

生産加工における超電導技術の応用

研究報告者 鈴木 恵友

プロフィール



最終学歴	1998 年 3 月 北陸先端科学技術大学大学院 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	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

超伝導援用加工法 (SUAM 法) は、ピンニング効果により磁性工具を空中にトラップして回転運動を与えることで加工するため、工具干渉を低減させることが可能な加工法である。これまで SUAM の課題としては磁性工具のトラップしたときの保持力や浮上量の向上である。本研究では、これらの課題を解決させるためダブルマグネット方式を考案し、本財団の助成金を活用し、実際に試作機を製作することで本手法の妥当性について検証を行なった。その結果、従来のシングルマグネット方式より、保持力は2倍以上、浮上量も3倍以上も向上した。加工試験ではアルミニウムやSUS板も適用可能であることを確認している。ここでは、下部磁石と超伝導バルクの距離が小さいほど保持力が向上し、加工能力も向上している。さらに、下部磁石に振動機構など運動させることで、上部磁石が連動することも確認している。今度、本研究の成果を活用し、SUAM法を実用化させるため、ダブルマグネット方式を用いた試作機で中空配管や金型などへの適用を目指す。

近年、生産加工技術では多軸制御マシニングセンタを用いた高精度加工、高速加工による多量生産化が進められている。ここでは加工形状の複雑化が進行するにつれ、より高度なプログラムによって加工へ適用させてきたが加工形状の複雑化に伴い、工具干渉などの問題が顕在化されてきている。

これまでに工具干渉を低減する加工手法として、超伝導現象であるピンニング効果により空中に保持した磁石を磁気浮上工具として利用した SUAM 法 (Superconductive Assisted Machining method : 超伝導援用加工法) が提案されてきた。ピンニング効果とは第 2 種超伝導体で生じる現象で、磁石から生じている磁束が超伝導バルクの内部に侵入し、超伝導体内部に存在する常伝導部分や欠陥に捕らえられることにより、磁石と超伝導バルク間の位置が一定となるようにトラップされる現象である。本研究で使用している超伝導バルクは液体窒素で超伝導状態が実現でき、かつピンニング効果を得ることが可能な第 2 種超伝導体である希土類系超伝導物質を用いている。これまでの超伝導技術の応用として、ピンニング効果を利用した超伝導軸受けや搬送装置や電気抵抗をゼロにする性質を利用した超伝導磁石などに応用されている。一方、本研究で注目している SUAM 法とは、磁石を磁場中冷却で超伝導状態に移行させた場合、ピンニング効果で空中にトラップされた磁石が、超伝導バルクに対して同じ高さで位置に保持する。この性質を利用し、磁石を磁気浮上工具として用いた加工手法である。ここでは磁気浮上工具を超伝導バルクにより空中でトラップさせたあと、超伝導バルクをモータによる回転運動および、XYZ ステージによる並行移動を組み合わせることで、磁気浮上工具による加工を進行させる。また、磁気浮上工具が空中にトラップした状態で加工を進行するので工具干渉などの制約は受けない。そのため、XYZ ステージの運動を設定することにより、中空物や複雑な加工形状などの内面において必要な部分を選択的に加工することが可能となる。

本研究では、従来の SUAM 法にて出力できる最大加工力を超える新たな機構を考案した。ここでは新たな機構として超伝導バルクの下側に磁石を追加することで超伝導バルク内に入る磁束密度を増加させ、SUAM 法で使用される加工力の増加を図った。そこで加工力の増加を確認するために、先行研究にて測定していた SUAM 法の加工力の元となる保持力の測定、および下面磁石の初期位置を変更した場合の磁束密度の変化や、加工で最も使用される最大引力と最大磁束の関係を評価した。その結果、下面磁石と超伝導バルクの間隔が狭いほど保持力と磁束は大きくなった。特に下面磁石が 4 mm のとき、保持力の 1 つである引力では最大値は先行研究より 2 倍以上増加していることが確認できた。また、磁束密度においても磁石を増やしたことにより最大値は 100 mT 以上高くなった。そこで本研究では、従来の機構による SUAM 法に対し、新機構による SUAM 法の加工性能の変化を明らかにするために SUS304 と A1000P を用いた研磨による比較検証をした。研磨実験では加工物が常温に近い水系のダイヤモンドスラリーを用いた。ここでは、A1000P と SUS304 両方とも研磨量は新機構による SUAM 法が増加した。SUS304 においては研磨量が 3 倍も違い、研磨痕におい

