

(論文)

# 切削シミュレーション技術

## Cutting Simulation of Wire and Rod



尾崎勝彦\*<sup>1</sup>(工博)  
Dr. Katsuhiko OZAKI



赤澤浩一\*<sup>1</sup>(工博)  
Dr. Koichi AKAZAWA



永濱睦久\*<sup>2</sup>  
Mutsuhisa NAGAHAMA

This study presents a practical technique to predict tool wear considering cutting conditions and work-piece components. The proposed model is developed for automation of production processes, optimization of cutting conditions, development of new work-piece materials, etc. The model 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 work-piece materials. The constants are identified and the material properties are measured for a steel work-piece and a carbide tool, and the system is verified by some experiments in the present research.

まえがき＝線材・棒鋼分野では、部品特性として高強度化が求められ、絶え間なく材料開発に挑戦しつづけている。部品を製造する際、高強度化に伴い切削加工時の工具摩耗や切りくず処理性が悪化し、生産性を阻害されることが一般的に知られている。その改善方法として、鉛や硫黄など、快削性元素を微量添加し、被削性を向上するとともに切削条件や工具を変更した対策も併せて検討されることが多い。

被削性改善のためには、ユーザの切削条件に適した改善方法の提案が重要であり、切削データを幅広く蓄積することによりこれまで対応してきた。しかしながら、より効果的に対策立案するには、切削シミュレーション技術を活用した被削性改善技術の開発が必要であり、その一環として、最も大きく影響を受ける工具摩耗の予測技術を確立し、活用してきたのでここで報告する<sup>1)~4), 8)</sup>。

### 1. 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によって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指数関数的に影響を受けることが知られており、式(1)のようなモデルが提案されている<sup>2)</sup>。

$$dW = A_1 \cdot \sigma \cdot dL \cdot \exp(-A_2 / temp) \dots\dots\dots(1)$$

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、 $\sigma$ 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<sup>2)</sup>ことから、その妥当性が理解できる。

本報では、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を提案する。

$$dW = dL \cdot C_1 \cdot H_w / H_t + dL \cdot C_2 \cdot \exp(-C_3 / temp) \dots\dots(2)$$

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得られた摩耗経過曲線により決定する。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。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、被削材は塑性変形と若干の弾性変形を受けながら工具刃先から逃げ面にかけて流れ

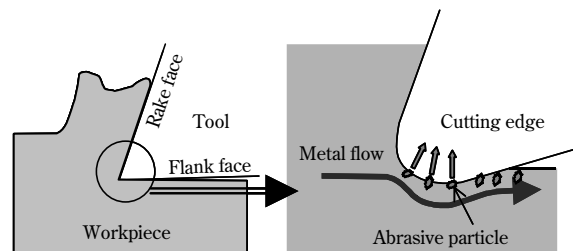


図1 アブレシブ摩耗メカニズム  
Fig. 1 Abrasive wear mechanism

\*<sup>1</sup>技術開発本部 材料研究所 \*<sup>2</sup>鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 (現 線材条鋼商品技術部)

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などに関係なく、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(式(2))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( $H_v$ ,  $H_t$ )によって切削速度の影響を受けると考えられる。

## 2. 実験方法

### 2.1 切削実験方法

本実験では、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) に取付けて加工を行った。加工機械はオークマ(株)製 NC 旋盤 LS30-N を使用した。また、被削材には構造用炭素鋼 S45C (HV216) 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。

### 2.2 被削材および工具材の硬さ測定方法

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、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、ひずみ速度は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、工具材のピッカース硬さの測定は、サファイア( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の圧子を使用して日本光学(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。測定条件を表2に示す。

### 2.3 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。切削温度の測定法としてはこれまでに、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<sup>5, 6)</sup>、いずれの方法も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。そこで本実験では、切削温度データベースの構築が容易に行えるよう、市販の温度連成有限要素法(以下、FEMという)解析ソフト(THIRD WAVE SYSTEMS 社製 AdvantEdge 2D)を使用して工具刃先温度を求め、その値を前述の摩耗予測モデルの入力値とした。また、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た。その他の解析条件を表3に示す。実際の旋削加工での切削断面は、工具ノーズ部での切削など、複雑な3次元形状となるが、ここではまず、比較的2次元切削に近いと考えられる旋削工具の

表1 切削条件  
Table 1 Cutting conditions

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

表2 硬さ測定条件  
Table 2 Conditions for hardness measurements

Test temperature	RT, 300, 600, 700, 800°C
Test load	9.8N
Atmosphere	Vacuum (3.0×10 <sup>-5</sup> torr)
Loading time	30s
Heating rate	0.333°C/s
Hold time	300s

