

(論文)

# 切削シミュレーション技術の被削性改善への応用

## Application of Cutting Simulation to Improve Machinability



赤澤浩一\*  
Koichi Akazawa



尾崎勝彦\*\*\*(工博)  
Dr. Katsuhiko Ozaki

There is a great demand for improved machinability, related to tool life and in cutting process. It is difficult to carry out cutting tests in actual production facilities due to the high number of tests and conditions involved. To this end, a simple and accurate tool wear estimation simulation method was developed. This paper introduces research related to drilling on free-machining steels.

まえがき = 線材や棒鋼といった鋼材製品の多くは、切削加工などの2次加工が行われることが多い。切削加工の良否は一般的に被削性の評価によって行われる。被削性の評価項目としては、切りくず形態と切りくず処理性、工具寿命(工具摩耗)、切削抵抗、仕上面性状の4つがあげられる<sup>1)</sup>。

これらの被削性は、切削加工工程において生産効率、生産コストおよび製品品質に大きな影響を与えるため、鋼材にとって重要な特性である。特に工具寿命は、製品品質に影響を与えるほか、生産ラインの連続自動化の可否を左右する要因となるため、工具の長寿命化のニーズは高い。しかしながら、工具を長寿命化する加工条件を決定するためには、数多くの切削試験を行わなくてはならず、実際の生産ラインで実施することは非常に困難である。

一方、工具摩耗を予測する方法はこれまでもいくつか報告されている<sup>2)</sup>ものの、予測には切削抵抗や切削温度などのデータベースが必要であり、同様に多くの切削試験と高度な測定技術を必要とする。

そこで本研究では、温度連成切削シミュレーションを

応用することにより、簡便に工具摩耗を予測する手法の開発を行い、本技術を用いて被削性(工具寿命)の改善を試みた。具体的には、ハイスドリルによる穴あけ加工において、開発した工具摩耗予測技術を利用し、鉛快削鋼と同等以上の工具寿命を鉛フリー快削鋼にて実現する切削条件の選定を行ったので報告する。

### 1. 工具摩耗予測方法

#### 1.1 寿命試験方法と結果

ドリル加工における工具の寿命および工具摩耗の切削速度依存性を明らかにするため、マシニングセンタ(シチズン時計(株)製 NF-4)によりドリル加工試験を行った。本研究では被削材として、表1に示す2種の鋼材を使用した。工具には一般的なツイストドリル(Co-HSS製)を用いた。また、切削液として水溶性切削油(ユシロ化学(株)製 EC-50:濃度5%)を用いた。工具摩耗の評価として今回の試験では、工具先端の外周刃付近に発生するマージン摩耗(図1)の評価を行った。なお、切削条件は表2に示すように、切削速度を2水準に変化させて切削

表1 被削材成分

Table 1 Chemical compositions of work piece

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Pb	Hardness (HRC)
Steel A	0.40	0.25	0.73	0.014	0.021	0.01	0.02	0.16	0.095	0.07	20
Steel B	0.40	0.26	1.06	0.012	0.062	0.01	0.02	0.18	0.061	-	19



図1 マージン摩耗の測定方法  
Fig. 1 Measuring method of margin wear

表2 切削条件

Table 2 Cutting condition

Feed rate	0.11 mm/rev
Cutting speed	14.70 m/min 22.05 m/min
Depth of hole	24 mm
Tool diameter	7.0 mm

\*技術開発本部 材料研究所 \*\*技術開発本部 開発企画部

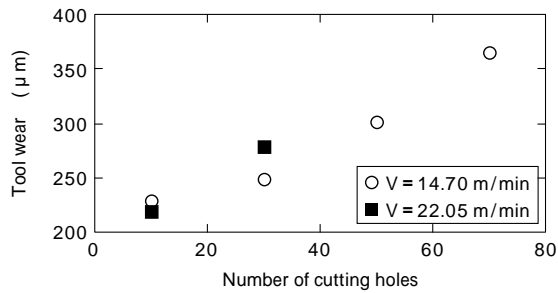


図2 寿命試験結果 (A 材)  
Fig. 2 Result of tool life test (Steel A)

