切削工具の境界損傷に及ぼす切削抵抗の影響*

——ニモニック 80 A の被削性 (第 1 報)——

升 田 雅 博** 鳥 居 正 司*** 中 嶋 博 樹†

The Influence of Cutting Force on Boundary Failure of Cutting Tool
—Machinability of Nimonic 80 A (1st Report)—

Masahiro MASUDA, Masashi TORII and Hiroki NAKAJIMA

It is well known that the tool life in machining nickel-based alloys depends mostly on the groove wear of the cutting tool. In this paper, the influence of cutting force distributions along a side cutting edge on boundary failure in cutting Nimonic 80 A is examined and is compared with these of stainless steel (SUS 304) and carbon steel (S 45 C). To measure cutting force distributions the tool dynamometer, which has two cutting edges and can measure separately the cutting forces on these is used. Cutting forces on the boundary regions of a side cutting edge are considerably large in cutting materials that the boundary failure arises. These results are discussed by observing the surface hardness and the cutting bur. Further, this paper presents some methods on decreasing the groove wear. The improvement of the rake face on boundary regions and the use of tool materials with high toughness are able to increase a tool life.

Key words: Nimonic 80 A, boundary failure, cutting forces, tool dynamometer, surface hardness, cutting bur

1. 緒 言

航空機産業、原子力産業の発展に伴い各種耐熱合金が出現している。これらは一般に加工硬化、高温強度、化学的活性が大きく、熱伝導率も小さいなど被削性の悪い材料であると言われている。また、耐熱合金の種類によっても適用できる工具材料が異なるなどその切削加工に苦慮している。ここで取り上げる Ni 基合金ニモニック 80 A (Ni 含有量 76%) もその一種で、船用エンジンの排気弁として用いられている。

耐熱合金の切削ではその特性から工具摩耗が迅速であるばかりか境界損傷が激しく、工具寿命はむしろ境界損傷によって決定されることが多い。境界損傷の原因は凝着による欠損が大きな比重を占め¹⁾、雰囲気の影響²⁾、工作物の塑性変形と切削バリ³⁾などによっても促進されると言われている。しかし、境界部にどの程度の切削抵抗が作用しているかを知ることは、境界損傷防止の一助になると思われるが、これまでほとんど論じられていない。

この目的から、横切れ刃に沿った切削抵抗の分布が測定できる分割切れ刃工具動力計⁴⁾を製作し、ニモニック 80 A、ステンレス鋼 (SUS 304)、炭素鋼 (S 45 C) などを切削した場合の境界損傷とその領域に作用する切削抵抗との関係について調べた。また、境界部における切削抵抗の増大について工作物硬度分布と切削バリ高さの観察から考察するとともに、ニモニック 80 A 切削時の工具材料と工具形状の選択についても若干触れた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 分割切れ刃工具動力計と切削抵抗の測定

横切れ刃に沿った切削抵抗の分布を調べるために、分割切れ刃工具動力計を製作した。図 1 に示すように前切れ刃側の第 1 切れ刃は工具動力計本体に、工作物外周側の第 2 切れ刃は八角リングを介して本体に取り付けられている。従って、第 1 切れ刃に作用する切削抵抗は動力計本体より得られる値から八角リングの影響を差し引くことにより、第 2 切れ刃に作用するそれは八角リングより別々に測定できる。なお第 2 切れ刃の送り分力の測定は八角リングの側面を利用している。両切れ刃が接触しないようにその間隔をすきまゲージを用いて約 30 μm に調整する。また、切りくず

* 原稿受付 昭和 61 年 12 月 27 日、昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和 61 年 3 月 29 日) にて発表

** 正 会 員 徳島大学工学部 (徳島市南常三島町 2-1)

*** 山陽特殊製鋼 (株) (姫路市飾磨区中島 3007)

† 学生会員 徳島大学大学院

Fig. 1 Schematic drawing of trial tool dynamometer

がこの間に入らないように両切れ刃が対向する面を約17°に研削し、さらに第2切れ刃を第1切れ刃より30~40 μm 高くしてある。これにより両切れ刃が接触することなく、工具すくい面側から見てすきまがない状態で切削可能である。

