

X線顕微鏡の開発

生命・情報等教育研究支援室 ○河原井 勝一 保谷 博 大石 健一

1. はじめに

長年機械工作ショップとして、物理工学系の各研究室に機械工作で研究支援してきました。その一部として、青木研究室のX線顕微鏡の開発の一助としてスピンドル支持台の製作を行いました。スピンドル支持台の製作がX線顕微鏡開発にどのような関係にあるか、X線顕微鏡の概要を踏まえて発表します。

2. X線顕微鏡の基本概念と要求精度

X線は可視光に比べ波長が短く、電子線に比べ透過力が大きいという特徴を持つ。この特徴によって、元素固有の吸収端や蛍光X線を利用した特定元素の識別も行える。このように、X線は物体の原子レベルでの情報を得る重要な手段となっている。

斜め入射X線顕微鏡

X線領域では物質の屈折率が1よりわずかに小さいので、鏡面すれすれに入射させると全反射を起こす。このときの鏡面と入射ビームのなす角を斜め入射角と呼び、全反射の臨界斜め入射角 θ_c は

$$\theta_c = 1.6 \times 10^{-2} \lambda \sqrt{\rho} \quad (1)$$

で表される。ここで、 λ は使用X線波長で nm 単位で表し、 ρ は鏡面の密度である。パイレックスガラス ($\rho = 2.32 \text{ g/cm}^3$) の反射面に Al K α 線 (波長 0.83nm) が入射する場合、 $\theta_c = 20.3 \text{ mrad}$ となる。

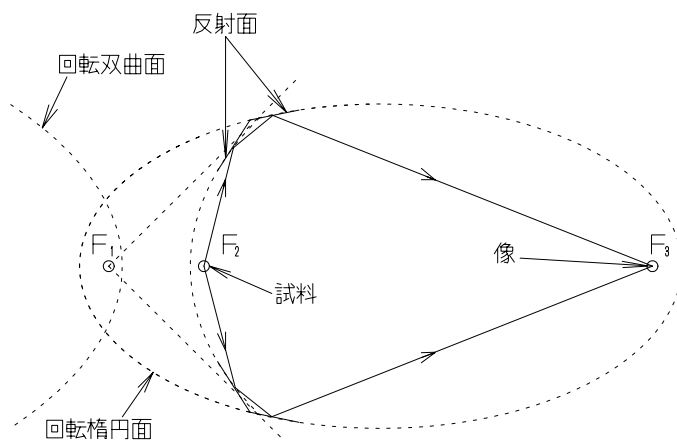


図 1 Wolter 型斜め入射 X 線顕微鏡概念図

全反射を利用したX線顕微鏡の原理は1952年Wolterによって提案された。概念図を図1に示す。入射および反射角は鏡面に対し 1° 前後であるが、図では誇張して書いてある。反射鏡面は1つの焦点 F_1 を共有する回転双曲面と回転楕円面からなる。焦点 F_2 を物点とし、ここを通るX線は2個の曲面で反射して焦点 F_3 に結像する。この2個の曲面の組合せでは、 F_2 を通る光線は反射面をどこにとっても光路長が一定になる。反射面を2回使うのは光軸から離れた物点の像のゆがみを少なくするためである。理論的な分解能は F_2 から鏡面を見込む開口角の大きさで決まる。斜め入射X線顕微鏡の開口は輪帯であるから、分解能 Δ は近似的に

$$\Delta = 0.38\lambda / \sin\theta_1 \quad (2)$$

で与えられる。ここで θ_1 は焦点 F_2 から鏡面を見込む角である。 θ_1 は θ_c の4倍なので式(1)を代入すると分解能は

$$\begin{aligned} \Delta &= 0.38\lambda / 4\theta_c \\ &= 5.9 / \sqrt{\rho} \quad (3) \end{aligned}$$

となる。ただし、単位はnmである。式より、分解能の限界は鏡面の密度によって決まってしまうことがわかる。例えば、パイレックスでは $\Delta = 3.9\text{ nm}$ 、金では $\Delta = 1.4\text{ nm}$ である。

しかしながら、実際の分解能は鏡面の加工精度で決まってしまう。鏡面精度は、X線の波長に近い面粗さと比較的周期の大きな形状精度とに分けられる。面粗さの要求精度は近似的に以下のように見積もられる。今、図2のように鏡面の凸凹が理想的な面より h だけずれていたとする。

