



入門講座

鉄鋼の試験/評価－7

切削特性試験とその評価

Evaluation of Machinability in Cutting Test

松村 隆 東京電機大学 工学部 教授
Takashi Matsumura

1 まえがき

自動車、航空機などの輸送機産業はじめ、多く産業において、切削による部品加工が行われており、切削工程における生産性の向上と、加工コストの削減に対するニーズは高い。一方、材料の研究開発によりその特性が日々改善されており、これに対して工具や切削条件を適切に選定することは、製造業において重要な課題の一つである。切削状態は材料の変形特性とともに切りくずと工具の界面の特性が影響するため、工具と被削材の組合せによって被削性を評価しなければならない。したがって、材料を提供するメーカは、ユーザがどのような環境で材料を切削するかをある程度認識し、切削に対する情報を提供することが、市場競争を勝ち抜くために強く求められている。以上の背景を踏まえ、本稿では切削特性の評価について述べ、次に、具体的な切削試験について述べる。

2 切削現象の考え方

一般的に切削の成否は、加工精度、仕上げ面粗さ、加工変質で評価される。しかし、切削条件や工具の組合せに対して、切削試験によってこれらの特性を収集し、これらのデータベースを構築することは、事例的であり柔軟性がない。すなわち、これらの評価に関連する切削の物理的な因果関係を明確にし、切削条件や工具はそれらの物理的背景のもとで、最適化されなければならない。

Fig.1は加工精度、仕上げ面粗さ、加工変質に対する切削過程の物理的な因果関係を示したものである。切削は切削条件、被削材、工具を指定すると、切削除去体積が与えられ、これに応じて切削力が見積もられる。この切削力は材料が変形して切りくずとなるときのせん断仕事と、切りくずと工具の接触界面における摩擦仕事と関連付けられるが、それぞれの

消費エネルギーに応じて、せん断面と工具と切りくずの接触界面で熱が発生する。これによって工具、被削材、切りくずの温度が上昇し、切削温度分布が得られる。一方、工具摩耗は製品の精度や仕上がりに対して大きく影響するが、摩耗の進行は切りくずと工具、または仕上げ面と工具の接触面内の応力と温度に依存する。すなわち、切削力と切削温度の情報が得られれば、工具摩耗が推定できる。そして、これらの現象によって加工誤差、仕上げ面粗さ、加工変質層が評価できる。このように切削温度と工具摩耗は切削力と関連付けられるため、切削力特性が明らかにし制御することが、切削作業の改善において重要となる。

3 切削機構と切削力特性

Fig.2は基本的な切削機構を示したものである。紙面に垂直な方向に対して切りくずと被削材の変形様式が変わらない場合、材料は平面内で変形するため二次元切削と呼ばれている。このモデルでは、所定の切込み t_1 、切削速度 V 、工具のす

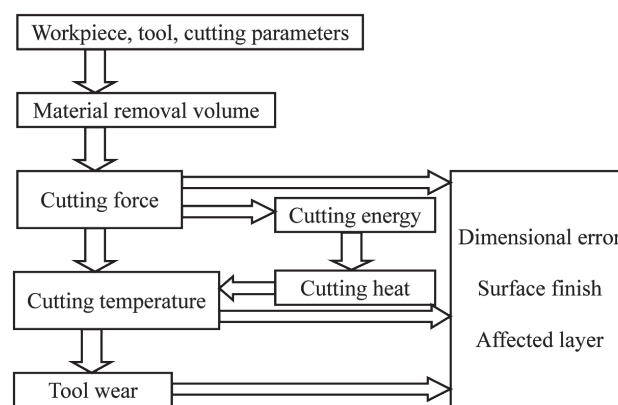


Fig.1 Cutting process

くい角 α に対して、厚さ t_2 の切りくずを生成する。なお、実際の切削では幅 b の材料を削ることになる。ここで、材料は同図の AB でせん断変形して切りくずとなるが、この AB をせん断面と呼ぶ。AB のせん断面と切削方向のなす角度がせん断角 ϕ であり、次式で与えられる。

