鉄-銅系焼結材料の硬さとヤング率・ポアソン比との関係*

廣瀬 徳 豊^{*1}, 田 中 慎 ^{—*2}棚 木 敏 幸^{*3}, 浅 見 淳 ^{—*3}Relations of Hardness to Young's Modulus and Poisson's Ratio of
Sintered Iron-Copper MaterialsNorimitsu HIROSE^{*4}, Shin-ichi TANAKA,
Toshiyuki TANAKI and Junichi ASAMI^{**} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Aeronautical Engineering,
8-52-1 Minamisenjyu, Arakawa-ku, Tokyo, 116-8523 Japan

The quadratic equation in which Young's modulus is a function of porosity of sintered iron was applied to the experimental results of sintered Fe-Cu materials. Vickers hardness and Poisson's ratio were also described as the quadratic equation of porosity of sintered Fe-Cu materials. The experimental constants were affected by the type of Fe and Cu powders and sintering temperature. In comparison with Young's modulus against porosity, the relationship between hardness and porosity were affected by those factors. It was clarified that Young's modulus and Poisson's ratio can be described as a linear function of hardness in the case of sintered Fe-Cu materials at the porosity below 20%. Consequently, in the case that the linear relations of Young's modulus and Poisson's ratio to hardness for use powder and sintering condition are known, those can be calculated from the measured value of hardness.

Key Words: Sintered Material, Elasticity, Material Testing, Poisson's Ratio, Vickers Hardness, Porosity

1. 緒 言

機械部品の設計や有限要素法での計算時にヤング率や引張強さなどの機械特性値が要求される。ヤング率と引張強さはそれぞれ弾性と塑性に関する物性値である。鉄鋼材料の引張強さは合金元素や熱処理条件に影響を受け異なり、ヤング率はそれらに依存せずほぼ同じ値を示す⁽¹⁾。

焼結鉄の引張強さとヤング率は気孔率に依存し、ヤング率が大きければ引張強さも大きいという結果が得られている⁽²⁾。そのため、ヤング率もしくは引張強さが分かればもう一方の物性値も計算で得ることができるものの、どちらの物性値も実際の製品で測定するのは形状の制約により試験不可能な場合が多い。

鉄鋼材料の硬さと引張強さの関係が調べられ⁽³⁾、また、焼結体では Pohl が密度率、ビッカース硬さおよ

び応力集中係数から引張強さを導く式を提唱している⁽⁴⁾。ように硬さと引張強さには相関関係が見られる。そこで、試験方法が簡便であるばかりでなく、焼結材料の形状も試験に適応しやすい硬さ試験に着目した。引張強さやヤング率と同様、焼結体の硬さ値は気孔の影響、特に気孔率の影響を受けると考えられる。

焼結機械部品には合金成分が添加されているので、既報で報告された焼結鉄のヤング率と気孔率との関係式⁽²⁾が適用可能とは限らない。そこで、実用材料であり単純な系である鉄-銅系焼結材料について検討した。鉄-銅系焼結材料には鉄粉に銅粉が混合されるので、銅粉の形状やサイズにより流出孔(融点以上で消失した銅粉の跡)の形状やそのサイズが異なる。また、焼結温度により銅液相が発生するかどうかで焼結の進行度が異なる。そのため、銅液相が発生すると気孔形状が焼結鉄と異なったり、焼結時に膨張(銅膨張)が発生したりする。これらの影響を考え、添加銅粉が既報の式に及ぼす影響について検討した。また、ヤング率やポアソン比と硬さとの関係についても検討し、製品検査への応用についても考察した。

* 原稿受付 2003 年 10 月 20 日。

^{*1} 正員, 東京都立航空工業高等専門学校機械工学科(〒116-8523 東京都荒川区南千住 8-52-1)。^{*2} 国立久留米工業高等専門学校材料工学科(〒830-8555 久留米市小森野 1-1-1)。^{*3} 東京都立産業技術研究所(〒115-8586 東京都北区西が丘 3-13-10)。

E-mail: nhirose@kouku-k.ac.jp

2. 実験方法

本研究では、鉄粉として還元鉄粉（ヘガネス社製 NC100.24：平均粒径 約 90 μm ）、アトマイズ鉄粉（神戸製鋼製アトメル 300M：平均粒径 約 70 μm ）を用いた。これら鉄粉は工業的によく使用されるものである。銅粉は福田金属箔粉工業(株)製のガスアトマイズ球状銅粉（AT-100：平均粒径 約 70 μm ）、電解銅粉（CE-15：平均粒径 約 40 μm ）および高圧水アトマイズ球状銅粉（HWQ：平均粒径 約 5 μm ）を用いた。以下それぞれを AT、CE および HWQ と略記する。使用した銅粉の外観写真を図 1 に示す。

