

平成30年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「難燃性マグネシウム合金の機械加工による部品製造技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 九州経済産業局
補助事業者 公益財団法人 くまもと産業支援財団

目 次

第 1 章	研究開発の概要	
1 - 1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1 - 2	研究体制	4
1 - 3	成果概要	4
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口	4
第 2 章	本論	
	【研究開発の具体的内容と目標値】	5
	【開発成果】	8
	[1-1] マシニングセンタを用いた高能率加工技術の開発	8
	[1-2] 超精密加工機を用いた高精度加工技術の開発	10
	[1-3] 高精度ダイヤモンド工具の開発	12
	[1-3-1] マグネシウム合金の加工に適した PCD 工具の開発	12
	[1-3-2] ダイヤモンド工具の刃先状態の高度化	14
	[1-3-3] ダイヤモンド砥石による超精密研削技術の開発	20
	[2-1] CMP による超精密研磨技術の開発	27
	[2-2] 電解研磨による超精密研磨技術の開発	30
最終章	全体総括	32

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【背景】

マグネシウム合金は以下に示すような様々なメリットを持ち、埋蔵量も多く、リサイクル性に優れるなど、実用金属として昔から注目されてきた材料である。

- ・ 実用金属の中で最も軽量
- ・ 比強度と比剛性がアルミニウム合金よりも優れる
- ・ 『耐くぼみ性/減衰性(振動吸収性)/電磁波シールド性/寸法安定性/切削性』に優れる

しかしながら反応性が高いマグネシウム合金は、特に微細紛体(削りカス)の状態となると、発火しやすく水をかけると爆発するなど取扱いが難しいため、一般的に機械的な除去加工(切削、研削、研磨等、以後、“機械加工”と表現する)は行えないのが常識であった。そのため、現在実用化されているマグネシウム製品は、デジカメやノートパソコンの筐体など、ダイキャストや板金といった塑性加工で製造されたものである。つまりマグネシウム合金では部品製造の基幹技術となる機械加工にかかわる技術が確立されていない状況にあった。

【難燃性マグネシウム合金の開発経緯】

一方、燃えやすいという弱点を克服すべく“KUMADAI マグネシウム合金”に代表される難燃性のマグネシウム合金の開発が近年で急速に発展した。例えば航空機材料への適用という観点では、米国 FAA(連邦航空局)は発火しやすいという理由でマグネシウム合金の民間航空機への利用を禁止してきたが、KUMADAI マグネシウム合金が、FAA が策定した燃焼試験に合格したため、2014 年にこの禁止令を解除したという背景がある。熊本大学はこの流れを受け 2014 年 10 月に米ボーイング社と次世代航空機への実装部品を目指した共同開発を開始した。我が国においても、経済産業省主管の「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」の 1 テーマとして 2003～2007 年の間に、難燃性マグネシウム合金の開発が行われた。

【研究目的と目標】

本研究ではこれらの状況を鑑み、マグネシウム部品の請負製造事業を可能とするレベルでの機械加工技術を粗加工から最終仕上げまで総合的に開発することを目的とした。具体的には難燃性マグネシウム合金の素材から高精度光学部品の代表とも呼べる“非球面ミラー”を開発した。この理由として、光学部品の中でも、ガラス製の球面レンズ(ミラー)であれば 17 世紀のガリレオの時代からある古典的な技術で製造可能である。しかし、金属製の非球面形状となると最先端かつ高度な加工技術が必要であり、非球面光学部品が製造可能となれば、この材料における高精度加工技術が達成されたと判断できるためである。

これらを達成するために、マグネシウム合金の切削や研磨加工技術、そのために用いられる専用工具を 1-2 項で示す体制で開発した。

1-2 研究体制

研究体制を以下に示す。

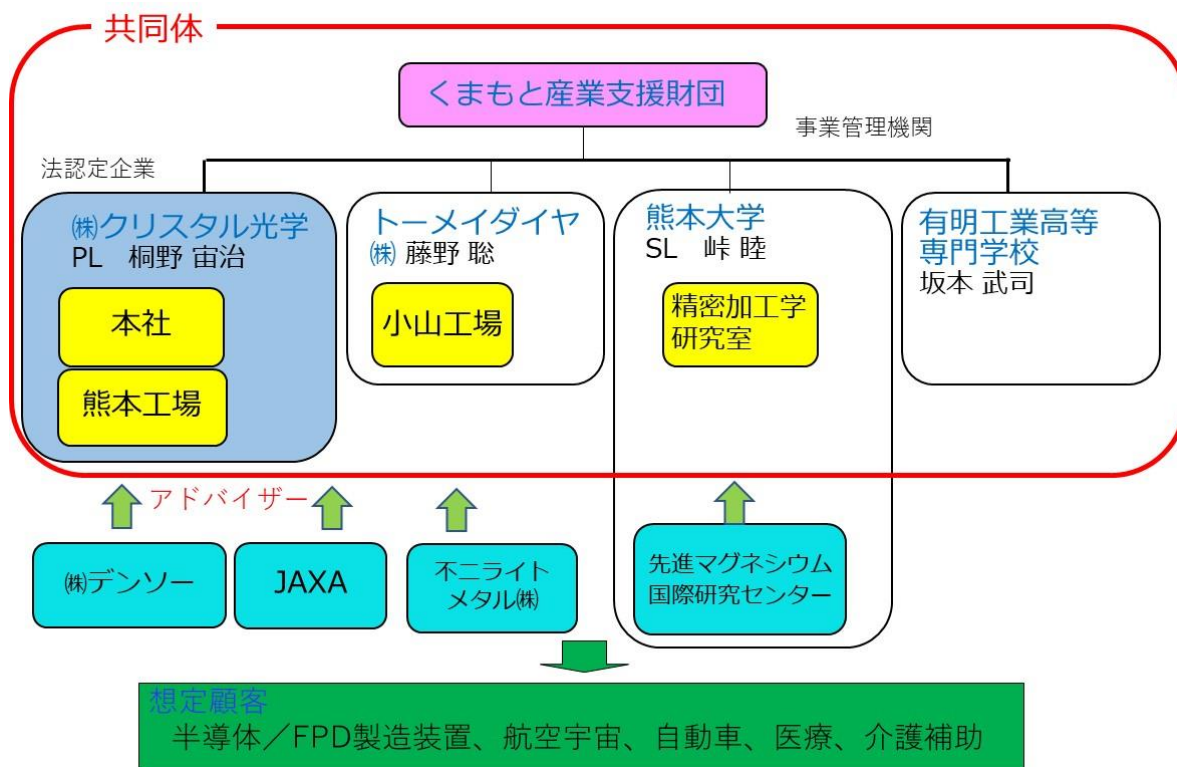


図1 研究体制図

1-3 成果概要

クリスタル光学にて、難燃性マグネシウム合金製の超高精度非球面ミラーを製造し、汎用材料であるアルミ合金同等の製造コストで、超高精度な光学部品を加工可能な技術を総合的に確立した。

工具開発に関しては、トーメイダイヤで多結晶ダイヤモンド(Poly Crystal Diamond、以後“PCD”と表現する)ソリッド多刃エンドミルを開発し、その刃先を熊本大学/有明高専で鋭利化することで、マグネシウム合金の加工で市販品工具と同等の切削品質をもつ工具の開発に成功した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社クリスタル光学 技術開発部 桐野 宙治

問い合わせ先 WEB : <https://www.crystal-opt.co.jp/contents/contact/>

第2章 本論

【研究開発の具体的内容と目標値】

難燃性マグネシウム合金で高精度な非球面ミラーを製造するにあたり、全体的な目標値を以下に示す。この数値の根拠は可視光領域アルミ製非球面ミラーの量産品と同等な精度を目標とした。

目標値：難燃性マグネシウム合金製でサイズΦ 50mm の非球面ミラーを製造し、**形状精度 3 μ mPV 以下、表面粗さ 5nmSa 以下**を達成する。

開発期間外(終了後 2 年以内が目途)の最終目標値

⇒**形状精度 1 μ mPV 以下、表面粗さ 2nmSa 以下**

金属などの素材から、高精度光学部品を機械加工で製造する一般的なプロセスを図 2 に示す。製造プロセスは、外形加工やミラー面の形状を加工する『[1]形状創成加工』と、ミラー面を鏡面化する『[2]表面平滑化』の二つに分けられる。

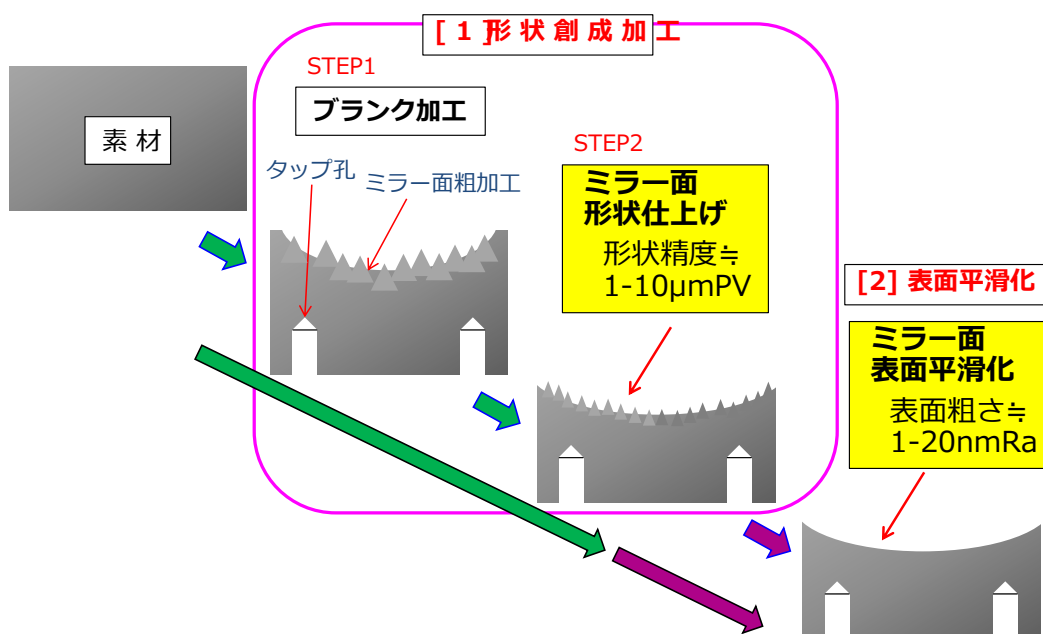


図2 機械加工による高精度金属製ミラーの製造プロセス

【1】形状創成加工技術の開発[クリスタル光学、トーメイダイヤ、熊本大学]

図2に示すように、素材から部品の外形形状や固定用のタップ孔、そしてミラー面の形状を加工するまでの範囲が形状創成加工であり、この形状創成加工の中でも、STEP1のブランク加工(いわゆる粗加工)と、STEP2のミラー面の高精度形状加工とに大別される。これら形状創成工程における機械加工とは、バイトやエンドミルといった刃物で加工する切削加工と、砥石(固定砥粒工具)で加工する研削加工である。我々は、これらの加工用工具として、熱伝導率の高いダイヤモンド工具に着目している。特にSTEP2の形状創成時では高精度なダイヤモンド工具が必要となるため、このダイヤモンド工具の開発も重要なテーマである。これらの詳細を以下に示す。

[1-1] マシニングセンタを用いた高能率加工技術の開発[クリスタル光学]

汎用の機械加工装置であるマシニングセンタを用いて、難燃性マグネシウム合金のブランク加工での高能率化と低コスト化を目指す。マグネシウム合金はアルミと比較して切削性に優れる(切削抵抗が低い)ことが知られているが、熱伝導率は反対にアルミの方が高い。工作物の熱伝導率が低いと加工域に熱がこもりやすく、この熱ダメージにより工具刃先の摩耗や工作物の熱溶着が起こり、切削品質の低下や工具の短寿命化、すなわちコストアップにつながる。よって、加工域で発生する熱を如何に逃がすかが重要かつ原理的な開発テーマとなる。

目標は難燃性マグネシウム合金のマシニングセンタ加工にて、アルミと同等の製造コストが可能であることを示す。

[1-2] 超精密加工機を用いた高精度加工技術の開発[クリスタル光学]