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2)\cos \alpha}{1 - (t_1/t_2)\sin \alpha} = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (1)$$

ここで r_c は切削比と呼ばれ、次式で定義される。通常の切削では、切りくず厚さ t_2 は切削厚さ t_1 より大きくなるため、切削比は 1 より小さい値をとる

$$r_c = \frac{t_1}{t_2} \quad (2)$$

このようにせん断角が得られれば、次式により切りくず速度 V_c とせん断速度 V_s が与えられる。

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V = r_c V \quad (3)$$

$$V_s = V_c \sin(\phi - \alpha) + V \cos \phi = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} V \quad (4)$$

Fig.2 のモデルにおいて、切削方向の主分力 F_H とこれに垂直方向の背分力 F_T が与えられると、さらにせん断面せん断応力 τ_s と摩擦係数 μ または摩擦角 β が次式で見積もれる。

$$\tau_s = \frac{(F_H \cos \phi - F_T \sin \phi) \sin \phi}{bt_1} \quad (5)$$

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_T + F_H \tan \alpha}{F_H - F_T \tan \alpha} \quad (6)$$

式 (1)、(5)、(6) が二次元切削の基本的な物理量であり、これから次式で切削力の推定が可能となる。

$$R = \frac{\tau_s bt_1}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (7)$$

そして、主分力 F_H および背分力 F_T は次式で与えられる。

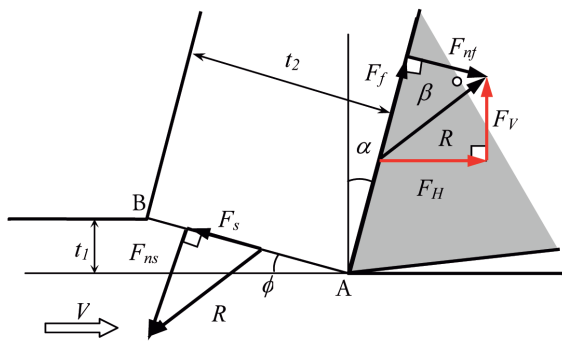


Fig.2 Orthogonal cutting model

$$\left. \begin{aligned} F_H &= \frac{\tau_s bt_1 \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ F_T &= \frac{\tau_s bt_1 \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

上述の切削力特性は、Fig.3 のようにして測定できる。同図は、旋盤における二次元切削試験の様子を示した例であり、円盤状の被削材に対して平行な切れ刃を有する工具を半径方向に送ることで二次元切削ができる。このときに生成した切りくずの厚み t_2 をマイクロメータ等で測定し、被削材回転方向に負荷する主分力 F_H 、半径方向の成分 F_T を圧電型切削動力計によって測定する。圧電型切削動力計は圧電効果のある水晶を内蔵した動力計であり、電荷を電圧に変換するチャージアンプを介して、オシロスコープに電圧の変化を記録することで、切削力を測定できる。

まず、測定した切りくず厚さから式 (1) を用いてせん断角を得る。次に、測定した主分力と背分力を用いて、式 (5)、(6) からせん断面せん断応力と摩擦角を得る。一般に、せん断面せん断応力は材料の変形抵抗と関連があり、切りくず生成に要する力として材料の難削性を評価できる。摩擦角は、材料と切りくずの界面に対する物理量であり、高温高压下の工具と材料の親和性を評価できる。すなわち、加工しようとする被削材に対して、工具や工具表面のコーティングに関する特性を評価できる。このように、単純な二次元切削試験で切りくず厚さと切削力を測定することで、被削材の特性および被削材に対する工具材質の適性を評価できる。

