

## SUAM法における超伝導線材接合技術に関する研究

研究報告者 鈴木 恵友

### プロフィール



最終学歴 1998年3月  
北陸先端技術大学大学院 材料科学研究科  
博士後期課程 修了  
専門分野 材料科学、半導体プロセス、超精密加工技術  
学 位 博士(材料科学)  
所属団体 国立大学法人九州工業大学  
大学院 情報工学研究院  
知的システム工学研究系  
役 職 名 教授

### 今後の抱負

超伝導用加工法（SUAM 法）は、ピンニング効果により工具を空中に浮上しているため、工具干渉が生じずに中空加工を可能にする画期的な研磨方法である。しかしながら、これまで超伝導バルク自体がセラミックで形状やサイズなどの制約があり、浮上工具に対する最適な配置を設定することが困難であった。そこで、近年開発された超伝導線材を活用することで超伝導線材を積層させることにより、超伝導体の形状の自由度が確保できるほかに、浮上量や保持力の向上などが期待できる。本研究では、本財団の助成金を活用し、超伝導線材を加工し、積層数の影響や四角柱における形状依存性などの影響を確認した。その結果、積層数を増加させることにより、浮上量や保持力が向上した。ここでは、中空加工技術から半導体 CMP 技術への拡張を目指し、Cu—CMP への適用を目指している。特に、SUAM では非接触であるメリットを活かし、今後、半導体における新しい搬送システムやプロセスの確立を目指していく。

## 1. はじめに

SUAM 法 (Superconductive Assisted Machining method : 超伝導支援用加工法) は、超伝導のピンニング効果を利用して工具を空中に浮上させながら研磨を行うため、工具干渉の問題を解決可能にする加工方法である。浮上工具は、図 1 に示すように超伝導バルクが設置されている超伝導 BOX を回転や移動させることにより、浮上工具も運動して磁石を回転、移動させることを特徴としている。ここでは磁石に刃物や研磨パッド等を取り付けることでピンニングにより発生する保持力を利用し、中空物でも選択的に加工や表面処理を行うことが可能となる。しかしながら、SUAM の課題である超伝導バルクの寸法や形状には制約があり浮上工具に対する自由度がほとんどない。そこで本研究では、超電導線材に着目し、SUAM への適用を試みた。超伝導線材の特徴としては、金属線材上に超伝導層が製膜されているため、浮上工具に適用させた加工も容易であり、セラミックバルクと比較して高い臨界電流の実現が可能である。そのため、超伝導線材を適用させることで、セラミックバルクと比較して、浮上量の向上や高い保持力が期待できる。本研究では、SUAM 法における近年開発された超電導線材の適用とセラミックバルクに対する優位性を検証するために、超伝導線材の積層数に対する保持力の向上を目指している。また、SUAM の応用範囲の拡張を目指して、半導体プロセスの一つである Cu-CMP へ実用可能かについても確認を行ったので報告する。

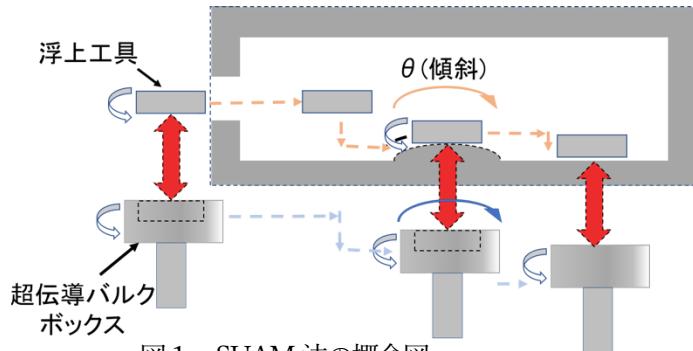


図 1 SUAM 法の概念図

## 2. 実験装置の概要

図 2 に SUAM 装置の概要を示す。超伝導ボックス内に超伝導線材などの超伝導体が固定されており、ボックス上部から液体窒素を供給する。そして、超伝導バルクが冷却され超伝導状態にすることによってピンニング効果（ピン止め効果）が生じ、ボックス上部の磁気工具の磁束が固定され、浮上する。また、磁束が固定されるため、ボックスを回転・移動させると磁気工具もその動きを追従する。次に超電導線材の評価に用いる保持力について説明する。保持力とは超伝導体のピンニング効果によって磁束が固定された状態で、外力が加えられたときに元の位置に復元しようとするときに発生する力の総称である。保持力には図 3 に示すように引力、反発力、復元力がある。研磨は、一般的に引力によって実施される。

