

切削加工後の WC-Co 超硬工具表面に現れる自発磁化測定

Evaluation of Spontaneous Magnetization of WC-Co Cemented Carbide Tool after Machining

岡本壮平¹⁾, 小竹茂夫¹⁾, 鈴木泰之¹⁾, 中西栄徳²⁾
Souhei Okamoto¹⁾, Shigeo Kotake¹⁾,
Yasuyuki Suzuki¹⁾ and Eitoku Nakanishi²⁾

Key Words: Cutting Force, Residual Stress, Magnetic Measurement, Experimental Mechanics

1. 緒 言

金属材料の切削加工においては、切削工具と被削材との間に局所的で大きな加工応力が加わるため、刃物先端の温度は大きく上昇し、機械的、熱的な反応によって、すくい面磨耗や逃げ面磨耗、欠損、溶着、熱亀裂といった損傷が生じることが知られている¹⁾。刃物の損傷は被削材の加工精度に関わるだけでなく、生産性の向上とも密接に関係するため、刃物の損傷をその場で評価できる技術の開発は重要となる。

従来、切削過程における刃物および被削材の切削抵抗は、刃物を保持するシャンクに掛る3分力を評価することが多かった。しかし、この3分力はあくまで工具全体に掛る力の総和であって、実際に工具の各領域に掛る局所的な応力状態を評価することとは異なる。加工の際の局所的な応力は被削材との摩擦や磨耗、熱応力と密接に関わるため、切削過程を理解するうえで重要となるが、これまでの手法では切削時に接触面を直接観察できないことから明確な評価ができないでいた。

切削時の工具の応力状態の解析には、有限要素法を用いた数値解析があり、多くの成果を上げている²⁾。しかし、加工硬化や熱的影響による材料パラメータの変化に未知な部分が多く、加工の際に形状や接触状態等の境界条件も経時的に大きく変化するため計算が困難であり、さらに実験的なデータとの比較が難しいために結果の信頼性に課題が残る。

一方、切削後の残留応力の評価法としてX線応力解析法が知られている³⁾。しかしX線は金属を透過しにくいいため、工具数 μm の最表面の応力しか測定することができず、一般に数百 μm に及ぶ加工残留応力を評価するこ

とは難しい。またX線を絞るレンズ等の光学部品が存在しないことから、一般には低い分解能でしか測定できない。また装置が大掛かりで高価になるため、旋盤やマシンニングセンタに取り付けることは難しく、実際の刃面に掛かる局所的な応力分布を実験的に明らかにした例はあまり見受けられない。

一方、鉄鋼材料や超硬合金のバインダーであるCoやNiを始め多くの工業用材料は、強磁性体であるため、強磁性材料の特徴を生かした様々な測定法が提案されている⁴⁾⁵⁾。強磁性体には、応力の負荷により内部磁化が変化する逆磁歪効果と呼ばれる性質がある。近年、これを応用して、破壊現象や塑性加工時における残留応力の評価⁶⁾が試みられている。しかし、負荷応力が自発磁化分布にどのように影響するかを詳細に検討した例は少なく、理論式と具体的な実験データの比較から、自発磁化と負荷応力の関係を明らかにする必要がある。

他方、切削加工においても、工具刃先に局所的に強い荷重が負荷されることから、超硬工具の場合、バインダーであるCoが負荷応力の効果により内部磁化が変化するものと期待される。しかし切削などの従来の研究において、磁化分布の変化を測定した例はあまり見受けられない。切削時の負荷応力は、値も大きく、方向も定まっていることから、負荷応力の自発磁化分布への影響を評価する良い具体例となり得、基礎的な研究を進めるうえでも、工具への具体的な適応が期待される。

そこで本研究では、強磁性体である超硬材料の持つ逆磁歪効果に着目し、切削前後の超硬工具表面の3次元残留磁化分布の状態から、切削後の残留応力の評価を行った。その際、切削時における切削抵抗の3分力を測定し、

1) 三重大学大学院工学研究科 量子物性工学研究室 Dept Mechanical Eng., Mie Graduate Sch Eng.

2) 三重大学大学院工学研究科 集積加工システム研究室 Dept Mechanical Eng., Mie Graduate Sch Eng.

