

切削環境評価技術とその応用

沖田 淳也*・森口 秀樹・西岡 隆夫
野口 和男・北川 信行

Evaluation Technologies for Machining Environment and Their Applications — by Junya Okida, Hideki Moriguchi, Takao Nishioka, Kazuo Noguchi and Nobuyuki Kitagawa — In recent years, the demand for machining is growing, and cutting tools are used in increasingly severe machining environments. Therefore, evaluating machining environment is important for developing new cutting tools and providing technical support to customers. This paper outlines the following technologies of machining environment evaluation: visualization of chip formation process using a high-speed video camera, measurement of cutting temperature using a high-speed infrared radiation pyrometer, and measurement of oscillation using an acceleration pickup. Finite element analysis of chip formation process is also applied to evaluate stress on cutting tools. In this paper the authors study the application of high-speed video camera visualization of chip formation process to the evaluation of orthogonal cutting of alloy steel and titanium alloy. The formation of build-up edge was observed in the cutting process of alloy steel while the formation of saw-tooth type chips was observed in the cutting process of titanium alloy. Because the cutting process of titanium alloy was greatly affected by cutting temperature, controlling the cutting temperature is effective for improving the machinability of titanium alloy.

1. 緒言

切削加工は工具と被削材の間に相対運動を与えて、不要部分を切りくずとして除去する加工法である。工具と被削材が接触する加工点近傍の狭い領域で多くのエネルギーが消費されるため、その領域での応力やひずみ、温度などは非常に高い値となる（図1）。これらは切りくずや工具にとっての内部もしくは外部環境と言えるが、杉田、上田ら⁽¹⁾はこのような加工点近傍の力学的・熱的環境の特徴として、①大変形、②高ひずみ速度（高速変形）、③高圧、④高温、の4点を挙げている。さらに、切削過程あるいは工作機械が原因となる振動も生じやすく、切削工具は厳しい環境下で使用されていると言える。これに加えて、近年の切削加工では、①加工の高効率化、②被削材の難削化、③環境対応、が進展しており、当然これらは前述の切削環境をより一層過酷なものとしている。

切削加工の評価は従来、実際に加工を行い、加工の結果である工具寿命や加工品位を評価するという形が一般的であった。しかしながら前述のように切削環境が過酷化し、被削材も多様化する中では、従来の単に加工の結果を評価する方法のみでは工具の開発スピードを加速することは困難である。すなわち工具が使用される環境を的確に把握することで、それぞれの加工に適した工具の要件をある程度絞り込むことが求められる。また最近では顧客の側でも加工ニーズの多様化に加え、熟練技術者の減少といった問題も重なり、教育的観点からも工具選択や加工条件決定におい

て理論的アプローチが求められる傾向にある。切削環境の把握はこの点でも重要であり、同観点での工具メーカーに対する技術サポートの要求も増大している。以上のような背景から、当社でも切削性能評価体制の充実に努め、その一環として切削加工環境を把握するための評価技術開発に注力してきた。本報告では、当社の切削環境評価技術を概説するとともに、その応用例について紹介する。

