

超音波励振された板状アーク電極からの 金属微粒子生成法

Metallic Powder Production from a Plate Arc Electrode Vibrated in an Ultrasonic Frequency

後藤 泰之

Yasuyuki GOTO

Abstract In recent years, various kinds of powder metal production methods have been developed. The plasma rotating electrode process (PREP) is a typical method but it needs a particular high-speed motor. Authors have proposed a metallic powder production method from an arc-discharge electrode vibrated in an ultrasonic frequency.

In this paper, I intend to make production time longer and to produce larger amount of metallic powder. I have adopted a metallic plate of $50 \times 150 \times 6$ mm in size as a processed ingot instead of a short cylindrical one in my previous trial. The iron plate is energized at its center by a 15 kHz-600 W ultrasonic power oscillator in this experiment. Both ends of the plate oscillate with amplitude of about $60 \mu\text{m}$. One end is now heated by an anode spot which is formed by an arc discharge established between the plate and another cathode. When the arc current is taken as 40 A, total processing time is attained to 2 min and 20 g of iron powder is obtained. Diameter of the produced powder is distributed between 30 to $160 \mu\text{m}$ with an average value of $67 \mu\text{m}$. Remarkable cooling effect are brought about by injecting water drops at a rate of 1 ml/s and by blowing He gas at a rate of 50 l/min. Processing time as well as producing amount will be expected to be improved with larger arc current and larger plate associated with effective cooling.

1. はじめに

電力をエネルギー源として発生する高気圧、大電流のアークプラズマは、現在、照明用光源、アーク

炉あるいは大電流の電力用遮断器等に利用されている。著者らはこれまで、この熱プラズマによる加熱と超音波励振とを組み合わせることによって粉末冶金法の原材料等に使用される金属微粒子を金属素材から直接に得る手法について報告してきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

いる。現在、金属微粒子の生成法としては、アークプラズマの高温により回転する金属素材を溶融し、遠心力により金属を液滴状にして周囲空間に飛散させて粉末化する回転電極法⁽⁵⁾、あるいは多量の溶融金属素材を回転円板に注いで飛散させる回転ディスク法が主たるものである⁽⁶⁾。回転ディスク法は生成される微粒子が一般に粗いため焼結するときの圧縮性が悪く、さらに、特殊な溶融金属の貯蔵容器が必要である。一方、アークによる回転電極法は金属素材から直接微粒子が生成でき、融点の高い素材からの生成に適しており、特殊な容器は必要ない。しかし、この方法では粒径が数100 μm 程度の微粒子が得られるものの、高速電動機が必要になるとともに、高速回転のため作業上の危険が多い。これに対し、著者らの提案してきた微粒子生成法では、超音波励振を加えた棒状の金属素材をアーク放電の陽極とし、その陽極スポットの高温により金属素材の一部を溶融して、数十kHzの振動の力学的加速度により溶融部を微粒子として飛散させている。これは、事実上静止型の生成法であり、銅、鉄、チタンについて試みた結果、15kHzで粒径50から100 μm 程度の微粒子の生成が可能である⁽¹⁾。従来、この装置では棒状の金属素材を超音波励振用ホーンの先端に取り付けていたが、ホーンとの共振を図るためには素材の大きさや形状に制約があり、素材として直径10mm、長さ50mm程度の小型のものしか使用できなかった。

そこで、加工時間を長くし、微粒子生成量を増大させることを目的として、金属素材を棒状から板状に変えて微粒子生成を試みた。これによって、棒状素材を用いたときに比べて、大きさや形状の制約が少なくなり、素材そのものを大型にできるとともに、連続加工時間を若干長くとることができるようになった。その反面、生成量はアーク電流に対して飽和する傾向がみられた。これは陽極スポットへの入力が大きくなりすぎ、その近傍が軟化して超音波振動の伝搬が弱まるためである。これに対処するため、板状電極の冷却を水ならびにHeガスを用いて行った。その結果、過度の溶融が抑制でき、生成量の飽和傾向を改善することができた。

