

アルミニウム部品の急速加熱による高品質・高効率 熱処理技術の開発（第3報）

八代 浩二・鈴木 大介・清水 誠司・平川 寛之*1・中山 栄浩*2・清弘 智昭*2
杉田 良雄*3・齋藤 基樹*4・久保田勝彦*5

Development of High Quality and High Efficiency Heat Treatment for Aluminum Alloy Components by Rapid Heating (3rd Report)

Koji YATSUSHIRO, Daisuke SUZUKI, Seiji SHIMIZU, Hiroyuki HIRAKAWA*1, Yoshihiro NAKAYAMA*2
Tomoaki KIYOHIRO*2, Yoshio SUGITA*3, Motoki SAITO*4 and Katsuhiko KUBOTA*5

要 約

自動車産業においては、原油価格の高騰、排出ガス規制、多様化する顧客ニーズ等種々の課題がある。これらの課題解決のため、本研究では従来行われていなかった急速短時間加熱によるアルミニウム合金の高品質・高効率な熱処理技術の開発に取り組み、自動車部品素材への高周波誘導加熱による熱処理、および熱処理装置を試作開発した。開発した熱処理装置は、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内の試料温度制御を実現することができた。また、この装置を用いて実際にアルミニウム合金の溶体化処理を行い、溶体化後電気炉にて時効処理を行った試験片に対し、圧縮試験を実施した結果、溶体化温度 530°C 、保持時間 60 秒以上で圧縮強さと硬さは最大値に達した。

1. 緒 言

本研究は前報^{1), 2)}に引き続き、従来行われていなかった急速短時間加熱によるアルミニウム合金の高品質で高効率な熱処理技術の開発を行い、課題解決に取り組むものである。開発終了後は、アルミニウム合金の高周波熱処理装置の製品化と受託加工の実用化を目指す。

研究および開発は、各共同研究機関と内容を分担して実施したが、本報告では下記 2 項目について述べる。

- ① アルミニウムへの熱処理とその評価
- ② アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発

前者は昨年度までに、実際に使用されているエンジン部品について、誘導加熱装置を用い熱処理実験を実施し、適切な溶体化条件（温度・保持時間）を設定することで目標とする硬さが得られることが確認されている。

本年度の報告では、同部品の素材より円板試験片を作成し、圧縮強度の測定、硬さ測定ならびに Si 粒子の数と大きさを詳細に測定し、熱処理の効果を検証した結果について報告する。後者は、これまでの研究成果をふまえ、製品化を見据えたプロトタイプ型の熱処理装置を試作開発し、試料の加熱実験を行った結果につ

いて報告する。

2. 実験方法

2-1 アルミニウムへの熱処理とその評価

(1) 試験片と温度校正

試験片素材は、エンジン部品に使用されている高シリコンの特殊材である。素材の組成を表 1 に示す。また、試験片形状を図 1 に示す。試験片は直径 22mm で厚さが 10mm の円板形状である。

放射温度計にて温度計測を行うために、試験片に熱電対を挿入し、放射温度計の計測値と一致するように表面状態および放射率 ε をそれぞれ変化させ、校正を行った。表 2 にその結果を示す。

黒体スプレー（株）堀場製作所製：推奨放射率 $\varepsilon=0.94$ ）を塗布しない No.1 の試験片の場合、熱電対による計測値との差が非常に大きく、約 30°C であった。それに対し、黒体スプレーを塗布した No.2~5 試験片では、放射率 ε を高くするほど温度差は少なくなり、 $\varepsilon=0.84\sim 0.88$ で $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 前後となった。

表 1 試験材の化学成分

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
含有量 (wt%)	10.8	0.3	4.4	1.2	0.6	0.19	0.02	82.49

