

# 高密度自動車焼結部品用鋼粉 疲労特性に優れた高密度焼結体が得られる 鋼粉およびその成形法

## Steel Powder for Automotive Sintered Parts with High Density —Attaining High Density for Achieving Excellent Fatigue Property of Sintered Parts Made by a Die-lubricated Warm Compaction System Using Highly Compressible Steel Powder—

宇波 繁 UNAMI Shigeru JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(副課長)  
尾崎由紀子 OZAKI Yukiko JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(課長)・理博  
上ノ園 聡 UENOSONO Satoshi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(課長)

### 要旨

JFE スチールは、疲労特性に優れた高密度焼結体が得られる温間金型潤滑成形用鋼粉とその成形法を開発した。この成形法では、温間金型潤滑成形法用に潤滑剤添加量を低減したプレミックス粉と噴射量精度に優れた金型潤滑剤塗布装置を用いる。この工法により、4Ni-1.5Cu-0.5Mo 組成の部分合金化鋼粉 KIP シグマロイ 415S を用いて作製した焼結光輝熱処理材では、焼結密度  $7.5 \text{ Mg/m}^3$ 、回転曲げ疲れ強さ 450 MPa (0.52 mass% C)、470 MPa (0.92 mass% C) と、従来の 2 回成形 2 回焼結法より優れた密度、疲労特性を達成した。C 量の増加による疲労強度の向上は、残留オーステナイト量の増加に起因すると考えられる。

### Abstract:

JFE Steel has developed a die-lubricated warm compaction method for producing high density sintered parts using premixed steel powder containing small amounts of internal lubricant suitable for this method. In this method, spraying equipment precisely controls the amount of die wall lubricant. The sintered and bright-quenched compacts were made with partially alloyed steel powder (KIP SIGMALOY 415S), composed of 4Ni-1.5Cu-0.5Mo, by this method. The compacts gave density as high as  $7.5 \text{ Mg/m}^3$ , and the rotating bending fatigue strength of 450 MPa and 470 MPa for carbon contents of 0.52 mass% and 0.92 mass%, respectively. The density and fatigue strength were superior to those obtained by the conventional double-pressing and double-sintering methods. The increase in the amount of retained austenite which was caused by the increase in carbon content enhanced the fatigue strength.

## 1. 緒言

自動車の軽量化および自動車エンジンの高性能化にと  
もない、自動車用部品への高強度化・高疲労強度化の要求  
が高まっている。

粉末冶金法では、焼結密度を向上させることが強度・疲  
労強度などの機械的特性の改善に最も効果的である。密度  
向上を目的として、粉末をあらかじめ加熱し、130 程度  
に加熱した金型中で 1 回成形し、その後焼結する温間成形  
法<sup>1-3)</sup> (以下、W/C 法)、常温成形・焼結のプロセスを 2

回繰り返す 2 回成形 2 回焼結法および 1 回成形 1 回焼結法  
で製造した焼結体を熱間鍛造する焼結鍛造法などの高密度  
化工法が提案されている。しかし、いずれの工法におい  
ても到達密度の増加に応じて製造コストが増大し、より安  
価な高密度化工法が求められている。

JFE スチールでは、新規な高密度化工法として、潤滑剤  
の添加量を低減した高密度成形用プレミックス粉と  
W/C 法および帯電塗布型金型潤滑法<sup>4,5)</sup> を組み合わせた温  
間金型潤滑成形法<sup>6,7)</sup> (以下、W/D 法)を開発した。この  
工法によれば、W/C 法とほぼ同等のコストでより高い密  
度を実現できることから、高密度自動車焼結部品の量産プ

ロセスへの適用検討が開始されている。

本報では、まず W/D 法の特徴を述べ、さらに高密度成形に適した高圧縮性の部分合金化鋼粉を用い、W/D 法により作製した焼結体（密度  $7.5 \text{ Mg/m}^3$ ）について、機械的特性および光輝熱処理後の回転曲げ疲労特性について述べる。

