

電波望遠鏡 NANTEN2 の楕円鏡製作

○大西崇文

教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

南米チリ共和国アタカマ高地にて運用されている電波望遠鏡 NANTEN2 では、全天の 70 % の分子雲分布を調査する NASCO (NANTEN2 Super CO Survey as Legacy) 計画が推進されている。この NASCO 計画では、取得するデータ量が増加するため、観測効率の向上が必要であり、新たな受信機の開発が行われている。これに伴い、電波を反射する鏡のうち、主鏡から数えて 5 番目と 7 番目の楕円鏡 (第 5 鏡、第 7 鏡) の製作を、5 軸マシニングセンターを使用して行った。加工面の形状誤差は第 5 鏡、第 7 鏡ともに 0.01mm 以内であった。この楕円鏡の製作過程および精度評価について報告する。

1 楕円鏡の形状および目標精度

図 1 および図 2 に今回製作した第 5 鏡および第 7 鏡の写真を示す。楕円鏡の大きさは、第 5 鏡が 336×415mm、厚さ 38mm であり、第 7 鏡は 55×75mm、厚さ 15mm を 1 枚、70×90mm、厚さ 17mm を 4 枚製作した。材質はいずれもアルミニウム合金であり、常温で使用する第 5 鏡は A5052、冷却して使用する第 7 鏡は熱伝導率の高い A6063 である。図 3 に鏡面形状を示す。鏡面は図 3 の z 軸を中心として楕円を回転させた回転楕円面となっている。楕円鏡の形状は、設置した際に目標とする場所に受信した電波を反射させるように設計されている。第 7 鏡の回転楕円面の形状は 4 種類あった。

鏡面の形状誤差および表面粗さは反射する電波の波長に依存しており、形状誤差は波長の 20 分の 1、表面粗さはそのさらに 3 分の 1 が目安とされている。製作する楕円鏡で反射する電波の波長は 2.3mm であるため、求められる形状誤差および表面粗さはそれぞれ、約 0.12 mm および 0.04 mm である。ただし、これは最低限満たしている必要のある精度であり、今回はそれよりもさらに 1 桁良い精度を目指して製作を行った。

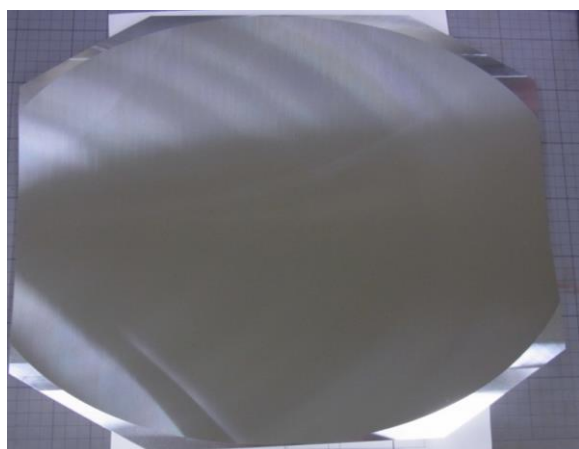


図 1. 製作した第 5 鏡

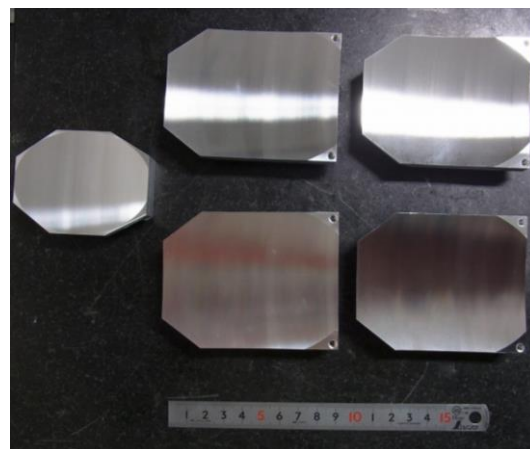
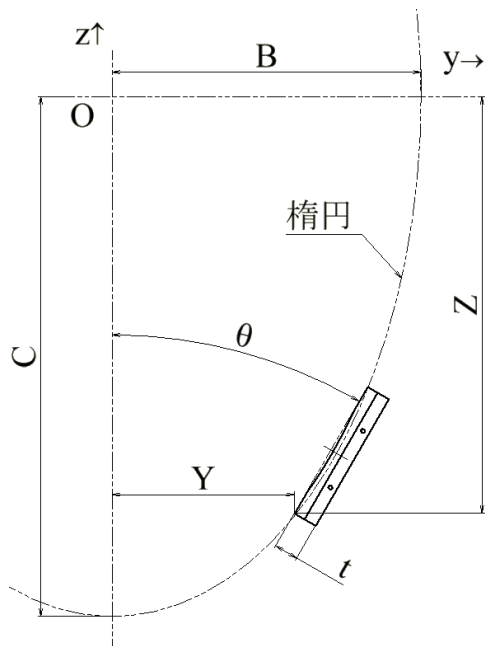


