

アルミニウム合金急速誘導加熱システムの開発*

～誘導加熱炉によるアルミニウム合金の急速溶解条件の検討～

岩清水 康二**、池 浩之**、黒須 信吾**
五十嵐 吉幾***、田中 宏憲***、渡邊 敏之***

誘導加熱炉によるアルミニウム合金の溶解は、溶湯を攪拌し、溶湯品質を低下させる。このことから、誘導加熱炉によるアルミニウム合金の溶解は、難しいとされてきた。しかし、誘導加熱炉の周波数の違いによる溶解実験において、品質を低下させずに溶解することが可能であった。そこで本研究では、誘導加熱炉によるアルミニウム合金急速溶解の適正条件について検討を行った。その結果、誘導加熱炉によるアルミニウムの高品質溶解は、電力と周波数それぞれの最適値を算出することにより可能であることが明らかになった。

キーワード：アルミニウム合金溶湯、誘導加熱炉

Development of rapid-induction-heating system for aluminum

alloys: Investigation of rapid-melt conditions for melting aluminum alloy in induction furnaces

Koji Iwashimizu, Hiroyuki Ike, Shingo Kurosu,
Yoshiki Igarashi, Hironori Tanaka and Toshiyuki Watanabe

Melted in an induction furnace is stirred during melting, thereby degrading the melt quality. Therefore, melting aluminum alloys in induction furnaces is difficult. We address this problem by studying the conditions required to obtain rapid aluminum alloy melts. In preliminary experiments, we obtain non-degraded aluminum alloy melts from an induction furnace. As a result, the range of optimum values of electric power and frequency for rapid melting of aluminum alloys in an induction furnace.

Key words: Aluminum alloy melt, rapid induction heating

1 諸 言

アルミニウム合金の溶解は、LP ガスや重油を燃料として一度に数百kgから数tの合金を溶解した後、長時間保持されることが多い。特に、アルミニウム合金ダイカストでは、連続操作のためアルミニウム合金の溶解と溶湯保持を連続的に行っている。作業が長時間にわたることから燃料コストが高く、大量の溶湯を保持することは、災害時の危険性も高くなっている。先の東日本大震災においても、地震の揺れにより溶湯が炉外へ飛び出したり、停電により溶解炉へ燃料の供給が止まり大量の溶湯を固着させ設備を破損するなど甚大な被害をもたらした。このことから、著者らは、大量の合金を溶解し長時間保持するのではなく、必要時に必要な量だけを溶解し、ダイカストマシン供給するシステムがあれば上記の様な事故

も回避できると考えた。

一方、鋳鉄、鋳鋼の溶解には、誘導加熱炉が使われている例が多い。この誘導加熱炉による溶解方法は、同心円状に巻かれた銅パイプコイル内側に被加熱材をセット、コイルに電流を流し、被加熱材内に渦電流を発生させる。この発生した渦電流と被加熱材の電気抵抗により被加熱材が発熱、融解が進む。短時間で必要量を溶解できるが溶解中は、溶湯が電流と共に発生する磁界や力（ローレンツ力）の影響を受け、攪拌されることで大気を巻き込む。特に、酸化傾向の強いアルミニウム合金は、溶解中、大気との接触により溶湯内に酸化物を主とする介在物の発生や凝固後の気泡の要因となる水素ガスを吸収し溶湯品質を低下させる。このことから、誘導加熱炉は、アルミニウム合金の溶解には適さないと考えられてきた。

* 平成 26～27 年度 共同研究

** 素形材技術部

*** 北芝電機株式会社

しかし、著者らは、アルミニウム合金の誘導加熱炉による溶解について検討したところ、印加電力や周波数が攪拌に影響を及ぼすことが予期された¹⁾。

そこで、本研究では、アルミニウム合金を高品質かつ急速溶解し、保持炉を必要としない小ロットの溶解法の確立を目的とし、誘導加熱炉における急速かつ高品質溶解の方法について検討した。

2 実験方法

2-1 周波数の検討

誘導加熱炉の電源周波数が溶湯品質へ及ぼす影響を検討するため、周波数を3kHz、8kHz、15kHzの3種の異なる誘導加熱炉を使用し溶解と溶湯評価を行った。この時の印加電力は予備実験の結果を基に20kWで行った。溶解は、表1に示す成分のJISアルミニウム合金ADC12材2.5kg塊を#10黒鉛るつぼに充填し、680℃で溶解した直後、溶湯中のガス量を評価する減圧凝固試験用小るつぼと介在物測定用のKモールド鑄型、溶湯中のガス定量分析のためにランズレー銅鑄型に溶湯を採取した。

表1 実験に用いた合金成分

	mass%					
	Cu	Si	Mg	Fe	Mn	Al
ADC12	2.26	11.36	0.25	0.80	0.18	rem.

