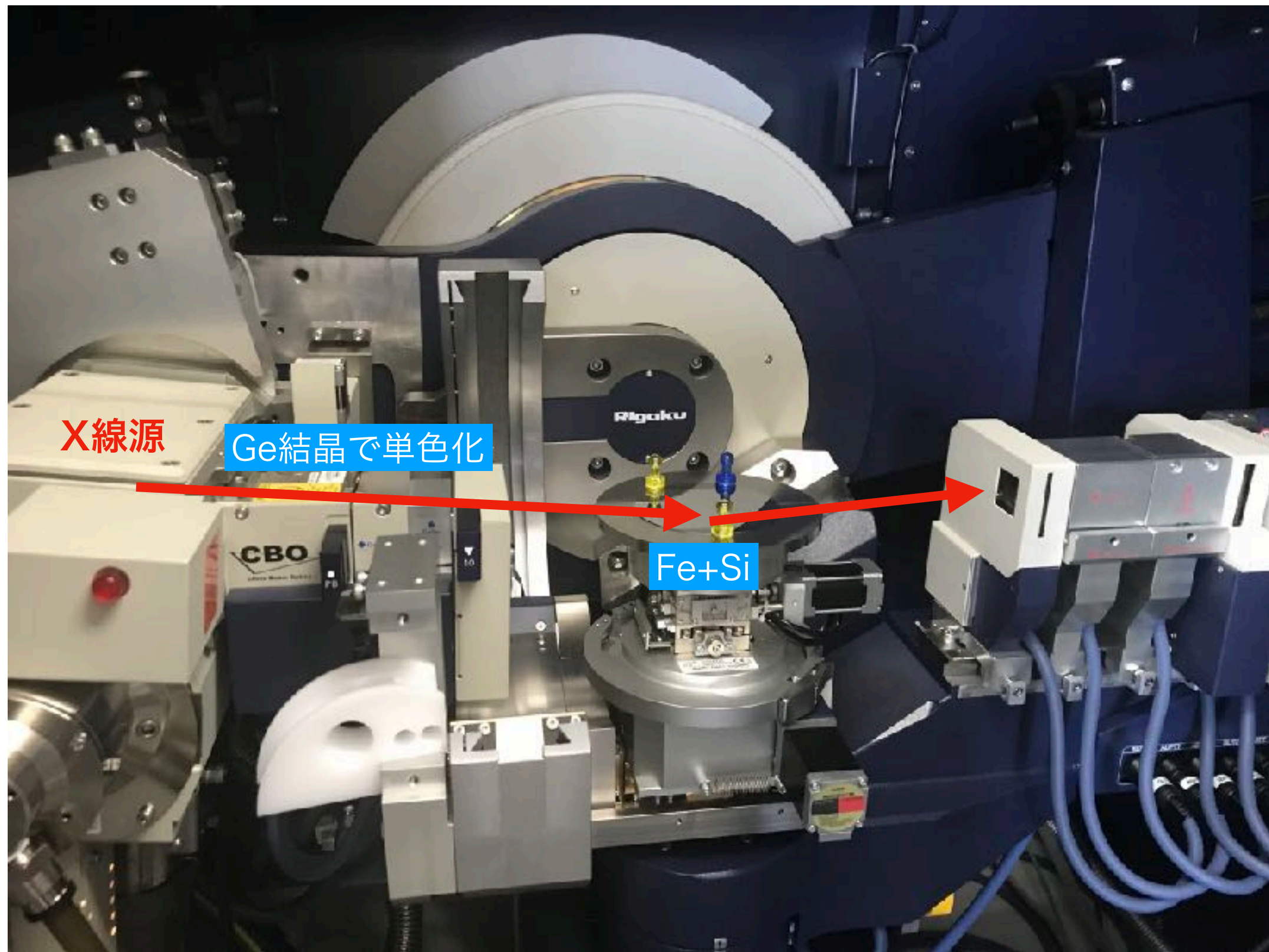


# 京大炉 反射率測定

赤塚浩明

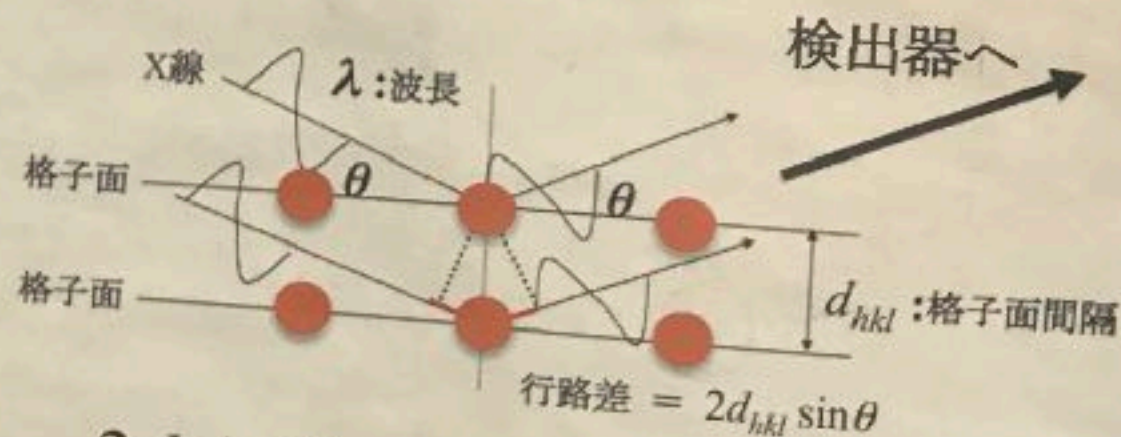
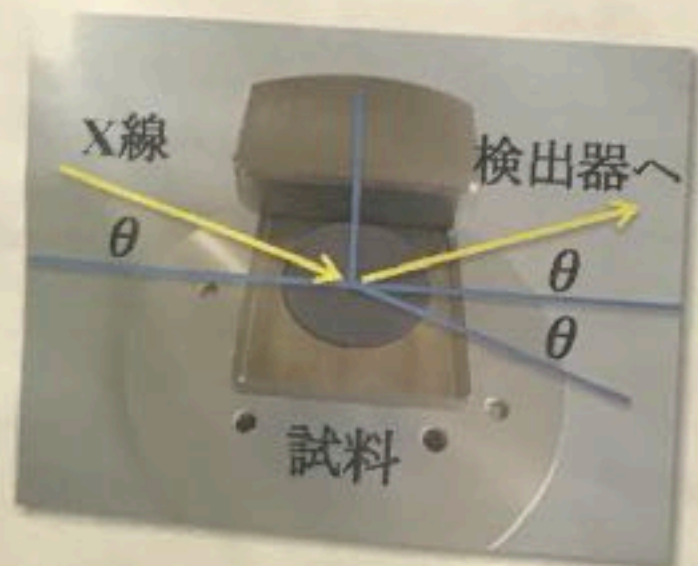
# 反射率測定実験 Fe+Si(径3inch 厚み0.38mm)