4 切削温度

前節で述べた切削モデルにおける単位時間あたりの切削エネルギー U は次式で与えられる。

$$U = F_H V \quad (9)$$

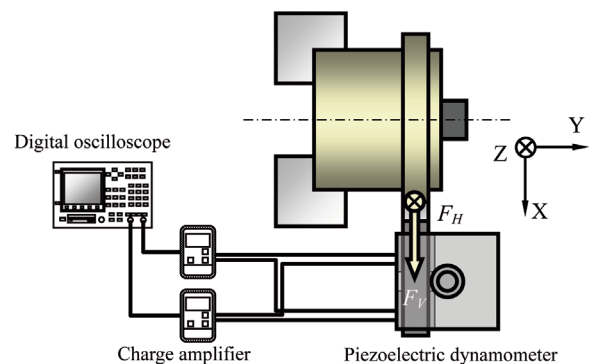


Fig.3 Orthogonal cutting test

この切削エネルギーは、せん断面におけるせん断仕事 U_s と、すくい面における摩擦仕事 U_f に消費され、それぞれのエネルギーは次式となる。

$$U_s = F_s V_s = F_s \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} V \quad (10)$$

$$U_f = F_f V_c = F_t \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V \quad (11)$$

ただし、 F_s と F_t はせん断面のせん断力とすくい面の摩擦力であり、前項の切削力とせん断角から次式で与えられる。

$$F_s = F_H \cos \phi - F_V \sin \phi \quad (12)$$

$$F_t = F_H \sin \alpha + F_V \cos \alpha \quad (13)$$

切削における発熱のほとんどは、せん断面におけるせん断仕事とすくい面における摩擦仕事に起因するものであり、式 (10)、(11) の力学的エネルギーがそれぞれの発熱源における発熱量と関係づけられる。また、逃げ面摩耗を伴う場合は、逃げ面と仕上げ面の接触部における摩擦仕事が逃げ面側の発熱強さとして与えられる。温度 θ の時間的な変化 $\partial \theta / \partial t$ は、熱拡散、熱移流、発熱により次式の微分方程式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad} \theta) - \text{div}(\rho c \mathbf{v} \theta) + q \quad (14)$$

k 、 ρ 、 c は材料の熱伝導率、密度、比熱であり、 $\mathbf{v}$ は材料移動における速度ベクトルである。 q は発熱量であり、式 (10)

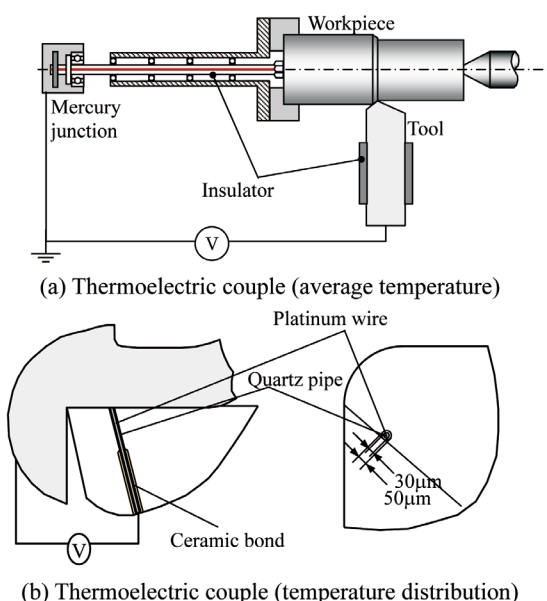


Fig.4 Cutting temperature measurement

と (11) に対して与えられる。切削温度の解析では、伝熱の理論式に基づく Lowen-Shaw¹⁾ や Trigger-Chao らの理論もあるが、最近の計算機技術の発達とともに、有限体積法²⁾ による数値解析も可能となっている。

Fig.4は、一般的な切削温度の測定方法である。同図 (a) は被削材と工具の接触部を熱電対とし、切削領域の温度を計測するものであり、同図 (b) は工具すくい面上の微小領域の温度を計測するものである。前者は切削領域の平均的な温度を測定するが、後者は切削領域内で熱電対の位置を変えることにより、工具面上の温度分布を測定できる。また、別の方法として放射温度計を用いた温度測定がある。最近では、放射温度計の性能が上がり、切削領域近傍の温度、あるいは、分解能は低い温度分布を容易に測定できるようになっている。しかし、この方法では工具と切りくずの接触界面における温度を直接計測できないため、実際の界面における温度との差を考慮すべきである。