2. 実験装置

図1に本研究で用いた実験装置を示す。本装置は、

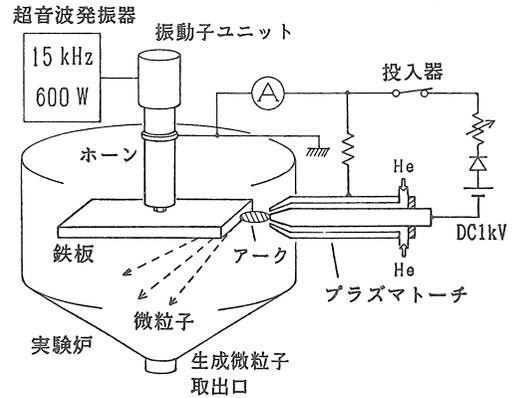


図1 実験装置の構成

大きく分けて超音波励振部およびアークプラズマ発生装置の二つの部分から構成されている。超音波励振部分は、超音波発振器およびそれによって駆動される振動子ユニットとホーンとから成り、その先端がこの図で上下方向に振動する。アークプラズマ発生装置は、アーク電流供給用直流電源(1000V, 50A)とプラズマを発生するプラズマトーチとから成っている。

長方形の素材金属板はその中心部で超音波励振用ホーンの先端に固定してあり、金属板はホーンと直角に支持されている。超音波発振器により振動子ユニットを励振することにより、ホーンを通じて超音波振動が伝搬する。この縦振動は金属板中心部に加わり、端まで横波状に伝わる。この金属板は同時に陽極となっており、これとプラズマトーチ内のタングステン製の陰極間にアークプラズマが形成される。このアークプラズマに対してはその軸方向にHeガスを、ノズルを通して吹き付けている。これによりアークを比較的低電圧で点弧しやすくすると同時に空間的に安定点弧させる。さらに、ガス流による素材の冷却効果も若干期待できる。トーチ内の電極および銅製ノズルは、通水により常時冷却されており、長時間、高温アークプラズマを維持できる。

このように形成されたアークプラズマの陽極スポットの高温により、陽極である金属板の端面の一部が局部的に溶融する。この溶融部分は、金属板端に伝わる超音波振動の力学的加速度により、細かな液滴となって離脱、飛散する。この液滴微粒子は、飛散後、急冷凝固して微粒子となり、実験炉内に落下する。板状の素材においては、プラズマトーチを金

属板の端面の幅の長さ分だけ左右に移動させている。これによって、加熱を局部に集中しないようにしている。

アーク電流は可変抵抗を通して1000Vの直流電源から供給され、本実験では10Aから40Aまでの範囲でこれを調整することができる。実験に用いた超音波発振装置の出力ならびに周波数は各々600W、15kHzである。

著者らはこれまで鉄、銅、チタンを素材として検討を行い^{(1)・(2)}、各素材で得られた特性はほぼ同様な傾向を示したため、本論文では代表的な素材として鉄板（軟鋼板：SS41）を用いて以下の検討を行っている。

3. 実験環境の設定

微粒子の生成実験には、使用する鉄板の大きさを決める必要がある。その条件として、以下が考えられる。

- (1)微粒子を飛散させるのに十分な振動が与えられること。
- (2)超音波発振器が機械的に過負荷にならないこと。
- (3)過度の溶融が起きないこと。
- (4)数分程度連続加工が可能なこと。

まず、振動振幅を評価するため、振動中の鉄板上に水を滴下し、その飛散状況を観察した。水の飛散が著しい振動状態ほど微粒子は大量に飛散すると考えられる。鉄板の幅はプラズマトーチの可動範囲の関係から50mmに固定し、長さと厚さをパラメータとした。その結果、長さが長くなるに従い、また厚さが薄くなるに従い水の飛散が著しくなった。しかし、条件(2)、(3)および(4)を満たすため、最終的に、厚さ6mm、長さ150mmの鉄板を用いることとした。これ以上長い板は超音波発振器が過負荷となり、これより薄い板は溶融が激しすぎて適当ではない。