難燃性マグネシウム合金の超精密加工機を用いたダイヤモンド切削(超精密切削加工)にて、高精度な形状創成と表面平滑化を行う。

目標値はΦ 50mm サイズの非球面ミラーを加工して、形状精度 3μmPV 以下、表面粗さ 10nmSa 以下を達成する。

[1-3] 高精度ダイヤモンド工具の開発[トーメイダイヤ、熊本大学、有明高専]

本項目ではマグネシウム合金の加工に適したダイヤモンド工具の開発を行う。新しいダイヤモンド工具をトーメイダイヤで試作し、その刃先を熊本大学と有明高専で鋭利化することでマグネシウム合金の加工に適した工具を開発する。

[1-3-1] マグネシウム合金の加工に適した PCD 工具の開発[トーメイダイヤ]

はじめに、ダイヤモンド粒の粒径やボンド材の種類や配合比などを変化させて、難燃性マグネシウム合金の加工に適した PCD 工具の素材を開発する。次に、刃先全体が PCD 層となる高耐久性の PCD エンドミルを製造する。

[1-3-2] ダイヤモンド工具の刃先状態の高度化[熊本大学]

超精密加工ではダイヤモンド工具の刃先エッジの状態により加工面の性状が大きく異なることが知られている。トーメイダイヤから支給される PCD 工具の刃先エッジを熊本大学所有するオリジナル研磨技術である紫外線照射研磨技術にて鋭利化し、マグネシウム合金の加工に最適なダイヤモンド工具を開発する。

[1-3-3] ダイヤモンド砥石による超精密研削技術の開発[有明高専]

電着軸付ダイヤモンド砥石を用いた加工において、残留加工ひずみを低減できる超精密研削技術の開発を目指す。そのため、ボンド材の軟質化(具体的にはレジンボンド)、作用砥粒数の高密度化(高集中度化)、マイクロバブルの研削液への添加による砥石目づまりのない安定した長寿命な研削技術を開発する。研削加工後の残留加工ひずみの数値化と、2nmRa 以下の仕上げ面粗さを目標とした。

[2] 表面平滑化技術の開発[クリスタル光学]

遊離砥粒とポリッシュパッドなどの工具を用いたいわゆる研磨加工にて難燃性マグネシウム合金の表面平滑化技術を開発する。サブテーマとして半導体ウエハ製造技術で用いられている化学的機械研磨(Cheical Mechanical Polishing/Planarization、以後“ CMP” と表現する)と、電気化学反応を援用する電解研磨を設定し、それぞれで並行して表面平滑化を目指す。

[2-1] CMP による超精密研磨技術の開発[クリスタル光学]

CMP は一般的な砥粒を用いた機械研磨に、化学薬品を用いた化学反応を援用することで超平滑面を得る手法である。マグネシウムは化学的に不安定で反応性が高いため、最適なスラリー(研磨液)を開発し、難燃性マグネシウム合金の表面平滑化を目指す。

目標値は難燃性マグネシウム合金のΦ 50mmの平面サンプルを研磨し、5nmSa 以下の鏡面化が行える条件を確立する。

[2-2] 電解研磨による超精密研磨技術の開発[クリスタル光学]

電解研磨は被研磨物に外部から電圧を印加することで、工作物表面を溶液中に溶解させ平滑表面を得る手法である。目標値は難燃性マグネシウム合金を電解研磨し、20nmSa 以下を達成することである。

【開発成果】

[1-1] マシニングセンタを用いた高能率加工技術の開発[クリスタル光学]

φ50mmの難燃性マグネシウム合金と汎用性アルミ合金(A5052)の工作物を用意し、図3に示すように幅1mm 深さ0.5mmのスクエア溝を1.5mmピッチで軸送り速度200mm/min(通常の切削条件よりも厳しい条件)で加工し、切削抵抗や加工面、および工具の摩耗度合いを比較した。

図3に結果を示すが、アルミ合金と同等の加工が可能であり、切削抵抗や刃先摩耗はアルミよりも明らかに低くなることを実証した。また、この実験で発生した切りくずに対してガスバーナーで燃焼試験を行った(図4参照)。その結果、燃焼することは確認されたが、激しい炎色反応などを伴わず、危険性が低いことが確認された。

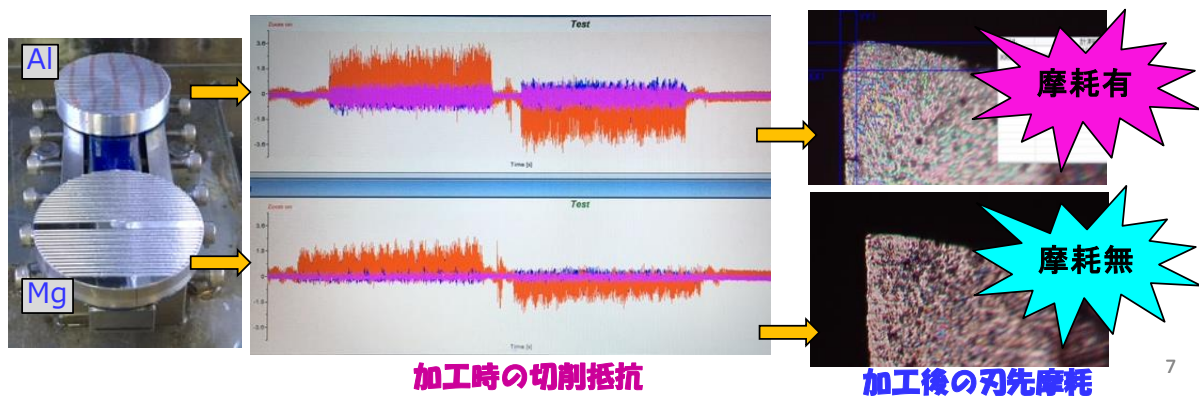


図3 難燃性マグネシウム合金とアルミ合金への溝入れ実験の結果



図4 切りくずの燃焼実験の様子

超音波を援用可能な5軸制御型のマシニングセンタを導入し、超音波援用による切削実験を行った。図5に結果を示す。この図に示すように超音波無しの加工では3穴加工時に工具が破損し、切削面にはバリが発生したのに対して、超音波を援用することで30穴以上の加工が可能となり、バリ発生も抑制できることがわかった。すなわち難燃性マグネシウム合金では超音波援用加工が効果的であることが示された。

図6はJAXAと共同で開発した難燃性マグネシウム合金製の超軽量ミラーを示す。裏面をハニカム構造としたことで、φ180x25mmサイズの凹面ミラーで重量はわずか400gである。汎用性アルミ合金で同じものを作ると600gとなり、マグネシウム合金の有用性を確認できた。また、この図に示すように複雑なハニカム形状でもアルミ同等に加工することが可能であることを実証した。

以上の成果より、難燃性マグネシウム合金の加工ではアルミ同等のコストと品質で加工が行えることが実証でき、また超音波援用加工が効果的であることもわかった。

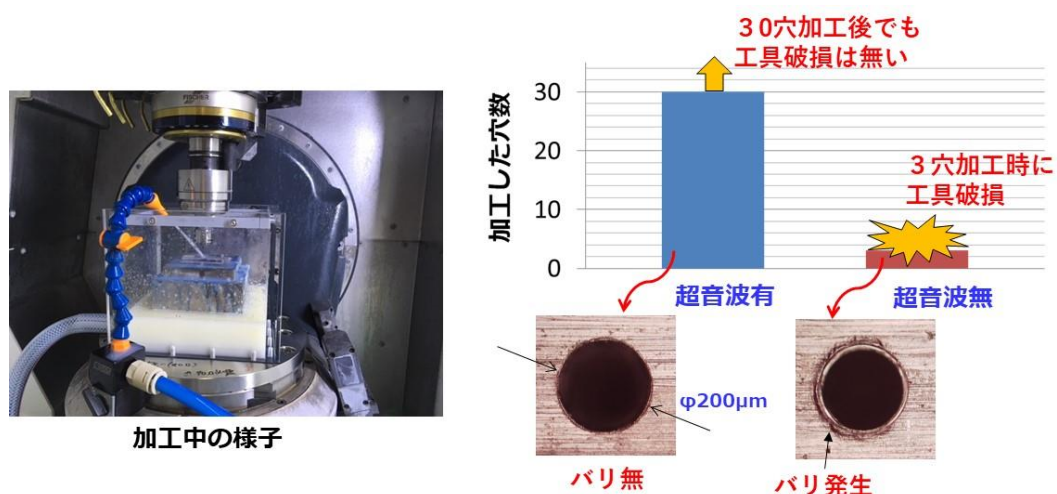


図5 超音波援用マシニング加工の様子と結果



図6 難燃性マグネシウム合金で製造した大型球面ミラー

[1-2] 超精密加工機を用いた高精度加工技術の開発[クリスタル光学]

はじめに単結晶ダイヤモンド工具と超精密加工機を用いてφ 50mm の非球面ミラーを試作した。初期検討にて難燃性マグネシウム合金でも、アルミ合金と同等にダイヤモンド切削での鏡面加工が行えることが判明し、また、加工条件などを鋭意検討した結果、図 7 に示すように非球面形状にて、形状精度 0.6μmPV、表面粗さ 7.4nmSa の値を達成し、当初掲げた目標値を達成した。

次に表面粗さの最小化を目指してを様々な難燃性マグネシウム合金に対して超精密切削を行った。図 8 に結果を示す。4 種類の材料で上段が低倍率 (□ 860μ m)、下段が高倍率 (□ 86μ m)での切削面の状態を示す。この図に示すように、最もよい材料では切削のみで 2nmSa 以下の超平滑面が得られることがわかった。

これらの研究開発にて難燃性マグネシウム合金の超精密切削加工では、アルミ合金と比較して、表面の柔らかさに起因してスクラッチ(局所的なひっかき傷)が入りやすい欠点があることがわかった。そこでこの対策として、図 9 に示すように超精密切削加工にも超音波を援用することで局所的な断続切削が行え、スクラッチを抑制できることを実証した。

