

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月30日現在

機関番号：12701
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22360059
 研究課題名（和文）温度／カセンサ群内蔵工具による高速切削のトライボロジー・アフィニティの解明
 研究課題名（英文）Clarification of tribology and affinity in high-speed cutting by use of an intelligent cutting tool with built-in temperature and force sensors
 研究代表者
 篠塚 淳（SHINOZUKA JUN）
 横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：30282841

研究成果の概要（和文）：工具 - 切りくず接触界面のトライボロジー・アフィニティ特性は、温度が強く関係している。そこで、工具すくい面上の工具 - 切りくず接触界面の温度分布を計測できるセンサ内蔵工具を開発した。本センサ内蔵工具は、工具すくい面上の刃先近傍に無電解めっき法と電気めっき法で成膜した7対の銅 - ニッケル微細熱電対群を有する。めっき法で作成した微細熱電対群の温度 - 熱起電力特性は、バルク材のものと同じであり、十分に切削温度を計測できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Both properties of the tribology and affinity of the tool-chip interface are strongly affected by temperature. To clarify these properties, an intelligent cutting tool with seven pairs of built-in micro Cu/Ni thermocouples on the tool face near the cutting edge was developed. These micro thermocouples were fabricated by electroless plating and electroplating. Experimental equipment for calibrating the relation between temperature and electromotive force of the micro thermocouples was also developed. It is confirmed that the intelligent cutting tool developed is capable of measuring the temperatures accurately, because the Seebeck characteristic of the micro thermocouples is the same as that of a thermocouple composed on Cu wire and Ni wire.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削加工，切削温度，トライボロジー，アフィニティ，熱電対，センサ内蔵工具，工具摩耗，溶着物

1. 研究開始当初の背景

高速切削加工の高品位化，高性能化，高能率化を検討する上で主要な評価因子に工具摩耗特性がある。工具刃先の摩耗は加工仕上げ面品位を著しく劣化させるため，工具摩耗

をいかに抑制させるかが，高速切削加工を成功させるためのキーポイントとなる。工具摩耗特性を把握し制御するためには，工具すくい面と切りくずの接触域，あるいは工具逃げ面と仕上げ面の接触域の潤滑・摩擦特性の把

握が極めて重要となる。工具摩耗や工具表面の潤滑・摩擦特性に関する研究は、従来から国内外で多くなされているが、多種多様なコーテッド工具の出現により、従来からの工具一切りくず摩擦や摩耗特性に関する理論を、そのまま適応するのが困難になりつつある。一方で、切りくずが工具表面を擦過する過程で、工具表面に、工具一切りくず接触域の摩擦特性を低減させる潤滑皮膜や工具の拡散摩耗を防止する保護皮膜を形成するような添加物を含有した素材の登場により、特に高速切削では、工具一切りくず接触界面のアフィニティが切削機構に与える影響が大きくなってきている。これら特性の切削条件に対する影響を定性的に調査する研究は多いが、工具一切りくず接触界面の状態を定量的に把握し理論的な検討をする研究例は極めて少ない。そのため、高速切削における工具一切りくず接触界面のトライボロジー・アフィニティには不明な点が非常に多いのが現状である。

例えば、申請者のこれまでの実験では、アルミニウム合金あるいは純鉛の高速切削では、切削速度が 100 m/s を超えると工具一切りくず接触域の摩擦角が急激に変化する現象を捉えている。この現象を明確に説明するためには、工具一切りくず接触域の温度分布の把握が不可欠であると考えている。

切削速度の高速化のほか、工具表面に保護皮膜を形成する等の新しい機能を持った添加物含有素材の開発により、工具一切りくず接触界面の摩擦・潤滑特性や、工具と切りくずの溶着特性が、加工能率や加工精度に大きな影響を与えるようになってきている。しかし、工具一切りくず接触界面の状態は詳細に検討されておらず、これらの特性を明確に説明できる理論モデルは未だ無いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、工具表面に多数の微細な温度と力センサを設置したセンサ内蔵工具を開発し、高速切削過程の工具一切りくず接触界面の温度を直接計測し、これら物理量の分布が工具一切りくず接触界面の潤滑・摩擦・溶着特性に及ぼす影響を体系的に分析検討することを目指す。これより、高速切削のトライボロジー・アフィニティの特性を、温度、応力、時間という基本的な物理量を用いて明確に説明できる理論モデルを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、工具一切りくず接触界面の温度分布を詳細に測定する手法を確立するために、工具すくい面上に、刃先近傍に多数の微細な熱電対群を設置した知的切削工具を開発する。

