

円筒中実材端面の正面フライス削りによる被削性試験法

北川 亮三*・大草喜太雄*・前田 俊明**

Machinability Testing Method Using Face-Milling of Cylindrical Workpiece

Ryozo KITAGAWA*, Kitao OKUSA* and Toshiaki MAEDA**

Abstract

Conventional machinability testing requires large numbers of workpiece specimens. The difficulty is evaluating the machinability rating of an unknown and newly produced work material.

A new method, proposed in this paper, is to face mill an end face of a cylindrical workpiece. The $VT^n=C$ curve is then determined from the data. Using this curve a machinability rating for the work material can be found. This method uses 85% of the workpiece for chip making as compared to 45% with conventional methods. From face milling a JIS S45C steel bar, the exponent n is found to be 0.35. This value is satisfactory when compared with the value obtained by using the conventional method.

Using these techniques a subsequent investigation was conducted using JIS S12C. Materials' properties were varied by changing the chemical composition and heat treatment. After the test runs, the following conclusions were reached:

- 1) A small workpiece diameter (up to 2.5 cm) can be used without altering results. It should be noted that homogeneous properties of the workpiece remain essential.
- 2) There is little change in chip thickness, when a 5.5 cm diameter workpiece is cut with 25 cm milling cutter, since the centers of the two elements coincide.
- 3) Wear pattern on the tool face is rectangular in form, and the repeatability of the wear progress is very high. We conclude that error in measuring the wearland is small, even when observed by different operators.
- 4) A graph of cutting time vs. wearland is a straight line; on running several tests under identical conditions, the VT curve is similar, even though a wearland of 0.2 mm or 0.3 mm is chosen as the tool life criterion. The employment of a small workpiece does provide a VT curve and analysis is possible.
- 5) Besides machinability evaluation of a material, this method is also appropriate to study tool chipping and tool wear.

1. 緒 言

切削工具材料や被削材を開発する立場や生産技術の立場から、特定の評価基準を設定した簡易切削試験法が数多く用いられて来た。

これらの簡易切削試験法に対しての被削性の相違、工具材料の切削性能を通常の工作機械で、短期間に、しかも少量の工具と被削材を用いて再現性のよいデータを出すことが強く求められている。しかし、一方では簡易切削試験は特定の評価基準により求めた実験結果であり、一般的評価基準を用いた標準切削試験法の

実験結果よりも現場への応用には注意を要することも指摘されている。

ここに報告する簡易切削試験法は筆者らが考案した円筒形中実材の端面を正面フライスで断続切削し、超硬合金工具のじん法を評価する方法¹⁾を応用し、じん性の高い超硬合金工具を用いて工具寿命試験を行なって、被削材の被削性を評価する方法である。

この方法によれば、均一な熱処理が可能な小径の被削材を切削することが出来るとともに少量の被削材で何回も繰返し切削実験が可能である。そして、実験結果の再現性は良い。また、この実験法で求めた実験結果は従来の旋削や正面フライス削りで求めた工具寿命線図との間に矛盾は生じていない。

この試験法を用いて、試作した低炭素鋼 (JIS, S12

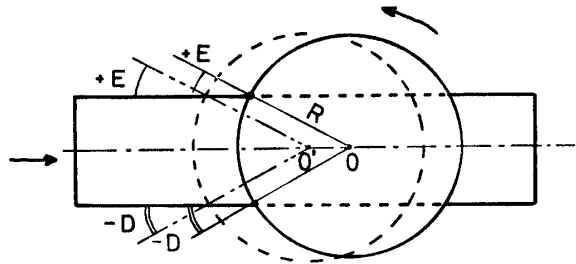
* 生産機械工学科

** 松江工業高等専門学校 機械工学科

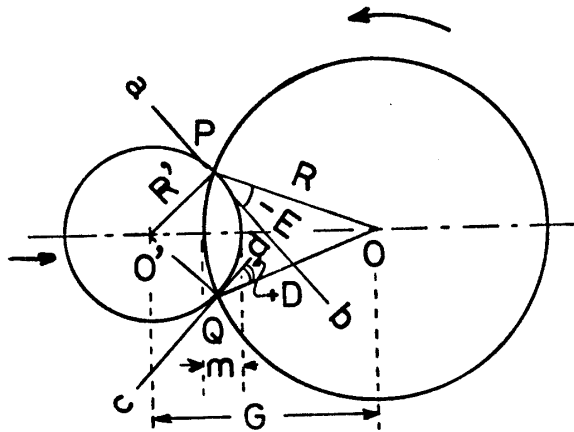
C) およびクロムモリブデン鋼 (JIS, SCM22H) の被削性試験を行なったところ, これらの被削材の被削性を評価する一つの資料が得られ, 簡易試験法として充分に使用できることが判った.

