

CCM 合金切削加工時における工具損傷機構

中央大学 ○山賀恭介, 石川広希, 伊津井裕人, 高橋幸男, 宋 小奇, ◎井原 透

要 旨

コバルトクロムモリブデン (CCM) 合金は耐摩耗性, 耐腐食性, 生体適合性に優れており医療デバイスへの応用が期待されている材料である. CCM 合金は高い加工硬化性と低熱伝導率であるがために工具損傷が生じやすい難削材に分類される. しかし, 具体的な切削特性に関する研究の報告事例は少ない. そこで本研究では, CCM 合金切削加工時における工具応力分布が工具損傷に及ぼす影響について着目し, 損傷機構について調査したので報告する.

1. 背景, 目的

近年, 日本の高齢者人口の増加に伴い, 関節の疫病患者が増加しており, この治療法の一つに人工関節の置換手術インプラントがある. コバルトクロムモリブデン合金(CCM 合金)は耐摩耗性, 耐腐食性に優れ, 生体適合性も高いことから, 人工関節の部品としての使用が増加している. 加工硬化性の高さ¹⁾と低熱伝導率であるがために, 工具が損傷しやすく, 切削加工においては高精度な加工が困難である. これらの理由により CCM 合金は難削材に分類される. しかしながら, 新素材のため具体的な切削特性に関する研究の報告事例は少ないのが現状である.

一般的に, 切削加工時に工具に掛かる負荷応力が工具材の強度を上回ると工具が損傷するとされている²⁾. また刃先後退が発生すると応力や切削温度に影響を及ぼすことから, 工具の刃先後退を調べることは, 工具損傷機構を把握する上で極めて重要である.

そこで本研究では CCM 合金切削時加工時の工具損傷過程について把握することを目的とし, 切削加工時に工具に掛かる垂直応力がすくい面深さ方向の刃先後退量に及ぼす影響に着目し, 損傷機構について調査した.

2. 切削加工時における工具に掛かる垂直応力の算出

CCM 合金切削加工時における垂直応力が刃先後退に及ぼす影響について調べるにあたって, 切れ刃稜と切りくず流出方向への影響に着目し, 工具に掛かる垂直応力を次のような方法で算出した.

切削加工時に発生する主分力を工具すくい面に加わる垂直荷重とみなし, 垂直応力との関係を式(1)とした³⁾. 図1に示すように切れ刃稜の切りくず接触境界の2点を結んだ直線を等分割し, その直線とある区間での切りくず接触長さ, 切れ刃稜の垂直応力の積を $1+\xi$ で割った値がその区間に加わる垂直荷重となる. また切りくず流出方向の垂直応力は式(2)に示すように切れ刃稜で最大となり, 切れ刃稜から距離が離れるほど小さくなり, 切りくず離脱点で0となる. 切れ刃稜の垂直応力は式(3)に示すように主切れ刃の切りくず接触境界からノーズ円との境界まで一定とみなし, ノーズ円との境界から垂直応力の最大位置までと, 垂直応力の最大位置からノーズ円の切りくず接触境界までをそれぞれ二次関数の近似式を用いた²⁾. なお, 定数 a はノーズ部分における切削加工時の被削材との初期接触面積とノーズがない場合の面積の比から, y_M は切りくず流出角よりそれぞれ算出した.

$$F_c = \sum_{i=1}^n \sigma_{E(i)} l_i \frac{w}{1+\xi} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sigma_{E(i)} \left(1 - \frac{l_i}{l_i}\right)^\xi \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{E(i)} &= \sigma_0 & (y_0 \geq y \geq r) \\ \sigma_{E(i)} &= \sigma_0 + a(y-r)^2 & (r \geq y \geq y_M) \\ \sigma_{E(i)} &= \sigma_0 + a(-y+2y_M-r)^2 & (y_M \geq y \geq y_e) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なお, F_c は主分力, σ_i はある区間での切れ刃稜の垂直応力の平均, l_i はある区間での切りくず接触長さの平均, w は1区間あたり

の測定幅, ξ は応力分布係数, $\sigma_{E(i)}$ は切れ刃稜の垂直応力, l は切れ刃稜からの距離, σ_0 は主切れ刃の垂直応力, r はノーズ半径, y_0 は主切れ刃の切りくず接触境界の y 座標, a は定数, y_M は垂直応力が最大の位置の y 座標, y_e はノーズの切りくず接触境界の y 座標である. 本研究では $\xi=3$ を採用した⁴⁾.

