

静電型荷電粒子エネルギー分析器の製作

大西崇文

装置開発技術支援室 極限環境機器開発技術グループ

概要

静電型荷電粒子エネルギー分析器は宇宙空間プラズマの観測に使用されるが、人工衛星に搭載する場合、その重量や大きさが制限される。従来の分析器では、荷電粒子の経路がひとつしかなく、ひとつの分析器でイオンと電子の両方を同時に観測することができなかった。今回製作した分析器は、2重殻の構造をしており、大きさを抑さえながらイオンと電子の両方を同時に観測できるのが特徴である。分析器の主要部品である電極はアルミニウム合金製であり、形状は回転楕円面で、加工には数値制御によって加工を行う NC 旋盤を使用した。通常、NC 工作機械における工具の移動は、直線か円弧のみであり、滑らかな楕円面を加工するには、複数の円弧で楕円を近似する必要がある。そこで、楕円を複数の円弧で近似して加工するプログラムを作成し、電極の加工を行った。

1 製作した分析器の形状

今回製作した分析器は、図 1 のような 2 重殻構造をしており、9 個の楕円面で構成されている。楕円の形状については研究室の学生が設計を行った。構成する部品の内、電圧が印加されるのは中殻とコリメータ内リングであり、これらは PEEK 製のスペーサーとねじによって他の部品から絶縁されている。中殻は、組み立て時に内殻を中に入れられるよう、二つに分割できるようになっている。各部品の位置は、平行ピンおよび円筒形のスペーサーのはめ合いによって定まっている。図 2 は中殻の下側にスペーサーを挿入した写真である。加工形状の目標精度は 0.01 mm であった。

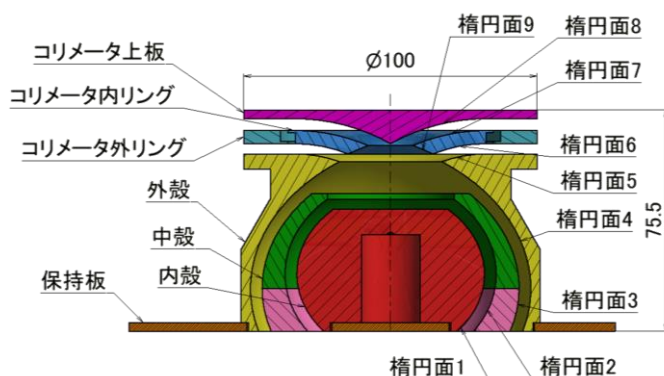


図 1. 製作した分析器の断面図



図 2. スペーサーを挿入した中殻の下側

2 加工

2.1 加工機

楕円面の加工は、荒加工に汎用旋盤（図 3）、仕上げ加工には、数値制御によって加工を行う NC 旋盤（図 4）を使用した。旋盤用の工具であるバイトは、加工面と干渉せずに楕円面が加工できるよう、先端が細いものを使用した（図 5）。治具の製作や穴あけ等その他の加工にはマシニングセンター（図 6）を使用した。



図 3. 汎用旋盤 (ワシノ LR-55A)



図 4. NC 旋盤 (ワシノ LN-32N)



図 5. 外径用バイト (左) と内径用バイト (右)
(タンガロイ)



図 6. 5 軸マシニングセンター
(ヤマザキマザック VARIAXIS j-500 / 5X)

2.2 加工プログラムの作成

楕円面を加工するため、以下の手法 (Kazimierz Jakubczyk, 2010) で楕円を複数の円弧で近似して加工プログラムを作成した。図 7 にその概略を示す。図 8 は内殻の楕円を複数の円弧で近似した結果であり、長さ 41.6 mm の楕円部分を 20 個の円弧で近似している。

1. 楕円の始点 P_0 における接線と、終点 P_2 における接線の交点を点 C とする。
2. 線分 P_0C の中点を点 A とする。
3. 点 A を通る楕円の接線と、直線 P_2C との交点を点 B 、楕円との接点を P_1 とする。
4. 点 P_0 を通り、直線 P_0C に垂直な直線と、点 P_1 を通り、直線 AB に垂直な直線の交点を S_0 とする。
5. 点 P_2 を通り、直線 P_2C に垂直な直線と、直線 P_1S_0 の交点を S_1 とする。
6. 点 S_0 を中心とする弧 P_0P_1 と、点 S_1 を中心とする弧 P_1P_2 は、点 P_1 における接線の傾きが互いに等しく、これらをつないだ曲線 P_0P_2 は、点 P_0 、 P_2 において接線の傾きが楕円と等しい。
7. 得られた曲線 P_0P_2 と楕円との誤差を求め、誤差

