

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「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」

研究開発成果等報告書

平成21年 3月

委託者 関東経済産業局
委託先 財団法人やまなし産業支援機構

目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	3
1-3 成果概要	7
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	8
第2章 本論	
1 アルミニウムへの熱処理技術の開発	
1-1 アルミニウムへの熱処理とその評価	9
1-2 A6061合金の強度向上	14
2 高出力電源の開発	
2-1 電源の高出力化	35
2-2 周波数の検討	40
3 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発	
3-1 プロトタイプ型アルミ熱処理装置	45
最終章 全体総括	49

第1章 研究開発の概要

1—1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究背景】

自動車産業は、世界第2位の生産量である日本の重要産業で、国内製造業の根幹として、ここ数年における景気回復の原動力となっている。

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の背景から、上記に示されたような技術的課題がある。それに対し、本研究ではこれまでにないアルミニウムの熱処理技術開発により課題解決に取り組む。新技術開発による高品質、高効率なアルミニウム部材や熱処理装置の川下製造業者等への供給は、自動車産業はもとより、我が国の工業の発展や競争力強化に極めて有効な技術となり得る。

アルミニウムは代表的な軽金属であり、軽量化による低燃費実現や運動性能の向上を目的として、また、リサイクル性が良好という特徴を有していることから自動車等の輸送機械向け部品に多く用いられている。平成16年度の統計では輸送機械用アルミニウム製部品の生産は158万トンであり、国内の全アルミニウム製品生産量の36%を占めている。

アルミニウムは鋳造や鍛造等による成形加工後、熱処理を行うことが多いが、現在、一般的なアルミニウムの加熱手法は、エネルギー効率が低く加熱時間を要する間接加熱がほとんどである。このため、アルミニウムの熱処理現場では、長い納期で膨大なエネルギーを消費しながら生産を行っているのが現状である。また、加熱時間が長いため金属結晶が成長して素材強度が発揮できない等の問題点がある。

これらの問題解決には、アルミニウム素材を急速加熱することが極めて有効である。そして、急速加熱が可能になると、以下の項目が実現される。

○部品の高機能化

- ・高強度：結晶粒の微細化による素材の機械的強度向上
- ・低変形：急速部分加熱による部品の熱変形低減

○生産効率の向上

- ・部分処理：部品全体でなく、必要な部位を選択的に処理することで短納期生産可。
- ・短納期：材料の直接加熱による処理時間短縮。
- ・インライン化：シンプルな加熱システムによる前後加工工程とのインライン化実現。

○省エネ

- ・低エネルギー：急速、短時間、高エネルギー効率な加熱による省エネルギー化。

【研究の目的及び目標】

自動車産業においては原油価格高騰、厳しい排出ガス規制、顧客ニーズの多様化等の問題があり、この解決手段として軽量化、短納期化、低コスト化などの技術的課題がある。それに対し、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・高効率熱処理技術を下記の項目により開発し、課題解決に取り組む。開発の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。平成20年度は、平成19年度までの成果を織り込み、事業化を視野に入れた熱処理装置を設計・製作し性能を検証する。また、機械的特性の検証、電源の高出力化についても継続して取り組む。

- 1 アルミニウムへの熱処理技術の開発
 - 1-1 アルミニウムへの熱処理とその評価
 - 1-2 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発
- 2 誘導加熱装置の高度化技術開発
 - 2-1 高出力電源の開発

【研究実施内容】

- 1 アルミニウムへの熱処理技術の開発
 - 1-1 アルミニウムへの熱処理とその評価
(浅川熱処理株式会社、有限会社丸真熱処理、山梨大学(中山准教授)、山梨県工業技術センター)

これまでにアルミニウムを急速短時間加熱させる手法がなかったため、急速加熱による熱処理技術の開発が行われた報告は皆無である。また、急速加熱がアルミニウムの機械的特性に及ぼす影響も不明である。平成19年度までに、熱処理の中でも溶体化処理を対象に絞り込んで実験を行い、その結果について硬さ等から評価した。本年度はこれまでの補完として、引張、疲労などの機械的特性を検証する。評価は主に、山梨大学及び山梨県工業技術センターが分担して実施する。

- 1-2 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発
(浅川熱処理株式会社、有限会社丸真熱処理、ワイエス電子工業株式会社、山梨県工業技術センター)

他項目の研究成果を反映させた加熱-冷却機能を備えた装置試作をワイエス電子工業が行う。試作装置を用いて各熱処理企業が熱処理実験を行い、検証を山梨県工業技術センターが行う。平成20年度は上期に装置の仕様を決定し、下期に検証を行う。

- 2 誘導加熱装置の高度化技術開発
 - 2-1 高出力電源の開発

(ワイエス電子工業株式会社、山梨大学(清弘教授))

加工工程と連携してインラインで熱処理を行うためには、誘導加熱電源の出力を向上させて昇温速度を高める必要がある。また、電源出力の向上やコイルを多数配列することで、被処理部材の大型化も実現できる。

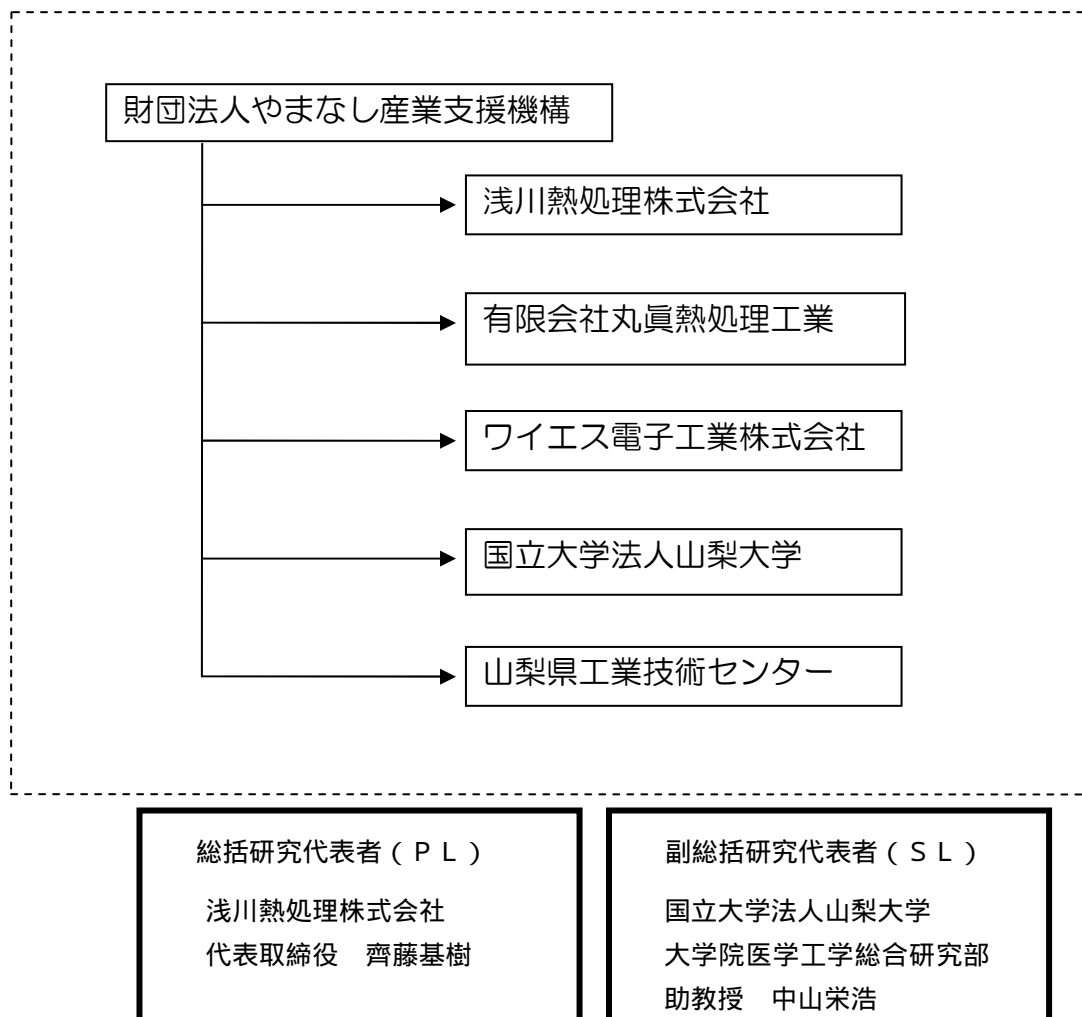
誘導加熱電源の高出力化に伴い、各素子への均等な電流配分が極めて困難になる。また、作動中に発生する熱に応じて電流配分が変化していくことも重要な問題になる。したがって、基板上における素子配置の最適化を実験的に検討し安定した発振回路を開発する。平成18年度に回路設計に着手しているが、平成20年度上期までに開発と検証を完了し、他装置への供給を行う。

- 3 プロジェクトの管理・運営(財団法人やまなし産業支援機構)
総合的に研究開発の進捗管理、経理、委員会開催(年12回程度)等を行う。

1-2 研究体制

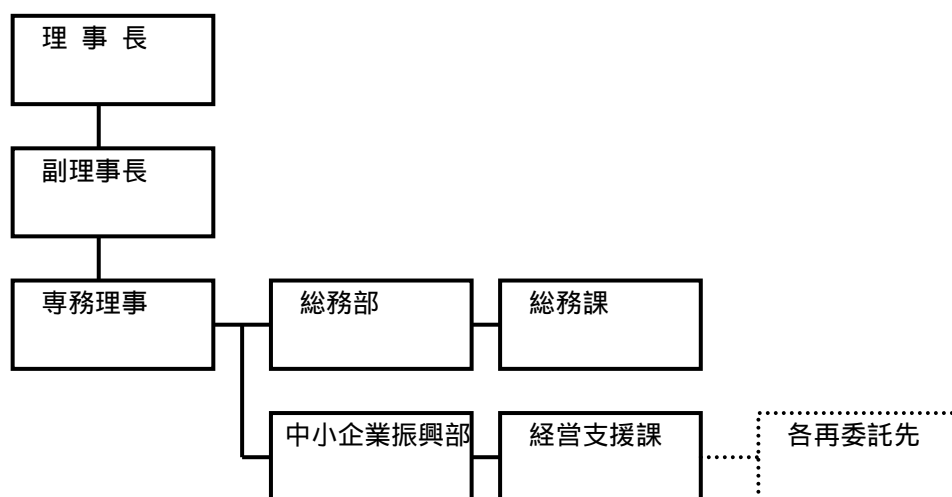
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織 (全体)



(2) 管理体制

①事業管理者 [財団法人やまなし産業支援機構]

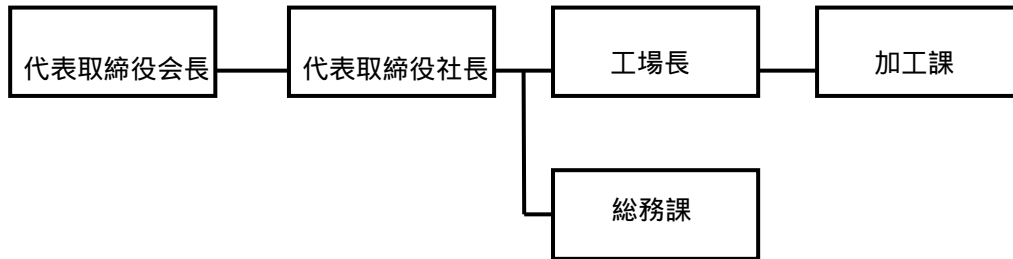


②（再委託先）

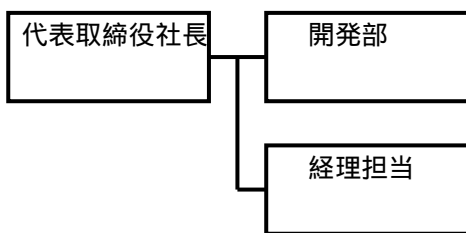
浅川熱処理株式会社



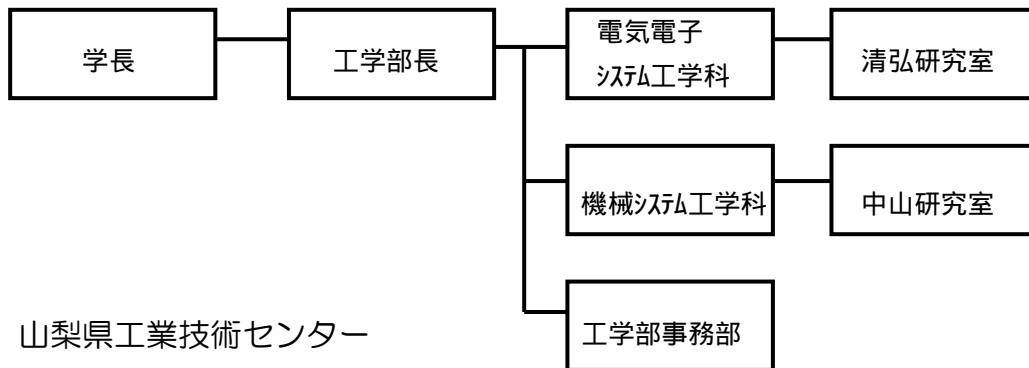
有限会社丸眞熱処理工業



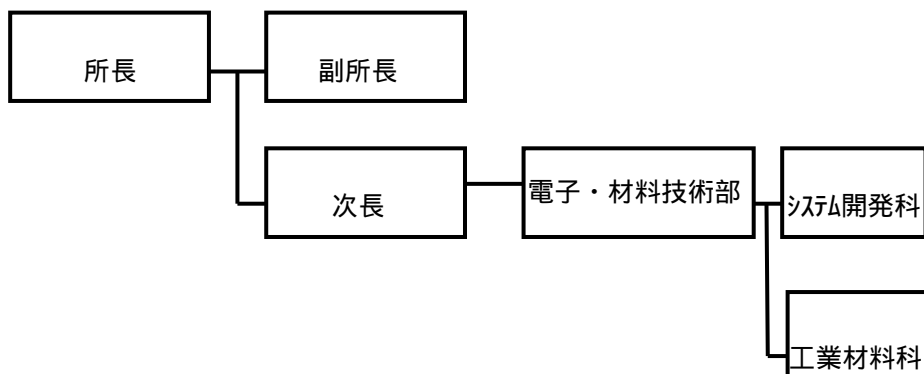
ワイエス電子工業株式会社



国立大学法人山梨大学



山梨県工業技術センター



(3) 研究者氏名、協力者

①事業管理者

財団法人やまなし産業支援機構

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
新藤 満	専務理事	3
窪田 文明	中小企業振興部長	3
木之瀬久司	中小企業振興部経営支援課長	3
野本 大貴	中小企業振興部経営支援課主査	3

②再委託先

浅川熱処理株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
齊藤 基樹	代表取締役社長	1 2 総括
竹田 文彦	生産技術課長	1－1 1－2
熊木 宏	品質保証課担当	1－1 1－2
桜井 博史	品質保証課担当	1－1 1－2

有限会社丸真熱処理工業

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
久保田勝彦	代表取締役社長	1－1 1－2
宮下 則夫	工場長	1－1 1－2
若尾 博明	営業部長	1－1 1－2
内田 勇	品質管理課	1－1 1－2
中楯陽一郎	検査係	1－1 1－2

ワイエス電子工業株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
杉田 良雄	代表取締役社長	2－1
関谷 英治	開発部	2－1
中込 章公	開発部	2－1

国立大学法人 山梨大学

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
清弘 智昭	大学院医学工学総合研究部 工学部 電気電子システム工学科 教授	2－1
中山 栄浩	大学院医学工学総合研究部 工学部 機械システム工学科 准教授	1－1

山梨県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
清水 誠司	電子・材料技術部長	1－1 1－2 2－1
平川 寛之	システム開発科 研究員	2－1
八代 浩二	工業材料科 研究員	1－1 1－2
鈴木 大介	工業材料科 研究員	1－1 1－2

③経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理者）

財団法人やまなし産業支援機構

（経理担当者） 総務部総務課主査 平岡 浩

（業務管理者） 専務理事 新藤 満

（再委託先）

浅川熱処理株式会社

（経理担当者） 総務部 土肥 きみ子

（業務管理者） 代表取締役社長 齊藤 基樹
取締役部長 持田 康

有限会社丸真熱処理工業

（経理担当者） 総務課 清水 れい子

（業務管理者） 代表取締役社長 久保田 勝彦

ワイエス電子工業株式会社

（経理担当者） 経理担当 相沢 和子

（業務管理者） 代表取締役社長 杉田 良雄
取締役 杉田 秀子

国立大学法人山梨大学

（経理担当者） 工学部事務部会計GL 武居 進

（業務管理者） 工学部長 中川 恭彦

山梨県工業技術センター

（経理担当者） 総務課主査 渡邊 宏

（業務管理者） 副所長 乙黒 親男

1—3 成果概要

本年度に得られた成果概要を研究開発計画の項目毎に以下に示す。

1 アルミニウムへの熱処理技術の開発

1—1 アルミニウムへの熱処理とその評価

①エンジン部品への熱処理

昨年度、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た熱処理実験を実施したところ、適切な温度条件を設定することで目標とする硬さが得られた。本年度は、エンジン部品に使用されている素材を用い、円板試験片を作成して圧縮強度の測定、硬さ測定ならびに析出している 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。その結果は下記のとおりである。

1) 溶体化熱処理において、加熱温度を一定とし、圧縮強度におよぼす加熱時間の影響を調査した結果、保持時間60秒以上で、ほぼ一定の値を示した。

2) 溶体化処理後のビッカース硬さを測定したところ、圧縮強度の傾向と同様に、保持時間60秒以上で、実部品の硬さ値である150HVを示した。

3) Si 粒子径の分布を測定したところ、2～3.9 μm の領域が最多であった。

この直径域の Si 粒子数は、溶体化処理時間の増加とともに減少したが、300秒程度になると大きな変化は認められなくなった。

②A6061合金の強度向上

工業的に多用されている A6061 合金について、溶体化熱処理の処理条件と機械的強度（耐力および疲労）の関係を検討した。その結果は、下記のとおりである。

1) 溶体化温度の影響を検証するために、溶体化処理における保持時間を5分（昇温時間36秒、時効処理（180℃—8時間））と一定にし、処理後に引張試験を行った。

強度を0.2%耐力で評価したところ、高周波では350MPa となり、従来の電気炉による処理の強度（263MPa）と比較して、33%の向上が認められた。

2) 上記の結果を基に、熱処理のコストダウンを目的に、溶体化処理における保持時間の短縮を試みた。

溶体化処理温度を560℃に上昇させたところ、同等な強度を得た保持時間は3分であり、40%短縮された。

3) 単軸の疲労強度を検証するため、上記1)の条件で疲労試験を行った。

S—N 線図において、106回で評価すると、受入材（購入時）は185MPa、電気炉（従来）は165MPa、誘導加熱（開発）は205MPa であった。これにより、24%（従来比）、11%（購入品比）の疲労強度が向上された。

