

ラッピング定盤・ポリシングパッド

谷 泰弘 (株)ツールバンク

1. はじめに

ラッピング定盤もポリシングパッドも遊離砥粒研磨で 사용되는工具である。いずれも圧力転写方式での加工の基準面となるため、表面は平滑で摩耗しにくく、空間的にも時間的にも表面形状の変化がないことが求められる。すなわち均質で、たとえ摩耗してもうねりなど発生せず、一様に摩耗することが要求される。また工具と砥粒は別々に提供される遊離砥粒加工であるため、工具と工作物の接触領域の加工域に砥粒が侵入しやすい構造をもっており、加工域に侵入した砥粒は工具に保持され、工具との間ですべりが少なく工具との相対速度が小さくなる(できれば工具とともに移動する)ことが求められる。このように研磨工具は基準面としては平滑性が求められるが、工具が平滑であると砥粒のアンカー効果が作用したいため、このことは砥粒保持の観点からは好ましくなく、2つの要求は二律背反の関係にある。さらに砥粒保持の観点からは研磨工具に砥粒が埋め込まれやすいように研磨工具は軟らかい方がよいが、基準面という観点からは耐摩耗性に優れるように硬い方が望まれる。この点でも相反する要求となる。砥粒の保持は研磨能率や到達面粗さに影響するため、こうした研磨性能が優れると、工具の耐摩耗性は劣る結果につながる。工具の耐摩耗性が劣ると、基準面が変形し加工精度の悪化につながり、また工具コストの上昇につながる。そこで研磨性能と耐摩耗性を勘案しながら、ニーズに最も合う工具を選定する必要がある。次章以降ではまずラッピング定盤とポリシングパッドのそれぞれについて説明したあと、研磨工具に施される溝切りについて述べる。

2. ラッピング定盤

ラッピング定盤は粗研磨のラッピングに使用される研磨工具であり、一般にラッピングプレートやラップと呼ばれている。砥粒切込み深さを大きくするために、ラッピング定盤としては木材以上の硬度をもつものが使用される。表1には現在使用されているラッピング定盤の種類とその用途、特徴を示す。ラッピング定盤には、

- ①砥粒の保持能力が高い
- ②耐摩耗性に優れ、その形状精度が長時間維持される
- ③加工負荷や自重による変形が小さい
- ④材質が均一で硬度のむらがない
- ⑤耐食性に優れ、水溶性スラリーを使用しても錆の発生がない

⑥スクラッチなどの傷の発生要因となる欠陥や介在物、不純物が無い

などの特性が求められる。このほか振動減衰性に優れる、熱膨張率が小さい、成形性に優れるなどの特性があれば、さらに好ましい。

一般砥粒である炭化ケイ素砥粒や酸化アルミニウム砥粒との組合せでは、安価で研磨性能が高く耐摩耗性にも優れ大径化にも対応可能な鋳鉄がよく用いられている。鋳鉄においても引張強度の低いものほど砥粒の保持特性が優れ研磨能率は高くなるが、耐摩耗性に劣ることになる。そのため球状黒鉛鋳鉄の FCD450 がバランスの取れた材料としてよく用いられている。硬質材料の研磨等で耐摩耗性が必要な場合には、より引張強度の高い球状黒鉛鋳鉄 FCD700 あるいは FCD900 が用いられる。一方、レンズなどの光学部品の研磨においては製品の高い形状精度を達成するために頻繁に工具形状の修正が行われるため、研磨能率が高く形状修正がしやすい、引張強度の低いねずみ鋳鉄が利用されている。鋳鉄の黒鉛は非常にもろく、表面に出てくると脱落して凹みとなる。この凹みに砥粒が保持され、その砥粒が後続の砥粒の動きを妨げることで、後続砥粒の工具に対するすべりがなくなることで除去量が増えると報告されている¹⁾。

通常球状黒鉛の粒径としては 20~30 μm のものが使用されるが、#1500 以上の高番手の砥粒を用いる場合にはより小さい 10~15 μm の径の球状黒鉛をもつ鋳鉄を採用した方が球状黒鉛の個数が増え凹みに保持される砥粒が増加することで研磨能率が向上すると言われている。黒鉛は型に流し込まれた鋳鉄が冷却する際に析出するので冷却速度が速いほどその粒径は小さくなる。ラッピング定盤が大径化・肉厚化するほど中央部の冷却速度は遅くなるため、全領域で均質な粒径の球状黒鉛鋳鉄を製造することが難しくなる。

