

財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

産学官共同研究開発事業

研究成果報告書

高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具
に対するチップングフリー仕上げ成形技術
の開発

(平成21年度～平成22年度)



目 次

【研究総括】

- 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具に対するチップングフリー仕上げ成形技術の開発
.....1
研究総括責任者 福岡工業大学工学部知能機械工学科 仙波卓弥

【研究報告】

1. 熱化学反応を利用した乾式研削に使用する焼結ダイヤモンド製ツルアの試作
.....6
福岡工業大学工学部知能機械工学科
2. 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドと焼結ダイヤモンド製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズム
.....12
福岡工業大学工学部知能機械工学科
3. 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の成形
.....19
福岡工業大学工学部知能機械工学科
4. 超硬合金製金型の加工に求められる高速粗加工への NPD 製切削工具の応用
.....26
西部電機株式会社精密機械事業部
5. 超硬合金製金型の加工に求められる超精密微細加工への NPD 製切削工具の応用
.....31
株式会社ワークス生産技術グループ

- 【成果実績】36

研究総括

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科
教授 仙波 卓弥

1 研究開発の背景および目的

1990年代の初めにドイツでマイクロ機械加工という概念が提案されて以来、マイクロ切削加工、マイクロ研削加工、マイクロ放電加工、ならびにマイクロレーザ加工といったマイクロ機械加工技術の開発が行われてきた⁽¹⁾。これらのマイクロ機械加工技術の中で、超精密微細と呼ぶにふさわしい機械加工面を作ることができるのは、今のところ単結晶ダイヤモンド製の切削工具を用いたマイクロ切削加工に限られている。

しかし、単結晶ダイヤモンドは衝撃力に対して脆い性質を持っており、硬さが1,000 Hv以上の高硬度金型材料に対する超精密切削加工には使えない。したがって、直径が1 mm以上のガラス製レンズを量産する超硬合金製金型の加工には放電加工、研削加工、ならびに研磨加工が用いられ、研削加工面に対して研磨加工を行うことによってキャビティやコアの粗さは10 nm Rz以下の値に成形されている。

単結晶ダイヤモンドが持つ欠点を克服する次世代の工具素材として、高純度グラファイトをダイヤモンドに直接変換したナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)が2003年に開発されている⁽²⁾。このNPDはサイズが数十ナノメートルの粒子で構成されている多結晶ダイヤモンドで、単結晶ダイヤモンドよりも硬いだけでなく衝撃力に対する耐欠損性にも優れている。

ただし、ダイヤモンドの{111}面が均一に分布しているために機械加工できる結晶面を持っていない。したがって、単結晶ダイヤモンドと異なり機械的な除去加工を行いNPDを切削工具の形に成形することは容易でない。したがって、NPDを超精密微細加工用の切削工具として使用するためには、NPDに対する高速粗加工技術や鋭利な切れ刃を成形できる超精密仕上げ加工技術を新たに開発する必要がある。

これら2つの加工技術の内、NPDに対する高速粗加工技術に関しては、パルスファイバーレーザを用いた加工技術を開発することに成功している⁽³⁾。超硬合金に対して切削加工を行い超精密微細形状を創成するといった大きな研究目標を達成するため、本研究ではNPD製切削工具の切れ刃を鋭利に成形できる、NPDに対する超精密仕上げ加工技術を新たに開発することを研究目標に掲げた。

2 研究開発体制

福岡工業大学工学部知能機械工学科教授仙波卓弥を研究統括責任者として、下記「産」
「学」の研究体制で本研究開発事業を実施した。

研究総括責任者 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 仙波卓弥

〈産〉 株式会社ワークス 研究代表者：代表取締役 三重野計滋

担 当 者：製造グループライン長 本田伸浩

西部電機株式会社 研究代表者：常務取締役 宮地敬四郎
担 当 者：生産部工作機械技術課グループリーダー
森川敏郎

〈学〉 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科
研究代表者：教授 仙波卓弥
担 当 者：助教 天本祥文

3 研究成果の概要

本研究を開始する前のことになるが、レーザ粗成形した半径が 50 μm の NPD 製マイクロボールエンドミルに対し、直径が 15 mm で砥石作用面の粗さを 30 nm Rz 前後の値に成形した焼結ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond: PCD)製円板をツールアに用いて乾式研削を行うと、欠けが無い鋭利な切れ刃を成形することができた⁽⁴⁾。欠けが無い鋭利な切れ刃が成形できたということは何らかの熱化学反応が NPD と PCD 製ツールアとの間に生じたことを意味しており、NPD に対する超精密仕上げ加工技術を開発するためには両者の間に生じた熱化学反応のメカニズムを解明する必要があると考えられた。

そこで、放電加工を行い表面を粗らした PCD 製円板の表面にチタン Ti, バナジウム V, 鉄 Fe, コバルト Co, ニッケル Ni, ならびにジルコニウム Zr といった 6 種類の遷移金属の微粒子を複合めっきし、これを NPD 製ツールアとして使用することを計画した。2009 年度に複合めっきを行った結果、めっき液の pH が 2.0 と低いことが原因で正常な複合めっき皮膜を作ることができたのは Ni と Zr の 2 種類だけであった。NPD と PCD 製ツールアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明する上で PCD 製ツールアを試作することは必要不可欠な研究であり、これを避けて通るわけにはいかなかった。

そこで、複合めっきを行うことによって PCD 製ツールアの砥石作用面に遷移金属を付着することをあきらめ、2010 年度から砥石作用面の粗さを 30 nm Rz 前後の値に成形した PCD 製円板に対して電解加工と高周波スパッタを行い、焼結助剤として用いられているコバルト Co を 7 種類の遷移金属で置換した PCD 製ツールアを試作することに研究方針を転換した。この方針転換は結果的に正解であり、試作した PCD 製ツールアを用いて NPD 製ノーズ R バイトのすくい面に対する乾式研削を行い、所定の研究期間内に熱化学反応のメカニズムを解明することができた。

ただし、2009 年度の後期に研究計画を変更した当時、電解加工と高周波スパッタを行ったとしても Co を 7 種類の遷移金属で置換したツールアを試作できる保証はなかった。また、NPD と PCD 製ツールアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明することは容易でないと予想された。そこで、熱化学反応のメカニズムを解明した後で行うことを計画していた NPD に対する超精密仕上げ加工技術の開発を 2009 年度の後期に繰り上げて実施した。NPD を仕上げ加工するためのツールアには焼結助剤としてコバルト Co とニッケル Ni を使用した PCD 製円板を使用した。完璧ではないが将来に繋がる有益な研究の成果を得ることができたと判断している。

また、当該研究プロジェクトでは株式会社ワークスと西部電機株式会社に共同研究企業

として参加いただき、本研究の成果を両社の事業拡大に繋げていただくことを計画した。西部電気株式会社で必要とされていた「超硬合金製金型の加工に求められる高速粗加工への NPD 製切削工具の応用」に関しては、当初計画していた研究目標を満たす研究成果を得ることができた。ただし、株式会社ワークスで必要とされていた「超硬合金製金型の加工に求められる超精密微細加工への NPD 製切削工具の応用」に関しては、研究総括責任者が PCD 製ツルアの開発に手間取ったことが原因で、当初計画していた研究目標を満たす研究の成果を得ることができなかった。

4 研究成果の市場性・優位性

ガラス例レンズを量産するための金型には超硬合金が用いられ、超硬合金に対して放電加工、研削加工、ならびに研磨加工が行われている。この放電加工と研削加工は、レーザ粗成形した NPD 製切削工具を用いた切削加工、研磨加工は超精密仕上げ成形した NPD 製切削工具を用いた切削加工に置き換えることができる。このように、本研究で開発した NPD 製切削工具は、従来は不可能であると考えられていた超硬合金に対する粗加工や超精密微細加工を可能にする工具であり、加工時間と加工精度の両面において従来の加工技術に比べ絶対的な優位性を持っている。また、放電、研削、ならびに研磨加工といった3つの工程を切削加工に集約することが可能であり、省エネルギーという面からも優位性を持っている。

この、超硬合金に対する超精密微細加工は従来の単結晶ダイヤモンド製の切削工具が成し得なかった加工の領域であり、単結晶ダイヤモンド製の切削工具は NPD 製の切削工具に置換されるといっても過言ではない。また、超硬合金に対するマイクロ研削加工技術やマイクロ研磨加工技術の開発が遅れていることが原因で、直径が 1 mm 以下のマイクロレンズに関しては樹脂からガラスへの置換が遅れている。本研究で開発した NPD 製の切削工具は、超硬合金に対して切削加工を行いマイクロレンズ金型を製造することが可能である。したがって、本研究の成果はたとえば医療用内視鏡に使われている直径が 0.1 mm 以下の複眼レンズや、液晶モニタの背面に使われている直径が 0.1 mm 以下のマイクロレンズアレイシートの製造に活用されることが期待される。

5 今後の具体的な計画

遷移金属を高周波スパッタした PCD 製円板をツルアに使用して NPD に対して乾式研削を行うと、

(1) ダイヤモンドの共有結合に関与している電子が遷移金属によって奪われ、結合強度が低下した変質層が PCD の砥石作用面に露出しているダイヤモンド砥粒の機械的なアブレーション作用によって NPD の表面から脱落する。この場合、遷移金属の電気陰性度が増すに従って加工能率は増加するが加工面は粗くなる。

(2) ダイヤモンド結合の一部が崩壊して結合強度が低下した熱影響層が生成され、これが PCD の砥石作用面に露出しているダイヤモンド砥粒の機械的なアブレーション作用によって NPD の表面から脱落する。この場合、遷移金属の比熱容量が増すに従って加工能率は低下するが加工面は平滑に成形される。

といった熱化学反応が生じていることが確かめられた。この、摩擦熱によって NPD の表面に生成された熱変質層が機械的なアブレーション作用によって除去されるといったメカニズムで NPD から切りくずが除去される場合、加工面は遷移金属の比熱容量が増すに従って平滑に成形される。現時点で Ti を高周波スパッタした PCD 製ツルアを用いた場合には、研削加工面の粗さを 1 nm Rz 前後の値に成形することに成功している。NPD 製切削工具の切れ刃をさらに鋭利に成形するといった観点から、プロジェクト終了後も比熱容量の高い高硬度材料をツルアに使用し、粗さが 1 nm Rz 以下の平滑な研削加工面を創成するための研究を継続して実施している。

次に共同研究企業で実施した 2 つの研究であるが、西部電機株式会社で実施した「超硬合金製金型の加工に求められる高速粗加工への NPD 製切削工具の応用」に関しては、当初計画していた研究目標を満たす研究成果を得ることができた。ただし、株式会社ワークスで実施した「超硬合金製金型の加工に求められる超精密微細加工への NPD 製切削工具の応用」に関しては、研究総括責任者が PCD 製ツルアの開発に手間取ったことが原因で、当初計画していた研究目標を達成することができなかった。直径が 1 mm 以下、キャビティやコアの粗さが 10 nm Rz 以下、ならびに形状精度が 0.1 μm 以下のマイクロガラス製レンズを量産できる超硬合金製金型を製造するといった当初の研究目標は、平成 23 年度中に達成致す予定である。

6 研究成果の波及効果

本研究を実施することによって開発できた NPD 製切削工具は、過去 10 年間に渡って停滞していた工具素材に関する技術開発の停滞を補って余りある工具であり、「工作機械は精度良く動いているが切削工具が摩耗するために所望の形状精度が得られない」、といった現状の問題点を完全に克服できる。総括責任者らが既に開発している超精密微細研削加工技術^{(5)~(9)}と本研究で開発した超精密微細切削加工技術を地域企業に技術移転できれば、北部九州に国際競争力を持つ超精密微細部品の製造にかかわる企業群を育成することに貢献できると考えている。

7 今後の課題と取り組み

図 1 に示しているのは、要求される部品のサイズとそれを作ることができる会社の数や部品の値段との関係である。工作機械、工具、ならびに CAD/CAM が揃っていれば作ることができる普通サイズの部品は、それを作ることができる会社の数は多いが値段は安い。これに反して、サイズが極端に小さい部品や極端に大きい部品を作ることができる会社の数は少ないが、部品の値段は高い。

これは、ノウハウや固有技術が無くても作れる部品の値段は安いノウハウや固有技術が無いと作れない部品の値段は高いことを意味する。マイクロレーザ加工技術と熱化学反応研削加工技術を駆使した NPD に対する工具成形技術は、両方の加工技術ともまさにノウハウの固まりである。したがって、北部九州に国際競争力を持つ超精密微細部品の製造にかかわる企業群を育成するため、本研究の成果を地域の企業に移転することが今後の課題である。

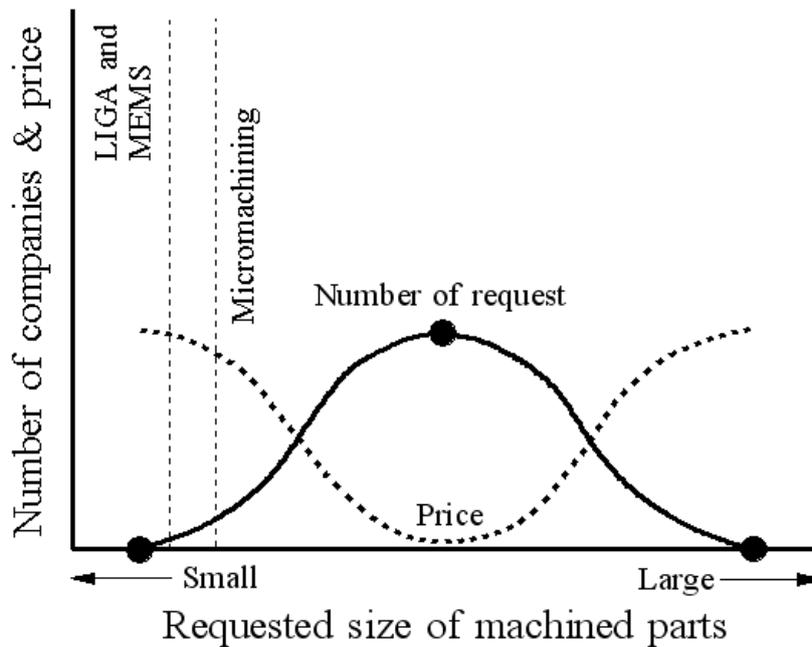


図1 要求される部品のサイズとそれを作ることできる会社の数や部品の値段

参考文献・引用文献

- (1) Th. Schaller・W. Bier, G. Linder・K. Schubert, Mechanische Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen, F&M Vol. 102 (1994), pp. 274-278.
- (2) T. Irifune・A. Kurio・S. Sakamoto・T. Inoue・H. Sumiya, Ultrahard Polycrystalline Diamond from Graphite, Nature, Vol. 421, No. 6923 (2003), pp. 599-600.
- (3) Takuya SEMBA, Ryuich OKAZAKI, Hitoshi SUMIYA, Ultraprecision Cutting of Cemented Carbide Using Microball Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2010 Proceedings, B01 (2010-10), pp.75-78.
- (4) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.
- (5) 原田武志・仙波卓弥・Brian J. STONE, 半球状極微粒ダイヤモンド電鍍工具に対する砥粒平坦化ツルージング技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.38 (2008-2), pp. 219-224.
- (6) Harada Takeshi・Takuya SENBA A truing Technique of Flattening Diamond Grains for Fabricating Microstructures with Fine Surfaces, Advances in Abrasive Technology 11(Proc. of the ISAAT 2008, (2008-10), pp. 350-354, Trans Tech Publications(Switzerland).
- (7) Takeshi HARADA・Naoko GOUYA・Yoshiki ITOH, Takuya SEMBA Tool Materials Adapted to Ultraprecision Microgrinding, Proceedings of the 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, ASPEN2009, 2B-13 (2009-11). (pp.69 Abstract).
- (8) 合屋尚子・孫万福・原田武志・仙波卓弥, 極微粒ダイヤモンド電鍍工具に対する砥粒平坦化および平滑化ツルージング技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010-11), pp. 3126-3133.
- (9) 伊東好樹・合屋尚子・原田武志・仙波卓弥, 焼結ダイヤモンド製マイクロ研削工具に対する砥粒平坦化ツルージングとドレッシング技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76 No.771 (2010-11), pp. 3134-3142.

