

(技術資料)

# 焼結浸炭歯車に適用したNi-Mo系プレアロイ粉「46F4H」

## Ni-Mo Pre-alloyed Powder "46F4H" Applicable to Carburized Sintered Gear



西田 智\*1  
Satoshi NISHIDA



鈴木浩則\*2  
Hironori SUZUKI



吉田真規\*3  
Masaki YOSHIDA

In order to increase the applicability of sintered parts in automobiles, sintered materials with high fatigue strength must be developed. In this study, 46F4H (0.5Ni-1.0Mo) pre-alloyed steel powder was sintered into gears, each having densities varying, by location, from 7.4 g/cm<sup>3</sup> to 7.5 g/cm<sup>3</sup> against the true density of 7.8 g/cm<sup>3</sup>. Their surfaces were densified by rolling, which resulted in a tooth bending fatigue strength and rolling contact fatigue strength equal to or higher than those of wrought steel (SCM415) gears. Shot peening, as an alternative for rolling, also has achieved comparable tooth bending fatigue strength for similar densities. This study has shown that the sintered gears, based on 46F4H, with their teeth rolled for surface densification or shot-peened to increase their residual stress, can provide fatigue strength comparable to that of wrought steel, even without powder forging.

まえがき = 自動車用トランスミッションには通常、クロム鋼 (SCr) やクロム・モリブデン鋼 (SCM) などの溶製鋼を浸炭焼入れした歯車 (以下、浸炭焼入れ溶製鋼歯車という) が多く使用されている。一方、焼結鋼を浸炭焼入れした歯車 (以下、焼結浸炭焼入れ歯車という) は、溶製鋼よりも面圧疲労強度が低いためにほとんど実用化されていない。

しかしながら従来の研究で、低合金鋼粉アトメル 46F4H (0.5 mass%Ni-1.0 mass%Mo) (以下、46F4Hという) を用いた歯車を粉末鍛造し、溶製鋼と同等の真密度で浸炭すれば、浸炭焼入れ溶製鋼歯車と同等の疲労特性を示すことが明らかにされている<sup>1)</sup>。

そこで本開発では、低コスト化<sup>2)</sup>を目的に46F4Hを用い、粉末鍛造のようにワーク全体を真密度 (7.8 g/cm<sup>3</sup>) まで上げずに7.4~7.5 g/cm<sup>3</sup>の高密度焼結体を作製した。これを歯車形状に加工した後、転造加工により歯部表面層部のみを緻密化し、さらに浸炭焼入れすることによって焼結浸炭歯車を作製した。

この焼結浸炭歯車の疲労強度を評価した結果、歯元曲げ疲労強度および面圧疲労強度において、浸炭焼入れ溶製鋼歯車に匹敵する荷重負荷能力を有することを確認した<sup>3)~5)</sup>。さらに、転造加工ではなく汎用性のあるショットピーニング加工を行った場合の焼結浸炭歯車の特性についても同様の密度で強度評価を行った。その結果、溶製鋼と同等の疲労強度であることを確認した<sup>6)</sup>。

本稿では、46F4Hを原料としたブランク材から歯車を作製し、さらに転造加工およびショットピーニング加工を行った焼結浸炭歯車の特性について報告する。

### 1. 46F4Hの概要

#### 1.1 46F4Hの特長

46F4Hは、水アトマイズ製法により製造した0.5 mass% Ni-1.0 mass% Mo組成をもつ完全低合金鋼粉 (以下、プレアロイ粉という) であり、その焼結部品は、均質な金属組織を得ることができる。粉体特性を表1に示す。

46F4Hの合金元素および組成は、①圧縮性が高い、②耐酸化性に優れ、焼結部品に一般的に多く使用される酸素ポテンシャルの高いエンドサーミックガス (RXガス) 雰囲気中でも使用が可能、③靱性が良い、④切削加工性が良い、⑤寸法精度が良い、などの項目を留意して合金成分の最適化が図られている<sup>7)</sup>。

とくに、フェライト硬化能が大きいNi含有量を抑えたことにより、プレアロイ粉にも関わらず純鉄粉 (アトメル300M) と同等の圧縮性を示すことが大きな特長となっている (図1)。

#### 1.2 疲労強度特性

当社の製品である高強度浸炭焼結材用プレアロイ粉 (Ni-Mo系およびMo系) に0.3mass%黒鉛粉を混合して作製した浸炭焼入れ焼結鋼の回転曲げ疲労強度 (焼結体密度7.0 g/cm<sup>3</sup>)、および二円筒式面圧疲労強度 (焼結体密度7.3 g/cm<sup>3</sup>) を表2に示す。回転曲げ疲労強度の焼結条件はN<sub>2</sub>雰囲気、1,120℃ (1,393 K) × 1,800 s、浸炭条

表1 46F4Hの粉体特性

Table 1 Powder properties of 46F4H

AD (g/cm <sup>3</sup> )	FR (s/50g)	GD (g/cm <sup>3</sup> )	RV (%)
2.99	22.3	6.91	0.77

