

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

**「任意曲線刃先形状の極微細総型ダイヤモンドバイト
製造技術の開発」**

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 タマティーエルオー株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 粗加工の平準化のための非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムの開発	9
2-2 粗加工の高速化に必要なレーザー加工技術の開発	17
2-3 任意刃先形状の加工可能な2軸精密制御スカ이프加工技術の開発	24
2-4 精密加工のための機上形状測定と補正技術の開発	33
第3章 全体総括	45

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

【研究開発の背景】

我が国が世界にリードすべき先端ものづくりとして、光学系・電磁波系部品の超精密加工がある。すなわち、光や電磁波の超集光性を実現化することで、新たな省エネ化、高輝度化、低歪み化等につながり、製品の新たな付加価値を生み出すことにある。

例えば、携帯電話や次世代型製品と言われている有機 EL・LED テレビのさらなる省電力化には、ディスプレイシートに波型加工して光の集光性を高めることにより、わずかなバックライト消費電力で高輝度を保つという省エネ技術が有力視されている。また、光学系レンズおよび X 線光学部品のフレネルゾーンプレート等の加工においても超高分解能を得るには、ナノオーダー精度、かつ、電磁波動の理論に基づく曲率を持つ曲線状の加工が必須である。これらが実現すれば、世界をリードできる超精密ものづくり製品のマーケット開発につながり、我が国の産業の継続的発展にも大きく貢献できる。

一方、このような加工を行うことのできる器具は、ダイヤモンドバイトが主流であった。この理由は、超硬質であることが最大の理由である。しかし、ダイヤモンドの結晶構造の性質のため、従来のダイヤモンドバイトの受け口を比較的柔らかい結晶面にする事が多く、かつ、先端形状を円状または直線状にせざるをえなかった。さらに、ダイヤモンドバイト製造の自動化は非常に難しく、熟練者の技能に多くを頼らざるをえなかった。また、精密加工ゆえ、製造途中でバイト刃先の仕上がり確認に冗長な手順を組み入れている。このような現状により、ダイヤモンドバイトの超精密でラピッド製造は困難とされてきた。

上記のような超精密かつ任意形状の曲線に対応できるダイヤモンドバイトをラピッド製造するためには、次の課題があげられる。すなわち、熟練者の技能をデータベース化して、その技能伝承の効率を高めて製造者の数を増やすとともに、ダイヤモンドの結晶構造から任意曲線までの加工プロセスを明らかにすること、さらに、製造途中でのバイト刃先の仕上がり確認における冗長性を減少させること等である。

本事業は、上記の課題に対して、従来の豊富な知見と独自の研究アプローチを効果的に融合して、事業期間内に超精密、バイト刃先の任意形状加工、かつ、ラピッド製造の実現を目指すものである。

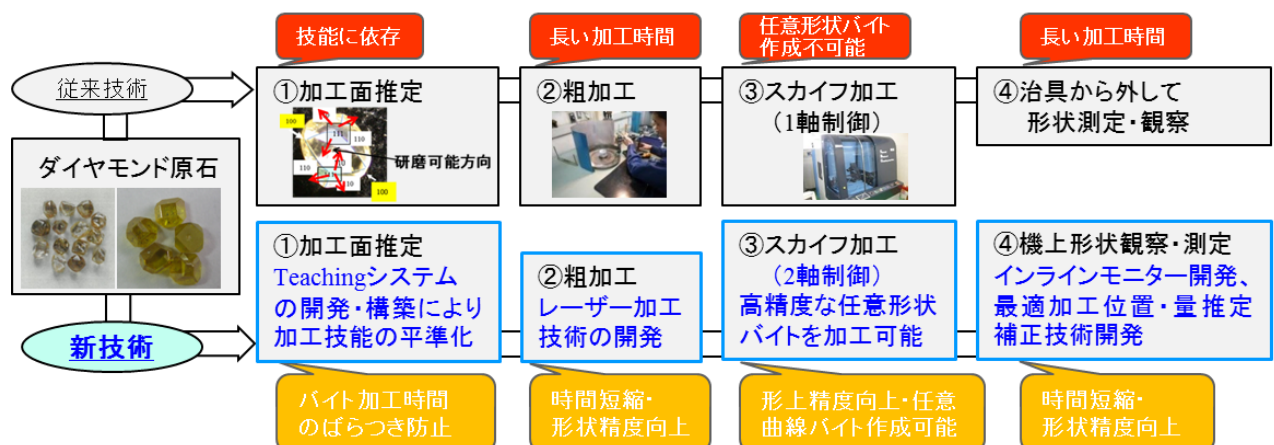


図 1-1 本研究開発の概要イメージ

【研究目的および目標】

① 粗加工の平準化のための非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムの開発

ダイヤモンドは、結晶面により加工のしやすさが大幅に異なる上、原石は個々に形状がばらばらである。熟練者は、目視で素材原石の結晶面を経験により推定し、加工面(111)を決定している。さらに素材原石の形状から加工量を経験により推定し高精度かつ高効率に加工している。しかし、これらは経験に基づく作業のため、決定・加工に至る時間は多くを必要とする問題点がある。また、熟練者の数が絶対的に不足しているという問題点がある。また、受注に迅速に対応するためには人員を増やさなければならないため非熟練者の加工スキルアップが必要であるが、非熟練者は経験不足により、粗加工にばらつきが生じるという問題点がある。これらの課題を解決していくために、非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムを実現する。

② 粗加工の高速化に必要なレーザー加工技術の開発

ダイヤモンドの粗加工は、従来は、スカイフ盤での手加工が主体であった。そのため、簡単な形状の粗加工時間は3時間程度であるが、任意曲線の粗加工は、工程が複雑になるため加工時間が簡単な形状に比べ2倍程度増加するという問題がある。この粗加工時間の短縮が課題である。ダイヤモンドのレーザー加工では、加工時に発生する熱と加工時のレーザーの送りピッチに対応して、加工面がギザギザになる。任意刃先形状ダイヤモンドバイトの粗加工方式の確立に向けて実施した条件出し（レーザースポット位置・パワー・送り速度等）を複合的に行うことにより、最適な粗加工方式を確立する。

③ 任意刃先形状の加工可能な2軸精密制御スカイフ加工技術の開発

これまでの精密スカイフ加工装置は、1軸（ Θ 軸）の回転を自動で加工し、回転半径（R）については手動送りするシステムであった。スカイフ盤で粗加工されたものを更に芯だし用顕微鏡で円弧形状を確認しながら何回も修正を加え仕上げる。円形刃先については、高精度の精密加工が可能であるが、任意形状刃先については、回転半径を変えながら手送りする必要があるため、現状の送り機構では、輪郭研削精度が出ない。精度向上のための送り機構の高度化が課題となる。これらの課題を解決し、再現性の高いスカイフ加工を実現するために、スカイフ盤ツールイングおよびコーティング技術の高度化と、2軸の精密送り機構を有する精密スカイフ加工装置の開発を行い、 $0.15\mu\text{m}$ 以内の精度を持つ任意刃先形状ダイヤモンドバイトの試作を実施する。

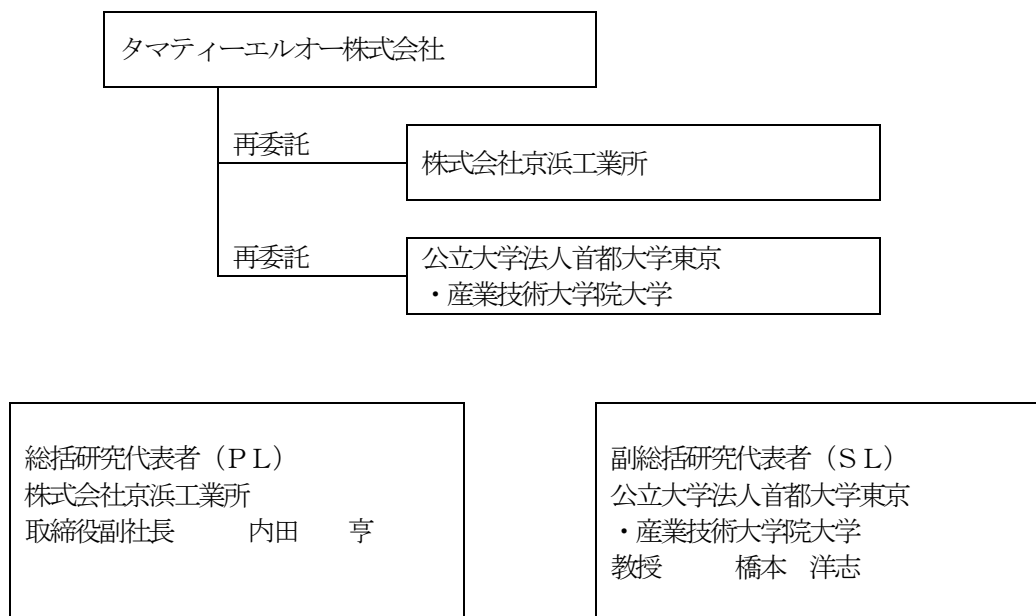
④ 精密加工のための機上形状測定と補正技術の開発

これまでは、Rバイトのみの製作であり、芯だし用顕微鏡でモニター上のRバイトの円弧中心を推定し、ガイド円弧形状からのずれから必要な削り量を推定している。すなわち、削り工程中は削り面を実際に見ることをしていないというオープンループ作業である。この行程中、ときどき、工程を中断し、バイト先端をきれいにしてから顕微鏡による目視計測を行い、再度、削り工程に戻るといった手順を繰り返している。このため、大幅な作業工程時間が必要である。特に、任意曲線刃先の場合は、刃先の部位によって円弧半径とその中心位置が変化し、どの部分からどの程度削るかの判断が複雑になるため、さらに削り工程全体の時間が増大するという問題がある。したがって、任意刃先形状に対して、削り工程中に削り面を観測するという機上形状測定とそれに対応した補正技術の開発が課題である。極微細任意刃先形状バイトの加工形状を測定可能な精密測定装置の試作開発と、その測定結果を利用して追加工する補正技術を開発し、超精密ダイヤモンドバイトの測定方式を確立する。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（1）研究組織及び管理体制

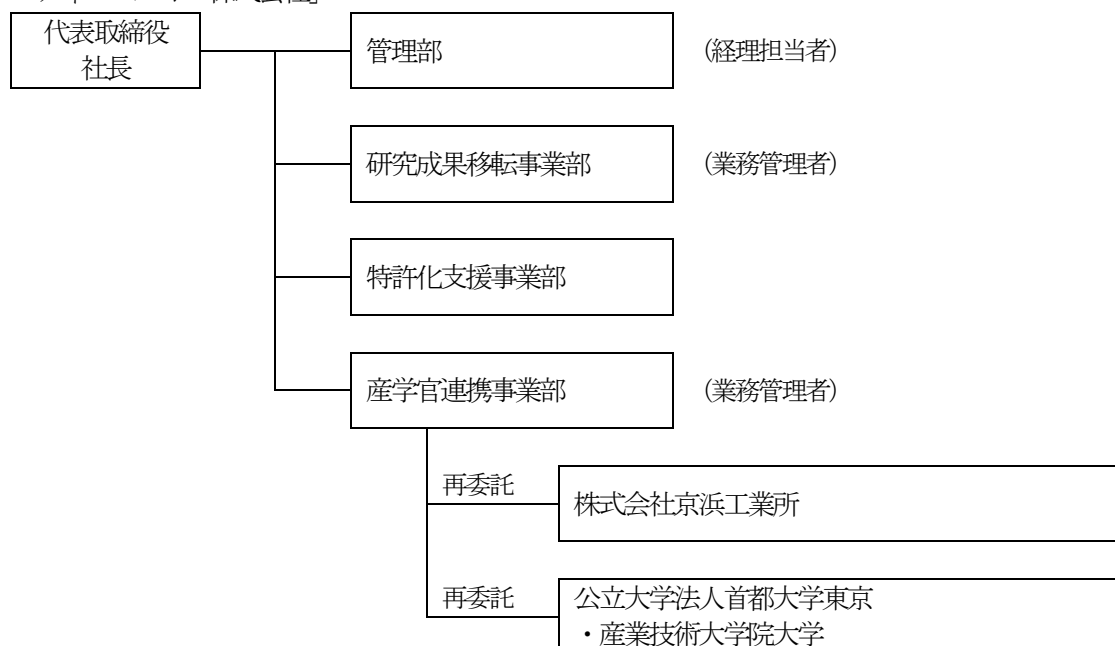
1）研究組織（全体）



2）管理体制

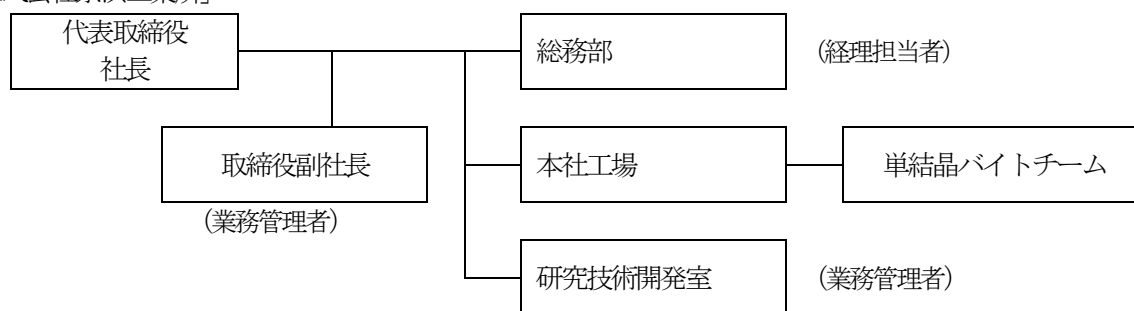
①事業管理機関

[タマティーエルオー株式会社]

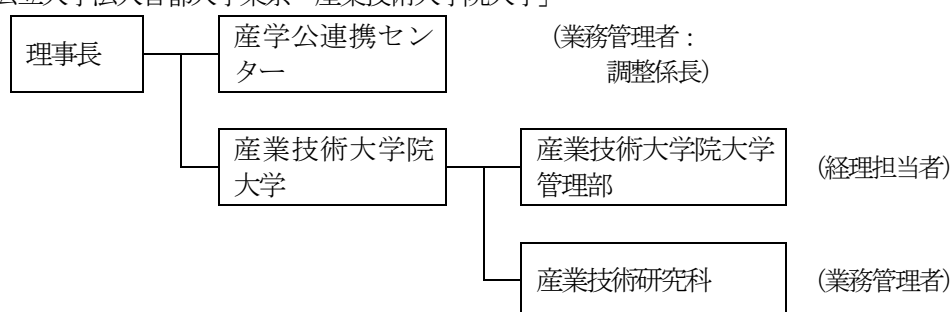


② 再委託先

【株式会社京浜工業所】



【公立大学法人首都大学東京・産業技術大学院大学】



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】タマティーエールオー株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容	年度
田島 伸明	産学官連携事業部・調査員	事業管理	H23、H24
武田 隆	特許化支援事業部長	事業管理	H25

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容	年度
田端 秀輝	産学官連携事業部・調査員	研究開発	H23

【再委託先】

(研究員)

株式会社京浜工業所

氏名	所属・役職	実施内容	年度
内田 亨	取締役副社長	統括	
佐藤 修之	研究技術開発室長	研究開発	
内田 大介	研究技術開発室・TL	研究開発	
岩田 雅之	研究技術開発室	研究開発	H25
池戸 康二	単結晶バイトチーム・TL	研究開発	
田中 裕樹	単結晶バイトチーム	研究開発	

公立大学法人首都大学東京・産業技術大学院大学

氏名	所属・役職	実施内容	年度
橋本 洋志	産業技術研究科 教授	副統括	
越水 重臣	産業技術研究科 准教授	研究開発	
舘野 寿丈	産業技術研究科 准教授	研究開発	
村尾 俊幸	産業技術研究科 助教	研究開発	H23、H24

(3) 他の指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
内田 亨	株式会社京浜工業所 取締役副社長	P L
橋本 洋志	公立大学法人首都大学東京・産業技術大学院大学 産業技術研究科・教授	S L
内田由美子	株式会社京浜工業所 代表取締役社長	
佐藤 修之	株式会社京浜工業所 研究技術開発室長	委
内田 大介	株式会社京浜工業所 研究技術開発室	委
岩田 雅之	株式会社京浜工業所 研究技術開発室	委
池戸 康二	株式会社京浜工業所 単結晶バイトチーム・T L	委
田中 裕樹	株式会社京浜工業所 単結晶バイトチーム	委
越水 重臣	公立大学法人首都大学東京・産業技術大学院大学 産業技術研究科・准教授	
舘野 寿丈	公立大学法人首都大学東京・産業技術大学院大学 産業技術研究科・准教授	
藤原 隆之	凸版印刷株式会社 総合研究所・リーダー研究員	アドバイザー
國岡 達也	日本電信電話株式会社 N T T環境エネルギー研究所・主幹研究員	アドバイザー
村尾 俊幸	早稲田大学 理工学術院 次席研究員	アドバイザー (H25)
井深 丹	タマティーエルオー株式会社 代表取締役会長	
山県 通昭	タマティーエルオー株式会社 代表取締役社長	
松永 義則	タマティーエルオー株式会社 研究成果移転事業部長	
田島 伸明	タマティーエルオー株式会社 産学官連携事業部	事務局 (H23, H24)
武田 隆	タマティーエルオー株式会社 特許化支援事業部長	事務局 (H25)

1－3 成果概要

【粗加工の平準化のための非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムの開発】

①ダイヤモンドバイトの製造工程の電子マニュアル作成

新人技能者がダイヤモンドバイトの製造工程を直感的に理解できることが可能となるように、3D 動画や 3D PDF ファイルとリンクした電子マニュアルを作成した。

②テーブル研磨面（1 1 1）の結晶方位解析

研磨されたテーブル面が（1 1 1）面からわずかに傾いた面となることが、熟練技能者から抽出された暗黙知であるが、未熟練技能者にこれを伝授する場合、定量的にどれくらい傾いた面なのかを目安として知っておく必要がある。熟練技術者が製作したダイヤモンドバイトのテーブル研磨面の、（1 1 1）に対する結晶方位のずれ（＝傾き）を走査電子顕微鏡に付設した EBSD（後方散乱電子回折）装置により測定したところ、その値は平均値で 11.7 度傾斜していることが判明した。

③ダイヤモンド結晶軸推定を支援する教材開発

新人技能者がダイヤモンド研磨の知識を効率よく学べる教材を熟練技能者の意見を参考に開発した。「ダイヤモンド結晶構造」、「ダイヤモンド原石モデル」と「テーブル研磨面」を関連付けて、学習することができる Web 教材になっている。

④スカイフ盤作業の 3D 動画マニュアルの作成

技能を習得するためには、実際にその作業をやってみることが一番重要であるが、コツや勘所を押さえてから作業に臨むことで習熟のスピードを上げられると考え、スカイフ盤を使ってテーブル面研磨を行う工程について、約 2 分間の 3D 動画マニュアルを作成した。

【粗加工の高速化に必要なレーザー加工技術の開発】

①レーザーによる任意刃先形状加工の妥当性確認

異なる 2 つの任意刃先形状を加工することにより、3D-CAD 図やレーザーパラメータを加工する形状に合わせて変えれば問題なく任意刃先形状の加工が行えることがわかった。

②レーザー加工時におけるカメラ中心位置による加工開始点の確立

カメラ中心に加工開始位置を目視で持ってくることにより加工がよりスムーズに行えるようになり、また、再加工を行いたい場合も加工位置を容易に合わせられるようになった。

③加工熟練技術者/非加工熟練者による手加工との比較

現状の工程と作業別作業時間を調査し、レーザー加工との比較を行った。その結果レーザーを取り入れると、二工程での大幅な時間短縮に繋がり、全体で 28～35%の効率化に成功した。

【任意刃先形状の加工可能な 2 軸精密制御スカイフ加工技術の開発】

①新機械による形状別による任意曲線バイトの製作

超精密ダイヤモンド研磨機にて、座標データより加工プログラムを作成することで、目標通りの形状に加工できることを確認し、異なる形状でも問題無く製作ができることを証明した。

