

高強度粉末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*
岩 田 篤**・山 口 和 幸**

The characteristics of fatigue strength and fatigue propagation on high tensile sintered steels

Toshikazu Shimoyama, Nobuyasu Kawai, Atsushi Iwata and Yamaguchi

Fatigue strength and fatigue crack propagation behavior have been investigated for high tensile sintered steels about 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 relation between the tensile strength and the fatigue strength has been established and the crack propagation behavior has been obtained using the compact tension specimens. Threshold of stress intensity factor range ΔK_{th} has been obtained and the relation between the fatigue strength and ΔK_{th} has been made clear. Propagation speed of high tensile sintered steel is faster than that of high tensile steel. The fracture of high tensile sintered steel occurred of grain boundary fracture than through the interior of grains.

KEYWORD: High tensile sintered steel, Fatigue strength, Fatigue crack propagation, Tensile strength σ_B , $\Delta CTOD_{th}$, ΔK_{th} , Crack propagation da/dN .

1. 緒言

機械構造部材や構造物の破壊・破損の約 60%以上は、疲労によるものである。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、本実験で使用した粉末焼結鋼は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、自動車部品であるミッション、クランク、コンロッドなどの自動車部品に多く使用されている、高強度レベルの粉末焼結鋼について、鋭い切り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、引張強さが 1000 MPa 級、焼入れ焼戻しの高強度粉末焼結鋼である、拡散型粉末焼結鋼 (PA-A)、プレアロイ型粉末焼結鋼 (PA-B)、プレアロイ・プレミックス型粉末焼結鋼 (PA-C、PA-D)、について疲労強度及び疲労亀裂伝播特性を調べた。また合わせて引張強さの同じ高張力鋼 HT-100 鋼、プレアロイ・プレミックス型の高強度粉末焼結鋼 (PA-F)、焼結のままの低強度粉末焼結鋼 (PA-P、PA-K、PA-M) と比較した。