*1 山梨県工業技術センター

*2 山梨大学

*3 ワイエス電子工業（株）

*4 浅川熱処理（株）

*5 （有）丸真処理工業

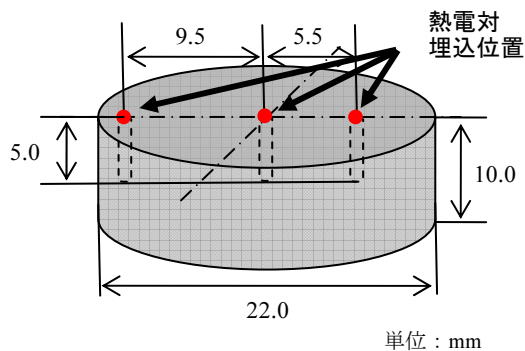


図1 試験片形状

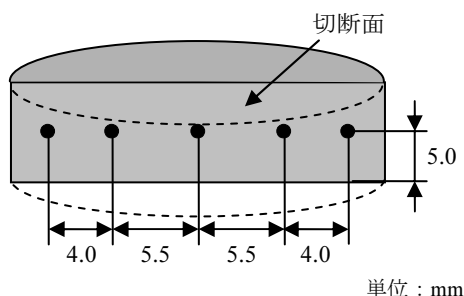


図2 硬さ測定位置

そのなかでも、放射率を 0.88 に設定した場合、 $-1 \sim +2^{\circ}\text{C}$ と良好な指示値を示したことから、以降の実験では、放射率を 0.88 に固定して実験を行った。

(2) 熱処理実験

円板試験片に対し、開発した装置を用いて溶体化処理を行い、溶体化温度保持時間をそれぞれ 0 秒、10 秒、60 秒、300 秒、600 秒と変化させ、後述の圧縮降伏応力、硬さ、Si 粒子の状態への影響を検証した。溶体化温度は 530°C とし、溶体化処理後の冷却は、氷水中に試験片を投入して行った。また、溶体化処理後、すべての試験片に対し、一般的な電気炉を使用し、大気雰囲気中で時効処理を行った。時効処理条件は $180^{\circ}\text{C}-10.8\text{ks}$ (180min) である。

(3) 圧縮試験

圧縮試験は、万能材料試験機 (オリエンテック UCT-30T/株式会社エー・アンド・デイ製) を用いて行った。熱処理後の試験片に対し、クロスヘッドの指示値で 2mm 移動するまで圧縮を行い、この時の圧縮降伏応力について評価を行った。

(4) 硬さ試験

円板試験片について、ビッカース硬さ測定を行った。硬さ測定は、前述の圧縮試験片と同一形状のものを使用し、図 2 に示すように切断面の中央部 5 点について計測し、5 点の平均値で評価を行った。

(5) Si 粒子の測定

溶体化一時効処理後、各試験片を切断し、断面研磨を行った後、画像解析により Si 粒子の数と面積を算出した。解析に用いたソフトウェアは Scion IMAGE である。

2-2 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発

これまでに得られている研究成果を基に、製品化を見据えたプロトタイプ型の熱処理装置を試作開発した。試作装置の概要図を図 3、外観写真を図 4 に各々示す。

加熱のための電源周波数は、2MHz または 400kHz に切り替え可能で、最大出力は、前者が 10kW、後者が 20kW である。

試料温度、電源出力、ワーク移動などの各パラメータはタッチパネルで入力が可能で、履歴が記録できるようになっている (図 5)。図 6 は、円板形状試験片を加熱コイル内にセットした状況を示す。試験片の保持は、アルミナ製の保持棒で行う。この保持棒は設定時間経過後、下方に開き試験片を冷却のため水中に投入する。

図 7 は、試験片の搬送機構 (円板形状) を示す。ワーク形状は丸棒と円板形状を想定し、搬送機構を設計した。搬送機構はピックアンドブレースであり、試験片は積み重ねて保持している。

表 2 放射率の校正結果

試験片 No.	溶体化処理条件 (sec)	黒体スプレーの有無	放射率 ϵ	熱電対との温度差 ($^{\circ}\text{C}$)
1	530×600	無	0.30	+28~+37
2		有	0.64	-23~-21
3			0.84	-3~-2
4			0.86	-3~0
5			0.88	-1~+2

○プロトタイプ型アルミ熱処理装置仕様

- 1) 熱処理用 IH 加熱部
 - 加熱周波数 2MHz または 400kHz
 - 最大出力 10~20kW
 - 変換方式 FET 式 P-P 発振器
 - 直流電流 (可変定電圧) トランスレスサイリスタ制御
- 2) ワーク送り装置部
 - 装着可能ワーク $\phi 21$ -L10mm, $\phi 10$ -L150mm,
 $\phi 4$ -L85mm, $\phi 9$ -L125mm
 - ワーク移動速度 1~100mm/秒
 - ワーク供給 自動
- 3) 冷却部
 - 冷却水温 5~20°C (一定温度に制御)
 - 水槽容量 50 リットル
 - 冷却能力 2kW
- 4) 温度計測部
 - 測定温度範囲 200~1000°C
 - 温度分解能 0.1%
 - スポット温度計測 レーザポイント指示
- 5) データ記録項目と記録範囲
 - 直流入力電流 0~300V
 - 直流入力電圧 0~50A
 - 出力設定 40~265V
 - 加熱遅延時間設定 0~10.0 秒

