

超精密加工機 ULG-300 における高負荷加工時の動作異常について

○三ツ井健司（先端技術センター）

概要

国立天文台先端技術センターMEショップでは超精密加工機を用いて各開発、実験への支援を行っている。109 素子シリコン(Si)レンズアレイの加工中に発生した動作異常を検証することで、過負荷によるエラーは出ないが加工軌道のズレが発生する領域が存在すると、判明した。これにより仕様書などだけでは知りえない、より深い階層での特性を理解するに至った。

1. 超精密加工機 ULG-300

先端技術センターMEショップ所有の超精密加工機の外観を図.1に示す。導入は15年以上前であるが、繰り返し位置決め精度 50nm、最小駆動単位 1nm である。これによりアルミ合金を切削加工のみで鏡面に仕上げることができる。



図.1 超精密加工機 ULG-300 外観

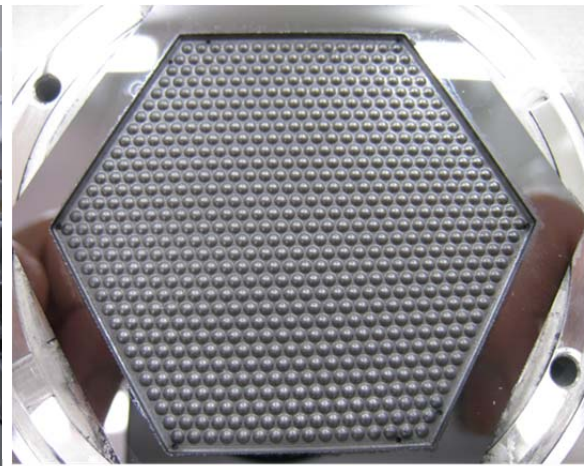


図.2 721 素子 Si レンズアレイ (過去の作品)

2. 本来加工しようとしていた製品 (109 素子 Si レンズアレイ)

Si レンズアレイは高純度多結晶シリコンを材料とし、半球状のレンズを細密に並べたアレイ形状である。これを単一の素材からミーリング加工によって削り出し一体のアレイ形状に成型した。

レンズのサイズと素子数は観測周波数と焦点面サイズによって決まってくるが、今回は 109 素子版を作製していた。図.2 は 2013 年度に作製した 721 素子版であり、製作期間 3 週間、総加工時間 70 時間であった。そこで時間短縮を目指し、より高負荷の加工に挑戦中したところ動作異常が発生した。

3. 動作異常の経緯

今回の動作異常の発生と原因究明に至る経緯を以下に示す。

(1) 動作異常の発生 : Si レンズアレイの六角溝の繰り返し加工中、加工軌跡がズレるという異常が発生した。加工プログラムの不備や操作中の人為的ミスの可能性があったため、同じ条件で再挑戦した

ところ再現した。図.3-1 は正常に動作していた段階で、図.3-2 は動作異常が起きた時の写真である。

(2) メーカーによる診断と対処：メーカーによる検査の結果、機械本体および制御系において異常や経年劣化などは確認されなかった。処置として制御系ソフトを最新版に改版した。

(3) 検証加工一度目：アルミ素材のダミーサンプルによる検証加工を行ったが動作異常の再現は見られず、一旦通常運用に復帰した。

(4) 動作異常の再発：通常運用への復帰から約半年後、Si レンズアレイの加工に再挑戦した際に同様の動作異常が再発した。

(5) 検証加工二度目：Si を使った検証加工を行ったところ図.4 の様に症状の再発が確認され、原因の一端を究明するに至った。

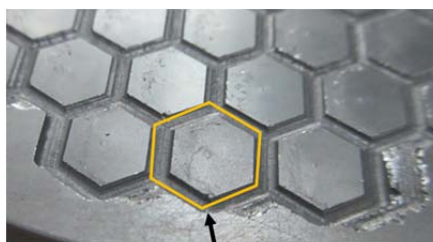
また、上記のどの段階においても加工機械より過負荷などのエラー信号は発せられなかった。



