

マイクロレンズ用波面収差測定装置の高精度化と
国際標準への適用に関する研究

宮下 隆明

2009年3月

奈良先端科学技術大学院大学

物質創成科学研究科

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 マイクロレンズの概要.....	2
1.3 本研究における目的と課題.....	8
1.4 本論文の構成.....	9

第2章 マイクロレンズとその計測技術

2.1 はじめに.....	13
2.2 マイクロレンズの作製と特徴.....	13
2.3 製法による比較.....	29
2.4 マイクロレンズの光学特性測定技術.....	37
2.5 マイクロレンズの波面収差測定技術.....	45
2.6 まとめ.....	57

第3章 マイクロレンズの波面収差測定

3.1 はじめに.....	62
3.2 マイクロレンズの波面収差測定方法に関する理論検証.....	63
3.3 マイクロレンズの波面収差測定装置の作製.....	83
3.4 マイクロレンズの波面収差測定に関する理論検証と実験の比較.....	133
3.5 考察.....	134
3.6 今後の展開.....	136
3.7 まとめ.....	138

第4章 マイクロレンズの国際標準開発

4.1 はじめに.....	141
4.2 マイクロレンズの国際標準の概要.....	142
4.3 マイクロレンズの波面収差測定研究の国際標準への適用.....	144
4.4 まとめ.....	157

第 5 章 結論	
5.1 本研究の成果.	159
5.2 今後の課題.	160
5.3 まとめ.	161
謝辞	162
研究発表目録	164
Appendix	167

論文要旨

マイクロレンズ、マイクロレンズアレイは、半導体レーザー、センサーと光ファイバー、光導波路間のカップリングなどの光通信用途、プロジェクタ用液晶パネル、共焦点顕微鏡、イメージセンサー（CCD・CMOS）などの光利用効率向上、シャック・ハルトマンセンサなどの計測分野、さらに、3D イメージングなど広範な用途で用いられている。

作成方法では、ガラス材料のイオン交換、プラスチック材料の重合による屈折率分布の形成、また、フォトリソグラフィ技術、ドライエッチング技術などの半導体プロセスの活用がすすむなど進歩がめざましい。形状も単なる球面だけでなく非球面、アナモフィック光学系など複雑な形状も容易に作成できるようになり、用途が広がっている。直径が数 μm 程度の小さなレンズの作成も可能になり、レンズの重要な光学特性のひとつである波面収差測定小径レンズへの適用に関するニーズが増大している。しかし、レンズサイズが小さいために、収差測定用の干渉計の開発が十分とはいえなかった。これは、マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で国際標準化を進めるための評価技術が確立されていなかったためであり、これらの解決が望まれていた。

本研究では、先ず各種製法で作製されたマイクロレンズの評価を通じて特性評価技術をまとめ、個々の技術の適用性を明らかにした。異なる製造方法によるマイクロレンズの波面収差を測定・評価し、レンズ特性評価基準として広く用いられている“マレシャル基準”をもとに議論を行った。次に代表的な光学特性評価法である波面収差測定をマイクロレンズに適用した干渉計のプロトタイプ開発を行った。そして評価技術の理論検討を行うとともに、実測との対応を検証し、実用化の可能性を明らかにした。具体的には、マイクロレンズの波面収差測定用途に選定した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定装置において、不要光を遮断するために、光学系の途中にアパーチャーを設け、マイクロレンズの瞳面に縮小投影し、測定領域にだけ干渉縞を形成し物理的に測定範囲外の光束を遮断した場合と、ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について詳細な検証を行った。両者の差異をシミュレーションと実測とで確認し、マイクロレンズ用波面収差測定用干渉計に必要な要件を明らかにした。またこのプロトタイプモデルの評価結果をもとに実用的なマイクロレンズ波面収差評価装置を開発した。

次に産業界のニーズに対応したマイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を定めるための波面収差測定技術の国際標準開発をすすめた。ISO 14880-2 (2006) Microlens arrays - Part 2 Test methods for wavefront aberrations に投影型ハードウェアアパーチャーを設けた Mach-Zehnder 型干渉計の技術を反映させる目的で、ラウンドロビンテストを実施した。Vrije 大学（ベルギー）の協力も得て、Erlangen 大学（ドイツ）で

開発された Mach-Zehnder 型の透過波面収差測定光学系に基づくファイバー光学系を用いた方式と比較した結果、高い測定互換性があることがわかった。これらの結果により本研究で開発した投影型ハードウェアアパーチャーを設けた Mach-Zehnder 型干渉計の技術が ISO 標準の一方式として採用された。

本研究で開発した測定技術を国際標準に反映したことで、マイクロレンズの評価技術を汎用的なものとし、マイクロレンズ製品の市場価値を高めることが期待できる。

High accuracy wavefront aberration measurement technologies for microlenses and their application to international standards.

Abstract

Microlenses and microlens arrays are widely and commonly used for optical communication devices, for the improvement of light efficiency of liquid crystal device (LCD) panels for projectors, for CCD and CMOS image sensors and for 3D imaging. Microlenses and microlens arrays have small diameter apertures and present several difficulties when testing their properties. It is not possible to perform the same evaluation methods as used with conventional lenses and to hold discussions between users and suppliers using the same terminology and test methods. This situation is restricting market growth and there are increasing needs for the measurement of wavefront aberration, one of the important optical characteristics of a lens. However, since the lens sizes are very small, the development of an interferometer for the measurement of microlens wavefront aberration was not fully progressed. Standard evaluation technologies for microlenses were required by both microlens suppliers and users to resolve the issues that were restricting business growth, which is strongly linked to the development of international standards.

In this research, the technologies for evaluating the characteristics of various microlenses were analyzed first and the applicability of each technology was clarified. The wavefront aberration of microlenses fabricated by different methods was measured and evaluated and the results discussed. The discussions were based on the "Maréchal Criterion" which is widely used as a lens characteristic evaluation standard.

A prototype interferometer was developed for the measurement of

wavefront aberration. A theoretical examination of the evaluation technology was performed and its correspondence with experiment was verified and the possibility of utilization was clarified. The Mach-Zehnder interferometer system was selected for the measurement of microlens wavefront aberration. In order to remove any unnecessary light a hardware aperture was installed at the centre of the optical system and a reduced image was projected on the pupil of a microlens. The difference between the hardware aperture and the software aperture was verified. The hardware aperture operated on interference fringes generated only in the measurement area and any unnecessary light was physically intercepted. The difference between both was checked by simulation and experiment, and the requirements necessary for the interferometer for wavefront aberration measurement for microlenses were clarified. Moreover, practical microlens wavefront aberration evaluation equipment was developed, based on the results of evaluating this prototype model.

Then, international standards for the wavefront aberration measurement technology for microlenses were developed, defining a common evaluation basis between the microlens supplier and users corresponding to the needs of the industry. The technology of the Mach-Zehnder interferometer using the projected type hardware aperture was applied in the ISO 14880-2 (2006) "Microlens arrays Part 2, Test methods for wavefront aberrations". An international round-robin test was carried out including a comparison with a system using polarization-preserving fiber optics, based on the Mach-Zehnder interferometer wavefront aberration measurement optical system developed at the University of Erlangen in Germany, collaborating with the Vrije Universiteit Brussel in Belgium. A high degree of measurement compatibility was shown. The improved technology of the Mach-Zehnder interferometer using the projected hardware aperture, developed by this research, was adopted as one standard system for ISO.

It is expected that the technology for evaluating microlenses will move to general use and will raise the market value of microlens products by having the measurement technology developed by this research reflected in international standards.

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

マイクロレンズ，マイクロレンズアレイは，光通信用途では半導体レーザーなどの光源と光ファイバー，光導波路，あるいはセンサーと光ファイバー，光導波路などとのカップリング，液晶プロジェクタパネル，共焦点顕微鏡の光利用効率向上，シャッターハルトマンセンサなどの計測分野，さらには 3D イメージングなど広範な用途で用いられている．また，最近では殆どの CCD・CMOS などのイメージセンサーの光利用効率の向上をはかるため，個々のフォトエレメントにそれぞれ個別のマイクロレンズを形成するなど応用範囲も広がっている．

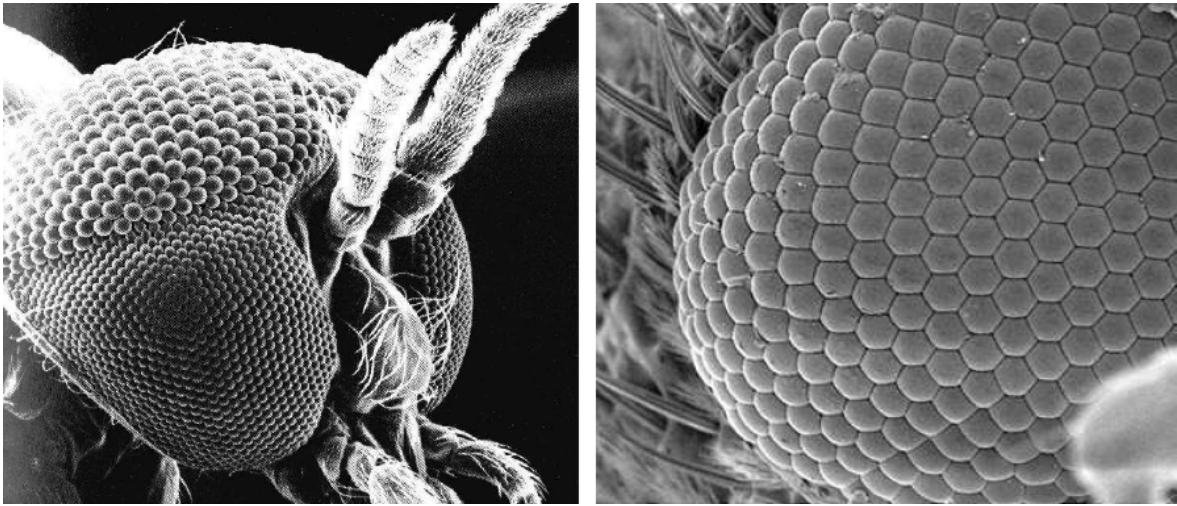
半導体レーザーから大きな発散角で広がる出射光を受けるために，NA (Numerical Aperture : 開口数) の大きなマイクロレンズが作製されたり，縦方向と横方向で異なる発散角のために楕円形になっている光束を円形に変換するためのマイクロレンズが作製されたりするなど，従来にはない目的への応用も検討されている．

作製方法については，ガラス材料のイオン交換，プラスチック材料の重合による分布屈折率の形成をはじめ，フォトリソグラフィ技術，ドライエッチング技術などの半導体プロセスが利用されるなど進歩がめざましい．また，形状では単なる球面レンズだけでなく非球面，アナモフィックレンズなど複雑な形状も比較的容易に作製できるようになり，種々な用途への応用が検討されている．サイズを見ると，小さなレンズでは直径が数 μm 程度のものまで作製されるようになってきた．また，最近では単純な単一レンズではなく，マイクロレンズ，あるいはマイクロレンズアレイを複合し種々のアプリケーションへの検討もすすめられている．

そのような状況で，レンズの重要な光学特性のひとつである波面収差測定に関するニーズが増大している．しかし，レンズサイズが小さいために，収差測定用の干渉計の開発が十分にすすんでいない．これは，マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準ユーザーのための国際標準化を進めているが，評価技術がともなっていないために標準の活用に課題があり，これらの解決が望まれている．

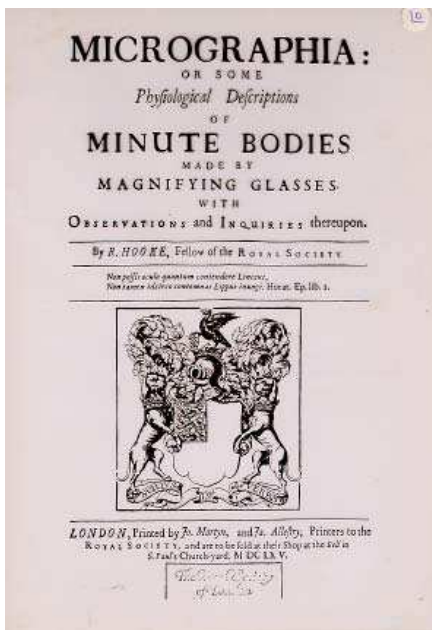
1.2 マイクロレンズの概要

歴史的な観点で見ると、マイクロレンズ、マイクロレンズアレイはもともと自然界で昆虫などの生物の複眼として存在してきた。図 1.1 にその例を示すが、(a)はトンボの複眼、(b)は他の昆虫の複眼の SEM イメージであり、個々のレンズサイズは約 $20\mu\text{m}$ 程度である[1]。特に(b)の六角形状の複眼レンズは、稠密充填レンズとして人工的にも作製されており、自然界からアイデアをもらっている面も多い。



(a) トンボの複眼の SEM イメージ (b)他の昆虫の複眼の SEM イメージ

図 1.1 マイクロレンズで構成される昆虫の複眼 [1]



very great company of radiating Pencils, which would go another way, and throwing them upon the deep Eye Glafs. But when ever I had occasion to examine the small parts of a Body more accurately, I took out the middle Glafs, and only made use of one Eye Glafs with the Object Glafs, for always the fewer the Refractions are, the more bright and clear the Object appears. And therefore 'tis not to be doubted, but could we make a *Microscope* to have one only refraction, it would, *ceteris paribus*, far exceed any other that had a greater number. And hence it is, that if you take a very clear piece of a broken *Venice* Glafs, and in a Lamp draw it out into very small hairs or threads, then holding the ends of these threads in the flame, till they melt and run into a small round Globul, or drop, which will hang at the end of the thread; and if further you stick several of these upon the end of a stick with a little sealing Wax, so as that the threads stand upwards, and then on a Whetstone first grind off a good part of them, and afterward on a smooth Metal plate, with a little Tripoly, rub them till they come to be very smooth; if one of these be fixt with a little soft Wax against a small needle hole, prick'd through a thin Plate of Brass, Lead, Pewter, or any other Metal, and an Object, plac'd very near, be look'd at through it, it will both magnify and make some Objects more distinct than any of the great *Microscopes*. But because these, though exceeding easily made, are yet very troublesome to be us'd, because of their smallness, and the nearness of the Object; therefore to prevent both these, and yet have only two Refractions, I provided me a Tube of Brass, shap'd much like that in the fourth Figure of the first *scheme*; into the smaller end of this I fixt with Wax a good *plano convex*

図 1.2 1664 年に出版されたマイクロレンズの作製法文献 (Robert Hooke) [2]

また、マイクロレンズの作製法を記述した最古の論文と思われるものが、Robert Hooke が「Proceedings of the Royal Society, London (英国王立協会誌)」に 1664 年に発表した、ベネチアンガラスを用いて糸状のガラスの先端を加熱して球状のレンズを作製する方法である[2]。この小径レンズ（マイクロレンズ）は、顕微鏡の対物レンズとして用いられていた。顕微鏡は 1590 年頃に発明されたと言われており、その出現から 70 年ほど後であるが、初期の構造の顕微鏡の性能を上げる（高倍率化）ために、対物レンズの構造を工夫したと考えられる。収差は大きいですが、焦点距離の小さい小径のボールレンズに近いレンズを作製し、対物レンズの倍率を上げることができたようである。

このような歴史を持つマイクロレンズであるが、最近では工業的にも多様な作製法が開発され、また多方面にわたる応用が検討されている。これらの状況にこたえるために、1990 年代から国際標準の開発が開始され、用語の定義はじめ特性評価法の標準化などが進められてきた。

ここでは、マイクロレンズ、マイクロレンズアレイについて、国際標準に定められた定義をベースに実際にどのようなレンズが作られているかを整理してみる。

マイクロレンズは、ISO 標準（ISO 14880-1 Microlens array Part.1 Vocabulary: August, 2001）では以下のように定義されている[3]。

microlens

lens in an array with an aperture of less than a few millimetres including lenses

NOTE The microlens can have a variety of aperture shapes: circular, hexagonal or rectangular for example. The surface of the lens can be flat, convex or concave.

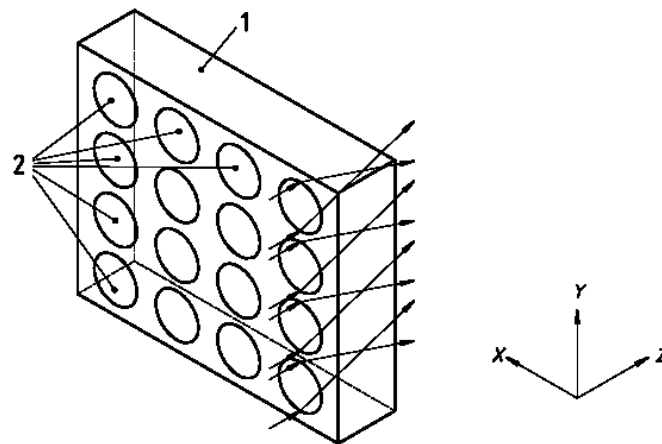
microlens array

regular arrangement of microlenses on a single substrate

実際には、用途、分野によりマイクロレンズのサイズは捕らえ方が異なるが、最大のもので光ディスク用のピックアップ用対物レンズ程度の大きさ（直径：数 mm）で、小さいものでは液晶プロジェクタの液晶パネルに使用されている直径 10 μ m 程度のものと考えられる。光通信用途では、光ファイバーの直径に合わせて直径 125 μ m 程度のレンズも多用されている。ただ、最近では、携帯電話に搭載されるデジタルカメラ用に直径が 1~2mm 程度の通常のレンズ（複数枚の組み合わせレンズ）も多用されるようになり、焦点距離測定に関しては本標準が意図したマイクロレンズと同じサイズでありながら、従来レンズの特性評価を行う必要があるなど、技術の進で様相が変わってきた分野もある。

また、本標準では、マイクロレンズ（マイクロレンズアレイ）の形状を図 1.3 のように定めている。基本的には、微小なレンズが基板上に配列して形成されたものである。

レンズの構造は、表 1.1 に示すように分類できる。レンズの形状では、Refractive (Spherical) lens（球面形状レンズ（凸，凹））、GRIN レンズ（分布屈折率レンズ）、Diffractive lens（回折レンズ）があり、また、単一レンズ、レンズアレイとも分類できる。レンズアレイも 1 次元配列されたもの、2 次元配列されたものに分類できる。次に、表 1.1 で分類したレンズの代表例を図 1.4 に示す[4]-[6]。図 1.4 (a)に Spherical lens, (b)に GRIN lens, (c)には Diffractive lens の例を示す。Spherical lens は後述するフォトレジストをパターンニングして作製したレンズをガラス基板に転写したものである。GRIN レンズは、高屈折率材料で作製した円筒状のレンズ母材を、低屈折率材料を溶融させた Salt bath（塩浴）に浸漬し、自然拡散させることで屈折率に分布を持たせたものである。レンズ中心の屈折率が最も高く、周辺に行くに従い屈折率が放物線形状に低くなっている。Diffractive lens は、基板に塗布したフォトレジストにクロムマスクを用いて多段階の露光・現像のプロセスを繰り返し多段の格子形状を作製する方法、さらに、フォトレジストに直接電子ビームで設計パターンを書き込み現像し格子形状を作製する、などの方法が代表的である。

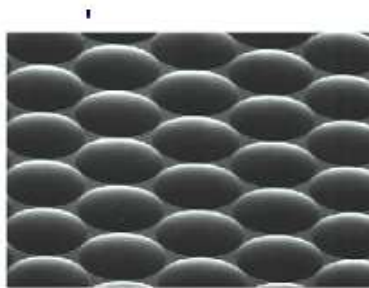


1. 基板 2. マイクロレンズ

図 1.3 マイクロレンズの構造[3]

表 1.1 マイクロレンズの構造から見た分類

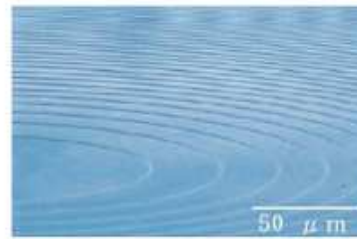
Lens Shape	Refractive (Spherical) lens	Convex
		Concave
	GRIN lens	
	Diffractive lens	
Lens Structure	Single lens	
	Lens array	Single line lens array
		2 Dimensional lens array



(a) Spherical lens



(b) GRIN lens



(c) Diffractive lens

図 1.4 マイクロレンズの構造[4]-[6]

図 1.5 に、1次元レンズアレイの代表的応用例である光ファイバアレイとの接続例を示す[7]。本図の例では、4チャンネルのファイバアレイ同士の接続であるが、光ファイバアレイとの結合、半導体レーザアレイとの結合、光導波路との接続などに用いられる。半導体レーザアレイとの結合には、主軸と副軸の曲率の異なる非球面レンズを用いることで端面発光レーザのビーム形状の変換にも用いられる。

図 1.6 に 2次元レンズアレイの代表例を示す[8][9]。2次元レンズアレイは、2次元配列された光スイッチの光集光用、あるいは、液晶プロジェクタのLCDパネルの光利用効率向上などに用いられている。

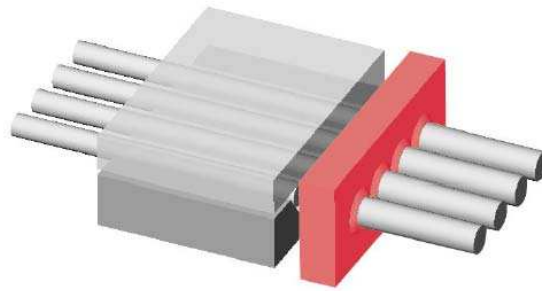


図 1.5 マイクロレンズの構造(1次元配列) [7]

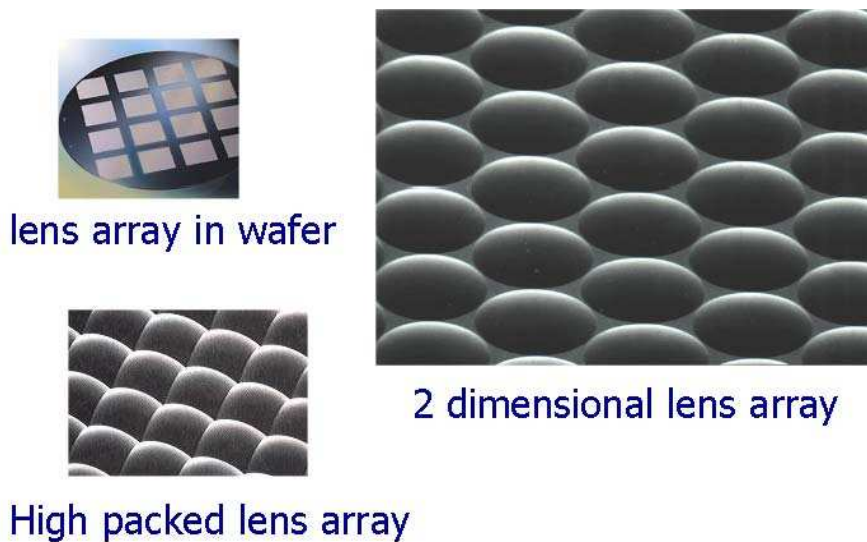


図 1.6 マイクロレンズの構造(2次元配列) [8][9]

図 1.7 に、2次元マイクロレンズアレイでのイメージ形成の例を示す[10]. 単一の対象物が、マイクロレンズアレイにより複数の異なるイメージを形成していることがわかる. 厳密には、それぞれのレンズで形成される像はすべて異なっている. この関係を利用して、2次元の画像処理への応用、さらには、2次元画像から3次元物体の復元などへの応用も可能になる. 図 1.8 には、2次元レンズアレイの他の応用として **Diffraction Lens** を用いて **Color separation** をした例を示す[11]. **Diffraction Lens** に入射された白色光は、Red, Green, Blue の3色に分離結像されている. 任意な形状の **Diffraction Lens** の設計、加工により自由に波長選択、結像などの効果をもたせることができ、応用範囲も広い.

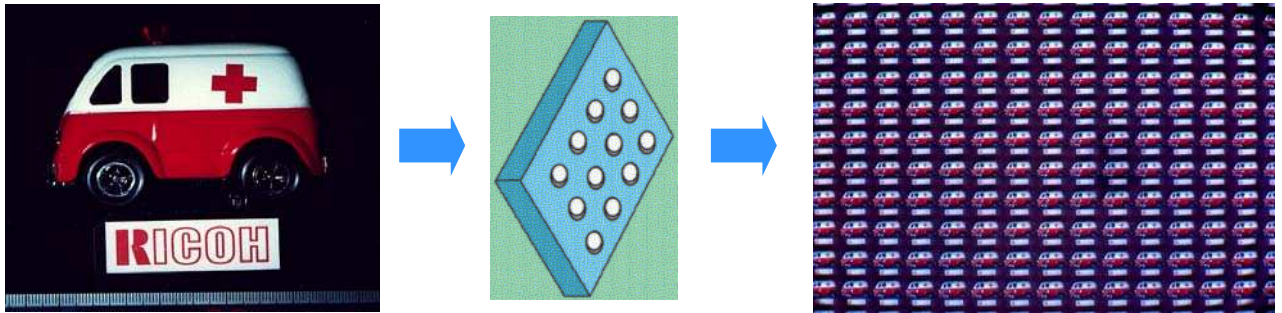
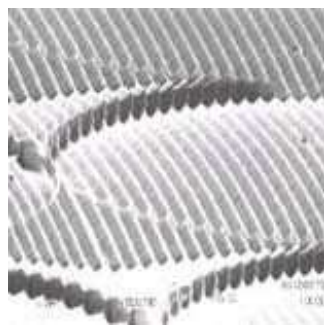
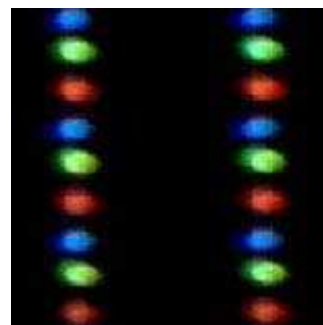


図 1.7 2次元マイクロレンズによる像形成の例 [10]



(a) Diffractive Lens



(b) 色分離のイメージ

図 1.8 Diffractive Lens による色分離の例 [11]

また、図 1.9 には球面レンズアレイを用いた TFT 液晶パネルの例、図 1.10 には同レンズアレイパネルの作製プロセスを示す[12]。ガラスに直接球面レンズアレイを形成する場合は、図 1.10 に示すように、まず基板ガラスにフォトレジストをスピコートなどの方法で塗布し、レンズの形状、サイズ、ピッチなどに合わせてフォトリソグラフィによりパターンを形成する (a)。このガラス基板をリフローにより加熱し、熔融したフォトレジストの表面張力により球面が形成される (b)。次に、真空チャンバー中でイオン・エッチングをおこないフォトレジストの形状をガラスに転写、ガラス製のレンズアレイプレートを作製する (c)。表面にカバーガラスを低屈折率樹脂で貼り合わせ (d)、さらにガラスを所定の厚みになるように研磨する (e)。さらに、カバーガラスの表面に ITO 膜、ブラックマトリクス膜を形成し、液晶パネルの片側の一面が作製される (f)。マイクロレンズを作製した後にカバーガラスを貼り、さらに研磨をするという複雑な工程を経ることになるが、これは、マイクロレンズを形成する際の基板をレンズの焦点距離に見合うように薄くすることが困難であることが最大の理由である。また、副次的な効果としてデバイス表面が平滑な方がゴミ、ホコリの付着が少なく、経時的にも安定になる。

このようなプロセスを経ることにより、分布屈折率型のレンズアレイを用いた場

合と同じようにブラックマトリクス部，TFT 部を通過する際に光束が収束され，照明光の光量損失が大幅に低下する．

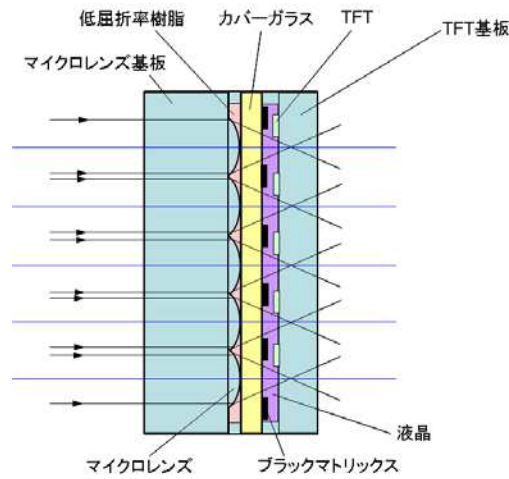


図 1.9 マイクロレンズアレイ付 TFT 液晶パネル

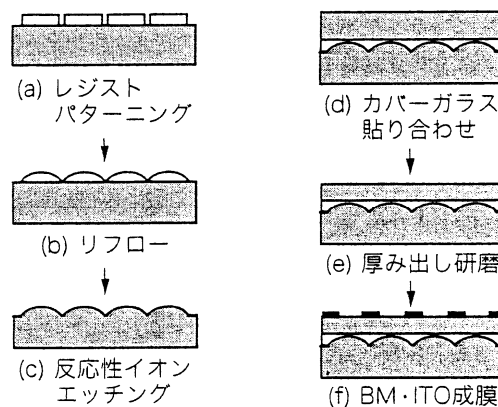


図 1.10 高温ポリシリコン TFT・LCD 用マイクロレンズアレイ付の製法[12]

1.3 本研究における目的と課題

本研究は，大きく分けると 3 つに分類される．第 1 に各種製法で作製されたマイクロレンズの評価を通じて特性評価技術をまとめ，個々の技術の適用性を明らかにすることにある．どのような評価技術をどのように適用すれば必要な情報が得られるかということについて明らかにする．第 2 に代表的な光学特性評価法である波面収差測定用の干渉計開発を通じて，評価技術の理論検討をおこない実測との対応を

検証，実用化の可能性を明らかにする．具体的には，Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定技術をマイクロレンズ評価に適用する場合の，測定範囲を設定するためのアパーチャーを用いる（測定範囲を限定する）際の回折光の影響に関し，理論検討と実測との対比をおこない精度確保に関して明らかにする．第3に産業界のニーズに対応した，マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を定めるための波面収差測定技術の国際標準開発の状況について整理する．開発した測定技術を国際標準に反映することで，マイクロレンズの評価技術を誰にも使えるものにし，マイクロレンズ製品の市場価値を高めて行く．

1.4 本論文の構成

以下に，本論文の構成を示す．

第2章では，先ずマイクロレンズの作製技術とその特徴を整理し，マイクロレンズの作製法に依存した特性，性能の違いを明らかにする．次に各種製法で作製されたマイクロレンズの評価を通じて光学特性測定技術を整理し，個々の技術の適用性を明らかにする．作製技術の影響が大きいレンズ表面の形状測定技術，さらには光学特性である焦点距離測定法についても整理する．ここでは，どのような評価技術をどのように適用すれば必要な情報が得られるかということについてまとめ，使用目的に合わせた特性評価法を明らかにする．また，代表的な光学特性である波面収差の測定法についても整理する．

第3章では，先ず一般的にレンズの代表的な光学特性測定法である波面収差測定技術をマイクロレンズに適用する場合の課題等を整理する．一般に，レンズの波面収差を干渉計を用いて測定する際には，ソフトウェアで開口を規制して（測定範囲を限定して）必要な部分だけを選択して演算している．しかし，マイクロレンズアレイのように測定領域以外に多くのレンズがある場合，測定領域以外のレンズからのノイズ光が測定領域に影響を及ぼす可能性があることが予想される．しかし，その影響の有無が明らかになっていない．また，多くは Fizeau（フィゾー）方式などのダブルパス干渉計を使用している．これは，被検レンズの設置の自由度が高い，被測定レンズに対応したコンバージョンレンズの交換が容易にできるなどの理由で採用されている．また，ダブルパス干渉計では，測定光路の往復で測定した収差量を $1/2$ にすることでレンズの固有の収差を演算している．収差の大きいマイクロレンズに適用する場合の課題を明らかにし，マイクロレンズ特性測定に適用できる干渉計の方式を明らかにする．次にマイクロレンズの波面収差測定用途に選定した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定装置の開発結果を示す．特に，不要光を

遮断するために、光学系の途中にアパーチャーを設け、マイクロレンズの瞳面に縮小投影し、測定領域にだけ干渉縞を形成することで、物理的に測定範囲外の光束を遮断した場合と、ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について検証する。両者の差異をシミュレーションと実測とで確認し、マイクロレンズ用波面収差測定用干渉計に必要な要件を明らかにする。

第4章では、マイクロレンズの特性について、その定義と特に代表的な光学特性評価法である波面収差測定法を国際標準に適用した結果を示す。マイクロレンズはそのサイズが小さいために、特性測定が非常に困難であり、また標準化された技術が無い場合もあり、マイクロレンズのメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を持つことができなかった。メーカー（サプライヤ）とユーザー間の仕様設定にも課題があり、製品の応用範囲に影響を及ぼしている可能性もある。特に評価技術の開発も含めて、国際標準化の推進が期待されていた。開発したマイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計の技術を、マイクロレンズの ISO 標準 (14880 Part2 Test Methods for Wavefront aberration) に反映し、日本の競争力の高い技術分野の技術を国際的に広めるとともに、産業界の期待にもこたえることができたと考えているが、その状況を示す。

最後に、第5章では、各章の成果を総括し、本研究から得られた知見を総括すると共に、残された課題について議論し、将来の展望を述べる。

参考文献

- [1] Miranda MacQuitty with Laurence Mound. *Megabugs, The Natural History Museum book of insects*. Barnes & Noble, N.Y.
- [2] Robert Hooke, "Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon", proceedings of the Royal Society, London (1664)
- [3] ISO 14880-1: "Microlens Array – Part.1; Vocabulary" (2001)
- [4] <http://www.leister.com/en/axetris-microsystems.html>
- [5] <http://www.nsg.co.jp/products/telecom/imaging.html>
- [6] <http://www.optical.ricoh.co.jp/products/micro/microlensarray.html>
- [7] <http://www.leister.com/axetris/microoptics/applications/index.html>
- [8] <http://www.leister.com/axetris/microoptics/microlensarrays/index.html> から
Article.pdf
- [9] <http://www.nsg.co.jp/about/device.html>
- [10] 「Handbook Of Optical Interconnects」, Chapter 2 "The Microlens", CRC Press, Taylor & Francis, p.44 (2005)
- [11] <http://www.memsoptical.com/prodserv/products/multi-func.htm>

[12] 浜中賢二郎: "ライトバルブ用マイクロレンズアレイ", O plus E, Vol.22, No.3, pp.313-318 (2000)

第 2 章 マイクロレンズとその計測技術

2.1 はじめに

マイクロレンズ，マイクロレンズアレイは，第 1 章で説明したように多くの用途で使用されており，その使用目的に合わせ多様な作製法が提案されている．本章では，先ずマイクロレンズ，マイクロレンズアレイの作製技術とその特徴を整理し，それぞれのマイクロレンズの作製法に依存した波面収差，表面粗さなどを測定・評価し，製法に依存した性能の違いを明らかにする．波面収差測定結果よりマイクロレンズ評価に必要な波面収差測定装置の要件を明らかにする．

次にマイクロレンズの光学特性測定技術を評価し，個々の技術の適用可能性を明らかにする．特に作製技術の影響が大きいレンズ表面形状の測定技術，さらには光学特性である焦点距離測定法，波面収差測定法について整理する．ここでは，どのような評価技術をどのように適用すれば必要な情報が得られるかということについて整理し，使用目的に合わせた特性評価法を明らかにする．また，ここで得られた知見をマイクロレンズの国際標準への反映を検討する．

2.2 マイクロレンズの作製と特徴

表 2.1 に代表的なマイクロレンズ作製法を整理，分類した．

l) Mechanical methods では，a) Mechanical forming プロセスを整理した．

a) Mechanical forming プロセスでは， 1) Diamond tool， 2) Steel tool の 2 種類のプロセスに分類した．

1) Diamond tool 法では，ダイヤモンド工具を用いて金属などを切削，研削加工してレンズを作製する方法が代表的である．

2) Steel tool 法では，金属に加え，プラスチックなどの素材を切削加工し，直接レンズを作製する方法がある．金属材料を用いる場合は，加工後にこれを金型にしてプラスチック材料，あるいはガラス材料に形状を転写することも

できる。

表 2.1 マイクロレンズ作製方法の分類

Methods	Category	Process
I) Mechanical methods	a) Mechanical forming	1) Diamond tool 2) Steel tool
II) Physical and Chemical methods	b) Photoresist forming	3) Photoresist forming 4) Diffractive element forming
	c) Photoresist and replication	5) Etching
	d) Replication	6) 2P (Photo polymer)
		7) Nano imprint
	e) Ion exchange	8) Ion exchange
	f) Direct forming	9) Ink jet
		10) Sol-gel
		11) Photo sensitive glass
12) Proton irradiation		
g) Direct and replication	13) Laser ablation	
	14) LIGA process 15) Direct laser writing	
III) Improvement methods	h) Direct forming	16) Step and repeat exposure
	i) Mask fabrication	17) Gray tone mask

II) Physical and Chemical methods では、b) Photoresist forming, c) Photoresist and replication, d) Replication, e) Ion exchange, f) Direct forming の 5 種類のプロセスに分類した。

b) Photoresist forming プロセスでは、3) Photoresist forming 法と 4) Diffractive element forming 法がある。

3) Photoresist forming 法では、フォトレジストを用いて直接レンズ形状を作製する方法である。レンズを形成したい部分についてのみ露光，現像によりフォトレジストを残し，残ったフォトレジストを熔融温度以上にあげ，液体の表面張力によりレンズを形成する方法である。次項で詳細を説明する。

4) Diffractive element forming 法では，同じくフォトレジストを用いて作製するが，レジストのパターンを多段に形成し所望の形状を得る方法である。多段に形成する場合には，最初の層を形成するフォトレジストを基板に塗布，露光，現像をおこないパターンを形成する。次いで 2 番目の層を形成するフォトレジストを再度基板に塗布，露光，現像をおこなう。これを複数回くり返すことで，多段（多層）の立体形状を作製することができる。

c) Photoresist and replication プロセスでは，5) Etching 法と言う名称で整理したが，フォトレジストを用いて作製したレンズ，あるいは回折格子の形状を基板

に転写する方法である．本方法も次項で詳細を説明する．

d) Replication プロセスでは，レンズ形状を転写し量産する方法として **6) Photo Polymer (2P)** 法と **7) Nano imprint** 法が代表的である．Mechanical な方法，あるいは他の方法により形成されたレンズ形状を転写した金型を作製し，プラスチック材料に形状を転写することができる．

e) Ion exchange プロセスでは，**8) Ion exchange** 法が代表的である．おもに GRIN レンズ（分布屈折率レンズ）を作製する際に使用される方法で，前述のように高屈折率材料で作製した円筒状のレンズ母材を，低屈折率材料を溶融させた Salt bath（塩浴）に浸漬し自然拡散させることで，屈折率分布を形成する方法である．レンズ母材を Salt bath に浸漬すると，自然拡散によりレンズ母材中の分子屈折率の高いイオンが塩浴中にある分子屈折率の低いイオンにレンズ周辺から徐々に置きかえられる．これにより，レンズ中心の屈折率が最も高く，周辺に行くに従い屈折率が放物線形状に低くなる屈折率分布を持つレンズが形成される．

f) Direct forming プロセスでは，基板にレンズを直接形成する方法として，**9) Ink jet** 法，**10) Sol-gel** 法，**11) Photo sensitive glass** を用いる方法，**12) Proton irradiation** 法，さらに **13) Laser ablation** に整理した．

9) Ink jet 法は，レンズを形成する樹脂材料を溶液に溶かし液体状にしたレンズ形成材料を，基板にインクジェットヘッドから吐出し，液体の表面張力によりレンズ形状を作製する．本法も次項で詳細を説明する．

10) Sol-gel 法は，一般に金属アルコキシドからなるゾルを加水分解・重縮合反応により，流動性を失わせてゲル状とし，このゲルを加熱して酸化物を得る方法を指す．マイクロレンズの作製は，例えば，紫外線を照射すると照射した部分の濡れ性が変わる素材（例えばポリシランなどのプラスチック）のマイクロレンズを形成したい部分に紫外線を照射し，ゾル状のレンズ形成材料に浸漬する．紫外線を照射された部分の親水性が増し，その部分にのみゾル状の液体が付着する．レンズはゾルの表面張力により形成され，これを加熱乾燥等の方法で固体状のゲルを得ることができる．

11) Photo sensitive glass を用いる方法は，たとえば感光性のガラスのレンズを形成したい部分に紫外線を照射し，加熱すると紫外線照射部分のみが結晶化される．この結晶化の過程で紫外線照射部分の平面部分が球面に膨らんで

くる。このような特徴を有する材料でレンズ作製が可能である。コーニング（米国）が「Smile™」という商品名で販売している[1].

12) Proton irradiation 法は、Synchrotron（シンクロトロン）から発生する放射光をアクリル材料などにマスクパターンを用いて露光することで立体的なレンズ構造を形成することができる。これも、次項で詳細を説明する。

13) Laser ablation 法は、エキシマーレーザー（波長：248nm, 193nm など）を光源として用い、ガラス、セラミック、プラスチックなどの基板材料にレンズを作製する形状のマスクを用いて露光する。露光エネルギーが作製材料の閾値を超えると局所的な熔融が始まり、表面張力により球面レンズを作製することができる。

g) Direct and Replication プロセスでは、14) LIGA process *, 15) Direct laser writing 法を代表例として整理した。

14) LIGA process は、deep X-ray リソグラフィ、電鍍法による金型作製、プラスチック成形を組み合わせた微細形状作製技術をさし、これらの方法を組み合わせたレンズ形状作製方法である。

(*LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) は、ドイツ語で示されるプロセス名称。)

15) Direct laser writing 法は、先ず、レーザー光を用いてフォトレジストにレンズを形成したい形状に露光する。次に、現像により露光した形状にフォトレジストを残す。残ったフォトレジストを熔融温度以上にあげ、液体の表面張力によりレンズを形成する方法である。一般に、本方法はマスタリングと言われる、量産の際に用いる母型を作製する際に使用されることが多い。

III) Improvement methods では、さらに複雑なレンズ、または回折格子の形状を作製する方法として、h) Direct forming, i) Mask fabrication に区分した。

h) Direct forming プロセスでは、16) Step and repeat exposure を代表例として整理した。

16) Step and repeat exposure は、スリット状のパターンを移動しながら複数回露光し、局所的な露光量を変えることで複雑な形状を作製する。

i) Mask fabrication プロセスでは、15) Gray scale photomask 法を代表例として整理した。

17) Gray scale photomask 法は、電子ビームに感度のある特殊なガラスに微細

パターンを創製したい形状に合わせて濃度変化を持たせて書き込み作製する方法である。このマスクを用いてフォトレジストへ同時多階調露光をおこなうことで微細形状の作製が可能になる。特に非球面レンズの作製，凸レンズ，凹レンズの同時作製など通常作製が困難な形状作製に有効である。次項で詳細を説明する。以上のように，用途ごとにそれぞれ適切な方法が選択され，あるいは組み合わせて用いられている。

以下，代表的な方法として，

3) Photoresist forming 法

5) Photoresist forming + Etching 法

8) Ion exchange 法

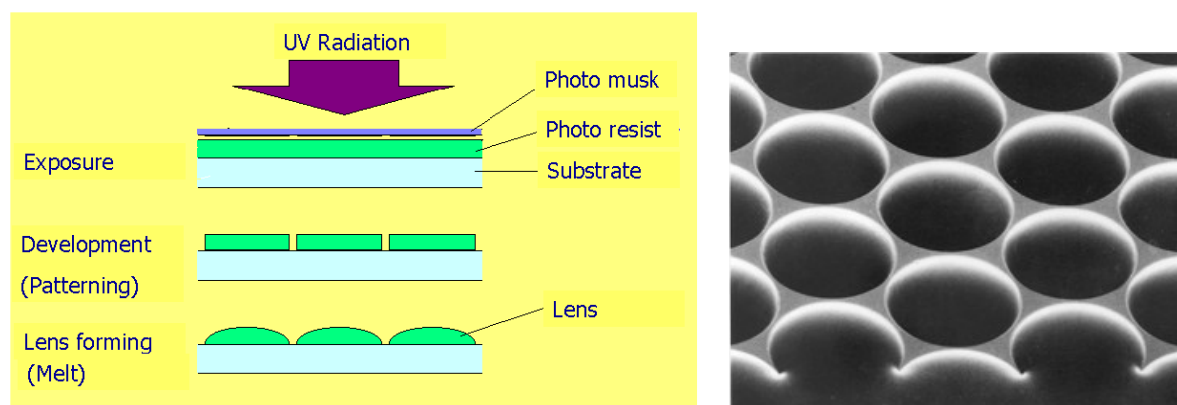
17) Gray scale photomask 法

(Photoresist forming + Etching 法をベースにした改良作製法)

について詳しく説明する。

さらに，本分類には入れていないが，特殊なガラス加工の方法として，ウェットエッチングプロセスを用いた方法についても説明する。

2.2.1 Photoresist forming 法



(a)マイクロレンズの作製プロセス

(b)マイクロレンズの外観 [2]

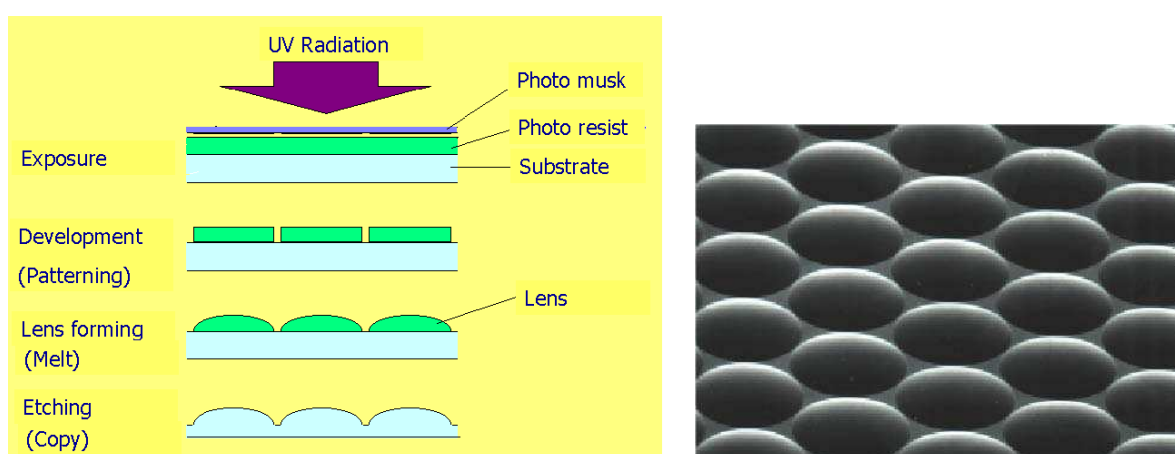
図 2.1 フォトレジストを用いたマイクロレンズの作製とレンズの外観

図 2.1 に Photoresist forming を用いる方法を示す。図 2.1(a) に作製プロセスを示す。基板にスピナーなどを用いてフォトレジストを一定の厚さにコートし乾燥させる。次にガラス基板に形成されたクロム（クロムマスク）のパターンをフォトレ

ジストに紫外光を用いて露光する．現像後はレンズの直径に近い形の円筒形状のフォトレジストがガラス基板に残る．これをフォトレジストの溶融温度以上に加熱すると，円筒形であったフォトレジストが表面張力により球形になる．球の高さや面積は使用するフォトレジストの種類，粘度，厚さなどにより制御することができる．この状態のフォトレジストを冷却，乾燥することで基板の上に形成されたフォトレジストレンズが完成する．図 2.1(b) には，フォトレジストで作製されたレンズの例を示す[2]．

2.2.2 Photoresist forming + Etching 法

図 2.2 に Photoresist forming + Etching を用いる方法を示す．図 2.2(a) にマイクロレンズの作製プロセス．まず，Photoresist forming レンズ作製と同じようにフォトレジストを用いてレンズ形状を作製する．次に，フォトレジストの形状をガラスなどの基板に転写する工程を追加し，基板にレンズなどの立体的な形状の転写をおこなう．一般にはプラズマガスを用いたドライエッチング法が用いられる．フォトレジストで形成された立体的な形状の転写は，フォトレジスト と基板材料（レンズ形成材料）とが垂直方向に等速でエッチングが行われるように，プラズマガスの組成とエッチング条件をコントロールすることにより可能になる．図 2.2(b) に，フォトレジストで作製されたレンズの形状をエッチングプロセスを経てガラスに転写した例を示す[3]．



(a) マイクロレンズの作製プロセス

(b) マイクロレンズの外観[3]

図 2.2 エッチング法を用いたマイクロレンズの作製とレンズの外観

2.2.3 2P (Photo Polymer) replication 法

マイクロレンズ，マイクロレンズアレイを低コストで量産する方法として，金属などで金型を作製し，金型と透明基板との間に Photo Polymer を充填，紫外光を照射し固化させる方法も有効である．図 2.3 に作製方法の例を示す[4]．金型の形状を転写したポリマーに，さらにカバーポリマーをコーティングしカバーガラスを付加した構造である．一般にポリマー材料を用いた場合，基板のガラス材料に比べ熱膨張率が大きく，耐熱性の問題もあるためカバーガラスを付加して信頼性を向上させる方法が有効になる．

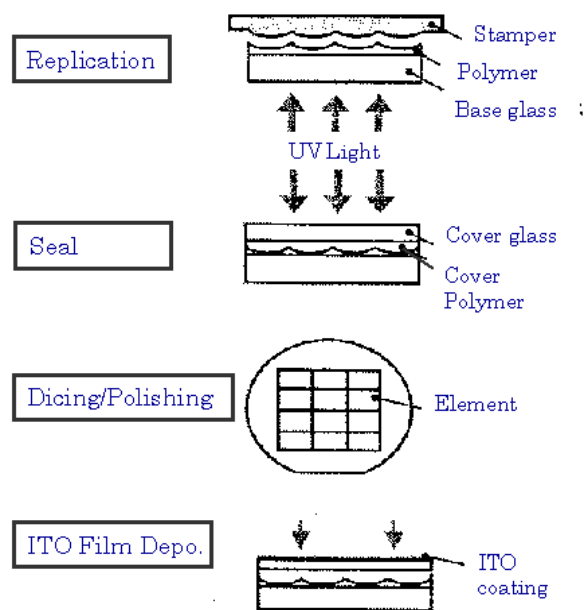


図 2.3 2P 法を用いたマイクロレンズの作製プロセス[4]

2.2.4 Nano imprint 法

Nano imprint (ナノインプリント) 法は，成型する形状の逆形状の金型を基板に塗布した樹脂材料に密着させ形状を転写する技術を指す．一般的に凹凸の高さは数十 nm から数百 nm であるが，作製形状のアスペクト比の制約はあるが，数 μm ~ 数十 μm 程度の高さも可能である．Roll stamper を用いる場合はナノインプリントと呼ぶだけでなく，Roll imprint (ロールインプリント) と区別する場合もあるが，ここでは広義意味での Nano imprint という名称を用いて説明する．

図 2.4 にナノインプリント法の基本プロセスを示す．基板に形成した転写素材(基

板に樹脂材料などをコートしたもの）をガラス転移点温度以上に加熱し金型を圧着する。その際に、加圧転写を行うが、転写素材の特性により加熱硬化を行うケース、UV硬化樹脂を用いた場合にはUV光を照射し硬化を進めるケースが代表的である。転写素材が硬化した後に金型を離型すると、レンズアレイ、プリズムアレイなどの成形品を得ることができる。図 2.5 には、連続成型が可能な構成例を示す[5]。金型をロール状に形成し（Roll stamper）、ガラス基板に Photopolymer をコート、Roll stamper と加圧ローラー（Contact roller）間を通過する際に金型の形状を転写し、UV光を照射し固化する。このような方法で連続生産が可能になる。図 2.6 にレンチキュラーレンズを試作した例[5]、図 2.7 にピラミッドパターンを作製した例を示す[5]。レンチキュラーレンズの場合は、本例では幅 280mm のロールを用いており、大面積の加工が可能である。ロールスタンプを用いる場合は、アスペクト比の大きい形状では離形時に形状が崩れる可能性もあるため注意が必要である。また、ナノインプリントの場合、転写精度を重視する際にはロールスタンプではなく、平面状のスタンプを用いてプレスする方法がとられる。生産性を重視するか加工精度を重視するかにより加工法を選ぶ必要がある。

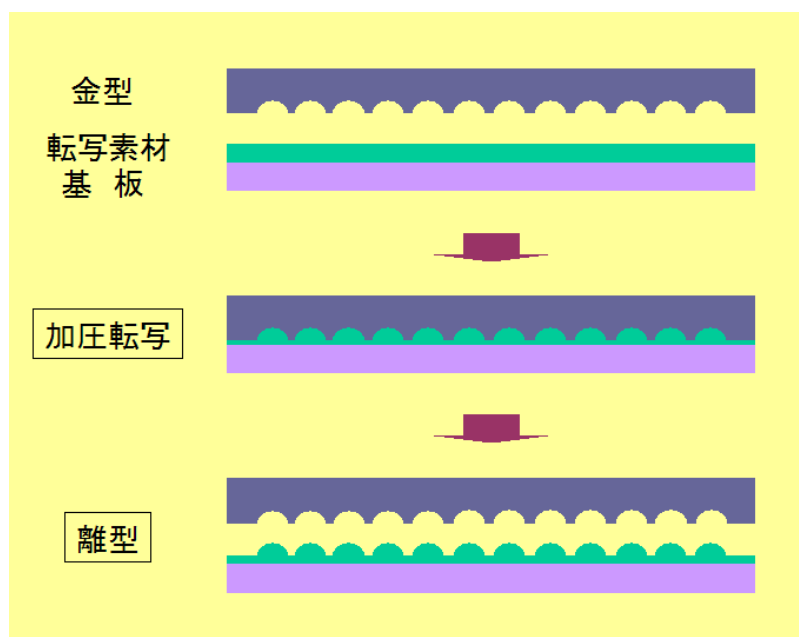


図 2.4 ナノインプリント法を用いたマイクロレンズの作製プロセス

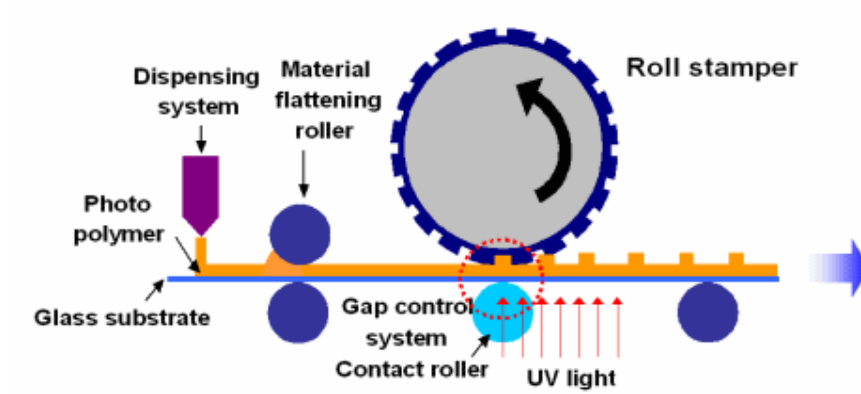
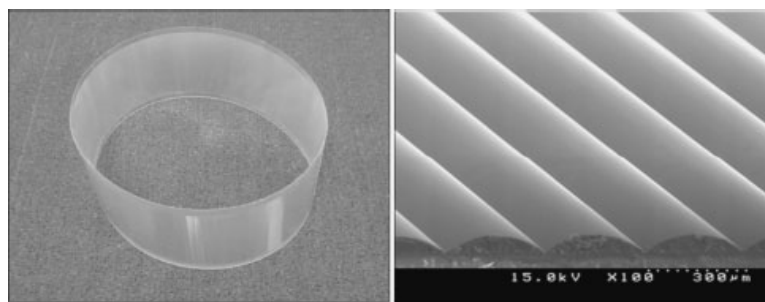


図 2.5 ロールスタンプ法を用いたマイクロレンズの作製プロセス[5]



(a) レンチキュラーレンズの外観 (b) レンチキュラーレンズの部分

図 2.6 ロールスタンプ法で作製したレンチキュラーレンズ[5]

(レンズ高さ：47mm, レンズピッチ：280 μm の例)

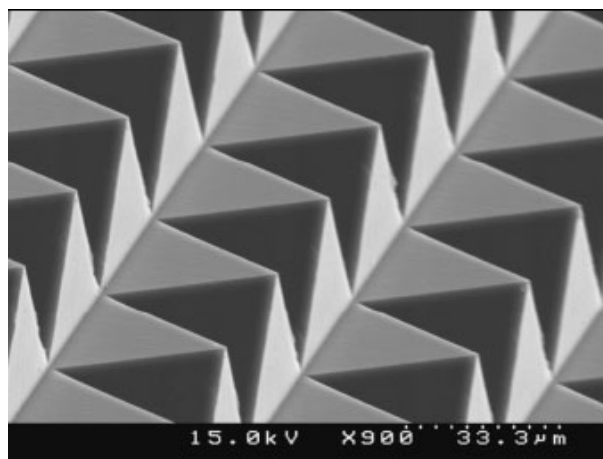


図 2.7 ロールスタンプ法で作製したピラミッドパターンの例[5]

(SEM 写真 ピラミッドの高さ：24 μm , ピッチ 50 μm の例)

2.2.5 Ion Exchange 法

図 2.8 には, Ion exchange 法 (イオン交換法) による平板マイクロレンズの作製法を示す[6]. ガラスなどの低屈折率材料で作製したレンズ形成材料 (基板ガラス) にピンホールをあけたメタルマスクスパッタリングなどの方法で形成し, 高屈折率材料を溶解させた Salt bath (塩浴) に浸漬し自然拡散させることで, 屈折率分布を形成する方法である. 基板ガラスを Salt bath に浸漬すると, メタルマスクのピンホールから高屈折率材料のイオンが基板ガラスに拡散, 基板ガラスからは低屈折率材料のイオンが塩浴中に拡散し (相互拡散), 図に示すような屈折率分布を持つレンズが形成される. 複数個のピンホールをメタルマスクに開けておくことで, レンズアレイを作製することができる.