減圧凝固試験は、試験専用鉄製小るつぼに溶湯を約85g採取し、真空チャンバ内で5.3kPaの減圧下で凝固させた。凝固後の試験片は、水中秤量法で見掛密度を測定後、試験片中央部を縦方向に切断、切断面を研磨した後、目視観察によりポロシティを観察した。

Kモールド試験片は、ハンマで破断し、 K_{10} で観察し、介在物数を測定した。また、ランズレー試験片は真空溶融抽出パラジウム管透過法(ランズレー法)により水素の定量分析を行った。

周波数3kHz、8kHz、15kHzの誘導加熱炉から採取した試験片を基に溶湯品質を比較した。また、アルミニウム合金溶湯が680℃に至るまでの昇温時間を測定した。

2-2 印加電力が溶湯品質に及ぼす影響の検討

誘導加熱炉の印加電力がアルミニウム合金の溶湯品質、溶解時間に及ぼす影響を検討するため、印加電力を10kW～50kWと変化させ、溶解実験を行った。この時、誘導加熱炉の周波数は、周波数の検討を基に8kHzとし、#10黒鉛るつぼに120g塊のアルミニウム合金を2.5kg充填し、RTから680℃までの昇温時間を測定し、前項の方法と同様に溶湯品質について比較を行った。

3 実験結果

3-1 周波数が溶湯品質に及ぼす影響

表2に、印加電力20kW、周波数3kHz、8kHz、15kHz

の溶湯評価結果を示す。表によると周波数3kHz、15kHzの溶湯による減圧凝固試験片断面は、上部に膨らみが確認でき、試験片断面には、ポロシティが分散発生している。溶湯中のガス量は、周波数3kHzの溶湯で、0.31cc/100g-Al、15kHzの溶湯は0.18cc/100g-Alであった。周波数8kHzの溶湯による減圧凝固試験片は、上面が引け、内部中央に引け状のポロシティが確認できる。この溶湯中のガス量は、0.18cc/100g-Alであり、周波数15kHzの溶湯と同等の結果であった。この結果から周波数3kHzは、ガス量が高いことが分かった。

介在物量は、表より周波数3kHzの溶湯で $K=0.27$ 、8kHzの溶湯で $K=0$ 、15kHzの溶湯で $K=0.18$ であり、8kHzの溶湯は、介在物が確認できないことから本実験の範囲においては最も高品質の溶湯が得られた。また、RT～680℃までの昇温時間を測定したところ、周波数3kHzは18分、8kHzは15分、15kHzは6分であった。この結果から、周波数を高くすると溶解速度は、速くなることが分かった。

表2 周波数の違いによる溶湯評価結果

周波数	3kHz	8kHz	15kHz
減圧凝固試験片断面			
ガス量 (cc/100g-Al)	0.31	0.18	0.18
介在物	0.27	0	0.18
溶解時間	18分	15分	6分

3-2 印加電力、周波数が溶解時間、溶湯品質に与える影響

図1は、誘導加熱炉の印加電力を変更させ、溶解した溶湯の介在物量、ガス量を示す。これより水素ガス量は、印加電力20kWが最も低かった。介在物量を示すK値も印加電力20kWが最も少ない結果となった。

