令和3年度特別研究助成対象・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



プロフィール

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年以降、マイクロ・ナノ機械加工技術を確立するために3つの研究を行っている. 1つめの研究は先に実施する機会に恵まれた特別研究を完結するための研究で、7年を要し たが超精密・極微小切削を行い原子の結合を切断できることを証明できた。2つめの研究は クロム合金ステンレス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、初年度の研 究を終了した時点ではハードルが高いと感じていたが、ハードルを越すことができた。3つ めの研究はパルスレーサに対する周波数制御技術を開発するための研究で、現時点では研究 目標を達成できていないが次年度には完結できると思っている。勉強不足と経験不足が原因 で、新たな加工技術を開発するということ容易でなく失敗を繰り返しているが、在職中に3 つの研究目標を達成する所存である。

三井金型振興財団 特別研究助成 (2021年9月~2024年8月) 2022年度(2022年9月~2024年3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
2. 原子配列に乱れのない加工面を作るための研究		7
2.1 研究目標		7
2.2 切削実験に使用した装置と被削材		7
2.2.1 被削材		7
2.2.2 ノーズ R バイト		7
2.2.3 切削実験に使用した装置		8
2.3 工作機械の位置偏差		9
2.4 ウェットエッチング法を使った加工変質層の観察		10
2.5 ワークの熱膨張を利用した極微小切り込み		11
2.6 SEM-EBSD 法を使った加工変質層の観察		13
2.7 研究成果		14
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		15
3.1 研究目標		15
3.2 cBN 製ノーズ R バイト BN7500		16
3.3 切削液と BN7500 の耐摩耗性		17
3.4 BN7500 を使った切削試験の結果		17
3.5 NCB100 を使った切削試験の結果		18
3.6 研究成果		20
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		21
4.1 研究目標		21
4.2 研究の背景		21
4.3 レーザ走査速度の加減速と加工誤差		23
4.4 周波数制御の方法		24
4.5 周波数制御装置		25
4.6 周波数制御の効果		27
4.7 半割円柱の加工方法		28
4.8 半割円柱の加工結果	•••	30
4.9 研究の成果		31
5. おわりに		32
謝辞		33
参考文献		34

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つの研究を行っている(1).本報告書は,2022 年9月から2024 年3月までに行った研究の成果をまとめた進捗状況報告書である.3つの課題に対する進捗状況を報告する前に,それぞれの課題の目標,研究内容,ならびに進捗状況について要点を説明する.

「原子配列に擾乱のない加工面を作るための研究」は、「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)」という課題で行った特別研究(2)を完結するための研究である.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超精密極微小切削を行うと、原子配列に擾乱のない加工面が作れることを示している.

「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」は、プラスティック製レンズを量産する金型の材料として多用されているクロム合金ステンレス鋼(Uddeholm, STAVAX)に対して 超精密切削を行い、表面粗さが pv で 50 nmRz、算術平均値で 3 nmRa 以下の加工面を作ることがで きる工具技術と加工技術を開発するための研究である.初年度の研究を終了した時点ではハードル が高いと感じていたが、無事ハードルを越えることができた.

「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」は、高硬度材料に対してレーザ加 工を行い、3次元微細形状を高速かつ高精度に加工できる加工技術を開発するための研究である.レ ーザの走査速度に比例してレーザパルスの繰返し周波数を可変できる、周波数変換器の試作と評価 試験は終了した.極微小3次元微細形状を高速加工するために解決すべき問題は残っているが、研 究目標を50%は達成できたと思っている.

研究課題	具体的な研究の実施内容	2021	2022	2023	2024	進捗度
 原子配列に擾乱の ない切削加工面を作る ための研究 	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			1		100
	②無酸素銅に対する超精密切削					100
	③切削加工面の結晶構造の解析			1		100
2. クロム合金ステンレ	④刃先を鋭利化した切削工具の試作	W	C)		cBN	100
ス鋼に対象る超精密切 削加工技術の開発	⑤クロム合金ステンレス鋼に対する超 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 御システムの構築	⑥繰返し周波数制御システムの構築					100
	⑦極微小3次元微細形状の高速・高精 度加工					50

表1 研究課題と2024年3月時点での進捗状況

2. 原子配列に乱れのない加工面を作るための研究

2.1 研究目標

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(2)を行った.上記の研究期間内に,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(3)を使って無酸素銅に対して超精密切削を行い,銅の数原子層を切りくずとして除去できることを証明できた(4). 数原子層を除去できれば原子配列に擾乱のない加工面を作ることができると考えていたが,勉強不足と経験不足が重なって,研究期間内に原子配列に擾乱がない加工面を作れなかった.本研究は,先に実施した特別研究を完結するための研究である.

2.2 切削実験に使用した装置と被削材

2.2.1 被削材

図1に示しているのは、650℃で1時間焼きならした後、銅専用エッチング液((株) 三若純薬研 究所、マストーバRC-365A)を使ってウェットエッチングした無酸素銅の金属組織である.図1(a)に 示しているのは微分干渉顕微鏡画像で、結晶粒のサイズは50~300 nm である.また、図1(b)に示し ているのは電子顕微鏡 SEM 画像で、同じ結晶粒に不均一な凹凸はなく原子配列に乱れは生じていな いことを表している.このように、焼きならしとウェットエッチングした無酸素銅を被削材(ワーク) として使用した.純度は99.99%、直径は20 nm と10 nm、厚さは5 nm、ならびに硬さは100 Hv で ある.

2.2.2 ノーズRバイト

図 2 に示しているのはレーザ成形後(a), 電解加工後(b), 乾式ラッピング後(c),ならびに酸素プラズ マを用いたドライエッチング後(d)に観察した NPD 製ノーズ R バイトの FESEM 画像である. ノーズ R の半径は 0.2 mm,すくい角は 0°, ならびに逃げ角は 10°である. ドライエッチング後の前切れ刃を,



図1 無酸素銅のウェットエッチング画像



図3 前切れ刃のAFM 画像と断面曲線(刃先の丸 み半径 r: 0.3 nm)



(a)レーザ加工後 (b)電解加工後 (c)乾式ラッピング後 (d)DE 後 (2 レーザ加工,電解加工,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(DE) 後に観察した前切れ刃の FE-SEM 画像





図4 無酸素銅に対する乾式での切削距離と摩 耗した刃先の丸み半径

図 5 切削実験に使った装置の外観(①無酸素銅, ②切削工具, ③MQL)

原子間力顕微鏡 AFM を用いて測定した結果を図3に示している. 探針先端の丸み半径 rpが4 nm の カンチレバーを使って測定した結果であり, 刃先の丸み半径の測定値 rm は 4.3 nm, rm から rp を引い て求めた前切れ刃の刃先の丸み半径 r は 0.3 nm であることを示している. 図4 に示しているのは, 乾式ラッピング後に r が 12.3 nm であったノーズ R バイトを使用し, 無酸素銅を乾式切削した場合 に得られた切削距離と r との関係である. 加工条件は図4 に付記したとおりである. このように, 刃 先の丸み半径 r を 0.3~25.4 nm に成形したノーズ R バイトを切削実験に使用した.