工具一切りくず接触界面では、高温になる以外に、切りくず擦過により、数百 MPa の高い摩擦応力と、数 GPa の高い垂直応力が負荷するため、非常に過酷な環境になる。これまでフォトリソグラフィ技術を用いて工具すくい面上に微細熱電対を作成していたが、これでは切りくず擦過により直ぐに破壊してしまっていた。そこで、今回は、工具すくい面上に微細熱電対回路形状に則した微細溝を掘り、その溝の中に、無電解めっき法と電気めっき法により熱電対素子を成膜する手法を検討する。微細熱電対は溝の中に創成されるから切りくず擦過の負荷に耐えうるものと考えられる。電気めっき法で創成した膜の結晶構造に依存する電気的特性は、バルク材のものとは異なる可能性がある。そこで微細熱電対の温度-熱起電力特性を詳細に計測できる温度校正装置を開発し、めっき法で作成した微細熱電対の Seebeck 特性を詳細に把握する。

また種々の被削材を用いて切削速度が 100 m/s を超え、200 m/s に至る高速切削試験を別に実施し、工具一切りくず接触界面の状態、特に、摩擦角の変化についての知見を集め、切削温度が摩擦角に対してどのような影響を与えているのかを検討する。

4. 研究成果

(1) 微細熱電対群内蔵型切削工具の開発

本研究で試作する、微細熱電対群内蔵型の切削工具を図 1 に示す。同図に示すように、すくい面上の刃先アール近傍に 7 対の微細熱電対群を創成する。微細熱電対群は、申請者が別に開発したサンドウィッチ工具を用いた超音波微細溝創成法により、回路形状に則した微細溝群を彫り、その中に、無電解めっきと電気めっき法で、熱電対素子となる膜をそれぞれ成膜する。微細熱電対の高温接点は、同図に示すように、微細溝の中ですくい面に対して垂直断面に形成される。よって、測定する温度は、すくい面から溝深さの間の平均値を計測することになる。微細溝を創成する、サンドウィッチ工具を用いた超音波微細溝創成法を図 2 に示す。

