切削条件と被削材成分を考慮した 工具摩耗予測システムの開発*

赤澤 浩 一** 尾崎 勝彦** 社本 英二***

Development of a System to Predict tool Wear Considering Cutting Conditions and Workpiece Components

Koichi AKAZAWA, Katsuhiko OZAKI and Eiji SHAMOTO

The present study presents a practical system to predict tool wear considering cutting conditions and workpiece components. The proposed system is developed for automation of production processes, optimization of cutting conditions, development of new workpiece materials, etc. The system consists of tool temperature analysis and tool wear prediction. The tool temperature is simulated by FEM analysis, and then the tool wear is predicted by utilizing the simulated temperature. The tool wear prediction model has a few constants which need to be identified for each set of tool and workpiece materials. The constants are identified and the material properties are measured for steel workpiece and a carbide tool, and the system is verified by some experiments in the present research.

Key words: tool wear, tool temperature, FEM analysis, cutting conditions, workpiece components

1. 緒 言

現在、機械加工生産の主流を占める多品種中・少量生産においては、少品種多量生産に比べ生産工程の自動化が遅れ、その自動化、高能率化が望まれている。生産工程の自動化、高能率化を阻害する要因は様々であるが、その一つに工具摩耗があげられる。加工により工具摩耗が進行すると、工具刃先丸みの増大に伴う仕上げ面粗さの増加、および刃先の減退による加工誤差が生じる。また極度に摩耗した工具による切削は、過大な切削抵抗を生じ、工具および工作物を損傷する可能性があり危険である。こうしたことから工具摩耗量の予測は、切削条件の最適化や工程の自動化において重要な技術であると考えられる。一方、鉄鋼材料に対するニーズは多様であり、切削工具寿命もその一つにあげられる。材料開発において工具摩耗予測技術は、試作・実験回数の削減につながり、材料開発のスピードアップに貢献できる。また、工具摩耗に及ぼす材料特性について理解が深まることによって新しい材料開発への指針が得られることも大いに期待される。

これまでに、工具摩耗の予測技術についていくつかの研究成果が報告されている^{1)~4)}。しかしながら、これらの予測には工具刃先の温度が既知である必要があり、実際の加工条件設計や被削材の材料開発などに利用されている例は少ない。そこで本研究では、これまでに提案されている工具摩耗モデルを改良するとともに、有限要素法解析による刃先温度の予測を組み合わせることで、少ない実験データを基に工具摩耗を予測する実用的なシステムの開発を行った。

2. 工具摩耗モデル

工具摩耗の機構としては、主に、被削材に含まれる硬質粒子によって機械的に工具刃先が削り取られるアブレシブ

摩耗と、高温・高圧環境下で工具材成分が被削材中に拡散することで摩耗が進展する拡散摩耗があげられる。拡散摩耗は切削温度に影響を指数的に受けることが知られており、次(1)のようなモデルが提案されている²⁾。

$$dW = A_1 \cdot \sigma \cdot dL \cdot \exp(-A_2 / \text{temp}) \quad (1)$$

ここで、 dW は摩耗量の増分であり、 dL は切削距離の増分を示している。また、 σ と temp はそれぞれ工具刃先近傍の応力と切削温度を表している。式(1)はフィックの拡散方程式と類似の形式となっている²⁾ことから、その妥当性が理解できる。

本研究では、式(1)の拡散摩耗モデルに新たにアブレシブ摩耗モデルを統合し、幅広い切削条件下で工具逃げ面摩耗の予測が可能な工具摩耗予測モデルとして、次式で表されるモデルを提案する。

$$dW = dL \cdot C_1 \cdot H_w / H_t + dL \cdot C_2 \cdot \exp(-C_3 / \text{temp}) \quad (2)$$

