

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「工具保持精度1 μ m以内の焼ばめホルダの開発と
微細切削加工技術の確立」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人奈良県中小企業支援センター

[目 次]

第 1 章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
(1) 研究開発の背景	2
(2) 研究目的及び目標	3
(3) 実施内容	4
1-2 研究体制	8
1-3 成果概要	10
(1) 高精度内面研削加工技術の確立	10
(2) 焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査	11
(3) 「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ」比較	12
(4) 加工条件調査	14
1-4 当該研究開発の連絡窓口	16
第 2 章 本論（成果報告）	17
2-1 高精度内面研削加工技術の確立	17
(1) 計画内容	17
(2) 新規クランプ治具の設計製作	18
(3) 高精度内面研削盤の開発及び導入と評価	19
(4) クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%	21
2-2 焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査	23
(1) 計画内容	23
(2) 工具保持部の内径公差の確立	24
(3) 保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%まで高める	26
(4) 保持部穴の高精度化の取組み	28
(5) 切削条件・研削砥石の改善	28
■ 高精度シャンク工具の推進	29
2-3 「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ」比較	30
(1) 計画内容	30
(2) 振れと工具寿命のアプローチ	31
(3) 工具寿命 1.5 倍の取組み	33
(4) LED 金型モデルの表面粗さ $Ra\ 30\text{nm}$ の取組み（高硬度材）	34
(5) LED 金型モデルの表面粗さ $Ra\ 30\text{nm}$ の取組み（超硬合金）	36
2-4 加工条件調査	37
(1) 計画内容	37
(2) CBN 工具の切削事例	40
(3) 傾斜角度（周速）の違いによる切削距離と加工表面粗さの関係	41
(4) 工具の突き出し量と工具寿命の関係	45
(5) 砥石を用いた切削事例	49
(6) ダイヤモンドコーティングエンドミルを用いた切削事例	53
第 3 章 研究開発後の事業化展開	59

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

地球規模で高まる環境・エネルギーに対する意識から省エネルギー化の動向は益々高まってきている。たとえば、照明光学機器や液晶パネル等では省エネルギー化のためにLED化が加速している。その製造過程で使われる実装金型はLEDチップを樹脂で封じるとともに、発光部から照射された光を反射させる部位や集光・拡散レンズの機能も同時に成形する。光の反射や集光・拡散機能を高めるには樹脂成形品の表面を刃部の外径が $\Phi 1\text{mm}$ 以下の切削工具で表面粗さ $Ra0.05\mu\text{m}$ 以下に加工することが求められている(図1)。

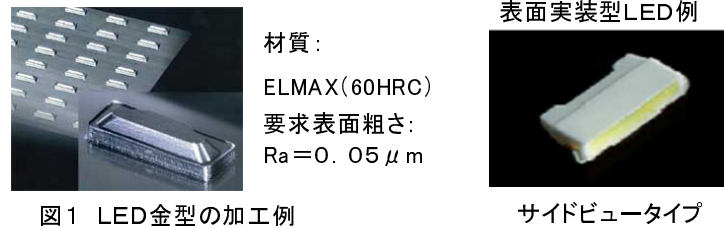


図1 LED金型の加工例

現行のLED金型加工は機械切削加工のみで金型の表面粗さを $Ra0.05\mu\text{m}$ 以下に仕上げるのが不可能なため金型を分割して磨き加工する非効率な製造方法を余儀なくしている。LEDを安定して大量に製造するために一体金型を高品位・高精度に機械加工で確実に表面粗さを確保する必要がある(図2)。そのための条件として、機械加工用切削工具保持具の高精度化と切削工具軌跡を含めた切削条件の適正化が必要不可欠である。

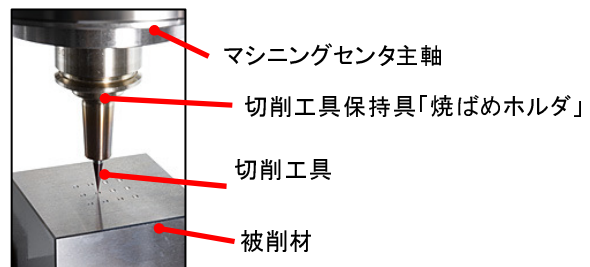


図2 微細機械加工のツーリング例

微細精密加工用に適したマシニングセンタは以前より開発が進められており、一部では商品化が実現し、主軸の振れ精度や位置決め精度が既に高められている。また、切削工具においても、刃部の直径が $10\mu\text{m}$ の微細工具も開発され、ユーザーニーズに対応してきている。しかしながら、工具保持ホルダ(図3)においては、工具保持精度の上限は $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 程度が実情であり、更なる高精度化が求められている。

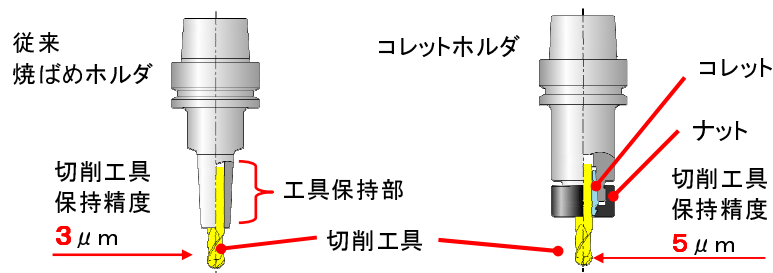


図3 従来の工具保持ホルダと保持精度

このような背景を鑑みて、本研究では、高精度研削加工技術の高度化において「工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発(および量産化)」を達成するとともに微細切削加工技術の確立を目指す。

(2) 研究目的及び目標

研究目的として、2つのテーマを掲げた。1つは、「工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発(および量産化)」である。つまり、微細精密加工用の工具保持ホルダとして期待されている「焼ばめホルダ」の工具保持精度を、極限まで向上・安定させるために新たな焼ばめホルダ加工技術を開発することである。数値目標は、切削工具把持部径(工具シャンク径) $\Phi 3$ 、 $\Phi 4$ において、工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内(図4)とした。2つは、「微細加工技術の確立」である。つまり、微細加工における加工ワークの面品位(図5)を向上させることや工具寿命を延ばすために最適な切削条件を確立することである。数値目標は、微細精密加工においては現行の工具寿命の1.5倍を目指す。

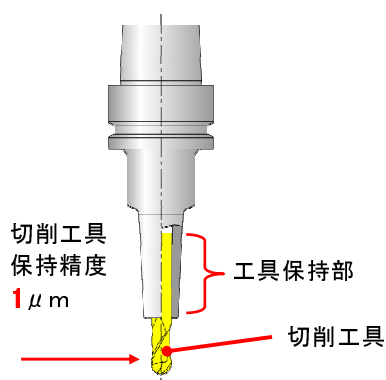


図4 焼ばめホルダ

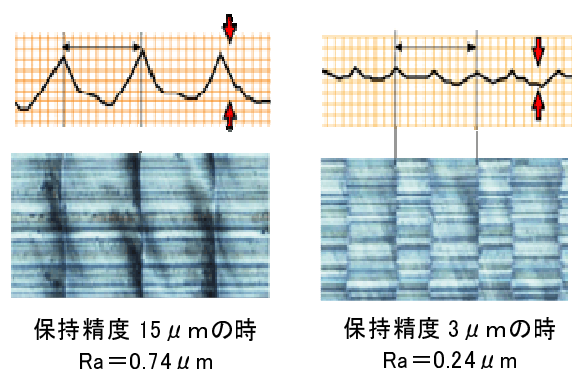


図5 切削工具保持精度と加工ワーク面品位の関係

さらに、2つのテーマには、それぞれ2つのサブテーマを設けた。「工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発(および量産化)」には、「高精度内面研削加工技術の確立」と「焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査」を掲げた。また、「微細加工技術の確立」では、「『従来品焼ばめホルダ』と『高精度焼ばめホルダ』比較」と「加工条件調査」を掲げた。

「工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発(および量産化)」については、まず焼ばめホルダの最終製造工程である内面研削盤での工具保持部内面研削時の信頼性を高めることが必須条件となる。その為に、高精度内面研削加工技術の確立として、テーパ振れ精度の目標値を $0.2\mu\text{m}$ 以内とし、2面拘束端面振れ精度の目標を $0.1\mu\text{m}$ とする。また、ワーク(焼ばめホルダ)の取付姿勢とクランプ機構の問題を解決するために、クランプ機構の検討・設計及びテストを行い、繰返し精度の目標値として、 $0.5\mu\text{m}$ 以内を目指す。

さらに、焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査として、内面研削加工の形状精度の高精度化を目指し、円筒度の目標を $0.5\mu\text{m}$ 、真円度の目標を $0.1\mu\text{m}$ とする。また、把持部公差違いによる焼ばめ振れ精度調査として、現状の保持基準から $5\mu\text{m}$ 単位で把持部の穴径を広げた試作を製作し、繰返し保持精度テストを行い、比較評価を行う。また、保持部の高精度化に関しても、切削条件や研削砥石の改善を継続し、最善の方法を確立していく。

微細加工切削条件の開発については、上記高精度焼ばめホルダを確立することと共に、加工面品位・工具寿命向上のためには、切削加工条件等も重要な課題となる。一般的にも切削速度・送り速度・切込み量、切削工具軌跡などが面品位や工具寿命に大きく関係しているといわれている。その為に、「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ」比較として、従来品の「焼ばめホルダ：振れ精度 $3\mu\text{m}$ 」と高精度型「焼ばめホルダ：振れ精度 $1\mu\text{m}$ 」との切削テスト比較を行い、工具寿命、面品位、機械振動など、微細加工における振れ精度の影響をデータ収集し、傾向を研究する。

加工条件調査として、超高速切削条件下において、切削工具の負荷が少なく工具の欠損・摩耗を防ぐ主軸回転、切削送り、切込み、切削経路などのデータを収集、研究を行い、最適な切削条件を確立する。最後に、研究の評価として従来品と高精度型焼ばめホルダの仕上げ面粗さ、工具寿命等について調査を行う。

(3)実施内容

①「高精度内面研削加工技術の確立」（株式会社 MST コーポレーション）

i. H22 年度は、機械精度調査及びクランプ機構の検討を行う。

クランプ治具にテストバー（マスターホルダ）を取付け、その時の振れ精度を判断基準とし、a.端面精度と振れの関係、b.テーパ角度と振れの関係、c.引き力と振れの関係、d.現状のクランプ機構と振れの関係、e.テーパ変形量と振れの関係などの調査をする。

ii. H23 年度は、クランプ機構の高精度化に取組み、クランプ繰返し精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を80%以上することを目標とする。

具体的には、a.内面研削盤の主軸の振れ精度調査（従来機及び導入機）、b.クランプ機構の検討・設計・試作（ボールクランプ機構）及びクランプ治具と中継フランジの一体化、c.クランプ機構テスト（従来型とボールクランプ型におけるクランプ繰返し精度調査）を行う。

iii. H24 年度は、高精度内面研削盤と新型クランプ治具（高精度クランプ機構）を用いて精度テスト（図6）を継続させながら、より高精度化への課題を探り、高い完成度を目指す。

また、数値目標は、クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を100%とする。

iv. H24 年度期間内で、数値目標であるクランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率は100%を達成した。

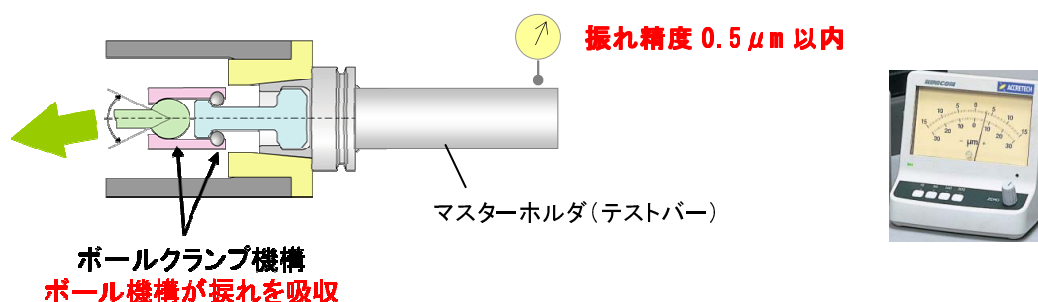


図6 新型クランプ治具を用いた精度テスト

②「焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査」

(株式会社 MST コーポレーション)

i. H22 年度は、工具保持部の内径公差の確立を目指す。

具体的には、数種類の焼ばめ保持量を設定し、各々の保持量の設定で繰り返し焼ばめ作業を行い、その時の振れ精度で評価する。

ii. H23 年度は、保持部穴径の加工精度の高精度化に取組み、テストバーチャッキング時の振れ精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 80%とする。また、高度化を確立する為に、幾何公差目標(真円度: $0.1\mu\text{m}$ 、円筒度: $0.5\mu\text{m}$)を掲げ、切削条件や研削砥石の改善に取組む。

iii. H24 年度は、切削条件、切削砥石の改善をさらに発展させ、幾何公差目標(真円度: $0.1\mu\text{m}$ 、円筒度: $0.5\mu\text{m}$)の達成を目指す。また、テストバーチャッキング時の振れ精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率が 100%に近づくように高めていく。

iv. H24 年度期間内で、数値目標であるテストバーチャッキング時の振れ精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率は 99.1%を達成し、当初の目標を達成した。(図 7)。

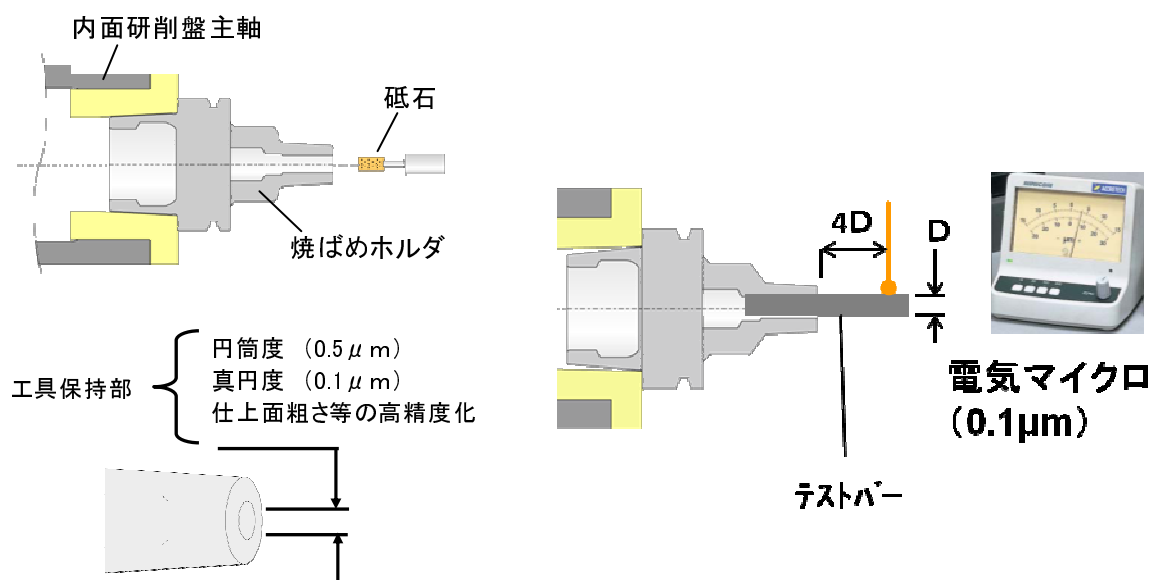


図 7 高精度内面研削加工と振れ精度測定

③「『従来品焼ばめホルダ』と『高精度焼ばめホルダ』の比較」

(株式会社 MST コーポレーション)

i. H22 年度は、高精度マシニングセンタにて、加工データ及びデータ収集を中心に取組み、工具寿命、面品位、機械振動など振れ精度による微細加工での影響を検証する。

具体的には、a.既存マシニングセンタと高精度マシニングセンタの位置精度比較、b.被削材の硬度と切削性能の評価、c.振れと工具寿命の関係などを調査していく。

ii. H23 年度は、高精度マシニングセンタにて、工具寿命を評価基準に、高硬度材や CBN エンドミルを中心とした加工テストを行い、振れ精度の影響を調査する。また、数値目標として、工具寿命 25%UPを目指す。

iii. H24 年度は、「高精度焼ばめホルダ」を用いて、LED 金型モデル(高硬度材)の高精度化を目指す。数値目標として、表面粗さの $Ra\ 30\text{nm}$ ($0.03\mu\text{m}$)の達成を目指す。

iv. H24 年度期間内で、工具寿命 1.5 倍の事例(図 8)を達成し、LED 金型モデル(高硬度材)では、表面粗さの数値目標ある Ra 30nm(0.03 μ m)の達成した。また、LED 金型モデル(超硬合金)でも表面粗さ Ra 30nm(0.03 μ m)の達成した。

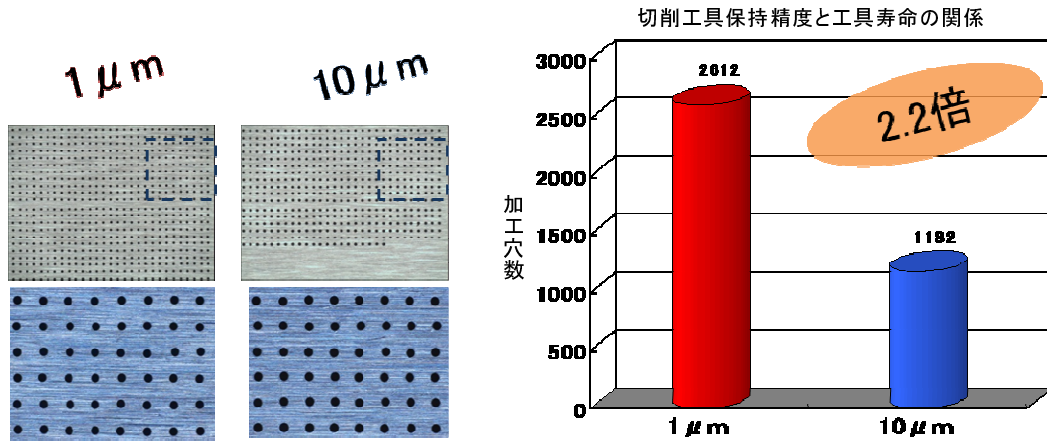


図 8 振れ精度と工具寿命

④「加工条件調査」(株式会社 MST コーポレーション)

- i. H22 年度は、高精度マシニングセンタにて、超高速切削条件下において、切削工具の負荷が少なく工具の欠損・摩耗を防ぐ主軸回転、切削送り、切込み、切削経路などのデータを収集していく。
- ii. H23 年度も、高精度マシニングセンタにて、加工テスト、データ収集を行い、定量的データの収集に務める。また、テストデータ 10 件以上を目標とする。
- iii. H24 年度は、超硬合金を素材とした難削材へのアプローチを中心にデータ収集を行う。また、昨年同様テストデータ 10 件以上を目標とする。

iv. H24 年度期間内で、工具形状が摩耗に影響することや傾斜角度(切削速度)の違いによる切削距離と加工面粗さの関係(図 9)、また超硬合金の切削事例を示すなど当初の目標を達成した。

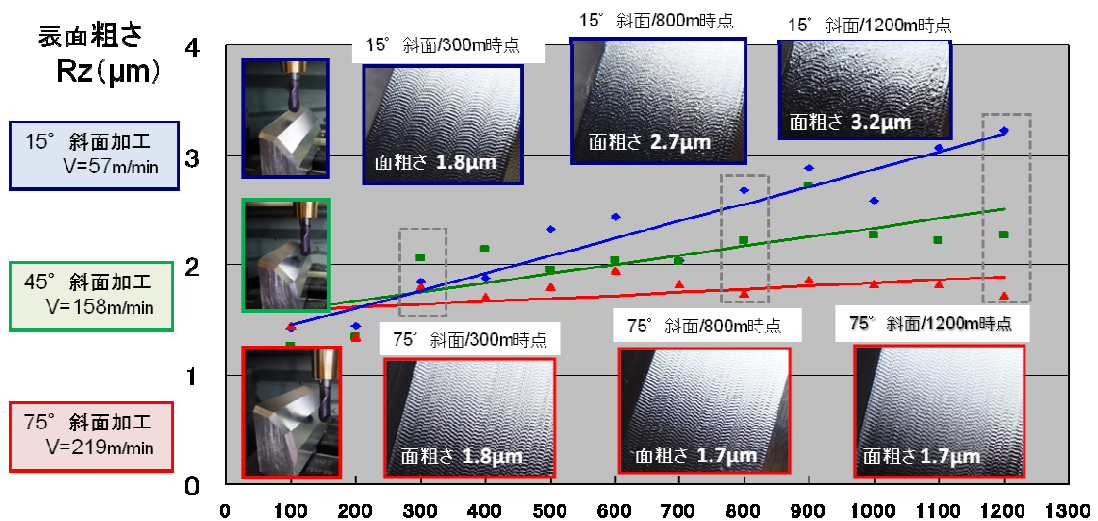


図 9 傾斜角度(切削速度)の違いによる切削距離(横軸, m)と加工面粗さの関係

専門用語等の解説

【マシニングセンタ】

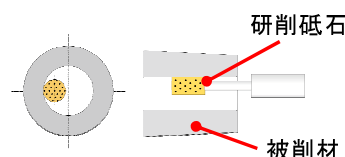
被削材(工作物)に対する切削工具の位置・経路、主軸の回転、その他、加工に必要な作業の工程などを数値情報で指令するNC工作機械(Numerical Control: NCと略称することが多い)で、フライス削り・中ぐり・穴あけなどの加工が1回の被削材の取付けで行える工作機械。形状により立形・横形があり、切削工具の交換は自動で行われる。



微細精密加工用マシニングセンタ

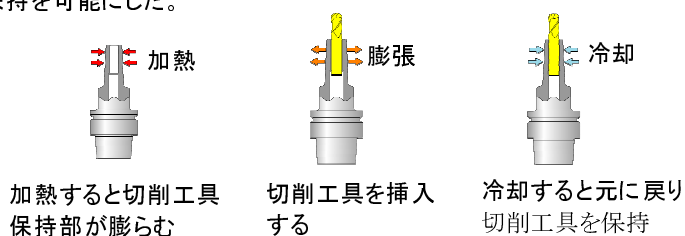
【内面研削盤】

研削砥石を用いて工作物を研削する工作機械で、穴の内面を研削する。



【焼ばめホルダ】

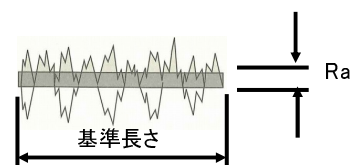
焼ばめホルダの工具保持方式は、金属は熱を加えると膨らみ、冷やすと元に戻るという性質を利用したホルダでそのシンプルな構造から、切削工具の高精度保持を可能にした。



【Ra】

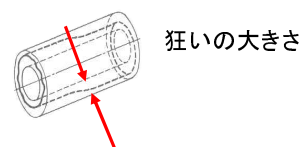
表面粗さを数値的に評価するパラメータの一つ。

Raは「算術平均粗さ」と呼ばれ、平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合計して、平均した値を μm で表している。