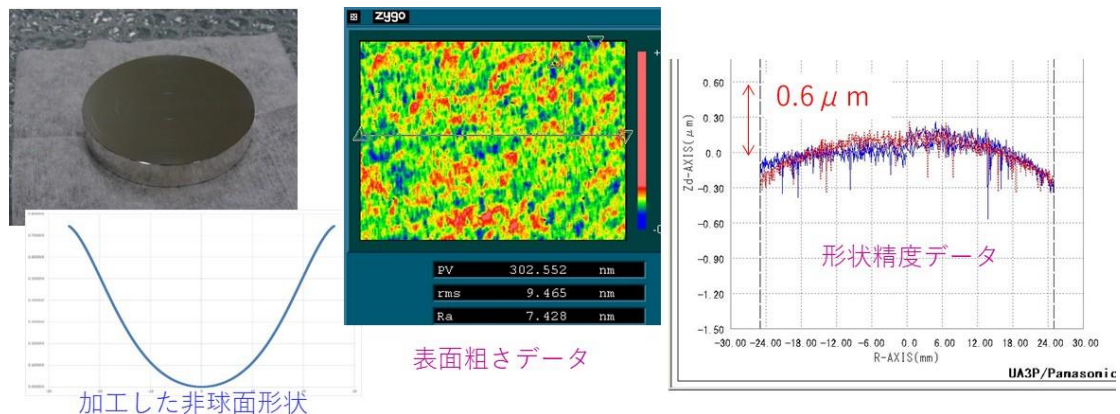


図 7 超精密加工機で試作した非球面ミラー

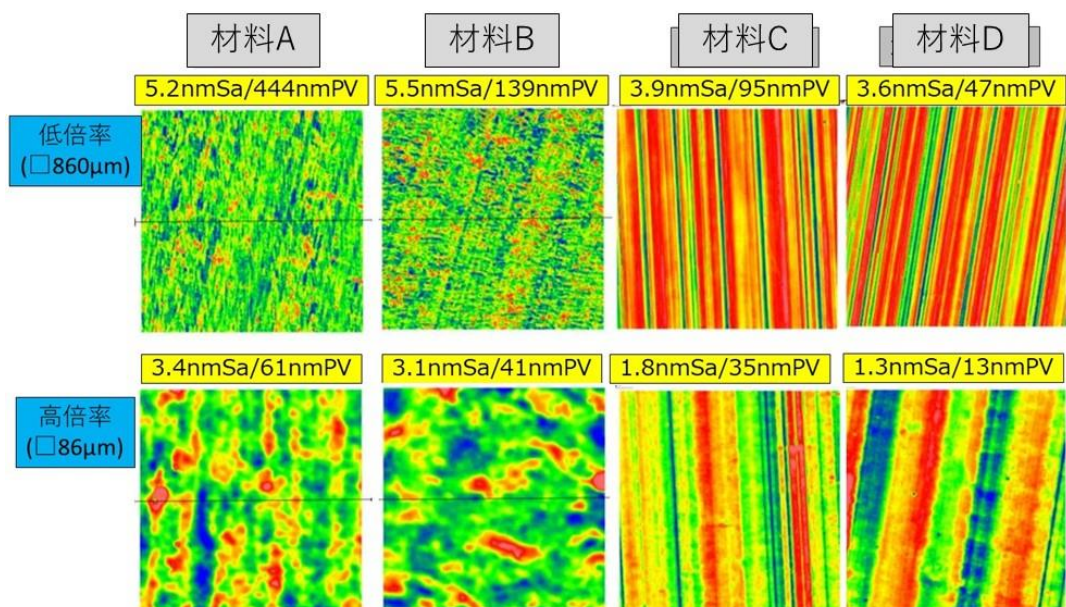


図 8 種々の難燃性マグネシウム合金の切削後表面粗さ比較

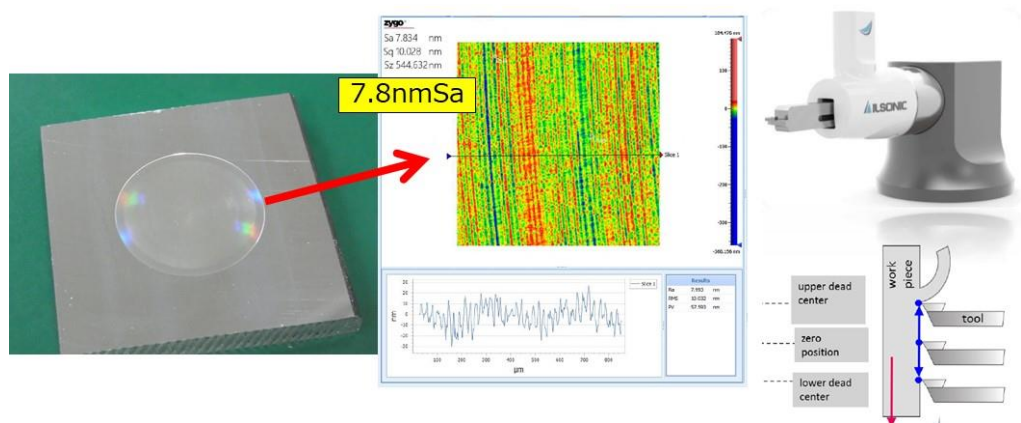


図 9 超音波を援用した超精密切削加工の結果

[1-3] 高精度ダイヤモンド工具の開発[トーメイダイヤ、熊本大学、有明高専]

[1-3-1] マグネシウム合金の加工に適した PCD 工具の開発[トーメイダイヤ]

はじめに、マグネシウム合金の加工に適した PCD 素材材種の選定を微粒($\phi 0.6\mu\text{m}$)、中粒($\phi 10\mu\text{m}$)、粗粒($\phi 40\mu\text{m}$)の 3 材種でインサートチップを製作して切削試験を実施して最適材種を選定した(図 10、図 11 参照)。材種選定にあたり、チップ刃先には熊本大学で刃先鋭利化が施されたものを使用した。その結果、微粒の材種が得られた結果から最適と判断した。

選定した微粒 PCD 材種の更なる性能向上を目的とした焼結合成前の素材混合粉を微粉砕する改良を試みた。改良には導入した自動めう乳鉢装置による粉砕作業を追加する事で、回転工具素材として使用する事を想定した焼結後の組織の均一化や摩耗特性を改良する事で、最終的に PCD エンドミル工具としての切削性能の向上を期待した。その結果、焼結合成後の観察にて組織的な均一性が得られ摩耗試験機での摩耗量の減少が実現出来た(図 12、図 13 参照)。

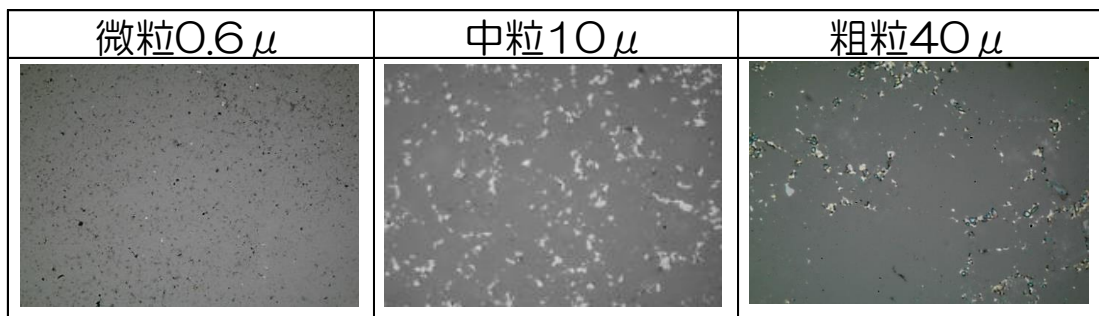


図 10 評価用 PCD 材種の組織写真



図 11 試作した加工評価用 1 枚刃 PCD エンドミル

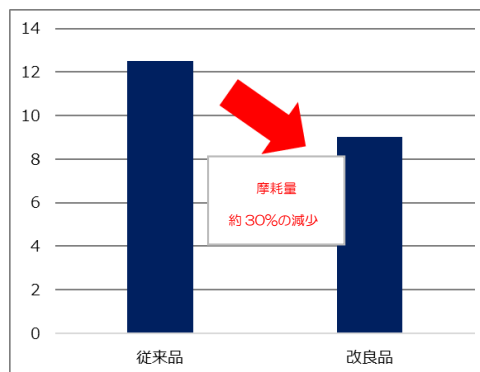
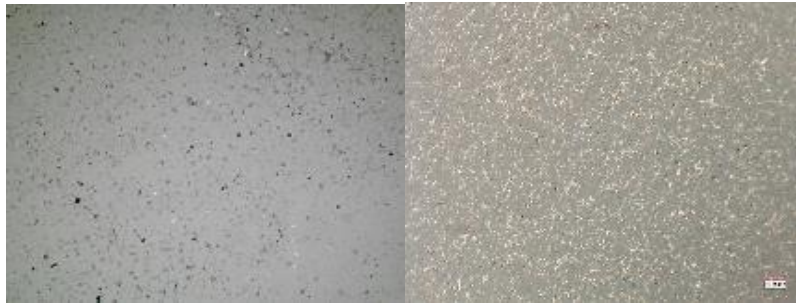


図 12 $0.6\mu\text{m}$ 微粒 PCD 材種の摩耗試験の結果

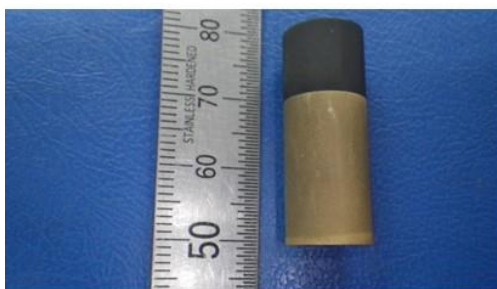


改良前（従来品）

改良された組織

図 13 0.6μ m 微粒 PCD 材種の組織写真

一般的に安価な回転工具として、超硬工具やコーティング工具が普及している中、より高精度な加工では高価な単結晶ダイヤモンド工具を用いて切削加工が行われている。この単結晶ダイヤモンド工具に代わる、より安価な工具として PCD ソリッド工具を開発した。通常の PCD 工具は PCD 部が 2mm 程度と薄いため、摩耗により工具寿命が短くなることが欠点である。我々が開発したソリッド工具では図 14 に示すように PCD 部が 8mm 以上と厚いため、繰り返し刃先再研磨を行うことにより長寿命工具の実現が可能となり、全体的なコストダウンを提案できる。我々は本プロジェクトの研究開発にて、図 14 に示すようにスパイラル形状を持つ多刃のソリッド PCD エンドミル工具の開発に成功した。



PCD ロウ付け+円筒研削



エンドミル形状へ加工

図 14 試作したスパイラル形状を持つ多刃ソリッド PCD エンドミル

[1-3-2]ダイヤモンド工具の刃先状態の高度化[熊本大学]

本項では、PCD 製旋削加工用チップおよびエンドミル工具の高度化を目的とし、難燃性マグネシウム合金を用いて切削性能の改善度合を数値化した。まず、旋削加工用チップの高度化について述べる。

市販の PCD 製切削工具のすくい面はラッピング加工により鏡面化されているが、逃げ面は研削加工であり、比較的深い研削条痕が多く残留している。これらの研削条痕と切れ刃稜線の交点付近に PCD 中の粒子の脱落やチッピングが多く発生しているため、PCD 工具が有するシャープな切削性能が発揮されていない。そこで、逃げ面を超精密研磨し、同時に切れ刃を鋭利化した。また、刃物角を大きくして刃先強度を高められる切れ刃への微細形状(以下、“チャンファ”と表現する)の形成を行った。研磨にはダイヤモンド基板の超精密研磨に有効であると報告されている紫外線照射研磨(以下、“UV 研磨”と表現する)を適用し、切れ刃の鋭利化およびチャンファ形成から成る高度化を行った。用いた PCD チップはトーメイダイヤ製の微粒($\phi 0.6\mu\text{m}$)、中粒($\phi 10\mu\text{m}$)、および粗粒($40\mu\text{m}$)の 3 種類である。本研究の目的は KUMADAI マグネシウム合金の高精度な光学部品製造に適用可能な超精密切削加工用工具の開発も目的の 1 つである。粒径 $0.6\mu\text{m}$ から構成される微粒の PCD 工具は耐摩耗性に優れ、刃先の欠けも少ないことから、KUMADAI マグネシウム合金の超精密切削加工にもっとも適している切削工具と考えられる。そこで、微粒の PCD 製切削工具の高度化を行って KUMADAI マグネシウム合金を切削加工し、切削性能の改善度合を数値化した。

図 15 に切削チップの逃げ面研磨装置を示す。また、図 16 に逃げ面研磨方法の詳細を示す。PCD 切削チップはホルダーに固定され、ノーズ R の中心を回転中心とした精密な回転により UV 研磨される。図 17 および図 18 に PCD 切削チップのすくい面および逃げ面の UV 研磨前後の光学顕微鏡写真を示す。逃げ面は良好に研磨され、すくい面側から観察した刃先にもダイヤモンド粒子の欠けや脱落のない鋭利な稜線が形成されている。

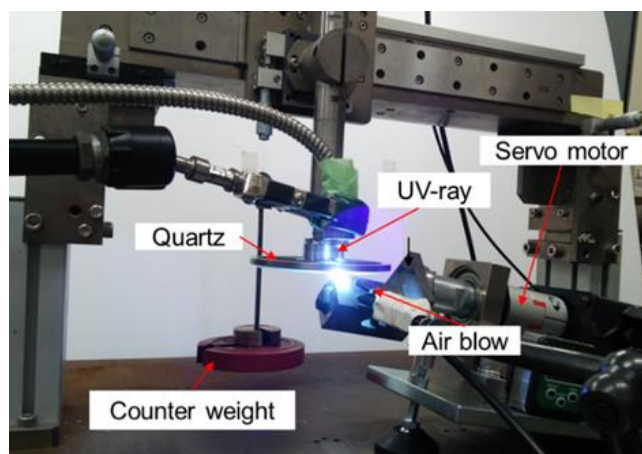
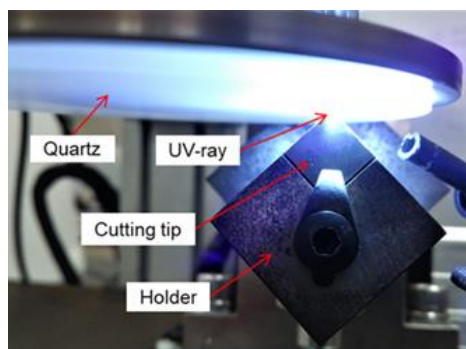
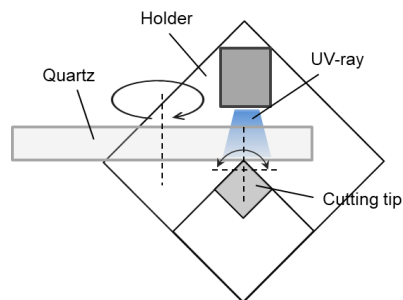


