

超精密非球面加工機用機上計測システム

On-machine Measuring System for Ultra Precision Aspheric Generator

キーワード

非球面、機上計測、補正加工、静圧軸受、エアスライドプローブ

精機製造所技術部

藪谷 誠

1. はじめに

不二越では、1988年より形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 以下の、非球面光学素子、およびその金型の加工を目的とした超精密非球面加工機 ASP-15 の販売を開始し、現在に至っている。加工精度に関して、各ユーザより高い評価をいただいている一方、機能面において機上での加工物の形状測定評価ができないかとの要望が強かった。

1996年には非球面光学素子に加えて、自由曲面光学素子の加工を可能にした、ASP-30へと進歩をとげるとともに、以前からの要望であった機上計測システムを開発した。

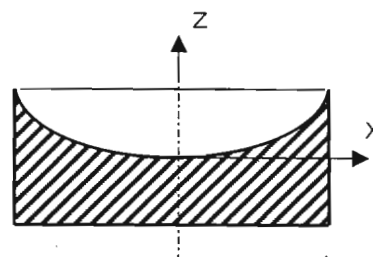
本稿では、開発した機上計測システムの非球面加工への適用に絞って紹介する。

このシステムの開発によって、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のレベルでのワーク形状精度の機上測定評価はもとより、ワークの形状誤差を補正するための、再加工 NC プログラムの自動作成が可能になった。

2. 非球面とは

非球面とは、球面でないということであるが、ここでいう非球面とは断面が図1で示すようなツェルニケの多項式と呼ばれる式で表現される形状である。非球面形状のレンズやミラー等の光学素子は、一般的な球面形状の光学素子に比べて性能的に優れており、様々な光学部品に適用されつつある。図2にASP-30の外観を、図3に非球面加工時に使用する軸構成を示す。非球面加工は、ろくろの上で、陶器を形作る作業と良く似ている。X、Z軸スライドテーブルの同時制御により形成された、様々な工具とワー

クとの相対変位（陶工の手の動き）を、ワークスピンドル（ろくろ）の回転によってワーク全面に展開することで行われる。ワークの材質に応じて、切削加工にも研削加工にも対応可能であり、切削加工の場合の工具はR形状バイト、研削加工の場合の工具はR形状の砥石となる。



$$Z = \frac{CX}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2 X^2}} + A_1 X^2 + A_2 X^4 + A_3 X^6 \dots$$