2.2.3 切削実験に使用した装置

図 5 に示しているのは、無酸素銅の正面切削に使用した装置の外観である.工作機械には位置決めや送り運動に対する制御分解能が 10 nm の非球面レンズ加工機(芝浦機械(株),ULG50A)を使用した.工作機械は、気温を±0.1℃の精度で制御できる簡易恒温室の中に設置した.切削液には白灯

油を使用し、ブルーベ給油機(フジBC技研(株)、モデルMK)を使ってミストを噴霧供給した. ブルーベ給油機に供給する圧縮空気の温度は、サーモドライヤ(SMC(株)、IDH4-10-E)を使って ±0.1℃の精度で制御した.また、切削液が内蔵されているブルーベ給油機をクールプレート((株) 日伸理化、NCP-2215)の上に置き、ミストの温度を±0.1℃の精度で制御した.

2.3 工作機械の位置偏差

図 6(a)に示しているのは、NC 制御装置 (FANUC, 16i)の波形診断機能を使って測定した、Z 軸を同 じ位置に止めておくための制御パルスである.図 6(b)に示しているのは 2 ms 間隔で測定した 4096 個 のパルス波形に対する周波数分析の結果である.NC 制御装置からは、図 6(a)に示したように振幅が算 術平均値で 18 nm、図 6(b)に示したように一次ピークでの周期が 16.5 ms の制御パルスが出ている.こ の制御パルスと、Z 軸が実際に動いている変位(位置偏差)とは一致していない可能性が考えられた. そこで、ワークにらせん溝を成形し円周方向の断面曲線を解析して位置偏差を測定した.

図 7(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らせん溝の画像である. ノーズ R の半径が 0.2 mm のノーズ R バイトを使用し、ワークの回転数を 15 rpm、切込み深さ h を 1 µm、





(b)パワースペクトラム

図6 工作機械のNC 制御装置から取出した位置制御パルスと周波数分析の結果





ならびに送り量 $f \ge 60 \mu$ m/revに設定してらせん溝を成形した. 倍率が 100 倍の対物レンズを用いる と,図 7(a)に示したように位置偏差が転写された横筋を検出できた. ここで,ワーク中心からのらせ ん溝の位置をx,ワークが1回転するのに要する時間をT,ならびに位置偏差の周期を Δt とすれば, Δt に相当する横筋の間隔 ΔL は

 $\Delta L = 2\pi \cdot x \cdot \Delta t/T$

(1)

と計算できる. x が 2.5 mm の位置に成形された溝の場合, Δt が 16.5 mms の周期に相当する位置偏差 の周期 ΔL はワークの回転数が 15 pm と 30 pm の場合, それぞれ 64 µm と 128 µm になる. 100 倍の 対物レンズを使った場合の視野のサイズは 128×128 µm であり,断面曲線に対して周波数分析を行い 位置偏差の周期 ΔL を測定するためには,最低でも ΔL の 2 倍程度は測定長を長くする必要があると 思われた.このように,100 倍の対物レンズを用いた場合に生じる測定上の制約があり,ワークの回 転数を 15 pm に設定してらせん溝を成形した.

図 7(b)に示しているのは x が 2.5 mm の位置に成形したらせん溝を円周方向に測定した断面曲線, 図 7(c) に示しているのは 0.125 μ m 間隔で 1024 点測定した断面曲線に対する周波数分析の結果であ る. 断面曲線から算術平均粗さは 6.3 nmRa,周波数分析の結果から 1 次ピークに対応する *AL* は 63.9 μ m と求められた.式(1)に *AL* の値を代入して *At* を求めると 16.5 ms になり,NC 制御装置の波形診断 装置を使って測定した *At* と一致した.このように、切削実験に使った工作機械は Z 軸の位置を制御 するために 16.5 ms 以下の周期で振幅が算術平均値で 6.3 nm の変位を繰返しており、切込み深さに 対して±6.3 nm の位置偏差が生じている.

2.4 ウェットエッチング法を使った加工変質層の観察

図8に示しているのは、刃先の丸み半径rが 0.5 nm のノーズRバイトを使用し、切込み深さhを 3 µm、送り速度fを 5 µm/rev に設定して平面切削した加工面を、時間を変えウェットエッチングし



図8 加工面のウェットエッチング画像 (r0.5 nm, h3 µm, f5 µm/rev)



図9 加工面のウェットエッチング画像 (r0.5 nm, *h*100 nm, *f*5 µm/rev)



 $(r 0.5 \text{ nm}, h10 \text{ nm}, f5 \mu\text{m/rev.})$



た結果である.加工面には結晶粒が微粒化した組織が生成されており、この微粒化層を除去するのに 240 min 要したことを表している. 図9に示しているのは、hを3 µm から 100 nm に減らして平面切 削した加工面をウェットエッチングした結果である. 加工面に生じた凹凸は増加した後, エッチング 時間が 120 min を越えると減少し加工面が平坦に変化するようすが観察された.転位密度が高い部分 が優先的にエッチングされた結果、このような現象が生じたと考えられる. 図 10 に示しているの は、hを100 nmから10 nm に減らして平面切削した加工面をウェットエッチングした結果である. 加工面が平坦になるまで、図9に示した結果では180 nm 要したのに対し図10に示した結果では10 分に減少している.

図8から図10に示した実験の結果は、加工面に生成された転位密度が高い部分の深さ、つまり加 工変質層の厚さは切込み深さが増すと増加することを意味する. そこで, 刃先の丸み半径を0.5~20 nm の範囲で4種類変化させたノーズRバイトを使って加工面を作成した. その後, 加工面の半分を マスクテープで被覆して加工面が平坦になるまでウェットエッチングし、段差を測定して加工変質 層の厚さを測定した. 図 11 に示しているのは,切込み深さと加工変質層の厚さとの関係である. 図 11に付記したように、刃先の丸み半径を変化させた各場合とも、切込み深さhを刃先の50倍と100 倍に変化させて加工面を成形した.図11のように得られた実験の結果から、刃先の丸み半径と切込 み深さをさらに減らせば、加工変質層の厚さは0になることが予想された.

2.5 ワークの熱膨張を利用した極微小切込み

切込み深さhを10nm以下に減らすことができれば、原子配列に乱れがない加工面を作れる可能 性があると考え、ワークの膨張を利用してhが1nm以下の極微小切込みを加えることを試みた.図 12 に青色の太線で示しているのは、切削点近傍の室温 T を 25±0.1℃、ミストの温度 T を 23.6±0.1℃ に設定して Z 軸の方向に測定したワークの膨張線図である. ワークをミストの温度になじませるた めの慣らし運転を2時間行った後、電気マイクロメータを使って刃物台とワークの相対変位を測定

した. ペンレコーダに出力した電気マイクロメータの出力を 5 分刻みで読み取った静的な変位に, 位置偏差に相当する 6.3 nm を加えた結果である. ワークは線形に膨張していたので, 膨張線図を直 線で近似して以下の計算を行った.

