

卓越した超精密加工技術

高富 俊和
高エネルギー加速器研究機構
技術部工作課
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

工作センター内の業務は、短期的な設計や加工作業ばかりでなく、機構のプロジェクトに対応するための開発グループに参加し、工作特有の技術で寄与するという形もある。特に筆者の場合は、ダイヤモンド工具を用いた超精密加工技術の開発などを中心におこなっている。

その中で、X バンド加速管用ディスク（以下ディスクと呼ぶ）の要求加工精度を満足する加工をおこなうために、機構内外における加工技術について調査をおこなったが、技術的に確立されていない部分が多く、一から加工技術を構築する必要があった。そのため加工機の開発、および加工技術の確立などをおこない、加工試験を繰返すことにより 1 μm 以下の高精度で安定性の高い加工をおこなうことができる超精密加工技術を習得・構築することができた。

また、その成果については学会等で報告し、企業などへの技術指導も行っている。

本報告では、X バンド加速管用ディスクの超精密加工を中心に、そこで発生した問題点とそれをどのように解決したかについて述べる。

1 . はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、実験機器等の高精度化にともない超精密加工の要求が高まってきた。そこで、ダイヤモンド切削による超精密加工技術を取り入れ要求に対応している。

X バンドのような非常に高い周波数（11.4GHz）でビームの性質を損なわずに加速させるためには ± 1 μm の寸法精度と形状精度が必要とされる。また、この加速管は約 200 枚の個々の寸法が異なるディスクから構成されており、高精度で加工することはもとより、その精度を安定的に継続することが重要となる。

ディスク加工に要求される精度を達成するために超精密加工の試験を開始したが、安定した加工をおこなうことが困難であった。そこで、加工時に発生する加工不安定性についてその要因と考えられる項目を考察し解決策を検討した。

2 . 加工時に発生する誤差要因

実際の加工では、図 1 に示すような誤差要因により加工精度の低下が発生する。これらを解決するには、加工理論、加工技術、加工機の性能、環境によ

る影響などトータル的に考察し、加工精度に起因する加工誤差の原因を究明する必要がある。

ディスク加工における加工誤差要因としては、加工機の運動精度、工具刃先形状の仕上げ面への転写性、加工環境およびディスクを無歪で加工機に取り付ける方法などの周辺技術が考えられる。また実際の加工をおこなう場合、環境等の影響により加工機が変形し、工具位置が変化することもわかっている。

これらの誤差要因を取り除くため、加工試験を繰り返しながら加工方法の確立および、精度向上のための技術開発をおこなった。また、加工物の測定のための測定器の開発等を行うことにより、現在ようやく要求される精度の加工が行えるまでになった。

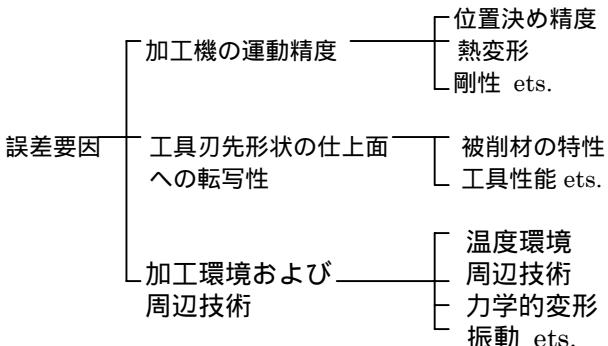


図 1 : 加工時に発生する誤差要因

3 . 加速管の説明

3.1 加速管とは

加速管とは、電場を形成する電極により粒子（荷電子）を加速する装置で、加速器の主要部分である。現在製作している加速管は、2つの線形加速器によって、電子、陽電子を数百 GeV まで加速し衝突させることにより、高エネルギー物理実験をおこなうための装置で、これまでの線形加速器の約 10 倍も高いエネルギーまで加速できる次世代の衝突型線形加速器の加速管として考えられているものである。