本モデルは第1項がアブレシブ摩耗のモデル、第2項が拡散摩耗モデルとなっている。ここで、 H_w は被削材の切削温度条件下での硬さ、 H_t は工具材の切削温度条件下での硬さを表している。 C_1 はアブレシブ摩耗の影響係数であり、被削材に含まれる硬質介在物 (TiN, TiC, Al_2O_3 , SiO_2 など) の含有率に依存すると考えられる。 C_2 , C_3 は拡散摩耗の影響係数であり、ともに切削試験により同定される。ここで、工具逃げ面のアブレシブ摩耗は、図1に示すように、仕上げ面側の被削材に含まれるアブレシブ粒子が工具刃先に押し付けられ、工具材が除去される摩耗である。ここでアブレシブ粒子は十分に硬いとすると、アブレシブ摩耗量はアブレシブ粒子が工具材に押し込まれる量に比例し、さらにその押し込み量は工具材の硬さに反比例するものと考えられる。一方、被削材は工具刃先から逃げ面にかけて塑性変形と若干の弾性変形を受けながら流れていく。つまり、この3次塑性域では被削材は常に塑性変形状態であることから、表面付近のアブレシブ粒子は切削条件等に関係なく、

* 原稿受付 平成20年4月9日

** 正会員 (株)神戸製鋼所 (神戸市西区高塚台1-5-5)

*** 正会員 名古屋大学 (名古屋市千種区不老町)

Fig. 1 Abrasive wear mechanism

切削温度下における被削材の硬さに対応する圧力で工具材に押し込まれていると考えられる。以上をまとめると、アブレシブ摩耗量は、被削材の硬さに比例し、工具材の硬さに反比例するものと考えられ、式(2)の第1項のように表される。

なお、アブレシブ摩耗はその機構から切削温度の影響をあまり受けず、低速切削条件域から高速切削条件域まで大きく変化しないと言われているが、実際には本モデルの第1項で表されるように、工具材と被削材の硬さの温度依存性によって切削速度の影響を受けると考えられる。

3. 実験方法

3.1 切削実験方法

本研究では、外周旋削加工により工具摩耗のデータ取得を行った。工具には超硬 P10 種 SNMG120405(株)タンガロイ製 TX10D)を使用し、工具ホルダ(住友電工ハードメタル(株)製 PSBN-R)に取り付けて加工を行った。加工機械にはオークマ(株)製 NC 旋盤 LS30-Nを使用した。また、被削材としては、構造用炭素鋼 S45C (Hv:216MPa)を用い、乾式切削を行った。切削条件については、切削温度を大きく変化させるため、切削速度を5段階に変化させた。切削条件を表1に示す。

3.2 被削材および工具材の硬さの測定方法

アブレシブ摩耗の予測に必要な切削温度下における被削材の硬さ情報としては、硬さと強い相関を持つ降伏応力を圧縮試験により測定した値を使用した。試験片の形状は、直径9mm、高さ12mmとし、圧縮速度は0.005mm/sとした。測定装置は島津製作所製オートグラフを使用した。一方、工具材のビッカース硬さの測定は、日本光学(株)製高温硬さ試験装置(高温顕微硬度計QM型)により実施した。測定にはサファイア(α - Al_2O_3)の圧子を使用した。測定条件を表2に示す。

3.3 切削温度の解析方法

工具刃先の切削温度は、工具摩耗予測モデルにおいて重要な入力パラメータである。切削温度の測定に関しては、これまでに工具-被削材熱電対法や、赤外線式非接触温度計を用いて輻射熱を測定する方法などが報告されているが^{5,6)}。広範囲の切削条件や被削材成分に対して測定を行うことは実用的ではない。そこで本研究では、切削温度データベースの構築が容易に行えるよう市販の温度連成FEM解析ソフト(伊藤忠テクノソリューションズ社製 ADVANT EDGE 2D)を使用し、本ソフトウェアより計算される工具刃先温度を前述の摩耗予測モデルの入力値とする。解析条件として、被削材強度の温度依存性は前節にて述べた高温圧縮試験により得られたデータを用いる。その他の解析条件を表3に示す。実際の旋削加工は工具のノーズ部での切削など、複雑な切削断面形状となるが、本研究ではまず、比較的2次元切削に近いと考えられる旋削工具の直線切れ刃部の工具摩耗を対象としたため、2次元切削の解析を行うことができる本ソフト

