平成23年度第3次補正戦略的基盤技術高度化支援事業

「超精密ダイヤモンド切削工具の製造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 四国経済産業局 委託先 公益財団法人高知県産業振興センター

# 目 次

### 第一章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口
- 第二章 本論
  - 2-1 ダイヤモンドの評価
  - 2-2 成型加工技術の開発
  - 2-3 超精密仕上技術の開発
  - 2-4 工具精度と加工性
- 第三章 全体総括

第一章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

超精密切削加工技術は、運動精度の高い超精密加工機と切味がよく輪郭精度の高い ダイヤモンド工具をもちいることで、寸法精度が高い鏡面を安価に得ることのできる技術 である。このため、コピー機のドラムやポリゴンミラーなどのアルミニューム合金の鏡面加 エからはじまり、DVD ピックアップレンズや携帯電話カメラレンズの量産に用いられる非球 面レンズ用金型の作製に用いられてきた。これらの高い加工精度が要求される部品の製 造において、超精密切削加工技術は必要不可欠な存在であり、国内の家電製品の競争 力を高めるために大きく貢献してきた。

最近では液晶テレビの部品の中でエネルギー消費の大きいバックライトには小型で省エ ネルギーな LED が利用され始めている。液晶テレビにおける LED の設置方式には、通常、 LED を画面周辺に内側に向けて配置するエッジライト方式が採用されており、この方式で はパネルの側面に配置された LED の光をパネル前面に向けて均一に広げることができる 導光板(LED の光を面状に広げるための光学部品)が必須となる。この導光板は、光学シ ミュレータによって設計されたミクロンサイズのグレーティングを、モールド加工によって導 光板上に正確に成型することで作製され、液晶が大画面になるほど成型に用いる金型に 非常に高い精度が要求される。この金型製作に要求されるミクロンサイズレベルでの高精 度加工は集積回路の製造で用いられるフォトエッチングでは対応できないため、超精密工 具を用いた切削加工が活用されている。大型液晶テレビは大画面の高画質化、薄型デザ インの追及、省エネルギー化を目的とした改良が行われており、ますます高精度な導光 板の重要が増大すると予想される。しかしながら、金型加工に対応できる、切削性、耐久 性の高い超精密切削用ダイヤモンドエ具が安定して市場に供給されておらず、導光板の 製造工程を管理する上で大きな問題となってきている。また、ダイヤモンド工具に切削加 エは、高い加工特性が高いアスペクト比を実現できるだけでなく、その加工面に他の加工 では得られないコピーしにくい見た目、質感が得られる。この特性からスマートフォン、iPad などをはじめとする高性能・高価格な電子機器の海賊版対策として、そのメタルフレーム の表面加工に、ダイヤモンド工具による精密加工技術が用いられ始めている。

また、MEMS、LSI デバイス中の薄膜硬度を測定するための高精度ナノインデンテーショ ン用圧子の作製にもダイヤモンド工具作製技術が利用されている。このナノインデンテー ション用ダイヤモンド圧子は、ISO9000 に則った品質管理基準の厳密化にともない、ます ます高精度な圧子の需要が増大してきているが、その需要に国内の圧子メーカではほと んど対応できていないのが現状である。このような状況の要因に、単結晶ダイヤモンドの 加工技術が、未だ職人のスキルに頼る部分が大きく、ダイヤモンド工具への要求精度が 高くなる程、歩留が低くなることが挙げられる。ダイヤモンド工具の寸法、精度によっては ときには発注から納品までに半年以上かかることがある。

本提案では、このような状況に対応するため、高精度部品の製造に対応できる形状精 度が高く剛性の強い単結晶ダイヤモンド切削工具を安定して作製できる技術の開発を行 い、これにより超精密ダイヤモンド工具の安定供給することを目的とする。そのために、研 磨面粗さ1nmRa以上、切刃稜線の丸味半径が20nm以下、切刃稜線上に5nm以上の欠 け(チッピング)がない超精密切削加工用のダイヤモンド工具を、製作期間2週間で完成 できる技術を確立する。さらに、ダイヤモンド工具の、被削材の加工精度に対する、切刃 稜線丸味半径と加工条件の関係を探索し、要求される加工精度に対する超精密切削工 具仕様の選択基準を策定する。

これら技術の開発は、導光板や MEMS をはじめとした微細形状を有する精密部品の製造価格を下げ、日本の工業製品の競争力を高めることに寄与できると考える。また、ダイ ヤモンドは卓越した物理特性をもつ極限材料であり、最先端技術による加工や計測を行う際には無くてはならない材料であることから、日本においてダイヤモンド単結晶の加工 技術を深化が日本の科学技術レベルを維持、発展させていく上で重要であると考える。

### 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事業管理者

[公益財団法人高知県産業振興センター]



### ②(再委託先)

[高知 FEL 株式会社]



[東京工業大学]



### (2) 管理員及び研究員

【事業管理者】公益財団法人高知県産業振興センター

①管理員

氏名	所属·役職	実施内容(番号)
谷脇 明	専務理事 兼 産業連携推進部 部長	5
田村 義之	産業連携推進部 産業連携課 課長	5
長尾 和香	産業連携推進部 産業連携課 主幹	5

【再委託先】

高知 FEL 株式会社

氏名	所属·役職	<u>実施内容(番号)</u>
西村 一仁	研究開発本部 本部長	1,2,3,4
笹岡 秀紀	研究開発本部 統括研究員	1,2,3,4
大岡 昌洋	研究開発本部 主任研究員	2.2.3.4

国立大学法人 東京工業大学

	氏 名	所属·役職	<u>実施内容(番号)</u>
戸倉	和	東京工業大学·教授	1,2,3,4
平田	敦	東京工業大学·准教授	1,2,3,4
青野	祐子	東京工業大学·助教	1,2,3,4

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人高知県産業振興センター

- (経理担当者)産業連携推進部 産業連携課 主幹 長尾 和香
- (業務管理者)専務理事 兼 産業連携推進部 部長 谷脇 明

(再委託先)

高知FEL株式会社

- (経理担当者) 経理部 経理課長 釜原康光
- (業務管理者) 研究開発本部部長 西村一仁

国立大学法人 東京工業大学

- (経理担当者) 研究推進部 研究資金管理課長 滝澤 重道
- (業務管理者) 大学院理工学研究科 教授 戸倉 和
- (4)その他
  - ①アドバイザー:森田 昇 国立大学法人 千葉大学工学部 人工システム科学専攻 教授 古田 寛 高知工科大学 システム工学群 電子・光システム工学教室 准教授

