第４章　軟Ｘ線顕微鏡の開発と性能評価

顕微鏡は照明がインコヒーレントな場合とコヒーレントな場合の二つに分類することができる。この二つの照明は理想的な場合を示しており、実際はともに部分的コヒーレントな照明である。しかしながら、照明系が臨界照明の場合にはインコヒーレントな照明条件に近くなり、Köhler照明ならば光源を絞ることによってかなりコヒーレントな照明条件に近くすることができる。本研究では、アンジュレータ光を光源とし、照明が臨界照明の場合とKöhler照明の場合の２種類の顕微鏡の開発を並行して進めてきた。§１の光学系の設計と§２の顕微鏡装置の開発は二つの光学系についてほぼ終了しているが、実験結果は臨界照明を用いた顕微鏡についてのみ得られており、Köhler照明を用いた顕微鏡については現在実験の準備中である。

§１．光学系の設計

１）ＫＥＫ・ＰＦ・ＢＬ－２Ｂの概要[1]

ＫＥＫ・ＰＦ・ＢＬ－２の概略を図４－１に示す。ＢＬ－２は２つのブランチビームライン、すなわち直線ブランチ２Ａと偏向ブランチ２Ｂからなっている。軟Ｘ線顕微鏡は偏向ブランチ内のアンジュレータの中心から約25ｍの位置に設置してある。アンジュレータから15.1ｍ後方にある直径１ｍｍの水冷仕様の銅製ビームラインダイアフラムは、アンジュレータ光の軸外れ成分を取り除く役割をしている。ダイアフラムの光源に対する半値取り込み角度は 0.033mradであり、この値はアンジュレータ光の固有角度拡がりσ_pの値0.019～0.030mradを考慮して決めてある。ビームラインダイアフラムの直後には偏向ミラーが設置してある。鏡面は白金でコートしてあり、斜入射角度が２°なので、臨界波長は 4.7Åである。ミラーの後方には、径の大きさを選択できる水冷ピンホールが設けてある。これは次節で述べる準平行光照明系の入射ピンホールの役割をする。

２）臨界照明を用いた光学系

臨界照明は図４－２（ａ）に示すように[2]、光源の像をコンデンサーによって物体面上に作ることによって物体を照明する方法である。この照明では物体は明

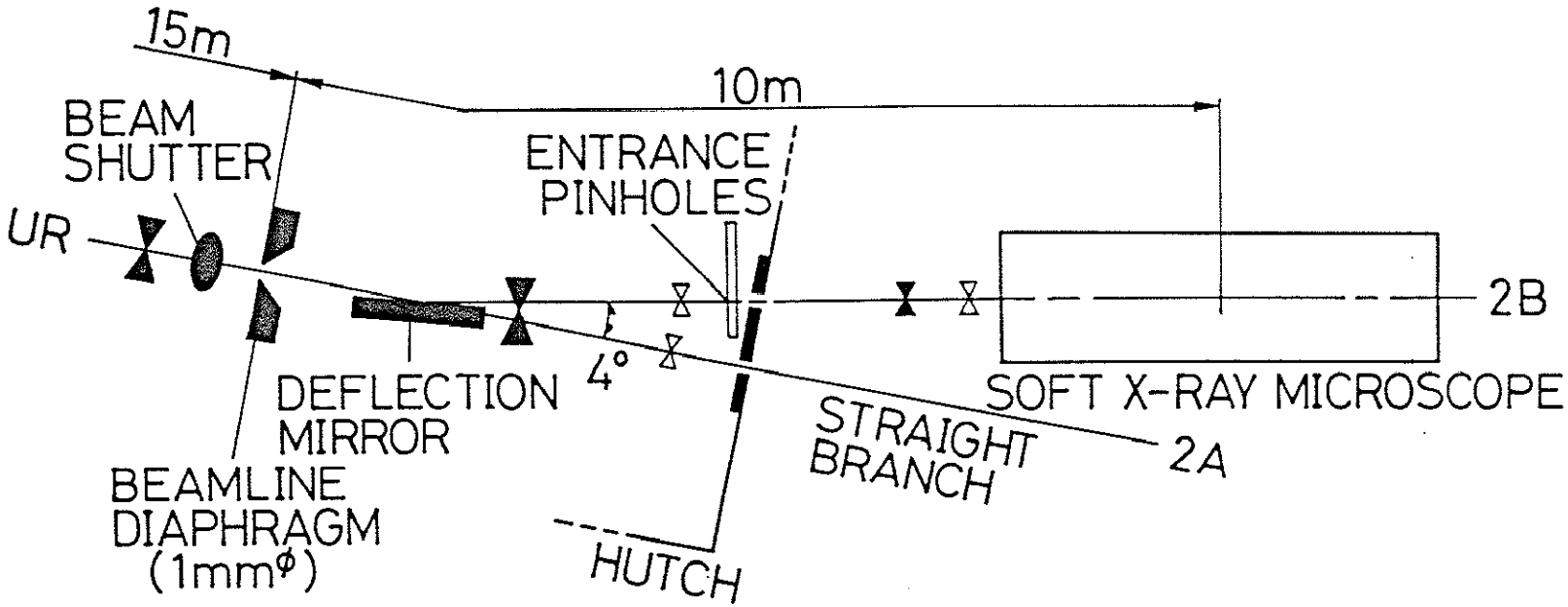


図４－１．ＰＦ・ＢＬ－２Ｂの概要

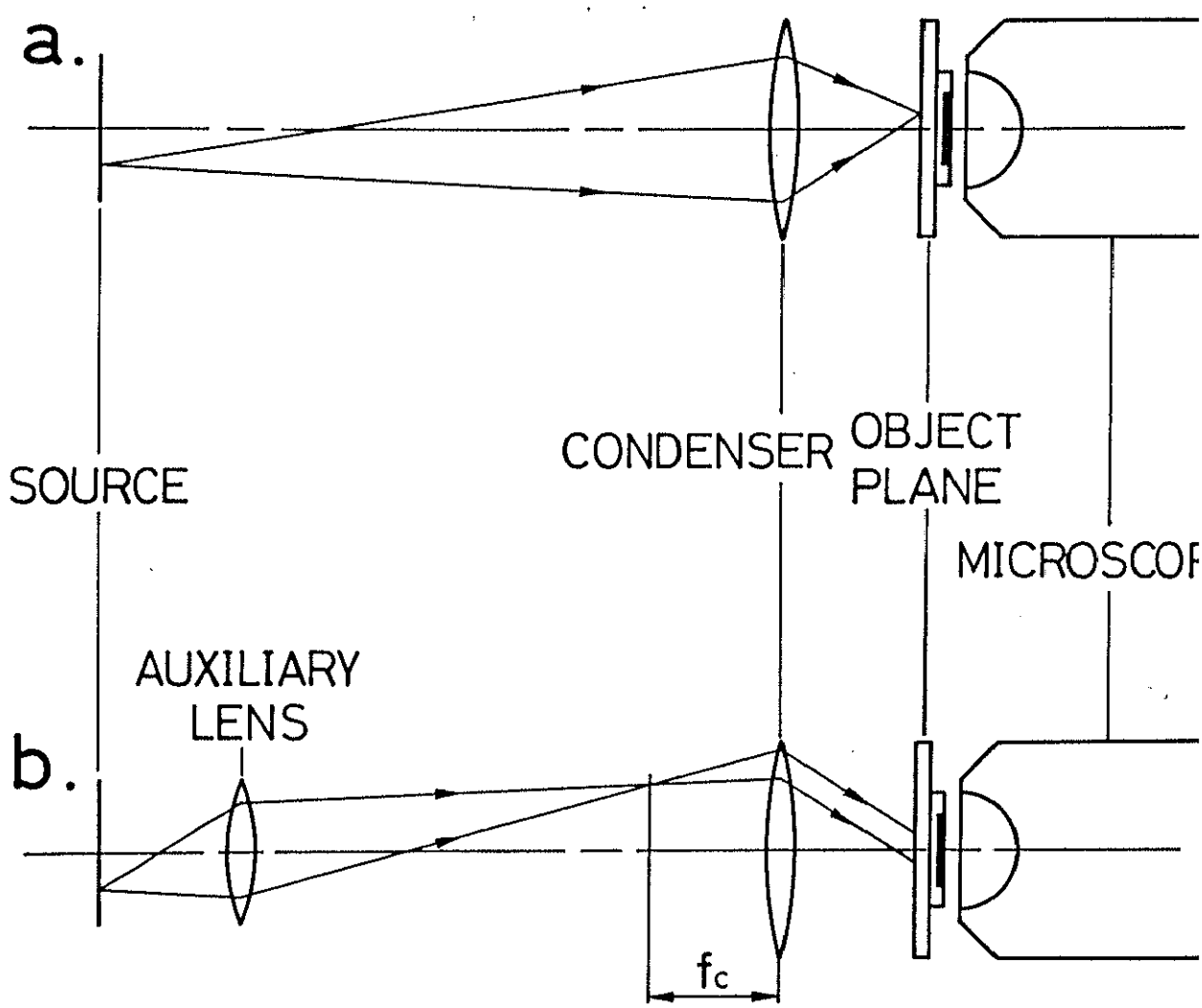


図４－２．臨界照明（ａ）とKöhler照明（ｂ）の原理

るく照明されるが、光源の像が物体面に結像されるので、観察する拡大像に光源の輝度のムラが重なることがあるという短所がある[3]。光源の各単一要素はそれぞれコヒーレントな光源点と考えられるので、コンデンサーによって物体面上に作られるそれらの光源要素のAiryディスクの領域内はコヒーレントに照明されていると考えてよい。臨界照明では、物体面内のコンデンサーによる照明領域の大きさが各要素のAiryディスクの大きさよりもはるかに大きい場合は、物体面はインコヒーレントに近い条件で照明される[2]。

臨界照明を用いた軟X線顕微鏡の光学系は、軸外しナイフエッジ、集光ゾーンプレート、ピンホール、試料（物体）、対物ゾーンプレート及び検出器から成り立っている。その概略を図4－3に示す。集光ゾーンプレートとピンホールは臨界照明系を構成するとともに、ゾーンプレートの焦点距離が波長によって異なることを利用した直線型分光器[4]の役割もする。アンジュレータ光の強度が非常に高く、直接ゾーンプレートに照射するとすぐに壊れてしまうため、1.5μm厚のアルミニウム膜で保護している。

光学系のパラメータは、以下に列記する方針に従って決定した。

①波長域は20～31Åとする。

この値は、a）アンジュレータ光の1次光の波長可変範囲が13～31Åである、b）ゾーンプレートのX線吸収体の透過率の上限を0.1%とする（波長が20Å以上なら0.5μm厚タンタルの透過率は0.1%以下になる）の2点を考慮して決めた。

②集光ゾーンプレートの直径は1mmとする。

波長域20～31Åでのアンジュレータ光の固有拡がりは0.02～0.03mrad程度である。集光ゾーンプレートの取り込み角はこの値以下になるようにした。光源点から約25mの位置で半径0.5mmだから、その半値取り込み角度は～0.02mradである。

③ピンホールの直径は10～20μmとする。

物体の照明領域の大きさを10～20μmφにするためにこの値とした。このとき、直線型分光器の波長分解能は2-21式から$\lambda/\Delta\lambda$＝50～25程度である。

④入射光をできるだけ効率よく利用するために、集光ゾーンプレートと対物ゾーンプレートの開口数（N.A.）をほぼ等しくする。

⑤理論分解能を0.25μmとする。

開発開始当時の微細加工技術を考慮して、この値を第一ステップの目標値とした。

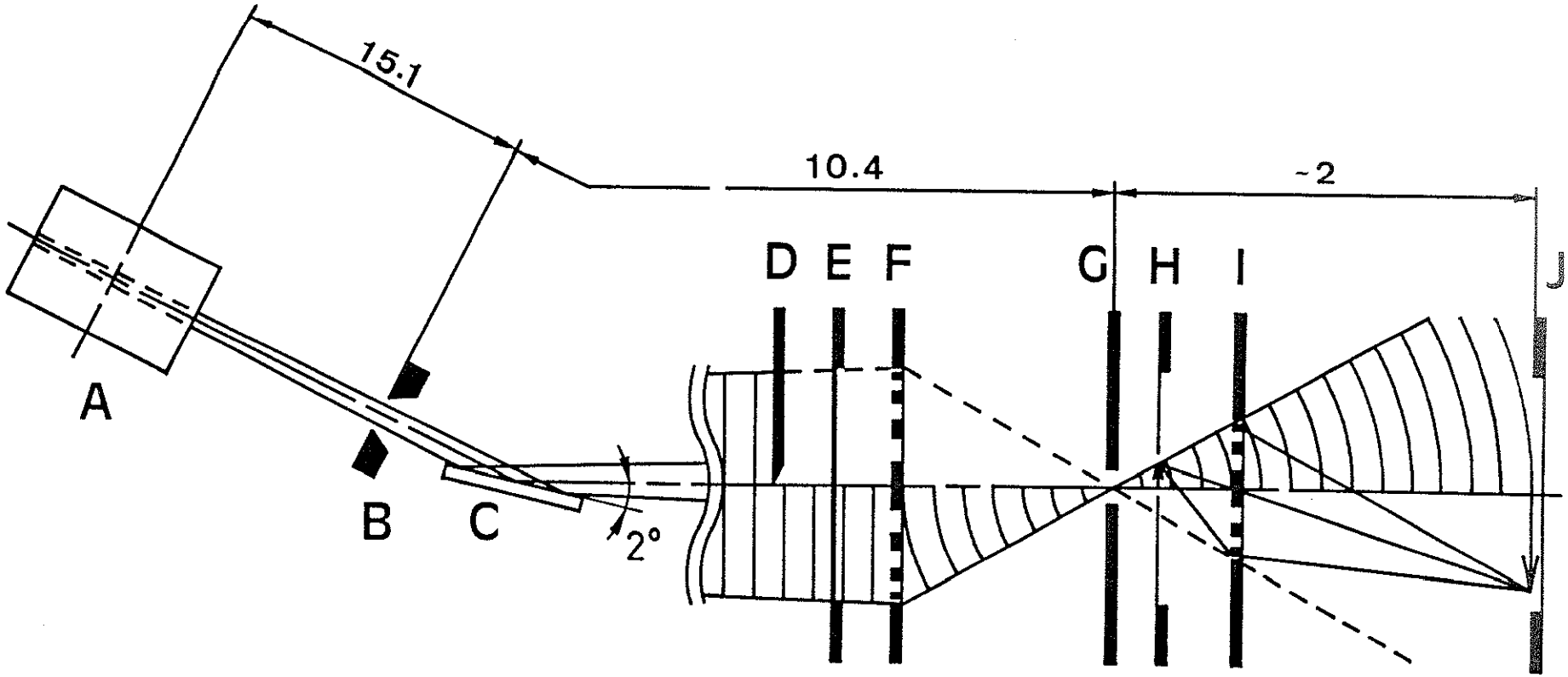


図４－３．臨界照明を用いた軟Ｘ線顕微鏡の光学系

A:undulator, B:beamline diaphragm(1mmφ), C:plane deflection mirror(Pt coat), D:off axis knife edge, E:aluminum foil(1.5μm thick), F:CZP, G:pinhole(10 or 20μmφ), H:object, I:OZP, J:screen

⑥対物ゾーンプレートの焦点距離を10mm程度とする。

装置製作上の諸々の条件を考慮してこの値とした。

⑦ピンホールと検出器までの距離を2m前後とする。

対物ゾーンプレートの焦点距離が10mm程度であるから、倍率は200倍前後となる。従って、理論分解能の0.25μmが検出器上で50μm前後となる。この値はフィルムの解像度には十分であり、マイクロチャンネルプレートの位置分解能と同程度である。

以上の条件を数式にまとめると、

A. $r_{N,CON}=500\mu m$ （②より）

B. $r_{N,CON}:f_{CON}\sim r_{N,OBJ}:f_{OBJ}$ （④より）

C. $\delta r_{N,OBJ}\simeq 2500Å$ （⑤より）

D. $f_{OBJ}=r_{1,OBJ}^2/\lambda\sim 10mm$ （⑥より）

となる。これらを解くことによって二つのゾーンプレートのパラメータを決定した。その結果を表4－1に示す。

表4－1. ゾーンプレートのパラメータ

	condenser ZP	object ZP
Radius of innermost zone r_1 (μm)	15.8	5.0
Outer diameter D (μm)	1000.0	100.0
Number of zones N	1000	100
Width of outermost zone δr_N	0.25	0.25

3）準平行光照明を用いた光学系

Köhler照明は図4－2（b）に示すように[5]、光源点から発する光線が物体面に平行光束となって入射する照明系である。この照明は光源の強度ムラが物体面

の強度分布に影響しないという利点を持っている。光源の大きさが無限に小さいならば、物体面に入射する光束は光軸に平行なものだけになる。この場合がKöhler's central illuminationである。光源が大きさを持たないので照明はコヒーレントになる。ゾーンプレートをコンデンサーに用いてこの照明系を構成する場合、2枚のゾーンプレートを必要とする。ゾーンプレートは回折効率が低いので使用する枚数を多くするのは不利である。一方、光源点をほぼ無限遠点にして、ピンホールを用いてコリメーションすることによって空間コヒーレンスを得れば、コンデンサーを用いずに疑似的にKöhler's central illuminationを構成できる。この照明系はアンジュレータ光のように平行度（指向性）の高い光源の場合に有効である。これが準平行光照明と呼ぶ所以である。光源が発散光源の場合は強度が得られないので有効でない。

ゾーンプレートをコンデンサーに用いた臨界照明の場合はそれ自身が分光系の役割も担っていたが、準平行光照明の場合には新たに分光系が必要となる。準平行光照明を用いた軟X線顕微鏡の光学系の設計の基本となる概念は以下の2点である。

①アンジュレータ光の高い平行性を積極的に利用し、照明系には集光素子を用いない。

②単色性は分光器を導入することによって得ることとし、その分散素子には照明領域に強度ムラが生じないように結像作用を持たない平面回折格子を用いる。また、波長選択は回折格子の回転のみによって行なう。

