

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 3 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630029

研究課題名(和文)超伝導砥粒を用いた磁気援用選択加工技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on nano machining technology using superconductor

研究代表者

鈴木 恵友 (Suzuki, Keisuke)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50585156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超伝導によるマイスナー効果やピンニング効果のより永久磁石を空中にトラップし、磁気浮上工具による加工法を考案した。本研究は、申請時に提案した超伝導粉体を磁場中にフィールドコイルで磁化させ、超伝導粉体を磁場により加速させてサンドブラスト加工をする手法を想定していた。しかしながらワークを液体窒素に冷却する制約から、逆に磁石を浮上させれば常温で加工可能である点に注目し、本手法の着想を得た。この磁気浮上工具が利用可能であれば工具の干渉自体が低減可能となり、中空加工などへの応用が期待できる。ここでは磁気浮上工具を回転および並行運動させるために永久磁石の極性の最適化を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed that unconventional processing technique with permanent magnet tool trapped in air by meissner effect and flux pinning by YBCO superconductor. First of all, this research had been proposed as sand blast processing by superconductive powder body accelerated by magnetic field after the superconductor powder grain is magnetized by field coolness process of the superconductor from electric magnet. Our new method can be applied to process against materials at room temperature although the sand blast processing using superconductors powder grain need to keep the lower temperature under superconductive transition point temperature because of the superconductor magnetization. This trapped magnetic tool at air becomes possible to reduce intervention of a tool during 2D or 3D processing and the applicability to the hollow processing can be expected. In our study, magnetic polarity of a permanent magnet was optimized to process against SUS and Cu materials.

研究分野：超精密加工

キーワード：超伝導 超伝導援用加工 磁気浮上工具 ピンニング

1. 研究開始当初の背景

近年、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)デバイスの適用範囲は、自動車の加速度センサーやデジタルミラーデバイスによる画像表示素子からマイクロニードルなどのバイオ・医療などへ拡大し、今後十数年で市場の飛躍的な拡大が見込まれている。

従来の MEMS 加工に応用される半導体プロセスは、微細加工、深溝加工や特殊樹脂加工などのケースには適用できないため、新たな用途を開拓する上では、ナノ三次元微細加工技術を確立する必要がある。既に産業技術総合研究所で LIBWE 法 (Laser-induced backside wet etching) による優れた三次元微細加工も提案されているが、透明材料へ適用できないのが難点であった。

これまでバルクの超伝導物質は電気抵抗が無く、強磁場中で冷却することにより高い磁化率を保つことが知られている (磁場中冷却着磁法)。超伝導物質の応用は超伝導マグネットの配線などとしてすでに実用化されているが、加工技術へ応用についての報告はなされていない。そのため、本研究においては超伝で生じるピンニング効果や反磁性など特異的な現象を生かし、新規加工技術への展開を図る。

2. 研究の目的

本研究の目的は超伝導物質を超伝導コイルの中で冷却し着磁させることで生じる強磁力を援用工具として適用することで中空加工や3次元微細構造を実現することである。これまで微細加工手法の一つである精密ドリルでは直径 $10\mu\text{m}$ が限界であり、それ以下では真空条件下での加工が主流であった。本研究では磁気援用による加工技術を用いるが、これまで用いられてきた鉄などの強磁性体では、微粒子化した際に超常磁性へと転移することや磁化した物体を空中にトラップできないため、3次元選択加工技術や中空加工技術への適用が困難となる。そのため本研究では超伝導物質のもつ高い磁束密度を利用させることで、高効率な3次元加工技術や工具の干渉を低減させた中空加工技術を実現し、MEMS や医療分野など複雑な3次元形状への応用展開を目指す。

3. 研究の方法

3次元選択加工技術や中空加工技術を確立するため、超伝導加工装置の開発と加工性能確認を行なった。研究代表者の鈴木恵友の役割は超伝導加工装置のハードウェアの設計、製作を行い、超伝導微粒子による加工性能評価を実施した。研究分担者である小田部 荘司教授の役割は、超伝導微粒子の作製とともに超伝導加工装置のソフトウェアの開発を行う。ここでは、ハードおよびソフトを改良することにより、3次元選択加工技術の確立を目指す。そのため当初の研究の方向性としては粉体を磁化する方法を想定してきたが、研究を進める過程でマイスナー効果やピンニング効果などの超伝導現象特有の現象

