

[12P-04]

PRECISE DISK FABRICATION TECHNOLOGY FOR RDDS STRUCTURE

T. Higo, Y. Funahashi, Y. Higashi, N. Hitomi, T. Suzuki, T. Takatomi, N. Toge, K. Takata, and Y. Watanabe

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

Abstract

We have been developing X-band accelerating structures for linear collider. Based on the high-precision diamond turning for the fabrication of DDS structures, we have recently proceeded to fabricate the RDDS structure, which comprises of parts with rounded inner shape. In the present paper, we describe how we realized the rounded shape within ± 1 micron. A feed-forward technique was applied to realize a much severe requirement on the accelerating mode frequency, resulting in an integrated phase error along the structure within 5 degrees.

RDDS 加速管の加速ディスクの精密加工技術

1. はじめに

リニアコライダの主線形加速器に用いる加速管には、高電界加速の実現とビームエミッタンスの増大を抑制することが要求されており、更に2~3年程度で数千台規模の量産を可能にするものでなくてはならない[1,2]。そこで、高エネルギー加速器研究機構では、超精密ダイヤモンド旋盤加工[3]と銅同士の拡散接合[4]を基礎技術として、これまでに周波数離散加速空洞(DS)[1]や減衰を併用したDS(DDS)[5]の開発研究を行ってきた。今回は、加速効率を向上させるために空洞内部の形状をなめらかな球形に近づける設計[6]に基づいた空洞(RDDS)を開発した[7]。本稿では、加速モード及び高次モードの周波数を必要な精度に制御するための加工、測定技術を述べると共に、電気測定情報を加工指示に反映させた方法を採用することにより、良い精度の加速管構成パーツの製作を実証できたことに関する詳細を述べる。

2. 要求性能

基本構成要素となるディスクの形状を図1に示す。高次モードを伝達すべき4本の円形マニフォールドと空洞内のモードを結合させるためのスリット等は3次元構造を有するが、空洞内の大部分は2次元断面で表される回転対称構造である。加速(TM0)モード(F0)とHEM1モード(F1)の周波数制御に敏感な寸法は、空洞半径"b"、ビームホール半径"a"、スリット幅"w"である。周波数に関する要求精度と寸法に対する感度をまとめると、

要求精度 (単位 MHz)

	ランダム	系統
F0	3 MHz	$\ll 1$ MHz
F1	3 MHz	~ a few MHz

周波数感度 (単位 MHz/ μ m)

	$\delta f/\delta a$	$\delta f/\delta b$	$\delta f/\delta w$
F0	+0.6 ~ +0.4	-1.2	-1/15
F1	+0.1 ~ -0.5	-1.2	-1/15

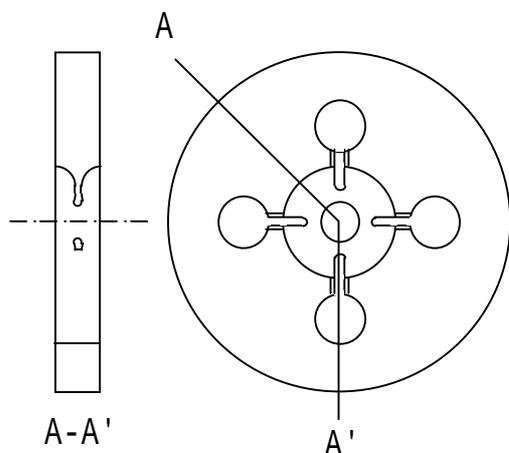


図1 RDDS ディスクの概念図

となる。ランダム誤差に対しては、空洞内形状に関する輪郭度を 2μ とすることにより達成されるはずである。また、加速モード F0 に関する公差は、加速管にわたっての積分位相スリップ量を 5 度に抑えるようフィードフォワードをかける加工工程を採用することにより、自動的に達成されるはずである。F1 に関する許容系統誤差の評価は明確には確立していないが、特別の分布形状でなければ 2 ~ 3 MHz 程度と考えられているので、これも自動的に満たされるような結果になると考えている。

3. 荒加工

無酸素銅の円柱から円盤を切り出し、旋盤の荒加工・端面研磨・3次元加工部仕上げ加工を経てアニールを行う。この後、超精密旋盤にて仕上げ加工を行う。注意の必要なことは、3次元加工部分は荒加工段階が既に仕上げ加工に対応していることである。

*) T. Higo, 0298-64-5226, toshiyasu.higo@kek.jp

3.1 荒加工スリット幅

3次元精密ミリングによる加工によるが、ツールを変更しない限り、数 μ 以内のばらつきに抑えられ、ドリフトも非常にゆっくりしたものであるため、必要であれば $\pm 5 \mu$ 程度に将来的には公差を厳しくすることも可能であろう。図2に、最終加工後に3次元測定器にて確認したスリット幅の測定値を示す。