Fe+0.75Lub, 490 MPa

\*1 鉄鋼事業部門 鉄粉本部 鉄粉工場 \*2 鉄鋼事業部門 鉄粉本部 鉄粉工場 (現 鉄粉本部 鉄粉企画室) \*3 鉄鋼事業部門 鉄粉本部 鉄粉企画室

表2 Ni-Mo系およびMo系プレアロイ浸炭材疲労強度

Table 2 Fatigue strength of Ni-Mo and Mo pre-alloyed sintered steel powders

Pre-alloyed steel powder	4600	46F2H	46F4H	44FH85	44FH
Chemical composition	2Ni-0.5Mo	0.5Ni-0.5Mo	0.5Ni-1.0Mo	0.85Mo	1.5Mo
Rotating bending fatigue limit, (MPa), SD:7.0	400	411	425	400	368
Tooth bearing fatigue strength on rollers test (GPa), SD:7.3	-	-	1.55	1.50	1.42

Addition:Fe-0.3Gr

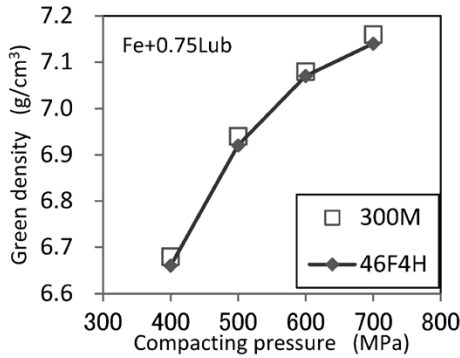


図1 46F4H/300Mの圧縮曲線

Fig. 1 Compression curve of 46F4H/300M

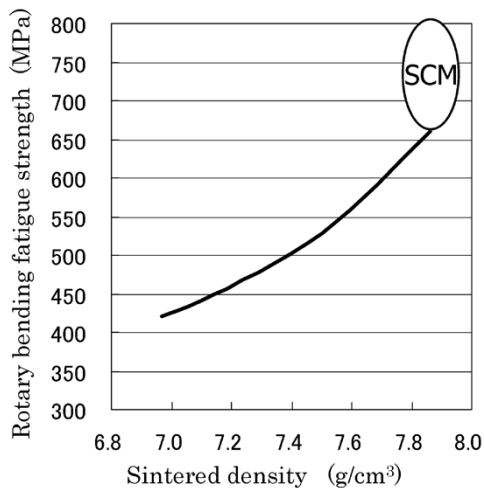


図2 46F4H-0.3Cの回転曲げ疲労強度

Fig. 2 Rotating bending fatigue strength for sintered 46F4H-0.3C

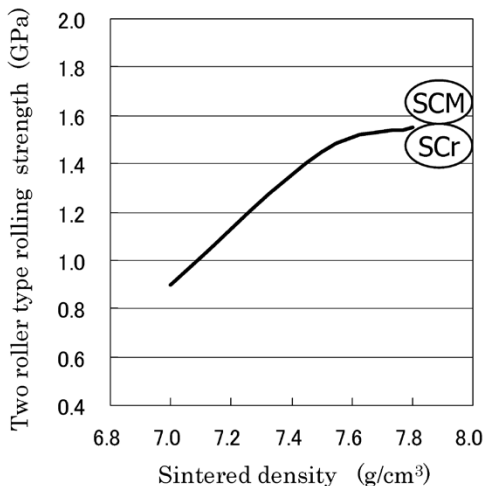


図3 46F4H-0.3Cの二円筒式面圧疲労強度

Fig. 3 Two roller type rolling strength of sintered 46F4H-0.3C

件は、920℃ (1,193 K) × 3,600 s (CP:0.8)、850℃ (1,123 K) × 3,600 sでの油焼入れ、200℃ (473 K) × 3,600 sでの焼戻しであり、回転曲げ疲労強度および二円筒面圧疲労強度は、 $1.0 \times 10^7$ サイクルを疲労限としている。

表2の結果から、46F4Hの疲労特性は、回転曲げ疲労強度が425 MPa、二円筒疲労強度が1.55 GPaであり、いずれも他のNi-Mo系およびMo系プレアロイ粉よりも高い値を示す。そのため従来、46F4Hは焼結粉末鍛造の研究に用いられており<sup>8), 9)</sup>、真密度まで高めれば、回転曲げ疲労は溶製鋼SCMと同等となる(図2)。また、面圧疲労強度においては密度7.5 g/cm<sup>3</sup>以上では溶製鋼SCMと同等であることが分かっている(図3)。

以上のことから本開発では、高圧縮性で浸炭材の疲労強度の高い46F4Hをベースにした鉄粉を駆動系歯車の原料として適用できないか検討した。

## 2. 焼結転造浸炭歯車の特性

### 2.1 試験条件

試験材は、46F4Hに0.3 mass%の天然黒鉛粉(平均粒径5 μm)を加えた混合粉を用いた。ブランク材(φ70 × 15 mmもしくはφ90 × 25 mm)は、金型に潤滑剤を塗布し、油圧式500 tプレスを用いて3条件の圧粉体密度(7.3 g/cm<sup>3</sup>, 7.4 g/cm<sup>3</sup>, 7.5 g/cm<sup>3</sup>)狙いで成形した。焼結はプッシュ式焼結炉で1,120℃ (1,393K) × 3,600 s, N<sub>2</sub>-10%H<sub>2</sub>雰囲気で行った。

