

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04125

研究課題名(和文) 極低温冷却切削における工具及び被削材表面の熱伝達現象の解明と冷却方法の最効率化

研究課題名(英文) Heat transfer characteristics of cutting tool and workpiece surfaces under cryogenic cooling conditions and optimum supply conditions of coolant

研究代表者

佐藤 昌彦 (SATO, Masahiko)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：50244512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液体窒素などの極低温冷媒による冷却環境下における切削加工での被削材表面の熱伝達特性と切削時のすくい面温度について検討した。被削材表面の冷却効果は熱伝導率の小さな材料ほど高い。超硬工具によってチタン合金を切削したところ、切削速度が低く、送りが小さいほどすくい面温度の低下に及ぼす効果が大きい。冷却の効果は送りを小さくするより切削速度を低くするほうが高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機等に使用される耐熱金属は高融点で低熱伝導率のため切削温度が高く工具摩耗が大きい。このためクーラント技術が重要であるが、切削液は環境汚染や作業者の健康被害など悪影響も多い。液体窒素や液化二酸化炭素による極低温切削では、切削液の廃棄がなく、製品の洗浄工程が省略できるなど利点が多い。本研究は、極低温切削における工具および被削材表面での熱伝達状態を明らかにし、環境負荷の小さな機械加工技術の実現を目指す点で社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, the heat transfer characteristics of the surface layer of workpiece material and the rake face temperature during cutting were investigated under a cooling condition using cryogenic coolant of liquefied carbon dioxide and liquid nitrogen. The cooling effect of the surface layer of workpiece material is higher for materials with low thermal conductivity. The rake face temperature of cutting tool in the turning of titanium alloy was measured by tool-workpiece thermocouple circuit. The lower the cutting speed and feed rate, the greater the effect on decreasing the average rake face temperature under coolant conditions. The cooling effect was larger at lower cutting speeds than at lower feed rates.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：切削加工 温度 クーラント 極低温

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

航空機や医療介護機器の製造では、素材強度の向上と同時に耐熱性や軽量性が要求され、チタン合金、ニッケル合金、CFRP等機能性材料の使用が増加している。これらの材料は今後も需要が伸びていくことが予想されるが、チタン合金やニッケル合金などの耐熱材料は融点が高く熱伝導率が低いことから切削温度が高くなりやすく、炭素鋼など一般構造材料と比べると切削時の工具摩耗が著しく大きい。このため、工具摩耗の抑制に対するクーラント技術が重要であるが、クーラントとして切削液を使用する場合、油剤による環境汚染や作業者の健康被害など悪影響も多い。そこで最近、加工時に大量の切削液を使用せず、液体窒素や液化炭酸ガスを切削点に噴射供給して極低温環境を作り出し、切削熱による刃先温度の上昇を防ぐ研究が多く進められている。冷却ガスを用いた極低温切削では、クーラント廃棄の必要がなく、工作物の洗浄工程が省略でき、作業環境もクリーンで、ポンプなど動力源を必要としないなど利点が多い。

工具寿命が延びる理由として、切削温度が低くなることによって工具強度が保たれること、工具と被削材との間の熱化学的な反応が抑制されること、被削材の延性の低下によって切削抵抗が減少することなどが挙げられる。しかしながら、液体窒素のような極低温冷媒の噴射においては、冷媒と被冷却物との温度差によって、液体窒素の液滴が工具や被削材と接触した際に蒸発をし、蒸気層の熱伝達率は極めて悪いことから熱伝達が阻害されて冷却効果を十分発揮できない。冷媒を有効に使うためには冷媒と被冷却物との伝熱特性を理解する必要があるが、加工時の被冷却物表面における熱伝達状態については不明な点が多い。特に切削時には高温となった切りくずがすくい面上を高速で移動するため、加工点への冷媒供給の仕方によっては適切な効果が得られない。そのため、液体窒素を加工点に供給する極低温切削において、工具および被削材表面での熱伝達状態を明らかにし、環境負荷の小さな、極低温冷媒を使用した機械加工技術を実現することが求められる。

