

令和 7 年 4 月 20 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K03848

研究課題名（和文）耐摩耗性に優れた人工関節を創成する超音波援用研削盤の開発とそれによる加工機構解明

研究課題名（英文）Development of ultrasonic assisted grinder and clarification of material removal mechanism for artificial joints with high wear resistance

研究代表者

藤本 正和 (Fujimoto, Masakazu)

足利大学・工学部・准教授

研究者番号：00581290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、耐摩耗性に優れた人工関節摺動面を創成するための超音波援用研削盤の開発と、それを用いた加工機構の解明を目的とした。そのために、直動3軸+回転2軸を有し、複雑な形状を高精度に加工できる精密研削盤を設計・製作した。特に、制御機構の設計と製作により、同時5軸制御を可能とした。また、人工関節用のジルコニアセラミックスを工作物とした研削実験を実施し、製作した研削盤が十分な幾何精度を有することを確認できた。さらに、加工後の工作物の形状精度と表面粗さの相関から、砥石の最適化に向けた設計指針を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たな同時5軸制御可能な研削盤の製作を行うことができた。開発された研削盤は卓上型であり、場所を問わず（医療現場を含む）、専用機として広く使用されることに耐えうるものとなった。また、本研削盤を用いた際の工作物の、表面粗さと形状精度の関係を示すことができ、要求される人工関節摺動面の精度を得るための砥石や加工工程を設計する指針を得た。

研究成果の概要（英文）：This study aims development of the ultrasonic assisted grinder and clarification of material removal mechanism for artificial joints with high wear resistance. Designing and trial manufacturing of desktop type precision grinder with three linear axes and two rotational axes for high precision manufacturing of complicated shape workpiece. The simultaneous 5-axis controlled motion was achieved by designing and manufacturing of control system. Grinding experiments using partially stabilized zirconia were carried out. Geometric accuracy of the grinder were satisfied. Relationship between the actual grinding depth of cut and the finished workpiece surface roughness was revealed. From these results, generation of the good workpiece surface roughness and the high quality form accuracy are expected using the developed grinder with fine-grained diamond grinding wheel.

研究分野：精密加工，工作機械

キーワード：精密研削盤 セラミックス 幾何精度 形状精度 表面粗さ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

我が国における少子高齢化は誰もが知ることであり、人口減少も含めてますます進展するものと考えられている。これを踏まえた上で経済成長をうながすために、経済基盤となるものづくり分野において「ものづくり革命」として様々な提案がなされている中で、長寿命の人工関節の製造により、社会に貢献できることが考えられてきた。

人工関節に用いられる構成材は、耐摩耗性、耐食性、生体親和性に優れた「生体適合性セラミックス」が用いられてきている。人工関節の寿命には、摩擦による摩耗に起因する摺動部の「ゆるみ」が直接的な影響を及ぼすことから、人工関節の摺動面には、高精度な表面仕上げによる優れた耐摩耗性が要求される。

従来、高精度な表面仕上げは、研削加工を行った後に表面仕上げを行うなど、複数の加工法を用いた複雑な工程が多かった。また、人工関節は表面精度だけでなく、形状精度が要求されることから、高剛性の5軸加工機を用いて製造されてきた。このような加工機は一般的に大型で高価であり、設置場所の自由度が小さく、セラミックス製人工関節のオーダーメイド化の推進をさまたげる一因となっていた。したがって、高精度な加工可能かつ小型の専用加工機の開発が要求されていた。

2. 研究の目的

本研究は、耐摩耗性に優れたセラミックス製人工関節の摺動面を創成可能な、加工技術を開発することを目的とする。具体的には、小型ゆえに低剛性でありながら、現行の大型加工機と同等の加工精度を達成できる「卓上型5軸NC精密研削盤」を試作する。さらに、試作加工機を用いた研削実験により、セラミックス製人工関節摺動面を高精度に加工する際の、加工機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 卓上型5軸NC精密研削盤の製作

本研究において試作した卓上型5軸NC精密研削盤の概略図を図1に示す。設置面積が680 mm × 500 mmの卓上型加工機である。5軸は、工具側にリニアモータによる直動3軸と、工作物側にACサーボモータによる回転2軸とした。スピンドルには、超音波スピンドルを採用した。これは、超音波援用研削による加工精度の向上効果により、後に研削加工による形状創製と表面仕上げの工程集約化を見据えたものである。研削盤の試作後には、JIS B 6190-2:2016に則した内容にて、レーザ測長器を用いた幾何精度試験を実施した。各軸の幾何精度が十分であることが確認できた後、制御機構を設計し、PLCコントロールボードの導入などにより、同時5軸制御可能とすることにより、研削盤を完成させた。