切削抵抗の向きと大きさから負荷応力と磁束分布との関連について調べ、自発磁化の変化から切削時の負荷応力を評価する可能性について考察をおこなったさらに被削材に強磁性体の S45C と非磁性体の A5056 を用い比較することにより、被削材の磁気特性との磁化分布の関連について考察を行った。

れる。この現象については様々なモデルが提案されているが、ここでは Jiles により提案された自由エネルギーによるモデル⁽⁸⁾を中心に考察する。

一般に強磁性体内部の Gibbs の自由エネルギーは、以下の式によって表現される。

$$G = \Psi(M) + HM + \frac{\sigma^2}{E} + \frac{3}{2}\lambda\sigma\left(\cos^2\theta - \frac{1}{3}\right) - TS \quad (1)$$

ここで、 $\Psi(M)$ は強磁性体内部のスピンの相互作用による磁化エネルギーであり、ここでは簡単に $\alpha M^2/2$ とする。

また μ_0 は真空の透磁率、 H は外部磁場、 M は内部の磁化、 σ は応力、 E はヤング率、 λ は磁歪、 θ は応力と磁束ベクトルのなす角、 T は絶対温度、 S は物質内部のエントロピーである。磁歪は、飽和磁化 M_s 、磁歪定数 λ_s により次式で表現される。

$$\lambda = \lambda_s \left(\frac{M}{M_s} \right)^2 = \gamma M^2 \quad (2)$$

この自由エネルギーの磁化による偏微分により、応力負荷下での有効磁場 H_{eff} が以下のように求められる。

$$H_{eff} = \frac{\partial G}{\partial M} = H + \alpha M + 3\gamma M \sigma \left(\cos^2\theta - \frac{1}{3} \right) \quad (3)$$

$$= H + \alpha M + H_\sigma = H + \alpha M + \beta\sigma$$

つまり、外部応力の負荷が有効磁場の変化分 (H_σ)

となって影響し、 H_σ が保磁力 (H_c) を越えた際に

内部磁化の変化が現れる。また多結晶の Co の磁歪定数は負 ($\lambda = -62 \times 10^{-6}$) であることから、圧縮応力

2. 応力による内部磁化の影響

強磁性体の磁気履歴に及ぼす応力の影響については、実験、理論の両面から広く研究が行われており^(7,9)、その効果は、外部磁場と等価な影響を与える可逆的な作用と、ピン止めされた磁壁を平衡位置に移動させ非履歴 (anhysteresis) 磁化曲線へと近づける不可逆的な作用とに分けら

($\sigma < 0$) の方向が磁化容易軸となり、引張応力方向が磁化困難軸となる。

一方、Jiles⁽⁸⁾、Pitman⁽⁷⁾の研究により、応力負荷後の磁化は非履歴磁化 (M_{an}) へと不可逆的に近づくこ

とが知られている。非履歴磁化曲線は、磁壁のピン止め等の非平衡な因子が取り除かれた平衡状態での磁場と磁化の関係式であり、一般に以下で示すランジュバン関数 ($L(x)$) によって表現される。

$$M_{an}(H, \sigma) = L\left(\frac{H + \alpha M + \beta\sigma}{a}\right)$$

$$= M_s \left[\coth\left(\frac{H + \alpha M + \beta\sigma}{a}\right) - \frac{a}{H + \alpha M + \beta\sigma} \right] \quad (4)$$

$$\approx \frac{M_s}{3} \left(\frac{H + \alpha M + \beta\sigma}{a} \right)$$

ここで $a = k_B T / M$ 、 k_B はボルツマン定数である。

近似式より、 M_{an} の応力微分は

$$\frac{\partial M_{an}}{\partial \sigma} \approx \frac{M_s \beta}{3a} = \frac{\gamma M_s M^2}{k_B T} \left(\cos^2\theta - \frac{1}{3} \right) \quad (5)$$

となる。一方、Jiles によれば⁽⁸⁾、磁化は、磁化と非履歴磁化の差が離れているほど応力により大きく変化することから、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{\partial M}{\partial \sigma} = \frac{\sigma}{3E\xi} (M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma}$$

(6)

ここで ξ は、実験から定まる係数である。磁化 M が小さい場合、右辺の第 2 項が無視できることから、この式を解いて以下の関係式が得られる。

$$M = M_{an} - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{6E\xi}\right) \approx M_{an} + \frac{\sigma^2}{6E\xi}$$

(7)

つまり、 H_{eff} が H_c を越えた後、応力が増加するに従って、磁化は非履歴磁化に漸近することが予想される。以下では、磁化が外部応力の負荷によって変化するこれらの効果を、広く“逆磁歪効果”として表現する。

3. 実験方法

3-1 測定試料 測定試料は実際の市販品である WC-TaC-TiC-Co 系超硬工具（三菱マテリアル製、TNGG160404R 材種：UTi20T, ISO P20~P30 相当）と TaC, TiC が混入されていない WC-Co 系超硬合金（材種：G4）を規定の工具形状に成型した WC-Co 系超硬工具（シルバーロイ製）を使用した。後者は特注品のため、精度やコーナー半径は旋削用インサートの規格外である。以後、前者を UTi20T 工具、後者を G4 工具と呼ぶ。チップの寸法と磁束分布の測定範囲を図 1 に示す。

