

解説

補償光学系の原理とその応用

一ノ瀬 祐治

(株)日立製作所電力・電機開発本部 〒319-12 日立市大みか町 7-2-1

(1995年7月28日受理)

Principle of Adaptive Optics and the Applications

Yuuji ICHINOSE

Power & Industrial Systems R & D Division, Hitachi, Ltd., 7-2-1, Omika-cho, Hitachi 319-12

1. ま え が き

レーザーあるいは光波の波面歪みを検出し、光学素子で光路差を変え歪みを補正する概念は、1953年にBabcockにより初めて提唱された¹⁾。その後、1970年代になり、ようやく光学素子および電子部品の進歩に伴い波面補正が実現できるようになった。そして今日、光学装置に波面補正機能を設け、その光学性能を向上させるための研究開発が進められている。

一般に波面補正技術には、位相共役波を発生する非線形光学材料を利用するもの (phase conjugation)^{2,3)} とミラー面の凹凸を制御し機械的に波面を補正する補償光学系 (adaptive optics) がある。ここでは補償光学系の主要技術である形状可変鏡と波面検出法について述べるとともに、様々な光学装置への応用例について概説する。

2. 形状可変鏡

図1に補償光学系の基本構成を示す。入射光の波面歪みを波面検出器で検出し、形状可変鏡でミラー面の凹凸を制御し波面歪みを補正するものである。波面歪みの補正性能はストレール比 (補正後の焦点強度と無歪時の焦点強度の比) で評価され、その上限は形状可変鏡の空間分解能で決まる。形状可変鏡の構造はいくつかの方式で大別され、以下ではそれらについて述べる。

2.1 分割型形状可変鏡 (分割鏡, segment mirror)

図2に防衛庁技術研究本部第2研究所で試作された分割鏡の外観図と駆動機構部の構造を示す⁴⁾。3×3配列の9枚のミラーごとに同図(b)の駆動機構が設けられており、45°反射で使用するためミラー寸法は22×31 mmと

なっている。この分割鏡はマルチディザイナ方式補償光学系用に開発されたものであり、各ミラーの高さを制御し波面を補正するほか、レーザーを位相変調する機能をもつ。ミラーに直結した圧電素子が位相変調用であり、レーザー波長10.6 μmの1/20程度の振幅で高周波駆動する。ミラーに軸を介して接続された圧電素子が波面補正用であり、波長の2倍以上の駆動量 (30 μm) をもつ。圧電素子は駆動量の増加に伴いその姿勢が傾くが、シャフトの採用により最大傾きを20 μrad以下に抑えている。また補正用圧電素子には変位センサー付きのものを採用し、ヒステリシス特性をフィードバック制御により補償している。

図2の分割鏡はミラー高さのみを制御するものであるが、ミラー高さのほか2軸の角度も制御できる構造の分割鏡も開発されている⁵⁾。ミラーごとに3個の圧電素子を設けて駆動するものであり、構造は複雑になるがミラー傾きを制御できるためストレール比を向上できる。その仕様はミラー数512、ミラー径220 mm、駆動量6 μm、応答周波数300 Hzであり、大気伝播中に生じる波面歪みの補正用に開発されたものである。

2.2 一体型形状可変鏡 (一体鏡, deformable mirror)

分割鏡にはミラー間隙による光損失や構造の複雑さがあり、1枚の薄いミラーに複数の駆動素子を取り付けた一体鏡が補償光学系に採用される例が多い。図3に示す一体鏡は⁶⁾、アルミミラー (直径90 mm、厚み1 mm) に37個の圧電素子を10 mm間隔で取り付けたものである。波長10.6 μmのCO₂レーザー用に開発されたもので、ミラー面精度0.4 μm、駆動量18 μm、応答周波数10

