

Characteristics of Alloyed Steel Powder “KIP SIGMALOY 2010” for Ultra High Strength Sintered Materials and Its Strengthening Mechanism



古君 修
Osamu Furukimi
ハイテック研究所 新素材
研究センター 主任
研究員(課長)・工博



丸田 慶一
Kei-ichi Maruta
化学事業部 新素材部



前田 義昭
Yoshiaki Maeda
千葉製鉄所 管理部鉄
粉管理室長(部長補)

要旨

熱処理高強度焼結材料用複合金鋼粉の調製を目的に、その組成について研究した結果、2%Ni-1%Moが最適であることが明らかになった。この新組成合金鋼粉 KIP シグマロイ 2010 を 2 回成形・2 回焼結・光輝焼入れ焼もどし処理することにより、引張強さ 1920 MPa、シャルピー衝撃値 53 J、耐久回転曲げ疲れ強さ 390 MPa、耐久面圧疲れ強さ 2710 MPa といずれも従来材に比較して超高強度、高靱性な焼結材料が得られる。この高強度化は、焼結体の密度増加とオーステナイトのひずみ誘起マルテンサイト変態に起因する。

一方、新組成合金鋼粉の焼結体硬さは低いため、従来の複合金鋼粉焼結体に比較して、低速度域での工具寿命は約 10 倍と長く、優れた切削性を示す。

Synopsis:

The chemical composition of Ni- and Mo-containing composite-type alloyed steel powder was optimized for the production of high strength sintered components via compaction, sintering and heat treatment. A powder with 2%Ni and 1%Mo, KIP SIGMALOY 2010, attained a high tensile strength of 1920 MPa, a high unnotched Charpy absorbed energy of 53 J, a high endurance limit of rotating bending fatigue strength of 390 MPa and a high endurance limit of contact fatigue strength of 2710 MPa, when double-pressed, double-sintered, bright-quenched and tempered. These values were much higher than those of a conventional composite-type alloyed steel powder. The strengthening was attributed to the increase of sintered density and the strain-induced martensitic transformation of the austenite phase.

The sintered compacts made from the new powder remained soft before heat treatment and showed a ten-times longer tool life in the case of low cutting speed, compared with that of a conventional composite-type alloyed steel powder.

1 結 言

自動車エンジンの高出力化および環境問題に伴う燃費向上の要求が年々高まりつつある中、自動車機械部品の高性能・小型化が指向され、強度、靱性および疲労特性の優れた焼結材料の開発が進められている¹⁾。しかし、現在の焼結材料の引張強さの最高値は 1300 MPa 程度であり、さらに強度を高めるためには、(1) 圧縮性を考慮した合金化方法および組成の最適化、(2) 再圧縮性による焼結体密度の増加²⁾、(3) 熱処理の実施^{3,4)} および (4) 不純物元素の低減が有効な手段である。再圧縮法と熱処理を適用する場合には、焼結のままでは硬さが低く、熱処理によって高強度が得られる組成の選択が必要である。

高圧縮性合金鋼粉として、純鉄粉と金属または金属酸化物を混合し、さらに拡散焼鈍して製造する 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 複合金鋼粉が開発された⁵⁾。この組成は、焼結のままで使用されることが前提となっている。それに対し、再圧縮法と熱処理に適した組成についての研究は、いまだになされていない。その際、複合金鋼粉では Ni, Mo の濃化層が存在するので、焼結・熱処理体でのオーステナイトの生成挙動に留意する必要がある。

一方、P, S などの不純物が鉄鋼材料の強度、靱性に及ぼす影響については多くの研究がなされてきたが、空隙を有する焼結材料とくにその熱処理材については、不純物元素量の影響が明らかにされていない。

本論文では、まず、圧縮性の高い複合金鋼粉について、(1) 再圧縮性に及ぼす Ni, Mo 量の影響、(2) 焼結・熱処理体の強度と靱性に及ぼす P, S 量の影響および (3) 焼結・熱処理体の高強度

化機構をオーステナイトのひずみ安定性の観点から基礎的に調べた結果を述べる。つぎに、以上の結果を踏まえて開発した、新組成 2%Ni-1%Mo 複合金鋼粉 (KIP シグマロイ 2010) の焼結および熱処理体特性について報告する。