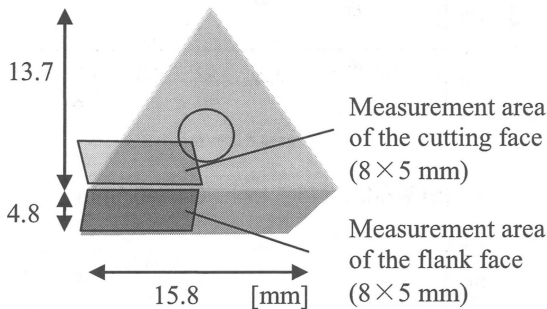


Fig. 1 Schematic figure of the cutting tool

3-2 実験方法 切削加工を行う前に試料工具の残留磁化を消磁する必要がある。今回、外部磁界を交番させながら、強度を減少させていくことにより、試料の残留磁束を消す交流消磁法を用いた。試料の保磁力はそれぞれ異なるため、UTi20T 工具は定置有芯交流消磁（電磁石、約 700mT）の後に回転交流消磁（ソレノイドコイル、約 66mT）を用いて交流消磁を行った。また、G4 工具は回転交流消磁のみで消磁を行った。

試料工具による切削加工は汎用旋盤で行った。切削条件を表 1 に示す。この際、切削油は使用しなかった。また切削の際に工具に掛る切削抵抗の主分力 (F_c)・送り分力 (F_s)・背分力 (F_t) を

3 分力測定装置（共和電業製 TD-500KA）にて測定した。これら 3 分力の方向を図 2 に示す。

Table 1 Cutting conditions of the experiments

Work: S45C (Ferromagnetic)				
Cutting speed V [m/min]	Feed f [mm/rev]			
	115~130	0.077	0.153	0.307
Cutting depth t [mm]	0.25	●	●	●
	0.5	●	●	●○
	1.0			○
	1.5			○

Work: A5056 (Non magnetic)				
Cutting speed V [m/min]	Feed f [mm/rev]			
	70~78	0.077	0.153	0.307
Cutting depth t [mm]	0.5	●		●

○ : UTi20T ● : G4

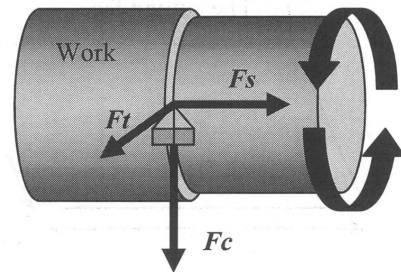


Fig. 2 The three components of cutting resistance

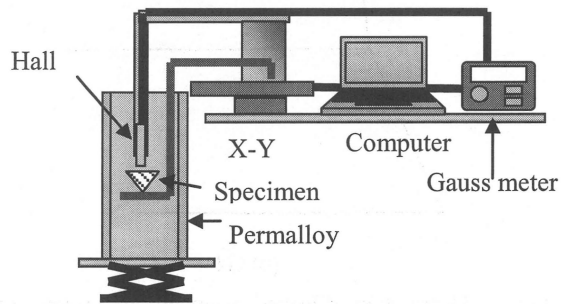


Fig. 3 Apparatus used for the measurement of leaked magnetic flux vectors

3-3 残留磁化測定 消磁後切削前および切削後の各工具試料の残留磁化を図 3 に示す装置を用いて測定を行った。装置は、自動 X-Y-Z ステージと 3 次元磁場測定用のガウスメータ（エーデーエス製 HGM-8900S）、パーマロイ 3 重管

からなる磁気シールドからなる。試料は内部の磁界が 10nT 以下まで防磁されている磁気シールド内中央部の非磁性試料台に設置した。3次元方向の磁束密度測定には、プローブ先端に取り付けられた測定領域 $70\mu\text{m}$ の3つのホール素子が、測定面を XYZ それぞれの方向に設置されたセンサーを用いた。パソコンからのプログラム制御により、水平に置かれた測定面上を X-Y 方向に 0.1mm 間隔でセンサーを走査させ、各測定位置における漏れ磁束ベクトルの分布を測定した。測定におけるホール素子と測定試料表面との距離は 1mm と一定に保持した。