## 2. 温間金型潤滑成形法（W/D 法）の特徴

W/D 法とは、前述したように、潤滑剤の添加量を低減した原料粉末を用いることにより、高密度化を図る工法である。Fig. 1 に、鉄粉と潤滑剤からなる混合粉について潤滑剤添加量に対する圧粉体の理論到達密度の関係を示す。理論到達密度は、鉄粉と潤滑剤の真比重をそれぞれ 7.87 および 1.00 とし、加圧成形によって空隙がまったくない状態に成形した場合の圧粉密度として算出した。潤滑剤量を低減すると理論到達密度が向上することが分かる。W/D 法では、金型に塗布された粉末潤滑剤によって成形体と金型間の摩擦を緩和できるため、内部潤滑剤量の少ない原料粉末を、成形体の割れや欠けなどの問題を発生させずに成形することが可能となる。内部潤滑剤量は通常では 0.8 mass % 程度必要となるのに対し、W/D 法では 0.2 mass % 程度の量で十分成形が可能である。W/D 法では、当社が開発した W/C 法用潤滑剤 KW ワックス<sup>3)</sup>を 0.1–0.2 mass % 程度添加した原料粉末を使用する。内部潤滑剤量の低減効果により、計算上は  $0.3 \text{ Mg/m}^3$  程度の密度増加が見込まれる。

W/D 法の模式図を Fig. 2 に示す。W/D 法は、金型に粉末潤滑剤を塗布する工程と、必要最少量の内部潤滑剤を混合した原料粉末を加熱した後、加熱金型中に充填して加圧成形を行う工程から構成される。金型に塗布する潤滑剤（金型潤滑剤）には、帯電銃内における帯電性、予熱された金型表面への付着性および金属粉末成形時における潤滑性などが要求されるため、独自に開発した。金型潤滑剤の帯電方式としては、コロナ帯電法を用いることも可能であるが、凹凸形状の金型を使用した場合、凸部に帯電粉末

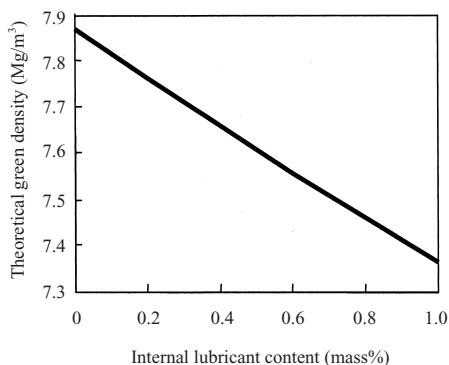


Fig. 1 Theoretical green density calculated using the mixing ratio of internal lubricant

が多量に付着するため、帯電量の少ない接触帯電方式<sup>8)</sup>を適用した。

金型潤滑剤の噴射量が不足した場合は、成形体と金型表面の接触面での摩擦が過大となるため、成形体を金型から抜き出す過程において摺動面に磨耗疵が発生して成形部品の外観を損なうばかりか、金型への負荷が増大して金型の劣化を招く。また、噴射量が過剰になった部分は、成形体の割れ、欠けの起点となる可能性が高く、形状不良を引き起こす。連続成形において生産性を阻害するこれらの問題が、量産化への障壁となっていた。

そこで、金型潤滑剤の噴射量の変動を抑えることのできる塗布装置を、ノードソン(株)と共同で開発した<sup>9)</sup>。模式図を Fig. 3 に示す。本装置は (1) 高精度に定量排出できるテーブルフィーダを排出部に設置したホッパー、(2) 帯電銃、(3) ノズル、(4) 分岐ブロック、および (5) 集塵機から構成される。本装置では、潤滑剤粉末は、金型に噴射されていない場合でも、連続的にテーブルフィーダによって排出され、乾燥空気により装置内を循環している。分岐ブロックに入る乾燥空気を止めることにより、ノズルから潤滑剤が噴射される。潤滑剤を常時循環させることにより、装置内に付着する潤滑剤量が低減できる。また、未使用のまま集塵機内に回収された潤滑剤は再利用が可能である。

