

## 論 文

UDC 669.14.018.298.2-15 : 669.14.018.298.2-122.2 : 669.15'26-194 :  
620.179.5 : 621.91.011 : 669.775 : 669.4Cr 肌焼鋼の切りくず処理性に及ぼす快削性元素,  
熱処理組織および冷間加工の影響\*

山本俊郎\*\*・熊谷憲一\*\*\*

Effects of Free-Cutting Additives, Heat-Treated Structures and  
Cold Working on the Machinability of Low Chromium Case-  
Hardening Steel Based on the Chip-Breaking Characteristics

Toshiro YAMAMOTO and Ken-ichi KUMAGAYI

## Synopsis:

Effects of free-cutting additives, heat-treated structures, and cold working on the machinability of low chromium case-hardening steels based on the chip-breaking characteristics have been investigated.

The order of free-cutting additives in decreasing contribution to a favourable broken chip were Bi > Pb > S > Se and Te at the same amount of addition in weight per cent. The effects of P and N on the contribution to a broken chip were comparatively small.

The machinability of case-hardening steels based on the chip-breaking characteristics was the best for spheroidized structure and decreased in the order of annealed structure to normalized structure. Cold working was detrimental to the machinability of spheroidized structure in terms of the chip-breaking characteristics.

The effects of heat-treated structures and cold working on the machinability based on the chip-breaking characteristics is mainly explained by the ratio of the chip thickness to the diameter of a helical chip, i.e., a high ratio provides a favourable broken chip.

## 1. 緒 言

自動化、高速化された機械工場では、切りくず処理性の良否は重要な被削性の評価基準である。切りくず処理を改善する方法として、従来よりチップブレイカーが広く採用されているが<sup>1)</sup>、そのみでは切りくず処理が完全に解決されない場合が多く、すぐれた切りくず処理性が鋼材に要求されることになる。

切りくず処理性の改善および安定化という立場からは、快削性元素の添加がもつとも効果的である。しかし快削性元素の種類およびその添加量が切りくず処理性におよぼす影響は、現場作業における経験を通して知られている場合が多く、定量的に比較された研究は少ない<sup>2)</sup>。また熱処理組織および冷間加工は被削材の延性および切りくずの生成挙動に影響を及ぼし、切りくず処理性との間に密接な関係を予想させる。しかし切りくず処理性と

熱処理組織および冷間加工との関係についても、切りくず処理のトラブルを介して経験的に知られている面が多い。

著者ら<sup>3)</sup>は、工具寿命およびドリル穿孔性が熱処理組織および冷間加工によつて大きな影響を受けることを報告した。これにひきつづき、本研究では切りくず処理性と快削性元素、熱処理組織および冷間加工との関係を明らかにせんと試みた。

## 2. 試 料

試料はA、BおよびCの3系列からなる。Table 1にそれらの化学組成を示した。A系列の試料はJIS, SCr22 (そのS量は0.011%)およびその化学組成にSを0.035, 0.05, 0.10 および 0.20%, Pbを0.05, 0.10, 0.15, および 0.20%, Biを0.05%, Se, Te および Pを0.10%, Nを0.02% 目標に添加した14種の鋼である。

\* 昭和46年10月本会講演大会にて発表 昭和50年3月31日受付 (Received March 31, 1975)

\*\* 愛知製鋼(株) 工博 (Aichi Steel Works, Ltd., 1 Wanowari, Araochō, Tokai 476)

\*\*\* 愛知製鋼(株) (Aichi Steel Works, Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of steels (%).

No.	Grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Pb	
A 1	SCr22	0.19	0.29	0.71	0.011	0.011	0.08	0.04	1.00	—	—
2	SCr22 +0.035 S	0.20	0.30	0.76	0.010	0.035	0.12	0.04	1.03	—	—
3	〃 +0.05 S	0.21	0.26	0.81	0.013	0.056	0.04	0.01	1.05	—	—
4	〃 +0.10 S	0.21	0.26	0.81	0.012	0.091	0.04	0.01	1.03	—	—
5	〃 +0.20 S	0.22	0.22	0.78	0.020	0.222	0.03	0.02	1.09	—	—
6	〃 +0.05Pb	0.23	0.26	0.78	0.014	0.029	0.04	0.01	1.04	0.04	—
7	〃 +0.10Pb	0.22	0.26	0.76	0.013	0.029	0.04	0.01	1.06	0.09	—
8	〃 +0.15Pb	0.21	0.26	0.76	0.011	0.029	0.18	0.07	0.97	0.15	—
9	〃 +0.20Pb	0.21	0.29	0.75	0.012	0.025	0.14	0.07	1.03	0.18	—
10	〃 +0.05Bi	0.21	0.16	0.63	0.025	0.027	0.03	0.02	1.13	—	0.04Bi
11	〃 +0.10Se	0.18	0.16	0.63	0.017	0.016	0.16	0.05	1.09	—	0.09Se
12	〃 +0.10Te	0.19	0.26	0.81	0.020	0.017	0.18	0.06	1.13	—	0.07Te
13	〃 +0.10P	0.22	0.21	0.64	0.107	0.015	0.12	0.05	0.96	—	—
14	〃 +0.02N	0.22	0.22	0.77	0.020	0.015	0.17	0.06	1.11	—	0.0198N
B 1	SCr22	0.20	0.25	0.75	0.014	0.017	0.17	0.07	1.09	—	—
2	〃 +0.05 S	0.19	0.26	0.91	0.021	0.063	0.18	0.05	1.11	—	—
C 1	SCr22	0.21	0.32	0.79	0.011	0.005	0.13	0.07	1.10	—	—

B系列の試料は JIS, SCr22 (その S 量は 0.017%) およびその化学組成に S を 0.05% 目標に添加した鋼, C 系列の試料は JIS, SCr22 (その S 量は 0.005%) である。

A 系列試料のうち, SCr22 および S, Pb を添加した試料 A1~A9 は 300 kg 高周波溶解炉で 300 kg 鋼塊に, Bi, Se, Te, P および N を添加した試料 A10~A14 は 20 kg 高周波溶解炉で 20 kg 鋼塊に, また B および C 系列の試料は現場作業的に塩基性電炉で 2.6 t 鋼塊に熔製した。300 kg 鋼塊および B 系列の 2.6 t 鋼塊は 60 mm  $\phi$  に, C 系列の 2.6 t 鋼塊は 26 mm  $\phi$  に圧延し, また 20 kg 鋼塊は 40 mm  $\phi$  に鍛伸し, 切りくず処理性試験に供した。

