

## GLC X-BAND TECHNICAL NOTE

---

---

# Positioning Error between Turning and Milling in H60VG4S17 Accelerator Structure Cells

T. Kume, Y. Watanabe, T. Takatomi, and T. Higo\*

Mechanical Engineering Center,

\*Accelerator Laboratory,

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

### Abstract

The errors in the dimensions of the milled surfaces were found to vary like sinusoidal curve as a function of azimuthal angle from the measurement of the H60VG4S17 accelerator structure cells using 3D coordinate measuring machine, CMM. Considering their directional dependencies and the characteristics of variation, they seem to be caused by the centering error between milling and turning. The center of the milling was found to be approximately 12  $\mu\text{m}$  off from the turning center and always toward the fixed direction.

These errors existed between the milling parts and the turning center in the semi-finish process. Because the centering of the final ultra-precision turning is precise and it is based on the turned surface made in the semi-finish process, we conclude that the errors appeared in the semi-finish process. These errors were observed also in the cells of H75VG4S18 (HDDS3) accelerator structure, one generation former. Therefore, we speculate that these errors are systematic.

## H60VG4S17 旋盤－ミリング加工部分の位置ずれ

2003/10/27 作成

2003/11/11 修正

2004/01/20 修正 2

工作センター 久米、渡辺、高富  
加速器研究施設 肥後

### 要約

H60VG4S17 加速管セルの三次元測定器(CMM)寸法測定において、セルのミリング加工部分の残差に、セルの方向に対してコサイン状に変化する方向依存性が見られた。この方向依存性は、セル方向に対する変化の特徴から、セルのミリング加工部分の、旋盤加工部分からのずれに起因するものと、考えられる。今回の測定では、加速管セルのミリング加工部分が、旋盤加工部分に対して、角度合わせ用のノッチ部分を右上にして、左方向（図4において x 軸のマイナス方向）に  $12\mu\text{m}$  程度ずれている、との結果が得られた。

この方向依存性は、超精密旋盤による仕上げ加工前のセルについても、同様に現れていることから、中仕上げのミリング加工時に発生したものと、考えられる。さらに、この方向依存性は、一世代前の H75VG4S18 (HDDS3) 加速管セルにおいても、同様に見られることから、これらと同様の手順で加工された一連の加速管セルに、系統的に現れているものと、考えられる。

## 1. はじめに

H60VG4S17-R1（以後は、単に H60VG4S17 と記述する）加速管セルの加工では、機械加工メーカにおいて、寸法公差 $\pm 10\sim 20\mu\text{m}$ 程度で中仕上げされたセルを、KEKにおいて、超精密旋盤により、寸法公差 $\pm 1\sim 2\mu\text{m}$ で仕上げている。これらの寸法管理は、本番セルに先立って加工する、テスト加工セルと RF テストセル、さらに、本番セルの全てのセルについて、中仕上げ段階でのメーカ側の寸法チェックと、触針式形状測定器や三次元測定器 (CMM)を用いた、KEK 側での形状と寸法の抜き取りチェックにより、行われている。

今回、R2 部分（図 1 参照）の寸法変更に伴う RF 周波数変化をキャンセルするため、加速管セルのカップ部分の径**b**（図 1 参照）を、SLAC での設計値から変更したセルについて、RF 周波数試験を行った結果、予想通りの周波数の変化が見られなかった。加速管セルの RF 周波数の変化は、セルの寸法変化に依存することから、その原因を解明するために、CMM 寸法測定結果から、セル各部の寸法について見直しを行ったが、現在のところ、RF 周波数に影響するような、寸法上の問題は見つかっていない。

一方、セルのミリング加工部分の残差には、旋盤加工部分との位置ずれによるものと考えられる、セルの方向に対してコサイン状に変化する、系統的な方向依存性が見られる。この位置ずれと、上記の RF 周波数の変化との関係については、今のところ不明である。しかし、今回測定を行った全ての加速管セルと、一世代前の H75VG4S18 (HDDS3) 加速管セルについても、同様のずれが見られ、これらと同様の手順で加工された、一連の加速管セルには、同様のずれが系統的に現れていると、考えられること、ミリング加工時の旋盤加工部分との位置ずれ量を、 $2\mu\text{m}$ 以下に調整しているにも関わらず、測定により求められるずれ量が $10\mu\text{m}$ 以上と、大きくなっていること、さらに、同じミリング加工部分であっても、加工部位によりずれの様子が異なり、ミリング加工間でのずれが予想されることなど、今後、より高い精度を目指す場合、問題となるものと、考えられる。

ここでは、今回見られたミリング加工位置の旋盤加工位置からのずれに着目して、その特徴を明らかにし、その原因究明や解決方法の検討に役立てる。

## 2. 測定結果

### 2. 1 測定位置

ここでは、旋盤加工部分とミリング加工部分の位置ずれを見るために、セル外径：OD の中心を基準として、R2 部分の半径方向切り込み量： $\Delta d$ 、V 字溝高さ： $h$ 、HOM 中心位置を測定した。それぞれの測定位置と定義を、図 1～3 に示す。ここで、 $\Delta d$  の値は、式 1 のように、2 b 部分中心と R2 部分中心間距離： $O_s O_b$  から、R2 と 2 b 部分半径、 $R_s$ 、 $R_b$  を差し引いた値とする。

$$\Delta d = O_s O_b - R_s - R_b \quad (1)$$

$\Delta d$  の残差については、R2 部分の指定切り込み量との差、h の残差については、CMM での直接測定値と図面指定寸法との差、HOM 中心位置の残差については、HOM 中心座標とセル中心座標から求めた距離と、HOM 中心位置半径： $c/2$  の指定値との差とした。なお、CMM 寸法測定時の測定座標系は、図 4 のようにセル上に固定した。