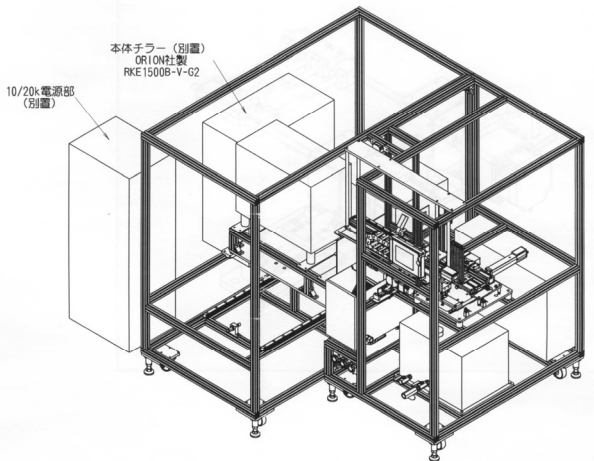


図3 試作装置の概要図

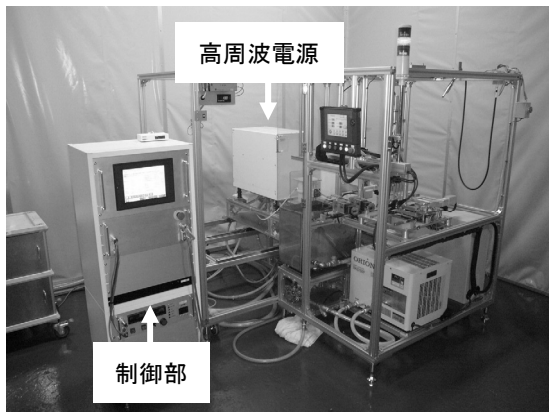


図4 試作装置の外観写真

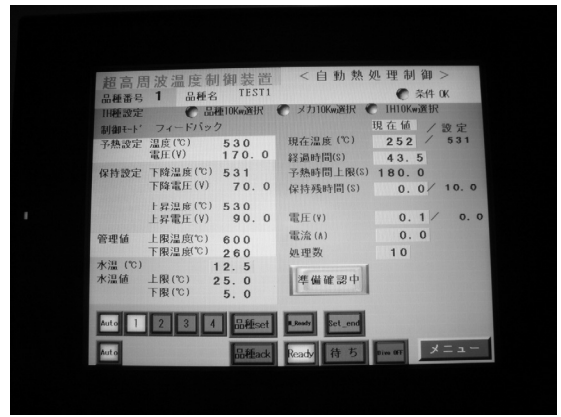


図5 本体操作画面

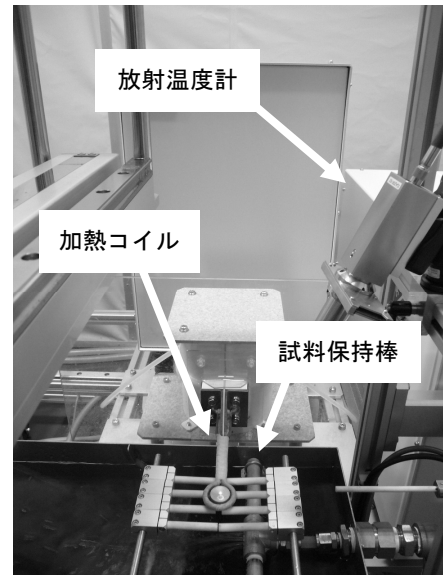


図6 加熱コイル内にセットされた試験片

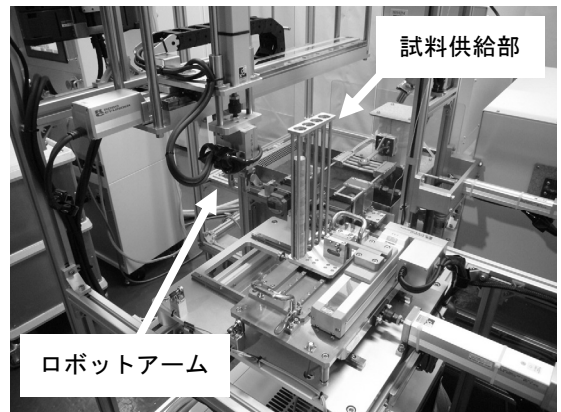


図7 試験片の搬送機構 (円形試験片)

