令和3年度特别研究助成対象·進捗状況報告

高硬度金型材料に対するマイクロ・ナノ機械加工技術の確立

研究報告者 仙波 卓弥





最終学歴 昭和57年6月
 同志社大学大学院工学研究科
 機械工学専攻博士課程後期単位取得退学
 専門分野 超精密・微細加工学
 学位 工学博士
 所属団体 福岡工業大学工学部知能機械工学科
 役職名 教授

今後の抱負

2021年9月から2024年8月までの間,特別研究として3つの研究を行った.1番目の研究は 2016年9月から2020年8までに実施した特別研究を完結するための研究で,原子の結合を切断 できる超精密・極微小切削加工技術の確立を目指した.2番目の研究は鋼に対する超精密切削加 工技術を開発するための研究で,途中で断念しそうになった難しい技術開発であった.3番目の 研究では,高硬度材料に対して3次元微細形状を高速・高精度に加工できるレーザ加工技術の開 発を目指した.これら3つの研究の内,3番目の研究に関しては研究終了時になって原点に戻 って考え直す必要があることに気付き,悔しいが完結できていない.今後は,3番目の研究を完 結することをライフワークにしたいと思っている.

三井金型振興財団 特別研究助成 (2021年9月~2024年8月) 2023年度(2023年9月~2024年8月)研究成果報告書

研究課題 高硬度金型材料に対するマイクロ・ ナノ機械加工技術の確立

研究代表者 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 教 授 仙波卓弥 共同研究者 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 准教授 天本祥文

目 次

1. はじめに	•••	6
 原子配列に乱れのない切削加工面を作ることができる極微小切削加工技術の開発 1 研究目標 		7 7
2.2 切削実験の結果		8
2.3 再現性の確認		9
2.4 研究成果		10
3. クロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削加工技術の開発		10
3.1 研究目標		10
3.2 cBN 製インサートチップ	•••	11
3.3 インサートチップの刃先に対する乾式ラッピング	•••	11
3.4 逃げ面摩耗幅 VB と切削条件	•••	13
3.5 工具摩耗とクロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削	•••	14
3.6 加工面の粗さとクロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削	•••	15
3.7 研究成果	•••	16
4. 極短パルスレーザに対する繰返し周波数制御システムの構築	•••	16
4.1 研究目標	•••	16
4.2 レーザの走査軌跡と加減速	•••	17
4.3 オーバーラップ率と周波数制御	•••	19
4.4 レーザ発振器が持つのパルスの間引き機能と周波数制御システム	•••	19
4.5 半割円柱の加工結果	•••	21
4.6 工作機械の運動モードと半割円柱の加工精度	•••	22
4.7 工具の振動変位と半割円柱の加工精度	•••	23
4.8 レーザ加工に使用する工作機械についての考察	•••	26
4.9 研究成果	•••	26
		~=
5. おわりに	•••	27
封接		30
11104		50
参考文献		30

1. はじめに

2021 年 9 月から 2024 年 8 月までの間,「高硬度材料に対するマイクロ・ナノ機械加工技術の確 立」という課題で表 1 に示す 3 つの研究を行った^{(1),(2)}.本報告書は,2023 年 9 月から 2024 年 8 月ま でに行った研究の成果をまとめた報告書である.研究成果の詳細を報告する前に,研究の経緯,研究 の目標,ならびに得られた研究の成果について概要を説明する.

「1. 原子配列に擾乱のない加工面を作ることができる極微小切削加工技術の開発」と題した研究 は、2016年9月から2020年8までの間に「理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多 結晶ダイヤモンド製切削工具の開発)」というテーマで行った特別研究^{3〜の}を完結するために行っ た. 刃先の丸み半径を0.5 nm以下に成形したナノ多結晶ダイヤモンド製のノーズRバイトを使った 上で、切込み深さを1 nm以下に設定して無酸素銅に対して極微小切削を行うと、結晶粒内で結晶方 位に乱れがない加工面が作れることを示している.

「2. プリハードン鋼に対する超精密切削加工技術の開発」と題した研究は、プラスティックモールド用金型として多用されているプリハードン鋼に対し、超精密切削を行うことができる工具技術と加工技術を開発するために行った.刃先の丸み半径を10nm前後に成形した cBN 製のノーズ R バイトを用いてプリハードン鋼に対して超精密切削を行うと、表面粗さが pv で 20 nmRz、算術平均で3 nmRa 以下の加工面が作れることを示している.

「3. 極短パルスレーザに対する繰返し周波数制御システムの開発」と題した研究は、 高硬度材料 に対して 3 次元微細形状を高速かつ高精度にレーザ加工できる加工技術を開発するために行った. 工作機械を使ってレーザ光を高速で走査させるためには工作機械が加減速することにより生じる加 工誤差を防止する必要があり、レーザの走査速度に比例してパルスの繰返し周波数を可変できる周 波数制御システムを開発した.

 研究課題	具体的な研究の実施内容	2021		2022		22 2023		2024
1. 原子配列に擾乱のない 切削加工面を作ることが できる極微小切削加工技 術の開発	①ナノ多結晶ダイヤモンドに対する切れ 刃鋭利化のためのドライエッチング					•		
	②無酸素銅に対する極微小切削							
	③切削加工面の結晶構造の解析							
2.プリハードン鋼に対す る超精密切削加工技術の 開発	④cBN製ノーズRバイトの試作		WC			•		cBN
	⑤プリハードン鋼に対する超精密切削						*	
3. 極短パルスレーザに対 する繰返し周波数制御シ ステムの開発	⑥繰返し周波数制御システムの構築						+	
	⑦超硬合金製・3次元微細形状に対する 高速・高精度加工					-		

表1 2021年9月から2024年8月までに行った研究.

2. 原子配列に擾乱のない切削加工面を作ることができる極微小切削加工技術の開発

2.1 研究目標

図1に示しているのは、刃先の丸み半径が2.5 nmの単結晶ダイヤモンド製の切削工具を使用し、 単結晶アルミニウムを極微小切削した時に排出される切りくずの形態を解析した結果⁽⁸⁾である.切込 み深さよりも切りくずは厚く、しかも加工面の原子配列は大きく乱れているが、刃先の丸み半径が 2.5 nmの切削工具を使用し切込み深さを0.5 nmに設定すれば切りくずが出ることを示している.こ こで、図1に示した論文が学会誌に掲載された約30年前、実際に成形できていた刃先の丸み半径は 30 nm 前後であった^の.

図1を初めて見た時,図に赤丸で示したように刃先の丸み半径を炭素の原子半径と同じに成形で きればアルミニウムの数原子層を除去できる可能性があり,切りくずの厚さと切込み深さとが等し い理想的加工⁽¹⁰⁾を具現化できるだけでなく,加工面に原子配列の乱れが生じない可能性もあると思 われた.これらの可能性を見極めたいと考え,2016年9月から2020年8月までの間,「理想的加工 法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の開発)」という課題で特 別研究を行った.

焼結後のダイヤモンド粒子サイズが数十 nm のナノ多結晶ダイヤモンドに対してナノ秒パルスレ ーザを使ったレーザ加工,電解加工,熱化学反応を使った乾式ラッピング,ならびに酸素プラズマを 使ったドライエッチングを行った結果,刃先の丸み半径が0.1 nm以下のノーズRバイトを成形でき た^{(11),(12)}.図2に示しているのは,刃先の丸み半径を0.3±0.1 nmに成形した前切れ刃のAFM 画像と 断面曲線である.また,無酸素銅に対して超精密切削を行い切りくずの幅から切りくずが発生し始



図1 極微小切削時に排出される切りくずの形態(井川直哉,極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ,精密工学会誌 Vol. 59, No.4 (1993), pp.673-679.).



図 2 前切れ刃の AFM 画像と断面曲線(刃先の丸み半径 r 0.3 nm).

図3前切れ刃の刃先の丸み半径 rと切りくず が発生し始める最小切込み深さ hs.

