

解説

ズームレンズの非球面プラスチック化技術

丸山 竹介*・高木 正雄*・榊田 正美**

(株)日立製作所 *家電研究所, **生産技術研究所 〒244 横浜市戸塚区吉田町 292

(1988年4月11日受理)

Zoom Lens with Aspherical Lenses

Takesuke MARUYAMA,* Masao TAKAGI* and Masami MASUDA**

* Consumer Products Research Center, ** Production Engineering
Research Laboratory, Hitachi Ltd., 292,
Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244

1. ま え が き

近年、固体撮像素子と小型録画機構の開発により、軽量、コンパクトな家庭用 VTR 一体型ビデオカメラが実現している。家庭用 VTR 一体型ビデオカメラは、高い操作性、優れた機能から、本格的な普及期を迎え、ホームビデオムービー時代を創りつつある。VTR 一体型ビデオカメラのズームレンズは、比較的 F 値が小さくズーム比も大きい。そのため、レンズとして大型化しやすい。ビデオカメラの特徴である軽量、コンパクトさを際立たせるためには、レンズの軽量、小型化が必要である。また、SVHS ムービーに代表されるカメラの高解像度化に対応し、ズームレンズは、解像性能の向上も要請される。軽量、コンパクト化と解像度の向上を同時に実現するには、レンズの非球面化が効果的である。

非球面レンズは、収差補正能力の向上でレンズ枚数の低減、レンズの小型化が可能となる。とくに、非球面レンズとしてプラスチックレンズを導入した場合、材料の持つ性質からいっそうの軽量化が実現される。

プラスチックレンズは、実用化の長い歴史を有する。初期の段階では、安価なレンズとして、高い精度を必要としないファインダーレンズなどに、応用が限られていた。その後、金型加工、成形技術など製造技術の大幅な進歩があり、精度の大幅な向上がなされた。これにより、コンパクトカメラのレンズの一部に応用される例が増えた。また、電子器機分野で、光ディスク¹⁾、プロジェクション TV²⁻⁵⁾ など光学系を応用した新しいシス

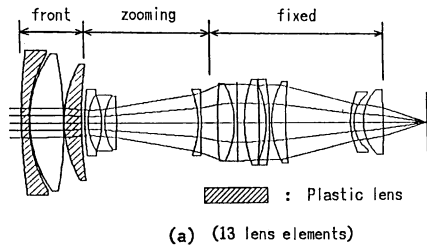
テムが出現している。これらの光学系は、ほぼ単一波長の光に対する光学性能を確保すればよい。プラスチックレンズの色収差補正が困難である欠点を回避し、利点を上手に活用しレンズ枚数の削減など大幅な簡易化がなされている。

このように、現在までのところ、プラスチックレンズは、小口径レンズ、色収差補正が不要なレンズに用いられた例がほとんどである⁶⁾。一方、ビデオカメラのズームレンズなど、口径が大きく、高度な収差補正を必要とするレンズでは、導入は困難であった。

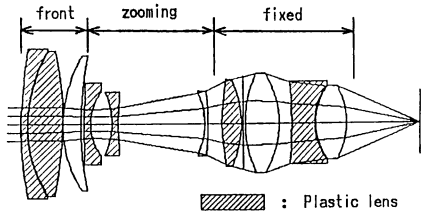
本稿では、著者らが開発したビデオカメラ用ズームレンズ⁷⁾ に応用した非球面プラスチックレンズ技術のうち、光学設計技術、超精密成形技術の概要を述べる。

2. ズームレンズ光学設計

プラスチックレンズは、材料として不利な点があり(種類が少、低屈折率、温湿度による特性変化、強度・耐熱性に劣る)、設計で性能劣化の補償を行なうことが必要である。また同時に非球面の収差補正効果を最大限に引き出したレンズ系の実現も大きな課題である。プラスチックレンズを用いたズームレンズの開発例を図1に示す。図1(a)は、重量比率の大きい前玉群にプラスチックレンズを採用した設計であり、約20%の軽量化が可能となった。本稿での試作結果は、このレンズについてである。(b)は、さらに結像系にもプラスチックレンズを採用した設計であり、従来の球面ガラスレンズで構成されたズームレンズと比較し、約30%のレンズ枚数



(a) (13 lens elements)



(b) (10 lens elements)