表1 ラッピング定盤の種類

材質	用途	特徴
ねずみ鋳鉄 (FC300, 350)	金属、非金属の粗仕上げ、光学レンズの加工	ゲージ、油圧シールなど比較的軟質の工作物をラッピングするのに適しており、安価だが脆く摩耗が早い
球状黒鉛鋳鉄 (FCD450, 700, 900)	金属、非金属、水晶、セラミック、ガラス、シリコンの粗・精密仕上げ	最も一般的に使われているラップ定盤で、ほとんどの工作物に適している。加工能率、仕上げ面粗さ、スクラッチ対策などの違いで FCD450, 700, 900 を選択する
アルミニウム、錫、銅、銅合金	へき開性材料、化合物半導体、硬質材料	軟らかく、摩耗が大きい。砥粒の埋込み、チャージングが容易で滑らかな仕上げ面を得るのに適しており、ダイヤモンド砥粒と一緒に用いることが多い
石英ガラス	化合物半導体	GaAs 等スクラッチを非常に嫌う工作物に対して転動砥粒ラッピングを行うために用いられるが、高価なため化合物半導体に限られる
複合定盤	軟質金属、非金属、硬質材料	金属やセラミックの硬質粒子をエポキシ樹脂で固めたもので、ポリシングに近い精密仕上げラッピングに用いられる特殊ラップ。鋳鉄の数倍で高価

* 株式会社ツールバンク: 〒520-0241 滋賀県大津市今堅田3-4-25

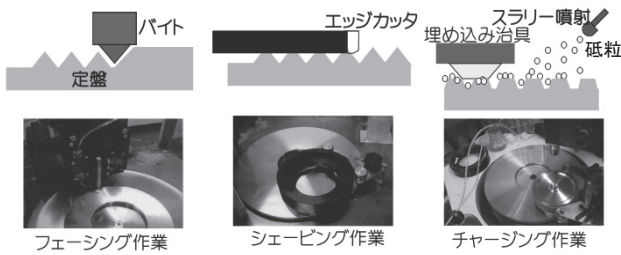


図1 チャージング作業

耐食性に優れるという観点から、ステンレス鋼をラッピング定盤に使用すると、砥粒の保持特性がよく研磨能率は球状黒鉛鋳鉄の2割増で到達面粗さと耐摩耗性は同等という結果が得られる。ステンレス鋼は材料価格が高いためにこの程度の研磨能率の上昇ではコストパフォーマンスが悪く、事実ステンレス鋼をラッピング定盤に使用している例はほとんどない。

上述のようにねずみ鋳鉄は片状黒鉛組織なので球状黒鉛鋳鉄よりも砥粒の保持特性に優れ研磨能率が高いが、引張強度が低いために耐摩耗性に劣り定盤の形状が容易に変化してしまう。最近ねずみ鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄の中間の特性をもつCV鋳鉄が開発された。CV鋳鉄は芋虫状の黒鉛組織を持ち球状黒鉛鋳鉄よりも砥粒の保持特性に優れるため高い研磨能率を示す²⁾。またその引張強度は350~500MPaであり、耐摩耗性はねずみ鋳鉄より勝り球状黒鉛鋳鉄と遜色ない値を示す。

高価なダイヤモンド砥粒を用いた研磨においては、砥粒を研磨工具に埋め込むチャージングという作業を行って後、研磨が開始される。そのため砥粒の埋め込みが行いやすい錫や銅などの軟質金属が研磨工具として使用される。チャージングは、図1のように

- ①フェーシングバイトなどにより研磨定盤の平面度を修正しながら微細な溝入れを行う(フェーシング作業)
 - ②エッジカッタなどにより定盤表面の山部を平坦化する(シェーピング作業)
 - ③定盤上に砥粒スラリーを噴射し、セラミックスなどの埋め込み治具で砥粒を定盤表面に埋め込む(チャージング作業)
- の3段階で行われる。ダイヤモンド砥粒との組合せでは、金属やセラミックなどの硬質粒子をエポキシ樹脂で固めた複合定盤が使用されることもある。この複合定盤を使用すると、ラッピングとポリシングの中間的な仕上げ面粗さが得られる。現在市販されている粉体と樹脂を組合せた複合定盤では10~50 μm の小径の粉体を使用されているが、0.1~0.3mmのより大きな粒径の粉体を使用すると、球状黒鉛鋳鉄定盤よりも高い研磨能率とほぼ同等の仕上げ面粗さが得られることが確認されている³⁾。また金属短繊維と樹脂とを複合させたラッピング定盤でも球状黒鉛鋳鉄定盤よりも同様な研磨性能が得られており、とくにこの複合定盤の場合には工具回転数が増加しても研磨能率が飽和現象を生じることなく向上することが確認されている⁴⁾。複合定盤では樹脂が使用されているため、耐摩耗性は鋳鉄定盤より劣る。

