



# シュリンクフィッタを用いた広視野レーザー顕微鏡\*

新田 勇\*\* 菅野明宏\*\*\* 岡本倫哉† 長岡 泰††

Study of a New Type of Laser Microscope with Wide Field of View Using a Shrink Fitter

Isami NITTA, Akihiro KANNO, Michiya OKAMOTO and Yasushi NAGAOKA

A shrink fitter is a ring-shaped new machine element to join mechanical components with different coefficients of thermal expansion. As an application of the shrink fitter several optical lenses were shrink-fitted in a lens-barrel using the shrink fitter. The optical axes of the several lenses in the lens-barrel agreed with each other regardless of changes in room temperature. The scanning lens assembled by the shrink fitter could focus the laser light well even over a wide scanning width. If such a scanning lens was incorporated into a laser microscope, object surfaces could be observed over a wider area, compared with the conventional microscope. In this study we have developed a new type of laser microscope with a field of view of 10 by 8 mm. The pixel number in the laser scanning direction of 10 mm was 20,000 and 16,000 in the perpendicular direction of 8 mm. Thus, one field of view of this laser microscope has 320,000,000 pixels. The observation result of some surfaces by this laser microscope are reported.

**Key words:** laser microscope, shrink fitter, scanner lens, field of view

## 1. 緒 言

著者らはシュリンクフィッタを用いて、レーザー走査用fθレンズの高精度化について研究を行っている<sup>1)~6)</sup>。シュリンクフィッタとは、熱膨張の異なる2つの機械要素を締めばめするための機械要素であり、レンズと鏡筒の締めばめに適用することができる<sup>1)~6)</sup>。

レーザー走査用fθレンズはレーザー光束を微細に集光し、かつ広い範囲にわたりレーザー光を走査するための光学レンズである<sup>6)~9)</sup>。レーザー発振器は、出力の大きいものから小さいものまであり、例えば高出力レーザーはレーザー加工機に用いられる。また、出力が中程度のものはプリント基板などのレーザー露光機として、さらに低出力レーザーはレーザー顕微鏡などに用いられている。いずれの場合でもfθレンズは各装置の高精度化に直結する重要な光学部品となっている。これまで、レーザー加工機<sup>10)</sup>とレーザー直接描画装置<sup>11)</sup>については、シュリンクフィッタを適用した結果、細く集光したレーザースポット径を広い走査幅にわたり維持できることを報告してきた。本研究ではレーザー顕微鏡にシュリンクフィッタ法を適用し、従来のレーザー顕微鏡に比べて観察視野の広領域化を試みた。レーザー顕微鏡の場合は、結像面からのレーザー反射光が再びfθレンズを通るというところが、これまでのシュリンクフィッタの適用例である前二者と異なる。

図1には様々な観察装置の視野と解像度の関係を概略的に示した。観察装置の解像度を上げるとそれに反比例して視野は狭くなるのが分かる。すなわち、高い解像度では一度に見える領域が狭くなる。そのため、広い範囲を高精度に観察する必要

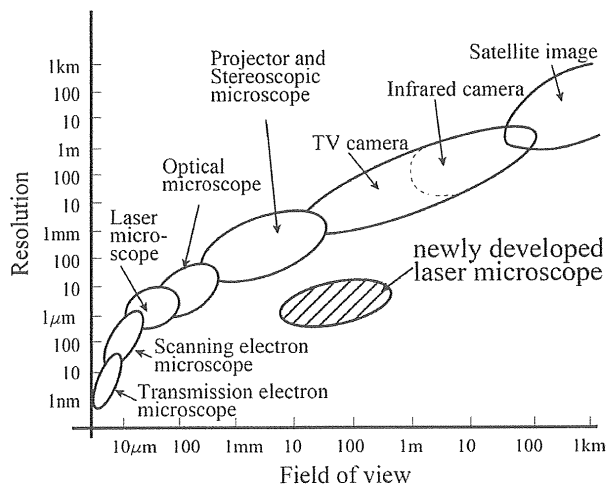


Fig.1 Relationships between resolution and field of view on various types of microscopes and cameras

があるときは、観察試料を移動させて複数回観察した後に、各画像をつなぎ合わせるが必要となる。ここで、各画像のつなぎ合わせの精度が悪いと、観察対象物の位置や形状が正確に観察できないという問題がある。観察回数が少ない場合はよいが、広い範囲を観察する場合は膨大な観察回数が必要され、それに比例して観察時間が長くなる。膨大な数の繰り返しを必要とする観察は理論的には可能であるが、観察時間が長すぎるために現実にはほとんど行われない。

この問題を解決するために、著者らはレンズ組み込みにシュリンクフィッタ法を用いて、図1の斜線で示す領域の観察装置の開発を目指している。走査幅全域でレーザーを微細に絞り込むことのできるfθレンズをキーテクノロジーとして、広視野で高解像度な観察装置の開発を行った。本研究では、試作したレーザー顕微鏡の基本性能と得られた観察画像を報告する。