でも目視による違いが確認できた。

SUAM 法の概要図を図 1 に示す。従来の機構である SUAM 法では、片面 4 極の永久磁石を 1 つ利用した Single magnet system (以後 SMS と記載) が採用されている。この磁石は磁気浮上工具として使用される。磁石の浮上量については、超伝導バルクに対し磁気浮上工具の高さをスペーサー等で調整することによって浮上量が決定する。このとき、磁気浮上工具が固定された高さは初期位置として設定される。超伝導バルクボックスでは液体窒素を満たせるよう容器形状となっており、内部には寸法 35 mm×35 mm×10 mm の超伝導バルクが 4 個均等に配置された状態で固定されている。この超伝導バルクは液体窒素の温度で超伝導状態に移行する希土類系(GBCO)の第 2 種超伝導体が使用されている。そのため、超伝導バルクボックス内部を液体窒素で満たし、磁場中冷却を行うことで超伝導現象であるピンニング効果が生じ、超伝導バルクは磁束を捉えられることが出来る機構となっている。

図 2 に磁気浮上工具を用いた中空物の加工例を示す。中空物内部にある加工対象まで工具を移動させ、モータによる回転運動と XY ステージによる並行移動、また、Z ステージの変位によって加工力となる保持力を発生させることで研磨や研削などの加工を行う。

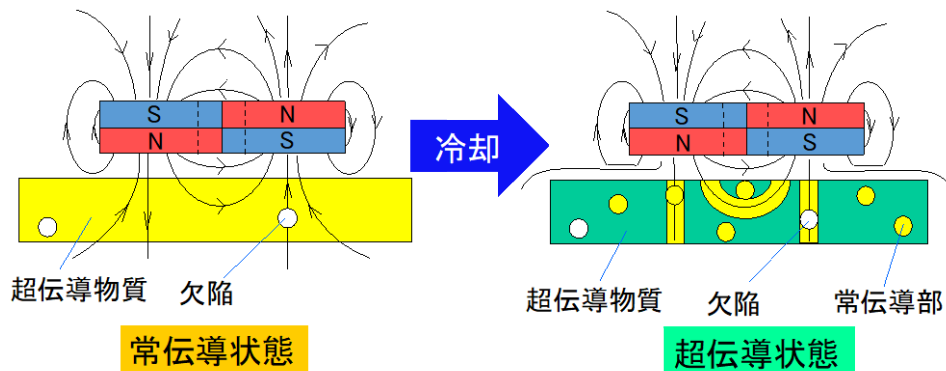


図 1 SUAM 法の概略図

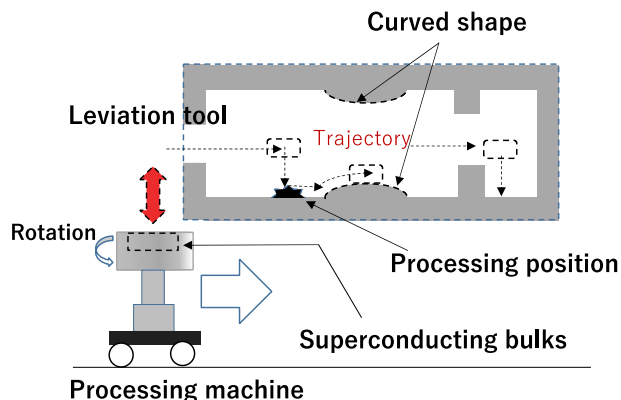


図 2 SUAM 法による加工例

図3にSMSとDMSによるSUAMの装置概要を示す。新機構によるSUAMではDMSに対応するために構造が大幅に変更されている。構造の変更点は、磁束密度を増加させる目的として導入されている下面磁石がスペーサーによって内部で高さ調整が可能となっている。また、新機構のSUAMは従来型のSUAMよりも容器が大きくなっているため、液体窒素を入れる量が増加しており、容器外部には断熱材が使用されていることで保温性も向上している。これにより、超伝導状態の持続時間が増加する機構となった。