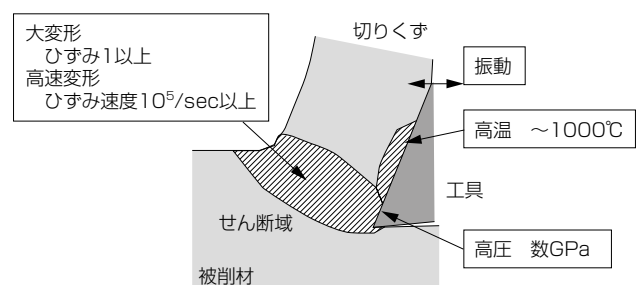


図1 切削環境の特徴

2. 切削環境評価技術の概要

図2に切削環境評価関連技術の概要を示す。対象となる環境指標は、切削温度、圧力（応力）、振動といったもの

であるが、工具にとっては切りくずが最も重要な「環境」であり、切りくず生成過程も評価対象として考える。

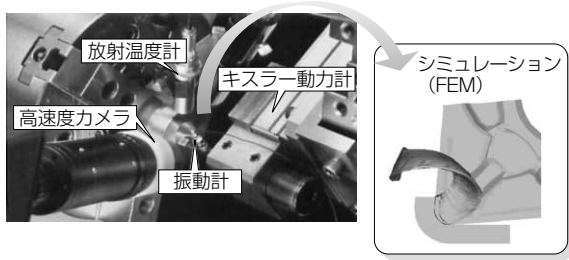


図2 当社の切削環境評価技術

切りくず生成過程に関しては、高速度ビデオカメラによる可視化が重要な評価法となる。切りくず生成は前述のように非常に高速な現象である上に、フライス等の転削加工においては工具自体も高速で運動する。このため切削現象を映像として捕らえることは一般のビデオカメラ（撮影速度 30 フレーム/秒）では困難であり、高速度ビデオカメラが必須である。加工条件や視野の大きさにも依存するが、おおむね 1,000 ~ 10,000 フレーム/秒の撮影速度が必要である。図3はその一例であり、各種の加工法における切りくず生成過程を明瞭に観察することが可能である。また後述のように、近接撮影を行うことで工具刃先近傍の微小な現象まで捉えることが可能となっている。このような観察手法により工具形状や工具表面処理の影響を評価することができ、工具の開発にいまや欠かせないツールとなっている。また顧客でのトラブルへの対応という面でも、当社内で同様の加工を行い高速度ビデオカメラにより観察することで、原因調査を円滑に行うことが可能となっている。

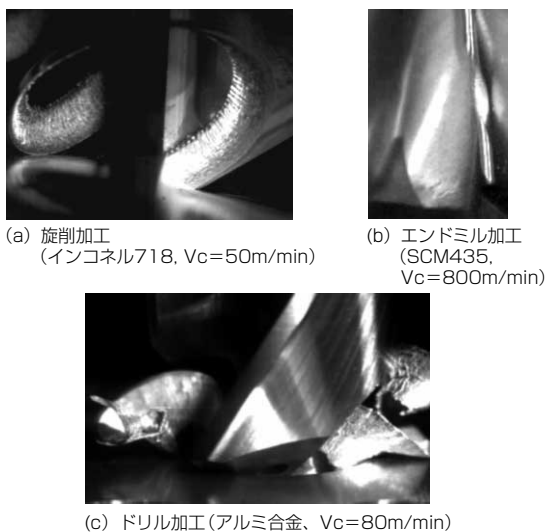


図3 高速度ビデオカメラでの撮影例

切削温度も工具寿命や加工品位に大きな影響を与える重要な因子である。切削加工では、切刃近傍の狭い領域においては 1000℃程度まで温度が上昇することも珍しくない。このため切削温度測定においては、切りくずや工具が高速運動する中で、狭い領域の温度を高温域まで測定することが必要となる。

上記の狙いのもと、当社では高速応答の放射温度計を用いた温度測定法を実用化している。φ0.1mmのスポット径を有するレンズにより刃先近傍から放射された赤外線を捉え、光ファイバーにより本体部に導光して温度へと変換する。約 10μsec の応答速度があるため、切削加工の高速な現象でも測定が可能である。図4にエンドミル加工における測定例を示すが、ここでは工具が被削材端部から抜けた際の工具逃げ面の温度を測定している。本手法は測定温度域や測定対象材質など制約事項も多いが、工具の使用環境を把握することで工具材質選定の判断材料とする、あるいは切削温度を制御対象とした加工条件の最適化を図る、といった活用が可能である。

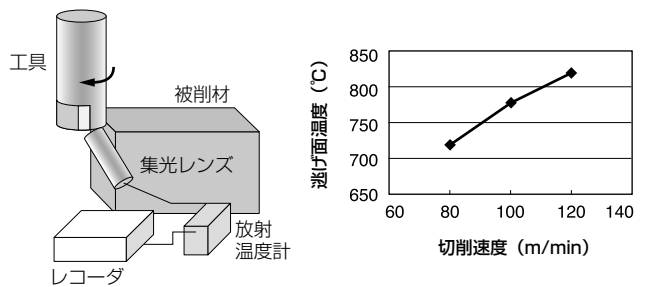


図4 Ti-6Al-4V材加工での温度測定結果
(fz = 0.1mm/t, ae = 20mm, ap = 1mm, Dry)