焼結されたブランク材から平歯車形状(モジュール3, 圧力角20°)に歯切加工し(ホブ切り)、表面転造を行った後、浸炭焼入れした。転造は(株)ニッセー製プランジ式転造装置<sup>10)</sup>を用い(図4)、転造量は片側歯減少量で150 μm(工具押し込み量1.2 mm)の条件で実施した。浸炭焼入れ条件は、ガス浸炭930℃ (1,203 K) × 7,200 s



図4 ニッセー製プランジ式転造装置外観

Fig. 4 Plunge type rolling device (Nissei corporation)

表3 試験に用いた焼結歯車の主な仕様  
Table 3 Specifications of tested sintered gears

ID	7.3C	7.3RC	7.4C	7.4RC	7.5C	7.5RC
Material	Chemical composition					
	0.26%C, 0.56%Ni, 0.99%Mo					
Process	Sintered density (g/cm <sup>3</sup> )					
	7.3	7.4	7.5			
Gears for tooth bending fatigue tests	Rolled					
	-	Done	-	Done	-	Done
Gears for surface durability tests	Carburized					
	Done	Done	Done	Done	Done	Done
Gears for tooth bending fatigue tests	Module					
	3					
	Pressure angle (°)					
	20					
Gears for surface durability tests	Face width (mm)					
	10					
	Number of teeth					
	24		20			
Gears for surface durability tests	Module					
	3					
	Pressure angle (°)					
	20					
Gears for surface durability tests	Face width (mm)					
	6					
	Number of teeth					
	26		13			



図5 試験歯車の外観  
Fig. 5 Appearance of tested gear

(CP:0.8%), 焼戻し160°C (433 K) × 7,200 s (大気中) とした。試験歯車の外観を図5に示す。

曲げ疲労試験は油圧式パルセータ<sup>11)</sup>を用い、荷重繰返し数Nが5 × 10<sup>6</sup>を超えても歯が破断しないときの荷重をもって曲げ疲労限度荷重とした。また、面圧疲労試験は動力循環式運転試験機<sup>12)</sup>を用いて行い、荷重繰返し数が1.5 × 10<sup>7</sup>を超えても損傷面積が2%に達しないときの荷重をもって疲労限度荷重とした。

面圧疲労試験は、焼結歯車を駆動側とし、相手歯車に溶製鋼SCM420歯車を使用した。試験歯車は全て同一条件で浸炭焼入れした後、粗さ最大高さがRz < 2 mmとなるよう歯面研削を実施した。各試験に使用した歯車条件を表3に示す。

焼結体密度7.5 g/cm<sup>3</sup>の歯車に対しては、歯元の歯幅中央部における空孔分布、表面硬さ、および残留応力を測定した。空孔分布の解析は、歯車断面のSEM観察(エッチングなし)を行った後、画像解析により空孔率を算出した。残留応力は、リガク製PSPC型微小X線測定装置を用いてsin2Ψ法で行い、電解研磨により深さ方向の残留応力分布を測定した。

## 2.2 試験結果と考察

### 2.2.1 疲労強度試験結果

図6に歯元曲げ疲労試験の結果を示す。縦軸に、会田・寺内式<sup>13)</sup>によって求めた歯元すみ肉部応力 $\sigma_t$ をとり、横軸に荷重繰返し数Nをとっている。比較のために参照材であるSCM415 (0.15C-1.0Cr-0.2Mo-0.7Mn) 浸炭焼入れ溶製鋼歯車の値も併記した。歯元曲げ疲労強度(N: 5.0 × 10<sup>6</sup>)は、焼結体密度7.5 g/cm<sup>3</sup>の転造歯車(7.5RC)が1.23 GPa, 7.4 g/cm<sup>3</sup>の転造歯車(7.4RC)が1.30 GPa

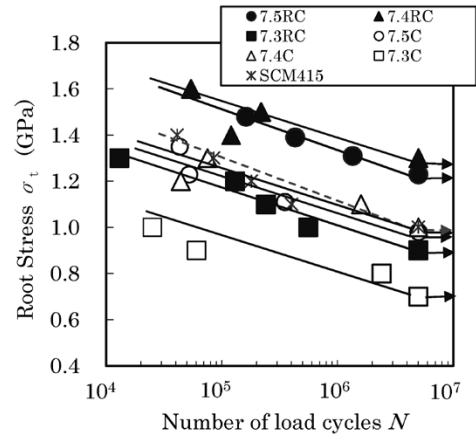


図6 46F4H焼結歯車の歯元曲げ疲労試験結果  
Fig. 6 Results of tooth bending fatigue tests of 46F4H sintered gears

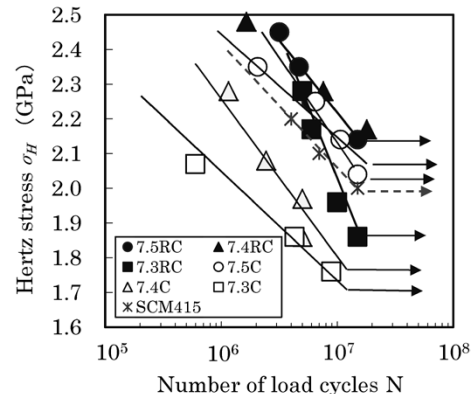


図7 46F4H焼結歯車の面圧疲労試験結果  
Fig. 7 Results of surface durability tests for 46F4H sintered gears