3.2 加速管の構造

現在までに試作用として数種類の加速管を製作した。加速管単体の構造は、主に入出力カプラ、ビームポート、本体となるディスクにより構成され、

全長は図2に示す1.3m長や1.8m長の加速管を製作している。

ディスク間の接合は拡散接合とロー付けによっておこなわれ、接合後の真直度を必要とする。また、加工により加速周波数を決定するため、超精密加工を必要とする。

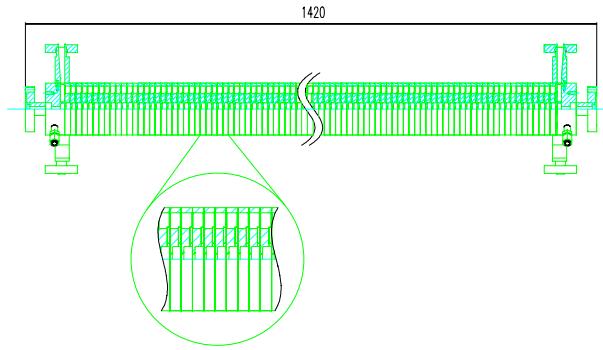


図2：1.3m長 DS(Detuned Structures)タイプの加速管の構造

3.3 ディスク形状

図3はRDDSタイプのディスクを示す。空洞部断面形状は円弧と直線で形成されている。また、各ディスクはわずかながら寸法が異なり、今までにない高電界加速管であることと、拡散接合によるディスク間の接合をおこなうため、加工時における切りくずの巻き込み等による傷は避けなければならない。

これらの加工に要求される精度は、寸法精度 $\pm 1\mu\text{m}$ 、円弧形状部の輪郭度 $2\mu\text{m}$ 、同軸度、平面度 $0.5\mu\text{m}$ 、平行度 $1\mu\text{m}$ および、表面粗さ 50nmRy など高精度が要求される。また、材料には無酸素銅を使用する。

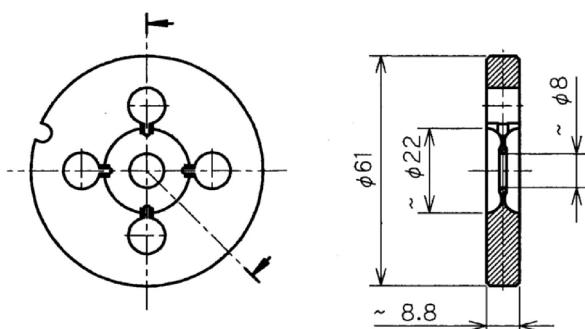


図3：RDDS(Rounded Damped Detuned Structure)タイプの加速管ディスク

4. 超精密加工機について

超精密加工では、加工機の運動精度が加工精度に

大きく影響を与える。近年、加工機の運動精度は向上しているが、加速管ディスクのような形状の加工を数百枚単位でおこなう場合、剛性や熱変形などの影響により充分な運動精度をもっているものではない。そこで、加工機の運動性能について調査をおこない、高精度な加工がおこなえるように調整をおこなった。

4.1 超精密旋盤

使用した超精密旋盤は、東芝機械(株)社製を使用した。構造としては、スピンドルに静圧空気軸受け(エアースピンドル)を用いた。エアースピンドルは空気圧により軸を浮上させ、ビルトインモーターにより回転を与えており、そのため、高精度な回転が得られ、多くの超精密加工機に使用されている。

本加工機は温度変化の影響を抑えるため低熱膨張のスーパーインバー材のスピンドルに載せかえた。

テーブルの案内には、ニードルローラーを用いたダブルV溝スライドテーブルを使用している。加工機械のスライドテーブルに要求される条件は、摩擦が小さく円滑に移動する、スティックスリップなどの不連続な動作をしない、移動精度が良い、剛性が十分大きく減衰能力が良いこと、保守管理が容易などがあげられる。

超精密加工機においては、すべり案内、転がり案内、静圧空気案内、静圧油案内などが用いられているが、位置決め精度、剛性の面から、ニードルローラーを用いたダブルV溝機構を採用した。測定により真直度は $0.15\mu\text{m}/150\text{mm}$ でニードルローラーの転がりによる変動は $0.02\mu\text{m}$ 以下である。

ディスクのスピンドルへの固定方法には、真空チャックを用いた。また、加工液には加工部の冷却と切りくずの除去のためケロシンをミスト状にして吹きつけた。ゴミ影響や外部からの熱の流入を抑えるため加工機はクリンルーム(クラス1000)のブース内に設置した。温度管理は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ でおこなっている。工具位置制御はFUNAC(ファンック(株)社製)15Tによりクローズド制御を行い、最小単位は $0.01\mu\text{m}$ である。

