

数値制御プラズマ CVM 加工による中性子顕微鏡用高精度 Wolter ミラーマンドレルの作製

大阪大学大学院工学研究科附属超精密科学研究センター ○荒川翔平, 小林勇輝, 遠藤勝義, ◎山村和也
 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 山崎大, 丸山龍治, 曾山和彦
 総合科学研究機構東海事業センター CROSS 東海 林田洋寿

要 旨

中性子ミラーのマンドレル作製に PCVM が適用可能かを検討した。プラズマ加工時の表面温度の上昇傾向を把握するために、円柱試料に PCVM 加工を行った。単位加工溝形状の取得後、1 軸走査加工を行い NC-PCVM に適用可能かを評価した。また NC-PCVM 加工によって最大高さ $1.4 \mu\text{m}$ の楕円筒形状を作製した。加工量誤差が 25 % 程度生じたが、加工速度の補正後の再実験では、6.1% に低減できた。その際の形状誤差は $0.23 \mu\text{m p-v}$ でサブミクロンオーダの形状精度を達成した。

1. 緒 言

中性子線を用いた測定は、X 線や電子線による解析では不可能な、軽元素や同位体の識別、試料内部の観察や磁性体材料の分析が可能である¹⁾。しかし、現状の中性子線の強度は X 線等と比べて極端に弱いため、解析に多大な時間を要してしまう。そこで我々は中性子源からの中性子線を全反射現象により集光し、強度を増強する Wolter I 型スーパーミラーの開発に取り組んでいる。Wolter I 型ミラーは、筒状の内面反射鏡であるために直接加工によって形状を作製することが困難である。このため、本研究では、Fig.1 に示すようなプロセスで NC-PCVM (Numerical Controlled Plasma Chemical Vaporization Machining) による加工を合成石英製の円柱試料に適用し、マンドレルを作製する。ミラーの集光性能はマン

ドレルの形状精度に大きく依存するために、形状精度が $0.1 \mu\text{m p-v}$ 以下で作製することを目標としている。その後マンドレルにスーパーミラーを成膜し、離型することで自立型のスーパーミラーを作製する²⁾。本報では、合成石英製の円柱試料に対して PCVM 加工を行った。まず 1 軸走査を行わない状態で、試料を回転させて単位加工溝形状を取得した。次に 1 軸走査加工をした際の表面温度を測定した。その結果を踏まえて NC-PCVM 加工時に用いる単位加工溝の加工溝として適切であるかを評価した。また合成石英製円柱材料に対して NC-PCVM 加工によって楕円筒形状を作製した結果を報告する。

2. 実験方法

PCVM で石英ガラス(SiO_2)を加工する場合、Fig. 2 に示すようにマイクロ波電界により発生させた Ar プラズマ中で CF_4 ガスを解離させて F ラジカルを生成、反応させて揮発性の SiF_4 となる化学反応を利用して除去加工を行う。Fig. 3 に示すように目的形状と単位時間あたりの体積加工量から計算されるプラズマの滞在時間分布に従い、マイクロ波加工プラズマヘッド (長野日本無線: NJZ-2925) を NC 走査することで、決定論的に目的形状を作製できる。

一方で、化学反応を利用した加工法であるため、加工点の表面温度が高くなるほど加工速度は増加し、表面温度による影響を補正する必要がある。合成石英製の円柱試料に対して加工前後の形状を非接触三次元形状測定機 (三鷹光器: NH-5N) で測定した。また一軸走査時の表面温度の変化をサーモグラフィカメラ (FLIR Systems: T650sc) により測定し、それらを評価した。Table 1 に加工条件を示す。