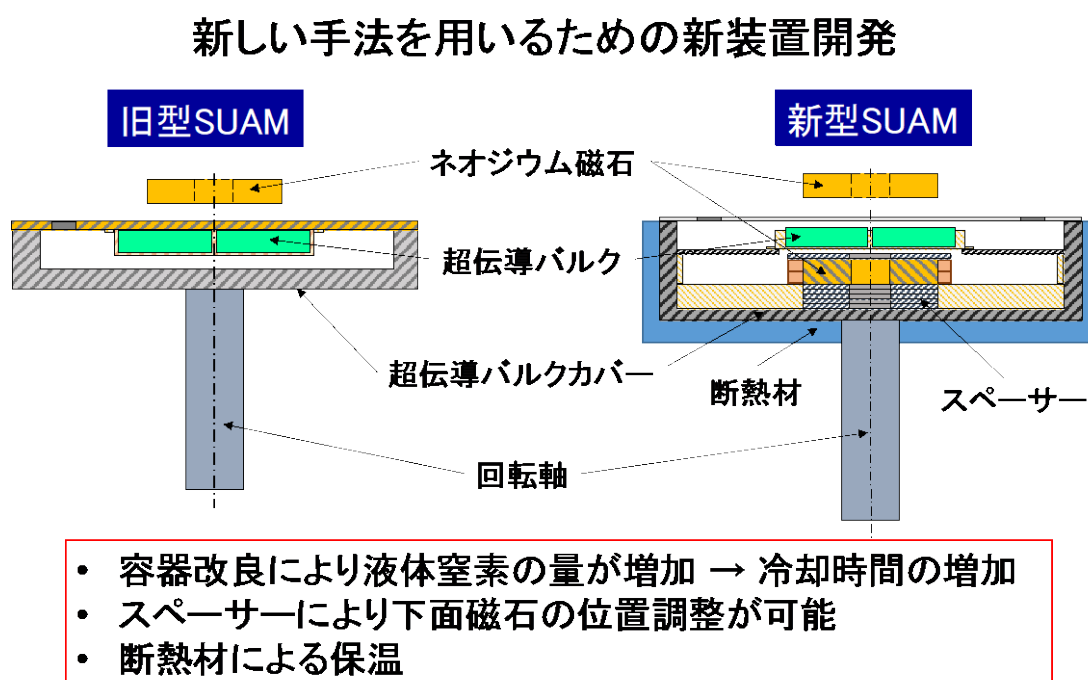


図3 従来法（SMS：Single Magnet System）と、
本研究で開発した DMS(Double Magnet System)の違い。

図4に最大磁束密度と最大引力の関係を示す。保持力の中で引力のみを選択した理由としては最も加工で使用する力であるからだ。最大磁束密度と最大引力の関係をみると、下面磁石が超伝導バルクや磁気浮上工具に近づくほど、磁束密度と引力の関係も大きくなっている。特にSMSとDMSの4mmと比べると磁束密度は100mT以上高くなることにより、引力は2倍以上向上していることが確認できる。つまり、磁束密度を制御することにより磁気浮上工具に生じる力の制御が可能となる。