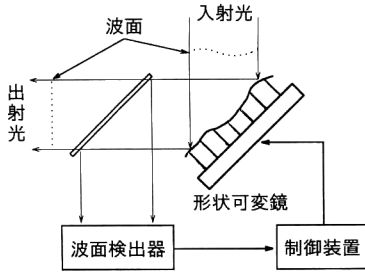


図1 補償光学系の構成

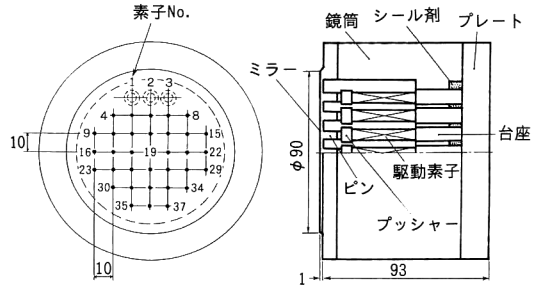
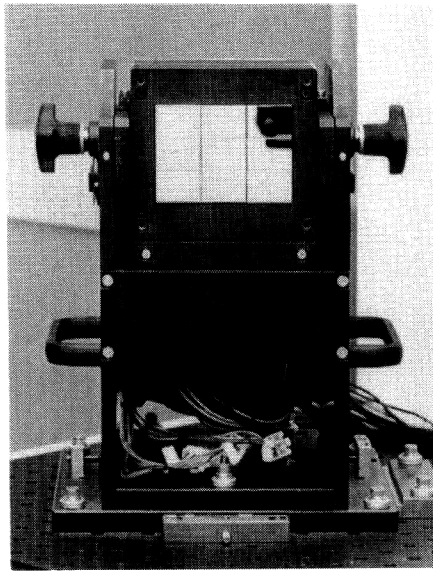
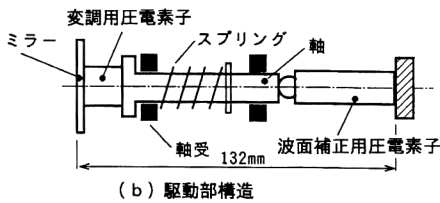


図3 一体形状可変鏡⁶⁾



(a) 外観



(b) 駆動部構造

図2 分割形状可変鏡 (写真提供 防衛庁)⁴⁾

kHzの性能をもつ。図3の一体鏡中心位置 ($x=0$, $y=0$) でのミラー変位に対する、各位置でのミラー変位の伝達特性を図4に示す。 $y=0$ の伝達特性では、ピンの直径 (5 mm) に相当する位置まで変位は一定であり、離れるに従い変位が低下している。素子間隔は10 mm であり、隣接する駆動素子より離れた位置での伝達変位は微小であり、その影響は無視できることがわかる。

図3の一体鏡はCO₂レーザー用であったが、可視光

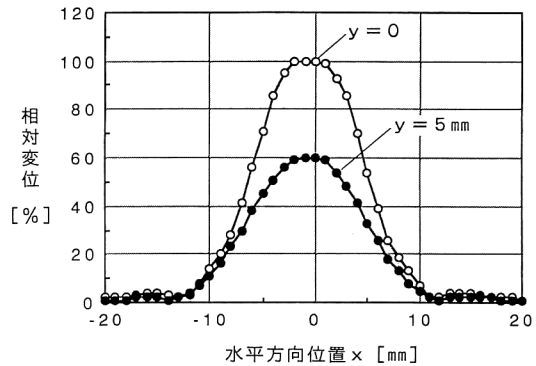


図4 ミラー変位の伝達特性

用のものも開発されている。一体鏡のミラー厚みは、応答性の点では薄い方がよく、ミラー面加工精度の点では厚い方が望ましい。低膨張率のガラスを母材としミラー厚1.5 mm で241個の圧電素子を取り付けた一体鏡において、面精度0.04 μm 、応答周波数1 kHzの性能が得られている⁷⁾。また高出力レーザーの波面補正を目的に、中空構造のミラーに冷却材を循環させ冷却する機能をもつ一体鏡も開発されている⁸⁾。

