

# 冷間金型用鋼の疲労寿命に及ぼす一次炭化物の影響

吉田 潤二\*・勝亦 正昭\*<sup>2</sup>・山崎 善夫\*<sup>3</sup>

Effect of Primary Carbide on Fatigue Life in Die Steel for Cold Working

Junji YOSHIDA, Masaaki KATSUMATA and Yoshio YAMAZAKI

**Synopsis :** The life of dies for cold working was markedly decreased by increasing stress applied to the edge of die, because the strength of materials for works was increased. It was found from an investigation of fractured waste dies which were used at high stress that fracture of dies originated at coarse primary rod-like carbides. It was confirmed that fatigue life of dies used at high stress could be evaluated with tension-compression fatigue test whose frequency was equivalent to that of practical dies. The effect of primary carbide on the fatigue life of JIS SKD11 die steels was studied on the basis of tension-compression fatigue test results. The fatigue life,  $N$ , at stress of 1.65GPa which is similar to stress applied to the edge of die decreased with an increase in the maximum width,  $W$ , of primary carbide following the equation:  $N=10^{3.12-0.08W}$ . Voids already initiated at interfaces between coarse primary carbides and matrix at extrem low stress (plastic strain) of 0.3GPa (0.001%) in tensile tests.

Voids were generated at all of coarse carbides more than  $8\mu\text{m}$  of width and seldom at carbides less than  $2\mu\text{m}$ . Thus, it is important that coarse primary carbides corresponding to latent crack are reduced to life of dies for cold working.

**Key words :** dies for cold working ; tool steel ; JIS SKD11 steel ; primary carbide ; tension-compression fatigue test ; tensile test ; void.

## 1. 緒言

最近、精密加工用冷間金型において、被加工材の強度上昇により、金型の刃先に加わる応力が高くなり、寿命が著しく低下し、問題となっている。金型用鋼を始めとする冷間工具鋼は多量の炭化物を含んでおり、その機械的性質は鋼中の炭化物と密接な関係を有している<sup>1-3)</sup>。冷間工具鋼の強度や靱性は炭化物の含有量が多いほど、さらには、炭化物粒径が大きくなるほど低下することが知られている<sup>1-3)</sup>。一方、冷間工具鋼の破壊靱性値は炭化物の大きさに無関係との報告もある<sup>4,5)</sup>。また、冷間工具鋼の破壊は、粗大な一次炭化物を起点として起こることが知られている<sup>1-3)</sup>。しかしながら、炭化物と冷間工具鋼の機械的性質に関する研究<sup>1-3)</sup>は、1970年代までに行われたものが多く、定量的検討は十分とは言えない。とくに、高応力がかかる場合の、冷間金型鋼の機械的性質や冷間金型の寿命に関する報告はない。

本研究では、代表的な精密加工用冷間金型鋼であるJIS規格のSKD11を用い、一次炭化物と金型鋼の疲労寿命の定量的な関係を調査した。まず、高応力で使用され、破損したため廃却となった金型の組織観察により、高応力で使用される金型の破壊状況と炭化物の関係を調べた。次いで、高

応力がかかる精密加工用金型鋼の適切な寿命評価方法の検討を行い、この評価方法を用いて冷間金型鋼の疲労寿命に及ぼす一次炭化物の影響を調査した。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材及び熱処理

用いた材料は、高応力で使用され、破壊したため廃却となった精密加工用冷間金型(SKD11製)及びTable 1に示す3種類のSKD11相当材(A, B, C鋼)である。Table 1に示した供試材は40t電気炉で溶製され、0.6, 1.6, 3.0tの鋼塊とし、分塊、圧延により50mm厚とし、870°Cで焼なましを行った。その後、1020°C加熱-空冷し、510°Cで焼戻しを2回行い、ロックウェルC硬度約60に調質した。

### 2.2 材料試験

熱処理後の供試材から、直径5.3mm、ゲージ長さ20mm

Table 1. Chemical compositions of steels used (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
A	1.42	0.32	0.42	0.023	0.001	11.64	0.83	0.23
B	1.46	0.25	0.40	0.030	0.001	12.89	0.83	0.23
C	1.43	0.29	0.39	0.025	0.004	11.37	0.86	0.25

平成9年6月2日受付 平成9年9月17日受理 (Received on June 2, 1997; Accepted on Sep. 17, 1997)

\* (株)神戸製鋼所加古製鉄所 (現:日本高周波鋼業(株)) (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., now Nippon Koshuha Steel Co., Ltd.)