次に、この寸法の素材を用いてHeガス吹付け量および素材金属（陽極）と陰極間の距離に対する微粒子生成量の関係を図2ならびに図3に示す。この場合、予備的にアーク電流は35A、連続加工時間は1分にとっている。両図から、Heガス吹付け量が40ℓ/min、鉄板-トーチ間距離が60mmの場合に生成量は最も多く、以後の実験では、基本的にはこれらの値を採用している。

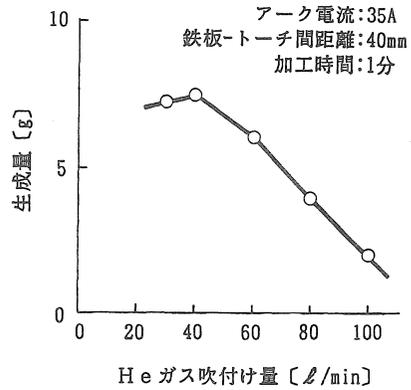


図2 微粒子生成量とHeガス吹付け量との関係

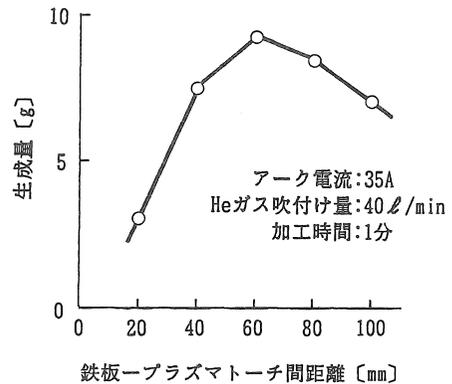


図3 微粒子生成量と素材金属-陰極間距離との関係

4. 微粒子生成量のアーク電流依存性

本実験装置を用いて、厚さ6mm、長さ150mm、幅50mmの鉄板から微粒子生成量のアーク電流依存性を求めたものが図4である。なお、Heガス吹付け量は図2で決定した40ℓ/minと、それとの比較のために60ℓ/minとし、連続加工時間は2分としている。これは、この大きさの鉄板の場合、高いアーク電流で2分以上連続加工を行うと鉄板の溶融が速いためにホーンとの固定箇所急速に接近し、アークの高温によってホーンを破損してしまう恐れがあるためである。各々の特性について比較すると、40A付近まではHeガス吹付け量40ℓ/minの場合の方が図2で示したように生成量が多い。しかしながら、アーク電流が40Aをこえる付近から生成量に飽和傾向が見られる。一方、60ℓ/minの場合はアーク電流が40Aにおいてもほぼ直線状に増加している。Heガス吹付け量

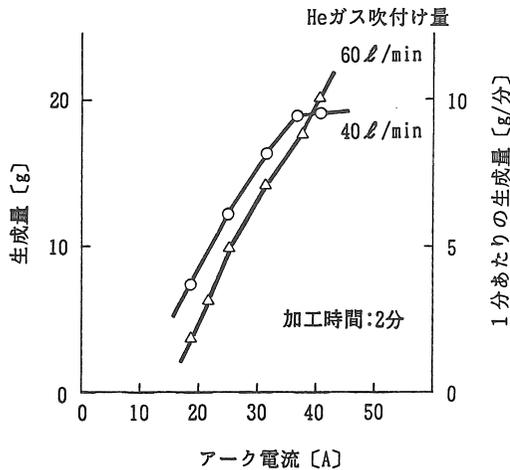


図4 微粒子生成量のアーク電流依存性

が少ないときにはアークが広がるため鉄板電極端の陽極スポット部分が大きくなり、加熱される範囲が広く、アーク電流35Aまでは40 l/minの方が生成量が多くなっている。しかし、アーク電流がそれ以上になると鉄板の溶融が広範囲に広がり過ぎ、軟化したり、一部は自重のため塊となって落ちてしまう。