### 3. 実験結果

#### 3-1 切りくず処理性に及ぼす快削性元素の影響

切りくず処理性を定量的に評価する試みとしては, H. SCHALLBROCH ら<sup>4)</sup>の容積係数および湊<sup>5)</sup>の切りくず形状係数がある。容積係数は切りくずになる前の容積に対する排出された切りくずの容積の比であり, この比が小さいほど切りくず処理性は良好と判定される。また切りくずの形状係数は吸塵機を用いて, 一定量の切りくずを吸引処理する時間の長短を切りくず処理性の評価としている。

B. C. TEN HORN ら<sup>6)</sup>は切り込みに対する送りの比 ( $f/d$ ) が大きくなると切りくずは折断されるとし, 切りくずが折断される  $f/d$  の限界値の大小で切りくず処理性を評価している。 $f/d$  が大きくなると, 切りくずは一般に横向きカールがはげしくなつて折断され<sup>7)</sup>, この点において  $f/d$  は評価基準としての意味を有してい

ると考えられる。

これらの文献を参考にして, 本研究においては A 系列の試料を用いて切りくず処理性に及ぼす快削性元素の影響について検討した。各試料は焼準処理 (920°C に 1 hr オーステナイト化後空冷) を施した後, 高速試験旋盤を使用して, 構成刃先の影響のない切削速度 160m/min で, 切込みおよび送りを変えて三次元長手方向に乾式で旋削し, 切りくずの形状を観察した。そして切りくず処理性が良好となる限界の切込みに対する送りの比  $f/d$  を求めた。使用工具はスローアウェイタイプの超硬工具 P20 種で, 工具の刃先形状は (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8) である。切りくずの形状は Fig. 1 に示すごとく, B. C. TEN HORN ら<sup>6)</sup>の分類に準じて切りくずの長さおよびカール方向により分類した。すなわち, 工具や被削材などからまわりやすい連続した切りくずを A 型とし, カールする切りくずについてはその軸方向の長さ ( $l$ ) により, B 型 ( $l \geq 50$  mm), C 型 ( $l < 50$  mm ~ 数巻き程度のカールした切りくず) および D 型 (1 巻き以下のカールした切りくず) に分類した。さらに B~D 型の切りくずはカール方向により, I 型 (横向きまたは斜向きカールの切りくず) および II 型 (上向きカールの切りくず) に分けた。

Length of a chip Curl direction	A-type	B-type	C-type	D-type
	Straight or tangled	$l \geq 50$ mm	$l < 50$ mm	$\leq 1$ curl
[I-type] Side- or conical-curl				
Mark				
[II-type] Up-curl				
Mark				

Fig. 1. Classification of chip forms.

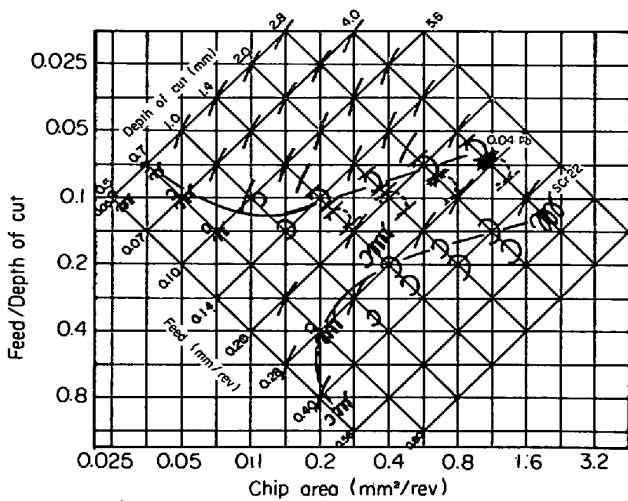


Fig. 2. Critical chip breaking feeds for steel A1 (SCr22) and A6 (SCr22+0.04% Pb).

そして  $l < 50$  mm の切りくず (C型およびD型) を切りくず処理性が良好と判定し、切りくず処理性良否の基準とした。

焼準処理を施した試料の顕微鏡組織はいずれもフェライト層状パーライト組織でその硬度は  $H_B$  149~170 である。

Fig. 2 に SCr22 およびその化学組成に Pb を 0.04% 添加した試料 A6 の切りくず形状を切り込みおよび送りとの関係において示した。なお切りくずの形状は Fig. 1 に示す記号で図示してある。Fig. 2 より知られるように、 $f/d$  が大きくなると切りくずはカールし折断されるが、切りくず処理性が良好と判定される  $f/d$  の限界値を結んで得られる曲線は Pb を 0.04% 添加することにより  $f/d$  の小さい方へ移行し、Pb による切りくず処理性の改善が明瞭に示されている。この Pb による切りくず処理性の改善は、切削面積の小さい、すなわち仕上切削において顕著である。なお Fig. 2 において、SCr22 の切りくず処理性が良好となる  $f/d$  が切込みの小さい場合大きくなるのは、ノーズ半径のため  $f/d$  と (切削厚さ/切削幅) が比例せず、切削断面が扁平になることによるカール傾向の低下<sup>7)</sup>によるものと考えられる。

切りくずカール方向についてみると、SCr22 では斜向きカール (I型) であるのに対し、Pb が 0.04% 添加された試料 A6 では切込みの大きい場合上向きカールの切りくず (II型) が生成される。上向きカールを有する切りくずの生成は、S を 0.09% 以上添加した試料 A4 および A5、Pb を添加した試料 A6~A9、および Bi を添加した試料 A10 において観察されたが、Se, Te, P および N を添加した試料ではいずれも斜向きのカールの切りくず (I型) が生成された。このような快削性元素添加

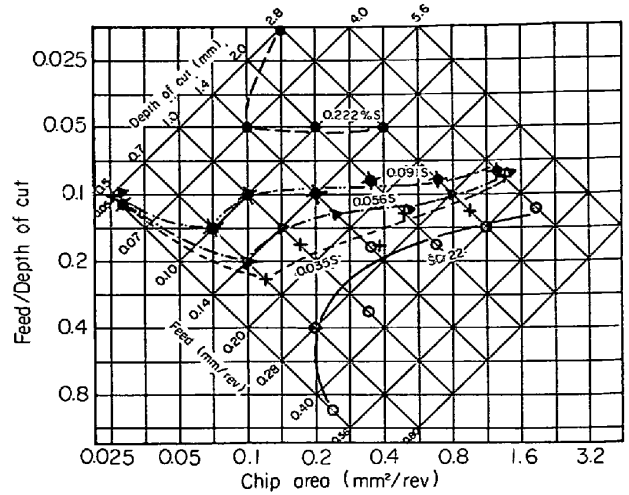


Fig. 3. Effect of sulfur on the critical chip breaking feeds for SCr22.

