

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760020

研究課題名（和文）高分解能の軟 X 線ビデオ観察を実現する実用超高倍率顕微対物鏡の開発

研究課題名（英文）Novel high magnification imaging objective for soft X-ray video microscopy with sub-100nm spatial resolution

## 研究代表者

豊田 光紀（TOYODA MITSUNORI）

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40375168

## 研究成果の概要（和文）：

波長 2-20nm の光を用いる軟 X 線顕微鏡では、100nm 以下の分解能で生きたままの生体試料の元素分布像観察が期待される。本研究では、研究代表者が独自に見出した非球面光学系をさらに発展させ、温度変化等の外乱下でも安定して回折限界分解能 (30nm) で観察できる低収差かつ高結像倍率 (1000x) をもつ顕微対物鏡を開発した。本研究による新型非球面光学系は、レーザープラズマ光源および CCD カメラと組み合わせることで、実験室環境で安定動作する、高空間分解能の軟 X 線ビデオ顕微鏡実現へのブレークスルーとなる。

## 研究成果の概要（英文）：

A soft-X-ray microscope is expected as a novel tool to observe a high definition image of a living tissue with a spatial resolution better than 100 nm. In this study, we propose innovative solutions for high magnification soft X-ray microscopy, based on two-stage imaging optics for focal length reduction. Novel optics consisted of aspherical mirrors allow one to enhance a magnification of a laboratory based soft X-ray microscope over 1000x, where movies with diffraction limited resolution can be observed with an X-ray CCD. The design example having a numerical aperture of 0.25 was successfully demonstrated both a high magnification and a large misalignment tolerance.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 薄膜・表面界面物性

キーワード：軟 X 線、顕微鏡、対物鏡、非球面、多層膜、光学設計、収差論

## 1. 研究開始当初の背景

波長 20nm から 2nm 程度の軟 X 線は可視光に比べ短波長であり、回折限界では原理的に数 10nm の空間分解能が得られる。また、波長 2.2-4.4nm の水の窓領域では厚さ数  $\mu\text{m}$  の生体試料を染色・脱水処理せずに生きたままで観察できる。このため、軟 X 線顕微鏡は生体・多元物質や磁性材料等の試料でナノスケール構造の動的変化をビデオ観察できる究極の光学顕微鏡として注目されている。

実験室光源を用いた軟 X 線顕微鏡には、多層膜光学系の他に斜入射鏡(ウォルターミラー)方式があるが、共に実現できる結像倍率は 50 倍程度である。このため、10nm オーダーの分解能を得るには、検出器にサブ  $\mu\text{m}$  の空間分解能を持つ写真乾板を用いる必要があり、観察は静的試料に限られてきた。CCD 検出器(分解能約  $10\mu\text{m}$ )により生体、多元物質や磁性材料などナノスケールの構造が動的に変化する試料をリアルタイム観察するには対物鏡の倍率を大幅に向上する必要がある。そこで、代表者は従来型 Schwarzschild 光学系(倍率 50x)の後段に望遠鏡(倍率 20x)を配置した 2 段結像による超高倍率対物鏡を独自に考案した。光学系は 3 面の Mo/Si 多層膜球面鏡からなり、1m 程度の全長で 1000 倍を超える高倍率を得ることができる。試作光学系による実証実験では、直径  $130\mu\text{m}$  の広い視野と直入射光学系として世界最高となる 1200 倍の結像倍率を確認できた。

## 2. 研究の目的

上記の超高倍率光学系は、旧来の Schwarzschild 光学系を包含し、数 100nm のミラー設置誤差(偏心)で生じる収差で像が容易に劣化する欠点を併せ持つ。このため、煩雑なナノ精度アライメントが顕微鏡の実用化の障害となることが予測される。代表者は、より高い実用性の実時間ナノ解像光学系の実現には、設置誤差の影響を緩和した新しい光学系の開発が必須であると考えた。このため本研究では、3 ないし 4 面の非球面で構成した対物鏡に独自に開発した解析的設計手法を適用し、実時間観測に必要な高倍率・広視野と、安定した高分解能観察に必要なミラーアライメント精度の緩和を両立した未知の光学解を得ることを目指した。またミラー系では色収差が発生しない。このため新型光学系を試作し、その結像特性を実験が容易な可視域で検証することも、あわせて目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、高倍率、広視野かつミラーの設置誤差に鈍感な実用的な軟 X 線用非球面对物鏡を開発した。このため、具体的には対物

鏡を 4 つおよび 3 つの非球面ミラーで構成した場合に得られる実用非球面对物鏡の新規解の探索を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 4 つの非球面で構成した対物鏡

