

燃焼合成法－電磁加圧成型法の組合せによる 金属間化合物材料の新製造法の開発

電気通信大学 電気通信学部 機械制御工学科
教授 根岸 秀明
助手 日比野 敦
(研究開発助成 AF-92017)

キーワード：電磁成形法，粉末成形，焼結，

1. 研究の背景

粉末を加圧焼結して作られる部品類が、自動車、電機、航空機をはじめ各方面で実用に供されるようになった。粉末を原料とする場合には、最終製品形状に近い形、または最終形状の成形品を得ることができること、異種材料を混合することにより容易に材料の複合化がはかれること、粉末粒子の形状寸法、並びに温度、圧力等の成形条件を制御することにより成形品の特性を自由に設計できること、などの利点が考えられ、1980年代に入り、新素材開発の名のもとに、主要工業国において製品及び製造プロセスの開発が急ピッチで進められた。製造プロセスとしては、ホットプレス法（HP法）と熱間静水圧成形法（HIP法）が開発され、実用化された。いずれも粉末を成形固化することにおいて優れているが、HP法には、高温での加圧成形用金型の寿命が短く、そのうえ加熱時間が長く生産性に劣るといった問題があり、また、HIP法には粉末試料のカプセル封入と脱気処理等の工程に手数がかかるといった問題がある。そこで生産性や経済性に有利な新しい粉末成形法の開発に関心が寄せられるようになった。

そこで、本研究では、金属の板や管の二次加工に用いられている電磁成形法を粉末の加圧焼結に利用することの可能性について実験的に検討することにした。電磁成形法とは¹⁾⁴⁾、磁場のもつエネルギーを加工エネルギーとして利用する方法で、これが粉末の加圧焼結に利用できれば、粉体に対して非接触で衝撃的な加圧力を作用させることが可能であり、また高温や真空といった特殊雰囲気での成形が可能であり、そのうえ衝撃加圧を利用するので作業時間が短いなどの特色を持つ手法となり得るものと考えられる。本研究では、その可能性を探るために鉄⁵⁾及び銅粉の加圧焼結を試みた。

2. 実験方法

2.1 圧粉体

原料粉末には、常温での加圧焼結用として平均粒径100 μm のアトマイズ鉄粉を使用した。この粉末を円筒形の金型に封入後、アムスラー万能試験機で圧粉したものと及び圧粉体を真空電気炉で1473 K、1時間の仮焼結したものを供試材とした。銅粉末は平均粒径74 μm の電解銅粉で、この粉末を金型で圧粉したものを熱間における電磁成形法の供試体として使用した。

2.2 実験装置及び実験方法

図1に供試体に加圧力として衝撃電磁力を作用させるための電磁成形装置（常温用）を示す。装置の定格は、コイルインダクタンス15 μH 、コンデンサの最大静電容量400 μF 、コンデンサ最大充電電圧10 kVである。また、供試体に磁場を効果的に作用させるために磁束集中器を使用している。コイル（本実験では単層ソレノイド）にコンデンサに蓄えた大量の電荷を衝撃大電流として流し、コイル内に衝撃磁場を作る。この磁場内に置かれた供試体には電流が誘起され、この電流と磁場との相互作用によって円筒状の供試体は円周側面に衝撃的な外圧力、すなわち電磁力を受けて圧縮される。電磁力の大きさはコンデンサ充電

