

GLC X-BAND TECHNICAL NOTE

Estimation of Dimples due to Precise Measurement by CMM on Copper Parts

Y. Watanabe, T. Kume, Y. Higashi, T. Higo and T. Takatomi

* KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

We have been measuring disks of X-band accelerator structure using 3D coordinate measuring machine, CMM. Disks are made of oxygen-free copper and diamond turned after annealing. Then their relevant dimensions are measured by CMM. During this measurement, the probe sinks into the material surface and affects the measured values. In the present paper, quantitative studies were made how the measured values are affected by the probing conditions. Based on this study, we concluded that the proper indentation calibration is needed to get dimensions with a precision of a micron order. This can be performed with measuring the depth (or equivalently the size over the measurement surface) of the indentation formed with the same probing condition, especially the approaching speed. The measurement with a precision of 5 microns or more can be made without taking severe care on indentation as far as the approaching speed is not too high.

銅パーツの CMM による精密測定時のへこみの評価

渡辺勇一、久米達哉、高富俊和、東保男、肥後寿泰

要旨

我々は三次元測定器（CMM）を使用してリニアコライダー用 Xバンド加速管ディスクの寸法測定を行っている。ディスクの材料は無酸素銅で、アニール後、超精密旋盤でダイヤモンド加工され、その後 CMM で代表的寸法を測定する。その際、CMM プローブが接触して材料へのめりこみがあり、測定値に影響する。今回、CMM 測定に必要なプロービングでめりこむ量がプロービング条件にどのように関係しているかを定量的に評価した。これにより、1 μm 程度の測定誤差におさめるためには、適切なめりこみ量の校正が必要なが分かった。この校正は、実際の測定と同一測定条件（特に初期接触速度に関する）でのプローブのめりこみによるへこみの深さ（又は測定表面上にできるへこみの大きさ）を測定することにより可能である。5 μm 以上の誤差を許される測定では、接近速度を大きくしないことに気をつければ、めりこみの影響を厳しく評価する必要はないことが分かった。

内容

1. ディスク
 - 1-1. 加速管ディスク
 - 1-2. 加工の流れ
 - 1-3. 測定箇所

2. 測定の条件
 - 2-1. 三次元測定器
 - 2-2. 測定ジグ
 - 2-3. プローブとプロービング条件

3. 試験と結果
 - 3-1. 圧痕の形状
 - 3-2. 測定圧
 - 3-3. 初期接触速度
 - 3-4. アニールの有無
 - 3-5. プロービングの方向
 - 3-6. 同一箇所の多重プロービング

4. 結論

序

加速器の材料には無酸素銅がよく使われるが、製造段階でアニールを施したり、ロウ付け等の高温プロセスを経ることが多く、材料の軟化が著しい。ところが加速器への応用には、このような材料を用いて製作したものに対して厳しい寸法精度を要求されるので、柔らかい材料表面で構成されるパーツの寸法測定が非常に重要な技術となる。

我々は三次元測定器（以下 CMM）を使用してリニアコライダー用 Xバンド加速管ディスク（以下ディスク）の寸法測定を行っている[1]。ここで扱われるディスクは、無酸素銅を荒加工後 500°C でアニールし、最後に超精密旋盤でダイヤモンド旋盤加工して製作されるので、QC としての三次元測定器（CMM）で代表的な個所を測定するとき、上で述べた軟化材料に対する寸法測定の技術が必要となった。

CMM は典型的な接触測定の一つであり、球形プローブを表面に接触させ、その接触を維持するときのプローブに与えている力が決められた接触圧に等しくなる状態を接触点として測定するものである。その際問題となる点のひとつが、柔らかい測定表面へのプローブのめりこみである[2]。このへこみ量に対する補正は精密測定には欠かすことのできない。本稿では、へこみ量のプロービングの条件に関する依存性について系統的なスタディをおこなった結果について報告する。

1. Xバンド加速管ディスク

1-1. 加速管ディスク

1本の加速管は、図1に示すような約50~200枚のアニールされた無酸素銅(class1)製ディスクが接合されて構成されている[1]。ディスクの仕上加工は、超精密旋盤を使用し、単結晶ダイヤモンドバイトを用いて $\pm 1\mu\text{m}$ 以下の形状精度で行う。ディスクにはいくつかの型があり、代表的な2例を図1に示す。