図4－4に準平行光照明系を用いた軟X線顕微鏡の光学系を示す。ビームライン上流の構成要素A、B、Cは1）で述べた通りである。分光器は、入射ピンホール（D）、出射ピンホール（H）、分散素子である平面回折格子（F）及び光軸を一定にするためと、アンジュレータ光の高次光をカットするための二つの役割を持つ2枚の平面ミラー（E、G）から構成される。拡大系は物体（試料）と対物ゾーンプレートからなる。

分光器に必要な条件をまとめると以下のようになる。

Ⓐ波長域は20～31Åとする。

これは、臨界照明の場合と同じである。

Ⓑ波長分解能（λ／⊿λ）はゾーンプレートのゾーン数を考えて200前後とする。

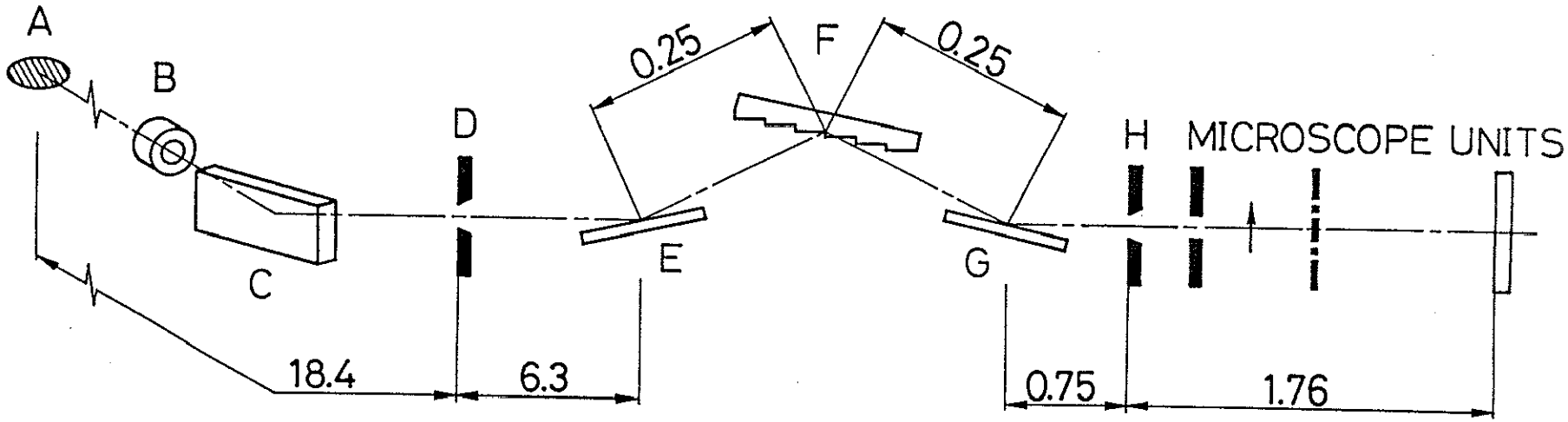


図４－４．準平行照明を用いた軟Ｘ線顕微鏡の光学系

A:undulator, B:beamline diaphragm(1mmφ), C:plane deflection mirror(Pt coat), D:entrance pinhole, E:plane deflectiom mirror 1 F:plane grating, G:plane deflection mirror 2, H:exit pinhole

Ⓒ光源は垂直方向の方が水平方向より発散角が小さいので光学系は垂直分散型とし、光軸が不変となるように2枚の平面ミラーを用いた定偏角型とする。
Ⓓアンジュレータ光の高次光を偏向ミラーを用いてカットする。
Ⓔ集光系を持たないので波長分解能はビーム幅によって決まる。従って、出射ビーム幅が入射ビーム幅よりも小さくなるように、回折格子の回折次数は－1次を採用する。
Ⓕ出射ピンホール上での光子密度は 10^7photons/sec/μm^2 at 100mA以上となるようにする。この値は、§4．3）で見積った値である。

分光器の性能の見積りは、①波長分解能、②出射ピンホール上での光子密度及び③偏向ミラーによるアンジュレータ光の高次光のカットの3点について行なった。①～③の計算結果から、上記Ⓐ～Ⓕの条件を満たす一つの解として、入射ピンホールの直径Dが500～200μm、出射ピンホールの直径dが200～100μm、回折格子の溝本数が1200本／mm、回折格子のブレーズ角が1.7°、偏向ミラーの反射面の材質がSiCで斜入射角が30mradという値を得た。以下にその詳細をまとめる。

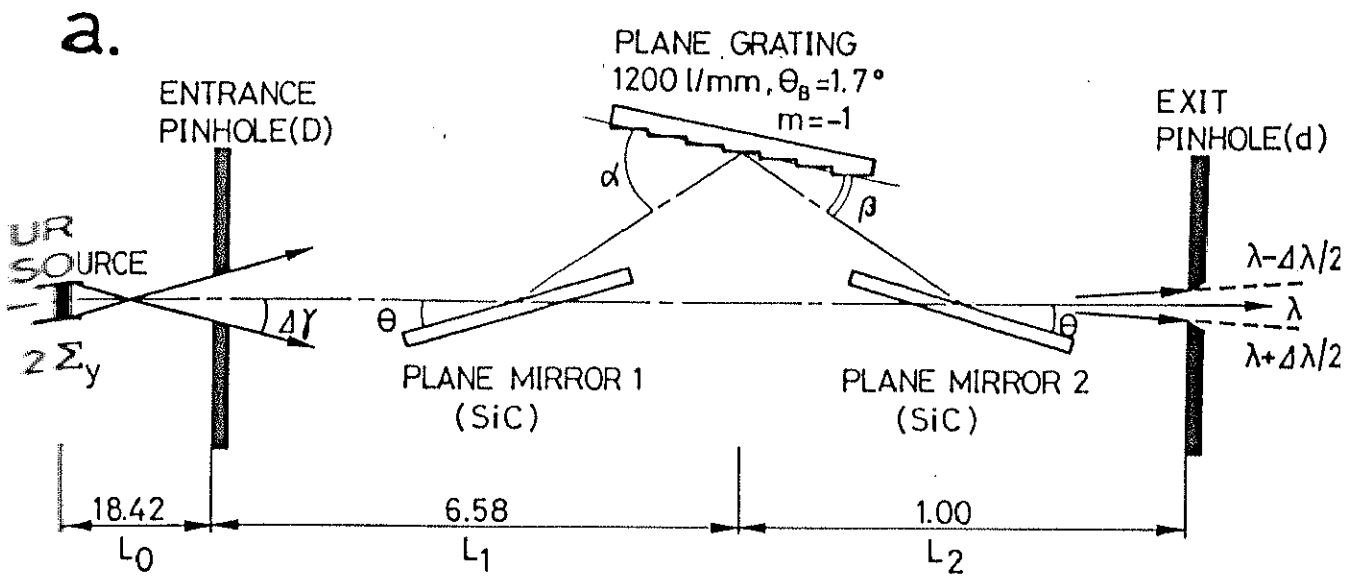
<u>①波長分解能の見積り</u>

図4－5（a）は、分光器の波長分解能の見積りの概要を示している。基本となるのは回折の式

$$\cos\alpha - \cos\beta = m\lambda / p \qquad 4\text{-}1$$

である。ここで、αは回折格子への入射光の斜入射角、βは斜出射角、mは回折次数、pは回折格子の格子定数である。回折格子に関する座標系は図（b）に示すように定義した。回折次数は通常＋1次を用いるので、$\alpha < \beta$である。mが負の場合は、θ_Bも負とすればよく、4-1式の解は$\alpha > \beta$となるので、この定義は回折次数の正負に関わらず適用できる。回折格子面と光線のなす角度α、βではなく、回折格子の中心を原点とする直交座標系に対する回折格子の回転角度ϕを用いれば4-1式は

$$2\sin 2\theta \sin\phi = m\lambda / p \qquad 4\text{-}2$$



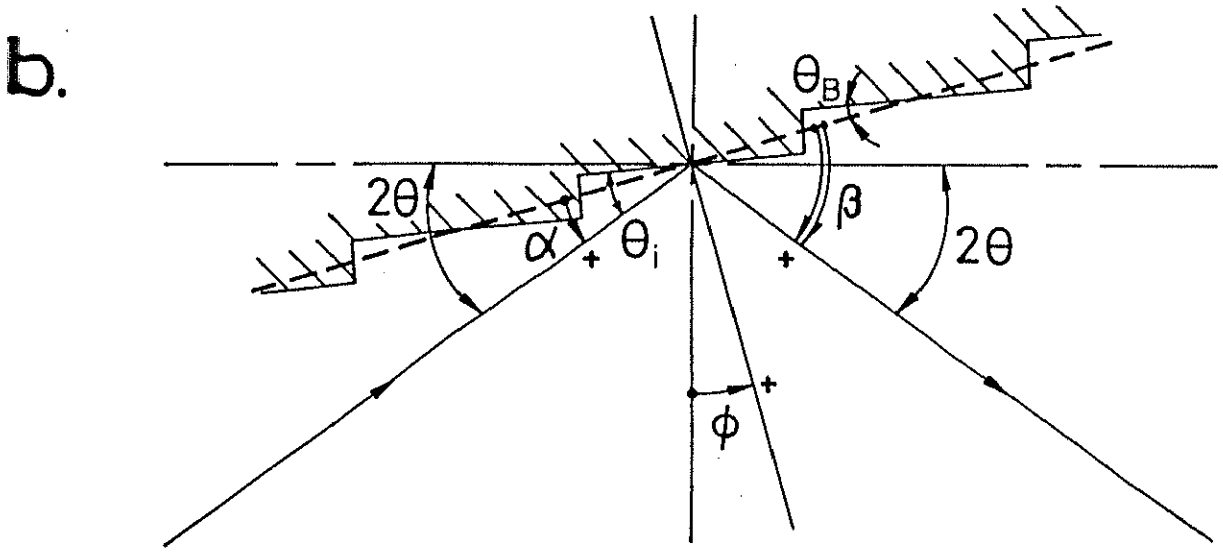


図４－５．（ａ）分光器の波長分解能の見積りの概要

（ｂ）回折格子の座標系の定義

と書けるので、波長λに対する回折格子の回転角は

$$\phi = \sin^{-1}(m\lambda / 2p\sin 2\theta) \qquad 4\text{-}3$$

で与えられる。mが負ならばϕも負である。偏向角θを固定した場合にはブレーズ面で回折光が正反射する最適波長は4-2式で$\phi = \theta_B$とおけば

$$\lambda_{opt} = 2p\sin 2\theta \sin\theta_B / m \qquad 4\text{-}4$$

となる。逆に、全波長領域で最適化するには、θを変化させなければならず、波長λが最適条件を満たす偏向角θ_{opt}は

$$\theta_{opt} = (1/2)\sin^{-1}(m\lambda / 2p\sin\theta_B) \qquad 4\text{-}5$$

で与えられる。分解能はアンジュレータ光の光源の大きさΣ_y、入射ピンホールの大きさD及び出射ピンホールの大きさdを考慮して導出した式（Appendix 2）

$$\lambda / \Delta\lambda \sim m\lambda / 2p\ \{\sin\alpha \sin\Delta\gamma + \sin\beta \sin\Delta\beta\} \qquad 4\text{-}6$$

$$\Delta\beta \sim \left[\frac{d}{2} + \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\left\{L_1\Delta\gamma + \frac{D}{2}\right\}\right] / L_2$$

$$\Delta\gamma \sim (D/2 + \Sigma_y) / L_0$$

を用いて計算した。

②出射ピンホール上での光子密度の見積り

光子密度を見積るために必要なパラメータは、図4－4の光学系の構成要素をビームライン上流から順次みていくと

Ⓐアンジュレータ光の実効光子密度：Brightness

Ⓑビームラインの偏向ミラー（Pt、斜入射角2°）の反射率：Reflectivity I

Ⓒ入射ピンホールの光源に対する取り込み立体角：Ω_{Bopt}

$\Omega_{acpt} = \pi\ (D/2/L_B)^2$ mrad^2

入射ピンホールの直径＜ビームラインダイアフラムの直径（１ｍｍ）であるので分光器に入射するフラックスを決めるのは入射ピンホールの方である。

Ⓓ２枚の偏向ミラーの反射率（ＳｉＣ、斜入射角θ）：ReflectivityⅡ

Ⓔ回折格子のブレーズ面の反射率（Ｐｔ、ブレーズ面への斜入射角$\theta_i = \alpha + \theta_B$：RefletivityⅢ

Ⓕ負の回折次数を用いているために、ブレーズによって回折光の一部が遮られる照射面積損失：ｆ

ブレーズ面への斜入射角をθ_i、ブレーズ角をθ_Bとしたとき

$$f = 1 - |\tan\theta_B| / \tan\theta_i \qquad 4\text{-}7$$

で与えられる[6]。

Ⓖ分解能：Bandwidth

Brightnessは0.1%bandwidthを単位としているので、分光器の分解能を0.1% bandwidthで規格化する必要がある。

$$\text{Bandwidth} = (\Delta\lambda/\lambda)/0.1\% = 1000\times(\Delta\lambda/\lambda)$$

ⒽExit スポットサイズ：Ｓ

入射ピンホールを通過してきた光源の出射ピンホール直前での幾何的投影像の大きさである。光源の幾何的投影像の形状は楕円であるので、そのｘ方向の大きさを$ExitBS_x$、ｙ方向の大きさを$ExitBS_y$としてＳを次式で定義する。

$$S = \pi\ (ExitBS_x/2)\ (ExitBS_y/2) \quad \mu m^2$$

Ⓐ～Ⓗを考慮して出射ピンホール上での光子密度（EXIT FLUX DENSITY）は

$$\begin{aligned}&\text{EXIT FLUX DENSITY(photons/s/}\mu m^2\text{ at 100mA)}\\&= \text{Brightness}\times\text{ReflectivityⅠ}\times\Omega_{acpt}\times\text{ReflectivityⅡ}\\&\quad\times\text{RefletivityⅢ}\times f\times\text{Bandwidth}\times\text{ReflectivityⅡ}/S\end{aligned}$$

として計算した。なお、反射率の計算に必要な原子散乱因子のデータは Ref.7を用いた。また、ＳｉＣの密度は3.2(g/cm^3)とした[8]。

①と②で計算した分光器の波長分解能と光子密度の値を図４－６に示す。ここでの値は、各波長について偏向角θが最適条件 4-5式を満たすときについての値

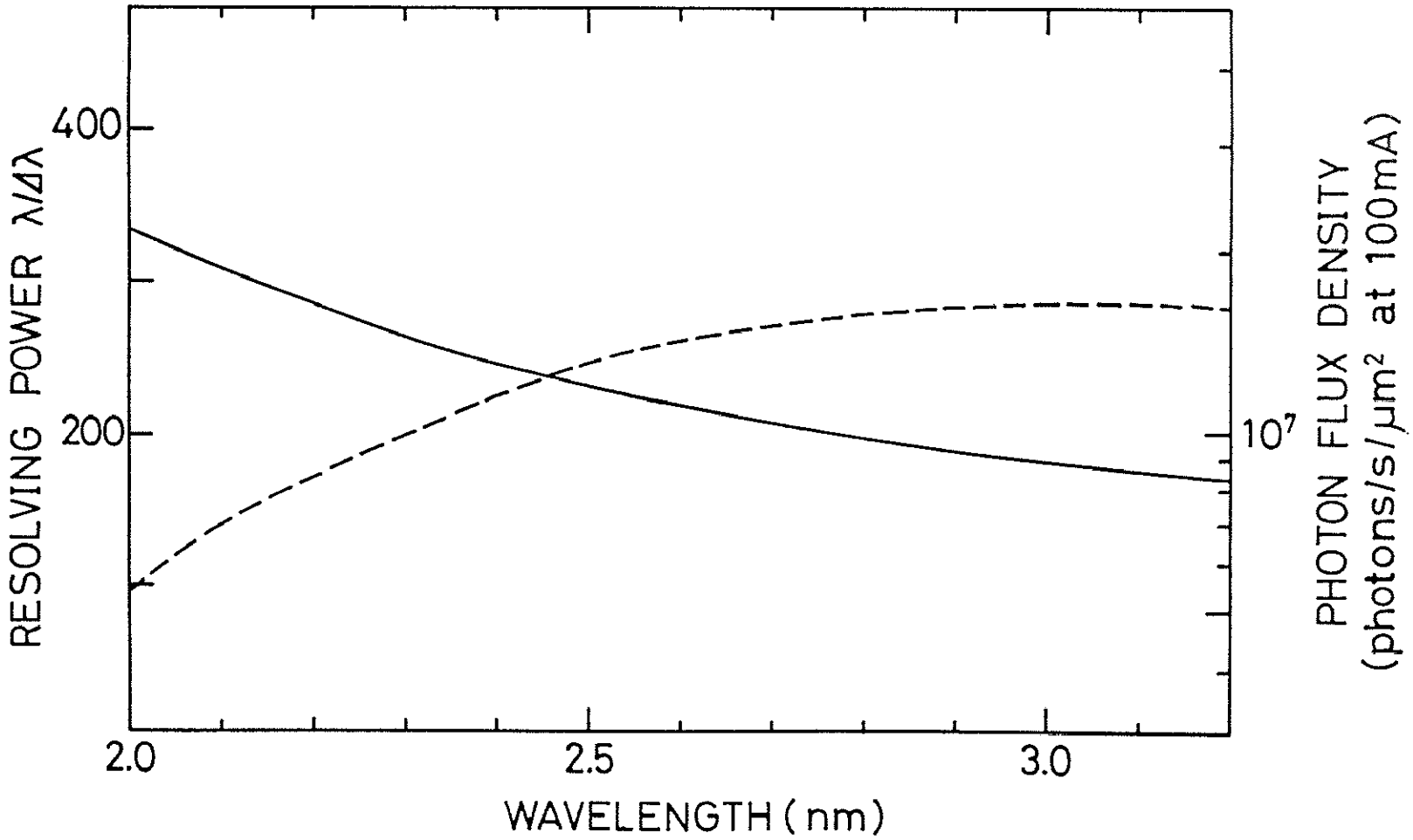


図４－６．分光器の波長分解能と光子密度の見積りの計算結果

である。この結果から、設定した性能である分解能200前後、光子密度 10^7photons/sec/μm^2 at 100mA 以上が期待されることがわかる。図4－7に、分解能を評価するために光線追跡[9]を行なった結果を示す。この図から、4-6式で見積った分解能がほぼ得られていることがわかる。