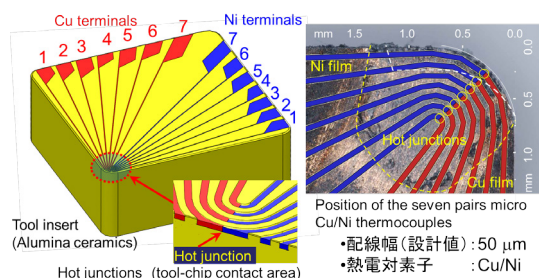


図 1 微細熱電対群内蔵型切削工具

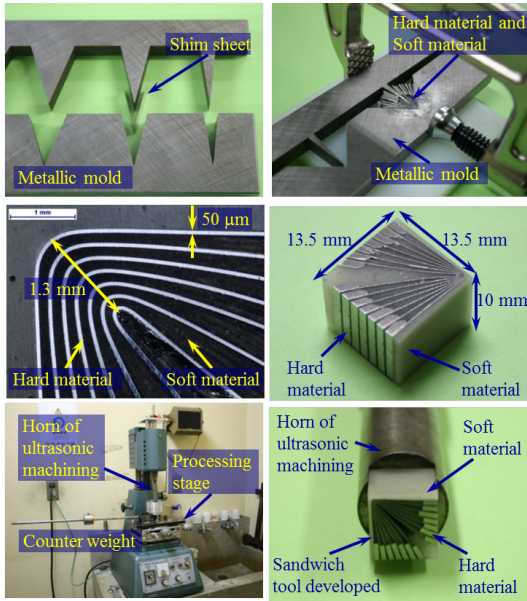


図2 サンドウィッチ工具を用いた超音波微細溝創成法

微細溝は、図2に示すように、厚さ $50\mu\text{m}$ のシムシートを熱電対回路の形状に曲げ、7本を積層し硬質材・軟質材の超音波工具（サンドウィッチ工具）を作成する。この方法により、工具すくい面上に1回の超音波加工で微細熱電対回路の溝を図3のように掘ることができる。図2は、電気絶縁性の高いアルミナセラミックス工具を基板と、 $\#1500$ のSiC砥粒を30wt%用いたスラリーで、 $20\mu\text{m}$ の深さの溝を約15分で創成できた。サンドウィッチ工具を用いた微細溝創成法では超硬合金の工具表面にも図4のように回路形状を創成することができる。超硬合金への溝加工の場合は、 $\#3000$ のSiC砥粒を50wt%にし、 $20\mu\text{m}$ の深さの溝を約10分で加工できた。

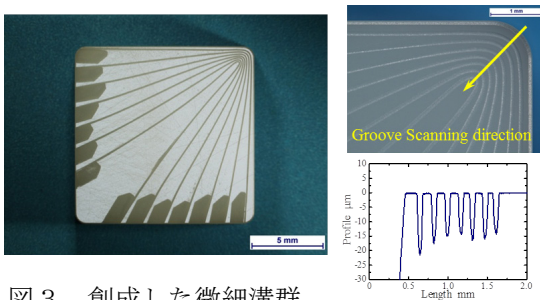


図3 創成した微細溝群

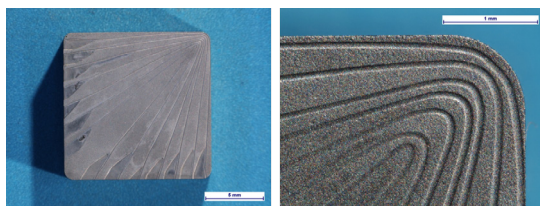


図4 超硬合金 K10 に創成した回路溝

次に、創成した微細溝の中に熱電対素子となる銅とニッケルを無電解めっき法と電気めっき法で創成する。基板となる工具は、電気絶縁性の高いアルミナセラミックス工具とした。アルミナセラミックスへの無電解めっきでは、塩化スズと塩化パラジウムにより触媒を付与するが、そのままの表面では付着力が極めて弱い。そこで、アンカー効果を高めるために 450°C の水酸化ナトリウム液に基板を浸食させ、表面に微細な凹凸を付与させてから、触媒付与を行った。なおPVD法ではなくめっき法を採用するのは、製作コストが安価であり、普及性が高いと判断したためである。そのため今回は、ウエットめっき成膜手法が確立されている銅とニッケルを熱電対素子とした。表1、2、3は、試行錯誤で決定した、無電解めっき、電気めっきによる素子の成膜の、前処理、ニッケルめっき、銅めっきの条件である。

表1 前処理条件

Process	Chemical	Concentration	Temperature	Immersion time
Etching	NaOH	1000 g/L	300 K	10 min
		36 ml/L	723 K	15 min
Neutralizing	HCl	36 ml/L	300 K	15 min
Sensitization	SnCl ₂ HCl	1 g/L 5 ml/L	303 K	60 sec (Ultrasonic vibration)
		0.05 g/L 0.25 ml/L	303 K	60 sec (Ultrasonic vibration)
Activation	PdCl ₂ HCl	0.05 g/L 0.25 ml/L	303 K	60 sec (Ultrasonic vibration)

Sensitization - activation process is repeated 6 times

表2 ニッケルの無電解・電気めっき条件

Parameter	Electroless plating		Electroplating	
	Chemical	Concentration	Chemical	Concentration
Bath constituents	NiSO ₄ ·6H ₂ O	30 g/L	NiSO ₄ ·6H ₂ O	280 g/L
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	10 g/L	NiCl ₂ ·6H ₂ O	45 g/L
	Na ₂ C ₂ O ₄ ·2H ₂ O	10 g/L	H ₃ BO ₃	35 g/L
pH of the bath	4.35~4.50		4.12~4.23	
Bath temperature	354~356 K		300 K	
Plating time	10 min		120 min (i = 0.16 mA / mm ²)	