5 工具摩耗

接触する界面が相対的に運動することで、界面の材料が変形し脱落するため、切削工具の摩耗は不可避免的である。Fig.5は切削工具の摩耗形態を示したものであるが、工具のすくい面側は切りくずの擦過によってくぼんだ形状となり、これをすくい面摩耗、または、クレータ摩耗 (Crater wear) と呼んでいる。一方、工具の逃げ面は、仕上げ面との接触により同図のように一様な幅の摩耗が生じ、これを逃げ面摩耗 (Flank wear) と呼んでいる。なお、難削材の切削においては、刃先の近傍の力学的および熱的な負荷が大きくなり、切れ刃先端の摩耗が著しくなる場合がある。また、切削領域と非切削領域の境界部に進行が著しい摩耗が生じるが、これを境界摩耗 (Notch wear または Grooving wear) と呼んでいる。この境

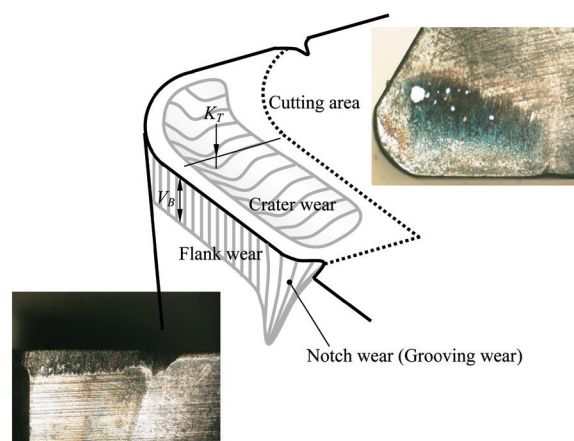


Fig.5 Tool wears

界摩耗は、加工雰囲気や材料の加工硬化等に依存して大きくなる。工具寿命はすくい面摩耗深さ (K_T)、または、逃げ面摩耗幅 V_B で判定されるが、加工誤差、仕上げ面の劣化、加工変質層の観点から逃げ面摩耗を寿命の基準にする場合が多い。

切削時間に対するすくい面摩耗深さと逃げ面摩耗幅の変化は、一般的に Fig.6 のようになる。すくい面摩耗は切削時間とともにほぼ線形的に増加し、逃げ面摩耗は、初期摩耗、定常摩耗、終期摩耗の3つの過程で進行する。逃げ面の初期摩耗では、切削初期において切れ刃先端部が鋭利で、その接触状態が不安定であるため摩耗速度が速い。この摩耗過程は、工作機械、工具、工作物の動的な挙動に依存するところが大きい。ため、たとえ工具や被削材の材料が同じであっても、摩耗の進行は切削作業の状態によって変わる。そのため、この進行の状態を観測すると、工作機械の性能、工具や被削材の取り付けの状態を評価できる。定常摩耗では、逃げ面と仕上げ面の接触状態が安定し、摩耗の進行は工具と被削材の界面の物性に依るため、被削材に対する工具の適性を評価できる。終期摩耗は逃げ面摩耗幅が過大となって摩耗面における摩擦仕事による発熱が大きくなり、摩耗の進行が早くなる。

工具摩耗の進行は切削速度の増加とともに早くなることから、工具寿命 T と切削速度 V は次式で関係づけられている。

$$VT^n = C \quad (15)$$

n と C は工具と被削材の組合せによって与えられるパラメータである。 n は工具の切削速度依存性を示すパラメータであり、 n が0に近いほど工具寿命に対する切削速度の影響が大きくなり、1に近いほど切削速度、すなわち切削温度の影響が小さい。これは Taylor の工具寿命方程式と呼ばれているが、さらに、一般の旋削の場合における送り f や切込み d を考慮し、次式のように拡張されている。

$$V^{\xi_v} f^{\xi_f} d^{\xi_d} T^n = C \quad (16)$$

ただし、 ξ_v 、 ξ_f 、 ξ_d はパラメータであり、各切削パラメータが工具摩耗に及ぼす影響を特性化している。式 (15) や (16) に

おけるパラメータをデータベースとして蓄積すれば、工具寿命を定量的に扱って切削条件の最適化が可能となる。しかし、このように拡張された式であっても、工具の形状の違いを寿命の特性式に組込むことは困難であるため、汎用性が低い。