#### 1-3 成果概要

① ダイヤモンドの評価

ダイヤモンド加工面の評価方法として、天然、CVD ダイヤモンド、高圧合成の単結晶 ダイヤモンドにFIB照射と切削を擬した AI 膜形成・加熱・エッチングを行った後の加 工面についての評価を行った。加工面の残留元素や表面粗さを調査した結果、CV Dダイヤモンド比べて、高圧合成ダイヤモンドは CL 観察でも格子欠陥密度に偏りが なく加工後に表面の欠落が見られなかったため、切削工具原石としては高温高圧合 成法による人工ダイヤモンドが最も適していると判断した。また、総型工具の輪郭度 と先端部曲率半径を個々に評価する手法を確立した。

成型加工技術の開発

ダイヤモンド工具成型加工装置の製作を進め、振動を極力抑えた高精度の軸受 けを持ち、加工切込を定寸切込とした機構で、高剛性のスピンドルにダイヤモンドホ イールを用いた加工装置を開発した。さらに成型加工を迅速化するためのレーザを 利用した切り出し加工装置を新たに設計、開発し、その加工性の確認を行った。さら にダイヤモンドまた、ヤング率の高いメタルボンド材のダイヤモンドホイールを使用す ることで切り込み量に対する除去量の誤差を 0.1 µm 以下とすることが可能となった。 この装置を用いてノーズ半径 0.5m、刃物角 90°のR型工具の成型加工を行った結 果、熱研磨による仕上げ処理をおこなうことで、輪郭度 20~30nm の精度で成型加 工を行うことができることを確認した。

また、集束イオンビーム(FIB)加工装置を用いた3次元加工技術を蓄積して、ダイ ヤモンド工具の刃先形成を行った。

3 超精密仕上技術の開発

鏡面研磨された精密スカイフにより砥粒レスで研磨をおこなう熱研磨を前提とした、 ダイヤモンド工具の仕上げ加工を行うための超精密仕上研磨装置の開発を行った。 これは研磨時のダイヤモンドへの衝撃を極力抑えると同時に、工具ホルダーを軽量 化することで衝撃を逃がす構造とした。熱研磨と、従来型スカイフによる砥粒研磨加 工の比較評価を行うことで、砥粒加工が大きな研磨方向依存性を持つのに対し、熱 研磨がほとんど依存性を持たないことを明らかにした。また、従来型スカイフによるダ イヤモンド研磨面の表面粗さは 1nmRa 以上であったのに対して、熱研磨によるダイ ヤモンド表面が表面粗さは 0.1nmRa 以下であることを確認した。また、この超精密仕 上研磨装置によって刃先角 30°のダイヤモンドの仕上研磨を行った結果、切刃稜線 の丸味半径は、20nm 以下で、5nm 以上の欠けのない仕上研磨が行えることを確認 できた。

FIB加工により刃先形成を行った工具に対して、ダイヤモンドの銀ロウ接合を傷め ない 500℃の温度で残留 Ga 元素の除去技術を開発し、この後処理技術の効果を切 削試験によって確認するためのダイヤモンド工具の作製を行った。

④工具精度と加工性(高知FEL株式会社、東京工業大学)

成型加工装置により開発した成型加工したR型工具、およびFIB照射した工具、F IB照射後、③で開発した後処理を施した工具の切削テストを行い、その切削性の比 較とテスト前後での工具刃先状態の評価を行った。また、製作方法、刃先稜丸味半 径の異なる工具についての加工性、工具耐久性の比較評価を、熱研磨加工によっ て作製した超精密工具と市販の精密工具などを利用して行う計画であったが、これ を事業期間中に行うことができなかったため、今後も、現在の研究グループで継続し て評価を行っていく予定である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人高知県産業振興センター

〒781-5101 高知市布師田 3992-2 TEL: 088-845-6600 E-mail: info@joho-kochi.or.jp (担当者)産業連携推進部 産業連携課 主幹 長尾 和香 第二章 本 論

2-1 ダイヤモンドの評価

2-1-1ダイヤモンド原石の選別方法の確立

工業用ダイヤモンド工具の原石は、価格的な観点から天然 Ia 型ダイヤモンドが利用 され、色、結晶の形、目視で分かる欠陥による選別が行われてきた。しかし、天然のダイ ヤモンド結晶を用いた超精密切削工具は、寿命にばらつきが生じやすく、上述の選別方 法だけでは判別しきれない内在する欠陥に加工によるダメージが加わることで刃先先端 の欠けの原因となる。このため天然ダイヤモンドではなく規定の結晶方位に対してカット された人工ダイヤモンドを使用することが妥当と判断し、市販されている人工ダイヤモンド のうち、高圧合成ダイヤモンドと、化学的気相合成法(CVD)ダイヤモンドについて、FIBを 利用した負荷試験を行った。

まず、各々のダイヤモンド原石(100)面に Ga イオン収束イオンビーム加工装置(FIB 装置)で、250  $\mu$  m × 150  $\mu$  m の領域に加工面を形成した。その際の加工条件は加速電圧 30kV、イオンドーズ量 1nC/ $\mu$  m2 である。ダイヤモンド中の Ga イオン飛程計算から 30kV の加速電圧でも 1nC/ $\mu$  m2 のドーズ量で、表面の変質の程度は充分に飽和に達してい ると判断できる。

その後、RF スパッタ装置により、加工面にダイヤモンド工具による被削材として一般的 なアルミニウム(99.99%)を100nm 厚さで形成した。その後、加工面に、ダイヤモンド切削工 具と被削材加工時に加わる温度を擬した加熱(300℃)を加え、アルミニウム膜を 10%NaOH 水溶液で除去した。アルミニウム膜除去後の表面状態を SEM、エネルギー分 散型元素分析装置によって評価を行った。図2-1-1左が CVD ダイヤモンドについて SEM 像、カソードルミネッセンス像、Ga 元素の特性エックス線(Ga L 線)強度のライン分析 結果である。線分析の測定ラインは SEM 像、CL 像中の白線に対応している。

SEM 像から直接イオン照射された面はイオン照射によって平坦面になっており、非加 エ面との境界はテーパ状の傾斜面をなしていることが確認できる。また、高圧合成ダイヤ モンドでは SEM 像、CL 像、Ga 元素分布いずれにも、加工面内でほぼ一様であるのに対 して、CVD ダイヤモンドの SEM 像には、画面全体にうねりを伴う細かい年輪状のコントラ スト変化が見られる。また、年輪状のコントラスト変化に加えて加工面、比加工面を問わ ず、表面に剥落した部分が見入られる。このような SEM 像で見られる文様は CL 像におい ても、SE 像の構造と対応した構造をもつコントラスト変化が確認できる。この年輪状の変 化は構造やイオン照射によるスキャン方向(画面上で左右もしくは上下方向)とは無関係 であることから、これはダイヤモンド原石のもつ結晶構造的な不均一性に由来するものと 考えられる。