* 平成 4 年 6 月 9 日原稿受付

2 基礎実験

2.1 実験方法

2.1.1 複合金鋼粉の圧縮性、再圧縮性および焼結体硬さに及ぼす Ni および Mo 量の影響

供試鋼粉には、Table 1 に示す Ni 量を 1.5% から 4%、Mo 量を 0.5% から 1.5% に変化させた複合金鋼粉 A~G を用いた。これらの鋼粉に潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を 1%、黒鉛を 0.6% 添加し、690 MPa で成形、75% H₂-25% N₂ 雰囲気において 1123 K で 30 min の仮焼結、さらに、690 MPa で再圧縮、75% H₂-25% N₂ 雰囲気において 1523 K で 60 min の本焼結を施し試験片を作製した (2 回成形・2 回焼結)。各プロセスにおける密度変化をアルキメデス法で測定し、また本焼結体のロックウェル硬さを調べた。

Table 1 Chemical compositions of composite-type alloyed steel powder studied (wt %)

Powder	Ni	Mo	P	S
A	1.56	0.99	0.006	0.003
B	2.09	1.02	0.007	0.003
C	2.04	0.52	0.007	0.003
D	2.10	1.48	0.006	0.002
E	2.50	0.99	0.007	0.003
F	2.99	0.99	0.006	0.002
G	3.92	1.02	0.005	0.003
H	2.00	0.98	0.013	0.012
I	2.10	0.98	0.011	0.012
J	1.92	0.93	0.001	0.002

2.1.2 焼結・熱処理体の強度および靱性に及ぼす P および S 量の影響

Table 1 の B および P, S 量を変化させた H~J 粉を用いて、2%Ni-1%Mo 鋼粉の焼結・熱処理体強度に及ぼす P および S 量の影響を調べた。成形および焼結は 2.1.1 と同様の条件で 2 回成形・2 回焼結を行い、さらに Ar ガス中 1143 K で 60 min 加熱後、光輝焼入れ、油中 453 K で 60 min 焼もどし処理した (2 回成形・2 回焼結・光輝処理)。

焼結・熱処理体の強度は、平行部径 5 mm、長さ 20 mm の小型丸棒試験片を用いて引張強さで評価した。また、引張破面を、加速電圧 15 kV の条件で走査型電子顕微鏡により観察するとともに、エネルギー分散型 X 線分析により介在物の同定を行った。

2.1.3 焼結・熱処理体の強度に及ぼすオーステナイト量の影響

2%Ni-1%Mo 鋼粉および従来組成の 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉の焼結・熱処理体を 2.1.2 と同様の条件で作製し、さらに、圧縮変形により 0~15% の高さ方向のひずみを付与し、MoK α 特性 X 線を用いてオーステナイトの (200) および (220) 面の積分強度でオーステナイト量を調べた。ひずみの付与は、オーステナイトのマルテンサイトへのひずみ誘起変態挙動を調べるためである⁸⁾。なお、供試材には Ni および Mo の拡散状態を変化させた鋼粉を用いて、引張強さとオーステナイト量の関係を調べた。引張強さは、平行部径 5 mm、長さ 20 mm の小型丸棒試験片を用いて評価した。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 成形、焼結体の密度および焼結体の硬さに及ぼす Ni および Mo 量の影響

成形、仮焼結および再圧縮後の密度に及ぼす Ni および Mo 量の影響を、それぞれ Fig. 1 および 2 に示す。成形および仮焼結体の密度は、本研究の Ni および Mo 量の範囲では変わらない。しかし、Ni 量が 2% および Mo 量が 1% を超えると、再圧縮による密度増加量は小さくなる。再圧縮による密度増加量が小さくならない最大の合金量を添加することが、強度の増加に有効である。なお、仮焼結による密度低下は、潤滑剤が蒸発除去されたことによる。