次に、実際の溶融量（実験前後の鉄板重量差）の内、どれだけ微粒子となって飛散しているかを検討するため、生成効率（生成量／溶融量）のアーク電流依存性を図5に示す。アーク電流が高くなるにつれて生成効率は徐々に低下傾向にあるものの、Heガス吹付け量40 l/minの方が60 l/minに比べて全体的に効率が低く、約20%から35%となっている。この鉄板では溶融量が多いものの実際に微粒子となる量は約1/3にすぎない。このことは逆に過度の溶融を防ぐことにより生成量をさらに増大することが可能であると思われる。

図4より本実験の生成量は加工時間2分で最高約20gである。これを、厚さが10mm（長さ150mm，幅50mm）の鉄板を用いた場合ならびに従来の棒状金属（鉄棒：直径28mm，長さ25mm）を用いた場合の生成量と比較したのが図6である。ただし、棒状素材を用いた場合には形状や大きさによる制約のため、連続加工時間は1分が限度であることから、図6では1分あたりの生成量で比較している。まず、厚さ6mmの鉄板を用いた場合と厚さ10mmの鉄板を用いた場合とを比較すると、特性の傾向は両方ともアーク電流35A以上で飽和する傾向を示しているもの、生

成量は厚さ6mmの方が全体的に約2倍の微粒子を生成することができている。これは、3章で述べた水の飛散状況と微粒子生成状況とが対応していることを示している。

鉄棒と鉄板を用いた場合を比較すると、6mmの鉄板においては、35Aまでは約4倍の生成量が得られ、40Aにおいても約2.5倍の微粒子を生成している。したがって、鉄板を用いることにより、同じ加工時間で比較すれば鉄棒を用いた場合と比較して生成量を2.5倍以上増大化することができた。実際には、板状金属では棒状金属より加工時間を長くとれるため、最終的に生成量は約5倍に達している。

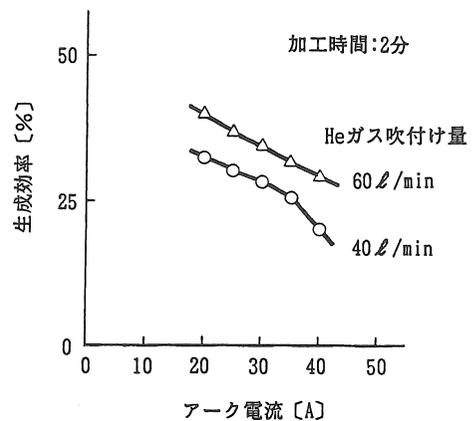


図5 生成効率のアーク電流依存性

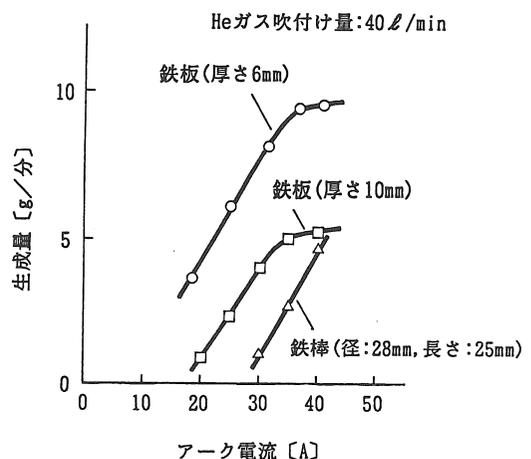


図6 微粒子生成量のアーク電流依存性

5. 生成微粒子の形状および粒径分布

本実験装置によって生成した微粒子の形状と粒径分布を調べるため、鉄の微粒子の顕微鏡写真を図7に示す。微粒子の形状はほぼ真球状であり、その表面は滑らかであることが分かる。これは棒状素材を用いた場合と同様である。このような微粒子の直径を顕微鏡写真から測定し、その分布をヒストグラムにしたものが図8(a)である。比較のため鉄棒を用いた場合の粒径分布⁽¹⁾を図8(b)に示してある。同図(a),(b)より、鉄板を用いた本実験装置から生成された微粒子の粒径は30~160μmのかなり広い範囲にわたって分布している。これに対して、鉄棒を用いた場合は40~150μmの範囲に限られている。