加工中の振動については加速度ピックアップを用いた測定を多く実施している。切削中の振動は工具、工作機械、被削材が十分な剛性を有し、クランプが十分に行われれば加工への影響はほとんどないものと考えられる。しかし実際には様々な事情により剛性が低下し、振動が発生して工具の異常欠損等の問題を引き起こす。そういう意味では、実験室レベルでの評価よりも、実際の加工現場における評価が求められる項目でもある。図5は実際の加工ラインにて工作機械の振動を測定した結果であり、複数の加工工程のうち、一部で大きな振動が発生していることが確認できる。実際、このように一部の工程のみで問題が生じていることも多く、対象工程を集中的に改善することで大きな効果が期待できる。当社が実施しているライン診断活動にも広く活用している評価手法である。

その他に、従来から行われている切削抵抗測定に関しても、各種の切削動力計を取り揃え、様々な加工形態に対応できる体制を整えている。

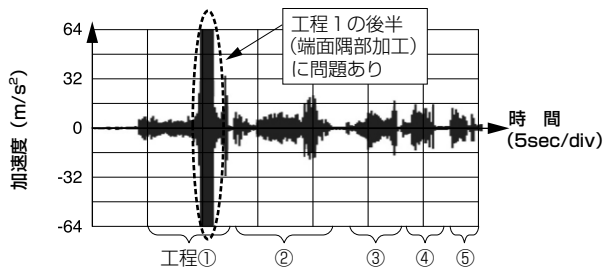


図5 自動車部品加工ラインでの振動測定実例

ここまで述べてきたものは全て実際の加工を行い、その環境を実測するものであったが、一方で計算によるアプローチも必要である。一般にシミュレーションは試作や実際の加工評価の負荷を軽減することを目的としているが、加工環境を把握するという観点でも非常に有効である。例えば重要な環境指標の1つである圧力や応力については、分割工具による実測などが一部試みられているものの、実質的には測定は困難と言わざるを得ない。さらに切りくず生成過程の可視化についても、例えば穴あけのように被削材や工具が視野を遮り観察できないケースもある。これらを計算機上で測定できるという意味で、計算手法も切削環境評価技術の1つと捕らえることができる。

当社ではFEM^{*1}を用いた3次元での切りくず生成シミュレーションをいち早く実現した。⁽²⁾ 図6は旋削加工における計算結果であり、切りくず形状とともに工具すくい面上の応力分布なども評価可能である。すくい面上の詳細な分布情報は、例えばチップブレイカー形状の設計において有用な情報である。このような当社独自の手法に加え、100種類以上の被削材データベースを備えた切削加工専用の商用ソフトウェアであるAdvantEdgeも導入し、工具形状開発のほか、顧客での工具、加工条件選定といった技術サポートにも利用している。

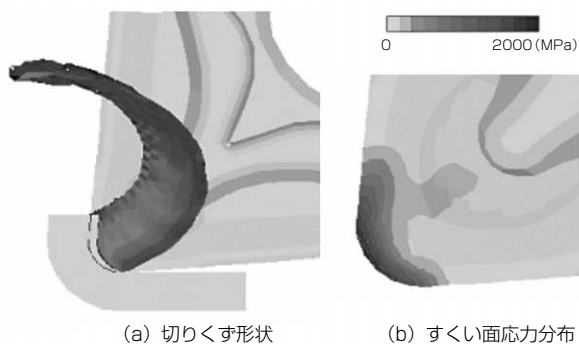


図6 切削シミュレーション例

(Vc = 200m/min, f = 0.2mm/rev, d = 1.5mm, S15C)

