無気孔アミド系エポキシ樹脂研磨パッドの開発*

張 宇** 谷 泰 弘** 野 村 信 幸***

Development of Non-foaming Polishing Pads Using Polyamide-based Epoxy Resin

Yu ZHANG, Yasuhiro TANI and Nobuyuki NOMURA

This paper describes newly developed non-foaming polishing pads for polishing glassware. A polyamide-based epoxy resin instead of a conventional polyamine-based epoxy resin or a polyurethane resin, is employed. The polyamide-based epoxy resin has a beneficial effect on hydrophilic property and abrasive retention of polishing pads. It was found that the material removal rate of glass using the polyamide-based epoxy-resin polishing pad is higher than that using the polyamine-based epoxy-resin pad or the commercially available polyurethane-resin polishing pad. It was confirmed that the surface roughness of glass polished by the novel polyamide-based epoxy-resin pads is better than that polished by the urethane pad. The contained amount of polyamide-based curing agent in polyamide-based epoxy-resin polishing pads was altered, but not changed the hardness of polishing pads by adjusting mixing ratio of polyamine-based curing agents. The material removal rate increases with the amount of polyamide-based curing agent contented in epoxy resin. What's more, the reason of high material removal rate with using the polyamide-based epoxy-resin polishing pad was also investigated. The contact angles of slurry on polishing pads and the surface states of various pads after polishing test were measured. The results showed that, the hydrophilicity of polyamide-based epoxy-resin pads is higher and a finer concave-convex surface generates in polishing process. The hydrophilicity and the finer concave-convex surface are suitable for polishing pads to improving the polishing performance. The surface states of polishing pads can be altered with mixing more than two kinds of curing agents in epoxy resin.

Key words: polishing pad, abrasive, polyamide, epoxy resin, hydrophilicity, surface roughness

1. 緒 言

液晶テレビ用フラットパネルディスプレイ基板や磁気ディスク基板、レンズやプリズムなどの各種光学素子などのガラス製品は所定の形状に加工された後、最終的には研磨加工によって表面が平滑化される。加工コストを低減するために、研磨加工の高能率化・高機能化が求められている。筆者らは、ガラス研磨における酸化セリウム砥粒使用量の低減や研磨技術の向上に取り込んでおり、高機能の研磨材¹⁾や研磨工具^{2,3)}の開発を行っている。その一つに従来のウレタン樹脂に代わりエポキシ樹脂を採用した多孔質エポキシ樹脂研磨パッド⁴⁾がある。エポキシ樹脂研磨パッドはスラリーを保持する能力が高く、多くの作用砥粒数が得られるため、従来のウレタン樹脂研磨パッドに比較して研磨能率が2倍程度向上することがわかっている。また、幾何学的精度などの仕上げ面品質の向上も確認されている。しかし、エポキシ樹脂研磨パッドに使用されてきたエポキシ樹脂にはアミン系硬化剤が用いられるため、樹脂のガラス転移温度が低く研磨加工時の加工点温度に近い。そのため、研磨時の室温や研磨加工条件によりエポキシ樹脂研磨パッドの研磨特性が大きく影響される場合がある。

本研究では、エポキシ樹脂研磨パッドの研磨特性を安定させるため、エポキシ樹脂の硬化剤の種類に着目した。汎用のアミン系硬化剤の代わりに大きな炭化水素グループをもつアミド系硬化剤をエポキシ樹脂研磨パッドに適用し、エポキシ樹脂研磨

パッドの温度特性の改善や研磨特性の向上を試みた。まず、アミド系硬化剤を用いたエポキシ樹脂研磨パッド（今後、アミド系エポキシパッドと称する）を作製し、その温度特性を評価した。次に、アミン系硬化剤を用いたエポキシ樹脂研磨パッド（今後、アミン系エポキシパッドと称する）と比較しながらアミド系エポキシパッドを用いてガラスの研磨特性評価を行った。最後に、研磨試験後の研磨パッドの表面状態を評価し、エポキシパッドの表面状態と研磨特性の関係について考察を行った。

