

## シンターハードニング高強度焼結鋼の 疲労強度及び疲労亀裂伝播特性

下山 仁一\*・河合 伸 泰\*  
山口 和 幸\*\*・寺 澤 和 泰\*\*\*

### The characteristics of fatigue strength and fatigue propagation on high tensile sinter-hardened steels

Toshikazu SHIMOYAMA\* Nobuyasu KAWAI\*  
Kazuyuki YAMAGUCHI\*\* Kazuhiro TERAZAWA\*\*\*

Fatigue strength and fatigue crack propagation behavior have been investigated for high tensile sinter-hardened steels about 500~1000MPa.

The relation between the tensile strength and the fatigue strength has been established and the maximum fatigue strength has been obtained under 1000~1100MPa tensile strength range.

The crack propagation behavior has been obtained using the compact tension specimens.

The relation between the crack propagation rate and the lower limit of stress intensity factor range of  $\Delta K_{th}$  has been made clear. The relation have been influenced by Ni content and sintered density. Propagation rate of high tensile sinter-hardened steel is faster than conventional high tensile steel.

As for high tensile sinter-hardened steel, it was found that fatigue crack propagated through prior particle and grain boundaries.

KEYWORD: High tensile sinter-hardened steel, Fatigue strength, Fatigue crack propagation, Tensile strength  $\sigma_B$ ,  $\Delta CTOD_{th}$ ,  $\Delta K_{th}$ , Crack propagation  $da/dN$ .

#### 1. 緒言

疲労破壊は、繰返し荷重を受け疲労亀裂の発生と伝播によって構造物の破壊に至るものであり、疲労亀裂の発生と伝播及び疲労強度を明らかにすることは、機械構造部材や構造物を設計する上で、極めて重要な問題である。また、疲労強度を高めることが望まれている。このような観点から、小型簡易型疲労試験機を使用し、高強度レベルのシンターハードニング熱処理された焼結鋼について、鋭い切欠き状態での片振り引張疲労強度特性と、CT試験片を用いて疲労亀裂伝播特性を比較、検討した。本研究の供試鋼として、シンターハードニング熱処理されていて、化学組成がほぼ同じでCu含有量に違いがあるPA-R鋼、PA-S鋼、化学組成がほぼ同じでNi含有量に違いがあるPA-T鋼、PA-U鋼、PA-W鋼について疲労強度及び疲労亀裂伝播特性を調べた。また合わせて焼入れ焼戻しされた高強度焼結鋼PA-C、高張力鋼HT-100と比較した。

シンターハードニングとは、焼結後の冷却速度を速めて焼結体の機械的特性を向上させ、熱処理等の後工程を省略させることを目的とした手法である<sup>(1)</sup>。

\* 機械工学科 \*\* 機械工学専攻大学院生 \*\*\* 機械工学科学生

## 2. 簡易型疲労試験機と試験要領

### 2-1 試験機の原理と構造

本装置は Fig.1 に示すように荷重を伝達するレバーを活用し、A点に圧縮変位を与え、支点部B点を介してC点に荷重が伝わり、試験片に引張力を負荷する方式である。

荷重の波形はモータ軸に取り付けた偏芯カムを回転させてA点に偏芯変位で与えることができるようにした試験機である。

また Fig.1 に示すように、モータに装着した偏芯カムによって生成した強制繰返し変位を駆動源とし、自由に動く治具構造で試験片に伝達すれば、微小荷重振幅の試験を安定に行うことができる。

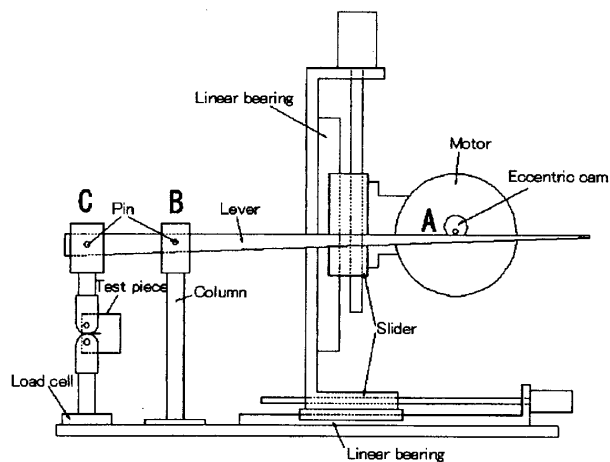


Fig. 1 Test Equipment

### 2-2 試験機の容量と仕様

試験装置本体

負荷荷重範囲 : 200N~3kN

周波数 : 28Hz (電源周波数 60Hz 時)