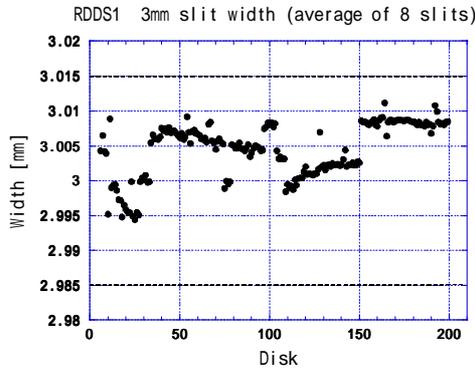


図2 3mmスリット幅測定値

3.2 端面

端面の平面度や傷等は、超精密旋盤加工での真空チャッキング特性に直接響くものであり、研磨を行って $5 \mu\text{m}$ 以下の平面度とした。

4. 精密加工技術の確立

輪郭度 2μ を実現するためには、以下の3点が重要である。

1. 正確なダイヤモンド工具刃先の形状把握
2. 工具刃先の精密な位置だし
3. 工具の(x、z)2軸での正確な移動

1項に対しては、工具の刃先真円度が 0.1μ 級で充分良いことを仮定して、半球を削ってその真円度を測定することにより、 0.3μ 程度の評価が可能である。2項に関しては、適宜真空チャック面をセルフカットすることによりZ方向の原点校正を行い、外周を正確に測定トレースして、必要に応じて半径方向の原点にオフセットを与えることによりR方向の原点校正を正確に行うことができる。3項は、旋盤の制御パラメータを最適化することにより、 0.5μ 以内の制御が保証される。

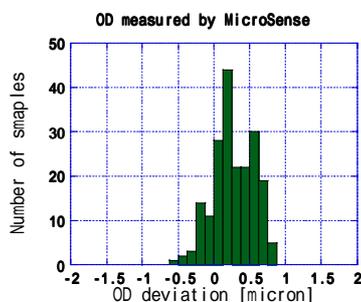


図3 外周直径のずれ測定値

5. 加工結果 寸法計測結果

5.1 外周直径

加工終了後、次のディスクを加工中に、直前に加工したディスクの外径を、静電ギャップセンサー(マイクロセンス)を用いて精度良く基準との比較測定する。図3に、全てのディスクを加工終了後に同様の測定方法で再度測定した結果を示す。公差 $\pm 1 \mu$ に対して、 0.75μ を連続して越す場合は、工具位置を再セットすることとした。その結果、公差内には十分に収まる加工が実現できていることが分かる。

5.2 アイリス直径"2a"とセル内直径"2b"

半径方向は、周波数制御に重要な寸法であり、本件では外周基準で決定した後は旋盤の制御に託している。この旋盤の相対移動精度は充分良いと考えてよく、実際図4に示す半径方向の2パラメータ"a"と"b"の相関は 1μ 以内でとれていることがわかる。このような校正制御方法により加工した200個のディスクの"2b"測定値を図5に示す。これは、3次元測定器(ZEISS CARAT850)を用いて直径1mmのプローブを使用し測低圧 0.2N での測定結果である。2~3 μ 程度のオフセットは、アニール済みの銅表面をプロービングする場合のプローブのめりこみ量にほぼ匹敵することが分かっているため、この結果より輪郭度 2μ 相当の制御が実現されていることがわかる。

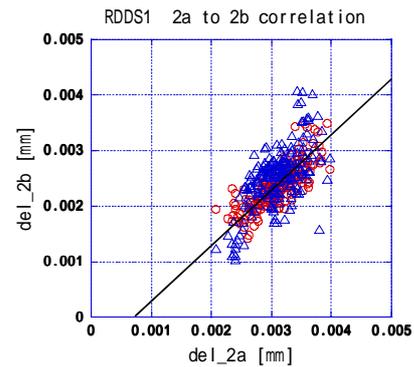


図4 "a"、"b"間の相関

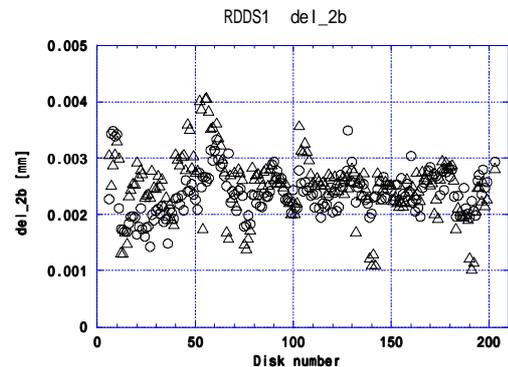


図5 "2b"測定値

5.3 平面度、平行度

拡散接合を想定したディスク製作であるため、端面の平面度公差(0.5μ)、面粗度公差(50nm)は重要であるが、前者に関しては、95%以上が満たされ

ていることを干渉計で確認した。後者はこれまでの経験より充分クリアーしていると考えている。

平行度は、端面内の4点の厚さを測定することにより、端面が平面であることを仮定して、フィットにより平行度を算出し、結果を図6に示した。5%程度のディスクが若干公差はずれとなっていることが分かるが、ブックシェルフ（ディスクの傾き角）の許容量 $50 \mu\text{rad}$ に対して小さいので問題にならない。但し、加工特性上何故このような平行度の悪いディスクができるかは不明で、把握しておく必要があると考えている。

