

【研究論文】

【平成25～29年度 地域企業競争力強化支援事業】

難加工性材料の精密切削・研削加工技術の開発

渡邊 洋一, 家口 心, 吉川 穰, 久田 哲弥, 和嶋 直*
自動車産業支援部, (* 現 企画・事業推進部)

自動車産業, 航空機産業では, 軽量化, 高強度化などの理由から新素材の導入が求められている。これらの材料は概ね難加工性材料であり, 高精度・高能率加工を実現する機械加工技術の開発が求められている。本研究では, モリブデン合金, 金属基セラミックス, 高純度チタン合金を供試材としてエンドミルによる切削実験を行い, 各供試材に適する切削工具の選定や最適な切削加工条件の導出を行った。

一方, 難加工な新素材の加工技術と共に, 従来の材料であっても更なる高精度化・高能率化を実現する加工技術の開発も求められており, これらを実現する研削加工技術の開発も行った。

本稿において, 切削加工技術や研削加工技術に関する一連の開発内容について紹介する。

キーワード: モリブデン合金, 金属基セラミックス, 高純度チタン合金, 切削加工, 研削加工

1 モリブデン合金の切削加工技術の開発

1.1 緒言

モリブデン合金材は高融点, 低熱膨張, 高熱伝導性を有するため, 半導体製造装置の光源やパワーエレクトロニクス用の半導体基板に使用される材料であるが, 高脆性の難削材である¹⁾。本研究では半導体製造装置の光源用の小型部品を想定し, 微細工具を用いた切削加工技術の開発を行った。実験ではコーティング材の異なる三種類の切削工具を用いて切削加工実験を実施し工具の摩耗状態を評価した。次に最も摩耗量が少ないコーティング材の工具について工具回転数を変化させた場合の工具摩耗量を評価し, 最適加工条件を導出した。また, 半導体製造装置の光源用小型部品を想定し, 試作品を作製した。

1.2 実験方法

本研究では TiAlN, ダイヤモンド, CrTiAlN のコーティング材を使用した三種類の工具を用いて厚さ 0.2mm のモリブデン合金の切削加工実験を行った。工具はいずれも直径 1.0mm のスクエア形状の市販品のエンドミルを使用した。実験は当センター設置の五軸マシニングセンター(アジエ・シャルミー社製 HSM400U-LP)を使用し, 表 1-1 の切削加工条件で実験を行った。

実験後の工具をマイクロSCOPE(キーエンス社製 VHX)にて観察し摩耗状態を比較した後, 最も摩耗量

が少ない工具を選定した。次に選定した工具について, 回転数が低速条件と高速条件の場合で工具摩耗状態を比較した。表 1-2 に切削加工条件を示す。実験後の工具先端部を電子顕微鏡(キーエンス社製 VE-8800)にて観察し, スクイ面部分の摩耗状態を比較した後摩耗量が少ない条件を選定した。

表 1-1 加工条件

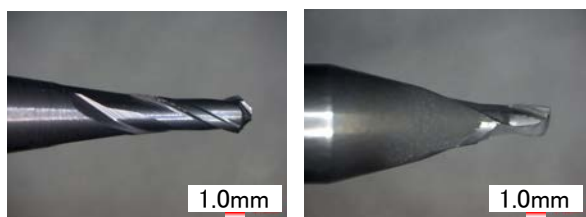
| 項目 | 設定値 |
|--------------------------------|--------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 20000 |
| 軸方向切り込み量[μm] | 5.0 |
| 送り速度[mm/min] | 200 |
| 冷却方法 | オイルミスト |

表 1-2 加工条件

| 項目 | 設定値 |
|--------------------------------|----------------------------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 10000(低速条件) 20000(高速条件) |
| 軸方向切り込み量[μm] | 50.0 |
| 送り速度[mm/min] | 250 |
| 冷却方法 | オイルミスト |
| 切削方法 | 溝加工 |