める最小切込み深さ hs を測定した結果,図3に示すように hs は 0.3 nm で銅の2原子層に相当する ことが明らかになった⁽¹³⁾.

このように,刃先の丸み半径を図1に赤丸で示したサイズに成形すると,無酸素銅の2原子層を 切りくずとして除去できること,つまり切りくずの厚さ≒切込み深さであることを証明できた.ただ し,加工面に原子配列の乱れが生じていないことに関しては研究期間内に証明できなかった.そこ で,先に実施した特別研究を完結するために本研究を行った.

2.2 切削実験の結果

加工面の結晶粒に残るひずみの観察には、後方散乱電子回折 SEM-SBSD(SEM: 日本電子(株) JSM-7100F, EBSD: Oxford Instruments AZtecHKL)を使用した. 同装置を用いて結晶方位差(Kernel Average Misorientation: KAM)を解析すると、隣接する結晶粒や結晶粒内に生じている結晶方位の乱 れを KAM マップと呼ばれている画像で観察できる^{(14),(15)}. 図4(a)に示しているのは、650°Cで1時間 焼きならした後ウェットエッチングした無酸素銅の KAM マップである. 黒い線で観察されている 結晶粒界の他に、粒内に薄い灰色の縞模様が見える. この縞模様の密度は結晶粒界の近くやサイズが 小さい結晶粒の内部で高くなっており、ワークの焼きならし時に結晶粒が再結晶する過程で、隣接す る結晶粒に生じた結晶方位の乱れ(原子配列の乱れ)を測定した可能性が高い.



(a) 標準試料(b) r0.5 nm, h100 nm(c) r0.5 nm, h10 nm(d) r0.3 nm, hmax 1 nm図 4 切込み深さを変え無酸素銅に対して超精密切削を行った加工面の KAM マップ.



(b) KAMマップ

図 5 図 14(d)のように得られた結果の再現性を確かめるために観察した加工面のレーザ微分干渉顕微 鏡画像(a)と KAM マップ(b). n.3 nm, h_{max} 1 nm, $f5\mu$ m/rev.

図 4(b)~図 4(d)に示しているのは、切込み深さ $h \ge 100 \text{ nm} \sim 1 \text{ nm}$ の範囲で変化させて無酸素銅に 対して超精密切削を行った加工面の KAM マップである.加工面の成形に使用したノーズ R バイトの 刃先の丸み半径 r は、図題に記したとおり 0.5 nm 以下である.切込み深さ hが 100 nm の図 4(b)や hが 10 nm の図 4(c)の画像には、微細化した結晶粒の他に隣接する結晶粒や結晶粒内で結晶方位が乱 れたことを意味する灰色のコントラストが生じている.これに対し、刃先の丸み半径が 0.3 nm のノ ーズ R バイトを使用し、切込み深さを 1 nm 以下に設定して成形した加工面の結晶粒を観察した図 4(d)の画像は図 4(a)に示した画像と似ており、隣接する結晶粒や結晶粒内に灰色のコントラストは生 じていない.なお、詳細な加工条件は 2024 年 4 月に発行された研究進捗状況報告書^(a)に記述したと おりである.

2.3 再現性の確認

図 4(d)のように得られた結果の再現性を確かめるため、刃先の丸み半径 rが 0.3 nm のノーズ R バ イトを使用し、 h_{max} を 1 nm、送り速度 fを 5 µm/rev に設定してワークの端面を平面切削し、同表面 に残る加工変質層を観察した.図 5(a)に示しているのは共焦点レーザ走査顕微鏡を使って観察した微 分干渉顕微鏡画像、図 5(b)に示しているのは SEM-EBSD を使って観察した KAM マップである.図 5(a)に示したように加工面に粒界段差は見られないが、ノーズ R バイトの送り速度(ワークー回転あ たりの送り量)と一致する干渉縞がかすかに観察できる.前切れ刃が加工面を擦過した痕跡だと思わ れるが、図 5(b)に示した KAM マップには結晶粒内で結晶方位が変化したようすは見られない.した がって、前述したように、刃先の丸み半径が 0.3 nm のノーズ R バイトを用いた上で、切込み深さが 1 nm 以下であると思われる条件で極微小切削した無酸素銅の結晶粒内には、結晶方位に乱れが生じていないと考えられる。

2.4 研究成果

2016年9月から2020年8月までの5年間に行った特別研究を完結するためには、結晶構造に擾乱 がない加工面が作れたことを証明する必要があり本研究を行った。得られた研究の成果は以下のよ うにまとめられる.

- (1) 刃先の丸み半径を 0.5 nm 以下に成形したナノ多結晶ダイヤモンド製のノーズ R バイトを使用し, バイトの送り速度を 5 µm/rev に設定して無酸素銅に対する極微小切削を行った.その結果,刃先 の丸み半径が 0.5 nm であっても切込み深さが 10 nm を越えると結晶粒内で結晶方位が局所的に回 転した加工変質層が生じることが明らかになった.
- (2) ワークの熱膨張を利用して切込み深さが 1 nm 以下になるような条件で無酸素銅に対する極微小 切削を行った.後方散乱電子回折法を使って結晶粒に残る局所的な結晶方位の乱れを観察した結 果,刃先の丸み半径が 0.3 nm のノーズ R バイトを用いた上で切込み深さを 1 nm 以下に減らし て切削した加工面には、局所的な結晶方位の乱れが生じないことが明らかになった.

3. クロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削加工技術の開発

3.1 研究目標

図 6 に示しているのは、プラスティックレンズ金型の外観である.金型にはプリハードン鋼が用いられており、NiP を無電解めっきした皮膜に対して単結晶ダイヤモンド製の切削工具を用いて超精密切削を行い、金型の表面は pv で 50 nmRz 以下, Ra で 3 nm 以下の粗さに成形されている.NiP が 無電解めっきされているのは、単結晶ダイヤモンド製の切削工具を用いてプリハードン鋼を超精密切削すると単結晶ダイヤモンドが直ぐに摩滅するためで、鋼に対して超精密切削を行い平滑と



図6 レンズ金型の外観(https: //ultraprecision-nanomachiningcenter.com).

表 2 cBN 製インサートチップの仕様 (ノーズ R 0.4 mm, す くい角 0⁰, 逃げ角 10°).

呼び(住友電工ハードメタル)	NCB100	BN7500		
cBN含有量(vol%)	100	90~95		
焼結助剤	_	WC-Co		
硬度Hv(Gpa)	51~54	41~44		
熱伝導率(₩/m・K)	$180 \sim 200$	100~120		
丧生	NU-TPGW	3NU-TPGW		
カンセム	110304LF	110304LF		

被削材:プリハードン鋼(uddeholm STAVAX, 4 Gpa Hv)



図7 BN7500の切れ刃稜.

図8 NCB100 の切れ刃稜.

呼ぶにふさわしい加工面を作ることは容易でない. 本研究ではプリハードン鋼としてマルテンサ イト系ステンレス (uddeholm, STAVAX) を使用し, STAVAX に対して超精密切削を行い表面 粗さが pv で 50 nmRz 以下, Ra で 3 nm 以下の加工面を作ることができる加工技術を開発するた めの研究を行った.

3.2 cBN 製インサートチップ

表2に示しているのは、切削工具として使用した cBN 製インサートチップ(住友電工ハードメ タル, NCB100 と BN7500)の仕様である. NCB100 と呼ばれているのは hBN を cBN に直接変換 した cBN で Co を含んでいない. BN7500 と呼ばれているのは超硬合金製の金型を使って溶浸焼結 した cBN で, WC と Co が合わせて 5 vol%含まれている. STABAX のビーカース硬さが 4 GPaHv であるのに対し, NCB100の硬さは51~54 GPa, BN7500の硬さは41~44 GPa である. インサート チップのノーズRは0.4mm, すくい角は0°, ならびに逃げ角は10°である.