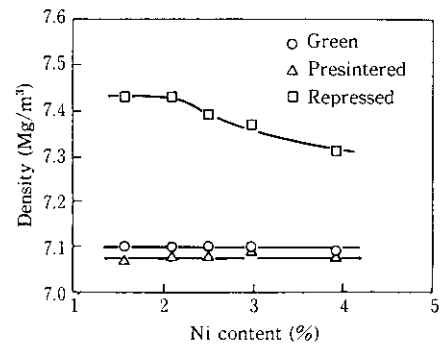


Fig. 1 Relationships between Ni content and green, presintered and repressed density for 1%Mo containing composite-type alloyed steel powders with 0.6% graphite

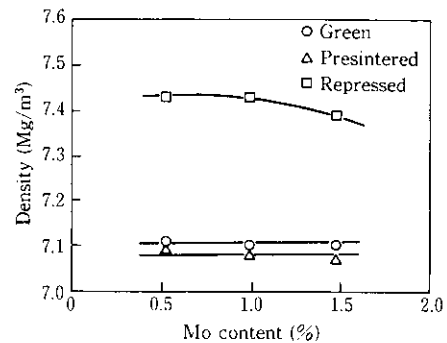


Fig. 2 Relationships between Mo content and green, presintered and repressed density for 2%Ni containing composite-type alloyed steel powders with 0.6% graphite

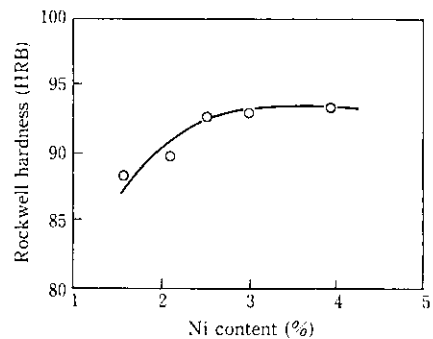


Fig. 3 Relationship between Ni content and Rockwell hardness for sintered compacts of 1%Mo containing composite-type alloyed steel powders with 0.6% graphite

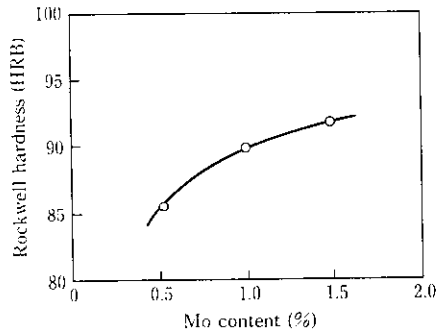


Fig. 4 Relationship between Mo content and Rockwell hardness for sintered compacts of 2%Ni containing composite-type alloyed steel powders with 0.6% graphite

1523 K で焼結したときの焼結体の硬さに及ぼす Ni および Mo 量の影響を、それぞれ Fig. 3 および 4 に示す。Ni 量が 2% および Mo 量が 1% を超えると、焼結体硬さは HRB 90 以上となる。

以上の結果から、2%Ni-1%Mo 組成の複合金鋼粉が、焼結体の硬さ低下による機械加工性の向上および再圧縮による高密度化を考慮した場合には、熱処理高強度焼結部品用鋼粉として適切であると結論できる。

2.2.2 2%Ni-1%Mo 鋼粉の 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材の強度

引張強さの異なった 2%Ni-1%Mo および 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉の 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材について、ひずみ付与によるオーステナイト量変化を Fig. 5 に示す。なお、Ni, Mo の拡散状態を変化させて、異なる引張強さの試料を得た。2%Ni-1%Mo および 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材のいずれにおいても、ひずみ付与前のオーステナイト量が大きいほど引張強さは高い。また、ひずみ量が増加するに伴いオーステナイト量は減少するが、10% 以上のひずみ領域では一定値を示す。そのひずみに対して安定なオーステナイト量は、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材のほうが高い。

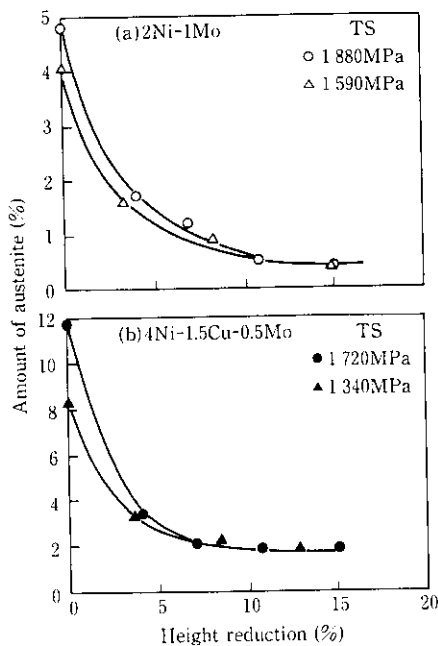


Fig. 5 Change in austenite amount of double-pressed, double-sintered and heat-treated compacts with 0.6% graphite