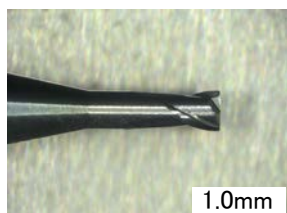
1.3 実験結果

コーティング材の異なる三種類の工具について実験後の工具先端部分を観察した結果を図 1-1 に示す。



a) TiAlN

b) ダイヤモンド



c) CrTiAlN

図 1-1 各コーティング材における工具摩耗状態

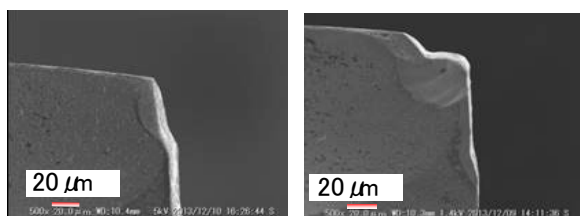
a) 10000min⁻¹b) 20000min⁻¹

図 1-2 各回転数における工具先端摩耗状態

実験の結果、ダイヤモンドコーティング工具は折損、CrTiAlNコーティング工具の摩耗量が最少となり、モリブデン合金の加工に適した工具であることが分かった。

次に選定した CrTiAlN のコーティング工具で低速条件と高速条件で加工した後工具先端のスクイ面を観察した結果を図 1-2 に示す。工具摩耗量に関して、回転数 20000min⁻¹が多く、より低い切削速度となる回転数 10000min⁻¹が少なくなることが分かった。

1.3 まとめ

以上の結果からモリブデン合金の切削では CrTiAlN のコーティング工具を使用し、低い切削速度であれば工具摩耗が抑制されることが判明した。表 1-3 に本実験で得られた結果をもとに直径 1.0mm のエンドミルにてモリブデン合金を切削する際の最適加工条件を示す。

得られた最適加工条件をもとにモリブデン合金の切削加工を実施した。厚さ 0.2mm のモリブデン合金板から直径 5.0mm の円形形状を切り出し、直径 0.2mm の貫通孔を 9 個加工した。

表 1-3 得られた最適加工条件

| 項目 | 設定値 |
|--------------------------------|-------------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 10000(低速条件) |
| 軸方向切り込み量[μm] | 50.0 |
| 送り速度[mm/min] | 250 |
| 冷却方法 | オイルミスト |

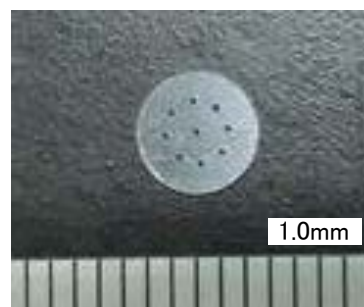


図 1-3 モリブデン合金の切削加工事例

2 金属基セラミックス材の切削加工技術の開発

2.1 緒言

金属基セラミックス材はアルミ合金と炭化ケイ素を混合した複合材であり、アルミ合金と比較して比剛性と熱伝導性が高い、線膨張係数が任意に調整可能などの特長を有する²⁾。これらの特性は炭化ケイ素の体積含有率で変化し、目的に応じて調整する。本研究では車載用電子基板のヒートシンクへの適用を想定し、炭化ケイ素含有率 50%の金属基セラミックス材を使用した。

金属基セラミックス材は金属組織内部に炭化ケイ素などの硬質粒子を含有しているため難加工性を有する³⁾。最適加工条件を導出する事前検討として、硬質材加工に適したダイヤモンドコーティング工具と、さらに硬質な刃先を有する多結晶焼結ダイヤモンド工具を選定し予備実験を実施したところ、ダイヤモンドコーティング工具は工具の摩耗が顕著であり、良好な切削条件が得られなかった。そこで本研究では多結晶焼結ダイヤモンド工具を使用した。実験ははじめに工具切り込み量を変化させた場合の工具摩耗量を評価し、最適な切り込み量を得た後、工具回転数と一刃あたりの送り量と表面粗さの相関を把握し最適加工条件を求めた。

最適加工条件導出後、炭化ケイ素含有率 50%の金属基セラミックス材にヒートシンクモデル形状の試作加工を行った。

2.2 実験方法

本研究では刃先直径 4.0mm の多結晶焼結ダイヤモンド工具を使用し、炭化ケイ素含有率 50%の金属基セラミックス材に対して切削加工実験を実施した。はじめに工具切込み量を表 2-1 の加工条件表に従い変化させた場合の工具摩耗量を評価した。切込み量は工具径方向を ae, 工具軸方向を ap と表記した。摩耗量はマイクロスコープ(キーエンス社製 VHX)にて実験終了後の工具先端のスライ面を観察し摩耗量を比較, 最小となる切込み条件を選定した。