図 7(a)に示しているのは市販の BN7500, 図 8(a)に示しているのは市販の NCB100 の刃先の SEM 画像である. 刃先の稜線に凹凸が残っているのは, 鋼の精密切削に使うことをターゲットにして製 造されたインサートチップなので仕方がない. 過去に無酸素銅に対して超精密切削を行った経験 から, STAVAX に対して超精密切削を行い表面粗さが pv で 50 nmRz, Ra で 3 nm 以下の平滑な加 工面を作るためには、図7(b)や図8(b)に示すように刃先の稜線から凹凸を除去する必要があると考 えられた. そこで、市販のインサートチップの刃先を乾式ラッピングした.

3.3インサートチップの刃先に対する乾式ラッピング

図 9(a)に示しているのは、逃げ面に対する乾式ラッピングに使用した装置の外観である. ラップ には直径が 15 mm の PCD 製円板(トーメイダイヤ, TDC-EM)を使用した. ラップはL字形の治 具に固定した DC サーボモータの軸に取付けた. L 字形の治具はくさび角が 8°のくさびを介して XY 手動ステージ,手動ステージはNC 円テーブルに取付けた. したがって,NC 円テーブルを回転



(a) 逃げ面の成形に使った装置の外観 (b) ラップに映ったノーズ R の輪郭 図 9 逃げ面の乾式ラッピングに使用した装置の外観 (①PCD 製ツルーア, ②バイトホルダ, ③ラバールノズル, ④くさび (8°), ⑤XY ステージ, ⑥DC サーボモータ).



 (a) PCD (EDM)
 (b) PCD(EDM+DL)

 図 10 PCD 製ラップの砥石作用面

 (EDM: 放電加工, DL: 乾式ラッピング, PCD: 焼結ダイヤモンド).

させるとラップは円錐の母線に沿って公転する.円錐の半径は XY 手動ステージのマイクロメータ を使って調節した.図9(b)に示しているのは、ラップに映ったノーズRの輪郭である.図9(a)に示し た y 軸の方向にバイトホルダに取付けたインサートチップを移動させてラップとノーズ R を接触さ せた後、同方向にインサートチップを揺動させて刃先を乾式ラッピングした.乾式ラッピング後の逃 げ角は 8°,逃げ面の幅は約 50 µm である.すくい面を成形する場合には NC 円テーブルを 85°回 転させ、すくい角が-5°で幅が約 50 µm のすくい面を成形した.

図 10 に示しているのは、インサートチップを乾式ラップするのに使用したラップ (PCD 製円板) の SEM 画像である. PCD のダイヤモンド粒子のサイズは 36±16 µm である. 図 10(a)に示している のは放電加工後に観察したラップの表面、図 10(b)に示しているのは熱化学反応を利用した乾式ラッ ピング⁽¹⁶⁾を行い、ラップ表面に露出しているダイヤモンド粒子の先端を平坦に成形した⁽¹⁷⁾ラップの 表面である. ダイヤモンド粒子の擦過痕が切削工具のすくい面や逃げ面に発生し、切れ刃稜に凹凸が 生じるのを防ぐため、図 10(b)に示した PCD 製円板をラップとして使用した.

乾式ラッピング後に観察した刃先の稜線を図7(b)と図8(b)に示している.市販の刃先に比べ刃先の 稜線に凹凸はなく滑らかである. AFM を使って測定した刃先の丸み半径は10nm以下である. ここ で,図7(a)に示した BN7500の刃先には観察されなかったのに対し,図8(b)に示した NCB100の稜線



図 11 切削実験に使った装置の外観 (①STAVAX, ②ノーズRバイト, ③ 給水&ミストノズル).



図 12 切削液と工具の摩耗曲線 (切削条件: *n*120 rpm 固定, *f* 10 µm/rev 固 定, *h* 0.2~30 µm, *CL* 129.5 m).

には微細な欠けが発生した.

3.4 逃げ面摩耗幅 しと切削条件

図 11 に示しているのは、STAVAX の切削実験に使用した装置の外観である.工作機械には制御 分解能が 10 nm の非球面加工機(芝浦機械, ULG50A)を使用した.切削液には、ソルーションタイ プの水溶性切削液(ネオス,ファインカット 870,×50 希釈)とミスト切削油(大同化学、ダイカト ールミスト V25 動粘度 35.0 nm²/s,と V105 動粘度 24.7 nm²/s)を使用した.ミスト噴霧には、セミ ドライ給油装置(フジ BC 技研、モデル MK)を使用した.切削加工後に微分干渉顕微鏡を使って逃 げ面摩耗幅、白色干渉計(Zygo, NewViewTM7500)を使って加工面の表面粗さを測定した.

図 12 に示しているのは、市販の NCB7500 を使用し、切削液の種類を変えて切削実験を行った工 具の摩耗曲線(切削距離 C_L と逃げ面摩耗幅 V_B との関係)である. ワークの回転数 nは 120 rpm、 送り速度 fは 10 µm/rev、 C_L の上限を 129.5 m に固定し、切込み深さ hを 0.2–30 µm の範囲で変化さ せた場合の結果である. 図 1 に〇印で示したように、水溶性切削液を切削点に大量に供給した場合 には、図 1 に〇印で示したように V_B は C_L にほぼ比例して増加した. これに対し、図 1 に〇印と□印 で示したミスト切削油を噴霧すると V_B の増加率は大幅に減少した. ミスト切削油の動粘度を変えて 切削実験を行ったが、 V_B に大きな差は見られなかった.

そこで、市販の NCB7500 とミスト切削油 V25 を使用し V_B を減らし得る加工条件を見い出すための切削実験を行った. 図 13(a)に示しているのはワークスピンドルの回転数 $n \ge 1000$ rpm、切込み深さ $h \ge 2 \mu m$ 、ならびに C_L の上限を 1131 m に設定した上で、工具の送り速度 f を変化させた場合に得られた工具の摩耗曲線である. 図 13(b)に示しているのは、工具の送り速度 f と切削距離 C_L が 1131 m の時の逃げ面摩耗幅 V_B との関係である. 図 13(b)に示したように、fが 1 $\mu m/rev$ 以下の領域で V_B は急激に減少することが明らかになった。そこで、ワークスピンドルの回転数 $n \ge 0$ 切込み深さ $h \ge 0$ 変化させ、図 13 と同様の実験を行った。その結果、逃げ面摩耗を減らすためにはワークスピンドル



図 13 逃げ面摩耗幅と送り量(BN7500 市販, n 1000 rpm, h 2µm, CL 1131 m, ミスト切削油).



スト切削油).



の回転数 n を早く(切削速度を早く),送り速度 f を遅く,しかも切込み深さ h を小さくすればよい ことが明らかになった.

3.5 工具摩耗とクロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削

図 14 に示しているのは、ミスト切削油 V25 と BN7500 を用いた場合に得られた工具の摩耗曲線 である. 市販のインサートチップを用いた場合の結果を△印, 刃先を滑らかに成形したインサートチ ップを用いた場合の結果を〇印,ならびに,水溶性切削液を用いた場合の結果を〇印で付記している. ○印で示した結果に比べ,○印や△印で示した逃げ面摩耗率(工具の摩耗曲線の傾き)は大幅に減少 した. ただし、切削距離が 1131 m の時に測定した Va は△印の場合が 7.3 µm であるのに対して〇印 の場合は3.3µmであり、刃先の稜線を滑らかに成形した効果は見られなかった.図15に示している のは、NCB100を用いた場合に得られた工具の摩耗曲線である.工具素材の硬さは表2に示したよう に BN7500<NCB100 であるが、工具の摩耗曲線に変化は見られなかった.