となり、焼結体密度7.4 g/cm<sup>3</sup>以上であればSCM415浸炭焼入れ溶製鋼歯車の1.0 GPaと同等以上の疲労強度を有する結果となった。

図7に面圧疲労試験の結果を示す。溶製鋼のヤング率およびポアソン比を用いて計算したヘルツ応力 $\sigma_H$ を縦軸にとり、荷重繰返し数Nを横軸にとっている<sup>14)</sup>。比較のためにSCM415浸炭焼入れ溶製鋼歯車のS-N曲線も併記した。面圧疲労強度(N: 1.5 × 10<sup>7</sup>)は、7.5 g/cm<sup>3</sup>転造歯車(7.5RC)が2.14 GPa, 7.4 g/cm<sup>3</sup>転造歯車(7.4RC)が2.17 GPaとなり、曲げ疲労強度と同様に、焼結体密度7.4 g/cm<sup>3</sup>以上であればSCM415浸炭焼入れ溶製鋼歯車の2.0 GPaと同等以上の疲労強度を有することを確認した。

### 2.2.2 空孔分布と金属組織

曲げ疲労試験に用いた焼結体密度7.5 g/cm<sup>3</sup>の歯車に

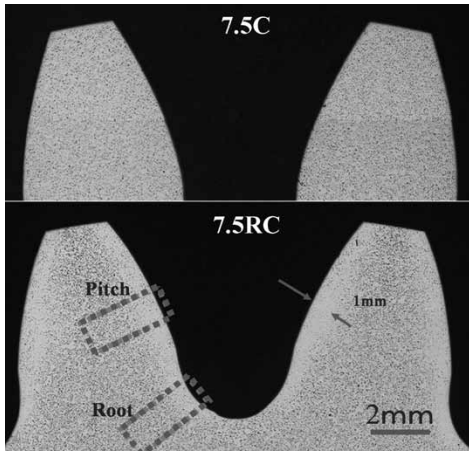


図8 焼結歯車断面の空孔比較

Fig. 8 Porosities in sintered gears (cross-sectional views)

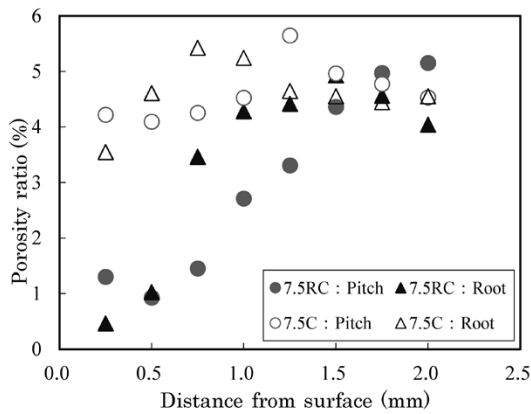


図9 曲げ疲労試験用焼結歯車の表面付近空孔分布

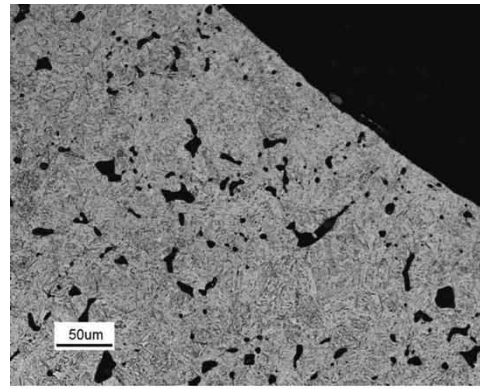
Fig. 9 Distributions of porosity near surface of sintered gears for bending fatigue tests

ついて、未転造歯車 (7.5C) と転造歯車 (7.5RC) の歯形断面の比較を図8に示す。転造加工を行うことにより、歯先から歯元まで歯形全体にわたり深さ約1 mmの表面層の空孔が減少し、緻密化されている。さらに、歯面 (Pitch点付近) および歯元 (Root) の歯車表面から2.0 mm深さまでの範囲を0.5 mm幅×0.25 mm深さごとに画像処理を行い、各深さでの空孔の面積率から求めた深さ方向の空孔分布を図9に示す。転造により、表面から0.5 mm深さまでは、Pitch点付近、歯元ともに空孔率が2%以下と低くなっていることが分かる。

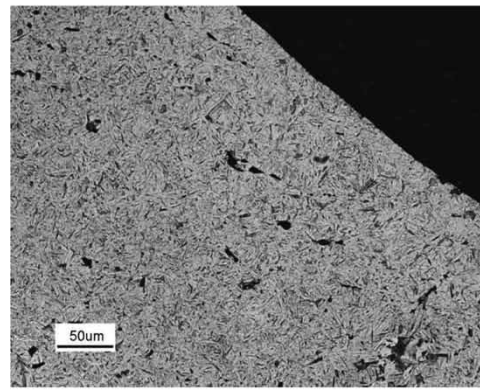
また図10は、曲げ疲労試験に用いた焼結体密度7.5 g/cm<sup>3</sup>の歯車の歯元部マイクロ組織 (ナイタールエッチング) を示す。転造加工の有無にかかわらず、粒界酸化が見られず、どちらも同様のマルテンサイトが観察された。