これまで磁束密度と保持力の関係から新機構によるSUAM法の性能が向上したことを確認できた。

そこで本研究では、従来型の SUAM 法に対して、新機構による SUAM 法の加工性能を明らかにするために遊離砥粒を用いた研磨による比較検証をした。本実験では、加工対象を厚さ 1 mm のアルミニウム A1100P と厚さ 0.5 mm のステンレス SUS304 の 2 種類で評価している。研磨で使用した遊離砥粒は、ダイヤモンド砥粒の粒径が $1\text{ }\mu\text{m}$ であり、KOH 粉末によって pH12 に調整したダイヤモンドスラリーである。研磨速度は 140 rpm、研磨時間は 10 分間に設定した。図 5 に研磨の様子と磁気浮上工具について示す。ダイヤモンドスラリーは磁気浮上工具の真上から滴下し、加工物を保持するステージの廃液口から回収することで循環型の研磨をしている。このとき、ダイヤモンドスラリーの温度は $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ に設定されており、常に砥粒が固まらないよう攪拌された状態にある。磁気浮上工具の初期位置 Z0 は磁束密度と保持力の測定より 12mm に、下面磁石の初期位置 Z1 は最も引力が強かった 4 mm に設定した。そして、超伝導バルクを磁場中冷却したあと、超伝導バルクカバーを 4mm 下降させることにより、SMS では 5N、DMS では 12N の引力を発生させ、研磨を行った。このとき、それぞれの研磨圧力はパッドのサイズより、SMS が 55kPa、DMS が 132kPa である。研磨後は重量法により研磨量の算出と、研磨前後の表面粗さの測定より、加工性能の評価をした。重量測定ではマイクロ電子天秤（A&D 社製、BM-10）を、研磨前後の表面粗さについては共焦点レーザ顕微鏡（KEYENCE 社製、VR-9700）を使用している。

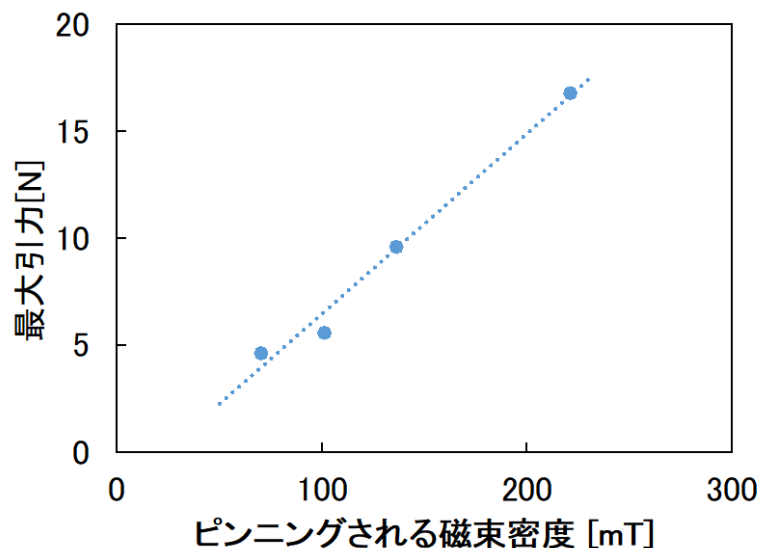


図4 磁束密度と最大引力の関係

1. 各機構による研磨圧力と回転速度の組合わせ

	SMS	DMS
研磨圧力 [kPa]	55	132
回転速度 [rpm]	70	70
	140	140

2. 共通条件

研磨時間	10 min
被研磨材	アルミニウム: A1100P サイズ: 70×70×1 mm 表面粗さ: Ra = 500~600 nm
	ステンレス: SUS304 サイズ: 75×75×0.5 mm 表面粗さ: Ra=150~170 nm
スラリー	砥粒: ダイヤモンド(多結晶) 粒径: $\phi 1 \mu\text{m}$, $\phi 15 \mu\text{m}$ pH: 12 製造: 日本エンギス製 供給量: 60mL/min
研磨パッド	IC1400 サイズ: 5.5×5.5 mm 個数: 3