②新機械による任意曲線バイトの評価

試作したダイヤモンドバイトを、試作開発した任意刃先形状バイト用精密測定装置によって、最終評価を行ったところ、本研究目標であった形状精度 $0.15\mu\text{m}$ 以内に製作できることを証明した。

【精密加工のための機上形状測定と補正技術の開発】

① 機上形状測定・形状補正システム構成

- ・機上形状測定・補正システムと、加工後の形状評価システムを統合したシステム構成を確立した。

② 顕微鏡画像による形状測定・補正量提示手法の確立

- ・光学顕微鏡によるバイト先端形状の観察画像から、画像処理によってバイト輪郭点群データを抽出し、目標形状との比較によって誤差量を算出して提示するまでの一連の処理方法を確立した。

③ 光学顕微鏡画像による形状計測の試験

- ・50 倍の対物レンズおよび 100 倍の対物レンズを装着した光学顕微鏡により、先端半径が異なる（最小のものは半径 $2\mu\text{m}$ 以下）バイト先端形状を計測し、それぞれの明確な輪郭点群データを得ることができた。
- ・バイトとテーブル面の設置角度を変えた実験を行い、計測の際のバイト設置角度誤差、バイトをホルダに接着させる際の誤差を、十分に許容できることを確認した。
- ・透過照明および落射照明を変えて計測し、いずれの照明方法であっても、明確な輪郭点群データを得ることができることを確認した。

④ 顕微鏡画像による補正量算出の精度評価

- ・抽出された輪郭点群データに、直線および円をフィッティングさせて、バイト先端半径と開き角度を算出する方法を確立した。
- ・目標形状を 3D-CAD によってモデル化しておき、これを計測データにフィットさせて、計測データと目標形状との誤差をカラーマップによって表示する方法を確立した。
- ・レーザー顕微鏡、機上顕微鏡、光学顕微鏡のそれぞれで、同一のバイト（先端半径約 $5\mu\text{m}$ ）を、開発したシステムを使用して計測および補正量を算出して比較した。この結果、レーザー顕微鏡と機上顕微鏡での差は先端半径で $5\mu\text{m}$ 程度となったが、レーザー顕微鏡と光学顕微鏡での差は先端半径で $2\mu\text{m}$ 以下となり、機上顕微鏡を改良することで、正確さを改善できることを明らかにした。
- ・機上顕微鏡とレーザー顕微鏡を併用した活用により、作業の効率化と十分な品質保証の両方を実現できることを確認した。

⑤ 機上計測に基づく補正量提示による作業時間削減の評価

- ・加工機およびレーザー顕微鏡それぞれにおいて、バイトの設置・調整と取り外し作業の時間を導出して評価した結果、この補正技術により、仕上げ作業の繰り返し 1 回につき、約 30 分程度の時間短縮になることが分かった。
- ・短縮できる作業の大部分は熟練度に影響される作業であり、この補正技術により作業条件が緩和され、作業効率を大幅に向上できることが確認できた。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

所属：タマティーエルオー株式会社 特許化支援事業部長

氏名：武田 隆

電話：042-649-8461 FAX：042-649-8462

E-mail：takeda@tama-tlo.com

第2章 本論

2-1 粗加工の平準化のための非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムの開発

2-1-1 熟練技術者の結晶軸推定技術を取り入れた作業手順の確立のための研究

【はじめに】

(1) ダイヤモンドバイトの製造プロセス

ダイヤモンドバイトはアルミニウム合金や銅合金など軽金属の鏡面切削をするのに用いられる。工具刃先に用いられるダイヤモンドには天然ダイヤモンドと人造ダイヤモンドがある。人造ダイヤモンドに比べて天然ダイヤモンドの方が熟練技能者の経験とスキルを必要とする。図 2-1-1 にダイヤモンドバイトの一例を示す。このようなバイトの製造工程は、表 2-1-1 に示すようなプロセスで行われている。



図2-1-1 ダイヤモンドバイト

表2-1-1 ダイヤモンドバイトの製造工程

工程	内容	備考
① 原石セレクト	天然のダイヤモンド原石からバイト形状に適した原石を選択する。	目利きが必要 <u>熟練技能を要す</u>
② テーブル研磨	テーブル（工具すくい面のこと、以下テーブルと呼ぶ）を形成するための研磨を行う。	ダイヤモンド加工 <u>熟練技能を要す</u>
③ 裏磨り	焼結時に抜けないようにテーブル裏面を三面に研磨する。	ダイヤモンド加工
④ 板軸加工	板軸と呼ばれる焼結時の治具を製作する。	
⑤ 焼結	板内にダイヤモンド原石を置いて焼結し固定する。	
⑥ 板軸セッティング	板軸にダイヤモンドの位置を調整しながら、銀ロー、挟みこみ、カシメ止め等で固定する。	
⑦ 横面研磨	ボンド部をやすりで落とし、ダイヤモンドを露出させる。その後で横面を研磨する。	
⑧ 多面R加工	設定寸法のゲージを使用し、投影機にて確認しながら研磨を行う。7つの面を平面研磨し、円弧形状に近づける。	ダイヤモンド加工 <u>効率化に寄与する</u>
⑨ 完全R加工	立型スカイフ盤を使って、7面研磨の状態から完全円弧形状に研磨する。	ダイヤモンド加工 <u>効率化に寄与する</u>
⑩ テーブル刃付	ダイヤモンドに刃先をつけるための研磨を行う。	ダイヤモンド加工
⑪ 本軸セッティング仕上げ	刃付を行ったダイヤモンドを本軸（バイトのこと）にアルゴン溶接やロー付などで固定する。	

表 2-1-1 の工程の中でも特に熟練を要する作業は工程①②である。①の原石セレクトでは、数多くあるダイヤモンド原石の中から所望するバイト形状に加工できるものを見つけ出す技能が必要になる。②のテーブル研磨では、ダイヤモンド原石の研磨加工方向を見出し、できるだけ広い面積のテーブル面を効率よく研磨する必要がある。刃先のチッピング（欠け）を防ぎながら、鋭利な刃先形状をスカイフ盤の研磨により成形する。そこで、非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムに関する以下の3項目について、教材開発を行った。

- ①ダイヤモンドバイトの製造工程の電子マニュアル作成
- ②ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得するための教材開発
- ③スカイフ盤作業の3D動画マニュアルの作成

（2）熟練技能の必要性と問題点

ダイヤモンドは、結晶面により加工の難易が大きく異なる上、図 2-1-2 に示すようにダイヤモンド原石は個々に形状がばらばらである。熟練者は、図 2-1-3 に示すように目視で素材原石の結晶面を経験により推定し、加工面(111)を決定している。さらに素材原石の形状から加工量を経験により推定し高精度かつ高効率に加工している。



図2-1-2 ダイヤモンド原石

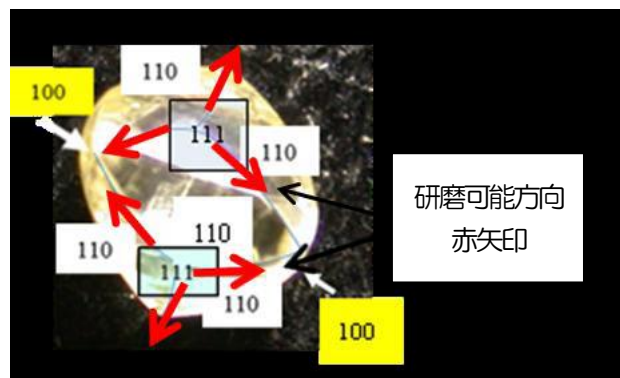


図2-1-3 ダイヤモンド原石に見る研磨可能方向

しかし、これらの作業は経験に基づくため、研磨可能方向の決定から加工に至るまでには、多くの時間を必要とする問題点がある。このような熟練技能を習得するまでに10年の経験が必要と言われている。さらに、熟練者の数が絶対的に不足しているという問題点がある。また、受注に迅速に対応するためには人員を増やさなければならないため非熟練者の加工スキルアップが必要であるが、非熟練者は経験不足により、

加工にばらつきが生じるという問題点がある。

以上のように作業者の作業支援、スキルアップ、人員増加などを解決しなければならず、このためには技能伝承、ならびに技能の平準化が課題となってきた。

（３）開発の目的

本研究テーマでは、熟練技術者の結晶軸推定技術を取り入れた作業手順を確立するための研究を行う。熟練技術者は、特にダイヤモンド結晶軸を主として見て、加工プロセスにより、ダイヤモンド結晶構造がどのように変化するかという経験に基づく知識を有している。これを形式知化して、その要点を非熟練技能者に効率よく伝承するダイヤモンド加工 Teaching システムの開発を本研究の目的としている。

【研究開発の方法】

①ダイヤモンドバイトの製造工程の電子マニュアル作成について

ダイヤモンドバイトの製造工程は表 2-1-1 で示した全 11 工程からなる。新人技能者がその製造工程を理解しやすくするため、3Dモデルと動画を利用した説明資料（パワーポイント形式）を作成した。一例として、工程⑧多面R加工のスライドを図 2-1-4 に示す。同教材は、3D 動画ファイルや 3D PDF ファイルへリンクされており、それらを新人技能者がこの資料で学習することで工程の内容を直感的に理解できることを可能とした。本説明資料について、京浜工業所の熟練技能者にご意見を伺い、説明文や文言の修正を重ねて完成させた。

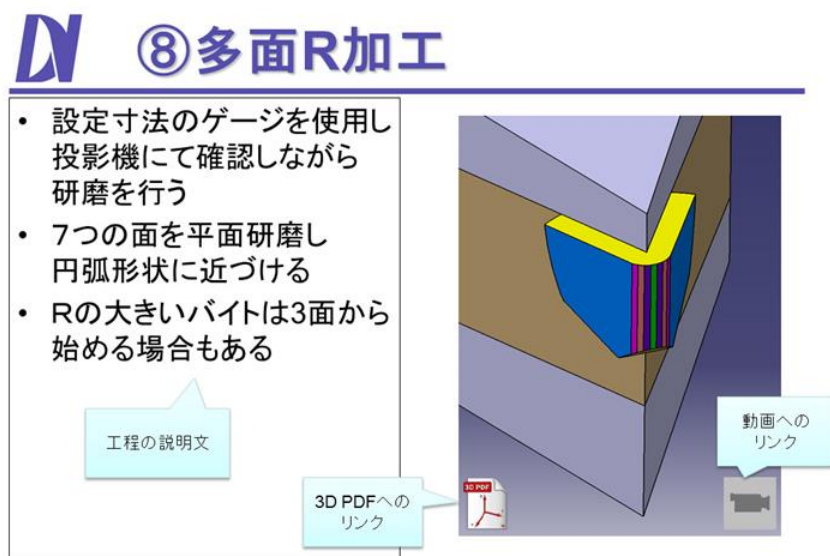


図 2-1-4 ダイヤモンド製造工程 多面R加工の説明スライド

②テーブル研磨面（1 1 1）の結晶方位解析について

これまでにダイヤモンドバイトの製造に携わる熟練技能者にインタビューなどを行い、暗黙知の抽出を試みてきている。インタビューの結果、テーブル面研磨では、以下の点が重要であることが判明した。この知見を次章で述べる教材開発に反映させている。

- (110) は5～10° 傾けると1方向にのみ削れる。
- 傾きをそれ以上に大きくすると色々な方向に削れてしまう。
- (100) も同様の性質を持つ。
- この性質を巧みに利用して、最初にテーブル面（すくい面）の研磨を行っている。

研磨されたテーブル面が（1 1 1）面からわずかに傾いた面となることが熟練技能者から抽出された暗黙知であるが、非熟練技能者にこれを伝授する場合、定量的にどれくらい傾いた面なのかを目安として知っておく必要がある。そこで、本研究では、熟練技術者が製作したダイヤモンドバイトのテーブル研磨面の、（1 1 1）に対する結晶方位のずれを走査電子顕微鏡に付設した EBSD（後方散乱電子回折）装置により測定した。テーブル研磨面上の5か所を測定し、得られた EBSD 像と結晶方位の指数を関連付けた結果を表 2-1-2 に示す。同表に示すように研磨面は（1 1 1）面に対して、平均値で 11.7 度傾斜していることが判明した。また、その標準偏差 σ は 0.2 であった。

測定点	オイラー角			(111)とNDとのなす角
	$\psi 1$	ϕ	$\psi 2$	
1	86.5	44	38.4	11.8
2	85.7	43.7	38.9	12.0
3	85.5	44.1	38.9	11.6
4	85.9	44.2	38.8	11.5
5	85.4	43.9	39.2	11.7
平均値				11.7
σ				0.2

表 2-1-2 各測定点のオイラー角および（111）とNDとのなす角

③ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材の開発について

数多くあるダイヤモンド原石の中からダイヤモンドバイトの加工に適した原石をセレクトするのが、製造工程の最初であるが、そこでは長年の経験で培った目利きの能力が必要となる。熟練技能者と新人技能者のインタビュー比較から、この原石セレクトが最も経験による違いが現れるということが判明した。熟練技能者は原石から結晶面をすぐに見出せるが、新人技能者には結晶面が全く見えないのである。さらに、ダイヤモンドバイトを研磨する上で、ダイヤモンドの結晶構造を理解しておくことは必須である。ダイヤモンドは結晶構造により研磨性が著しく異なるためである。どの結晶面を研磨するのかによって、研磨可能方向が決まってしまう。しかしながら、ダイヤモンド結晶構造は平面的な図解による書物で学んでもなかなかイメージしにくいといった問題点がある。ダイヤモンド原石はその形状により大きく 4 分類されるが、そのいずれもが 12 個の結晶面から形成され、研磨に関する規則性も共通である。研磨の知識を正しく習得しない限り、ダイヤモンドバイトの製造における技能の熟達はあり得ない。そこで新人技能者がダイヤモンド研磨の知識を効率よく学べる教材を熟練技能者の意見を参考に開発した。

具体的には、図 2-1-5 に示すような「①ダイヤモンド結晶構造」と「②ダイヤモンド原石モデル」と「③テーブル研磨面」を関連付けて、学習することができる Web 教材を作成した。図 2-1-6 には開発した教材のポータル画面を示す。5 種類の天然ダイヤモンド原石（ラウンド型、八面体型、フラット型、ロング型 1、ロング型 2）と人造ダイヤモンド（タイプ 1、タイプ 2）について、それぞれの結晶面（100）（110）（111）を色分けして示し、その研磨方向を矢印で示している。

図 2-1-7 には、ダイヤモンド結晶面の研磨に関する教材の一部を示す。この教材ではコンピュータ内でのいろいろな角度からダイヤモンド結晶構造を自由に見られるようになるメリットがあるだけでなく、研磨方向を選ぶ（クリックする）ことで研磨面が消れていく様子が理解できるようになっている。また、原石種別と製作されるダイヤモンドバイトの関連も解説している。

本教材は、新人技能者がダイヤモンドに関する知見を学習するのに用いることを想定しており、経験の乏しい非熟練技能者の学習効率向上に寄与するものと期待できる。また、この教材についても京浜工業所の

熟練技能者や新人技能者らの意見を取り入れながら、わかりやすいユーザーインターフェースにするなどの改善を行った。熟練技能者にインタビューをするうちに有用なコメント（ダイヤモンド研磨に関するコツやノウハウ）も聞けたので、それらコメントも「ベテラン職人からのコメント」として表示するように工夫した。

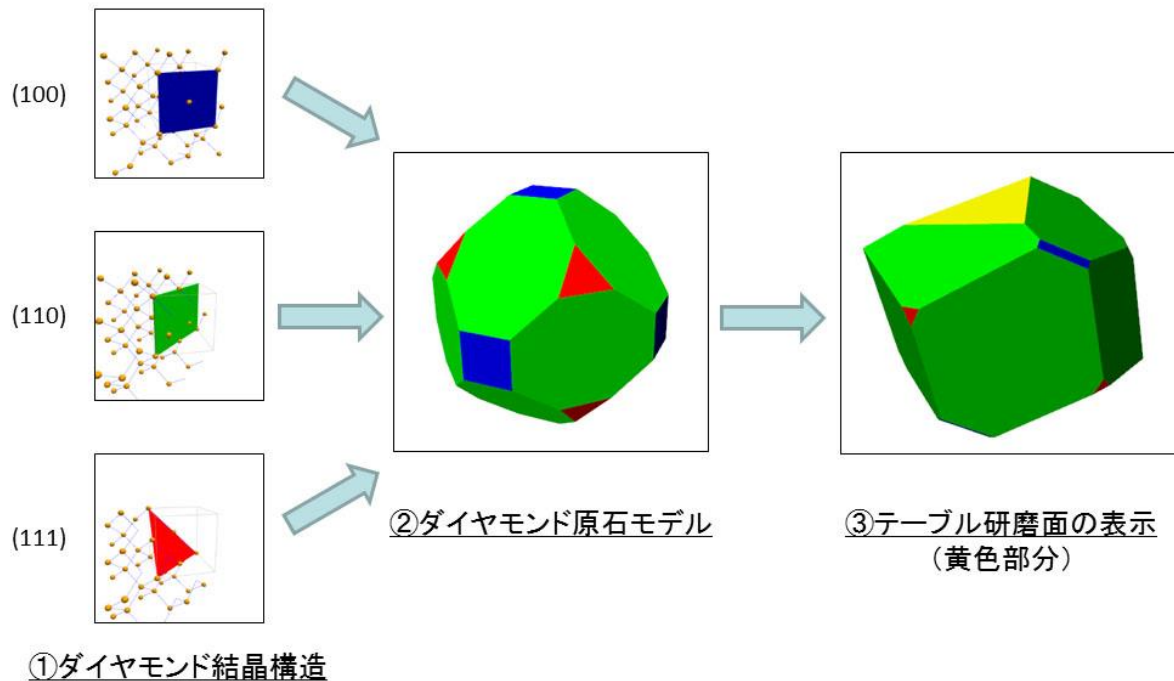


図 2-1-5 ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材の構成

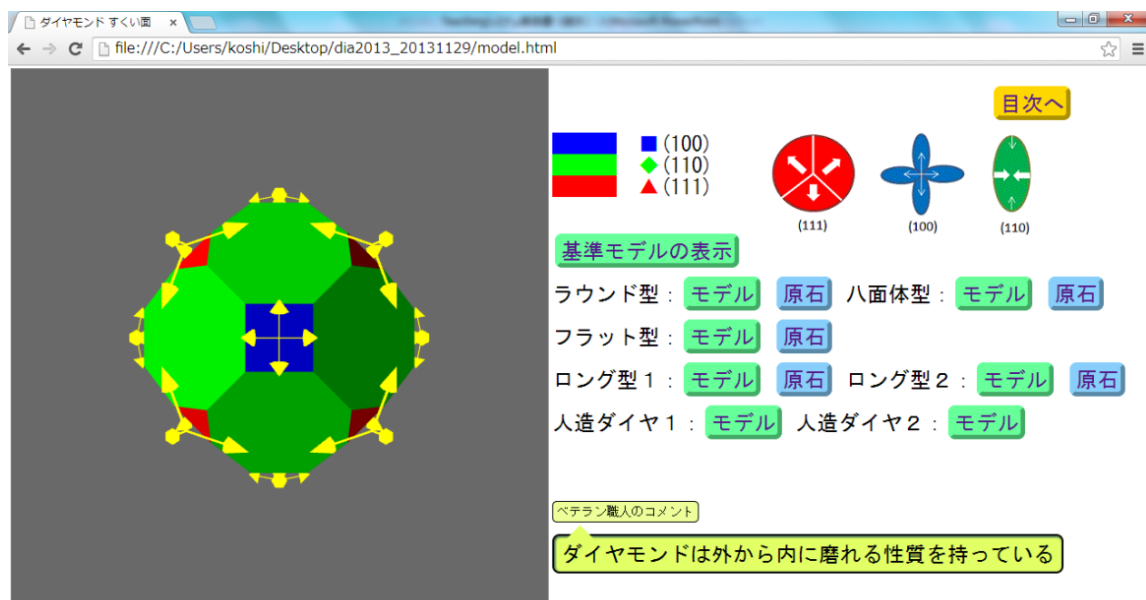


図 2-1-6 ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材のポータル画面

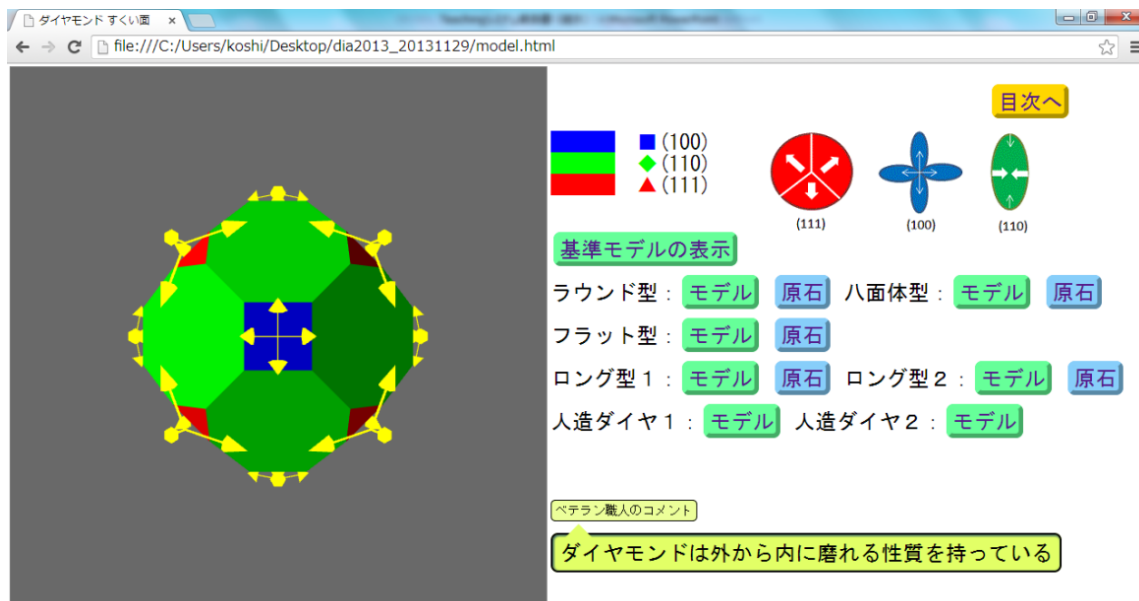


図2-1-7 ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材の内容

④スカイフ盤作業の3D動画マニュアルの作成について

技能を習得するためには、実際にその作業をやってみることが一番重要であるが、コツや勘所を押さえてから実作業に臨むことで習熟のスピードを上げられると考えた。それにより、むやみやたらな反復練習や試行錯誤を削減することが期待できる。