この工具動力計の荷重とひずみの関係において、主分力と送り分力の較正式は他の方向からの影響が小さく十分信頼できるものであった。しかし、背分力は採用した工具諸元、切削条件の下では非常に小さく、また較正式で他の方向の干渉が大きく信頼性に欠けたのでここでは考えない。

横切れ刃に沿った切削抵抗の分布を測定するために切込み深さ t を一定にして第1切れ刃(図1の L の部分)を少しずつ短くしながら実験を行った。工作物材料によって違いはあるが、 L が t の約1/2になると第1切れ刃の強度は低下して正常な切削ができなくなった。両切れ刃に作用する切削抵抗の合計は、 L の変化に対してあまり大きな変動はなかった。また、切りくずは $L/t \approx 0.75$ より小さな範囲で2つに分割されて流出したが、それらの幅を加えるとほぼ同じ値となった。従って、切れ刃長さを変化させても切削機構に大きな変動は無かったと判断できる。

2.2 工具摩耗, 工具寿命および硬度分布の測定

工具摩耗実験はニモニックについて行った。境界損傷が特に著しかったので、前、横逃げ面での平均摩耗、境界摩耗のうち最大摩耗幅を用いて寿命線図を作成した。その時の寿命判定基準は0.4 mmである。

横切れ刃に沿った工作物の硬度分布については、切

Table 1 Cutting conditions and tool geometry

a) Cutting force test

Work material	Nimonic 80 A	SUS 304, S 45 C
Cutting speed V m/min	25	95
Depth of cut t mm	2	2
Feed f mm/rev	0.075	0.056
Cutting fluid	dry	dry
Tool material	K 10	P 20
Tool geometry	(0, 8, 5, 5, 5, 0, 0)	(0, 0, 5, 5, 5, 0, 0)

b) Tool life test

Cutting speed V m/min	12-85
Depth of cut t mm	1
Feed f mm/rev	0.225
Cutting fluid	dry
Work material	Nimonic 80 A
Tool geometry	(-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.8)

削を途中で停止し、その部分を切り出し、マイクロビッカース硬度計(試験荷重 200 gf)で測定した。

2.3 実験条件と使用材料

工具寿命試験、切削抵抗測定実験の切削条件、工具諸元をそれぞれ表1 a), b)に示す。

実験で使用した工作物材料はすべて中実円筒で、ニモニック 80 A (硬度 275 HV, $\phi 120 \times 300$ mm) および比較用の炭素鋼 S 45 C (引抜きのまま、硬度 185 HV, $\phi 100 \times 150$ mm)、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 (硬度 218 HV, $\phi 100 \times 150$ mm) であった。ニモニックは1180°Cで8 h 保持後空冷、SUS 304 は1100°Cで1 h 保持後水冷の溶体化処理されている。

工具材料は超硬合金(K 10, P 20)、アルミナコート、白セラミック、黒セラミック、TiN 系サーメットおよび超微粒超硬合金(以下、UFGG と呼ぶ)であった。

実験は昌運カズヌーブ HB-500 旋盤で行った。

3. 実験結果

3.1 工具摩耗の形態

種々の工具でニモニックを旋削した際の工具摩耗の様子を図2に示す。どの工具においてもすくい面に剝離の痕跡が観察される。UFGG 以外では刃先部近傍の横逃げ面摩耗が進んでいないにもかかわらず境界部に大きな欠損が生じている。また前逃げ面の境界部においても小さな欠損が観察される。比較的寿命の長かった工具の横逃げ面の境界摩耗と平均摩耗進行との様子を図3に示す。UFGG 以外の工具では境界部欠損は切削開始とともに現れ、切削時間とともに成長し、これが横逃げ面最大摩耗となり寿命判定基準に達している。UFGG ではコーナ部と横切れ刃の交点付近から摩耗が始まり、ある程度進行したところで境界部に欠損

