

# 引張強さ 1 300 MPa 級および 1 500 MPa 級の焼結材料を 製造可能な Ni フリー合金鋼粉

## Ni-Free Alloyed Steel Powder for Manufacturing Heat-Treated Compacts with Tensile Strength of 1 300 MPa and 1 500 MPa Grades

小林 聡雄 KOBAYASHI Akio 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)  
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 (副部長)  
尾崎由紀子 OZAKI Yukiko JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部長・理博

### 要旨

JFE スチールでは Ni フリー高強度合金鋼粉の新グレードとして、焼結・熱処理後の引張強さが 1 300 MPa 級の「JIP<sup>®</sup> FM1300」、および 1 500 MPa 級の「JIP<sup>®</sup> FM1500」を開発した。「FM1300」では、合金成分である Mo の一部を粒子表面に拡散付着させ、焼結を促進させることにより強度向上を図った。また、「FM1500」では、合金元素として Mo とともに Cr および Mn を添加することで、それらの相乗効果によって焼入れ性を高めた。両者のいずれについても、高温焼結を施すことによってほぼ均一な組織となり、適切な条件で熱処理することでそれぞれの目標の引張強さが得られる。既開発鋼粉と併せて 600~1 500 MPa 級の広い強度範囲の用途に対応した、Ni フリー合金鋼粉がラインアップ化された。

### Abstract:

JFE Steel has developed new grades of Ni-free alloyed steel powders, “JIP<sup>®</sup> FM1300” and “JIP<sup>®</sup> FM1500”, with tensile strengths of 1 300 MPa and 1 500 MPa, respectively, after sintering and heat-treatment. “FM1300” is a Mo-prealloyed steel powder with diffusion bonded Mo fine particles on the steel particle surfaces for acceleration of inter-particle atomic diffusion during sintering and improvement of mechanical strength of sintered products. “FM1500” includes Cr and Mn as well as Mo for further improvement of the hardenability effect. The newly developed powders show almost homogeneous microstructures after sintering at high temperatures ( $\geq 1 200^{\circ}\text{C}$ ), and give the tensile strengths mentioned above after appropriate heat-treatments. In conjunction with the products developed previously, JFE Steel has lined up Ni-free alloyed steel powders suitable for a wide range of applications requiring tensile strength from 600 MPa to 1 500 MPa.

## 1. はじめに

鉄系焼結部品は、自動車分野をはじめとする多くの用途に適用されており、昨今の軽量化・小型化に対応するために高強度化が進められてきている。高強度が要求される用途では、合金成分として Ni を鉄粉粒子表面に拡散付着させた合金鋼粉が従来から用いられてきたが<sup>1)</sup>、Ni フリー化のニーズに対応した合金鋼粉の開発も進められている<sup>2-4)</sup>。すでに、JFE スチールでは、引張強さ 600~1 000 MPa 級の Ni フリー合金鋼粉「JIP<sup>®</sup> FM600」および「JIP<sup>®</sup> FM1000」の開発を完了した<sup>2)</sup>。

本報では、Ni フリーで 1 300 MPa 級および 1 500 MPa 級の焼結材料を製造可能な新開発の合金鋼粉について報告する。この強度レベルの焼結材料としては、たとえば、4Ni 系

拡散合金鋼粉 (Fe-4mass%Ni-1.5mass%Cu-0.5mass%Mo) を 1 250℃で高温焼結し、浸炭・焼入れ・焼戻しを行なって引張強さ 1 380 MPa を得た報告がある<sup>1)</sup>。また、2Ni 系拡散合金鋼粉 (Fe-2mass%Ni-1mass%Mo) を同じく 1 250℃で高温焼結し、浸炭・焼入れ・焼戻しを行なった材料では 1 500 MPa が得られている<sup>1)</sup>。今回新たに開発した「JIP<sup>®</sup> FM1300」および「JIP<sup>®</sup> FM1500」は、Ni フリー合金鋼粉をベースに、最適量の副原料と潤滑剤を混合した偏析防止処理粉である。適切な条件で焼結・熱処理を行なうことにより、それぞれ 1 300 MPa 級および 1 500 MPa 級の焼結材料を得ることが可能である。本報告では、これら合金鋼粉により作製した材料の焼結・熱処理体の機械的特性について報告する。