# X線回折装置の原理

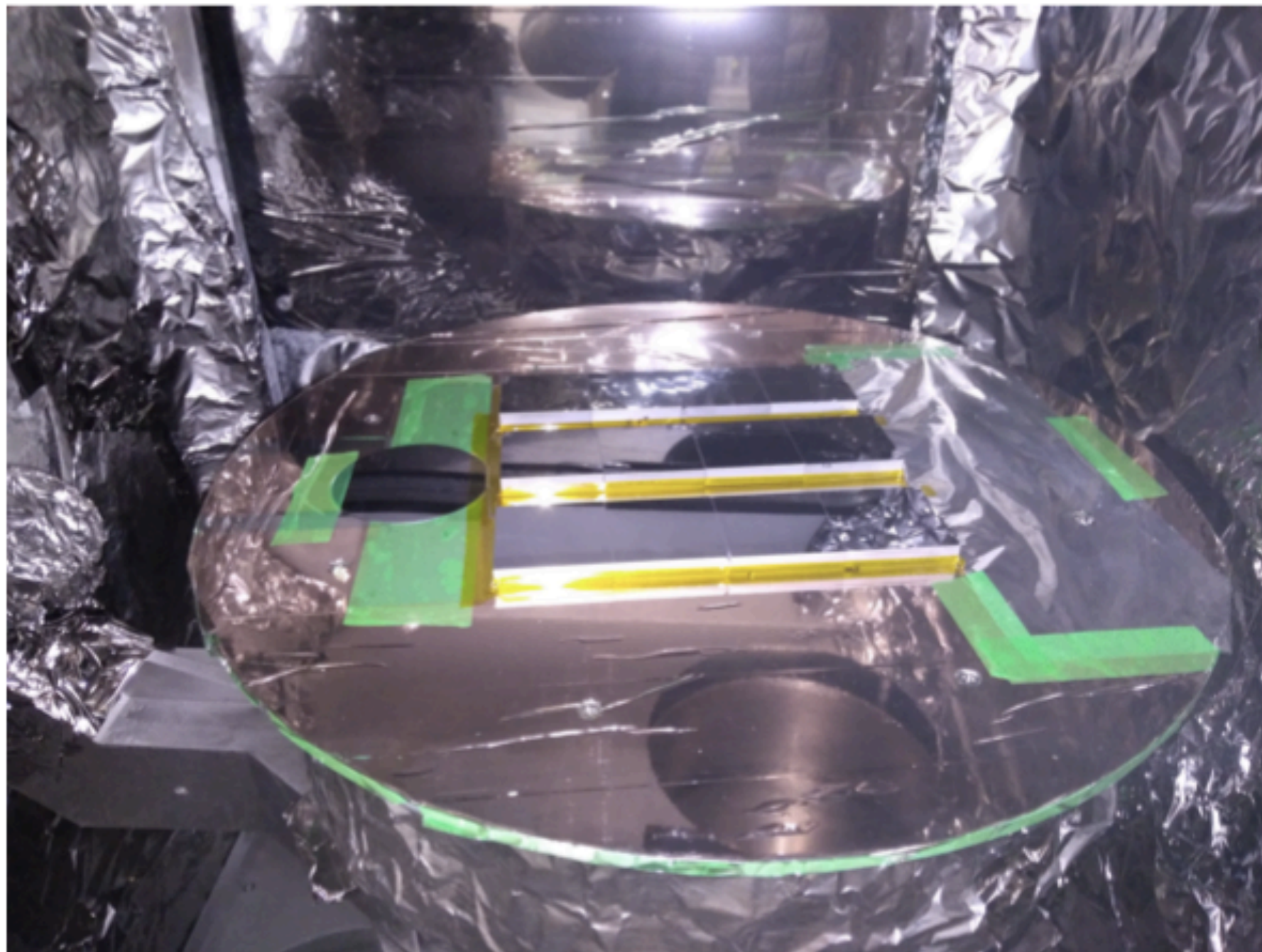
線源                      スリット                      試料                      スリット                      モノクロ  
メーター                      検出器