\* 2 (株)神戸製鋼所加古製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675)

\* 3 日本高周波鋼業(株)技術開発部 (Technical Development Department, Nippon Koshuha Steel Co., Ltd.)

の試験片を圧延方向から切り出し、ラッピング仕上げを行った後、引張-圧縮疲労試験(平均応力0)及び引張試験を行った。試験はコンピューター計測制御式万能試験機を用い、室温で行った。疲労試験の繰り返し速度は0.05~1Hz、引張試験の引張速度は0.1~6 mm/minで行った。破断前の種々の応力で中止した引張試験も実施した。歪は試験片に貼付した歪ゲージで測定した。

2・3 組織観察

廃却金型及びTable 1に示した供試材の炭化物を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。炭化物の量、幅及び長さの測定は、画像解析装置により行った。廃却金型の破壊起点近傍及び疲労または引張試験後の試験片の断面組織をSEMで観察し、炭化物とボイドの関係を調査した。

3. 実験結果と考察

3・1 供試材の炭化物の形態

供試材の一次炭化物の体積率、平均幅、最大幅、平均アスペクト比(長さ/幅)、二次炭化物及び全炭化物の体積率をTable 2に示す。一次炭化物、二次炭化物及び全炭化物の体積率は、A、B、C鋼でほぼ同じであるが、一次炭化物の平均幅、最大幅、アスペクト比はC鋼が最も大きく、B鋼、A鋼の順に小さくなる。また、廃却金型の炭化物の体積率、形状はC鋼のそれに類似していた。

3・2 廃却金型の炭化物とボイドの関係

Fig. 1 (a)に高応力が加わった精密加工用冷間金型廃却品の破壊起点近傍の組織を示す。打ち抜き方向と垂直にボイドが発生しており、ボイドは炭化物と基地の界面剝離もしくは炭化物自身の割れにより形成されている。Fig. 1 (b)は、破壊起点部から十分離れた位置の組織を示すが、やはり棒状炭化物にボイドの発生が認められる。この結果は、棒状炭化物に発生するボイドは、かなり低い歪で発生していること及びこのボイドが破壊の起点となっていることを示唆している。また、炭化物の幅と発生したボイドの長さとの関係を調査した結果をFig. 2に示す。大部分のボイド長さは炭化物幅と等しく、冷間金型鋼の破壊すなわち金型の寿命

を評価する上で、炭化物の幅が重要であることが示唆される。

3・3 冷間金型鋼の寿命評価方法の検討

冷間金型鋼の寿命評価には、回転曲げ疲労試験が用いられてきた<sup>1,2,6)</sup>。しかし、回転曲げ疲労試験を高応力で行うと瞬時に試験片が破壊するため、高応力が加わる精密加工用金型鋼の評価には不適當である。一方、引張-圧縮疲労試験では、回転曲げ疲労試験では瞬時に破壊する応力においても、繰り返し変形が可能であることがわかった。Fig. 3に応力振幅が±1.65GPa<sup>†</sup>の高応力を付加したときの疲労試験結果を示す。

Fig. 3は疲労寿命を疲労試験の繰り返し速度との関係で示す。0.05~1 Hzの比較的低速領域において、繰り返し速度が大きくなると、疲労寿命が増大することがわかる。本研究で調査した廃却金型の寿命(58回)と金型使用時の繰り返し速度(0.17Hz)をFig. 3中にプロットすると、実験結果とよく一致する。また、引張-圧縮疲労試験では、破壊起点は棒状炭化物であり、廃却金型の破壊起点と同じであった。一方、低応力で行った回転曲げ疲労試験の破壊起点は、必