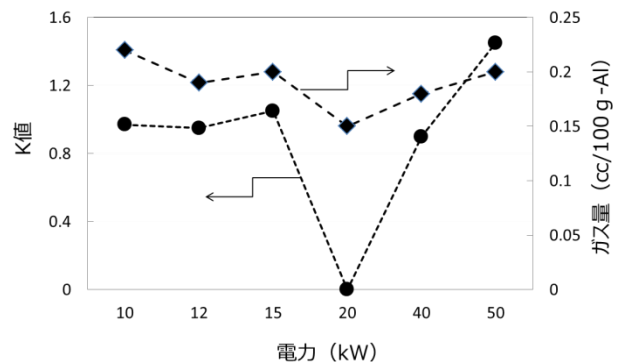


図1 印加電力と介在物、ガス量の関係

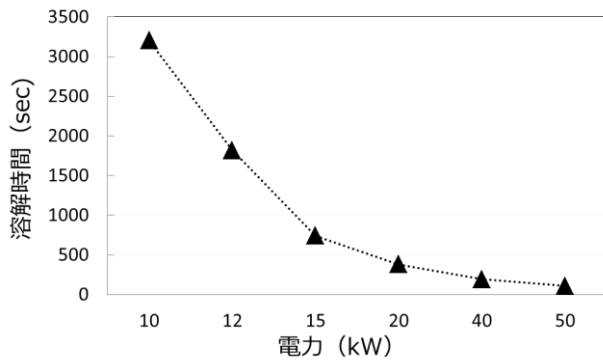


図2 印加電力と溶解速度の関係

図2は、それぞれの印加電力での昇温時間を測定した結果を示す。これによると、印加電力が上昇すると昇温時間が速くなる傾向にあった。そこで、さらに高速で溶解するため、電力50kW、周波数15kHzの条件で溶解を試みたところ、溶解開始とともに合金表面が溶解し飛散した。

4 考 察

4-1 誘導加熱炉の最適周波数について

本実験において、周波数の影響を検討するために印加印加電力を20kW一定とし、周波数を3kHz、8kHz、15kHzと変化させて溶解し、RTから680℃に至るまでの昇温時間を測定した結果、15kHzが最も速かった。このことは、溶解炉内のコイルからアルミニウム合金へ電流を浸透させる表皮効果の影響が考えられる。誘導加熱炉は、同心円状のコイルに電流を流すとアルミニウム合金へ浸透電流が発生する。この電流浸透深さ δ は、表皮効果とされ、次式(1)で表される。

$$\delta \text{ (cm)} = 5.03 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 ρ ：被加熱材の抵抗率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)、 μ ：被加熱材の比透磁率、 f ：周波数 (Hz)

(1)式によると誘導加熱炉の周波数 f が高いと電流のアルミニウム合金への浸透深さが浅くなる。これによりアルミニウム合金表面部の電流密度も高くなり、アルミニウム合金表面部が急速加熱され溶解時間が短縮されたと考えられる。また、表皮効果の影響を受けやすくするため、誘導加熱炉内のコイルとアルミニウム合金の高さ方向の中心を揃え、コイルとアルミニウム合金のギャップを狭くし、材料を120g程度まで小さくすることが適正と考えられる。また、この時の溶湯中のガス量は、周波数8kHz、15kHzに比較し、3kHzは、高い値を示し、介在物量は、8kHzが最も良い結果となっている。このことから、合金を高品質に溶解する最適周波数は、8kHzと考えられる。

4-2 誘導加熱炉の最適印加電力について

急速、高品質溶解のために周波数を8kHzと一定にし、印加電力を変化させて実験を行ったところ、印加電力を

高くすると溶解速度が速くなった。これは、印加電力をあげることでアルミニウム合金に発生する印加電力密度 (W/cm^2)も高くなるため溶解速度が速くなったと考えられる。しかし、印加電力を高くすると昇温時間は短縮されたが溶湯品質は低下した。これは、溶湯表面に生成した酸化被膜を溶湯中に巻き込んだためと考えられる。この酸化被膜の巻き込みは、溶湯の攪拌が影響していることが考えられる。誘導溶解炉による溶解は、アルミニウム合金内部にローレンツ力がかかる。さらに、溶湯はこのローレンツ力の影響を受け、溶湯が攪拌する。この溶湯攪拌力 F を次式(2)に表す。

$$F = 316P / (\pi * d * lc \sqrt{\rho * f}) \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 F ：溶湯攪拌力 (kg/cm^2)、 P ：印加電力 (kW)、