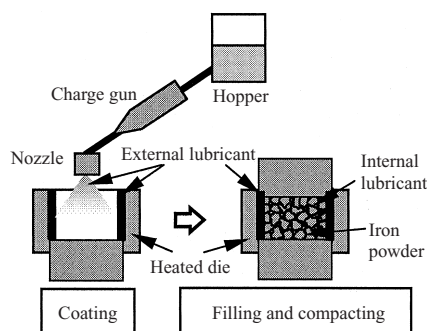


Fig. 2 Schematic diagram of die-lubricated warm compaction method

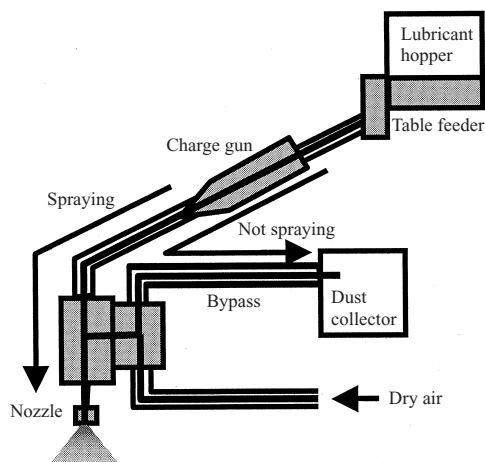


Fig. 3 Schematic diagram of the developed lubricant applicator

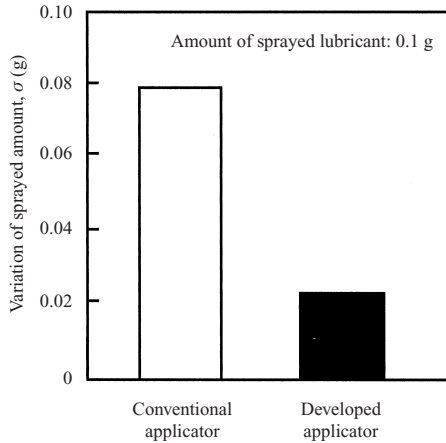


Fig. 4 Variation of amount of sprayed lubricant depending on ability of applicator

### 3. 潤滑剤塗布装置における噴射量精度

#### 3.1 実験方法

W/D 法用に開発した独自金型潤滑剤 (WD2) を用いて従来装置と本装置 (Fig. 3) における噴射量の変動幅を評価した。1 回に潤滑剤を 0.1 g 噴射する条件で、噴射された量を測定した。噴射量の変動幅として、10 回噴射した場合の噴射量の標準偏差を算出した。

#### 3.2 実験結果

本装置を用いた場合の潤滑剤噴射量の標準偏差を従来装置を用いた場合と比較して Fig. 4 に示す。本装置を用いることにより、潤滑剤噴射量の変動幅を 1/4 に低減した。これは、潤滑剤のテーブルフィードによる高精度の定量排出と、常時循環させることにより、装置内に潤滑剤が付着する量を減らすことができたことに起因する。

### 4. W/D 法により作製した高密度焼結体の特性

#### 4.1 実験方法

##### 4.1.1 原料

KIP シグマロイ 415S (Fe-4Ni-1.5Cu-0.5Mo 部分合金化鋼粉)、黒鉛粉および潤滑剤からなる混合粉末を供試粉とした。粉末の配合組成を Table 1 に示す。黒鉛粉は日本黒

鉛工業(株)製の J-CPB、内部潤滑剤は旭電化工業(株)製のステアリン酸亜鉛 ZNS-730 および W/C 法用潤滑剤 KW ワックスを用いた。金型潤滑剤として W/D 法用に開発した粉末潤滑剤 WD2 を用いた。

#### 4.1.2 試験片作製条件

Fig. 3 に示した装置を使用して、130 に加熱した金型の表面に潤滑剤 WD2 を塗布した後、あらかじめ 130 に加熱した上記混合粉末を充填し、成形を行った。成形圧力は 490–686 MPa であった。また、成形体の寸法は、長さ 55 mm、幅 10 mm、高さ 10 mm であった。比較のために常温の鉄粉を常温の金型で成形する常温成形法 (以下 C/C 法)、および W/C 法によっても成形体を作製した。これらの成形体を、N<sub>2</sub>-10vol% H<sub>2</sub> 雰囲気中、1250 で 60 min 保持して焼結を行った。焼結体の一部は、引張試験用として平行部径 5 mm、長さ 15 mm の丸棒試験片に機械加工した。

#### 4.1.3 評価方法

長さ 55 mm、幅 10 mm、高さ 10 mm の試験片を成形する際に抜出力を測定した。圧粉密度は、その際に得られた試験片を用いて測定した。引張強さは、前述の丸棒引張試験片を用い、引張速度 5 mm/min で測定した。衝撃値は 10 × 10 × 55 mm のノッチなしシャルピー試験片を用いて測定した。

### 4.2 実験結果

#### 4.2.1 出力および圧粉密度

各成形法における成形時の抜出力および圧粉密度を Fig. 5 に示す。W/D 法における抜出力は、W/C 法の場合より低く、C/C 法の場合とほぼ同等の値となる。W/D 法における密度は、C/C 法の場合に比べ約 0.2 Mg/m<sup>3</sup> W/C 法に比べ約 0.1 Mg/m<sup>3</sup> 向上し、7.4 Mg/m<sup>3</sup> の高い値を示す。この密度の向上は、内部潤滑剤の添加量の低減によるものである。また、一般に、圧粉密度の上昇とともに金型と成形体間の摩擦力が増大するが、W/D 法を用いれば、高密度の成形体が比較的低い抜出力で成形可能である。