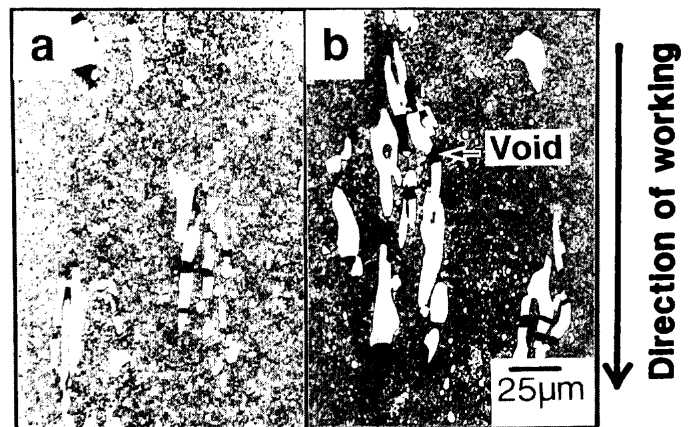


Fig. 1. Microstructure and voids (a) near and (b) far from fracture surface in fractured waste die.

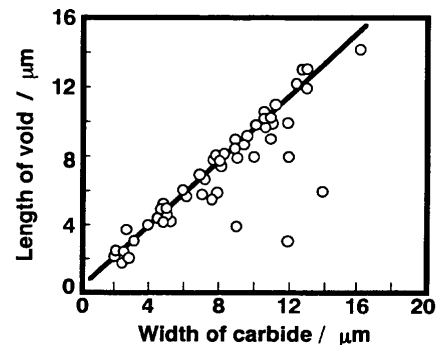


Fig. 2. Relationship between length of void and width of carbide in fractured waste die.

Table 2. Amount and size of carbides in Steels A, B and C.

Steel	Primary carbides				2ndry carbides	Total carbides
	Vf	aW	mW	aAR	Vf	Vf
A	7.0	2.4	10.0	1.5	7.4	14.4
B	6.8	3.1	14.0	2.5	7.4	14.2
C	7.2	3.8	18.5	4.5	7.5	14.8

Vf: volume fraction (%), aW: average width (µm), mW: maximum width (µm), aAR: average aspect ratio

† 本研究に用いた廃却金型の刃先にかかる応力を2次元の弾塑性有限要素法で解析したところ、最大1.65GPaの応力がかかることがわかった<sup>7)</sup>。そこで、刃先にかかる応力は1.65GPaとして議論を進める。

ずしも棒状炭化物のみではなく、表面も破壊起点となっていた。すなわち、高応力で使用される冷間金型の寿命評価は金型使用時の繰り返し速度での引張-圧縮疲労試験で可能なことがわかった。

繰り返し速度(10~10<sup>5</sup>Hz)が増すと疲労寿命が増大するが、極めて低速では寿命は繰り返し速度に依存しないといわれている<sup>8,9)</sup>。Fig. 4 に疲労試験中に徐々に生ずる平均塑性

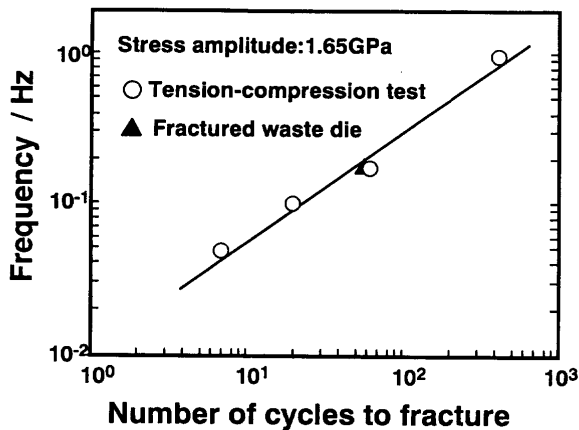


Fig. 3. Relationship between frequency and fatigue life in Steel C. Fatigue life is number of cycles to fracture.

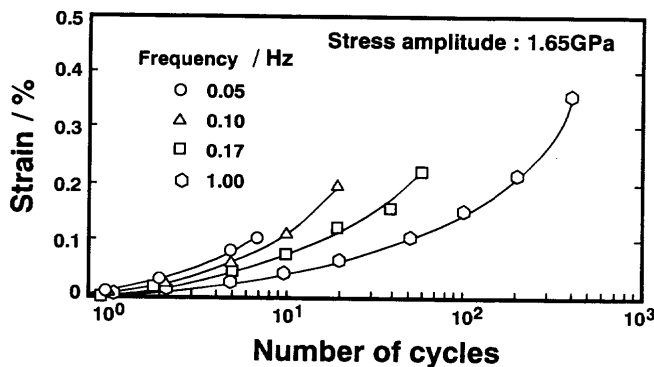


Fig. 4. Effect of frequency on relationship between mean plastic strain and number of cycles in Steel C in fatigue tests.

