合金鋼 SNCM 8 (熱処理) の超硬正面フライス削り

— 超硬フライス削りに関する研究 (第2報) —

竹 山 秀 彦* 山 田 皓 一* 草 岡 則 行**

Study on Face Milling of Hardened Alloy Steel
— Study on Carbide Milling (Part 2) —

Hidehiko TAKEYAMA, Akihito YAMADA, Noriyuki KUSAKA

The required conditions for face milling with sintered carbide blades are extremely critical, this being especially so with the case where a hardened alloy steel is machined. This is the reason why the machining standards for face milling is difficult to be established. In order to overcome this, the methodological investigation for the test procedure is essential.

Important factors to govern the tool life such as carbide grade, tool shape, depth of cut, feed, speed, engage angle, shock number, path ratio, etc. have been investigated experimentally.

1. 緒 言

フライス削りに関する作業標準設定に関する一連の研究のうち合金鋼 SNCM8 (熱処理状態) の超硬正面フライス削りの場合について述べる。

超硬正面フライス削りの条件は微妙である。ゆえに切削作業標準を設定するまでには方法論的吟味が必要であつて、ここに述べるのは工具寿命からみた切削標準設定までの経過である。

2. 実験方法

本実験の主な項目はつぎの通りである。

- (1) 最適超硬材種選択に関する試験
- (2) 最適刃部形状選択に関する試験
- (3) 切込みの効果に関する試験
- (4) 送りの効果に関する試験
- (5) エンゲージアングルの影響に関する試験
- (6) 切削行程比に関する試験

上記各試験は単一ブレードを用いて、工具のフランク摩耗およびすくい面摩耗を追跡し、工具寿命の立場から種々の検討を行なつた。以下に切削諸元をあげる。

使用機械：強力たてフライス盤 (3 番)

カッタ径：8 インチ (切削行程比試験では可変)

工具チップグレード：P30, P25, P20

刃部形状：アクシヤルレークアングル = -10° (刃部

形状選択試験の場合は可変), ラジアルレークアングル = -5° (同前), 前切れ刃角 = 15° , コーナアングル = 15° , 逃げ角 = 7° , チャンファ = 1 mmR

図 1 ブレード諸角名称

Re = 逃げ角 C = コーナアングル
Cn = 前切れ刃角 Ca = チャンファ
A = アクシヤルレークアングル
R = ラジアルレークアングル

(図 1 参照)。

被削材：ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM8), 焼入れ焼戻し状態, 化学成分表および機械試験結果をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。

切込み：主として 1.5mm

* 工業技術院機械試験所 正会員

** 工業技術院機械試験所

表 1 被削材 (SNCM8) の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	Cu
規 格	0.36 0.43	0.15 0.35	0.60 0.90	<0.30	<0.03	0.60 1.00	1.60 2.00		0.15 0.30	<0.35
分 析 結 果	0.38	0.30	0.73	0.14	0.11	0.74	1.82		0.21	0.16

表 2 被削材 (SNCM8) の焼入れ焼戻し後の機械的性質

	降伏点 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸び%	絞り%	シャルピー値 kgm/cm ²	硬度 H _B
規 格	>90	>100	>16	>45	>7	293 352
試 験 結 果	107.0	111.5	18.6	57.0	11.8	341

送り：主として 0.2mm/tooth

エンゲージアングル：主として 10°

被削材幅：主として 115mm

3. 実験結果

3.1 工具損傷の特徴

本被削材は焼鈍した炭素鋼などに比し、切りくず生成からみた被削性が良好である。すなわちせん断角は大きく（したがって切りくずは薄い）、またすくい面と切りくずとの接触長さが短い。その結果図 2 からわかるように、切れ刃稜に接近して大きい曲率の、しかもかなり深いすくい面摩耗が発達する。この結果フランク摩耗が大体 0.4mm 程度になる時分にはすくい面摩耗のためにチップングを起こすようになる。

