ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ製造技術の開発

張 宇^{*1}, 谷 泰弘^{*2}, 桐野 宙治^{*3}, 川波多 裕司^{*4}

Development of drum-type manufacturing method for electroplated diamond wire tools

Yu ZHANG^{*1}, Yasuhiro TANI^{*2}, Okiharu KIRINO^{*3} and Yuji KAWAHATA^{*4}^{*1} Ritsumeikan Univ., Research Organization of Science and Technology

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577, Japan

^{*2} Ritsumeikan Univ., Department of Mechanical Engineering

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577, Japan

^{*3} Tool Bank East Co., Ltd.

1-11-10 Suimei, Otsu-shi, Shiga 520-0531, Japan

^{*4} Crystal Optics Inc.

3-4-25 Imakatata, Otsu-shi, Shiga 520-0241, Japan

Received 19 April 2016

Abstract

Diamond wire saws are widely used in slicing various kinds of hard and brittle materials, such as silicon, sapphire, etc. Electroplated diamond wire tools are used for high-efficiency slicing process, because of high abrasion resistance. However, low production efficiency of diamond wire tools causes high cost in the production process, because the electroplating rate is low. To solve the problems, a drum-type manufacturing method for electroplated diamond wire tools was developed in this study. Multiple diamond wire tools could be manufactured simultaneously at high speed in one machine. The mechanism of drum type electroplating unit was introduced, firstly. Then the electroplating characteristics, such as maximum current density, Ni deposition rate and uniformity of electroplated wires, were evaluated. Composite electroplating experiments using diamond abrasive were carried out and the effect of electroplating factors on the amount of electrodeposited diamond grains was discussed, too. It was found that turbulence flow of electroplating solution could improve amount of deposited diamond grains. Long diamond wire tools were manufactured and used to slice Si ingot, it was confirmed that the developed wire tools have high slicing performance equal to the commercially available diamond wire tool.

Key words : Diamond wire tool, Wire sawing, Electroplating, Current density, Deposition rate, Slice

1. 緒 言

エコブームや電力消費節約等の社会情勢が世界中に広がり、エネルギー政策における太陽電池や LED の必要性が近年ますます高まっている。シリコン太陽電池に使われるシリコンウェーハや LED 用のサファイア基板は、マルチワイヤソーで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。スライシング加工においては、ピアン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ワイヤに固着した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。固定砥粒ワイヤ工具には、レジンボンドまたは電着によりダイヤモンド砥粒を固着したものがある。電着ダイヤモンドワイヤ工具は、レジンボンドワイヤ工具より耐熱

No.16-00180 [DOI:10.1299/transjsme.16-00180], J-STAGE Advance Publication date : 7 October, 2016

^{*1} 正員, 立命館大学総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

^{*2} 正員, 立命館大学理工学部機械工学科

^{*3} 正員, (株) ツールバンク (〒520-0531 滋賀県大津市水明 1-11-10)

^{*4} (株) クリスタル光学 (〒520-0241 滋賀県大津市今堅田 3-4-25)

E-mail of corresponding author: zhangyu@fc.ritsumei.ac.jp

性、耐摩耗性に優れ、その加工技術に関して研究成果が多数報告されている (Clark et al., 2003, Chen et al., 2014). 市販の電着ダイヤモンドワイヤ工具に関しては、直径 $\phi 100\mu\text{m}$ のピアノ線に平均粒径 $10\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド砥粒を付着したシリコンスライシング用のものと、直径 $\phi 160\mu\text{m}$ のピアノ線に平均粒径 $30\text{--}40\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド砥粒を付着したサファイア等高硬度材料のスライシング用のものの2種類が主に使用されている. さらに材料ロスを低減するために電着ダイヤモンドワイヤ工具の細線化が進められている. 近年、電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造方法の改善等でその製造コストが低下してきているが、産業界においては電着ダイヤモンドワイヤ工具の価格のさらなる低減を求めている. このように重要性が上昇しているにもかかわらず、電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造方法に関してはその報告が少ないのが現状である. 電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造は、電着ダイヤモンドホイール等の製造に用いられている沈降共析法 (榎本他, 1989) ではなく、分散めっき法が一般的である. 新しい電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造方法に関しては、ブラシめっき法を用いた製造方式 (千葉他, 2003)、液流式電着めっき法を用いた製造方式 (諏訪部他, 2010)、回転ドラム式装置による製造方式 (諏訪部他, 2012) 等が報告されている. しかし、いずれの方式においてもワイヤ工具のマルチ製造ができず製造コストの低減に限界を生じている. 電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造コストは、その製造速度に直結しめっき皮膜の成長速度に依存するため、同時に数本のワイヤ工具が製造できる技術または高いめっき電流密度が得られる高速めっき技術を活かしたワイヤ工具の高速製造技術が望まれている.