* 機械工学科 ** 機械工学専攻大学院生

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。

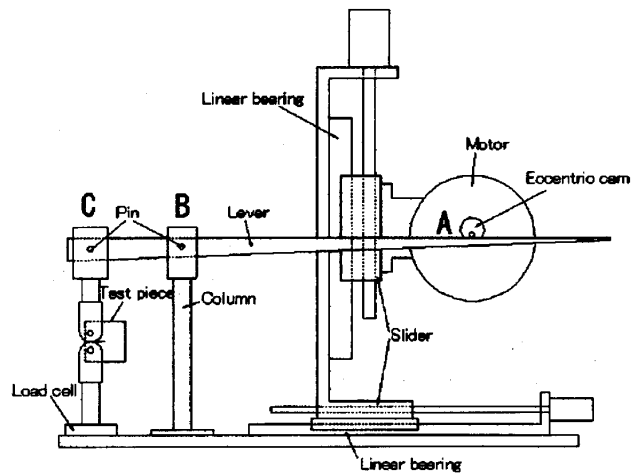


Fig. 1 Test Equipment

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

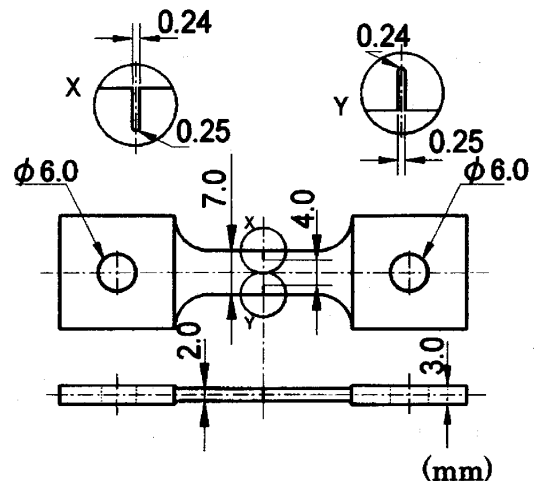


Fig.2 Tensile Fatigue Specimen Size
With Sharp Notches

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

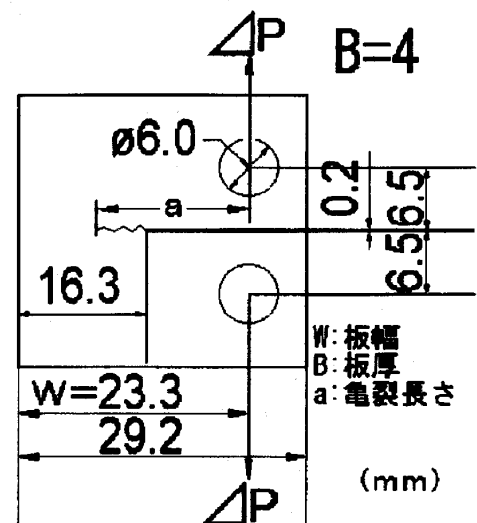


Fig. 3 CT Specimen Size

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。

(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 σ_{\max} 、応力範囲 $\Delta \sigma$ 及び応力振幅 σ_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。

(3) 応力拡大係数 K と応力拡大係数範囲 ΔK の計算

CT 試験片に対して、応力拡大係数範囲 ΔK は次式で計算した。

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

$$\alpha = a/w$$

$$\Delta P: \text{荷重(N)} \quad \Delta P = P_{\max} - P_{\min}$$

$$a: \text{亀裂長さ(m)} \quad w: \text{板幅(m)} \quad B: \text{板厚(m)}$$

なお、応力拡大係数 K については(2)式の ΔK 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 ΔK は、Paris 式によって次の(3)式で表される。

$$da/dN = C_2 (\Delta K)^{m_2} \dots (3)$$

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 ΔK_{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(4)式で求められる。

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

E : ヤング率

σ_{ys} : 0.2% 耐力

本研究では、焼入れ焼戻し高強度粉末焼結鋼 (PA-A、PA-B、PA-C、PA-D) 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

焼入れ焼戻しの高強度粉末焼結鋼 (PA-A、PA-B、PA-C、PA-D、PA-F) と、焼結のままの低強度粉末焼結鋼 (PA-P、PA-K、PA-M) 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。

Table 1 Manufacture data of sintered 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-A | 0.4C-4Ni-0.5Mo-1.5Cu | 4800DF-Cu-0.5C | 拡散型 | 1140℃ 20min N ₂ 雰囲気 | 880℃ 60min OQ 180℃ 60min AC |
| PA-B | 0.4C-0.5Ni-1Mo | 46F4H-0.5C | プレアロイ型 | | |
| PA-C | 0.4C-2.5Ni-1Mo | 46F4H-2Ni-0.5C | プレアロイ-プレミックス | | |
| PA-D | 0.4C-4.5Ni-1Mo | 46F4H-4Ni-0.5C | プレアロイ-プレミックス | | |
| PA-F | 0.5C-1.5Ni-1.0Mo-2.0Cu | 46F3H-2Cu-0.6C | プレアロイ-プレミックス | | 焼結のまま |
| PA-P | 0.5C | 300M-Mn | プレミックス | | |
| PA-K | 0.5C-0.3Mn-0.3MnS | 300M-Mn | MnS添加なし | | |
| PA-M | 0.56C-0.6Mn-0.3S | 400MSA | プレアロイ | | |

Table 2 Chemical compositions of sintered steels

| 材料の種類 | 化学組成 (wt%) | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Cu |
| PA-A | 0.42 | 0.01 | 0.08 | 0.008 | 0.004 | 4.22 | 0.02 | 0.55 | 1.5 |
| PA-B | 0.45 | 0.02 | 0.19 | 0.013 | 0.008 | 0.5 | 0.01 | 0.95 | - |
| PA-C | 0.46 | 0.02 | 0.19 | 0.013 | 0.007 | 2.53 | 0.02 | 0.94 | - |
| PA-D | 0.45 | 0.02 | 0.19 | 0.013 | 0.008 | 4.52 | 0.02 | 0.92 | - |
| PA-F | 0.56 | 0.01 | 0.19 | 0.014 | 0.007 | 1.44 | 0.01 | 1.05 | 1.98 |
| PA-P | 0.50 | 0.008 | 0.20 | 0.015 | 0.007 | - | - | - | 2.07 |
| PA-K | 0.48 | 0.010 | 0.41 | 0.015 | 0.104 | - | - | - | 1.92 |
| PA-M | 0.46 | 0.014 | 0.61 | 0.015 | 0.281 | - | - | - | 1.98 |