\* 原稿受付 平成19年 3月26日

\*\* 正 会 員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050)

\*\*\* 正 会 員 新潟大学大学院自然科学研究科  
(新潟市五十嵐2の町8050)

(現、新潟県中央地域地場産業振興センター;新潟県三条市須頃1-17)

† 新潟大学大学院自然科学研究科(新潟市五十嵐2の町8050)

(現、株式会社リコー;東京都大田区中馬込1-3-67)

†† 新潟大学大学院自然科学研究科(新潟市五十嵐2の町8050)

2. 試作したレーザ顕微鏡の概要

2.1 装置の構成

図2に本研究で試作したレーザ顕微鏡の概略を示す。本装置は、共焦点光学系を用いた走査型レーザ顕微鏡の一種である。光源には波長405nmと650nmの半導体レーザを用いている。この2種類の波長のレーザに適合するように、2種類の fθレンズを製作した。物体の反射率は光の波長により異なる。したがって、複数の波長のレーザを使い分けることで観察対象が広がる。本報では主に波長が405nmの場合について報告する。半導体レーザから射出されたレーザはコリメータレンズにより平行光束にされ、偏光ビームスプリッタと1/4波長板を通過する。その後レーザは走査用平面ミラーによって偏向されて、fθレンズによって結像面上すなわち観察面上に集光される。レーザ走査用平面ミラーを安定して回転させるために空気動圧モータを用いた。波長405nm用fθレンズは、観察面上の走査幅10mmにわたってレーザ光が直径約2μmに集光するように設計した。表1にその光学特性を示す。観察面上で反射したレーザ光は途中まで往路を戻り、ビームスプリッタによって受光素子方向へ進路を変えられ、集光レンズによって受光素子の手前に置かれたピンホールに集光される。ピンホールを抜けてきたレーザは、その光強度を受光素子によって電圧に変換される。

受光素子の電圧は、A/D変換器(DP310, Acqiris社製)により

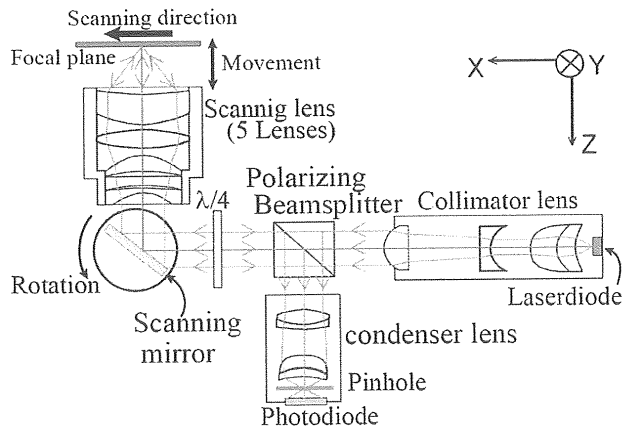


Fig.2 Layout of the developed laser microscope

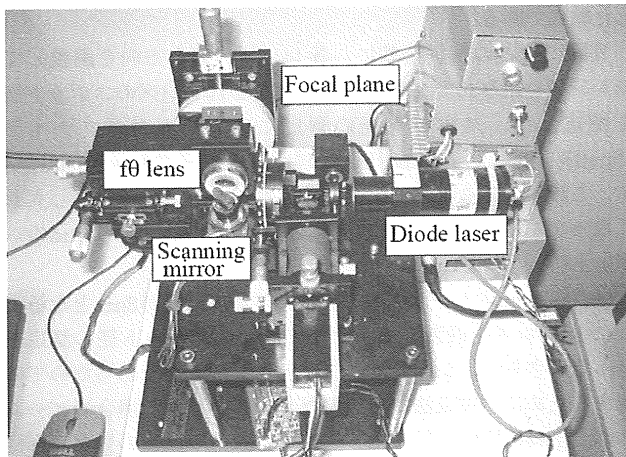


Fig.3 Overview of the developed laser microscope

Table 1 Optical properties of the fθ lens

Effective Focal Length	27.3mm
Back focal length	32.9mm
Wave length	405nm
Spot size	approx. Φ2μm
Scanning width	10mm

Table 2 Sizes of each lens [mm]

Lens No.	Radius of curvature (in)	Radius of curvature (out)	Diameter
L1	-12.28	-75.6	25
L2	-57.44	2760	25
L3	-53	-20.44	25
L4	210	-28.88	28
L5	35.8	56.2	28