工具摩耗は工具と材料の界面で生じる現象であり、本来、摩耗は界面における応力と温度に依存することから、次式の摩耗特性式が提案されている³⁾。

$$\frac{dW}{dL} = C\sigma \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta}\right) \quad (17)$$

ただし、 dW/dL は単位面積単位擦過距離あたりの摩耗体積である。 C と λ は、工具と被削材の組合せによって与えられる摩耗特性定数であり、 C は摩耗に対する応力依存度であり、 λ は温度依存度を示す。通常の鋼の切削における工具摩耗は、すくい面上の高温域では凝着拡散摩耗が支配的であるため λ が大きい。一方、逃げ面摩耗は引っ掻きによる機械的摩耗が支配的であるため λ が小さくなる。すなわち、 λ の大きさによって切削温度が工具摩耗に及ぼす影響を定量的に評価できる。式 (17) は、切削における操作変数を含まない特性式であるため、切削条件や工具形状に対して工具面の応力と温度分布が与えられれば、摩耗の進行を予測できる。

6 切削シミュレーションへの発展

前節で述べた切削過程の流れに基づいて切削特性を評価できるが、生産現場で行われている切削作業は二次元切削ではなく、旋削、エンドミル切削、ドリル切削などのように三次元的な切削様式となる。このような切削作業における三次元的に切りくず生成過程を、切削方向と切りくず流出方向を含む二次元切削の重ね合わせとして考えれば、二次元切削の基礎データに基づいて切削力、切削温度、工具摩耗の解析や予測が可能となる。

Fig.7 は旋削における切りくず生成モデルを示したものであり、同図のように、傾斜した切れ刃によって切削領域とこ

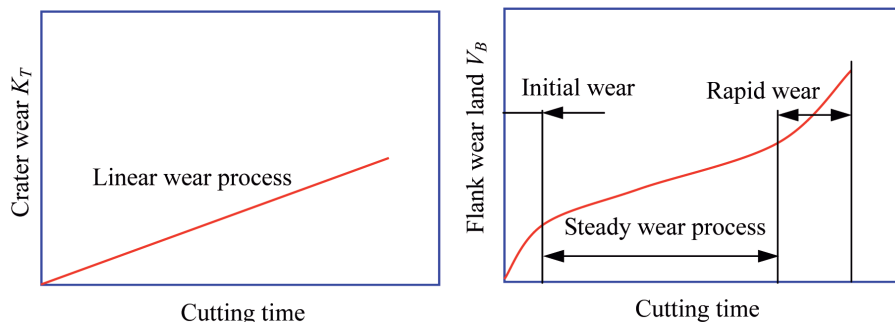


Fig.6 Tool wear progresses

れに応じたせん断面の形状によって三次元形状の切りくずが生成され、ある角度を持って流出する。このような切りくず生成を、切削速度と切りくず流出方向を含む面内の二次元切削の重ね合わせとして考え、切りくずは切削エネルギーが最小となる方向に流出するものとしてモデル化する⁴⁾。この解析では、二次元切削における切削速度、切削厚さ、すくい角に対する式 (1)、(5)、(6) をデータベースとして用意すれば、任意の切削条件と切れ刃形状に対して切削力が予測できる。

Fig.8はインコネルX750の切削力について、測定値とシミュレーションの値を比較したものである⁵⁾ (図中K10はISO規格による工具材質のグレード、(-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8) は切れ刃基準による工具形状を示す)。この切削力に基づいて、すくい面上の垂直応力と摩擦応力の分布を設定する。一般に、垂直応力は指数分布で与えられる。また、摩擦応力は切れ刃先端部のそれをせん断面せん断応力とする台形分布、または、三角形分布であることが知られており、これに基づいて応力分布を与える。この応力分布に応じて、力学的エネルギーと発熱量とを関係づけて、切削温度の数値解析ができる。Fig.9は式 (14) に基づいた有限体積法による切削温

