

## 焼なましした S45C 鉛快削鋼の疲労強度

論 文

村上 敬宜\*・峰 公雄\*<sup>2</sup>・宇宿 尚史\*<sup>3</sup>

## Fatigue Strength of Annealed 0.45%C Pb-Free-Cutting Steel

Yukitaka MURAKAMI, Kimio MINE and Hisafumi USUKI

## Synopsis :

According to the conventional hypothesis, the high machinability of free cutting steels is attributed to both the easy cutting due to stress concentration at inclusions such as Pb and S (MnS) and their lubricating effects between cutting tool and chips. However, previous studies have not necessarily made clear the relationship between the strength characteristics and the cutting mechanism from the viewpoint of fracture caused by the crack nucleation due to the stress concentration at inclusions. If these inclusions behave as fracture origins, we cannot expect high fatigue strength of free cutting steels.

In the present paper, the effects of Pb and MnS on fatigue strength were studied by comparing the fatigue behavior of annealed 0.45%C Pb-free-cutting steel (SAE10L45) and 0.46%C steel (S45C). The effects of small fatigue cracks and small artificial holes (diameter : 40-500  $\mu\text{m}$ , depth : 40-500  $\mu\text{m}$ ) on fatigue strength were also investigated by microscopic observations.

Experimental results showed no evident difference in both static and fatigue strengths between SAE10L45 and S45C ; no evident decrease in strength of SAE10L45 due to the existence of inclusions of Pb and S (MnS) was confirmed. This result should be considered to explain the high machinability of SAE10L45, because the stress concentration at inclusions of Pb and MnS may not be the main factor for the high machinability.

**Key words :** fatigue ; fracture ; Pb-free-cutting steel ; inclusions ; small artificial holes ; small fatigue cracks ; machinability.

## 1. 結 言

近年、加工工程の自動化、省エネルギー化とともに、快削鋼の使用率が高まってきたが、快削鋼は Pb や S の介在物等を含み、これらが被削性と強度の両者に影響を与えることが考えられる。もし被削性の良さが主として P や S の介在物による応力集中作用<sup>1)2)</sup>によるものであれば、応力集中作用は切削という一種の延性破壊より強く疲労強度に影響することが予想される。しかし一方で、Pb 快削鋼では疲労強度はそれほど低下しないという報告<sup>14)15)</sup>もあり、微視的観察にもとづく欠陥や介在物の応力集中効果を明らかにする必要がある。鉛快削鋼の性質については詳しい総説<sup>14)</sup>も見られるが、快削鋼の疲労強度に関する系統的な研究はなされておらず、今後普及率の向上のためにも、系統的かつ定量的研究が必要である。

本研究では、その第一歩として S45C 鉛快削鋼 (S45CL2) 焼なまし材と、その基地材である S45C 焼なまし材についての回転曲げ疲労強度を調べ、比較検討を行ったものである。特に微小欠陥が疲労強度に及ぼす影響を明らかにするため、直径 40  $\mu\text{m}$ ~500  $\mu\text{m}$  の人工微小穴をあけた試験片を作製し、S45C 鉛快削鋼と S45C の欠陥感受性を定量的に調べた。

なお、微小欠陥、切欠きならびに穴やき裂などが疲労強度に及ぼす影響を統一的に評価するための、一連の研究がこれまで著者らのグループにより行われており<sup>3)~8)</sup>、その成果は次式で表現されている。

$$\sigma_w = 1.43 (HV + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \dots\dots (1)$$

ここで  $\sigma_w$  : 欠陥を有する部材の回転曲げ、または引張圧縮疲労強度 (MPa), HV : ピッカース硬さ,  $\sqrt{area}$  : 欠陥を最大主応力方向に投影した投影面積の平方根 ( $\mu\text{m}$ )。式 (1) の適用範囲は材質により異なるが、ほとんどの材

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 1 月 13 日受付 (Received Jan.13, 1987)

\* 九州大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki, Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 九州大学工学部(現:日産自動車(株)) (Faculty of Engineering, Kyushu University, Now Nissan Automobile Co. Ltd.)