2. 実験方法

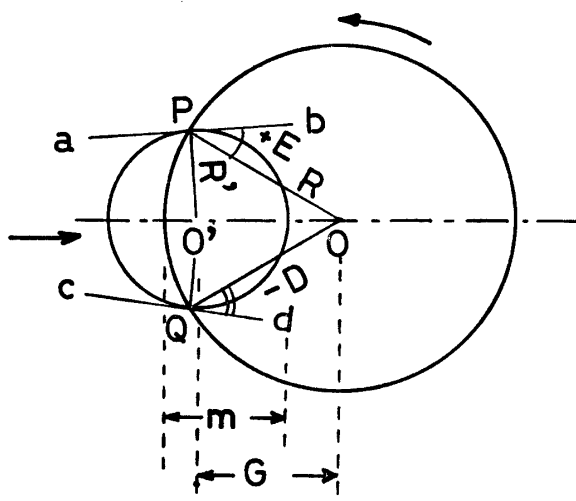
この実験に用いた切削方式はつぎのようになる.



(A) Conventional face milling



(a) Negative angle E



(b) Positive angle E

(B) Face milling of cylindrical workpiece

Fig. 1 Two face milling methods.

切削時の喰付き角 (角 E) と離脱角 (角 D) を変えるには被削材の切削幅やオフセット量を変えること, 正面フライスの直径を変えることにより可能²⁾である. しかし, この実験に用いた方法は円筒形中実材の端面切削を行なうことにより連続的に角 E や角 D を変える切削方式を用いる.

Fig. 1 は正面フライスの中心 O と円筒材の中心 O' の進行方向をオフセットなしに同一直線上におき, O' を O の方向へ送って切削を行なう. 切れ刃は円筒材外周部の点 P で接触し, 点 Q で離脱する. それぞれ図示のように角 E は点 P における接線 ab と PO とのなす角, 角 D は点 Q における接線 cd と QO とのなす角で, 図示のように正負は定義される. 同図の m をオーバーラップ, 正面フライスの半径を R, 円筒材の半径を R', 両者の中間距離を G とすると

$$m = R + R' - G \quad \dots\dots (1)$$

となり, $\triangle POP'$ に余弦法則を用いて

$$G = \sqrt{R^2 + (R')^2 - 2RR' \sin E} \quad \dots\dots (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入して, オーバーラップ m と角 E との関係を求めると式 (3) のようになる.

$$m = R + R' - \sqrt{R^2 + (R')^2 - 2RR' \sin E} \quad \dots\dots (3)$$

本実験では式 (3) に $R=127 \text{ mm}$, $R'=27.5 \text{ mm}$ を代入して計算し, Fig. 2 に示すオーバーラップ m と角 E, 角 D の関係を得た.

この図中に示した接触法は実験に用いた切れ刃形状

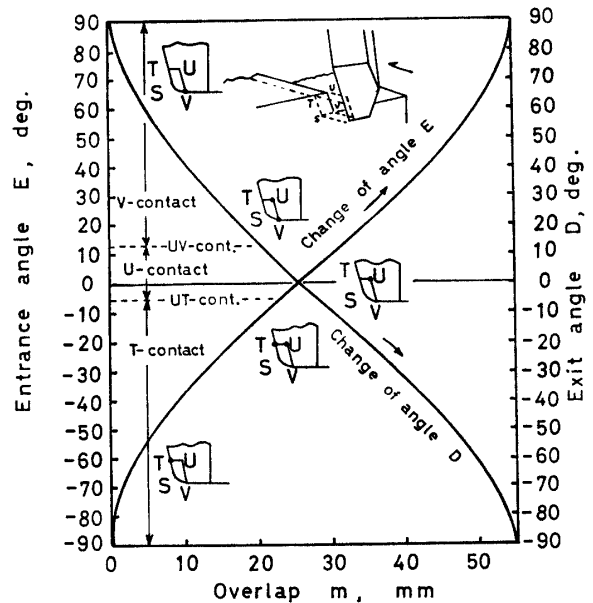


Fig. 2 Relation among overlap m, angle E and D, and three types of initial contact.