1—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た。

開発装置が完成し、試料温度が設定値近傍で3℃の幅で制御可能なことが判明した。今後は、補完研究として開発装置を用いて熱処理実験を実施し、量産の可能性を検証する。

2 高出力電源の開発

2-1 電源の高出力化

電源の高出力化にあたり、周波数の検討を行った。同一のコイルおよび試料を用い、2MHz と400kHz の2種類の周波数について、2段階の出力で昇温曲線を比較した。

同一電圧で比較すると400kHz のほうが早い昇温速度を示した。また、電圧を調整し、同一出力（5.7kW）で昇温レートを比較したところ、ほぼ同等であった。条件により2MHz の優位性はないことが示されたため、20kW 化の周波数は400kHz で行い、項目1-2の試作装置に搭載することとした。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

連絡先・連絡担当者	住所
浅川熱処理株式会社 代表取締役 齊藤基樹	〒409-3853 山梨県中巨摩郡昭和町築地新居1584-2 TEL055-275-5231
有限会社丸眞熱処理工業 代表取締役 久保田勝彦	〒400-0116 山梨県甲斐市玉川1578 TEL055-276-4953
ワイエス電子工業株式会社 代表取締役 杉田良雄	〒400-0043 山梨県甲府市国母5丁目19-18 TEL055-237-0600
国立大学法人山梨大学 大学院医学工学総合研究部 准教授 中山栄浩	〒400-8510 山梨県甲府市武田4-4-37 TEL055-220-8424
山梨県工業技術センター 電子・材料技術部工業材料科 研究員 八代浩二	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2094 TEL055-243-6111
財団法人やまなし産業支援機構 中小企業振興部経営支援課 主査 野本大貴	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2192-8 TEL055-243-1888

第2章 本論

1 アルミニウムへの熱処理技術の開発

1-1 アルミニウムへの熱処理とその評価

1-1-1 はじめに

昨年度、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た熱処理実験を実施したところ、適切な温度条件を設定することで目標とする硬さが得られた。

本年度は、エンジン部品に使用されている素材を用い、円板試験片を作成して圧縮強度の測定、硬さ測定ならびに析出している 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。

1-1-2 実験方法

(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。組成を表 1-1-1 に示す。また、試験片形状を図 1-1-1 に示す。試験片は直径 22mm で厚さが 10mm の円板形状である。

まず、放射温度計の指示と試験片温度を一致させるため、試験片に熱電対を挿入し、放射率の校正を行った。表 1-1-2 はその結果を示す。黒体スプレーを塗布しない場合、熱電対による計測値との差が非常に大きく、約 30℃であった。それに対し、黒体スプレーを塗布すると温度差は少なくなり、3℃前後に収められた。また、放射率は 0.88 に設定することで良好な指示値が得られたことから、以降では、放射率をすべて 0.88 として実験を行った。

(2) 熱処理

円板試験片に、溶体化処理を行い、その後、時効処理を行った。溶体化処理は高周波により加熱し、保持時間を変化させて影響を検証した。処理温度は 530℃とした。加熱後の冷却は、氷水中に試験片を投与して行った。

時効処理は電気炉で行い、すべての試験片について 180℃で 180分を行った。

(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）で行った。試験は、試験機に試験片をセットし、圧縮を開始してからクロスヘッドが 2mm 移動するまで行った。試験後、この時の降伏応力（0.2%耐力）を算出して強度を評価した。

(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用意した。測定位置は、図 1-1-2 に示すように切断した中央部について行った。

(5) Si 粒子の測定

熱処理後、各試験片を切断し、断面研磨を行った後に画像解析により Si 粒子の数と大きさを算出した。解析に用いたソフトウェアは Scion IMAGE である。

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

表 1-1-1 試験片の組成

No	処理条件	黒体スプレー	放射率	温度差
	530 × 600sec	無	$\epsilon = 0.30$	+28 ~ +37
	530 × 600sec	有	$\epsilon = 0.64$	-23 ~ -21
	530 × 600sec	有	$\epsilon = 0.84$	-3 ~ -2
	530 × 600sec	有	$\epsilon = 0.86$	-3 ~ 0
	530 × 600sec	有	$\epsilon = 0.88$	-1 ~ +2

表1—1—2 放射率の校正結果

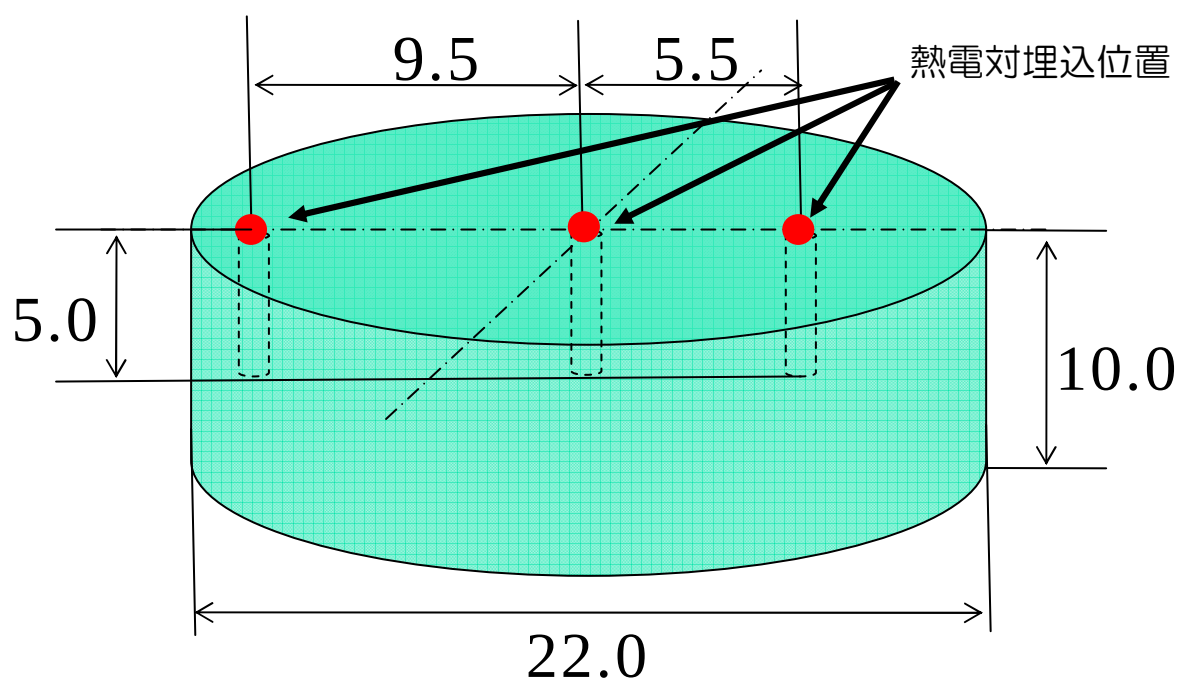


図1—1—1 試験片形状と熱電対埋め込み位置

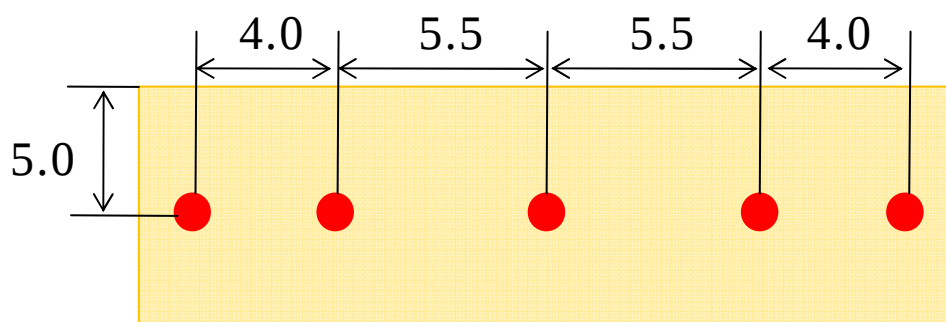


図1—1—2 硬さ測定位置 (試験片断面)

1—1—3 実験結果

(1) 圧縮試験

図1—1—3は、溶体化処理における保持時間と降伏応力との関係を示す。溶体化処理の方法は、処理時間1800秒については電気炉で行い、処理時間0秒のものと併せて比較対照とした。残りのものはすべて高周波で行った。なお、時効処理は180℃、180分の条件で、電気炉を用いて全ての試験片に適用した。

保持時間0秒の場合、降伏応力は約360MPaであった。保持時間の増加とともに降伏応力は増加し、60秒で470MPa程度となった。その後は、ほぼ同様な値で400MPaの後半で推移した。溶体化処理においては、加熱により銅が基材中に分散する必要があるため、設定温度に到達してからある程度の保持時間が必要となる。本実験では、保持時間が60秒程度になると銅原子の拡散が終了し、強度的な安定領域に到達することが明らかとなった。

(2) 硬さ試験

図1—1—4は、溶体化処理における保持時間とビッカース硬さとの関係を示す。

硬さ測定の結果は、圧縮試験結果と同様な傾向を示した。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、この材料を用いたエンジン部品の規格である150HVを上回るようになった。

(3) Si粒の測定結果

図1—1—5は、試験片断面に観察されたSi粒子の直径分布を、溶体化処理の保持時間をパラメータとして示す。

各溶体化処理条件ともに、Si粒子の直径は2～3.9μmが最多であった。この直径域のSi粒子数に着目すると、保持時間の増加とともに、粒子数は減少する傾向を示した。特に保持時間が0秒から10秒までの変化が大きかった。また、300秒および600秒になると大きな変化は認められなくなった。

工業的な観点で上記の結果を見ると、この素材に関しては加熱、保持時間の短縮によるコストダウンが期待できる。設定温度までの到達時間は10数秒であり、電気炉を用いた場合では30分程度かかることを考慮すると、大きな時間短縮と考えられる。一方、保持時間はある程度設定する必要があり、本実験では60秒程度であった。保持時間に関しては、本実験では60秒以上設定しても利点はないことから、量産を行う場合、あらかじめ予備実験を行い、数分程度の最短の保持時間を設ければよいと考えられる。

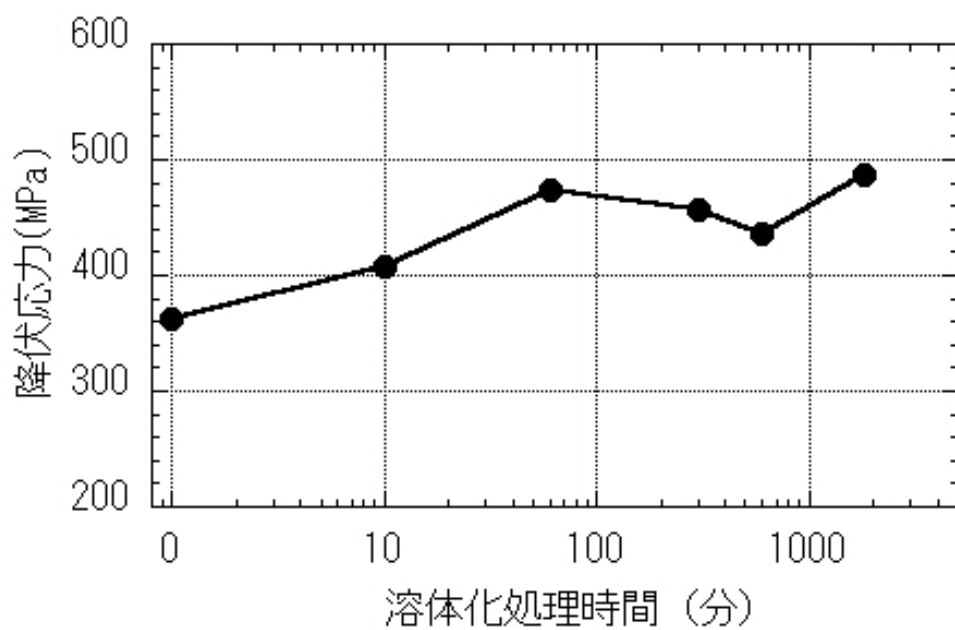


図 1—1—3 溶体化処理の保持時間と降伏応力との関係

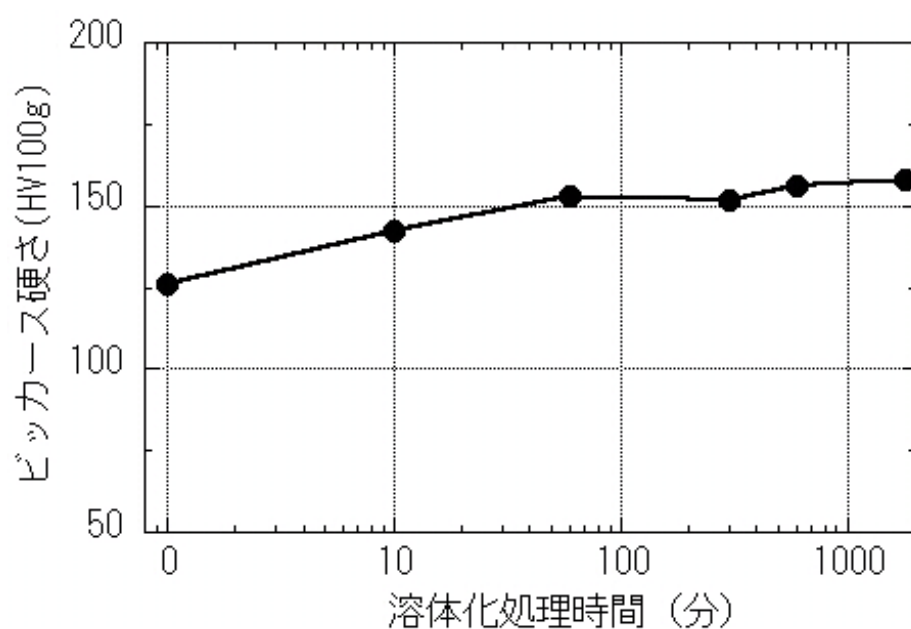


図 1—1—4 溶体化処理の保持時間とビッカース硬さとの関係

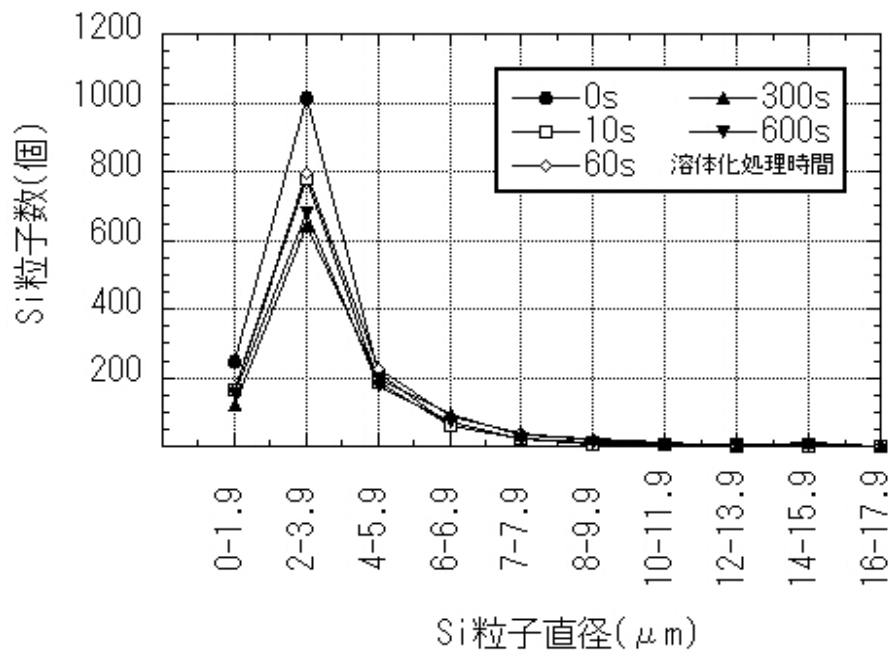


図 1—1—5 試験片断面に観察された Si 粒子の直径分布

1—1—4 まとめ

本実験で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、加熱温度を一定とし、圧縮強度におよぼす加熱時間の影響を調査した結果、保持時間 60 秒以上で、ほぼ一定の値を示した。

2) 溶体化処理後のビッカース硬さを測定したところ、圧縮強度の傾向と同様に、保持時間 60 秒以上で、実部品の硬さ値である 150HV を示した。

3) Si 粒子径の分布を測定したところ、2～3.9 μm の領域が最多であった。この直径域の Si 粒子数は、溶体化処理時間の増加とともに減少したが、300 秒程度になると大きな変化は認められなくなった。

1-2 A6061アルミニウム合金の強度向上

本プロジェクトでは、高周波誘導加熱装置を用いたアルミニウム合金の加熱状況の詳細把握とこの加熱を利用した材料特性の向上を研究目的に掲げている。以下では、以上の研究目的について具体的に検討した結果について説明する。具体的な研究項目として、次の2つを設定した。①「加熱状況」：ここでは、アルミニウム合金に対する高周波誘導加熱装置を用いた加熱の可否を検証すると共に、加熱状況の詳細把握と加熱の特徴を理解することを目的とした。②「誘導加熱と機械的性質」：ここでは、加熱状況の検討結果を踏まえて、高周波誘導加熱装置を熱処理型アルミニウム合金における溶体化処理に適用する。誘導加熱装置による急速な昇温状況や安定性に優れた温度保持などの特徴的な温度履歴が、硬さや引張性質ならびに疲労寿命などの材料特性に及ぼす影響を実験的に検証することを目的とした。この2つの検討項目に関する研究を遂行することにより、熱処理型アルミニウム合金の溶体化処理に対する誘導加熱装置の有効性を検証すると共に、その加熱を利用した材料特性の向上について検討を加える。

1-2-1 実験試料と実験方法

本プロジェクトの共通試料である6061アルミニウム合金押出丸棒を実験試料に用いた。供試材の形状と寸法を図1-2-1に、化学組成の分析結果を表1-2-1に示す。また誘導加熱装置の全体像を図1-2-2に、加熱コイルと試料の拡大図を図1-2-3にそれぞれ示した。この装置は、本プロジェクトの実施に伴い平成18年度に設置したもので、発振周波数に特徴があり、既存の汎用的な高周波誘導加熱装置（40～400kHz）と比較すると著しく高い周波数（2MHz）を発振することが可能となっている。なお容量は10kWである。本研究では試料全体を一度にかつ均一に加熱するために、図1-2-3に示した矩形状の加熱コイルを作成した。加熱コイルの中央に試料を設置した状態で通電を開始し、試料表面温度を放射温度計で測定した。温度測定に関わる検討内容の詳細は省略するが、試料表面の黒体化と校正実験に基づく適切な放射率（0.78）の設定により、精度の高い温度測定が実施可能であることを確認している。目標とする熱サイクルが達成できた時点で、加熱コイル下部に設置したホルダーが解放されることにより試料はチラーにより一定の温度（20℃）に保持された水中へ落下する仕組みとなっている。これにより、溶体化処理に相当する加熱あるいは保持と急冷に相当する冷却を、迅速かつ再現性を保った状況で実現することが可能である。