図 15 PCD 切削工具逃げ面研磨装置

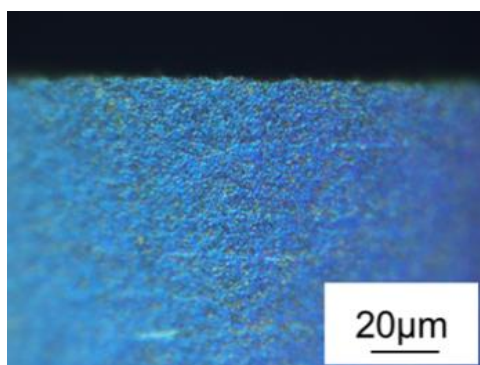


(a) 研磨部

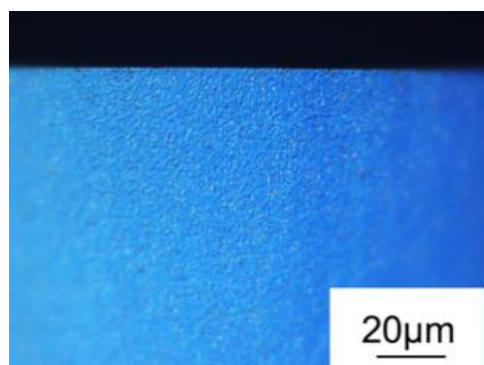


(b) 概念図

図 16 逃げ面研磨部の詳細図

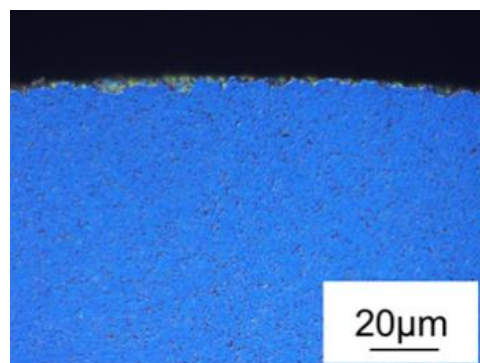


(a) 研磨前

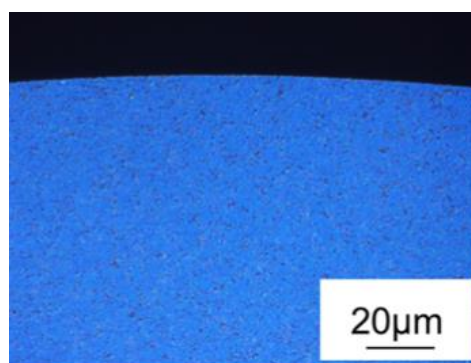


(b) 2 往復研磨後

図 17 PCD 工具逃げ面の UV 研磨前後の OM 写真



(a) 研磨前



(b) 2 往復研磨後

図 18 PCD 工具すくい面の UV 研磨前後の OM 写真

鋭利化した PCD 製切削チップは切れ刃先端に集中する負荷のため焼結したダイヤモンド粒子が脱落し、寿命が短くなることが危惧される。そのため、刃物角増加による刃先強度の増強を目的とし、UV 研磨により PCD 製切削工具の刃先稜線にチャンファ形成を行った。図 19 に UV 研磨によるチャンファ形成後の PCD 製切削チップの模式図およびすくい面側から見た工具刃先のレーザー顕微鏡による観察像を示す。右図より、刃先稜線にはダイヤモンド粒子の脱落痕はほとんど認められない。ここでは、チャンファ角 20° および 30° の成形を行い、それぞれの幅は $28\mu\text{m}$ および $40\mu\text{m}$ とした。

図 20 に切削試験後の被削材表面を走査型白色干渉計(Zygo NewView7300)の低倍($358\mu\text{m} \times 268\mu\text{m}$)で計測した仕上げ面粗さ S_a の結果を示す。図より、C30 工具の表面粗さ S_a は切削条件から求めた理論粗さ $0.879\mu\text{m} R_z$ にもっとも近い値となっている。以上より、鋭利化完了後のチャンファ形成はさらなる工具の高性能化を実現でき、超精密切削による高精度な KUMADAI マグネシウム合金製の光学部品の製造において C30 工具が有効であると予想できる。

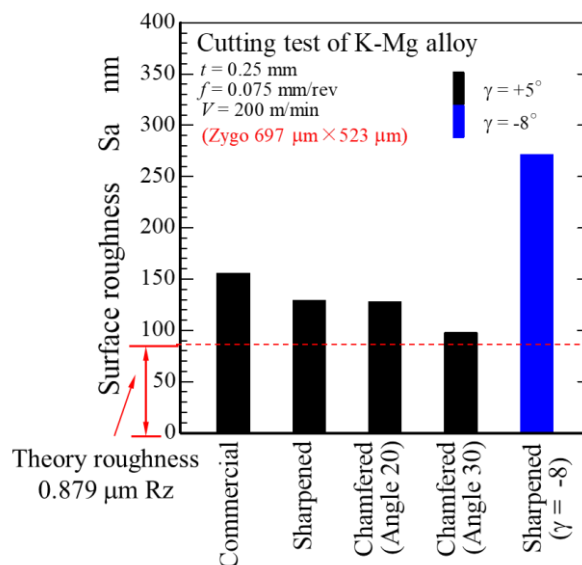
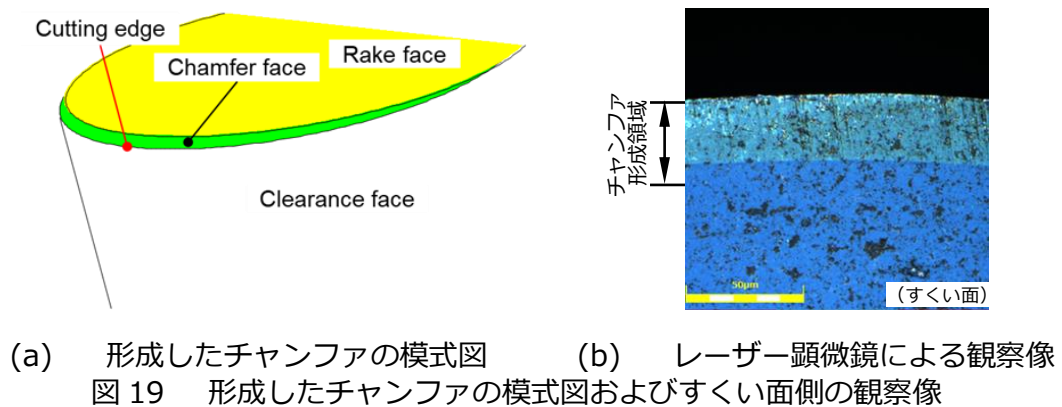
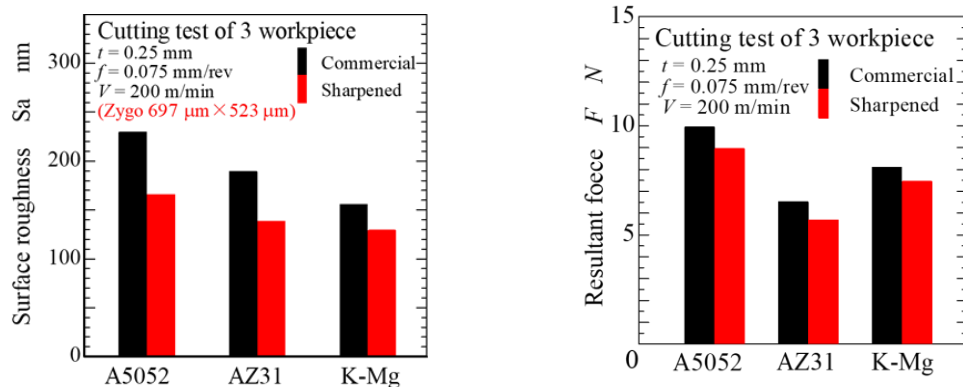


図 20 切削試験後の被削材加工面の仕上げ面粗さ S_a

KUMADAI マグネシウム合金の被削性を市販のアルミニウム合金 A5052 および市販のマグネシウム合金 AZ31 と比較した。被削性は仕上げ面粗さおよび切削抵抗より判断した。図 21 に切削試験後の 3 種類の被削材の仕上げ面粗さ S_a および切削抵抗 3 分力により求めた切削抵抗の合力の結果を示す。KUMADAI マグネシウム合金の S_a は市販工具および鋭利化工具共に他の合金より良好な値を示し、合力は A5052 より小さく、AZ31 より大きいことがわかる。その度合いは数値的には A5052 の 0.8 倍、AZ31 の 1.4 倍と計算された(A5052>K-Mg>AZ31)。

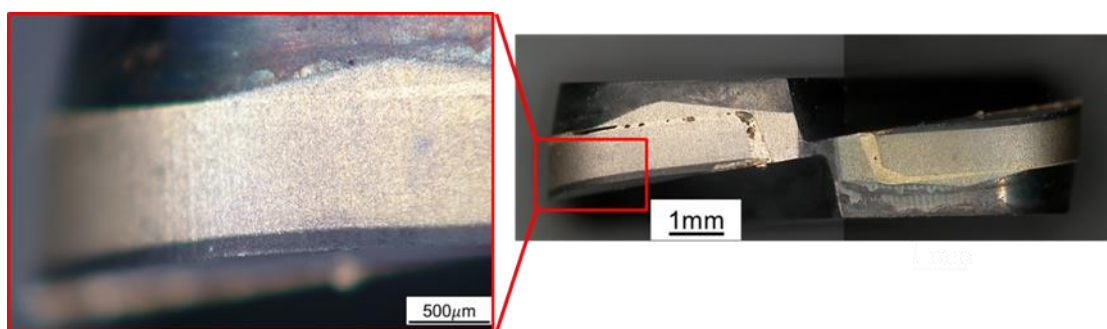


(a) Zygo による仕上げ面粗さ S_a (b) 切削抵抗 3 分力の合力
図 21 切削試験後の仕上げ面粗さ S_a および切削抵抗合力

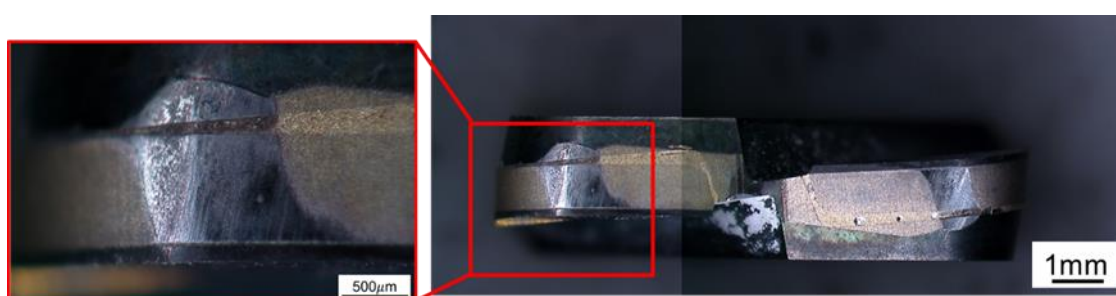
次に、PCD 製エンドミル工具の高度化結果について述べる。ラジアスタイプおよびボールタイプの 2 種類の PCD 製小径エンドミル工具の刃先を UV 研磨して高度化し、加工面粗さや切削抵抗に及ぼす逃げ面の精密な UV 研磨による高度化の効果を調べた。用いた工具は OSG 製およびトーメイダイヤ製の PFR-CVD、PFR-PCD、PFR-New PCD の 3 種類である。標準型の PFR に CVD ダイヤモンド膜を成膜したものの(PFR-CVD)、一部を PCD 基板を貼り付けたものの(PFR-PCD)および工具全体をソリッド PCD 化したものの(PFR-New PCD)であり、それぞれを UV 研磨した。一例として、図 22 にデジタルマイクロスコプで撮影した UV 研磨前後の PFR-PCD の逃げ面を示す。UV 研磨により、PCD 工具の逃げ面は研磨前の 393nm S_a から 83 nm S_a と大幅に改善されている。また、図 23 に PFR-PCD の UV 研磨前後の切れ刃および稜線の走査型電子顕微鏡(SEM)による観察像を示す。これより、逃げ面の PCD が精密に研磨され、逃げ面の鏡面化とエンドミル刃先稜線の鋭利化が完了していることがわかる。また、図 24 はデジタルマイクロスコプで撮影した UV 研磨前後の PFR-NewPCD である。逃げ面が同様に精密に研磨され、鏡面化されている。