3.6 加工面の粗さとクロム合金ステンレス鋼に対する超精密切削

図 16 に示しているのは、切削距離 C_Lが 1131 m の時に観察した切削加工面の光学微分干渉顕微 鏡画像である.市販のインサートチップを使った加工面を図 16(a)、刃先の稜線を滑らかに成形し たインサートチップを使った加工面を図 16(b)に示している.白色干渉計で測定した加工面の粗さ は図 16 に示したとおりで、刃先の稜線を滑らかに成形した場合には pv で 17.8 nmRz, Ra で 3.1 nm であった.

ここで、加工条件から幾何学的に求められる表面粗さを計算するとpv で 0.8 nmRz になる. 一方、 実際に測定された 17.8 nmRz から工具の送り速度 f を計算すると 7.5 µm/rev になり、図 16(b)に青色 の矢印で示した領域で見られる工具の送りマークの間隔とほぼ一致している. また実際に測定され た 17.8 nmRz という加工面の粗さは、2004 年 4 月に発行された研究進捗状況^のに記述した工作機械 の位置偏差と一致している. したがって制御分解能が 1 nm の工作機械を使うか、図 16(b)に白い矢印 で示した送りマークがついていない部分の粗さを測定すれば、加工面の表面粗さは 17.8 nmRz 以下 になると考えている. NCB100 を使った場合にも図 16 と同様の加工面が得られた.



(a) 市販(98.5 nmRz, 10.5 nmRa)
 (b) 刃先成形後(17.8 nmRz, 3.1 nmRa)
 図 16 切削加工面(BN7500, CL1131 m).
 理論粗さ 0.8 nm Rz (f0.5 μm/rev, R 0.4 mm), 17.8 nmRz (f7.5 μm/rev, R 0.4 mm)



 (a) 切削加工面 (pv 17.8 nmRz)
 (b) 研磨面 (pv 1.8 nmRz)
 図 17 切削加工面と綿棒にサイズが 0-1/2 のダイヤモンドスラリをつけ切削加工面 を手磨きした研磨面.

図 17(b)に示しているのは、綿棒にサイズが 0-1/2 のダイヤモンドスラリをつけ、図 17(a)に示した 切削加工面を 15 分手磨きした研磨面である.研磨面の粗さは pv で 1.8 nmRz で、工作機械の位置偏 差によって生じた切削工具の送りマークを完全に消すことができた.

3.7 研究成果

プラスティック用モールド金型に多用されているプリハードン鋼に対して超精密切削を行い,粗 さが pv で 50 nmRz, Ra で 3 nm 以下の加工面を作ることができる加工技術を開発するための研究を 行った.本研究で得られた研究の成果は以下のようにまとめられる.

- (1) 溶浸焼結法で作られた, WC と Co を合わせて 5 vol%程度含む cBN の刃先を平滑に成形した cBN 製のノーズ R バイトを使用し, マルテンサイト系のステンレス合金であるプリハードン鋼を切削 した. ミスト切削油を用いて切削実験を行った結果, 1131 m 切削した後で観察した逃げ面摩耗幅 は 3.3 µm, 加工面の表面粗さは pv で 17.8 nmRz, Ra で 3.1 nm で, プラスティックレンズ金型に 要求される品質をクリアできた.
- (2) 17.8 nmRz という表面粗さは、2004 年4月に発行された研究進捗状況^のに記述した工作機械の位置偏差と一致している.したがって制御分解能が 1 nm の工作機械を使えば、刃先を平滑に成形した cBN 製の切削工具を使ってプリハードン鋼に対して超精密切削を行い、表面粗さが pv で17.8 nmRz 以下の加工面を作れる可能性が高い.
- (3) プリハードン鋼に対して超精密切削を行い,粗さが pv で 50 nmRz, Ra で 3 nm 以下の加工面を 作ることを目標にして研究を行ったが, "cBN 製の切削工具を用いれば鋼を超精密切削できるこ とを示した"という意味において,本研究の成果は工学的に有用である.

4. 極短パルスレーザに対する繰返し周波数制御システムの構築

4.1 研究目標

過去20年くらいの間,対物レンズで集光したレーザを汎用の工作機械とCAD/CAMを使って 走査させ,高硬度材料に対して3次元微細形状を成形できるレーザ加工技術の開発を行ってきた ⁽¹⁸⁾⁻⁽²¹⁾. 従来のCAMに相当する加工形状のシミュレーション技術や切残しを除去するためのゼ ロカットを併用した高精度加工法⁽²²⁾,ならびにゼロカットをしなくても高精度な3次元微細形 状を加工できる焦点加工法⁽²³⁾を開発した.

図18に示しているのは、ナノ秒パルスレーザを使用し半径が40µmの超硬合金製・円柱の上半分に加工した半径が20µmの半割円柱のSEM画像である.レーザ発振器からは繰返し周波数が同じパルスレーザが出射されているのに対し工作機械の送り速度には加減速があり、対物レンズで集光したレーザスポットの重なり具合が密な部分(オーバーラップ率が高い部分)はオーバーカットされ、加減速誤差が発生する.この誤差が目立たないようにするため、図18に示した半割円柱の加工では工作機械の送り速度(レーザの走査速度)を5 mm/minに設定せざるを得なかった^{(22),(23)}.その結果、



図 18 半径が 40 µm の超硬合金製・円柱の上半分に成形した半径が 20 µm の半割円柱の外観(レーザ の走査速度 5 mm/min, 加工時間 9.7 h).



(a) 半径が R の円柱の加工パス (b) Y 軸方向の走査パス (c) X 軸方向の走査パス 図 19 図 18 に示した半割円柱のレーザ加工に使ったレーザの走査軌跡.

図 18 に示した半割円柱の加工に 9.7 時間を要したが、工作機械の送り速度を 100 mm/min に増せば 加工時間は 9.7 時間から 0.5 時間に減少する.ただし工作機械が加減速する時に生じる速度差は送り 速度が増すに従って増加する.本研究では、半割円柱を加工する場合に工作機械を 100 mm/min で 直線/円弧/直線運動させたとしてもレーザスポットのオーバーラップ率が変化せず、3 次元微細形状 を高精度に加工できるレーザ加工技術を開発することを試みた.

4.2 レーザの走査軌跡と加減速

図 19(a)に示しているのは、先端が半球で半径 R が 100 µm の円柱を加工するのに使ったレーザ の走査軌跡と加工条件である.研削加工を行い半径 Ro を 150 µm の円柱状に予備成形した円柱の 外周部分にレーザの焦点を合わせ、走査軌跡を X 軸の負の方向に切込んで R が 100 µm で先端が 半球の基礎円柱を加工した.パルスの繰返し周波数 f は 12 kHz,パルスエネルギ P_E は 2 µJ,平均 出力 W は 24 mW,円柱の回転数は 600 rpm,ならびにレーザの走査速度 v は 0.2 mm/min に設定し た.焦点での発光が消えた時点で X の負の方向に走査軌跡を 1.5 µm 切込むといった要領で、円柱 を加工した.

図 19(b)と図 19(c)に示しているのは図 18 に示した半割円柱を加工するのに使ったレーザの走査軌

跡で、市販の CAD/CAM (PTC, Creo/牧野フライス製作所,FFCAM)を使って計算した. 図 19(b)の 下段に示すように X 軸方向の横送り 量 $\Delta p \ge 0.4 \ \mu m$ に設定してレーザを Y 軸方向のみに走査させる と、 θ が 20°以下で円周方向の長さ ΔL が増加し θ が 20°以下の部分に切残しが発生した. この現象を 避けるため、レーザを Y 軸方向だけでなく X 軸方向にも走査させることにした、走査軌跡の間隔 (横 送り量) は 0.4 μm に設定した.

図 20 に示しているのは図 19(c)に示した XZ 平面内でレーザを走査させた場合の軌跡で、同平面内ではレーザの焦点位置は直線/円弧/直線の軌跡に沿って運動する. 試作した周波数制御装置²⁰ (ワイズシステム, IF4FIT)を使って工作機械の送り速度を測定した結果,図 20 に示した直線部の長さが 200 µm 以下の場合には送り速度は 100 mm/min に達しないことが明らかになった. また、リサージュを測定して工作機械の運動精度を測定した結果、送り速度を 100 mm/min に設定した場合には半割 円柱の半径 $r \ge 50$ µm 以上に設定しないと円弧の形が崩れることが明らかになった. そこで、図 20 に示した直線部の長さは 200 µm、円弧の半径は 50 µm に設定した.