次に工具回転数と一刃あたりの送り量を表 2-2 の加工条件に従い変化させた場合の表面性状の観察と表面粗さを測定することで評価し, 最適な切削条件を選定した。なお, 表面粗さの測定はアメテックテラーホブソン社製フォームタリサーフ PGI1250A を使用した。

得られた最適加工条件から炭化ケイ素含有率 50%の金属基セラミックス材にヒートシンクモデル形状の試作加工を行った。

表 2-1 加工条件

| 項目 | 設定値 |
|----------------------------|-------------------------------------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 10000 |
| 切り込み量 (ap, ae)[mm] | (0.5,1.0) (0.35,1.43), (0.2,2.5) |
| 送り速度[mm/min] | 1000 |
| 冷却方法 | 水溶性切削液 |

表 2-2 加工条件

| 項目 | 設定値 |
|-------------------------------|-------------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 10000~30000 |
| 切り込み量[μm] | (0.2,2.5) |
| 送り量[$\mu\text{m}/\text{刃}$] | 10~100 |
| 冷却方法 | 水溶性切削液 |

2.3 実験結果

切込み量を変化させた場合の工具刃先のスライ面を観察した結果を図 2-1 に示す。軸方向の切込み量(ap)が増加するに従い, 工具側面刃の摩耗は増加するが, 径方向の切込み量(ae)が増加しても底面刃の摩耗量が変化しない結果を得た。このことから ap を少なく, ae は大きな切込み量を設定することで工具摩耗を抑制し高効率で加工可能と思われる。よって本実験では (ap,ae)=(0.2,2.5)を最適切込み量とした。

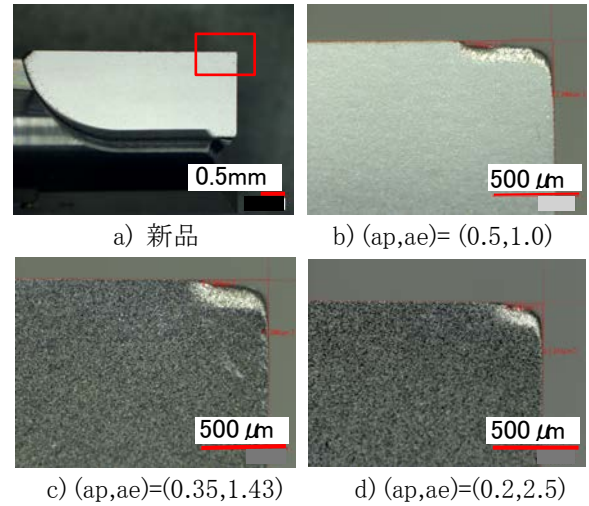


図 2-1 多結晶焼結ダイヤモンド工具の刃先観察結果

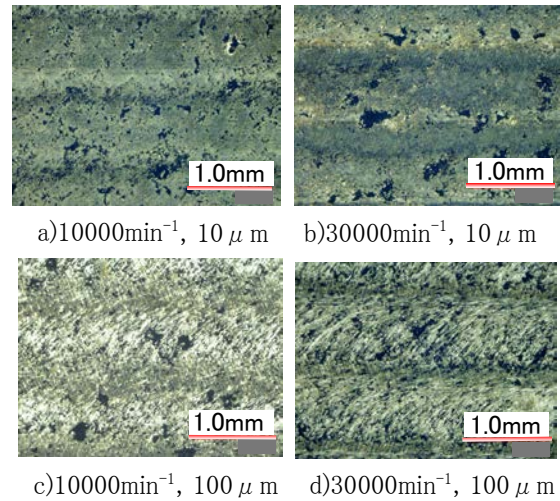


図 2-2 加工表面の観察結果(工具回転数, 送り量)