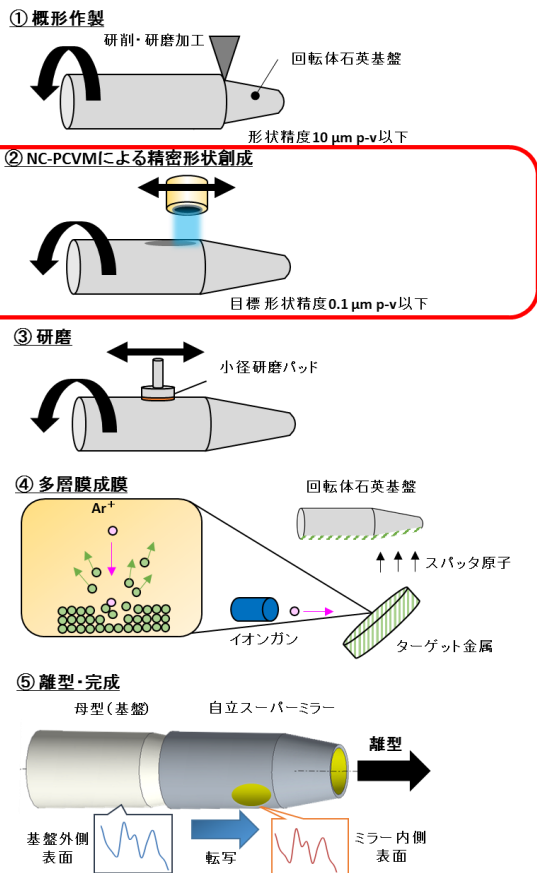


Fig. 1. 自立型 Wolter I 型スーパーミラー作製プロセス

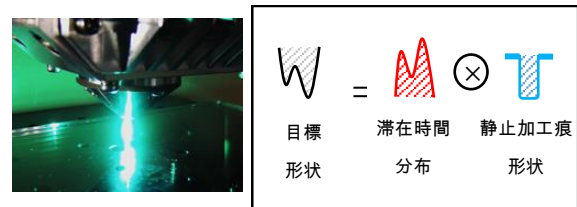


Fig. 2. プラズマの様子 Fig. 3. 走査速度分布計算方法

Table 1 PCVM における加工条件

投入電力 (W)	67.8
キャリア Ar ガス流量 (ml/min)	300
プロセス Ar ガス流量 (ml/min)	1000
CF_4 ガス流量 (ml/min)	150
加工ギャップ (mm)	5.2

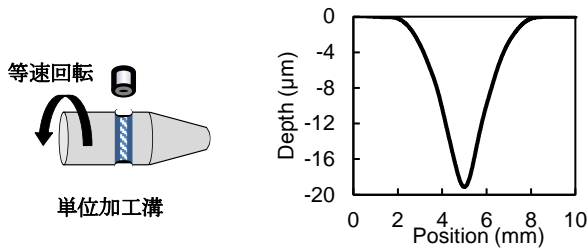


Fig. 4. 単位加工溝

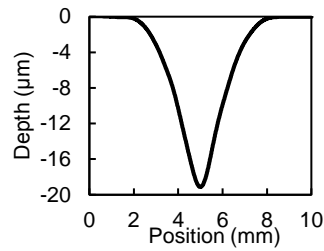


Fig. 5. 単位加工溝形状

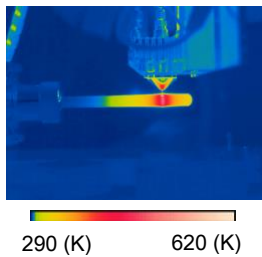


Fig. 6. 温度測定の様子

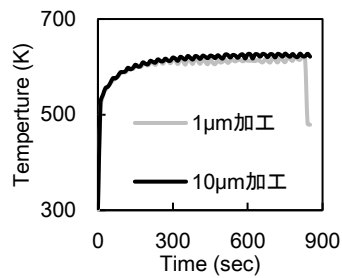


Fig. 7. 1軸走査における表面温度の変化

3. 結果と考察

Fig. 4. に一軸走査を行わずに、試料を回転させながら PCVM 加工を行うことで加工溝形状を作製する様子を示す。Fig.5. に PCVM 加工によって作製した加工溝形状の結果を示す。加工時間 40 min の PCVM 加工を行い最大加工深さ 19.1 μm の単位加工溝形状が得られた。次に Fig. 6. に円柱試料の加工深さを 1 μm と 10 μm に設定して 1 軸走査加工をした際の表面を測定した際の様子を示す。Fig. 7. にそれぞれの表面温度の変化の結果を示す。加工時間はそれぞれ 13 min 及び 130 min で、この時の走査速度はそれぞれ 1.73 mm/min と 0.16 mm/min であった。本実験は粗加工用の条件として 10 μm の加工量、精密修正用の条件として 1 μm の加工量を模擬している。本結果より 600 sec 後には試料表面の温度が十分に飽和しており、NC 制御による PCVM 加工時における表面温度は飽和した温度に達することが確認できた。これらの条件を満たす単位加工溝形状として加工時間 40 min のものを選定した。