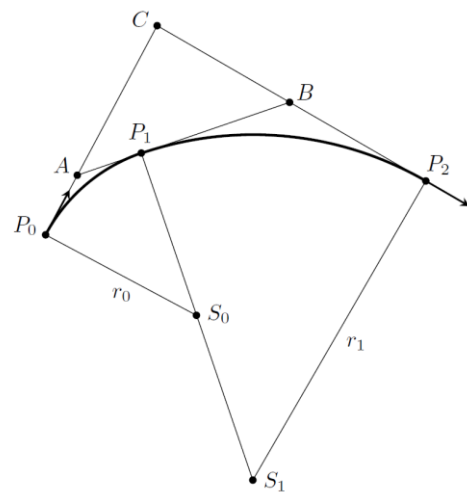


図 7. 曲線を近似する円弧の構築^[1]

が指定した値（今回は 0.001 mm とした）より大きい場合は、点 A の位置を変化させるか、区間を細分化（ P_1 を P_2 、 P_0 とする）し、誤差が指定した値より小さくなるまで上記の手順を繰り返す。

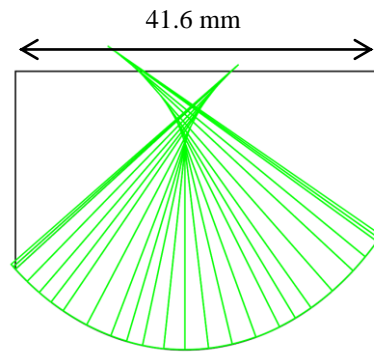


図 8. 楕円を複数の円弧で近似した結果

2.3 加工条件

仕上げ時の加工条件を表 1 に、NC 旋盤による加工時の様子を図 9 にそれぞれ示す。

表 1. 仕上げ時の加工条件

使用工具	超硬合金チップ
主軸回転数 [rpm]	最高 900
送り速度 [mm / rev]	0.05
切り込み [mm]	0.01 ~ 0.05
切削液	油性切削液



図 9. 加工時の様子（コリメータ上板）

3 組み立て

製作した部品を図 10 に、組み立ての手順を図 11 にそれぞれ示す。



(1) 内殻



(2) 中殻上側、下側



(3) 外殻



(4) コリメータ外リング



(5) コリメータ内リング



(6) コリメータ上板

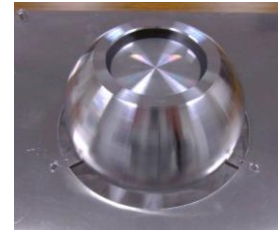
図 10. 製作した各部品



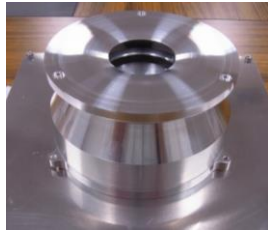
(1) 中殻の下側を、スペーサーを介して保持板上に乗せる。



(2) 内殻を保持板に固定する。



(3) 中殻の上側を取り付ける。



(4) 外殻を保持板に固定する。



(5) コリメータ内リングを取り付けたコリメータ外リングを、スペーサーを介して外殻に固定する。



(6) コリメータ上板を、スペーサーを介して取り付ける。

図 11. 組み立ての順序

4 形状測定結果

内殻のテスト加工を行った加工物を使用し、回転楕円面の母線形状を非接触三次元測定装置（三鷹光器 NH-6、図 12）で測定した。測定機の構造上、測定面の傾斜角度が大きいと測定ができないため、楕円の原点から前後に 8 mm の範囲（傾斜角度が 20° 以下）で、0.5 mm 間隔で測定を行った。図 13 に母線の設計値との誤差を示す。この範囲では形状誤差は 0.01 mm 程度であった。横軸の 0 mm 付近で誤差の変動が大きくなっているが、これは、工具の送り方向が逆転する際の摩擦力の変化や、ボールねじのバックラッシュに起因するものだと考えられる。



図 12. 非接触三次元測定装置
（三鷹光器 NH-6）

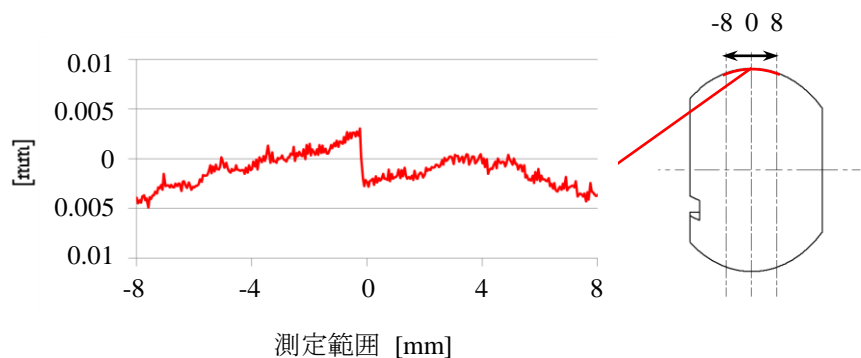


図 13. 母線の設計値との誤差（内殻） [mm]

参考文献

- [1] Kazimierz Jakubczyk, “Approximation of Smooth Planar Curves by Circular Arc Splines”, May 30, 2010 (rev. January 28, 2012)