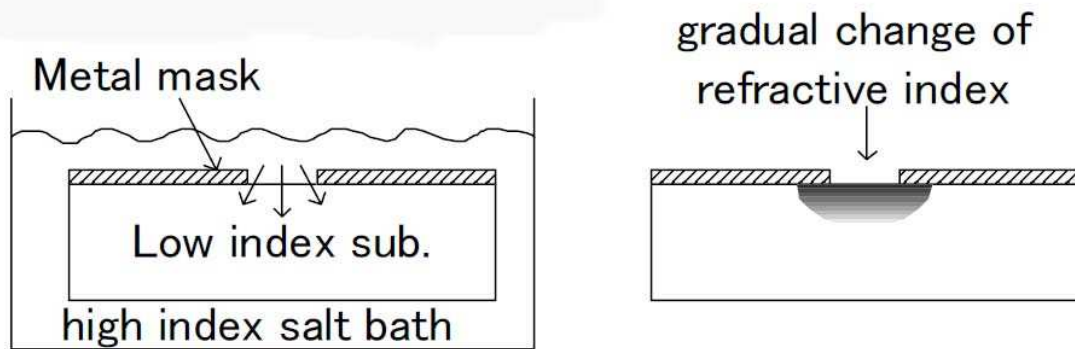


図 2.8 イオン交換法による平板マイクロレンズの作製[6]

2.2.6 Ink jet 法

Ink jet (インクジェット) 法は, 液体状の樹脂 (ポリマー) を基板上に滴下しマイクロレンズを形成する方法である. 滴下する液状ポリマーの粘度, 温度, 滴下量, 基板の移動速度などをパラメーターにしてレンズ形状をコントロールすることができる.

図 2.9 に Ink jet 法の基本プロセスを示す[7]. ドライバーでピエゾ圧電素子を制御しインクの吐出量がコントロールされる. オリフィスから吐出された液状の樹脂は基板上に滴下され, 液体の表面張力により球面形状が形成される. この際に, 基板の同一の場所に複数の液滴を滴下すればレンズのサイズを大きくすることもできる.

図 2.10 に空中を飛行する吐出樹脂の液滴の状態を示す[8]。図 2.11 には Ink jet 法で作製したマイクロレンズアレイの例[9]、図 2.12 にはシングルモードファイバの先端に形成したコリメーターレンズの例を示す[10]。樹脂の滴下量を精密に制御することで、形状、サイズのそろったレンズの作製が可能である。また、フォトレジストをパターンニングしてレンズを作製する場合には、一般的に同一基板上に形状、高さの異なるレンズを作製することは難しい。フォトレジストの厚みを部分的に変えて制御することが難しいためである。Gray scale photomask を用いる場合には制御が可能であるが、マスクの製作時間、コストの課題もあり必ずしも簡単ではない。それに対し、Ink jet 法の場合は球面レンズであれば、液滴の滴下量を変えることでレンズ形状の制御ができるため同一基板に異なる形状のレンズの作製が可能である。Ink jet 法で作製したレンズをそのまま製品として使用することは、必ずしも生産性が高いとは言えないが、多品種少量生産、あるいは金型作製のマスタレンズ作製の際に有効な方法である。ただ、あるいは、図 2.12 に示した例のように、ファイバー先端に設けるコリメーターレンズを作製するなどの特殊な用途では効果的である。

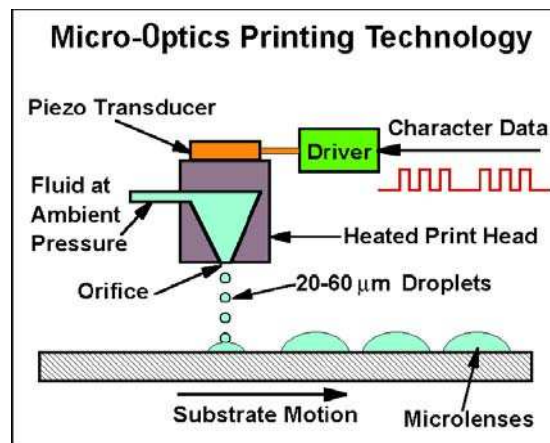


図 2.9 インクジェット法を用いたマイクロレンズの作製プロセス[7]

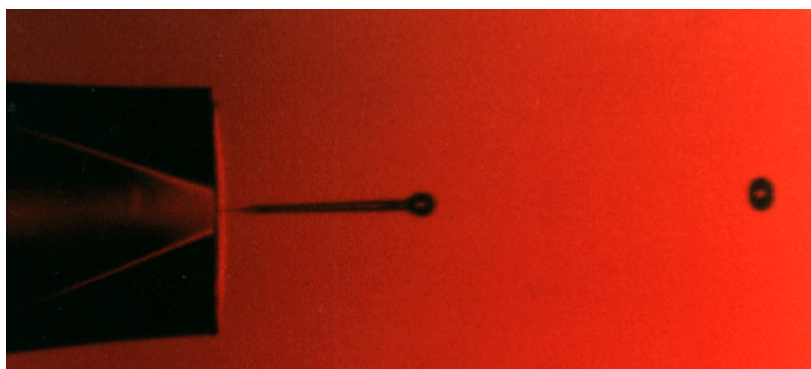


図 2.10 空中を飛行する吐出樹脂の液滴[8]

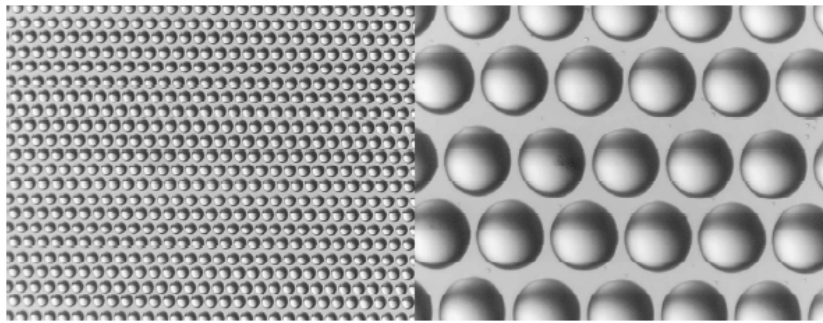
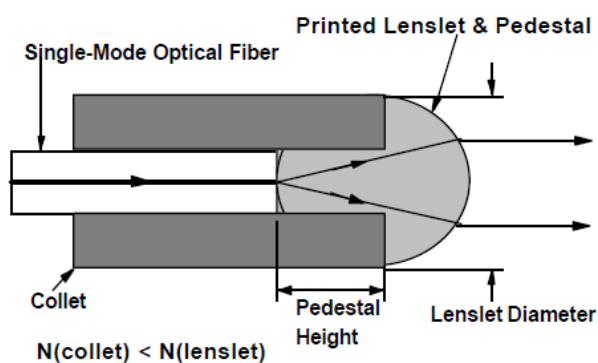
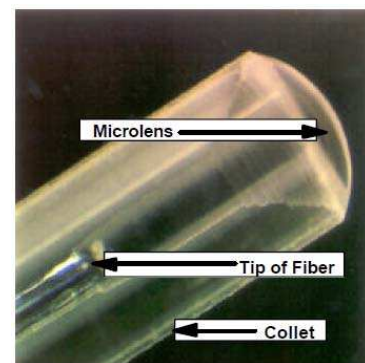


図 2.11 インクジェット法で作製したマイクロレンズ[9]



(a) 断面図



(b) 外観写真

図 2.12 インクジェット法でシングルモードファイバの先端に形成したポリメーターレンズ[10]

2.2.7 Proton irradiation 法

Proton irradiation (プロトン (陽子) 照射) 法は、シンクロトロン放射光施設と言う特殊な環境・設備が必要なやや特殊な作製法である。プラスチック素材にプロトン (陽子) を打ち込んだ箇所は、後処理でレンズ形状を付与することができる、あるいはその箇所を溶剤により除去しホール形状を作製することができるなどユニークな方法である。図 2.13 に Proton irradiation 法を用いたマイクロレンズ、マイクロホールの作製法を示す[11]。図 2.13 (a) には、放射光を選択的にプラスチックに露光するためのマスクとシャッターの配置が示してある。レンズアレイを作製する場合には、真空チャンバー内に置いた基板を X-Y ステージなどで移動し順次露光を繰り返す。図 2.13 (b), 図 2.13 (c) には、それぞれ、露光した部分にホールを形成する場合、レンズを形成する場合の例を示す。露光した部分を溶剤で除去すれば、

高精度なホールが作製できる。放射光の直進性が高いために、側壁の平行度も高い精度で得ることができる。また、加熱現像（モノマー拡散）を行うことで、露光部分にレンズを形成することもできる。図 2.14 には Proton irradiation 法で作製したマイクロホールの例[12] を、同じく図 2.15 には Proton irradiation 法で作製したマイクロレンズの例[12]を示す。プラスチック基板が高精度で加工されていることがわかる。

さらに、図 2.16 には Proton irradiation 法で作製可能な異なる形状の例 [13] を示す。レンズ、ホールについては、前述の図 2.15 とほぼ同じであるが、図 2.16 の最下部に示されているように、三角形のマイクロプリズムを作製する場合、三角プリズムの断面形状のみを決めたマスクを用意し（あるいはサンプル基板を移動させ）、放射光で露光する（プロトンを打ち込む）だけで高精度なマイクロプリズムを作製することができる。これも前述のように、放射光の直進性が高いために、平行度は高いプリズムの断面を得ることができる。露光後は、溶剤によるエッチングを行うだけで、高精度なマイクロプリズムを得ることができる。図 2.17 に Proton irradiation 法の露光セットアップ[14]を示す。シンクロトロン放射設備の複数ある取り出し口のひとつから、基板を置く真空チャンバーに放射光をコリメーターで導く。2 つのコリメーターを用いることでビームの直進性が向上している。ニッケルマスクの加工精度、サンプルを移動させるステージの精度を確保すれば任意の形状のレンズ、プリズム、ホールなどが作製できる。ただし、本方法も非常に設備負荷が大きいため、得られたプラスチックからの加工品をそのまま製品にするというよりも、レプリケーションをする際のマスクの加工に用いることの多い方法である。

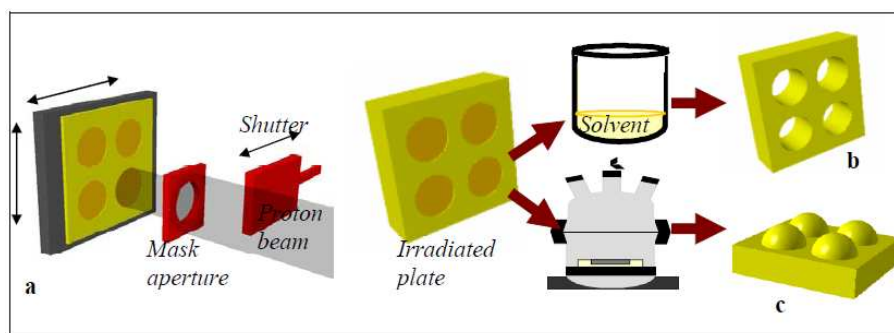


図 2.13 プロトン（陽子）照射法を用いたマイクロレンズの作製プロセス[11]

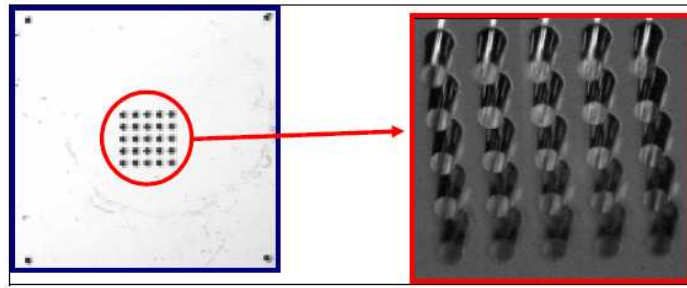


図 2.14 プロトン（陽子）照射法で作製したマイクロホール例[12]

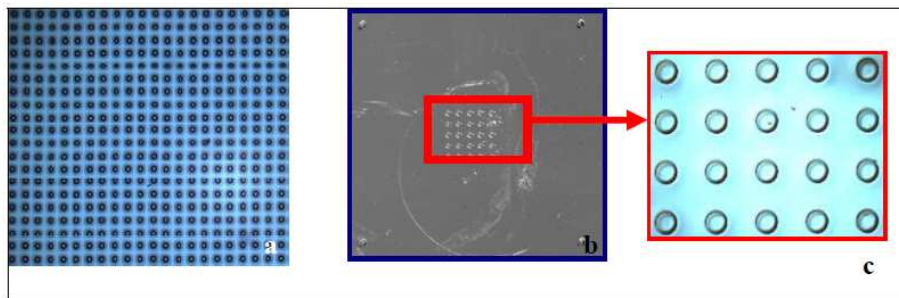


図 2.15 プロトン（陽子）照射法で作製したマイクロレンズ例[12]

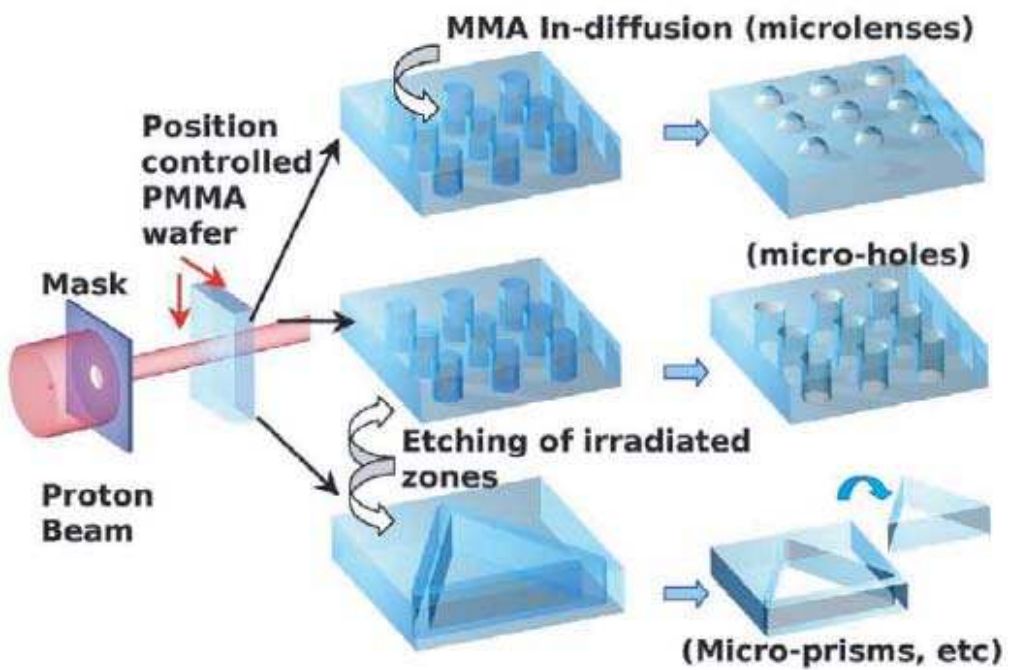


図 2.16 プロトン（陽子）照射法で作製可能な異なる形状例[13]

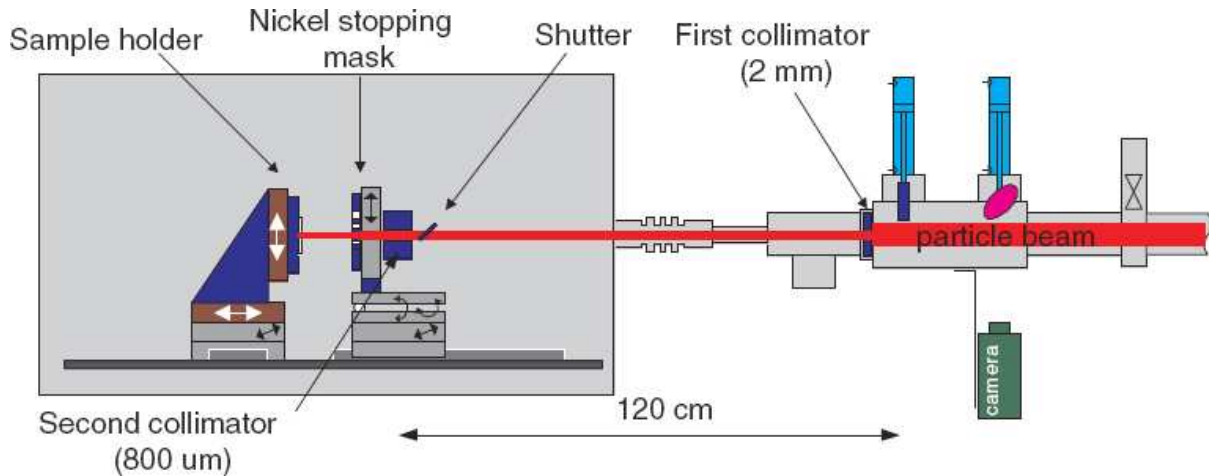


図 2.17 プロトン（陽子）照射法の露光セットアップ[13]

2.2.8 Gray scale photomask 法

Gray scale photomask 法は、電子ビームで露光、現像された透過率分布を有するマスクを用いて、フォトレジストへ同時多階調露光をおこなうことで微細形状の作製が可能になる。特に非球面レンズの作製、凸レンズ、凹レンズの同時作製など通常作製が困難な形状作製に有効である。図 2.18 に Gray scale photomask を用いて microoptics element を作製する方法を示す[14]。

- Step.1 電子ビームに感度を持つ特殊な感光性ガラスにパターンを記録、現像してフォトマスクを作製する。所望の形状に比例した濃度分布がガラスに記録される。
- Step.2 濃度分布が記録されたフォトマスクを用いてフォトレジストに紫外光で露光する。現像するとフォトマスクの濃度分布に比例した三角形形状が連続したフォトレジストの形状がガラス基板に残る。従来の方法では、これを溶融して表面張力により球面形状を創製していたが、Gray scale photomask を用いる方法では、フォトレジストを溶融しないでフォトマスクの濃度分布に応じて形成された形状をそのまま利用する。
- Step.3 フォトレジストで形成された立体的な形状は、従来法と同じくフォトレジスト と基板材料（レンズ形成材料）とをいわゆる等方性エッチングにより基板材料に転写することで得られる。

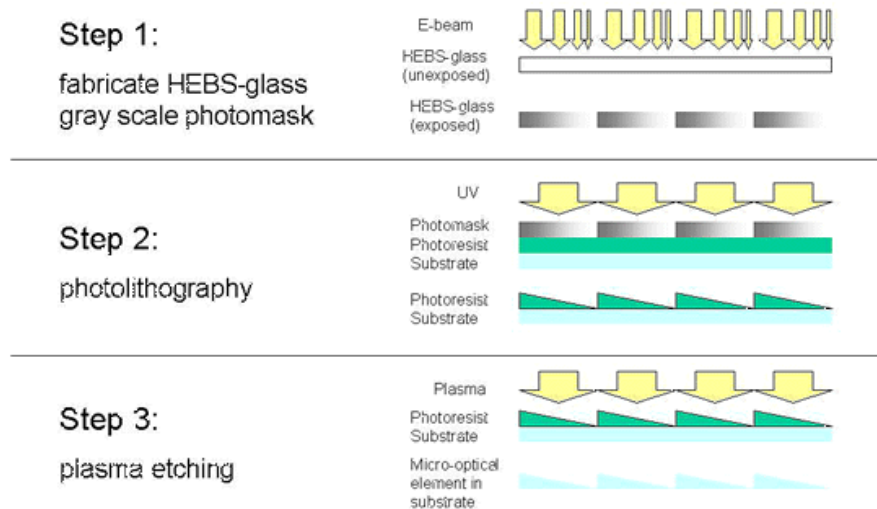


図 2.18 グレースケールフォトマスクを用いた高精度マイクロ
 オプティクスエレメント作製プロセス[14]

図 2.19 には，Gray scale photomask を用いて作製したマイクロレンズアレイの例を示す[15]．本例のように，高 NA でかつ非球面形状のレンズが 100%の面積を占めるレンズアレイへの作製には有効な手段になる．また，本例に示した Gray scale photomask の場合は，基板となる感光性ガラスが電子ビームに感度を有しているため，非常にファインなパターンの作製が可能である．可視光に感度のある感光性ガラスは従来からあり，レーザービームによる露光は可能であったが，最小ビームスポットは 0.5 ミクロン程度である．一方，電子ビームを用いた場合は 0.1 ミクロン程度のスポット作製が可能であることから，電子ビームに感度のある感光性ガラスを用いた露光用のフォトマスクの作製，使用はレンズ形状の高精度化には有効な手段になる．

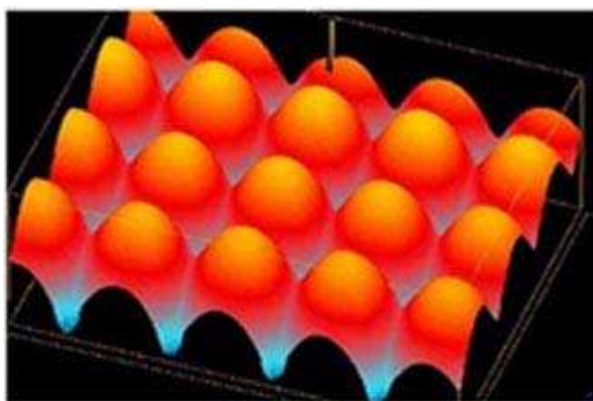


図 2.19 グレースケールフォトマスクリソグラフィーを用いた
 100%高密度充填 F/1 非球面マイクロレンズ [15]

2.3 製法による性能比較

2.3.1 概要

2.2 章では，マイクロレンズの作製方法とその特徴をまとめたが，本章では代表的な作製法で試作されたマイクロレンズの波面収差，表面粗さなどの特性を測定し，それぞれの作製法に依存した性能の違いを評価する．また，波面収差測定結果よりマイクロレンズ評価に必要な波面収差測定装置の要件を明らかにする．

2.3.2 測定方法

マイクロレンズの特性評価は，以下の方法でおこなった．波面収差は共同研究先である Vrije University Brussel (Brussels, Belgium) に設置されている，Erlangen University (Erlangen, Germany) で開発された Mach-Zehnder 干渉計を用いた．本干渉計の詳細は，第 2 章 5.2 節 (2.5.2 マイクロレンズの波面収差測定用干渉計) で説明するが，図 2.20 に示したマイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計を用いて波面収差を測定した．

本干渉計は，レーザー光源の光束をビームスプリッターで光路を 2 分割したのち，参照側光束と測定光側光束に分離した光束はそれぞれ偏波面保存光ファイバーで伝達され，再度ビームスプリッターでサンプル光束と参照光束とが合成され干渉縞を生成する．サンプル光束は，顕微鏡の対物レンズで球面波に変換された光束を被検レンズ (マイクロレンズ) に入射し再度平面波に変換される．この部分が光ファイバー外の空間に光路が構築されている．ヨーロッパでは，数台程度の稼動実績がある干渉計であり，Erlangen University (Erlangen, Germany) と Vrije University Brussel (Brussels, Belgium) とが共同研究をすすめていることもあり，Vrije University に装置が導入されている．



図 2.20 マイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計

図 2.21 に本 Mach-Zehander 干渉計でのマイクロレンズ測定例を示す．サンプル光東側にピエゾ駆動のミラーを配置し，使用している光源の波長 λ (本例では 632.8nm)に対応し位相を変化させた 5 種類 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 4\pi/2$) の干渉縞の画像を取り込み演算している．図の最上部の 5 枚の干渉縞の画像が 5 種類の干渉縞である．この 5 枚の干渉縞を合成し $0\sim 2\pi$ の範囲の連続した干渉縞として再構成し波面収差を計算により求めることができる [16]． 2 段目の中央が計算により求められた波面収差を示している． 3 段目中央のグラフが同じく計算で求められた MTF (Modulation Transfer Function : レンズの伝達関数) を示している．

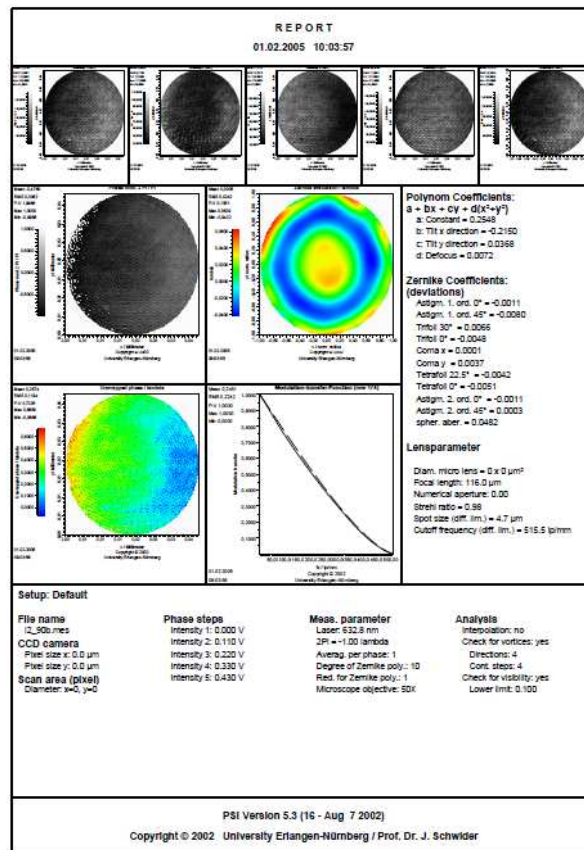


図 2.21 Mach-Zehander 干渉計でのマイクロレンズ測定例

図 2.22 に光学式非接触形状測定装置 ((a) 装置の構成図, (b) 装置外観) を示すが，レンズの表面粗さについては，市販の Veeco 社製 optical non-contact profilometer (WYKO NT2000 : 白色光を用いた Mireau 型の干渉計) を用いた．測定面積は非常に小さいが，サンプルを X-Y にスキャンして光軸方向 (Z 方向) の高さ情報を高精度で得ることができる．高さの最大差 : 2mm, 測定感度 : 3nm とされており，特にレンズの表面粗さを非接触で測定する際に有効な装置である．

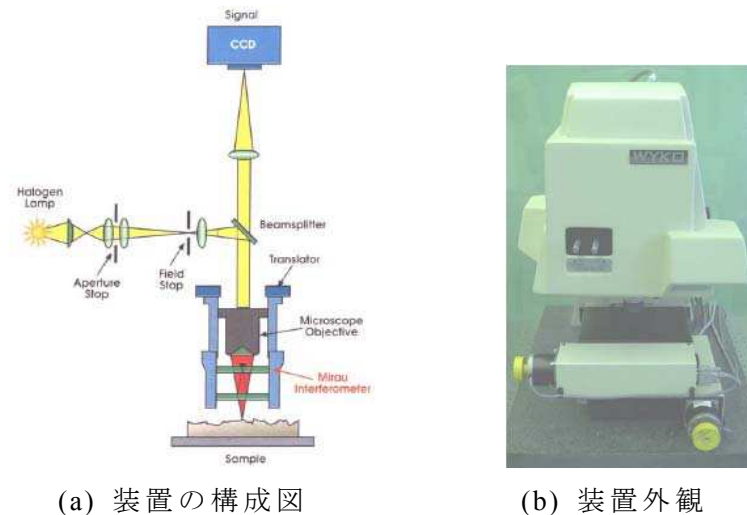


図 2.22 光学式非接触形状測定装置

2.3.3 測定結果

異なる方法により作製されたマイクロレンズの性能を比較した例を図 2.23, 図 2.24 に示す[17][18].

図 2.23 では, 異なる作製方法で試作されたマイクロレンズの特性を比較した. F 値をパラメータにして製法ごとのマイクロレンズの波面収差特性 (RMS : Root-Mean-Square : 2 乗平均平方根) を示した.

これらの測定結果から, microjet printing, Laser beam writing および Reactive ion etching 法(反応性イオン・エッチング法: Photoresist forming法+Etching法)で作製されたマイクロレンズの収差はMaréchal Criterion (マレシャル基準: $\Phi_{RMS} \leq \lambda/14 \approx 0.071\lambda$) *1) を満たす回折限界以下である. 一般に, F値を大きくする(焦点距離を長くする)ことで波面収差を減少させることができるが, F値が4.0から2.0の領域で見ると同じF値でも製法により特性に大きな差がある. 特に複数のデータがある Reactive ion etching (反応性イオン・エッチング)法で作製されたマイクロレンズを比較すると, RMSが0.01~0.15の値をとっている.

Reactive ion etching 法(反応性イオン・エッチング法: Photoresist forming 法+Etching 法)で作製する場合も, 初期形状は Thermal reflow 法(Photoresist forming 法)で作製されており, 球面形状はフォトレジストの表面張力により形成されるため, エッチング前の形状誤差に大きな差は無いと考えられる. しかし, エッチングの条件(エッチングガスの組成, 圧力, エッチング速度など)で大きく特性が変わる可能性がある. 一般には, エッチング速度を下げることで, Thermal reflow 法(Photoresist forming 法)で作製された元の形状の転写性を向上させることができる. ただし, エ

ツチング速度の大小は大きく生産コストを変化させるため、形状精度の確保と生産性のバランスをとることが求められる。したがって、図 2.23 の評価結果が直接に製法ごとの最高能力を示している訳ではないことに注意する必要がある。あくまでも大まかな比較としてとらえる必要がある。

特に、図 2.23 に示した評価結果では、Thermal reflow 法(Photoresist forming 法)で作製されたレンズの特性が必ずしも良い結果を示していないが、これは技術の特性を示しているものではなく、たまたま測定したレンズが示した特性である事に注意を払う必要がある。一般には、球面レンズで比較すれば、フォトリソを用いた Thermal reflow 法(Photoresist forming 法)で作製したレンズの特性が優れている。

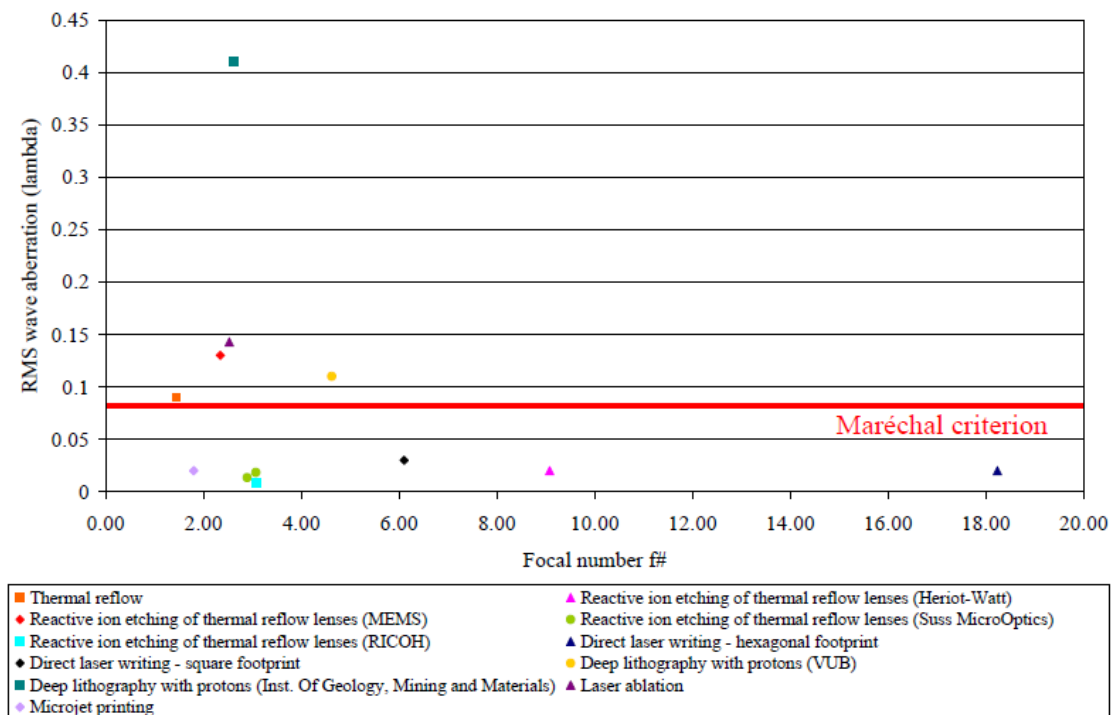


図 2.23 マイクロレンズの製法による性能比較例（波面収差：RMS）[17][18]

また、図 2.24 では、図 2.23 と同じように異なる作製方法で試作されたマイクロレンズの特性を比較した。F 値をパラメータにして製法ごとのマイクロレンズの波面収差特性 (PV: Peak to Vally) を示した。同じく、これらの測定結果から、microjet printing, Laser beam writing および Reactive ion etching (反応性イオン・エッチング) 法で作製されたマイクロレンズの収差は Rayleigh Criterion (レーリー基準: $\Phi_{PV} \leq \lambda/4 = 0.25\lambda$) *2) を満たす回折限界以下であると言える。

これらの製法に起因する技術の比較は、幾何学的な特性（直径 D, 表面の粗さ, レンズ高さ h), 光学特性（焦点距離 f, F 値, 開口数 NA : Numerical Aperture), さ

らには内部の不均一性に起因する特性の変化により、波面収差（RMS 値，PV 値）は変化する．可能であれば，幾何学的な特性，光学特性が同じ条件での比較が望ましいが，なかなか同じ条件のレンズを入手するのは困難であるため，ある程度の誤差は見込んだ上での比較をせざるを得ない．

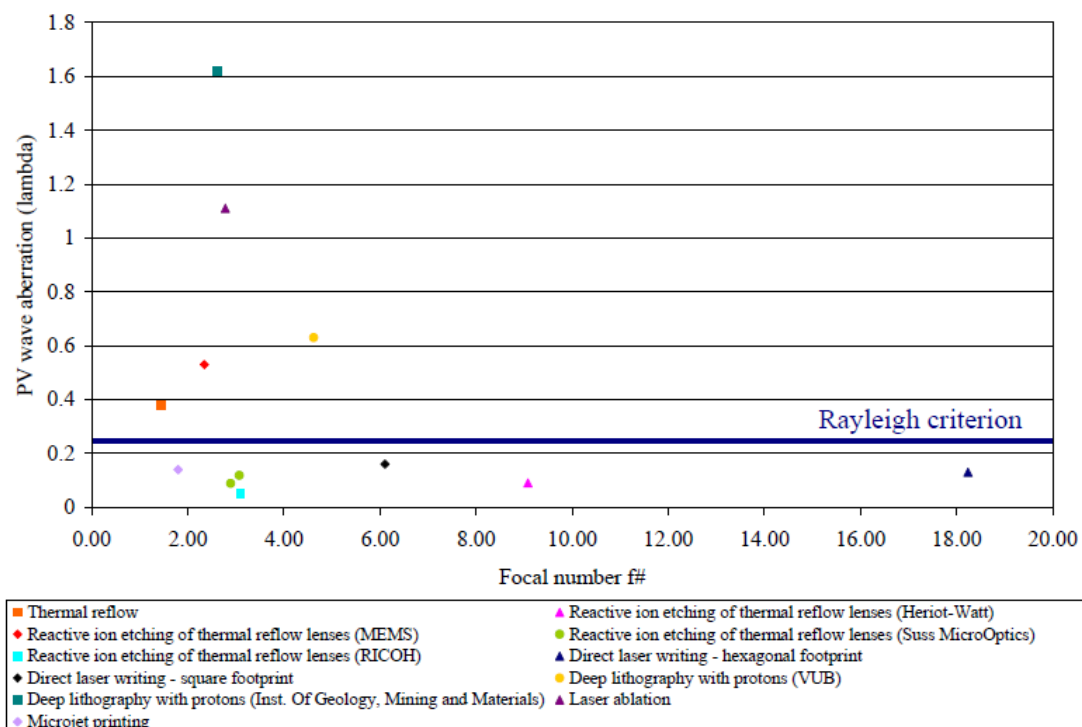


図 2.24 マイクロレンズの製法による性能比較例（波面収差：PV） [17][18]

図 2.25 に，図 2.23 および図 2.24 に整理した波面収差以外の特性(MTF: Modulation Transfer Function, PSF : Point Spread Function *3), Strehl 比（ストレーン比）*4，表面粗さ，レンズ高さと表面粗さの比）を示す．波面収差特性の優れているレンズは概ね他の特性も優れているが，製法ごとに若干の特性の良否の変動もある．

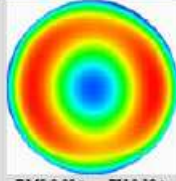
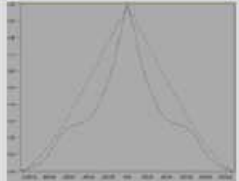
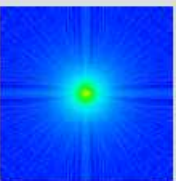
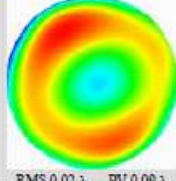
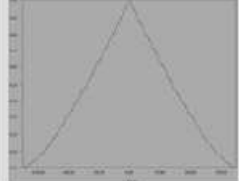
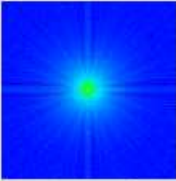
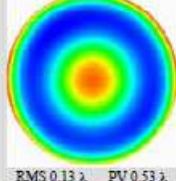
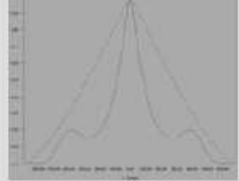
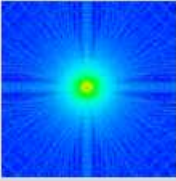
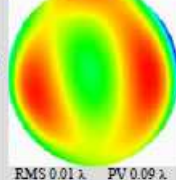
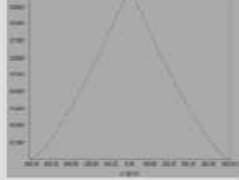
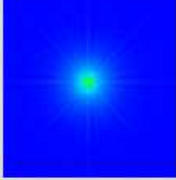
さらに，表 2.2 に種々のマイクロレンズの波面収差（RMS と PV）の実測値と計算値，およびその比較，Strehl 比の実測値と計算値，およびその比較を製法ごとに比較し示した．レンズ径，焦点距離などの設計諸元に基づいたシミュレーションを行い計算値と実測値とを比較した．

その結果，Inkjet 法である Microjet printing と代表的な Etching 法である Reactive ion etching of thermal reflow lenses（フォトレジストフォーミング+反応性イオン・エッチング）法で作製されたマイクロレンズが，形状制御性が高いために波面収差も実用的に十分に小さく，また Strehl 比も小さいことが示された．Microjet printing, Reactive ion etching 法(反応性イオン・エッチング法：Photoresist

forming 法+Etching 法)で作成されたマイクロレンズが像形成用途への適用が可能であり，加えて Laser beam writing が集光用途への適用が可能であると言える．

ただし，同じ Etching 法である Reactive ion etching of thermal reflow lenses (フォトリソトフォーミング+反応性イオン・エッチング)法で作製されたマイクロレンズでも，性能が十分でないレンズもある．作製に用いる装置，制御などの影響を受けることがあることを示している．特に，エッチングの速度は生産性への影響が大きい制御因子であるが，製造コスト低減のためにエッチング速度を高めることが形状制御性を低下させる事もある．生産性と制御性のバランスをとることが重要になる．

これらのレンズの波面収差の測定について考えると，評価したマイクロレンズのサンプルは直径が $38\mu\text{m}\sim 687\mu\text{m}$ であるが，多くは直径が $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ の間に分布している．最近の傾向として，より小さなサイズのレンズが作製されていることも考慮すると，既存のマクロレンズ用（通常レンズ用）の波面収差測定用の干渉計が最小直径 $500\mu\text{m}$ 程度のサイズの測定が可能であるため，それ以下のサイズの測定に重点を置くことが精度向上の観点からも重要になる．

Micro lens fabrication technology	Wavefront aberration	MTF	PSF	Strehl ratio	Deviation from an ideal sphere	Surface roughness R_a ($50 \times 50 \mu\text{m}^2$)	Ratio surface roughness / sag
Thermal reflow D= 144.7 μm h= 20.2 μm f= 209 μm $\#m$ = 1.44 NA= 0.3445	 RMS 0.09 λ PV 0.38 λ			0.7036	RMS 0.0936 λ PV 0.5753 λ	1.87 nm	0.01 %
Reactive ion etching (Heriot-Watt) D= 199.3 μm h= 5.7 μm f= 1809 μm $\#m$ = 9.19 NA= 0.0544	 RMS 0.02 λ PV 0.09 λ			0.9804	RMS 0.1051 λ PV 0.4425 λ	1.55 nm	0.03 %
Reactive ion etching (McGill - MEMS Opt.) D= 117 μm h= 13.76 μm f= 274 μm $\#m$ = 2.38 NA= 0.21	 RMS 0.13 λ PV 0.53 λ			0.4866	RMS 0.1120 λ PV 0.7019 λ	1.97 nm	0.01 %
Reactive ion etching (Suss MicroOptics) D= 134.2 μm h= 22.2 μm f= 676.6 μm $\#m$ = 2.89 NA= 0.1765	 RMS 0.01 λ PV 0.09 λ			0.99		1.34 nm	0.01 %

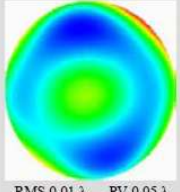
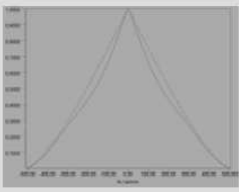
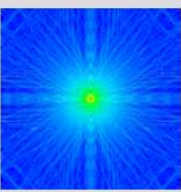
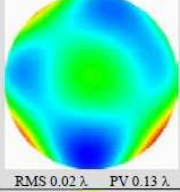
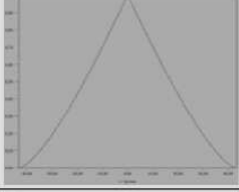
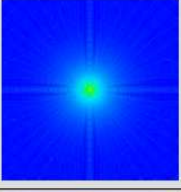
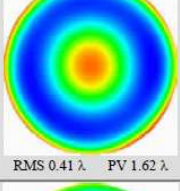
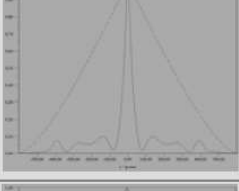
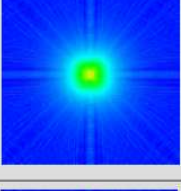
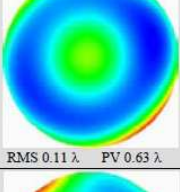
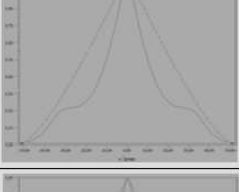
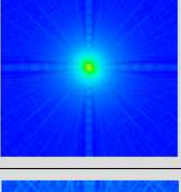
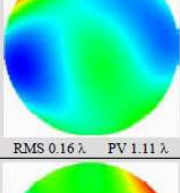
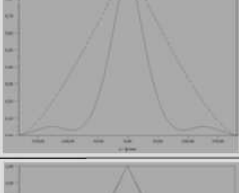
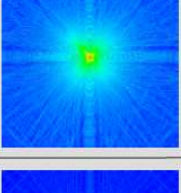
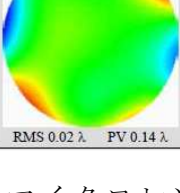
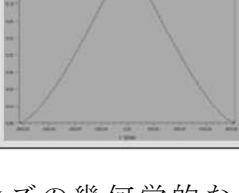
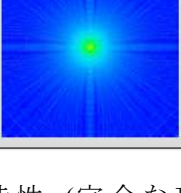
Micro lens fabrication technology	Wavefront aberration	MTF	PSF	Strehl ratio	Deviation from an ideal sphere	Surface roughness R_q ($50 \times 50 \mu\text{m}^2$)	Ratio surface roughness / sag
Reactive ion etching (RICOH Company) D= 38 μm h= 3.52 μm f= 117.5 μm f#= 3.09 NA= 0.16	 RMS 0.01 λ PV 0.05 λ			0.99		2.89 nm*	0.08 %
Direct laser writing D= 219.3 μm h= 1.67 μm f= 3999 μm NA= 0.0273	 RMS 0.02 λ PV 0.13 λ			0.9853	RMS 0.0975 λ PV 0.9277 λ	28.65 nm	1.72 %
DLP (Inst. Of Geology, Mining and Materials) D= 173.3 μm h= 15.2 μm f= 454 μm f#= 2.64 NA= 0.1894	 RMS 0.41 λ PV 1.62 λ			0.12		2.71 nm	0.02 %
DLP (VUB) D= 197.4 μm h= 11.5 μm f= 912 μm f#= 4.62 NA= 0.1082	 RMS 0.11 λ PV 0.63 λ			0.6293		2.14 nm	0.01 %
Laser ablation D= 199.8 μm h= 16.38 μm f= 553.45 μm f#= 2.85 NA= 0.1755	 RMS 0.16 λ PV 1.11 λ			0.4028		3.14 nm	0.02 %
Microjet printing D= 687.1 μm h= 98.2 μm f= 1235 μm f#= 1.91 NA= 0.2619	 RMS 0.02 λ PV 0.14 λ			0.9898	RMS 0.2715 λ PV 1.5880 λ	3.03 nm	0.01 %

図 2.25 マイクロレンズの幾何学的な特性 (完全な球からの誤差, 直径, レンズ高さ, 表面粗さ) と光学特性 (焦点距離, F 値, NA, 波面収差, MTF, PSF および Strehl 比) [17][18]

* 本マイクロレンズのみ, 表面粗さは $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ のレンズの頂点近傍で評価

表 2.2 マイクロレンズの製法と波面収差（測定値と計算値の比較）[17][18]

	波面収差 (RMS) : 測定値 (Å)	波面収差 (RMS) : 計算値 (Å)	波面収差 (RMS) の比 : 測定値/計算値 (Å)	波面収差 (PV) : 測定値 (Å)	波面収差 (PV) : 計算値 (Å)	波面収差 (PV) の比 : 測定値/計算値 (Å)	Strehl 比 : 測定値	Strehl 比 : 計算値	Strehl 比の比較 : 測定値/計算値
[Proton irradiation] Deep lithography with Protons (Inst. of Geology, Mining and Materials)	0.41	0.0174	23.6	1.62	0.0652	24.8	0.12	0.9698	0.12
[Proton irradiation] Deep lithography with protons (VUB)	0.11	0.0039	28.2	0.63	0.0146	43	0.63	0.9991	0.63
[Direct laser writing]	0.02	0.0008	25.6	0.13	0.0003	445.2	0.99	1.0	0.99
[Laser ablation]	0.16	0.0122	13.1	1.11	0.0456	24.3	0.4	0.9882	0.4
[Inkjet] Microjet printing	0.02	0.0485	0.4	0.14	0.1817	0.8	0.99	0.8039	1.2
[Etching] Reactive ion etching (Heriot-Watt)	0.02	0.0006	32.5	0.09	0.0023	39.1	0.99	1.0	0.99
[Etching] Reactive ion etching of thermal reflow lenses (MEMS Optical)	0.13	0.0175	7.4	0.53	0.0655	8.1	0.49	0.9537	0.5
[Etching] Reactive ion etching of thermal reflow lenses (RICOH Company)	0.01	0.0028	3.6	0.05	0.0104	4.8	0.99	0.9993	0.99
[Etching] Reactive ion etching of thermal reflow lenses (Suss MicroOptics)	0.01	0.65	1.5	0.09	0.0243	3.7	0.99	0.9973	0.99
[Photoresist forming] Thermal reflow	0.09	0.0333	2.7	0.38	0.1226	3.1	0.7	0.7748	0.9

：像形成用途に適用可能

：集光用途に適用可能

- *1) Maréchal Criterion (マレシャル基準) : André Maréchal (1917-2007 : フランス) によって導かれたレンズの解像度に関する評価基準. 理論的なビームウエストサイズまで絞るには, この波面収差の標準偏差 (RMS 値) を $\lambda/14$ ($\Phi_{RMS} \leq \lambda/14 \approx 0.071$) 以下に収めなければならない.
- *2) Rayleigh Criterion (レーリー基準) : John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh (1842-1919 : 英国) によって導かれたレンズの解像度に関する評価基準. レンズがほぼ無収差とみなせるためには, 点像強度分布の中心強度が, 最良像点位置での強度分布の 0.8 以上である範囲が波面収差 (PV 値) で $\lambda/4$ ($\Phi_{PV} \leq \lambda/4 = 0.25$) 以下になる.
- *3) PSF (Point Spread Function : 点像分布関数) : 点光源がレンズにより結像されたときの収差による発生する像のボケを, 2 次元的な強度分布として関数であらわしたものの.
- *4) ストレール比(S) : レンズにより結像された点像の最大強度と, 無収差時の理想状態の円形開口による結像の点像の最大強度との比を言う. 通常 0.8 以上であれば無収差レンズによる結像と考えられる. 以下の近似式が用いられる.

$$S = \exp(- (2\pi W/\lambda)^2) \approx 1 - W (2\pi/\lambda)^2$$

(λ : 波長 W : 波面収差の RMS 値)

2.4 マイクロレンズの光学特性測定技術

2.4.1 概要

マイクロレンズの評価に関しては、大きくは形状評価と光学性能評価に分けられる。形状情報は主にレンズ作製者（サプライヤ）側に、光学性能は使用者（ユーザ）とサプライヤの両者に有効な情報を与えてくれる。マイクロレンズは、従来のレンズと比べ、主にそのサイズ、構造上の違いがあるため、必ずしも従来の計測技術がそのままつかえないケースが多い。ここでは、マイクロレンズを使用するユーザー、作製するサプライヤの両者が共通の理解を進めるために ISO で制定された国際標準を示す。

表 2.3 に、ISO 14880-1 で定められた用語の定義のうち重要な項目を抜き出し和訳をつけて示した [19][20]。図 2.26 には、同じく用語に対応し定めたディメンジョンを示す [19]。特に、一般のレンズで定められている焦点距離測定の方法が異なり、主点からの距離ではなく、レンズに平行光を入射したときに集光する光軸上の強度が最大になる位置とレンズの頂点までの距離を、それぞれ、実効焦点距離（後側）（Effective back focal length）、実効焦点距離（前側）（Effective front focal length）と定義している。

表 2.3 マイクロレンズの用語（ISO 14880-1 からの抜粋と日本語追記） [19][20]

	Symbol	Unit	Term	
1	A_g	mm^2	geometric aperture	幾何学的開口
2	$2a_1, 2a_2$	mm	lens width	レンズサイズ
3	H	mm	surface modulation depth	レンズ高さ
4	NA	none	numerical aperture	開口数
5	$n(x, y, z)$	none	refractive index	屈折率分布
6	n_o	none	refractive index (lens centre)	中心屈折率
7	P_x, P_y	mm	pitch	配列ピッチ
8	f_{Eb}	mm	effective back focal length	実効焦点距離（後側）
9	f_{Ef}	mm	effective front focal length	実効焦点距離（前側）
10	R_c	mm	radius of curvature	レンズ曲率半径
11	S_x, S_y, S_z	mm	coordinates of focal spot position	集光位置
12	$\Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$	mm	focal spot position shift	集光位置ズレ
13	W_x, W_y	mm	focal spot size	集光スポットサイズ
14	Φ_{rms}	λ	wavefront aberration	波面収差
15	λ	μm	wavelength	波長
16	v_{eff}	none	effective Abbe-number	有効アッペ数

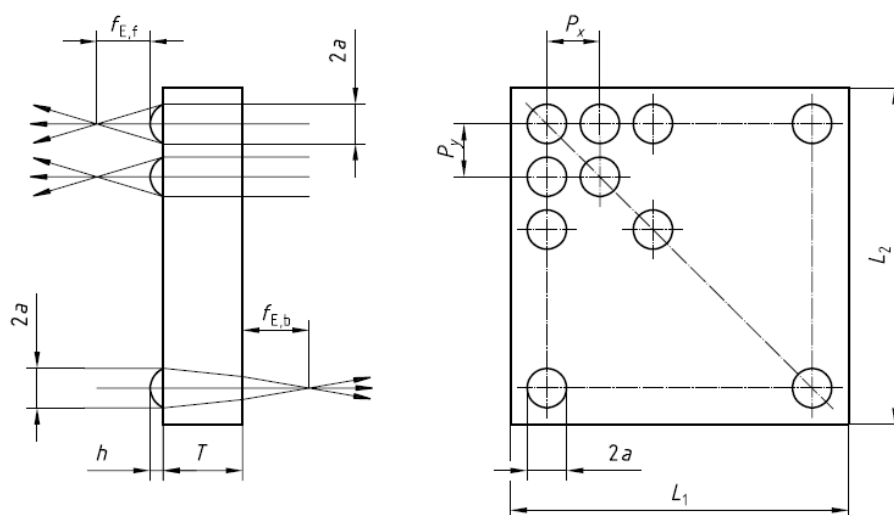


図 2.26 マイクロレンズの基本構造 (ISO 14880-1) [19]

2.4.2 光学特性評価

ここで、レンズ性能への影響の大きいレンズの表面形状、焦点距離、およびレンズの光学性能（結像性能）を評価する波面収差の測定法について説明する。

2.4.2.1 表面形状測定

レンズの形状は、その性能を確保するためには重要な要素であるが、対象物が小さいための精度確保の問題、あるいはレンズ周縁部の勾配がきつい部分の測定がうまくできないなどの課題も多い。用途に応じて種々な方法が検討され使い分けられている。一般に触針などを用いた接触測定、干渉計、コンフォーカル（共焦点）顕微鏡、オプティカルプローブ（レーザー光プローブ）などを用いた非接触測定が行われる。

接触式では、触針式の形状測定器、3次元測定器にソフトウェアを組み合わせて測定する方法、非接触方式では、干渉計を用いる方法、共焦点顕微鏡を用いる方法、さらにはレーザー光をプローブとした非接触3次元測定方式などが代表的である。触針式の測定は、非球面レンズが登場した初期段階には多用されたが、ワーク（測定サンプル）に痕跡を残す、測定時間が長い、レンズ径が小さくなると針先の形状も誤差要因になるなどの制約があるためマイクロレンズの分野では一部を除きあまり使われなくなっている。

非接触測定法では、Twyman-Green（トワイマン・グリーン）方式の干渉計，共焦点顕微鏡，オプティカルプローブ（レーザー光プローブ）などの方式が代表的である。一部，AFM（Atomic Force MicroscopyまたはAtomic Force Microscope：原子間力顕微鏡）が用いられることもあるが，非常に小さいサンプル（ナノオーダーから数マイクロン（数十マイクロン）程度の大きさのサンプルの測定に適用すると効果的であり，それに比べるとややサイズの大きいマイクロレンズへの応用は限定的である。

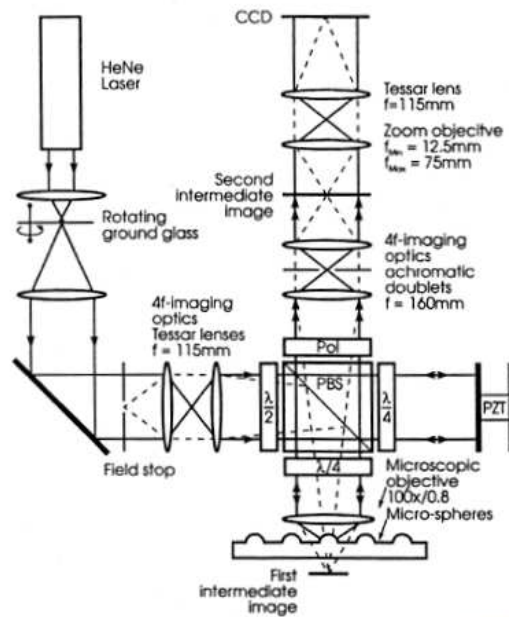


図2.27 Twyman-Green 干渉計の構造 [21]

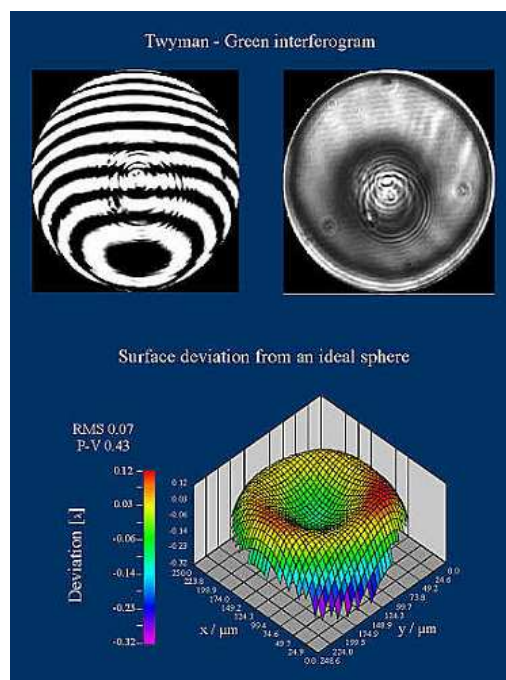


図2.28 Twyman-Green干渉計での表面形状測定例 [21]

図 2.27 に Twyman-Green (トワイマン・グリーン) 方式の干渉計の例を示す[21]. 位相シフト方式の干渉計を用いているため, 短時間でレンズ面全体の情報が得られるが, レンズ周縁部の勾配がきつい部分の測定が難しい. 図 2.28 に Twyman-Green 干渉計での測定例を示す[21]. 図の上部左はサンプル表面の形状をあわらした干渉縞 (フリンジ) (この場合は, サンプルを光軸に対し若干傾斜させ干渉縞を見やすく表している), 図の上部右は測定時の干渉縞 (測定時は, 干渉縞の本数を少なくした方が測定精度が上がるため, 実際の測定時の状況を表している), 図の下部は, サンプル表面の参照球面からの偏差を 3 次元的に表示した例を示している.

共焦点顕微鏡もマイクロレンズの表面形状を測定する有効な方法である. 多数のピンホールを配列したディスク (ニポウディスク) を透過した照明光は, 対物レンズにより被検サンプル (マイクロレンズ) の表面に集光される. 焦点のあった位置 (共焦点状態) の情報のみがピンホールを透過して CCDカメラに投影される. ニポウディスクを回転させることで二次元的な情報, さらに被検サンプルを光軸方法に移動させることで, 表面に焦点の合う位置の検出が可能になる. マイクロレンズサンプルを光軸方法に移動させることで, あたかも地図上の等高線を立体的に描くかのような 3 次元的な表示, 測定が可能になる. 図 2.29 に共焦点顕微鏡の構造, 図 2.30 に共焦点顕微鏡で測定したマイクロレンズの表面形状の例を示す. 共焦点顕微鏡を用いた場合も, Twyman-Green 干渉計を用いた場合と同じようにレンズ周縁部の勾配が大きい部分の測定が難しい[22].