3. 高速度ビデオカメラによる切削現象可視化の応用例

3-1 実験方法

ここでは環境評価技術の応用例として、高速ビデオカメラによる二次元切削現象の可視化について示す。二次元切削は工具の直線切刃稜線と切削方向が直交する加工様式であり、最も基本的な加工様式であることから各種の切削現象を理解するのに適している。また被削材種や工具材種の影響など、形状因子を取り除いて評価したい場合にも好適である。

図7に実験装置の概略を示す。マシニングセンター内に直線送り装置を設置し、その上にバイスを取り付け、被削材をクランプする。工具側はチップを先端にクランプしたホルダをマシニングセンターの主軸に取り付け、主軸の回転は固定する。そして前記送り装置で被削材側に直線運動を与えることにより、二次元切削を行う。

表1に加工条件等を示す。装置の制限上、切削速度は80m/minまでとなる。被削材としては合金鋼 (SCM435) およびチタン合金 (Ti-6Al-4V) を、工具材質は超硬合金 K20種を用いた。

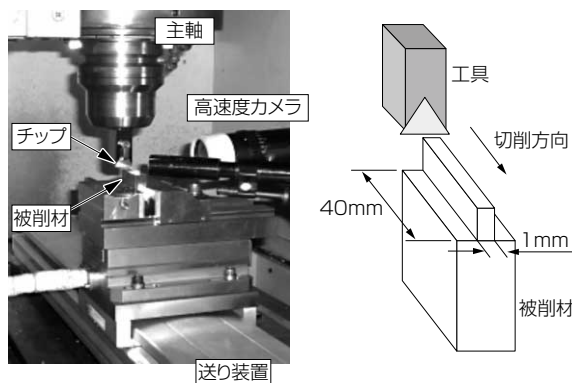


図7 二次元切削実験の方法

表1 二次元切削実験の条件

切削条件： 切削速度：15-80[m/min] 切込み：0.1[mm] 切削幅：1.0[mm] 潤滑条件：Dry	工具： 材質：超硬合金K20種 型番：TPGN220404 すくい角：0[°] 逃げ角：7[°]
被削材： 合金鋼 SCM435 (HB 165) チタン合金 Ti-6Al-4V (HB273)	

3-2 被削材種による切りくず生成の違い

図8に各被削材での、切削速度60m/minにおける切りくず形状を示す。まず合金鋼に関しては、刃先近傍にいわゆる構成刃先^{*2}が生成している。構成刃先は被削材の一部が工具刃先

に付着し、あたかも切刃のように作用する現象であり、鋼材の場合は50m/min前後の切削速度で加工した場合に生じやすい。この構成刃先は加工中常に付着している訳ではなく、生成、成長、脱落のプロセスを繰り返すとされていたが、実際に高速度ビデオカメラにより連続観察することで、一連の過程が確認された(図9)。構成刃先が発生すると実質的なすくい角が増大するため、構成刃先がない場合よりも切りくずの流れがスムーズになり、切りくずが薄くなっていることも本手法により確認できる。

一方、Ti合金においては被削材が工具面に薄く付着するものの、鋼材の場合と違い構成刃先は生成しない。そして図に見られるように、鋸刃型と呼ばれる切りくずが生成している。鋸刃型切りくずが生成する際には切削抵抗も振動するため、工具には疲労的な負荷が加わることとなり、工具寿命の悪化につながる。

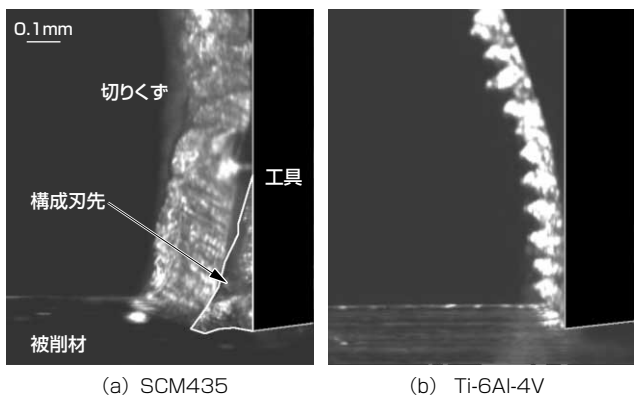


図8 各被削材での切りくず形状 (Vc = 60m/min)