1. 熱化学反応を利用した乾式研削に使用する焼結ダイヤモンド製ツルアの試作

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 教授 仙波卓弥

1-1 はじめに

2007年にナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)を工具素材として使用する機会に恵まれて以来、NPD製のマイクロ切削工具を成形できる工具成形技術の開発を行ってきた。この過程で、波長が1,060 nmのパルスファイバーレーザーはNPDに対する高速粗加工に適していることを見出すことができた⁽¹⁾。また、砥石作用面の粗さを30 nm Rz前後の値に成形した焼結ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond: PCD)製円板をツルアに使用し、レーザー粗成形したNPD製マイクロボールエンドミルに対して仕上げ研削を行うと、欠けが無い鋭利な切れ刃を成形できることが明らかになった⁽²⁾。

欠けが無い鋭利な切れ刃を成形できたということは、NPDから何らかの熱化学反応によって切りくずが除去されたことを意味しており、NPD製切削工具に対する超精密仕上げ加工技術を開発するという観点からは、熱化学反応のメカニズムを解明する必要があると考えられた。本研究では、市販のPCDに偏析しているコバルトCoを他の遷移金属で置換したPCD製円板をツルアに用いてNPDに対する乾式研削を行い、NPDとPCD製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明するための実験を行った。

1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

「研究総括」の項目で紹介したとおり、本研究プロジェクトの目的はNPDとPCD製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明し、これをNPD製切削工具の切れ刃を鋭利に成形できる超精密仕上げ加工技術に応用することである。本研究開発は、NPD製切削工具を乾式研削するために使用するPCD製ツルアの試作にかかわる研究であり、本研究プロジェクトの目的を達成する上で必要不可欠な研究である。

1-3 目的と目標

市販のPCDには焼結助剤としてコバルトCoが用いられている。したがって、砥石作用面を平坦に成形したPCD製ツルアを用いてNPDに対して乾式研削を行うと、砥石作用面に露出しているコバルトCoとNPDとが接触し両者の間に何らかの熱化学反応が生じる可能性がある。この熱化学反応として、ダイヤモンドの共有結合に参与している電子がCoによって奪われて結合強度が低下した脆弱層がNPDの表面に生成され⁽³⁾、この脆弱層が機械的なアブレーション作用によって除去されるといった現象が起こり得ると考えられた。また、砥石研削点の温度が高い場合には酸化・還元反応⁽⁴⁾の他にNPDの表面に熱変質層⁽¹⁾が生成され、この熱変質層が機械的なアブレーション作用によって除去されるといった現象も起こり得ると考えられた。

表1に示しているのは、本研究で使用した9種類の遷移金属とその物性である。他の原子から電子を引きつける強さを表す電気陰性度⁽⁵⁾と、d軌道を満たしている電子の飽和度

を表す d 電子飽和度^{(6),(7)}との関係は図 2 のように表される. 表 1 に示した遷移金属を黒印で示している. 電気陰性度が高い遷移金属ほどダイヤモンドの共有結合から電子を奪う性質は強く, NPD の表面に脆弱層が生じる可能性は高い. 図 3 に示しているのは遷移金属の比熱容量と d 電子飽和度との関係である. 比熱容量が低い遷移金属ほど加熱され易いため砥石研削点での温度が高く, 酸化・還元反応や NPD の表面に熱変質層が生じる可能性は高い. このように, 共有結合の結合強度が低下した脆弱層は遷移金属の電気陰性度, 酸化・還元反応や熱変質層は遷移金属の比熱容量に関連して生成される可能性が考えられた. そこで, 市販の PCD に介在している Co を表 1 に示した遷移金属で置換した PCD 製ツルアを試作した.

表 1 本研究で使用した 9 種類の遷移金属とその物性

Atomic symbol	Electron arrangement	Percent of d-bond character ⁽⁷⁾	Electro-negativity (Pauling)	Specific heat capacity	Standard free energy of oxide formation*
		%	—	J/(Kg · K)	KJ/mol
Y	[Kr]4d ¹ 5s ²	10	1.22	300	—
Zr	[Kr]4d ² 5s ²	20	1.33	276	- 1037
Ti	[Ar]3d ² 4s ²	20	1.54	520	- 1435
V	[Ar]3d ³ 4s ²	30	1.63	490	- 1323
W	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	40	2.36	130	- 764
Mo	[Kr]4d ⁵ 5s ¹	50	2.16	250	- 528
Fe	[Ar]3d ⁶ 4s ²	60	1.83	440	- 740
Co	[Ar]3d ⁷ 4s ²	70	1.88	420	- 216
Ni	[Ar]3d ⁸ 4s ²	80	1.91	440	- 212

* Temperature at 298.15 K⁽⁸⁾

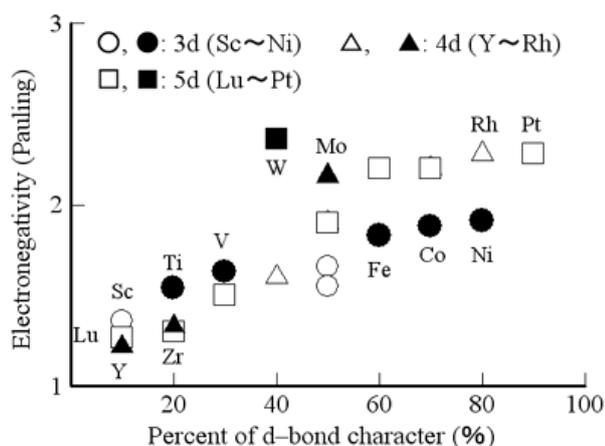


図 2 d 電子飽和度と遷移金属の電気陰性度との関係

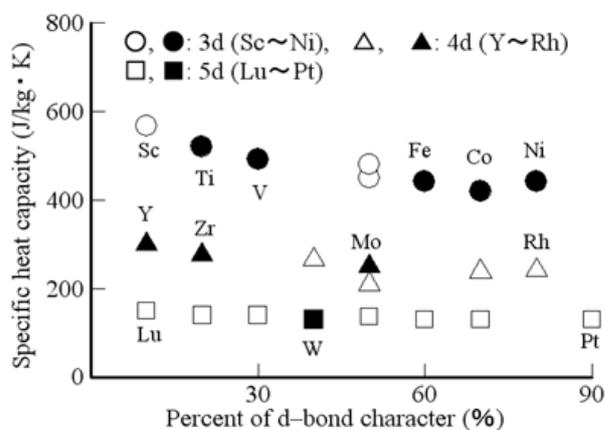


図 3 d 電子飽和度と遷移金属の比熱容量との関係

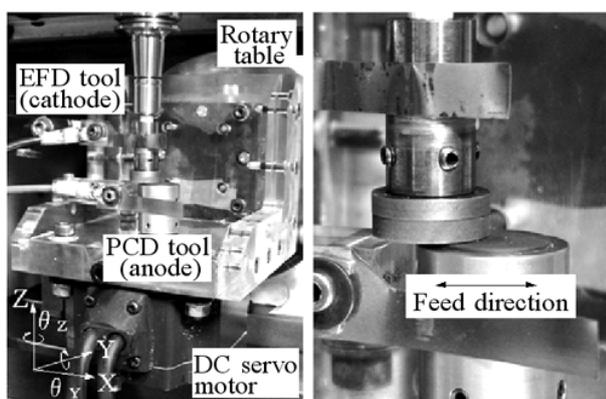
1-4 実験方法と実験の結果

1-4-1 面振れの除去

NPD を乾式研削するためのツールには、ダイヤモンドの一次粒子径が $1\ \mu\text{m}$ で直径が $15\ \text{mm}$ の PCD 製円板を使用した。図 4 に示しているのは、PCD 製ツルアの面振れを除去するために使用した装置の外観である。PCD 製ツルアは DC サーボモータの主軸、DC サーボモータは治具を介して NC 円テーブルにそれぞれ装着した。立形マシニングセンタの主軸に装着したメッシュサイズが #600 のダイヤモンド電着工具を陰極、PCD 製ツルアを陽極に接続して放電加工(Electrical Discharge Machining: EDM)を行った。放電加工の条件は表 2 に示すとおりである。図 5 に示しているのは、放電加工後に観察した砥石作用面の SEM 画像である。放電加工では、面振れを $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、砥石作用面の粗さを $2.5\ \mu\text{m}\ \text{Rz}$ 前後の値に成形した。

1-4-2 砥石作用面の平坦化

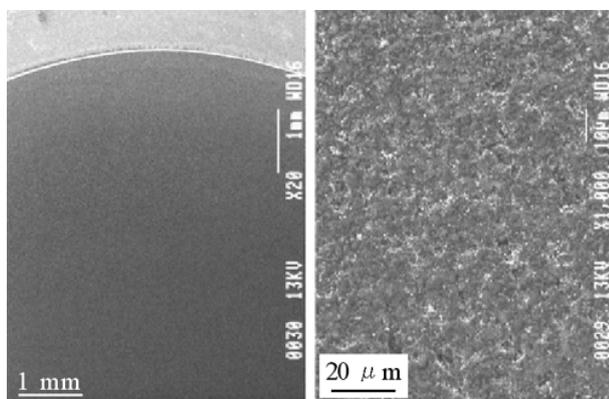
図 4 に示した要領でダイヤモンド電着工具と PCD 製ツルアとを面接触させ、砥石作用



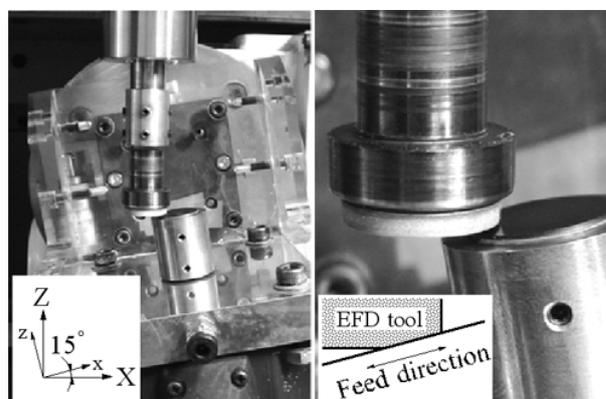
(a) 外観 (b) 拡大
図 4 PCD 製ツルアの面振れを除去するために使用した装置

表 2 PCD 製ツルアに対する放電成形の条件

Cathode	Electroformed diamond tool (EFD) with mesh size of #600
Anode	Polycrystalline diamond (PCD) and diamond made by chemical vapor deposition (CVD)
Rev. speed of cathode	400 rpm
Rev. speed of anode	100 rpm
Maximum set voltage	300 V
Maximum set current	40 mA
Capacitance	10 000 pF
Discharge energy	450 μJ
Fluid	Dielectric oil



(a) 外観 (b) 拡大
図 5 放電加工後に観察した PCD 製ツルアの砥石作用面



(a) 外観 (b) 拡大
図 6 PCD 製ツルアの平坦化に使用した装置

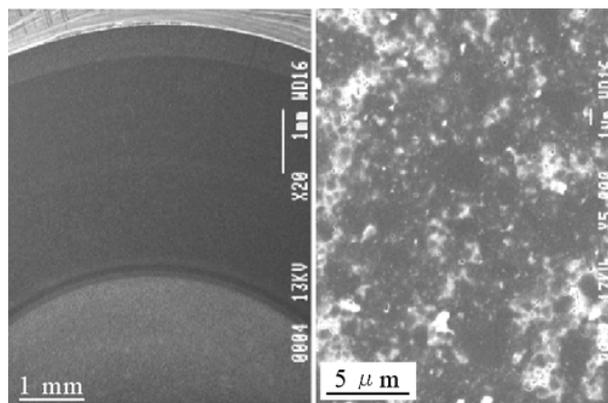
面の粗さを 30 nm Rz 以下に成形するために接触圧を上げて乾式研削を行うと、DC サーボモータを取付けた治具が弾性変形するために PCD 製ツルアの外周部に縁だれが発生した。そこで、図 6 に示すように外周部をテーパ状に成形したメッシュサイズが #600 のダイヤモンド電着工具を用いて放電加工と湿式ラッピングを行った後、ダイヤモンド電着工具を PCD 製ツルアに線接触させて乾式研削を行った。ツルアの成形条件は表 3 に示すとおりであり、砥石作用面を 30 nm Rz 前後の粗さに成形した。図 7 に示しているのは、乾式研削後に観察した砥石作用面の SEM 画像である。SEM 画像で黒く見えている部分はダイヤモンドが凝集して焼結された部分、白く見えている部分は微粒のダイヤモンド砥粒の他にコバルト Co が偏析している部分である。

1-4-3 電解加工と高周波スパッタ

砥石作用面に露出している Co を表 1 に示した遷移金属と置換するため、まず初めに図 8 に示すように PCD 製ツルアに対して電解加工(Electrochemical Machining: ECM)を行い砥石作用面に露出している Co を除去した。次に、図 9 に示すように Co を除去した PCD 製ツルアに対して表 1 に示した遷移金属を高周波スパッタした。電解加工と高周波スパッタ

表 3 PCD 製ツルアに対する湿式ラップと乾式研削の条件

	Wet lapping	Dry grinding
Tool	Electroplated diamond tool with mesh size of #600	
Truer	PCD (Co 10%)	
Rev. speed of tool	1 000 rpm	5 000 rpm
Rev. speed of truer	100 rpm	4 000 rpm
Feed rate	2 mm/min	
Machined area	3 mm from periphery of disc	
Wheel depth of cut	2 μm	50 μm
Slurry	Diamond mesh size from #3 000, to #12 000	—
Total machining time	3 hrs	1 to 1.5 hrs