図 21 に示しているのは、図 20 に示した軌跡で工作機械を XZ 平面内で運動させた場合に発生する、X 軸と Z 軸方向の送り速度に対応する各電圧の合成電圧である. 直線部で電圧が一定になって



図 20 半径 r が 50 μm の半割円柱の加工をイメージした直線/円弧/直線の走査軌跡 (送り速度:100 mm/min, Vmax: 350 mV, Δp:0.4 μm, f:15 kHz).



図 21 図 20 に示した軌跡で工作機械を運動させ測定した X 軸と Z 軸の合成電圧(350 mV/100 mm/min).



図 22 オーバーラップ率の概念(f:パ ルスレーザの繰返し周波数, D: レ ーザスポットの直径, v: 送り速度, p: レーザスポットの打撃間隔, Δ p: 横送り量).

いるのは工作機械が100mm/minで動いていること、円弧部での電圧が一定になっていないのは円弧 部で工作機械の送り速度が変化していること、ならびに直線/円弧のつなぎ部bや円弧/直線のつなぎ 部cで電圧が変動しているのはつなぎ部で工作機械が加減速したことを表している.

4.3 オーバーラップ率と周波数制御

図 22 に示しているのは、レーザスポットの重なりの度合いを表すオーバーラップ率 O_L の概念で ある⁽²⁴⁾. 工作機械の送り速度を v(mm/s)、パルスレーザの繰返し周波数を f(Hz)とすれば、レーザスポットの打撃間隔 p(mm)は

 $p = \nu/f, \tag{1}$

(2)

送り方向の OL は

 $O_L = 1 - v/(D \cdot f) = 1 - p/D,$

と表すことができる.式(2)より O_Lを同じ値に保つためには p を同じ値に保てばよく, p を同じ値に 保つためには式(1)より速度 v の変化に比例してパルスレーザの繰返し周波数 f を変化させればよい. そこで、レーザ発振器が持つパルスの間引き機能を利用して工作機械の送り速度に比例してパルス レーザの繰返し周波数を可変できる、周波数制御装置を試作した.厳密には、周波数 f を変えてポケ ットサイズ D を測定し、D を f の関数として式(2)を書き換える必要があるが、現時点では f が変化 した場合に生じる D は考慮していない.

4.4 レーザ発振器が持つパルスの間引き機能と周波数制御システム

レーザ発振器には light conversion の carbide を使用した. 図 23 に示しているのは, pulse picker と 呼ばれているレーザ発振器が持つパルスの間引き機能を示した模式図である. 発振器は 60 kHz の周



図 23 外部で作ったトリガパルスをレーザの発振器に入力し,発振器から出射されるパルスの繰返し周波数を制御するパルスの間引き方法を示した模式図.



図24 試作した周波数制御システム のブロック線図.





図25 周波数制御装置からレーザの発振器へ出力 したトリガパルス列 (15 kHz/350 mV/100 mm/min).

図 26 図 25 に示したパルス列の間隔から計 算したトリガパルス列の周波数 (15 kHz/350 mV/100 mm/min).

波数でパルスを励起しており、外部からトリガパルスを入力すると 51 μs (3 波)遅れた位置のパル スを出射する機能を持っている.この機能を用いると、工作機械の送り速度νに比例してパルスの繰 返し周波数fが変化するパルス列を外部で発生させ、このパルス列をレーザ発振器に入力すれば発振 器からはνの変化に比例してfが変化するレーザパルスが出射される.

図 24 に示しているのは、トリガパルスとして使用するパルス列を発生させるために試作した周波 数制御システムのブロック線図である.工作機械から取出した送り速度に対応する電圧に対してア ナログフィルタをかけた後、整流された信号を CPU と表現した周波数制御装置(ワイズシステム、 IF4FIT) に入力した.アナログ電圧に対するサンプリング時間は 12.5 µs, CPU から出力されるパル ス列の最大周波数は 30 kHz である. XYZ 各軸の電圧に対するスケーリング機能,オフセット調整機 能,合成基能,ならびに合成電圧に対するデジタルフィルタリング機能を持っている.デジタルフィ ルタには FIR(有限インパルス応答)フィルタと IIR(無限インパルス応答) フィルタを使用した.

図 20 に示した軌跡で工作機械を 100 mm/min で運動させ、工作機械から取出した速度電圧に対し て合成電圧を求めると図 21 に示したように求められる.図 25 に示しているのは図 21 に示した直線 部でのレーザの繰返し周波数を 15 kHz (350 mV/100 mm/min) に設定し、速度電圧に比例して出射 パルスの周波数を変化させるように生成したトリガパルス列,図26に示しているのは、トリガパル ス列の間隔から求めた周波数である.図26に示した結果で直線部や円弧部でトリガパルス列の周波 数が11.0-15.4 kHz の範囲で変動しているのは、CPU で電圧のサンプリング時間を12.5 μs に設定し たのが原因で、サンプリング時間を変えないで周波数の変動を抑えるためには設定周波数を下げれ ばよい.

4.5半割円柱の加工結果

はじめに、工作機械の運動速度を100mm/min、工作機械の運動モード(Super GI: SGI)を高精度モ ード M250 に設定し、加速時間や最大加速度を変更する機械パラメータを使用しないで超硬合金製 の円柱に対して半割円柱を加工した. 図 27(a)に示しているのは工作機械を図 20 に示した直線/円弧/ 直線の軌跡で運動させ測定したリサージュ、図 27(b)に示しているのは合成電圧である. 図 27(a)に赤 い細線で示しているのは指令値、黒の太線で示したのは実際の動きである. 指令値と異なり、機械パ ラメータの設定が適切でないために直線/円弧のつなぎ部には R が生じている. また、図 27(b)に示し たように直線/円弧のつなぎ部ではレーザの走査速度が減少し合成電圧が減少している.

図 28 に示しているのは、周波数制御を行い成形した半径 r が 50 µm の半割円柱の SEM 画像である. レーザの走査軌跡は図 19 に示したとおりで、工作機械の運動速度は 100 mm/min、繰返し周波数 は 15 kHz, パルスエネルギは 1.5 µJ, ならびにパスの横方向送り量 Δp は 0.4 µm に設定した. SEM 画像の倍率は 500 倍である。半割円柱の加工に要した時間は 2.7 h で、CAM で計算できる総軌跡長さ から従来と同様に 5 mm/min で走査した場合の加工時間を求めると 54 h になる。図 28 に示した半割 円柱の加工形状に目立った加工誤差は見られなかった。

しかし, 倍率を 500 倍から 1000 倍に上げて観察すると円弧が真円でないことが明らかになった. 図 29 に示しているのは, 図 28 に示した XZ 平面で Y 方向に観察した半割円柱(円弧)の SEM 画像 である. 周波数制御しないで加工した円弧の形を図 29(a), 周波数制御して加工した形状を図



図 27 工作機械を図 20 に示した(直線/円弧/直線)の軌跡で運動させ測定したリサージュと合成電圧 (レーザの走査速度 v: 100 mm/min, SGI: 高精度モード M250, 機械パラメータ変更無).



図 28 周波数制御を行って超硬合金に加工した $r50/R100 \,\mu\text{m}$ の半割円柱 (2.7 h/100 mm/min \rightarrow 54 h/5 mm/min, SGI: 高精度モード M250, 機械パラメータ変更無).



 (a) 周波数制御無
 (b) 周波数制御有
 図 29 半割円柱の加工精度に及ぼす周波数制御の効果 (SGI: 高精 度モード M250, 機械パラメータ変更無).