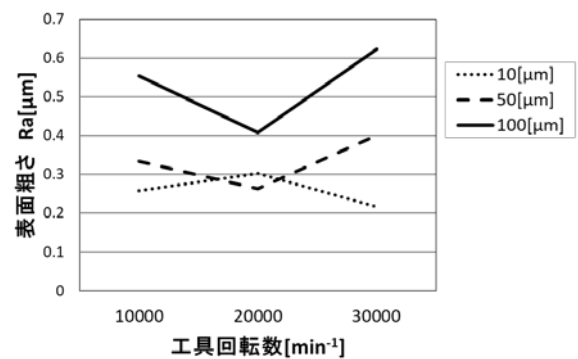


図 2-3 工具回転数と表面粗さの関係

次に, 工具回転数と一刃あたりの送り量を変化させた場合の加工表面の観察結果を図 2-2 に示す。

回転数の変化に対する表面性状の大きな変化は観察されなかった。送り量が小さくなると表面の凹凸が少なくなり, 良好な表面性状が得られた。

次に表面粗さの測定結果を図 2-3 に示す。表面粗さ

Raの値は、一刃あたりの送り量が $100\mu\text{m}$ で大きくなり、送り量が減少すると小さくなる傾向となり、一刃あたりの送り量が $10\mu\text{m}$ 、工具回転数 30000min^{-1} で最小となった。また工具回転数 20000min^{-1} で表面粗さRaの値が小さくなる傾向も得られた。これらの結果から良好な表面粗さが得られる加工条件は、一刃あたりの送り量が $10\mu\text{m}$ 、工具回転数 30000min^{-1} であるが、送り速度が低くなる条件であり効率が悪く、実用的でないため本実験では一刃あたりの送り量 $50\mu\text{m}$ 、回転数 20000min^{-1} を最適加工条件とした。

以上の結果を用いて、直径 3.0mm の多結晶焼結ダイヤモンド工具で炭化ケイ素含有率50%の金属基セラミックス材にヒートシンクモデル形状(直径 2.0mm 高さ 5.0mm の円柱が 3.5mm ピッチで45本加工)の試作加工を行った。図2-4に結果を示す。加工表面を観察したところ、割れや欠けがなく、良好な加工面が得られた。

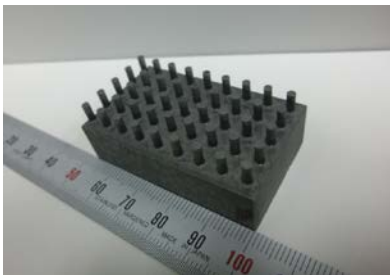


図2-4 金属基セラミックス材の切削加工事例

2.4 まとめ

以上の結果から炭化ケイ素含有率50%の金属基セラミックス材の切削加工においては、硬度の高い多結晶焼結ダイヤモンド工具が適しており、工具の摩耗量はエンドミルの側刃と底刃と比較すると、側刃は切り込み量が大きくなるに従い摩耗量が増加するが、底刃については切り込みによらずほぼ一定になる結果が得られた。また加工表面粗さは工具送り量が増加するに従い大きくなることも明らかになった。

3 高純度チタニウム合金の切削加工技術の開発

3.1 緒言

高強度チタニウム合金(Ti-6Al-4V, 以下Ti合金とする。)は軽量、高強度の性質を持つため航空機の構造部材として使用されている。これらの構造部材は切削加工で加工されているが、Ti合金は熱伝導性が低いため、

加工中の工具刃先温度が上昇し、工具の摩耗を促進させる。そのためTi合金は切削加工において難削性を示す材料特性を有する⁴⁾。本研究ではTi合金材の最適加工条件の導出を目的とし、加工に最適な切削工具をコーティング材の異なる工具の耐摩耗性を比較することで選定した。次に選定した工具を用いて工具回転数を変化させた場合の工具摩耗状態を観察し摩耗量が最小となる工具回転数を選定した。

3.2 実験方法

実験では直径 4.0mm の4枚刃のスクエアエンドミルを4種類使用した。それぞれコーティング材の成分分析を行い、異なるコーティング材の工具について同一の切削加工条件でTi合金を一定体積切削加工した。加工後、工具の先端を観察することで摩耗状態を観察を行い、摩耗量が最小となる工具を選定した。次に、選定した工具について工具回転数を変化させた場合の工具摩耗状態を観察し、摩耗量が最小となる工具回転数を求め、最適加工条件とした。

実験に使用した切削工具の成分は、エネルギー分散型蛍光X線分析装置(エスアイアイ・ナノテクノロジー社製SEA6000VX)を使用し、コーティング膜に含まれる元素を定量した。