#### 4.2.2 焼結体の機械的特性

焼結体の引張強さおよびシャルピー衝撃値を Fig. 6 に

Table 1 Chemical compositions and compacting conditions of the studied powders for investigating the effects of compaction methods

	Graphite	Internal lubricant	Compacting temperature	Compacting pressure	External lubricant
C/C method	0.6 mass%	Zinc stearate 0.75 mass%	Room temperature	686 MPa	-
W/C method		KW-wax* 0.6 mass%	130°C		
W/D method		KW-wax* 0.2 mass%	130°C		WD2**

\* Lubricant for warm compaction, \*\* Lubricant for heated die



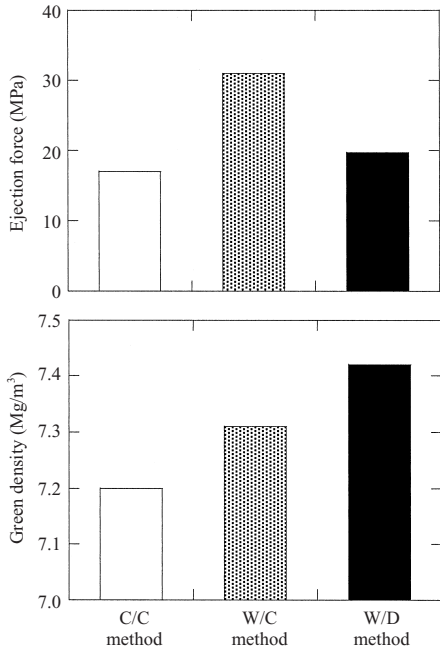


Fig. 5 Ejection forces and green densities of the compacts made by various compaction methods

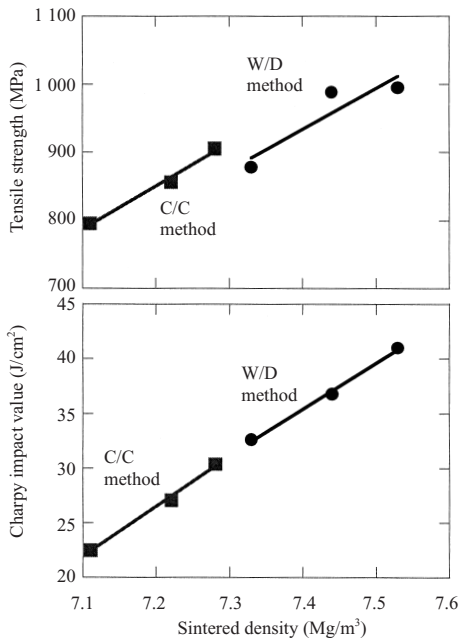


Fig. 6 Tensile strength and Charpy impact value of the sintered compact made by several compaction methods

示す。引張強さおよびシャルピー衝撃値のいずれの特性も、焼結密度の増加に応じて高くなる。同一成形圧力で比較すると、W/D法では、C/C法に比べ焼結密度が約0.2 Mg/m<sup>3</sup>高く、686 MPaの圧力で成形した場合に7.5 Mg/m<sup>3</sup>の焼結密度となり、引張強さ1000 MPa、衝撃値40 J/cm<sup>2</sup>という高い値を示す。