また,Ga 元素の線分析の結果と SEM、CL 像でみられるコントラスト変化の比較により



図2-1-1 CVD ダイヤモンドと高圧合成ダイヤモンドに FIB ミリングと切削を擬した後処理を行った加工面の比較

Ga の密度が高い部分が, SE 像ではコントラストが明るい部分と, また CL 像では暗い部 分と対応していることがわかる。これらの結果からダイヤモンド原石由来の結晶の乱れが 大きい部分において、より多くの Ga 元素が捉えられており、それが加工面における SEM 像、CL 像のコントラストをつくっていると考えられる。一方、高圧合成ダイヤモンドのほう には SEM 像にも CL 像にも、CVD ダイヤモンドにみられるような加工面におけるような構 造が見られないことから、格子欠陥密度が小さく、かつ、そのかたよりも CVD ダイヤモンド よりもずっと少ないと判断できる。

図2-1-2に図2-1-1と同じくAI 膜形成・300℃加熱・AI エッチングを行った後の、 FIB 加工面の表面粗さの FIB 加速電圧、ダイヤモンド原石種類に対する依存性を示す。



図2-1-2 アルミニウム膜形成・300℃加熱・除去を行った FIB 加工面の表面粗さ

表面粗さは三次元表面粗さ計(Zygo)によって表面粗さを3次元的に計測した結果を3次 元算術平均粗さで表したものである。

図2の結果からわかるように CVD ダイヤモンドではその表面粗さは、Ga イオンの加速 電圧が高いほど大きい傾向を示したが、天然 I a ダイヤモンドと高圧合成ダイヤモンドで はその表面粗さに大きな違いは見られず、各々が測定限界に近い 1nmSa に近い値とな った。このことからも CVD ダイヤモンドが FIB 加工およびその後の後処理の影響を受けや すく、ダイヤモンド工具として使用した場合の耐久性に乏しいことが示唆された。このため、 切削工具原石としては高圧合成法による人工ダイヤモンドが最も適していると判断した。

2-1-2 加工面の検査手法の開発

ワークに母型転写することで特異形状をもつ加工面を得ることができる総型バイトでは、 工具形状の刃先稜線に特別な形状を持ち、仕様と実際の工具形状とが極力一致してい ることが求められる。このため、総型工具にたいしては、工具の精度を表す指標として、 刃先稜丸味半径だけでなく、仕様に定められる理論的に正確な幾何学形状に対する公 差域をしめす、輪郭度が求められる。近年、白色干渉顕微鏡を利用した計測技術によっ てダイヤモンド表面性状の三次元形状データを 0.1nm の分解能で得ることができる。こ のデータを基に、工具の理想的な幾何学形状に対するずれの範囲を輪郭度の評価を行 うことが可能である。

本提案における成型加工装置は、研磨板に対して水平方向の軸を回転軸として工具 自体を研磨板に対して揺動回転させることで、工具先端部に銀ロウで接着してあるダイ ヤモンド原石の先端をR型に研磨する機構をもつ。このシステムにおいて、実際の半径は、 おもにダイヤモンド原石の取り付け位置と強制切込み量に依存し、その両者によって決 定される幾何学形状に対する輪郭度はチッピングの発生によって支配される。このため、 装置の開発においては、総型バイトの寸法誤差に対する要因分析を容易にするために、 仕様半径からのずれによって輪郭度を評価するのではなく、まず、ノーズ半径を評価した のち、その半径による幾何学形状からのずれによって輪郭度を評価する手法をとること が望ましい。このため XYZ 座標で表現される3次元表面性状データから平均曲率半径と 輪郭度を各々評価するための計算手法を確立し、これに基づいて工具形状の評価を行 った。また、本来、開発中の成型加工装置の加工面の理想幾何学形状は真円であるが、 回転揺動装置に対して工具の取りつけに角度のずれがあった場合や、表面性状の測定 装置に工具をセットする際にその角度にずれがあった場合には、その幾何学形状は楕円 になるため、円関数だけでなく楕円関数を用いた評価手法も作製し、両者を用いて研磨し た工具の表面性状の評価を行った。

実際の評価手手順を以下に示す。

- 1)成型加工装置により円弧状に成型加工する際の揺動回転軸(即ち円が含まれる面に 対して垂直方向)をY軸、Yに垂直で研磨面と平行な方向をX軸、X, Yに対して垂直な 方向をZ軸として白色干渉顕微鏡(NewView 7300, Zygo Corporation)により計測 する。
- 2) 測定結果より Y=一定の一連のデータ(X, Z)を Zygo 出力ファイルより抽出する。その際、計測不能点の座標データ(\*\*, No data)は消去しておく。抽出された(X, Z)データ列に対して、中心座標(α,β)、半径 a の円のモデル関数、または長、短軸を a, b とする楕円関数によって、Z 値に対して非線形最小二乗法でフィッティングを行う。



図2-1-4 実測データに対する楕円関数のフィッティング例

3) (x,z)データを、フィッティングで得られた中心座標 $(\alpha, \beta)$ を原点とし、Z 軸を $\theta=0$  とす る極座標表示 $(r, \theta)$ に変換する。その座標系において、 $\theta$ に対する、rとフィッティング によって得られた半径 a の差分、 $\delta$  r を計算する。また楕円関数でフィッティングを行っ た場合については、R と、中心座標から(x,z)への方向が同じとなる楕円上の点までの 距離との差δrを、式1に従って計算する。

 $\delta r = \sqrt{(x-\alpha)^2 + (z-\beta)^2} - \sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} \qquad \left(\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a(y-\beta)}{b(x-a)}\right)\right) \qquad ( \mbox{if } 1 )$ 

4)  $\theta$ に対する理想的な幾何学曲線からの実測データ $\delta$ rをグラフ化し、 $\delta$ rの最大値(山) と最小値(谷)の差分を輪郭度として算出する。



図2-1-5 測定点と理想幾何学曲線との差分

(5)各抽出データ(x,z)での a(楕円の場合は a,b)と輪郭度 δr を表面性状の三次元描画 画像と突き合わせ、輪郭度に影響を及ぼしている要素について判断する。



図2-1-6 総型工具ノーズ部逃げ面における3次元形状データとノーズ半径と輪 郭度の解析結果

研磨加工を行った総型工具に対して、これら(1)~(5)までの測定、解析を行うことで工 具のノーズ部半径と輪郭度を別々に評価した。その結果、この際、欠けは不連続な凹形 状、また、デブリ不連続な凸状プロファイルとなる。また、工具揺動回転運動や研磨板回 転運動の運動精度、装置剛性不足などの影響は、δr にθに対して連続的で非対称な 変化をもたらすことが分かった。

また、Z 軸を中心として実測値データが±3°以上の領域にわたってある場合、図2-1 -5にあるようにフィッティング関数が円関数、楕円関数のいずれの場合であってもδrに 1nmを超える差異は見られなかった。このことより成型加工装置や、白色干渉顕微鏡へ の工具のセッティング時の角度誤差によって生じるプロファイルの対称的な幾何学曲線 からのずれはないとみなして、工具の実際の評価には、円関数をモデル関数として解析 を行った。