### 2.2.3 硬さ分布

曲げ疲労試験に用いた焼結体密度7.5 g/cm<sup>3</sup>の歯車における、歯面表面から2.5 mm深さまでの硬さ分布を図11に示す。転造加工の有無にかかわらず、有効硬化層 (550 Hv) の深さは0.5 mm以上であり、全硬化層深さは約1.5 mmであった。図12に歯面表面のC濃度分布を示す。C濃度のピークは、転造加工の有無にかかわらず表面から0.1 mm付近にあり、大きな差は見られなかった。転造加工材の表面層の硬さが未転造加工材より若干高いのは、転造により表面層の密度が高くなったためと考え



7.5C



7.5RC

図10 焼結歯車のマイクロ組織比較

Fig.10 Microstructures at root of sintered gears

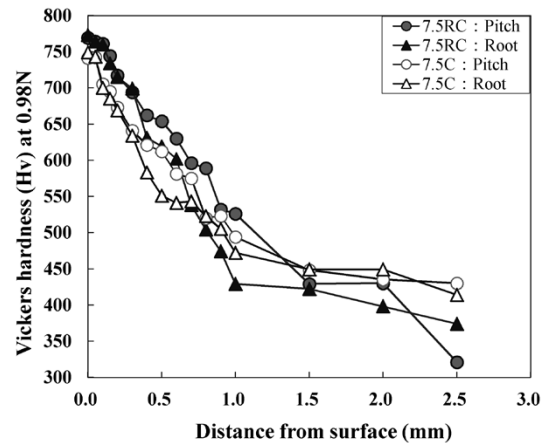


図11 焼結歯車表面の硬さ分布

Fig.11 Distributions of hardness near surface of sintered gears for tooth bending fatigue tests

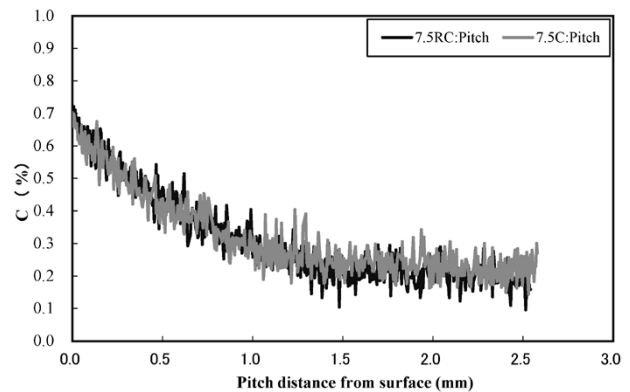


図12 焼結歯車表面のC値分布

Fig.12 Distributions of C values near surface of sintered gears for tooth bending fatigue tests

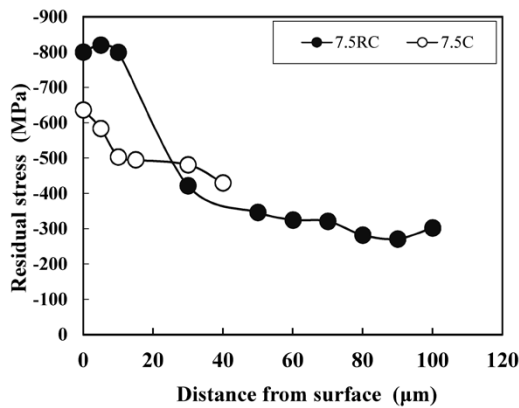


図13 焼結歯車表面の圧縮残留応力分布

Fig.13 Distributions of compressive residual stresses near surface of sintered gears

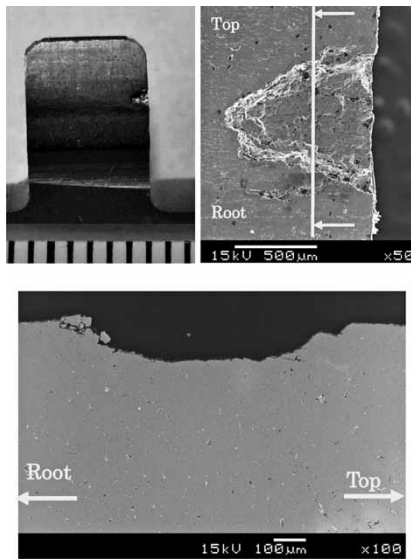


図14 転造浸炭焼結歯車の損傷例

Fig.14 Photographs of damaged sintered gears

られる。

#### 2.2.4 残留応力分布

曲げ疲労試験に用いた焼結体密度 $7.5 \text{ g/cm}^3$ の歯車を対象に、表面から深さ $100 \mu\text{m}$ までの歯元歯筋方向の圧縮残留応力を測定した結果を図13に示す。転造加工した歯車の圧縮残留応力は未転造歯車よりも高く、深さ $5 \mu\text{m}$ 程度のところにピークが存在している。さらにその圧縮残留応力値は $800 \text{ MPa}$ 以上あり、ショットピーニング加工した浸炭焼入れ溶製鋼歯車と同等であった<sup>15)</sup>。転造加工した歯車の圧縮残留応力が高い理由はつぎのように考えられる。すなわち、転造加工で焼結体内部に存在する数十ミクロンの空孔が潰れることによって表面の密度が高くなり、内部との密度差が生まれる。さらに、転造後の浸炭焼入れによって高密度部分（金属含有が多い）の熱処理ひずみが大きくなり、表面近傍の圧縮残留応力が大きくなったためである。また、残留オーステナイト量を測定した結果、転造歯車が $10.8\%$ 、未転造歯車が $13.2\%$ と差がなかった。