$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (\text{ブラッグの式})$$



Fe20min( $\sim 30\text{nm}$ )@20210225製作

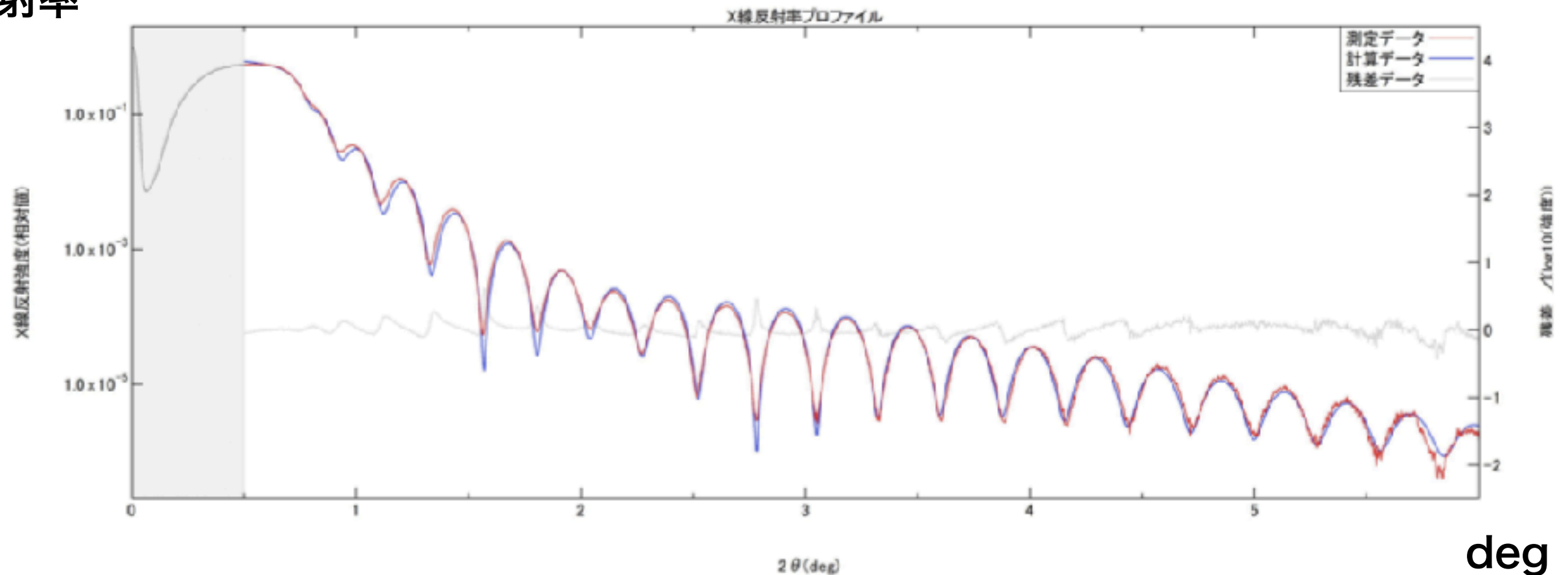


## Results

## 20min Fe+Si

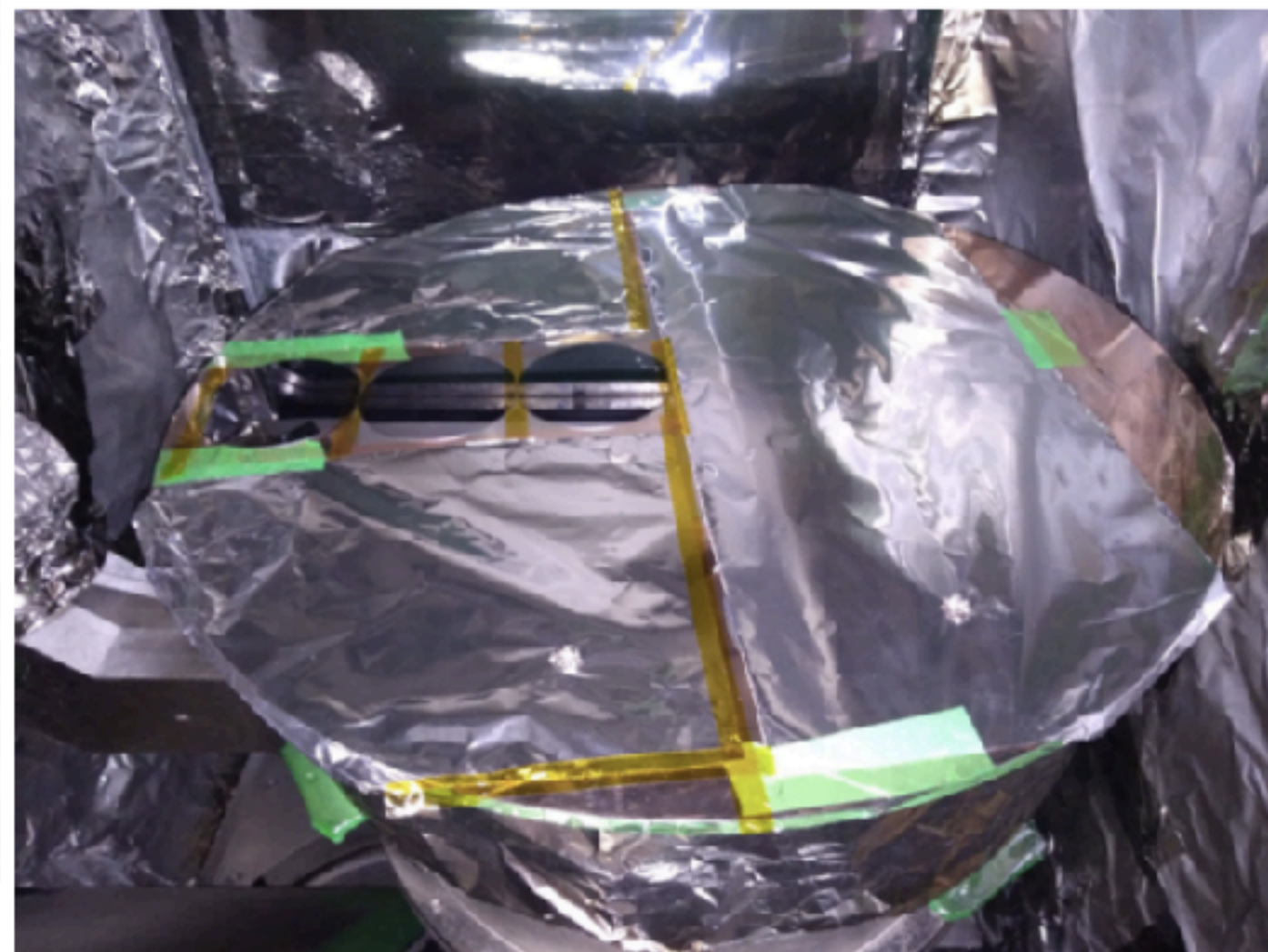
ID	Material	Thickness (nm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Roughness (nm)
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.911(10)	6.72(12)	0.817(4)
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.080(15)	5.096(16)	0.1(5)
2	Fe	30.239(8)	7.4[--]	0.27(7)
1	Fe	0.36(13)	2.6(9)	0.430(3)
Sub.	Si	0.0[--]	2.33[--]	0.3[--]

## 反射率





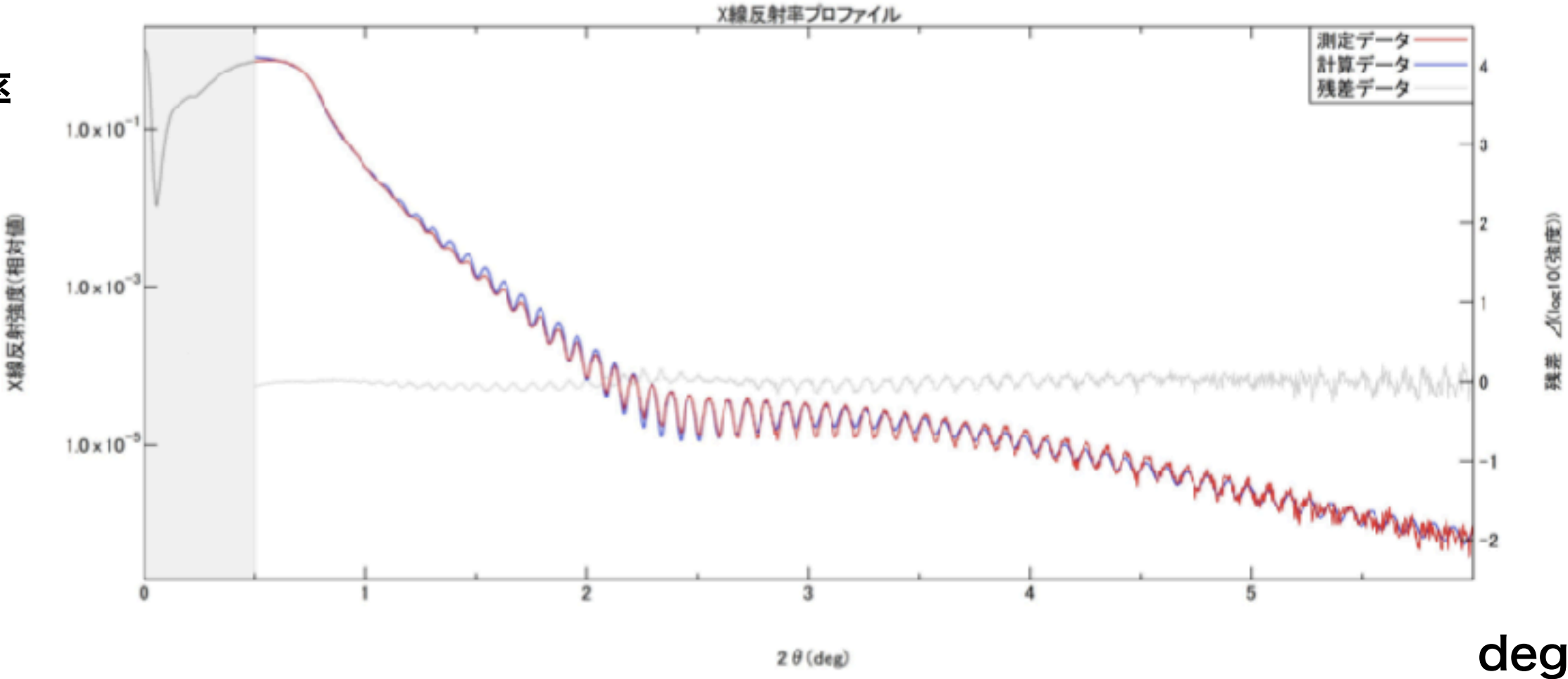
Fe60min(~90nm) @20210327製作



ID	Material	(nm)	(g/cm3)	(nm)
4	Fe2O3	0.89(3)	6.4(4)	0.751(3)
3	Fe2O3	1.20(3)	5.824(5)	0(254686)
2	Fe	93.37(3)	7.7[--]	0.20(8)
1	Fe	0.63(3)	3.02(3)	1.059(14)
Sub.	Si	0.0[--]	2.33[--]	0.3[--]