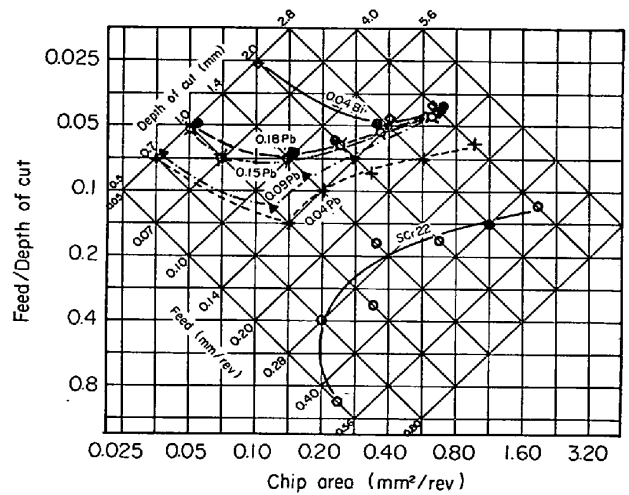


Fig. 4. Effects of lead and bismuth on the critical chip breaking feeds for SCr22.

による上向きカールを有する切りくずの生成は、快削性元素により切りくずの横ひろがりが小さくなり横方向への切りくずのカール傾向<sup>7)</sup>が減ることおよび工具と切りくずの接触面積の減少にもとづく上向き方向へのカール傾向<sup>8)</sup>の増加によるものであろう。

A系列の他の試料についても、Fig. 2 と同じように、切りくず処理性が良好となる  $f/d$  の限界曲線を求め、Fig. 3 に S 添加の影響を、Fig. 4 に Pb および Bi 添加の影響を示した。S または Pb 添加量の増加とともに、切りくずのカールする範囲はより小さい  $f/d$  まで広がり、切りくず処理性が改善される。Bi は 0.04% 程度の少量添加で切りくず処理性を改善する効果が顕著である。また S および Pb の切りくず処理性に及ぼす効果を比較すると、特に軽切削領域において Pb の添加がより効果的である。

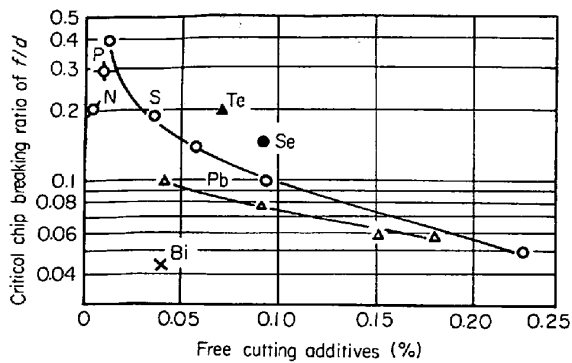


Fig. 5. Relation between the critical chip breaking ratio of  $f/d$  and the amounts of free-cutting additives.

快削性元素が切りくず処理性に及ぼす効果を比較するため、切削面積が  $0.2 \text{ mm}^2/\text{rev}$  における切りくず処理性が良好となる  $f/d$  の限界値を、S, Pb および Bi については Fig. 3 および Fig. 4 より、Se, Te, P および N については両図と同様な実験結果より求め、快削性元素量との関係において Fig. 5 に示した。同一重量%の快削性元素の添加で比較すると、切りくず処理性が良好となる  $f/d$  の限界値は、 $\text{Bi} < \text{Pb} < \text{S} < \text{Se}$  および  $\text{Te}$  の順である。すなわち同一重量%の快削性元素の添加によつて得られる切りくず処理性の改善効果は、 $\text{Bi} > \text{Pb} > \text{S} > \text{Se}$  および  $\text{Te}$  の順になる。N および P の切りくず処理性を改善する効果は比較的小さい。

現場作業的には S を  $0.04 \sim 0.07\%$  添加した硫黄快削鋼の切りくず処理性は、Pb を  $0.10 \sim 0.20\%$  添加した鉛快削鋼に比較して劣つてると同時に、そのばらつきが大きいことが経験されている。Fig. 5 より知られるごとく、鉛快削鋼に相当する切りくず処理性を得るためには約  $0.15\%$  以上の S 添加が必要と考えられる。また  $0.04 \sim 0.07\%$  の S が添加された硫黄快削鋼の切りくず処理性のばらつきが大きいのは、Fig. 5 において、S 量の規格内 ( $0.04 \sim 0.07\%$ ) のばらつきにもとづく  $f/d$  の限界値の変動が大きいことに原因すると考えられる。

### 3.2 切りくず処理性に及ぼす熱処理組織の影響

一般に、肌焼鋼はフェライト-層状パーライト組織に焼準または焼鈍処理され切削されるか、または球状化焼鈍後冷間鍛造され、しかる後に仕上加工に供せられる。そこで本実験でも、B 系列の試料、すなわち SCr22 およびその化学組成に S を  $0.063\%$  添加した試料を用い、焼準、焼鈍および球状化焼鈍を施し、切りくず処理性におよぼす熱処理組織の影響について検討した。なお焼準処理は  $920^\circ\text{C}$  に 1 hr オーステナイト化後空冷、焼鈍処理は  $920^\circ\text{C}$  に 1 hr オーステナイト化後炉冷、球状



(a) Normalized ( $H_B$  167) ×400  
 (b) Annealed ( $H_B$  154)  
 (c) Spheroidized ( $H_B$  144)

Photo. 1. Microstructures of steel B2 (SCr22+0.063%S).