2.3 曲率ミラー

曲率ミラーとは、駆動電圧とミラー面の曲率が比例する駆動素子を採用したものであり、バイモルフミラー、メンブレンミラー等が開発されている。図5はバイモルフミラーの構造であり、互いに逆方向に分極した圧電素子を2枚貼り合わせたバイモルフ圧電素子をミラー裏面に複数個取り付けたものである。バイモルフ圧電素子に電圧を印可すると一方は伸び、他方は縮むため、全体として屈曲変位を起こす⁹⁾。有効径30 mm、素子数13のバイモルフミラーが開発されており¹⁰⁾、構造が単純で、比較的大きな曲率を得ることができる。

図6はメンブレンミラーの構造であるが¹¹⁾、チタニウ

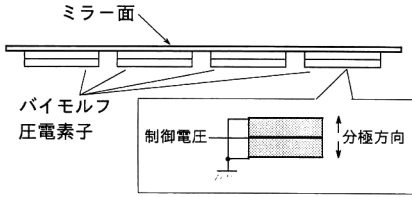


図5 バイモルフミラーの構造

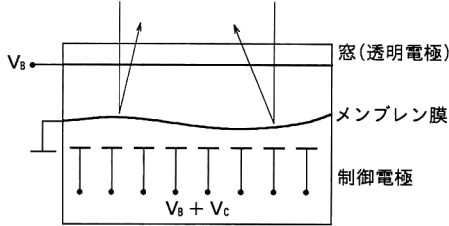


図6 メンブレンミラーの構造

ム膜 (1.4 μm) をミラーとし、ミラーと制御電極間に生じる静電力でミラー面を変形させる。制御電極だけでは凹面しかできないため、透明電極で逆方向にミラーを引っ張ることで、凹凸面の制御を可能にしている。有効径 25 mm のミラーを 53 個の制御電極で駆動し、4 kHz の応答周波数が得られている。メンブレンミラーは静電力を利用するため、ミラーの曲率は印可電圧の自乗に比例する。なお、このような曲率ミラーは後述する波面の曲率分布を検出するカーバチャー方式とのマッチングがよく、コマ収差などの比較的低次の歪み補正に利用される。

3. 波面検出法

補償光学系の波面検出には様々な方式が提案されており、表1に代表的なものを示す。シャックハルトマン、シェアリング干渉、カーバチャーの各方式は波面検出器で光学的に検出し、マルチディザ方式は光学的な波面検出器を設けず間接的に波面を検出するものである。

3.1 シャックハルトマン方式¹²⁻¹⁴⁾

図7にシャックハルトマン方式の原理図を示す。レンズを2次元的に配列したマイクロレンズアレイに入射光を入力し、各レンズ焦点像を CCD (charge coupled device) で検出し、計算機処理にてその重心位置変位からレンズに入射された波面の傾きを算出する。波面傾き角度 θ_x, θ_y は次式で計算される。

$$\theta_x = x_G/f, \theta_y = y_G/f \quad (1)$$

表1 補償光学系の波面検出方式

方式名	検出原理および検出量
シャックハルトマン方式	レンズ焦点像の位置変化による波面傾き
シェアリング干渉方式	自己干渉による干渉強度変化による波面傾き
カーバチャー方式	レンズ焦点前後の強度差による波面曲率
マルチディザ方式	送信光の位相変調による光の位相差

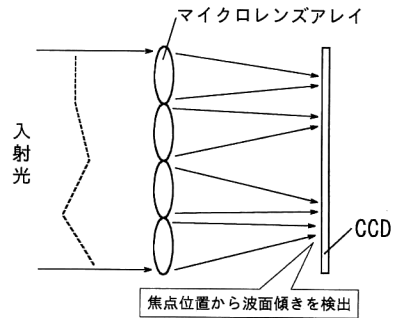


図7 シャックハルトマン方式の原理

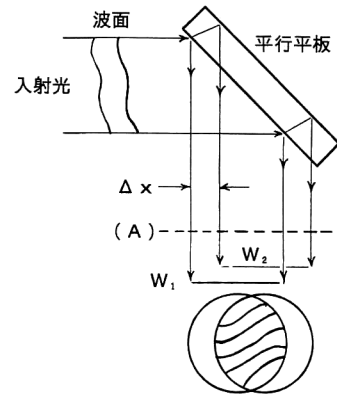


図8 横ずらしシェアリング干渉計

$$x_G = \frac{\sum_{m=1}^M x_m \cdot I_m}{\sum_{m=1}^M I_m}, y_G = \frac{\sum_{m=1}^M y_m \cdot I_m}{\sum_{m=1}^M I_m} \quad (2)$$