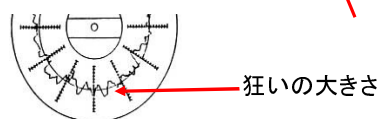
【円筒度】

円筒でなければならない部分の幾何学的円筒面からの狂いの大きさ。



【真円度】

円形形体の幾何学的円からの狂いの大きさ。



【直角度】

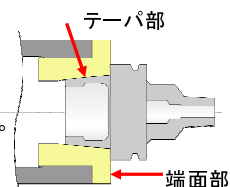
基準となる平面または直線に対し、幾何学的な垂直面及び直線に対する狂いの大きさ。

【2面拘束】

ホルダのテーパ部と、端面を同時に機械主軸に密着させること。

大きな切削負荷を受ける事ができ且つ、高速回転主軸においても安定した精度を維持できる。

近年の高速回転型マシニングセンタの主軸に多く採用されている。



【HSKシャンク】

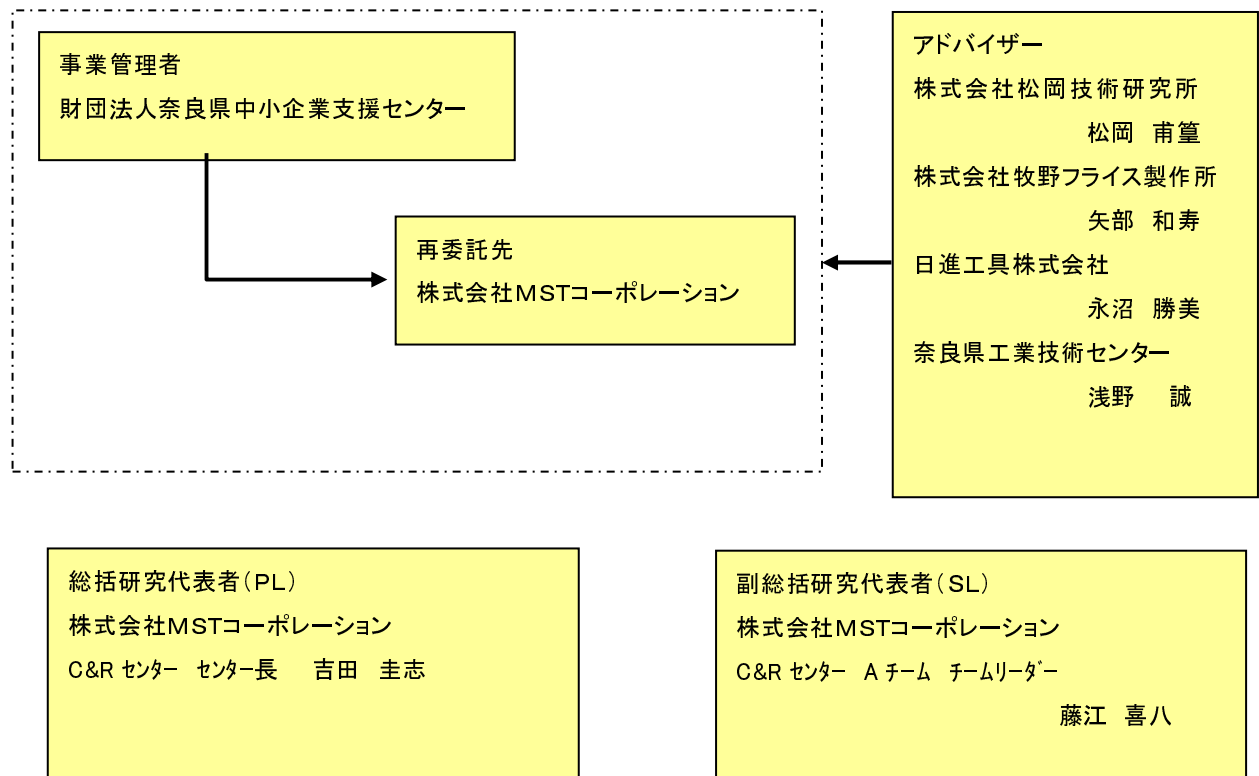
HSK シャンクとは、テーパ(1/10 ショートテーパ)と端面を密着させる2面拘束ツーリング用のシャンク。

大きなクランプ力と端面密着により横送り剛性が高く、また、自動交換時の繰り返し装着精度が高い利点がある。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

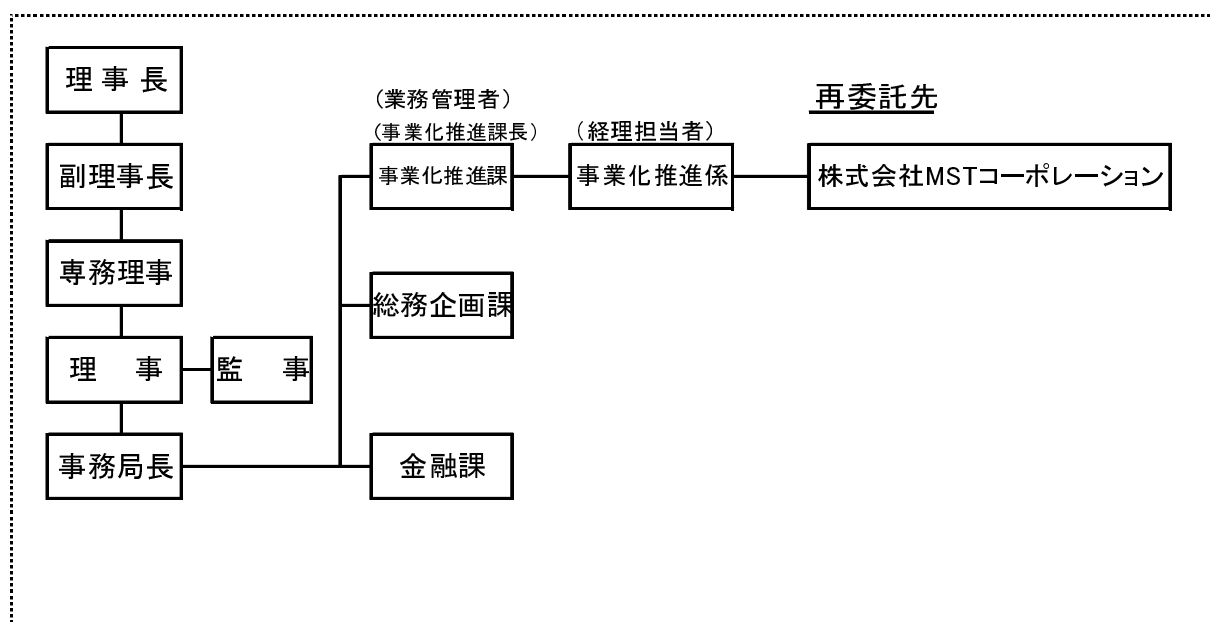
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

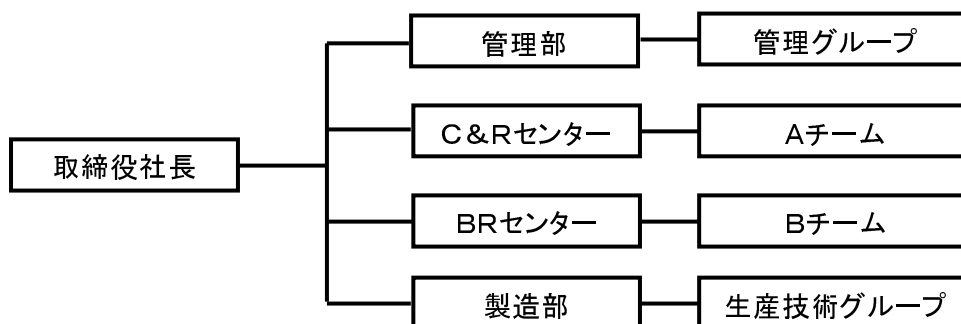
① 事業管理機関

[財団法人奈良県中小企業支援センター]



②(再委託先)

【株式会社MSTコーポレーション】



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】財団法人奈良県中小企業支援センター

①管理員

氏名	所属・役職
浅井 保典	事業化推進課長
杉山 淳一	事業化推進課 事業化推進係 係長
杉本 卓三	事業化推進課 事業化推進係 主査
東 正訓	事業化推進課 事業化推進係 主査
山田 裕士	事業化推進課 事業化推進コーディネーター

【再委託先】※研究員のみ

②株式会社MSTコーポレーション

氏名	所属・役職
吉田 圭志	C&Rセンター センター長
藤江 喜八	C&Rセンター Aチーム チームリーダー
吉富 達也	C&Rセンター Aチーム 主任
打本 誠	C&Rセンター Aチーム 主任
東 憲弘	BRセンター Bチーム チームリーダー
上畑 義治	生産技術グループ 主任

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

財団法人奈良県中小企業支援センター

(経理担当者) 事業化推進課 事業化推進係
(業務管理者) 事業化推進課長

杉本 卓三
浅井 保典

(再委託先)

株式会社MSTコーポレーション

(経理担当者) 管理部 管理グループ 主任
(業務管理者) C&Rセンター センター長

甲斐 麻友美
吉田 圭志

1-3 成果概要

(1)「高精度内面研削加工技術の確立」

H22 年度では、「クランプ治具端面精度と振れ精度」「クランプ治具テーパ角度と振れ精度」「ホルダ引き力と振れ精度」「現状のクランプ機構と振れ精度」「ホルダのテーパ変形量と振れ精度」の調査を行い、各調査テストの中で、クランプ治具に焼ばめホルダを高精度に取付ける方法を見出すことができた。

H23 年度では、クランプ治具の中でも最も精度への影響が大きい部分と考えられているクランプ機構の高精度化をテーマに取り組み、新たな工夫を取入れた新規クランプ治具を製作した。また、油静圧軸受を搭載した高精度内面研削盤も計画通りに納入された。クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を数値目標の 80% まで高めることができた。

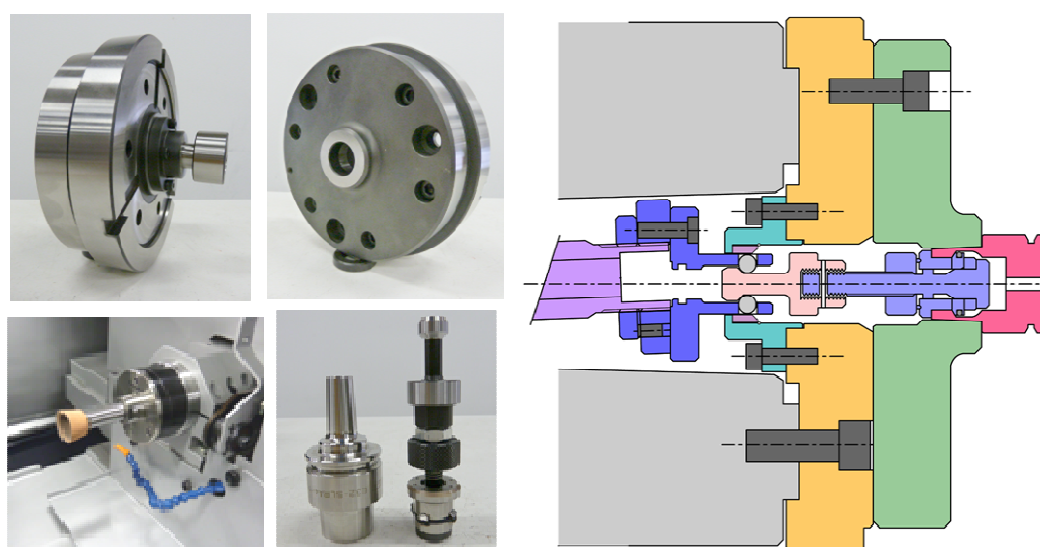
H24 年度は、高精度内面研削盤と新型クランプ治具（高精度クランプ機構）を用いて評価テスト（装着精度テスト）を継続させながら、より高精度化への課題を探り、高い完成度を目指した。

具体的には、新型クランプ治具によるテストの中で、改良点を抽出し、改善を繰り返す中で完成度の高いクランプ治具に仕上げた。

また、導入した高精度内面研削加工機と従来機を比較し、導入効果を検証した。

その結果、新型クランプ治具（高精度クランプ機構を取入れた治具）の完成、及び数値目標として掲げた①テーパ振れ精度の目標値を $0.2\mu\text{m}$ 以内、②2面拘束端面振れ精度の目標を $0.1\mu\text{m}$ 、③クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を 100% とした 3 カ年の目標はすべて達成した。

1. 新規クランプ治具の設計製作……治具の完成



2. 高精度内面研削盤の開発及び導入と評価……従来機との比較



高精度内面研削盤

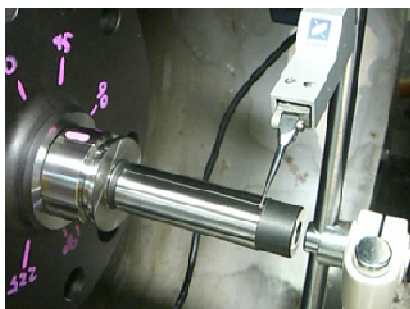


従来の内面研削盤

目標の達成

- ・テーパ振れ精度の $0.2 \mu\text{m}$ 以内
- ・2面拘束端面振れ精度の $0.1 \mu\text{m}$ 以内

3. クランプ精度 $0.5 \mu\text{m}$ 以内の確率を 100%



測定風景と電気マイクロ測定器

目標の達成

- ・クランプ精度 $0.5 \mu\text{m}$ 以内の確率を 100%

(2) 焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査

H22 年度では、「焼ばめホルダの保持量と振れ精度」の調査及び「保持量に基づく最適な内径寸法の設定」に取り組んだ。その結果、保持量と振れ精度の関係が数値で明確に示すことができ、保持量に基づく最適な内径寸法を設定することができた。

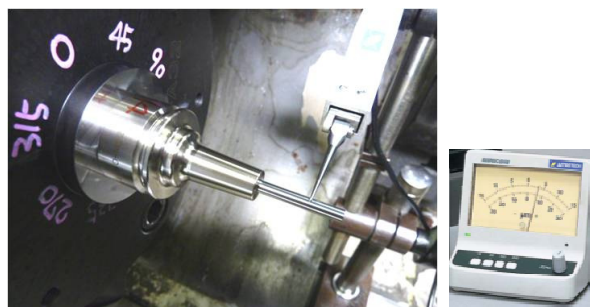
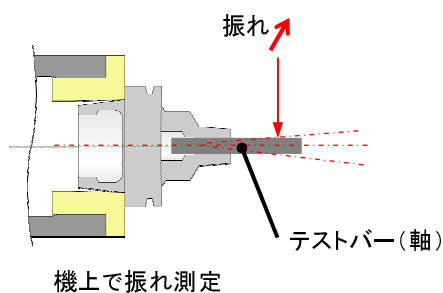
H23 年度では、焼ばめホルダ(保持部の穴)の加工精度の高精度化の確立に取り組んだ。焼ばめホルダは、金属に熱を加えると膨らみ、冷やすと元に戻る性質を利用したホルダである。よって、ホルダの工具保持部(穴)が切削工具のシャンク部を直接把持する。そのため、焼ばめホルダの穴径(工具保持部)の加工精度はチャッキング振れ精度に大きな影響を及ぼすからである。

また、特定ユーザーの要望に応えるために $1 \mu\text{m}$ 焼ばめホルダ(製品)の提供を行った。その課程で、そのホルダにテストバーを焼ばめし、テストバー直径の 4 倍の位置で全品を測定した。測定結果の累積データから、目標である $1 \mu\text{m}$ 以内の確立 80%以上の結果を得ることができた。

H24 年度では、昨年同様に高精度焼ばめホルダの製作本数を増やし、保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内のホルダ製作の確率を高める取組みを行った。その為に、焼ばめホルダ(保持部の穴)の加工精度の高度化を目指すと共に、全製作ホルダの振れ測定を実施した。実施本数は 1000 本を超えた。

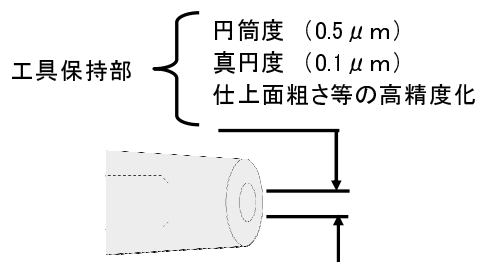
測定したデータに基づき、保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%までに高めるという、目標に対して、到達することができた。

1. 保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%まで高める・・・**99.1%**(H24 年度後半)を達成



2. 保持部穴の高精度化の取組み(真円度 $0.1\mu\text{m}$ 、円筒度 $0.5\mu\text{m}$ を目標)

3. 切削条件、研削砥石の改善



(3)「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ」比較

H22 年度では、「マシニングセンタの繰返し位置決め精度の比較」「切削性能の評価方法の検討」「ホルダ評価調査」を行ってきた。その結果、振れ精度と工具寿命等の関係を実験データで示すことができた。

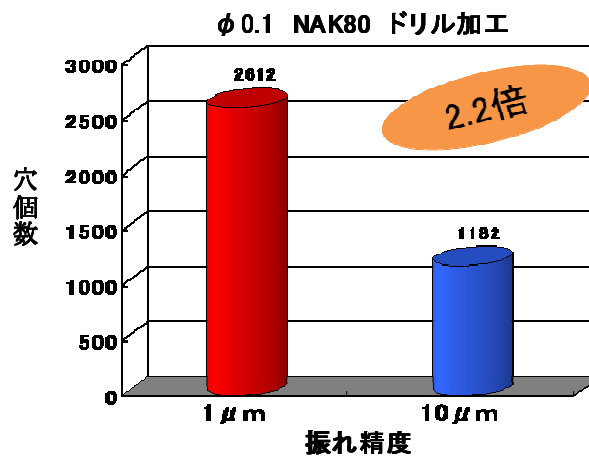
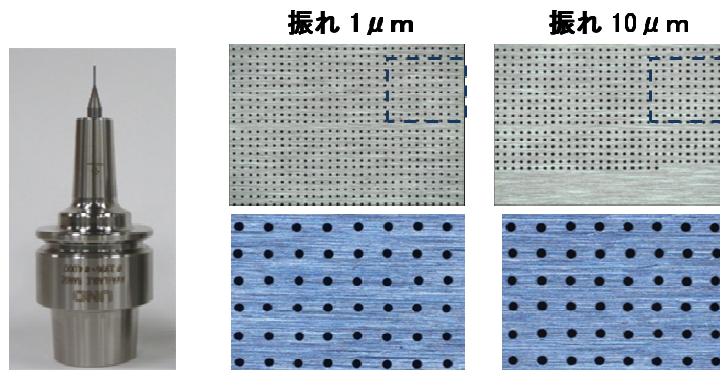
H23 年度では、高精度マシニングセンタにて、「従来品焼ばめホルダ」と「 $1\mu\text{m}$ 以内焼ばめホルダ」を比較する加工テストを行い、チャッキング振れ精度が、工具寿命、面品位、機械振動などにどのような影響を及ぼすかの検証を行い、振れ精度が及ぼす影響を確認できた。また、LED 金型の高精度化に向けて加工条件調査を実施した。さらに、数値目標であった工具寿命 1.5 倍は、ドリル加工において達成した。

H24 年度では、「高精度焼ばめホルダ」を用いて、LED 金型の高精度化、LED 加工個数の増加を目指し本研究成果の一つに結び付けていく努力をした。

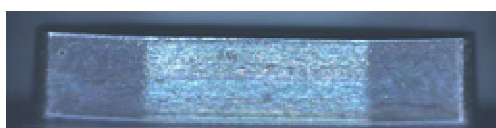
具体的には、高硬度材と CBN エンドミルを用いた評価と超硬合金とダイヤモンドコーティングエンドミルを用いた評価を行った。いずれも表面粗さで評価を行い、数値目標の $\text{Ra}30\text{nm}$ ($0.03\mu\text{m}$) を達成した。

数値目標とした、工具寿命 1.5 倍は H23 年度に、また LED 金型モデルの表面粗さ Ra30nm (0.03 μm) の取組みは H24 年度で達成することができた。

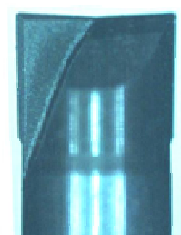
1. 工具寿命 1.5 倍の達成……工具寿命 2.2 倍、及び 2 倍の小径穴加工



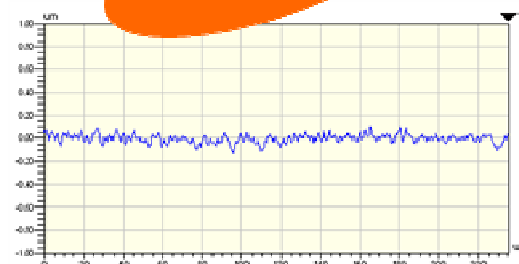
2. 高硬度材モデル……表面粗さ Ra30nm (0.03 μm) の達成



ELMAX 材 (60HRC) 金型コア部 拡大写真



CBN エンドミル

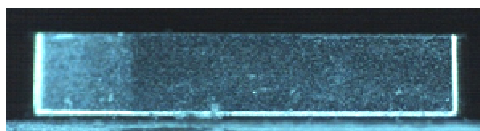


Ra	0.04 μm
Ra	0.03 μm
Rt	0.23 μm
Rp	0.10 μm
Rv	-0.13 μm

Angle	-124.85 urad
Curve	0.47 m
Terms	Tilt
Avg Ht	0.00 μm
Area	0.00 μm^2

測定単位: マイクロメートル (μm)

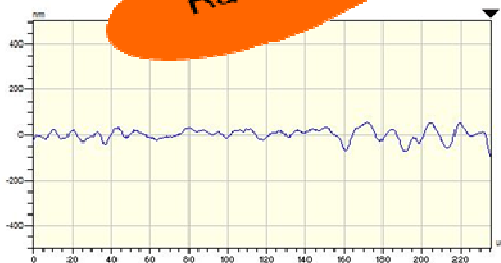
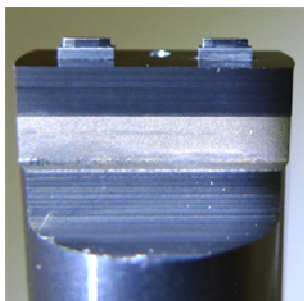
3. 超合金モデル……表面粗さ Ra30nm(0.03 μm)の達成



超合金(92HRA) 金型コア部 拡大写真



ダイヤモンドコーティング
エンドミル



Req	25.29 mm
Ra	19.68 mm
Rt	158.51 mm
Rp	55.76 mm
Rv	-102.76 mm

Angle	-308.36 urad
Curve	-0.37 mm
Terms	T0t
Avg Ht	0.00 mm
Area	0.00 mm2

測定単位:ナノメートル(nm)

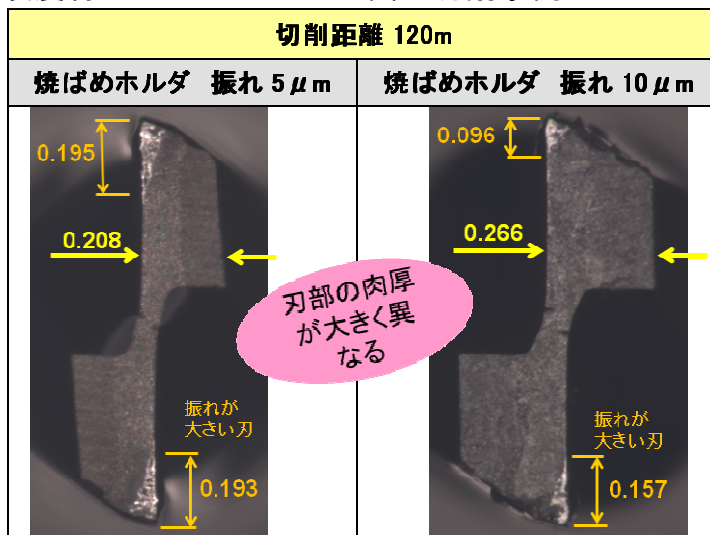
(4)加工条件調査

H22 年度では、「各切削工具における加工テストとデータ収集」を行ってきた。その結果、クーラントによる違いや工具形状の僅かな違いが、工具寿命に影響をあたえることが確認できた。

