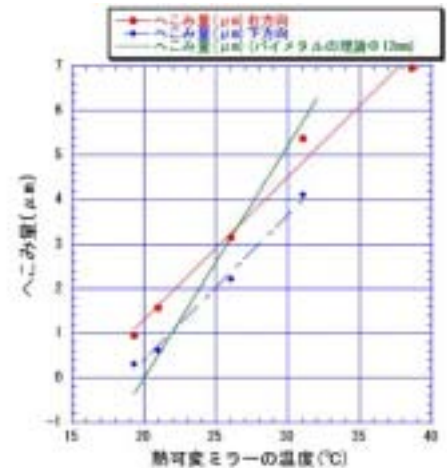


図 12：バイメタルの温度とへこみ量の関係

また、先に示したバイメタルの変形によるへこみ量も温度に対して線形の関係であったことを考えると、今回作製した熱可変ミラーはバイメタルの変形によりミラー形状が変形していると考えられる。しかし、図 12 から実験とバイメタルの理論とは傾きが異なっていることもわかる。これはミラーとバイメタルを接着するとき用いた接着剤が変形力を吸収しているからだと考えられる。この熱可変ミラーの温度と曲率半径の関係を図 13 に示す。

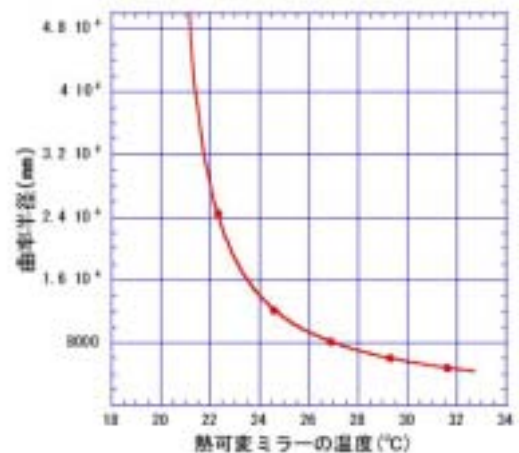


図 13：バイメタルの温度と曲率半径の関係

3-2 熱可変ミラーを用いた光波面制御

次にこの熱可変ミラーを用いた光波面の曲率補正実験を行った。実験系を図 14 に示す。

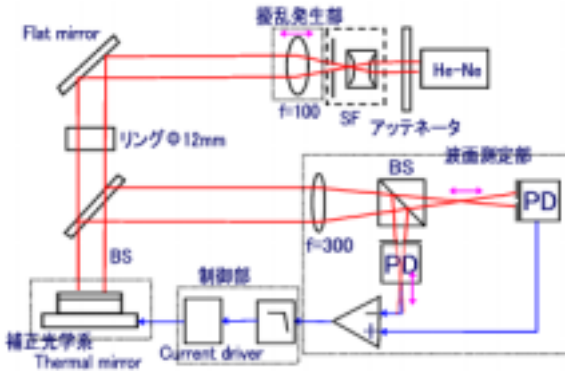


図 14 : 熱可変ミラーを用いた曲率制御実験

波面測定部として、先の曲率可変ミラー実験時と同様なシステムを用いた。

このときの曲率補正結果を図 15 に示す。

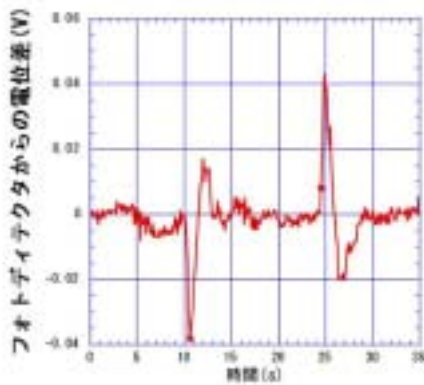


図 15 : 熱可変ミラーを用いた曲率制御

10,24 秒時点の急峻な電位差変化はレンズ移動に伴うものであり、その後熱可変ミラーによる補正が行われていることが確認できる。この時のレンズの移動距離は $100 \mu\text{m}$ 、補正に必要な時間は 5 秒であった。電位差がゼロで安定することからペルチエを装着した熱可変ミラー、今回用いた波面測定部、制御部を用いることによって光波面の曲率を自動制御することが確認できた。