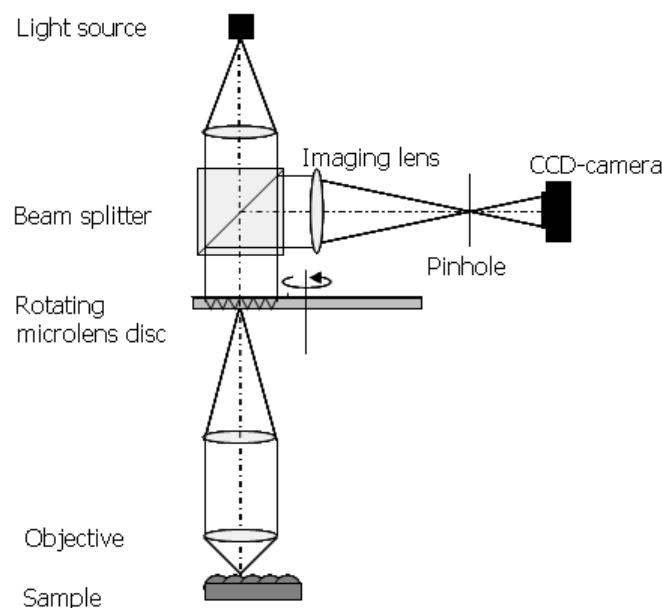


図 2.29 共焦点顕微鏡の構造[22]

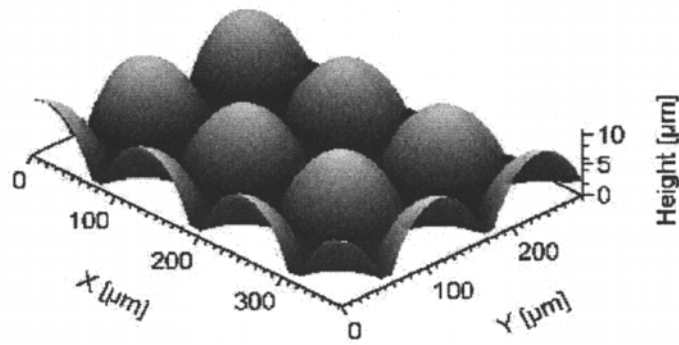


図 2.30 共焦点顕微鏡で測定したマイクロレンズの表面形状の例[22]

また，最近レーザー光をプローブとした非接触 3 次元測定方式の測定器も登場し注目を集めている [23] [24]．図 2.31 に測定原理，図 2.32 に装置の外観を示すが，レーザー光を顕微鏡の対物レンズを用いてサンプルに照射し，反射光を AF (Auto - Focus) センサーで検知し同時に光学系全体を垂直方向（測定光学系の光軸方向）に移動させ，表面位置を検出するものである．X-Y 方向のスキャンは被測定物をのせたステージでおこなう．プローブ光のうち 1%程度の反射光でも検出でき，表面の粗いサンプルであれば，ほぼ 90°（垂直）に近い面も測定可能と言われている．ただ，被測定物全面を測定スポット光でスキャンする必要があるため，計測に時間がかかることから大量の製品検査へは用途を限定しての使用になる．

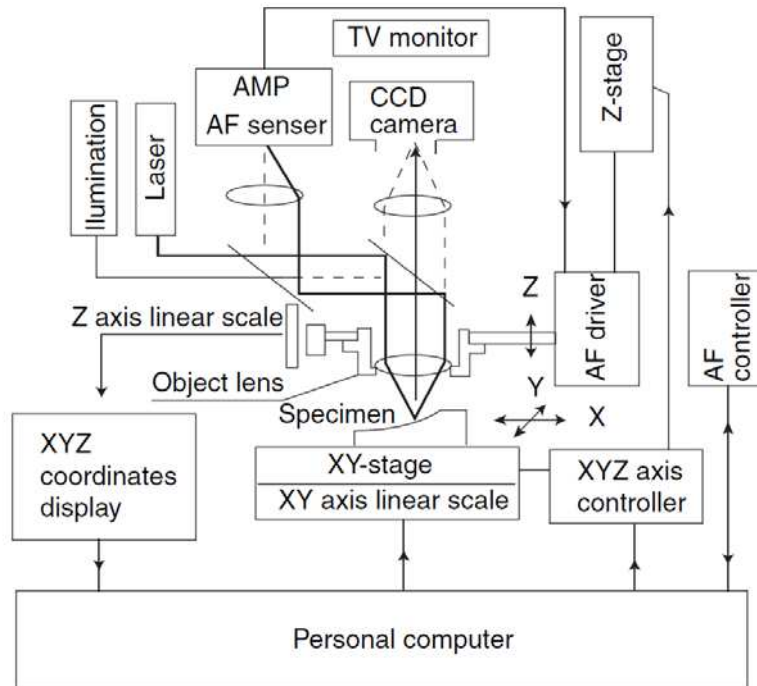


図 2.31 レーザー光をプローブとした非接触 3 次元測定方式の原理 [23] [24]

図 2.33 に、マイクロレンズの測定例を示す。本例は比較的計測が簡単な例であるが、レンズ表面の形状が非常に良くわかり、特に加工誤差が発生しやすいレンズ周縁部の形状も高精度で把握できる。垂直方向の表示分解能は、最大 $0.001\mu\text{m}$ とされている。



図 2.32 レーザー非接触 3 次元測定器の外観 [23] [24]

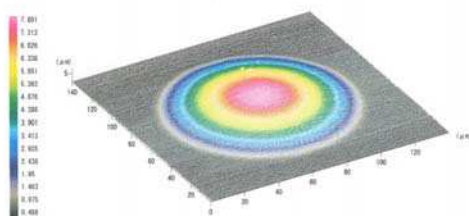


図 2.33 レーザー非接触 3 次元測定器の測定例
(サンプル： $\phi=100\mu\text{m}$ マイクロレンズ)

2.4.2.2 焦点距離

焦点距離測定は、図 2.34 に示すような干渉計を用いる方法、図 2.35 に示すような専用測定器を用いる方法が代表的である。図 2.34 に示すような干渉計を用いる場合は、干渉計からの集光光束がレンズの表面で反射される位置（干渉計で干渉縞を観察する場合は集光スポットが現れる状態(キャッツアイポジションとも言う)と、被検レンズを透過し平面ミラーで折り返された光束とで干渉縞が現れる状態（コリ

メーターポジションとも言う) との光軸上の位置の差を焦点距離 (実効前側焦点距離 (f_{Ef} : Effective Front Focal length), あるいは実効後側焦点距離 (f_{Eb} : Effective Back Focal length)) とすることができる[25]. ただし, この場合は, 測定光が被検レンズを往復で2回透過する. レンズの収差が大きい場合, 厳密にはレンズの収差により光束が同じ位置を通過しないことによる誤差が発生する可能性がある. したがって, レンズの収差が十分に小さいことが確認できているレンズの場合にのみ適用することができる.

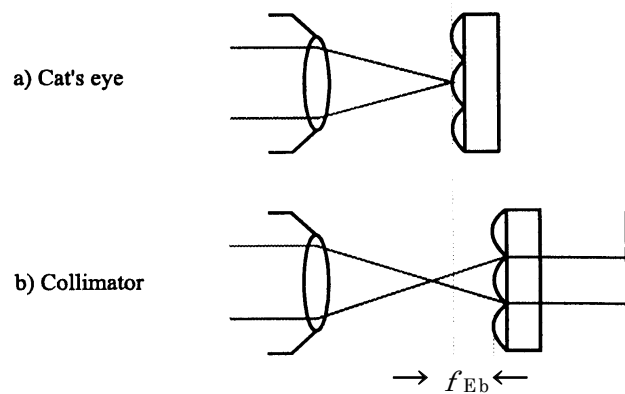
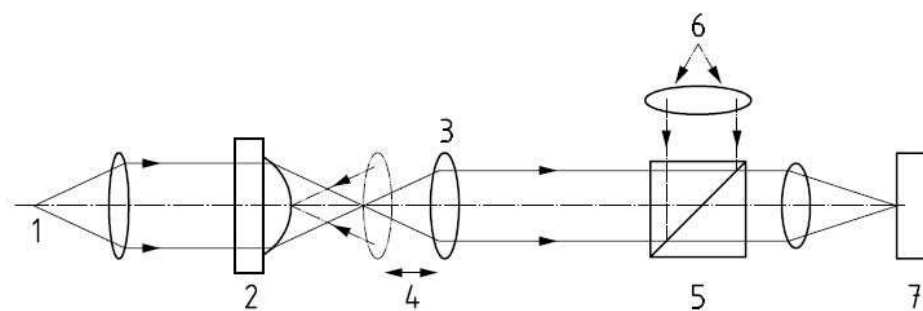


図 2.34 干渉計を用いた焦点距離測定の実例 [25]

図 2.35 に示すような専用測定器を用いる場合は, 被検レンズの裏面側から照明された透過光が光軸上で最大の強度を示す位置と, レンズの光軸上の頂点 (表面) の位置との差を, 干渉計を用いた場合と同じく焦点距離 (実効前側焦点距離 (f_{Ef}), あるいは実効後側焦点距離 (f_{Eb})) として測定することが可能である[26]. レンズの表面 (光軸上の頂点) は, 落射照明装置を用いて観察, 検出することができる. また, 光軸上の光量検出は, 図 2.36 に示すように CCD カメラで捕らえた画像の強度分布を計測し, ピーク強度が最大になる位置を選択することができる.

また, 干渉計を用いる場合, あるいは専用測定器を用いる場合の両方とも, 前述のように通常のレンズの焦点距離を測定する際に用いられる, レンズの主点 (主平面) から最適像面までの距離を焦点距離とするのとは異なり, ISO 標準 (ISO14880-1 **Microlens array - Part 1: Vocabulary**) で定められた, 実効 (前側 / 後側) 焦点距離 (f_{Ef}/f_{Eb}) を測定することができる. これは, 一般にマイクロレンズはその製法の影響, サイズの問題で主点位置を探すのが非常に困難であるため, 測定誤差の小さい, あるいは光ファイバーとのカップリングなどに用いる際の利便性も考慮して決められた.



Key

- 1 distant point source
- 2 substrate and microlens producing focussed spot
- 3 microscope objective
- 4 axial adjustment of microscope to locate lens surface and focus
- 5 beamsplitter
- 6 source for focus location on lens surface
- 7 charge-coupled device (CCD) camera

図 2.35 焦点距離測定装置光学系の例 [26]

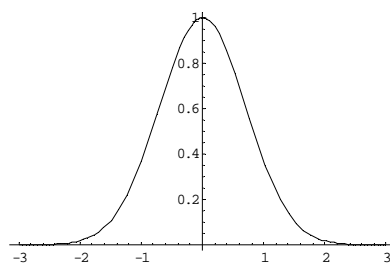


図 2.36 光軸上の光量検出例 [26]

2.5 マイクロレンズの波面収差測定技術

レンズの結像性能を評価するために、特に光を「波」として取り扱う波動光学的な性能評価をする際には波面収差の測定が多用されるようになってきた。ここでは、干渉計を用いた波面収差測定技術が活用されており、コンベンショナルレンズ（従来レンズ）の測定では Fizeau（フィゾー）型干渉計が製品化され多用されている。しかし、マイクロレンズの波面収差測定の場合は、コンベンショナルレンズに比べ、非常にサイズが小さい、製法上の特性により収差が大きいなどの制約条件を考慮した測定方式を選定する必要がある。以下各種の干渉計の方式を簡単に整理してみる。

2.5.1 波面収差測定に適用可能な干渉計

・ Michelson（マイケルソン）干渉計

光源からの光をビームスプリッターによって直交する2光路に振幅分割し、それぞれの光路に直角においた2枚の平面鏡による反射光を再びビームスプリッターで合成する。レンズを通して干渉縞が観察できる（図 2.37） [27]。

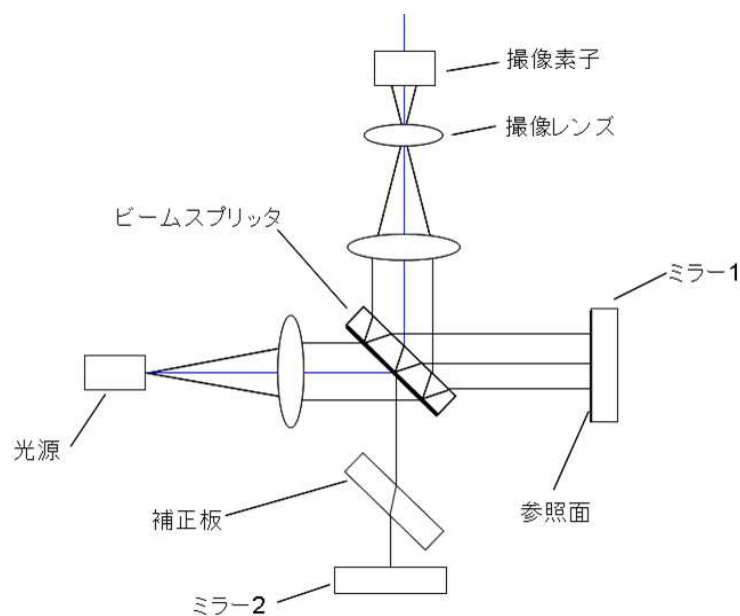


図 2.37 Michelson 干渉計の構成例 [27]

・ Twyman-Green (トワイマン・グリーン) 干渉計

単色光の点光源をコリメーターの焦点において得られる平行光を用い、ビームスプリッターを介して2枚のミラー間の等厚干渉が観察できる。マイケルソン干渉計がベース。光学部品の検査，位相物体の測定などに用いられる (図 2.38) [27].

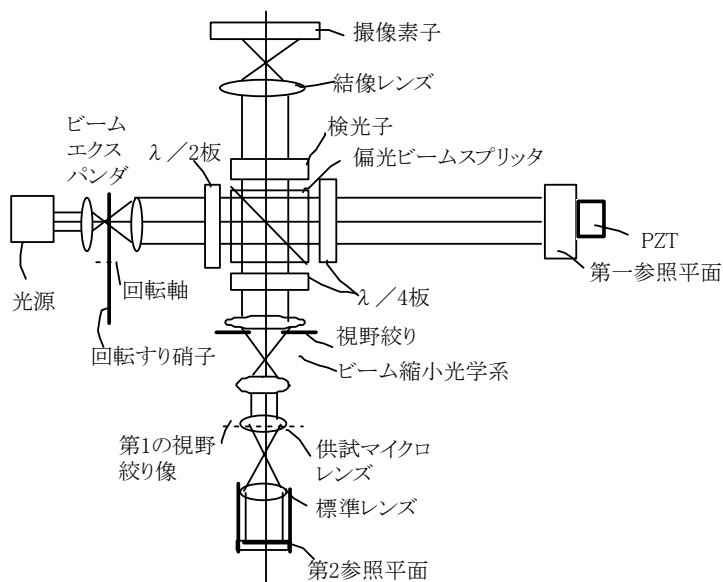


図 2.38 Twyman-Green 干渉計の構成例 [27]

・ Fizeau (フィゾー) 干渉計

透明な板 (参照板) とミラーとの間の等厚干渉を観察し，一方を基準とした場合の他方の形状測定に用いられる。参照面を形成するコンバージョンレンズを用いることでレンズの測定も可能 (図 2.39) [26].

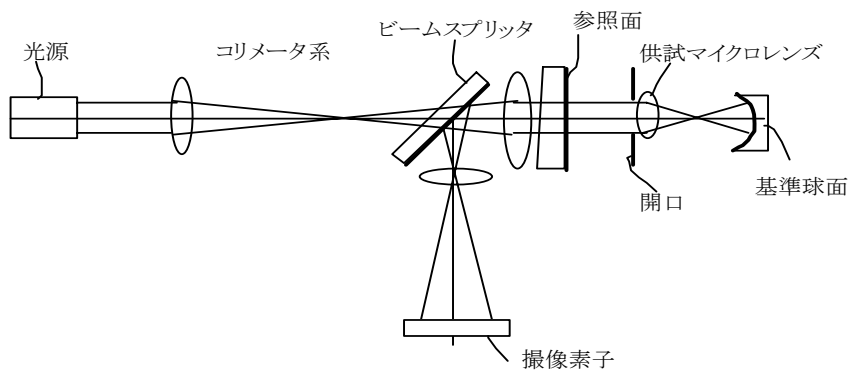


図 2.39 Fizeau 干渉計の構成例 [27]

・ Mach-Zehnder (マッハ・ツェンダー) 干渉計

単色光の点光源をコリメーターの焦点において得られる平行光をビームスプリッターへ入射させて光束を振幅分割し，一方の光路に位相変化を生じる物体（被検サンプル）をおくと，位相変化を受けた波面と，他方の光路で得られる基準の平面波（参照波）との干渉が観察できる．ビームスプリッターのあとにレンズを置きスクリーン(イメージセンサー)に投影することにより等厚干渉縞が観察できる(図 2.40) [27].

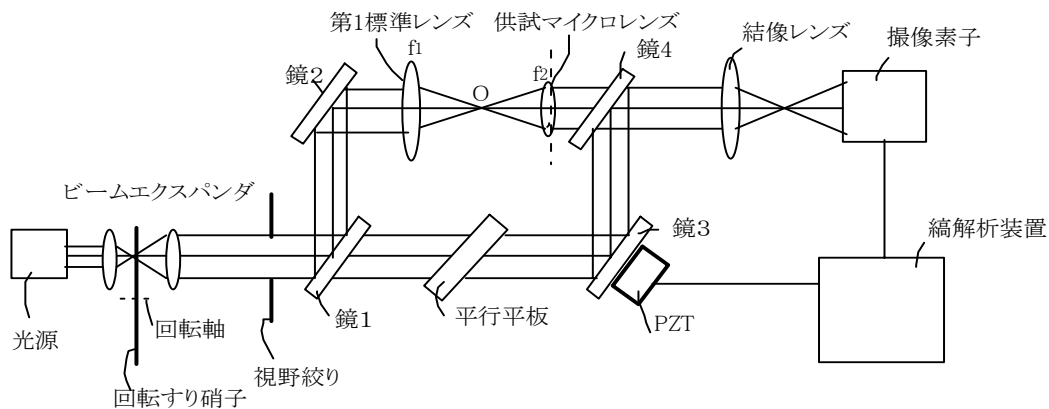
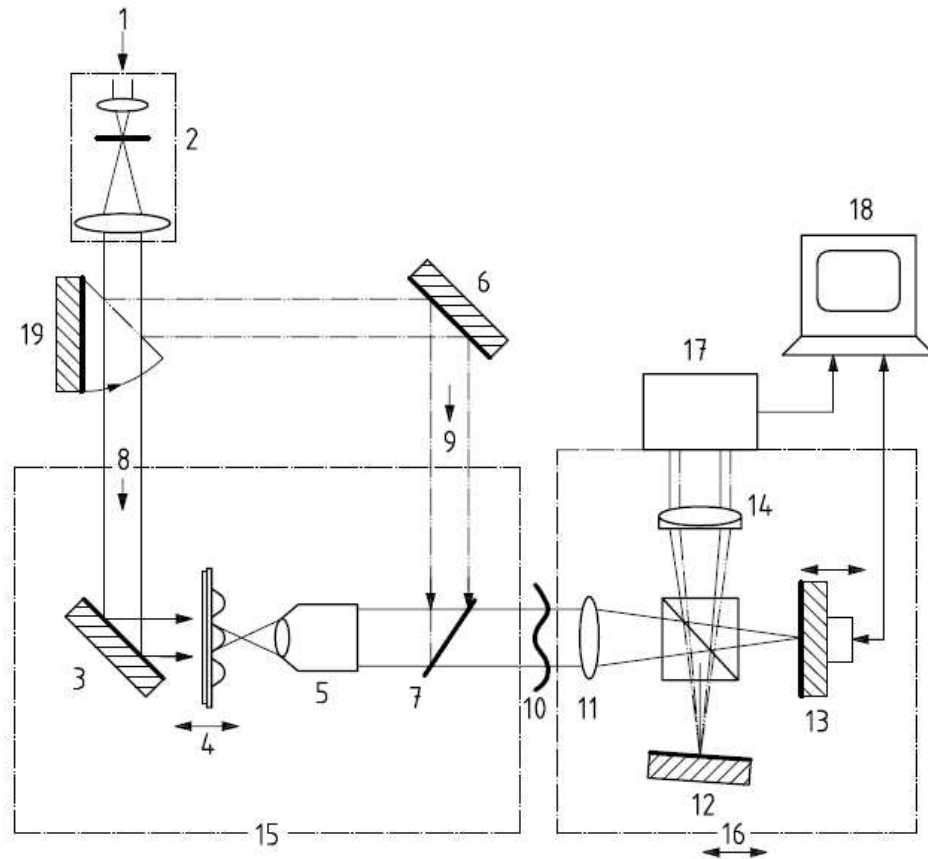


図 2.40 Mach-Zehnder 干渉計の構成例 [27]

・ Lateral Shearing (ラテラルシアリング) 干渉計

被検物を透過した光源からの光束（波面）を，ハーフミラー（プリズム）で振幅分割し，一方の光路に置いたミラーの角度を微小に変化させ，さらにもう一方の光軸に直交させて置いたミラーとで反射された平面波との干渉縞が観察できる．シエア量は，ミラーの角度変化で決定される（図 2.41） [28].



Key

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1 laser | 11 auxiliary lens |
| 2 beam expander | 12 Mirror 1, tiltable |
| 3 mirror | 13 Mirror 2, on piezoelectric transducer (PZT) |
| 4 microlenses under test | 14 sheared apertures |
| 5 microscope objective 20×0,65 | 15 illumination setup |
| 6 mirror | 16 shearing setup |
| 7 beam splitter | 17 charge-coupled device (CCD) |
| 8 transmitted optical radiation | 18 PC |
| 9 reflected optical radiation | 19 tiltable mirror |
| 10 aberrant plane wave | |

図 2.41 Lateral Shearing 干渉計の構成例 [28]

・ Radial Shearing (ラジアルシアリング) 干渉計

被検物を透過した光源からの光束（波面）を，ハーフミラーにより振幅分割し二組のコーナーキューブプリズム（ミラー）を用いた再帰反射波面を合成することでラジアルシアを受けた波面が観察できる．シア量は，2組のコーナーキューブのハーフミラーからの距離で決定される．シア量を大きくすると干渉縞の観察が困難になるが，逆に小さいと感度が悪くなるなどの課題があり測定対象の制約が大きい（図 2.42） [27].

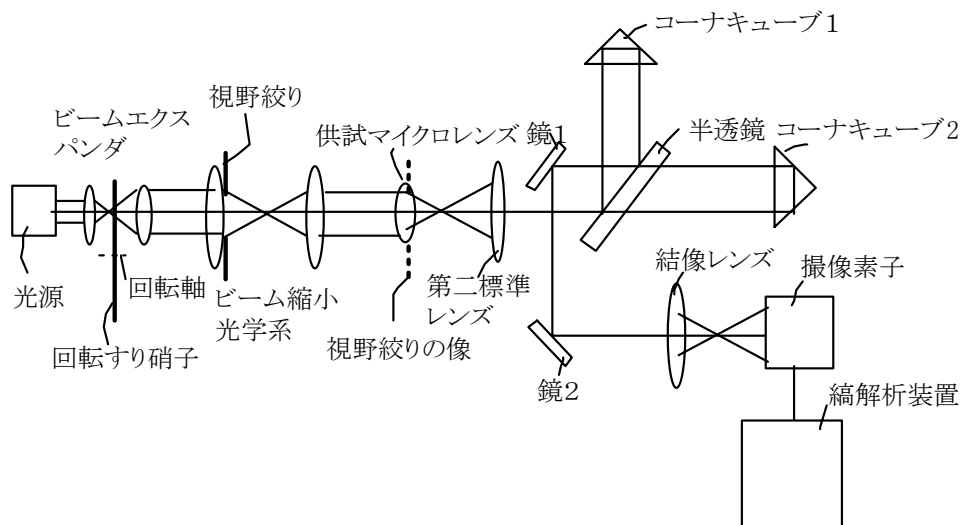


図 2.42 Radial Shearing 干渉計の構成例 [27]

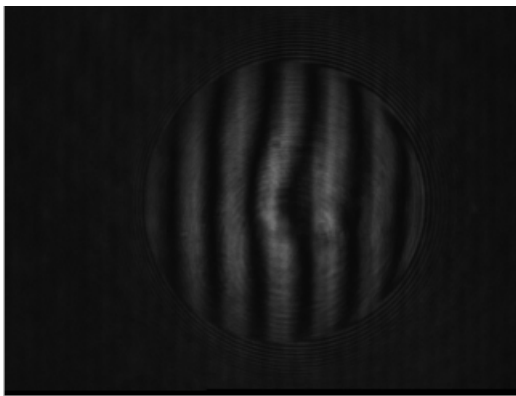
また，表 2.4 に光学特性計測用干渉計の特徴を整理した。

表 2.4 光学特性計測用干渉計の特徴

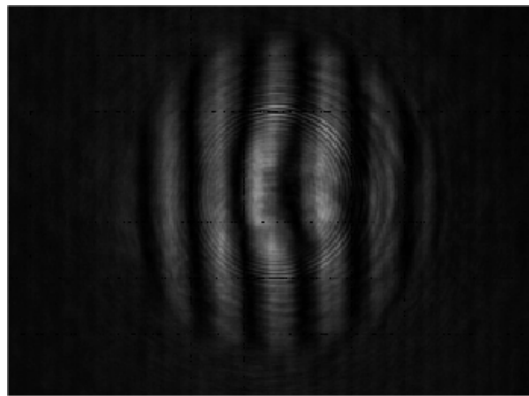
構造	方式	特長	制約事項	主な応用
ダブルパス	Michelson干渉計 (マイケルソン干渉計)	高い汎用性を持ち，光路差検出が容易。	光路分割により参照光束と測定光束が異なる場所を通るため，空気の揺らぎなど光路差の発生に注意が必要。	波長測定，屈折率，分散率測定，精密測長，表面粗さ測定，膜厚測定など。
	Twyman-Green干渉計 (トワイマン・グリーン干渉計)	透過型試料の波面収差測定可能。	光路分割により参照光束と測定光束が異なる場所を通るため，空気の揺らぎなど光路差の発生に注意が必要。	レンズ・プリズムの波面収差測定など。
	Fizeau干渉計 (フィゾー干渉計)	簡単な構成で高精度の平面測定・球面測定が可能。最も普及している干渉計のひとつ。参照光路と測定光路が同一光路となるため振動に強い。	参照面の精度確保が重要。	平面度測定，平行度測定，レンズ・プリズムの波面収差測定。
シングルパス	Mach-Zehnder干渉計 (マツハツゼンダー干渉計)	測定物設置の自由度が高い，干渉計の大型化も可能	光路分割により参照光束と測定光束が異なる場所を通るため，空気の揺らぎなど光路差の発生に注意が必要。	流体の可視化，透明物体の歪量測定，圧力測定など。
	Lateral Shearing干渉計 (ラテラルシェアリング干渉計)	簡素な構造で干渉が可能，参照面が不要	光軸に回転対称でない収差がある場合は，直交する2軸の測定が別途必要。	平面度測定，平行度測定，レンズ・プリズムの波面収差測定など。
	Radial Shearing干渉計 (ラジアルシェアリング干渉計)	被検物を透過した後に干渉させることが可能	シェア量を大きくすると干渉縞の観察が困難になるが，逆に小さいと感度が悪くなるなどの課題があり測定対象の制約が大きい。	平面度測定，平行度測定，レンズ・プリズムの波面収差測定など。

さまざまな干渉計が実用化されており，用途に合わせて活用されている．特に，Michelson (マイケルソン) 干渉計，Twyman-Green (トワイマン・グリーン) 干渉計，Fizeau (フィゾー) 干渉計はそれぞれの目的に応じて多用されている．Michelson 干渉計は波長測定，屈折率測定，測長などの用途で，Twyman-Green 干渉計はレンズ，プリズムの波面収差測定の使用で使われている．特に，Fizeau 干渉計は被検レンズの設置の自由度が高い，さまざまなレンズに対応することができるなどの理由で，コンベンショナルレンズの波面収差測定の使用で多用されている．特に，米国のメーカーが開発した製品は，特に参照波面を形成するコンバージョンレンズを交換するだけで，多くのレンズに適用できる自由度の高さもあり，世界的に標準的な干渉計として，開発用途だけでなく製造工程でも活用されている．

ただ，Fizeau 干渉計をはじめ，Michelson 干渉計，Twyman-Green 干渉計はダブルパス構造の干渉計であるため，一般に収差の大きいマイクロレンズ測定に適用する場合には課題が多い．ダブルパス干渉計では，測定光路の往復で測定した収差量を $1/2$ にすることでレンズの固有の収差を演算し求めている．マイクロレンズの波面収差をダブルパス干渉計を用いて測定すると，レンズの収差のために測定光が通過する光路は往復で異なり，共役関係が維持できずに正しい測定結果が得られない可能性がある．



(a) 測定時にレンズの瞳面に焦点を合わせた場合



(b) 測定時にレンズの瞳面から観察レンズの焦点位置をずらした場合 (デフォーカス量: $100\mu\text{m}$)

図 2.43 共役条件が満たされない場合の回折光の影響 [29]

図 2.43 に共役条件が満たされない場合の，干渉計により形成された観察用の干渉縞に回折光が重畳された例を示す[29]．図 2.43 (a) は，測定時にレンズの瞳面に焦点を合わせた場合，図 2.43 (b)は，測定時にレンズの瞳面から観察レンズの焦点位置を光軸方向にずらした場合 (デフォーカス量: $100\mu\text{m}$) の例を示す．縦のストラ

イプ状に形成されている観察用の干渉縞に、細い同心円状の縞が重畳されていることがわかる。このように、共役条件が満たされないと不要なノイズが測定時に必要な干渉縞の情報に付加され、誤差要因になる可能性がある。

以上のように、マイクロレンズの性能上の問題を含め、誤差要因を減らす考え方をとる意味でシングルパス構造を持つ干渉計の選定が望ましい。また、さらに装置構成の自由度の高さなどから Mach-Zehender (マッハ・ツェンダー) 干渉計がマイクロレンズの波面収差測定に有効であると言える。

2.5.2 マイクロレンズの波面収差測定用干渉計

Mach-Zehender (マッハ・ツェンダー) 干渉計をマイクロレンズの波面収差測定に応用するいろいろな方式が提案されている[30][31]。Mach-Zehender 干渉計は、シングルパス方式での測定が可能であり、ダブルパス光学系を用いた干渉計 (Fizeau (フィゾー) 干渉計, Twyman-Green (トワイマン・グリーン) 干渉計など) と違い、被検レンズの波面が共役関係を保ったまま撮像素子上に投影されるため、レンズの性能に影響されないなどの利点がある。ただ、測定光学系の内部に被検レンズを配置する必要があり、装置の構成、使い勝手には制約がある。さらに、光路分割により参照光束と測定光束が異なる場所を通るため、空気の揺らぎなど光路差の発生に注意が必要であるが、装置構造工夫により対応が可能である。

図 2.44 には、マイクロレンズの測定に適用した、基本的な Mach-Zehender 干渉計のレイアウトを示す[30]。He-Ne レーザー光源光をビームエキスパンダーを用いて光束系を拡大、ビームスプリッターで 2 分割、一方を参照光束、もう一方を測定光束としている。測定光束中に顕微鏡対物レンズと被検マイクロレンズを配置し、顕微鏡対物レンズで集光した光束の集光位置に被検マイクロレンズの焦点を一致させて配置し、被検マイクロレンズで平行光に変換した後、次のビームスプリッターで参照光と合成することにより干渉縞を生成することができる。干渉縞は撮像レンズにより CCD カメラのイメージセンサー面に結像することができる。この際には CCD カメラのイメージセンサー面と被検マイクロレンズの射出瞳面とが共役関係になるように配置する必要がある。また、参照光の光路中にピエゾデバイスで駆動する平面ミラーを配置し、その平面ミラーを前後に移動させることで干渉縞をスキャンし、位相シフト法による波面収差を計算により求めることができる。

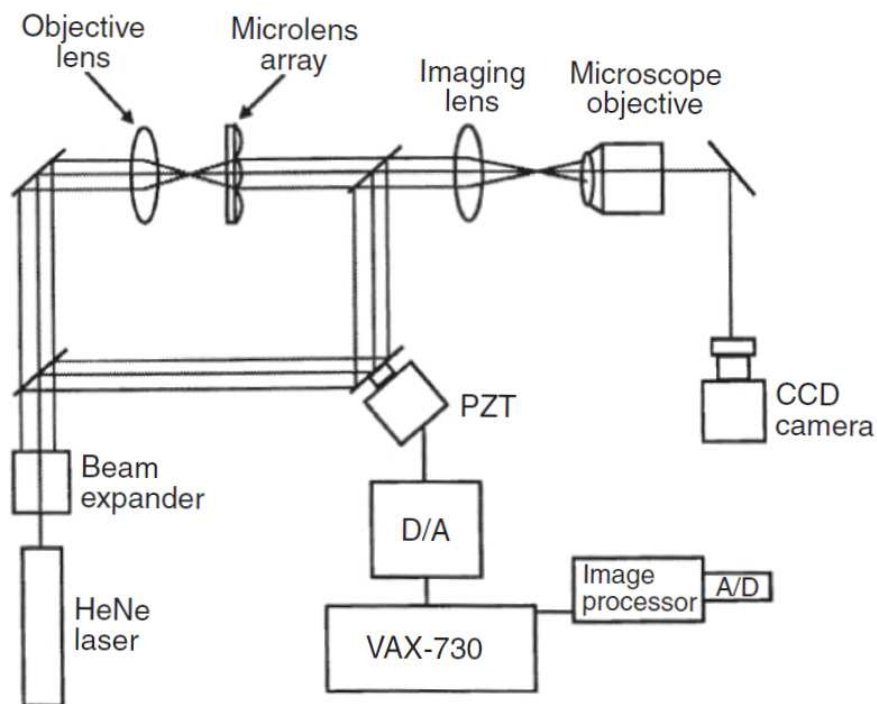


図 2.44 Mach-Zehnder 干渉計の構成 [30]

図 2.45 には、Mach-Zehnder 型干渉計を顕微鏡ベースで簡易に構築した装置例を示す[31]。光源側の光束を偏光ビームスプリッターで 2 分割し、光ファイバーで測定光，参照光を顕微鏡に導き測定光アーム内には顕微鏡の対物レンズを配置して光束を変換，さらに， piezoミラーを配置して位相シフトデータの収集を可能にしている。測定光アーム内に 2 つの顕微鏡対物レンズが挿入されているため，そのレンズ自身の収差補正が必要になるなど，装置を簡易にした分デメリットもあるが，構造が簡易で扱いやすい。また，He-Ne レーザー光源からの光を PBS（偏光ビームスプリッター）で，それぞれを参照光束と，測定光束とに 2 分割し光ファイバーで Mach-Zehnder 型干渉計に導いているが，この場合の光ファイバーには偏波面保存ファイバーが用いられている。図 2.46，図 2.47 には，それぞれ装置の外観，マイクロレンズの波面収差測定例を示す。

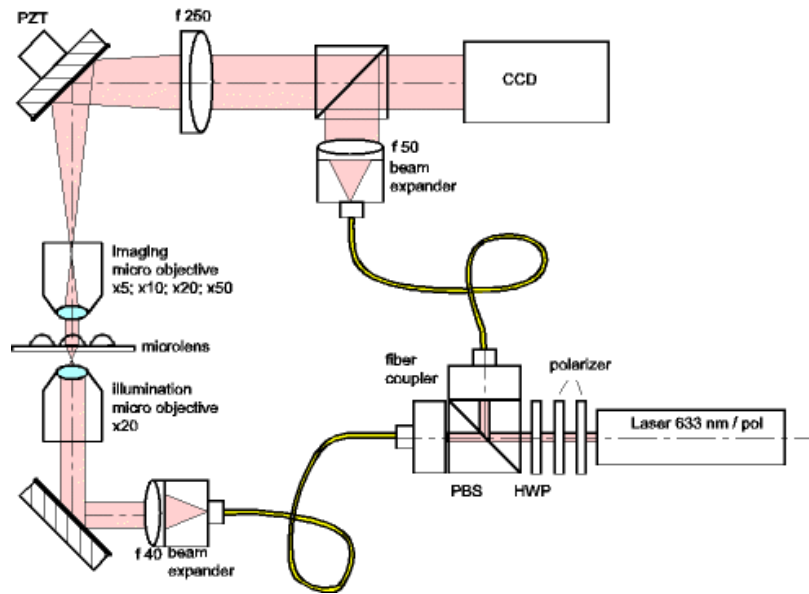


図 2.45 Mach-Zehnder 干渉計にファイバー光学系を用いた透過波面収差測定光学系[31]



図 2.46 Mach-Zehnder 干渉計に光ファイバー光学系を採用した透過波面収差測定装置[31]

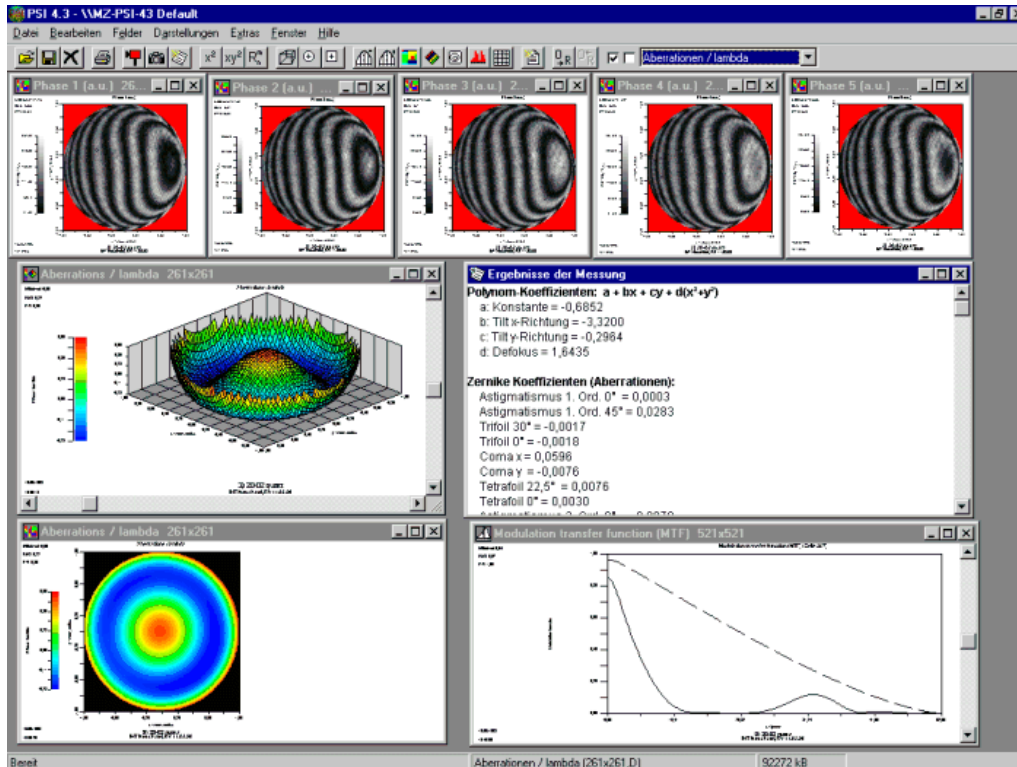


図 2.47 Mach-Zehnder 干渉計にファイバー光学系を用いた透過波面収差測定例[31]

2.5.3 シャック・ハルトマンセンサを用いたマイクロレンズの波面収差測定

また，干渉計を用いなくて，波面収差を測定することができる方法も提案されている．図 2.47 にシャック・ハルトマンセンサを用いた波面収差測定原理を示す[30]．被検レンズを透過した波面を 2 次元配列されたマイクロレンズで分割し，CCD 等の撮像素子に投影する．マイクロレンズを介して撮像素子に結像されるスポットは，入射波面（測定波面）の法線に垂直な方向にシフトされ結像されるため，それぞれの分割された領域ごとのスポットの位置を演算することで波面収差が求められる．望遠鏡の性能測定，さらには，望遠鏡の大気揺らぎによる位相の乱れを保証するためのアダプティブ光学系の波面検出系として用いられてきた方法である．

具体的な測定例については，図 2.49 から図 2.51 に示す[31]．まず，図 2.49 に示すように，レンズの透過波面測定は，まず被検レンズを入れない状態で，コリメーターレンズで平行にした光束をビームエキスパンダーにより拡大してシャック・ハルトマンセンサに導き参照波面を取り込む．次に，焦点距離の大きなレンズ（F 値の大きなレンズ）の場合は，図 2.50 に示すようにコリメーターレンズの代わりに被

検レンズを用いて、シャック・ハルトマンセンサに導き波面検出をおこなう。また、焦点距離の小さなレンズ（F 値の小さなレンズ）の場合は、図 2.51 に示すようにコリメーターレンズに加えて結像レンズを付加して、同じくシャック・ハルトマンセンサに導き波面検出をおこなう。この場合は、光源光が出射される光ファイバーの NA が被検レンズの NA よりも小さい場合に用いられる。図 2.50 に示すような構成で使用すると、被検レンズの有効径の全体が測定できないためである。ただ、いずれの場合も、焦点距離の大きなレンズ（F 値の大きなレンズ）の場合はコリメーターレンズ、焦点距離の小さなレンズ（F 値の小さなレンズ）の場合は結像レンズの性能を事前にチェックする必要がある。コリメーターレンズ、結像レンズの波面収差が誤差として無視できる性能を持つレンズを使用する必要がある。シャック・ハルトマンセンサは、センサーの内部にマイクロレンズアレイを用いているため、水平方向の解像度は使用しているマイクロレンズの直径、あるいはビームエキスパンダーの倍率などにより制約を受ける。非常に直径の小さいマイクロレンズの波面収差測定を行う場合には、拡大率の大きなビームエキスパンダーを使用する必要があるなどの制約があり、注意が必要である。

また、シャック・ハルトマンセンサの垂直方向（光軸方向）の検出感度が高い利点を生かし、シリコンウェハなどの大面積基板の平面度測定などへの応用も検討されている。

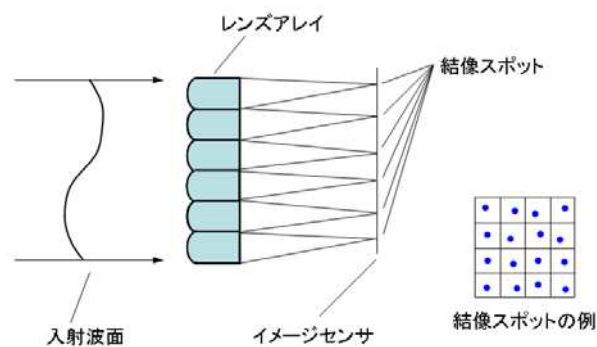
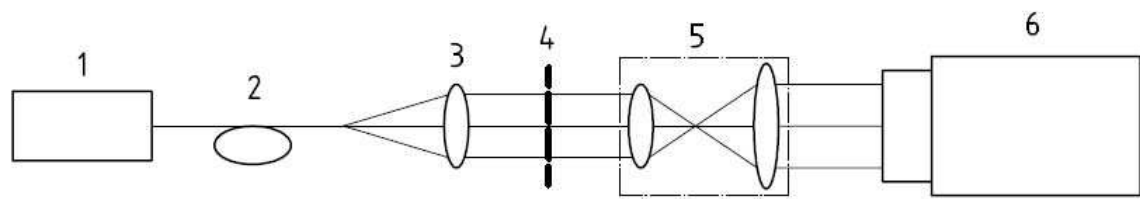


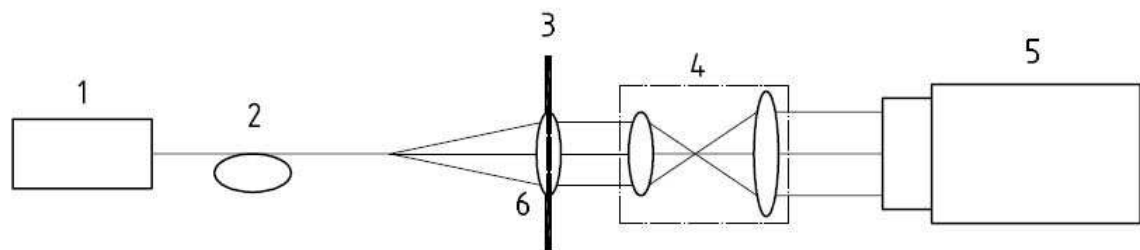
図 2.48 シャック・ハルトマンセンサの波面収差検出原理 [32]



Key

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1 source of optical radiation | 4 imaging plane |
| 2 fibre | 5 beam expander |
| 3 collimating lens | 6 Shack-Hartmann sensor |

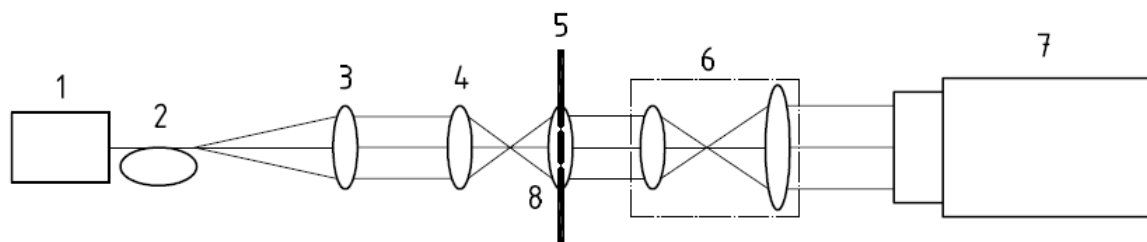
図 2.49 シャック・ハルトマンセンサの波面収差測定（初期測定）[28]



Key

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 source of optical radiation | 4 beam expander |
| 2 fibre | 5 Shack-Hartmann sensor |
| 3 aperture | 6 slower microlens to be tested |

図 2.50 シャック・ハルトマンセンサの波面収差測定(長焦点距離レンズの測定)[28]



Key

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 source of optical radiation | 5 aperture |
| 2 fibre | 6 beam expander |
| 3 collimating lens | 7 Shack-Hartmann sensor |
| 4 refocusing lens | 8 fast microlens to be tested |

図 2.51 シャック・ハルトマンセンサの波面収差測定(短焦点距離レンズの測定) [28]

2.6 まとめ

第2章では、先ずマイクロレンズの作製技術とその特徴を整理した。最初に、異なる製法で作製されたマイクロレンズの評価を通じて作製法に依存した特性、性能の違いを明らかにした。同一設計諸言を持つレンズを異なる製法で作製するのは非常に困難であるため、直径の異なるレンズをF値で規格化（F値をパラメーターと）して性能比較した。製法ごとに異なる性能を示したが、特に **microjet printing**, **Laser beam writing** および **Reactive ion etching** (反応性イオン・エッチング) 法で作製されたレンズは、非常に収差が小さいことが示された。

次に、マイクロレンズの評価技術に関し整理した。レンズの形状情報は主にレンズ作製者（サプライヤ）に、光学性能は使用者（ユーザー）とサプライヤの両者に有効な情報を与えてくれるが、マイクロレンズは、従来のレンズと比べると主にそのサイズ、構造上の違いがあるため、必ずしも従来の計測技術がそのままつかえないケースが多い。ここでは、マイクロレンズを使用するユーザー、作製するサプライヤの両者が活用できる、マイクロレンズの光学特性測定技術を整理し、個々の技術の適用性を明らかにした。作製技術の影響が大きいレンズ表面の形状測定技術、さらには代用的な光学特性である焦点距離測定法と波面収差の測定法についても整理した。ここでは、どのような評価技術をどのように適用すれば必要な情報が得られるかということについて着目して整理し、使用目的に合わせた特性評価法を明らかにした。

参考文献

- [1] http://199.197.132.46/photonicmaterials/products__services/SMILE_lens_array/Frame_SMILE_lens_array.asp?PageTitle=Photonic+Materials+SMILE%99+Lens+Array&BodyURL=%2Fphotonicmaterials%2Fpdf%2FP1104_SMILE.pdf
- [2] D. Daly, M. C. Hutley and R. F. Stevens: Proc. SPIE Vol. **2340**, *Interferometry '94*, p.59 (1994)
- [3] <http://www.leister.com/axetris/microoptics/microlensarrays/index.html>
- [4] Shigeru Aoyama and Tsukasa Yamashita: "Planar Microlens arrays using stumping replication method", Proc. 05, SPIE, Vol. **3010**, pp11-17 (1997)
- [5] Suho Ahn, Minseok Choi, Hyungdae Bae, Jiseok Lim, Ho Myung, Hongmin Kim, and Shinill Kang, "Design and Fabrication of Micro Optical Film by Ultraviolet Roll Imprinting", JJAP, Vol. **46**, No. 8B, pp. 5478-5484 (2007)
- [6] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto, K. Nishizawa, "Array of Distributed-Index Planar Micro-Lenses Prepared from Ion Exchange Technique", Jpn. J. Appl. Phys. , **20**, 4, p.L296-298 (1981)
- [7] W.R. Cox and T. Chen, "Micro-optics Fabrication by Ink-jet Printing", Optics & Photonics News, Vol. **12**, no. 6, pp. 32-35 (June, 2001)
- [8] W. Royall Cox, Ting Chen, Chi Guan, Donald J. Hayes and Rick E. Hoenigman, "Micro-jet Printing of Refractive Microlenses", *OSA Diffractive Optics and Micro-Optics Topical Meeting*, Kailua-Kona, Hawaii, June (1998)

- [9] D.B. Wallace and D.J. Hayes, "Micro-Printing System for MEMS Packaging Using Nano-Structured Materials", *Proceedings, NanoEngineering World Forum, Marlborough, MA*, 23-25 (June, 2003)
- [10] W. Royall Cox, Chi Guan and Donald J. Hayes, "Microjet Printing of Micro-optical Interconnects and Sensors", SPIE Proc. Vol. **3952**, *Optoelectronic Interconnects VII; Photonics Packaging and Integration II*, Michael R. Feldman, Richard L. Li, W. Brian Matkin, Suning Tang, Editors, pp.400-407, (April 2000)
- [11] H. Ottevaere, B. Volckaerts, J. Lamprecht, J. Schwider, A. Hermanne, I. Veretennicoff and H. Thienpont, "2D plastic microlens arrays by deep lithography with protons: fabrication and characterization", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, Vol. **4**, pp. S22-28 (2002)
- [12] Bart Volckaerts, Heidi Ottevaere, Rafal Krajewski, Jan Watté, Daniel Daems, Alex Hermanne and Hugo Thienpont, "The fabrication of 2D fibre alignment μ -optic structures using Deep Lithography with Protons", *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, Amsterdam* (2002)
- [13] C Debaes, J Van Erps, M Vervaeke, B Volckaerts, H Ottevaere, V Gomez, P Vynck, L Desmet, R Krajewski, Y Ishii, A Hermanne and H Thienpont, "Deep proton writing: a rapid prototyping polymer micro-fabrication tool for micro-optical modules", *New J. Phys.* **8**, pp.270 (2006)
- [14] <http://www.canyonmaterials.com/CMI-01-88-2.html>
- [15] <http://www.canyonmaterials.com/request3.html>
- [16] Daniel Malacara (Editor), *Optical Shop Testing* (Wiley Series in Pure and Applied Optics), Second Edition, p501-598 (January, 1992)
- [17] H.Ottevaere, R. Cox, H. P. Herzig, Takaaki Miyashita, et al, "Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies", *Journal of Optics A: Pure Appl. Opt.* **8**, S407-S429 (2006)

- [18] H.Ottevaere, R. Cox, H. P. Herzig, Takaaki Miyashita, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. J. Woo, H. Thienpont, "Comparative study of glass and plastic refractive microlenses and their fabrication techniques", SPIE Photonics Europe '04, (Apr., 2004)
- [19] ISO 14880-1: "Microlens Array - Part.1; Vocabulary" (2001)
- [20] 三船博庸, 宮下隆明, "マイクロレンズ技術とその評価", O Plus E, Vol. **24**, No.2, pp. 750-757 (1993)
- [21] Johannes Schwider, Oliver Falkenstorfer: "Twyman-Green interferometer for testing microspheres", Optical Engineering, Vol.**34**, No.10, pp.2972-2975 (1995)
- [22] Tiziani H J, Haist T, Reuter S., "Optical inspection and characterisation of microoptics using confocal microscopy", Optics and Lasers in Engineering, **36**, pp 403-415 (2001)
- [23] 三浦勝弘, 岡田 睦: "ステージ走査型レーザープローブ顕微鏡による三次元計測", LST28-5, 第 28 回光波センシング技術研究会 講演論文集, pp15 - 20 (2001)
- [24] K. Miura and M. Okada, Three-dimensional measurement by a laser probe microscope with a scanning stage, *Proc. 28th Meeting Lightwave Sens. Technol.*, LST 28-1, (December, 2001).
- [25] Dan Daly, "Microlens Arrays", Taylor & Francis, pp.101 (2000)
- [26] ISO 14880-3 : "Microlens array - Part 3: Test methods - Optical properties other than wavefront aberrations" (2006)
- [2 7] J I S C 5 9 3 5 光 伝 送 用 レ ン ズ 試 験 方 法 (2 0 0 5)
- [28] ISO 14880-2 : "Microlens Array - Part.2 ; Test method for microlens array wavefront aberrations" (2006)

- [29] Takaaki Miyashita, K.Hamanaka, M. Kato, E, Sato, T. Morokuma, S. Ishihara, "Wavefront aberration measurement technology for microlens using the Mach-Zehnder interferometer provided with a projected aperture", SPIE, Proceedings, Vol. **5532**, Interferometry XII: Applications, pp. 117-127 (2004)
- [30] K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda: "Aberration properties of the planer microlens array and its applications to imaging optics", SPIE, Proceedings, Vol. **1014** Micro-Optics, pp58-65 (1988)
- [31] H. Sickinger, J. Schwider, B. Manzke: "Fiber based Mach-Zehnder interferometer for measuring wave aberrantions of microlenses", Optik, **110**, No.5, pp239-243 (1999)
- [32] <http://www.wavefrontsciences.com/semiconductor/columbus.html>

第 3 章 マイクロレンズの波面収差測定

3.1 はじめに

第 2 章では、マイクロレンズの波面収差測定用途に適した干渉計として、シングルパス構造の光学系を用いた Mach-Zehnder 干渉計の選定が望ましいことを示した [1]- [5]。本章では、さらに選定した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定装置の開発をおこない、マイクロレンズ用波面収差測定用干渉計に必要な要件を明らかにする。

マイクロレンズの場合、多くは単一のレンズでは無くレンズアレイの状態で使用されることが多いが、マイクロレンズアレイのように、着目した測定レンズの領域以外に多くのレンズがある場合は、測定領域以外のレンズ、あるいはマイクロレンズが形成されている基板からのノイズ光が測定領域に影響を及ぼす可能性がある。

一般に、レンズの波面収差を干渉計を用いて測定する際には、CCD などのイメージセンサーに投影された干渉縞をソフトウェアで開口を規制して（測定範囲を限定して）必要な部分だけを選択して演算しているが、特にマイクロレンズの波面収差を測定する場合は、測定領域以外のレンズからのノイズ光の測定領域への影響の有無を確認する必要がある。不要光を遮断するには、被検レンズの近傍にアパーチャを設置することもできるが、マイクロレンズはサイズが小さいこともあり、設置したアパーチャのエッジによる回折光が測定領域に影響を及ぼすことが十分に考えられるため現実的ではない。ここでは、不要光を遮断するために、照明光学系の途中にアパーチャを設けてマイクロレンズの瞳面に縮小投影、測定領域にだけ干渉縞を形成し、物理的に測定範囲外の光束を遮断することを検討した [6]。

その上で、一般の干渉計で波面収差計測の際に活用されているソフトウェアのみで測定範囲を規定する方法とを比較し、マイクロレンズ用波面収差測定用干渉計に必要な要件を明らかにした。具体的には、ハードウェアアパーチャを用いた場合と、ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について、先ずシミュレーションで確認し、さらに被検レンズの瞳面に縮小投影が可能なハードウェアアパーチャを実装した Mach-Zehnder 干渉計を開発し実測をおこなった。シミュレーション結果と測定結果について比較検証をおこない、両者の差異を明らかにした。

3.2 マイクロレンズの波面収差測定に関する理論検証

3.2.1 ハードウェアアパーチャー導入に関わる効果確認

3.2.1.1 理論解析

(1) はじめに

マイクロレンズの特性は実効 NA，実効焦点距離により主に定められ，両者により実効開口が定められる．逆に，同じマイクロレンズでも実効開口が異なると波面収差が異なり，従って実効焦点位置が変化し，実効焦点距離，実効 NA が異なってくる．このようなことは通常のマクロレンズでは問題とされなかったことであり，マイクロレンズ特有の特性と考えられる．

マイクロレンズの波面収差を干渉計で測定するときに，上述の特性を考慮して実効開口に対応した波面収差を規定する必要が生ずる．しかし，マイクロレンズに実開口を設けて干渉測定を行なう事は非常に難しい．また実開口を挿入することにより生ずると思われる回折光の影響や，実開口をマイクロレンズの瞳面に投影する補助光学系を併用する場合にはその影響も考慮する必要がある．このため従来は撮像面にソフト的に開口を設け，これを実開口とみなすことが行なわれている．

たとえば Mach-Zehnder 干渉計にみられるように被検マイクロレンズの瞳面を撮像面に結像することが可能な場合には，瞳面の位相情報はほぼ確実に撮像面で把握される．これは共役面のもつ大きな特長である．もちろん観察光学系として用いる対物レンズの収差や有限な NA のレンズによる影響を受けるが，通常は無視しうる影響に留まっている．Fizeau 干渉計は，被検レンズを観察光が往復して 2 回透過するために共役関係が維持できない典型的な例で，マクロレンズでは標準的な干渉計として用いられているが，マイクロレンズを測定するときには注意が必要になる．他の形式の干渉計でも共役面以外のところで観察する場合には同じ注意が求められる．被検マイクロレンズの瞳面と撮像面とを共役として干渉測定を行なう場合には，ソフトウェアアパーチャーはマイクロレンズの瞳面での実開口と仮想的に一致し，両者の差は実開口で発生する回折波程度と考えられ，該回折波は結像光学系により撮像面上に設けられたソフトウェアアパーチャーの，仮想的輪郭線に集光することから，差があっても無視しうる程度と考えられてきた．

ここでは，実開口の代わりとして用いられるハードウェアアパーチャー(投影ハードウェアアパーチャー)とソフト的に設けられた開口(ソフトウェアアパーチャー)

の等価性と相違点を理論的に、また数値例を交えて検討した内容を述べる[7].

