

平成19～20年度 地域活性化共同研究開発事業研究成果報告書
(電源立地地域対策交付金補助事業)

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

研究テーマ：小径パイプ内面の高度研磨技術開発

Theme of Research : Development of a Method for Polishing the Inner Surface of Cylinders of Small Diameter

平成21年3月

福島県
ハイテクプラザ
FUKUSHIMA TECHNOLOGY CENTRE

はじめに

日本経済の現状は、資源価格の不安定な情勢や米国発の世界的金融危機の影響により、消費の低迷や雇用情勢の悪化など、極めて厳しい状況下にあります。

このような変動の大きい社会情勢の中、本県におきましては、産学官の連携を強化し、県内企業が直面している技術課題に対し、ハイテクプラザを中核として地域企業と共同で研究開発を行い、成果を広く県内企業に移転し、技術力の向上と新製品の開発を促進するために平成 19 年度より平成 20 年度までの 2 年間にわたって、地域活性化共同研究開発事業「小径パイプ内面の高度研磨技術開発」に、実直に取り組んで参りました。

本事業では、県内製造業界からニーズの高かった「小径かつ穴長さが深い円筒シリンダ一部分の製造技術」とその最終仕上げ工程である「内面の高度研磨加工」について、自動機による高品質な研磨手法の確立、及び小径深穴内面を研磨するための新たな工具の開発を行いました。

本報告書は関係者一同の 2 年間の事業成果をとりまとめたものであり、広く県内企業の皆様の興味を引き、生産現場における技術向上の一助となれば幸いです。

おわりに、本事業の推進にあたり、参画企業の皆様、大学や関係機関の皆様の温かいご協力とご指導をいただきましたこと、心から厚く御礼申し上げます。

平成 21 年 3 月

福島県ハイテクプラザ
所長 宮野 壯太郎

研究テーマ：小径パイプ内面の高度研磨技術開発

目 次

| | |
|---------------------|-------|
| 1. 研究の概要 | ・・・1 |
| 2. 小径パイプ内面自動研磨装置の開発 | ・・・3 |
| 3. 小径部品内面の研磨前粗さの改善 | ・・・13 |
| 4. 小径深穴内面研磨材の開発 | ・・・21 |

研究の概要

研究の概要

1. 背景

研磨は、製造業の最終仕上げ工程として欠かせないものづくりの要素技術の一つである。例えば、均一な平坦面、3次元の複雑形状、コーナー部、小径部品、長尺部品の仕上げ技術として重要な役割を果たしている。我々が研究の対象としたものは、小径深穴内面の研磨技術である。特に産業機械の小型化、高精度化にともない、これら部品の表面粗さが均一でない場合、摺動部の摩擦が大きくなり、精密位置決めや機械寿命を大きく左右する。また、金型による成型品に不良が発生してしまうなど、シリンダー内面や金型部品などへの応用技術として、業界から強く要望が挙げられていた。

これら小径円筒内面の研磨手法として、一般的には、研磨対象となる穴の内径と同じ形状でわずかに外径寸法が小さい工具を作製し、ホーニング加工のように研磨面と工具を擦り合わせて研磨を行う手法や磁性流体による研磨手法、電解液による電解研磨などが応用されている。これらの手法は寸法穴形状に合わせて工具を特注する必要や特殊な砥粒を取り扱うノウハウ、設備投資の必要性など、コストや生産性の面で一般の製造現場には普及しにくい。現状は、内径に合わせて、作業者が研磨工具を自作することで対応しているが、手作業であるため、作業者やロットごとでの品質のバラツキが課題であった。

そこで、我々は、様々な内径寸法や形状に対応できるという手作業の研磨手法を上手く生かしながら、自動研磨装置の開発と、研磨工具の開発を行うことで、上記の課題に取り組み、製品品質の安定した高精度の小径深穴部品製造技術を確立した。

研磨対象としたワークは、主に携帯電話やデジタルカメラなどの家電製品の筐体を成型するプラスチック金型用部品であり、内径 ϕ 1.5~6mm、長さ約75~100mm、材質は合金工具鋼（SKD材）である。

また、実施体制として、ハイテクプラザでは装置の自動化技術を、（株）神崎製作所では、生産現場における小径深穴部品の製造プロセスの検討を、そして研磨剤メーカーである（株）光陽社では、研磨工具の開発を行った。

2. 分担課題と内容

2. 1. 小径パイプ内面自動研磨装置の開発 ハイテクプラザ

目的：小径深穴部品の自動研磨を行う装置を開発する。

概要：研磨対象は内径 ϕ 4~6mm、穴長さ75~100mm、アスペクト比12.5~25の小径深穴部品。研磨手法や研磨荷重などの研磨に関わる要素の検討結果を踏まえ、装置を設計製作した。また、本装置により、自動研磨の評価実験を行った。

2. 2. 小径部品内面の研磨前粗さの改善 株式会社神崎製作所

目的：小径深穴部品製造プロセス全体を見直し、研磨前段階の作業工程の検討を行う。

概要：研磨荷重を一定に負荷できる治具を製作し、粗研磨時の荷重と表面粗さの影響について調べた。また、研磨前工程のリーマ加工工程、熱処理工程を見直し、研磨前粗さを現状の4 μ mRaから向上させるための検討を行った。目標は、研磨前粗さで1 μ mRa、内径の真円度で10 μ mとした。

2. 3. 小径深穴内面研磨材の開発 株式会社光陽社

目的：小径深穴部品用の研磨手法の検討と工具や手法など技術の構築を行う。

概要：遊離砥粒、固定砥粒による研磨手法の評価を行った。また、固定砥粒を用いた軸付きの小径深穴内面研磨用工具を試作し、乾式の研磨手法で効果を検討した。更に、市場化、量産化を踏まえ、製造手法や形状の改良を行った。

3. 成果

3. 1. 小径パイプ内面自動研磨装置の開発 ハイテクプラザ

小径深穴部品製造プロセスの研磨工程を自動化し、研磨面品質の安定化を検討した。その結果、ワーク寸法最小内径 6mm、全長 75mm、アスペクト比 12.5 の部品の内穴内面を目標の表面粗さ 0.3 μ mRa 以下に安定的に仕上げることができた (図 1)。

3. 2. 小径部品内面の研磨前粗さの改善 株式会社神崎製作所

最終仕上げ工程である研磨に大きく影響する研磨前工程を含めた製造工程全体を検討することで、小径深穴部品の製造プロセスの確立と効率化を図った。その結果、研磨前粗さにして約 4 μ mRa であった工程を、約 1 μ mRa 以下に改善できることがわかった (図 2)。

3. 3. 小径深穴内面研磨材の開発 株式会社光陽社

小径深穴内面研磨手法の検討を行った。その結果、遊離砥粒や電解砥粒、磁性流体などの特殊な研磨剤の使用や設備導入の必要がなく、自社の生産設備で製造可能な固定砥粒による乾式の研磨工具を開発した。また、これら工具を自動研磨装置で使用することにより、工具の特性を有効に活用した研磨が行えることがわかった (図 3)。



図1 自動研磨装置



図2 小径深穴部品

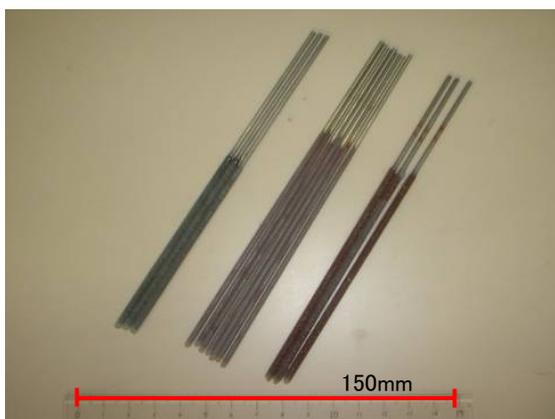


図3 研磨工具

小径パイプ内面自動研磨装置の開発

福島県ハイテクプラザ

小径パイプ内面の高度研磨技術開発

—小径パイプ内面自動研磨装置の開発—

Development of a Method for Polishing the Inner Surface of Cylinders of Small Diameter

福島県ハイテクプラザ 安藤久人、吉田 智
福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター 富田大輔
株式会社神崎製作所 神崎二郎、草野光一
株式会社光陽社 安部賢一、網島和郎、生田桂

固定砥粒を用いた研磨工具を開発し、乾式による小径深穴内面研磨技術の確立と、自動研磨装置を開発した。加工面に対して、工具の傾斜角度や押込み変位量を最適化した研磨手法を適用することで、目標である表面粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の仕上げを達成することができた。また、この結果を小径深穴内面（最小内径 $\phi 6\text{mm}$ 、長さ 75mm 、アスペクト比 12.5）の製品に応用し、目標の品質を達成することができた。

Key words: 小径深穴内面研磨、工具傾斜角度、押込み変位量

1. 緒言

製造現場では品質の安定化、コスト削減などの要望から、従来手作業によっていた生産工程の自動化ニーズを潜在的に抱えている。携帯電話やデジタルカメラなどの精密機器を成型するための金型用部品や、油圧シリンダー内面などには、小径かつ穴深さの長い高アスペクト比の部品が用いられている。製品の小型化や高精度化にともない、これら内面の表面粗さ品質の安定化と、更なる鏡面研磨が求められている。現状は、これら小径深穴部品の内面研磨を行うための工具がなく、作業者が工具を自作して手作業を行っている例が多い。そのために、大量に安定した生産が難しいのが課題となっている。そこで、小径深穴部品の高品質化と安定供給のために、共同研究企業と工具を製作し、この専用工具に対応した自動研磨装置を開発した。

具体的な研磨対象は、寸法形状が内径 $\phi 4\sim 6\text{mm}$ 、穴長さ $75\sim 100\text{mm}$ 、アスペクト比 $12.5\sim 25$ 、硬度がおおよそ HRC50 の合金鋼とした。また、内径の形状がストレートの穴のみではなく、テーパ形状をした部品にも対応できるものとした。目標品質は円筒内面の全面で $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の表面粗さを達成することとした。

ハイテクプラザで自動研磨装置を設計、製作する上で、共同研究企業の（株）神崎製作所では、手作業を自動化するための仕様の検討と小径深穴部品製造技術の検討を行い、（株）光陽社では、自社技術を基礎とする専用工具の開発を行った。

図1に試作した小径深穴内面用の研磨工具を示す。専用工具は、研磨対象とする部品の内径寸法に合わせ、鋼材の軸（ $\phi 2\text{mm}$ ）に固定砥粒を付着させ、工具と研磨面との接触により表面を仕上げるものである。

この片持ち式、軸付き工具を応用した自動研磨装置を設計、製作することとした。

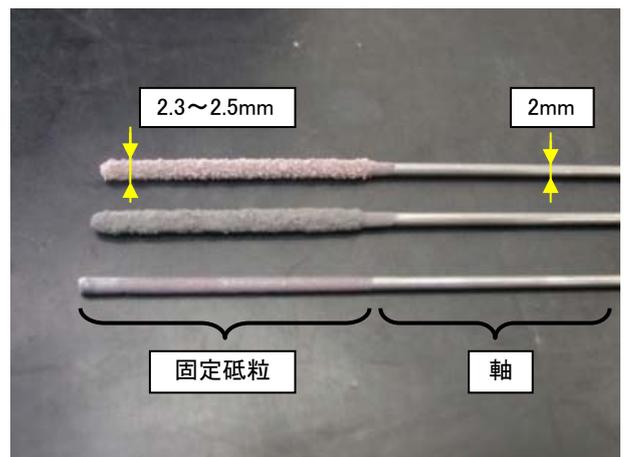


図1 軸付き研磨砥石

2. 自動研磨装置の設計と製作

自動研磨装置のコンセプトとして、我々は、小径内面研磨に一般的に用いられている、研磨ワークの寸法形状に合わせて最適化された外径を持つ、特注工具を用いるのではなく、多軸駆動機構を持った装置により、工具の形状を図1のような単純な形状とし、様々な内径寸法や長さに対応して研磨を行うことができる装置を開発することとした。そこで、以下に示す項目を重視し仕様を検討の上、自動研磨装置を設計製作した。

1) 研磨対象ワーク

・ワークの寸法は、内径 $\phi 4\sim 6\text{mm}$ 、外径 $\phi 10\sim 20\text{mm}$ 、全長 $75\sim 100\text{mm}$ とする。

・ワークの材質は合金鋼とする。

- ・ワークは縦向きに保持する。
- ・ワーク回転速度は、研磨対象とする想定ワークの負荷トルク及び負荷慣性モーメントから 2,400rpm を上限とする。

2) 工具

- ・軸付き工具は縦向きにモーターに取り付ける。
- ・垂直上方から工具をワークに挿入させる。
- ・工具回転速度は、工具外形がφ2.0mm と小径のため高速回転で周速を補うこととし、約 100,000mm/min(約 20,000rpm)以上のものとする。
- ・工具回転用のモーターは、上下方向及び傾斜など多軸運動をさせる必要があるため、モーター部が軽量のもの (500g 以下) を採用する。

3) 機構

- ・テーパ形状を研磨するための工具軸の傾斜機構を付与する。
- ・工具移動時、穴の半径方向と軸方向の2軸を動作させる機構を付与する。
- ・工具の送り速度を可変にし、往復運動させる。

4) 制御

- ・駆動軸の単独駆動と、連動運動の切替を可変にする。
- ・開発時に回転速度や移動距離などの修正や変更が簡易にできるシステムを採用する。

5) その他

- ・研磨屑などの残留を少なくするために、縦型とする。
- ・電源電圧を交流 100V にする。

表 1 に装置の仕様を示す。

表 1 自動研磨装置仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------------|---|
| 回転数 | 工具側: 最大35,000rpm(無負荷時) ワーク側: 最大4,000rpm(無負荷時) |
| 自由度 | 位置決め: 3軸(X, Z, θ) 回転軸: 2軸(工具、ワーク) |
| 動力 (位置決め) | リニアスライダアクチュエーター (リード長6mm、分解能0.01mm、 0.6° / 1puls) |
| 動力 (研磨) | 試料回転: ブラシレスDCモーター 工具回転: DCモーター |
| システム | インターフェース: PCIボード ソフト: Visual Studio 2005 OS: Windows XP |
| 全長 | 幅500 × 奥行500 × 高さ800mm |
| 電源 | AC100V |

これら仕様を基に、自動研磨装置を設計した。図2に

装置の概要を示す。

実際に装置を製作し、仕様を満足することを確認した。

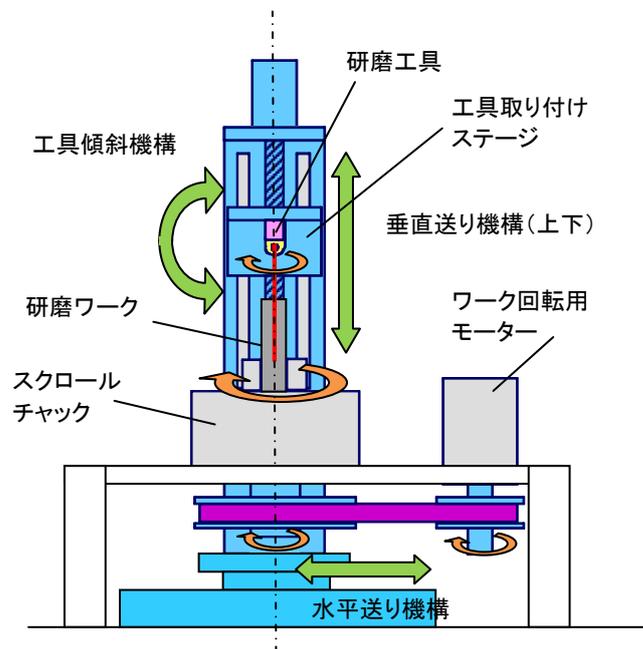


図 2 自動研磨装置概要図

3. 研磨実験

3. 1. 実験内容

試作した自動研磨装置により、研磨工具が研磨面に対してどのように接触し、どの程度の表面粗さに仕上げることができるかを確認するため、小径深穴部品のひとつであるテーパ形状の円筒内面を研磨した。材質は合金工具鋼の SKD61 材であり、熱処理により硬度が HRC50 ±2 となっている。

このとき、実験に用いた工具は、全長 150mm、工具外径φ2.3~2.5mm、軸外径φ2.0mm の片持ち式工具である。材料は、φ2.0mm の軸に鋼材を用い、その先端にアルミナ固定砥粒(#400)、平均粒径でおよそ 35μm の砥石がレジノイド系の接着剤により着けられている。研磨面との接触による弾性変形により、研磨面積が増加することをねらって、添加剤としてコルクを砥粒に混入させた。

