電着工具用の部分 Ni 被覆ダイヤモンド砥粒の開発

張 宇^{*1}, 谷 泰弘^{*1}, 村田 順二^{*1}

Development of partially Ni-coated diamond abrasives for electroplated tools

Yu ZHANG^{*1}, Yasuhiro TANI^{*1} and Junji MURATA^{*1}^{*1} Ritsumeikan Univ., Dept. of Mechanical Engineering
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

Received 4 February 2014

Abstract

Electroplated diamond tools are developed for grinding hard and brittle materials because of its low wear resistance. To improve the grinding performance of diamond tools, a single layer of diamond abrasives is electroplated on the tool body. The electroplating process delivers a homogeneous layer with diamonds embedded in nickel alloy at high speed. In order to facilitate the adhesion of diamond abrasives, the diamond abrasives are coated by nickel membrane. Therefore, the cutting edges of diamond abrasives are hidden and the grinding performance of diamond tools decreases. Moreover, a phenomenon of abrasive aggregation generates and leads to bad abrasive distribution. In this paper, in order to solve those problems, authors developed partially Ni-coated diamond abrasives, which were produced from the commercially available full Ni-coated diamond abrasives. The adhesion characteristics of partially Ni-coated diamond abrasives were discussed, too. The grind-abilities of diamond tools, which are fabricated with using non-coated diamond abrasives, Ni-coated diamond abrasives and partially Ni-coated diamond abrasives, have been evaluated. As the results, the problems when using non-coated diamond abrasives or Ni-coated diamond abrasives could be solved and the grind-abilities of electroplated tools were improved with using partially Ni-coated diamond abrasives.

Key words : Diamond tool, Abrasive grain, Electroplating, Grinding force, Abrasive distribution, Tool life

1. 緒 言

世界のエネルギー政策における太陽光発電の重要性は近年ますます高まっている。結晶系シリコン太陽電池に使われるシリコンウェーハはマルチワイヤソーでシリコンインゴットをスライシング加工することにより製造される。スライシング加工工程においては、ピアノ線を高速走行させながら加工液に GC 砥粒を懸濁させたスラリーをかける研磨切断法とダイヤモンド砥粒をピアノ線に電着したダイヤモンドワイヤ工具を走行させて水溶性研削液のみをかける研削切断法がある (Webster and Tricard, 2004)。研削切断方式は研磨切断方式に比べて 2~3 倍程度の切断能力を有するため、現在シリコン、サファイア、SiC などの硬脆材料の切断に研削切断方式の普及が進んでいる。電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造工程では、砥粒の析出速度と砥粒の保持力を向上するために一般的にニッケルなどの金属皮膜が被覆された導電性を有するダイヤモンド砥粒が使用されている (千葉他, 2003)。一方、ガラス、セラミックス等の硬脆材料の研削には形状精度、耐摩耗性に優れた電着ダイヤモンドホイールがよく利用されている (前田, 2013)。電着ダイヤモンドホイールについては一般的に砥粒をめっき液中に懸濁し共析させるめっき法や砥粒を沈降させて析出金属により粒子を埋め込んでいく沈降共析法などの方法 (榎本他, 1989) で製造され、砥石の切れ味を高めるため金属被覆のないダイヤモンド砥粒が使用されている。一般に電着

工具の目立てを行うドレッシング作業においては、硬い金属結合剤が使用されているためドレッシング作業が困難である。電着ダイヤモンドワイヤ工具のドレッシングは細いワイヤの円周における全ての箇所をドレッシングする必要があり、より一層難しくなる。そのため、ドレッシングを必要としない電着ダイヤモンドワイヤ工具の開発が期待されている。

それを実現するために著者らはダイヤモンド砥粒の表面状態と砥粒の工具台金への析出状態との関連性に注目している。本研究ではダイヤモンド砥粒の一部分のみがNi皮膜で覆われた部分Ni被覆ダイヤモンド砥粒を提案する。この砥粒を今後部分Ni被覆砥粒と称する。これに対して通常の全面がNiで被覆された砥粒を全面Ni被覆砥粒と称する。その部分Ni被覆ダイヤモンド砥粒の電着工具母材への析出状態について検討した。そして、全面Ni被覆ダイヤモンド砥粒および非金属被覆ダイヤモンド砥粒と比較しながら、試作した部分Ni被覆ダイヤモンド砥粒を用いた際の電着工具の製造条件を検討した。被覆状態を変えた各種砥粒を用いて作製した電着工具を使用し、硬脆材料を代表するシリコンとガラスの研削実験を行い、研削抵抗により電着工具の切れ味を評価した。その結果、開発した部分Ni被覆ダイヤモンド砥粒を使用した場合、非金属被覆ダイヤモンド砥粒より電着工具上の砥粒保持力が高く、全面Ni被覆ダイヤモンド砥粒より切れ味が優れることが確認できたので報告する。