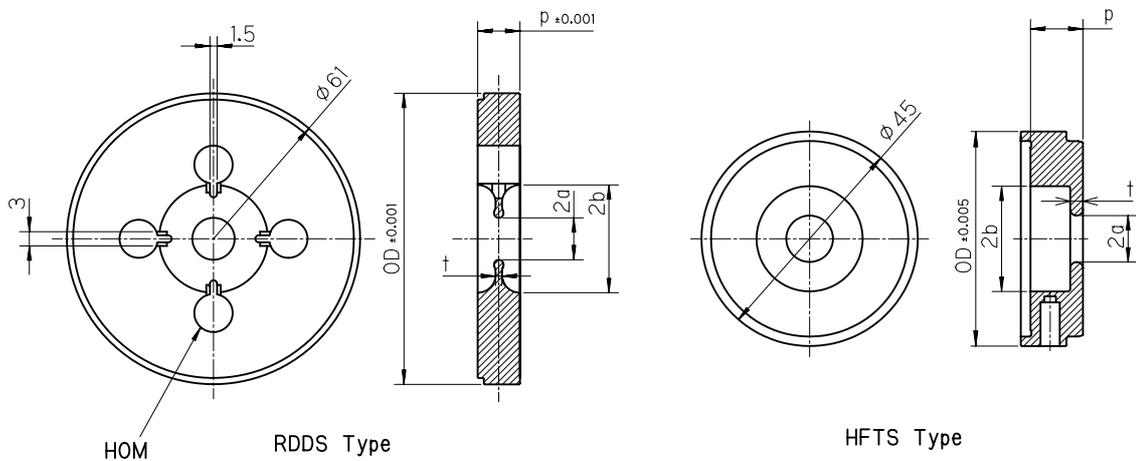
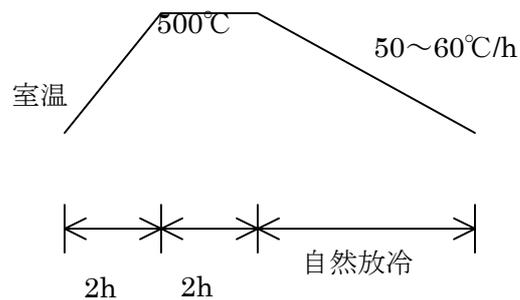


Fig. 1 Two representative types of accelerator structure cells and typical geometries of dimensional measurement.

1-2. ディスク加工の流れ

ディスクの製作工程を以下に示す。

1. 無酸素銅素材を鋸盤でカット
2. 旋盤、フライスで荒加工
3. アニール (500°C、2時間)
4. 中仕上げ(10 μm × 3回)
5. 仕上げ (4 μm → 4 μm → 2 μm)



アニールは荒加工による残留応力を除去するためであり、窒素雰囲気炉を用いて500°C、2時間おこなう。条件を以下に示す。これにより、銅の硬度は、アニール無しの時のHv=60からHv=44まで軟化する[3]。

1-3. 測定箇所と必要プローブ径

ディスクの代表的な測定箇所を図1に示してある。

RDDSタイプはHOMや1.5mm及び3mmのスリットなどを測定するが、1.5mmスリット測定のため、 $\phi 1$ のプローブを使用する。一方HFTSタイプでは狭いスリット測定が不要であるため $\phi 3$ プローブを使用することができる。

このように、必要箇所の形状の差異により用いることのできるプローブに制約が生じ、プロービング時のへこみ量に関係してくる。

2. 測定装置

2-1. 三次元測定器

今回使用した三次元測定器は ZEISS 社製 UPMC-850CARAT である。

構造は門型センタ駆動式、エアダンパにより振動を減衰させ、各測定軸にはエアベアリングを使用、最良の走行状態を保持する。測定精度仕様は $U1\ 0.5 \pm L/900\ \mu\text{m}$ である。概観を図 2 に示す。クリーンルーム内に設置されており、環境仕様は、室内温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 40~60%、クリーン度はクラス 10000 である。



Fig. 2. CMM measurement view.