ラッピング定盤は研磨機に搭載後、フェーシング装置を使用して形状修正を行ったあと、砥粒の保持特性を改善するた

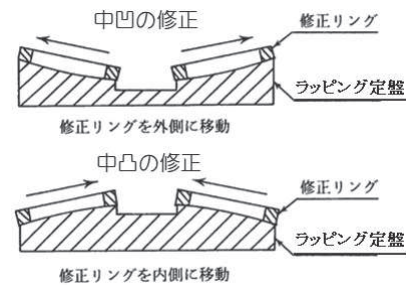


図2 片面研磨における定盤の平面度の修正

めにドレッサを用いて表面にある程度の凹凸を付与するドレッシングを行う。フェーシング装置がない場合は、図2のように修正リングの位置や回転方向を変えて研磨を行い、形状修正を行う。ラッピング定盤はポリシングパッドのように砥粒保持のための表面構造をもっているものは少なく、このドレッシング作業で砥粒の保持を改善するしかない。ダイヤモンドドレッサを使用すれば比較的容易にドレッシングが行えるが、ダイヤモンドドレッサがない場合や使用できない場合は粗目の砥粒を用いたラッピングによりドレッシング作業が行われる。ある程度研磨が進むとドレッシングにより付与された表面凹凸は削られ研磨能率は低下するため、適当な間隔でドレッシングを再び行うことになる。また形状も狂ってくることから形状修正作業も必要となる。形状修正作業やドレッシング作業はポリシングパッドでも必要となる。本来研磨工具としてはノードレスで高い研磨能率が維持できることが理想であるが、現実にはそれを満足する研磨工具は存在しない。

3. ポリシングパッド

ポリシングパッドは仕上げ研磨のポリシングで使用される研磨工具であり、一般に研磨パッドあるいはポリシャとも呼ばれている。ポリシングの目的は、前加工の仕上げ面をより平滑にし鏡面化することである。また必要に応じて前加工で生じた加工ダメージを低減あるいは除去する。そのため、ポリシングパッドには、

- ①砥粒の保持特性を高めるために粘弾性的特性をもつこと
- ②縁だれ、うねり、中凹・中凸など、形状精度の劣化を起こしにくい剛性をもつこと
- ③砥粒が加工域に侵入しやすいような構造をもつこと
- ④摩耗・摩滅しにくく、長寿命であること
- ⑤親水性の酸化物砥粒が使用されることから、ある程度の親水性をもつこと
- ⑥研磨スラリーがポリシングパッドの表面に滞留するように、吸水性をもたないこと
- ⑦ポリシングでは酸やアルカリ、酸化剤などが用いられるため、耐薬品性に優れること

といった特性が求められる。しかし、これら全ての要件を同時に満たすポリシングパッドを見つけることは非常に難しく、ニーズに応じて最適なポリシングパッドを選択することが必要となる。一般的には、ラッピング定盤のように硬質で工作物に傷を付けやすい素材を避け、砥粒切込み深さを小さくするために軟質で弾力のある素材を用いる。硬度としては木材以下の

表 2 ポリシングパッドの種類

分類	構造、材質など	厚さ	シオア硬さ[度]
人工皮革 (スエードワックス)	表層:エステル系またはエーテル系ポリウレタンの発泡体、気孔径は40~100 μm 基材:ポリエステル繊維不織布または織布、PVAシート他	発泡層0.3~0.5mm 総厚み0.8~1.5mm	発泡層20~40 全体60~70
人造繊維不織布	ポリエステル繊維ウェブをポリウレタン、PVAなどのバインダを用いて製造した不織布ブロックをスライスしたもの	0.8~1.3mm	70~85
天然繊維不織布	羊毛フェルト	10~50mm	50~80
多孔質ポリウレタン	ウレタン樹脂に硬化剤、発泡剤を加えて加熱発泡、硬化させ所望の厚さにスライスしたもの。成形性改善のためフィラーとして酸化セリウム、シリカパウダなどを混合。気孔径は0.1~1mm	0.5~1.2mm	80~90
ピッチ	タール系、石油系、木タール系のピッチを定盤に載せ、加熱硬化して成形し網目あるいは溝加工したもの	3~5mm	100に近い
植毛	静電植毛技術および精密塗布技術により、ポリエステルにナイロン毛を移植したもの	0.3~1mm	40以下