本研究では、電着ダイヤモンドワイヤ工具のマルチ製造化かつめっき電流密度の向上による高速製造化を実現するために、リング状の筒の中に多数本のワイヤを設置し、コアロータに取り付けられたフィンによりワイヤ近傍のめっき液を激しく攪拌する電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造方式を考案した. また、めっきの限界電流密度やワイヤ円周のめっき皮膜の肉厚が均一になるためのワイヤおよび陽極の配置等について検討した. さらに、ワイヤの周方向に均一に砥粒を共析させるために、めっき液の流れを制御しワイヤの周囲にめっき液が均一に流れるようにワイヤの前方に障害物を設置した. このドラム式装置を用いて試作した電着ダイヤモンドワイヤ工具は、市販のワイヤ工具と同等な切断能力を有することが確認できたので報告する.

2. ドラム式ダイヤモンドワイヤ工具製造方式の提案

2・1 ドラム式ダイヤモンドワイヤ工具製造方式の概念および簡易めっき槽による検証

現在電着ダイヤモンドワイヤ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分散めっき法が生産現場でよく利用されている. めっき皮膜の成長を高速化するためには、めっき電流密度を高くすることが必須である. 高いめっき電流密度を実現するために陰極付近の拡散層 (金属イオン欠乏層) を常に薄くしなければならない (川崎, 1969). その手段として陰極近傍に陽イオンを供給することができるようなジェット流めっき法やブラシめっき法が報告されている. 著者らはブラシめっき技術を活用し、ロールブラシの回転

Fig.1 Schematic of drum type plating unit. Several fins are fixed upon a core rotor. The anodes and the wires are set in the interspace between the metallic pipe and the fins. To improve the current density of plating, the plating solution is agitated strongly by the rotational fins. The drum type plating unit can plate multiple wires simultaneously and manufacture the diamond wire tools with high efficiency.

により陽イオンが減少する陰極近傍のめっき液を攪拌し、拡散層を薄くする効果を確認している(谷, 桐野, 2013). これは2本ブラシまたはフィンを付けた羽根車の間にワイヤを通す構造であり, ダイヤモンドワイヤ工具の高速製造を実現した. 2本の羽根車の中央部にワイヤを設置するブラシ方式では, 同時に多数本の電着ダイヤモンドワイヤ工具を製造するためには多数の羽根車が必要となり, 製造装置の設置面積が大きくなる, 消費電力が大きくなるといった問題点があった.

本研究では, ブラシめっき式電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造技術を改良し, コンパクトでありながら高いめっき電流密度が得られるドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具製造方式を提案する. 図1(a)は3本のワイヤを同時にめっきするドラム式めっき槽の外観を示す. ワイヤがほぼ空気が巻込みのないめっき槽内を走行しながら, ワイヤにめっきする構造である. めっき槽の上下部の給電プーリー(陰極)がワイヤに接触し給電する. めっき液はタンクからポンプにより吸込み供給口よりめっき槽内に注入され, 排出口からタンクに戻り循環させる. 図1(b)はドラム式めっき槽の断面を示す. 羽根車(コアロータ)とめっき槽外壁の間にリング状の流路を形成し, 流路にワイヤやニッケルペレットを入れたチタンバスケット(陽極)を設置する. リング状の流路には複数本のワイヤが簡単に設置できるため, 同時に多数本の電着ダイヤモンドワイヤ工具の作製が可能となる. 数枚のフィンが取り付けられた羽根車をめっき槽上部のモータにより回転し, 槽内のめっき液を攪拌する. めっき液が強力に攪拌されることによりワイヤ付近の拡散層が薄くなり高いめっき電流密度が得られると考えられる.

ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具の連続製造装置を作る前に, 図2に示される簡易的なドラム式めっき槽を作製し, ドラム式装置のめっき特性を検証した. めっき槽の外壁として汎用のビーカを用い, ビーカの下部に設置したホットプレートによりめっき液を加温した. 陽極として純ニッケル製の丸棒($\phi 3\text{mm}$)を使用した. より均一にワイヤに給電できるようにめっき槽の内側に補助電極としてチタン製の金属パイプも設置した. フィンの先端と金属パイプの内側の距離はおおよそ10mmであり, 陰極のワイヤ($\phi 0.25\text{mm}$)と陽極のニッケル棒をフィ

Fig.2 Schematic of simple drum type plating unit. The core rotor fixed up 8 fins is rotated by the rotating shaft. A wire (cathode) and a nickel rod (anode) are fixed on the up and down fixtures. The fixtures are set in a beaker. For improving the current distribution around the wire a metallic pipe is located on the inner wall of beaker as a secondary anode.

Fig.3 Variation of thickness of plated layer in circumferential direction of wire caused by the rotating core rotor. The growth rate of plated layer is independent of the rotating speed of core rotor. The variation of thickness of plated layer in circumferential direction of wire is small, too.