2.2.1~2.2.4項の結果より、転造加工歯車の疲労強度が高い理由は、転造により表面付近の欠陥（空孔）が減少したこと、それに伴って表面付近の硬さが若干高くなることに加え、高い圧縮残留応力が付与されたためと考え

られる。

#### 2.2.5 歯面損傷観察

図14は面圧疲労試験に用いた焼結体密度 $7.4 \text{ g/cm}^3$ の転造歯車の損傷例であり、損傷歯面における歯形方向断面のSEM写真を示す。これらの写真から、歯面の損傷形態は空孔や内部が起点となるスポーリング破壊ではなく、表面からき裂が生じ進展するピッチング損傷であることが分かった<sup>16)</sup>。すなわち、損傷形態は溶製鋼歯車と同様であることから、本焼結転造歯車は従来の転造加工しない焼結歯車とは異なり、溶製鋼歯車と同等以上の疲労強度を有することと矛盾しない。

### 3. 焼結浸炭ショットピーニング加工歯車の特性

#### 3.1 試験条件

転造加工試験と同様の手法で46F4Hを原料とした焼結体密度 $7.5 \text{ g/cm}^3$ の歯車を作成し、転造を行わず浸炭焼入れ処理のみを行った。つづいて、直径 $\phi 0.6 \text{ mm}$ 、硬さ $700 \text{ Hv}$ のショット粒を用い、アークハイト: $0.5 \text{ mm}$ 狙い、カバレッジ: $300\%$ 以上、ショット圧: $4 \text{ kgf/cm}^2$ 、投射距離: $170 \text{ mm}$ の条件で $20 \text{ rpm}$ の速度で回転させたターンテーブルに歯車を置き、投射時間: $45 \text{ s}$ でエアノズル式のショットピーニング（以下、SPという）加工を行った。このSP加工後の歯車を対象に歯元曲げ疲労強度を評価した。

また、面圧疲労試験に適用する歯車に対しては、歯面の平滑化を目的とし、上記のエアノズル式ショットピーニングに続いて、2次加工としてインペラ式のSP加工（粒子: $\phi 0.6 \text{ mm}$ 、硬さ: $700 \text{ Hv}$ 、速度: $20 \text{ m/s} \times 20 \text{ min}$ 、ターンテーブル回転速度: $20 \text{ rpm}$ ）を行った。さらに、ウレタン+砥石材によるホーニング加工（研削量 $< 0.01 \text{ mm}$ ）もしくは、グライディングによる歯面研削（研削量: $150 \mu\text{m}$ ）を行った。

#### 3.2 試験結果と考察

##### 3.2.1 歯元曲げ疲労試験結果

図15に、密度 $7.5 \text{ g/cm}^3$ (7.5SP)、 $7.4 \text{ g/cm}^3$ (7.4SP)の焼結浸炭焼入れ後にSP加工した歯車の歯元曲げ疲労強度の結果を示す。浸炭焼入れしたSCM415溶製鋼歯車、および転造後に浸炭焼入れした焼結歯車7.5RCも併記した。SP加工した歯車の歯元曲げ疲労強度（ $N: 5.0 \times 10^6$ ）は、7.5SPが $1.18 \text{ GPa}$ 、7.4SPが $1.0 \text{ GPa}$ となりいずれの密度であっても、SP加工しないSCM415浸炭焼入れ溶製鋼歯車の $1.0 \text{ GPa}$ と同等以上の疲労強度であった。

図16にSP加工歯車の圧縮残留応力測定結果を示す。いずれの密度においても圧縮残留応力のピーク値は $1,200 \sim 1,400 \text{ MPa}$ であり、転造材の約 $1.75$ 倍であった。緻密化を行わなくても残留応力だけで疲労強度が向上することを確認した。

##### 3.2.2 歯面平滑化と面圧疲労試験結果

前項で評価したSP加工歯車の歯面の粗さは歯面研削と比較して大きい（粗い）ため（ $R_a: 1.47 \mu\text{m}$ 、 $R_z: 7.42 \mu\text{m}$ ）、面圧疲労試験に不適であることが分かった。そこで、密度 $7.5 \text{ g/cm}^3$ のSP加工した歯車の歯面を平滑化するために、2次加工として低速SP加工を行い、その後、ホー