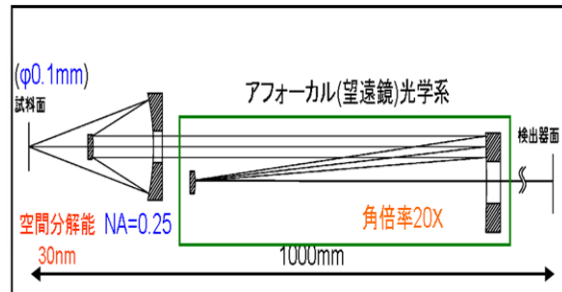


図 1 : 4 面对物鏡の模式図

2 面の回転対称非球面からなる対物鏡部の後段に同じく 2 面非球面鏡で構成した望遠鏡部を挿入した、2 段結像による 4 面鏡(図 1)で生じる収差を 3 次収差論により解析的に導出した。具体的には、既に導出済みの 2 面球面鏡の収差特性式を対鏡部および望遠鏡部に各々適用し、瞳遮光量等の実用的な設計パラメータにより整理することで、光学系体で生じる 3 次収差の解析的表現を求めた。このとき、非球面鏡にチルトおよびシフト偏心を仮定した場合の偏心収差も 1 次の範囲で導出した。

次に、得られた収差特性の解析表現を用いて、高倍率と広視野を両立した新規設計解を大域的に探索した。その結果、開口数 0.25、結像倍率  $m=1028$  を物体-像間距離  $t=1\text{m}$  で実現する新規解を見出した。光線追跡法による数値計算の結果、新規解では直径約  $130\mu\text{m}$  の視野内で波面収差が  $1\text{nm rms}$  以下となり、波長  $13\text{nm}$  では  $30\text{nm}$  の空間分解能を得ることが分かった。

### (2) 3 つの非球面で構成した対物鏡

2 面の回転対称非球面からなる対物鏡部の後段に 1 面の非球面鏡を付加し構成した 2 段結像による 3 面鏡(図 2)で生じる収差を 3 次収差論により解析的に導出した。具体的には、既に導出済みの 2 面球面鏡の収差特性式を対鏡部および付加鏡部に各々適用し、瞳遮光量等の実用的な設計パラメータにより整理することで、光学系体で生じる 3 次収差の解析的表現を導出した。また、非球面鏡にチルトおよびシフト偏心を仮定し、偏心量の 1 次の範囲で偏心収差も同時に求めた。

次に、得られた収差特性の解析表現を用いて、高倍率・広視野と、安定した高分解能観察に必要なミラーアライメント精度の緩和を両立した新規設計解を大域的

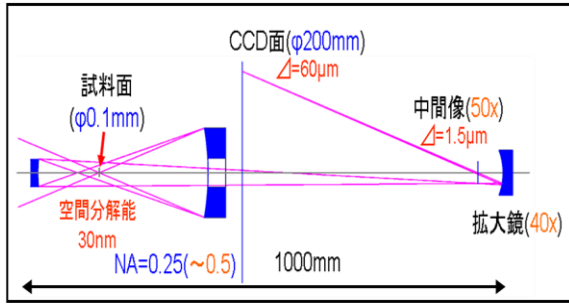


図 2 : 3 面对物鏡の模式図

に探索し、2 種の新規解を見出した。

さらに、新規実用解を、厳密な光線追跡法により評価最適化し、軟 X 線領域で回折限界結像が可能な新型光学系の光学設計を得た。これらの新規設計では、直径  $400 \mu\text{m}$  の視野内で  $30\text{nm}$  程度の回折限界分解能を得ることができる事がわかった。

### (3) 可視域での結像実験

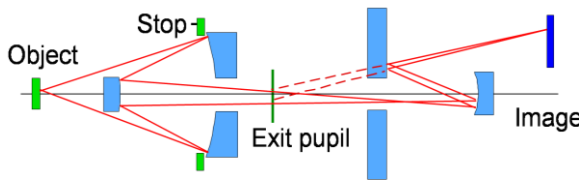


図 3 : 試作対物鏡の構成図

表 1 : 試作対物鏡の仕様

focal length $f$	0.3 mm
numerical aperture $NA$	0.25
magnification $m$	5208
pupil-image distance $g'$	1575 mm

最後に得られた実用新規解を試作し、1000 倍を超える高倍率が得られることを可視域で実証した。結像実験には、新考案の 3 面鏡による高倍率対物鏡を用いた。その模式図を図 3 に、仕様を表 1 に示す。Schwarzschild 鏡の後段に凹面鏡を付加した 3 面鏡による 2 段拡大系とすることで、5000 倍を超える高倍率を実現することができる。また、凹面鏡の後段には、CCD 検出器の配置を容易にするために平面鏡を配置した。

図 4 に像面で得られた点像強度分布を示す。光源に水銀ランプの  $g$  線 ( $\lambda=436\text{nm}$ ) を使い、直径  $1 \mu\text{m}$  のポリスチレン球の暗視野点像を観察した。中心の図はガウス像面で得られた像であり、他は、ガウス像面の前後  $500\text{mm}$  の位置に CCD 検出器を配置して得た像を示す。