ンの先端と金属パイプ内側の中間に設置した. モータのシャフトは上部で支持し, モータにより羽根車を回転し, めっき液を攪拌する. 金属パイプ上のめっき液の境界層厚さを理論的に計算すると 1mm 以下であり (加藤, 1989), ワイヤは流れるめっき液の中央部付近 (壁による影響がない領域) に設置した. なお, ドラム式簡易めっき槽を用いた基礎実験では, ワイヤは走行させずニッケル丸棒と同じく上下の治具に固定した.

ブラシめっき式ダイヤモンドワイヤ工具製造装置においては, 2 本の羽根車が逆方向に回転した場合めっき液がワイヤの片側に当たるため砥粒の析出が偏るのに対し, 2 本の羽根車が同方向に回転すればワイヤの全面がより均一にめっき液が当たりワイヤに析出した砥粒の分散性が向上することが分かっている (桐野, 谷, 2011). 本研究で開発したドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造装置においてもめっき液が一方向に流れるため砥粒の偏析現象が生じるが, 第 3 章でその解決方法を詳細に述べる. なお, 砥粒を入れない場合, ワイヤの円周方向におけるめっき皮膜の成長速度に関しては, 図 3(a)に示されるようにワイヤの円周方向に 8 個所のめっき皮膜の厚さを測定した結果 (図 3(b)), そのばらつきが少ないことが確認されている. したがって, ワイヤの円周に析出した砥粒の分散性が悪くなる原因がめっき皮膜の成長速度によるものではないことがわかる.

2・2 ドラム式めっき槽のめっき特性

めっき実験を行う前に芯線であるピアノ線の前処理として, 有機溶剤による脱脂洗浄を行った後, 10vol%の塩酸溶液よりピアノ線表面の油脂や防錆用の黄銅膜を完全に取り除いた. 表 1 はめっき実験の基本条件を示す. 電着応力が小さく, 高いめっき電流密度が得られるようにスルファミン酸ニッケル浴を使用した. ドラム式めっき槽のめっき特性が調べやすいように, 実際の電着ダイヤモンドワイヤ工具のめっき層よりめっき皮膜を厚くした. まず, 陽極のニッケル棒と陰極のワイヤとの電極間距離による限界電流密度 (図 4(a)に示されるようなめっき焼けが生じない最大のめっき電流密度) の変化を調べた. 図 4(b)に示されるように金属パイプに通電せずニッケル棒のみに通電した場合にはニッケル棒とワイヤの距離が長くなるにつれて限界電流密度が下がった. 一方, 金属パイプにも通電した場合には, ニッケル棒とワイヤの距離による限界電流密度の変化がほとんど見られず高い電流密度を維持できることが分かった. これはニッケル棒とワイヤ間の電極間距離が大きくなるにつれ, めっき液の電気抵抗が増えニッケル棒からワイヤへの電気供給が少なくなったためである. それに対して金属パイプにも

Table 1 Basic electroplating condition.

Components of plating solution	$\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	600g/L
	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	10g/L
	H_3BO_3	30g/L
Core wire	Piano wire, $\phi 0.25\text{mm}$	
Temperature of plating solution	60 °C	
Plating time	120 s	
pH	4

Fig.4 Effect of anode configuration on limiting current density. The addition of a metallic pipe can prevent plating burn and improve the limiting current density in the plating process.

通電した場合はめっきに必要な電気量がワイヤに十分に供給できたと考えられる。

次に、羽根車の回転速度がめっきの限界電流密度やめっき皮膜の成長速度に与える影響を調べた。図 5(a) に示されるように羽根車の回転速度を 100rpm から 200rpm に増加すると限界電流密度が約 2 倍に向上することが分かった。めっき液が激しく攪拌されるとワイヤ付近の拡散層が薄くなりワイヤへの Ni^{2+} 供給が改善されたため限界電流密度が向上したと考えられる。しかし、回転速度が 200rpm 以上になると限界電流密度が低下する傾向が現れた。これは、羽根車が高速に回転するとめっき液の攪拌が激しくなり、図 5(b) に示されるようにニッケル棒後方のめっき液（赤枠の中）に空気が巻き込まれたためと考えられる。巻き込まれた空気が Ni^{2+} の供給を妨げ、ワイヤの焼けが発生した。また、めっき皮膜の成長速度は電流密度にほぼ比例することが確認できる。