波形 : 正弦波

概略寸法 : 幅約 350×長さ 850×高さ 500mm

振幅 :  $\pm 200\text{N} \sim \pm 1\text{kN}$

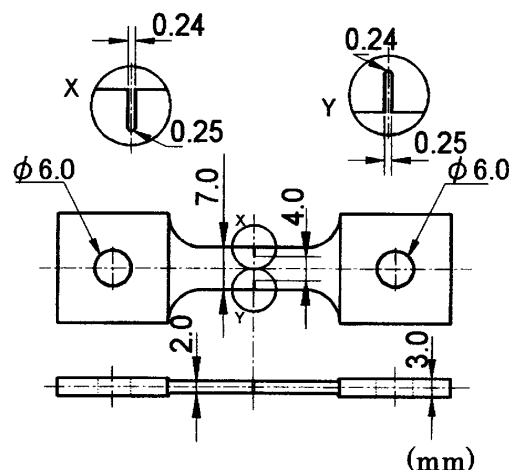


Fig.2 Tensile Fatigue Specimen Size  
With Sharp Notches

### 2-3 疲労強度試験

鋭い切欠き状態での疲労強度試験について述べる。

#### (1) 試験片形状

Fig.2 に鋭い切欠き付きの疲労強度試験片の形状寸法を示す。鋭い切欠きは、放電加工によるワイヤカットにより加工し、切欠き両端の径は約 0.13mm とした。その時の応力集中係数は約  $\alpha \approx 5$  である。

#### (2) 試験方法

最大荷重を決めた後、時間と共に荷重が低下するので決めた  $P$  (荷重) に保つようにした。

#### (3) 荷重条件

最大荷重  $P_{\max}$  は、供試材料の降伏点を基準にし、最初の試験は、約  $0.7 \sim 0.5 \sigma_{ys}$  を選定した。それを基準に 2 本目以降の試験片については  $P_{\max}$  を下げ

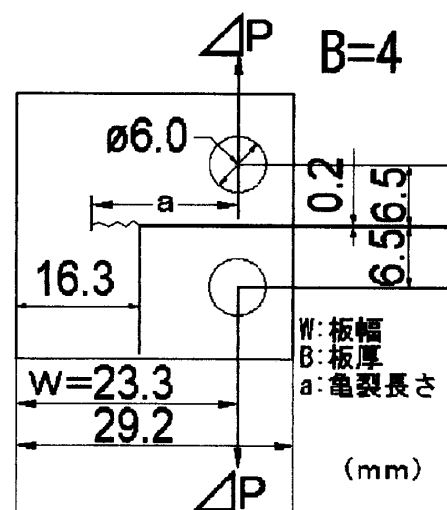


Fig.3 CT Specimen Size

た。また、最小荷重  $P_{\min}$  は、最大荷重の約 10% に設定し片振り引張疲労試験を実施した<sup>(2)</sup>。

#### (4) 疲労強度図(S-N 曲線)の作成

応力範囲  $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

$\sigma_{\max} = P_{\max} / \text{切欠き部の初期断面}$

$\sigma_{\min} = P_{\min} / \text{切欠き部の初期断面}$

繰返し最大応力  $\sigma_{\max}$ 、応力範囲  $\Delta \sigma$  及び応力振幅  $\sigma_a$  と破断時間より求めた繰返し数を片対数のグラフ上にプロットした。