化焼鈍処理は  $750^\circ\text{C}$  に 5 hr 保持後  $600^\circ\text{C}$  まで  $20^\circ\text{C}/\text{hr}$  の冷却速度で徐冷することにより施した。

試料 B2 の熱処理組織および硬度を Photo. 1 に示した。焼準および焼鈍組織はいずれもフェライト-層状パーライトであるが、焼鈍組織は縞状を呈し、焼準組織よりも硬度は低い(Photo. 1 (a) および (b))。球状化焼鈍組織は主にパーライトコロニー内で球状化が進行したパ

ーライトで、硬度はもつとも低い(Photo. 1 (c)). 試料 B1 の熱処理組織および硬度は試料 B2 のそれらと同程度である。

熱処理組織が切りくず処理性に及ぼす影響は、快削性元素のそれに比較して小さいことが予想されるため、本実験では切りくず処理性の微妙な差まで判定できるように、切りくずを形状別にその重量比であらわす方法<sup>9)</sup>を採用した。すなわち、切削速度 120m/min, 切り込み 1.6 mm において、送りを 0.1~0.4 mm/rev に変えて 8sec 間旋削し、採取した切りくずを Fig. 1 の切りくず分類表にしたがって分類した。そして形状別の切りくずの重量比を送りとの関係で整理し、処理性の良好な切りくずが生成されるはじめる送りの大小でもって、切りくず処理性の良否を判定した。なお工具はスローアウェイタイプの超硬工具 P10 種を使用し、その刃先形状は (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8) である。

熱処理組織を異にする試料 B1 (SCr22) における、切りくずの形状別の重量比と送りとの関係を Fig. 6 に示した。小さい送りでは A 型の切りくずが生成されるが、

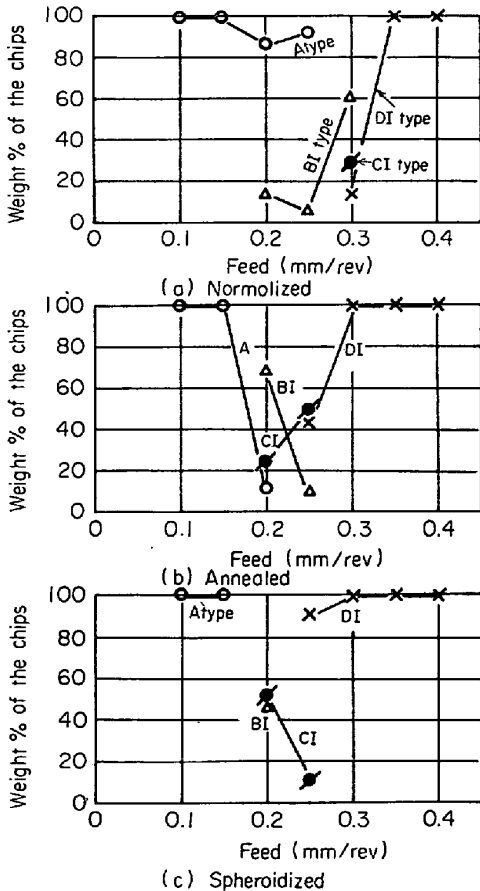


Fig. 6. Relation between the weight percent of the type of chips and the feed for steel B1 (SCr22).

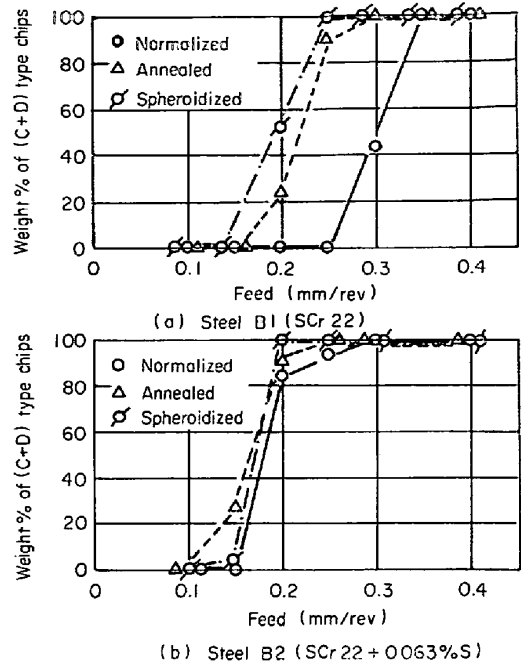


Fig. 7. Relation between the weight per cent of (C+D) type chips and the feed for steels B1 and B2.

送りの増加とともに切りくずは B 型および C 型に移行し、さらに送りが大きくなると D 型の切りくずのみになる。そして中間の送りでは形状の異なる切りくずが混在している。送りの増加にともなうこのような切りくず形状の変化は試料 B2 においても同じであった。

試料 B2 についても Fig. 6 と同様な実験を行ない、切りくず処理性が良好な (C+D) 型切りくずの重量比を送りとの関係で整理すると Fig. 7 のごとく示される。(C+D) 型切りくずに移行する送りは、試料 B1 では球状化焼鈍組織がもつとも小さく、ついで焼鈍、焼準の順である。(Fig. 7 (a)). すなわち、切りくず処理性は球状化焼鈍組織がもつともすぐれ、ついで焼鈍組織、焼準組織の順である。一方 S が 0.063% 添加された試料 B2 の切りくず処理性は熱処理組織によりほとんど影響を受けない(Fig. 7 (b)). このことは試料 B2 では熱処理組織の差によつて切りくず処理性にほとんどばらつきを生じないという現場作業的に有利な特長を有しているといえる。

試料 B1 と試料 B2 の切りくず処理性を比較して知られるごとく、いずれの熱処理組織においても切りくず処理性は試料 B2 の方がすぐれているが、特に焼準組織において切りくず処理性を改善する S の効果が大きくあらわれている。

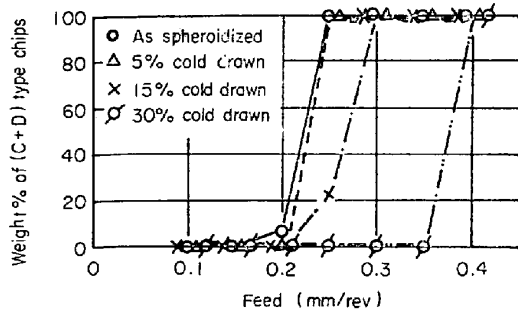


Fig. 8. Relation between the weight per cent of (C+D) type chips and the feed for cold drawn steel C1 (SGr22).