図 25 に用いたすべてのラジアス型エンドミル工具を用いて KUMADAI マグネシウム合金をエンドミル加工し、加工面をレーザー顕微鏡により計測した仕上げ面粗さ S_a の結果を示す。PFR-CVD および PFR-PCD は UV 研磨することで加工前よりも大きく仕上げ面粗さが改善されている。PCD 製エンドミル工具の逃げ面を UV 研磨することで、超硬製の PFR-ST、PFR-SH (チャンファ付きの PFR 工具) より良好な面粗さを有する工具が得られている。さらに、送り速度を小さくすることで、ソリッド PCD 化された工具では 29nm S_a まで改善することができた(図中、赤色と青色で示すデータ)。

なお、ボールエンドミル工具についても同様の UV 研磨を行ったが、大きな改善は認められなかった。



(a) UV 研磨前の PFR-PCD 逃げ面



(b) UV 研磨後の PFR-PCD 逃げ面

図 22 デジタルマイクロスコープで観察した PFR-PCD の逃げ面

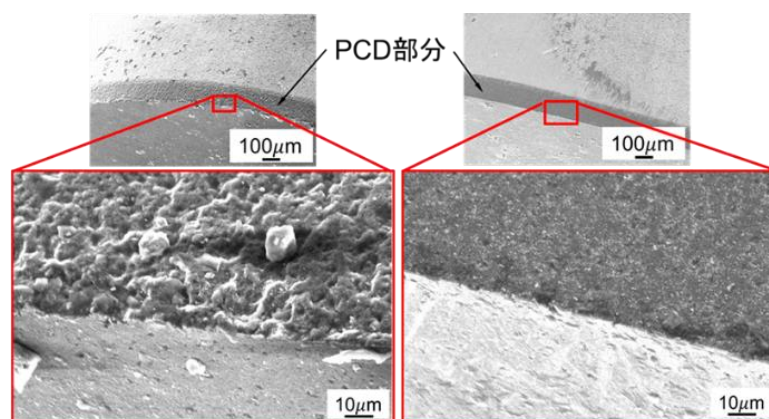
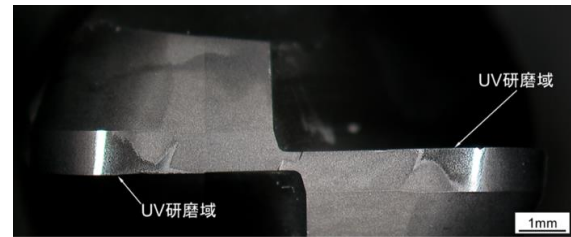


図 23 SEM による PFR-UV-PCD 逃げ面および稜線の同一倍率観察像
(左 : UV 研磨前、右 : UV 研磨後)



(a) UV 研磨前の PFR-NewPCD の逃げ面



(b) UV 研磨後の PFR-NewPCD の逃げ面

図 24 デジタルマイクロスコープで観察した UV 研磨前後の PFR-NewPCD の逃げ面

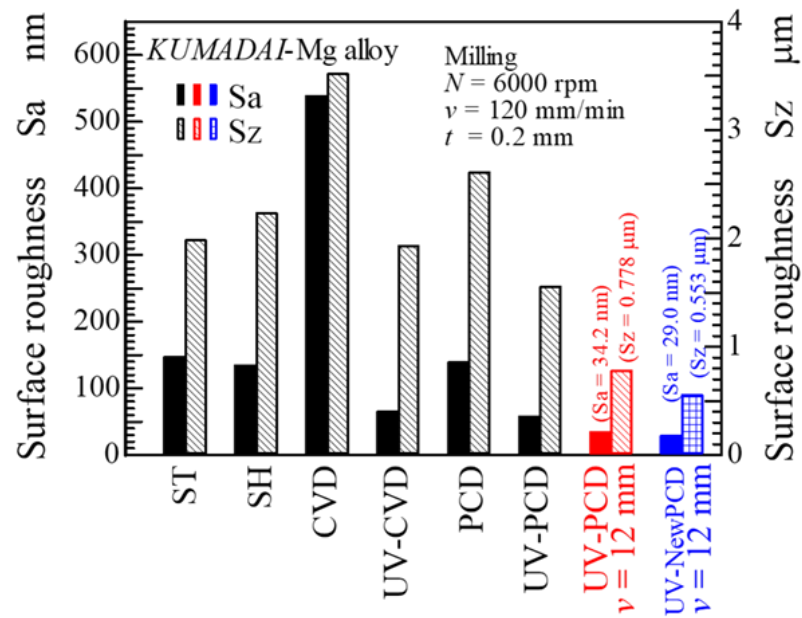


図 25 UV 研磨した各工具を用いて KUMADAI マグネシウム合金を旋削加工し、レーザー顕微鏡により切削面を計測して得られた仕上げ面粗さ Sa

[1-3-3]ダイヤモンド砥石による超精密研削技術の開発[有明高専]

電着軸付ダイヤモンド砥石端面部に対する紫外光援用ツルレーイング（以後、“UV ツルレーイング”と表現する）技術は確立済みであり、難燃性マグネシウム合金に対する超精密研削技術を開発することを本研究では目指した。ミラーとして使用することを想定し、加工によって生じる表面の残留ひずみの定量化と2nmSa以下の仕上げ面粗さを目標とした。

図 26-29 に電着軸付ダイヤモンド砥石と、本研究で用いた UV ツルレーイング、機上ツルレーイングを示す。また、ツルレーイング前後のダイヤモンド砥粒の微分干渉像を示す。



図 26 電着軸付ダイヤモンド砥石とツルレーイングを施す端面部

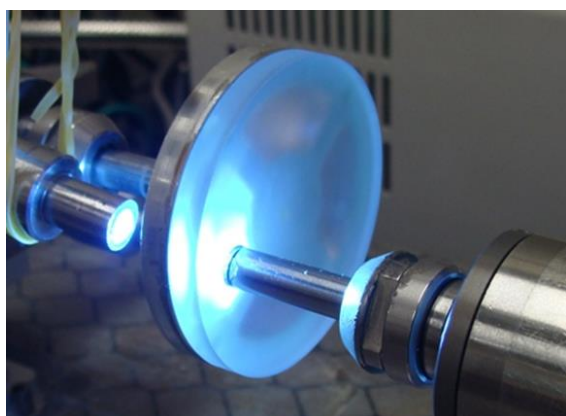
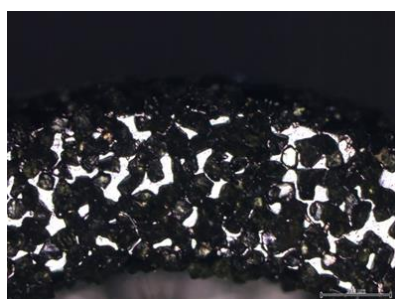


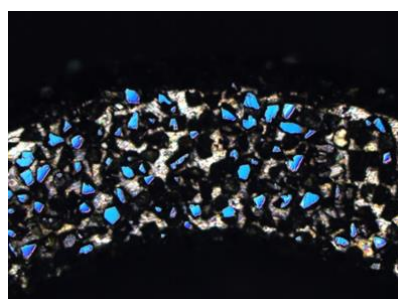
図 27 UV ツルレーイングの様子



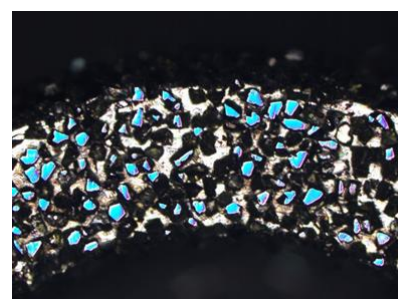
図 28 定圧装置を用いた機上ツルレーイング



加工前



前加工後



UV ツルレーイング後

図 29 ツルレーイング前後の砥粒（微分干渉像）

(1)一般的な切削加工と研削加工

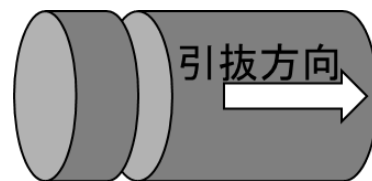
本研究で使用した被削材は、KUMADAI マグネシウム合金のφ 52 mmの丸棒を図 30 のように切り出して製作した。市販されているマグネシウム合金 AZ61 と比較し、一般的な切削加工、研削加工においてどのような加工特性を示すのかを調べることから研究を開始した。

図 31 に加工実験に使用した工具を示す。加工機は小型マシニングセンタ(ファナック ロボドリル)を使用した。フライス工具はチップを交換することで、超硬と PCD の 2 種類の工具との相性を調べた。

図 32 に結果として面粗さの比較図を示す。超硬工具に比べて PCD 工具に対する相性も良いことがわかった。電着軸付砥石による研削では、UV ツルレーイングを施しても PCD 工具の切削面よりも良好な研削面を獲得することができなかった。



被削材の外観



被削材の切出し方向の模式図

図 30 被削材の外観と切出し方向の模式図



フライス工具



整列砥粒工具



電着軸付ダイヤモンド砥石

図 31 加工実験に用いた工具

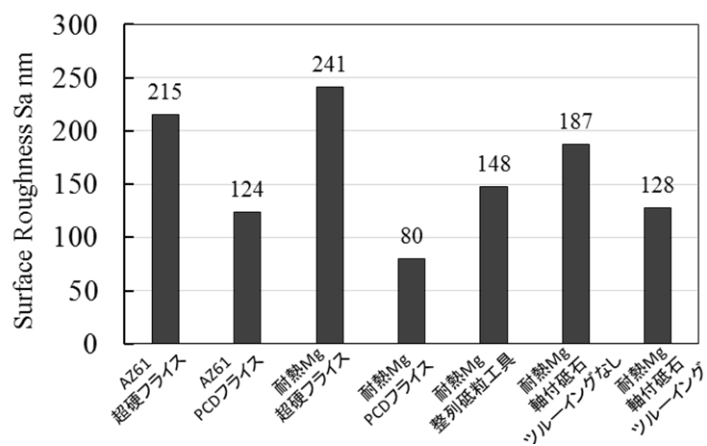


図 32 加工実験の結果 (加工面の面粗さ)

(2) レジンボンド砥石とマイクロバブルクーラントの使用

図 33 に研削面の面粗さ改善のために仕様したレジンボンド砥石と加工条件、研削屑の排出性を改善するために仕様したマイクロバブル発生装置を示す。

図 34 に電着砥石、レジンボンド砥石の研削実験の結果を示す。レジンボンド砥石は切込みが小さいとボンド剤の変形に吸収されて研削ができないことがわかった。またレジンボンド砥石と #325 の電着砥石は、UV ツルレーイング後にチップポケットが不足し加工不能となった。

良好な研削面の獲得を目的として、レジンボンド砥石とマイクロバブルクーラントを使用したか、研削屑は図 35 に示すように流れ型となるため、砥粒に絡み付き図のような擦過傷を生じる。場合によっては研削不能となることが明らかになった。