Table 3 Mechanical properties of sintered steels

| 材料の種類 | 機械的性質 | | | | | |
|-------|-----------------|---------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|----------------|
| | 0.2%耐力 (MPa) | 引張強さ (MPa) | 伸び (%) GL=2.5mm | 絞り (%) | ビッカース硬度 (10kgf) ※(200gf) | ヤング率E (GPa) |
| PA-A | 833 | 1046 | 1.30 | 0.90 | 325 | 138 |
| PA-B | 968 | 1113 | 0.60 | 0.40 | 331 | 141 |
| PA-C | 951 | 1141 | 0.70 | 0.30 | 345 | 142 |
| PA-D | 877 | 1126 | 1.10 | 0.40 | 351 | 147 |
| PA-F | 806 | 869 | 0.50 | 0.00 | 318 | 127 |
| PA-P | 273 | 363 | 3.30 | 2.30 | ※171 | 130 |
| PA-K | 280 | 379 | 3.10 | 2.30 | ※164 | 131 |
| PA-M | 282 | 353 | 2.70 | 2.70 | ※161 | 124 |

4. 試験結果と考察

4-1 疲労強度試験

各供試粉末焼結鋼について、 σ_{\max} (最大応力)、 $\Delta\sigma$ (応力範囲)、 σ_a (応力振幅)と破断繰返し数

Nf の関係を求め、 σ_{\max} と Nf について求めた S-N 曲線を描いた。Fig.4 に高強度粉末焼結鋼と比較に用いた高張力鋼 (HT-100) の σ_{\max} と破断繰返し数 Nf について求めた S-N 曲線を示す。

Fig.4 の高強度粉末焼結鋼の破断繰返し数 2×10^6 回数時間強度 $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$ は、PA-A 粉末焼結鋼は 127MPa、PA-B 粉末焼結鋼は 109MPa、PA-C 粉末焼結鋼は 99MPa、PA-D 粉末焼結鋼は 100MPa、また、比較に用いた高張力鋼 HT-100 鋼は 177MPa である。

次に、Fig.5 に引張強さ σ_B と破断繰返し数 2×10^6 回数の時間強度 $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$ の関係を示す。また、合わせて以前までの実験結果である高張力鋼とプレアロイープレミックス型高強度粉末焼結鋼 (PA-F)、焼結のままの低強度粉末焼結鋼 (PA-P、PA-K、PA-M) の結果もプロットした。この結果から鋭い切欠き下の時間強度 $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$ は、引張強さ σ_B が約 1000~1100MPa 領域で最大になることが分かった。