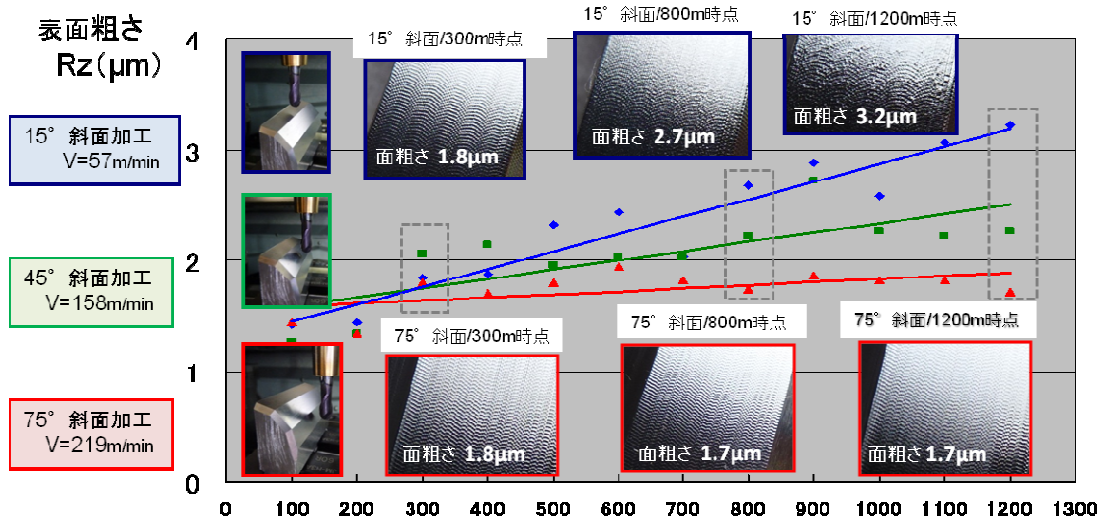
H23 年度は、超高速切削条件下において、切削工具の負荷が少なく工具の欠損・摩耗を防ぐ主轴回転、切削送り、切込み、切削経路などのデータを収集、研究を行い、最適な切削条件を提示することができた。特に、切削面の傾斜角度による工具寿命、仕上面の違い、工具の突出し長さによる工具寿命や仕上面の違いにおいては、定量的データとして価値のある取組みができた。また、テストデータ 10 件の目標を達成した。

H24 年度では、超合金を被削材とした加工実例を中心に実施した。数値目標であるテストデータ 10 件を達成した。

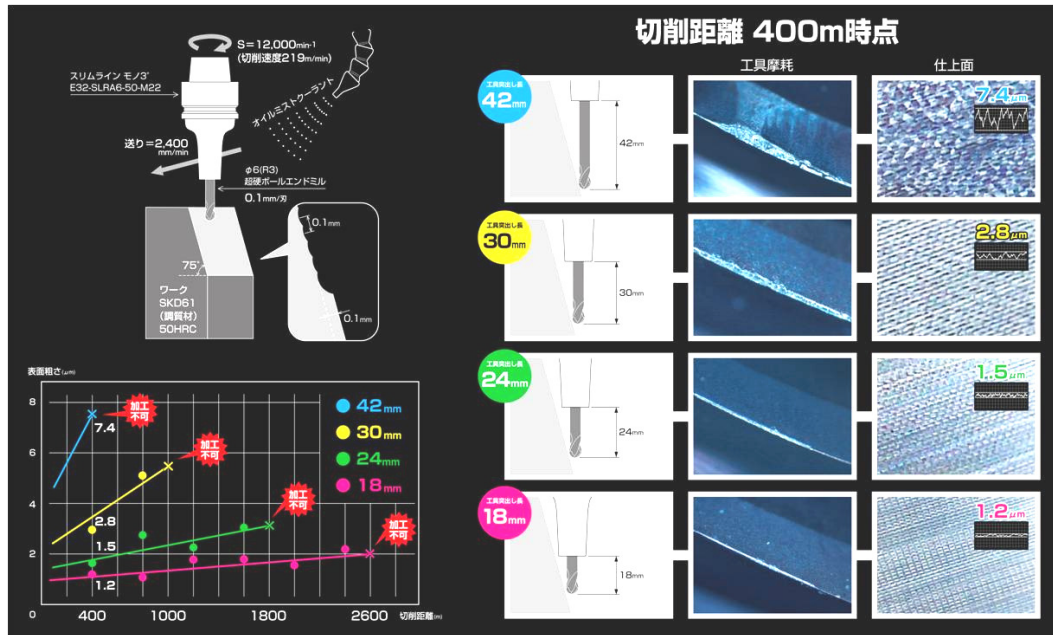
1. 高硬度材の加工……CBN 工具の切削事例



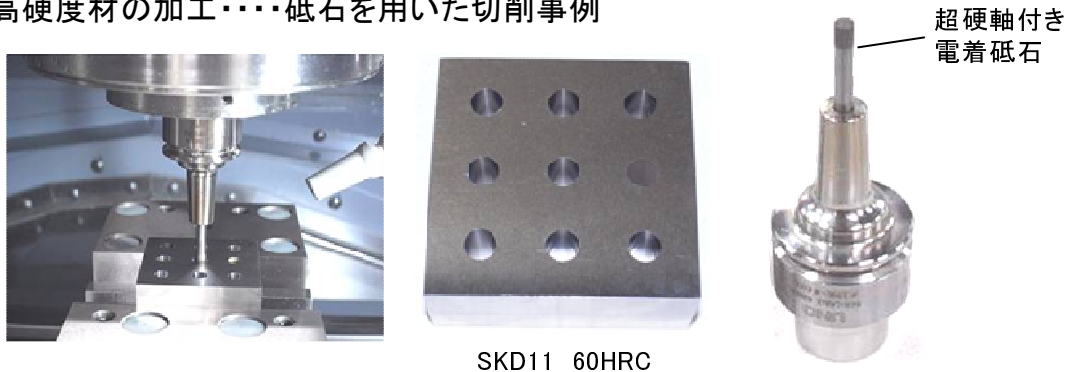
2. 高硬度材の加工・・・傾斜角度の違いによる切削距離と加工表面粗さの関係



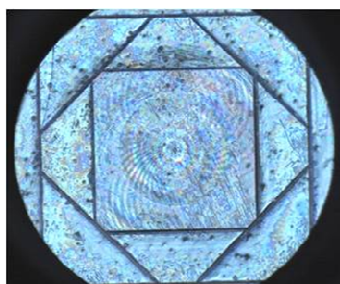
3. 高硬度材の加工・・・工具の突き出し量と工具寿命の関係



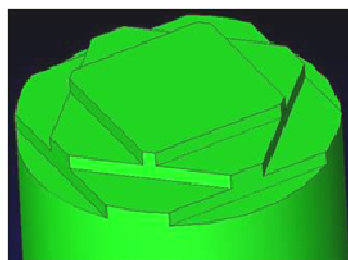
4. 高硬度材の加工・・・砥石を用いた切削事例



5. 超合金の加工……ダイヤモンドコーティングエンドミルを用いた切削事例



加工上面

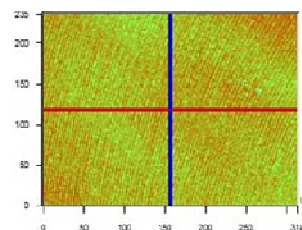


3D モデル図



ダイヤモンドコーティングエンドミル

測定部分



X Profile



測定結果

X profile

Rq	4.76 nm
Ra	3.38 nm
Rt	25.44 nm
Rp	12.12 nm
Rv	-13.32 nm

Y profile

Rq	4.08 nm
Ra	3.35 nm
Rt	19.20 nm
Rp	8.77 nm
Rv	-10.42 nm

Y Profile



X : Ra 4nm (0.004 μm)

Y : Ra 3nm (0.003 μm)

1-4 当該研究開発の連絡窓口

[プロジェクト全体に関すること]

所属 財団法人奈良県中小企業支援センター
 氏名 浅井 保典
 電話 0742-36-8312
 FAX 0742-36-4010

[研究開発内容に関すること]

所属 株式会社MSTコーポレーション C&Rセンター
 氏名 吉田 圭志
 電話 0743-78-1184
 FAX 0743-78-3854
 E-mail yoshida@mst-corp.co.jp

第2章 本論（成果報告）

「工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発と微細切削加工技術の確立」における実施内容と成果は以下の通りである。

2-1 高精度内面研削加工技術の確立

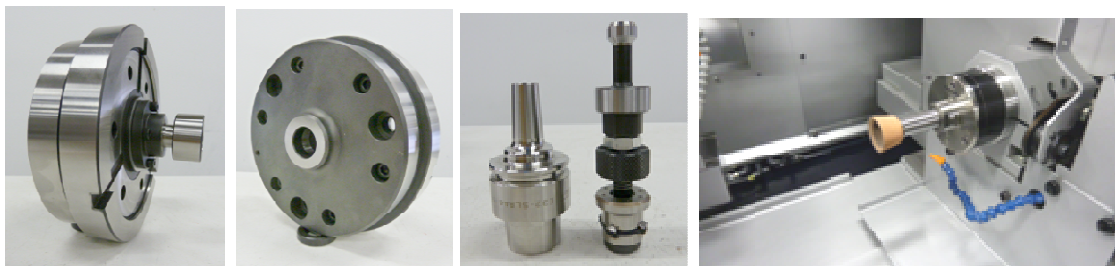
(1) 計画内容

H22 年度より、クランプ治具の中でも最も精度への影響が多い部分と考えられているクランプ機構の高精度化をテーマに取組んだ。具体的には以下の項目を掲げて調査を行い、クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率 100%を数値目標とした。

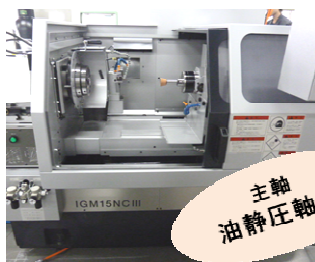
特に、H24 年度では、高精度内面研削盤と新規クランプ治具（高精度クランプ機構）を用いて精度テストを継続させながら、より高精度化への課題を探り、高い完成度を目指した。

当初の数値目標は、クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%である。

1. 新規クランプ治具の設計製作……治具の完成



2. 高精度内面研削盤の開発及び導入と評価……従来機との比較

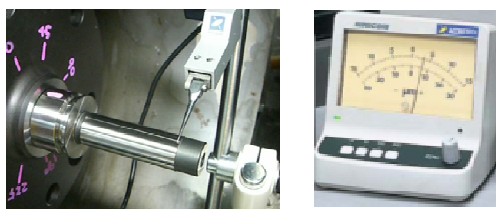


高精度内面研削盤



従来の内面研削盤

3. クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%



測定風景と電気マイクロ測定器

(2) 新規クランプ治具の設計製作

H22 年度では、高精度内面研削加工に必要な不可欠なクランプ治具(クランプ機構)を中心に、現状の加工精度の問題を明らかにするために、必要と思われる 5 つの項目について調査を行った。いずれの項目においても有意義な調査(実験)となり、高精度化に向けての課題や対策が明らかになった。その中で、クランプ治具のクランプ機構を全面的に改善する必要性が明らかになった。H23 年度では、そのクランプ機構の問題点を整理し、その対策を施した新たなクランプ治具(クランプ機構)を設計製作することを目標に掲げ、完成することができた(図 10)。

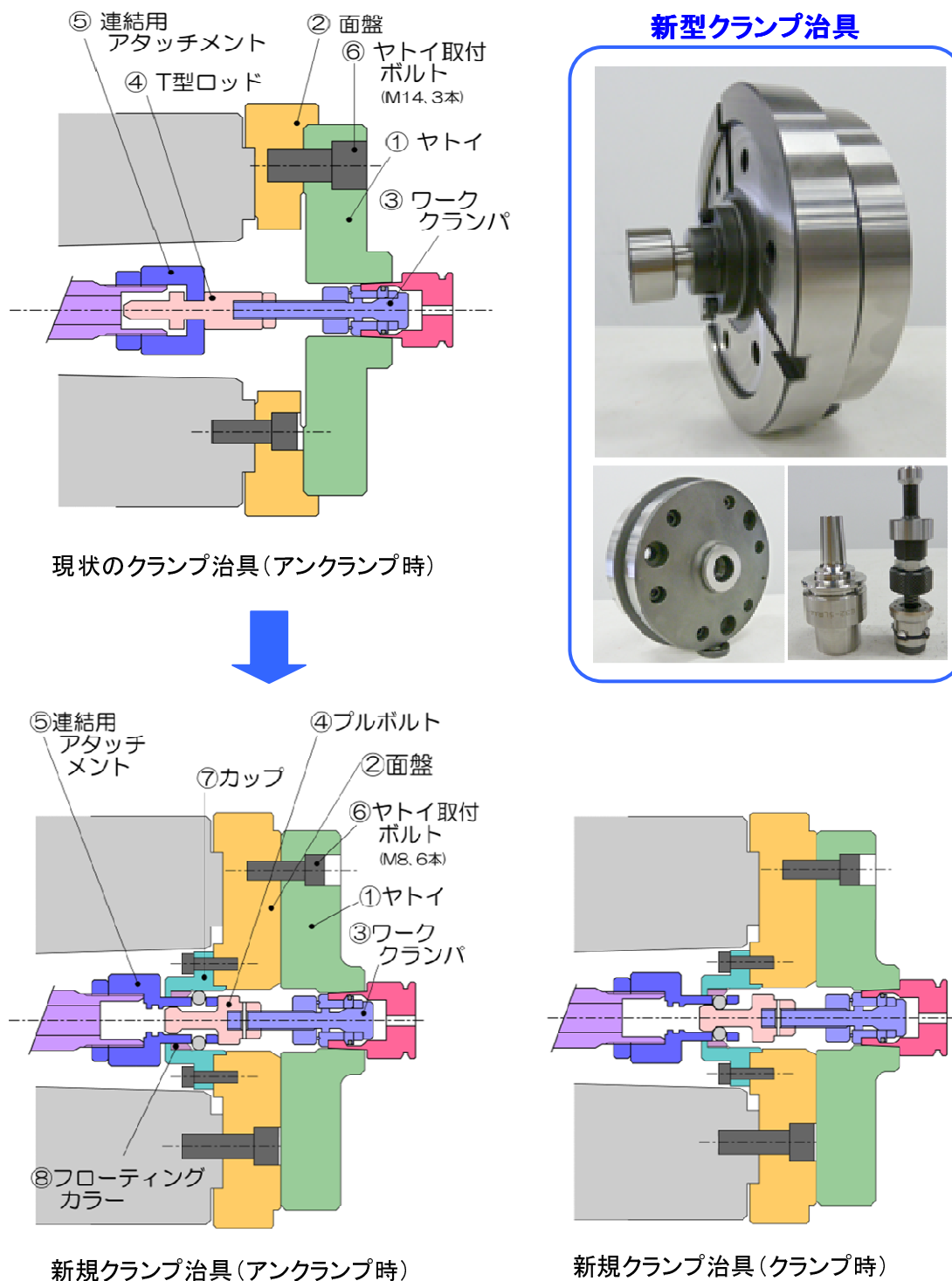


図 10 新旧クランプ治具の比較

(3)高精度内面研削盤の開発及び導入と評価

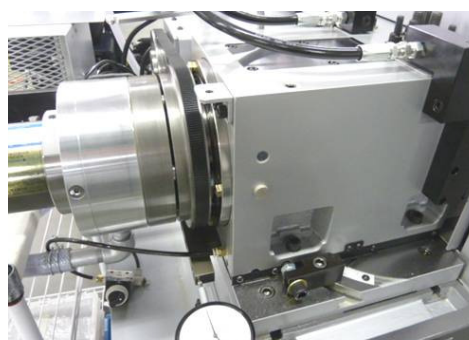
1. 油静圧軸受を採用した主軸を搭載

工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発(および量産化)を達成させるには、従来よりも1ランク上の形状精度が加工できる内面研削盤が不可欠であった。H23年度では、高精度内面研削盤の導入を計画し、主軸(工作物取付け用)に油静圧軸受を採用した機種を選択した。理由は、ベアリングの主軸では、 $0.2\mu\text{m}\sim 0.3\mu\text{m}$ の回転精度が限界であり、 $0.1\mu\text{m}$ 以内の回転精度を達成するには、非接触である油静圧軸受を採用した主軸の方が可能性は高いと考えた。製作に時間がかかったが、H23年10月末日に納入が完了した。

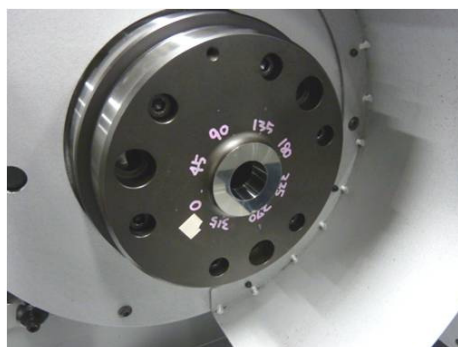
ただし、油静圧軸受の主軸であるが、機械の特性を十分に熟知しないと、治具を加工した際の穴の振れや端面の振れで、 $0.1\mu\text{m}$ 以内の精度を出すことは難しい。従来機と比較しながら機械特性と加工ノウハウの蓄積を行った。



高精度内面研削盤の外観



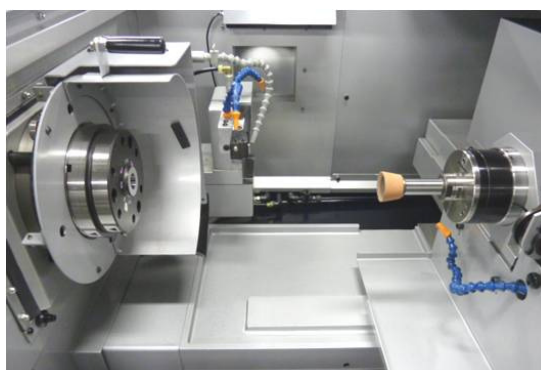
静圧軸受主軸の外観



主軸端面(新型クランプ治具を装着)



スピンドル(砥石装着主軸)



加工エリアの外観

2. 従来機との比較

工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発（および量産化）を達成させるには、従来よりも1ランク上の形状精度で加工できる内面研削盤が不可欠であった。H23 年度では、高精度内面研削盤の導入を計画し、主軸（工作物取付け用）に油静圧軸受を採用した機種を選択した。

H24 年度では、新型クランプ治具の完成に伴い、高精度内面研削盤と従来機の比較評価を実施した。結果は下記の通りであり、油静圧軸受の効果が検証できた（図 11）。



■測定結果

※測定値の単位:マイクロメートル(μm)

・測定値はマスターホルダの振れ量を示し、5回測定した平均値である。

テーパ角 当り量	2° 52' 13" 100% (現在)				
設定					
スキマ量 (mm)	0.015		0.030		
機 械	従来機	高精度機	従来機	高精度機	
装着位置と測定値 (μm)	0°	0.5	0.3	0.4	0.3
	90°	0.5	0.3	1.0	0.3
	180°	0.3	0.2	0.5	0.3
	270°	0.6	0.2	0.8	0.4

図 11 高精度機と従来機の振れ精度比較

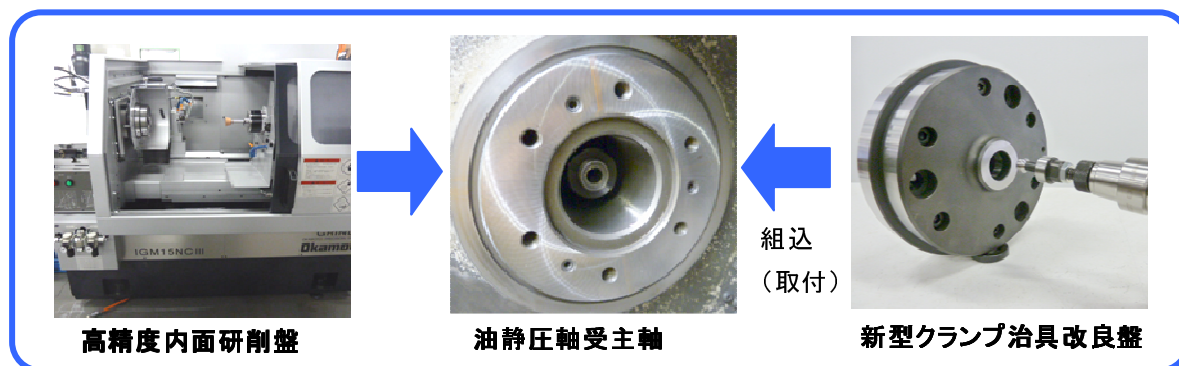
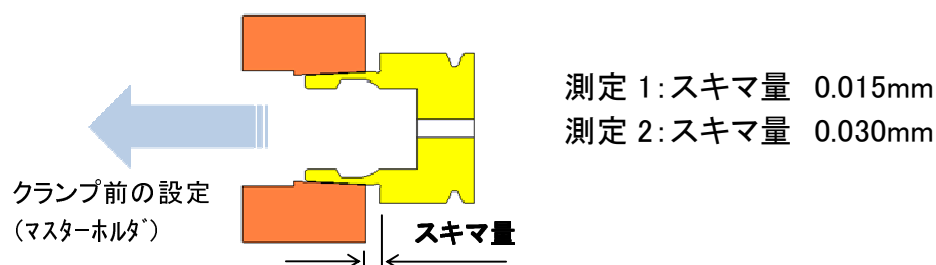
(4) クランプ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%

H23 年度では、ベアリングを使った従来機の主軸でテストを行い、クランプ精度の確率は 88%の結果であった。

H24 年度では、油静圧軸受の主軸を採用した高精度内面研削盤と新型クランプ治具の改良版を用いて、昨年同様のクランプ精度テストを実施した(図 12)。

結果は下記(表及び図 13)に示す通り、全ての測定で $0.5\mu\text{m}$ 以内の振れ精度であった。当初の計画目標である $0.5\mu\text{m}$ の確率 100%は達成することができた。

測定方法は、あらかじめクランプ治具にマスターホルダを取付ける角度を記載し、それぞれ 90 度ずつ角度を変えながらマスターホルダの振れ量を測定している。測定値 1 は治具に装着する前の治具端面とホルダ端面のスキマ量が 0.015mm とし、測定値 2 はそのスキマ量を 0.03mm した時のマスターホルダの振れ量を示すものである。いずれの場合でも振れ量は小さくバラツキも少ないことがわかる。



90 度毎に
マスターホルダを
取付けて測定

マスターホルダ
と合マーク

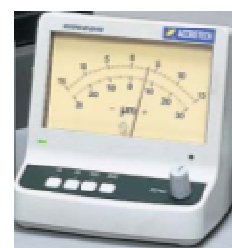
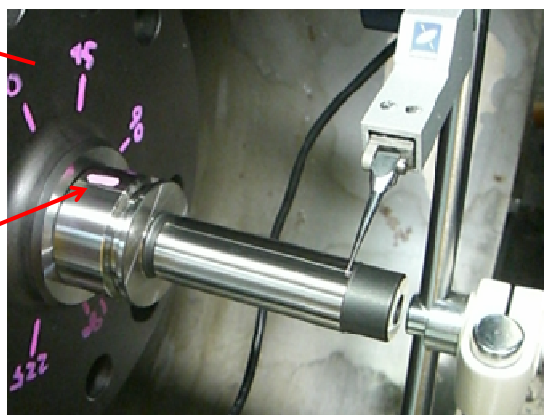


図 12 振れ精度測定の設定と環境

■測定結果

取付位置	設定1 (5回測定)					設定2 (5回測定)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2
180	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
90	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2
270	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4