W/D法によって作製した焼結体断面の気孔分布状態をPhoto 1に示す。金型に塗布した潤滑剤が成形体表層に入り込み、焼結後に粗大な気孔となることが懸念される

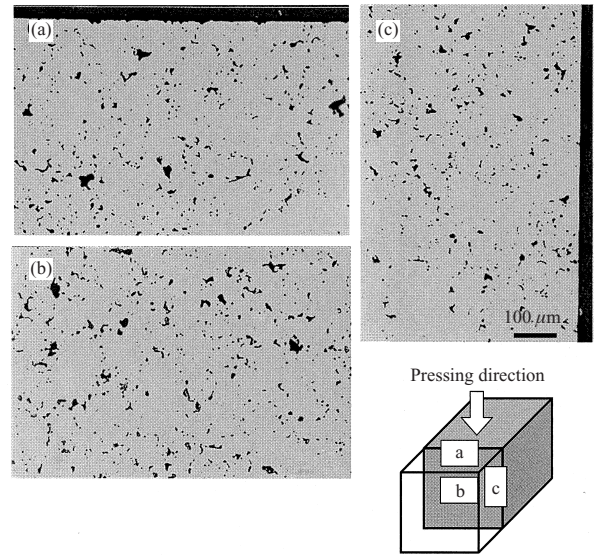


Photo 1 Pore structure of sintered compacts made by W/D method

が、表層には粗大な気孔は認められず、均一な気孔分布になっていることが分かる。

## 5. W/D法により成形した高密度焼結光輝熱処理材の回転曲げ疲労特性

### 5.1 実験方法

#### 5.1.1 原料

KIP シグマロイ 415S, 黒鉛粉および潤滑剤からなる混合粉末を供試粉とした。粉末の配合組成をTable 2に示す。黒鉛粉, 内部潤滑剤および金型潤滑剤は4.1.1項と同様のものを用いた。

#### 5.1.2 試験片作製条件

4.1.2項と同様の方法により、以下に示す2種の試験片の成形および焼結を実施した。それぞれの形状は、長さ55 mm, 幅10 mm, 高さ10 mm および長さ80 mm, 幅15 mm, 高さ15 mmであった。焼結体の一部は、引張試験用として平行部径5 mm, 長さ15 mmの丸棒試験片に回転曲げ疲労試験用として平行部径8 mm, 長さ15.4 mmの平滑丸棒試験片に機械加工した。その後, Ar 雰囲気中900 で30 min加熱後, 50 の油焼入れを行い, 200 で60 min 焼きもどしを行った。

#### 5.1.3 評価方法

引張強さおよび衝撃値は, 4.1.3項と同様の方法により測定した。回転曲げ疲労試験には, 前述の平滑丸棒試験片を用い, 小野式回転曲げ疲労試験機により回転数3000 rpm, 応力比 $R = -1$ の条件で実施した。耐久限度は繰返し数 $10^7$ 回において破壊しない最大応力値として求めた。また, 残留オーステナイト(以下  $\gamma$ )量は, MoK $\alpha$ 線を用いたX線回折を行い,  $\alpha$ の(110),(200)および(211)面  $\gamma$ の(111),(200),(220)および(311)面の積分強

Table 2 Chemical composition and compacting condition of the studied powders for investigating the effect of carbon content

	Graphite	Internal lubricant	Compacting temperature	Compacting pressure	External lubricant
Low carbon compact	0.6 mass%	KW-wax 0.2 mass%	130°C	686 MPa	WD2**
High carbon compact	1.0 mass%				

\* Lubricant for warm compaction, \*\* Lubricant for heated die

度を測定し、直接比較法により (1) 式から算出した<sup>10)</sup>。

$$V_\gamma = 100 / (1 + I_\alpha R_\gamma / I_\gamma R_\alpha) \quad (1)$$

- $V_\gamma$  : オーステナイトの体積率 (vol%)
- $I_\alpha$  : マルテンサイトの積分強度
- $I_\gamma$  : オーステナイトの積分強度
- $R_\alpha$  : マルテンサイトの理論積分強度
- $R_\gamma$  : オーステナイトの理論積分強度

## 5.2 実験結果および考察

### 5.2.1 焼結光輝焼入材の機械的特性

W/D 法を用いて成形した焼結光輝焼入材の密度と機械的特性を Table 3 に示す。圧粉密度は、黒鉛を 0.6 mass% 添加した成形体が 1.0 mass% 添加したものより 0.07 Mg/m<sup>3</sup> 高い。これは、黒鉛の比重(2.27)が鉄粉(7.87)に比べ低いため、黒鉛添加量が多くなると理論到達密度が低くなるためである。しかし、圧粉密度の相対密度(理論密度との比)は、いずれの黒鉛添加量においても 96% と変わらない。また、いずれの黒鉛添加量でも焼結密度はほぼ同等で、7.5 Mg/m<sup>3</sup> 以上の高い値である。焼結後の C 量は、添加黒鉛量から 0.08 mass% 減少し、それぞれ 0.52 0.92 mass% である。低 C 材の引張強さおよび衝撃値は高 C 材の値より高く、引張強さ 1 800 MPa、衝撃値 44 J/cm<sup>2</sup> と高い値である。