90nm程度の膜ができていることがわかる

反射率

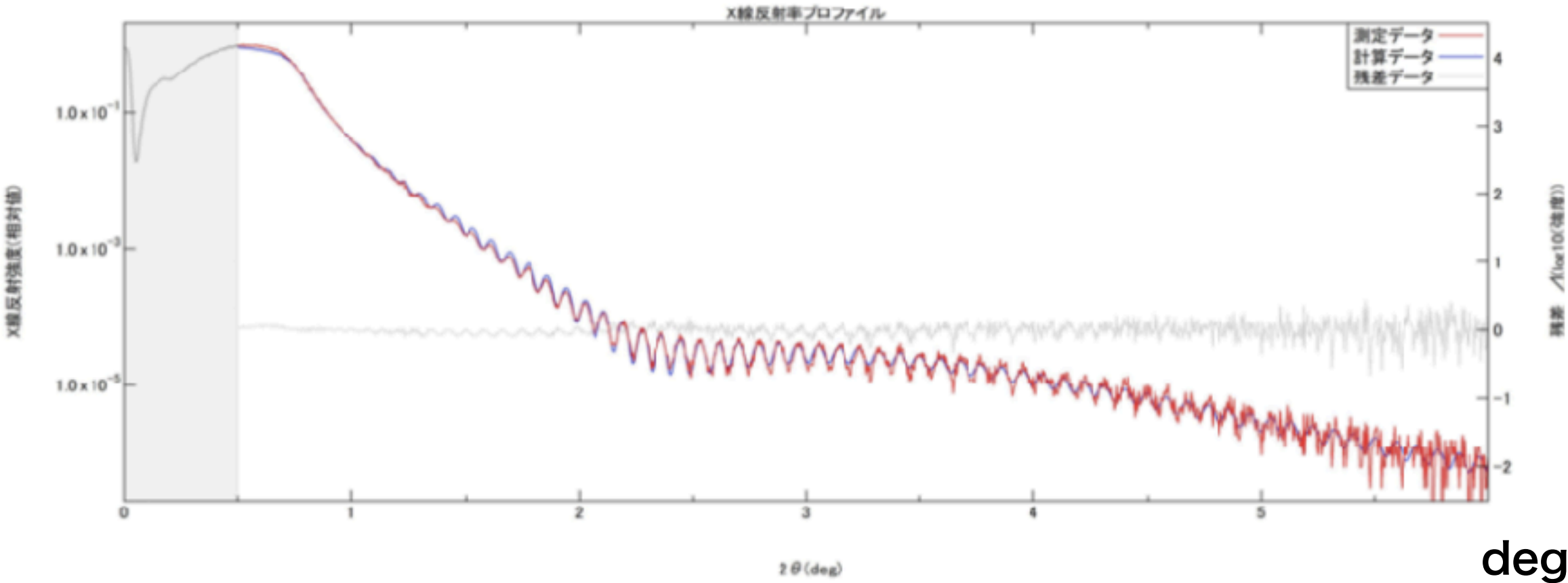


60min Fe+Si

2 左右の間

ID	Material	Thickness (nm)	Density (g/cm3)	Roughness (nm)
4	Fe2O3	0.88(3)	6.62(2)	0.762(7)
3	Fe2O3	1.18(3)	5.91(9)	0(2794659)
2	Fe	94.37(5)	7.9[--]	0.24(11)
1	Fe	0.35(6)	3.12(5)	1.17(3)
Sub.	Si	0.0[--]	2.33[--]	0.3[--]

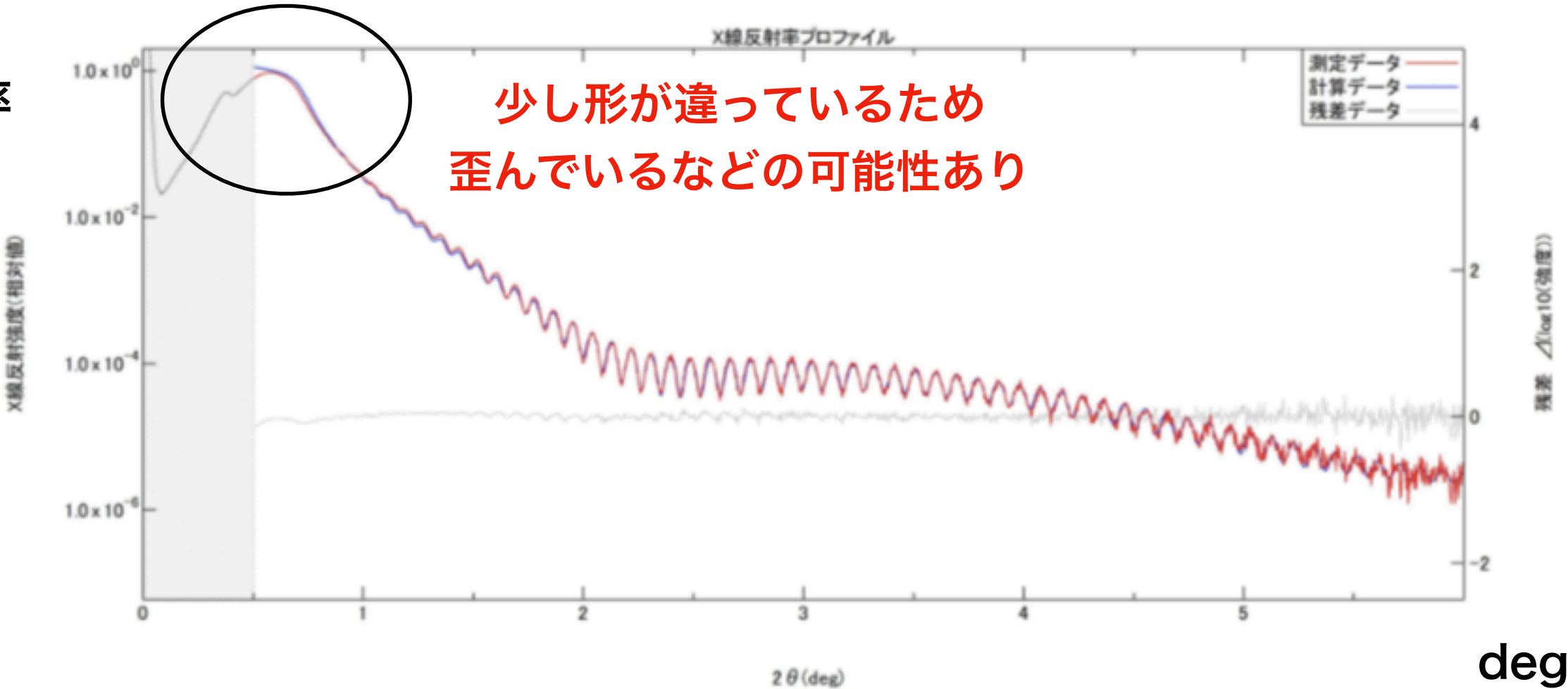
反射率





ID	Material	Thickness (nm)	Density (g/cm3)	Roughness (nm)
4	Fe2O3	1.4(5)	4.95(4)	0.440(8)
3	Fe2O3	0.694(12)	4.55(5)	0(3)
2	Fe	86.041(12)	7[--]	0.3(2)
1	Fe	4.1(7)	0.23(3)	2.8(4)
Sub.	Si	0.0[--]	2.33[--]	0.3[--]