図1 非球面プラスチックレンズを用いたズームレンズ

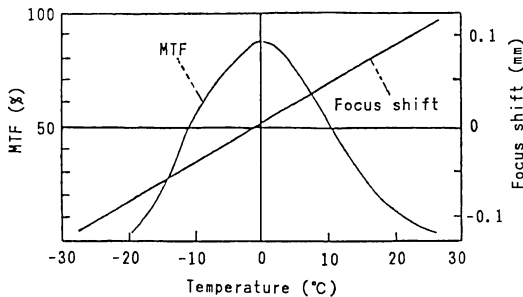


図2 MTF 特性の温度変化による影響

低減となっている。

2.1 温度、湿度補償設計

温度、湿度変化に対する補償は光学設計、鏡筒の構造設計で配慮が必要である。たとえば、図1(a)の構成で、すべてのレンズをプラスチック化した場合の温度変化によるフォーカスシフト、および、MTF性能の変化を図2に示す。この場合、30度の温度変化で、ほとんど解像度がなくなる。この例では、フォーカスシフトは、±0.02 mm 以内に抑えなければならない。また、主にレンズに使用する PMMA 材料では、湿度変化でも形状、屈折率の変化が生じ、温度変化と同様にフォーカスシフトが生じる。図3は、前玉群にプラスチックレンズを用い温度、湿度補償を行なった構成を示す。この構成は、プラスチックレンズとガラスレンズを組み合わせた構成とし、かつ、正のパワーのプラスチックレンズに耐吸湿材料である OZ-1000 (日立化成) を用いている。

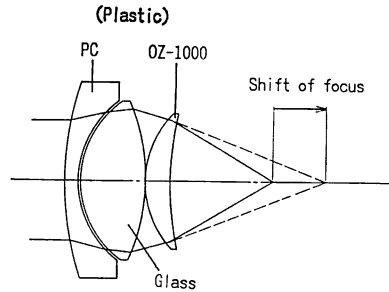


図3 前玉群の構成とフォーカスシフト

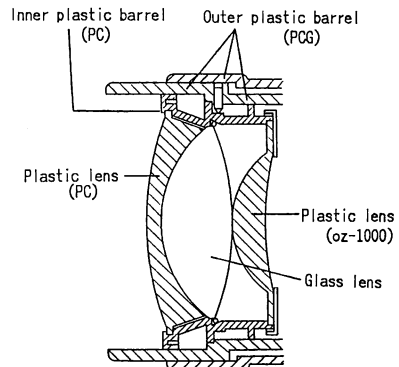


図4 レンズ保持構造 (2重鏡筒)

温度変化によるフォーカスシフトの補償方法については原理的な検討がなされている^{8,9)}。今回、温度、湿度および、色収差補正も含めた一般化した方法を作り、設計を行なった。図3の前玉部の例では、温度補償の条件として、2枚のプラスチックレンズのパワーを異符号かつ、絶対値を等しくする条件としている。

また、湿度の補償では、凸のプラスチックレンズのパワーをガラスレンズのパワーに比べ小さくし、かつ、ガラスレンズを低分散材料である FK5 とし、補正を行なっている。この構成により、温度、湿度のいずれの変化に対しても、フォーカスシフトを最小限とし、解像度劣化を防止している。

また一方、プラスチックレンズの熱膨張から生ずる機械的変形についても配慮が必要である。熱変形を防止するレンズ保持の鏡筒構造について種々提案されている。本開発では、温度の変化にもレンズ面の高い精度を維持する構造として、図4の2重鏡筒構造を考案した。内側の鏡筒は、レンズと同材料である PC 材料である。温度変化に対し、膨張量が同一であるため、レンズに応力をかけずに保持できる。そのため、内側の鏡筒内では、光軸のズレを最小限にでき、光学性能の劣化が最小限にとどめられる。