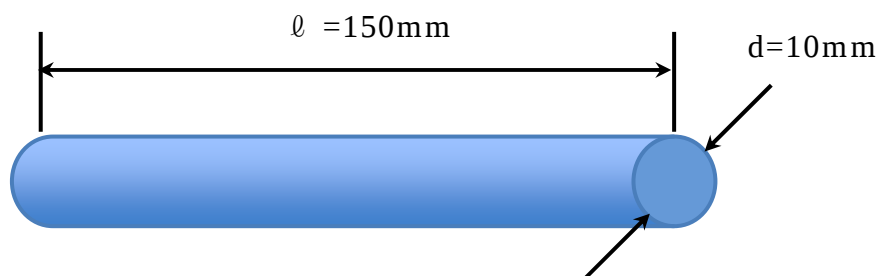


図 1-2-1 実験試料の寸法・形状

表 1-2-1 実験試料の化学組成（分析結果：mass%）

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.67	0.30	0.31	0.13	1.00	0.19	0.08	0.02	bal
JIS	0.40- 0.80	-0.70	0.15- 0.40	-0.15	0.80- 1.20	0.04- 0.35	-0.25	-0.15	bal

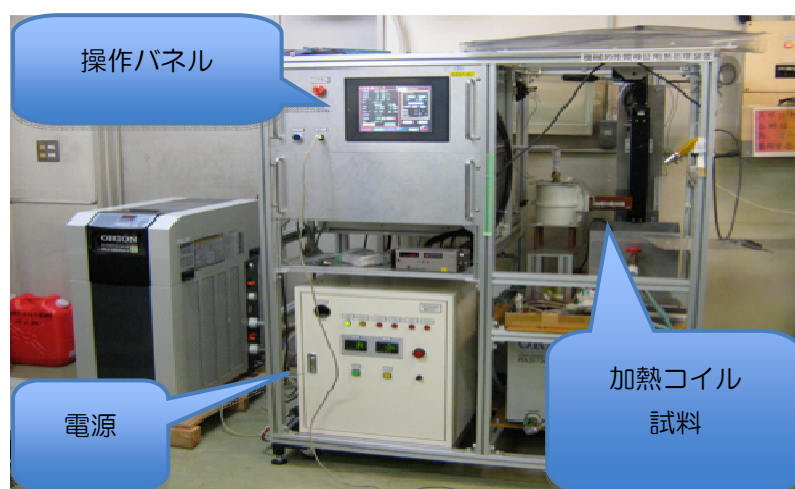


図 1-2-2 誘導加熱装置の全体図

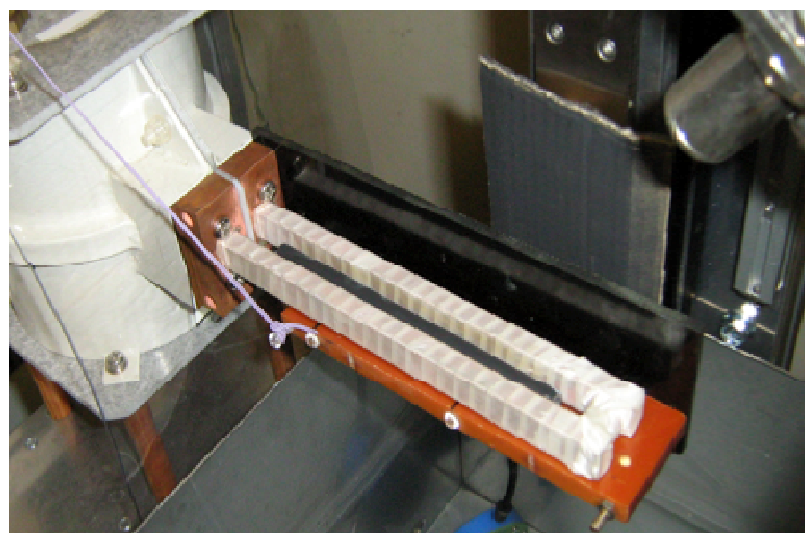


図 1-2-3 試料と加熱コイルの拡大図

本研究で用いたインストロンタイプの引張試験機（容量50kN）の外観を図1-2-4に、引張試験片の形状（JIS 14A 相当）を図1-2-5にそれぞれ示す。引張試験は25℃に保持した恒温槽中で、引張速度が1 mm/min の条件で行った。本研究で用いた試験片（標点間距離=30mm）では、この引張速度は $5.6 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の初期ひずみ速度に相当する。疲労寿命試験に用いた試験機と試験片を図1-2-6と図1-2-7にそれぞれ示す。図1-2-8に示すように、最大引張および最大圧縮応力の絶対値が等しくなる条件（応力比 $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} = -1$ ）、すなわち完全反転の条件下で応力負荷を繰り返し、破断までの疲労寿命を評価した。繰返し速度は10Hz、試験温度は室温である。



図 1-2-4 引張試験機の全体図

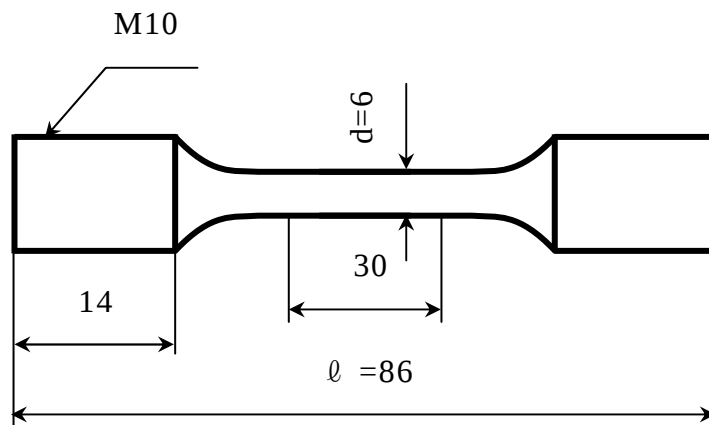


図 1-2-5 引張試験片

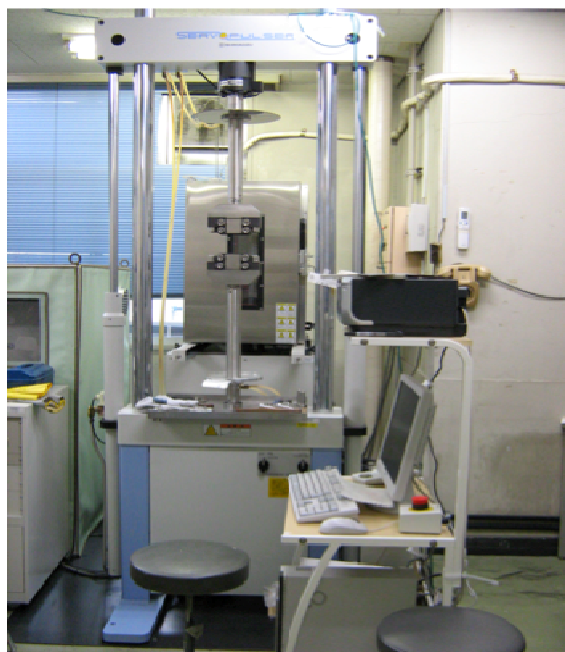


図 1-2-6 疲労試験機の全体図

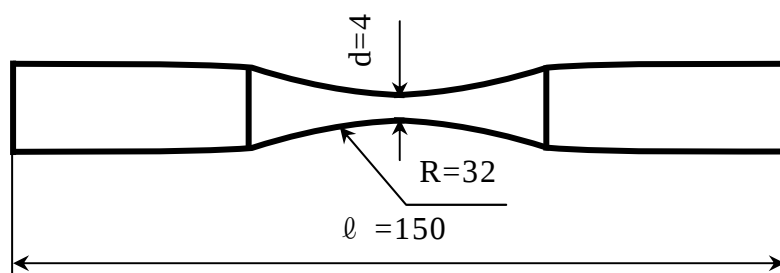


図 1-2-7 疲労寿命試験片

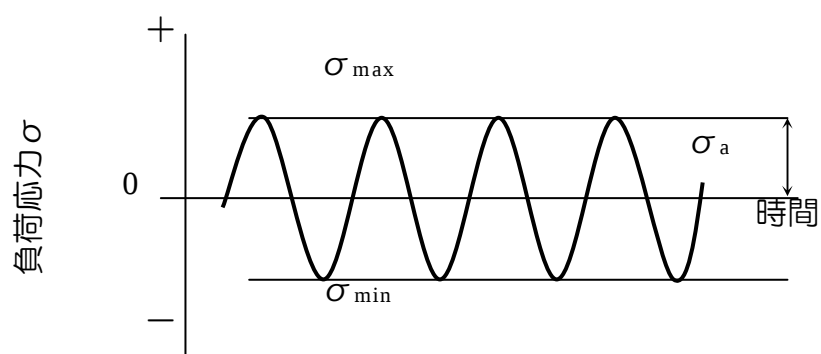


図 1-2-8 疲労寿命試験の条件

本研究では代表的な熱処理型アルミニウム合金のひとつである6061合金を供試材とした。この合金には、強度向上のために、図1-2-9に示す熱処理が一般的に施される。「①溶体化処理」は、560℃程度の高温において特定の時間保持することにより溶質原子であるMgとSiの拡散を促進し、母相中へ均一に固溶させるための処理である。「②急冷」は、溶体化処理で達成された均一な固溶状態（固溶体）を急冷することにより、常温において過飽和な固溶体を実現するための処理である。「④時効処理」は、常温において過飽和な固溶体に対して僅かな加熱を施すことにより溶質原子の拡散を通じて相分解を促進するための処理である。時効処理に伴い、微細な析出物を母相中に形成（析出）し、強度の向上を達成する。以上が、熱処理型アルミニウム合金に施される基本的な熱サイクルとそれに伴うミクロ組織変化である。ところで、「③室温放置」の時間は、時効処理後のミクロ組織ならびに材料強度に顕著な影響を及ぼすことが知られているので、本研究ではこの点にも配慮して実験を進めた。具体的には、急冷後の室温放置時間を48時間に統一した。なお引張や疲労試験片などを得るための機械加工は、この室温放置期間内に完了することとした。上述の熱サイクルにおける温度や時間は個々の検討項目に依存して異なるが、特に断りの無い場合には、「②急冷」は20℃に保持された水中への投入、「③室温放置」は室温における48hrsの保持、「④時効処理」は180℃で8hrsの保持、である。なお誘導加熱装置を用いた加熱は、急速加熱や高精度な温度制御性が期待できることから、「①溶体化処理」のみに対して適用することとし、「④時効処理」は既存の強制対流式電気炉を用いた。

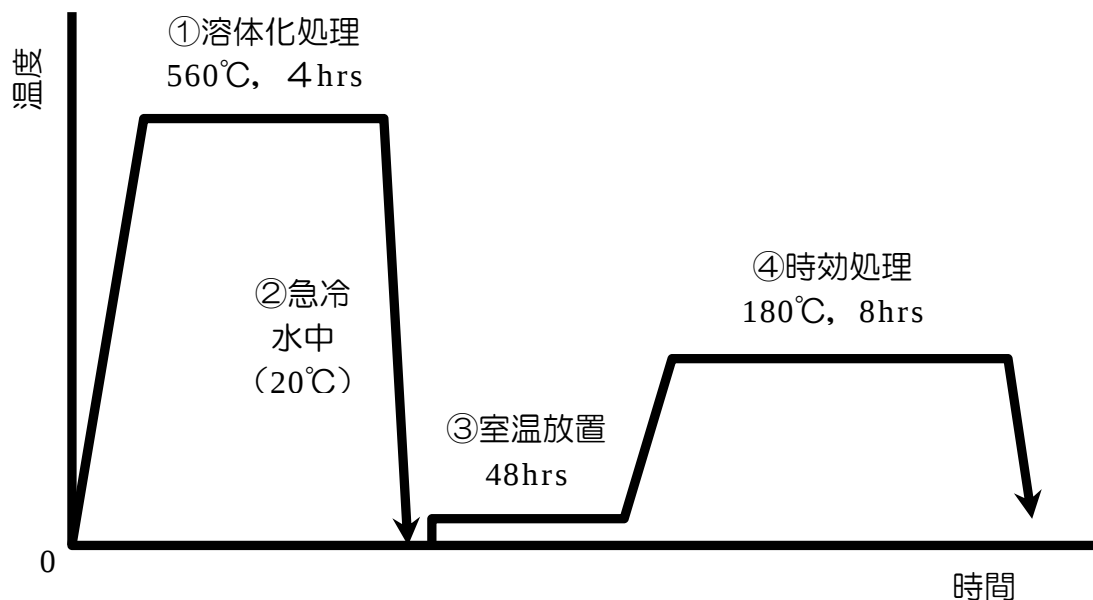


図 1-2-9 熱処理型アルミニウム合金に施される熱処理

1-2-2 実験結果および考察

1-2-2-1 加熱状況

誘導加熱装置を用いて上述の溶体化処理を行う上では、昇温割合や温度の安定性のみならず、基本的な条件として、試料内における温度分布が均一であることが要求される。そこで、以下ではこれらの点について個別に検討を加えた。

本研究では矩形の加熱コイルを使用したので、形成される磁界の強弱により試料表面における発熱状態が変化し、それに伴い温度分布を生じる可能性が考えられる。そこで最初に、試料内における温度分布を調査した。試料の設置位置が試料内の長手方向における温度分布に及ぼす影響を検討したところ、図1-2-10に示す結果が得られた。この実験では、図中に合わせて示したように、試料の長手方向に関して5本の熱電対を36mm 間隔で設置し、試料と加熱コイル端部との距離 L が試料長手方向における温度分布に及ぼす影響を調査した。何れの場合でも試料の中央部（3ch）における温度が低く、両端部（1ch と5ch）で高くなる傾向が認められた。これは加熱コイルの形状に起因する現象と考えられ、直線部と比較して端部（曲線部）で強い磁界が形成されることを示唆している。図に示した結果を詳細に見ると、 $L=21$ では5ch、 $L=23\text{mm}$ では1ch で温度が最高となるので、この間の L で温度差が最小になると期待される。このような推測は実験的にも確かめることができ、 $L=22\text{mm}$ の場合には最小の温度差（ $\Delta 4^{\circ}\text{C}$ ）が得られた。

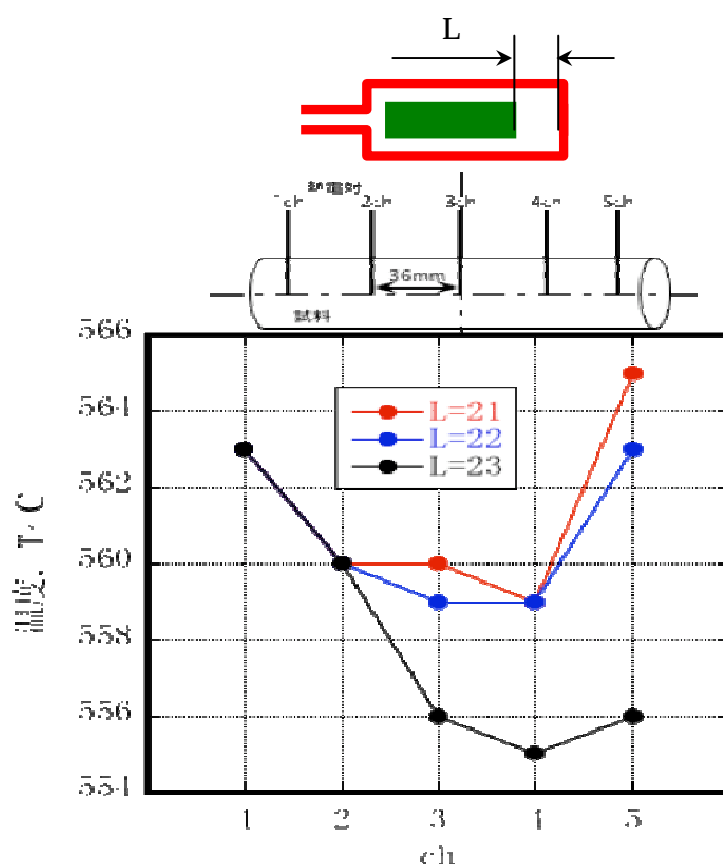


図1-2-10 試験片の設定位置と長手方向の温度分布

この結果を踏まえて、 $L=22\text{ mm}$ に試料を設置した場合について、試料の幅方向および深さ方向に関する温度分布を測定したところ、図1-2-11に示す結果が得られた。図に示した結果から明らかなように、幅および深さ方向に関する温度分布は殆ど確認できず、温度差は最大でも 2°C 程度であった。以上に述べた結果から、加熱コイルに対して適切な位置（ $L=22\text{ mm}$ ）に試料を設置した場合には、長手方向や幅方向ならびに深さ方向における温度差は最大でも 4°C 程度と小さいことから、試料全体を均一に加熱可能であることが実験的に確認できた。誘導加熱装置では加熱コイルに対向した試料表面における発熱により試料の温度が上昇するにも関わらず、このように温度分布が小さくなる理由については、試料であるアルミニウム合金の熱伝導性が優れているためと考えられる。いずれにしても、試料全体を均一に加熱可能であることが検証できた。