図 4 に超伝導線材と浮上工具に用いた磁石の外観を示す。超伝導線材はセラミックバルクに比べて結晶性が高く、100 倍程度の臨界電流密度が実現可能である。しかしながら、超伝導層の膜厚が小さく、超伝導の膜厚指定ができないため、超伝導線材を積層化することでピンニング力を確保した。本研究

で使用した超伝導線材は、株式会社フジクラの FYSC-S12 で、超伝導層の厚さは  $2 \mu\text{m}$ 、金属基板（ハステロイ）は  $75 \mu\text{m}$  である。本実験では、超電導線材を 3 層、5 層、10 層についてそれぞれ保持力の測定を行った。保持力の測定は各積層枚数で、ロードセルからの距離を  $1\text{mm} \sim 10\text{mm}$  の間で  $1\text{mm}$  ずつ変化させ測定した。この測定を各保持力、積層枚数で 3 回ずつ行い、その平均値をその層が示す保持力とした。また、研磨の際に保持力増幅のために用いる下部のマグネットも除去した状態で行っている。

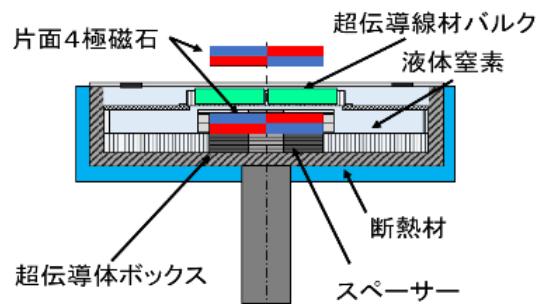


図2 実験装置の概要

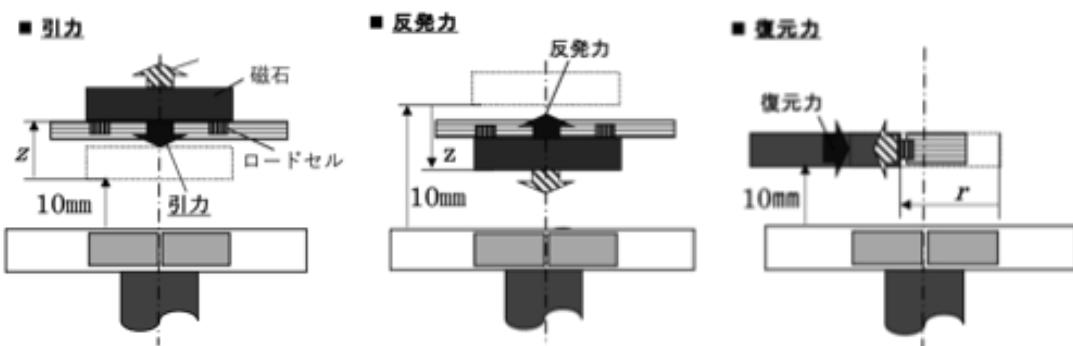


図3 保持力の概念図

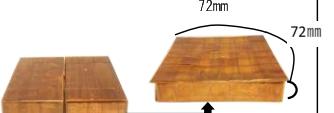
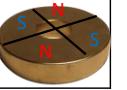
<b>リブ付き超伝導線材 + セラミックバルク</b> 	 <b>セラミックバルク</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>材質 : YBCO</li> <li>サイズ : <math>67 \times 35 \times 13\text{mm}</math></li> <li>粉末を焼結して製造</li> <li>欠陥、結晶性のばらつきにより、臨界電流が低い →超電導特性が低い</li> </ul>
<b>磁気浮上工具</b> 	<b>材質 : ネオジウム</b> <b>サイズ : <math>\Phi 59 - \Phi 19 - 10\text{mm}</math></b> <b>磁束密度 : <math>400\text{mT}</math></b> <b>極性 : 片面4極</b> 