ただし、 x_G, y_G : 重心位置、 f : レンズ焦点距離、 I_m : 各画素の輝度、 x_m : 画素の位置 x 、 y_m : 画素の位置 y 、 M : 計算する領域の画素数。

通常、画素数 16 (4×4) 程度であり、像の光強度にもよるが画素幅の 1/10 程度の重心位置分解能が得られる。マイクロレンズで波面の空間分解能が決まるが、300 μm の方形レンズ ($f=10$ mm) を 30×30 配列したものが開発されている¹⁴⁾。

3.2 シェアリング干渉方式

波面を干渉計測するには、参照波面および縞走査が不要なシェアリング干渉計が適しており、図8に原理図を示す。入射波面と平行平板により横方向に Δx ずらした波面を干渉させる。このとき観測面(A)上の波面 W_1 , W_2 の複素振幅は次式で表される。

$$W_1 = A \cdot \exp\{j(2\pi/\lambda) \cdot W(x,y)\} \quad (3)$$

$$W_2 = B \cdot \exp\{j(2\pi/\lambda) \cdot \{W(x-\Delta x,y) - \phi_0\}\} \quad (4)$$

ただし、 A, B : 強度, ϕ_0 : 平行平板による位相差。

干渉強度分布 $I(x,y)$ は、

$$I(x,y) = A^2 + B^2 + 2AB \cos[\Delta x \cdot \{W(x,y) - W(x-\Delta x,y)\} / \Delta x + \phi_0] \quad (5)$$

となり、強度は x 方向の波面傾き $\partial W / \partial x$ に比例する。波面検出器では、入射光を2つに分け x, y 方向のシェアリング干渉計を構成して波面傾きを検出する¹⁵⁾。なお、光軸方向にずらし干渉させる方式や¹⁶⁾、回折格子を回転させ干渉像を変調することで波面検出速度を向上させた方式等¹⁷⁾が開発されている。シェアリング干渉方式は、空間分解能が高く、ずらし量により感度が調整可能であるが、 $2n\pi$ 位相差の誤検出および光学系の複雑さが問題である。

3.3 カーバチャー方式

カーバチャー方式は波面の曲率分布を検出するものであり、図9にその原理図を示す。レンズ焦点前後の光強度 I_1, I_2 の比は、次式に示すように波面 W の2次微分に比例する¹⁸⁾。

$$(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) = \{f(f-l) / l\} P \cdot \nabla^2 W \quad (6)$$

ただし、 P : レンズ伝達関数, f : レンズ焦点距離。

波面検出器として構成するには、図9のレンズ焦点位置にメンブレンミラーを配置し、ミラーの凹面および凸面時の像を CCD で検出することで、検出速度を向上させることができる¹⁹⁾。曲率ミラーとカーバチャー方式は、双方とも波面の2次微分を制御、検出することから、1対で使用されることが多い^{18,19)}。

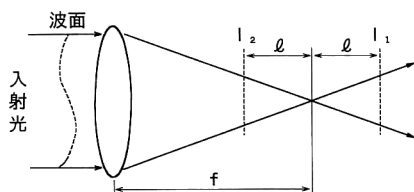


図9 カーバチャー方式の原理

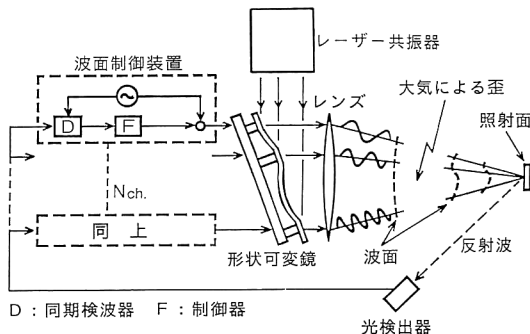


図10 マルチデザイナー方式の原理

3.4 マルチデザイナー方式^{20,21)}

マルチデザイナー方式は波面検出器を用いずに波面を間接的に検出するものであり、その原理を図10に示す。レーザービームを形状可変鏡の駆動素子ごとに異なる周波数で位相変調したとき、その領域のレーザー振幅は次式で与えられる。