2%Ni-1%Mo および 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉の 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材について、10% 以上のひずみを付与した時のオーステナイト量変化と引張強さの関係を、Fig. 6 に示す。同一鋼粉について見ると、オーステナイト量変化が大きくなるにしたがい引張強さは高くなる。また、2%Ni-1%Mo 材の引張強さは、オーステナイト量を制御することにより、この実験条件では 1960 MPa に達する。一方、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材の最高到達引張強さは、1720 MPa と低い。2%Ni-1%Mo 材で高い引張強さが得られる現象は、ひずみに対して安定して残留するオーステナイト量が小さく、かつ焼結体密度が高いことに起因する。2%Ni-1%Mo 鋼粉の焼結体密度は 7.43 Mg/m³、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉の焼結体密度は 7.34 Mg/m³ であるが、小原ら⁷⁾の結果から推定すると、焼結体密度で説明できる両者の引張強さの差は 90 MPa 以下である。

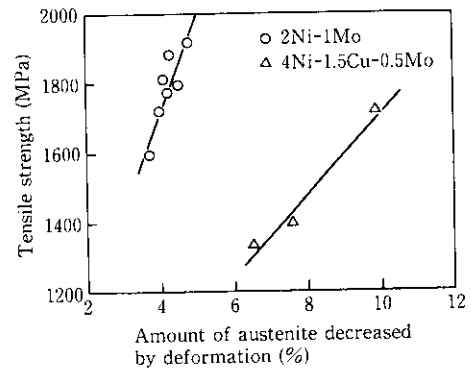


Fig. 6 Effect of amount of austenite decreased by deformation on tensile strength of double-pressed, double-sintered and heat-treated compacts with 0.6% graphite

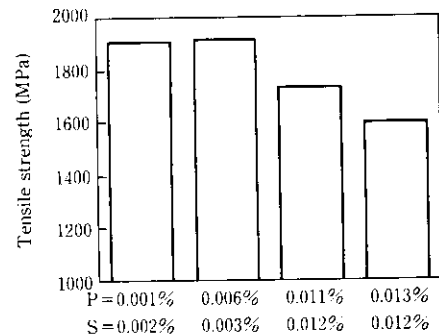


Fig. 7 Effects of P and S contents on tensile strength of double-pressed, double-sintered and heat-treated 2%Ni-1%Mo compacts with 0.6% graphite

2%Ni-1%Mo 鋼粉の 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材の引張強さに及ぼす P および S 量の影響を Fig. 7 に示す。P, S 量をそれぞれ 0.006% および 0.003% まで低下させると、引張強さは 1900 MPa 以上となる。P および S 量がそれぞれ 0.013% および 0.012% と高い試料の引張破面について、走査型電子顕微鏡で観察した結果および介在物をエネルギー分散型 X 線分析した結果を Photo 1 に示す。破面には MnS および CaS が認められる。それに対して、P 量が高くなっても、結晶粒界破面は認められなかった。P は延性破壊には影響せず、粒界破壊を伴い変形応力を低下させる^{8,9)}。この結果から、P および S 量が低くなるに伴い引張強さが高くなる主な要因