の諸角度を Kronenberg の解析式³⁾ に代入して接触状態を決めたものである。一方、点 Q における角 D は上述の結果と符号のみ反対となるだけである。

これらのことから、円筒材端面の正面フライス削りでは角 E、角 D とともにオーバーラップ m を変えると連続的に変化する。

このように角 E と角 D は広範囲にわたって変化させることが出来る。このため、切れ刃は強い衝撃を受けて欠損を生じやすい。そこで、この切削実験に用いた超硬合金材種は最もじん性に富む ISO-M40 を選定した。実験用の正面フライスは単一刃をもつ直径 254 mm のもので、そのラジアルすくい角 -5° 、アキシヤルすくい角 -5° 、コーナ角 15° でスローアウェイ型チップ (SNP432) を用い、チャンファーは全くつけていない。

実験に用いた被削材はいずれも直径 55 mm の中実丸棒で、焼きならし処理を行ない、標準の金属組織にするとともに出来るだけ硬度にばらつきを生じないように配慮した。被削材は LD 転炉で溶製した炭素鋼 (JIS S45C, HB=186~191) を基準とし、標準の旋削や正面フライス削りにも同一ロットで、同一化学成分のものをを用いた。そして、この被削材を用いて、この試験法が従来の旋削や正面フライス削りの標準試験法と比べて妥当であるか否かについて検討した。

この試験法の妥当性が確認されたのち、製鋼時の脱酸法や鋼中の快削元素含有の有無がどのように鋼の被削性に影響するか、また同一鋼種でも微量の化学成分が被削性に影響するかなどを判定出来るか否かについても検討する。

この実験に用いた被削材は特別に溶製した低炭素鋼 (JIS S12C) と焼入性を保証した構造用鋼 (H 鋼, JIS SCM22H) のそれぞれ 4 種類である。

切削実験は旋削、正面フライス削り、そして円筒形中実材端面の正面フライス削りのいずれも切り込み 2 mm, 送り 0.2 mm/rev または 0.2 mm/tooth, 乾式切削で、切削速度のみ変数とした。

3. 実験結果と考察

簡易切削試験を行なう目的は短期間に信頼性の高い被削性判定資料を得ることである。そこで、本実験に用いた円筒材端面の正面フライス削り法が簡易切削試験法として適当か否かを検討するため、切削速度をパラメータとして切削時間と工具横逃げ面摩耗幅 (VB) との関係求めた。各切削速度ともに 5 回の繰返し実験を行ない、その平均値を図上に打点した。この実験

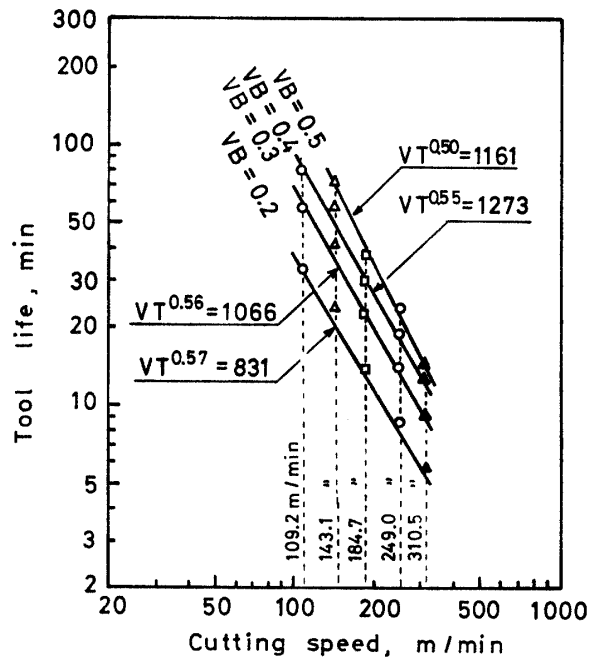


Fig. 3 Comparison of tool life at various tool life criterion in face milling of cylindrical workpiece. Workpiece: Medium carbon steel (JIS-S45C) Heat treatment: Normalized Depth of cut: 2 mm, Feed: 0.2 mm/tooth

結果をもとにして得られた工具寿命線図を Fig. 3 に示す。被削材は炭素鋼 S45C で、超硬合金のチップ材種は M40-T (ISO M40) である。この図から寿命基準を横逃げ面摩耗幅 $VB=0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ mm として求めた寿命線図を見ると、それぞれ寿命方程式 $VT^n = C$ へ指数 n はほぼ同じ値を示し、寿命曲線からの実験値のばらつきは小さい。そして、寿命曲線はそれぞれほぼ平行である。このことから工具寿命線図を求めるに当り、寿命基準を小さく定めて良く、切削試験に必要な時間を短縮出来る。