### 3.3 切りくず処理性に及ぼす冷間加工の影響

肌焼鋼が冷間鍛造される場合、冷鍛性を考慮し前処理として球状化焼鈍されることが多い。本実験においても球状化焼鈍組織の切りくず処理性に及ぼす冷間加工の影響について検討した。

試料は SGr22 (試料 C1) を使用し、球状化焼鈍を施した後、冷間加工として断面減少率で 5, 15 および 30% の冷間引拔を行ない、切りくず処理性試験に供した。球状化焼鈍方法は前述した B 系列のそれと同一で、その熱処理組織は試料 B2 における球状化焼鈍組織 (Photo. 1 (c)) と同程度である。なお球状化焼鈍のまま、5, 15 および 30% の冷間引拔を行なった試料の硬度はそれぞれ  $H_B$  131, 162, 174 および 189 である。

切りくず処理性試験の方法は熱処理組織の検討の場合と同一である。Fig. 8 に切りくず処理性が良好な (C+D) 型切りくずの重量比と送りとの関係を示した。切りくず形状が C 型および D 型に移行する送りは、球状化焼鈍のままおよび 5% 冷間引拔鋼においてもつとも小さく、ついで 15% 冷間引拔鋼、30% 冷間引拔鋼の順になっている。球状化焼鈍のままと 5% 冷間引拔鋼の切りくず形状をさらに詳細に比較すると、0.25 mm/rev の送りで両者の切りくずは (C+D) 型が 100% であるが、このうち D 型の切りくずの重量比は球状化焼鈍のままの試料で約 93%、5% 冷間引拔鋼では約 50% であり、またカール径のばらつきは 5% 冷間引拔鋼においてより大きく、切りくず処理性が 5% の冷間引拔により不安定になることが知られた。

以上の実験結果を総合すると、切りくず処理性は冷間引拔率の増加とともに劣化すると結論される。なお本実験において生成された切りくずのカール方向は冷間引拔の有無によらずいずれも斜向きであった。

## 4. 考 察

切りくず処理性は主として切りくずの幾何学的形状お

よび切りくずの破断歪によつて解釈される。切りくずが折断されるためには、切りくずがカールし、かつ被削材、工具逃げ面などの障害物にあつて切りくずの自由な進行が妨げられ、切りくずの粗面が引張り側になるような曲げモーメントを受け、曲げモーメントが最大の位置で折断される場合が多い<sup>10)</sup>。そして切りくずが折断するかどうかは、切りくずの最初の半径  $R_0$  と工具の下を通り抜けて離脱し得るための半径  $R_L$  との差によつて  $t_2$  の厚さを有する切りくず表面に生じる歪  $\epsilon$ 、すなわち

$$\epsilon = t_2/2(1/R_0 - 1/R_L) \dots\dots\dots (1)$$

がその切りくずの破断歪をこえるかどうかによつて決定される<sup>11)</sup>。したがつて切りくずのカール半径が小さく、その厚さが大きく、切りくずの破断歪が小さいほど切りくずは折断されやすい。

上述したように、切りくずの折断にとつて切りくずのカールは必要条件である。切りくずのカールは切削機構、切削抵抗および切削温度に関連した現象であり、種々の機構<sup>7)8)11)~13)</sup>が提案されているが、切りくずのカールと被削材の冶金学的要因および切削条件との関係については充分解明されていないのが現状である。

さらに切りくずの破断歪については、切りくずがその生成過程において著しく変形を受け、加工硬化と同時に動的回復が進行しつつあること、高歪の部分ではマイクロクラックの発生が認められる場合のあること、および切りくずが折断されるときに平均的な温度は青熱脆性域に達しているなどの特徴をも考慮する必要がある。

### 4.1 快削性元素の影響について

白井<sup>8)</sup>は快削性元素 (S, Pb) により切りくずが分断されるのは、工具と切りくずの接触面積が小さくなり切りくずのカール径が小さくなることおよび快削性元素による脆性が切りくずを脆くするためであるとしている。

また荒木<sup>14)</sup>は、快削性元素の切りくずの破断歪に及ぼす効果について、MnS で代表される非金属介在物は鋼中の不均質を増し、高歪部分の鋼の内部切欠きによりマイクロ亀裂の発生一連結をうながし、切りくず中にせん断的破断面を導入するのに対し、Pb で代表される金属介在物は 250°C ~ 500°C の範囲で Pb が液化とともにマイクロ亀裂の内面に浸透して亀裂の伝播エネルギーを下げ、破断歪を著しく低下せしめると考察している。

切りくず処理性を改善する快削性元素の効果は、Fig. 5 に示されるように、同一重量%のそれらの添加で比較すると  $Bi > Pb > S > Se$  および  $Te$  の順になつている。S, Se および Te はその切りくず処理性を改善する機構が類似したものとして考えられるため、同一原子%でこれら快削性元素の効果と比較すれば同じ程度に評価でき

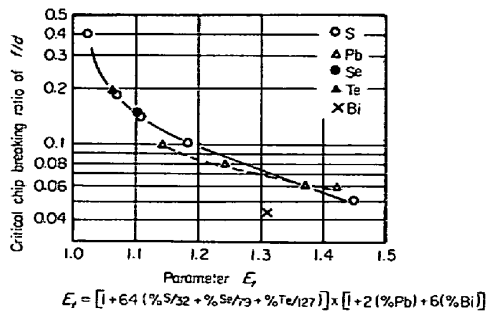


Fig. 9. Relation between the critical chip breaking ratio of  $f/d$  and the parameter  $E_f$ .

るのではないかとと思われる。また Pb および Bi の効果については、Pb および Bi を添加した試料 A6~A10 では、Se, Te, P および N を添加した試料に比較して S 量の水準が高く (0.025~0.029%S), Pb または Bi の効果のほかに S による相乗効果が加算され、切りくず処理性に及ぼす Pb または Bi の効果が過大評価されているのではないかと懸念される。

そこで非金属快削性元素 (S, Se, Te) および金属快削性元素 (Pb, Bi) の効果が相乗的に効くこと、および S, Se および Te についてはその原子量を考慮した効果係数  $E_f$ <sup>15)</sup> で Fig. 5 の実験結果を整理して Fig. 9 に示した。なお効果係数  $E_f$  は次式で与えられている。

$$E_f = [1 + 64(\%S/32 + \%Se/79 + \%Te/127)] \times [1 + 2(\%Pb) + 6(\%Bi)] \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 9 に示されるように、S, Se および Te の切りくず処理性を改善する効果は、効果係数によつて一義的に処理でき、同一原子%の S, Se および Te の添加による切りくず処理性改善効果は同じ程度に評価することができる。また Pb および Bi の切りくず処理性を改善する効果は、共存する S との相乗効果を差引いても、S, Se および Te のそれよりも大きいことが明らかである。

金属快削性元素 (Pb, Bi) の切りくず処理性を改善する効果が非金属快削性元素 (S, Se, Te) のそれと比較して大きい理由は、 $f/d$  が小さくても前者の切りくずをカールさせる傾向が大きいことおよび青熱脆性域における著しい脆化作用によるものと考えられる。Pb が S に比較して小さい  $f/d$  においても切りくずをカールさせる効果が大きいのは、S および Pb の被削性を改善する機構の相違によるものと思われる。すなわち、Pb の被削性改善機構が主として切りくずと工具の接触域における鋼中 Pb の直接潤滑作用であるのに対して、S のそれは主として切りくずせん断域における MnS の応力集中源としての作用にもとづいている<sup>16)</sup>。したがつて  $f/d$  が小