以下銅無添加の場合を焼結鉄、3 mass% 銅混合の場合を混合焼結体と記す。成形は 19.6 から 882 MPa の範囲で行った。ステアリン酸亜鉛 / アセトン分散液を金型に塗布した金型潤滑で、フローティング・ダイ方式で成形を行った。圧粉体の形状は直径約 11 mm、焼結鉄の厚さは約 3 mm, 5 mm, 7 mm および 15 mm、混合焼結体の厚さは約 5 mm のタブレット形とした。水素雰囲気中で、焼結鉄は 1473 K で焼結し、混合焼結体は 1273 または 1473 K で焼結した。保持時間は 3.6 ks とした。

鉄の密度を 7.87 Mg/m^3 、銅の密度を 8.96 Mg/m^3 とし⁽⁵⁾、混合焼結体の理論密度を上記密度に対する混合比から計算して 7.90 Mg/m^3 とした。

焼結密度(ρ)から気孔率(P)は $1 - \rho / \rho_0$ で求めた。 ρ_0 は鉄または混合焼結体の理論密度である。

ビッカース硬さ（以下硬さと記す）は押込み荷重 49 N で測定した。焼結鉄の硬さ測定では 1 試料につき 5 点、混合焼結体の場合は 3 点測定し、その平均値を用いた。

ヤング率(E) およびポアソン比(ν) は超音波パルス法^(6,7)で測定し、それぞれ

$$E = \rho V_s^2 (3V_l^2 - 4V_s^2) / (V_l^2 - V_s^2) \quad (1)$$

$$\nu = (V_l^2 / 2 - V_s^2) / (V_l^2 - V_s^2) \quad (2)$$

で表される⁽⁶⁾。 V_l および V_s はそれぞれ試料を伝播する縦波および横波音速である。

3. 結果および考察

3.1 焼結鉄の気孔率に対するヤング率と硬さ

図 2 に還元鉄粉とアトマイズ鉄粉を用いた焼結鉄の気孔率に対するヤング率と硬さの関係を示す。硬さでの誤差バーは 5 点測定の標準偏差である。

この図から以下のことがわかる。

- 1) 硬さとヤング率は気孔率に依存する。
- 2) 硬さの測定誤差は気孔率の影響に比べ無視できる。
- 3) 硬さとヤング率に対する試料厚さの影響は気孔率

に比べ無視できる。

- 4) 気孔率の影響に比べ小さいが、ヤング率や硬さは使用した鉄粉末に影響される。還元鉄粉に比べアトマイズ鉄粉を用いた焼結鉄のヤング率、硬さ共に小さい。以下、上述の 4 項目の詳細について記す。

1) 気孔率の増加は焼結体内部の空隙を増加させるため、機械特性値が減少する。焼結鉄の引張強さや耐力も気孔率に依存し、二次関数として減少する結果が得られている⁽²⁾。気孔率に対するヤング率と引張強さ(T_s) との関係をそれぞれ式 (3)、(4) に示す⁽²⁾。

$$E = (E_0 - K_E \cdot P) \cdot (1 - P) \quad (3)$$

$$T_s = (T_{s0} - K_{T_s} \cdot P) \cdot (1 - P) \quad (4)$$

ここで、 E_0 および T_{s0} は気孔率 0 % の場合のヤング率および引張強さ、 K_E および K_{T_s} はそれぞれの実験係数であり、気孔の影響を反映している。

Fig.1 SEM images of copper powders.

Fig.2 Young's modulus and Vickers hardness against porosity of sintered irons.