この実験では、正面フライスの直径は 254 mm と大きく、被削材の直径は 55 mm と小さい。このため、切削時の正面フライス回転角は最大 24° であり、空切削時のそれは 336° である。このことから短時間の切削であり、切削工具の刃先は切削熱の影響を受けにくい。

切削工具の刃先には超硬合金材種 M40 のチップを選定したにもかかわらず、切削速度は 109~310 m/min と高い値を採用し、切れ刃すくい面に生成し、脱落する構成刃先によって、切れ刃がチッピングを生じないようにした。また、工具の横逃げ面摩耗形状はすべて矩形型であり、VB の値を読みとる時に実験者間の誤差はほとんど生じなかった。切削実験中、切れ刃のすくい面や横逃げ面に熱きれつが発生したにもかかわらず

ず、 $VB=0.6\text{ mm}$ の寿命試験範囲内では切れ刃にチッピングを全く生じなかった。

Fig. 3 に示した実験結果から、寿命方程式の指数は $n=0.5$ 以上であり、工具の摩耗は切削時間の短いことも手伝って切削熱の影響よりも機械的なすきとり摩耗が支配的であると推定される。

つぎに、この円筒材端面の正面フライス削りで得られた工具寿命線図は通常の旋削や正面フライス削りで得られた工具寿命線図とどのような関係にあるか検討しなければならない。そこで、Fig. 3 の実験に用いたと同じ炭素鋼 S45C と工具 M40-T (参考までに工具 MAH を用いた。この工具 MAH は超微粒子の炭化物より作られた超硬合金で、高いじん性を持っている。) を用いて切削実験を行なった。

Fig. 4 は通常の旋削、正面フライス削り、そしてここで提案した円筒中実材の端面を削る正面フライス削りの3種類の切削方式により求めた工具寿命線図である。この図から、それぞれの切削方式による工具寿命方程式の間に矛盾は存在しない。また、工具材種を変えて実験した結果は同じ傾向を示している。ただ、工具材種の相違は炭化物の種類、粒子径、そして結合相

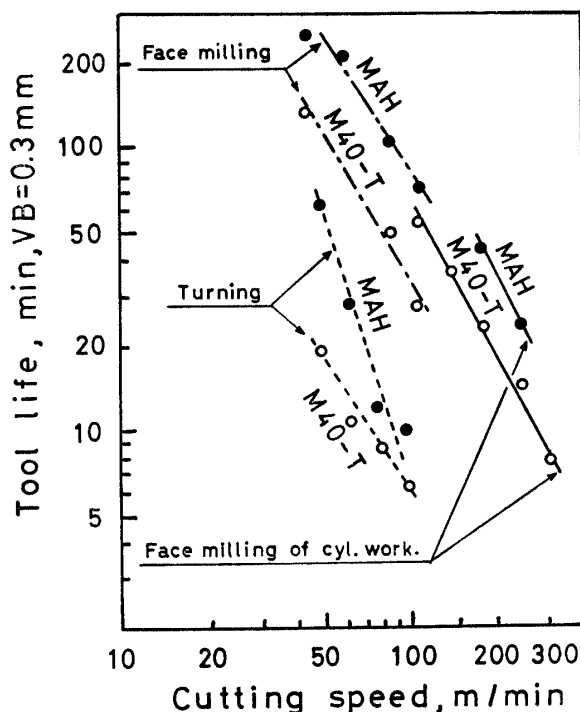


Fig. 4 Comparison of tool life at various cutting speeds in turning, face milling and face milling of cylindrical workpiece.

Workpiece: medium carbon steel (normalized)
Tool: carbides M40-T, MAH
Depth of cut: 2 mm, Feed: 0.2 mm/tooth

(Binder phase) Co の量により、同じ切削速度においても工具摩耗量は異なっている。

旋削の工具寿命は通常の正面フライス削りや円筒中実材端面の正面フライス削りのそれと比べ短くなっている。これは切削中に常時高温高圧下の摩耗作用を受けて、切削工具すくい面や逃げ面の摩耗が進行しやすいためである。