軟らかさをもつことが求められる。以前はピッチや松やに、フェルトなどの天然樹脂が用いられていたが、最近では合成樹脂や繊維、合成皮革が主流となっている。表 2 にポリシングパッドの種類とその構造および硬度を示す。

ポリシングパッドは軟らかいほど工作物表面にフィットして加工点が増加し研磨能率が上昇するが、軟らかくなりすぎると研磨スラリーが工作物とパッドの間に侵入しにくくなり、研磨能率が低下してしまう。またポリシングパッドの硬度が高いと傷が発生しやすく、逆に軟らかいと縁だれを生じやすくなり、硬度むらの影響が大きく現れ、うねりを生じたり形状精度を悪化させたりする。そのためシオア硬度で 80 前後が最も好ましい硬さとされている。ポリシングパッドにおいてもラッピング定盤と同様に溝切りを行って、加工域へのスラリーの侵入を改善することが行われる。スエードパッドや植毛は表面硬度が 40 以下と非常に軟らかいが、表面に多数の穴をもっているため、その部分にスラリーを蓄えることで研磨を可能にしている。

ピッチはガラス転移点以上に温めると軟化し流動性をもつようになるので、軟化したピッチに原器を押し当てることで所望の曲率をもつ工具が容易に製造できることから、レンズなどの光学部品の研磨に現在でも多く使用されている。ピッチには木タール系ピッチ、石炭系ピッチ、アスファルト系ピッチがあるが、アスファルト系ピッチは硬度範囲が広く比較的容易に希望の硬度が得易い特徴があり、多用されている。アスファルト系ピッチは炭化水素を主成分としているため疎水性であり親水性のスラリーをはじくが、その表面に親水性砥粒が付着することにより水に濡れるようになる。ピッチを扱うには熟練が必要であるため、これに置き換わるものとして多孔質ウレタン樹脂パッドが使用されるようになった。以前は植毛や織布のポリシングパッドも使用されていたが、現在では植毛のポリシングパッドは形状精度を問わない仕上げ面粗さを向上したいような用途のみ使用され、織布のポリシングパッドも織り目の転写が起りうねりが発生しやすいため、形状精度を問わない粗研磨にのみ使用されている。

多孔質ウレタン樹脂パッド、不織布パッド、スエードパッドは工業的に非常によく使用されている代表的な 3 種類のポリシングパッドである。表 3 にこの代表的な 3 種類のポリシングパッドの研磨性能を比較して示す。弾性圧縮率の小さい多孔質ウレタンパッドと不織布パッドは 1 次研磨用として使用され、弾性圧縮率の大きいスエードパッドは仕上げ研磨用に使用され

表 3 代表的なポリシングパッドの研磨性能

種類	多孔質パッド	不織布パッド	スエードパッド
断面構造			
材質	ウレタン樹脂	ポリエステル繊維にウレタン樹脂含浸	ウレタン樹脂
適用工程	1次研磨	1次研磨	仕上げ研磨
圧縮弾性率(%)	小(3.0)	中間(4.0)	大(13.0)
研磨能率	中間	良好	良くない
仕上げ面粗さ	中間	良くない	良好
平坦性	良好	中間	良くない
縁だれ	小	中間	大
表面粗さ	中間	良くない	良好
ドレスの影響	大	中間	小
砥粒の侵入し易さ	良くない	良好	中間
砥粒の保持	良くない	中間	良好
傷の発生し易さ	良くない	中間	良好
工具寿命	中間	良好	良くない