Table 1. Chemical compositions (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Pb
S45CL2	0.45	0.21	0.74	0.021	0.017	0.01	0.02	0.11	0.19
S45C	0.46	0.22	0.74	0.024	0.026	0.01	0.02	0.15	—

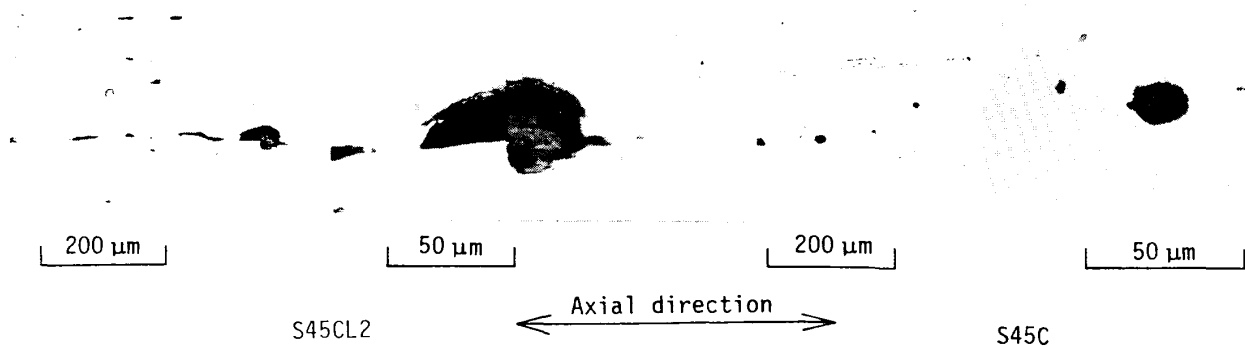


Photo. 1. Non-metallic inclusions (Longitudinal section).

料において  $\sqrt{\text{area}} = \sim 10 \mu\text{m} - \sim 1000 \mu\text{m}$  である。式(1)は疲労限がき裂発生限界ではなく、発生したき裂が伝ばを停止する限界であるという事実を基礎にし<sup>9)</sup>、更に三次元き裂に関する解析的研究<sup>10)~13)</sup>を応用して得られたものである。快削鋼に関する本研究も、この一連の研究成果を考慮に入れて行う。

## 2. 使用材料、試験片形状および実験方法

使用材料は、Table 1 に化学成分を示す S45C 鉛快削鋼圧延丸棒 (直径 27 mm) と、S45C 圧延丸棒 (直径 26 mm) である。

Photo. 1 は素材に含まれる非金属介在物の例である。S45C 鉛快削鋼では S45C に比べ、圧延時に溶融した鉛が非金属介在物を取り囲み、介在物に静水圧がかかる状態となるので非金属介在物 (特に MnS) が圧延方向に延ばされにくく、本実験で観察された範囲でその最大寸法 (最大主応力に直角方向) は、S45C で約 20  $\mu\text{m}$  であるのに対して S45C 鉛快削鋼では MnS を取り囲む Pb も含めて約 35  $\mu\text{m}$  である。なお、疲労試験時の最大主応力は圧延方向と平行に作用する。したがって、S45C 鉛快削鋼では、欠陥としての非金属介在物はその寸法が見かけよりやや大きいと考えなければならない。

S45C 鉛快削鋼素材および S45C 素材は、それぞれ 844°C、1 h の焼なましを行ったのち機械加工をした。Table 2 にこの状態での機械的性質を示す。なお Table 2 の値は圧延方向に切り出した試験片による値である。またピッカース硬さ HV は後述の電解研磨した後の値である。

Table 2. Mechanical properties.

	Test piece No.	$\sigma_{sl}$	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\psi$	HV	IV
S45CL2	1	321	606	1000	46.8	171.6	7.84
	2	306	616	1005	46.1		
S45C	1	356	663	1043	43.9	178.7	7.93
	2	348	619	1041	49.1		

$\sigma_{sl}$ : Lower yield point, MPa  
 $\sigma_B$ : Ultimate tensile strength, MPa  
 $\sigma_T$ : True fracture stress, MPa  
 $\psi$ : Reduction of area, %  
 HV: Vickers hardness number (200 gr)  
 IV: Charpy impact value,  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$   
 (JIS No. 3, 35°C, mean of three specimens).