3. 被削材及び実験方法

工具に掛かる垂直応力の大きさを確認するため, 表1に示す切削条件のもと複合加工機(オークマ製, MULTUS B200)を用いて連続切削を行った. 被削材は直径 45mm を有する Co-28Cr-6Mo (CCM, ASTM F1537 Alloy2)で, 化学成分を表2に, 材料特性を表3にそれぞれ示す. 工具は耐摩耗性, 耐熱性に優れている TiAlN と TiCrN を成膜した PVD コーティング超硬工具を用いた. 切削抵抗は切削動力計(Kistler 製, 9129AA)を用いてオンライン測定した.

工具損傷の評価は切削後の工具表面を SEM(FEI 製, Quanta250)で観察し, 共焦点レーザー顕微鏡(OLYMPUS 製, OLS-4100)を用いてすくい面深さ方向の後退量を測定した. ただし, 測定値は切削に関与していない部分を基準として凝着物を含めたものである. 図2に刃先後退の模式図と切削後の工具切れ刃の様相を示す. 測定は図3に示すように切れ刃稜を等間隔な 10 箇所とその測定箇所から切りくず流出方向に 20 μ m ずつ移動させて行った. なお再現性を取るために3回切削と計測を実施した.

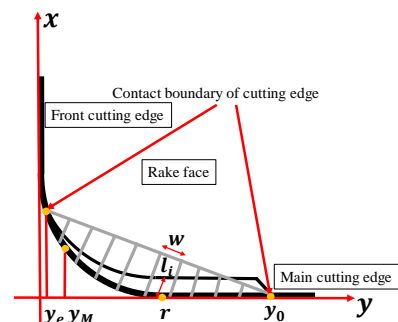


Fig. 1 Tool model for measuring positions

Table1 Cutting conditions

Work material	Co-28Cr-6Mo
Tool material	PVD Coated cemented carbide
Tool dimension	SNMN120408
Rake angle α [deg]	-8.5
Clearance angle β [deg]	-6
Cutting speed V [m/min]	30
Feed f [mm/rev]	0.05
Depth of cut ap [mm]	1
Cutting time [s]	60
Lubrication	Dry

Table2 Chemical composition

	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	Ni	N	C	Co
%	28.1	5.98	0.56	0.61	<0.1	<0.01	0.166	0.045	Bal

Table3 Material properties

Tensile strength [MPa]	Yield point [MPa]	Hardness [HV]	Thermal conductivity W/(m · K)
~1643	~1197	~530	12.6

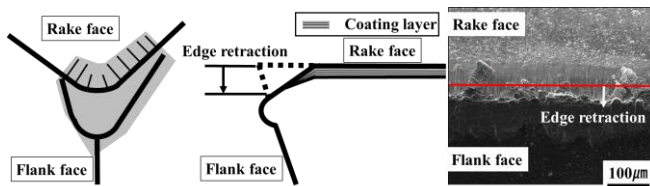


Fig. 2 Model of edge retraction and SEM image of tool cutting edge



Fig. 3 Measured positions on the rake face

4. 実験・計算結果及び考察

4.1 切れ刃稜の垂直応力と刃先後退量

図4に各測定位置からの切りくず接触長さ、図5に切れ刃稜の垂直応力とすくい面深さ方向の刃先後退量のグラフをそれぞれ示す。ノーズ円部分では主切れ刃に比べ切りくず接触長さが短く、主切れ刃ではほぼ一定となった。垂直応力はノーズ円部分である測定位置2近傍で最大(約9.4GPa)となり、主切れ刃においては約3.9GPaとなった。刃先後退量は主切れ刃の切れ刃稜ではほぼ一定であるが、ノーズ円部分で垂直応力が極めて大きいにもかかわらず、主切れ刃よりも小さくなっていった。

表4にコーティングのナノインデーション硬さ⁵⁾、室温における超硬工具の圧縮強度²⁾をそれぞれ示す。ノーズ円部の切れ刃稜においては、超硬工具の圧縮強度を大きく上回っているため、工具の母材が脆性破壊したと考えられる。

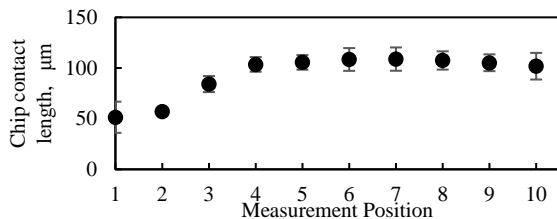


Fig. 4 Chip contact length at each measuring position

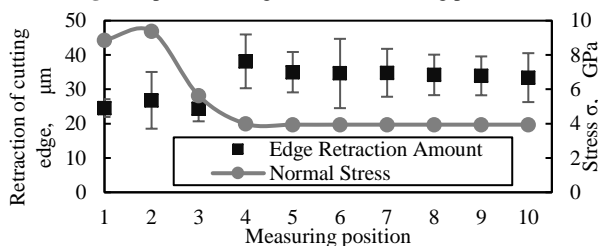


Fig. 5 Measured the retraction of cutting edge and predicted normal stress σ at each measuring position ($\xi=3$, $y_0=2.05$, $y_M=0.312$, $y_e=0.140$)