2-2 成型加工技術の開発

2-2-1 ダイヤモンドホイールを利用した成型加工装置の開発

2-2-1-1 成型加工装置の開発

ダイヤモンド加工で一般的に用いられている、遊離砥粒をもちいた鋳鉄円板による研 磨加工ではダイヤモンド工具を成型する際、総型バイトの形状を作製するにはダイヤモ ンド原石を仕様寸法に合わせて多くの量を除去する必要があるため、作製に多大な時間 を要している。また、本研究の眼目である熱研磨加工は高精度な仕上げ加工を行うため のものであり、研磨レートの点で粗加工を行うには適していない。そこで、研削性能の良 いメタルボンドダイヤモンドホイール(固定砥粒)と、精密スカイフの両方を使用でき、かつ、 静圧軸受けを利用した工具保持装置の運動により、ノーズ部のR形状を高精度作製す



図2-2-1 成型加工装置(工具ノーズ部研磨時)



図2-2-2 成型加工装置の研磨板揺動運動

ることのできる加工装置の開発を行った(図2-2-1)。

よく知られているように、ダイヤモンドの研磨加工には、結晶方位ごとに硬度、研磨レ ートに研磨方向に対する方向依存性が存在する。このため、先端部の円弧形状に沿っ た加工が必要となる総型工具の成形加工装置では、Y方向だけの揺動だとダイヤモンド の結晶方位に対して難加工方向のみにしか揺動しないことがありえる。このような状況で は、成型加工装置で定寸切り込み後に長時間研磨状態を保持しても、円弧の一部で加 工がほとんど進まないため輪郭精度が悪化する。このため、成型加工装置に備わる研磨 板の揺動をY軸方向だけでなくX軸方向にも振動させることで、ダイヤモンドに対する研 磨板の運動方向の角度変化の振れ幅を大きくするため、X方向についても揺動できる機 構を設けている(図2-2-2)。また、幅の狭いダイヤモンドホイールを用いた粗加工時で も、加工面がダイヤモンドホイール加工面からはみ出さないように X 軸方向、Y 軸方向の 揺動を容易に同期させる構造としている。

また、他にも通常のダイヤモンドホイールを用いて定寸切込加工を行った際に、定寸切 込み量に対するダイヤモンドの除去量に約 0.5μmの誤差が生じたため、ダイヤモンドホ イールの検討も行った。市販のダイヤモンドホイールは、メタルボンド材としてブロンズ系 のものを使用している。ブロンズはメタルボンド材として標準的な材料であり、すずの含有 量が多くなるにつれ硬度が増すが、含有用が多すぎると錫が湧出して焼結が不安定とな るため、ダイヤモンド砥石の結合材としては一般的に 80%銅-20%錫(α相が主成分)まで とされ、そのビッカース硬度は HV=60~65 である。このメタルボンド材の弾性変形が、そ の強制切込み時の定寸切込み量と、除去量との間の誤差となっている可能性が高いと 判断した。このため、そこでブロンズα相よりもより高いヤング率をもつ物質をメタルボンド 材とするダイヤモンドホイールの調査を行った結果、同じブロンズでも金属間化合物であ る ε 相の銅ー錫合金をメタルボンドとしたダイヤモンドホイールについての研究報告を見 つけた。この高錫含有のブロンズボンドは α 相 (ビッカース硬さ HV=60~65)より硬い ε 相 (ビッカース硬さ HV=120~125)に着目したものである。この銅ー錫 ε 相をメタルボンド材 として利用したダイヤモンドホイールを、われわれの仕様で、工具メーカに特注で発注し、 そのダイヤモンドホイールを使用して研磨加工をおこなったところ、切り込み量に対するダ イヤモンドの除去量の誤差が 0.1 μ m以下とすることができた。

2-2-1-2 レーザ加工装置の導入

より迅速な形成加工方法を確立するために、前項の成型加工装置に加えて、レーザ加 工装置を導入した。研磨加工前に、レーザ加工機による原石から工具形状の大まかな外 形を切り出す工程をもうけることで、時間を要する研磨加工に必要となる除去量を減少さ せ、工具成型加工の効率を図った。使用するレーザのタイプは、YAG 波長(1060~1064 nm)を発信できる 42W 出力の Yb:ファイバレーザとした。レーザによるダイヤモンドの加 エについてはいくつか報告例があり、より短い波長のレーザ(ArF や Excimer)を使用する ことで加工変質層をより少なくできることが知られている。しかし、高出力短波長レーザは ファイバレーザに比べて価格が非常に高いだけでなく、レーザ加工のみでは高精度ダイ ヤモンド工具に要求される加工精度を達成することができない。また、本研究においては 高精度な研磨加工を追及することが主眼であるため、高精度・高速に照射域を制御でき るガルバノスキャン付のレーザであっても比較的低価格で高出力レーザを得ることができ る、YAG 波長ファイバレーザを採用することとした。

レーザ加工は法的にケース内で行う必要があることからゴニオステージを組み込んだ ボックスを設計、作製した。その装置内部写真を図2-2-3に示す。ダイヤモンド工具を 固定するホルダーは、XYZ方向についての水平移動とX軸、Y軸、Z軸について各々独立 して回転操作ができるようにゴニオステージが組み合わせられており、このホルダーのジ グの部分にダイヤモンド原石を接合したシャンクをねじ止めする。レーザ発振器はボック スの上部に配置し、下方に向かってレーザを放射し、コンソール上で1µmの分解能で照 射を制御することが可能である。また、ボックス中にセットした工具位置をCCDカメラによ ってモニタすることで、ダイヤモンドへのガイドレーザの照射位置を確認しながら工具位置、 角度を調整することができる。

16



図2-2-3 レーザ加工機の概略図と内部構造写真

2-2-2 成型加工方法の最適化

開発した成型加工装置によりダイヤモンド工具の成型を行った。以下に作製した代表 的な総型工具ならびにその作製方法について示す。

1)ダイヤモンド工具を設計する。成型加工装置の性能評価も兼ねているため、工具は比 較的単純な形状とし、刃先角 90°、ノーズ半径 0.5、逃げ角 10°、掬い角 0°とした。 また、シャンク材は超鋼が基本であるが、刃先を高倍率の電子顕微鏡で確認するとき に像の歪みをできるだけ抑えるために、非磁性超鋼とした。



図2-2-4 試作する総型工具の図面

2)シャンクへのダイヤモンド原石の接合

作製したシャンクに、ダイヤモンド原石を、Tiを含有する活性金属ロウ(Ag-Cu-Ti)で、 接合した。ダイヤモンドは人口単結晶ダイヤモンド(スミクリスタル Ib、住友電気工業株 式会社)、上下面が(100)面で、厚さ 1mm、縦横:最低保証寸法 3mm のものを使用し、 <100>方向が、図2-2-4において水平、あるいは垂直方向となるように接合した。 3)レーザ加工装置によりダイヤモンドのトリミング