2. 部分金属被覆ダイヤモンド砥粒の提案

現在、電着ダイヤモンド工具の製造においてはめっき液にダイヤモンド砥粒を懸濁させた電気ニッケル複合めっき法が生産現場でよく利用されている。電着工具を製造する場合には、砥粒の切れ味を考慮して非金属被覆のダイヤモンド砥粒が多用されている。めっき層の焼けを生じさせないためにこの複合めっき工程では電流密度を 1 kA/m^2 以下と低く設定されており、電着速度が遅い。さらに、導電性のないダイヤモンド砥粒が使用されているため、砥粒とめっき層の密着性が低くなる。そこで、電着ダイヤモンドワイヤ工具では、砥粒とめっき層との密着性や共析率を向上するため、金属被覆ダイヤモンド砥粒が用いられている。金属被覆ダイヤモンド砥粒を使用することにより、ダイヤモンド砥粒を工具台金に析出する複合めっき工程の時間が短縮でき、電着工具の製造速度を著しく向上させることができる。しかし、金属被覆砥粒を使用すると突出した砥粒先端にめっきが多く析

Fig. 1 Effect of nickel membrane coated on abrasives on growth of electrodeposited layer along the surface of diamond abrasives. The Ni-coated abrasives aggregate seriously on the tool surface and the nickel membrane coated on abrasives causes a decrease in the grinding performance of diamond tools. That the adhesion between the electrodeposited layer and the non-coated abrasives is low leads to the low grip force of abrasives. The low grip force of the non-coated abrasives and the problem of aggregated abrasives could be improved with using the partially Ni-coated abrasives.

出するため電着工具の切れ味が低下してしまう。また、複合めっきを行う際に砥粒の凝集共析が顕著となる。そこで、著者らは金属被覆ダイヤモンド砥粒と非金属被覆ダイヤモンド砥粒のメリットを活かすことができ、複合めっき液中で低い砥粒濃度でも砥粒の析出が速く、切れ味が優れる工具の実現のため、ダイヤモンド砥粒の一部のみが金属で覆われる部分金属被覆ダイヤモンド砥粒を提案する。

砥粒の導電性に関して砥粒近傍のめっき層の成長について詳しく論述されている(佐藤, 鈴木, 1982, 1987)。複合電気めっきを行う際に導電性のある砥粒を使用した場合には、図 1(a)に示すように砥粒の全面が導電性皮膜に覆われるため台金に析出した砥粒が陰極の一部となり、突出した砥粒の上に金属皮膜や砥粒が多く析出する。その結果、砥粒の析出が速く砥粒の保持力が高くなるが、砥粒の凝集が起きて工具上の砥粒分布が不均一になる。それに対して、導電性のない砥粒を使用した場合には図 1(b)に示すように電着工具上の砥粒と台金の接触面積が少ないため、砥粒の保持力が低くなる。また、砥粒の表面には導電性がないため、析出した砥粒の表面の上にさらに砥粒や金属皮膜の析出が生じず砥粒の凝集がほとんど生じないため切れ味が良いが、析出速度が遅くなる。これらの問題を解決するために図 1(c)に示すように切れ刃の一部分に金属皮膜がない砥粒を作れば工具に析出した砥粒の分散性が良く保持力の高い電着工具の作製が可能となるものと思われる。そこで、著者らは、前述したように電着工具の問題点を克服するため砥粒表面の一部分だけに導電性を持つ Ni 皮膜で被覆された部分 Ni 被覆ダイヤモンド砥粒を開発した。部分 Ni 被覆砥粒の上部には金属皮膜がないため、必ず砥粒の導電性のある部分が下になって台金に析出しめっき層が成長する。砥粒の全面がめっき層に覆われないため、保持力が高く切れ味の良い電着工具の作製が可能となる。

部分 Ni 被覆砥粒の作製方法に関しては、非被覆砥粒表面の一部分に無電解 Ni めっきにより Ni 皮膜を形成させ

Fig. 2 Production method of partially Ni-coated abrasives. The Ni-coated abrasives were embedded partially in wax and the partial nickel membrane exposed to the stripping bath was stripped from abrasives. The wax was dissolved in toluene and the partially Ni-coated abrasives were filtered by a paper filter.

Fig. 3 Elemental analysis of partially Ni-coated abrasives. A partial nickel membrane coated on abrasives was stripped from the Ni-coated abrasives. Both nickel and carbon (diamond) were confirmed on the surface of partially Ni-coated abrasives.