2. 研究の目的

本研究は、液体窒素などの極低温冷媒による冷却環境下における切削加工での工具および被削材表面における熱伝達特性を明らかにし、切削液を使用しない新たな機械加工技術の実現を図ることを目的としている。チタン合金等の航空機部材に対する極低温切削加工の実用的な研究は近年盛んに行われ、液体窒素噴射環境における工具摩耗低減の有効性が明らかになってきているが、加工中の工具と被削材表面における伝熱特性については不明な点が多い。本研究では、液体窒素噴射環境下での熱伝達特性を評価することで、極低温冷媒による切削加工技術の実現を目指す。

3. 研究の方法

はじめに、液化二酸化炭素、液体窒素による噴射冷却効果を明らかにするため、被冷却物として被削材であるチタン合金を使用し、被冷却物表面の冷却速度を測定する。測定結果と熱伝導解析の結果とを比較し、液化二酸化炭素と液体窒素の熱伝達率を算出する。特に液体窒素を噴射した際の冷却については、被冷却物表面での液体窒素の液滴の挙動を高速度カメラで観察する。

実際の切削加工時の工具すくい面温度は、アルミナ工具および超硬工具を用いてチタン合金の切削を行い、乾式、液化二酸化炭素、液体窒素による冷却環境下での工具すくい温度をそれぞれ測定する。切削条件として切削速度と送りを変化させる。温度測定は切りくずからの熱放射あるいは工具-被削材間の熱起電力を検出して行う。工具として使用するアルミナ工具は赤外線透過する性質を有していることから、工具裏面から工具表面近傍まであらかじめ小穴をあけておき、その穴に光ファイバを挿入して加工中に工具と切りくずとの接触面から放射される赤外線を受光することにより温度測定を行う。超硬工具の場合はチタン合金との間で生じる熱起電力を検出することで測定する。

測定温度は工具すくい面上の平均的な温度となることから、すくい面上の温度分布については有限要素法による熱伝導解析により明らかにし冷却効果の影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 液化二酸化炭素および液体窒素の供給装置

二酸化炭素の昇華点は大気圧下では -78.5°C であり、室温において液体状態で保管する場合は5.7MPaの高圧下に保つ。三重点は -56.6°C である。液化二酸化炭素をノズルを通して急激に室温、大気圧下に圧力を落とすと断熱膨張により温度が低下して三重点以下になり、40%のドライアイスと60%の気体が生成される。フレキシブルホースに電磁弁を設けて電源のON/OFFにより液化炭酸ガスを供給する。時間当たりの気体の噴射量を測定したところ、本装置のノズルの開度では190 l/minである。

液体窒素は耐圧ポンペに1.5MPaの圧力で充填されており、電磁弁を介して内圧を利用してノズルから噴射される。内径0.4 mmのノズルを8本使用して噴射している。液体窒素は温度が-

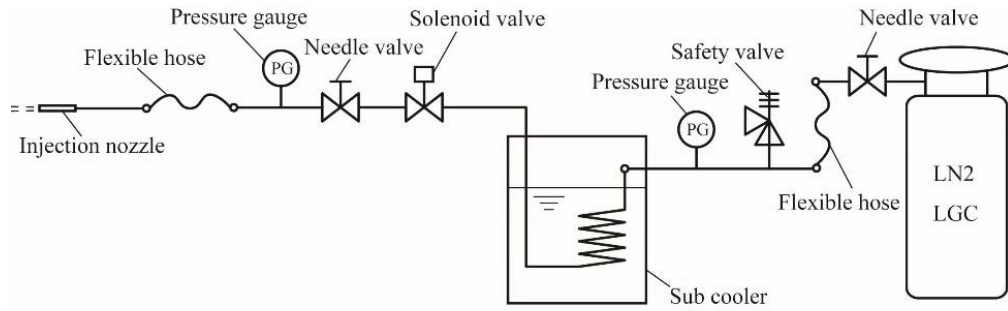


図1 液体窒素供給装置

196℃と低いことから途中の経路で気化して生じる脈動を防ぐため図1に示すようにサブクーラーによって再冷却している。ノズルからの噴射量は600 g/minである。

図2はノズルからの距離と噴射されたガス温度との関係である。温度は直径0.2 mmの熱電対を用いて測定した。図より、液化二酸化炭素の場合はノズル近傍0~20 mmでは-75℃前後の低温環境が得られているが、ノズルからの距離が大きくなるにつれて雰囲気温度は上昇していき、ノズルから100 mm離れると温度は0℃となる。液体窒素を噴射した場合は、ノズルから約180mmまでは約-190℃の低温環境が得られており、180 mmを超えると温度が上昇し、200 mmでは約-100℃となっている。液化二酸化炭素と異なり、液体窒素の場合にはノズルから液体窒素が液滴の状態で噴射されるため、液滴が蒸発せずに届く範囲範囲においては-190℃程度の雰囲気温度が得られると考えられる。

