

金属粉末の圧縮に関する研究

立 沢 清 彦・小 原 嗣 朗

Study of the Compaction of Metal Powders

By

Kiyohiko TATSUZAWA and Shiro KOHARA

Abstract: A detailed investigation of the compaction behavior of powders was carried out with many different metal powders using a cylindrical single action die. From the density-pressure relationship obtained, three formulas on powder compaction Bal'shin's, Heckel's, and Kawakita's, were evaluated and the constants in the formulas were related to the yield strength of metals. The effect of the particle shape, the ratio of height to diameter of the compact, and the lubrication of die wall were studied. Then the compaction behavior of mixed powder of two different metals was investigated.

The density of the compact of mixed powder of two different metals can be obtained by the calculation, assuming that the compact is composed of two layers of different metals. The difference between measured density and calculated value depends on the composition and the strength characteristics of the powder. When the difference between yield strengths of two metals is large, measured density appears a little higher than the calculated value, and the discrepancy changes with composition and becomes largest for the composition of about fifty per cent in volume each other.

概 要

粉末冶金法の基礎的技術である粉体の圧縮成形に関して、種々の金属粉末を用い、金型成形法により圧縮成形する場合の密度—成形圧力の関係式を比較検討した。そして粉末の形状、圧粉体の高さ—直径比、金型直径などの変化、および金型潤滑の圧縮成形に対する影響を調べた。さらに、降伏強さの極端に異なる場合、およびほぼ等しい場合の2元混合粉末を圧縮する場合の粉体の挙動についても研究を行なった。

1. 序 言

金属粉末を原料として焼結によって各種の製品を作る粉末冶金における金属粉末の成形法としては、金型成形法、液圧成形法（ラバープレス法）、泥漿鑄込法（スリップキャスト法）、震動法、圧延法などがある。このなかで金型成形法は、その簡便さと生産能率の高さから広く採用されている方法である。

金型成形法によって金属粉末を圧縮成形する際の粉末の挙動を示す実験式については、多くの研究者により各種の式が提出されている。しかしながらこれらの式の比較検討は、これ

までにほとんどなされておらずわずかに Donachie ら [1] の総括的検討と若林 [2] による理論的考察が見られるのみである。著者らは、金型成形法により種々の金属粉末を圧縮成形する場合の密度-成形圧力の関係式を幅広く比較検討してみた。また粉末冶金においては、種々の合金やサーメットなどの製造の場合のように、異種金属の混合粉末を成形する機会が多い。特に超硬合金やサーメットの製造の場合には、非常に性質の異なる、金属と非金属の混合粉末を成形しなければならない。このような混合粉末を圧縮成形する際の粉末の挙動に関する研究は、ほとんど行なわれていない。それで、2元混合粉末の圧縮成形の際の挙動についても研究を行なった。

2. 実験方法

実験に用いた金属粉末は市販のもので、表1にその粉末特性と共に示す。表中の平均粒径は、顕微鏡写真法により測定した値であるが、一部の微粉末については粉体比表面積測定装置により求めた値である。粉末の見掛密度の測定は、JIS Z 2504 を参考にして求めた。

使用した金型は 12 mm ϕ の円筒形で、加圧方法は片押法で圧力は油圧プレスによって加えた。予備実験の際、一部の金属粉末は金型に接着する傾向が著しく、また圧縮の均一化の目的のためにも、実験は各回毎に金型の壁面およびパンチに潤滑剤を塗布して行なった。潤滑剤としては、速乾性を考慮して4% ステアリン酸エチルエーテル溶液を用いた。圧粉体の密度は、重量は化学天秤により 0.01g まで、また寸法はノギスにより 1/20 mm まで測定した値により算出した。

金属粉末を圧縮する場合、圧粉体の高さや直径の比が圧粉体の内部の密度の均一性に影響を及ぼすことは、Duwez ら [3] により示されている。したがってこの実験では、圧粉体の高さや直径の比を 1/2 一定とした。また壁面との摩擦の影響を見るために、この比を変えた場合の実験も行なった。

3. 実験結果および考察

(1) 圧縮式について

金属粉末の圧縮に関する実験式は、これまでに多くの研究者により提出されているが、そのうちのおもなものは次のようである。

Bal'shin [4] は、成形圧力と比体積の間にガス体圧縮式と同様な関係が成り立つとしている。すなわち成形圧力を P 、圧粉体の体積 V と圧粉体の実質部分の体積 V_{th} の比を W とすると、

$$PW^n = \text{const.} \quad (1)$$

(1) 式を成形圧力 P と密度比 D の関係に変換すると、

$$P(1/D)^n = L \quad (2)$$

$$D = \rho/\rho_{th}$$

ただし、 L は定数、 ρ は圧粉体の密度、 ρ_{th} は理論密度である。

Heckel [5], [6] は、成形圧力と空孔率から次式を導いた。

$$\ln(1/1-D) = KP + A \quad (3)$$

$$D = \rho / \rho_{th}$$

ここに K および A は定数である。そして定数 K は、物質定数でその物質の降伏強さに比例する。

川北 [7] は、各種粉末の体積減少率 $C = (V_0 - V) / V_0$ と、成形圧力 P から次の式を導いた。

$$P/C = 1/ab + P/a \quad (4)$$

ここに a および b は定数で、 a はある粉末の極限体積減少率（その粉末が空孔率 0 になるときの体積減少率、すなわち C_∞ ）であり、 b はその粉末の圧縮前の凝集力に関係のある定数であるとしている。 P/C を P に対してプロットすると直線となり、これによって a, b を決めることができる。

そして、

$$\pi = a/b(1-a) \quad (5)$$

で表わされる π は、その粉末の降伏強さに相当するとしている。

(2) 単一粉末の圧縮

(a) 金属の種類による圧縮式の検討

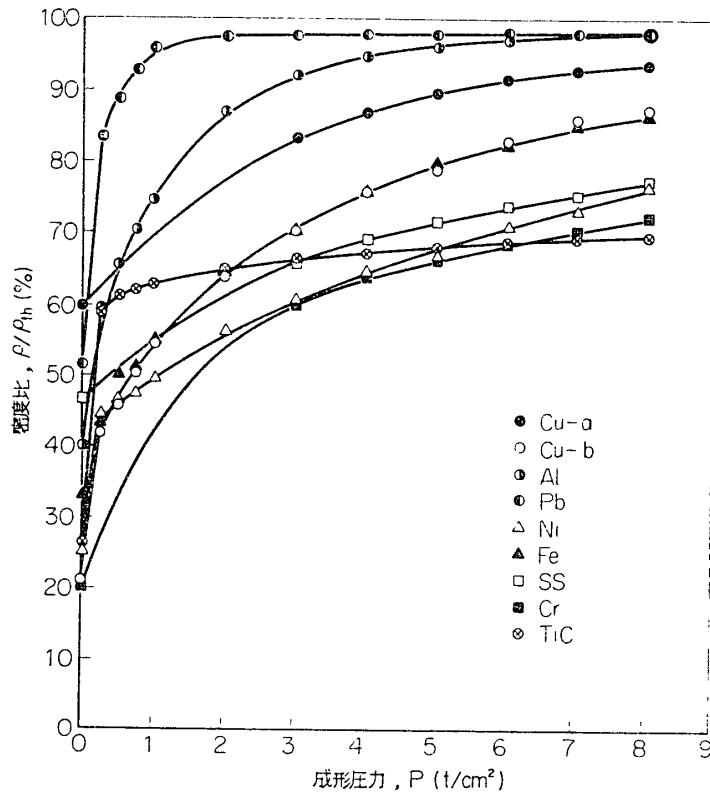
表 1 の各金属粉末を圧縮成形し、得られた密度比-成形圧力曲線を図 1 に示す。そしてこれらの実験結果を上述の各実験式に対応するようにプロットすると、Bal'shin の式 ((2)式) は図 2, Heckel の式 ((3)式) は図 3, そして川北の式 ((4)式) は図 4 のようになる。そしてこれらの図から求めた各式の定数を表 2, 3, 4 に示す。搗碎銅粉 Cu-c の場合は、 $1 \sim 8t/cm^2$ の成形圧力範囲では圧粉体に層状割れが生じたために図では除いた。また他の粉末の場合も、成形圧力が低くて成形できなかった場合や、層状割れの生じた点は除いた。