### 2-4 疲労亀裂伝播試験

#### (1) CT 試験片形状

CT タイプの超小型試験片とし、寸法形状を Fig.3 に示した。

#### (2) 試験方法

最大荷重  $P_{\max}$  を決めた後、時間と共に荷重が低下するので、決めた  $P$  (荷重) に保つようにした<sup>(2)</sup>。

#### (3) 応力拡大係数 $K$ と応力拡大係数範囲 $\Delta K$ の計算

CT 試験片に対して、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は次式で計算した。

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B(1 - \alpha)^{3/2} \sqrt{w}} (0.086 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \cdots (1)$$

$$\alpha = a / w$$

$\Delta P$ : 荷重(N)

$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$

$a$ : 亀裂長さ(m)  $w$ : 板幅(m)  $B$ : 板厚(m)

なお、応力拡大係数  $K$  については(1)式の  $\Delta K$  を  $K$  の値に置き換え計算できる。

また、疲労亀裂伝播速度  $da/dN$  と応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は、Paris 式によって次の(2)式で表される。

$$da / dN = C_2 (\Delta K)^{m_2} \cdots (2)$$

$C_2$  及び  $m_2$  は材料定数

また、次に疲労亀裂が伝播しなくなる下限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  から、疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位範囲  $\Delta CTOD_{th}$  (Crack Tip Opening Displacement) は次の(3)式で求められる<sup>(3) (4)</sup>。

$$\Delta CTOD_{th} = \frac{4 (\Delta K_{th})^2}{\pi E \sigma_{ys}} \cdots (3)$$

$E$ : ヤング率

$\sigma_{ys}$ : 0.2% 耐力

本研究では、シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼 (PA-R、PA-S、PA-T、PA-U、PA-W) について、疲労強度試験及び疲労亀裂伝播試験を実施した。

## 3. 供試粉末焼結鋼

シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼 (PA-R、PA-S、PA-T、PA-U、PA-W) の製造データを Table 1 に、化学組成を Table 2、機械的性質を Table 3 にそれぞれ示した。

また、比較に用いている焼入れ焼戻しされた PA-C も示している。

Table 1 Manufacture data of sinter-hardened steels

符号	成分系	粉末と添加元素	合金元素 添加方法	焼結条件	熱処理条件
PA-R	0.2C-1.5Ni-2.0Cu-1.0Mo	96FDH-2Cu	ブレアロイ-プレミックス	1393K 1.2ks N <sub>2</sub> 雰囲気	シンターハードニング 1323K × 0.6ks
PA-S	0.3C-1.5Ni-0.03Cu-1.0Mo	96FDH	ブレアロイ-プレミックス		
PA-T	0.4C-2.5Ni-0.02Cu-1.0Mo	96FDH-1Ni	ブレアロイ-プレミックス		
PA-U	0.3C-3.5Ni-0.02Cu-1.0Mo	96FDH-2Ni	ブレアロイ-プレミックス		
PA-W	0.4C-4.5Ni-0.02Cu-1.0Mo	96FDH-3Ni	ブレアロイ-プレミックス		
PA-C	0.4C-2.5Ni-1Mo	46F4H-2Ni-0.5C	ブレアロイ-プレミックス	1413K × 1.2ks N <sub>2</sub> 雰囲気	1133K × 3.6ks OQ 453K × 3.6ks AC

Table 2 Chemical compositions of sinter-hardened steels

符号	化学組成 (mass%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
PA-R	0.23	0.01	0.31	0.018	0.011	1.53	0.22	0.94	1.92
PA-S	0.26	0.01	0.31	0.013	0.011	1.56	0.23	0.96	0.03
PA-T	0.38	0.01	0.31	0.013	0.011	2.55	0.22	0.95	0.02
PA-U	0.32	0.01	0.31	0.013	0.011	3.43	0.22	0.94	0.02
PA-W	0.41	0.01	0.30	0.012	0.011	4.49	0.22	0.92	0.02
PA-C	0.46	0.02	0.19	0.013	0.007	2.53	0.02	0.94	-

Table 3 Mechanical properties of sinter-hardened steels

符号	焼結密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	機械的性質					
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%) GL=25mm	絞り (%)	ピッカース硬度 HV10	ヤング率 E (GPa)
PA-R	6.83	508	680	1.3	1.3	213	123
PA-S	6.92	375	518	2.4	2.4	224	135
PA-T	6.95	442	634	2.2	2.1	216	134
PA-U	6.99	609	870	1.5	1.2	305	136
PA-W	7.00	710	1014	1.8	1.1	320	137
PA-C	7.02	951	1141	0.7	0.3	345	142