2. アミド系エポキシ樹脂研磨パッドの物性

エポキシ樹脂は、一般的に反応性のエポキシ基を有するエポキシポリマー（主剤）と活性水素化合物（硬化剤）の架橋反応により、三次元網目を形成する熱硬化性樹脂である。硬化剤は、主剤と交互に反応するため硬化したエポキシ樹脂（架橋構造物）に高い割合を占めている。また硬化剤の骨格のみならず架橋反応部分の構造も硬化したエポキシ樹脂の性能に大きな影響を及ぼす。著者らは、最も広く使用されているアミン系硬化剤を用

Fig.1 Structure of curing agent of epoxy resin

* 原稿受付 平成 29 年 12 月 26 日

掲載決定 平成 30 年 4 月 1 日

** 正 会 員 立命館大学 (滋賀県草津市野路東 1-1-1)

*** 正 会 員 九重電気㈱ (神奈川県伊勢原市鈴川 16)

Table 1 Composition and hardness of various polishing pads

Product code of polishing pads		DE-0	NE-D	NE-S	U
Main agent	Bisphenol A type wt%	52.3	54.8	56.8	-
Curing agent	Polyamide type S wt%	12.7	-	-	-
	Amine type D-230 wt%	-	10.2	-	-
	Amine type D-400 wt%	-	-	24.1	-
	Amine type D-2000 wt%	35.0	35.0	19.1	-
Hardness (Asker-D) of polishing pads		54	54	53	55

Fig.2 Contact angles of various pads with CeO_2 slurry

いたエポキシ樹脂を研磨パッドに適用し、研磨特性の優れるエポキシ樹脂研磨パッドを開発し、市販までに至っている³⁾。しかし、通常の研磨点の温度は45℃前後⁴⁾であり、アミン系硬化剤を用いたエポキシ樹脂のガラス転移温度と同程度である。そのため、エポキシ樹脂研磨パッドの性能は研磨条件や室温により大きく影響されることが判明している。本研究では、アミン系硬化剤の代わりに架橋部にアミド基を有するアミド系硬化剤に着目し、エポキシ樹脂研磨パッドの性能向上を試みた。図1に示すようにアミド系硬化剤はアミン系硬化剤に比べ、硬化剤の骨格に親水性の高いアミド基(-CONH-)が存在するため硬化したエポキシ樹脂の親水性に大きく寄与することが期待される。アミド基中の-H基も主剤のエポキシ基と反応するため、アミン系硬化剤より官能基が多く硬化したエポキシ樹脂の硬化度が高いとも考えられる⁷⁾。また、アミド系硬化剤は大きな炭化水素グループをもつため、硬化したエポキシ樹脂は強い熱硬化性共重合体となり機械的な物性(引張強度、靱性等)が向上することも期待できる⁸⁾。

本研究に使用したエポキシ主剤は、ビスフェノールA型であり、エポキシ当量が230 g/eqである。アミド系硬化剤には、活性水素当量が80 g/eqのアミド系エポキシ硬化剤Sを用いた。また、アミン系エポキシ樹脂研磨パッドの作製やアミド系硬化剤含有量の調整をするために、JEFFAMINE系列(Huntsman社製)のアミン系硬化剤であるD-230(活性水素当量が60 g/eq)、D-400(活性水素当量が115 g/eq)、D-2000(活性水素当量が514 g/eq)を使用した。活性水素当量の値が小さいほど成形したエポキシ樹脂が硬くなる。なお、硬質硬化剤であるD-230、D-400または、アミド系硬化剤Sを単独に使用した場合、研磨パッドのデュロメータ硬度がAsker-D 70以上に達し硬すぎるため、研磨実験中に工作物が暴れ研磨特性の評価ができなかった。研磨パッドの硬度を調整するため、軟質硬化剤であるD-2000を併用した。エポキシ樹脂の主剤、硬化剤を表1に示した配合比で混合し、150℃で3時間加熱硬化を行うことで、直