## 2. Ni フリー超高強度合金鋼粉 FM1300 の特性

### 2.1 材料設計の考え方

#### (1) ベース合金鋼粉

「FM600」や「FM1000」では 0.45mass% の Mo プレアロイ鋼粉としていたのに対し<sup>2)</sup>、「FM1300」ではさらなる強度アップのために 0.45mass% の Mo のプレアロイ鋼粉にさらに 0.15mass% の Mo を拡散付着させたハイブリッド合金鋼粉（プレアロイ+拡散合金鋼粉）とした。図 1 に示すように、プレアロイ鋼粉表面に拡散付着させた Mo 粒子が、焼結中もフェライト相を保つことによって大きな拡散速度を維持し焼結促進効果を示すとともに、焼入れ性向上にも寄与して強度向上に繋がる<sup>5)</sup>。

#### (2) 副原料および焼結条件

黒鉛粉は平均粒径が 4 μm の天然黒鉛粉を使用し、添加量は予備実験により 0.5mass% に決定した。また、潤滑剤は既開発の高密度成形用潤滑剤 HDX<sup>®6)</sup> を採用し、黒鉛偏析防止処理を施したクリーンミックス<sup>®</sup> とした。焼結条件は、従来の 4%Ni 系合金鋼粉で 1300 MPa 級の材料が得られた例<sup>1)</sup> と同様に、1250℃程度の高温焼結をした後、浸炭・焼入れ・焼戻し熱処理を施すことを前提としている。

### 2.2 試料および実験方法

#### 2.2.1 原料粉

プレアロイにより 0.45mass% の Mo を合金化し、さらに拡散付着により 0.15mass% の Mo を合金化したハイブリッ

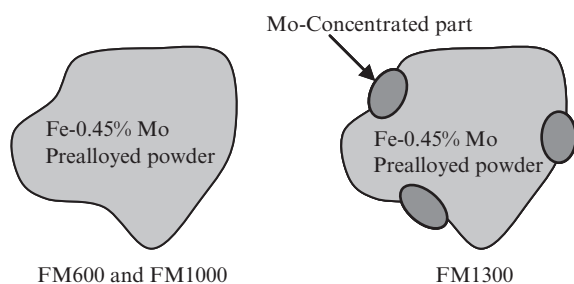


図 1 ベース合金鋼粉の粒子構造

Fig. 1 Particle structure of the base alloyed steel powders

ド Mo 鋼粉 JIP<sup>®</sup> AH4515 に、天然黒鉛粉（平均粒径 4 μm）を 0.5mass%、高密度成形用潤滑剤 HDX<sup>®6)</sup> を 0.5mass% 添加し、偏析防止処理を行なった粉末（以下、「FM1300」）を用いた。比較材として、4mass%Ni 系の拡散付着合金鋼粉に天然黒鉛粉 0.3mass%、エチレンビスステアロアミド 0.6mass% を混合した粉末（以下、「4Ni」）を用いた。「FM1300」の配合を「4Ni」と比較して表 1 に示す。

#### 2.2.2 試験片作製条件および評価方法

それぞれの混合粉を、429~686 MPa の間の成形圧力で、55 mm×10 mm×10 mm の棒状試験片 A、80 mm×15 mm×15 mm の棒状試験片 B、および外径 60 mm×内径 20 mm×高さ 6 mm のリング状試験片に成形した。これらの試験片を 90vol% N<sub>2</sub>+10vol% H<sub>2</sub> 雰囲気中で 1250℃×60 min 焼結した。

引張試験は、焼結後の棒状試験片 A から平行部直径 5 mm の小型丸棒試験片を機械加工により作製し、浸炭熱処理（浸炭：900℃×60 min、カーボンポテンシャル 0.8mass%、焼入れ：60℃油中、焼戻し：180℃×60 min）を行なった後に JIS Z 2241 に基づき評価した。硬さは、上記条件の浸炭熱処理を行なった棒状試験片 A の表面のロックウェル硬さを測定した。組織観察は、浸炭熱処理試験片 A の切断研磨面を 3vol%硝酸アルコール溶液で腐食した後、光学顕微鏡を用いて行なった。