硬さ値 (H) は引張強さと同様な傾向を示すとすれば、式 (5) が考えられる。

$$H = (H_0 - K_H \cdot P) \cdot (1 - P) \quad (5)$$

K_H は実験定数であり、 H_0 は実測値を式 (5) を用いて計算した気孔率 0 % での硬さ値である。

図 2 での硬さにおける曲線は式 (5) で近似したものであり、実測値とほぼ一致する。よって硬さも気孔率の二次関数として表すことができる。

2) 圧痕の大きさが気孔サイズよりも十分大きくなるように今回の押込み荷重を設定したので気孔の影響による硬さ値のばらつきは小さくなっている。焼結体の場合、気孔を内在しているので硬さ値は気孔と金属の両方の影響を受ける。押込み荷重を小さくし、圧痕の大きさが気孔サイズに近くなれば、誤差バーの大きさは今回の値以上になるが、気孔のサイズに依存しない押し込み荷重を設定することで 2) の関係は満足されると思われる。

3) の結果は、金型成形した焼結体に生じる試料中央部のニュートラルゾーン (低密度部位) の影響は無視できると言うことである。硬さ測定により焼結体の密度分布を調査した研究⁽⁸⁾では、ニュートラルゾーンと金型壁やパンチ壁近傍の硬さは異なることを報告している。硬さは内部の影響を受けるものの変形が大きいのは圧子が接する表面近傍である。超音波パルス法では、表面および底面からの反射超音波の時間差を測定しているので、試料内部の影響を受ける。試料厚の違いで異なるニュートラルゾーンによる密度分布の影響は小さい。

4) の結果は気孔形状や分布の影響と言える。焼結条件および気孔率が同じでも還元鉄粉、アトマイズ鉄粉、カーボニル鉄粉を用いた焼結鉄のヤング率やポアソン比は同じにならない^{(2),(9)}。これら鉄粉による焼結鉄の違いは気孔形状や分布である。気孔の形状や分布は応力集中に影響を及ぼし、弾性変形領域でも気孔周囲に塑性変形が生じる。焼結体の引張試験による応力-ひずみ線図において、弾性変形領域でも直線を示さないのはこのためである⁽¹⁰⁾。

ビッカース硬さは圧痕寸法を測定することから塑性変形後の状態を測定している。粗大な気孔が存在すれば押込み時の塑性変形量も大きくなるので硬さが低くなる。その結果、還元粉焼結鉄よりも粗大な気孔を持つアトマイズ粉焼結鉄の方の硬さが低くなっているものと思われる。

3.2 硬さおよびヤング率に及ぼす銅粉添加および焼結温度の影響

図 3 に還元鉄粉を用いた焼結鉄の気孔率に対する

ヤング率と硬さとの関係を示す。どちらも気孔率の影響が見られるが、ヤング率と硬さでは傾向が異なる。焼結温度はヤング率に影響を及ぼすが、銅粉の影響は小さい。硬さには焼結温度ばかりでなく銅粉の影響も見られる。焼結温度の増加による銅液相の発生は焼結の進行を促進するので、焼結の進行はヤング率よりも硬さに影響するようである。この傾向はアトマイズ鉄粉を用いた焼結鉄でも同様であった。

鉄に銅を添加すると硬さが上昇する⁽¹¹⁾と言われており、同一気孔率では銅添加により硬さは上昇している。また、1473 K の焼結温度では使用銅粉の種類の影響は小さくなっている。1273 K は銅の融点以下であり、焼結は拡散のみで進行する。1473 K では銅は液相化し焼結の進行に寄与する。その温度では流出孔が発生するが、流出孔よりも焼結の進行の方がヤング率や硬さには影響している。

1273 K での焼結では AT 混合焼結体の硬さは他の銅粉を用いた場合よりも小さく、1473 K で焼結した焼結鉄に近い硬さになっている。HWQ 混合焼結体は他の混合焼結体よりも大きな硬さ値を示している。

1273 K の焼結温度では、混合焼結体内部に銅粉が光学顕微鏡で観察でき、一部鉄粉と結合していた。鉄粉

Fig.3 Young's modulus and Vickers hardness against porosity of sintered irons (Pure) and sintered Fe - Cu materials (CE, HWQ, and AT).