(a) 外観 (b) 拡大

図 7 乾式研削後に観察した PCD 製ツルアの砥石作用面

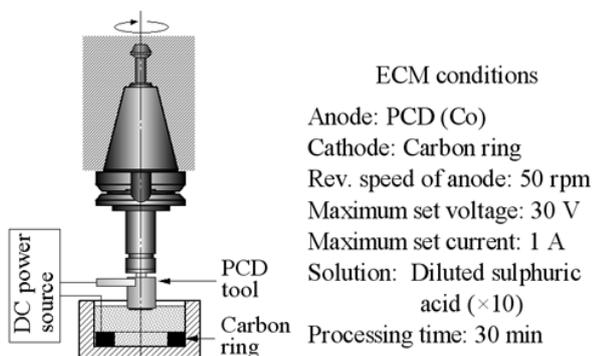


図 8 PCD 製ツルアに対する電解加工の要領と加工条件

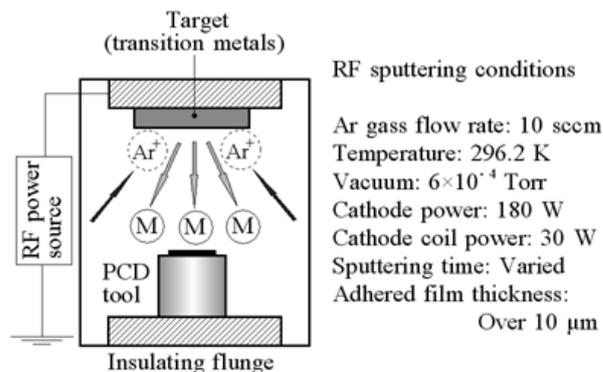


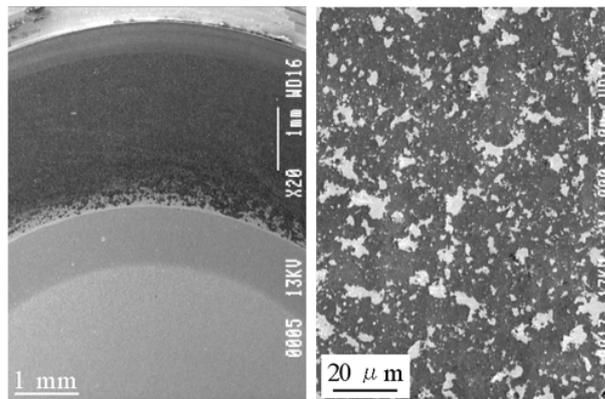
図 9 PCD 製ツルアに対する高周波スパッタの要領とスパッタ条件

タの条件は、それぞれ図 8 と図 9 に付記したとおりである。

1-4-4 NPD の乾式研削に使用した PCD 製ツルア

すくい面に生成される脆弱層や熱変質層を機械的なアブレーション作用によって除去するためには、PCD 製ツルアの砥石作用面にダイヤモンド砥粒を露出させる必要がある。そこで、遷移金属を高周波スパッタした PCD 製ツルアに対して研削加工を行い、砥石作用面を被覆している遷移金属を除去した。研削加工には、メッシュサイズが#600 のダイヤモンド電着工具を使用した。図 10 に示しているのは、タングステン W を高周波スパッタした砥石作用面の SEM 画像である。SEM 画像に対して画像処理を行い砥石作用面に露出している遷移金属の面積割合を測定した結果、遷移金属の種類を変化させた各場合とも 25 ~ 30 % の範囲内にあった。

このように、NPD の乾式研削には市販の PCD 製円板に対して電解加工と高周波スパッタを行い、焼結助剤として用いられている Co を表 1 に示した遷移金属で置換した PCD 製ツルアを使用した。ただし、ニッケル Ni と Co に関しては、これらの遷移金属を焼結助剤として作製した PCD 製円板をツルアとして使用した。また、化学気相成長 (Chemical Vapor Deposition: CVD) 法で作られた、直径が 15 mm の CVD ダイヤモンド製円板をツルアに用いた場合についても同様の乾式研削を行った。



(a) 外観 (b) 拡大

図 10 焼結助剤として用いられている Co を W で置換した PCD 製ツルア

1-5 研究成果

本研究を立案した 2008 年度の後期には、図 5 のように放電成形した PCD 製ツルアの砥石作用面にチタン Ti, バナジウム V, 鉄 Fe, コバルト Co, ニッケル Ni, ならびにジルコニウム Zr といった 6 種類の遷移金属の微粒子を複合めっきすることを計画した。また、複合めっきを行った後、図 10 のように砥石作用面にダイヤモンド砥粒を露出させた PCD 製ツルアを NPD に対する乾式研削に使用することを計画した。

研究計画通りに複合めっきを 2009 年度に行った結果、めっき液の pH が 2.0 と低いことが原因で、正常な複合めっき皮膜を作ることができたのは Ni と Zr の 2 種類だけであった。

「1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ」の項目で紹介したとおり、当該研究は NPD と PCD 製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明する上で必要不可欠な研究であり、これを避けて通るわけにはいかなかった。

そこで、PCD の表面に遷移金属の皮膜を高周波スパッタして付着させるための基礎実験を 2009 年度に実施した。その上で、2010 年度からは市販の PCD に焼結助剤として用いられる Co を表 1 に示した遷移金属と置換する手段として、PCD の表面に介在している Co を電解加工によって除去した後、Co が除去された PCD の表面に遷移金属を高周波スパッタすることにした。

この計画変更は結果として正解であり、NPD と PCD 製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明することに繋がった。熱化学反応のメカニズムを解明することに成功していなければ、NPD 製切削工具の切れ刃を鋭利に成形できる超精密仕上げ加工技術を開発することはできなかつたと考えている。ダイヤモンドと遷移金属との間に生じる熱化学反応のメカニズムを実験的に解明した前例はなく、工業的のみならず工学的にも有意義な研究の成果が得られたと考えている。

1-6 今後の課題と取組

当該研究の目標は完全に達成できており、研究終了後に当該研究を継続して実施する必要はない。Ti を高周波スパッタした PCD 製円板をツルアに用いて NPD に対して研削加工を行った場合には現時点で粗さが 1 nm Rz 前後の研削加工面が得られている。ただし、研削加工面の粗さをさらに平滑化するためには、熱化学反応を利用した別の手段を考える必要がある。

参考文献・引用文献

- (1) Takuya SEMBA・Testuro YAMAGUCHI・Yoshifumi AMAMOTO, Three-Dimensional Microfabrication System Using Focused Fiber Laser Beam, Proc. of the 4th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21 st Century (LEM21), 430 (2007), pp. 843-848.
- (2) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.
- (3) F. Furushiro・H. Tanaka・M. Higuchi・Y. Yamaguchi・S. Shimada, Suppression Mechanism of Tool Wear by Phosphorous Addition in Diamond Turning of Electroless Nickel Deposits, CIRP Annals, 59 (2010), pp.105-108.
- (4) 諸節祐子・松下孟・三木則尚, 鉄系金属/ダイヤモンドの熱化学反応を利用した単結晶ダイヤモンドの加工, 電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会資料, Vol.MSS-08, No.2 (2008), pp.7-11.
- (5) Linus Pauling, The Nature of the Chemical Bond, Third Edition, (1960), pp. 93, Cornell University.
- (6) 日本金属学会編, 金属データブック, 改訂 3 版, (1993), pp.5, 丸善.
- (7) Kazuhisa MIYOSHI・Donald H. BUCKLEY, Adhesion and Friction of Single-Crystal Diamond in Contact with Transition Metals, Applications of Surface Science 6 (1980), pp. 161-172, North-Holland.
- (8) John F. Elliot・Molly Gleiser, Thermochemistry for Steelmaking, Volume 1 (1960), pp. 214-215, Addison-Wesley.

2. 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドと焼結ダイヤモンド製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズム

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 教授 仙波卓弥

2-1 はじめに

単結晶ダイヤモンドは結晶面によって硬さが異なっており、 $\{1\ 1\ 1\}$ 面以外の結晶面であれば極微粒のダイヤモンド砥粒を用いた湿式ラッピングを行うことにより、これを研磨加工することができる。これに対して、ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) はサイズが数十ナノメートルの粒子で構成されている多結晶ダイヤモンドであり⁽¹⁾、超微粒のダイヤモンド砥粒を用いたとしてもこれを湿式ラッピングすることは難しい。

仮に NPD を湿式ラッピングできたとしても、工作物よりも硬い遊離砥粒で工作物より切りくずを排出するといった機械的アブレーション作用によって NPD から切りくずが排出される限り、すくい面と逃げ面が交わる切れ刃に欠けが生じることは避けられない。これに対し、単結晶ダイヤモンド製の切削工具で鉄 Fe、ニッケル Ni、タングステン W といった遷移金属を超精密切削すると切削工具が簡単に摩耗する⁽²⁾。

この原因として、工作物の表面に生成される酸化皮膜がダイヤモンドによって還元され、ダイヤモンドを構成する炭素原子が燃焼するために切削工具が摩耗するといった酸化還元反応や⁽³⁾、ダイヤモンドの共有結合を構成する電子が遷移金属によって奪われ、ダイヤモンドの表面に生成される脆弱層が機械的アブレーション作用によって除去されるために切削工具が摩耗する⁽⁴⁾、といった熱化学反応が考えられている。

切削工具の切れ刃はすくい面と逃げ面とが交わる稜線であり、切れ刃にはすくい面や逃げ面が成形される際に生じる切りくずとほぼ同じサイズのチップングが発生する。この場合、熱化学反応により NPD 製切削工具のすくい面や逃げ面から原子サイズの切りくずが排出されれば、これら 2 つの面が交わる切れ刃に生じるチップングのサイズを原子サイズにまで抑え得る可能性がある。

そこで、第 1 章で紹介した遷移金属を高周波スパッタした PCD 製円板を用いて NPD 製切削工具のすくい面に対する乾式研削実験を行い、NPD と PCD 製ツルアとの間に生じている熱化学反応のメカニズムを解明するための実験を行った。熱化学反応のメカニズムを明らかにした上で、この熱化学反応を欠けが無く鋭利な切れ刃を成形することができる超精密仕上げ加工技術に応用することを計画した。

2-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

「研究総括」の項目で紹介したとおり、本研究の目的は NPD と PCD 製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明し、これを NPD 製切削工具の切れ刃を鋭利に成形できる超精密仕上げ加工技術に応用することである。本研究開発は、まさに NPD と PCD 製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明するために行った研究であり、当該プロジェクトの中で最も重要な研究である。

2-3 目的と目標

表 1 に示したとおり，PCD 製ツルアに高周波スパッタした遷移金属は他の原子から電子を引きつける性質を表す電気陰性度⁽⁵⁾が異なっている。したがって、「ダイヤモンドの共有結合を構成する電子が遷移金属によって奪われ，ダイヤモンドの表面に生成される脆弱層が機械的アブレーション作用によって除去される」といった熱化学反応が生じる場合，その反応速度は電気陰性度に関連して変化すると考えられた。

また、「工作物の表面に生成される酸化皮膜がダイヤモンドによって還元され，ダイヤモンドを構成する炭素原子が燃焼するために切削工具が摩耗する」といった酸化還元反応には，遷移金属の比熱容量や遷移金属へ酸化皮膜が生成される度合いを表す，酸化物の生成に関する標準自由エネルギー⁽⁶⁾が関与していると考えられた。

そこで，第 1 章で紹介した PCD 製ツルアを用いてレーザ粗成形した NPD 製ノーズ R バイトのすくい面に対して乾式研削を行い，すくい面の除去深さや表面粗さと電気陰性度，酸化物の標準生成自由エネルギーならびに比熱容量⁽⁷⁾との関連を見出すことにより，NPD と PCD 製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明するための実験を行った。

2-4 実験方法及び実験条件

2-4-1 NPD 製ノーズ R バイト

走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いて観察した，NPD 製バイトの外観を図 11 に示す。断面×長さが□2×20 mm の超硬合金の先端にろう付けした幅×長さ×厚さが 2×3×0.6 mm の NPD に対してレーザ加工を行い，NPD をすくい角が 0 度，逃げ角が 5 度，ならびにノーズ R が 0.2 mm のバイト形状に成形した⁽⁸⁾。図 11 に示したようにレーザ成形した NPD 製バイトのすくい面に対し，湿式ラッピングと乾式研削を行った

2-4-2 すくい面に対する湿式ラッピングと乾式研削の方法

すくい面に対する湿式ラッピングと乾式研削に使用した装置の外観を図 12 に示す。図 11 に示したレーザ粗加工後の NPD 製バイトは，C 軸制御機能を持つ立形マシニングセンタの

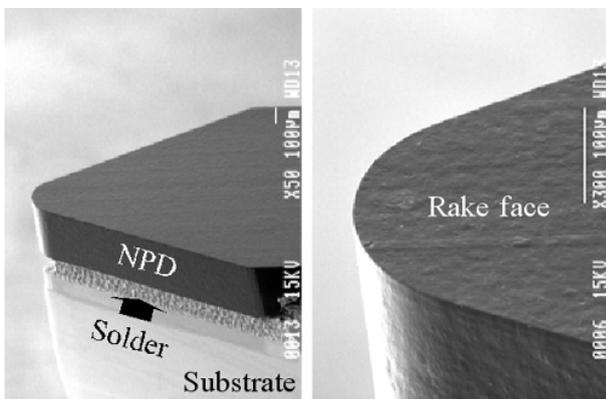
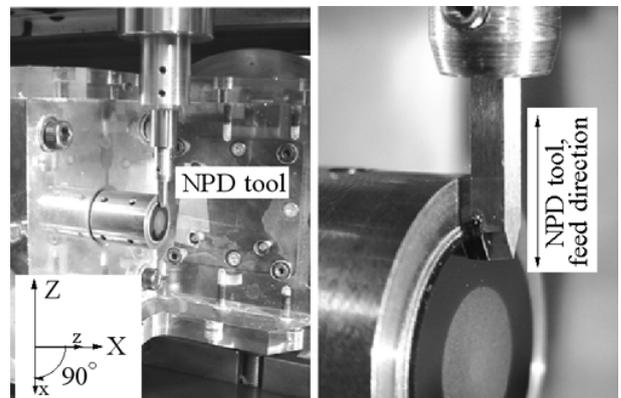


図 11 レーザ粗成形したすくい角が 0 度，逃げ角が 5 度，ノーズ R が 0.2 mm の NPD 製ノーズ R バイト



(a) 外観 (b) 工具近傍
図 12 NPD 製ノーズ R バイトの乾式研削に使用した装置

主軸に装着した。また、すくい面に対して湿式ラッピングや乾式研削を行うための PCD 製ツルアは DC サーボモータの主軸，DC サーボモータは治具を介して NC 円テーブルにそれぞれ装着した。NC 円テーブルを 90 度回転させ，すくい面に対して湿式ラッピングや乾式研削を行った。

表 4 に示しているのは湿式ラッピングと乾式研削の条件である。まず初めにレーザ粗加工されたすくい面に残る熱変質層を除去するため，図 5 に示した PCD 製ツルアを用いてノーズ R の下端から Z 軸のプラス方向 2 mm の領域に対して湿式ラッピングを行った。この場合，NPD 製バイトを Z 軸方向に 0.1 mm の範囲で揺動させることにした。研磨液にはメッシュサイズが #3,000 のダイヤモンドスラリーを使用した。

加工能率が極端に低下する総砥石切込み深さが 6~7 μm に達した時点で湿式ラッピングを止め，乾式研削に移行した。乾式研削時には，ノーズ R の下端から Z 軸のプラス方向 0.5 mm の領域に対して NPD 製バイトを Z 軸方向に 0.1 mm の範囲で揺動させることにした。砥石切込み深さを 30 μm に設定して乾式研削を 1 時間行い，加工後に再度接触点を取直して砥石切込みを加えるといった方法での乾式研削を 10 時間継続して行った。乾式研削後に，すくい面の除去量やツルアの損耗量を測定した。

2-5 実験結果

2-5-1 すくい面の除去量深さと電気陰性度

図 13 に示しているのは PCD 製ツルアの砥石作用面に露出している遷移金属の電気陰性度とすくい面の除去深さとの関係，図 14 に示しているのは電気陰性度と PCD 製ツルアの平均損耗深さとの関係である。図 13 に示したように，すくい面の除去深さは電気陰性度が増すに従って増加することが明らかになった。この結果は，ダイヤモンドの共有結合に関与している電子を遷移金属が奪い，結合強度が低下した脆弱層がすくい面から機械的なアブレーション作用によって除去されたことを表している。すくい面の除去深さと同様に，PCD 製ツルアの平均損耗深さもまた電気陰性度が増すに従って増加した。これは