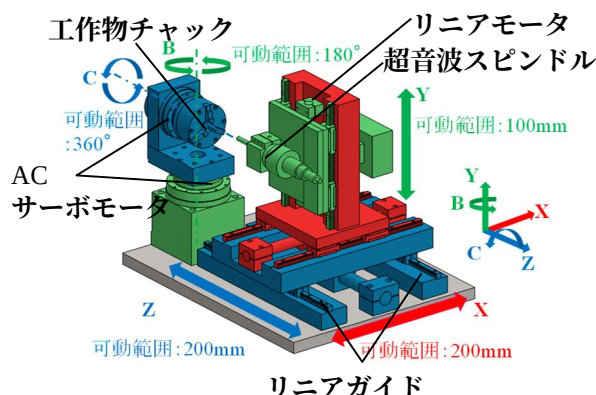


図1 卓上型5軸NC精密研削盤の概略図

(2) 試作研削盤を用いたセラミックス研削時の加工機構解明

製作した研削盤を用いて、セラミックス研削時の材料加工機構の解明を実験的に行った。工作物には、人工関節用セラミックスとして広く利用されている部分安定化ジルコニアの丸棒 ($\phi 11 \times t45$ mm) を使用した。研削砥石として、当初は軸にダイヤモンド砥粒を1つ固着した単粒を用いる予定であったが、関連の研究にて、一般の電着ダイヤモンド砥石でも加工機構の検討は可能であることがわかり、市販の電着ダイヤモンド砥石 ($\phi 2 \times t4$ mm, #140) を使用した。実験方法の模式図を次頁の図2に示す。研削の方式は、工作物に砥石を切り込ませて、直動軸に対して平行に送り速度を与える平面研削とした。切込みの方向はX軸、送りの方向はY軸とした。はじめに、図2(a)に示すように、丸棒の任意の箇所に対して研削を行い、平面を作り出す。次に、砥石をZ軸方向に1 mm 移動させて、平面研削を実施する (図2(b))。このときの平面形成は、複数回切込みを与えて、設定の総切込み量が100 μm となるまで実施し、これらの工程を経て加工終了とした。このとき、図2(c)に示すように、工作物上には平面研削を行った面が2つ形成されることになる。ここで、最初に加工した面を「基準面」、次に加工した面を「加工面」と呼ぶこととした。研削実験が終了した後は、基準面と加工面の高さの差（実際の切込み深さ）を二次元レーザ変位計で測定し、設定の切込み深さとの差を「加工誤差」として算出した。また、加工面をワンショット三次元形状測定器を用いて測定し、表面粗さ S_a 、 S_z を求めた。これらの結果が

ら、試作した研削盤の性能を確かめるとともに、加工機構の解明を試みた。

4. 研究成果

(1) 卓上型 5 軸 NC 精密研削盤の製作

研削盤の試作は、設計通りの設置面積にて行うことができ、卓上型研削盤とすることができた。試作した研削盤に対して、レーザ測長器を用いた幾何精度試験を行い、その結果の例として、X 軸方向の位置決め精度試験を実施した結果を図 3 に示す。測定された位置決め誤差は、指令値に対して $\pm 1 \mu\text{m}$ の範囲であった。なお、各軸ともに同程度の精度を得られた。人工関節に要求される形状精度は $5 \sim 35 \mu\text{m}$ 程度とされており、それを加工するために十分な精度を有していることがわかった。さらに、これらの制御系の設計を実施した。「3. 研究の方法」に記載したように、当初は PLC コントロールボードの導入などを検討していたが、最終的にシーケンサ一式を導入し、研削盤と接続を行った。その結果、直動 3 軸+回転 2 軸の同時制御を可能とした。

以上の結果から、試作研削盤は、対象の工作物を加工するための要求値を満たしているだけでなく、卓上型である。したがって、場所を問わない（医療現場を含む）専用機として、広く使用されることに耐えうるものとすることができた。