Table 1 Cutting conditions

Cutting speed	50,100,150,200,250 m/min
Feed rate	0.25 mm/rev
Depth of cut	1.5 mm

Table 2 Conditions for hardness measurements

Test temperature	RT,300,600,700,800°C
Test load	9.8 N
Atmosphere	Vacuum(3.0×10^{-4} torr)
Loading time	30 s
Heating rate	0.333 °C/s
Hold time	300 s

Table 3 Conditions for analysis of cutting temperature

Rake angle	-5°
Relief angle	5°
Radius of cutting edge roundness	0.01 mm
Thermal conductivity of workpiece	45 W/m·°C
Specific heat of workpiece	460 J/kg·°C
Density of workpiece	7900 kg/m ³
Cutting length	10 mm
Friction coefficient	0.5

Fig. 2 Relationship between cutting speed and tool wear

ウェアを使用した。

4. 実験結果

切削実験結果として、各切削速度における工具逃げ面摩耗量と切削距離の関係を図2に示す。図に示されるように、超硬工具によるS45C鋼の旋削加工では、切削速度が150m/min以上の比較的高速度領域では切削速度の増加にともなって工具摩耗量が急激に増加するのに対して、150m/min以下の中低速度領域では高速度領域と比較して切削速度の影響が小さい。高速度領域での切削速度増加に対する工具摩耗量の大きな増加は、拡散摩耗が切削速度に対して指数関数的に増大するためであると考えられる。一方、低速度領域では、工具摩耗の主要因がアブレシブ摩耗であり、拡散摩耗がほとんど起こっていないため、切削速度の影響が小さいと考えられる。

次に、切削プロセスのシミュレーションによる工具内部温度の解析結果の1例として、切削速度200m/minにおける工具刃先部の温度分布を図3に示す。本研究では逃げ面の摩耗を対象とするため、すくい面上の最高温度部ではなく、図中に○で示している刃先部の温度を切削温度とした。切削速度と切削温度解析値の関係を図4に示す。切削温度の解析値の妥当性については、先行の研究³⁾において微小熱電対露出法により測定された

Fig. 3 Simulated temperature distribution

Fig. 4 Relationship between cutting speed and cutting temperature

Fig. 5 Relationship between temperature and yield stress of workpiece

Fig. 6 Relationship between temperature and Vickers hardness of tool material

値と比較を行った。測定では、炭素鋼 S48C を切削速度 100m/min、送り速度 0.15mm/rev においてすくい面上の最高温度が約 830°C となっており、S45C における同一切削条件における最高温度の解析値は 809°C であることから、実際の現象に即した解析が行えていると考えられる。

被削材の高温時における降伏応力と工具材の高温時におけるビッカース硬さをそれぞれ図 5、図 6 に示す。図から、実験に使用した被削材および工具材は、共に温度の増加にともなって軟

Fig. 7 Comparison between calculated and measured flank wear

Fig. 8 Comparison between calculated and measured wear rates dW/dL

化するが、被削材の軟化傾向の方が工具材と比較して大きいことが分かる。このことから、アブレイシブ摩耗は切削速度の変化に対し一定量となるのではなく、切削温度の上昇にともなって減少するものと推測される。

式(2)に示す工具摩耗予測モデルにより、工具摩耗量を予測するためには、切削温度 $temp$ 、被削材の高温降伏応力 H_w 、工具の高温硬さ H_t が必要となる。切削温度については解析により求めることができる。また、高温時の被削材の降伏応力および工具の硬さについては、切削温度と同一温度において測定試験を行い、データを取得することが理想であるが、この場合、予め切削温度を知っておく必要があり、現実的には困難である。そこで、図 5、図 6 に示す代表的な温度条件にて測定を行った実験データから回帰式を求め、切削温度における値を算出することとした。回帰式を式(3)および式(4)に示す。式(3)、式(4)を用いることにより、少ない実験回数で、簡便に被削材の降伏応力および工具材の硬さを求めることが可能となる。また、工具逃げ面と被削材仕上げ面の微小接触領域では両者の温度は同じと考えられることから、本研究では、前述の解析により得られた切削温度を工具、被削材の温度とした。