表3-1 実験に使用した工具のコーティング膜の成分

| 工具番号 | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|----|-------|-------|-------|-------|
| 含有 元素 (wt%) | Al | 43.27 | 42.11 | 16.15 | 35.03 |
| | Ti | 0.96 | 52.02 | 48.46 | 52.24 |
| | Cr | 55.77 | - | 28.66 | 12.73 |
| | Co | - | 5.87 | - | - |
| | Si | - | - | 6.72 | - |

表3-1に実験に使用した切削工具の成分分析結果を示す。含有元素の定量値は重量パーセントで表示した。なお含有量が微量となる元素は無視した。コーティング材は主に窒化物となっており、番号1の工具はCr-Al系、番号2の工具はTi-Al-Co系、番号3の工具はTi-Cr-Al系、番号4の工具はTi-Al-Cr系のコーティングになっていることが分かった。

成分分析を実施した4種類の工具について、切削加工実験を実施した。実験には当センター設置の五軸マシニングセンターを使用した。Ti合金のブロック材を加工機のバイスに固定し、表3-2の切削加工条件にて一定体積(145.4cm^3)切削した。加工後の工具先端をマイ

クロスコープにて観察を行い、摩耗量が最小となる工具を選定した。また、コーティング膜の摩耗状態を電子顕微鏡で観察し、摩耗の進行状態を観察した。

表3-2 切削加工条件

| 項目 | 設定値 |
|----------------------------|--------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 7000 |
| 軸方向切り込み量[mm] | 2.0 |
| 径方向切り込み量[mm] | 0.25 |
| 送り速度[mm/min] | 500 |
| 冷却方法 | 水溶性冷却水 |
| 切削方向 | ダウンカット |

次に選定された工具を使用し、表3-3の切削加工条件で実験を実施した。異なる工具回転数で一定体積(13.04cm^3)を切削し、加工後の工具先端を電子顕微鏡で観察した。実験後の工具摩耗状態を比較し最適な工具回転数を選定した。

表3-3 切削加工条件

| 項目 | 設定値 |
|----------------------------|-------------|
| 工具回転数[min^{-1}] | 10000~40000 |
| 軸方向切り込み量[mm] | 2.0 |
| 径方向切り込み量[mm] | 0.25 |
| 送り量[mm/刃] | 0.018 |

3.3 実験結果

一定体積加工した後の工具側刃先端のニゲ面を観察した結果を図3-1に示す。その結果、工具番号1のAl-Cr系コーティングの摩耗量が最大となり、工具番号2のTi-Al-Co系工具が最小となった。次に、工具番号1と工具番号2の刃先について電子顕微鏡で500倍に拡大し観察した結果を図3-2に示す。工具番号1のコーティング膜は大きく損傷している様子が観察された。一方工具番号2のコーティング膜は被削材との摩擦により摩耗はしているものの、剥離も少なく損傷も少ない。コーティング膜の違いによる工具の耐摩耗性は大きく変化することが確認できた。またTi合金の加工について、工具コーティングの種類はTi-Al-Co系が良好であることが分かった。この結果から工具番号2の工具を選定した。コーティング膜の耐摩耗性に関しては膜の成分や付着力、表面性状などの要因で変化することが考えられるため、今後さらに検討を進める予定である。

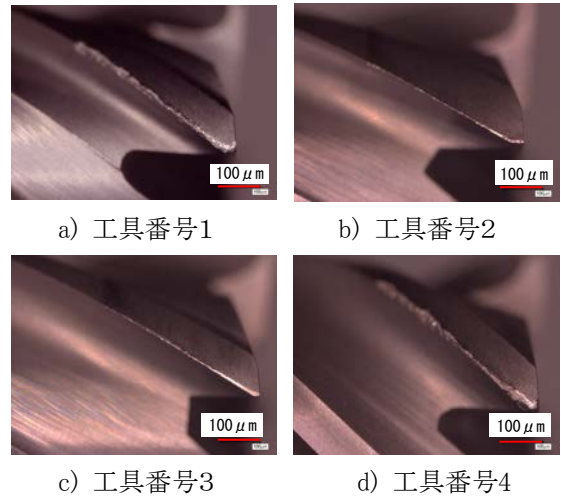


図3-1 工具先端部の観察結果(100倍)