3. 結果および考察

3-1 アルミニウムへの熱処理

(1) 圧縮試験

図 8 は、530℃で保持時間を変えて溶体化処理を行った後、180℃-10.8ks の時効処理を行った試験片の圧縮降伏応力の測定結果を示す。

溶体化温度保持時間 0 秒の場合、降伏応力は約 360MPa であったが、溶体化温度保持時間の増加とともに降伏応力は増加していく傾向が認められた。保持時間 60 秒では電気炉による溶体化処理をした試験片と同程度の約 480MPa を示し、その後は 400MPa 後半で推移した。

溶体化処理では、アルミニウム合金中の化合物を基材中に固溶させる必要があるため、溶体化温度に到達してからある程度の温度保持時間が必要とされている。この実験結果から、開発装置による溶体化処理では、溶体化保持時間に必要な時間は約 60 秒であり、約 60 秒で化合物の固溶が終了したものと推測される。

(2) 硬さ試験

図 9 は、溶体化温度保持時間とビッカース硬さとの関係を示す。

ビッカース硬さ測定の結果は、保持時間 0 秒では約 125HV であったが、保持時間が 60 秒になると、この材料に通常の溶体化時効処理を施した場合の硬さ要求値である 150HV を上回るようになり、圧縮試験結果と同様な傾向を示した。

(3) Si 粒子の測定結果

図 10 は、各溶体化温度保持時間における Si 粒子数と面積の関係を示したものである。なお、電気炉にて溶体化を実施した試験片については、画像解析ソフトウェアに取り込むことが出来なかったため、ここでは示していない。

各溶体化処理条件とともに、Si 粒子面積は $2.0 \sim 3.9 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ が最多であった。この面積における Si 粒子数に着目すると、溶体化温度保持時間の増大とともに、粒子数は減少する傾向を示した。保持時間が 0 秒から 10 秒までの変化量は今回実験を行った溶体化処理条件の中でも大きいことが示された。一方で、溶体化温度保持時間が 300 秒および 600 秒と長くなるにつれ、大きな変化は認められなくなることが示された。また、 $6.0 \sim 7.9 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ における Si 粒子数に注目すると、300~600 秒においては 0~60 秒までの条件よりも増加する傾向を示した。これは、溶体化温度保持時間の増大とともに、Si 粒子が成長しはじめているからであると考えられる。