歪の増加量を測定した結果を示す。繰り返し数とともに塑性歪量が増加するが、繰り返し速度が速いほど、同一繰り返し数における塑性歪が小さく、さらに、破断時の塑性歪は増大する。同一繰り返し数における塑性歪量の減少は、後述するように0.3GPaのような低応力でも一次炭化物に発生するボイドの成長を遅らせるので、疲労破壊までの繰り返し数は増加すると考えられる。この点が金型鋼の高応力側での疲労寿命の速度依存性の最大の原因と考えられる。

### 3・4 疲労寿命に及ぼす一次炭化物の影響

金型用鋼の寿命に及ぼす一次炭化物の幅の影響を引張-圧縮疲労試験によりA, B, C鋼を用いて調査した結果をFig. 5に示す。繰り返し速度は本研究で用いた廃却金型の繰り返し速度0.17Hzとした。高応力で使われる精密加工用金型の受ける繰り返し速度は、0.1~0.2Hzといわれており、この繰り返し速度は妥当と考えられる。Fig. 5に示すように、A鋼の疲労寿命が最も長く、次いでB鋼, C鋼の順である。本実験結果から、一次炭化物が微細化するに従い疲労寿命が向上することがわかる。

Fig. 6は一次炭化物の最大幅(W)と1.65GPaにおける疲労寿命(N)との関係を、Fig. 5の平均値より求めた結果を示す。両者には良好な相関関係があり、(1)式が得られた。

$$N = 10^{3.12 - 0.08W} \quad \dots \dots \dots (1)$$

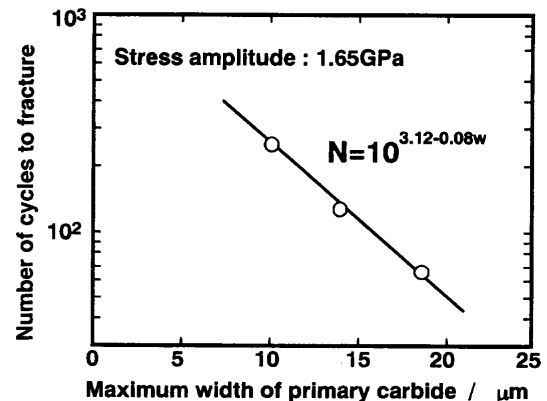


Fig. 6. Relationship between fatigue life and maximum width of primary carbide.

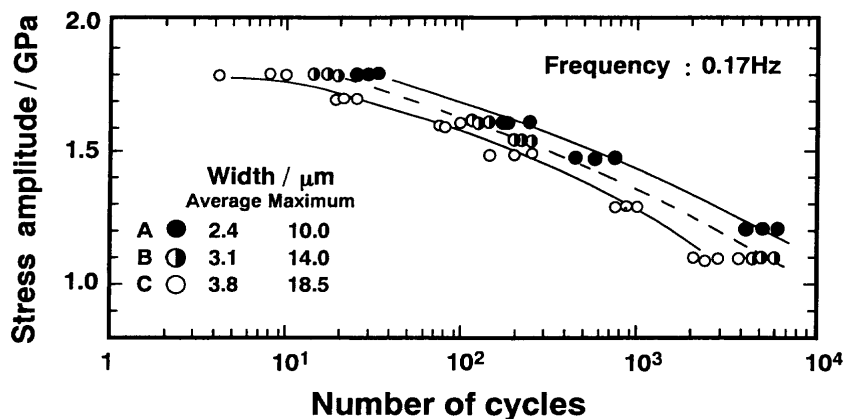


Fig. 5. Effect of width of primary carbide on fatigue properties in Steels A, B and C.