$$H_w = 3110 \cdot \exp(-0.00538 \cdot temp) \quad (3)$$

$$H_t = -1.38 \cdot temp + 1740 \quad (4)$$

次に、各切削速度における切削温度 $temp$ 、被削材の降伏応力 H_w 、および工具材の硬さ H_t を算出し、実際の工具逃げ面摩耗の測定値とモデルによる計算値が一致するように、モデル係数 C_1 、 C_2 、 C_3 の最適化を実施した。その結果、 C_1 は 0.0641、 C_2 は 114000、 C_3 は 11900 となった。このモデル係数により、逃げ面摩耗幅を算出した結果を図 7 に示す。なお、今回実験に使用した工具には初期刃先丸みが逃げ面側から観察すると 10 μm 程度存在していたため、初期摩耗として逃げ面摩耗幅の計算結果に 10 μm を

Table 4 Cutting conditions for temperature simulation

Cutting speed	20,50,100,150,200,250,300 m/min
Feed rate	0.10,0.25,0.40 mm/rev

Fig. 9 Relationship between cutting conditions and cutting temperature (S45C)

Fig. 10 Relationship between cutting conditions and predicted flank wear (S45C)

加えることとした。図から分かるように、各切削速度における逃げ面摩耗量と工具摩耗予測モデルによる計算値は良く一致しており、各モデル係数は適切に同定されていると考えられる。次に、切削温度と工具摩耗の関係をより明確にするため、切削距離と工具摩耗量の線形関係における直線の傾き(工具摩耗率 dW/dL)と切削温度の関係について実測値と計算値を比較した結果を図8に示す。図8に示す摩耗量の計算値については、総摩耗量のほか、アブレシブ摩耗量と拡散摩耗量の計算値を区別して示している。図7と同様に、このグラフからも測定値と計算値は良い一致を示しており、低速度から高速度まで全速度領域において本モデルにより逃げ面摩耗幅を精度良く表すことができていることが分かる。また、低速度領域では拡散摩耗はほとんど無視できる程度となり、式(2)の第1項のようにアブレシブ摩耗を考慮する必要があることが分かる。

5. 工具摩耗予測システムの開発

実際の切削条件設計においては切削条件と工具摩耗の関係を明らかにしておくことが重要である、そこでまず、表4に示すように切削速度と送り速度を様々変化させて切削温度解析を行い、切削条件と切削温度の関係を求めた。解析結果を図9に示す。この切削温度の解析結果と式(2)、式(3)、式(4)により工具摩

Fig. 11 Relationship between cutting conditions and cutting temperature (Free cutting steel)

Fig. 12 Relationship between wear rates and additive amount of sulfur

耗を予測することが可能となるが、解析での切削条件以外の切削温度については、各送り速度における切削速度と切削温度の回帰式を式(5)、式(6)、式(7)とし、この回帰式から解析での切削速度条件以外の切削温度を求めた。式中の V は切削速度を示す。また、送り速度の変化に対しては、各送り速度における切削温度から直線補間により求めた。

$$temp = 122 \cdot \log V + 64.4 \quad (\text{Feed rate: } 0.10 \text{ mm/rev}) \quad (5)$$

$$temp = 132 \cdot \log V + 83.5 \quad (\text{Feed rate: } 0.25 \text{ mm/rev}) \quad (6)$$

$$temp = 127 \cdot \log V + 137 \quad (\text{Feed rate: } 0.40 \text{ mm/rev}) \quad (7)$$

以上により、様々に変化する切削条件において、工具摩耗を計算することが可能となる。そこで、切削速度および送り速度を変化させ、切削距離が4000mに達した時の工具摩耗量の予測を行った結果を図10に示す。図に示されるように、切削条件の変化に対する工具摩耗の増減を容易に知ることができ、本工具摩耗予測システムは、切削条件設計において非常に有益であると考えられる。