100MHzのサンプリングスピードで12bitの数値に変換される。走査用平面ミラーの回転速度は9,000rpmであり、結像面上でのビームスポットの走査速度は約50m/sとなる。したがって、このサンプリングスピードによる変換は、走査幅10mmにわたり0.5μm間隔で反射強度を測定することに相当する。観察物は電動ステージによりレーザ走査方向と直角方向に約8mm副走査される。副走査方向の移動速度も0.5μm間隔に反射強度を取得できるように設定したので、観察画素としては縦横20,000画素×16,000画素となる。したがって、1画面あたりの画素数は3億2千万となる。この反射光の強度データを自作のソフトウェアで処理することで観察画像を形成した。画面に表示される画像の分解能は、水平方向と縦方向それぞれ0.5μmである。図3は、実際に製作したレーザ顕微鏡の外観である。

2.2 シュリンクフィッタ法を用いた fθ レンズ

図4は、本研究で用いたfθレンズの構成を示したものである。光学設計には光学解析ソフトcodeV(ORA製)を用いた。fθレンズは5枚組のレンズである。表2にレンズの主要な寸法を記す。表中ではレーザ入射面の曲率半径を記号inで表し、レーザ出射面の曲率半径を記号outで表している。絞りばめで組み込む都

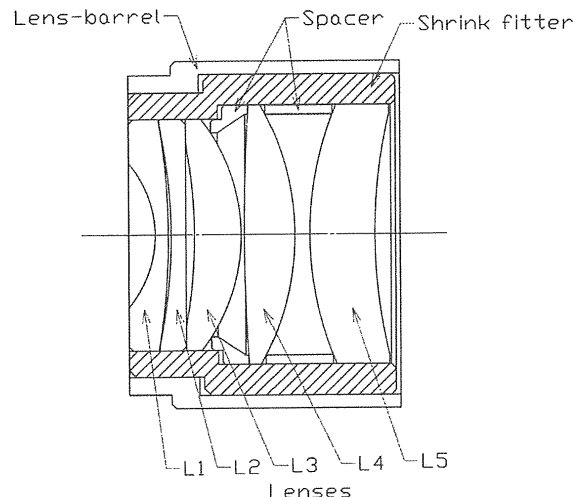


Fig.4 fθ lens with the shrink fitter

合上, レンズの外径は小さいものは25mmに, 大きいものは28mmに揃えた。

一般的には, 鏡筒内径とレンズ外径にはわずかな隙間が存在するので, 各レンズの光軸を一致させるのは難しい。また, 鏡筒とレンズの熱膨張係数が異なるために, 周囲の温度が変化すると鏡筒内のレンズは位置ずれを起こす。これが原因で周囲の温度が変化すると結像性能が悪化する。本研究では, これらのレンズをPOM製のシュリンクフィッタを介して鏡筒に締め付めた。したがって, レンズと鏡筒の間に隙間は存在せず, 各レンズの外周基準でレンズの中心を一致させることができる。また, 周囲の温度が変化する場合でも, シュリンクフィッタが適切に熱膨張してレンズの位置ずれを防止する。しかし, レンズ外周を締めているので, シメシロが大きい場合にはレンズが変形し過ぎて結像性能は悪化する恐れがある。

レンズの締めすぎを防止するために, 本研究ではあらかじめ有限要素法でレンズの変形を許容値以下にするシメシロを求めた<sup>12)13)</sup>。実際にレンズを締め付けるときは, この許容シメシロ以下で締め付けているので結像性能は設計値から大きく悪化することはない。

### 3. 実 験

#### 3.1 fθレンズの性能に及ぼすレンズ偏心の影響

シュリンクフィッタで組み立てたfθレンズの性能を調べるために, 結像面上のレーザスポットを測定した。fθレンズへの入射ビーム直径は9.6mmとした。fθレンズの焦点距離は約27.3mmである。またfθレンズ端面から結像面までの距離であるワーキングディスタンスは約30mmである。ガウス分布のレーザ光を入力した場合に, 結像面に集光するスポット径の概略は式(1)で計算できる。したがって, 本装置での概略のスポット径は約1.9μmとなる。

シュリンクフィッタ法を用いているので, 各レンズの光軸中心がレンズ外径中心と一致していれば, レンズの外径を基準にして各レンズの光軸中心を一致させることが可能である。すなわち, 締め付けによりレンズの心出しができることになる。そこで, fθレンズを構成する各レンズの偏心量と偏心方向をレンズ単体芯検査器(LCC-2-R-U, オリンパス製)を用いて測定した。その結果を図5に示す。ここで, 5枚のレンズに名前を付けてL1からL5と呼ぶことにする。各レンズのレーザ入射面における偏心の位置をS1で示し, 出射面における偏心の位置をS2で示す。これより, 最も大きい偏心量は17μmであり, 最も小さい偏心量は4μmであることが分かる。

次に, 各レンズの偏心が光学性能にどのような影響を及ぼすかについて光学解析ソフトで解析した。図6は, 偏心がない理想的な状態のスポット径の解析結果である。全走査幅にわたり, スポット径が約2μmとなっていることが分かる。