ワークとノーズRバイトとの接触位置を決め、たとえば図 12 に赤色の太線で示した位置にノーズ Rバイトの刃先位置を固定してノーズRバイトを図 12 に付記した a→b へ移動させると、刃先位置 を超えて膨張したワークは除去され切込み深さは b の位置で最大になる. 続いて刃先を b→a へ反 転させる間、ワークは直線 I を Z 軸の方向に平行移動させた直線 II に沿って膨張すると考えられ るので、刃先が b→a に移動する間の切込み深さは黒の太線で示したように求められ切込み深さは a の位置で最大になる. ここで、図を見やすくするために、a→b や b→a の移動時間は 20 分に設定し ている. 図 12 に付記したように、膨張線図の傾きを Δz 、ノーズ R バイトが a→b に移動する時間を Δt と表現すれば、切込み深さの最大値 h_{max} は式(2)のように求めることができる.

$$h_{max} = \Delta z \cdot \Delta t$$

ワークのサイズに合わせて ab の長さを 3.5 mm に設定すると、図 8~図 10 に示した加工面を成形 したのと同じ送り量fが 5 µm/rev の場合、式(2)に示した Δt は 5.8 分になる.また、式(2)を使って h_{max} が 1 nm になる Δz を求めると 10.3 nm/h になる. そこで、 Δz が 10.3 nm/h になるミストの温度 T_m を求 めるために、 T_a を 25±0.1℃ に保った上で T_m を変化させ図 12 に示したのと同じ要領でワークの膨張 線図を測定した.図 13 に〇印で示しているのは($T_a - T_m$)と Δz との関係である.測定結果を直線で近 似した結果、切削点近傍の室温よりもミストの温度を 2.1 ℃低く設定すると Δz が 10.3 nm/h になるこ とが明らかになった.そこで、切削点近傍の室温 T_a を 25.0±1℃、ミストの温度 T_m を 22.9±0.1℃に設 定して正面切削を行い h_{max} が 1 nm であると思われる加工面を成形した.

ワークをミストの温度になじませるための慣らし運転を2時間行った後,100 nm 刻みでノーズR バイトをワークに接近させ両者の接触位置を求めた.その後,切込みを加えないで正面切削を12時





図 12 ワークの熱膨張を利用した極微少切込みの 方法

図 13 ミストの温度 *T_m*とワークの熱膨張率 *Az* との関係

(2)



 (a)標準試料
 (b) r0.5 nm, h100 nm
 (c) r0.5 nm, h10 nm
 (d) r0.3 nm, hmax1 nm

 図 14 切込み深さを変え超精密切削を行った加工面の KAM マップ

間行い,面振れを部分的に除去した加工面を成形した.加工面の成形には,刃先の丸み半径 $r \ge 0.3$ nm に成形したノーズ R バイトを使用した.接触位置を決める時点で過剰に切込んだ可能性がある が,その結果として切込み深さが大きくなるのは図 12 に示したように 1 回目の加工のみであり,2 回目以降は位置偏差を含めノーズ R バイトの刃先位置を超えた部分が除去される.したがって,面振れが除去された箇所での h_{max} は 1 nm になる.

2.6 SEM-EBSD 法を使った加工変質層の観察

加工面の結晶粒に残るひずみの観察には、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(5).図14(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 トエッチングした前加工面の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観察された.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の間に生 じたひずみを測定した可能性が高い(6).

図 14(b)~図 14(d)に示しているのは、直径を 20 mm から 10 mm に変えたワークに対し、切込み深 さhを 100 nm~1 nm の範囲で変化させて成形した加工面を観察した 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dが 100 nm の図 14(b)やhが 10 nm の図 14(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、 h_{max} を 1 nm に設定して成形した図 14(d) の画像は図 14(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.このように、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、 h_{max} が 1 nm であ ると思われる条件で正面切削した無酸素銅の加工面には、結晶方位の乱れが生じていないことが明 らかになった.

図 14(d)に示した実験結果の再現性を確かめるため、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 μ m/rev に設定して平面切削した加工面を作成し、同表面に残る加工変質層を



(b) KAMマップ

図 15 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走査微分干渉 顕微鏡画像と KAM マップ

観察した. 図 15(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 15(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 15(a)に示したよう に加工面に結晶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わずかに生じている. 前切れ刃が通過した痕跡だと考えられるが,図 15(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痕跡は見られない. 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, *h_{max}*が 1 nm であると思われる条 件で正面切削した無酸素銅の加工面には,結晶方位の乱れが生じていないと考えられる.

2.7 研究成果

「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)」 という課題で行った特別研究(2)を完結するには、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 以下に成形したノーズRバイトを使用し,バイトの送り速度を5µm/rev に設定し無酸素銅に対する平面切削を行った. 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 を越えると格子欠陥や,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平面切削を行い,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.その結果,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ていないことが明らかになった.

(3)(2)の結果にたどり着くまで2016年9月から2022年8月の7年間を要したが、原子配列に擾乱がない加工面を作ることができた.

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 16 に示しているのは、プラスティックレンズの量産に用いられているクロム合金ステンレス (Uddeholm, STAVAX) 製の金型の外観である.形状精度として 0.1 µm/10 mm,表面粗として pv で 50 nmRz,ならびに算術平均値で 3 nmRa の品質が求められている.STAVAX に対して超精密切削加 工を行って上記の品質を達成することは容易でなく、荒成形したレンズ金型に対して無電解 NiP め っきを行った後、NiP めっき皮膜に対して単結晶ダイヤモンド製の切削工具を使って超精密切削を行 っているのが現状である.

2021 年度には、STAVAX に対して超精密切削加工を行い、上記の品質を達成できる超硬合金製の切削工具(ノーズ R バイト)を試作するための研究を行った。初年度の進捗状況報告書(1)に記載したように、工具素材にプラズマ放電焼結法で作られた硬さが 2700 Hv の超硬合金を使用し、ノーズ R の半径が 0.2 mm、すくい角が 0°、ならびに逃げ角が 10°の切削工具を試作した。また、切削工具の耐摩耗性を評価するための切削実験を行った。図 17 に示しているのは、切削実験に使用した装置の外観である。位置決めや送り運動に対する制御分解能が 10 nm の非球面加工機(芝浦機械, ULG50A)を使用し、直径が 20 mm で硬さが 327 Hv の STAVAX (ワーク)に対して平面切削



図 16 STAVAX 製レンズ金型 (https:// ultraprecision-nanomachining -center.com/ column/)



図 17 切削実験に使った装置の外観(① ワーク, ②切削工具, ③MQL)

を行った.切削液には水溶性切削液((株)ネオス,ファインカット 870,×50 希釈)を使用し,切削点に大量に供給した.ワークの回転数nは 120 rpm,切込み深さhは 1 μ m,ならびに送り速度 fは 5 μ m/rev に固定した.

図 18 に示しているのは、 ワークの端面を 1 度だけ切削した後に観察した切削工具と加工面である. 切削距離はわずか 18.5 m であったが、切削工具の前逃げ面には幅 V_B が 13.2 nm の摩耗が生じていた. また、加工面の粗さは pv で 201.7 nm Rz で、工具の素材に超硬合金を使うことにこだわっていると研究目標を達成できない恐れがあった. そこで、2022 年度には切削工具の素材としてワークと熱化学反応を起こさない cBN を使用することに変更した.