(2) ハードウェアアパーチャ(投影)の精度評価

(2) -1 有限開口の複素振幅

干渉計によるマイクロレンズの波面収差の測定については、使用される光束径が1mm未満のような小さい場合もある。また、回折効果はマクロレンズのそれと比較して、重要な影響を持つ可能性がある。波動方程式から展開して、干渉計中の波面伝播のための理論的な検討をおこなう[8]。その際に、干渉計中への開口を導入する場合の影響についても検討する。単純性化するために、光学系は光軸に対して対称であるとする。

光束が自由空間を通過して伝播される場合、波面の特性は波動方程式によって(3.2.1)式のように説明される。

$$(\nabla^2 + k^2)u(x, y, z) = 0, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (3.2.1)$$

ここで k は真空中の波数、 λ は波長 を示す。

光束は z 軸の正方向に伝播されるが、 z 軸上の位置 z の波面の複素振幅 $u(x, y; z)$ は、そのフーリエ変換 $U(v_x, v_y; z)$ との関係から(3.2.2)式のように示される。

$$u(x, y; z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} U(v_x, v_y; z) \exp[-j2\pi(xv_x + yv_y)] dv_x dv_y \quad (3.2.2)$$

方程式(3.2.2)は角度のスペクトル表現として呼ばれ、空間周波数 v_x および v_y の複数の x と y に関する平面波の重ね合せとしてそれぞれ理解される。軸対称の場合については、波動方程式(3.2.1)に関しては、(3.2.3) 式であらわすことができる[9].

$$u(\rho, z) = \int_0^{\infty} U(\mu; 0) \exp(jz\sqrt{k^2 - \mu^2}) J_0(\mu\rho) \mu d\mu, \quad \mu = 2\pi v \cdot \sin\theta \quad (3.2.3)$$

ここで ρ は半径、 θ は角度を示す。

(3.2.3) 式は、「Hankel 変換」の形式をとり、積分の上限は無限として示されるが、

現実には光学系の NA によって制限されている。

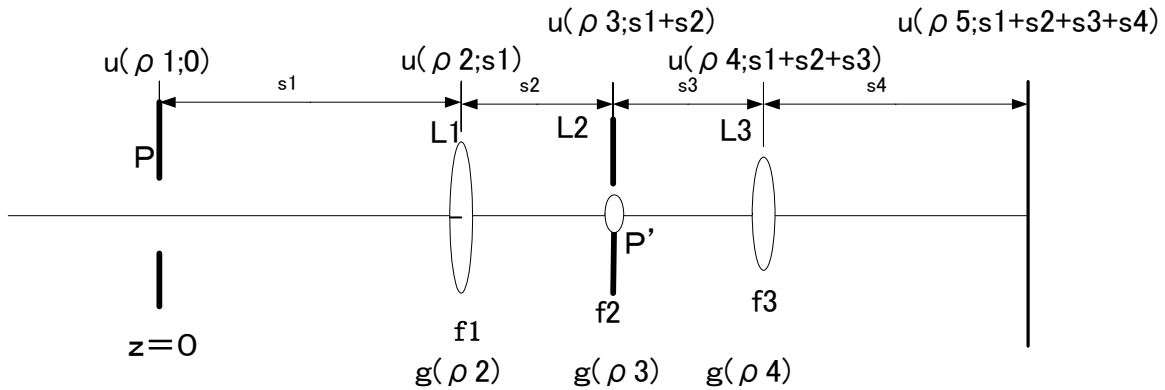


図 3.1 基本光学レイアウト

本検討で使用した光学系を図 3.1 に示す． $z=0$ に開口 P があり， $z=s1$ に置かれたレンズ $L1$ による縮小像 P' が $z=s1+s2$ に置かれた被検レンズ $L2$ の瞳上に形成されている．これがハードウェアアパーチャ(投影ハードウェアアパーチャ)を形成する．さらに $z=s1+s2+s3$ に置かれたレンズ $L3$ により $z=s1+s2+s3+s4$ にある撮像面上にレンズ $L2$ の瞳の像が形成されるものとする．ソフトウェアアパーチャはこの撮像面上で，コンピュータソフトウェアにより形成される．

初めに有限開口 P をもつレンズ $L1$ により， $z=0$ での波面の複素振幅がその共役面 ($z=s1+s2$) にどのように移されるかを考える．簡単のために光軸に対称な場合を想定する．波動方程式の解から，レンズ $L1$ での複素振幅は (3.2.4) 式のように与えられる． ρ_{10} は開口 P の半径， J_n は次数 n のベッセル関数を表す．

$$u(\rho_2; s_1) = \int_0^\infty U(\mu_1; 0) \exp\left(js_1 \sqrt{k^2 - \mu_1^2} \right) J_0(\mu_1 \rho_2) \mu_1 d\mu_1 \quad (3.2.4)$$

$$U(\mu_1; 0) = \int_0^{\rho_{10}} u(\rho_1; 0) J_0(\mu_1 \rho_1) \rho_1 d\rho_1 \quad (3.2.5)$$

(2) -2 有限開口 (ソフトウェア, ハードウェアアパーチャ) を持つ場合の結像

レンズ $L1$ の作用を位相 $\exp[jk\psi(\rho_2)]$ で表せば，レンズ L 透過後 $u(\rho_2; s_1) \rightarrow u(\rho_2; s_1) \exp[jk\psi(\rho_2)]$ に変換される．レンズ L の瞳関数を $g(\rho_2)$ とすると， $z=s1+s2$ の共役面での複素振幅 $u(\rho_3; s1+s2)$ は

$$u(\rho_3; s_1 + s_2) = \int_0^\infty U(\mu_2; s_1) \exp\left(j s_2 \sqrt{k^2 - \mu_2^2}\right) J_0(\mu_2 \rho_3) \mu_2 d\mu_2 \quad (3.2.6)$$

$$U(\mu_2; s_1) = \int_0^{\rho_{20}} u(\rho_2; s_1) \exp[jk\psi(\rho_2)] g(\rho_2) J_0(\mu_2 \rho_2) \rho_2 d\rho_2 \quad (3.2.7)$$

ここで $g(\rho_2)$ はレンズ L1 の瞳関数を表す, ρ_{20} はレンズ L1 の半径を示す. (3.2.4) から(3.2.7)の方程式は, いわゆる Hankel 変換とよばれる積分変換の形をとっている.

この形は $u(r)$ をレンズ L1 の瞳面での複素振幅, $h(r)$ をレンズ L1 の Point Spread Function としたときの

$$u'(r) = u(r) * h(r) \quad (3.2.8)$$

(3.2.8)式で表される, 古典的なフーリエ光学でよく知られたコンボリューションとよばれる積分変換の形と異なっているが, 基本の性格は Hankel 変換である.

単純化のためにテストレンズ L2 の開口数が小さい場合は, 拡張式(3.2.9)を使用することができる[10].

$$\begin{aligned} \exp\left[jz\sqrt{k^2 - \mu^2}\right] &= \exp\left[jkz\left(1 - \frac{\mu^2}{k^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right] = \exp\left[jkz - jz\frac{\mu^2}{2k} - jz\frac{\mu^4}{8k^3} - jz\frac{\mu^6}{16k^5} - \dots\right] \\ &\cong \exp\left[jkz - jz\frac{\mu^2}{2k}\right] \end{aligned} \quad (3.2.9)$$

有限開口のレンズ L1 を用いたときにレンズ L2 の射出瞳での複素振幅は(3.2.10)式で与えられる. 簡単のために開口 P での位相はフラット(平面)とし, レンズ L1 は無収差に近いとする.

$$u(\rho_3; s_1 + s_2) = -\exp[jk(s_1 + s_2)] \frac{1}{m} g(\rho_3) \int_0^{\rho_{10}} u(\rho_1; 0) \frac{\rho_1 J_1(t_0 \rho_1) J_0(t_0 r) - r J_1(t_0 r) J_0(t_0 \rho_1)}{\rho_1^2 - r^2} t_0 \rho_1 d\rho_1 \quad (3.2.10)$$

ここで,

$$g(\rho_3) = \exp[jkW(\rho_3)], \quad m = s_2 / s_1, \quad t_0 = k\rho_{20} / s_1, \quad r = s_1 \rho_3 / s_2 \quad (3.2.11)$$

$$A(r) = \int_0^{\rho_0} u(\rho_1; 0) \frac{\rho_1 J_1(t_0 \rho_1) J_0(t_0 r) - r J_1(t_0 r) J_0(t_0 \rho_1)}{\rho_1^2 - r^2} t_0 \rho_1 d\rho_1 \quad (3.2.12)$$

$W(\rho_3)$ が被検レンズ L2 の波面収差を表す．開口 P での位相はフラットとし，レンズ L1 は無収差に近いとしたことから， $F(\rho_1; 0)$ に虚数部は含まれず，(3.2.12)式で表される積分結果にも虚数部は含まれない．ハードウェア開口による撮像面上の複素振幅は，(3.2.13)式で表される．

$$u_{hard}(\rho_5) = \exp[jks] \frac{1}{mm'} \int_0^{\rho_{30}} A\left(s_1 \rho_3 / s_2\right) \exp[jkW(\rho_3)] \frac{\rho_3 J_1(t'_0 \rho_3) J_0(t'_0 r') - r' J_1(t'_0 r') J_0(t'_0 \rho_3)}{\rho_3^2 - r'^2} t'_0 \rho_3 d\rho_3 \quad (3.2.13)$$

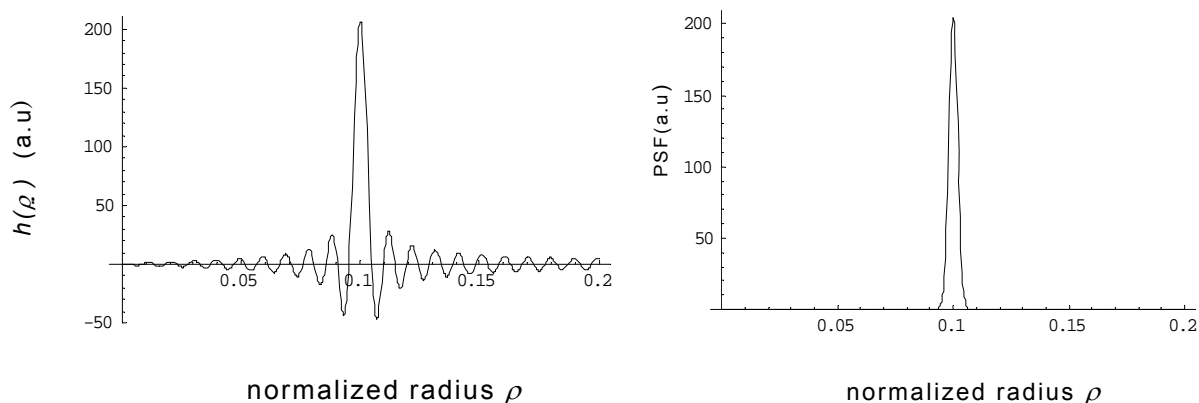
$$s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4, \quad t'_0 = k\rho_{40}/s_3, \quad r' = s_3\rho_5/s_4, \quad m' = s_4/s_3 \quad (3.2.14)$$

尚 “ ’ ” はレンズ L3 に関する量であることを意味する．また ρ_{30} はレンズ L3 の瞳面でのハードウェアアパーチャー投影像の半径を表している．

(3.2.10), (3.2.12)式に共通に現れる (3.2.15) 式はレンズの Point Spread Function に対応する．

$$h(\rho) = \frac{\rho J_1(t\rho) J_0(tr) - r J_1(tr) J_0(t\rho)}{\rho^2 - r^2} t\rho \quad (3.2.15)$$

図 3.2 に(3.2.15) 式で表される h 関数と Point Spread Function (PSF) との比較を示す．図 3.2 (a) に h 関数，図 3.2 (b) はこれに対応する古典的描像を表す． h 関数; $h(\rho)$ は， $\rho=r$ のピークを中心に振動し，古典的 PSF は，ガウシアン形状を示している．



(a) h 関数

(b) Point Spread Function

図 3.2 h 関数と Point Spread Function との比較

レンズの NA が大きいほど δ 関数的に幅が狭く高さは高くなる．逆に NA が小さいと幅が広く高さは低くなる．これと比較すると (3.2.15) 式の h 関数はピークの周辺に振動部を有する． h 関数のピーク位置は近似的に (3.2.16) 式から求められる．

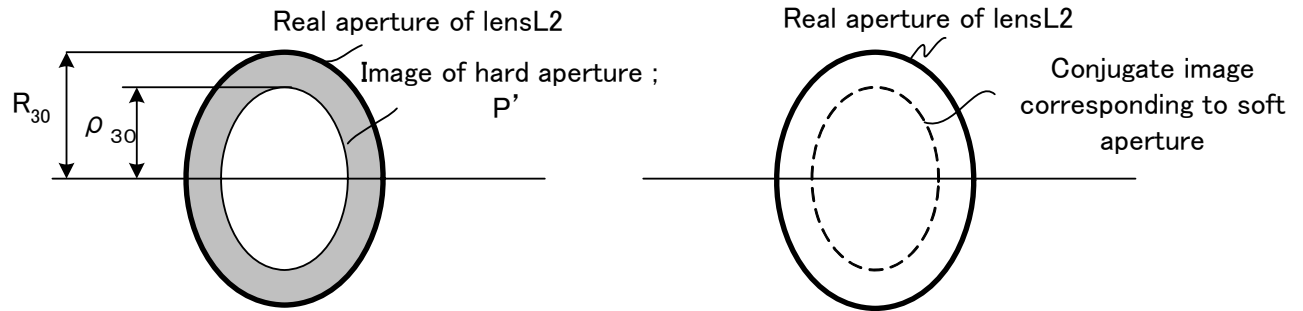
$$\frac{1}{2} \frac{dy}{d\rho_1} t \cong \frac{1}{2} tr J_1^2(tr) \cdot t \quad (3.2.16)$$

また，半値半幅 Δ は (3.2.17) 式で与えられる．

$$\Delta \approx \sqrt{\frac{3y'}{-y'''} t} = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{12J_1(tr)}{3J_1(tr) - J_3(tr)}} \quad (3.2.17)$$

一方，ソフトウェアアパーチャーが選択される場合は，図 3.1 に示すハードウェアアパーチャー P が取り除かれる．干渉縞の計算領域はイメージセンサー上にコンピュータでソフトウェアにより設定される．ソフトウェアアパーチャーの大きさは，ハードウェアアパーチャーのそれと同じ大きさに設定することが可能である．これは，ソフトウェアアパーチャーを用いた場合，同じく図 3.1 に示したように，レンズ L2 上に投影された実際のハードウェアアパーチャーが，レンズ L3 によりイメージセンサー上に共役関係を保って投影されたことと等価な意味を持つ．図 3.3 に，テストマイクロレンズの瞳面に投影したハードウェアアパーチャーと，共役な

面に設定したソフトウェアアパーチャーの状態を示す。ソフトウェアアパーチャーの場合は単に計算範囲（領域）を設定するのみであり、計算範囲の周辺から計算範囲内に入射されるノイズ光をブロックできるものではない。



(a) 投影ハードウェアアパーチャー (b) ソフトウェアアパーチャー
 図 3.3 テストマイクロレンズの瞳面に投影したハードウェアアパーチャーと共役な面に設定したソフトウェアアパーチャー

次に(3.2.13)式の数値例を用いてハードウェアアパーチャー(投影)の精度評価を試みる。

[例 1] マイクロレンズ ($\phi=125 \mu\text{m}$) をテストレンズに用いた場合

光学系のパラメーターを表 3.1 に示す。

開口の径は約 $\phi=5\text{mm}$ で $m1=0.0233$ (約 1/43)倍に縮小して $\phi=0.115\text{mm}$ の開口像を被検レンズ L2 の瞳上に形成する。これは被検レンズ L2 の径の 92%に相当する。

表 3.1 $\phi=125 \mu\text{m}$ の測定パラメーター

Parameter	Aperture	Lens 1	Lens 2(test lens)	Lens 3	Image sensor
Diameter			$\phi=0.125\text{mm}$		
Effective aperture	$\phi=4.929\text{mm}$		$\phi=0.115\text{mm}$ (92% of the real diameter) $m1 = 0.0233$		$\phi=2.3\text{mm}$ $m2=20$
Focal length		9mm	$f2: 0.210\text{mm}$	9mm	
Numerical aperture		0.4		0.4	
$s1=394.7\text{mm}$		$s2=9.210 \text{ mm}$		$s3=9.45\text{mm}$	$s4=189\text{mm}$

レンズ 1, 3 としては NA=0.4 の対物レンズを用いた. レンズ 3 は $m_2 = 20$ 倍の拡大系として用いている. 被検レンズ L2 が持つ固有の収差として図 3.4 に示す曲線を想定した. レンズ半径 (r) を相対値で 0~1.0 とし, レンズ半径 $r=1.0$ (レンズ外形: $\phi=0.125\text{mm}$) での波面収差量 (y 軸に相当) を -1.0λ と設定した. 半径の任意の位置での値は $y = -r^2$ の関係になるように設定した. なお, 図 3.4~図 3.19 の横軸に用いられている "Normalized radius" は, それぞれ計算に用いたレンズの外形 (最大半径) を 1.0 で規格化した相対値を示す. また, 計算を簡単にするため対物レンズの収差は小さいとして無視した.

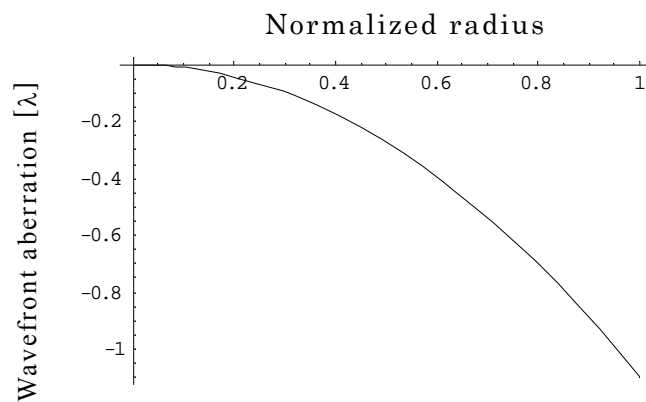


図 3.4 被検レンズの収差曲線(横軸: レンズ半径)

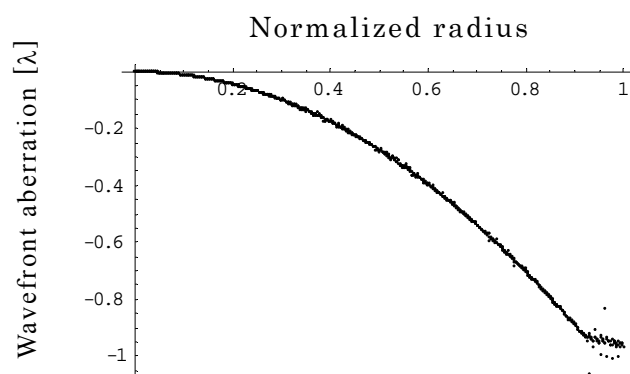


図 3.5 ハードウェアアパーチャー(投影)による波面収差(計算)

(3.2.13)式でシミュレーションした撮像面での波面を図 3.5 に示す. また図 3.4 の収差曲線との差を図 3.6 に示す.

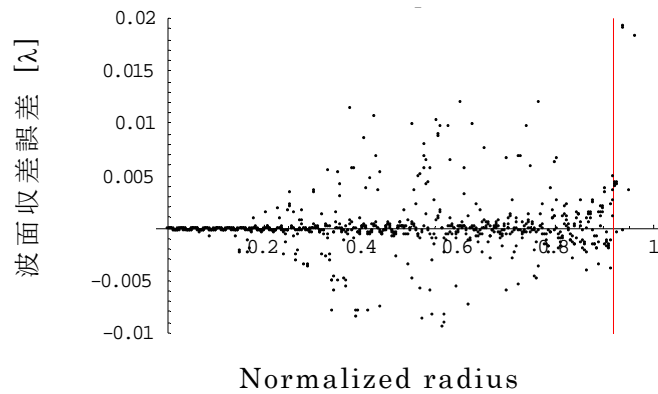


図 3.6 ハードウェアアパーチャー(投影)での誤差

図 3.6 での横軸 0.92 における縦線はハードウェアアパーチャー(投影)の縮小像の位置(半径の 92%)を表す。振動的な性格を有しているがばらつきの範囲は 1/100 波長以内に収まっていることがわかる。

[例 2] マイクロレンズ ($\varphi=38\mu\text{m}$) をテストレンズに用いた場合

光学系のパラメーターを表 3.2 に示す。

表 3.2 $\varphi=38\mu\text{m}$ の測定パラメーター

Parameter	Aperture	Lens 1	Lens2(test lens)	Lens 3	Image sensor
diameter			$\varphi=0.038\text{mm}$		
Effective aperture	$\varphi=0.296\text{mm}$		$\varphi=0.034\text{mm}$ (90% of the real diameter) $m1 = 0.0533$		$\varphi=2.3\text{mm}$ $m2=66.7$
Focal length		3.6mm	f2: 0.210mm	9mm	
Numerical aperture		0.4		0.4	
s1=65.3mm		s2=3.81 mm		s3=9.13mm	s4=609mm

開口の径は約 $\varphi=0.296\text{mm}$ で $m1 = 0.0533$ (約 1/18)倍に縮小して $\varphi=0.034\text{mm}$ の開口像を被検レンズ L2 の瞳上に形成する。これは被検レンズ L2 の径の 90%に相当する。

[例 1]と同じように (3.2.11)式でシミュレーションした撮像面での波面を図 3.7 に示す．図 3.4 の収差曲線との差を図 3.8 に示す．

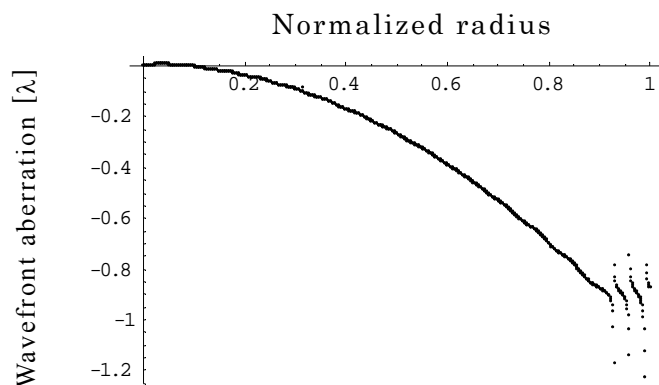


図 3.7 ハードウェアアパーチャ(投影)による波面収差(計算)

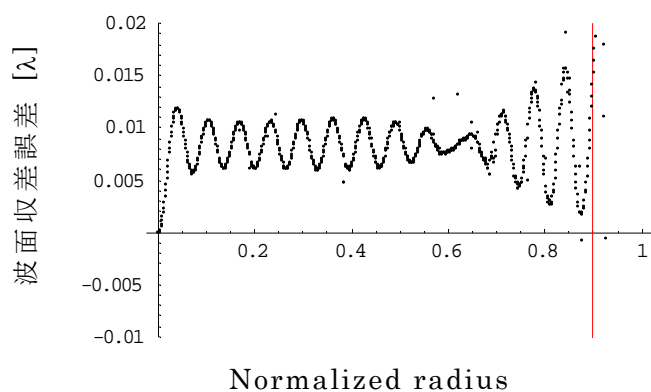


図 3.8 ハードウェアアパーチャ(投影)での誤差

図 3.8 での横軸 0.92 における縦線はハードウェアアパーチャ(投影)の縮小像の位置(半径の 90%)を表す．やはり振動的な性格を有するが、 0.015λ 以内に収まっている．半径の 90%に近づくにつれ誤差が増大するのは、開口部における回折波の影響を示唆するもので、被検マイクロレンズの径が $\phi=38\mu\text{m}$ と小さいためによると思われる．

(3) ソフトウェアアパーチャの精度評価

ハードウェアアパーチャ(投影)とソフトウェアアパーチャとの数式上の相違は(3.2.13)式の積分範囲にある．後者では被検レンズ L2 上で前者の縮小された開口像のように光束を制限するものがないから，該レンズの半径を R_{30} とし，投影された開口像のそれを ρ_{30} とすれば，

$$R_{30} \geq \rho_{30} \quad (3.2.18)$$

の関係にある．従って，ソフトウェアアパーチャによる撮像面上の複素振幅は(3.2.19)式で与えられる．

$$u_{soft}(\rho_5) = \exp[jks] \frac{1}{mm'} \int_0^{R_{30}} A\left(\frac{s_1}{s_2} \rho_3\right) \exp[jkW(\rho_3)] \frac{\rho_3 J_1(t'_0 \rho_3) J_0(t'_0 r') - r' J_1(t'_0 r') J_0(t'_0 \rho_3)}{\rho_3^2 - r'^2} t'_0 \rho_3 d\rho_3 \quad (3.2.19)$$

前述と同様に図 3.4 の収差曲線を被検レンズに仮定して，これをソフトウェアアパーチャを用いて測定した場合の (3.2.19) 式によるシミュレーション結果を次に示す．

[例 3]：テストレンズとして $\phi=125\mu\text{m}$ のマイクロレンズを用いた表 3.1 に示した光学系の場合を図 3.9，図 3.10 に示す．

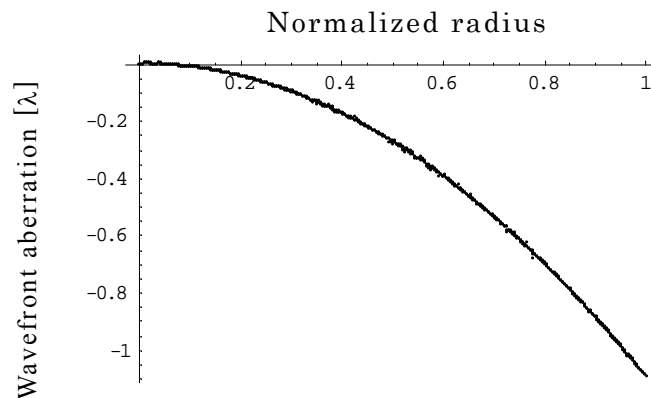


図 3.9 ソフトウェアアパーチャ(表 3.1 の場合)による測定波面シミュレーション

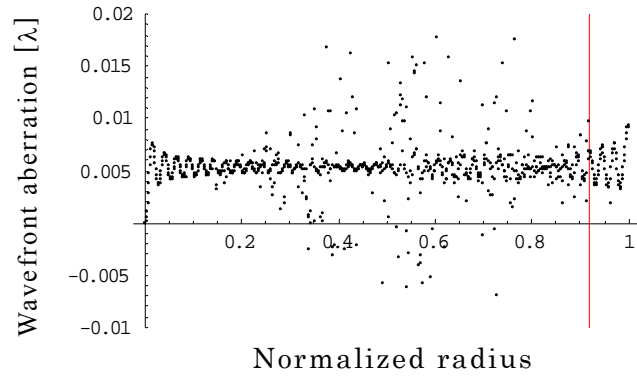


図 3.10 ソフトウェアアパーチャ(表 3.1 の場合)による測定精度(縦線は半径の 92%)

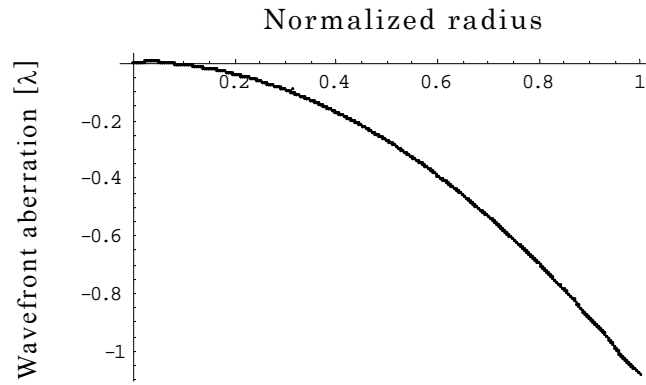


図 3.11 ソフトウェアアパーチャ(表 3.2 の場合)による測定波面シミュレーション

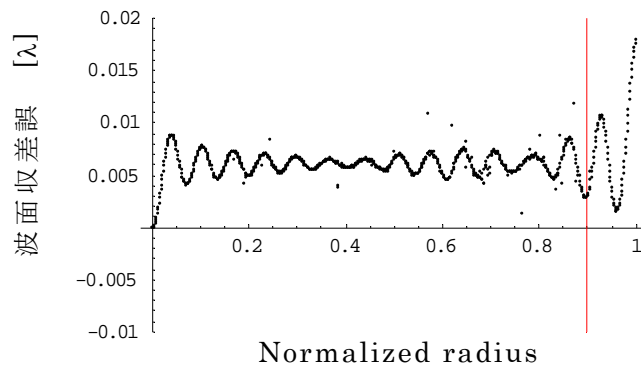


図 3.12 ソフトウェアアパーチャ(表 3.2 の場合)による測定精度(縦線は半径の 90%)

図 3.10, 表 3.2 による場合共に測定精度のばらつきの中心位置が 0.005λ だけシフトしており, 振動的性格を有しているが, PV 値 (Peak to valley value : 最大値と最小値の差) は 0.02λ 以内に収まっている. 図 3.12 の表 3.2 による場合の測定誤差が半径 = 1.0 近傍に近づくにつれ増大するのは, 前述と同様に開口部における回折波の影響を示唆するもので, 被検マイクロレンズの径が $\phi=38\mu\text{m}$ と小さいためによると思われる.

(4) ハードウェアアパーチャ(投影)とソフトウェアアパーチャの等価性と相違点

ハードウェアアパーチャ(投影)とソフトウェアアパーチャの原理的な面の相違は, 以下の項目があげられる.

- ① ハードウェアアパーチャ(投影)での投影光学系の収差
- ② (3.2.18) 式に表される積分範囲の相違
- ③ 開口の縁での回折の影響
- ④ フレネル数の小さい領域

① ハードウェアアパーチャ(投影)での投影光学系の収差

上記のシミュレーションでは投影光学系として用いられる対物レンズの収差は小さいとして無視している. しかし, 実際には有限な NA と僅かの収差を有しているためこの影響を評価しておく必要がある.

表 3.1 に示した光学系のパラメーターと配置の場合に, 開口面での位相, 強度分布共にフラット(平面波で振幅が一樣)としたときの被検マイクロレンズの瞳面に与える位相と振幅の分布は図 3.13, 図 3.14 のようになる.

図 3.13 に示す(3.2.10)式で計算される振幅は NA の有限な影響を受けているが, 対物レンズの収差は小さいとすると, 図 3.14 に示す(3.2.9)式で計算される開口の共役面である被検マイクロレンズの瞳面での位相は, 開口面でのフラットな位相をよく反映している. 規格化された半径 1.0 の外側で誤差が増大するのは, 開口像の外側で光強度が急速に減衰するためである. このように共役面では位相情報がかなり正確に伝達される性質を有していることがわかる. しかし, これは対物レンズの収差が無視できるほど小さいとした場合である. これが無視できない場合はこれに積分変換を施した複素振幅の影響が被検マイクロレンズの収差に加算される.

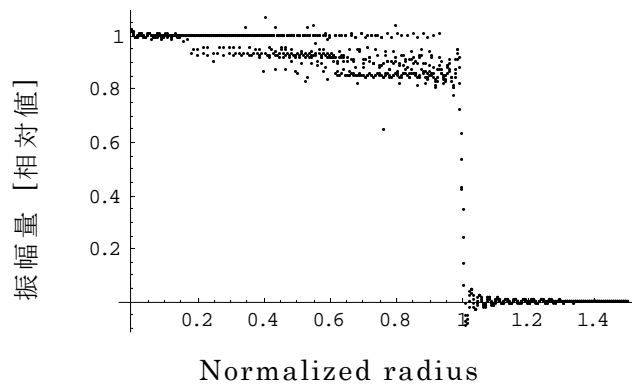


図 3.13 有限な NA(0.4)による振幅の影響

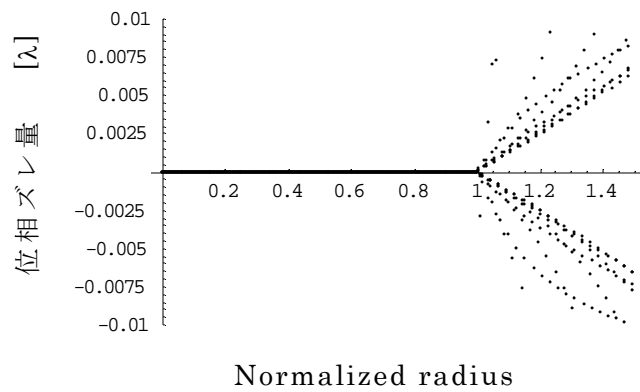


図 3.14 有限な NA(0.4)による位相の影響

② 積分範囲の相違

積分範囲の影響は、図 3.3(a), 図 3.3(b)に示した Point Spread Function の幅の範囲で情報の Mixing が行なわれる影響をどう評価するかによる。例えば実際に存在するかどうかは別にして、図 3.15 に示すような収差曲線を例として用いた場合に、その影響がどうなるかを見てみる。ソフトウェアアパーチャーを用いた結果を図 3.16 に示す。またハードウェアアパーチャー(投影)による結果を図 3.17 に示す。

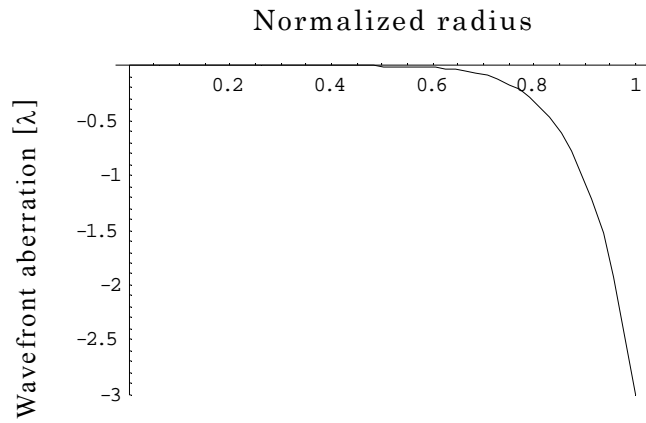


図 3.15 テストマイクロレンズの波面収差

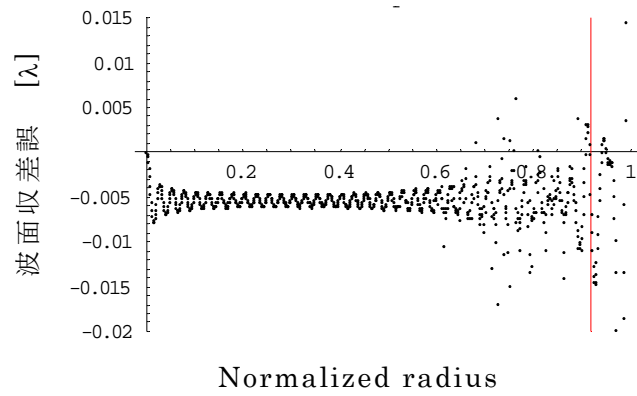


図 3.16 測定誤差(ソフトウェアアパーチャー)

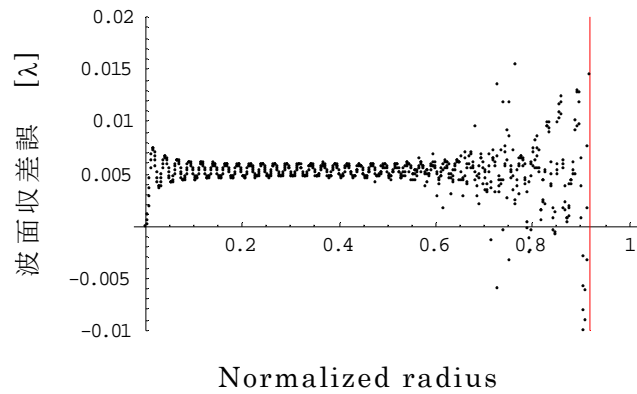


図 3.17 測定誤差(ハードウェアアパーチャー)

図 3.16, 図 3.17 を比較すると(シフトを除いて)ややソフトウェアアパーチャーの方が規格化された半径が 0.92 に近づくとつれ、ばらつきが増大するように見える。この関係は図 3.3 (a), 図 3.3 (b) に示した Point Spread Function の幅がどうなっているか、その幅の範囲で収差がどう変化するかに依存する。

③ 開口の縁での回折の影響

開口の縁での回折の影響は、実開口あるいは投影された開口像を用いる場合には注意が必要になる。これは図 3.8, 図 3.12 に見られるように $\phi=38\mu\text{m}$ のマイクロレンズを用いた表 3.2 の場合に顕著に表れている。図 3.6, 図 3.10 で表わされた表 3.1 の $\phi=125\mu\text{m}$ のマイクロレンズを用いた場合と比較するとこの影響が顕著にみられる。ハードウェアアパーチャー(投影)では規格化された半径が 0.92 に近づくとつれて 0.02λ に達する。ソフトウェアアパーチャーでも規格化された半径が 1.0 に近づくとつれて 0.02λ に達する。いずれも 0.01λ を問題とする場合の領域で、その影響も縁の近傍に限定される。

④ フレネル数 N の小さい($N<10$)領域

フレネル数 N (*1) の小さい($N<10$)領域ではフォーカスシフト (*2) という現象が生ずることが知られている。これが波面測定に影響を与えることがないかをチェックする必要がある。

*1) フレネル数 (F)

レンズ径の半径の自乗を焦点距離と波長の積で割った数値をいう。レンズの結像に際しての回折の影響を判断する際に使用する数値で、フレネル数が小さいと回折効果が大きいことを示す。

$$F = a^2 / (z\lambda) \quad (a: \text{レンズ半径 } z: \text{焦点距離 } \lambda: \text{波長})$$

*2) フォーカスシフト

カメラレンズなどでも見られるが、レンズの絞りを小さくするにしたがって最適像面がレンズから遠ざかる方向にずれる現象をいう。このような現象がおきにくいように収差補正をしたレンズもある。

表 3.1 の $\varphi=125\mu\text{m}$ のマイクロレンズを用いた場合を例にとり，他の条件は同じで開口のみを 1/3 とした場合を考える．このシミュレーション結果を図 3.18，図 3.19 に示す．但し，共焦点配置の再調整などはせず，そのままの配置とする．この結果をみるかぎり，特に顕著な影響はないと考えられる．

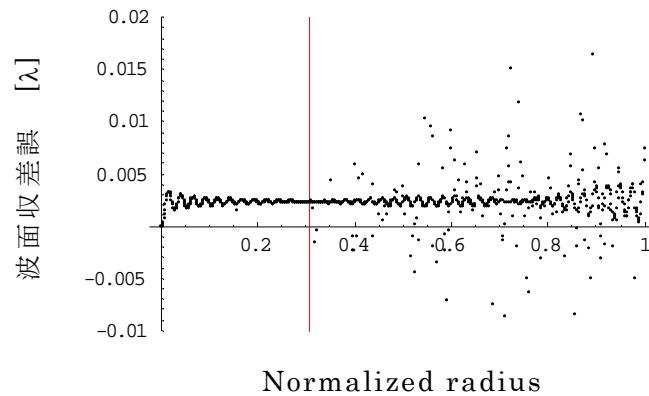


図 3.18 フレネル数 $N=2.8$ での測定誤差 (ソフトウェアアパーチャー)

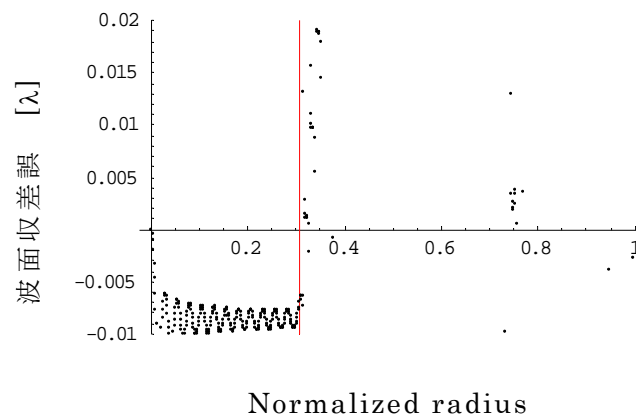


図 3.19 フレネル数 $N=2.8$ での測定誤差 (ハードウェアアパーチャー)

以上の検討結果から，測定光学系として収差の少ない系を用いる限り，ハードウェアアパーチャー(投影)とソフトウェアアパーチャーとは実用的に等価と考えられる．

注意点としては，以下の項目が重要になる．

- 1) 共役関係が保証されている光学配置を採用する．
- 2) ハードウェア：投影光学系に収差の少ないものを選ぶ．
- 3) ハードウェア・ソフトウェア共通：NA が大きいものを選ぶ．

3.2.1.2 まとめ

原理的な面からの考察とシミュレーションから，相互の共役関係が保たれていれば，被検マイクロレンズの瞳面(あるいはその近傍)に設けた実開口とハードウェアアパーチャー(投影)，ソフトウェアアパーチャーとに基本的差異はなく，実用上等価と考えてよいと思われる．

(1) ハードウェアアパーチャー(投影)とソフトウェアアパーチャーの等価性と相違点

両開口を用いた場合につき，有限な開口をもつ測定光学系を用いた時の撮像面での複素振幅の表式を波動方程式の解から出発して求めた．求めた式により，規格化された半径の端で λ 程度の波面収差をもつ $\phi=125\mu\text{m}$ の被検レンズを用いた場合(表 3.1)と $\phi=38\mu\text{m}$ の被検レンズを用いた場合(表 3.2)とにつきシミュレーションを行い，数値例とした．それぞれの開口を用いた場合の精度として，被検レンズに与えた波面収差とシミュレーションの結果撮像面で得られた位相分布との差を採用した．

両者での相違点として懸念される点は，

- a) ハードウェアアパーチャー(投影)での投影光学系の収差
- b) 被検レンズ瞳面における光束の透過領域の相違
- c) 開口の縁での回折の影響

などがあげられる．

以下項目別に整理する．

a) ハードウェアアパーチャー(投影)での投影光学系の収差

投影光学系がもつ有限な開口と収差の 2 つの要因が考えられるが，NA が大きく収差の小さい投影レンズを採用することにより回避される．

b) 被検レンズ瞳面における光束の透過領域の相違

ソフトウェアアパーチャでは開口の投影像の径より被検レンズの径は大きいいため、この差の領域を透過する光束が撮像面上で開口像の内側領域に与える影響が懸念されるが、結像レンズの NA の大きなものを選ぶことにより、(共役面である撮像面上では) その Point Spread Function の幅の範囲での情報の Mixing による影響を小さくできる。

c) 開口の縁での回折の影響

実開口を光学系内に設置することによる回折光の影響が懸念された。特に、例えば $\phi=38\ \mu\text{m}$ といった径の小さいマイクロレンズでは信号光に比較して回折光の比重が増大することから強く懸念されたが、共役の条件が満足される領域ではその影響を小さくできることがわかった。この他にフレネル数が 10 より小さいマイクロレンズの領域では、フォーカス点のシフト現象が起きることが知られており、波動方程式の解においてもこの効果を内蔵していることがわかるが、この効果が波面測定に与える影響も懸念された。しかし、これも小さいと思われる。これらの判断基準としては、誤差の PV 値が $1/100\lambda$ 程度以内に収まっているときに影響は小さいとした。

以上の検討から両開口は実用上等価と考えられる。但し、被検マイクロレンズの瞳面と開口面、撮像面とはそれぞれ投影光学系、結像光学系を介して共役の関係にあり、両光学系の収差は無視しうる程小さい、とした場合に限定されることに注意が必要である。

(2) 他のパラメータ(焦点距離, 結合効率など)の測定との関連

開口を設けて焦点距離, 結合効率などの他のパラメータを測定することは必須条件と考えられるが、波面測定においても、可能であれば被検マイクロレンズの瞳面に実開口を設ける事が望まれるが、これと共役関係にあるソフトウェアアパーチャおよびハードウェアアパーチャ(投影)が実用上の代替手段として利用できる。

(3) 今後の課題

実用面では、

- 1) アライメントの影響, 特に被検マイクロレンズの中心あるいは輪郭をどのよ

うに設定し、傾きを含めて測定光学系の光軸とどのように合わせるか。

- 2) 被検マイクロレンズの瞳面と撮像面あるいは開口面とにおける共役関係、言い換えると焦点をどのように合わせるか。
- 3) 測定光学系自身が持つ収差をどのように検出し補正するか。

などの課題がある。

特にレンズアレイは個々のレンズ径が微小であり、配列、ピッチのズレなど構造上の課題もあり、その結果、共役関係を保持できなかったり、焦点合わせや光軸調整が不十分になったりする。また測定光学系自身が持つ収差の分離が困難であると言ったような懸念もある。一方、レンズ1個あたりの測定時間は限りなく短くしたいという生産面からの要求もある。

従来、簡便な方法として用いられてきたソフトウェアアパーチャが、ハードウェアアパーチャを縮小投影により被検マイクロレンズの瞳面に形成した実開口とが、波面収差測定においてほぼ等価であることがシミュレーションにより確認できた。次章以降では実際の干渉計に適用し、その効果を確認することでシミュレーションの有効性の判断をおこなう。

3.3 マイクロレンズ用波面収差測定装置の作製

3.3.1 Mach-Zehnder干渉計の試作

3.3.1.1 はじめに

3.2 章では、マイクロレンズの波面収差を測定する際に Mach-Zehnder 干渉計を用いて、不要光を遮断するためにレンズの開口を規制する方法を検討した。照明光学系の途中にアパーチャーを設けてマイクロレンズの瞳面に縮小投影、測定領域にだけ干渉縞を形成し、物理的に測定範囲外の光束を遮断した場合（本方法をハードウェアアパーチャーと呼ぶ）と、一方イメージセンサー（CCD カメラ）上に形成された干渉縞の必要な領域だけをコンピューターによるソフトウェアだけで選択して演算する方法（ソフトウェアアパーチャーと呼ぶ）をシミュレーションにより比較した。

被検レンズの瞳面とイメージセンサー（CCD カメラ）のセンサー面とが共役の関係になるように設置されている、あるいは、被検レンズの周縁（概ね半径で 90% を超える領域）を有効範囲としないというような条件面の制約があるが、基本的にハードウェアアパーチャーとソフトウェアアパーチャーとはほぼ等価に扱っても良いと言う結果を得た。

本章では、Mach-Zehnder 干渉計に被検レンズの測定領域以外からの不要光を遮断するために、照明光学系の途中にアパーチャーを設けてマイクロレンズの瞳面に縮小投影、測定領域にだけ干渉縞を形成し、物理的に測定範囲外の光束を遮断する機能を付加することを検討した。そのうえで、一般の干渉計で波面収差計測の際に活用されているソフトウェアのみで測定範囲を規定する方法とを比較し、シミュレーション結果の検証を行った。具体的には、ハードウェアアパーチャーを用いた場合と、ソフトウェアアパーチャーのみで測定範囲を規定した場合の差異について確認が可能な Mach-Zehnder 干渉計を開発し実測をおこなった。その上でシミュレーション結果と実測結果について比較検証をおこない、両者の差異を明らかにした。

第 1 ステップとして、光学ベンチ上に Mach-Zehnder 干渉計の光学系を水平にレイアウトしたプロトタイプモデルを作製し、ハードウェアアパーチャー設置の際の条件を明らかにするとともに、異なる特性（レンズ径、NA など）を持つ被検レンズの測定を通じて最終的に実用に供することができる干渉計の仕様を明らかにした。

第 2 ステップでは、第 1 ステップで明らかにした干渉計の仕様に基づき改良型 Mach-Zehnder 干渉計を開発し、測定精度の安定をはかった。そのうえでハードウ

ウェアパーチャを用いた場合と、ソフトウェアアパーチャーのみで測定範囲を規定した場合の差異について確認が可能な干渉計を開発し実測をおこなった。

さらに、第3ステップとして、海外で開発された異なる設計の Mach-Zehnder 干渉計との同一サンプルの比較測定（ラウンドロビテスト）に適応可能な装置を完成させた。これは、第4章で示す国際標準開発を行った際の測定方式の選定。設定に大きな影響と価値を提供することができた。

3.3.1.2 プロトタイプモデルの設計・試作

(1) プロトタイプモデルの設計

光学ベンチ上に Mach-Zehnder 干渉計の光学系を水平にレイアウト（平面的に部品を配置）したプロトタイプモデルを作製した。被検レンズ（サンプル）の保持を考えれば、測定時の光軸を垂直に立てる方式が望ましいが、ハードウェアアパーチャーを設置しての検討、被検レンズ（サンプル）に収束光を入射させるためのカップリングレンズの性能チェック、さらには、小径レンズ（最小直径 $\phi=20\mu\text{m}$ 程度を想定）を測定する際のノイズの問題などへの対応を考慮した結果、光学ベンチ上に光学系を水平にレイアウトする方式を選択した。

He-Ne光源を用い、参照光路、測定光路の光量比を任意に設定できるようにアッテネーター光学系（1/2波長板、偏光ビームスプリッター、偏光板）を採用した。また測定レンズ径に対応したハードウェアアパーチャーを被検レンズの瞳面に縮小投影可能な開口（ピンホール）ホルダーを光軸に沿って移動設置可能な光学レールを設置し、ピンホールを光軸方向にスライドさせる構成とした。ピンホールの開口形状は、カップリングレンズ（顕微鏡対物レンズを使用）で被検レンズに投影することができ、開口の光軸上の位置を変えることで異なる焦点距離を持つ被検レンズに対応できる構造とした。

ハードウェアアパーチャーを被検レンズの瞳位置に縮小投影する際には、絞りの投影結像は干渉測定光学系の制約によりカップリングレンズ（顕微鏡対物レンズ）を共用することになる。その場合、干渉測定光学系の構成と顕微鏡対物レンズの焦点距離（レンズ倍率で規定される）の組合せにより制約を受ける。また、径や焦点距離が異なる被検レンズに対応するために、異なるピンホール径を有する開口板を複数準備し、ピンホールをレール上を移動させ被検レンズ上に結像させた。したがって、プロトタイプモデルでは、被検レンズの瞳面に有効なハードウェアアパーチャー

ャーを投影できる条件は、レンズの直径、焦点距離の組み合わせで、対応可能範囲が不連続にならざるを得ない面がある。

サンプル（被検レンズ）の保持に関しては、水平に自重での保持ができないため、サンプルであるマイクロレンズアレイ基板を垂直に立て、基板の一部（下部）をエア吸着する方法を採用した。サイズが大きくなると、保持の安定性、設置の再現性に問題があり、大面積を持つ基板への対応は難しい面がある。

表3.3 マイクロレンズ用波面収差測定装置（プロトタイプモデル）仕様

干渉計タイプ	Mach-Zehnder(マッハ・ツェンダー)干渉計
対物レンズ (カップリングレンズ)	20倍 NA(開口数): 0.40 W.D.(作動距離): 12.0mm 50倍 NA(開口数): 0.50 W.D.(作動距離): 10.6mm
観察レンズ	20倍 NA(開口数): 0.40 W.D.(作動距離): 21.5mm 50倍 NA(開口数): 0.42 W.D.(作動距離): 17.0mm
光源: 波長 (nm)	He-Ne レーザー: 632.8nm (直線偏光)
レンズ径範囲	$\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$
サンプルサイズ	$\square 50\text{mm}$ 以下程度
サンプリング画素	640 × 480 ピクセル
サンプル位置決め	サンプルステージ: エア吸着ホルダーを採用 手動微調ステージ (XYZ) 傾き (Tilt) 調整機能あり
ソフトウェア	市販の位相シフト解析ソフトウェアを使用
ハードウェア	市販の PC にインタフェースボードを追加, ピエゾドライバ・ビデオデータ収集を制御
CCD カメラ	2/3・1/2・1/3・1/4 インチ (Cマウント)
ハードウェア アパーチャー	$\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$ 径への不連続可変対応構造 (被検レンズ径に応じて交換)

表 3.3 にマイクロレンズ用波面収差測定装置（プロトタイプモデル）の仕様，図 3.20 Mach-Zehnder 干渉計の基本構造を示す。被検レンズは，サイズ（レンズ径） $20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ (0.5mm) 程度，NA は最大で $0.4\sim 0.5$ （実効 F 値で $1.0\sim 1.25$ ）程度を想定し，対応が可能な光学系を選定した。

以下，使用した主要デバイスの特性を示す。

a) 光源

He-Ne レーザー

- ・ 波長：632.8nm
- ・ ビーム径： $\varphi=0.59\text{mm}$
- ・ ビーム拡がり：1.3mrad
- ・ 出力：3mW（直線偏光）

b) ビームエキスパンダー

レーザー光源のビーム径は $\varphi=0.59\text{mm}$ であるが、被検レンズにはカップリングレンズを介した集光光束を入射させるため、カップリングレンズに入射する光束径を拡大する必要がある。光束径は、被検レンズの NA よりも大きな NA で入射させる必要があり、カップリングレンズの NA 等も考慮し、ビームエキスパンダー光学系を用いて $\varphi=3.3\text{mm}$ とした。

ビームエキスパンダー部には、顕微鏡対物レンズ（ULWD MS Plan 20x f=9mm）とアクロマートレンズ（ $\varphi=20\text{mm}$, f=50mm）を組み合わせ以下の特性とした。

光束径拡大率：5.6 倍（50:9），光束径： $\varphi=3.3\text{mm}$

c) Spatial filter（空間フィルター：ローパスフィルター）

干渉計における干渉縞のコントラストを低下させるノイズを除去する為に光源部（ビームエキスパンダーと光源の間）に Spatial filter（集光レンズ+ピンホール）を設け（図 3.20 には詳細に示されていないが、ビームエキスパンダー部の光学系の一部として設置）。集光レンズには、ビームエキスパンダー部の顕微鏡対物レンズ（×20）倍を兼用した。

顕微鏡対物レンズ（×20）倍の集光位置における光束径 A は（3.3.1.2.1）式により計算できる。

$$A = 2 \times f \times \text{波長}(\lambda) / (\pi \times \text{光源の光束径}) \quad (3.3.1.2.1)$$

ここで f: 集光レンズ焦点距離

数値を入れて計算すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} A &= 2 \times 9(\text{mm}) \times 632.8 \times 10^{-6} (\text{mm}) / (3.14 \times 0.59(\text{mm})) \\ &= 0.00615(\text{mm}) \end{aligned}$$

Spatial filter のピンホール径は、光束をケラないためにはビーム径の 2 倍程度に設定する必要があるため、直径を 0.0012mm（12 μm ）程度にすれば良いことになる。

プロトタイプモデルでは、既製品で入手可能な $\phi=15\mu\text{m}$ のピンホールを採用した。

d) 干渉部 (Mach-Zehnder 光学系)

Mach-Zehnder 干渉計は、2つのミラー (図 3.20: BS2, Phase Shift Mirror) と2つのハーフミラー (BS1, BS3) からなり、干渉する2光束は全く異なる光路を通るように構成されており、被測定物の大きさに対応してミラー間の距離を変えることにより、測定空間の自由度の高い干渉計として利用できる。本装置においては、特に測定光と参照光を合成する部分のハーフミラー (BS1, BS3) にはキューブビームスプリッターを用いた。これはイメージセンサーへ干渉縞を投影結像する光学系の収差を低減するためである。光源からのビームは、ハーフミラーにより2光束に分割され、参照光束と被検光束 (測定光束) となる。被検 (測定) 光路では、ミラー (BS2) で反射したビームは集光レンズ (カップリングレンズ) により集光され、発散光として被検レンズ (Test microlens) に入射し、平行光に変換されキューブビームスプリッター (BS3) に入射する。Phase Shift Mirror より反射された参照光は、キューブビームスプリッター (BS3) で反射され、被検 (測定) 光路側からきた光束との干渉像を形成する。これを Image sensor に投影、演算することで、被検物の透過波面収差が測定できる。

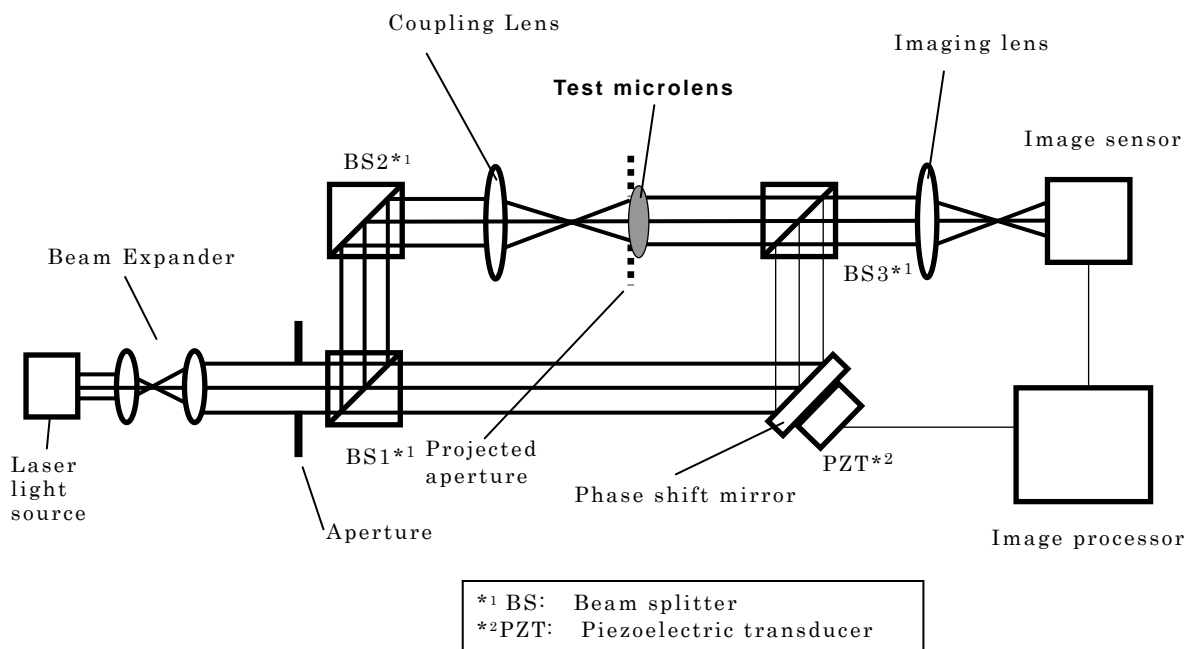
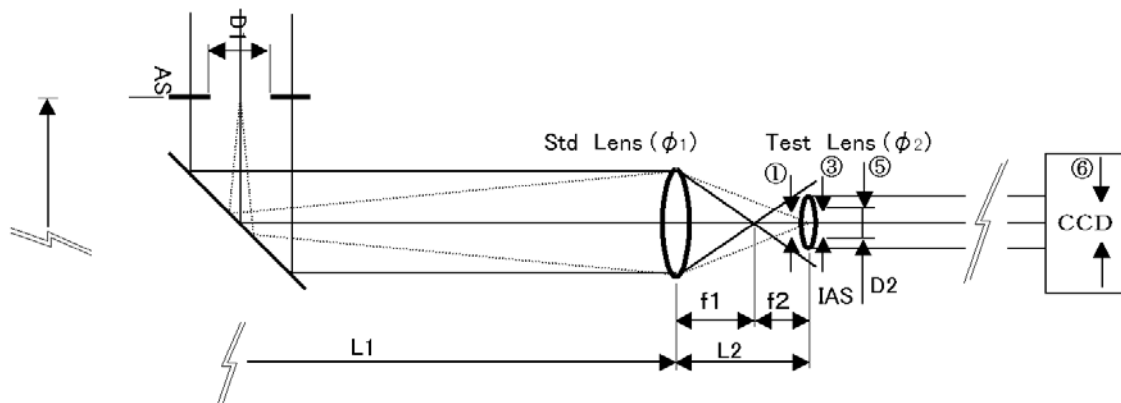


図 3.20 Mach-Zehnder 干渉計の基本構造

e) ハードウェアアパーチャー（投影光学系）

ハードウェアアパーチャーをカップリングレンズのみを用いて被検レンズの瞳面に投影可能な条件を設定した．図 3.21 に被検マイクロレンズへのハードウェアアパーチャーの投影光学系の検討レイアウトを示す．複数の異なる NA（焦点距離）を持つカップリングレンズ（顕微鏡対物レンズ）を用いて被検レンズに投影できる条件を求めた．



- カップリングレンズ 焦点距離 f_1 ， レンズ径： $\phi=1$ ($NA_1 : \phi=1 / 2f_1$)
 被検レンズ 焦点距離 f_2 ， レンズ径 $\phi=2$ ($NA_2 : \phi=2 / 2f_2$)
 ハードウェアアパーチャーAS径 D_1 ， 絞り-カップリングレンズ間距離 L_1
 ハードウェアアパーチャー像 IAS 径 D_2 ， カップリングレンズ-絞り像間距離 L_2

図 3.21 被検マイクロレンズへのハードウェアアパーチャーの投影光学系

計算における前提条件は以下とした．

1. 被検レンズとカップリングレンズの NA $NA_1 \geq NA_2$
 （カップリングレンズのフレネル回折を考慮すると実際には， $NA_1 \gg NA_2$ ）
2. 絞り像を被検レンズ瞳面に形成する条件から $L_2 = f_1 + f_2$

まず，ハードウェアアパーチャーAS とハードウェアアパーチャーの像 IAS との共役関係から，Newton の公式 (3.3.1.2.2) を用いて計算をすすめる．

$$(L_1 - f_1) \cdot f_2 = f_1^2 \quad (3.3.1.2.2)$$

(3.3.1.2.2) 式を変形し，(3.3.1.2.3) 式を得る．

$$L1 = f1^2 / f2 + f1 \quad (3.3.1.2.3)$$

$$D1 = D2 (L1 / L2) = D2 (f1^2 / f2 + f1) / (f1 + f2) \quad (3.3.1.2.4)$$

カップリングレンズ，被検レンズ，および，被検レンズの瞳面上のハードウェアアパーチャー像の径が与えられたとき，ハードウェアアパーチャーの位置 $L1$ と径 $D1$ が，(3.3.1.2.3) (3.3.1.2.4) 式で一義的に決まる．また，(3.3.1.2.4) 式は (3.3.1.2.5) 式のように書き換えることができる．

$$D2 / D1 = f2 / f1 \quad (3.3.1.2.5)$$

これは，干渉光束の幾何光学的倍率変換とも一致し，干渉光束がハードウェアアパーチャーによって不用意に制限される（ケラレル）不都合も生じないことがわかる．

以上の検討より，実際に被検レンズ上に投影できるハードウェアアパーチャー像の径は図 3.22 の被検マイクロレンズへのハードウェアアパーチャーの投影可能領域に示した関係が得られる．プロトタイプモデルでは，被検レンズの選択に制限があるが，この許容範囲内での試作をおこなった．

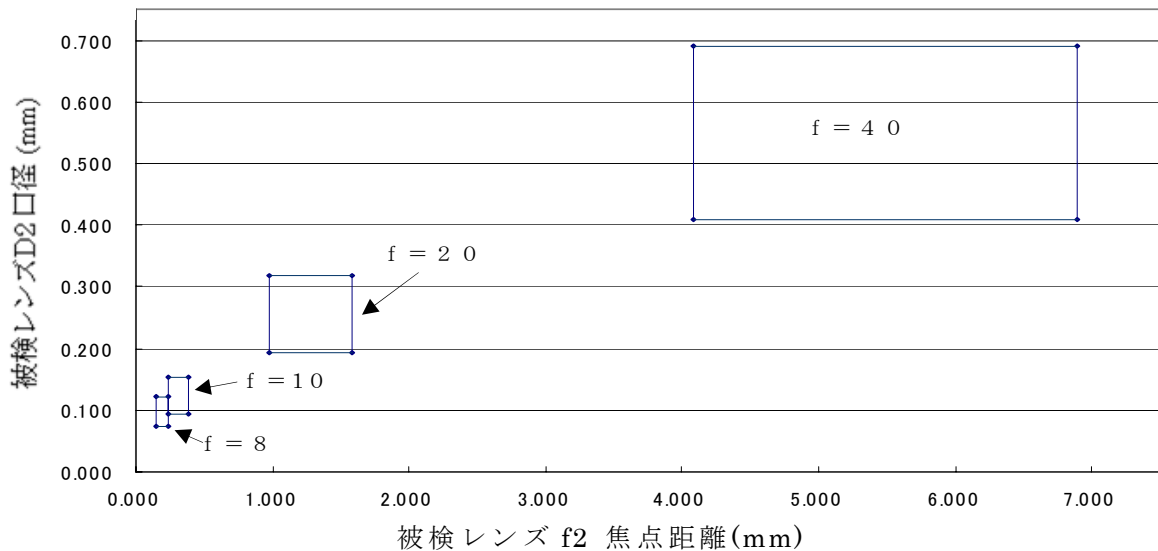


図 3.22 被検マイクロレンズへのハードウェアアパーチャーの投影可能領域

(2) プロトタイプモデルの試作

図 3.23 には実際に試作した Mach-Zehnder 干渉計のレイアウト (プロトタイプモデル) を示す. 光源部 (Light source), コリメーター部 (Collimator optical unit), Mach-Zehnder 干渉計部 (Mach-Zehnder optical unit), CCD カメラ部 (CCD camera) の 4 つのブロックで構成されている. コリメーター部と Mach-Zehnder 干渉計の間にハードウェアアパーチャー (Projection Aperture) を配置した. ハードウェアアパーチャーは, 使用するカップリングレンズ (Coupling lens) の焦点距離, 被検レンズ (Test microlens) の直径, 焦点距離に応じてアパーチャー径を変えると同時に光軸に沿って前後させ被検レンズの瞳面上にその像を投影することができる. 干渉縞の位相を変化させるための Phase shift mirror は PZT (Piezoelectric transducer) 素子に取り付けてあり, PZT 素子への印加電圧の変化で前後に移動させることができる. 参照光路側の光路長を変化させ, 測定光路側の光路長との差をつけることで干渉縞を移動させ, 複数の縞画像を (一般的には 5 種 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 4\pi/2$) の異なる干渉パターン) を取得し演算することで波面収差を求めることができる [11].