(2) 試作研削盤を用いたセラミックス研削時の加工機構解明

試作研削盤を用いて実施した平面研削実験の結果として、実際の切込み深さを、二次元レーザ変位計を用いて測定した結果を図 4 に示す。なお、前述のとおり、設定の総切込み深さは $100 \mu\text{m}$ とした。結果より、実際の切込み深さは $100 \mu\text{m}$ に近い値を示した。よって、設計と試作において達成した研削盤の持つ加工精度が、実際の研削に反映されたといえる。

次に、送り速度、砥石切込み深さ、砥石周速度を変更させながら研削実験を実施し、さらなる高精度化、高能率化を実現することを試みた。砥石切込み深さを横軸に取り、設定と実際の切込み深さの差を縦軸に取ってプロットすると、次頁の図 5 のようになった。砥石切込み深さの増加に伴い、設定と実際の切込み深さの差は大きくばらつくようになった。砥石周速度については、明確な傾向を見ることができなかったが、周速度が小さい方がばらつきは小さいように見えた。しかしながら、先に述べたとおり、人工関節を創成するためには、 $5 \sim 35 \mu\text{m}$ 程度の形状精度が要求され、設定と実際の切込み深さの差にもこの付近の値が求められる。複数の実験を通して、この要求値を満たすことができた結果は、試行回数に対して約 7 %に留まった。この問題について検討するために、研削後の加工面を、ワンショット三次元形状測定器により測定を行った。測定された三次元像を用いて、表面粗さ S_z を計測した。設定と実際の切込み深さの差を横軸に、加工面の表面粗

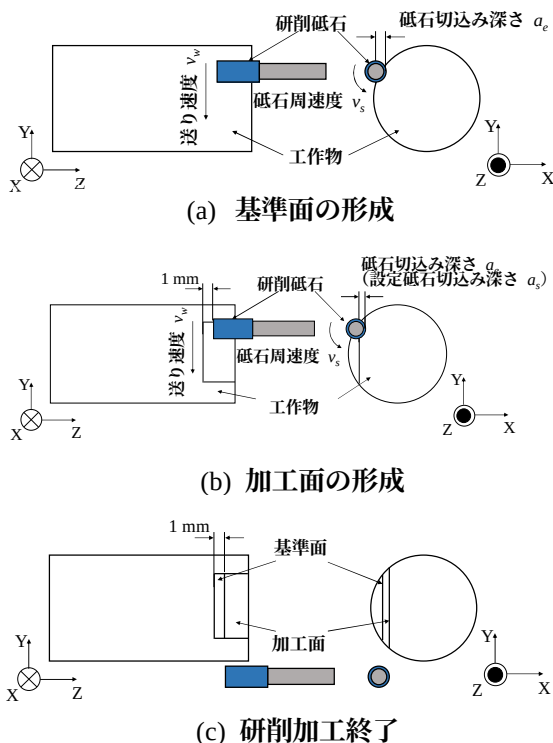


図 2 平面研削実験の概略図

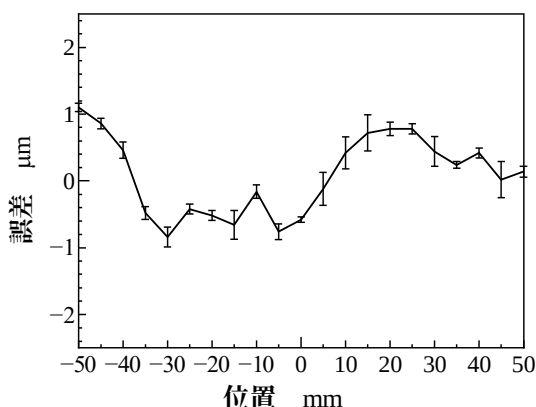


図 3 X 軸の位置決め精度試験結果

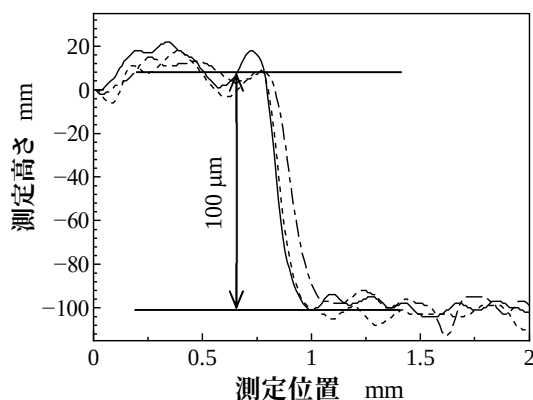


図 4 実際の切込み深さ測定結果

さ S_z を縦軸にそれぞれ取ってプロットした結果を図 6 に示す。この結果から、設定と実際の切込み深さの差は、表面粗さ S_z との間に正の相関があることがわかる。したがって、表面粗さ S_z を減少させることができれば、設定と実際の切込み深さの差、すなわち形状精度を向上させることを実験的に示すことができた。