③偏向ミラーによるアンジュレータ光の高次光のカット

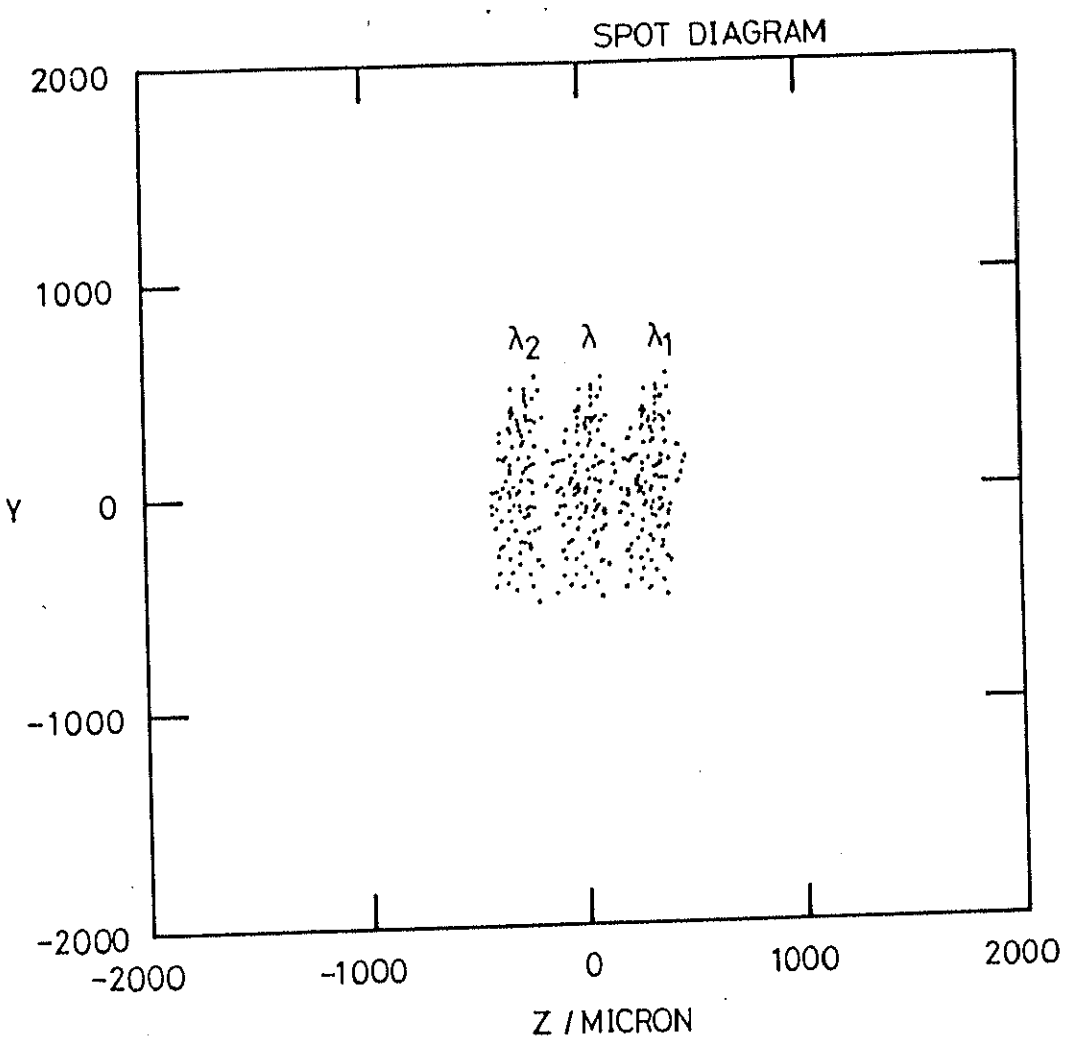
アンジュレータ光には高次光が必ず伴う。回折格子で分光しても高次光は高次回折によって必ず存在することになる。特に奇数次光はスペクトル幅が狭いので、その影響は無視できない。従って、これらの高次光は全反射の臨界角を利用する方法などを用いてカットする必要がある。表4－2に設定波長域におけるアンジュレータ光の1、2及び3次光の各ミラーに対する反射率と、トータルの反射率の計算結果を示す。この表から2次光は1次光に対して3分の1程度残っているが、3次光はほぼ除去できていることがわかる。

図4－8に平面回折格子と平面ミラーの写真を示す。回折格子は株式会社日立製作所製で、仕様は以下に示す通りである。

溝数	1200 l/mm
ブレーズ角度	1.7° ±0.3°
ブランクサイズ	60±0.1×20±0.1×15±0.2 mm
ブランク材質	石英
刻線面積	56(W)×19(L) mm
有効面積	53(W)×16(L) mm
コーティング	白金（Pt）
使用温度	200° C 以下（ベーカブルレプリカ）

平面ミラーは東芝セラミックス株式会社が開発したβ－SiC素材をキャノン株式会社がSiC研磨用に開発した超精密加工法によって表面研磨したものである以下に仕様を示す。

材質	カーボン+クリアーCVD-SiC 30μm+CVD-SiC 500μmコーティング
サイズ	100(+0,-0.5)×20(+0,-0.5)×15(+0,-0.5) mm
面精度	λ／10 以下 （λ＝0.6328μm）
表面粗さ	RMS 5Å以下



$\lambda = 30.0$Å

$\lambda_1 = 29.9167$ Å　　$\lambda/\Delta\lambda \sim 180$

$\lambda_2 = 30.0833$Å

図４－７．光線追跡による波長分解能の評価

========== Initial Parameters ! ==========
[1] Grating Pitch (lines/mm) 1200
[2] Brazed Angle (mrad) -29.6706
[3] Diameter of Entrance Diaphragm (micron) 500
[4] Diameter of Exit Pinhole (micron) 200
[5] Distance between Entrance Pinhole and Grating (mm) 6580
[6] Distance between Grating and Exit Pinhole (mm) 1000
[7] Diffraction Order m (+1 or -1)-1
[8] Deflection Mirrors ; SiC

* Deflection Angle Optimized

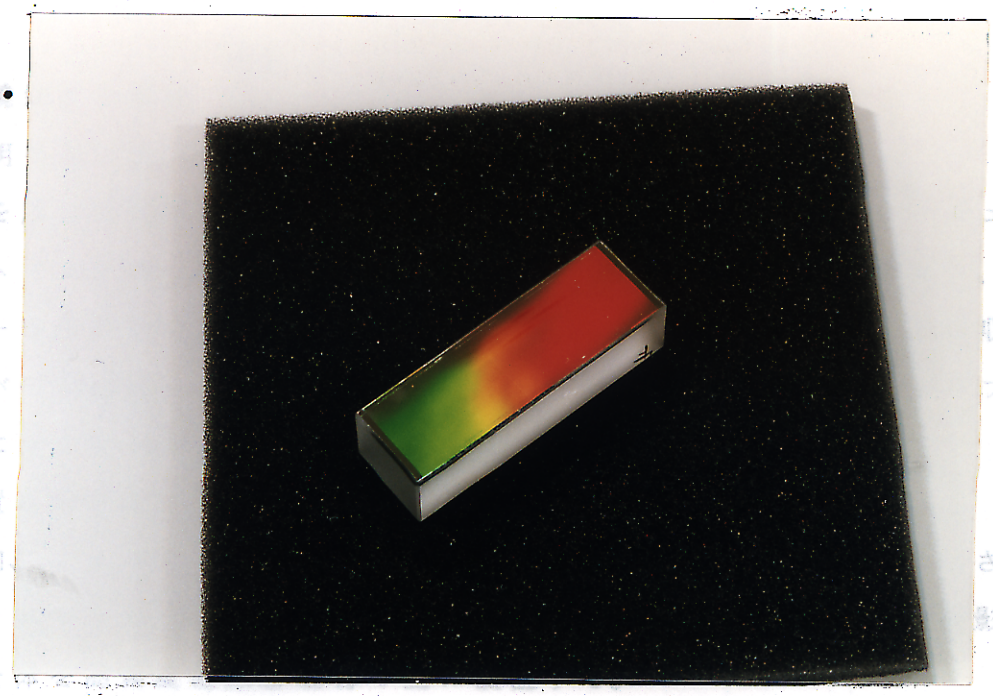
	Reflectivities									Total Reflectivity		
	Deflection Mirror(Pt)			Plane Mirror(SiC)			Plane Grating(Pt)					
ﾗﾑﾀﾞ	UR,1	UR,2	UR,3	UR,1	UR,2	UR,3	UR,1	UR,2	UR,3	UR,1	UR,2	UR,3
2.00	64.0	60.2	25.3	80.8	48.0	1.7	59.0	52.2	9.5	24.7	7.2	0.0
2.05	64.2	60.7	31.7	80.2	48.3	1.5	58.5	51.5	10.6	24.2	7.3	0.0
2.10	64.3	61.3	37.8	79.5	49.4	1.6	57.7	51.0	11.9	23.4	7.6	0.0
2.15	64.0	61.3	42.5	78.8	48.7	1.6	56.6	49.9	13.1	22.5	7.3	0.0
2.20	63.9	61.6	45.0	78.1	48.8	1.7	55.6	49.1	13.3	21.6	7.2	0.0
2.25	63.9	61.9	47.2	77.5	48.6	1.7	54.9	48.4	13.6	21.1	7.1	0.0
2.30	64.4	63.0	49.1	77.0	48.2	1.8	54.6	48.6	13.8	20.8	7.1	0.0
2.35	64.9	62.3	50.7	76.1	47.6	1.8	54.3	46.9	14.0	20.4	6.6	0.0
2.40	65.4	62.5	52.2	75.6	47.5	1.8	54.2	46.1	14.3	20.3	6.5	0.0
2.45	65.8	62.4	53.5	75.1	47.2	1.9	53.9	45.0	14.5	20.0	6.3	0.0
2.50	66.0	62.7	54.7	74.6	46.6	1.9	53.5	44.5	14.7	19.6	6.1	0.0
2.55	66.1	62.8	55.5	74.1	46.5	1.9	52.9	43.8	14.7	19.2	5.9	0.0
2.60	66.3	62.9	56.2	73.5	46.1	2.0	52.4	43.1	14.7	18.8	5.8	0.0
2.65	66.5	63.0	56.8	73.0	45.7	2.0	51.9	42.3	14.7	18.4	5.6	0.0
2.70	66.6	63.0	57.4	72.4	45.1	2.0	51.4	41.6	14.6	18.0	5.3	0.0
2.75	66.7	63.1	58.0	72.1	44.8	2.0	50.9	40.9	14.6	17.6	5.2	0.0
2.80	66.8	63.2	58.5	71.4	44.4	2.1	50.3	40.2	14.6	17.1	5.0	0.0
2.85	66.8	63.2	59.0	70.7	43.9	2.0	49.7	39.5	14.5	16.6	4.8	0.0
2.90	66.8	63.3	59.4	70.0	43.8	2.1	49.1	38.8	14.5	16.1	4.7	0.0
2.95	66.9	63.3	59.8	69.4	43.1	2.1	48.5	38.0	14.4	15.6	4.5	0.0
3.00	66.9	63.2	60.3	68.7	42.6	2.1	47.9	37.3	14.4	15.1	4.3	0.0
3.05	66.9	63.2	60.5	68.2	42.2	2.1	47.3	36.5	14.3	14.7	4.1	0.0
3.10	66.9	63.5	60.8	67.5	41.8	2.1	46.7	36.3	14.1	14.2	4.0	0.0
3.15	66.8	63.1	61.0	66.9	41.4	2.1	46.0	35.1	14.0	13.8	3.8	0.0
3.20	66.9	63.0	61.2	66.1	41.1	2.1	45.6	34.3	13.9	13.3	3.6	0.0

END OF EXECUTION

表４－２．偏向ミラーのアンジュレータ光の１，２，３次光に対する反射率

Deflection Mirror(Pt)とPlane Mirror(SiC)は、それぞれビームラインの偏向ミラーと分光器の２枚の偏向ミラーを示している。また、UR,1、UR,2、UR,3はアンジュレータ光の１次光、２次光及び３次光を表わしている。

a.



b.

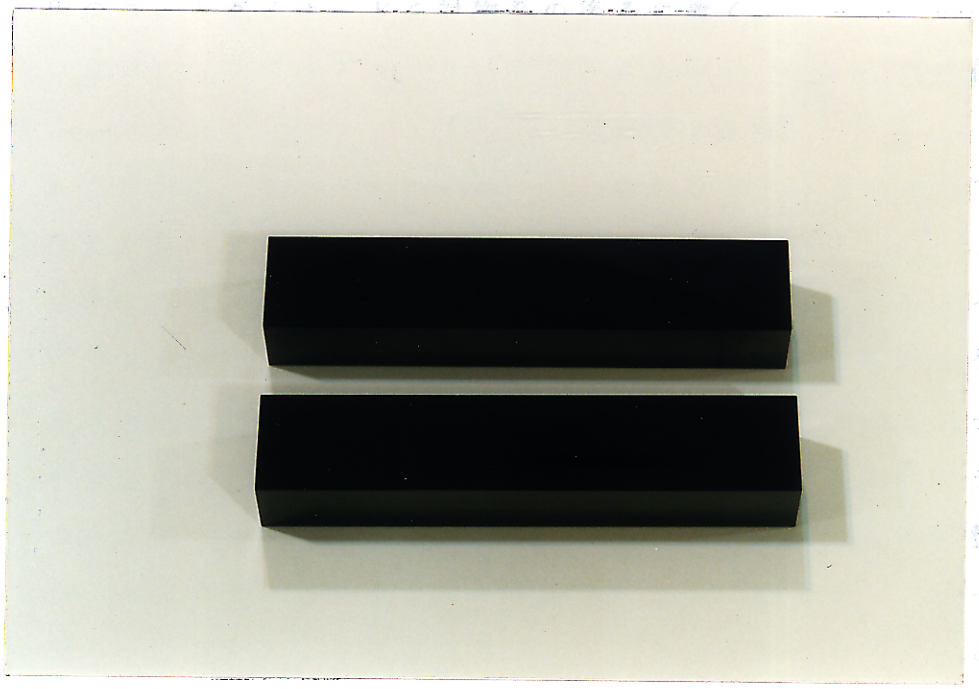


図４－８．平面回折格子（ａ）と平面ミラー（ｂ）の写真

§２．顕微鏡装置の開発

１）臨界照明を用いた光学系による顕微鏡装置の開発

臨界照明を用いた光学系は、§１．１）で述べたように、軸外しナイフエッジ、アルミニウムフォイル、集光ゾーンプレート、ピンホール、試料（物体）、対物ゾーンプレート及び検出器から成り立っている。従って、これら各素子を収める真空チェンバーが必要となる。また、ゾーンプレート、ピンホール、ナイフエッジ及び試料には２次元の高精度可動機構が必要となる。

顕微鏡装置の設計は次のような方針に従って行なった。

①集光、対物、フォトダイオード、撮影の４つの真空チェンバーから構成される。

②集光ゾーンプレートとピンホールで直線型分光器の働きをするので、撮影系以外の光学系全体を高精度直線移動台の上に設置する。

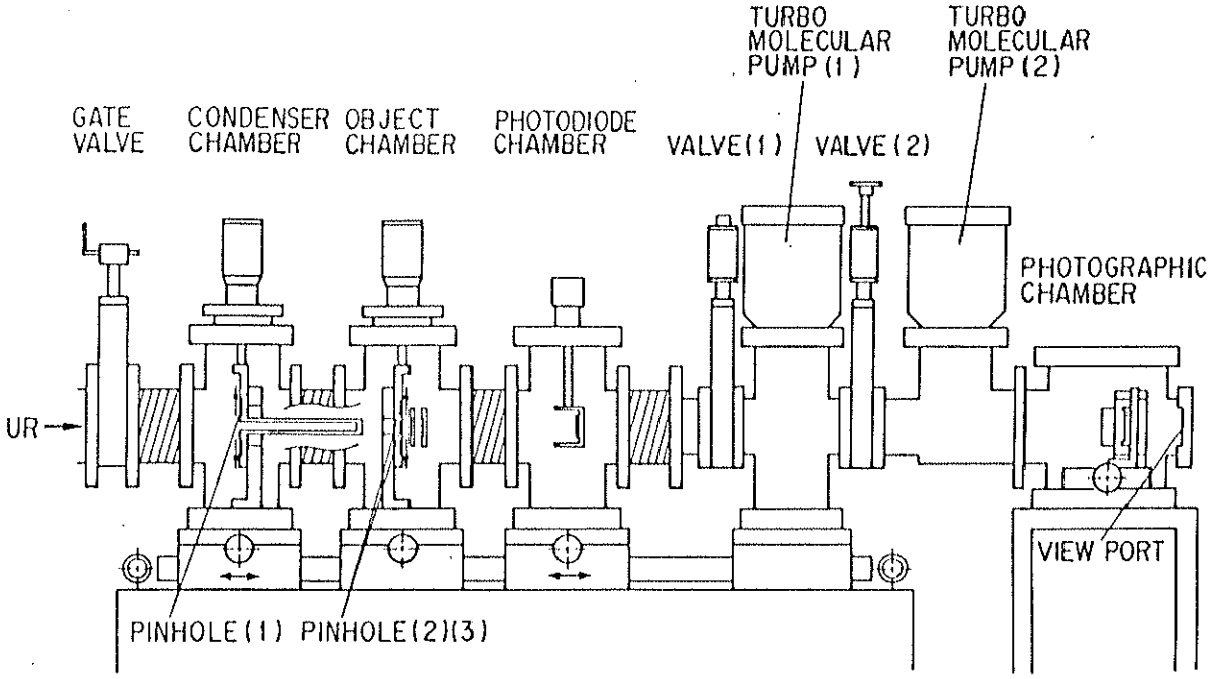
③ピンホール、試料及び対物ゾーンプレートは一つのチェンバーに収め、試料と対物ゾーンプレートはそれぞれ３軸マニピュレータを用いて調整する。