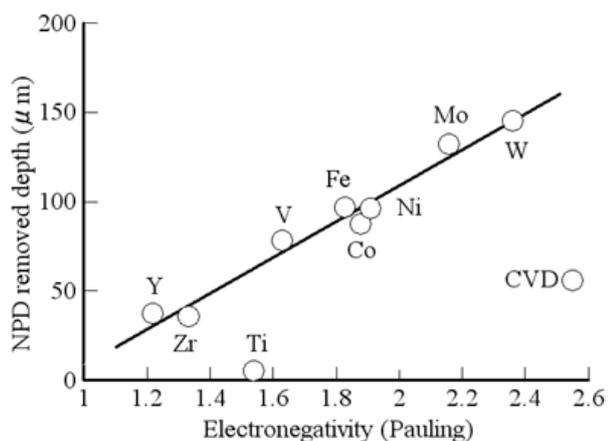


図 13 遷移金属の電気陰性度とすくい面の除去深さ

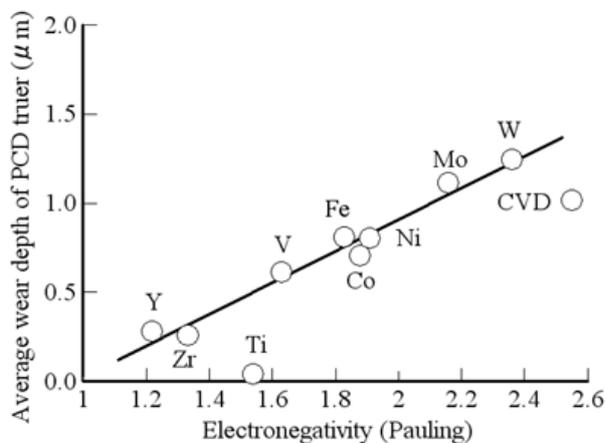
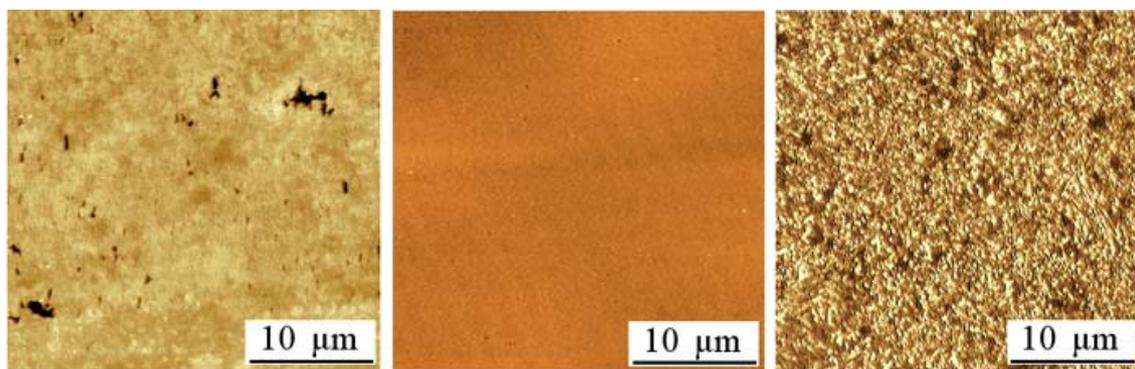


図 14 遷移金属の電気陰性度とツルアの損耗深さ



(a) CVD(98.8 nm Rz at crack) (b) Ti (1.4 nm Rz) (c) W (28 nm Rz)

図 15 乾式研削後に観察された典型的なすくい面のようす

PCD 製ツルアから脱落した遷移金属の微細な切りくずがすくい面と PCD 製ツルアの接触面に侵入し、すくい面だけでなく PCD 製ツルアの砥石作用面に生成された脆弱層が機械的なアブレーション作用によって除去されたためである。

2-5-2 すくい面の粗さと電気陰性度

乾式研削後に観察された、典型的なすくい面のようすを図 15 に示す。原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM)を用いて観察した画像である。ツルアに CVD ダイヤモンド製円板を用いた場合にはすくい面に微細な割れが生じていた。Ti を高周波スパッタした PCD ツルアを用いた場合のすくい面の粗さは 1.4 nm Rz であり、平滑な加工面が得られていた。一方、W を高周波スパッタした PCD 製ツルアを用いた場合にはすくい面に微細な凹凸が生じていた。この微細な凹凸は、程度に違いは見られたが Ti を除く他の遷移金属を高周波スパッタした PCD や、焼結助剤に Ni や Co を使用した市販の PCD 製円板をツルアに用いた場合にも観察された。

2-5-3 すくい面の粗さと比熱容量

砥石研削点の温度が高い場合には、酸化・還元反応の他に NPD の表面に熱変質層が生成され、この熱変質層が機械的なアブレーション作用によって除去されるといった現象も起こり得ると考えられた。そこで、すくい面の粗さと表 1 に示した比熱容量との関連について調査した。その結果、図 16 に示したようにすくい面の粗さと比熱容量と間には、相関係数が -0.72 の強い負の相関があることが明らかになった。この結果は、遷移金属の比熱容量が増すに従って酸化・還元反応や NPD の表面に熱変質層が生成される度合いが増加し、その結果としてすくい面が平滑に成形されたことを表している。

2-5-4 切りくずに対する成分分析

図 13 に示したように、W を高周波スパッタした PCD 製ツルアを用いた場合にはすくい面の除去深さが最も深く、乾式研削時に切りくずが盛んに生じているようすが観察された。そこで、乾式研削後に PCD 製ツルアの砥石作用面に対する元素分析を行った。しか

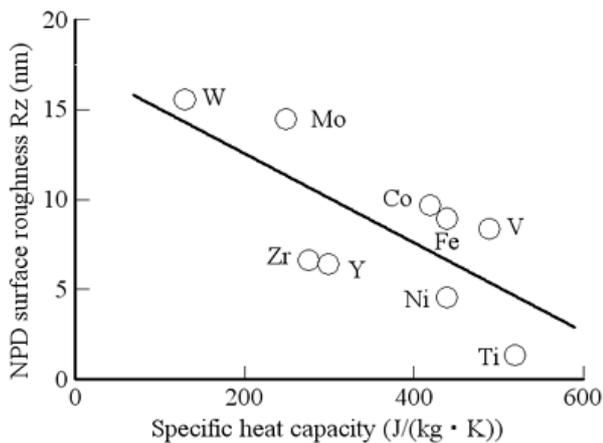
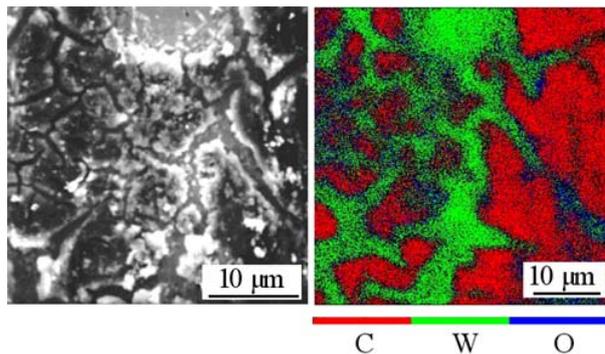


図 16 遷移金属の比熱容量とすくい面の粗さ



(a) 反射電子画像 (b) X線画像
 図 17 EPMA を用いて測定した切りくずの反射電子画像と X 線画像

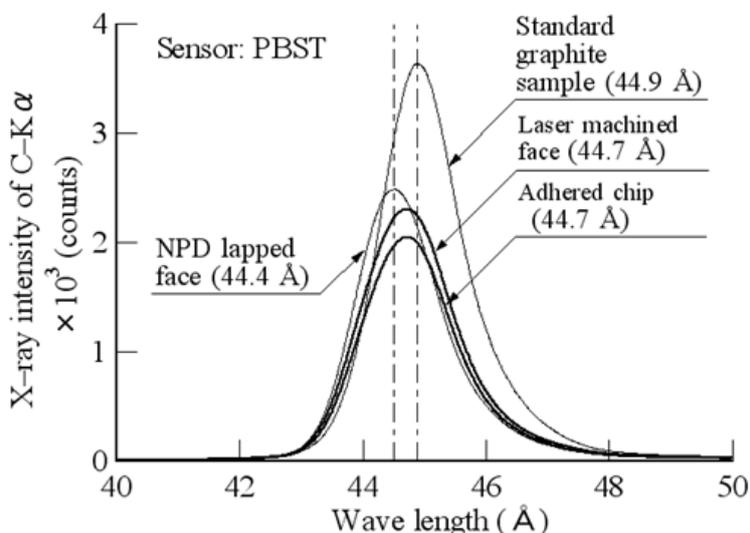


図 18 W 製ツルアに付着した切りくず, レーザ加工した NPD のすくい面, 湿式ラップした NPD のすくい面, ならびにグラファイトの標準試験片から測定された X 線スペクトル

し、砥石作用面から切りくずが飛散したことが原因で、砥石作用面に切りくずが付着しているようすは観察されなかった。そこで、W 製円板をツルアに用いて同様の乾式ラッピングを行い、W 製円板に付着した切りくずに対する定性分析を行った。

図 17 に示しているのは、波長分散型の電子線マイクロアナライザ (Wavelength Dispersive Type Electron Probe Micro Analyzer: EPMA) を用いて測定した W 製ツルアに付着していた切りくずの反射電子画像と X 線画像である。反射電子画像で白く見えている箇所では W や O の濃度が高く、W 製ツルアから除去された切りくずであると考えられる。一方、反射電子画像で黒く見えている箇所では C の濃度が高く、すくい面から除去された切りくずであることを表している。この、すくい面から除去された切りくずに対して行っ

た定性分析の結果を図 18 に示している。比較のため、図 11 に示したようにレーザ粗加工した NPD 製バイトのすくい面から測定された X 線スペクトルを太線、グラファイトの標準試験片や湿式ラッピングを行うことによってレーザ加工時に生じた熱変質層を除去したすくい面から測定された X 線スペクトルを図 18 に細線で付記した。

熱変質層を除去したすくい面からは波長が 44.4 Å の位置にピークがある X 線スペクトル、グラファイトの標準試験片からは波長が 44.9 Å の位置にピークがある X 線スペクトルが測定された。これらの結果と異なり、W 製ツルアに付着した切りくずやレーザ粗加工したすくい面からは、波長が 44.7 Å の位置にピークがある X 線スペクトルが測定された。この結果は、W 製ツルアを用いた乾式ラッピング時にはレーザ粗加工面に残る熱変質層と同じ結晶構造を持つ熱変質層がすくい面に生成され、これが機械的なアブレーション作用によって除去されたことを表している。

2-6 研究成果

図 13 に示したように、すくい面の除去深さは PCD 製ツルアの砥石作用面に露出している遷移金属の電気陰性度が増すに従って増加することが明らかになった。この結果は、PCD 製ツルアを用いた乾式研削時にはダイヤモンド結合に参与している電子が遷移金属によって奪われ、結合強度が低下した脆弱層がすくい面から機械的なアブレーション作用によって除去されるといった熱化学反応が生じたことを表している。この、電気陰性度に関係する熱化学反応によってすくい面から切りくずが除去される場合、電気陰性度が増すに従って切りくずの除去量は増加するがすくい面は粗くなる。

W 製ツルアを用いた乾式ラッピング時と同様に、PCD 製ツルアを用いた乾式研削時にもすくい面には摩擦熱によって熱変質層が生成されたと考えられる。したがって、PCD 製ツルアを用いた乾式研削時には遷移金属により電子が奪われて結合強度が低下した脆弱層だけでなく、熱変質層もすくい面に生成されたと考えられる。この場合、図 16 に示したように比熱容量が高い遷移金属ほど、熱変質層が除去される度合いが増すためにすくい面は平滑になる。ただし、遷移金属の表面が酸化されると同表面は化学的に不活性になり、電気陰性度に関係する熱化学反応が生じ難くなるために切りくずの除去量は減少する。

2-7 今後の課題と取組

「1-7 今後の課題と取組」で述べた内容と全く同じである。当該研究の目標は完全に達成できており、研究終了後に当該研究を継続して実施する必要はないと判断している。ただし、Ti を高周波スパッタした PCD 製円板をツルアに用いて NPD に対して研削加工を行った場合には現時点で粗さが 1 nm Rz 前後の研削加工面が得られているが、これをさらに平滑化するためには、熱化学反応を利用した別の手段を考える必要がある。

参考文献・引用文献

- (1) T. Irifune・A. Kurio・S. Sakamoto・T. Inoue・H. Sumiya, Ultrahard Polycrystalline Diamond from Graphite, Nature, Vol. 421, No. 6923 (2003), pp. 599-600.
- (2) Ed Paul・Chris J. Evans・Anthony Mangamelli・Michael L. McGlaufflin・Robert S. Polvanit,

Chemical aspect of tool wear in Single point diamond turning, *Precision Engineering* 18, Vol.4, No.19 (1996), pp. 4-19, Elsevier Science.

- (3) 諸節祐子, 松下孟, 三木則尚, 鉄系金属/ダイヤモンドの熱化学反応を利用した単結晶ダイヤモンドの加工, 電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会資料, Vol.MSS-08, No.2 (2008), pp.7-11.
- (4) F. Furushiro・ H. Tanaka・ M. Higuchi・ Y. Yamaguchi・ S. Shimada, Suppression Mechanism of Tool Wear by Phosphorous Addition in Diamond Turning of Electroless Nickel Deposits, *CIRP Annals*, 59 (2010), pp.105-108.
- (5) Linus Pauling, *The Nature of the Chemical Bond*, Third Edition, (1960), pp. 93, Cornell University.
- (6) John F. Elliot・ Molly Gleiser, *Thermochemistry for Steelmaking*, Volume 1 (1960), pp. 214-215, Addison-Wesley.
- (7) 日本金属学会編, 金属データブック, 改訂3版, (1993), pp.5, 丸善.
- (8) 天本祥文・吉田昌史・仙波卓弥・角谷均, レーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具・成形技術の開発, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, M03 (2010-9), pp.805-806.