目標数値 : 振れ精度 0.5 μm 以内の確率

100%

振れ精度測定結果

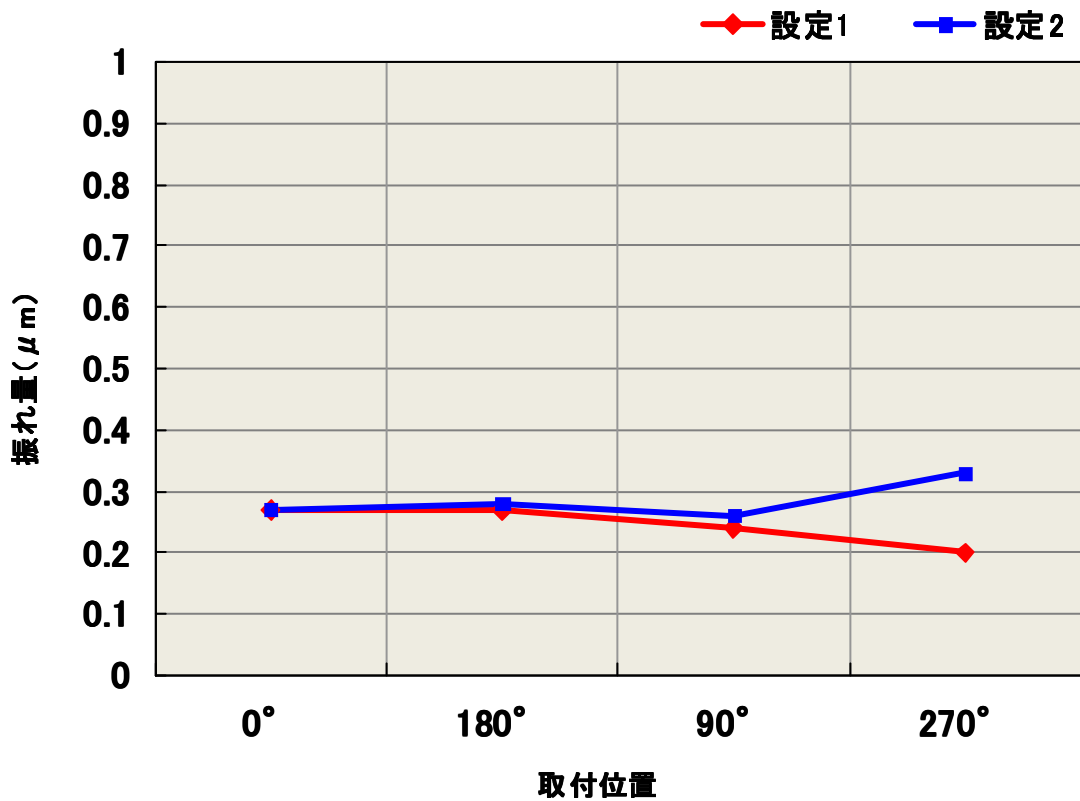


図 13 測定結果のグラフ化

2-2 焼ばめホルダ把持部の振れ精度および焼ばめ精度調査

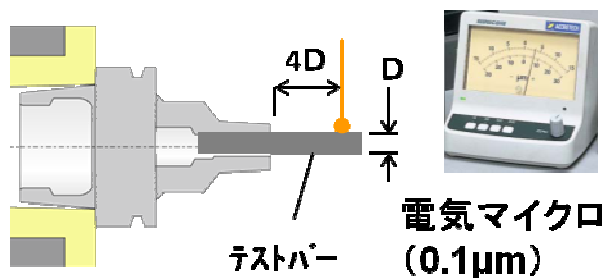
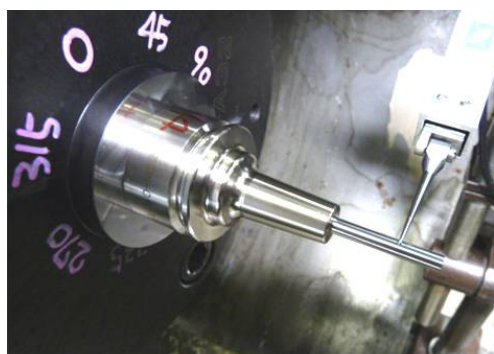
(1) 計画内容

H22 年度より、工具保持部の内径公差を確立させ、保持部内径の加工精度向上の取り組みをしてきた。その結果として、テストバーチャッキング時の振れ精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100% までと高める目標数値を掲げた。評価方法として、高精度焼ばめホルダの製作本数を増やし、全製作ホルダの振れ測定し、保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内のホルダ製作の確率を高める取り組みを行った。

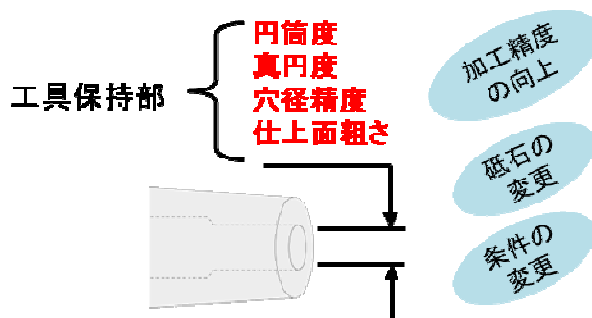
具体的には、焼ばめホルダに高精度テストバーを焼ばめ(装着)し、テストバー外径の 4 倍の位置で、電気マイクロで測定し、その振れ量で評価する。

当初の数値目標は、保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100% まで高める、である。

1. 工具保持部の内径公差の確立
2. 保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100% まで高める



3. 保持部穴の高精度化の取組む(真円度 $0.1\mu\text{m}$ 、円筒度 $0.5\mu\text{m}$ 、を目標)
4. 切削条件、研削砥石の改善



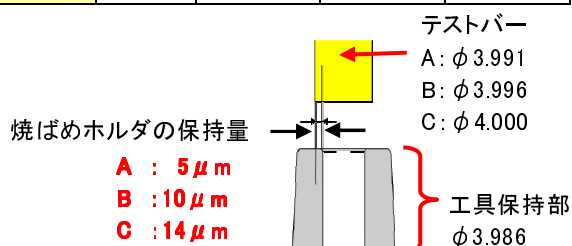
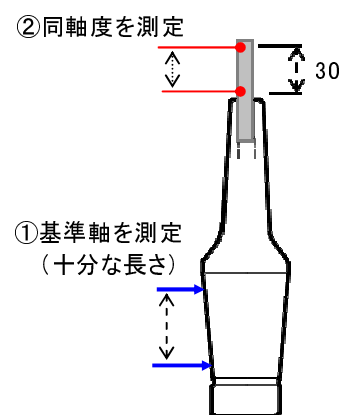
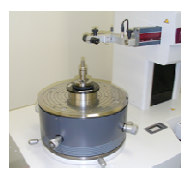
(2) 工具保持部の内径公差の確立

1. 保持量と振れの調査テスト A

現在生産されている焼ばめホルダは、汎用性(加工用途が広い)が高く工具保持力が強い設定になっている。しかし、本研究では微細加工をテーマにしており、必ずしも工具保持力が求められているわけではない。それよりも、工具保持力が強い場合と弱い場合で振れ精度に変化があるのかどうか、の方が気がかりであった。工具を直接、把持できる焼ばめホルダは高精度ホルダの代名詞となっているが、 $1\mu\text{m}$ に限定されてしまうと少しの不安定要素も見逃すことができない状況下にある。

具体的には、焼ばめホルダと高精度テストバーを用い、穴(焼ばめホルダ保持部)と軸(テストバー)の関係で、数種類の焼ばめ保持量をあらかじめ設定した。そして、各々の保持量の設定で繰り返し焼ばめ作業を行い、その時の振れ量で評価した。初めに、真円度測定器で評価した。

テストバー	外径 (mm)	保持量 (μm)	円筒度 (μm)	真円度 (μm)
A	3.991	5	0.4	0.2
B	3.996	10	0.4	0.2
C	4.000	14	0.3	0.2



真円度測定による結果は、下記グラフの通りであった。保持量を小さくする方が、振れ精度が高く、かつ安定することが確認できた(図 14)。

	AV.
A	0.6
B	1.2
C	1.5

保持量と振れの結果

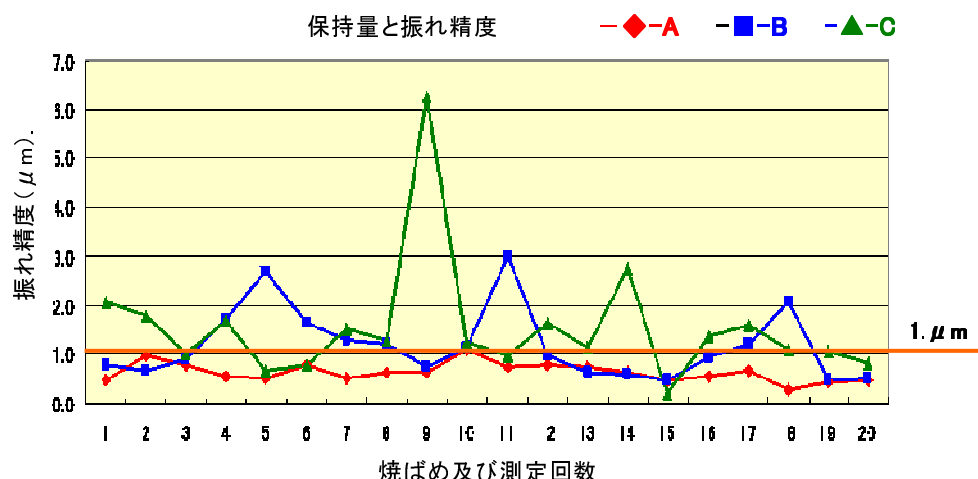
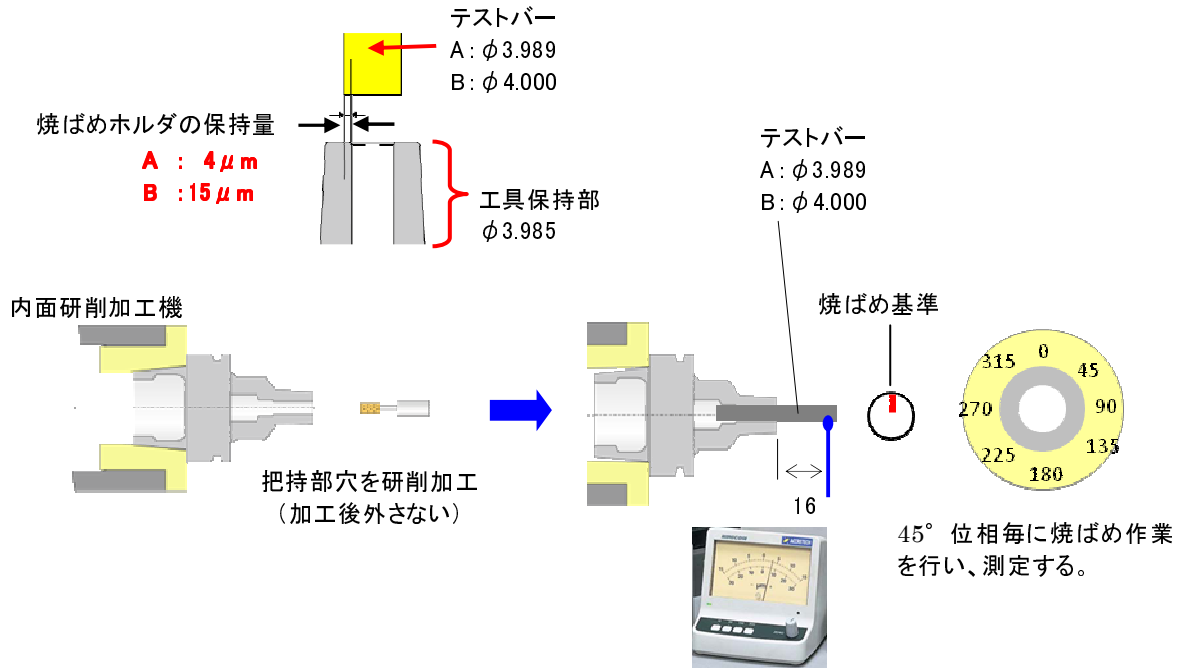


図 14 保持量と焼ばめ回数における振れの変化

2. 保持量と振れの調査テスト B

次に、機上で保持量と振れの確認を行った。まず、焼ばめホルダの把持部穴を仕上げ、そのホルダは取り外しせず、そのまま機上で焼ばめ作業を行った。理由は、加工した状態の穴の振れは、ほぼ主軸(加工機)のベアリング精度に近く、 $0.2\mu\text{m}$ 程度である。

異なる外径のテストバーを焼ばめして、振れを測定することにより、保持量の違いによる振れ精度の傾向を見出すことができた。



機上による結果は、下記グラフの通りであった。保持量($4\mu\text{m}$)を小さくする方が、振れ精度は高い。振れの数値がグラフの中心に集まっている結果から明らかである(図 15)。

2つの実験から、 $1\mu\text{m}$ を目指すには、保持量の設定は少なくする方が望ましいことが確認できた。

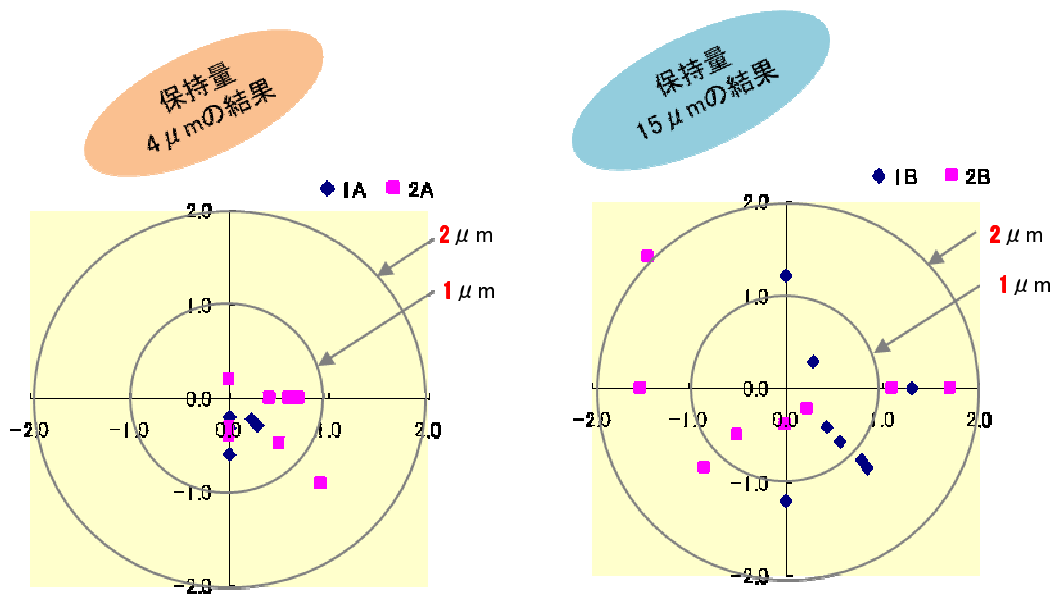


図 15 保持量と振れ精度(中心に集まるほど高精度を示す)

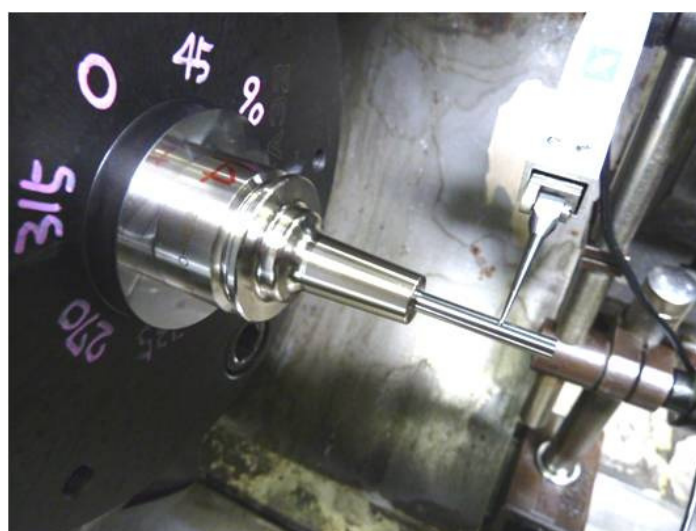
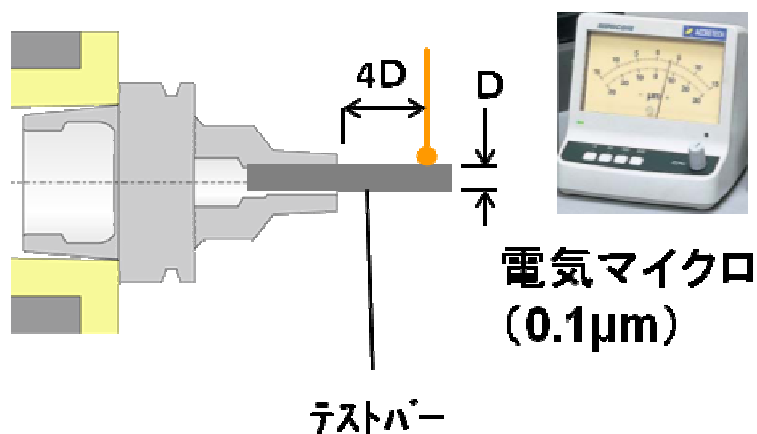
(3) 保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の確率を 100%まで高める(目指す)

H24 年度では、高精度焼ばめホルダの製作本数を昨年以上に増やした。そして、製作したホルダの全品について振れ精度測定を実施した。

測定方法は、下記に示す通り、テストバーをホルダに焼ばめし、クランプ治具に取付ける。測定位置は、テストバー外径の 4 倍の長さとした。また、ホルダの取付位置をクランプ治具に記載した 0 度と 180 度に装着し、合計 2 回測定する。2 回の測定で、いずれも $1\mu\text{m}$ 以内に入った場合のみ $1\mu\text{m}$ 達成ホルダとする、という昨年のルールを採用し、実施した。測定には電気マイクロを用いた。

測定結果(表及び図 16)は、下記に示す通りである。また、サポイン年度と $1\mu\text{m}$ の達成率の推移を図 17 にまとめた。

高精度焼ばめホルダを累計で 1024 本製作した。その内、 $1\mu\text{m}$ に入るホルダは 1009 本であり、確率は 98.5%であった。また、後期に関しては 99.1%の確率まで向上しており、保持精度 $1\mu\text{m}$ の確率 100%まで高めるといふ当初の目標に対して、概ね達成できたと考える。



■測定結果

●製作本数と1 μ mホルダの比率

製作時期	製作総数	1 μ m 以内	1.1 μ m 以上	1 μ m 率
前期	593	582	11	98.1%
後期	431	427	4	99.1%
通期	1024	1009	15	98.5%

目標数値 : 保持精度 (振れ精度) 1 μ m 以内の確率

目標100%
98.5%達成

●振れ精度数値と製作本数の関係

振れ精度(μ m)	本数	率(%)
0.2 以下	7	0.7
0.3 ・ 0.4	93	9.2
0.5 ・ 0.6	220	21.8
0.7 ・ 0.8	250	24.8
0.9 ・ 1.0	439	43.5

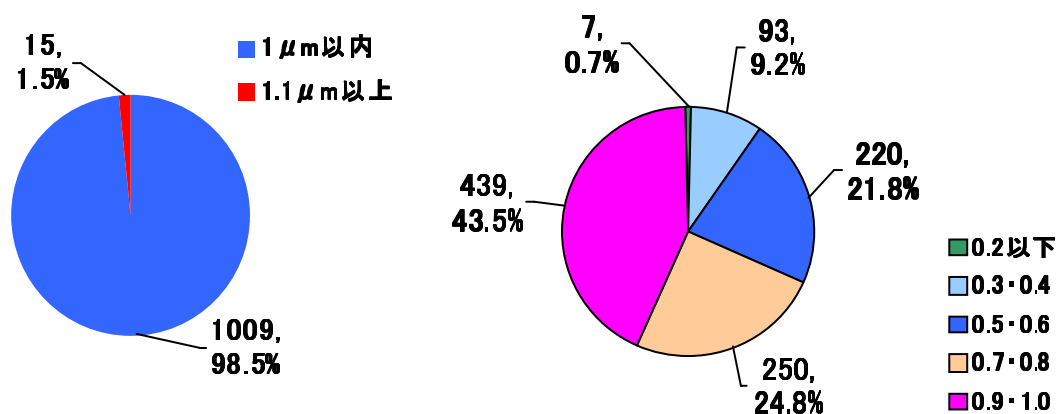


図 16 グラフ: 振れ精度測定結果

●サポイン年度の製作本数と1μm比率

	2010	2011	2012
1μm以内	160	415	1,009
NG数	17	17	15
1μm比率(%)	90.4	96.1	98.5

2010年度 2010/9/21～2011/2/20

2011年度 2011/2/21～2012/2/20

2012年度 2012/2/21～2013/2/20

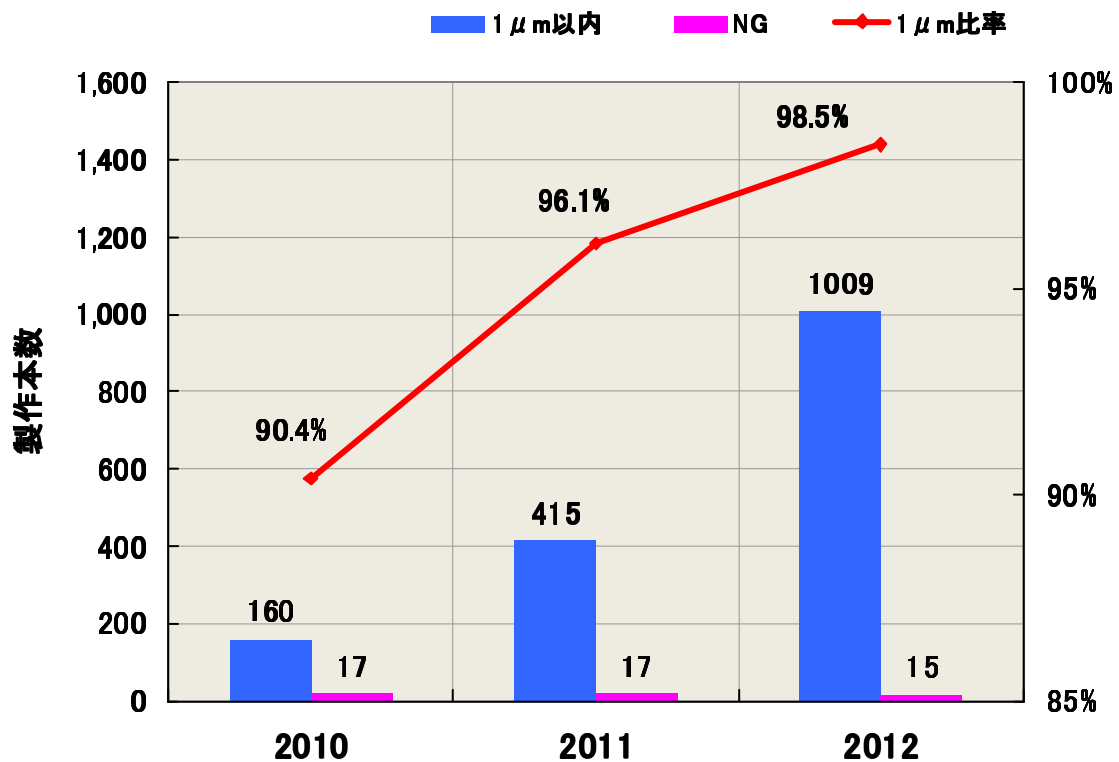
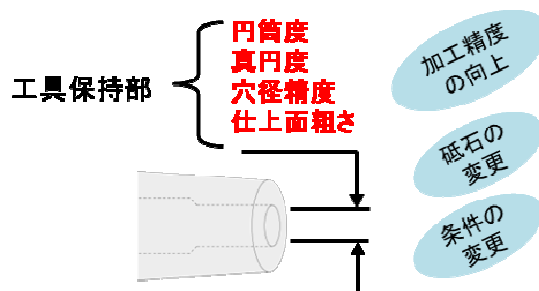