本研究では、スカイフ盤を使ってテーブル面研磨を行う工程について、約2分間の3D動画マニュアルを作成した。図2-1-8にそのイメージを示す。この動画マニュアルの特徴としては、新人技能者が工程の手順に沿って、そのコツやノウハウが学べるようなWeb教材になっている点である。また、3D-CADモデルを使っているので、他の工程も同様の手段を用いて動画マニュアルが比較的に簡単につくれるというメリットもある。今後の技能伝承の一助としたい。



図2-1-8 スカيف盤作業の3D動画マニュアル

【研究開発の成果】

①ダイヤモンドバイトの製造工程の電子マニュアル作成について

新人技能者がダイヤモンドバイトの製造工程を理解しやすくするため、3Dモデルと動画を利用した説明資料（パワーポイント形式）を作成した同教材は、3D 動画ファイルや 3D PDF ファイルへリンクされており、それらを新人技能者がこの資料で学習することでダイヤモンドバイトの製造工程の内容を直感的に理解できることを可能とした。本説明資料について、京浜工業所の熟練技能者にご意見を伺い、説明文や文言の修正を行っている。

②テーブル研磨面（1 1 1）の結晶方位解析について

研磨されたテーブル面が（1 1 1）面からわずかに傾いた面となることが、熟練技能者から抽出された暗黙知であるが、未熟練技能者にこれを伝授する場合、定量的にどれくらい傾いた面なのかを目安として知っておく必要がある。そこで、今年度は、熟練技術者が製作したダイヤモンドバイトのテーブル研磨面の、（1 1 1）に対する結晶方位のずれ（＝傾き）を走査電子顕微鏡に付設した EBSD（後方散乱電子回折）装置により測定したところ、その値は平均値で11.7度傾斜していることが判明した。

③ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材の開発について

ダイヤモンド原石はその形状により大きく4分類されるが、そのいずれもが12個の結晶面から形成され、研磨に関する規則性も共通である。研磨の知識を正しく習得しない限り、ダイヤモンドバイトの製造における技能の熟達はあり得ない。そこで新人技能者がダイヤモンド研磨の知識を効率よく学べる教材を熟練技能者の意見を参考に開発した。具体的には、「ダイヤモンド結晶構造」と「ダイヤモンド原石モデル」と「テーブル研磨面」を関連付けて、学習することができる Web 教材を作成した。新人技能者がダイヤモンド結晶面の研磨に関する知識を学習するために用いることを想定している。

④スカيف盤作業の3D動画マニュアルの作成について

技能を習得するためには、実際にその作業をやってみることが一番重要であるが、コツや勘所を押さえてから作業に臨むことで習熟のスピードを上げられると考えた。本研究では、スカيف盤を使ってテーブル面研磨を行う工程について、約2分間の3D動画マニュアルを作成した。この動画マニュアルの特徴としては、新人技能者が工程の手順に沿って、そのコツやノウハウが学べるような Web 教材になっている点である。3D-CAD モデルを使っているため、他の工程にも同様に展開でき、各工程ごとの動画マニュアルが比較的簡単につくれるというメリットもある。

【まとめ】

本研究テーマでは、熟練技術者の結晶軸推定技術を取り入れた作業手順を確立するための研究を行った。熟練技術者は、特にダイヤモンド結晶軸を主として見て、加工プロセスにより、ダイヤモンド結晶構造がどのように変化するかという経験に基づく知識を有している。これを形式知化することにより、その要点を非熟練技能者に効率よく伝承するダイヤモンド加工 Teaching システムの開発を本テーマの目的としている。最終年度には、非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムに関する以下の3項目について、教材開発を行った。今後は、作成した教材を実際に新人技能者らに使ってもらい、さらなる改善をしていきたい。

①ダイヤモンドバイトの製造工程の電子マニュアル作成について

新人技能者がダイヤモンドバイトの製造工程を理解しやすくするため、3Dモデルと動画を利用した説明資料（パワーポイント形式）を作成した。同教材は、3D 動画ファイルや 3D PDF ファイルへリンクされており、それらを新人技能者がこの資料で学習することで、ダイヤモンドバイトの製造工程の内容を直感的に理解できることを可能とした。

②ダイヤモンド研磨の基礎知識を習得する教材の開発について

ダイヤモンド原石を選定する場合やダイヤモンドバイトを研磨する上で、ダイヤモンドの結晶構造を理解しておくことは必須である。しかしながら、ダイヤモンド結晶構造は平面的な図解による書物で学んでもなかなかイメージしにくいといった問題点がある。ダイヤモンド原石はその形状により大きく 4 分類されるが、そのいずれもが 12 個の結晶面から形成され、研磨に関する規則性も共通である。研磨の知識を正しく習得しない限り、ダイヤモンドバイトの製造における技能の熟達はあり得ない。そこで新人技能者がダイヤモンド研磨の知識を効率よく学べる教材を熟練技能者の意見を参考にして開発した。具体的には、「ダイヤモンド結晶構造」と「ダイヤモンド原石モデル」と「テーブル研磨面」を関連付けて、学習することができる Web 教材を作成した。新人技能者がダイヤモンド結晶面の研磨に関する知識を学習するために用いることを目的とする。

③スカイフ盤作業の 3D 動画マニュアルの作成について

技能を習得するためには、実際にその作業をやってみることが一番重要であるが、コツや勘所を押さえてから作業に臨むことで習熟のスピードを上げられると考えた。本研究では、スカイフ盤を使ってテーブル面研磨を行う工程について、約 2 分間の 3D 動画マニュアルを作成した。この動画マニュアルの特徴としては、新人技能者が工程の手順に沿って、そのコツやノウハウが学べるような Web 教材になっている点が挙げられる。

2-2 粗加工の高速化に必要なレーザー加工技術の開発

【はじめに】

単結晶ダイヤモンドバイトの製造方法はスカイフ盤での手加工が主体である。手加工による簡単な形状の粗加工でも3時間程度かかる。また任意曲線においての粗加工は、工程が複雑になるため加工時間が簡単な形状に比べ2倍程度増加してしまう。任意形状を加工するにあたり、機械で全ての加工を行うと数日かかることが予想され、製品価格も高くなってしまう問題がある。このような問題を解決する為に、素材メーカーにも使用されていることからレーザー加工装置が最も良い方法と判断した。

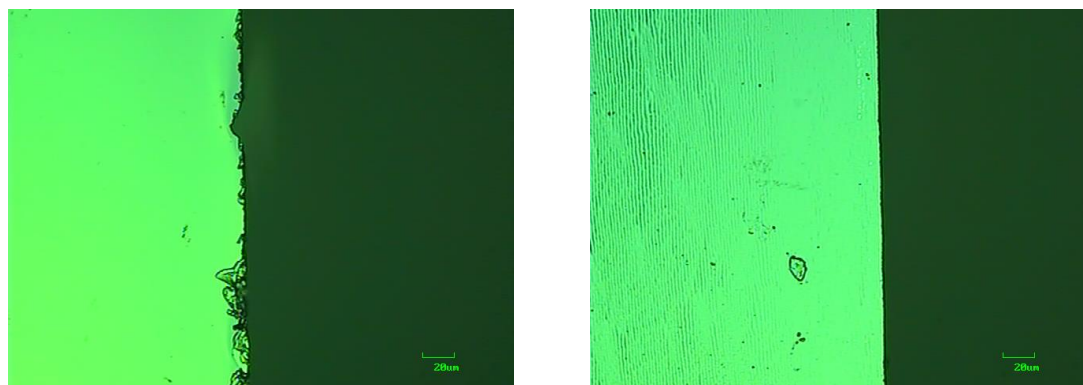
しかしながら、ダイヤモンドのレーザー加工では、加工時に発生する熱によりダイヤモンドが炭化し、加工表面に不要な炭化層が形成される。さらに加工時のレーザーの送りピッチに対応して、加工面に亀裂がはいったり、ギザギザな面になるという課題を持つ。

そこで、本研究テーマではレーザー切断した時に発生するダイヤモンドへのダメージを最小限にすべく、粗加工で残す取代を最小にするレーザースポット位置、パワー、送り速度などのレーザー加工条件の研究をし、粗加工の高速化を達成することを目的とする。任意刃先形状ダイヤモンドバイトの粗加工方式の確立に向けて実施した条件出し（レーザースポット位置・パワー・送り速度等）を複合的に行うことにより、最適な粗加工方式を確立する。

●本研究に用いるレーザー加工機の概要

(1) レーザー波長

本研究に適するレーザーとして高速かつコストを抑えられる波長 1064nm、532nm の YAG レーザーを検討し、波長の違いによるダイヤモンドへの影響を調べ（図 2-2-1）、より影響の少ない Green レーザーと呼ばれる第二高調波（波長 532nm）のレーザーを選定した。



波長 1064nm （Red レーザー加工面）

波長 532nm （Green レーザー加工面）

図 2-2-1 波長別レーザーによる影響(各 x600)

(2) レーザー加工装置の仕様

レーザーの方式はガルバノミラー方式である。ガルバノミラーを稼働させることでレーザー光を振り、図 2-2-2 のように 2 次元加工を行う。これにステージの Z 軸方向の移動を連動して動かすことにより、自動で 3 次元的加工を可能にした。加工効率を上げるため装置にはエアブローと吸塵用の穴があり、エアブローによってレーザー加工時に発生するデブリを吹き飛ばしワーク表面に付着するデブリを抑えながら加工を行う仕様になっている。また、加工開始点をカメラで確認し、任意の場所でも加工可能にした。装置全体の外観を図 2-2-3 に示す。

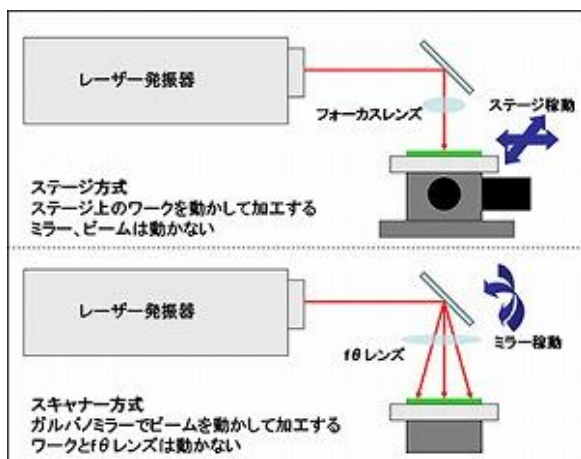


図2-2-2 ステージ方式とガルバノミラー方式の違い



図2-2-3 装置外観

レーザー波長 532nm、Q スイッチ式により最短 36nm のパルス幅にでき高ピークのエネルギのレーザーを照射可能である。レーザービーム径は約 $16\mu\text{m}$ である。

●2年度までの成果

(1)1 レイヤーにおける条件別の取り代の調査

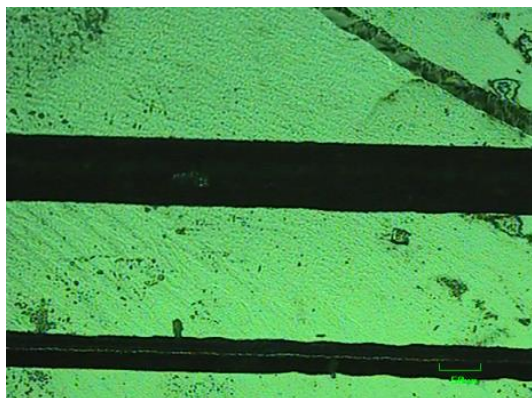


図2-2-4 1レイヤーでの
レーザー加工跡の観察(×300)

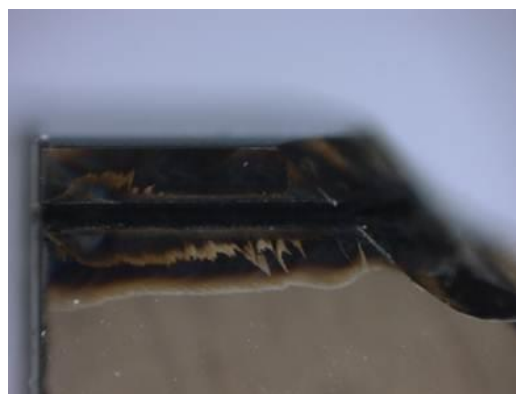


図2-2-5 悪条件によるダイヤへの影響
(×100)

レーザーによるダイヤモンドへの影響や除去量を調査するために周波数、レーザースピード、ラインギャップを変化させ、電流値は各周波数での最大値、Attenuation 値は1%、レイヤー数は1としダイヤモンド表面にレーザーを照射したものを図2-2-4に示す。使用ダイヤモンドはトーメイダイヤ株式会社のTMD-Ibで厚さ1.5mmを使用した。使用した3D-CAD図は幅0.1mm、長さ7mm、高さ1.9mmの直方体である。

調査の結果からダイヤモンドのエッジへの影響は周波数を小さくしレーザーピッチやラインギャップを調整することで抑えられ、除去量は周波数を大きくすることで増やせることがわかった。また、条件が悪いと図2-2-5のようにダイヤモンドが溶けてしまうことがある。

(2) レーザーによるダイヤモンド切断

上記の1レイヤーでの取り代の調査をもとに幅0.3mm、長さ7mm、高さ1.9mmの加工図を図2-2-6に示す。図2-2-6に3Dデータを用いてダイヤモンドを切断した。切断面のきれいさと加工時間の兼ね合いから、最適条件を導いた。その写真を図2-2-7に示す。

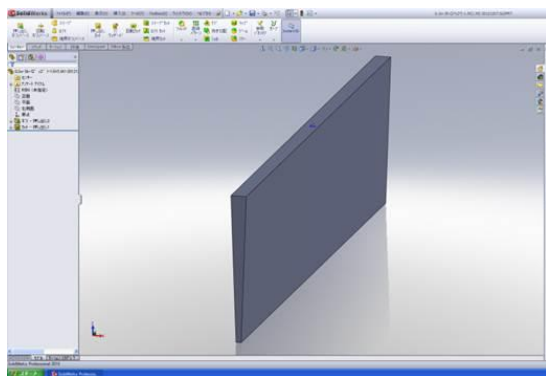


図2-2-6 切断用3D-CAD図

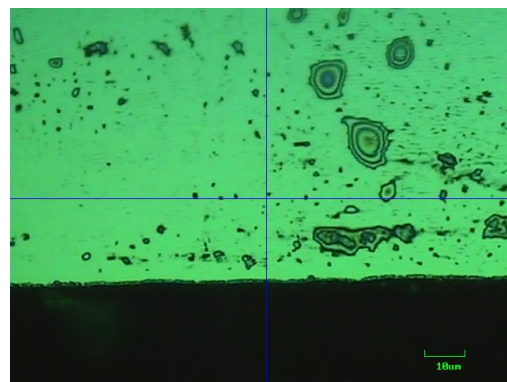


図2-2-7 切断後のエッジ部分 (×1500)

エッジ部に少し凹凸が見えるが $5\mu\text{m}$ 以内に抑えられており、当初の目標だった $10\mu\text{m}$ 以内を十分に満たしている。

(3) レーザーによる任意刃先形状ダイヤモンドバイトの形状加工

切断テストで得た結果を基に実際に任意刃先形状の加工を行った。使用した3D-CAD図を図2-2-8に示す。この図は曲線部分から 3.5mm 両端を伸ばし、加工幅は 0.3mm 、高さ 1.3mm となっている。

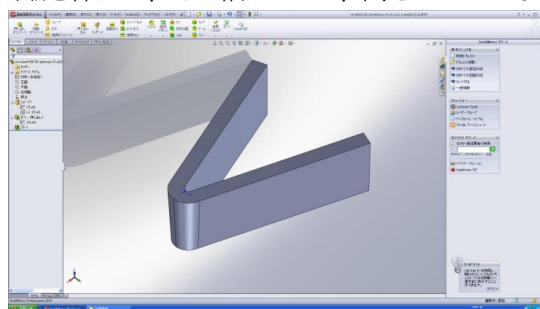


図2-2-8 任意刃先形状用3D-CAD図

図2-2-8を使用して条件C27-Q5-S100-A1-L10-Lg0.001-Ang0で加工したものが図2-2-9である。

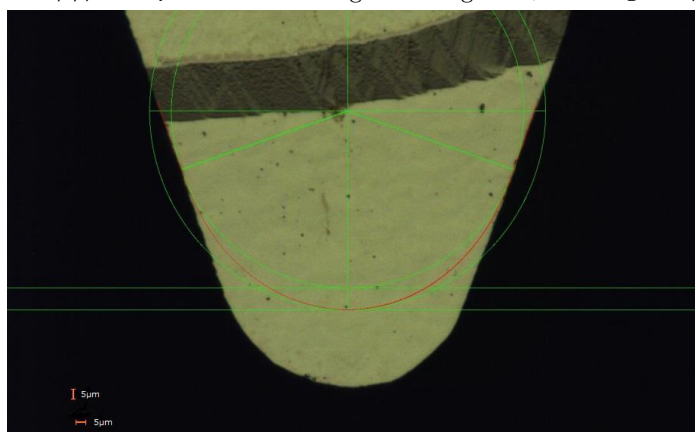


図2-2-9 任意刃先形状レーザー切断 (×1119)

図2-2-9で見てわかるように目標の形状よりも小さくなっている。これはレーザーの除去量による寸法の変化と思われる。取代は約 $40\mu\text{m}$ 程となった。形状やダイヤモンドへのダメージが少なく良い条件であると判断し、単純に3D-CAD図を目標寸法から外に 4mm オフセットし加工を行ったが、今度は約 $30\mu\text{m}$ 程取代が無くなってしまった。次に目標寸法より外に 1.5mm オフセットし、加工を行った結果を図2-2-10に示す。