反射率

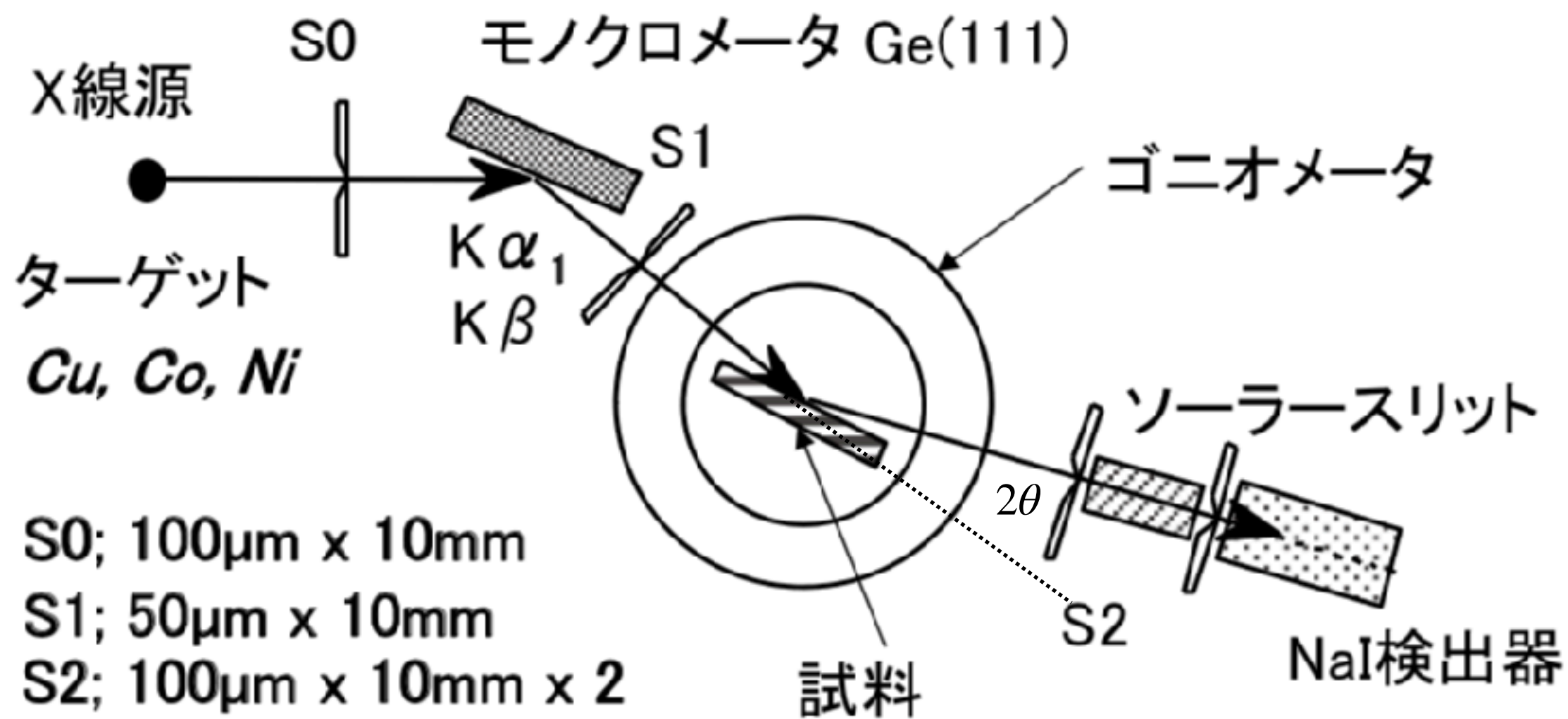


計算の時1、2 nmの酸化鉄膜も考慮すべき  
鉄の密度が知りたかった



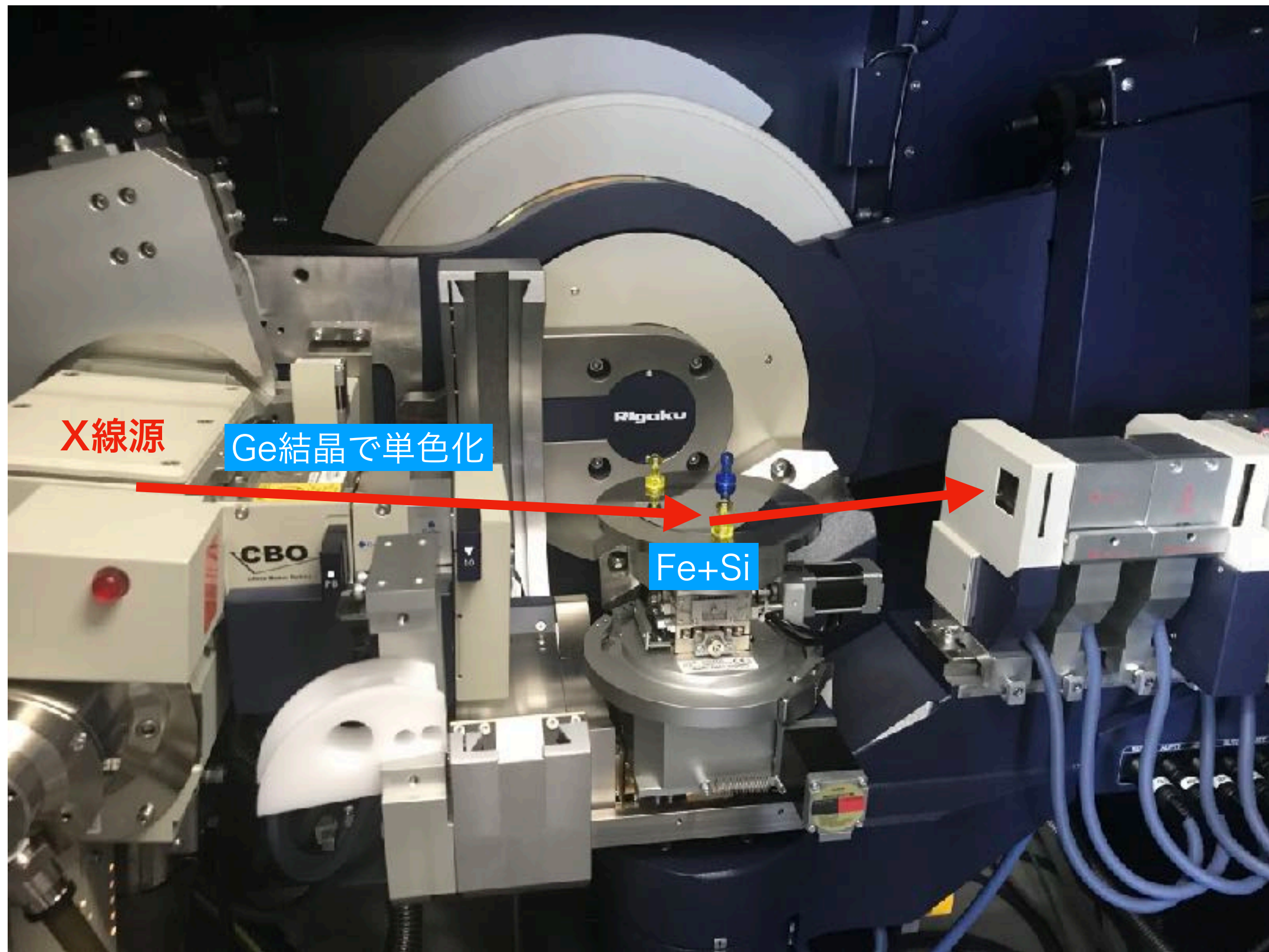
6/8議論

## 実験概要

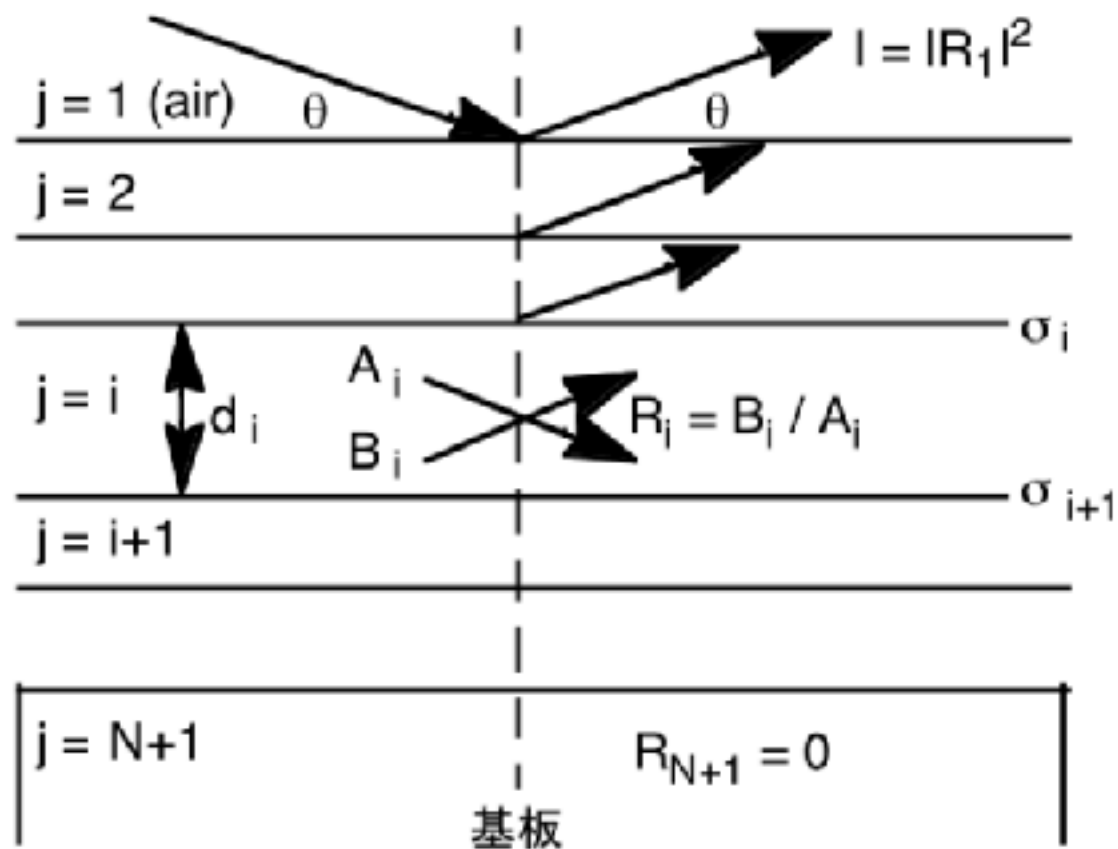




# 反射率測定実験 Fe+Si(径3inch 厚み0.38mm)



## フィット関数(パラメータは厚さ、表面粗さ)



本稿では, Parratt の漸化式の見通しを良くするため, 散乱ベクトル  $q$  表示に修正して示す<sup>12)</sup>。 $n$  は波長  $\lambda$  での X 線の複素屈折率である。X 線の波長領域では, 屈折率  $n$  は 1 に非常に近いため, 1 からの差の実数部を  $\delta$ , 虚数部を  $\beta$  として,  $n = 1 - \delta - i\beta$  と表示する。 $r_e$  は古典電子半径であり,  $\rho_M$  は密度,  $N_A$  はアボガドロ数,  $w_i$  は  $i$  元素の組成,  $M_i$  は  $i$  元素の原子量,  $z_i$  は  $i$  元素の原子番号,  $f'_i, f''_i$  は  $i$  元素の原子散乱因子の異常分散項の実数部と虚数部である。

$$\delta = 8r_e \rho_M N_A \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left[ \frac{\sum_i w_i |z_i + f'_i(\lambda)|}{\sum_i w_i M_i} \right]$$

$$\beta = 8r_e \rho_M N_A \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left[ \frac{\sum_i w_i |f''_i(\lambda)|}{\sum_i w_i M_i} \right] \dots\dots\dots (1)$$

図 1 基板上に N-1 層の膜を積層した試料積層体からの X 線反射の模式図  
第 1 層は空気, 第 N + 1 層は基板。

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/28/9/28\\_9\\_494/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/28/9/28_9_494/_pdf/-char/ja)