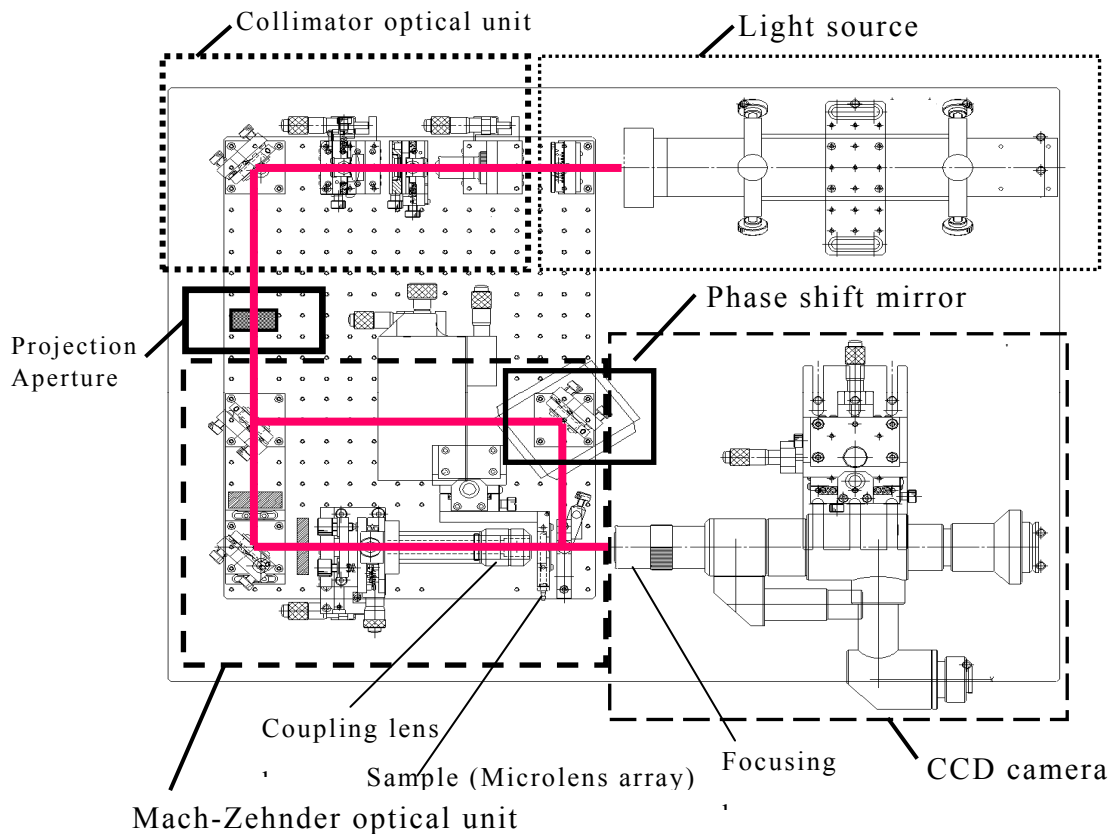


図 3.23 Mach-Zehnder 干渉計のレイアウト (プロトタイプモデル)

図 2.37 に示した，ファイバー光学系を用いた Mach-Zehnder 干渉計で透過波面収差測定をおこなった例にある，5 枚の干渉縞の写真が位相を変えて測定したものである．

光源部の He-Ne レーザーからの光束はコリメーター部で光束系を約 5.6 倍の $\phi=3.3\text{mm}$ に拡大され（その際には，Spatial filter を用いてノイズ低減を行なう），平行光のまま Mach-Zehnder 干渉計部に導かれる．ビームスプリッター（キューブビームスプリッター）で振幅を 2 分割された光束は，一方が参照光として PZT に取り付けられた Phase shift mirror で反射され再度ビームスプリッター（キューブビームスプリッター）で反射される，一方測定光束は平面ミラーで反射され光路を 90° 曲げられカップリングレンズにより収束光に変換される．被検レンズはカップリングレンズの焦点位置にその焦点を一致させて光軸上に配置される．被検レンズにより平面波に変換された光束は参照光が反射したビームスプリッター（キューブビームスプリッター）を透過し CCD カメラ部に導かれセンサー面に干渉縞が投影される．

図 3.24 に Mach-Zehnder 干渉計（プロトタイプモデル）の外観を示す．光学定盤上に平面的にレイアウトされている．このような配置をとることで，ハードウェアアパーチャーを設置しての検討，被検レンズ（サンプル）に収束光を入射させるためのカップリングレンズの性能チェック，さらには，小径レンズ（最小直径 $\phi=20\mu\text{m}$ 程度を想定）を測定する際のノイズの問題などへの対応が可能になり，干渉計の基本性能向上のための検討をおこなうことができる．

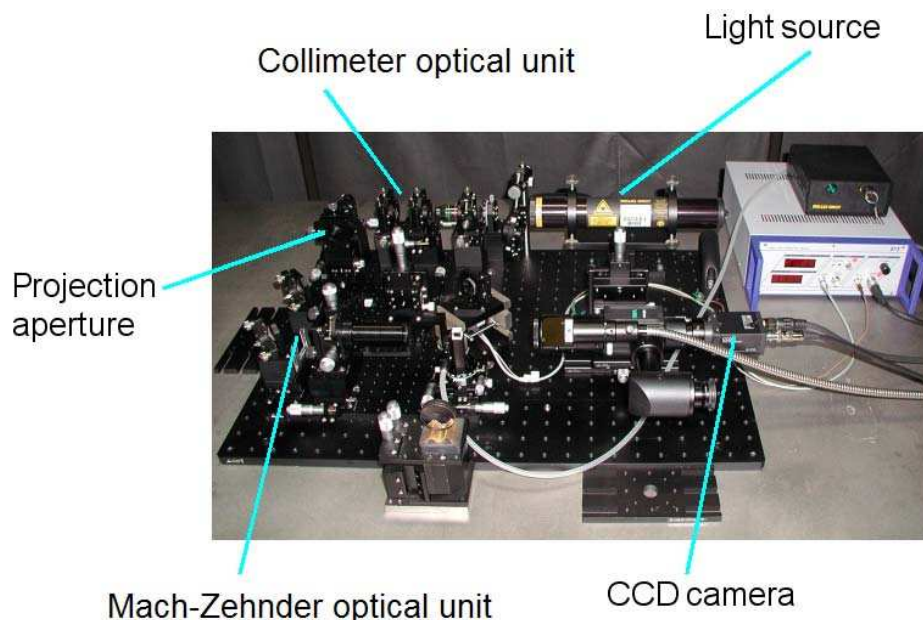


図 3.24 Mach-Zehnder 干渉計（プロトタイプモデル）の外観

図 3.25 に Mach-Zehnder 干渉計（プロトタイプモデル）のサンプル部を示す。被検レンズ（マクロレンズアレイ）は、エア吸着ホルダーに垂直に保持された状態がわかる。右下の半透明チューブで負圧がかけられホルダーに吸着されている。左上には PZT 素子に取り付けられた Phase shift mirror を見ることができる。Imaging lens は CCD デバイスに干渉縞を投影するためのものであり、ビームスプリッター（キューブビームスプリッター）越しに被検レンズ（マクロレンズアレイ）の瞳面を観察することができる。本来は左下の黒く見える円筒にカップリングレンズ（顕微鏡対物レンズ）が取り付けられるが、写真撮影の際に被検レンズが隠れて見えなくなるためとりはずした状態になっている。

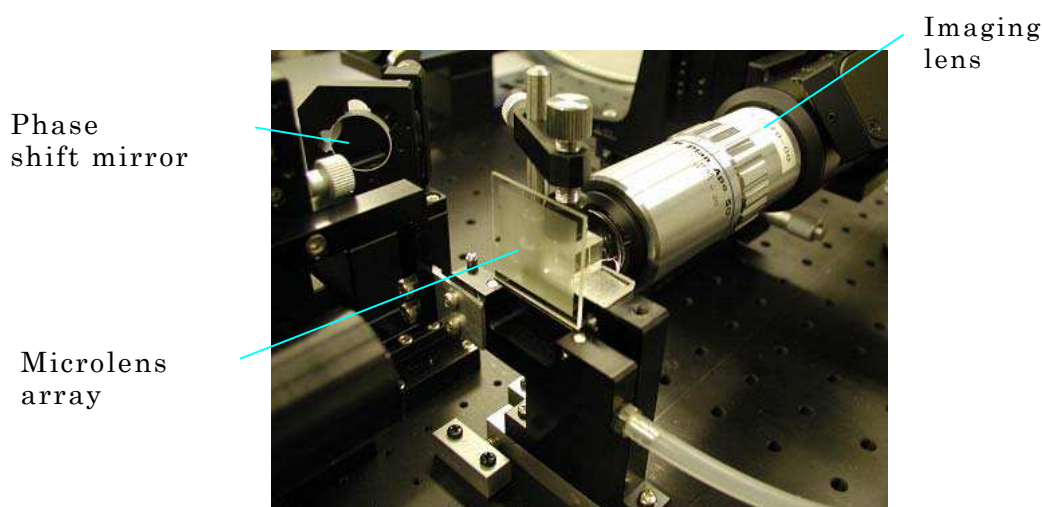


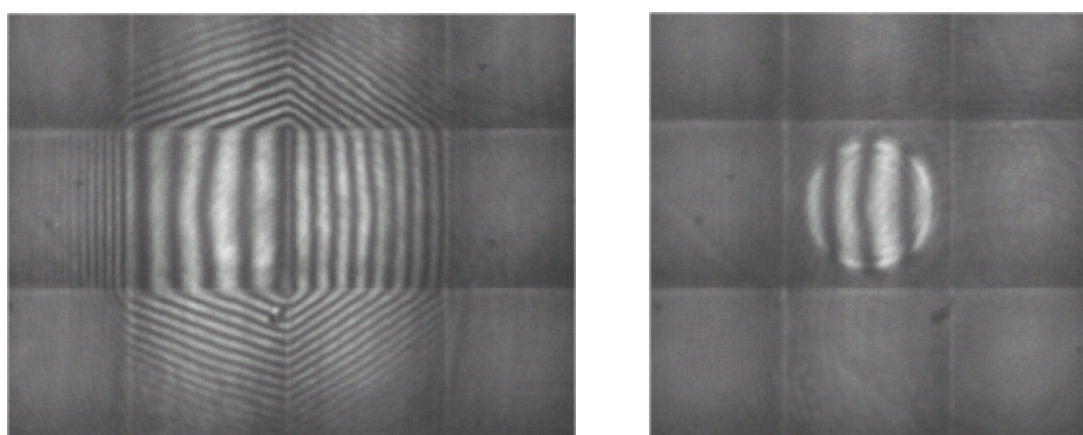
図 3.25 Mach-Zehnder 干渉計（プロトタイプモデル）のサンプル部

(3) プロトタイプモデルでの測定

作製したプロトタイプモデルを使用して特性確認をおこなった。まず、ハードウェアアパーチャーが実際に被検レンズの瞳面上に焦点を合わせて形成されるかどうかの確認を行った。被検レンズの直径に合わせてアパーチャーのサイズを変えて投影した。

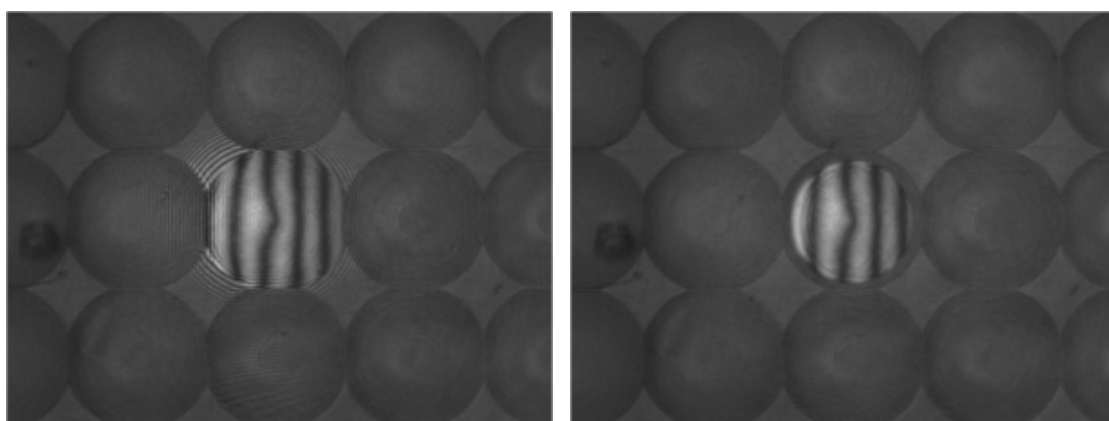
ハードウェアアパーチャー像を投影した結果を図 3.26, 図 3.27 に示す。まず、図 3.26 に縮小アパーチャー像を被検レンズ（マクロレンズアレイ）に投影して干渉縞の発生領域を規制した状態を示す。サンプルは、 $32 \times 32 \mu\text{m}^2$ のサイズの矩形レンズアレイで、投影されたアパーチャーサイズは $\phi = 25 \mu\text{m}$ である。図 3.26 (a) はマイクロレンズアレイ上に形成された干渉縞を、図 3.26 (b) は円形に規制された干渉縞を示している。ハードウェアアパーチャーが投影形成されないと、測定したいレンズ以外の部分以外に干渉縞が観察され、外乱光の発生の可能性があることを示している。

この際の干渉縞のコントラストが若干低く見えるが、これは被検レンズの形状を同時に記録するためにレンズに対して落射照明を行ったためであり、実際の干渉縞のコントラストはもっと高い。同じく図 3.27 に、他のマイクロレンズアレイに縮小アパーチャー像（ハードウェアアパーチャー）を投影して干渉縞の発生領域を規制した状態を示す。サンプルは、円形のレンズアレイで $\phi=62.5 \mu\text{m}$ のサイズであり、投影されたアパーチャーサイズは $\phi=55 \mu\text{m}$ である。図 3.27 (a) はマイクロレンズアレイ上に形成された干渉縞を、図 3.27 (b) は円形に規制された干渉縞を示している。ハードウェアアパーチャーの縮小アパーチャー像がレンズアレイの瞳面上に投影され、干渉縞の生成領域を規制することができる。



(a) マイクロレンズアレイ上に形成された干渉縞 (b) 円形に形成された干渉縞

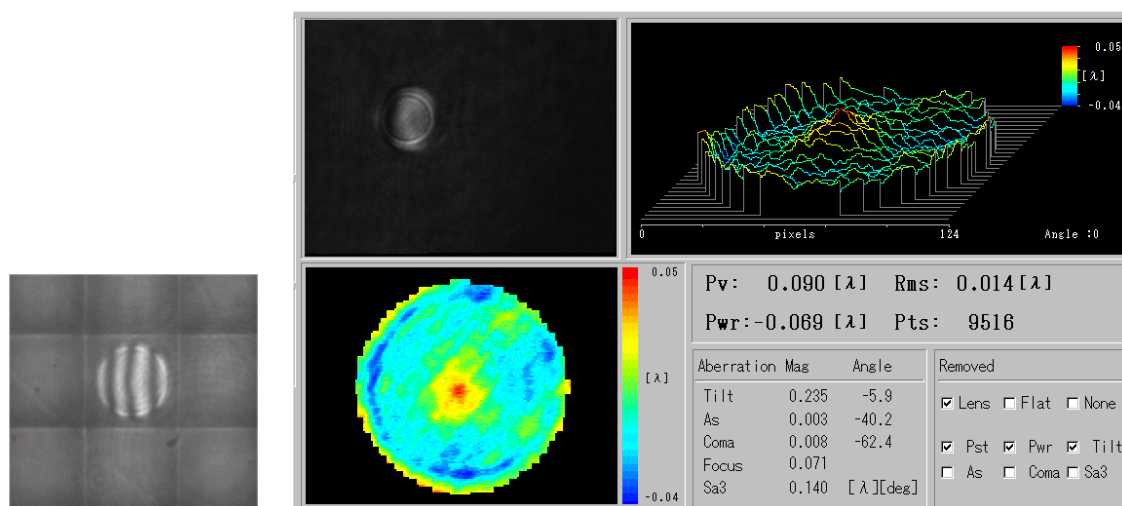
図 3.26 縮小アパーチャー像を投影した干渉パターン
(レンズ形状: $32 \times 32 \mu\text{m}^2$, 投影アパーチャーサイズ: $\phi=25 \mu\text{m}$)



(a) マイクロレンズアレイ上に形成された干渉縞 (b) 円形に形成された干渉縞

図 3.27 縮小アパーチャー像を投影した干渉パターン
(レンズ形状: $\phi=62.5 \mu\text{m}$, 投影アパーチャーサイズ: $\phi=55 \mu\text{m}$)

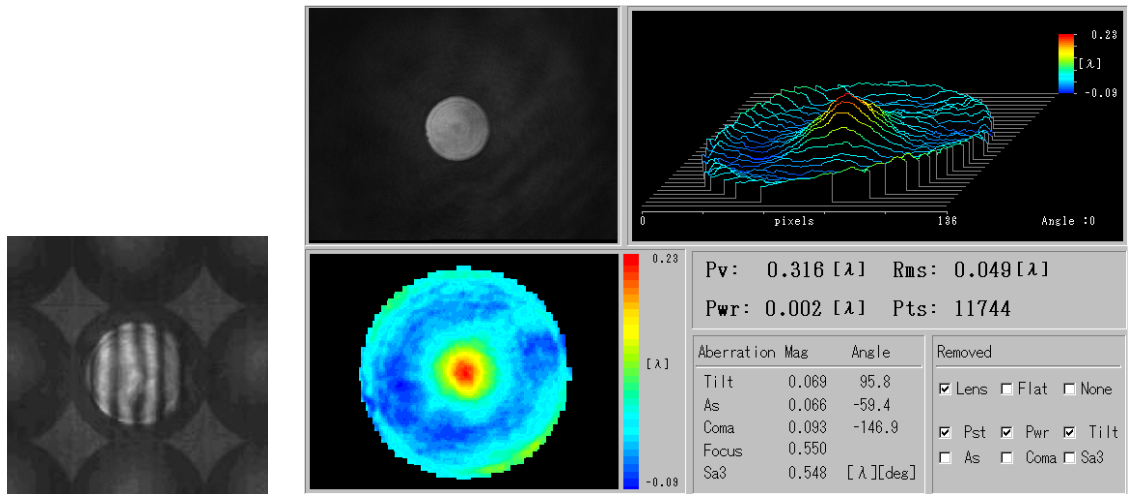
次に、実際の波面収差の測定を行った結果を図 3.28、図 3.29 に示す。図 3.28 には、Mach-Zehnder 干渉計（プロトタイプモデル）を用いて、図 3.26 で示したマイクロレンズ（レンズ形状： $32 \times 32 \mu\text{m}^2$ 、投影アパーチャーサイズ： $\phi=25 \mu\text{m}$ ）を測定した例を示す。図 3.28(a)は、測定時の干渉縞の発生状態、図 3.28 (b) には、波面収差測定結果を示す。図 3.28 (b)の左上は、実際に干渉縞のデータ取得した際の縞画像を示す。一般に干渉縞解析を行う場合は、検出精度を向上させるために、発生する縞の数をなるべく減らすことが多い。複数の干渉縞が見えていると目視での観察には、収差の状態が定性的にわかるので便利であるが、データ取得の際には本数を減らす方向で調整することになる。同じく右上が波面収差を 3 次元的に表現した図、左下にはそれを正面から見た図、右下が実際の計測データを数値で表したものである。PV 値は、計測領域内の波面の差の最大値を表すが、計測時のノイズの影響、あるいはサンプルの汚れ、ゴミなどによる誤差が入ることもあり、実際の性能評価を行う際には被検レンズの状態を反映しているかどうかの判断が必要になる。RMS（Root-Mean-Square：2 乗平均平方根）は波面の平均二乗偏差を表し、比較的正しいレンズの状態を表していると考えられることができる。図 3.29 には同じく 図 3.27 で示したマイクロレンズの波面収差測定例（レンズ形状： $\phi=62.5 \mu\text{m}$ 、投影アパーチャーサイズ： $\phi=45 \mu\text{m}$ ）を示す。図 3.27 では、投影アパーチャーサイズはで $\phi=55 \mu\text{m}$ であったが、本例では、さらにハードウェアアパーチャーサイズを小さく設定し $\phi=45 \mu\text{m}$ のサイズで測定を行った。



(a) 干渉縞

(b) 波面収差測定結果

図 3.28 Mach-Zehnder 干渉計を用いたマイクロレンズの波面収差測定例
(レンズ形状： $32 \times 32 \mu\text{m}^2$ 、投影アパーチャーサイズ： $\phi=25 \mu\text{m}$)



(a) 干渉縞 (b) 波面収差測定結果

図 3.29 Mach-Zehnder 干渉計を用いたマイクロレンズの波面収差測定例 (レンズ形状: $\phi=62.5 \mu\text{m}$, 投影アパーチャーサイズ: $\phi=45 \mu\text{m}$)

それぞれ測定された収差 (RMS(λ)) は, 0.014 (レンズ形状: $\phi=62.5 \mu\text{m}$, 投影アパーチャーサイズ: $\phi=45 \mu\text{m}$), 0.049 (レンズ形状: $32 \times 32 \mu\text{m}^2$, 投影アパーチャーサイズ: $\phi=25 \mu\text{m}$) であり, Maréchal Criterion (マレシャル基準: $\Phi_{\text{RMS}} \leq \lambda/14; 0.071\lambda$), Rayleigh Criterion (レーリー基準: $\Phi_{\text{RMS}} \leq \lambda/4; 0.25\lambda$) の両方を満たす回折限界以下であることがわかる. ここでは, 測定されたレンズの性能の良否を判断する目的ではなく, あくまでどのような測定が可能であるかを示している.

(4) プロトタイプモデルでの課題

プロトタイプモデルでは, 以下のような課題が確認できた. 当初設計時点で認識していた項目は改良モデルへの反映し, 新たに発生した問題も同じく改良モデルへの反映をおこなうこととした.

1) プロトタイプ的设计時にすでに確認できていた課題

次ステップで開発を予定している改良モデルへの反映を行うこととした.

a) ハードウェアアパーチャーの径の任意選択ができない

投影するハードウェアアパーチャーの径が被検レンズの径 ($\phi=20 \mu\text{m} \sim \phi=500 \mu\text{m}$ を想定) に対応して連続的に任意の大きさを選べないため, 測定できる被検レンズが限られてしまう.

→ 投影するハードウェアアパーチャーの径を連続的に可変にできるような新たな投影光学系を開発する.

b) サンプル（被検レンズ）保持の安定性が悪い.

サンプル（被検レンズ）保持の安定性が悪いため測定再現性，安定性に欠ける.

→ サンプル（被検レンズ）を自重で保持できるよう，また基板サイズの大きなサンプルへも対応できるように干渉光学系を垂直に立てた構造に変更する.

c) プロトタイプモデルの水平設置面積が大きく操作性に難がある.

設計の自由度，さまざまな要素の検討を優先させたためプロトタイプモデルの水平設置面積が大きく操作性に難がある.

→ b)の課題への対応と同じく，干渉光学系を垂直に立てた構造に変更することで対応する.

2) プロトタイプの開発で新たに発生した課題

同じく次ステップで開発を予定している改良モデルへの反映を行うこととした.

d) CCD カメラ部の光学系の収差

CCD カメラでは，Mach-Zehnder 干渉部の参照光束と被検光束(サンプル光束)を合成するキューブビームスプリッター（10mm³）を通して被検レンズの瞳面を観察しているため，使用するレンズの収差が大きく鮮明な像が得られない. これは，より装置を小型化するために焦点距離の短いレンズを用いているために 10mm 厚のキューブビームスプリッターを通して観察すると大きな収差が発生することによる. (図 3.48, 3.49 (P.117 参照))

プロトタイプでは，暫定的にキューブビームスプリッターの代わりにペリクルミラー（t=20 μ m のフィルム状のミラー）を用いたが，耐久性，空気の揺らぎによる変形などの課題があり長期的な使用は難しいと判断した.

→ b)の課題への対応と同じく，干渉光学系を垂直に立てた構造に変更することで対応する.

→ 10mm厚のガラス越しに観察した場合に，収差の最適化がはかれる新規設計のCCD素子用対物レンズを試作し対応する.

図 3.30 にキューブビームスプリッターと CCD カメラ用撮像レンズのレイアウト状態を示す。CCD 撮像素子用のレンズは、10mm 厚のガラス越しに干渉縞（被検レンズの瞳面）を観察することになり、大きな収差（主に球面収差）により像のコントラストが大幅に低下する。

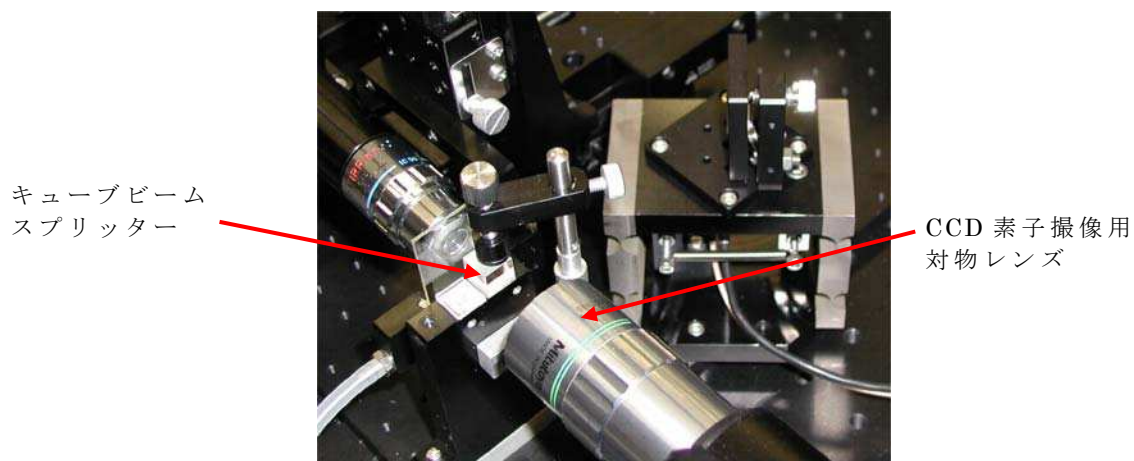


図 3.30 キューブビームスプリッターと CCD カメラ用撮像レンズ

(5) まとめ

プロトタイプモデルでは、光源と Mach-Zehnder 干渉部の間に設置したハードウェアアパーチャを被検レンズの瞳面に投影して干渉縞の生成領域を限定する、という基本的な効果の確認ができた。また、被検レンズのサイズなどの制約はあるが、ハードウェアアパーチャを用いた小径レンズの波面収差測定も可能になった。

サンプル保持の安定性、水平設置面積が大きく操作性がやや悪いというような課題もあるが、基本的な性能確認ができ、次ステップへの課題が明らかになった。

3.3.1.3 改良型 Mach-Zehnder 干渉計の開発

(1) 改良モデルの設計

プロトタイプモデルでは、光学ベンチ上に Mach-Zehnder 干渉計の光学系を水平にレイアウト（平面的に部品を配置）したため、被検レンズ（サンプル）の保持の安定性が悪い、水平設置面積が大きくなり操作性がやや悪い、さらには投影するハードウェアアパーチャーの径が連続的に任意の大きさを選べないため、測定できる被検レンズに限られてしまうというような課題もあった。また、新たな課題として、CCD カメラの撮像レンズの収差低減が新たな課題として顕在化した。

そこで、Mach-Zehnder 干渉計の光学系を垂直にレイアウトし、実用に供することができるレベルのモデルを改良型として再設計、試作し課題解決を試みた。

プロトタイプモデルからの最大の変更点は、従来光学定盤上に平面展開していた光学系を縦型とし、サンプルを平面で自重保持できる構成としたことにある。また、サンプルの測定時の光軸を微小に変化できるようにゴニオヘッド機構を付加し±約 1deg. 程度の傾斜を可能にした（これは、マイクロレンズが実際に使用される際の他のデバイスとの組み立て誤差を生じた際の性能の変化を把握する際に有効な測定になる）。さらに、測定範囲のレンズ径に対応して可変可能なハードウェアアパーチャーを被検レンズの瞳面に投影する絞り投影光学系を新規設計し導入した。これは、プロトタイプモデルに2枚のレンズを追加し、カップリングレンズと組み合わせ、合計3枚のレンズで被検レンズの瞳面にハードウェアアパーチャーを縮小投影できるようにするものである。絞り投影光学系の新規設計により、ハードウェアアパーチャーの対応範囲を拡大すると共に、装置サイズの縮小・小型化も狙った。

光源は同じく He-Ne レーザーを用い、参照光路、測定光路の光量比を任意に設定できるようアッテネーター光学系（1/2波長板、偏光ビームスプリッター、偏光板）を採用した。

表 3.4 にマイクロレンズ用波面収差測定装置（改良モデル）仕様を示す。基本的にプロトタイプで設定した仕様に準じている。被検レンズは、同じくサイズ（レンズ径）20 μm ~0.5mm 程度、NA は最大で 0.4~0.5（実効 F 値で 1.0~1.25）程度を想定した。ただ、大面積サンプル（マイクロレンズアレイ）の測定にも対応できるようにステージサイズは、6 インチウエハに対応できるように $\square 150\text{mm}$ とした。手動微調ステージ（XYZ）、傾き(Tilt) 調整機能も付加した。

光源（He-Ne レーザー）、ビームエキスパンダー、Spatial filter（空間フィルター：ローパスフィルター）、干渉部（Mach-Zehnder 光学系）はほぼ同一の設計とした。

ただ、参照光束と被検光束（測定光束）を合成するハーフミラーはキューブビームスプリッター（10mm³）をそのまま使用した。

表3.4 マイクロレンズ用波面収差測定装置仕様

干渉計タイプ	Mach-Zehnder(マッハ・ツェンダー)型干渉計
対物レンズ (カップリングレンズ)	20倍 NA(開口数): 0.40 W.D.(作動距離): 12.0mm 50倍 NA(開口数): 0.50 W.D.(作動距離): 10.6mm
観察レンズ	20倍 NA(開口数): 0.40 W.D.(作動距離): 21.5mm 50倍 NA(開口数): 0.42 W.D.(作動距離): 17.0mm ビームスプリッター(キューブプリズム) 対応設計
光源: 波長 (nm)	He-Ne レーザー: 632.8 nm (直線偏光)
レンズ径範囲	$\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$
サンプルサイズ	□150mm 以下
サンプリング画素	640 × 480 ピクセル
干渉縞モニター	14 インチモニター
サンプル位置決め	サンプルステージ: 6 インチ対応 手動微調ステージ (XYZ) 傾き(Tilt) 調整機能あり
ソフトウェア	市販の位相シフト解析ソフトウェアを使用
ハードウェア	市販の PC にインタフェースボードを追加し, ピエゾドライバ・ビデオデータ収集を制御
CCD カメラ	2/3・1/2・1/3・1/4 インチ (C マウント)
ハードウェアアパーチャー	$\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$ 径への連続可変対応構造

また、干渉計の参照光路、測定光路の波面合成用にキューブプリズムを用いる構成で対応可能な、CCD素子用撮像レンズを新規設計・製作した。CCDカメラの結像される干渉縞の画質を向上させ(10mm厚のキューブプリズムを通して被検レンズの瞳を観察した際に発生する収差を低減)、干渉縞の解析の精度を向上させた。

図 3.31 に改良型 Mach-Zehnder 干渉計の構造(右側面)を示す。正面中央(本図では左部)に被検レンズ保持部、カップリングレンズ、CCD 撮像光学系が上部に配置してある。右部最下部からの He-Ne 光源光を干渉部に至るまでに導くコリメータ

一、1/2 波長板，Spatial filter（空間フィルター：ローパスフィルター），新規設計し導入したハードウェアアパーチャ投影光学系等を配置してある．被検レンズの径に対応して連続可変が可能になり，装置サイズの縮小・小型化にも寄与している．

また，プロトタイプモデルで効果を確認した干渉計の参照光路，測定光路の光量比を任意に設定できるように，アッテネーター光学系（1/2 波長板，変更ビームスプリッター，偏光板）も採用した．

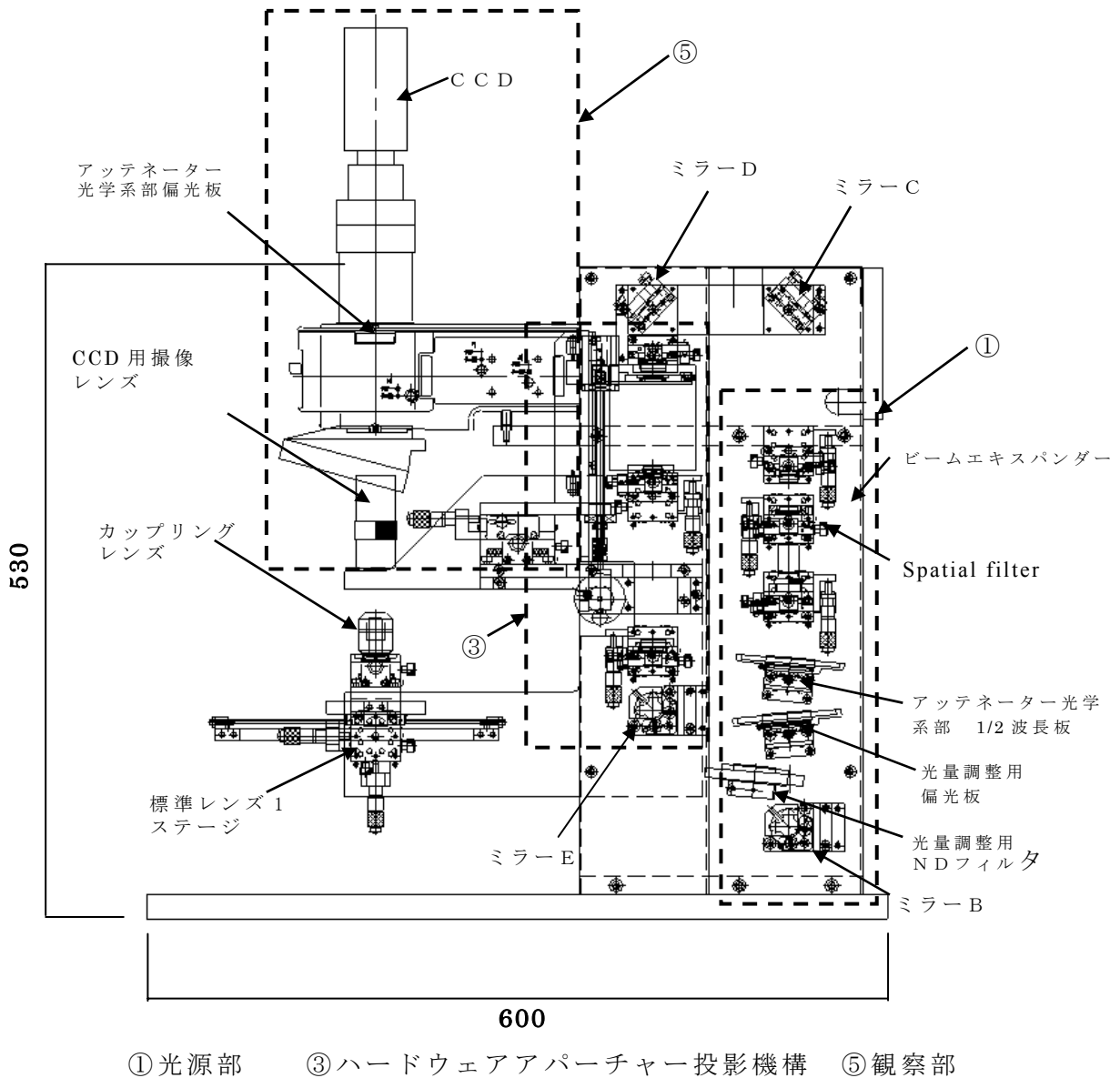
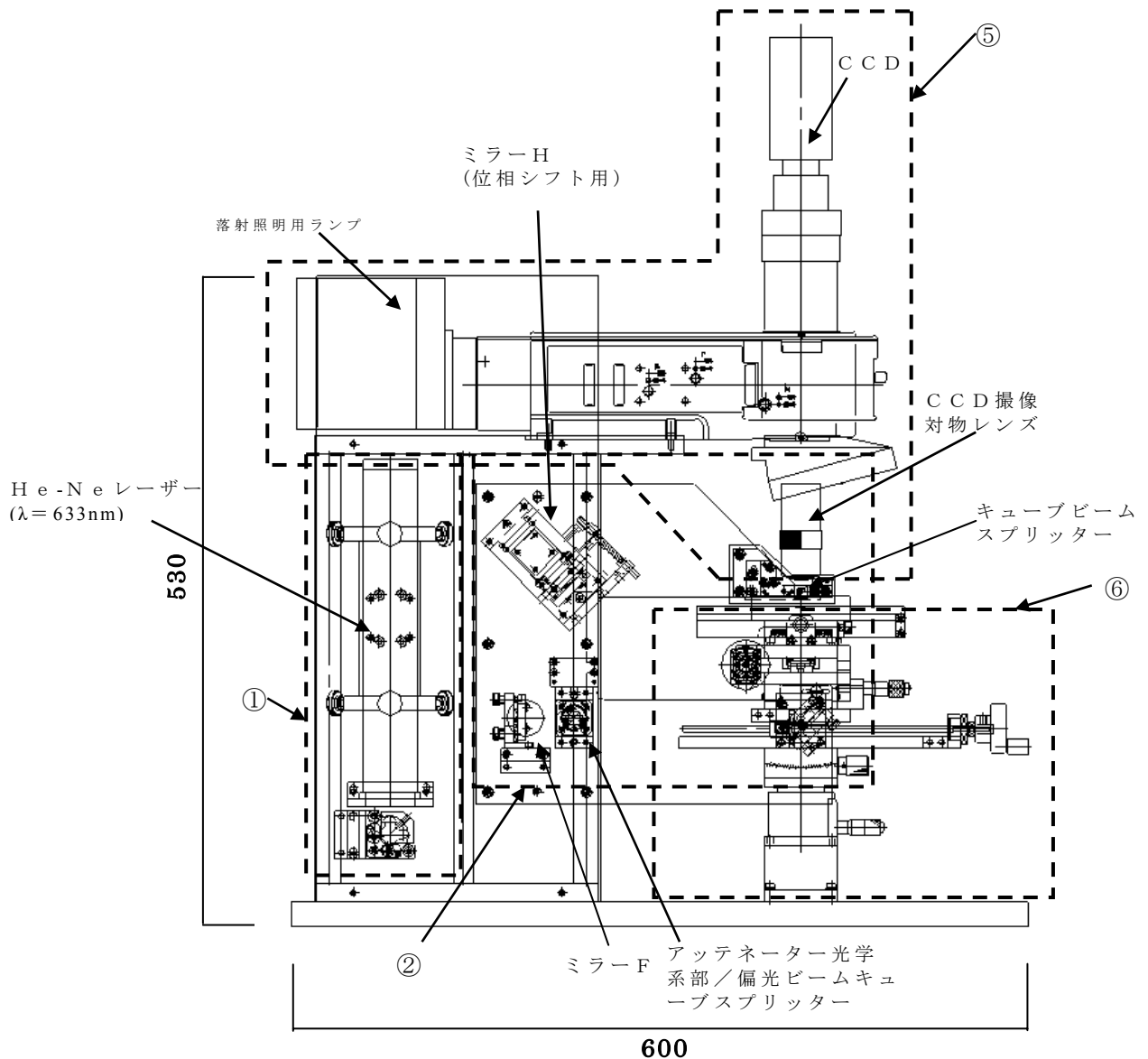


図 3.31 改良型 Mach-Zehnder 干渉計の構造（右側面）

図 3.32 に改良型 Mach-Zehnder 干渉計の構造（左側面）を示す．正面中央（本図では右部）にサンプルレンズ保持部，カップリングレンズ，キューブプリズム，CCD

撮像光学系が上部に配置してある。左部に He-Ne レーザー光源を配置し，光源光を左下端のミラーで本図裏面側（右側面）に導き干渉部に至るまでに導くコリメーター光学系，1/2 波長板，Spatial filter（空間フィルター：ローパスフィルター），絞り投影光学系等を配置してある。本図中央下部から光源光が光源側に戻り，偏光ビームスプリッターで測定光路と参照光路とに分割されている。参照光は，上部の PZT 素子に取り付けられたミラー（Phase Shift Mirror）で反射され測定光の波面と合成するキューブビームスプリッターへと導かれる。



- ①光源部 ②干渉部(Mach-Zehnder 干渉光学系)
 ④Phase Shift Mirror ⑤観察部 ⑥サンプルステージ

図 3.32 改良型 Mach-Zehnder 干渉計の構造（左側面）

測定光は、偏光ビームスプリッター内を直進し、下方のミラーで光路を90°曲げられカップリングレンズで集光され、同レンズの焦点位置に集光される。被検レンズは、カップリングレンズと同じ光軸上に焦点位置を合致させて配置される。この際に、絞り投影光学系で倍率を変換された絞りが、カップリングレンズでサンプルレンズの瞳位置に結像される。また、Mach-Zehnder干渉計の参照光、測定光の波面合成用にキューブプリズムを用いる構成に対応可能なCCD素子用撮像レンズを新規設計・製作し撮像側の収差(10mm厚のキューブプリズムを通して被検レンズの瞳を観察した際に発生する収差)を大幅に低減、フリッジ解析の精度を向上させた。

(2) ハードウェアアパーチャ投影光学系設計

Mach-Zehnder 干渉計(プロトタイプモデル)では、カップリングレンズの物体側空間に絞りを配置し、同レンズによる像を被検レンズの瞳に投影する方式で、ハードウェアアパーチャの投影に関する基礎実験を終了した。しかし開口数が大きく焦点距離の小さい被検レンズでは、絞りとカップリングレンズの距離が大きくなり実験機では投影ができないという問題が残された。そこで、改良型 Mach-Zehnder 干渉計の開発にあたり、新たなハードウェアアパーチャの投影光学系を検討した。

まず絞り投影光学系の基本的考え方を以下に示す。

(1) アフォーカル光学系の利用

最も簡単な光学系は第1レンズと第2レンズのアフォーカル光学系である。第1レンズに平行光束が入射し、第2レンズから射出した平行光束がカップリングレンズに入射する。ハードウェアアパーチャは第1レンズの物体側(光源側)に設置する。改良モデルでは、被検レンズの波面収差測定ができるためには、ハードウェアアパーチャの像はカップリングレンズの像側焦点の右側(光源から見れば後側)にできなければならない。

第1レンズの物体側焦点からはかったハードウェアアパーチャまでの距離を z_1 、焦点距離を f_1 、第2レンズの焦点距離を f_2 とする。第2レンズの像側焦点からハードウェアアパーチャの像位置までの距離 z_2' は(3.3.1.3.1)式で与えられる。

$$z_2' = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 z_1 \quad (3.3.1.3.1)$$

図 3.33 にアフォーカル系におけるハードウェアアパーチャー投影光学系のレイアウトを示す。

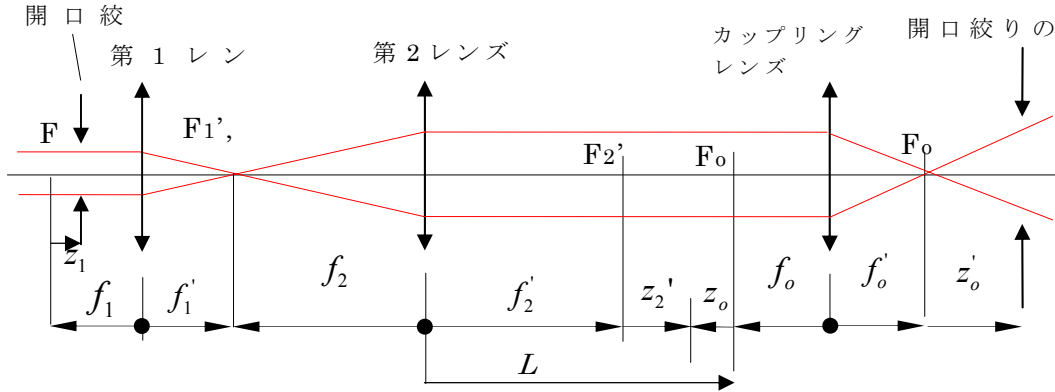


図 3.33 アフォーカル系における絞り投影

ここで L を第 2 レンズの射出瞳（像側主平面）からカップリングレンズの物体側焦点までの距離としたとき

$$z_o = f_2' + z_2' - L \quad (3.3.1.3.2)$$

カップリングレンズによるハードウェアアパーチャーの像位置 z_o' は

$$z_o' = \frac{f_o^2}{L - f_2' - (f_2/f_1)^2 z_1} \quad (3.3.1.3.3)$$

(3.3.1.3.3)式で与えられる。これを被検レンズの焦点距離の最大値 f_{\max}' に等しいと置けば、(3.3.1.3.4)式が得られる。

$$z_1 = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \left(L - f_2' - \frac{f_o^2}{f_{\max}'}\right) \quad (3.3.1.3.4)$$

ここで L は干渉計の機構設計上きまる距離である。またハードウェアアパーチャーが第 1 レンズに干渉しないためには

$$z_1 < f_1' \quad (3.3.1.3.5)$$

の関係でなければならない。

(3.3.1.3.4), (3.3.1.3.5)式から(3.3.1.3.6) 式が得られる.

$$f_1' < \frac{f_2'^2}{L - f_2' - f_0'^2/f_{\max}'} \quad (3.3.1.3.6)$$

例えば $L = 450 \text{ mm}$, $f_2' = 100 \text{ mm}$, $f_{\max}' = 2 \text{ mm}$ とすると, カップリングレンズの焦点距離 f_0' に対して第 1 レンズの焦点距離のとりうる値は図 3.34 のようになる. カップリングレンズの最小焦点距離は 3.6 mm であるので, 第 1 レンズの焦点距離が 28.6 mm 以下であれば(3.3.1.3.6)式を満足する. ハードウェアアパーチャーを設置可能な機械的余裕を見て仮に $f_1' = 25 \text{ mm}$ とする. このとき(3.3.2.4)式を用いて z_0' が 2 mm になるハードウェアアパーチャーの位置 z_1 の値を計算した結果を図 3.35 に示す.

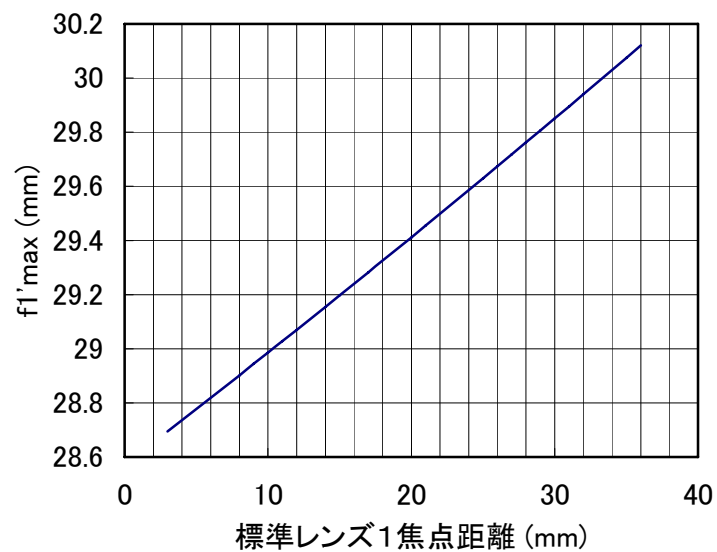


図 3.34 第 1 レンズ焦点距離の範囲

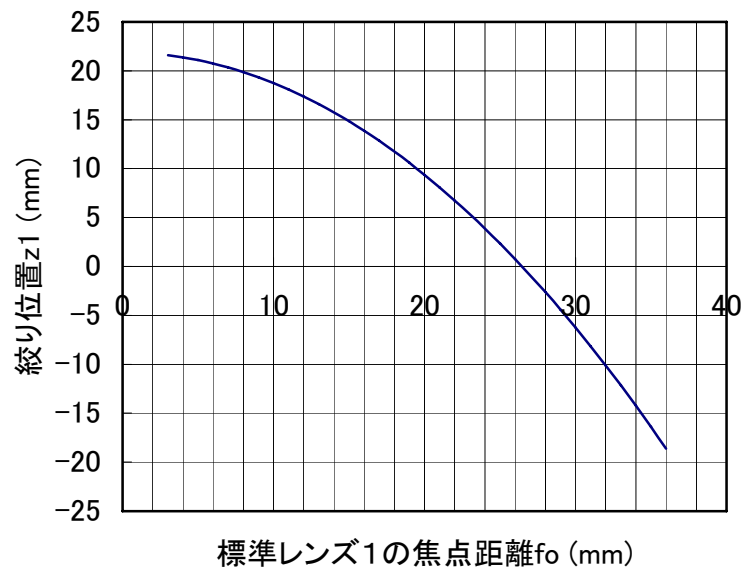


図 3.35 $z_o' = 2 \text{ mm}$ に対するハードウェアアパーチャーの位置

このアフォーカル系ではハードウェアアパーチャーが左側無限遠にあるときその像はカップリングレンズの像側焦点面にできる．しかし実際には無限遠に置くことはできない．いま(3.3.1.3.3)式の左辺が被検レンズの焦点距離の最小値 f'_{\min} に等しいとすれば(3.3.1.3.7) 式であらわされる．

$$z_1 = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \left(L - f_2' - \frac{f_o'^2}{f'_{\min}} \right) \quad (3.3.1.3.7)$$

ここで仮に $f'_{\min} = 0.01 \text{ mm}$ とした時，カップリングレンズの焦点距離に対するハードウェアアパーチャーの位置を図 3.36 に示す．カップリングレンズの焦点距離が 4 mm 以内であればハードウェアアパーチャーの移動距離は 100 mm 程度に納めることができるが，被検レンズの焦点距離が 0.01 mm 以下になるとハードウェアアパーチャーの移動距離が大きくなってしまう．また使用できるカップリングレンズの焦点距離が非常に短いものだけに限定されてしまうので，汎用性に問題が出てくることが考えられる．

このアフォーカル系ではハードウェアアパーチャーの位置に関係なくカップリングレンズからでる光束の開口角は絞りの径できまるという特長がある．換言すれば被検レンズの開口数に対応した径の絞りを用意すればよいことになる．

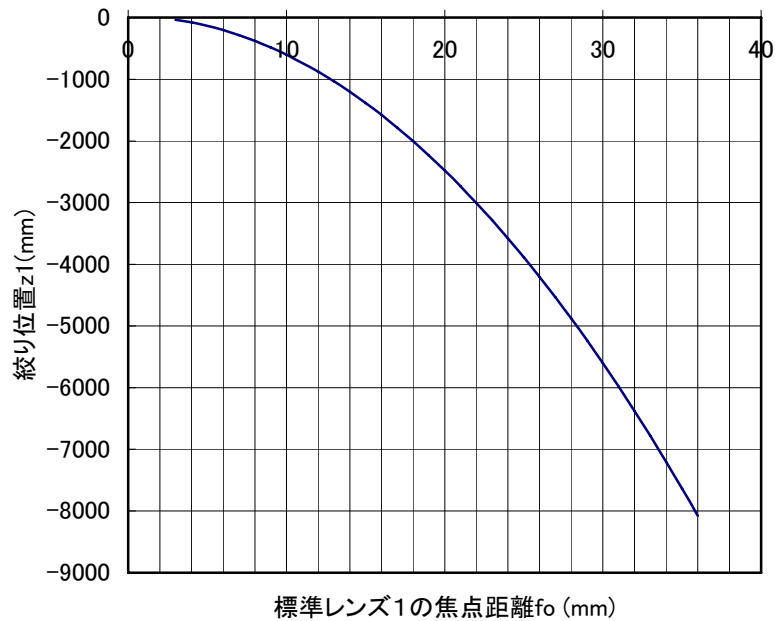


図 3.36 $f'_{\min}=0.01\text{mm}$ の時のハードウェアアパーチャーの位置

(3) 非アフォーカル光学系

第 1 レンズと第 2 レンズがアフォーカル系でない場合にはハードウェアアパーチャーの左方向への移動量を減らすことができる。すなわち第 1 レンズの像側焦点と第 2 レンズの物体側焦点が d だけ光軸方向にずれている場合である。この場合第 1 レンズの左側に平行光束を集光するレンズが必要である。図 3.37 に示すレイアウトで考えると以下の関係が導出される。

$$z_1 z_1' = f_1 f_1' \quad (3.3.1.3.8)$$

$$z_2 z_2' = f_2 f_2' \quad (3.3.1.3.9)$$

$$z_1' = d + z_2 \quad (3.3.1.3.10)$$

(3.3.1.3.8)～(3.3.1.3.9)式より(3.3.1.3.10)式が導かれる。

$$z_2' = \frac{f_2 f_2'}{z_1' - d} = \frac{f_2^2 z_1}{f_1^2 + z_1 d} \quad (3.3.1.3.11)$$

(3.3.1.3.2)式と(3.3.1.3.11)式より, (3.3.1.3.3)式のように変形すると(3.3.1.3.12)式が得られる.

$$z_o' = \frac{f_o^2}{L - f_2' - f_2^2 z_1 / (f_1^2 + z_1 d)} \quad (3.3.1.3.12)$$

これより(3.3.1.3.4)式のように変形すると(3.3.1.3.13)式が得られる.

$$z_1 = \frac{L - f_2' - (f_o^2 / f_{\max}')}{f_2^2 - \{L - f_2' - (f_o^2 / f_{\max}')\} d} f_1^2 \quad (3.3.1.3.13)$$

ハードウェアアパーチャがレンズにぶつからないためには(3.3.1.3.6)式に対応して(3.3.1.3.14)式が導かれる.

$$f_1' \leq \frac{f_2'^2}{L - f_2' - (f_o^2 / f_{\max}')} - d \quad (3.3.1.3.14)$$

ここで

$$z_0 = -\frac{f_1^2}{d} \quad (3.3.1.3.15)$$

であるが, $z_1 = z_0$ のときハードウェアアパーチャの像はカップリングレンズの像側焦点位置にできる. 換言すれば, ハードウェアアパーチャの像位置をカップリングレンズの像側焦点面に合致させることができるので, 原理的に被検レンズの焦点距離はどんなに短くてもよいことになる. アフォーカル系の場合と同様 $f_{\max}' = 2 \text{ mm}$ とすれば(3.3.1.3.14)式から $f_1' < 28.7 - d \text{ [mm]}$ の関係が得られる. 仮に $d = 8 \text{ mm}$, $f_1' = 20 \text{ mm}$ とすれば, $z_0 = -50 \text{ mm}$ となる. この条件でカップリングレンズの焦点距離に対する絞り位置を計算した結果を図 3.38 に示す. -50 mm からこのグラフで示される位置までがハードウェアアパーチャの移動範囲である. カップリングレンズの焦点距離が短くなると移動範囲は大きくなる.