この工具が研磨面に対して平行な位置関係となり、全面で研磨面と接触するように、テーパ角度と同じ角度 ($\theta=1^\circ$) だけ工具を傾斜させた。工具と研磨面の接触位置を目視で確認した後に研磨を行った。工具は大径部の方から挿入した。

実験条件を表2に示す。

表2 実験条件

| | |
|-----|--|
| 工具 | 砥粒種 アルミナ#400 粒 径 35 μ m 添加剤 コルク 工具傾斜角度 $\theta = 1^\circ$ (テーパ角度) |
| ワーク | 全長 90mm 形状 テーパー形状 内径 3.0mm(小径側)、6.4mm(大径側) 材質 SKD61 硬度 HRC50 \pm 2 |
| 加工 | ワーク回転速度 1,500rpm 工具送り速度 2.0mm/sec 工具回転速度 20,000rpm 工具挿入方向 大径側 |

実験後、サンプルを湿式高速切断機で軸方向に切断し、内面の表面粗さを測定した。このとき、試料の小径部、中央部、大径部の3箇所各々で表面粗さを3回計測し平均値を計算した。粗さ測定には図3に示す表面粗さ測定機を使用した。



(サーフコム 2000-DX、(株)東京精密社製)



(サーフコム 575A-3DF、(株)東京精密社製)

図3 表面粗さ測定機

また、表面粗さ測定部近辺をデジタルマイクロスコープ (KH-7700、(株)ハイロックス社製) にて観察した。また、研磨による工具の摩耗状況や砥石の脱落、損傷などがないかを目視で確認した。

3. 2. 結果

表面粗さの測定結果を表3に示す。

表3 研磨後の表面粗さ

| 測定箇所 | 小径部 | 中央部 | 大径部 |
|----------------|------|------|------|
| 表面粗さ μ mRa | 1.78 | 0.23 | 0.24 |

内面研磨した試料の大径部、中央部の表面粗さは目標値である 0.3 μ mRa 以下であったものの、工具を挿入した大径側に対して、小径部では 1.78 μ mRa と粗い面が残った。

図4に、粗さが目標値以下となったワーク中央部近辺の、デジタルマイクロスコープによる観察画像の例を示す。

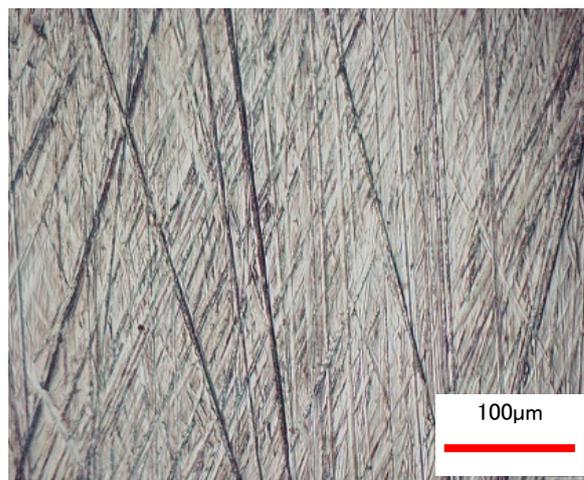


図4 研磨面の観察像(中央部)

工具の接触により生じたと見られるヘアラインのような研磨痕が確認できた。しかし、素地は概ね均質な金属光沢を持った表面に仕上がっていた。このとき、大径部も同様な表面であった。

図5に、表面粗さが大きかった小径部の観察画像を示す。表面粗さの小さい部位にくらべ、工具の接触で生じる研磨の痕跡が少なく、研磨残しと思われる凹状の粗面が確認できた。この粗面は大きさにして最大約 50 μ m ほどの大きさである。これが、観察面全体にわたり分布していた。

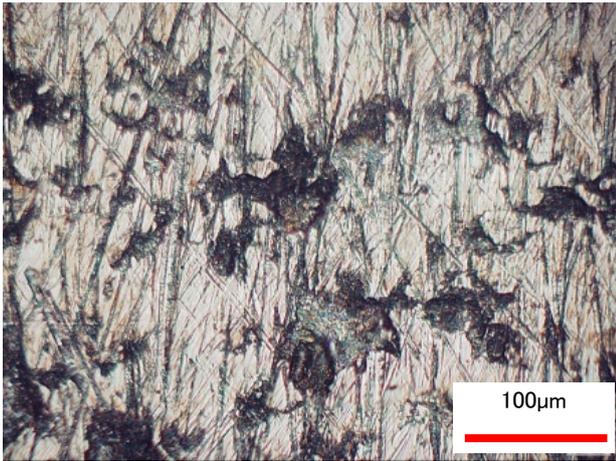


図5 研磨面の観察像(小径部)

研磨後の工具先端を観察した結果を図6に示す。工具先端には砥粒の脱粒と思われる剥離が確認できた。また、根元の一部には接触痕を示す黒色の変色が確認できたものの、工具中央部では接触した形跡がなかった。



図6 研磨後の研磨工具

3. 3. 考察

試作した自動研磨装置と工具による研磨実験の結果、本実験条件では、研磨面の全長で、目標とする表面粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下を達成することができなかった。その理由として、研磨手法と工具の問題の2点が考えられる。

研磨手法について、今回の実験に使用したワークは内径が小さく、穴長さが深いため、研磨中の実際の工具と研磨面の接触状況が確認できない。工具と研磨面との位置関係を平行とした本実験条件では、小径部が研磨されておらず、また、研磨工具も工具先端の観察から、全面接触していないことがわかる。つまり、工

具先端が浮き上がってしまい、工具挿入方向に対して奥側となる小径部が磨かれなかったと考えられる。

工具について、特に研磨面と工具の接触により砥粒の剥離が生じてしまった。剥離の問題は、接着剤の選定や配合など接着力や、添加剤などの混入による影響などが考えられる。

これら工具の不安定な接触状況と砥粒の脱落という2つの大きな要因のために、研磨部位による表面粗さ品質のばらつきが発生したと考えられる。

以上から、自動研磨装置と研磨工具の機能を十分に発揮できるような研磨手法の検討が必要であることがわかった。

そこで我々は、研磨面に対する工具姿勢の影響と、砥粒が脱落しない工具の作製を詳細に検討することとした。工具姿勢が表面粗さに及ぼす影響について実験による検討を行うこととし、砥粒の脱落しない研磨工具の作製は共同研究企業で行った。

4. 研磨面に対する工具姿勢の検討

4. 1. 実験内容

前節の実験条件では、均一にワークを研磨できなかったため、研磨手法を検討するための実験を行った。図7に示すように、工具を傾けて押しつけることで、工具先端が浮き上がることなく、安定して研磨面に接触させることができる。

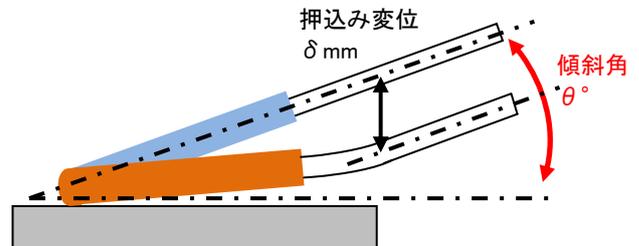


図7 軸の弾性を応用した研磨手法

ここで、研磨面に対する工具の傾斜角 θ° と押し込み変位 δm とを調整したとき、作用する研磨荷重も変わり、工具の接触長が変わると考えた。

これら工具姿勢を変えたときの研磨面粗さが良好に仕上がる条件を調べるため、実験を行った。

4. 2. 工具姿勢

4. 2. 1. 実験手法

工具傾斜角度、工具押し込み変位量など、工具姿勢の違いによる、研磨への影響を調べるために実験を行った。実験条件を表4に示す。

表4 実験条件

| | |
|-----|--|
| 工具 | 砥粒種 CBN325/400 50%粒径 50 μ m 添加剤 なし 軸径 ϕ 2mm、長さ150mm、 材質 SKD61 |
| ワーク | 研磨前粗さ 約 1 μ mRa 形状 平板、外形 ϕ 30mm、板厚 10mm 材質 SKD61 硬度 HRC50 \pm 2 |
| 加工 | ワーク回転速度 400rpm 工具送り速度 2.0mm/s 工具回転速度 5,000rpm 工具傾斜角度 θ 1 $^\circ$, 2 $^\circ$, 3 $^\circ$ 押込み変位量 δ 1mm, 3mm, 5mm |

実験には、工具と接触部の位置関係が確認しやすいよう、円筒内面ではなく、平面円盤形状のサンプルを用いた。また、使用した工具は、共同研究先で検討の結果、砥石にコルクを混入しないものが、研磨後に砥粒の脱落や剥離などが生じないことがわかったため、これらを改善したものを使用した。

実験条件について、ワーク回転速度を400rpmと一定とした。このとき、ワーク形状が平面なため、条件によっては、高速回転時に研磨面に対して工具が滑ってしまう場合があった。特に、工具傾斜角度が小さい条件の場合には、このような現象が確認されたため、回転速度を400rpmに設定した。

また、工具の傾斜角度を1 $^\circ$ 、2 $^\circ$ 、3 $^\circ$ 、工具押込み変位量を1mm、3mm、5mmと変化させ、仕上げ面粗さの時間変化と工具接触長を測定した。このとき、工具傾斜角度は、工具軸とワークとの長さから、 $\theta=3^\circ$ を最大値とした。また、押込み変位量は工具の軸が塑性変形をしない程度の $\delta=5$ mmを最大値とした。

各条件 θ° 、 δ mmにおける表面粗さの時間変化及び、工具接触長の時間変化を測定した。粗さは研磨時間2分ごとに表面粗さ計で測定した。数値は、ワーク表面を3回計測した後、その平均値を算出した。

また、工具姿勢の変化による研磨時の工具の接触状況と、表面粗さとの相関を調べるために工具接触長を測定した。工具接触長は、研磨によりその先端が研磨屑の付着によって黒色に変色する。その変色部を工具顕微鏡（MM-40/2T、（株）ニコン社製）で50倍の倍率で観察した。また、装置のステージに取り付けてあるカウンターを用いて変色部の長さを測定した（図8）。



図8 工具顕微鏡

また、図9に示すように、工具接触長が研磨に与える影響を検討するため、工具傾斜角度を規定し、押込み変位量を変えたときの工具に作用する荷重を荷重計（MP-10N、（株）アトニック）で測定した。荷重計の検出端子にアルミの板（幅24mm×長さ40mm×厚さ3mm）を張り付け、その表面に工具を押し付けた。

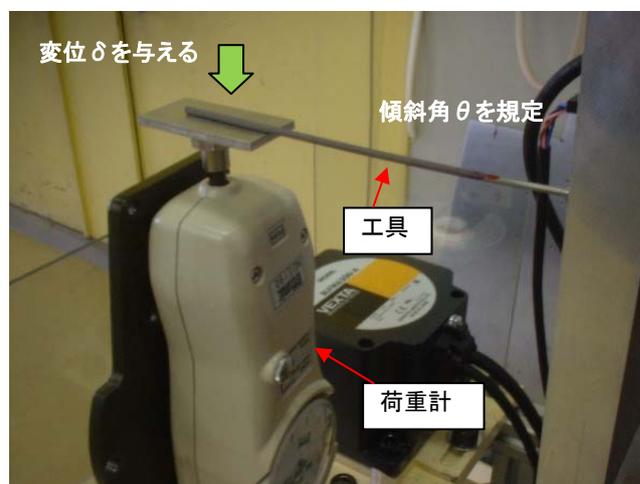


図9 工具に作用する荷重の測定

図10に詳細を示す。工具傾斜角度を規定し、工具先端部を荷重計の検出部に工具接触長とおおよそ同じ長さになるように工具を押し込んだ。このときの荷重計の値を測定した。

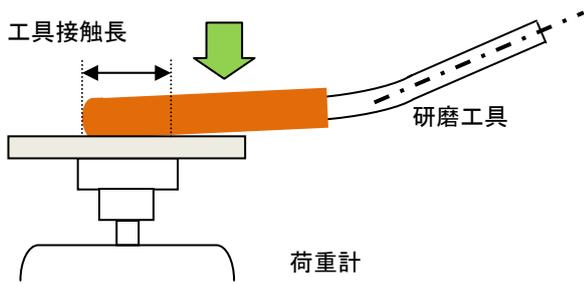


図10 工具に作用する荷重の計測

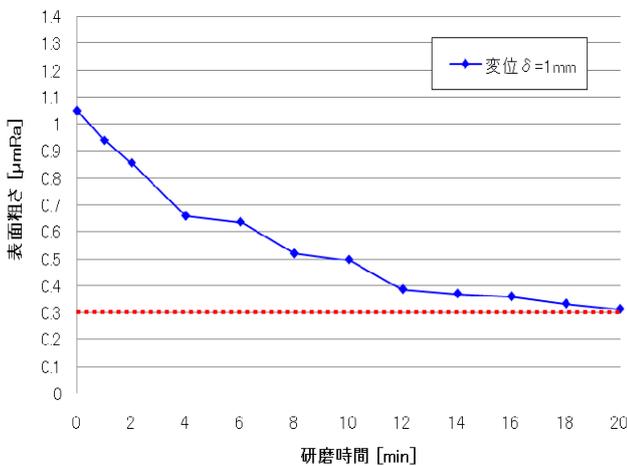
4. 2. 2. 結果と考察

工具傾斜角度 θ° 、押込み変位量 δ mmを変化させたとき、条件によっては工具先端が試料表面から浮きあがり研磨ができない条件があった。それぞれの条件における研磨の可否の状況を表5に示す。研磨可能な条件を○、研磨が不可能な条件を×とした。

表5 実験条件における研磨の可否

| | | 工具傾斜角度 θ° | | |
|--------------------|---|-----------------------|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 押込み変位量 δ mm | 1 | ○ | ○ | ○ |
| | 3 | × | ○ | ○ |
| | 5 | × | × | ○ |

図11に、工具傾斜角度 $\theta=1^\circ$ 、押込み変位量 $\delta=1$ mmにおける表面粗さの時間変化minを示す。

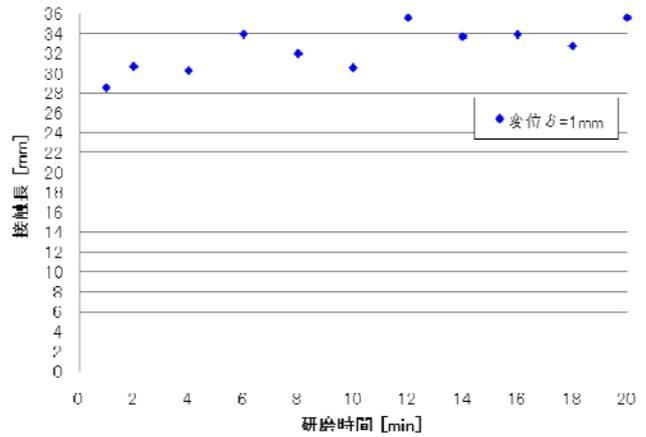


工具傾斜角 $\theta=1^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1$ mm

図11 表面粗さの時間変化($\theta=1^\circ$)

このとき、図11に示すように20分を経過しても表面粗さは目標値以下にはならなかった。

図12には、このときの工具接触長を示す。

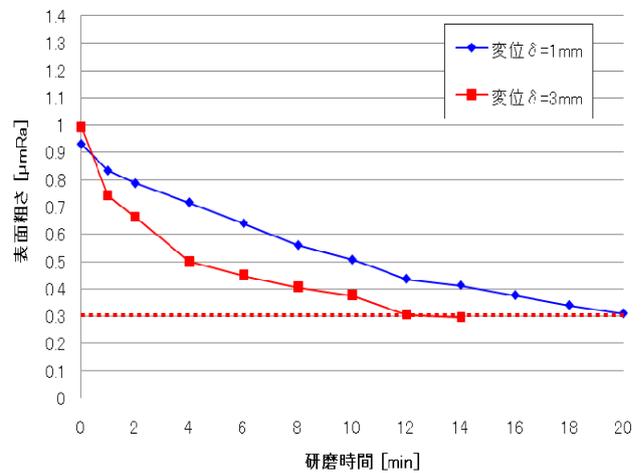


工具傾斜角 $\theta=1^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1$ mm

図12 工具接触長の時間変化($\theta=1^\circ$)