図 2 切れ刃稜に接近した摩耗の一例

被削材 = SNCM8, 1 刃当たり = 0.2mm/tooth, 切込み = 1.5mm
 切削速度 = 90m/min, アクシヤルレークアングル = 5°, ラジアルレークアングル = -10°, エンゲージアングル = 15°

本被削材のように、強靱な熱処理合金鋼はせん断強度ないし変形抵抗が大きく、その意味で刃先のチップングを起こしやすいことは考えられるが、刃先温度が高くまた延性も比較的小さいこともあつていわゆる構成刃先や溶着のトラブルは普通鋼の場合に比べると少ない。このことはせめてものなぐさめであるが、力学および熱的衝撃が大きいために工具刃面に亀裂を生じやすいのはたしかにトラブルである。

3.2 最適超硬材種の選択

本被削材の正面フライス削りに使用可能と考えられる超硬グレードは P30, P25 および P20 程度である。いま被削材幅 115mm, 切込み 1.5mm, 送り 0.2mm/tooth, 切削速度 90, 130 および 198m/min, ラジアルレークアングル -10°, アクシヤルレークアングル -10° のもと

で切削時間とフランク摩耗幅の関係を求めて超硬材種の適応性を検討した。図 3 は切削速度 130m/min のときの上記 3 種の超硬グレードに対するフランク摩耗経過曲線である。いずれのグレードに対してもフランク摩耗幅が 0.4mm 程度以上になるとすくい面摩耗によるチップングを起こすか摩耗速度が加速度的に増大する。したがってフランク摩耗寿命判定基準は 0.4mm 以上にとらないようにすべきである。

上記のようにいずれのグレードでもフランク摩耗幅で約 0.4mm 以上が許せないとすれば、その摩耗幅に達するまでの切削容積の多いグレードを選ぶのが得策である。この意味から P20 が最適であるとした。

3.3 最適刃部形状の選択

3.2 で選出した最適超硬グレード P20 を

図3 各種超硬グレードに対するフランク摩耗経過曲線

切削速度=130 m/min, エンゲージアングル=+15°, 1刃当たりの送り=0.2 mm/tooth, アクシヤルレークアングル=+5°, 切込み=1.5 mm, ラジアルレークアングル=-10°, 被削材および幅=SNCM 8, 115 mm, カッタ径=8"

用い, 切込み 1.5 mm, 送り 0.2 mm/tooth, 切削速度 142 m/min, エンゲージアングル 15° のもとでアクシヤルレークとラジアルレークアングルを広く変化せしめて工具摩耗を追跡し, 工具寿命の立場から最適レークアングルの組合わせを求めた。

図4はその結果で, 縦軸にはフランク摩耗からみた工具寿命 (寿命判定基準は平均幅 V_B 0.4 mm とした), およびチッピングを起こしたときのフランク摩耗幅をとつてある。フランク摩耗幅が大きくなるまでチッピングを起こさないということは結局チッピングを起こしにくいレークアングルの組合わせということになる。図4から

図4 すくい角の寿命への影響

被削材および幅=SNCM 8, 115 mm, 切削速度=142 m/min, 切込み=1.5 mm, 送り=0.2 mm/tooth, 超硬グレード=P20, エンゲージアングル=+15°, カッタ径=8"

もうなづけるように, 一見連続的と見られる工具摩耗からみた寿命と耐チッピング性とがほぼ平行的であるということは, 前報¹⁾でも指摘したように, 断続切削における工具の摩耗は, 一見それが連続的な摩耗のごとく見えても実は細かいチッピングの連続とみなしうるか, 少なくとも工具材の脆性破壊が摩耗と深い関係にあり, 耐チッピング性のすぐれたものは工具摩耗からみた寿命も長いということがいえよう。

上述の見地から, 最適のレークアングルの組合わせはアクシヤルレークが約-10°, ラジアルレークが約-5°である。要するに上記の値より大きいレークアングルではチッピングの危険性が増し, 一方小さい値では切削抵