一方、正面フライス削りで実切削時間よりも長い空切削時間のため適当に切れ刃は冷却され、旋削と比べ工具寿命は伸びている。通常の正面フライス削りと比べ円筒中実材端面の正面フライス削りはさらに空切削時間も長く、切れ刃の冷却は良くなり、工具寿命はさらに伸びている。これらの実験結果から超硬工具 M40-T はいずれの切削方式とも平行な線で示される。

そこで、ここに提案した切削方式で得られた工具寿命線図は被削材の被削性を評価する一つの資料になることが認められた。切削試験に供する工具材種 (Carbide grade) の選定は Fig. 4 に示した実験から重要な事項である。しかし、切削条件の選定が正しければ、ここに述べた超硬工具 MAH の実験結果は超硬工具 M40-T 実験結果と矛盾していない。このことから、ここで提案した切削方式は一般性を持ち、その結果は妥当であることが判った。Fig. 3 に示したように VB の寿命基準を変えて求めた工具寿命線図は平行な線であり、最小自乗法で求めたそれぞれの工具寿命方程式と実験点との相違は小さい。

そこで、円筒中実材端面の正面フライス削り法を用いて、試作した被削材の被削性を調べることに応用した。試作する被削材は各 50 kg 程度であり、切削速度を一定として切削時間と横逃げ面摩耗幅 VB との関係を求め、その結果から被削性を判定する一資料を得ようとするものである。

最初に硫黄含有量、脱酸法を変えて溶製した低炭素鋼 (JIS S12C) と通常の製鋼法で作られた低炭素鋼 (JIS S12C) との被削性の違いを調べる。

Table 1 は試作した3種類の低炭素鋼と通常のそれについて化学分析した値と鋼中に存在する非金属介在物の分析値を示す。また、Fig. 5 はこれら低炭素鋼の金属組織 ($\times 100$) と鋼中に分布する介在物の状態 ($\times 100$) に示す。これらの被削材はいずれも焼きならしを行ない、金属組織や硬度はほぼ同じになるよう配慮した。

被削材の被削性を調べる評価基準の一つとして、切りくず厚さが測定される。Fig. 6 は旋削実験により求めた低炭素鋼と参考のため使用した通常の中炭素鋼 (S45C) およびカルシウム脱酸調整快削鋼とした中炭

Table 1 Chemical composition of low carbon steels

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	O ppm	N ppm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	total
S12C	0.11	0.22	0.37	0.017	0.023	0.061	—	38	39	0.002	0.015	—	0.017
S12C-191	0.13	0.22	0.72	0.022	0.116	<0.002	0.0024	119	33	0.016	0.009	0.003	0.028
S12C-210	0.12	0.23	0.58	0.022	0.150	0.003	0.005	163	45	0.024	0.019	0.007	0.050
S12C-M1	0.07	<0.01	0.88	0.060	0.310	<0.002	—	166	43	0.006	0.001	—	0.006

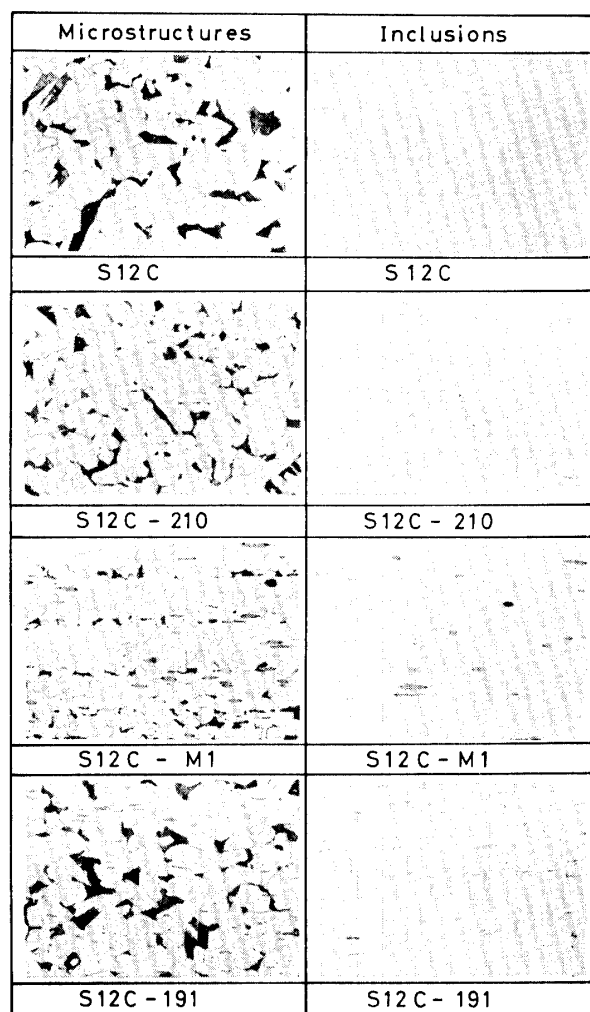


Fig. 5 Typical microstructures and inclusions of low carbon steels. (×100)