速度依存性を調査した。また本研究では、ドリルの最外周の周速を切削速度とした。

切削実験結果として、鉛添加鋼である A 材の加工穴数と工具摩耗の関係を図 2 に示す。切削速度 14.7m/min の加工試験結果から、工具のマージン摩耗は加工穴数の増加に対し、ほぼ直線的に増大していることがわかる。また、加工穴数 30 の実験結果から、切削速度を 14.7m/min から 22.05m/min に上げれば、工具摩耗が増加することがわかる。

### 1.2 工具摩耗予測モデルの構築

工具摩耗の機構には主に、被削材に含まれる硬質粒子により機械的に刃先を削り取られる機械的摩耗と、高温・高圧環境下で工具と被削材の接触面において、化学的反応により摩耗する拡散摩耗、凝着摩耗がある。機械的摩耗はその機構から、工具刃先に作用する応力と切削距離に比例すると考えられる。また、拡散摩耗や凝着摩耗は、切削温度の影響を指数的に受けることが知られている<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、ドリルマージン摩耗予測モデルとして、垂直応力に比例し、かつ切削温度の指数関数となる式 (1) に示す数学モデルを構築した。

$$w_M = C_1 \cdot \sigma \cdot N \cdot \exp(C_2 \cdot T) + C_3 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $w_M$  : マージン摩耗 (μm)  
 $\sigma$  : 垂直応力 (MPa)  
 $N$  : 加工穴数  
 $T$  : 切削温度 (K)  
 $C_1, C_2, C_3$  : 係数

さらに詳細に記述すると、垂直応力 および切削温度  $T$  は、切削加工中に工具刃先部に作用する垂直応力と刃先近傍の温度である。また、係数  $C_1$  は機械的物理的作用によるアプレッシブ摩耗の影響を反映する係数であり、係数  $C_2$  は熱化学的な摩耗や被削材と工具の凝着摩耗の影響を反映する係数である<sup>2)</sup>。係数  $C_3$  は初期摩耗および初期刃先丸みを表す係数である。

本モデルでは、前節で述べたような切削温度と垂直応力を変化させた予備寿命実験をあらかじめ行うことにより、係数  $C_1, C_2, C_3$  の同定を行う。そして同定した係数を用いることにより、切削条件により変化する切削温度と垂直応力を入力値として工具摩耗量の推定が可能となる。しかしながら、切削条件は多様であり、それらにより決定される切削温度や垂直応力も多様に存在する。したがって、様々に変化する切削条件において切削実験を行い、その実験データから切削温度、垂直応力のデータ

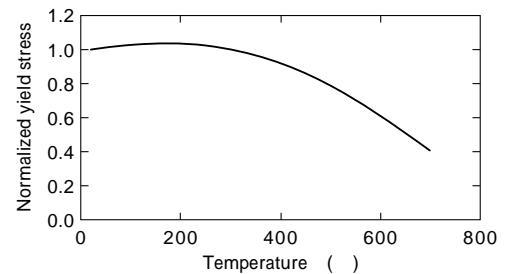


図3 切削温度と規格化した降伏応力の関係 (A 材)  
Fig. 3 Relationship between temperature and normalized yield stress (Steel A)

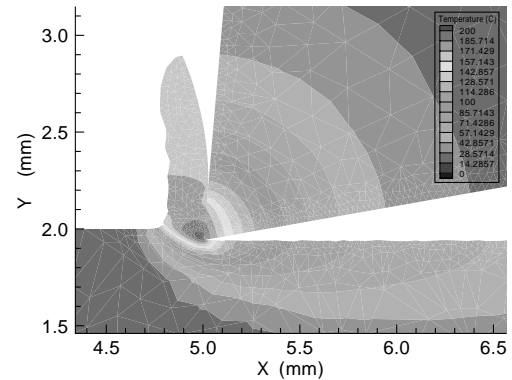


図4 切削シミュレーション結果 (A 材, 切削速度 14.70m/min)  
Fig. 4 Result of cutting simulation (Steel A, cutting speed 14.70m/min)