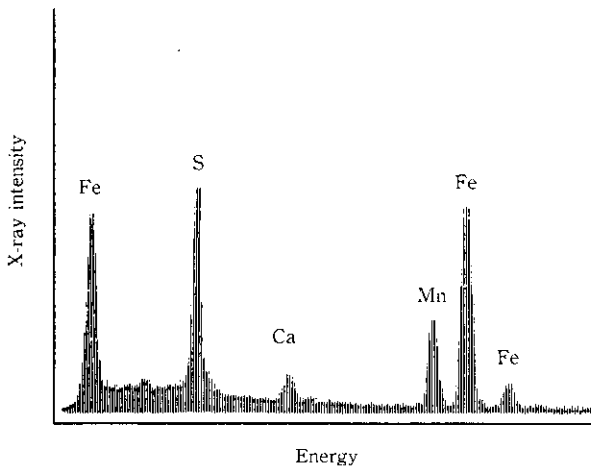


Photo 1 Scanning electron micrograph of fractured specimen in double-pressed, double-sintered and heat-treated 2%Ni-1%Mo compact, and impurity contents in inclusion revealed by dispersive energy analysis

は、MnS および CaS 介在物の低減であると考えられる。

以上の結果から、2%Ni-1%Mo 鋼粉において、不純物元素を低減し、焼結・熱処理体のオーステナイト量を制御することによって、1920 MPa の超高強度焼結材料が得られることが明らかになった。

3 工場試作実験

3.1 実験方法

3.1.1 供試材

前節で熱処理高強度焼結部品用複合金鋼粉に適切な組成であることが明らかになった高純度 (0.005%P, 0.003%S) 2%Ni-1%Mo 鋼粉 KIP シグマロイ 2010 および比較材として 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉 KIP シグマロイ 415S を工場で製造し、焼結・熱処理

体特性を調べた。供試鋼粉の粉体特性を Table 2 に示す。

これらの鋼粉について、焼結体を以下に示す 2 条件で作製した。

- (1) 潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を 1% 添加した後 690 MPa で成形、75% H_2 -25% N_2 雰囲気において、1523 K で 60 min 焼結した後、カーボンポテンシャル 0.9% の条件で、1193 K において 150 min の浸炭処理後、油中に焼入れ、453 K で 60 min の焼もどし処理を施した供試材 (1 回成形・1 回焼結・浸炭処理材)。
- (2) ステアリン酸亜鉛を 1% および黒鉛を 0.6% 添加し、690 MPa で成形、75% H_2 -25% N_2 中において 1123 K で 30 min の仮焼結、さらに、690 MPa で再圧縮、75% H_2 -25% N_2 中において 1423, 1523 および 1573 K で 60 min の本焼結を施した後、1143 K で 60 min 加熱後、光輝焼入れ焼もどし処理した供試材 (2 回成形・2 回焼結・光輝処理材)。

焼もどし処理は、453 K で 60 min の条件で行った。

3.1.2 焼結体の切削性と焼結・熱処理体の機械的特性

焼結体について、超硬の K10, P20 およびサーメット工具を用い、旋削試験を行った。切削条件は、切り込み量 1 mm, 送り量 0.05 mm/rev, 切削速度 50~200 m/min とした。

焼結・熱処理体の強度と靱性は、平行部径 5 mm, 長さ 20 mm の小型丸棒試験片、また高さ 10 mm, 幅 10 mm, 長さ 55 mm のノッチなしシャルピー衝撃試験片を用いて、それぞれ引張強さと吸収エネルギーで評価し、さらに、ロックウェル硬さを測定した。つぎに、平行部径 8 mm, 長さ 15.4 mm の小型丸棒試験片を用いた小野式回転曲げ疲労試験および外径 60 mm, 内径 20 mm, 高さ 5 mm の試験片を用いた 6 球森式面圧疲労試験を行い、耐久疲れ強さを調べた。また、大越式摩耗試験により、焼結・熱処理体の耐摩耗性を調べた。摩耗環境は、大気中でオイルを 1 滴/s の条件で滴下し、摩耗速度は 4.21 m/s, 荷重は 12.6 kg, 相手材は SUJ-2 とした。

3.1.3 破面解析

面圧疲労破面近傍でのオーステナイト量の変化を、マイクロビーム X 線を用いて加速電圧 45 kV, コリメーター径 50 μ m の条件で調べた。オーステナイト量の変化は、オーステナイトの (200) 面とフェライトの (200) および (110) 面の積分強度の比として相対的評価を行った。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 焼結体の切削性