表3 切削温度解析条件  
Table 3 Conditions for analysis of cutting temperature

Rake angle	-5°
Relief angle	5°
Radius of cutting edge roundness	0.01mm
Thermal conductivity of workpiece	45W/m·°C
Specific heat of workpiece	460J/kg·°C
Density of workpiece	7,900kg/m <sup>3</sup>
Cutting length	10mm
Friction coefficient	0.5

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ウェアを使用した。

## 3. 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幅と切削距離の関係を図2に示す。超硬工具によるS45C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伴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の温度分布解析結果の一例として、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。本実験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3右図中に○で示した箇所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を確認するため、先行の研究<sup>3)</sup>において微小熱電対露出法により測定された値と比較を行った。測定では、炭素鋼S45C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および工具材の高温

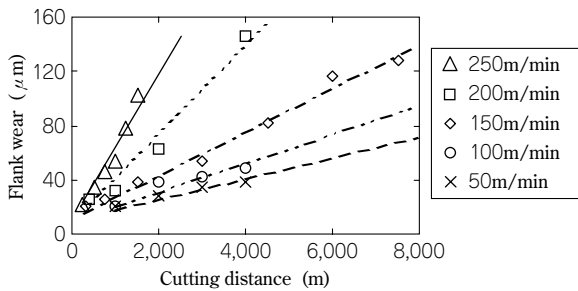


図2 切削速度と工具摩耗の関係  
Fig. 2 Relationship between cutting speed and tool wear

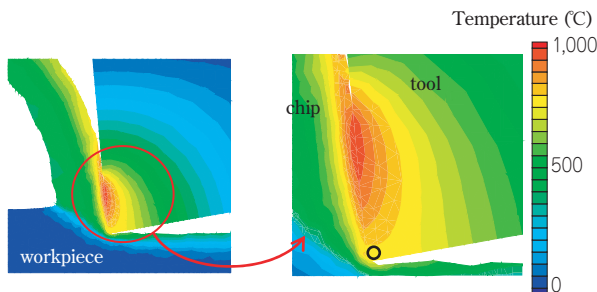


図3 切削温度解析結果；温度分布  
Fig. 3 Simulated temperature distribution

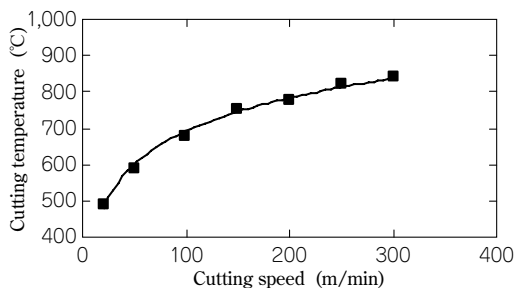


図4 切削速度と切削温度の関係  
Fig. 4 Relationship between cutting speed and temperature

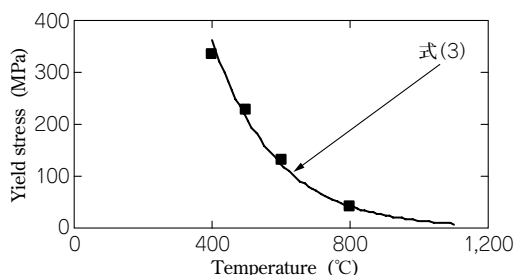


図5 温度の被削材降伏応力に及ぼす影響  
Fig. 5 Relationship between temperature and yield stress of workpiece

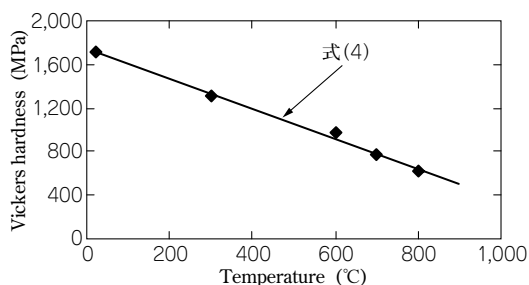


図6 温度の工具材料硬さに及ぼす影響  
Fig. 6 Relationship between temperature and Vickers hardness of tool material

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ともに、温度の増加に伴って軟化するが、工具材と比較して被削材の方が軟化傾向が大きいことが分かる。このことか

ら、アブレ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、切削温度の上昇に伴って減少するものと推測される。

式(2)に示したモデルによって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  $H_t$  を知る必要がある。切削温度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。しかしながら、その場合、あらかじめ切削温度を知っておく必要があることから、現実的には困難である。そこで、代表的な温度条件において測定を行った実験データ(図5、図6)から回帰式(式(3)、式(4))を求め、切削温度におけるそれぞれの値を算出することとした。

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

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

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との微小接触領域では両者の温度は等しいと考えられることから、ここでは、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。