結果より、工具接触長は約28mmから36mmと大きい値を示した。

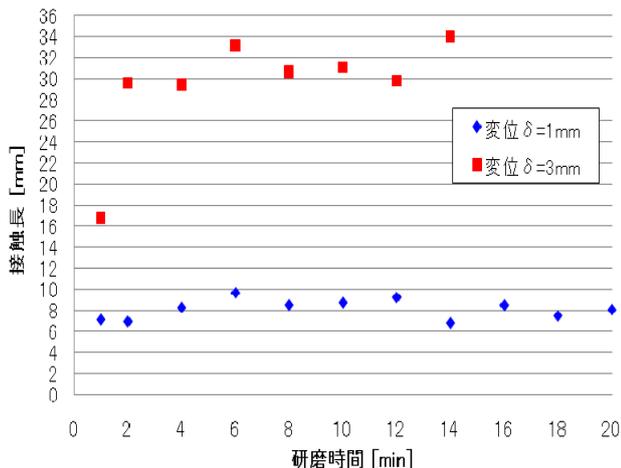
図13に、工具傾斜角 $\theta=2^\circ$ 、押込み変位量 $\delta=1, 3$ mmの場合の結果を示す。



工具傾斜角 $\theta=2^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1$ mm, 3mm

図13 表面粗さの時間変化($\theta=2^\circ$)

図13に示すように、 $\delta=1$ mmのとき、20分研磨後も表面粗さは目標値以下にはならなかった。一方、 $\delta=3$ mmと変位を大きく取ると、表面粗さは14分で目標値 $0.30\mu\text{mRa}$ に達した。

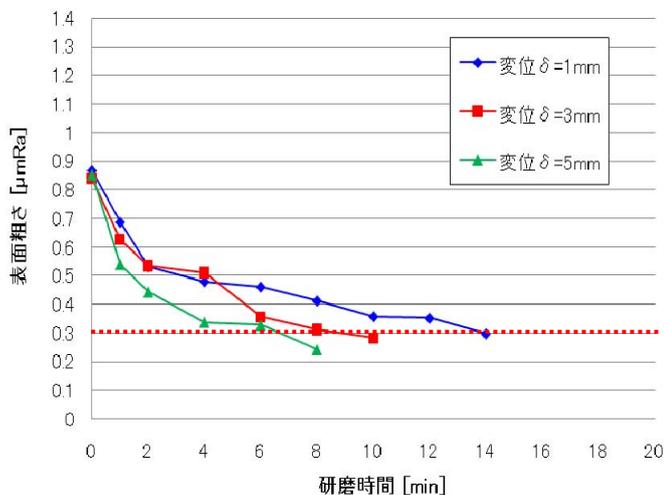


工具傾斜角 $\theta=2^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1\text{mm}, 3\text{mm}$

図14 工具接触長の時間変化 ($\theta=2^\circ$)

このとき、工具接触長を図14に示す。押込み変位量 $\delta=1\text{mm}$ のとき、工具接触長はおよそ8mmであるのに対し、押込み変位量の大きい $\delta=3\text{mm}$ の条件下では、およそ30~34mmと工具接触長が伸びている。

図15に、工具傾斜角 $\theta=3^\circ$ 、押込み変位量 $\delta=1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$ の場合の表面粗さの時間変化を示す。



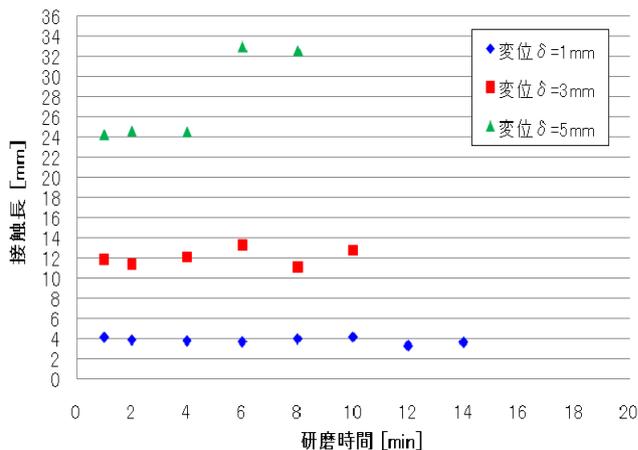
工具傾斜角 $\theta=3^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$

図15 表面粗さの時間変化 ($\theta=3^\circ$)

押込み変位量が $\delta=1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$ と増加するのにもない、目標の粗さ以下に仕上がる研磨時間が短くなる傾向を示した。

工具傾斜角度をある角度に規定した場合、押込み変位量を増やすと、目標粗さに到達するまでの時間が短縮する結果となった。

また、図16に工具接触長の時間変化を示す。



工具傾斜角 $\theta=3^\circ$, 押込み変位量 $\delta=1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$

図16 工具接触長の時間変化 ($\theta=3^\circ$)

変位 $\delta=1\text{mm}$ のとき、工具が傾いているため、接触長がおよそ4mmと先端のみが接触している状況であるのに対し、押込み変位量を増やしていくと、 $\delta=3\text{mm}$ のとき約12mm、 $\delta=5\text{mm}$ の場合、24mm~33mmまで増加する結果となった。

また、工具接触長と研磨荷重との相関を検討するために、工具接触長となるように工具を押し込んだ場合の研磨荷重の値を表6に示す。このとき、表の上段には測定した工具に作用する荷重値を、下段()内の値は、図12、14、16の測定結果から工具の接触長として目安とした長さを示す。

表6 工具先端に作用する荷重[N]

| | | 工具傾斜角度 θ ° | | |
|--------------------|---|-------------------|----------------|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 押込み変位量 δ mm | 1 | 0.39 (32mm) | 0.52 (8mm) | 0.56 (4mm) |
| | 3 | — | 0.78 (32mm) | 1.15 (12mm) |
| | 5 | — | — | 1.30 (32mm) |

工具傾斜角度が大きく、かつ押込み変位量が多いほど、工具に作用する荷重が大きい結果となった。

平面試料の研磨実験の結果から、工具傾斜角度 θ° が大きく、かつ押込み変位量 δmm が大きい場合、短時間で目標粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下に仕上げる事ができた。また、工具傾斜角度 θ° が同じ場合、結果より工具接触長は押込み変位量 δmm が大きいほど長い。このとき、目

目標粗さに達する研磨時間が短縮する結果となった。工具に作用する荷重は、工具傾斜角度 θ °が大きく、かつ押し込み変位量 δ mmが大きいほど大きい値を示した。これは、目標粗さに到達する研磨時間と同様の傾向を示している。

この理由として、工具傾斜角度が大きく、かつ押し込み変位量が増加すれば、工具に作用する分布荷重が増加し、工具が研磨面に対して安定して全面接触する状況となるためと考える。そのため、単位時間あたりに研磨に作用する砥石面積も増加し、短時間で目標粗さに仕上がったと考える。

4. 3. ワーク回転速度の検討

4. 3. 1. 実験手法

工具姿勢（工具傾斜角度、押し込み変位量）が、研磨に要する時間に及ぼす影響を実験により調べた。その結果、本実験条件下では、工具傾斜角度 $\theta=3^\circ$ 、押し込み変位量 $\delta=5$ mmのとき、最も短時間で目標とする表面粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下に仕上げることができた。そこで、今度は工具姿勢が、最適な $\theta=3^\circ$ 、 $\delta=5$ mmの条件下で、ワーク回転速度を変化させたときの仕上げ面粗さの時間変化を測定した。この工具条件下では、ワークの回転速度を $2,000\text{rpm}$ にしても、工具が安定して押し付けられ、研磨面を滑ることはなかった。

ワーク回転速度は 200rpm (25), 400rpm (12.5), $2,000\text{rpm}$ (2.5)と変化させた。()内は工具回転速度/ワーク回転速度比を示す。工具傾斜角度 $\theta=3^\circ$ 、 $\delta=5$ mmである。

4. 3. 2. 結果と考察

ワーク回転速度を変えたとき、目標粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ に到達するまでの表面粗さの時間変化を図17に示す。

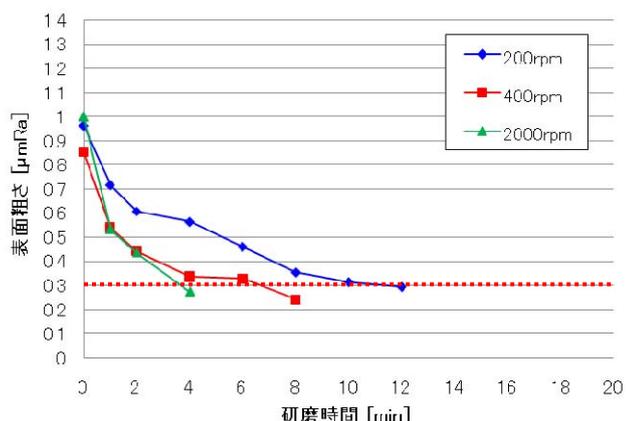


図17 ワーク回転速度と表面粗さ

ワーク回転速度が増加すると研磨に要する時間が短縮した。回転数の増加（工具回転速度/ワーク回転速度比の減少）にともない、目標粗さに達する研磨時間が短縮した。

これは、ワークの回転数を増加させることで、単位

時間に砥石と研磨面が接触する回数が増加するため、研磨に要する時間が短縮したと考えられる。

4. 4. 条件の最適化

以上の実験結果を受けて、工具傾斜角度 $\theta=3^\circ$ 、押し込み変位量 $\delta=5$ mm、ワーク回転速度 $2,000\text{rpm}$ を最適な研磨条件とした。

5. 小径深穴部品への応用

5. 1. 実験内容

平面円盤サンプルで実験した、工具姿勢を考慮した研磨条件と、コルクを混入させない新たな軸付き工具での結果を受け、選定した研磨条件（工具傾斜角度 $\theta=3^\circ$ 、工具押し込み変位量 $\delta=5$ mm、ワーク回転速度 $2,000\text{rpm}$ ）が、実際のワークを研磨する上で適切であるかを検討するため、高アスペクト比の部品である、テーパ形状をした円筒部品内面を、自動研磨装置により研磨した。

自動研磨装置に工具とワークを取り付け、運転を行う。このとき、工具は研磨面に対して $\theta=3^\circ$ となるように傾斜させ、テーパ面に沿って工具が移動するように制御を行った。

このときの実験条件の詳細を表7に示す。

表7 実験条件

| | |
|-----|---|
| 工具 | 砥粒種 CBN325/400 50%粒径 $50\mu\text{m}$ 添加剤 なし 軸径 $\phi 2\text{mm}$ 、長さ 150mm 、 材質 SKD61 |
| ワーク | 研磨前粗さ $0.58\mu\text{mRa}$ 全長 75mm (送り全長 80mm) 形状 テーパー内面 内径 6mm (小径側)、 11.5mm (大径側) アスペクト比 12.5 材質 SKD61 硬度 $\text{HRC}50\pm 2$ |
| 加工 | ワーク回転速度 2000rpm 工具送り速度 3.0mm/s 工具回転速度 $5,000\text{rpm}$ 工具傾斜角度 $\theta = 3^\circ$ 押し込み変位量 $\delta = 5\text{mm}$ 工具挿入方向 大径側 |

試験後、表面粗さ計により、研磨面を測定した。測定箇所はワークの大径部、中央部、小径部をそれぞれ3回測定($n=3$)し、その平均値を計算した。

1 往復ごとに大径側の表面粗さを測定し、目標となる $0.3\mu\text{mRa}$ の表面粗さになるまで研磨した。

図 18 に実験の状況を示す。

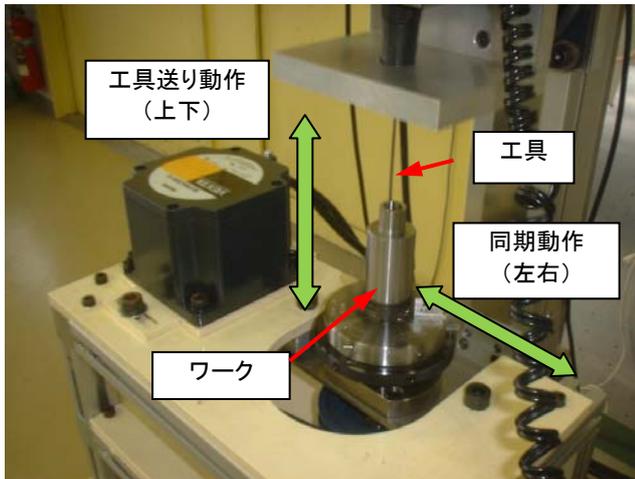


図 18 実験の状況

5. 2. 結果

実験結果を表8に示す。

表8 研磨後の表面粗さ

| 測定箇所 | 小径部 | 中央部 | 大径部 |
|----------------------|------|------|------|
| 表面粗さ μmRa | 0.25 | 0.29 | 0.29 |

表面粗さにして最大 $0.29\mu\text{mRa}$ と、ワーク内面の大径部、中央部、小径部の各部位で目標の粗さである $0.3\mu\text{mRa}$ 以下に仕上げることができた。このとき、自動研磨に要した時間は4分27秒であった。

また、図19、20、21にデジタルマイクロスコープ (KH-7700、(株)ハイロックス社製) で観察した研磨面 (大径部、中央部、小径部) の表面状態を示す。

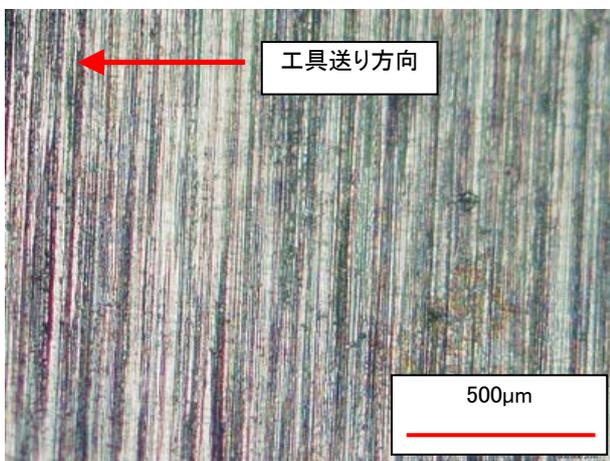


図19 研磨面の観察(大径部)

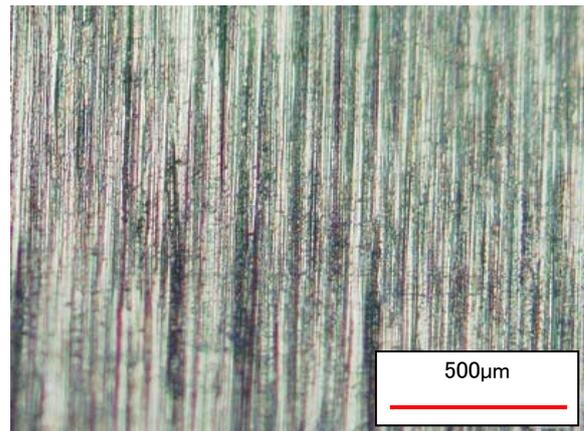


図20 研磨面の観察(中央部)

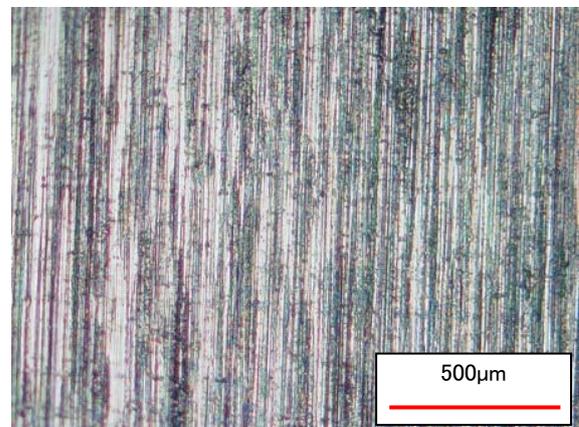


図21 研磨面の観察(小径部)