同士の焼結が進行していない場合、粗大銅粉 (AT) の存在は硬さを下げる原因になる。微細銅粉 (HWQ) は鉄粉同士の隙間に入り込むので粗粉に比べ銅粉の占有する体積は減少する。また、微粉のほうが同体積では表面積が大きいので拡散しやすく、合金化され硬さが増加したものと思われる。CE は微粉ではないが樹枝状粉であり AT に比べ表面積が大きいので合金化が進行し、HWQ 混合焼結体よりは低いものの AT 混合焼結体よりも硬くなっている。

1423 K の焼結ではいずれの銅粉も消失し硬さの値は同程度になっているが、AT 混合焼結体の硬さは HWQ 混合焼結体よりも硬くなっている。鉄-銅系の焼結では、銅の融点以上で銅液相が生じ鉄粉間に進入する。銅の一部は鉄中に拡散するが、残存した銅液相を介して鉄原子同士が拡散し焼結が進行する。微粉である HWQ から生じる個々の液相は微量なため、鉄中に固溶してしまい鉄原子の拡散に必要な銅液相量が鉄粉界面に存在しない。一方 AT は粒度が大きいので、一部鉄中に拡散するものの鉄原子同士の拡散に十分な銅液相が発生するので焼結が進行し硬さが上昇したと思われる。

図 3 の曲線は式 (3) および (5) を用いて近似したものである。ここで用いた実験係数を表 1 に示す。これらの式による近似曲線と実測値は一致している。近似曲線の傾向は焼結条件や使用銅粉で異なっている。使用銅粉が異なっても焼結条件が同じであればほぼ同じ値になる E_0 に対し、使用銅粉および焼結条件で H_0 は異なる値になっている。

ヤング率と気孔率との関係では焼結による合金化、

Table 1 Experimental constants obtained from eq. (3), eq. (5), and the data in Fig. 3.

Reduced iron compact				
	E_0	K_E	H_0	K_H
CE	205.5	371.1	98.3	174.5
1273K HWQ	206.5	364.1	115.9	207.4
AT	204.0	369.5	86.0	164.0
CE	202.1	311.0	125.9	201.4
1473K HWQ	210.5	328.9	117.9	190.5
AT	211.4	331.9	131.4	210.5
Pure	219.2	352.6	70.1	114.9
Atomized iron compact				
	E_0	K_E	H_0	K_H
CE	207.8	405.5	104.8	214.1
1273K HWQ	206.3	394.9	115.1	240.3
AT	208.1	414.8	80.7	161.7
CE	202.2	340.0	119.8	205.3
1473K HWQ	210.7	364.8	127.2	243.1
AT	208.5	345.9	135.3	239.3
Pure	216.2	375.4	75.4	148.0

気孔形状・サイズなど変化の影響は K_E に含まれるが、硬さと気孔率との関係ではそれらの影響は K_H および H_0 に含まれる。表 1 に見られるように、銅粉と焼結温度が同じならば鉄粉の種類に関係なく H_0 は近い値になっている。それゆえ、気孔率 0% の場合つまり気孔がない焼結体の H_0 の値は焼結条件、銅粉の種類 (形状、サイズ) に依存する。銅粉の形状やサイズが異なることで焼結後の鉄中の銅分布状態が異なると考えられる。ヤング率に比べ合金元素や熱処理の影響に敏感な硬さでは、これらの分布状態の影響が実験係数の違いとして表れたと言える。ここでの気孔率に対するヤング率の相関係数は 0.997 以上であり、硬さに対する相関係数は 0.960 以上であった。

3.3 硬さ値から他の機械特性値への変換

上述したように硬さには焼結温度や銅粉の影響が見られるものの、焼結鉄および混合焼結体のヤング率や硬さは主に気孔率に依存する。気孔率の増加とともに、気孔形状は複雑になり数やサイズが増える。気孔形状やサイズが弾性変形や塑性変形のどちらにも同様な影響を及ぼすとすれば、硬さとヤング率にも相関関係があることが予想される。

焼結機械部品を考え気孔率 20 % 以下の試料の硬さ

Fig.4 Relationships between Vickers hardness and Young's modulus of sintered irons and sintered Fe - Cu compacts at the porosity below 20 %.

とヤング率の関係を図4に示す。式 (3) および (5) からヤング率と硬さの関係を求めると直線関係は示さないが、図4で分かるように気孔率 20 % 以下の条件ではヤング率は硬さの一次関数と考えてよい。この図での実験係数を表2に示す。還元鉄粉+CE, HWQ または AT の混合焼結体の相関係数はそれぞれ 0.942, 0.933, 0.975 とやや低い値であったが他の条件では 0.99 以上であった。

図4での直線の傾きは 1473 K で焼結したよりも 1273 K で焼結した方に違いが見られる。この違いはヤング率よりも硬さに影響を及ぼす銅粉末や焼結の進行の影響である。1273 K では銅粉は消失せず、鉄粉同士の焼結も 1473 K に比べ進んでいない。そのため粗大銅粉の存在は硬さを低下させ、銅粉のサイズによる銅拡散程度の違いは鉄素地の硬さに影響を及ぼす。1473 K の焼結では焼結が進行し鉄粉同士の連結が強化されるとともに合金化が進むことで添加銅粉の影響は小さくなる。