29(b)示している. 図 29(a)に比べ, 図 29(b)に示した円弧の形は半円に近づいている. ただし, 左側の 直線/円弧のつなぎ部には R が生じているのに対し右側には無く, 円弧が左右対称になっていない. このように観察された円弧形状の非対称性を解決するため, 工作機械の運動モードと機械パラメー タを変えて半割円柱を加工した.

4.6 工作機械の運動モードと半割円柱の加工精度

図 30 に示しているのは、工作機械の運動モードを高精度モード M250 から高能率モード M251、 加速時間と最大加速度を増すように機械パラメータを使用し(O0012)、図 27 と同様に測定したリ サージュと合成電圧である.図 27(a)に示したリサージュに比べ直線/円弧部に生じていた R はずいぶ ん小さくなっている.また、図 27(b)に示した合成電圧に比べ、直線/円弧のつなぎ部での電圧の変動 は大きくなっている.

図 31 に示しているのは、 XZ 平面で Y 方向に観察した半割円柱の 1000 倍の SEM 画像である. 周波数制御しないで加工した半割円柱の形状を図 31(a),周波数制御して加工した形状を図 31(b)に示 している. 図 29 に示した加工形状に比べ,直線/円弧のつなぎ部に生じていた R は小さく円弧形状 の非対称性は改善されたが、解消されなかった.









4.7 工具の振動変位と半割形状の加工精度

直線/円弧のつなぎ部で工作機械が加減速し、加速度によって工作機械や工具が振動すれば CAM で求めたレーザの焦点位置は工具の狙った加工位置からずれてしまう.この、振動によって生じる工 具の変位を振動変位と表現すれば、XZ 平面内で振動変位が発生し変位の方向が円弧の左右で異なっ ていれば円弧形状に非対称性が生じたとしてもおかしくはない.そこで、図 31 に示した半割円柱を 加工したのと同じ条件で図 20 に示した軌跡に沿って工作機械を往復運動させ、工作機械の振動が工 具に伝わる振動変位を測定した.

図 32(a)に示しているのは、工具の振動変位を測定するのに使用した装置の外観である.工作機械 のテーブルに固定した電気マイクロメータの触針を工具に接触させ、X 軸方向と Z 軸方向の変位を 同時に測定した.電気マイクロメータを工作機械のテーブルにマグネットで固定したので、電気マイ クロメータで測定される振動変位は工具を把持した治具の振動が工具に伝わった振動変位と見なす ことができる.ここで、工作機械のテーブル、治具、ならびに工具が同期して振動している場合には、 電気マイクロメータで測定される振動変位は0になる.

図 32(b)に示しているのは X 軸方向(上段)と Z 軸方向(下段)の振動変位で,直線/円弧/直線の 走査軌跡を青色の線で同図に付記している.上段に示した X 軸方向の測定結果によれば,円弧の左



(a)測定装置の外観 (b)工作機械のテーブルと工具の相対変位 図 32 工作機械の振動が工具に伝わった工具の振動変位を測定するのに使用した装置の外観と測定結果.



(a)測定装置の外観 (b)工作機械のテーブルと工具の相対変位 図 33 工具をバイスに固定しバイス口金からの工具の突出し長さを短く 10 mm に設定して測定した工 具の振動変位.

側の①の領域で負の方向,円弧の右柄の③の領域では正の方向に工具は変位しており,円弧部の左右 で振動変位の方向が反転している.下段に示した Z 軸方向の振動変位も同様である.このように,X と Z 方向の振動変位の方向は円弧部の左右で反転していることが明らかになった.このことが,円 弧形状が非対称に加工された原因であると考えられる.

前述したように、工作機械が加減速することによって生じる機械振動は工具を固定しているテー ブルと治具に伝わり、工具が振動変位する.これらの振動変位の内、テーブルの振動変位は工作機械 を変えない限り防ぎようがないが、工具を固定する治具の振動変位は工具の固定方法を変えれば減 る可能性がある.そこで、図 33(a)に示すように工具を小形のバイスに固定し、バイスの口金から工 具の突出し長さを短くして振動変位を測定した.33(b)に示しているのは工具素材のX方向とZ方向 の振動変位である.工具を小形のバイスで固定したために工具の把持剛性は増加したと考えられる が、図 33 に示した振動変位と比べX軸方向の振動変位はほとんど変化していない.ただし、Z方向 の加速度変位は1/2程度に減少した.

そこで、図33(a)に示したように工具を小形のバイスに固定して半割円柱を加工した.図31に示した加工結果と同様に、工作機械の運動モードは髙能率モード M251、機械パラメータは O0012 に設定した.図34 に示しているのは、XZ 平面で観察した半割円柱の SEM 画像である.周波数制御をしなかった場合の結果を図34(a)、周波数制御をした場合の結果を図34(b)に示している.図33(b) に示し



(a) 周波数制御無(b) 周波数制御有図 34 工具素材をバイスに固定し工具素材の把持剛性を上げ加工した半割円柱(SGI: 高能率モード M251, 機械パラメータ O0012).



図 35 周波数制御を行って超硬合金に加工した r50/R100 µm の半割円柱(SGI: 高能率モード M251, 機械パラメータ O0012).

たように円弧部の左右で工具が非対称に振動しており、円弧形状の非対称性は完全に回避できていない. ただし、図 29(b)や図 31(b)に示した加工形状に比べると左側の直線/円弧のつなぎ部に生じていた R はずいぶん小さくなっている.

図35に示しているのは、図29に示した結果と同様に倍率を500倍にして観察した半割円柱のSEM 画像である.図34で述べたように、振動変位を完全に除去できていないためにXZ平面で観察した 円弧の左側に切残しが生じているが、これはゼロカットを併用した高精度加工法²¹⁾を使って誤差修 正を行えば除去できることを確かめている.また、工具を把持するバイスと工作機械のテーブルとの 間にゴムマットを敷けば、工具のZ軸方向の振動変位は減少する.ただし、工具の振動変位を完全 に制震するには至っていない.

4.8 レーザ加工に使用する工作機械についての考察

本研究のように工作機械の直進/円弧運動を利用してレーザを走査させる場合,加工時間を短くす るためには工作機械の送り速度を増せばよい.しかし,工作機械の送り速度が増すに従ってたとえば 直線/円弧のつなぎ部では加減速が増加し,加減速が増すに従って加速度が大きくなるために工作機 械が振動する.工作機械の振動はテーブルに伝わり,テーブルの振動は工具を固定している治具を介 して工具に伝達される.工具が振動すると,CAMを使って求めたレーザの焦点位置が工具の狙った 加工位置からずれるために加工誤差(振動誤差)が生じる.この振動誤差は,オーバーラップ率が変 化することによって生じる加減速誤差とは発生要因が異なる.

オーバーラップ率が変化することによって生じる加減速誤差は周波数制御を行えば抑えられるが、 振動誤差を抑えるためには、加減速に関わっている工作機械の質量を小さくする必要がある.本研究 では精密小型のマシニングセンタを使ってレーザを走査したが、精密小型といっても高速切削に耐 える静剛性や動剛性を持っており、その結果として工作機械の加減速に関わる質量は大きいと言わ ざるを得ない.この工作機械の加減速や加速度の変化に伴い生じる振動を抑えるためには、レーザを 走査するのに使用する工作機械を、第2章で使った非球面レンズ加工機のような、静剛性や動剛性 の低い工作機械に変える必要がある.あるいは、レーザの走査方法をガルバノスキャナに変える必要 があるのかもしれない.

4.9 研究成果

工作機械を使ってパルスレーザを走査させ高硬度材料に対して 3 次元微細形状を高速かつ高精度に 加工するためには、工作機械を高速で運動させるに従って顕在化する加減速誤差を防止する必要があ る.本研究では、工作機械の送り速度に比例してパルスレーザの繰返し周波数を可変できる周波数制 御装置を試作した.また、工作機械の加工モードや機械パラメータを変更し、工作機械を 100 mm/min で運動させて径が 50 μm の半割円柱を高精度に加工できるレーザ加工技術を開発することを試みた. 得られた研究の成果は、以下のようにまとめられる.