Table 4 Compression strength of PVD coating and cemented carbide

PVD coating	K10
56GPa	4.8GPa

4.2 切りくず流出方向の垂直応力と後退量

図6にノーズ部分である測定位置2と主切れ刃部分である測定位置4, 9から、切りくず流出方向における垂直応力、図7に後退量のグラフをそれぞれ示す。図6, 7に示したように垂直応力及び後退量は、いずれの測定位置でも切れ刃稜で最大となり、切れ刃

稜からの距離が20 μ mまでは、垂直応力の減少に伴って後退量も減少するが、40~60 μ mの位置では垂直応力が減少しているにもかかわらず、後退量が大きくなる傾向が認められた。なお、切りくず離脱点付近では垂直応力及び後退量がほぼ0となっていた。それぞれの測定位置の垂直応力、後退量を比較すると測定位置4, 9は垂直応力、後退量ともに同様な傾向を示すが、測定位置2では他の測定位置と比べて極端に垂直応力が低下し、また全体的に垂直応力に対して後退量が小さくなる傾向が認められた。

切りくず離脱点付近で後退量がほぼ0になったのは、垂直応力がほぼ0になったからだと考えられ、前節の結果を踏まえると、主切れ刃での刃先後退は、垂直応力が主な原因だと考えられる。また40~60 μ mの位置で後退量が大きくなったのは、切りくずとの接触により工具面が高温域となることで⁶⁾、工具が熱軟化し、垂直応力が小さくても塑性変形が生じやすくなったことが原因と考えられる。なお、測定位置2において垂直応力に対して後退量が小さくなったのは、他の測定位置よりも工具面の温度が低かったことによるものと推測された。

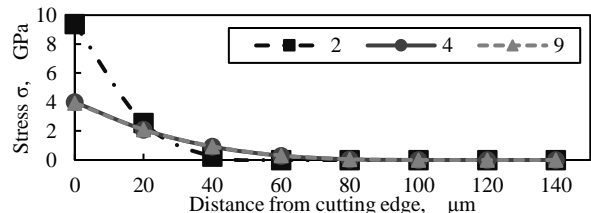


Fig. 6 Predicted normal stress σ in chips outflow direction at each measuring position 2, 4 and 9

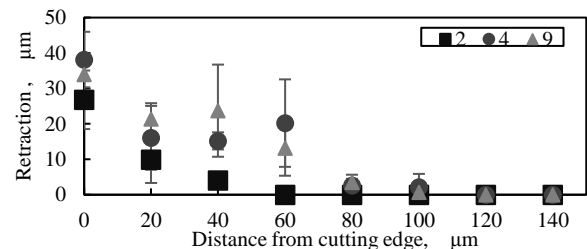


Fig. 7 Retraction of tool rake face in chips outflow direction from each measuring position 2, 4 and 9

5. 結言

- (1) ノーズ円の切れ刃稜に掛かる垂直応力は、工具の圧縮強度を大きく上回っていることが確認された。
- (2) 主切れ刃の切れ刃稜付近では垂直応力の減少に伴って後退量も減少するが、切りくず流出方向に40~60 μ mの位置では垂直応力が減少しているにもかかわらず、後退量が大きくなる傾向が認められた。

刃先後退はノーズ円の切れ刃稜では脆性破壊、主切れ刃では塑性変形が主な原因であると考えられ、また切削加工時の工具面の温度も影響を及ぼしていると考えられる。

参考文献

- 1)金枝ら:人工関節用 Co-Cr-Mo 合金加工面性状に影響を及ぼす切削現象の把握,日本機械工学会中国四国支部学術講演会 講演論文集,(2008),407., 2)白井,現代切削理論 コンピュータ解析と予測システム,共立出版,(1990)., 3)Bahi, S et al., Hybrid modeling of sliding-sticking zones at the tool-chip interface under dry machining and tool wear analysis, *Wear*, **286-287**, (2012), 45., 4)Xiaoqi SONG et al., Predicting periodic evolution of BUE formation mechanisms during machining ductile material using damage mechanics, *Mechanical Engineering Journal*, **3,6**(2016),15., 5)柴田ら: 難削材加工用新材種「エースコート AC510U/AC520U」の開発, *SEI テクニカルレビュー*, **173**,(2008),39., 6)白井ら: 切削温度分布の数値解析, *精密機械*, **38,6**(1972),510.