レジンボンド砥石



マイクロバブル発生装置

図 33 実験に用いた砥石とマイクロバブル発生装置

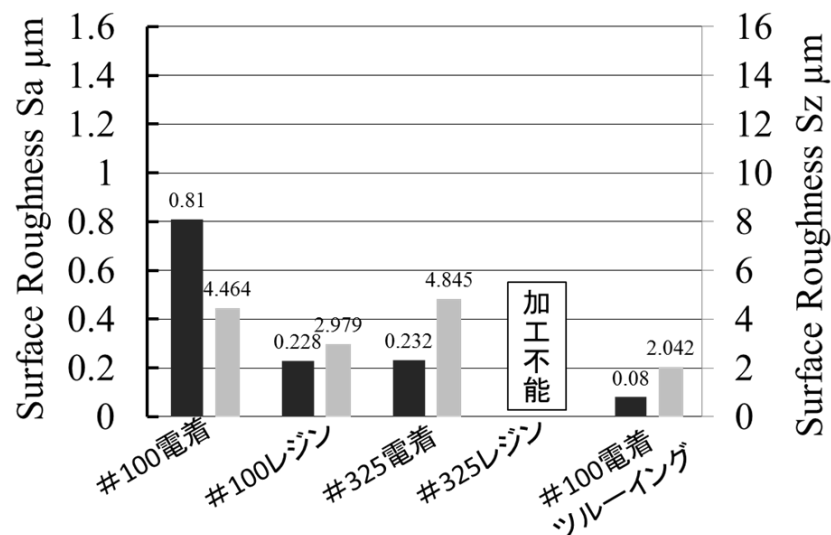


図 34 電着・レジンボンド砥石による研削実験結果（研削面粗さ）

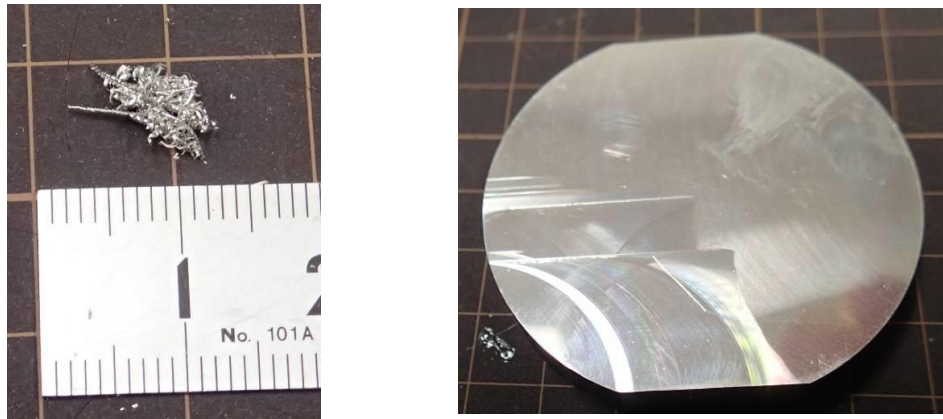


図 35 流れ型の研削屑と研削面に生じた擦過傷

(3) 整列砥粒工具による良好な研削面の獲得

研削面の粗さが改善しない理由は以下のことを考えている。

- ・ 研削に関与する砥粒が多く研削面を荒らしてしまう
- ・ 研削屑が流れ型（線状）となり砥粒に絡まりチップポケットに詰まる
- ・ 研削屑が粉状でないためマイクロバブルクーラントの効果を得られない

この対策として整列砥粒工具を使用することにした。整列砥粒工具は軸付砥石とは比較にならないほど大きなチップポケットを有していることがメリットとして考えられる。また研削に関与する砥粒を限定して使用することができる。図 36 に整列砥粒工具の砥材層の拡大図を示す。粒径数百 μm の単結晶ダイヤモンドの砥粒が規則正しく並んでいる。図 37 は整列砥粒工具と PCD フライスで加工した面を比較して示しているが、主切れ刃方向の研削面粗さが良好で被削材が鋭利な砥粒に削られていることがわかる。最も突き出し高さが高く研削に関与する砥粒の向きを調整し、研削実験を行った。

図 38 と図 39 に研削実験の結果を示す。UV ツルレーイングを施した整列砥粒工具を用いて、送りを 5 mm/min とすることで、13.5 nmRa の研削面を獲得することができた。

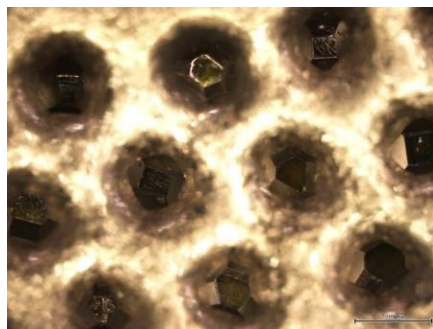


図 36 整列砥粒工具の拡大図

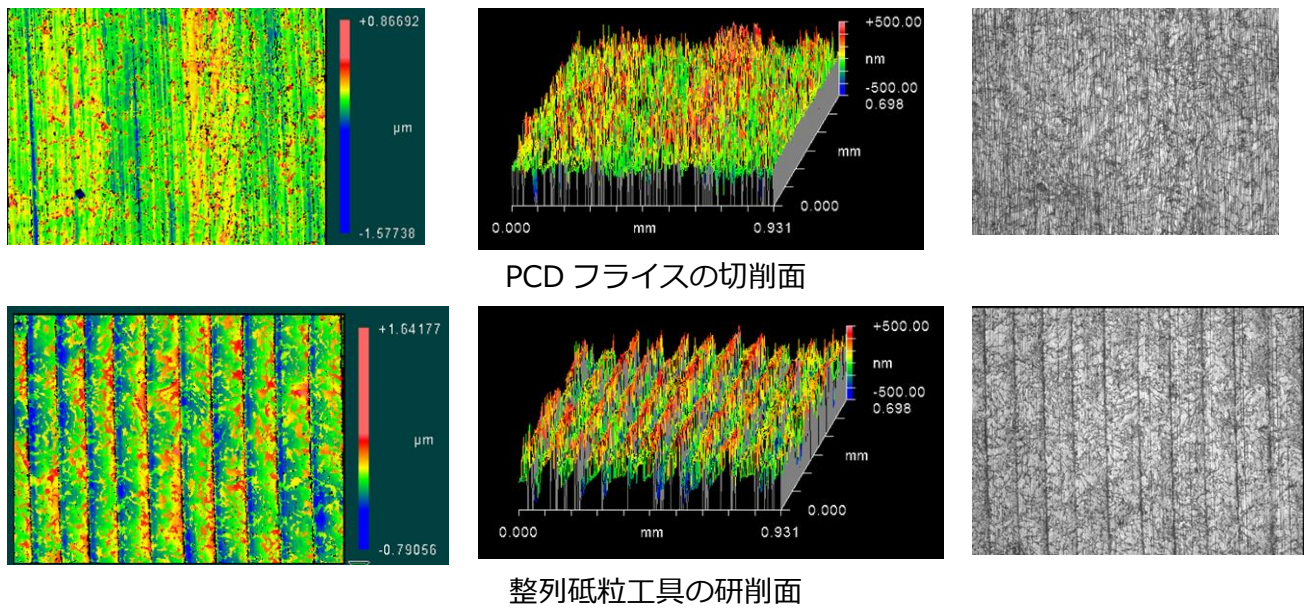


図 37 PCD フライスの切削面と整列砥粒工具の研削面との比較

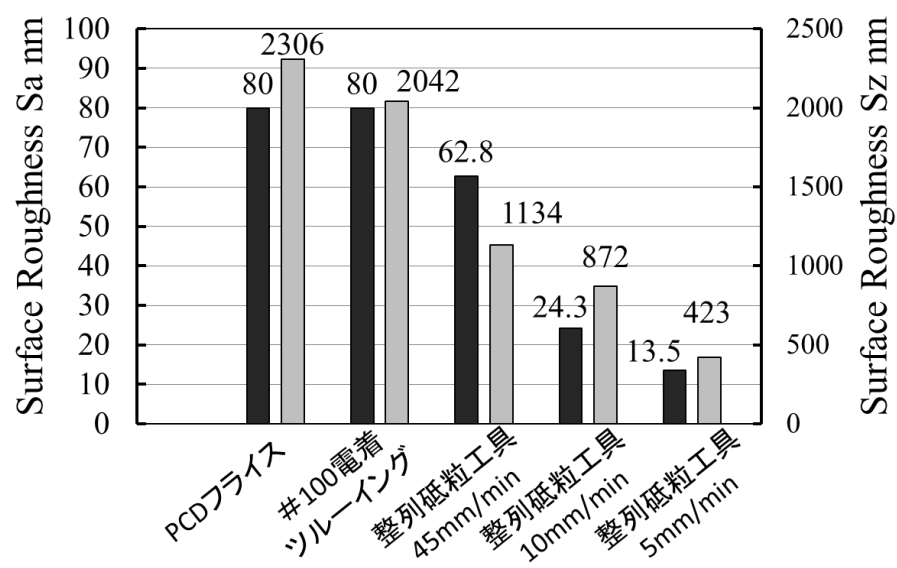


図 38 整列砥粒工具の研削面（他の工具との比較）

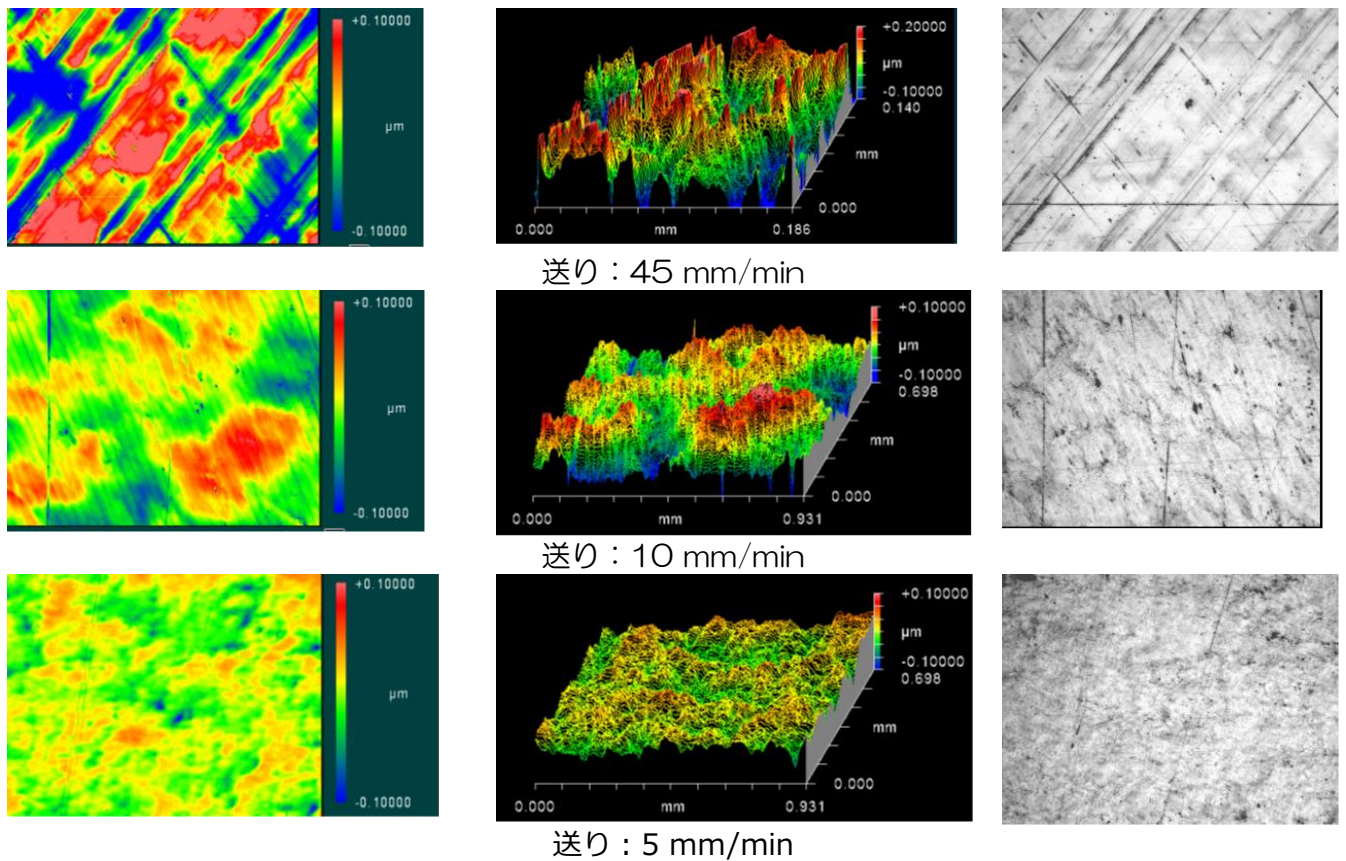


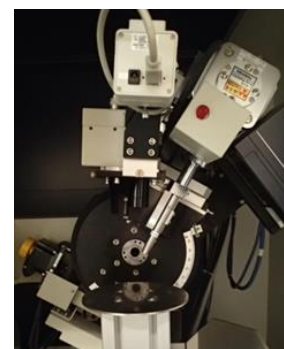
図 39 整列砥粒工具の研削面

(4) 残留ひずみの定量化

研削面の残留ひずみを評価する方法として、X 線回折装置による 残留応力測定を行った。図 40 に装置の外観・内部の画像と、図 41 に計測結果を示す。切削加工面と比べて研削加工面は残留応力の信頼限界の範囲が狭くなる傾向があった。また、条件によっては切削加工よりも残留応力を低減することが可能であることがわかった。