次に、快削添加成分の影響について検討を行う。硫黄や鉛などの快削元素は、鋼材加工における被削性向上のために必要に応じて添加される。特に硫黄は、鋼材中でMnと硫化物MnSを形成し、切りくず分断性を向上させるほか、工具摩耗を低減させることが知られている⁷⁾。このことから、予め硫黄の工具摩耗低減効果を予測することができれば、要求される工具寿命に対し適切な硫黄添加量を求めることが可能となり、鋼材成分設計効率化において非常に大きな効果が期待できる。そこで、硫黄添加量と工具摩耗量の関係を定量化するため、本工具摩耗予測システムにより硫黄添加鋼の工具摩耗予測を行った。ここでは、

Fig. 13 Relationship between cutting speed, S content and predicted flank wear (S45CS1)

Fig. 14 Relationship between feed rate, S content and predicted flank wear (S45CS1)

S45C 材（硫黄 0.019wt%添加）に、硫黄を 0.053wt%添加した S45CS1 材と 0.097wt%添加した S45CS2 材に対して、表 4 に示す切削条件で切削温度の解析を行った。解析結果を図 11 に示す。図のように、硫黄の添加に伴って若干温度解析値が低下している。これは、硫黄添加により機械的特性が変化したためである。例えば降伏応力では、S45C が 410MPa であるのに対し、S45CS1、S45CS2 ではそれぞれ 400MPa、395MPa と小さいため、温度が低下したと考えられる。今回は鉛添加快削鋼については検討を行っていないが、鉛のように潤滑効果を向上させる添加物を添加した場合は、温度解析時に摩擦条件の詳細な検討が必要になると考えられる。

次に、解析により得られた切削温度をモデル式(2)に代入して工具摩耗の予測を行った。ここでモデル内の係数 C_1 、 C_2 、 C_3 については、極微量の添加物が摩耗機構に与える影響は無視できるものとして、S45C 鋼に対して同定された上述の値を用いた。また、実際に超硬 P10 種工具による加工実験を行い、それぞれの鋼材における工具摩耗量の測定値と予測値の比較を行った。ここでは、切削速度を 200m/min、送り速度を 0.25mm/rev とした。各鋼材に対して測定および予測された摩耗率 (dW/dL) を図 12 に示す。図に示されるように、硫黄の添加に伴って摩耗量は小

Table 5 Cutting conditions

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Cutting speed m/min	100	350	200	200	170	140
Feed rate mm/rev	0.25	0.25	0.05	0.35	0.35	0.40
Depth of cut mm	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Tool material	P10	P10	P10	P10	P10	P10
Workpiece material	S45CS1	S45CS1	S45CS1	S45CS1	S45CS1	S45CS1

Fig. 15 Comparison between predicted and measured wear (S45CS1)

さくなる傾向があり、それぞれの硫黄添加鋼における工具摩耗量の測定値と、S45C 材に対して同定した工具摩耗予測モデルによる予測値は良く一致している。

ここで、図 12 における工具摩耗予測値と硫黄添加量の関係を 1 次式で補間することにより、特定の切削条件（切削速度 200m/min、送り速度 0.25mm/rev）において、硫黄添加量の増減に対する工具摩耗の変化を定式化することができる。同様にして、図 10 に示す切削条件域で硫黄添加量と工具摩耗の関係を定式化し、切削条件および硫黄添加量を変化させた時の切削距離 4000m における工具摩耗の予測を行った。予測結果として、切削速度と硫黄添加量を変化させた場合の工具摩耗量を図 13 に、送り速度と硫黄添加量を変化させた場合の工具摩耗量を図 14 に示す。なお、図 13 の計算では送り速度を 0.25mm/rev に固定し、また図 14 では、切削速度を 200m/min に固定して表示している。図 13、図 14 に示すように、本摩耗予測システムにより工具摩耗に与える硫黄添加の効果容易に予測できるため、鋼材成分設計時に工具摩耗を考慮した硫黄添加量の最適設計が可能になると考えられる。