工具の送り方向と垂直に、研磨工具が接触したと思われるヘアライン状の研磨痕が確認できた。各部位とも均一な研磨面が確認できた。

また、このとき、小径部研磨面の三次元形状データを図22に示す。3節の実験では、研磨が難しかった小径側が良好に研磨できていることがわかった。

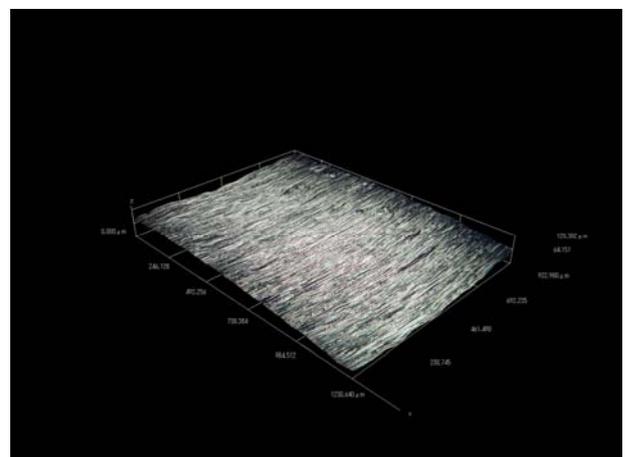


図22 研磨面の三次元形状(小径部)

5. 3. 考察

自動研磨へ平面研磨の条件を適用することで、高アスペクト比の小径深穴部品の円筒内面を均一な表面粗さに仕上げる事ができた。

特に、小径部が良好に研磨できており、コルクを混入しない新規工具と、工具の傾斜角度と押し込み変位量を規定した研磨手法に品質安定化の効果があることがわかった。

6. 結言

小径内面を研磨する手法として、固定砥粒を用いた高アスペクト比に対応した研磨工具を用い、かつ、工具の傾斜角度と押し込み変位量を最適化した研磨条件を用いることで、均一な研磨面（表面粗さにして $0.3\mu\text{mRa}$ 以下）を達成することができた。

以下に、本研究の成果をまとめる。

- 1) 固定砥粒による軸付きの片持ち式研磨工具による自動研磨装置を開発した。
- 2) 工具の傾斜角度、押し込み変位量の条件を最適化することで、 $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の均一な研磨面を達成した。
- 3) 条件に基づき、寸法にして内径6mm、全長75mm、アスペクト比で12.5の小径深穴部品を仕上げる事ができた。

更に、今後の課題として、主に以下の事項について検討を行っていきたい。

- 1) 内径寸法がより小さく、全長の長い、高アスペクト比の小径深穴部品へ応用する。
- 2) 要求される表面粗さに対応するため($0.2\mu\text{mRa}$ 以下、 $0.1\mu\text{mRa}$ 以下など)、砥粒の種類や粒径などの異なる工具を適用する。
- 3) 本研究の研磨手法を応用した自動研磨装置を製造ラインに組み込むため、生産性の評価を行う。

小径部品内面の研磨前粗さの改善

株式会社神崎製作所

小径部品内面の研磨前粗さの改善

Processes which Improve the Surface State of Cylinders of Small Diameter before the Final Polishing Step

株式会社神崎製作所 神崎二郎, 草野光一
福島県ハイテクプラザ 安藤久人, 吉田 智
福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター 富田大輔

本研究では自動化を行うために、研磨工程の特に研磨荷重と仕上げ面粗さの影響を調べた。また、最終工程である研磨工程に大きく影響を与える研磨前工程のリーマ加工と熱処理工程の条件を検討し、従来の加工工程では研磨前粗さ約4 μ mRaであった表面粗さを、約1 μ mRaにした。また、これら約1 μ mRaのリーマ加工による切削面は、1種類の工具のみで目標粗さ0.3 μ mRa以下に上げることができた。しかし、チッピングなどにより刃先が欠けてしまった場合には、表面にむしれが生じてしまった。

Key words:プラスチック成形金型、テーパー、リーマ加工

1. 緒言

携帯電話やデジタルカメラなど、精密機器の筐体を製作するプラスチック成形金型の重要な部品の一つとして、樹脂の流路となるスプルーブシュと呼ばれる部品がある。材質は金型材である合金工具鋼(SKD材)であり、図1に示すように、内径が大径側で約 ϕ 4~8mm、小径側で約 ϕ 1.5~6mm、全長が標準品で75~100mmと長くテーパー形状をしている。

精密機器の小型化や形状の複雑化などにもない、穴の内面粗さも樹脂の流入抵抗などの点から、より小さくすることが求められている。



図1 小径深穴部品

しかし、これら小径深穴部品内面の研磨において、現状では適切な研磨工具は市販されておらず、工具を自作し手作業で研磨している。そのため、研磨作業への負担とともに研磨面の品質が安定しないという問題があった。本研究では、この問題を解決するため、小径深穴の内面研磨手法および自動研磨装置の開発を行っているが、安定した仕上げ面品質を得るためには、研磨前の加工面の状態(粗さ)が重要であり、粗研磨工程が必要である

が、現状の研磨工程を自動化すると粗研磨工程、仕上げ研磨工程で合計2台の研磨装置が必要となり高コスト化してしまう。そこで、本研究では、自動研磨に対応した研磨前粗さの向上を行い、2工程かけている研磨工程を1工程で行うことを目的に、製造工程の見直しを行った。

2. 小径深穴部品の製造プロセス

2. 1. 製造プロセス全体の現状

本研究で研磨対象としている、小径深穴ワークの製造工程を図2に示す。

- (1) 金型材料素材 (SKD材) を切断
- (2) 旋盤による粗加工
- (3) フライス盤によるボルト穴加工
- (4) リーマによるテーパー穴加工
- (5) 熱処理 (大気中)
- (6) 円筒研削による外周研削
- (7) 内穴のワイヤー放電加工
- (8) 内径粗研磨 (電着工具)
- (9) 内径仕上げ研磨 (自作工具)

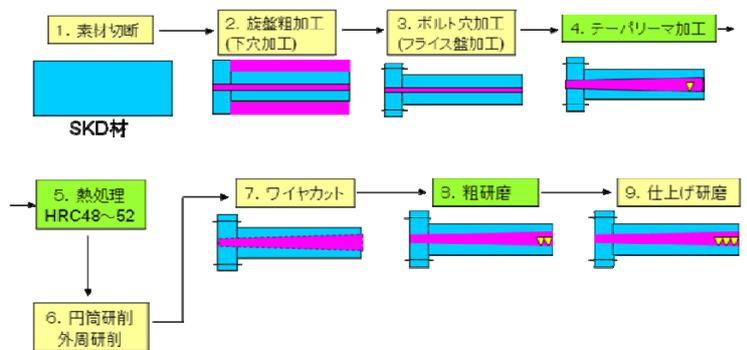


図2 小径深穴部品の製造プロセス

図3に、各工程終了後の円筒内面の表面粗さを示す。表面粗さは3回計測した平均値を示す。

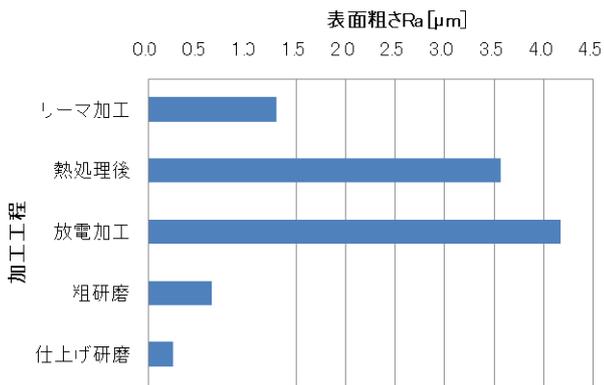


図3 加工工程ごとの円筒内面表面粗さRa

リーマ加工後の表面粗さは、およそ1~1.5μmRaであるが、その後の熱処理で約3.6μmRa、放電加工で4.2μmRaと大きく増加している。その後、粗研磨により表面粗さをおよそ0.6μmRaまで仕上げ、最後の仕上げ研磨で0.3μmRa以下に磨いていた。

2. 2. リーマ加工工程

リーマ加工はテーパ穴を開ける工程である。特にワークを700rpmの高速で回転させて加工を行う。表面粗さは、工具による切削加工のため、およそ1~1.5μmRaに仕上げることができる。使用する工具は、小径かつ長尺であるため、刃が振動を起こし(びびり現象)、ワーク内面にうねり形状が残ってしまう。図4にリーマ加工後のワークの真円度を示す。真円度にして、約15.7μmであった。

ワーク回転速度: 700rpm
真円度: 15.7μm
測定深さ: 3mm

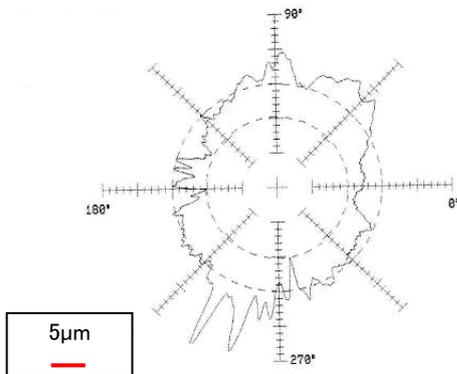


図4 リーマ加工ワークの真円度

2. 3. 熱処理工程

現状の熱処理工程を図5に示す。大気中で、焼入れを680°C (1時間)、880°C (2.5時間)、1020°C (2.5時間)で行い空冷する。その後、焼戻しを2段階の工程、590°C (3時間)、510°C (5時間)で行い空冷を行う。保持時間のみで合計14時間かけているが、昇温時間を考慮すると、熱処理時間は14時間以上となる。このときの目標の硬度はHRC50±2である。

熱処理は要求仕様の硬度を得るためのものであるが、図6に示すように、雰囲気が大気中のために表面に酸化被膜を形成してしまう。このとき表面粗さにして約3.6μmRaにまで、粗らされてしまう。

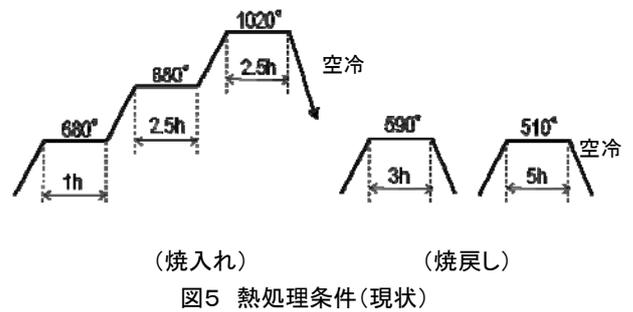


図5 熱処理条件(現状)



図6 熱処理したワーク(現行品)

2. 4. ワイヤ放電加工工程

ワイヤ放電加工は、リーマ加工時のうねり形状を除去する工程である。このとき高い電流密度により加工を行うため、放電痕が表面に形成され、およそ4.2μmRaまで表面粗さが大きくなる。

ここで、ワイヤ放電加工での表面粗さを向上させる方法として、ワイヤ径を細くし、加工時間を長くする方法がある。しかし、特殊な絶縁治具が必要なため、ワイヤが切れてしまい作業性が大幅に悪くなってしまい、作業時間が大幅に増加してしまい短納期の要求に答えられないなどの課題があった。

2. 5. 粗研磨工程

粗研磨は、放電加工面粗さ $4\mu\text{mRa}$ をおよそ $0.6\mu\text{mRa}$ まで仕上げる重要な工程である。使用する工具は電着砥石であり、砥粒はCBN、粒度は#600である。特に粗研磨前の表面粗さが大きいため、作業に負担がかかっていた。作業は手作業で行うため、品質は作業者の熟練に依存している。このため、品質にバラツキが生じやすい。

また、最後の仕上げ研磨の直前の工程であるため、研磨残しや研磨面が均一に仕上がっていない場合には、後の研磨工程に直接影響を及ぼしてしまう。

3. 研磨前粗さ改善のための検討

現状の研磨条件を検討した結果、研磨品質の安定化のためには、最終仕上げの研磨工程の直前の工程である粗研磨工程で、手作業の技量により品質に差が生じる要因と、その粗研磨に大きく負担をかけている表面粗さにして $4\mu\text{mRa}$ となっている粗研磨前の工程改善を行う必要があると考えた。

まず、粗研磨品質の安定化要因としては、手作業時の研磨荷重であると考え、研磨荷重の違いによるワーク表面の粗さについて実験による検討を行った。また、目標とする研磨前粗さは、共同研究先での実験結果より、均一な $1\mu\text{mRa}$ の表面であれば、自動研磨装置と#400のCBN砥石を用いた工具で、最終的な目標粗さである $0.3\mu\text{mRa}$ 以下に仕上がることがわかった。

以上より、研磨前の表面粗さに大きく左右する、円筒内面の粗さに関与している工程であるリーマ加工と熱処理について検討を行うこととした。これにより、放電加工を要しないうねり形状のないリーマ加工条件を見つけ出し、要求仕様の硬度を満足する真空熱処理を施すことで研磨前工程の粗さ改善ができると考えた。そこで、粗研磨工程、リーマ加工工程、熱処理工程についてそれぞれ検討を行った。

3. 1. 粗研磨工程の検討

3. 1. 1. 実験内容

手作業による粗研磨のばらつきが、最終工程である仕上げ研磨に大きく影響を与える。研磨荷重を均一にすることで、研磨品質が安定するかを検討するため、工具を一定荷重で押し付けたときの表面粗さを調べた。

実験は、当社で、評価は共同研究機関のハイテクプラザで行った。図7に示すように、汎用旋盤と荷重の大きさを調整できる治具を用いて実験を行った。

研磨荷重を一定とする方法は、図7に示すようにバネ計りを工具軸の端にひっかけ、回転軸を中心に工具を傾斜させる方法である。実験中、作業者はバネ計りの数値が一定となるように調整した。

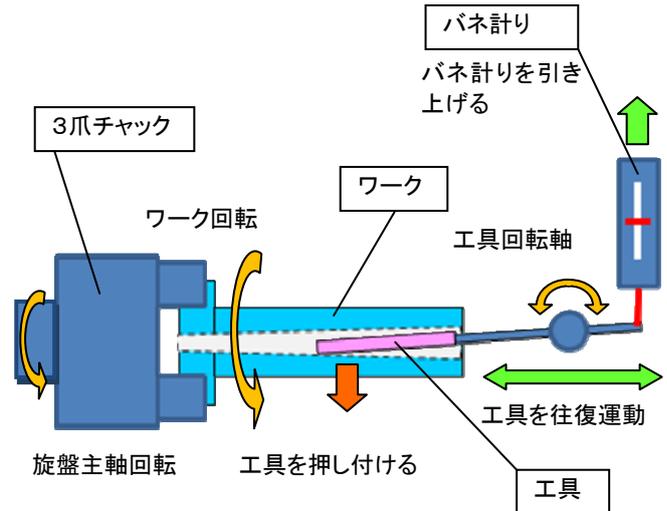


図7 研磨荷重一定とした研磨手法

このとき、ワークは旋盤の主軸に取り付け、回転させる。また、工具は一定速度で挿入し、往復運動させる。バネばかりの指示値と往復回数を変え実験を行った。このときの実験条件を表1に示す。

表1 実験条件(粗研磨工程の検討)

| | |
|-----|---|
| 工具 | 砥石 電着砥石(CBN 600) 平均粒径 $25\mu\text{m}$ 工具回転数 0rpm |
| ワーク | 研磨前粗さ 約 $4\mu\text{mRa}$ (放電加工面) ワーク回転数 1000rpm 長さ 75mm 形状 テーパー内面 内径 11.5mm(大径側)、6mm(小径側) 材質 SKD61 硬度 HRC50 \pm 2 |
| 加工 | バネ計り指示値 1, 2, 3kgf 往復回数 5, 10, 20回 |

測定は表面粗さ計(SURFCOM 575A-3DF、(株)東京精密社製)を使用し、3回測定した平均値を求めた。

3. 1. 2. 結果

研磨荷重、工具送りの往復回数を変えたときの表面粗さの変化を図8に示す。表面粗さは、いずれの研磨荷重でもおよそ $0.65\sim 0.70\mu\text{mRa}$ であった。また、往復回数(研磨時間)を増やしても表面粗さには大きな変化は見られなかった。

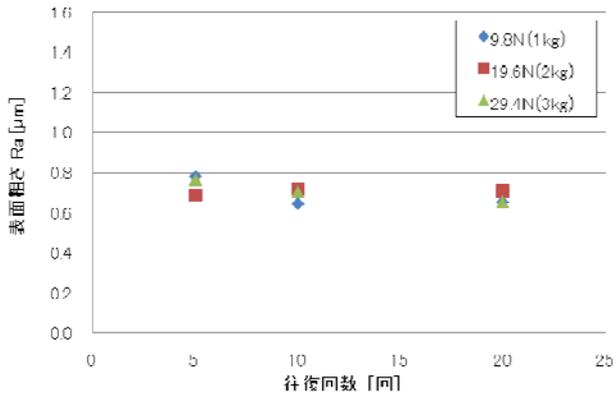


図8 研磨荷重と表面粗さの関係

3. 1. 3. 考察

本実験条件下では、研磨荷重および往復回数（研磨時間）を変えても表面粗さに大きな変化がなかった。この結果から、研磨荷重の増加に比例して表面粗さが向上することはなく、相関は認められなかった。