2-2. 測定治具

ディスク固定用の治具は、測定場所により縦型、横型の 2 種類を用意した[2]。各ジグについての詳細は参考文献[1,5]に詳しい。

横置き治具：

横置き治具を図 3 に示す。治具はアルミ製で上面は超精密加工してあり、90 度おきに $\phi 6$ の真空引き口を設け測定中も排気しつつ、ディスクを治具に固定している。この方式により、局所的に圧力がかかってディスクを変形させることなく固定して測定することができる。

縦置き治具：

横置き治具は測定時のディスク安定性にすぐれるが、片面からの測定に制限されるので、両面方向からの測定を可能にするため、図4に示す縦置きジグを開発した。このジグを用いるとすべての測定ポイントを一度のセッティングですべて行うことができるので測定時間減少とともに測定精度も向上する。但し、反対方向に突き出す2本のプローブを使用することになる。

横置き同様にアルミ製真空チャックであるが、大きな違いはディスクの両面にプローブがアクセスできるようにチャック形状をドーナツ状のリングにしていることである。この真空チャックの外径はディスクと同じ $\phi 61$ とし、研磨したVブロック上に固定している。ディスクは同一Vブロックにのせられ、真空引きを行うことにより、垂直面へ吸着固定される。真空引きは、 $\phi 53\text{mm}$ の位置に吸引面積は 620mm^2 の幅 2mm 、深さ 3mm のリング状の溝で行う。その底部に開口する $\phi 2\text{mm}$ の穴を介し、これを図3に示したように、チャック外周部のコネクターからフレキシブルホースを通してCMM装置から数m隔離したオイルフリーポンプ（到達圧力 3kPa 程度）にて引く。

プロービングによるディスクの動きは、マイクロセンス等の微小移動センサーを背面に設置してプロービング時の動きを測定し、 $1\ \mu\text{m}$ 以下であることを確認している。



Fig. 3 Horizontal setup.



Fig. 4 Vertical setup.

2-3. プロブとプロービング条件

使用したプローブは $\phi 1$ 及び $\phi 3$ で、材質はルビーである。代表的なプローブセッティング状況を図5に示した。

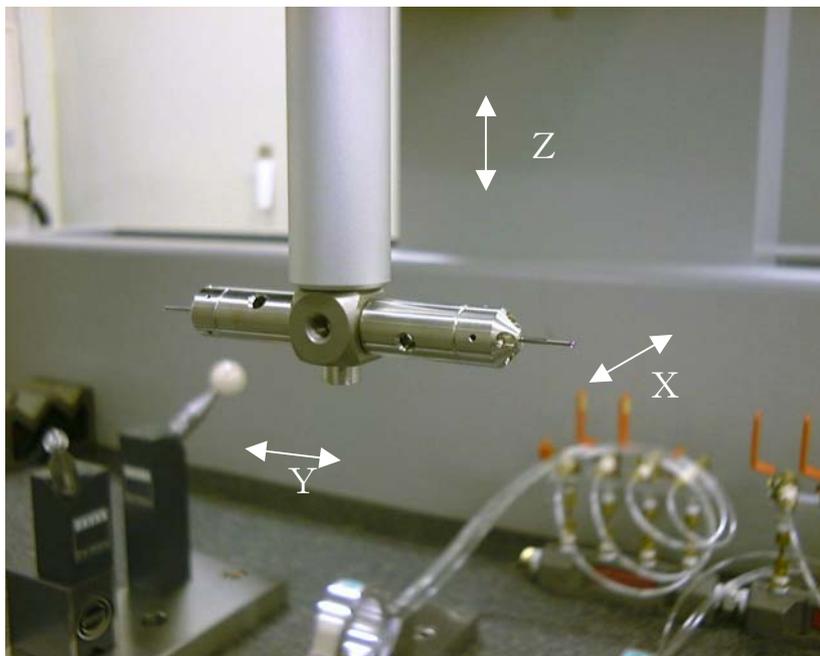


Fig. 5. Setup of two $\phi 1$ probes

プロービング条件には、プローブ径、接触速度、測定圧等がある。通常、プローブは、 $\phi 1 \sim \phi 8$ である。測定圧の変換範囲は $0.005\text{N} \sim 1.6\text{N}$ であり、通常は安定して良い測定精度を得られるとされているのは標準測定圧 0.2N である。一方、初期触圧は固定されており 1N であるが、接触速度は $1\% \sim 100\%$ の範囲で可変である。但し接触速度は、AUTO 測定の際は Table 1 に示すように、測定に使用するプローブ半径で決まっている。つまり、 $\phi 1$ のプローブを使用する際は 1mm/s 、 $\phi 3$ を使用する際は 3mm/s の接触速度となる。