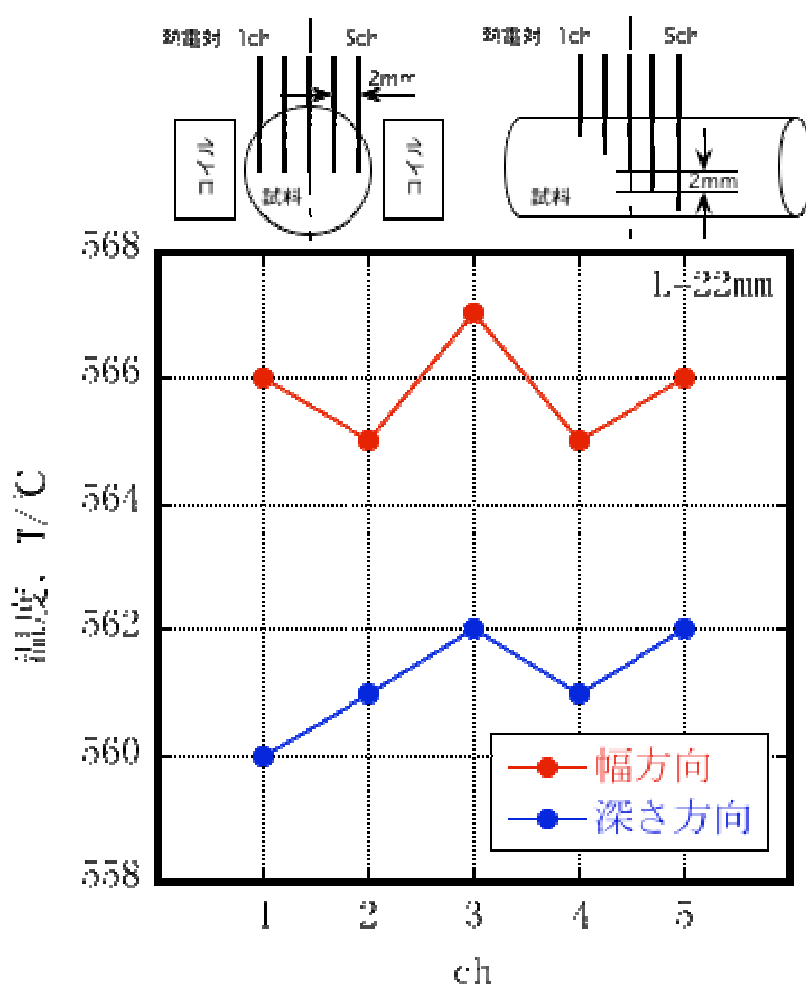


図1-2-11 幅および深さ方向の温度分布

誘導加熱の特徴のひとつに急速加熱が挙げられることから、本研究においてもこの点について検討を加えた。加熱コイルへの供給電圧が加熱状況に及ぼす影響を調査したところ、図1-2-12に示す結果が得られた。図に示した温度は、試料長手方向の中央部（3ch）に挿入した熱電対による測定結果である。150Vを超える供給電圧では、室温から500℃を超える広い温度範囲においてほぼ直線的な温度上昇が実現できるものの、250Vから150Vへの供給電圧の低下に伴い当該温度範囲における平均的な昇温割合は20℃/sから6℃/sへと急激に減少した。一方100V以下まで供給電圧が低下すると、300℃以下の温度範囲では直線的な温度上昇が達成されるものの300℃以上の温度範囲における昇温割合は漸次減少する傾向を示した。特に95Vや90Vの供給電圧では、誘導加熱による発熱と大気中などへの放熱とが拮抗したために、設定温度である550℃まで温度が上昇しない状態となった。何れにしても、本研究で用いた誘導加熱装置の最高出力に相当する250Vの供給電圧で加熱した場合には、室温から550℃に亘る広い温度範囲において20℃/sを超える大きな昇温割合で試料を加熱することが実現できるだけでなく、その昇温割合もほぼ一定に維持されることが明らかとなった。

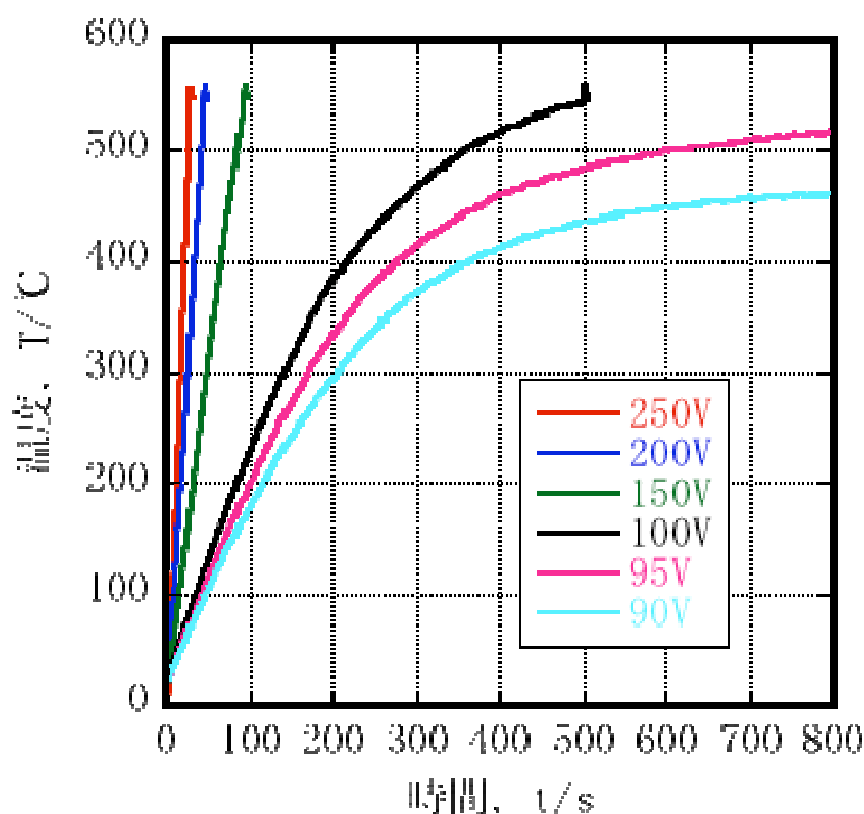
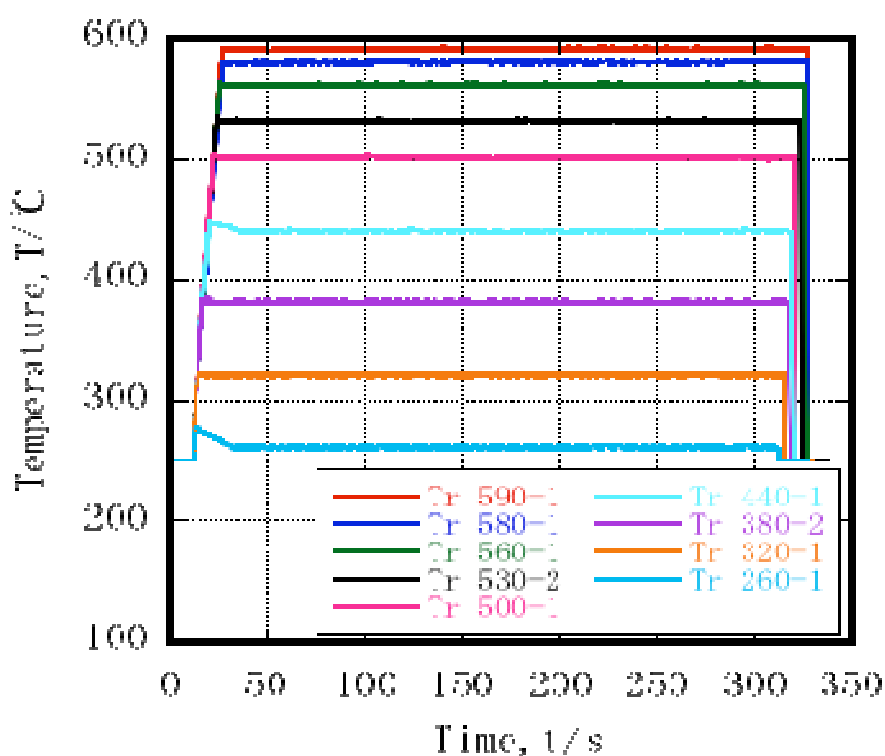


図1-2-12 供給電圧と昇温状況

一方、目標温度を260から590℃の間に設定した場合について、5分間の定温維持（温度保持）に伴う温度変化を調査した。このような温度範囲を目標温度とした理由は、本実験試料である6061アルミニウム合金の溶体化処理に対して、誘導加熱装置による加熱を適用することを想定しているためである。測定結果の一例を図1—2—13に示す。



※1-2-13 昇温と温度保持の状況

ここでは放射温度計を用いて温度測定を行ったために、その測定温度範囲（250℃以上）との兼合いから250℃以下の昇温過程を測定することができないが、前述の一連の熱処理（溶体化処理→急冷）を想定した場合には加熱後に試料を水中へ投入する必要があることから、やむを得ないと判断した。なお加熱コイルへの供給電圧は、すべての温度条件で250Vの一定とした。図に示した結果から明らかなように、加熱過程における昇温状況は何れの目標温度でもほぼ等しく、目標温度に向けてほぼ直線的に温度が上昇している状況が確認できる。なお、これらの昇温割合は約21℃/sであることが確認され、電気炉などの既存の熱処理装置では実現不可能な急速な加熱が達成できた。また昇温過程の再現性も良好であると言える。目標温度が500℃以下の場合には、目標温度に達した直後に若干のオーバーヒートが認められるものの、500℃以上の目標温度ではオーバーヒートが認められない。他方、温度変動については、何れの目標温度でも殆ど確認できず、5分の保持時間における温度変動は最大でも3℃であった。

以上から、溶体化処理を想定したアルミニウム合金の熱処理に誘導加熱装置を用いると、電気炉などの既存装置では実現できない急速加熱と温度制御が達成できる

ことが明きからとなった。加えて、今回用いた矩形型加熱コイルの場合には、加熱温度の均一性にも優れることを確認した。これらの結果を踏まえて、以下では、誘導加熱装置をアルミニウム合金の溶体化処理に適用した試料のミクロ組織や機械的性質を調査した。この検討を通じて、アルミニウム合金に対する誘導加熱装置の有効性を検証することとした。

1-2-2-2 誘導加熱と機械的性質

一般に、溶体化処理温度の上昇に伴い処理時間を短縮できることが期待されるが、温度の安定性に劣り比較的大きな温度分布を生じる電気炉などの既存の熱処理装置を用いる場合には、この点を系統的かつ詳細に検証することは困難である。一方前述のように、誘導加熱装置を用いてアルミニウム合金を加熱すると、既存装置では得難い急速昇温と温度の安定性、加えて極めて小さな温度分布が実現できる。そこで以下では、誘導加熱装置を用いることにより、試料の固相線直下を含めた高温での溶体化処理がミクロ組織や機械的性質に及ぼす影響を調査することとした。具体的には、溶体化時間を短時間（5分）とした場合について、溶体化処理温度が機械的性質に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果を踏まえて、更なる処理時間の短縮を目指して、固相線直下の高温での溶体化処理（560℃）に関して溶体化処理時間の影響を検証した。これらの検討により、誘導加熱装置を用いたアルミニウム合金における溶体化処理の有効性について検討を加えた。

1-2-2-2-1 溶体化処理温度の影響

溶体化処理温度を260から590℃の範囲に選んだ場合について、時効処理前（ST）および時効処理後（aged）の硬さに及ぼす溶体化処理温度の影響を調べたところ、図1-2-14に示す結果が得られた。溶体化処理温度が400℃以下の場合、処理温度の上昇に伴い時効処理前の硬さは低下した。また時効処理に伴う硬さの変化が見られない状況を考慮すれば、400℃以下の溶体化処理温度では、溶質原子の母相への固溶は促進されず、むしろ時効生成物の成長・粗大化を助長する効果が大いと考えられる。つまりこれらの溶体化処理温度では、実質的には過時効状態への組織変化が促進されたと思われる。他方、400℃以上の溶体化処理温度では、処理温度の上昇に伴い硬さは増大し、時効処理に伴う硬さの増加も明瞭であることから、これらの温度範囲では溶体化処理に伴う溶質原子の固溶量の増大と時効処理に伴う微細析出物の形成が示唆される。これらの試料に関する組織変化を更に詳細に検討するために、導電率の測定の行い別の側面からも調査を行った。導電率の測定結果を図1-2-15に示す。400℃以下の溶体化処理温度では導電率に明瞭な変化がみられないことから、これらの処理温度では母相中の固溶量は殆ど変化していないと考えられる。他方、400℃以上の溶体化処理温度では、処理温度の上昇に伴い溶体化処理後の導電率は顕著に減少したが、時効処理に伴い一転して導電率は明瞭に増大した。このような溶体化処理に伴う導電率の減少と時効処理に伴う増大は、前述のような母相中における溶質原子の固溶量の変化を鋭敏に反映していると考えられる。つまり、導電率と硬さの検討結果には整合性が確認され、何れの変化も母相中における溶質原子の固溶量の増減に関連する現象であることが確認された。以上に述べた硬さと導電率の結果から、溶体化処理時間が5分間と短い場合には、溶体化処理に伴う固溶量の増大を実現するためには、処理温度を400℃以上に設定することが必要であると結論される。

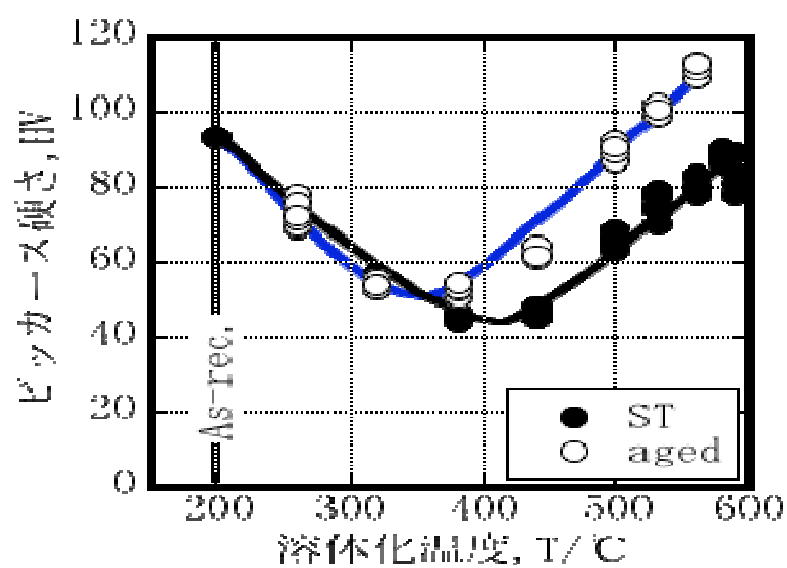


図1-2-14 溶体化処理温度と硬さ

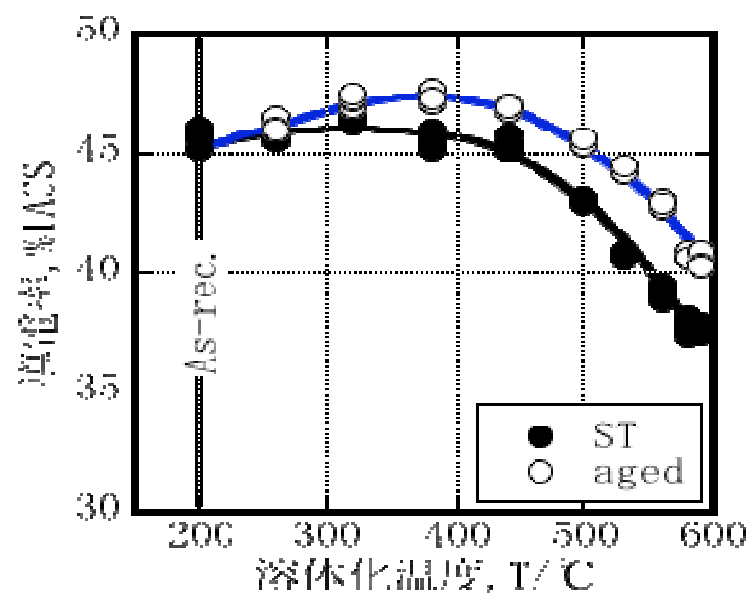


図1-2-15 溶体化処理温度と導電率

次に引張試験の結果について説明する。誘導加熱装置を用いて上述の各温度で溶体化処理した試料で測定された応力—ひずみ曲線を図1—2—16に例示する。図では時効処理前の状態における試料について示したが、0.2%耐力や引張強さに対する溶体化処理温度の影響は前述の硬さに対する効果と類似であることが確認される。すなわち、400℃以下の溶体化温度では温度上昇に伴い0.2%耐力や引張強さは低減するが、400℃以上では温度上昇に伴い増大した。引張特性に及ぼす溶体化処理温度の影響について更に詳細に検討するために、これらの応力—ひずみ曲線から0.2%耐力と破断伸びを読み取った。0.2%耐力の溶体化処理温度依存性を図1—2—17に示す。なおこの図では、時効処理後の試料に関するデータについてもあわせてプロットしている。

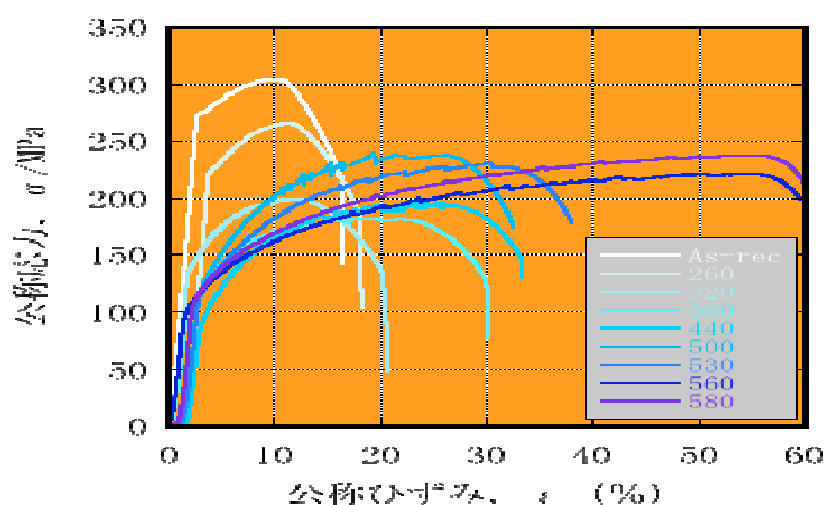


図1-2-16 溶体化処理温度と応力—ひずみ曲線 (時効処理前)

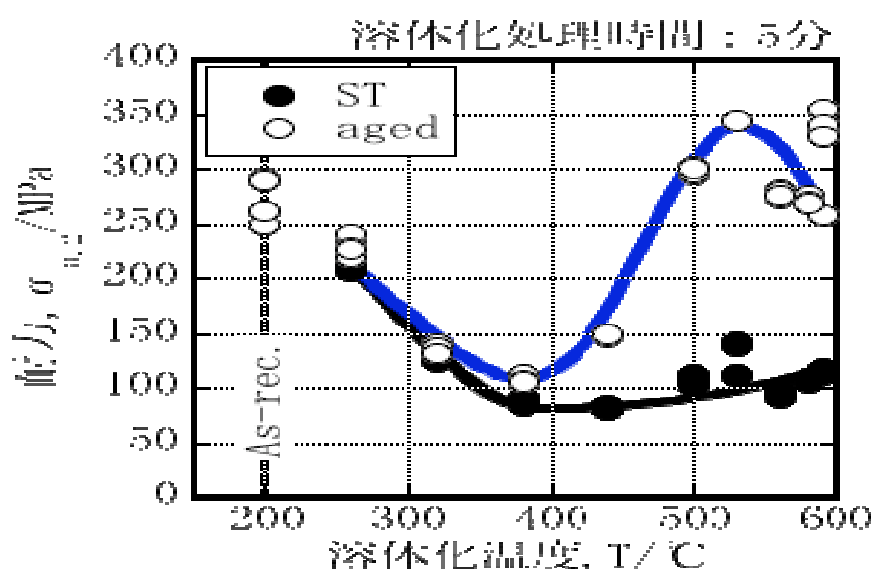


図1-2-17 0.2%耐力と溶体化処理温度

最初に時効処理前の試料に関する0.2%耐力について説明する。400℃以下の溶体化温度では、処理温度の上昇に伴い0.2%耐力は低下したが、この低下は硬さの検討結果で述べたように、時効析出物の成長・粗大化に伴う過時効軟化に相当すると考えられる。一方400℃以上の溶体化温度では、処理温度の上昇に伴い0.2%耐力は僅かに増加したが、前述のように、この増加は溶質原子の固溶量の増大に起因する現象と解釈される。次に時効処理に伴う変化について説明する。400℃以下の溶体化処理温度では時効処理を加えても耐力はほぼ一定であるが、これは前述のように400℃以下の低温での溶体化処理は過時効状態への移行を促進する熱処理に相当するため、このような溶体化処理の後に180℃で時効処理を加えても明瞭な組織変化を生じないためと考えられる。他方、400℃以上の溶体化処理温度では、時効処理に伴い耐力は著しい増大を示したことから、これらの温度範囲では時効処理に伴い微細析出物が著しく形成されたと考えられる。590℃の溶体化処理温度では、耐力が2極化される傾向もみられることから更なる実証実験の必要性が感じられるものの、530℃で溶体化処理を加えることにより350 MPa に達する耐力が得られた。既存の電気炉を用いて530℃で溶体化処理を施した場合には、260 MPa 程度の耐力が得られることを確認しているので、誘導加熱装置の適用により90 MPa にも達する著しい強度の向上が実現できたことになる。なお、電気炉を用いた溶体化処理では、処理温度に達するまでに約30分を要することから、より詳細な検討を行うためには、処理温度に達するまでの時間、すなわち昇温時間の影響に関する検討が必要であることを付け加えておきたい。