図 2, 3, 4 から各実験式を比較すると、Bal'shin と Heckel の式は同じような傾向を示す。ただし Bal'shin の式は、高圧領域において Heckel の式より直線性がよくなる。この両式が定性的に類似していることは、表 2 および 3 の屈曲点の圧力値がよく一致していることから示される。一方川北の式は、図 4 の通り極く低圧を除いて非常によい直線性をもつ。川北

第 1 表 実験に用いた各粉末の諸特性

粉 末	製 造 法	粒 度 (mesh)	平均粒径 (μ)	見掛密度 (g/cm^3)	理論密度 (g/cm^3)
Cu-a	噴霧	-200	23	5.35	8.96
Cu-b	電解	-250	9.6	1.97	8.96
Cu-c	搗碎	-250	7.4	1.08	8.96
Al	噴霧	-200	17	1.08	2.70
Pb	噴霧	-200	13	5.83	11.34
Ni	還元	-325	2.7*	2.24	8.90
Fe	海綿	-300	22	2.61	7.87
Stainless Steel (SUS27)	噴霧	-200	17	3.66	7.82
Cr	搗碎	-325	1.3*	1.43	7.19
TiC	炭化	-325	2.3*	1.29	4.94

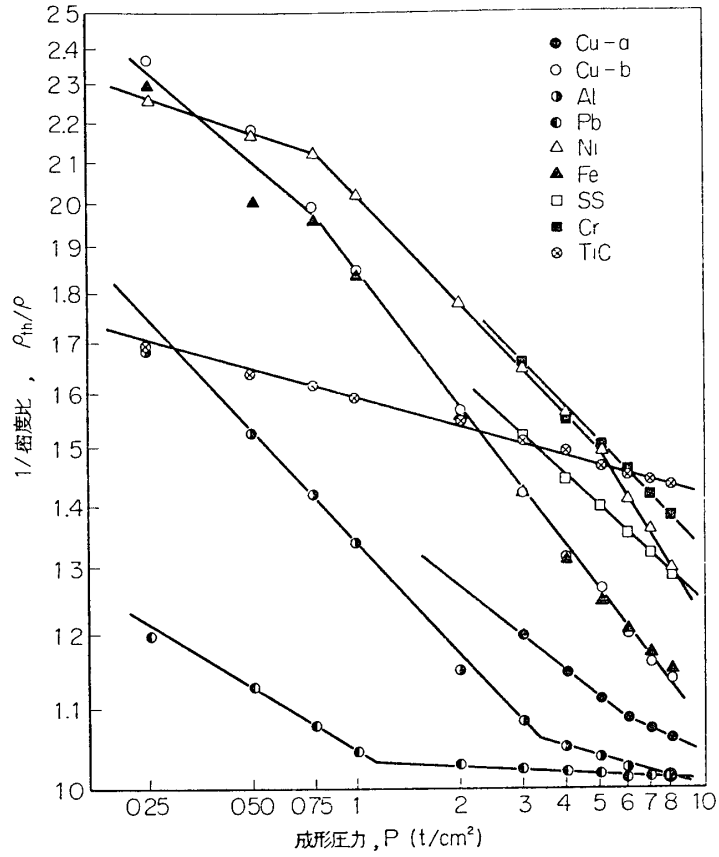
* 粉体比表面積測定装置により測定



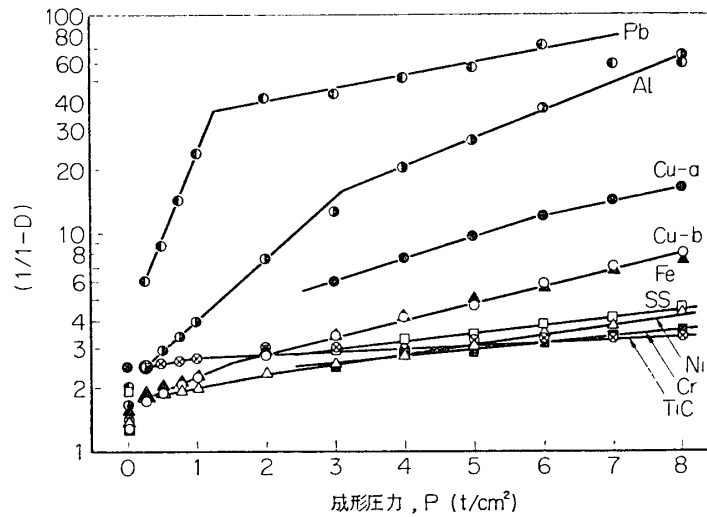
第1図 各種の金属粉末の密度比-成形圧力曲線, (12 mm^φ ダイス, 潤滑剤使用)

