

# 研究

## シュバルツシルトタイプ軟X線顕微鏡の 最適設計とその性能

加道 雅孝\*・田中 和夫\*・児玉 了祐\*・山内 明\*・望月 孝晏\*\*  
山下 広順\*\*\*・中山 龍彦\*・中井 貞雄\*・中山千代衛\*\*\*\*

\* 大阪大学レーザー核融合研究センター 〒565 吹田市山田丘 2-6

\*\* HOYA (株) レーザー研究所 〒196 昭島市武蔵野 3-3-1

\*\*\* 大阪大学理学部物理学教室 〒560 豊中市待兼山町 1-1

\*\*\*\* レーザー技術総合研究所 〒565 吹田市山田丘 2-6

(1987年11月24日受理)

### Optimized Design and Its Characteristics of Schwarzschild Type Soft X-Ray Microscope

Masataka KADO,\* Kazuo A. TANAKA,\* Ryosuke KODAMA,\* Akira YAMAUCHI,\*  
Takayasu MOCHIZUKI,\*\* Koujun YAMASHITA,\*\*\* Tatsuhiko YAMANAKA,\*  
Sadao NAKAI\* and Chiyo YAMANAKA\*\*\*\*

\* Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6, Yamadaoka, Suita 565

\*\* Laser Laboratory, HOYA Co. Ltd, 3-3-1, Musashino, Akishima, Tokyo 196

\*\*\* Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University,

1-1, Machikaneyama-chou, Toyonaka 560

\*\*\*\* Institute for Laser Technology, 2-6, Yamadaoka, Suita 565

Recently soft X-ray imaging is applied in many fields such as in biology, semiconductor technology, and laser fusion. In this study we present an optimized design of the Schwarzschild type soft X-ray microscope. The Schwarzschild type microscope shows a very high spatial resolution in a large range of vision. Our design was aimed to use this microscope as a laser-plasma diagnostics. For example the magnification is 15, the distance from the object to the image is 1500 mm, the r.m.s. (root mean square) height of the surface finish is 3 Å and the incident X-ray wavelength is 60 Å. The best spatial resolution is better than 1000 Å. The range of vision at a given spatial resolution of 5000 Å is larger than 1 mm. Moreover we show the incident X-ray wavelength dependence of the spatial resolution. When the incident X-ray wavelength is longer than 20 Å, the spatial resolution is better than 2500 Å. When the r.m.s. height is 1 Å, the spatial resolution is independent of the incident X-ray wavelength and is 200 Å.

### 1. まえがき

現在、X線を用いた光学系はレーザープラズマ、生物学、半導体工学等さまざまの分野において利用され積極的な応用が考えられている。たとえば、(1) 波長 24 Å 付近のX線は水に吸収されにくく、原子の種類によって衝突断面積が大きく異なる。そこでこの特性を利用した高コントラスト、高分解能で、生きたままの生物が見れ

る軟X線顕微鏡<sup>1,2)</sup>、(2) サブミクロン領域のX線リソグラフィーを可能とするX線の縮小光学系<sup>3)</sup>、(3) プラズマ実験における軟X線領域の高空間分解能力メラ等がある。

軟X線顕微鏡の光学系としては現在次の三つのタイプが考えられ、製作されている。

- (1) ゾーンプレートタイプ
- (2) ウォルタータイプ

## (3) シュバルツシルトタイプ

それぞれの特徴について簡単に触れると、(1) ゾンプレートタイプは円形の透過型回折格子を用い、一次の回折を利用して集光する。現在理論的に考えられている像分解能は 500 Å 程度で、生体顕微鏡に利用されている。一次の回折を利用して集光するため、波長によって集光点が異なる。そのため、単一波長（通常 30~40 Å）の光源が必要となり、波長に幅がある場合、色収差によりコントラストが悪くなる。

(2) ウォルタータイプは同軸の楕円面と双曲面（ウォルター幾何）を用い、入射角を大きくとり（斜入射）全反射を利用して集光する。理想鏡面を仮定した場合、1 μm 以下の像分解能が得られるが、楕円面と双曲面のミラーを用いるためミラー精度を向上させるのが困難である。現在、10 μm 以下の像分解能が得られている。また斜入射であるため、大きな立体角を得ることが困難である。