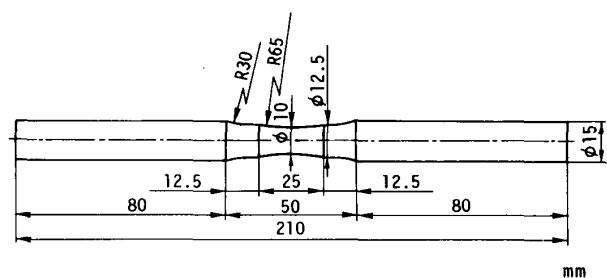


Fig. 1. Shape and dimensions of specimen.

Fig. 1 に試験片の形状を示す。試験片の軸方向は圧延方向と一致している。試験片は、機械加工後表面を 2000 番の紙やすりまで研磨した後、電解研磨により表面層を直径で約 50  $\mu\text{m}$  除去した。電解液の成分はりん酸 1500 cc、ゼラチン 40 g、しゅう酸 30 g、蒸留水 500 cc である。電解研磨の目的は疲労機構を顕微鏡観察によつて明らかにするためである。

試験片には電解研磨後人工欠陥として、4 種類の直径

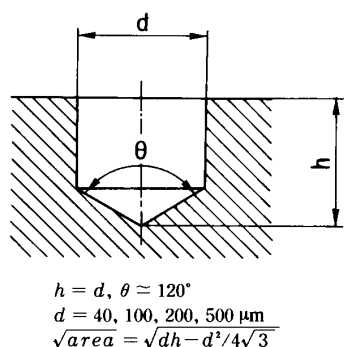


Fig. 2. Shape and dimensions of a micro-drilled hole.

(40  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ ) の微小穴を表面に直角にドリルであけた。Fig. 2 に穴の形状を示す。特に 40  $\mu\text{m}$  程度の微小穴の場合には、穴をあけた場所の強さの統計的なばらつきの影響を考慮して 4 個の穴をあけた。その位置は、最小断面の円周を四等分した位置である。つまり 40  $\mu\text{m}$  の穴の場合、試験片の穴をあけた 4 箇所の中で最も弱いものを取り出す実験に相当する。

穴あけ加工後、穴縁の残留応力を除去するために 600°C, 1 h の真空焼なましを行った。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 98 N·m, 回転数 2 100 rpm) である。

本研究で注目する疲労強度は、 $10^7$  回の繰返しに耐えた最高の公称曲げ応力である。試験応力のきざみは 4.9 MPa (0.5 kgf/mm<sup>2</sup>) とした。疲労限の応力で  $10^7$  回の繰返しに耐えた試験片については、穴縁と穴底付近を直接金属顕微鏡を用いて観察し、停留き裂の有無を確かめた。

### 3. 実験結果と考察

快削鋼の被削性の良さは、Pb や S の介在物 (MnS) が切削時に応力集中源として作用するとともに、工具と切りくず間の潤滑作用および、切りくず生成時マイクロクラック面に浸透して面溶着を防ぐことにより、切りくずを分断しやすくすること<sup>1)2)</sup>にあるというのが通説になっているようである。

もし、Pb や S の介在物 (MnS) が応力集中源として作用するならば、それが絞り、衝撃値および疲労強度に及ぼす影響は大きいことが予想される。従来の研究においては、快削鋼における Pb や S の介在物 (MnS) が応力集中源として作用し疲労強度を低下させる機構について、実際に微視的観察を行った例はほとんど見当たらないので、本研究では特にこの点に重点をおき考察する。このことは Pb や S に囲まれた MnS が応力集中源として作用することが、被削性を高める真の原因かどうかを判断する重要な点となるであろう。

Table 3. Relationship between micro-hole dimensions and fatigue limit (Rotary-bending fatigue).