Table 1 Approaching speeds depending on probe diameters.

プローブ半径	$<0.7\text{mm}$	$<1.4\text{mm}$	$\geq 1.4\text{mm}$
AUTO 時接触速度	1mm/s	2.5mm/s	3mm/s (標準)
標準測定圧	0.2N	0.2N	0.2N

測定の座標系原点は、ディスクの平面を Y 軸原点、外径を測定した際の中心座標を X,Z 軸原点とした。測定に使用するアプローチ方向は、X 軸、Y 軸及び Z 軸方向すべてで、制御座標軸上のみである。言い換えると、斜め方向からのプロービングは行っていない。

3. 試験と結果

3-1. へこみの形状

φ1プローブを使用し、アニールしたディスクを測定した際に発生したへこみの形状を観察した結果を以下に示す。Y軸方向のプローブシャフトを用いてプロービングの方向はY軸+方向である。

ディスク平面に対しプローブシャフトが垂直方向に位置し、このシャフト方向にプロービングしている。プロービングにより生じた圧痕をキーエンス社の共焦点型レーザ顕微鏡（VK-8500）を使用して測定し結果を図6に示した。図中の緑の線が圧痕の直径方向の断面形状を示す。図からわかるように、残された形状はサブミクロン精度で球形である。また圧痕をφ1の球形と仮定してその直径φ83.5μmからめり込み量を推定すると

$$83.5^2 / (4 * 1000) = 1.7\mu\text{m}$$

となり、この値は図6のレーザ顕微鏡での深さ測定値1.9μmとよく合っている。

従って、この後の解析では、プロービング時のプローブめり込み量として、平面上のプロービング跡の直径を測定して推定した。



Fig. 6. Spur of probing on a flat surface measured by laser microscope.
(X2000, φ83.5 μm, depth 1.91 μm)

3-2. 測定圧と圧痕深さ

目的と測定条件：

接触速度を固定した時、圧痕の深さが測定圧とプローブ径に関してどのように変化するかを調べた。横置き治具を使用、Z方向プローブでZ方向プロービング、接触速度は手動で3 mm/sとした。

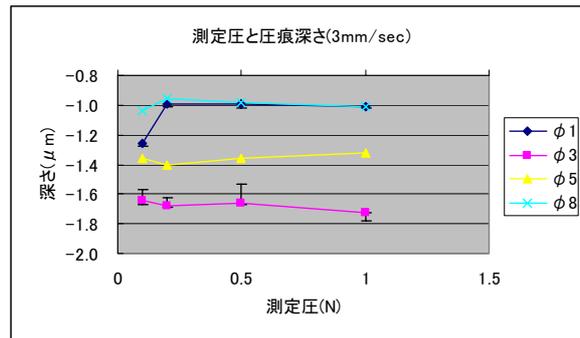


Fig. 7. Depth versus probing pressure.

結果と考察：

測定結果を図7に各プローブ径での測定圧を変化させたときの圧痕の深さ測定値を示した。これから下記の考察を行った。

1. 接触速度が同じであれば、測定圧を変化させてもプローブ径を変えない限りワークの圧痕の深さは、ほとんど変化しない。これは、ワークのへこみは固定の初期触圧（1 N）で接触した際に発生し、その後のプロービングでは、測定圧が1 N以下であるため、このへこみ以上にはめり込んでいないものと思われる。
2. 図7より、φ1を除いて、プローブ径が大きくなるに従って、プローブ径が大きくなるに従って深さが小さくなる傾向を示している。φ1に関しては別のメカニズムが働いていると思われ、プローブ径と圧痕の関係を把握するにはこれらを総合した調査が必要である。