表3 銅の無電解・電気めっき条件

Parameter	Electroless plating		Electroplating		
	Chemical	Concentration	Chemical	Concentration	
Bath constituents	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	9.7 g/L	CuSO ₄ ·5H ₂ O	300 g/L	
	37% HCHO solution	25 ml/L		H ₂ SO ₄	34 ml/L
	KNaC ₆ H ₅ O ₆ ·4H ₂ O	40 g/L			
	NaOH	5.3 g/L			
pH of the bath	12.38~12.65		0.70~0.78		
Bath temperature	306 K		300 K		
Plating time	20 min		60 min (i = 0.48 mA / mm ²)		

無電解めっきで薄膜を成膜し、その後、電気めっきで厚膜化し、溝の中全体にそれぞれの膜を成膜し、最後に表面の余分な膜をラップ加工することで、図1に示すような溝の中に熱電対素子を埋め込んだセンサを製作した。

図5は、完成した微細溝群内蔵型切削工具である。図6は、市販のシャンクと組み合わせた例であり、高温接点部からの熱起電力は、工具表面に同時に作成した端子と、チップブレイカーピースに内蔵した端子によって外部レコーダーに取り出せる。このように、本工具は、微細溝群内蔵型切削工具と端子内蔵チップブレイカーピースのみで温度を測定でき、工作機械やそのた既存の装置を改造する必要は無い特徴がある。

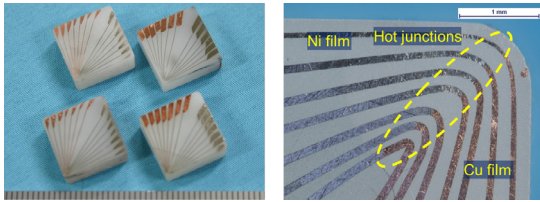


図5 作成した微細溝群内蔵型切削工具

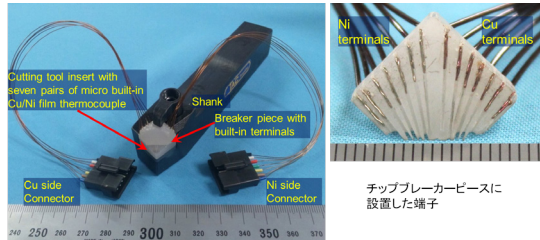


図6 切削温度測定の実例

図5の状態では、銅とニッケルが外界と接触するため、この上に電気絶縁膜を成膜し、再表面には耐摩耗性の高い薄膜を成膜する。この成膜には、EBガンによりイオンプレーティング法を採用した。電気絶縁膜として窒化ケイ素をイオンプレーティングで成膜する手法を検討した。成膜装置を図7に示す。本成膜装置は、1本のEBガンと、1本のPVDカソード、基板加熱装置を有し、基板には任意のバイアス電圧を付与できる。基板ホルダーには4個の基板となる工具を設置できる。

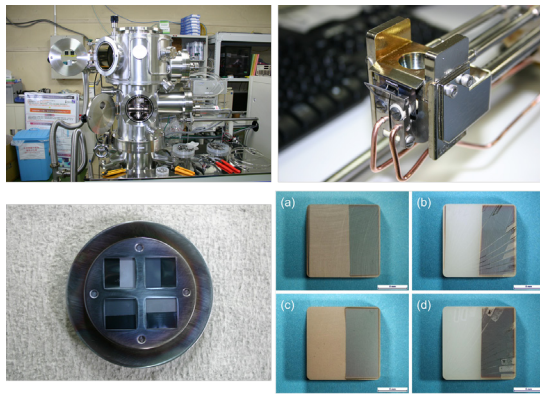


図7 イオンプレーティング装置（上段）と成膜実験の結果の例（下段）

窒化ケイ素被膜は、ケイ素をEBガンで沸点以上に昇温し、アルゴンと窒素プラズマ雰囲気中で基板に堆積させるイオンプレーティング法で成膜することを検討した。電気絶縁性が高い窒化ケイ素被膜の成膜には、ケイ素の蒸発速度、成膜圧力、アルゴンと窒素の分圧、基板バイアス電圧の大きさ、基板加熱温度など様々な条件が影響する。