Micro-hole dimensions					Fatigue limit $\sigma_w$ MPa (kgf/mm <sup>2</sup> )		
	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$h/d$	$\sqrt{\text{areaa}}$ ( $\mu\text{m}$ )	S 45 CL 2 HV=171.6	S 45 C HV=178.7	S 45 C* HV=170
Plain	—	—	—	—	250(25.5)	260(26.5)	240(24.5)
Holed	40	40	1	37.0	240(24.5)	250(25.5)	235(24.0)
	100	100	1	92.5	211(21.5)	206(21.0)	201(20.5)
	100	200	2	136.2	186(19.0)	—	191(19.5)
	200	200	1	185.0	181(18.5)	181(18.5)	181(18.5)
	500	500	1	462.5	152(15.5)	—	157(16.0)

\* : MURAKAMI & ENDO<sup>3)</sup>

#### 3.1 S45C 鉛快削鋼と S45C の静的強度の比較

Table 2 に示すように、S45C 鉛快削鋼と S45C の降伏応力 (下降伏点  $\sigma_{s1}$ ) と引張強さ ( $\sigma_B$ ) および真破断応力 ( $\sigma_T$ ) を比較すると差は 10% 以下である。また、絞り ( $\psi$ ) については有意な差は見られない。ピッカー硬度は 8 点の平均値であるが差は 5% 以下である。また、衝撃値についても有意な差は見られない。

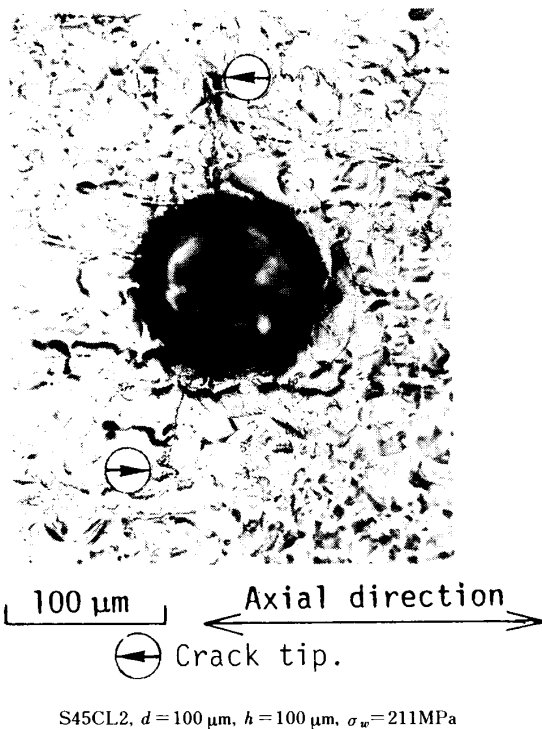
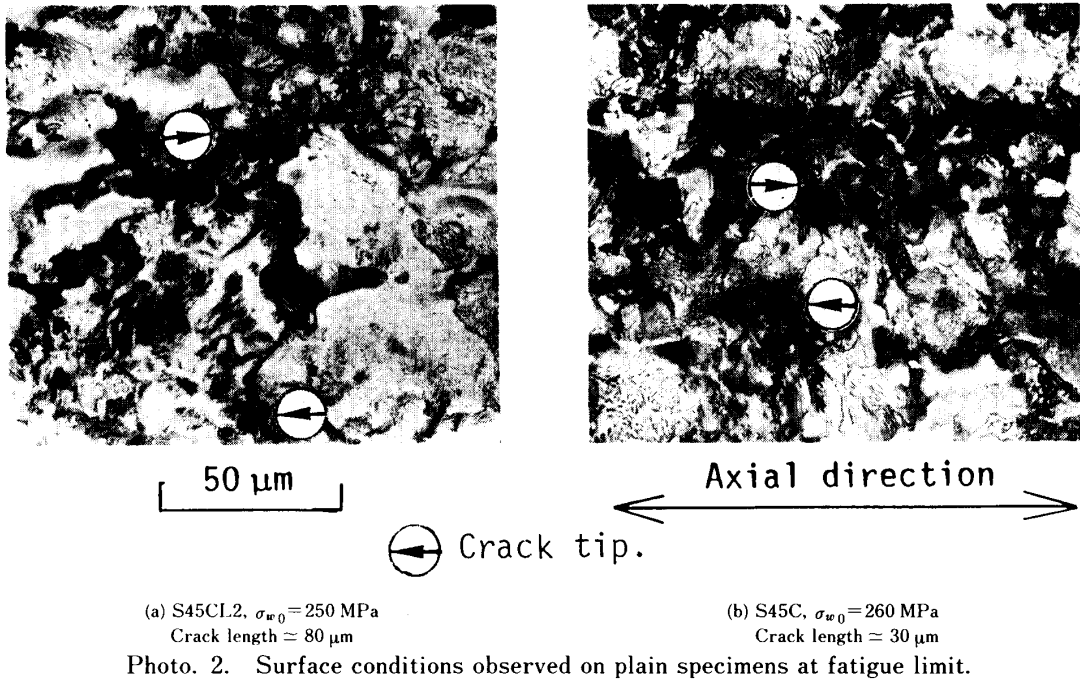
これまで、微小介在物の存在は弾性係数、降伏応力および引張強さなどにはあまり影響せず、絞りや衝撃値を低下させるといわれてきた。しかし、Table 2 で両者の値を比較する限り、快削鋼において Pb や S に囲まれた MnS が応力集中源として作用し、き裂の発生や連結を促進させるといった効果は表れていない。これに対して、試験片製作時にみられた両者の被削性には著しい差があった。