図.3-1 正常時



図.3-2 初めの動作異常時



本来加工したかった正六角形

図.4 検証により動作異常が再現したサンプル

4. 検証加工

動作異常の原因究明のため、二度にわたって検証加工を行った。

一度目の検証加工では、加工機械の故障を疑っていた段階であり、調達の手やすさからアルミ板を使用した。Si レンズアレイ作製時と同様の加工条件で二週間以上継続したが、異常は一度も起きなかったため故障ではないと判断し、通常運用に復帰した。

二度目の検証加工では、加工抵抗が影響していると考え Si レンズアレイと同じシリコンにて検証を行ったところ、動作異常が再現できた。

検証加工での加工条件は以下の通りである。

回転数：40000rpm、 送り：120mm/min、 切込深さ：50 μ m、 繰返し数：8回

5. 検証結果

一度目の検証加工では特に異常は見られなかったが、二度目の検証加工では動作異常が再現できたので、溝の断面測定を行った。また、動作異常前後で機械座標に異常がないか調べるため座標測定を行った。測定には非接触三次元測定機 NH-3（三鷹光器）を使用した。

5.1 断面測定

図.5 に加工終了付近の溝の拡大と模式図を示す。

本来であれば図.5 右上の模式図のように同じ位置で深さを増していくが、実際は深さを増すごとに加工位置がズレていっていることが分かる。この時のズレ量は 552 μ m であった。

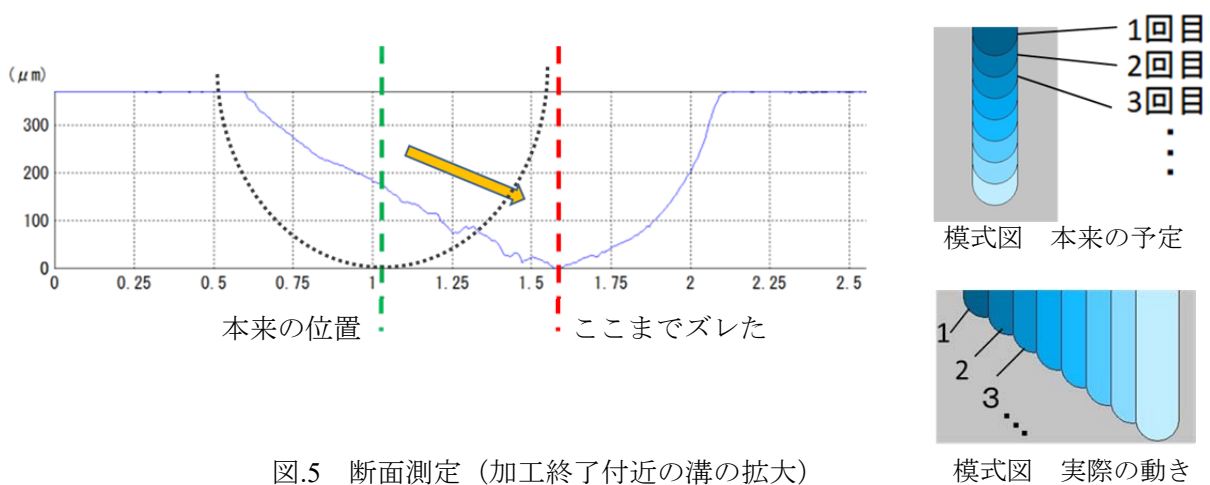


図.5 断面測定（加工終了付近の溝の拡大）

5.2 座標測定

図.6 に座標測定の測定位置の模式図を示す。また、表.1 に座標測定結果を示す。表中の測定点“中央”と“右”は動作異常発生前にあらかじめ傷をつけておいた位置であり、測定点“左”は動作異常後に傷をつけた位置である。加工後につけた傷は目標値より 631 μ m の誤差があった。

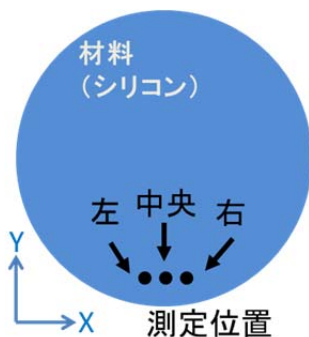


図.6 座標測定模式図

表.1 座標測定結果

測定点	測定値 [μ m]		目標値 [μ m]		目標値との差分 [μ m]	
	X	Y	X	Y	X	Y
中央	-8.5	-36997.5	0.0	-37000	8.5	-2.5
右	992.6	-36996.9	1000.0	-37000	7.4	-3.1
左	-368.8	-36997.6	-1000.0	-37000	-631.2	-2.4