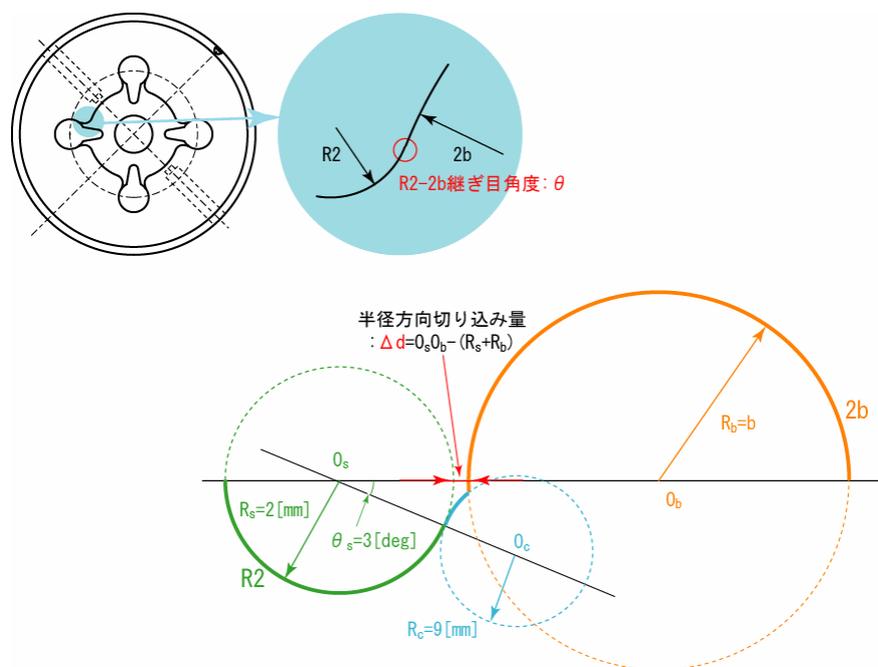


図 1. R2 部分半径方向切り込み量： $\Delta d$

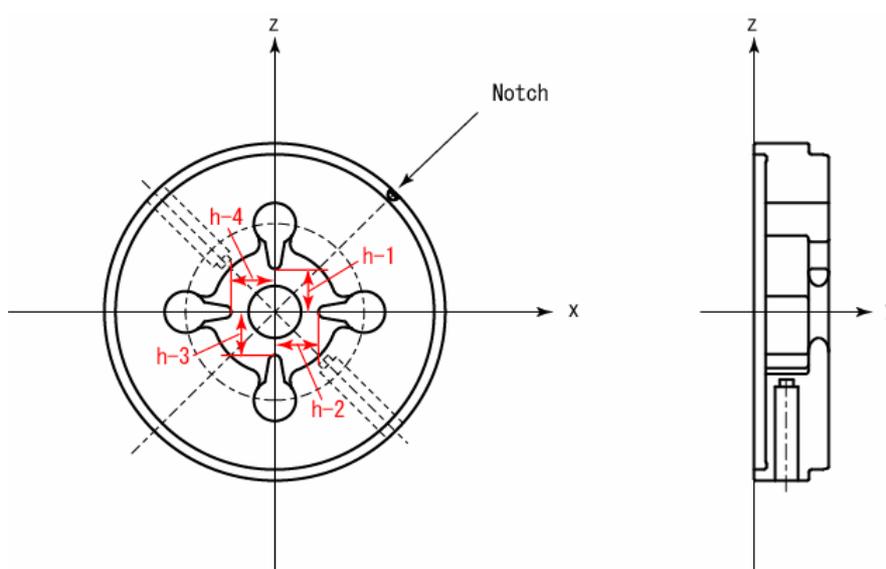


図 2. V 字溝高さ： $h$  の測定位置、-1,2,3,4 は測定順

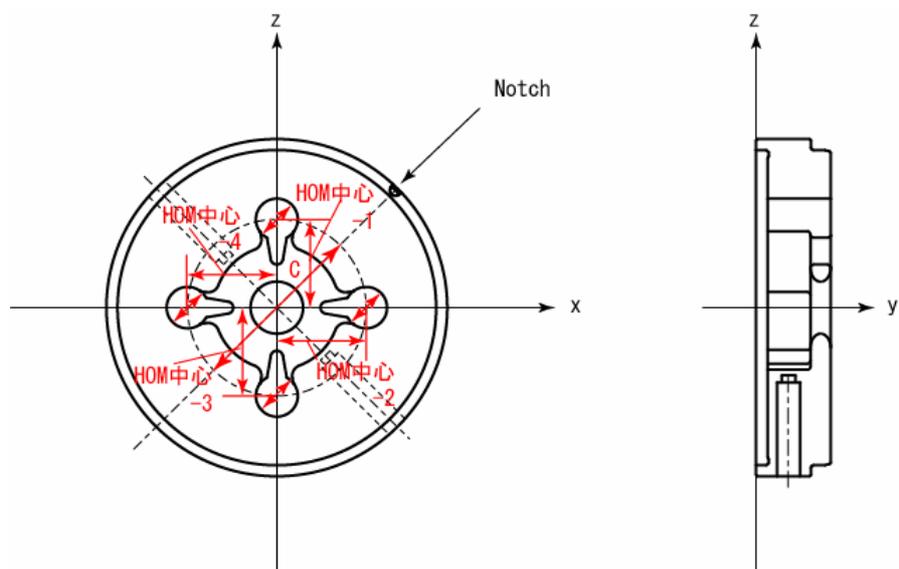


図 3. HOM 中心の測定位置、-1,2,3,4 は測定順

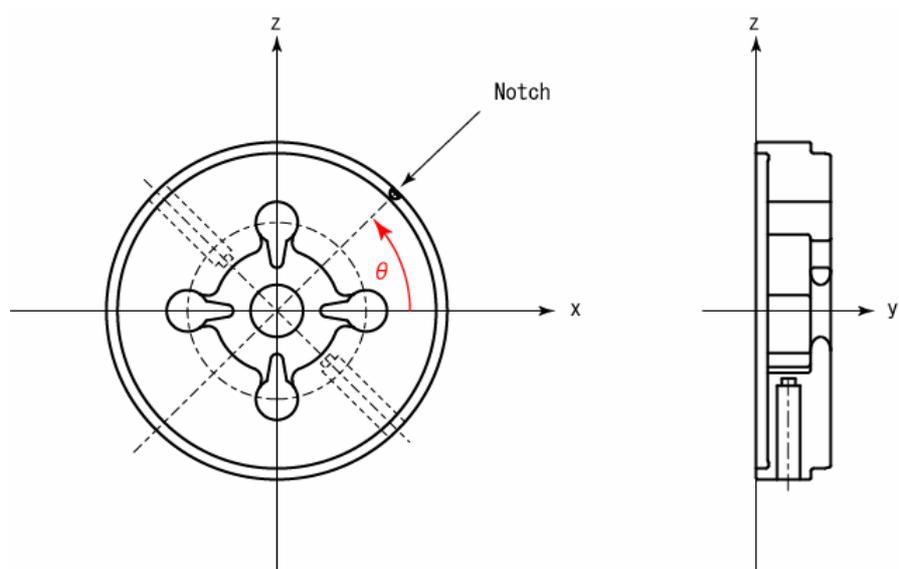


図 4. 測定座標系、測定座標系はセル上に固定する

## 2. 2 測定精度（再現性）

本番測定用ディスク#028-Dについて、測定精度を見積もるため、測定方法を変えながら、測定値の再現性を確認した。本測定では、測定プログラム作成に要する時間を短縮するため、Parameter Control Manager(PCM)を用いて新たに作成した、測定プログラムを用いているが、当該測定プログラムを用いた場合、水平位置に来るV字溝幅の測定値（図4において、 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ の位置に相当）に、原因不明のばらつきが見られた（別途レポートを参照）。ここでは、このような測定における系統誤差の影響を評価するために、測定時のセルの向きを、図4の向き（以後、 $0^\circ$ と表記）の他に、時計方向（ $\theta$ のマイナス方向）に $90^\circ$

回転させた場合（以後、90° 回転と表記する）について、それぞれ二度ずつ測定を行った。さらにここでは、新たな測定プログラムを用いた場合に見られたようなばらつきが、測定結果に見られなかった、旧測定プログラム（CNC）を用いて、0°、90° 回転の2つのセルの向きについて、それぞれ、一回ずつ測定を行った。

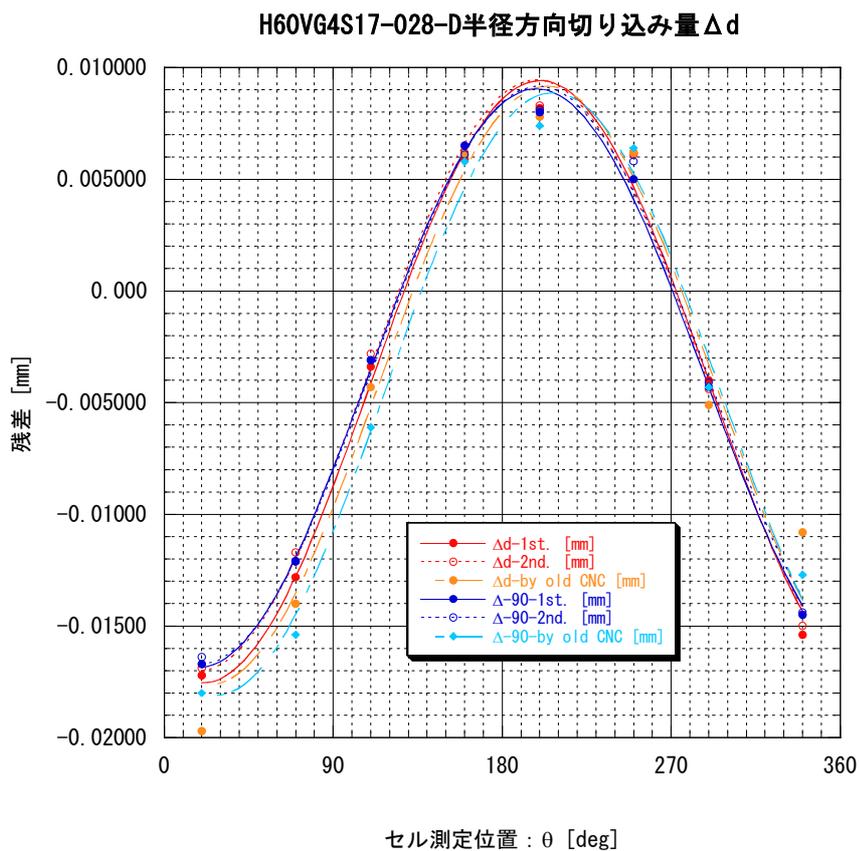


図5. セル測定位置 :  $\theta$  による半径方向切り込み量 :  $\Delta d$  の残差の変化 (再現性)

H60VG4S17-028-D-h残差

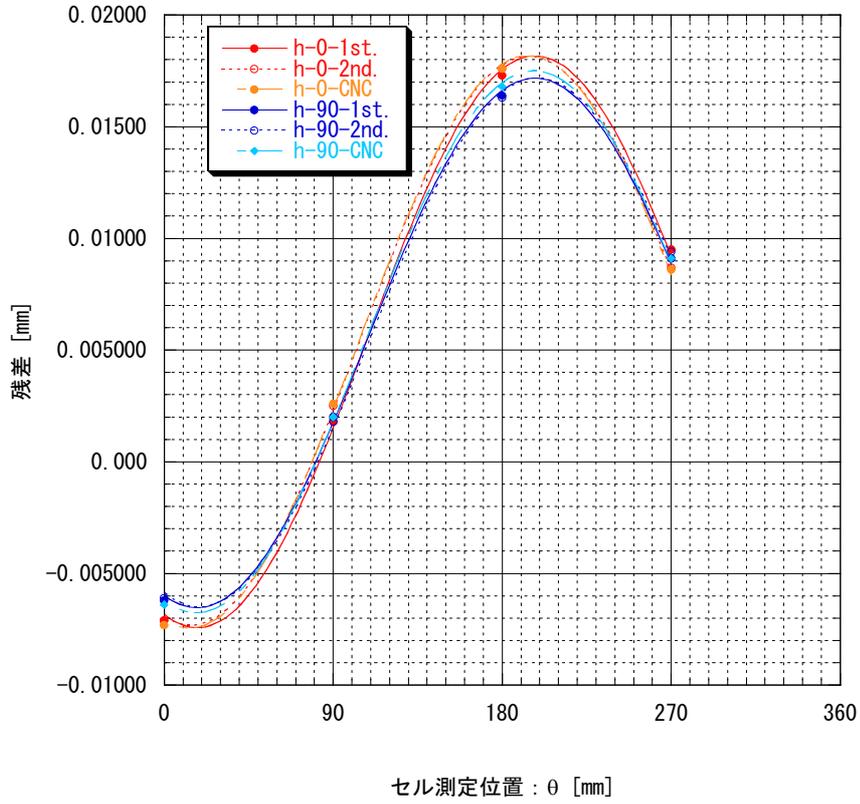


図6. セル測定位置 :  $\theta$  による V 字溝高さ : h の残差の変化 (再現性)