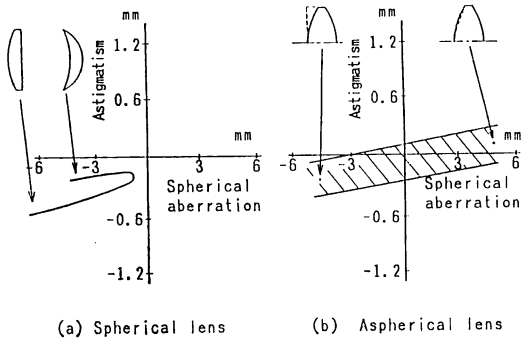


図 5 単レンズの収差補正能力

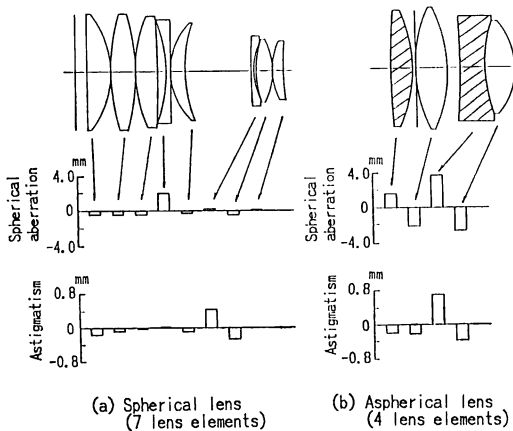


図 6 非球面レンズの収差補正能力

2.2 非球面レンズ設計

非球面レンズは、球面レンズに比較し、格段に大きい収差補正能力を有する。開発レンズでは、非球面は 10 次の多項式で表わされ、球面の 6 倍のパラメータをもつ自由度を有する。非球面レンズの収差補正能力を球面レンズと比較し、図 5 に示す。図 5 は、代表的収差として、球面収差と非点収差（3 次収差）を示している¹⁰⁾。球面の収差補正の自由度は、ベンディングの 1 自由度に対し、2 次元的な自由度をもつ。ズームレンズの結像系に非球面を用いた効果を図 6 に示す。非球面の収差負担量は、球面に比べ、数倍大きく、これにより、レンズ枚数を約半分を削減することが可能である。

非球面レンズ設計は、多くのパラメータを取り扱うため、従来の球面レンズの設計に比べ困難となる。非球面設計に対応したズームレンズ設計プログラムとして、(KALAS-II) を開発した。非球面レンズ設計に対応し新しい機能として、低次から高次まで順を追った収差補正プログラム、および BASIC 言語に準じ設計手法をストアするマクロプログラム機能がある。これにより、非球

面の効率のよい設計を可能としている。

3. 精密レンズ成形

ビデオカメラ用のプラスチックレンズは、面精度と形状から従来にない成形の困難さがある。図 7 に成形の困難さを示す指標として、外径、肉厚比を示す。実用化されているレンズの肉厚比は 2 以下である。それに対し、ビデオカメラレンズは、肉厚変化が大きく、外径も 40 mm 前後と大きい。要求精度の高さとあいまって成形は困難となる。今回開発したレンズ形状を図 8 に示す。開発レンズの形状精度は、設計値からの偏差で約 1 μm である。残留内部応力は、約 1 λ である。ディスク用レンズに比較し格段に大きい値であるが、一般の結像レンズの波面収差から考慮し、問題のない値である。

3.1 超精密射出成形

図 9 に示すように、射出成形のプロセスは、射出、冷却、取出の 3 段階である。レンズ金型に射出されたプラスチック樹脂は、レンズ金型内で溶融状態から固化する。樹脂は、固化する際大きく体積収縮する。レンズと