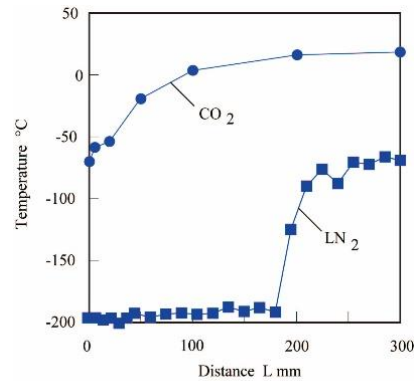


図2 ノズルからの距離と温度の関係

(2) 液化二酸化炭素および液体窒素の熱伝達率

液化二酸化炭素および液体窒素を供給した際の金属表面の熱伝達について、被冷却物を初期温度 T_i の半無限固体と考え、固体表面が時刻 $t=0$ において温度 T_s の外気にさらされたとして冷却時間 t での固体表面から x の位置の温度 T を計算した。

被削材であるチタン合金および比較として銅と炭素鋼に対して、液化二酸化炭素の温度を $T_s = -75^\circ\text{C}$ とし、対流熱伝達率を $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$ としたときの表面から $x = 1\text{ mm}$ の位置における温度変化を計算した結果を図3に示す。チタン合金 > 炭素鋼 > 銅の順に内部の冷却（表層の温度勾配）は大きい。熱伝導率および温度伝導率の値が大きな銅の場合には材料内部からの熱が表層に伝達するため表層の温度変化は小さい。チタン合金の場合には熱伝導率が小さいことから主に表層から熱が奪われることとなり温度低下が大きい。

次に、円柱形状の試験片を用い、端面に液化二酸化炭素および液体窒素を噴射した際の試験片内部の温度を測定した。直径20 mm、長さ200 mmの円柱試験片を作成し、端面から1mm, 5mm, 10mmの位置に円柱外周面から中心に向けて半径方向に直径1 mmの穴をあけて熱電対を挿入し、各深さにおける温度変化を測定した。円柱試験片を1次元と考え、端面を熱伝達率 h で冷却される境界条件で内部温度を計算し、測定結果と比較することで熱伝達率を推定した。液体窒素については気液の状態変化は考えていない試験片には、チタン合金、炭素鋼、銅を使用し被冷却材の熱伝導率の違いを検討した。

図4(a)に液化二酸化炭素の場合の $x=1\text{mm}$ での実験結果を、図4(b)に液体窒素の場合の $x=1\text{mm}$ の実験結果をそれぞれ示す。試験片端面に近いほど冷却は速く、液化二酸化炭素を噴射した場合、

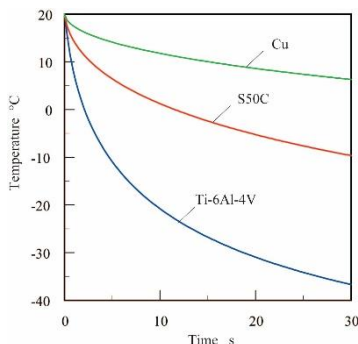


図3 各被削材表層の冷却特性 ($x=1\text{mm}$)