図8は、各条件を変化させて窒化ケイ素被膜の膜質を検討した結果の例である。

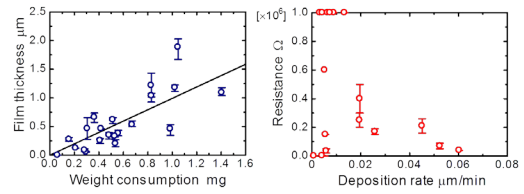


図8 成膜条件が窒化ケイ素被膜の膜質に及ぼす影響

EBガンの出力を上げ、蒸発速度を上げれば膜厚は増加するが、膜中の窒素の配分率が低下するため電気絶縁性が落ちる。一方、100%窒素プラズマ中成膜すれば電気絶縁性が高まるが、成膜レートが落ちる。最適な成膜条件を探索するには時間が必要であるが、現状では表4に示すように、成膜レートを落とし、基板バイアス-100V、基板加熱温度600℃程度で絶縁膜が成膜できることを確認している。成膜能率を向上させるためには、T-S間距離を短くする、高密度なプラズマを生成するためにプラズマ発生用のコイルの直径や巻き数を再設計すること、コイルの周囲に磁場をかけ、成膜圧力が小さくても高密度なプラズマを成膜すること、などを検討中である。

表4 窒化ケイ素被膜の成膜条件

Pretreatment	Ar ion bombardment
Supply N ₂ flow	2 sccm
Supply Ar flow	16 sccm
Total pressure	0.06~0.07 Pa
RF power supply	60 W
Electron beam power	3.8 kV, 140 mA
T-S distance	262.5 mm
Substrate bias voltage	-100 V
Substrate temperature	600 °C
Deposition time	25 min
Film thickness	0.3 μm

(2) 微細熱電対の温度 - 熱起電力特性

本研究では、上記のように無電解めっきと電気めっき法で微細熱電対を作成している。無電解ニッケル被膜中では隣が混入すること、ニッケルも銅も無電解めっき薄膜ではアモルファスになること、電気めっきでは成膜速度により結晶粒径が大きく変化すること、など、無電解・電気めっき被膜の電気的特性は、熔融金属から冷間引き抜き等で製作されるワイヤー材の電気的特性とは異なる可能性がある。そこで、微細熱電対の温度 - 熱起電力特性を詳細に計測する実験装置を開発し、微細熱電対のSeebeck特性を計測した。

図9は、開発した温度 - 熱起電力校正装置である。本装置は、ハロゲンランプをリフレクターにより基板上に集光させ、昇温させる機構である。最高温度は、ステンレス板状で

1370 Kに達する。また酸化を防止するために真空環境下で校正実験できる。7対の微細熱電対群は工具すくい面上の刃先付近のおおよそ直径1mmの領域内にある。7対の微細熱電対の校正を行うためには、この領域を均一な温度にする必要がある。そこで、本装置では、図10に示すように、ステンレス製の加熱板の表面をハロゲンランプでまず加熱させる。加熱板は熱伝導で裏面まで昇温するが、この区間で温度勾配はかなり小さくなる。そこで、加熱板の裏面に微細熱電対群を接触させ、温度勾配を小さくする機構とした。なお、工具を加熱板に接触させることで温度勾配が生じる。微細熱電対群は工具の端にあるため、接触させることで発生する温度勾配はかなり大きくなる。そこで、同一材料の別の工具チップを微細熱電対内蔵工具の周囲に密着させ、この温度勾配を小さくするように工夫した。この機構の最適化には図12に示すように、FE熱伝導解析を利用した。

