

卒業論文
X線望遠鏡の反射鏡用
スパッタマスクの製作

窪田 廉 (東京都立大学)¹

2005年2月10日

目次

第1章	マンドレルマスクの設計	2
1.1	目的	2
1.2	ガラスマンドレルのダイレクトの測定	2
1.3	マンドレルのスパッタ	2
1.4	スパッタしたマンドレルの膜厚測定	4
1.5	膜厚の計算	4
第2章	マスクの設計	8
2.1	座標の補正	8
2.2	膜厚の積分・マスクの設計	8
2.3	マスクの製作	9
2.4	アルミ板の加工	10
第3章	マスクを用いたスパッタ	13
3.1	マンドレルのスパッタ	13
3.2	スパッタしたマンドレルの膜厚測定	15
3.3	膜厚の計算	15
第4章	まとめ	22
4.1	考察	22
4.2	課題	22
4.3	発展	22

第1章 マンドレルマスクの設計

1.1 目的

硬 X 線領域の観測には多層膜反射鏡を搭載した望遠鏡が用いられる。そして、この望遠鏡はブラッグ反射の原理で集光する。ブラッグ反射を効率よく起こすには、全体に均一な膜厚を持った多層膜反射鏡が必要不可欠であり。均一な多層膜反射鏡を製作するには、均一にマンドレルにスパッタする必要がある。

本研究では、マンドレルに均一なスパッタを行うための、マスクの製作を行う。

1.2 ガラスマンドレルのダイレクトの測定

スパッタをしていない $\phi 200 \times 150$ のマンドレルにレーザーを当てて、ダイレクト強度の測定を行った。測定点は円周方向に 1.05 cm にピッチで、高さ方向に 1.0 cm ピッチで行った。測定した点は 13×15 (円周方向 \times 高さ方向) = 195 点で高さ方向には、下端から 0.5 cm のラインから 14.5 cm のラインまで 1.0 cm 毎に測定した。

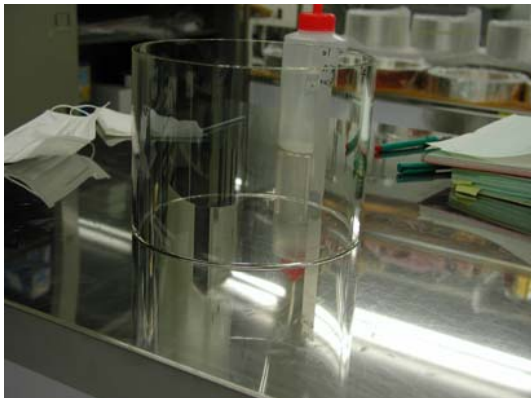


図 1.1: 今回測定したマンドレル

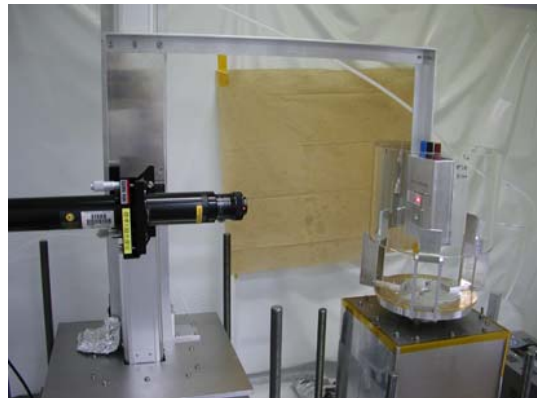


図 1.2: 測定装置

測定から得られるデータは透過したレーザー光の強度で、それは $I[V]$ で得られる。今回の測定で得られたレーザー光のマンドレルを通さないダイレクト強度とレーザー光当てないで得られたバックグラウンドそしてガラスマンドレルを透過したレーザー光強度の平均値は表 1.1 に示す。

1.3 マンドレルのスパッタ

測定したマンドレルに Pt のスパッタを行った。

まず今回の測定に使わない部分にスパッタしないようにするため、外側を円周方向に 150mm ほど残して、カプトンフィルムとアルミ фольで覆った。内側もアルミ фольで覆う。

表 1.1: ガラスマンドレルの測定から得られたレーザー光の強度

	強度 [V]
ダイレクト	12.139
バックグラウンド	0.046
測定点 (195 点) の平均強度	11.298

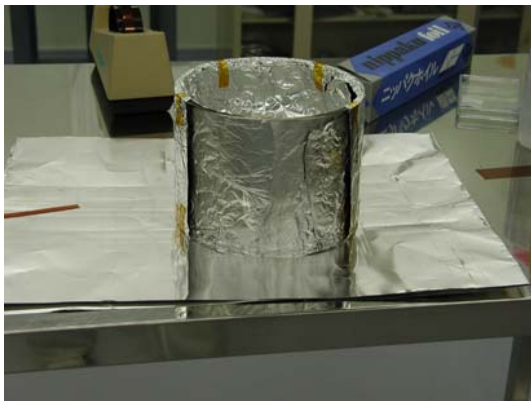


図 1.3: カプトンフィルムとアルミフォイルで覆ったマンドレル

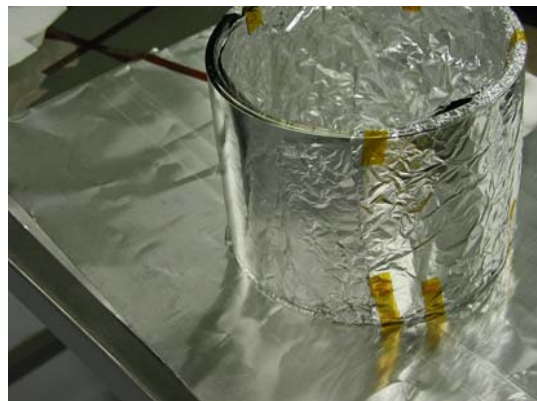


図 1.4: 横から見たところ

マンドレルをスパッタ装置にセットしスパッタを行う。

マンドレル - ターゲットの距離は 145 mm、スパッタ時の装置内の圧力は 1.64×10^{-4} Pa。

膜厚の目標は 228 Å 程度、145 mm ではスパッタレートは 12 Å/sec より、露出時間は 19 sec でスパッタを行った。また、今回は Pt の分布の仕方を知りたいので、マンドレルは静止させたままスパッタを行う。

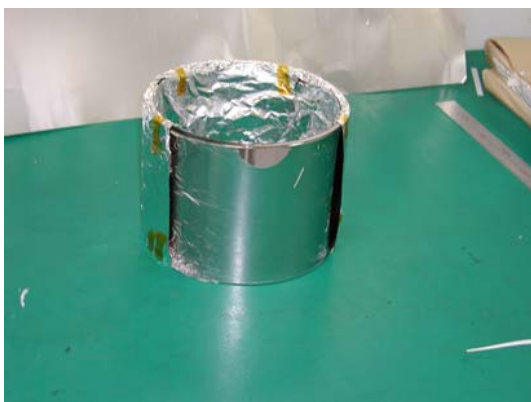


図 1.5: スパッタ直後のマンドレル



図 1.6: フォイルとカプトンフィルムをとったところ

1.4 スパッタしたマンドレルの膜厚測定

スパッタしたマンドレルをスパッタ前と同様の手順で測定した、その結果得られた、ダイレクトとバックグラウンドは表 1.2 のようになる。

表 1.2: ガラスマンドレルの測定から得られたレーザー光の強度

	強度 [V]
ダイレクト	12.1175
バックグラウンド	0.0455

1.5 膜厚の計算

電圧から膜厚への変換は以下の関係にしたがって行う。

$$I = I_0 \exp(-\alpha d)$$

ここで I はスパッタされたマンドレルを透過したレーザーの強度 (V) からバックグラウンド (V) を引いたもの、 I_0 はスパッタされていないマンドレルを透過したレーザーの強度 (V) からバックグラウンド (V) を引いたもの、 α は Pt の吸収係数で 0.006929、 d は膜厚 (Å) である。この式を変形して、