図1 非球面多項式

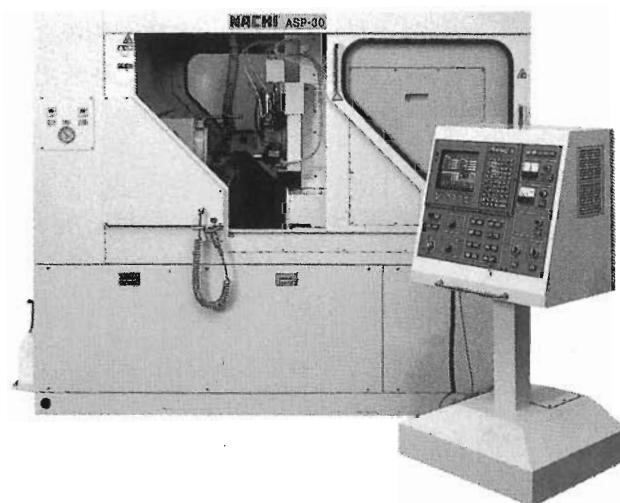


図2 ASP-30の外観

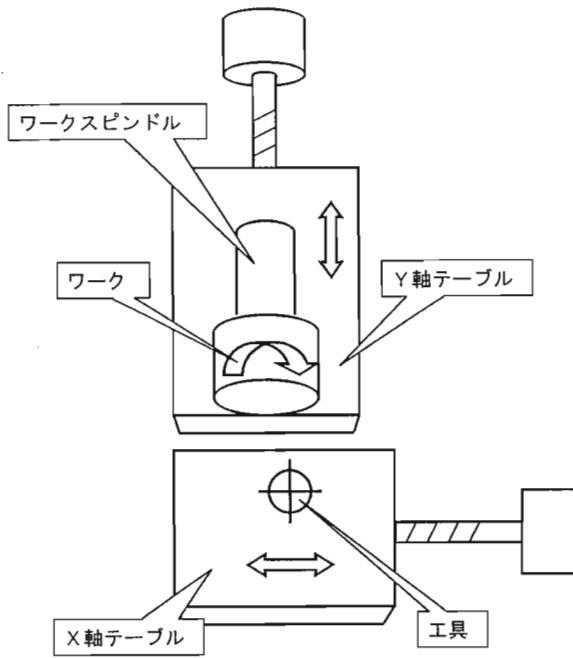


図3 非球面加工時軸構成

3. 高精度化のポイント

非球面加工において、形状精度に悪影響を及ぼす要因としては、次のようなものがあげられる。

- (1) 加工機の機械精度誤差
(例えばスライドテーブルの真直度誤差)
- (2) X軸加工原点のずれ
(X軸の加工原点と、ワークスピンドルの中心の不一致による誤差)
- (3) 工具の真円度誤差
(工具とワークの接触位置が変化するために、工具の形状誤差がワークに転写される)
- (4) 工具径の測定誤差
- (5) ワークの外周部と中心部とでの加工条件の差異

非球面加工用のNCプログラムは、非球面曲線をその上の無数の座標に分割し、それらを直線補間でつなぎ、近似表現している。再現性の高い誤差に関しては、これらの座標を補正して再加工することで、形状誤差が縮減でき、高精度化が図れる。

一般的には、前記2)~5)項の誤差要因は、すべて再現性が高く、機械精度誤差の再現性の高さこそが、補正加工が実現できるかどうかの重要なポイントとなる。不二越機の特長の一つとして、スライドテーブル、送りねじ、ワークスピンドル等の要素すべてを、静圧軸受で構成していることがあげられる。静圧軸受は高压流体を介して非接触で可動体を支持し、機械的接触による不確定な挙動が無いために、真直

度や回転精度などの機械精度と、その繰り返し再現性が非常に高く、確実な補正加工を実現するには必要不可欠な要素といえる。

4. 従来のワーク形状測定

従来のワーク形状測定は、機外の測定機で行っていたため、以下にあげるような問題点があった。

- (1) 機外の測定器にワークをセットする場合は、厳密なアライメントが必要
(アライメントの誤差は、形状測定の誤差となる)
- (2) 測定のための、ワーク取り付け取り外しの手間が増加
- (3) ワークの再取り付け誤差分を補正加工時に除去するためのロスタイム
(とくに、研削加工の場合は1パス当たりの加工時間が長く無視できない時間となる)

以下、これらの問題を解決するために、今回開発した非球面機上計測システムを紹介する。

5. 非球面機上計測システム

5.1 構成

図4に機上計測システムの構成図を示す。機上計測システムは、ワーク形状を測定するプローブ、プローブを搭載するステージ、及び測定データを解析するパソコンと形状解析ソフト(NA-OMM)で構成される。パソコンは非球面加工プログラムの作成ソフト(NA-CAM)でも使用するため、機上計測システムとして追加が必要なハードウェアは少なく、シンプルなシステムといえる。

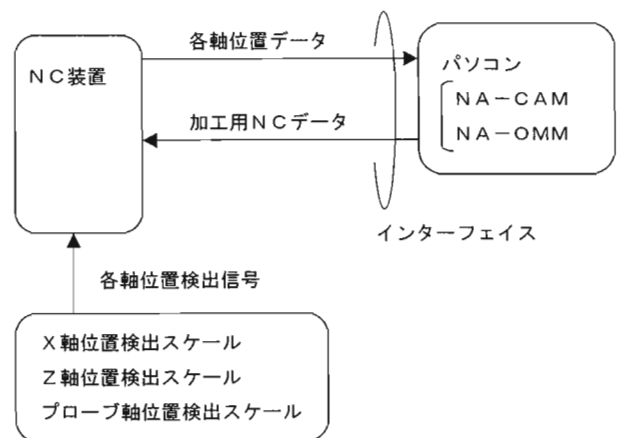


図4 機上測定システムの構成

5.2 測定評価項目

ワーク形状誤差の P-V 値、ツェルニケの多項式の 1/C に相当する近軸曲率半径推定値、X 軸加工原点ずれ量（心ずれ量）を評価しプリントアウトできる。また、解析処理前の測定データ（ワーク表面の座標データ）、解析処理後の形状誤差データはアスキー形式のファイルとしても出力でき、ユーザでの自由なデータ処理が可能である。