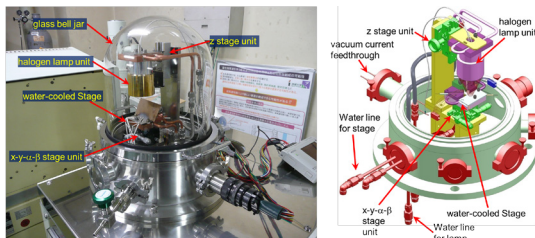


図9 温度 - 熱起電力校正装置

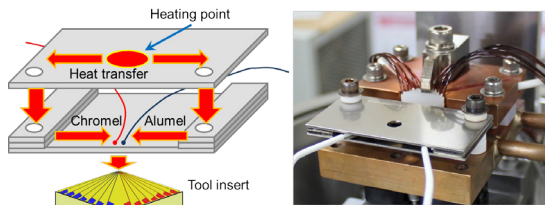


図10 高温接点部の加熱機構

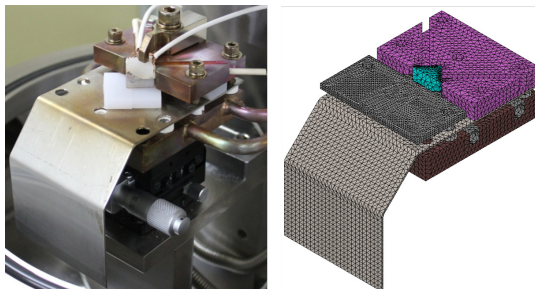


図12 FEAの解析モデル

7対の微細熱電対群が設置してあるすくい面の温度勾配がどの程度にあるのかFEAと実験により確認した。その結果、図13に示すように、微細熱電対内蔵工具の周囲にダミーの工具を設置しない場合は、 $\pm 11.5\text{K}$ であったが、周囲にダミーを設置すると、 $\pm 1.5\text{K}$

にまで小さくすることができた。この傾向はFEAでも同じであった。一方、厚さ方向には、図14に示すように、参照温度を計測する加熱板(厚さ1mm)表面から、微細熱電対の高温接点部の表面までには、10Kの温度差があることが分かった。

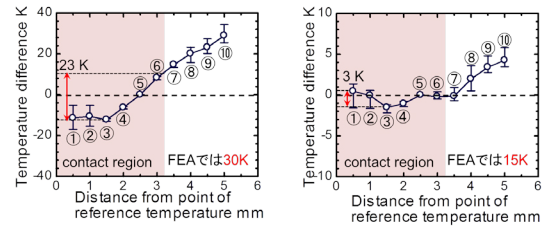


図13 微細熱電対群のすくい面上の水平方向の温度勾配

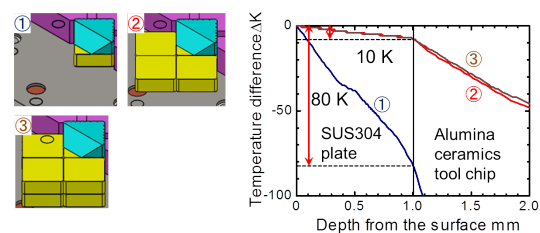


図14 厚さ方向の温度勾配(参照温度計測点から微細熱電対群の高温接点までの温度差)

以上より、本装置により、温度差 $\pm 10\text{K}$ 以内で微細熱電対群の温度 - 熱起電力の計測ができることが分かった。銅とニッケルは遷移元素であるため、温度と熱起電力特性は非線形性を有する。銅とニッケルの直径0.2mmのワイヤー熱電対の熱起電力特性は、温度が600K程度で勾配が変化する。この特性と同じ特性を有するか、確認をした。その結果を図15に示す。同図より、銅 - ニッケル熱電対の熱起電力特性は、バルク材の熱起電力特性と同じであることが分かった。

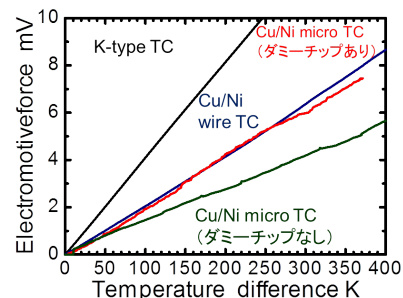


図15 微細熱電対の温度 - 熱起電力特性

ワイヤー材で構成した熱電対では、切削温度を十分に計測できることは、これまでの各種文献で検証されている。今回、無電解めっきと電気めっきで成膜した部再熱電対の温度 - 熱起電力特性は、ワイヤー材で構成した熱電対と同じ熱起電力特性があることが分