度分布の解析例である。同図のように、工具の形状や材質によって切削温度分布の違いを解析できる。

そして、工具面の応力および温度分布が得られれば、式 (17) によって摩耗の進行を予測できる。Fig.10は逃げ面摩耗の予測と実測とを比較したものである。なお、逃げ面摩耗痕上の応力分布は、摩耗面が仕上げ面に対して平行に進行するものとし、摩耗面の摩耗速度が一樣となるように決定する。

Fig.8, Fig.10からもわかるように、切削力や工具摩耗経過のシミュレーションは、実測のそれらとよく一致しており、解析の基礎データである二次元切削特性と工具摩耗特性の妥当性を確認できる。なお、材料や工具の条件は異なるが、切削温度に関してここで示したモデルの妥当性は、Fig.4 (b) の測定によって確認されている。

7 おわりに

生産現場、または生産技術においては、それぞれの目的に応じて特性データ収集を収集しているが、新たに開発された被削材や工具に対して、逐次、データベースを更新すること

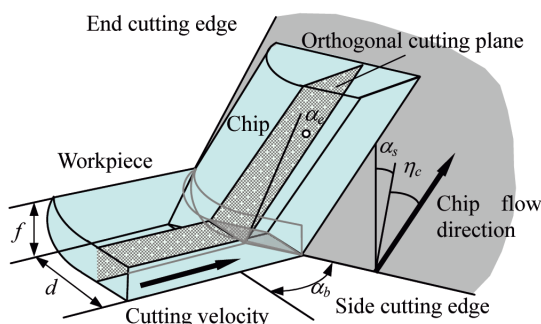


Fig.7 Three-dimensional cutting model in turning
 α_b , α_s , and η_c are back rake angle, side rake angle, and chip flow angle. f and d are feed rate and depth of cut, respectively.

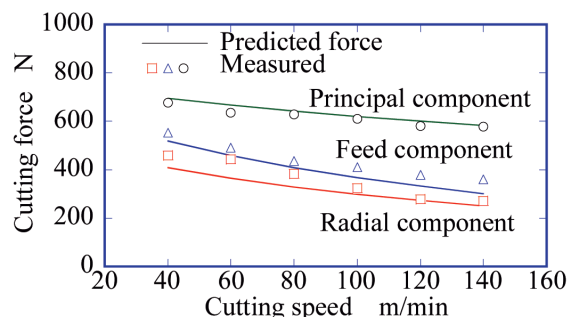


Fig.8 Prediction of cutting force
Cutting conditions: material cut, Inconel X750; tool, carbide K10(-5,-5,5,5,15,15,0.8); depth of cut, 1.0mm; feed rate, 0.2mm/rev; and lubrication, dry.