引き続いて、破断伸びに及ぼす溶体化処理温度の影響について説明する。破断伸びと溶体化処理温度の関係をプロットしたところ、図1-2-18に示す関係が得られた。

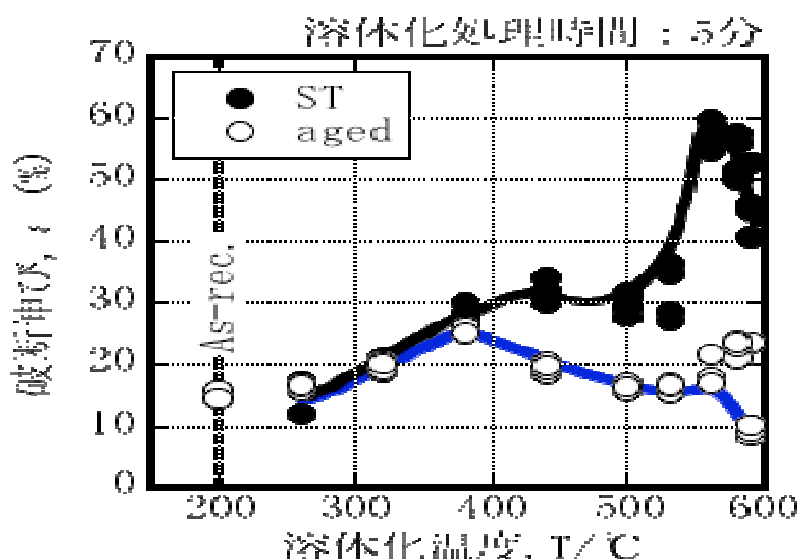


図1-2-18 破断伸びと溶体化処理温度

時効処理前の破断伸びは、400℃から500℃付近で溶体化処理温度に対する依存性が小さくなる傾向もみられるものの、560℃以下の溶体化処理温度では温度上昇に伴い破断伸びが増大する傾向がみられた。一方580℃と590℃の溶体化処理温度では、破断伸びが急激に低減したが、これは融点直下の高温保持に伴う局部融解あるいは結晶粒の粗大化に関連する変化と考えられる。次に時効処理に伴う破断伸びの変化について説明する。400℃以下の溶体化処理温度では、時効処理を加えても破断伸びに変化はみられないが、この原因については、溶体化処理時における過時効状態への移行により時効処理に伴う組織変化を実質的に生じないためと解釈される。400℃以上の溶体化処理温度では、590℃でやや複雑な変化を示すものの、処理温度の上昇に伴い破断伸びは減少した。最大の耐力が得られた530℃の溶体化処理温度での破断伸びは約18%であり、通常の電気炉で溶体化処理された試料（24%）と比較しても小さな値である。

このように、アルミニウム合金の溶体化処理に誘導加熱装置を用いると、既存の電気炉により処理された試料と比較しても、耐力には顕著な向上が認められた。ところで、溶体化処理に関連する処理時間を整理すると、電気炉を用いた場合には溶体化処理温度までの昇温に30分と保持に30分の合計で60分を要しているが、誘導加熱装置の場合には昇温と保持を含めても合計の処理時間は6分にも満たない。これを処理効率に換算すると、90%を超える効率の改善が実現できたことになり、誘導加熱装置の有効性が明瞭に示された結果となった。しかし今後の検討課題も散見され、破断伸びが急減する理由の解明は早急に克服すべき重要な課題と考えられる。

続いて、疲労寿命の観点から、誘導加熱装置の有効性に関する検証を進めた。破断までの繰返し数と負荷応力（応力振幅）の関係を図1—2—19に示す。図では、受入れ材の疲労寿命に対して、電気炉により溶体化処理された試料と誘導加熱により処理された試料とを比較して示した。各試料の疲労寿命を比較すると、誘導加熱処理材、受入れ材および電気炉処理材の順序で疲労寿命は低下しているが、前述のようにこれらの試料に関する耐力も同一の順序で減少している。先に述べたように、電気炉処理材（昇温時間：30分、保持時間：30分）と誘導加熱処理材（昇温時間：30秒、保持時間：5分）では、溶体化処理温度は同一（530℃）であるものの、昇温ならびに保持時間が異なるために厳密な意味での比較には問題もあると言えるが、上で述べた疲労寿命の改善は耐力や引張強さの増大に伴う材料強度の向上に起因する現象と考えられる。

次に、溶体化処理温度が疲労寿命に及ぼす影響を検討した。ここでは、誘導加熱装置を用いて3水準の処理温度で溶体化処理を施した場合について、疲労寿命の比較を行った。図1—2—20に実験結果を例示する。図に示す結果から明らかなように、530℃で溶体化処理した試料の疲労寿命が最も高く、500℃および560℃処理材の順序で疲労寿命は低下した。図1—2—17に示した耐力から明らかなように、これらの試料の耐力は上述の順序で減少していることから、この疲労寿命の測定結果にも耐力との整合性が確認できた。

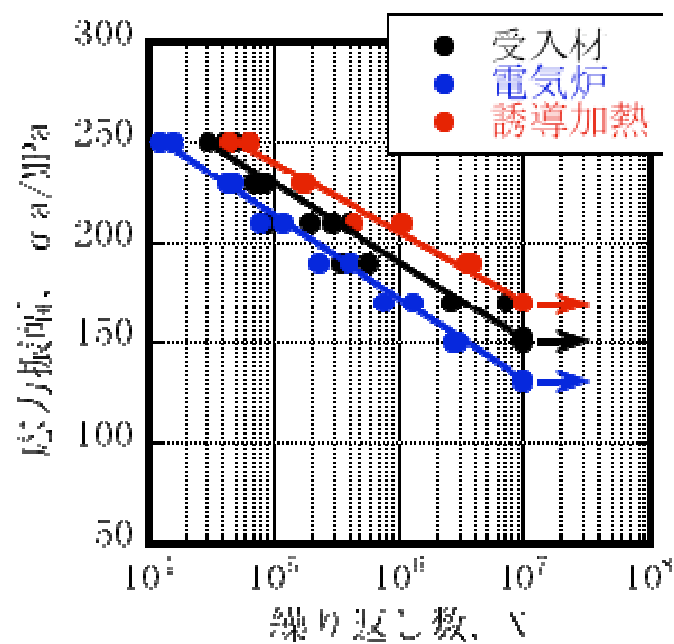


図1-2-19 電気炉あるいは誘導加熱装置で溶体化処理された試料の疲労寿命

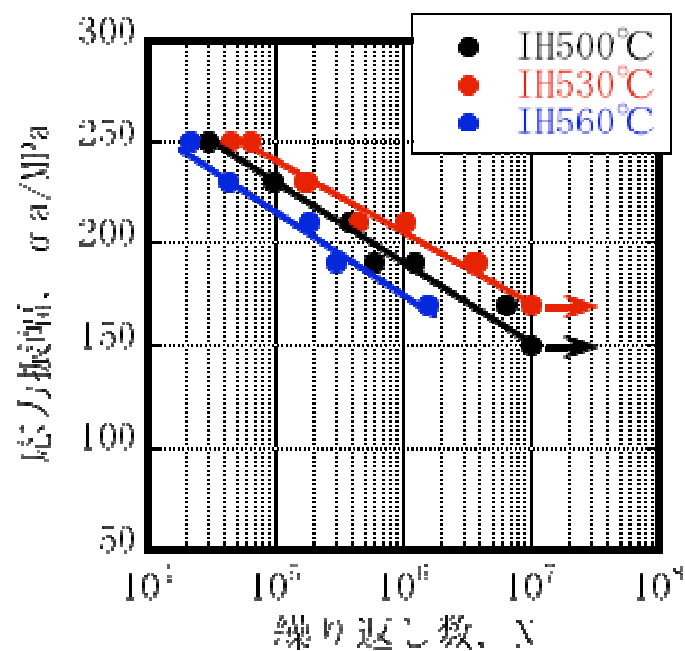


図1-2-20 疲労寿命と溶体化処理温度

このように、高い疲労寿命を有する試料では、耐力も大きな値を有することが示唆されたので、両者の対応関係を明示するために次のような整理を行った。すなわち、各々の試料の0.2%耐力を用いて負荷応力を規格化することにより、同一基準下における疲労寿命の比較を行ったところ、図1-2-21に示す関係が得られた。図に示した結果から明らかなように、受入れ材を含めた何れの試料の疲労寿命も同一の曲線上にプロットされることから、個々の試料に関する疲労寿命の増減は0.2%耐力の変化に伴う現象であることが確認できた。結果の提示は省略するが、疲労破壊後の試料に関する破断面の観察結果によると、低および高サイクル疲労に関連する破断面の差異は観察されるものの、電気炉処理材と誘導加熱処理材との相違、ならびに溶体化処理温度に関連する破断面の相違は確認できなかった。このことから、各試料間で認められた疲労寿命の差異は、き裂の発生形態ならびに伝播の様式が変化したこと起因する現象でなく、基本となる材料強度の増減に基づいて疲労強度が変化したと解釈することが妥当なように思われる。

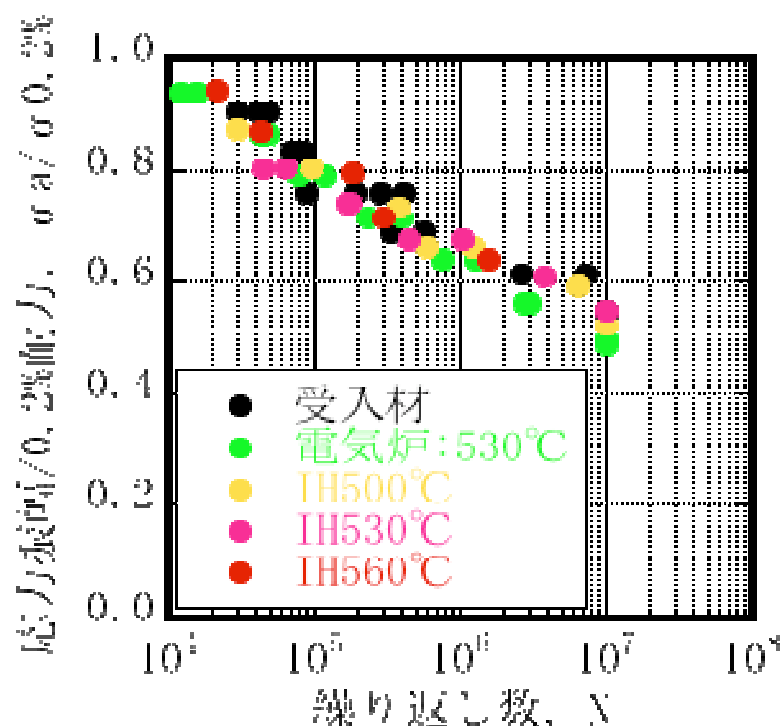


図1-2-21 0.2%耐力で応力振幅を規格化した場合の疲労寿命

1-2-2-2 溶体化処理時間の影響

上述のように、溶体化処理時間が5分の場合には、530℃で溶体化処理を施した場合に最大の0.2%耐力を得ることができた。更なる処理時間の短縮を実現するためには、処理温度を高めることが基本となるが、このような場合には昇温から保持を含めて温度を精確にコントロールすることが必須となる。電気炉などの既存の熱処理装置では、急速加熱にも限界があり、加えて急速加熱した場合には大きな温度変動を生じることが避けられないために、高温で短時間の熱処理を実現することは困難である。一方誘導加熱装置では、急速昇温と高精度な温度制御が容易に実現可能であることを先に確認しているので、この種の検討には最良の加熱装置と言える。そこで、誘導加熱装置を用いて、5分以下の短時間の溶体化処理の可能性を検証した。時効処理後(T6)の試料に関するビッカース硬さと導電率を測定したところ、図1-2-22と図1-2-23に示す結果が得られた。ビッカース硬さは、溶体化処理時間の延長に伴い増大するが、5分の処理時間を超えると飽和する傾向を示した。類似の現象が導電率にもみられ、溶体化処理時間の延長に伴い導電率は低下傾向を示すものの、5分を超える処理時間では飽和した。このような硬さと導電率の増減は、溶体化処理時間の延長に伴う固溶量の増大で説明可能と思われる。すなわち溶体化処理時間が5分以下の場合には、処理時間の延長に伴い固溶量が増大するために、硬さは増加し、導電率は減少するが、5分を超える溶体化処理時間では固溶量が一定となるために硬さや導電率は飽和したと考えられる。これらの試料について0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と引張強さ σ_{uts} を整理したところ、図1-2-24に示す結果が得られた。560℃で溶体化処理を施した場合、0.2%耐力と引張強さの最大値は3分の溶体化処理時間で得られ、それらの絶対値は5分の溶体化処理時間で得られた最大値(処理温度530℃)と比較してもほぼ同等であった。このように、溶体化処理温度を530℃から560℃へと30℃高めることに伴い、処理時間を5分から3分へと40%短縮できることが確認できた。くわえて、処理温度の上昇に伴う材料強度の低下が顕著でないことも確認された。破断伸びの変化を図1-2-25に示す。0.2%耐力や引張強さが最大となる溶体化処理時間で破断伸びは最小(約12%)となることが理解できる。電気炉処理材では24%、530℃で5分間の溶体化処理を施した試料では18%の破断伸びが得られることを先に述べたが、560℃で3分の溶体化処理で得られる12%の破断伸びは最も小さな値であった。このように、高温で短時間の溶体化処理を施した場合には、耐力や引張強さは高い値を示すものの、破断伸びが減少傾向を示すことから靱性の劣化が懸念される。今後は、この点を克服するための検討が必要と考えている。