3.2 cBN 製ノーズRバイト BN7500

図 19(a)に示しているのは、市販の cBN 製インサートチップ(住友電工ハードメタル, BN7500)の SEM 画像である. ノーズRの半径は 0.2 mm、すくい角は 0°、ならびに逃げ角は 10°である. 溶浸 焼結法で作られた Coを 5 Vol%程度含む cBN で、硬さは 43 Gpa である. 図 19(b)に示しているのは、



(a) すくい面摩耗
 (b)逃げ面摩耗(V_B13.2 μm)
 (c) 加工面(pv 201.7 nmRz)
 図 18 超硬合金製ノーズ Rバイトに生じた摩耗と加工面 (n 120 rpm, h1 μm, f5 μm/rev)



(a)成形前 図 19 溶浸焼結法作られた cBN の刃先 (工具の素材 BN7500)

100 ▲ 切削液:ダイカトールミストV105 □ 切削液:ダイカトールミストV25K ● 切削液:純水 ● 切削液:純水 0 50 100 150 切削距離(m)

図 20 切削距離と前逃げ面摩耗幅 V_B (n 120 rpm, h 1 μ m, f 5 μ m/rev)

市販の工具の刃先と購入したインサートチップに対して乾式ラッピングを行い,切れ刃を鋭利に成 形した切削工具である.ラップには焼結ダイヤモンド (PCD) 製の円板 (トーメイダイヤ (株), TDC-SM)を使用した. PCD 製の円板に対して放電加工,湿式ラッピング,ならびに乾式ラッピングを行 ってラップの砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を平坦に成形した.

3.3 切削液とBN7500の耐摩耗性

図 20 に示しているのは、切削距離を 18.5 m から 129.5 m に変え BN7500 の耐摩耗性を調べるため に行った切削実験の結果である.切削実験を始めた当初、切削液には水溶性切削液((株)ネオス、 ファインカット 870、×50 希釈)を使用し切削点に大量に供給した.その結果、図 20 に〇印で示し たように逃げ面摩耗幅 V_Bは切削距離に比例して増加した.

経験不足が原因で逃げ面摩耗を減らす方策を思いつかず、cBN 製の切削工具を製造販売している 企業の技術者に切削工具の性能試験に使っている切削液を尋ねた.その結果、切削液にはミストの切 削油を使っており、商品名(大同化学(株)、ダイカトールミスト V25K と V105)を教えてもらう だけでなく、切削油を提供して頂いた.早速ミストの切削油を使って図 20 に〇印で示したのと同様 の切削実験を行った.図 20 に〇印で示しているのは粘度が 24 mm²/s の切削油を使った場合の結果、 □印で示しているのは粘度が 35 mm²/s の切削油を使った場合の結果である.〇印で示した結果と異 なり、ミストの切削油を用いると逃げ面摩耗幅 V_B が大幅に減少することが明らかになった.企業の 技術者は既にご苦労され、回答を見つけられていたということである.

3.4 BN7500 を使った切削試験の結果

そこで、粘度が 35 mm²/s の切削油を使用し、ワークの回転数 n、切込み深さ h、ならびに送り速度 f といった加工条件を系統的に変化させ、逃げ面摩耗を減らすことができる加工条件を見出すための 切削実験を行った. この場合、加工条件を変化させた各場合とも切削距離は 1150m に統一した. 図 21 に示しているのは、n を 1000 rpm、h を 2 μ m に保った上で、f を 0.5~5 μ m/rev の範囲で変化させ









た場合に得られた工具の摩耗曲線である.加工条件を変化させたことの影響が最も顕著に表れた結果で、fを減らせば V_B は減少することが明らかになった.そこで、fを0.5 μ m/rev に固定した上でワークの回転数nと切込み深さhを変化させ図21と同様の切削試験を行った.

図 22 に示しているのは、最終的に f を 0.5 µm/rev, n を 1500 rpm, ならびに h を 0.1 µm に設定した場合に得られた工具の摩耗曲線である.図 19(a)に示した市販の BN7500 を使った場合の結果を● 印,図 19(b)に示した刃先を鋭利化した BN7500 の結果を〇印で示している.〇印で示したように切削距離が 1150 m での V_B を 3.3 µm まで減らすことができた.図 23 と図 24 に示しているのは、切削試験後に観察した切削工具の摩耗形態と加工面である.市販の BN7500 を使った場合の結果を図 23、刃先を鋭利化した BN7500 を使った場合の結果を図 24 に示している.図 24 に示したように、加工面には逃げ面に生じた櫛刃状摩耗の間隔と一致する送りマークが生じている.ZygoNewViewTM7500で測定した加工面の表面粗さは pv で 17.8 nmRz、算術平均値で 3.1 nmRa であり、これほど平滑な加工面を作れるとは思っていなかった.

図 25(a)に示しているのは図 24(c)に示した加工面,図 25(b)に示しているのは 0-1/2µm のダイヤモンドペーストをつけた綿棒で図 25(a)に示した加工面を 30 分手磨きした加工面である.表面粗さはpv で 1.8 nmRz,算術平均値で 0.3 nmRa であり,プラスティック用レンズ金型に要求される 50 nmRz と 3 nmRa を大幅にクリアしている.

3.5 NCB100 を使った切削試験の結果



(b)逃げ面摩耗(V_B7.3μm) (4) 図 23 市販の BN7500 に生じた摩耗と加工面



(a) すくい面摩耗
 (b)逃げ面摩耗(V_B3.3 μm)
 (c) 加工面(pv 17.8 nmRz)
 図 24 刃先を鋭利に成形した BN7500 に生じた摩耗と加工面



(a)切削加工面(pv 17.8 nmRz)(b)研磨面(pv 1.8 nmRz)図 25 切削加工面と加工面をサイスが 0-1/2 のダイヤモンドで手磨きした研磨面



図 26 Co を含有しない NCB100 の刃先

図 27 NCB100 に関する切削距離と逃げ面摩耗幅 (f0.5 µm/rev, n1500 rpm, h0.1 µm)

図 22 から図 25 に示したのと同じ切削試験を、Co を焼結助剤として使っていないバインダレス cBN (住友電工ハードメタル、NCB100)を用いた場合について行った. Co が 5 Vol%含まれてい る BN75000 に比べ NCB100 は 10 Gpa 程度硬く、熱伝導率が 2 倍程度高くなっている. 図 26(a)に示 しているのは、NCB100 製インサートチップの SEM 画像である. ノーズR の半径は 0.2 mm、すくい 角は 0°、ならびに逃げ角は 10°である. 図 26(b)に示しているのは、購入したインサートチップに対 して乾式ラッピングを行い、切れ刃を鋭利に成形した切削工具である. 乾式ラッピングには、BN7500 の乾式ラッピングに使ったのと同様に、PCD 製の円板を使用した.