図 3.37 に非アフォーカル系におけるハードウェアアパーチャ投影光学系のレ

イアウトを示す。

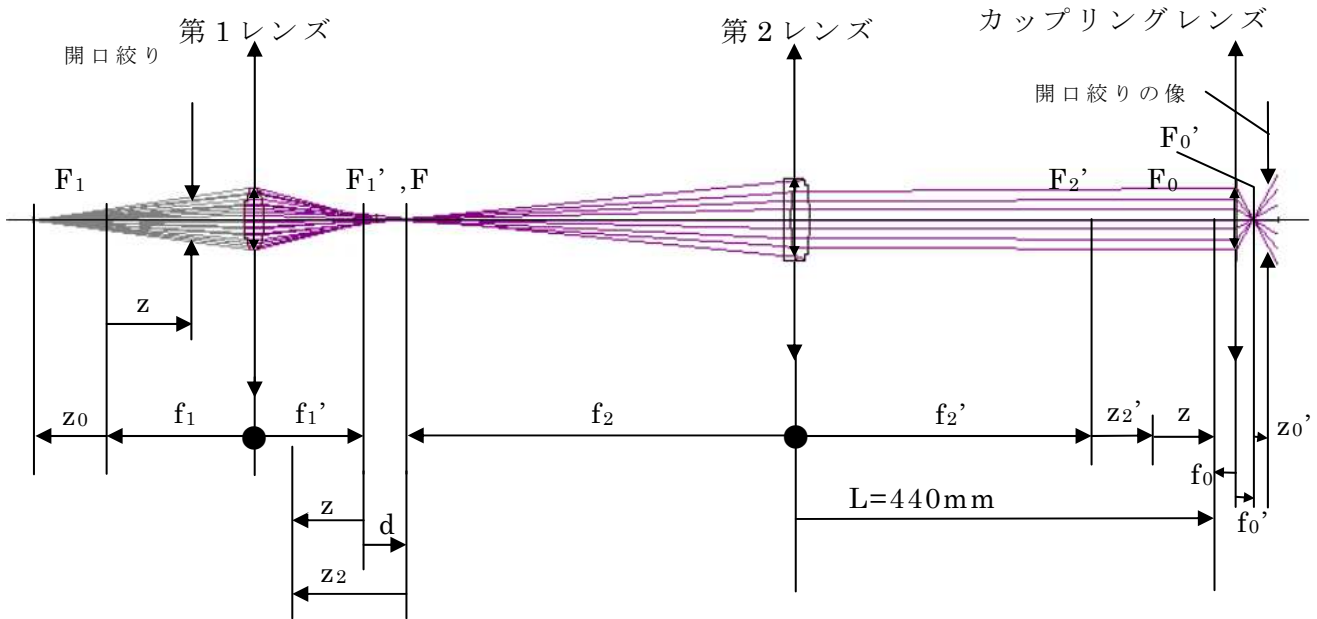


図 3.37 非アフォーカル光学系

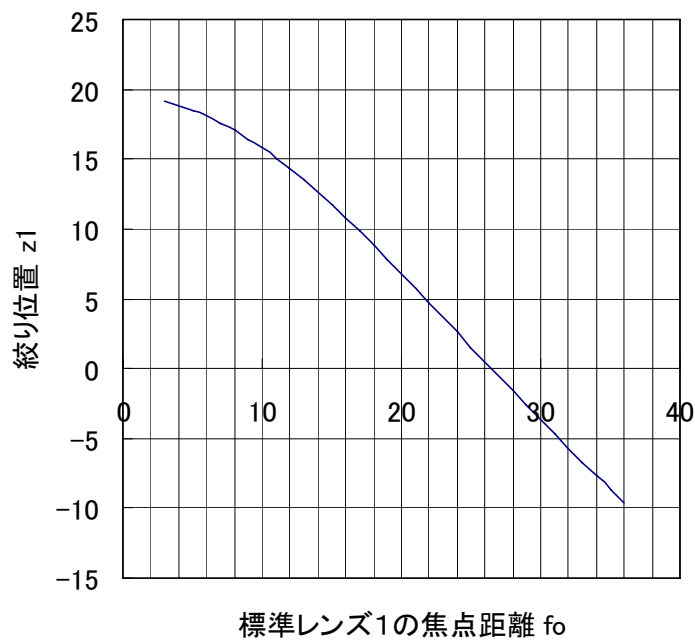


図 3.38 $z_0' = 2 \text{ mm}$ に対するハードウェアアパーチャーの位置

この系では被検レンズの焦点距離の短い方は 0 まで対応可能で、ハードウェアアパーチャーの移動範囲を小さくすることができる。しかし被検レンズの開口数と焦点距離に見合った絞り径を選択する必要がある。

(3) 改良モデルの試作

図 3.39 には実際に試作した改良型 Mach-Zehnder 干渉計の外観（内部構造）を示す。大きくは，光源部（Light source），コリメーター部（Collimator optical unit），ハードウェアアパーチャー投影光学系，Mach-Zehnder 干渉計部（Mach-Zehnder optical unit），サンプルステージ部，CCD カメラ部（CCD camera）の 6 つのブロックで構成されている。コリメーター部と Mach-Zehnder 干渉計の間に可変開口選択が可能なハードウェアアパーチャー（Projection Aperture）を配置した。ハードウェアアパーチャーは，使用するカップリングレンズ（Coupling lens）の焦点距離，被検レンズ（Test microlens）の直径（レンズサイズ） $\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$ への対応，焦点距離に応じてアパーチャー径を変え被検レンズの瞳面上にその像を投影することができる。干渉縞の位相を変化させるための Phase shift mirror は PZT（Piezoelectric transducer）素子に取り付けてあり，プロトタイプと同じく PZT 素子への印加電圧の変化で前後に移動させることができる。

プロトタイプが光学定盤上に水平に光学系が構築されていたのに比べ，サンプルを水平ステージに自重で保持するために光軸をベンチに垂直に構成したため設置面積が大幅に小さくでき小型化を図れた。同時に操作性も向上している。

また，図 3.40 には改良型 Mach-Zehnder 干渉計の外観を示す。プロトタイプに比べ大幅に小型化がはかれ，実用に近いモデルになったことがわかる。

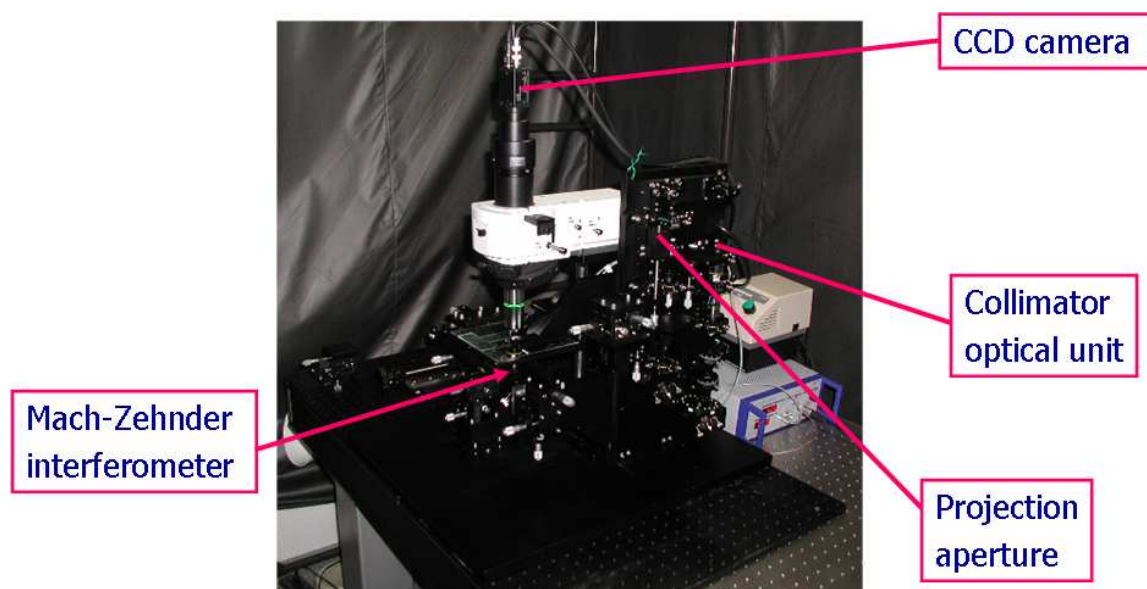


図 3.39 マイクロレンズ用改良型 Mach-Zehnder 干渉計（内部構造）

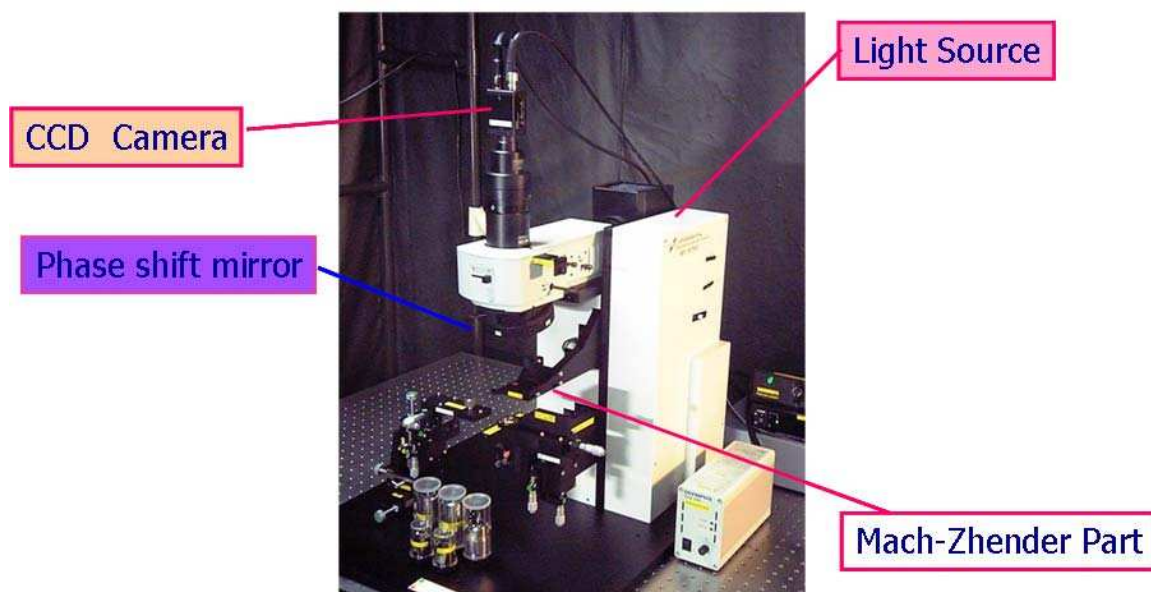


図 3.40 マイクロレンズ用改良型 Mach-Zehnder 干渉計（外観）

a) ハードウェアアパーチャー投影光学系

図3.41に試作したハードウェアアパーチャー投影光学系を示す.

可変開口選択が可能なハードウェアアパーチャーは、第 3 章 3.1.3 節、(2)項に示した設計結果に基づき非アフォーカル光学系を採用した。図 3.41 では、コリメーターからの光束が上部から入射されるため、上から順にハードウェアアパーチャー、第 1 レンズ、第 2 レンズで構成されている。被検レンズの NA に応じてハードウェアアパーチャーの開口サイズを変更する必要があるが、基本的には、被検レンズの直径（レンズサイズ） $\phi=20\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}(0.5\text{mm})$ への対応が可能になった。被検レンズの瞳面上のハードウェアアパーチャーの投影径は、アパーチャーを上下に移動することで変更が可能である。この機構の導入により、アパーチャー径選択の自由度の拡大、大幅な操作性の向上が図れた。

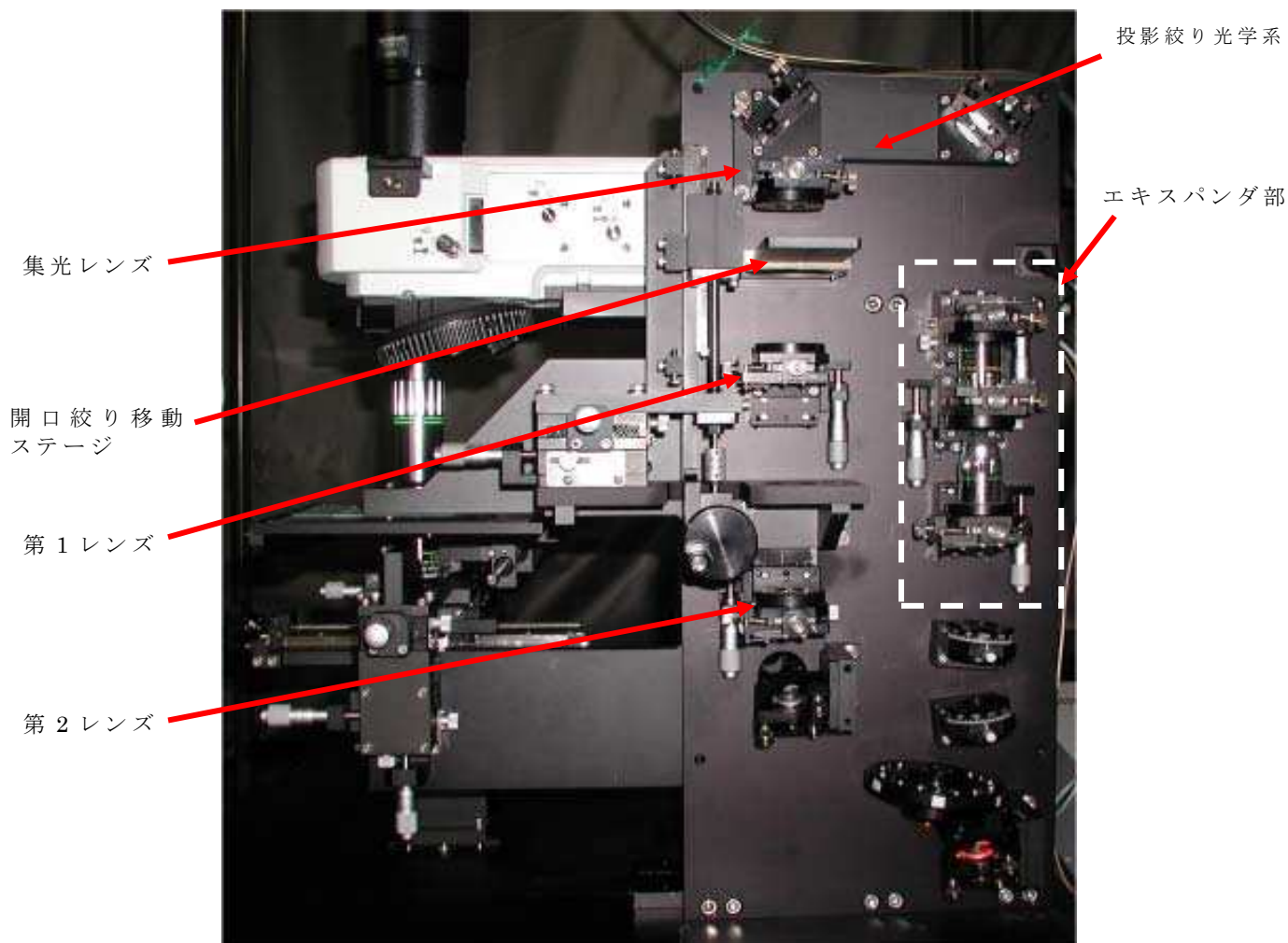


図3.41 ハードウェアアパーチャ投影光学系

b) キューブビームスプリッター対応可能なCCD素子用撮像レンズ

キューブビームスプリッター対応可能な CCD 素子用撮像レンズを新たに設計し試作した。図 3.42 にキューブビームスプリッター部と新たに作製した CCD 素子用撮像レンズの外観を示す。このように 10mm^3 のキューブビームスプリッターを用いた構成での測定が可能になった。

また図 3.43 から図 3.45 に CCD 素子用撮像レンズの収差曲線(球面収差)を示す。図 3.43 に示した CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 1 (球面収差) は、被検物とレンズ間は空気に対応したオリジナルレンズの収差で、このままの使用では全く性能上の問題は無い。しかし、図 3.44 に示した CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 2 (球面収差) は、同レンズを用いて被検物とレンズの間に 10mm 厚の透明ガラスを入れ

た場合の収差を示す。像高が高くなると球面収差が極端に大きくなっていることがわかる。言い換えると、像高が高くなるにつれ焦点面がずれてくるため画像のコントラストが悪くなってくる。それに対し、図 3.45 に示した CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 3（球面収差）は、被検物とレンズの間に 10mm 厚の透明ガラスを挟んだ場合に収差が小さくなるような設計を行ったものである。

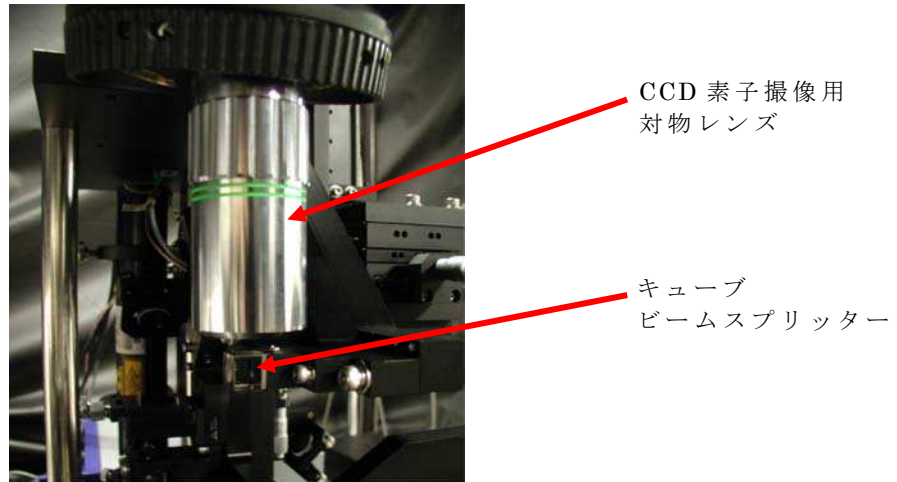


図 3.42 キューブビームスプリッター部と CCD 素子用撮像レンズ

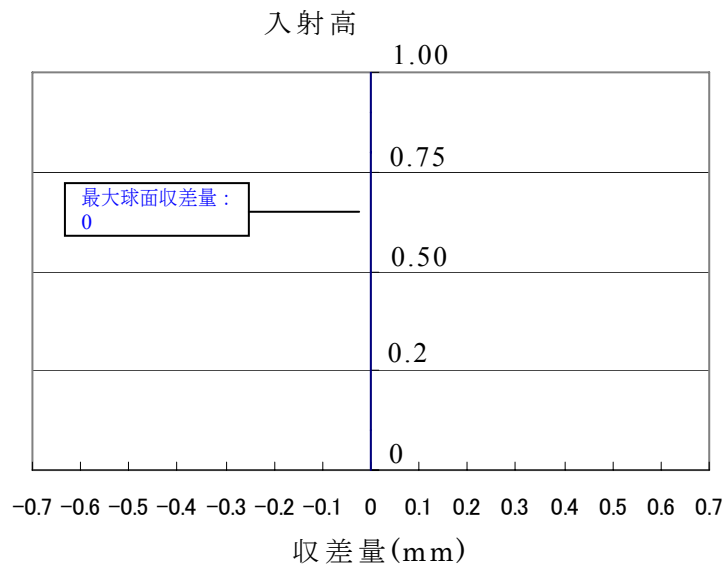


図 3.43 CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 1（球面収差）
オリジナルレンズの収差（被検物とレンズ間は空気に対応）

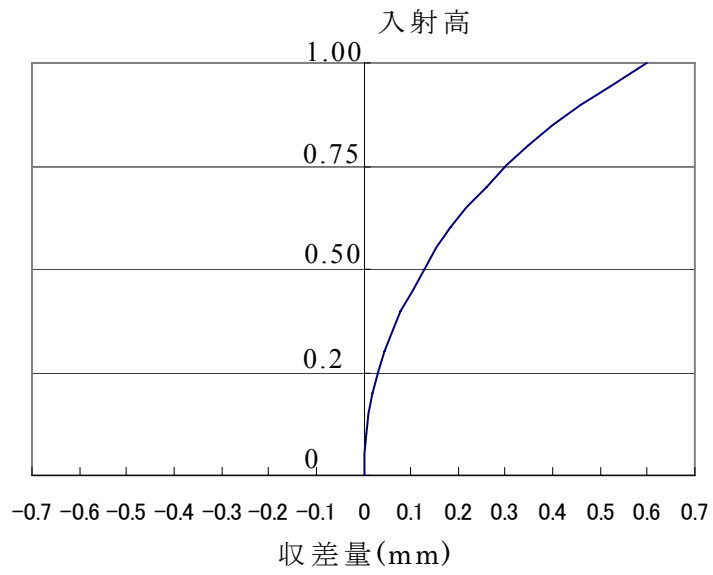


図 3.44 CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 2 (球面収差)
被検物とレンズ間に 10mm 厚のガラスを入れた場合

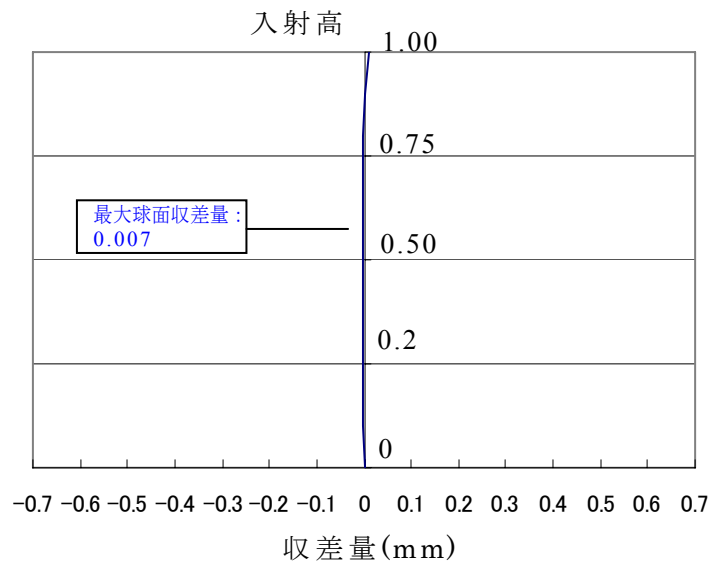


図 3.45 CCD 素子用撮像レンズの収差曲線 3 (球面収差)
新規設計レンズ (被検物とレンズ間に 10mm 厚のガラスを入れた場合)

(4) 改良モデルでの測定

作製した改良モデルを使用し特性確認をおこない以下の項目の確認を行った。

- ①縦型光学系を用いた干渉計の基本機能の確認と性能確保
→ 基本機能には特に問題は無く、設計どおりに機能した。
- ②サンプルの平面保持（自重保持）機構（ $\square 150\text{mm}$ 大型ステージ）の安定動作確認
→ 基本機能には特に問題は無く、設計どおりに機能した。
- ③サンプルの光軸を微小に変化できるゴニオヘッド機構（ \pm 約 1deg.）の動作確認
→ 特に問題は無く、設計どおりに機能した。
- ④絞り投影光学系の開口投影性能（レンズサイズ $\phi 20\sim 500\mu\text{m}$ への対応）評価
→ 基本機能には特に問題は無く、設計どおりに機能した。
(a) ハードウェアアパーチャの投影光学系の項参照
- ⑤キューブプリズム対応可能な CCD 素子撮像用対物レンズの性能評価
→ 基本機能には特に問題は無く、設計どおりに機能した。
(b) キューブビームスプリッター対応可能な CCD 素子用撮像レンズの項参照
- ⑥アッテネーター光学系（1/2 波長板，偏光ビームスプリッター，偏光板）の効果確認
→ 特に問題は無く，設計どおりに機能し，干渉縞のコントラストが向上した。

以下，ハードウェアアパーチャの投影光学系とキューブビームスプリッター対応可能な CCD 素子用撮像レンズの効果について整理する。

(a) ハードウェアアパーチャの投影光学系

新たに作製したハードウェアアパーチャの投影光学系は，連続的に投影サイズを変更することができ，当初の目的を達成した。

図 3.46 に改良型 Mach-Zehnder 干渉計での被検レンズへのアパーチャー形成と波面収差測定結果を示す。φ=125μm 径のマイクロレンズアレイサンプルから選択した特定のマイクロレンズ上に、φ=120μm, φ=95μm, φ=70μm, φ=60μm, φ=30μm と 5 種類の開口を形成し、波面収差 (PV(λ), RMS(λ)) を測定した。たまたま、本サンプルは開口を小さくすると波面収差が小さくなる傾向が確認できたが、このようにハードウェアアパーチャーを被検レンズの瞳面上に投影して、外乱光を小さくしての測定が可能になり、その効果が確認できた。実際には、ここまで開口を絞って使用することは少ないが、測定時の径を変化させて測定することで実使用時の性能評価が確実にできるため、その効果は大きい。

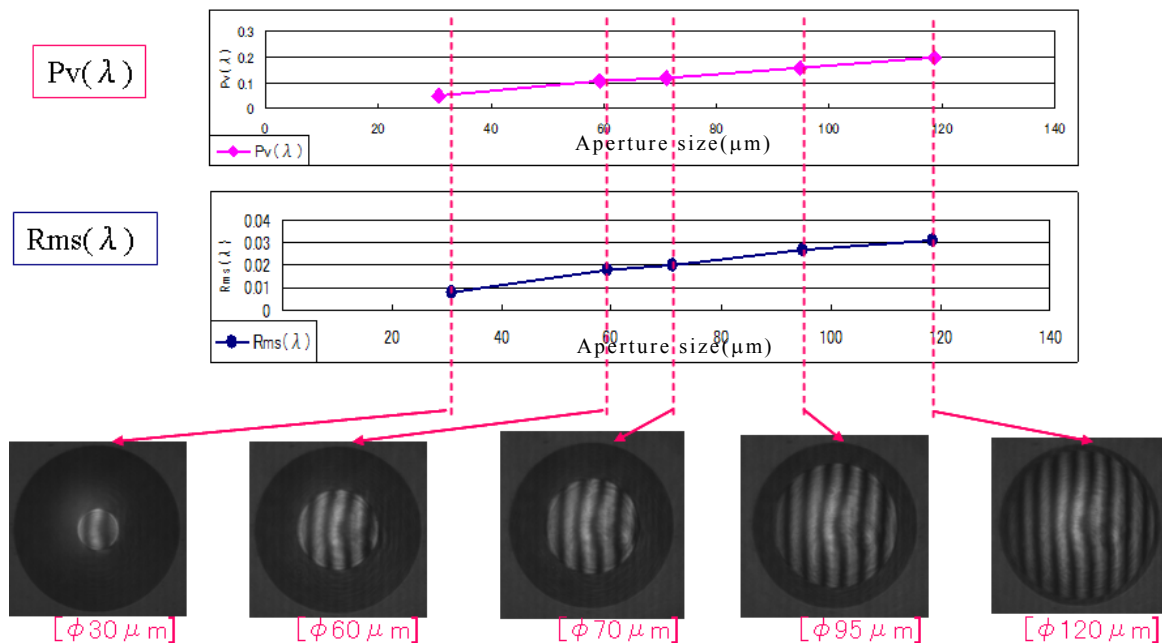


図 3.46 改良型 Mach-Zehnder 干渉計での被検レンズへのアパーチャー形成と波面収差測定結果 (φ=125μm マイクロレンズアレイサンプル使用)

図 3.47 に改良型 Mach-Zehnder 干渉計での波面収差測定例を示す。マイクロレンズアレイサンプル (φ=62.5μm) 使用して測定した。CCD 素子用撮像レンズの性能が大幅に向上したため、干渉縞のコントラストが大幅に向上している。

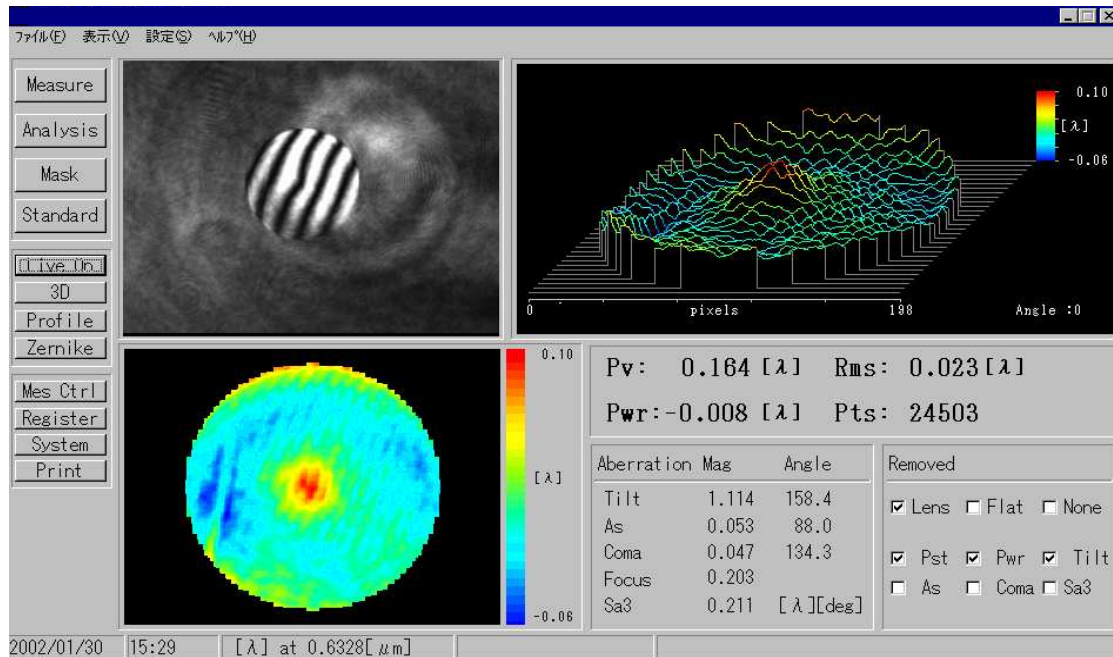


図 3.47 改良型 Mach-Zehnder 干渉計での波面収差測定例
 ($\phi=62.5\mu\text{m}$ マイクロレンズアレイサンプル使用)

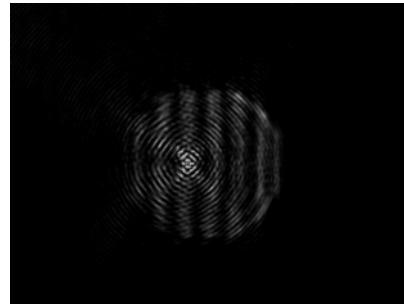
(b) キューブビームスプリッター対応可能な CCD 素子用撮像レンズ

キューブビームスプリッター越しで被検レンズを観察すると、プロトタイプモデルの試作結果の項で報告したが、図 3.48 に示すように被検レンズの表面(図 3.48(a))、干渉縞(図 3.48(b))とも、非常にコントラストが悪い画像しか得られていなかった。これは、CCD カメラ用の撮像レンズが 10mm 厚のキューブビームスプリッターへの対応を考慮した設計がなされていなかったためであった。そこで、10mm 厚のキューブビームスプリッターを通して観察した場合に、収差量が少なくなるように最適化したしたレンズを新たに設計し、その効果を確認した。

新たに試作した CCD カメラ用の撮像レンズを用いた場合の画像を図 3.49 に示す。被検レンズの表面(図 3.49(a))、干渉縞(図 3.49(b))とも、非常にコントラストがあがりクリアな画像が得られるようになった。図 3.49(b)の平行な干渉縞パターンに重畳されていたフレネル回折が原因と思われる細かいリング状のノイズも殆ど消失し、干渉縞の解析には問題ないレベルのコントラストが得られるようになった。

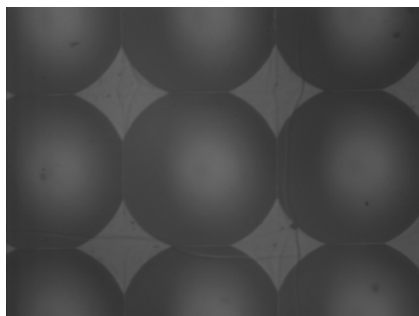


(a) 被検レンズ表面像

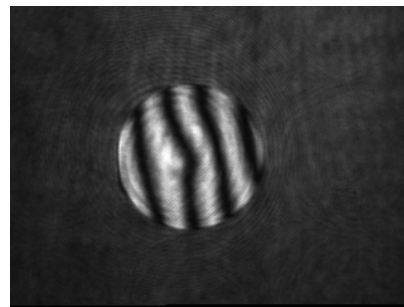


(b) 干渉縞

図 3.48 キューブビームスプリッター越しの CCD カメラ画像 (撮像レンズ改良前)
(サンプル: $\varphi=62.5\mu\text{m}$ レンズ)



(a) 被検レンズ表面像



(b) 干渉縞

図 3.49 キューブビームスプリッター越しの CCD カメラ画像 (撮像レンズ改良後)
(サンプル: $\varphi=62.5\mu\text{m}$ レンズ)

(5) Mach-Zehnder 干渉計の測定安定性

次に、改良型 Mach-Zehnder 干渉計での波面収差測定の安定性を確認した。マイクロレンズアレイサンプル ($\varphi=240\mu\text{m}$) 使用して測定した。

図 3.50 に改良型 Mach-Zehnder 干渉計の波面収差 ($\text{RMS}(\lambda)$) の連続測定での安定性を示す。平均値: 0.0517, 標準偏差: $\sigma=0.000471$, 一般に干渉計の精度検証の際に用いられる安定度を評価する指標である 4σ は 0.00188 であり, 高い安定性があることが確認できた。

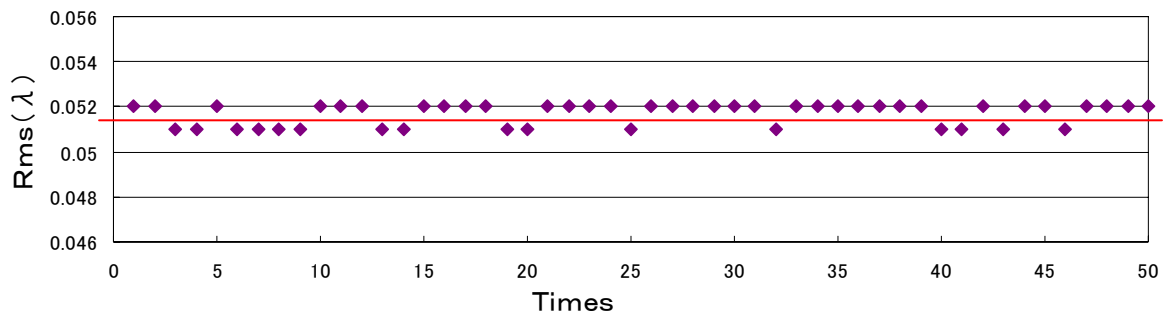


図 3.50 Mach-Zehnder 干渉計の測定安定性（連続測定）

さらに、経時的な安定性を評価するために、同じように 30 秒間隔のインターバルを置いての連続測定を行った。その結果を図 3.51 に示す。同じく、平均値：0.0535，標準偏差： $\sigma=0.000706$ ，一般に干渉計の精度検証の際に用いられる安定度を評価する指標である 4σ は 0.00283 であった。単純な連続測定に比べると、若干ばらつきが大きくなっているが、標準偏差（ 4σ ）は 0.03 以下であることから、実用的には特に問題ないレベルと言える。ただし、光源の変動，測定環境では空調による空気の揺らぎ，温度変化の影響などの影響も考えられるため，装置の製品化の際にはさらに詳細な検証が必要になる。

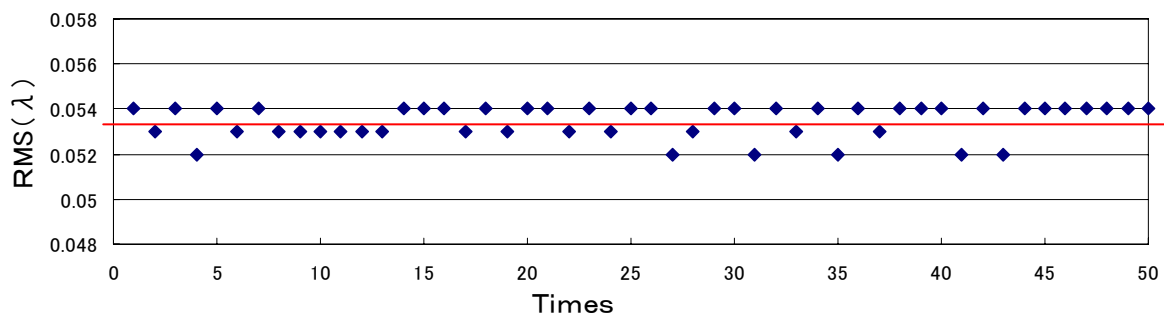


図 3.51 Mach-Zehnder 干渉計の測定安定性（30 秒間隔で連続測定）

3.3.2.3 Mach-Zehnder 干渉計の測定誤差検討

ここでは、改良型 Mach-Zehnder 干渉計で測定した波面収差の誤差が発生すると思われる、干渉計の光源の収差、カップリングレンズの収差、系全体の収差の3項目について検証をおこなった。

(1) Mach-Zehnder 干渉計光源の収差検討

今回使用した Mach-Zehnder 干渉計の光学系は、光源からの光束を、ビームスプリッターで2分割をし、参照光束、被検光束に分割し再度ビームスプリッターで合成し干渉縞を生成している。被検光束側は、カップリングレンズで収束光を被検レンズに入射させているため、測定する被検レンズの NA に依存するが、カップリングレンズに入射する使用される光束径は2~3mm 程度になることが多い。一方参照光の光束径は、実際の被検レンズ径の大きさの光束を用いて干渉させることになり、両者の干渉に使用する光束径は大きな差が生じていることになる。これは、今回用いた Mach-Zehnder 干渉計の光学系特有の現象であるが、さまざまな検討の結果選択した光学系であるため、それがすぐに課題と言うことではない。

そこで、実際に本干渉計の光源の波面収差の測定を行い、どの程度の差が生じているかを確認した。

今回開発した Mach-Zehnder 干渉計の光源部にミラーを挿入し、光路を別の Mach-Zehnder 干渉計に導き波面収差を測定した。光源の波面収差測定用には同じ Mach-Zehnder 干渉方式であるが、装置設置上の制約等を考慮して入射光束を二分割し、うち一方はピンホールを介して参照光となる基準波面を生成するタイプを用いた。

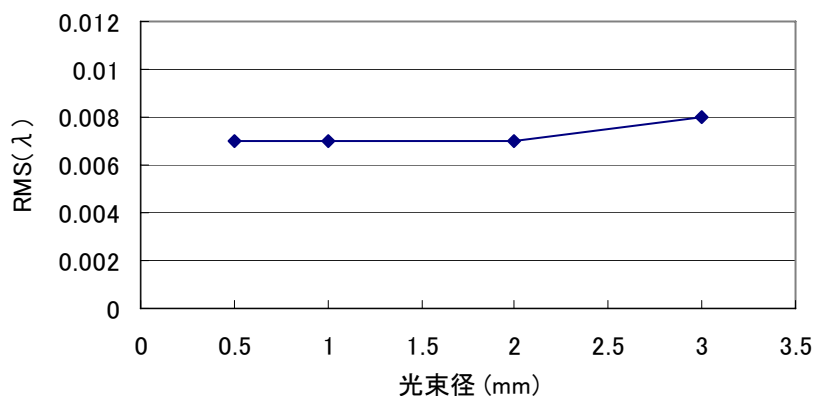


図 3.52 Mach-Zehnder 干渉計の照明光源部の直径と波面収差

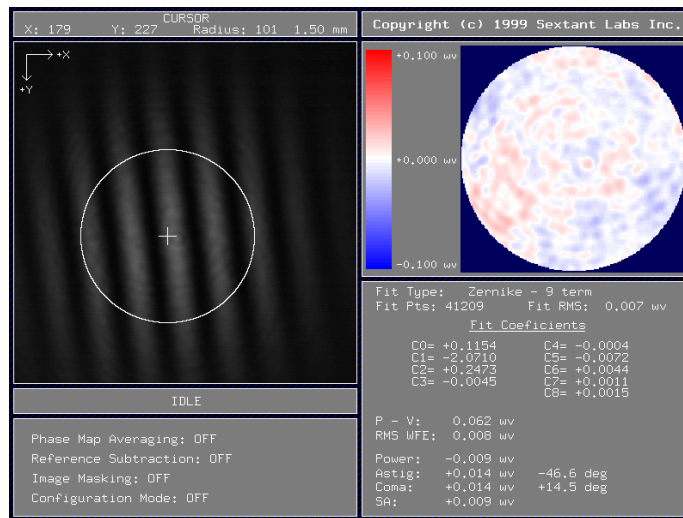


図 3.53 Mach-Zehnder 干渉計の照明光源部の波面収差測定例

図 3.52 には, Mach-Zehnder 干渉計の照明光源部の直径と光源自身が持つ波面収差の関係を示す. 光束径を $\phi=3\text{mm}$ から $\phi=0.5\text{mm}$ まで変化させた際の差は, 0.001RMS であり実用的には問題ない範囲にある. 図 3.53 には, その際の干渉縞(フリンジ)の例を示す. 全体が直線状になっており収差の絶対値も小さいことがわかる.

また, 図 3.54 に測定光束内部の波面収差分布の測定結果を示す. 光束径を $\phi=5\text{mm}$ に拡大し, $\phi=2\text{mm}$ の径のサンプリング領域を移動して測定した. 中央のほか上下, 左右の 5 か所で測定した結果, $0.006\lambda \sim 0.009\lambda$ (RMS) であり, これも実用的には問題ない範囲にある. さらに, 図 3.55, 図 3.56 にその際の干渉縞(フリンジ)の例を示すが, 全体が直線状になっており収差の絶対値も小さい.

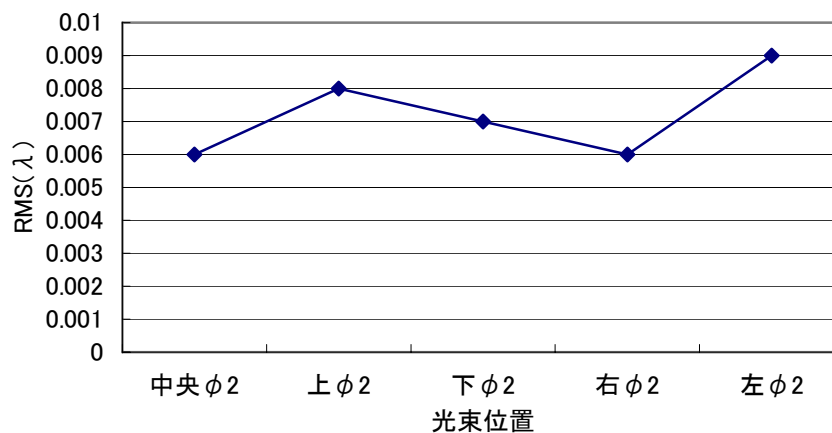


図 3.54 Mach-Zehnder 干渉計の照明光源の光束内の位置と波面収差

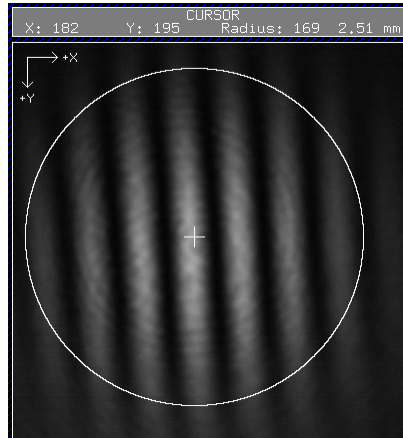


図 3.55 測定光（全光束）の干渉縞($\phi=5\text{mm}$)

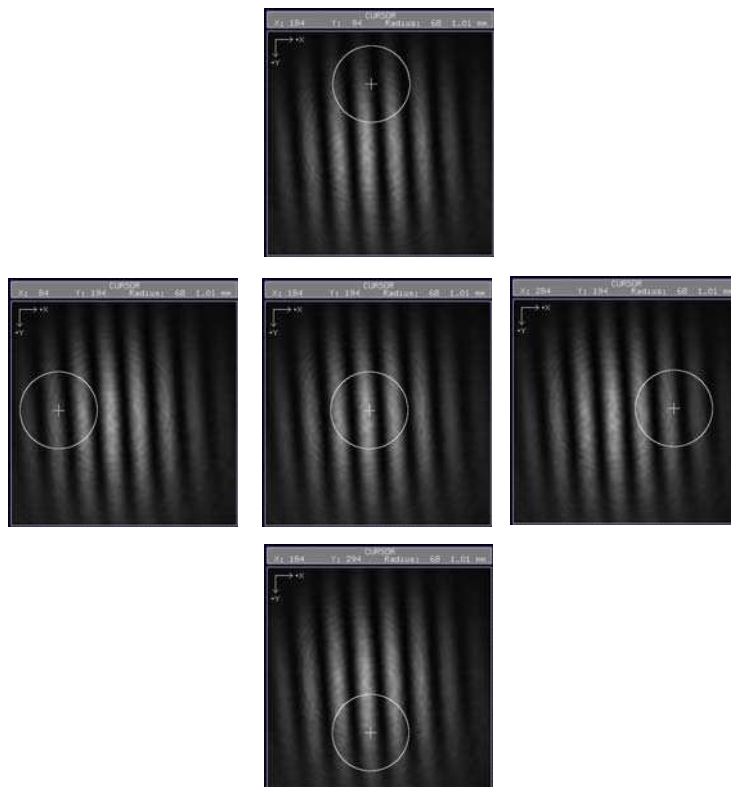


図 3.56 Mach-Zehnder 干渉計の照明光源の波面収差測定的光束内の位置

(2) カップリングレンズの精度検証

被検レンズの波面収差測定には、カップリングレンズの使用が必須になるが、その特性の良否によっては、測定結果に影響を及ぼすことが考えられる。カップリングレンズには、顕微鏡対物レンズを用いているため実用的には無視できる範囲の波面収差を持つことが推定できるが、固有の収差がどの程度であるかを把握し、無視できる範囲であるかどうかの確認をおこなった。

a) 方法

同種 3 本のレンズを用いた波面収差測定

O 社製 顕微鏡レンズ ULWD MIRPlan50× (0.55 $\infty/0$ $f = 180\text{mm}$) を 3 本使用して測定を行い、各レンズの波面収差を求めた。

・測定環境

- ・カップリングレンズ : O 社製 顕微鏡レンズ ULWD MIRPlan50× (0.55 $\infty/0$ $f = 180\text{mm}$)
- ・ CCD カメラ : SONY XC-ST70 (カバーガラス無し) 2/3 インチ
- ・ 干渉計 : プロトタイプモデルを使用 (参照光と測定光の合成はペリクルフィルムを用い CCD 素子の撮像レンズの収差の影響を受けないようにした。

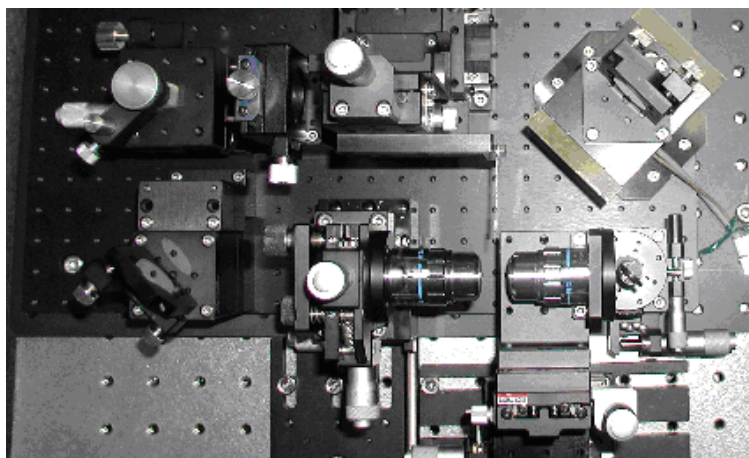


図 3.57 カップリングレンズの波面収差測定

図 3.57 にカップリングレンズの波面収差測定時のレイアウトを示す。3 本のカップリングレンズを順に 2 本ずつ組み合わせ測定を行った。

1. No.1 レンズ + No.2 レンズ
2. No.2 レンズ + No.3 レンズ
3. No.3 レンズ + No.1 レンズ

b) 測定結果

1. No.1 レンズ + No.2 レンズ

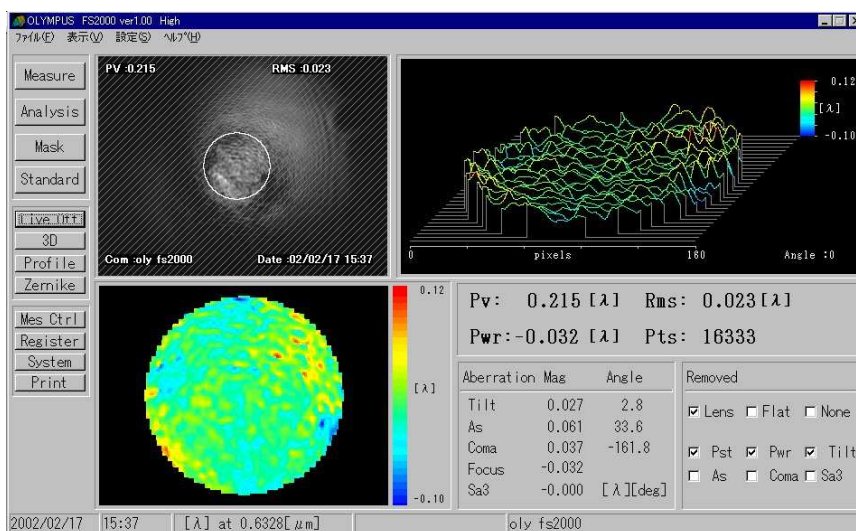


図 3.58 No.1 レンズ + No.2 レンズ波面収差測定結果

2. No.2 レンズ + No.3 レンズ

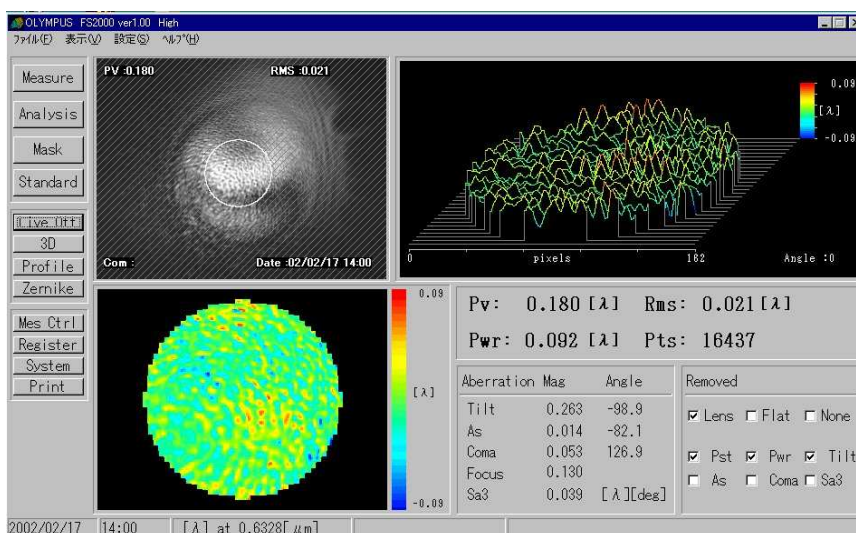


図 3.59 No.1 レンズ + No.2 レンズ波面収差測定結果

3. No.3 レンズ + No.1 レンズ

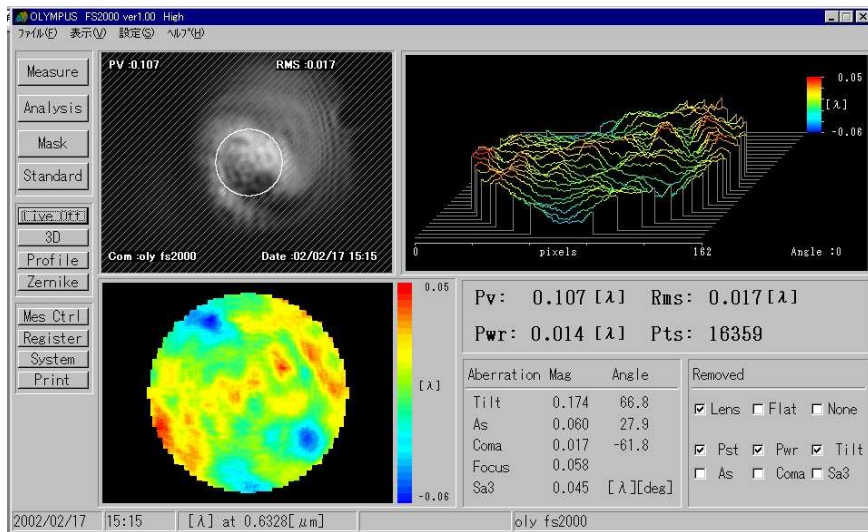


図 3.60 No.3 レンズ + No.1 レンズ波面収差測定結果

図 3.58 ~ 図 3.60 に 3 組のカップリングレンズの波面収差測定結果を示す。それぞれのレンズの収差は、以下の方法を用いて計算で求めた。

c) 各レンズの波面収差の導出

以下のように各レンズ固有の波面収差を仮定し、計算によりそれぞれのレンズの波面収差を求めた。

それぞれのレンズの波面収差を W_1 から W_3 とおき、

$$\text{No.1 レンズ} : W_1$$

$$\text{No.2 レンズ} : W_2$$

$$\text{No.3 レンズ} : W_3$$

3 回の測定結果は、それぞれ 2 本ずつの波面収差の合成量が測定されたとする。

$$\text{No.1 レンズ} + \text{No.2 レンズ} = W_1 + W_2 = W_{S12} \quad (3.3.2.3.1)$$

$$\text{No.2 レンズ} + \text{No.3 レンズ} = W_2 + W_3 = W_{S23} \quad (3.3.2.3.2)$$

$$\text{No.3 レンズ} + \text{No.1 レンズ} = W_3 + W_1 = W_{S31} \quad (3.3.2.3.3)$$

上記より

$$2(W_1 + W_2 + W_3) = W_{S12} + W_{S23} + W_{S31} \quad (3.3.2.3.4)$$

$$W_1 + W_2 + W_3 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} \quad (3.3.2.3.5)$$

各レンズの波面収差は次の(3.3.2.3.6)～(3.3.2.3.8)式により求めることができる。

$$W_1 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S23} \quad (3.3.2.3.6)$$

$$W_2 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S31} \quad (3.3.2.3.7)$$

$$W_3 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S12} \quad (3.3.2.3.8)$$

(3.3.2.3.6)～(3.3.2.3.8)式に前項の測定結果(解析結果：RMS値)を代入する。

$$\text{No.1 レンズ} + \text{No.2 レンズ} = W_1 + W_2 = W_{S12} = 0.021$$

$$\text{No.2 レンズ} + \text{No.3 レンズ} = W_2 + W_3 = W_{S23} = 0.023$$

$$\text{No.3 レンズ} + \text{No.1 レンズ} = W_3 + W_1 = W_{S31} = 0.017$$

$$\frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - 0.061 / 2 = 0.0305$$

$$W_1 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S23} = 0.0305 - 0.023 = 0.0075$$

$$W_2 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S31} = 0.0305 - 0.017 = 0.0135$$

$$W_3 = \frac{W_{S12} + W_{S23} + W_{S31}}{2} - W_{S12} = 0.0305 - 0.023 = 0.0095$$

以上から各レンズの波面収差は、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{No.1 レンズ} &= W_1 = 0.0075 \\ \text{No.2 レンズ} &= W_2 = 0.0135 \\ \text{No.3 レンズ} &= W_3 = 0.0095 \end{aligned}$$

この結果を見ると、3本のレンズ間で若干の特性の差が見られ、使用するレンズによって被検レンズの測定値に影響を及ぼすことが無いとは言えないが、それぞれ $\lambda/100$ (0.01λ) 程度であり、マイクロレンズの測定ではその影響は小さい。

波面収差の計算の中には、DC成分、Tilt成分、デフォーカス成分が含まれているため、厳密には測定ごとの Zernike 係数から前記の成分を除外しての比較が望ましいが、今回は、3本のカップリングレンズに用いる顕微鏡対物レンズの性能がどの程度のものであるかの目安をつけるのが目的であるため、先ずは上記のような比較を行った。