5.3 操作フロー

システムの操作フローを図 5 に示す。

大きな作業の流れとしては、以下のようになる。

- (1) 設計非球面式を非球面 NC プログラム作成ソフト (NA-CAM) に入力し、一次加工を行う
- (2) 加工後、機上計測を行い、ワークの断面形状データを取り込む
- (3) 取り込んだデータを NA-OMM で解析する

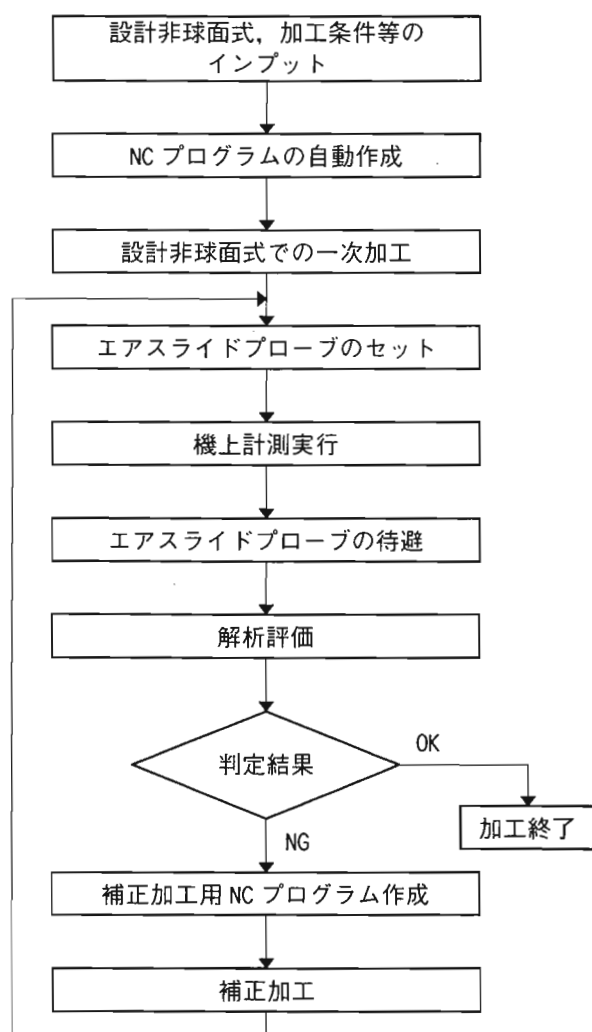


図 5 機上計測装置の操作フロー

- (4) 必要があれば、1 項で作成した非球面加工プログラムを補正し、再加工する

それぞれの作業は、マニュアルに沿って行えるような NC 装置やパソコンの操作であり、作業者の資質によって、得られる結果が左右されるということは少ない。

5.4 測定中の軸動作

測定中は微い制御により、エアスライドプローブが変位しないように Z 軸が自動的に追従制御されるために、エアスライドプローブのストロークに左右されない広い測定レンジを得ることができる。

X, Z 軸テーブルと、プローブ位置検出信号は同時に NC 装置に取り込まれ、Z 方向は Z 軸テーブルとプローブからの位置信号を加えあわせてプローブ先端の位置データとする。そのため、スライドテーブルの位置決め精度に左右されない、高い測定精度が得られる。また、測定中の位置データは、インターフェイスを介して、自動的にパソコンのハードディスクに保存される。

5.5 エアスライドプローブ

エアスライドプローブの概観を図 6 に示す。エアスライドの採用により、プローブシャフトはヒステリシスの無い滑らかな動きを実現している。

プローブシャフトの変位を読み取るために後端に光学式スケールを取り付けている。測定中の熱変位による測定誤差を少なくするために、シャフトの材質は低熱膨張材であるスーパインバを使用している。プローブ先端にはルビー球が接着されており、これがワークの表面をトレースする。プローブ先端部はネジで固定されており、容易にルビー球が交換できるようにになっている。プローブへの予圧にはコイル

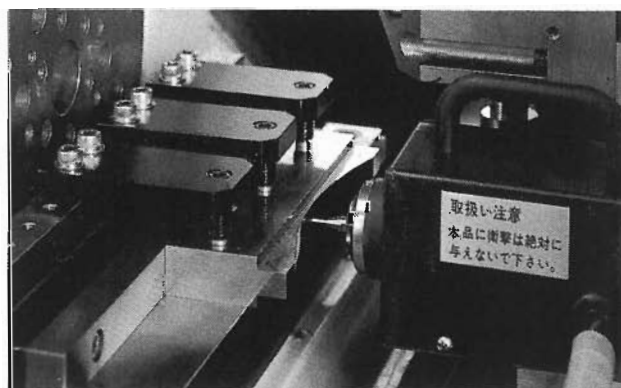


図 6 エアスライドプローブの概観

バネを使用しており、数十 mg の触針圧が得られるように設計されている。コイルバネを使用しているため、プローブのストローク位置によって予圧荷重は変化するが、測定中は微い測定を行っているために、プローブは変位せず、測定中の予圧変化を抑えることができる。