図 1 に示されるように羽根車とめっき槽の外壁が形成されたリング状の流路に多数本のワイヤを同時に設置することにより、ドラム式めっき槽を用いてダイヤモンドワイヤのマルチ製造が可能である。複数本のワイヤに同時に電気を流した場合、ワイヤ間に電氣的な干渉が生じ、めっき膜厚の均一性が劣ることが考えられる。そこで、めっき膜厚の均一性を調べるため、図 6(a) に示すようにめっき槽に 2 本のワイヤを同時に設置し、それぞれのワイヤに析出しためっき皮膜の円周方向の厚さばらつきを調査した。図 6(b) に示すように、1 本ずつ通電した場合にはめっき液が一方向に流れてもワイヤの円周方向の膜厚のばらつきはほとんどなかった。それは、ワイヤ附近には、 Ni^{2+} が十分に供給され、2 本のワイヤ間に電氣的な干渉がなかったためと考えられる。それに対して 2 本のワイヤに同時に通電した場合、ワイヤ間距離によってめっき皮膜の厚さばらつきが大きくなることが分かった。特にワイヤ同士が接近した場合（ワイヤ間距離：2mm）では、めっき皮膜の厚さばらつきが最も大きくなった。図 7 はめっき後のワイヤ断面の一例を示す。1 本ずつ通電した場合にはワイヤの円周における膜厚はほぼ均一と

Fig.5 Effect of rotating speed of core rotor on limiting current density, deposition rate and plating solution. The limiting current density can be improved by increasing the rotating speed of core rotor, except for the case of air is involved into the plating solution.

Fig.6 Thickness distribution of plated layer around wires. In the case of feeding to left or right wire respectively, the standard deviation of the nickel layer thickness is much lower than that of feeding left and right wires in parallel. The thickness deviation is larger as the distance of left and right wires is nearer and nearer, especially.

なったが、2本のワイヤに同時に通電するとワイヤの断面がカム形状を呈していることが確認される。2本のワイヤに同時に通電するとワイヤ間の電氣的な取り合いが複雑となり、ワイヤに析出するめっき皮膜が円周方向で不均一となったと推察した。ワイヤ間距離が小さくなるほどめっき膜厚の均一性はさらに悪化した。ワイヤ間距離が28mmの場合には膜厚の最大と最少の差が $8.9\mu\text{m}$ であったのに対し、2mmの場合には $37.2\mu\text{m}$ となった。ワイヤ間距離が2mmの場合、膜厚の最大と最少の差が平均膜厚の5割程度となっており、ダイヤモンドワイヤ工具の性能に大きく影響を与えると予想される。ワイヤ間距離が28mmになると、ワイヤ間の電氣的な取合いが軽減し平均膜厚の1割以下に収まり、ダイヤモンドワイヤ工具の性能への影響がほとんどなくなったと考えられる。なお、同時に数本のワイヤ工具を製造するドラム式めっき槽を設計する際、給電プーリーの設置スペース等を考慮すればワイヤ間距離を50mm以下にすることが事実上困難であるため、ワイヤ間距離によるめっき膜厚の影響がほとんどないと考えられる。

2・3 ワイヤに析出する砥粒の分布

ダイヤモンド砥粒をめっき液に分散した複合めっきの実験条件を表2に示す。上述のように攪拌フィンを取り付けた外壁を羽根車と逆方向に回転させれば、ワイヤへの砥粒の析出は均一になると予想されたが、外壁を回転させるには構造が複雑となり消費電力も増加するため、羽根車のみを回転させて均一に砥粒を析出させることができないか検討した。図8(a)に示すように、めっき液が一方から流れるためめっき液とワイヤがぶつかる面には砥粒が析出せずめっき液に流されることが分かった。それに対してめっき液の流れに対してワイヤの後方にはめっき液の渦（乱流）が生じ（東，1999），数多くの砥粒が付着した。したがって、ワイヤの周囲にめっき液の乱

Fig. 7 Cross section of two wires plated in parallel. The variation of plated layer in circumferential direction of wire is large in the case of plating near 2 wires.

Table 2 Composite plating condition.	
Wire	Piano wire, $\phi 0.12\text{mm}$
Abrasive	55wt% Ni-coated diamond abrasive, Grain size: $10\sim 15\mu\text{m}$
Abrasive concentration	5g/L
Drum rotating speed	200rpm
Current density	160A/dm^2
Plating time	3s

Fig. 8 Uniformity in abrasive distribution with obstacles. The obstacles located in front of wire can cause vortex around the wire and improve the distribution of abrasives deposited on wire.