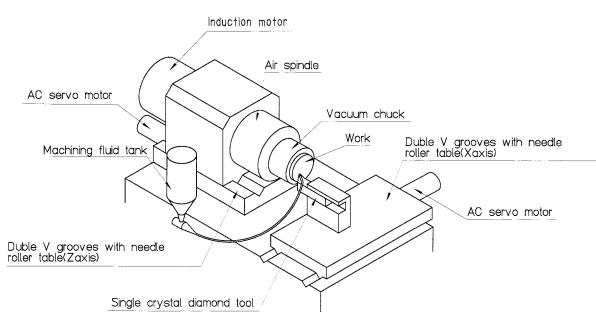


図4：超精密旋盤の構造

4.2 ダイヤモンドバイト

バイトは刃先が円弧形状の単結晶ダイヤモンドバイトを使用した。ダイヤモンドは物質中最も硬く、高剛性で、耐摩耗性にすぐれ、他の物質との摩擦係数が小さく、熱伝導率が優れている。また、アルミニウム、銅に対して化学的にも安定で、鋭利な刃先稜が製作可能である。これらの特性によりダイヤモンドバイトは超精密加工に適している。

バイトの形状は、先端が R0.4mm の片刃バイトでウインドアンダルは 120°、輪郭度は 0.2 μm 以下である。材質はシャンク部が SUS410、チップ部は超硬合金で銀ローによりダイヤモンドを固定、シャンクとチップはネジにより固定されている。

ダイヤモンドバイトの使用上の問題点としては、高価であること、扱いに注意を要すること、個々のバイトで性能にばらつきがあること、チッピングの発生により加工不能になる、バイトの交換時間が長いなどがある。また、極力剛性を落とさないようにディスクの加工に最適と思われる形状とした。

Single crystal diamond tool

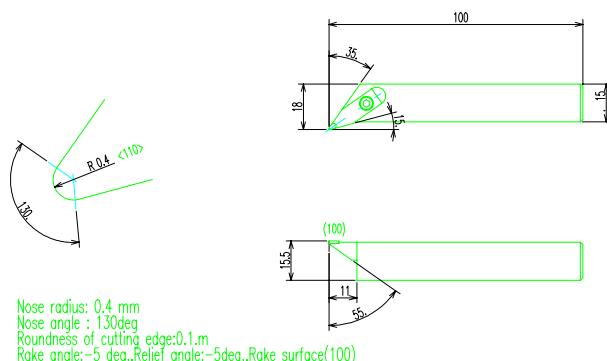


図 5 : 単結晶ダイヤモンドバイト

4.3 真空チャック

加工物をスピンドルに固定する方法には固定による変形を防ぐため真空チャックを用いた。

真空チャックは、ディスクの平面度、表面の傷に大きく影響するため、かなりの試行錯誤により今の構造を得ることができた。構造はベース部とチャック部により構成され、チャック部を交換することにより、いろいろなディスク形状の固定も可能である。材質は、ダイヤモンドとの親和性を考慮して A5052 を使用した。

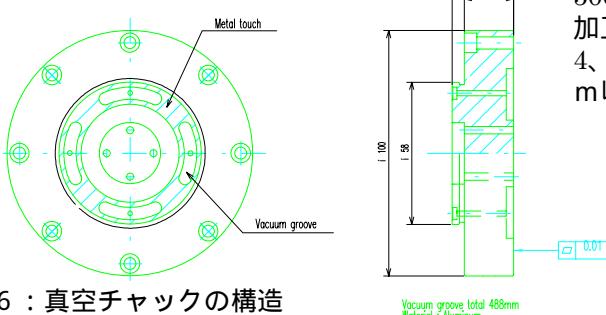


図 6 : 真空チャックの構造

5 . 加工時に発生した問題点

実際にディスクの加工試験をおこなうと、幾多の問題が発生し加工精度の低下をまねいた。これらの問題が発生するたびに、加工精度に影響する加工誤差の検証をおこない原因を究明して解決していった。

特に、高精度で安定的に継続する加工についてはわれわれもまったくの未経験であり、工作機械メーカーからの情報も充分でなく、問題が出るたびに処理し技術を構築しなければならなかった。

また、サブミクロンの寸法を評価できる測定技術も確立されていなかったため、測定器の開発からおこなう必要があった。そのため、加工そのものより問題を解決することに多くの時間を必要とした。

これらの問題点について、どのように解決していくか主要な項目について以下に説明する。

6 . 平面度不良

ディスクの加工では、平面度を 0.5 μm 以下にする必要がある。ところが、加工後の測定の結果 1 μm 程度しか平面度がでていなかった。

そこで、平面度に影響を与える誤差要因について検証を行った。誤差要因と考えられるのは、加工機の運動精度として、スライドテーブルの直角度、スライドテーブルとスピンドルの直角度、スピンドルの回転精度などが考えられ、機械精度の仕上面の転写性および加工環境・周辺技術としては材料の剛性、加工条件、加工方法、荒加工時の平面度、真空チャックの形状などが考えられる。