図5 切込みと寿命との関係

被削材および幅=SNCM 8, 115 mm, 送り=0.2 mm/tooth, 切削速度=80 m/min, ラジアルレークアングル=-5°, アクシヤルレークアングル=-10°, エンゲージアングル=+15°, カッタ径=8"

抗の増大, 温度の上昇従つて熱および力学的衝撃の増加のためかえつて悪くなる。

3.4 切込みの影響

超硬グレード P20, ラジアルレーク-5°, アクシヤルレーク-10°, エンゲージアングル 15°, 送り 0.2 mm/tooth のもとで切込みを種々変化せしめた場合の寿命曲線を求め, 切削速度 80 m/min のときの寿命と切込みとの関係を示すと図5のようになる。この結果からすると, 切込みが大きくなると若干寿命が低下し, 一方切込みが非常に小さくてもよくない。結局切込みが約 1.5 mm において寿命が最大になる。切込みが小さい場合寿命がかえつて低下するのは切削方向 (接線方向) および軸方向の比切削抵抗が急増することが大きな原因となつている²⁾。

3.5 送りの影響

図6は超硬グレード P20, アクシヤルレーク-10°, ラジアルレーク-5°, エンゲージアングル+15°, 被

図6 各種送りに対する寿命曲線

被削材および幅=SNCM 8, 115 mm, 送り=0.2 mm/tooth, 切込み=1.5 mm, ラジアルレークアングル=-5°, アクシヤルレークアングル=-10°, エンゲージアングル=-10°, カッタ径=8"

削材幅 115 mm, フランク摩耗寿命判定基準 0.4 mm のもとで, 送りを種々変化した場合の寿命曲線を示したものである。いまこれを送りと 60 分寿命切削速度との関係で示すと図 7 のようになる。これを旋削の場合と比較するに, フライス削りにおいては送りの影響がいかに小さいかがわかる。

図7 送りと 60 分寿命切削速度との関係
条件は図 6 と同じ

一方, 送りのチッピングにおよぼす影響は非常に重要な問題である。すなわち, 送りが大きすぎると(たとえば 0.4 mm/tooth のごとく) 超硬チップに加わる荷重が大きくなって大きくチッピングを起こすし, また送りが非常に小さくなると, 3.4 で述べた切込みの場合と似た寸法効果のほかに, 刃先への溶着ないし切りくず付着によってチッピングを起こす。刃先溶着とか構成刃先は刃先温度と深い関係があり, それらが発達するには刃先温度はある程度以下に保たれていなければならない。そこで送りがある程度以下に小さくなると刃先温度が低下して溶着ないし構成刃先, あるいは切りくず付着が起りやすくなって, それらを切れ刃に付けたまま被削材に突入するさい過大な抵抗が切れ刃に加わってチッピングを起こすと考えられる。しかしながら, 本被削材では焼鈍した炭素鋼などに比しかなり溶着性に乏しいので下方送り限界の制限はずつとゆるやかである(焼鈍炭素鋼の場合の下方送り限界は大体 0.05 mm/tooth であるのに反し,

本被削材では大体 0.02 mm/tooth である)。

超硬フライス削りで一番警戒すべきことはチッピングをいかに抑制するかということであるが, 切削条件のうちでチッピングと深い関係にある切削速度と送りをいかなる範囲で行なえばチッピングに対して安全かを示すと図 8 のようになる。ただしこの場合の超硬グレードは P 20, アクシヤルレーク -10°, ラジアルレーク -5°, 切込み 1.5 mm, 被削材幅 115 mm, カッタ径は 8" である。図中○印はチッピングを起こさずにそれ相応

図8 安全切削領域
条件は図 6 と同じ

の寿命を全うした場合を(寿命判定基準はフランク摩耗幅で 0.4 mm), ×印はかなりはつきりしたチッピングを起こした場合で, ・印は著しいチッピングを起こす場合を示す。