表 4 SP加工した焼結歯車の表面粗さ  
Table 4 Surface roughness of SP sintered gears

Process	Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )		ID
	Ra	Rz	
Carburized+SP(High)	1.47	7.42	-
Carburized+SP(High+Low)	1.03	5.18	-
Carburized+SP(High+Low)+ Honing	0.78	3.93	7.5 2SP-H
Carburized+SP(High+Low)+ Grinding	0.05	0.40	7.5 2SP-G

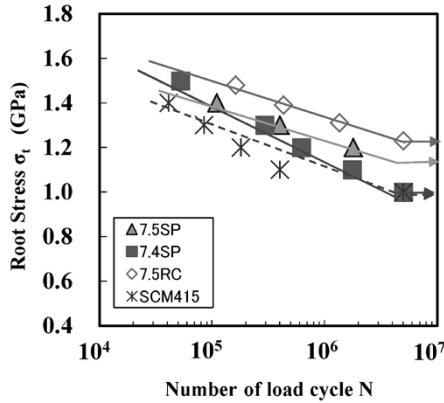


図15 SP加工した焼結歯車の歯元曲げ疲労試験  
Fig.15 Results of tooth bending fatigue tests for 46F4H SP gears

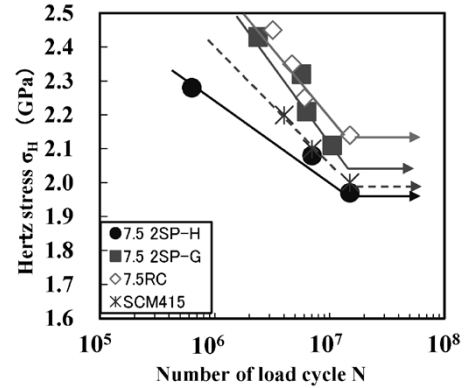


図17 2段SP加工+平滑化した焼結歯車の面圧疲労試験結果  
Fig.17 Results of surface durability tests for 46F4H SP gears

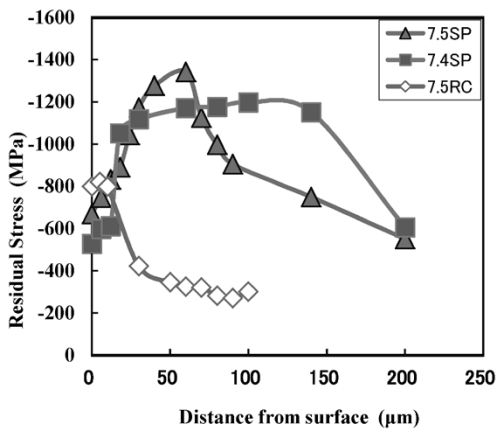


図16 SP加工した焼結歯車表面の圧縮残留応力分布  
Fig.16 Distributions of residual compressive stresses near surface of sintered SP gears

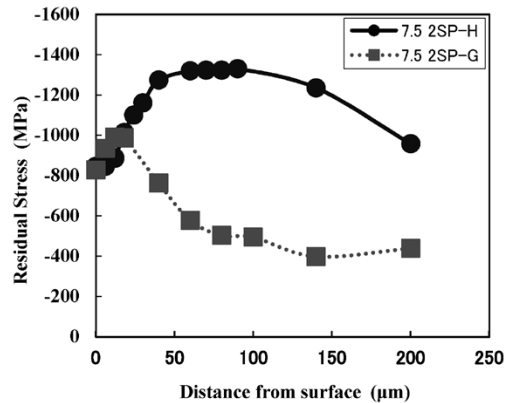


図18 2段SP加工+平滑化した焼結歯車表面近傍の圧縮残留応力分布  
Fig.18 Distributions of residual compressive stresses near surface of SP gears for durability tests

ニグ加工 (7.5 2SP-H) もしくは、歯面研削 (7.5 2SP-G) を実施した。表 4 にそれぞれの加工条件と歯面粗さを示す。

図17にSP加工歯車の面圧疲労試験結果を示す。浸炭焼入れしたSCM415材と転造浸炭した7.5RCを併記した。面圧疲労強度 ( $1.5 \times 10^7$ ) は、ホーニング加工歯車 (7.5 2SP-H) が1.97 GPa、歯面研削加工歯車 (7.5 2SP-G) が2.11 GPaとなり、歯面研削加工歯車が溶製鋼歯車と同等以上の疲労強度であった。

### 3.2.3 考察

図18, 19にそれぞれ、各平滑化した歯車の表面の圧縮残留応力分布および硬さ分布を示す。7.5 2SP-Gは、7.5 2SP-Hに比べて圧縮残留応力は減少し、最表面の硬さも低いにもかかわらず、面圧疲労強度が大幅に向上している。これより、粗さの改善が面圧疲労強度向上に大きく寄与していることが分かる。