- (1) 工作機械の送り速度に比例してパルスレーザの繰返し周波数を制御できる周波数制御装置を試作 した. XYZ 各軸の電圧に対するスケーリング機能,オフセット調整機能,電圧の合成機能,ならび に合成電圧に対するデジタルフィルタリング機能を持っている.
- (2) 半径が 100 µm の超硬合金製・円柱の上面に半径が 50 µm の半割円柱を加工した。周波数制御の効果を確かめるため、機械パラメータは変更しないで高精度モードで加工した。その結果、周波数制 御を行わない場合に比べると円弧部の形状精度は向上することが確かめられた。
- (3) 半割円柱の直線/円弧/直線のつなぎ部に生じた丸みを消すため、工作機械の運動モードや機械パラメータを変更して最短加速時間や最大加速度を変え、(2)と同じように半割円柱を加工した.その結果、工作機械の運動モードや機械パラメータを適切に選べば円弧部の形状精度は向上することが確かめられた.
- (4) レーザの走査速度を増すために工作機械の送り速度を増すと、工作機械の加減速にともない工作機 械のテーブルに固定した工具の振動が増加し、CAMを使って求めたレーザの焦点位置が工具の狙 った加工位置からずれてしまう.この機械振動が生じているために、半割円柱の円弧部が左右非 対称に加工されることが明らかになった.

このように、本研究では対物レンズで集光したレーザを汎用の工作機械と CAD/CAM を使っ て走査させ高硬度材料に対して 3 次元微細形状を加工した. この走査方法のメリットは汎用の DAD/CAM や工作機械をレーザ加工に使用できる点にあるが、加工能率を上げるために工作機械 の送り速度を増すと加減速誤差や振動誤差が顕在化する. 加減速誤差についてはパルスレーザの 周波数制御を行えば回避できるが、振動誤差を防ぐためには加減速に伴い生じる工作機械の振動 を抑える必要がある. したがって、レーザ高速加工を実現するためには工作機械も含め、原点に 戻ってレーザの走査方法を考え直す必要がある.

5. おわりに

表3に示しているのは、2021年9月から2024年8月までの3年間に行った研究のテーマと達成度 である.表3に示した1番目と2番目の研究課題については、研究目標を達成できたと考えている. 3番目の研究に関しては、研究終了時になって原点に戻って考え直す必要があることに気付き、悔し いが完結できていない.このように、3つの課題に対する達成度が全て100%に達したとは言い難い が、問題点を含め、現時点で得られている研究の成果を以下に記述する.

「1. はじめに」では、表3に示した3つの課題に対する研究の背景、研究の目標、ならびに得られた研究成果の概要を記述した.3つの課題に対する研究成果の詳細は以下のとおりである.

「2.4 研究成果」で記述したように、2016年9月から2020年8月までの5年間に「理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の開発)」というテーマで行

研究課題	具体的な研究の実施内容	2021	2022	2023	2024	達成度(%)
1. 原子配列に擾乱のない 切削加工面を作ることが できる極微小切削加工技 術の開発	①ナノ多結晶ダイヤモンドに対する切れ 刃鋭利化のためのドライエッチング					100
	②無酸素銅に対する極微小切削					100
	⑧切削加工面の結晶構造の解析					100
2.プリハードン鋼に対す る超精密切削加工技術の 開発	④cBN製ノーズRバイトの試作	wo			cBN	100
	⑥プリハードン鋼に対する超精密切削					100
3. 極短パルスレーザに対 する繰返し周波数制御シ ステムの開発	⑧繰返し周波数制御システムの構築			•		95
	⑦超硬合金製・3次元微細形状に対する					▶ 95

表3 2021 年9 月から 2024 年8 月までに行った研究課題と達成度.

った特別研究^{3→の}を完結するためには、結晶構造に擾乱がない加工面が作れたことを証明する必要が あり表3に示した1番目の研究を行った.得られた研究の成果は以下のようにまとめられる.

高速・高精度加工

- (1) 刃先の丸み半径を 0.5 nm 以下に成形したナノ多結晶ダイヤモンド製のノーズ R バイトを使用し, バイトの送り速度を 5 µm/rev に設定して無酸素銅に対する極微小切削を行った.その結果,刃先 の丸み半径が 0.5 nm であっても切込み深さが 10 nm を越えると結晶粒内で結晶方位が局所的に 回転した加工変質層が生じることが明らかになった.
- (2) ワークの熱膨張を利用して切込み深さが 1 nm 以下になるような条件で無酸素銅に対する極微小 切削を行った.後方散乱電子回折法を使って結晶粒に残る局所的な結晶方位の乱れを観察した結 果,刃先の丸み半径が 0.3 nm のノーズ R を用いた上で切込み深さを 1 nm 以下に減らして切 削した加工面には,局所的な結晶方位の乱れが生じないことが明らかになった.

「3.7 研究成果」で記述したように、第3章ではプラスティックモールド金型に多用されている プリハードン鋼に対して超精密切削を行い、粗さが pv で 50 nmRz, Ra で 3 nm 以下の加工面を作る ことができる加工技術を開発するために行った研究の成果を記述した.本研究で得られた研究の成 果は以下のようにまとめられる.

- (1) 溶浸焼結法で作られた, WC と Co を合わせて 5 vol%程度含む cBN の刃先の稜線を滑らかに成形 した cBN 製のノーズ R バイトを使用し,マルテンサイト系のステンレス合金であるプリハード ン鋼を切削した.ミスト切削油を用いて切削実験を行った結果,1131m 切削した後で観察した逃 げ面摩耗幅は 3.3 µm,加工面の表面粗さは pv で 17.8 nmRz, Ra で 3.1 nm で,プラスティックレ ンズ金型に要求される品質をクリアできた.
- (2) 17.8 nmRz という表面粗さは、2004 年4月に発行された研究進捗状況^のに記述した工作機械の位置偏差と一致している.したがって制御分解能が 1 nm の工作機械を使えば、刃先の稜線を平滑

に成形した cBN 製の切削工具を使ってプリハードン鋼に対して超精密切削を行い,表面粗さが pv で 5 nmRz 以下の加工面を作れる可能性が高い.

(3) プリハードン鋼に対して超精密切削を行い,粗さが pv で 50 nmRz, Ra で 3 nm 以下の加工面を 作ることを目標にして研究を行ったが, "cBN 製の切削工具を用いれば鋼を超精密切削できるこ とを示した"という意味において,本研究の成果は工学的に有用である.

「4.9 研究の成果」で記述したように、工作機械を使ってパルスレーザを走査させ高硬度材料に対して3次元微細形状を高速かつ高精度に加工するためには、工作機械を高速で運動させるに従って顕在化する加減速誤差を防止する必要がある.本研究では、工作機械の送り速度に比例してパルスレーザの繰返し周波数を可変できる周波数制御装置を試作した.また、工作機械の加工モードや機械パラメータを変更し、工作機械を100mm/minで運動させて径が50µmの半割円柱を高精度に加工できるレーザ加工技術を開発することを試みた.得られた研究の成果は、以下のようにまとめられる.