かったことより、本微細熱電対内蔵工具は工具 - 切りくず接触界面の温度分布を十分に計測できる能力があることが分かった。

(3) 高速切削領域における工具 - 切りくず接触界面の溶着物と摩擦角の変化について

切削速度が高速化すると、熱軟化により切削力は低下し、同時に、工具 - 切りくず接触界面の摩擦角（平均摩擦係数）は減少する。しかしながら、切削力が最小値を示す切削速度よりも、さらに切削速度を高速化すると、切削力は慣性力に影響により増加し、また、工具 - 切りくず接触界面の摩擦角も増加する。本研究と同時並行で実施した別の高速衝撃切削試験機を用いた高速切削試験の結果によると、アルミニウム合金では、T3材では、切削速度が 80 m/s を超えた付近から摩擦角が増加する。一方焼き鈍した 0 材では、切削速度が 160 m/s に達しても摩擦角は増加しない。T3 材と 0 材では、切りくず生成も異なるが、工具 - 切りくず接触界面に付着する溶着物の様子も異なる。切削実験データを用いて解析した温度によれば、T3 材の方が 0 材よりも工具 - 切りくず接触界面の平均温度は高い。これより工具 - 切りくず接触界面に形成する溶融薄層が、摩擦角の増減に影響をもたらしている可能性がある。一方、快削添加物 MnS を添加した焼結鋼の切削速度 150 m/s 程度の高速切削実験では、工具すくい面上に溶着物が形成し、さらに摩擦角は増加する。溶着物の成分を EPMA で計測したところ、Mn と S が分解した痕跡が認められた。各種被削材の高速切削における工具 - 切りくず接触界面の摩擦角の変化を図 1 6 に示す。

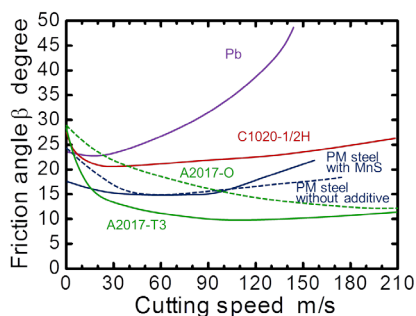


図 1 6 各種被削材の切削速度に対する工具 - 切りくず接触界面の摩擦角の変化

高速切削過程では、工具 - 切りくず接触界面の温度が被削材の融点付近に達する。この時、溶融層の存在や、被削材に含有している添加物の分解等が、切削のトライボロジー特性を複雑化している可能性が極めて高いことが分かった。今後は、開発した微細熱電対群内蔵工具を用いて、工具 - 切りくず接触界面の

温度分布と、形成する溶着物の組成が、切削トライボロジーに及ぼす影響を検討する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Junichi HARASHITA, Yuji TOMODA and Jun SHINOZUKA, Development of a cutting tool with micro built - in thermocouples - Characteristic of the micro Cu/Ni thermocouples fabricated by electroless plating and electroplating -, Key Engineering Materials, Vols. 523-524 (2012) pp 815-820. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.815 (査読有)
- ② 篠塚 淳, 薄硬質材と薄軟質材の積層工具を用いた超音波加工による微細溝群の創成, 砥粒加工学会誌, Vol.54, No.8 (2010) pp. 482-487. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 原下 洵一, 篠塚 淳, 切削工具表面に設置した微細熱電対群の温度 - 熱起電力校正装置の開発, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013 年 3 月 13 日, 東京工業大学
- ② 友田裕士, 原下洵一, 篠塚淳, 刃先に微細熱電対群を内蔵した切削工具の作成に関する研究, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 14 日, 首都大学東京
- ③ Yuji TOMODA, Junichi HARASHITA and Jun SHINOZUKA, Fabrication of a tool insert in which micro thermocouples are embedded for monitoring cutting temperature, 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2011 年 11 月 8 日, 埼玉
- ④ 篠塚淳, 友田裕士, 切削工具の工具 - 切りくず接触域の温度分布測定に関する研究, 2010 年度砥粒加工学会学術講演会, 2010 年 8 月 26 日, 岡山大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.shinozuka.me.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠塚 淳 (SHINOZUKA JUN)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 30282841