また、7.5 2SP-Gを焼結転造浸炭歯車 (7.5RC) と比較

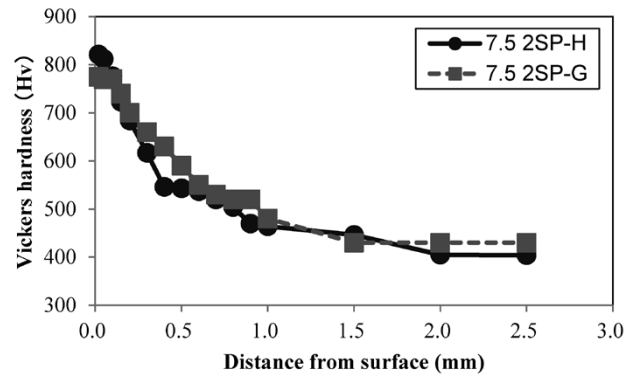


図19 2段SP加工+平滑化した焼結歯車表面近傍の硬さ分布  
Fig.19 Hardness distributions near surface of SP gears for durability tests

すると、表面硬さは図11に示した転造歯車の硬さと同等であり、残留応力も転造歯車の残留応力 (-830 MPa: 別途測定) とほぼ同等であった。このことも面圧疲労強度向上の要因の一つであり、その結果、溶製鋼歯車に匹

敵する面圧疲労強度が得られたと考えられる。なお、これら影響因子の詳細なメカニズムの解析を行うにはさらに調査が必要である。

以上より、SP加工歯車が高い面圧疲労強度を確保するためには、硬さと表面粗さと残留応力のバランスを考慮した歯面の平滑化が必要と思われる。

むすび=本開発結果のまとめを以下に示す。

- (1) 0.5mass%Ni-1.0mass%Moプレアロイ粉（アトメル46F4H）の密度 $7.4\text{ g/cm}^3$ 以上の焼結転造浸炭歯車は、歯元曲げ疲労強度 $1.0\text{ GPa}$ 以上（ $N: 5 \times 10^6$ ）、面圧疲労強度 $2.0\text{ GPa}$ 以上（ $N: 1.5 \times 10^7$ ）であり、浸炭焼入れ溶製鋼（SCM415）と同等の疲労強度であることを確認した。
- (2) 歯車材質調査の結果、焼結転造歯車はPitch点付近で $1\text{ mm}$ まで緻密化されていた。また、表面近傍の圧縮残留応力は $800\text{ MPa}$ となり、溶製歯車のショットピーニング加工と同等レベルであった。
- (3) 焼結転造歯車は溶製鋼と同様に、表面がき裂の起点となるピッチング損傷であり、内部から生じるスポーリング破壊ではないことが歯面損傷の断面観察によって分かった。
- (4) 汎用性のあるショットピーニング加工を検討した結果、焼結歯車の歯元曲げ疲労強度はショットピーニングしない溶製鋼と同等であった。また、密度 $7.5\text{ g/cm}^3$ の焼結歯車の歯面に対しては、平滑化を行うことによって溶製鋼と同等の面圧疲労強度を得ることができた。

以上により、ここで開発した手法によってアトメル46F4Hを用いて作製した焼結歯車は、粉末鍛造のようにワーク全体の密度を上げなくても、浸炭焼入れ前の歯面の転造加工による部分的な緻密化もしくは浸炭焼入れ後のショットピーニング加工により高い圧縮残留応力を付

与することで、溶製鋼と同等の疲労強度が得られることが明らかになった。

実用化に向けて、さらに高密度化成形が適用できる材料や成形方法の開発、様々な歯車形状に適用するために、転造や浸炭加工条件の最適化を行ってゆく必要がある。

最後に、本開発において開発当初から転造技術や歯車評価をご指導いただいている諏訪東京理科大学竹増光家教授と鳥取大学小出隆夫教授に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 關 正憲ほか. 日本機械学会 [No12-14] 第12回機素潤滑設計部門講演論文集. 2012, 2101, p.103-106.
- 2) P. Brewin et al. Powder Metallurgy 2007. Vol.50, No.2, p.98-104.
- 3) 西田 智ほか. 粉体粉末冶金協会秋季講演大会概要集. 2013, p.73.
- 4) 西田 智ほか. 粉体および粉末冶金. 2014, Vol.61, No.6, p.318-323.
- 5) H. Suzuki et al. ADVANCES in Powder Metallurgy & Particulate materials-2014 Part12. p.28-37.
- 6) 西田 智ほか. 粉体粉末冶金協会秋季講演大会概要集. 2014, p.16.
- 7) 佐久間均ほか. R&D神戸製鋼技報. 1994, Vol.44, No.2, p.18-21.
- 8) Qiang et al. JSME International Journal. 2004, Vol.47, p.925-932.
- 9) A. Yoshida et al. JSDE Journal Design Engineering. 2005, Vol.40, p.360-367.
- 10) T. Takemasu et al. Gear solutions. 2004, p.33-39.
- 11) 会田俊夫ほか. 日本機械学会論文集. 1966, Vol.32, No.323, p.137-142.
- 12) 小田 哲ほか. 日本機械学会論文集C編. 1984, Vol.50, No.454, p.1039-1044.
- 13) 会田俊夫ほか. 日本機械学会論文集. 1961, Vol.27, p.862-868.
- 14) 小出隆夫ほか. 日本機械学会 [No.13-17] MPT2013シンポジウム<伝熱装置>講演論文集. 2013, p.264-267.
- 15) 吉崎正敏ほか. 日本機械学会論文集C編. 2009, Vol.75, p.97-105.
- 16) 日本機械学会編. 歯車損傷図鑑. 2006, p.155-208.