3. 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の成形

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 教授 仙波卓弥

3-1 はじめに

単結晶ダイヤモンドは、 $\{111\}$ 面に平行な結晶面で劈開する性質を持っている。したがって、工具の成形時に切れ刃にチップングが生じているとチップングを起点にして切削加工時には大きな欠けが発生する。ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)を構成するサイズが数十ナノメートルの粒子もまた劈開性を持っているが、個々の粒子で結晶方位が異なっているためにチップングの伝播は抑えられる。つまり、単結晶ダイヤモンドに比べるとNPDは耐チップング性に優れた工具素材であるといえる^{(1),(2)}。

ただし、切れ刃にチップングが生じると隣接する粒子にチップングが伝播することは事実である。したがって、工具の成形時には切れ刃に生じるチップングを完全に防止する必要がある。そこで、短冊状のNPD製工具素材を切削工具の形に成形するための粗加工には、レーザ加工を用いることにした。NPDに対してレーザ加工を行うと、加工面に脆弱な熱変質層が残ることは予測されたが⁽¹⁾、機械的除去加工法と異なり加工面にクラックが残る可能性は低いと考えた次第である。

レーザ粗成形したNPD製切削工具に対する仕上げ加工には、NPDとPCD製ツルアとの間に生じる熱化学反応を利用することにした。熱化学反応によってNPDの研磨面に生じる脆弱層を除去できれば、NPDに機械的なダメージを与えないで鋭利な切れ刃を創成できる可能性が高いと考えられた。この熱化学反応を利用した乾式研削に使用するツルアとして、本研究プロジェクトを立案した2008年にはPCDの表面に遷移金属の粉末を複合めっきしたPCD製円板を用いることを計画した。

「1-5 研究成果」の項目で紹介したようにこの複合めっきは完全な失敗であり、砥石作用面を完全に平坦化したPCD製円板に対して電解加工と高周波スパッタを行い、乾式研削に使用するPCD製ツルアを試作するために多くの時間を費やさざるを得なかった。また、複合めっきに失敗した2009年度、仮にPCD製ツルアの試作に成功できたとしても、第2章で紹介したNPDとPCD製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを残された研究期間内で解明することは容易でないと考えられた。

そこで、レーザ粗成形したNPD製切削工具に対して熱化学反応を利用した乾式研削を行い、欠けのない鋭利な切れ刃を成形できる超精密仕上げ加工技術を開発するといった本研究は、研究実施時期を繰り上げ2009年度の後期に実施することにした。研究協力企業である住友電気工業株式会社エレクトロニクス・材料研究所に依頼して焼結助剤としてコバルトCoとニッケルNiを使用したPCD製円板を試作いただき、これをツルアに使用してNPD製切削工具に対する仕上げ成形を行った。

3-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

第1章で紹介した遷移金属を高周波スパッタしたPCD製ツルアを使用し、第2章で紹介したNPDとPCD製ツルアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明した上で、欠けが無い鋭利な切れ刃を持つNPD製切削工具を試作するというのが本研究プロジェクト

の目標である。したがって、目に見える形で本研究プロジェクトの成果物が求められるとすれば、それは当該研究の成果ということになる。

3-3 目的と目標

直径が 1 mm 以下のガラス製レンズを量産する超硬合金製金型の加工では、キャビティやコアの粗さを 10 nm Rz 以下に仕上げることが求められている。したがって、NPD 製切削工具を用いたマイクロ切削加工を行い所望の粗さを達成するためには、切れ刃に生じる欠けのサイズを 10 nm 以下に抑える必要がある。

切れ刃はすくい面と逃げ面が交わる稜線であり、切れ刃に生じる欠けのサイズを 10nm 以下に成形するためには、乾式研削時に逃げ面やすくい面を 10 nm Rz 以下の値に成形できる PCD 製円板をツールアに使用し、NPD 製切削工具に対して熱化学反応を利用した乾式研削を行う必要がある。

ただし、本研究を実施した 2009 年度には、図 16 に示した実験の結果は得られていなかった。つまり、市販の PCD 製円板の焼結助剤として用いられているコバルト Co をチタン Ti で置換した PCD 製ツールアを用いると、すくい面を 1nm Rz 前後の値に成形できることが判っていなかった。

一方で、砥石作用面の粗さを 30 nm Rz 以下に成形した市販の PCD 製円板をツールアに使用して NPD 製マイクロボールエンドミルに対して乾式研削を行うと、欠けが無い鋭利な切れ刃が成形できることは判っていた^{(1),(2)}。もしも NPD と Co との間に熱化学反応が生じたのであれば、焼結助剤としてニッケル Ni を用いた PCD 製円板をツールアに用いた場合にも同様の切れ刃が成形できると考えられた。

そこで、レーザ粗成形を行ったすくい角が 0 度、逃げ角が 5 度、ならびにノーズ R が 0.2 mm の NPD 製ノーズ R バイトに対し、Co と Ni を焼結助剤として使用した PCD 製ツールアを用いて仕上げ成形を行い、Co だけでなく Ni を用いた場合にも欠けが無い鋭利な切れ刃を成形できることを確認するための実験を行った。

3-4 実験装置及び実験方法

3-4-1 工具素材と成形法の概要

図 19 に示しているのは、工具成形の概要である。工具素材には、ダイヤモンドの粒子径が数十 nm、ヌープ硬さが約 13,000 Hk の NPD を使用した。超硬合金製の基板上にろう付けした幅×長さ×厚さが 2×3×0.6 mm の NPD に対しレーザ粗加工と熱化学反応を利用した乾式研削を行うことにより、すくい角が 0 度、逃げ角が 5 度、ならびにノーズ R が 0.2 mm の NPD 製ノーズ R バイトを試作した。

3-4-2 レーザ粗加工

図 20 に示しているのはレーザ加工装置の外観である。位置決めや送り運動に対する制御分解能が 10 nm の立形マシニングセンタのコラムにレーザを集光させると同時に加工面を観察するための光学系を取付け、レーザ光を機械走査させることにした⁽³⁾。NPD を装着した工具軸は真鍮製の芯振れ防止治具を介してステッピングモータ、ステッピングモータは X-Y ステージを介して回転テーブルに取付けた。立形マシニングセンタの直進・円弧運動と工具の自転・公転運動とを併用することにより、超硬合金の先端にろう付けされた

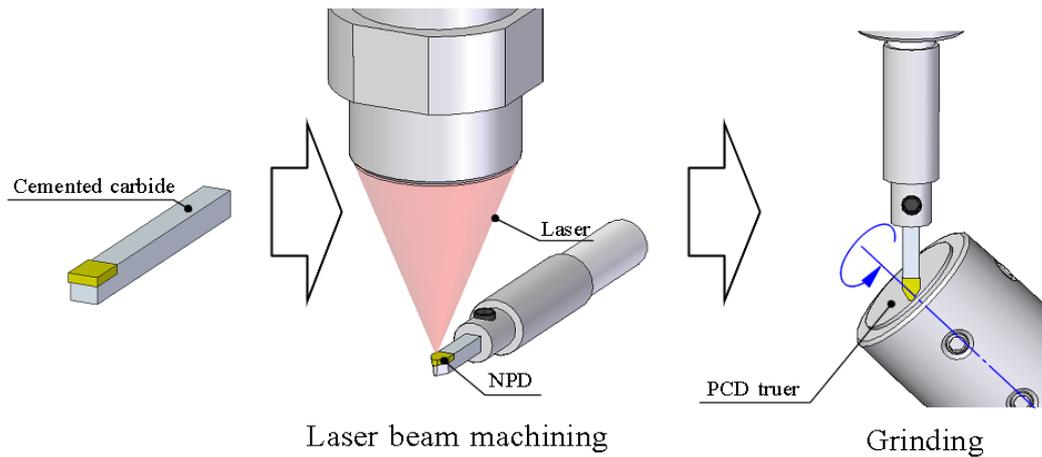


図 19 NPD 工具素材に対するレーザ粗加工と熱化学反応を援用した乾式仕上げ研削

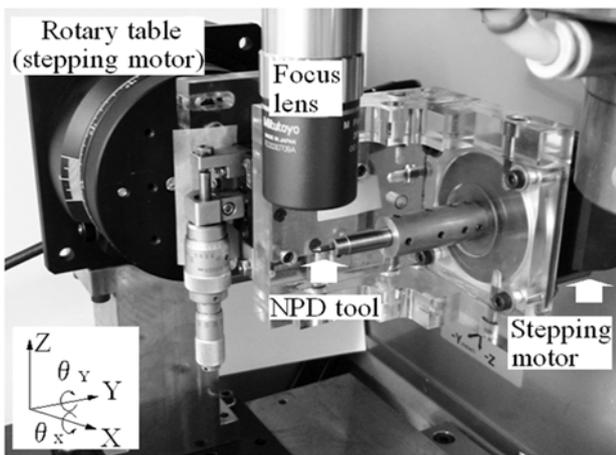


図 20 レーザ加工に使用した装置の外観

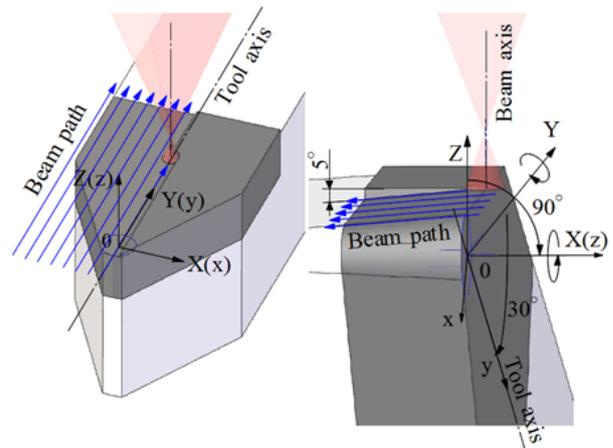


図 21 すくい面と前逃げ面に対するレーザの走査軌跡

NPD を，工具形状に粗成形できる機能を持っている⁽⁴⁾。

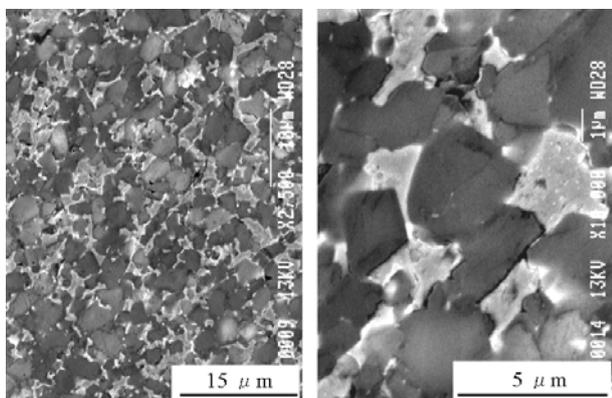
工具を粗成形するために使用したレーザの走査軌跡を図 21 に示す．まず始めに図 20 に示した XY 平面内でレーザを走査させてミーリング加工を行うことによってすくい面を成形した．次に，工具を Y 軸の回りに 90 度自転，Z 軸の回りに 90 度公転させた後，工具を Z 軸の回りに ± 60 度公転運動させると同時にレーザ光を XY 平面に対して 5 度傾斜させた平面内で走査させてミーリング加工を行うことにより，逃げ角が 5 度の前逃げ面と横逃げ面を成形した．

3-4-3 熱化学反応を援用した仕上げ成形

図 22 に示しているのは，乾式研削加工に使用した PCD 製ツルアの砥石作用面に関する電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)写真である．図(a)に示しているのは焼結助剤として Co を用いた PCD, 図(b)に示しているのは焼結助剤として Ni を使用した PCD

である。メッシュサイズが#600のダイヤモンド電鍍を用いて湿式ラッピングと乾式研削を行い、砥石作用面の粗さを30 nm Rz前後の値に成形したPCD製円板を熱化学反応を援用した乾式研削を行うためのツールアとして使用した。

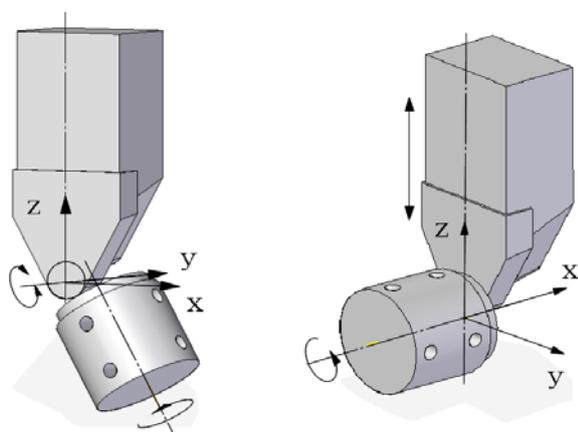
図23に示しているのは、レーザ粗加工されたNPD製ノーズRバイトの逃げ面とすくい面に対する乾式研削の要領である。まず始めに、図(a)に示したY軸の回りに自転運動しているツールアを往復公転運動させ、逃げ角が5度の逃げ面を成形した。次に図(b)に示したように自転運動しているツールアをZ軸の方向に揺動させながら逃げ面を成形した。図24に示しているのは、逃げ面の成形に使用した装置の外観である。PCD製ツールアはDCサーボモータの主軸、DCサーボモータはXYテーブルと楔角が5度のスペーサを介してNC円テーブルに取付けられている。スペーサの楔角を変えることにより、逃げ角を変えることができる構造になっている^{(1),(2)}。



(a) 焼結助剤： Co

(b) 焼結助剤： Ni

図22 熱化学反応を利用した乾式研削に使用したPCD製ツールアの砥石作用面



(a) 逃げ面

(b) すくい面

図23 逃げ面とすくい面に対する乾式研削の要領

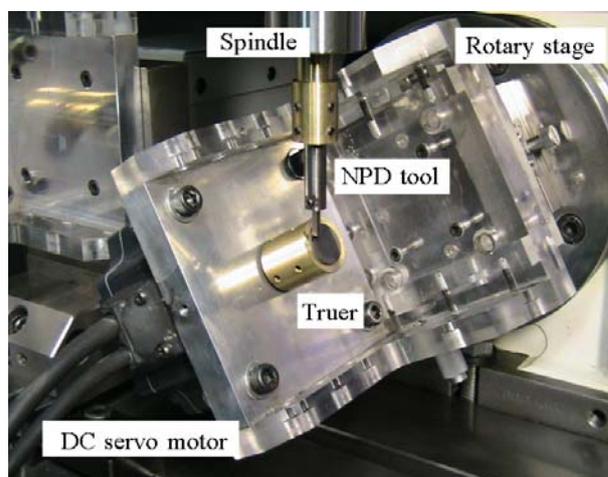


図24 逃げ面の乾式研削に使用した装置の外観

3-5 実験結果

3-5-1 レーザ粗成形の結果

逃げ面を成形する場合, 図 25 に示すようにすくい面から刃裏に向かってレーザを走査させるとレーザの入り口で縁ダレが生じてしまった. 刃裏からすくい面の方向にレーザを走査させた場合にも, レーザの出口で同様の縁ダレが発生した. そこで, 図 26 に示すように刃裏からレーザを走査させる際にすくい面の $10\ \mu\text{m}$ 手前でレーザを止め, 逃げ面側の刃先に突起を成形した. 次に図 27 に示すように刃裏から工具の輪郭に沿ってレーザを走査させ, 突起をトリミングによって除去することにより, 逃げ面に生じる縁ダレを $2\ \mu\text{m}$ 以下の範囲に抑えることを試みた⁽⁴⁾.