個々について調査を行った結果、加工機のスライドテーブルの直角度および、スライドテーブルとスピンドルの直角度については、ピッティング方向に 0.4 μm 程度のバックラッシュが見られるものの、直角度は P-P で 0.1 μm 以下であり、平面度不良の直接の原因では無いことがわかった。スピンドルの回転精度、材料についても問題は無かった。

平面度不良のもっとも大きな原因だったのは、ディスクを真空チャックに吸引することにより変形が起こり、荒加工時の平面度の不良が仕上げ加工後まで残ってしまうことをつきとめた。

そこで、真空チャックについては 4.3 で述べたように、できるだけディスクに変形を与えない吸着できる形状とし、荒加工時に平面度を向上させるため、ディスクの吸着面側に研削やラッピングを採用した。また、荒加工時の加工歪を抑えるため、加工後 500~2 時間のアニールをおこない、仕上げ加工時も加工歪を考慮した加工条件として加工厚さ 10 μm を 4、4、2 μm で加工することにより、平面度を 0.5 μm 以下に抑えることができた。

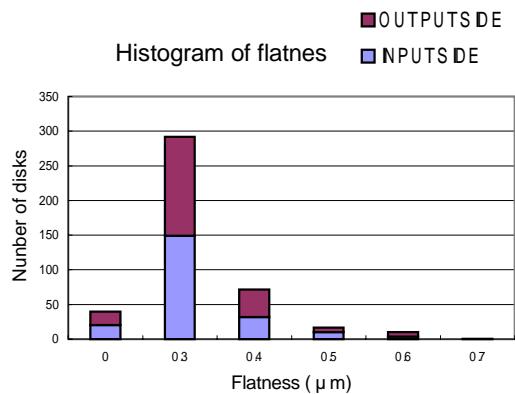


図 7：加工後のディスクの平面度

7. 連続加工時に発生する寸法のばらつき

加速管を製作するには、個々のディスクを高精度に維持したまま連続して加工をおこなわなければならない。しかし、実際には機械の位置決め精度、環境による影響、測定方法等の誤差要因により連続加工したディスクの寸法にばらつきが生じた。

7.1 測定器の開発

寸法のバラツキは、ディスクの外径（61）を測定し、比較することにした。サブミクロンの精度で寸法を簡単に測定する測定器が無いため、測定器の開発を行った。

測定方法としては、固定された 2 つの静電容量型の変位センサー（分解能 $0.01 \mu\text{m}$ ）間にディスクを通すことにより基準寸法のレファレンスとの比較測定を行った。繰返し測定精度は $\pm 0.2 \mu\text{m}$ が得られた。

これにより、連続加工と平行して高精度な測定が短時間できるようになった

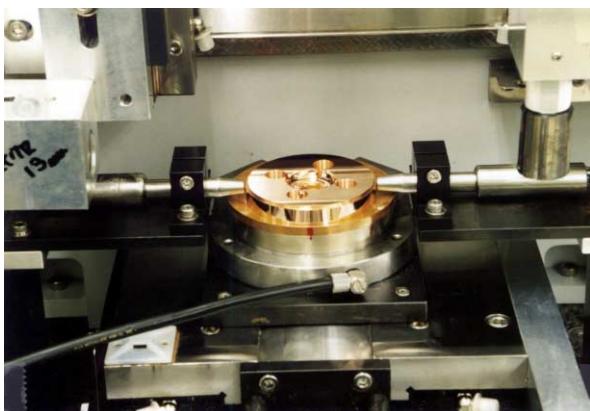


図 8：外径測定器

7.2 環境による影響

連続加工時の加工精度を低下させる要因としては、加工環境温度が大きく影響していることがわかった。

環境温度の調査を行った結果、温度管理されたブース内で加工をしているにもかかわらず場所により温度差が生じていた。これは、スピンドルの回転による熱の発生や外部からの熱の流入が原因であると考えられた。

また、加工中に加工物に温度変化が生じていることもわかった。これは、加工液として使用しているケロシンのエアーミストにより加工物の温度が低下することが原因である。

現状の環境では、これらによる温度変化をコントロールすることは困難である。そこで、加工時のディスクの温度と外径寸法の関係について調査した。これにより、外径寸法のばらつきは、加工時のディスクの温度による熱膨張と関係があることがわかった。（図 9）

そこで、加工時のディスクの温度を測定し、その温度を加工機に入力することにより、熱膨張を考慮した指令値で加工できるシステムを構築した。これにより、温度変化のある環境下でも安定した加工をおこなうことができるようになった。