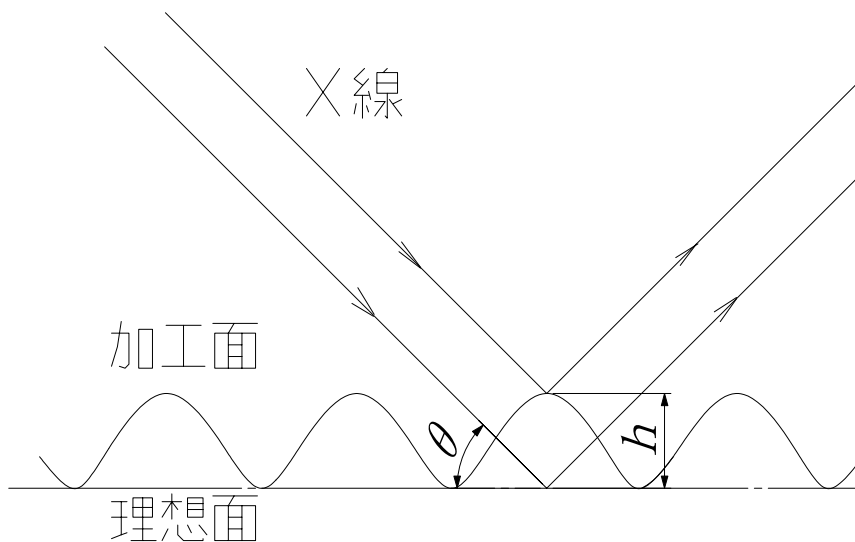


図2 表面粗さによる光路差

このとき、ずれによる光路差Dは、斜め入射角を θ とすると

$$D = 2h \sin \theta \quad (4)$$

となる。レーリーの結像条件より $D < \lambda/4$ でなければならないので、

$$h < \lambda/8 \sin \theta \quad (5)$$

の面粗さが要求される。この式に斜め入射臨界角 θ_c を代入してまとめると

$$h < 7.8/\sqrt{\rho} \quad (6)$$

が求まる。ただし、単位はnmである。前例のパイレックスに対しては5.1nm、金に対しては1.8nmの面精度が要求される。

形状精度に対する見積もりは、簡単なモデルを使ってPriceが計算した。彼によると、分解能は、主に光軸に垂直な方向の表面傾斜角の乱れによって決まる。乱れの標準偏差を σ とすると、点物体のぼけdは

$$d \approx 7.5 \sigma l \tan \theta \quad (7)$$

となる。ここで、lは物点と鏡面との距離、 θ は斜め入射角である。例えば、 $\sigma = 1 \mu \text{rad}$ 、 $l = 50 \text{mm}$ 、 $\theta = 20 \text{mrad}$ とすると $d = 7.5 \text{nm}$ となる。

上記の2つの条件を満足すれば、ほぼ理想的な斜め入射X線顕微鏡が実現できる。すなわち、面粗さと形状精度においてnmオーダの精度が必要になる

3. 研削用スピンドル支持台の製作

金型母材を製作するにあたって、理研製鋼株式会社製のNC旋盤UPL-120で研削加工を行うスピンドルを保持する架台の製作が必要になった。

使用するスピンドルは「アストロ-E 400」超精密スピンドルNR-402Eで、拘束タイプアンギュラベアリングをフロント側に2個、リヤ側に2個組み合わせ、ラジアル方向、スラスト方向にも強い剛性が得られるように配慮した設計。小径エンドミル加工、小径ドリルでの穴あけ加工、スリ割り加工、面取り加工、研削加工などに使用できます。

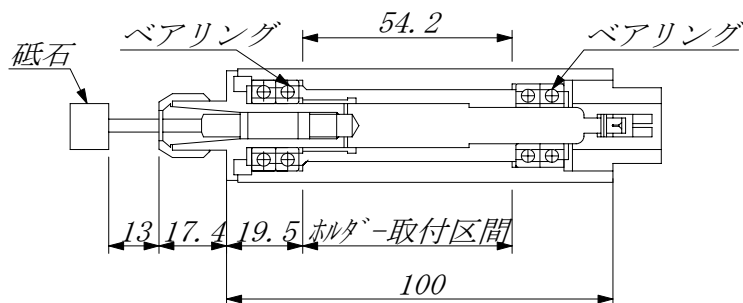


図3 スピンドルNR-402E

図3にスピンドルNR-402Eの半断面図と軸付砥石装着した状況を示す。次にスピンドル取り扱い上の注意として、スピンドルはモーター回転数20,000rpm以上で回転させると、内部歯車の磨耗が早くなり耐久時間が短くなるのでモーターの回転数は、20,000rpm以下で使用するか減速器を使用