図3において、気孔率が P_1 から P_2 に微量増加し、ヤング率および硬さが E_1 から E_2 , H_1 から H_2 にそれぞれ変わったとすると、 $(E_2 - E_1) / (P_2 - P_1)$ および $(H_2 - H_1) / (P_2 - P_1)$ がそれぞれの曲線の傾きになる。図4での硬さに対するヤング率の変化

$$(E_2 - E_1) / (H_2 - H_1)$$

$$= \{(E_2 - E_1) / (P_2 - P_1)\} / \{(H_2 - H_1) / (P_2 - P_1)\}$$

はヤング率および硬さの気孔率の変化に対する比である。硬さの気孔率に対する変化の方がヤング率の気孔率に対する変化よりも鉄粉や銅粉の影響を受けているため、作製条件により図4の傾きは異なる。気孔率が 20 % よりも減少していくと、気孔同士の連結が減り、独立気孔が増加するので弾性変形や塑性変形に対し連結気孔の影響が減少する。この領域での図3の実測値は気孔の増加とともに直線的に減少している。つまり、 $(E_2 - E_1) / (P_2 - P_1)$, $(H_2 - H_1) / (P_2 - P_1)$ どちら

も定数になるので、図4は直線関係になっているものと思われる。また、1473 K の焼結では硬さも添加銅粉の影響は小さくなり、ヤング率同様に気孔率の影響のみになるので図4の傾きの傾向が近づくと言える。

次に測定が比較的難しく、実測値にばらつきが生じやすいポアソン比について検討する。ポアソン比と気孔率との関係式は既に提案されており⁷⁾、この式を展開すると気孔率の二次関数となる。ポアソン比も気孔率の影響を受けるので、硬さとの相関関係があると思われる。そこで図5にそれらの関係を示す。ヤング率に比べばらつきはあるもののポアソン比も硬さと相関関係があると言える。硬さとポアソン比の関係を表3に示す。今回の実験結果では 1473 K で焼結した還元鉄粉+CE で相関係数が 0.935 であり、ヤング率ともに他の鉄粉と銅粉の組合せに比べ良くなかったため、実際に実験式として使用可能か検討した。

表4はCEを混合した試料の実測値と硬さから求めた計算値およびそれらの測定誤差である。硬さからヤング率とポアソン比を計算し、式(5)から気孔率を求めた。相関係数が最も小さい鉄粉と銅粉の組合せであ

Fig.5 Relationships between Vickers hardness and Poisson's ratio of sintered irons.

Table 2 Experimental coefficient of $E = a + b \cdot H$.
E: Young's modulus (GPa), H: Vickers hardness (Hv)

		Reduced iron compact		Atomized iron compact	
		a	b	a	b
1273K	CE	14.29	1.859	23.88	1.677
	HWQ	36.01	1.325	32.57	1.418
	AT	-71.30	3.543	15.73	2.311
1473K	CE	56.48	0.971	34.94	1.276
	HWQ	62.42	1.046	42.83	1.202
	AT	60.83	0.927	38.82	1.137
	Pure	23.51	2.632	31.72	2.344

Table 3 Experimental coefficient of $\nu = a + b \cdot H$.
 ν : Poisson's ratio, H: Vickers hardness (Hv)

		Reduced iron compact		Atomized iron compact	
		a	b	a	b
1273K	CE	0.227	5.98E-04	0.238	4.96E-04
	HWQ	0.231	4.68E-04	0.242	3.68E-04
	AT	0.199	1.21E-03	0.238	6.80E-04
1473K	CE	0.233	3.41E-04	0.245	2.74E-04
	HWQ	0.246	3.09E-04	0.249	3.04E-04
	AT	0.247	2.64E-04	0.244	3.32E-04
	Pure	0.219	1.10E-03	0.241	7.00E-04

Table 4 Measured values and calculated values obtained from above equations of sintered Fe-Cu (CE) material