次に, 各レンズの偏心の方向によってスポット径がどのように変化するのかを調べるために, L1からL5の各レンズを45度毎に回転させてスポット径の解析を行った。その結果, L5以外のL1からL4までのレンズでは, 偏心方向によってレーザのスポット径が悪化することが分かった。ここで, 図は省略するが各レンズの偏心方向を考慮しないでレンズを組み込んだ場合, 走査端において最大で約5μmまでスポット径が悪化することが分かった。そこで, スポット径が小さくなるような各レンズの回転角度の組合せを調べた。その結果, 各レンズの偏心方向を調

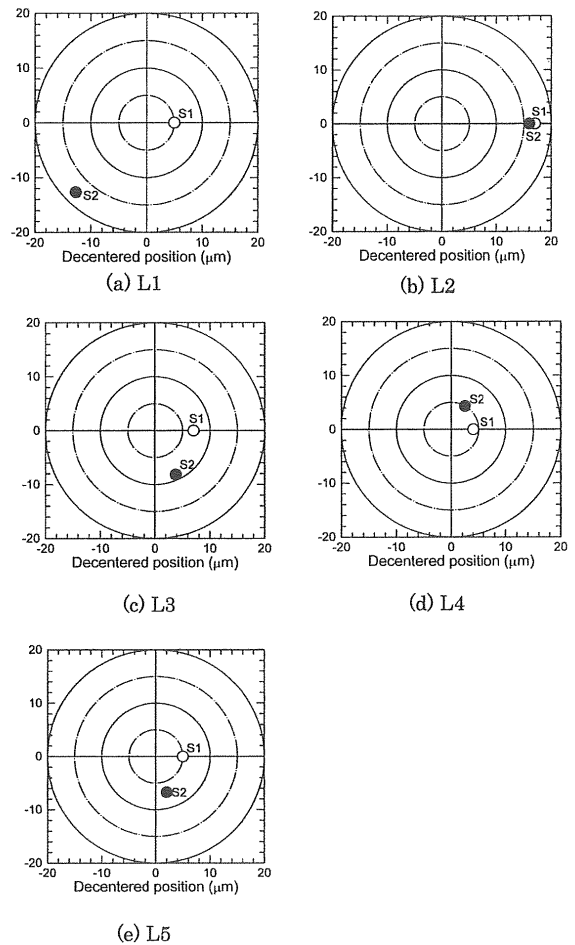


Fig.5 Measured position of optical axis of each lens  
S1: optical axis on incident side,  
S2: optical axis on injection side

$$d = 1.64 \frac{f\lambda}{D} \quad (1)$$

$d$ : diameter of laser spot

$\lambda$ : wave length

$f$ : focal length

$D$ : beam diameter of incident light

整することでほぼ目標のスポット径が得られることが分かった。図7は, 各レンズの偏心方向を調整した場合のスポット径を解析した結果である。

実験ではこの解析を基に, 各レンズの偏心方向を調整してfθレンズを組み立てた。そして組み立てたfθレンズのスポット径を測定した。スポット径の測定にはビームプロファイラ(SpotScan0390, Photon Inc.製)を用いた。その結果を図8に示す。これより走査位置+5mmではスポット径が4μmと少し小さくなっているが, 走査領域全体としては平均して約3μmのスポット径となっている。

波長650nmのレーザに対しては, スポット径が3μmとなるようにfθレンズを設計した。そして同様にスポット径の測定を行った。さらに, シュリンクフィッタ法の効果をあらためて確認するために, 従来法で組み込んだレンズを用いた場合のビームスポット径の比較も行った。ここでは組み込み直後のスポット径と, 90℃まで加熱, および-20℃に冷却してそれぞれ3時間保持

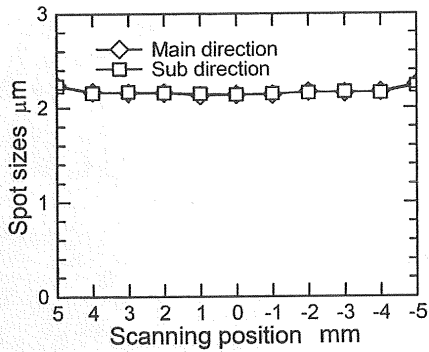


Fig.6 Spot sizes as a function of scanning position, calculated from the optical design soft, code V

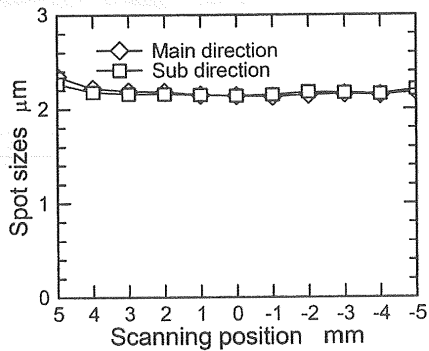


Fig.7 Spot sizes as a function of scanning position, calculated values with lens eccentricities into consideration