#### 4. 試験結果と考察

##### 4-1 疲労強度試験

各供試焼結鋼について、 $\sigma_{\max}$ (最大応力)、 $\Delta\sigma$ (応力範囲)、 $\sigma_a$ (応力振幅)と破断繰返し数  $N_f$  の関係を求め、 $\sigma_{\max}$  と  $N_f$  について求めた S-N 曲線を描いた。

Fig.4 にシンターハードニング熱処理され、化学組成がほぼ同じで Cu 含有量に違いのある PA-R、PA-S の S-N 曲線に、比較の PA-C と HT-100 を示した。

供試鋼の破断繰返し数  $2 \times 10^6$  回数時間強度  $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$  は 90~100MPa で比較の PA-C とほぼ同じ値となった。しかし、HT-100 と比べると、時間強度に 80MPa の差が生じた。

Fig.5 にシンターハードニング熱処理され、化学組成がほぼ同じで Ni 含有量に違いのある PA-T、PA-U 及び PA-W の S-N 曲線に、比較の PA-C と HT-100 を示した。

供試鋼の破断繰返し数  $2 \times 10^6$  回数時間強度  $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$  は 100~110MPa で比較の PA-C より高い値をとった。だが、HT-100 に比べると時間強度は低い値を示した。

次に、Fig.6 に引張強さ  $\sigma_B$  と破断繰返し数  $2 \times 10^6$  回数の時間強度  $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$  の関係を示す。以前のデータである高張力鋼(HT60~230)、焼結鋼(PA-A~M)も示している<sup>(5)(7)(8)</sup>。高張力鋼は 800~1000MPa を頂点とし実線の範囲で表せることがわかっている。焼結鋼も約 1000MPa を頂点として点線のような範囲を描くと考えられる。