4. 実験結果

4-1 消磁後の工具刃面の残留磁束分布 交流消磁後の UTi20T 工具と G4 工具刃面の残留磁束分布を図4に示す。

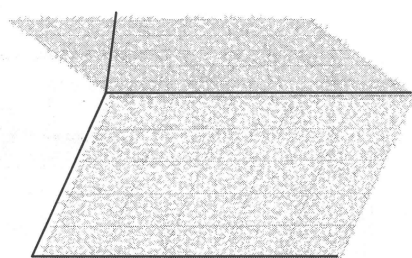
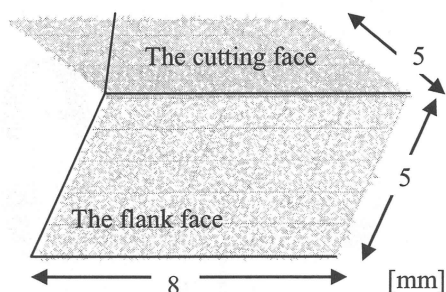
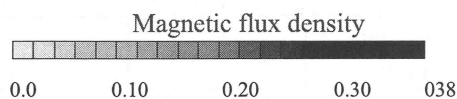
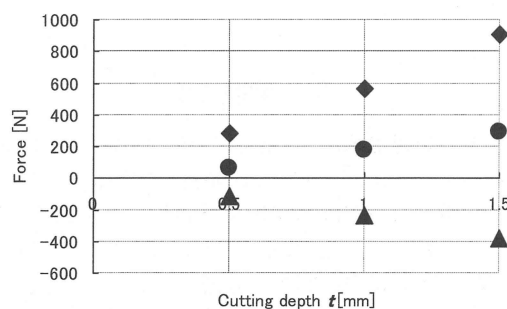


Fig. 4 Distribution of leaked magnetic flux vectors at the surface of the tool after demagnetizing. The maximum magnetic flux densities are (a) 0.038 and (b) 0.183mT

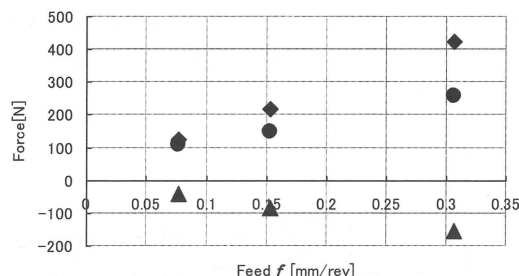
図の上面が工具のすくい面に、下面が逃げ面に対応する。実験結果から、両試料共に残留磁化が地磁気以下に均質に消磁されたことが分かる。これ以降

の磁束分布図の寸法と磁束密度のスケールは図4と等しくした。

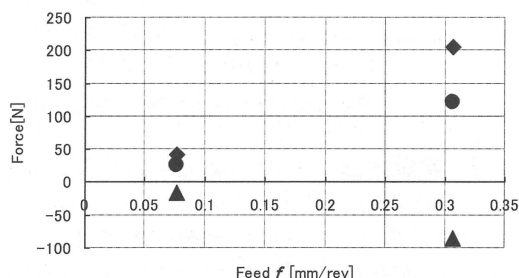
4-2 切削抵抗と自発磁化の関係 各試験条件で切削した際に負荷した3分力をまとめて図5に示す。ここで図5(a)は工具に UTi20T, 被削材に S45C を用い、送り量 $f=0.307\text{mm/rev}$ を一定とし、切り込み t を変化させた際の3分力である。また図5(b)は工具に G4, 被削材に S45C を用い、切り込み $t=0.5\text{mm}$ を一定とし、送り量 f を変化させた際の3分力であり、



(a) Work : S45C, tool : UTi20T, $f=0.307\text{mm/rev}$



(b) Work : S45C, tool : G4, $t=0.5\text{mm}$

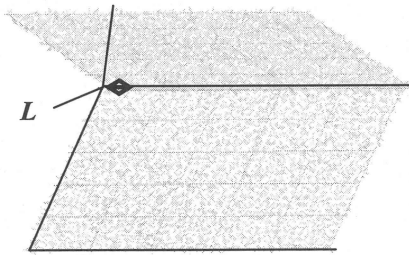


(c) Work : A5056, tool : G4, $t=0.5\text{mm}$

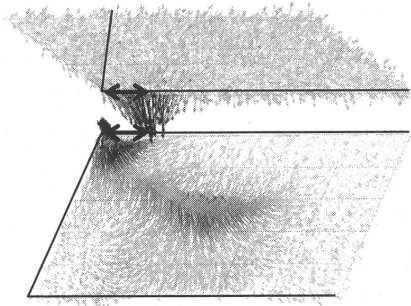
Fig. 5 Relationship between cutting speed and the three components of cutting resistance, ◆ : F_c , ● : F_s , ▲ : F_t

図5(c)は工具に G4, 被削材に A5056 を用い、切り込みを $t=0.5\text{mm}$ と一定とし、送り量 f を変化させた際の3分力である。全ての条件で共通に切込み量や送り