さらに厳密な取り扱いを行う場合は、表 3.5 に示すようにそれぞれのカップリングレンズの波面収差を測定した際の非点収差、3次のコマ収差、3次の球面収差のそれぞれの Zernike 係数ごとに計算を行う必要がある。(計算の詳細は、Appendix B「波面収差と Zernike 多項式」の項参照)

表 3.5 カップリングレンズの波面収差測定結果 (Zernike 係数)

n	m	成分	Zernike polynomial (多項式)	W12	W23	W31	W1	W2	W3
0	0	Piston	1	-	-	-	-	-	-
1	0	傾き(Tilt)X成分	$\eta \sin \theta$	-	-	-	-	-	-
1	1	傾き(Tilt)Y成分	$\eta \cos \theta$	-	-	-	-	-	-
2	0	非点収差 ($\pm 45^\circ$ 方向)	$\eta^2 \sin 2\theta$	-0.0024	0.0162	0.0707	0.013	-0.0425	0.0306
2	1	フォーカスシフト	$\eta^2 \eta \lambda$	-	-	-	-	-	-
2	2	非点収差 ($0^\circ, 90^\circ$ 方向)	$\eta^2 \cos 2\theta$	-0.0551	-0.0263	-0.0642	-0.0222	-0.0157	0.0066
3	1	3次コマ収差 (X成分)	$\eta^3 \eta \lambda \sin \theta$	-0.0125	-0.0083	-0.0148	-0.0036	0.0029	0.0006
3	2	3次コマ収差 (Y成分)	$\eta^3 \eta \lambda \cos \theta$	-0.0048	0.0328	-0.0126	-0.0277	0.0177	0.0003
4	2	3次球面収差	$\eta^4 \eta \lambda^2 \eta \lambda$	-0.0159	-0.006	0.0018	-0.0007	-0.0085	0.0092

(3) ボールレンズを用いての Mach-Zehnder 干渉計の測定誤差検討

次に波面収差量を計算により求めることが可能なボールレンズを用いて干渉計全体の収差量を予測するための検証を行った。

a) 方法

以下の条件で測定をおこなった。

- ・カップリングレンズ : O社製 LMPlan IR 20× NA=0.4
- ・被検レンズ : $\phi=4\text{mm}$ BK7 ボールレンズ (真球度 ; $0.4\mu\text{m}$)
- ・CCD カメラ : S社製 XC-ST70(カバーガラスなし)2/3 インチ
- ・アパーチャー : ハードウェアアパーチャーを使用

※測定 : 測定時は, 1 回ごとにマニピュレータでボールレンズの位置をランダムに回転し測定。

図 3.61 に示すように, ボールレンズの波面収差測定はステージにセットした円形開口のホルダー上にボールレンズを置き, 着脱を繰り返し測定した。ボールレンズがランダムに置かれることで, ボールの真球度誤差があっても, 測定回数を増やすことで平均化され真値に近い結果が得られる [12]。

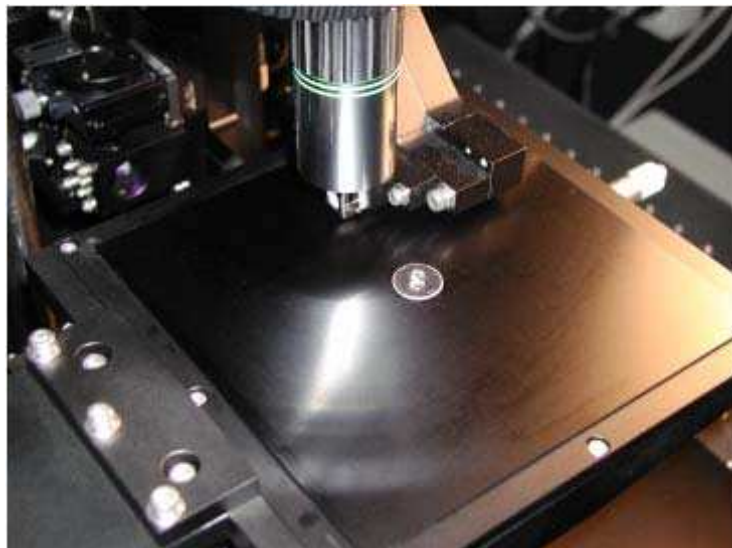


図 3.61 ボールレンズの波面収差測定

b) ボールレンズの収差計算（シミュレーション）

次に測定に使用するボールレンズを選択するため、シミュレーションにより波面収差を求めた。表 3.6 にその結果を示す。ボールレンズは、光軸近傍のみを使用する場合は理論上収差が少ない。計算によりボールレンズ収差量を導出し、使用可能な範囲を検討した。計算結果より、 $\varphi=4\text{mm}$ のボールレンズに $\varphi=0.25\text{mm}$ 径の絞りをを用いた場合の収差量がほぼゼロとみなせることが確認できた。また実験の際のハンドリングも容易であるため、 $\varphi=4\text{mm}$ のボールレンズを選定した。

表 3.6 ボールレンズ直径とアパーチャーの組合せによる波面収差

(シミュレーションによる算出)

絞り径 ボールレンズ径	$\varphi=0.25\text{mm}$	$\varphi=0.5\text{ mm}$	$\varphi=0.75\text{ mm}$	$\varphi=1.0\text{ mm}$
$\varphi=4\text{mm}$	0	0.003	0.017	0.047
$\varphi=2.5\text{ mm}$	0.004	0.019	0.066	0.218
$\varphi=1\text{mm}$	0.023	0.231	1.53	—

c) ボールレンズ測定結果

ボールレンズ $\varphi=4\text{mm}$ を使用し、 $\varphi=0.25\text{mm}$ のハードウェアアパーチャーを投影し 55 回の測定を行った。

図 3.62 に測定した際のボールレンズにより形成された干渉縞、図 3.63 に測定結果を示す。

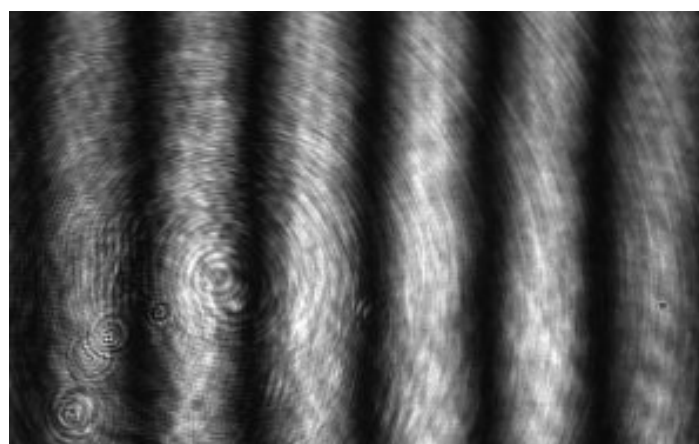


図 3.62 ボールレンズの干渉縞

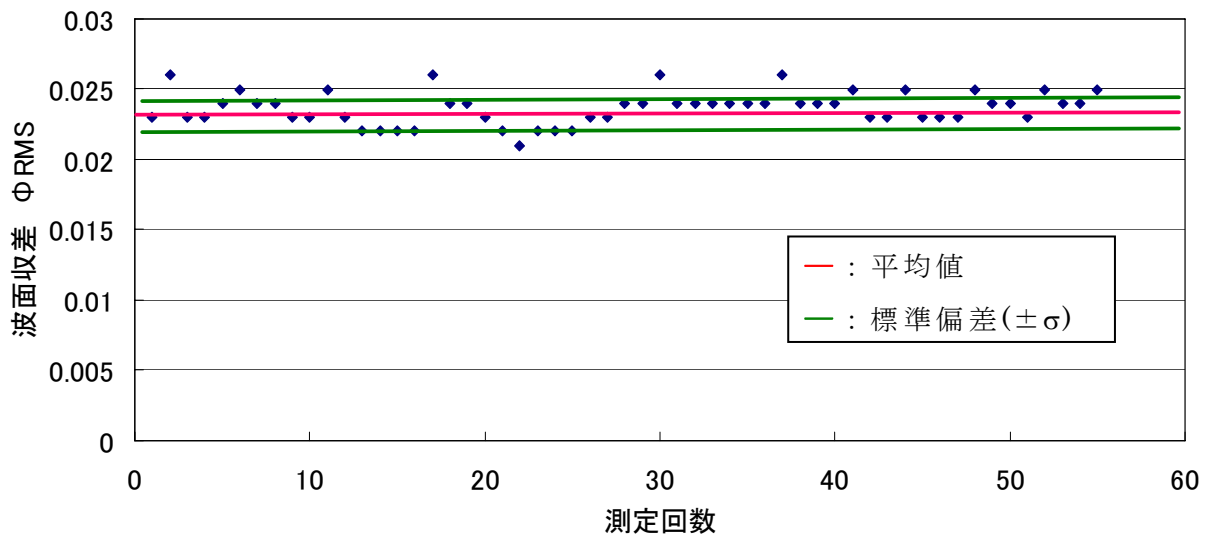


図 3.63 解析ソフトを用いて求めた波面収差量

本測定で使用した解析ソフトによる波面収差の RMS 値は、ランダムノイズを含み実数値との乖離がある（実際の数値よりも大きくなる）ことがわかった。そこで、波面収差の演算時に求められるゼルニケ係数より、高周波のランダムノイズを除いて波面収差を再度計算した。

図 3.64 にゼルニケ係数の計算により求めた波面収差量を示す。

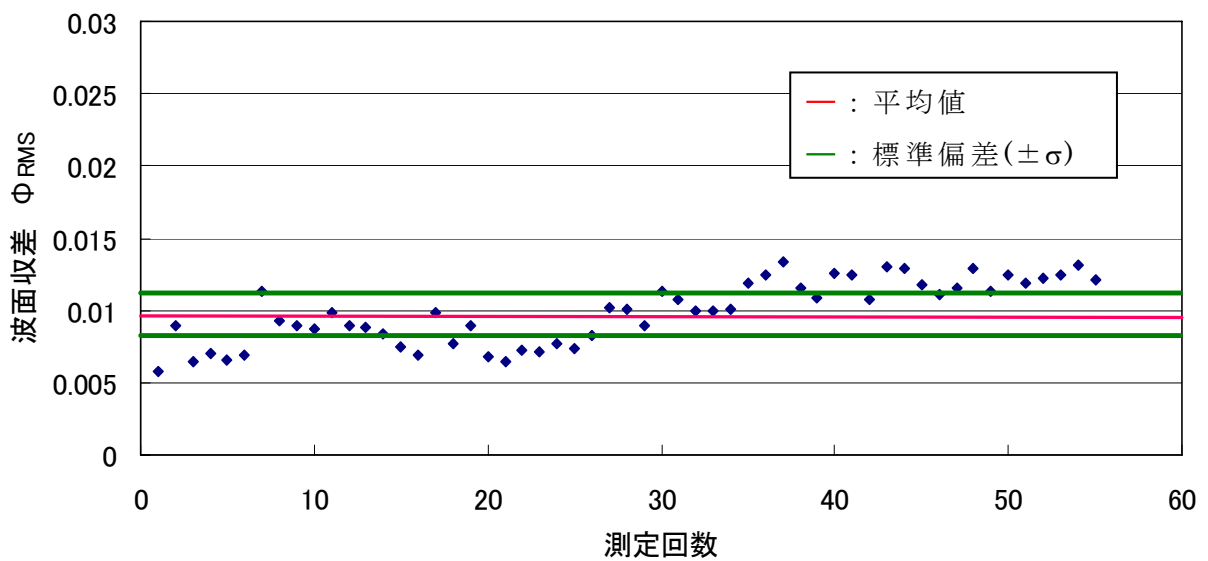


図 3.64 ゼルニケ係数の計算より求めた波面収差量

d) 考察

干渉光学系がもつ固有の収差を求めるため、光軸近傍での収差が理論上少ないボールレンズを用いての測定を検討した。シミュレーションにより $\phi=4\text{mm}$ のレンズを選択し、 $\phi=0.25\text{mm}$ のハードウェアアパーチャを投影し測定を行った。

解析ソフトによる RMS 値は高周波のランダムノイズを含むため、波面収差測定時に算出されたゼルニケ係数を使用して再計算により収差量を求めた。

上記の測定により、干渉光学系（干渉計本体・カップリングレンズ等）の持つ固有の収差としては約 0.01λ （平均値）という結果が得られた。これは、Maréchal Criterion（マレシャル基準： $\Phi_{\text{RMS}} \leq \lambda/14 ; 0.071\lambda$ ）と言われるレンズの回折限界の性能を表す際に一般に用いられる 0.071λ に比べ小さく、実用的には問題ない値と言える。

また、期せずして、前項で測定したカップリングレンズの収差量 $\lambda/100$ (0.01λ) にかなり近い値が得られた。この結果で干渉光学系が持つ固有の収差がすべてカップリングレンズに起因すると言う結論を出すのは難しいが、カップリングレンズの性能が測定結果に大きな影響を持つことは確かと言える。いずれにしろ、この干渉計の固有の収差は非常に小さいものであるため、マイクロレンズの波面収差を求めるとい実使用では特に問題となる数値では無いと考えられる。

3.3.2.4 開発した Mach-Zehnder 干渉計のまとめ

以上述べたように，Mach-Zehnder 干渉計にハードウェアアパーチャ縮小投影光学系とカップリングレンズ（顕微鏡対物レンズ）を用いた，マイクロレンズの評価を目的とした波面収差測定装置を設計・開発した．

主な特徴，実施内容，実施結果は以下のようにまとめられる．

- ① Mach-Zehnder 干渉部のサンプル光・光束の光軸を鉛直に立てた構成とし，基板のセットが容易に行えるようサンプルの平置きを可能にした．これにより，各種作製技術により広く開発・製品化されている，大面積マイクロレンズアレイ基板（最大： $\square 150\text{mm}^2$ ）の測定にも対応した，
- ② 絞り投影光学系を干渉計の照明光路中に組み込み，ハードウェアアパーチャの被検レンズ瞳面上への縮小投影結像を可能にした．それにより，被検レンズの測定時の開口径を任意に設定することが可能になった．
- ③ ハードウェアアパーチャ投影光学系について，シミュレーションにより 3 枚のレンズ（カップリングレンズを含む）を組合せた開口の縮小投影光学系方式を選定した．これにより，干渉計の光源部に設けた開口を，被検マイクロレンズの瞳面上に縮小投影結像する際の，開口像サイズの広範囲設定を可能とした．
- ④ サンプルステージに X-Y 方向への移動機構を設け，最大サイズ $\square 150\text{mm}^2$ の基板からの任意の被検マイクロレンズの選択，測定を可能にした．
- ⑤ サンプルステージに傾斜機構を付加し，光軸上だけでなく，軸外の波面収差も測定できるように対応した．また，設定可能範囲はおよそ $\pm 1^\circ$ と設定した．
- ⑥ 被検レンズの径や NA が異なる場合，物体光と参照光の強度比を広い範囲で調整する必要がある．これに対応するため，偏光ビームスプリッターと 1/2 波長板とを組合せた光量バランス調整機構を導入した．これにより，異なる被検レンズごとに最適な光量バランス選択ができ，良好なコントラストの干渉縞画像が得られた．
- ⑦ Mach-Zehnder 干渉計の撮像部に，キューブビームスプリッターに対応した収差補正を施した，長作動距離 CCD 用高倍率撮像レンズを採用した．これにより，共役関係を保持したまま，被検レンズの瞳像を CCD 素子面に高コントラストで結像することが可能になった．
- ⑧ 最小レンズ径 $\phi=20\ \mu\text{m}$ の超微小マイクロレンズの干渉縞画像を明瞭に得ることができ，波面収差測定も可能になった．

- ⑨ マイクロレンズアレイサンプル ($\phi=240\mu\text{m}$, $f=720\mu\text{m}$) 使用し測定の安定性を確認した。波面収差 ($\text{RMS}(\lambda)$) の連続測定で、平均値：0.0517, 標準偏差： $\sigma=0.000471$, $4\sigma=0.00188$, 30 秒間隔のインターバル測定の結果, 平均値:0.0535, 標準偏差： $\sigma=0.000706$, $4\sigma=0.00283$ の結果が得られ, 実用的には問題ないレベルであることを確認した。
- ⑩ 今回開発した Mach-Zehnder 干渉計特有の, 参照光と被検光 (サンプル光) の光束系が異なる現象に対して, 光源の波面収差を他の Mach-Zehnder 干渉計を組み合わせ測定, 評価した結果, 問題の無いレベルであることを確認した。
- ⑪ 次章 (第 4 章) で説明するように, 本 Mach-Zehnder 干渉計 (改良モデル) を用いて, 海外の研究機関と共同で同一サンプルの評価試験 (いわゆるラウンドロビンテスト) を実施した。相互の波面収差測定結果を比較した結果, マイクロレンズの干渉計測で実績のある, Erlangen 大学 (Germany) 開発の Mach-Zehnder 干渉計を用いた際の測定結果と良好な対応関係があることを確認した。

3.4 マイクロレンズの波面収差測定に関する理論検証と実験の比較

本章では、マイクロレンズという通常のレンズに比べれば非常にサイズの小さいレンズの波面収差測定をどのように行うことが望ましいのか、という課題について検討をすすめてきた。ハードウェアアパーチャを用いた場合と、ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について、先ずシミュレーションで確認し、さらに被検レンズの瞳面に縮小投影が可能なハードウェアアパーチャを実装した Mach-Zehnder 干渉計を開発し実測をおこなった。ここでは、シミュレーション結果と測定結果について比較検証をおこない、両者の差異を明らかにする。

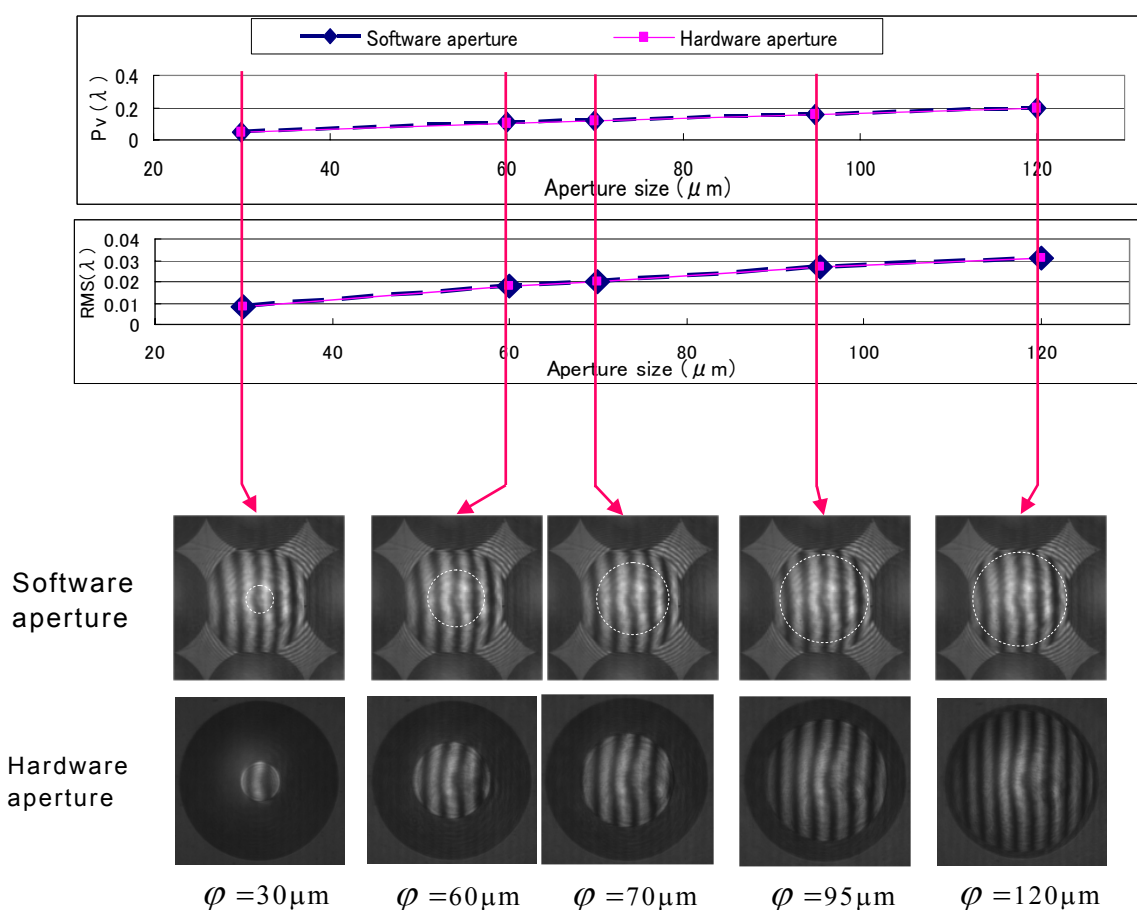


図 3.65 ソフトウェアアパーチャとハードウェアアパーチャの波面収差測定結果比較

図 3.65 にソフトウェアアパーチャとハードウェアアパーチャの波面収差測定結果の比較を示す。図の最上部のグラフは、波面収差の PV(λ), 次は RMS(λ)を示す。上段の写真は、ソフトウェアアパーチャのみで被検レンズの測定範囲を選択

している様子，下段はハードウェアアパーチャを被検レンズの瞳面に投影し測定範囲外に干渉縞を形成しないようにした場合である．いずれも横軸は被検レンズ上のアパーチャサイズを示している．

結果を見ると非常に簡素な結論しか導けないが，本結果を見る限り，シミュレーションで得られた，ソフトウェアアパーチャとハードウェアアパーチャでの波面収差測定結果に差は見られない，という結果を裏付ける測定結果が得られたことになる．

3.5 考察

以上，Mach-Zehnder 干渉計を用いてマイクロレンズの波面収差測定を行う際に，ハードウェアアパーチャを用いた場合と，ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について，シミュレーションで確認，さらに被検レンズの瞳面に縮小投影が可能なハードウェアアパーチャを実装した Mach-Zehnder 干渉計を開発し実測をおこなった結果を示した．その結果，シミュレーションで得られた，ソフトウェアアパーチャとハードウェアアパーチャでの波面収差測定結果に差は見られない，という結果を裏付ける測定結果が得られた．

この結果からすぐに，ハードウェアアパーチャなしですべての測定が可能と言う結論を出すのは早いように思われるが，通常の球面レンズで構成されるマイクロレンズの測定の場合にはハードウェアアパーチャが必須とは言えないようである．ただ，あくまでも経験的な判断であるが，分布屈折率型レンズのような特殊なレンズの場合には，ハードウェアアパーチャの付加が測定時のノイズを大きく減少させると言うような例もある．したがって，基本は，ハードウェアアパーチャなしでも測定が可能と言うことになるが，サンプルの特性に応じてハードウェアアパーチャを使い分ける，というような考え方が妥当かもしれない．

いずれにしろ，マイクロレンズの波面収差測定を行う際に常に疑問を抱えていたアパーチャに関する課題は，条件付ではあるがある程度明確になったと考える．本検討で開発した Mach-Zehnder 干渉計（改良型）は，図 3.66 に示すような測定可能範囲への適用が可能である．レンズサイズは，最大 $\phi=500\ \mu\text{m}$ から最小 $\phi=20\ \mu\text{m}$ 程度まで，NA は概ね最大 0.5 程度（実効 F 値：1.0）の測定への適用が可能である． $\phi=500\ \mu\text{m}$ よりも大きなサイズの測定は，すでに市販の干渉計が用いられているため本干渉計をあえて適用する必要は無いと考え，最大 $\phi=500\ \mu\text{m}$ 程度とした．極端に NA が大きい 1.0 以下のレンズ（たとえば DVD 用のピックアップレンズ）などはその径も大きいため既存の干渉計（専用測定器）での波面収差測定が可能である．し

たがって、本干渉計は、光通信デバイスの中でも直径の小さなファイバーオプティクス領域に適用されるレンズなどの測定への対応が可能である。

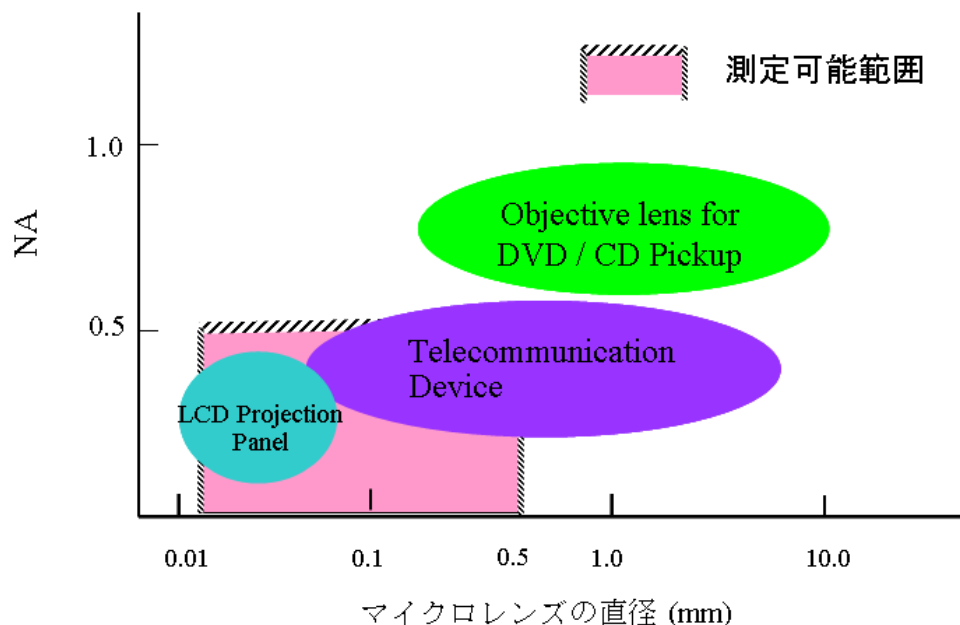


図 3.66 開発した Mach-Zehnder 干渉計の測定可能範囲

また、本章の検討の多くは、筆者が委員長を務めた通称「M-プロジェクト」*1)の総合技術専門委員会で検討、まとめた報告書（図 3.67）によっている。

*1) M-プロジェクト

平成 12 年度（2000 年度）～平成 14 年度（2002 年度）の 3 年間にわたって行われた経済産業省の委託開発事業。平成 12 年度は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託事業，平成 13 年度，平成 14 年度は経済産業省からの委託事業として，財団法人光産業技術振興協会が受託元となり開発をすすめた。本事業の成果は，次章（第 4 章）で説明する，筆者がプロジェクトリーダーを務めた，マイクロレンズの ISO 標準（ISO 14880-2: “Microlens Arrays Part2 ; Test Methods for Wavefront aberration”(2006)）の内容に日本案として反映されている。

平成 12 年度

基準認証開発事業「光情報処理用マイクロレンズ光学性能評価方法の標準化」

平成 13 年度

基準創成開発事業「光情報処理用マイクロレンズ光学性能評価方法の標準化」

平成 14 年度

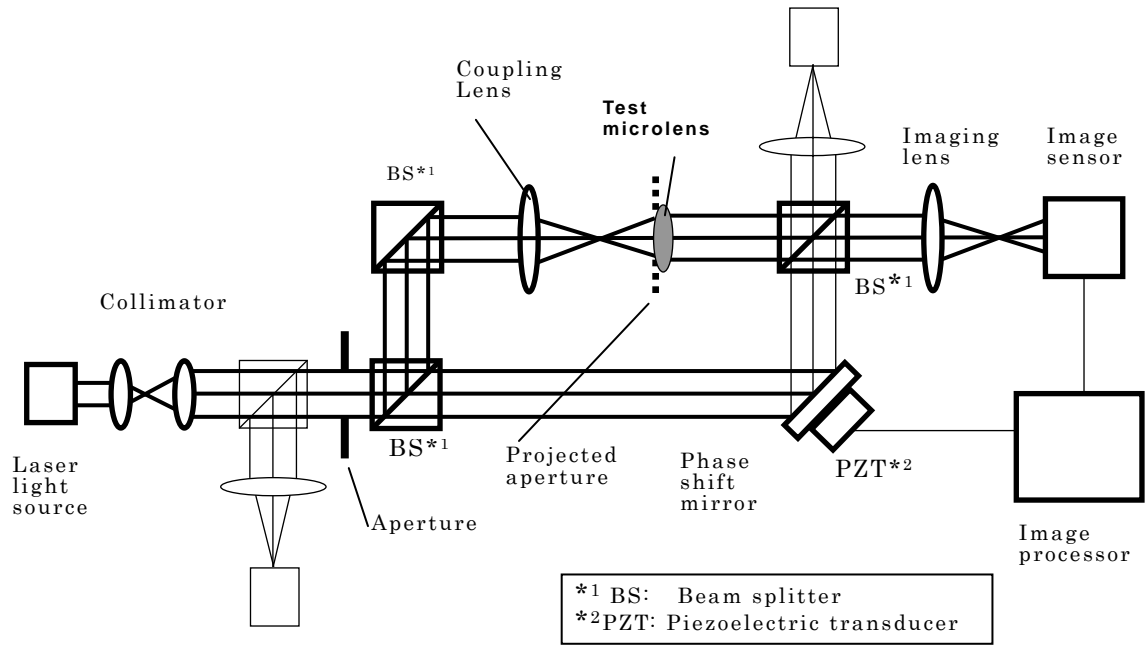
新規産業支援国際標準開発事業「光情報処理用マイクロレンズ光学性能評価方法の標準化」



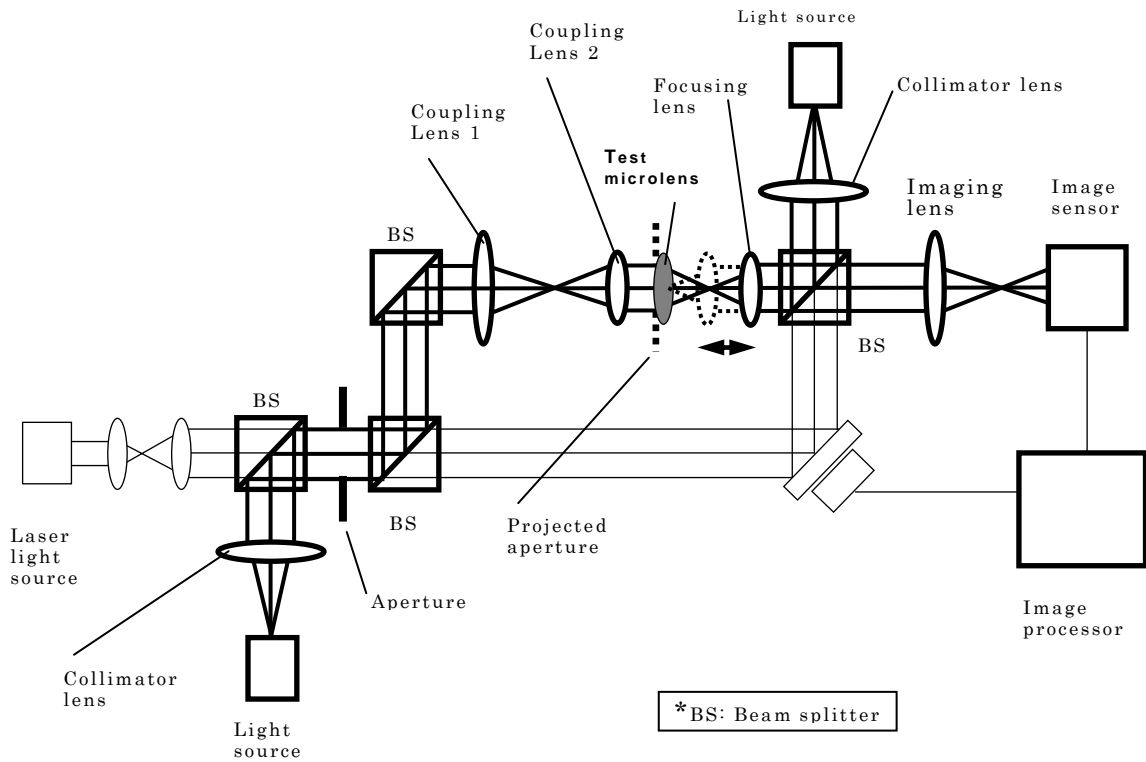
図 3.67 M-Project（経済産業省）報告書

3.6 今後の展開

本章での検討結果から，Mach-Zehnder 干渉計を用いてマイクロレンズの波面収差測定を行う際には，ソフトウェアアパーチャーとハードウェアアパーチャーでの波面収差測定結果に差は見られず，ハードウェアアパーチャーの使用は必須では無いという結論を導いた．しかし，最近のマイクロレンズを使用するユーザー，製作者の両方から，複数の特性を同時に測定したいというような要望が出てきている．本干渉計に実効焦点距離測定機能を付加した例を図 3.68 に示す．実効焦点距離測定の際には，ハードウェアアパーチャーの使用が必須になるため，開発した Mach-Zehnder 干渉計に機能を付加することが非常に有効に機能することになる．



(a) Mach-Zehnder 干渉計 (波面収差測定レイアウト)



(b) Mach-Zehnder 干渉計 (焦点距離測定レイアウト)

図 3.68 実効焦点距離測定機能を付加した Mach-Zehnder 干渉計

図 3.68 (a) には Mach-Zehnder 干渉計を波面収差測定に用いる際のレイアウト，図 3.68 (b) には同じく実効焦点距離測定に用いる際のレイアウトを示した．現状の Mach-Zehnder 干渉計に，落射照明ユニット，光量検出センサー，被検レンズの光軸上での移動量測定ユニットを付加するだけで，被検レンズに設定された有効開口での実効焦点距離測定が容易に行える．

3.7 まとめ

Mach-Zehnder 干渉計を用いてマイクロレンズの波面収差測定を行う際に，ハードウェアアーチャーを用いた場合と，ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合の差異について，シミュレーションで確認，さらに被検レンズの瞳面に縮小投影が可能なハードウェアアーチャーを実装した Mach-Zehnder 干渉計を開発し実測をおこなった結果を示した．その結果，シミュレーションで得られた，ソフトウェアアーチャーとハードウェアアーチャーでの波面収差測定結果に差は見られない，という結果を裏付ける測定結果が得られた．

また，本干渉計は実際に産業界からの要望にこたえることが出来るレベルの性能を持つものであることも確認できた．今後，広く使用されるように改良を含めた開発を続けて行きたい．

参考文献

- [1] D. Daly, M.C. Hutley, "Microlens measurement at NPL", Proc. EOS Topical Meeting 2, 50 (1993)
- [2] K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda, "Aberration properties of the planer microlens", Proc. SPIE **1014** Micro-optics (1988)
- [3] D. Daly, M.C. Hutley, R. F. Stevens, "Mach-Zehnder interferometer for measuring microlenses", Proc. SPIE Interferometry **94**, 59 (1994)
- [4] J. Schwider, H. Sickinger,, "Array test for microlenses", Optik **107**, No. 1, pp.26 (1997)
- [5] H. Sickinger, J. Schwider, B. Manzke, "Fiber based Mach-Zehnder interferometer for measuring wave aberrations of microlenses", Optik **110**, pp.239-243 (1999)
- [6] Takaaki Miyashita, Kenjiro Hamanaka, Masahiko Kato, Satoshi Ishihara, Hiroyasu Sato, Eiichi Sato, Tadashi Morokuma, "Wavefront aberration measurement technology for microlens using the Mach-Zehnder interferometer provided with a projected aperture", SPIE 49th annual meeting **5514-12** (2004)
- [7] Masahiko Kato, Takaaki Miyashita, Kenjiro Hamanaka, Satoshi Ishihara, Eiichi Sato, Tadashi Morokuma, "Equivalence between the software determined and the hardware determined effective numerical aperture in the interferometrical measuring of microlens", SPIE 49th annual meeting, **5514-14** (2004)
- [8] L. D. Dickson, "Characteristics of a propagating Gaussian beam", Appl. Opt. **9**, 1854-1861 (1970)

- [9] H. Margenau, G.M. Murphy, *The Mathematics of Physics and Chemistry*, Chapter 7 (Van Nostrand) (1955)
- [10] G. N. Watson, *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*, p. 454, (Cambridge University Press, London) (1966)
- [11] J.E. Greivenkamp, J.H. Bruning, "Phase shifting interferometers", *Optical Shop Testing, Second edition*, D. Malacara ed., pp. 501-598 (John Wiley & Sons) (1992)
- [12] Brent C. Bergner and Angela Davies, "Self-calibration for transmitted wavefront measurements", *Appl. Opt.*, Vol. **46**, No. 1, pp. 18-24 (2007)

第4章 マイクロレンズの国際標準開発

4.1 はじめに

1章～3章で述べたように、マイクロレンズは、従来のレンズと比べ、主にそのサイズ、構造上の違いがあるため、従来からの計測技術がそのままつかえないケースが多い。したがって、マイクロレンズを使用するユーザー、作製するサプライヤの両者が共通の理解を進めるために検討されてきたISOでの国際標準化動向について整理する。

ISOでのマイクロレンズの標準化作業は、1991年にISO / TC 172 / SC 9 (TC172:Optics and Photonics, SC9: Electro-optical systems) 会議、(実審議はWG 7 (Electro-optical systems other than lasers) 分科会) 会議で日本から提案したが、まだ産業も育っていなかったと言う事情もあり、海外からの支持を取り付けることができなかった。1994年に再度提案し、「用語と定義」に関するプロジェクトがスタートした。数年の時間を要したが、2001年8月に「用語と定義」が「ISO 14880-1:2001 : Microlens array - Part.1 Vocabulary」[1]として出版された。これと平行して、1999年のSC 9 (WG 7) 会議で同じく日本から計測法のプロジェクト設立を提案、2000年3月の国際投票で採択され審議が開始された。当初は、計測法の全てを同一プロジェクトで審議を始めたが、審議の迅速化をはかるため「Project 14880-2 : Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations」, 「Project 14880-3 : Microlens arrays - Part.3 Test methods for optical properties other than wavefront aberrations」, 「Project 14880-4 : Microlens arrays - Part.4 Test methods for geometrical properties」の3つのプロジェクトに分割し審議をすすめた。その中でProject 14880-2「波面収差測定法」とProject 14880-4「物理・機械特性測定法」の二つのプロジェクトリーダーを日本(筆者)が引き受け重要な役割を担ってきた。

図4.1にマイクロレンズの14880シリーズのISO国際標準策定ロードマップを示す[2]。Part.2の「波面収差測定法」の標準は2006年2月に、Part.3「波面収差以外の光学特性測定法」, Part.4「物理・機械特性測定法」の二つの標準は2006年6月に出版された。これらの標準の中でも特に重要性の高い「波面収差」に関し、Part.2の「波面収差測定法」の審議に多くの時間を費やしてきた。

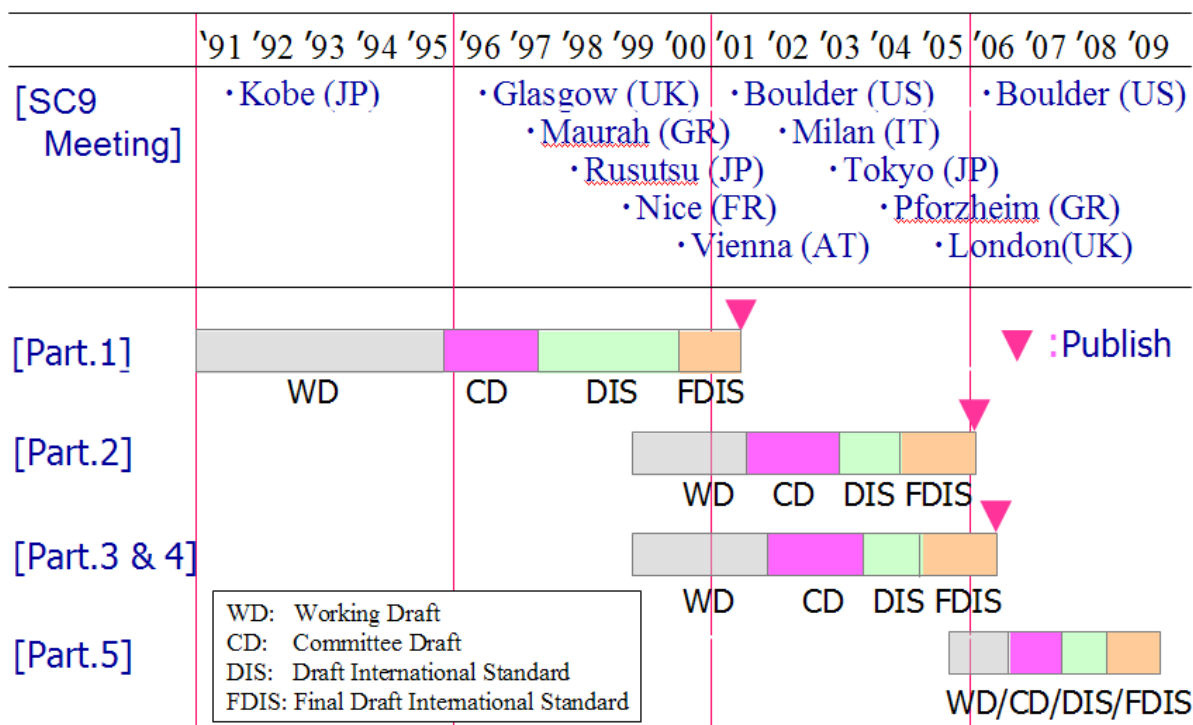


図 4.1 マイクロレンズ（14880 シリーズ）ISO 国際標準策定ロードマップ

4.2 マイクロレンズの国際標準の概要

マイクロレンズの ISO 国際標準 14880 シリーズは、以下のように Part.1～Part.4 の 4 つの標準がすでに出版され、Part.5 の TR（Technical Report）を日本から提案し（同じく筆者がプロジェクトリーダー）、現在審議中である。

- ・ ISO 14880-1(2001) Microlens array - Part.1
Vocabulary [用語と定義]
- ・ ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2
Test methods for wavefront aberrations [波面収差測定法] [3]
- ・ ISO 14880-3(2006) Microlens arrays - Part.3
Test methods for optical properties other than wavefront
Aberrations [波面収差以外の光学特性測定法] [4]
- ・ ISO 14880-4(2006) Microlens arrays - Part.4
Test methods for geometrical properties [物理・機械特性測定
法] [5]

- ISO TR 14880-5(2006) Microlens arrays - Part.5

Guidelines for Testing [試験法のガイドライン]

図 4.2 にすで出版されたマイクロレンズの ISO 国際標準（14880 シリーズ）の表紙を示す。

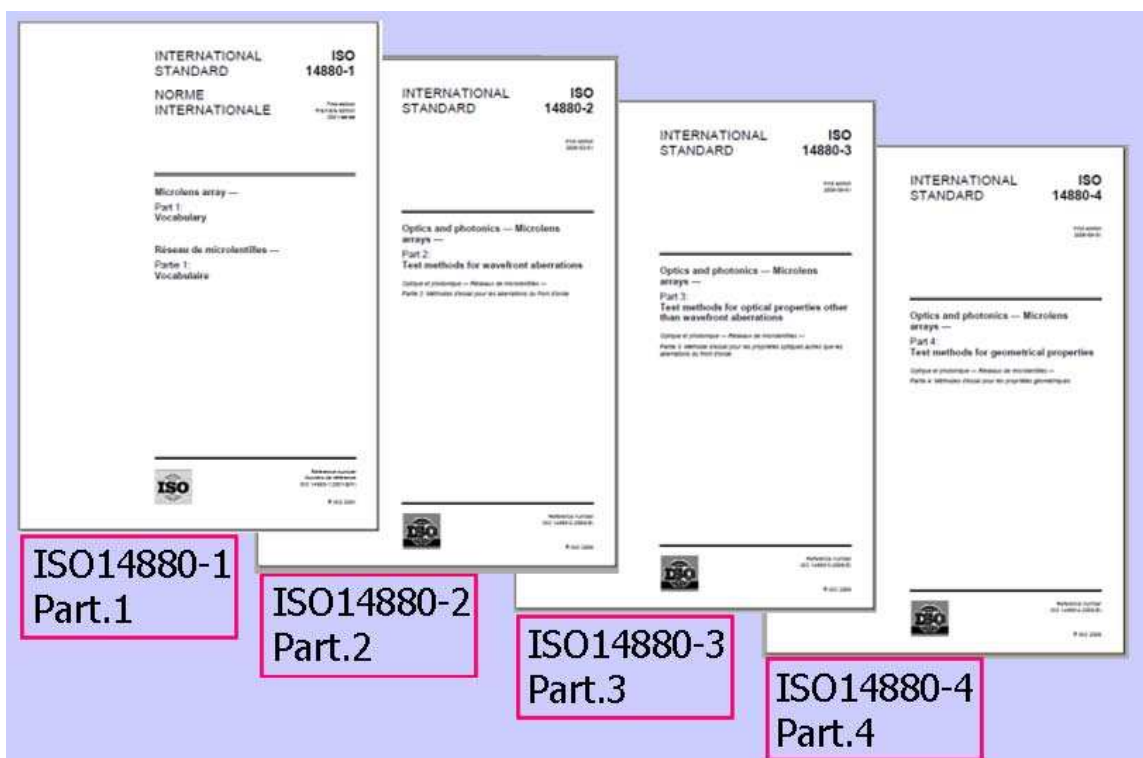


図 4.2 すで出版されたマイクロレンズの ISO 国際標準（14880 シリーズ）

ISO 14880-1(2001) Microlens array - Part.1 Vocabulary[用語と定義]は，マイクロレンズ，マイクロレンズアレイに関する用語をまとめたもので，表 2.2，図 2.22 に示した従来のレンズの用語ではカバーしきれない特有の用語を定義したものである。

ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations [波面収差測定法] は，マイクロレンズ特有の特性に合わせた波面収差測定法をまとめたもので，Mach-Zehnder 干渉計など，シングルパス干渉計の利用を推奨している。また，日本提案のハードウェアアパーチャーを用いた Mach-Zehnder 干渉計も推奨方式のひとつとして記述されている（筆者がプロジェクトリーダーを担当）。

ISO 14880-3(2006) Microlens arrays - Part.3 Test methods for optical properties other than wavefront Aberrations [波面収差以外の光学特性測定法]は，マイ

クロレンズの、波面収差以外の光学特性、実効焦点距離、色収差、フォーカススポット位置の均一性測定法などが記述されている。

ISO 14880-4(2006) *Microlens arrays - Part.4 Test methods for geometrical properties* [物理・機械特性測定法]は、マイクロレンズの物理・機械特性測定法について、レンズピッチ、レンズ高さ、レンズ厚、レンズの曲率半径の測定法などについて記述されている（同じく、筆者がプロジェクトリーダーを担当）。

ISO TR 14880-5(2006) *Microlens arrays - Part.5 Guidelines for Testing* [試験法のガイドライン]は、Part.2～Part.4 のマイクロレンズの測定法に関する標準が、別々の標準として出版されてしまったため、実際に標準書を使用するユーザーが、どの特性を測定したいときにどの標準を参照すれば良いかが不明確でわかりにくい、という声にこたえるために開発を開始した *Technical Report (TR)* である。この TR を参照することで、測定したい特性に対応する標準（測定法）がどこに記載されているかが簡単に探せるガイドをめざして現在開発中である（これも同じく、筆者がプロジェクトリーダーを担当）。

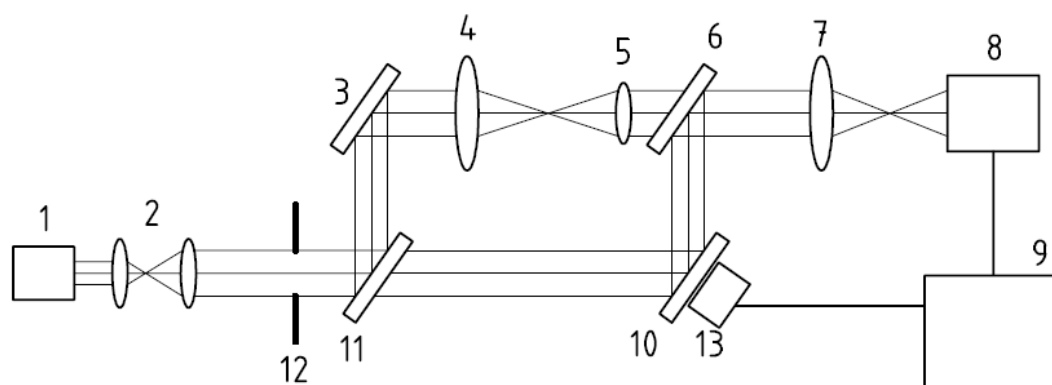
4.3 マイクロレンズの波面収差測定研究の国際標準への適用

4.3.1 日本提案 Mach-Zehnder 干渉計の国際標準への反映

本項では、マイクロレンズの特性について、その定義と特に代表的な光学特性評価法である波面収差測定法を国際標準に適用した結果を示す。マイクロレンズはそのサイズが小さいために、特性測定が非常に困難であり、また従来は標準化された技術が確立されておらず、マイクロレンズのメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を持つことができなかった。メーカー（サプライヤ）とユーザー間の仕様設定にも課題があり、製品の応用範囲も限られていた。特に評価技術の開発も含めて、国際標準化の推進が期待されていた。開発したマイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計の技術を、マイクロレンズの ISO 標準 (*ISO 14880 Part 2 Test Methods for Wavefront aberration*) に反映し、日本の競争力の高い技術分野の技術を国際的に広めるとともに、産業界の期待にもこたえることができたが、その状況を

示す.

図 4.3 に ISO 14880(2006)Part 2 Test Methods for Wavefront aberration に記載されているハードウェアアパーチャーを設けた Mach-Zehnder 干渉光学系を示す. 筆者が日本案として提案し採択されたものである. “12 Aperture stop”がハードウェアアパーチャーに相当する.



Key

- 1 light source
- 2 beam expander
- 3 Mirror 2
- 4 1st standard lens
- 5 2nd standard lens or microlens under test
- 6 Mirror 4
- 7 imaging lens
- 8 image sensor
- 9 image processor
- 10 Mirror 3
- 11 Mirror 1
- 12 aperture stop
- 13 piezoelectric transducer (PZT)

図 4.3 Mach-Zehnder 干渉光学系

図 4.4 に ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations の Annex B (Normative) に記述された日本提案の投影型ハードウェアアパーチャーを設けた Mach-Zehnder 干渉計の記載ページを示す.