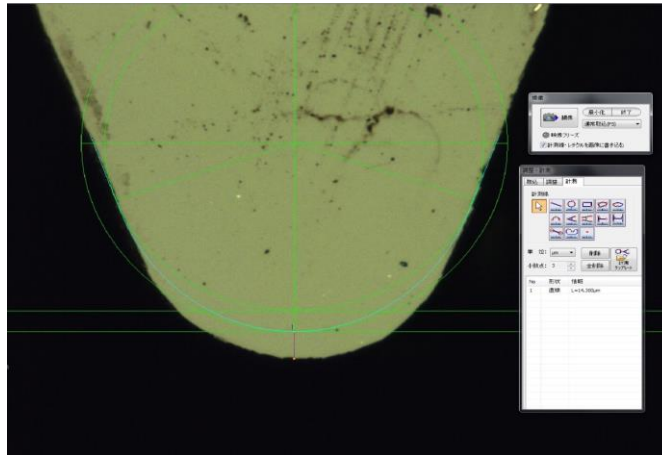


図2-2-10 任意刃先形状レーザー切断 (×1119)

図 2-2-10 から綺麗な曲線である事がわかる。また、エッジのチッピングやカケも $5\mu\text{m}$ 以内に収まっており、取代は約 $14\mu\text{m}$ と後工程に適した取代に加工することができた。加工時間も 219 秒と早く切断可能になり、4 分以内での粗加工を実現した。

【研究開発の方法】

最終年度での研究開発は、任意刃先形状の加工の妥当性確認、任意刃先形状バイトのレーザー加工の最適条件の追求のために次の3項目を実施した。

①レーザーによる任意刃先形状加工の妥当性確認

異なる2種の任意刃先形状加工を行いレーザー加工による任意刃先形状加工の妥当性を確認した。

②レーザー加工時におけるカメラ中心位置による加工開始点の確立

加工開始点の改善から最適且つ容易な加工方法を確立した。

③加工熟練技術者/非加工熟練者による手加工との比較

レーザー切断を行うことにより、現状の手加工での作業時間について比較を行った。

【研究開発の成果】

①レーザーによる任意刃先形状加工の妥当性確認

これまでに試作した任意刃先形状 (サンプル NO. 1) よりも刃先の小さい形状 (サンプル NO. 2) のレーザー加工を行った。使用した加工図を図 2-2-11 に示す。加工図は厚み 0.3mm 、高さ 1.3mm の図である。

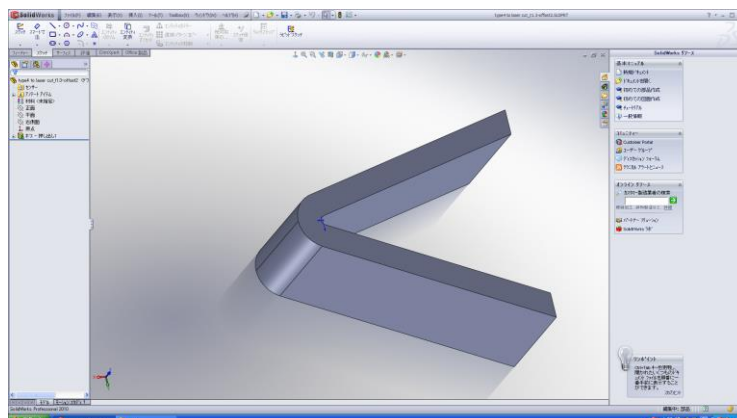


図2-2-11 サンプルNO.2用3D-CAD図

サンプル NO. 1 での最適条件での加工は、刃先がボロボロになってしまった。これはサンプル NO. 2 はサンプル NO. 1 よりも形状が小さいため、加工時に発生する熱の影響が原因と思われる。そこで新たに条件を選定し、熱影響を抑えるため周波数を 3kHz と小さくし、レーザーピッチとラインギャップを大きくすることで、一ヶ所にかかる熱影響を減らすことを目的に加工を実施した。加工結果を図 2-2-12 に示す。

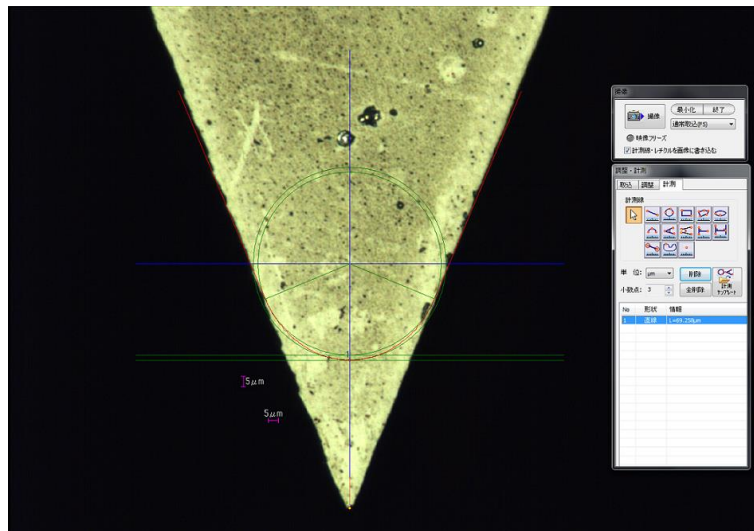


図2-2-12 でのレーザー切断 (×1119)

図 2-2-12 のように先端がほぼピン角になってしまった。これは 3D 加工図の刃先部分が小さすぎて、レーザー加工機で曲線部分のプログラムが認識できなかったことが原因と思われる。そこでサンプル NO. 1 のときのように図をオフセットしていき、その中でも 50 μm オフセットしたものがちょうど良い形状となった。加工結果を図 2-2-13 に示す。

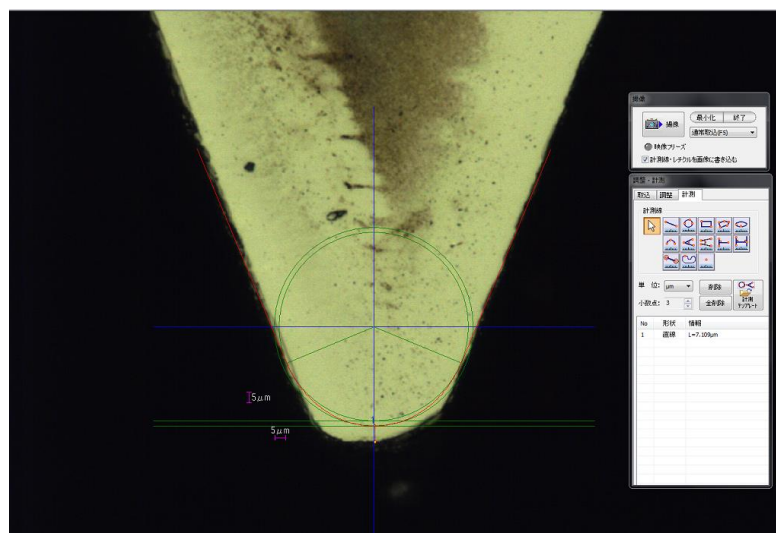


図2-2-13 を50 μm オフセットした図でのレーザー切断 (×1119)

図 2-2-13 より取代を約 7 μm にすることができた。また加工機にて仕上げ加工しやすい形状にすることができた。かかった加工時間は 204 秒でサンプル No. 2 の形状でも 4 分以内の加工を実現した。

これらのことから、異なる任意刃先形状の加工は形状によって 3D-CAD 図やレーザーパラメータの条件を変えることで問題なく行えることが確認できた。

②レーザー加工時におけるカメラ中心位置による加工開始点の確立

レーザー加工の際、通常は装置に搭載してあるカメラ中心が、3D-CAD 図加工図の中心となってしまう、その中心点から図の半分の長さ分移動しないと狙った位置に加工することができなかった。これでは加工開始点を探すのに手間がかかり、加工開始位置を間違えるといったミスも起こりやすくなる。そこで加工図の先端が加工開始位置となるよう、加工開始位置をレーザー加工命令用のコマンドファイルに座標を入力して機上カメラの中心が刃先先端となるようにした。サンプル No. 2 のデータにて加工したものを図 2-2-14 に示す。

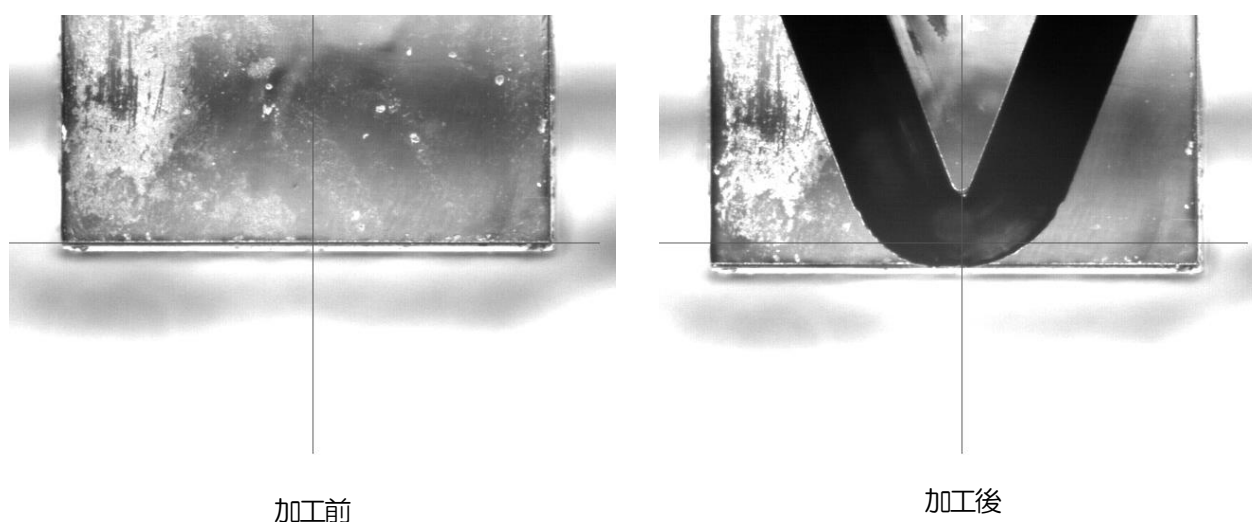


図 2-2-14 カメラ中心を加工開始位置にしての加工

③加工熟練技術者/非加工熟練者による手加工との比較

以上の結果より作業者別に現状での手加工の工程とその作業にかかる時間を調査し、試作したレーザー加工装置との加工時間をサンプル No. 2 の形状にて比較を行った。まとめたものを表 2-2-1 に示す。

表 2-2-1 各工程順序別作業時間表

順番	作業	熟練者 (min)	熟練者 ＋ レーザー (min)	非熟練者 (min)	非熟練者 ＋ レーザー (min)
①	横面粗加工	30	④⑥同時加工	40	④⑥同時加工
②	口ウ付け	10	10	20	20
③	横面加工	20	20	30	30
④	多面加工	35	①⑥同時加工	80	①⑥同時加工
⑤	すり上げ加工	20	20	40	40
⑥	任意刃先形状加工	60	4	160	4
⑦	テーブル研磨	10	10	15	15
合計		185	64	385	109

レーザー加工を使用すると表 2-2-1 の①④⑥の工程を同時に加工することが可能である。目標寸法に近い形状に加工できるため、⑥の任意刃先形状加工もやり易くなる。それだけでなく機械で行う為、ばらつきを抑える事ができ、安定した粗加工が可能になる。

表 2-2-1 から全工程完了時間は熟練者で 64min、非熟練者 109min となり、レーザー加工を取り入れた作業時間と比べると、熟練者が約 35%、非熟練者で約 28%に抑えることが実証できた。これは①④⑥の工程を同時に行うことで大幅な時間短縮に繋がったことが分かる。

【まとめ】

①レーザーによる任意刃先形状加工の妥当性確認

異なる 2 つの任意刃先形状を加工することにより、3D-CAD 図やレーザーパラメータを加工する形状に合わせて変えれば問題なく任意刃先形状の加工が行えることがわかった。小さい刃先形状のものは 3D-CAD 図をより大きくオフセットする必要がある。

②レーザー加工時におけるカメラ中心位置による加工開始点の確立

カメラ中心に加工開始位置を目視で持ってくることにより加工がよりスムーズに行えるようになり、また、再加工を行いたい場合も加工位置を容易に合わせられるようになった。

③加工熟練技術者/非加工熟練者による手加工との比較

現状の工程と作業者別作業時間を調査し、レーザー加工との比較を行った。その結果レーザーを取り入れると、二工程での大幅な時間短縮に繋がり、全体で 28～35%の効率化に成功した。

2-3 任意刃先形状の加工可能な2軸精密制御スカイフ加工技術の開発

【はじめに】

ディスプレイ等の光学関連では高精細化等と共に比例して、川下ユーザからのダイヤモンドバイトに求められる形状や精度の要求は徐々に高くなってきている。初年度に試作した機械装置「超精密ダイヤモンド研磨機」では、CNC5軸制御を用いることにより、刃先をR形状のみではなく任意刃先形状のダイヤモンドバイトの製作が可能である。この超精密ダイヤモンド研磨機は θ 旋回角度毎に半径方向の距離を連続的に変化させ、左右対称の形状を正確に繰り返すことにより、任意での動きが可能である。更に任意での動きをさせながら微小量の切り込みをすることにより、任意刃先形状に加工できる。また、2年度に行ったスカイフ盤の研究により、より高精度で安定したダイヤモンドバイトの製作が可能になった。この成果によりユーザからの多様なニーズに対応が可能となり、バイトにおける精度・形状のばらつきが生じにくくなることから、高い品質での生産が実現できる見通しがついた。

最終年度では、これまでの研究成果に基づいて、目標精度での加工方式を確立する。また、目標精度での加工方式の確立を検証するために、試作開発した任意刃先形状バイト用精密測定装置によって、試作したダイヤモンドバイトの最終評価を実施した。

任意形状を製作するには θ 旋回角度毎に半径方向の距離を連続的に変化させると共に、左右対称の形状を正確に繰り返す機能をもたせることが必要である。更に高精度をだすには微小量の切り込み機能が必要になってくる。

また、精密な任意刃先形状バイトを製作するには、機械の精度とスカイフ盤が重要になってくる。初年度に開発した試作機にて形状確認を行ってきた。機械の仕様を次に記す。

- ・ NC 制御装置・・・ FUNAC-31i
- ・ 軸構成・・・・・・ R θ 2 軸補間 + 3 軸CNC = CNC5 軸制御
- ・ 主軸回転数・・・・500～3000rpm
- ・ NC 軸構成

表2-3-1 NC 機構

軸	最小設定単位	制御モーター
A軸	0.0001°	サーボ
Z1軸	0.00001mm	サーボ
Z2軸	0.0001mm	サーボ
X軸	0.001mm	サーボ
Y軸	0.001mm	サーボ

- ・ リニアスケール・・・10nm 分解能 (Z1 軸)
- ・ 本体構造・・・・・・石定盤本体 ・ エアークッション

上記の仕様にて高精度な任意刃先形状の製造が可能であることを確認した。これを基に開発を進めてきた。

●これまでの成果

(1) 2 軸精密送り機構を有する超精密ダイヤモンド研磨機

初年度に 2 軸精密送り機構にて任意曲線形状に製作できる事を確認。これにより 2 軸精密送り機構の機能による製作が可能であることを実証した。サンプルバイトの全体図を図 2-3-1、刃先形状写真を図 2-3-2 に示す。



図2-3-1 サンプルNo.1 全体図

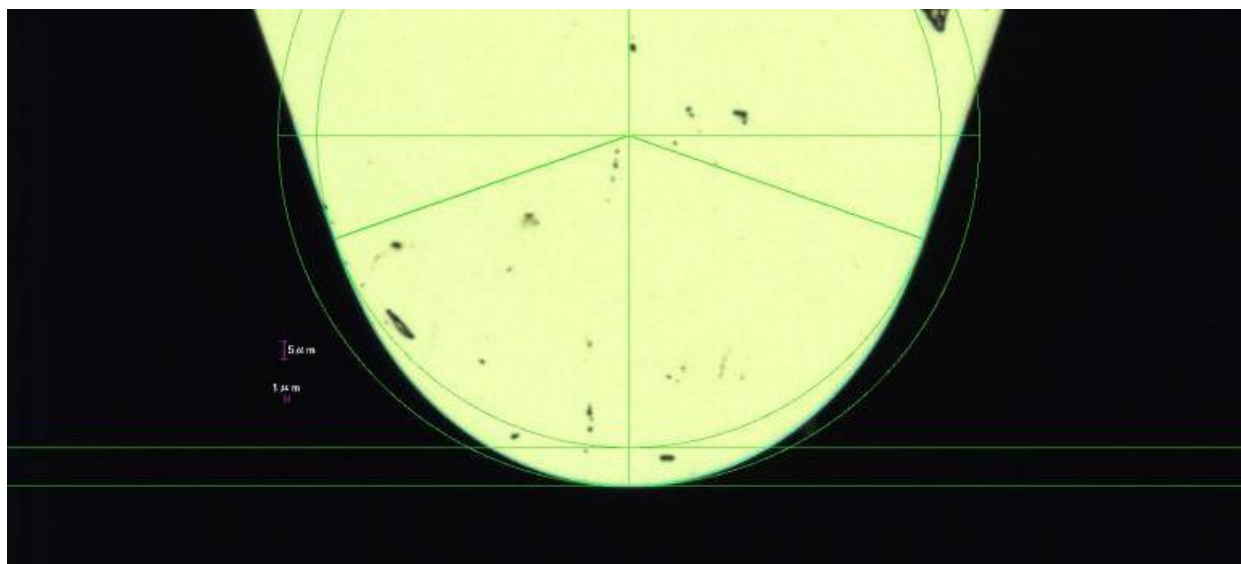


図2-3-2 サンプルNo.1 (×1227)

刃先部分を更に拡大したものを図 2-3-3 に示す。青い線が目標形状である。

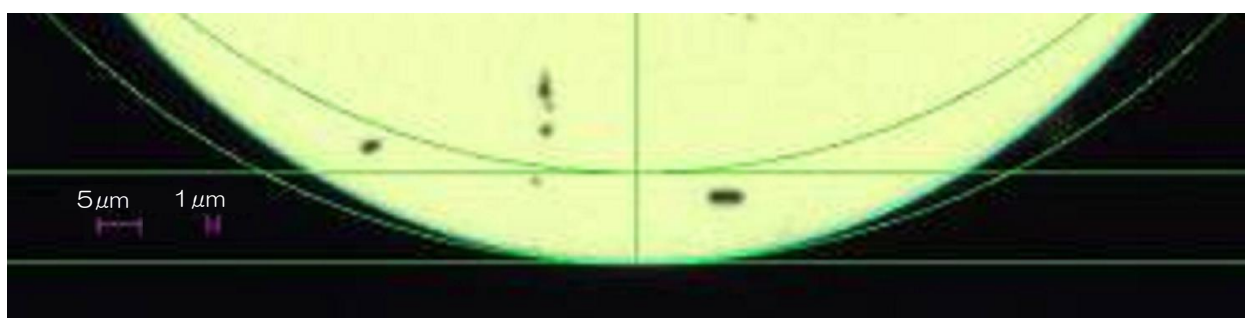


図2-3-3 サンプルNo.1 の刃先拡大写真

図 2-3-3 で確認できるように形状精度を $1\mu\text{m}$ 以下に抑える事ができた。

(2) スカイフ盤における形状精度の向上

形状精度 $0.15\mu\text{m}$ に収めるにはスカイフ盤の状態が大きく左右される。

スカイフ盤の状態に関連する項目として次のものがあげられる。

- ・ホイールにて使用する砥粒の違い
- ・スカイフ盤における平面度の向上

以上のことを研究し、実際に測定可能な R 形状バイトにて評価を行った。

図 2-3-4 に示すホイールによって、スカイフ盤の平面度を 1 メモリ $1\mu\text{m}$ のダイヤルゲージで、メモリが振れない状態にすることが可能になった。また、このホイールによって、スカイフ盤の修正を通常の 1/2 以下の作業時間に短縮することが可能になった。