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  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  の同定を行った。その結果、 $C_1$  は 0.0641、 $C_2$  は 114000、 $C_3$  は 11900 となった。これら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、今回の実験で使用した工具には逃げ面側から観察すると  $10\mu\text{m}$  程度の初期刃先丸みが存在していたため、逃げ面摩耗幅の計算結果に初期摩耗として  $10\mu\text{m}$  を加えることとした。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(図2)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(図8)。図8に示した摩耗量の計算値では、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た。図7と同様に、このグラフでも測定値と計算値は良い一致を示して

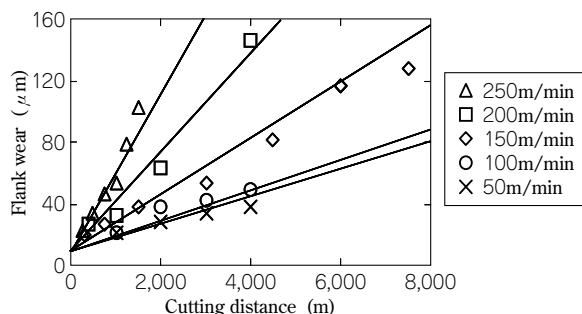


図7 切削距離と逃げ面摩耗幅の関係  
Fig. 7 Comparison between calculated and measured flank wear

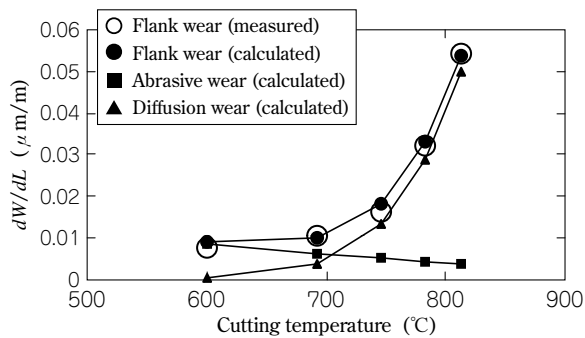


図8 切削温度と逃げ面摩耗速度の関係  
Fig. 8 Comparison between calculated and measured wear rates  $dW/dL$

おり、低速度から高速度までの全速度領域における逃げ面摩耗幅が本モデルによって精度良く表すことができることが分かる。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項で表したアブレシブ摩耗を考慮する必要があることが分かる。

#### 4. 工具摩耗予測技術の開発と検証

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に示したように切削速度と送り速度を様々に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(図9)。この切削温度解析結果と式(2)、式(3)、式(4)により工具摩耗を予測することが可能となるが、解析で用いた切削条件以外の切削温度は、各送り速度における切削速度と切削温度の回帰式(式(5)、式(6)、式(7))から求めた。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。

・ Feed rate : 0.10mm/rev  
 $temp = 122 \cdot \log V + 64.4$  ..... (5)

・ Feed rate : 0.25mm/rev  
 $temp = 132 \cdot \log V + 83.5$  ..... (6)

・ Feed rate : 0.40mm/rev  
 $temp = 127 \cdot \log V + 137$  ..... (7)

式(2)~式(7)により、様々に変化する切削条件における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4,000m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。この図を用いることによって、様々な切削条件の変化における工具摩耗量を容易に知ることができることから、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用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った。硫黄や鉛などの快削元素は、鋼材加工における被削性を向上させる目的で添加される。とくに硫黄は、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<sup>7)</sup>。このことから、あらかじ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

表4 切削温度解析条件

Table 4 Cutting conditions for temperature simulation

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

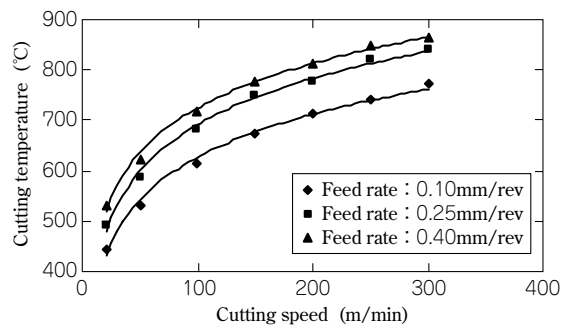


図9 切削速度の切削温度に及ぼす影響  
Fig. 9 Relationship between cutting conditions and cutting temperature (S45C)

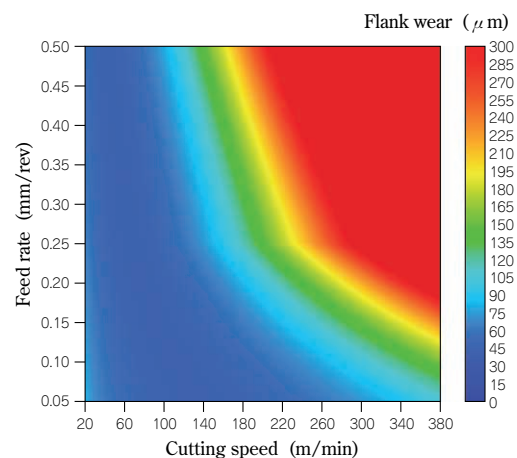


図10 切削条件と工具摩耗予測量の関係  
Fig.10 Relationship between cutting conditions and predicted flank wear (S45C)