る部分めっき法と全面 Ni 被覆された砥粒表面の一部分の Ni 皮膜を剥離させる部分剥離法がある。部分めっき法に使用されるダイヤモンド砥粒の前処理により砥粒と Ni 皮膜の密着性が大きく異なるため、本研究では部分剥離法により部分 Ni 被覆砥粒を作製した。なお、部分剥離法で作成しても、部分めっき法で作成しても、電着工具の研削性能はほとんど変化がないことが確認されている（中川他，2008）。図 2(a)には、部分剥離法による部分 Ni 被覆砥粒の作製プロセスを示す。まず、厚み 2 mm の耐薬品性が優れるステンレス鋼板 (SUS430, □150×150 mm) 上にホットプレートにより 120 °C に加熱することでワックス (KPW-A, 九重電気 (株) 社製) を 20 μm 程度塗布した。市販の全面 Ni 被覆ダイヤモンド砥粒 (粒径: 30~40 μm, 55 wt%Ni) をワックス上に均一に散布し、上部よりスポンジを押し当て加熱により軟化させたワックス内に砥粒を押し込んだ。この状態では、図 2(b)に示されるように砥粒がワックスの表面から半分程度露出している。この砥粒を散布した鋼板を表 1 に示したニッケル剥離浴に浸漬し、ワックスに覆われていない部分の Ni 皮膜を剥離させた。その結果、図 2(c)に示されるように剥離終了後に元素分析を行った結果、砥粒表面にニッケルが検出されず、砥粒表面には炭素（ダイヤモンド）が露出することが確認できた。その後、ステンレス鋼板をトルエンの中に浸し、ワックスを完全に溶かし、脱落した砥粒を含んだ溶液を紙フィルタでろ過することにより部分 Ni 被覆砥粒を取り出した。

図3にはエネルギー分散型X線分光器（EDX, INCA x-act, Oxford Instruments社製）を用いて、作製した部分Ni被覆砥粒の表面元素分析を行った結果を示す。砥粒表面の一部分のNi皮膜がなくなりダイヤモンド（炭素）が露

Table 1 Conditions of stripping nickel membrane

Stripping agent (Okuno Chemical Industries Co., Ltd)	Top rip PF-1	180 g/L
	Top rip F-85	90 g/L
Operating temperature	75 °C	
Number of rotation of agitating device	500 rpm

Fig. 4 Ratio of carbon and nickel atoms on the surface of partially Ni-coated abrasives. The percentage of carbon atoms increased in proportion of stripping time. In the case of stripping time of 50 min, almost all of nickel membrane was stripped from the Ni-coated abrasives.

Fig. 5 Surface state of partially Ni-coated abrasives stripped in 30 min, 40 min and 50 min. In the case of stripping time of 30 min, the portion of stripping nickel membrane was not removed perfectly and denoted by small arrows in the left figure. The coverage of nickel membrane coated on abrasives decreased with increasing the stripping time.

出していることが確認できる。剥離液への浸漬時間を30 min, 40 min, 50 minと変化させて得られた砥粒を一方向からEDX分析することによりCとNiとの原子数の割合を求めた。その結果、図4に示すように剥離時間が長くなるにつれて炭素の割合が増えることが分かった。剥離時間が50 minの場合には砥粒とワックスの隙間に剥離液が侵入し、砥粒全面のNi皮膜がほとんど剥離されたものと考えられる。図5は作製した部分Ni被覆砥粒のSEM写真を示す。30 minの場合ではワックスの表面に露出したNi皮膜が完全に剥離されていないが、40 minの場合には砥粒の約半分の部分が剥離されていることが確認できる。50 minの場合では、砥粒の表面にわずかなNi皮膜しか残っていない。本研究では剥離時間が30 min, 40 min, 50 minの部分Ni被覆砥粒（それぞれが今後部分Ni被覆砥粒30 min, 40 min, 50 minと称する）を用いて電着工具を作製し、それらの加工特性を評価した。

3. 電着工具の作製

3・1 電着工具の製造装置および製造条件

細線であるワイヤでは砥粒の凝集状態観察が困難であるため、本研究では製作した部分Ni被覆砥粒と市販の全面Ni被覆砥粒および非被覆砥粒を複合電気めっき法により、あらかじめアルカリ脱脂処理および酸洗処理（齋藤他, 2011）を施した直径10 mmの丸棒（S45C）に電着した。図6には電気ニッケルめっき実験装置のイメージ図を示す。陽極とした純ニッケル丸棒をビーカーの内壁に固定した。工具母材となるS45C丸棒を回転装置の軸の下部に取り付け、丸棒の周囲に均一なめっきができるように丸棒をゆっくりと回転させながらめっきを行った。電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造速度は10 m/min以上を目標としているため、丸棒の回転速度が電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造速度と同じ程度になるように300 rpmに固定した。回転装置の軸の金属芯の上端と直流電源の陰極を接続し金属芯を通して丸棒に通電した。ビーカーは加熱と攪拌の機能をもつマグネティックスターラの上に載せ、めっき浴を加熱しながらめっき浴を攪拌した。前述したダイヤモンド砥粒（粒径：30~40 μm ）をめっき浴に分散させるため、スターラの回転数は1000 rpmに固定した。電着ダイヤモンド工具の作製におけるめっき工程は一般的にストライクめっき、複合めっき、後めっきの3ステップで行われる。ウッド浴は、強酸浴で陰極付近に大量の水素ガスを発生し、陰極付近において還元雰囲気中で工具母材の表面酸化物を還元しながらめっきす

Fig. 6 Schematic diagram of plating setup for manufacturing diamond tools. The tool body was rolled by a roller in plating process. 2 nickel bars were fixed on the beaker in parallel with the tool body. The plating bath was stirred by a stirring bar. The tool body was connected to the electronic power supply through the core metal of shaft of roller.