④強度モニター用のフォトダイオードを対物系の後ろに置く。

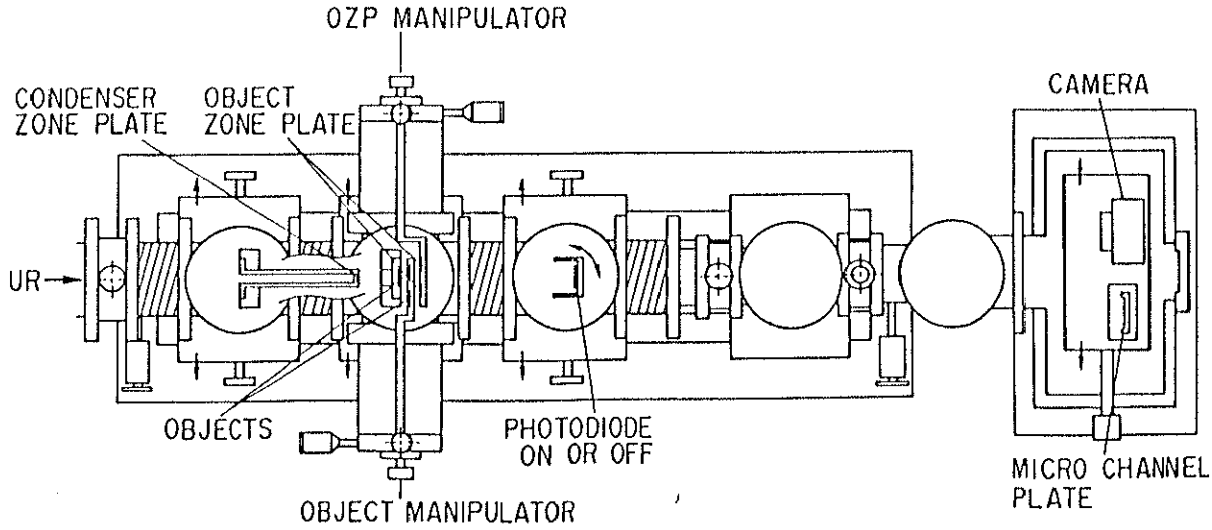
⑤光軸調整はマイクロチャンネルプレート（ＭＣＰ）を用いて行い、拡大像はフィルムに記録する。

⑥ＭＣＰとカメラは撮影チェンバー内に収め、一つの可動ステージに乗せて、真空を切らずに交換できる。

図４－９に、開発した軟Ｘ線顕微鏡装置の概略を示す。真空はビームラインと顕微鏡装置との間のゲートバルブと、顕微鏡の中心部分と撮影系との間のゲートバルブによって適宜区切ることができる。従って、フィルムの交換は撮影チェンバーをリークするだけで済む。集光チェンバーの前方に取り付けたＸＹステージにはアルミフォイルと軸外しナイフエッジが取り付けてあり、集光系を調整するときにはナイフエッジを光軸から外すことができる。また、対物チェンバー内のピンホールで光軸の中心を出すときにはアルミフォイルも光軸から外すことができる。集光チェンバー内には垂直方向の高精度直線移動ステージがあり、このステージにピンホールと集光ゾーンプレートのホルダーが取り付けてある。ステージはチェンバーの上部にある直線導入端子で動かす。集光ゾーンプレートは焦点距離が短いのでホルダーでその分を補っている。チェンバーが横方向の高精度直線移動ステージに取り付けてあるので、このステージと垂直方向の直線導入端子



SIDE VIEW



TOP VIEW

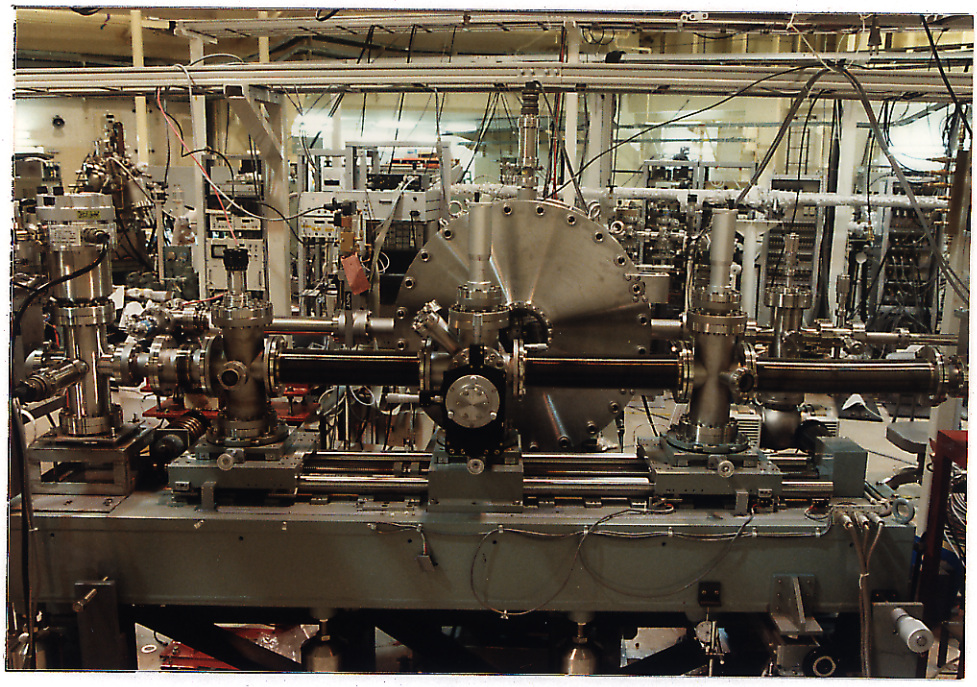
図４－９．開発した臨界照明型軟Ｘ線顕微鏡装置の概要

によって2次元の高精度位置合わせが可能となる。対物チェンバー内にも垂直方向の高精度直線移動ステージがあり、これにピンホールを取り付ける。ピンホールは2種類取り付け可能であり、通常は10μmと20μmをセットしている。チェンバーの両サイドには、試料及び対物ゾーンプレート専用の3軸マニピュレータが取り付けてある。試料ホルダーには4個の取り付け箇所があるので、同時に四種類の試料がセットできる。対物ゾーンプレートのホルダーには、2個のゾーンプレートがセットできる。マニピュレータのホルダーがかなり長いために震動を拾って像質を劣化させてしまうことがあるので、バネを用いてホルダーを抑えている。対物チェンバーも横方向の高精度直線移動ステージに取り付けてあるので、ピンホールも2次元の高精度位置合わせが可能である。フォトダイオードチェンバー内には強度測定用のフォトダイオードが回転導入端子を用いて取り付けてある。ダイオードは表面を研磨したステンレスの板に金を蒸着したもので、アノードに電圧をかけて光電子電流をピコアンメータで測ることによって入射光の相対強度を測定する。撮影系に入射光を通すときには回転導入端子を90°回してフォトダイオードを光軸から外す。集光チェンバー、対物チェンバー及びフォトダイオードチェンバーは隣同士溶接ベローズで連結してあり、3つとも光軸方向の高精度直線移動台に取り付けてあるので、光軸と移動軸を一致させるように調整をすれば集光チェンバーを光軸方向に走査するだけで波長選択ができることになる。撮影チェンバーは顕微鏡の最後尾にある。MCPとカメラは共通の移動台に取り付けてあり、チェンバーの外の回転導入端子を用いて適宜入れ換えることができる。MCPの蛍光面に投影された拡大像は、チェンバーの後端のビューポートを通して直接目でみることができる。図4－10に顕微鏡装置の写真を示す。（a）は横から見たところ、（b）は後ろから見たところ、（c）は撮影チェンバー内の様子、（d）は対物チェンバー、（e）は対物ゾーンプレートの取り付け機構である。

2）準平行光照明を用いた光学系による顕微鏡装置の開発

準平行光照明を用いた顕微鏡装置は、分光系と拡大系から構成される。図4－11にその概要を示す。分光系は図4－4で既に述べたように、入射ピンホール、2枚の平面偏向ミラー、平面回折格子及び出射ピンホールから成り立つ。偏向ミ

a.



b.

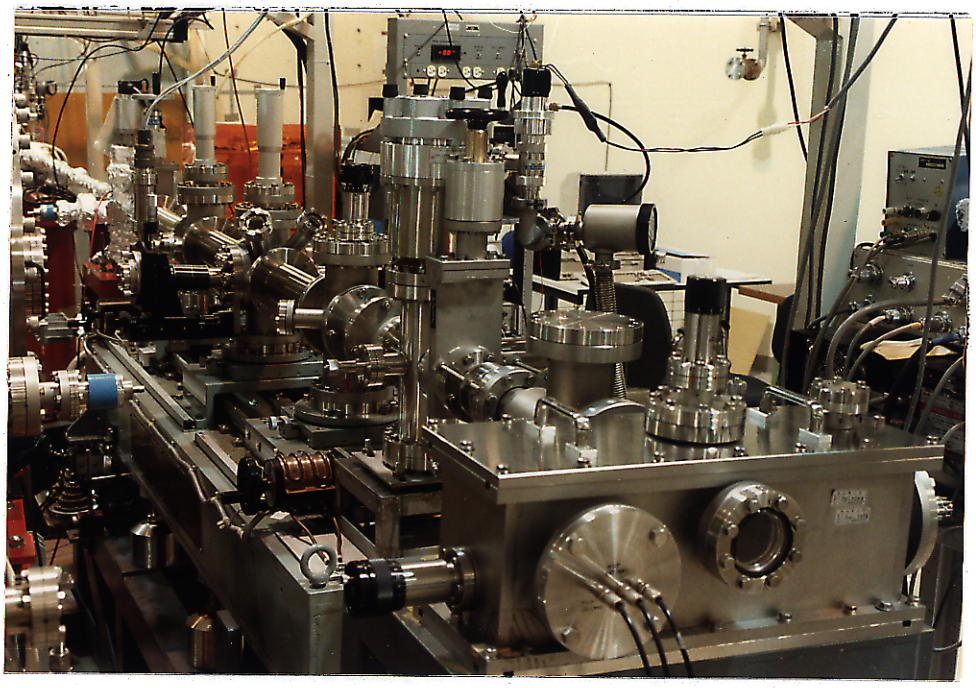
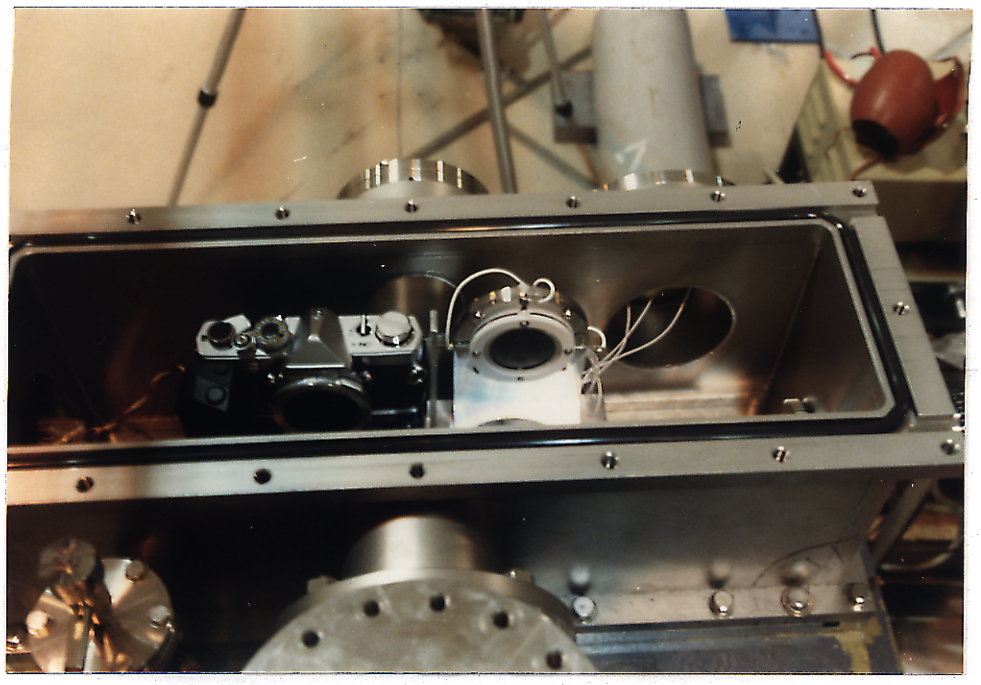


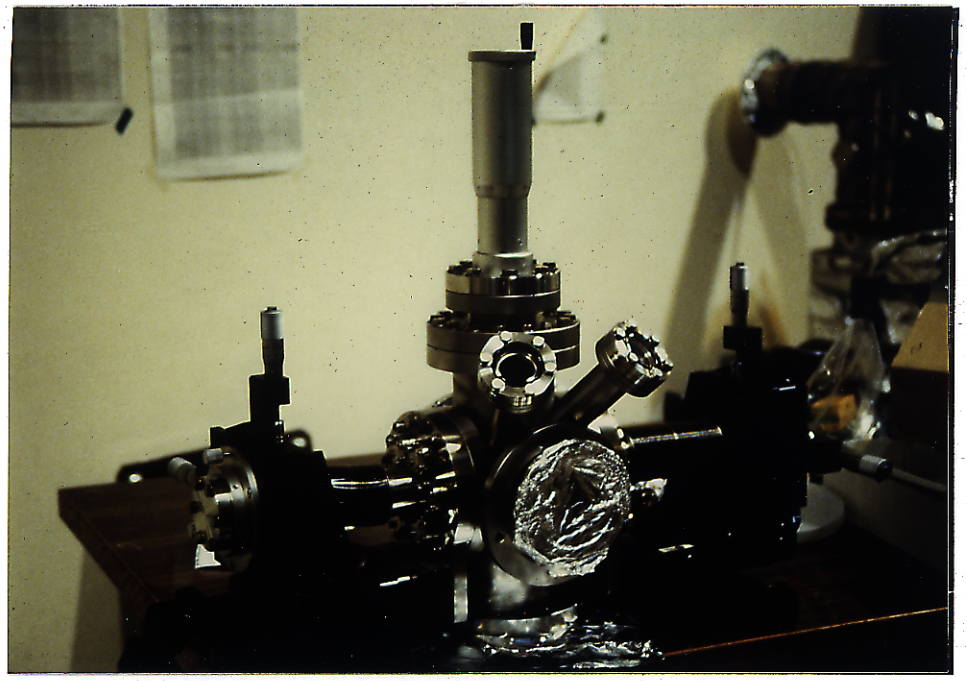
図４－１０．臨界照明型軟Ｘ線顕微鏡装置の写真

（ａ）横から見た様子、（ｂ）後ろから見た様子、（ｃ）撮影チェンバー内、（ｄ）対物チェンバー、（ｅ）対物ゾーンプレートの取り付け機構

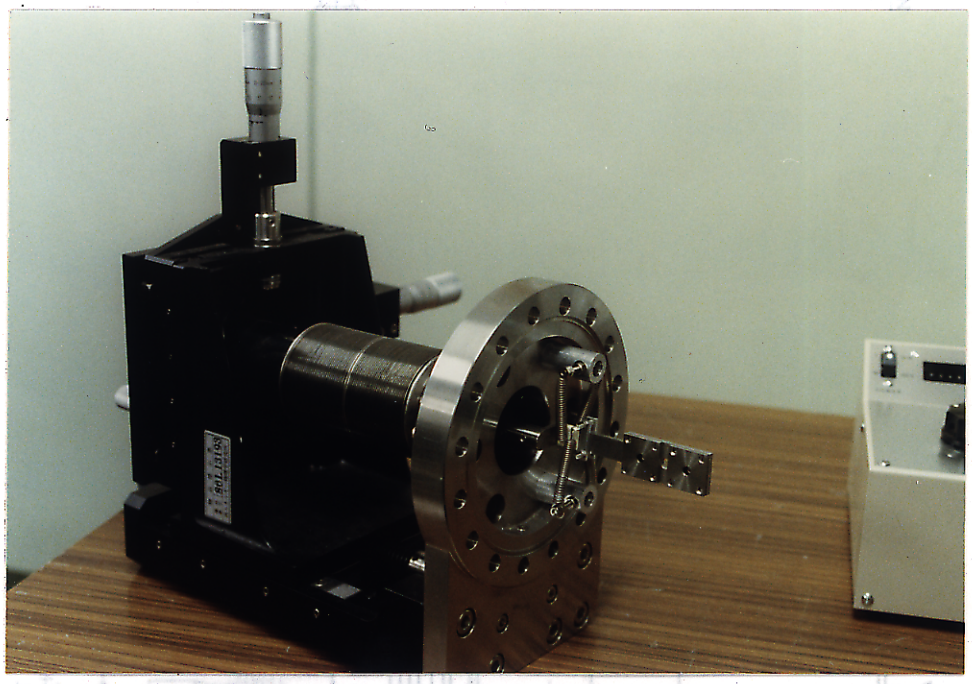
c.



d.



e.