(3) シュバルツシルトタイプは二つの同心球面（シュバルツシルト幾何）を用い、直入射で集光する（Fig. 1）。このタイプは可視光学系ではすでに普及しているが、直入射タイプのため、軟X線での反射率が十分に高くとれず、実用化には及ばなかった。最近の多層膜コーティングの技術の進歩により、波長 40~60 Å 程度の軟X線に対し約 30% の反射率<sup>4)</sup>が得られるようになってきた。この波長領域では表面粗さを考慮しても 1000 Å 程度の像分解能が得られる。また直入射タイプのため、小さなミラーで大きな立体角を得ることができ、球面のミラーを用いるためその製作精度も高く、近い将来軟X線顕微鏡として非常に実用性の高いものになると期待される。この論文では軟X線領域におけるシュバルツシルトタイプの顕微鏡の最適設計と性能評価について述べる。まず 2. 章ではその設計指針、方法を述べ、像分解

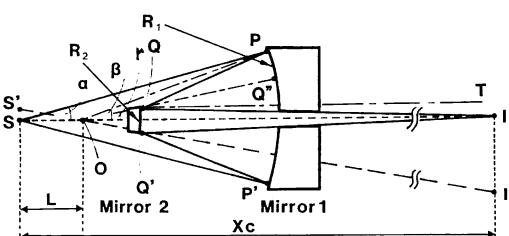


Fig. 1 The schematic view of the Schwartzschild Type soft X-ray microscope. S is the object point. I is the image point. P and P' are the reflection points on the surface of the mirror 1. Q and Q' are the reflection points on the surface of the mirror 2.

能、倍率、表面粗さの考慮について述べる。3. 章ではその計算結果と評価について述べる。4. 章では実用上の問題、応用について述べる。5. 章では全体のまとめを述べる。

## 2. 設計および計算方法

## 2.1 光線追跡

ここではシュバルツシルトタイプの軟X線顕微鏡を設計するにあたり用いた光線追跡法について述べる。光線の球面ミラーでの反射は球面の接平面に対して鏡面反射であると仮定した。Fig. 1においてまず点光源 S を考え、S から角度  $\alpha$  で出た光線はミラー 1 の P, P' 点で反射され、ミラー 2 の Q, Q' 点で反射され、I 点に集光される。ミラー 1 およびミラー 2 は同心球面で、その曲率中心を点 O, それぞれの曲率半径を  $R_1, R_2$  とする。OS = L, 角 IOP =  $\beta$ , 角 IOQ =  $\gamma$  とすると、

$$\text{角 OPS} = \beta - \alpha \quad (1)$$

OQ の延長線がミラー 1 と交わる点を Q'' とすると

$$\text{角 PQQ''} = 2\beta - \alpha - \gamma \quad (2)$$

点 Q から SI に平行線を引き、左端を T とすると

$$\text{角 Q''QT} = \gamma \quad (3)$$

よって

$$\begin{aligned} \text{角 QIS} &= \text{角 TQI} \\ &= \text{角 PQQ''} - \text{角 Q''QT} \\ &= 2\beta - \alpha - 2\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

となる。点 Q から SI に降ろした垂線の足を U とすると

$$SI = UI + SU$$

$$= \frac{R_2 \sin \gamma}{\tan(2\beta - \alpha - 2\gamma)} + R_2 \cos \gamma + L \quad (5)$$

となる。また

$$\tan \alpha = \frac{R_1 \sin \beta}{L + R_1 \cos \beta} \quad (6)$$

$$\tan(2\beta - \alpha) = \frac{R_1 \sin \beta - R_2 \sin \gamma}{R_1 \cos \beta - R_2 \cos \gamma} \quad (7)$$

となり、光源 S から集光点 I までの距離を X とすると上記式(1)～(7)より

$$X = \frac{R_2 \sin \gamma}{\tan(2\beta - \alpha - 2\gamma)} + R_2 \cos \gamma + L \quad (8)$$

$$\beta = \sin^{-1}(L/R_1)A + \sin^{-1}A$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \sin^{-1} \left\{ \frac{R_1}{R_2 \sqrt{1 + \tan^2(2\beta - \alpha)}} \sin \beta - \frac{R_1}{R_2} B \cos \beta \right\} \\ &\quad + \sin^{-1}B \end{aligned}$$

$$A = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}, \quad B = \frac{\tan(2\beta - \alpha)}{\sqrt{1 + \tan^2(2\beta - \alpha)}}$$