6. 工具摩耗予測システムの検証

開発した工具摩耗予測システムの予測精度を検証するため、S45CS1 材に対して切削速度と送り速度を変化させて切削距離 4000m まで切削実験を行い、測定値と予測値の比較を行った。切削条件を表 5 に、比較結果を図 15 に示す。図のように予測値と測定値は良い一致を示していることがわかる。

次に、本システムを利用して切削条件を最適化することを考える。図 16 に S45CS1 材における切削条件と工具摩耗の予測値との関係を示す。図中の数値は、図 15 に示した確認実験における工具摩耗の測定結果を示している。ここで、仮に現行条件を、図中に赤丸で示す切削速度 200m/min、送り速度 0.25mm/rev とすると、工具摩耗を増加させず、加工効率を向上させるには、図中矢印の方向に切削条件を変更することが有効であると予測さ

7. 結 言

本研究では、従来の工具摩耗モデルを改良するとともに、有限要素法解析による刃先温度の予測を組み合わせることで実用的な工具摩耗予測システムの開発を試み、以下の成果を得た。

- (1) アプレシブ摩耗と拡散摩耗を同時に考慮することで広い加工条件に対応し得る逃げ面摩耗予測モデルを構築した。
- (2) 上記モデルにFEM切削シミュレーションにより計算される切削温度、被削材・工具の高温時の機械的特性を入力することにより、S45C 鋼の旋削加工における工具摩耗量を広い切削速度範囲にわたって正確に表現し得ることを確認した。
- (3) 硫黄添加快削鋼において、硫黄の添加量の工具摩耗に対する影響を補間式で表すことにより、硫黄添加量と切削条件の変化に対して工具摩耗量を予測することが可能な工具摩耗予測システムを開発した。
- (4) 切削実験による検証の結果、本工具摩耗予測システムは、広範囲の切削条件における工具摩耗量を比較的精度良く予測し得ることを確認した。また、本システムを利用して実際に加工条件の改善が可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 植松哲太郎, 大島康次郎: 主入力変数による表現の簡潔な GMDH モデルとその工具摩耗予測モデルへの適用, 生産研究, **33**,5,(1981)28.
- 2) 北川武揚, 前川克廣, 白樫高洋, 白井英治: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第4報), 精密工学会誌, **53**,9(1987)1414.
- 3) 白井英治: 現代切削理論, 共立出版, (1990)162.
- 4) E. Kannatery-Asibu, Jr.: A Transport-Diffusion Equation in Metal Cutting and its Application to Analysis of the Rate of Flank Wear, ASME Journal of Engineering for Industry, **107** (1985) 81.
- 5) 生田明彦, 篠崎賢二: 切削過程における凝着現象の材料学的検討, 高温学会誌, **32**,3 (2006) 152.
- 6) P. kwon, R. kountanya: Experimental Observations on Flank Wear in Machining Spherodized Plain Carbon Steels, Prepr. ASME/STLE Tribol. Conf.,(1998) 1.
- 7) 鳴瀧則彦, 山根八洲男ほか: 高速切削における硫黄快削鋼の被削性, 精密工学会誌, **53**,3 (1987) 455.

Fig. 16 Comparison between predicted and measured flank wear (S45CS1)

れる。そこで、高効率切削条件として表5に示す条件No.5, No.6を選定すると、現行条件では摩耗量 $107\mu\text{m}$ (図12の摩耗率測定における実験値) であるのに対して、条件No.5では加工能率が約20%向上して摩耗量は $124\mu\text{m}$ となり、大きく工具寿命を低下させずに加工効率を向上させることができた。また、条件No.6では、加工能率が12%向上する上に摩耗量は $89.3\mu\text{m}$ に減少し、加工効率向上と工具寿命延長を両立することができた。なお、条件No.6において、同一加工除去体積となる切削距離2500mと比較すると、工具摩耗量の測定値は $59\mu\text{m}$ となり、摩耗量を24%減少させることができた。

これらの結果から、本手法により加工効率を向上し、かつ工具寿命を延長させる切削条件の選定が可能となる。すなわち、本工具摩耗予測システムは、切削条件の最適化や被削材の開発を行う上で、実用的に有用であると考えられる。