図 2. 製作した第 7 鏡



	第5鏡	第7鏡 No. 1	第7鏡 No. 2, 4	第7鏡 No. 3	第7鏡 No. 5
B[mm]	584.4012	229.8890	190.3784	191.7718	188.8916
C[mm]	860.8463	535.4449	320.0816	320.0816	320.0816
Y[mm]	460.5529	82.1691	112.6277	112.6713	112.5992
Z[mm]	519.1872	499.6918	254.9906	255.4917	254.4550
θ [°]	15.63	39.47	29.19	29.97	28.36
t[mm]	38	15	17	17	17
幅[mm]	338	55	70	70	70
高さ[mm]	415	75	90	90	90
枚数	1	1	2	1	1

図3. 楕円鏡の形状

2 加工

2.1 加工機

加工機は、図4に示す5軸マシニングセンター（ヤマザキマザック社製 VARIAXIS j-500 / 5X）を使用した。VARIAXIS j-500 / 5Xはx、y、z軸の3軸方向の平行移動に加え、xおよびz軸の2軸に対して回転移動（A軸およびC軸）が可能であり、傾斜面や複雑な曲面の加工を行うことができる。表1に VARIAXIS j-500 / 5Xの主な仕様を示す。今回製作した第5鏡の幅は、加工機の限界に近い大きさであった。



図4. VARIAXIS j-500 / 5X

表1. VARIAXIS j-500 / 5Xの主な仕様

X軸移動量	350 mm
Y軸移動量	550 mm
Z軸移動量	510mm
A軸移動量	-120~30°
C軸移動量	360°
最大ワーク寸法	Φ500×350 mm
主軸回転数	35~12000 rpm

2.2 加工プログラムの作成

マシニングセンターによる曲面の加工プログラムの作成にはCAMソフトが一般的によく用いられる。CAMソフトは、3DCADのデータから加工する面の形状を認識して工具の経路を計算し、設定した切削条件に沿った加工プログラムを出力するため、複雑形状の加工には便利である。今回の加工でもCAMソフトに

よる加工プログラムの作成を試みた。しかし、工具経路の細かい設定が困難で、経路に無駄が生じて、加工時間が長くなることと、曲面を微小区間に分割して加工プログラムを作成するため、加工面に図5のような複数の筋が見えてしまうことから、CAMソフトは粗加工にのみ使用することとした。今回の加工面は回転楕円面であるため、加工時に回転楕円面の軸と加工機の軸の向きを一致させるように工作物を固定すれば、楕円に接する位置でボールエンドミルの円弧補間送りを順次繰り返していくことで加工が可能である。したがって、仕上げ加工のプログラムは自作することとし、図3に示した回転楕円面の寸法から仕上げ加工のプログラムを作成した。

図6に自作した加工プログラムでの加工面を示す。図5のような筋は見られなくなったが、中央に1本の筋が見られた。これは象限突起と呼ばれており、円弧補間送りを行う際、送りの向きが逆転するときの摩擦力の変化やボールねじのバックラッシュが原因で発生すると言われている。これを避けるには、円弧補間送りの途中で象限が切り替わらない場所にワークを置いて加工を行う必要がある。第5鏡は大きさに加工時の象限の切り替えを防ぐのは困難であるが、第7鏡に関してはさほど困難ではない。図7は象限が切り替わらない場所で加工した加工面であり、中央の筋がなくなっていることがわかる。

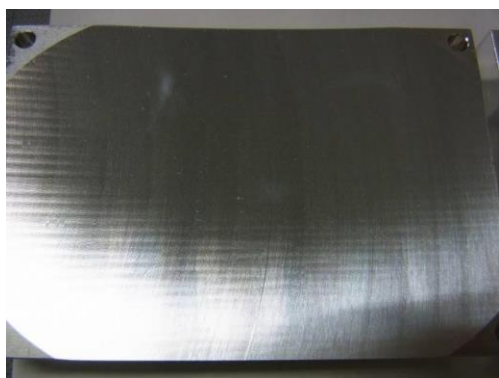


図5. CAMソフトによる加工プログラムの加工面



図6. 自作の加工プログラムの加工面
(中央に筋がある)