Table 2 Compositions of plating baths and plating conditions

	Strike-plating	Complex plating	After-plating
Composition	Nickel chloride 250 g/L Hydrochloric acid 100 mL/L	Nickel sulfamate 450 g/L Nickel chloride 10 g/L Boric acid 30 g/L	Nickel sulfamate 450 g/L Nickel chloride 10 g/L Boric acid 30 g/L Brightener (NSF-E) 5 mL/L
Temperature	25 °C	60 °C	
Current density	1 kA/m ²	1.5 kA/dm ²	
Plating time	150 s	5~60 s	200 s

ることが可能で母材とめっき層との密着性が良くなる．そのため，ストライクめっきにはウッド浴を選択した．砥粒を析出する複合めっき浴と砥粒の保持力を高める後めっき浴には，電着応力が小さく成膜速度が速いスルファミン酸ニッケル浴を選択した．具体的なめっき浴の組成およびめっき条件を表 2 にまとめた．ストライクめっきの膜厚は $0.5\ \mu\text{m}$ になるようにストライクめっきの時間を $150\ \text{s}$ とした．後めっきの条件では，めっきの成膜速度が $3\ \mu\text{m}/\text{min}$ であるため，砥粒径の $1/3$ 程度 ($10\ \mu\text{m}$) が埋め込まれるように後めっきの時間を $200\ \text{s}$ とした．複合めっきの時間は砥粒の析出量に影響を与えるため，砥粒の析出量を考慮しながら複合めっきの時間を調整した．また，高成膜速度の維持のため塩基性炭酸ニッケルとアミド硫酸を用いて複合めっき浴と後めっき浴が pH4 になるように管理した．

3・2 複合めっき条件による電着工具表面の砥粒の析出量と分布

前章に述べたように砥粒表面の金属被覆率は工具に析出した砥粒量に影響を与え，部分 Ni 被覆砥粒の析出量が全面 Ni 被覆砥粒と非被覆砥粒の間になると考えられる．作製した部分 Ni 被覆砥粒と市販の非被覆砥粒および全面 Ni 被覆砥粒を用いて同一条件で電着した工具の表面に析出した砥粒の分布状態は図 7 に示される．非被覆砥粒の場合には砥粒がほとんど析出していない．全面 Ni 被覆砥粒を使用した場合には工具に析出した砥粒が最も多いが，砥粒同士が凝集して析出する傾向が見られる．それに対して，部分 Ni 被覆砥粒を使用した場合には全面 Ni 被覆砥粒と比べて析出砥粒数はやや少ないが，砥粒の分散性がよくなっている．また，砥粒の Ni 皮膜剥離時間が長いほど析出した砥粒の量が少なくなることが確認できる．千葉らは，金属材質が異なる被覆砥粒を用い，砥粒の析出量が砥粒導電性に密接に関係し，導電性が高いほど砥粒が析出しやすいと論じた（千葉他，2003）．その結果通り，本研究に使用された砥粒は全面 Ni 被覆砥粒，部分 Ni 被覆砥粒 30 min，40 min，50 min，非被覆砥粒の順に砥粒表面の金属皮膜が少なく導電性が悪くなったため，砥粒の析出量が低くなったと考えられる．

一般的な電着ダイヤモンドワイヤ工具は砥粒密度が $150\ \text{mm}^2$ 程度であるため，全面 Ni 被覆砥粒，部分 Ni 被覆砥粒および非被覆砥粒を用いて複合めっきの条件を変化させ，析出した砥粒の量を調べた．図 8 には複合めっき浴中の砥粒濃度，複合めっき時間等を変化させた際，工具表面の単位面積あたりに析出した砥粒個数（砥粒密度）を示す．いずれの砥粒においても複合めっき浴中の砥粒濃度や複合めっき時間が増えるほど析出した砥粒の量が増加することがわかった．非被覆砥粒の場合には，析出した砥粒密度が $150\ \text{mm}^2$ に達するためには浴中の砥粒濃度を $40\ \text{g/L}$ ，複合めっき時間を $60\ \text{s}$ にしなければならない．全面 Ni 被覆砥粒を使用する場合には， $0.5\ \text{g/L}$ の低砥粒濃度，複合めっきの時間を $5\ \text{s}$ にして目標の析出量が得られる．それに対しては，部分 Ni 被覆砥粒 30 min の場合には，浴中の砥粒濃度を $1\ \text{g/L}$ ，複合めっき時間を $5\ \text{s}$ にすれば $150\ \text{mm}^2$ の砥粒密度が得られ，全面 Ni 被覆砥粒より砥粒の析出がやや遅れるが非被覆砥粒に比べて著しく速いことが分かった．剥離時間が長い部分 Ni