図 27 に示しているのは、 $f \ge 0.5 \mu$ m/rev、 $n \ge 1500 rpm$ 、ならびに $h \ge 0.1 \mu$ m に設定した場合に得られた工具の摩耗曲線である。図 26(a)に示した市販の NCB100 を使った場合の結果を●印、図 26(b) に示した刃先を鋭利化した NCB100 を使った場合の結果を〇印で示している。〇印で示したように切削距離が 1150 m での V_B は 4.3 µm である。図 28 と図 29 に示しているのは、切削試験後に観察した工具の摩耗形態と加工面である。市販の NCB100 を使った場合の結果を図 28、刃先を鋭利化した NCB100 を使った場合の結果を図 29 に示している。図 29(b)に示したように、1150 m 切削したにもかかわらず前逃げ面はほとんど摩耗していない。ZygoNewViewTM7500 で測定した加工面の表面粗さは pv で 18.9 nmRz、算術平均値で 3.1 nmRa である。図 30(a)に示しているのは図 29(c)に示した加工



(a)すくい面摩耗

(b)逃げ面摩耗(V_B 6.1 µm) 図28 市販のNCB100に生じた摩耗と加工面



(a)すくい面摩耗 (b)逃げ面摩耗(V_B 4.3 µm) (c) 加工面 pv 18.9 nmRz) 図 29 刃先を鋭利に成形した NCB100 に生じた摩耗と加工面



(a)切削加工面(pv18.9 nmRz) (b)研磨面(pv 2.2 nmRz) 図30 切削加工面と加工面をサイスが0-1/2のダイヤモンドで手磨きした研磨面

工面,図 30(b)に示しているのは 0-1/2µm のダイヤモンドペーストをつけた綿棒で図 30(a)に示した加 工面を 30 分手磨きした加工面である. 表面粗さは pv で 2.2 nmRz, 算術平均値で 0.3 nmRa であり, プラスティック用レンズ金型に要求される 50 nmRz と 3 nmRa を大幅にクリアしている.

3.6 研究成果

2022年度には、研究目標を達成するために切削工具として使ったノーズRバイトの材質を超硬合 金から cBN に変えたが、研究を開始した当初は研究目標を達成するのは無理かもしれないと思って いた.研究に光が見えたのは切削液を水溶性切削液から潤滑性の高い切削油に変えてからで、工具の 逃げ面摩耗が大幅に減少した.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 Co を 5 Vol%程度含む cBN の刃先を鋭利に成形した cBN 製のノーズ R バ イトを使用して STAVAX を切削した. その結果, 1150 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, 算術平均値で 3.1 nmRa であり, レンズ金型に要求 される品質をクリアできた.

- (2) hBN を cBN に直接変換した,バインダレス cBN の刃先を鋭利に成形した cBN 製のノーズ R バイトを使用して STAVAX を切削した. その結果,1150 m 切削した後で観察した逃げ面摩耗幅は 4.3 µm,加工面の表面粗さは pv で 18.9 nmRz,算術平均値で 3.1 nmRa であり,レンズ金型に要求 される品質をクリアできた.
- (3)(1)の加工面を,顕微鏡で観察しながらサイズが 0-1/2 µm のダイヤモンドペーストをつけた綿棒で 30 分研磨すると.表面粗さは pv で 1.8 nmRz,算術平均値で 0.3 nmRa であった.

このように、プラステック用レンズ金型の素材として用いられているクロム合金ステンレス鋼に対して超精密切削加工を行い、レンズ金型に要求される表面粗さが pv で 50 nmRz 以下、算術平均値で 3 nmRa 以下の加工面を作るという研究目標を達成できた.

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

レーザ加工は非接触加工であり、物理的な反力に起因する加工誤差は生じない.また、フェムト秒 やピコ秒といった短パルスレーザでは非熱的なアブレーションによって材料が除去されるため、熱 影響は極微小な範囲に限られる(7).さらに、フルーエンスと呼ばれている単位面積に照射されるエ ネルギを変えると材料の除去深さはサブµmから数+µmの範囲で変化する(8).これらの特徴は、短 パルスレーザが機械加工では作れない3次元微細形状を加工できることを意味する.ただし、現時 点では加工法の開発が遅れているために短パルスレーザは2次元微細形状の加工に使われているこ とが多い(9),(10).

研究代表者らはナノ秒パルスレーザを使って等高加工(11)や走査加工(12)を行い,高硬度材料に対して3次元微細形状を成形できる加工技術の開発を行ってきた.この間,従来のCAMに相当する加工形状のシミュレーション技術,ゼロカットを併用した高精度加工法,ならびに切残しを除去するための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を開発できた(13).その一方で,レーザ微細加工技術を実用化するためには,高速加工技術を開発する必要があると感じていた.

「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(フェムト秒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)」と題した本研究は、この高速加工技術を開発するための研究で ある.レーザ加工機が加減速することにより、オーバーラップ率と呼ばれているレーザスポットの重 なり具合がすることによって生じる加工誤差を防止できる繰返し周波数の制御技術であり、当該技 術を確立すれば超硬合金等の高硬度材料に対し3次元微細形状を高速で加工できると夢見ている.

4.2 研究の背景

図31 に示しているのは加工装置の外観である.赤色の線で示したレーザ発振器から出射された レーザを,真空引きしたフォトニック中空ファイバを使って精密小形マシニングセンタの主軸の側 面に取付けた中継ボックスまで伝送した.中継ボックスにはレーザを対物レンズに入射させるため のミラーアレイと光源から出射された白色光を対物レンズに入射させるためのミラーアレイを組み 込んでいる.100 倍の対物レンズで測定してレーザと白色光の焦点位置が一致するように光軸を調 整しており,図31 に白色の線で示したように CMOS カメラを使って加工中に供試材の表面を観察 できるようにした.

レーザの発振器には、LIGHT CONVERSION の CARBIDE を使用した. 波長は 1028 ± 5 nm, パル ス幅の可変範囲は 300 fs-10 ps,最大パルスエネルギは 65 µJ,ならびにパルスの繰返し周波数は 60-1000 kHz,レーザの品質は TEM00 で M2 < 1.2 である.フォトニック中空ファイバには、 GLOphotonics の PMC-C-Yb-7C を使用した.ファイバの中空部を 50 Pa に真空引きしており、出力メ ータ (Gentec Electro-Optics, MAESTRO)を使って測定した対物レンズに入射される前のレーザの透 過効率は 50% である.精密小形マシニングセンタには(株)牧野フライス製作所の HYPER2J を使用 した.制御分解能は 10 nm で、室温を 24±0.1℃に保った簡易恒温室に設置した.

図 32 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 の超硬合金製の基礎円柱の上 半分にレーザ成形した半径が 20µm の半割円柱の SEM 画像である. ゼロカットを併用した加工法と 図 31 に示した工作機械を使って成形した. 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 ットのオーバーラップ率が変化するために加工誤差が発生する. この加工誤差を目立たないように するため、工作機械の送り速度を 5 mm/min に設定せざるを得なかった. また、切残しを除去するた めにゼロカットを併用した形状加工を行った.



図 31 レーザ加工機の外観(①レーザ発振機,②真空排気,③レーザビーム,④中継ボックス,⑤白色 光,⑥CMOS カメラ,⑦対物レンズ,⑧工作物,⑨ステップピングモータ,⑩公転テーブル)



図 32 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)ポケットの外観 (b)NC 制御装置から取出した速度電圧 (c)ポケットの断面曲線 図 33 サイズが□400 µm のポケットの顕微鏡画像(a), NC の制御装置から取出した速度電圧(b),なら びにレーザの走査方向に測定したポケットの断面曲線

その結果,図32に示した半割円柱の加工に9.7時間を要したが、たとえば送り速度を100mm/min に増すことができれば加工時間は9.7時間から0.5時間に減らすことができる.その上で、ゼロカッ トを無くすることができれば、加工時間をさらに減らすことができる.このように、加工時間を短縮 化し生産性を高めるためには、送り速度に比例してパルスの繰返し周波数を可変できるパルスレー ザに対する繰返し周波数の制御技術(1)や、ゼロカットを併用しなくても高精度な3次元微細形状を 加工できる加工技術(14)を確立する必要がある.