レーザの加工条件は表2—2-1 のとおりである。レーザ加工では表面に約 10 $\mu$ m、 加工後のクリーニングしなければデブリを含めて数十 $\mu$ mの表面粗さがある。さらに、 Bloshchanevich らによって、レーザ加工されたダイヤモンド単結晶の下に、計測される 格子欠陥が高い領域が約100 $\mu$ m弱の厚さで存在することが確認されている。(A. M. Bloshchanevich et al., Powder Metallurgy and Metal Ceramics 43 (2004) 150) Bloshchanevich らによれば、この結晶学的な加工変質層は、ダイヤモンド工具となっ た時にも加工特性に影響はないとしているが、一般に高い格子欠陥密度は欠けの原 因となり、長期的な工具の寿命に影響を与える可能性があるため、できるだけ取り除く ことが望ましい。一方、あまりに多くの除去が必要であると製造コストを増大することに なる。このため、今年度の作製では作業時間も考慮に入れて、研磨加工(ダイヤモンド ホイールによる粗加工と精密スカイフによる中、仕上げ加工)の削り代として 50µm を 加味してトリミングを行った。



表2-2-1 レーザ加.
--------------

Condition	Parameters	
Output power	33W	
パルス周期	20µs	
Scan 速度	500-1000 m/s	
レーザ幅	100 µm	

図2-2-5 単結晶ダイヤモンドのレーザ加工面

4)ダイヤモンドホイールによる粗加工

ダイヤモンドトリミング終了後、成型加工装置の研磨板にダイヤモンドホイールをセットし、heat affected zone の除去および、粗加工には、高錫含有ブロンズによってメタルボンドした#800CPF ホイール(アライドマテリアル)を使用した。ダイヤモンドホイールの回転数は2700rpmとし、ダイヤモンドのホイールをX方向に幅40mmで揺動させた状態で使用した。ダイヤモンド工具の取り付けは工具を成型加工装置の治具にセットし後、研磨板に対する角度、位置を装置の精密ステージ、ゴニオで調整することが可能である。なお、前に逃げ面のノーズ部の加工については、工具の回転揺動装置の回転中心がノーズ部Rの中心と一致するように、拡大鏡を見ながら調整を行った。また、加工開始時には、揺動装置にセンサ部を固定した研削音検出器からの音声出力を耳でモニタすることで、原石とダイヤモンドホイールの接触時状態を確認しながら、工具に対してダイヤモンドホイール上昇させていくことで切り込みを行った。ダイヤモンドとワークの接触後の、ダイヤモンドホイールの切り込みの設定は、スパークアウト3回に対して 0.1 µm ずつ、所定の位置までダイヤモンドホイールを上昇させることで加工を行った。

4) 中加工、仕上げ加工

所定の厚さをダイヤモンドホイールで研磨したのち、研磨板をダイヤモンドホイール から精密スカイフに変更し、掬い面、前逃げ面および横逃げ面の加工を行った。研磨



図2-2-6 成型加工を行った前逃げ面のノーズ半径と輪郭度

板の回転はダイヤモンドホイールと同じく、2700rpmとし、研磨盤全体をX方向に40mm 横揺動させながら研磨を行った。掬い面、横逃げ面の平面加工は通常は、3章でのべ る超精密研磨装置にて行うが、本工具の平面加工については、治具と研磨盤との干 渉が生じないため、回転揺動装置を固定した状態で研磨を行った。工具取り付け治具 に固定したままの状態で、ノマルスキー型干渉顕微鏡(1000X)で観察を行い、研磨面 に条痕が見られなくなるまで精密スカイフによる仕上研磨を行った。

5)検査

作製した工具を、富山県工業技術センターの協力により、非接触三次元粗さ測定装置(Neview, Zygo Cooperation)より測定を行い、2-1-2節の手法に基づいて、ノ ーズ半径と輪郭度をの評価を行った。そのうちの代表的な解析結果を図2-2-7に 示す。ゴミのない清浄な部分での輪郭度は、20~30nm であり、計画の目標値である 50nm を達成していることが分かる。現在、図2-2-に示した工具であれば、レーザト リミングと研磨作業要する実作業時間は1日を割っており、作業効率を考えて連続で 行っても1日あたり3本以上の作製が可能である。このため、今回は外注で処理したダ イヤモンドとシャンクの接合を合わせても、1週間以内の作製が可能であり、目標を達 成したといえる。

2-2-3 FIB 装置による刃先の成型加工

FIB は集束させたガリウムイオンビームを加工箇所に照射しそのスパッタ効果によって 物質を加工する装置であり、これを用いることでマイクロ~ナノレベルの 3 次元加工が可 能となるため、微細で複雑な構造が必要となる超精密加工用工具の加工に有効である。 本研究では、FIB を用いた微細な刃先加工を行うための技術の開発を行った。その結果、 長時間にわたってシーケンサにより自動で加工を行うと観察領域と加工領域にずれが生 じ、寸法精度に誤差が生じるため、1プロセスの Ga イオンドーズ量は 30nC/μm<sup>2</sup>以下に 抑え、プロセスごと照射領域の調整を行う必要があることが分かった。また、また、1プロ セスでの加工領域が 500μm 以下にしかとれないことから、現状では特殊形状をもつ刃 先の仕上げ加工にのみ用いることが妥当あると判断した。

FIB により加工を施したダイヤモンドの刃先には、加工に使用したイオンの元素が残留 し、これが工具としての加工性に影響を及ぼすことが懸念される。本研究事業のなかで、 シャンクとダイヤモンドを接合させる銀ロウ接合の耐熱性の許す範囲(500°C以下)でこ の残留イオンを取り除く方法(2-3-3節に後述)を開発したため、この後処理方法を実 際の切削実験によって評価するため、FIB加工を施したダイヤモンド工具の作製を行った。 ダイヤモンド工具は高圧合成された単結晶ダイヤモンドを加工することで、ノーズ半径 0.5 mm、刃先角 90°、第1逃げ角 10°、掬い角 0°のダイヤモンド工具を作製し、そのうち2 本に対して掬い面、逃げ面各々の幅 220μm の領域にわたって FIB 加工装置による Ga イオンビームを、加速電圧 10kV、ドーズ量 0.01nC/μm²の条件で照射した。照射を行っ たダイヤモンド工具ノーズ部分の電子顕微鏡写真を図2-2-9に示す。このFIB加工を 施したダイヤモンド工具に2-3-3節の後処理を施した工具と、FIB加工のみ、FIB加工 なしのダイヤモンド工具を作製し、この3種類のダイヤモンド工具について切削実験を行 った。それについては、2-3節で後述する。