さい場合 (切りくずの体積に対する表面積の比が大きい)、Pb の効果は S よりも大きく<sup>16)</sup>、工具刃先の切りくず接触面積の減少にもとずく切りくずのカール傾向も Pb 添加においてより大であると考えられる。

つぎに切りくずの破断歪に及ぼす金属快削性元素と非金属快削性元素の効果を比較すると、前述した荒木<sup>14)</sup>の指摘のように、青熱脆性域の延性の低下は、S 添加の場合に比較して、Bi および Pb 添加の場合にはその融解およびぬれ現象により著しく助長され、特に Bi 添加の場合その作用が大である<sup>17)</sup>。この Bi および Pb による青熱脆性域における著しい延性の低下は、これら元素の添加によつて小さい送りでカールした切りくずの折断に効果的にはたらいっているものと考察される。なんとなれば、送りが小さく、さらに快削性元素の添加により切りくずがうすく、したがつて切りくずの表面に生じる歪  $\epsilon$  が小さい場合の切りくずの折断にとつて、切りくず折断時の切りくずの平均的温度と推定される青熱脆性温度域での延性の著しい低下は重要であるからである。

N および P の切りくず処理性を改善する効果は比較的小さい。N および P はフェライト中に固溶して延性を下げ、工具刃先の切りくず接触面積を減じることにより、切りくずのカール傾向を助長するが、切りくずの破断歪を低下せしめる効果は、被削材が切りくずの生成過程において著しく加工硬化されることを考慮すると、両元素の添加による被削材の延性の低下から予想されるほど大きくないと考えられる。

#### 4.2 熱処理組織および冷間加工の影響について

Cr 肌熱鋼の切りくず処理性は、球状化焼鈍組織がもつともすぐれ、ついで焼鈍組織、焼準組織の順である。しかし S が 0.063% 添加された Cr 肌焼鋼では、熱処理組織により、切りくず処理性はほとんど影響を受けない。また球状化焼鈍組織を有する Cr 肌焼鋼の切りくず処理性は、冷間引抜率の増加とともに劣化する。

切りくずのカールは上向き方向と横向き方向との成分に分解して考えることができる。上向きカールは、切りくずのカールの幾何学的構成から、工具と切りくずの接触面積に支配される<sup>8)</sup>。横向きのカールは、切りくずの横ひろがりに関連している。すなわち、切りくずが生成される場合、切削幅の自由面に近い部分では、横ひろがりをおこしこの部分が内側になるようにカールする<sup>7)</sup>。したがつて、一般には延性の小さい被削材では、せん断角が大きく、工具と切りくずの接触面積が小さくなり、上向きカール傾向が大きく、一方延性の大きい被削材では切りくずの横ひろがりが大きく、横方向へのカール傾向が大きくなると考えられる。

熱処理組織を異にする試料 B1 および試料 B2 の切りくずの厚さ、幅と送りとの関係を Fig. 10 に、切りくずのカール直径と送りとの関係を Fig. 11 に示した。切りくずの厚さおよび幅は、S 添加により小さくなるが、熱処理組織との関係についてみれば、それらは球状化焼鈍組織 > 焼鈍組織 > 焼準組織の順である (Fig. 10)。つぎにカール直径は、試料 B1 では、球状化焼鈍組織 < 焼鈍組織 < 焼準組織の順であるが、試料 B2 では、焼準組織 <

焼鈍組織 < 球状化焼鈍組織の順で、試料 B1 と試料 B2 のカール直径と熱処理組織との関係は逆になっている。

冷間引抜率を異にする球状化焼鈍組織の試料 C1 の切りくずの厚さ、幅と送りとの関係を Fig. 12 に、そのカール直径と送りとの関係を Fig. 13 に示す。冷間引抜率の増加とともに、切りくずは薄く、その幅は小さく、カール直径は大きくなる。

Fig. 10~Fig. 13 の結果より、切りくずのカール直径を切りくずの幅との関係において整理すると Fig. 14 のごとく示される。熱処理組織を異にする試料 B1 の切りくずのカール直径とその幅との関係は、あるばらつきを有する曲線で示され、切りくずの幅の増加とともにカー

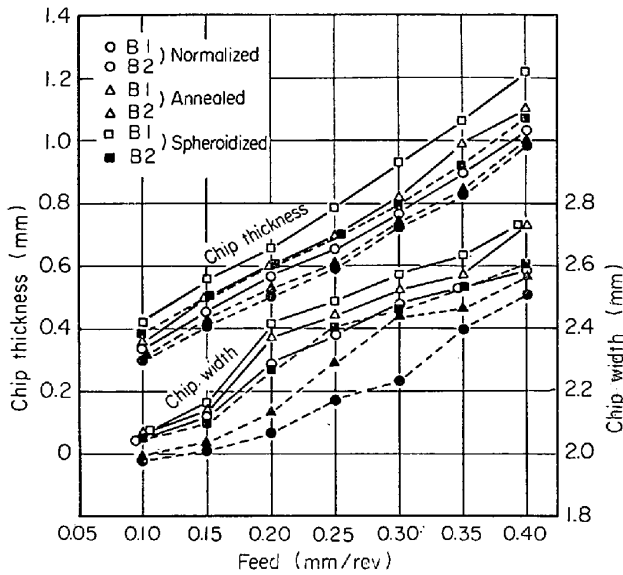


Fig. 10. Relation between the thickness and the width of chips and the feed for B-series steels with different heat-treated structures.

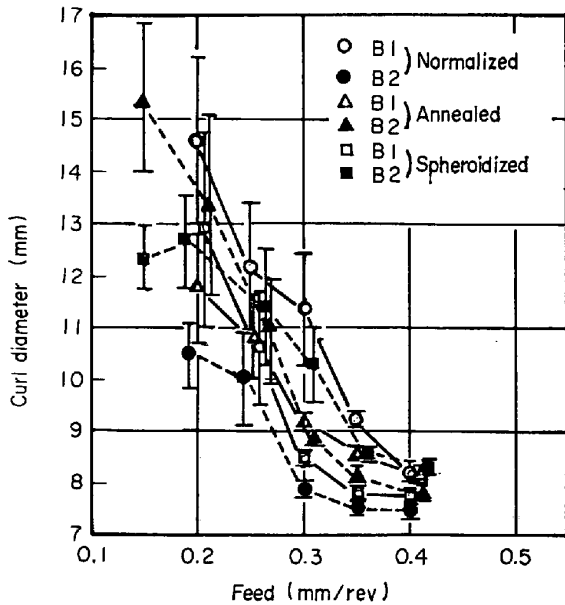


Fig. 11. Relation between the curl diameter of a chip and the feed for B series steels with different heat-treated structures.