図 2-3-4 CBN・SD ホイール

このホイールによって修正したスカイフ盤に $0\sim 1/4\mu\text{m}$ パウダーを使用することにより、R バイトにおけるウインドアングル 101° の範囲で、輪郭精度が 69nm に抑えることが可能になった。

測定データを図 2-3-5 に示す。

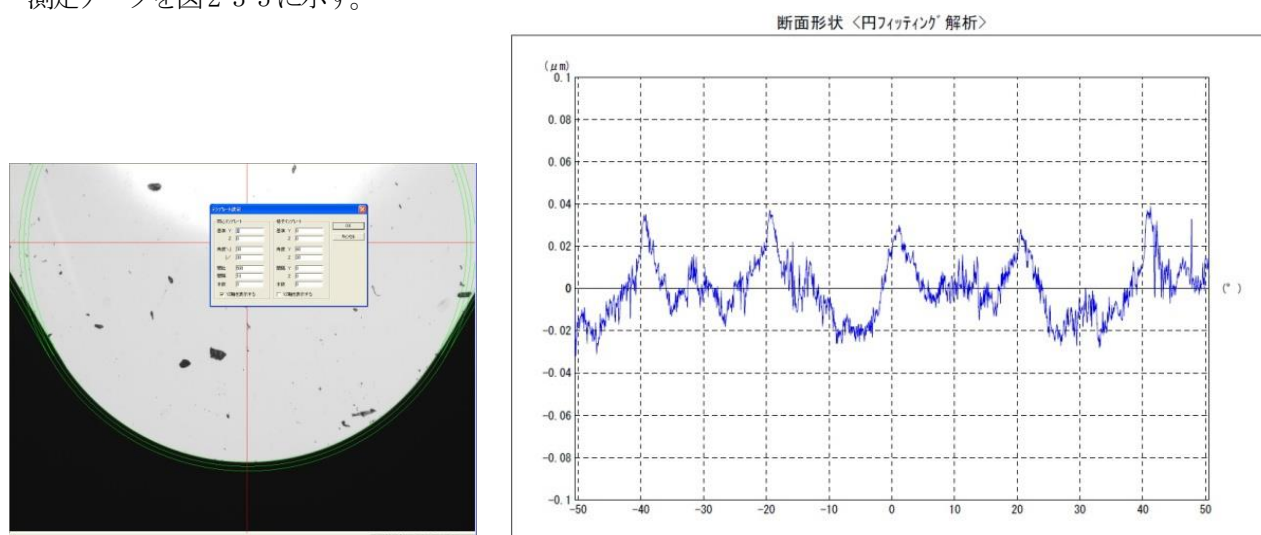


図 2-3-5 $0\sim 1/4\mu\text{m}$ パウダー使用時の測定

更に図 2-3-6 に示すようにスカイフ盤に外周からの粗いパウダーが溝に落ち、混入しないよう境界溝をいれ、 $0\sim 1/4\mu\text{m}$ パウダーをコーティングすることにより、粗加工と仕上げ加工をスカイフ盤を外さずに加工できるようにした。更には内外周の面の高さが同じなため、ツルーイング時に同時に修正ができるので、時間短縮や精度の安定化が可能となった。

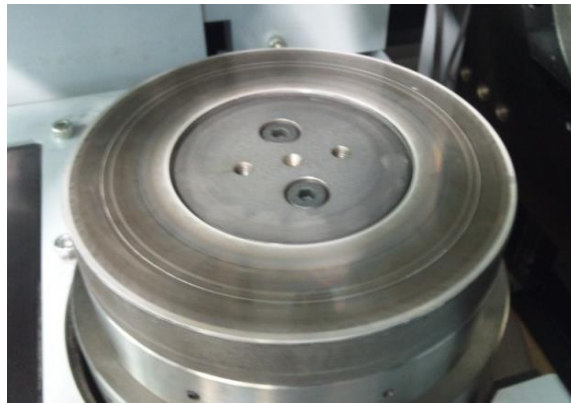


図2-3-6 境界溝スカ이프盤

以上のことを基に形状精度 $0.15\mu\text{m}$ の任意刃先形状バイトの開発を行った。

【研究開発の方法】

①新機械による形状別による任意曲線バイトの製作

妥当性確認の為、サンプル No. 1 以外の形状（サンプル No. 2）にて任意曲線バイトを製作し、機上カメラよりモニターのテンプレートにて形状確認。

②新機械による任意曲線バイトの評価

前年度までの研究を基に、今年度目標の任意形状 $\pm 0.15\mu\text{m}$ 以内のバイトの製作を行い、2-4 章にて開発した評価方法より、形状精度の評価を行う。

・フィッティング手順

(1) レーザテック社製のレーザ顕微鏡（OPTELCIS HYBRID）にて刃先を計測

(2) 計測データの輪郭部分を xy 座標データとして csv ファイルで出力

(3) 得られた座標データと目標値となる 3DCAD のデータをフィッティングソフト（SpGauge）にてフィッティング

座標データにする流れを図2-3-7に示す。

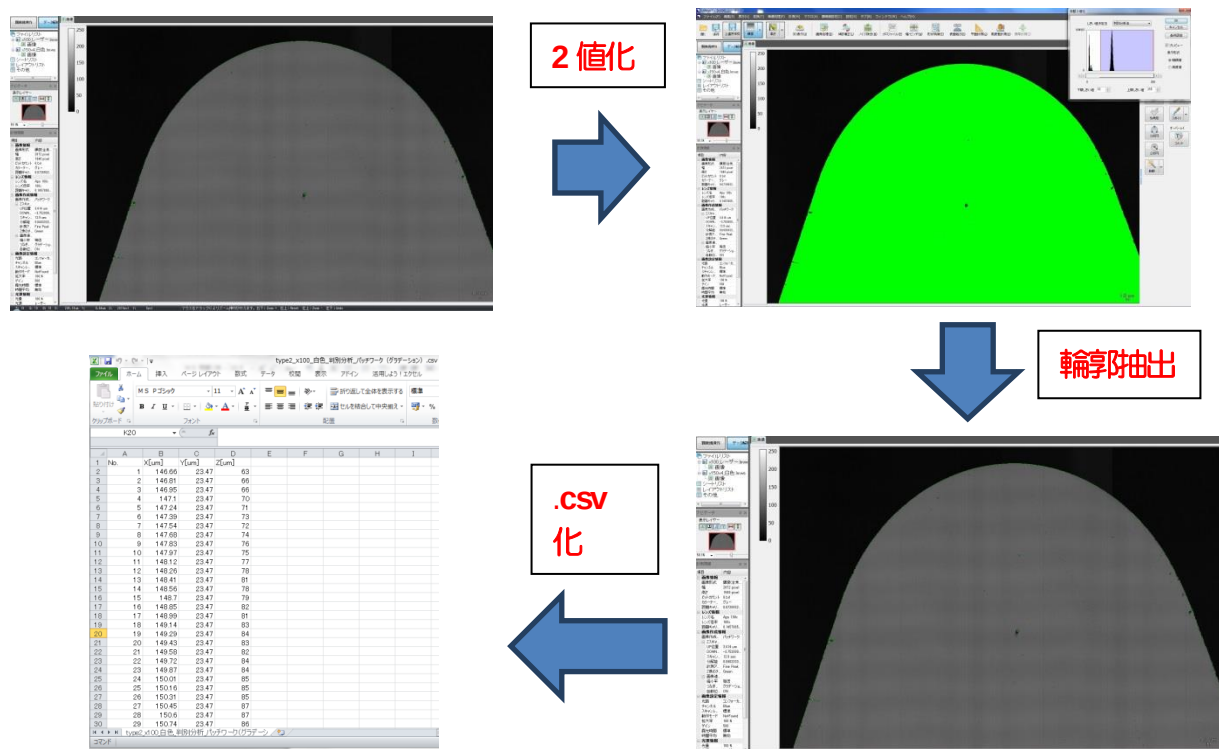


図2-3-7 レーザ顕微鏡によるtype2 バイトの刃先計測及び座標データ化の流れ

以上の流れより任意刃先形状バイトの評価を実施した。

【研究開発の成果】

①新機械による形状別による任意曲線バイトの製作

サンプル No. 1 の形状は製作可能ということを実証できている。最終年度はこの試作機にて他の形状でも同じような成果を上げられるか、サンプル No. 2 の形状にて妥当性確認を実施した。

サンプル No. 2 の目標座標データをグラフ化したものを図 2-3-8 に示す。

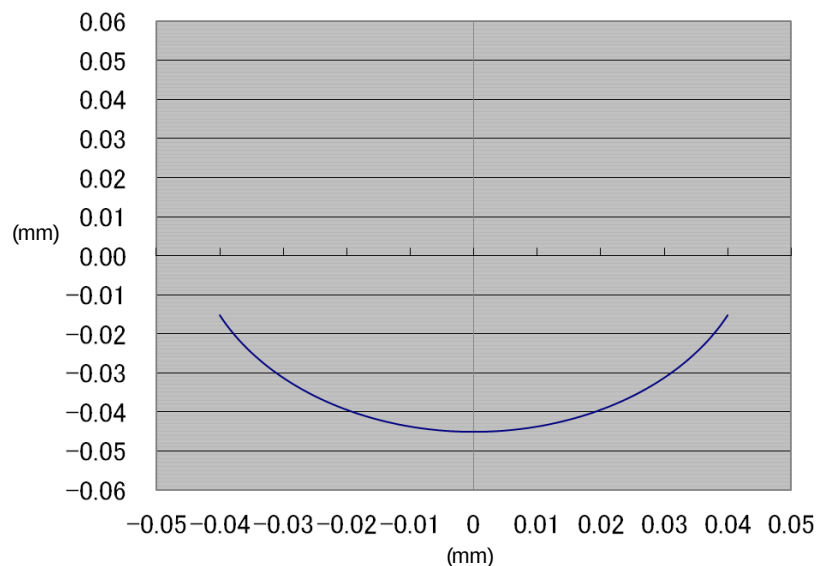


図 2-3-8 目標形状

この座標データを基にプログラムを作成し、試作機にて動作確認後、バイト加工を行った。

試作機での加工条件はサンプル No. 1 の加工時と同じ条件にて行った。加工した写真を図 2-3-9 に示す。

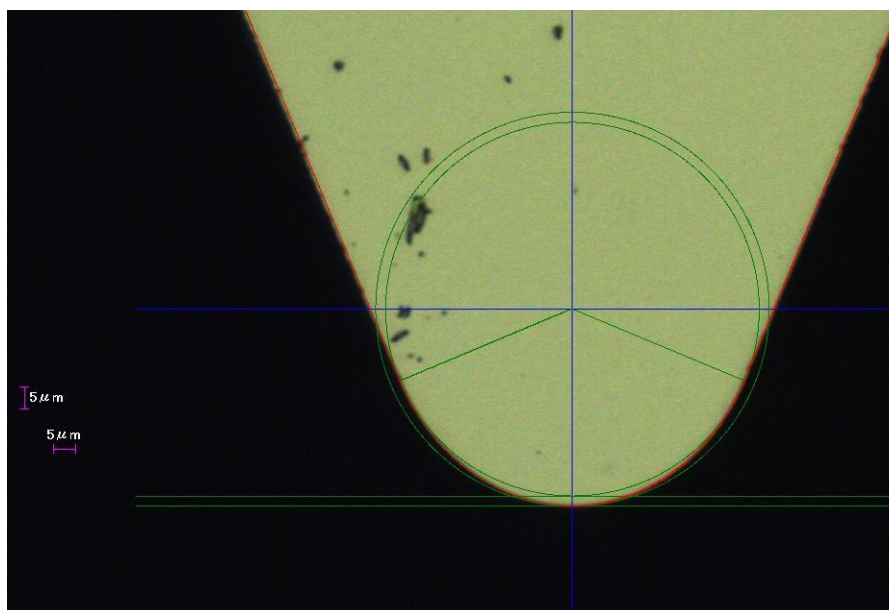


図 2-3-9 サンプル No.2 (×1227)

図 2-3-9 にある赤い線が目標形状である。図 2-3-9 の先端部を拡大したものを図 2-3-10 に示す。

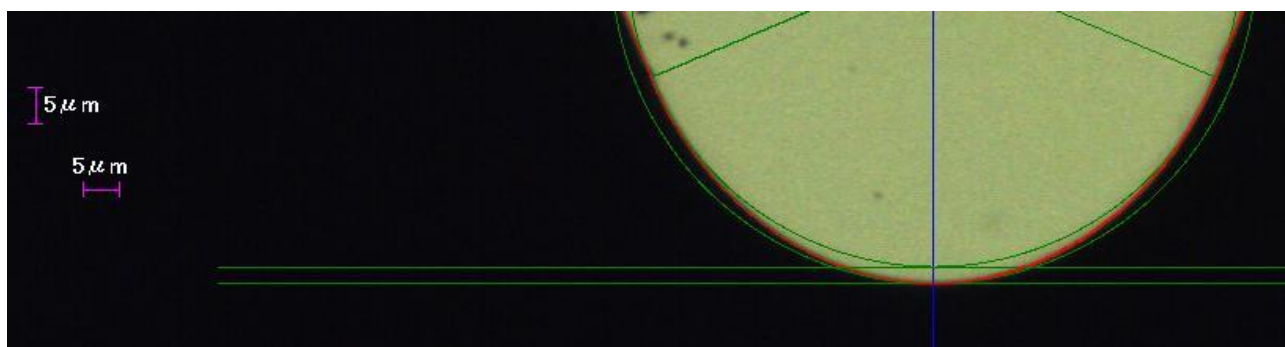


図2-3-10 サンプルNo.2 先端拡大図

図2-3-10 より目標形状（赤い線）に加工できたのが分かる。これにより形状違いでも問題無く加工できることが確認できた。

②新機械による任意曲線バイトの評価

画像確認によるテンプレートの確認では、数値としてどれほどの誤差があるかわからない。そこで 2-3 章の測定により、目標の任意刃先形状精度の数値化することで評価を行った。

●サンプルNo. 1 の評価

初年度より製作してきたサンプル No. 1 を測定し評価を行った。実際に評価したサンプル No. 1 の写真を図2-3-11に示す。

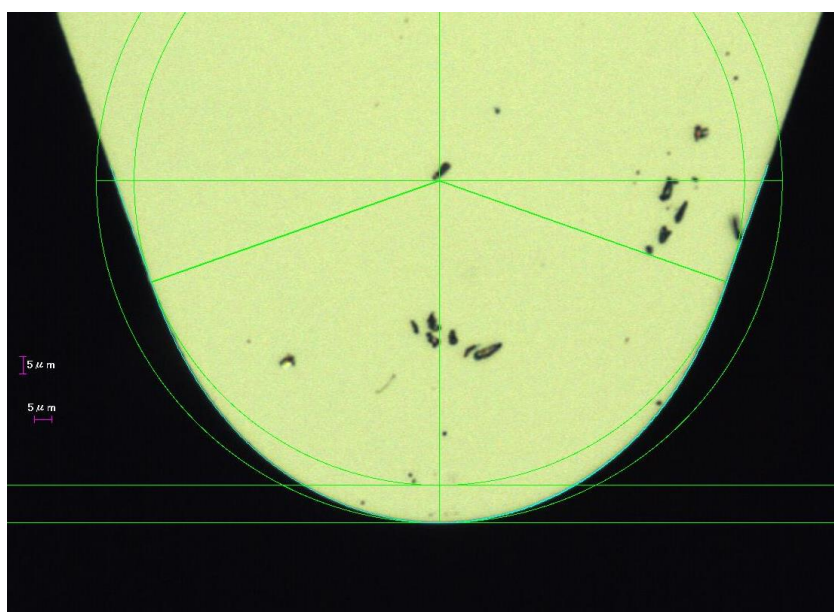


図2-3-11 サンプルNo.1(x1227)

機上カメラにて確認した際は目標形状通りに加工出来ているように見える。これを評価する為、レーザ顕微鏡にて画像を撮った。レーザ顕微鏡での画像を図2-3-12に示す。

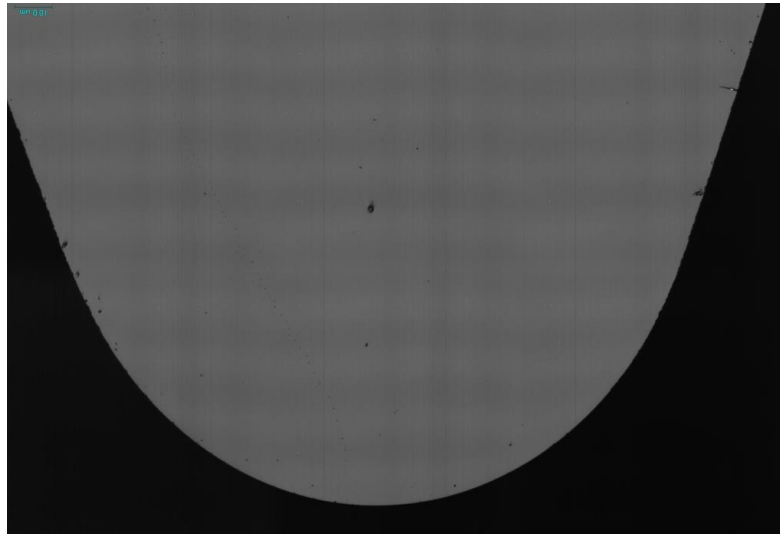


図2-3-12 サンプルNo.1（レーザー顕微鏡レンズx100）

この画像より 2 値化処理を行い、エッジ抽出することにより点群による座標データを出した。この抽出した座標データをフィッティングすることにより、精度評価を行った。実際にフィッティングした写真を図2-3-13に示す。

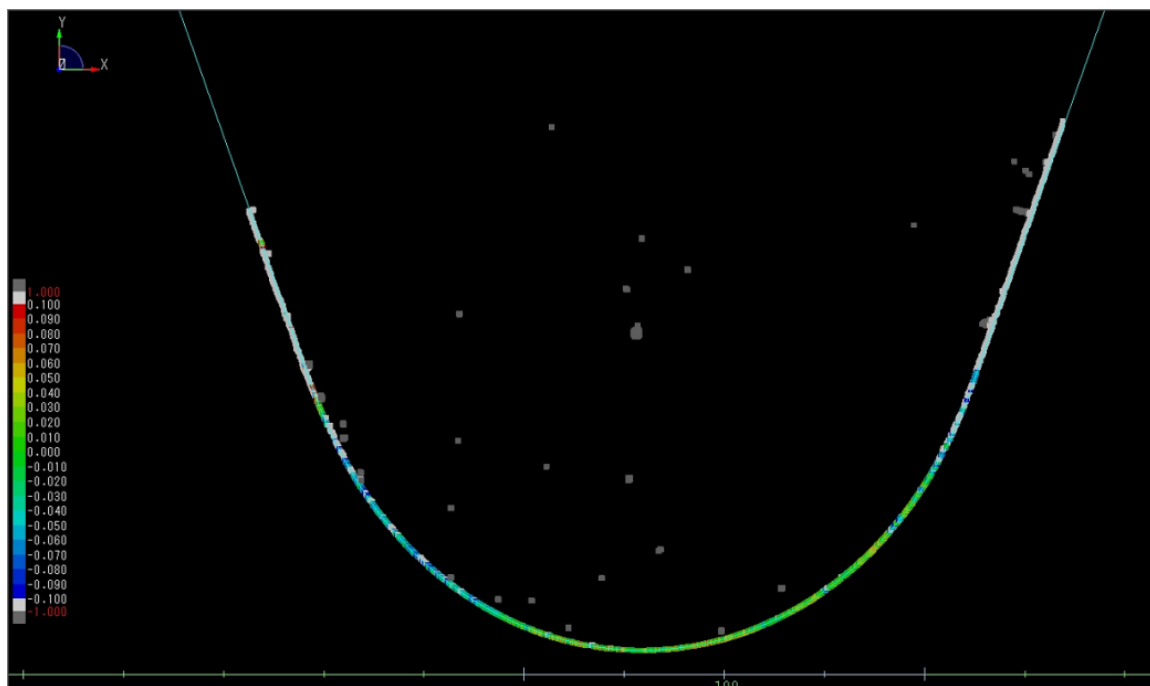


図2-3-13 サンプルNo.1 フィッティング評価

この評価では色によって誤差を一目で見る事が可能である。図2-3-13の左に表示されている数値と色は、目標形状との誤差を示している。数字の単位は μm で、写真の中心等に点在する点は、2 値化処理時にゴミ等も取り込んだものである。この図より $0.15\mu\text{m}$ 以内の形状に収まっている為には、使用刃先部が水色から黄色の範囲である必要がある。図2-3-13を見ると加工した範囲が水色から黄色の範囲内に収まっている事がわかる。よって目標であった形状精度 $0.15\mu\text{m}$ 以内と評価した。