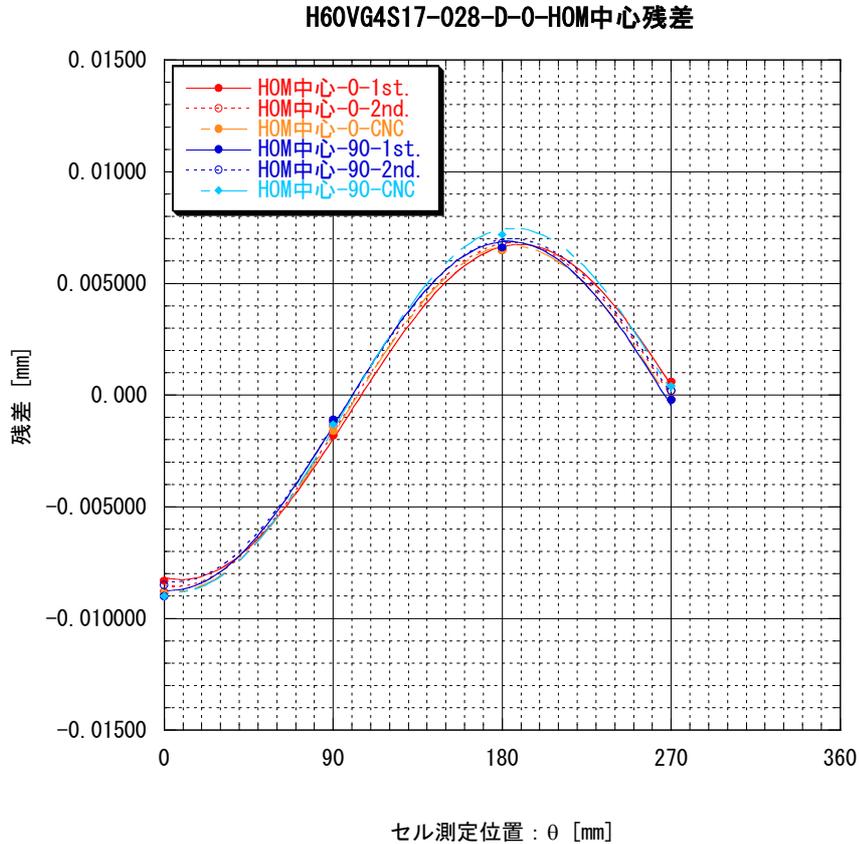


図 7. セル測定位置:  $\theta$  による HOM 中心位置残差の変化 (再現性)

セル測定位置:  $\theta$  に対する、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置の残差の変化の様子を、それぞれ、図 5、6、7 に示す。これらの再現性に着目すると、図 5 に示された  $\Delta d$  の全 8 点の測定点の半分の 4 点で、測定値のばらつきが  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  とやや大きく出ている他は、いずれの測定点においても、 $1 \mu\text{m}$  前後の良好な再現性が見られる。

加速管セルにおいて、旋盤加工位置とミリング加工位置にずれが発生すると、その大きさと方向に応じて、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置の残差は、コサイン状に変化する。図 5、6、7 では、測定値とともに、セル測定位置による残差の変化を、コサインカーブで最小自乗近似した近似曲線を示しているが、いずれの場合においても、測定値が良好にあてはめられていることがわかる。

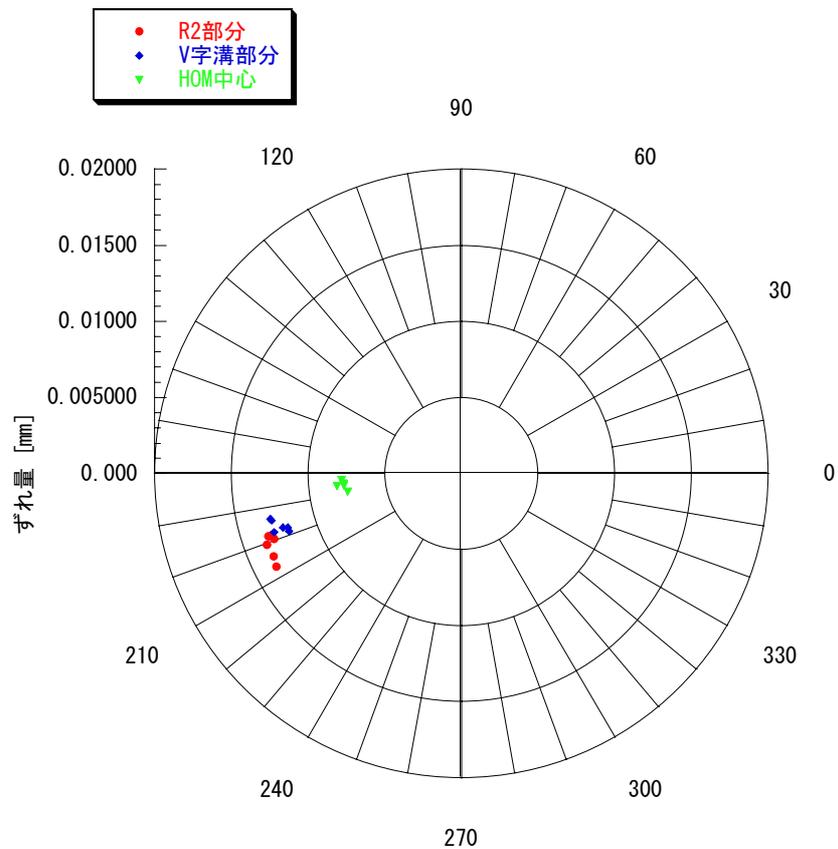


図8. #028-D・ミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ（再現性）

図5～7において、コサインカーブで近似された近似曲線の振幅と位相遅れ（ずれ）が、各ミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ量とずれ方向を示す。ここでは、これらの近似曲線から、R2部分（ $\Delta d$ ）、V字溝部分（ $h$ ）、HOM中心について、旋盤加工位置からのずれ量と方向を求め、図8に示す。図8では、中心が、旋盤加工の中心を示し、プロットが、各加工部位のずれ量とずれ方向を表している。図より、この加速管セルでは、R2、V字溝部分は、 $200^\circ$  方向に  $12\mu\text{m}$  程度、HOM中心は、 $185^\circ$  方向に  $7\mu\text{m}$  程度、それぞれ、旋盤加工位置に対してずれていることがわかる。

なお、図5に示される  $\Delta d$  の全測定位置の半分の4点で、ばらつきが  $4\sim 5\mu\text{m}$  と大きくなったが、図8を見ると、それらを用いて求めた、R2部分の加工位置のずれには、大きなばらつきは見られない。これは、加工位置のずれを求める際に用いた、近似曲線を算出する際に、測定値のばらつきが平均化され相殺されたためと、考えられる。このことから、新たな測定プログラムを用いて得られた、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM中心位置の測定値から、R2部分、V字溝部分、HOM中心の旋盤加工位置からのずれを評価する場合、V字溝幅の測定時に問題となったような測定誤差は、影響しないものと、考えられる。図8より、今回の測

定で得られる、各ミリング加工部位と旋盤加工位置とのずれ量とずれ方向の再現性は、それぞれ、約  $2 \mu\text{m}$ 、約  $8^\circ$  といえる。