送りが非常に小さくなれば前述の種々の原因でチッピングを起こしやすくなり, 過大になれば大規模なチッピングをきたす。しかも切削速度が増加すれば機械的にしる熱的にしるとにかく衝撃的応力が大きくなってチッピングをより起こしやすくなると考えられる。かくて実線の下側は安全な領域を上側は危険領域を示すことになる。

比較的溶着性に富む炭素鋼の場合には横軸にほぼ平行な下方速度限界線が存在したが, 本被削材は比較的溶着性に乏しいので, 本実験範囲ではその存在は確認されず, 全体として限界線に挟まれる安全領域がずつと広くなっている。この意味では本被削材は比較的扱いやすい材料といえよう。

3.6 エンゲージアングルの影響

エンゲージアングルが正で大きな値をとると, 切れ刃のチッピングを起こしやすくなることは炭素鋼の場合と同様であるが, その理由はすでに前報で述べたのでここでは省略する。ただ炭素鋼の場合と異なるのは, 図 9 でみるようにエンゲージアングルが 0° 以下になると却って寿命が短くなるような傾向を示すことであるが, この

図 9 エンゲージアングルと寿命との関係
被削材および幅＝合金鋼 (SNCM 8) 65 mm,
カッタ径＝8", 切削速度＝142 m/min, 送り＝
0.2 mm/tooth, 切込み＝1.5 mm, ラジアルレ
ークアングル＝ -5° , アクシヤルレークア
ングル＝ -10°

理由は必ずしも判然としない。

3.7 被削材幅および行程比の影響

カッタ径が同一の場合、被削材幅が減少するとチッピングの傾向が増してくることは前報¹⁾でも報告し、また奥島、星³⁾および篠崎⁴⁾の実験でも指摘されている。図 10 は合金鋼 (SNCM 8) を 8 インチのカッタで超硬

図 10 被削材幅によるフランク摩耗経過曲線の相違

被削材＝合金鋼 (SNCM 8), カッタ径＝8",
切削速度＝142 m/min, 送り＝0.2 mm/tooth,
切込み＝1.5 mm, エンゲージアングル＝ 10° ,
ラジアルレークアングル＝ -5° , アクシヤルレ
ークアングル＝ -10°

正面フライス削りした場合、被削材幅 (B) によつてブレードのフランク摩耗が正味切削時間に対して変化する模様を示したものである。同図において上向き矢印はチッピングを示しているが、ここでも明らかに被削材幅の狭いほど早期にチッピングを起こす。見掛けは被削材幅

により寿命が変化するというのであるが、その内容は簡単でなく、原因として以下に述べるようなことが考えられる。

(a) 衝撃の回数

図 10 の結果を、フランク摩耗幅が 0.4 mm に達するまでの衝撃回数とそれまでの寿命の関係としてプロットすると図 11 のようになる。同図においてチッピングを起こさない上のグループにおいては、衝撃回数の少ないほど寿命が長いという前報¹⁾の結果と同一傾向を示すが常にチッピングを起こす下のグループでは衝撃回数の多いほど寿命が長い (チッピングを起こしにくい) という逆の結果になっている。このことは、摩耗速度はある程

図 11 衝撃回数と寿命の関係

被削材＝SNCM 8, グレード＝P 20, アクシヤルレーク＝ -10° , ラジアルレーク＝ -5° , エンゲージアングル＝ 10° , 切込み＝1.5 mm, 送り＝0.2 mm/tooth, 切削速度＝142 m/min, 被削材幅＝可変

図 12 被削材幅と寿命の関係

被削材＝SNCM 8, グレード＝P 20, アクシヤルレーク＝ -10° , ラジアルレーク＝ -5° , 切込み＝1.5 mm, 送り＝0.2 mm/tooth, 切削速度＝142 m/min