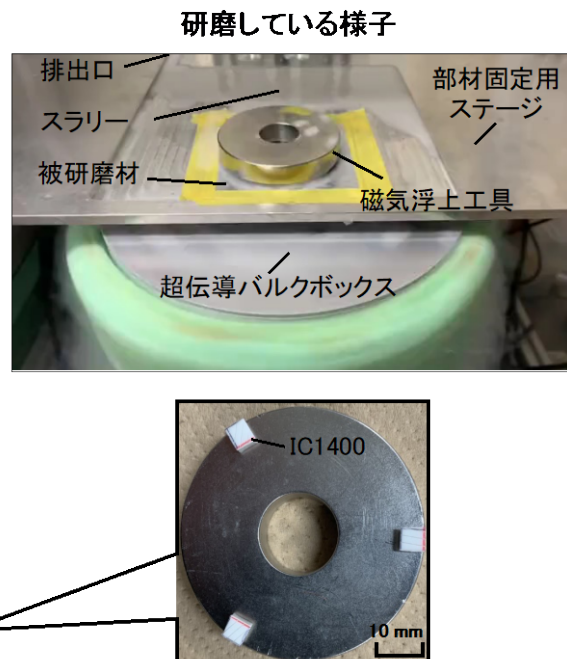


図5 研磨装置および工具の外観と研磨条件

図6に SUS304 と A1100P をそれぞれの機構で研磨した際の研磨量について示す。DMS と SMS による研磨量を比較してみると、新機構の SUAM 法である DMS の方が研磨量は多い。特に SUS304 においては、SMS の研磨量が 7.11 mg/m² に対し、DMS の研磨量は 22.06 mg/m² と 3 倍以上研磨量に差が生じた。これは引力が増加したことで圧力が大幅に高くなり、十分な切込深さを得ることで研磨量が多くなったと考えられる。一方 A1100P においては、SMS に比べると DMS の方が研磨量は多いが大きな差は生じなかった。ここでは A1100P の表面粗さ Ra が 800~1000 nm と粗かったこと、また、砥粒の粒径が小さいことにより十分な研磨性能を得ることが出来なかったと考えられる。また、

図7に従来型の SUAM 法である SMS と新機構の SUAM 法である DMS による研磨後の SUS304 の表面を示す。図を見てみると両方とも鏡面が出ていることが確認できる。しかしながら、SMS と DMS で比較すると、SMS で研磨した SUS304 は鏡面内部に薄らと傷が残っている。それに対し、DMS で研磨した SUS304 では傷はあまり残っていない。これらの研磨痕は、目視で判断できるほど鏡面の違いがあった。この研磨検証より、新機構である SUAM 法の加工性能することを明らかにした。