流を生じさせることができれば、砥粒の付着を均一化にさせることができるのではないかと考えた。そこで、ワイヤ周囲のめっき液の流れを制御するためにワイヤの前方にめっき液の流れに対する障害物を設置することにした。2次元流体解析ソフト（Flowsquare3.1b）により障害物の形状や位置の最適化を行った結果、ワイヤの前方に2本の柱状障害物を設置することでワイヤ周囲に乱流を形成することができた（浅沼，1977）。めっき液の流れを制御することにより，図 8(b)に示されるようにワイヤの周囲に砥粒が均一に付着することが確かめられた。

3. ドラム式ダイヤモンドワイヤ工具の連続製造装置

3・1 連続製造装置の開発

電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造工程は，芯線の活性化処理工程，下地めっき工程，複合めっき工程，後めっき工程，洗浄工程等で構成される。電着ダイヤモンドワイヤ工具の素材とするピアノ線は防錆のために軟らかい黄銅めっきが施されているため，そのうえにニッケルめっきが成長するとダイヤモンドワイヤ工具の使用時にめっき皮膜が剥離されやすい。そのため，ニッケルめっき皮膜と芯線の密着強度を向上させるために，有機溶剤による脱脂洗浄を行った後，アルカリ電解等で黄銅層を取り除くなどの前処理が行われる。そして，露出したピアノ線とめっき皮膜の密着性を向上するために塩酸よりワイヤ表面の活性化を行ってからウッド浴やワット浴によりニッケルストライクめっき（下地めっき）を施した後，ダイヤモンド砥粒を固着させる複合めっきを行う。その後，砥粒の保持力を向上させるために後めっき（砥粒の保持強度を高める埋め込みめっき）を施す。最後に純水でワイヤを洗浄し，防錆材を塗布する。

前章では，簡易的なめっき槽を用いてドラム式めっき槽による電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造が可能であることを確認した。本節では，電着ダイヤモンドワイヤ工具を連続的に製造する装置を提案する。電着ダイヤモンドワイヤ工具製造装置で最も重要となるめっき槽は，ワイヤ工具の製造速度や品質に大きく影響する。ドラム式めっき槽を使用することにより高いめっき電流密度が得られるため，ワイヤ工具連続製造装置のすべてのめっき槽は図 9(a)に示されるドラム式めっき槽にした。ポンプによりめっき液タンクからめっき液を送り出し，めっき槽上部の流入口からめっき槽内にめっき液を注入し，下部の流出口よりめっき液タンクに戻す構造である。簡易めっき槽と同じく上部に設置したモータにより羽根車を回転し，めっき液を攪拌する。めっき槽上下部に設置したステンレス鋼製のプーリーによりワイヤ（陰極）に給電する。電気めっき用ニッケルペレットを充填したチタンバスケットを可溶性陽極として使用した。また，チタン製パイプをめっき槽の内壁に設置し，不溶性の補助

Fig. 9 Continuous manufacturing system of diamond wire tools. Power feeding points of wires are set the top and the bottom of plating unit. The manufacturing system consist of a pretreatment equipment, 1 strike plating unit, 1 complex plating unit, 3 after plating units and a post treatment equipment and equipment of winding wire.

電極として使用した。チタンバスケットとチタンパイプの上部より電気供給を行った。めっき槽の中央に外径が $\phi 90\text{mm}$ のプラスチック製円柱に 6 個のフィンを取り付けた羽根車を設置した。フィンの先端からプラスチック製円柱までの距離は 10mm とした。円筒容器の内径は $\phi 130\text{mm}$ であるが、厚さ 1mm のチタンパイプを使用したためフィンの先端とチタンパイプ内壁との距離は 9mm である。ドラム式めっき槽の高さについては、めっきできる有効高さが 350mm であるが、 550mm まで延長できるように設計した。ドラム式めっき槽ではめっき液がほぼ密閉されるため、有害ガスの排出が少なく作業環境がよい。このドラム式めっき槽は、内部容積が約 2L であり、一般的めっき槽に比べてめっき液の使用量が少ないという長所がある。ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具製造装置の全貌を図 9(b) に示す。ワイヤの巻出部、脱脂、酸洗・活性化、前めっき (1 槽)、複合めっき (1 槽)、後めっき (3 槽)、防錆剤塗布部、ワイヤの巻取部、めっき液の温度やドラムの回転制御などを行うコントローラ部で構成される。各めっき槽にはめっき液を蓄積するタンク (容量: 10L) がついており、個別にめっき浴の管理を可能にした。ウッド浴は、強酸浴であり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ですぐに工具母材の表面酸化物を還元しながらめっきすることが可能で、母材とめっき皮膜との密着性が良くなる。そのため、ストライクめっき工程にはウッド浴を選択した。砥粒を析出させる工程の複合めっき浴と砥粒の保持力を高める後めっき工程には、電着応力が小さく成膜速度が高いスルファミン酸ニッケル浴を選択した。また、高い成膜速度を維持する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の pH を 4 程度になるように管理した。

3・2 めっき条件による電着特性の影響

開発したドラム式ダイヤモンドワイヤ工具の連続製造装置を用いて簡易めっき槽と比較しながらめっき槽のめっき特性を調べた。図 10(a) に示されるように羽根車回転速度の増加につれてめっきの限界電流密度が向上し、簡易めっき槽と同様の傾向になることが確かめられた。なお、本めっき槽はほぼ空気の巻込みがないため、羽根車

Fig.10 Limiting current density depending on rotating speed of core rotor. It was confirmed that air are not involved into the plating solution and the limiting current density increases with the rotating speed of core rotor. The wire exposed to air is burned in high current density.