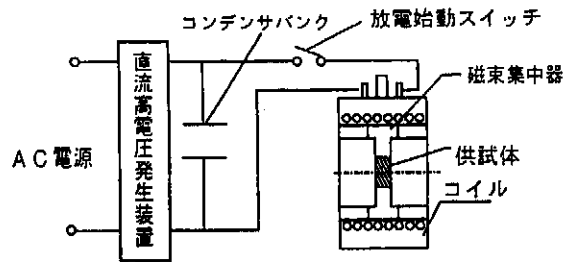


図1 電磁成形装置（常温用）

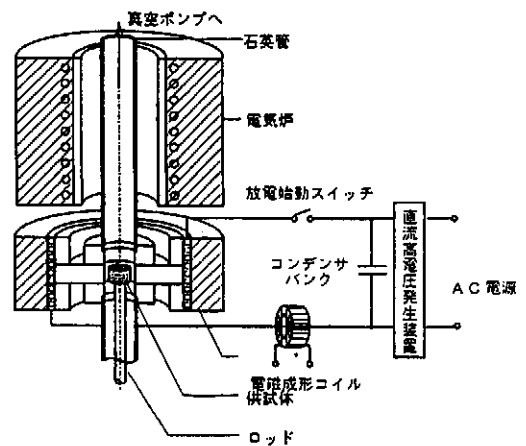


図2 電磁成形装置（高温用）

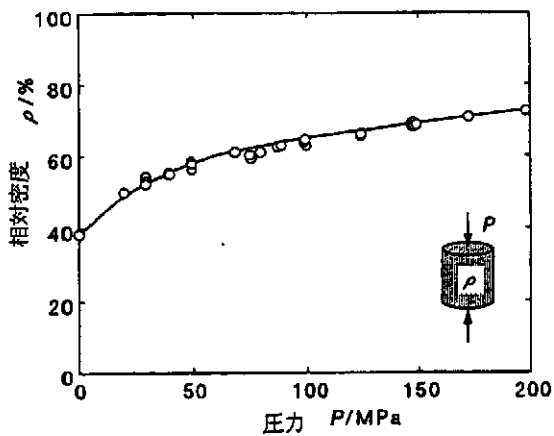


図3 万能試験機による圧粉

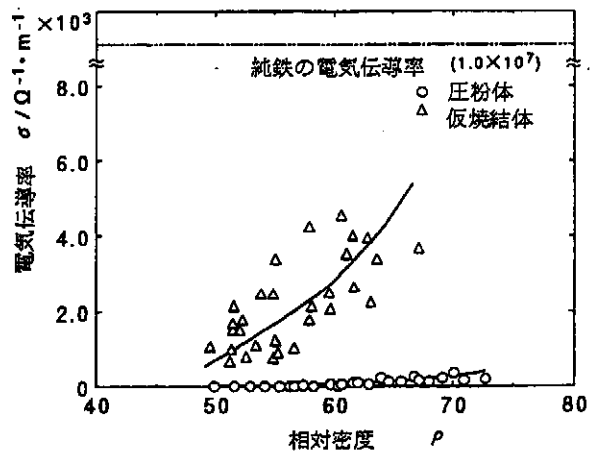


図5 圧粉体の相対密度 ρ と電気伝導率 σ

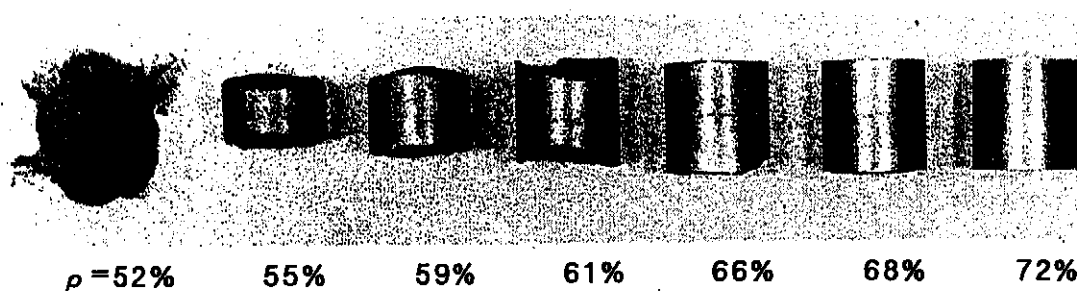


図4 電磁成形後の圧粉体外観

電圧を、作用時間はコンデンサ容量をそれぞれ変えることにより変化させた。成形後の供試体について、質量、寸法、及び密度を測定して、電磁成形法による供試体の圧密度について検討した。