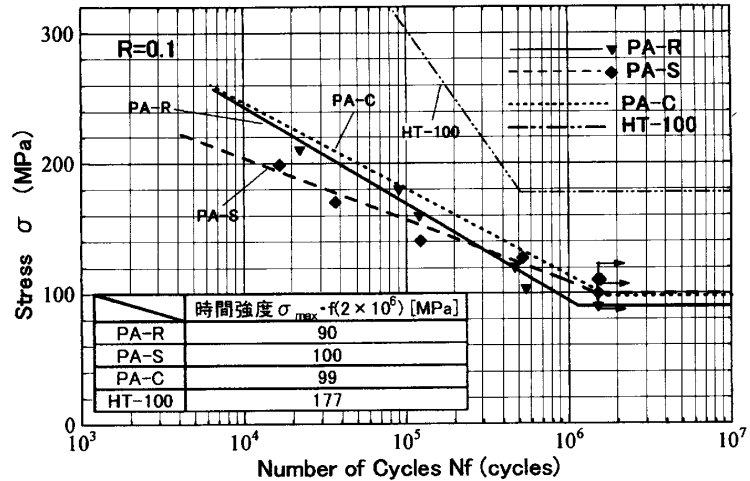


Fig.4 S-N curves of PA-R, PA-S, PA-C and HT-100

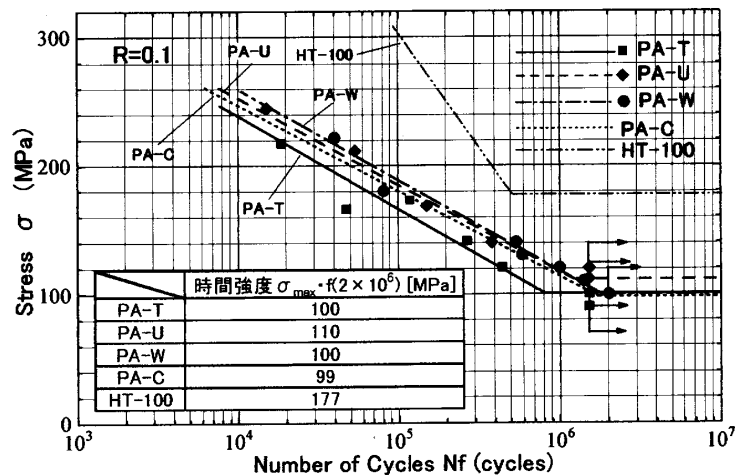


Fig.5 S-N curves of PA-T, PA-U, PA-W, PA-C and HT-100

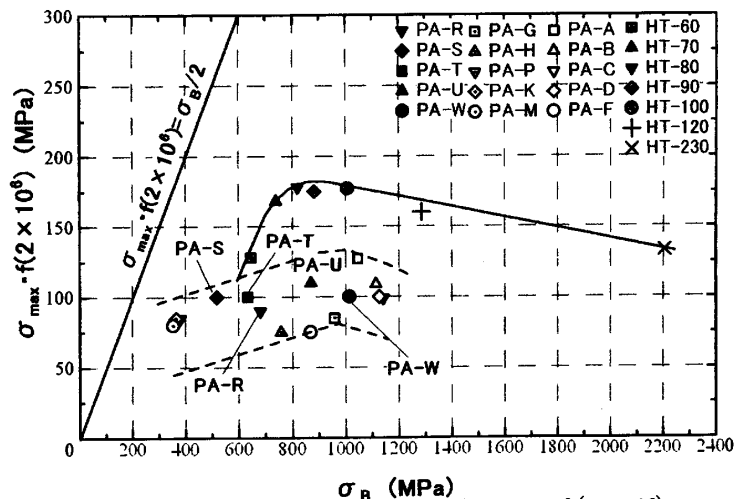


Fig.6 Relation between  $\sigma_B$  and  $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$

#### 4-2 疲労亀裂伝播試験

疲労亀裂伝播試験の結果から応力拡大係数範囲  $\Delta K$  と、亀裂伝播速度  $da/dN$  の関係を Fig.7、Fig.8 に示した。

Fig.7 はシンターハードニング熱処理され、化学組成がほぼ同じで Cu 含有量に違いのある PA-R、PA-S のグラフに、比較で焼入れ焼戻された PA-C と高張力鋼の HT-100 を載せてある。亀裂伝播速度の要因である傾き  $m_2$  の値は、Cu 含有量が PA-S より 2wt% 多い PA-R の方が低い値をとることから、亀裂伝播速度は PA-R の方が遅いことがわかる。これは粒界に存在する Cu の影響が考えられる。続いて、焼入れ焼戻された PA-C や高張力鋼 HT-100 と比べると供試鋼の伝播速度は速いことがわかる。下限応力拡大係数  $\Delta K_{th}$  の値は PA-R が  $4.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  であり、PA-S の値が  $5.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の値をとった。

Fig.8 はシンターハードニング熱処理され、化学組成がほぼ同じで Ni 含有量に違いのある PA-T、PA-U 及び PA-W のグラフに、先ほど用いた比較の PA-C と HT-100 のグラフも示した。今回の供試鋼で Ni 含有量が増加すると、Table3 からわかるように焼結密度の値が高くなり、伝播速度の要因である傾き  $m_2$  の値も低くなり、また、下限応力拡大係数  $\Delta K_{th}$  の値の高くなる。焼結鋼の疲労亀裂伝播には、焼結密度が重要と考えられる。しかし、供試鋼の亀裂伝播速度は比較の PA-C より速いことから熱処理の影響が関係していると考えられる。また、HT-100 と比べても  $\Delta K$  の高い領域で亀裂伝播速度は速いことがわかる。

Fig.9 に疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位の範囲  $\Delta CTOD_{th}$  と、引張強さ  $\sigma_B$  の関係を示した。