Fig.11 Diameter of wire deposited at various height from the bottom of plating bath. The current density of central portion of plating unit is lower than that of top or bottom of plating unit, because the power feeding point is far. The short plating bath (350mm) is more suitable for plating wire than the long one, because of a higher current density can be applied to wire.

の回転速度の上昇による限界電流密度の低下がないことがわかった。しかし、連続製造装置のドラム式めっき槽を用いた場合には、簡易めっき槽より限界電流密度が 1/2 ほどまで低下した。簡易めっき槽に使用されたワイヤは長さが 100mm 程度でありワイヤに流れる電流が小さいため、ワイヤの電気抵抗による発熱量が少ない。それに対して、連続製造装置のめっき槽ではワイヤの電極間距離が 350mm となったため、簡易めっき槽と同じ電流密度でめっきを行った場合ワイヤに流れる電流が 3.5 倍ほど大きくなり発熱量は 3.5^2 に比例し多くなる。また、給電部とめっき液の液面の間が空气中に暴露されたためワイヤに流れる電流 (図 10(b)) が最も大きく、発生した熱が迅速に発散できずワイヤ焼けに至ったと考えられる。このようにワイヤの電気抵抗により生じる熱が原因で連続製造めっき槽の長さが制限されることが分かった。めっき液中にてワイヤへの給電ができれば、給電が分散され発熱が少なくなりめっき槽をもっと長くすることが可能だと考えられる。非接触給電方式を用いればこの問題が解決できると考えられるが今後の課題とする。

長さが 350mm と 550mm の 2 種類のめっき槽 (図 11(a)) を用い、ドラム式めっき槽の長さによるめっき膜厚の分布を調べた。析出しためっき皮膜の厚さ分布を測定するためにピアノ線を停止して 90 秒間のめっきを行った。めっきの電流密度が 100A/dm^2 の場合には、長さが 350mm のめっき槽の場合 1.32A の電流が流れるが、長さが 550mm のめっき槽では 2.07A を流す必要がある。前述したようにワイヤの電気抵抗による発熱等の原因で長さが 550mm のめっき槽は限界電流密度が約 90A/dm^2 となった。本実験では、めっきの安定性を考慮し、2 種類のめっき槽を用いて電流密度を同じく 80A/dm^2 一定にした実験と、長さが 350mm のめっき槽を用いて限界電流密度に近い 170A/dm^2 とした実験を行った。図 11(b)にはめっき槽の高さ方向におけるめっき後のワイヤ直径が示され、めっき槽の上下部で膜厚が大きく中央部で小さくなっていることが分かる。給電部付近の電流集中が大きくなり析出したニッケル量が多くなるが、めっき槽の中央部では電流が小さいためめっき皮膜が薄くなったと推測される。また、上部は下部よりめっき皮膜がやや厚くなっている。これは、陽極の給電部がめっき槽の上部だけ設置されており、上部の電気集中が下部より大きいためである。長さが 550mm のめっき槽を使った場合には、めっき槽の上下部 (給電点に近い) のめっき皮膜が厚いが、めっき槽の中央部のめっき皮膜が上部の 2/3 ほどの厚さしかなくめっき膜厚のばらつきが大きい。それに対して、長さが 350mm の場合には、550mm のめっき槽と同様な膜厚分布となるが、めっき膜厚がより均一であることが分かった。実際にワイヤ工具の製造工程では、ワイヤが一定の速度でめっき槽を通過するため、めっき槽の高さ方向によるめっき膜厚の不均一という問題がワイヤ工具の品質に影響を与えることはない。したがって、めっき槽を長くすることは、めっき電流密度を低下させるた

Fig.12 Effect of current density on deposited diamond abrasives. The diamond abrasives are distributed uniformly on wire tools. The abrasives increase in number as the current density is raised.

Fig.13 Effects of current density or rotating speed of core rotor on diamond density of wire tools. The density of diamond abrasives deposited on wire increases as current density and decreases as the rotating speed of core rotor.