**質問 異常分散項  $f'(\lambda), f''(\lambda)$  はどのように決定するのか**



$g_j^2 = n^2 - \cos^2 \theta \doteq \sin^2 \theta - 2(\delta_j + i\beta_j)$ ,  $\gamma_j^2 \equiv (4\pi/\lambda)^2 g_j^2$  とすると,  
 $\gamma_j^2 = q^2 - 2(4\pi/\lambda)^2 (\delta_j + i\beta_j)$  となり, 界面粗さ補正した Parratt  
 漸化式は次式のように修正される。

$$F_{j,j+1} = \frac{\gamma_j - \gamma_{j+1}}{\gamma_j + \gamma_{j+1}} \exp \left[ -\frac{\gamma_j \cdot \gamma_{j+1} \cdot \sigma_{j+1}^2}{2} \right] \quad \text{表面粗さ } \sigma$$

この関数でフィットする

$$R_j = a_j^4 \frac{R_{j+1} + F_{j,j+1}}{R_{j+1} \cdot F_{j,j+1}}$$

$$|R_1|^2 \cong \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^4 \cdot \sum_{i=2}^{N+1} \frac{\Delta \delta_i^2 + \Delta \beta_i^2}{4q^4} \exp \left[ -q^2 \cdot \sigma_i^2 \right] + \sum_{j=3}^{N+1} \sum_{k=2}^{j-1} H_{j,k}$$

$$a_j = \exp \left[ -i \frac{\gamma_j \cdot d_j}{4} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$H_{j,k} \equiv \frac{1}{2q^4} \cdot \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^4 (\Delta \delta_j^2 + \Delta \beta_j^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta \delta_k^2 + \Delta \beta_k^2)^{\frac{1}{2}} \cdot$$

次に,  $\sin^2 \theta \gg \delta > \beta$  とすると,  $\gamma_j \doteq q$  となる。また,  
 $|R_{j+1} \cdot F_{j,j+1}| \ll 1$  とすると,

$$\exp \left[ -\frac{q^2}{2} (\sigma_j^2 + \sigma_k^2) \right] \cdot \cos(\phi + \phi')$$