これから、一次炭化物の幅を1/2にすることにより、同一材料でも寿命が5倍以上も向上することが判った。

応力振幅±1.65GPaでの疲労試験時の繰り返し数と塑性歪量の関係を調査したところ、A, B, C鋼ともに、繰り返し数の増加に伴う塑性歪量の増加挙動はFig. 4の0.17Hzの曲線とほぼ一致した。各鋼の破断直前の繰り返し数と塑性歪量はそれぞれA鋼で200回、0.50%、B鋼で91回、0.31%、C鋼で58回、0.23%であり、一次炭化物の最大幅が大きくなると小さな歪で破断に至ることがわかった。

3・5 引張強さに及ぼす一次炭化物の影響

Fig. 7にA, B, C鋼を用い、引張速度0.1~6 mm/minの範囲で引張試験をした時の引張強さと一次炭化物の最大幅の関係を示す。両者には良好な直線関係があり一次炭化物の最大幅の小さい鋼ほど引張強さが高い。また、引張速度が増加すると、引張強さが増大するとともに、引張強さは一次炭化物の大きさの影響を受けやすくなる。引張速度の増加による引張強さ増大の主原因も、疲労寿命に及ぼす繰り返し速度の影響と同様に、ボイドの発生、成長と関係あると考えられる。

3・6 疲労寿命と引張強さの関係

Fig. 8はA, B, C鋼の疲労寿命と引張強さの関係を示したもので、疲労寿命が長いほど引張強さが高くなる傾向にある。また、引張速度が増加すると、疲労寿命の延長に伴う引張強さの増加の程度が大きくなる。いっぽう、高応力で使われる精密加工用金型の受ける繰り返し速度(0.17Hz)で1.65GPaの応力に到達するには、ヤング率を210GPa、変形は弾性範囲内で起こると仮定すると、変形速度は約6.3 mm/min必要である。これらの結果は、引張速度6 mm/minの引張試験の引張強度で金型寿命の優劣の評価が可能であることを示している。

3・7 ボイドの発生と応力、炭化物の関係

3・2節で述べたように廃却金型の破壊起点は、棒状の一次炭化物であり、炭化物やその界面にボイドが観察された。

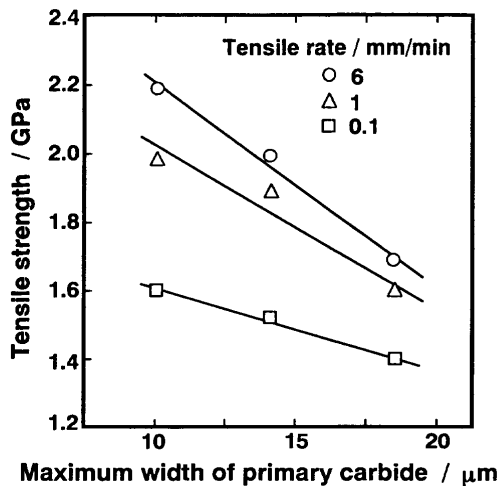


Fig. 7. Relationship between tensile strength and maximum width of primary carbide.

そこで、疲労試験及び引張試験後の組織観察を行い炭化物の大きさとボイドの関係を調査した。

疲労破壊後の破面近傍において、ボイドの発生した一次炭化物の幅を測定した結果を全炭化物の分布とともにFig. 9に示す。幅8 μm以上の炭化物にはすべてボイドが発生し、幅が2 μm以下の炭化物にはほとんどボイドが発生していなかった。また、発生したボイドは一次炭化物幅の大きいC鋼が最も多く、次いでB鋼、A鋼の順である。すなわち、粗大一次炭化物が多い供試材ほどボイド発生率が高い。Fig.10は疲労寿命とボイド発生率の関係を示す。疲労寿命とボイド

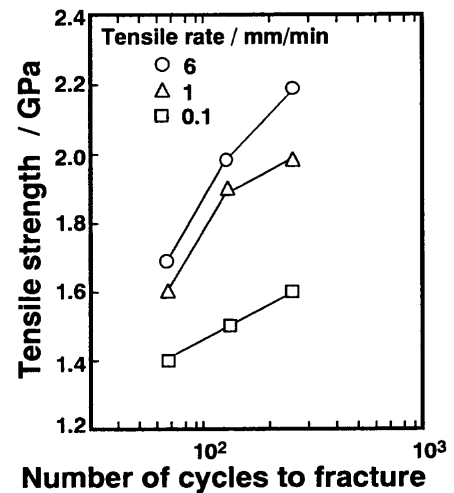


Fig. 8. Relationship between tensile strength and fatigue life (fatigue test condition: stress amplitude = 1.65GPa and frequency = 0.17Hz).