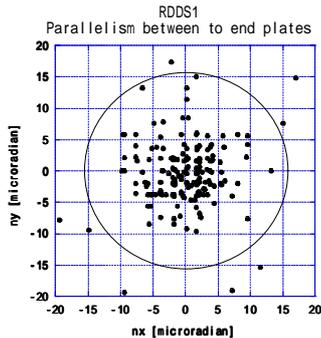


図6 平行度測定値

6. 加速モード周波数精密調整

前節で述べたことから、3次元ミリング加工部分の加工精度や、2次元超精密旋盤加工部分の加工精度は、周波数精度で約1MHzに制御することが可能な加工方法を得ていることがわかる。ランダム誤差の要求はこれで自動的に満たされている。図7に、各ディスクの代表的なモードの周波数のスムーズ曲線からのずれを示したが、これより1MHzより充分良いなめらかさを実現できていることが分かる。

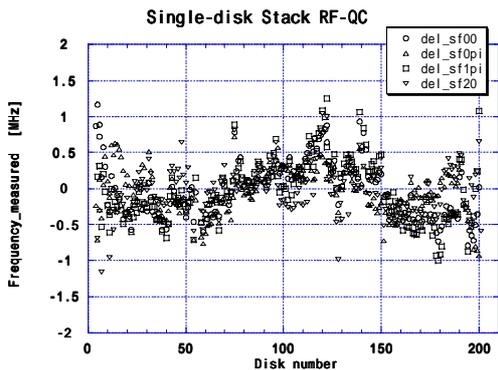


図7 単一ディスク周波数測定値

これにひきかえ加速モードの周波数要求精度はずっと厳しいので、フィードフォワード法を採用することにした。番号の若い、即ち周波数の位相ずれに対する感度の低い方から加工を進め、6ディスク毎の加速モード周波数の絶対値を測定し、位相シフト誤差を評価してその積分量が大きくならないように

後の加工分の"2b"にオフセットをかけることにした。オフセット量は $1 \mu\text{m}$ 強までであり、図8に示した。これから分かるように、積分位相誤差を数度内に抑えることが可能であることが実証できた。

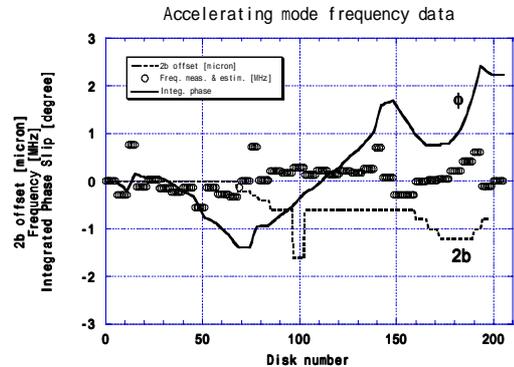


図8 フィードフォワード量（破線）と加速モード周波数測定値（○）及び積分位相誤差（実線）

7. 議論

ダイヤモンド工具を用いた超精密旋盤加工を用いて、RDDSを校正するディスク200枚程度を輪郭度 $2 \mu\text{m}$ 相当で加工し、その精度を機械的な測定より確認した。初めてのRDDSディスク加工ということもあり、1日の加工量は極めて保守的な8枚程度で進めたが、先に加工したディスクの電気的測定を後の加工ディスクの寸法オフセットに反映させ、加速モードの加速管全体に渡る実効周波数精度を極めて良くすることが実証できた。

ある確率で平行度の悪いディスクが生じたが、原因はチャック面の傷やゴミ等が考えられるが特定できていないので、将来の課題として残っている。また、ビームアイリス両側の同心度が $2 \mu\text{m}$ 程度のものが破壊検査でいくつか見ついているが、これに関してはスピンドルの動作特性に関連しており、詳しい追加調査が必要である。

最終仕上げ加工において、ダイヤモンド工具のチップングにより取り替えが生じて今回は4個のチップを使用した。交換に要する手間暇を考えると、量産対応の長寿命のチップまたは切削方法の開発が必要であると考えられる。

また、加工時間の内訳は、主にチャッキング後の心出しと、最終加工時の 3 mm/min の遅い切削速度支配されているので、これらの時間短縮を狙った開発にこれから取りかかるべきである。

参考文献

- [1] JLC Design Study, KEK Report 97-1, 1997.
- [2] ZDR, SLAC Report 474, 1996.
- [3] Y. Higashi et al., KEK Report 00-1.
- [4] Y. Higashi et al., KEK Report 00-2.
- [5] T. Higo et al., Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, p3417, New York, 1999.
- [6] Z. Li et al., 同上, p3480.
- [7] J. Wang et al., 同上, p3423.