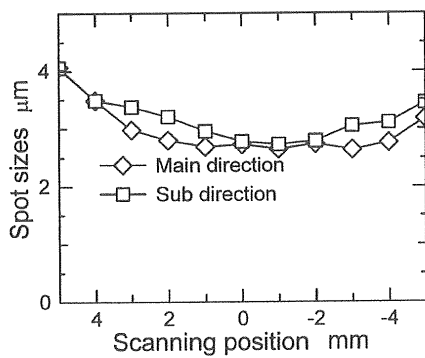


Fig.8 Spot sizes as a function of scanning position, obtained from the experiment (405nm)

した後に常温に戻してスポット径を測定した。それぞれの方式において、レンズとスペーサは同じものを使用している。その測定結果を図9に示す。シュリンクフィッタ法では走査幅全域にわたってスポット径は約4μmであるが、従来法の場合はスポット径が大きく悪化しており、さらに温度履歴によって不規則に変化することが分かる。この結果より、シュリンクフィッタを用いない場合には、鏡筒とレンズの間にはすき間が存在するために、全走査幅にわたり微細なスポット径を保つのは非常に難しいことが分かる。

なお今回、スポット径の測定値は、設計値よりも少し大きな値になった。今後は、詳細に検討を行って原因を突き止めると共に、実測のスポット径が設計値により近づくようにしたいと考えている。

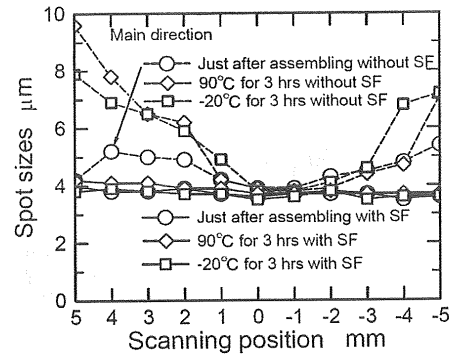
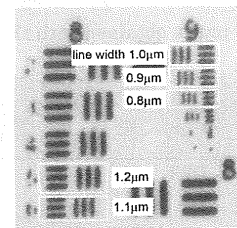


Fig.9 Spot sizes as a function of scanning position in case of various temperature, obtained from the experiment (650nm)



(a) test chart for line widths of 0.8 μm to 1.2 μm

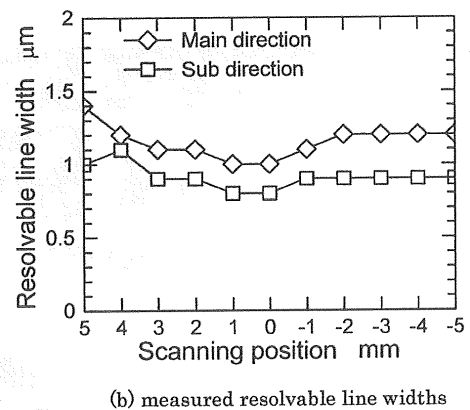


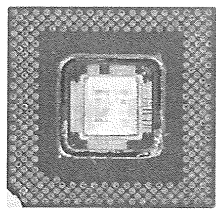
Fig.10 Resolvable line width as a function of scanning position, (a) test chart and (b) measured results

### 3.2 解像度

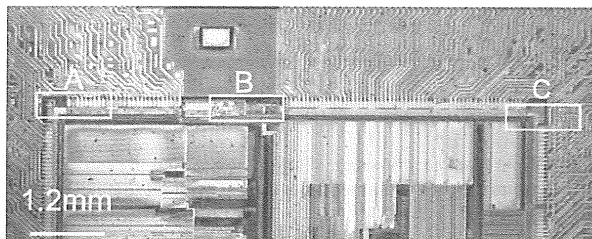
本装置の解像度を評価するために解像力テストチャートの観察を行った。解像力テストチャートはガラス基板にクロム薄膜を蒸着したもので、一部分をエッチングすることで透明なパターンが描かれている。そのパターンは縦、横それぞれ3本の等幅の線が等間隔に並んでいる。レーザー顕微鏡で解像力テストチャートを観察し、観察画像上でどの程度の狭い線幅まで見分けることができるかにより解像度を評価する。

図10に波長405nmのレーザー顕微鏡で観察した結果を示す。本装置で観察可能な線幅は、1.4μm以上であった。ここで副走査方向に比べて主走査方向の解像度が悪いのは、走査ミラーのモータジッタによる影響が含まれているからであると考えている。次に既存の光学顕微鏡(光源はハロゲンランプ)で同様な観察を行ったところ、対物5倍のレンズでは1.8μm以上、対物10倍のレンズでは1.0μm以上の線幅が観察可能であった。従って、本装置で観察した画像は、光学顕微鏡で5倍から10倍の対