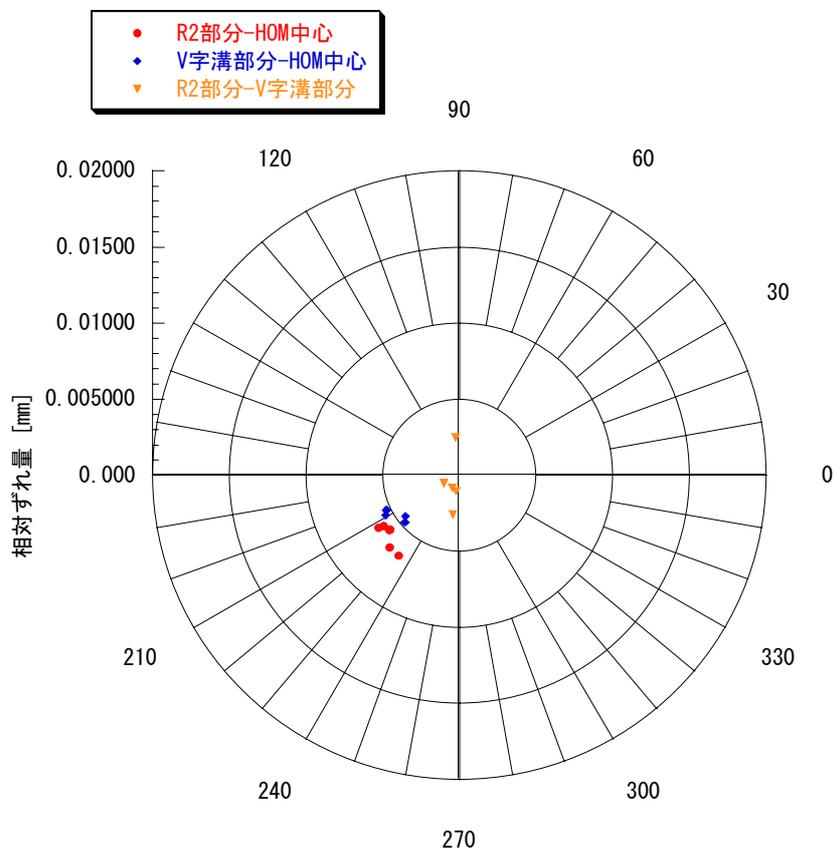


図 9. #028-D-3つのミリング加工部位間の相対位置（再現性）

図 8 において、測定を行った 3つの加工部位のうち、R2 部分と V 字溝部分のずれが、同様に現れているのに対して、HOM 中心位置のずれの様子が異なっている。図 9 に、これら 3つのミリング加工部分の相対位置を示す。図より、HOM 中心に対する、R2 部分と V 字溝部分の相対位置には、明らかな方向性が見られ、その距離も  $6 \mu\text{m}$  程度と大きくなっている。一方、R2 部分と V 字溝部分の相対位置には、明確な方向性は見られず、その距離も  $3 \mu\text{m}$  未満と、前者と比較して小さくなっている。これらのことから、セルのミリング加工部位において、R2 部分、V 字溝部分と、HOM 中心位置に関する、HOM 穴部分の仕上がりは異なっていると、考えられる。これら 2つの部位は、異なるエンドミルで加工していることから、エンドミルによる加工位置の相違や、加工抵抗によるエンドミルの変形度合いの相違等に起因するものではないかと、考えられる。

## 2. 3 H60VG4S17 加速管 RF テストセル測定結果

本番セルの加工に先立って、本番セルと同様に加工された、7枚のRFテストセル、#005-1,3,5、#028-1,2、#049-1,5について、前項2.2と同様の測定を行った。セル測定位置に対する、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置の残差の変化の様子を、それぞれ、図10、11、12に示す。