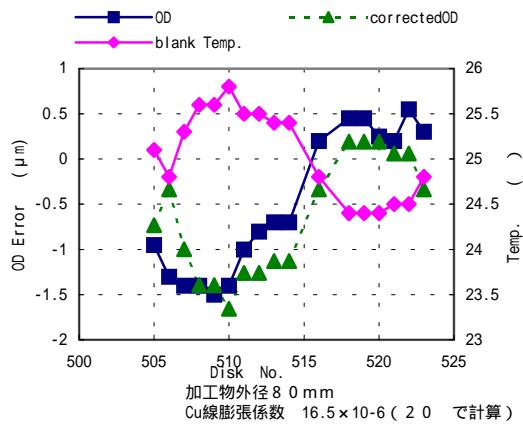


図 9：加工時のディスクの温度と外径寸法の関係

8. 曲面加工時の形状誤差

ディスク加工後に図 10 に示す a1 部の円弧形状の測定をおこなった結果、曲面部に $15 \mu\text{m}$ 程度の形状誤差が発生した。これは、加工機の動作不良に問題があると考察し調査を行なった。

8.1 加工機の動作不良について検証

加工時にバイトがどのような動きをしているのか検証するため加工機に測定器を取り付け、実際のディスク加工時の円弧動作をさせたときのバイトの動きを確認した。その結果、加工機の指令値の軌跡どおりにスライドテーブルが動いていないことがわかった。

スライドテーブルの動きは、各モーターに制御系からのパルス信号により移動をおこなっている。円

弧動作をさせる場合、X,Z 軸のパルス信号の出力を同期させる必要がある。

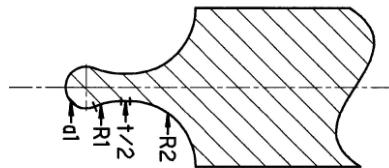


図 10：バイトの軌跡

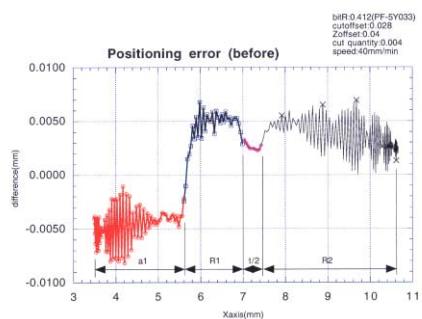


図 11：調整前の加工機の動き

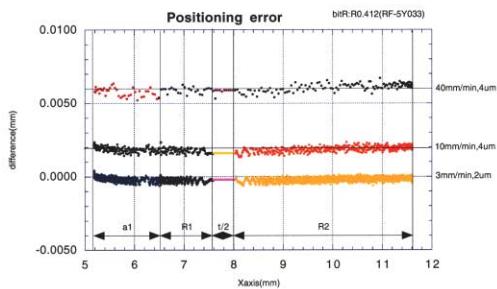


図 12：調整後の加工機の動き

図 10 に示すような加工軌跡 (a1 R2) で動作させた場合、任意の点での指定値からの半径方向のずれ量を測定すると、図 11 のようになつた。横軸は工具移動距離 (X 軸)、縦軸は指令値からの偏差を表している。このときの工具送り速度は 40mm/min すなわち円弧の動作をさせた場合、制御系からのパルス信号に対してモーターが正確に動いていないため 5 μm ほど指定した半径値より小さく動いていることを示している。また、最大 6 μm 微小振幅が生じていることがわかつた。

これは、制御盤とモーターとスライドテーブルの自動制御のバランスが崩れていたためで、制御盤の

パラメーターを調整するとともに、スライドテーブルの移動速度の最適値を測定結果から求めた。

その結果、図 12 のような結果が得られた。これらは実際の加工時の動作をさせたときの結果を表したもので 40mm/min は仕上げ寸法が 6 ミクロン残し、10mm/min は 2 ミクロン残し、3mm/min は仕上げ寸法となっている。

この加工条件では、円弧部での工具位置決め精度が $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下であることが明らかになった。

8.2 工具刃先半径誤差の測定

加工機の動きの調整をおこなつたあとに、まだ数ミクロンの形状誤差が曲面部に残つた。これは、工具の刃先半径に誤差があるのでないかと考え検証を行つた。

NC 制御では、工具刃先半径を加工機に入力することにより、工具中心軌跡を計算し加工が行なわれる。円弧形状を加工する場合、加工ポイントは工具刃先の曲面に沿つて移動する。そのため、加工される形状は工具の刃先形状が転写されたものとなるので、工具の刃先半径は高精度に測定しなければならない。しかし、工具メーカーの測定値では精度が不足している可能性があると判断し、工具刃先半径を高精度に測定できる測定器の開発をおこなつた。