図2は熱間で圧粉を行うための電磁成形装置である。熱間での試料の酸化を防ぐために、石英管内を排気し、電気炉で加熱された試料はロッドでガイドされて磁束集中器中央に移動できるようにしてある。

3. 実験結果及び検討

3.1 鉄圧粉体の成形

原料粉末のアトマイズ鉄粉を万能試験機で圧粉したときの圧密特性を図3に示す。圧粉圧力を増加するにつれて圧粉体の相対密度は増加する。相対密度 $\rho=52\sim 72\%$ の圧粉体を電磁成形により圧粉したときの圧粉体の写真を図4に示す。いずれの圧粉体にもその側面中央部に亀裂が生じ、相対密度55~66%の圧粉体では両端部が破壊されている。このことより圧粉体をそのまま電磁成形により圧縮しても効果が期待できないことがわかる。

図5に圧粉体の相対密度と電気伝導率を測定した結果を示す。ここで圧粉体の電気伝導率を○印、仮焼結体のそれを△印で示してある。圧粉体の電気伝導率は、相対密度60%程度までほぼ0であり、密度が高くなると若干上昇するものの、相対密度70%の圧粉体でも純鉄に対して約1/3000にすぎない。このために圧粉体に電流が流れ難く、電磁成形の効果が現れないと考えられる。これに対し、仮

焼結体の電気伝導率は圧粉体に比べて大きく改善されていることがわかった。

3.2 鉄仮焼結体の成形

電磁成形法により圧縮成形を行った仮焼結体の形状、密度の変化を図6に示す。(a)は半径方向の寸法変化、(b)は軸方向の寸法変化を示しており、仮焼結体が半径方向に縮み、軸方向に伸びていることを示している。(c)は密度の変化を示しており、コンデンサ充電エネルギーが大の場合には、電磁成形が相対密度の向上に効果があることがわかる。しかしながら、相対密度の高い仮焼結体の場合には、充電エネルギーを大にしても密度変化は少ない。高密度の仮焼結体を高密度化するには大きな圧縮力と軸方向への材料の流れを抑えることが必要であると思われる。

3.3 電磁成形の効果

図7にコンデンサ容量一定のもとで充電電圧を変えて仮焼結体を圧縮させた場合の密度変化を示す。コンデンサ充電電圧が高くなるに伴い、高密度化が達成されている。しかしながら、相対密度51%の仮焼結体を12.5 kVで成形を行ったところ、仮焼結体に割れが生じた。これは、仮焼結体の強度が十分でなく、電磁力の衝撃に耐えられなかったためであり、仮焼結体の密度はある程度大にしておくことが必要であろう。