#### 3.2 S45C 鉛快削鋼と S45C の疲労強度の比較

Table 3 に疲労試験結果をまとめて示す。平滑材の試験片の疲労限においては Photo. 2 に示すような停留き裂が、また微小穴材の疲労限においては Photo. 3 に示すような停留き裂がそれぞれ観察された。平滑材におけるき裂発生源は S45C 鉛快削鋼および S45C とともに主としてすべり帯または粒界であり必ずしも MnS ではなかった。しかし、MnS が大きい方が疲労破壊に影響する確率は当然高くなるものと思われる。

このように、疲労限はき裂が発生する限界の応力ではなく、発生したき裂が伝ばを停止する限界の応力である。平滑材の疲労限に観察されるこのような微視的停留き裂の最大寸法は、疲労強度に及ぼす介在物の影響を定量的に評価する上で極めて重要である<sup>3)7)9)</sup>。

S45C 鉛快削鋼の疲労限を S45C と比較すると、 $\sqrt{\text{areaa}} \cong 100 \mu\text{m}$  を超える場合 (穴径, 穴深さ  $\geq 100 \mu\text{m}$ ) にはほとんど同じ疲労強度を示しており、平滑材および直径 40  $\mu\text{m}$ , 深さ 40  $\mu\text{m}$  の穴材 ( $\sqrt{\text{areaa}} = 37 \mu\text{m}$ ) につ



陥が自然欠陥（非金属介在物）よりはるかに大きくなるため、自然欠陥の影響は顕著に表れなくなる。本実験で S45C 鉛快削鋼に観察された非金属介在物の最大級のものは約  $35 \mu\text{m}$  程度であり、このことと S45C 鉛快削鋼の平滑材の疲労限が、S45C に  $\sqrt{area} = 37 \mu\text{m}$  の微小穴をあけたものの疲労限と同じ値となっていることは関係があるものと考えられる。すなわち、S45C 鉛快削鋼は疲労強度の観点からは S45C に直径約  $40 \mu\text{m}$ 、深さ約  $40 \mu\text{m}$  の人工微小穴をあけた材料とほぼ等価と見なされるのである。したがって、人工微小穴の寸法が大きくなれば、疲労強度は自然欠陥より大きいその穴の応力集中（厳密には穴近傍の応力分布）によって決まるから、快削鋼と S45C の疲労強度はほぼ等しくなるのである。

Fig. 3 は Table 3 の疲労限を欠陥代表寸法  $\sqrt{area}$  に対してプロットしたものである。穴材の疲労限を結んだ曲線の延長線が、平滑材の疲労限と等しくなるところの  $\sqrt{area}$  は S45C で約  $27 \mu\text{m}$ 、S45C 鉛快削鋼で約  $30 \mu\text{m}$  となっており、それ以下の大きさの微小欠陥や介在物は疲労強度に影響を与えないと予想される。

### 3.3 微小欠陥を有する S45C 鉛快削鋼の疲労強度の予測

式(1)はピッカース硬さと欠陥代表寸法  $\sqrt{area}$  から疲労強度を予測する式であり、これまで  $HV = 70 \sim 700$  の範囲の 10 種類以上の材質に精度良く適用できることが示されている<sup>7)</sup>。もし、式(1)が本研究の快削鋼にもそのまま適用できれば、疲労強度の観点からは S45C 鉛快削鋼も他の材質と同等に扱ってよいことを意