4.3 レーザ走査速度の加減速と加工誤差

図 33(a)に示しているのは、パルスの繰返し周波数 fを 15kHz、パルスエネルギを 1.5 µJ、レーザの 走査速度 v を 100 mm/min、ならびに横送り量 Δp を 0.4µm に設定し、表面粗さを 40 nmRz に研磨し た超硬合金にレーザ加工した□400 µm のポケットである。図 33(b)に示しているのは工作機械の NC 装置(FANUC 16i)から出力した走査速度を反映した電圧(速度電圧)、図 33(c)に示しているの



図 34 外部で作ったトリガパルスをレーザの発振機に入力し,発振機から出射されるレーザパルスの 繰返し周波数を制御する方法を湿した模式図



(a)トリガパルスの発生方式 (b)電圧速度に比例したトリガパルスパルス 図 35 トリガパルスの発生方式(a)と台形速度電圧に対してトリガパルスを発生させた例(b) (加減速と 定速時間を 20 ms, 定速部の最大電圧 Vmax を 100 mV, ならびに定速部での繰返し周波数 f を 1 kHz に設定してシミュレーションした結果)

は走査方向に測定したポケットの断面曲線である. 図中に a(a'), b(b'), c(c')と示しているのは加速部, 定速部, ならびに減速部である. レーザの発振器からは同じ繰返し周波数でレーザパルスが出射され ているが,加減速部ではレーザスポットのオーバーラップ率が増すためにオーバーカットされたよ うすを表している. 2021 年度の進捗状況報告書(1)に記載したように,レーザの走査速度に比例して パルスの繰返し周波数を制御すればオーバーラップ率を一定の値に保つことができる.

4.4 周波数制御の方法

図 34 に示しているのは、レーザの発振機から出射されるレーザパルスの周波数を制御する方法を示した模式図である。発振器は 60 kHz の周波数でパルスを発振しているが、発振器に外部からトリガパルスを入力すればパルスを間引きして出射できる pulse picker と呼ばれている機能を持っている。 そこで、レーザの走査速度に比例してパルスの繰返し周波数を変化させることを試みた。

図 35(a)に示しているのは、レーザの走査速度に比例してレーザパルスの繰返し周波数を変化させ

る方法を示した模式図である. 横軸は時間,縦軸は図 35(b)に示したように測定できる出力電圧である. レーザの走査速度が同じ定速部での最大電圧を Vmax, 周波数をfとすれば, 周期 p は

$$p=1/f$$
(1)

になるので、電圧を時間t(ピッチp)で積分した電圧の積分値(閾値)は、

$$\Sigma V \cdot t = V_{max} \cdot p = V_{max}/f \tag{2}$$

になる.加速時,微小区間内での平均電圧をV,周波数をfとすれば

$$p'=1/f'$$
(3)

なので電圧の積分値は

$$\Sigma V \cdot t = V \cdot p' = V/f', \quad V = (V_s + V_e)/2 \tag{4}$$

になる. 式(2)と式(4)のように求められる電圧の積分値が同じになったときにパルスを発生すれば、

$$V_{max}/f = V/f' \quad \rightarrow f' = (V/V_{max}) \cdot f \tag{5}$$

と表すことができる.このように、加減速時は電圧を時間積分して閾値達したときにパルスを出射 すれば、パルスの周波数 f は電圧 V に比例して変化する.

図 35(b)に示しているのは、加減速と定速時間を 20 ms, 定速部の最大電圧 V_{max}を 100 mV, ならび に定速部での繰返し周波数 fを 1 kHz に設定してシミュレーションしたトリガパルスである.加減速 部分では電圧が減少するに従ってトリガパルスの間隔が広く変化しているようすを表している.

4.5 周波数制御装置

企業の技術者から(有)ワイズシステムを紹介され,図 35 に示した方式でレーザの走査速度に比例 してパルスの繰返し周波数を制御できる周波数制御器を試作した.周波数制御器への入力最大電圧 は400 mV,電圧のサンプリング時間は12.5 µs,制御器からの最大出力周波数は30 kHz である. XYZ 各軸の速度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.演算処理速度12.5 µs から 50.0 µs の範囲で可 変できるようになっている.

図 36 に示しているのは、試作した周波数変換システムのブロック線図である. NC 制御装置から 出力されるレーザの走査速度を反映した出力電圧に対してアナログフィルタをかけて高周波ノイズ を除去した後、電圧を CPU と表現した周波数制御器へ入力した. CPU では、デジタルフィルタをか けた電圧に対してトリガパルスを発生した後、トリガパルスをレーザ発振機に出力した. 図 34 に示



図36 試作したパルスレーザに対する繰返し周波数の制御装置 CPU と制御システム



(c)③トリガパルス

(d)④出射パルス強度

図 37 図 36 に①~④で示した位置で測定した電圧,トリガパルス,ならびに出射パルスの強度(パルスの繰返し周波数fを 15kHz,レーザの走査速度vを 100 mm/min,ならびに横送り量 Δp を 0.4 μ m に設定しサイズが□400 μ m のポケットを加工する過程で測定した波形)

したように、レーザ発振機からはレーザの走査速度に比例した繰返し周波数のレーザパルスが出射 されることになる.なお、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)フィルタを併用した.

図 37 に示しているのは,図 36 に①~④で示した位置で測定した電圧,トリガパルス,ならびに 出射パルスの強度である.パルスの繰返し周波数 *f* を 15kHz,パルスエネルギを 1.5 µJ,レーザの走 査速度 *v* を 100 mm/min,ならびに横送り量 *Δp* を 0.4µm に設定しサイズが□400 µm のポケットを加 工する過程で測定した波形である. ①に示しているのはアナログフィルタをかける前の電圧,②は デジタルフィルタをかけた後の電圧,③に示しているのはトリガパルス,ならびに④に示しているの はフォトディテクタを使って測定した出射パルスの強度である.

4.6 周波数制御の効果

図38(a)に示しているのは周波数制御を行って加工したサイズが□400µmのポケットのレーザ走査 顕微鏡画像,図38(b)に示しているのはポケットを加工する過程で測定したトリガパルスの繰返し周 波数を解析した結果,図38(c)に示しているのはレーザの走査方向に測定したポケットの断面曲線で ある.図33(c)に示したように、周波数制御をしない場合には加減速部分がオーバーカットされてい たのに対し、周波数制御をした場合には図38(c)に示したようにオーバーカットされた領域は減少し ている.ただし、ポケットの底面が完全にフラットには成形できていない.ここで、トリガパルスの 繰返し周波数を解析した図38(b)に示した結果によればトリガパルスの繰返し周波数は定速部で大き く変動している.