図4 超伝導線材の適用例と磁気浮上工具の外観

### 3. 引力の測定

引力とは、磁気工具を超伝導ボックスから上向きに引き離そうとしたときに、磁石が初期位置に戻ろうとする下方向の力である。研磨実験では、引力測定時のように、磁気工具と超伝導ボックスの間に研磨対象物を挟み、引力を用いて研磨を行う。そのため引力とポリシングパッドの面積により研磨圧力が設定される。引力の測定では超電導線材と磁気工具の間に専用のスペーサーを挿入することによって 10mm 離した地点で液体窒素により冷却される。そして、冷却後、専用のスペーサーを取り除き、ピンニングにより磁石を空中に保持させる。そして、磁石磁気工具と超伝導ボックスの間に 3 点のロードセルが取り付けられた圧力測定板の位置を Z ステージにより調整する。ここでは、ピンニングにより保持された初期位置から 1 mm ずつ引き離したときの引力を計測している。

積層枚数別の引力の測定結果を図 6 に示す。引力の場合、変位が 6mm のとき最大となり、それ以上、引き離しても引力は増加しない。ここでは積層枚数を増やすごとに引力が向上しているが 3 層から 10 層にしても 30 % 程度の向上であった。これは超電導線材の積層枚数を増やすことによって捕捉される磁束線が増加するが、必ずしも層数に比例しない。その理由としては、引力では磁石が超伝導バルクから遠ざかる方向で移動しているため捕捉される磁束が減少したためと考えられる。また、反発力、復元力では、引力と異なり変位が増加するにつれて力が強くなる。この場合、3 層から 10 層にした場合、2 倍程度増加する。これは磁石と超伝導バルクの間隔が狭くなるため、引力とは逆に捕捉される磁束が増加したためと推測できる。

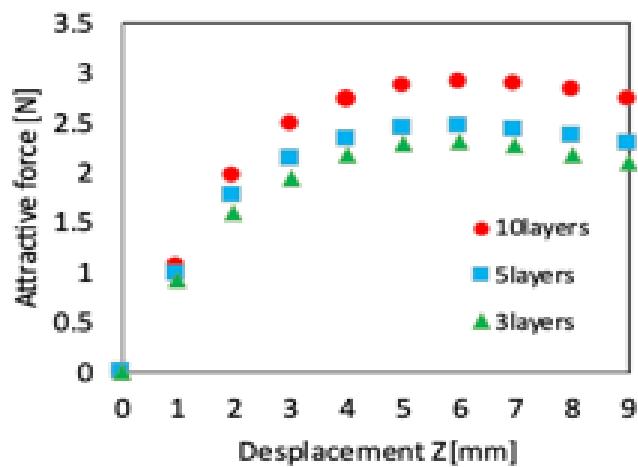


図 6 変位と引力の関係

### 4.Cu—CMP の評価

SUAM 法を Cu-CMP に適用させるため、研磨性能について評価した。ここでは一般的に用いられている研磨装置での研磨結果と比較した。研磨実験では保持力の強化のため、セラミックバルクと超電導線材をテープで組み合わせた超伝導体を用いた。また、本実験ではダブルマグネット方式と呼ば

れる装置下部に磁気工具と同じ磁石を設置することで引力を増加させている。研磨実験の様子を図7に示す。ここでは研磨圧力は引力とポリシングパッドの接触面積で設定されている。具体的には、永久磁石と超伝導体の間隔を10mmに固定し、ピンニングにより空中に固定させた後、1mmから6mmまで変位を変えることにより研磨圧力を変化させた状態で研磨した。