素鋼 (S45C-ZS) について切削速度と切りくず厚さとの関係を求めた図である。それぞれの実験点は各切削実験ごとに切りくず50筒を任意に採集し、厚さを測定し、50筒の算術平均値を示している。一般に同一切削条件で比較すると切りくず厚さが薄い被削材ほど良い被削性を持っていると言える。

最も被削性の良い被削材はカルシウム脱酸調整快削鋼 (S45C-ZS) であり、最も悪いそれは通常の低炭素鋼 (S12C) である。このことは鋼中の炭素含有量の低

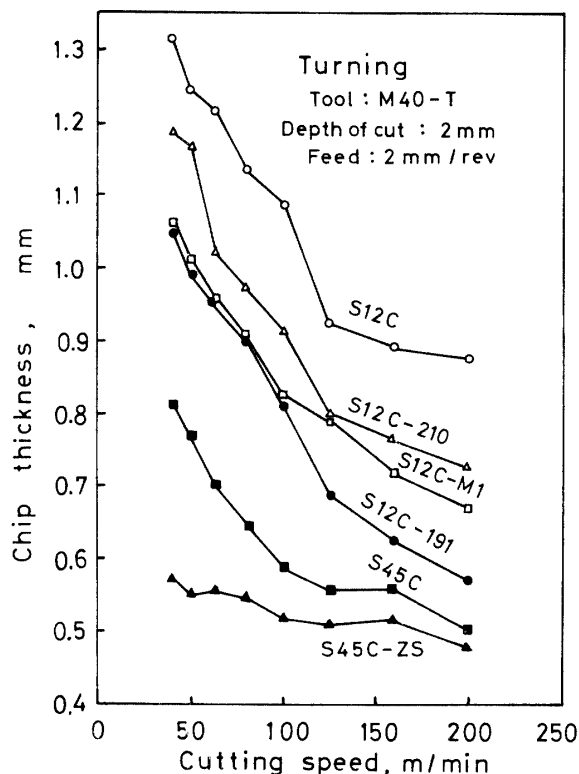


Fig. 6 Influence of the free cutting additives on the chip formation in conventional turning.

いものほど削りにくくなることと一致している。また、鋼中に固溶するアルミニウム (Al) 量が低く、カルシウム (Ca) や硫黄 (S) のような快削元素を含むものほど、良い被削性を示すことは筆者らが報告した実験結果⁴⁾とも良く一致している。

Fig. 5 の非金属介在物の分布状況を示す写真からも判るように低炭素鋼 S12C-191 中の介在物は細かく一様に分布し、被削性改善に役立っている。つぎに、比較的大きな非金属介在物を持っている S12C-M1 が良い。介在物の少ないカルシウム脱酸調整快削鋼 S12C-210 は通常の低炭素鋼の被削性とほぼ同じである。これは切削工具と被削材との接触時間が極めて短かく、切削工具刃先の温度は上昇せず、カルシウム脱酸調整快削鋼特有の非金属層が切削工具すくい面に生成しなかったことに起因している。

このように Fig. 7 の切削実験を通じて、試作した被

Table 2 Chemical composition of low alloy steels

	C	S	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SCM22H812	0.20	0.29	0.80	0.017	0.002	0.100	1.07	0.21
SCM22H815	0.19	0.27	0.80	0.019	0.004	0.010	1.16	0.22
SCM22H817	0.22	0.32	0.79	0.022	0.035	0.010	1.08	0.22
SCM22H819	0.20	0.31	0.81	0.019	0.030	0.010	1.07	0.21

	sol	insol	sol	insol	O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	HV
SCM22H812	0.031	0.002	0.0013	0.0005	0.0015	0.002	0.002	201
SCM22H815	0.018	0.002	0.0035	0.0005	0.0015	0.002	0.003	211
SCM22H817	0.016	0.003	0.0046	0.0005	0.0027	0.004	0.005	208
SCM22H819	0.031	0.002	0.0013	0.0005	0.0015	0.002	0.003	203