このことから、仕上げ面粗さに影響すると考えられている研磨前粗さのバラツキは、粗研磨における研磨荷重などの条件の変動によるものではなく、4μmRaある粗研磨前の表面粗さに起因する、研磨残し等であると思われる。

この対策として、粗研磨前の表面粗さの改善が最も有効であると考えられるので、以下では工程の見直しによる粗さの改善について検討した。

3. 2. リーマ加工工程の検討

3. 2. 1. 実験内容

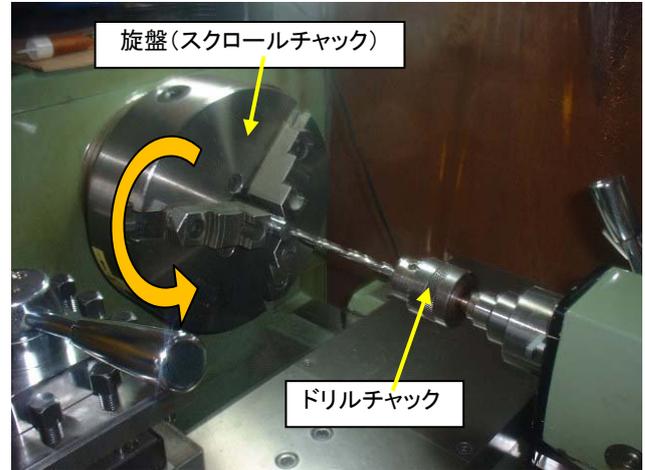
生産に用いているリーマは、外径が小径でかつ全長が長いので、びびり振動をおこし、内穴形状を変形させてしまう。今回、後の放電加工による内穴形状の修正の工程を省くため、びびり振動のないリーマ加工条件を見つけ出すこととした。

真円度を測定して、びびり振動による内穴形状の変化を確認した。目標は、数値にして10μm以下を達成することとした。また、リーマ加工後の表面粗さを1μm Raに仕上げることにした。

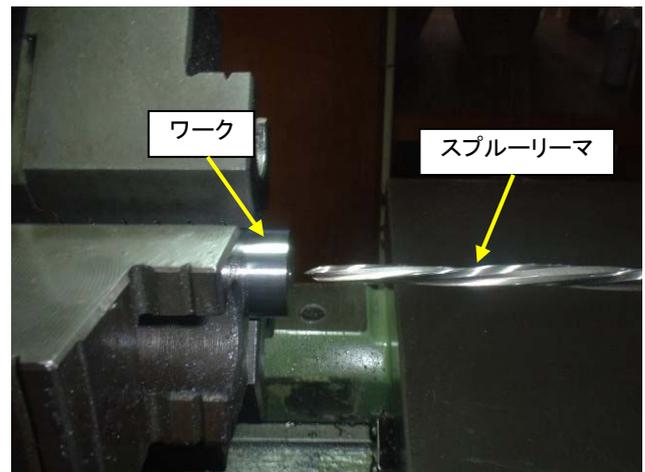
図9-a)に示すように、リーマは汎用旋盤のドリルチャックで固定し、リーマ自身は回転させずにワークを主軸に取り付け、回転させて加工を行う。従来の加工工程では700rpmの回転速度でワークを回転させていた。実験には高速精密旋盤（AM20、イケガイ製）を使用した。

予備実験では、現状の700rpm以下の回転速度でワークを製作したところ加工面とリーマが全面で接触し、噛み合わさってしまい、リーマがワークから抜けなくなってしまうなど、加工性が悪かった。そこで、現状

の加工条件に近い回転数800rpmとそれよりも高速回転である1,120rpmのワーク回転速度を選択した。また、800rpmでテーパ穴を加工したワークに対し、最後に低速35rpmで仕上げたワークも作製した。いずれもワークの全長は100mmであった。



a 実験状況(全体)



b 実験状況(拡大)

図9 リーマ加工

図9-b)に示すように、使用したリーマはテーパ形状をしたスプルーリーマ(SUR、(株)栄工舎製)であり、外径φ4mm（小径側）、テーパ角度が2°、刃長が120mm、刃数が3枚、材質はSKH56である。刃は螺旋状に切られている。

また、真円度の測定には、図10)に示す真円度測定機（RONDCOM52B-550、(株)東京精密）を使用した。測定位置は、触針の長さで測定ワーク内径の制限から、内穴の内径が大きい方を上向きに設置し、ワークの上端から3mm、13mm、23mm、33mm（計4箇所）とした。



図10 真円度測定機

また併せて、表面粗さ測定機（SURFCOM 575A-3D F、（株）東京精密社製）により表面粗さを、デジタルマイクロスコープ（KH-7700、（株）ハイロックス社製）により、リーマ加工面の観察も行った。

3. 2. 2. 結果

ワーク上端から3mm、13mm、23mm、33mmの位置での真円度を測定した。測定結果のチャートを図11、12に、測定結果を表2に示す。

ワーク回転速度：1,120rpm
真円度：33.2 μ m
測定深さ：3mm

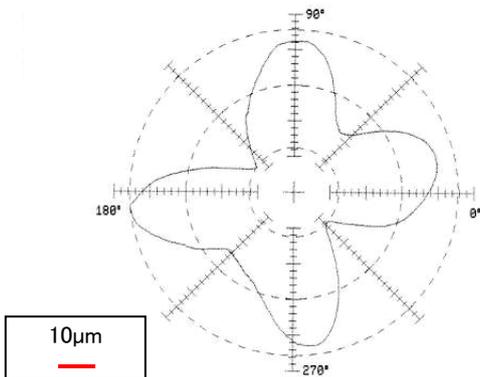


図11 真円度測定結果(1,120rpm)

ワーク回転速度：800rpm+35rpm
真円度：5.6 μ m
測定深さ：3mm

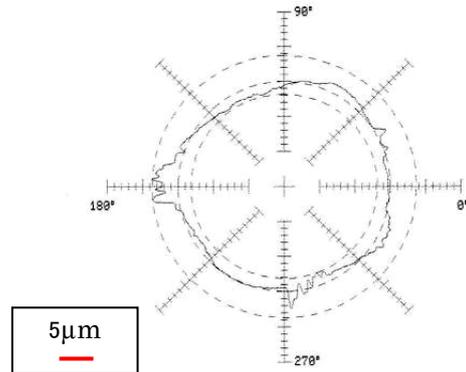


図12 真円度測定結果(800rpm+35rpm)

表2 リーマ加工品の真円度[μ m]

| 計測位置 | ワーク回転速度 | | |
|------|---------|---------|-----------|
| | 700rpm | 1120rpm | 800+35rpm |
| 3mm | 15.7 | 33.2 | 5.6 |
| 13mm | 9.3 | 43.1 | 7.4 |
| 23mm | 9.1 | 50.7 | 7.6 |
| 33mm | 8.8 | 52.7 | 2.7 |

現在の製造プロセス条件では真円度が上端から3mmの位置で真円度が最大で15.7 μ mである。ワーク回転速度1,120rpmで高速加工したものは、端から奥に行くほど真円度が大きくなり、33mmの位置で52.7 μ mであった。形状も真円から大きく変形していた。現在の製造プロセス条件とほぼ等しい800rpmで加工を行った後、低速の35rpmで仕上げたワークは、端から23mmの位置で真円度が最大7.6 μ mであった。ただし、4箇所測定位置いずれでも真円度が10 μ m以下であり、かつ、現在の製造プロセスで作製したワークよりも真円度が良い結果であった。

また、700rpmの回転速度で加工したワークの表面粗さの平均値が1.30 μ mRaであるのに対し、800rpmで加工した後、35rpmで仕上げたワークの表面粗さは1.15 μ mRaであった。

3. 2. 3. 考察

現在の製造プロセスと同等の回転速度で加工後、低速でリーマを通すことにより表面の真円度を向上させることができた。これは、低速条件下では、リーマのびびり振動が抑えられたために、真円度が向上したと考える。

また、表面粗さも改善することができ、目標の1 μ m Raを達成することができた。ただし、チッピング現象などにより刃先が欠けた場合には、表面に切削面とは異なる、むしられた表面が形成されることがわかった。

3. 3. 熱処理工程の検討

3. 3. 1. 実験内容

酸化による表面粗さの悪化を改善するために、真空熱処理について検討した。使用したワークはリーマ加工において回転速度800rpmで加工後、低速の35rpmで仕上げたものである。

真空熱処理条件を図13に示す。工程変更後は、焼入れ温度を400 $^{\circ}$ C (30分)、800 $^{\circ}$ C (30分)、1020 $^{\circ}$ C (40分)の3段で行い、その後焼戻しを1段の550 $^{\circ}$ C (40分)で行うこととした。このとき、昇温時間はいずれも1時間とし、焼入れ、焼戻し終了後は、窒素による強制冷却を行うこととした。

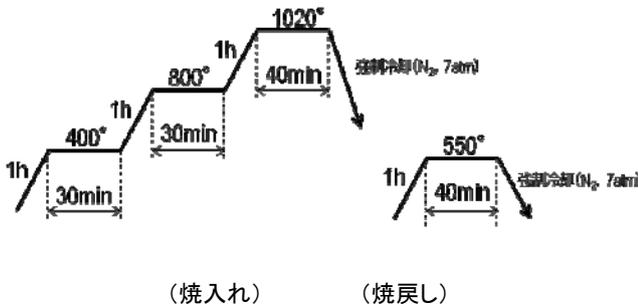


図13 真空熱処理条件

真空熱処理を施した後は、求められている要求仕様を満たしているかを評価するため、表面粗さとともにロックウェル硬度を測定した。硬度の測定にはロックウェル硬度計 (ATK-F2000A、(株)アカシ) を使用した。また、熱処理の前後でワークの表面粗さ変化も測定した。

使用した真空熱処理炉 (PVSGgr20/20、(株)島津製作所社製) の装置外観を図14に示す。



図14 真空熱処理装置

3. 3. 2. 結果

表面の硬度を測定したところ、平均値は50.1(n=5)であり、要求仕様のHRC50 \pm 2を満足する結果となった。また、表3に真空熱処理前後での表面粗さの変化を示す。

表3 真空熱処理前後での表面粗さ変化

| | 熱処理前 | 熱処理後 |
|---------------------------|------|------|
| 表面粗さ[μ mRa] (平均値) | 1.15 | 1.01 |

真空熱処理を施したワークは、表面粗さが1.01 μ mRaとリーマ加工面と変わらなかった。

図15に真空熱処理を行ったワークの外観を示す。表面に酸化皮膜が形成されていないため、外観上もほとんど変化がなかった。



図15 真空熱処理ワーク

3. 3. 3. 考察

真空熱処理を施した結果、熱処理条件変更後も、設計仕様である硬度HRCで50.1を得ることができ、また表面粗さも劣化しなかった。また、副次的にはあるが、工程にかかる時間を14時間から6時間20分へとおおよそ7時間40分短縮することができた。

4. 研磨前工程改善後の自動研磨の検討

4. 1. 実験内容

研磨前工程の表面粗さを改善して仕上げたワークを1種類の研磨工具のみで追加工し、製品を仕上げることができるかを検証するため、開発した自動研磨装置を用いて実験を行った。

実験条件を、表4に示す。研磨にはハイテックプラザで開発した自動研磨装置と、(株)光陽社で開発した研磨工具 (CBN325/400) を用いた。

このときの研磨条件は、ハイテクプラザで円筒内面の研磨実験を行い、最適化されたものを用いた。

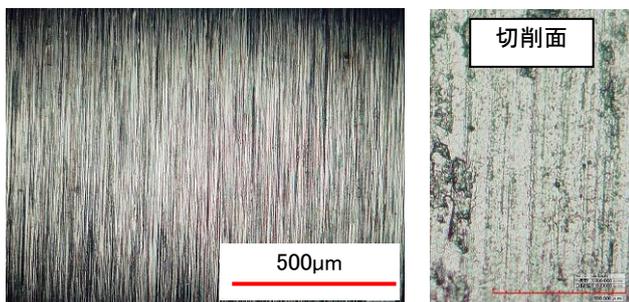
表4 実験条件

| | |
|-----|---|
| 工具 | 砥粒種 CBN325/400 平均粒径 50 μ m 添加剤 なし 軸径 ϕ 2mm、長さ150mm、 材質 SKD61 |
| ワーク | 研磨前粗さ 0.84 μ mRa(平均値 n=5) 0.65 μ mRa(最小値) 1.48 μ mRa(最大値) 全長 100mm(送り全長 105mm) 形状 テーパー内面 内径 4mm(小径側)、7.5mm(大径側) アスペクト比 25 材質 SKD61 硬度 HRC50 \pm 2 |
| 加工 | ワーク回転速度 2000rpm 工具送り速度 3.0mm/s 工具回転速度 5,000rpm 工具傾斜角度 $\theta = 3^\circ$ 押し込み変位量 $\delta = 5$ mm 工具挿入方向 大径側 |

4. 2. 結果

自動研磨装置とCBN(325/400)砥石(50%平均粒径50 μ m)の1工具のみで、目標粗さの0.3 μ mRa以下である0.26 μ mRaに仕上げることができた。この時、最小の表面粗さは、0.24 μ mRaであった。

図16に、デジタルマイクロスコープで観察した表面状態を示す。

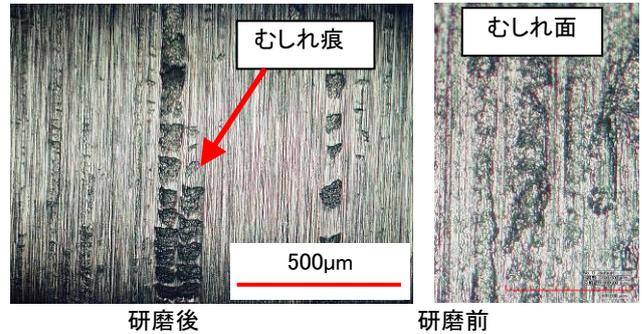


研磨後 研磨前
図16 研磨面(切削面)

リーマ加工による表面の平滑な切削加工面を自動研磨装置により磨くことで、目標とする0.3 μ mRa以下の均質な表面が確認できた。

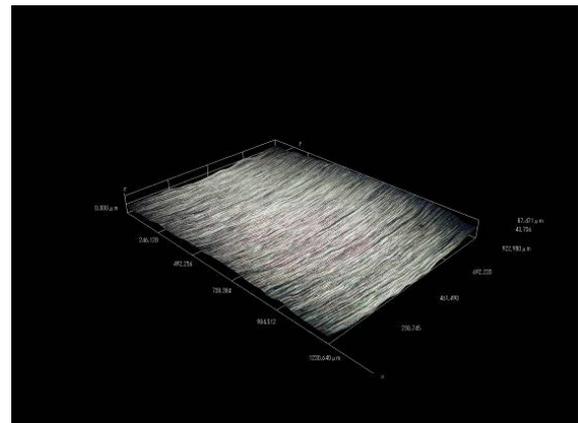
しかし、リーマにチッピングが生じ、加工面にむしれた表面が形成された場合、同じ研磨工具1種類のみでは表面粗さは平均で0.57 μ mRaと目標値に仕上げることができなかった。

図17に示すように、リーマの工具疲労によるチッピングの影響と思われるむしれた面が形成された場合には、その表面をCBN(325/400)砥石のみで仕上げることができなかった。

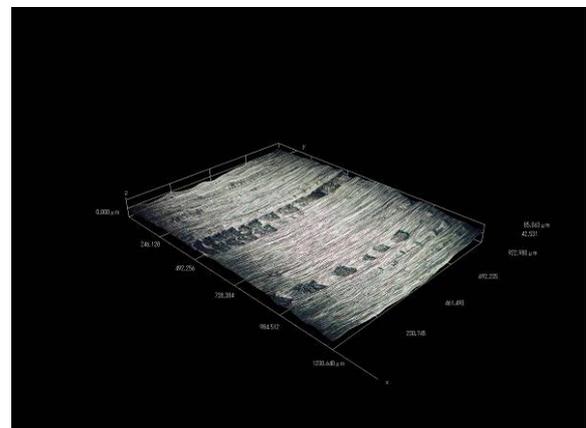


研磨後 研磨前
図17 研磨面(むしれ面)