黒鉛を 0.6% 添加し 690 MPa で成形、1123 K で仮焼結、690 MPa で再圧縮、1523 K で本焼結した 2%Ni-1%Mo 鋼粉および比較材の 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉焼結体の切削性試験結果を Fig. 8 に示す。なお、工具寿命は、逃げ面摩耗幅が 0.2 mm に達した時間とした。2%Ni-1%Mo 鋼粉焼結体のほうが、いずれの工具においても低切削速度域で優れた切削性を示す。この現象は、2%Ni-1%Mo 材の硬さが HRB 89 と、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉焼結体硬さ HRB102 に比較して低いことに起因する。

Table 2 Characteristics of powders studied

Powder	Particle size distribution (%)						Apparent density (Mg/m^3)	Flow rate (s/50 g)
	≥ 150 μ m	106~150 μ m	75~106 μ m	63~75 μ m	45~63 μ m	≤ 45 μ m		
KIP SIGMALOY 2010 (2Ni-1Mo)	2.5	27.7	25.2	14.9	14.9	14.8	2.90	18.5
KIP SIGMALOY 415S (4Ni-1.5Cu-0.5Mo)	3.1	21.9	25.4	9.0	16.1	24.5	2.90	25.6

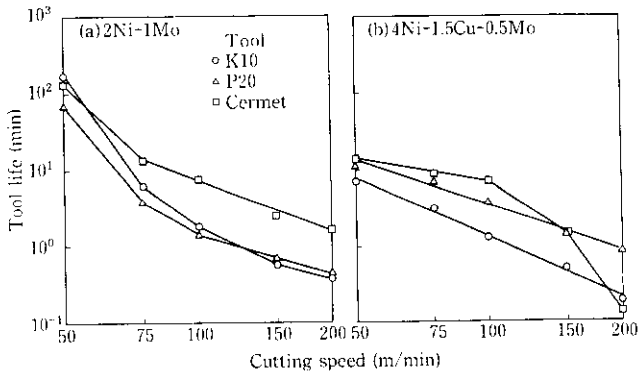


Fig. 8 Machinability test results of double-pressed, double-sintered compacts made from 2%Ni-1%Mo(a) and 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo(b) composite-type alloyed steel powders with 0.6% graphite

Table 3 Mechanical properties of sintered and heat-treated compacts made from a single-pressing, single-sintering, carburizing and tempering process (0%Gr., sintered at 1 523 K)

Power	Tensile strength (MPa)	Absorbed energy (J)	Endurance limit (MPa)	
			Rotating bending	Contact
KIP SIGMALOY 2010 (2Ni-1Mo)	1 500	21	460	2 560
KIP SIGMALOY 415S (4Ni-1.5Cu-0.5Mo)	1 380	20	410	2 430

Table 4 Mechanical properties of sintered and heat-treated compacts made from a double-pressing, double-sintering, bright-quenching and tempering process (0.6%Gr., sintered at 1 523 K)

Power	Tensile strength (MPa)	Absorbed energy (J)	Endurance limit (MPa)	
			Rotating bending	Contact
KIP SIGMALOY 2010 (2Ni-1Mo)	1 920	53	390	2 710
KIP SIGMALOY 415S (4Ni-1.5Cu-0.5Mo)	1 720	39	350	2 330

3.2.2 焼結・熱処理体の機械的特性

1 回成形・1 回焼結・浸炭処理材と 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材の引張強さ、シャルピー吸収エネルギー、耐久回転曲げ疲れ強さおよび耐久面圧疲れ強さを Table 3 および 4 に示す。1 回成形・1 回焼結・浸炭処理材および 2 回成形・2 回焼結・光輝処理材ともに、2%Ni-1%Mo 材のほうが従来材に比較して引張強さ、シャルピー吸収エネルギー、耐久回転曲げ疲れ強さ、耐久面圧疲れ強さのいずれも高い。

2 回成形・2 回焼結・光輝処理材の引張強さおよびシャルピー吸収エネルギーに及ぼす焼結温度の影響を Fig. 9 および 10 に示す。焼結温度を 1573 K まで高くすることにより、2%Ni-1%Mo 鋼粉では引張強さ 1960 MPa、シャルピー吸収エネルギー 63J の超高強度・高靱性焼結材料が得られる。