図 17 グラフ: サポイン年度と1μm比率推移

- (4) 保持部穴の高精度化の取組み
 高精度化が進んでいる。
 保持精度の高さに結果として現れている。

- (5) 切削条件・研削砥石の改善
 昨年に引き続き、粒度#325から
 #400及び#600の調査を実施した。

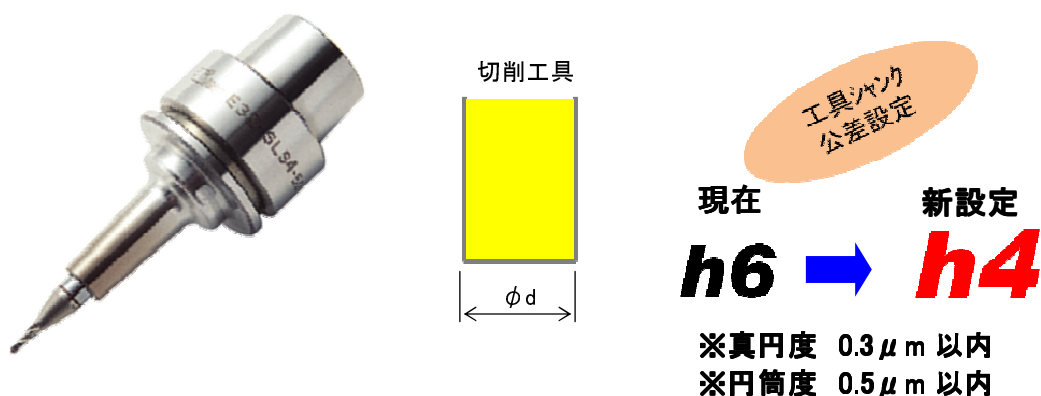


■高精度シャンク工具の推進

本事業では、H25年度以降の企業化を目指し、工具保持精度 $1\mu\text{m}$ 以内の焼ばめホルダの開発を進めている。そのためには工具のシャンク精度も重要である。本事業で取組んでいる高精度焼ばめホルダが普及するには、高精度シャンクの工具が市販されることが前提となる。H24年度もこの点を十分熟知し、工具メーカーに積極的に提案してきた。

日進工具はじめ日本を代表する4社で、高精度焼ばめホルダに適する製品を標準化されている。

工具シャンク(ϕd)の幾何精度



高精度シャンク採用工具の一例



日進工具



オーエスジー



日立ツール



住友電工

2-3 「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ」比較

(1) 計画内容

H22 年度より、「従来品焼ばめホルダ」と「高精度焼ばめホルダ: 振れ精度 $1 \mu\text{m}$ 」との切削テスト比較を行い、工具寿命、面品位、機械振動など、微細加工における振れ精度の影響をデータ収集し、傾向を研究することである。

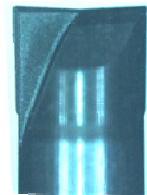
具体的には、ドリル加工を中心とした工具寿命の比較や LED 金型モデルの表面粗さ $Ra30\text{nm}$ ($0.03 \mu\text{m}$) の加工に取り組む。

当初の数値目標は、工具寿命の 1.5 倍である。

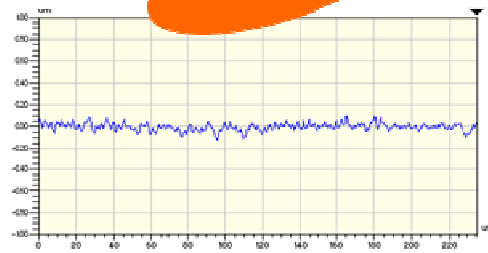
1. 振れと工具寿命のアプローチ
2. 工具寿命 50%UP の取組み……工具寿命 2.2 倍、及び 2 倍の小径穴加工
3. LED 金型モデルの表面粗さ $Ra 30\text{nm}$ の取組み(高硬度材)



ELMAX 材(60HRC) 金型コア部 拡大写真



CBN エンドミル

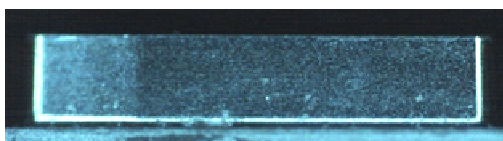


測定単位: マイクロメートル (μm)

Rq	0.04 μm
Ra	0.03 μm
Rt	0.23 μm
Rp	0.10 μm
Rv	-0.13 μm

Angle	-124.85 μrad
Curve	0.47 m
Terms	Tilt
Avg Ht	0.00 μm
Area	0.00 μm^2

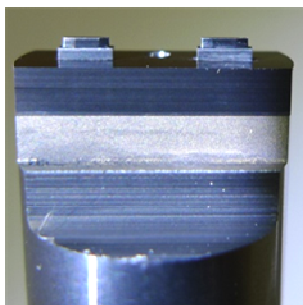
4. LED 金型モデルの表面粗さ $Ra 30\text{nm}$ の取組み(超硬合金)



超硬合金(92HRA) 金型コア部 拡大写真



ダイヤモンドコーティング
エンドミル



測定単位: ナノメートル (nm)

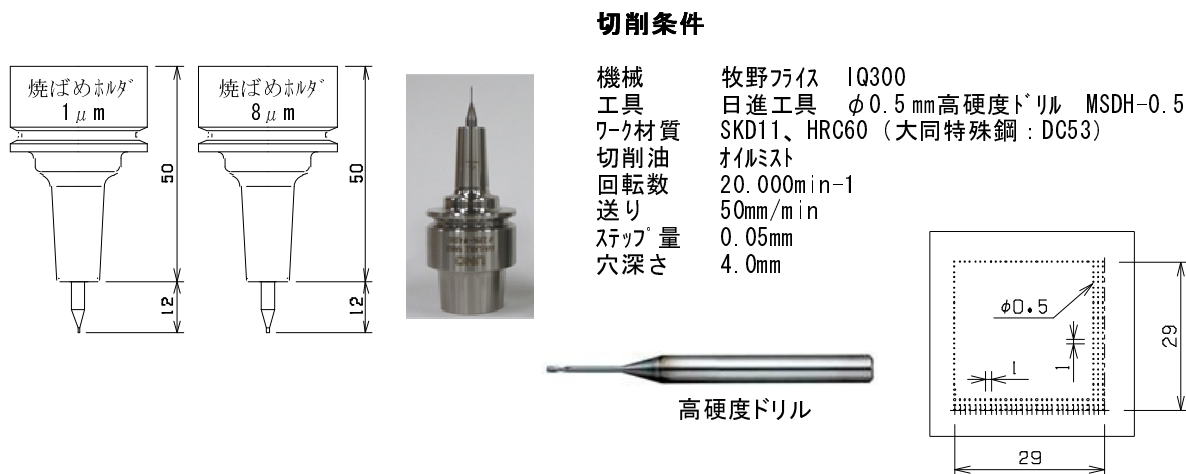
Rq	25.29 nm
Ra	19.68 nm
Rt	158.51 nm
Rp	55.76 nm
Rv	-102.76 nm

Angle	-308.36 μrad
Curve	-0.37 m
Terms	Tilt
Avg Ht	0.00 nm
Area	0.00 μm^2

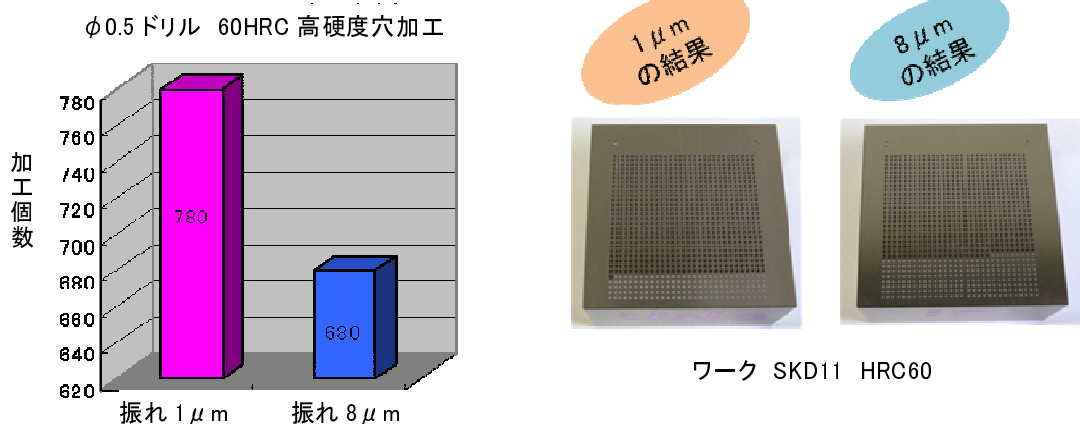
(2) 振れと工具寿命のアプローチ

高硬度材料(60HRC)のドリル加工、エンドミル加工における振れ精度の影響を工具摩耗及び工具寿命で評価した。

1. 振れと工具寿命の比較調査(ドリルの高硬度加工)



結果は、下記(図 18)の通りであった。振れ 1 μ mの方が加工個数も多く、穴の状態(631穴目)も良かった。



穴数	振れ 1 μ m	振れ 8 μ m
1, 2		
301, 302		
631, 632		

図 18 振れによる加工穴数とその状態

2. 振れと工具寿命の比較調査(CBN エンドミルの高硬度加工)



結果は、下記(図 19)の通りであった。焼ばめホルダ 1 μm の方が、工具摩耗が小さい。また、10 μm の振れの場合、振れの高い刃先で大きく欠けが生じた。

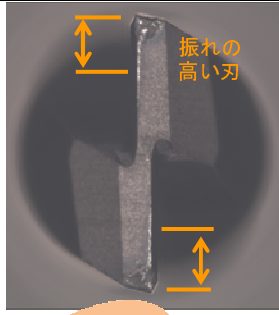
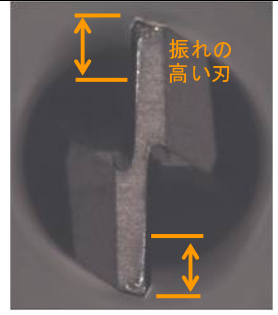
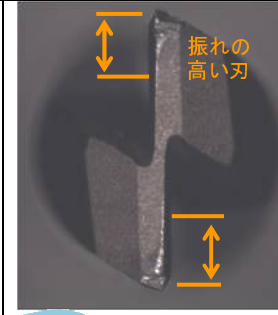
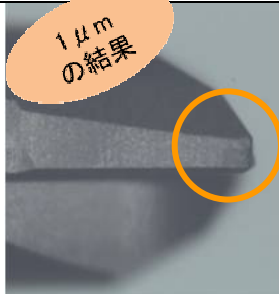
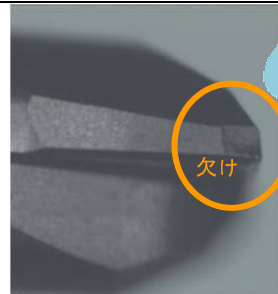
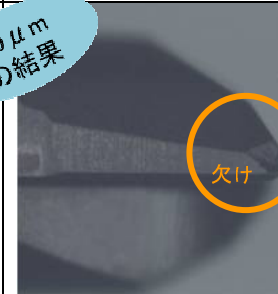
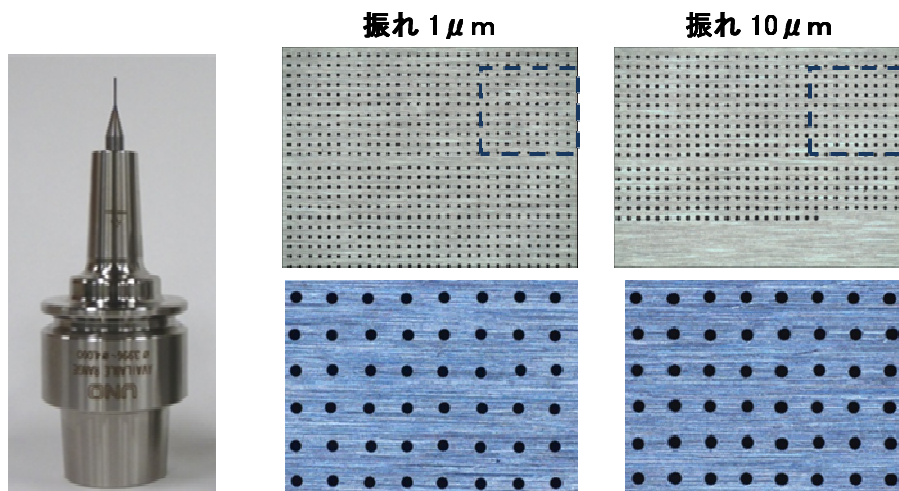
	焼ばめホルダ 1 μm	焼ばめホルダ 10 μm	コレットホルダ 10 μm
工具を真上から	 <p>振れの高い刃</p>	 <p>振れの高い刃</p>	 <p>振れの高い刃</p>
振れの高い刃先	 <p>1 μm の結果</p>	 <p>10 μm の結果 欠け</p>	 <p>欠け</p>

図 19 振れによる工具摩耗の状態

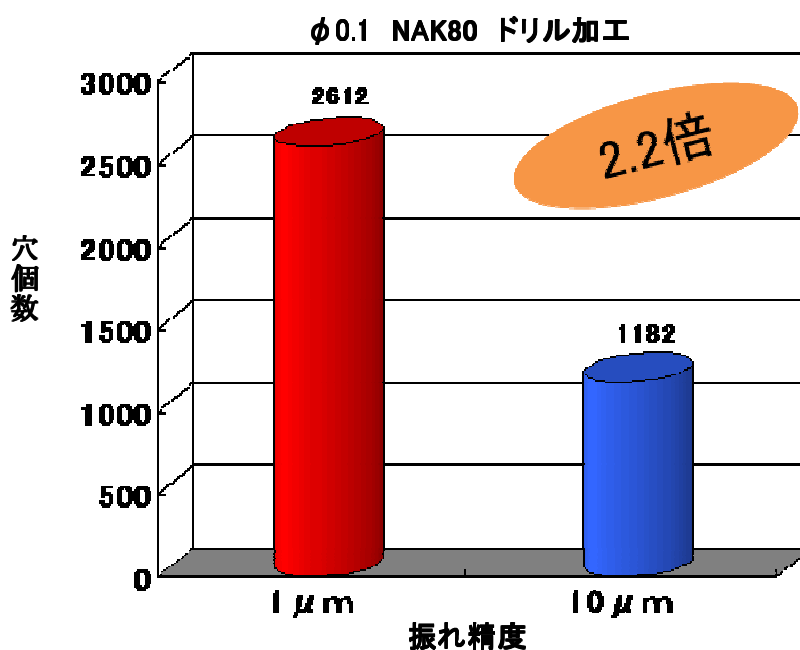
(3) 工具寿命 1.5 倍の取組み……工具寿命 2.2 倍、及び 2 倍の小径穴加工

高硬度材のドリル加工で、振れ精度の違いによる工具寿命の比較テストを行った。
結果は以下に示す通りである。

■ $\phi 0.1\text{mm}$ ドリル加工の結果



機 械	牧野フライス iQ300
工 具	日進工具 $\phi 0.1$ ドリル MDS-0.1
ワーク材質	NAK80 HRC40(大同特殊鋼)
切削油	水溶性切削液
回転数	$20,000\text{min}^{-1}$
送り	$60\text{mm}/\text{min}$ $0.003\text{mm}/\text{rev}$
穴深さ	0.4mm ノンステップ



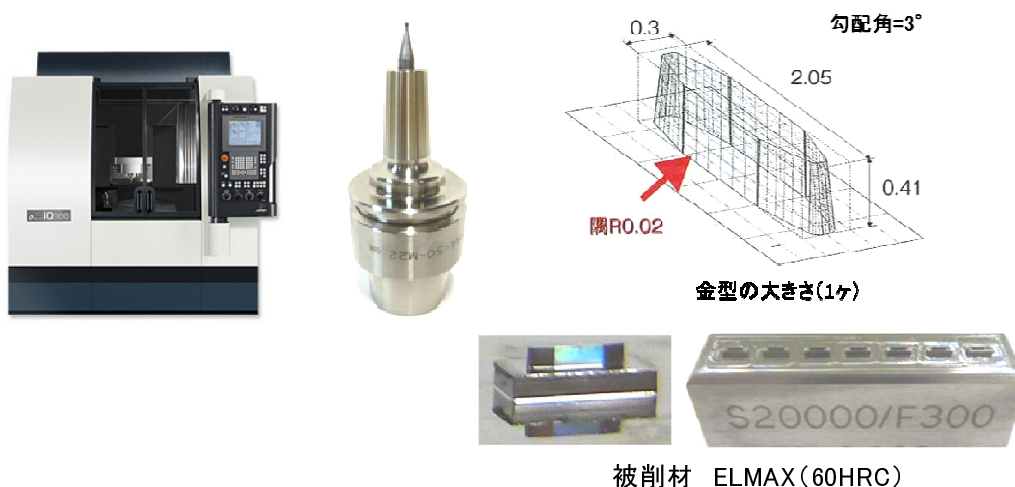
(4) LED 金型モデルの表面粗さ Ra 30nm の取組み(高硬度材)

H23 年度より LED 金型モデルの製作に挑戦した。本事業の動機も LED 金型の高精度化に貢献することにあった。機械加工による表面粗さを Ra50nm(0.05 μ m)以下にすることが当面の目標であったが、昨年の取組みで達成することができた。

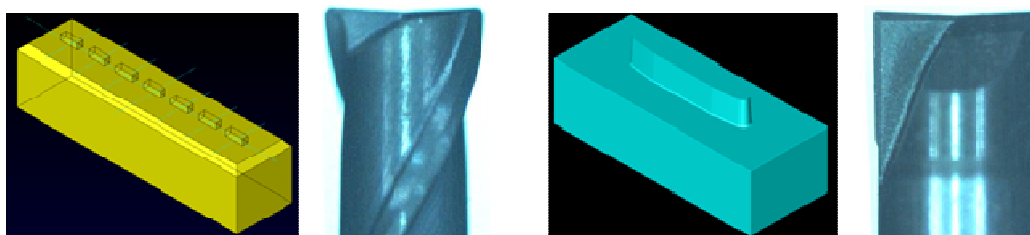
H24 年度は、表面粗さの目標を Ra30nm(0.03 μ m)とし、高硬度材を用いて達成することができた。

製作したLED金型形状、加工条件、評価に関して図を中心に記載する。

■ 高硬度材モデル……表面粗さ Ra30nm(0.03 μ m)を目標



● 加工条件



荒取り 外周全加工(島残し) 超硬コーティッドラジアスエントミル			仕上 LED コア全加工(島部分) CBN ラジアスエントミル:日進工具		
回転数	min ⁻¹	45,000	回転数	min ⁻¹	20,000
送り速度	mm/min	500	送り速度	mm/min	300
切込み : a p	mm	0.02	垂直切込み A	mm	0.003
: a e	mm		B	mm	0.001

*使用クーラント : MQL

■LED 金型の評価

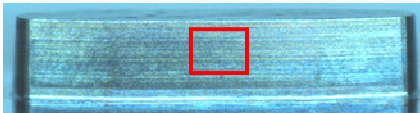
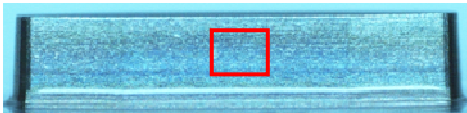
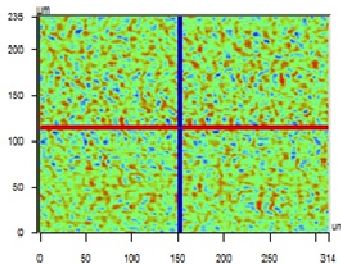
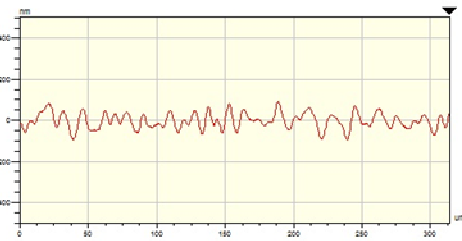
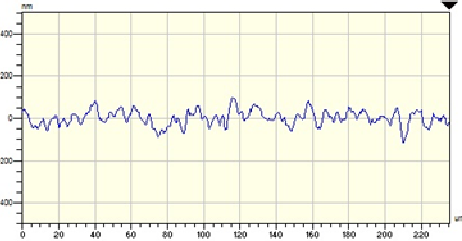
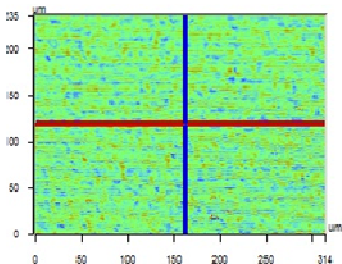
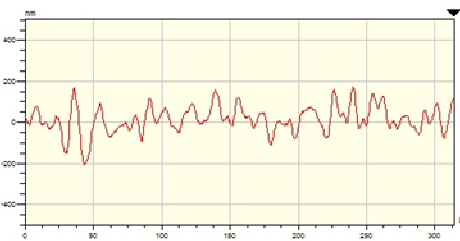
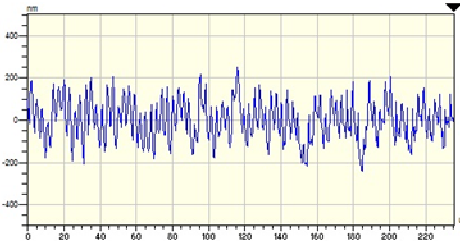
	A	B
	20,000min ⁻¹ / F300 垂直切込み量 : 0.001mm	20,000min ⁻¹ / F300 垂直切込み量 : 0.003mm
拡大写真		
表面粗さ測定結果	 <p>X Profile</p>  <p>Y Profile</p> 	 <p>X Profile</p>  <p>Y Profile</p> 
評価	<p>X: Ra30nm (0.030 μm)</p> <p>Y: Ra28nm (0.028 μm)</p>	<p>X: Ra48nm (0.048 μm)</p> <p>Y: Ra78nm (0.078 μm)</p>

図 20 表面粗さ測定結果

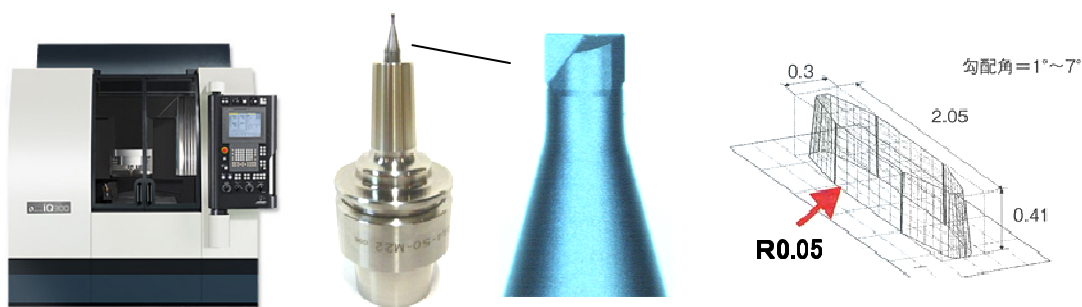
●考察

仕上の回転数や送り(F)は一定条件で、垂直方向の切込み量を 0.001mm と 0.003mm で比較サンプルを製作した。表面粗さの目標は 30nm であったので、目標通り仕上げるには、垂直方向の切込みは 0.001mm 程度の微細切込みが必要である。切込み方向の Y の数値にその違いが顕著に現れた(図 20)。

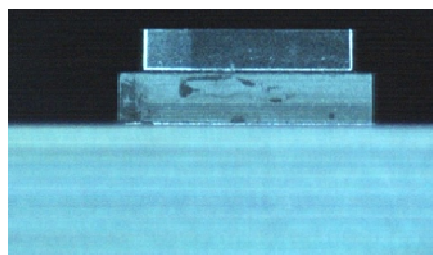
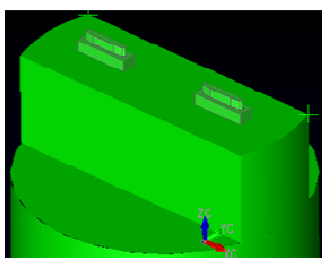
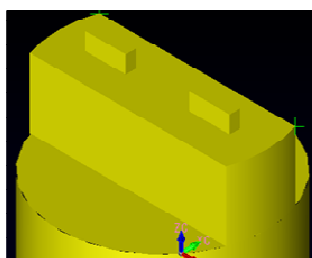
(6)LED 金型モデルの表面粗さ Ra 30nm の取組み(超硬合金)

H24 年度は、超硬合金の切削加工に取組んできた。LED 金型モデルの製作にあたっても超硬合金を用いて試みた。結果は、高硬度材と同等に Ra30nm(0.030 μm)を達成することができた。