図2-2-7 刃先のみ FIB 加工を行ったダイヤモンド工具のノーズ部の電子顕微鏡写真

#### 2-3 超精密仕上技術の開発

2-3-1 超精密仕上研磨装置の開発

通常、ダイヤモンド工具をふくめた単結晶ダイヤモンドの加工は、従来スカイフにダイヤ モンドの遊離砥粒を介在させ、加工面に一定の圧力を印加することで行われる。しかし、 この手法は、基本的に宝飾ダイヤモンドを加工するためのもので、加工面でのダイヤモン ド原石と砥粒の衝突が不可避であることから、刃先稜丸味半径を鋭利な刃先稜線 100nm 以下にすることが難しい。また、そのような衝突は、刃先が鋭角が必要となる工具の研磨 の際には、チッピングを発生させる原因となりうる。そこで本稿では、ダイヤモンド砥粒をも ちいない熱研磨をベースとし、かつ刃先に加わる衝撃を逃がす構造をもつ超精密仕上研 磨装置の開発を行った。



図2-3-1超精密仕上研磨装置

スカイフは、従来型スカイフに変わって焼き入れ後鏡面研磨処理を施した精密スカイフ を用いている。また、研磨装置のスカイフ駆動部はスピンドルに静圧軸受けを用いること で、振動を発生を抑えると同時に、駆動部とスピンドルとの駆動力の連結に布ベルトを用 いることで、モータの振動をスカイフにもたらさないようにしている。さらに、スカイフ駆動部 (精密スカイフ、スピンドルを含むテーブルより上の部分)は、テーブルとボルトで固定され ているだけであり、精密スカイフに修正が必要になった時には、スカイフ駆動部ごと装置 から取り外し、それを平面研削盤にそのままセットして修正を行うことで精密スカイフの回 転による面ブレを 0.2 µm 以下にすることができる。ダイヤモンド工具を保持する工具ホル ダーは、揺動装置によって精密スカイフに対して揺動運動する。この揺動により精密スカ イフの局所的な損耗が抑えられ、精密スカイフの修正する頻度を抑えられる。

ダイヤモンド原石の熱研磨においては、加工面での撃力の発生を抑制しながら温度上



図2-3-2 超精密仕上げ研磨装置の軽量型工具ホルダー

昇させていくことが必要になる。これを踏まえて、2種類の工具ホルダーを開発した。

ーつは、構造をシンプルにした強化プラスチック製の軽量型ホルダーである。これは構造材として軽く熱伝導性の低い強化プラスチックを用いることで、より低い研磨圧力で加工面の温度を上昇させるとともに、慣性質量を抑えることでダイヤモンド原石と精密スカイフの間にデブリなどの障害物が生じた場合でも、ホルダー自体が上方に逃げやすくし、チッピングの発生するリスクを下げることができる。このため、よりチッピングが発生するリスクの高い刃先稜線のなす角が鋭角な工具の研磨に適している。このホルダーでの精密スカイフに対する原石のピッチ角、ロール角の調整は、底部2つの加工面角度調節ネジの突出し量を調整することで、自在に行うことができる。また、それをサポートするための、試行研磨と観察より評価したピッチ角、バンク角の調整量から、それに必要となるネジの突出し量の調整量を算出するための計算プログラムも合わせて行った。





図2-3-3 ゴニオ内蔵ホルダーの概略図および使用状態写真

もう一つの工具ホルダーは、ホルダーに精密ゴニオメータや、ダイヤモンド原石に加わ る荷重を調整できるバランサーを組み込んだものである。図2-3-3に開発した工具ホ ルダーを示す。このホルダーは、慣性質量は軽量ホルダーに比べて大きいため、チッピン グ発生のリスクは高くなるが精密角度調整の可能なゴニオメータが内蔵されており、ピッ チ角とロール角を独立に秒のオーダで設定することができる。これらのステージは角度調 整を直観的に行うことができる。このため、先端部が鈍角もしくはそれに近い角度でチッピ ングの発生の恐れが小さい工具では、このステージを用いることでより迅速でヒューマン エラーの起こしにくい加工手順とすることができる。

2-3-2 超精密仕上研磨条件の最適化

従来のスカイフ盤を用いた工具加工においてその表面粗さは2nm以下となるのが一般 的であり、精密研磨加工の場合、その表面粗さは1nmからどれだけ小さくできるかを目指 す必要があるといわれている。しかし、従来型スカイフを用いた機械研磨ではどうしても条 痕が残ってしまうため、精密研磨に必要な1nm以下という平滑性は得ることができない。 また、また、従来型スカイフの場合、研磨方向に対する加工依存性が強いため、わずか に研磨方向が変わるだけで研磨レートが変化し、治具や遥動装置のセッティングの調整 が繁雑になる。

この従来型の研磨方法の問題点に対する熱研磨の特徴を明らかにすべく、ダイヤモンドのテストピースを用いた熱研磨加工実験を行った。加工するダイヤモンドは底面の直径が約500μmの円錐形状のIb型の単結晶ダイヤモンドを用い、(100)面である底面を加工面として15度ずつ回転させて研磨し、加工方向ごとの研磨量を測定した。研磨板は2500rpmで回転させ、また加工するダイヤモンドには7.2Nの荷重を加えた。



図2-3-3左側は機械研磨時の加工量と加工方向の比較を示す。加工には粒径

図2-3-3 従来型スカイフとダイヤモンド砥粒(粒径 0.25μm)を用いて機械研磨加工を行った時のダイヤモンドの研磨レート(左)と表面の AFM 像(右)





図2-3-4 精密スカイフで作製した研磨円板を用いて熱研磨加工を行った時のダイヤモン ドの研磨レート(左)と表面の AFM 像(右)

0.25µm のダイヤモンド砥粒を用い、<100>から<110>方向まで加工を行った。この結果、 <110>方向は全く加工されなかったのに対し、<100>方向の場合の研磨量は約 4×10<sup>-5</sup>µ m/hour・µm<sup>2</sup>であった。一般的に(100)面における<110>方向は難加工方向、<100>方向 は易加工方向とされていることから、加工機構は機械研磨によるものであるといえる。ま た、AFM で加工後の表面を測定した結果、加工後の表面粗さ Ra は 1.16nm であった。機 械研磨加工後の表面 AFM 像(図2-3-3右)を見ると、表面には最大高低差 15nm の研 磨条痕が残っており、これが表面粗さの要因となっている。

図2-3-4は熱研磨を行った時の研磨レートの方向依存性である。加工条件はダイ ヤモンド砥粒を用いないこと以外は機械研磨加工の時と同じである。<100>方向から <110>方向までの研磨結果を比較すると研磨量はすべての方向で 2~3×10<sup>-5</sup> $\mu$ m/ hour・ $\mu$ m<sup>2</sup> で、機械研磨の場合よりも研磨量の最大値は小さいが、加工されない研磨方 向が無かった。また、図2-3-4右のように研磨後表面には機械研磨のときのような研 磨条痕が見られず、表面粗さ Ra は 0.09nm という精密研磨に十分活用できる平滑性が得