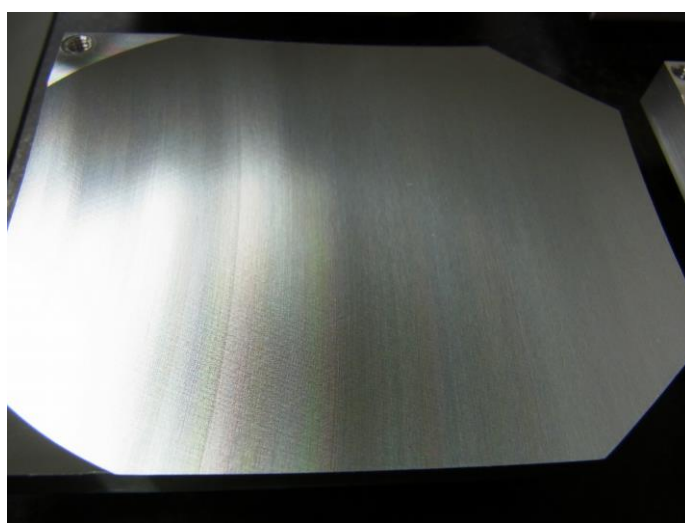


図7. 自作の加工プログラムの仕上げ面 (中央に筋がない)

2.3 加工手順

ワークを固定する際の歪みを少なくするため、ワークにはあらかじめねじ穴を加工しておき、そこに適当な長さにそろえた寸切ボルトを取り付け、テーブルに固定した治具に設けた穴に寸切ボルトを通して下からナットでワークを固定した（図 8）。以下に加工手順を示す。

- (1) 治具の表面をフェイスミルで削る。
- (2) 鏡となる面を上にしてワークを治具に固定し、フェイスミルで削る。
- (3) ワークを取り外した後、裏返して治具に固定し、フェイスミルで削る。
- (4) 鏡の裏側のねじ穴、段等の加工および側面の加工を行う。
- (5) ワークを取り外し、再び鏡となる面を上にして治具に固定する。第 7 鏡の加工では、フェイスミルとボールエンドミルの工具長の誤差による影響を無くすため、ワークを取り付ける前に、仕上げ用のボールエンドミルで治具の表面を加工した。
- (6) スクエアエンドミルで鏡面の粗加工を行う。
- (7) ボールエンドミルによる鏡面の粗加工および仕上げ加工を行う。

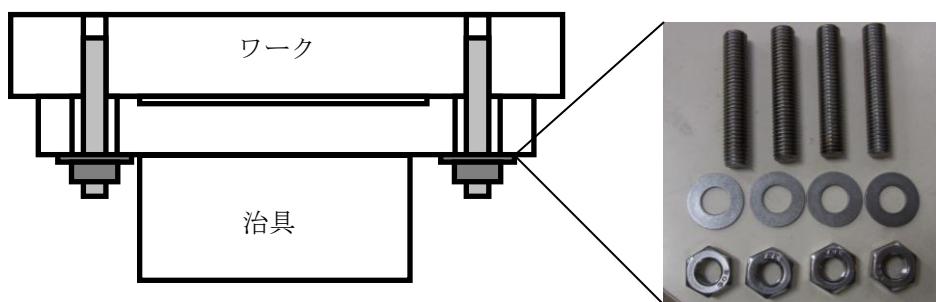


図 8. 寸切ボルトとナットを使用したワークの固定

第 5 鏡および第 7 鏡の仕上げ加工の様子を図 9 および図 10 に示す。第 5 鏡は工具とテーブルの干渉を避けるため、回転楕円面の軸と加工機の軸を y 軸と一致させて、 xz 平面上でボールエンドミルの円弧補間送りを行った。第 7 鏡では傾斜面をもつ治具にワークを固定して回転楕円面の軸と加工機の z 軸を一致させ、 xy 平面上でボールエンドミルの円弧補間送りを行った。加工時には、テーブルを z 軸周りに 45° 回転させて、円弧補間送りの最中に象限が切り替わらないようにした。