また、切削面とむしれた表面を研磨した後の三次元形状データを図18に示す。



a 切削面の研磨面



b むしれ面の研磨面

図18 三次元形状データ

図16の切削面を研磨した表面は、傷やチッピングの影響もなく平滑な研磨面が形成された。

一方、図17のむしれた表面を研磨した三次元画像から、表面のチッピングなどによる傷は、窪んでおり、幅約50 μm 、深さ約50 μm であることがわかった。

4. 3. 考察

研磨前粗さを改善して製作したワークの、表面粗さが良好な切削面を、自動研磨装置と1種類の工具のみで目標粗さ0.3 μmRa 以下に上げることができた。

ただし、リーマ加工時、工具刃先にチッピングなどによる、むしれ形状が形成された場合には、研磨前粗さが1 μmRa 前後に仕上げられていても、今回採用した、平均粒径50 μm のCBN砥石のみでは、そのむしれた凹部を除去できなかった。

今後の対策として、チッピングの生じないリーマ加工条件の検討や、粒度の大きい研磨砥石で粗加工を行い、その後仕上げ研磨を行うことで、むしれのない、均一な表面に仕上げることができると考える。

5. 結言

研磨前工程の表面粗さを1 μmRa とするため、製造プロセス全体を見直した。以下に成果を示す。

- 1) 粗研磨の品質の安定化について検討し、研磨荷重の増加と表面粗さの減少に相関がないことを確認した。
- 2) 仕上げに低速でリーマ加工を行うことで、真円度を向上させることができた。
- 3) 真空熱処理により、酸化被膜の形成を防ぎ、工程の前後で表面粗さの増加を抑えることができた。また、熱処理条件を変更しても要求仕様の硬さを得ることができた。また、副次的に作業時間を短縮することができた。
- 4) 自動研磨装置と1種類の工具により、研磨前粗さの改善したワークの円筒内面を目標値0.3 μmRa 以下に研磨することができた。

また、課題と今後の対策を以下に示す。

- 1) リーマ加工時にチッピングによるむしれた表面が生じるため、リーマ加工条件の見直しやリーマの素材、形状などの選定を行う。
- 2) チッピングによるむしれた凹部を粒度の大きい砥石による粗研磨で平滑にし、その後、仕上げ研磨を行うことで、目標の粗さに仕上げることができると考える。

小径深穴内面研磨材の開発

株式会社光陽社

小径深穴内面研磨材の開発

Development of the Tools for Polishing the Inner Surface of Cylinders of Small Diameter and Long Length

株式会社光陽社 生田桂、綱島和郎、安部賢一

内面研磨材として、遊離砥粒による加工及び固定砥粒方式を検討した。研磨能率の高さから固定砥粒方式を中心に検討することとし、線径 $\phi 2.0\text{mm}$ の軸を使用して酸化アルミニウム、CBN、ダイヤモンドの砥粒を練り付け方式及び巻付け方式にて塗布する製作方法を検討した。この試作研磨ツールを用いた高速研磨試験の結果、ワーク研磨前表面粗さ $0.6\mu\text{mRa}$ の素材面を、研磨時間2分で研磨面粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の仕上げ面が得ることができ、小径深穴内面の加工ツールとして有効であることを確認した。

Key words:小径深穴内面、固定砥粒研磨、細軸研磨ツール、高速研磨方式、 $0.3\mu\text{mRa}$ 仕上げ

1. 緒言

一般的には、小径内面の研磨を行うには電解研磨が主流となっている。しかし、電解液の管理や電極の作製など、その応用は特殊な業界に限られている。また、磁性流体による研磨技術が大学などで研究されているが、磁性流体の管理や特殊装置の利用といった観点から、現場の作業にはなかなか浸透していない。

小径深穴 ($\phi 15\text{mm}$ 以下) の研磨方法は、市販の研磨ツールに適切なものが見当たらず、各社の創意工夫による手作業が主流である。今回、バフ研磨及び研磨布紙加工を応用した、砥粒による物理的な方法でテーパ穴を持つ小径深穴内面の研磨用ツールの開発を行うこととした。

パイプ：機械構造用炭素鋼 S45C、穴径 $\phi 12\text{mm}$

パイプ回転数：16rpm

研磨材：バルブコンパウンド粗目

(#120 相当：平均粒径約 $120\mu\text{m}$)

表1 試験内容

| 順序 | 試験内容 |
|----|---|
| 1 | 丸棒を研磨ベルト#120で研磨し、表面粗さを測定した。 |
| 2 | 丸棒をパイプに挿入し、バルブコンパウンド粗目をパイプ内に充填し回転させた。2分毎にコンパウンドを補充した。 |
| 3 | 10分間研磨後、30分間研磨後の丸棒表面粗さを測定し、研磨前後の表面粗さ変化を確認した。 |

2. バルブコンパウンドによる粘性体研磨

2. 1. 研磨試験方法

遊離砥粒として、粘性の高い研磨材料を使用して内面研磨が可能かを確認する。遊離砥粒としては、バルブコンパウンド (光陽社製) を使用する。バルブコンパウンドとは、油脂と研磨材を混合した粘性の高い半練り状のコンパウンドであり、機械部品やバルブ等の摺り合わせ用に使用されるものである。

試験方法は、表1に示すようにバフレース (バフ研磨に使用する手磨き用研磨機：図1右) に取り付けた丸棒を回転試験機 (図1左) に取り付けたパイプ内に挿入し、バルブコンパウンド粗目をパイプ内に充填し回転させ、10分間研磨後、30分間研磨後の丸棒表面粗さを測定した。試験条件は、以下のような研磨条件とした。

丸棒：機械構造用炭素鋼 S45C、外径 $\phi 10\text{mm}$

丸棒回転数：1,500rpm (図2に示すようにバフレースにドリルチャックを装着し丸棒を取り付けて回転させる)



左：回転試験機 右：バフレース
図1 研磨試験機



図2 研磨試験時の状態

2. 2. 研磨試験結果

1) 研磨後の状態

研磨後の丸棒及びパイプは、図3に示すようにバルブコンパウンドが付着して研磨面が確認できない状態であった。



図3 研磨試験後の状態

2) 表面粗さの変化

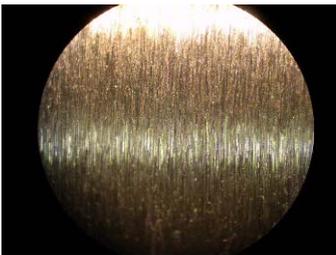
丸棒の表面粗さは、表2に示すように30分間研磨しても研磨面の粗さが細くならなかった。図4及び図5に示した研磨前後の丸棒表面の写真からも変化が見られない。バルブコンパウンドは、研磨にほとんど作用していないものと思われる。

表2 丸棒の表面粗さ(μm)

| 研磨工程 | Ra | Rz | Ry |
|---------|------|-------|-------|
| 研磨前 | 2.08 | 14.89 | 18.92 |
| 10分間研磨後 | 2.12 | 14.35 | 17.96 |
| 30分間研磨後 | 2.29 | 15.34 | 18.59 |

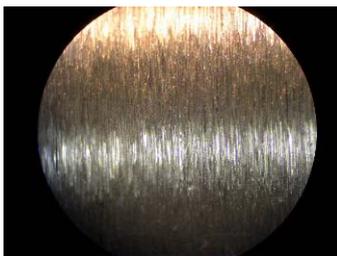
カットオフ:0.8mm、測定長さ:4.0mm

3点測定の平均値



(研磨ベルト#120 研磨面)

図4 研磨前の丸棒表面



(バルブコンパウンド粗目研磨面)

図5 30分間研磨後の丸棒表面

2. 3. バルブコンパウンドのまとめ

- 1) コンパウンドを使用しての研磨では研磨面にコンパウンドが残り研磨状況が確認できず、研磨仕上げの状況確認には、穴内面をその都度洗浄する必要があることから現場的ではないと判断される。
- 2) バルブコンパウンドを使用しての研磨では、30分間研磨しても研磨面の粗さは細くならなかった。バルブコンパウンドは、研磨にほとんど作用していないものと思われる。

以上のことから、コンパウンドによる研磨方式については、今回テーマの内面加工には適当ではないと判断して検討を中止することとした。

3. 研磨試験機の改造

前項での試験機は、既存のバフレース及び回転研磨機を使用したがり、取り付け精度の問題、ワーク及び研磨ツールの回転数が不足していると判断された。そこで、より精度が良く、高速で回転させることが可能な試験機として当社既存の高速バフ試験機を改造することとした。

この試験機は、主軸を高速回転(20000rpm)でき、ワーク軸台を左右に自動往復動できる構造であることから、表3に示すような改造を行うこととした。改造前後の試験機の状態を図6及び図7に示す。

表3 高速バフ試験機の改造内容

| 改造部 | 改造内容 |
|------|--------------------------------------|
| 主軸 | 研磨ツール取付け用として、新規にドリルチャックを取り付ける。 |
| ワーク軸 | ワーク軸ギヤモータを交換し、最高回転数40rpmから500rpmとした。 |



図6 改造前の試験機



図7 改造後の試験機

改造後の研磨試験機の仕様

- * 主軸回転数：最高回転数 20,000rpm
- * ワーク軸回転数：最高回転数 500rpm
- * ワーク軸台送り速度：1~10mm/s

4. ピアノ線を使用した研磨ツール試作

2 節の結果から、固定砥粒研磨方式を検討することとして、より効率的な研磨ツールと思われる細軸のピアノ線に研磨材を固着させたツールを試作することとした。この小径パイプ内面研磨用固定砥粒ツールに最適な研磨材塗布条件、接着剤配合等を検討すると共に、研磨ツールを小径パイプ内面に挿入し、高速で回転させて内面研磨試験を行い、効果を確認することとした。

4. 1. 研磨ツール作製

研磨材は、褐色アルミナ研削材#400（以後 A-400 とする）を使用し、表 4 に示すような 2 通りの接着方法で試作することとした。

接着剤は、接着剛性の高いフェノール樹脂接着剤（以下フェノール）と比較的弾性のあるポリビニールアルコール樹脂（以下 PVA）を使用することとした。又、コルク粒子を塗布することによる研磨時のクッション効果の確認を行う。

使用する材料、研磨材の塗布及び接着剤は、表 5 に示すような条件にて行った。

表4 研磨材の塗装方法

| 方式 | 塗装方法 |
|------|----------------------------|
| ふりかけ | 接着剤を軸に塗布した後、研磨材をふりかけて接着する。 |
| 練り付け | 接着剤と研磨材をあらかじめ混合しておき軸に塗布する。 |

表5 研磨材塗布条件

| No. | 接着方法 | 接着剤 |
|-----|-----------------|-------|
| 1 | 研磨材ふりかけ | フェノール |
| 2 | コルクふりかけ+研磨材ふりかけ | " |
| 3 | コルクふりかけ+研磨材ふりかけ | " |
| 4 | 研磨材練り付け | " |
| 5 | 研磨材練り付け+研磨材ふりかけ | " |
| 6 | コルクふりかけ+研磨材練り付け | " |
| 7 | コルク・研磨材練り付け | " |
| 8 | 研磨材ふりかけ | PVA |
| 9 | 研磨材練り付け | " |
| 10 | コルクふりかけ+研磨材練り付け | " |
| 11 | コルクふりかけ+研磨材練り付け | " |
| 12 | 研磨材練り付け×2 回 | " |

コルク： 粒径 0.3mm

乾燥： 120℃、20min

練り付け及びコルク粒子塗布によって試作したツールは、図 8a)及び b)に示すような形状となった。



a)コルク粒子を塗布したツール



b)練り付け方式によるツール

図8 ピアノ線を使用した試作ツール

4. 2. 研磨試験方法

今回の試験から、改造した高速バフ試験機を使用した高速回転での試験を行う。

1) 試験方法

研磨は、図 9 の模式図に示すように加工物、ツールをそれぞれ回転させると同時に、加工物を左右に往復させて研磨を行った。試験機での研磨状態は、図 10 に示す。研磨ツールの挿入位置は、穴の中心ではなくワーク φ6.5 の縁に合わせてオフセットした。2 分間研磨及び 5 分間研磨したところで研磨面の粗さ測定を行い、研磨性の確認を行った。

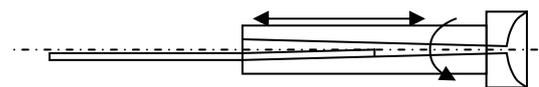


図9 研磨試験の模式図

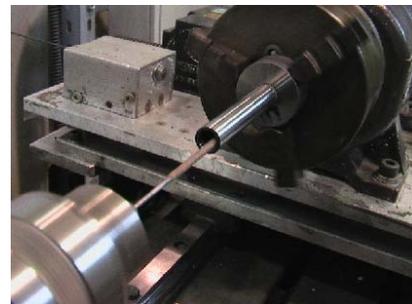


図10 研磨時の状態

2) 試験条件

ツール回転数：6,000rpm

ワーク回転数：45rpm

送り速度：5mm/s

研磨時間：2 分、5 分

4. 3. 研磨試験結果

研磨ツールは、ピアノ線なので適度なしなりを持つことで研磨面に追従しているようである。研磨後の加工物内面を見ると、切粉が確認できたので、確実に研磨されていると思われる。

研磨面の表面粗さ測定結果（表 6）をみると、測定位置によらず 2 分間研磨の時点で粗さが細かくなっている。2 分後と 5 分後での粗さ変化は少ないことから、2 分間研磨ですでにツール本来の粗さに達していると考えられる。

コルク粒子の塗布による弾性効果を期待したが、接着剤の硬さによって期待した効果が得られなかった。

表6 パイプ内面粗さ測定結果

| 測定部 | 研磨時間 | 表面粗さ(μm) | | |
|--------|---------|----------|------|------|
| | | Ra | Rz | Ry |
| φ3.5 側 | 研磨前 | 0.46 | 4.24 | 8.65 |
| | 2 分間研磨後 | 0.35 | 3.01 | 4.03 |
| | 5 分間研磨後 | 0.38 | 3.48 | 6.49 |
| φ6.5 側 | 研磨前 | 0.24 | 1.99 | 2.60 |
| | 2 分間研磨後 | 0.20 | 1.51 | 2.03 |
| | 5 分間研磨後 | 0.20 | 1.60 | 2.12 |

粗さ測定機: サーフコム 550AD (東京精密製)

ピックアップ: 細穴用粗さ計測定子

測定条件: 縦倍率×5k、カットオフ 0.8mm、

測定長さ=4.0mm、3 点の平均値

4. 4. ピアノ線ツールのまとめ

- 1) 研磨材塗布方法は、「ふりかけ」のみでは研磨材粒子が接着剤に沈んでしまい、ツール表面に研磨材が出にくい。特に、フェノール樹脂では研磨材を単層に薄く塗布する調整が難しい。
- 2) 「練り付け」+「ふりかけ」の方法は、研磨材が表面に現れており研磨に作用すると思われる。
- 3) PVA は、軸への接着力が弱く、接着層が剥離し易い傾向がある。
- 4) 試作ツールは、ピアノ線を軸とすることで、バネ性がありテーパ穴の内面形状に追従しており、内面研磨できることを確認できた。
- 5) ピアノ線ツールは、軸剛性が低く、強く荷重をかけての研磨ができず研磨性が低いと思われる。

5. φ2 軸を使用した研磨ツール試作

前項にて、ピアノ線細軸に砥粒を固定したツールにて研磨ができることを確認したが、剛性不足の点が問題となった。そこで、より剛性の高い線径の太い細軸を使用すると同時に、砥粒種類による研磨性を確認するための試作を行った。

5. 1. 試作方法

1) 使用研磨材

研磨材としては、従来のアルミナ以外に、より研磨性が高いと思われるダイヤモンド及び CBN (立方晶窒化ほう素) を使用することとし、表 7 に示すような研磨材種類、粒度から選定することとした。

表7 研磨材の種類

| 種類 | 粒度呼称 | 平均粒径(μm) |
|--------|---------|----------|
| アルミナ | A-400 | 35 |
| CBN | 200/235 | 80 |
| | 230/270 | 65 |
| | 325/400 | 50 |
| | G45 | 45 |
| | G30 | 30 |
| ダイヤモンド | G15 | 15 |
| | 325/400 | 50 |
| | 12-25 | 15 |

2) ツール試作方法

研磨ツール軸として、φ2×長さ 150mm 硬鋼線ジェットタガネ用ニードル 90101 (日東工器製) を使用することとした。研磨材としては、アルミナ、ダイヤモンド及び CBN を使用してふりかけ方式で表 8 に示すような試作工程で試作を行った。