$$U_m = A_m \cdot \exp[j\omega t + j(\phi_m + \psi \cdot \sin\omega_m t)] \quad (7)$$

ただし、 A_m : レーザー強度, ϕ_m : レーザー位相, ψ : 位相変調時の振幅, ω_m : 位相変調角周波数。

レーザービームのレンズ焦点強度 I_p には、次式に示すように位相変調信号 $I(m)$ が含まれる。

$$I_p = I_{DC} + \sum_{m=1}^N I(m) \cdot \sin\omega_m t + I_H \quad (8)$$

$$I(m) = k \cdot \sum_{k \neq m}^N \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (9)$$

ただし、 I_{DC} : 直流成分, I_H : 高周波成分, k : 定数, N : 駆動素子数。

式(9)に示す $I(m)$ は、位相変調した領域のレーザー位相 ϕ_m と他の領域のレーザー位相 ϕ_k との差の正弦関数に比例するため、すべての $I(m)$ を検出すれば波面を間接的に検出できる。波面が平坦であればすべての $I(m)$ はゼロとなるため、各駆動素子ごとに $I(m)$ を同期検波器で分離検出し、 $I(m)$ を独立に最小化する制御系を構成することで波面制御が可能となる。マルチデザイナー方式では、形状可変鏡に高い応答性が求められる反面、波面検出用の光学系が不要で単純な制御系で構成できる点が特徴である。

マルチデザイナー方式では、式(9)からわかるように $2n\pi$ の位相差が生じてもこれを検出できない。このため、波面歪みと形状可変鏡のミラー面が異なり、波面補正誤差を生じるおそれがある。その対策として、波面は連続であり隣接する駆動素子間のレーザー位相差 π 以内

と仮定し、 π 以上の場合には一方に 2π を加算する制御法が開発されている²²⁾。

4. ミラー一面制御法

補償光学系の波面検出器は波面の傾きあるいは曲率分布を検出するため、形状可変鏡を制御するには波面の再構成演算が必要となる。検出値が波面の傾き、曲率のいずれの場合でも、以下に示す演算法から形状可変鏡の駆動量は決定できる。いま、波面を (ϕ) 、検出値を (s) とすれば、次式の関係が成立する。

$$(s)=[B]\times(\phi) \quad (10)$$

ただし、 $[B]$:感度行列、

一方、形状可変鏡のミラー面 (ϕ_m) と駆動電圧 (a) には、次式の関係が成立する。

$$(\phi_m)=[D]\times(a) \quad (11)$$

ただし、 $[D]$:応答行列、

式(10)、(11)より (ϕ) と (ϕ_m) が等しいとし、 (a) について解けば次式が得られる²³⁾。

$$(a)=[B]\times[D]^{-1}\times(s) \quad (12)$$

いま (a) の要素数を M^2 とすれば、波面傾きを検出する場合、 (s) の要素数は $2M(M-1)$ となり、式(12)は $2M^3(M-1)$ 回の積和演算となる。駆動素子数が増えると演算量も増大するため、処理の高速化が課題であり、アレイプロセッサを用いた回路構成が開発されている²⁴⁾。

一方、制御演算を簡略化する手法も開発されている。式(12)では、ひとつの駆動電圧をすべての波面検出値から演算するのに対し、特定の波面検出値から制御演算するものである。駆動素子と隣接する波面検出値のみを用いたり¹⁵⁾、駆動素子と直交する波面検出値のみを用いる