Fig. 2 Wear of various tool materials

Cutting conditions

$V=30$ m/min, $t=1$ mm, $f=0.225$ mm/rev, dry,

Tool geometry ; $(-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.8)$

Fig. 3 Relation between groove and flank wear rate in cutting Nimonic 80 A by various tool materials

Cutting conditions and tool geometry are same as in Fig. 2

が生じ他の工具とは摩耗形態が異なっている。これは一般に言われているように UFGG が他の工具よりじん性を有し耐熱性に劣る結果によると考えられる。

P 20, アルミナコート, UFGG などではすくい面や境界部に切りくずの凝着が観察された。これが脱落するときに工具材料も剝離することが予想され欠損を助長すると考えられる。

3.2 横切れ刃に沿った切削抵抗の分布

2.1 節で述べた工具動力計を用いて、第 1 切れ刃を短くしながら旋削を行った。第 1, 第 2 切れ刃に作用す

る切削抵抗の主分力成分 P , 送り分力成分 F を図 4 に示す。図において、横軸は第 1 切れ刃長さ L を切込み深さ t で割り無次元化している。当然のことながら、どの材料においても L の減少とともに第 1 切れ刃に作用する主分力、送り分力は減少し、第 2 切れ刃のそれらは増加する。SUS 304, S 45 C の切削では両切れ刃に作用する切削抵抗はほぼ中央 ($L/t \approx 0.5$) で等しくなり、その値は全切削抵抗の約半分である。ニモニックの切削では主分力、送り分力とも他の材料より大きくなり、その結果 L が小さくなると第 1 切れ刃が切込み方向に変位し測定値にばらつきが見られる。しかし、変化の傾向は他の材料と大差ない。

横切れ刃の境界部に作用する応力を知るためには、工具-切りくず

接触面積と切れ刃長さの変化量 ΔL に対する切削抵抗の変化量 (主分力 ΔP , 送り分力 ΔF) を知らなければならない。図 4 に見られるような切削抵抗のわずかなばらつきでも $\Delta P/\Delta L$, $\Delta F/\Delta L$ は大きく変化し、計算値の信頼性は欠ける。ここでは切削面積を計算するとき用いられる t の代わりに切りくず幅 b_c を用いて、 L を変化させた場合の各切れ刃に対する単位面積当たりの平均切削抵抗を計算した。すなわち、送り量を f とすれば、第 1 切れ刃からみた場合の基準面積は $b_c \leq L$ のとき Lf , $b_c > L$ のとき $b_c f$, 第 2 切れ刃では $b_c \geq L$ のみで $(b_c - L)f$ となる。単位面積として一般に切削面積や工具-切りくず接触面積が基準にとられるが、前述の単位面積を基準にしたのは、切りくずの side flow により切削抵抗が t を越えた領域まで作用すること、工具-切りくず接触面積が正確に求められないなどの理由による。この考えに基づいて計算した結果を図 5 に示す。

第 1 切れ刃からみた単位面積当たりの切削抵抗は横切れ刃に沿ってほぼ一定である。一方、第 2 切れ刃ではニモニック, SUS 304 において境界部付近に大きなピークを持ち、 L/t が約 0.8 以下で一定で第 1 切れ刃に作用する値とほぼ一致する。S 45 C ではピークは出現せず、 L/t が約 1 以下ではほぼ一定である。境界部において二つの切れ刃の傾向が異なっている理由は、第 1 切れ刃では L のわずかな変化に対して切削抵抗の変

Fig. 4 Cutting forces on the 1st and 2nd cutting edge for a decrease of 1st cutting edge length L

Cutting conditions

$V = 25$ m/min (Nimonic 80 A), 95 m/min (SUS 304, S 45 C), $t = 2$ mm, $f = 0.075$ mm/rev (Nimonic 80 A), 0.056 mm/rev (SUS 304, S 45 C), dry, Tool geometries; (0, 8, 5, 5, 5, 0, 0) Nimonic 80 A, (0, 0, 5, 5, 5, 0, 0) SUS 304, S 45 C