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 ΔK と、亀裂伝播速度 da/dN の関係を示した。

Fig.6 に焼入れ焼戻し高強度粉

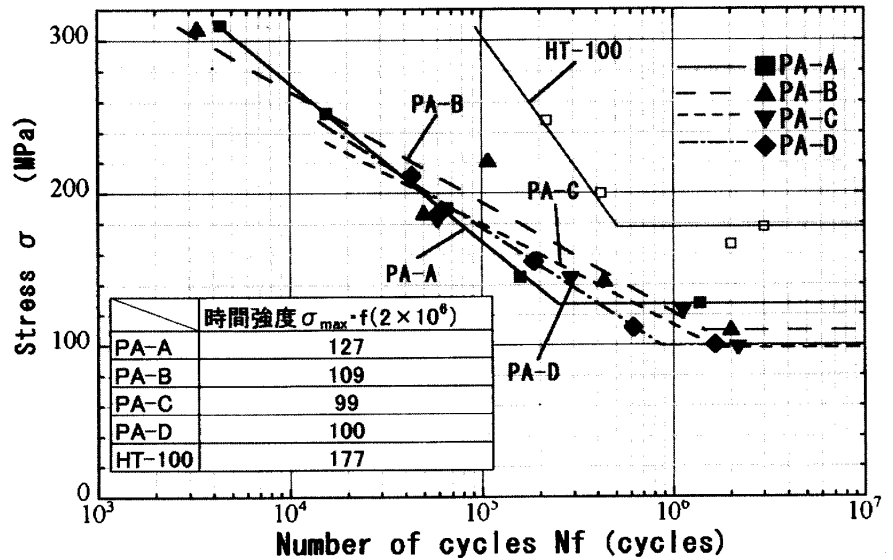


Fig.4 S-N curves of PA-A, PA-B, PA-C, PA-D and HT-100

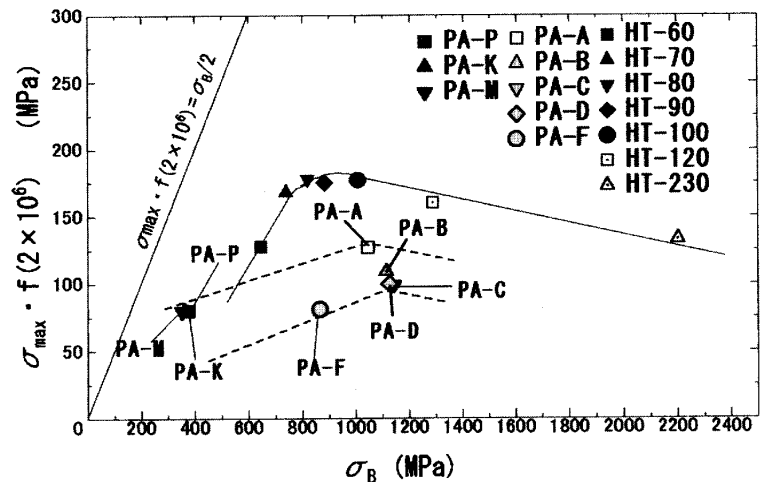


Fig.5 Relation between σ_B and $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$