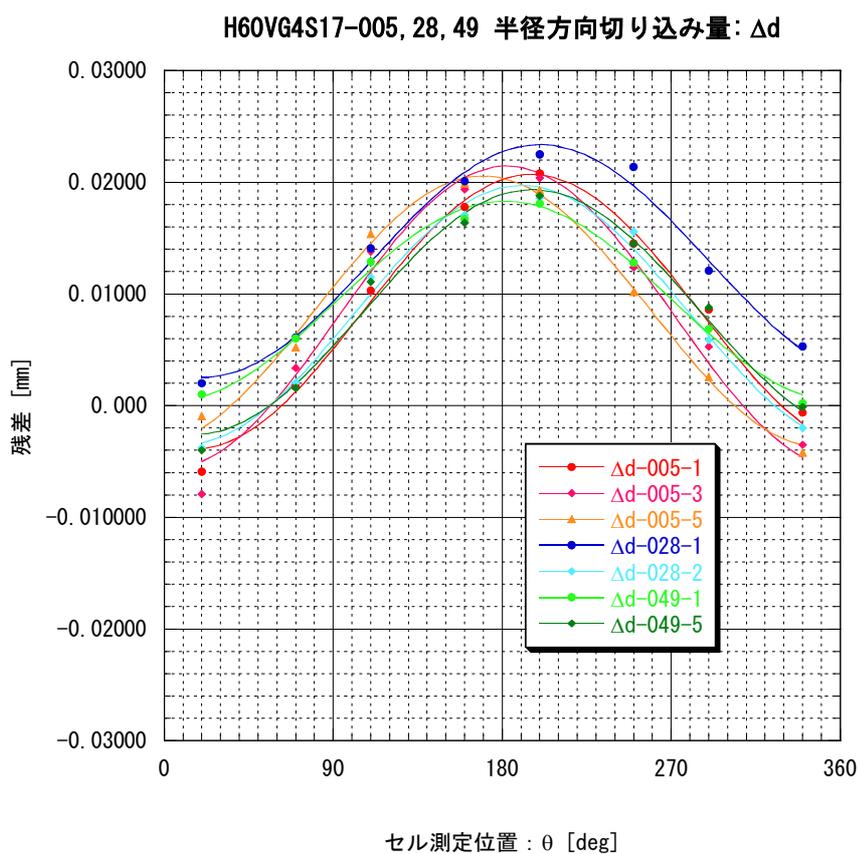


図10. セル測定位置 :  $\theta$  による半径方向切り込み量 :  $\Delta d$  の残差の変化

H60VG4S17-005, 28, 49-h-残差

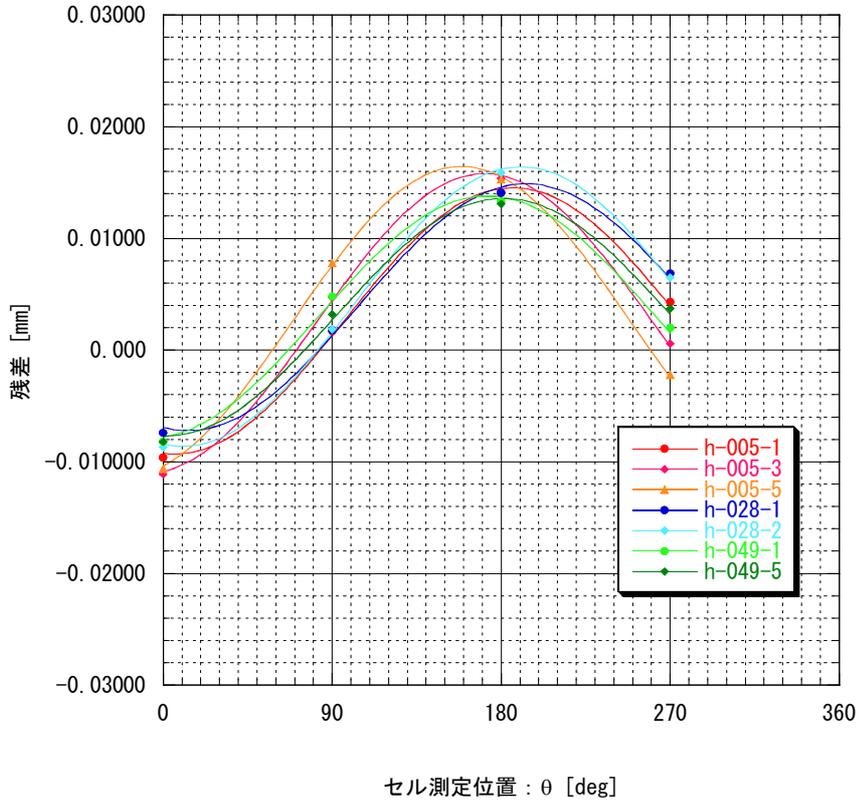


図 1 1. セル測定位置:  $\theta$  による V 字溝高さ: h の残差の変化

H60VG4S17-005, 28, 49-HOM中心残差

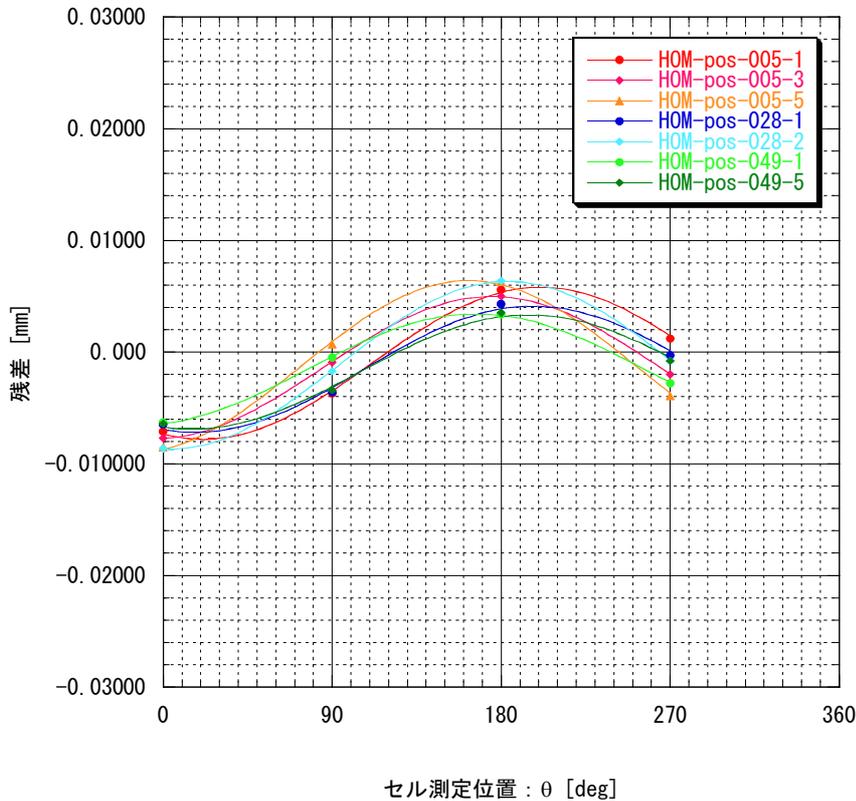


図 1.2. セル測定位置： $\theta$ による HOM 中心位置残差の変化

これらの図を見てもわかるように、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心の残差の、セル測定位置による変化の様子は、前項において本番測定用セル#028-Dで見られたものと、同様である。ここで、これらのコサインカーブへの最小自乗近似曲線の係数から、旋盤加工中心との各加工部位のずれ量を求め、図 1.3 に示す。図 1.3 では、前項の図 8 と同様に、R2 部分と V 字溝部分が、 $180^\circ$  方向を中心に  $\pm 20^\circ$  方向に  $12 \pm 2 \mu\text{m}$  程度、HOM 中心がそれらと同じ方向に、 $6 \pm 1 \mu\text{m}$  程度、それぞれずれ、さらに、R2 部分と V 字溝部分のずれの様子が、同様であるのに対して、HOM 中心位置のずれの様子が異なっている。ここで、図 8 と図 1.3 を比較すると、各加工部位のずれ量、方向とも、同様の傾向を持っていることから、今回の H60VG4S17 加速管セルの加工において、このような加工部位のずれは、系統的に現れているものと考えられる。

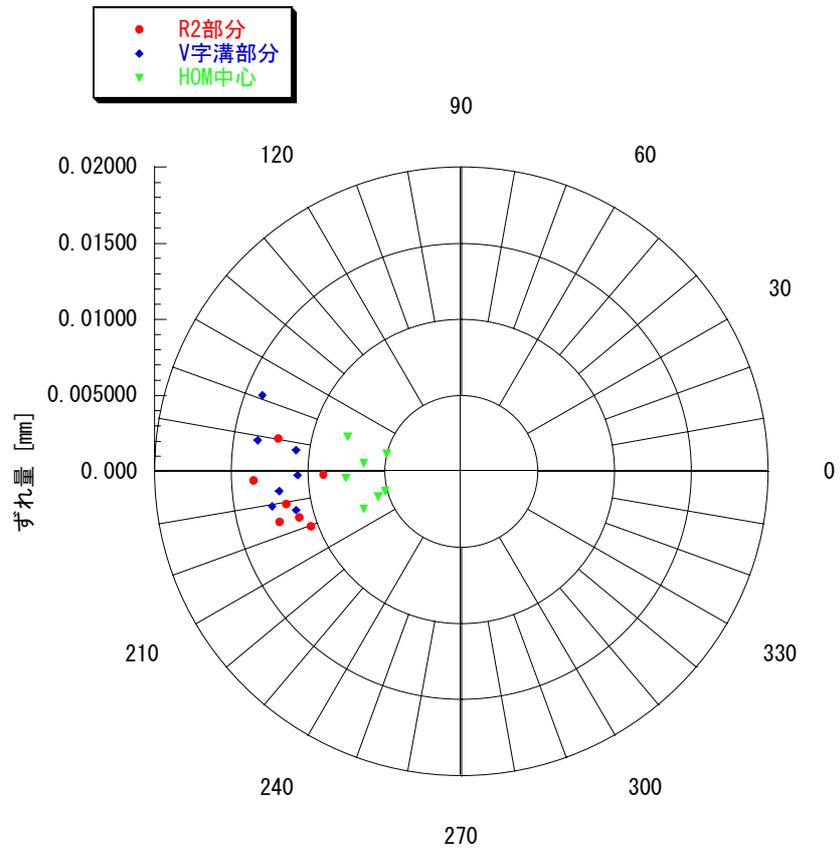


図 1 3 . #005-1,3,5、#028-1,2、#049-1,5-ミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ

ここで、さらに前項の図 9 と同様に、R2、V 字溝部分と HOM 中心位置の相対位置を求めると、図 1 4 のようになる。ここでも、図 9 と同様のずれが見られることから、今回の H60VG4S17 加速管セルの加工では、ミリング加工部位による相対位置についても同様に、系統的に現れているものと考えられる。

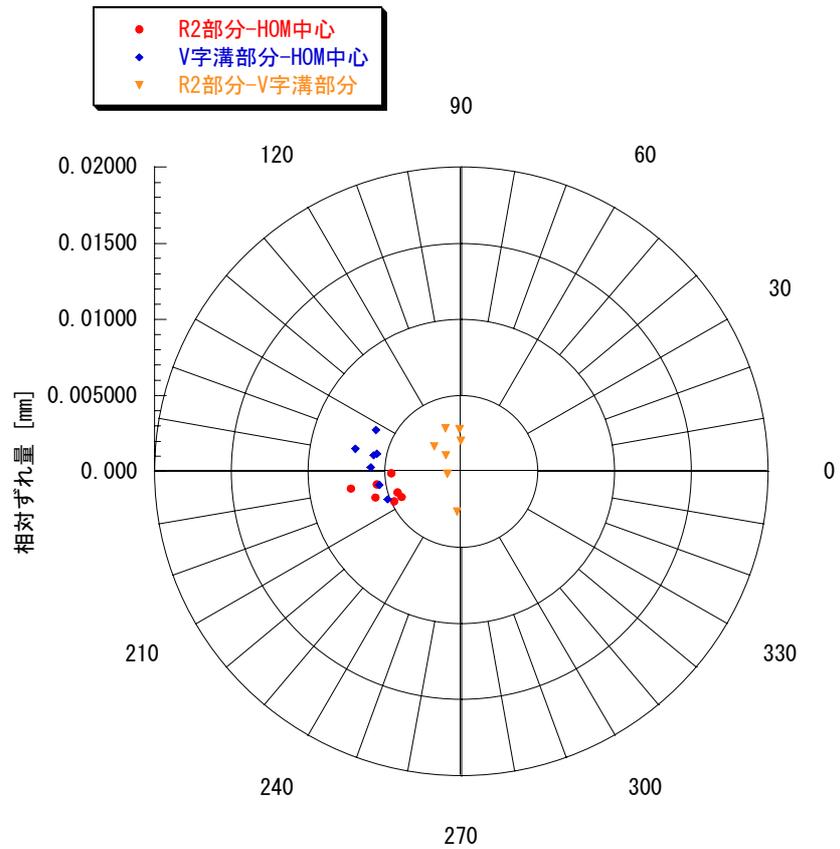


図 1 4 . #005-1,3,5、#028-1,2、#049-1,5- 3つのミリング加工部位間の相対位置

#### 2. 4 仕上げ加工前のセル測定結果

H60VG4S17 加速管セルは、外部機械加工メーカーで、旋盤中仕上げ加工とミリング加工を行ったものを、KEKにて超精密旋盤を用いて仕上げ加工している。これまで見られたミリング加工部位と旋盤加工部位との位置ずれが、どの時点で発生しているのかを明確にするため、KEKにて行われる超精密旋盤仕上げ前のセルの寸法測定結果から、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM中心のセル測定位置による変化を求め、その結果を図 1 5 に示す。ここでは、測定の再現性を見るために、セルを  $180^\circ$  回転して同様の測定を行った。図より、2回の測定値には、 $1 \mu\text{m}$  未満の良好な再現性が見られることがわかる。ここで、図中の近似曲線は、コサインカーブである。