Measured value					Calculated value				Error			
<i>P</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	ν	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	ν	<i>G</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	ν	<i>G</i>
18.5	118.8	47.3	0.255	70.0	17.9	124.5	0.257	49.5	0.6	5.6	0.002	2.2
15.0	135.1	53.6	0.261	75.9	15.4	130.2	0.259	51.7	0.4	4.9	0.002	1.9
12.3	144.3	57.1	0.263	88.3	11.6	142.2	0.263	56.3	0.7	2.1	0.000	0.8
9.2	160.5	63.2	0.270	102.4	9.7	155.9	0.268	61.5	0.5	4.6	0.002	1.7

P: Porosity (%), *E*: Young's modulus (GPa), *G*: Shear modulus (GPa) = $0.5E / (\nu + 1)$

ν : Poisson's ratio, *H*: Vickers Hardness (Hv)

Error = | Calculated value - Measured value |

るがヤング率は1桁目、ポアソン比は3桁目の違いであり、ヤング率、ポアソン比ともに硬さと直線関係があると言っても問題は無いようである。

製品の形状の影響やバレル研磨などの表面状態によりこれらの実験係数は補正する必要がある。実測値を用い新たに検量線を作成する場合でも、低気孔率では硬さ値とヤング率やポアソン比との関係は直線関係なので、最低3点のデータがあれば検量線作成が可能と考えられる。

金型成形による焼結体は表裏のパンチ面が平行になっているので、実製品に対しても硬さ測定が可能である。それゆえ、実製品の合金組成や焼結条件さらに最終的な表面処理をした試料に対する各物性値の検量線を作成すれば、硬さ値からヤング率およびポアソン比を計算することが可能であり実用的な検査方法となりえる。また、式(5)と実験係数から気孔率も計算できる。

硬さ測定は局所的な測定が可能ことから、これらの実験係数、近似式または検量線を用い局所的な気孔率、ヤング率やポアソン比を求めることで品質管理にも利用可能である。さらに、硬さ分布を測定し気孔率、ヤング率やポアソン比の分布を計算することで金型の形状最適化にも応用可能と考えられる。

4. 結 言

本研究では、鉄-銅系焼結材料の弾性率およびビッカース硬さを測定し、それらの相関関係と銅添加量、焼結温度の影響について検討した。

- 1) 鉄-銅系焼結体にも気孔率(*P*)に対するヤング率(*E*)と硬さ(*H*)の関係が以下で示すことができた。

$$E = (E_0 - K_E \cdot P) \cdot (1 - P)$$

$$H = (H_0 - K_H \cdot P) \cdot (1 - P)$$

ここで、添え字0は気孔率0%を示す。 K_E , K_H は実

験係数である。これらの係数は焼結温度、鉄粉あるいは銅粉の種類および添加量で異なった。

- 2) 鉄-銅系焼結体の硬さに対するヤング率とポアソン比の関係は実用材料20%以下の気孔率で考えると一次関数で示せることが分かった。その実験係数は焼結温度や銅粉の種類で異なった。
- 3) 焼結鉄ばかりでなく鉄-銅系焼結体でも、塑性変形量を測定した結果から得られる硬さ値から弾性変形の物性値であるヤング率やポアソン比が、さらに局所的な気孔率も計算できることを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) 文部科学省国立天文台編, 理科年表, 丸善株式会社, (2002), 398 - 399.
- (2) Hirose, N., Tanaka, S., Tanaki, T., and Asami, J., 粉体および粉末冶金, **50**, (2002), 96 - 103.
- (3) SAE J417 (アメリカ自動車技術協会規格), (1983).
- (4) Pohl, D., Arch. Eisenhütt., **40**, (1969), 647 - 650.
- (5) 文部科学省国立天文台編, 理科年表, 丸善株式会社, (2002), 387.
- (6) 金属材料の高温ヤング率試験方法, JIS Z2280, (1993).
- (7) Hirose, N., Tanaka, S., Asami, J., and Kohno, T., 粉体および粉末冶金, **48**, (2001), 27 - 33.
- (8) Kuczynski, G. C., and Zaplatynskyj, I., Trans. AIME, **206**, (1956), 216.
- (9) 廣瀬徳豊, 浅見淳一, 棚木敏幸, 湯浅真, 関根功, 粉体および粉末冶金, **45**, (1998), 920 - 925.
- (10) 本多忠敏, 徳永洋一, 粉体および粉末冶金, **18**, (1972), 295 - 301.
- (11) Syarif, J., 星野俊幸, 土山聡宏, 高木節雄, 鉄と鋼, **86**, (2000), 558 - 562.