による磁気浮上工具を新規に考案した。ここでは、超伝導バルクによりトラップした磁石を超伝導体とともに回転及び並行させることにより磁気浮上工具としての適用が試みた。実際の装置試作に関しては、研究代表者によりスラリー微粒子の供給条件、液体窒素の断熱部分の構造、そして磁場印加治具を製作し、加工条件の最適化を行なった。設計用ソフトとしては鈴木恵友研究室所有の CAD 専用コンピュータで実施し、部品加工については、九州工業大学情報工学部内にある実習工場で行なった。

一方、研究分担者の小田部 荘司らは磁気浮上工具に働く様々な力を簡易的な実験により測定し、有限要素法により計算した結果との比較を行った。磁気浮上工具の様々な力に対する有限要素法計算のために JSOL 社製 JMAG を使用した。有限要素法の計算においては磁界中冷却の捕捉磁界の計算のため初めに常伝導状態の特性を与え、磁界の侵入後に超伝導状態の特性を付与することで磁界中冷却を行っている。E-J特性の計算にはn値モデルを使用し、 $n = 10$ である。また、解析に必要な臨界電流密度の磁界依存性 (J_c -B特性)は、YBa₂Cu₃O_{7-x} 超伝導バルクの実験結果を用いて実施した。

4. 研究成果

本研究では、当初申請時に考案した超伝導粉体をフィールドコイルで磁化し、磁場により粉体を加速させ、ブラスト加工により金属表面を選択的に加工する手法を想定していた。本手法では加工対象物を液体窒素に冷却する必要もあり、用途も限定的であった。そのため、図1に示すようにマイスナー効果やピンニング効果などの超伝導現象を利用した磁気浮上工具による加工法を新規に考案した。

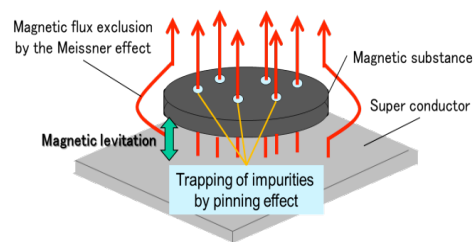


図1 超伝導バルクによる磁気トラップの概念図。

図2に超伝導援用加工法の概念を示す。ここでは回転工具に永久磁石を使用する。最初に回転工具を空中に保持した状態でワークの下部に存在する超伝導バルクを液体窒素温度まで冷却する。このとき回転工具は、超伝導バルクにより空中にトラップされる。その後、超伝導バルクを回転することで、回転工具も連動して回転運動を行なう。このときXYZ ステージで回転工具の運動方向を制御することで、運動軌跡にしたがって中空加工が可能となる。この原理を活用できれば、工具

の干渉を極力低減させた従来には不可能とされてきた中空加工などに適用が可能となる。

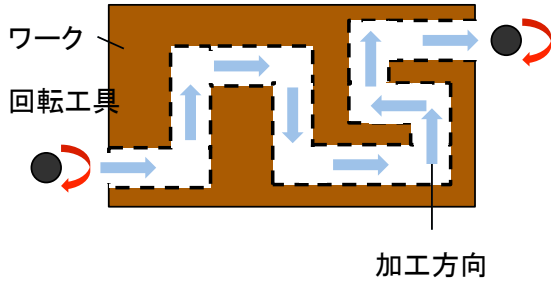


図2 超伝導援用加工法の概念図

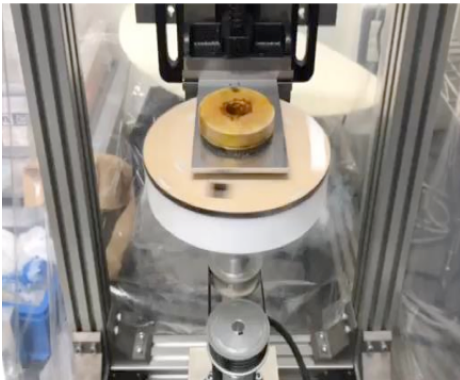


図3 超伝導援用加工装置の外観写真

図3に超伝導援用加工装置の外観写真を示す。液体窒素は白色の円筒部分の容器に蓄えられる。ここで冷却部分はテフロンを加工した専用の液体窒素容器に供給口を設けて補充する構造である。白い液体窒素容器の上蓋部分には、超伝導バルクが4個専用プレートにより固定されている。図4に超伝導バルクと回転工具として使用したマグネットの極性を示す。本研究では、回転工具（磁石）を回転方向にトラップさせるため4極のネオジウム磁石を用いた。そして、磁石に工具を