回転曲げ疲労試験結果を Fig. 7 に示す。低 C 材の回転曲げ疲れ強さは 450 MPa (耐久限度比 0.25) であり、従来の 2 回成形 2 回焼結材<sup>11)</sup> (黒鉛添加量 0.6 mass%, 密度 7.34 Mg/m<sup>3</sup>, 回転曲げ疲れ強さ 350 MPa) と比較すると疲労強度は 30% 程度向上しており、本 W/D 法で作製したものの密度が 7.53 Mg/m<sup>3</sup> と高いため、疲労特性が向上したと考えられる。2 回成形 2 回焼結法では、本実験で使用した焼結後に硬くなる組成の合金鋼粉では再成形時に密度が上昇しにくい、本 W/D 法では、1 回成形 1 回焼結で再成形を行わないため、焼結後に硬くなる組成でも焼結

密度を高められるという利点がある。また、高 C 材の回転曲げ疲れ強さは、引張強さとは逆の傾向を示し 470 MPa (耐久限度比 0.38) で低 C 材より高い値を示す。

焼結光輝焼入材の組織を Photo 2 に示す。いずれの C 量でも、表層部、中心部ともにマルテンサイト組織となっているが、低 C 材はラス状、高 C 材はレンズ状と、C 量に対応した組織となっている。

試料表面からの硬度分布を Fig. 8 に示す。硬度分布は

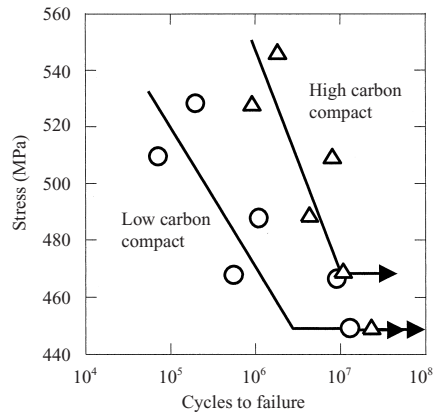


Fig. 7 S-N curves of rotating bending fatigue test of sintered and bright-quenched compacts

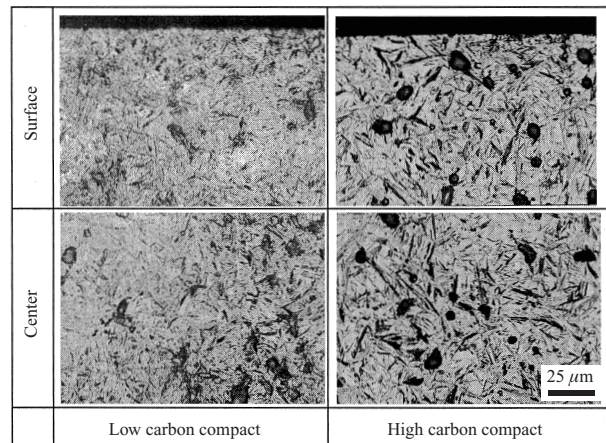


Photo 2 Microstructures of sintered and bright-quenched compacts

Table 3 Densities and mechanical properties of sintered and bright-quenched compacts made by W/D method

	Carbon content (mass%)	Green density (Mg/m <sup>3</sup> )	Sintered density (Mg/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Charpy impact value (J/cm <sup>2</sup> )
Low carbon compact	0.52	7.43	7.53	1 800	44
High carbon compact	0.92	7.36	7.51	1 250	25

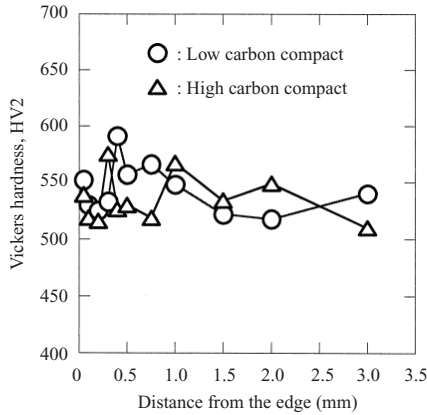


Fig. 8 Hardness distribution of sintered and bright-quenched compacts

若干変動しているが、表層部と中心部でほとんど差がない値となっている。また、通常、マルテンサイト組織の硬さはC量に依存することが知られているが、C量の違いによる差はほとんど見られない。これは、微細に分散して存在するマルテンサイト相およびオーステナイト相のサイズよりピッカース硬さ測定時の先端部のサイズが十分に大きいため、硬度の値が平均化されたものになったためと考えられる。