$$d = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

となる。

この式を測定点全てに適用して、以下の結果を得た。

なお、グラフは全て \sin でフィッティングした。

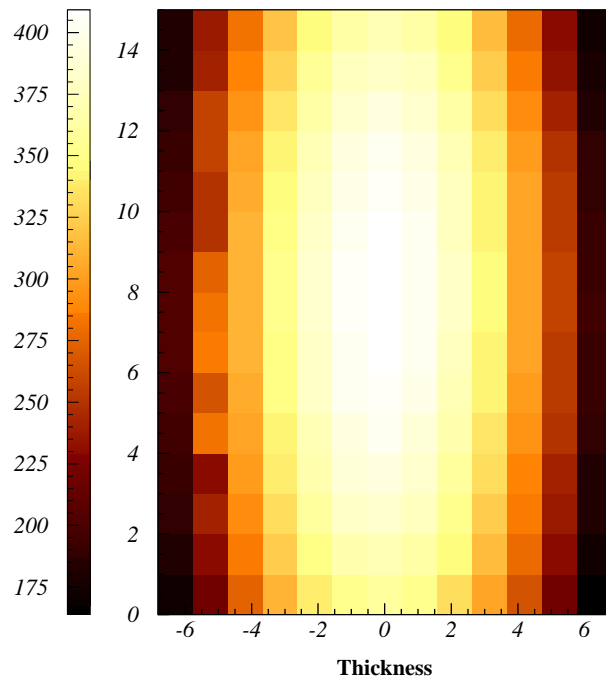


図 1.7: 膜厚の分布

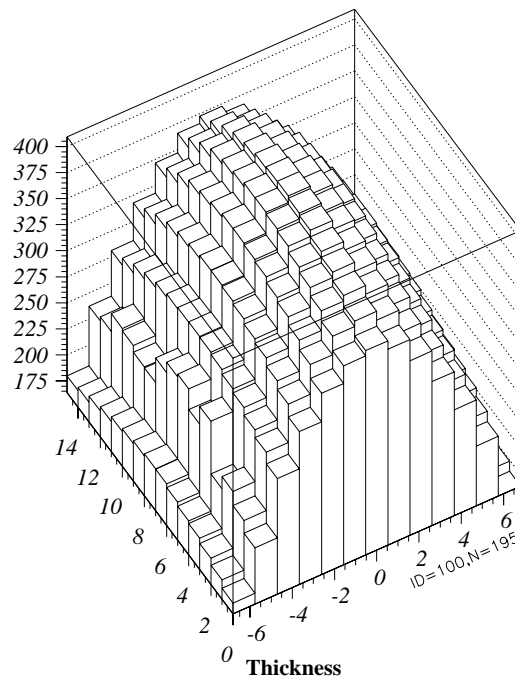


図 1.8: 膜厚の分布

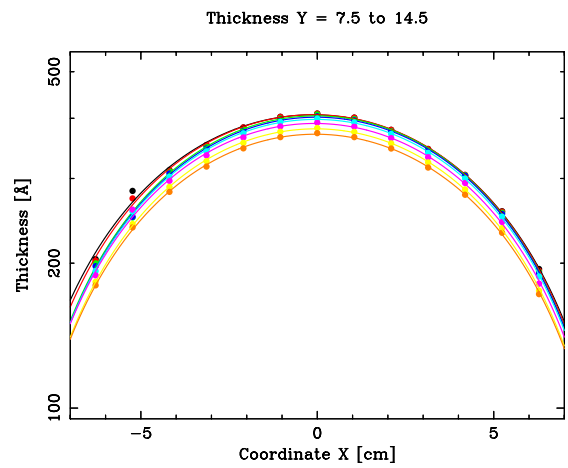
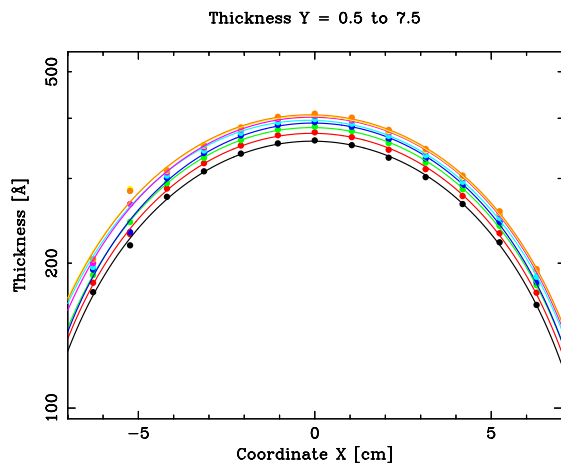
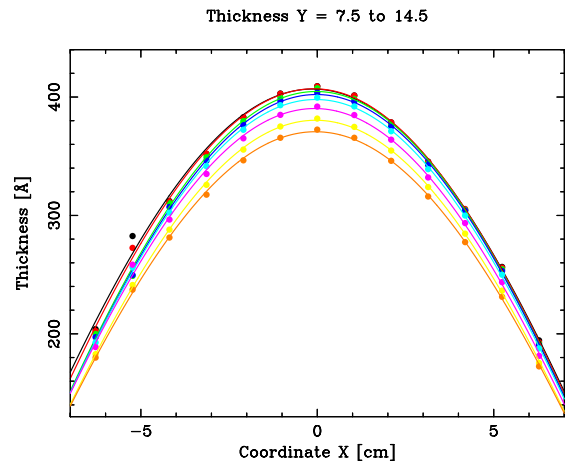
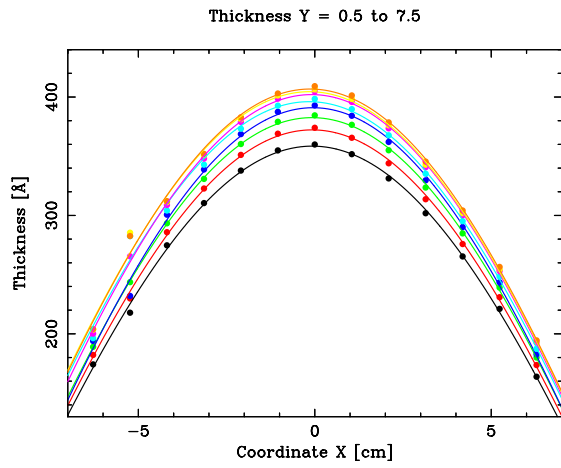


図 1.9: 高さ $Y = 0.5$ から 7.5 cm(左)、高さ $Y = 7.5$ から 14.5 cm (右)、下 2 図は縦軸を LOG スケールでプロットしてある — (右) 黒: $Y = 0.5$, 赤: $Y = 1.5$, 緑: $Y = 2.5$, 青: $Y = 3.5$, 水色: $Y = 4.5$, ピンク: $Y = 5.5$, 黄: $Y = 6.5$, オレンジ: $Y = 7.5$ 、(左) 黒: $Y = 7.5$, 赤: $Y = 8.5$, 緑: $Y = 9.5$, 青: $Y = 10.5$, 水色: $Y = 11.5$, ピンク: $Y = 12.5$, 黄: $Y = 13.5$, オレンジ: $Y = 14.5$