1 回成形・1 回焼結・浸炭処理材の耐摩耗性試験結果を、Fig. 11 に示す。2%Ni-1%Mo 材の耐摩耗性は、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材に比較して優れている。2%Ni-1%Mo 材と 4%Ni-1.5%Cu-0.5%

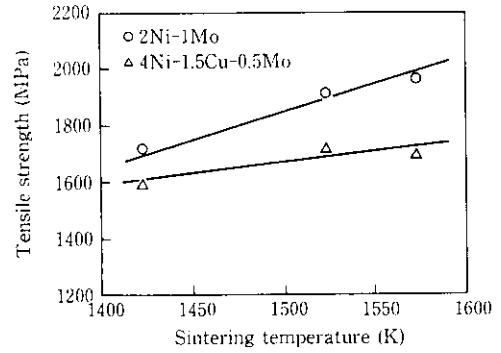


Fig. 9 Relationships between sintering temperature and tensile strength of double-pressed, double-sintered and heat-treated compacts with 0.6% graphite

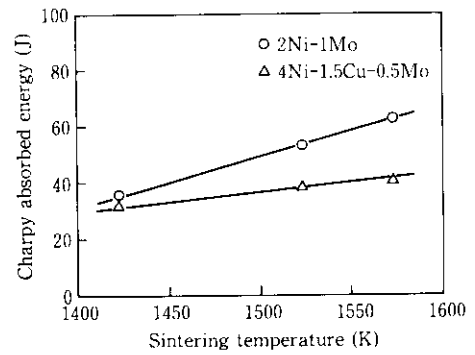


Fig. 10 Relationships between sintering temperature and Charpy absorbed energy of double-pressed, double-sintered and heat-treated compacts with 0.6% graphite

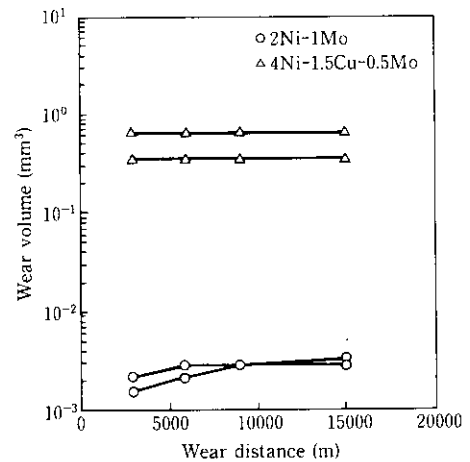


Fig. 11 Wear resistance test results of single-pressed, single-sintered and heat-treated compacts made from 2%Ni-1%Mo and 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo composite-type alloyed steel powders

Mo 材の表面硬さは、それぞれ HRC 39 および 34 であり、硬さだけでは 2%Ni-1%Mo 材が優れた耐摩耗性を示すことは説明できない。

引張強さ、疲れ強さおよび耐摩耗性のいずれの特性も、4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材に比較して 2%Ni-1%Mo 材が優れている主要因は、オーステナイトのマルテンサイトへのひずみ誘起変態挙動

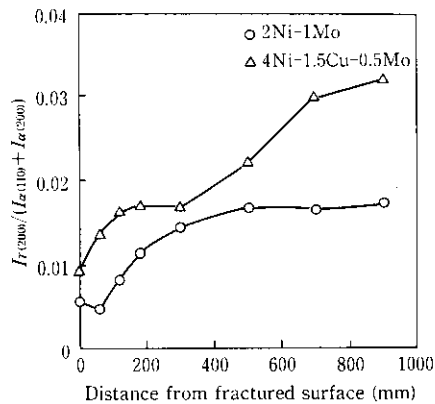


Fig. 12 Amount of austenite near contact fatigue fractured surface of double-pressed, double-sintered and heat-treated compacts

と考えられる。2回成形・2回焼結・光輝処理材の面圧疲労破面下のオーステナイト量の変化を、マイクロビームX線で測定した結果を Fig. 12 に示す。破面直下では両鋼粉の焼結・熱処理体ともにマルテンサイトへ変態しているが、未変態のオーステナイト量は、2%Ni-1%Mo 材のほうが小さい。この現象は、Fig. 5 に示した結果と対応する。したがって、引張変形、疲労変形および摩耗などの塑性変形が関与する現象における、2%Ni-1%Mo 鋼粉・焼結熱処理体の優れた特性は、マルテンサイトへのひずみ誘起変態で説明できる。