コンデンサ充電エネルギーは、コンデンサの充電電圧と静電容量によって定まる。コンデンサ充電エネルギーを

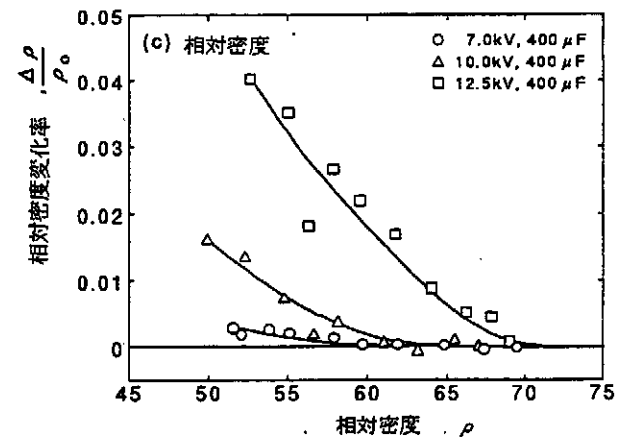
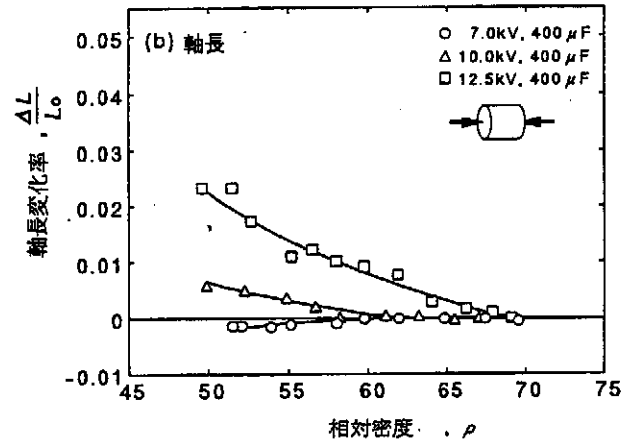
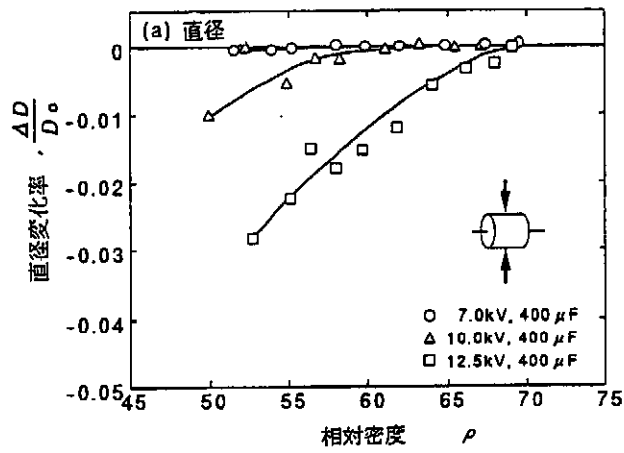


図6 仮焼結体の電磁成形による寸法、密度の変化

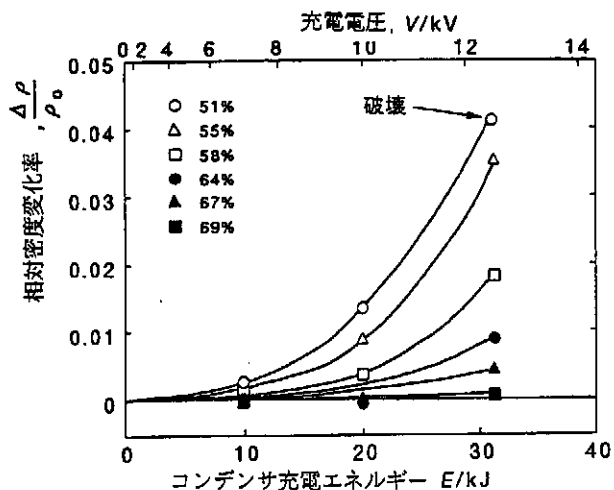


図7 コンデンサ充電エネルギーが相対密度に及ぼす影響

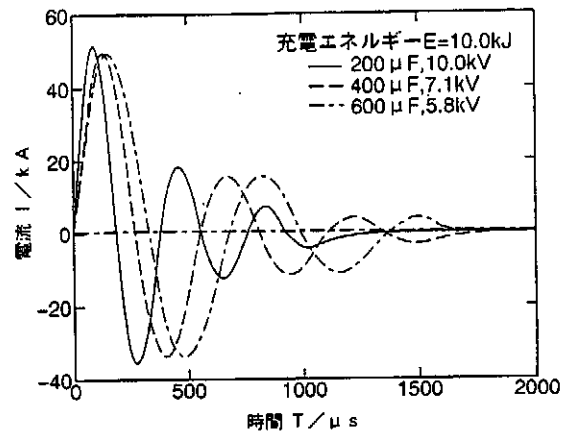


図8 コイル電流波形
(コンデンサ充電エネルギー E = 10 kJ 一定)