しなければならない。軸付砥石の最高（適正）使用回転数、周速度は、適正オーバーハング（チャックから切刃までの距離）が 13mm の時です。オーバーハングと回転数の関係を表-1 に示す。

表-1 オーバーハングと回転数の関係

オーバーハング (mm)	最高使用回転数 (rpm)
20	$N \times 0.5$
25	$N \times 0.3$
50	$N \times 0.1$

※ Nは、オーバーハング 13mm の時の最高使用回転数

以上の点からオーバーハングを 13mm で設計する事とする。

スピンドルを機械に装着する場合、スピンドルには図 3 の様にベアリングが内部に入っているの、ホルダーに取り付ける場合には、出来るだけベアリング部を避けて取り付けなければならない。また、取り付けは図 4 の A の様に直接ネジで止めると、スピンドルの外サヤが変形し回転不良や発熱の原因となり、極端に寿命を縮めますので、図 4B の取り付け方法で取り付けて下さい。（Bの方法でどうしても出来ない場合はCの方法で取り付けてる）

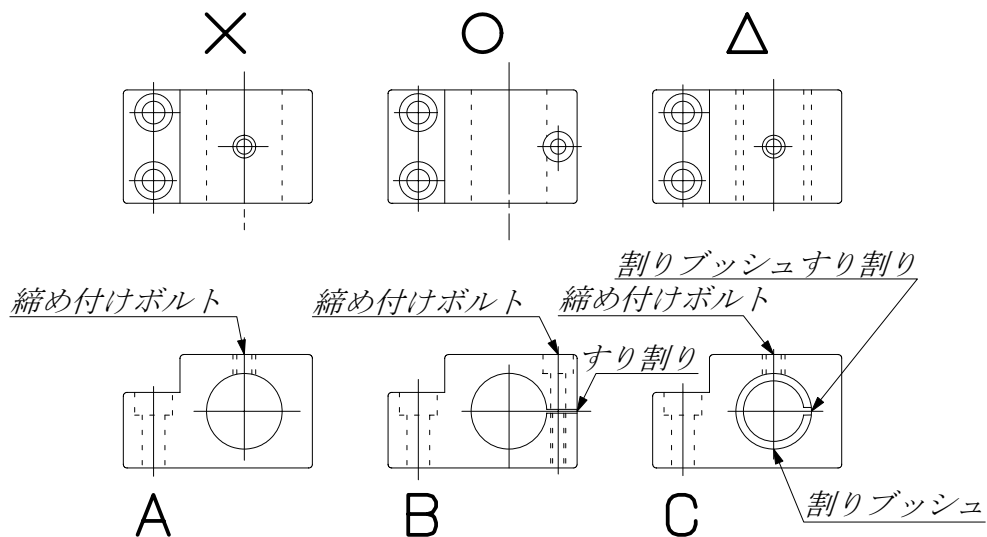


図 4 スピンドル取り付け時の注意

材料の選択としてNC旋盤で加工する際にスピンドルの位置が煽られたりして、ズレないよう剛性と重量が有り耐食性が有ることからステンレスの SUS304 を選定した。

スピンドルの支持位置は、図 5 の様にNC旋盤のテーブルに対し垂直とし、スピンドルのチャックを下向きの方で考えた。上向きセットの場合、NC旋盤のテーブルと回転軸の距離が 150mm しかなくスピンドル自体の長さが約 140mm も有りこれに、軸付砥石や減速器