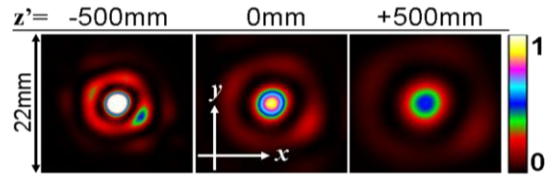


図 4 : 高倍率対物鏡で得られる点像強度分布

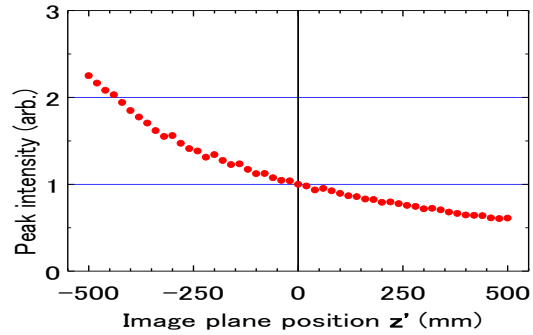


図 5 : 点像の最大強度の像面位置依存性

ガウス像面では、ほぼ設計倍率が得られることを確認できた。

一方で、ガウス像面の前後  $500\text{mm}$  の位置で得た像では、像面が焦点深度 ( $\sim \lambda/NA^2$ ) 内にあるにも関わらず、強度分布に変化が観測された。つまり、強度分布の形状は変化せずに、その大きさが像面距離により変化した。像面距離による光強度の最大値の変化を図 5 に示す。ガウス像面 ( $z'=0$ ) の前後でデフォーカスによる強度変化が非対称となり、像距離が小さくなると強度が増大した。これは、ガウス像面の前後でデフォーカスの影響が対称に現れる通常の光学系の振る舞いと大きく異なっており、小フレネル数集光光学系で観察される傾向と一致することが分かった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Closed-Form Representations for Third-Order Aberrations of Two-Aspherical Mirror Aplanats with the Mirror Tilt and Decenter, M. Toyoda, Opt. Rev. **18**, 441-447 (2011). 査読有
2. Aplanatic Three-Mirror Objective for High-Magnification Soft X-Ray Microscopy, M. Toyoda, T. Jinno, and M. Yanagihara, AIP Conf. Proc. **1365**, 176-179 (2011). 査読有
3. High throughput and wide field of view

EUV microscope for blur-free one-shot imaging of living organisms, T. Ejima, F. Ishida, H. Murata, M. Toyoda, T. Harada, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, M. Yamamoto, H. Mizutani, Opt. Express **18**, 7203-7209 (2010). 査読有

4. Theoretical investigation of the meaning of odd-order aspherical surface and numerical confirmation of effectiveness in rotational-symmetric but off-axis optics, Masato Shibuya, Kazuhisa Maehara, Yoshihito Ishikawa, Akira Takada, Kei Kobayashi, Mitsunori Toyoda, Masanori Tanikawa, Suezou Nakadate, Opt. Eng. **49(7)**, 073003 (2010). 査読有

〔学会発表〕(計7件)

1. 豊田光紀, 軟 X 線多層膜による高倍率対物鏡の開発と生体試料観察への展開, 先端計測シンポジウム, 仙台, (2011. 3. 3).
2. 豊田光紀, 軟 X 線多層膜光学系による顕微鏡開発の現状とコヒーレント軟 X 線集光への展開, 第 11 回エクストリームフォトンクス研究, 和光市, (2010. 10. 12-2010. 10. 13).
3. 豊田光紀, 倉光康太, 柳原美廣, フレネル数の小さい軟 X 線用 顕微光学系の結像特性 第 35 回 光学シンポジウム, 東京, (2010. 7. 8-2010. 7. 9)
4. 豊田光紀, 倉光康太, 柳原美広, 軟 X 線用高倍率対物鏡の結像特性, 応用物理学会学術講演会, 長崎市, (2010. 9. 14-2010. 9. 17)
5. F. Ishida, T. Ejima, M. Toyoda, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, H. Mizutani, Development of Wide Field of View EUV Microscope Using Normal - Incident Multilayer Optics with LPP Light Source, The 10th international conference on x-ray microscopy, USA, Chicago, (2010. 8. 15-2010. 8. 20)
6. M. Toyoda, T. Jinno, T. Harada, T. Hatano, M. Yanagihara, Novel multilayer-mirror optics for a whole tissue imaging, The 10th international conference on x-ray microscopy, Chicago, (2010. 8. 15-2010. 8. 20).
7. T. Ejima, M. Toyoda, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, Super - Hierarchical Microscope in EUV Region, The 10th international conference on x-ray microscopy, USA, Chicago, (2010. 8. 15-2010. 8. 20).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/1aboratory/index.php?laboid=43>

6. 研究組織

(1)研究代表者

豊田 光紀 (TOYODA MITSUNORI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40375168