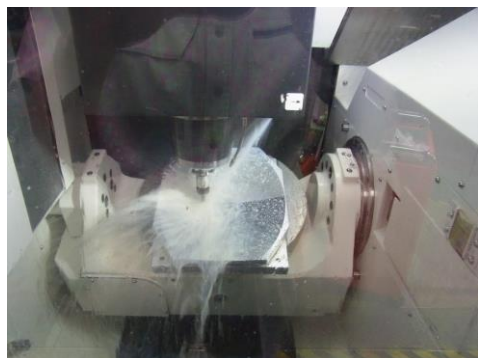


図 9. 第 5 鏡の仕上げ加工

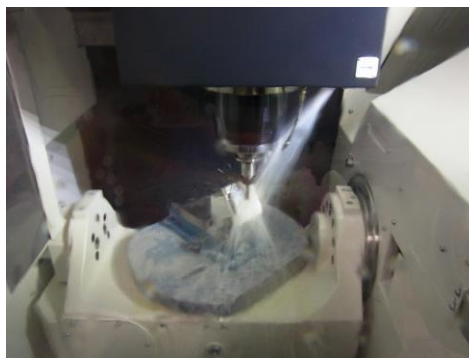


図 10. 第 7 鏡の仕上げ加工

2.4 加工条件および加工面の表面粗さ

表 2 に仕上げ加工の加工条件、表面粗さおよび仕上げ加工時間を示す。第 5 鏡の加工の際の主軸回転数は通常の加工よりも高い値であるが、これはテーブルを傾ける角度が小さく、加工をボールエンドミルの中心近くの速度が小さい部分で行うためである。表面粗さの値は、同じ加工条件でテスト加工を行った際に測定したものである。表面粗さは最大粗さ Rz で数 μm 程度であり、要求精度の約 10 分の 1 であった。

表 2. 仕上げ加工の加工条件、表面粗さおよび加工時間

	第 5 鏡	第 7 鏡
使用工具	超硬ボールエンドミル (R6 ± 0.003mm)	
主軸回転数 [rpm]	10,000	5,000
送り速度 [mm / min]	2,500	700
切り込み [mm]	0.05	0.05
工具経路の間隔 [mm]	0.15	0.1
切削液	水溶性切削液	
加工時間	7 時間 15 分	1 時間 5 分、2 時間 5 分
送り方向の 表面粗さ [μm] (n = 3)	Rz = 1.671 ± 0.465 Ra = 0.227 ± 0.106	Rz = 0.822 ± 0.465 Ra = 0.136 ± 0.003
送りと垂直方向の 表面粗さ [μm] (n = 3)	Rz = 2.450 ± 0.281 Ra = 0.326 ± 0.023	Rz = 1.380 ± 0.140 Ra = 0.192 ± 0.007

3 形状測定結果

加工後の鏡面形状の測定には、非接触三次元測定装置（三鷹光器社製 NH-6 図 11）を使用した。図 12 は第 5 鏡の中心から縦と横方向に 1mm 間隔で高さを測定し、形状誤差を示したものである。第 5 鏡は周縁部の傾斜角度が大きく、今回使用した測定器では構造上、測定を行うことができないため、縦横 2 方向のみの測定とした。図 13 は端から 10mm を除く範囲で、1mm 間隔の格子状に第 7 鏡の高さを計測し、形状誤差を示したものである。形状誤差は第 5 鏡、第 7 鏡いずれも 0.01mm 以下であった。第 7 鏡で周縁部に形状誤差が大きい領域があるが、これはワークを固定する際に歪が生じていたことが原因だと考えられる。

4 まとめ

5 軸マシニングセンターを使用して、電波望遠鏡 NANTEN2 における NASCO 計画用受信機の開発に関する楕円鏡の製作を行った。鏡面の表面粗さ Rz は数 μm 、形状誤差は 0.01mm 以内であり、研究者から求められた精度を十分満たすものであった。さらに精度の向上を目指すためには、加工機の温度管理やワークの歪を減らす固定方法等の対策をとる必要があると考えている。



図 11. 非接触三次元測定装置
(三鷹光器社製 NH-6)