1項の、測定圧に関わらず圧痕の深さが一定であることから、以後の測定では測定圧は測定器標準である0.2Nとした。

3-3. 自動・手動プロービングと圧痕深さ

目的と条件：

接触速度を落としたマニュアル（手動）測定と、ルーティンで用いる AUTO での測定でへこみの深さがどう変わるかを評価する。ここでの手動とはジョグレバーを使用し、約 0.1mm/s で行なうプロービング、自動とは CNC プログラムか位置決め時のスピードでのプロービングを指す。

水平治具を使用して、 $\phi 1$ 及び $\phi 3$ のプローブで、近傍ではあるが重複しない点に対してプロービングを 10 回繰り返し測定した。測定力は 0.2N 一定、プローブ軸は Z 軸方向で、プロービング方向も -Z 軸方向である。なお、自動測定時の接触速度は使用するプローブ径に依存して表 1 のように決まっていることに注意する。

結果と考察：

測定結果を図 8 に示した。へこみ量は手動の時は $0.5 \mu\text{m}$ 程度だが、自動の時には $1 \mu\text{m}$ を大きく越えることが分かった。自動測定は手動時よりアプローチの速度が速くへこみ量も大きくなっていると考えられる。更に、プローブ径が小さくなるとへこみ量は大きくなり留意を要する。

従って、接触速度によるへこみ量を小さく保った測定を行うためには、大きいプローブを用い、手動によるソフトな接触を行うことが重要であることが分かった。

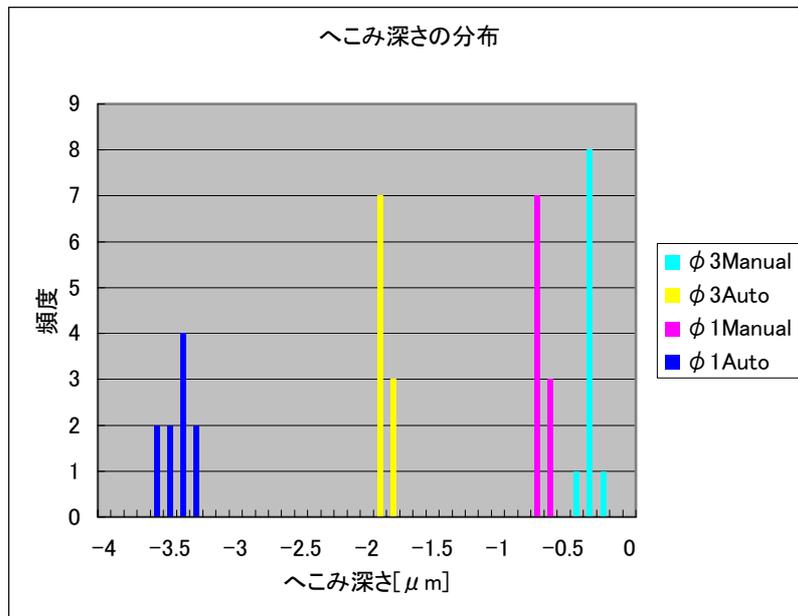


Fig. 8. Depth depending on approaching speeds and probe diameters.

3-4. アニールの有無と圧痕深さ

目的と条件：

アニールしたディスクではへこみ量が多いことが予想されるので、アニール有無でプロービングによるへこみがどの程度違うかを調査した。

アニール済み、アニール無しの2つのディスクを同じ条件でダイヤモンド加工をし、それぞれ縦型治具を使用したCMM測定による圧痕の直径を測定した。プローブは $\phi 1$ 、アプローチはAUTOで1mm/sで接近、プローブの方向はY方向、プロービング方向は $\pm Y$ 方向の時を調べた。

結果：

測定結果を図9に示した。へこみ量の平均値は予想通り、アニールしてある方が素材は柔らかくなっているため、大きい。更に、圧痕の深さのばらつきについては、アニール無しでのばらつきは非常に小さく、アニール有りのディスクではばらつきが大きくなることが分かった。