いてもわずか 4% ( $9.8 \text{ MPa}$ ,  $1.0 \text{ kgf/mm}^2$ ) の低下にすぎない。平滑材および  $\sqrt{area} = 37 \mu\text{m}$  の穴材における疲労強度の低下は、Photo. 1 の例にみられるように S45C 鉛快削鋼の非金属介在物（主として MnS）の大きさが、S45C よりやや大きいことによるものと思われる。これに対して  $\sqrt{area} \approx 100 \mu\text{m}$  以上になると、人工欠

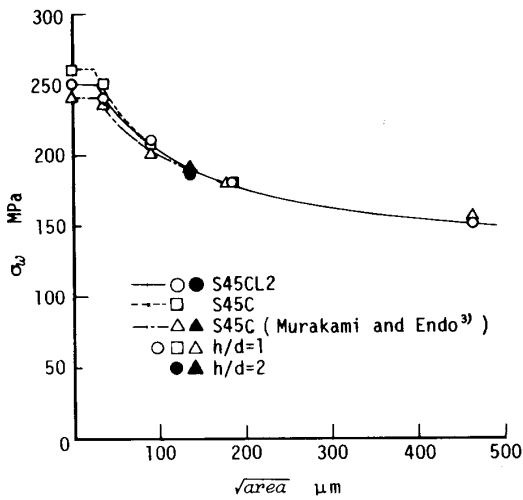


Fig. 3. Relationship between  $\sqrt{areā}$  and  $\sigma_w$ .

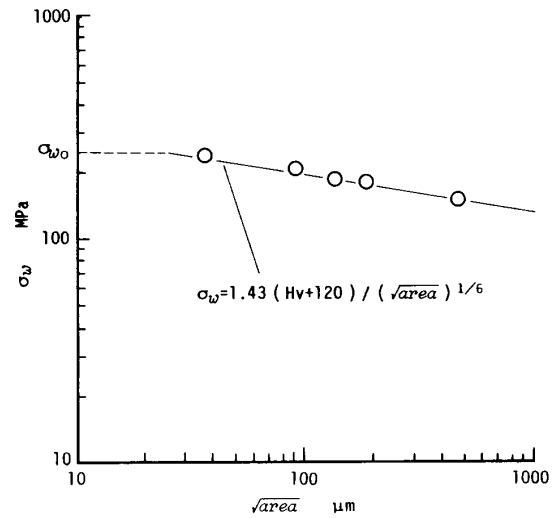


Fig. 4. Log-log plot of predictions by Eq. (1) and experimental results (S45CL2, HV=171.6).

Table 4. Comparison of predicted values by Eq. (1) with experimental results of fatigue limit in S45 CL2 steel.

Micro-hole dimensions				$\sigma_w$ MPa		Error (%)
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$h/d$	$\sqrt{areā}$ ( $\mu\text{m}$ )	Expt.	Pred.	
40	40	1	37.0	240	228	-5.0
100	100	1	92.5	211	196	-7.1
100	200	2	136.2	186	184	-1.1
200	200	1	185.0	181	175	-3.3
500	500	1	462.5	152	149	-2.0

S45 CL2, HV=171.6,  $\sigma_w = 1.43 (HV + 120) / (\sqrt{areā})^{1/6}$

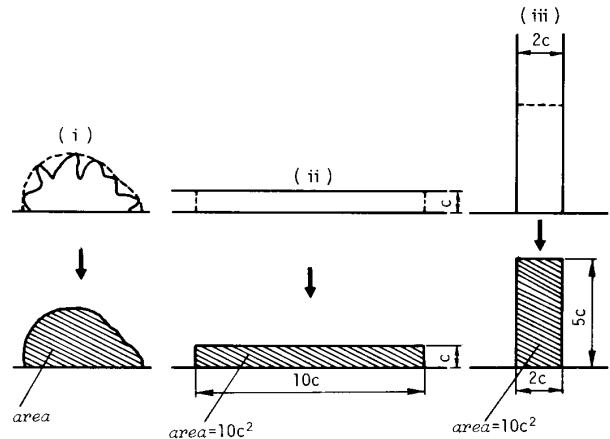


Fig. 1A. Estimation of area for irregularly shaped crack and very slender cracks.