これは、電圧のサンプリング時間が 12.5 μ s であったのに対し定速部でのレーザパルスの繰返し周 波数を 15 kHz に設定したのが原因である.表 2 に示すように、繰返し周波数が 15 kHz の場合の周期 pは 66.7 μ s なのでサンプリング時間 δ が 12.5 μ s の場合、周期は 66.7±12.5 μ s の範囲で変動してもお かしくない.この周期から上限周波数を求めると 18.5 kHz,下限周波数は 12.6 kHz になる.これが、



(a)ポケットの外観 (b)トリガパルスの周波数 (c)ポケットの断面曲線 図 38 サイズが□400 µm のポケットの顕微鏡画像(a),トリガパルスに対する周波数解析の結果(b),なら びにレーザの走査方向に測定したポケットの断面曲線

表 1 サンプリング時間に関係する周 波数の変動

繰返し周波数 f	15.0	kHz
周期p	66.7	μs
サンプリング時間δ	12.5	μs
$\bigcirc p-\delta$	54.2	μs
①上限周波数	18.5	kHz
①変動	23.1	%
$@p+\delta$	79.2	μs
②下限周波数	12.6	kHz
②変動	15.8	%
(①変動+②変動) /2	19.4	%



図 39 定速部でのパルスの繰返し周波数とサンプリン グ時間に関係する周波数の変動

図 36(b)に示したグラフで繰返し周波数が変動した原因である.

なお上限周波数と下限周波数との差を15 kHz で除して繰返し周波数の変動率を求めると,繰返し 周波数を15 kHz に設定した場合の変動率は19.4%になる.図 39 に示しているのは、定速部でのレ ーザパルスの繰返し周波数と表2と同様にして求めた周波数の変動率との関係である.図 39 に示し たように、定速部でのレーザパルスの繰返し周波数を下げればトリガパルスの繰返し周波数の変動 を減らすことができる.レーザパルスの繰返し周波数を下げることの他に、速度電圧のサンプリング 時間を減らせばトリガパルスの繰返し周波数の変動幅を減らすことができ、加工面をより平滑に成 形できると考えている.

4.7 半割円柱の加工方法

図 40(a)に示しているのは、先端が半球で半径 R が 100 µm の基礎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. 先端を半径 Ro が 150 µm の円柱状に予備成形した円柱側面の外周 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. 基礎円柱の加工には 100 倍の対物レンズ比べ焦域が長い 20 倍の対物レンズを 使用した. 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 pm, 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加工を繰返して行った. 加工に要 した時間は約 30 分で、綿棒を使って機上で加工面を擦過してデブリを除去した.

図 40(b)と図 40(c)に示しているのは半径 r が 50 µm の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/(株)牧野フライス製作所,FFCAM)を使って計算した. 図 40(b)の下に示すように X 軸方向の横送り量 Δp を 0.4µm 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、Y 軸方向の Δp を 0.4 µm に設定し、レーザを X 軸方向にも走査させることに



図 40 半径が 50 µm の半割円柱のレーザ加工に使ったレーザの走査軌跡

した. つまり、X軸とY軸方向の走査を交互に繰返して半割円柱を加工した.

本研究で試作した周波数変換器を使うためには、定速部での最高電圧とパルスの繰返し周波数を CPU に入力する必要がある. そこで図 40 に示した r が 50 µm の半割円柱を加工する前に、図 41 に 示した直線と円弧の軌跡に沿って工作機械を速度を 100 mm/min で運動させ、直線部分で速度が 100 に達する直線部の長さ L を求めるための測定を行った. その結果、L を 200 µm 以上にする必要があ ることが明らかになった. 図 42(a)に示しているのは L を 200 µm に設定して工作機械を直線と円弧 の軌跡に沿って 1 往復させた場合に得られた X 方向の出力電圧、図 42(b)に示しているのは Z 方向の 出力電圧である. 図 31 に示した工作機械はスーパーGI と呼ばれている運動速度を一定に保つ先行予 知制御を行っており、制御のアルゴリズムは開示されていないが図 42(a)や図 42(b)に示したように X.Z 軸とも複雑な運動をしている.

図 43(a)に示しているのは、X、Z 軸の合成電圧である. 図 43(a)に示したように直線部では電圧が 一定になっていること、円弧部分では電圧が変動しており工作機械が定速で動いていないこと、なら びに直線と円弧が繋がる円弧の両端部では電圧が減少しており工作機械が加減速していることが確 かめられた. 図 43(b)に示しているのは図 43(a)に示した合成電圧に対して周波数制御を行ったトリガ



図 41 定速部(直線部)でレーザの走査速度が 100 mm/min になる直線部の長さを求めるために行った直線と円弧のレーザの走査軌跡





(b)Z 軸方向の速度電圧

図 42 レーザの走査に使った工作機械を図 41 に示した直線と円弧の軌跡に沿って運動させた場合に 得られた X 軸方向と Z 軸方向の速度電圧



(a)XZ の合成速度電圧

(b)トリガパルス

図43 レーザの走査に使った工作機械を図41に示した直線と円弧の軌跡に沿って運動させた場合に得られた XZ 軸の合成速度電圧(a)と合成速度電圧に対して生成したトリガパルス(b)



図 44 半径が 100 µm の基礎円柱の上半分にレーザ成形した半径が 50 µm の半割円柱 (レーザパルスの 繰返し周波数 f 15kHz, パルスエネルギ 2 µJ, レーザの走査速度 v 100 mm/min, ならびに横送り量 Δp 0.4µm)

パルスである.円弧の両端部ではパルスの密度が粗になっており、トリガパルスの繰返し周波数が 低下したことを表している.

4.8 半割円柱の加工結果

レーザの走査速度を 100 mm/min, 速度一定部での繰返し周波数を 15 kHz, パルスエネルギを 1.5 μ J, ならびにパスの横方向送り量 Δp を 0.4 μ m に設定し、半径 R が 100 μ m の基礎円柱の上面に半径 r が 50 μ m の半割円柱をレーザ加工した. 図 44 に示しているのは周波数制御を行って成形した半割 円柱の SEM 画像である. R は 100 μ m であるが、図 42 に示した L が 200 μ m になるようにレーザの 走査軌跡を作成した. 半割円柱の長手方向についても同様であり、円弧部からのL が 200 μ m になる ようにパスを生成した. 半割円柱の加工に要した時間は 2.7 h である. CAM で計算したレーザの



(a)周波数制御無 図 45 図 42 に示した XZ 平面で Y 方向に観察した半割円柱の SEM 画像.図(a):周波数制御をしない で加工した半割円柱の形状.図(b)周波数制御をして加工した形状

走査距離は16.2mであり、これを従来と同様に5mm/minで走査したとすれば54hになる.

図 45 に示しているのは、図 42 に示した XZ 平面で Y 方向に観察した半割円柱の SEM 画像である. 周波数制御をしないで加工した半割円柱の形状を図 45(a),周波数制御をして加工した形状を図 45(b)に示している. 画像処理ソフトウェア(adobe photoshop)を使って原画像と原画像を左右に反転させた反転画像を重ね合わせた画像であり、Z 軸に対して左右非対称に形状が加工された部分はピントが合っていないように見える. 図 43(a)に示したように円弧部や円弧両端部での電圧の変動は定速部での最大電圧に比べて小さく,周波数制御をしても効果はあまり見られない可能性があると考えていた. 予想に反して XZ 平面で Y 方向に観た半割円柱の形状は,周波数制御を行うと円弧に近づいた印象を持っている. 円弧底部の左側に生じている形状誤差は工作機械の運動誤差が原因であることを突きとめており,2024年の8月までには改善できると考えている.