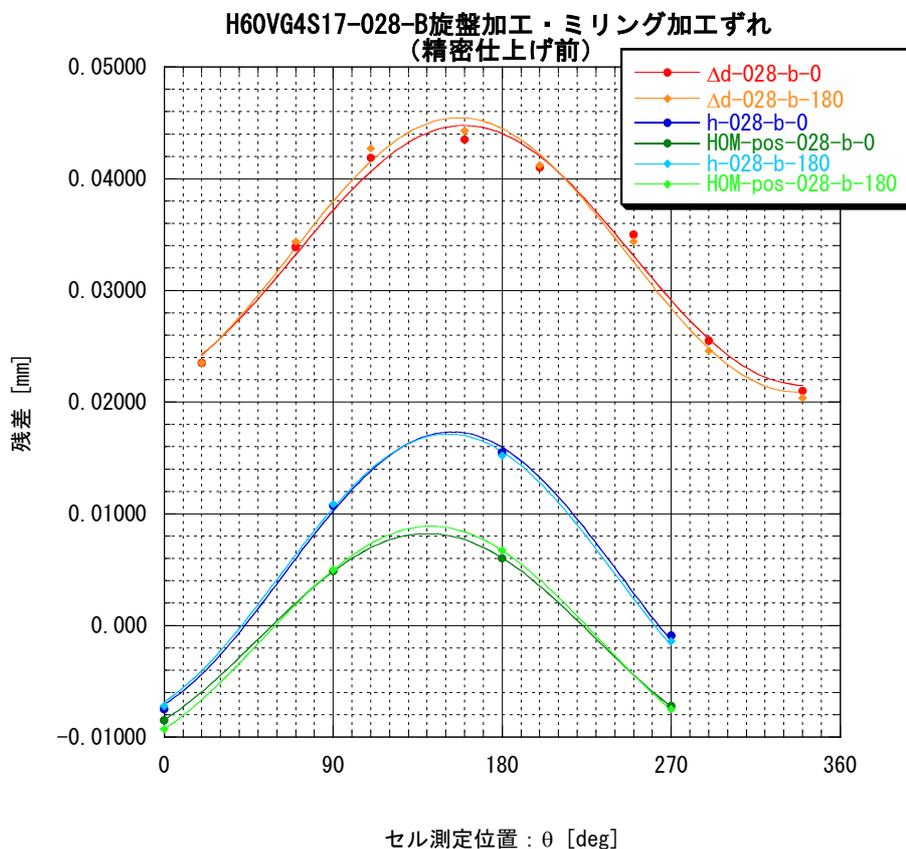


図 1 5. 超精密旋盤仕上げ前の#028-Bセルの $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心残差の変化

図 1 5 の結果から、R2 部分、V 字溝部分、HOM 穴中心の、旋盤加工部分からの位置ずれ量と方向を求め、図 1 6 に示す。図より、KEK での仕上げ加工前のセルについても、仕上げ加工後のセルで見られたものと同様のずれが、見られることがわかる。このことから、これまで見られた、旋盤加工部分とミリング加工部分のずれは、KEK に納入される前に発生しているものと思われる。ここで、参考として、3つのミリング加工部位の相対位置を求め、図 1 7 に示す。図 1 7 はミリング加工間でのずれを示すものであるため、旋盤仕上げの前後で変わることは無く、当然の結果ではあるが、これまで他のセルで見られたものと、同様の結果が見られている。

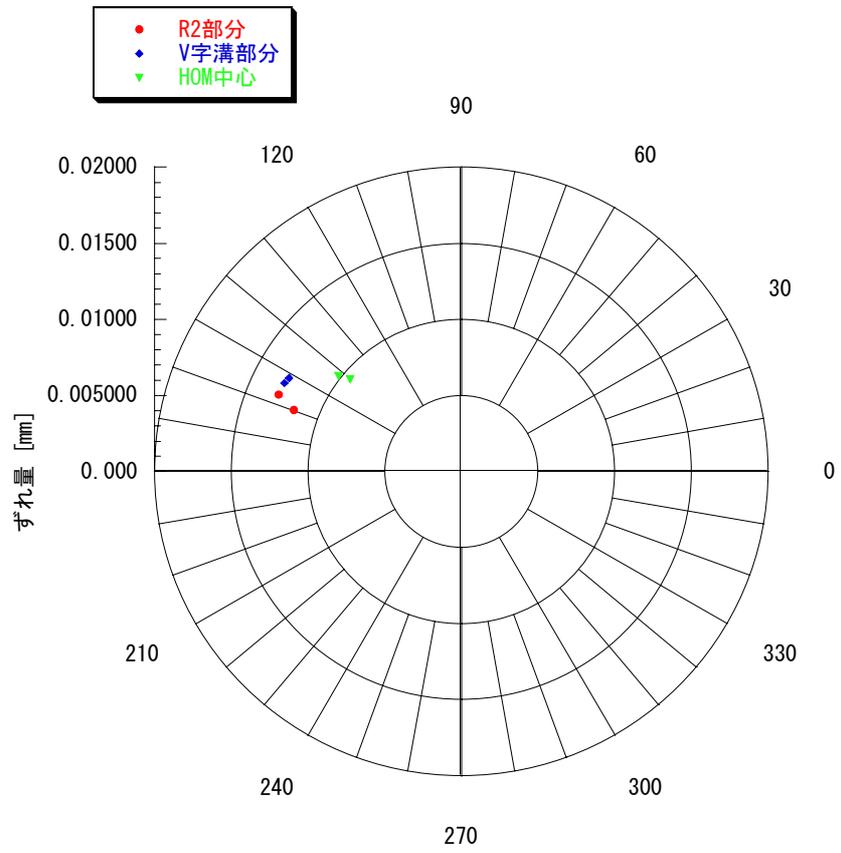


図 1 6 . 超精密旋盤仕上げ前の#028-Bセルのミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ

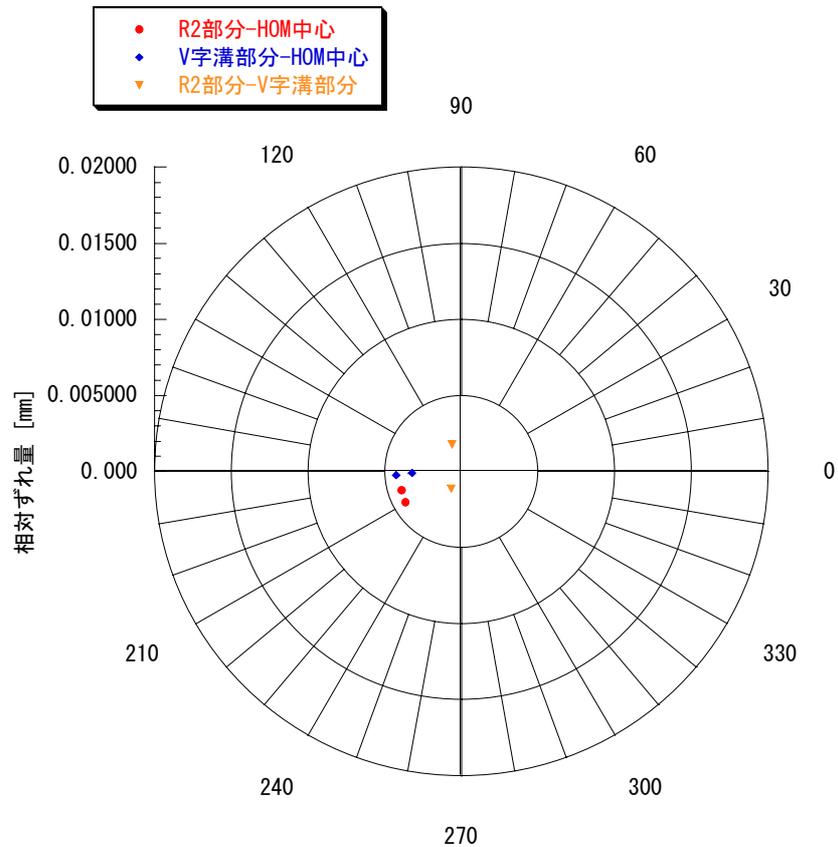


図 17. 超精密旋盤仕上げ前の#028-Bセルの3つのミリング加工部位間の相対位置

## 2. 5 H75VG4S18 (HDDS3) 加速管セル測定結果

今回測定を行った H60VG4S17 加速管セルの1世代前に加工した、H75VG4S18 (HDDS3) 加速管セルの寸法測定結果から、ミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれと、ミリング加工部位間の相対位置を求め、それぞれ、図 18、19 に示す。ここでは、#003, #013, #023, #033, #043, #053, #063 の7種類のセルを、測定サンプルとした。

図 13 と 18、図 14 と 19 を比較すると、今回の H60VG4S17 加速管セルの測定値と比較して、H75VG4S18 加速セルの測定値のばらつきが、より大きくなっていることがわかる。しかし、各ミリング加工部位と旋盤加工位置とのずれ量や方向、さらに、R2 部分や V 字溝部分と HOM 中心の相対位置は、2つの場合でほぼ同様に出ている。これらのことから、H60VG4S17 加速管セルに見られた、旋盤加工位置とミリング加工位置のずれ、さらに、ミリング加工部位による、位置ずれは、一世代前の H75VG4S18 加速管セルの加工時から、系統的に出ていたものと考えられる。