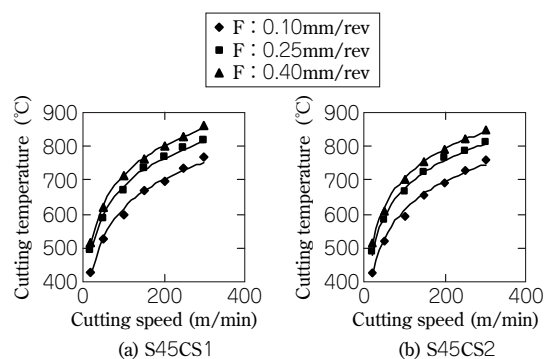


図11 切削条件と切削温度の関係  
Fig.11 Relationship between cutting conditions and cutting temperature (free cutting steel)

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、S45C(硫黄0.019wt%添加)に、硫黄を0.053wt%添加したS45CS1と0.097wt%添加したS45CS2に対し、表4に示した切削条件による切削温度解析を行った。その結果を図11に示す。硫黄の添加に伴って切削温度が若干低下している。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、S45Cの降伏応力が410MPaであるのに対し、S45CS1および

S45CS2 では、MnS の切欠き効果などによってそれぞれ 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 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。硫黄の添加に伴って摩耗量は小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 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。

さらに、本工具摩耗予測技術の予測精度を検証するため、S45CS1 に対して切削速度と送り速度を変化させて切削距離 4,000m 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13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分かる。

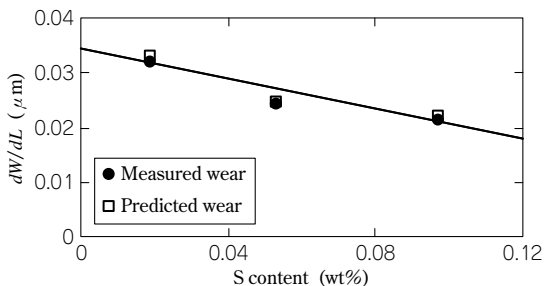


図12 硫黄添加量の逃げ面摩耗速度に及ぼす影響

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

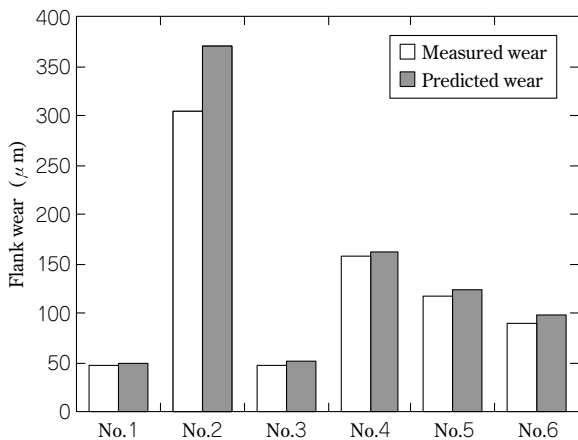


図13 各種切削条件下での逃げ面摩耗量の実験値と予測値の比較結果

Fig.13 Comparison between predicted and measured wear (S45CS1)

表5 切削条件  
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

むすび=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によって実用的な工具摩耗予測技術の開発を試み、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により、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 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、工具摩耗に対する硫黄添加量の影響をモデル式で表すことにより、様々な硫黄添加量および切削条件に適用可能な工具摩耗予測技術を開発した。
- (4) 切削実験による検証の結果、本工具摩耗予測技術は、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。

#### 参考文献

- 1) 植松哲太郎ほか：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, Vol.33, No.5 (1981), p.28.
- 2) 北川武揚ほか：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, Vol.53, No.9 (1987), p.1414.
- 3) 白井英治：現代切削理論, 共立出版, (1990), p.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, Vol.107 (1985), p.81.
- 5) 生田明彦ほか：切削過程における凝着現象の材料学的検討, 高温学会誌, Vol.32, No.3 (2006), p.152.
- 6) P. Kwon et al.: Experimental Observations on Flank Wear in Machining Spheroidized Plain Carbon Steels, Prepr. ASME/STLE Tribol. Conf., (1998), p.1.
- 7) 鳴瀧則彦ほか：高速切削における硫黄快削鋼の被削性, 精密工学会誌, Vol.53, No.3 (1987), p.455.
- 8) 鳴瀧則彦ほか：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, 精密工学会誌, Vol.75, No.3 (2009), p.396.