ベースを構築することは現実的に不可能であると思われる。

そこで本研究では、有限要素法による温度連成切削シミュレーションを用い、各切削条件による切削温度、垂直応力を計算により予測することで、簡便に本工具摩耗予測モデルの入力パラメータを求めることとした。

### 1.3 切削シミュレーションの構築

切削速度に代表される切削条件と切削温度、応力状態の解析を行えるようにするため、本研究では温度連成切削シミュレーションソフト ADVANTEDGE を用いた。本ソフトにおいて温度と応力の連成解析を行うためには、被削材の降伏応力など基本的機械特性のほか、強度の温度依存特性のデータ取得が重要となる。そこで、高温圧縮試験を実施し、各温度での降伏応力値を測定した。圧縮試験は、島津製作所製オートグラフを用いた。サンプルは円筒形状 (直径 9mm, 高さ 12mm) とし、圧縮プレス金型の温度制御を行いながら実施した。

圧縮試験結果として、A 材において、試験温度と各試験温度で測定された降伏応力値を室温において測定された応力値で割ることにより求めた規格化降伏応力値の関係を図 3 に示す。室温から温度 200 まで規格化応力値は若干増加し、その後温度が高くなるに従い減少傾向を示していることがわかる。200 まで若干増加するのは時効のためであると考えられる。

上記の材料特性データを用いて、切削シミュレーションにより各切削速度における工具刃先近傍の切削温度の解析を行った。解析結果の 1 例として、A 材における切削温度分布の解析結果を図 4 に示す。本研究では、切削シミュレーションによる刃先付近の温度を切削温度として、モデルの入力値  $T$  とした。切削速度と刃先付近の切

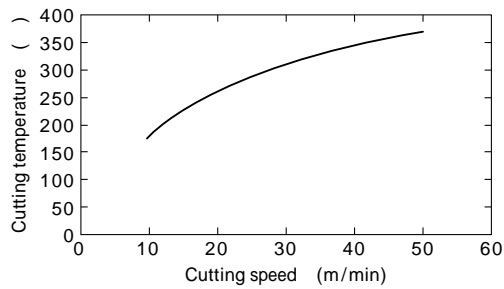


図5 切削速度と切削温度の関係 (A材)

Fig. 5 Relationship between cutting speed and temperature (Steel A)

表3 モデル係数の算出結果

Table 3 Calculation results of model parameters

	Steel A	Steel B
$C_1$	$5.99 \times 10^{-4}$	$9.25 \times 10^{-4}$
$C_2$	$4.24 \times 10^{-3}$	$8.60 \times 10^{-3}$
$C_3$	191	105

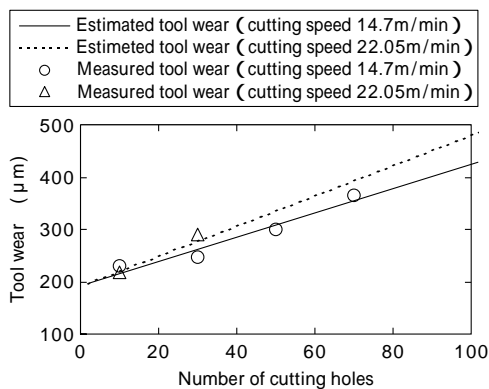


図6 工具摩耗の推定値と実験値 (A材)

Fig. 6 Estimated and measured results of tool wear (Steel A)

削温度の関係を図5に示す。一般的な高速度工具鋼ドリル加工の切削速度範囲(10~50m/min)では、切削温度は150から350の範囲となっていることがわかる。一方、工具刃先近傍の垂直応力については、解析結果から、A材では478MPaとなった。