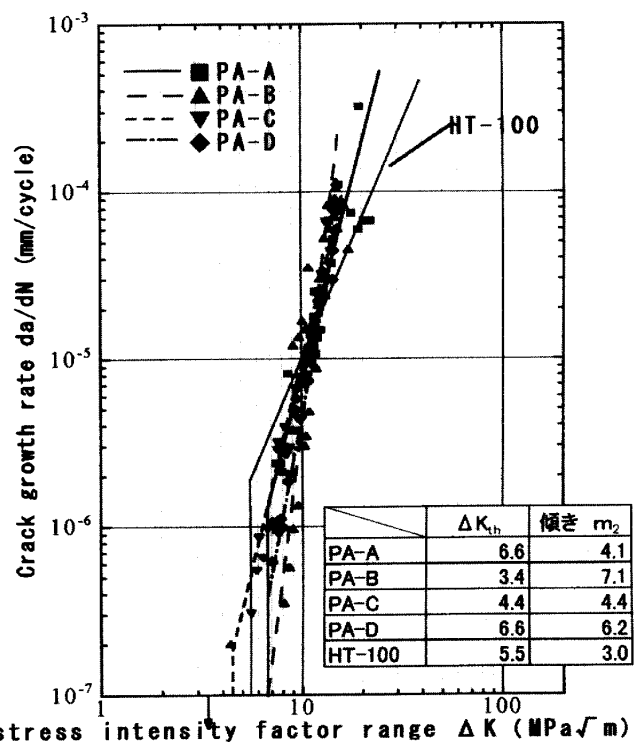
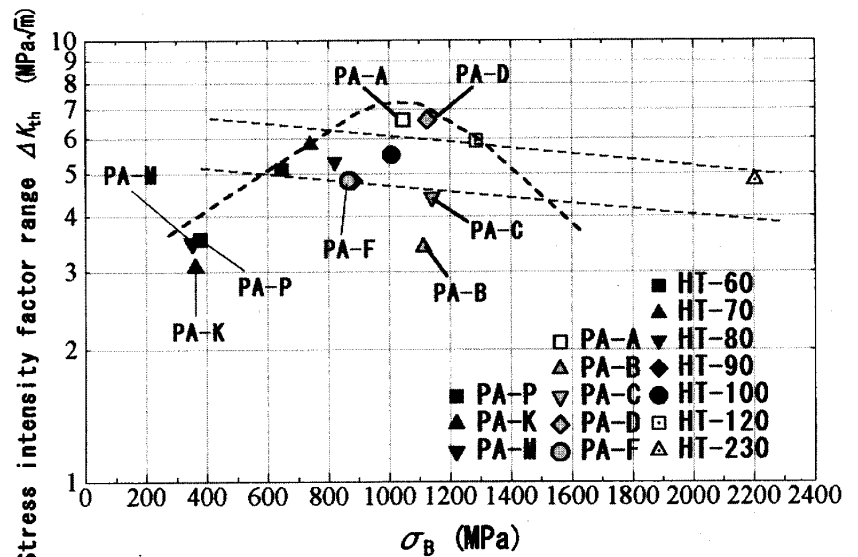
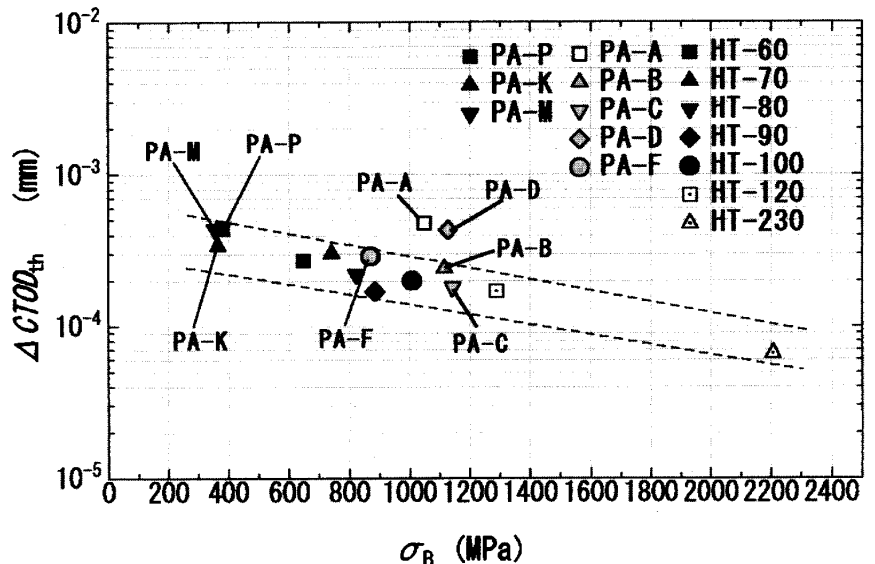
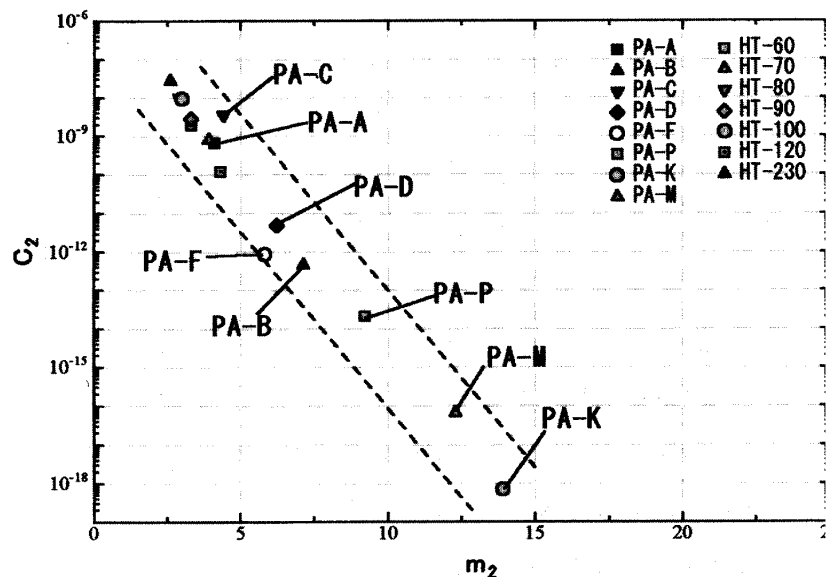