接着剤は、前回のフェノールに変えてより弾性のある酢酸ビニル樹脂 (以下酢酸ビニル) を使用して表 9 に示す種類のツールを試作した。

表8 試作工程

| 工程 | 内容 |
|----|--|
| 1 | 軸を約40mm程度、接着剤中に浸漬する。 |
| 2 | 接着剤から抜き上げた軸をマイクログラインダーに取り付け、3,000rpmにて遠心分離を10秒間行う。 |
| 3 | コルク粒子又は砥粒をふりかける。 |
| 4 | 乾燥 |

表9 試作ツールの種類

| | | 砥粒の種類 | 砂付け接着剤 |
|---|---|-------------|--------|
| 1 | × | A400 | 酢酸ビニル |
| 2 | ○ | A400 | 酢酸ビニル |
| 3 | ○ | A400 | PVA |
| 4 | ○ | CBN325/400 | PVA |
| 5 | ○ | CBN G15 | PVA |
| 6 | ○ | ダイヤ 325/400 | PVA |
| 7 | ○ | ダイヤ 12-25 | PVA |

注)○、×は、コルク付けの有無を示す

5. 2. 研磨試験方法

1) 試験条件

今回から、ワーク軸モータを変更してワーク回転数が高速での研磨ができるようになり（図 11）、試験条件を以下のような条件とした。

- ツール回転数：5,000rpm
- ワーク回転数：500rpm
- ツールオフセット：3mm
- 送り速度：5mm/s
- 研磨時間：2分、4分



図11 研磨状態

2) 粗さ測定方法

- 粗さ測定機：サーフコム 550AD（東京精密製）
- ピックアップ：細穴用粗さ計測定子
- 測定条件：縦倍率×5k、カットオフ 0.8mm
- 測定長さ=4.0mm、3点の平均値
- 粗さ測定部：図 12 に示す穴内面の 2 点で測定

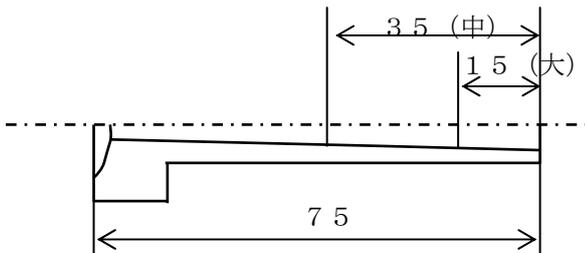


図12 粗さ測定部

5. 3. 研磨試験結果

1) 表面粗さの変化

表 10 に示す表面粗さの変化を見ると、前回の試験よりワーク回転数を高速回転とした効果は、2 分研磨では差がないが、4 分研磨ではより細かい仕上がりとなっている。これは、硬鋼線（SW 材）を使用して軸剛性が強くなったことと併せて、研磨効果が持続して作用していると考えられる。

特に、ダイヤモンド 12-25 ツールによる研磨では、4 分研磨後に表面粗さ 0.15 μ mRa の仕上げ面が得られて

いる。

表10 粗さ測定結果

| | 研磨条件 | 中央(中) | | | ϕ 7.6(大) | | |
|-------------------|-------|-------|------|------|---------------|------|------|
| | | Ra | Ry | Rz | Ra | Ry | Rz |
| A400 | 研磨前 | 0.35 | 3.51 | 2.82 | 0.36 | 3.48 | 2.77 |
| | 2分研磨後 | 0.24 | 2.52 | 1.99 | 0.23 | 2.51 | 2.09 |
| CBN 325/400 | 研磨前 | 0.29 | 3.71 | 2.74 | 0.30 | 3.04 | 2.45 |
| | 2分研磨後 | 0.24 | 2.45 | 1.97 | 0.26 | 3.71 | 2.22 |
| CBN 325/400 | 研磨前 | 0.34 | 3.93 | 2.99 | 0.38 | 4.17 | 3.27 |
| | 2分研磨後 | 0.22 | 2.57 | 2.00 | 0.27 | 2.85 | 2.24 |
| | 4分研磨後 | 0.21 | 2.37 | 1.82 | 0.24 | 2.76 | 2.13 |
| CBN G15 | 研磨前 | 0.35 | 3.97 | 2.76 | 0.35 | 3.48 | 2.71 |
| | 2分研磨後 | 0.21 | 2.41 | 1.90 | 0.28 | 2.56 | 2.10 |
| | 4分研磨後 | 0.22 | 2.39 | 1.74 | 0.24 | 2.36 | 1.91 |
| ダイヤモンド 325/400 | 研磨前 | 0.28 | 2.89 | 2.22 | 0.36 | 3.55 | 2.75 |
| | 2分研磨後 | 0.19 | 2.63 | 1.75 | 0.21 | 2.45 | 1.90 |
| | 4分研磨後 | 0.17 | 2.40 | 1.64 | 0.18 | 2.51 | 1.81 |
| ダイヤモンド 12-25 | 研磨前 | 0.27 | 2.88 | 2.33 | 0.33 | 3.39 | 2.64 |
| | 2分研磨後 | 0.19 | 2.37 | 1.78 | 0.21 | 2.29 | 1.75 |
| | 4分研磨後 | 0.15 | 2.08 | 1.46 | 0.20 | 2.13 | 1.77 |

2) 研磨材種類による効果

研磨材種類による研磨効果は、今回の試験では特徴的な差は見られなかった。コルク付けをしたツールは、図 13 に示すように 4 分間研磨で、ツール砂面に欠け落ちが発生しており、接着剤及び接着方法の検討が必要と思われる。



a) 2分研磨後

b) 4分研磨後

図13 研磨前後のツールの状態

5. 4. ϕ 2 軸を使用した研磨ツール試作のまとめ

- 1) 鋼製の細軸に砥粒を固定した研磨ツールは、内面研磨の可能性が見られた。但し、外径 ϕ 2.0mm 以下では押付け力が低くより剛性が必要である。
- 2) 研磨時間 2 分～4 分で、研磨面粗さが 0.2 μ mRa 以下の仕上げ面が得られ目的の加工が可能と判断される。
- 3) コルク粒子の凹凸は、研磨部の当たりの不均一さとなり研磨効果が低下する。また、期待したコルク粒子の弾性効果が得られなかったことからコルク付けツールの開発を中止することとした。
- 4) テーパー穴内で均一な研磨効果が得られていないようであり、研磨時の条件制御方法についての検討が必要と思われる。

6. 練り付けタイプ研磨ツール試作

φ2 軸の練り付けタイプが効果的であったことから、練り付けツールの作製方法を検討すると同時に各種砥粒度のツールを試作し研磨性の確認をした。

6. 1. 練り付けタイプツールの作製

1) 練り付け方法

練り付けタイプの作製方法は、接着剤と研磨材を混合した塗布液に軸を浸して図14のように引き上げることで軸に研磨材を固定する方法である。軸への塗布方法は、当初接着剤から引き上げ塗布後に軸を高速回転する遠心分離方式としたが均一な表面状態になりにくかった。

そこで、軸に接着剤を塗布後に接着剤の表面張力による膜形成方式を行い、均一な表面状態の塗布ができた。この方法は、軸表面に塗布された研磨材混合液が表面張力により軸表面に薄く均一に塗布される効果がある。表11に示すような試作工程にて、練り付けツールを作製した。



図14 混合液から軸を引き上げた状態

表11 試作工程

| 工程 | 内容 |
|----|------------------------------|
| 1 | 軸を約100mm程度、研磨材・接着剤混合液中に浸漬する。 |
| 2 | 研磨材・接着剤混合液から軸をゆっくり引き上げる。 |
| 3 | 乾燥 |

2) 軸材質の種類

軸材質は、剛性の異なる軸での研磨性を確認するために以下の2種類を使用した。

硬鋼線 SW 材 (ジェットタガネ用ニードル)
合金工具鋼 SKD61

3) 研磨材の種類

研磨材種類は、表12に示すようなアルミナ研削材、CBN およびダイヤモンドから選定して使用した。

表12 使用研磨材

| 種類 | 粒度 |
|--------|-------------------|
| アルミナ | A-400 |
| CBN | 200/235(以下CBN200) |
| | 230/270(以下CBN270) |
| | 325/400(以下CBN400) |
| | G-45(以下CBN G45) |
| | G-30(以下CBN G30) |
| ダイヤモンド | 325/400(以下ダイヤ400) |
| | 12-25(以下ダイヤ12-25) |

4) ツールの整形方法

研磨材を塗布した軸は、乾燥後に研磨材塗布表面を整形 (ツルーイング) して完成する。整形時には、ツールをマイクログラインダーに装着して回転させ、図15のようなダイヤモンド電着砥石に押し付けて加工する。この時、ツール回転数を 4,000rpm として形状を整えた。

高速回転での整形のみでは、ツール表面が平滑になりすぎるため、整形後に低速な回転数 500rpm で目立てをするのが効果的である。

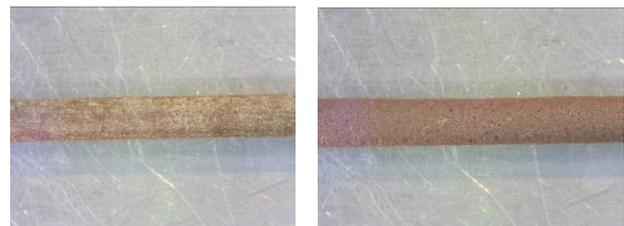
整形作業前後のツール表面状態は、図16に示す。

*マイクログラインダー：ナカニシ製
エレクターEmax EL351C-1R10

*ダイヤモンド電着砥石：トラスコ中山製
ダイヤモンド角砥石#700、TAB-07



図15 整形作業の状態



a) 練り付け塗布後

b) 整形後

図16 CBN400練り付けツールの状態

5) $\phi 3$ 軸の練り付け方法改良

この練り付け方法では、 $\phi 2$ 軸では均一な塗布（図 17a）が出来たが、より軸表面積の大きい $\phi 3$ 軸では図 17b 未加工軸に示すような不均一な塗布状態となった。この点を改善する方法として、練り付け前に図 17b ベルト研磨軸のように、軸表面をベルト研磨によって表面粗さを粗くする軸表面処理を行うことで塗布ムラを改善できることが確認された。

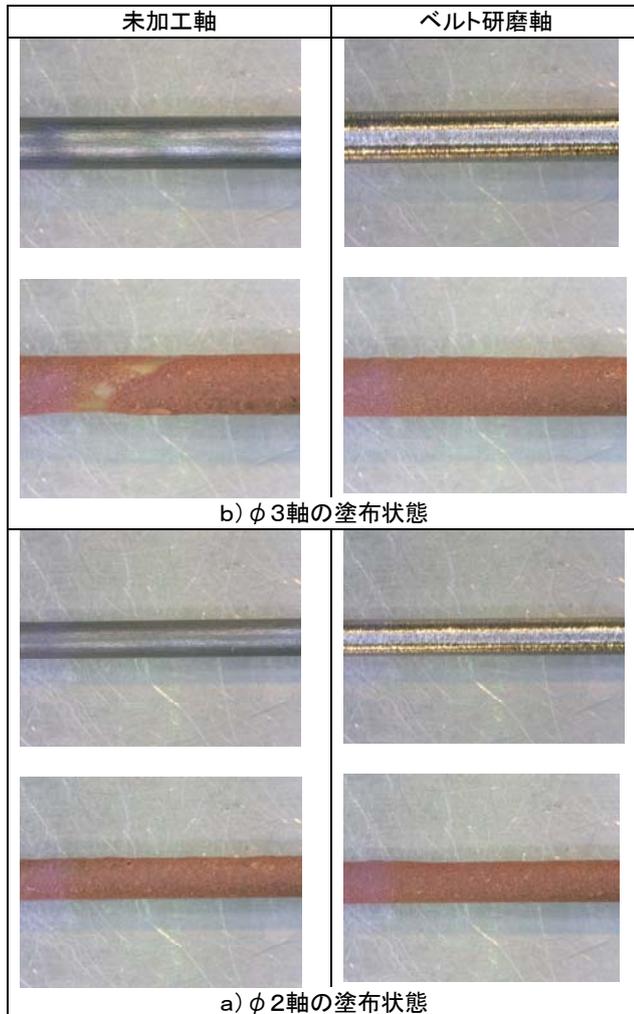


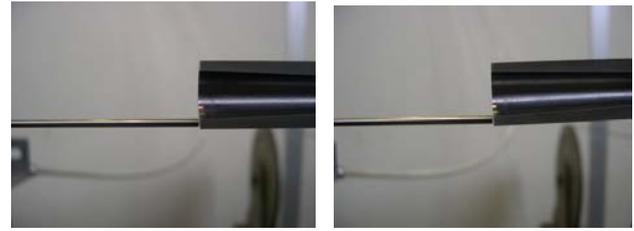
図 17 $\phi 3$ 軸ツールの練り付け改善効果

6. 2. 研磨試験方法

1) 研磨機のセッティング

研磨効果を高めるために、高速バフ研磨機のツールとワークのセッティングを従来の軸並行から、ワーク軸を図 18 のように約 1.5 度傾けてツールのしなりを利用して当りを強くするようにした。

さらに、軸オフセットを、内面端部から約 1mm とし、ツール軸のしなりを有効に活用するようにしたことで、図 19 のツールとワークの接触状態に示すようにツール移動長さ全体にわたってツールが作用していることが解かる。



a) 従来セッティング

b) 新規セッティング
(約 1.5 度傾け)

図 18 従来と新規の軸セッティングの状態



a) ワーク入り口



b) ワーク中央



c) ワーク最奥

図 19 ツールとワークの接触状態

2) 研磨条件

ツール回転数：5,000rpm

ワーク回転数：500rpm

研磨長さ：50mm

送り速度：約 5mm/s

3) 粗さ測定条件

粗さ測定機：サーフコム 550AD（東京精密製）

ピックアップ：細穴用粗さ計測定子

測定条件：縦倍率×5k、カットオフ 0.8mm

測定長さ=4.0mm

測定場所：穴先端から 20mm の位置

穴内面を約 120 度おきに 3 点測定した。

6. 3. 研磨試験結果

練り付けツールにて、整形加工の効果、軸材質の影響及び研磨材種類による研磨性を確認した。

1) 未整形と整形品との研磨性

研磨ツールは、整形（ツルーイング）を行うことで図20に示すように研磨時間5分以降も表面粗さが細くなり、研磨効果が持続して作用していることが解かる。これは、ツール表面の研磨作用面積が多くなること及び自生発刃作用が行われていることによる研磨性の向上があったものと思われ、以後の試験には整形品を使用することとした。

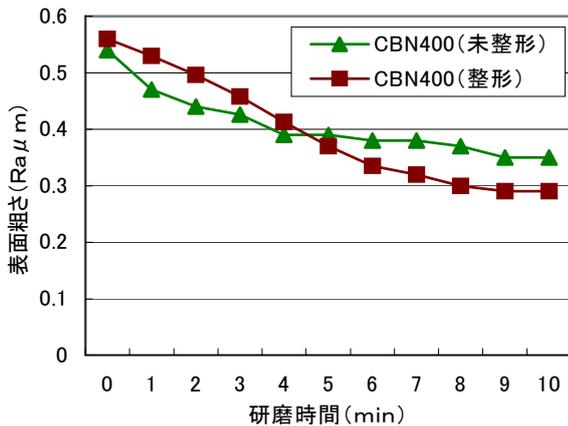


図20 未整形品と整形品の研磨性

2) 軸材質による研磨性

軸材質は、硬鋼線とSKD材を比較すると図21に示すように剛性の高いSKD材を使用したツールの表面粗さが細かく研磨性が高く効果的であった。本試験機では、研磨圧力がツールオフセットのみで荷重制御による研磨ができないため、軸剛性がより研磨効果を高めたためと思われる。