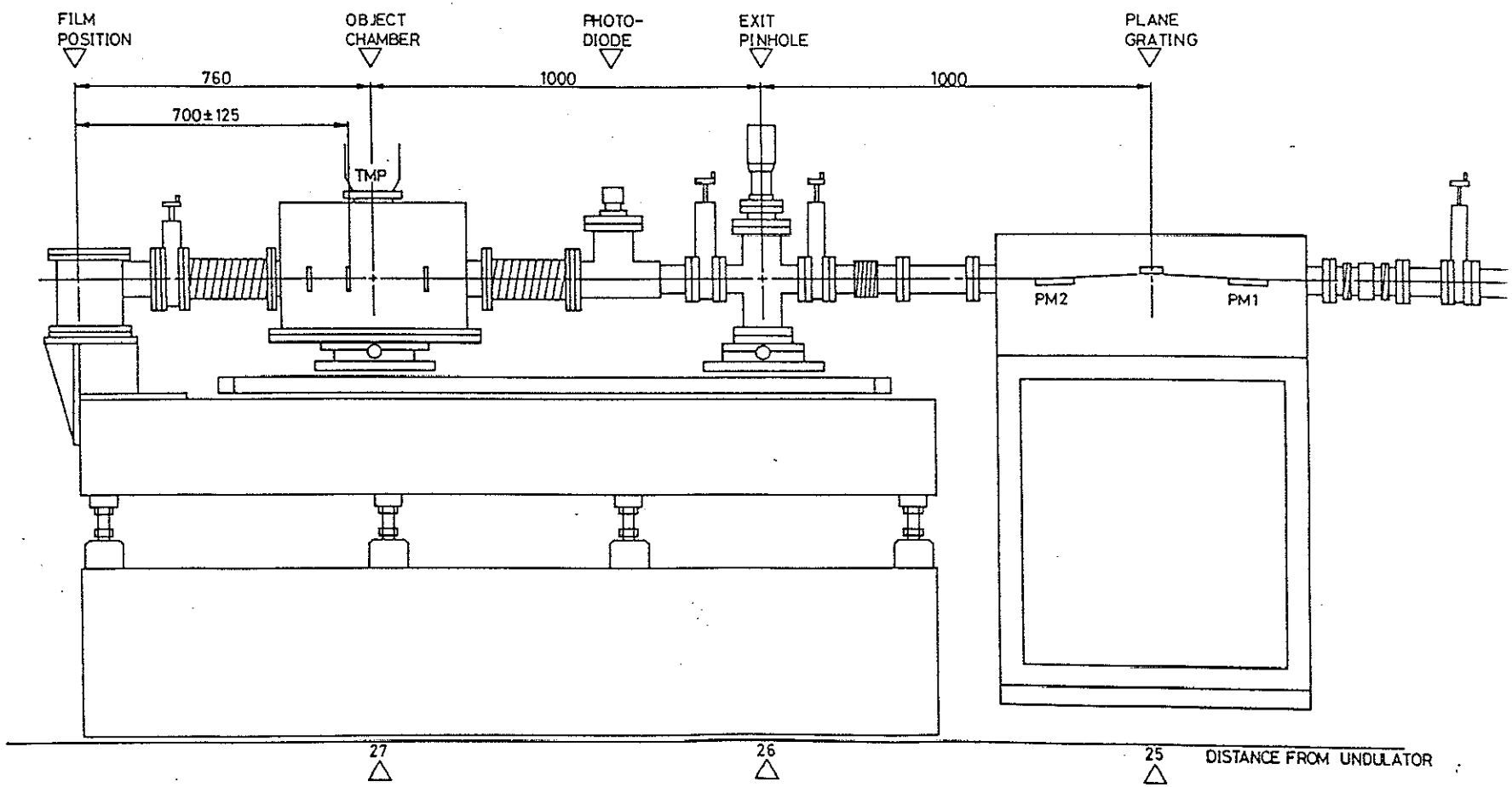


図４－１１．開発した準平行光照明型軟Ｘ線顕微鏡装置の概要

ラーと平面回折格子は一つのチャンバーに収め、分光器と呼んでいる。拡大系は軸外しピンホール、試料及び対物ゾーンプレート用の3個の3軸高精度ステージから成り立つ。これら3個のステージを簡易除震台上に取り付け真空チェンバー内に収めている。これを対物チェンバーと呼んでいる。

分光器の設計の基本概念は以下の3点である。

①3個の光学素子は専用のゴニオメータを用いて微調する。ゴニオメータの駆動はY（上下）軸、面内回転、振り及びあおりである。波長走査は回折格子の振りで行なうので、これには真空仕様のパルスモータを用いる。回折格子の振り以外の全駆動は真空仕様のDCモータで行なう。

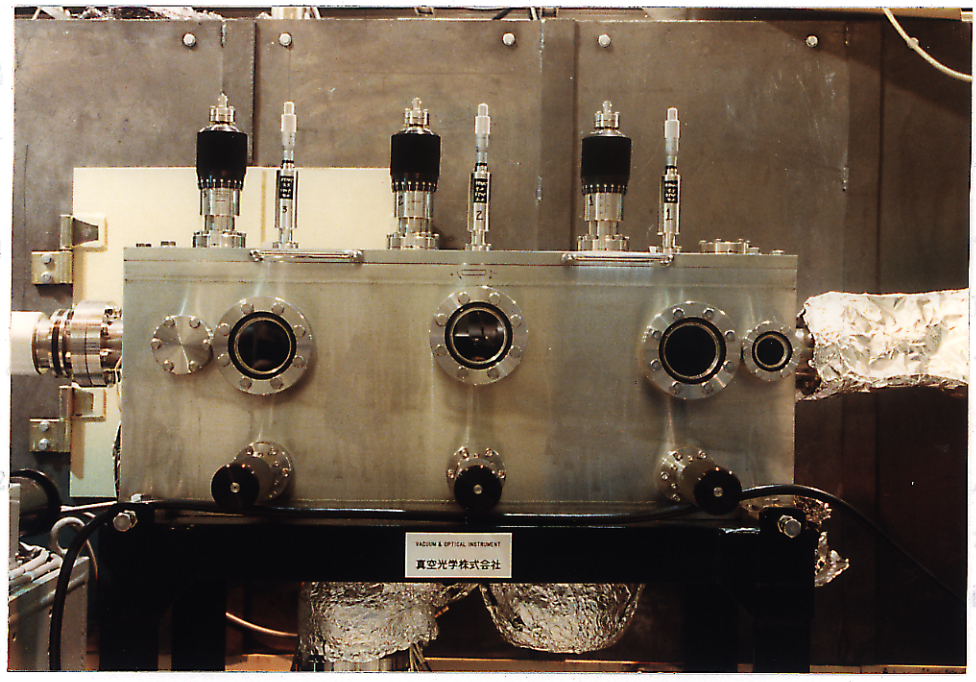
②3個の光学素子のホルダーには、光軸調整用のナイフエッジを取り付け、直線導入端子を用いてチェンバーの外から素子面に対して上下できる。各素子の後方には強度モニター用のフォトカソードを取り付け、直線導入端子を用いて光軸に対して抜き差しできる。また、フォトカソードの光電子電流を測定できるように電流導入端子を設ける。

③BL－2Bでは軟X線顕微鏡と10m斜入射分光器が直列に配置されている。斜入射分光器を用いた実験を行なうときには、軟X線顕微鏡の光学素子はすべて光軸上から外しておかなければならない。従って、3個のゴニオメータは、光軸からよけられるように横（X軸）方向のステージに乗せて平行移動できる。

図4－12に分光器の写真を示す。（a）は横から見たところ、（b）は3台のゴニオメータの様子である。

拡大系の設計の基本概念をまとめると以下のようになる。対物チェンバー内にバイトンOリングとステンレスの板を3段に積み重ね、最上段のステンレス板を光学ベンチとする簡易除震台を設ける。そのベンチの上に、互いに共通の軸を持つ3台のZ軸（光軸）方向の精密駆動ステージを設ける。一番前のステージが軸外しピンホール用、二番目が試料用、三番目が対物ゾーンプレート用である。各Z軸ステージには、同仕様の2軸（X－Y）精密駆動ステージを取り付ける。従って、3個の光学素子は、各々独立に3軸可動である。全ステージは真空仕様のDCモータで駆動する。また、全ステージにはポテンショメータを設け、9軸の位置読み取りができ、さらにリミットスイッチを設ける。各X、Yステージには、各素子用の同仕様のホルダートレイを取り付け、このトレイに素子をセットした

a.



b.

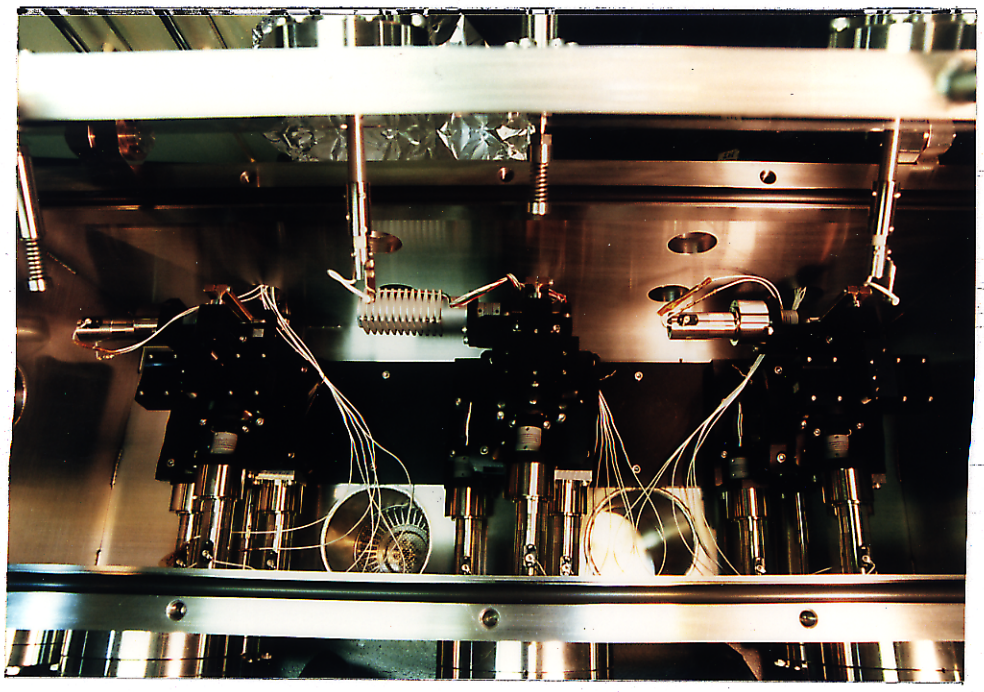


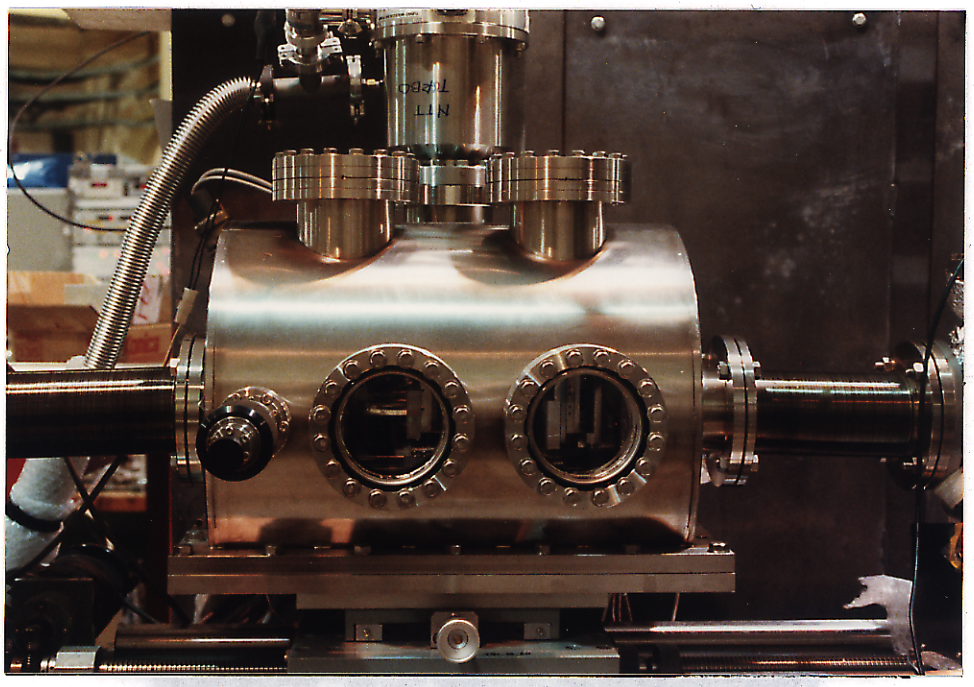
図４－１２．分光器の写真

（ａ）横から見た様子、（ｂ）３台のゴニオメータ

ホルダーを出し入れするだけで素子の交換がができる。３台のＺ軸ステージの移動量は、それぞれ±50ｍｍで、ＸＹステージの移動量は両方向とも±12.5ｍｍである。図４－１３に顕微鏡装置の写真を示す。（ａ）が対物チェンバー、（ｂ）が３台の３軸ステージを横から見たところ、（ｃ）が後方から見たところである。

入射ピンホールは、図４－１に示したようにビームラインのハッチの直前に取り付けてある。ピンホールをマウントする支持台は、銅製で水冷仕様にしてある。マウント箇所は４つあるので、４種類の大きさのピンホールをセットできる。現在は、500、200、50、15μｍを取り付けてある。500と200μｍは顕微鏡の入射ピンホールとして、50と15μｍは将来ホログラフィーの実験を行なうときのために選んだ大きさである。また、ピンホールの下には入射光全部を通すための直径10ｍｍの孔を設けてある。ピンホールの選択は、パルスモータを用いてＢＢＳ（ブランチビームシャッター）を開けたままできる。図４－１４に入射ピンホールを示す。（ａ）は全体を、（ｂ）はビームラインに取り付けてある様子である。

a.



b.

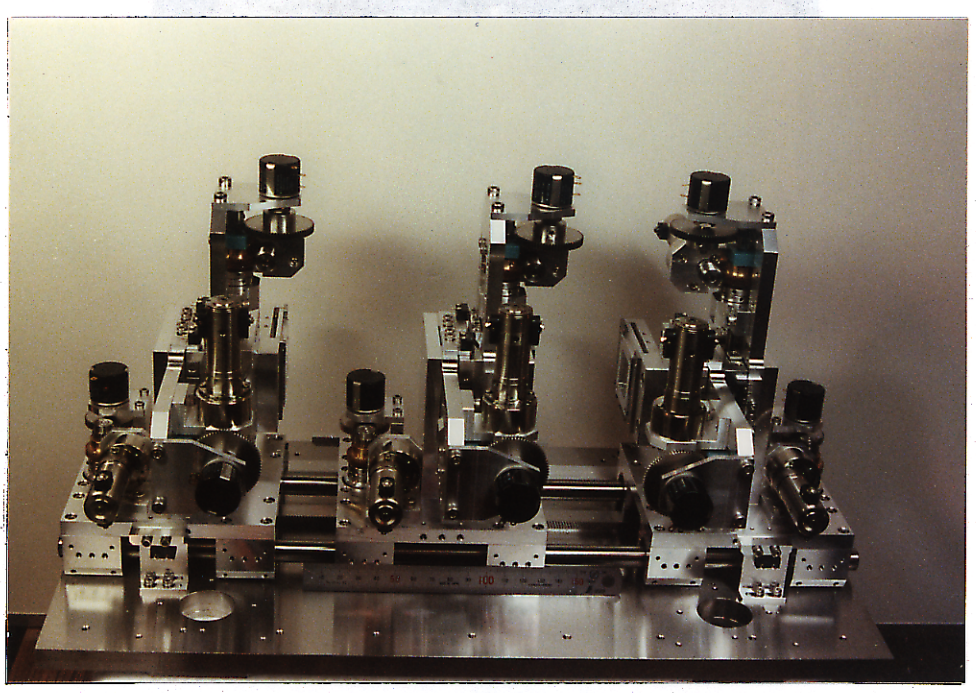
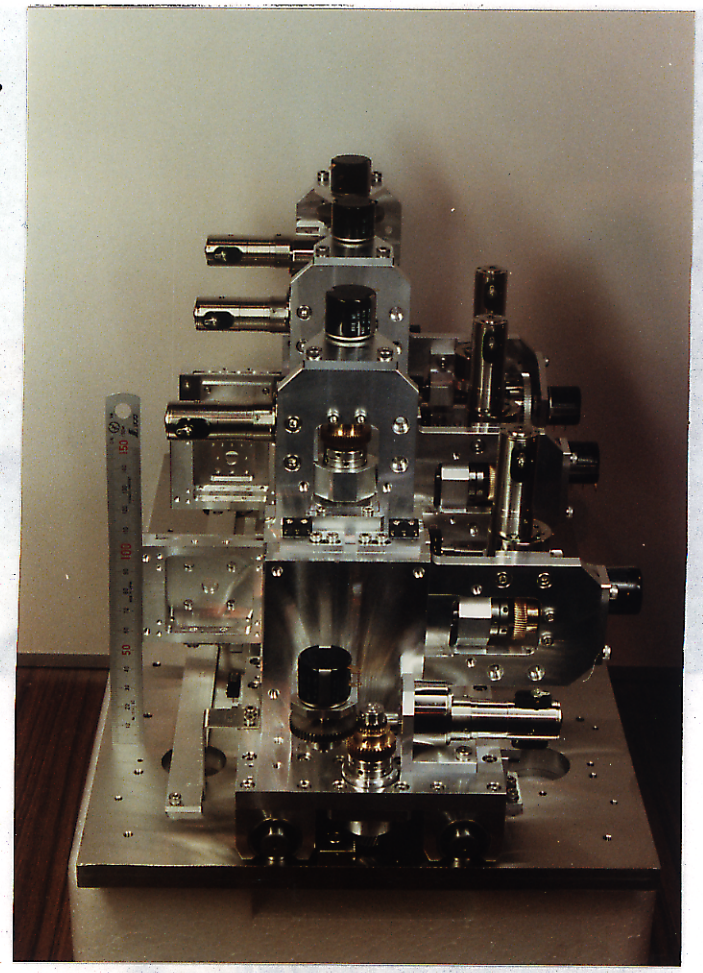


図４－１３．準平行光照明型顕微鏡装置の写真

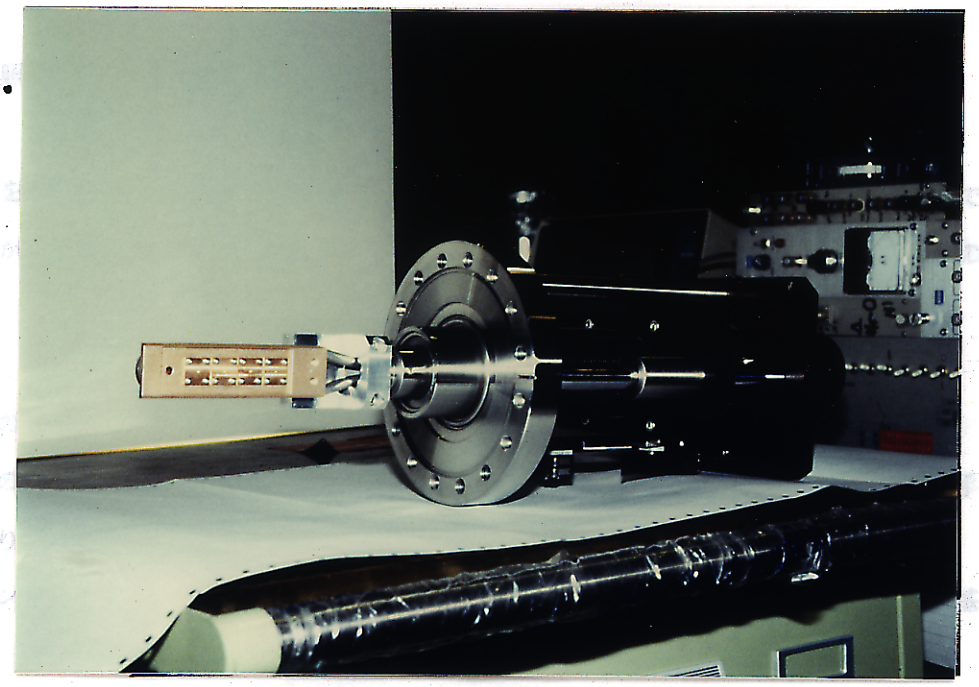
（ａ）対物チェンバー、３台の３軸ステージを（ｂ）横から見た様子

（ｃ）後ろから見た様子

C.



a.



b.