手法が開発されている²⁵⁾。一般に、検出値を限定し制御すれば応答速度が低下するが、直交する検出値を用いる手法では他の検出値に外乱が生じても次の制御演算で反応できるため、応答性の低下が小さいことが検証されている。

5. 補償光学系の応用例

補償光学系により波面歪みを補正できるため、レーザービーム品質や光学的分解能の向上を目的に各種の光学装置への応用が進められている。以下ではその代表的なものについて述べる。

5.1 天体望遠鏡

天体望遠鏡の分解能は、次式に示す光学開口 D と観測波長 λ から決まる回折限界が上限となる。

$$\theta=1.22\cdot\lambda/D \quad (13)$$

ところが実際の分解能は、光学系の歪みのほか大気ゆらぎによる波面歪みのために低下し、大気ゆらぎのコヒーレンス長 r_0 がみかけ上の開口 D となる。 r_0 は観測波長および気象条件により異なるが可視光で数十cm程度であり、開口数 m の大型天体望遠鏡ではその影響は大きい。

そこで図11に示すように、天体望遠鏡で集光した光を補償光学系で波面補正した後、天体像を観測するシステムが開発されている。ヨーロッパ南天天文台のCOME-ON(チリ、開口3.6m)は²⁶⁾、19素子の形状可変鏡と 5×5 配列のシャックハルトマン波面検出器の構成で、波長 $1.7\mu\text{m}$ で回折限界にほぼ近い0.12秒角の分解能が得られている。現在では、さらに素子数を向上させたシステムで近赤外域での波面補正が達成されている²⁷⁾。このほかハワイ大学¹⁹⁾、日本の国立天文台におい

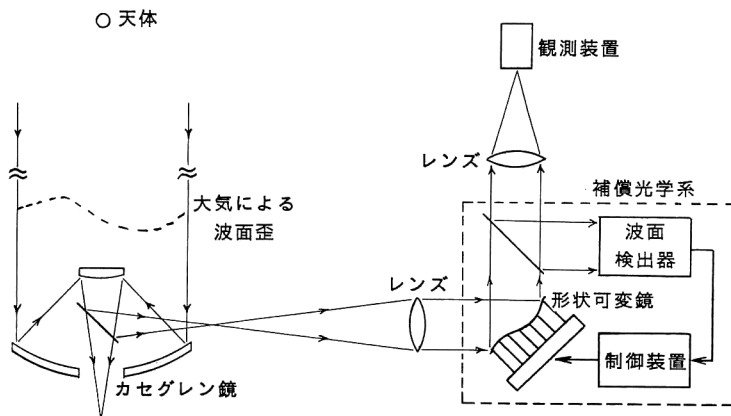


図11 天体望遠鏡への補償光学系の適用例

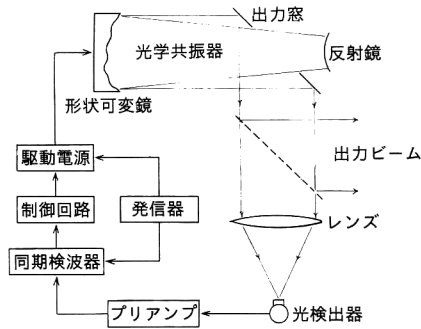


図 12 レーザー共振器への補償光学系の適用例

でも開発が進められている²⁸⁾。天体用のシステムでの課題は、可視光での補正を可能にするための高空間分解能化と観測天体の限界等級を上げるための光検出器の高感度化にある。また、より暗い天体を観測する目的で、観測天体と同視野の上空 (90 km) のナトリウム層にレーザービームを照射して人工的な星 (レーザーガイドスター) を作り、その反射光から波面を推定し波面補正する技術も開発されている²⁹⁾。