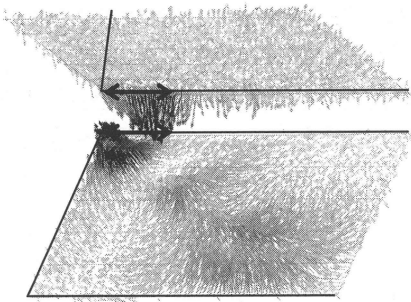
り量が増えると 3 分力も比例的に増加することが分かった。



(a) $t=0.5\text{mm}$



(b) $t=1.0\text{mm}$



(c) $t=1.5\text{mm}$

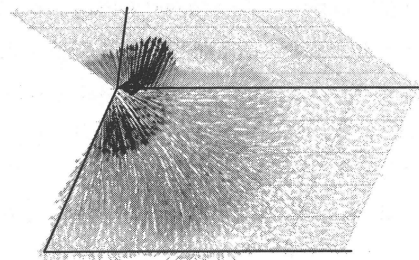
Fig. 6 Distribution of leaked magnetic flux vectors at the surface of the UTi20T tool after cutting S45C under $f=0.307\text{mm/rev}$. The maximum magnetic flux densities are (a) 0.037, (b) 0.183 and (c) 0.150mT

次に図6に工具に UTi20T, 被削材に S45C を用い, 送り量を $f=0.307\text{mm/rev}$ で一定とし, 切り込み量 t を変化させて切削実験を行った工具試料における切削後の工具刃面の残留磁束分布を示す. 図中の矢印は被削材との接触部であり, 長さは L である. 切り込み量 $t=1.0, 1.5\text{mm}$ の場合には, 刃面接触部を中心に 0.1mT を超える局所的な自発磁化の発現が確認され

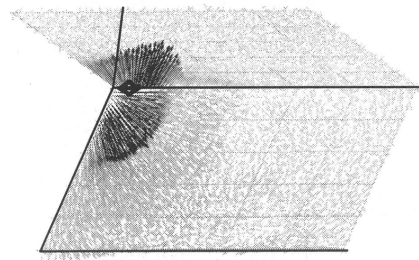
たが, $t=0.5\text{mm}$ の場合には磁化の発生が確認できなかった。

図 5(a)より切り込みに対して切削抵抗が比例的に増加していることから, この自発磁化の発生の違いには切削抵抗の大きさが関与していると考えられる。

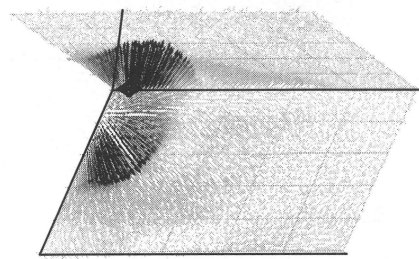
次に工具に G4 被削材に S45C を用い, 切り込み量を $t=0.5\text{mm}$ と一定にし, 送り量 f を変化させた切削実験における切削後の工具刃面の残留磁束分布を図 7 に示す. 前述の UTi20T 工具の場合には, 300N の切削抵抗では自発磁化が現われなかったが, G4 工具の場合は 200N 以下の切削抵抗でも自発磁化が現われ,



(a) $f=0.077\text{mm/rev}$



(b) $f=0.153\text{mm/rev}$



(c) $f=0.307\text{mm/rev}$

Fig. 7 Distribution of leaked magnetic flux vectors at the surface of the G4 tool after cutting S45C under $t=0.5\text{mm}$. The maximum magnetic flux densities are (a) 0.289, (b) 0.398 and (c) 0.450mT

接触部近傍で特に強い磁化が確認できた。送り量を変化させた場合、磁束分布には大きな違いがないものの、自発磁化の強度は切削抵抗の増加とともに上昇した。以上のように工具の材種や切削抵抗の変化によって自発磁化の生成に違いが現れた。

4・3 非磁性体の被削材の切削 G4 工具を用い、非磁性体 A5056 を被削材、切り込み量 $t=0.5\text{mm}$ を一定とし、送り量 f を変化させて切削した工具刃面の残留磁束分布を図 8 に示す。 $f=0.077\text{mm/rev}$ の場合には、自発磁化は確認できなかったが、 $f=0.307\text{mm/rev}$ の場合には、接触部近傍で磁化の発現が確認できた。この磁束分布の傾向は磁性体 S45C を切削した場合と同様であったものの、ほぼ同様の切削抵抗が負荷した図 8(b) と図 7(b) と比べると、非磁性体 A5056 を切削した方が、生成した磁化強度が 0.3mT 以上弱かった。これにより工具の自発磁化は切削抵抗による影響以外にも、被削材の磁気特性が密接に関わっていることが分かった。