#### 1.4 モデル係数の同定

切削シミュレーションにより算出される切削温度および垂直応力を入力値として、式(1)に示す工具摩耗予測モデルからドリルのマージン摩耗量を予測するためには、式(1)のモデル係数 $C_1$ から $C_3$ を同定する必要がある。そこで、摩耗予測モデルから算出される工具摩耗量が図2に示す実験値と一致するように、係数 $C_1$ から $C_3$ を最適化手法(最急降下法)により同定した。同定結果を表3に示す。また、A材と同様の方法で、B材についても摩耗予測モデルの係数 $C_1$ から $C_3$ を同定した。同定結果を表3に併せて示す。

また本モデルの評価として、A材の実験値と計算値の比較結果を図6に示す。加工穴数の増加や切削速度の変化に対するドリルマージン摩耗量の変化とモデルによる計算値はよく一致しており、モデル係数 $C_1$ から $C_3$ は精度よく設定できていることがわかる。

以上から、切削温度と垂直応力を変化させた予備実験による工具摩耗データから係数 $C_1, C_2, C_3$ をあらかじめ設定しておくことにより、様々な切削条件に対し、実

際に加工を行うことなく切削シミュレーションから算出される切削温度と垂直応力を入力値として、簡便に工具摩耗量の推定が可能となる。

## 2. 工具摩耗予測技術を利用した工具摩耗低減切削条件の選定

近年、環境問題から快削成分である鉛を添加しない鉛フリー快削鋼のニーズが高まっている。このため、鉛を硫化物に代えて被削性を確保しようとする試みがなされている。ところが硫黄を大量に添加すると材料の異質性が大きくなるため、横目靱性の低下や熱間鍛造時の割れなどの問題が出る恐れがある。この場合、表1の例のように十分な量の硫黄を添加することができない場合がある。

図7に、加工穴数300における、鉛添加鋼であるA材に対する鉛フリー鋼B材の工具摩耗量の比を示す。図のように、B材での加工では工具の摩耗はA材の1.23倍となり、鉛添加鋼と同等の被削性を確保することが困難な例である。そこで本研究では、工具摩耗予測技術を利用して、鉛フリー鋼であるB鋼において、鉛添加鋼A材と同等の工具摩耗を実現する切削条件の選定を試みた。

B材においても同様に工具摩耗予測モデルを構築し、2種(A, B材)の鋼材の基準切削条件(表4)における工具摩耗量予測を行った。予測結果として、加工穴数と工具摩耗量の関係を図8に示す。図から、基準切削条件では加工穴数が少ない加工初期ではA材の工具摩耗がB材よりも大きいのが、150穴を越えると、B材の摩耗量が

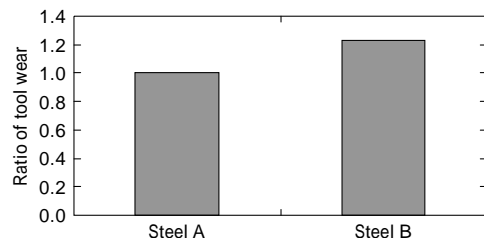


図7 被削材種による工具摩耗の変化

Fig. 7 Change of tool wear between work pieces

表4 基準切削条件

Table 4 Standard cutting conditions

Feed rate	0.11 mm/rev
Cutting speed	14.70 m/min
Depth of hole	24 mm
Tool diameter	7.0 mm