径200 mm、厚さ4 mmの円板状硬化物を作製した。アミン系エポキシパッドとアミド系エポキシパッドの親水性や研磨特性等を比較するため、研磨パッドの硬度がAsker-D 54程度になるように調整した。なお、本研究ではエポキシ樹脂組成による研磨パッドの特性の影響を評価対象とするため、気孔剤を添加せず無気孔ウレタン樹脂研磨パッド(U)または無気孔エポキシ樹脂研磨パッドを用いて物性および研磨特性の評価を行った。

研磨パッドとスラリーの親和性が研磨特性に影響を与えるため、作製したエポキシ樹脂研磨パッドとスラリーとの親和性を評価する接触角を調査した。研磨パッド表面をフェイシングおよびドレッシングした後、接触角計(CA-DT, 協和界面化学㈱製)を用いてスラリーと研磨パッドの接触角を測定した。図2は各研磨パッド表面のスラリーに対する接触角を示す。アミド系エポキシパッドはアミン系エポキシパッドより接触角が小さく親水性が高いことが分かる。各研磨パッドには同じ主剤を使用したため、アミド硬化剤中の親水性の高いアミド基が研磨パッドの親水性に寄与したと考えられる。また、すべてのエポキシパッドはウレタンパッドより親水性が高いことが確認された。

エポキシ樹脂やウレタン樹脂のような高分子体は、粘弾特性といわれる弾性固体と粘性液体の両方の性質を持っている⁷⁾。これまでの研究では、アミン系硬化剤を使用したエポキシパッドのガラス転移温度が研磨時のパッド温度(約45℃)に近いと、研磨加工中のパッドの硬さや研磨特性等が研磨温度や環境温度の変動に大きく変わることが確認されている⁹⁾。また、材料の温度特性を表す $\tan \delta$ は研磨パッドの研磨能率に影響を与えることが分かっている。本研究では、動的粘弾特性の測定装置(HR-2, TA Instruments社製)を用いて各種研磨パッドの粘弾特性を計測した。試験片としては、10×50 mm、厚さ1.5 mmのエポキシパッドから切り出したものである。試験片にサイン波の歪みを入力し、測定されるひずみと応力の位相差 δ を用いて粘弾特性を求めた。測定条件は、引っ張りモードで昇温速度は5℃/minとし、周波数1 Hz、入力歪0.05%で評価を行った。 $\tan \delta$ の値が高

Fig.3 Dynamic viscoelastic properties of various pads as different environmental temperatures

Table 2 Experimental condition	
Polishing machine	Lapping machine FACT-200 (Nano Factor Co., Ltd)
Workpiece	Soda-lime glass: φ 20 mm×t10 mm Surface roughness: 0.4 μmRa
Pressure	20 kPa
Workpiece / Platen rotation	90 rpm / 90 rpm
Polishing time	30 min
Abrasives	1.2 μm CeO ₂ (SHOROX A-10, Showa Denko K.K.)
Concentration of slurry	3.0 wt% in pure water
Supply rate of slurry	25 mL/min

Fig.4 Material removal rate and surface roughness of workpiece using various polishing pads

Fig.5 Surfaces of workpieces polished by various polishing pads

い研磨パッドは歪みと応力の位相差が大きいために応答が遅れる、一方 $\tan \delta$ の値が低い研磨パッドは位相差が小さいために応答が早いことを意味している。 $\tan \delta$ が最大となる温度はガラス転移温度 (T_g) と定義される。