を取り付けるスペースが無く出来ない事がわかる。

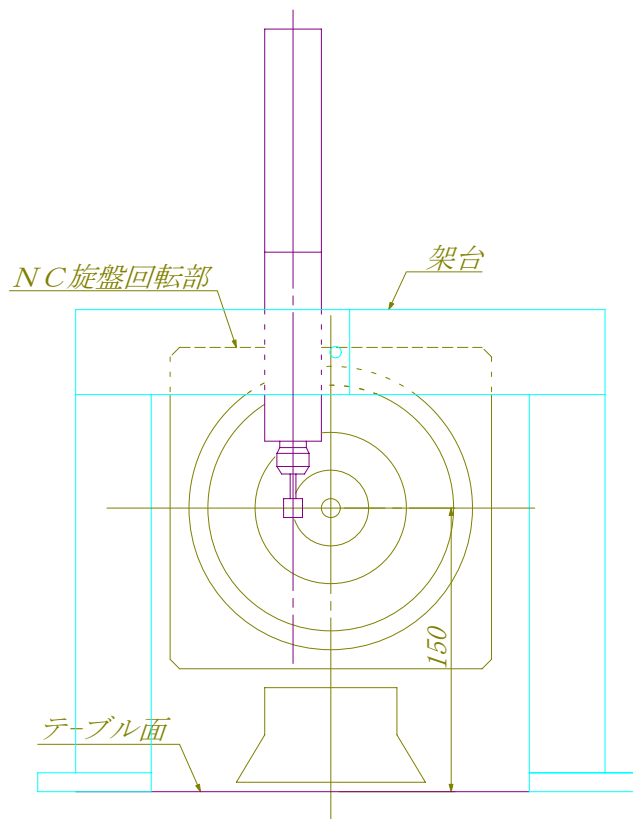


図 5 スピンドル支持架台構想図

以上の条件と図 5 スピンドル支持架台構想図を元にスピンドル取り付け部分の設計をした。

図 6 にスピンドル取り付け部の設計図を示す。図 4 の B に準ずるよう設計した。結果、スリ割を入れるため加工上右端が 29mm とした。また、M6 のボルトで締め付けた時スピンドルを固定し易い様にスピンドル固定部分の肉厚を 7mm 削り薄くした。

スピンドル取り付け区間が図 3 で最大 54.2mm であり、スリ割り径 150mm で入れられる厚みが 43mm で有ることで 43mm を決定した。また、砥石の厚みの補正を締め付け区間とする為にも 11.2mm は有効です。

次に、スピンドル取り付け部分の NC 旋盤のテーブル面からの位置を決定したい。

図 3 から砥石の大きさ x 適正オーバーハング 13mm ホルダー取付区間までの $17.4+19.5=36.9\text{mm}$ となり

$$x + 13 + 36.9 = x + 49.9 \text{ (mm)} \quad (8)$$

図 5 からテーブル面から NC 旋盤の回転センターの距離は 150mm です。(8) 式と合わせると

$$x + 49.9 + 150 = x + 199.9 \text{ (mm)} \quad (9)$$

x は 10mm ほどとして 209.9mm となり高さは最低 209.9mm になり 210mm で設計した。

図 6 からテーブル面固定プレートの厚みが 10mm で、左右の支柱が 200mm とした。

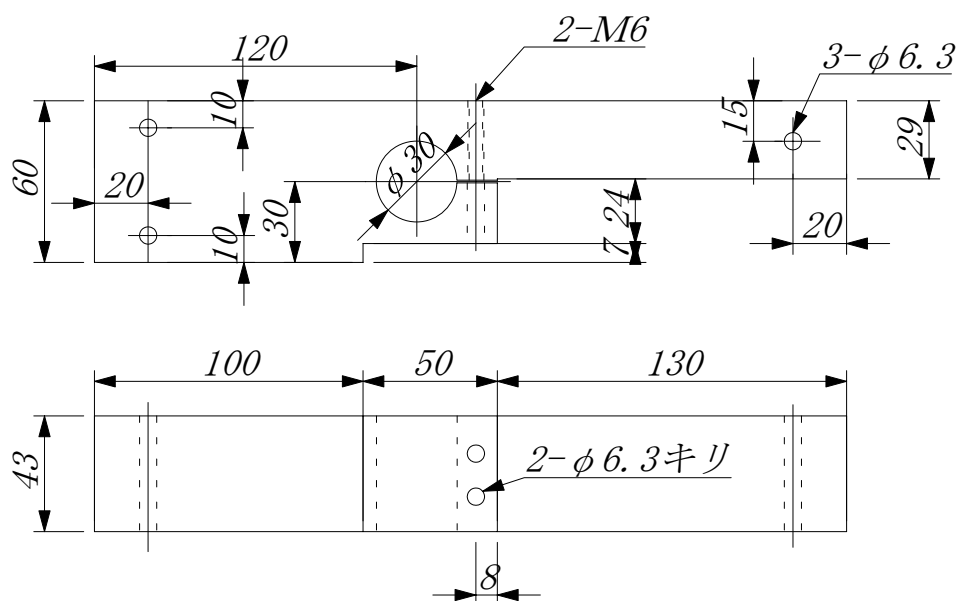


図 6 スピンドル取り付け部分

4. まとめ

設計上の制約を踏まえて、機械工作上可能な物としてスピンドル支持架台を製作する事が出来た。我々の日常的な機械工作が、各研究室の研究に寄与している事がわかる。

この発表にあたり、資料を提供や便宜をして頂いた物理工学系青木先生ならび渡辺先生そして青木研究室の院生の皆様に感謝します。