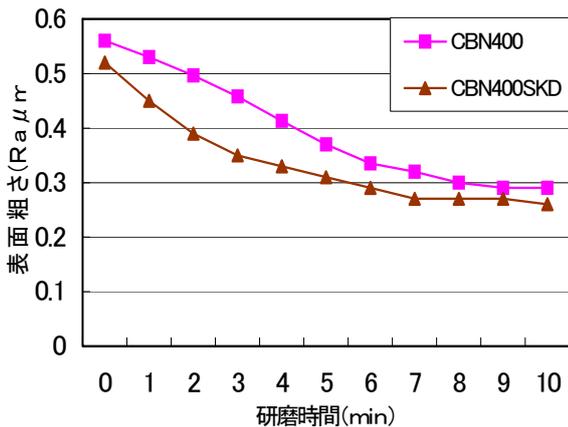


図21 軸材質による研磨性

3) 各種研磨材の研磨性

研磨材の種類として、アルミナ400、ダイヤモンド400及びCBN400の研磨性を比較した結果は、図22に示すようにCBNの研磨性が良好であった。鋼の研削

において、ダイヤモンドよりCBNのほうが効果的であるのは一般的な知見からも妥当である。

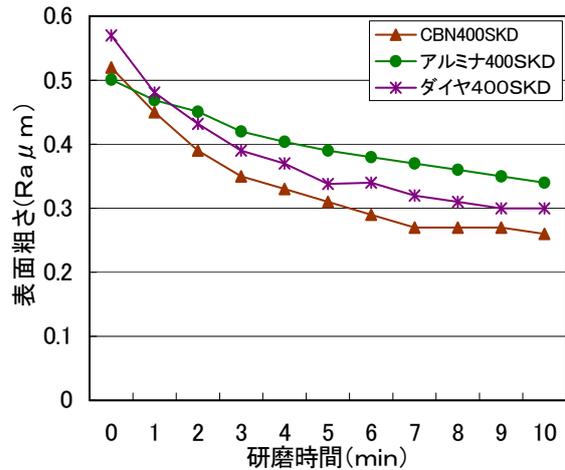


図22 各種砥粒の研磨性

4) CBN各粒度の研磨性

CBN各粒度による研磨性を図23に示し、この時のCBN400研磨時の粗さ曲線の変化を表13に示した。CBN200及び270では、10分研磨後でも目標の0.3μmRaより粗い表面粗さとなっている。これらの2粒度では、目標表面粗さに対して研磨材粒子径が大きく、適当ではないと思われる。

CBN400では、5分間研磨後で目標とする表面粗さ0.3μmRaの仕上げ面が得られている。さらに、10分研磨後には表面粗さ0.26μmRaとなっている。この粒度が、今回の加工目的には適当な粒度と思われる。

より細かな仕上げ面を得るには、CBN-G15による研磨で研磨前粗さ0.3μmRaから5分間研磨で表面粗さ0.15μmRaまでの研磨ができた。

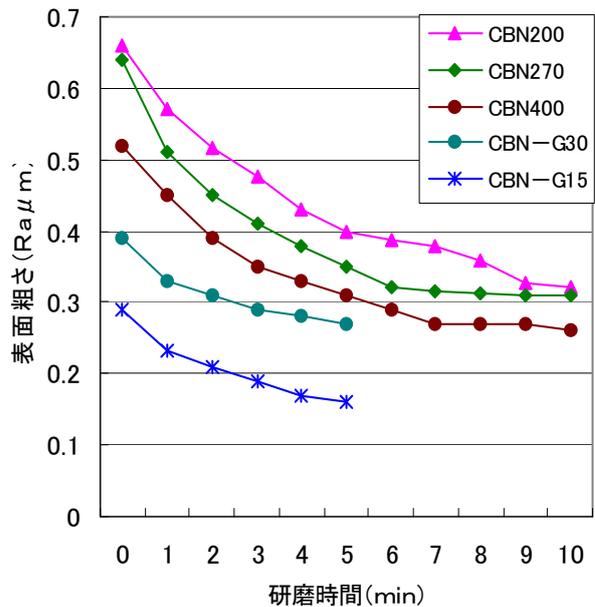
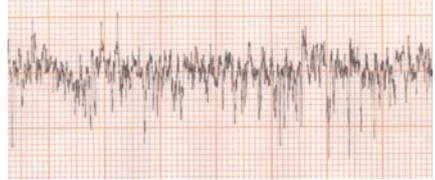
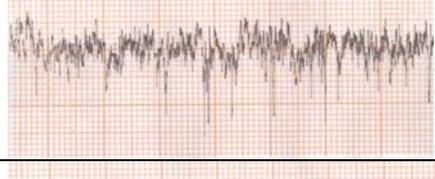
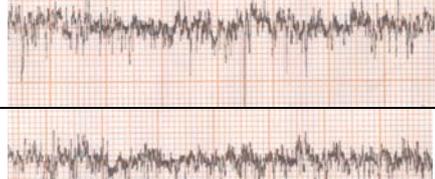
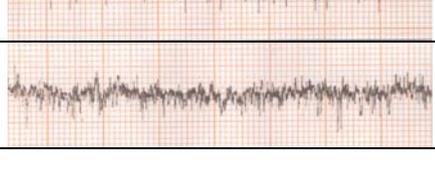
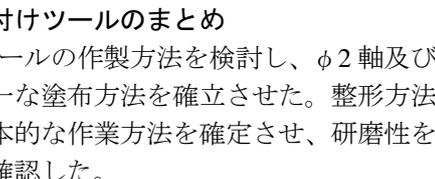


図23 CBN砥粒各種粒度の研磨性

表13 CBN400の粗さ曲線変化

| 研磨時間 | 粗さ曲線(縦倍率×5K、横倍率×20) |
|-------|---|
| 素材面 |  |
| 1分研磨 |  |
| 3分研磨 |  |
| 5分研磨 |  |
| 10分研磨 |  |

6. 4. 練り付けツールのまとめ

- 1) 練り付けツールの作製方法を検討し、φ2軸及びφ3軸への均一な塗布方法を確立させた。整形方法についても基本的な作業方法を確定させ、研磨性を高める効果を確認した。
- 2) 軸材質の影響は、剛性の異なる軸材質を比較すると軸剛性の高いSKD材軸の研磨性が高かった。
- 3) 研磨材種類として、アルミナ、ダイヤモンド及CBNの研磨性を比較したところ、CBNの研磨性が良好であった。
- 4) 練り付けツールで、CBN400を使用したツールにて研磨時間5分程度で目標とする表面粗さ0.3μmRa仕上げとする研磨性能が得られた。

7. 超砥粒巻き付けタイプ研磨ツール試作

練り付けツールとは異なり、より汎用的な研磨用途に対応するツールとして、研磨布巻き付けタイプツールを試作することにした。巻き付けタイプ用研磨布として、合成樹脂系接着剤を使用してダイヤモンド及びCBNの砂付け研磨布を試作し、巻き付けタイプツールを作製し研磨性を確認することとした。

7. 1. 巻き付けタイプツールの作製

1) 超砥粒研磨布の作製

研磨布の作製は、表14に示す試作工程にて、研磨布

用綿布基材に接着剤を塗布した後に研磨材をふりかけて乾燥させる。この後に、再度上引き接着剤を塗布し乾燥させて研磨布とする。試作した研磨布は、表15に示すような研磨材砂付け量となった。

表14 研磨布試作工程

| 工程 | 内容 |
|----|--|
| 1 | 研磨布用基材(樹脂加工綿布)を幅100×長さ350mmに切断する。 |
| 2 | ロールコートにて、基材表面に接着剤を塗布した後に研磨材をふりかけて乾燥させる。110°C 30min |
| 3 | ロールコートにて、乾燥後の砂付け研磨布に上引き接着剤を塗布する。 |
| 4 | 乾燥。130°C 120min |

表15 研磨材砂付け量

| 研磨材 | 砂付け量 (g) | 単位砂付量 (g/m ²) |
|-------------|----------|---------------------------|
| CBN 200 | 9.59 | 274 |
| CBN 400 | 9.62 | 275 |
| CBN G45 | 5.49 | 157 |
| CBN G30 | 4.24 | 121 |
| CBN G15 | 7.74 | 221 |
| ダイヤモンド 400 | 13.57 | 387 |
| ダイヤモンド12-25 | 6.7 | 191 |

2) 巻き付けツールの作製

CBN及びダイヤモンドを砂付けした研磨布から、幅2.5mm×長さ350mmの研磨布を切り出してφ2軸に螺旋状に巻き付けて研磨部長さ100mmとなる図24に示すような巻き付けタイプ研磨ツールを作製した。

軸材質は、硬鋼線SW材を基本とし、比較用として合金工具鋼SKD61も使用することとした。



図24 CBN400巻き付けタイプツールの形状

7. 2. 研磨試験方法

1) 研磨機セッティング

今回のワーク形状は、表16のように穴径が大きく、テーパが大きくなった。また、巻き付けタイプツールは、練り付けツールよりツール外径が約1mm大きくなることから、ツールセッティングを図25に示すように、ワーク軸、ツール軸を60mmで1mmの傾きに変

更することとした。

このセッティングでの接触状態は、図 26 に示したようにツール移動長さ全体でツールとワークが接触していることを確認した。

表16 ワークの形状

| ワーク種類 | 長さ (mm) | 穴小 (mm) | 穴大 (mm) |
|-------|------------|------------|------------|
| 前回ワーク | 75 | 5.3 | 7.8 |
| 今回ワーク | 75 | 6.3 | 11.3 |



図25 ワークとツール軸の設定



a)穴先端



b)穴中央



c)穴最奥

図26 穴内面でのツールとワークの接触状態

2) 研磨条件

ツール回転数：5,000rpm
 ワーク回転数：500rpm
 研磨長さ：50mm
 送り速度：5mm/s

3) 粗さ測定

粗さ測定機：サーフコム 550AD (東京精密製)
 ピックアップ：一般測定用粗さ計測定子
 測定条件：縦倍率×5k、カットオフ 0.8mm、
 測定長さ=4.0mm、

測定場所：穴先端から 20mm の位置

7. 3. 研磨試験結果

超砥粒巻付けタイプツールにて、素材表面粗さ 0.6 μ mRa のワークを用いて、使用軸の種類、研磨材種類及び各粒度での研磨性を確認した。

1) 軸材質による研磨性

CBN G30 による軸材質の変化では、図 27 に示すように硬鋼線軸、SKD 軸による研磨性の差は見られなかった。これは、軸に研磨布を巻きつけることによって、軸と研磨布の相乗効果によってツール剛性が高くなったことによるものであろう。

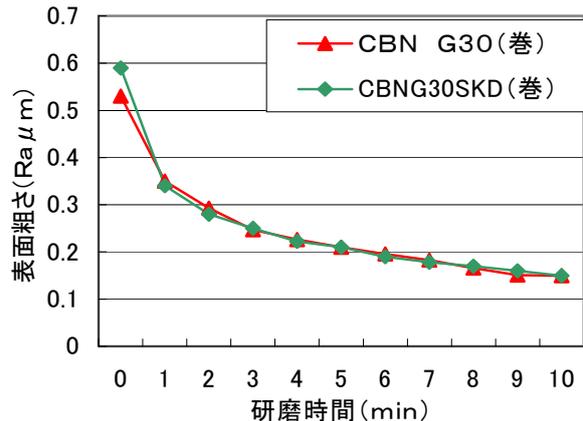


図27 軸材質による粗さ変化

2) CBN ツールの研磨性

CBN 各粒度による研磨性は、図 28 に示すように CBN G45、CBN G30 及び CBN G15 において 2 分間の研磨で表面粗さが 0.3 μ mRa 以下となった。10 分研磨後では、CBN G45 が 0.25 μ mRa であるのに対し、CBN G30 及び CBN G15 では 0.2 μ mRa 以下の表面粗さが得られた。

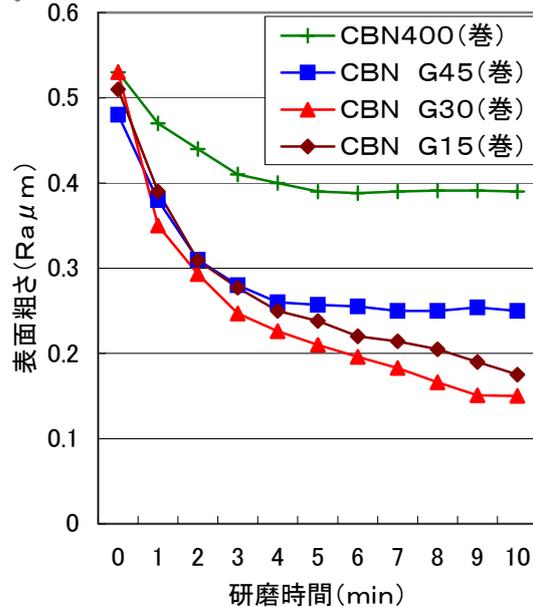


図28 CBN砥粒による粗さ変化

3) ダイヤモンドツールの研磨性

ダイヤモンドツールの研磨性は、図 29 に示すように CBN ツールに比べると、仕上げ面粗さが細くなる傾向が見られる。ダイヤ 12-25 では、2 分間の研磨で表面粗さが $0.3\mu\text{mRa}$ 以下となった。

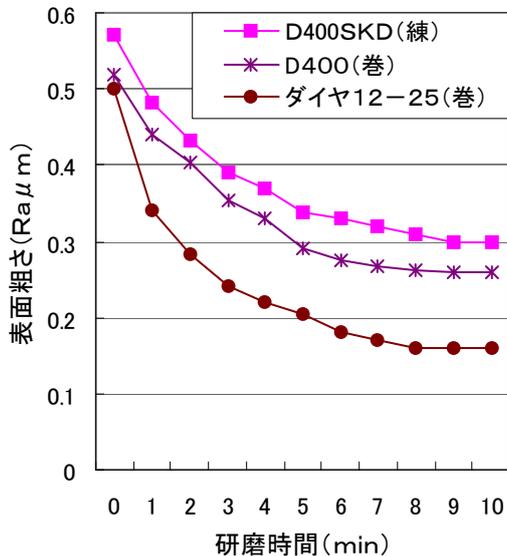


図29 ダイヤモンド砥粒による粗さ変化

5 分で目標とする $0.3\mu\text{mRa}$ 仕上げとする研磨性能が得られることを確認した。

4) より汎用的な研磨用途に対応するツールとして、研磨布巻き付けタイプツールを試作した。超砥粒研磨布を作製する方法及び巻き付けタイプツールとする作製方法を確立した。このツールを用いて、素材表面粗さ $0.5\sim 0.6\mu\text{mRa}$ から 2 分間の研磨で表面粗さ $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の仕上げ面が得られることを確認した。

7. 5. 巻き付けタイプツールのまとめ

- 1) 巻き付けタイプでは、軸に研磨布を巻きつけ固定することでツール剛性が高くなり、軸材質の影響が少なくなる。又、研磨布基材が綿布であることから、適度な弾性がありなじみ性が見られた。
- 2) 素材表面粗さ $0.5\sim 0.6\mu\text{mRa}$ からの研磨では、CBN G45、CBN G30、CBN G15 及びダイヤモンド 12-25 による 2 分間の研磨で表面粗さが $0.3\mu\text{mRa}$ 以下の仕上げ面が得られ、穴内面研磨に効果があることを確認した。

8. 結言

小径深穴内面研磨材の開発として、コンパウンドによる遊離砥粒研磨及び細軸に砥粒を固着する固定砥粒研磨について研磨ツールを試作し研磨実験を行い研磨性能を確認した。

- 1) コンパウンドによる遊離砥粒研磨は、加工能率の低いこと及び加工面の汚れによる仕上げ検査の難しさから開発を中止した。
- 2) 固定砥粒工具として、細軸に研磨材を練り付け方法で固着した研磨ツールを試作した。線径 $\phi 2$ 及び $\phi 3\text{mm}$ の軸表面に長さ 100mm の砂付け部を均一に塗布する引き上げ作製方法を確立した。
- 3) 練り付け研磨ツールによる研磨試験を行い、素材表面粗さ $0.5\sim 0.6\mu\text{mRa}$ から CBN400 を用いて研磨時間

謝 辞

本研究開発事業の推進にあたり、東北大学大学院工学研究科教授 厨川常元氏には、研削加工技術や砥石に関する基礎的な知見などご指導いただきました。また、秋田県立大学システム科学技術学部教授 呉勇波氏には、小径内面の研削技術についてご指導いただきました。また、福島大学理工学群共生システム理工学類准教授 島田邦雄氏には、磁性流体を用いた細管内面の研磨技術についてご指導いただきました。

多大なるご協力ならびにご助言をいただきました皆様に感謝いたします。

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

地域活性化共同研究開発事業
小径パイプ内面の高度研磨技術開発

発 行

福島県ハイテクプラザ

〒963-0215 福島県郡山市待池台1丁目12番地 郡山西部第2工業団地内

TEL 024-959-1738 (直通)

FAX 024-959-1762

編 集

福島県ハイテクプラザ

研究開発部 生産・加工科

※この研究は、電源立地地域交付金により実施した事業です。