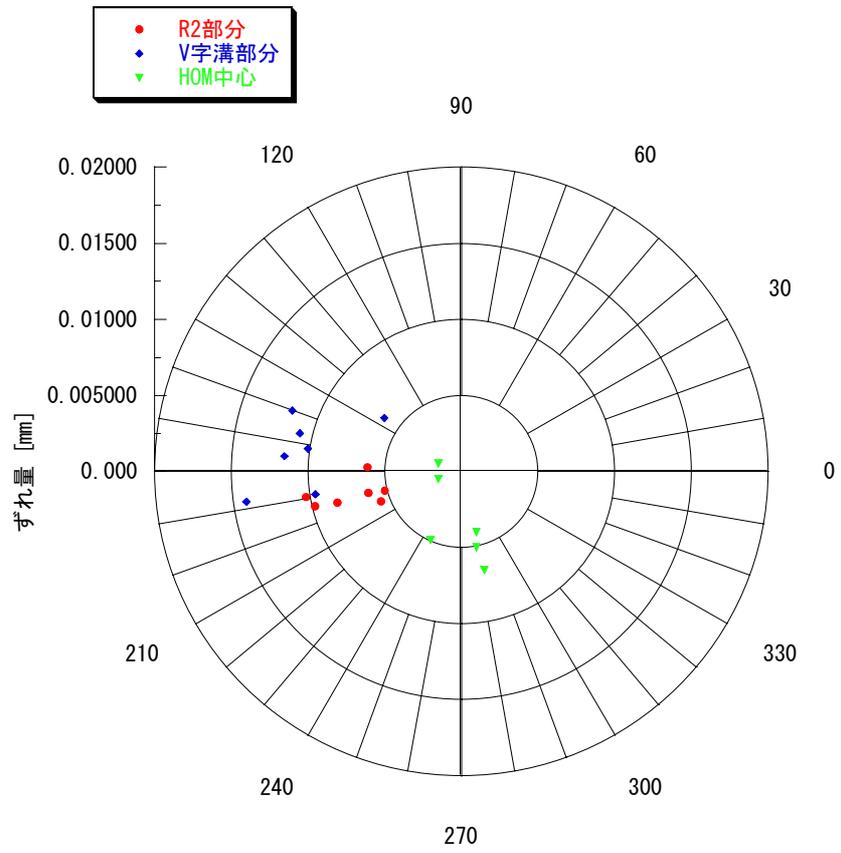


図 18. H75VG4S18 加速管セルのミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ

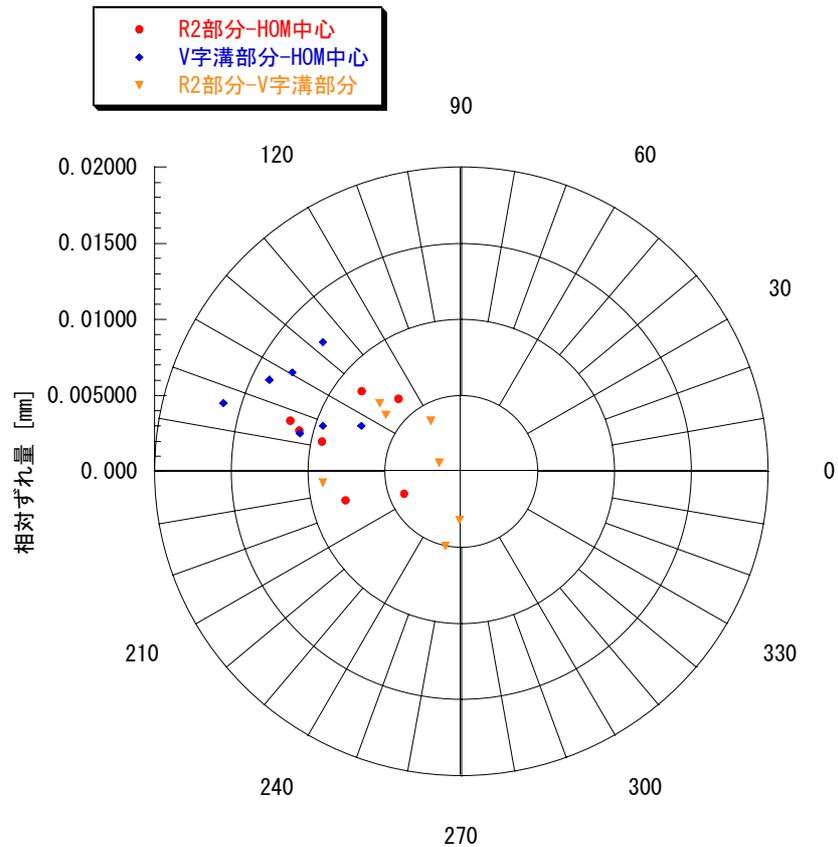


図 19. H75VG4S18 加速管セルの 3つのミリング加工部位の相対位置

#### 4. まとめ

H60VG4S17 加速管セルについて、R2 部分切り込み量： $\Delta d$ 、V 字溝高さ： $h$ 、HOM 中心位置の測定値より、各ミリング加工部位の旋盤加工位置からのずれ量とずれ方向を求めた。その結果、ずれ量として約  $2 \mu\text{m}$ 、ずれ方向として、約  $8^\circ$  の再現性が得られた。

このずれは、CMM 測定を行った全ての H60VG4S17 加速管セルで同様に見られ、系統的に発生しているものと、考えられる。また、KEK で行われる超精密旋盤加工前にも、同様のずれが見られることから、KEK 納入前に発生しているものと、考えられる。

今回の測定で明らかになった、H60VG4S17 加速管セルの、旋盤加工部分とミリング加工部分の位置ずれは、一世代前の H75VG4S18 加速管セルにも同様に見られた。このことから、これらと同様の手順で加工された一連の加速管セルには、同様のずれが系統的に現れているものと考えられる。

これらの中で、旋盤加工部分とミリング加工部分の位置ずれに起因するものについては、ミリング加工時のセルの位置あわせを、より厳密に行うことで、改善されるものと、考えられる。また、このずれについては、その大きさと方向に再現性がみられることから、こ

のことは見越して、ミリング加工時のワーク位置にオフセットを与えて調整することでも、対処可能と、考えられる。

ミリング加工部位間に見られる相対的な位置ずれについては、ミリング加工が同一の加工機で行われていることから、加工機に起因するものと考えられる。そのため、この部分のずれが問題となった場合、より高剛性のツールや加工機を用意する必要があるものと、考えられる。

付録1. HDDS1 加速管セルの測定

H75VG4S18 (HDDS3) 加速管セルの、さらに一世代前に加工した、HDDS1 加速管セルについても、CMM 寸法測定結果をもとに、本編と同様の解析を行った。

ここでは、測定の再現性の確認のために、セルの向きを反転して2度同様の測定を行った、#051-1, 2 の2つのセルの測定データから、 $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置の残差のセル方向に対する変化の様子を求めた。その結果を、セル毎に、図 A1、A2 に示す。図では、セルを反転した場合に得られた結果を「-180」で示す。

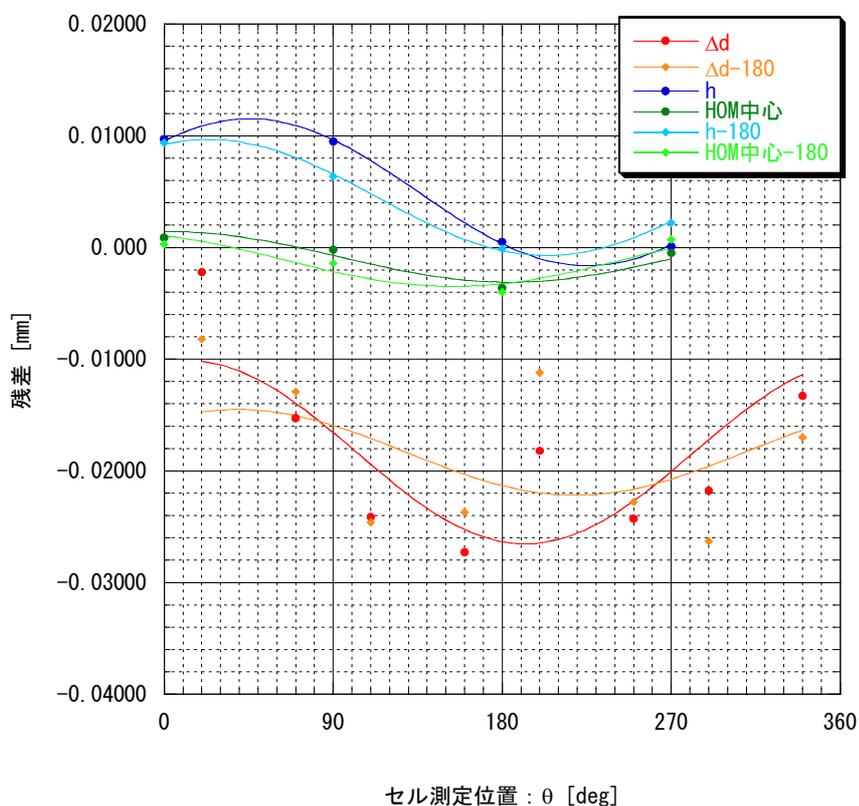


図 A1. HDDS1 加速管セル#051-1 における  $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置残差の変化