■ 超硬合金モデル……表面粗さ Ra30nm(0.03 μm)を目標



直径 1mm R0.05 ダイヤモンドコーティングエンドミル



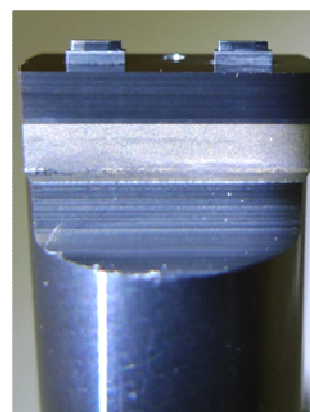
ワーク形状 3D 図 (左:粗取り、右:仕上 直径 12mm)

被削材 超硬合金(92HRA)

●加工条件

		粗加工	中仕上	仕上 X2
回転数	min ⁻¹	30,000	30,000	45,000
送り速度	mm/min	750	750	500
切込み : ap	mm	0.01	0.01	0.001
: ae	mm	0.25	0.25	—

*使用クーラント : MQL



■LED 金型の評価

	超硬合金 92HRA	ELMAX 60HRC																																								
	45,000min ⁻¹ / F200 垂直切込み量 : 0.001mm	20,000min ⁻¹ / F300 垂直切込み量 : 0.001mm																																								
拡大写真																																										
表面粗さ測定結果	<table border="1"> <tr> <td>Rq</td> <td>44.69 nm</td> <td>Rq</td> <td>25.29 nm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>30.50 nm</td> <td>Ra</td> <td>19.68 nm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>463.08 nm</td> <td>Rt</td> <td>158.51 nm</td> </tr> <tr> <td>Rp</td> <td>273.93 nm</td> <td>Rp</td> <td>55.76 nm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>-189.15 nm</td> <td>Rv</td> <td>-102.76 nm</td> </tr> </table>	Rq	44.69 nm	Rq	25.29 nm	Ra	30.50 nm	Ra	19.68 nm	Rt	463.08 nm	Rt	158.51 nm	Rp	273.93 nm	Rp	55.76 nm	Rv	-189.15 nm	Rv	-102.76 nm	<table border="1"> <tr> <td>Rq</td> <td>37.23 nm</td> <td>Rq</td> <td>35.62 nm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>30.11 nm</td> <td>Ra</td> <td>27.79 nm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>184.25 nm</td> <td>Rt</td> <td>209.91 nm</td> </tr> <tr> <td>Rp</td> <td>90.44 nm</td> <td>Rp</td> <td>94.91 nm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>-93.80 nm</td> <td>Rv</td> <td>-115.00 nm</td> </tr> </table>	Rq	37.23 nm	Rq	35.62 nm	Ra	30.11 nm	Ra	27.79 nm	Rt	184.25 nm	Rt	209.91 nm	Rp	90.44 nm	Rp	94.91 nm	Rv	-93.80 nm	Rv	-115.00 nm
Rq	44.69 nm	Rq	25.29 nm																																							
Ra	30.50 nm	Ra	19.68 nm																																							
Rt	463.08 nm	Rt	158.51 nm																																							
Rp	273.93 nm	Rp	55.76 nm																																							
Rv	-189.15 nm	Rv	-102.76 nm																																							
Rq	37.23 nm	Rq	35.62 nm																																							
Ra	30.11 nm	Ra	27.79 nm																																							
Rt	184.25 nm	Rt	209.91 nm																																							
Rp	90.44 nm	Rp	94.91 nm																																							
Rv	-93.80 nm	Rv	-115.00 nm																																							
評価	<p>X: Ra30nm (0.030 μm)</p> <p>Y: Ra20nm (0.020 μm)</p>	<p>X: Ra30nm (0.030 μm)</p> <p>Y: Ra28nm (0.028 μm)</p>																																								

図 21 表面粗さ測定結果

●考察

高硬度材と同様に超硬合金に LED 金型モデルの切削加工を試みた。評価は上記の通り、同等の加工精度が得られ、目標の 30nm を達成した(図 21)。工具寿命が課題である。

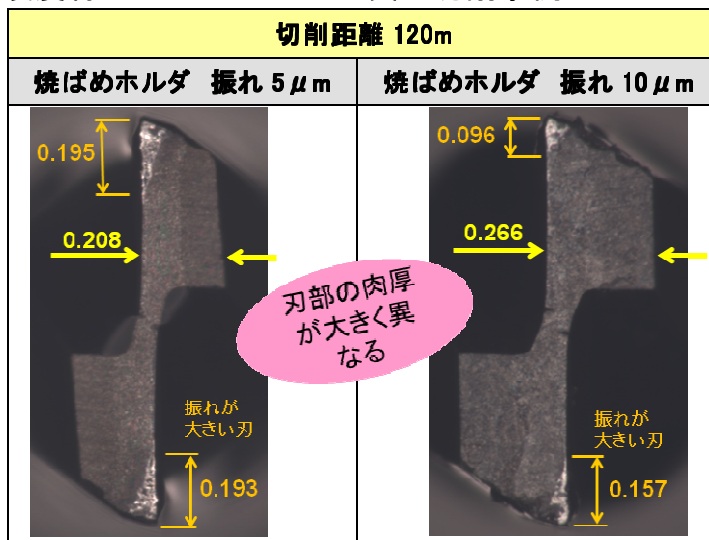
2-4 加工条件調査

(1) 計画内容

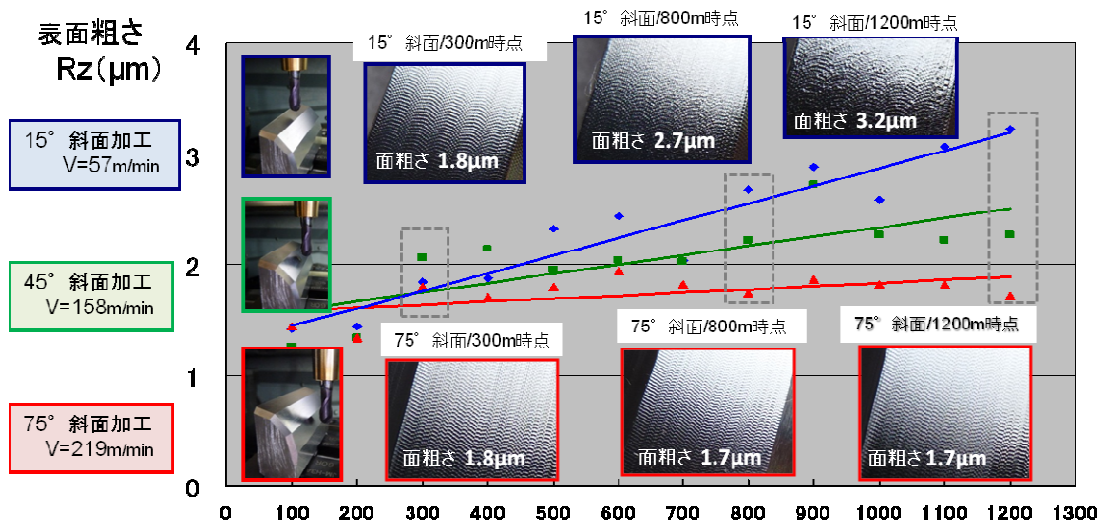
H22年度より、高精度マシニングセンタにて、各切削工具による加工テスト、データ収集を行ってきた。主として高硬度材を対象にした切削加工を計画した。特にH24年度では、超硬合金を被削材とした加工実例を数多く実施した。超硬合金の切削加工は硬度が高いため、従来では放電加工機や研削加工が中心であったが、最近では切削で加工する取組みもされているからである。また、超硬合金の仕上加工では工具1刃の切込みが極めて小さいため、振れ精度が重要と考える。

さらに、マシニングセンタで実施されていない研削工具の活用の提案も行った。当初の数値目標として、テストデータ10件に取組むことにした(H23年度、H24年度)。

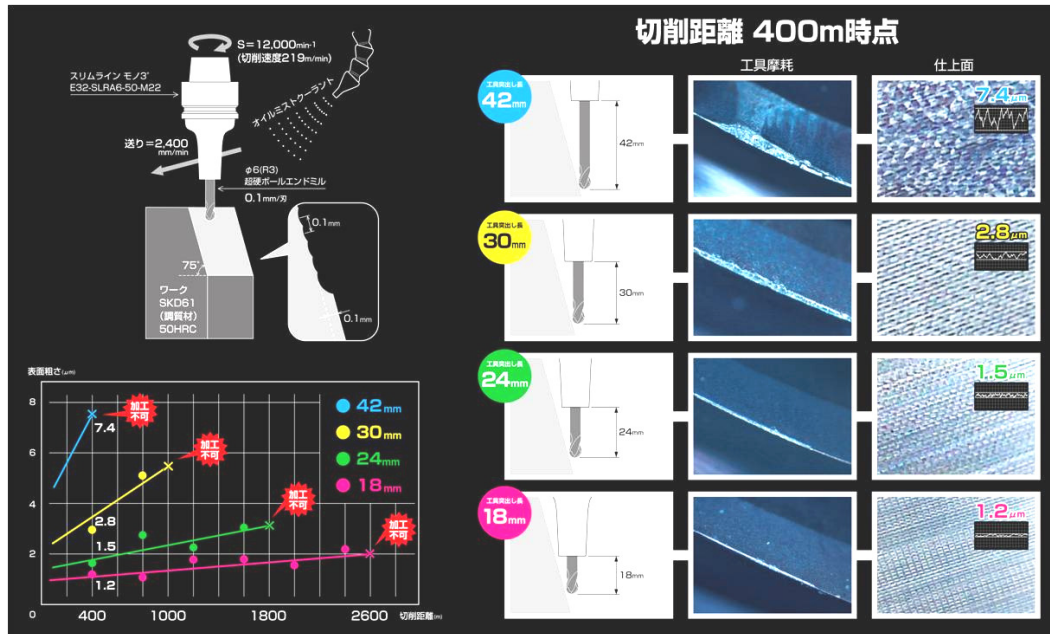
1. 高硬度材の加工・・・CBN 工具の切削事例



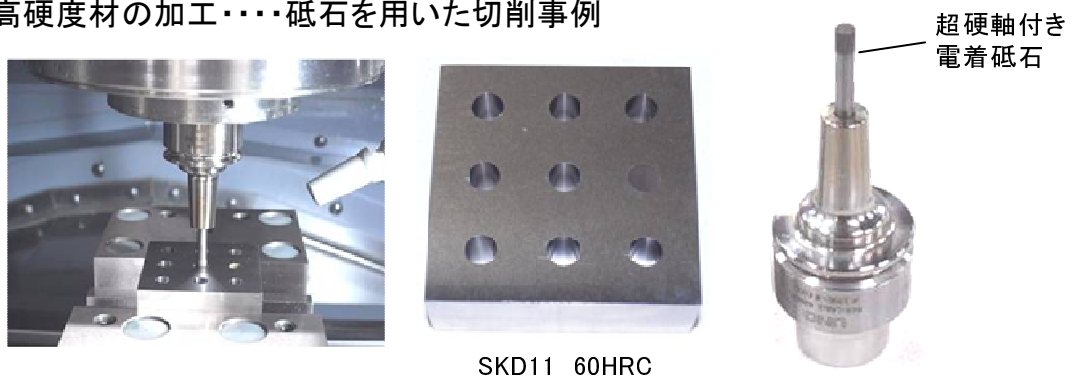
2. 高硬度材の加工・・・傾斜角度の違いによる切削距離と加工表面粗さの関係



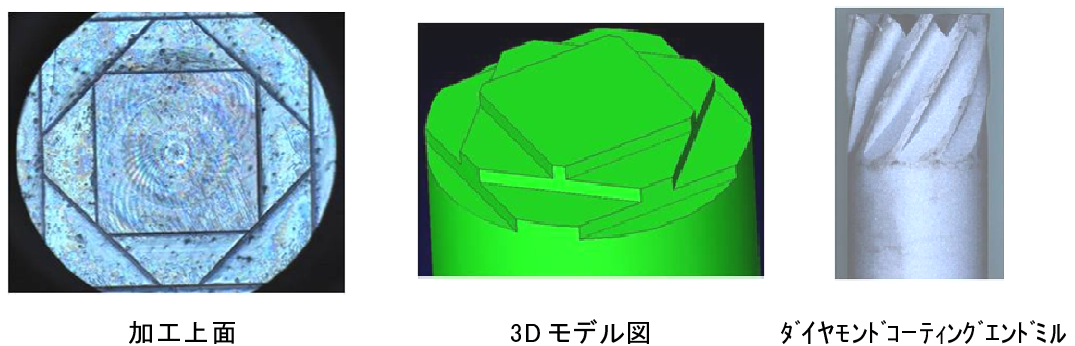
3. 高硬度材の加工……工具の突き出し量と工具寿命の関係



4. 高硬度材の加工……砥石を用いた切削事例

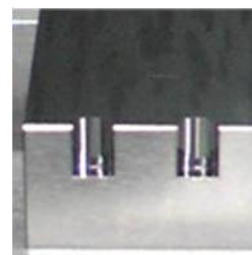
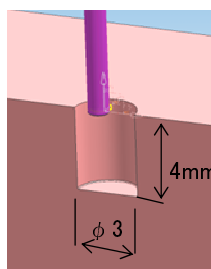


5. 超合金の加工……ダイヤモンドコーティングエンドミルを用いた切削事例



(2) CBN 工具の切削事例

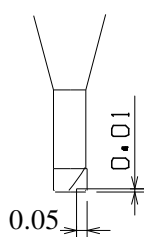
CBNエンドミル(2枚刃)を使って工具摩耗状況を調査した。



ワーク ELMAX 60HRC

焼ばめホルダ

1 μm



■切削条件

機械 牧野フライス IQ300
 工具 φ1-0.05R-3L CBN ラジ'アセント'ミル
 ワーク材質 SKD11、HRC60 (大同特殊鋼: DC53)
 切削油 オイルミスト
 切り込み 軸方向 $a_p=0.01\text{mm}$ / 径方向 $a_e=0.05\text{mm}$
 回転数 45,000min⁻¹
 送り 934mm/min (1刃送り 0.010mm/刃)
 加工時間 125min
 加工距離 100m
 加工パス Z方向 0.01切り込み-ス'イブル加工
 X-Y方向切り込み0.1-繰り広げ加工

結果は、下記(図 22)の通りであった。CBN エンドミルの摩耗は振れ 5 μm の方が大きくなった。これは工具刃先の剛性(肉厚が異なる)の違いによる影響が大きく現れたと推測できる。振れの切削評価をする場合、工具形状を調査し、均一な刃形状の工具で比較しなければならない。

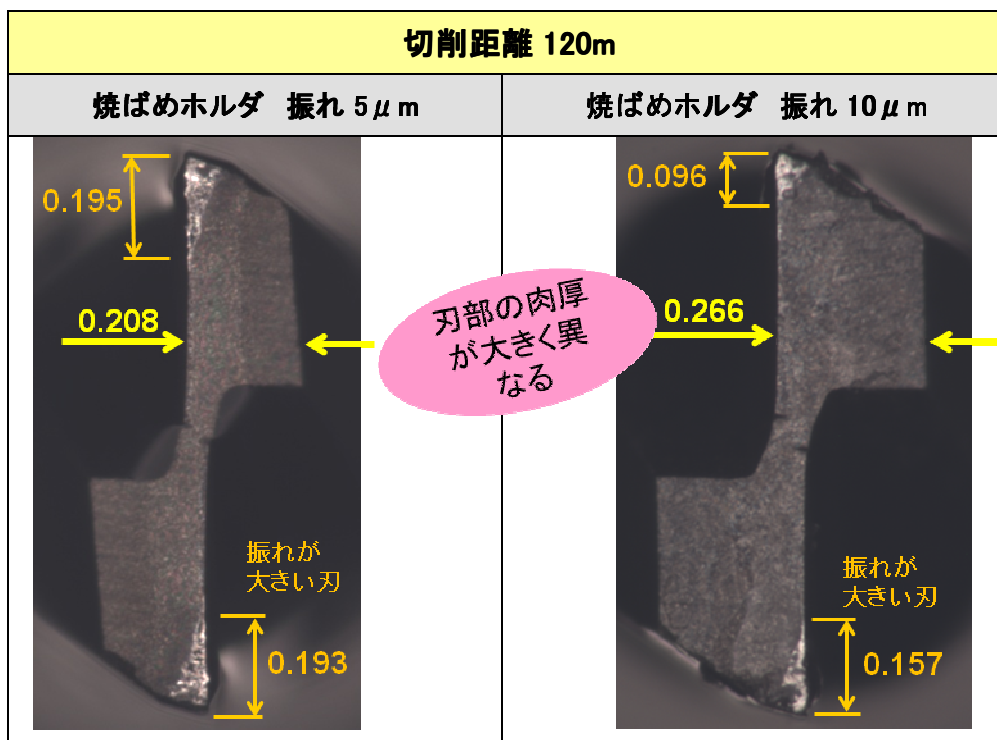


図 22 工具形状の違いと工具摩耗

(3) 傾斜角度(周速)の違いによる切削距離と加工表面粗さの関係

ボールエンドミルといくつかの傾斜角度を持ったワークを利用して、加工面や工具摩耗の観察を行った。目的は、ボールエンドミルの刃がワークを切削する時、ワークの角度によって、切削点の切削速度が異なる。切削速度が異なることにより、ワーク加工面や工具刃先部にどのような影響があらわれるか、定量的なデータ収集を行った。

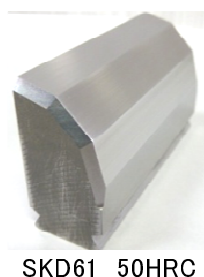
現在の高精度マシニングセンタは、3軸(X軸、Y軸、Z軸)制御が一般的であるが、近年5軸制御(3軸プラス2つ回転軸を持つ)が普及しており、いずれ5軸制御ができる高精度マシニングセンタも普及するであろうと思われる。

以下、加工内容、加工結果(評価)等順に記載する。

1.加工内容

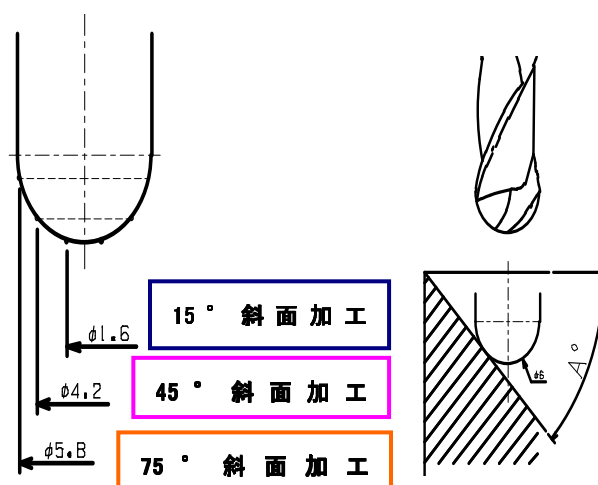
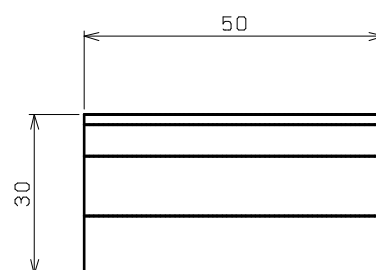
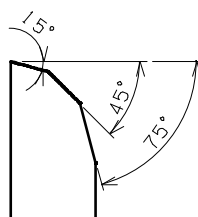


高精度マシニングセンタ iQ300
CAD/CAM FF/CAM(牧野)
切削液 オイルミスト(MQL)



SKD61 50HRC

傾斜角度
15°
45°
75°



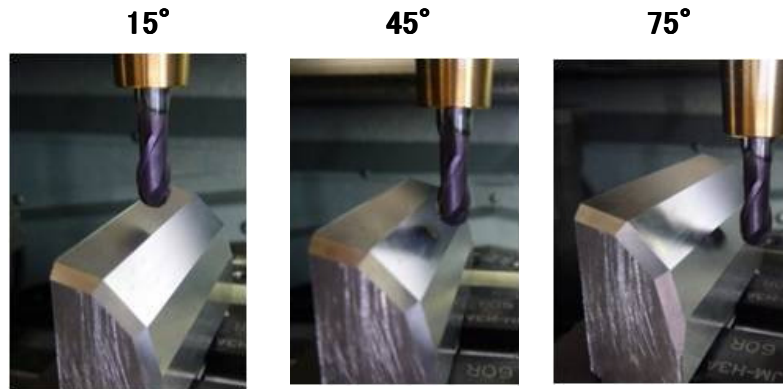
●加工条件

回転数 min-1	送り mm/min	1刃当り mm/刃	ピクフィード* Pf	切込み mm
12,000	24,000	0.1	0.1	0.1

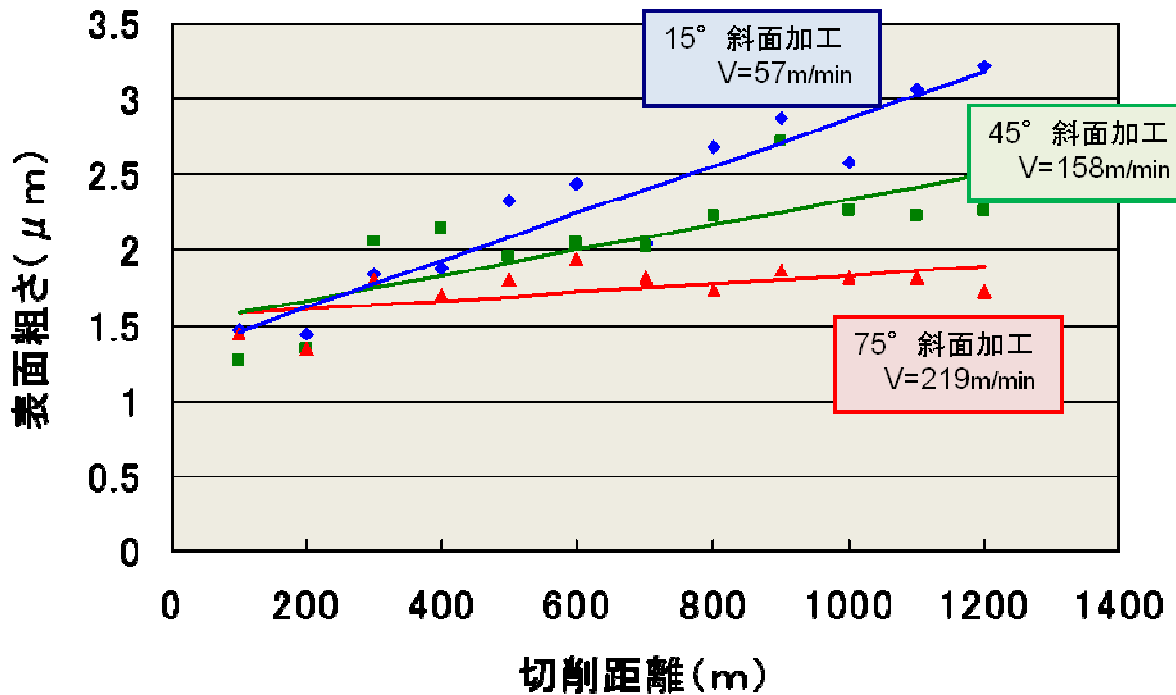
2.加工結果(評価)

■傾斜角度(切削角度)違いにおける切削距離と表面粗さ

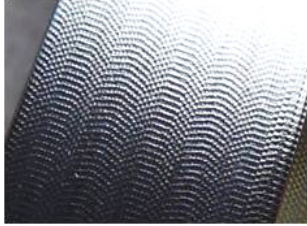

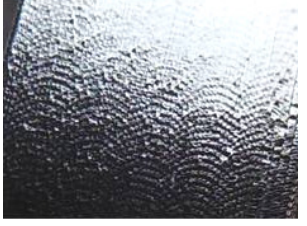






	切削距離(m) / 測定値:表面粗さ(μm)											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
15°	1.42	1.44	1.84	1.88	2.32	2.44	2.04	2.68	2.88	2.58	3.06	3.22
45°	1.26	1.34	2.06	2.14	1.96	2.04	2.02	2.22	2.72	2.26	2.22	2.26
75°	1.44	1.34	1.80	1.70	1.80	1.94	1.82	1.74	1.86	1.82	1.82	1.72