Fig. 5. で取得した単位加工溝形状を用いて Table 1 の加工条件で NC 制御を行い最大高さ 1.4 μm の楕円形状を作製した際の加工量誤差を Fig. 8. に示す。1 回目と 2 回目ではいずれも 25 % 程度、設定加工量より多く加工されている。そこで 3 回目はシミュレーションに用いる単位加工溝形状分布を Fig. 5. で得られたものに対して 1 回目と 2 回目の加工における増加分の平均値として 24.8 % 増加させる補正を行い、得られた走査速度分布を適用して形状加工を行った。その結果、加工量誤差は -6.1 % と大幅に低減できた。補正の精度を向上させることで加工量誤差はさらに低減することが期待できる。また設定加工量との誤差が生じる原因に関して考察した。本実験で単位加工溝として用いた加工溝形状は加工時間 40 min の試料の表面温度が十分に飽和状態になったものを用いたが、加工開始から 600 sec 以下の温度が飽和していない時点での加工量も含まれるために設定加工量と実加工量に 20~25 % のズレが生じたと考えられる。

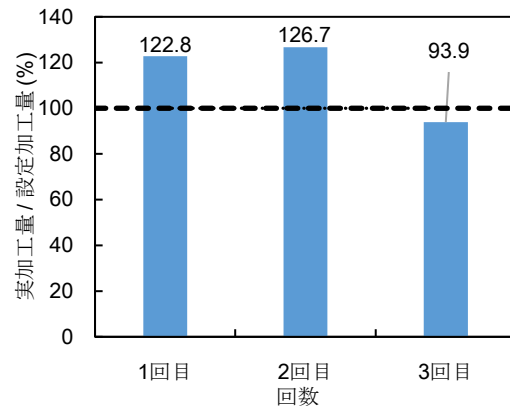


Fig. 8. 実加工量 / 設定加工量

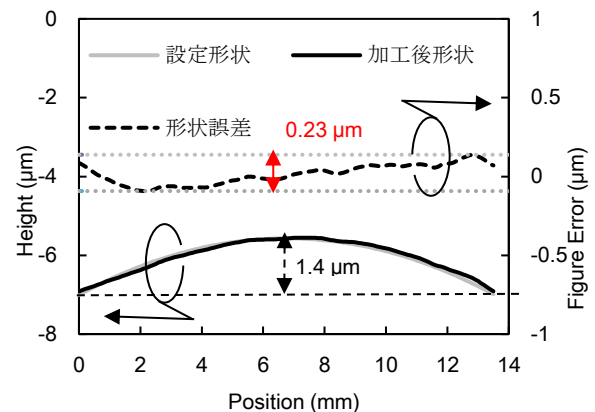


Fig. 9. NC 制御 PCVM による形状創成の結果

Fig.9. に補正した単位加工溝を用いて、NC-PCVM による形状創成加工を行ったときの設定形状、加工後形状、形状誤差を示す。設定形状と比較した時の形状誤差は 0.23 μm p-v となりサブミクロンオーダーの形状精度が得られた。最大加工深さは 2.45 μm であることから絶対加工量に対して 9.38 % 程度の形状誤差であった。以上の結果から測定と修正加工を繰り返すことで目標精度の 0.1 μm p-v は達成可能な見通しを得た。

4. 結言

中性子集光用の Wolter ミラーマンドレルの作製を目的として、合成石英製の円柱試料に対し PCVM 加工を行った。単位加工溝形状の取得後、1 軸走査加工時の温度を測定し、NC 制御に用いる単位加工溝として適用可能かを評価した。適切な加工溝を用いた NC 制御によって楕円形状を創成したが、設定加工量に対して 25 % 程度の誤差が確認された。これは、単位加工溝形状は温度が飽和していない時点の加工形状も含んでいるためと考えられる。また加工速度の補正を行った後、再実験をした結果、加工量誤差は -6.1 % に低減できた。なお本稿の実験の実施および実験結果の解析は登壇者が担当した。

参考文献

- 1) D. Liu, *et al.*, Nat. Commun. **4** (2013) 2556.
- 2) 小林勇輝 他, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2017) 973-974.