アニール有での測定ばらつきは、試験したプローブ $\phi 1$ に対しては標準偏差は $0.2\mu\text{m}$ 以下で小さいが、P-Vでは $0.7\mu\text{m}$ もあり、精密な計測においては留意を要する。

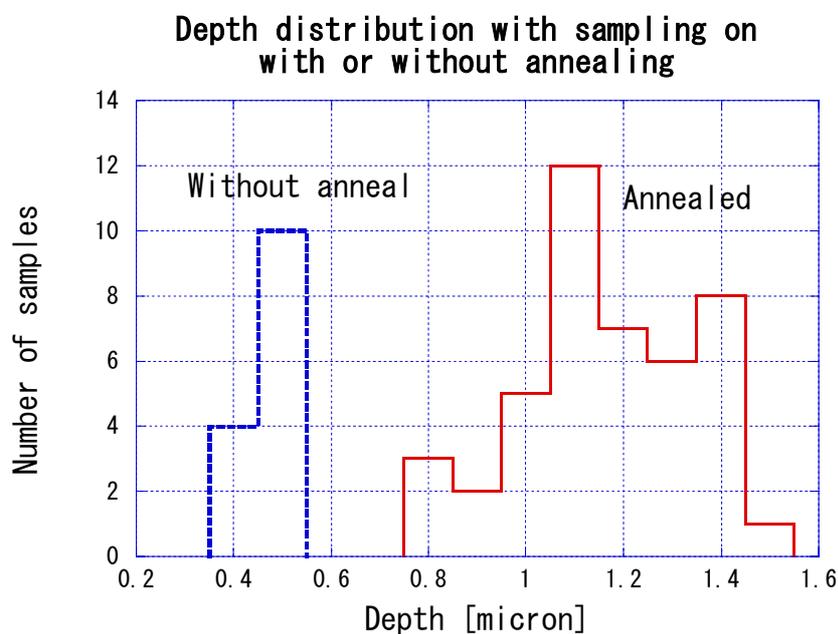


Fig. 9. Probing depth on disks with and without annealing.

3-5. プローブの方向と圧痕深さ

目的と条件：

ディスク寸法計測にはその形状から、複数方向からプロービングする必要がある。その折り、プローブ軸の方向や測定時接触方向の違いがへこみ量にどのように影響するかを調べる。

Z 軸方向のプローブで Z 軸方向の測定を行った場合と、Y 軸方向のプローブで Y 軸方向の測定を行った場合とを、 $\phi 1$ プローブに関して比較してみる。この比較はこれまでに示した結果を整理することにより可能で、前者は図 8、後者は図 9 を参照する。

結果：

参照結果を表 2 に示した。これより、プロービングの方向により、大きな違いが生ずることが判明した。

一番太いコラムにセットされた Z 方向プローブの軸方向測定が一番圧痕が大きく、そのコラムに垂直に（水平面内に）設置されている Y 方向プローブでは、Z 方向プローブに比べて圧痕が小さく、特にそのプローブ軸と直交する方向の測定では圧痕が非常に小さいことが判明した。

Table 2. プロービングの方向と圧痕の依存性に関する測定条件と結果

プロービング方向	Z 方向プローブ Z 方向測定	Y 方向プローブ Y 方向測定
実験	本稿 (図 8)	本稿 (図 9)
プローブ径	$\phi 1$	$\phi 1$
初期接触	AUTO	AUTO
圧痕	$3.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$	$1.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$

追記：

Xバンドディスク測定での通常測定は縦型治具にセットし、図 5 に示したようにプローブは Y 軸上にほぼ対称に 2 本配置して、ディスクの裏表や上下左右からの測定を可能にする。このセットアップで、ディスクの厚さに関連する寸法は、Y 軸方向のサンプリング、径寸法の測定は X 及び Z 方向のサンプリングによる測定である。従って、前者（厚さ方向）の測定でのめりこみ量は上の結果から片側 $1.2 \mu\text{m}$ 程度と分かる。しかし、後者（径方向）の測定でのめりこみ量測定は未だ行ってないので、定量的な議論ができない。