これまでの圧縮、硬さ、Si 粒子の測定結果から、開

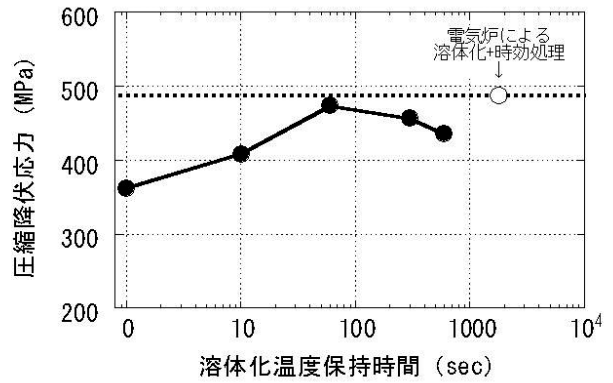


図 8 溶体化温度保持時間と圧縮降伏応力との関係

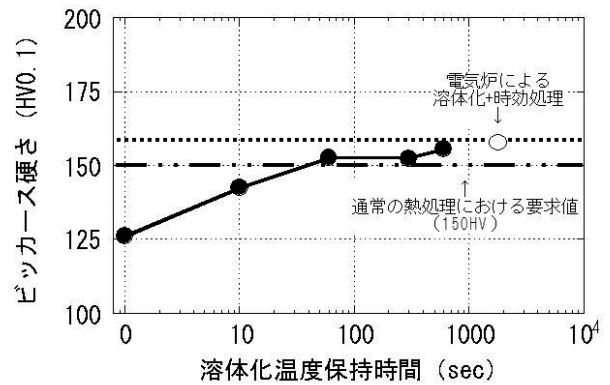


図 9 溶体化温度保持時間とビッカース硬さとの関係

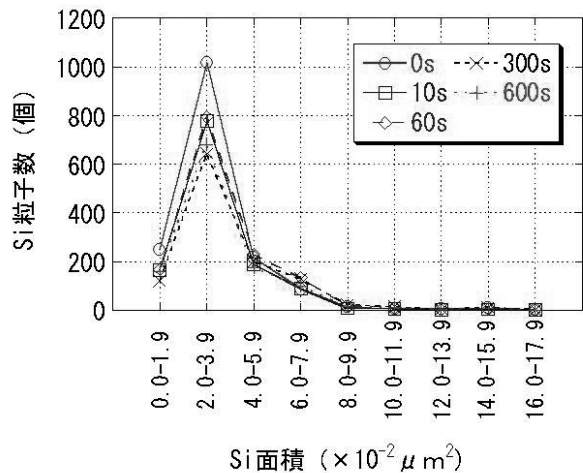


図 10 試験片断面に観察された Si 粒子面積と粒子数

初装置による溶体化処理では、溶体化温度保持時間がある程度設定する必要があり、60 秒以上設定しても強度、硬さなどに大きな変化がないことから、60 秒程度の保持時間が良好であると考えられる。

3-2 試作開発装置の加熱実験

開発装置を用いて、温度制御を行いながら試料の加熱実験可能かどうか検証を実施した。

試料形状は円板で、図 1 で示した温度校正を行った試験片と同一形状である。加熱前には、熱電対を挿入した試験片を用意し、放射温度計と熱電対の指示値が

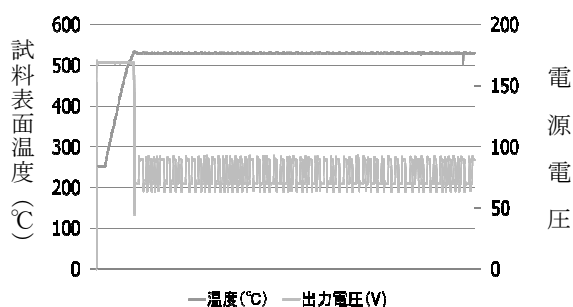


図 11 電源電圧と試料温度の経時変化

一致するように放射率の設定を行っている。その後、試料の加熱実験を行った。図 11 は、設定温度 530°C で加熱を行ったときの電源電圧値と試料温度の経時変化を示したものである。

試料が設定温度に到達するまでは、電源電圧は 170V で昇温を行う。設定温度に到達後、放射温度計での試料温度計測結果をフィードバックし、約 70V と 90V の間で出力を自動的に切り替える。この制御方法で、試料表面温度を 528°C から 531°C の間で温度制御をすることが可能となった。

4. 結 言

本実験において得られた結果は下記のとおりである。

- 1) 溶体化熱処理において、溶体化温度を 530°C と一定にし、溶体化温度保持時間が圧縮降伏応力におよぼす影響を検証した結果、溶体化温度保持時間が 60 秒以上で、400MPa 後半で推移することが確認された。
- 2) 溶体化時効処理後のビッカース硬さを測定したところ、圧縮降伏応力の傾向と同様に、保持時間 60 秒以上で、通常の溶体化時効処理を施した場合の硬さ要求値である 150HV を上回る結果を示した。
- 3) Si 粒子面積の分布を測定したところ、 $2\sim 3.9 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ が最多であった。この面積の Si 粒子数は、溶体化温度保持時間の増加とともに減少したが、300 秒以上では大きな変化は認められなくなった。
- 4) 開発装置が完成し、試料表面温度が設定値近傍で $\pm 3^\circ\text{C}$ の幅で制御可能となった。

参考文献

- 1) 八代他：山梨県工業技術センター研究報告，No.21，p.60-63 (2007)
- 2) 八代他：山梨県工業技術センター研究報告，No.22，p.34-39 (2008)