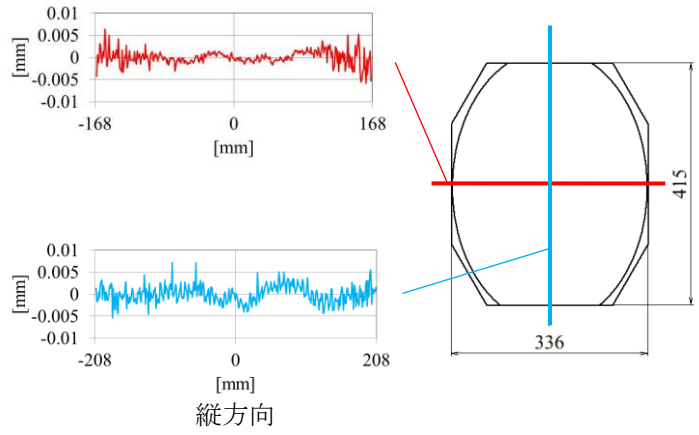


図 12. 第 5 鏡の形状誤差

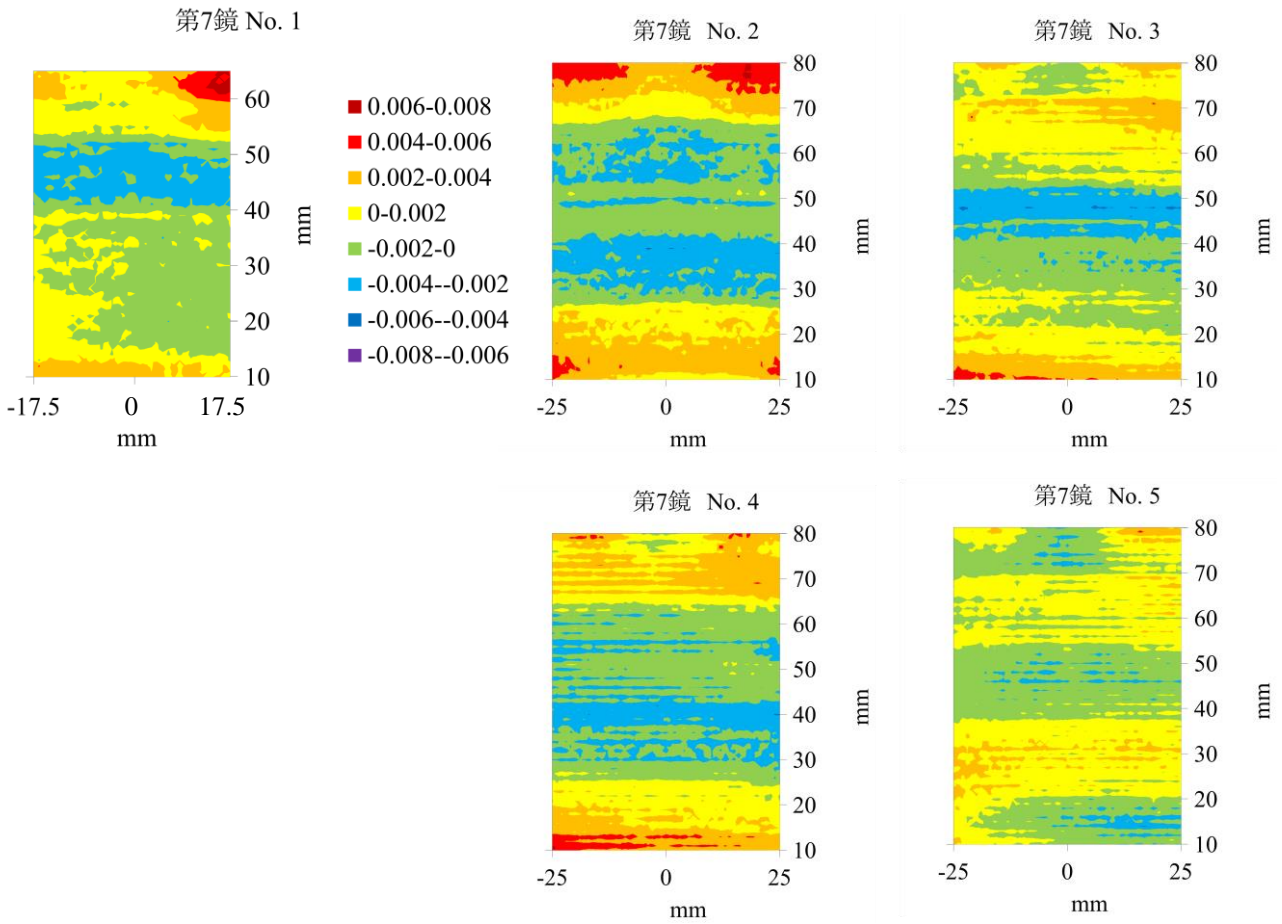


図 13. 第 7 鏡の形状誤差