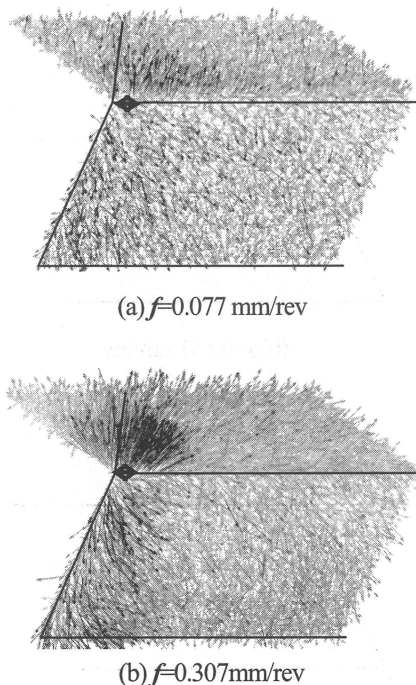


Fig. 8 Distribution of leaked magnetic flux vectors at the surface of the G4 tool after cutting A5056 under $t=0.5\text{mm}$. The maximum magnetic flux densities are (a) 0.050 and (b) 0.064mT

5. 考 察

5・1 切削抵抗と自発磁化の関係 図 9 に UTi20T 工具と G4 工具の切削実験における切削抵抗と測定された最大漏れ磁束密度の関係を示す。図の示すように切削時の負荷応力である切削抵抗に比例して自発磁化が大きくなる傾向を示した。自発磁化が、外部応力に比例して増加することは、式(7)とよく一致するものの、UTi20T 工具と G4 工具で点線の傾きや応力の閾値は大きく異なる。小さい切削抵抗では磁気弾性エネルギーが保磁力による磁場エネルギーを越えることができず自発磁化が生成されにくいと考えられることから、応力の閾値は有効磁界が工具の保磁力を越える位置に相当すると考えられる。UTi20T 工具の場合は、バインダー金属は合金化されていることから保磁力が大きく、一方 G4 工具は不純物が少ないことから工具の保磁力が小さいために、磁気弾性エネルギーによって容易に自発磁化が現れたものと考えられた。一方、UTi20T 工具では、外部応力に対する自発磁化の飽和が観察されたが、外部磁界の影響と考えられる。

一方、直線の傾きは、ピン止めされた磁壁の外力による解放率に相当し、同様な機構である保磁力と密接に関係するものと考えられるが、 ξ の決定を始め、機構の詳細については今後の研究に期待したい。この様に工具に発生する自発磁化の大きさには切削抵抗と材質が大きく関わっていることが明らかになったが、具体的な残留応力値を推定することはできなかった。

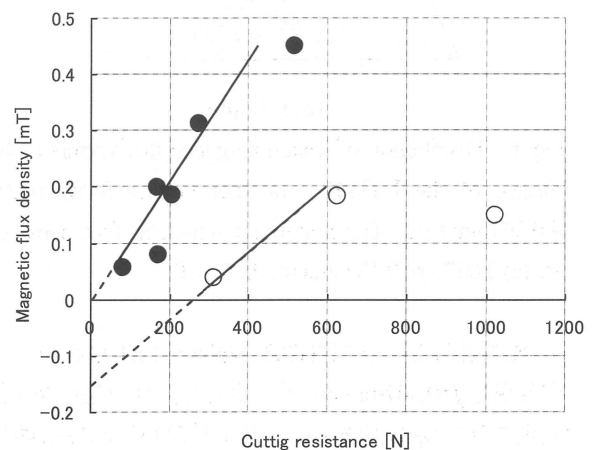


Fig.9 Relationship between cutting resistance and maximum magnetic flux density, \circ : UTi20T, \bullet : G4

他方、切り込み深さを増加させた場合、工具が受ける面積も増加することから、切削抵抗の増加は切

削圧力の増加を必ずしも意味しない。今回、切り込み深さに比例して磁束密度の増加が観察されたが、これはプローブの空間分解能が低いために、磁化範囲の広がりによって磁束密度が増加した可能性が考えられる。

5・2 工具内部の残留応力と自発磁化の方向の関係

切削によって工具の接触部付近に強い磁化が現れた。六方晶 Co の多結晶体の磁歪定数は $\lambda < 0$ であることが知られていることから⁽¹⁰⁾、磁束ベクトルが圧縮応力方向に向くことで、磁気弾性エネルギーは安定化する。

一方、図 6、7 に示すように、今回測定された自発磁化は、工具逃げ面とすくい面の両方で刃面に対して、垂直方向に現われた。また図 10 に示すように、S45C を切削した後の (a) UTi20T 工具と (b) G4 工具の逃げ面には、接触部近傍以外に曲線状または広範囲に強い自発磁化が確認でき、この際、磁束ベクトルは逃げ面に対して垂直方向に現れた。