同じく Annex B (Normative)の後半部分には, 図 2.35 で示した, Mach-Zehnder 干渉計にファイバー光学系を用いた透過波面収差測定光学系 (Erlangen 大 (Germany) で開発) が掲載されている. この両者の Mach-Zehnder 干渉計の方式については, 次項で説明する同一サンプルの比較測定 (ラウンドロビンテスト) を通じてほぼ同一の測定結果が得られたため, その内容 (方式) を ISO 標準に併記することで国際

合意が得られた。

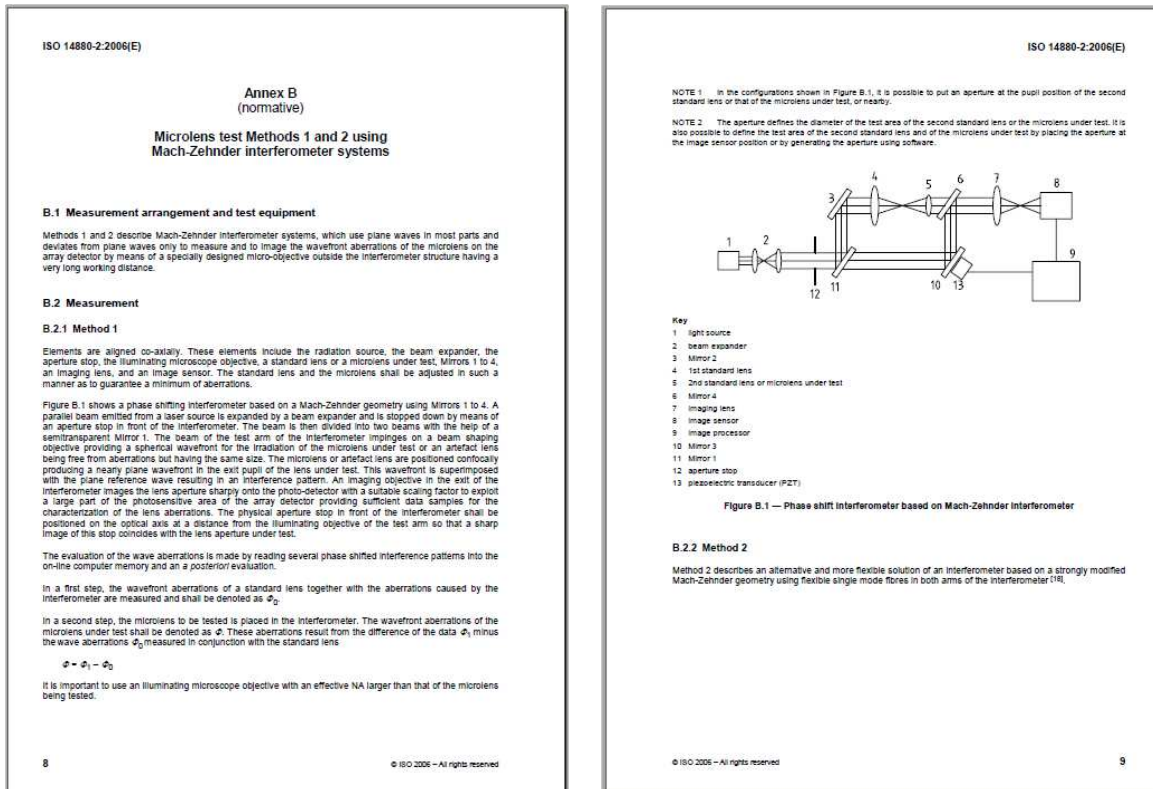


図 4.4 ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations Annex B (Normative) に記述された日本提案の投影型ハードウェアアパーチャーを設けた Mach-Zehnder 干渉計

4.3.2 ラウンドロビンテスト

4.3.2.1 ラウンドロビンテスト実施方法

前項で説明したように、ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations には、Mach-Zehnder 干渉計を用いた透過波面収差測定光学系に投影型ハードウェアアパーチャーを設けた方式と、ファイバー光学系を用いた方式 (Erlangen 大 (Germany) で開発) が併記されている。この両者の Mach-Zehnder 干渉計の方式については、同一サンプルの比較測定 (ラウンドロビンテスト) を行い、両者の差の有無を先に検証した。先ず日本でマイクロレンズサンプルの測定を行い、現地 (ヨーロッパ) に送付し、現地の干渉計で比較測定してもらう方法をと

った。

(1) 実施方法

以下の協力先に、本プロジェクトで試作した干渉測定装置で測定したマイクロレンズサンプルを送付し測定を依頼した(2002年9月末:測定データを添付して送付). 先方から報告された測定データを、本プロジェクトでの測定データと比較し対応関係を確認した。

1) ラウンドロビンテスト実施先

- ・ヨーロッパ
 - － Erlangen University (Nuremberg, Germany) : Erlangen 大学
 - － Vrije University Brussel (Brussels, Bergium) : Vrije 大学
 - * いずれも Mach-Zehnder 型干渉測定装置を保有
 - * Vrije Universitat Brussel は、基本的には Erlangen University で開発された Mach-Zehnder 型干渉測定装置を使用しているが、カップリングレンズが異なるなど細部では仕様が異なる。

2) 測定レンズサンプル

以下の3種類のレンズを事前に測定し、協力先に送付した。

サンプルA, サンプルBは、それぞれ同一形状のレンズが一枚の基板に形成されているが、サンプルCは、異なる3種類のレンズがそれぞれ複数個のブロックに分かれ同一基板に形成されている。

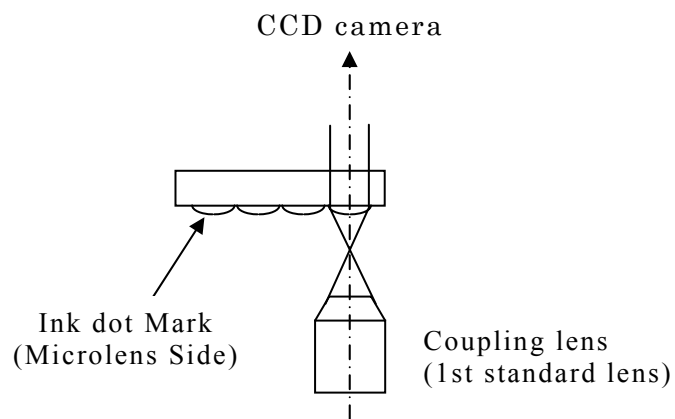
- ・ サンプルA (GRIN (分布屈折率型) マイクロレンズ)
 - － レンズ径 : $\varphi=240\mu\text{m}(0.24\text{mm})$
 - － 基板厚 : 0.53mm

- ・ サンプルB (GRIN (分布屈折率型) マイクロレンズ)
 - － レンズ径 : $\varphi=85\mu\text{m}(0.085\text{mm})$
 - － 基板厚 : 0.34 mm

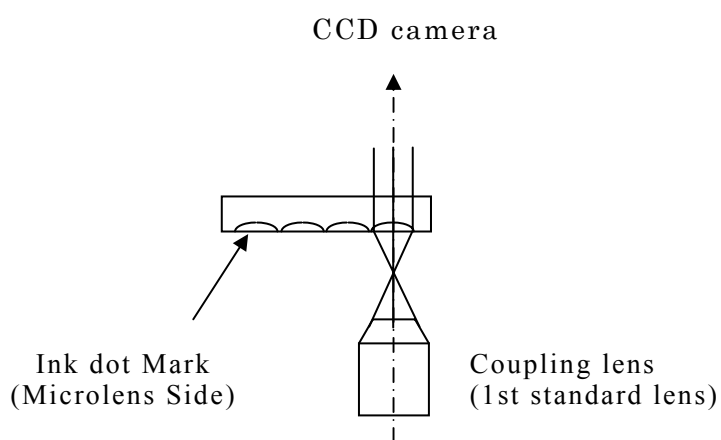
- ・ サンプルC (球面型 マイクロレンズ)
 - － レンズ径 : $\varphi=20\mu\text{m}(0.02\text{mm})$, $\varphi=30\mu\text{m}(0.03\text{mm})$, $\varphi=40\mu\text{m}(0.04\text{m})$
 - － 基板厚 : 0.5 mm

3) 測定方向

球面型マイクロレンズ，GRIN（分布屈折率型）マイクロレンズともに図 4.5 に示すようなレイアウト（方向）での測定を依頼した．



(a) 球面マイクロレンズの場合



(b) GRIN（分布屈折率型）マイクロレンズの場合

図 4.5 ラウンドロビンテストの際のサンプル測定レイアウト指示

3) 測定レンズの特定

同一基板に複数個のレンズが形成されているため，測定対象レンズを特定する必要があり，図 4.6 に示すように測定レンズを指定した．測定は，可能な限り 3 回の

繰り返し測定を行ったが、今回は先方の事情により 1 回になっている。

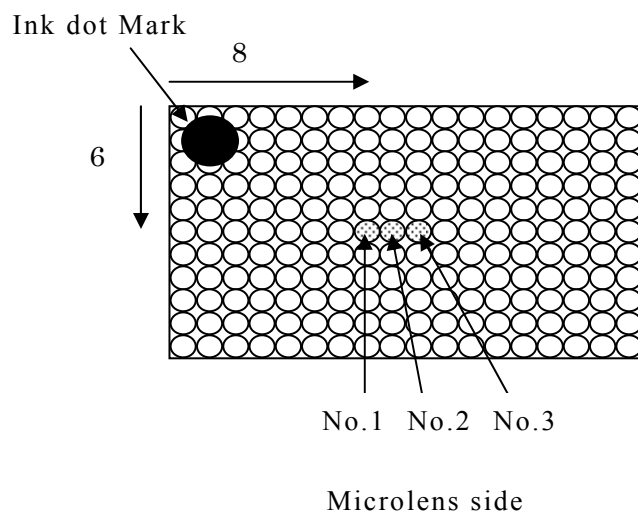
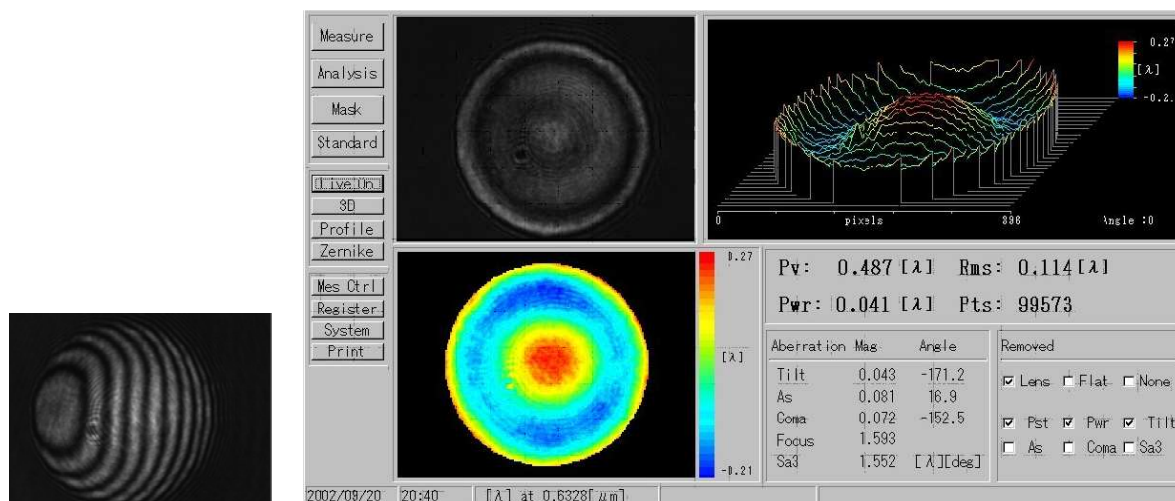


図 4.6 ラウンドロビンテストのサンプルレンズアレイ内の測定レンズ指示

4) Mach-Zehnder 干渉計での被検レンズ測定

図 4.7 にラウンドロビンテストのマイクロレンズサンプルの波面収差測定結果例を示す。また、図 4.8 に被検マイクロレンズ測定例を示すような干渉計により生成された干渉縞を右上に示し、測定データを中央に配置してある。下部には、測定結果のまとめ(波面収差量、ゼルニケ定数)を表示している。



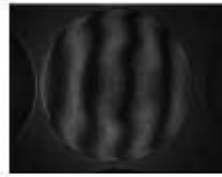
(a) 干渉縞

(b) 波面収差測定結果

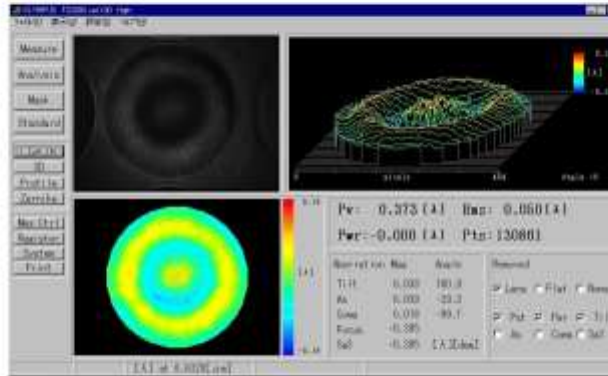
図 4.7 ラウンドロビンテストのマイクロレンズサンプルの波面収差測定結果例

Data Sheet

Sample : Sample_A_No.2
 Lot No. : No.1
 Effective Aperture : 90%
 Traces : 1



Result



Pw	0.878
Pwv	0.06
Pwv	0
Ptw	180861
Tilt	0.088
Tilt Ang	160.864
As	0.089
As Ang	-79.241
Caas	0.0181
Caas Ang	-99.144
Bas	-0.896
Bas Ang	-0.896

Zernike

1	1	0.1618
2	2 ₀₀ Z	-0.0867
3	3 ₀₀ Z	0.0006
4	4 ₀₀ Z	-0.0018
5	5 ₀₀ Z	0.0188
6	6 ₀₀ Z	-0.0189
7	(2 _c -2) ₂₀ Z	0.0078
8	(2 _c -2) ₄₀ Z	-0.0061
9	8 _c -8 _c +1	-0.0706
10	6 _c 6 _c Z	-0.061
11	6 _c 4 _c Z	-0.0084
12	(4 _c -2) ₄₀ Z	-0.0087
13	(4 _c -2) ₆₀ Z	0.0081
14	(10 _c -18 _c +2) ₄₀ Z	0.0076
15	(10 _c -18 _c +2) ₆₀ Z	0.0016
16	8 _c 6 _c -8 _c +1	-0.0478

Page 7

図 4.8 被検マイクロレンズ測定例

4.3.2.2 ラウンドロビンテスト実施結果

(1) Erlangen University (Germany) ・ Mach-Zehnder 干渉計の測定結果

図 4.9～図 4.12 に Erlangen 大学 Mach-Zehnder 干渉計との測定結果比較例を示す。

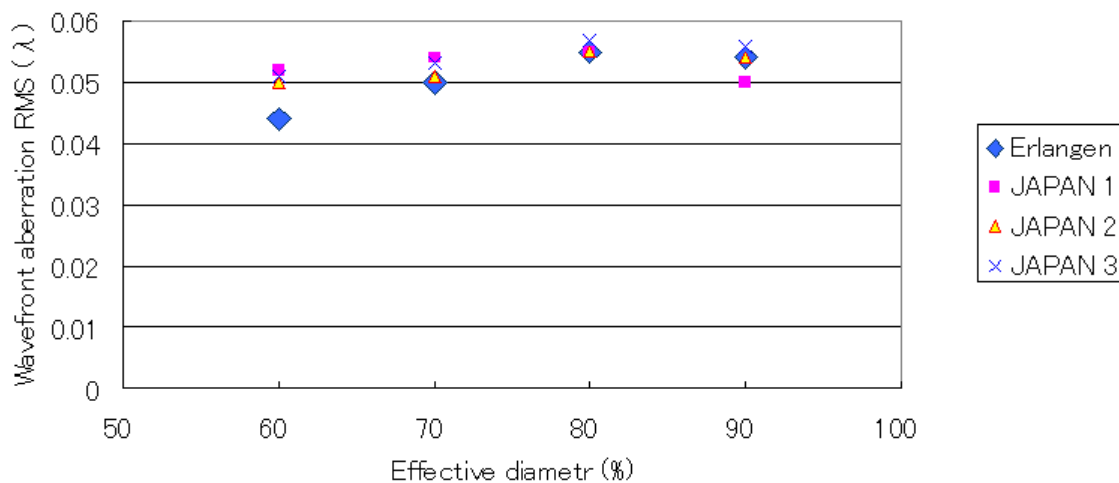


図 4.9 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果

Erlangen 大学（ドイツ）との比較（ $\varphi=240\mu\text{m}$ マイクロレンズ：No.1）

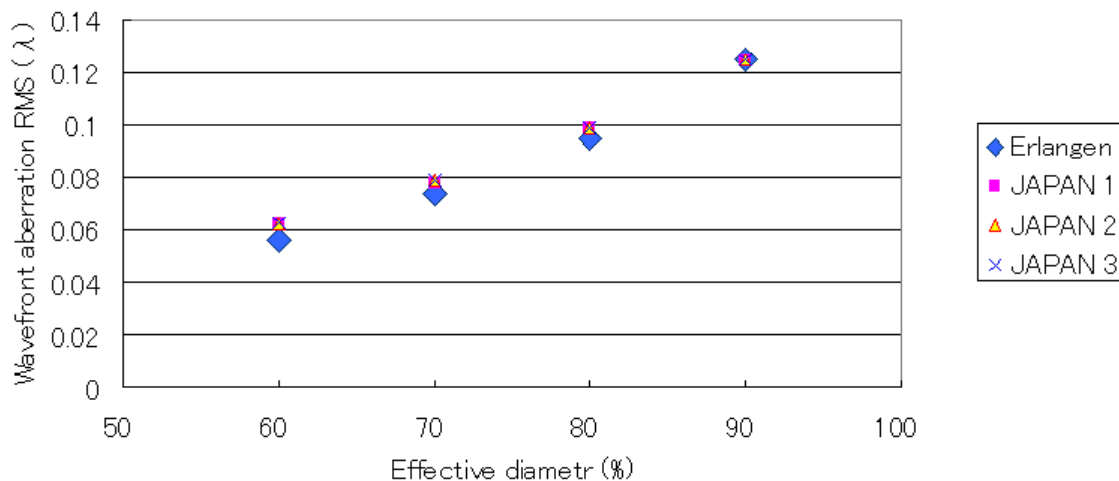


図 4.10 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果

Erlangen 大学（ドイツ）との比較（ $\varphi=85\mu\text{m}$ マイクロレンズ：No.1）

サンプル A ($\varphi=240\mu\text{m}$), サンプル B ($\varphi=85\mu\text{m}$), サンプル C ($\varphi=40\mu\text{m}$, $\varphi=30\mu\text{m}$)
とも改良型 Mach-Zehnder 干渉計とは高い相関を示しており, 両者の差は小さい. サ

サンプル A のマイクロレンズの測定範囲(直径)を 60%程度に絞った場合と、サンプル C レンズ($\phi=30\mu\text{m}$)の測定結果では若干の差が生じている。それぞれ RMS 値で 0.005λ , 0.01λ の差であり実用的には問題ないと言えるが、やはりレンズ径が小さくなると測定結果の差が大きくなる可能性は高い。Erlangen 大学では、 $\phi=20\mu\text{m}$ のレンズは測定が困難とのことで未実施。

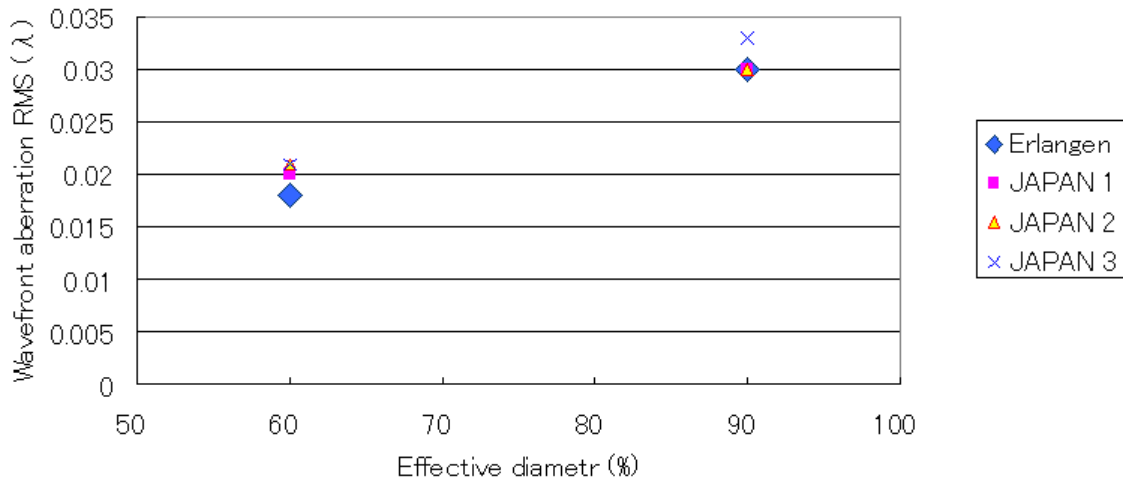


図 4.11 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Erlangen 大学 (ドイツ) との比較 ($\phi=40\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.1)

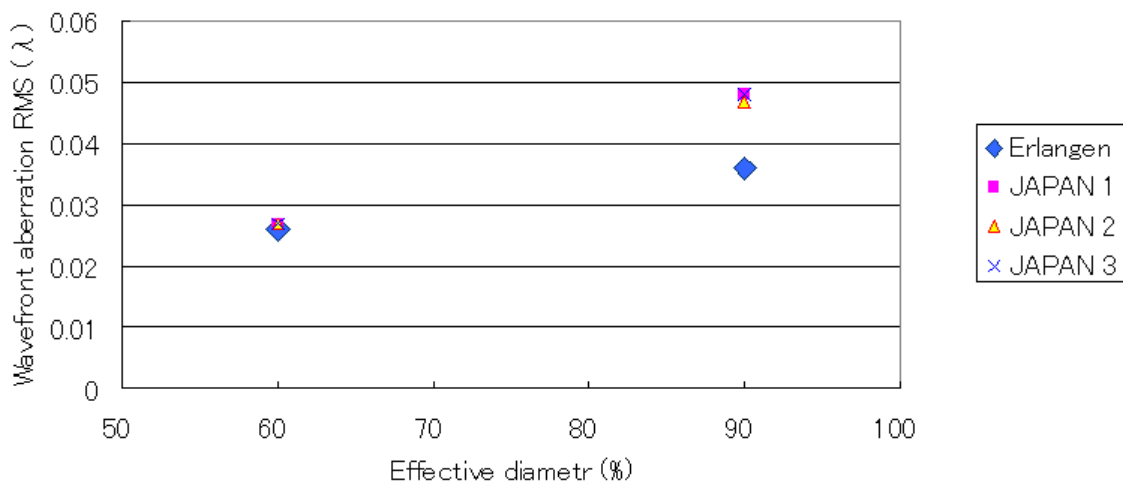


図 4.12 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Erlangen 大学 (ドイツ) との比較 ($\phi=30\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.1)

(2) Vrije Universitat Brussel (Belgium) ・ Mach-Zehnder 干渉計の測定結果

以下, Vrije 大学 Mach-Zehnder 干渉計との測定結果比較例を示す. サンプル A, B, C ともそれぞれ 3 個の異なるレンズの測定を実施してくれた. ただし, $\phi=20\mu\text{m}$, $\phi=30\mu\text{m}$ のレンズは測定が困難とのことで未実施.

図 4.13～図 4.15 にサンプル A ($\phi=240\mu\text{m}$)の測定結果を示す. 最大の差がある部分で RMS (λ): 0.006 程度であり, 両者の差があるとは言い難い. また, No.1 ～ No.3 の異なるレンズ特性を持つサンプルに対しても, 測定結果の一致度が高いと言える.

図 4.16～図 4.18 にサンプル B ($\phi=85\mu\text{m}$)の測定結果を示す. サンプル A と同じく最大の差がある部分で RMS (λ): 0.006 程度であり, 両者の差があるとは言い難い. 開口径を絞ると若干誤差が増えているように見えるが, これは, 開口径を決定する際の誤差の影響を受けている可能性もある.

図 4.19～図 4.21 にサンプル C ($\phi=40\mu\text{m}$)の測定結果を示す. グラフからは, サンプル A, サンプル B に比べ差が大きいのに見えるかもしれないが, サンプル C については開口を小さくした際の性能の向上が他の 2 つのサンプルに比べ顕著でないため, Y 軸のスケールが異なっているためである. これも, 最大の差がある部分で RMS (λ): 0.008 程度であり, 両者の差があるとは言い難い.

いずれのサンプルとも改良型 Mach-Zehnder 干渉計とは高い相関を示しており, 両者の差は小さく, 実用的には問題ない範囲と言える.

a) サンプル A ($\phi=240\mu\text{m}$)

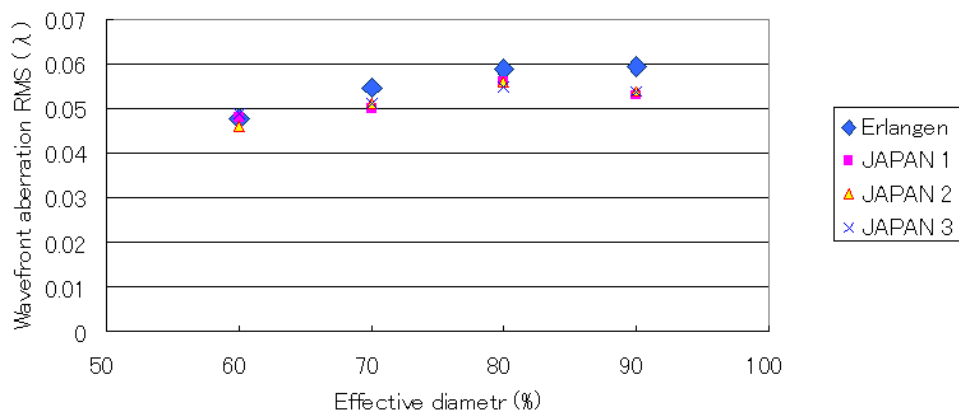


図 4.13 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=240\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.1)

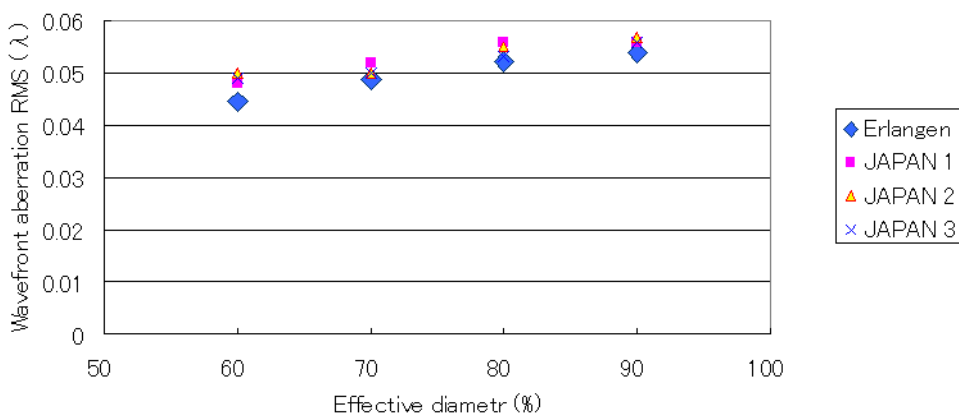


図 4.14 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=240\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.2)

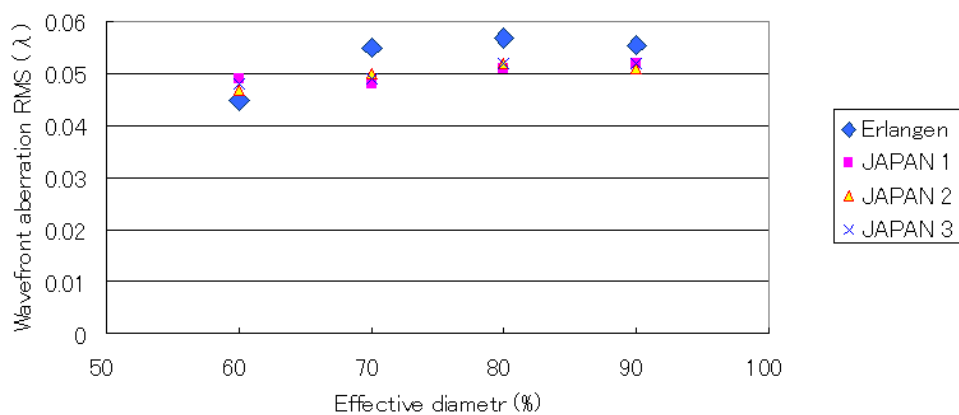


図 4.15 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=240\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.3)

b) サンプル B ($\varphi=85\mu\text{m}$)

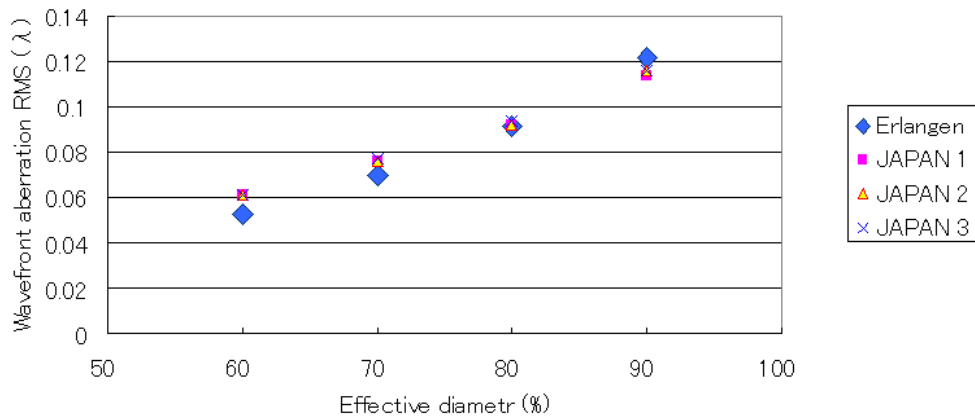


図 4.16 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\varphi=85\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.1)

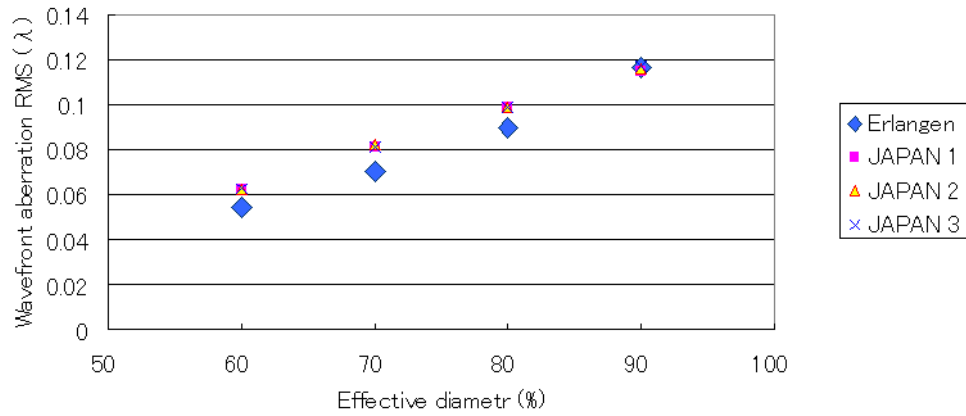


図 4.17 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\varphi=85\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.2)

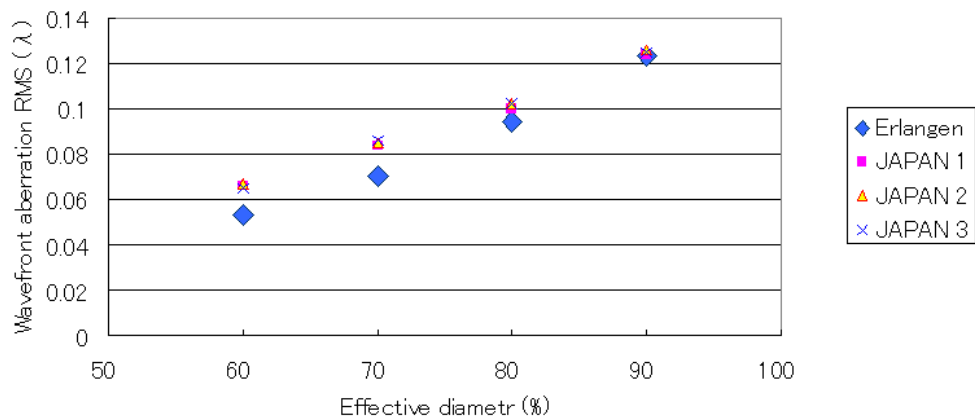


図 4.18 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\varphi=85\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.3)

C) サンプル C ($\phi=40\mu\text{m}$)

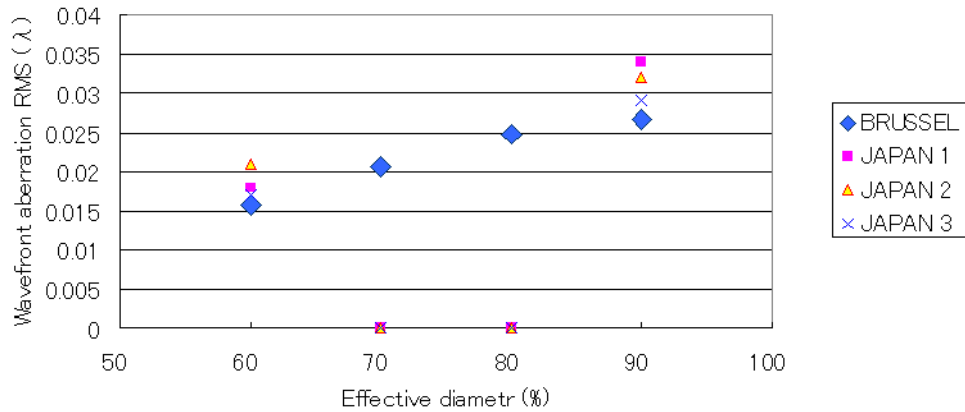


図 4.19 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=40\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.1)

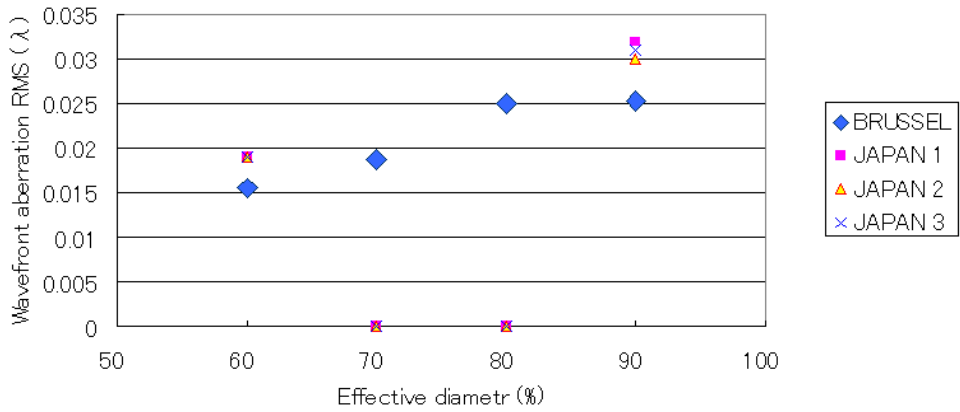


図 4.20 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=40\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.2)

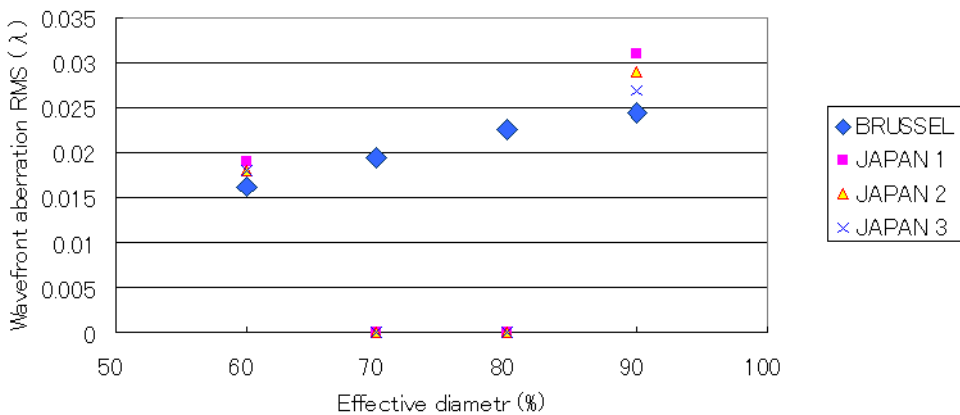


図 4.21 Mach-Zehnder 干渉計のラウンドロビンテスト結果
Vrije University Brussl (Brussels : ベルギー) との比較
($\phi=40\mu\text{m}$ マイクロレンズ : No.3)

4.4 まとめ

ISO 14880-2(2006) Microlens arrays - Part.2 Test methods for wavefront aberrations に投影型ハードウェアアパーチャを設けた Mach-Zehnder 型干渉計の技術を反映させる目的で，ラウンドロビンテストを行った．

基本的には，Mach-Zehnder 型の透過波面収差測定光学系を持つが，ファイバー光学系を用いた方式（Erlangen 大（Germany）で開発）で構造が異なっているが，比較した結果，予想以上の高い測定互換性があることがわかった．厳密には，波面収差測定時に用いるカップリングレンズの性能が，被検レンズの波面収差測定値に影響を及ぼしている可能性もある．しかし，実用的には問題ないレベルと見て良いのではないかと考える．このような結果を受け，筆者らが開発した，投影型ハードウェアアパーチャを設けた Mach-Zehnder 型干渉計の技術が ISO 標準の 1 方式として採用された．

参考文献

- [1] ISO 14880-1: "Microlens Array – Part 1; Vocabulary" (2001)

- [2] Takaaki Miyashita, "Standardization for Microlens and Microlens Arrays", Japanese Journal of Applied Physics(JJAP), Vol. **46**, No. 8B, pp. 5391-5396 (2007)

- [3] ISO 14880-2: "Microlens Arrays Part2 ; Test Methods for Wavefront aberrations" (2006)

- [4] ISO 14880-3: "Microlens Arrays Part3 ; Test Methods for optical properties other than Wavefront aberrations" (2006)

- [5] ISO 14880-4: "Microlens Arrays Part4 ; Test Methods for geometrical properties" (2006)

第 5 章 結論

5.1 本研究の成果

第 1 章～第 4 章で説明したように、ニーズが増大しているマイクロレンズの重要な光学特性のひとつである波面収差測定に関する検討をおこない、マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を持つことができるような基盤技術の提供ができたと考える。

第 2 章では、先ずマイクロレンズの作製技術とその特徴を整理し、異なる製法のマイクロレンズの評価を通じて作製法に依存した特性、性能の違いを明らかにした。次にマイクロレンズの光学特性測定技術を整理し、個々の技術の適用性を明らかにした。作製技術の影響が大きいレンズ表面の形状測定技術、さらには重要な光学特性である焦点距離測定法について整理した。ここでは、どのような評価技術をどのように適用すれば必要な情報が得られるかということについてまとめ、使用目的に合わせた特性評価法を明らかにした。また、代表的な光学特性である波面収差の測定法についても整理した。

第 3 章では、レンズの代表的な光学特性測定法である波面収差測定技術をマイクロレンズに適用する場合の課題を整理し、マイクロレンズ特性測定に適用できる干渉計の方式を明らかにした。次に、マイクロレンズの波面収差測定用途に選定した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定装置に関し、シミュレーションで不要光を遮断するために、光学系の途中に設けたアパーチャーをマイクロレンズの瞳面に縮小投影、測定領域にだけ干渉縞を形成し物理的に測定範囲外の光束を遮断した場合（ハードウェアアパーチャー）と、ソフトウェアのみで測定範囲を規定した場合（ソフトウェアアパーチャー）との差異について検証した。次いで、マイクロレンズの波面収差測定用の投影型ハードウェアアパーチャーを実装した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定装置の開発結果を示した。さらに、ハードウェアアパーチャーと、ソフトウェアアパーチャーの差異をシミュレーションと実測とで比較検証し、マイクロレンズ用波面収差測定用干渉計に必要な要件を明らかにした。また、開発したハードウェアアパーチャーを実装した Mach-Zehnder 干渉計を用いた波

面収差測定装置の実効焦点距離測定装置への応用も示し、技術の展開の可能性を示した。

第4章では、マイクロレンズの特性について、その定義と特に代表的な光学特性評価法である波面収差測定法を国際標準に適用した結果を示した。開発したハードウェアアパーチャを用いたマイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計の技術を、マイクロレンズの ISO 標準 (14880 Part 2 Test Methods for Wavefront aberration) に反映した。日本の競争力の高い技術分野の技術を国際的に広めるとともに、産業界の期待にもこたえることができたと考えるが、その状況を示した。

以下、代表的な成果を整理すると以下のようなになる。

1. マイクロレンズとその計測技術

マイクロレンズの特性評価技術をまとめ、技術の適用性を明らかにした。

2. マイクロレンズの波面収差測定

代表的な光学特性である波面収差測定用の干渉計開発を通じて、評価技術の理論検証と実測との対応を検証し、実用技術としての可能性を明らかにした。

3. マイクロレンズの国際標準開発

産業界のニーズに対応した、マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を持つための国際標準開発をすすめた。

4. 以上のようにマイクロレンズの特性評価技術（測定技術）として不可欠な

Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定技術を開発し、国際標準にも反映することで、マイクロレンズの評価技術を誰にも使えるものにし、マイクロレンズ製品の市場価値を高めて行くための研究として貢献できた。

5.2 今後の課題

マイクロレンズの重要な光学特性のひとつである波面収差測定に関するニーズに対応する形で本研究を開始し、Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定技術の必要要件を明らかにし、マイクロレンズメーカー（サプライヤ）とユーザー間で共通の評価基準を持つことができるような基盤技術の提供ができたと考える。今後は、

さらに以下のような検討を継続して行きたいと考える。

- (1) Mach-Zehnder 干渉計を用いた波面収差測定技術を、さらに安定性の高いものにすることで低価格な測定装置の開発につなげ、より利用しやすくして行く。その結果、さらにマーケット規模の拡大につながることを期待できる。
- (2) 光学特性である波面収差と形状特性をリンクできるような計測技術の開発を検討して行く。
- (3) マイクロレンズの国際標準の技術進化、応用範囲の変化に対応できるような改定作業を含めた開発を進めて行く。

5.3 まとめ

Mach-Zehnder 干渉計測技術の研究、マイクロレンズの国際標準開発の研究も含め、マイクロレンズの評価技術を誰にも使えるものにし、マイクロレンズ製品の市場価値を高めて行くことに繋がったと考える。と同時に、マイクロレンズとその計測技術の重要性が再認識でき、さらにマイクロレンズの波面収差測定技術の精度向上など新たな課題も見えてきた。

謝辞

本研究は、筆者が奈良先端科学技術大学院大学 (NAIST) 物質創成科学研究科 物質創成科学研究専攻 光機能素子科学講座において、太田 淳 教授のご指導をいただき、ここに博士論文としてまとめることができたものです。太田 淳先生には主指導教員として、研究方針や論文にまとめる際の論理構造の組み立てなど、懇切丁寧に多岐にわたるご指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

奈良先端科学技術大学院大学 (NAIST) 物質創成科学研究科 物質創成科学研究専攻、演算・記憶素子科学講座の塩 寄 忠 教授には副指導教員として、超高速フォトニクス講座の河口 仁司教授、量子物性科学講座の山本愛士准教授、光機能素子科学講座の徳田 崇 准教授には指導教員として、有意義なまた適切なお助言をいただきました。広い視野に基づく洞察に満ちたご助言は本論文をまとめるにあたり大変参考になりました。深く感謝いたします。

また、マイクロレンズ用 Mach-Zehnder 干渉計測技術の研究は、筆者がマイクロレンズの波面収差測定技術開発に関して、M - Project「総合技術専門委員会」で委員長をつとめさせていただいた際の共同研究に負っている部分が大きいものです。

M - Project は、経済産業省から「基準認証研究開発事業『光情報処理用マイクロレンズ光学性能評価方法の標準化』」テーマの業務委託を受けた光産業技術振興協会のプロジェクトで、「総合技術専門委員会」でともに委員を務めていただいた 諸隈 肇 (東海大: 当時)、加藤正彦 (コンサルタント)、浜中賢二郎 (日本板硝子)、プロジェクト運営に尽力いただいた 石原 聰 (光産業技術振興協会: 当時)、増田岳夫 (光産業技術振興協会)、装置の試作・実験データ収集に尽力いただいた 佐藤榮一、佐藤弘泰 (オプトデザイン) の各氏の協力なくしては完成しなかったものです。深く感謝いたします。

また、Mach-Zehnder 干渉計測技術の開発にあたって、特に干渉計のラウンドロビンテストを実施する際に協力いただいた Professor Johannes Schwider (Universität Erlangen-Nürnberg, Germany), Professor Hugo Thienpont, Dr. Heidi Ottevaere, Dr. Virginia Gomez (Vrije Universiteit Brussel, Belgium), ま

た, Mach-Zehnder 干渉計開発にさまざまな助言をいただいた, Dr. Richard Stevens (NPL: National Physical Laboratory, U.K.), Professor Angela Davies (University of North Carolina, USA) , Dr. Torsten Possner (GRINTECH, Germany) に感謝いたします.

研究発表目録

学位論文の主たる部分を公表した論文

- (1) **Takaaki Miyashita**, "Standardization for Microlens and Microlens Arrays", Japanese Journal of Applied Physics(JJAP), Vol. **46**, No. 8B, pp. 5391-5396 (2007)
- (2) H.Ottevaere, R. Cox, H. P. Herzig, **Takaaki Miyashita**, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. J. Woo, H. Thienpont, "Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies", Journal of Optics A: Pure Appl. Opt, **8**, S407-S429 (2006)
- (3) **Takaaki Miyashita**, "International standards for metrology of microlens arrays", Nano- and Micro-Metrology. Edited by Ottevaere Heidi, DeWolf Peter, Wiersma Diederik S, Proceedings of the SPIE, Vol. **5858**, pp. 9-22 (2005).
- (4) **Takaaki Miyashita**, Masahiko Kato, Jun Ohta, "Wavefront aberration measurement technology for microlenses using a Mach-Zehnder interferometer with effective apertures", Optical Engineering, submitted.

参考論文

- (1) **Takaaki Miyashita**, K.Hamanaka, M. Kato, E. Sato, T. Morokuma, S. Ishihara, "Wavefront aberration measurement technology for microlens using the Mach-Zehnder interferometer provided with a projected aperture", SPIE, Proceedings, Vol. **5532**, Interferometry XII: Applications, pp. 117-127 (2004)
- (2) Masahiko Kato, **Takaaki Miyashita**, K.Hamanaka, E. Sato, T. Morokuma, S. Ishihara, "Equivalence between the software determined and the hardware determined effective

numerical aperture in the interferometric measuring of microlens", SPIE, Proceedings, Vol. **5532**, Interferometry XII: Applications, pp. 136-146 (2004)

- (3) H.Ottevaere, R. Cox, H. P. Herzig, **Takaaki Miyashita**, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. J. Woo, H. Thienpont, "Comparative study of glass and plastic refractive microlenses and their fabrication techniques", Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects, Edited by Hugo Thienpont; Kent D. Choquette; Mohammad R. Taghizadeh, Proceedings of the SPIE, Vol. **5453**, pp.27-39 (2004).

国際会議における発表

- (1) **Takaaki Miyashita**, "International standards for metrology of microlens arrays", Institute of Physics Optical Group, Micro-optics and Metrology, Cambridge, (November, 2003) [Invited]
- (2) H.Ottevaere, R. Cox, H. P. Herzig, **Takaaki Miyashita**, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. J. Woo, H. Thienpont, "Comparative study of glass and plastic refractive microlenses and their fabrication techniques", SPIE Photonics Europe '04, (Apr., 2004) [Invited]
- (3) **Takaaki Miyashita**, K.Hamanaka, M. Kato, E. Sato, T. Morokuma, S. Ishihara, "Wavefront aberration measurement technology for microlens using the Mach-Zehnder interferometer provided with a projected aperture", SPIE, Annual meeting '04, 5532-12, (Aug., 2004)
- (4) Masahiko Kato, **Takaaki Miyashita**, K.Hamanaka, E. Sato, T. Morokuma, S. Ishihara, "Equivalence between the software determined and the hardware determined effective numerical aperture in the interferometric measuring of microlens", SPIE, Annual meeting '04, 5532-14, (Aug., 2004)
- (5) **Takaaki Miyashita**, "International standards for metrology of microlens arrays", SPIE, Nano- and Micro-Metrology, 5858-2, (June, 2005) [Invited]

- (6) **Takaaki Miyashita**, "Applications and standerdization of Microlens and microlens arrays", MOC'06 (Microoptics Conference), Seoul, Korea, (Sep., 2006) [Invited]

国内学会における発表

- (1) 宮下隆明, "マイクロレンズアレイ -計測法と標準化- Microlens and Microlensarrays -Standardization snd Metrology", 第92回微小光学・第6回システムフォトンクス合同研究会 (2004) [Invited]

執筆書籍

- (1) 「マイクロレンズ（アレイ）の超精密加工と量産」, 第7節"マイクロレンズの応用", 技術情報協会, ISBN 4-906317-92-8 (2003)
- (2) 「Handbook Of Optical Interconnects」, Chapter 2 "The Microlens", CRC Press, Taylor & Francis, ISBN 0824724410 (2005)
- (3) 「リアプロジェクションテレビ」, 第4節 レンズ, 第2項 "マイクロレンズの最新技術", 情報機構株式会社, 2006, ISBN 4-901677- 54-3 (2005)
- (4) 「各種光学部材における透明樹脂の設計と製造技術」, 第3節 プラスチックレンズの応用, 第3項 "マイクロレンズアレイ", 情報機構株式会社, ISBN 978-4-901677-91-2 (2007)
- (5) 「用途別ガラス部材の改善と要素技術の最前線」, 第9章, 第2節 第3項 "マイクロレンズ", 情報機構, 978-4-904080-17-7 (2009)

Appendix

1. レンズの幾何光学的収差と波動光学的収差

レンズの収差は，幾何光学的には光を「光線」として捉えたザイデルの 5 収差と呼ばれる収差に分類されており，他に色収差も加えることがある．一方，波動光学では光を「波」として捉えレンズを透過した理想的な波面（「理想波面」）と実波面との差を波面収差として規定している．波面収差は，光学系を通過後の波面と、結像後の像点を中心とする参照球面との位相のズレを波長単位で評価する．この最大値（P-V 値）が 1/4 波長（Rayleigh Criterion（レーレー基準（レイリー限界）： $\Phi_{RMS} \leq \lambda / 4$ ））を越えなければ，あるいは，1/14 波長（Maréchal Criterion（マレシャル基準： $\Phi_{RMS} \leq \lambda / 14$ ））を超えなければ回折限界以下で理想像と大きな差が無いとされている．

本論文では，マイクロレンズの収差についてはすべて波面収差について取り扱っているが，ここでは，従来の幾何光学的なザイデルの 5 収差と波面収差との関係について説明する．

A. ザイデルの 5 収差

ザイデルの 5 収差（*1）は，図 A.1 に示すように，共心光学系の単色光に対する収差で，球面収差，コマ収差，非点収差，歪曲収差（ディストーション），像面湾曲の 5 種類で構成されている．これらはレンズ面に入射する光線の入射角 a に関して $\sin a$ をテイラー展開した 3 次の項の係数としてそれぞれ表される．このため 3 次収差とも呼ばれる．

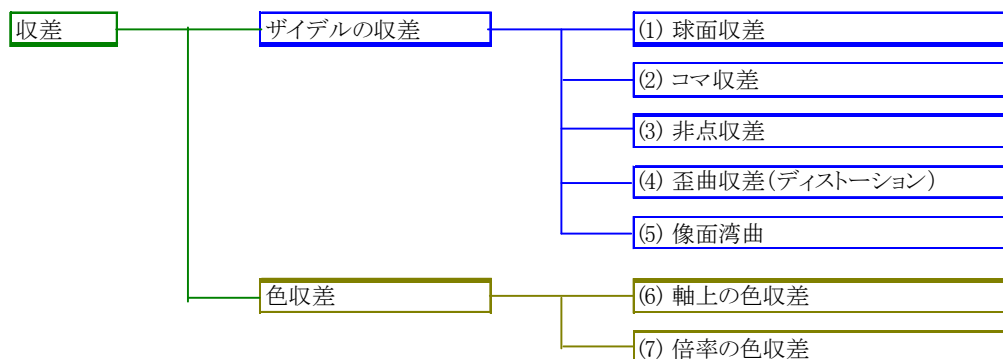


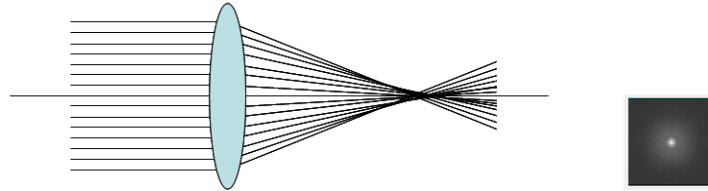
図 A.1 レンズの幾何光学的収差

*1) ザイデルの 5 収差（Seidel's classification of aberrations）：ドイツの光学学者 Phillip Ludwig von Seidel によりまとめられたレンズ系の基本収差．

ザイデルの 5 収差は以下のように説明される。

1) 球面収差 (spherical aberration)

レンズに光軸と平行な光線を入射させたとき、レンズの光軸に近い光線の焦点位置に比べ、光軸から離れたレンズ周辺部に入射した光線の焦点位置がレンズに近い方に移動する現象で、F 値の小さな明るいレンズになるほどその傾向が強くなる。



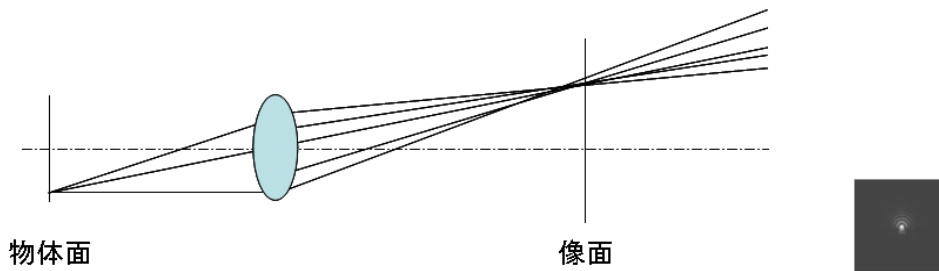
a) 球面収差のある光学系の光束

b) 結像スポットの例

図 A.2 球面収差の例

2) コマ収差 (coma aberration)

球面収差が補正されたレンズの画像周辺部に見られる現象。光軸外の斜めから入射する光線が像面上の一点に結像せず、画面の中心方向あるいはその逆の方向に尾を引いたように結像する。この尾を引いた状態が彗星に似ているためコマあるいはコマ収差と呼ぶ。光軸上では物点が点像として結像するレンズでも、光軸から離れた点から出てレンズの周縁部を通る光線は、レンズの中心を通る主光線に比べ異なった屈折をするために起こる。



物体面

像面

a) コマ収差のある光学系の光束

b) 結像スポットの例

図 A.3 コマ収差の例

3) 非点収差 (astigmatism)

球面収差とコマ収差を補正してあるレンズでも、光軸から離れたところの点を結像させると点像が点として結像せずに楕円形にぼけたり、水平方向、あるいは垂直方向に線状の形状に結像することがある。これは、像面を移動させると点像の形状も変化する。

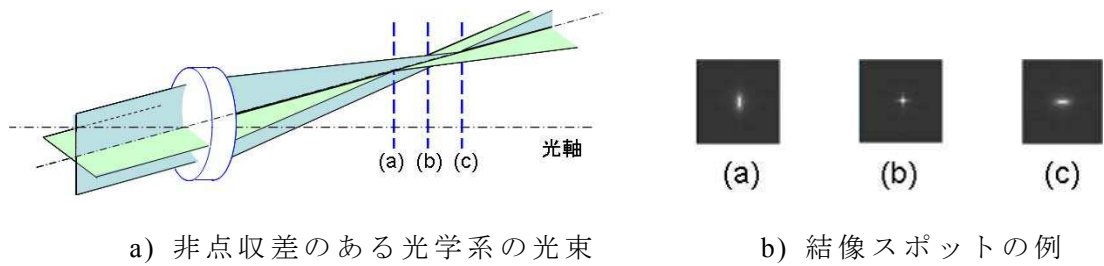
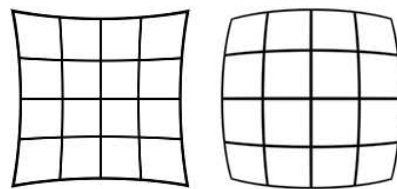


図 A.4 非点収差の例

4) 歪曲収差 (ディストーション : distortion)

結像された像が物体と相似形にならずに、歪んで写る収差。ディストーションとも言う。例えば物体が矩形の場合、その像の歪みが糸巻型になる場合を糸巻型歪曲、樽型になる場合を樽型歪曲と言う。非対称型のレンズはこの歪曲が生じやすく、対称型のレンズでは歪曲が目立ちにくい。



(a) 糸巻型歪曲 (b) 樽型歪曲

図 A.5 歪曲収差 (ディストーション) の例

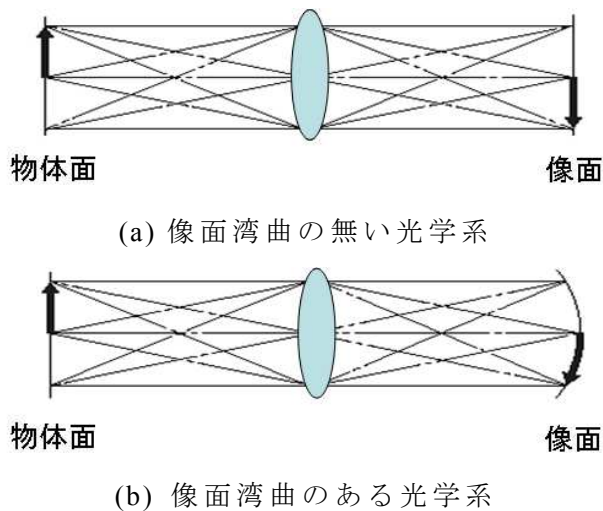


図 A.6 像面湾曲の例

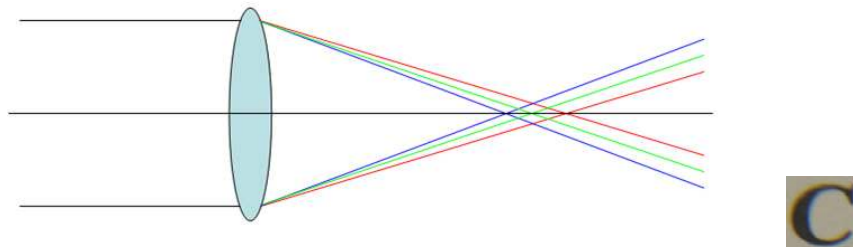
5) 像面湾曲 (field curvature)

平面に焦点を合わせたとき、像面が平面にならずに、湾曲した像面に結像する収差を言う。画面中心に焦点を合わせると周辺部がぼけ、逆に周辺にピントを合わせると中心がぼけてしまう。レンズ付フィルム（カメラ）では、像面湾曲を補正するために（その特性を逆に活用して）フィルム面を湾曲させた設計を採用している製品もある。

ザイデルの 5 収差には分類されないが、色収差は以下のように説明される。

6) 色収差 (chromatic aberration)

光学系に使用するガラスは、各波長により屈折率が異なる特性を有している。それにより各波長で焦点距離が異なり、結像位置のズレが発生する。この現象を「色収差」と呼び、光軸上での軸方向でのズレを「軸上の色収差」、像平面上でのズレを「倍率の色収差」と区別して呼ぶ。



a) 色収差のある光学系の光束 b) 色収差のある像の例

図 A.7 色収差の例

参考文献

- [1] 久保田 広, "光学", (岩波書店) (1971)
- [2] 久保田 広, "波動光学", (岩波書店) (1971)

B. 波面収差と Zernike 多項式

レンズの収差を波動光学では光を「波」として捉え、レンズを透過した理想的な波面（「理想波面」）と実波面との差を波面収差として規定している。図 B.1 にその例を示すが、波面収差は光学系を通過後の波面と、結像後の像点を中心とする参照球面波との位相のズレを波長単位で評価する。

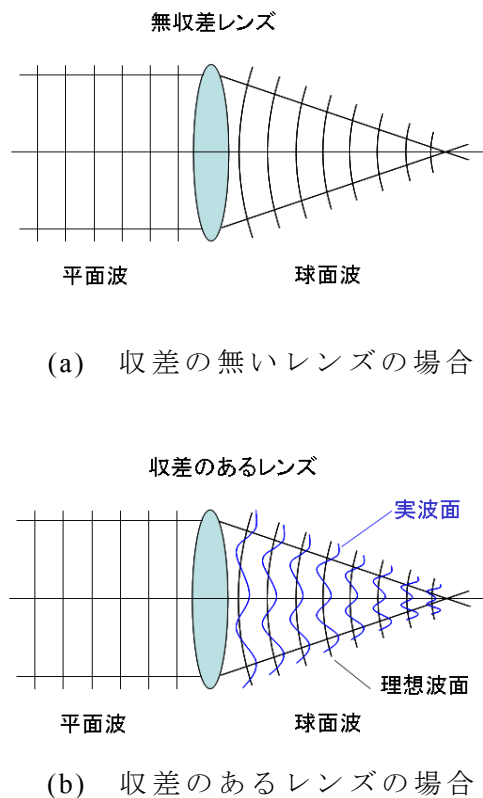


図 B.1 光学系の波面収差

光学系が対称（光軸を中心とした回転対称）の場合には波面収差を近似する多項式として、極座標を採用した Zernike 多項式（Zernike circle polynomial）がこの目的によく使われる。

観察する波面を $W(\rho, \theta)$ とすると、光学系の波面収差は光線が瞳を通過する座標を x, y として $W(x, y)$ として表される。実際は各 x, y に対して対応する波面収差 $W_i(x, y)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) が光線追跡により求まる。 $W(x, y)$ を x, y およびレンズパラメータの関数として表すことは複雑な光学系では困難だが、あらかじめ関数形を決めておいて W_i ($i = 1, \dots, n$) からその係数を最小二乗法により決めること

ができる。

Zernike 多項式の $U(\rho, \theta)$ は完全な 2 つの正負の変数を持つ直交多項式 (B.1) 式で表される。 ρ と θ は、単位円の内部の連続データで、 ρ は 0 から 1 までのラジアル座標での変数、 θ は 0 と 2π の間の方位角の値を持つ。

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} U_n^l(\rho, \theta) U_n^l(\rho, \theta) \rho d\rho d\phi = \frac{\pi}{2(n+1)} \delta_{nn} \delta_{ll} \quad (\text{B.1})$$

ここで、 d_{ij} はクロネッカーシンボル、
 n はラジアル多項式の次数、
 l が角度依存パラメーターを表す。

これらの数は共に偶数か、奇数である。それで $n-l$ は常に偶数である。
 また、多項式は (B.2) 式のように分離することができる。

$$U_n^l(\rho, \theta) = U_n^{n-2m}(\rho, \theta) = R_n^{n-2m}(\rho) \left(\frac{\sin}{\cos} \right)^m (n-2m) \theta \quad (\text{B.2})$$

サイン関数は $n-2m > 0$ のケースで、コサイン関数は $n-2m < 0$ の条件で用いられる。

放射状の多項式 $R_n^l(\rho)$ は、 n と $0 < m < n$ の間の値をとる。

また、ラジアル多項式は (B.3) 式のように表現される。

$$R_n^{n-2m}(\rho) = R_n^{-(n-2m)}(\rho) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s} \quad (\text{B.3})$$

ここで Zernike 多項式が指標 r によって並べられる。

$$r = \frac{n(n-1)}{2} + m + 1 \quad (\text{B.4})$$

連続波面 $W(x, y)$ 、が Zernike 多項式の線形のコンビネーションによって (B.5)

式のように表わされる。

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} U_{nm}(\rho, \theta) = \sum_{r=0}^L A_r U_r(\rho, \theta) \quad (\text{B.5})$$

次に、Zernike 多項式は n と m の次数の組み合わせで、表 B.1 のように表される。特に、結像スポットの品質に影響の大きい球面収差、コマ収差、非点収差はそれぞれ、 n と m の組合せで表される。それぞれ、球面収差 ($n=4, m=2; 64\rho^4-6\rho^2+1$)、コマ収差 (X 成分: $n=3, m=2; (3\rho^3-2\rho) \cos \theta$, Y 成分: $n=3, m=1; (3\rho^3-2\rho) \sin \theta$)、非点収差 ($0^\circ, 90^\circ$ 方向: $n=2, m=2; \rho^2 \cos 2\theta$ / $\pm 45^\circ$ 方向: $n=2, m=0; \rho^2 \sin 2\theta$) と表すことができ、波面収差を近似する Zernike 多項式の中に位置づけることができる。

表B.1 Zernike polynomial とザイデルの収差との関係

n	m	n-2m	r	Zernike polynomial	Meaning	
0	0	0	1	1	Piston or constant term	
1	0	1	2	$\pi \sin \theta$	Tilt about x axis	傾き (Tilt) X成分
1	1	-1	3	$\pi \cos \theta$	Tilt about y axis	傾き (Tilt) Y成分
2	0	2	4	$\pi^\pi \sin 2\theta$	Astigmatism at $\pm 45^\circ$	非点収差 ($\pm 45^\circ$ 方向)
2	1	0	5	$\pi/\pi \pi/$	Focus shift	フォーカスシフト
2	2	-2	6	$\pi^\pi \cos 2\theta$	Astigmatism at 0° or 90°	非点収差 ($0^\circ, 90^\circ$ 方向)
3	0	3	7	$\pi^\pi \sin 3\theta$		
3	1	1	8	$\pi/\pi \pi/\sin \theta$	Third-order coma along x axis	3次コマ収差 (X成分)
3	2	-1	9	$\pi/\pi \pi/\cos \theta$	Third-order coma along y axis	3次コマ収差 (Y成分)
3	3	-3	10	$\pi^\pi \cos 3\theta$		
4	0	4	11	$\pi^\pi \sin 4\theta$		
4	1	2	12	$\pi/\pi \pi/\pi \sin 2\theta$		
4	2	0	13	$\pi/\pi \pi/\pi/$	Primary spherical aberration	3次球面収差
4	3	-2	14	$\pi/\pi \pi/\pi \cos 2\theta$		
4	4	-4	15	$\pi^\pi \cos 4\theta$		

参考文献

- [1] F. Zernike, 'Begunstheorie des Schneidenver-Fahrens und Seiner Verbesserten Form der Phasenkontrastmethode', Physica, Vol. 1, No. 689 (1934)
- [2] M. Born, E. Wolf, 'Principles of Optics', Pergamon Press, New York (1964)
- [3] Daniel Malacara (Editor), Optical Shop Testing (Wiley Series in Pure and Applied Optics), Second Edition, p.464-486 (January, 1992)
- [4] Daniel Malacara (Editor), Optical Shop Testing (Wiley Series in Pure and Applied Optics), 3rd edition, p.498-543 (July 16, 2007)
- [5] 久保田 広, "波動光学", (岩波書店) (1971)