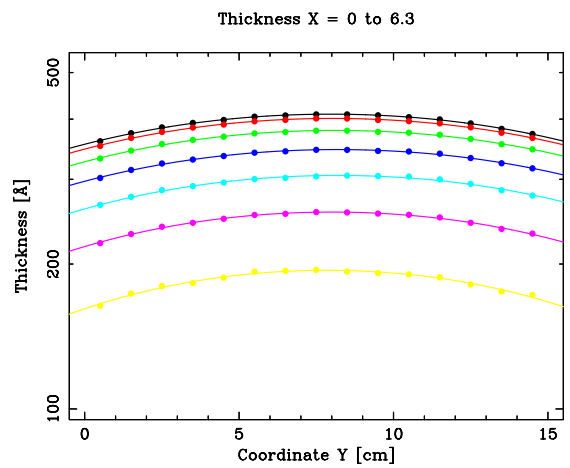
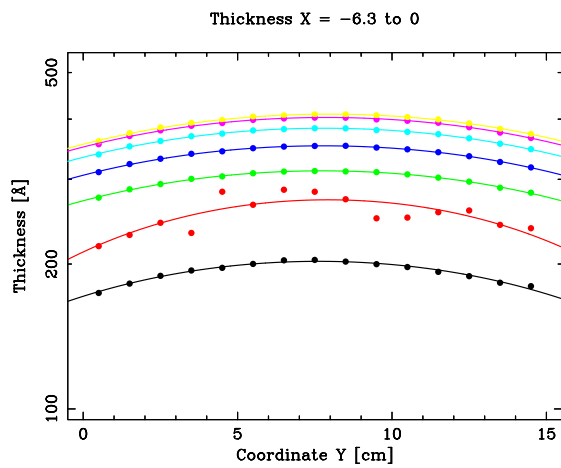
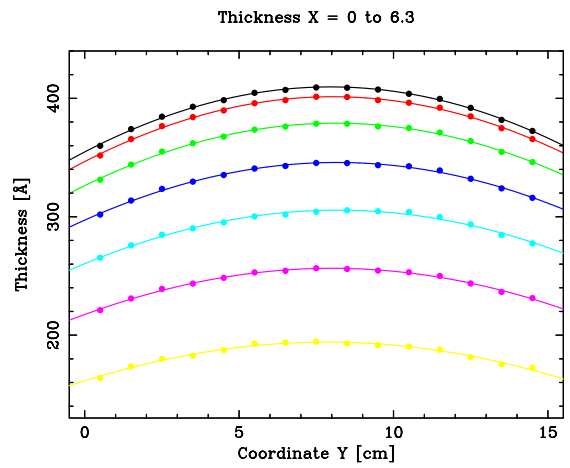
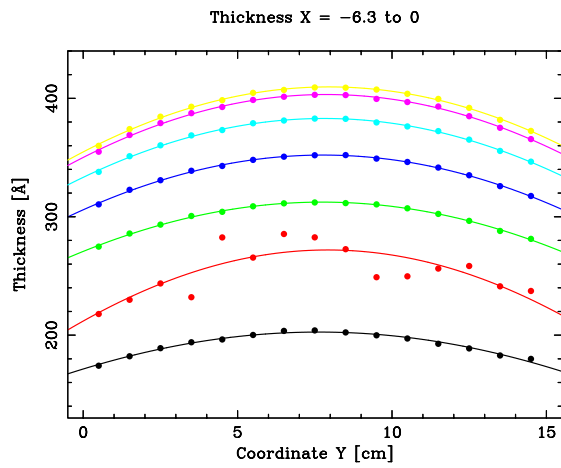


図 1.10: $X = -6.3$ から 0 cm(左)、 $X = 0$ から 6.3 cm (右)、下 2 図は縦軸を LOG スケールでプロットしてある — (右) 黒: $X = -6.3$, 赤: $X = -5.25$, 緑: $X = -4.2$, 青: $X = -3.15$, 水色: $X = -2.1$, ピンク: $X = -1.05$, 黄: $X = 0$ 、(左) 黒: $X = 0$, 赤: $X = 1.05$, 緑: $X = 2.1$, 青: $X = 3.15$, 水色: $X = 4.2$, ピンク: $X = 5.25$, 黄: $X = 6.3$

第2章 マスクの設計

2.1 座標の補正

一定の高さでの円周方向の分布を見ると、全体的にピークすなわち最も厚いところが X 座標負の側にずれていることが分かった。このあと行う積分に影響を与えるので、あらかじめ補正しておく、まずピークの分布は以下のグラフのようになり。この平均値を求めると、 $X = -0.0798 \text{ cm}$ となる。そこで、このピークのずれの平均値が原点となるように全てのグラフを平行移動させる。

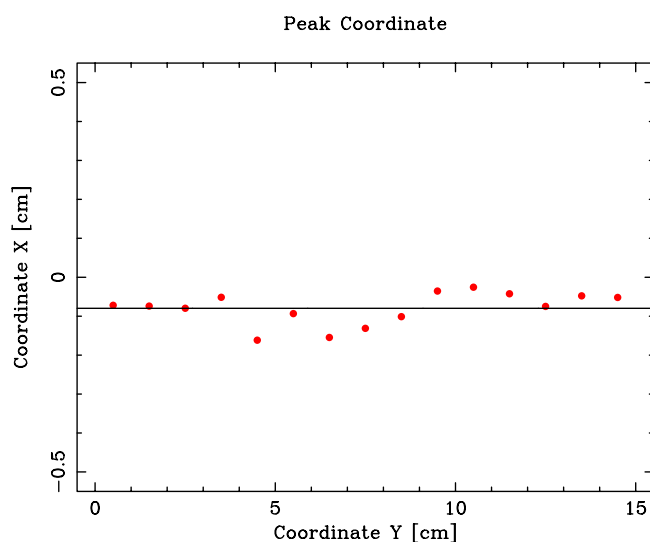


図 2.1: 膜厚のピークの座標

2.2 膜厚の積分・マスクの設計

得られた膜厚の円周方向の分布の関数を最も膜厚が厚くなるところを中心に幅 5cm に渡って積分を行う。

$$\int_{-\frac{z}{2}}^{\frac{z}{2}} f(x, y) dx = d(y)$$

積分値 $d(y)$ の最大値を h とする。計算の結果、 h は $y = 8.5 \text{ cm}$ のときで、 1.975×10^{-5} となる。ここで他の y でも積分値が h に等しくなるように、積分範囲を考えると、

$$\int_{-\frac{z}{2}}^{\frac{z}{2}} f(x, y) dx = h = d(8.5)$$

ここで、フィッティングは \sin を用いたので、

$$f(x, y) = C(y) \sin \frac{2\pi}{A(y)} \{x - B(y)\}$$

となり、

$$\int_{-\frac{z}{2}}^{\frac{z}{2}} f(x, y) dx = -\frac{A(y)C(y)}{\pi} \sin \frac{\pi z}{A(y)} \sin \frac{2\pi B(y)}{A(y)}$$

となる。

よってこれから、

$$z = \frac{A(y)}{\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{-\pi h}{A(y)C(y) \sin \frac{2\pi B(y)}{A(y)}} \right\}$$