Fig. 5 Specific cutting forces on the 1st and 2nd cutting edge along side cutting edge
Cutting conditions and tool geometries are same as in Fig. 4

動率 $\Delta P/P$, $\Delta F/F$ が小さく、一方、第2切れ刃では無負荷状態から出発するためにそれらが大きくなる結果であると考えられる。さらに、切削抵抗波形の振動振幅の最小値、最大値の変化傾向と切りくず幅は、 L の変化に対してほぼ一定であったので、 L の変化による切りくず side flow への影響は小さかったと考えられる。従って、境界部付近の単位面積当たりの切削抵抗は第2切れ刃からみた状態が正確である。

SUS 304, ニモニックを旋削した場合、横切れ刃に沿った単位面積当たりの切削抵抗の分布は境界部が他の部分より相当大きい。しかし、これらの値は作用している力を正確に表していない。ここで、工具と切りくずの接触長さは切りくず厚さ t_c に等しく、接触領域

の応力分布は一定で、切りくず流出方向も分割切れ刃の角度 (図1の 17°) に等しいと仮定して、図5の主分力方向のピーク値を計算した。ただし、S 45 C の場合は $L/t=1$ の値を用いた。S 45 C と SUS 304 の値はそれぞれ約 0.9 GPa ($t_c=0.246$ mm) と約 1.2 GPa ($t_c=0.247$ mm) であり、ニモニックでは 8° のすくい角を付けているにもかかわらず約 2.0 GPa ($t_c=0.268$ mm) であった。これらの結果、ニモニックの切削の場合、境界付近の面圧が特に大きいために境界欠損を引き起こす原因の一つになっていると考えられる。

3.3 工作物硬度分布

切削抵抗の分布に対応させて横切れ刃に沿った工作物表面の硬度分布を測定した。その結果を図6に示す。

Fig. 6 Surface hardness distributions along side cutting edge
Cutting conditions are same as in Fig. 4 except of $f = 0.225$ mm/rev, Tool geometry; $(-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.8)$

図において右端の実線は加工前の工作物硬度である。S45Cでは熱処理が施されていないために加工前後の硬度差は小さく、さらに硬度分布は一定である。SUS304とニモニックではビッカース硬度でそれぞれ150~300, 150~550の増加が見られ、両材料とも工作物外周付近で特に大きくなり加工硬化が著しい。急激な硬度上昇は工作物外周から約0.4 mm (図5で $L/t \approx 0.8$) のところから始まり、切削抵抗の分布にはほぼ対応している。すなわち、境界部で切削抵抗が大きくなるのは工作物の硬度上昇によると判断できる。

3.4 工作物の切削バリ高さ

ニモニックはSUS304よりさらに加工硬化の激しい材料であり、工作物表面側において特に顕著である。この原因を調べるために工作物の切削バリ高さを電気式マイクロメータで測定した。その結果を図7に示す。切削バリ高さは工作物外周上の4点での測定値を単純平均した値である。同一形状の工具では、切削バリ高さはS45CよりSUS304、ニモニックが相当大きい。この結果、工作物表面層の塑性変形や切削バリの発生は境界部の硬度を増加させ切削抵抗を大きくしていると推察される。また切削バリは、その変動域を図7に示すように工作物全周にわたって様でないことから、切削抵抗を衝撃的に切れ刃境界部に加え、欠損を助長していると考えられる。

4. 境界損傷への対応

4.1 工具形状について

境界損傷を減少させるためには、工作物の塑性変形や切削バリの発生を少なくし、加工硬化をおさえ切削

Fig. 7 Relation between feed and height of bur
Cutting conditions and tool geometry are same as in Fig. 6

抵抗を減少させることが必要である。すなわち、境界部の切れ味を良好にする方法を講じることである。このため、すくい面に溝を有する工具で旋削を行った。その結果を図8に示す。図8(a)において溝型1は市販の工具(SNPR 432 M)、溝型2は図に示すような寸法、形状の溝を放電加工により横切れ刃境界部近傍に付けた工具である。UFGGについてはポッキー型(CNMG 432)を使用し平型と比較を行った(図8(b))。溝を付けることにより、すくい角を大きくした効果と切りくずが流出しやすくなった効果が切削抵抗を減少させ、工具寿命を延長させたと考えられる。しかし、溝型1と2の比較よりすくい面のランド幅 A が小さ過ぎるとその効果は少ない。これは刃先強度の不足によると考えられる。