上記の方法で粗成形した NPD 製ノーズ R バイトの外観を図 28 に示す. 上記の方法で逃げ面を成形すると, ミーリングした加工面とトリミングした加工面の境界に繋ぎ目が発生する. また, 加工面に熱変質層が発生することは避けられない. ただし, 1 日あれば図 19 に示した短冊状の NPD 工具素材を工具の形に粗成形することができる. 湿式ラップを用いた機械的除去加工では, 同様の粗成形を行うのに少なくとも 1 ヶ月は要するのではないかとと思われる. また, 粗粒のダイヤモンド砥粒を用いた湿式ラッピング時に生じる欠けを除

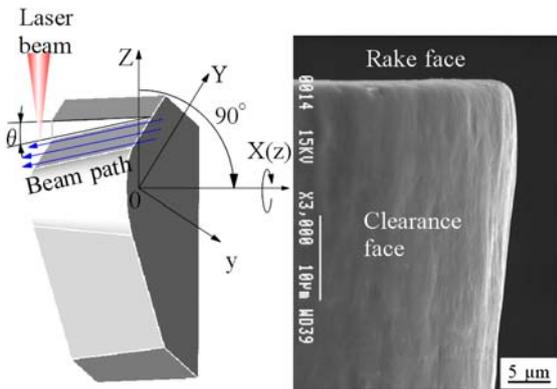


図 25 逃げ面の成形時に生じた縁ダレ

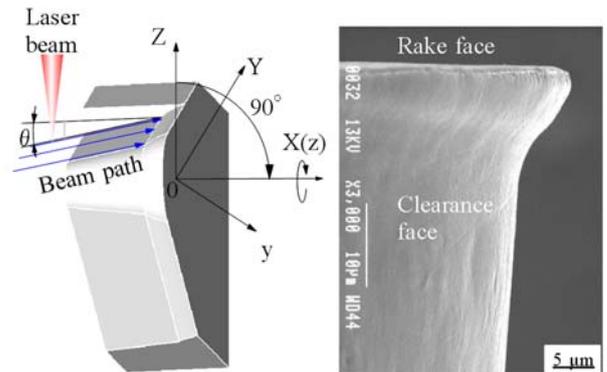


図 26 切れ刃近傍への突起成形

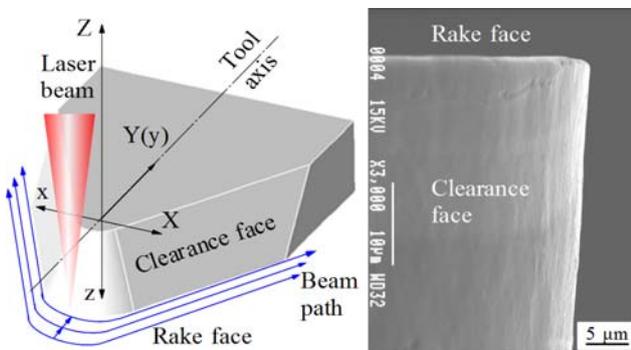


図 27 刃裏からのトリミングによる突起の除去

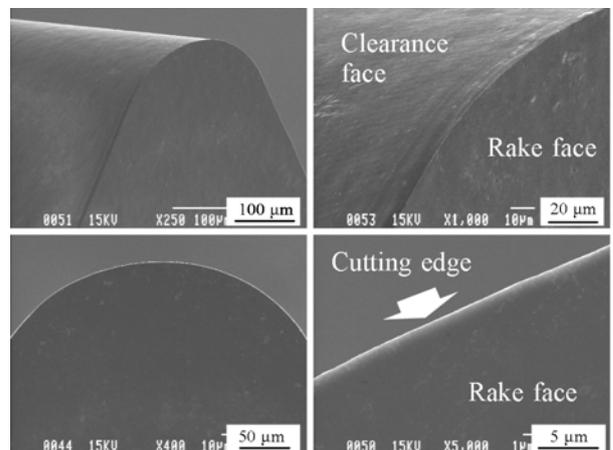


図 28 レーザ粗成形したすくい角が 0 度, 逃げ角が 5 度, ノーズ R が $0.2\ \text{mm}$ の NPD 製ノーズ R バイトの外観

去することは容易でない。

3-5-2 熱化学反応を援用した仕上げ成形の結果

仕上げ成形後に観察した工具の SEM 写真を図 29 と図 30 に示す。図 29 に示しているのは図 22(a)に示した Co を焼結助剤に用いた PCD 製円板をツールアに用いた場合の結果、図 30 に示しているのは図 22(b)に示した Ni を焼結助剤に用いた PCD 製円板をツールアに用いた場合の結果である。両方の工具とも切れ刃にチップングが生じたようすは観察されなかった。また、両方の工具とも逃げ面に梨地のような凹凸が生成されていた。この場合、Ni を焼結助剤に用いた PCD 製ツールアを用いて成形した逃げ面の方が、凹凸の度合いは少ないように観察された。

そこで、図 30 に示した切れ刃の近傍を電界放出形走査電子顕微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)を用いて観察した。図 31 に示しているのは、FE-SEM を用いて観察した切れ刃の状態である。NPD を構成するサイズが数十ナノメートルのダイヤモンドの粒子よりも小さいことは事実であるが、切れ刃にはサイズが 10 nm 前後の凹みが

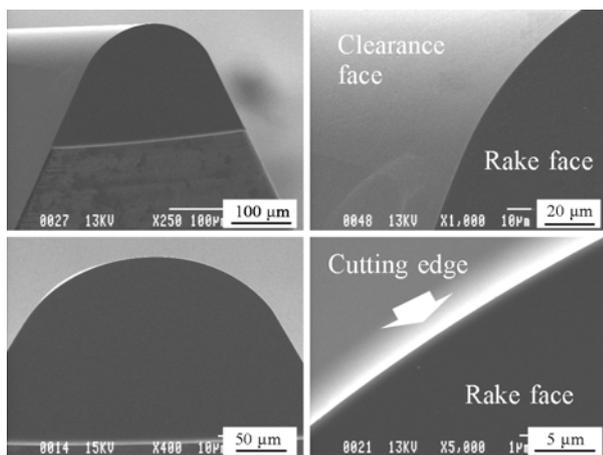


図 29 Co を焼結助剤に用いた PCD 製円板をツールアに使用し仕上げ成形を行った場合のノーズ R バイト

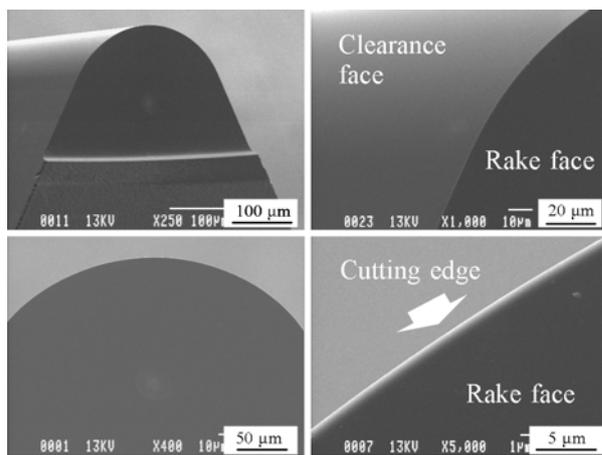


図 30 Ni を焼結助剤に用いた PCD 製円板をツールアに使用し仕上げ成形を行った場合のノーズ R バイト

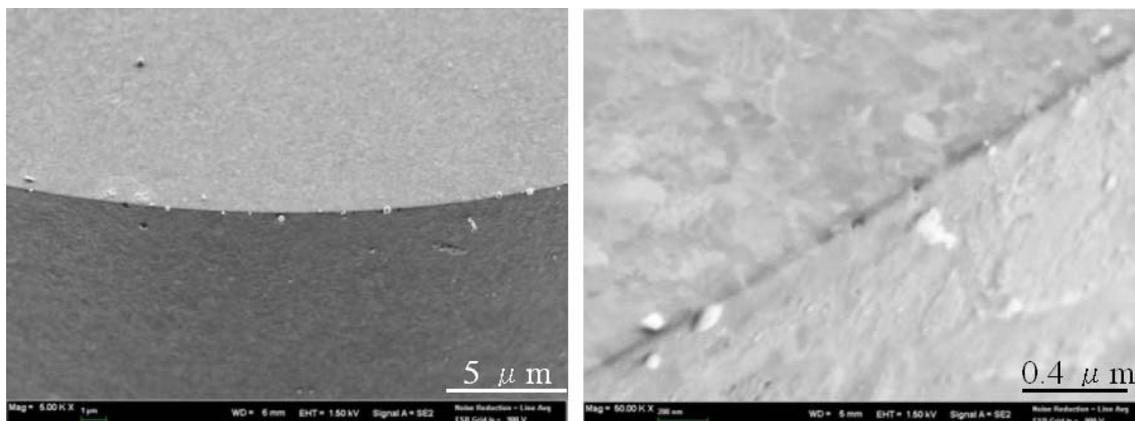


図 31 FE-SEM を用いて観察した切れ刃近傍の拡大 (ツールア : Ni を焼結助剤に用いた PCD 製円板を使用)

生じていることが観察された。図 31 に示したように、すくい面に比べると逃げ面は粗く成形されており、逃げ面の凹みが切れ刃に転写されたことが原因である。

3-6 研究成果

Co や Ni を焼結助剤に用いた PCD 製円板を用いて乾式研削を行うと研削加工面に図 15 (c) に示すような梨地が発生し、とくに逃げ面に生じた梨地が切れ刃に転写されるため図 31 に示したように切れ刃にはサイズが 10 nm 程度の凹みが発生する。工具成形時にすくい面とツルアとは面接触しているのに対し、逃げ面とツルアとは線接触しているために砥石研削点での温度が高く、熱化学反応が活性化されたことが原因である可能性が高い。

第 2 章で紹介したとおり、NPD と遷移金属との間に遷移金属の電気陰性度に関係する熱化学反応が生じる場合には NPD の表面には梨地が生成されるが、Co を Ti で置換した PCD 製円板をツルアに用いて乾式研削を行うと NPD の表面には梨地が全く発生せず、粗さが 1 nm Rz 前後の研削加工面が得られている。したがって、Co を Ti で置換した PCD 製円板をツルアに用いて乾式研削を行えば図 31 に示した結果にも増して鋭利な切れ刃を成形できると考えている。

3-7 今後の課題と取組

「3-1 はじめに」の項目で紹介したとおり、本研究は第 2 章で紹介した研究の成果が得られた後に実施すべき性質の研究である。ただし、PCD 製ツルアの開発に手間取ることが予想されたため、研究計画を前倒して 2009 年度の後期に実施した。この場合、研究協力企業である住友電気工業株式会社エレクトロニクス・材料研究所に依頼し、焼結助剤としてコバルト Co とニッケル Ni を使用した 2 種類の PCD 製円板を試作し、これをツルアとして使用した。

NPD と Co や Ni との間には電気陰性度に関係する熱化学反応が発生し、研削加工面に梨地が発生することは避けられない。この場合、NPD とツルアとが面接触するすくい面に比べ NPD とツルアとが線接触する逃げ面に生じる梨地の方が粗くなるといった現象が観察できたことは、本研究で得られた最大の収穫である。この結果は、Co を Ti で置換した PCD 製円板をツルアに用いることの他に、乾式研削の条件を変えることにより図 31 に示した結果にも増して鋭利な切れ刃が成形できることを意味している。

参考文献・引用文献

- (1) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.
- (2) Takuya SEMBA, Ryuich OKAZAKI, Hitoshi SUMIYA, Ultraprecision Cutting of Cemented Carbide Using Microball Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2010 Proceedings, B01 (2010-10), pp.75-78.
- (3) Takuya SEMBA・Testuro YAMAGUCHI・Yoshifumi AMAMOTO, Three-Dimensional Microfabrication System Using Focused Fiber Laser Beam, Proc. of the 4th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, LEM21, 430 (2007), pp. 843-848.
- (4) 天本祥文・吉田昌史・仙波卓弥・角谷均, レーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具・成形技術の開発, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, M03 (2010-9), pp.805-806.

4. 超合金製金型の加工に求められる高速粗加工への NPD 製切削工具の応用

西部電機株式会社 生産部 工作機械技術課 グループリーダー 森川敏郎

4-1 はじめに

超合金製の金型を機械加工する場合には、粗加工として放電加工、中仕上げ加工として研削加工、ならびに仕上げ加工として研磨加工を行うのが一般的である。それぞれの加工に使用する工作機械や治工具が異なるため、金型の加工には長時間を要しているのが現状である。また、細穴の加工や形状精度や寸法精度が求められるコーナ R の加工には従来の放電加工や研削加工が適用できないため、工作機械ユーザからはこれら 2 つの工程を集約できる次世代の加工技術を開発することが求められている。

工作機械ユーザからの要望を受け、超合金に対する高速粗加工技術を開発することの重要性は弊社でも認識し、当該プロジェクトに参加する以前から市販の単結晶ダイヤモンド(SCD)製の切削工具や焼結ダイヤモンド(PCD)製の切削工具を超合金の加工に用いるための研究を進めていた。とくに、放電加工と研削加工といった 2 つの工程を 1 つに集約できる、高速粗加工技術の開発を進めていた。

その結果、単結晶ダイヤモンド製の切削工具は耐チップング性に劣っており、超合金の高速粗加工には向いていない印象を持っていた。また、単結晶ダイヤモンド製の切削工具に比べると焼結ダイヤモンド製の切削工具は耐チップング性に優れているが工具が損耗することは事実であり、ランニングコストの面で放電加工と研削加工を切削加工に集約することには無理があると考えていた。

福岡工業大学・仙波教授から本研究プロジェクトへの参加要請を受けたのは研究に行き詰まっていた丁度その頃であり、志向している研究が完全に一致していたために本研究プロジェクトに参加することにした。弊社で切削実験に使用するナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製の切削工具は福岡工業大学で試作、弊社では超合金に対する切削加工実験を実施した。本報告書では、弊社で行った切削実験の結果について報告する。

4-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

本研究プロジェクトの目的は、超合金に対して粗さが 10 nm Rz の切削加工面を作ることができる超精密加工用の NPD 製切削工具を開発することである。ただし、超精密切削加工用に開発された工具を高速粗加工に用いることは、ランニングコストの面で得策とは思えない。本研究では、超合金製金型の製造に要するリードタイムを短縮するという観点から、本研究プロジェクトの成果が活かされる超精密切削加工の前に行う必要がある、高速粗加工技術の開発を行った。

4-3 目的と目標

「4-1 はじめに」の項目で紹介したように、工作機械のユーザからは従来の放電加工と研削加工を 1 つに集約できる次世代の加工技術が求められている。また、放電クラックが嫌われる超合金製金型の加工には研削加工を用いるが、研削加工を行い超合金を短時

間で加工することは容易でない。さらに、金型のサイズは昨今微細化する傾向にあるが、放電加工や研削加工を用いてサイズが 1 mm 以下の超合金製金型を成形することは容易でない。これらの問題点を克服するため、本研究では超合金に対して高速粗加工を行うことができる NPD 製のマイクロ切削工具を新たに開発することを試みた。

4-4 実験方法及び実験条件

4-4-1 NPD 製切削工具

図 32 に示しているのは、レーザ加工を行い成形した NPD 製ノーズ R バイトの外観である⁽¹⁾。すくい角を 0 度に固定して逃げ角を 5~30 度の範囲で 4 通り変化させたバイトと、逃げ角を 5 度に固定してすくい角を -20~20 度の範囲で 5 通り変化させた、計 8 種類のバイトを使用した。マイクロ切削に対応できるように、ノーズ R は 0.4 mm に設定した。レーザ加工後の工具表面には、ダイヤモンド構造(sp3)の一部がグラファイト構造(sp2)に変化した熱変質層が残っており⁽²⁾、この熱変質層は導電性を持っている。そこで、レーザ加工後のノーズ R バイトに対して電解加工を行い、熱変質層を除去することにした。

4-4-2 切削実験の方法

被削材には、焼結助剤として Co を用いたビッカース硬さが 1,200 Hv の超合金を使用した。図 33 に示しているのは、切削試験に使用した精密旋盤の外観である。三爪チャックを使って被削材を精密旋盤の主軸に装着し、端面に対する正面切削を行った。機上で工具の逃げ面摩耗幅を測定し、すくい角や逃げ角といった刃物角を変化させた場合に得られる工具の摩耗曲線を比較することにより、超合金の高速粗加工に適した工具の刃物角を見出すための実験を行った。

4-5 実験結果

4-5-1 超合金製リレー接点金型キャビティの加工

まず初めに、NPD が超合金の切削加工に使えるか否かを見極めるため、直径が 15 mm

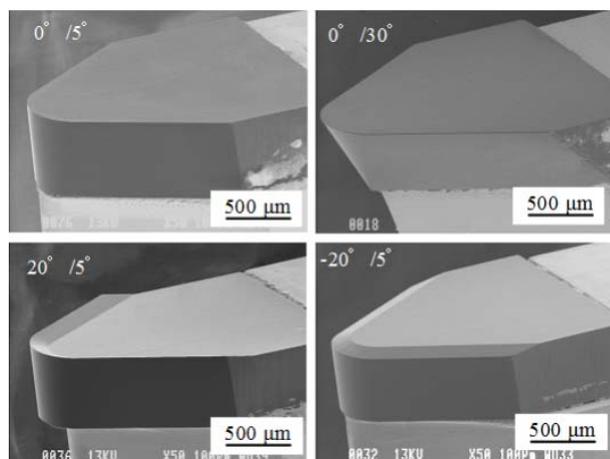


図 32 切削実験に使用したノーズ R バイトの外観 (0° / 5° : すくい角/逃げ角)