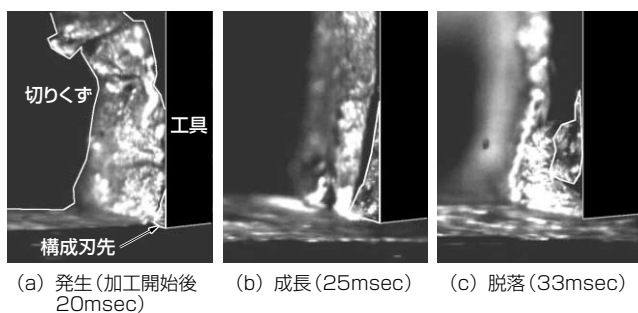


図9 構成刃先の発生、成長、脱落プロセス (SCM435)

3-3 Ti合金加工における切削速度の影響 次にTi合金加工に関して、切削速度が与える影響を調査した結果を示す。Ti合金は一般に難削材に分類され、超硬合金工具を用いる場合はおおむね50m/min程度の切削速度で加工さ

れる。図10に高速度ビデオカメラで撮影した、各切削速度における切りくず形態を示す。切削速度40m/min以上では、前節に示した通り、やはり鋸刃型切りくずを生成している。一方切削速度15m/minにおいては、鋸刃型のような周期的な切りくず形状の変動は顕著でなく、いわゆる流れ型切りくずに近い様相を呈している。

また図11は切削速度80m/minにおける、切削終了後の工具の状態を示しており、工具への切りくず付着が発生している。切削速度が低いとこのような現象は発生しておらず、これよりTi合金加工においては、切削速度が上昇するほど工具への被削材の溶着や切りくず付着が激しくなることが分かる。このような現象は工具のチップングやコーティングの剥離といったトラブルにつながりやすい。

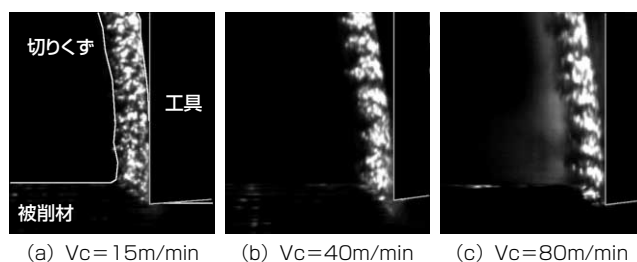


図10 Ti-6Al-4V材加工での切削速度の影響



図11 工具離脱時の切りくず付着 (Vc = 80m/min)

Ti合金加工において鋸刃型の切りくずが生成する原因は、Ti合金の低熱伝導性に伴うせん断域^{*3}での断熱変形によって説明されることが多い。よって切削速度上昇に伴うせん断域での発熱量の増大が、鋸刃型切りくずの生成を助長する方向に作用するものと考えられる。さらに前述の工具への溶着も、切削速度、すなわち切削温度の上昇により悪化する方向となっている。よってTi合金加工においては、切削熱の影響をいかに抑制するかが重要であると言える。

その実例としてPCD^{*4}工具によるTi合金加工について示す。PCD工具は熱伝導率が大きいため、切削温度の低減が可能であると考えられる。図12は前章で示したAdvantEdgeによるシミュレーション結果であり、表2に示す条件にて計算を実施した。PCD工具では超硬合金工具に比べ300℃程度もの切削温度低減効果が得られている。図

13は実際にPCD工具と超硬合金工具で旋削加工での耐摩耗性を比較した結果であり、Ti合金の加工としては比較的高速な条件ながら、PCD工具では長寿命の切削が可能であった。これは加工環境と加工結果がよく対応している実例であり、加工環境を把握、制御することが“上手な”切削加工を行う上で重要であることが理解できる。