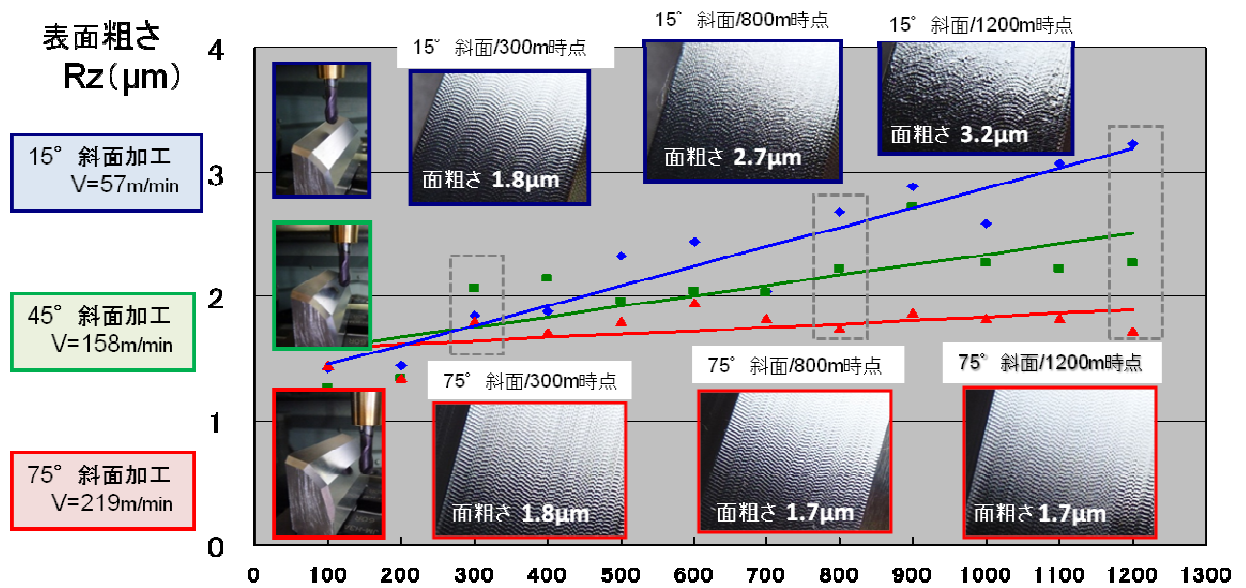
傾斜角度違いによる切削距離と表面粗さ関係



■ 切削距離と加工面の様子

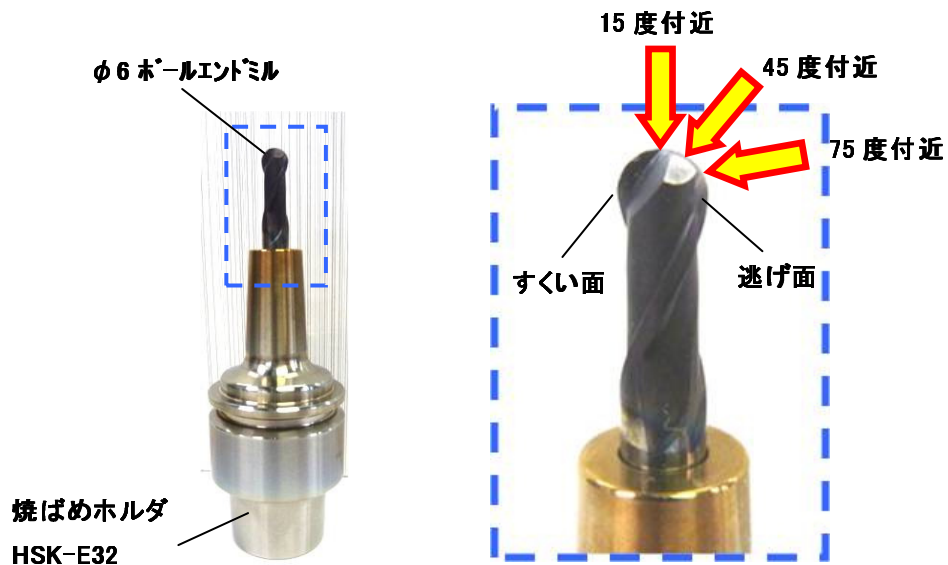
	300m	800m	1200m
15°	 1.8 μm	 2.7 μm	 3.2 μm
45°	 2.1 μm	 2.2 μm	 2.3 μm
75°	 1.8 μm	 1.7 μm	 1.7 μm

■ 傾斜角度(切削速度)の違いによる切削距離と表面粗さの関係(まとめ)



3.切削距離と工具寿命

工具寿命については、切削距離 1,200mまで加工した後の状態を確認した。観察の位置と結果については、以下の通りである。



■工具刃先の拡大

	逃げ面	すくい面
15°		—
45°		
75°		

(4) 工具の突き出し量と工具寿命の関係

ボールエンドミル(工具)の突出し長さの違いを 4 種類作り、その結果、ワーク加工面や工具寿命に対して、どのような影響を及ぼすか、観察を行った。そして、工具剛性が異なることにより、ワーク加工面や工具刃先部に現れる現象について、定量的なデータ収集を行った。

工具の長さは、ボールエンドミル外径の、3 倍、4 倍、5 倍、7 倍とした。また、工具の種類、ワーク材質やその硬度、切削条件は、先の傾斜角度の違いで比較テストしたものと同等とした。傾斜角度は、先のテストで最も結果が良かった 75 度斜面を用いて行った。

結果は、以下に述べる通りである。また、結論は、工具剛性が高いと工具寿命は飛躍的に延びる。と同時に表面粗さも高精度で維持できることが確認できた。

1. 加工内容



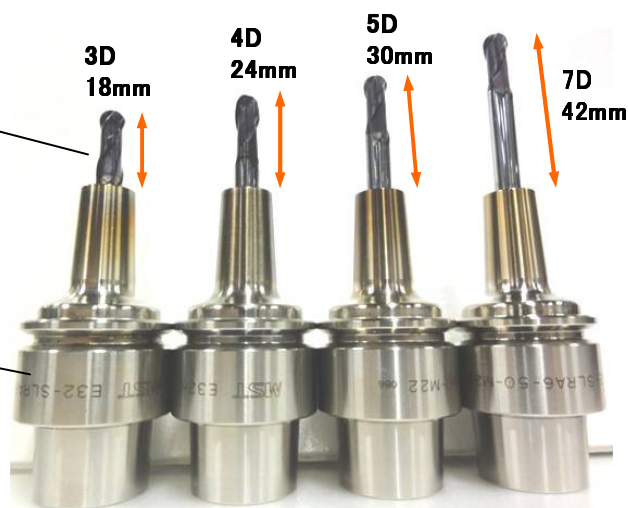
高精度マシニングセンタ iQ300
CAD/CAM FF/CAM(牧野)
切削液 オイルミスト(MQL)



加工ワーク SKD61 50HRC

超硬
2 枚刃ボールエンドミル
直径φ6mm

高精度焼ばめホルダ
(HSK-E32 シャンク)



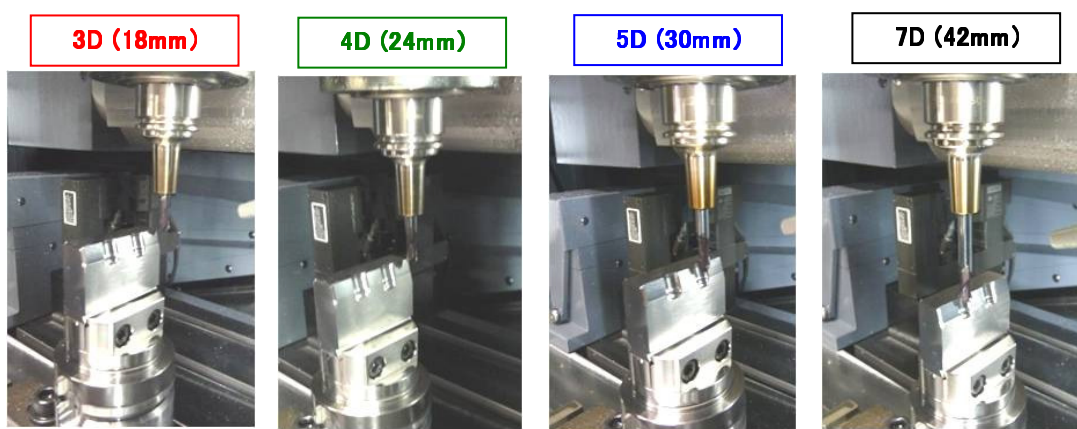
●加工条件

回転数 min-1	送り mm/min	1 刃当り mm/刃	ピックフィード Pf	切込み mm
12,000	24,000	0.1	0.1	0.1

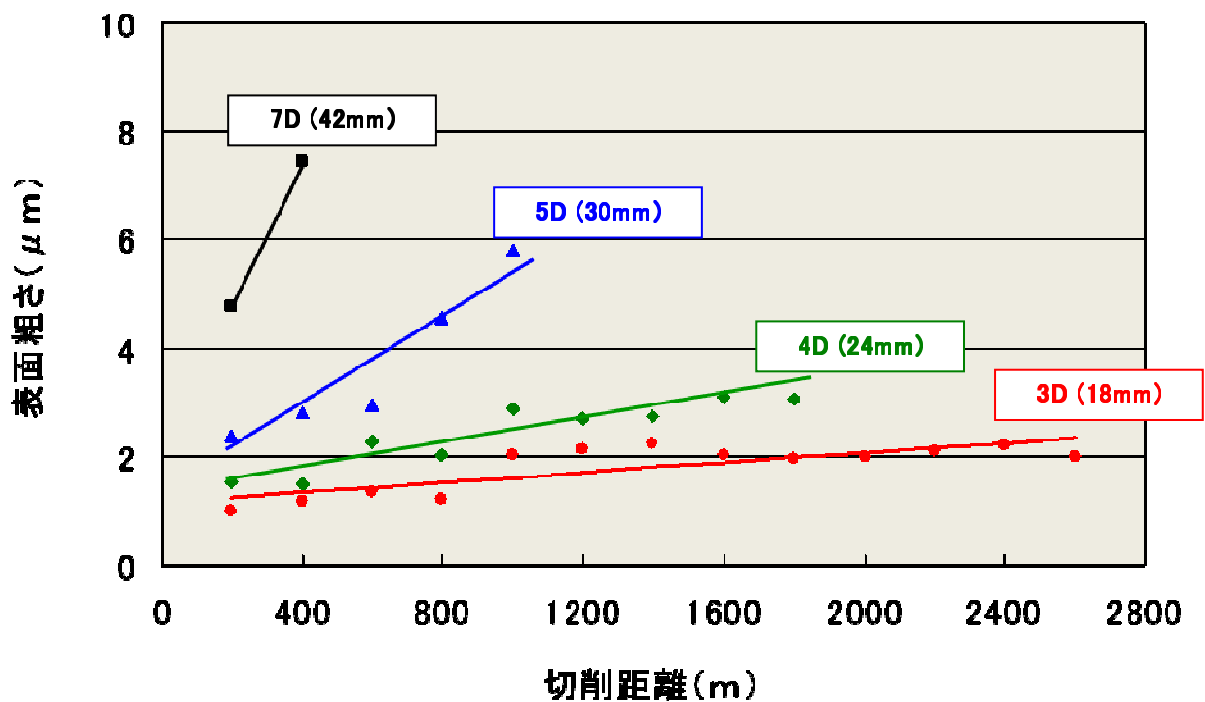
2. 加工結果(評価)

■ 工具突出し長さ違いにおける切削距離と表面粗さ



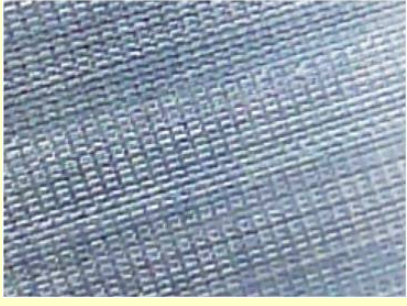







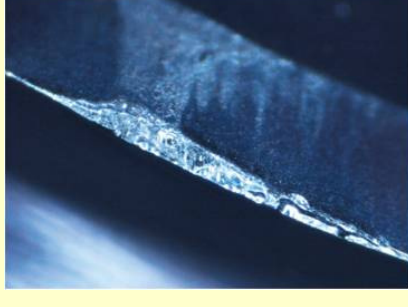

	切削距離(m) / 測定値: 表面粗さ(μm)												
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
3D	0.98	1.18	1.34	1.22	2.02	2.14	2.24	2.02	1.94	1.99	2.09	2.22	1.99
4D	1.52	1.50	2.26	2.04	2.88	2.71	2.74	3.11	3.05	折損	←	←	←
5D	2.38	2.82	2.94	4.54	5.81	折損	←	←	←	←	←	←	←
7D	4.78	7.42	折損	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←



工具突出し長さの違いによる表面粗さと切削距離の関係








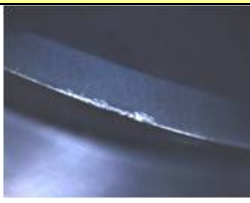


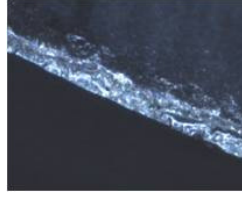
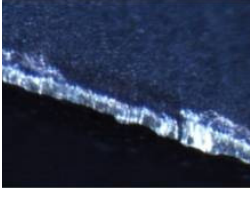


■ 切削距離 400m 時点における工具摩耗と表面粗さ

突出し長さ	工具摩耗	表面粗さ
		
3D		1.2 μm
		
4D		1.5 μm
		
5D		2.8 μm
		
7D		7.4 μm

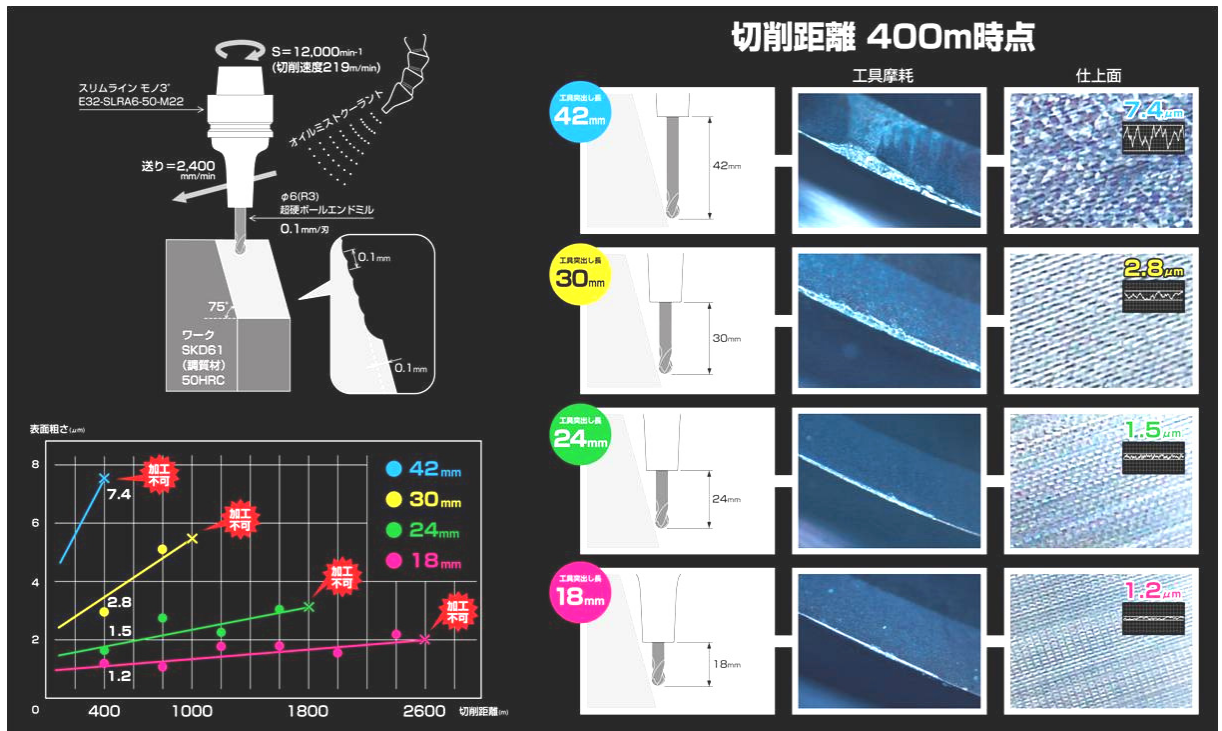
※ 切削距離 400m で、工具突出し長さの差が顕著に表れた。

■ 切削距離と工具寿命及び表面粗さ(様子)

※各工具において最終切削距離での観察

	3D (2600m)	4D (1800m)	5D (1000m)	7D (400m)
表面粗さ				
	2.0 μm	3.1 μm	5.8 μm	7.4 μm
工具逃げ面				
工具逃げ面(拡大)				

■ 工具突出し長さの違いによる切削距離と表面粗さの関係(まとめ)



(5) 砥石を用いた切削事例

1. ツルーイングの有無による表面粗さの比較

超硬軸付き電着砥石を用いて穴の研削加工を行った。比較条件として、一方は市販品をそのまま無修正で使用し、他方は砥石表面をツルーイングにより表面処理を施して使用した。加工条件等は全く同じである。

以下、加工環境、加工内容、加工結果(評価)等順に記載する。

●ツルーイング

内面研削盤用焼ばめクイルに超硬軸付き電着砥石を焼ばめし、同スピンドルに装着してツルーイング処理を施す。ツルーイング処理することで、ダイヤモンド粒子の高さが均一化される(図 23)。

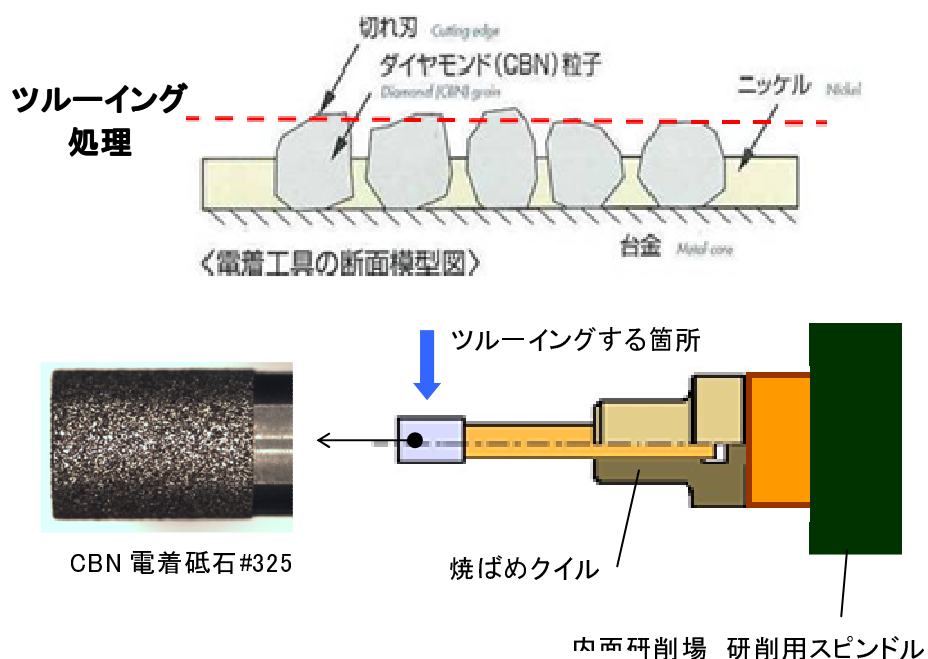


図 23 ツルーイングの概要

●加工条件

回転数	min ⁻¹	45,000
送り速度	mm/min	390
切込み：荒加工	mm	0.005
：仕上	mm	0.002

*使用クーラント：水溶性

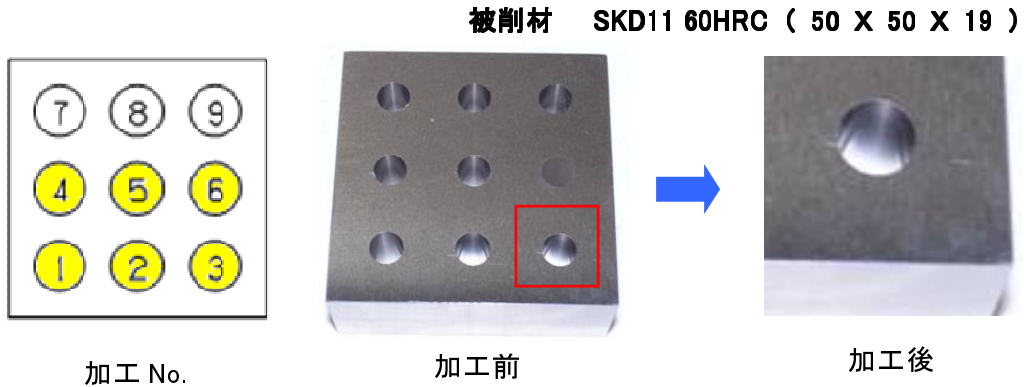


備考

切削方法: Z ピッチ 1mm でのヘリカル加工

仕上加工はヘリカルの位相を 90 度ずつ変えてゼロカット 9 回行った。

■加工結果



加工 No.	ツルーイング 有無	加工後 表面粗さ (Rz μ m)	加工径 ※目標 6.03 (ϕ mm)	芯ずれ
1	CBN 電着 有	0.90	6.03	いずれも \pm 1 μ m 以内
2	CBN 電着 有	0.80		
3	CBN 電着 無	3.30		
4	CBN 電着 有	0.94		
5	ホール エンドミル	2.4~4.2	テーパ状	—
6	CBN 電着 無	3.36	6.03	\pm 1 μ m

図 24 ツルーイング有無と表面粗さの測定結果

●考察

CBN 電着砥石を用いたミーリング加工方法(研削)において、砥石表面を事前にツルーイングした CBN 電着砥石と市販のまま何も施さなかった CBN 電着砥石を比較し、加工後の表面粗さで評価したが、予想以上に違いが明らかになった(図 24)。砥石の粒度を細かくする方法も考えられるが、ツルーイングにより均一の高さに揃えることで、十分高精度な面が得られることがわかった。

一般的な砥石と異なり、電着工具(CBN やダイヤモンド)などの超砥粒の砥石はツルーイングをしない場合が多いが、表面粗さを良くするにはツルーイング処理が必要である。

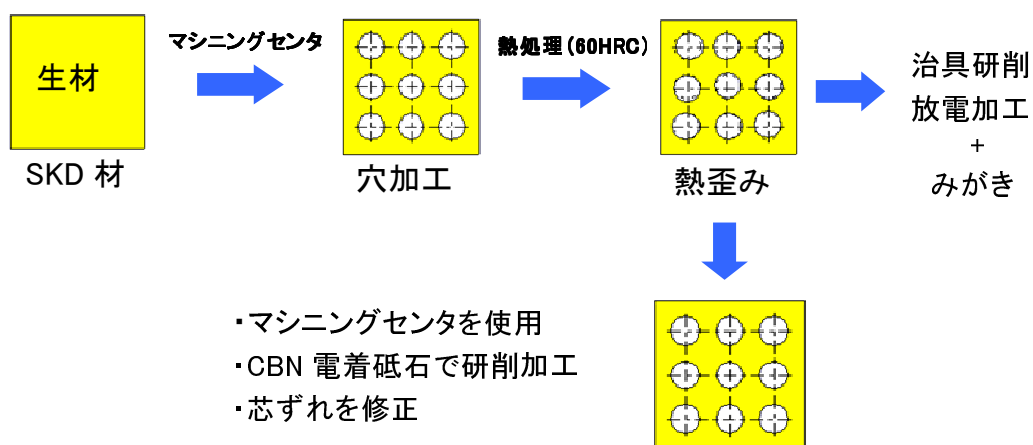
2. 焼き入れ後の歪(芯ずれ)を修正する事例

生材を加工後、熱処理で発生した歪をマシニングセンタで修正した事例である。

現在では 60HRC の高硬度材でも穴を開けるドリルが開発されているが、一般事例としては、放電加工後に治具研削盤で仕上げる場合が多い。

また、生材を加工した後に熱処理をすることで歪による芯ずれが発生する場合がある。前述の通り、電着部をツルーイング処理することで、表面粗さが得られる前例から穴のピッチ修正を試みた。結果として、芯ずれを $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内に修正することが可能であり、表面粗さも $Rz1 \mu\text{m}$ 程度に入れることができた。