微粒子の粒径については、超音波励振による加速度に基づく離脱力と、液滴の表面張力が釣り合った時に微粒子が飛散すると仮定し、微粒子径dについて次式を導いている⁽¹⁾。

$$d = \sqrt{\frac{3}{2\pi^2 \Delta x}} \frac{1}{f} \sqrt{\frac{\nu}{\rho}} \quad (1)$$

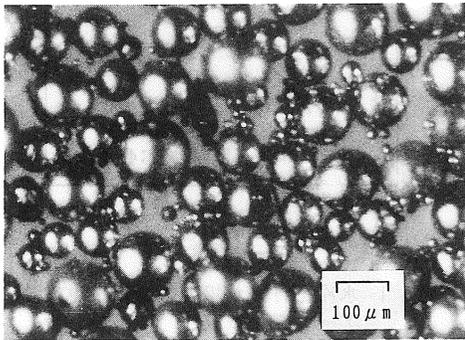


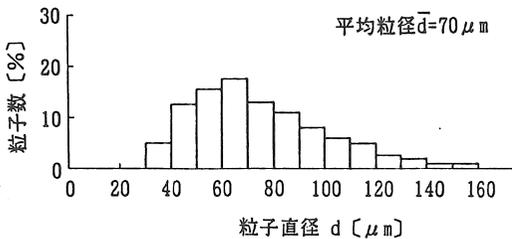
図7 鉄微粒子の顕微鏡写真

ここで、 ν は表面張力、 ρ は密度、 f は振動周波数、 Δx は振幅である。この式から、粒径は振幅の平方根に反比例している。本装置では鉄板全体にわたって定在波が形成され、振幅 Δx は位置の関数として決まってくる。加振部の振幅は一定であっても加工が進んで板長が変わると、鉄板端面での振幅 Δx が周期的に変わる。すなわち、加工が進むにつれて振幅の異なる箇所でも微粒子が生成される。このため、鉄板を用いた場合には粒径分布が図8(a)に示すように広がるものと思われる。

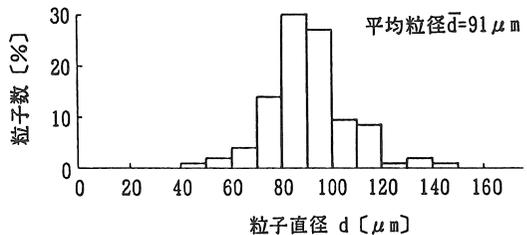
次に、図8(a),(b)から各々の平均粒径dを求めると、鉄板の場合は70μm、鉄棒の場合は91μmである。このような微粒子サイズの相違は、鉄板と鉄棒の振動振幅の違いによるものと考えられる。いま、本装置によって振動中の鉄板端の振幅を測定したところ約60μmであった。鉄板の端において振幅は最大で、それが正弦波状に分布しているとすれば、振幅の平均値は38μmとなる。これを(1)式に代入すれば理論的平均粒径として67μmを得る。この値は図8から得られる平均粒径70μmとほぼ一致している。一方、鉄棒を用いた場合、その先端の振幅は20μmであり⁽¹⁾、平均粒径の理論値は93μmである。したがって、鉄板を用いると、鉄棒を用いた場合に比べて粒径の分布は広がるものの、振幅が大きいため平均的に粒径の小さな微粒子が生成される。

6. 微粒子生成量に対する水冷の効果

図4においてアーク電流が増大すると微粒子生成量が飽和する最大の原因は、板状素材が過度に加熱され、全体が軟化することにある。これは、陽極スポットに注入された熱エネルギーが素材に蓄積するのみで失われぬからである。そこで、素材を冷却