度衝撃回数の影響をうけるが、いま問題にしているチップリングはそれ以前の要素によつて支配されていることが考えられる。

(b) 切れ刃が被削材から離れるときの切りくず生成エンゲージアングルを一定に保ち、被削材幅を変化する場合に当然切れ刃が切削過程を終えて被削材を離脱するさいの切りくず生成が異なっているはずである。すなわち被削材幅が狭い場合は、この時期における切りくずは厚く、したがつて切れ刃への被削材溶着の規模も大きいことが考えられる。

そこで図 12 左上に示すように、カッタの切り終り点が常に被削材内にあり、しかもその点における切りくず生成の条件を同一にしたながら切削幅 B を変化せしめる（このさい当然エンゲージアングルも変化するが）という試験を行なつた。この結果が同図破線で示してある。この結果よりすれば、幅 B が広いところでは前記の試験の値とほとんど変化ないが、 B の狭いところでは多少寿命ないしチップリングの程度が改善される。これは B が小さくなるにつれエンゲージアングルが減少するための寿命向上と考えられよう。しかし基本的には決してチップリングに対する解決策とはなつておらず、いわば補助的作用にすぎない。換言すればチップリングの根本的原因は他にあると見なければならぬ。

(c) 切りくず付着

被削材幅が変化することにより、切りくずの刃面付着の程度が変化してチップリングを左右することもありうるであろう。いま図 12 に示すように、切れ刃が被削材を出る直後に木材をおき、これによつて切りくずが脱落した状態で新たに被削材に突入する

ようにして得た結果が同図点線で示してある。条件は全て実線の場合と同様であるが、やはり被削材幅の狭い場合には完全にチップリングを起こしてなら改善の跡が見られない。結局切りくず付着は

図 13 すくい面摩耗断面形状の比較

このさいのチップリングの直接的原因とはなつていないことになる。

(d) すくい面摩耗の形状

被削材幅が広い場合には、切りくず厚さないし実効送り量は広範囲に変化し、したがつて工具のすくい面摩耗断面の形状は図 13 (a) のごとくなるであろうが、被削材幅が狭く、したがつて実効送り量の変化が少ない場合には旋削バイトのそれと似て同図(b) のごとくなるであろう。後者の場合は刃先形状より当然チップリングを起こしやすいことが想像される。しかしいま問題にしているチップリングは、すくい面摩耗などほとんど問題になら

図 14 被削材幅および正味切削時間を変化した時の切れ刃溶着の度合(矢印は著しい溶着を示す)

ない時期(たとえば切削開始後数秒後)でのことなので、これも直接原因として採用しがたい。

(e) 熱 衝 撃

前にも触れたように、本被削材ではいわゆる熱亀裂をかなり生じやすい。ところで被削材の幅が狭くなると、刃物が被削材に突入する際の温度上昇の絶対値が大となり(空中冷却期間が長く、温度がより下がった状態から切削過程に入る)、熱応力が増大してチッピングを起こすのではあるまいか。

たしかに熱衝撃の影響を無視することはできない³⁾⁴⁾。しかしこれも、被削材幅の相違により有意な温度振幅差を生ずるかどうかを確かめた上でないと結論できない。もう一つ、いま問題にしているチッピングは切削開始後ものの数秒以内で起こることがかなりあることを考えると(通常熱亀裂は工具のフランク摩耗がかなり進行してから認められる)、熱衝撃のみがその原因でもなさそうである。

(f) 切れ刃溶着

最後に考えられる原因は被削材の切れ刃への溶着である。図 12 の場合の実験において観察されることは、炭素鋼などの場合に比すれば溶着程度は少ないとはいえ、やはり被削材幅が狭くなれば溶着が著しくなることである。切れ刃に溶着が生ずれば、被削材に突入するさい不当に大きな応力が切れ刃に与えられ容易にチッピングを起こす。