装置外観



装置内部

図 40 RIGAKU X 線回折 残留応力測定システム

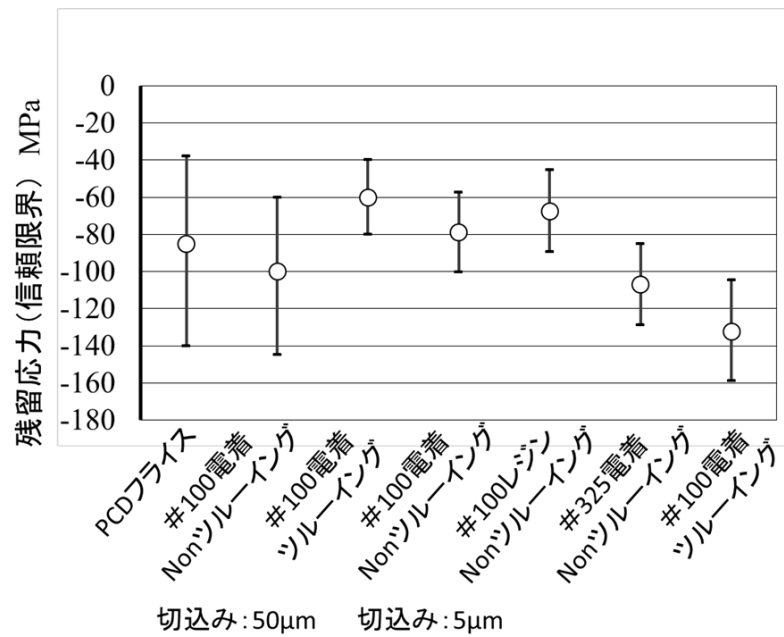


図 41 研削面の残留応力（マイナスは圧縮応力を示す）

(5)まとめ

目標としていた 2 nmRa 以下には届かなかったが、13.5 nmRa の研削面を獲得することができた。また、残留ひずみの評価法として、残留応力の計測が有効であることを明らかにした。

[2-1] CMP による超精密研磨技術の開発[クリスタル光学]

はじめに難燃性マグネシウム合金の水に対する溶解/研磨特性を評価するために、以下のような基礎実験を行った。超精密切削で鏡面に加工した難燃性マグネシウム合金の試験片を

- ① 純水に浸漬
- ② 純水に浸漬し、液を攪拌
- ③ 純水を滴下しながら(純水のみを加工液として)研磨加工

の3条件にて、表面粗さおよび除去能率の経過時間変化を評価した。

結果を図 42 に示す。水に溶解するマグネシウムの特徴のとおり、すべての条件で時間の経過とともに表面粗さは著しく悪化した。最も表面粗さが悪化したのが③の研磨を行った条件であり、着目すべき点は、③の研磨条件では 10 分以降においても一定量以上の除去能率を維持していたことである。これに対して①と②の条件では浸漬 5 分までは高い除去能率を示すものの、その後は急激に能率が下がった。これは表面に発生した酸化皮膜が不動態皮膜として働き全体的な溶解を抑制させるものの、局所的な孔食が進展するため表面粗さは悪化するというメカニズムを推察している。③の研磨の場合では、表面の酸化皮膜が適宜除去されるため能率が高いまま加工が進展していくと考えている。

本実験結果より、予想通りではあるが、水系スラリーでは難燃性マグネシウム合金の鏡面研磨は難しいことがわかった。

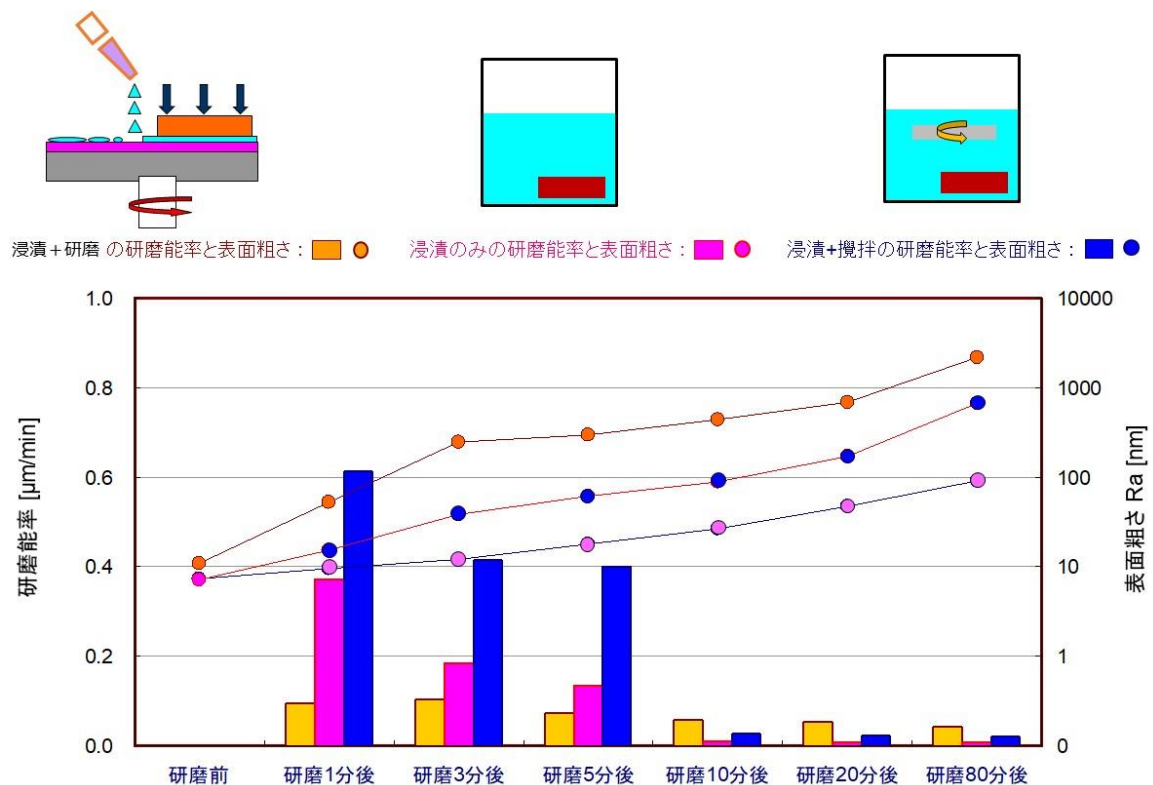


図 42 難燃性マグネシウム合金の純水浸漬試験

検討を重ねた結果、市販品の(水系/油系)スラリーには難燃性マグネシウム合金の鏡面研磨に適したものが存在しないことが判明したため、我々は油系スラリーの独自開発に着手した。様々な“油系のベース液/砥粒/研磨パッド”を組み合わせ最低な条件を求めた結果、図 43 に示すように 5nmSa 程度の鏡面化が行えるオリジナルスラリーの開発に成功した。なお、上段は白色干渉計で計測した表面状態を表しているが、この図に見られるスクラッチは目視（可視光）レベルでは検出できない程度のものである。

このスラリーを用いて超精密切削にて 5nmSa 以下に鏡面化した難燃性マグネシウム合金を研磨した場合での、表面の経過時間変化を図 17 に示す。この研磨の目的は前加工の切削に起因する回折目(虹目)やスクラッチを除去することであり、図 44 においても途中までは表面粗さも 1.5nmSa ほど向上し、目的的加工が行えた。しかしながら研磨を続けると図 44 の一番右の図に示すように表面に孔食(エッチピット)が発生し、表面粗さは悪化した。これは、もともと表面が非常に不安定なマグネシウムであり、また合金のためその他の元素も添加されているため電池現象が起こり、長時間の研磨では粗さの悪化は避けられないためと考えている。超精密切削と最適な研磨条件、時間を組み合わせることが肝要である。

図 45 は難燃性マグネシウム合金で非球面サンプルの超平滑化を行ったチャンピオンデータを示す。超精密切削で 2.3nmSa の平滑化を行った後に、CMP 加工で回折目を除去し、1.5nmSa にまで粗さを向上できた。

以上のように難燃性マグネシウム合金においても、前加工である超精密切削とオリジナルスラリーを用いた CMP を組み合わせることで、超平滑表面が得られることが実証できた。