5.6 プローブ校正

測定時に得られる生データ（各軸の座標データ）は、ルビー球の中心軌跡であり、ルビー球の絶対 R 値だけオフセットされている。生データをワーク表面形状データに変換するためには、ルビー球の正確な絶対 R 値が必要になるが、NA-OMM ではあらかじめ絶対 R 値が高精度に検定された校正用のマスタ球を測定して、ルビー球の絶対 R 値を評価できるようになっている。また、校正測定時の測定形状誤差をルビー球の形状誤差として保存しておき、測定データからその形状誤差分を除去する機能も持っている。

5.7 プローブ搭載ステージ

プローブ本体をワーク加工時に待避するとともに、上下方向の測定心ずれ調整するためのステージである。

一般的に、加工時と同一条件を再現するために、測定時にはプローブ本体を、工具付近に設置することが望ましいが、これでは加工時にプローブが邪魔になってしまう。そこで、この搭載ステージを使って加工時にはプローブ本体を待避させる。ここでも微い制御の効果によって、測定時はプローブのストローク位置がいつも一定となるので、プローブ再セット時のアライメント誤差によるコサインエラーは考慮する必要がない。

6. 測定例

本機上計測システムを使って真鍮材を非球面切削加工した例を紹介する。図7は設計非球面式での一次加工結果、図8は機上計測結果をフィードバックして補正加工した結果である。

一次加工では、X 軸の加工原点ずれや、工具の真円度誤差によるものと思われるうねりが見られるが、補正後はこれらのうねりがキャンセルされ、形状誤差が $0.2\mu\text{m}$ から $0.09\mu\text{m}$ に改善されている。