各種の研磨パッドの動的粘弾特性の評価結果を図 3 に示す。各種研磨パッドの動的粘弾特性が大きく異なることが分かる。アミン系エポキシ樹脂を使用した研磨パッド NE-D と NE-S は計測温度の上昇に伴い、貯蔵弾性率が大きく低下することが分かる。アミド系エポキシパッド DE-0 は、従来のウレタンパッド U と比較して計測温度の上昇に伴い、貯蔵弾性率に大きな変化が見られなかった。また、損失弾性率と温度の関係も貯蔵弾性率と同様な変化傾向が示された。温度による各研磨パッドの $\tan \delta$ の変化に関しては、アミン系エポキシパッド NE-D、NE-S は $\tan \delta$ が 20 °C から大きな変化が現れたのに対し、アミド系エポキシパッド DE-0 は 55 °C までに大きな変化が示されないことが確認された。一方、ウレタンパッドは温度によって貯蔵弾性率や損失弾性率および $\tan \delta$ の粘弾特性の変化が少なく、温度による物性の変動が小さいことが確認される。各エポキシパッドのガラス転移温度 T_g に着目すると、アミン系硬化剤のみを使用したエポキシパッド NE-D、NE-S の T_g が 35~40 °C 付近であるのに対し、アミド系硬化剤を用いたエポキシパッド DE-0 の T_g が約 80 °C の高温側にシフトした。そのため、アミド系エポキシパッドは、

研磨時の温度による物性変化が少ないと考えられる。温度におけるパッド物性の変化量が少ないウレタンパッドに対し、アミド系硬化剤を使用したエポキシパッドは安定性が少々劣るが、これまでに使用されてきたアミン系エポキシパッドに比べて大きく改善されたことが分かった。これは、アミド系エポキシ樹脂硬化剤を配合することにより、エポキシパッド内の大きな炭化水素グループや分子量の大きい硬化物の生成による影響だと考えられる。

3. アミド系エポキシ樹脂研磨パッドの研磨特性

表 2 に示される基本研磨実験条件で各種研磨パッドの研磨特性を評価した。研磨機には、定盤直径 200 mm の片面精密ラッピング装置 (FACT-200, ㈱ナノファクター社製) を用いた。工作物にはソーダガラスを用い、直径 90 mm のワークホルダに対し、中心から半径 35 mm の位置に等間隔で 3 個の工作物を貼り付けた。工作物表面は、前処理として #2000 の緑色炭化珪素 (GC) 砥粒を用いたラッピングにより表面粗さを約 0.4 μmRa に加工した。研磨パッドの表面は、ノーズ半径 0.5 mm のダイヤモンドバイトを用いて、切込み量 150 μm、バイト送り速度 0.5 mm/s、パッド回転速度 100 rpm の条件で切削 (フェイシング) を行った。その後、#100 のダイヤモンド電着ドレッサを用いてドレッシングを 10 分間行った。研磨能率は加工前後の工作

Fig.6 Relationship between the material removal rate and polishing conditions using various polishing pads

Product code		DE-0	DE-1	DE-2	DE-3	DE-4
Main agent wt%		52.3	47.6	43.6	50.1	53.7
Curing agent wt%	S	12.7	9.9	7.6	8.7	1.9
	D-230	-	-	-	2.0	8.4
	D-2000	35.0	42.5	48.8	39.2	36.0
Hardness (Asker-D)		54	45	36	54	54

Fig.7 Comparison of the material removal rate and the surface roughness by different type of epoxy-resin pads

物の重量差によって算出した。研磨後工作物の仕上げ面粗さは、白色位相シフト干渉顕微鏡 (Zygo, NewView 7300) を用いて、カットオフ値 0.08 mm の高域フィルタを適用して評価した。