測定原理としては、真円度測定機の高精度な回転を基準とし、加工した半球の曲率半径誤差を求ることにより、R バイトの平均的な刃先半径を容易に、また高精度に測定できるものである。

球面形状の加工では、バイトの刃先半径中心の軌跡を与えることにより加工が行なわれる。球の中心と切れ刃半径中心を結ぶ線上に切削点がくるのでバイト形状が転写され刃先半径が求められるはずである。通常、バイトの刃先半径中心位置の設定方法としては、テストピースの端面側 (Z 軸) と側面側 (X 軸) を加工し、その測定結果からバイトの刃先中心を求め、これを制御系に与えることにより設定をおこなつている。

図 13 に示すように、バイトの刃先半径 (br) に誤差 ($br - b$) がある場合、バイトの刃先半径中心が ($br - 2$) だけ離れる。この状態で加工される半球の形状は、X, Z 方向に半径誤差分の ($br - b$) だけ離れたところの交点 (P)を中心とした半径 ($R + br$) で加工される。これにより $=45^\circ$ で極値をもつことがわかる。他の誤差要因が無いとすると、

$=45^\circ$ での形状誤差は、

$$t(45) = br \cdot (\sqrt{2} - 1) \quad (1)$$

となる。

$t(45)$ の値を、真円度測定機により真円度誤差として測定し、バイトの実刃先半径の誤差を求めバイト刃先半径値の補正をおこなう。これにより、バイトの切れ刃全体での平均的な刃先半径を高精度に測定することができ、ディスクの円弧部 (a1, b1 等) の形状誤差を $\pm 0.2 \mu\text{m}$ に抑えることができた。

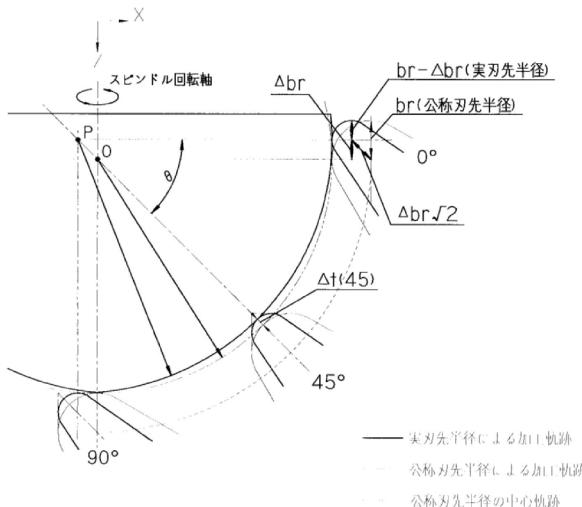
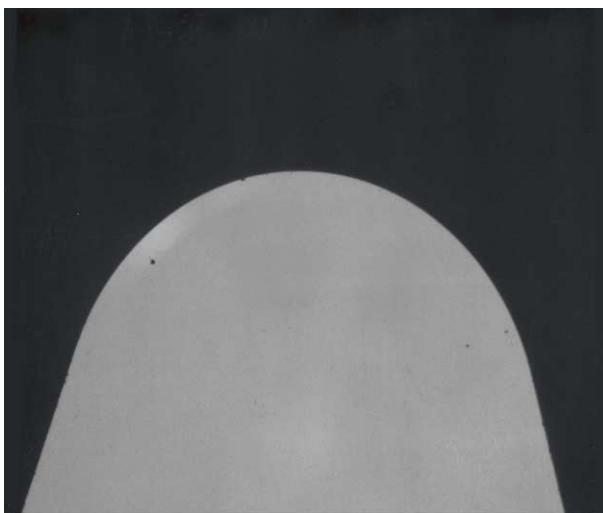


図 13 : 半球を加工したときの概念図

9. バイトの損耗

バイトの損耗は、摩耗によるものよりもほとんど刃先のチッピングによるものだった。チッピングが発生するとディスクの表面粗さが途端に悪化してしまい不良品となる。チッピングの原因は、穴部の断続切削によるものと、汎用加工機で加工された面を加工する場合、平面度、面粗度が悪く切り込み量が変化するため、バイトへの衝撃が大きくなるためだと思われる。