第2表 各粉末の Bal'shin の式の圧縮定数

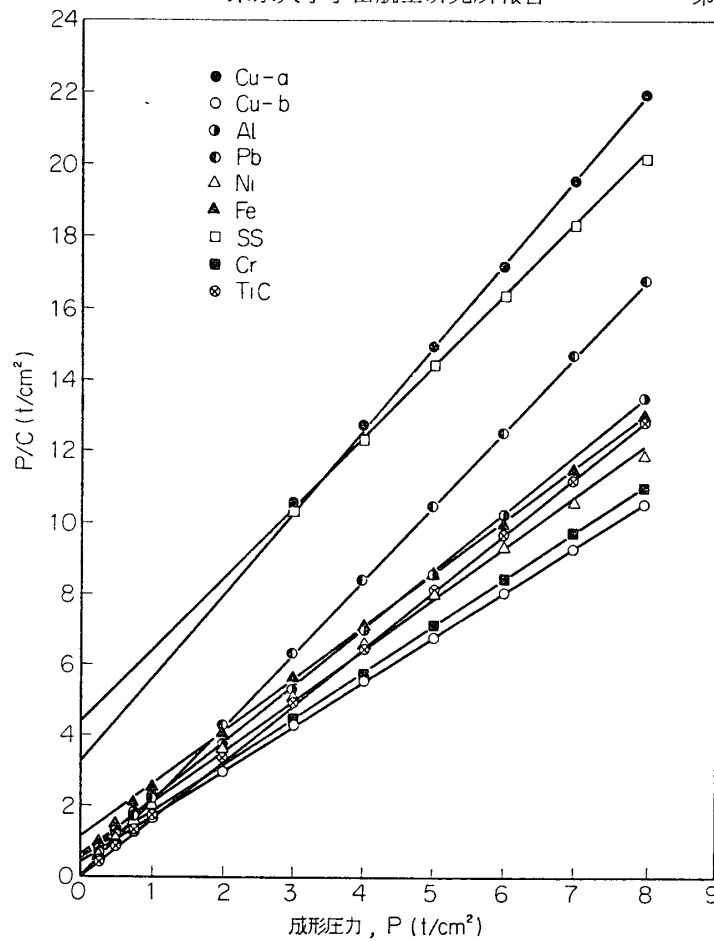
粉 末	n	L (t/cm^2)	直線領域 (t/cm^2)	屈曲点 (t/cm^2)
Cu-a	7.71	11.6	3~6	5.94
	12.0	16.9	6~8	
Cu-b	4.20	13	1/2~8	—
Al	5.46	4.70	1/4~3	3.44
	20.5	11.0	4~8	
Pb	9.55	1.51	1/4~1	1.12
	180	130	2~8	
Ni	17	26×10^4	1/4~3/4	0.762
	5.40	43.3	3/4~5	
Fe	3.4	20	5~8	5.04
	6.20	43	1/4~1	
	4.24	13	3/4~5	
SS	5.80	18	5~8	5.05
	6.2	39	3~8	
Cr	5.99	57	3~8	—
TiC	21	16×10^3	1/4~8	—



第 2 図 Bal'shin の式による圧縮曲線



第 3 図 Heckel の式による圧縮曲線



第4図 川北の式による圧縮曲線

第3表 各粉末の Heckel の式の圧縮定数

粉 末	K $\times 10^{-4} (\text{kg/cm}^2)^{-1}$	A (1/1-D)	直線領域 (t/cm^2)	屈曲点 (t/cm^2)
Cu-a	1.01	2.99	3~6	6.00
	0.689	4.67	6~8	
Cu-b	1.36	1.60	1/4~2	1.45
	0.807	1.92	2~8	
Al	2.78	2.10	1/4~2	3.10
	1.28	6.14	4~8	
Pb	7.75	3.94	1/4~1	1.25
	0.577	30.3	2~6	
Ni	0.612	1.73	1/4~2	2.00
	0.441	1.86	2~8	
Fe	1.25	1.65	1/4~2	1.75
	0.756	2.01	2~7	
SS	0.337	2.39	3~8	—
Cr	0.268	2.21	4~8	—
TiC	0.75	2.36	1/4~3/4	0.90
	0.13	2.70	2~6	

第 4 表 各粉末の川北の式の圧縮定数

粉 末	X	Y	a	a_{th}	b	$\pi(t/cm^2)$
Cu-a	2.32	3.35	0.431	0.403	0.693	1.09
Cu-b	1.28	0.40	0.781	0.790	3.2	1.1
Al	1.61	0.50	0.621	0.600	3.2	0.51
Pb	2.09	0.03	0.478	0.486	70	0.013
Ni	1.46	0.60	0.685	0.749	2.4	0.89
Fe	1.48	1.14	0.676	0.669	1.30	1.6
SS	1.99	4.40	0.503	0.532	0.452	2.2
Cr	1.32	0.53	0.758	0.801	2.5	1.3
TiC	1.60	0.12	0.625	0.739	13	0.13

注: $\begin{cases} P/C=1/ab+P/a=Y+XP \\ a_{th}=C_{\infty}=(V_0-V_{\infty})/V_0=1-\rho_0/\rho_{th} (\rho_0 \cdot \text{見掛密度}) \\ \pi=a/b(1-a)=1/b((X-1)) \end{cases}$

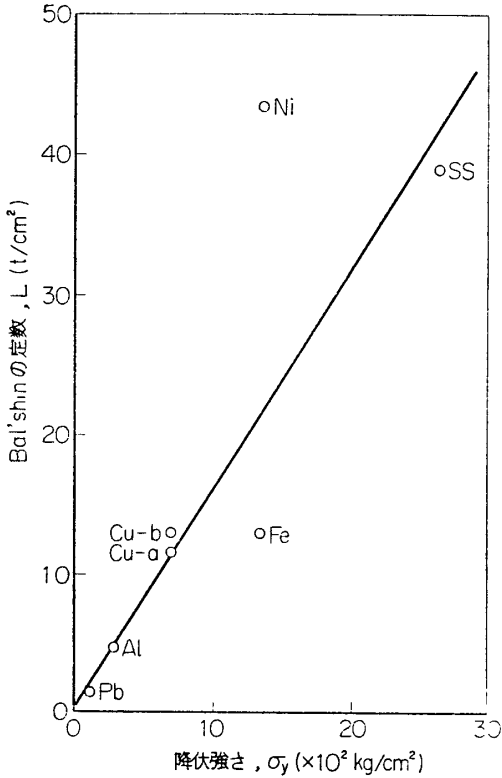
は金属以外の粉体を用いた実験からこの式の有用性を報告している [7] が、この実験結果から金属粉末の場合も含めて粉体の圧縮式として成り立つものといえる。

金属粉末の圧縮に際しては、Burr ら [8] が指摘しているように 3 段階の過程が考えられる。すなわち、(1) ブリッジ構造の減少による圧縮、(2) 局部的塑性変形による圧縮、(3) 静水圧的な弾性および塑性変形による圧縮、の 3 段階である。図 2, 3 で成形圧力の増加と共に図上で屈曲点が表われることは、これらの段階と対応する変化とも見られるが、この実験の範囲内ではその関係を明瞭にすることはできなかった。上記の 3 段階のなかで最も重要なのは、(2)、(3) の塑性変形の段階であろうから、金属粉末の圧縮式の定数と、その金属の降伏強さとの間に何んらかの相関関係が成立すると思われるし、事実各実験式の著者達もこのことを指摘している。そこで最初に圧縮式の定数と降伏強さの関係を考察することにする。