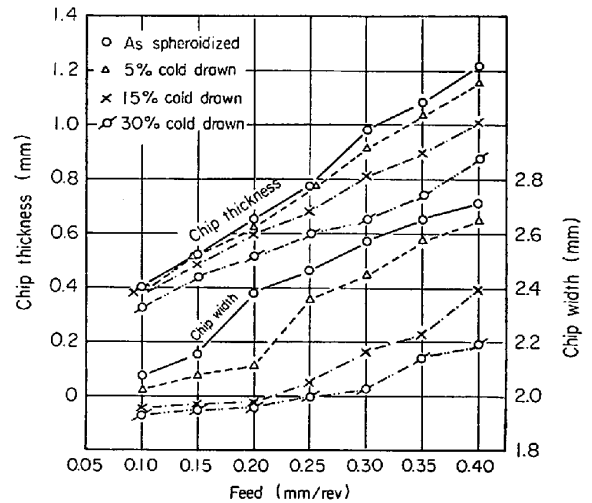


Fig. 12. Relation between the thickness and the width of chips and the feed for cold drawn steel C1 (SCr22).

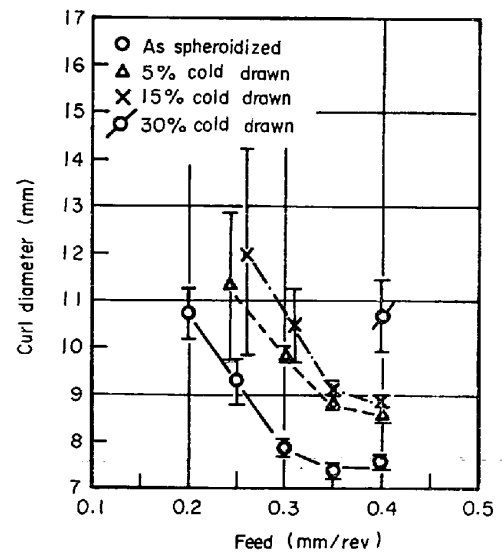


Fig. 13. Relation between the curl diameter of a chip and the feed for cold drawn steel C1 (SCr 22).



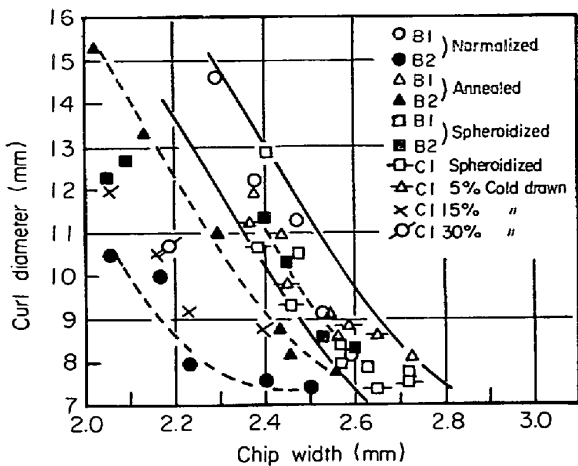


Fig. 14. Relation between the curl diameter and the chip width.

ル径は減少することが知られる。このことより、試料 B1 の切りくずのカール方向が斜向きであることをあわせ考慮すれば、カール径が主として切りくずの横ひろがりによつて律せられているものと考えられる。したがつて試料 B1 の切りくずのカール径が、球状化焼鈍組織<焼鈍組織<焼準組織の順であるのは (Fig. 11), 切りくずの幅が球状化焼鈍組織>焼鈍組織>焼準組織の順であること (Fig. 10) より説明される。しかし、Fig. 14 より知られるごとく、焼準および焼鈍組織の試料 B2, 15%および 30% の冷間引抜率を有する試料 C1 の切りくずのカール径は、同一水準の切りくずの幅を有する試料 B1 のそれよりも小さい。これらの試料では、切りくずの横ひろがりによる横方向へのカール機構のほか、切りくずが薄いことより (Fig. 10 および Fig. 12), 工具と切りくずの接触面積の小さいことが予想され、このため上向きカールが助長され、その効果が加算された結果と考えられる。したがつて、冷間引抜率の増加とともに、切りくずのカール径が大きくなるのは (Fig. 13), 冷間引抜率の増加とともに切りくずの横ひろがり大きく抑制され (Fig. 12), 横方向へのカール傾向が減じる一方、同時に工具と切りくずの接触面積の減少により上向きカールの傾向は増大するが、前者の効果が大きいためであろう。また S が 0.063% 添加された試料 B2 では、切りくずのカール径は焼準組織<焼鈍組織<球状化焼鈍組織の順であるが (Fig. 11), これは S 添加により切りくずの横ひろがりが抑制された結果 (Fig. 10), 横向きカール傾向よりも工具と切りくずの接触面積の大小にもとづく上向きカール傾向の熱処理組織による差が大きくあらわれたものと考えられる。

いずれにしても切りくずのカール機構は切りくず処理

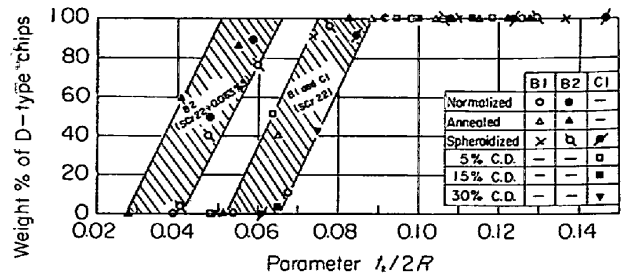


Fig. 15. Relation between the weight per cent of D-type chips and the parameter  $t_2/2R$ .