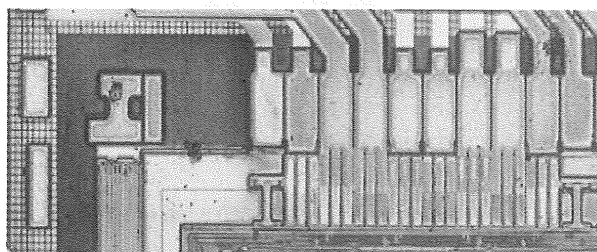
## シュリンクフィッタを用いた広視野レーザ顕微鏡



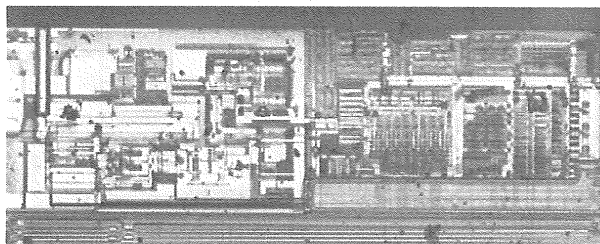
(a) a CPU chip without a top cover



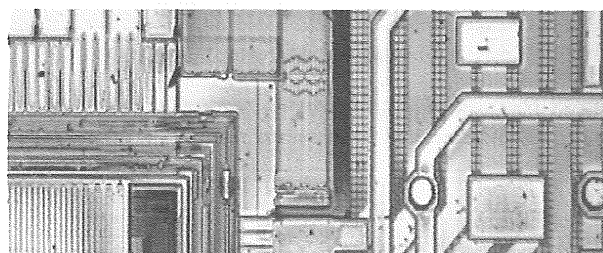
(b) a CPU circuit image obtained with the laser microscope



(c) magnified image of the portion of A in Fig.11(b)



(d) magnified image of the portion of B in Fig.11(b)



(e) magnified image of a portion of C in Fig.11(b)

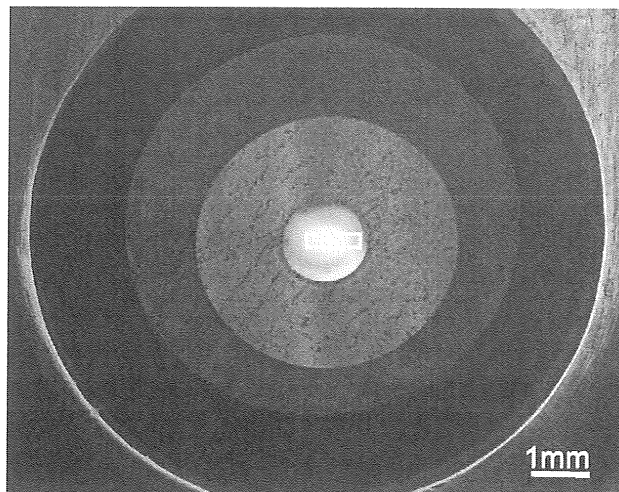
Fig.11 a CPU circuit and the images obtained the laser microscope

物レンズを使用した場合に近い解像度であるといえる。

### 3.3 広い走査幅を利用した観察

本装置で一度に観察できる範囲はレーザの主走査方向、すなわち横方向に10mmである。縦方向は機械ステージの送り量で決まるが、本研究では8mmとした。これは従来のレーザ顕微鏡や光学顕微鏡の同倍率で一度に観察可能な範囲の数十倍から数百倍広い範囲である。

本装置と同じ観察範囲を従来の観察装置で観察する場合は、多くの回数の観察が必要であり、その観察結果をつなぎ合わせることになる。使用する対物レンズの倍率が大きくなればなる



(a) an aspheric lens observed with the laser microscope, observed area: 10mm×8mm



(b) a magnified image of the portion of a white rectangle in Fig.12(a)

Fig.12 an aspheric lens of CCD camera for a cellular phone

ほど、一度に観察できる範囲が狭くなるため、観察に要する回数は多くなる。観察回数が増えるということは、観察に必要な時間もそれに比例して長くなるということである。参考までに光学顕微鏡とCCDカメラを組み合わせて測定を行った。対物レンズ5倍の光学顕微鏡では視野が0.87mm×1.00mmとなった。10mm×8mmの範囲を観察するためには、約92回の観察が必要である。実際に、10mm×8mmの範囲の観察を行い、それに要する時間を測定したところ約14分であった。また、対物レンズ10倍(視野が0.44mm×0.58mmとなった)では、約313回の観察が必要であり、それに要する時間は約46分であった。本装置ではこの広い視野を約1分50秒で一度に観察できた。すなわち観察に要した時間は、対物レンズ約5倍に比べて7.6倍短く、また対物レンズ10倍に比べて約25倍短いという結果になった。

### 3.4 レーザ顕微鏡による観察例

本装置で図11(a)に示すパソコンのCPUの配線パターンを観察した。ここでは、図11(a)中の白い四角で示す10mm×4mmの範囲を観察し、その結果を図11(b)～11(e)に示す。観察では、配線パターンを保護している透明皮膜で光が反射されないように波長650nmのレーザを使用した。図11(b)は観察領域全体を示すために、画素を間引いて縮小表示している。図11(c)、11(d)および11(e)は、図11(b)中の領域A、領域Bおよび領域Cの拡大図である。このように配線パターンや表面の形状を広い範囲にわたり一度に測定し、かつ詳細に観察したい部分を拡大することが容易にできる。