$d$  厚さ がパラメータ

$$R_{j,j+1} \doteq a_j^4 (R_{j+1} + F_{j,j+1}), \quad a_j = \exp[-iq \cdot d_j/4],$$

$$\phi \equiv \gamma_k \cdot d_k + \gamma_{k-1} \cdot d_{k-1} + \dots + \gamma_{j-1} \cdot d_{j-1} = q(d_k + d_{k-1} + \dots + d_{j-1})$$

$$F_{j,j+1} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{|(\delta_j - \delta_{j+1}) + i(\beta_j - \beta_{j+1})|}{2q^2} \exp \left[ -\frac{q^2 \cdot \sigma_{j+1}^2}{2} \right]$$

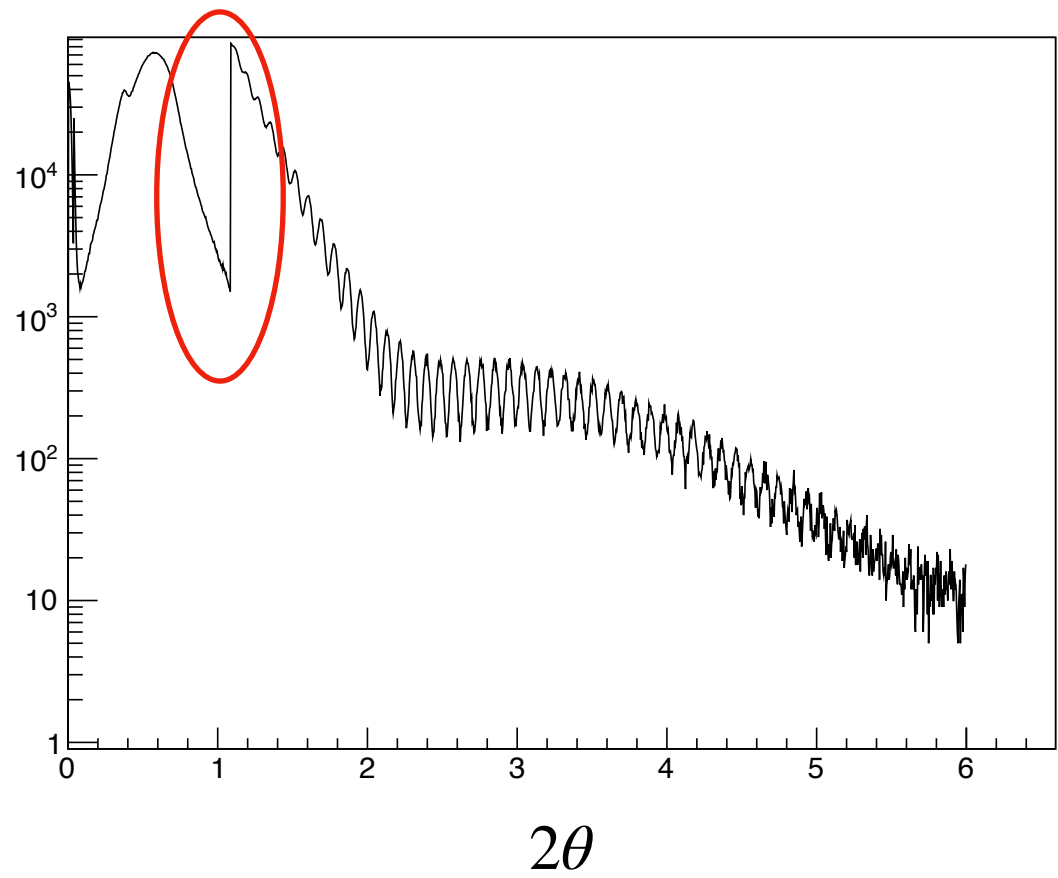
$$\tan(\phi') = \frac{(\Delta \delta_j \cdot \Delta \delta_k) - (\Delta \beta_j \cdot \Delta \beta_k)}{(\Delta \delta_j \cdot \Delta \delta_k) + (\Delta \beta_j \cdot \Delta \beta_k)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

# 2021/03/31実験結果のプロット

補正なし

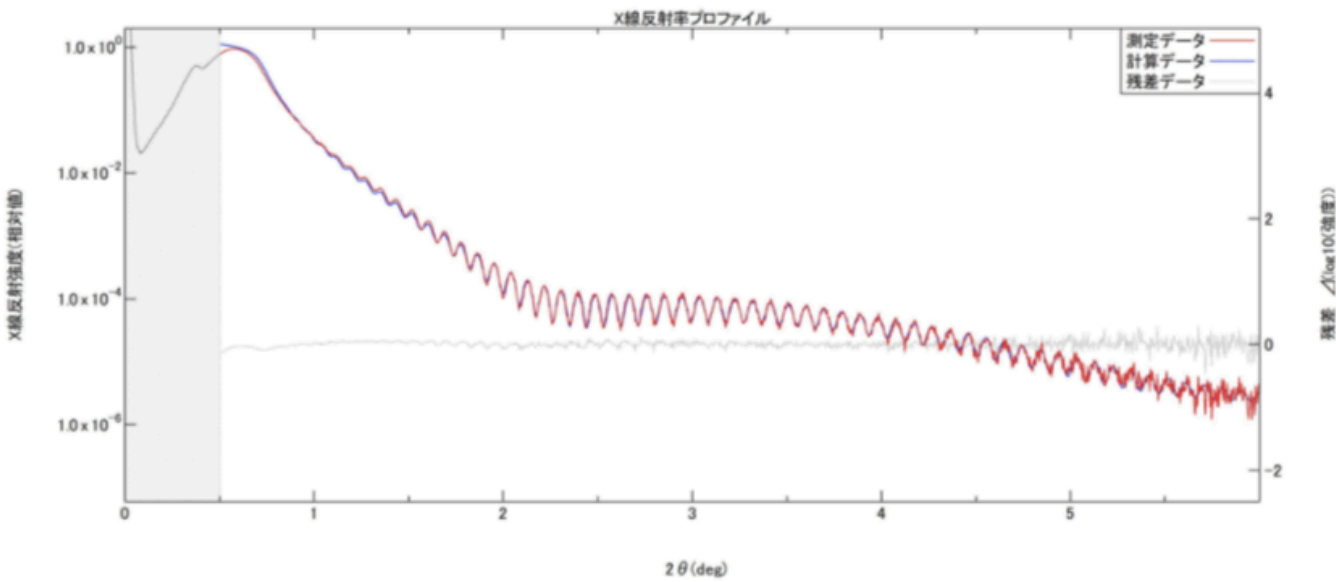
$\propto$  X線反射率

Graph



補正あり

ID	Material	Thickness (nm)	Density (g/cm3)	Roughness (nm)
4	Fe2O3	1.4(5)	4.95(4)	0.440(8)
3	Fe2O3	0.694(12)	4.55(5)	0(3)
2	Fe	86.041(12)	7[--]	0.3(2)
1	Fe	4.1(7)	0.23(3)	2.8(4)
Sub.	Si	0.0[--]	2.33[--]	0.3[--]