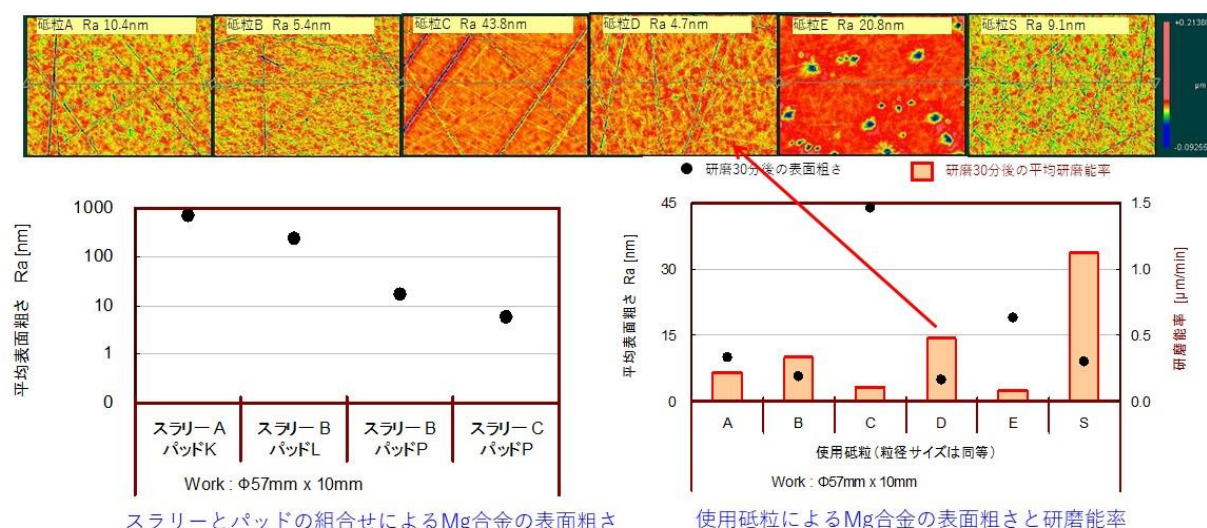


図 43 難燃性マグネシウム合金のオリジナルスラリーの検討

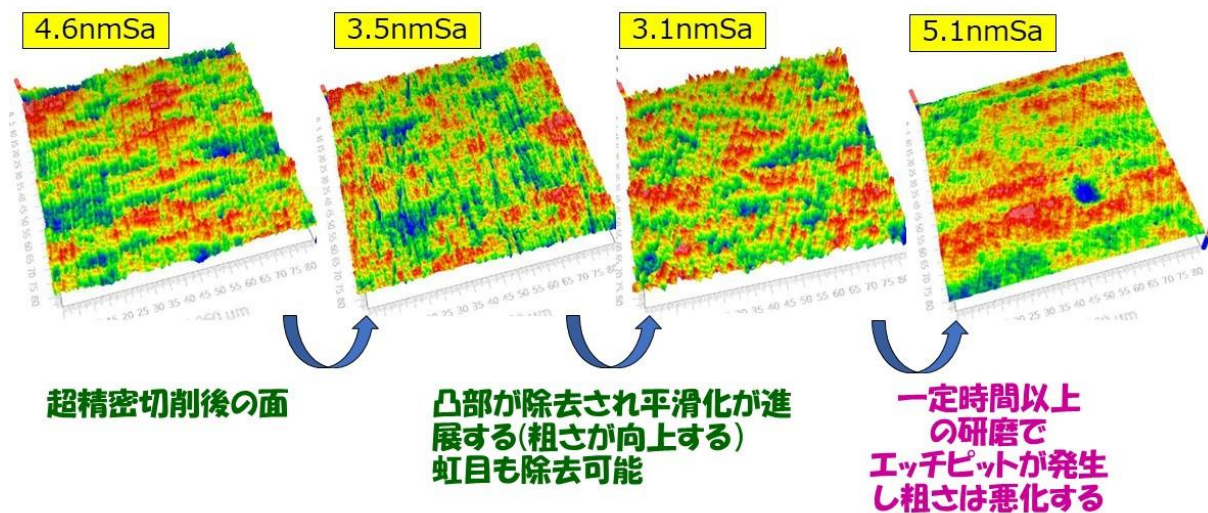


図 44 CMP による表面状態の変化

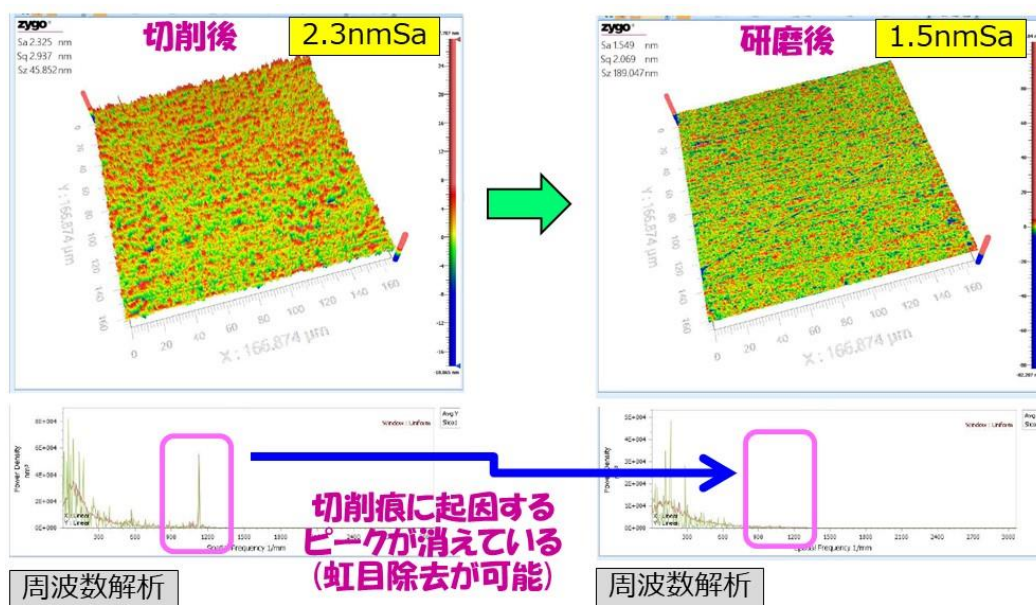


図 45 難燃性マグネシウム合金の CMP による超平滑化

[2-2] 電解研磨による超精密研磨技術の開発[クリスタル光学]

電解研磨に関しても様々な電解液を自作し平滑化実験を行った。図 46 は最も良い電解液を用いて 5 種類の難燃性マグネシウム合金に対して 5 種類の電解条件(電圧、電極間距離、液攪拌条件)で平滑化を行った実験結果を示す。この図に示すように最も良い材料でのチャンピオンデータで 25nmSa の平滑化が行えた。これ以上の平滑面を目指し、実験を継続したもの、合金であるがゆえに通常の電解研磨では 20nmSa の目標値をクリアすることはできなかった。

そこで電解研磨に機械研磨を組み合わせた電解複合研磨で平滑化を行った。図 47 に概略図を示すが、条件の良かった電解液に砥粒を含有させたスラリーを滴下し、通電しながら研磨パッドで表面擦過を行った。図 48 にこの実験結果として表面粗さの経過時間変化と表面観察結果を示す。この図に示すように電解複合研磨を行うことで難燃性マグネシウム合金の 20nmSa の目標値が達成できた。

以上のように難燃性マグネシウム合金の電解研磨に関しても基礎技術の確立が行えた。

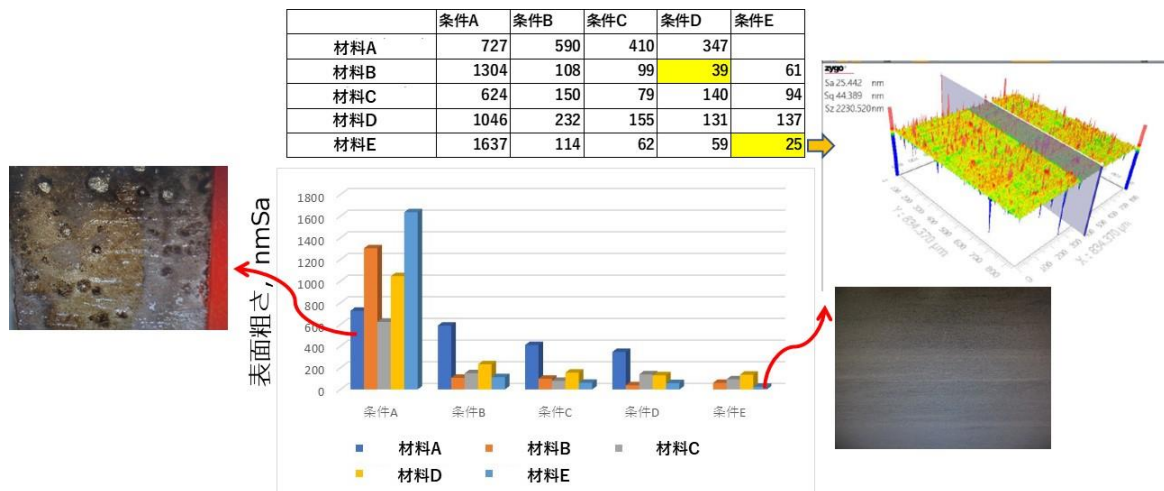


図 46 難燃性マグネシウム合金の電解研磨による平滑化

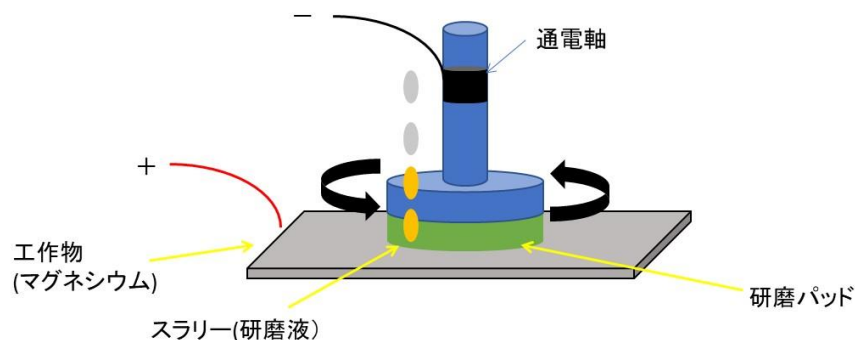


図 47 電解複合研磨法の概略図

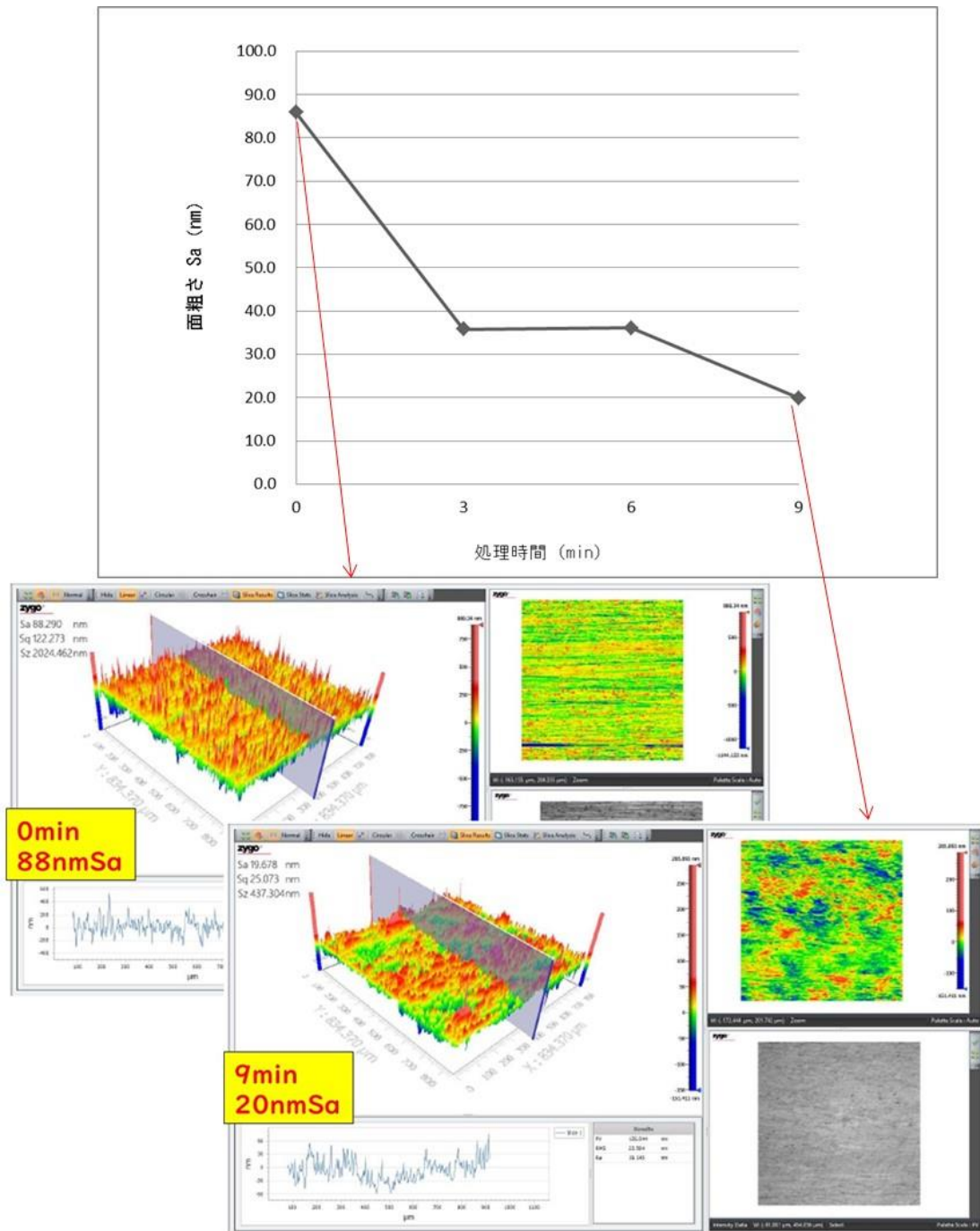


図 48 難燃性マグネシウム合金の電解複合研磨による平滑化

最終章 全体総括

○ 研究開発成果

本研究では難燃性マグネシウム合金の機械加工に関する製造技術、およびこの加工に適した切削工具の開発を行った。この結果として、当初目標に掲げた高精度光学部品である非球面ミラーの製造を可能とし、材料費を除く製造コストや加工精度も現在の汎用材料であるアルミニウム合金と同等程度であることを実証した。

○ 研究開発後の課題

難燃性マグネシウム合金の耐食性の低さを補うための表面処理技術に関しては開発の余地を残す。現在行われている陽極酸化や塗装などの処理では、前加工で得られた鏡面や光沢面が失われてしまうため、これらを維持した状態での耐食性コーティング技術を引き続き開発していく。

○ 事業化展開

はじめに、難燃性マグネシウム合金の機械加工部品の受託製造で事業化を行う。我々は研究開発期間中においても、JAXA や大手電気機器メーカーに対して、難燃性マグネシウム合金で製造したサンプル品を提供済みである。JAXA とは現在も本研究成果に関する部品で共同研究を継続している。これら軽量化ミラーの需要が大きい航空宇宙分野の開発試作品などで受託製造の実績を増やし、汎用部品(量産品)の受注量を増やしていく計画である。これらが軌道に乗った後に、光学機器や医療・介護用品などで、マグネシウム合金製のオリジナル製品の事業化を目指していく。

○ 外部発表

本研究開発成果の外部発表として以下の学会発表を行った。

- 国際学会での講演
 - 1) Okiharu Kirino, Hiroyuki Nakagawa, “ Practical fabrication of freeform optical parts with various materials” European Optical Society Annual meeting (EOSAM) 2018 (招待講演)
- 国内学会での講演：
 - 2) 桐野宙治, 中川寛之, 塩谷圭吾, 峠睦, 河村能人, “ マグネシウム合金を用いた超軽量光学部品の開発” , 2018 年砥粒加工学会学術講演会

○ 知的財産権

本研究開発の成果として 1 件の特許申請を行うべく現在準備を進めている。