図2-3-5 超精密仕上加工を行った剣バイト SEM 像

られている。これらの結果より、精密スカイフ熱研磨加工は工具の精密研磨に必要な 1nmRa以下の加工面形成が可能であることが明らかとなった。また研磨量の方向依存性 が小さいため工具ごとに治具やセッティング角度の調整をして研磨方向を合わせる手間 が省けるため、多数の工具加工もスムーズに行うことが可能である。

本事業で開発した超精密仕上研磨装置で刃先を形成した剣バイトの刃先稜線の電子 顕微鏡写真を図2-3-5に示す。仕上研磨おいては刃先角が30°と鋭角であるため、 軽量ホルダーを用いて加工を行った。この結果、図2-3-5に示されるように、切刃稜線 の丸味半径は、20nm 以下で、5nm 以上の欠けのない仕上研磨が行えることを確認でき た。

2-3-3表面改質処理

特に FIB 加工を行ったダイヤモンドの加工面には加工に使用されたイオン源が蓄積す るため、それらを取り除く表面加湿処理が必須となる。それら加工変質層の表面改質手 段としては水素プラズマ曝露や真空加熱が知られているが、いずれも1000℃近い温度 が必要となる。一方、ダイヤモンド工具はダイヤモンドとシャンク(超鋼合金の台金)の接 合には活性金属ロウ付法が用いられ、ダイヤモンドはシャンクに接合された状態で成型 加工がおこなわれ、シャンクの平面に対してダイヤモンドの刃先の角度が決定される。こ のため、表面改質手段には銀ロウの耐熱温度である500℃以下での処理が望まれる。

そこで我々は、加工表面に対して反応性の高い AI 金属膜(~100nm)をスパッタリング によって形成し、500℃で加熱することでAI 膜中に表面近傍の不純物元素を拡散させるこ とで表面を安定化させた後、NaOH エッチングによって AI 膜を除去する手法を開発した。



図2-3-6 開発した後処理を施したダイヤモンド加工面の Ga 特性 X 線の強度比

(強アルカリに対して超鋼、銀ロウ、ダイヤモンドは耐性がある) 図2-3-6に FIB 加工 面に対して後処理を施したサンプルに対して、エネルギー分散型元素分析装置によって 加工面の Ga の特性 X 線強度を測定したときの強度を比較したグラフを示す。AI-573K、A I-673K、AI-773K は AI 膜形成後に各々573K、673K、773K で一時間加熱した後、AI 膜の 除去を行ったサンプルを示している。図2-3-6からわかるように AI-773K で Ga の特性 X 線の強度はほとんど誤差範囲となり、単に 773K で 1 時間加熱した場合に比べてもはる かに効率よく Ga の除去がおこなわれていることがわかる。特に加工時のイオンの加速電 圧が 10kV のサンプルでは真空加熱処理、水素プラズマ処理と比べても遜色のない Ga の除去が行われていることが確認できた。このため、表面改質手段としては、FIB 加工時 の仕上処理にイオンの投射飛程の短い 10kV での加工を行い、さらに前述の AI 膜形成・ 500℃加熱・AI 膜除去を行うことで、1000℃での水素プラズマ曝露や真空加熱と同等の改 質効果を得られることが期待できる。本手法による FIB 加工によって刃先処理を行ったバ イトに関して切削加工実験を進めることで表面改質処理が切削性にあたえる影響を評価 していく予定である。

2-4-1 工具精度と加工性

前章で作製した、おなじ形状仕様をもつ3つのダイヤモンド工具、(a)FIB照射なし、(b)F IB照射あり、(c)FIB処理後、後処理について、アルミニウムを被削材とした引き切り加工 の切削加工実験を行なった。実験は、富山県工業技術センターの協力により超精密切削 加工機(ファナック社製ROBONANO α-0iB)のシャトルユニットを用いて行なった。動力 計の上に設置されているアルミニウムに対し、(a)、(b)、(c)の3つの切削工具を用いて、引 き切り加工を行なった。被削材にはA5052を用い、切り込み量を3μm、送り量20μmとした。 図2-4-1に、各工具における切削抵抗値、図2-4-2に切削試験後の工具刃先の 電子顕微鏡像、図2-4-3にアルミニウムを3つの工具で加工した後の加工面の、Zygo による三次元形状データを示す。







10 µm

## 図2-4-2 各工具の切削後の刃先稜線の電子顕微鏡像



図2-4-3 各工具によるアルミニウム加工面の ZYGO 測定結果

切削抵抗値の値を比較すると、(b)FIB 照射有り工具の切削抵抗値が主分力,背分力 ともに最も大きく、特に、背分力に差が大きく見られた。また、アルミニウム加工後の工具 刃先SEM観察像を見ると、(b)FIB 照射有り工具と(c)FIB 照射後後処理した工具にアル ミニウムの凝着が見られ、特に(b)FIB 照射有り工具に凝着が多く見られた。これは切削 中に照射部のGaイオンが被削材のアルミニウムと反応したためについたと考えられる。 切削加工面の比較については、(a)FIB 照射無し工具と(c)FIB 照射後熱処理工具で加 工面に山の大きさがほぼ均一な切削痕が形成されていることが確認できた。また(b)FIB 照射有り工具での加工面には、山の大きさが不均一な切削痕ができていた。

これらの結果から、FIB照射された切削工具はその加工性に問題生じること、また、後 処理によってそれが改善できることが確認できた。今後はさらに、今後、さらに後処理条 件の改善と、切削加工実験を進め、FIB加工切削工具でも研磨加工工具と劣らない切削 性持たせる技術を確立していく予定である。

### 第三章 全体総括

はじめに

切削加工は、最も一般的な加工方法であり、研削、研磨等の砥粒加工の前工程の粗加 工として用いられてきた。しかし、従来の方法では加工が困難であった非球面形状を切削加 工によって最も効率よく作製できること、高い生産性で寸法精度よく鏡面が得られることなど により、最近広い分野において超精密切削加工が注目されてきた。レーザ核融合や X 線望 遠鏡に用いられる大口径の金属反射鏡、あるいは既に実用化が進んでいる記録媒体やポ リゴンミラー、各種レンズやその成形用金型等がその例である。

切削加工の基本原理は、母型転写である。超精密切削加工では、極めて精度の高い工 作機械の運動精度を、極めて切れ味の良い工具を用いて、極めて被削性の良い工作物の 表面に工具形状を転写することである。超精密切削加工の到達限界は、工作機械、工具、 被削材の三つの要素とこれら各々の相関により定まる。工作機械は、ナノメートルオーダの 運動精度を保持した高剛性高精度の装置が市販され、内外の工場に数台から数百台装備 されてきている。工具については、筆者らの研究開発によりコーナ半径の輪郭精度が 50nm の形状精度で製造されたものが市販されるようになり、レンズ用金型はじめ多くの精密、鏡 面部品が安価に製造できるようになった。しかし、消耗部材であるダイヤモンド切削工具の 作再研磨は、工具メーカに依存したまであり、日本のものづくりの拠点が海外にシフトするこ とで研磨のための往復の送料及び通関費用、さらに、工具のストック数量の増加からダイヤ モンド切削工具の再研磨を自社で行う必要性が出てきた。