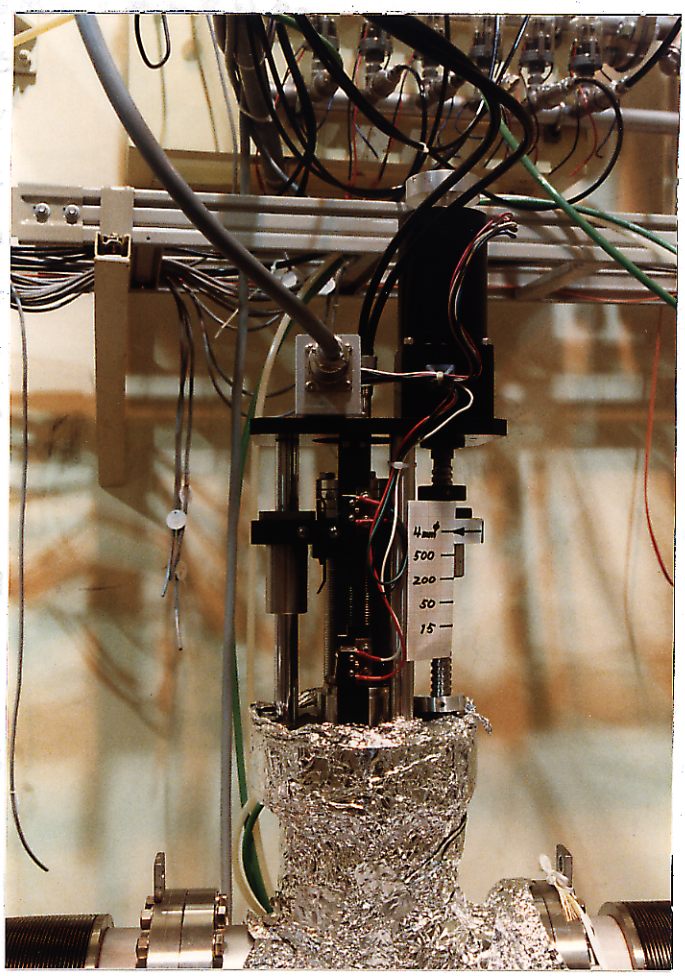


図４－１４．入射ピンホールの（ａ）水冷式ピンホールホルダー、
（ｂ）駆動機構の写真

§３．臨界照明型顕微鏡による実験

臨界照明を用いた顕微鏡については、性能評価及び生物試料の観察まで実験を進めることができた。準平行光照明を用いた場合については、現在実験の準備中である。

１）光学系の調整

臨界照明の場合についての光学系の調整法はほぼ確立している。その手順は以下に示す通りである。

①対物チェンバーのピンホールの位置を固定する。この位置を光学系の基準とする。

②ピンホールを通ってフォトダイオードに入射したＸ線の強度をピコアンメータでモニターしながら、ビームラインの偏向ミラーを微調し最大電流値の位置で固定する。この作業を軸出しと呼んでいる。

③アルミフォイルを光軸に乗せ、集光ゾーンプレートをさらに乗せる。照明系の光軸があっているかどうかはピコアンメータの電流値で経験的にわかる。
集光ゾーンプレートによる光源の縮小像の幾何光学的な大きさは数μｍなので、この焦点を10～20μｍφピンホールに合わせ込むのはかなり難しい作業である。

④フォトダイオードを光軸から外しＭＣＰによるモニターに移行する。

⑤照明系の光軸が合っていれば、集光ゾーンプレートの＋１次回折によって集光されてピンホールから発散してくる円形の投影像がＭＣＰの蛍光面上で観察される。

⑥対物ゾーンプレートをＭＣＰでモニターしながら光軸に乗せる。光軸が完全にあったときは、⑤の円形像の内側に対物ゾーンプレートの＋１次回折のよる円形投影像と、外側に－１次回折による円形投影像がさらに加わる。

⑦試料を光軸に乗せる。形の認識しやすい試料ならばＭＣＰで観察すると、⑥の３重の円形像の中心部分に低コントラストの拡大像が観察できる。

⑧軸外しナイフエッジを光軸に挿入する。入射光のほぼ半分をカットした程度の位置で、試料の拡大像がコントラスト良くなって現われる。

光源の位置が動いたときには、光学系を全てリセットし①～⑧の操作をやり直

す。慣れてくると10～20分程度で終わる。

２）性能評価実験

顕微鏡の性能を評価するために、空間ピッチが2.0μｍ～0.3μｍの一次元透過回折格子を用いてＭＴＦ（Modulation Transfer Function）を測定した。使用した回折格子はＮＴＴ・ＬＳＩ研究所が開発したもので、第２章§１，２）で述べたゾーンプレートと全く同じ方法で製作したものである。アンジュレータ光の１次光の波長は26.6Å、倍率は230倍で実験を行なった。ピンホールは視野を大きくするために20μｍを用いた。実験の手順を以下にまとめる。

①光学系を調整後、ピッチの異なる回折格子の拡大像を順次フィルムに撮影した露光時間は各ピッチについて、5、10、20、40、80秒の５通りとした。フィルムはFuji Minicopyを用いた。

②現像後、デンシトメータを用いて各ピッチの拡大像の山と谷の光学濃度（O.D.を測定した。現像はコピナールで５分、定着はスーパーフジフィックスで３分とした。使用したデンシトメータは、英国ジョイス・レーブル（Joyce-Loebl）社製マイクロデンシトメータ3CSで、ウェッジ（Wedge）はNo.J403（レンジ:3.249 O.D.、スロープ(slope):0.180D/cm）を用いた。

③0.8μｍピッチの拡大像の各露光時間の光学濃度を用いて波長 26.6Åにおけるフィルムの特性曲線を求めた。

④各ピッチの拡大像の山と谷の光学濃度を特性曲線を用いて相対強度に変換し、コントラストを求めた。

⑤得られたコントラストを規格化空間周波数の関数としてグラフにプロットし、矩形波伝達関数を得た。

⑥公式[10]を用いてＭＴＦ、すなわち正弦波伝達関数に変換した。

３）生物試料の観察

実際の生物試料の観察を試みた。試料には乾燥状態の珪藻土、赤血球を用いた。これらの試料は、銅メッシュに付着させた炭素の薄膜の上に置いたものである。アンジュレータ光の１次光は26.6Å、倍率は195倍で実験を行なった。ピンホールは照明系の波長分解能を考えて10μｍを用いた。

§4. 実験結果及び考察

1) 性能評価

A. 拡大像

図4－15に得られた各ピッチの回折格子の拡大像を示す。2.0～0.4μmピッチまでははっきりと解像されていることがわかる。0.3μmピッチは低コントラストではあるが解像されている。また、照明の強度分布が光源の強度分布を反映しているので、視野全体は均一には照明されていない。

B. フィルムの特性曲線

露光量EはE＝It（Iは強度、tは露光時間）で定義されるので、特性曲線（H－D curve）は強度が一定の位置を露光時間を変えて撮影し、各露光時間の光学濃度を測定すれば求められる。本実験では0.8μmピッチの拡大像の山の部分を用いて、波長26.6Åにおけるフィルムの特性曲線を求めた。光学濃度はウェッジのスロープが0.180D/cmであることがわかっているので、トレース上での原点からの距離から絶対値（単位：D）が得られる。強度は相対値がわかればよいので、特性曲線を求めるのに用いた強度、すなわち0.8μmピッチの拡大像の山の部分の強度をI_0＝1と定義し、I_0に対する相対値I_{rel}を相対強度とした。照射量を表わす量として、比照射量（E/E_{max}）の常用対数をとった値を特性曲線の横軸とした。すなわち、横軸の相対値X_{rel}は

$$X_{rel}=\log\left\{\left(\frac{B.C.}{B.C._{max}}\right)\frac{I_{rel}}{I_0}\ \frac{t}{t_{max}}\right\} \qquad 4-8$$

で定義した。ここで、（$B.C./B.C._{max}$）は蓄積リングの電流値の減少を考慮した項である。光学濃度の値がわかれば特性曲線を用いてX_{rel}に変換でき、相対強度I_{rel}は次式を用いて計算できる。

$$I_{rel}=I_0\frac{B.C._{max}}{B.C.}\ \frac{t_{max}}{t}\ 10^{X_{rel}} \qquad 4-9$$

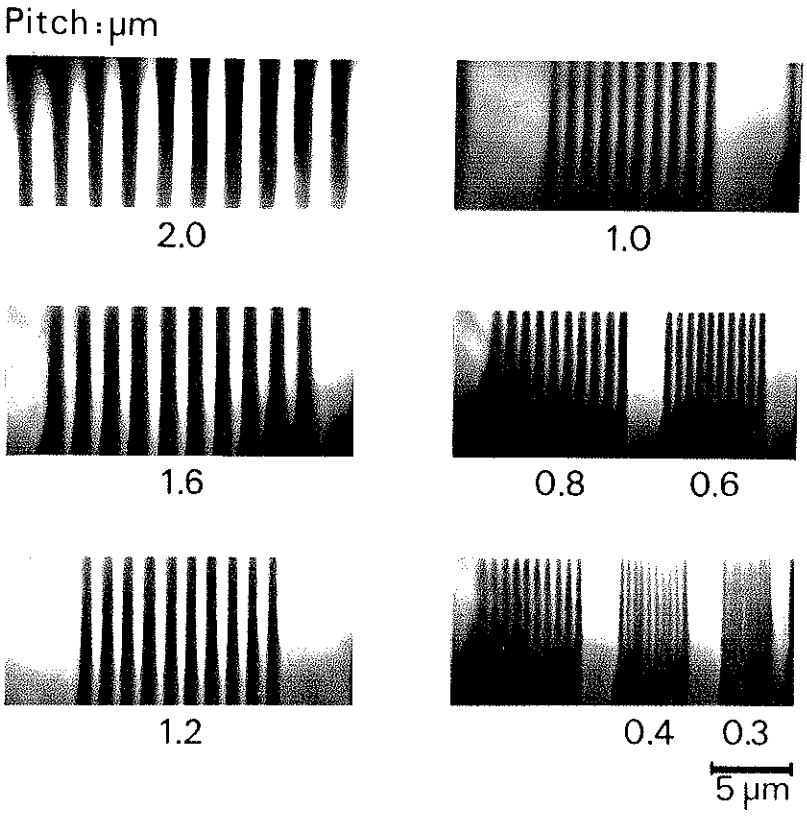


図４－１５．回折格子の拡大像　λ＝26.6Å、倍率230倍、露光時間10秒

表４－３に露光時間と 0.8μｍピッチの拡大像の山の部分の光学濃度の値を示す。

表４－３　特性曲線に用いた露光時間と光学濃度

Exposure time (sec)	Optical density (D)
80	1.56
40	1.03
20	0.59
10	0.38
5	0.30

表４－３の値を指数関数回帰した結果、光学濃度と X_{rel} の関係は

$$D = 1.51 \exp(1.40 X_{rel}) \qquad 4\text{-}10$$

となった。図４－１６に得られた特性曲線を示す。○は測定点を、実線は指数回帰した曲線4-10式を示している。

C．空間分解能の評価

一般に空間分解能という場合Airyディスクの半径で定義するが、実際の結像系においてこの大きさを直接測定することは困難である。本実験ではエッジの拡大像を用いて、その立ち上がりのコントラストが75％と25％の位置の間隔をもって分解能とした。エッジとしては銅＃2000メッシュの片側を利用した。図４－１７にその結果を示す。縦軸はデンシトメータトレースの光学濃度を相対強度に変換した値である。本軟Ｘ線顕微鏡の空間分解能は0.3μｍであると見積られた。

D．正弦波伝達関数（ＭＴＦ）

各ピッチの各露光時間に対する拡大像の山と谷の光学濃度を特性曲線を用いて相対強度に変換し、各露光時間に対するコントラストを計算し、その平均をとって各ピッチのコントラストとした。表４－４にその結果を示す。