※測定時の座標原点は材料の中心

5.3 ズレ量の推定

座標測定において加工後につけた傷は 631 μ m の目標値との差があったが、断面測定での加工終了付

近のズレ推定量 $552\mu\text{m}$ と比較しても、さらに $79\mu\text{m}$ の開きがある。

この検証加工では8回の繰返し運転を行ったが、一回目はズレないため、合計7回座標がズレたことになる。断面測定での $552\mu\text{m}$ は7回分であるから

$$552 \div 7 = 78.9 [\mu\text{m}]$$

となり、一回当たりのズレ量と合致する。よって、一回当たりのズレ量は約 $79\mu\text{m}$ であり、今後も繰り返すと同じピッチでさらにズレていくと推定される。

6. 考察

前項において動作異常発生時における座標の狂いは一回当たり $79\mu\text{m}$ と推定されたが、通常これほどの誤差が生じれば加工機からエラー信号が発せられるはずである。しかし、今回の動作異常発生時には一度もエラーは出ていない。これは超精密加工機の位置制御に起因しているのではないかと推察できる。

超精密加工機は常に位置制御をかけ続けており、内蔵のスケールと指令位置との差を読み取り、復元する方向に常に微小な移動を繰り返している。完全に指令値と一致することはないので、常に“行き過ぎる”と“戻す”を繰り返し、振動している。これは暗振動と呼ばれている。

今回の加工ではある方向への溝加工が明らかに多かった、かつ高負荷であったため、ある方向への軸ズレが大量に発生していた。よって、常にその逆方向に戻すための信号が出されており、それが飽和することで今回のような現象が起きたのではないかと推察している。

このことは技術資料としてメーカーに提出し、問い合わせ中である

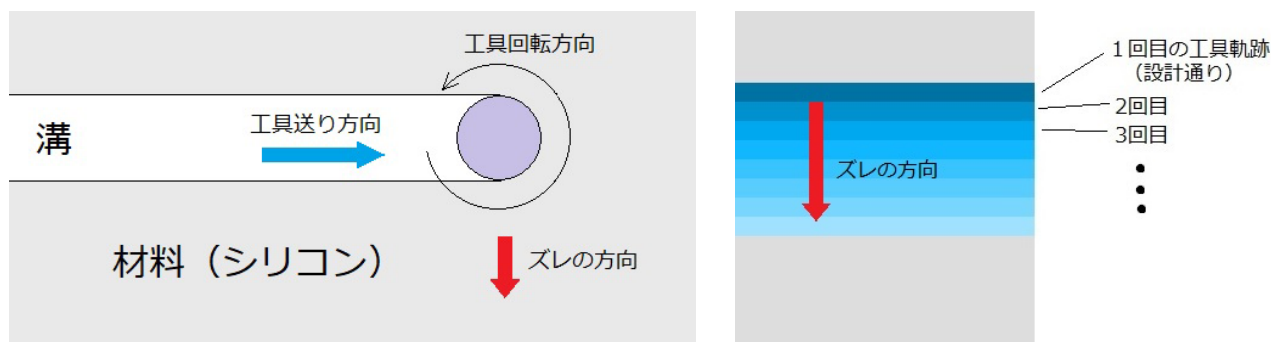


図.7 工具軌跡のズレの方向

7. まとめ

超精密加工機 ULG-300 を用いた加工において材料、工具、加工条件の組み合わせによっては過負荷によるエラーは出ないが脱調のような動作異常が発生する領域が存在することが判明した。これはこの機械の特性であり、特に長時間繰り返すことで顕著にあらわれる。

加工負荷を軽減することでこの動作異常を回避できる。

回転数 40000rpm 、送り速度 120mm/min 、切込量 $50\mu\text{m}$ の加工条件で材料は多結晶シリコン、一回の加工パスは15分で加工方向に大きな偏りがある場合、脱調のズレ量は一回当たり約 $79\mu\text{m}$ と推察された。