Fig.6 ΔK - da/dN relation of PA-A, PA-B, PA-C, PA-D and HT-100

末焼結鋼 (PA-A、PA-B、PA-C、PA-D)、また比較として用いた高張力鋼 (HT-100) も合わせてプロットした。下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 値は、PA-A 粉末焼結鋼と PA-D 粉末焼結鋼の $6.6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ が最も高く、最も低かったのは PA-B 粉末焼結鋼の $3.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。疲労亀裂伝播速度 da/dN の対数値の傾斜 m_2 は、PA-A 粉末焼結鋼は 4.1、PA-B 粉末焼結鋼は 7.1、PA-C 粉末焼結鋼は 4.4、PA-D 粉末焼結鋼は 6.2 が得られた。また比較の高張力鋼 (HT-100) と比べると、本実験で使用した高強度粉末焼結鋼は傾き m_2 が大きいことから伝播速度が速いことが分かった。

次に、引張強さ σ_B と疲労亀裂が伝播しなくなる下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の関係について、Fig.7 に一括して示した。高張力鋼では、引張り強さ σ_B が大きくなるにつれて ΔK_{th} が下がる傾向があるのに対して、粉末焼結鋼では、約 1000MPa で ΔK_{th} が最大になり、そこから引張り強さ σ_B が大きくなるにつれて ΔK_{th} が下がると推測される。続いて、Fig.8 に引張強さ σ_B と、疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位範囲 $\Delta CTOD_{th}$ の関


 Fig.7 Relation between σ_B and ΔK_{th}

 Fig.8 Relation between σ_B and $\Delta CTOD_{th}$

 Fig.9 Relation between m_2 and C_2

係を一括で示した。以前までの高張力鋼の実験結果と合わせて比較してみた。高張力鋼では、引張強さが高くなるにつれては、 $\Delta CTOD_{th}$ が低くなるが、今回の供試鋼である粉末焼結鋼もまた引張強さが高くなるにつれ $\Delta CTOD_{th}$ が低くなる傾向がみられる。

次に、Fig.9 に疲労亀裂伝播速度 da/dN の対数値の傾斜 m_2 と、材料定数 C_2 の関係について一括して示す。高強度粉末焼結鋼は、以前までの実験結果である、高張力鋼と同じ直線上に位置していることが分かった。

4-3 ミクロ組織観察

高強度粉末焼結鋼と高張力鋼についてミクロ観察を行った。Fig.10 は高強度粉末焼結鋼 (PA-B) のミクロ組織である。また、Fig.11 は高張力鋼 (HT-100) のミクロ組織である。高張力鋼は結晶粒内を通過して破壊しているのに対して、高強度粉末焼結鋼は、結晶粒界を通ることが分かる。また、高強度粉末焼結鋼には複数の気孔を見ることができる。このことから、粒界同士の結束が弱く、高強度粉末焼結鋼は疲労により結晶粒界を通り破壊したと考えられる。

4-4 破断面観察

高強度粉末焼結鋼と高張力鋼について、走電子顕微鏡顕微鏡 (SEM) による観察を行った。Fig.12 は高強度粉末焼結鋼 (PA-A) の SEM の写真である。Fig.13 は高張力鋼 (HT-100) の SEM の写真である。高張力鋼は疲労破面を見ることができるが、高強度粉末焼結鋼では、結合結晶粒界を見ることができる。



Fig. 10 Micro structure of sintered steel (PA-B)

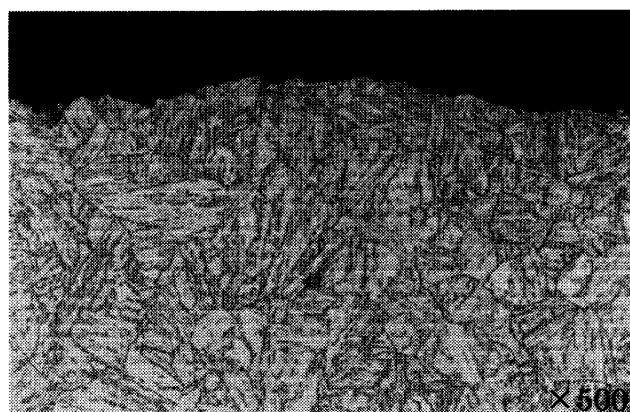


Fig. 11 Micro structure of high tensile steel (HT-100)