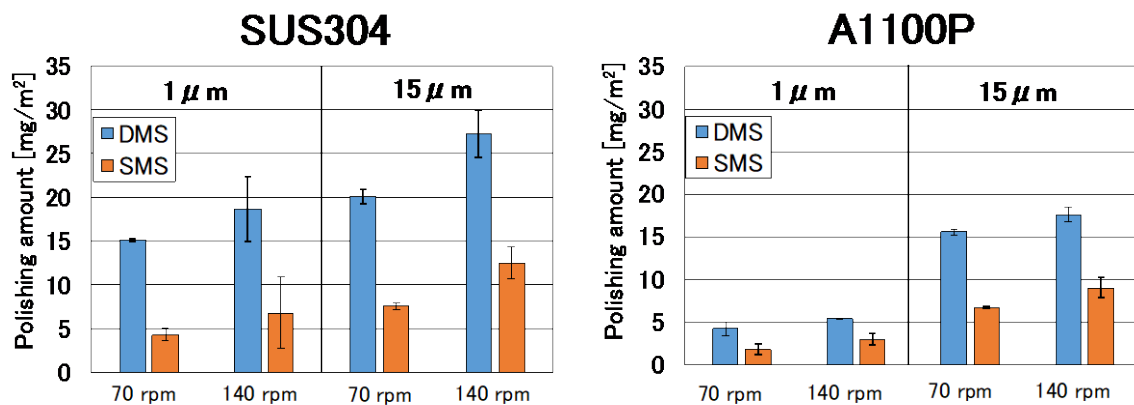


図6 SUS304 と A1100P の研磨量

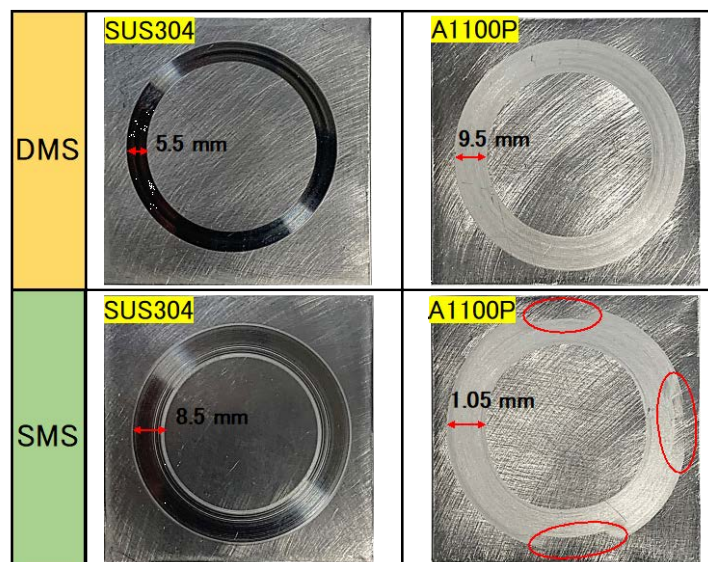


図7 SMS と DMS による研磨後の加工痕。DMS の方が工具の振れもなくクリアな加工痕が確認できる。

本助成による主な研究業績

1. H. Nakashima, K. Suzuki, K. Panart and E. S. Otabe., Int. J. of Automation Technology Vol.15. No4. ,pp234-242, 2021.
2. T. Nakasaki, Y. Kinoshita, K. Panart, E. S. Otabe and K. Suzuki., Int. J. of Automation Technology Vol.15. No4. pp503-511, 2021.

生産加工における 超電導技術の応用

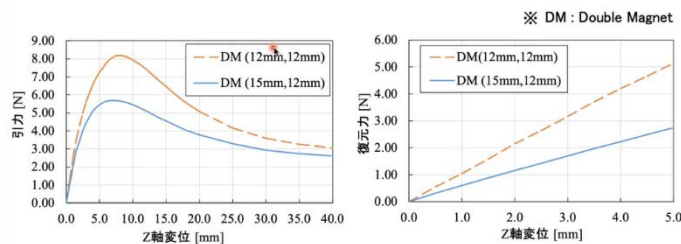
九州工業大学
大学院情報工学研究院
知能システム工学研究室



⑤ 引力と復元力

September 14,
2021

【上面磁石の配置を変えた場合】



⑥ 結論

September 14,
2021

1. 保持力を増加させる新たな機構を検討した。これにより、JMAGにおけるシミュレーション結果に基づいてDMSの優位性について確認し、新たな機構によるSUAM法を開発することが出来た。
2. DMSによるSUAM法の磁束密度の関係は、下部磁石の初期位置が超伝導バルクおよび上部磁石に近づくにつれて高くなる。本実験では、下部磁石の初期位置を4 mmとしたとき、すべての保持力が最大値を示すことを確認した。
3. SUAM法による加工において、最も使用する引力の最大値と最大磁束密度の関係からSMSとDMSを比べると、磁束密度は最大で100 mT以上高くなる。これにより、引力は2倍以上向上する。
4. DMSによるSUAM法では、保持力が増加しているため2種類の被研磨材を用いた研磨実験では、DMSの研磨量がSMSを上回る。SUS304、A1100Pの最大研磨量はSMSの2倍以上であることが確認された。
5. 2種類の被研磨材による研磨前後の算術平均粗さ R_a は、SUS304の場合、DMSはSMSよりも表面粗さを改善する。一方A1100Pの場合、表面粗さはすべてSMSよりも改善できない。これはA1100Pの表面にあるスクラッチに力が増加した分、食い込みやすくなったため余計に粗くした。

Kyushu Institute of Technology
Suzuki & Panart Lab

33

Kyutech
Kyushu Institute of Technology

直(復元力)

h) - 12[mm] : 5.15[N]
h) - 12[mm] : 2.75[N]

Kyutech
Kyushu Institute of Technology