を得る。

この式から各高さでの z の値を求め、マスクのそれぞれの高さでの幅を決めた。

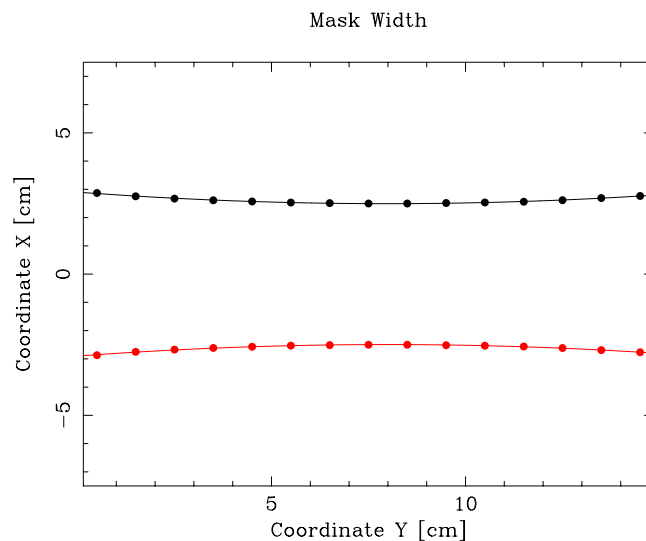


図 2.2: マスクの形状

この曲線は二次関数でフィッティングした。

2.3 マスクの製作

前章で決めた図形を元にマスクの作成を行った。マンドレルの高さは 15cm であるが実際にミラー用に用いる部分は中心の 10cm ほどなので、マスクの縦方向の幅は 14cm とした。

2.4 アルミ板の加工

マスクの素材には厚さ 1.5mm のアルミ板を用いた。設計された図はマンドレルの表面にマスクが張り付いた場合のものであるが、実際には、固定されたマスクの内側でマンドレルが回転しながらスパッタされるため、密着させるのは不可能である。そこで 5mm ほどマスクとマンドレルの間を浮かせるのを目標に加工した。

まずマスクの大きさになるアルミ板を切り出す。そして切り出したアルミ板に曲げ加工をほどこした。

下の写真はアルミ板の加工に用いた曲げ機である。この機械は 3つのローラーからなっていて、手前の 2つのローラーで板を挟み、ハンドルでローラーを回すことで奥にあるローラーに送り、送られた板は奥のローラーと手前の下のローラーで押されることによって曲がる仕組みである。



図 2.3: 曲げ機—3本のローラーからなっていて手前の2本のローラーで奥に送り、奥のローラーに当てることで曲げる

下は実際の加工の様子である。均一に曲げるため、一度曲げたら反対方向からも曲げ機に挿入して加工を行う。



図 2.4: 加工の様子

今回はマスク口を開けてから曲げるものと、曲げてからマスク口を開けるものの2通りの加工方法でマスクを作成した。

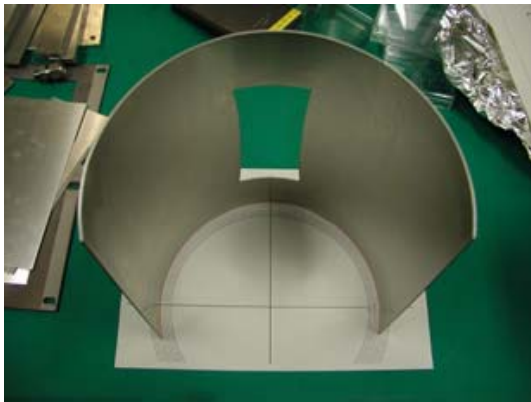


図 2.5: マスク口を開けてから曲げたもの—曲率が内側と外側で異なるのがわかる

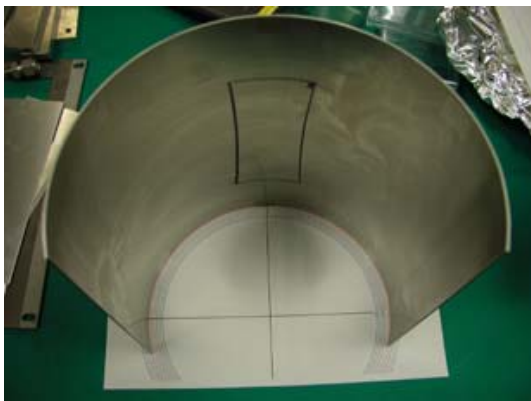


図 2.6: マスク口を開ける前に曲げたもの—曲率が内側と外側でほぼ同じである

2通りの加工を行った結果、マスク口を開けてから曲げた場合、マスク口を開けた部分の強度が弱い
ため、外側に比べてよく曲げられ、場所により曲率の違うマスクができてしまうことがわかった。マス
ク口を開けずに曲げたものは内側と外側で曲率がそれほど変わらなかった。マスクはマンドレルにでき
るだけ、接近させて使いたいので曲率の均一なマスク口を開ける前に曲げる加工を行ったものを使うこ
とにした。

マスク口は、ボール盤と電動糸のこを用いて作った。

完成したマスクは内径が $\phi 213\text{mm}$ となった。

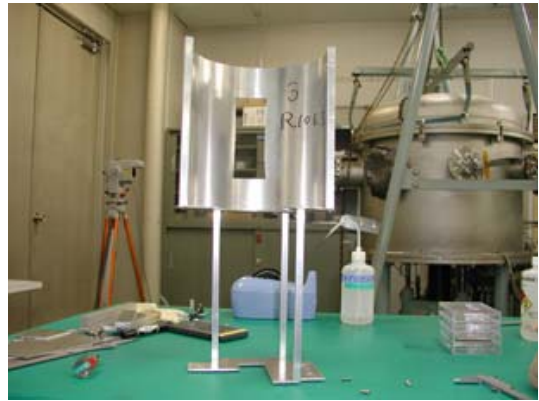


図 2.7: 完成したマスクとマスク台—外側から見たところ (左) 内側から見たところ (右)

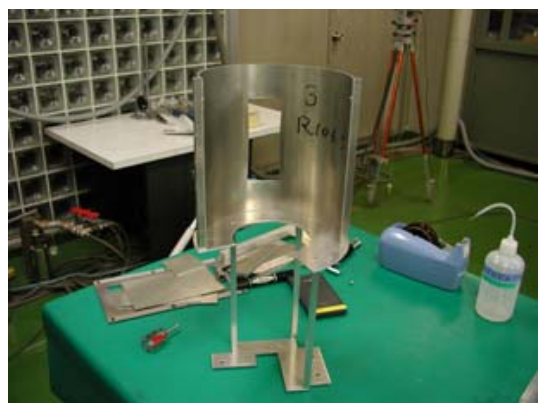
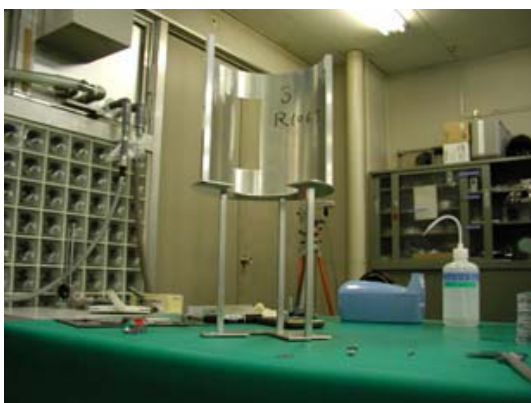


図 2.8: 完成したマスクとマスク台—下から見たところ (左) 上から見たところ (右)

第3章 マスクを用いたスパッタ

3.1 マンドレルのスパッタ

今回は、作成したマスクを用いて、Ptのスパッタを行った。今回はマンドレルを回転させてスパッタを行う。スパッタ粒子がマンドレルの内側に回り込んで付着し膜厚の測定に影響を与えるのを防ぐため内側はカプトンフィルムで全周を覆ってスパッタされないようにした。