但し、吉川による同一型式の CMM 測定器に対する試験報告[4]によれば、プローブの軸と垂直の方向でのサンプリングによる圧痕は非常に小さい。例えば $\phi 1.5$ のプローブでの測定ではオートでの初期接触でも圧痕は $0.1 \mu\text{m}$ 以下である。これから推定すると、KEK での測定でも同様に $1 \mu\text{m}$ より充分小さい圧痕で済んでいることが推定される。

3-6. 同一箇所を重複してプロービングした時の圧痕深さの変化

目的と方法：

実際の測定では、何らかの原因で二度以上の測定をすることがあり得るが、その時以前にサンプリングした場所を再度サンプリングする可能性もある。このときの測定値の違いを評価しておく必要がある。

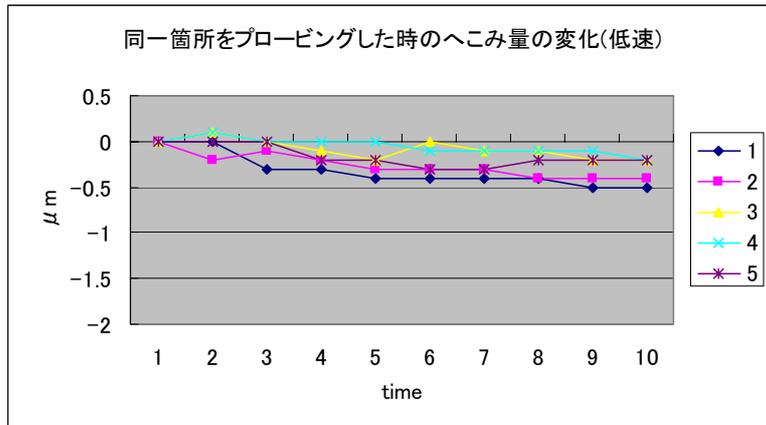
同一箇所を繰り返しプロービングしたときに、どこまで読みとり値が変化していくかを調べた。比較のため充分硬くめりこみのほとんど無いと考えられる、ブロックゲージを治具に接着して同様のテストを行った。

条件：

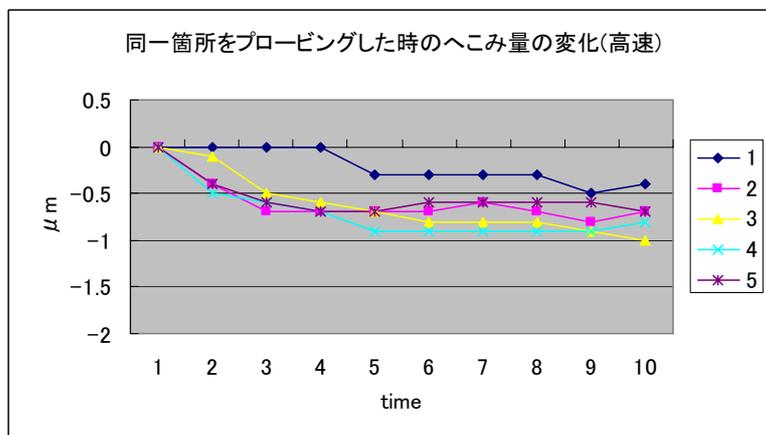
接触速度	低速 (0.1mm/sec) 及び高速 (3mm/sec)
プローブ	直径φ3、Z軸方向プローブ
測定方向	Z軸方向 (横置きジグを使用)