各種の研磨パッドの研磨特性 (研磨能率と仕上げ面粗さ) は図 4 に示されている。アミド系エポキシパッド DE-0 は研磨能率がウレタンパッド U の 4 倍、アミン系エポキシパッド NE-D または NE-S の 1.5 倍、2.1 倍に達しており、優れた研磨能力を有することがわかった。また、アミド系エポキシパッド DE-0 の仕上げ面粗さは、アミン系エポキシパッド NE-D、NE-S と同等であり、ウレタンパッド U より向上することが確認された。図 5 は工作物の仕上げ面状態を示す。ウレタンパッドで研磨した工作物の表面には規則的な加工マークが確認できない。それに対して、エポキシパッドを使用した場合には研磨後の工作物の表面に研削加工と相似する方向性のある加工マーク (白い矢印の方向) が確認された。特にアミド系エポキシパッドを使用した場合、加工マークが最も鮮明に確認された。エポキシパッドは砥粒に対する保持能力が高いため、研磨パッドにほぼ固定された砥粒が工作物を擦った痕だと考えられる。このような加工マークが現れることは、砥粒が研磨パッドにより保持され工作物と砥粒の相対速度が向上し研磨能率が高まった原因の根拠ともいえる。

また、研磨条件による各種研磨パッドの研磨特性の変化を調査した。図 6(a) はスラリーに含まれる酸化セリウム砥粒の濃度と研磨能率の関係を示す。すべてのエポキシパッドはウレタンパッドに比較して砥粒濃度によらず高い研磨能率が得られることが分かった。ウレタンパッドはエポキシパッドより砥粒の保持性が低いため、高い砥粒濃度でも加工領域に十分な砥粒が供給できず低い研磨能率となったと考えられる。また、ウレタンパッドを使用した場合には砥粒濃度が高くなるにつれて研磨能

率が高くなるのに対して、エポキシパッドを使用した場合には砥粒濃度が 1.0 wt% に達したら飽和する傾向が見られる。その傾向は、アミド系エポキシパッドが最も顕著に表れている。エポキシパッドは砥粒の保持能力が高く低い砥粒濃度でも多くの作用砥粒数が得られるためだと考えられる⁴⁾。逆に砥粒濃度が高すぎると砥粒が複層になったり砥粒同士が互いの動きを妨げたりすることが生じるため、1 wt% 程度になると作用砥粒数が飽和し研磨能率が一定になったと考察した。図 6(b) は、研磨パッドの回転速度が研磨能率に与える影響を示す。低回転領域においては、研磨パッドの回転速度が高くなるほど研磨パッドに保持される砥粒と工作物との相対速度が大きくなり研磨能率が向上しており、プレストンの法則に一致する。しかし、研磨パッドの回転速度が高速になると研磨パッドの表面に遊離している砥粒に作用する遠心力も大きくなるため、砥粒が研磨パッドから離れ研磨に作用する砥粒数が減少してしまう。ウレタンパッドはエポキシパッドに比べ、砥粒の保持能力が低いため、研磨パッドの回転速度が 120 rpm 以上になると砥粒の飛散が激しくなり研磨能率が低下している。アミン系エポキシパッドはウレタンパッドより砥粒の保持能力が高く 150 rpm に達すると研磨能率が減少する傾向が確認されている。それらに対して、アミド系エポキシパッドは 150 rpm でも砥粒が保持できるため、研磨能率が低下しないことが分かった。

4. アミド系硬化剤の配合率について

アミド系硬化剤を用いたエポキシパッドはアミン系エポキシパッドまたはウレタンパッドより研磨特性が向上することが確認された。本章ではアミド系硬化剤の性能を最大に引出すためにアミド系硬化剤の配合率による研磨特性の影響について検討する。表 3 に示すようなアミド系硬化剤の配合比を調整したエ

Fig.8 Surface states of epoxy-resin pads and urethane pad after polishing test

ポキシパッドを作製した。アミド系硬化剤の配合率を減少するほど研磨パッドの硬度が低下することが確認された。また、アミン系硬化剤 D-230 と D-2000 をアミド系硬化剤 S と併用し、アミド系硬化剤の比率を変化しても硬度が Asker-D 54 程度のアミド系エポキシパッドの作製を可能にした。