回転曲げ疲れ試験は、焼結後の棒状試験片 B から、平行部直径 8 mm の丸棒試験片を機械加工により作製し、上記条件の浸炭熱処理後にさらに研磨加工で試験片表面を平滑に仕上げ、小野式疲労試験機により、回転数 3000 min<sup>-1</sup>、応力比 R=-1 の条件で実施した。耐久限度は繰り返し数 10<sup>7</sup> 回における最大応力として求めた。面圧疲れ試験は、焼結後のリング状試験片のプレス面を機械研削で平滑とし、上記条件の浸炭熱処理後にさらに鏡面研磨を行なって、森式試験機を用いて 6 球方式で実施した。疲れ限度は繰り返し数 10<sup>7</sup> 回における最大接触応力（ヘルツ応力）として求めた。摩耗試験は大越式摩耗試験機を用いて行なった。試料は焼結後の棒状試験片 A を上記条件で浸炭熱処理したものをを用いた。相手材として SUJ2（JIS G 4805、高炭素クロム軸受鋼鋼材）製の円筒形状のものをを用い、その円筒側面を荷重 124 N で試料表面に接触させ、接触部にオイル（デキ

表 1 FM1300 および比較の 4Ni の配合

Table 1 Nominal composition of FM1300 and 4Ni steel powder mixture

| Code   | Steel powder |                        |     |      | Pre-mixed powder | Lubricant |                  |
|--------|--------------|------------------------|-----|------|------------------|-----------|------------------|
|        | Prealloy     | Diffusion alloy bonded |     |      |                  | Gr        | HDX <sup>®</sup> |
|        | Mo           | Ni                     | Cu  | Mo   |                  |           |                  |
| FM1300 | 0.45         | —                      | —   | 0.15 | 0.5              | 0.5       | —                |
| 4Ni    | —            | 4                      | 1.5 | 0.5  | 0.3              | —         | 0.6              |

Gr: Graphite, EBS: Ethylene-bisstearamide

シロンⅢ)を毎秒1滴の速度で滴下した状態で摩擦速度4.21 m/sで相手材を回転させた。耐摩耗性の評価は接触部の摩耗体積で行なった。摩耗体積は、試料表面についた摩耗痕幅と相手材の円筒直径から計算した。相手材の円筒の周長×回転数から摩擦距離を求め、同じ摩擦距離に対して摩耗体積が小さいほど耐摩耗性に優れると判断した。

### 2.3 実験結果および考察

「FM1300」および比較の「4Ni」で作製した棒状試験片Aの成形圧力と圧粉密度および焼結密度の関係を図2に示す。「FM1300」は「4Ni」と圧粉密度、焼結密度ともほぼ同等である。次に、引張強さと焼結密度との関係を図3に示す。「FM1300」は「4Ni」とほぼ同等の挙動を示す。図2および図3より、「FM1300」および「4Ni」において引張強さ1300 MPa以上を得るための密度や成形圧力を読み取ると両者ともほぼ同等であり、具体的には、焼結密度で7.18 Mg/m<sup>3</sup>以上が

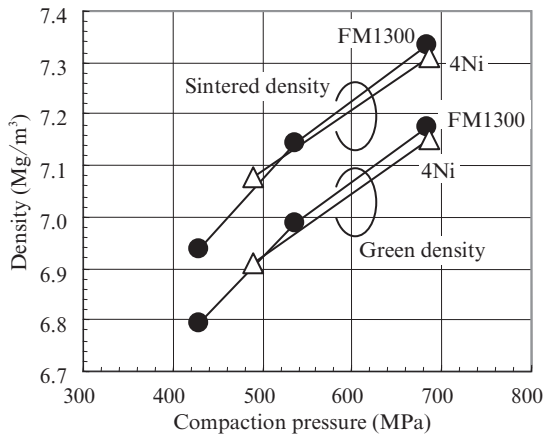


図2 成形圧力と圧粉密度および焼結密度の関係

Fig. 2 Dependence of green and sintered density on compaction pressure

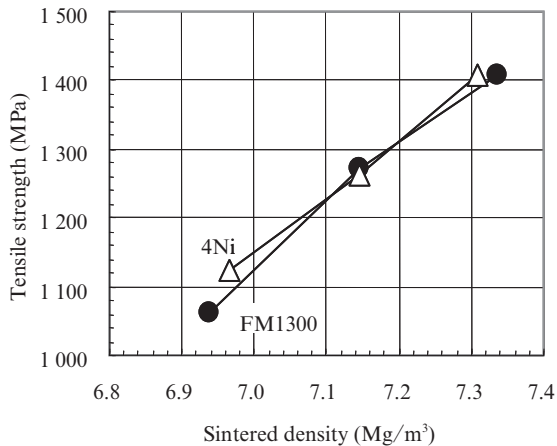


図3 FM1300 および 4Ni で作製した焼結熱処理材の引張強さ  
Fig. 3 Tensile strength of the case-hardened materials made from FM1300 and 4Ni