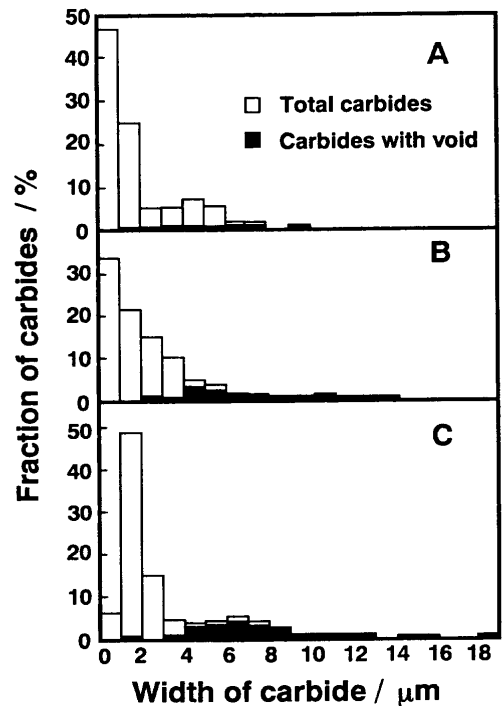


Fig. 9. Size distribution of carbides with and without void after fatigue tests in Steels A, B and C (stress amplitude = 1.65GPa and frequency = 0.17Hz).

発生率の間には直線関係があり、ボイド発生率が低い材料は疲労寿命が長い。

Fig. 6, 10の結果から、一次炭化物の粗大化に伴い、発生するボイドが大きく、量も増すため、切欠き効果は大きく

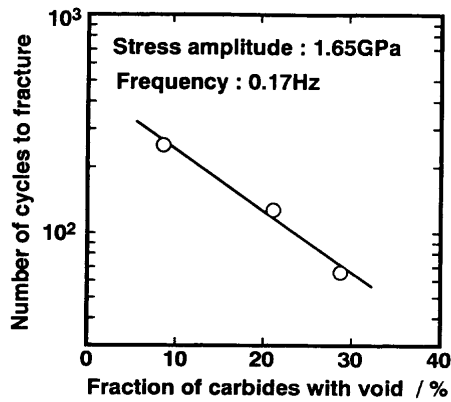


Fig. 10. Relationship between fatigue life and fraction of carbides with void.

なり、ボイド界面への集中応力が増加し、低歪(低寿命)で破壊すると推定される。すなわち、一次炭化物に発生したボイドの大きさが寿命に大きく影響する。

ボイドの発生時期を把握するため、C鋼を用い、引張速度 6 mm/minの引張試験において、種々の応力(塑性歪)における、炭化物とボイドの関係を詳細に検討した。Fig.11は応力 1.65GPa, 歪0.2%までの結果を示す。ボイドは応力0.3GPa(塑性歪0.001%)の著しく低い応力、低い塑性歪で炭化物先端に発生している。0.5GPa(0.002%)では炭化物と母相界面に発生したボイドは大きくなり、数も増加している。著しく低い塑性歪量でボイドが発生するのは、一次炭化物の形成過程に原因があると考えられる。一次炭化物( $M_7C_3$ )は、1200°C前後で液相とオーステナイト相の混合組織中に晶出する。そのため、一次炭化物は非金属介在物と同様に基地との密着性が低く、低応力で破壊すると考えられる。また、この一次炭化物中には、弾性限内の歪ですでに割れが発生