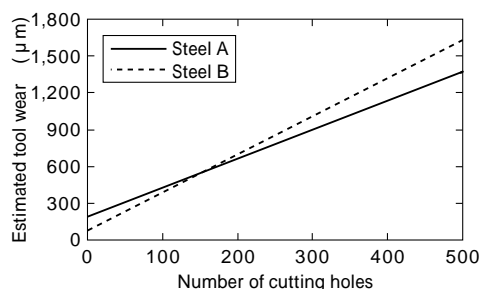


図8 加工穴数と工具摩耗の関係

Fig. 8 Relationship between number of cutting holes and tool wear

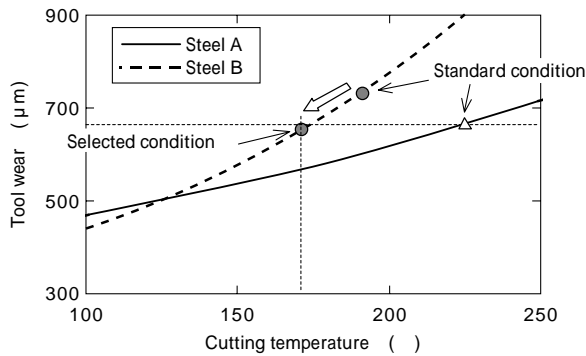


図9 切削温度と工具摩耗の関係

Fig. 9 Relationship between cutting temperature and tool wear

A材よりも大きくなり、結果的にB材加工時の工具寿命がA材よりも短くなるものと考えられる。工具摩耗は前述のように切削温度の影響を指数関数的に受けるため、工具摩耗の低減には切削温度を低下させることが効果的であると考えられる。また、表3に示す温度依存項のモデル係数 $C_2$ が、B鋼ではA鋼より大きいため、切削温度の低下により、A鋼よりも工具摩耗の低減が可能となる。

そこで、切削温度と工具摩耗の関係を式(1)により推定した。推定結果を図9に示す。また、A材、B材における切削速度と切削温度の関係を図10に示す。基準条件での切削温度は、図10からB材で188℃、A材で224℃

であるので、A材では工具摩耗量は約650 $\mu\text{m}$ なのに対し鉛フリー鋼であるB材では約750 $\mu\text{m}$ と100 $\mu\text{m}$ も増加することが図9からわかる。この工具摩耗の増加量100 $\mu\text{m}$ を低減させ、鉛快削鋼であるA材と同等の工具摩耗量にするためには、切削温度を170℃程度まで低下させる必要があることが図9から推察できる。B材の加工において切削温度170℃となる切削速度は、図10から

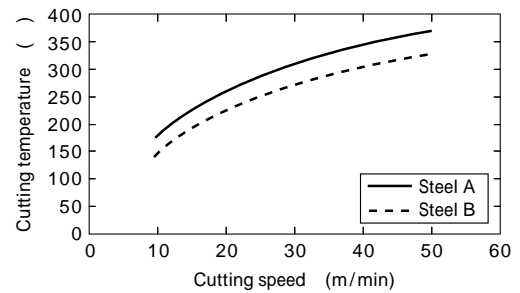


図10 切削速度と切削温度の関係 (A, B材)

Fig.10 Relationship between cutting speed and temperature (Steel A, B)

約12.5m/minとなる。つまり、A材からB材に変更する場合は、切削速度を14.7m/minから12.5m/min以下にし、かつ送り速度を加工効率が低下しないよう若干増加させることにより、工具寿命を短くすることなく加工が可能となると推測できる。

むすび=最後に本研究の結果をまとめる。

- 1) ハイスドリルの穴あけ加工において、工具のマージン摩耗を予測する摩耗予測モデルの構築を行った。
- 2) 上記工具摩耗予測モデルの入力パラメータである工具刃先近傍の切削温度と工具切削に作用する垂直応力を温度連成切削シミュレーションにより算出することにより、切削条件の変化に対し、実際に切削実験を行うことなく簡便に工具摩耗を予測する手法を開発した。
- 3) 本予測技術を利用して、鋼種を変更する場合の工具寿命を最適化する切削条件の選定方法を提案した。

#### 参考文献

- 1) 田忠 彰ほか：基礎切削加工学，(1984) p.87，共立出版．
- 2) 白井英治：現代切削理論，(1990) p.162，共立出版．