(a) 鉄板による粒径分布



(b) 鉄棒による粒径分布

図8 鉄板ならびに鉄棒から生成された微粒子の粒径分布

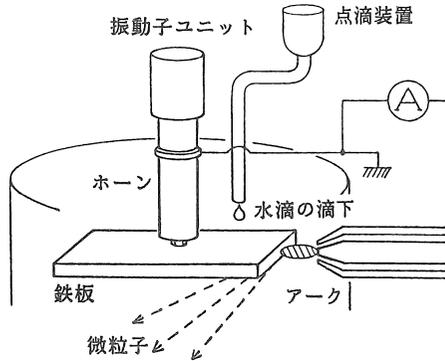


図9 水冷機能を持つ実験装置

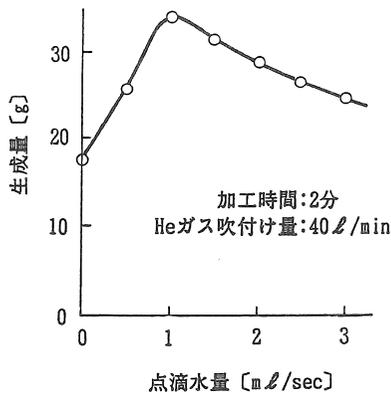


図10 微粒子生成量と点滴水量との関係

するために鉄板に対して水冷を試み, 生成量の増大を図った。

図9に示すように, ホーンで固定してある箇所から鉄板端までの中間に点滴装置により水滴を滴下して微粒子生成実験を行った。

まず, 鉄板の水冷効果を確認するため, 滴下水量に対する生成量の変化を図10に示す。ただし, アーク電流40A, 連続加工時間2分である。同図より水量が増すにつれて急激に生成量が増え, 1ml/secで極大となり, それ以上水量を増やしても急激に生成量が減少する結果を得た。したがって, 以後の実験では点滴装置の水量は1ml/secで行った。

図11に水冷を行った場合の微粒子生成量のアーク電流依存性を示す(Heガス吹付け量40 l/min)。比較のため, 図4で示した水冷をしていない場合の特性を併記する。同図より, 水冷を行った場合, 微粒子生成量はアーク電流40A以上においても飽和す

ることなく, 直線的に増加している。40Aにおいては約35gを生じ, これは水冷をしていない場合の約2倍である。したがって, アーク電流が高い場合には水冷の効果は非常に高く, 生成量の飛躍的な増大を図ることができる。

図12に水冷を行った場合の生成効率のアーク電流依存性を示す(Heガス吹付け量40 l/min)。比較のため水冷を行っていない場合の特性を併記する。同図より, 効率はアーク電流20Aの時約80%であり, アーク電流が増すにつれて徐々に低下しているものの, アーク電流40Aにおいても50%以上の値を示している。これは, 水冷をしていない場合の倍以上であり, 素材中に蓄積した熱を取り除くことはこの面からも有効である。