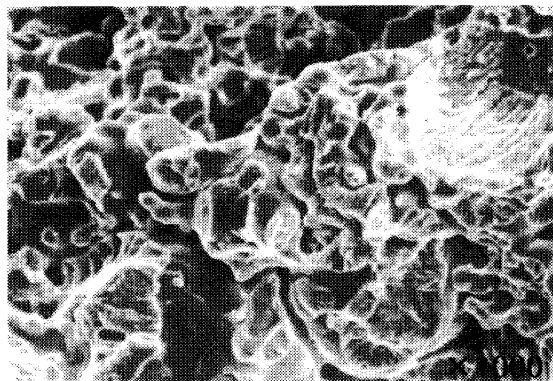


Fig. 12 Fracture surface of high tensile powder sintered steel (PA-A)

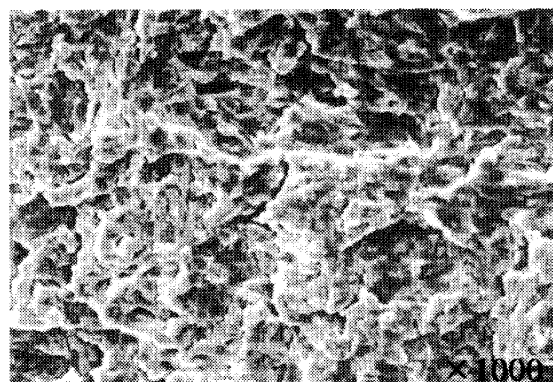


Fig. 13 Fracture surface of high tensile steel (HT-100)

5 結言

引張強さが 1000MPa 級の、焼入れ焼戻し高強度粉末焼結鋼である、拡散型粉末焼結鋼 (PA-A)、プレアロイ型粉末焼結鋼 (PA-B)、プレアロイ-プレミックス型粉末焼結鋼 (PA-C、PA-D) 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) 高強度粉末焼結鋼と高張力鋼 (HT-100) の S-N 曲線のグラフより、強度が同じでも高強度粉末焼結鋼のほうが、疲労強度が低いことが明らかになった。
- 2) 高強度粉末焼結鋼の機械的性質引張強さ σ_B と、繰返し数 2×10^6 回数の時間強度 $\sigma_{\max} \cdot f(2 \times 10^6)$ との関係を探めると、引張強さ σ_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) 高強度粉末焼結鋼と高張力鋼 (HT-100) の応力拡大係数範囲 ΔK と、亀裂伝播速度 da/dN の関係を探めると、傾き m_2 の値が高張力鋼 (HT-100 鋼) は 3.0 に対して、高強度粉末焼結鋼は 4.1~7.1 と傾きが大きいことから、粉末焼結鋼の伝播速度は速いことが明らかになった。
- 4) 高強度粉末焼結鋼の機械的性質引張強さ σ_B と、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の関係を探めると、引張強さ σ_B が約 1000MPa で下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が最大になり、そこから引張強さ σ_B が高くなるにつれは下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が低くなることが明らかになった。
- 5) 高強度粉末焼結鋼と高強度鋼のミクロ組織から、高張力鋼は粒内を通り破壊しているのに対して、高強度粉末焼結鋼は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) 米沢正倫、清水誠、長野和俊、藤井学 平成 11 年度卒業論文 金属系新材料の疲労特性に関する研究 (調質高張力鋼及び超高張力鋼の疲労強度及び疲労亀裂特性) 1999 年
- (2) 春日 一輝、芝本 宗幸、中谷 努、葛山 大豪 平成 12 年度卒業論文 粉末焼結鋼の疲労特性に関する研究 2000 年
- (3) 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
- (4) 山口 和幸、藤木 真琴 平成 13 年度 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
- (5) 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
- (6) 横堀武夫 金属の疲労破壊 丸善株式会社 1970 年
- (7) 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
- (8) 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 14 年 12 月 6 日受理)