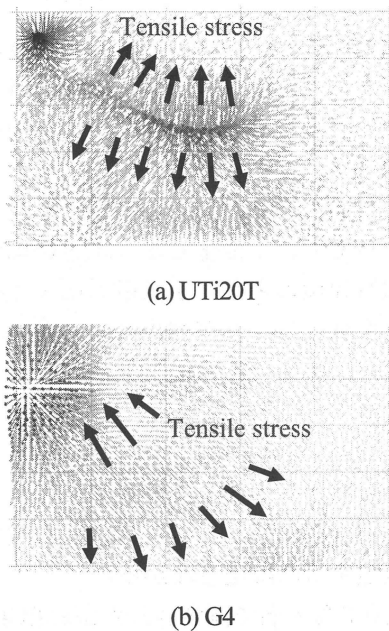


Fig. 10 Distribution of leaked magnetic flux vectors at the flank face of the tool after cutting S45C, $t=0.5\text{mm}$, $f=0.307\text{ mm/rev}$

一般に、切削時における主成分力は、図 11(a) に示すように、逃げ面全体に圧縮応力として掛る。一方、磁歪による残留磁束ベクトルは、圧縮応力方向に向くことから、逃げ面の中央部には広く引張応力が残

留しているものと推察された。切削時に掛る応力と切削後に現れる残留応力が逆向きであることから、逃げ面の残留応力は、切削による圧縮応力負荷時の塑性変形により、切削後に現れたスプリングバックによる引張応力であると推察された。また残留磁束ベクトルは、残留する引張応力による非履歴磁化の発現によって生じる逆磁歪効果であると考えられた。また図 10(a) に現れた曲線状の特徴ある磁束分布は、切削加工の際、工具中腹部に塑性変形が集中したものと推測された。切削後の残留応力による自発磁化の様子を図 11(b) に示す。

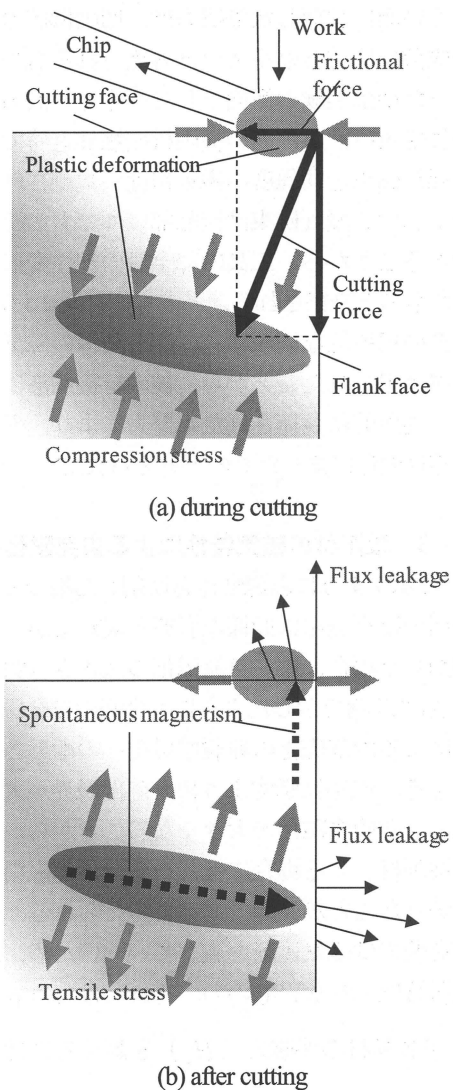


Fig. 11 Schematic figure of cutting resistance, stress and leaked magnetic flux vectors (a) during, and (b) after cutting

一方、切削時のすくい面においては、刃先先端部で直に切りくずと接触するために、すくい面表面に摩擦力が集中する。これにより、刃先先端部では、すくい面に対して平行方向に圧縮応力が生じると考えられる。切削抵抗時に圧縮応力を受けた工具の刃先先端領域は塑性変形し、加工後、周囲の弾性変形（スプリングバック）により、逆の引張方向の残留応力が生じるものと考えられる。図11(b)に示すように、切削後の工具のCo バインダーには、すくい面に平行に引張応力が残留することにより、逆磁歪効果により、すくい面垂直方向に磁束ベクトルが向いたものと考えられる。

すくい面に負荷した摩擦力は、切削抵抗の主分力方向成分に比べると小さいと考えられるものの、今回行った切削実験の傾向として、すくい面刃先先端の漏れ磁束は、逃げ面の被削材接触部近傍で測定された漏れ磁束と同程度の磁束密度が観測された。逃げ面における漏れ磁束は接触部以外でも広範囲に確認できることから、工具内部全般の塑性変形により生じたものと推察される。一方すくい面においては、先端部の局所的な領域に逃げ面と同等の磁気弾性エネルギーが得られたことから、被削材接触部においてのみ、局所的に負荷された摩擦力により、刃先先端部が塑性変形に達したものと考えられた。