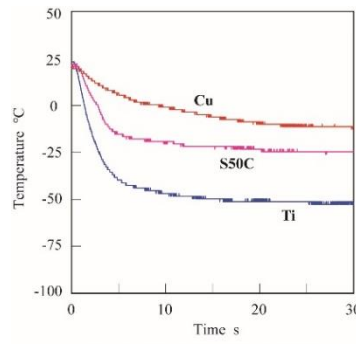


図4(a) 液化二酸化炭素の冷却特性

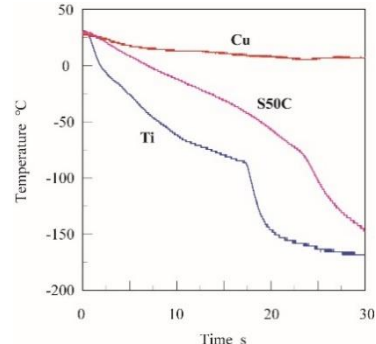


図4(b) 液体窒素の冷却特性

約 10 秒で端面から 1mm の位置が -50°C に達する。内部の冷却は遅いが一般に切削の場合の切り厚さは最大でも 0.5mm 程度であり表層の冷却が重要となる。炭素鋼と銅の場合と比較すると、被冷却物の熱伝導率が大きくなるにつれて試験片表層の温度低下は小さくなる。銅の場合には冷却開始後 10 秒の時点で 0°C と温度低下はチタンの場合と比べて小さい。熱伝導率が大きい場合には冷却時に表層から奪われた熱が試験片の内部から速く表層へ伝導されるためと考えられる。計算結果と比較して熱伝達率を求めると $2500 \text{ W/m}^2\text{K}$ となった。

図 4(b)は液体窒素を試験片に噴射した場合のチタン合金、炭素鋼、銅に対する実験結果である。試験片をチタン合金とした場合には噴射直後からの試験片内部の冷却は液化二酸化炭素の場合よりも遅く、熱伝達率を求めると $1100 \text{ W/m}^2\text{K}$ となる。液体窒素が被冷却物表層で蒸発し気体を介した熱伝達となるためと考えられる。このため液体窒素による冷却の場合には十分な冷却時間を取る必要がある。波形の途中で温度低下が急激に変化している点については不明な点があり、今後の検討を有する。

(3) すくい面温度に及ぼす液化二酸化炭素および液体窒素の影響

本研究では、アルミナ工具と超硬工具を用いてチタン合金の切削を行ったが、本報告では超硬工具を用いた場合について記載する。実験には汎用旋盤を使用し、超硬工具でチタン合金 Ti-6Al-4V 丸棒の外周旋削を行った。切削抵抗は水晶圧電型の動力計を使用して測定し、解析に使用する発熱量を算出した。工具すくい面温度は、工具-被削材間の熱起電力を検出して、温度に換算した。刃先の電気接点が冷却剤で冷やされる影響を防ぐために工具に直径 1 mm、長さ 200mm の超硬細線を取り付けて延長し電気信号を取り出した。被削材にチタン合金細線を取り付け、旋盤主軸内を通し、主軸端に取り付けたロータリーコネクタを介して回転する主軸から電気信号を取り出した。超硬とチタン合金の熱起電力は別途校正を行った。

切削速度とすくい面温度との関係および、送りと切削温度との関係を図 5(a), (b)に示す。切り込みはいずれも 1mm であり、切削速度を変えた場合の送りは 0.075mm 、送りを変えた場合の切削速度は 80m/min である。チタン合金切削時のすくい面温度は切削速度が 120m/min のときや送りが 0.15mm のときで 1000°C 程度に達している。

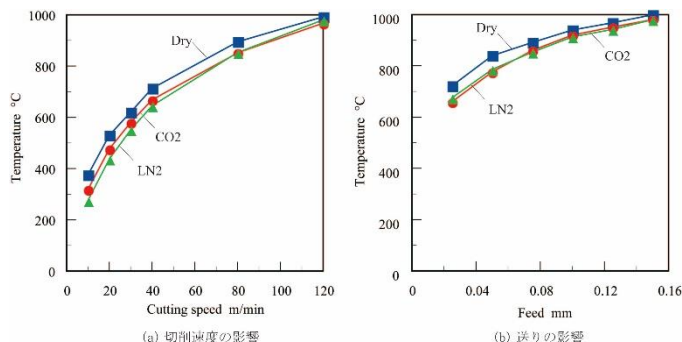


図5 すくい面温度に及ぼす冷却法の影響

図 6(a), (b)は乾式と液化二酸化炭素冷却、乾式と液体窒素冷却のときの温度差をプロットしたものである。低速で小さな送りの切削条件下ほど、液化二酸化炭素や液体窒素の冷却効果が大きい。切削速度 10m/min で液体窒素を使用した場合、約 100°C の冷却効果となる。液化二酸化炭素や液体窒素を切りくず自由面側から噴射していることから、切削速度が高い場合や送りが大きい場合には、切りくずを介してすくい面が冷却されるより早く切りくずが移動するため冷却効果が低いと考えられる。図 7 は切削速度を 10m/min と低速にした場合のすくい面温度に及ぼす送りの影響であり、液体窒素冷却の際の送り 0.025mm のときにはすくい面温度は約 67°C と低い。比率に換算すると、乾式に対して液体窒素冷却の場合は切削速度 10m/min の場合で 27% の温度低下、 120m/min では 1% の温度低下となる。