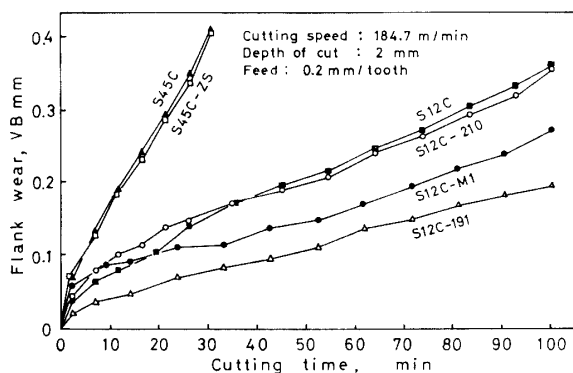


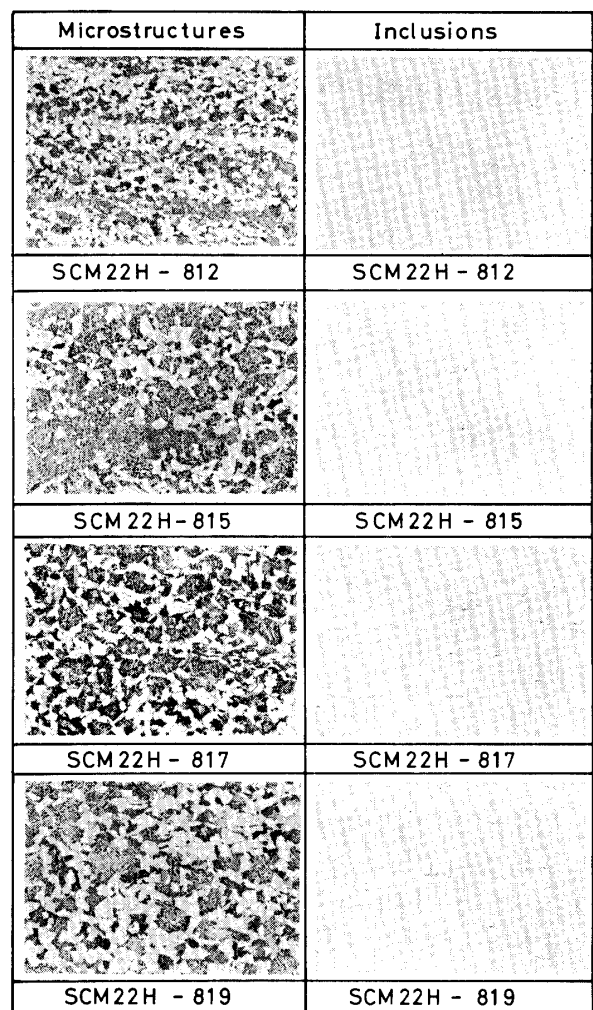
Fig. 7 Influence of the free cutting additives on the tool wear in face milling of cylindrical work-piece.

削材の被削性を調べることが出来る。

つぎに前述したと同じ切削方式を用いて焼入性を保証した構造用鋼 (H 鋼, SCM22H, 以下構造用鋼と略す) の被削性試験に応用した。

構造用鋼 SCM22H は自動車用歯車材として多く使用され, 歯車のじん性と耐摩耗性向上のため熱処理が行なわれる。熱処理の結果として構造用鋼 SCM22H は縞状組織を示し, 熱処理の方法により, その被削性は著しく変化する。これらのことを改善する目的で Table 2 に示す化学成分を真空中と大気中でそれぞれ溶製し, 一方では快削元素 S の有無と脱酸剤 Al の新を変化させた構造用鋼 SCM22H を 4 種類作った。これら試作した鋼の金属組織 ($\times 100$) と非金属介在物の分布を示す写真 ($\times 100$) を Fig. 8 に示す。快削添加物や溶製時の雰囲気がこの構造用鋼の被削性改善にどのように寄与するか検討する。

試験に用いた構造用鋼 (SCM22H) はそれぞれ 50 kg ずつ溶解し, 鋳塊を作ったのち鍛造によって直径 60 mm の丸棒に伸ばした。この丸棒は 870°C で一時間加熱し, 焼きならし処理後, 旋削により直径 55 mm の試験材に仕上げた。

Fig. 8 Typical microstructures and inclusions of low alloy steels. ($\times 100$)