5.2 レーザー共振器

気体レーザーのビーム品質 (空間コヒーレンス) は、共振器内部の気体密度の不均一性および不純物などの混入により低下する。さらに高出力レーザーの場合には、気体中や出力窓での熱レンズ効果により低下する。図 12 にレーザー共振器に補償光学系を適用した例を示す。レーザー共振器の一方のミラーを形状可変鏡にし、共振器から出力されるレーザーの波面を検出し波面補正する。波面検出にはマルチディザイナ方式を採用しており、28 素子の形状可変鏡で波面補正した結果、ストレール比を 50% 程度向上できている³⁰⁾。

レーザー慣性核融合に使用するような高出力ガラスレーザーでは、発振時に生じる熱によりガラスに屈折率分布が生じビームが歪む。このため、レーザーの発振間隔を短くすることが難しい。これを解決するため補償光学系の適用が検討されている¹⁴⁾。このように、高出力レーザー発振器も大きな応用分野のひとつである。

5.3 レーザー同位体分離装置

レーザー同位体分離装置とは、原子番号が同じで質量数が異なる同位体の特定のものをレーザーエネルギーを利用して分離抽出するものである。その代表的なものがレーザーウラン濃縮装置であり、天然ウランを加熱蒸発させ、4 波長のレーザービームを照射することにより、²³⁵U のみを選択的にイオン化し抽出するものである³¹⁾。

ウラン蒸気の体積に比べレーザービーム径は小さいため、商業機では 4 波長のレーザービームをミラーにより多重反射させてウラン蒸気に照射する。その伝播距離は 100 m 以上と予想されており、レーザー発振器および蒸気の密度分布による波面歪みが発生し伝播できなくなるおそれがある。米国では、レーザー発振器および光学部品の熱歪みに起因する波面歪みを補正する目的で、5×5 素子の形状可変鏡と 4×8 配列のシャックハルトマン波面検出器の補償光学系が開発されている³²⁾。

6. む す び

光波やレーザーの補面歪みを補正する補償光学技術について概説し、主要な構成要素である形状可変鏡および波面検出器の開発動向を紹介した。また、最近天体望遠鏡への応用を中心に、補償光学系を光学装置へ導入する研究開発が進められており、その現状について説明した。補償光学系はすでに一部の光学装置で実用化されており、今後いろいろな光学装置への適用が期待できる。しかし、そのためには波面補正性能の向上もさることながら、低コスト化が応用先を広げる点ではより重要であり、研究開発の進展に期待したい。

文 献

- 1) H. W. Babcock: "The possibility of compensating astronomical seeing," Publ. Astron. Soc. Pac., **65** (1953) 229-234.
- 2) 黒田和夫: "位相共役光学の基礎と現状", 精密工学会誌, **60** (1994) 1065-1069.
- 3) 青木 勝, 加藤純一, 山口一郎: "BSO 結晶を用いた周期構造中の欠陥検出", レーザー科学研究, **14** (1992) 182-187.
- 4) 杉井正克, 齊藤英明, 一ノ瀬祐治, 上野俊明, 角井晴夫, 岸 俊一: "マルチディザイナ方式補償光学系の基本補償制御性能", レーザ研究, **21** (1993) 953-964.
- 5) B. Hulburd, T. Barrett, L. Cuellar and D. Sandler: "High bandwidth, long stroke segmented mirror for atmospheric compensation," Proc. SPIE, **1543** (1991) 64-75.
- 6) 一ノ瀬祐治, 土田健二: "補償光学用一体型形状可変鏡の開発", 第 16 回レーザーセンシングシンポジウム (1993) pp. 131-132.
- 7) E. H. Anderson, D. M. Moore and J. L. Fanson: "Continuous facesheet low voltage deformable mirrors," Opt. Eng., **29** (1990) 1191-1198.
- 8) D. Kittell and C. L. Fiandra: "Cooled deformable mirror," Proc. SPIE, **1543** (1991) 101-106.
- 9) 内野研二: 圧電/電歪アクチュエータ, 第 1 版 (森北出版, 1986) pp. 82-84.
- 10) P. Jagourel and J. P. Gaffard: "Adaptive optics components in laserdot," Proc. SPIE, **1543** (1991) 76-86.
- 11) R. P. Grosso and M. Yellin: "The membrane mirror as an adaptive optical element," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 399-406.
- 12) R. V. Shack and B. C. Platt: "Production and use of a