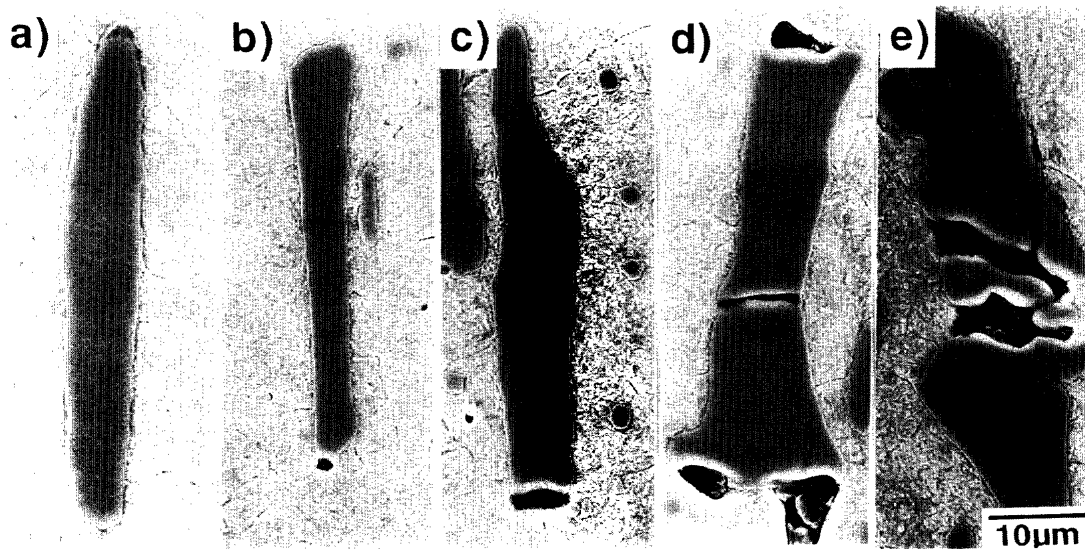


Fig. 11. Scanning electron micrographs of carbides in tensile tests of 6mm/min in Steel C. a)  $\sigma=0\text{GPa}$  ( $\epsilon=0\%$ ), b)  $0.3\text{GPa}$  (0.001%), c)  $0.5\text{GPa}$  (0.002%), d)  $1.0\text{GPa}$  (0.01%), e)  $1.65\text{GPa}$  (0.2%)

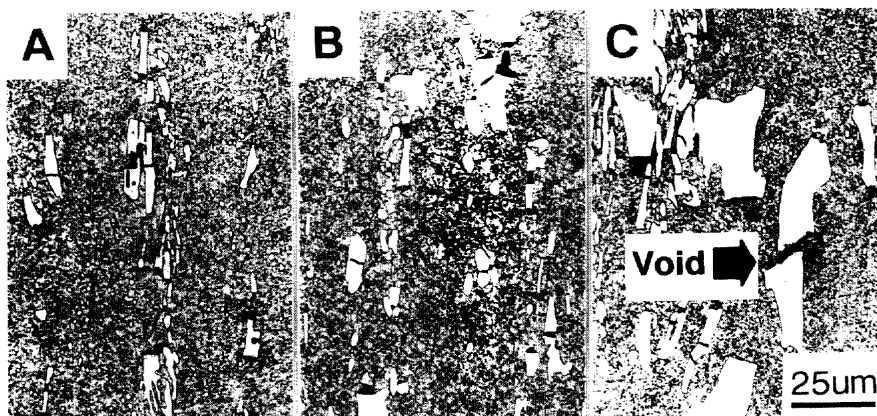


Fig. 12. Microstructures at 1.65GPa in tensile tests of 6mm/min in Steels A, B and C.

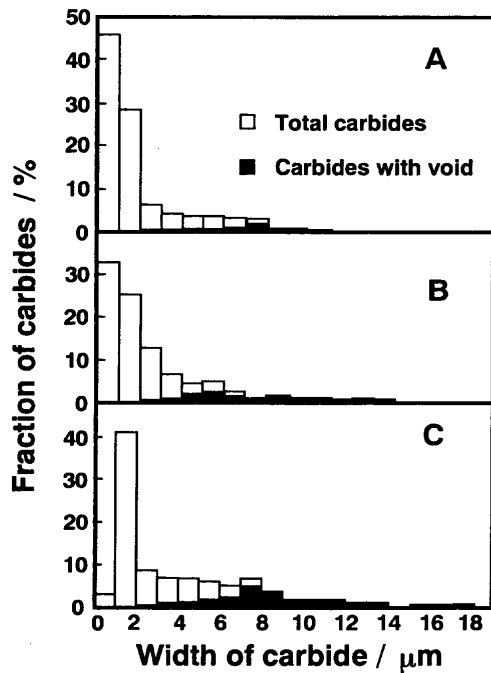


Fig. 13. Size distribution of carbides with and without void after tensile tests in Steels A, B and C (stress=1.65GPa and tensile rate=6mm/min).