である。このとき X は入射角  $\alpha$  の関数で球面収差により

$\alpha$  が違うと集光点が異なる。

次に物点面上で  $S$  から少し離れた点  $S'$  から出た光線は同心球面曲率中心  $O$  を通る軸上に集光される。そのときの集光点を  $I'$  とすると倍率  $M$  は

$$M = II'/SS' = OI/OS = (X-L)/L \quad (9)$$

で表わされる。

## 2.2 像分解能

点光源から角度  $\alpha$  で出た光線は距離  $X(\alpha)$  の点に集光し、球面収差により  $\alpha$  の大きさによって  $X(\alpha)$  は異なる。 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$  なる  $\alpha$  を考え、光線が最も絞れる位置をディテクター面（たとえばフィルム面）にとる。点光源からディテクター面までの距離を  $X_c$  とすると、入射角  $\alpha$  で出た光線はディテクター面上で  $\Delta I(\alpha)$  の広がりをもつ。そこで、

$$\text{Max}\{\Delta I(\alpha) | \alpha_1 < \alpha < \alpha_2\} = \Delta I_{\max} \quad (10)$$

をディテクター面上での光線の広がりとすると、このディテクター面上で像が重ならないような光源上の 2 点の距離を像分解能と定義した。

$$\Delta I(\alpha) = 2|X(\alpha) - X_c| \tan(2\beta - \alpha - 2\gamma) \quad (11)$$

で、像分解能  $\Delta X$  は

$$\Delta X = \Delta I_{\max}/M \quad (12)$$

で求まる。

## 2.3 表面粗さについての考察

表面粗さとして、r.m.s. height (root mean square height) を考える。ミラー表面の粗さを多くの正弦波をフーリエ変換を用いて合成したものと仮定し、その一つの正弦波の波長を  $\lambda$  とすると次の式が成り立つ。

$$n\lambda = I(\cos \theta_s - \cos \theta_i) \quad (13)$$

ここで  $\lambda$  は入射光波長、 $\theta_i$  はミラー表面に対する入射角、 $\theta_s$  はミラー表面の対する散乱角である。次に波数  $p$  として

$$p = 2\pi/\lambda \quad (14)$$

を定義し、波数  $p$  に対するパワースペクトルを  $W(p)$  とすると

$$dI/d\theta_s = (2k/\pi)I_R \sin \theta_i \sin \theta_s W(p) \quad (15)$$

という関係式が成り立つ<sup>5)</sup>。ここで  $k = 2\pi/\lambda$ 、 $I_R$  は全回折光強度、 $dI/d\theta_s$  は角度  $\theta_s$  で散乱された光の強度である。そこで直入射 ( $\theta_s = \theta_i = 90^\circ$ ) を仮定し、全強度の  $1/2$  が集光される範囲を光の広がりとするとその散乱角の広がり  $\Delta\theta_s$  は

$$\Delta\theta_s = \pm 16\pi\sigma/\lambda l_0 \quad (16)$$

で表わされる。ここで  $\sigma$  は r.m.s. height、 $l_0$  はミラーの大きさで規定されるスケール長である。Fig. 2 に  $\Delta\theta_s$  の  $\lambda$ 、 $\sigma$  に対する依存性をグラフに示した。このグラフ

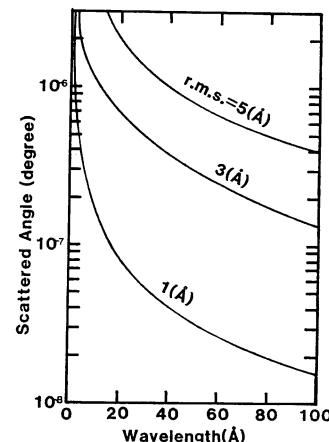


Fig. 2 The incident X-ray wavelength dependence of the scattered angle. The three curves show the cases of r.m.s.=5, 3 and 1 Å, respectively.

から、波長が長くなるにつれて、また r.m.s. が小さくなるにつれて散乱角が小さくなることがわかる。とくに r.m.s. に関しては 2 乗で効くので、散乱角を小さくする、すなわち像分解能を良くするために r.m.s. を小さくすることは非常に効果的である。

## 3. 計算結果および評価

倍率と像分解能 (r.m.s.=0 Å の理想鏡面を仮定) との関係を Fig. 3 に示した。その結果、倍率が 15 倍以下においては像分解能 200 Å 程度と高い分解能が得られることがわかり、倍率が 15 倍を超えると急激に分解能が悪くなることがわかる。この結果をもとに倍率 15 倍の軟X線顕微鏡の最適設計を行なった。その結果、パラメータは