● サンプル No. 2 の評価

サンプル No. 1 の形状では目標精度を達成したので、サンプル No. 2 も評価を実施した。使用したサンプル No. 2 は妥当性確認で製作したものを使用。評価方法はサンプル No. 1 と同じように評価を行った。

フィッティングによって評価したものを図 2-3-14 に示す。

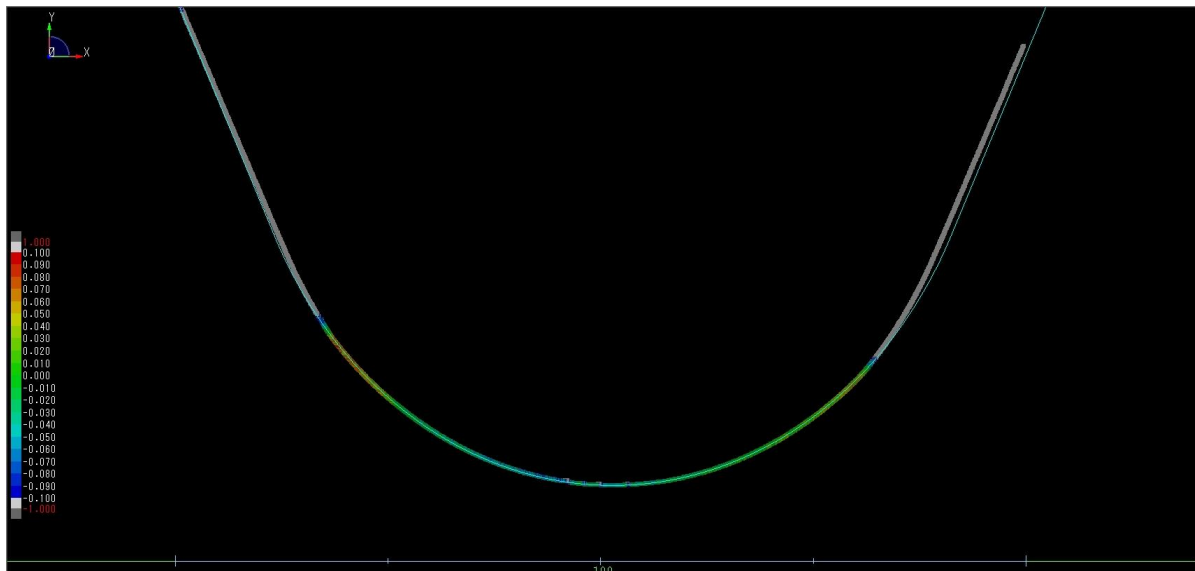


図 2-3-14 サンプルNo.2 フィッティング評価

図 2-3-14 より、右部分に隙間があるのが分かる。これは試作機にバイトをセットする際、芯だし調整でずれてしまったからである。しかし、実際にこのバイトを使用する部分は、任意形状に加工した部分を使用するので、特に問題はない。実際にユーザ情報でもこのようなバイトの切込は 0.01mm もない加工が殆どないという情報も頂いている。よって先端部より切込深さ方向に 0.01mm (10 μ m) 以内に形状精度が収まっていれば問題ないと評価した。実際に切込深さを入れたものを図 2-3-15 に示す。

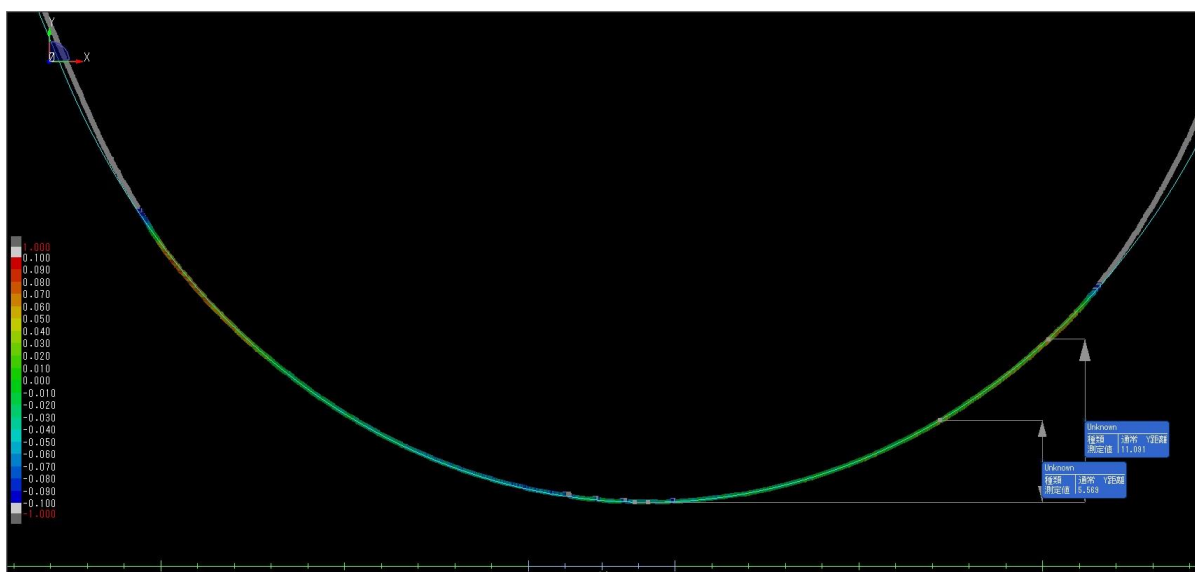


図 2-3-15 サンプルNo.2 フィッティング評価（切込深さ数値付）

切込深さ数値の部分拡大したものを図 2-3-16 に示す。

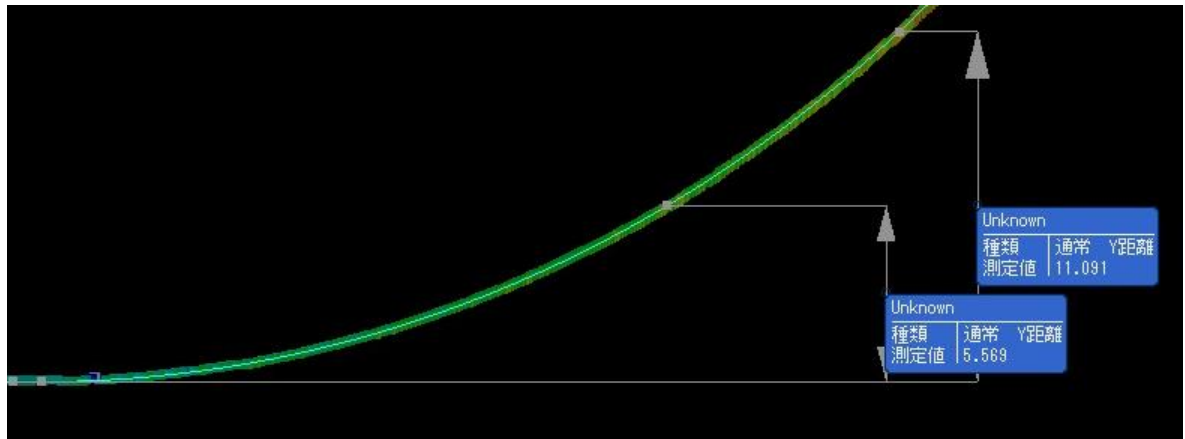


図 2-3-16 切込深さ数値拡大図

図 2-3-15 と図 2-3-16 より切込深さの範囲で水色から黄色の範囲に収まっている事が分かる。よってサンプル No. 2 においても目標形状精度 $0.15\mu\text{m}$ 以内に収まっていると評価した。

【まとめ】

①新機械による形状別による任意曲線バイトの製作

サンプル No. 1 のように、座標データより加工プログラムを作成することで、目標通りの形状に加工できることを確認。異なる形状でも問題無く製作ができることを証明した。

②新機械による任意曲線バイトの評価

2-4 章より開発した評価システムより、本研究目標であった形状精度 $0.15\mu\text{m}$ 以内に製作することを証明した。また、サンプル No. 1、No. 2 の異なった形状でも問題なく精度を達成することが実現できた。

2-4 精密加工のための機上形状測定と補正技術の開発

【はじめに】

スカيف盤を使った従来の加工プロセスでは、加工物を少し加工する度に、加工機から取り外し、測定器によって測定した後、再び加工機に設置して再加工することを繰り返す。しかし、加工物の取り外しや設置には時間がかかるうえ、取り外しにより設置状態が崩れてしまうので、再設置において位置決めを正確に行おうとしても誤差を生じやすい。そこで本項目では、加工物であるバイトを加工機に設置したまま形状測定を行うという機上測定と、その測定結果と目標形状とを比較評価することで、追加工が必要な部分を明示し、目標形状に近づける補正作業について研究開発を行う。この成果により、バイトを測定のために加工機から取り外す作業を削減できるので、作業の効率向上が期待できる上、高い品質での生産が実現できる。

最終年度では、これまでの研究成果に基づいて、実際の加工機上の顕微鏡による機上形状計測と、高精度なレーザー顕微鏡での形状計測を行い、これらを比較することで精度評価を行った。また、機上計測の結果と、目標形状の CAD モデルとの差を作業者に提示することを補正技術とし、その効果を作業時間の観点から評価した。

【研究開発の方法】

最終年度に実施した研究開発は、具体的には次の5項目になる。それぞれに研究開発の方法を示す。

①機上形状測定・形状補正システム構成

昨年度までの研究開発において、機上形状測定・形状補正システムの全体構成を示した。そこでは加工後の品質保証用顕微鏡として、光学顕微鏡を想定していた。しかし、その後、レーザー顕微鏡が高焦点深度で、かつ高解像度であり、品質保証用として最適であることから、レーザー顕微鏡を採用したシステムとして再構成した。

②顕微鏡画像による形状測定・補正量提示手法の確立

昨年度までの研究において、光学顕微鏡によるカメラ画像から画像処理を行って、形状測定を行うまでの処理を実現した。また、補正量提示方法についても検討し、形状測定結果と目標形状との差を作業者に提示するための処理も実現した。今年度は、加工機上の顕微鏡とレーザー顕微鏡において、昨年度に実現したカメラ画像から形状測定をする処理、および補正量提示処理を試験した。

③光学顕微鏡画像による形状計測の試験

光学顕微鏡を用いて実際のバイト先端の形状計測を行った。先端半径が異なるバイトの画角と、対物レンズの倍率との関係、およびバイトの傾き、および照明による画像処理への影響を確認した。

④顕微鏡画像による補正量算出の精度評価

目標形状である CAD モデルと加工中のバイトとの形状の差を補正量として作業者に提示することで、追加工の必要な部分を明確にするソフトウェアを昨年度に開発した。今年度は、この補正量提示処理を、機上顕微鏡、評価用光学顕微鏡、およびレーザー顕微鏡画像から導かれた測定結果に適用し、これら3者を比較することで精度評価を行った。

⑤機上計測に基づく補正量提示による作業時間削減の評価

機上計測の結果と、目標形状の CAD モデルとの差を作業者に提示することを補正技術とし、その効果を作業時間の観点から評価した。補正技術の有無は、最終的には測定のためにバイトを取り外し、再度取り付ける作業の有無となって現れる。そこで、これらの実際の作業をビデオ撮影し、作業時間を測定することで、補正技術により削減可能な時間を定量的に導出した。

【研究開発の成果】

①形状測定・形状補正システム構成の検討

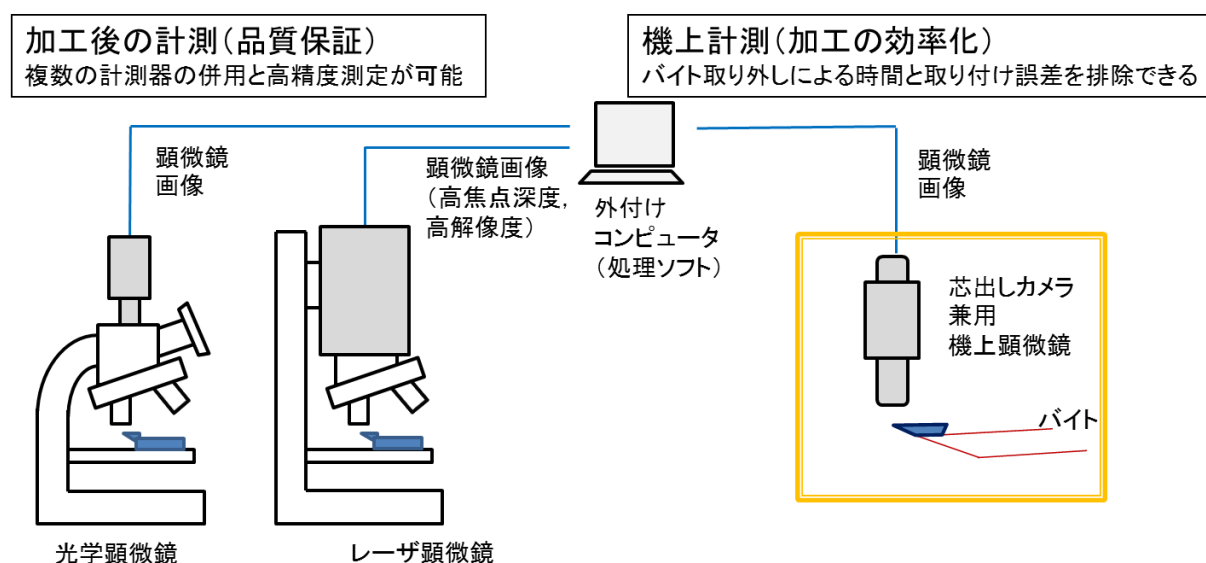


図 2-4-1 総合的な精度管理を実現する形状計測・評価システム

図 2-4-1 に総合的な形状測定・補正システムを示す。外付けコンピュータを中心に、右側が機上測定および補正システムであり、左側が、品質保証に向けた加工後の形状評価のためのシステムである。これらの2つのシステムにおいては、ソフトウェアの処理上、共通する部分があり、それを外付けコンピュータで行うことにより、設備を有効利用できるようにした。

機上測定では、高精度の測定は当然必要であるが、測定の機能に加えて、目標値との誤差を評価し、その結果を補正に利用できるよう作業員に見やすいように映像で提示することが大切である。これに対し、加工後の形状評価では、高精度で信頼性の高い方法で形状測定する必要がある。このため、高焦点深度かつ高解像度のレーザ顕微鏡を採用する。また、本研究では、光学顕微鏡による形状測定も行い、レーザ顕微鏡と光学顕微鏡との差異についても評価できるシステムとした。

②顕微鏡画像による形状測定・補正量提示手法の確立

図 2-4-1 に示した全ての顕微鏡において、観察映像をカメラで画像データとし、その画像データを画像処理することで、形状を計測する仕組みとしている。このため、一つの処理ソフトウェアによって、全ての顕微鏡での形状評価が可能である。

図 2-4-2 にこれらの処理全体の流れを示す。全体の流れは、形状計測の処理と誤差算出の処理とに分けることができる。形状計測は、顕微鏡カメラによる撮影から、形状データを作成するまでであり、誤差算出の処理は、計測された形状データと、あらかじめ定義されている形状との比較を行う部分になる。

まず、形状計測の処理を説明する。まず、カメラによってバイトの先端テーブル面を観察するように撮影する。倍率は、先端半径 $2\mu\text{m}$ の場合で、5000～7000 倍程度が必要である。画像は、多くの微小領域（画素）の集まりとなるが、バイトの部分に含まれる画素の明るさは、落射照明の場合、周囲の部分に含まれる画素の明るさと比較して明るい。そのため、それぞれの明るさを区別できる値を閾値として設定し、

これを超えた明るさを持つ画素は白、暗い場合は黒に置き換える。これを二値化と呼ぶ。顕微鏡画像には、必ずノイズが含まれるので、二値化された画像の中の画素には、いくつか不適切に置き換えられた画素もある。これらを手作業で除去したうえで、次に境界線抽出を行う。境界線とは、白色と黒色とが隣り合った場所に存在する画素の集まりである。これらで作成された境界線データを、Excel 等を用いて、境界線画素の位置をグラフ化すると図中の図のように線のように見ることができる。この境界線データの値は、あくまでも画角に対する画素の位置を示しているが、画素間の距離があらかじめ特定されていれば、換算することで長さスケールでの点群データとして得ることができる。

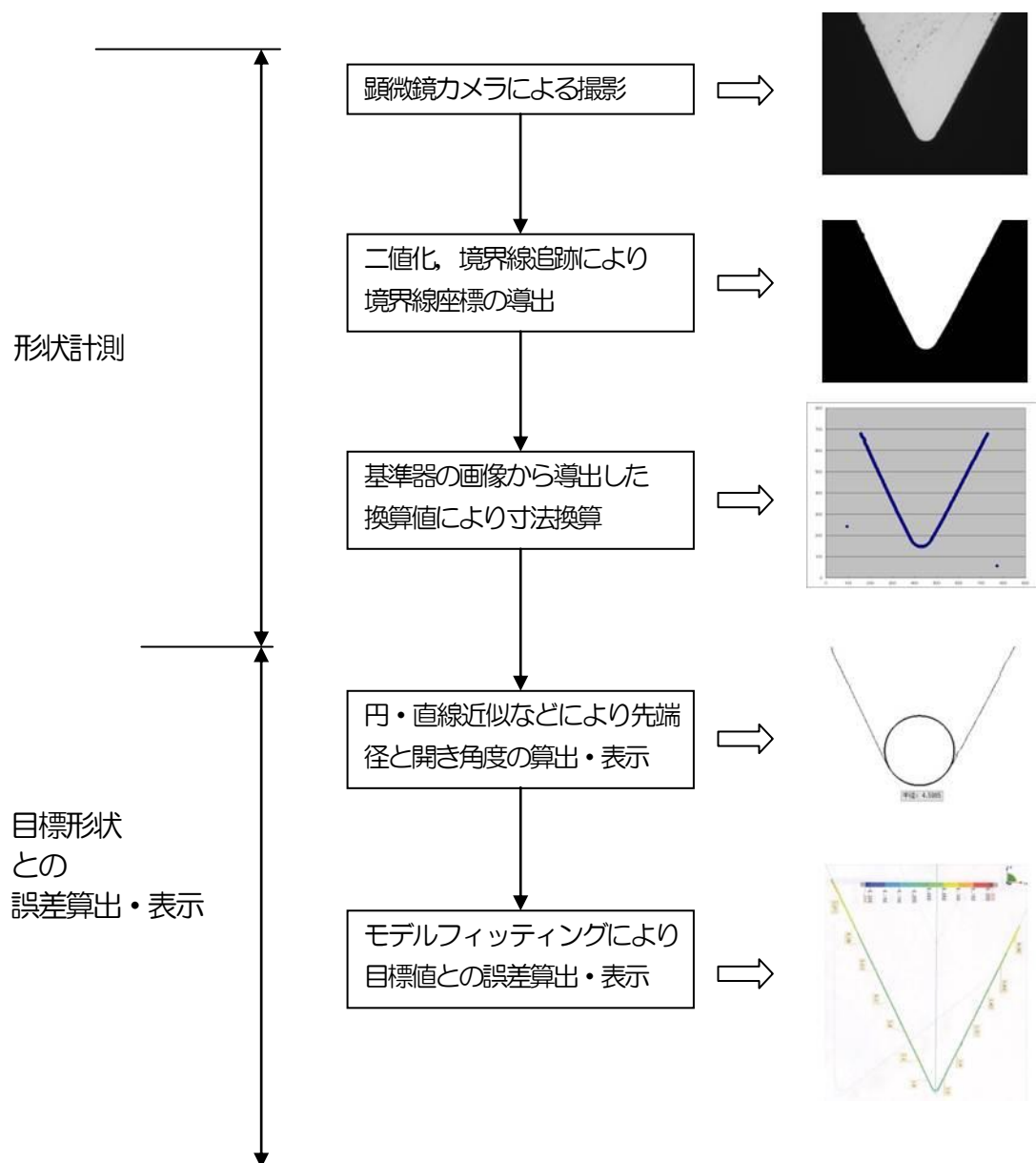


図 2-4-2 形状計測および補正量提示の処理

次に誤差算出の処理を説明する。まず、目標形状の設定として、あらかじめ 3D-CAD に形状を入力しておく。この目標形状と計測結果の点群データとのフィッティングを行うことになる。このフィッティング処理は、3 次元の CAD モデルと、2 次元の点群データとのフィッティングになる。3 次元モデルを利用する理由は、光学顕微鏡の計測データはテーブル面に垂直の方向から見た輪郭形状であるため、顕微鏡におけるバイトの設置がテーブル面に対して傾いた場合、3 次元 CAD モデルに対する姿勢にずれが生ずる恐れがある。このような場合、レーザー顕微鏡によって 3 次元測定を行い、3 次元 CAD モデルとのフィッティングを行うことで、目標値との誤差を正しく評価することができる。