しているものも観察された。

さらに応力が増し、低応力で使用される金型の刃先推定応力(1.0GPa)では塑性歪が0.01%となり、炭化物中に割れが多数発生し、炭化物と母相界面に発生したポイドはさらに拡大する。しかしながら、この応力では母相中への亀裂としての進展は見られなかった。さらに応力が増し、現在使用されている高応力用加工金型の推定刃先応力(1.65GPa)では、塑性歪が0.2%となり、炭化物中の割れも大きく口を開いている。この程度の応力以上となると炭化物中の割れが成長し、母相中へ亀裂の進展が認められた。すなわち、高応力の加わる精密加工用金型では、金型使用開始と共に炭化物にポイドが発生するので、炭化物を潜在亀裂と見なし、特性を評価する必要がある。

そこで、疲労寿命に差があるA, B, C鋼における引張応力1.65GPa(塑性歪0.2%)の時のポイド発生率と引張強さの関係を調査した。Fig.12に引張試験後の試験片のマイクロ組織を示す。これらの組織から測定したポイド発生率をFig.13に、ポイド発生率と引張強さの関係をFig.14に示す。疲労破面近傍の炭化物を観察したFig.10とほぼ同様のポイド発生率が得られた。ポイド発生率はC鋼で最も大きく、B鋼, A鋼の順

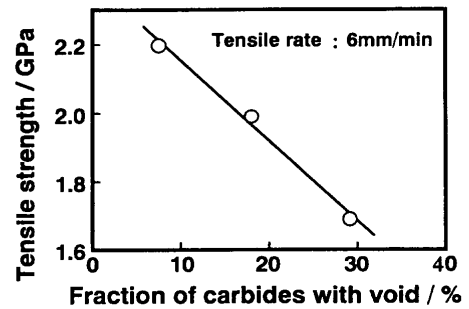


Fig. 14. Relationship between tensile strength and fraction of carbides with void.

に小さくなる傾向にあった。また、ポイド発生率と引張強さの間にも直線関係があり、ポイド発生率が低い材料は引張強さが高い。

#### 4. 結言

(1)精密加工用金型の寿命は、変形速度を金型のそれに一致させた引張-圧縮疲労試験で評価が可能である。また、変形速度を金型のそれに一致させた引張試験の引張強度で金型寿命の優劣の簡便評価が可能である。

(2)疲労及び引張試験ともに、粗大一次炭化物が多い供試材ほどポイド発生率が高かった。また、ポイドは著しく低応力(0.3GPa)で発生し、高応力用加工金型の推定刃先応力(1.65GPa)では、炭化物と母相界面に発生したポイドや炭化物中の割れは大きく口を開いていた。

(3)ポイド発生率が低い鋼は、疲労寿命が高いことがわかった。すなわち、金型の寿命を向上させるためには、ポイド発生率を少なくする必要がある、そのために一次炭化物を小さくすることが重要である。

#### 文 献

- 1) 新持喜一郎, 裏野元一: 日本金属学会会報, 8 (1969), 117.
- 2) 清水欣吾: 鋼の強靱性, Climax Molybdenum Development Company (Japan) Ltd, 東京, (1971), 207.
- 3) A.M.Bayer: Met. Prog., 97 (1970) Apr., 86.
- 4) K.J.Eriksson: Scand.J.Metall., 2 (1973), 197.
- 5) L.R.Olson and H.F.Fischmeister: Powder Metall., 28 (1978), 13.
- 6) 共同研究グループ: 塑性と加工, 22 (241), 159.
- 7) 吉田潤二: 未発表
- 8) 改訂3版金属便覧, 日本金属学会編, 丸善, 東京, (1971), 474.
- 9) 川島忠義, 横堀武夫: 日本材料強度学会誌, 3 (1968), 61.