$$R_1 = 344.962 \text{ mm}$$

$$R_2 = 116.445 \text{ mm}$$

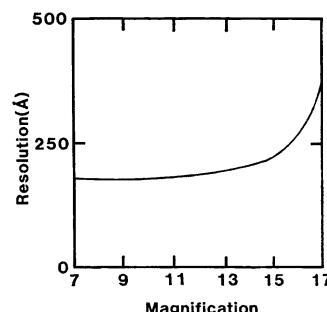
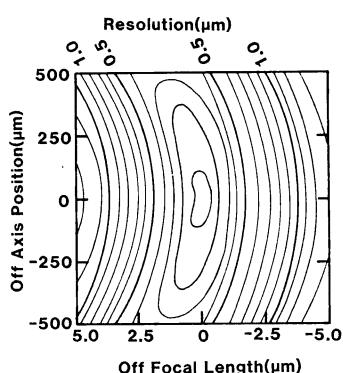


Fig. 3 The magnification dependence of the spatial resolution, assuming the ideal mirror surface.



**Fig. 4** The off axis position and the off focal length dependences of the spatial resolution; this figure shows the range of vision and the depth of focus, assuming that the r. m. s. height is  $3 \text{ \AA}$ , the magnification is 15, and the incident X-ray wavelength is  $60 \text{ \AA}$ .

$$\begin{aligned} X_c &= 1500 \text{ mm} \\ \text{r. m. s.} &= 3 \text{ \AA} \\ \lambda &= 60 \text{ \AA} \end{aligned}$$

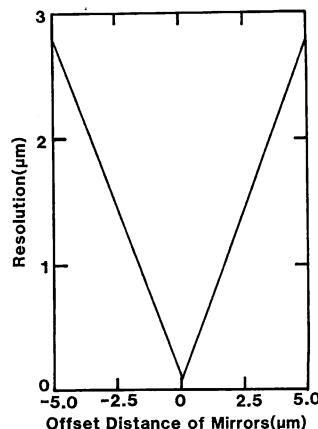
である。

**Fig. 4** は、横軸に二つの同心球面ミラーの曲率中心 O と二つのミラーの中心を結んだ軸 IOS 上での焦点位置からのずれをとり、縦軸に軸 IOS から垂直方向のずれをとったグラフで、2次元空間における等分解能曲線を表わしている。図より軸に沿った方向においてその等分解能曲線が等間隔で変化し軸上での分解能は焦点位置からずれるに従って線形的に悪くなるのがわかる。また、軸に垂直な方向においては分解能はあまり変化しない。

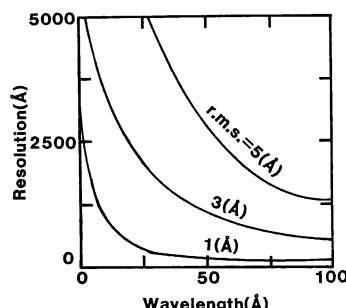
ある値以下の像分解能を与える領域を考えたとき、軸から垂直方向の大きさを視野、軸方向の大きさを被写界深度と定義すると、ミラーに近い方向に高い分解能を得られる視野が広くなっている。これは等分解能面が二つのミラーの曲率中心を中心とする球面であることに起因している。以上のことを考慮して、像分解能  $5000 \text{ \AA}$  以下の場合、視野は  $1 \text{ mm}$  以上で、被写界深度は  $4 \mu\text{m}$  程度である。

**Fig. 5** は二つのミラーの曲率中心がずれた場合の像分解能への影響を示し、中心のずれに対し像分解能は線形的に悪くなることがわかる。このグラフは実際に製作するときの二つのミラーの組上げ誤差の影響を表わしている。その結果、像分解能  $5000 \text{ \AA}$  を得るためには、二つのミラーの組上げ精度を  $1 \mu\text{m}$  以下にしなければならない。

**Fig. 6** は像分解能の入射光波長および鏡面粗さに対



**Fig. 5** The offset distance of the mirrors dependence of the spatial resolution, assuming that the r. m. s. is  $3 \text{ \AA}$ , the magnification is 15, and the incident X-ray wavelength is  $60 \text{ \AA}$ .



**Fig. 6** The incident X-ray wavelength dependence of the spatial resolution. The three curves show the cases of r. m. s. =  $5$ ,  $3$  and  $1 \text{ \AA}$ , respectively.