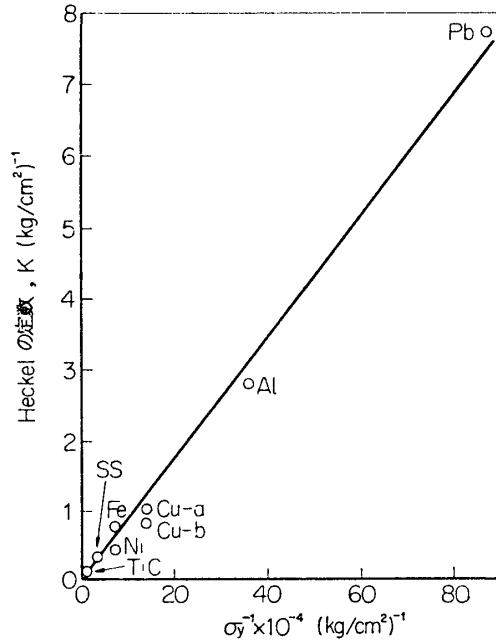
Bal'shin の式 ((2) 式) において定数 L は、理論密度に等しい圧粉体を作るのに要する圧力 P_{max} に相当する。そしてこの P_{max} は、第一次近似ではその金属の降伏強さに依存するように思われる。そこで実験結果から求めた Bal'shin の式の定数 L (表 2) と用いた金属の降伏強さとの関係をプロットすると図 5 のようになる。なお図 2 に示されているように低圧、中圧および高圧領域でそれぞれ直線関係が成り立つ場合もあるが、表 2 から図 5 をプロットする際には定数 L は中圧領域の値を選んだ。その理由は、この領域が前記の (2)、(3) の何れかの塑性変形の段階に相当すると考えられるからである。図 5 に示されるように、Bal'shin の式の定数 L と降伏強さの間に大体直線関係が成り立つ。各点の多少のばらつきは、用いた金属粉末の純度、粒度分布の相違および純金属の降伏強さと実験に用いた金属粉末のそれとに差があることなどによるものと考えられる。Cr の点は降伏強さの値がはっきりしないので示してない。

Heckel によると (3) 式の比例定数 K は、降伏強さとの間に次の関係がある [6].

$$K=1/3\sigma_y \quad (6)$$



第5図 Bal'shin の定数 (L) と降伏強さ (σ_y) の関係

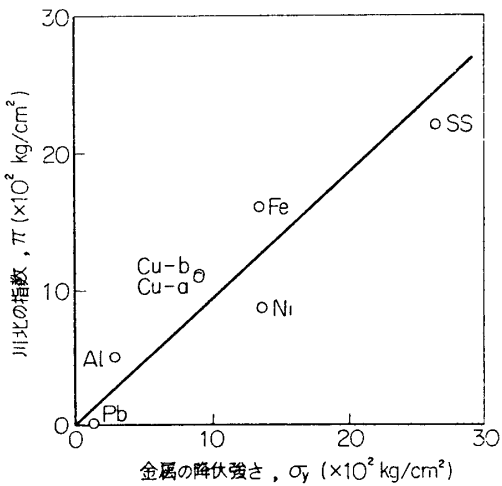


第6図 Heckel の定数 (K) と降伏強さ (σ_y) の関係 (縦軸は, ×10⁻⁴)

ここに σ_y は降伏強さ (kg/cm²) である. この実験結果から求めた K の値 (表 3) を降伏強さに対してプロットすると図6のようになる. そして K と σ_y の関係は次式によって表わされる.

$$K \approx 0.086 \cdot 1/\sigma_y \quad (7)$$

したがって K と $1/\sigma_y$ の間には比例関係が成立する. Heckel の式は Bal'shin の式と同様に, ある成形圧力範囲においてのみ直線性が成り立つ. しかし Heckel の式の定数 K と降伏強さ σ_y の関係は, Bal'shin の式のそれよりよい直線関係を示している.



第7図 川北の指数 (π) と降伏強さ (σ_y) の関係

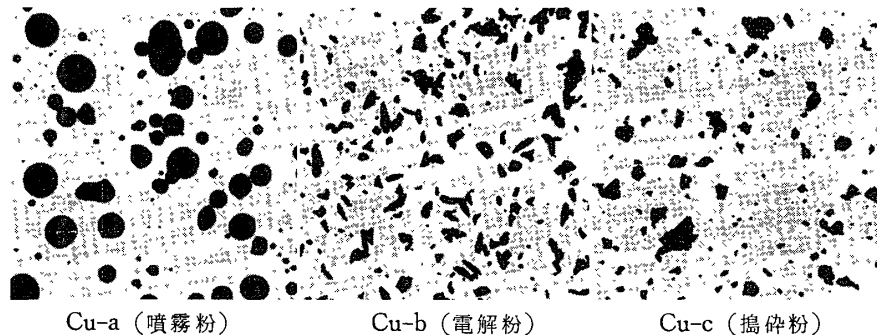
川北は, 川北の式 ((4)式) の定数 a, b から得られる π ((5)式) がその粉体の降伏強さに相当すると報告している [7], そこで実験結果から求めた π の値 (表 4) と用いた金属の降伏強さ σ_y との関係を図7に示した. 図のごとく π と σ_y の間に直線関係が成り立つ. しかし TiC の値は, この直線関係にあてはまらなかった. これは純粋な TiC の降伏強さの測定値が, 金属の場合ほど正確でないことによるのであろう. 川北の式の場合

合は、Bal'shin の式や Heckel の式に比較して広い成形圧力範囲にわたってよく実験値と一致し、降伏強さとの対応もよかった。

各実験式の定数と降伏強さとの相関関係とはほぼ同じ傾向が、各金属の弾性係数との間にも認められたが、降伏強さとの関係ほど明瞭ではなかった。これは金属粉末の圧縮成形においては、その粉末粒子の弾性変形より塑性変形の方が重要であることから当然と思われる。

(b) 粉末の形状の圧縮に対する影響

同一金属粉末でも製法が異なれば、粉末の粒子の形状、表面状態、従って流動性も異なってくる。よって圧縮成形の際にも当然その差が生じるはずである。これを検討するため、表 1 のなかの製法の異なる 3 種類の銅粉末の間の圧縮成形を比較した。用いた各粉末の形状を示す顕微鏡写真を図 8 に示す。



第 8 図 実験に用いた銅粉末の形状を示す顕微鏡写真 (×100)

実験の結果、最も成形性がよかったのは Cu-b (電解粉) で、続いて Cu-a (噴霧粉) そして Cu-c (搗碎粉) の順であった。成形可能の最低成形圧力は、Cu-b で $0.25 t/cm^2$ 、Cu-a が $3 t/cm^2$ そして Cu-c の場合はどんな成形圧力でも層状割れが生じた。Cu-a の粉末が低圧で成形性が悪いのは、球状粉であるため粒子相互の機械的からみ合いがなく、粒子同士の結合不足によるのであろう。層状割れの原因としては、次の二つが考えられる。(1) 脱型時における弾性回復によるもの、(2) 圧粉体内部に閉じ込められた空気圧によるものである。本実験の Cu-c 粉末の層状割れの原因は、他の Cu 粉末に弾性回復による膨張が認められなかったこと、およびこの粉末粒子が鱗片状であるために圧縮の際に同一方向に揃う傾向があることから (2) の閉じ込められた空気圧によるものと推定される。