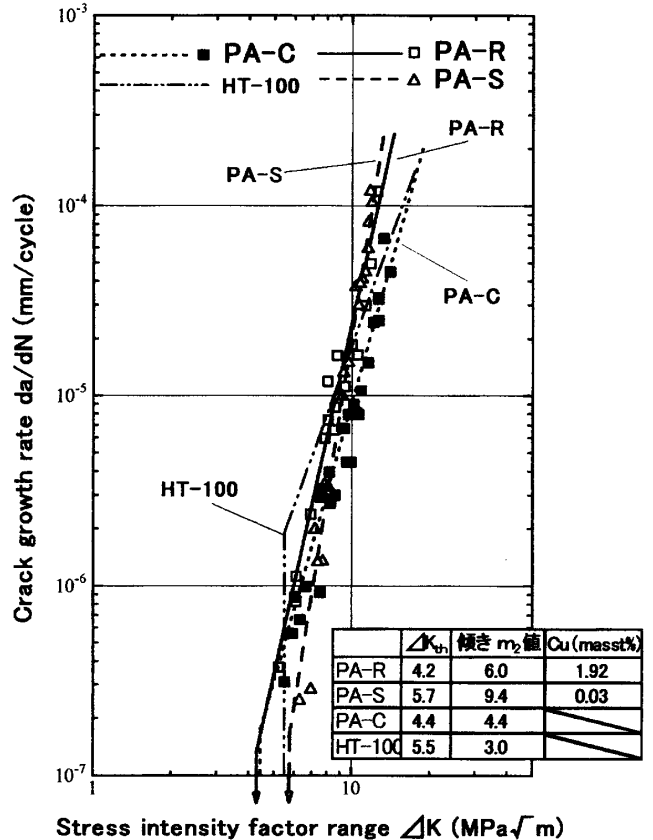


Fig.7  $\Delta K$ - $da/dN$  relation of PA-R, PA-S, PA-C and HT-100

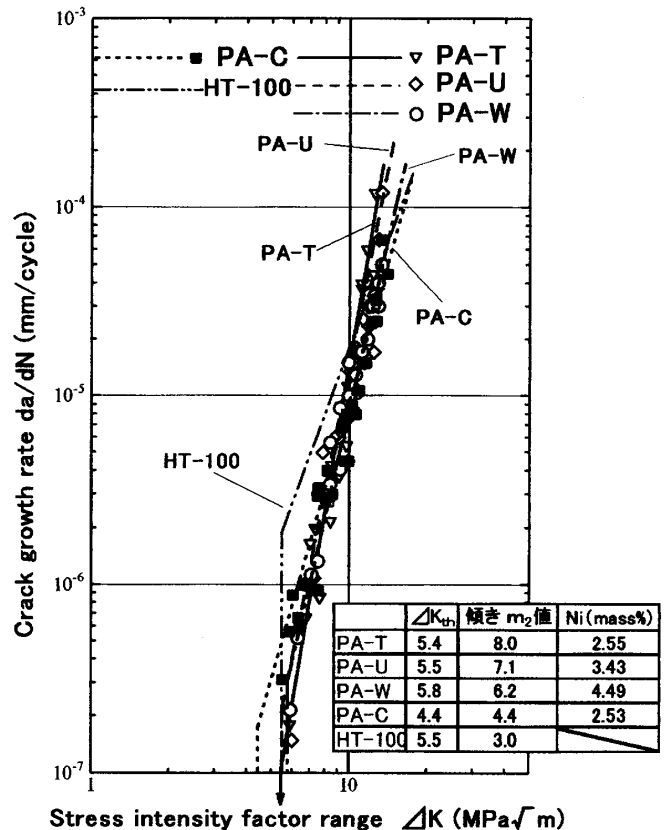


Fig.8  $\Delta K$ - $da/dN$  relation of PA-T, PA-U, PA-W, PA-C and HT-100

以前のデータである高張力鋼 (HT-60~230)、焼結鋼(PA-A~M)も示している<sup>(6)(7)(9)</sup>。高張力鋼(HT-60~230)は、引張強さ $\sigma_B$ の値が高くなると $\Delta CTOD_{th}$ の値は低くなり、Fig.9 に示すように右下がりの傾向が見られる。