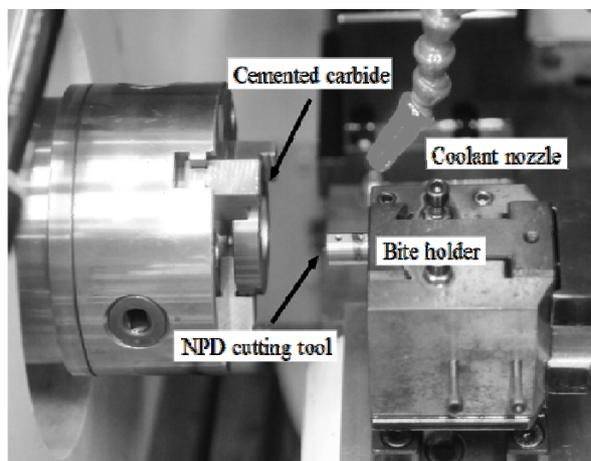


図 33 切削実験に使用した精密旋盤の外観

の超合金製丸棒の端面に直径が 3 mm で深さが 0.5 mm のリレー接点金型キャビティを加工した。主軸の回転数は 3000 rpm, 切込みは 25 μm , ならびに送りは 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$. に設定した。送りを 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$. に設定したので 1 パス当たりの加工時間は 7 秒, 切削距離は 0.7 m である。切込みを 20 回加えて深さが 0.5 mm のキャビティを加工したので総加工時間は 140 秒, 総切削距離は 14.1 m である。

図 34 に示しているのは切削実験に使用したすくい角が 0 度, 逃げ角が 30 度, ならびにノーズ R が 0.2 mm の NPD 製ノーズ R バイトの外観, 図 35 に示しているのはキャビティの加工例, ならびに図 36 に示しているのは加工前, 1 パス加工した後, 10 パス加工した後, ならびに 20 パス加工した後に観察したノーズ R バイトの外観である。このように, 切込みを 25 μm , 送りを 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$. に設定すると工具はほとんど摩耗せず, 粗さが 250 nm Rz 程度の切削加工面を作ることができた。

放電加工, 研削加工, ならびに研磨加工を行うことによって図 35 に示したキャビティを

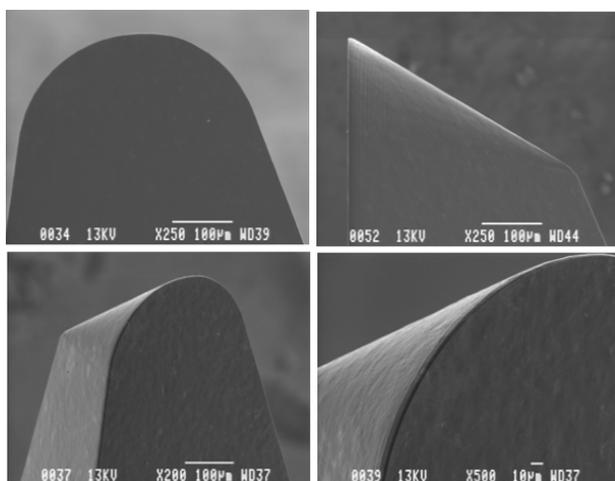


図 34 リレー接点金型キャビティの加工に使用したノーズ R バイトの外観

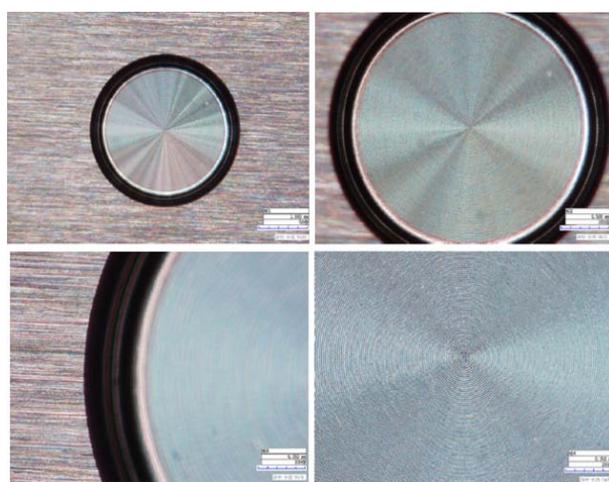


図 35 リレー接点金型キャビティの加工例 (加工面の粗さ: 250 nm Rz)

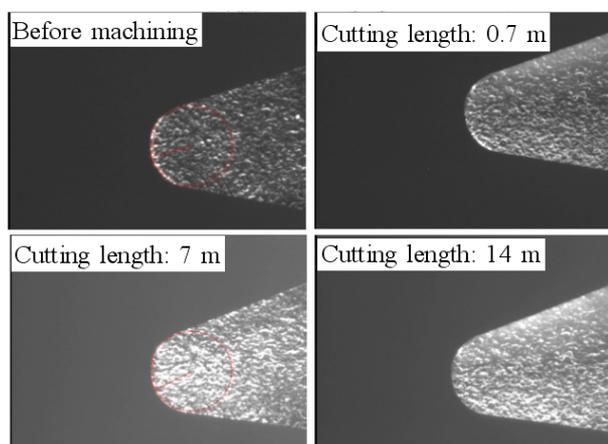


図 36 切削加工時に観察した工具摩耗の様子

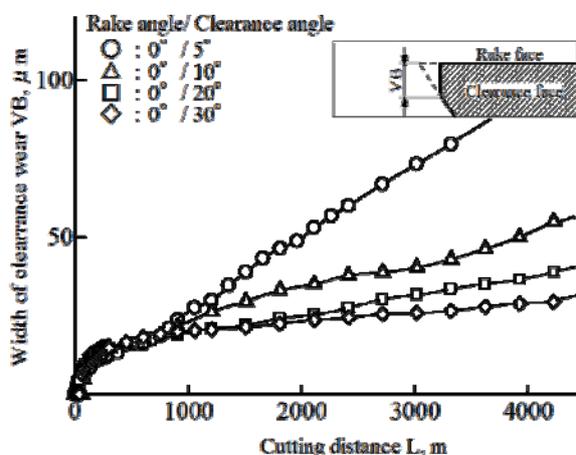


図 37 逃げ角を 5~30 度の範囲で変化させた場合に得られた逃げ面摩耗幅と切削距離

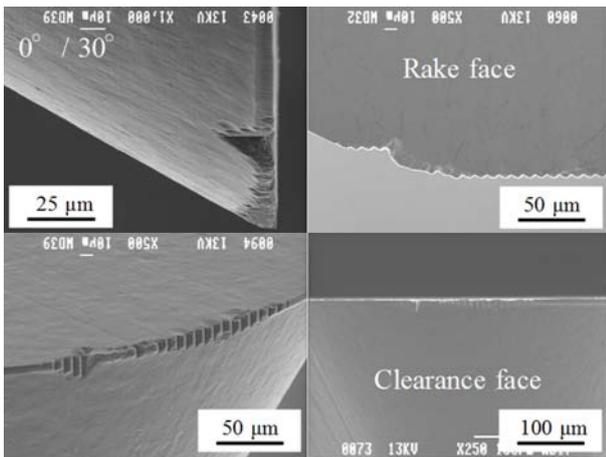


図 38 超硬合金を 4 Km 正面切削した後
に観察した工具の摩耗形態（すくい角 0 度，逃げ角 30 度，ノーズ R
0.4 mm）

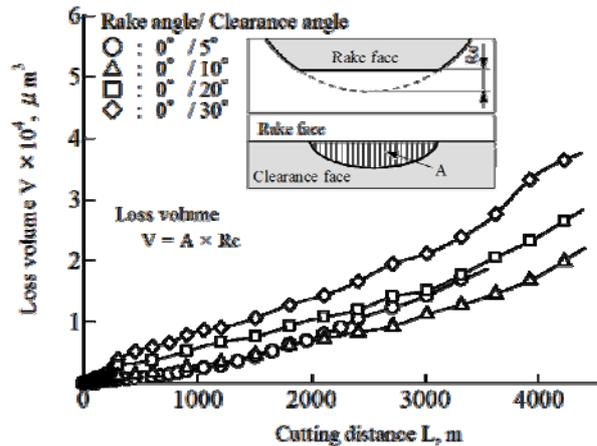


図 39 逃げ角を 5～30 度の範囲で変化
させた場合に得られた逃げ面摩耗体積
と切削距離

成形する場合，放電加工の場合には電極の成形，研削加工の場合には研削工具のツルーイングやドレッシングに時間を要するため，最低でも 1 時間は要する加工である．これを切削加工を行い 140 秒で行うことができたというのは驚きであり，硬さが 1,200 Hv 前後の超硬合金に対して粗加工を行う目処を立てることができた．なお，同じ条件で硬さが 2,000 Hv 前後の超硬合金加工すると切れ刃に欠けが発生した．

4—5—2 NPD 製切削工具の耐摩耗性

次に図 32 に示したようにレーザ成形した NPD 製のノーズ R バイトを使用し，工具の耐摩耗性を評価するための切削実験を行った．内径が 24 mm で外径が 50 mm の超硬合金製円筒の端面に対する正面切削を行った．工具の耐摩耗性を評価するため，切削距離が 4 Km に達するまでの切削実験を行った．主軸の回転数は 3,000 rpm，切込みは 25 μm，ならびに送りは 10 μm/rev に設定した．

図 37 に示しているのは，すくい角を 0 度に固定し逃げ角を 0～30 度の範囲で変化させた NPD 製ノーズ R バイトを用いた場合に得られた，切削距離と逃げ面摩耗幅との関係である．逃げ面摩耗幅は逃げ角が増すに従って減少した．図 38 に示しているのは，逃げ角が 30 度のノーズ R バイトを用いて超硬合金を 4 Km 切削した後観察した工具の摩耗形態である．工具の前逃げ面には櫛刃状の摩耗，横逃げ面には境界摩耗が生じていたが，切れ刃にチッピングが生じたようすは観察されなかった．

図 37 に示した逃げ面摩耗幅から切れ刃先端からの後退量を求め，逃げ面摩耗面積と切れ刃の後退量から逃げ面摩耗体積を求めると，切削距離と逃げ面摩耗体積との関係は図 39 のように求められた．逃げ面摩耗幅が小さいほど新生面との摩擦抵抗が少ない．したがって切れ味の良さという観点からは逃げ角を 30 度に成形したノーズ R バイトが優れている．ただし，図 39 のように得られた実験の結果から，刃先の耐摩耗性という観点からは逃げ角を 10 度に成形したノーズ R バイトが優れていることが明らかになった．

4-6 研究成果

超硬合金製金型の加工には、放電加工、研削加工、ならびに研磨加工が用いられる。本研究の目的は、放電加工と研削加工を集約できる高速切削加工技術を開発することであった。「4-5-1 超硬合金製リレー接点金型キャビティの加工」で紹介したように、すくい角が0度、逃げ角が30度ならびにノーズRが0.2 mmのNPD製切削工具を用いると、直径が3 mm、深さが0.1 mm、ならびに表面の粗さが0.25 μm Rzのリーレー接点金型のキャビティを140秒で加工することができた。放電加工や研削加工を行うと従来は最低でも1時間は要していた加工である。第3章で紹介した超精密微細加工用のNPD製ノーズRバイトを用いると粗さが10 nm Rz以下の切削加工面を得ることが可能である。この結果は、レーザー成形したノーズRバイトと超精密仕上げ成形を行ったノーズRバイトを合わせて用いれば、従来は放電加工、研削加工、ならびに研磨加工をとった3つの工程が切削加工に集約できることを意味する。

4-7 今後の課題と取組

超硬合金に対する高速粗加工技術を開発するといった本研究の目標は完全に達成されており、本研究を継続して実施する必要はない。ただし、本研究で得られた研究の成果をどのように弊社の事業展開に繋げていくかという点に関しては、社会情勢を踏まえながら判断する必要がある。

工作機械、工具ならびにCAD/CAMを駆使した我が国のモノづくり技術は過去20年くらいの間に中国を初め東南アジア諸国に流出した。過去に我が国が歩んできたのと同様に、近未来にこれらの諸国は自前の工作機械、工具、ならびにCAD/CAMを持つようになると考えられる。

このような状況の中で我が国がモノづくりに関してトップの位置を維持し続けるためには、従来になかったコンセプトの工作機械、工具、ならびにCAD/CAMを開発する必要がある。本研究で使用したNPD製の切削工具は、まさに次世代を担う切削工具であることに間違いない。

これを上手く駆使するためには、工作機械ユーザが工具を成形しノウハウを自社内に蓄積することができる、自己増殖型のモノづくりシステムを新規に構築する必要があるように思われる。弊社では、この自己増殖型のモノづくりシステム貢献できる工作機械の開発に取り組むたいと考えている。

参考文献・引用文献

- (1) 吉田昌史・原田武史・仙波卓弥・角谷均, パルスファイバーレーザーを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の成形, 2010年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, D38 (2010-8), pp.401-402.
- (2) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.

5. 超合金製金型の加工に求められる超精密微細加工への NPD 製切削工具の応用

株式会社ワークス 製造グループライン長 本田伸浩

5-1 はじめに

ガラス製レンズを量産するための金型には超合金が用いられており、超合金に対して研削加工と研磨加工を行うことによって金型キャビティの表面は 10 nm Rz 以下の粗さに成形されている。ただし、超合金に対して直径が 1 mm 以下のレンズ型を成形できるマイクロ研削加工技術やマイクロ研磨加工技術は今のところ開発されていない。とくに、圧力切込み方式のマイクロ研磨加工を行い所望の形状精度を満たすことは容易でない。

一方、医療用内視鏡のレンズに使われている直径が 0.1 mm 以下の複眼レンズや、液晶モニタの背面に使われている直径が 0.1 mm 以下のマイクロレンズアレイシートが、近未来に樹脂からガラスに置換されることは間違いない。このレンズ素材の変化に対応するためには、超合金に対して直径が 1 mm 以下で粗さが 10 nm Rz 以下のレンズ型を成形できるマイクロ研削加工技術やマイクロ切削加工技術を開発する必要がある。

本研究では、現時点で最も鋭利に成形された NPD 製のマイクロ切削工具を、超合金製レンズ金型の加工に求められる超精密微細切削へ応用するための研究を行った。超合金に対して 10 nm Rz 以下の切削加工面を作ることができれば、従来行っていた研磨加工は不要になり、リードタイムを大幅に短縮することができる。また、従来は不可能であった、直径が 1 mm 以下のレンズ型の加工が実現されることになる。

5-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

単結晶ダイヤモンドほどではないが、NPD もまたチップングを起点にしてチップングが伝播する性質を持っている^{(1), (2)}。したがって、成形時には NPD 製切削工具の切れ刃に生じるチップングを完全に防止する必要がある。本研究プロジェクトは、NPD 製切削工具の切れ刃に生じるチップングを防止できる工具成形技術を新たに開発するための研究である。本研究プロジェクトの中で、本研究は NPD 製切削工具を超合金に対する超精密切削加工に使用した場合に、粗さが 10 nm Rz 以下の切削加工面が得られるか否かを確かめる役割を担っている。

5-3 目的と目標

第 2 章で紹介した、NPD とそれを成形する PCD 製ツールアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムが解明できたのは 2011 年の 2 月であり、本研究プロジェクトの成果物ともいえる NPD 製切削工具を本研究に使用することができなかった。福岡工業大学では本研究プロジェクトを真の意味で成功させるために必要な、NPD とそれを成形する PCD 製ツールアとの間に生じる熱化学反応のメカニズムを解明することに傾注しており、本研究で使用する NPD 製切削工具を福岡工業大学で試作することには無理があった。