Fig. 7 Distribution states of various abrasives deposited on tools. In the case of using the Ni-coated abrasives, a massive amount of abrasives aggregated and formed into abrasive lumps on the tool surface. There were few non-coated abrasives which were deposited on the tool surface and the aggregated abrasives were the fewest. The distribution state of partially Ni-coated abrasives was at the level intermediate between the Ni-coated abrasives and the non-coated abrasives.

被覆砥粒 50 min では、砥粒濃度を 10 g/L、複合めっき時間を 60 s にする必要がある。部分 Ni 被覆砥粒を使用することにより、複合めっき時間や複合めっき浴中の砥粒濃度が全面 Ni 被覆砥粒よりやや高いが、非被覆砥粒よりかなり低いことが確かめられた。

電着工具表面の砥粒密度と砥粒分布状態は工具の研削特性に大きく影響を与えると考えられる。そのため、電着ダイヤモンドワイヤ工具と同じく、砥粒密度が 150 mm^{-2} 程度の電着工具を作成し、工具表面の砥粒分布状態を調べた。砥粒の分布状態を数値的に評価するため、一辺 $150 \mu\text{m}$ 四方形の領域に析出した砥粒の個数を 200 箇所数え、砥粒の個数を統計的に分類した。砥粒の凝集に関しては、砥粒間の中心距離が $40 \mu\text{m}$ 以内の砥粒個数を数え、全体の砥粒数との割合で砥粒凝集率を定義した。図 9 には工具表面に析出した各種砥粒の凝集率と個数分布頻度を示す。全面 Ni 被覆砥粒を使用した工具には、凝集した砥粒がかなり多く約 70 % に達し、砥粒が存在しない領域と 7 個以上の領域が 30 % 程度占める。非被覆砥粒の場合には、析出した砥粒の中に凝集率が最も低く 40 %

Fig. 8 Effect of complex plating conditions on density of abrasives on tool surface. To improve the density of abrasives deposited on tool surface, it was effective to raise the abrasive concentration in complex plating bath or the complex plating time. To reach the same abrasive density level, a large quantity of non-coated abrasives and long complex plating time were necessary. The necessary quantity of abrasives and the complex plating time depended on the coverage of nickel membrane on the surface of abrasives.

Fig. 9 Relationship between grain distribution on tools and kinds of abrasives. The distribution of non-coated abrasives was the best and the aggregated abrasives were the fewest. The distribution state and the ratio of aggregated partially Ni-coated abrasives were at the level intermediate between the Ni-coated abrasives and the non-coated abrasives.

以下になっている。それらの砥粒に対しては、開発した部分 Ni 被覆砥粒は、非被覆砥粒より砥粒の凝集率がやや高いが、全面 Ni 被覆砥粒より大きく低減することができた。部分 Ni 被覆砥粒 30 min と 40 min の場合には分布状態の差異がほとんど見られず全面 Ni 被覆砥粒と比べて凝集した砥粒の量が 15 % 程度少なくなることが確認された。砥粒が存在しない領域と 7 個以上の領域においても、部分 Ni 被覆砥粒が全面 Ni 被覆砥粒に比べて半分程度低減することがわかった。部分 Ni 被覆砥粒 50 min は非被覆砥粒と変わらないほど砥粒分布状態がよいことが確認できる。表面に導電性がある砥粒の付近には電位が高く砥粒が析出しやすいためだと考えられる。部分 Ni 被覆砥粒を使用すると全面 Ni 被覆砥粒の場合により砥粒の凝集共析が抑制でき、電着工具上の砥粒の分散性を改善する効果があることが確かめられた。