今回の供試鋼でもある焼結鋼も高張力鋼と同じような傾向があると考えられる。

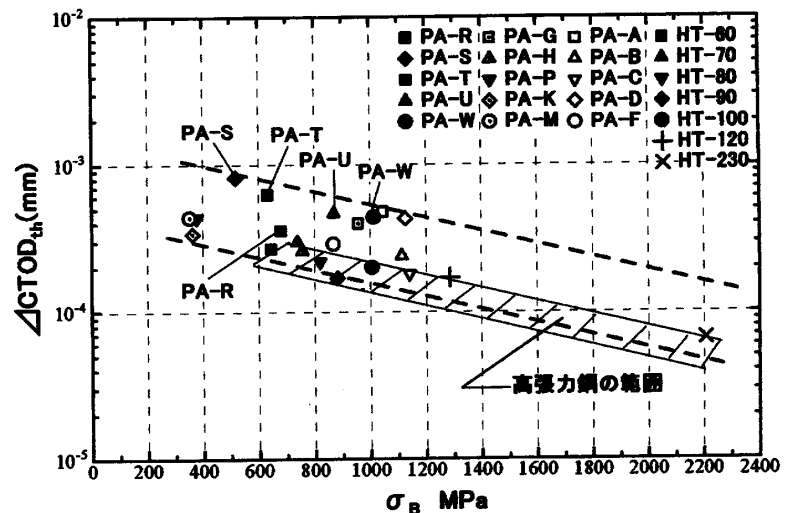


Fig.9 The relation between  $\sigma_B$  and  $\Delta CTOD_{th}$

#### 4-3 ミクロ組織観察

シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼のミクロ組織観察を行った。

Fig.10 には今回の供試鋼 PA-R のミクロ組織を示す。焼結鋼は、元の粒子界面または結晶粒界を通して破壊が起きていることがわかった。また、気孔が数多く存在するが確認できる。このことから、粒子同士の結束が弱く、気孔が複数存在するため結晶粒界を通り疲労破壊したと考えられる。

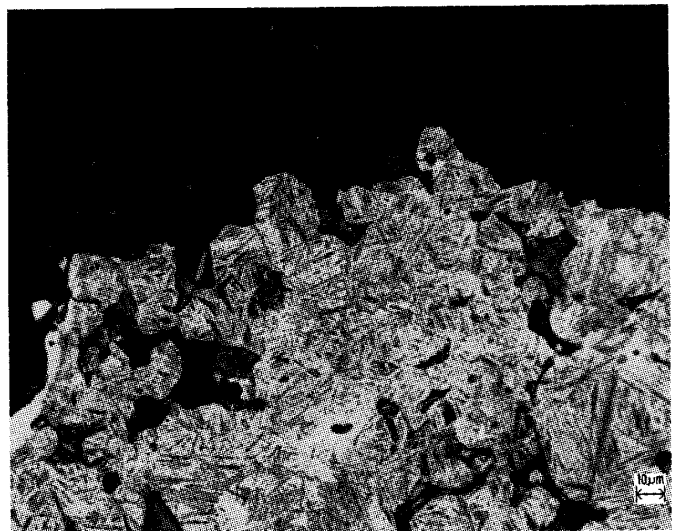


Fig.10 Micro structure of sinter-hardened steels (PA-R)

#### 4-4 破断面組織観察

シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼について、走電子顕微鏡(SEM)による観察を行った。

Fig.11 は供試鋼PA-Rの破面を観察したものである。粉末粒子の原型を残したものや、粉末粒子の結合部分が剥がれてきた面などが見られる。また、気孔も数多く見ることができる<sup>(10)</sup>。

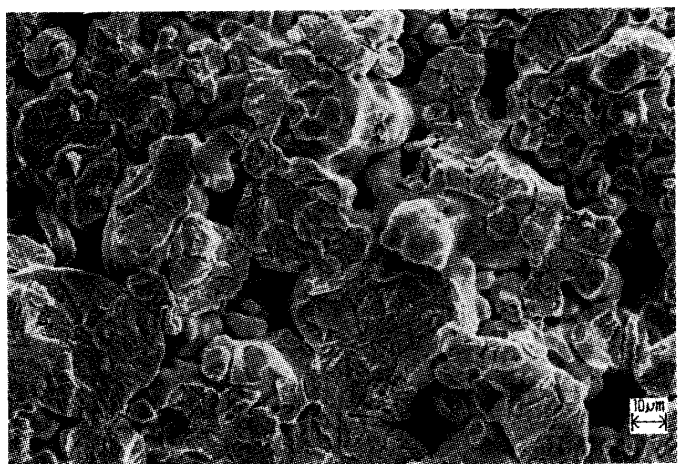


Fig.11 Fracture surface of sinter-hardened steels (PA-R)