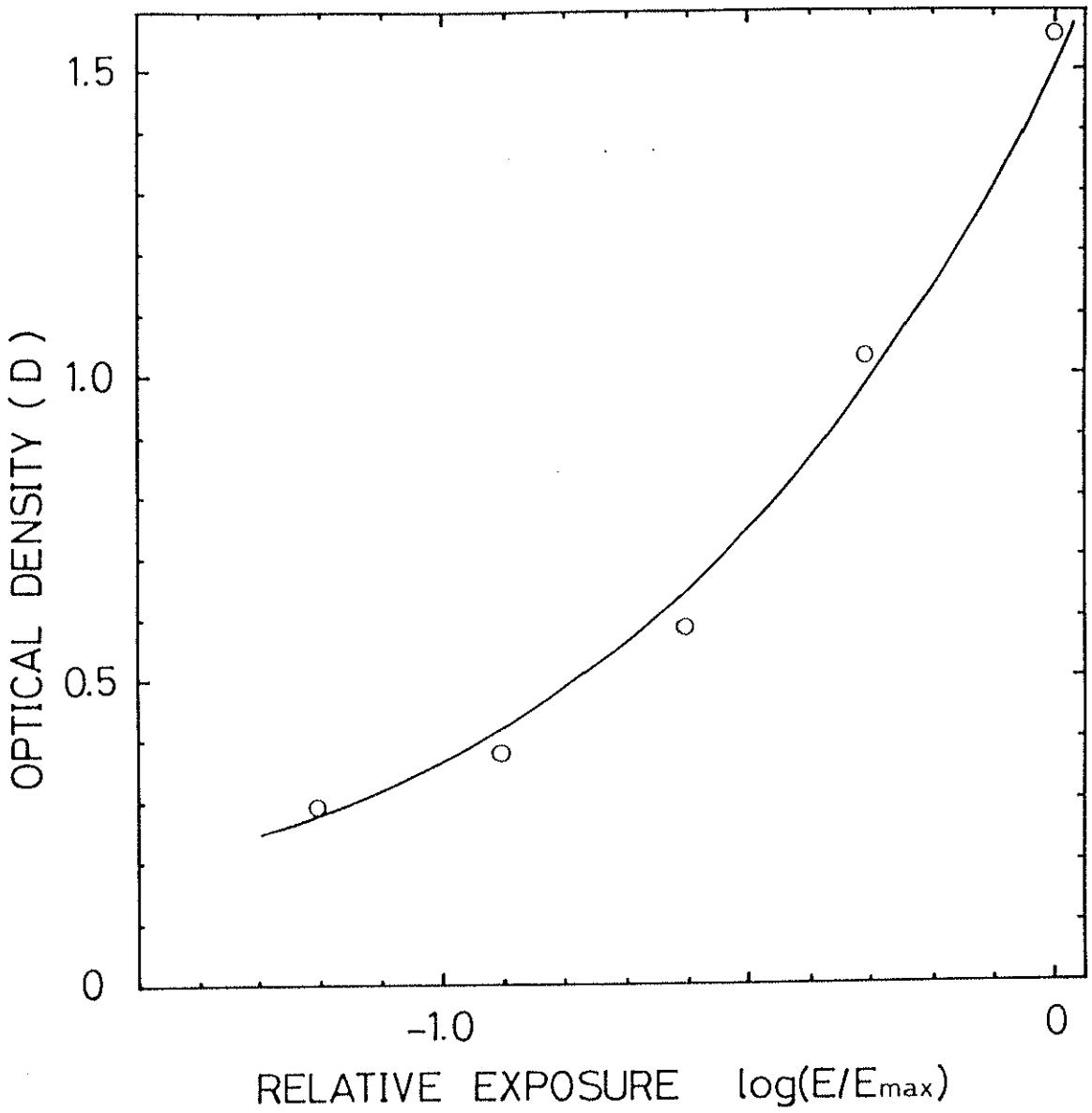


図４－１６．フィルムの特性曲線　Fuji Minicopy film、λ＝26.6Å、
○は測定点、――― は指数関数回帰した結果を示す。

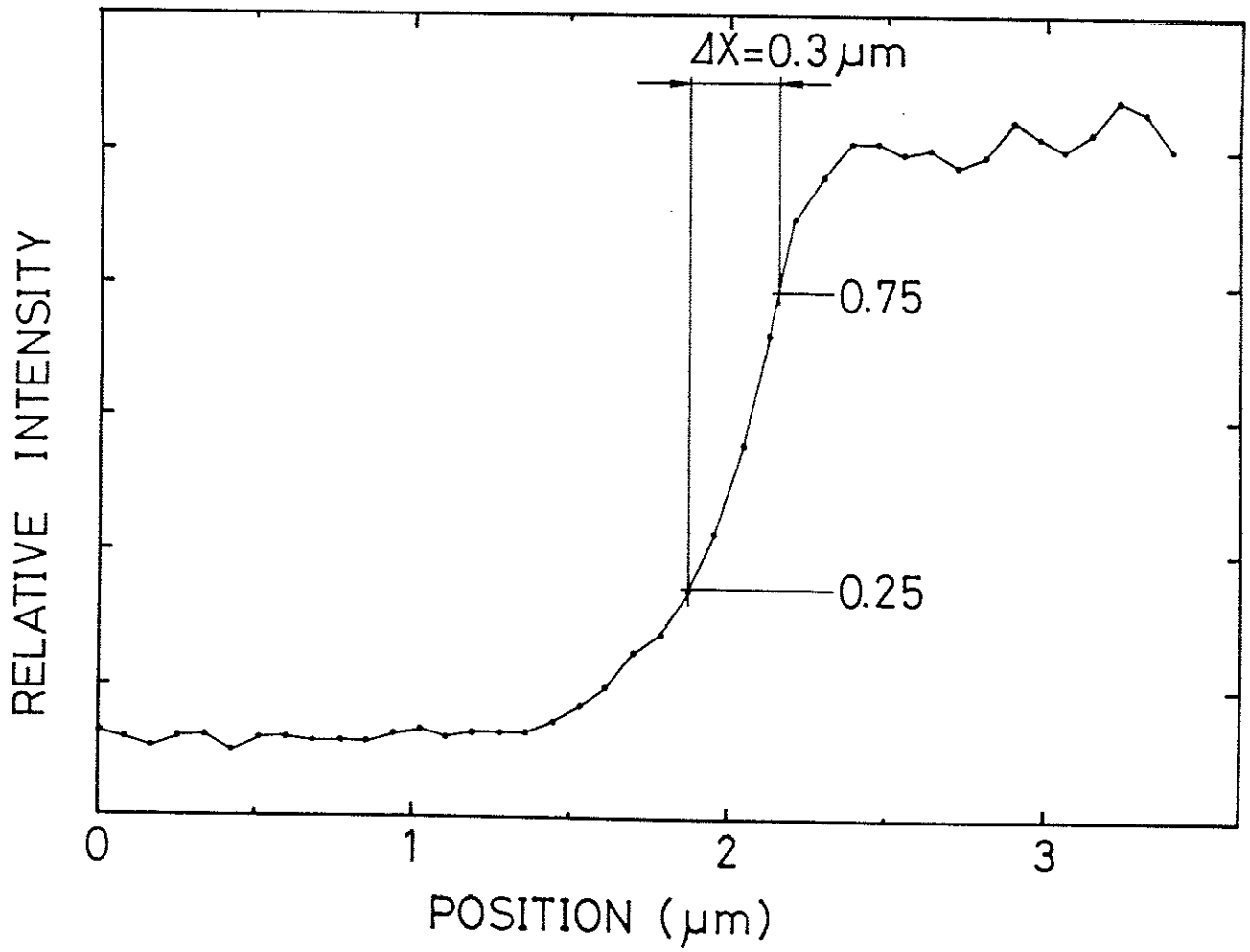


図４－１７．エッジを用いた分解能評価

表４－４　各ピッチの回折格子の拡大像のコントラスト

Pitch(μm)	2.0	1.6	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3
Contrast	0.48	0.46	0.44	0.37	0.24	0.20	0.09	0.04

空間周波数は、光学系の倍率に無関係になるように規格化空間周波数ｓを用いると便利である。ｓは対物レンズの開口数N.A.と物体の空間ピッチｐを用いて次式で定義される[11]。

$$s = \lambda / pN.A. \qquad 4\text{-}11$$

ゾーンプレートのN.A.は2-20式で与えられ、用いた対物ゾーンプレートの最外輪帯幅δr_Nは0.25μｍなので実験での規格化空間周波数ｓは

$$s = 0.50 / p(\mu m) \qquad 4\text{-}12$$

である。コントラストをｓの関数としてグラフにプロットすれば、光学系の矩形波伝達関数ｒ（ｓ）が得られる。ＭＴＦは正確には正弦波伝達関数であって、矩形波伝達関数ではない。しかし、ｒ（ｓ）がわかっていればｒ（ｓ）を正弦波伝達関数Ｒ（ｓ）に変換する公式[10]

$$R(s) = \frac{\pi}{4}\left\{r(s) + \frac{r(3s)}{3} - \frac{r(5s)}{5} + \frac{r(7s)}{7} + \frac{r(11s)}{11} \cdots\cdots\right\} \qquad 4\text{-}13$$

を利用すればをＭＴＦを求めることができる。Ｘ線領域では正弦波分布の透過率を持つ試料を作ることは困難であるので、この方法は有効である。図４－１８に実験で得られたｒ（ｓ）と、そのｒ（ｓ）から4-13式を用いて計算したＲ（ｓ）を示す。

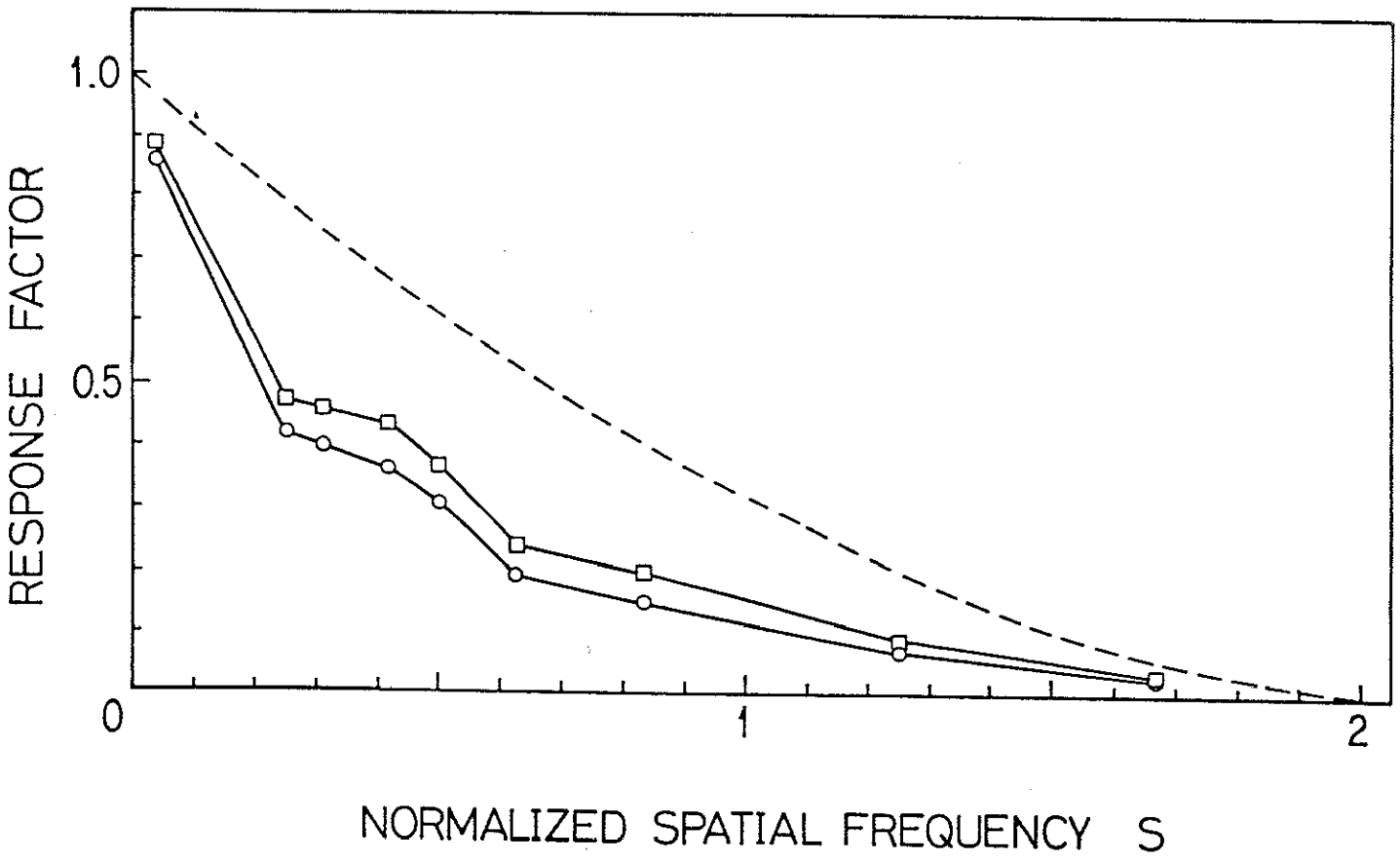


図４－１８．臨界照明型軟Ｘ線顕微鏡のＭＴＦ

—□—は測定点、—○—は4-13式を用いてＭＴＦに変換した値、

------ は無収差円形開口レンズのＭＴＦを示す。

R(s)を計算するときには、r(s)の隣合う各点は直線補間した。点線は、無収差円形開口レンズの場合のMTF[11]を示す。この図から実験で求めた軟X線顕微鏡のMTFは、理想的MTFに比べて全空間周波数領域にわたってかなり低くなっていることがわかる。直線型分光器の波長分解能は2-29式にD＝1000、d＝20を代入して25と見積られる。また、アンジュレータ光の1次光の単色性は約30である。従って、直線型分光器は実際には集光系としての作用しかしておらず、結像系に入射する光の単色性はアンジュレータ光の単色性で決まっていると考えられる。ゾーンプレートに必要な単色性は2-26式からそのゾーン数以上である。本顕微鏡の対物ゾーンプレートのゾーン数Nは100なので、MTFが理論値に比べて低い理由の一つとして色収差が考えられる。ここで、直線型分光器を用いてアンジュレータ光を単色化する場合の問題点がはっきりとしてくる。直線型分光器の分解能を上げるには、集光ゾーンプレートの直径Dを大きくするかあるいはピンホールの直径dを小さくすればよい。dを小さくすると必然的に照明領域の大きさが小さくなるので顕微鏡としては不都合である。一方、アンジュレータ光の固有拡がりはもともと小さいので、Dを大きくしても意味がない。従って、アンジュレータ光と直線型分光器の組合せは、結像型顕微鏡の照明系にはあまり適さないという結論に達する。ただし、アンジュレータの周期数が多くアンジュレータ光の単色性がもともと対物ゾーンプレートのゾーン数よりも大きい場合には、直線型分光器を単に集光系として結像型顕微鏡の照明系に応用することは十分に意味があるといえる。

E. 軸外しナイフエッジの効果

軸外しナイフエッジは、結像領域における対物ゾーンプレートの＋1次回折以外の回折によるノイズとアンジュレータ光の高次光によるノイズを空間的に除去することによって拡大像のコントラストを上げる役割をしている。図4－19に、その効果を見るために結像領域全体の様子を示す。試料はゾーンプレートの中心から少し離れたところである。写真中央より少し下側に、ノイズから空間的に分離されたゾーンプレートの拡大像が観察される。その上の強い光が、集光ゾーンプレートの高次回折で集光されてピンホールに入射したアンジュレータ光の次数の低い高次光の、対物ゾーンプレートの＋1次投影像であると考えられる。その上の光がアンジュレータ光の次数の高い高次光の対物ゾーンプレートの＋1次投

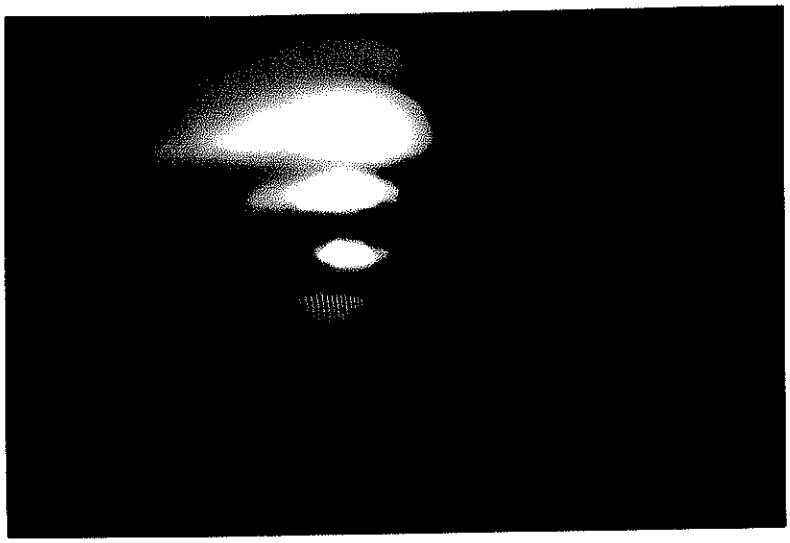


図４－１９．軸外しナイフエッジの効果　試料はＣＺＰの内周付近である。

影像と考えられる。さらにその上にある大きい領域は対物ゾーンプレートの0次投影像である。対物ゾーンプレートの－1次投影像は、そのまたさらに上側に微かに見えている。この写真が示すように軸外しナイフエッジの効果は大きいと言える。

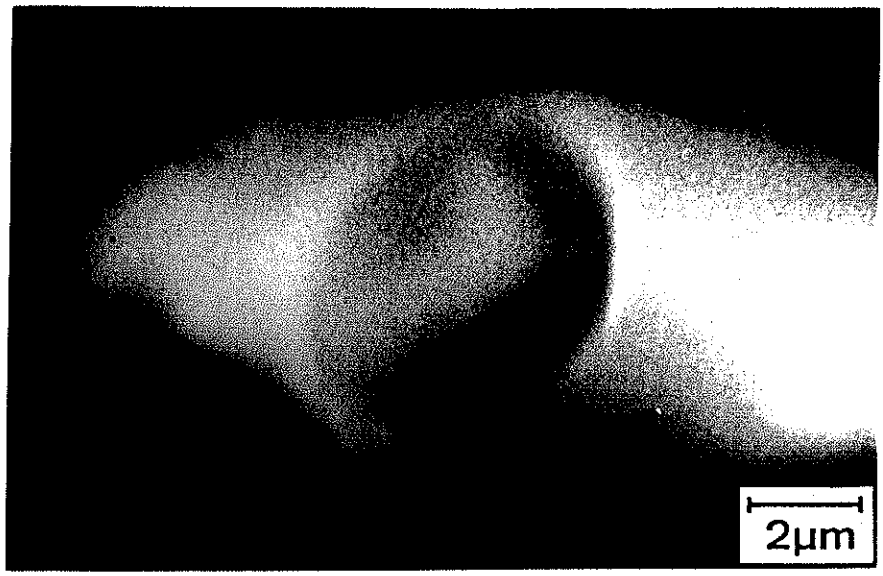
2）生物試料の観察

図4－20（a）～（f）に赤血球の拡大像を示す。全て軟X線顕微鏡でフィルムに撮影した軟X線拡大像を、さらに光学顕微鏡で拡大してフィルムに収めたものである。用いたフィルムはFuji Minicopy filmである。（a）～（c）は光学系を固定して試料の観察位置を変えて撮ったもので、ほぼ同条件下の拡大像である。（d）はピンホールを20μmにして撮ったものである。（e）と（f）は照明領域を大きくするために、10μmピンホールと試料との間の距離を大きくしたときの拡大像である。撮影条件を以下にまとめる。

（a）～（c）	露光時間	2秒	蓄積リング電流値	141mA
（d）	〃	10秒	〃	169mA
（e）、（f）	〃	5秒	〃	246mA

（a）、（b）では、よく知られる赤血球の”アンパン”型の構造がはっきりと観察されている。大きさは約5μmである。また、厚さに由来すると考えられる吸収率の分布があることがわかる。（c）では複雑に重なり合っている様子が認識できる。（a）～（c）では、全体を覆っている明るい領域が照明されている領域である。この領域の大きさは10μmピンホールで決まり、その形状は軸外しナイフエッジの影響で半円形になっている。（d）ではピンホールが大きいので照明される領域も広くなっている。（a）～（c）は試料をピンホールの直後に置いたのに対し、（e）と（f）は照明領域を大きくするために、ピンホールと試料との間の距離を大きくしたときの拡大像である。露光時間が違うのはこのためである。ピンホール直後の場合は、照明領域の強度分布は中心部が強く周辺部が弱く、光源の強度分布を反映しているものの細かな照明ムラがない。一方、ピンホールから試料を遠ざけるにしたがって全体の強度は均されるが照明領域内に細かなムラが出てくる傾向がある。このムラは集光ゾーンプレートの構造を反映していることから、照明光はピンホールの直後では光源の縮小像であるのに対

a.



b.