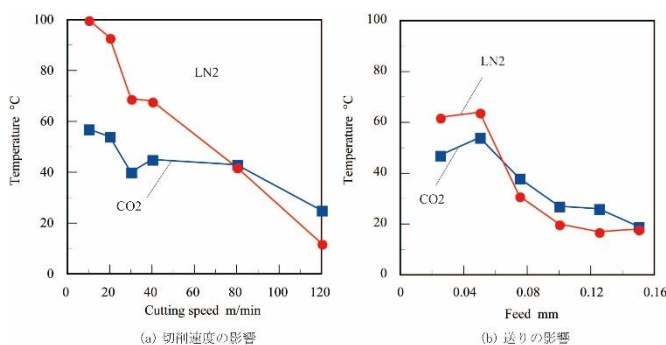


図6 乾式と各冷却方法でのすくい面温度差

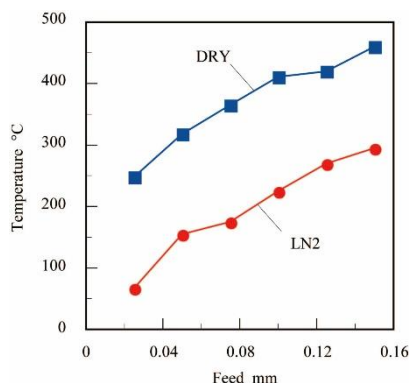


図7 送りとすくい面温度 ($V = 10\text{m/min}$)

(4) 液体窒素の液滴の観察

金属材料表面での液体窒素の液滴の挙動を、高速度カメラで観察をした。図 8 は室温においてチタン合金表面に滴下した水と液体窒素の液滴の観察例である。水の場合は表面に沿って滑らかに広がるが液体窒素の場合は広がるこ