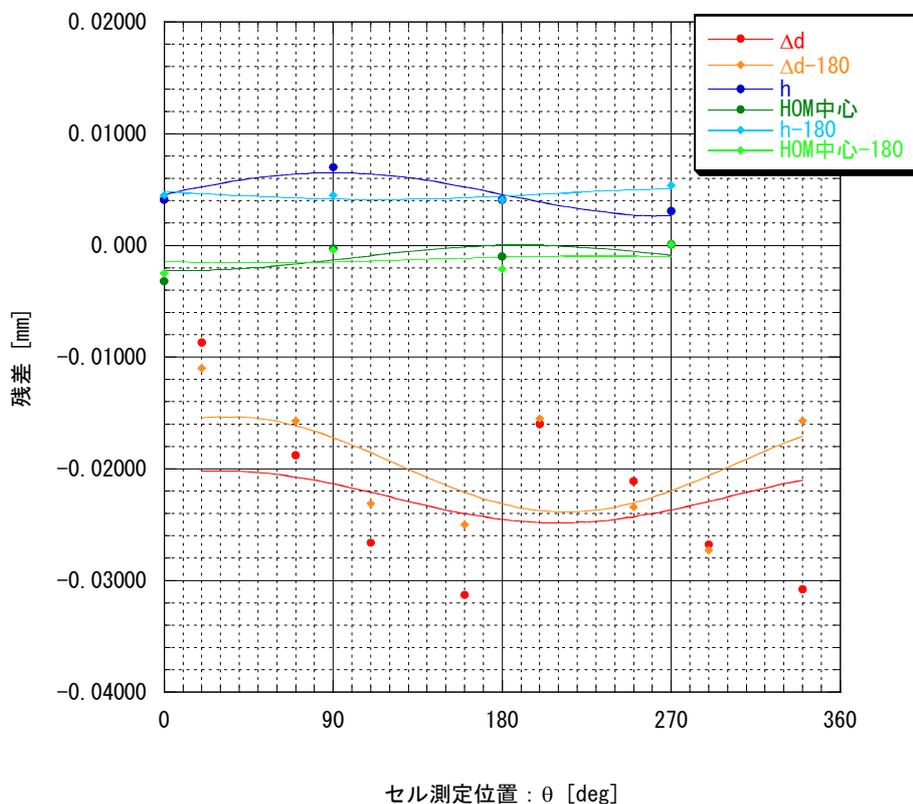


図 A2. HDDS1 加速管セル#051-2 における  $\Delta d$ 、 $h$ 、HOM 中心位置残差の変化

図 A1、A2 では、本編の図 5～7 や、図 15 に見られたような、良好な再現性は見られない。HDDS1 加速管セルの CMM 寸法測定では、 $\Delta d$  を算出する際に用いる、R2 部分の中心位置と半径の測定値が、R2 部分の円弧上の 3 点の位置データから求められていることから、18 点の位置データから求められた、H60VG4S17 加速管セルの測定値と比較して、大きな測定誤差が含まれる可能性がある。このことが、図 A1、A2 で良好な再現性が得られない一因ではないかと、考えられる。

図に示した近似曲線は、測定値をコサインカーブで最小自乗近似したものである。図を見てもわかるように、測定値は、ミリング加工部分と旋盤加工部分との位置ずれに起因して発生するコサイン状の変化に、うまくあてはまらない。このことから、HDDS1 加速管セルについては、HDDS3 加速管セルや H60VG4S17(HDDS4)加速管セルに見られたような、旋盤加工とミリング加工の位置ずれは、明確には現れない。この原因が、加工側にある（加工誤差）か、測定側にあるか（測定誤差）については、現状では判断できない。

## 付録 2. H60VG4S17 メーカー測定結果

機械加工メーカーにおいて、H60VG4S17 加速管セルの中仕上げ後に行われた寸法測定データから、 $h$  と HOM 中心位置の残差に着目して、セル測定位置に対する変化の様子を求めた。ここでは、KEK に納入された本番用と本番測定用の全 119 枚のセルについて、HOM 穴の無い 2 枚のセルの HOM 中心位置を除き、セル上の測定位置毎の平均値を用いて評価した。その結果を図 A3 に示す。

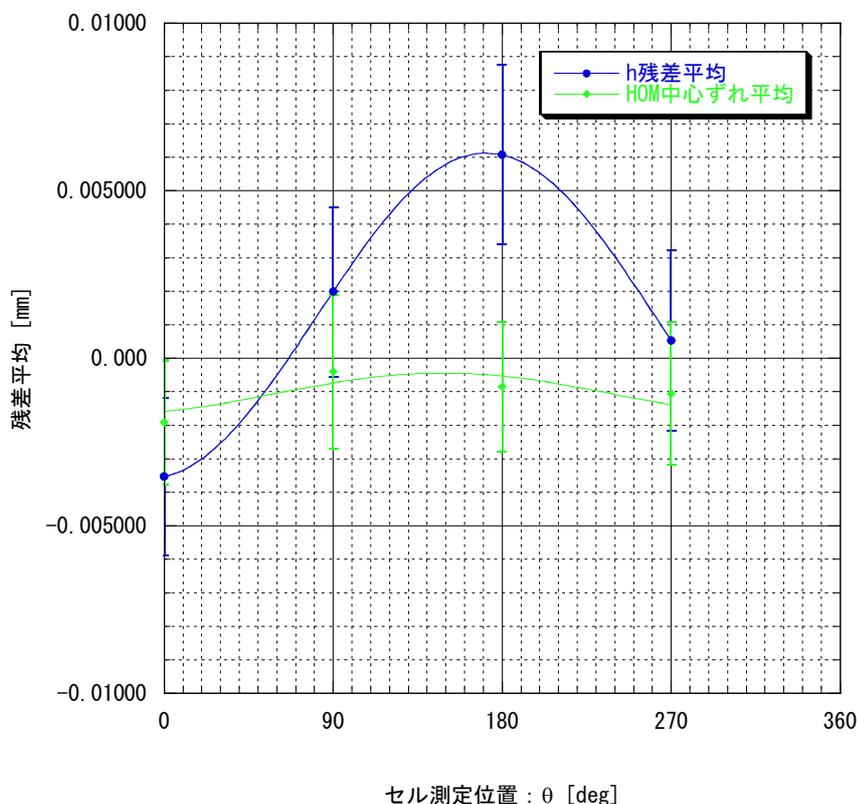


図 A3. メーカー測定、本番用、本番用測定セル全数の  $h$ 、HOM 中心の残差平均値の変化、エラーバーは各測定値の標準偏差： $\sigma$

図中の曲線は、これまでと同様に、図の関係をコサインカーブで最小自乗近似した近似曲線である。データ点が 4 点と少ないが、各平均値は、近似曲線により良好に当てはめられている。ここで、図中のエラーバーは、それぞれのデータの標準偏差を示す。

ここで、本編と同様に、図 A3 の近似曲線の係数から、V 字溝、HOM 穴中心の加工位置の、旋盤加工位置からのずれを示したものが、図 A4 である。

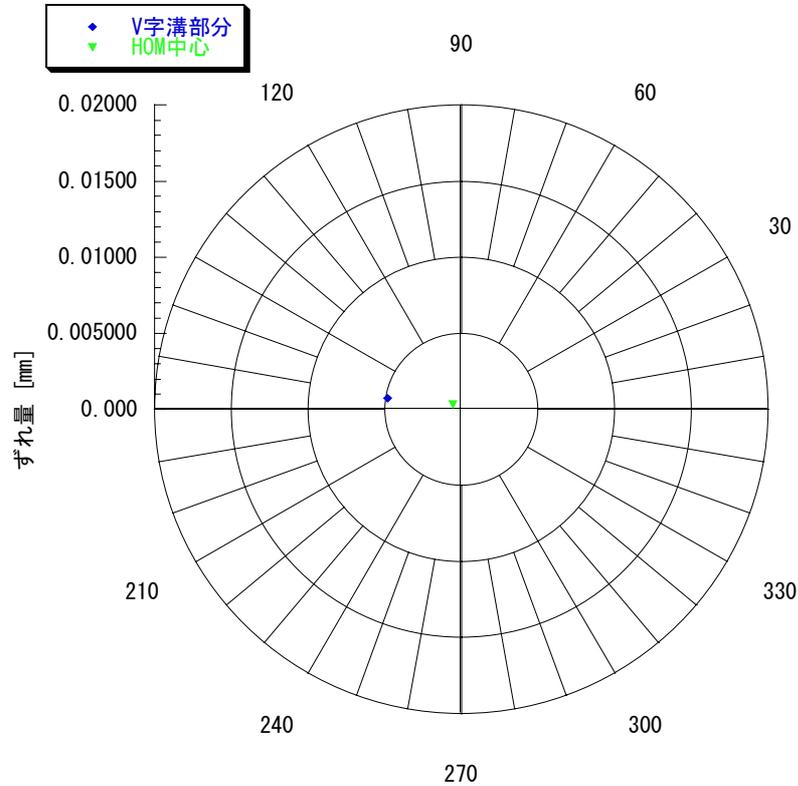


図 A 4. H60VG4S17 加速管セルの、本番用、本番用測定セルのメーカーでの測定値の平均から求めた、ミリング加工位置の旋盤加工位置からのずれ。

図より、ずれの大きさは、V 字溝部分で、 $180^\circ$  方向に、約  $5 \mu\text{m}$ 、HOM 中心で  $1 \mu\text{m}$  未満となり、本編の図 8、図 1 3 などと比較すると、V 字溝部分については、KEK での測定値、の半分以下、HOM 中心については、ほとんどずれ無しと、ともに小さくなっている。しかし、V 字溝部分のずれ方向が、x 軸のマイナス方向 ( $180^\circ$  方向) であること、HOM 中心のずれ量に対して、V 字溝部分のずれが大きくなっていることが、KEK の測定結果と同様である。