め、Niの析出量が少なくワイヤ工具の高速製造に向かないことが分かった。めっき槽の数を増やせばめっき電流密度が低下せず、ワイヤ工具の製造速度が向上できる。

簡易めっき槽を用いて砥粒の付着特性について検討した結果を利用し、連続製造装置の複合めっき槽に通過するワイヤ附近に乱流を形成するようにワイヤの前方に2本の障害物を設置した。なお、本実験に使用しためっき槽高さは350mmである。図12にはめっき電流密度を変化させた場合の砥粒付着状態を示す。いずれの電流密度においてもワイヤに付着した砥粒の分散性がよいことが確認できる。めっきの電流密度を変化した際のワイヤに析出した砥粒の密度を図13(a)に示す。析出した砥粒の量は電流密度に比例することが分かった。電流密度が大きくなるにつれ、めっき皮膜の成長速度が高くなり、より短い時間に砥粒を固着することができたためと考えられる。また、羽根車の回転速度を変化した際のワイヤに析出した砥粒の密度を図13(b)に示す。羽根車の回転速度が増えめっき液の流れが速くなると、完全に固着していない砥粒が激しく流動するめっき液やめっき液中の砥粒より衝突されて流されてしまうため砥粒の付着量が減少したと考えられる。したがって、羽根車の回転を速くすることにより、めっき電流密度を向上させることができるが、ワイヤに析出した砥粒の量は低下してしまう。羽根車の回転速度とめっき電流密度に関しては最適な複合めっき条件があることがわかった。なお、後めっき工程に関しては砥粒の析出がないため、羽根車の回転が速いほど高いめっき電流密度が得られるため好ましい。

4. 作製した電着ダイヤモンドワイヤ工具の切断特性

ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具の連続装置を用いて5m/minの製造速度で長さ500mのダイヤモンドワイヤ工具を試作した。シングルワイヤソー(WSD-K2, ㈱タカトリ社製)を用いて表3に示される切断実験条件で多結晶シリコンインゴットのスライシングを行い、電着ダイヤモンドワイヤ工具の切断特性を評価した。ワークローラに0.3mmのワイヤピッチでダイヤモンドワイヤ工具を3巻し、2枚のシリコンウェーハを切り出した。研削液に関しては水溶性研削液(MC-80C, トラスコ中山(株)社製)を水で30倍に希釈したものを用いた。

図14(a)は試作したダイヤモンドワイヤ工具により切断されたシリコンウェーハの写真を示す。多結晶シリコンインゴットからウェーハの割れを生じることなく切り出すことができた。図14(b)には切り出したウェーハの表面

Table 3 Schematic diagram and conditions of slicing test.

Wire	Diamond wire, $\phi 0.12\text{mm}$
	Workpiece	Polycrystal silicon. Cross section: $\square 145 \times 35\text{mm}$
	Running speed of wire	600m/min
	Roll number	3 (2 wafers)
	Infeed of workpiece	1mm/min
	Tension of wire	20N
	Coolant	Water-soluble, MC-80C

(a) Wafer sliced by wire tool of medium diamond density

(b) Surface roughness of wafer

Fig.14 Photo and surface roughness of sliced silicon wafer. Polycrystal silicon can be sliced by the trial diamond wire tools. The surface roughness of sliced wafer is good by high density of diamond abrasive.

粗さを示す。試作したワイヤ工具を用いて切断されたシリコンウェーハの表面粗さは、市販のワイヤ工具により切断したウェーハと同程度であることがわかる。また、固着した砥粒の密度が高いワイヤ工具を使用した場合、ウェーハの表面粗さがよくなることが確認される。これは、ワイヤ工具の砥粒密度が高いほど砥粒の平均切込み深さが小さくなりウェーハの表面粗さが向上するためである。使用したダイヤモンドワイヤ工具の切断前後の写真を図 15 に示す。砥粒の先端に覆われたニッケル皮膜はなくなっているが、砥粒の脱落等のワイヤ工具の性能に大きく影響するダメージがないことが確認される。したがって、ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具連続製造装置を用いて高速にワイヤ工具を製造することが可能であることと、製造されたダイヤモンドワイヤ工具が高い砥粒保持力を有することが確認できた。

5. 結 言

本研究では、めっきの電流密度を向上することにより電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造速度を高めることと電着ダイヤモンドワイヤ工具製造のマルチ化を目的とし、ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具製造法を提案した。まず、簡易ドラム式めっき槽を用いてワイヤへのめっき特性を調査した。また、ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具製造装置を開発し、限界電流密度、砥粒の付着状態等について検討した。電着ダイヤモンドワイヤ工具を試作し、多結晶シリコンの切断実験を行った。得られた結果は、以下の通りである。

- (1) ドラム式電着ダイヤモンド工具の製造装置のめっき槽においては、めっき液が激しく攪拌され、 $100\text{A}/\text{dm}^2$ 以上のめっき電流密度が実現でき、高速に電着ダイヤモンドワイヤ工具の製造が可能であることが明らかになった。
- (2) ドラム式めっき槽を用いて同時に数本のワイヤへのめっきができることが確認された。数十 mm 程度の間隔にワイヤを設置すればワイヤ間に電氣的な取り合いがなく、ワイヤの円周に均一なめっき皮膜が得られる。
- (3) ワイヤの前方に障害物を設置することにより、ワイヤの周囲に乱流が形成されワイヤに析出した砥粒の分散性を向上できることが分かった。
- (4) めっき電流密度が高いほど羽根車の回転速度が低いほど、砥粒の析出量が多くなることが分かった。羽根車の回転数を高くすることにより高いめっき電流密度が得られるが、複合めっき工程には羽根車の回転速度とめっき電流密度を総合的に考慮する必要がある。
- (5) ドラム式電着ダイヤモンドワイヤ工具の連続製造装置を用いて試作したワイヤ工具は、市販品と同等の切断能力を有することが確かめられた。