- lecticular Hartmann screen," J. Opt. Soc. Am., **61** (1971) 656-661.
- 13) 田中 済, 野口 猛: "シャックハルトマン鏡面測定装置のデータ処理", 国立天文台技報, **2** (1994) 431-446.
 - 14) 実野孝久, 伊根 栄, 中塚正大, 加藤義章, 中井定雄: "シャック・ハルトマン計測と核融合レーザーにおけるアダプティブ光学系", 電気学会光・量子デバイス研究会資料 (1994) pp. 14-19.
 - 15) J. W. Hardy, J. E. Lefebvre and C. L. Koliopoulos: "Real-time atmospheric compensation," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 360-369.
 - 16) C. L. Koliopoulos: "Radial grating lateral shear heterodyne interferometer," Appl. Opt., **19** (1980) 1523-1528.
 - 17) B. A. Horwitz: "Multiplex techniques for real-time shearing interferometry," Opt. Eng., **29** (1990) 1223-1232.
 - 18) F. Roddier, C. Roddier and N. Roddier: "Curvature sensing; A new wave-front sensing methods," Proc. SPIE, **976** (1988) 203-209.
 - 19) J. E. Graves and D. L. McKenna: "The University of Hawaii adaptive optics system: III The wavefront curvature sensor," Proc. SPIE, **1542** (1991) 262-272.
 - 20) T. R. O'Meara: "The multidither principle in adaptive optics," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 306-315.
 - 21) 一ノ瀬祐治, 川端正弘, 道口由博: "マルチディザイザ方式補償光学系における波面制御性の解析およびシミュレーション結果", 光学, **21** (1992) 714-719.
 - 22) 一ノ瀬祐治: "補償光学系用一体型形状可変鏡の開発", 攪乱媒質中の波動伝播と補償光学研究会 (国立天文台, 1993) pp. 225-230.
 - 23) R. K. Tyson: *Principle of Adaptive Optics* (Academic Press, San Diego, 1991) pp. 240-255.
 - 24) L. Cuellar, P. Johnson and D. G. Sander: "Performance tests of a 1500 degree-freedom adaptive optics system for atmospheric compensation," Proc. SPIE, **1542** (1991) 468-476.
 - 25) 一ノ瀬祐治: "補償光学系における波面制御アルゴリズム", 光学連合シンポジウム浜松'94 (1994) pp. 225-226.
 - 26) F. Merkle, G. Gehring, F. Rigaut, P. Lena, G. Rousset, J. C. Fontanella and J.P. Gaffard: "Adaptive optics system tests at the ESO 3.6 m telescope," Proc. SPIE, **1542** (1991) 308-318.
 - 27) 高見英樹: "アダプティブ光学による光ビーム制御の現状 (天文学への応用)", 精密工学会誌, **60** (1994) 1091-1096.
 - 28) 高遠徳尚: "天体補償光学用可変形鏡", 光学, **23** (1994) 183-184.
 - 29) G. P. Graham: "Making star to see stars; DOD adaptive optics work is declassified," Phys. Today, **45**, 4 (1992) 18-22.
 - 30) K. E. Oughstun, J. M. Spinhirne and D. Anafi: "Intracavity adaptive optics. 4; Compensation of theory and experiment," Appl. Opt., **23** (1984) 1529-1541.
 - 31) 中井洋太, 藤田尚徳, 濱田博義, 島崎善広, 矢戸弓雄, 岸本洋一郎, 笹尾信之: "レーザ法ウラン濃縮の現状", 日本原子力学会誌, **35** (1993) 280-285.
 - 32) J. T. Salmon, E. S. Bliss, W. Long, E. L. Orham, R. W. Presta, C. D. Swift and R. S. Ward: "Real-time wave-front correction system using a zonal deformable mirror and a Hartmann sensor," Proc. SPIE, **1542** (1991) 459-467.