フィッティング処理が正しく行われたならば、目標形状と点群データとの位置誤差を算出して表示する。計測データの点群の数は多いので、それぞれの点群の誤差をいくつかの方法でわかりやすく表示する。一つの方法は、バイト先端半径と開き角について、点群データを直線と円弧でそれぞれ近似した値を提示する方法である。これらの 2 つの値はバイトの形状を定義するうえで重要なパラメータであり、形状の粗どり工程における補正作業計画に役立つ表示となる。もう一つの方法は、それぞれの点群データと目標形状との誤差を色で表示する方法である。これは特に仕上げ工程において補正すべき場所を詳細に把握する上で役に立つ。

③光学顕微鏡画像による形状計測の試験

光学顕微鏡画像から形状計測を行うまでの試験を行った。光学顕微鏡はレーザー顕微鏡に比べて焦点深度が浅い。特に高倍率対物レンズではその傾向が顕著となる。そこで、この試験では、先端半径の異なるバイトを、高倍率の対物レンズで撮影し、形状評価の処理ができることを確認することと、バイトと顕微鏡ステージとに傾きを設けた時の違いを確認する。また、照明の違いによる評価も行う。

使用した光学顕微鏡システムの機種・仕様を表 2-4-1 に示し、計測の様子を図 2-4-3 に示す。

表 2-4-1 実験で使した顕微鏡の機種・仕様

項目	機種・仕様
顕微鏡	オリンパス BX60
対物レンズ	50 倍, 100 倍
カメラ	AR-630 3CCD,200 万画素

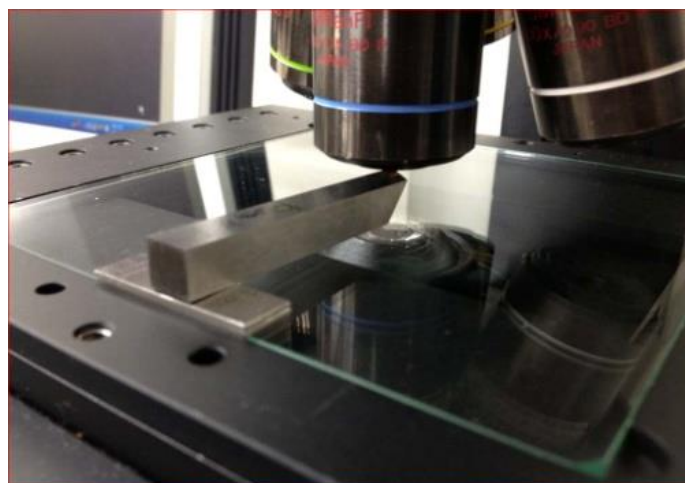


図 2-4-3 顕微鏡によるバイト先端計測

(a) 半径の異なるバイト先端形状の計測 (50 倍対物レンズ)

先端半径がおおよそ $500\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ であるバイトの先端形状計測を、50 倍の対物レンズで行った。図 2-4-4 にそれぞれのバイト先端を撮影したカメラ画像を示す。そして、図 2-4-5 にそれらの画像を二値化処理した画像を示し、図 2-4-6 に境界線抽出を行って得られたバイトの輪郭点群データを示す。

カメラ画像を見ると、バイトのテーブル面に若干の汚れのようなものが残っている。また、 $5\mu\text{m}$ のバイトには若干のチッピングがみられる。これらが二値化画像に及ぼす影響を見ると、テーブル面の汚れに関しては二値化処理によってほとんど除去されていることがわかる。一方で、チッピングに関しては、二値化処理結果にも反映され、直線であるべき部分が若干のゆがみをもって表れている。さらに、図 2-4-6 の輪郭点群データへの影響を見てみると、チッピングに関しての部分が結果に表れている。

これらの結果から、本手法によりバイトの輪郭点群データが正しく得られることを確認した上、バイトの仕上がりを評価する上で重要なチッピングの存在を、明確に検出できることも分かった。

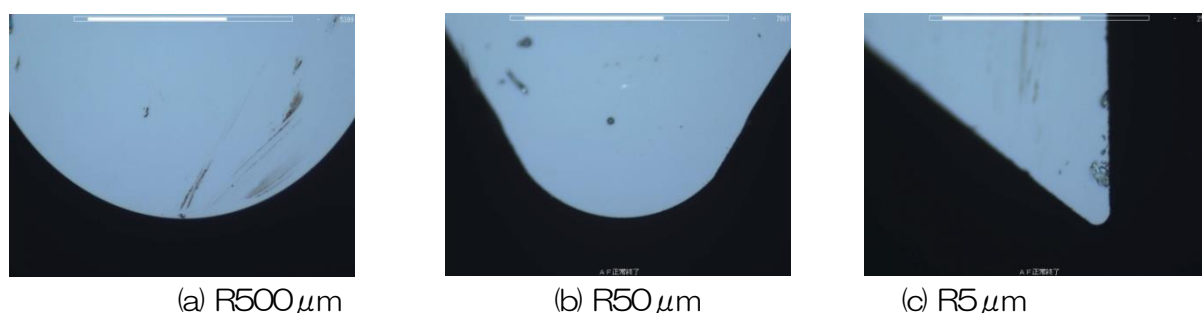


図2-4-4 顕微鏡カメラ画像 (50 倍対物レンズ)

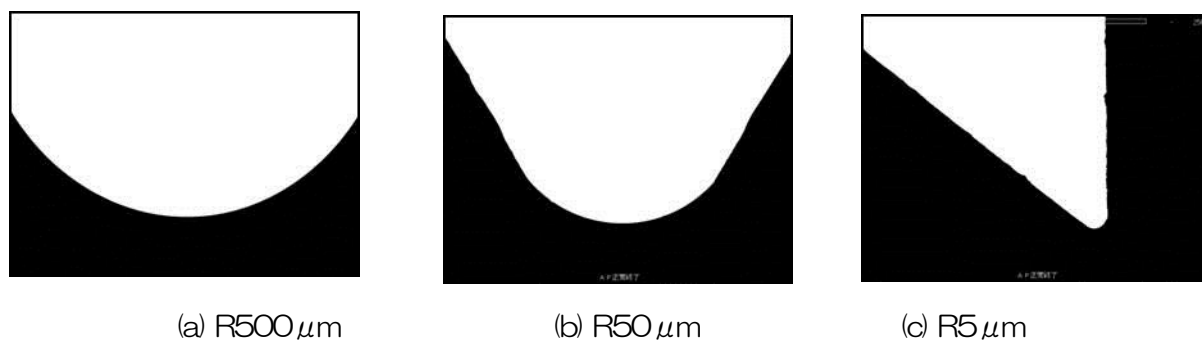


図2-4-5 二値化処理後の画像 (50 倍対物レンズ)

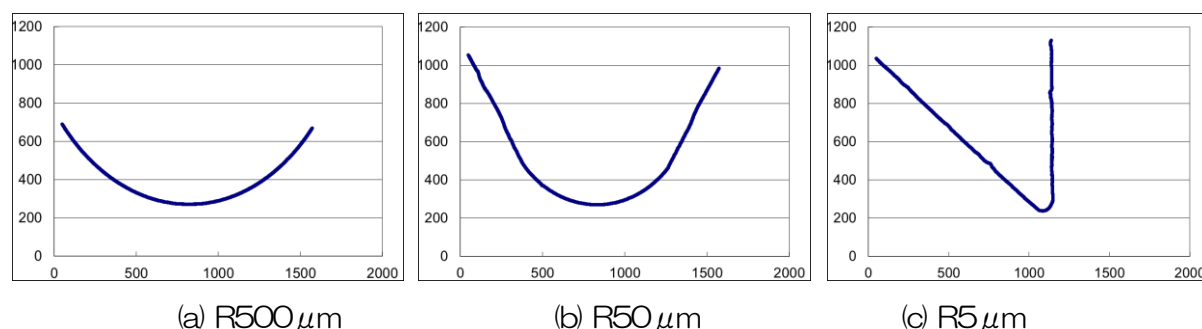


図2-4-6 境界線抽出されたバイトの輪郭点群データ (50 倍対物レンズ)

(b) 半径の異なるバイト先端形状の計測（100 倍対物レンズ）

バイト先端半径がおおよそ $5\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ 以下であるバイトの先端形状計測を、100 倍の対物レンズを用いて行った。画像処理によって得られたバイト輪郭の点群データを図 2-4-7 に示す。

$R5\mu\text{m}$ のバイトは、対物レンズ倍率 50 倍での実験で使用したものとは異なるものである。このバイトではチッピングが無く、きれいな輪郭が得られているのがわかる。 $2\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ 以下であるバイトにおいても、鮮明な輪郭が抽出されている。ただし、輪郭点群データの中には、ノイズと思われるデータが 2 画素ほど含まれている。これらは 3 種類すべてにおいて同じ場所に表れているので、レンズもしくはカメラの受光器付近に付着している汚れと思われる。これらはあらかじめ除去しておくことが必要である。

これらの結果から、光学顕微鏡ではほぼ最高倍率の水準である 100 倍の対物レンズを用いた画像であっても、バイト輪郭の点群データを鮮明に検出できることが確認された。

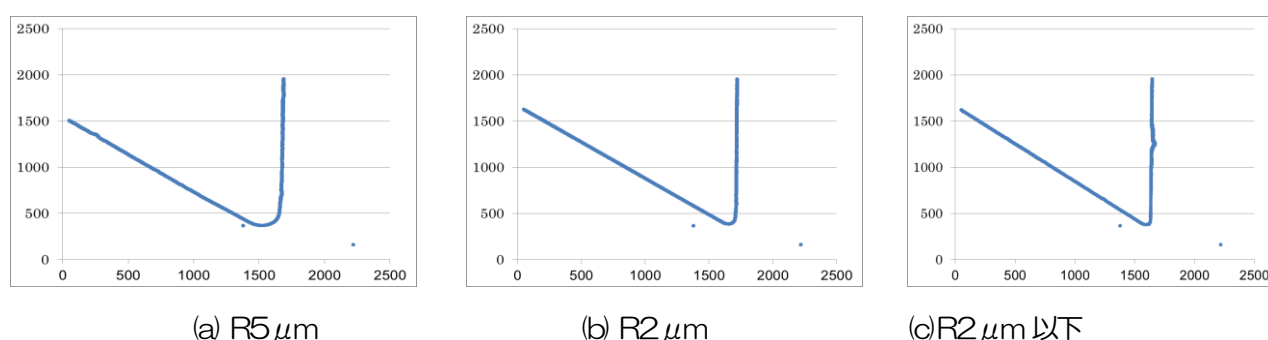


図 2-4-7 境界線抽出されたバイト輪郭の点群データ（100 倍対物レンズ）

(c) バイトテーブル面の設置角度による影響評価実験

顕微鏡の被写体となるバイトのテーブル面が、レンズに対して正面を向かず傾いている場合、焦点はテーブル面の一部にしか合わず、焦点ぼけを生ずる部分が発生する。焦点の合う被写界深度は絞りによって変わるが、限界がある。特に、高倍率の対物レンズになるほど被写界深度は浅くなるので、焦点を合わせにくくなる。このようなことから、意図的にバイトを傾かせた状態でバイト先端映像を撮影し、画像処理によって点群データを得ることに問題を生ずるか否かを確認する実験を行った。

バイトの傾きは、バイトホルダの下に 1mm のスペーサを 1 枚、もしくは 2 枚重ねて設置することで生成させた。したがって、傾きの程度は定量的ではないが、通常、設置した際に生ずる傾きに比べ十分に小さく、また、通常発生するバイトテーブル面とホルダの底面との面どうしの傾きに対しても十分に小さい。

図 2-4-8 にバイトを傾かせたときの点群データを示している。この結果を見ると、スペーサなしの場合とスペーサが 2 枚入れた場合でも、ほぼ同じ結果がえられた。このことから、本手法による計測は、通常発生する程度の、計測時の設置の傾きや、バイト接着時の傾きに対して、十分に許容できることが確認された。

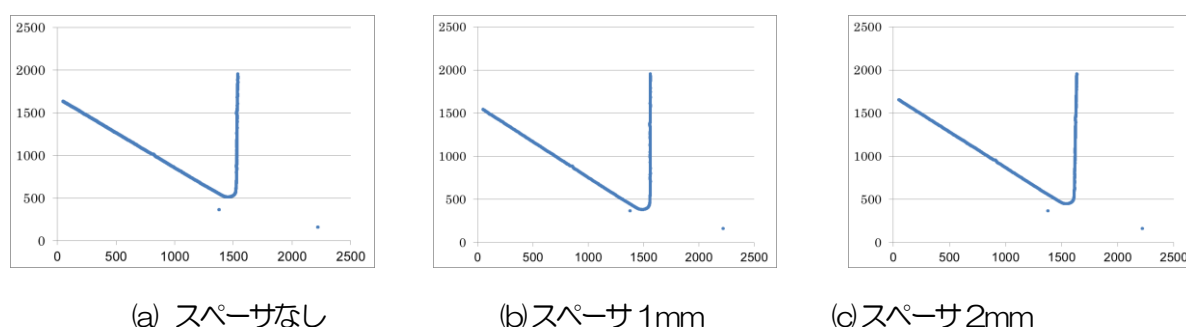


図2-4-8 被写体の設置角度による影響評価実験 (R5 μ m、50倍対物レンズ)

(d) 照明の違いによる影響評価実験

光学顕微鏡の照明方法には、透過と落射とがある。透過では、バイトを通過した光を計測するので、バイトが加工時に抜ける形状となるのに対し、落射では、バイト表面の反射光を計測するので、バイトテーブル面の形状となる。それぞれの照明において比較する実験を行った。先端半径5 μ mのバイトを設置し、それを動かさずに照明方法のみを変えて画像を取り込み、輪郭点群データの抽出を行った。図2-4-9に、透過照明による画像(a)を二値化(b)して輪郭点群データ(c)を導出した結果と、落射照明による画像(d)を二値化(e)して輪郭点群データ(f)を導出した結果を示す。照明方法の違いにより、カメラ画像の明暗が逆転するが、いずれの方法でも同程度に正しく輪郭点群データを導出できることが確認され、結果においても、ほとんど差異が無かった。

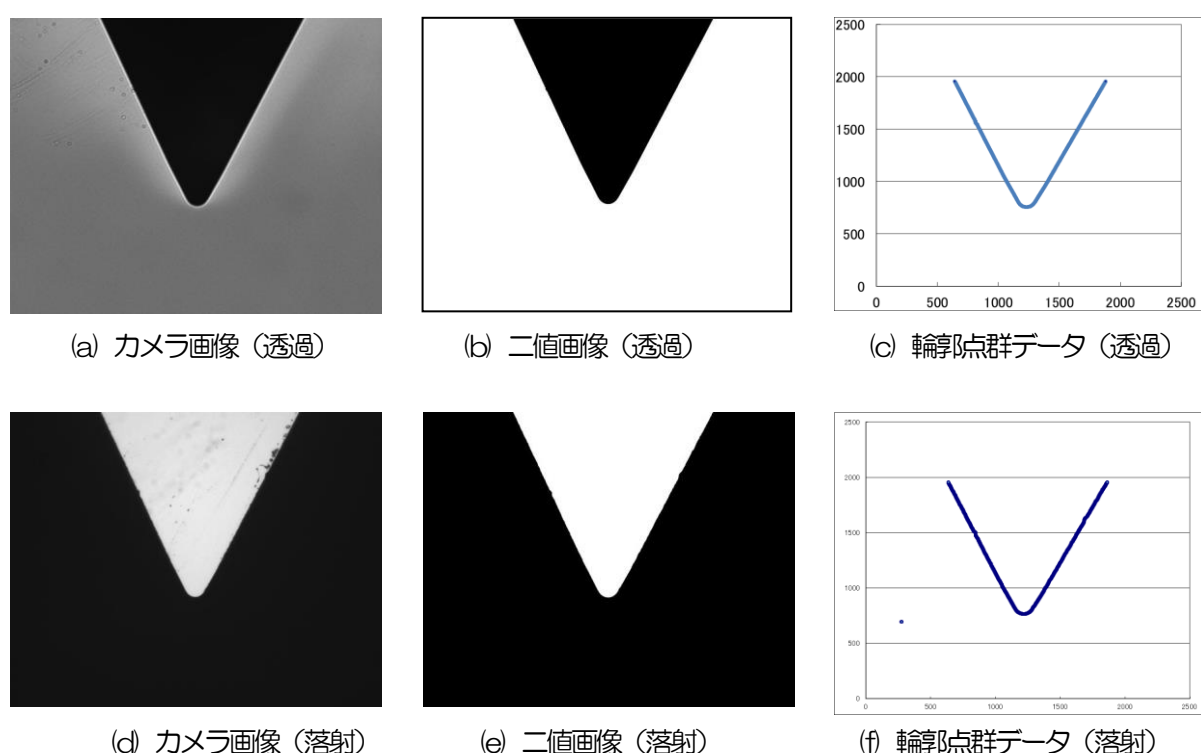


図2-4-9 照明の違いによる影響評価実験 (R5 μ m、50倍対物レンズ)

④顕微鏡画像による補正量算出の精度評価

(a) 誤差算出・表示方法

まず、測定された輪郭点群データと目標形状とをフィッティングさせ、その差異を提示する処理について説明する。

フィッティングには、対象とする目標形状によって目的の異なる2種類の方法に分けることができる。図2-4-10にそれらのフィッティングの方法についての概念図を示す。

一つの方法は、直線や円といった基本的なプロファイルフィットさせる方法である。この処理は通常の顕微鏡画像処理ソフトに含まれることが多い。輪郭点群データのある領域を基本的なプロファイルで近似させ、複数の直線間の距離や円の半径などといった代表寸法を知るためによく使われる。この処理を行った例を図2-4-10左下に示す。バイトの形状として重要なパラメータとなるのが、バイト先端半径と開

き角になるが、バイト先端に円弧をあてはめ、側面に直線をあてはめることで、これらの値を算出できる。フィッティングのもう一つの方法は、対象物全体の形状を定義しておき、それとデータとをフィッティングさせる方法である。バイト形状であれば、角度を持った二つの側面と、その中間に曲面が存在するが、それらを組み合わせた形状を目標形状として定義しておく。この目標形状と輪郭点群データをフィッティングさせて、その差を提示する。基本的なプロファイルのフィッティングでは、部分的な形状の代表寸法を算出するのみであるのに対し、全体形状のフィッティングでは目標形状と現状との差を提示することができる。このため、任意形状のバイトであっても、誤差を算出して表示することができる。

ここでは、後者の処理について説明する。まず、計測データである輪郭点群データを用意する。ただし、ここでの輪郭点群データは画像の画素位置での表記であるので、これを長さスケールに変換する必要がある。このキャリブレーション処理に関しては、すでに済んでいるので、Excel 等の処理によって行うことができる。次に、目標形状となる 3D-CAD モデルを作成する。図 2-4-10 右上に作成したモデルの例を示す。続いて、輪郭点群データと 3D-CAD モデルのバイト先端の部分とで、フィッティングを行う。フィッティング後、それぞれの輪郭点群データと 3D-CAD モデルとの距離が算出できるので、この量を形状に重ねて色で表現する。これをカラーマップと呼ぶ。カラーマップで表現することで補正に必要な部分を直感的に理解することができる。また、先端半径と開き角度についても、直線と円のフィッティングにより測定結果を示すだけではなく、3D-CAD モデルと比較して目標形状との差異として表示するようにした。