チッピングを抑えるため、仕上げ加工前に中仕上加工をおこなうことにより、仕上げ加工でのチッピングの発生をほとんど無くすことができた。また、加工方向を考慮することによりバイトへの負担を抑えている。チッピングしたバイトは再研磨修理を行っている。



New tool

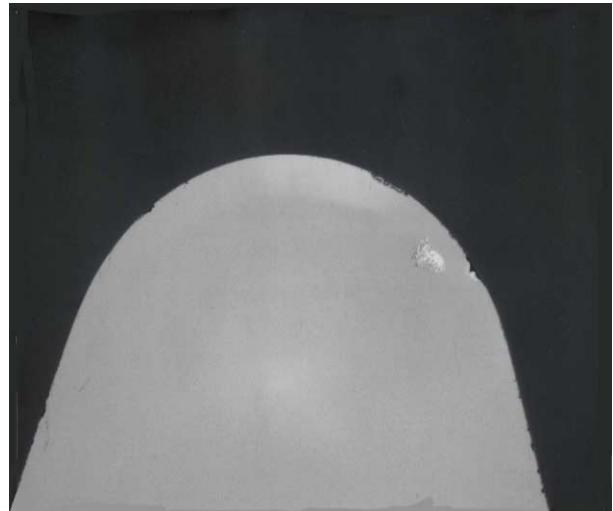


図 14 : バイトの写真

10. 加工誤差を極力抑えるための加工方法、加工手順

10.1 加工手順

数百枚を超える精度安定化のための加工試験の結果から得られた情報をもとに下記のような加工手順を確立した。

荒加工

超精密加工では、荒加工の平面精度が仕上げ加工後の平面度を決定するため、荒加工は非常に重要である。

荒加工は仕上げ代 $40 \mu\text{m}$ 残して寸法精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ である。また、平面度の向上のため両端面の研削を行う。

アニーリング

荒加工時の加工歪を除去するためにおこなう。
真空炉で $500^\circ / 2 \text{ h}$ の条件である。

ハンドラップ

真空チャックとの接合面をラッピングすることにより、平面度の向上と端面のスクラッチの除去を目的とする。方法は #800 サンドペーパーをオプティカルフラット上でラッピングをおこなう。

中仕上加工

中仕上加工を行うことにより、仕上げ加工時のバイトダメージの軽減と、反転回数をふやすことによる平面度の向上を図っている。中仕上加工での仕上げ代は $10 \mu\text{m}$ 残しとしている。

仕上げ加工

仕上げ加工では、連続で加工をおこなうことによる温度変化の影響をどれだけ抑えられるかが重要である。そこで、加工機の温度を安定させるため、加工開始前には十分にアイドリングを

おこなう。また、加工直後のディスクの温度を測定し、次のディスクの設定温度として入力する。各ディスクの加工後の外径を測定し、温度変化による寸法に変化がないことを確認しながら加工をおこなう。

10.2 プログラミング

加工誤差を抑えるために加工プログラムについても考慮した。温度変化による影響を抑えるため、加工時の温度を制御系に入力することにより、熱膨張を考慮した値に変換し加工をおこなう。スライドテーブルのバックラッシュの影響を抑えるため、同じ方向で加工をおこなう。位置決め精度を向上させるため、位置決め後加工機が安定するまで停止させる。などをおこなう。

10.3 加工条件

加工条件については、加工歪を小さくするため最大切り込み量を $20 \mu\text{m}$ 以下におさえた。また、仕上げ加工では切り込みを $4 \mu\text{m}$ とし、最終加工では $2 \mu\text{m}$ とした。

加工速度は理論面粗さが $0.03 \mu\text{m}$ となるように設定し、円弧動作では加工誤差を小さくするため速度を落とした。

加工液には、ケロシンをミスト状にして吹きつける。

表1：ディスクの加工条件

加工条件	中仕上げ加工	仕上げ加工
仕上げ代	$10 \mu\text{m}$ 残し	
Rotation speed	2800 r.p.m	2800 r.p.m
Cutting speed	40 mm/min	40 mm/min (キャビティ内 3 mm/min)
Cutting depth	$6 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}+4 \mu\text{m}+2 \mu\text{m}$
Tool	単結晶ダイヤモンドバイト	単結晶ダイヤモンドバイト
Chuck	真空チャック	真空チャック
Process time	$\sim 15 \text{ min/1disk}$	$\sim 30 \text{ min/1disk}$

10.4 ディスクのチャッキング

ディスクを真空チャックに取り付ける場合、界面にゴミ等をはさまないことが重要となる。洗浄方法をいくつか試した結果、アセトンを塗布した光学レンズ用ワイパーで拭き取る方法を採用した。