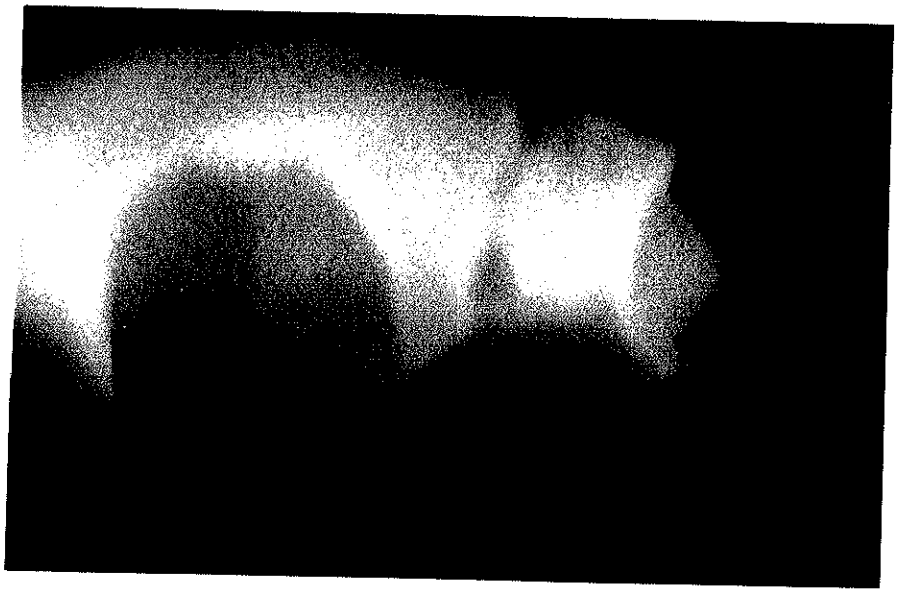
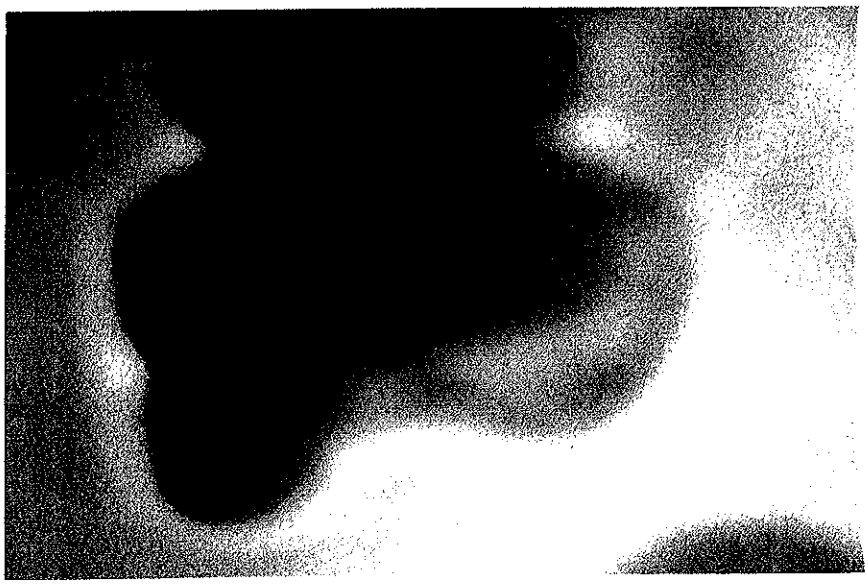


図４－２０.（ａ）～（ｆ）．臨界照明型軟Ｘ線顕微鏡で得られた赤血球の拡大像

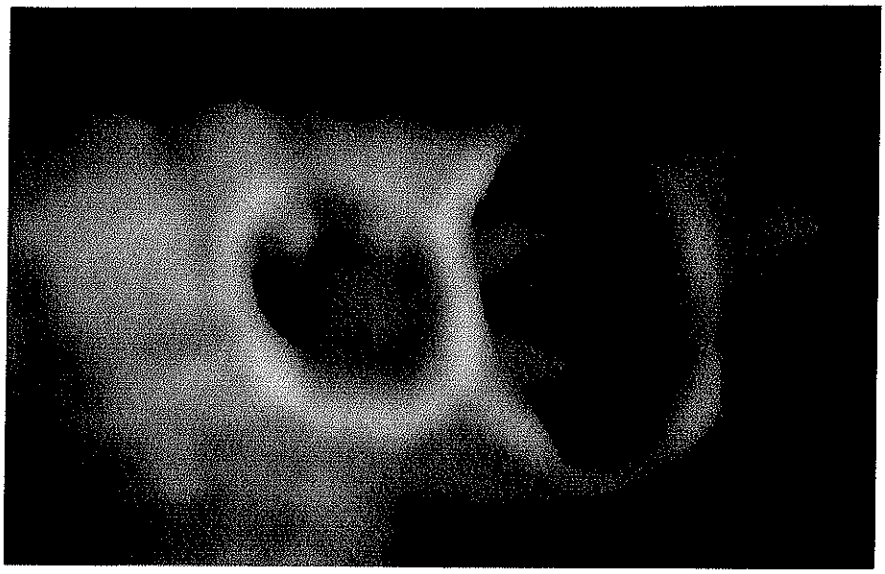
λ＝26.6Å、倍率195倍、露光時間2秒

c.

d.



e.



f.

して、ピンホールから離れると集光ゾーンプレートの構造をある程度保ったままピンホールから発散してくる投影像としての性質が強くなるのではないかと考えられる。

図４－２１（ａ）～（ｄ）に珪藻土の拡大像を示す。露光時間は2秒である。蓄積リングの電流値は（ａ）114ｍＡ、（ｂ）112ｍＡ、（ｃ）171ｍＡ、（ｄ）134ｍＡであった。実験条件は赤血球の（ａ）～（ｃ）と同じである。（ａ）、（ｂ）では約 1.2μｍ間隔の周期構造が確認されている。（ａ）では、さらに同周期で並んだ約 0.7μｍの節状の構造が観察されている。（ｃ）は周期構造を持たない微小な珪藻土が固まって存在している様子である。（ｄ）は微細構造のない比較的大きな珪藻土である。

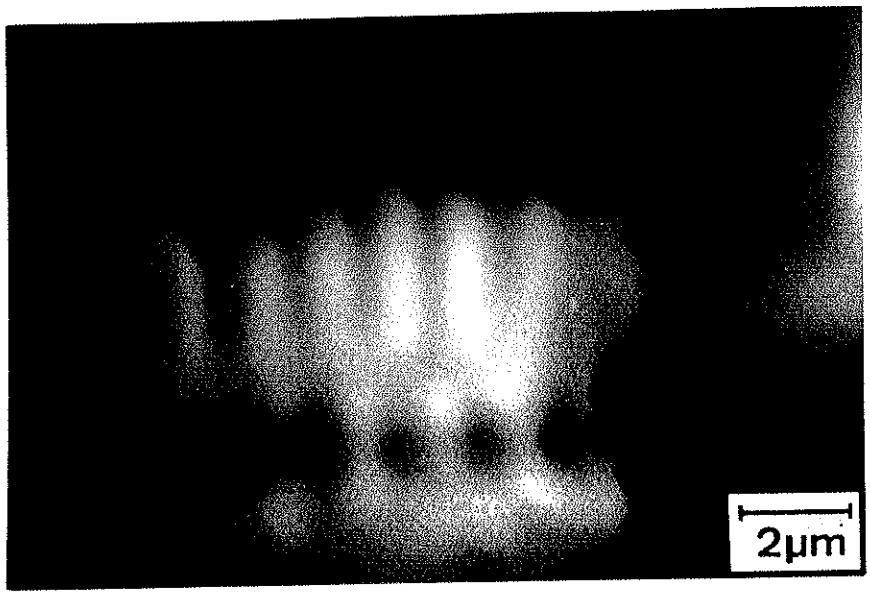
３）光子密度の見積り

軟Ｘ線顕微鏡は生物試料のその場観察を最終的な目的としているので、試料に入射するフォトンフラックスを見積っておく必要がある。表４－５にフォトンフラックスの見積りに必要な光学系の構成要素と、その波長26.6Åのｘ線に対する減衰率を示す。白金とアルミニウムの光学定数はRef.7の値を、ＳｉＮの質量吸収係数と密度はRef.12の値を用いた。

表４－５　軟Ｘ線顕微鏡にける光学系構成要素の減衰率（λ＝26.6Å）

Half angular acceptance of CZP	0.02mrad
Reflectivity of deflection mirror (Pt, 2°)	68 %
Spatial filter	50 %
Transmissivity of aluminum foil (1.5μm thick)	2.6 %
Transmissivity of supporting membrane (0.5μm thick SiN)	5.9 %
Diffraction efficiency of zone plate (ideal case)	10 %
Total loss factor	5×10^{-5}

a.



b.

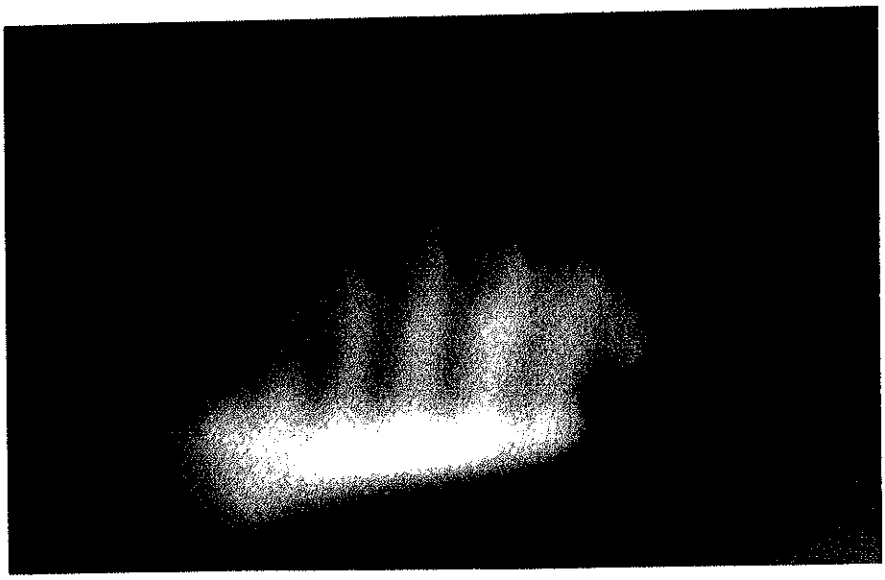
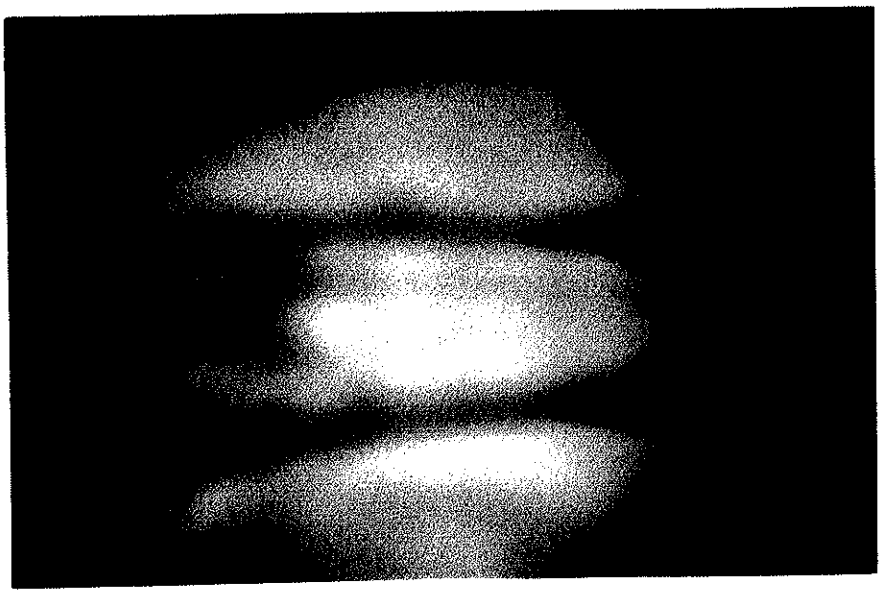


図４－２１（ａ）～（ｄ）．臨界照明型軟Ｘ線顕微鏡で得られた珪藻土の拡大像
λ＝26.6Å、倍率195倍、露光時間2秒

c.

d.



アンジュレータ光の1次光（26.6Å）の実効光子密度Brightnessは 1.7×10^{16} である。アンジュレータ光のバンド幅は電子ビームがゼロエミッタンスのとき2-36式で与えられるが、光源の実効拡がりを考慮したときはθ_{ob}の代わりにθ_{ob}と垂直方向の実効拡がり$\Sigma_{y'}$とのコンボリューション、すなわち

$$\theta_{ob}\rightarrow(\theta_{ob}^2+\Sigma_{y'}^2)^{1/2} \qquad 4\text{-}14$$

を代入すれば、実験値と比較的よく合うことが経験的にわかっている[13]。このことから、$\Sigma_{y'}=0.030$mradなので1次光（26.6Å）のバンド幅は約2.8%と見積られる。集光ゾーンプレートの光源に対する半値取り込み角度は 0.5／25.4mrad である。従って、照明系に入射する全フラックス（Total flux）は、

$$\text{Total Flux}=1.7\times10^{16}\times(2.8/0.1)\times\pi(0.5/25.4)^2$$
$$=5.8\times10^{14}\quad\text{photons/s at 100mA}$$

となる。これに表4－5の Total loss factorをかけて、ピンホールを通過するフラックスは～3×10^{10} photons/s at 100mA となる。以上の見積りは各光学素子の減衰率が理論値の場合である。実際は理論値よりも低いと考えられるので、各素子について約50%さらに減衰するとすると ～10^9 photons/s at 100mA 程度であると推測される。ピンホールの直径が10μmであるので、ピンホール直後の試料に入射する光子密度（Flux density）は～10^7 photons/s/μm^2 at 100mA であると見積ることができる。

フォトダイオードの光電効果の量子効率がわかれば、フォトダイオードを検出器に用いて光子数を実験的に見積ることができる。入射光子の数をNph、光電効果で放出される電子の数をNe、量子効率をηとすれば

$$Ne=\eta\,Nph \qquad 4\text{-}15$$

が成り立つ。銅の基板に蒸着した厚さ1000Åの金の薄膜の量子効率は入射光のエネルギーが10eV～10KeVまでの範囲で測定されており[14]、 27Å（470eV）近傍での効率はη～0.07という結果が得られている。調整後の照明系で、10μmピンホールを通過した光電子電流値が蓄積電流値が245mAのとき0.25×10^{-10}Aという

データがあるのでこれを採用すると

$$Nph = Ne/\eta$$
$$= (0.25\times10^{-10}/1.6\times10^{-19})\times(1/0.07)\times(100/245)$$
$$= 9\times10^{8}\ (\text{photons/s at 100mA})$$

が得られ、ピンホールの面積を考慮に入れると試料を通過する光子密度（Flux density）は

$$\text{Flux density} = 9\times10^{8}/\pi\ (5\mu m)^{2}$$
$$= 1.2\times10^{7}\ (\text{photons/s}/\mu m^{2}\ \text{at 100mA})$$

という結果を得る。この値は、計算による見積りと非常によく一致している。アンジュレータ光の3次光も集光ゾーンプレートの3次回折でピンホールに入射しているはずである。1次回折の効率は10.1%で3次回折の効率は 1.1%であるから、全体の約10%が3次光と考えてもよい。しかし、このことを考慮しても実験での1次光の光子数はほぼ見積りと一致していると考えられる。

§5. 結論

ゾーンプレートを結像素子に用いアンジュレータ光を光源に用いた軟X線顕微鏡の光学系として、臨界照明の場合と準平行光照明の場合の二つの光学系を考案し、それらの顕微鏡装置を製作した。臨界照明を用いた顕微鏡について、基礎及び応用実験を行なった。準平行光照明を用いた顕微鏡については、基礎実験を開始したところである。

空間周期が2.0～0.3μmの一次元透過回折格子を用いて臨界照明型顕微鏡の正弦波伝達関数を測定した。その結果、 0.3μmピッチまで解像できることがわかった。また、空間周波数域全体にわたってレスポンスがかなり低いことがわかった。その主要な原因の一つとして色収差が考えられる。

乾燥状態の赤血球と珪藻土の拡大像を得た。その結果、臨界照明型顕微鏡が実際の生物試料の観察に有効であることがわかった。

References

1)H.Maezawa,A.Toyoshima,Y.Kagoshima,K.Mori and T.Ishikawa:Rev.Sci. Instrum.60(1989)1889.

2)M.Born and E.Wolf:Principles of Optics, 6th ed.(Pergamon Press, Oxford ,1986)p.522.

3)村田和美：光学（サイエンス社、1982）.p.217.

4)第２章§１．１）で述べてある。

5)M.Born and E.Wolf:Principles of Optics, 6th ed.(Pergamon Press, Oxford ,1986)p.525.

6)A.G.Michette:Optical Systems for Soft X Rays(Prenum Press,New York, 1986)p.150.

7)B.L.Henke,P.Lee,T.J.Tanaka,R.L.Shimabukuro and B.K.Fujikawa:At.Data Nucl.Data Tables 27(1982)1.

8)V.Rehn and W.J.Choyke:Nucl.Instr.Meth.177(1980)173.

9)シンクロトロン放射光を想定した光線追跡プログラムは、Muramatuらによって開発されており、ＰＦの大型計算機Ｍ３０６を用いて実行することができる。
Y.Muramatu,Y.Ohishi and H.maezawa:Development of a Ray Tracing Program for Synchrotron Radiation,"SRXRAY v.1"(KEK Internal 87-10)(in Japanease)

10)J.W.Coltmann:J.Opt.Soc.Am.44(1954)468.

11)久保田広：波動光学（岩波書店、1973）p.380.

12)J.Kirz and H.Rarback:Rev.Sci.Instrum.56(1985)1.

13)H.Maezawa,Y.Suzuki,H.Kitamura and T.Sasaki:Appl.Opt.25(1986)3260

14)R.H.Day,P.Lee,E.B.Saloman and D.J.Nagel:J.Appl.Phys.52(1981)6965.