図 7 は作製した各種研磨パッドの研磨特性を示す。アミド系エポキシパッド DE-0, DE-1, DE-2 の研磨結果にはアミド系硬化剤の配合率が減少するとともに研磨特性が低下する傾向が見られるが、研磨パッドの硬度も同時に変化するためアミド系硬化剤の配合率の影響だと判断しきれない。アミン系硬質硬化剤 D-230 も配合したパッド DE-3, DE-4 はアミド系エポキシパッド DE-0 と硬度が同等であるため、比較するのが妥当である。アミド系硬化剤の配合率の減少とともに研磨能率が低下することが確認された。エポキシパッドに配合したアミド系硬化剤の配合率が研磨パッドの特性に大きく影響を与えることがわかった。

5. エポキシ樹脂研磨パッドの表面状態に関する検討

3CCD リアルコンフォーカル顕微鏡 (Optelics H1200, レーザテック(株製)) を用いて研磨後の研磨パッドの表面状態を計測した。図 8 はそれぞれの研磨パッドの表面状態を示す。アミド系エポキシパッドはアミン系エポキシパッドより多くの細かい凹凸部を有することが確認された。さらに、アミド系硬化剤 S の配合比が高いほどパッド表面の凹凸部分が細くなる。畝田ら¹⁰⁾¹¹⁾は、研磨パッドと工作物の接触点数および接触点間隔が研磨能率に大きく影響することを確認している。エポキシパッドの表面に凹凸が形成される原因については以下のように樹脂の硬化速度から分析した。図 9 に示されるようにそれぞれの硬化剤を単独に用いた場合、アミン系硬化剤に比べてアミド系硬化剤と主剤の反応速度はるかに高く硬化時間が短いことが分かる。攪拌・加熱により主剤と硬化剤が反応するが、アミド系硬化剤 S は末端のアミン基と中間のアミド基 (=O による共鳴効果) が主剤と反応するため、反応速度が速く優先的に反応する。先に硬化した樹脂の周囲にある反応速度が低いアミン系硬

Fig.9 Curing speed with using various curing agent

Fig.10 Cross-section structure of epoxy-resin pad

Fig.11 Relationship between material removal rate and surface roughness of polishing pads

硬化剤 D-2000 や反応しきれない主剤が存在するため、アミド系硬化剤 S と主剤の硬化物が大きく成長できない。その後、軟質硬化剤 D-2000 と主剤が反応し始まる。その結果、図 10 に示すような硬い部分と柔らかい部分の両方がある硬化物（研磨パッド）が形成される。大径ガラスと小径研磨パッドを用いたローカル研磨を行い、単一硬化剤が使用された硬質樹脂または軟質樹脂の摩耗速度を調査した。軟質樹脂の摩耗速度が $17.5 \mu\text{m/h}$ に対し、硬質樹脂が $3 \mu\text{m/h}$ であった。樹脂の硬度により研磨中の摩耗速度が異なるため、研磨中に軟質の部分が先に摩耗され研磨パッド表面に微細な凹凸が形成したと考えられる。

パッド表面の微細凹凸は、研磨領域（工作物とパッドの隙間）への砥粒供給促進や工作物とパッドの接触点間隔の減少¹⁰⁾につながると考えられる。図 11 には、各種研磨パッドの表面粗さ RSm（要素の平均長さ）と研磨能率の関係を示す。RSm の値が小さいほど研磨能率が高いことが分かる。また、ウレタンパッド U とエポキシパッド NE-S、またはエポキシパッド DE-1 と DE-4 においては、パッドの表面粗さ RSm が同程度であるのに研磨能率が大きく異なることが確認される。それは、パッドとスラリーの親和性による影響だと考えられる。したがって、アミド系エポキシパッドにおいては、アミド基による研磨パッドの親水性の向上と、硬化速度の違いによる微細凹凸の形成という総合作用があるため、優れた研磨特性が得られたものと考えられる。