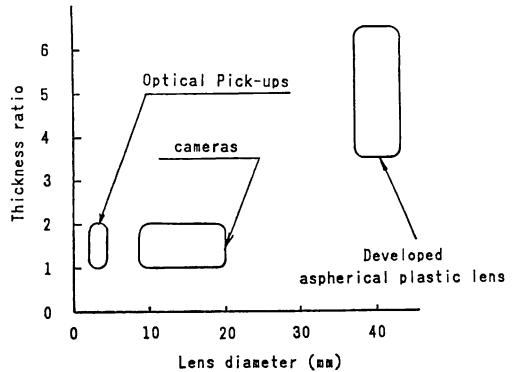


図 7 プラスチックレンズの形状による分類

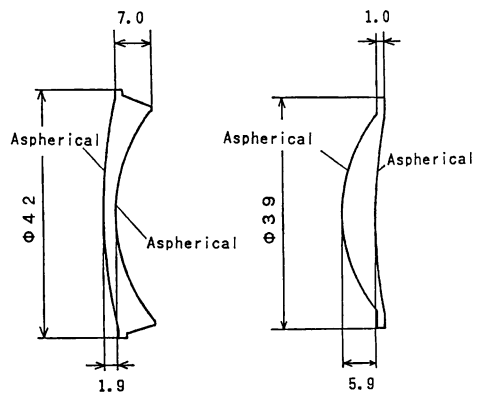


図 8 開発プラスチックレンズ形状

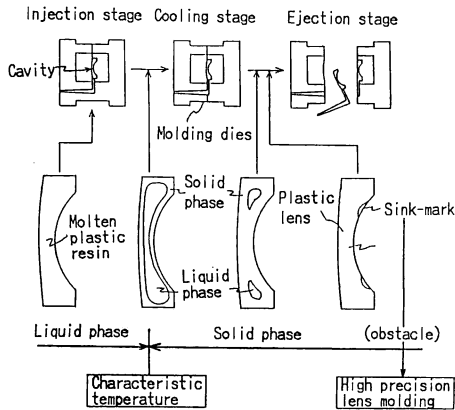


図9 プラスチックレンズの射出成形法

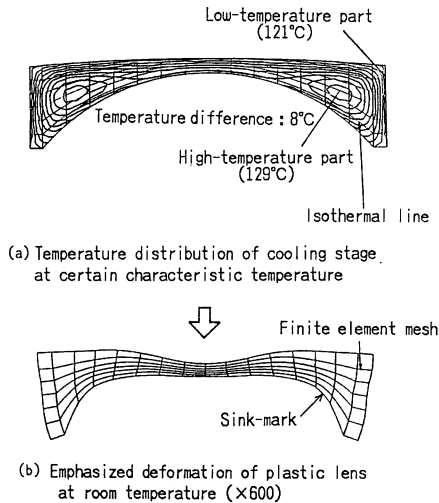


図10 計算機シミュレーションによる解析結果

金型の容積に差が生じ、レンズ面に、ヒケ、ソリ、ウェルドマークなどの精度劣化が起こる。レンズ径が大きいほど、肉厚差が大きいほど、この精度劣化は大きい。

精度向上の手段として、成形圧力に着目した精密成形が提案されている。今回、新たに計算機シミュレーション解析技術を開発¹¹⁾し、超精密成形技術を検討した。その結果、精密成形には温度の制御が重要であり、なかでも、冷却時の温度分布の不整がレンズ変形に与える影響が大きいと結論づけられた。

冷却過程では、樹脂は、高温、高圧下での液相状態から、固相状態へと非線形的な変化をする。この非線形的な樹脂の挙動の解析を行なうプログラムを開発した¹²⁾。開発プログラムは、FEMによる解法プログラム(ADINA)をベースとし、非線形の熱解析、熱変形解析

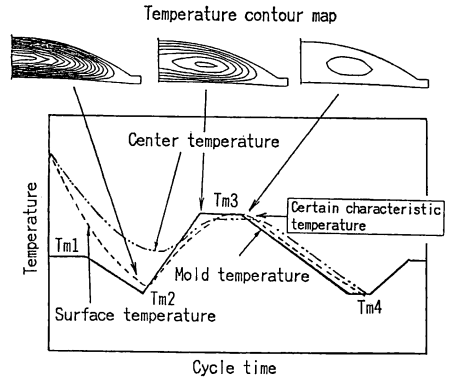


図11 レンズ成形の制御パターン

部分を追加した。図10に凹レンズでの解析結果を示す。図で示した解析結果では、レンズの内部と表面で、8°Cの温度差が存在していることがわかる。この温度差で、レンズを室温に取り出した際変形量は、約10μmである。この解析結果から、面精度の確保には、冷却過程での温度分布の均一性の確保が必須であることが結論された¹³⁾。

3.2 成形プロセス

冷却過程での温度分布の均一性を高める成形として、2段加熱成形プロセスを開発した。開発プロセスは、6段階の工程(射出、急速冷却、急速加熱、冷却、および次成形の型温の上昇)からなる。この成形プロセスでの、樹脂内の温度分布の変化は、図11に示すように制御される。このプロセスでは、樹脂を金型内に射出し冷却した後、再度金型を加熱し、冷却過程での温度分布の均一性を確保する。その際、金型内の温度差、温度の時間的なゆらぎを解消する精密温度制御が必須である。