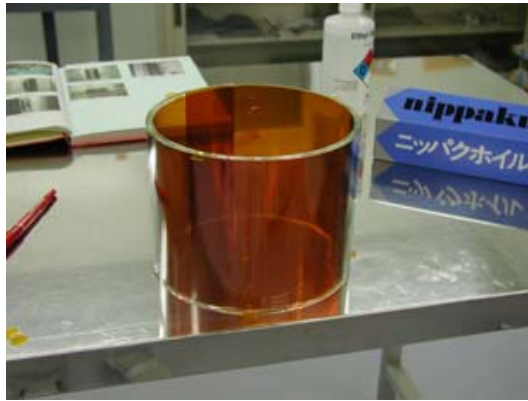


図 3.1: マンドレル—内側にカプトンフィルムを巻いた状態

マンドレルをスパッタ装置にセットしスパッタを行う。

マンドレル-ターゲット間の距離は前回同様 145mm。マンドレル回転角速度は $2.9^\circ/\text{sec}$ と設定（実際にモニタされた値は $3.0^\circ/\text{sec}$ ）、回転角は 360° でスパッタを行う。

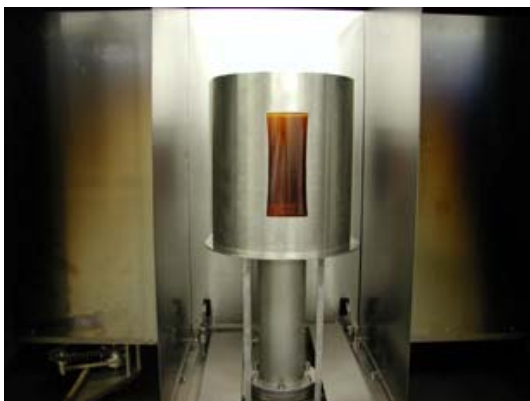


図 3.2: 設置したマスクとマンドレル

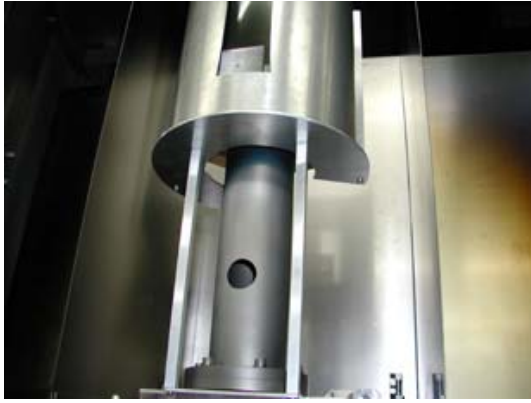


図 3.3: 下から見たところ (左)、上から見たところ (右)—下から見たところ (左)、上から見たところ (右)、マスクの内側にマンドレルがある

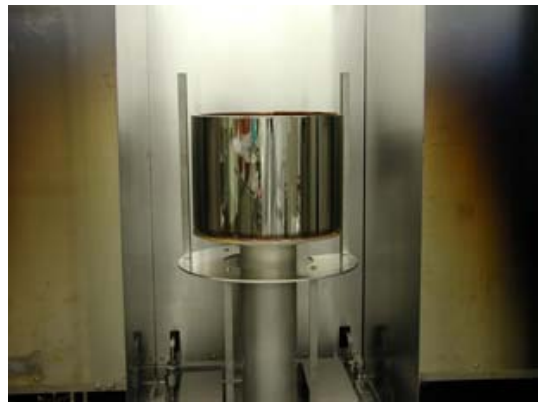
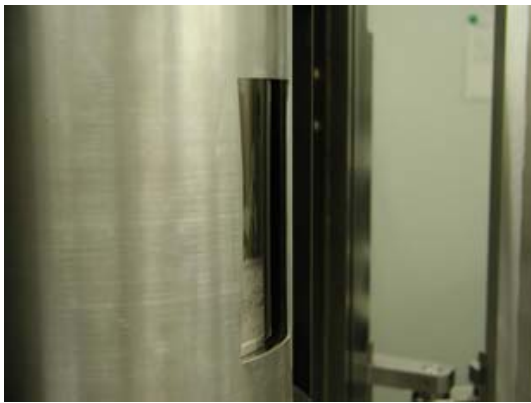


図 3.4: マスク口の部分 (右)、マスクを取り除いたところ (右)— マスクとマンドレルは 5mm ほどすきまが空いている、マンドレルの周りのマスク台は固定されていて、マンドレルのみが回転する。