部分 Ni 被覆砥粒においては Ni 皮膜のない部分が研削工具上で台金に対して外向きにならないと電着工具の切れ味の向上を実現することができないため、工具に析出した部分 Ni 被覆砥粒の向きを観察した。図 10 は工具表面に電着された部分 Ni 被覆砥粒 50 min の SEM 画像と炭素分布図 (EDX) を示す。砥粒のあるところには炭素がほとんど観察されるため Ni 皮膜のない部分が外向きになっていることが確認できる。導電性のない非被覆砥粒が大変析出しにくいことと、導電性のある全面 Ni 被覆砥粒が析出しやすいことを前述された。砥粒が液中にランダムに運動し部分 Ni 被覆砥粒のすべての面が台金に接触する頻度が同じと考えられるが、砥粒のダイヤモンド部分には導電性がなく台金に接触しても固着されないまたは固着されにくいと推測できる。それに対し、Ni 皮膜の部分が台金に接触すると接触部分に電気が流れめっき層が高速に成長し砥粒が固着されやすいと考えられる。なお、部分 Ni 被覆砥粒表面 Ni 膜のどの部分が台金に固着されるのが判断することができなかった。したがって、析出した部分 Ni 被覆砥粒が色々な方向に向かずダイヤモンドが露出した部分が台金に対して外向きになりやすいと定性的に考察した。また、図 5 に示されたように部分 Ni 被覆砥粒の Ni 皮膜と砥粒の間に剥離液が多少侵入し隙間が生じ砥粒の保持力が低下することが懸念されたが、図 1(c)と図 10(a)に示されるように砥粒と Ni 皮膜の界面にはその隙間が確認されておらず、電着中にめっき液が侵入し析出したニッケルより埋められたと推察される。以上の理由により、部分 Ni 被覆砥粒を用いて作製した研削工具は全面 Ni 被覆砥粒と非被覆砥粒の長所を有し、砥粒の保持力が高いまま切れ味がよいものと考えられる。

4. 電着工具の研削特性評価

全面 Ni 被覆砥粒、部分 Ni 被覆砥粒および非被覆砥粒を用いて砥粒密度が 150 mm^{-2} 程度の電着工具を作製し、グライディングセンタ (VKC45, 日立精機株式会社製) を用いて硬脆材料の端面研削を行い、電着工具の研削特性を評価した。図 11 は研削実験の様子を示す。被研削材は寸法が $30 \times 50 \times 8 \text{ mm}$ の板状のソーダガラス、多結晶シリコンの 2 種類を用意した。被研削面は $30 \times 8 \text{ mm}$ の面である。電着ダイヤモンドワイヤ工具を使用する際の走行速度は一般的に 700 m/min 程度である。本実験では、電着ダイヤモンドワイヤ工具の使用条件に参考し、研削条件を次のように設定した。電着工具の回転数を 8000 rpm 、送り速度を 100 mm/min 、切込み量を $60 \text{ }\mu\text{m}$ と一定にした。研削液は水溶性研削液 (MC-80C, トラスコ中山株式会社製) を水で 30 倍に希釈したものである。研削抵抗は、三軸切削動力計 (9257B, キスラー社製) を用いて法線方向の研削抵抗 (厚みで割ったもの) を測定した。

Fig. 10 Orientation of partially Ni-coated abrasives (50 min) and EDX analysis of carbon on tool. It was confirmed that the portion of diamond (carbon) was not embedded in the electrodeposited layer and deposited on the tool surface outwardly.

図 12 は作製した電着工具を用いてガラスとシリコンを研削した際の単位幅当りの研削抵抗および工作物の表面粗さを示す。この結果から砥粒表面の Ni 皮膜の被覆率により電着工具の研削特性が異なることが分かる。部分 Ni 被覆砥粒を用いた工具の場合には、全面 Ni 被覆砥粒の工具に比べ研削抵抗が低くなっている。非被覆砥粒を使用した場合に、研削抵抗が最も小さくなった。これは、図 1 に示されるように電着工具の表面に析出した非被覆砥粒または部分 Ni 被覆砥粒の表面には Ni 皮膜がなく、本来のダイヤモンド砥粒の鋭い切れ刃を持つため、研削抵抗が小さくなったと考えられる。部分 Ni 被覆砥粒を作製する際の剥離時間が長くなるにつれて研削抵抗が小さくなっている。図 4 に示されるように剥離時間が長いほど砥粒表面の Ni 皮膜が少なく、ダイヤモンド砥粒の露出部分が増えたためと考えられる。また、工作物の材質によって研削動力が異なり、ガラスの場合にはシリコンより研削抵抗が倍程度高くなっている。ガラスは非晶質で粘り強い難研削材料と知られており、シリコンと比べて硬くて工具が滑りやすいため研削抵抗が増大したと考えられる。

工作物研削面の表面粗さについては、図 12 に示されるように部分 Ni 被覆砥粒を使用した工具の場合は全面 Ni 被覆砥粒の工具の場合より表面粗さがやや低くなることがわかった。全面 Ni 被覆砥粒の工具の場合には凝集した砥粒の量が多く砥粒の分散性が悪いため砥粒間隔のばらつきが大きい。さらに、図 1 に示されるように全面 Ni 被覆砥粒が台金の半径方向にも凝集し、切れ刃の高さが揃っていないため、表面粗さの値が大きくなったのではないかと考察した。これに対し、部分 Ni 被覆砥粒または非被覆砥粒の工具の場合には、析出した砥粒の分散性がよ

Fig. 11 Schematic diagram of grinding tests. The workpiece was fixed on dynamometer. The grind-abilities of tools were evaluated in terms of grinding force and surface roughness of workpiece.