ている。天然繊維不織布のフェルトは厚みのあるものが得られるので工具を交換することなく長時間の研磨が行えるため、高い形状精度を問わない仕上げ研磨に使用されている。

多孔質ウレタン樹脂パッドはその名の通りウレタン樹脂の多孔質体であり、不織布パッドはポリエステル繊維あるいはナイロン繊維の不織布にウレタン樹脂を含浸したものであり、マトリクスがウレタン樹脂でウレタン樹脂の割合が繊維の割合より勝るためにウレタン樹脂の特性が大きく現れる。スエードパッドはウレタン樹脂内で DMF(ジメチルホルムアミド)を湿式凝固させることにより製造されており、3種類とも代表的な材質はウレタン樹脂と言える。ウレタン樹脂は床のコーティングや靴底、車のバンパーに使用されるように耐水性(吸水性がない)、耐磨耗性に優れており、ポリシングパッドに適した材質といえる。

多孔質パッドはウレタン樹脂に化学的発泡剤あるいは中空バルーンを混合することにより製造される。表面が平面と穴から構成されているという点では構造が球状黒鉛鉄定盤と似ている。しかし多孔質パッドの気孔は、

- ①スラリーを蓄えポンピング作用で加工域に砥粒を供給する
- ②工作物がポリシングパッドに吸着することや、工作物を浮き上がらせるハイドロプレーン現象の発生を抑制する

という役割がある。代表的な 3 種類のポリシングパッドの中では、最も平滑で均質な基準面をもっており、形状精度を重視する光学部品の研磨に使用される。またポリシングパッド中に研磨スラリーが浸透することはなく、比重の重い酸化セリウムを砥粒として用いる光学ガラスの研磨に適している。しかし、平面と微細な穴で構成されていることからスラリーが加工域に供給されにくいという欠点をもっており、これを緩和するために砥粒として使用される酸化セリウムや酸化ジルコニウムを含有するものが提供されている。これら硬質粒子の存在は、工作物とポリシングパッドの間に隙間を発生させている。また硬質粒子の存在は多孔質パッドの耐磨耗性を改善し、基準面の形状精度を維持することに役立っている。砥粒の保持性能が低くドレッシングによってそれが改善される点も球状黒鉛鉄定盤と似ている。このためドレッシングによって研磨能率が大きく変動する。

これらの特性は基材のウレタン樹脂を粘弾性が高く親水性に富むエポキシ樹脂に置き換えることで改善される⁵⁾。すなわち多孔質ウレタン樹脂パッドを多孔質エポキシ樹脂パッドで置き換えれば、化学的に砥粒を保持することが可能となり表面凹凸の影響が減少するためドレッシングが不要となり、作用砥粒数が増加するために高い研磨能率を実現する高加工圧や高加工速度の領域や砥粒の供給が少ない低濃度スラリーや低供給量の領域で高い研磨特性を実現する。

不織布パッドは表面に突出した繊維の間隔で作用砥粒間隔が決まるため、この作用砥粒間隔が多孔質パッドよりも大きいため研磨能率が高くなるが到達面粗さは悪くなる。このように不織布パッドは表面凹凸が大きく研磨スラリーが加工域に侵入しやすいため扱いやすいポリシングパッドである。本来不織布は連続気孔であるため、酸化セリウムが砥粒の場合、中にどんどん詰まってしまうので、比重の軽いシリカスラリーとの組合せで使用される。不織布にDip-Nip法で均質に樹脂を含浸させることはかなり難しく、そのため樹脂の充填率の高い不織布パッドの場合はスエードパッドの製造に使用されている湿式凝固法を適用してウレタン樹脂の湿式含浸が行われる。

スエードパッドは上部にナップ層と言われる縦穴構造をもっており、これは前述のようにDMFの湿式凝固で製造される。縦方向に繊維が伸びた構造は水平方向の機械的特性と垂直方向の機械的特性を大きく変え、軟らかい割には縁だれやうねりを発生しない構造となっている。この特性は1次研磨にも望まれるものであり、従来は微細な縦穴構造を作ることが難しく柱の板厚も大きくできなかったが、最近では微細な穴で柱の厚さを変えた1次研磨用のスエードパッドも開発されている。ナップ層の厚さは最大で0.5mm程度であり、他のポリシングパッドに比較するとスエードパッドの寿命は短い。