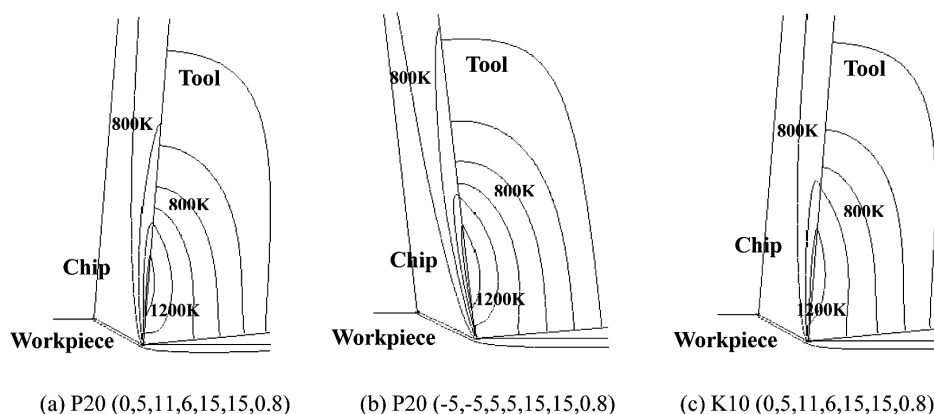
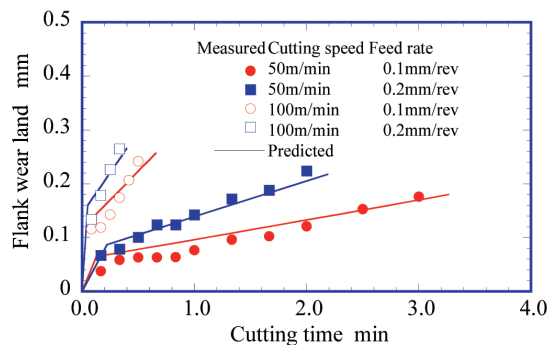
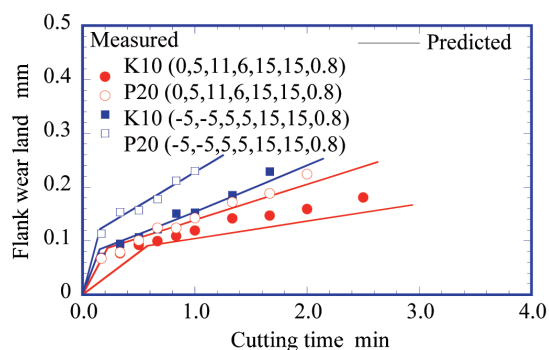


Fig.9 Cutting temperature analysis
Cutting conditions: material cut, Inconel X750; cutting speed, 100m/min; feed rate, 0.2mm/rev; depth of cut, 1.0mm; and lubrication, dry.



(a) Effect of cutting condition
Tool, P20 (0,5,11,6,15,15,0.8)



(b) Effect of tool geometry and material
Cutting speed, 50m/min; feed rate 0.2mm/rev

Fig.10 Flank wear simulation

は容易ではなく、これに対する多くのコストも無視できない。ここでは、このような背景のもとで、汎用性と定量性を考慮し、切削理論に基づいた特性評価について述べてきた。切削モデルにおける各特性パラメータは被削材や工具材質の性能を理論的な観点から評価できるものであり、これに基づけば、事例的な評価ではなく物性的な評価としてとらえることが可能となる。このようにして得られた特性に基づいて切削シミュレーションをすることで、切削状態を精度良く予測し制御できる。

切削シミュレーション技術としては、現在、有限要素法による切りくず生成のシミュレーションも可能となっているが、計算機能力が未だ十分でなく、その解析には時間がかかる。また、被削材の材料特性として構成方程式が必要であるが、それを得るための材料試験に対してコストと時間を要する。また、切削は被削材とともに工具の界面における特性が不可欠であるが、その与え方によって解析結果が異なる。したがって、有限要素法による切削シミュレーションを切削作業の最適化に用いることは現時点では難しい。ここで示したシミュレーションはエネルギー解析法と呼ばれ、二次元切削データを完備すれば、切れ刃形状に応じて短時間に切削過程を予測できることが特徴である。有限要素法と比べれば出力情報は少ないが、短時間に切削力、切削温度、摩耗を解析できるため、工具形状の設計や切削条件の最適化に利用できる。

参考文献

- 1) E.G.Loewen and M.C.Shaw : Trans. ASME, 76 (1954) 217.
- 2) S.Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp, (1980)
- 3) E.Usui, S.Shirakashi and T.Kitagawa : Wear, 100 (1984) 129.
- 4) E.Usui, A.Hirota and M.Masuko : Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME, 100 (1978) 222.
- 5) T.Matsumura, T.Obikawa, T.Shirakashi and E.Usui : Proc. of the 6th International ESAFORM Conf. on Material Forming, (2003) 519.

(2016年11月14日受付)