今般、精密加工に携わる技術者が自社でダイヤモンド切削工具が再研磨でき、市販され ている工具よりも高性能のダイヤモンド工具が研磨できる装置を開発し、その装置でダイヤ モンドを加工し、研磨面の表面性状、切刃稜線の鋭利性およびダイヤモンドの成形性につい て検討し実際の超精密工具を作製し加工実験を実施した。

ダイヤモンドの評価

ダイヤモンド結晶は、結晶成長時の環境条件に対応して、不純物や転位等の種々の欠陥 が導入されている。これらは当然、ダイヤモンド本来が持つ諸性質、例えば機械的、熱的、 電気的、光学的な性質に大きく影響を与える。従って、ダイヤモンドを工業的に利用するうえ で、結晶中に存在する欠陥を明らかにし、個々の結晶を評価することは重要である。結晶の 評価に関しては、今までに多くの研究がなされてきた。天然ダイヤモンドにかんしては、研究 の歴史も古く、多くの報告がある。評価は、結晶の形態や表面及び内部の微細構造の観察 からはじまり、ついで結晶に内在する欠陥を観察する。

超精密切削工具に用いられるダイヤモンドの大半は超高圧合成された Ib 型ダイヤモンド である。特に、国内メーカで合成されたダイヤモンドは品質管理が行われおり、ESR、カソー ドルミネッセンス観察で欠陥濃度に大きな差がなかった。また、超精密切削工具にとって、重 要な要素は実際に母型転写を行う切刃の形状精度、輪郭精度である。これら形状を評価す る技術を白色干渉顕微鏡の測定座標から独自に改正評価する構築した。

成形加工技術の開発

ダイヤモンドの成形・研磨加工は、ダイヤモンドホイールやスカイフと言われる鋳鉄製円板 上にダイヤモンド微粉を塗布して行われている。この方法では砥粒とダイヤモンド切刃稜線 との接触によるチッピングの発生や切刃稜丸み半径精度、工具寿命の低下の要因となって いる。

本研究開発では、シャンクにロー付けされたダイヤモンドチップをワンチャックで最終研磨 工程まで行える工程を開発した。

- ①ダイヤモンド結晶をファイバーレーザにより成形加工を実施する。レーザ加工用の 5 軸機構のゴニオ加工ボックスを設計製造した。
- ②レーザの加工時のシャンクを基準面として、ダメージ層の除去をダイヤモンドホイールで加 エした後、ホイールを精密スカイフに変更し、高い形状精度で成形できる R 成形装置を設 計製作した。
- ③凹凸の連続形状を持つ総型形状の切削工具の切羽をFIBにより三次元加工が行える加 工技術を構築した。また、FIB 加工によるダメージ層の除去(Ga の除去処理)ができる熱 処理技術を開発した。

#### 超精密仕上技術の開発

ダイヤモンドの加工は、硬さの異方性を利用した機械研磨がスカイフ盤を用いて行われて いる。本研究開発では、切削工具の切刃稜線にチッピングが生じない研磨技術の開発に努 めた。このために、研磨用の砥粒を使用しない研磨板との反応を利用した熱研磨装置を開 発した。この加工では、研磨方向に依存しない精密研磨が行なえ、従来よりも一桁精度の高 い加工が行えるようになった。また、FIB を用いて凹形状の微細形状の刃先もサブミクロン の寸法精度加工できる技術を確立した。FIB 加工時の Ga の除去も500℃以下のシャンク

#### 工具精度と加工性能の評価

本事業により開発した装置により、従来よりも一桁精度の高い加工面の表面性状、切刃 稜線を成形する技術開発が行えた。しかし、超精密工具の評価は実際に切削加工を行い、 その工具形状の転写性能、工具の寿命の評価において効果が示すことができてはじめて工 具の研磨システムが完成したと言える。現在、銅合金の加工により転写性の評価、Ni-P 合 金の加工により工具寿命の評価中である。鋭利な切刃に研磨出来ているために加工時の 応力が小さくなり、これにより切削時の発熱が軽減できるなど優れた加工結果がでつつある。 今後も工具の評価としての加工実験は継続して実施し行く。

今後の展開

ダイヤモンド切削工具を用いた超精密切削技術は、1962 年に米国において Union Carbide 社が Micro-inch Machining の研究プロジェクトを開始したことが最初である。初 期は、軍需に関連した精密機器の開発からはじまり、今日では情報機器、オーディオ部品の 加工でなくてはならないものとなってきている。時代とともに超精密の基準がかわり、この10 年を見ても20世紀に花形商品であったビデオがなくなり、もはや CD も無くなろうとしている。 これに伴い、ダイヤモンド工具の非削材も軟質金属、高分子材料、脆性材料、結晶材料、硬 質材と変遷している。

表面粗さ 0.01 µ mRy オーダの鏡面切削に関し、加工の基本である切屑生成(Chip Formation)や切削面生成メカニズムの解明に関する研究、あるいは、使用するダイヤモンドをはじめとした高硬度切削工具の刃先形成に関する研究報告はほとんどない。走査型電子顕微鏡内での切削速度1mm/min.における切屑生成の観察と有限要素法を用いた微小切込切削シュミレーションの研究が行われているが、切屑生成時の歪速度依存性も考慮されていないために、実際の切削速度 200~1,000m/min.における切削現象の解明はなされていない。

さらに、超精密切削の研究着手には、加工機や精密温調室に莫大な設備費が必要であ り、量産に適用するためには加工環境の維持と高価な工具の使用などにより諸経費が増大 する。このため、加工精度を追求する超精密加工と言えども、所要加工精度に対する不良 率の低減、及び加工タクト短縮による原価低減を図る必要がある。

現状の超精密部品の量産加エラインでは、加工精度が作業者の熟練度に依存したり、 使用するダイヤモンド切削工具によってばらつくなど、生産計画の管理に支障をきたすこと が多い。特にダイヤモンド切削工具に関しては、切刃形状精度など全てダイヤモンド工具メ 一カに全面的に頼っているのが現状である。しかし、超精密部品の要求加工精度の向上に 伴う超精密切削工具自体の形状精度向上が日進月歩でおこなれている。このために、今後 もダイヤモンド切削工具をはじめとする、超精密切削工具のサブミクロンメータオーダの形状 成形・研磨を対象とし、切削条件を加味した応用を行い、光学部品や電子部品の超精密加 工の生産性を向上させる研究開発を継続実施していく。