する依存性を表わし、波長が短くなるほど像分解能は非線形的に悪くなることがわかる。逆に、r. m. s. が小さくなるほど像分解能が良くなる。とくに  $\text{r. m. s.} = 1 \text{ \AA}$  においては、ほとんど入射光波長には依存せずに像分解能は実に  $200 \text{ \AA}$  程度に達するため、鏡面粗さを向上させることは、高像分解能を得るために重要である。

#### 4. 応用

たとえば、フィルムのグレインを考慮した場合像として識別できるためには数  $\mu\text{m}$  の像の大きさが必要である。倍率 15 倍の場合、 $1000 \text{ \AA}$  程度の像分解能があったとしても、フィルム面で像として識別できないためほとんどの無意味である。とくにプラズマ実験等に用いるには像分解能はせいぜい  $1 \mu\text{m}$  程度で良く倍率も高いほうが良い。そこで同様の計算を 30 倍について行なうと、視野  $500 \mu\text{m}$ 、被写界深度  $3 \mu\text{m}$  程度において像分解能

$1 \mu\text{m}$  が得られる。このとき、二つのミラーの組上げ精度は、15倍のときと変わらないことがわかった。

また軟X線の集光光学系としてX線リソグラフィーへの応用が考えられている。それはX線光源（ここではレーザープラズマを考えている）から出た軟X線をマスクを通しシュバルツシルトタイプの光学系で集光し照射するもので、その利点は、(1) サブミクロンの加工をする場合においてそのマスクのパターンの大きさを比較的大きくできる、(2) 単色性が良い、(3) 高分解能が得られる、等がある。

また、多層膜コーティングのミラーの特性として狭い波長領域において反射率が高いため ( $\Delta\lambda/\lambda=0.2$ ,  $\Delta\lambda$ : 半値幅) それを利用して特定の波長のX線をラインファオーカスすることにより、同じ物質を用いて、余計な波長のX線でプラズマを加熱することなく特定の準位を励起できるのでX線レーザーへの利用の可能性もある。

このように、今後このシュバルツシルトタイプの軟X線光学系は、いろいろな分野で利用が考えられるであろう。

## 5. まとめ

以上からシュバルツシルトタイプの軟X線顕微鏡は、広い視野で高い像分解能が得られることがわかった。まとめとして15倍の軟X線顕微鏡の規格を示す。

$$R_1 \text{ (ミラー1の曲率半径)} = 344.962 \text{ mm}$$

$$D_1 \text{ (ミラー1の直径)} = 120.0 \text{ mm}$$

$$D_1' \text{ (ミラー1の穴の直径)} = 20.0 \text{ mm}$$

$$R_2 \text{ (ミラー2の曲率半径)} = 116.445 \text{ mm}$$

$$D_2 \text{ (ミラー2の直径)} = 21.5 \text{ mm}$$

$$X_e \text{ (焦点位置からディテクターまでの距離)}$$

$$= 1500.0 \text{ mm}$$

倍率=15倍

r. m. s.=3 Å,  $\lambda=60 \text{ \AA}$

最高分解能=800 Å

視野1 mm, 被写界深度  $4 \mu\text{m}$  において分解能  
5000 Å 以下

製作精度としては、二つの同心球面ミラーの中心を合わせることが重要で、その精度は  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  以下である必要がある。またこの顕微鏡の軸方向のアライメントは軸に垂直方向のアライメントに比べて厳しく  $\pm 1 \mu\text{m}$  程度の精度が必要となる。

今後の展望として、ミラーの表面粗さ r. m. s.=1 Å が達成できるなら像分解能は 200 Å 程度 ( $\lambda=60 \text{ \AA}$ ) となり、ゾーンプレートタイプよりも高分解能のX線顕微鏡を製作することができると考えられる。ミラーの反射率がさらに向上すれば、シュバルツシルトタイプ軟X線顕微鏡はますます汎用性の高いものとなることが期待される。

最後に、本設計においてご助言くださった、有留助教授に謝意を表します。

## 文 献

- 1) M. Howells, J. Kirz, D. Sayre and G. Schmahl: "Soft-X-ray microscope"; 永井喜則, 木原 裕 (訳): パリティ, 01 (1986) 4.
- 2) 青木貞雄: "X線光学素子とその利用技術", 応用物理, 56 (1987) 342.
- 3) NTT 電気通信研究所, 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 竹内信行, 石原 直: "X線縮小投影露光の検討(その1)", 第47回秋季応用物理学会, 28p-ZF-15 (1986).
- 4) 三宅 明: "多層膜X線反射鏡の開発", 大阪大学理学部物理工学科修士論文 (1987).
- 5) H. Kunieda, S. Hayakawa, T. Hirano, T. Kii, F. Nagase, N. Sato, Y. Tawara, F. Makino and K. Yamashita: "Roughness measurement of X-ray mirror surfaces," Jpn. J. Appl. Phys., 25 (1986) 1299.