Fig. 12 Influence of kinds of abrasives on grinding force and surface roughness. The value of grinding force became smaller in order of Ni-coated abrasives > Partially Ni-coated abrasives > Non-coated abrasives. The trend of grinding force was applicable to the ratio of nickel atom on the surface of abrasives. The surface roughness depended on the distribution of abrasives on the tools.

いだけではなく、砥粒の先端に導電しないダイヤモンドとなっており砥粒が縦に凝集することが少なく砥粒の先端高さが揃っていたため、研削面の表面粗さがよくなったと考えられる。これらの結果を図9の結果と合わせて考慮すれば、電着工具に析出した砥粒の分布状態がよいほど研削面の性状が良くなることが明らかとなる。

電着ダイヤモンドワイヤ工具は砥粒層が単層であり、砥粒の保持力は工具寿命に大きく影響する。各種の砥粒の保持力を評価するため、研削条件の切込み量を $150\text{ }\mu\text{m}$ に増加しガラスの重研削を行った。図13には、各種の砥粒を使用した電着工具を用いて研削回数を増加しながら研削加工を行った際の研削抵抗の変化を示す。部分Ni被覆砥粒を用いた工具は、全面Ni被覆砥粒の工具により工具破壊に至るまでの研削抵抗が安定することが確認される。全面Ni被覆砥粒の場合、研削初期では砥粒先端に覆われたNi皮膜が摩耗されダイヤモンドが露出し研削抵抗が減少する傾向がみられる。部分Ni被覆砥粒の場合では、砥粒の先端にNi皮膜が少ないため、研削抵抗が安定して低い値を示したと考察した。工具寿命（研削回数）は砥粒周囲のNi皮膜分布状態および砥粒分布の均一性に大きく影響される。強固なNi膜で囲まれる砥粒が均一に工具上に分布した研削工具は工具寿命が長いと考えられる。非被覆砥粒を使用した場合には、わずか7回目の研削で工具が破壊した。図1に示されるように、非被覆砥粒が母材との接触する部分でめっき膜が凹んでいたため、砥粒の保持力が弱くなり、工具寿命が最も短かったと考えられる。これに対して、全面Ni被覆砥粒を使用した場合には、非被覆砥粒を使用する場合よりも工具寿命は伸びているが、12回研削以後には研削抵抗が急激に増大し工具のめっき層が剥がされ工具破損に至った。それは、一部の保持力が弱い砥粒が先に工具から脱落し、残った砥粒には大きな研削力が受けられ大規模の砥粒脱落が生じ、研削能力のないめっき層が工作物に直接に当たって剥がされることにより工具の破損に至ったと推察した。部分Ni被覆砥粒30 minと40 minを用いた工具の場合、13回研削まで工具が破損せずに研削できた。部分Ni被覆砥粒30 minと40 minの工具は全面Ni被覆砥粒の工具より工具寿命がやや長いことが分かった。砥粒表面のNi皮膜の剥離時間を適切に調整した部分Ni被覆砥粒を用いることにより、全面Ni被覆砥粒より高い寿命を有する電着工具が作製できることがわかった。部分Ni被覆砥粒30 minと40 minを用いた電着工具の工具寿命が長くなる原因としては、砥粒が工具に析出した状態が異なるためと考えられる。全面Ni被覆砥粒の場合には、図1に示されるように部分Ni被覆砥粒と比べ砥粒に導電性のNi皮膜があるためめっき層の成長形態は似ており砥粒の保持力が高いと考えられるが、凝集した砥粒の塊にかかる研削力が大きくその砥粒が工具から剥離しやすいため、部分Ni被覆砥粒30 minと40 minの工具より寿命が短くなったのではないかと考察した。なお、部分Ni被覆砥粒50 minの工具は10回目の研削を行った際に工具が壊れ、他の部分Ni被覆砥粒の工具より工具寿命が短

Fig. 13 Variations of grinding force using various tools according to the number of grinding pass. The grinding force increased rapidly after tool fracture. When the grinding force exceeded the value of 6 N/mm , the tool life was judged to have been arrived. The tool life of using the partially Ni-coated abrasives (30 min or 40 min) was better than that of using the Ni-coated abrasives. The tool life of using the non-coated abrasives was the shortest, because the grip force of abrasives was lowest.