4.2 工具材料について

工具材料として具備すべき主な条件としてじん性と高温硬度とがある。これら2点からニモニックの切削加工に適する工具材料を考える。

じん性を評価する因子の一つに抗折力がある。メーカーが公表している抗折力の値を用いて工具寿命を観察した。切削速度 30 m/min では図9に示すように、工具寿命は抗折力の増大とともに指数関数的に増大する。特に工具形状が溝型では平型よりさらに長い工具寿命を示している。そして、超合金 K10 (HRA 91; 硬度はメーカーのカatalogによる)、UFGG (HRA 92) より硬度の高い TiN 系サーメット (HRA 92.5)、セラミック (白 HRA 94, 黒 HRA 94.3) などでは、切削開始直後から境界部に大きな欠損が生じたために工具寿命は著しく短い。工具寿命が抗折力とともに長くなり、工具硬度にほとんど依存しなかった原因について考えるために P20 とニモニックとを熱電対にして切削温

Fig. 8 Comparison between groove type and plane type on tool life
Cutting conditions and tool geometry are same as in Fig. 2

Fig. 9 Relation between defective strength and tool life at cutting speed 30 m/min
Cutting conditions and tool geometry are same as in Fig. 2

度を測定した。切削速度 20 m/min で約 680°C, 32 m/min で約 770°C とかなり高温になっていたが、この程度の切削温度では硬度が極端に低下する状態ではない。この結果、工具材料の耐熱性に対する切削温度の影響より境界部の切削抵抗の増大に対する影響が大であったと判断できる。また、アルミナコートについても被覆によるじん性の低下⁵⁾が考えられ、同じように境界部に欠損が生じた(図 2, 図 3)。UFGG においてはその摩耗形態が他の工具とは異なっていたこと、図 8 (a), (b) から切削速度が大きくなると K 10 より工具寿命が短くなることなどは工具の耐熱性の不足が工具寿命を支配していたと考えられる。以上の結果、ニモニックを乾式切削する場合、低切削速度で工具は硬

度よりじん性から選択しなければならない。

5. 結 論

ニモニック 80 A の切削加工において SUS 304, S 45 C と比較しながら境界損傷について観察した。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) ニモニック 80 A の切削加工では SUS 304 よりも境界欠損が顕著である。
- (2) 境界損傷の原因の一つは、境界部における工作物の塑性変形、切削バリの発生による加工硬化のための切削抵抗の増大にあると考えられる。
- (3) 境界損傷を減少させる方法は、境界部の切れ味を良くするような工具設計を行うこと、低切削速度でじん性の大きな工具材料を使用することである。

参 考 文 献

- 1) 竹山秀彦, 飯島 昇, 山本幸弘: 切削工具の凝着欠損に及ぼす工具表面仕上法の影響, 精密工学会誌, **52**, 2 (1986) 279.
- 2) 例えば, 山根八洲男, 鳴瀧則彦: 正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気の影響 (第 1 報), 精密機械, **49**, 4 (1983) 521.
- 3) 例えば, 新井 実, 中山一雄: バリによる境界損傷の増大とその抑制, 精密工学会誌, **52**, 5 (1986) 864.
- 4) Y. Chujo, T. Hara, M. Masuda, S. Q. Huang: Cutting Forces and Chip Control by Using Obstruction-type Chip Breaker, Bull. JSPE, **20**, 2, (1986) 123.
- 5) 例えば, 林 宏爾, 鈴木 寿, 土井良彦: CVD 法によって TiC と Al₂O₃ を複層被覆した超硬合金の被膜組織と抗折力, 粉体および粉末冶金, **32**, 2 (1985) 61.