π ：円周率、 d ：溶湯内径 (cm)、 lc ：コイル巻き高さ (cm)、 ρ ：溶湯の固有抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 f ：周波数 (Hz)

この式より、周波数を一定にし、印加電力を高くすると溶湯攪拌力が大きくなり、溶湯の攪拌が活発となり溶湯は、表面に生成した酸化物を巻き込み品質を低下する。

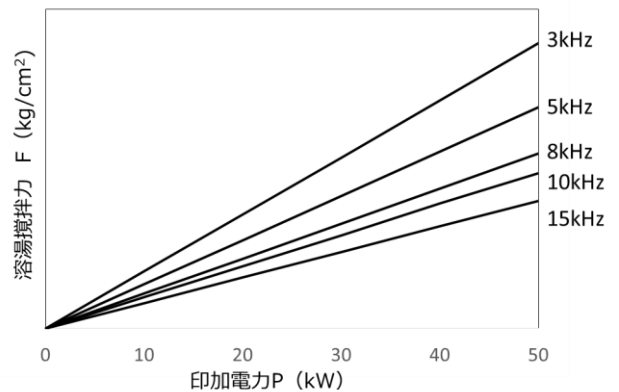


図3 アルミニウム合金の溶湯攪拌力と電力の関係

図3に、(2)式による本実験で使用した誘導加熱炉を基にアルミニウム合金の溶湯攪拌力と印加電力の関係を示す。これによると、溶湯攪拌力の強さは、印加電力のみの影響ではなく、周波数の影響も受けることが分かる。このことから、誘導加熱炉の周波数、印加電力は、溶湯攪拌力を基に検討することが必要であると考えられた。そこで、溶湯攪拌力に着目し、急速溶解かつ溶湯表面の酸化被膜を巻き込まない最適な印加電力、周波数を検討した。本実験の加熱条件を(2)式に代入し、(3)式の定数 a を求め、溶湯が飛散せずに安全に急速溶解できる上限印加電力と周波数の関係式及び溶湯表面の酸化被膜を巻き込まない上限の印加電力と周波数の関係式を求めた。

$$P = a \sqrt{f} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 P ：印加電力 a ：溶湯攪拌力 F による定数 f ：周波数 (Hz)

これを図4に示す。また、図中にK値の結果も併せて示す。

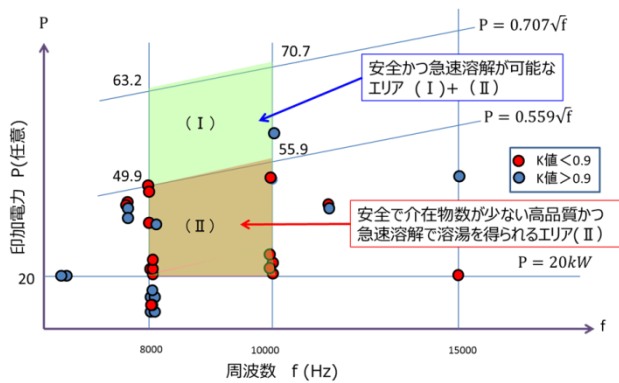


図4 アルミニウム合金の印加電力と周波数の最適範囲

これにより、安全に急速溶解できる印加電力及び周波数の範囲 (I+II)、さらに、高品質の溶湯が得られる範囲 (II)を求めることができた。

5 結 言

本研究において、アルミニウム合金の誘導加熱炉による急速かつ高品質溶解する条件を検討した結果、以下の結論が得られた。

- ・周波数 8kHz の誘導加熱炉で溶解した溶湯が最も高品質であった。
- ・印加電力を上昇させると溶湯中の介在物が増加したが、ガス量は大きく増加しない。
- ・アルミニウム合金を安全に急速かつ高品質に溶解する印加電力P及び周波数fの範囲を次式のとおり求めることができた。

$$20 \leq P \leq 0.559\sqrt{f} \quad (8000 \leq f \leq 10000)$$

以上を条件を考慮すると、誘導加熱炉によるアルミニウムの高品質溶解が可能である。

文 献

- 1) 手嶋大介、亀山勝、岩清水康二、池浩之、高川貫仁：(公社)日本鑄造工学会第 160 回全国講演大会講演概要集, P57 (2012)