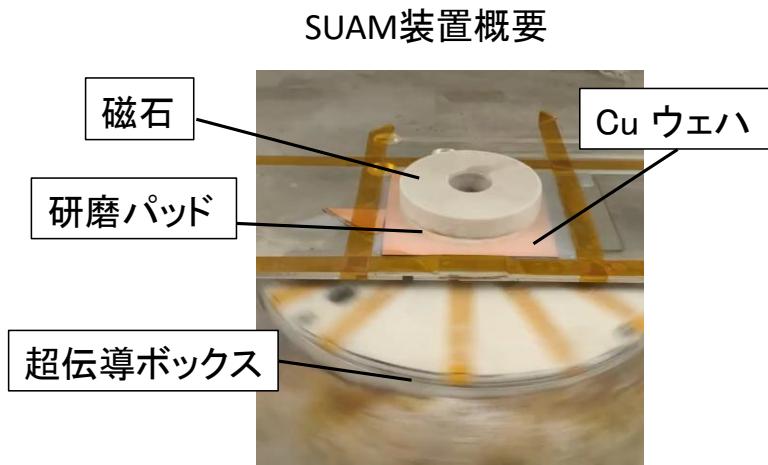


図7 SUAMによる研磨実験の様子

SUAM法における研磨条件を表1に示す。研磨対象として半導体配線材料として代表的なCuで研磨性能を評価した。スラリーには同じコロイダルシリカ(NP1000MS, NITTA DuPont)を用いて研磨を行った。研磨レートの結果の比較を図8に示す。圧力が6.6kPaになるまでは研磨レートが一般的な加工機で研磨した値よりも低くなったが、8.3kPaより高い研磨圧力領域では従来のCu-CMPと比較して高い研磨レートであった。ここでは最大で15.64nm/min従来のCu-CMPの約1.5倍の研磨レートを確認している。このとき表面粗さも従来とCu-CMPと同程度の値が得られSUAMがCMPプロセス適用可能であることを確認した。

表1 SUAM法における研磨条件

<b>Superconducting Wire</b>	$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO)
<b>Superconducting Ceramic Bulk</b>	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)
<b>Polishing Pressure</b>	36, 66, 83, 94, 101 [kPa]
<b>Rotation Speed</b>	100 [rpm]
<b>Polishing Time</b>	1 [min]
<b>Work</b>	Cu (70mm × 70mm)
<b>Slurry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colloidal silica (NP1000MS:NITTA DuPont)</li> <li>• Hydrogen peroxide</li> </ul>
<b>Polishing Pad</b>	IC1000 size:5 × 5mm

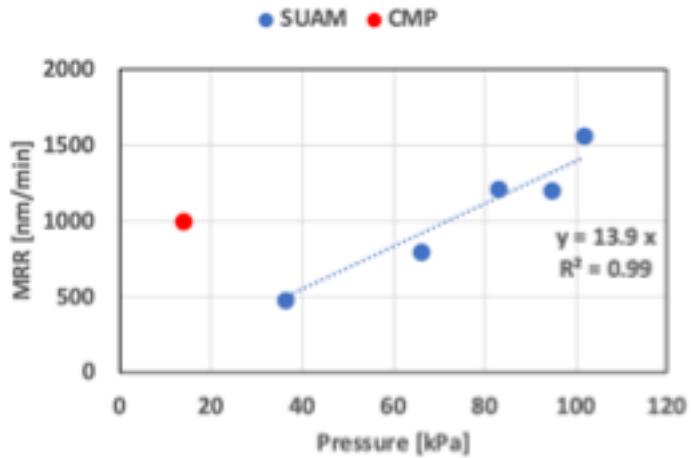


図8 研磨圧力と材料除去率の関係

## 5. まとめ

本研究では SUAM 法の半導体プロセス適用を検証するために、超電導線材の積層枚数別の保持力の評価と Cu-CMP を想定した研磨性能の評価を行った。その結果、超伝導線材の積層枚数を増やしていくと保持力の大きくなることが明らかとなった。また、SUAM 法は Cu—CMP と同程度の研磨レートと表面粗さを実現することができた。今後、Cu—CMP など半導体プロセス研磨にも SUAM 法が適用を目指し、保持力の向上とともに SUAM に適した研磨部材の開発を行なっていく。