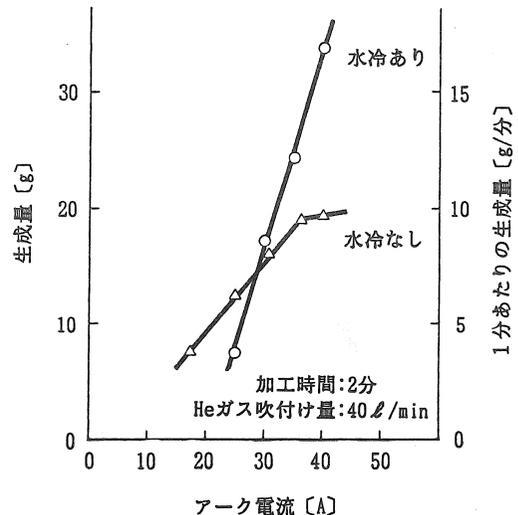


図11 水冷を行った場合の微粒子生成量のアーク電流依存性

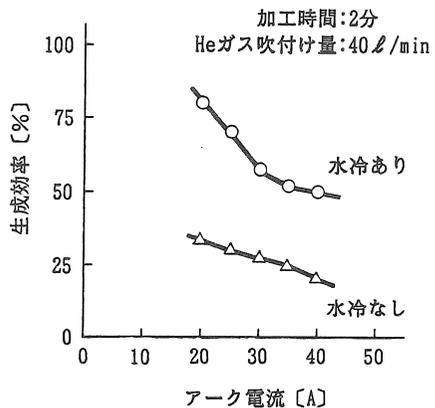


図12 水冷を行った場合の生成効率のアーク電流依存性

7. Heガスによる冷却の効果

前節では板状電極を水冷することにより生成量が飛躍的に増大することを示した。しかしながら、水冷法では生成した微粒子に水が混じるため、その処理に問題があると思われる。本手法ではアーク形成を容易にし、しかも溶融部の過度の酸化を防ぐためにアークにHeガスを吹き付けている。そこで、そのHeガスを水に代わる冷却媒体としても利用することを試み、その冷却効果を調べた。

図13にHeガス冷却装置を備えた実験装置を示す。本実験では、プラズマトーチを金属板の端面の幅の長さ分だけ左右に移動させ、アークによる加熱を局部に集中しないようにしている。さらに、プラズマトーチ-金属板間距離を一定に保つため、溶融分だけ前に移動する。そこで、同図に示すように、冷却用Heガス吹き付けパイプもそのプラズマトーチとともに移動できるようにし、アークスポットから一定の間隔の箇所が冷却できるようにHeガスを吹き付けている。

図14に冷却用Heガス吹き付け量に対する生成量の変化を示す。ただし、アーク電流40A、連続加工時間2分である。同図より、吹き付け量が50ℓ/minで生成量は極大となり、それ以上吹き付け量が増えると生成量は減少する。特に、200ℓ/minではHeガスによる冷却を行っていない場合よりも生成量は減少する。従って、以後の実験では冷却用Heガス吹き付け量は50ℓ/minで行った。

図15にHeガス冷却を行った場合における微粒子生成量のアーク電流依存性を示す。なお、比較のため、水冷を行った場合、冷却のない場合ならびにHeガスの代わりに空気を吹き付けて冷却した場合の特性も併記してある。同図より、Heガス冷却を行った場合の生成量はほぼ直線状に増加し、アーク電流40Aにおいて約36gの微粒子を生成している。これは、水冷を行った場合の生成量よりも若干多く、冷却を行っていない場合に比べると約2倍である。また、空気冷却を行った場合の生成量は40Aにおいて約22gであり、これと比べるとHeガス冷却時の生成量は空気冷却時の約1.6倍である。Heガスの冷却効果が空気よりも高いのは、Heガスの熱伝導率が空気の約5.6倍であり、鉄板表面からの熱放散が増えるためと考えられる。