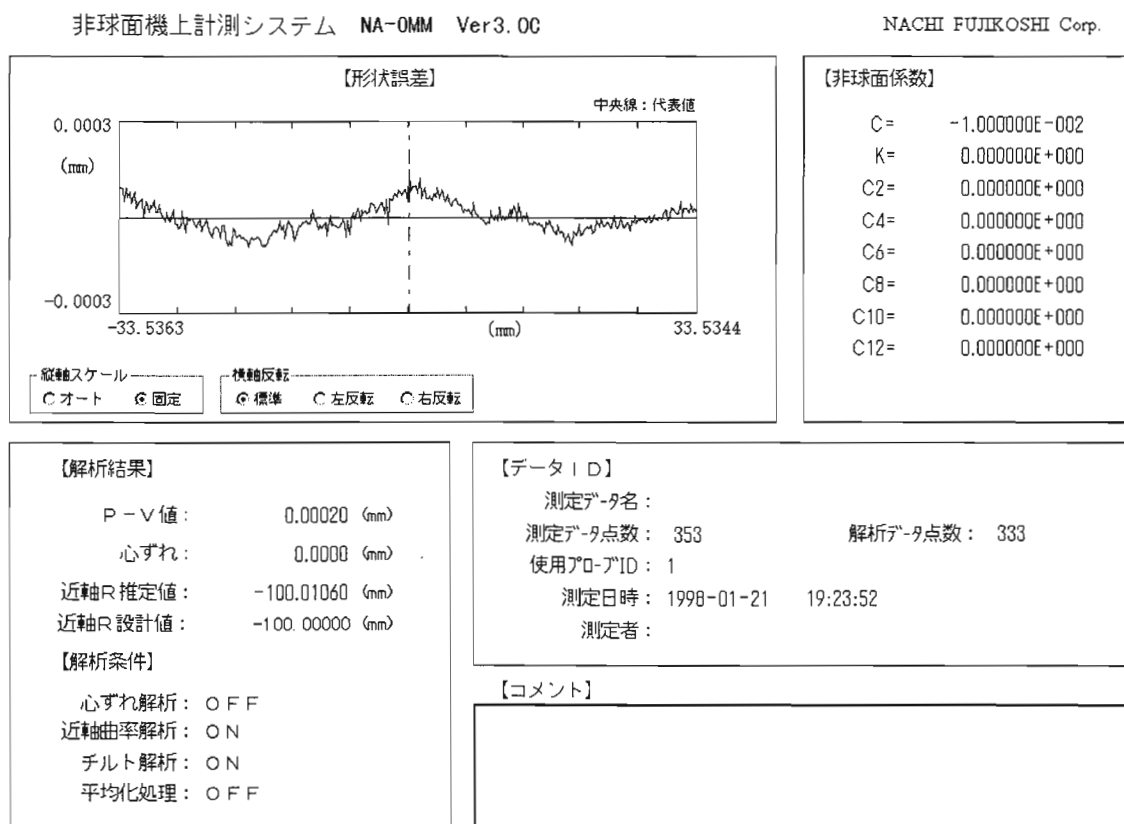


図7 設計非球面での1次加工結果

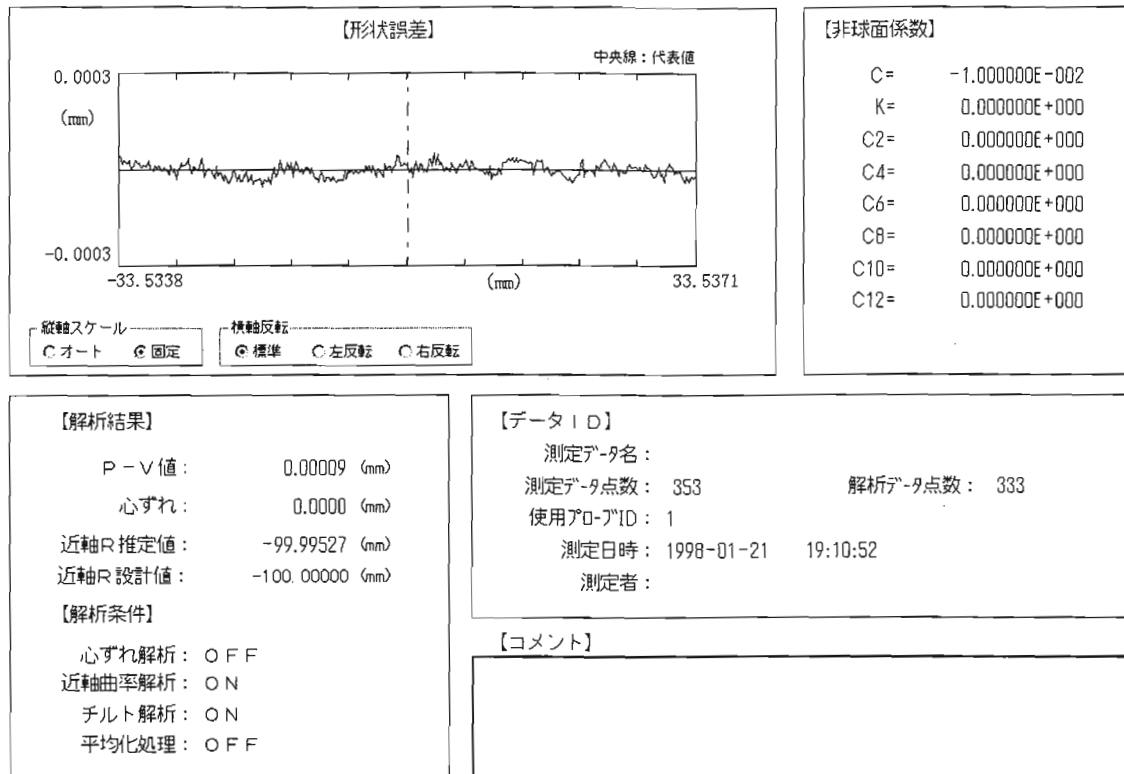


図8 補正加工結果

7. おわりに

非球面加工において、機上計測技術が非常に重要でありメリットも大きいことは、非球面加工機を開発した当初から明らかであったが、ここに来てようやく、コンピュータやセンサ等の周辺技術の進歩によって、不二越独自の機上計測装置が確立できたといえる。

超精密加工の分野は、作業者の熟練度や資質によるアウトプットの差異が、とかく問題となるが、本機上計測装置に関しては、作業のレベルには関係のない、しかも高精度なアウトプットが期待でき、今後この分野における作業の標準化に貢献できるものと期待する。