回転軸との芯出し精度は、ディスク両面の同軸度誤差となるため $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下の調整が必要となる。そこで、外径の回転ぶれを静電容量型の変位センサーにより測定し調整を行った。このとき、調整のための移動量が大きいと界面での凝着等により傷が発

生する。それを防ぐために位置決め用のガイドにより粗位置決めをおこない、真空チャックの吸着力を下げるにより容易に調整できるようにした。また、取付け時の温度変化の影響を抑えるため作業時間をできるだけ一定にするよう心がけた。

現状は手作業で行っているが将来的には自動化を検討中である。

11. 加工結果

200枚のディスク加工後の測定により、外径寸法のバラツキは $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 、平面度は $0.3 \mu\text{m}$ 以下で加工できた。平行度については、いくつかのディスクで許容値をオーバーしたものがいた。原因についてはまだ不明な点もあるが、チャックとの界面でのゴミおよび傷により傾きが発生したものと思われる。

三次元測定機 (ZEISS UPMC 850C) による測定結果は、測定プローブによる圧痕の影響により評価が困難であるが $\pm 2 \mu\text{m}$ の加工精度であった。また、各ディスクの周波数測定の結果から要求される加工精度を充分に満足していることがわかった。

バイトの寿命については $20\text{km} \sim 400\text{km}$ とかなりバラツキが見られ、全てチッピングによるものだった。

これらのことより、試験加速管ディスクの加工方法については、ほぼ確立できたといえる。

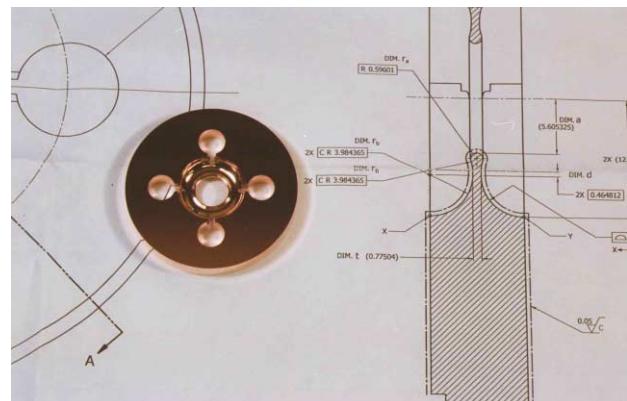


図15：RDDS DISK

まとめ

超精密加工の作業は、どれだけ誤差要因を取り除くことができるかが重要である。加工機、工具の性能は日々向上しているが、実際の加工をおこなう場合、加工環境による影響および作業者の熟練度などにより加工を困難にしている。特に、長期にわたり加工精度を維持するには、温度が大きく影響しているため、これを取り除くことが重要である。そのため、作業全体を自動化することにより温度の安定化をはかることがこれからの課題となっている。また、サブミクロンの絶対測定をおこなうことが困難であることも加工に大きく影響している。そこで、測定

機の開発、測定方法の確立が重要である。

その他の問題として、バイトの長寿命化、加工時間の短縮、洗浄方法の確立なども今後の課題として検討しなければならない。

謝辞

超精密加工において、人見工作センター長、東助教授をはじめ、X バンドグループの高田元加速器研究施設総主幹、肥後助教授、峠助教授に貴重なご助言とご指導を頂きました。また、工作センターの皆さんに多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 飯塚：超精密位置決め制御とその現状 1991、精密工学会秋期大会シンポジューム
- [2] 井川、島田：超精密切削加工の精度限界 1986、12 精密工学会誌
- [3] 高富、小泉、東、小池、山元：超精密加工中に使用する切削液の温度と寸法誤差に関する研究 1993 精密工学会秋期大会
- [4] 鈴木、北島、奥山：軸対称非球面の高精度切削に関する研究 精密工学会誌 Vol65.No3.1999
- [5] 高富、東、渡辺、舟橋、人見：切削加工した半球の真円度測定によるバイト刃先半径の決定法 1999 精密工学会秋期大会
- [6] Y.Higashi, 他 : Studies on high-precision machining of accelerator disks of X-band structure for a linear collider KEK-Report 2000-1
- [7] 高富、東、真木、小池、小泉：超精密加工による高精度飛跡検出器の開発 1991 精密工学会秋期大会
- [8] 東、小池、高富、小泉：X 線集光用軸対称非球面ミラーの加工装置の開発 1992 精密工学会秋期大会
- [9] 小池、東、高富、小泉、山元：X 線集光用ミラーの加工の研究 1994 精密工学会秋期大会