### 5 結言

引張強さが 500~1000MPa 級の、シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼 (PA-R、

PA-S、PA-T、PA-U、PA-W) について疲労強度及び疲労亀裂伝播特性を調べた。

その結果を要約すると次の通りである。

- 1) シンターハードニング熱処理された高強度焼結鋼の疲労強度は S-N 曲線から 100MPa 前後であるが、高張力鋼 (HT-100) の S-N 曲線と比べると、疲労強度は低く、寿命が短いことが明らかになった。
- 2) シンターハードニング高強度焼結鋼の機械的性質である引張強さ  $\sigma_B$  と、繰返し数  $2 \times 10^6$  回数の時間強度  $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$  との関係を求めると、引張強さ  $\sigma_B$  が約 1000～1100MPa の領域で最高になることが明らかになった。
- 3) シンターハードニング高強度焼結鋼の応力拡大係数範囲  $\Delta K$  と亀裂伝播速度  $da/dN$  の関係から、Cu 含有量の多い供試鋼は伝播速度が遅いが、低応力でも亀裂が伝播することがわかった。これは粒界に存在する Cu の影響が考えられる。また、Ni 含有量が多くなると焼結密度が高くなり、疲労亀裂伝播速度の低下や下限界応力拡大係数  $\Delta K_{th}$  値の増加などに繋がることがわかった。
- 4) 疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位の範囲  $\Delta CTOD_{th}$  と、引張強さ  $\sigma_B$  の関係から、引張強さ  $\sigma_B$  の値が高くなると  $\Delta CTOD_{th}$  の値は低くなり、右下がりの傾向が見られる。
- 5) シンターハードニング高強度焼結鋼のミクロ組織や SEM 組織観察から元の粒子界面または結晶粒界を通り破壊をしていることが明らかになった。

## 参考文献

- (1) 鈴木 浩則、佐藤 正昭、関 義和 : Ni-Mo-Cr-Mn 系プレアロイ型鋼粉のシンターハードニング特性  
粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集, 2002 年, 1-8A
- (2) 國尾 武、中沢 一、林 郁彦、岡村 弘之 : 破壊力学実験法, 朝倉書店, 1984 年
- (3) 横堀武夫 : 日本金属学会 強度委員会編, 金属材料の強度と破壊, 丸善株式会社, 1964 年
- (4) 横堀武夫 : 金属の疲労破壊, 丸善株式会社, 1970 年
- (5) 春日 一輝、芝本 宗幸、中谷 努、葛山 大豪 : 平成 12 年度卒業論文 粉末焼結鋼の疲労強度特性に関する研究, 2000 年
- (6) 岩田 篤、西畠 修一、三島 淳志、山本 大介 : 平成 12 年度卒業論文 粉末焼結鋼の疲労亀裂伝播特性に関する研究, 2000 年
- (7) 山口 和幸、藤木 真琴 : 平成 13 年度卒業論文 高強度粉末焼結鋼の疲労強度及び疲労亀裂伝播特性に関する研究, 2001 年
- (8) 小牧 祐紀、種本 雅裕、永野 敏幸、松浦 圭祐 : 平成 14 年度卒業論文 粉末焼結鋼の疲労強度特性に関する研究, 2002 年
- (9) 玉野 宏明、山口 宜紀、牛越 寛生 : 平成 14 年度卒業論文 粉末焼結鋼の疲労亀裂伝播特性に関する研究, 2002 年
- (10) 藤木 榮 : 機械部品の疲労破壊・破断面の見方, 日刊工業新聞社, 2002 年  
(平成 15 年 11 月 4 日受理)