味し、設計上も特別視する必要はないことになる。

Table 4 は S45C 鉛快削鋼の微小欠陥材の疲労限の実験値と、式(1)による予測値とを比較したものである。予測値と実験値との間の誤差は最大で 7.1% であり、実用上十分な精度で疲労限が予測されている。

Fig. 4 は Table 4 の値を両対数グラフにプロットしたものである。式(1)では形式的に  $\sqrt{areā} \rightarrow 0$  とすると  $\sigma_w \rightarrow \infty$  となるが、実際には  $\sqrt{areā} \rightarrow 0$  となると  $\sigma_w \rightarrow \sigma_{w0}$  となる。この理由は、欠陥がなくても結晶のすべりが原因となつてき裂が発生し、その停留条件から  $\sigma_{w0}$  が決まるからである。Fig. 4 の点線で示されるように  $\sqrt{areā}$  が小さくなつていくと、ある限界で  $\sigma_w = \sigma_{w0}$  となりそれ以下の  $\sqrt{areā}$  では  $\sigma_w = \sigma_{w0}$  となる。前にも述べたように Photo. 2 の停留き裂寸法と関連して S45C 鉛快削鋼において式(1)が適用される下限界値は  $\sqrt{areā} \cong 30 \mu\text{m}$  程度である。式(1)が適用される上限は明確ではないが、これまでの種々の材質の結果から判

断すると、およそ  $\sqrt{areā} \cong 1000 \mu\text{m}$  である。

#### 4. 結 言

快削鋼の被削性の良さは Pb や S の介在物 (MnS) が切削時に応力集中源として作用し、一種の破壊である切削が起りやすくとともに、工具と切りくず間の潤滑作用の役目も果たすことに起因するというのが通説となつているようである。もしこれらの介在物が応力集中源として作用するのであれば、強度、特に疲労強度には著しく影響をおよぼすことが予想され、実用の面からその影響を明らかにしておく必要がある。

本研究では、焼なましした S45C 鉛快削鋼とその基地材である S45C の疲労強度を比較検討することにより、快削鋼の疲労機構を明らかにすることを試みた。また、直径  $40 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$  の人工微小欠陥を試験片表面

に導入することにより、切欠き敏感性と介在物の寸法の影響を定量的に評価することも目的とした。

得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) S45C 鉛快削鋼と S45C の静的強度の差は小さい。例えば降伏応力、引張強さ、真破断応力の差は 10% 以下である。また、絞りについては有意な差は見られない。ピッカース硬さは 8 点の平均値で差は 5% 以下である。また、衝撃値についても有意な差は見られなかつた。これに対して、試験片製作時にみられた両者の被削性には著しい差が見られた。この結論はこれまでの報告<sup>11)14)15)</sup>と一致する。

(2) S45C 鉛快削鋼の疲労限を S45C と比較すると、穴径、穴深さ  $\geq 100 \mu\text{m}$  の穴を有する試験片の場合には、疲労強度にはほとんど差が見られなかつた。また、平滑材及び直径  $40 \mu\text{m}$ 、深さ  $40 \mu\text{m}$  の穴材 ( $\sqrt{\text{area}} = 30 \mu\text{m}$ ) についてもわずか 4% (9.8 MPa, 1.0 kgf/mm<sup>2</sup>) の低下にすぎなかつた。これは、S45C 鉛快削鋼の非金属介在物 (主として MnS) の寸法 (最大級で約  $35 \mu\text{m}$ ) が S45C の場合 (最大級で約  $20 \mu\text{m}$ ) より若干大きいことによるものと思われる。

(3) S45C 鉛快削鋼は疲労強度の観点からはその基地材である S45C 材に直径  $40 \mu\text{m}$ 、深さ  $40 \mu\text{m}$  程度の微小穴をあけた材料とほぼ等価と見なされるが、その低下率はわずか (4%) である。したがって、穴や切欠きが大きくなれば両者の疲労強度差はほとんど無視できる程度になる。