精密温度制御を実現するため、図12に示す金型温度制御システムを開発した^{14,15)}。このシステムは、五つのユニットから成り立つ。徐冷ユニット、急冷ユニット、サーボコントロール弁と、これらの制御を行なう制御装置である。温度制御に、高温、低温、中間の温度の3種の熱媒質を用いた。急速加熱には高温、急速冷却には低温、徐冷には中温の熱媒質を循環させ金型の温度を制御している。さらに、温度制御の高精度化として、金型の内部に温度センサーを埋め込みフィードバック制御を行なっている。これにより、成形サイクルの各段階で、成形金型内の温度差、および温度の時間的なゆらぎを解消している。

3.3 非球面レンズ金型の精密加工

非球面の形状誤差の光学性能に与える影響は、誤差の様相により、大きく異なる。解像度性能とくに問題と

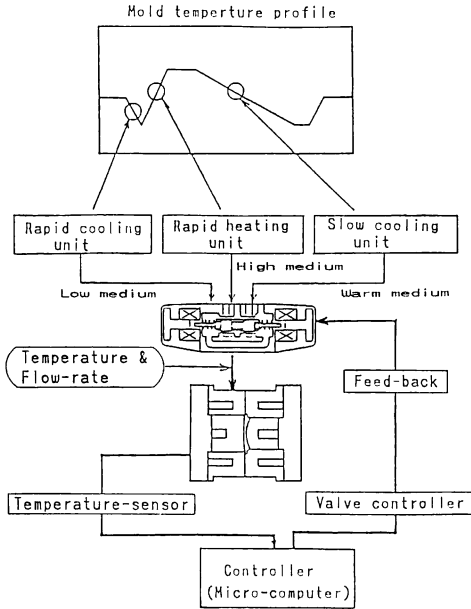


図 12 温度制御システム

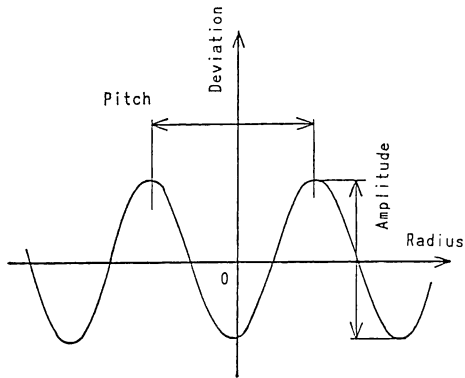


図 13 レンズ面の形状誤差 (面うねり) のモデル

なるものは、細かいピッチの形状誤差である面うねりである。面うねりを図 13 に示すような正弦波状の形状誤差とし、解像度性能を解析した。図 14 に示す光学計算の結果からわかるように、MTF 性能の劣化は、とくに細かいピッチの形状誤差で大きいことがわかる。

細かいピッチの形状誤差は、金型の旋盤加工時に生じやすい。そこで、細かいピッチの形状誤差をとくに配慮した精密金型加工装置を開発した。図 15 に開発した精密金型加工装置を示す。開発した精密金型加工装置では、電気的、機械的なノイズを、加工定盤の空気サポート、および切削条件の最適化で取り除いている。非球面の加工精度は、バイトの形状精度によるところが大である。そのため、バイトの形状精度を $0.1 \mu\text{m}$ 以下に研磨

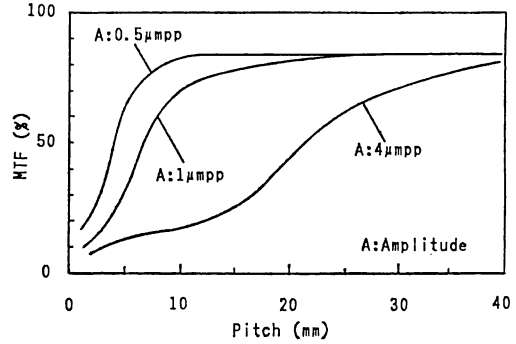


図 14 面うねり誤差による MTF 特性の劣化

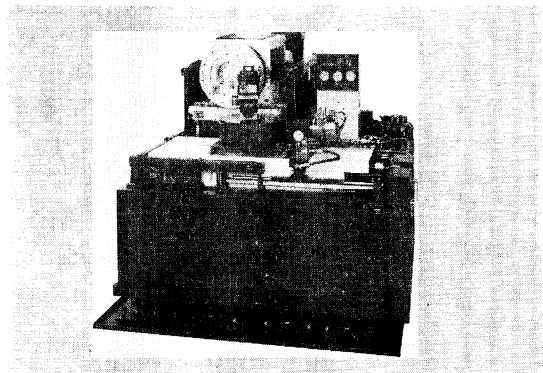


図 15 非球面レンズ超精密加工装置

表 1 開発ズームレンズの仕様

項目	単位	開発レンズ
F 値	—	1.6
焦点距離	mm	11.5~69
ズーム比	—	6
歪曲収差	%	-1.7~2.4
周辺光量比	%	30
MTF (24 pl/mm)	%	中央 90 周辺 50
大きさ	mm	$\phi 39 \times 105$
重さ	g	198 (-30%)