必要、圧粉密度では7.03 Mg/m<sup>3</sup>以上が必要であり、要求される成形圧力は570 MPa以上が必要である。

続いて、回転曲げ疲れ試験および面圧疲れ試験で得られたS-N曲線を図4に示す。回転曲げ疲れ限度については「FM1300」は「4Ni」とほぼ同等の値であり、また、面圧疲れ限度については「FM1300」は「4Ni」より大きい。さらに、摩耗試験の結果を図5に示す。「FM1300」の摩耗量は「4Ni」に比べて2桁ほど少なく、耐摩耗性能は「FM1300」の方が非常に良好である。以上から、これらの機械的特性について、

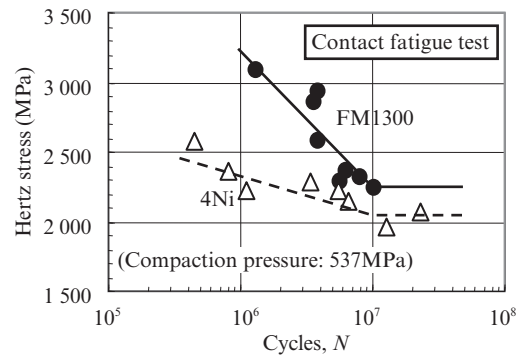
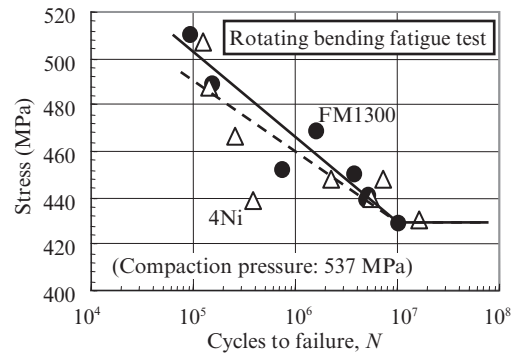


図4 FM1300 および 4Ni で作製した焼結熱処理材の疲労特性  
Fig. 4 Fatigue properties of the case-hardened compacts made from FM1300 and 4Ni

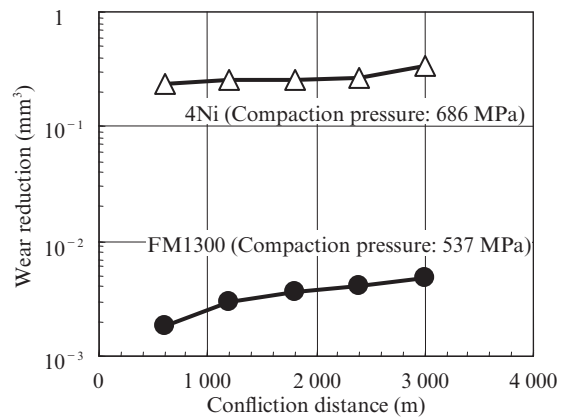


図5 FM1300 および 4Ni で作製した焼結熱処理材の摩耗特性  
Fig. 5 Wear resistance of the case-hardened compacts made from FM1300 and 4Ni

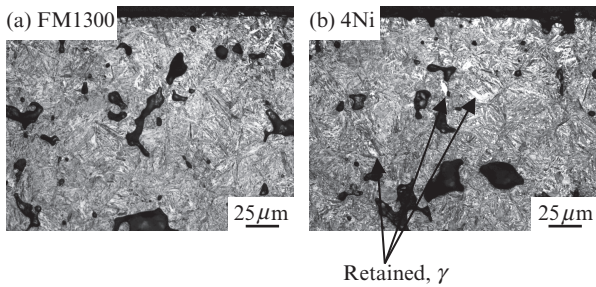


写真1 FM1300 および 4Ni で作製した焼結浸炭熱処理材の組織  
Photo 1 Microstructures of the case-hardened compacts made from FM1300 (a) and 4Ni (b)