円筒中実材端面の正面フライス削り法の切削条件は切削速度 184.7 m/min, 切り込み 2.0 mm, 送り 0.2 mm/tooth を選び, 定められた切削時間ごとに切削工具の横逃げ面摩耗幅を読みとり, 切削時間と逃げ面摩耗幅 VB との関係をもとに 4 種類の構造用鋼について求めた。その実験結果を Fig. 9 に示す。

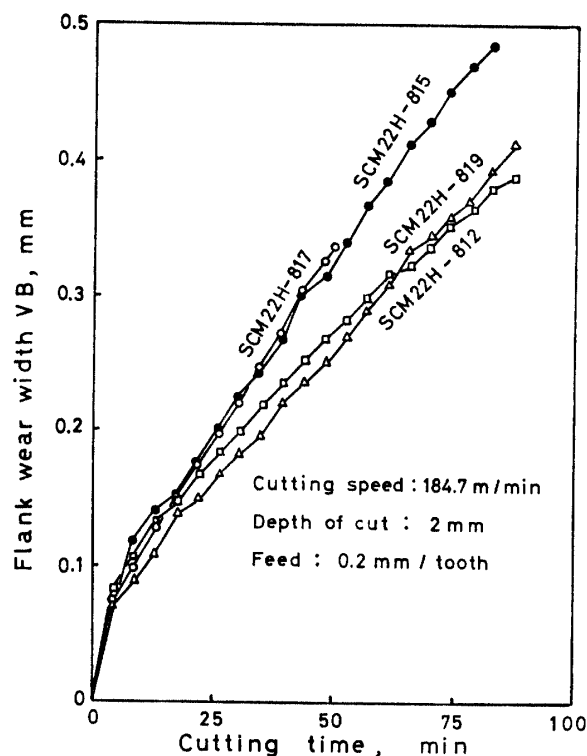


Fig. 9 Influence of the free cutting additives on the tool wear in face milling of cylindrical workpiece.

この図から、快削元素 S を含む構造用鋼 SCM22H-817, SCM22H-819 が快削元素 S を含まないもの SCM22H-812, SCM22H-815 よりも少ない横逃げ面摩耗を示している。

同じ快削元素 S を含むものを比較すると鋼中に固溶したアルミニウム量の少ない SCM22H-817 が SCM22H-819 よりもわずかに良い被削性を示している。この鋼を溶製する時の雰囲気の違いは被削性の改善にほとんど影響していない。快削元素 S を含まないもの (SCM22H-812, 815) は快削元素 S を含むものとは逆に工具摩耗を進行させやすい。

被削材はいずれも 50 kg ずつ溶製したにもかかわらず、ここで提案した切削方式は工具摩耗試験を通じてそれぞれの鋼の被削性を調べられることが判った。

4. 緒 言

(1) 円筒形中実材の端面を正面フライスで断続切削する簡易切削試験法は超硬合金のじん性試験だけでなく、じん性のすぐれた超硬合金を切れ刃に選べば、被削性試験に応用出来る。

(2) 小径の被削材は均質なものが得やすい。この試験法は直径 55 mm の被削材も十分に使用出来る。また、被削材の 85% が切削されるが、他の方法では 45% しか切削に使用出来ない。この試験法は被削材の利用度も高い。

(3) 工具の横逃げ面摩耗の形状は矩形であり、実験者が代っても読みとり誤差は極めて小さい。工具寿命試験の再現性は良い。このため切削工具の寿命基準を低くとり、実験時間を短縮することが出来る。

(4) 円筒形中実材端面の正面フライス削り法では脱酸法や快削元素の異なる低炭素鋼や構造用鋼の被削性を調べる資料が得られた。実験結果は従来から説明されて来た化学成分と被削性との関係と矛盾していない。従って、この試験法は簡易切削試験法として十分に利用出来ることが判った。

この実験を進めるに当り、当時の学生直田章三郎君 (現 (株) 西島製作所) と山本要君 (現日本国有鉄道) のご協力をいただいた。また、被削材は新日本製鉄 (株) に、工具は東芝タンガロイ (株) にご援助をいただいた。ここに深く謝意を表します。

考 文 献 参

- 1) 大草喜太雄, 北川亮三: 精密機械, **40**, 238 (1974)
- 2) T. Hoshi, K. Okushima: Trans. ASME-B, **87**, 442 (1965)
- 3) M. Kronenberg: Trans. ASME, **68**, 217 (1946)
- 4) K. Okusa, R. Kitagawa, T. Akasawa P.: Proceedings International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, Sept. 26-28 (1977) ISIJ-ASM, p. 461

(昭和 56 年 3 月 20 日 受理)