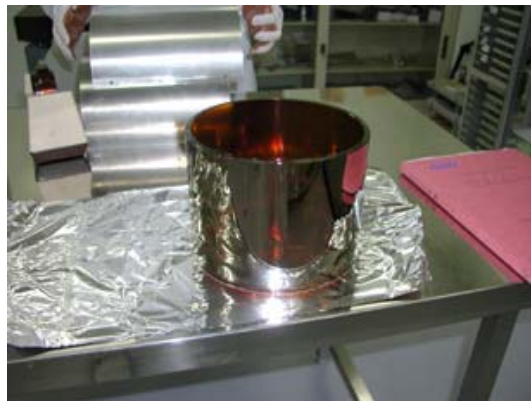


図 3.5: スパッタ後のマンドレル

3.2 スパッタしたマンドレルの膜厚測定

スパッタしたマンドレルを第1章の時と同様の手順で測定した、その結果得られた、ダイレクトとバックグラウンドは表 3.1 のようになる。

表 3.1: 今回の測定から得られたレーザー光の強度

	強度 [V]
ダイレクト	12.0015
バックグラウンド	0.0419

3.3 膜厚の計算

第2章と同様の方法で、膜厚を計算した。

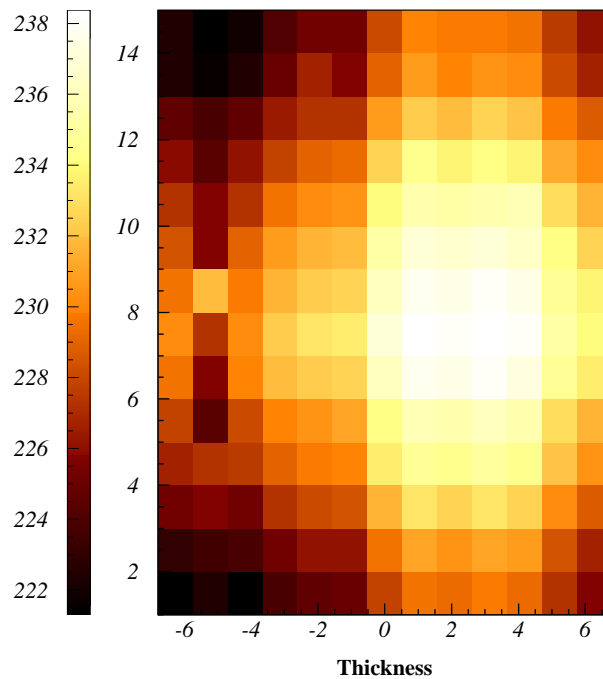


図 3.6: 膜厚の分布

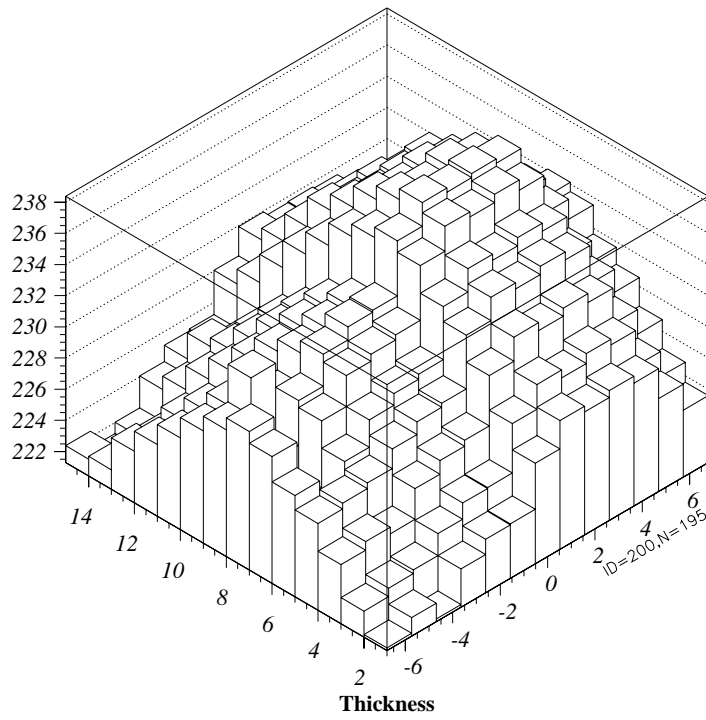


図 3.7: 膜厚の分布

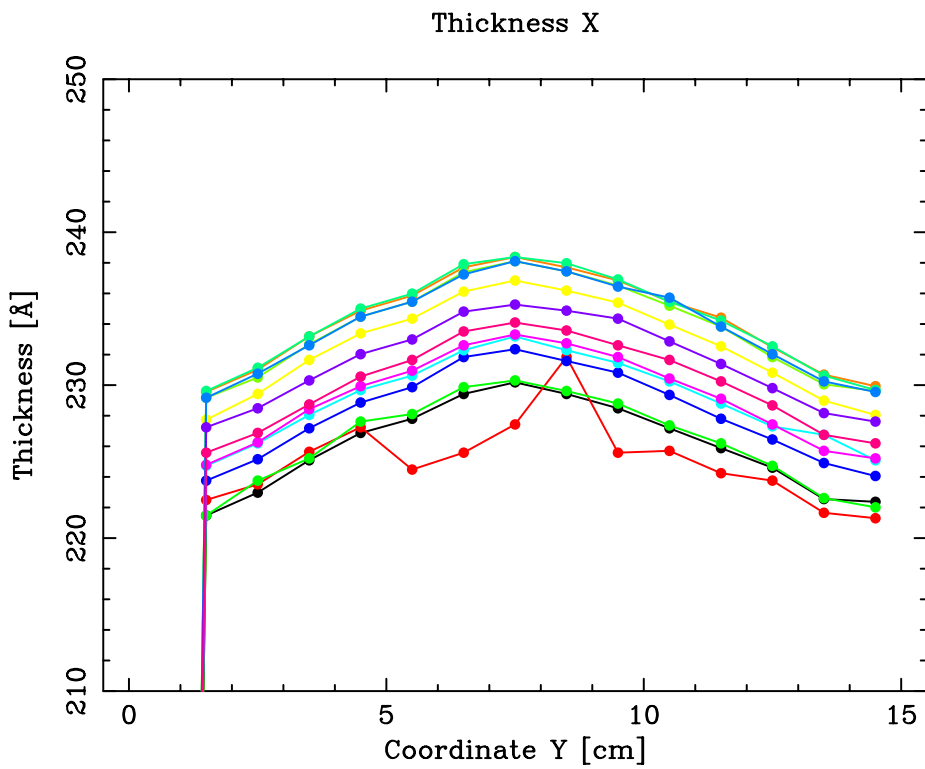


図 3.8: 高さ方向の膜厚の分布: X=-6.3 から 6.3

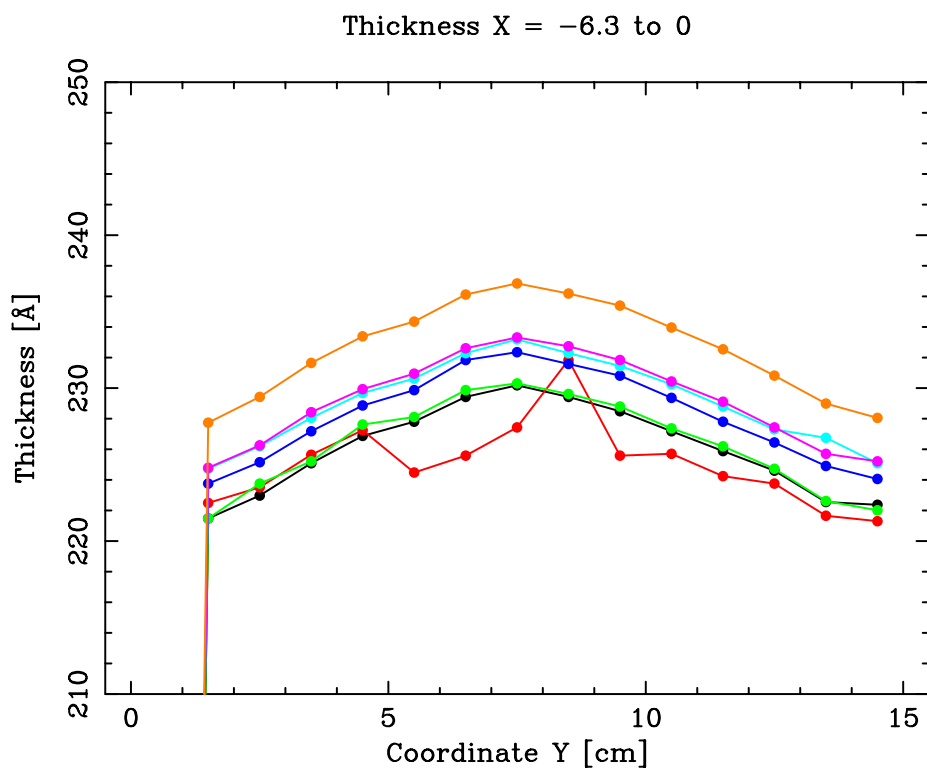


図 3.9: 高さ方向の膜厚の分布: X=-6.3 から 0—黒: X = -6.3, 赤: X = -5.25, 緑: X = -4.2, 青: X = -3.15, 水色: X = -2.1, ピンク: X = -1.05, オレンジ: X = 0

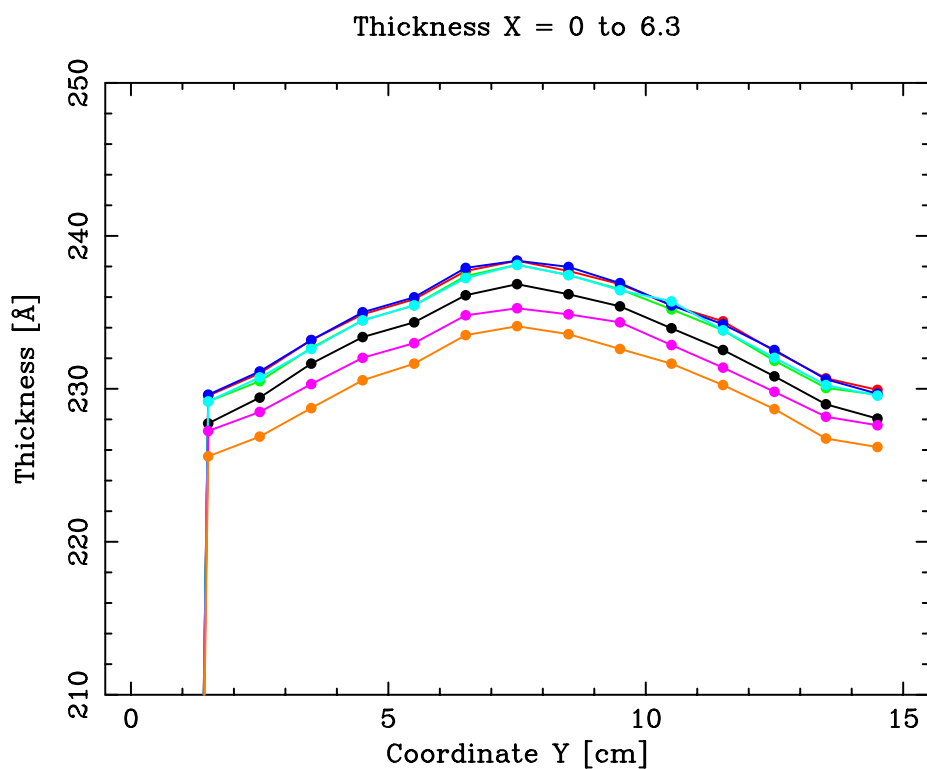


図 3.10: 高さ方向の膜厚の分布: X=0 から 6.3—黒: X = 0, 赤: X = 1.05, 緑: X = 2.1, 青: X = 3.15, 水色: X = 4.2, ピンク: X = 5.25, オレンジ: X = 6.3