() 内、従来比

している。旋盤加工の後工程の研磨では、無電解ニッケルメッキに化学活性な研磨剤、研磨液を用い機械化学研磨を行なう。

4. 開発結果

非球面プラスチックレンズの設計、製造の基礎技術を開発した。これにより非球面プラスチックレンズを前玉群に用いたズームレンズを開発した。仕様を表 1 に、外

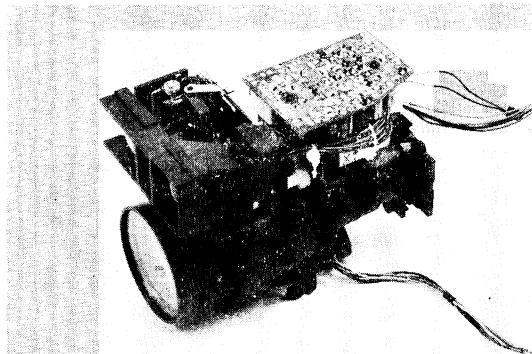


図 16 開発ズームレンズの外観 (F 1.6, 6 倍ズーム: 非球面レンズを前玉群に採用)

観を図 16 に示す。開発したレンズは、2/3 インチ、 F 1.6, 6 倍ズームである。表 1 からわかるように、非球面プラスチックレンズの導入により従来のレンズに比べ大幅な軽量化がなされている。

本稿で報告したビデオカメラ用ズームレンズは、非球面プラスチックレンズの応用として緒についた段階である。今後、材料、成形技術の発展によって、さらに高度な展開が進むと考えられる。

文 献

- 1) T. Kojima, *et al.*: "Optical performance of aspheric singlets for compact disc use," Int. Lens Design Conf. (1985) p. 295.
- 2) S. Kubota: "A lens design for optical disk systems," Int. Lens Design Conf. (1985) p. 282.
- 3) E. Betensky: "A new wide-angle TV projection lens having aspherical surfaces," Int. Lens Design Conf. (1985) p. 386.
- 4) Y. Yamamoto, *et al.*: "Super compact plastic projection lenses for projection televisions," IEEE Int. Conf. Consumer Electronics (1986) p. 80.
- 5) 福田京平, ほか: "高画質薄型投影形テレビの開発", TV 学会技術報告, 電子装置研究会, 10, No. 45, ED '87-1 (1987) 13-18.
- 6) 藤堂安人: "量産性高い非球面モールドレンズ (安価なプラスチック vs 高性能なガラス)", 日経ニューマテリアル, 3月9日号 (1987) 53-62.
- 7) T. Maruyama, *et al.*: "A zoom lens system with new infrared autofocus mechanism," IEEE Int. Conf. Consumer Electronics (1986) p. 320.
- 8) David S. Gray: "Athermalization of optical systems," J. Opt. Soc. Am., 38 (1984) 542-546.
- 9) Kimbell Straw: "Control of thermal focus shift in plastic-glass lenses," Int. Lens Conf. (1980) p. 386.
- 10) 松居吉哉: レンズ設計法 (共立出版, 東京, 1972).
- 11) T. Maruyama, *et al.*: "Zoom lens systems with aspherical plastic lens," Polym. Jpn., 36, No. 4 (1986) 256-266.
- 12) 丸山照法, ほか: "プラスチックレンズ形状精度の有限要素法解析", 第35回高分子学会予稿集, No. 4 (1986) p. 1176.
- 13) 稲毛久夫, ほか: "プラスチックレンズ成形における最適金型の研究", 昭和62年度精密工学会学術講演会論文集 (1987) p. 69.
- 14) 高木正雄, ほか: "非球面プラスチックレンズ成形の研究", 昭和62年度精密工学会春季工学会学術講演会論文集 (1987) p. 709.
- 15) M. Muranaka, *et al.*: "Precision molding of aspherical plastic lens for cam-corder and projection TV," Proc. SPIE, 896 (1988) in print.