また、本装置はワーキングディスタンスが約30mmと長いので、奥まったところにある観察対象物でも観察が可能である。一例として、携帯電話に付いているカメラのレンズ表面を観察した。レンズは携帯電話に組み込まれた状態であり、レンズ前面にある透明なカバーフィルターを通して観察した。図12はその観察画像である。レーザ波長は405nmである。図12(b)の拡大図を見ると、レンズ表面の微細な凹凸やきずまできれいに観



察できていることが分かる。

近年は微細加工技術が発達し、精密金型などのように複雑な3次元形状に精密な加工が施されている物もある。それらは観察面以外の部位が邪魔をして、対物レンズを観察面に近づけることができない場合が多い。本装置では、それらの精密な立体形状物などの観察にも適用可能である。

図13は、光学顕微鏡用のカバーガラスの表面を波長405nmのレーザーを使用して観察したものである。通常、このような透明体などを光学顕微鏡で観察すると、その表面のきずは観察しにくい。しかし、本装置では対象物からの光の反射強度により観察しているため適切なレーザー波長を選択することで、これらのきずも高いコントラストで観察できることが分かる。

図14は、温水と冷水を混合するために用いられる、アルミナセラミックス製の水道栓である。観察領域は、10mm×1mmである。観察に使用したレーザー波長は波長は650nmである。図14(b)よりアルミナセラミックスは、比較的大きな孔が点在していることが分かる。拡大した図14(c)からは、多くの空隙を持つ多孔質体であることが分かる。さらに、研磨痕らしい筋がいくつか認められる。このように、観察画像を拡大もしくは縮小表示することで、目的に応じた大きさのきずや欠陥を観察できる。すなわち、広い領域を一度に観察できることにより、小さなき

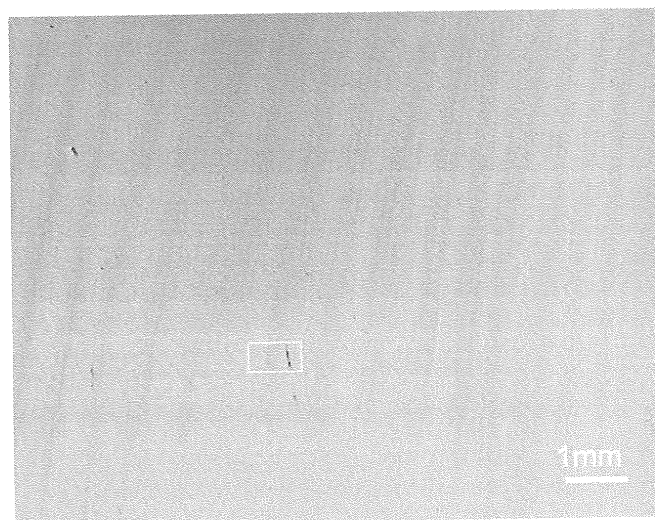
ずや欠陥を観察しながら、さらに小さな欠陥が存在していないか確認する作業が簡単にできることが分かる。

#### 4. 結 言

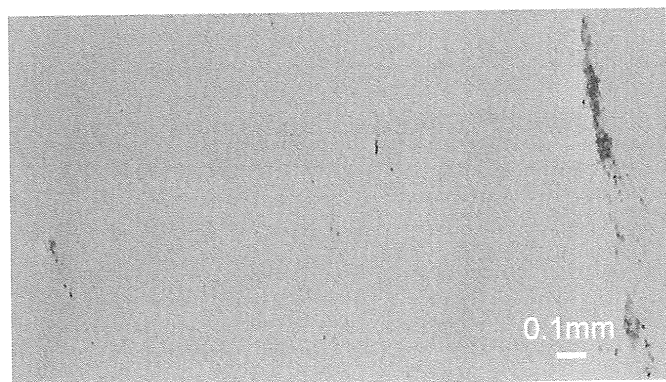
シュリンクフィッタ法を用いて視野が広い共焦点型のレーザー顕微鏡を試作した。その観察視野は、横方向10mm×縦方向8mmである。そして本レーザー顕微鏡の解像度を確認したところ、一般的な光学顕微鏡で5～10倍の対物レンズを使用した場合と同程度であった。試作したレーザー顕微鏡は、この広い視野を一度に観察でき、その測定時間は約1分50秒であった。