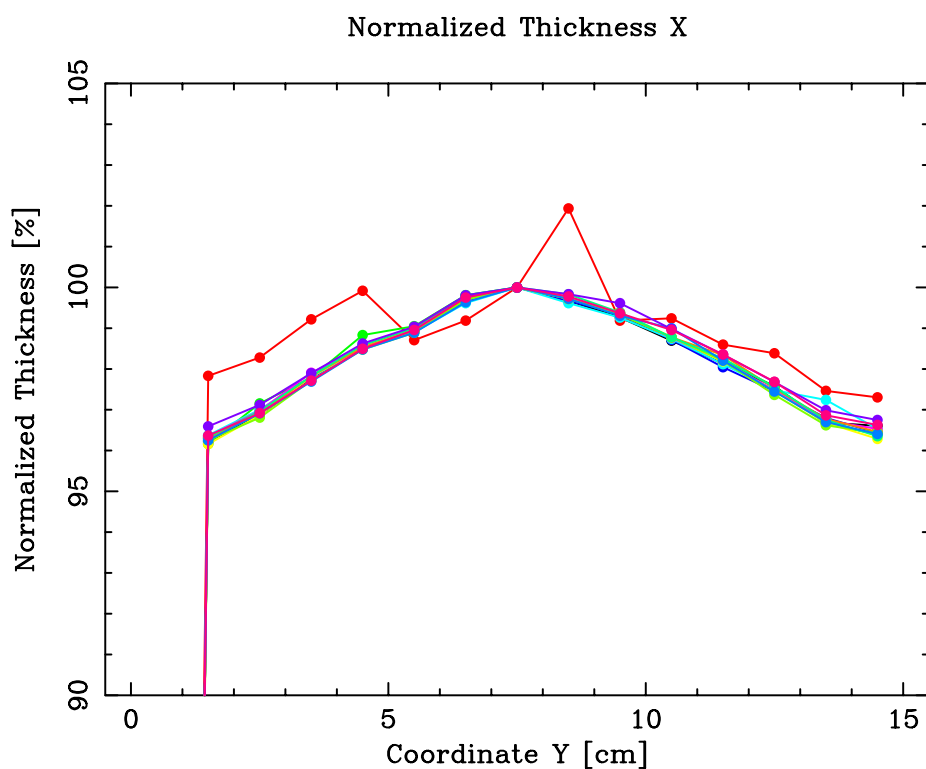


図 3.11: 高さ方向の膜厚の分布: X=-6.3 から 6.3—高さ Y=7.5 で規格化して表した

図 3.6、図 3.7 は全体の膜厚の分布を表したものである。高さ Y=1.5 以下で急速に膜厚が薄くなっているのは、この部分はマスクロが開いていないためほとんどスパッタされなかったからである。

図 3.8 は円周方向に見た高さ方向への膜厚の分布を表している。

図 3.9、図 3.10 は図 3.8 を円周中心の X=0 で分けて表わしたグラフである。

図 3.11 は高さ Y=7.5cm で図 3.8 の全てのグラフを規格化してそれぞれのラインでの高さ方向の膜厚の変化を表わしている。この図から、赤のグラフ (X=-5.25cm) を除き高さ方向の分布は 5%以下に抑えられていることがわかる。