そこで、本研究で使用する NPD 製切削工具については、研究協力企業である住友電気工業株式会社エレクトロニクス・材料研究所に依頼して試作して頂くことにした。2010 年の

時点で切れ刃を最も鋭利に成形した NPD 製の切削工具を用いて超硬合金に対する超精密切削加工を行い，超精密切削加工で得られる加工面の粗さと切れ刃の耐摩耗性を明らかにするための研究を行った。

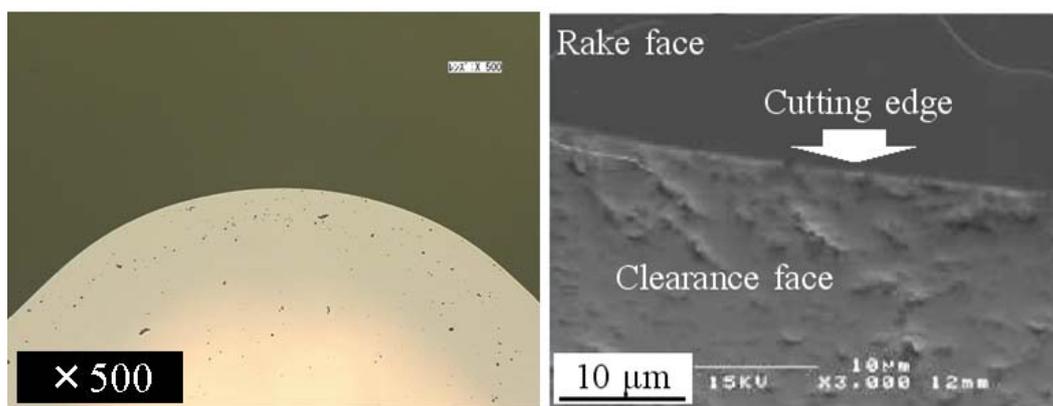
5-4 実験方法及び実験条件

5-4-1 NPD 製切削工具

切削実験に使用した NPD 製ノーズ R バイトの外観を図 40 に示す。すくい角は 0 度，逃げ角は 10 度，ならびにノーズ R は 0.4 mm である。すくい面は平滑に成形されているが逃げ面には凹凸が残っており，切れ刃に目立った欠けは見られないが逃げ面の凹みが残っている。

5-4-2 切削実験の方法

被削材にはピーカース硬さが 1,300 Hv と 2,600 Hv の超硬合金を使用した。切削実験には，位置決めや送り運動に対する制御分解能が 1 nm の横形マシニングセンタを使用した。図 41 に示すように，マシニングセンタの主軸に被削材をクランプし，直径を 6 mm に成形した被削材の端面に曲率半径が 6mm で深さが 0.5 mm のキャビティを成形した。研削加工



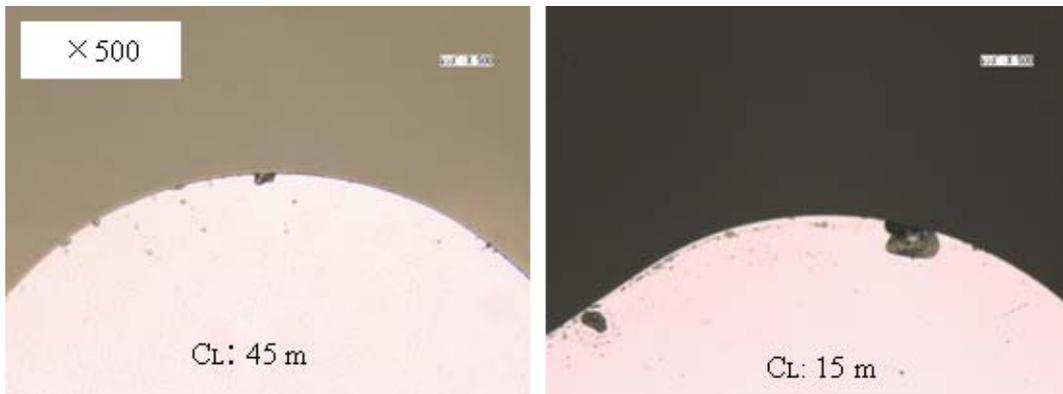
(a) 光学顕微鏡画像 (b) 走査型電子顕微鏡画像
図 40 超硬合金の超精密切削に使用した NPD 製ノーズ R の外観



(a) 横形マシニングセンタの外観 (b) 端面切削のようす
図 41 切削実験に使用したマシニングセンタの外観と端面切削のようす

表 4 超硬合金に対する切削条件

	Hardness of cemented carbide	Rev. speed of spindle	Feed rate	Feed/revolution	Depth of cut	Surface roughness/ Cutting length
	Hv	rpm	mm/min	μm	μm	nm Rz/ m
Depth of cut	2600	300	0.9	3	1	176/15
	2600	300	0.9	3	0.5	129/45 127/45
Hardness	1300	300	0.9	3	0.5	659 /15 471/45 560/75
Rev. speed	1300	2000	0.9	0.45	0.5	247/15 307/45 240/75



(a) 切込み $0.5\ \mu\text{m}$

(b) 切込み $1\ \mu\text{m}$

図 42 硬さが 2600 Hv の超硬合金を切削．半径方向切込みを変え切削実験を実施．チップングが初めて発生した切削距離 CL

を行い、被削材外径と端面の粗成形を行った。切削実験の条件は表 4 に示すとおりである。被削材である超硬合金の硬さ、工具の半径方向切込み量、ならびに工具の送り速度が、切削加工面の粗さや工具摩耗に及ぼす影響を明らかにするための実験を行った。

5-5 実験結果

5-5-1 加工面の粗さと半径方向切込み

まず初めに、ビッカース硬さが 2,600 Hv の超硬合金に対して端面切削を行った。主軸の回転数を 300 rpm、工具の送り速度を 0.9 mm/min に固定し、半径方向切込みを変化させ切削実験を行った。加工終了後に機上で工具を観察し、切れ刃にチップングが生じた時点で加工を終了した。なお、1 パスあたりの切削距離は 15 m である。

半径方向切込みを $0.5\ \mu\text{m}$ に設定した場合には、図 42 に示すように 3 パス加工した後に切れ刃にチップングが生じていた。半径方向切込みを $1\ \mu\text{m}$ に増すと、1 パス加工しただけで切れ刃にチップングが生じた。表 4 に示したように、半径方向切込みを $0.5\ \mu\text{m}$ に設定した場合の加工面の粗さは 176 nm Rz、半径方向切込みを $1\ \mu\text{m}$ に設定した場合の加工面の粗

さは約 130 nm Rz であった。

5-5-2 加工面の粗さと超硬合金の硬さ

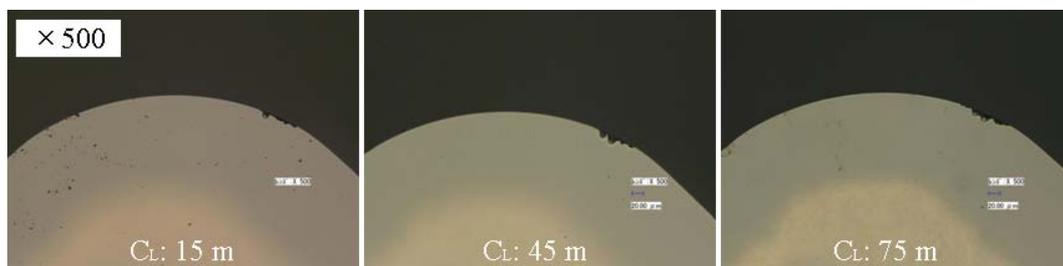
西部電機㈱で行った粗加工の実験でも，ビッカース硬さが 2,000 Hv の超硬合金を切削すると切れ刃にチッピングが生じていた．そこで，被削材をビッカース硬さが 2,600 Hv の超硬合金から 1,300 Hv の超硬合金に変え，硬さが 1,300 Hv の超硬合金に対して同様の切削実験を行った．加工条件は表 4 に示したとおりであり，主軸の回転数は 300 rpm，工具の送り速度は 0.9 mm/min，ならびに半径方向切込みは 0.5 μm に設定した．

図 43 に示しているのは被削材の端面を 1，3，ならびに 5 パス加工した後に観察した切れ刃の摩耗状態である．図 42 に示した結果に比べ，切れ刃に生じたチッピングのサイズは減少したが，すくい面にチッピングが生じていた．また，表 4 に示したとおり 1，3，ならびに 5 パス加工した後に測定した加工面の粗さは，それぞれ 659，471，ならびに 560 nm Rz であった．

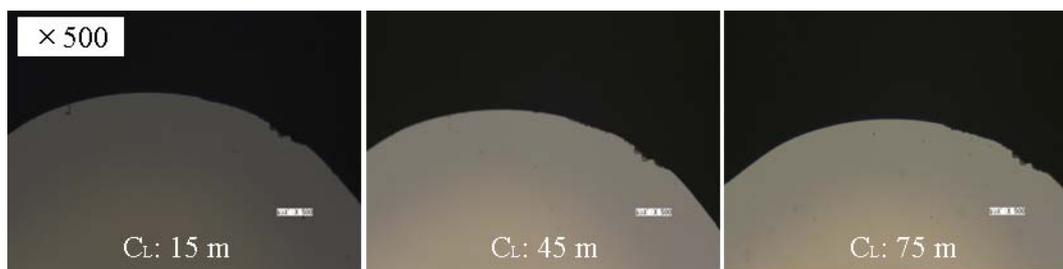
5-5-3 加工面の粗さと送り速度

切れ刃に生じるチッピングを防ぐためには，切れ刃にかかる負担を減らす必要があると考えられた．そこで主軸の回転数を 300 rpm から 2,000 rpm に上げ，工作物一回転当たりの送り量を 3 μm から 0.45 μm に減らして同様の切削実験を行った．加工条件は表 4 に示したとおりである．図 43 と同様に，被削材の端面を 1，3，ならびに 5 パス加工した後に観察した切れ刃の摩耗状態を図 44 に示す．

表 4 に示したとおり 1，3，ならびに 5 パス加工した後に測定した加工面の粗さは，それぞれ 247，307，ならびに 240 nm Rz であり，工作物一回転当たりの送り量を 3 μm から 0.45



(a) 1 パス加工後 (b) 3 パス加工後 (c) 5 パス加工後
図 43 硬さが 1300 Hv の超硬合金を使用．端面を 1,3，ならびに 5 パス加工した後に観察した切れ刃の摩耗状態．1 パスの切削距離 CL: 15 m



(a) 1 パス加工後 (b) 3 パス加工後 (c) 5 パス加工後
図 44 硬さが 1300 Hv の超硬合金を使用．送りを 3 $\mu\text{m}/\text{rev}$ から 0.45 $\mu\text{m}/\text{rev}$ に減少．端面を 1,3，ならびに 5 パス加工した後に観察した切れ刃の摩耗状態．1 パスの切削距離 CL: 15 m

μm に減らした効果は見られた。ただし，工作物一回転当たりの送り量を $0.45 \mu\text{m}$ まで減らしたが，すくい面にはチッピングが生じていた

5-6 研究成果

研削加工と研磨加工を行い，ガラスレンズ用金型のキャビティは 10 nm Rz 以下の粗さに仕上げられている。これに対し，図 40 のように成形した NPD 製切削工具を用いた場合には，超精密と表現してもよい条件で切削加工を行ったにもかかわらず $240\sim 300 \text{ nm Rz}$ の粗さしか得ることができなかった。この切削加工面の粗さは，図 34 のようにレーザ粗成形した NPD 製切削工具を使用し，半径方向切込みを $25 \mu\text{m}$ ，送りを $10 \mu\text{m/rev}$ に設定して端面切削を行い，図 35 のように粗成形した切削加工面の粗さとほぼ同じである。

本研究で使用した NPD 製切削工具を提供いただいた研究協力企業では，単結晶ダイヤモンド製の切削工具を成形するのと同様に，粗粒のダイヤモンド砥粒を用いた粗成形と鑄鉄製のスカ이프⁽³⁾、⁽⁴⁾を用いた乾式研削を行うことによって NPD 製切削工具を成形したと聞いている。その結果，図 40 に示したように逃げ面に生じた凹凸が切れ刃に残り，切れ刃にはチッピングではないが凹凸が生じている。この凹凸が原因で切れ刃にチッピングが生じた可能性が高い。

5-7 今後の課題と取組

図 28 に示したように，パルスファイバーレーザを用いると欠けのない切れ刃を短時間で粗成形することができる。また，図 16 に示したように焼結助剤として用いられているコバルト Co をチタン Ti で置換した PCD 製円板をツルアに用いて NPD に対して乾式研削を行うと現時点でも 1 nm Rz 前後の粗さが得られている。本研究プロジェクトを行うことによって解明された熱化学反応のメカニズムを利用すると，研削加工面の粗さはさらに改善される可能性がある。したがって，NPD 製の切削工具を超合金の超精密微細加工に使用することを指向した本研究は，継続して実施する価値があると考えている。

参考文献・引用文献

- (1) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均，ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル，日本機械学会論文集 C 編，Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.
- (2) Takuya SEMBA, Ryuich OKAZAKI, Hitoshi SUMIYA, Ultraprecision Cutting of Cemented Carbide Using Microball Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2010 Proceedings, B01 (2010-10), pp.75-78.
- (3) ダイヤモンド工業協会編，切削工具の種類・規格・製造法・性質・選択法，ダイヤモンド技術総覧，(2007), pp. 192-199, NJT.
- (4) (財)機械振興協会技術研究所，宝石の加工，昭和 61 年度加工技術データファイル第 9 巻別刷，(1986), pp.22-43.

成果実績

(1) 口頭発表

- ・2009年度精密工学会秋季大会学術講演会(2009.9.10 神戸大学)
ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル(発表者 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均)
- ・2009年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会(2009.12.12 佐賀大学)
ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミルの耐欠損性(発表者 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均)
- ・2010年度砥粒加工学会学術講演会(2010.8.28 岡山大学)
パルスファイバーレーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の成形(発表者 吉田昌史, 原田武史, 仙波卓弥, 角谷均)
- ・2010年度精密工学会秋季大会学術講演会(2010.9.27 名古屋大学)
レーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具・成形技術の開発(発表者 天本祥文, 吉田昌史, 仙波卓弥, 角谷均)
- ・2010年度精密工学会九州支部熊本地方講演会(2010.12.11 熊本大学)
ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具に対するレーザ成形技術の開発(発表者 吉田昌史, 天本祥文, 仙波卓弥, 角谷均)
- ・2011年度砥粒加工学会学術講演会(2011.9.7 中部大学)
ナノ多結晶ダイヤモンドと焼結ダイヤモンド製研削工具との間に生じる熱化学反応のメカニズム(発表者 太田修介, 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均)
- ・2011年度砥粒加工学会学術講演会(2011.9.7 中部大学)
レーザ粗成形したナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の切削性能(発表者 吉田昌史, 天本祥文, 仙波卓弥, 角谷均)

(2) 論文発表

- ・仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.768-776.
- ・Takuya SEMBA・Ryuich OKAZAKI・Hitoshi SUMIYA, Ultraprecision Cutting of Cemented Carbide Using Microball Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2010 Proceedings, B01 (2010-10), pp.75-78.

(3) 雑誌掲載

該当事項無し

(4) 特許出願

該当事項無し

(5) 商品化

該当事項無し

(6) 受賞

該当事項無し