6. 結 言

本研究では、エポキシ樹脂研磨パッドの温度特性および研磨特性を改善するため、エポキシ樹脂の硬化剤に着目しアミド系エポキシ樹脂研磨パッドを開発した。また、研磨パッドの表面状態の形成メカニズムおよび表面状態と研磨特性の関係について検討した。得られた結果は以下に示す。

- (1) アミド系エポキシ樹脂研磨パッドはアミン系エポキシ樹脂研磨パッドに比べ、親水性とガラス転移温度が高いことと、温度による硬度変化が小さいことが確認された。
- (2) アミド系エポキシ樹脂研磨パッドはウレタン樹脂研磨パッドやアミン系エポキシ樹脂研磨パッドに比べ、スラリーとの親和性が高いため砥粒の保持特性がよく低い砥粒濃度、高い回転速度という砥粒が少ない研磨条件でも優れる研磨能率が得られることが分かった。

- (3) 硬化剤が主剤との反応速度により硬度が異なる部位が形成され、研磨時に研磨パッドの表面に微細な凹凸が生じることがわかった。多種類の硬化剤の配合により研磨パッド表面の凹凸を調整することが可能である。
- (4) エポキシ樹脂研磨パッドはパッドの表面構造と樹脂材料の親水特性の総合作用により研磨特性が大きく変化する。本研究の範囲内では表面凹凸が微細ほど、親水性が高いほど、優れる研磨能率が得られることが確認された。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会（JSPS）による学術研究助成基金助成金（基盤研究（C）17K06096）の支援を受けて行われたものであり、謝意を表します。本研究の実施にご協力いただいた立命館大学の元大学院生中川貴裕様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 一廻徳直聡, 村田順二, 谷泰弘, 張宇, 山田美幸, 楊原武: 滞留性を考慮した複合砥粒の開発とその研磨特性, 日本機械学会論文集 C 編, **78**, 790 (2012) 2302.
- 2) Yu Zhang and Yasuhiro Tani, Application to a High-performance Lapping Plate of Stainless Steel, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, **6**, 5 (2017) 343.
- 3) 川波多裕司, 桐野宙治, 張宇, 谷泰弘: 金属短繊維含有ラッピング工具の開発, 精密工学会誌, **83**, 7 (2017) 672.
- 4) 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) 2153.
- 5) 野村信幸, 望月隆弘, 澤島智也, 広川良一, 若杉博雄: 砥粒の保持特性を大幅に向上させた多孔質エポキシ樹脂研磨パッドの開発, 精密工学会誌, **81**, 2 (2015) 108.
- 6) 畠田道雄, 松永敬弘, 高橋佳宏, 澁谷和孝, 中村由夫, 市川大造, 石川憲一: サファイア CMP における研磨パッド表面温度と研磨レートとの関係, 砥粒加工学会誌, **60**, 8 (2016) 448.
- 7) 阿部俊彦: アミン系エポキシ硬化剤について, 色材協会誌, **88**, 1 (2015) 17.
- 8) 総説 エポキシ樹脂 基礎編 I, エポキシ樹脂技術協会, (2007) 272.
- 9) 村田順二, 稲澤求, 谷泰弘, 張宇: エポキシ樹脂研磨パッドの粘弾性と研磨特性, 日本機械学会論文集, **80**, 817 (2014) SMM0253.
- 10) 畠田道雄, 岡部憲嗣, 守屋紀彦, 澁谷和孝, 石川憲一: ダブルリズムを用いた接触画像解析に基づくポリシングパッド表面性状の定量評価手法の開発に関する研究, 精密工学会誌, **77**, 9 (2011) 883.
- 11) 畠田道雄, 高橋佳宏, 澁谷和孝, 中村由夫, 市川大造, 石川憲一: Si-CMP の研磨レートに及ぼす要因分析, 砥粒加工学会誌, **58**, 10 (2014) 652.