また試作したレーザー顕微鏡により、いくつかのサンプルの観察を行い、本法によるf $\theta$ レンズを用いた広視野型レーザー顕微鏡の利点と適用例を報告した。

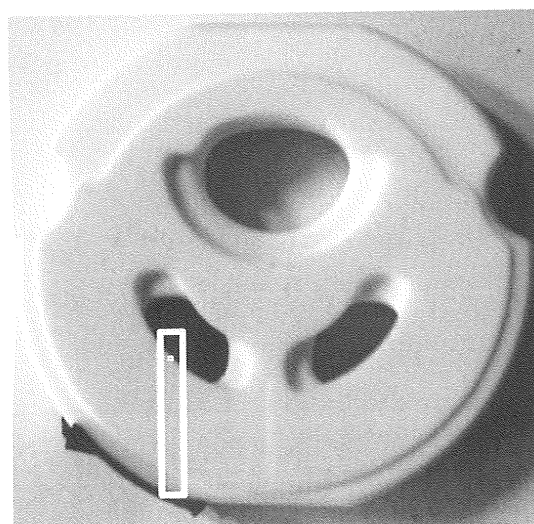
なお、今後は本実験において実測のスポット径が設計値より



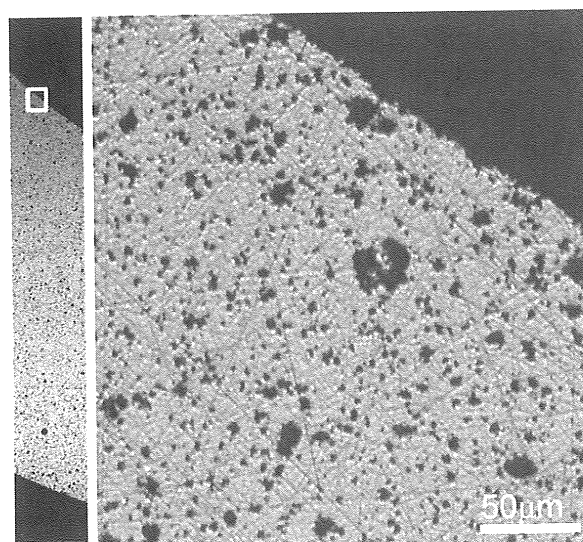
(a) a cover glass observed with the laser microscope, observed area: 10mm×8mm



(b) a magnified image of the portion of a white rectangle in Fig.13(a)



(a) an upper surface of an alumina ceramics faucet



(b)

(c)

Fig.14 an Alumina ceramics faucet, (a)an appearance of the faucet, (b) a magnified image of the portion of a white rectangle in Fig. 14(a), (c) a magnified image of the portion of a white rectangle in Fig.14(b)

Fig.13 a cover glass for an optical microscope

## シュリンクフィッタを用いた広視野レーザ顕微鏡

大きくなった点についてその原因を詳細に検討し、理論値に近づくように装置の改良を行う予定である。

## 謝 辞

装置の光学設計については(株)オプセルの小俣公夫氏に協力を頂きました。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金、基盤研究(B)No.30159082により行われた。

## 参 考 文 献

- 1) 新田勇, 菅野明宏, 刈田伸樹, 小俣公夫, 白井健司: シュリンクフィッタを用いた光学レンズの超精密接合, 精密工学会誌, 67,10(2001)1615.
- 2) I. Nitta, A. Kanno, K. Komata and S. Iguch.: New joining method of laser scanner lenses by using a shrink fitter, Proc. 5th Int. Conf. on computational methods in contact mechanics V, WIT Press, Seville, (2001) 31.
- 3) 新田勇, 菅野明宏: シュリンクフィッタを用いた光学レンズの組み込み法, 光アライアンス, 13 (2002)32.
- 4) 新田勇: シュリンクフィッタ, トライボロジスト, 48, 5(2003), 325.
- 5) 新田勇: 光学技術と半導体レーザ制御技術, 化学工業, 8(2003)585.
- 6) 桜井健二郎: 実用レーザ技術, コロナ社, 東京, (1983).
- 7) 辻内順平: 光学技術ハンドブック, 朝倉書店, 東京, (2002).
- 8) オプトニクス社編集部編: 光学系の仕組みと応用, オプトロニクス社, 東京, (2003).
- 9) Gerald F. Marshall: Handbook of Optical and Laser Scanning, Marcel Dekker Inc, New York, (2004).
- 10) 野中 敏, 新田 勇, 菅野明宏, 西村方孝, 芳賀亮介, 土田恵一: シュリンクフィッタを用いた高精度光学系によるレーザ微細加工装置, 精密工学会誌, 72, 3(2006)403.
- 11) 菅野明宏, 小俣公夫, 新田勇: 感光材料評価用レーザー走査装置, 光アライアンス, 7 (2002)47.
- 12) I. NITTA, A. KANNO and K. KOMATA: Effect of Interference on Scanning Performance on  $f\theta$  Lens Fixed by a Shrink Fitter, OPTICAL REVIEW, 10, 4(2003)321.
- 13) 菅野明宏, 新田 勇, 小俣公夫: シュリンクフィッタを用いたレンズの超精密接合法の光学シミュレーションによる理論的解析, 精密工学会誌, 71, 6(2005)779.