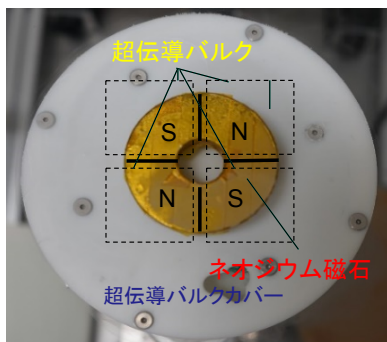


図4 超伝導バルクとネオジウム磁石の関係。

取り付けると空中に固定された工具となる。そのため、回転軸を用いて超伝導体を回転させることで、空中の磁気浮上工具も追従回転し、加工を行なう。

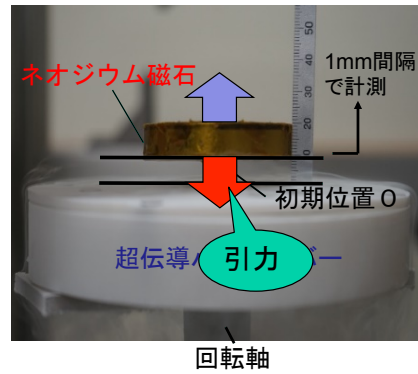


図5 超伝導バルクによりネオジウム磁石が空中にトラップされている様子。

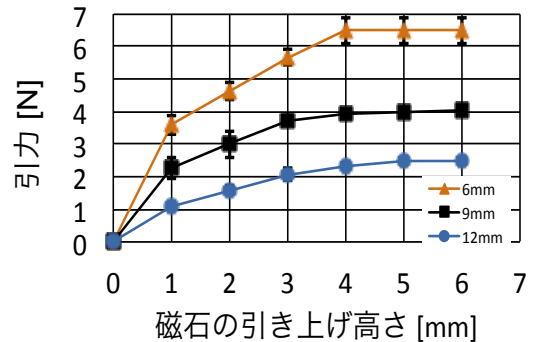


図6 磁石の引き上げ高さ と 引力の関係。

図5に超伝導バルクによりネオジウム磁石が空中にトラップされている様子を示す。磁石の下には、加工対象物であるアルミ板を設置する。磁石をトラップする際、浮上量を6mmから12mmに設定した。その後、アルミ板を上へ引き上げた際、磁石は最初のトラップした場所に引き戻すための保持力が発生するので、この保持力を利用し研磨を行なった。ここでは写真に示すように引力と定義した。そして、この他の鉛直方向、水平方向、回転軸方向の力に分け、それぞれの力を引力および反発力、復元力、駆動力と定義し、磁石のトラップの高さと力の関係について評価した。

ここでは磁気浮上の初期高さに対する力に関する評価を実施した。図6に初期位置が6mm、9mm、12mmの時に発生する引力の結果を示す。引力は初期位置が6mmの時、最も大きくなった。この結果より引力は、超伝導バルクと磁石の距離が近いほど大きくなる。また、超伝導現象の効果が保たれた範囲は初期位置に関わらず、原点からの距離が4mmまで増加し、4mmから6mmまで一定であった。そしてそれ以上の距離では磁石はトラップされなくなった。また、復元力や駆動力、反発力に関しても同様な計測を行なった結果、初期位置による力の変化が確認された。したがって、初期位置を設定する時は、被研磨材の厚さと研磨に必要な力の関係を考慮しなければならない。