4.まとめ

4-1 結果

本研究では 2 つの可変ミラーによる光波面の曲率補正を試みた。1 つ目はアクチュエータにモーター駆動のピストンを利用した曲率可変ミラーである。この曲率可変ミラーでは曲率半径 $\sim 600\text{mm}$ までを実現した。またこの曲率可変ミラーを用いて光波面の曲率制御を行うことができた。その際、変動周波数 23mHz で抑圧利得 2.0 以上を実現した。しかしこの曲率可変ミラーの制御帯域は動作条件により異なるが mHz オーダーと低く、アクチュエータであるピストンがその制御帯域を決めていることがわかった。そのためアクチュエータを改善することが制御帯域の向上につながると考えられる。2 つ目はバイメタルを用いた熱可変ミラーである。このミラーにおいてはバイメタルの接着時でその表面精度がほぼ決まってしまうことが判明した。今回製作した熱可変ミラーを用いることによってレンズ移動に伴う光波面の曲率制御を行うことができた。さらに熱可変ミラー時では波面制御システム内にコンピュータを用いることなく光波面の曲率制御を行うことができた。

以上から、今回考案した波面測定部で光波面の曲率変動を測定することができ、さらに非常にシンプルな光波面の曲率制御システムの構築ができたと言えるだろう。

4-1 今後の課題 将来展望

曲率可変ミラーにおいては、制御帯域を決めているピストンの改善が第 1 の課題である。径の大きいピストンを用いる、モーターの駆動スピードを上げるなどアクチュエータの根本的解決により制御帯域を向上させることが重要である。

熱可変ミラーにおいては、まずバイメタル接

着後の表面精度の向上である。現在のところ 12mm 内で $1.6\ \mu\text{m}$ 以下は実現したが、接着剤をより綺麗に均一に塗布することにより $1\ \mu\text{m}$ 以下にすることが可能であると考えている。また、変形の等方性という意味でも接着剤の選択や均一に塗布することは重要な課題であるといえる。さらに、曲率補正限界や制御帯域の測定も重要な課題である。

本研究では光波面の曲率のみを対象として補正を行ったが、光波面の曲率を補正するだけでは不十分である。よって収差など他の影響も補正できるようにミラー変形を曲率以外に広げる必要がある。図 16 のようにバイメタルを細切れにしてミラーの背後につけることによって任意な変形を促すことが可能であると考えている。しかし、これでは全体の変形が困難になることが考えられるため、今回のような全体の形状を決めるものと局所的な形状を決めるものの融合が必要であると考えている。

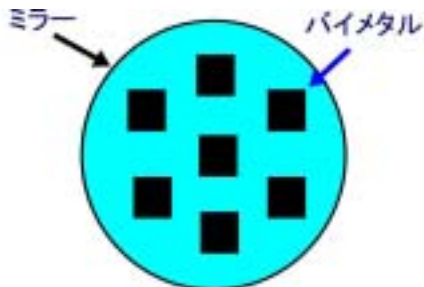


図 16 : 任意に変形可能な熱可変ミラー

最後になったが本研究室で光をフェーズマスクに通すことによってそのフーリエパターンで各収差を分類できることをシミュレーションにより示すことができたため、ここに記述する。図 17 がフェーズマスクであり、そのフーリエパターンが図 18 である。フェーズマスク内の黒くなっているところは位相シフトゼロ、それに対し白くなっているところは位相をシフトさせる領域である。フーリエパターン内の集光点は Zernike 多項式で求まる各収差項

に対応している。

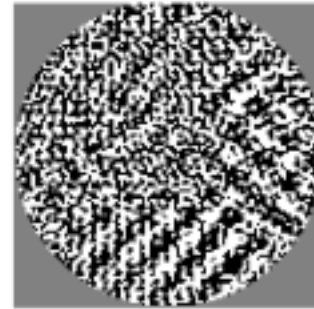


図 17 : フェーズマスク

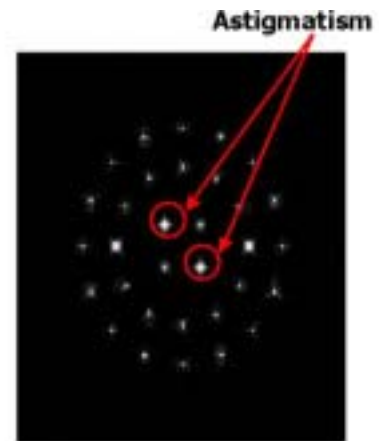


図 18 : フーリエパターン

例えば記載されている 2 つの集光点は 1 つの astigmatism に対応していてこれらの集光強度が同じ場合、つまり集光強度差がゼロの場合にその収差がゼロであることを意味する。このフェーズマスクを用いることによって各収差を分解することができ、個々に収差を補正することが可能になると考えている。また、2 つの集光強度の差をゼロにすることにより収差を補正することができるので、今回考案した 2 つのフォトディテクタを用い電位差がゼロになるように制御する波面制御システムを応用することができると考えている。

5. 参考文献

Gleb Vdovin and Mikhail OPTICS LETTERS vol.27,No.9,677(1994)