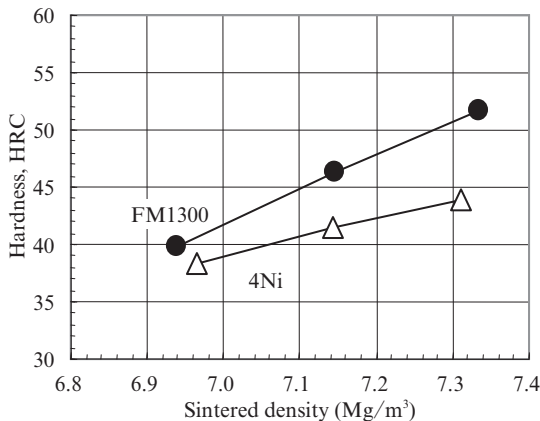


図6 FM1300 および 4Ni で作製した焼結熱処理材の表面硬さ  
Fig. 6 Surface hardness of the case-hardened materials made from FM1300 and 4Ni

「FM1300」は「4Ni」と同等以上のポテンシャルをもっていることが分かる。

特性評価に用いた試料の表層部の断面組織を写真1に示す。「FM1300」と「4Ni」のいずれも、多くの部分は焼戻しマルテンサイト組織であるものの、「4Ni」は白く示される残留オーステナイトが多く分布している。これは鉄粉粒子表面に拡散付着させたNiが十分拡散せず、組織内に残ったNiの濃化部分が残留オーステナイトを形成するためであると考えられる。試験片の表面硬さを測定した結果は図6に示すとおり、「FM1300」の方が「4Ni」より高く、引張強さが両者とも1300 MPaとなる焼結密度7.18 Mg/m<sup>3</sup>では「FM1300」の方が10%程度高硬度である。「4Ni」に多く含まれる残留オーステナイトはマルテンサイトより軟らかい組織であることから、これら組織観察と硬さ測定の両結果は符合している。「FM1300」が「4Ni」より面圧疲れ限度および磨耗特性で優位にあるのは、このような残留オーステナイトが少ない硬い組織が影響しているものと思われる。

### 3. Ni フリー超高強度合金鋼粉 FM1500 の特性

#### 3.1 材料設計の考え方

##### (1) ベース合金鋼粉

「FM1300」よりさらに高強度の1500 MPa級を得るため、「FM1500」ではMoに加えてCrやMnを添加し、これら元素の相乗効果によって焼入れ性を高めることを検討した。組成の選定にあたっては、合金鋼粉の圧縮性低下を招かないようにすることにも配慮して、これらの元素の中でフェライトの固溶強化能<sup>7)</sup>の低いCrを主体とする成分系を探索し、0.5mass%Cr-0.2mass%Mn-0.2mass%Moのプレアロイ鋼粉に決定した。

##### (2) 副原料および焼結条件

黒鉛粉は平均粒径が4 μmの天然黒鉛粉を使用した。添加量は0.7~0.8mass%が前提となる。「FM1300」と同様に、潤滑剤は既開発の高密度成形用潤滑剤HDX<sup>®6)</sup>を採用し、黒鉛の偏析防止処理を施したクリーンミックス<sup>®</sup>とした。なお、焼結条件については、焼結を進展させて強度を確保するために1200°C×150 min程度の高温長時間の条件が、また、熱処理は光輝焼入れが前提となる。

#### 3.2 試料および実験方法

合金成分としてCr, Mn, およびMoをプレアロイ化したJIP<sup>®</sup>5CRA (Fe-0.5mass%Cr-0.2mass%Mn-0.2mass%Mo)に、天然黒鉛粉(平均粒径4 μm)を0.6mass%, 0.7mass%, 0.8mass%, 0.9mass%の4水準と、高密度成形用潤滑剤HDX<sup>®6)</sup>0.5mass%を添加し、偏析防止処理を行なった粉末を用いた。

上記4水準の5CRA混合粉を、成形圧力700 MPa(圧粉密度7.13~7.15 Mg/m<sup>3</sup>)で、55 mm×10 mm×10 mmの棒状試験片Aに成形した後、90vol% N<sub>2</sub>+10vol% H<sub>2</sub>雰囲気中、1200°C×150 min焼結した。その後、熱処理として(1)ガス浸炭(メタノール滴注式ガス浸炭: 870°C×60 min, カーボンポテンシャル0.8mass%, 焼入れ: 60°C油中, 焼戻し: 180°C×60 min), (2)光輝焼入れ(900°C×30 min, Ar雰囲気, 焼入れ: 60°C油中, 焼戻し: 180°C×60 min)の2条件をテストした。

引張試験および組織観察は2.2.3項と同様の方法で行なった。また、焼結後の試験片の一部を用いてC量分析を行なった。さらに、衝撃試験については、JIS Z 2550に準拠したノッチなしの棒状試験片Aを用いて実施し、シャルピー衝撃値を測定した。