4.9 研究の成果

フェムト秒やピコ秒といった短パルスレーザを使って高硬度材料に対して高精度な 3 次元微細形 状を短時間で作るためには、レーザの走査方法にかかわらず走査速度が加減速し、レーザスポットの オーバーラップ率が増加するために生じるオーバーカット防止する必要がある.本研究では工作機 械を使ってレーザを走査させた上で、NC 制御装置から出力できる走査速度を反映した電圧に比例し てパルスレーザの繰返し周波数を変えることができる周波数制御器を試作した.また、試作した制御 機の性能を評価するための加工実験を行った.得られた研究の成果は、以下のようにまとめられる.

- (1)レーザの走査速度に比例してパルスの繰返し周波数を制御できる周波数制御器を試作した.周波 数制御器への入力最大電圧は 400 mV,電圧のサンプリング時間は 12.5 μs,制御器からの最大出 力周波数は 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, 電圧の合成基能,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.
- (2)電圧が0から350mVまで大きく変化するポケットを加工して周波数制御の効果を確認した結果. 周波数制御を行わない場合には走査速度が加減速する部分でオーバーカットされていたのに対

し周波数制御を行った場合にはオーバーカットを防止できることが明らかになった.ただし、加 工誤差を完全に防止するための研究は継続して行う必要がある.

(3)半径が100µmの超硬合金製の基礎円柱の上面に半径が50µmの半割円柱を加工した.円弧部や円 弧両端部での電圧の変動は定速部での最大電圧に比べて小さく,周波数制御をしても効果はあま り見られない可能性があると予想していたが,予想に反してXZ平面でY方向に観た半割円柱の 形状は円弧に近づいた印象を持っている.円弧底部の左側に生じている形状誤差は工作機械の運 動誤差が原因であり,研究期間中には修正できると考えている.

5. おわりに

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 に示した 3 つの研究を行っている.本報告書は,2022 年 9 月から 2024 年 3 月までに行った研究の成果をまとめた進捗状況報告書である.

第2章では、「原子配列に擾乱のない加工面を作るため」に行った研究の成果を記述した.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 に設定し無酸素銅に対する平面切削を行った. 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 を越えると格子欠陥や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平面切削を行った.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.その結果,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 以下に減らして成形した加工面 には, 局所的な結晶方位の乱れが生じていないことが明らかになった.
- (3)(2)の結果が得られるまでに2016年9月から2022年8月の7年間を要したが、結晶構造に擾乱が ない加工面を作ることがきた.先に「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)」という課題で行った特別研究(1)完結できたと考えている.

第3章では、「プラスティック製レンズを量産する金型の材料として多用されているクロム合金 ステンレス鋼(Uddeholm, STAVAX)に対して超精密切削加工を行い、表面粗さがpvで50nmRz以 下、算術平均値で3nmRaxの加工面を作ることができる切削工具技術と切削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.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 Co を 5 Vol%程度含む cBN の刃先を鋭利に成形した cBN 製のノーズ R バイトを使用して STAVAX を切削した. その結果, 1150 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, 算術平均値で 3.1 nmRa であり, レンズ金型に要求 される品質をクリアできた.

- (2) hBN を cBN に直接変換した,バインダレス cBN の刃先を鋭利に成形した cBN 製のノーズ R バイトを使用して STAVAX を切削した. その結果,1150 m 切削した後で観察した逃げ面摩耗幅は 4.3 µm,加工面の表面粗さは pv で 18.9 nmRz,算術平均値で 3.1 nmRa であり,レンズ金型に要求 される品質をクリアできた.
- (3) (2) の結果が得られるまでに 2021 年度から 2023 年度の3 年間を要したが、切削工具の素材を超 硬合金から cBN に変えたことと切削液を水溶性切削液からミスト切削油に変えたことにより、 研究目標を達成することができた.

第4章では、「極短パルスレーザに対する繰返し周波数制御システム」を構築するために行った研究の成果を記述した. 高硬度材料に対してレーザ加工を行い3次元微細形状を高速かつ高精度に加工できる加工技術を開発するといった、夢のある研究である.得られた研究の成果は、以下のようにまとめられる.

- (1)レーザの走査速度に比例してパルスの繰返し周波数を制御できる周波数制御器を試作した.周波数制御への入力最大電圧は 400 mV,電圧のサンプリング時間は 12.5 µs,制御器からの最大出力 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,電 圧の合成基能,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.
- (2)電圧が0から350mVまで大きく変化するポケットを加工して周波数制御の効果を確認した結果. 周波数制御を行わない場合には走査速度が加減速する部分でオーバーカットされていたのに対し、周波数制御を行った場合にはオーバーカットを防止できることが明らかになった.ただし、 加工誤差を完全に防止できる研究は継続して行う必要がある.
- (3)半径が100µmの超硬合金製の基礎円柱の上面に半径が50µmの半割円柱を加工した.円弧部や円 弧両端部での電圧の変動は定速部での最大電圧に比べて小さく,周波数制御をしても効果はあま り見られないのではないかと予想していたが,予想に反してXZ平面でY方向に観た半割円柱の 形状は円弧に近づいた印象を持っている.なお,円弧底部の左側に生じている形状誤差は工作機 械の運動誤差が原因であり,研究期間中に修正できると考えている.

謝辞

第4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液に変えたことが研究の 転機につながった.また、第4章で紹介したパルスレーザに対する周波数変換器は、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. ご両氏のお名前を記載し、ご協力に心より感謝申し上げる.

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.1-37.5年間特別研究の成果報告書.
- (2) 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), https://www.mitsuizaidan.or.jp/2018report_no3.pdf, (2021-4), pp.1-34.
- (3) 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.
- (4) 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/transjsme.22-00276.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 藤田雅之,橋田昌樹,フェムト秒レーザ加工, Journal of Plasma Fusion Research, Vol. 81 (2005), pp. 195-201.
- (8) Nolte, S., Momn1a, C., Jacobes, H., Tunnermann, A., Chichikov, B. N., Wellegehausen, B. and Welling, H., Ablation of metals by ultrashort laser pulses, Journal of the Optical Society of America B, Vol. 14, No. 10 (1997), pp. 2716-2722.
- (9) David Gomez, Igor Goenaga, Ion Lizuain and Milagros Ozaita, Femtosecond laser ablation for microfluidics, Optocal Enineering, Vol.44, No5, 501101(2005), pp. 1-8.
- (10) You Zhao, Yu-Long Zhao and Lu-Kang Wang, Application of femtosecond laser micromachining in silicon carbide deep etching for fabricating sensitive diaphragm of high temperature pressure sensor, Sensors and Actuators A: Physical, A 309 (2020)112017.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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(2023/10/25), DOI:10.1299/transjsme.23-00138.
- (14) 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.