■ 芯ずれの修正のイメージ



超硬軸付
CBN 電着砥石



● 加工条件

回転数	min^{-1}	45,000
送り速度	mm/min	390
切込み：荒加工	mm	0.005
：仕上	mm	0.002

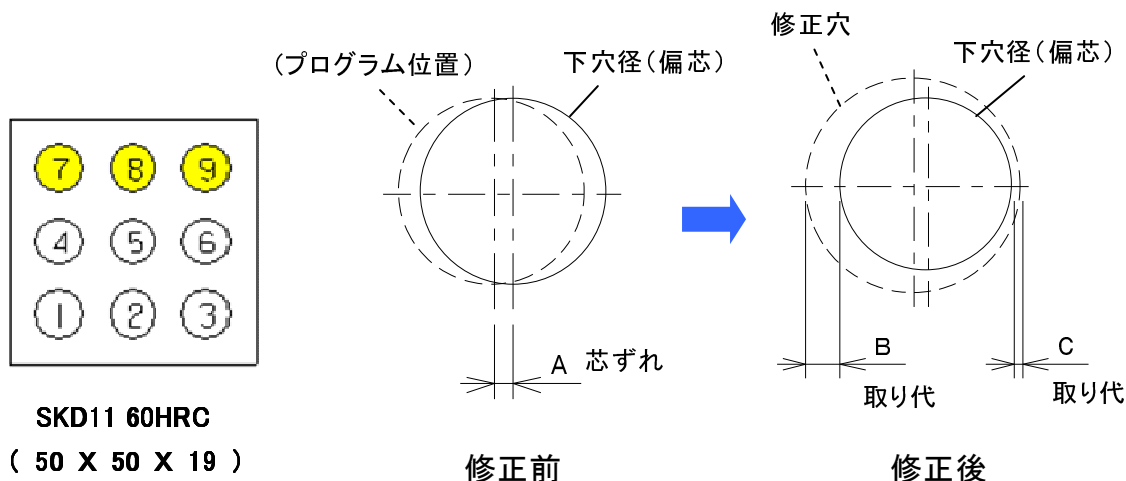
*使用クーラント：水溶性

備考

切削方法：Z ピッチ 1mm でのヘリカル加工

仕上加工はヘリカル位相を 90 度ずつ変えてセロカット 9 回行った。

■加工結果



加工 No.	下穴径 芯ずれ量 A	修正径 (ϕ mm)	取代 (mm)		表面粗さ Rz (μ m)	芯ずれ (μ m)
			B	C		
7	ϕ 6.03 0.04	6.13	0.085	0.015	1.0	いずれも ± 1 以内
8	ϕ 6.03 0.07	6.20	0.155	0.015	0.9	
9	ϕ 6.03 0.07	6.25	0.180	0.040	1.0	

図 25 修正加工と表面粗さの測定結果

●考察

治具研削盤で修正加工するのではなく、マシニングセンタを用いて芯ずれの修正を試みた。硬度が 60HRC あるので CBN 電着砥石を使って修正した。CBN 電着砥石は事前にツルーイングを施し、外周表面を整えて加工をおこなった。

大きく偏芯した穴であるが、 $1\mu\text{m}$ 以内に修正することができた。また、ヘリカル加工であったが、入り口の位相を変えていくことにより、表面粗さも $Rz1\mu\text{m}$ 以内に抑えることができ、きれいな穴に仕上げることができた(図 25)。

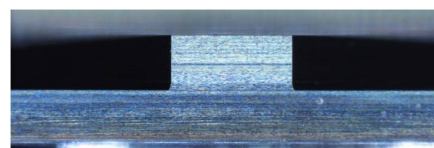
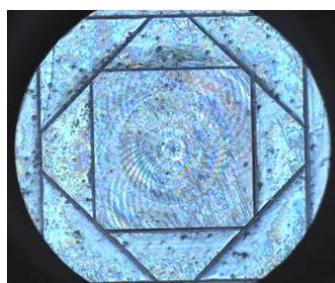
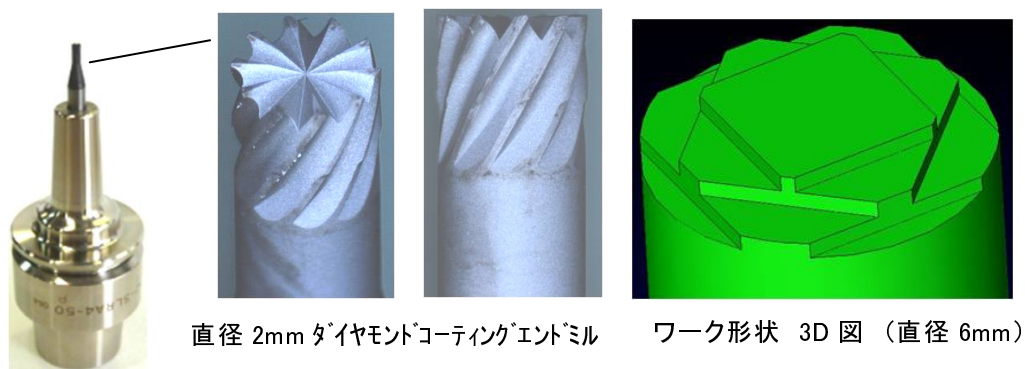
穴の真円は機上測定であるが、 $1\mu\text{m}$ 読みテストインジケータで針の振れは $1\mu\text{m}$ 以内であった。

(6)ダイヤモンドコーティングエンドミルを用いた切削事例

1. 加工事例 A

超硬合金をエンドミルによる直彫りを試みた。超硬合金の丸棒(92HRA)に、ダイヤモンドコーティングの超硬エンドミルを用いて、ピラミッド形の削り出し加工を行った。高硬度材60HRCの被削材に直接エンドミルで切削する事例は多いが、超硬合金に直接切削で加工する事例はまだ少ない。コーティング技術が進歩しダイヤモンドコーティングの工具が製品化されたことにより切削ができるようになってきた。型の寿命を向上させるには型の素材が硬い方が摩耗も少なく有利である。硬いだけでなく鏡面性も持ち合わせている。比較的小さく高精度を必要とするワークに適しており、この事業の加工事例にも適している。以下にその3事例を紹介する。また、評価はすべて表面粗さの数値で判断し、Ra50nm(0.05 μ m)を目指した。

■ピラミッド形状の直彫り



写真上: 加工後の側面
写真左: 加工後の上面

●加工条件

回転数	min ⁻¹	20,000	
切削速度	m/min	126	
送り速度	mm/min	100	
1回転切込み	ap	mm	0.001
切込み	ae	mm	1.2

*使用クーラント : MQL



備考

切削距離:153m 加工時間:13.5(h)

■超硬合金加工面の評価

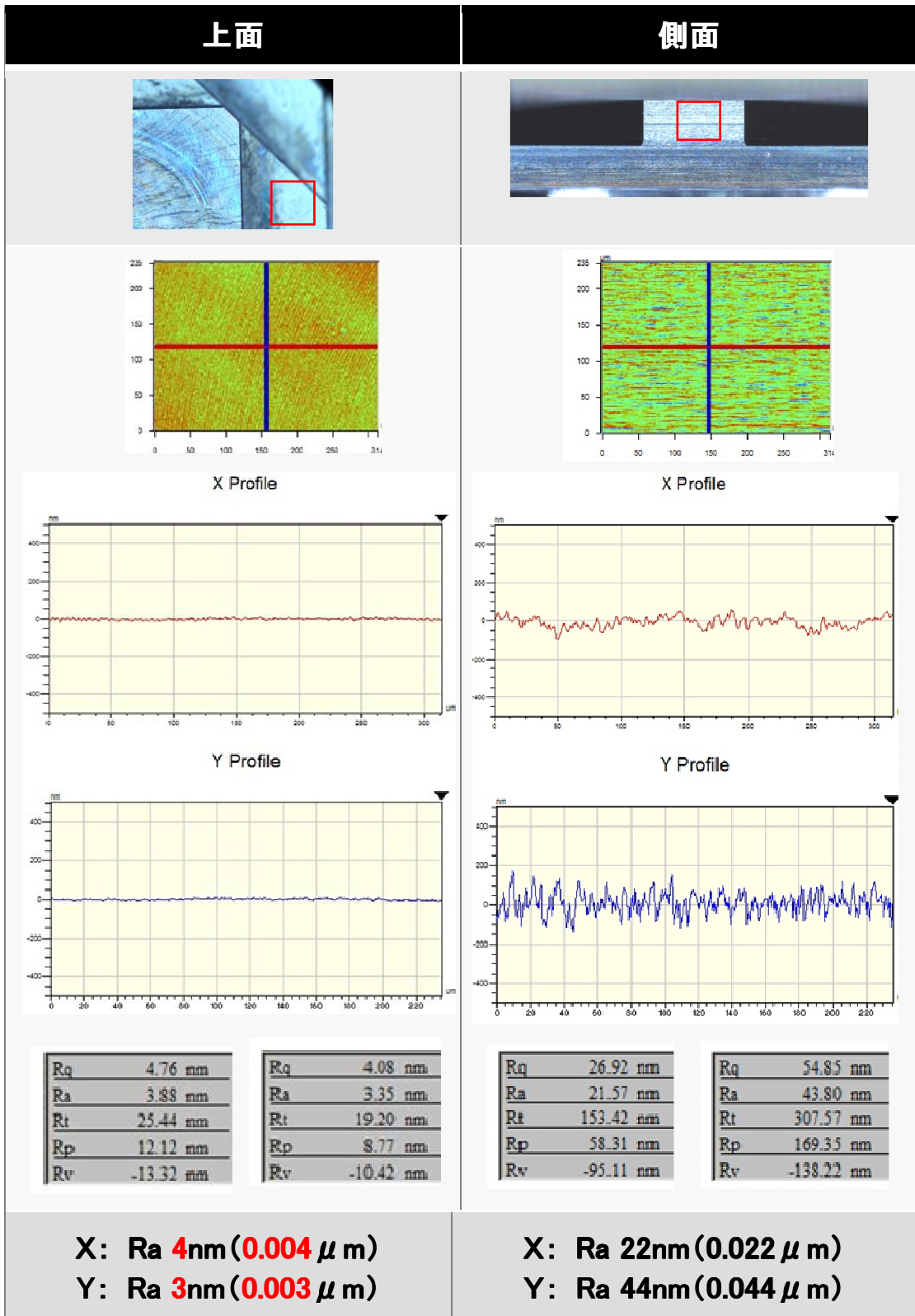


図 26 表面粗さの評価

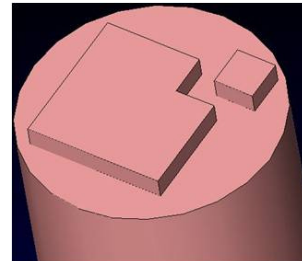
●考察

鏡面性のある表面粗さの良い切削ができています。軸方向に 0.001mm の切込み量で削り出しを行っている。目標より表面粗さの小さい数値が得られた(図 26)。

2. 加工事例 B

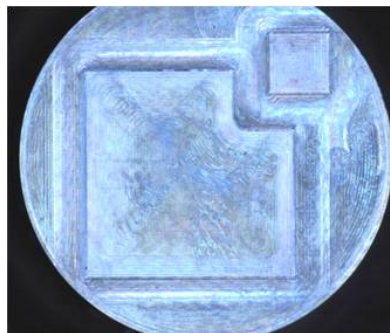
超硬合金をエンドミルによる直彫りを試みた。超硬合金の丸棒(92HRA)に、ダイヤモンドコーティングの超硬エンドミルを用いて、社名ロゴの削り出し加工を行った。

■ 社名ロゴの直彫り



直径 0.5mm ダイヤモンドコーティングエンドミル

ワーク形状 3D 図 (直径 6mm)



加工後の上面

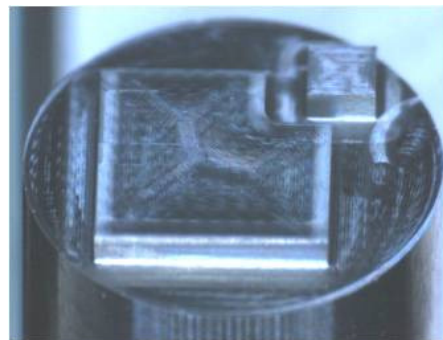


上面の拡大図

● 加工条件

回転数	min ⁻¹	20,000	
切削速度	m/min	31.4	
送り速度	mm/min	80	
1 回転切込み	ap	mm	0.001
切込み	ae	mm	0.3

*使用クーラント : MQL



備考

切削距離: 77m 加工時間: 15(h)

■超硬合金加工面の評価

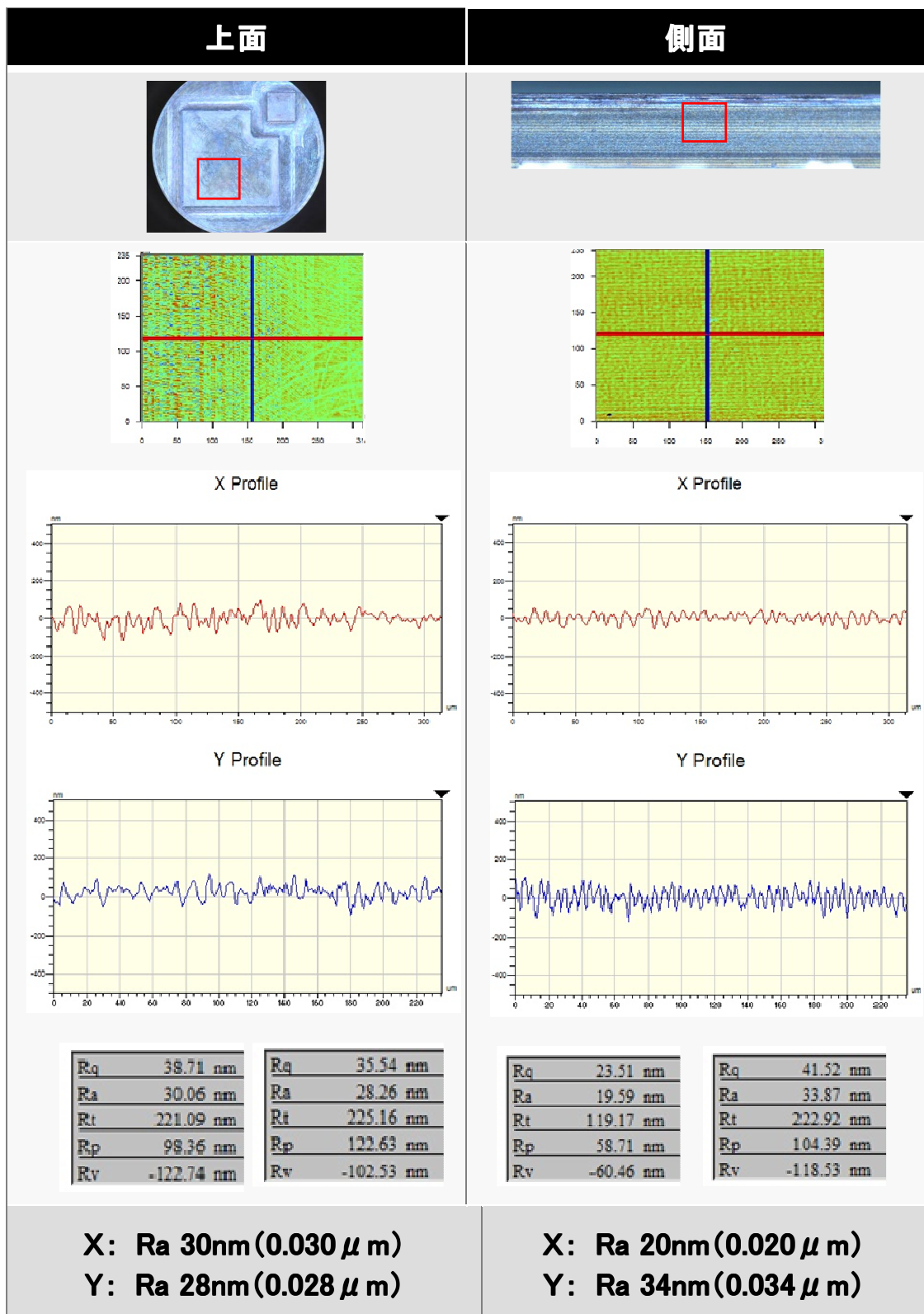


図 27 表面粗さの評価

●考察

鏡面性のある表面粗さの良い切削ができています。軸方向に 0.001mm の切込み量で削り出しを行っている。直径 0.5mm の切削工具で加工することができた。(図 27)。

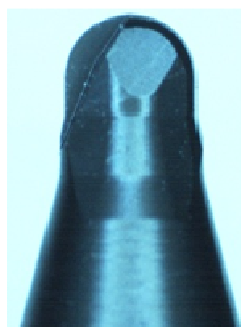
3. 加工事例 C

超硬合金をエンドミルによる直彫りを試みた。超硬合金の丸棒(92HRA)に、ダイヤモンドコーティングの超硬エンドミルを用いて、鏡面製の高い削り出し加工を行った。

■鏡面加工



R径 1mm ダイヤモンドコーティングエンドミル



ワーク形状 3D 図 (直径 6mm)



加工後の上面



加工面の拡大図

●加工条件

		粗加工	中仕上	仕上	仕上
回転数	min ⁻¹	30,000	30,000	45,000	45,000
送り速度	mm/min	300	300	100	100
切込み	ap	mm	0.03	0.001	0.0007
	ae	mm	0.1	—	—

*使用クーラント : MQL

■超硬合金加工面の評価

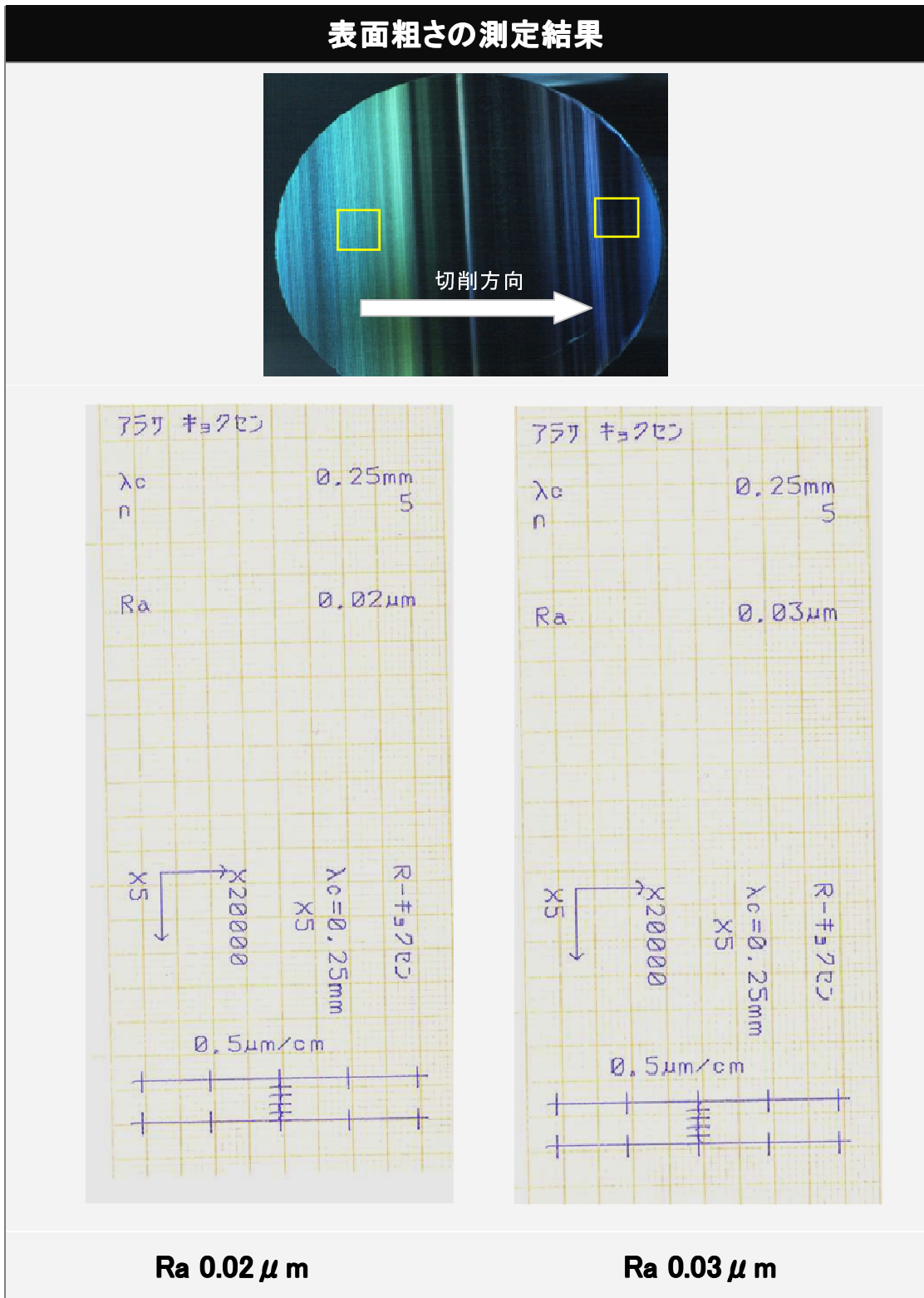


図 28 表面粗さの評価

●考察

鏡面の加工事例である。軸方向に 0.0005mm の切込み量で仕上げを行った。各行程の精度が重要である。仕上げの前工程でわずかでも削り残しがあるとき綺麗な鏡面にならない(図 28)。

第3章 研究開発後の事業化展開

事業化については、当初の計画(図 29)を基本に取組んでいく。H25年度から積極的に拡販PRを展開し、研究成果を事業として確立していく。まずは、カタログの充実、展示会への出品PRなどユーザーへの認知度を高めていく。

販売本数(予想含む) 単位:本

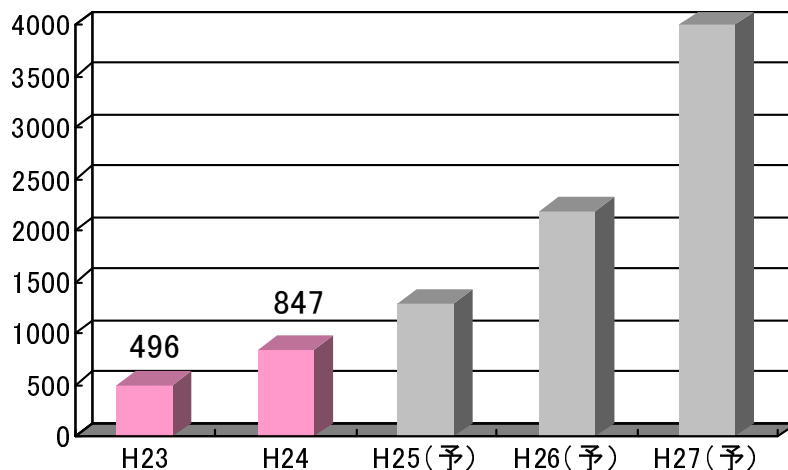


図 29 販売計画 (予想)

※H23年度、H24年度はテスト用製作本数及び一部ユーザー納入数の合計

■PR用カタログ

■展示会風景(東京ビックサイト)