また、円周方向の分布は

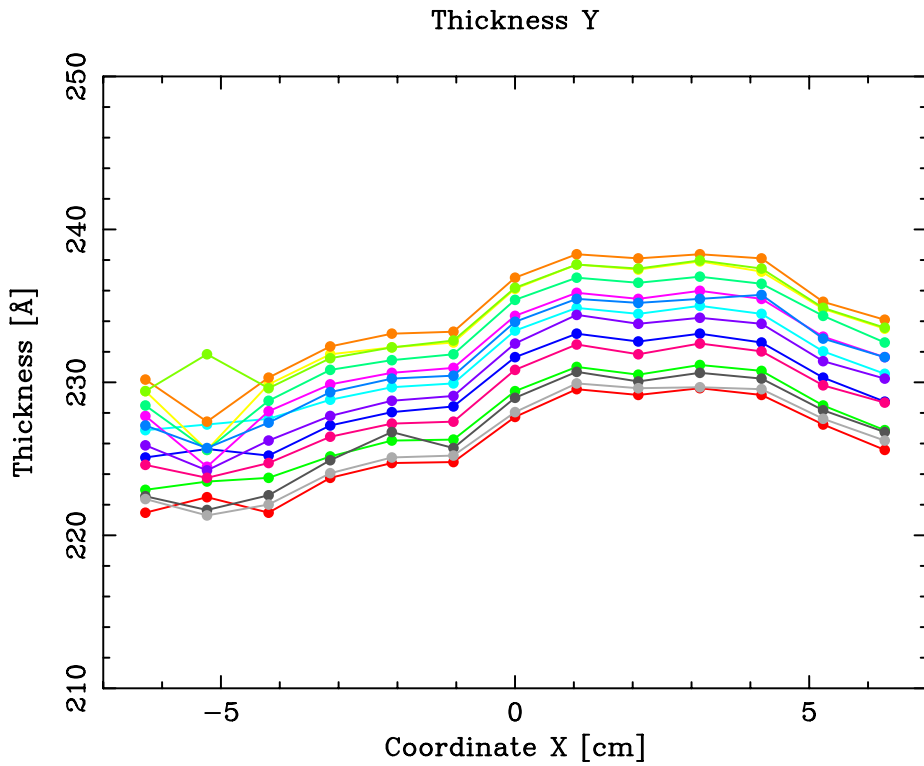


図 3.12: 円周方向の膜厚の分布: Y=1.5 から 14.5

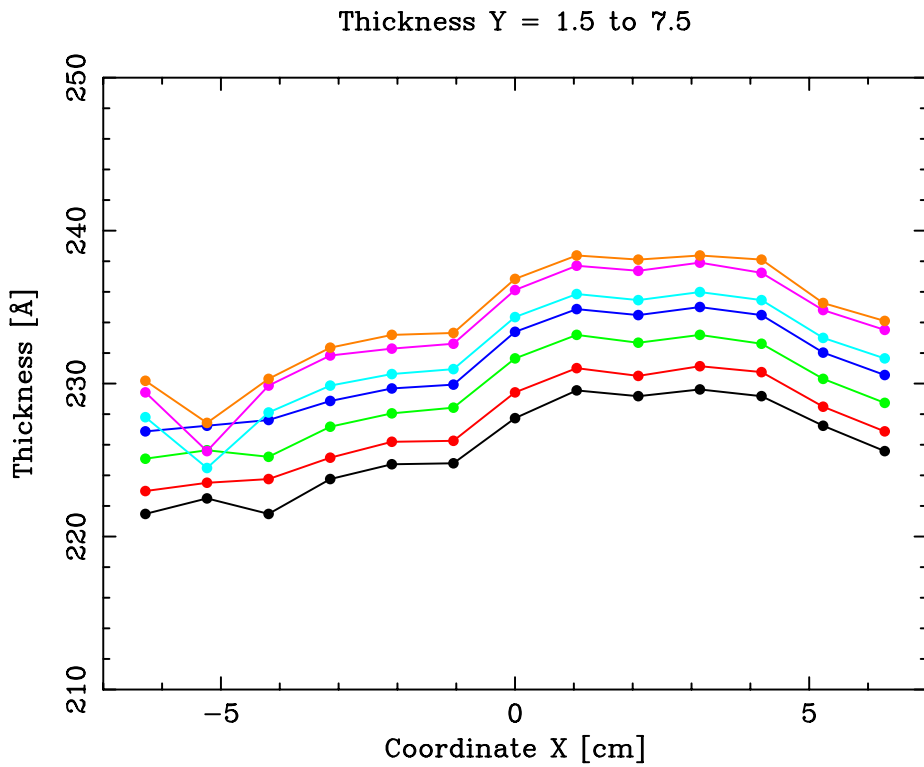


図 3.13: 円周方向の膜厚の分布: Y=1.5 から 7.5—黒: Y = 1.5, 赤: Y = 2.5, 緑: Y = 3.5, 青: Y = 4.5, 水色: Y = 5.5, ピンク: Y = 6.5, オレンジ: Y = 7.5

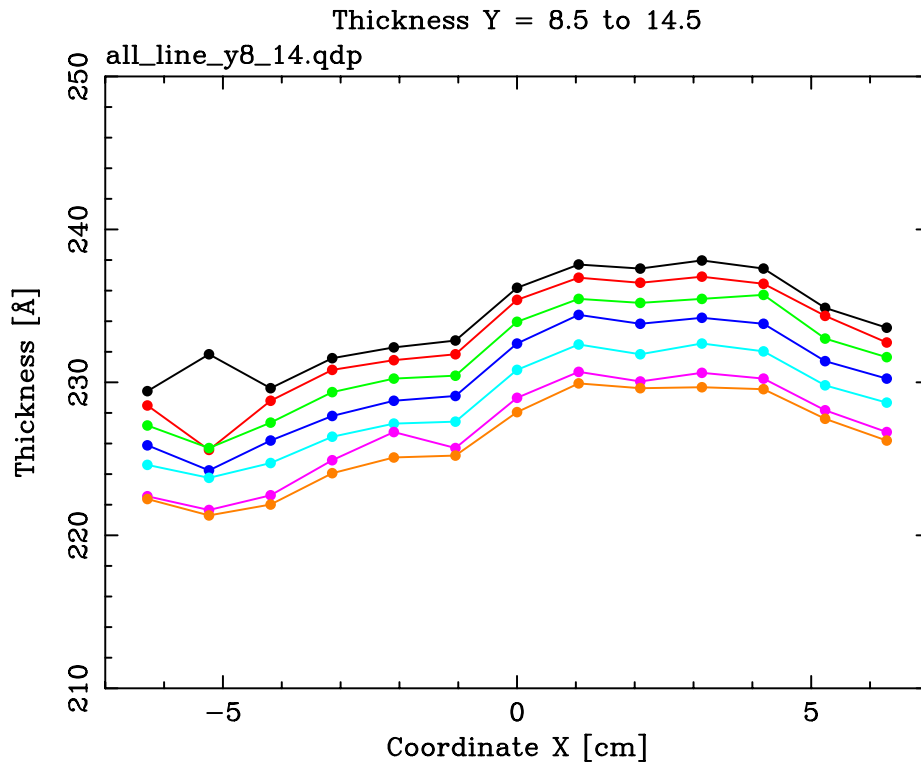


図 3.14: 円周方向の膜厚の分布: Y=8.5 から 14.5—黒 : Y = 8.5, 赤 : Y = 9.5, 緑 : Y = 10.5, 青 : Y = 11.5, 水色 : Y = 12.5, ピンク : Y = 13.5, オレンジ : Y = 14.5

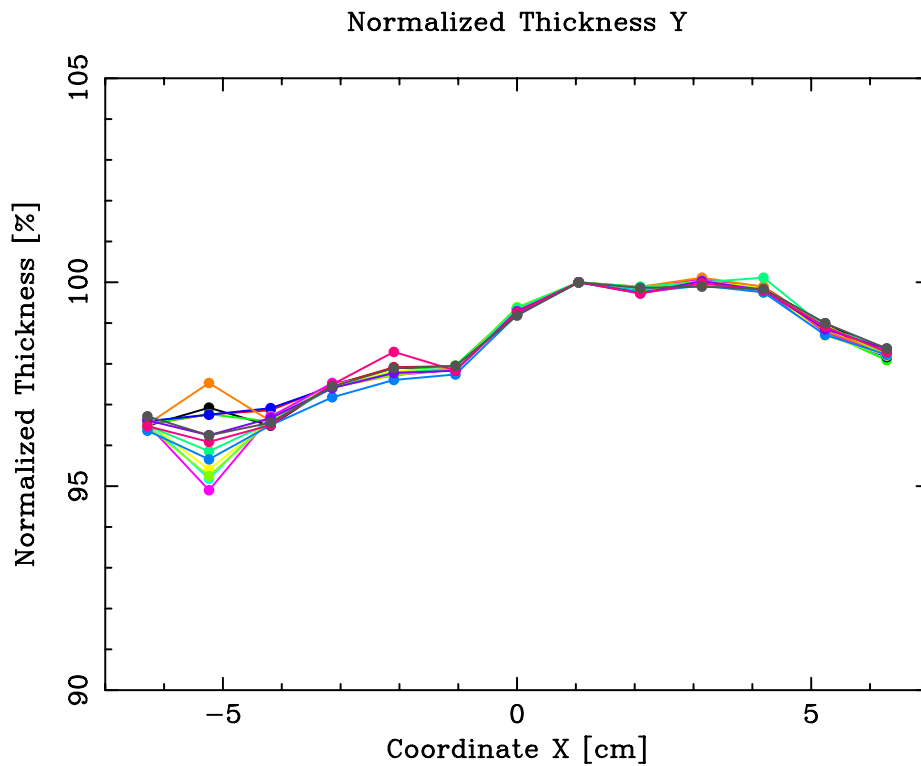


図 3.15: 円周方向の膜厚の分布: Y=1.5 から 14.5—円周 X=1.05 で規格化して表した

マンドレルは回転させているので、同じ高さ (Y 座標) の場合、円周方向には均一であるはずである。ところが図 3.15 からわかるように円周方向にそれぞれの高さで 5%近い分布を持ってしまっているのがわかる。

第4章 まとめ

4.1 考察

初めてのマスクの製作の結果、縦方向の膜厚分布はそれぞれの円周上で5%以下に抑えることができた。この点ではマスクの効果を発揮したと考えられる。

しかし、本来ならであるはずのない円周方向の5%近い膜厚分布が現れた。この原因はマスクの設計をマンドレル表面で行ったのに、マンドレルから5mm以上浮かせてマスクを作ってしまったことや、マスクとマンドレルの間にできた隙間の影響、またマンドレル台にマンドレルを設置するときのマンドレルの中心とマンドレル台の中心がずれてしまうことによる、歳差運動によって生じていることなどが予想される。

4.2 課題

マスクとマンドレルの距離をより詰めれるように、マスクを加工し直す。また、マスクとマンドレル間の距離が一定となるように、マンドレルを設置することのできるマンドレル台を作成する。

4.3 発展

これらの課題が解決できれば、縦方向の分布を5%に満足せず。できる限り0に近づくように、マスクを改良する。さらに、 $\phi 200\text{mm}$ だけでなく他の径のマンドレル用のマスクも作成する。