次に、実験で得られた測定結果と磁気勾配によるシミュレーションの計算結果を比較

検討も行なった。計算としては、JSOL 社の JMAG を使用した。有限要素法の計算においては、磁界中冷却の捕捉磁界の計算のために初めに常伝導状態の特性を与え、磁界の侵入後に超伝導状態の特性を付与することで磁界中冷却を想定した。E-J特性の計算にはn値モデルを使用し、 $n = 10$ とした。また、解析に必要な臨界電流密度の磁界依存性 ($J_c - B$ 特性) は YBa₂Cu₃O_{7-x} 超伝導バルクの実験結果を用いている。その結果、超伝導バルクと磁石の距離が近い程、増加したため実験結果と同じ傾向を示した。

次に図7に示すようにシリコン化合物系とアルミナ系粉末とエポキシ樹脂を混合し、専用の工具を作製した。工具刃の形状は半円状である。ここでは引力の測定値と工具刃の接触面積から研磨圧力が21kPaになるように設計した。図8に研削実験の結果を示す。ここでは回転数を70回転に設定した。その結果、シリコン化合物系とアルミナ系粉末の両者とも20分で60mg程度削ることが可能となった。現在、工具形状や刃先など改良を行なうことで、より高い加工レートの実現を目指しているところである。

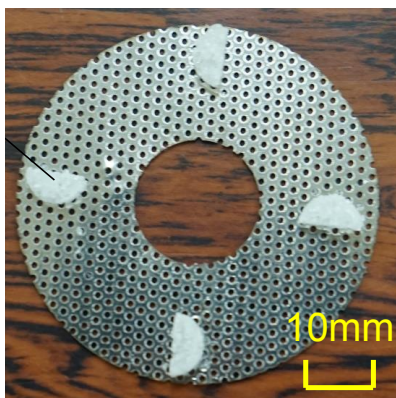


図7 専用工具の外観写真。

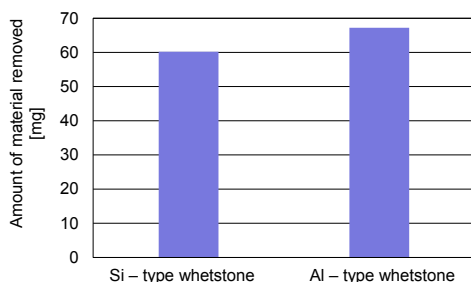


図8 研削試験における加工量の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

〔学会発表〕(計 6件)

①田中佑季, 鈴木恵友, カチョン・ルンルアン・パナート「超伝導による磁気浮上工具を用いた加工技術に関する研究」日本機械学会九州支部 第70期総会・講演会, 2017年3月14日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)

②田中佑季「超伝導による磁気浮上工具を用いた研磨技術に関する研究」精密工学会九州支部「第17回学生研究発表会」, 2016年12月11日, 北九州工業高等専門学校(福岡県北九州市)

③日高裕, 上原和晃, カチョン・ルンルアン・パナート, 小田部荘司, 鈴木恵友「超伝導バルクを利用した磁気浮上工具による中空加工技術に関する研究」2016年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016年3月15~17日, 東京理科大学 野田キャンパス(千葉県野田市)

④日高裕, 鈴木恵友, カチョン・ルンルアン・パナート, 小田部エドモント荘司, 上原和晃「超伝導体を利用した磁気援用加工技術に関する研究」2015年度精密工学会九州支部「飯塚地方講演会」, 2015年12月5日, 九州工業大学情報工学部(福岡県飯塚市)

⑤日高裕「超伝導体を用いた磁気援用加工技術に関する研究」日本機械学会九州支部 第68期総会・講演会, 2015年3月13日, 福岡大学工学部(福岡県福岡市)

⑥高橋悠, 平松佑太, 小田部荘司, 鈴木恵友, 田中佑季, 木内勝「超伝導バルクを利用した磁気浮上工具における磁気浮上力の計算」応用物理学会九州支部学術講演会, 2016年12月4日, 対馬市交流センター(長崎県対馬市)

〔図書〕(計 1件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1件)

名称: 超伝導体を利用した加工装置及び加工方法

発明者: 鈴木恵友, 日高裕, 小田部荘司, 上原和晃

権利者: 九州工業大学

種類: 特許

番号: 特許願-2015-228714

出願年月日: 2015年11月24日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kyutech-iizuka.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木恵友(SUZUKI, Keisuke) 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号: 50585156

(2) 研究分担者

小田部荘司(OTABE, Souji) 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号: 30231236