#### 3.3 実験結果および考察

3.2節で作製した試験片の引張強さおよびシャルピー衝撃値を焼結体のC量に対してプロットしたものを、図7および8にそれぞれ示す。比較のため、1500 MPa級の引張強さ

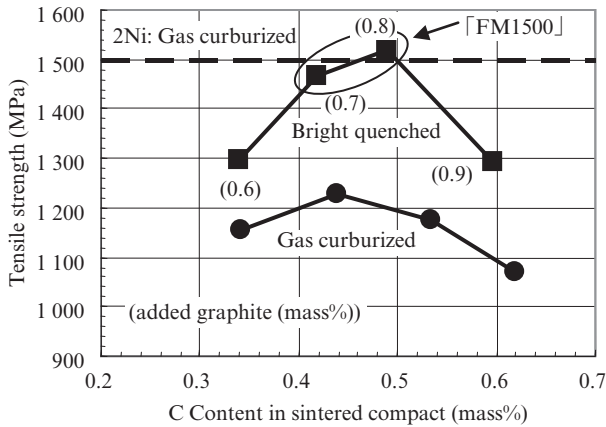


図7 JIP® 5CRA の黒鉛・潤滑剤混合粉で作製した焼結熱処理材の引張強さ

Fig. 7 Tensile strength of the case-hardened compacts made from JIP® 5CRA mixed with graphite and lubricant

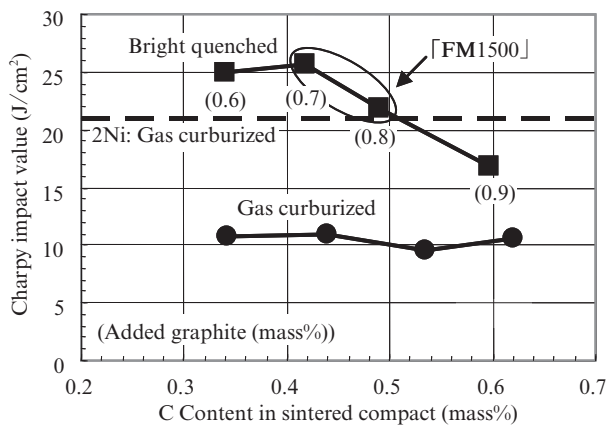


図8 JIP® 5CRA の黒鉛・潤滑剤混合粉で作製した焼結熱処理材のシャルピー衝撃値

Fig. 8 Charpy impact value of the case-hardened compacts made from JIP® 5CRA mixed with graphite and lubricant

が得られている従来粉の例として、文献1)に記載されている 2Ni 系拡散合金鋼粉 (Fe-2mass%Ni-1mass%Mo) のガス浸炭材 (以下「2Ni」) の測定値を併せて示す。引張強さは、黒鉛粉 0.8mass% の光輝焼入れ材で目標の 1500 MPa を超える 1520 MPa が得られる。この黒鉛粉 0.8mass% 添加光輝焼入れ材のシャルピー衝撃値は、「2Ni」ガス浸炭材とほぼ同等である。衝撃値を重視したい用途の場合は、黒鉛粉 0.7mass% 添加の光輝焼入れ材を用いることにより、シャルピー衝撃値は黒鉛粉 0.8mass% の場合に比べて約 2 割向上し、引張強さは約 4% の低下に留まる。一方、ガス浸炭材の引張強さは、いずれの黒鉛量でも目標の強度レベルに達しなかった。さらに、シャルピー衝撃値についても「2Ni」ガス浸炭材の 1/2 程度にとどまった。

以上から、1500 MPa 級の引張強さを得るためには、JIP® 5CRA に黒鉛を 0.7~0.8mass% 添加し偏析防止処理を施した混合粉を光輝焼入れすればよく、このときシャルピー衝撃

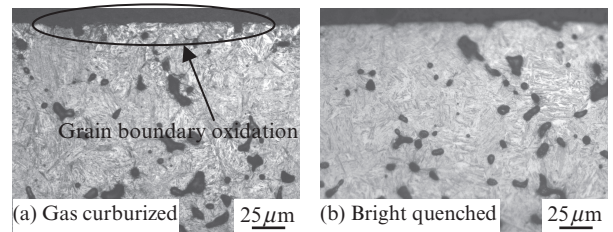


写真2 FM1500 で作製した焼結浸炭熱処理材の組織

Photo 2 Microstructures of the sintered and case-hardened compacts made from FM1500