実測値の Bal'shin の圧縮式に対するプロットを図 2 に、Heckel の式に対するそれを図 3 に示したが、Cu-a の場合の屈曲点は Bal'shin 式、Heckel 式共に約 $6 t/cm^2$ である。そして Cu-b の場合は、大体 $1 t/cm^2$ 以上で直線関係が成り立っているが、この実験範囲内では Cu-a の屈曲点に対応すると思われる屈曲点は表われていない。その理由は次のように推察される。Cu-b の平均粒子径は Cu-a のそれより小さく、また粒子の形状は Cu-a は球状で、Cu-b は樹枝状である。よって圧縮過程で粒子の再配列が早く終って、塑性変形が早く起こり始めるために、圧縮過程の第 3 段階への移行が Cu-b より早くなることによるのであろう。したがって Cu-a の場合、低い圧力で屈曲点が現われたものと思われる。Cu-a が同一成形圧力に対して密度比が高いのは、粉末の見掛密度において Cu-a の方が高いことから当然で

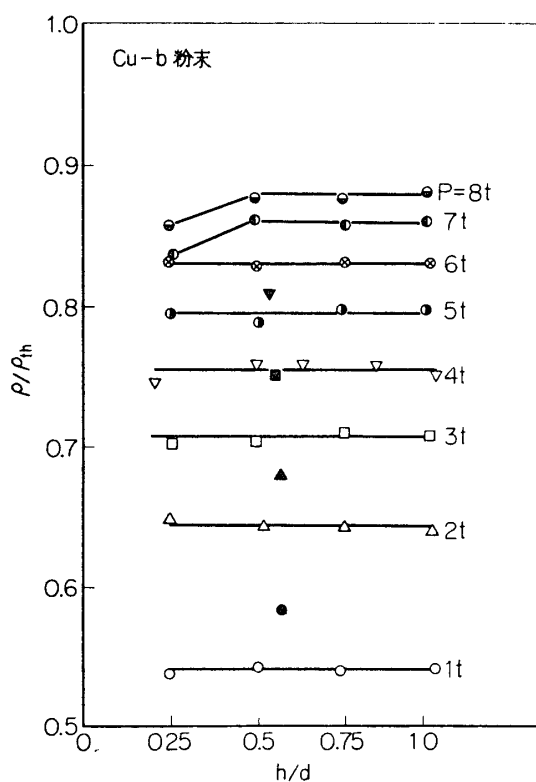
ある。これと上記のことを考え合わせると、Cu-a 粉末、Cu-b 粉末共圧縮成形過程の変化の傾向が非常によく似ているといえる。川北の式への対応は図4に示したが、Cu-a, Cu-b 共によく直線にのっている。直線の勾配がかなり違っているが、これは両粉末の見掛密度の相違による(表1参照)。

以上により、銅粉末の場合粉末の形状は、極端に方向性がある場合を除いて、圧縮成形が可能な範囲では、その過程にそれほど大きな差はないと結論できる。しかし圧縮成形が可能な範囲の最小成形圧力は粉末粒子の形状により非常に異なる。

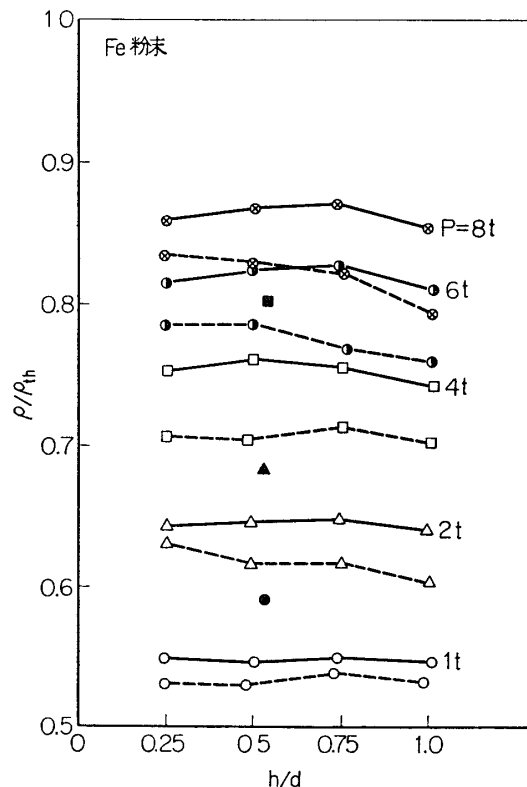
(c) 圧粉体の高さ-直径比, ダイス径および金型潤滑の圧縮式に対する影響

上にも述べたように圧縮の過程においては金型の壁面との間の摩擦があるから、圧粉体の高さ-直径比が変わると圧粉体の密度も変化するはずである。そこで前記の実験においては、12mm ϕ の金型を用い高さ-直径比を1/2一定として実験したが、ここでは直径が一定でこの比を変化させた時の圧縮式への影響を検討した。

使用した粉末は Cu-b と Fe 粉末であり、金型は 12mm ϕ のものをを用い圧粉体の高さ-直径比を1/4から1/1まで変化させて圧縮した。実験は総て金型の壁面およびパンチに潤滑剤を塗布して行なった。またダイス径の影響をみるために、圧粉体の高さ-直径比を一定に保



第9図 銅の圧粉体密度におよぼす、高さ-直径比 (h/d) およびダイス径の影響 (黒印は 25mm ϕ のダイスによる実験値)

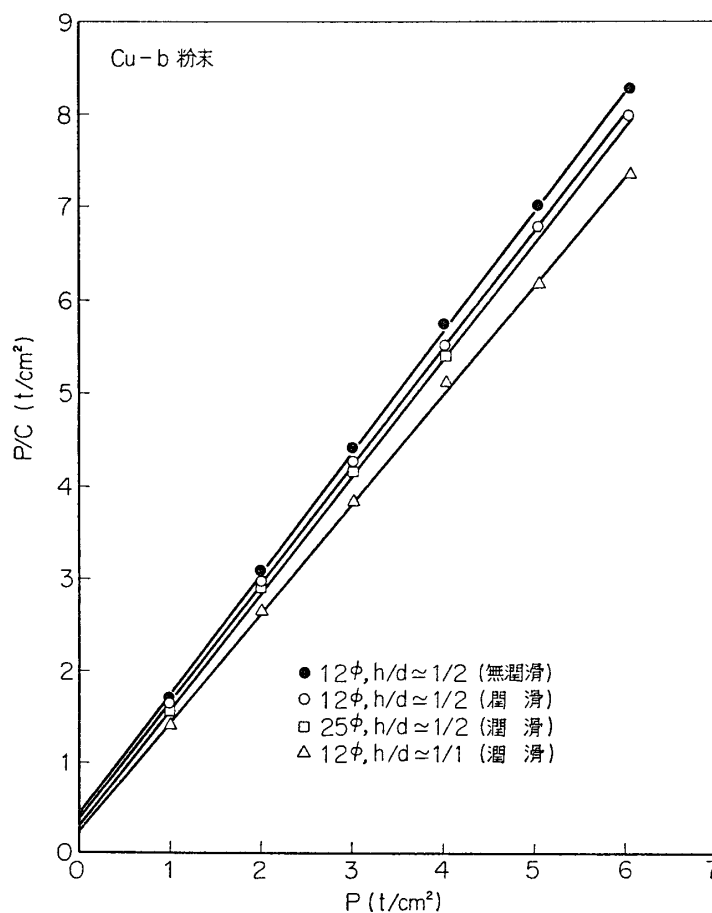


第10図 鉄圧粉体の密度におよぼす、高さ-直径比 (h/d), ダイス径および潤滑剤の影響, (黒印は 25mm ϕ ダイスに潤滑をほどこして圧縮した値, ほかは 12mm ϕ ダイスによる値. 実線は潤滑をほどこした場合, 破線は無潤滑)