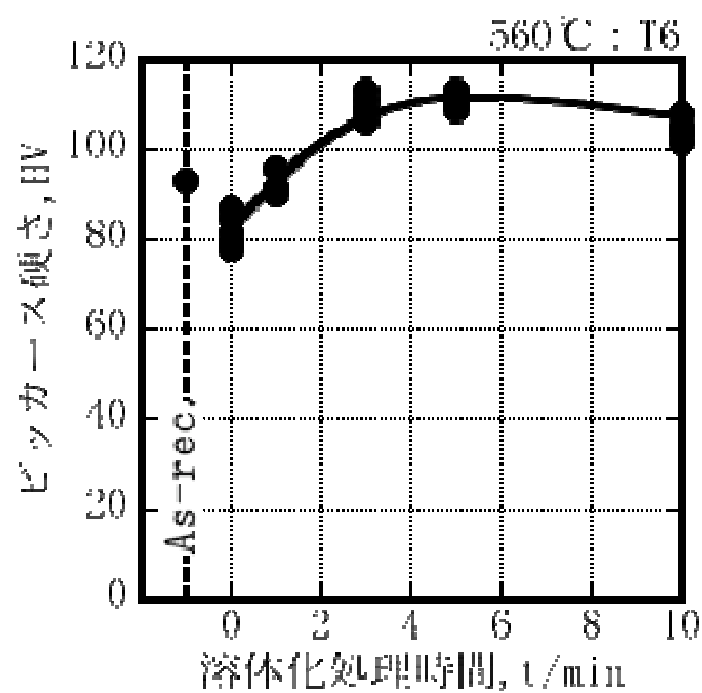


図1-2-22 溶体化処理時間とビッカース硬さ

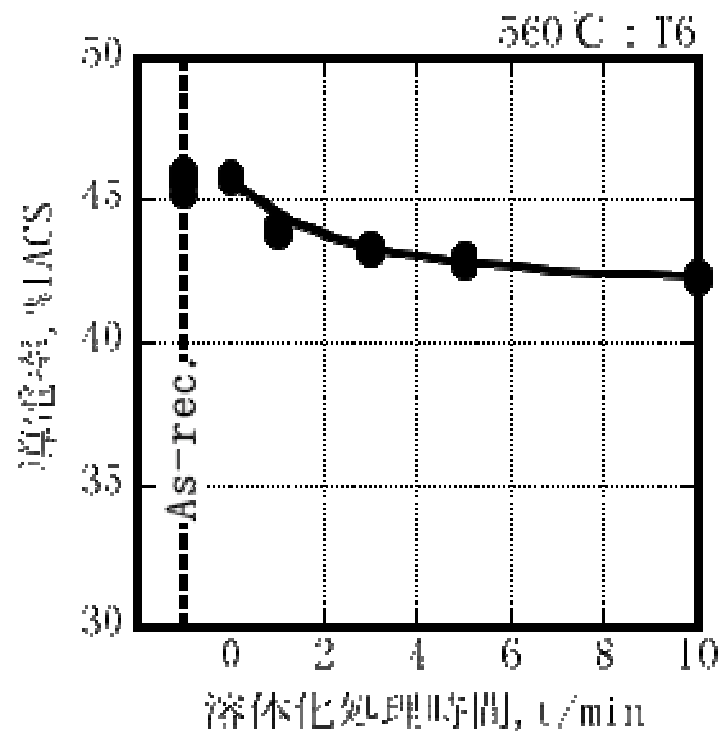


図1-2-23 溶体化処理時間と延伸率

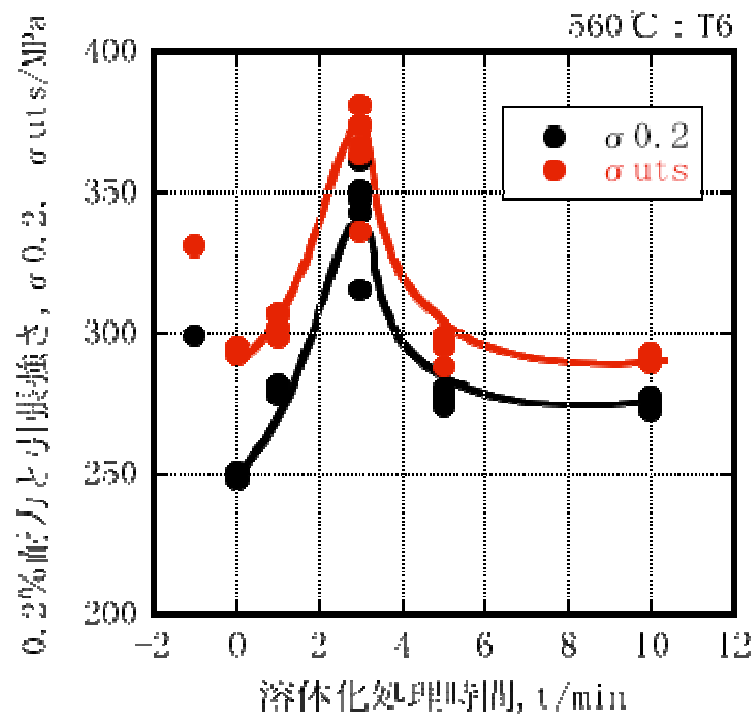


図1-2-24 0.2%耐力と引張強さに及ぼす溶体化処理時間の影響

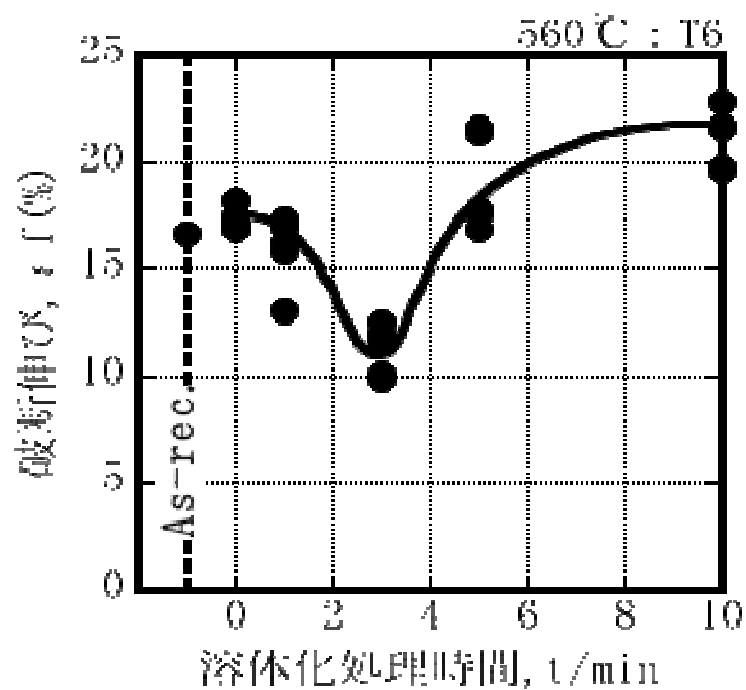


図1-2-25 破断伸びに及ぼす溶体化処理時間の影響

1-2-3 本節の成果

本節では、高周波誘導加熱装置を用いたアルミニウム合金の加熱状況の詳細把握とこの加熱を利用した材料特性の向上について検討を加えた。具体的な研究項目として、『①「加熱状況」：ここでは、アルミニウム合金に対する高周波誘導加熱装置を用いた加熱の可否を検証すると共に、加熱状況の詳細把握と加熱の特徴を理解する』、『②「誘導加熱と機械的性質」：ここでは、加熱状況の検討結果を踏まえて、高周波誘導加熱装置を熱処理型アルミニウム合金における溶体化処理に適用する。誘導加熱装置による急速な昇温状況や温度の保持状態などの特徴的な温度履歴が、硬さや引張性質ならびに疲労寿命などの材料特性に及ぼす影響を実験的に検証する』の2つを研究項目として掲げ実験的に検討を加えた。またこれらの検討を通じて、熱処理型アルミニウム合金の溶体化処理に対する誘導加熱装置の有効性を検証したところ、以下の結果が得られた。

①「加熱状況」について

アルミニウム合金の加熱に誘導加熱装置を用いた場合、590℃以下の広い温度範囲に亘り20℃/s を超える高い昇温割合が維持されることが明らかとなった。またその昇温割合は加熱の際の目標温度に依存せずほぼ一定であること、ならびに目標温度に到達した時点でのオーバーヒートも極めて小さく、さらに定温維持における温度変動も実用上問題とならない水準（Δ3℃）であることを確認した。一方、実験試料に関する温度分布の測定結果によれば、長手方向、幅方向および深さ方向における温度分布は極めて小さい（Δ4℃）ことが実験的に確認できた。以上のような良好な加熱状況が実現できたのは、アルミニウム合金の大きな熱伝導率に起因する現象と考えられた。何れにしても、本プロジェクトで採用した発振周波数が2MHz の高周波誘導加熱装置をアルミニウム合金の加熱に用いると、急速な昇温と、安定性の高い温度維持、ならびに均一な加熱を実現可能であることが確認された。

②「誘導加熱と機械的性質」について

誘導加熱装置により溶体化処理された試料の引張特性を調査したところ、電気炉を用いて従来の手法で溶体化処理された試料と比較して、0.2%耐力や引張強さは優れることが確認できた。この際の時間効率を単純計算すると、90%を超える効率化が達成できたことになる。他方、疲労寿命の実験結果によれば、誘導加熱装置で溶体化処理された試料では溶体化処理条件に依存して種々異なる疲労寿命が得られることが明らかとなった。溶体化処理温度に依存する疲労寿命の変化は、0.2%耐力などの増減に基づく材料強度の変化により説明できることを示した。なお530℃の溶体化処理温度で比較した場合、誘導加熱処理材は電気炉処理材より高い疲労寿命を示すことを確認した。

1-2-4 今後の検討課題

時間の関係から検討が不十分な研究項目については、追加実験の実施を含めてその内容を充実する予定である。くわえて、検討できなかった研究項目については、新規に研究を開始し、本プロジェクト全体の達成度を高める予定である。他方、本節で得られた基本的な研究成果を工業的な処理に適用する上では、個々の案件に関してさらに詳細な検討が必要と考えている。今後早急に解決すべき検討課題を以下に列挙する。

①「加熱状況」について

本節で得られた加熱状況は、誘導加熱に用いる加熱コイルの幾何学形状と試料サイズに依存すると考えられるので、誘導加熱装置を用いたアルミニウム合金の加熱に関連する一般的な傾向を捉える上では、種々異なる形状やサイズを有する加熱コイルと試料に関する検討が不可欠と考えられる。そこで、この点に関する検討を行う予定である。

②「誘導加熱と機械的性質」について

6061アルミニウム合金の溶体化処理に対する誘導加熱装置の適用により、5分という非常に短い処理時間でも、既存の熱処理装置により溶体化処理された材料を大きく超える耐力や引張強さが得られた。ところが、固相線直下に相当する590℃の溶体化処理温度では、耐力などの引張特性に大きな変動が認められたので、この変動原因を早急に解決する必要がある。

上述のように、誘導加熱装置を溶体化処理に用いた場合、耐力や引張強さは十分なレベルまで向上することが可能であるが、それらの試料では小さな破断伸びを示すことが問題と思われる。破断伸びと耐力などの間にはトレードオフの関係が成立することが一般的に知られているが、誘導加熱装置により溶体化処理された試料の破断伸びの低下は、既存の電気炉などにより溶体化処理された試料と比較しても、低下傾向が著しい。誘導加熱装置を用いた場合の溶体化処理時間を5分と極端に短くしたことが、破断伸びの減少を助長した原因とも考えられるので、この点について早急かつ系統的に調査する必要がある。

加えて、研究期間の制限もあり、現状では材料のミクロ組織観察が十分に行えていない。前述のように、誘導加熱装置を用いた溶体化処理により、短時間のうちに大きな耐力が得られるものの、破断伸びは極端に小さいことが明らかとなった。その理由を検証する上でも、これらの試料の固溶状態や析出状態などについて、ミクロ組織の観点から系統的に検討することが不可欠である。そこで、電気比抵抗の測定や熱分析あるいは透過型電子顕微鏡を用いた析出物の直接観察などを通じて、熱処理に伴う材料特性の変化をミクロ組織の観点から関連づけることが必要である。

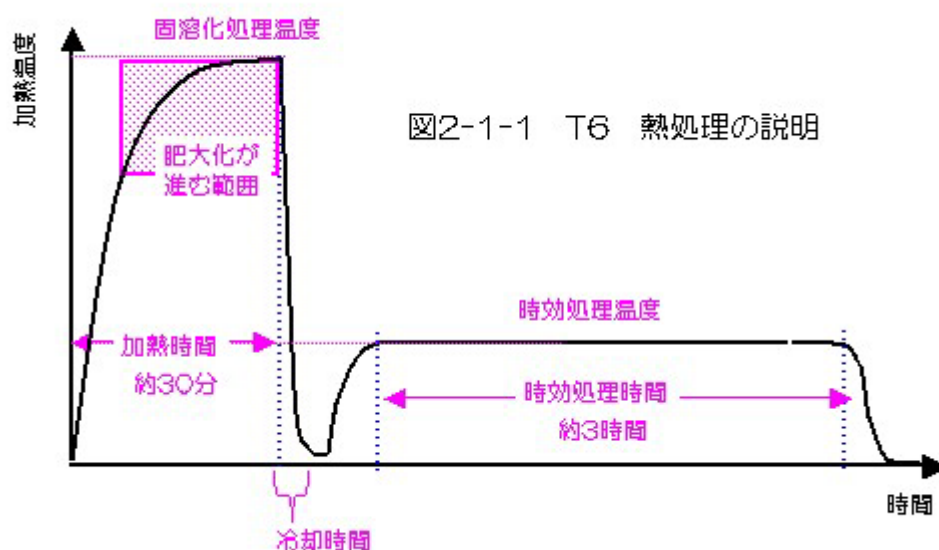
2 高出力電源の開発

2-1 電源の高出力化

アルミ急速加熱のための高周波電源の高出力化

2-1-1 アルミ強化研究と IH 加熱の必要性

アルミ強化の熱処理として JIS の T6 熱処理法が知られている。これはアルミを所定温度まで加熱し、急速に冷却（固溶化処理）、その後時効処理を行い、強化を図るという方法である。その際、JIS では所定温度には要件を定めているが、昇温速度については特別に要件を定めていない。しかしゆっくりした昇温速度（加熱）では、アルミ合金成分（シリコンなど）の“肥大化”が予想され、強度が阻害されることが知られていた。そこで、ここにねらいを定めたのが本研究である。肥大化はある温度範囲以上で起こるので、この範囲を狭めることが本研究の真っ先の課題であった。



さて、アルミの加熱は、従来は電気炉のように輻射熱や対流、熱伝導などいわゆる間接的に加熱を行っているのが一般的である。間接加熱は、熱媒体の比熱や温度差、それに部材表面などの影響を受ける。それに図のように目標温度に近づけば近づくほど媒体温度差が少なくなるので昇温速度は下がり、加熱時間は延びる。現状、電気炉では、0.1～0.3℃/secのゆっくりした加熱速度となっている。それで従来、急速な加熱が必要な場合には、媒体の熱伝導効率のよい、ソルトバス（塩浴～塩を高温で溶かした液）に浸す方法があったが、塩浴法は昇温速度は大幅に改善されるが、アルミは化学反応しやすい金属なので、実験といえども適当でない。

一方、間接加熱とは違い、熱媒体の影響がなくワークそのものを発熱させ昇温させる直接加熱の方法がある。この代表的な加熱方法が電磁誘導加熱（IH）であり、飛躍的に加熱時間が短縮できる。しかし家庭用の電磁調理器で知られるように非磁性のアルミやSUSは、鉄鍋など磁性体にくらべ加熱しづらいとされている。アルミは固有抵抗の低さによる低ジュール発熱量の性質も加わる。しかし適当な周波数と出力を用いれば、アルミといえども“急速加熱”は可能で、しかもIHなので電氣的に精密にコントロールできることがわかった。

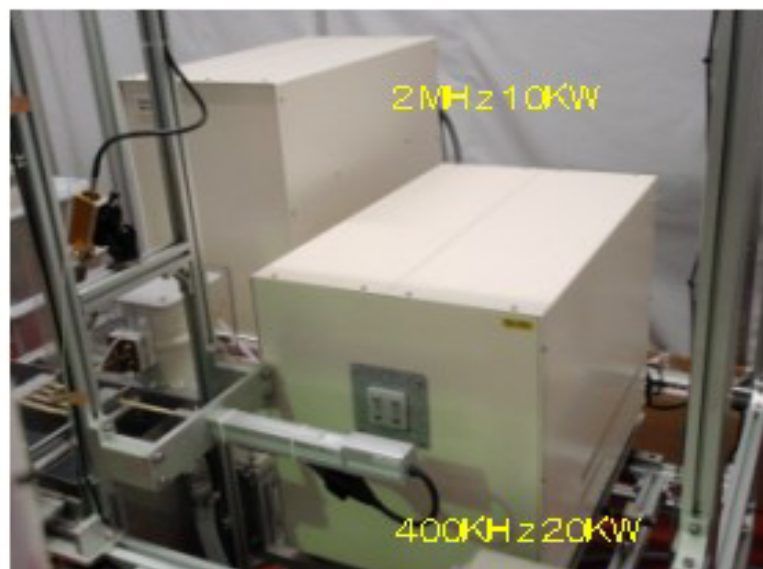
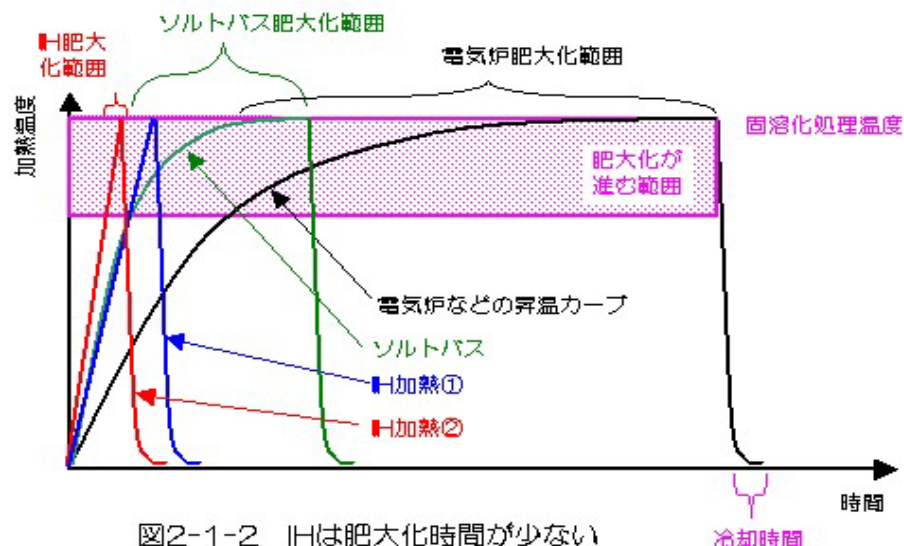


写真2-1-1 開発したIH装置を搭載

本研究の成果として、10KW2MHz、20KW400KHzのIH装置を開発し、アルミのテストピース（10φ150L）について、30℃/sec以上の昇温レートが得られた。

これはアルミの溶解温度（約600℃）まで、20sec以下の加熱時間である。従来法では、530℃到達に約30分が一般的であるので、0.3℃/secである。肥大化範囲での昇温速度はこれ以下になっている。写真はワーク及びコイルの形状に対応して、簡単に周波数を切り替えて実験できるようにした装置を示す。

このようにIHによるアルミの短時間加熱を行うと、電子顕微鏡写真などの結果から、シリコン成分の肥大化の傾向は見られず、肥大化を防ぐという初期の目標は十二分に達成された。

2-1-2 新たなる課題の克服とその成果

しかしながら、肥大化を防いだというものの、これほど短時間の加熱だと、アルミ強化に必要な他の成分（例えば添加元素の中では、銅成分が考えられる）の熱拡散時間の少なさによる強化阻害が新たに問題視されてきた。

熱拡散時間には、一般的に概ね到達温度にて保持時間が30～60secは必要とされる。従来法の加熱では、図のように到達温度近くなると、温度勾配が平らになり、到達温度と保持時間のはっきりした区分けができず一体化された結果となっているので、この関係は解明されようにも解明できない。

それでこれを解明するためには、装置として「急速に昇温したワークを、溶解寸前の温度で、オーバーシュートなく一定に保持させる」という新たな制御上の課題がでてきた。目標温度が溶解ギリギリなので、少しのオーバーヒートでも溶解に至ると、結果に重大な影響を及ぼすものと考えられるからである。

一般にPIDの温度制御では、系の遅れ要素からくるオーバーシュートが必ず生ずるので、この方法を用いることはできない。

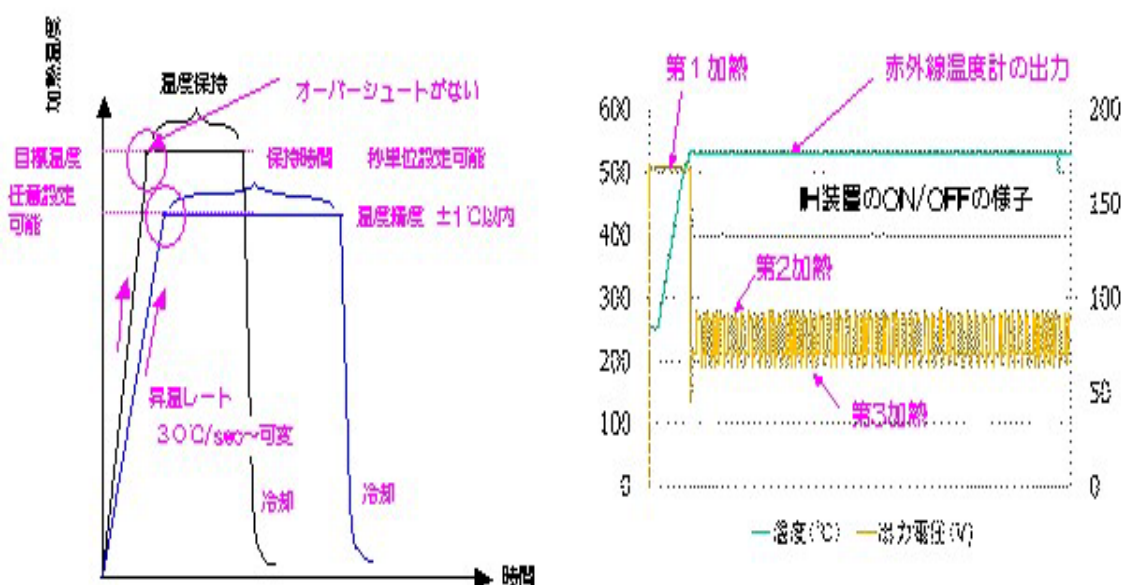


図2-1-3 昇温レート、保持時間を任意に設定できる

しかしよくみると、IH加熱（直接加熱）は、媒体を問わず、発熱源である誘導電流により自己発熱されているので、誘導電流を立ち切るとワークはただちに冷却に向かう。ただし冷却は“自然放熱”となるので、媒体を通じた“間接的な”冷却となる。