5.2.2 高疲労強度化機構

焼結体中のNi分布をEPMAにより分析した結果をFig. 9に示す。本報ではNi粉を拡散付着させた部分合金化鋼粉を使用した。焼結後もNiは均一に拡散せず、濃度分布が存在する。いずれのC量でもNiが2-6 mass%存在する部分の面積が最大である。また、高C材では、Niが6 mass%以上の部分および2 mass%以下の部分が少なく、Niは比較的均一に分布している。

一方、式(2)<sup>12)</sup>に示すように、マルテンサイト変態開始温度( $M_s$ 点)は、Ni量およびC量が多くなると低下する。式(3)<sup>13)</sup>に示すように $M_s$ 点が低下すると $\gamma$ 量は増加する。Fig. 10に、X線回折で測定した残留 $\gamma$ とFig. 9に示したNi濃度分布から、式(2)、(3)を用いて算出した残留 $\gamma$ 量を比較して示す。Ni濃度分布から計算した残留 $\gamma$ 量の値は、測定値とほぼ一致しており、高C材の方が残留 $\gamma$ は多い。

$$M_s = 550 - 350[C] - 40[Mn] - 30[V] - 20[Cr] - 17[Ni] - 10[Cu] - 10[Mo] - 5[W] + 15[Co] + 30[Al] \quad [2]$$

$M_s$ : マルテンサイト変態開始温度 ( $M_s$ 点) (°C)  
[合金元素]: 合金元素濃度 (mass%)

$$V_\gamma = 6.95 \times 10^{-15} \{455 - (M_s - T_q)\}^{5.32} \quad [3]$$

$V_\gamma$ : オーステナイトの体積率 (vol%)  
 $T_q$ : 変態温度 (本実験では、焼入油温: 50°C)

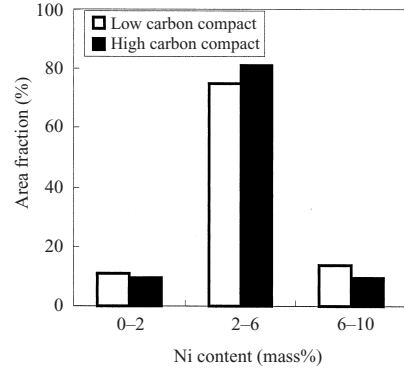


Fig. 9 Ni content distribution in low and high carbon compacts analyzed by EPMA area analysis

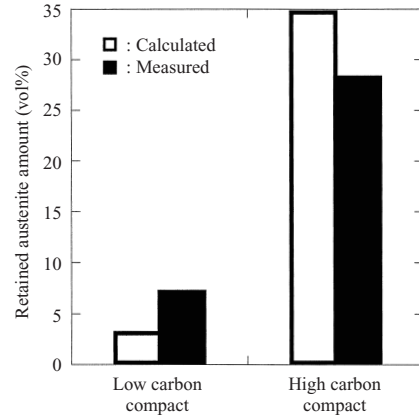


Fig. 10 Amounts of retained austenite calculated and actually measured by X-ray diffraction method

従来の鋼材に関する研究報告の中には、疲労強度への残留 $\gamma$ の影響について、有効であるとする結果のもの<sup>14,15)</sup>と悪影響を及ぼすとする結果のもの<sup>16)</sup>が存在し、材質や試験条件によってその評価が異なる。残留 $\gamma$ が疲労強度に有効に働く機構としては、残留 $\gamma$ の加工誘起変態による圧縮残留応力の発生、あるいは残留 $\gamma$ の亀裂進展の抑制により、疲労強度が向上するという説明がなされている。残留 $\gamma$ が疲労強度に悪影響を及ぼす機構としては、残留 $\gamma$ は柔らかい組織であるため疲労破壊の起点となり、疲労強度を低下させるというものである。

本実験では、C量の差によって焼結密度、硬さ分布が大きく変化しないことから、C量増加による残留 $\gamma$ 量の増加は疲労特性に有効に働き、高C材において疲労強度が向上したのと考えられる。

6. 結言

潤滑剤添加量を低減したプレミックス粉を用いた高密度化が可能な温間金型潤滑成形法を開発した。4Ni-1.5Cu-0.5Mo組成の部分合金化鋼粉 KIP シグマロイ 415Sを用いた温間金型潤滑成形法により作製した高密度焼結体の機械的特性を調べ、以下の結果を得た。