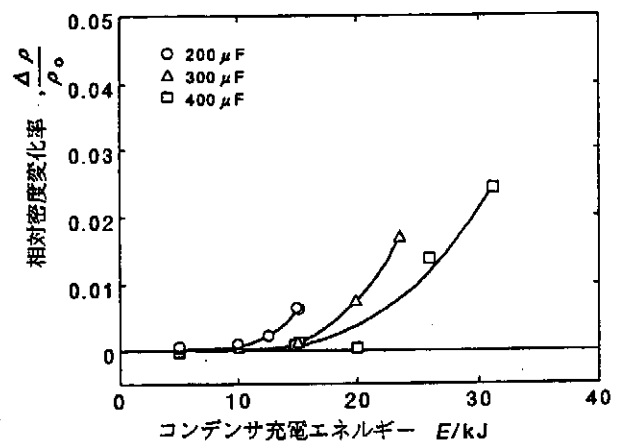


図9 コイル電流波形の違いが相対密度変化率に及ぼす影響

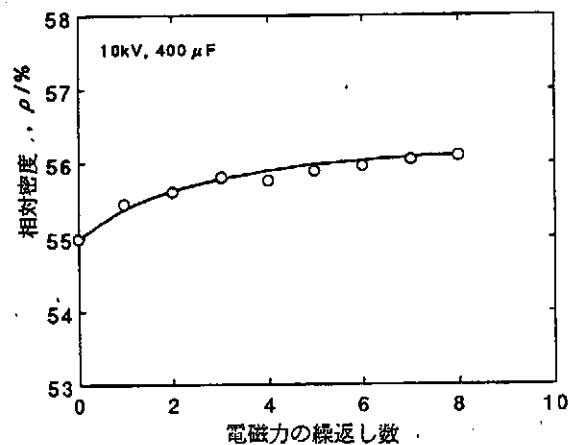


図10 電磁力の繰返し負荷の影響

10 kJ 一定に保つようにコンデンサの充電電圧と静電容量を変化させたときのコイル電流を図8に示す。この3種類の電流によって電磁成形を行った結果を図9に示す。コンデンサ容量を小にして、電流の周期を短くした方が高密度化に有利であることがわかる。電磁成形法における電流周期の成形への影響は、被加工材の電気伝導率に依存して

おり、本供試体のような鉄系材料の場合には、周期は短く、即ち高い周波数の電流をする方が有効な磁場を材料内に閉じこめられるので有利に働くのであろう。図10は仮焼結体に複数回、同じ大きさの電磁力を加えたときの回数と密度の関係を示したもので、回数の増加とともに密度が高くなる傾向が見られる。電磁成形装置の出力上の制限から、より大きい電磁力を負荷することができなかったが、複数回負荷の効果は重要な成形要因となるものと思われる。