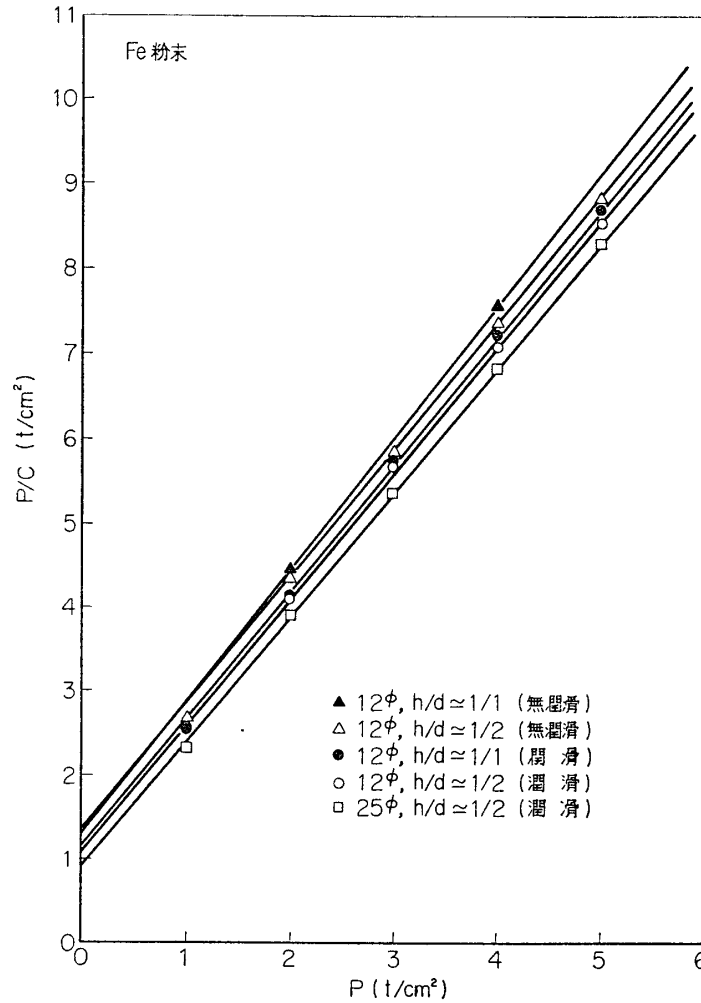
って直径 25 mm ϕ の金型で圧縮し, 12 mm ϕ の金型による結果と比較検討した. また潤滑剤を用いた場合と用いない場合の差を検討するために, 12 mm ϕ の金型で Fe 粉末をそれぞれの条件で圧縮成形した.

Cu-b 粉末を 12 mm ϕ の金型で圧縮成形した時の圧粉体の高さ-直径比に対する密度比の変化を図 9 に示す. これによると低圧領域では高さ-直径比の影響がほとんどなく, 高圧領域になるとその影響が次第に増すことがわかる. しかし図 2, 4 と同様な方法で図示してみると, 図 2, 4 の Cu-b の直線に大体のってくる. したがって金型潤滑を行なって金属粉末を圧縮成形するときは, 圧粉体の高さ-直径比の値が 1/1 までの範囲では圧縮式に対する影響はほとんどないといえる.

Duwez ら [3] の実験結果から予測すると, 圧粉体の密度におよぼす高さ-直径比の影響はもう少し大きいはずであるが, 彼らの実験は無潤滑で行なっているので比較のため Fe 粉末を用いて無潤滑で同様な実験を行なった. 得られた結果を図 10 に示す. 無潤滑の場合は h/d が 0.25 でもすでに密度の低下が見られ, 高圧になるにしたがって h/d の増加, すなわち壁面との接触面積の増加と共に密度は減少する傾向がある. これは Duwez らの結果とよく一致している. 無潤滑の場合は, 金型の壁面との摩擦の影響が大きいので, 同じ成形圧力に



第 11 図 h/d , ダイス径および潤滑剤を変化させた場合の川北の式に対する影響



第12図 h/d , ダイス径および潤滑剤を変化させた場合の川北の式に対する影響

対して得られる圧粉体密度が潤滑した場合より低くなる。したがって極くわずかではあるが圧縮式の定数値が変化する。

次に h/d を一定にして金型の直径を $12\text{mm}\phi$ から2倍の $25\text{mm}\phi$ に変えたときの影響を見ると、図9, 10に示したとおり密度の増加となって表われる。これは h/d が一定、金型直径が2倍の条件においては、荷重と金型壁との接触面積の比が増大することにより圧縮が効果的になるため密度の増加が生じたものと思われる。この場合圧縮曲線の直線性は保たれるが、式の定数にわずかな変化が生じる。

以上の h/d , 金型潤滑, および金型直径を変化させたときの影響を川北の式によって示したものが図11, 12である。この場合も、この実験の範囲内では直線的な関係が保たれている。以上から考えると、圧縮式に対する壁面との摩擦, したがって潤滑剤の影響は極くわずかであるといえる。ただし粉体の成形ができるかできないかの限界に近い場合の潤滑剤の効果は非常に大きい。