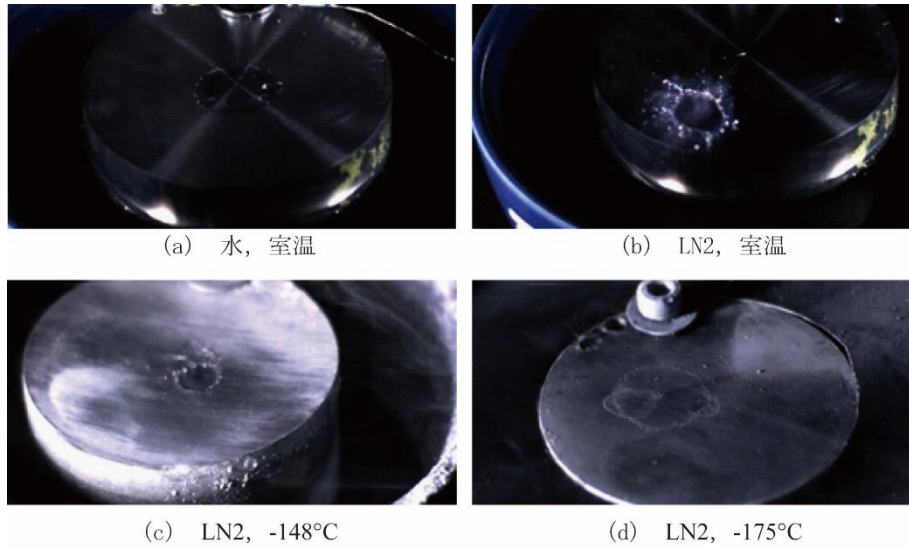


図8 各温度における液滴の様子

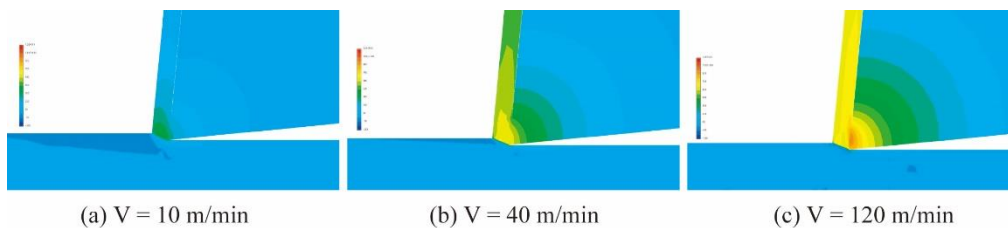


図9 切削速度がすくい面近傍温度分布に及ぼす影響
d = 0.075 mm, LN2 cooling

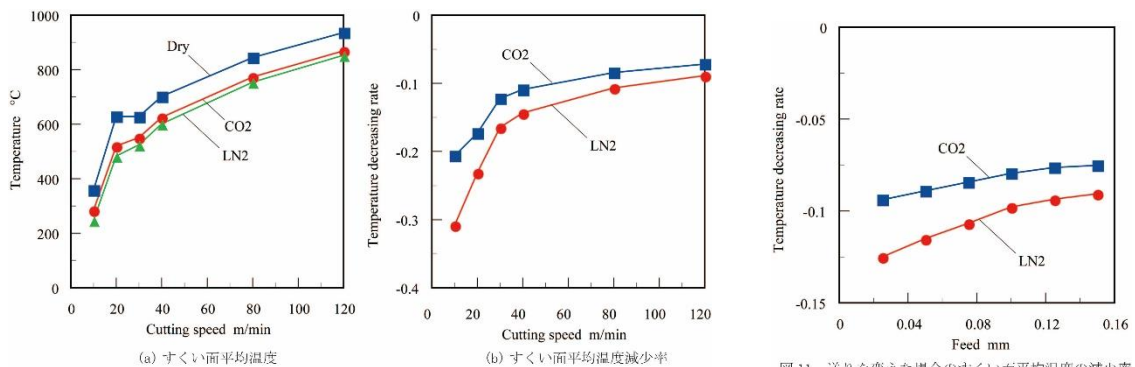


図10 すくい面平均温度に及ぼす冷却方式の影響

図11 送りを変えた場合のすくい面平均温度の減少率

となく弾けている。図(c), (d)はチタン合金を -148°C , -175°C に冷却した場合の表面上の液滴の挙動である。 -148°C の場合でも液滴は表面上で弾け、 -175°C の場合には表面に沿って広がっている。切削時の切りくずは発熱により少なからず温度上昇するため、切りくず表面での冷却は液体窒素の液滴ではなく気体による熱伝達と気化によるものと考えられる。

(5) すくい面近傍の温度分布

切削時の液化二酸化炭素および液体窒素による冷却がすくい面温度に及ぼす影響について、切削点近傍の温度分布を計算した。図9は各切削速度ごとの液体窒素による冷却時の温度分布である。図より高速になるほどすくい面温度は上昇しており、被削材や工具と比べると切りくずの冷却の程度が低く、すくい面温度の低下への効果は小さい。図10は計算したすくい面平均温度と、乾式切削と液化二酸化炭素および液体窒素冷却時の差を比較したもので、測定値と同様、低速時の方が冷却の効果が大きい。送りの影響を図11に示す。送りについては測定値と同様で、送りが小さい方が冷却効果は高いが、切削速度を変えた場合と比べると減少率は小さい。これらのことから、すくい面温度については高速切削や高送りにおいては、切りくずの流出に伴って冷却効果が妨げられ、冷却効果が高めるに、低速で低送りの切削条件が望ましく、特に切削速度の影響は大きいといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ahmed Abdalla, Masahiko Sato
2. 発表標題 Effects of cutting speed and feed rate on rake face temperature in cryogenic machining
3. 学会等名 2021年度精密工学会中国四国支部・九州支部岡山地方講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiko Sato, Masashi Kamoto
2. 発表標題 MEASUREMENT OF RAKE FACE TEMPERATURE IN CRYOGENIC MACHINING OF TITANIUM ALLOY
3. 学会等名 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing, LEMP2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hikaru Bussho and Masahiko Sato
2. 発表標題 Rake face temperature when machining Ti-6Al-4V under cryogenic carbon dioxide cooling
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌彦, 佛生光
2. 発表標題 低温切削における冷却剤の熱伝達特性とすくい面温度
3. 学会等名 2019年度精密工学会中国四国支部・九州支部佐世保地方講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佛生光, 佐藤昌彦
2. 発表標題 低温切削における工具すくい面温度計測と熱伝達特性
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関