従って、Heガス冷却は水冷と同程度の冷却効果が

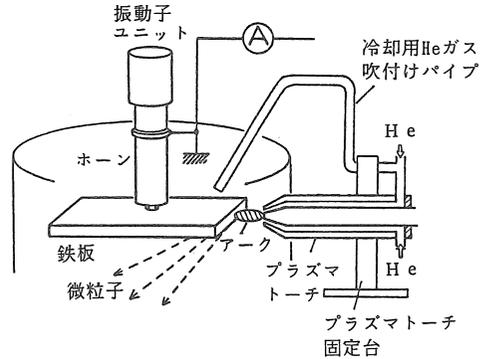


図13 Heガス冷却機能を持つ実験装置

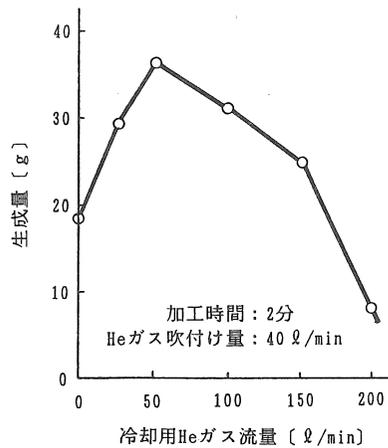


図14 微粒子生成量と冷却用Heガス吹付け量との関係

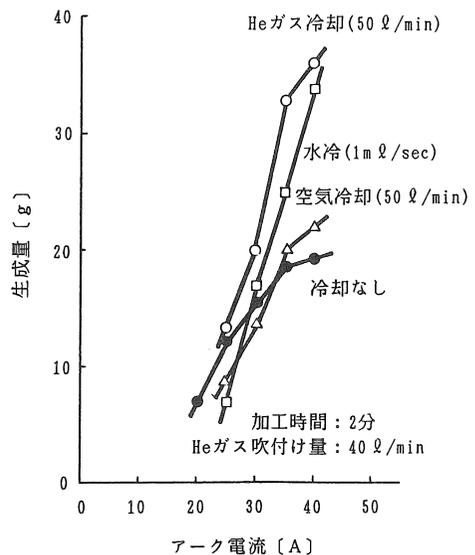


図15 Heガス冷却を行った場合の微粒子生成量のアーク電流依存性

あり, 水冷を行った場合の微粒子の酸化や水の混在による微粒子の回収のプロセスが複雑になるのを避けることができ, 空気冷却よりもはるかに冷却効果が高いことがわかった.

8. まとめ

本論文では, アーク電極の超音波励振による金属微粒子の生成法において, 金属素材の板状化によって, 生成量の増大, 加工時間延長および生成効率の向上が実現できることを鉄を素材として示した. さらに, 水冷による過度の溶融の抑制が効果的であることも示した. それらの結果を以下に要約する.

(1)板状素材を用いることにより, 従来の棒状素材を用いた場合に比べて同じ加工時間において微粒子生成量を2倍程度増大化することができた.

(2)板状素材では, 超音波発振器が過負荷とならず, しかも溶融が過度にならない範囲で厚さを薄くする(ここでは6mm)ことにより, 端面での振動が大きくなり, 陽極スポットにおける加熱も促進されて多量の微粒子を生成できる.

(3)過度の溶融を防ぐためには板状電極の冷却は有効であり, アーク電流が高くなっても生成量の飽和傾向を抑制できる. その結果, 従来より高いアーク電流での加工が可能で, 生成量も電流とともに増大する.

(4)本実験で得られる微粒子の形状は, 表面は滑らかで, ほぼ真球状である. しかし, 粒径分布は30~160 μ mの範囲に広がった. これは, 板状素材を用い

た場合は振幅が板全体にわたって一定ではないためである.

終わりに, 本研究の実施に際して, 有益なご助言を賜りました名古屋大学工学部電気学科鬼頭幸生教授に対し, 心よりお礼申し上げます.

参考文献

- (1) Y. Kito, T. Sakuta, T. Mizuno & T. Morita : "Producing Metal Powders from a High Frequency Vibrating Arc Electrode", Int. J. Powder Metallurgy, 25, No.1, pp.13-19 (1989)
- (2) 岩田, 水野, 鬼頭, 作田: 「超音波励振機能をもつ熱プラズマ炉による金属微粒子の直接生成」電気学会開閉保護装置研資, SPD-88-12 (昭63)
- (3) 後藤, 鬼頭: 「超音波励振された板状アーク電極からの金属微粒子生成法」, 電学論A, Vol. 112-A, No. 8, pp.695-700 (平4)
- (4) Y. Goto & Y. Kito : "High Rate Production of Metallic Powder from Water-Cooled Arc Electrode with Ultrasonic Vibration", 10th Int. Conf. Gas Discharges and Their Applications, Vol. 2, pp.734-737 (1992)
- (5) 赤松: チタニウム・ジルコニウム, 33, No. 4, 245 (昭60)
- (6) 粉末冶金技術協会: 金属粉の生成, 日刊工業新聞社(昭39)

(受理 平成6年3月22日)