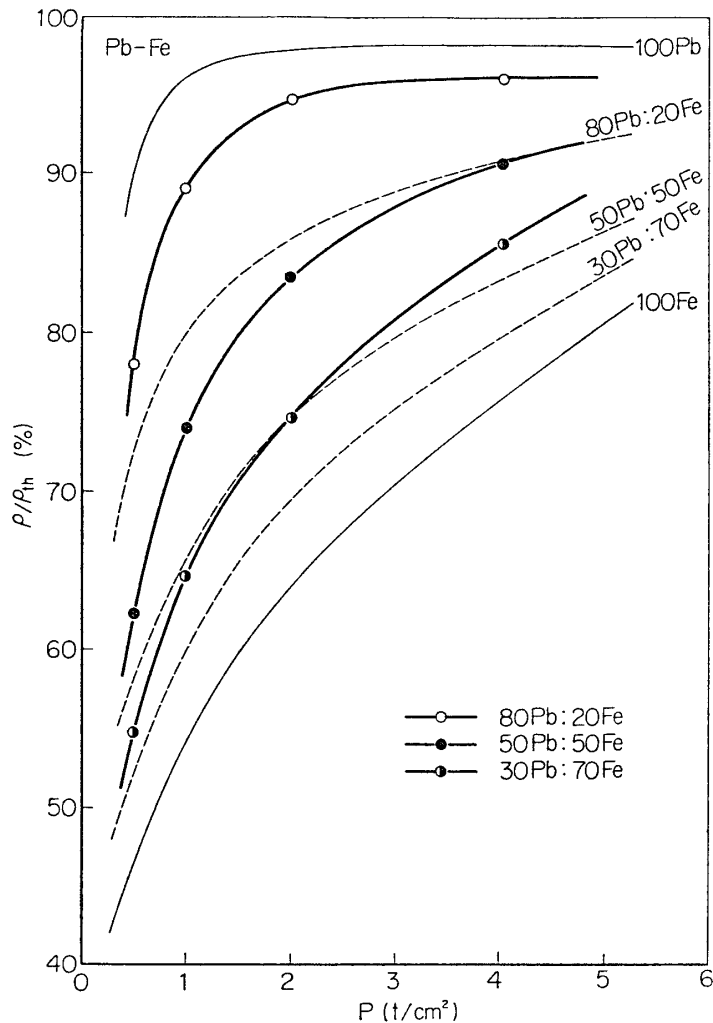
(3) 混合粉末の圧縮

粉末冶金においては、合金を材料にした製品を作る場合最初から合金粉末を用いる場合もあるが、合金粉末の製造の困難さや価格の面から混合粉末から出発する場合が多い。特に超硬合金やサーメットの製造においては、性質の非常に異なる物質の混合粉末を圧縮成形しなければならない。混合粉末を圧縮する場合、果して単一粉末と同様な挙動を示すのであるかは、興味ある問題であるが、まだあまり研究されていない。

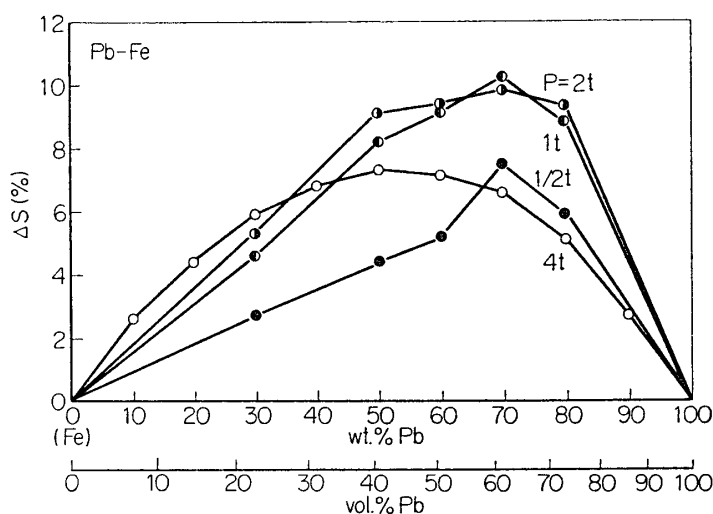
すでに述べたように、金属粉末の圧縮においてはその金属の降伏強さが重要な意味をもつので、(a) 降伏強さの極端に異なる 2 種類の金属の混合粉末、(b) 降伏強さがほぼ等しい 2 種類の金属の混合粉末の二つの場合について実験を行なった。このほか混合粉末においては、混合する粉末の粒度分布を当然考慮しなければいけないが、ここでは表 1 の粉末をそのまま使用した。実験方法は単一粉末の場合と同様に 12 mm ϕ の金型を潤滑して用いた。混合粉末は総て手で充分混合して調製した。

(a) 降伏強さが極端に異なる 2 元混合粉末の圧縮

降伏強さの極端に異なる 2 元系として、Pb-Fe 系および Fe-TiC 系の二つを取り上げた。



第 13 図 Pb-Fe 2 元混合粉末の密度比-成形圧力曲線
(図中の破線は計算値を示す)



第14図 Pb-Fe 2元混合粉末圧縮の場合の実測値と計算値の差 $\Delta S = (\rho_{\text{exp}} - \rho_{\text{cal}}) / \rho_{\text{th}}$

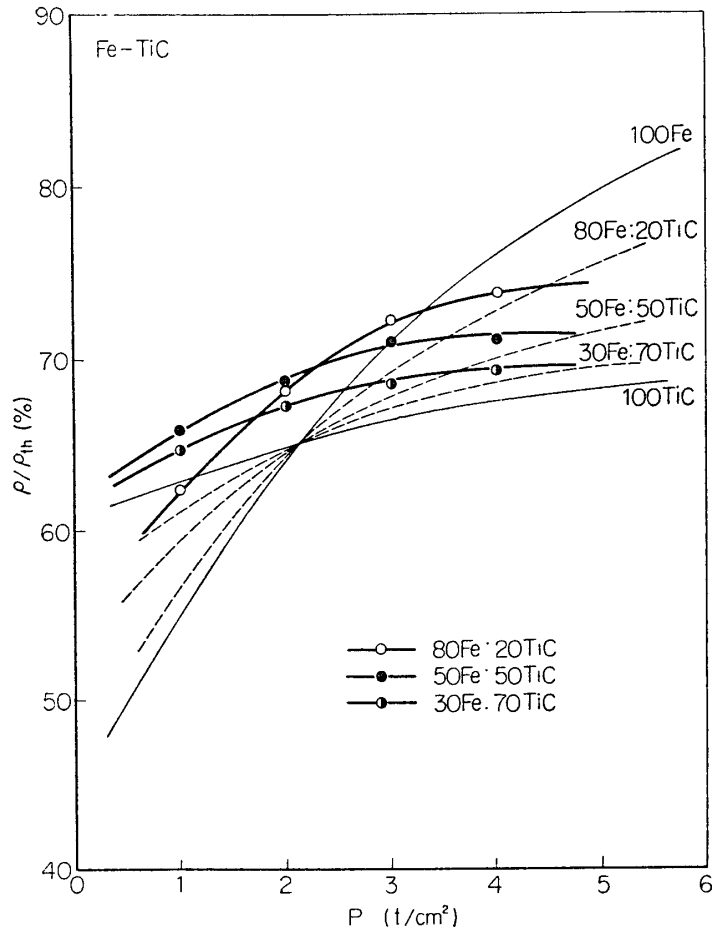
図1の密度比-成形圧力の曲線に示されるように、Pb-Fe系は両粉末が単一では密度比曲線が大きく離れ、Fe-TiC系の場合交差している。よってこの二つの系を代表的に取り上げたのである。

Pb-Fe系について得られた密度比-成形圧力曲線を図13に示す。図中の破線はPb粉末とFe粉末を混合しないで、それぞれ別々に圧縮した場合を仮定したときの計算密度比である。図に示されているように、実験値はこの計算値より高い値になる。この密度比の増加を ΔS として粉末の混合比率に対して目盛ると図14のようになる。