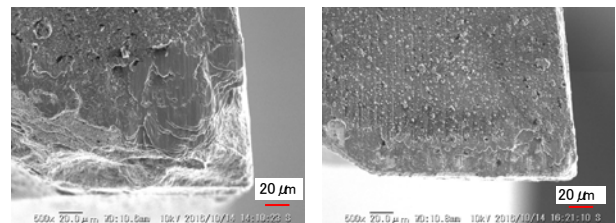


図3-2 工具先端のコーティング損傷状態(500倍)

次に選定した工具番号2を用いて切削加工実験後、工具側刃のニゲ面を電子顕微鏡で観察した結果を図3-3に示す。回転数が上昇するに従い、コーティング膜の損傷も大きくなることが明らかになった。このことから回転数が低い条件での加工条件が最適であることが分かった。

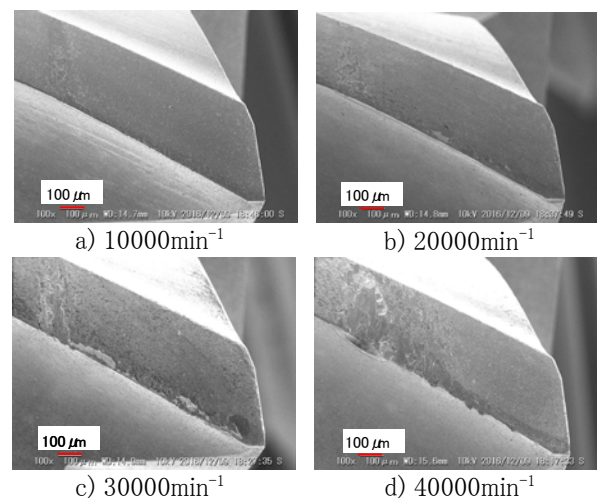


図3-3 工具番号2の先端側刃ニゲ面摩耗(100倍)

本実験から低回転での条件が良好である結果が得られたが、一方で加工能率の低下につながる。そこで高能率な加工を行うには、切込み量を増加させ低速回転で切削する条件が最良の加工条件になるものと考えられる。

3.4 まとめ

以上の結果より、Ti合金材の切削加工においては、Ti-Al-Co系コーティング工具の耐摩耗性が高い。加工条件については、工具回転数が高いと工具の摩耗が促進されるため、低回転数、高切込み量が良好である。

4 高精度・高能率研削加工技術の開発

従来材料ではあるが、加工硬化し易い非磁性ステンレス材料の反り防止薄板研削技術や鉄鋼材料を乾式で高能率に研削する技術を県内企業と共同で開発し、従来以上の高精度化や高能率化を達成した。

5 結言

難加工性材のモリブデン合金、金属基セラミックス、高純度チタン合金について最適切削加工条件の導出を目的とし、工具の選定、切削速度や送り量の最適化、工具摩耗状態の評価を行った結果、以下の知見が得られ、各難加工性材に合わせた最適加工条件を導出した。

また、従来材料であるが、従来以上の高精度化や高能率化を実現する研削加工技術の開発に取り組んだ。

それらの結果、以下の知見が得られた。

(1) モリブデン合金の切削についてはCrTiAlNのコーティング材の工具を使用し、低速回転での加工条件が最適である。

(2) 金属基セラミックス材の切削加工においては、硬度の高い多結晶焼結ダイヤモンド工具が適しており、工具の摩耗量はエンドミルの側刃と底刃で比較すると、側刃は切り込み量が大きくなるに従い摩耗量が増加しているが、底刃については切り込みによらずほぼ一定になる結果が得られた。

(3) Ti合金材の切削加工においてはTi-Al-Co系のコーティング材の工具が適しており、工具回転数が高いと工具の摩耗が促進されるため、切削条件は低回転数、高切込み量が良好である。

(4) 非磁性ステンレス材料の反り防止薄板研削技術と、鉄鋼材料の高能率研削技術を開発した。

謝辞

「4 高精度・高能率研削加工技術の開発」の一部は、公益財団法人JKAの平成28年度機械工業振興補助事業で導入した「精密平面研削盤」を活用し遂行されたものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 狩野勝吉:難削材の加工技術, 工業調査会 P228
- 2) 落合庄治郎ほか:軽金属 Vol.38, No10 685-694 (1988)
- 3) 狩野勝吉:難削材・新素材の切削加工ハンドブック, 工業調査会 p22-32
- 4) 狩野勝吉:難削材・新素材の切削加工ハンドブック, 工業調査会 p287-288