- (1) レーザの走査速度(工作機械の送り速度)に比例してパルスレーザの繰返し周波数を制御できる 周波数制御装置を試作した.XYZ 各軸の電圧に対するスケーリング機能,オフセット調整機能, 電圧の合成機能,ならびに合成電圧に対するデジタルフィルタリング機能を持っている.
- (2) 半径が 100 µm の超硬合金製の円柱の上面に半径が 50 µm の半割円柱を加工した. 周波数変換の 効果を確かめるため,機械パラメータは変更しないで高精度モードで加工した. その結果,周波 数変換を行わない場合に比べ円弧部の形状精度は向上した.
- (3) 半割円柱の直線/円弧/直線のつなぎ部に生じた丸みを消すため、工作機械の運動モードや機械パラ メータを変更して最短加速時間や最大加速度を変え、(2)と同じように半径が 50 µm の半割円柱を加 工した. その結果、工作機械の運動モードや機械パラメータを適切に選べば円弧部の形状精度は 向上することが確かめられた.
- (4) レーザの走査速度を増すために工作機械の送り速度を増すと、工作機械の加減速にともない工作機 械のテーブルに固定した工具の振動が増加し、CAMを使って求めたレーザの焦点位置が工具の狙っ た加工位置からずれてしまう.この機械振動が生じているために、半割円柱の円弧部が左右非対 称に成形されることが明らかになった.

本研究では対物レンズで集光したレーザを汎用の工作機械と CAD/CAM を使って走査させ高 硬度材料に対して 3 次元微細形状を加工した. この走査方法のメリットは汎用の DAD/CAM や 工作機械をレーザ加工に使用できる点にあるが,加工能率を上げるために工作機械の送り速度を 増すと加減速誤差や振動誤差が顕在化する.加減速誤差についてはパルスレーザの周波数制御を 行うことによって回避できるが,振動誤差を防ぐためには加減速に伴い生じる工作機械の振動を 抑える必要がある.したがって,レーザ高速加工を実現するためには工作機械も含め,原点に戻 ってレーザの走査方法を考え直す必要がある. 第3章で紹介した STAVAX を超精密切削するのに使用したミスト切削油は、日進工具株式会社・ 渡辺健志氏に紹介していただいた.切削液を水溶性切削液からミスト切削油に変えたことが研究の 進展につながった.第4章で紹介したパルスレーザに対する周波数制御装置は、株式会社牧野フラ イス製作所・持田英樹氏に紹介され、有限会社ワイズシステム・奈良靖氏に試作していただいた.周 波数制御装置については試行錯誤を繰返しながら4回試作し、理想に近い装置を試作できたと考え ている.また、第4章で紹介した工作機械の加速時間や最大加速度を制御するマクロコマンドであ る機械パラメータは、株式会社牧野フライス製作所・持田英樹氏に試作していただいた.周波数制御 装置とマクロコマンドがなければ第4章で記述した研究成果は得られなかったことを記し、ご協力 を賜った方々に心から感謝申し上げる.

参考文献

- (1) 仙波卓弥,高硬度金型材料に対するマイクロ・ナノ機械加工技術の確立,三井金型振興財 団令和3年度特別研究助成対象・進捗状況報告, https://www.mitsui-zaidan.or.jp /2021report no1.pdf(2023-4), pp.1-37.
- (2) 仙波卓弥,高硬度金型材料に対するマイクロ・ナノ機械加工技術の確立,三井金型振興財団令和3年度特別研究助成対象・進捗状況報告, https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2021report no4.pdf, (2024-4), pp. 3-34.
- (3) 仙波卓弥,理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切 削工具の開発),三井金型振興財団平成27年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告①), https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report nol.pdf, (2017-4), pp1-22.
- (4) 仙波卓弥,理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切 削工具の開発),三井金型振興財団平成27年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告(2)), https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report no2 1.pdf, (2018-4), pp1-17.
- (5) 仙波卓弥,理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切 削工具の開発),三井金型振興財団平成27年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告(3)), https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report no2.pdf, (2019-4), pp.1-24.
- (6) 仙波卓弥,理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切 削工具の開発),三井金型振興財団平成27年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告④), https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no10.pdf, (2020-4), pp1-29.
- (7) 仙波卓弥,理想的加工法の具現化(原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切 削工具の開発),三井金型振興財団平成27年度特別研究助成金給付者(最終報告⑤), https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2018report no3.pdf, (2021-4), pp.1-34.
- (8) 井川直哉, 極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ, 精密工学会誌 Vol. 59, No.4 (1993), pp.673-679.
- (9) 浅井昭一,田口佳男,堀尾健一郎,河西 敏雄,小林 昭,改良走査電子顕微鏡 (SEM) による単結晶ダイヤモンド工具の切れ刃稜丸み半径の測定と解析,精密工学会誌, Vol. 56, No. 7(1990), pp. 145-150.
- (10) 中山一雄,切削加工論, (1978), p.38, コロナ社

- (11) 仙波卓弥,天本祥文,角谷均,酸素プラズマを使ったナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するドライエッチング(成形し得る刃先の丸み半径),日本機械学会論文集, Vol.88, No.907 (2022/3/4), DOI:10.1299/transjsme.21-00354.
- (12) Takuya SEMBA, Yoshifumi AMAMOTO and Hitoshi SUMIYA, Dry etching of singlepoint cutting tool made of nano-polycrystalline diamond using oxygen plasma (Selected Paper) (Shapeable cutting edge radius), Mechanical Engineering Journal, Vol. 11, No. 1(2024-2), DOI:10.1299/mej.23-00427.
- (13) 仙波卓弥,天本祥文,角谷均,切削工具の刃先の丸み半径と無酸素銅の極微小切削時に生じる諸現象,日本機械学会論文集, Vol, 89, No. 918(2023), DOI:10.1299/transisme.22-00276.
- (14) 佐々木孔英, 釜谷昌幸, 三浦照光, 福谷耕司, 微視的な塑性ひずみ分布と結晶方位差の関係, 日本金属学会誌, Vol. 74, No. 4 (2010), pp.467-474.
- (15) 釜谷昌幸,電子後方散乱回折(EBSD)による構造材料の損傷評価(測定手順標準化のための測定品質の定量評価),(株)原子力安全システム研究所技術システム研究所, Vol. 18 (2011), pp. 181-197.
- (16) 仙波卓弥,天本祥文,藤山博一,橋本親弥,角谷均,熱化学反応を利用したナノ多結晶ダイヤ モンドに対する乾式研削,日本機械学会論文集 C 編,79-807(2013-11), pp. 4513-4523.
- (17) 合屋尚子,孫万福,天本祥文,仙波卓弥,極微粒ダイヤモンド電鋳工具に対する砥粒平坦化ツ ルーイングのメカニズム,日本機械学会論文集 C 編,77-782 (2011-10),pp,3904-3915.
- (18) 山口哲郎, 仙波卓弥, 集束レーザ光を用いた高速微細加工技術の開発, 日本機械学会綸文 集 C 編, Vol. 73, No.732(2007-8), pp.220-226.
- (19) ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズRバイトに対するレーザ成形技術」, (天本祥文,吉田昌 史,仙波卓弥,角谷均),日本機械学会論文集 C 編,78-794(2012), pp. 3583-3593.
- (20) 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均, ナノ秒パルスレーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製ノ ーズ R バイトに対する走査線加工技術, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No.851 (2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00573.
- (21) 天本祥文,仙波卓弥,三浦太久真,ピコ秒パルスレーザを使った超硬合金に対する精密・ 微細加工技術(ゼロカット加工法と低出力焦点加工法,ABTEC2022 講演論文集,C12(2022, 神奈川大学), pp.157-158.
- (22) 仙波卓弥,天本祥文,三浦太久真,ピコ秒パルスレーザを使った超硬合金に対する精密微細 加工(ゼロカットを併用した3次元微細加工法,日本機械学会論文集,Vol.89,No.926(2023-10),DOI:10.1299/transjsme.23-00138.
- (23) 仙波卓弥,天本祥文,三浦太久真, ピコ秒パルスレーザを使った3次元微細形状に対する焦点加工,ABTEC2024 講演論文集,C06 (2024,長岡), pp.206-207.
- (24) 天本祥文,仙波卓弥,三浦太久真,短パルスレーザを使った3次元微細形状に対する高速加 工技術(レーザスポットのオーバーラップ率を調節するための周波数制御,ABTEC2024 講 演論文集,C07 (2024,長岡), pp.208-209.