このことに着目し次の温度制御を行うことにした。

まず、目標温度まで急速加熱を行う（第1加熱）。この昇温速度は、装置の出力調整で自由に設定できる。用意してある赤外線温度計にて目標温度を検知したら、単純にIHの電源をOFFする。すると誘導電流は立ち切れ、ワークは直ちに冷却に向かい、オーバーシュートは生じない。自然放熱で冷却が始まり目標温度より -1°C となったらIHの電源をONにする。このとき第2加熱としてIHの出力を落として

加熱する。そうすると、第1加熱のような急速加熱ではなく、今度はゆっくりと昇温する。もちろん放熱に打ち勝つ出力を設定する。さらに冷却時に、自然放熱よりさらにゆっくり冷却されるように、冷却時にも微量の“加熱”を加えるよう工夫した（第3加熱）。赤外線温度計は、応答速度の良いものを使用し、熱電対などで正しい温度に校正しておく必要がある。

直接発熱の加熱/冷却の性質を積極的に利用し、これを電氣的な制御に応用した方法である。幸いアルミの熱伝導率の良さが、この制御系の精度を助ける方向になっている。

この方法で、オーバーシュートなく、精度良く一定の温度を確保し（ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内）、保持時間（拡散時間）を任意にとれることとなった。

肥大化防止の短時間加熱の達成、到達温度と熱拡散時間の関係を分離して追及できる本装置は、アルミあるいは、チタン、マグネシウム合金などの強化法を研究する加熱装置として大きな成果といえる。

2-1-3 高出力化した高周波半導体 IH 装置

高周波半導体 IH 装置の高出力化研究は、何もアルミ加熱のためばかりではない。熱処理業界では、鋼材用に多くの真空管式の高周波装置が現在も活躍している。真空管は周波数特性が優れていて、単一素子で大出力が扱える。現在、表面熱処理では200~400KHz 30~50KWの装置が主流である。しかし真空管は高電圧駆動なので電源に昇圧トランスや高圧回路が必要とし、周辺のスペースを広くとる必要性や、耐圧劣化による放電の危険性、フィラメントの寿命による故障、また真空管の製造中止による入手困難、また変換効率が悪いなど、大型で、経済的にも、信頼性や安全性面からも、多くの不都合があるため半導体式に代替を迫られているのが実情である。

一方、半導体化 IH 装置は、半導体メーカーは周波数変換素子（スイッチング素子）を大電力化するため、チップ上に小さな素子を並列駆動する IC 化（単一の IC 化された素子）を行っているが、たくさんの素子を狭い面積に集中させるので電流拡散や放熱の問題などがあり、単一素子での高周波化はすすんでいない。しかし低い周波数（30KHz以下）での大電力化は、MW（1000KW）クラスまで進んでいる。これとは別に、個別素子を集合させ並列運転（パララン）させる分散手法とがある。分散手法では、広い面積に素子が配置されるので、高周波領域での電流の均流化の問題がある。

国内大手の IH メーカーでは200KHzで100KW（or more）程度が実用化されている。

周波数が高いと波長が短くなり、扱う信号も速くなる。部品配置や配線、冷却方法など極端に制限を受ける。それゆえ分散手法による高周波化は一段と難しいものとなる。我々は分散手法で最大出力実績2MHz 10KWを実用化させてきた。これをさらに高出力化するかが本研究のサブテーマとしての狙いでもあった。

アルミのテストピース（10φ150、30φ10t他）は、熱処理後に行われる各種の機械的試験機にかけられる形状として決められた寸法である。アルミはもともと電気抵抗分がとても小さく、また非磁性体で Δ （電流浸透深さ）も大きく、ワークの大きさによるし分（加熱コイル含めたインダクタンス）も小さい。このワークの大きさと材質から、予備設計を行った結果、

①400KHzでも、十分加熱可能。(効率の低下は計算上ほとんどない)

②20KW2MHzは定数計算から製作不可能。

③20KW400KHzは、製作可能である。

という、結論を得て、設計製作を試みた。

本来ならば真空管式の代替需要を見越して中心出力の30～50KWを目指すべきだが、ステップバイステップで目標を400KHz 20KWにした。

これが実現できれば、300KHz 40KWは、比較的簡単と判断している。

完成後同じワーク、同じコイルで400KHzと2MHzの加熱比較実験を行った。その結果から、同じ電圧で400KHzの方が2MHzより、加熱速度が速いという結果が得られた。同じ電圧でも、400KHzの方が入力電流が増えている。

これらの結果から

①周波数が下がってワークとコイルの結合効率が良くなった

②周波数が低いと装置の高周波ロスが少なく、皮相電力が増した。

といえる。

2-1-4 400KHz 20KWのIH装置

写真のようにFETを横にたくさん並べて、4列のパラランを行っている。ひとつひとつのTr回路は、時間軸すべてわたって同じように動作させなければならないので、各回路は調整が必要でありとても手間がかかる。アナログ動作、高周波、大電力なので部品特性、配置や配線、冷却方法などすべてが影響する。

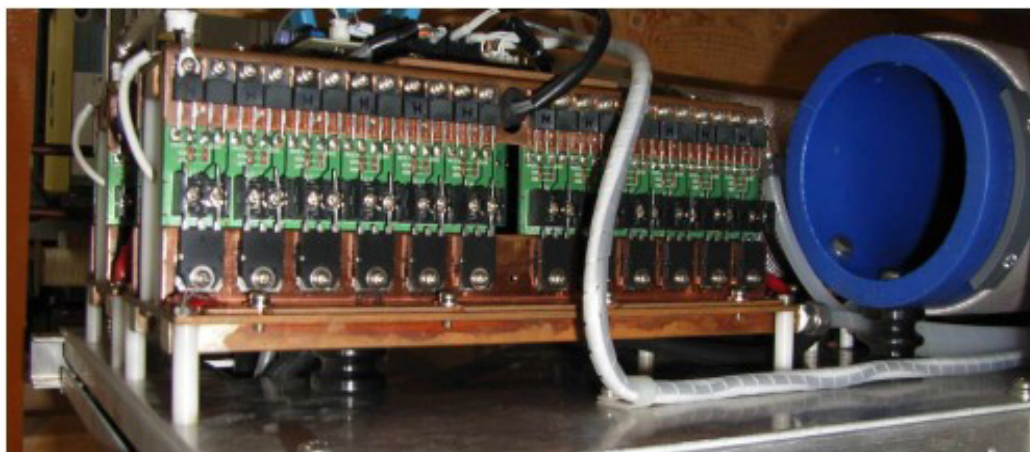


写真2-1-2 FETのパララン

2-1-5 半導体高周波IH装置の高出力化の方向

今回実現した400KHz 20KWの装置でも、まだまだ真空管熱処理装置の主流範囲には届いていない。しかし今回の開発で培った高出力化への技術をもってすれば、もうすぐ手に届くところまで来ていると実感している。

高出力、高周波装置は今後、プラズマや太陽電池など表面改質やエネルギーの分野で需要が高まると予想されている。また、アルミ素材強化以外に、チタン、マグネシウムも同様に合金化され、より強い材料が望まれることは明らかである。アルミ強化研究によるこの高出力化研究は熱処理業界だけのためでなく、広く産業界に貢献できていると思っている。

2-2 周波数の検討

平成18年度に設置した誘導加熱装置「機械的性質検証用熱処理装置」では、誘導加熱装置を用いたアルミニウム合金の加熱状況の把握ならびにその加熱を利用した熱処理がアルミニウム合金の機械的性質に及ぼす影響の調査を目的としていた。この検討では、鉄鋼材料に関して特徴的な加熱状況が実現でき、アルミニウム合金についても既存装置より加熱に有利と考えられる高い周波数（2MHz）を用いた。しかし、プロトタイプの熱処理装置の開発にあたり、高効率で利便性の高い加熱状況を実現するためには、アルミニウム合金の加熱状況に及ぼす周波数の影響を改めて調査する必要があると考えられた。そこで、同一試料ならびに同一形状の加熱コイルを用いることによりほぼ同等と考えられる条件を実現し、加熱実験を実施した。この検討を通じて、周波数の違いがアルミニウム合金の加熱状況に与える影響を実験的に検証した。

2-2-1 実験試料と実験方法

本プロジェクトの共通試料である6061アルミニウム合金押出丸棒を実験試料に用いた。供試材の形状と寸法を図2-2-1に、化学組成の分析結果を表2-2-1に示す。誘導加熱装置を用いた加熱実験は、図2-2-2に示す状況で行った。図に示したように、試料端部から20mmの位置に加熱コイルを設置し、加熱コイル近傍の試料表面について温度測定を行った。試料表面の温度測定にあたり、温度測定部にはあらかじめ黒体化処理を行った。前年度の研究成果を参照すると、黒体化処理と適切な放射率（0.78）の設定に伴い、250℃から600℃程度の広い温度範囲に亘って放射温度計を用いた試料表面温度の測定精度は適正に維持（ $\Delta 5^{\circ}\text{C}$ 程度）できることが明らかとなっている。2MHzあるいは400kHzの周波数を有する電源に加熱コイルを接続し、種々の条件で加熱実験を実施した。各電源における最大の出力電圧は250Vで、それ以下の出力電圧については任意に調整可能な仕様となっている。

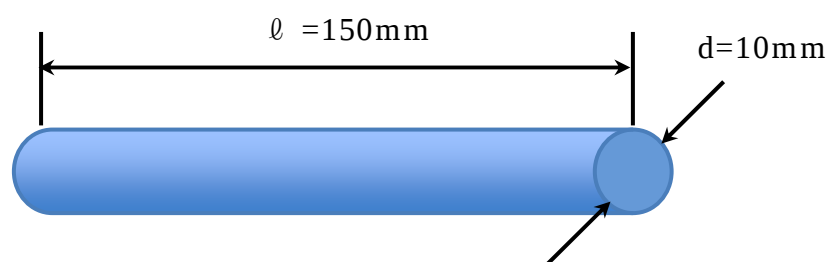


図 2-2-1 実験試料の寸法・形状

表 2-2-1 実験試料の化学組成（分析結果：mass%）

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.67	0.30	0.31	0.13	1.00	0.19	0.08	0.02	bal
JIS	0.40- 0.80	-0.70	0.15- 0.40	-0.15	0.80- 1.20	0.04- 0.35	-0.25	-0.15	bal

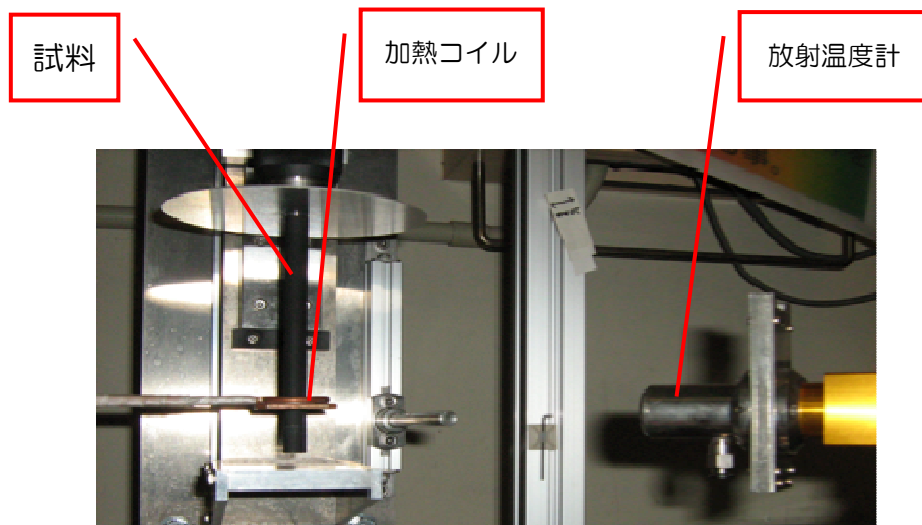


図 2-2-2 試料の加熱状況

2-2-2 実験結果および考察

2MHz ならびに400kHz の周波数を有する電源を用いて、出力電圧を250V あるいは200V に設定した際に得られた試料表面温度を図2-2-3に例示する。この図では、縦軸に放射温度計で測定した試料表面温度、横軸に通電開始からの経過時間を示している。図では250℃以下の温度測定が行えていないが、これは今回使用した放射温度計の測定温度の下限が250℃であることによる。図に示した結果から明らかなように、2MHz より400kHz の周波数で加熱した場合に大きな昇温速度が得られると言える。また、何れの周波数で加熱した場合にも出力電圧の増大に伴い昇温割合は増大した。例えば450℃での到達時間を比較すると、出力電圧を200V から250V へ高めることにより、2MHz では28.7s から13.3s (46%) へ、400kHz では17.6s から8.9s (50%) へと顕著に短縮した。今回の実験において最大の昇温割合が得られる条件(400kHz、250V)では、約41℃/s を超える昇温割合を達成している。同一試料をソルトバスで急速加熱した実験結果によると、200℃以下における温度範囲では上述の昇温割合に匹敵する高い値(約47℃/s)を示したものの、400℃以上の温度範囲では昇温割合が急速に低減(約7℃/s)することを確認している。このことから明らかなように、誘導加熱装置による加熱時の特徴として、ソルトバスに相当する高い昇温割合が得られるだけでなく、低温から高温に至る広い温度範囲において高い昇温割合が維持される点を挙げることができる。このような特徴は、既存の電気炉やその他の汎用の加熱装置では、実現することが難しい。

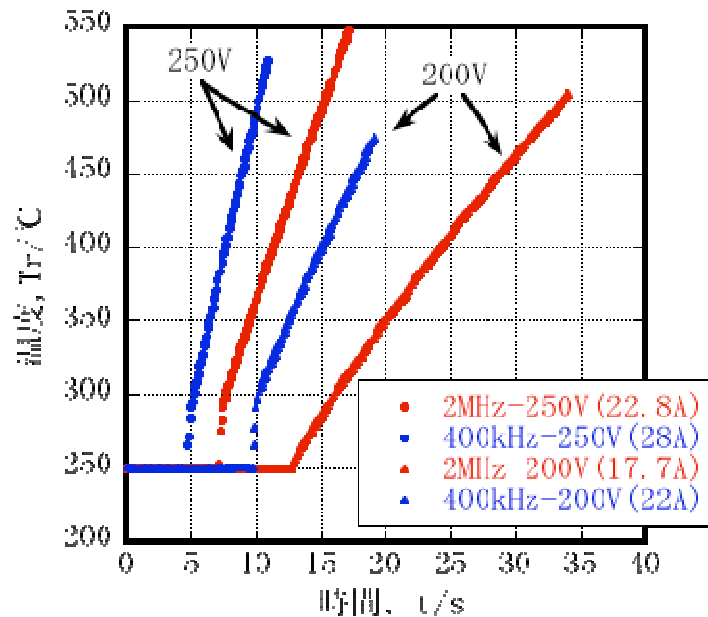


図2-2-3 周波数が加熱状況に及ぼす影響

今回の実験では、2MHzと比較して400kHzで加熱した場合に高い昇温割合が得られた。この結果は、「周波数の増大に伴いアルミニウム合金の加熱効率が向上する」という推測と矛盾する。そこで引き続いて、この点について検討を加えた。今回の加熱実験では、同一の試料と加熱コイルを用いることにより、周波数が加熱状況に及ぼす影響を検討したが、図2-2-3中に記述したように加熱コイルに供給される電流は周波数に依存して異なっている。250Vの出力電圧における加熱実験で比較すると、400kHzの場合の供給電流は28Aであるのに対して、2MHzの供給電流は23Aであった。したがって、加熱コイルに供給された仕事は、それぞれ7.0kW（400kHz）および5.7kW（2MHz）となり、18%以上の差異が存在するので、昇温状態の比較にあたり適正な評価にならない可能性がある。そこで、加熱コイルへ供給される仕事を同等にした場合の加熱状況について調査を進めることとした。

加熱コイルへの供給仕事を5.7kWで統一した際の昇温状況を図2-2-4に示した。供給する仕事の調整は、2MHzを250Vで加熱した場合（5.7kW）を基準として、400kHzで加熱する際の出力電圧を適切に調節（228V、25A）することにより達成できた。このような実験を通じて、昇温状況に及ぼす周波数の影響を直接的に検討することが可能と考えた。図に示した結果から明らかなように、周波数の違いによる加熱状況の差異は低減されたものの、依然として400kHzで加熱した場合に昇温割合がやや大きくなる傾向が確認される。

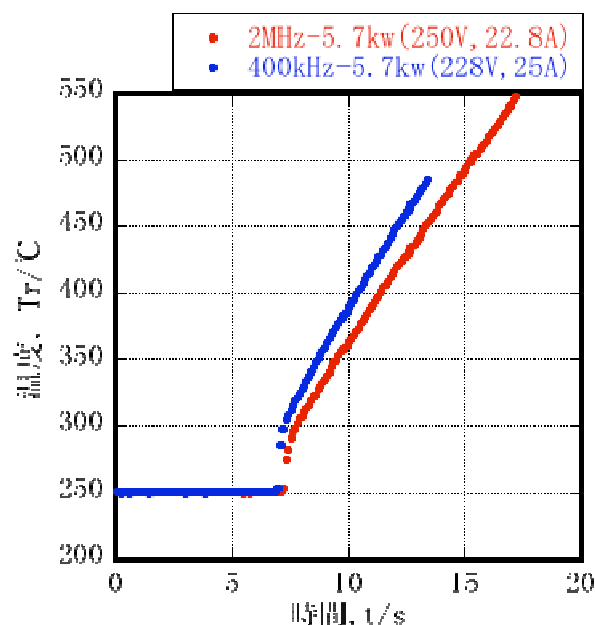


図2-2-4 周波数と加熱状況
(同一仕事での比較)

ところで、加熱の対象物が存在しない状況においても通電に伴い相当量の仕事消費されることが知られている。そこで、試料が存在しない状況下で消費される仕事の測定を行うことにより、試料の加熱に実質的に寄与する仕事を評価することとした。試料の有無が加熱コイルへ供給される仕事に与える影響を調査したところ、図2-2-5に示す結果が得られた。ここでは、「試料あり」と「試料なし」との差分に相当する仕事が、試料の加熱に寄与すると解釈した。

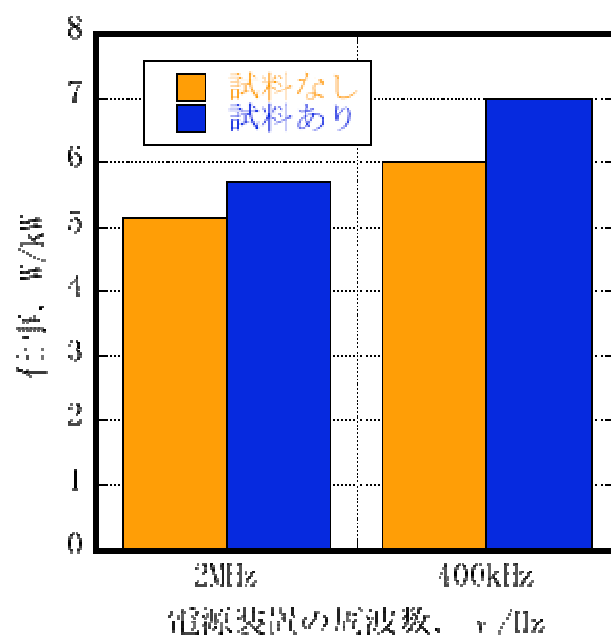


図2-2-5 周波数と実効仕事

図に示した結果から、試料の加熱に寄与する仕事（実効仕事）は極めて僅かであることが明らかとなった。また試料の加熱に有効な仕事の割合は周波数の増大に伴い低減する（2MHz：10.1%、400kHz：14.3%）ことも同時に示された。参考までに、いくつかの条件で加熱実験を行った結果に関して、昇温割合と実効仕事との対応関係を求めたところ、図2-2-6に示す結果が得られた。実験条件の設定が十分でないことに起因して、測定データ数が不足しているように感じられるものの、各周波数においては昇温割合と実効仕事の間には良好な直線関係が存在すると解釈できる。また周波数の観点から検討すると、同一の実効仕事では、2MHz の場合に高い昇温割合が得られると推測されることから、周波数の増大に伴い加熱効率も増加すると考えられる。