かった．剥離時間が 50 min になると砥粒の表面の Ni 皮膜がほとんどないため，砥粒の保持力が弱く非被覆砥粒よりわずかに高い程度になったと考えられる．したがって，部分 Ni 被覆砥粒表面の Ni 皮膜の量は工具の研削特性に大きく影響し，適切な Ni 皮膜を有する部分 Ni 被覆砥粒を使用することにより，砥粒の保持力が高くて切れ味の優れる電着工具が作製できることが分かった．

5. 結 言

本研究では，電着工具の切れ味と砥粒保持力のトレードオフを解決し高性能電着工具を開発するために，部分 Ni 被覆砥粒を提案した．全面 Ni 被覆砥粒表面の一部分の Ni 皮膜を剥離することにより部分 Ni 被覆砥粒の作製を試みた．開発した部分 Ni 被覆砥粒を市販の全面 Ni 被覆砥粒および非被覆砥粒と比較しながら，電着条件による砥粒の電着工具への析出特性や分布状態の相違を検討した．部分 Ni 被覆砥粒と全面 Ni 被覆砥粒，非被覆砥粒を用いて同じ砥粒密度の電着工具を作製し，シリコンとガラスの研削実験を行い，研削抵抗や研削面の状態を評価した．得られた結果は，以下の通りである．

- (1) 全面 Ni 被覆砥粒表面の Ni 皮膜を剥離することにより Ni 皮膜の量が異なる部分 Ni 被覆砥粒の作製ができた．
- (2) 複合電気めっき法による電着ダイヤモンド工具の作製においては，部分 Ni 被覆砥粒が全面 Ni 被覆砥粒に比べて析出量がやや劣るが砥粒の凝集量が少なく，分散性がよくなる．非被覆砥粒より部分 Ni 被覆砥粒の凝集率はやや高いが，砥粒の析出量が多くなることが分かった．
- (3) 部分 Ni 被覆砥粒を使用することによりダイヤモンド砥粒の鋭い切れ刃が外向きになり，研削抵抗が低くなることがわかった．砥粒の保持力が劣ることなく優れた研削特性が維持できることがわかった．
- (4) 部分 Ni 被覆砥粒を用いた電着工具は全面 Ni 被覆砥粒に比べて砥粒の凝集が少なく分散性がよいため，研削面粗さが良好であることがわかった．Ni 皮膜の剥離時間を 40 min にした砥粒を使用した工具の研削特性が最も優れることがわかった．

最後に，本研究を行うに当たって実験に協力された立命館大学元学生・宝田真吾氏，中川晃宏氏，橋爪雄大氏，金偉氏に心より感謝いたします．

文 献

- 千葉康雅，谷泰弘，榎本俊之，電着ダイヤモンドワイヤ工具の高速製造法の開発，日本機械学会論文集 C 編，Vol.69, No.680 (2003), pp.303-309.
- 榎本英彦，古川直治，松村宗順，複合 めっ き，日刊工業新聞社 (1989), p.4.
- 前田知洋，研削用電着ホイールの紹介，砥粒加工学会誌，Vol.57, No.8 (2013), pp.502-505.
- 中川晃宏，宝田真吾，谷泰弘，電着工具用部分コーティングダイヤモンド砥粒の開発，2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2008), pp.467-468.
- 斎藤 圀，本間英夫，山下嗣人，新めっき技術 (2011), p.75
- 佐藤金司，鈴木数夫，電着ダイヤモンド砥石の作成とその研削挙動，金属表面技術，Vol.33, No.6 (1982), pp.285-290.
- 佐藤金司，鈴木数夫，電着ダイヤモンド砥石の性能に対する砥粒物性の効果，金属表面技術，Vol.38, No.3 (1987), pp.92-96.
- Webster, J. and Tricard, M., Innovations in abrasive products for precision grinding, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.53, No.2 (2004), pp.597-617.

References

- Chiba, Y., Tani, Y. and Enomoto, T., Development of a high-speed manufacturing method of an electroplated diamond wire tool, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.69, No.680 (2003), pp.303-309 (in Japanese).
- Enomoto, H., Furukawa, N. and Matsumura, S., Composite plating, Nikkan Kogyo Shimibun (1989), p.4 (in Japanese).
- Maeda, T., Profile of the electroplated grinding wheel, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, Vol.57, No.8 (2013), pp.502-505 (in Japanese).

- Nakagawa, A., Takarada, S. and Tani, Y., Development of partially coated diamond abrasives for electroplated tools, Proceedings of the 2008 JSPE Autumn Meeting (2008), pp.467-468 (in Japanese).
- Saito, M., Honma, H. and Yamashita, T., New plating technology, Kanto Gakuin University Press (2011), p.75 (in Japanese).
- Sato, K. and Suzuki, K., Manufacture of electrodeposit diamond wheel and its grinding action, Journal of the Metal Finishing Society of Japan, Vol.33, No.6 (1982), pp.285-290 (in Japanese).
- Sato, K. and Suzuki, K., Effects of physical properties of diamond grit on the performance of electroplated diamond wheel, Journal of the Metal Finishing Society of Japan, Vol.38, No.3 (1987), pp.92-96 (in Japanese).
- Webster, J. and Tricard, M., Innovations in abrasive products for precision grinding, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.53, No.2 (2004), pp.597-617.