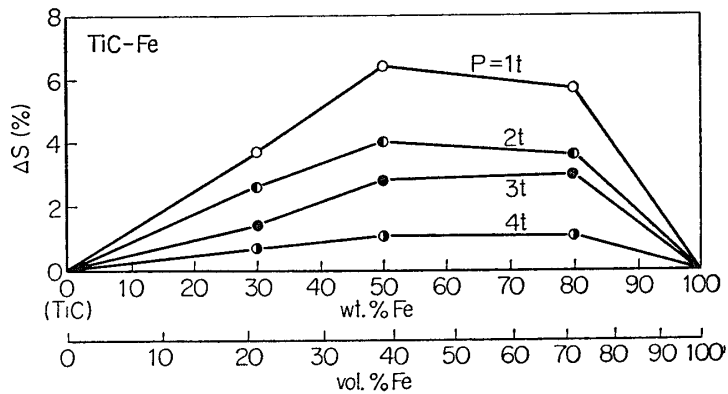
Fe-TiC系について同様に得られた結果を図15, 16に示す。これらの結果から両系に共通していえることは、2元混合粉末の圧縮の場合両粉末を混合せず、2層に重ね合わせた圧縮と考えたものより密度増加が認められることである。そしてその最大密度増加を与える混合比率は、両者の容積比が40~60%近傍である。しかしながらこの密度増加は成形圧力に依存し、高圧になるほど減少する傾向がある。この密度増加は、Pb-Fe系の場合はより塑性変形しやすいPb粒子がFe粒子の空隙を埋めるように変形するためであろう。このような効果は、硬い粒子が多いほど小さくなり、一方軟い粒子が多過ぎても効果は下がる。そして圧力が高くなるとFe粒子の変形も起こるので、単一に圧縮した場合との差は小さくなる。このため40~60 vol%近傍で最も密度増加が大きくなるのであろう。そしてFe-TiC系の場合は、用いたTiC粉末が超微粉であるためさらに別な効果も含まれるであろう。

図13, 15で興味あるのは、混合前の各粉末単一の密度比曲線が交差する場合(図15)は、交点以下の成形圧力では単一粉末の密度より混合粉末のそれが大になり、両曲線が交差しない場合(図13)は、どの混合比率においても混合粉末の密度が単一粉末のそれより大きくなることはないということである。この点に関しては、はっきりした理由はわからないが、両粉末の塑性変形の差、それぞれの粒度分布、平均粒径の大きさなどに関連があると思われる。

以上の結果から2元混合粉末を圧縮する場合、両単一粉末の2層圧縮と考えて密度を算出することができる。そしてその誤差は、両粉末の混合比および成形圧力により異なるが、密



第 15 図 Fe-TiC 2 元混合粉末の密度比-成形圧力曲線

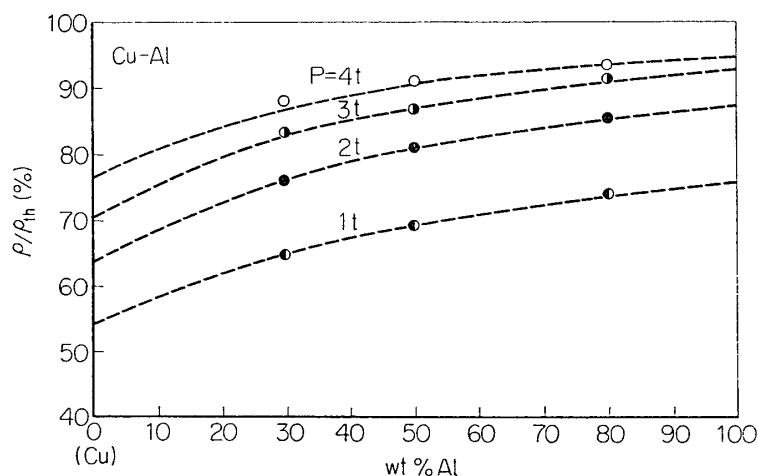


第 16 図 TiC-Fe 2 元混合粉末圧縮の場合の実測値と計算値の差
 $\Delta S = (\rho_{\text{exp}} - \rho_{\text{cal}}) / \rho_{\text{th}}$

度比で最大約 10% である。そして高圧成形になるほど、この誤差は小さくなる。

(b) 降伏強さのほぼ等しい 2 元混合粉末の圧縮

この系の代表的な例として、Cu-Al 系を選び実験を行なった。用いた粉末は表 1 の Cu-b および Al 粉末である。実験方法は (a) の場合と同様にして行なった。



第17図 Cu-Al 2元混合粉末の混合比率に対する密度比の変化
(破線は計算値を示す)

降伏強さのほぼ等しい混合粉末の圧縮の場合は、図17に示すように、混合による密度増加は認められず、2種類の粉末を2層に重ねた圧縮と仮定した計算値とよく一致している。これは両単一粉末の粒子がほとんど同じ圧力に対して塑性変形を起こすので、上記(a)の場合のように圧縮の初期に一方の粉末粒子が他方の粒子の空隙を埋めて減少させる効果が少ないためであろう。しかしCu-Al系ではAlの方が降伏強さは低いので、非常に低圧の領域における圧縮の場合、この系でも計算値より密度が増す効果が現われると思われる。

4. 結 論

(1) 種々の金属粉末を、金型潤滑のもとに圧縮成形し、密度-成形圧力の関係から、Balshin, Heckel, そして川北の粉体の圧縮式を検討した。その結果、最も広い圧力範囲にわたって直線性を示したのは、川北の式であり、また各実験式の定数と用いた金属の降伏強さとの関係においても、川北の式のそれが最もよい対応を示した。したがって粉体の圧縮成形においては、実用的には川北の式が有用であることがわかった。

(2) 粉末の形状の差による圧縮成形への影響をみるため、製法の異なる3種類の銅粉末を用いて実験を行なったが、搗碎銅粉のように、粉末の形状に極端な方向性がある場合を除いて、圧縮成形過程にそれほど大きな差は生じなかった。ただし成形性は、不定形塊状の電解銅粉の方が球状の噴霧銅粉よりよく、鱗片状の搗碎銅粉の場合は、どの成形圧力でも層状割れができて成形できなかった。

(3) 圧粉体の高さ-直径比、金型潤滑、および金型直径を変化させた場合、圧粉体の密度に多少の増減がみとめられ、圧縮式の定数値が若干変化することがわかった。金型潤滑を行なわないで、 h/d の値が1以上に大きいような場合は、これらの変化はずっと大きくなるであろう。

(4) 2元混合粉末の圧縮の場合、降伏強さがほぼ等しい2元混合粉末を圧縮成形するときは、2種類の単一粉末を別々に同じ条件で圧縮した2層の和として求めた計算値とよく一致した。

降伏強さが極端に異なる 2 元混合粉末を圧縮成形するときは、一方の成分が多い場合は各単一粉末の 2 層の圧縮として求めた計算値とよく一致するが、混合比率が等しくなるにしたがって実測値の方が計算値より大きくなる。そしてその差は、両粉末の混合比が 50 vol% の近傍で最大であった。

終りに、本実験に終始協力を願った武藤範雄君に感謝の意を表します。

1966 年 12 月 9 日 材料部

参 考 文 献

- [1] M. J. Donachie, Jr., M. F. Burr: J. Metals, **15** (1963), 849
- [2] 若林: 粉体および粉末冶金, **10** (1963), 83
- [3] P. Duwez, L. Zwell: Trans. AIME, **169** (1949), 137
- [4] M. Yu. Bal'shin: Vestnik Metalloprom, **18** (1938), 124
- [5] R. W. Heckel: Trans. AIME, **221** (1961), 671
- [6] R. W. Heckel: Trans. AIME, **221** (1961), 1001
- [7] 川北: 粉体および粉末冶金, **10** (1963), 236
- [8] M. F. Burr, M. J. Donachie, Jr.: Trans. ASM, **56** (1963), 863