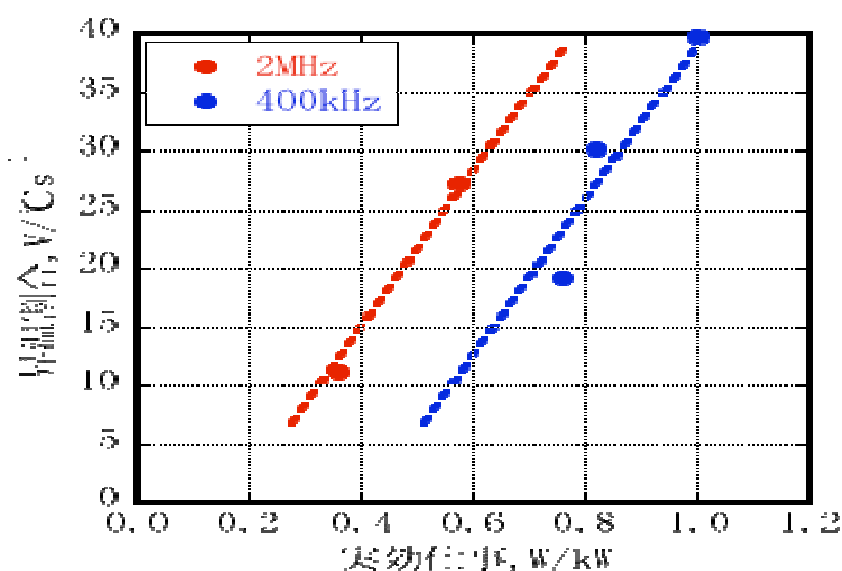


図2-2-6 昇温割合と実効仕事

以上のように、本プロジェクトで採用した周波数である2MHz と既存の誘導加熱装置で用いられている周波数のほぼ上限に相当する400kHz に関して、加熱状況を検討したところ、次の結果が得られた。①加熱コイルへの供給電圧を同一にするような単純な比較実験では、400kHz の方が大きな昇温速度が得られる。②しかし試料の加熱に実質的に関与する仕事で評価した場合には、2MHz の方が大きな昇温速度が得られる。このように、本プロジェクトで採用した高周波誘導加熱装置の周波数（2MHz）をアルミニウム合金の加熱に適用した場合、既存装置における周波数の上限に相当する400kHz との差異を明瞭に見出すことはできない。この原因としては、試料の寸法を挙げることができる。今回の実験で用いたアルミニウム合金丸棒の直径は10mm、加熱に用いたコイルの内径は12mm である。誘導加熱の原理によると、小径試料や薄板試料の加熱に対しては、周波数の増大に伴い加熱効率が飛躍的に増大する可能性がある。つまり、実験試料の寸法が大きいことに起因して、2MHz の特徴を明瞭に捉えることが困難であった可能性が考えられる。本プロジェクトでは小径・小物アルミニウム合金部品の高効率な熱処理を開発目標の一部に掲げているので、現状より更に小さな試料を研究対象とする必要がある。今後は試料寸法の低減を通じて、詳細に検討する予定である。

3 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発

3-1 プロトタイプ型アルミ熱処理装置

3-1-1 装置概要

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た。試作装置の概要図を図3-1-1に、外観写真を図3-1-2に各々示す。

加熱の周波数は、2MHzまたは400kHzの切り替え方式で、最大出力は、それぞれ10kWおよび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方式で入力が可能で、履歴は記録される（図3-1-3）。

図3-1-4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、アルミナセラミックス製の保持棒で行う。設定時間経過後、保持棒は下方に開き試験片は水中に投入、冷却される。

図3-1-5は、試料の搬送機構（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プレイスであり、試料は積み重ねて保持している。

3-1-2 加熱実験

開発装置を用いて、試料の加熱実験を行った。試料形状は円板で、第2章1-1項で用いたものと同じである。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一致するように放射率の設定を行った。その後、試料の加熱実験を行った。図3-1-6は、設定温度530℃で昇温したときの電源電圧と試料温度の経時変化を示す。

試料が設定温度に到達するまでは出力電圧は最大の170Vである。設定温度に到達後、放射温度計で試料温度を計測しながら、70Vと90Vの出力を切り替える。これにより、試料温度を528℃から531℃の間に制御することができた。

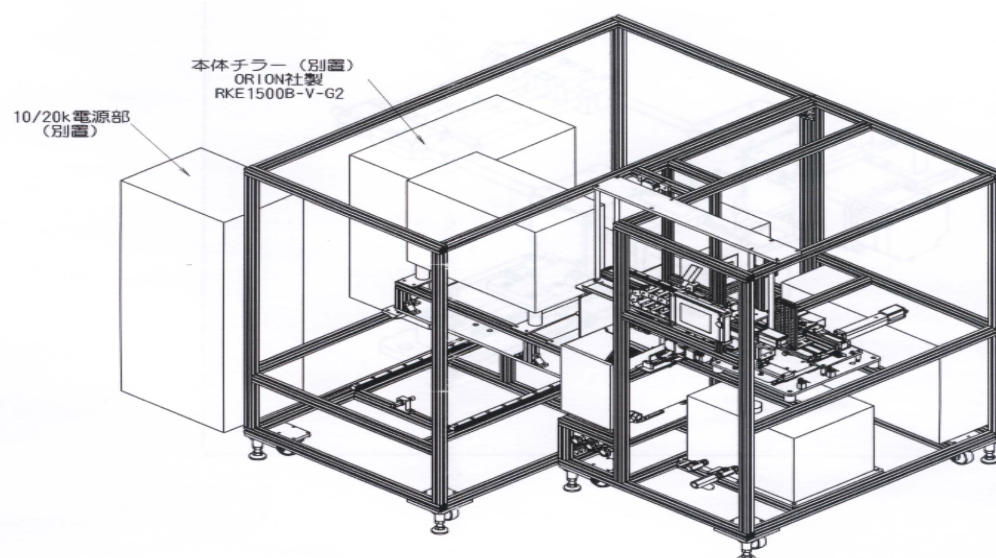


図3-1-1 試作装置の概要図（設計段階）

○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	10~20 kW
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	φ21—L10mm、 φ10—L150mm、 φ4—L85mm、 φ9—L125mm
ワーク移動速度	1~100mm/秒
ワーク供給	自動

3) 冷却部

冷却水温度	5~20 °C（一定温度に制御）
水槽容量	50 リットル
冷却能力	2 kW

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—1—2 試作装置の外観



図3-1-3 操作パネルの外観

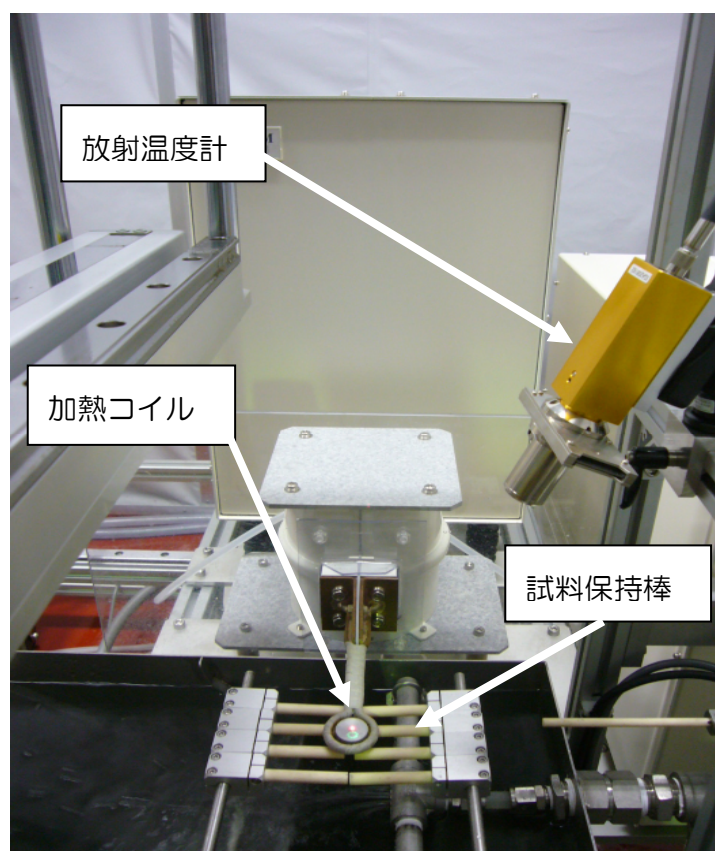


図3-1-4 加熱コイルと試料保持機構

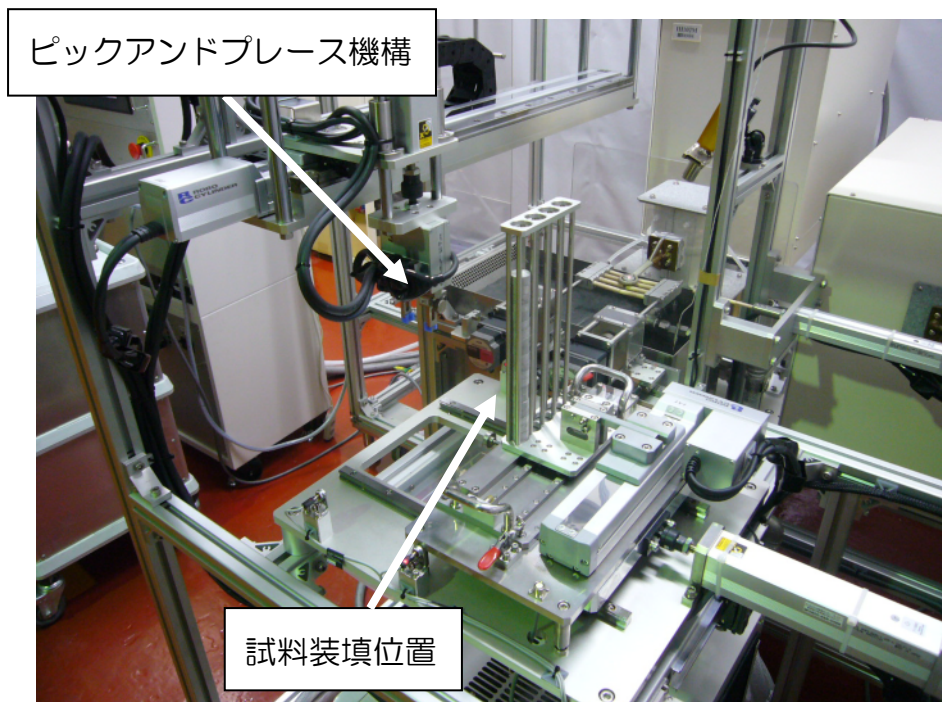


図3—1—5 試料の搬送機構（円板形状）

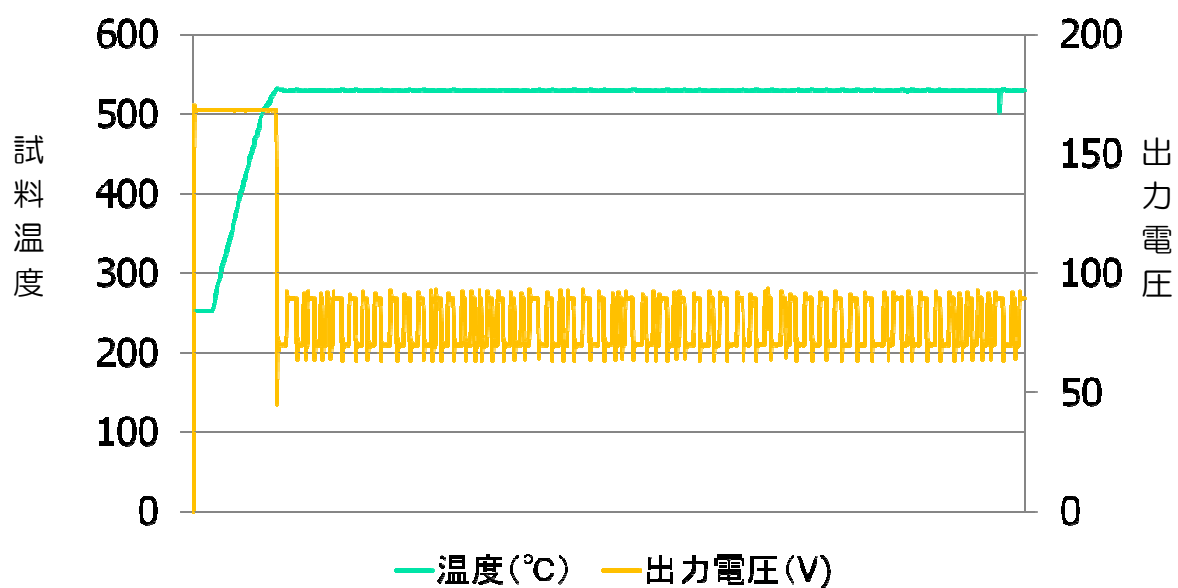


図3—1—6 設定温度530℃で昇温したときの出力電圧と試料温度の経時変化

3—1—3 まとめ

開発装置が完成し、試料温度が設定値近傍で3℃の幅で制御可能なことが判明した。今後は、補完研究として開発装置を用いて熱処理実験を実施し、量産の可能性を検証する予定である。

最終章 全体総括

(1) 設定目標と研究成果

3年間にわたり実施した、本研究における各項目毎の目標と研究成果は次のとおりである。

1-1 アルミニウムへの熱処理とその評価

○機械的強度の向上（A6061合金、0.2%耐力で評価、時効処理8時間で共通）

従来技術（電気炉による溶体化処理） 263MPa



開発技術（高周波による溶体化処理） 350MPa



33%の耐力向上達成

1-2 シミュレーション技術によるコイル開発および熱処理条件の最適化

○昇温時間90%削減

従来技術（電気炉）昇温30分、保持30分



開発技術（高周波）昇温36秒、保持3分



昇温時間：98%削減、保持時間：90%削減

1-3 アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発

○アルミニウム用高周波熱処理装置の試作開発が完了。熱処理実験を開始。

局部熱処理については検証が終了していないため、継続して補完研究を実施。

2-1 高周波誘導加熱における温度制御技術の開発

○均熱加熱の実現

ばらつきのない安定した熱処理を実現



コイル移動前に予熱時間を設け±3℃の均熱加熱を実現

2-2 高出力電源の開発

○電源出力：20kW 以上

20kW 以上の出力を有する電源装置開発を目指す。



電源出力10～20kW で可変、周波数400kHz または2MHz の切換の装置を開発

(2) 現在の技術開発動向とその影響

競合技術又は類似研究等はない。

自動車産業では燃費向上のため、軽量化の研究は盛んに行われている。本研究は、アルミニウムの機械的強度向上を目的の一つにしていることから、この分野での利用が期待できる。

また、本研究は、アルミニウムのみならず、マグネシウム、チタンなどの軽金属の熱処理による機械的強度の向上に関わる技術開発には影響を及ぼすものと考えられる。

(3) 現在の市場動向及びその対応

08年秋以降の世界的不況により、自動車の売り上げは低迷している。しかし、自動車は生活必需品のため、金融不安が払拭されれば数年後には買い換え需要が期待できる。

各企業では数年後を見越して本腰を入れた開発を行うとともに、従来にない技術への注目が高まっている。今のタイミングで市場へ装置や部材を供給することは、開発技術を広く普及させるために有効である。

(4) 事業化計画について

川下ユーザーから実製品と同一形状・材質の試験片を入手し、実験をしてきたことから、品質や製造コストが見合えば生産・普及できる体制にある。

また、他の川下ユーザーへも開発技術を周知し、用途の開拓を行っている。現在は最終年度に試作した装置の評価をしている段階であり、具体的な販売戦略を今後の開発会議で打ち出す予定である。

さらに、開発に携わった企業は全て県内中小企業であることから、山梨県の「県内製造業中小企業者向け技術研究開発等補助金」等を活用して事業化を図る。

なお、平成21年度から同メンバーで、山梨県工業技術センターの共同研究として補完研究を行うことが決定しており、サポインメンバー相互および川下との協力関係は継続する。

(5) 参画機関相互の摺り合わせ及び協力・連携体制

研究開発推進委員会は全期間を通して、月1回のペースで開催した。研究項目や内容に応じて主担当機関を設定するとともに研究開発推進委員会で議論を交わし、必要な研究内容が発生すると、その都度、役割分担を行い、研究を実施した。

連携体制の例として、山梨大学では、試験片を用いた熱処理実験を行い、丸真熱

処理工業が協力して評価を行った。熱処理装置の改良についてはワイエス電子工業が随時対応した。浅川熱処理では実用化を主眼に置き、エンジン部品の熱処理に取り組み、強度試験を山梨県工業技術センターで実施した。

（６）今後の研究開発方針

最終年度に開発した熱処理装置で熱処理実験を行ったが、製品化には問題ないレベルと考えている。

今後は同メンバーで、山梨県工業技術センターの共同研究として補完研究を実施しながら対象範囲を拡大し、事業化を検討する。また、展示会などを通して川下企業へPRを行い、市場ニーズを把握して事業化・製品化を推進する。

（７）おわりに

数種類設定した目標はほぼ達成され、順調に研究が実施できたと考えている。特に、機械的強度は33%向上し、極めて大きな成果と考える。今後は、補完研究を実施しながら事業化を推進していく。

また、本研究は、参画機関が全て山梨県内に所在することから、山梨発の地域技術としても価値があると考えている。

川下ユーザーは来るべく景気回復に向けた研究開発を推進しており、本研究のような従来にない技術を積極的に取り入れる気風が大いに感じ取れる。景気の回復基調に合わせて設備投資が活発になることが予測できるため、着実に開発を重ねて実用化に積極的に挑戦するとともに、この研究成果が関連業界における景気回復の起動力の一つになることを切望している。

最後に、本研究は研究計画書のメンバーはもとより、参画企業・工業技術センターでは、当初計画における研究メンバー以外の方々、山梨大学では各研究室の学生諸氏、ならびに関東経済産業局の方々の多大なる協力の下に遂行され、大きな成果を得ることができた。ここに深甚なる感謝を申し上げます。