- 1] 潤滑剤噴射量の変動を抑えた金型潤滑剤塗布装置により、潤滑剤の噴射量の変動を従来装置の 1/4 まで低減することができた。
- 2] 温間金型潤滑成形法における密度は、内部潤滑剤の添加量の低減効果により、常温成形法の場合に比べ約  $0.2 \text{ Mg/m}^3$ 、温間成形法に比べ約  $0.1 \text{ Mg/m}^3$  増加し  $7.4 \text{ Mg/m}^3$  の高い値が得られた。
- 3] 0.6% 黒鉛添加の焼結体では、温間金型潤滑成形法により、常温成形法に比べ焼結密度が約  $0.2 \text{ Mg/m}^3$  高い  $7.5 \text{ Mg/m}^3$  以上の焼結体が得られ、引張強さ  $1000 \text{ MPa}$ 、衝撃値  $40 \text{ J/cm}^2$  の高い値が得られた。
- 4] 0.6% 黒鉛添加の光輝熱処理材では、引張強さ  $1800 \text{ MPa}$ 、衝撃値  $44 \text{ J/cm}^2$ 、回転曲げ疲れ強さ  $450 \text{ MPa}$  と従来の 2 回成形 2 回焼結法より優れた疲労特性が得られた。
- 5] 1.0% 黒鉛添加の光輝熱処理材では、回転曲げ疲れ強さ  $470 \text{ MPa}$  (耐久限度比 0.38) という 0.6% 黒鉛添加材より高い値が得られた。この疲労強度の向上は、C 量の増加により残留オーステナイト量が増加したことに起因すると考えられる。

今後、これら開発した高密度成形用鋼粉および高密度成形法は、自動車分野において粉末冶金法による高疲労強度部品の製造に適用されることが期待される。

#### 参考文献

- 1] Engstrom, U. et al. "Porosity and properties of warm compacted high strength sintered steels." Proc. of 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition. Granada, 1998-10, EPMA. p. 21-26.
- 2] Ozaki, Y. et al. "An analysis of compaction behaviors of iron powder during warm compaction." Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials. Vancouver, 1999-06, MPIF. vol. 1, part 2, p. 109-116.
- 3] 尾崎由紀子ほか. 温間成形用部分合金化鋼粉クリーンミックス「KIP クリーンミックス HW シリーズ」. 川崎製鉄技報. vol. 33, no. 4 2001, p. 170-174

- 4] Ball, W. G. et al. New die wall lubrication system. Int. J. Powder Metallurgy. vol. 33, no. 1, 1997, p. 23-32.
- 5] Gasbarre, G. P. Jr. "Die wall lubrication system, consistency and reliability." Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials. 2001-06, part 3, p. 38-46.
- 6] 宇波繁ほか. "焼結密度  $7.5 \text{ Mg/m}^3$  を有する光輝焼入れ鋼の疲労強度に及ぼす残留オーステナイトの影響". 粉体粉末冶金協会平成 14 年度春季講演大会概要集. 東京, 2002-05, 粉体粉末冶金協会. p. 256
- 7] 宇波繁ほか. "温間金型潤滑成形法による高密度焼結体の面圧疲労特性". 粉体粉末冶金協会平成 14 年度秋季講演大会概要集. 京都 2002-11, 粉体粉末冶金協会. p. 28
- 8] 渡辺隆. トリボマチック・パウダーコーティングシステム. 塗装工学 vol. 29, no. 5, 1994, p. 176-192
- 9] 川崎製鉄ほか. 宇波繁ほか. 粉体成形用金型への潤滑剤塗布装置特開 2002-327204. 2002-11-15
- 10] 円山弘. 残留オーステナイトの X 線測定方法. 熱処理. vol. 17 no. 4, 1977, p. 198
- 11] Furukimi, O. et al. "New composite-type alloyed 2%Ni-1%Mo steel powder for ultrahigh-strength sintered components." Advances in Powder Metallurgy. MPIF. vol. 5, 1991, p. 59-67.
- 12] 日本熱処理技術協会. 熱処理技術便覧. 日刊工業新聞社, 2000 66p
- 13] 荒木透. 鉄鋼材料学. 丸善, 1970, 171p
- 14] Richman, R. H. et al. Some effects of retained austenite on the fatigue resistance of carburized steel. Met. Trans. A, 6A, 1975, p. 955-964.
- 15] French, H. J. Fatigue and the hardening of steels. Trans. ASST. vol. 21, 1933, p. 899-946.
- 16] Frankel, H. E. et al. Fatigue properties of high strength steels. Trans. ASM. vol. 52, 1960, p. 257-276.



宇波 繁



尾崎由紀子



上ノ園 聡