4 結 言

熱処理前は硬さが低く切削性、サイジング性が良好で、熱処理を施すことで高強度、高靱性となる焼結部品用合金鋼粉として、新組成の KIP シグマロイ 2010 (2%Ni-1%Mo) を開発した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) Ni が 2%、Mo が 1% まで合金添加量を増加しても、再圧縮

による密度増加量は小さくならない。したがって、2%Ni-1%Mo 複合金鋼粉は、再圧縮で高密度焼結材料が得られる。

- (2) 2%Ni-1%Mo 鋼粉焼結体の硬さは低く、低切削速度域での切削性は、従来の 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉焼結体より優れている。
- (3) 焼結・熱処理体中のオーステナイト量を高くし、ひずみ誘起マルテンサイト変態量を大きくすると、引張強さは高くなる。しかし、ひずみ安定オーステナイト量が増加すると引張強さは低下する。
- (4) 2%Ni-1%Mo 鋼粉を 1 回成形・1 回焼結・浸炭処理することで、引張強さ 1500 MPa、ノッチなしシャルピー吸収エネルギー 21J、また、2 回成形・2 回焼結・光輝処理 (焼結温度 1523 K) することで、引張強さ 1920 MPa、ノッチなしシャルピー吸収エネルギー 53J の超高強度、高靱性焼結体を得られる。これらの特性は、従来の 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 鋼粉より優れている。
- (5) 2%Ni-1%Mo 鋼粉を 1 回成形・1 回焼結・浸炭処理することで、回転曲げ耐久疲れ強さ 460 MPa、面圧耐久疲れ強さ 2560 MPa、また、2 回成形・2 回焼結・光輝処理することで、回転曲げ耐久疲れ強さ 390 MPa、面圧耐久疲れ強さ 2710 MPa と高い特性が得られる。これらの特性は、従来の 4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo 材と比較して高い。さらに、耐摩耗性も 2%Ni-1%Mo 鋼粉の焼結・熱処理体のほうが、従来鋼粉の焼結・熱処理体より優れている。
- (6) 2%Ni-1%Mo 材が引張強さ、疲れ強さおよび耐摩耗性に優れている理由は、組成の最適化により焼結体の密度が増加できたほかに、ひずみに対して安定しているオーステナイト量が低減できたことによる。

以上の実験結果に基づき、熱処理高強度焼結材料用の新組成複合金鋼粉 KIP シグマロイ 2010 を開発した。本開発鋼粉は、自動車エンジンの高性能、小型化が指向される中、シクロハブなどのトランスミッション部品に幅広く適用できる。さらに、強度および靱性の要求水準が高く、従来の粉末冶金では製造不可能とされていた機械部品の製造も可能になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) S. MocarSKI, D. W. Hall, J. Khanuja, and S. K. Suh: SAE Paper 890409, SAE 1989, Congress and Exposition, Detroit (U.S.A.)
- 2) G. F. Bocchini: "Modern Developments in Powder Metall.", Vol. 18", (1988), 507, [MPIF]
- 3) M. Khaleghi and R. Haynes: *Powder Metall. Int.*, 20 (1988), 9
- 4) R. Haynes: *Powder Metall.*, 32 (1989), 140
- 5) K. Ogura, T. Abe, Y. Makiishi, T. Minegishi, E. Hatsugai, and S. Takajo: Sintering '87 (Proc. of the Intl. Inst. for the Science of Sintering Symposium, Tokyo (Japan), 1987), Vol. 1, 707, [Elsevier Applied Science]
- 6) V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr, and R. Busch: *Trans. ASM.*, 60 (1967), 252
- 7) 小原嗣朗, 立沢清彦: 粉体および粉末冶金, 21 (1974), 91
- 8) M. Guttman: *Surf. Sci.*, 53 (1975), 213
- 9) 安彦兼次, 鈴木 茂, 木村 宏: 鉄と鋼, 69 (1983), 625