性にとつてもつとも重要な要素であり、カール機構と被削材の冶金学的要因との関係の詳細な検討は今後に残された大きい課題であると思われる。

さて切りくず表面に生じる歪が (1) 式に示されるごとく、切りくずのカール直径 ( $2R$ ) と厚さ ( $t_2$ ) に影響されることを考慮し、切りくずのカール直径に対する厚さの比 ( $t_2/2R$ ) をパラメーターとして、試料 B1 については Fig. 6 より、試料 B2 および C1 については同図と同様な実験結果より、D型切りくずの占める重量比を整理すると Fig. 15 のごとく示される。

切りくずの形状がD型に移行するパラメーター ( $t_2/2R$ ) の値は, SCr22 (試料 A1, A2) と試料 B2 (SCr22 + 0.063% S) においてあるばらつきの幅を有する 2 本の直線で区別され、D型切りくずに移行する  $t_2/2R$  の値は後者の方が小さい。またこのD型切りくずに移行する  $t_2/2R$  の値は熱処理組織および冷間加工によらずばらつきの範囲内で一定である。このことより切りくずの破断歪は S 添加によつて低下するが、熱処理組織および冷間加工によりほとんど変化しないことが知られ、切りくず処理性におよぼす熱処理組織および冷間加工の影響が主として切りくずの幾何学的形状によつて解釈できることになる。つまり試料 B1 の切りくず処理性がそのすぐれている順に球状化焼鈍組織>焼鈍組織>焼準組織であるのは、上記した順に切りくずが厚かつそのカール直径が小さいためであり、試料 B2 の切りくず処理性が熱処理組織によつてほとんど影響を受けないのは、切りくずの厚さおよびカール直径が球状化焼鈍組織>焼鈍組織>焼準組織の順に大きく、切りくずの歪  $\epsilon$  への寄与が相殺されるためである。また冷間引抜率の増加とともに切りくず処理性が劣化するのは、切りくずがうすかつそのカール直径が大きくなるためである。

被削材の破断歪は熱処理組織および冷間加工によつて大きな影響を受ける。球状化焼鈍組織の破断歪は焼準組織よりも大きく<sup>18)</sup>、冷間加工率の増加とともに被削材の破断歪は著しく低下する<sup>19)</sup>。被削材は切りくずの生成過

程において大きな変形を受け著しく加工硬化されるが、被削材の延性が小さいほどその変形量および加工硬化の程度は小さい。さらに炭化物の分布も大きい変形のためせん維状になる。結局熱処理組織の相違および冷間加工の有無にもとづく切りくずの破断歪の差は、被削材のその差に比較して、よほど小さくなっているものと考えられる。

以上 Cr 肌焼鋼について、切りくず処理性におよぼす快削性元素、熱処理組織および冷間加工の影響に関する検討を行なってきたが、快削性元素の種類およびその添加量によつて、その改善効果が相違すること、切りくず処理性が熱処理組織によつて大きな影響を受けることおよび冷間加工によつて劣化することを明らかにした。これらの結果より切りくず処理性の安定化という立場からは、適切な熱処理組織の選択および冷間加工の影響を、さらに切りくず処理性の改善および安定化をはかるためには快削性元素の選択およびその添加量をも、現場作業の見地から十分考慮されねばならないと結論される。

## 5. 結 言

Cr 肌焼鋼の切りくず処理性におよぼす快削性元素、熱処理組織および冷間加工の影響について検討した結果、次の諸結果を得た。

(1) 焼準処理を施した Cr 肌焼鋼の切りくず処理性を改善する効果は、同一重量%の添加量で比較すると、 $Bi > Pb > S > Se$  および  $Te$  の順である。しかし同一原子%のそれらの添加量で比較すると非金属快削性元素である S, Se および  $Te$  の効果は同じ程度に評価できる。N および P の切りくずを改善する効果は比較的小さい。

(2) 金属快削性元素である Bi および Pb の切りくず処理性を改善する効果が大きい理由としては、非金属快削性元素に比較して切り込みに対する送りの比 ( $f/d$ ) が小さい切削条件においてもカール傾向の大きいことおよび Bi, Pb の融解、ぬれ現象による青熱脆性温度域での著しい脆化作用があげられる。

(3) Cr 肌焼鋼の切りくず処理性は球状化焼鈍組織がもつともすぐれており、ついで焼鈍組織、焼準組織の順である。しかし S が 0.063% 添加された Cr 肌焼鋼で

は、熱処理組織によつて切りくず処理性はほとんど影響されない。

(4) 球状化焼鈍組織を有する Cr 肌焼鋼の切りくず処理性は冷間引抜率の増加とともに劣化する。

(5) 切りくず処理性におよぼす熱処理組織および冷間加工の影響は主としてその幾何学的形状、すなわち切りくずのカール直径に対する切りくずの厚さの比 ( $t_2/2R$ ) により解釈される。その比が大きいと短かく折断された切りくずが生成される。

(6) S 添加により、短かく折断した切りくずを生成する限界の  $t_2/2R$  値は小さくなる。これは S 添加による切りくずの破断歪の低下によるものと考えられる。

## 文 献

- 1) 中山: 日本機械学会論文集, 27(1961)6, p. 833
- 2) 伊藤, 高橋, 木村, 山野: 機械技術, 21(1973), p. 24
- 3) 山本, 熊谷: 鉄と鋼, 59(1973)1, p. 100
- 4) H. SCHALLBROCH, H. WILICKS, and H. BATHMANN: *Metalkunde*, 29(1937), p. 301
- 5) 湊, 豊島, 垣野: 精密機械, 39(1973)6, p. 596
- 6) B. C. TEN HORN and R. A. SCHÜRMANN: *Microtecnic*, 9(1955), p. 1
- 7) 中山: 精密機械, 40(1974)5, p. 409
- 8) 白井: 機械試験所報告, 第 43 号(1961), p. 55
- 9) 野呂, 松谷: 昭和 49 年度精機学会秋期大会学術講演前刷, p. 51
- 10) 中山: 精密機械, 26(1960)8, p. 482
- 11) E. K. HENRIKSEN: *Trans. ASME*, 73(1951), p. 461
- 12) R. S. HAHN: *Trans. ASME*, 75(1953), p. 581
- 13) 中山, 上野山, 田村: 精密機械, 27(1961)10, p. 681
- 14) 荒木: 「切りくず処理に関するシンポジウム」(1973), 精機学会切削性専門委員会
- 15) 荒木, 谷地: 鉄と鋼, 52(1966)4, p. 741
- 16) M. C. SHAW: *Machinability*, (1965), p. 1, ISI Special Report 94
- 17) 荒木, 谷地: 鉄と鋼, 49(1963)10, p. 1490
- 18) T. GLADMAN, B. HOLMES, and F. B. PICKERING: *JISI*, 182(1970)2, p. 172
- 19) たとえば, 日本金属学会編: 金属便覧, (1971), p. 696 [丸善]