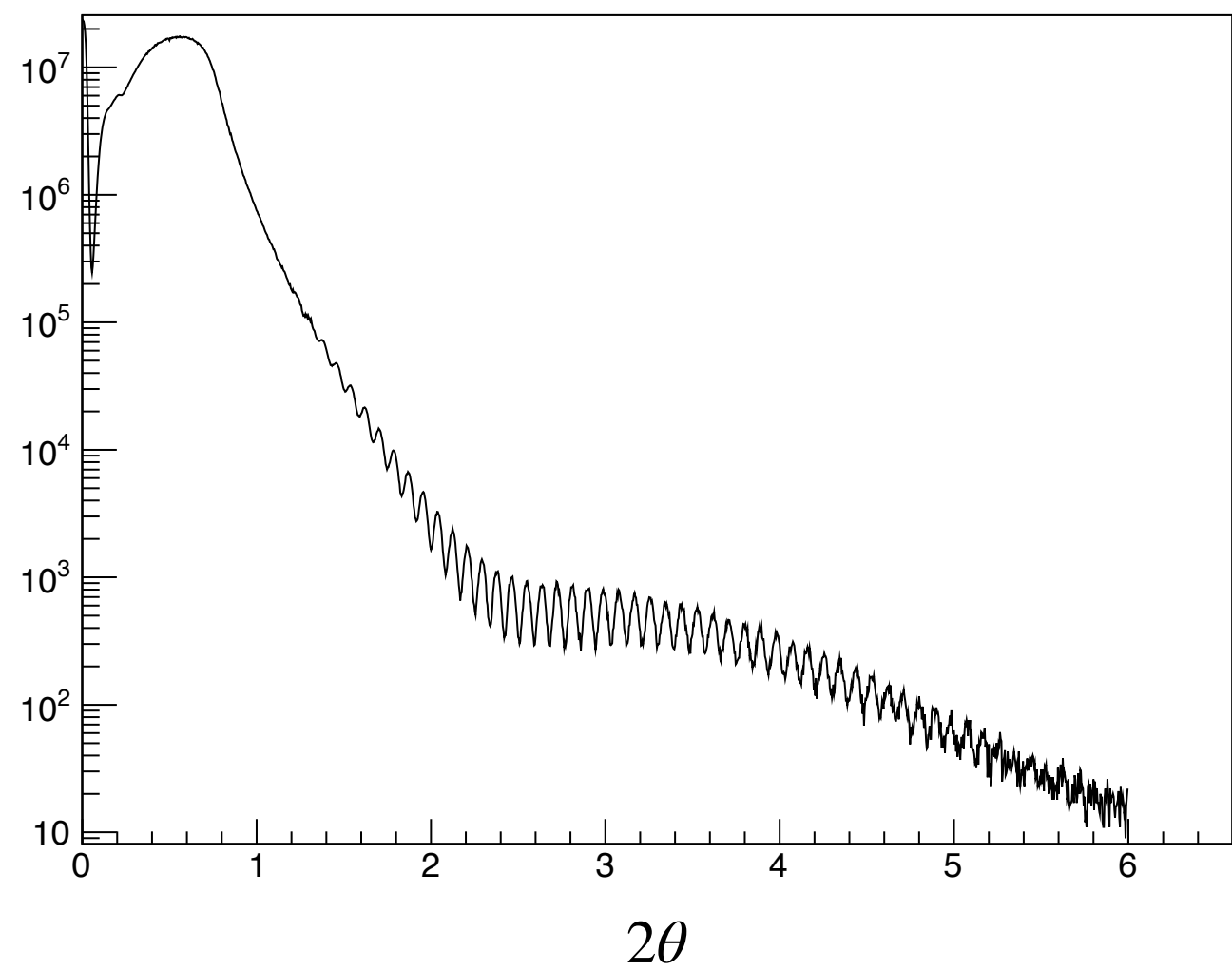
質問 どのような補正をしているのか？

上流のコリメータを変えたタイミング (強度を変えたタイミング)何分の一かをきく



$\propto$  X線反射率

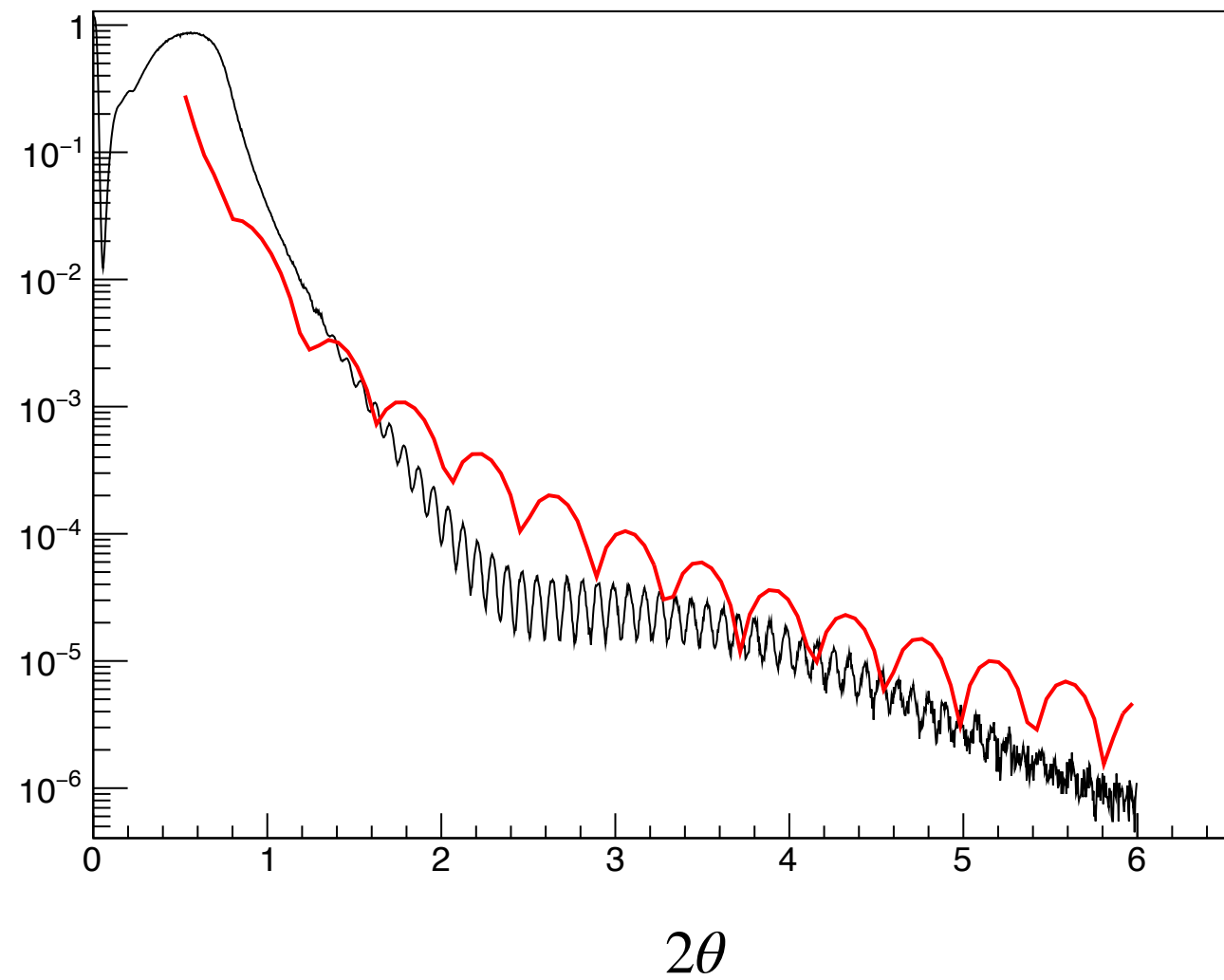
Graph



6/29

$\propto$  X線反射率

Graph













Rigaku

SmartLab