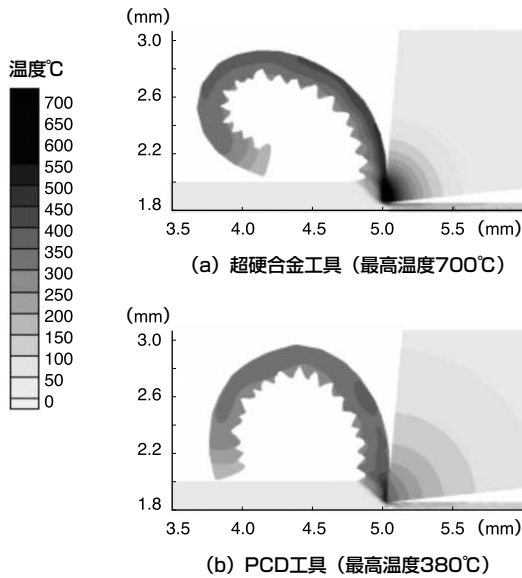


図 12 Ti合金加工のシミュレーション結果

表2 シミュレーション条件

被削材	Ti-6Al-4V
条件	$V_c = 80\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm}$, $d = 1.0\text{mm}$, Wet
工具	(a)超硬合金K種(熱伝導率 90W/mK) (b)PCD(熱伝導率 450W/mK) すくい角 5° 、刃先丸味 $10\mu\text{m}$ 設定

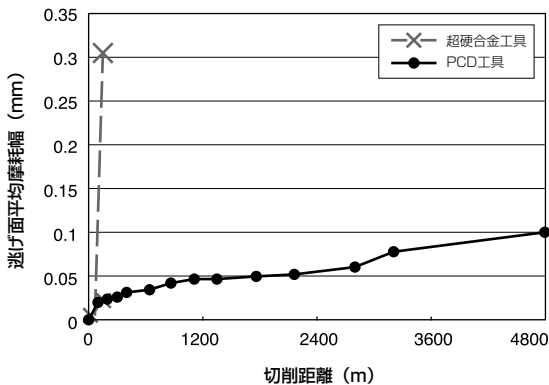


図 13 Ti-6Al-4V材旋削加工での逃げ面摩耗幅の推移 ($V_c = 80\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/rev}$, $d = 1.0\text{mm}$, Wet)

4. 結 言

本報告では、切削環境評価技術の概要について述べ、その応用例として二次元切削評価の事例を紹介した。これらの評価手法は工具開発だけでなく、顧客での切削条件・工具選定やトラブルシューティングのツールとしても効果的であり、当社の切削性能評価・顧客サポートの拠点であるツールエンジニアリングセンターにて、実際にこれら評価ツールを活用し好評を頂いている。今後も切削加工環境はより一層苛酷なものとなることが予想されるが、工具開発の加速、技術サポートの充実のため、各種評価技術の効果的な活用、新規技術の導入を推進していく。

用語集

※1 FEM：Finite Element Method

有限要素法。数値解析手法の1つで、解析対象を微小な要素に分割し、各要素での計算結果を足し合わせることで、全体の挙動の近似解を求める。

※2 構成刃先

アルミニウムあるいは軟鋼などを比較的低速度で切削すると、被削材の一部が刃先に付着し、あたかも新しい刃先が出来たように振る舞う。この付着物を構成刃先と呼ぶ。

※3 せん断域

切削加工時に、工具切刃先端から被削材自由面にかけて生じる塑性変形域であり、本領域でのせん断変形によって切りくずが生成される。

※4 PCD：Poly-crystalline Diamond

多結晶（焼結）ダイヤモンド。

参考文献

- (1) 杉田、上田、稲村、「基礎切削加工学」、共立出版（1984）
- (2) 島田ら、「3次元切削シミュレーション技術の開発」、SEIテクニカルレビュー、160, pp.52-56（2002）

執筆者

沖田 淳也*：エレクトロニクス・材料研究所 アドバンスマテリアル研究部 主査 博士（工学）

森口 秀樹：エレクトロニクス・材料研究所 アドバンスマテリアル研究部 グループ長 工学博士

西岡 隆夫：エレクトロニクス・材料研究所 アドバンスマテリアル研究部 部長 工学博士

野口 和男：住友電工ハードメタル(株) 工具開発部 グループ長

北川 信行：北海道住電精密(株) 社長

*主執筆者