いま被削材幅を種々変化せしめ、切れ刃が切削の1行程を終わつて空中に出た途端にカットを上方に引離して溶着の模様を調べたのが図 14 である。この写真は明らかに被削材幅による溶着程度の相違を示している。

それならば被削材幅によつてなぞ溶着程度が異なるのであろうか。それには切れ刃温度と(b)で述べた切りくず生成が大きな作用をしていると考えられる。被削材幅が広いとき果たして切削温度が上がつて溶着が起こりにくくなるかどうかは切削温度を測つた上でないとなんともいえないが。

図 15 は1個の切れ刃が被削材中を走行する行程(l_w mm)と全行程(l mm)との比と寿命との関係を3種のカッタ径につきしらべた結果である。これからすると、 l_w/l が小さいときは前記の理由(主として熱衝撃と刃先溶着と考えられる)でチッピングを起こし寿命が短く、 l_w/l が約 0.2 で寿命は最大となる。 l_w/l がそれ以上大きくなるとまたチッピングを起こしやすくなる。 l_w/l が大きくなるとかえつて寿命が低下するのは奇妙であるが、この場合は切れ刃の脱出時における実効送り量が小さくなり、丁度送りが非常に小さくなつたときと同様に

図 15 行程比と寿命の関係

被削材=合金鋼 (SNCM 8)

切削速度=95 m/min, 送り=0.2 mm/tooth

切込み=1.5 mm, エンゲージアングル=25°

ラジアルレークアングル=-5°

アキシヤルレークアングル=-10°

切れ刃に接近して生ずる溶着とか切りくず付着のためのチッピングと観察される。

なお図 15 において、カッタ径が大きいほど成績がよいのは、一定寿命時間内における衝撃回数が少ないことがその主な理由と思われる。

4. 結 論

- (1) 熱処理した合金鋼 (SNCM 8) の超硬正面フライス削りにおける最適超硬グレードは P20 である。
- (2) 寿命判定基準はフランク摩耗幅で約 0.4 mm 以下とすべきである。
- (3) 刃部形状諸元のうちすくい角に関しては、アキシヤルレーク約 -10°, ラジアルレーク約 -5° が適当である。
- (4) 切込みがある値のとき(本実験では約 1.5 mm) 寿命が最大になる。切込みがあまり小さすぎると寿命がかえつて低下することは注目すべきであり、この理由としては比切削抵抗の増大が考えられる。
- (5) 送りはチッピングに対し大きな影響をもち、上下に限界送りが存在する。本実験の場合上の限界送りは約 0.4 mm/tooth, 下のそれは約 0.02 mm/tooth である。
- (6) 切削速度もチッピングに対し影響をおよぼしやはり限界速度が存在する(溶着性が比較的に少ないので下方限界速度は実験範囲では余り明確には掴めなかつた)。かくてチッピングを起こさずに安全に作業できる範囲を示す送りと速度に関する限界図を作製した。
- (7) エンゲージアングルが約 20° 以上になるとチッピングが多発する。
- (8) 寿命は、工具が被削材内を走行する距離と全走行

距離の比によつて大きい影響をうけ、その比が約 0.2 のとき寿命は最大になる。また上記比は一定でもカッタ径が大きい方が寿命は長くなる。

上記行程比のチップニングにおよぼす影響は熱衝撃、溶着および切りくず付着により説明できよう。

(1962, 11月21日受付)

参考文献

- 1) 竹山秀彦, 山田皓一: 炭素鋼 S50C の超硬正面

フライス削り, 精密機械, 26巻 (1960) 674.

- 2) 竹山秀彦, 山田皓一: 正面フライス削りの機構 (第1報), 機械試験所所報, 15巻 (1961) 後 65.
- 3) 奥島啓式, 星鉄太郎: 超硬正面フライスにおける熱き裂, 日本機械学会論文集, 27巻 (1961) 843.
- 4) 篠崎襄: 超硬正面フライスの熱損傷, 日本機械学会前刷集, No.46 (1961—4).