値は「2Ni」と同等以上となる。したがって、この 5CRA に黒鉛を 0.7~0.8mass% 添加し高密度成形用潤滑剤 0.5mass% とともに偏析防止処理を施した混合粉が「FM1500」として定義される。

上記で評価した試験片のうち、黒鉛添加量が 0.8mass% のものの表層部の断面組織を写真2に示す。いずれの条件による熱処理材もほぼ均一な焼戻しマルテンサイト組織を示す。しかしながら、ガス浸炭材ではごく表層部分にわずかな粒界酸化が認められた。さらに、黒鉛添加量が 0.8mass% 以外のものも含めてガス浸炭材は 4 サンプルともすべて同様な粒界酸化が起きていることが確認された。図7でガス浸炭材の引張強さが光輝焼入れ材よりも低くなっている原因は、試料表層部分に見られる粒界酸化が引張試験の際に破断の起点になっているためと推定される。

粒界酸化の原因は、光輝焼入れではドライ (露点: -60℃以下) の Ar 雰囲気であるのに比べて、ガス浸炭では、より酸化性の雰囲気になるためである。本実験で行なったメタノール滴注式ガス浸炭では、 $\text{CH}_3\text{OH} = \text{CO} + 2\text{H}_2$  の反応により生成した CO および  $\text{H}_2$  が雰囲気の主たる組成である。この際、 $\text{CO} = [\text{C}] + (1/2)\text{O}_2$  の反応に基づき、 $\text{O}_2$  分圧を制御することによりカーボンポテンシャルを制御する。雰囲気中に  $\text{O}_2$  と  $\text{H}_2$  が存在することから、 $\text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$  の反応により  $\text{H}_2\text{O}$  (水蒸気) が発生する。この反応の 870℃での平衡水蒸気分圧は約 14℃の露点に相当し<sup>8,9)</sup>、光輝焼入れの雰囲気より高露点であることがわかる。

また、図7の引張強さは、光輝焼入れ材とガス浸炭材のいずれも焼結体 C 量に対してピークをもつ形となっている。溶製材料では均一な焼戻しマルテンサイト組織をもつ場合には、硬さは熱処理後の C 量で 0.6mass% 程度までは C 量とともに増加し<sup>10)</sup>、引張強さも同様の傾向を示す<sup>11)</sup>。しかしながら、焼結材料では、C 量とともに硬さは増加しても、引張強さはある C 量を超えると低下する現象が報告されている<sup>12)</sup>。実際に本焼結材料においても表面硬さは図9に示すように、C 量とともに単調に増加するが、引張強さは図7のとおりピークが現れる。これは、硬質なマルテンサイト組織が増加すると、切欠き感受性が高まり、気孔の内部切欠き効果により脆性破壊が生じやすくなるためと説明されてい

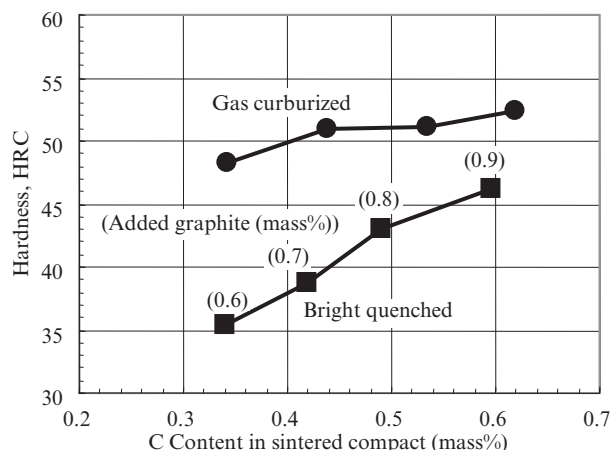


図9 JIP® 5CRAの黒鉛・潤滑剤混合粉で作製した焼結熱処理材の表面硬さ

Fig. 9 Surface hardness of the case-hardened compacts made from JIP® 5CRA mixed with graphite and lubricant