(4) S45C 鉛快削鋼の切欠き敏感性をこれまで著者らのグループが、10 種類以上の材質の疲労強度の予測で成功をおさめた予測式で評価した結果、他の材質と同様にピッカース硬さ HV と切欠きや欠陥の投影面積  $\sqrt{\text{area}}$  で精度良く予測できた。その予測式は以下のようになる。

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6}$$

ただし、上式の諸量の単位としては、 $\sigma_w$ : MPa, HV: (kgf/mm<sup>2</sup>),  $\sqrt{\text{area}}$ :  $\mu\text{m}$  をとるものとする。また上式の適用範囲は S45C 鉛快削鋼焼なまし材 (HV=171.6) においておよそ  $\sqrt{\text{area}} = 30 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$  である。

以上の結果より、S45C 鉛快削鋼は設計上特別視する必要はないことが結論できる。

(5) 結論(2)と(4)、基地材の組織写真および疲労過程の微視的観察を詳細に検討した結果、Pb や S の介在物 (MnS) が応力集中源として作用しそれから発生したき裂が他の MnS から発生したき裂と連結して強度を著しく低下させるというような現象は見られなかつた。このようなき裂連結現象は皆無とは断言できないが、少な

くとも強度を支配する主要因ではないようである。

この結論は疲労過程の微視的観察の結果はじめて明らかになったもので、特に Pb や MnS の応力集中またはひずみ集中作用効果に関しては本研究の材質に関する限り、従来から指摘されているほど大きくはない。しかし、このことは快削鋼の利用あるいは普及の面からは好ましいものである。強度特性から被削性を論じるのは早計かもしれないが、一種の破壊という見方をすれば鉛快削鋼の被削性の良さは、その強度特性より Pb または Pb に囲まれた MnS による切削時の境界条件の変化あるいは違いに主要因を求めべきであると思われる。考えられる原因の中で最も有力なものは、従来から指摘されている切りくずと工具間の潤滑作用が考えられる。

以上の結論は焼なまし S45C 鉛快削鋼のみについての実験結果にもとづくものであり、快削鋼利用の信頼できる指針を得るために今後、熱処理材および他の快削鋼 (例えば硫黄快削鋼) についても系統的な研究を行う計画である。

終わりに、実験に協力された西山博志氏 (九州松下(株)) と松田健次氏 (九州大学大学院) に感謝申し上げます。

## Appendix

Fig. 1A に極端に凹凸の著しいき裂や極端に細長いき裂についての  $\text{area}$  の算出法を示す。

## 文 献

- 1) たとえば、古澤貞良: 第 96・97 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 42
- 2) 山口喜弘, 下畑隆司, 淵野好秀, 有村和男: 昭和 52 年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1977), p. 127
- 3) 村上敬宜, 遠藤正浩: 日本機械学会論文集, A-49 (1983), p. 127
- 4) 村上敬宜: 日本機械学会講演論文集, No. 840-2 (1984), p. 1
- 5) 村上敬宜, 森永寿一, 遠藤達雄: 材料, 34 (1985), p. 1153
- 6) 村上敬宜, 阿部雅二郎, 清田高德: 日本機械学会論文集, A-53 (1987), p. 1482
- 7) 村上敬宜, 遠藤正浩: 材料, 35 (1986), p. 911
- 8) 村上敬宜, 松田健二: 日本機械学会論文集, A-52 (1986), p. 1492
- 9) 村上敬宜, 福田四郎, 遠藤達雄: 日本機械学会論文集, 44 (1979), p. 1479
- 10) Y. MURAKAMI and S. NEMAT-NASSER: Engng. Frac. Mech., 17 (1983) 3, p. 193
- 11) 村上敬宜, 石田 誠: 日本機械学会論文集, A-50 (1984), p. 1359
- 12) 村上敬宜, 石田 誠: 日本機械学会論文集, A-51 (1985), p. 1050
- 13) Y. MURAKAMI: Engng. Frac. Mech., 22 (1985) 1, p. 101
- 14) 木村篤良: 第 96・97 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 129
- 15) 浅田千秋, 藤原達雄, 門脇 亮, 村治敏明: 電気製鋼, 31 (1960) 2, p. 74