4. 研磨工具の溝切り

ラッピング定盤においてもポリシングパッドにおいても、研磨工具には砥粒の加工域への供給を容易にするため溝切りが施される。しかし研磨工具に周期的な溝が存在すると、その形状が工作物に転写してうねりなどの発生原因となるため、可能であれば研磨工具に溝はない方がよい。直径20mm以下のサイズの工作物の研磨においては、溝がなくても工作物のほぼ中心部まで砥粒が供給されるため、あえて溝を設ける必要はない。溝の存在は砥粒の加工域への供給のみでなく、切りくずの排除、だれの抑制、研磨能率の向上、薄物工作物の吸着防止にも役立つ。溝が存在すると、溝の肩の部分で加工圧の応力集中が生じるため、研磨能率が上昇する。現在研磨によく使用されている溝の形状は、図3のように直交溝、菱形溝、同心円溝+放射溝、らせん溝+斜め溝の4種類である。ポリシングパッドでは砥粒の滞留性を高めるために、スラリー流量が多いような切りくずの滞留が問題とならない研磨条件で放射溝のない同心円溝やパンチングメタルのように連続性のない穴が使用されることもある。同心円溝の場合、溝の形状が工作物表面に転写してうねりとなることがあり、その改良版としてらせん溝が使用される。らせん溝の場合砥粒の

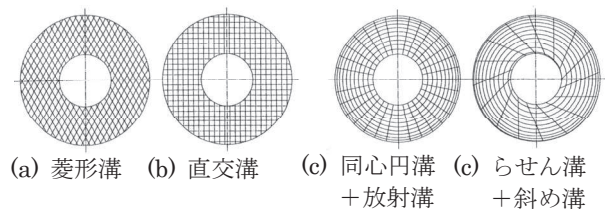


図3 研磨工具に施される溝形状

滞留が多少損なわれるため、放射溝との組合せではなく斜め溝との組合せが使用される。らせん溝は工具の回転方向とは逆の方向に切られ、なるべく砥粒の排出が抑えられるようにする。直交溝は最も一般的な溝形状で、放射溝や斜め溝よりも砥粒の滞留性に優れる。脆くて割れやすい小径の工作物の場合菱形溝が使用される。使用される溝のピッチは10~40mmで、溝幅は1~2mm、溝の深さは0.5mm以上である。ポリシングパッドの場合は研磨工具の厚みが薄いため、溝の深さは研磨工具の厚みの1/3程度である。難加工な工作物の場合ほど、溝のピッチは細かく、溝幅は広くして、加工圧を高くして研磨能率の向上に努める。溝に砥粒や切りくずの滞留が多くなると、凝集粒子が発生し傷の原因となるため、溝の掃除は適宜必要である。溝の断面形状は研磨工具が摩耗しても形状を維持することから、通常は矩形形状が使用されるが、砥粒の加工域への供給をよくするために三角形状が使用されることもある。現在の日本ではラッピング定盤の場合溝切りの加工賃が研磨工本体の価格と同等と言われており、溝がなくても溝がある場合と同様の研磨性能を示す研磨工具があれば面白い。

5. おわりに

研磨においては砥粒が研磨工具に完全に固定されているわけではないので、砥粒と研磨工具間にはすべりがあり、研磨工具の摩耗を完全にすることはできない。研磨工具に対する砥粒のすべりを小さくするためには、砥粒と研磨工具間に化学的親和性があり、かつ研磨工具表面に砥粒を保持する構造をもつことが望まれる。しかし、現在のラッピング定盤にはそういう構造をもつものは存在しない。一方、ポリシングパッドにはそうした表面構造をもつものが存在し、かつ樹脂の材質を選択すれば化学的親和性や粘弾性特性をもつものを選定することができる。これまで研磨工具は身の回りにあるものの中から合うものを選択されてきて現在に至っているが、よりニーズに合うものを開発する必要がある。

6. 参考文献

- 川波多 裕司, 桐野 宙治, 谷 泰弘:ラッピングの見える化技術と新しいラッピング定盤の開発, 砥粒加工学会誌, 64, 3 (2000) 124.
- 谷 泰弘, 桐野 宙治, 川波多 裕司, 大石 尚己, 石原 忠弥: 鋳鉄ラッピング工具の高性能化に関する検討, 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2020-3) 482.
- 山本 剛史・張 宇・谷 泰弘・川波多 裕司・桐野 宙治: 工具構造を考慮した混合ラッピング工具の高性能化, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2018-3) 743.
- 中山 智弘・張 宇・谷 泰弘・川波多 裕司・桐野 宙治: 金属短繊維含有ラッピング工具の砥粒保持性の改善, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2016-3) 895.
- 村田 順二・谷 泰弘・広川 良一・野村 信幸・張 宇・宇野 純基: ガラス研磨用エポキシ樹脂研磨パッドの開発, 日本機械学会論文集(C編), 77, 777 (2011-5) 2153.