5・3 被削材の磁気特性による自発磁化の変化

図8に示すように非磁性体を切削した場合でも、工具表面の磁束分布に同様な影響が表れるが、磁性体を切削した場合に比べ自発磁化の大きさは弱かった。

2節の理論で示したように、今回の自発磁化は、応力による内部磁化の非履歴磁化への漸近として理解できる。式(4)に示すように、外部磁界が大きくなるほど、非履歴磁化が大きくなることから、非磁性材を被削材とする場合には、十分な外部磁場が得られなかったことが原因であると考えられる。今回の切削実験では磁気遮蔽を施していないため、地球磁場の影響は免れないものの、それだけでは有効磁場 H_{eff} が各具材の保磁力 (H_c) を越えるには十分でなかったものと考えられる。一方、S45C等の強磁性材料を切削した場合は、被削材そのものが持つ内部

磁化が工具に対する外部磁界として働き、 H_c を越えるだけの H_{eff} が与えられたものと考えられた。

今回、他の組成の超硬工具でも、切削後の自発磁化の測定を試みたが、工具によっては強切削条件でも磁化が発現しない例が見受けられた。非磁性体の切削を始め、これらの例が示す様な自発磁化分布が僅かにしか見られない場合については、外部から積極的に磁場を印加することで、応力分布に対応する自発磁化の発現が起こる可能性があり、応用の観点からも今後の研究に期待したい。

6. 結 言

本研究により超硬工具の切削後に生じる自発磁化測定を行ったところ、以下のことが明らかになった。

1. 消磁した超硬工具刃面には、切削加工後に自発磁化が生じる。この自発磁化は一定の閾値後に応力に比例して増加する傾向が観察された。
2. この磁化の要因は主として切削後の残留応力負荷下で磁化が非履歴磁化に漸近する逆磁歪効果によるものとして、負荷応力による磁化の増加が説明された。
3. 自発磁化における応力の閾値は、工具の材質によって大きく変化した。小さい切削抵抗では磁気弾性エネルギーが保磁力による磁場エネルギーを越えることができないことから、応力の閾値は保磁力と密接に関係することが示唆された。
4. 応力による自発磁化の増加率は、ピン止めされた磁壁の外力による解放率に相当し、保磁力と密接に関係するが、具体的な残留応力値を推定するには至らなかった。
5. 超硬工具表面で測定された漏れ磁束は、逃げ面では主として切削時の主応力によって生じた圧縮応力の、またすくい面では被削材との摩擦力による圧縮応力のスプリングバックによって発生した引張応力による逆磁歪効果であると推察された。
6. 大きな切削抵抗を負荷した場合、すくい面工具中腹部に曲線状の特徴ある磁束分布が観察され、これはCo バインダーの塑性変形が集中

した領域であると推測された。

以上の結果から、切削加工後の超硬工具加工面の漏れ磁束分布測定から工具内部の残留応力分布の評価が可能であることが推察された。

Free Energy Model for Hysteresis in Magnetostrictive Transducers, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 1, pp. 458-466, (2003).

(10) Lacheisserie, E.T., *Magnetostriction*, p. 141, CRC Press, (1993).

文 献

- (1) Usui, E., *Modern Machining Theory* (in Japanese), pp.14-78, Kyoritsu Syuppan, (1990).
- (2) Usui, E., Kitagawa T., Maekawa, K., Obikawa, T. and Shirakashi T., Study on Analytical Prediction of Cutting Tool Life, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 48, No. 9, pp. 1231-1237, (1982).
- (3) Inoue, Y., Amemiya T. and Kashiwaya K., Evaluation of X-ray Residual Stress in High-Speed Heavy Cut Surfaces Using Machining Center, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 49, No. 9, pp.963-969, (2000).
- (4) Yamasaki, T., Ikeda, M. and Fukuoka H., Stress Dependence of An hysteretic Permeability and Its Application to Nondestructive Residual Stress Measurement, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 60, No. 571, pp.777-783, (1994).
- (5) Jiles, D.C., Review of Magnetic Methods for Nondestructive Evaluation, *NDT International*, Vol. 21, No. 5, pp.311-319, (1988).
- (6) Hase, H., Kotake, S., Ohota, M., Kawakami, H., and Suzuki, Y., Evaluation of Fracture Surface of 11/4Cr-1/2Mo Steel by Residual Magnetization Induced from Inverse-Magnetostrictive Effect, *Key Engineering Materials*, Vol. 340-341, pp.549-554, (2007).
- (7) Pitman, K.C., The Influence of Stress on Ferromagnetic Hysteresis, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, pp. 1978-1980, (1990).
- (8) Jiles, D.C., Theory of the Magnetomechanical Effect, *Journal of Physics D*, Vol. 28, pp. 1537-1546, (1995).
- (9) Smith, R.C., Dapino, M.J. and Seelecke, S.,

(日本機械学会論文集 C 編, 76, pp.438-445, (2010) 掲載)