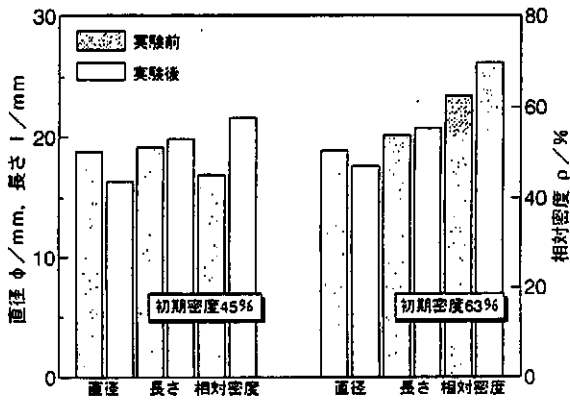


図11 銅粉仮焼結体の電磁成形による寸法、密度の変化

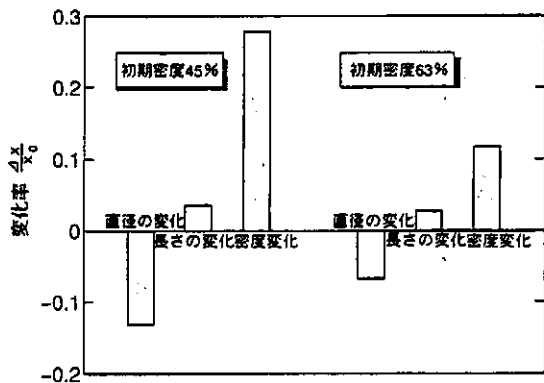


図12 銅粉仮焼結体の電磁成形による寸法、密度の変化率

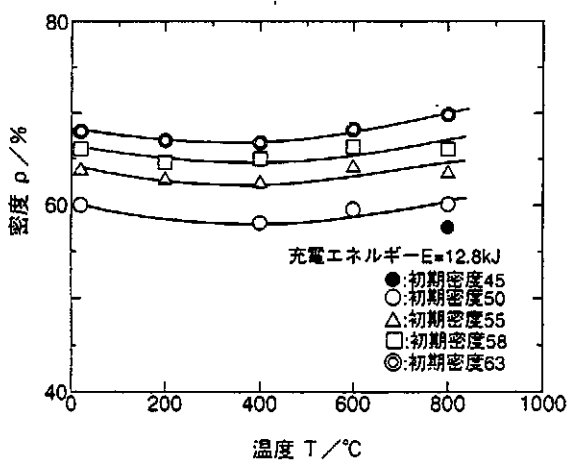


図13 高温下電磁成形による銅粉仮焼結体の密度変化

3. 4 銅粉末の熱間電磁成形

電磁成形では導電性の良い材料の方が成形し易い。ここでは、銅粉末を金型で圧粉し、仮焼結を施したものを供試体として、図2の電磁成形装置により供試体の固化成形を試みた。図11に電磁成形を施す前後の供試体の直径、軸長、相対密度を示す。図12はこれらの変化率を示したもので、外径の縮小に比べて軸方向の伸びは小さく、よって密度が高められていることがわかる。図13はコンデンサ容量400 μ F、充電電圧8kV一定として、常温から800 $^{\circ}$ Cまでの温度で実験を行い、温度と電磁成形後の供試体密度の関係を示したものである。400 $^{\circ}$ C付近では、室温での成形に比べて密度が低くなっており、それ以上の温度では緻密化している。温度は供試体の変形抵抗及び電気伝導率に影響を及ぼすので、電磁成形を行う際には、適切に温度を設定することが必要である。

4. 結言

電磁成形法が粉末圧縮成形に有用な手法となり得るかについて実験的に検討した。

- (1) 圧粉体の電気伝導率は低く、電磁成形の効果は期待できない。圧粉体のままで電磁力負荷を加える場合には、圧粉体密度をバルク材の60%以上にしておくことが必要である。
- (2) 圧粉体を仮焼結することによって、電気伝導率と機械的強度が改善され、電磁成形の加圧焼結への適用性が認められた。
- (3) 電磁成形の成形条件に関しては、コンデンサ容量を小さくしてコイル電流の周波数を短くした方が有効な加圧条件となる。
- (4) 電磁力を繰返し加えることにより、繰返し回数に応じて粉体密度は上昇する。
- (5) 電磁成形の加圧焼結への効果は、加圧時の温度に依存し、効果的な加圧には適切な温度の設定が必要である。
- (6) 本実験研究により、電磁成形法を粉末成形へ適用するために必要な因子、問題点等が明らかになった。今後、より大きな電磁力による成形実験や導電性カプセルの使用など電磁成形法の特徴を生かした成形実験を行う必要があると思われる。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成によって行われたものです。ご支援を賜りました関係者各位に厚く感謝申し上げます。

文献

- 1) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，コロナ社（1992）。
- 2) 佐野利男：アマダ技術ジャーナル，21-102，(1988)，1。
- 3) 根岸秀明：金属プレス，8-6，(1976)，2。
- 4) 鈴木秀雄，根岸秀明：塑性と加工，20-224，(1979)，789。
- 5) 日比野敦，佐藤一太郎，根岸秀明：粉体および粉末冶金，14-3（1994），263。