以上の結果を踏まえて、今後の展望を示す。卓上型でありながら同時 5 軸制御を可能とする研削盤を製作することができた。これを用いて、さらに工作物の形状精度を向上させるためには、以下の 2 つの手法が考えられる。1 つは、微粒の砥石を使用することである。加工面の三次元測定結果より、表面粗さ増加の主要因は、被加工面に存在する脆性破壊であった。本報では、加工機構の検討を主とするために #140 の粗粒ダイヤモンド砥石を使用しており、脆性破壊が顕著となったが、微粒のダイヤモンド砥石を使用することにより、抑制されることが考えられる。このように、高精度加工を実現するための砥石を設計する指針を得ることができた。2 つめには、本研削盤に備えた超音波援用研削を使用することである。金属材料の研削において、超音波援用研削を利用することにより、工作物の形状精度が向上することが報告されている。本研削盤が十分な幾何精度を有していることから、本加工法は有効であることが示唆された。

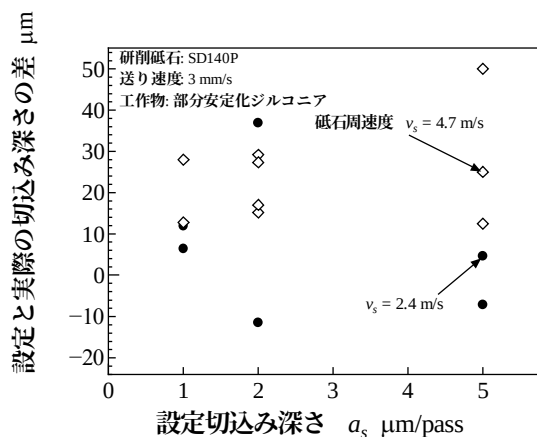


図 5 研削条件が実際の切込み深さに及ぼす影響

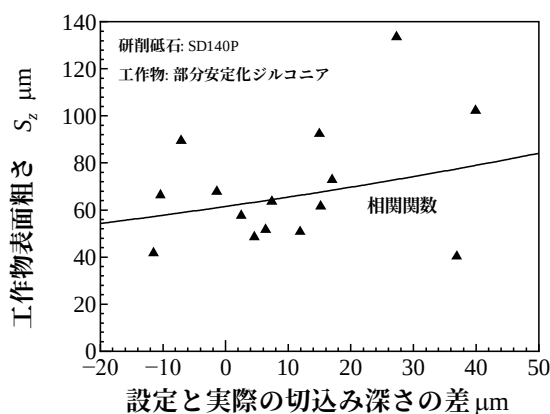


図 6 切込み深さと表面粗さの関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤本正和, 山本智哉, 大崎健汰	4. 巻 56
2. 論文標題 デスクトップ型5軸NC精密研削盤の試作と幾何精度測定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 近畿大学工学部研究報告	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masakazu Fujimoto, Yuki Inoue, Tomoya Yamamoto
2. 発表標題 Fundamental Grinding Characteristics of Trial Manufactured Desktop Type Grinder
3. 学会等名 The 20th International Conference on Precision Engineering (ICPE2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤本正和
2. 発表標題 小径砥石を用いた研削による難削材の高精度加工技術
3. 学会等名 栃木県産業人クラブと日本機械学会関東支部栃木ブロックとの交流会（招待講演）
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 藤本正和
2. 発表標題 小径砥石を用いた難削材の研削加工技術
3. 学会等名 第78回マイクロ加工懇談会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本正和, 山本智哉
2. 発表標題 試作したデスクトップ型5軸NC精密研削盤の性能評価（位置決め精度が加工特性に及ぼす影響）
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本正和
2. 発表標題 小径砥石による難削材の研削加工技術
3. 学会等名 第118回難削材加工専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

足利大学工学部創生工学科機械分野 精密加工技術研究室ホームページ
<https://www2.ashitech.ac.jp/mech/fujimoto/index.html>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------