結果：

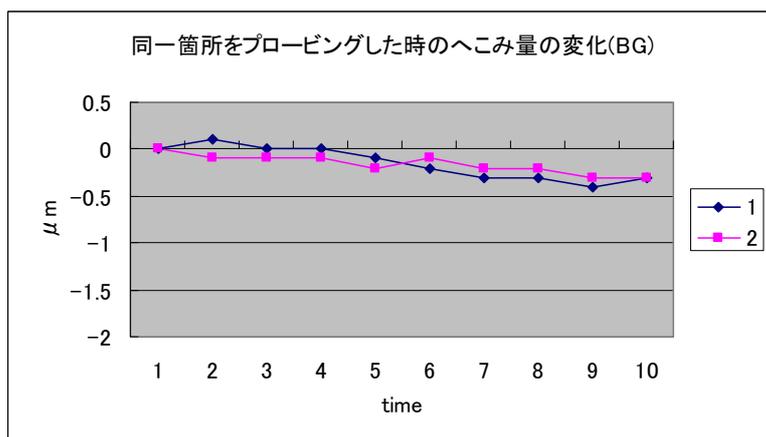
結果を図10に示す。ブロックゲージにプロービングしたとき(c)は0.2~0.3µmにおさまっているのに対して、銅ディスクにプロービングしたとき(a) & (b)は、徐々に数値が変化する。これは、硬い材料でもワークの姿勢が若干変わることに伴い読みとり値が変化していると考えられるが、その量は小さい。これに対して無酸素銅では、数回かかって飽和し、第一回目のめり込み量に加算される量は0.5µm程度であり、ワークの姿勢の変化は充分小さいことを確認しているため、この増加量は主に圧痕の深さの増加が原因であると予想している。これより、たまたま既にプロービングした点をサンプリングして測定したとしても、0.5µm以内の誤差でおさまることが確認できた。



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Measured depths when multiply sampled at the same point.
 Reading of the first probing is set to zero as a start position.
 (a) Slow approaching, (b) fast approaching and (c) measuring block gauge.

4. 結論

三次元測定器のように有限の接触圧を伴う測定方法を使用して、アニールされた無酸素銅のような柔らかい材料を測る際には、測定直前のプローブ接触により材料表面の塑性変形が生じるので、その効果を繰り込んで測定値を補正して実際の寸法を評価する必要がある。

この際留意すべきことは、

1. へこみの形状はほぼ球形である
2. へこみの深さは測定時の測定圧には殆ど影響されない
3. へこみの深さは初期接触スピードに関連する

ことである。本稿では、圧痕の測定面上の直径を測定して深さを評価することにより、CMM測定値の誤差を形成する重要な要素、圧痕の深さ、を支配する重要なパラメータを見いだす実験的評価を行った。

本稿の評価試験から、圧痕の深さを決める重要なパラメータとその圧痕を浅くする方法に関して、下記のこと分かった。

1. プロービングの方向：プローブ方向に直角方向とする
2. 接触までのアプローチ速度：遅いアプローチとする（手動にて実現できる）
2. 材料の硬さ：硬い方がよい（アニール前の測定が可能ならその段階で行う）

なお本稿では明確に結論付けできなかったが、プローブ径に関しては、それを大きくすることは圧痕を浅くする方向にあると考えられるが、小さいプローブでの測定に関連して条件が異なることがある可能性があり、それらを含めて圧痕量が決まることに留意すべきである。

本研究に基礎をおき、Xバンド加速管を構成するディスクのCMMによる寸法精密測定を行うことができる。1 μm 程度の測定誤差におさめるためには、適切なめりこみ量の校正が必要である。この校正は、実際の測定と同一測定条件（特に初期接触速度）でのプローブのめりこみによるへこみの深さ（又は測定表面上にできるへこみの大きさ）を測定することにより可能である。5 μm 以上の誤差を許される測定では、接近速度を大きくしないことに気をつければ、めりこみの影響を厳しく評価する必要はない。

参考文献

- [1] Y. Higashi, Y. Funahashi, T. Higo, N. Hitomi, S. Koike, S. Koizumi, K. Takata, N. Toge, T. Suzuki and Y. Watanabe, “Studies on High-precision Machining of Accelerator Disks of X-band Structure for a Linear Collider”, KEK Report 2000-1, May 2000.
- [2] 渡辺勇一、平成 13 年度 核融合科学研究所 技術研究会、及び高エネ研 メカワークショップ (第 1 回～第 3 回), KEK Proceedings 2000-10、KEK Proceedings 2001-12、KEK Proceedings 2002-10.
- [3] 東保男、他、”Study of High-precision Diffusion Bonding for X-band Accelerator Structure”, KEK Report 2000-2, April 2000.
- [4] 吉川満雄、「セルの寸法測定におけるプローブ圧痕対策」、高エネ研第 5 回メカワークショップ、2004 年 4 月 15 日.
- [5] ISG Workshop, ISG3 and ISG5, <http://lcdev.kek.jp/ISG/>.