謝 辞

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の元学生・楊聖みょう氏、Mohd Aizat 氏に心より感謝します。また、台湾の江信有限公司 (FACT) よりダイヤモンド砥粒をご提供いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

Fig.15 Photos of trial diamond wire tool having a diamond density of about 30/mm in before and after slicing test. The drop of diamond abrasives from the wire tool was not observed. It was confirmed that the diamond abrasives are fixed strongly on the wire by the drum-type manufacturing system.

文 献

- 浅沼強, 流体の可視化ハンドブック, 朝倉書店 (1977), pp.277-279.
- 東昭, 流体力学, 朝倉書店 (1999), pp.81-83.
- Chen, W., Liu X., Li, M., Yin, C. and Zhou, L., On the nature and removal of saw marks on diamond wire sawn multicrystalline silicon wafers, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.27 (2014), pp. 220-227.
- 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.
- Clark, W.I., Shih, A.J., Hardin, C.W., Lemaster, R.L. and McSpadden, S.B., Fixed abrasive diamond wire machining—part I: process monitoring and wire tension force, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, No.5 (2003), pp. 523-532.
- 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.
- 加藤宏, ポイントを学ぶ 流体の力学, 丸善株式会社 (1989), pp.63-66.
- 川崎元雄, 高速めっきについて, *金属表面技術*, Vol.20, No.12 (1969), pp.621-627.
- 桐野宙治, 谷泰弘, ブラシめっき法を適用した高速電着ダイヤモンドワイヤ製造方法の開発, *2011 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集* (2011), pp.261-262.
- 諏訪部仁, 秋充, 石川憲一, 回転ドラム式メッキ装置によるダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発に関する研究, *砥粒加工学会誌*, Vol.56, No.10 (2012), pp.703-708.
- 諏訪部仁, 大口敦史, 中村義弘, 石川憲一, 液流式電着メッキ法を用いたダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発とその加工特性に関する研究, *砥粒加工学会誌*, Vol. 54, No. 5 (2010), pp. 298-303.
- 谷泰弘, 桐野宙治, 電着ダイヤモンドワイヤの高速製造技術の開発, *砥粒加工学会誌*, Vol.57, No.8 (2013), pp.498-501.
- 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

- Asanuma, T., Handbook of fluid visualization, Asakura Shoten (1977), pp.277-279 (in Japanese).
- Azuma, A., Fluid mechanics, Asakura Shoten (1999), pp.81-83 (in Japanese).
- Chen, W., Liu X., Li, M., Yin, C. and Zhou, L., On the nature and removal of saw marks on diamond wire sawn multicrystalline silicon wafers, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.27 (2014), pp. 220-227.
- 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).
- Clark, W.I., Shih, A.J., Hardin, C.W., Lemaster, R.L. and McSpadden, S.B., Fixed abrasive diamond wire machining—part I: process monitoring and wire tension force, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, No.5 (2003), pp. 523-532.
- Enomoto, H., Furukawa, N. and Matsumura, S., Composite plating, *Nikkan Kogyo Shimbun* (1989), p.4 (in Japanese).
- Kato, H., Learning point Mechanics of fluid, Maruzen co., Ltd. (1989), pp.63-66 (in Japanese).
- Kawasaki, M., High speed plating, *Kinzoku Hyomen Gijutsu*, Vol.20, No.12 (1969), pp.621-627 (in Japanese).
- Kirino, O. and Tani, Y., Development of a high-speed manufacturing method of electroplated diamond wire utilizing brush plating, *Proceedings of ABTEC2011* (2011), pp.261-262 (in Japanese).
- Suwabe, H., Aki, M. and Ishikawa, K., High-speed processing of diamond wire tool by turn drum plating apparatus, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol.56, No.10 (2012), pp. 703-708 (in Japanese).
- Suwabe, H., Oguchi, A., Nakamura, Y. and Ishikawa, K., Development of a high-speed manufacturing diamond wire tool by flow plating and slicing characteristics, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol.54, No.5 (2010), pp.298-303 (in Japanese).
- Tani, Y. and Kirino, O., Development of high-speed manufacturing technology for electroplated diamond wires, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol.57, No.8 (2013), pp.498-501 (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.