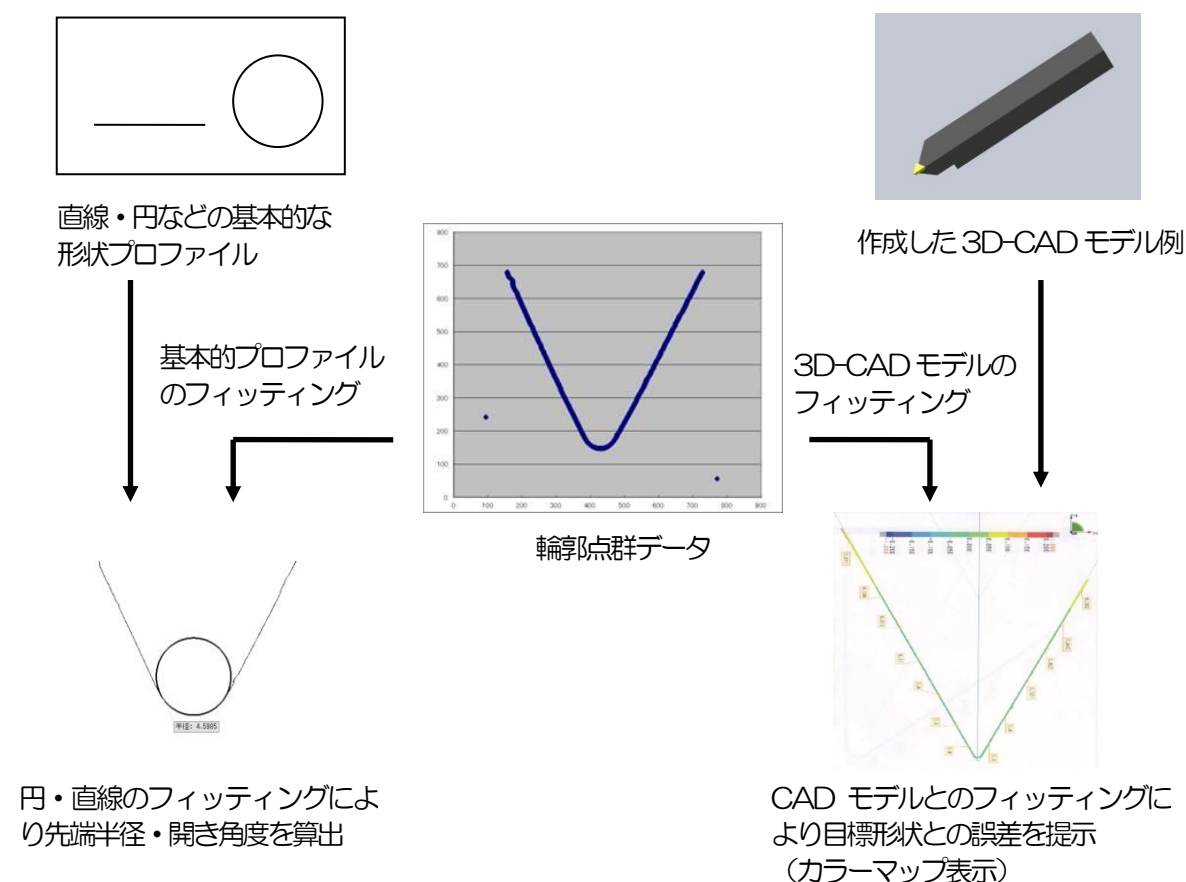


図 2-4-10 フィッティングの処理と誤差表示

(b) レーザー顕微鏡、機上顕微鏡、光学顕微鏡での計測

システム構成に含まれる3種の顕微鏡で、同一バイトの形状測定を行い、それらの結果を比較することで、それぞれの持っている計測精度を評価する。

まず、レーザー顕微鏡による計測を行った。使用したレーザー顕微鏡は共焦点型レーザー顕微鏡である。これは、レーザー光が照射された測定対象物を、高さ方向に焦点をわずかに変えて撮影していき、焦点の合った部分のみを撮影データとして残していく。このため、焦点を変えた分の焦点深度を持ち、レーザー光のため高解像度での撮影が実現できる。

表2-4-2に使用したレーザー顕微鏡の機種と仕様を示し、図2-4-11に外観を示す。また、図2-4-12に光学顕微鏡での測定試験で使用したものと同一のバイトを観察したカメラ画像(a)、二値化した画像(b)、抽出された輪郭点群データ(c)を示す。また、直線および円のプロファイル进行フィッティングさせることでバイト先端半径と開き角度を導出した様子を図2-14-13に示す。

表2-4-2 レーザー顕微鏡の機種と仕様

項目	機種・仕様
レーザー顕微鏡	レーザーテック OPTELICS HYBRID L3
総合倍率	70~36,000倍
画素数	高精細モード 2048×2048×16bit
最小測定単位	0.001 μm



図2-4-11 使用したレーザー顕微鏡

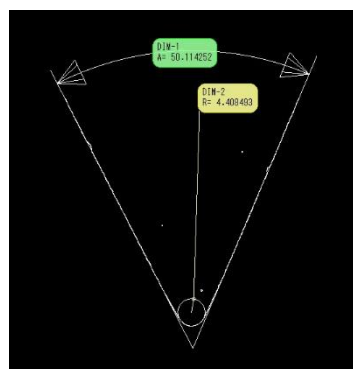


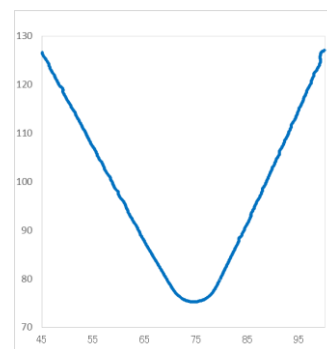
図2-4-13 レーザー顕微鏡画像からのバイト先端半径と開き角の導出



(a) カメラ画像



(b) 二値画像



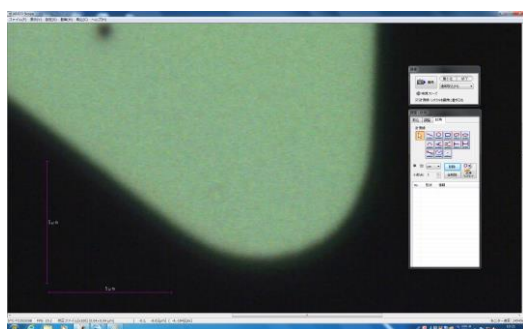
(c) 輪郭点群データ

図2-4-12 レーザー顕微鏡による計測結果

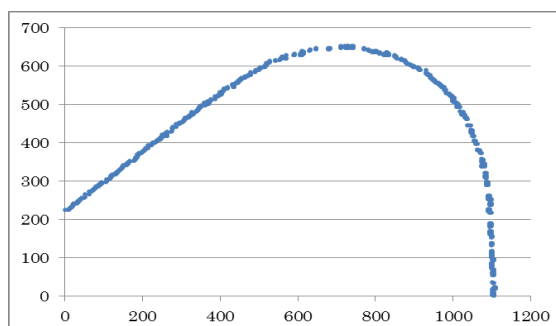
次に、機上顕微鏡による計測を行った。機上顕微鏡は小型の光学顕微鏡であり、仕様を表 2-4-3 に示す。また、画像処理による輪郭形状計測結果を図 2-4-14 に示し、バイト先端半径と開き角度を導出した様子を図 2-4-15 に示す。

表2-4-3 機上顕微鏡の機種と仕様

項目	機種・仕様
機上顕微鏡	ABICO Scope
対物レンズ	100 倍
最小測定単位	0.04 μm



(a) カメラ画像



(b) 輪郭点群データ

図 2-4-14 機上顕微鏡による計測結果



図 2-4-15 機上顕微鏡画像からのバイト先端半径と開き角の導出

レーザー顕微鏡および機上顕微鏡と同様の方法で、表 2-4-1 で示した光学顕微鏡を使用し、対物レンズを 50 倍と 100 倍の両方において同じバイトを計測した。そして、バイト先端半径と開き角度を導出した。以上で導出されたバイト先端半径と開き角度の結果を表 2-4-4 にまとめる。

表2-4-4 測定データの比較

測定方法	先端半径 μm	開き角度 deg
レーザー顕微鏡	4.408	50.11
機上顕微鏡 対物レンズ 100 倍	3.905	53.93
光学顕微鏡 対物レンズ 100 倍	4.574	50.72

光学顕微鏡 対物レンズ 50倍	4.597	50.38
-----------------	-------	-------

被測定物であるバイトを最も高精度に測定できる装置は仕様の上ではレーザー顕微鏡であるので、これによる結果が最も信頼性の高い結果である。機上顕微鏡とレーザー顕微鏡との差は、先端半径で約 $0.5\mu\text{m}$ 、開き角度で 4° 程度であった。これに対し、光学顕微鏡とレーザー顕微鏡との差では、先端半径で約 $0.2\mu\text{m}$ 、開き角度で 1° 以内の差に収まっている。機上顕微鏡は小型の光学顕微鏡であるので、計測の原理は光学顕微鏡と同じであるから、鏡筒や撮影カメラを高精度なものにしたり、測定の向きを調整するなどすれば、光学顕微鏡の精度にまで向上させることができる。また、機上顕微鏡で生ずる差には一定の傾向があるので、その傾向を加味した上で、機上での加工を進め、最終的にレーザー顕微鏡で形状を評価するという運用上の方法によって、作業効率を得ながら品質を確保することが可能である。

⑤機上計測に基づく補正量提示による作業時間削減の評価

図 2-4-16 に従来の仕上げ加工プロセスを示す。仕上げ加工では、バイトを加工した後、計測機器によって測定し、その結果を見ながら、さらに加工すべき箇所や切込み量を決定し、再度の加工を行う。この工程を繰り返すことで、目標の形状に近づけていく。そして、加工と計測をする度にバイトの取り出しと、装着・調整作業を必要とする。そのため、加工機上で形状計測をし、その結果を、加工に反映できれば、測定のためのバイトの取り外し、再取り付け作業を削減できる。そこで、機上計測の結果と、目標形状の CAD モデルとの差を作業者に提示することで、計測結果を加工に反映できるようにする。これを補正技術と呼び、その効果を作業時間の観点から評価した。

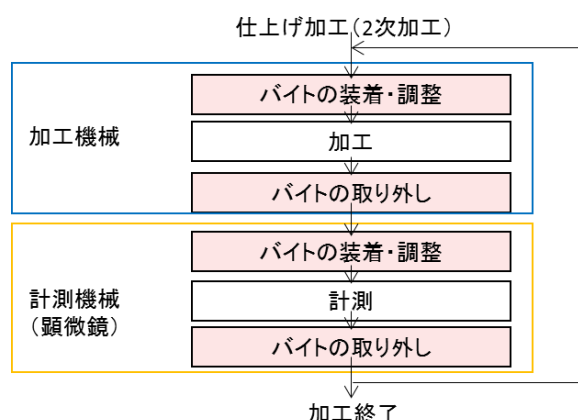


図 2-4-16 従来の仕上げ加工プロセス



図 2-4-17 加工機での調整作業の様子

実験方法は、加工機とレーザー顕微鏡のそれぞれで、バイト装着・調整および取り外し作業をビデオで撮影し、その画像から作業を目視で判断して作業時間を導出した。被験者は、加工機においては、熟練者と非熟練者の 2 名で実施し、レーザー顕微鏡においては、作業者の技能による時間差は少ないと判断し、1 名で実施した。図 2-4-17 にビデオ画像の例を示し、導出された作業時間を表 2-4-5 に示す。

表 2-4-5 導出された作業時間

被験者	バイト装着・調整および取り外し作業時間 min	
	加工機	顕微鏡
作業者 A (熟練者)	24	3
作業者 B (非熟練者)	31	-

表 2-4-5 には、装着・調整と取り外し作業時間の合計を示しているが、加工機、顕微鏡のいずれでも、取り外しにはほとんど時間はかからず、装着・調整作業がほぼ全てである。また、顕微鏡よりも加工機のバイト装着・調整に多くの時間を要し、熟練者と非熟練者との時間比較から、それが熟練度に影響を受ける作業であることがわかる。

機上計測に基づいて補正量提示を行うという補正技術によって、表 2-6-16 における繰り返し工程 1 回に対し、装着・調整作業を減らせるので、約 30 分の作業時間を短縮できることがわかる。しかも、熟練を要する作業工程を削減できるので、作業条件が緩和され、作業効率を大幅に向上できることが確認できた。

【まとめ】

① 機上形状測定・形状補正システム構成

- ・機上形状測定・補正システムと、加工後の形状評価システムを統合したシステム構成を確立した。

② 顕微鏡画像による形状測定・補正量提示手法の確立

- ・光学顕微鏡によるバイト先端形状の観察画像から、画像処理によってバイト輪郭点群データを抽出し、目標形状との比較によって誤差量を算出して提示するまでの一連の処理方法を確立した。

③ 光学顕微鏡画像による形状計測の試験

- ・50 倍の対物レンズおよび 100 倍の対物レンズを装着した光学顕微鏡により、先端半径が異なる（最小のものは半径 $2\mu\text{m}$ 以下）バイト先端形状を計測し、それぞれの明確な輪郭点群データを得ることができた。
- ・バイトとテーブル面の設置角度を変えた実験を行い、計測の際のバイト設置角度誤差、バイトをホルダに接着させる際の誤差を、十分に許容できることを確認した。
- ・透過照明および落射照明を変えて計測し、いずれの照明方法であっても、明確な輪郭点群データを得ることができることを確認した。

④ 顕微鏡画像による補正量算出の精度評価

- ・抽出された輪郭点群データに、直線および円をフィッティングさせて、バイト先端半径と開き角度を算出する方法を確立した。
- ・目標形状を 3D-CAD によってモデル化しておき、これを計測データにフィットさせて、計測データと目標形状との誤差をカラーマップによって表示する方法を確立した。
- ・レーザー顕微鏡、機上顕微鏡、光学顕微鏡のそれぞれで、同一のバイト（先端半径約 $5\mu\text{m}$ ）を、開発したシステムを使用して計測および補正量を算出して比較した。この結果、レーザー顕微鏡と機上顕微鏡での差は先端半径で $5\mu\text{m}$ 程度となったが、レーザー顕微鏡と光学顕微鏡での差は先端半径で $2\mu\text{m}$ 以下となり、機上顕微鏡を改良することで、正確さを改善できることを明らかにした。
- ・機上顕微鏡とレーザー顕微鏡を併用した活用により、作業の効率化と十分な品質保証の両方を実現できることを確認した。

⑤ 機上計測に基づく補正量提示による作業時間削減の評価

- ・加工機およびレーザー顕微鏡それぞれにおいて、バイトの設置・調整と取り外し作業の時間を導出して評価した結果、この補正技術により、仕上げ作業の繰り返し 1 回につき、約 30 分程度の時間短縮になることが分かった。
- ・短縮できる作業の大部分は熟練度に影響される作業であり、この補正技術により作業条件が緩和さ

れ、作業効率を大幅に向上できることが確認できた。

第3章 全体総括

【研究開発の達成状況】

達成目標として掲げたものは、全て達成した。

事業1年目、2年目で開発してきた各技術を最適に組み合わせて Teaching システムの構築および超精密ダイヤモンドバイトの製造方法の確立を図った。

各サブテーマ毎の達成状況の詳細については、以下のようになる。

(1) 粗加工の平準化のための非熟練者向けダイヤモンド加工 Teaching システムの開発

これまでに構築した加工熟練者の暗黙知データベースに、高度な知見である結晶軸推定技術を取り込み、またスカイフ盤によるダイヤモンド研磨加工工程の学習が可能となるシステムを構築した。利用者は、3D 動画マニュアルや3D PDF ファイルを閲覧することで、直感的に理解することができる。これは非熟練者に向けた「加工支援システム」として、技術伝承の一助となるものであり、現場における利用価値の高いものとすることができた。

(2) 粗加工の高速化に必要なレーザー加工技術の開発

レーザー切断による粗加工において、レーザーによるダイヤへの影響、レーザー切断形状による断面評価、形状変化や形状加工の妥当性に問題が無いことを確認してきた。その結果、熟練者でも手加工では加工に時間がかかっていた工程でも、レーザー加工による簡略化を行うことで、同等の品質を保ちながら、加工時間を1/2以下に削減することができた。

(3) 任意刃先形状の加工可能な2軸精密制御スカイフ加工技術の開発

2軸精密制御スカイフ盤加工装置を開発、この装置により任意刃先形状が問題なく目標形状に加工できることを確認し、 $0.15\mu\text{m}$ 以内の加工精度を達成することができるようになった。また、ワークやスカイフ盤を取外しすることなく、粗加工、仕上げ加工が可能であり、段取り時間の削減にも効果が得られた。

(4) 精密加工のための機上形状測定と補正技術の開発

顕微鏡画像による形状計測・補正量提示手法を確立し、機上顕微鏡、評価用の光学顕微鏡、レーザー顕微鏡の3種で実現した。これにより、機上計測に基づいて補正量提示ができるようになり、バイト装着・調整・取外し作業時間が削減でき、取り付け誤差も排除できるようになった。

【研究開発後の課題・事業化展開】

最終年度までに開発した各技術を最適に組み合わせて Teaching システムの構築および超精密ダイヤモンドバイトの製造方法の確立を図った。具体的に、①Teaching システムでは、熟練技術者のダイヤモンドの結晶軸推定方式の補完・実証、②レーザーによる粗加工方式の確立では、任意刃先形状の精密研削量が最少となる手法の確立、③2軸精密制御スカイフ加工技術の開発、および④機上形状計測技術・形状数値化、これらを機械装置「超精密ダイヤモンド研磨機」に組み込み、加工精度の向上、加工時間短縮を図った。

既に、研究開発機関において一部のユーザー向けにサンプル出荷を行い、高い評価を受けている。この評価により、市場拡大させるための品質は確保したと判断しているが、今後、更なる精度の追求、応用分野の開拓を図っていく。新規の応用分野としては、テレビ、PC、スマホ等のディスプレイのためのレンズシート、プリンタや一眼レフ交換ズームレンズの鏡筒、X線光学部品のフレネルゾーンプレート加工

等々が考えられ、国内のシートメーカーやマイクロレンズ製造メーカーをサンプルの出荷先として想定している。事業化としては平成26年5月頃を予定している。

【全体の総括】

研究開発内容を4つのサブテーマ、①ダイヤモンド加工 Teaching システム、②レーザー加工技術、③2軸精密制御スカ이프加工技術、④機上形状測定・形状数値化にわけ、全テーマにわたって、大学メンバーのご指導をいただき、当初予定通り、開発を効率的に進めることができた。各テーマごとに、今年度の開発目標を達成しており、特に、①ダイヤモンド加工 Teaching システムのテーマでは、これまでに構築した加工熟練者の暗黙知データベースに、高度な知見である結晶軸推定技術を取り込み、またスカ이프盤によるダイヤモンド研磨加工工程の学習が可能となるシステムも構築した。これは非熟練者に向けた「加工支援システム」として、現場における利用価値の高いものとなった。

初年度は任意曲線刃先形状のダイヤモンドバイト製作に不可欠な2軸スカ이프加工装置、2年度は粗加工の精度向上・時間短縮に必要であるレーザー加工装置の研究開発を行うなど、ダイヤモンドバイト製作の過程で必須となる要素技術の研究開発を実施しており、最終年度の目標である「任意曲線刃先形状の総型バイト製造技術」を確立したことは、日本の産業界に大いに貢献するものである。

情報機器メーカーからのアドバイザーには、実際に必要なプリズムシート、刃先形状等に関する情報、研究の方向に関するご指導をいただき、川下企業のニーズに密着した研究を推進し、研究開発終了後には、当該企業の新製品開発に大きく貢献するものと期待している。

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。