る。

一方、図8のシャルピー衝撃値のC量依存性については以下のように考察できる。まず、光輝焼入れ材については、焼結体C量が増加するとともに衝撃値は低下している。これは、上述のとおり硬質なマルテンサイト組織は切欠き感受性が高まり脆性破壊が生じやすくなる<sup>12)</sup>という点に加えて、一般に鋼材ではC量増加が脆化を招くとされている<sup>13)</sup>点から理解できる。次に、ガス浸炭材の衝撃値は、光輝焼入れ材よりも低く、かつ、焼結体C量依存性がほとんど認められない。光輝焼入れ材よりも低いのは、ガス浸炭材の試料表層部分に見られた粒界酸化が、引張試験の場合と同様に衝撃試験の際にも亀裂発生の起点となって、衝撃値の低下を引き起こしているためと考えられる。また、焼結体C量依存性が小さいのは、ガス浸炭後にはいずれの焼結体C量の試料も表層部のC量は浸炭雰囲気のカーボンポテンシャルの0.8mass%程度となり、粒界酸化のために亀裂が発生しやすい試料表層部のC量が材料の脆性を決定しているためであると考えられる。

#### 4. おわりに

Niフリー合金鋼粉「FMシリーズ」として、「FM1300」(引張強さ1300 MPa級)および「FM1500」(同1500 MPa級)を新たに開発した。これらの新規開発合金鋼粉の焼結熱処理後の特性を調べ、主な結果として以下を得た。

##### (1) 「FM1300」

0.45mass%のMoのプレアロイ鋼粉にさらに0.15mass%

のMoを拡散付着させたプレアロイ+拡散合金鋼粉に0.5mass%の黒鉛粉および0.5mass%の高密度成形用潤滑剤を混合した偏析防止処理粉であり、成形圧力570 MPa以上で成形すると圧粉密度が $7.03 \text{ Mg/m}^3$ 以上となり、 $1250^\circ\text{C} \times 60 \text{ min}$ の焼結および浸炭焼入れ焼戻し処理を施すと1300 MPa以上の引張強さが得られる。

##### (2) 「FM1500」

プレアロイによりCr, Mn, Moを合金化したFe-0.5mass%Cr-0.2mass%Mn-0.2mass%Mo鋼粉に0.7~0.8mass%の黒鉛粉および0.5mass%の高密度成形用潤滑剤を混合した偏析防止処理粉であり、成形圧力700 MPaで成形すると圧粉密度が $7.13 \sim 7.15 \text{ Mg/m}^3$ となり、 $1200^\circ\text{C} \times 150 \text{ min}$ の焼結および光輝焼入れ処理を施すと1500 MPa級の引張強さが得られるとともに、シャルピー衝撃値についても従来のNi系鋼粉と同等以上の値が得られる。

既開発の「FM600」および「FM1000」と併せて、引張強さ600~1500 MPa級まで「FMシリーズ」のラインアップを拡大した。「FMシリーズ」は、Niを全く含まない新しいタイプの合金鋼粉である。自動車のエンジン・駆動系部品用途として、今後の適用拡大が期待される。

#### 参考文献

- 1) 古君修, 丸田慶一, 前田義昭. 川崎製鉄技報. 1992, vol. 24, no. 4, p. 273-278.
- 2) 宇波繁, 尾崎由紀子, 尾野友重. JFE技報. 2010, no. 26, p. 54-59.
- 3) 吉田真規, 古田智之, 澤山哲也, 佐藤正昭. R & D 神戸製鋼技報. 2010, vol. 60, no. 2, p. 66-69.
- 4) Engstoem, U.; Milligan, D.; Klekovkin, A. Adv. Powder Metall. Part Mater. 2006, vol. 1, p. 7.21-7.32.
- 5) 宇波繁, 尾崎由紀子. JFE技報. 2010, no. 26, p. 48-53.
- 6) 尾崎由紀子, 尾野友重, 宇波繁. JFE技報. 2005, no. 7, p. 1-5.
- 7) 田村今男, 泉久司, 伊佐重輝. 鉄鋼材料学. 朝倉書店, 1981, p. 83.
- 8) 鉄鋼協会編. 第3版 鉄鋼便覧 第I巻 基礎. 丸善, 1980, p. 14.
- 9) 内藤武志. 浸炭焼入れの実際 第2版. 2006, p. 17.
- 10) 田村今男, 泉久司, 伊佐重輝. 鉄鋼材料学. 朝倉書店, 1981, p. 98.
- 11) 門間改三. 鉄鋼材料学改訂版. 実教出版, 1992, p. 132.
- 12) 宇波繁, 中村高道. 粉体粉末冶金協会講演概要集 平成22年度春季大会. 2010, p. 140.
- 13) 田村今男, 泉久司, 伊佐重輝. 鉄鋼材料学. 朝倉書店, 1981, p. 87.



小林 聡雄



宇波 繁



尾崎由紀子