

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2報)

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

Development of High Quality and High Efficiency Heat Treatment for Aluminum Ware by Rapid Heating (2nd Report)

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

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で高効率な熱処理技術に取り組んだ。研究項目の中から、自動車部品への高周波誘導加熱による熱処理、およびシミュレーション技術によるコイル形状の検討を行った。その結果、適切な加熱条件を設定することで、高周波熱処理によって目標とする硬さが得られた。また、コイルと試料との間隙の影響を解析した結果、間隙が増加するほど温度上昇率が低下した。

Abstract

In the auto industry, there are various kinds of problems such as a remarkable rise of a crude oil price, exhaust emission regulation and customer needs to diversify. For these problem solution, we wrestled in the heat-treatment technology that was high efficiency in a high quality of aluminum alloy by the rapid short time heating that was not performed conventionally. From a study item, we tried to heat treatment for Aluminum automotive parts by high frequency induction heating. And shapes of heating coil were discussed by Finite Element Method simulation technique. As a result, under the good heating condition, the hardness of specimen increased by solution heat treatment with an Ultra-High Frequency power supply. According to the calculation for the effect of the coil gap, heat increase ratio was decreased as the coil gap become large.

1. 緒 言

本研究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で高効率な熱処理技術を前報¹⁾に引き続き下記の項目により開発し、課題解決に取り組むものである。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。

研究は、各共同研究機関と内容を分担して実施した。本報告では下記の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 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

前者では、昨年度に試作した装置を用い、エンジンバルブリテーナ（以下、リテーナと表記する）を模した試験片の高周波熱処理を試みた。対象としたリテーナは、現状では、鍛造→溶体化処理（電気炉）→時効処理（電気炉）のプロセスで生産されている。本研究では、溶体化処理の工程を高周波熱処理で行った。高周波熱処理への変更の利点は、熱処理時間の短縮、割れによる不良削減である。熱処理の際の所定温度保持時間を変化させ、硬さ測定、金属組織観察、残留応力測定により評価を行った。

後者では、加熱コイルと試験片間隔（以下コイルギャップと記す）、試験片の移動方法などの諸条件が加熱特性に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。

*1 山梨大学

*2 ワイエス電子工業(株)

*3 浅川熱処理(株)

*4 (株)丸真熱処理工業

昨年度は、電源周波数が炭素鋼 (S45C相当) への加熱状態へ与える影響について解析を行った。

本年度は実際に熱処理を行うアルミニウムに対して、試験片-コイル間隔や試験片移動速度等を変えることで、温度分布変化にどのような影響があるかについて解析を行った。

2. 実験方法

2-1 アルミニウムへの熱処理とその評価
エンジンバルブ周辺構造の模式図を図1に示す。

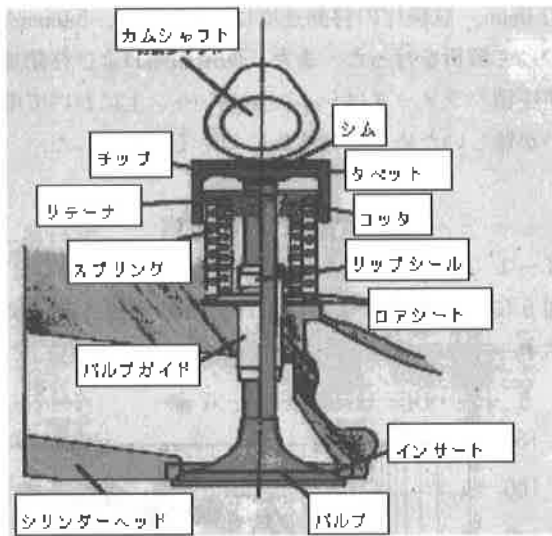


図1 エンジンバルブ周辺構造の模式図

本実験で対象としたリテーナはバルブの上部に位置し、スプリングとバルブの接続を行う部品である。

図2に加熱装置にセットされた試験片の写真を示す。

試験片はコイル上部に固定し、斜め上方から放射温度計で測温しながら実験を行った。

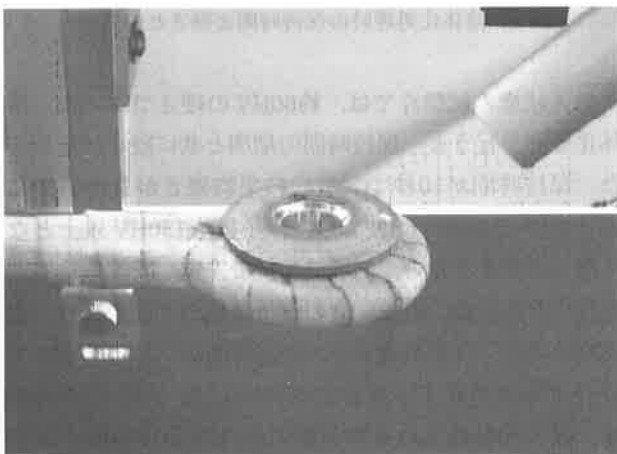


図2 加熱装置にセットされた試験片

試験片材質は高シリコンの特殊アルミニウム合金であり、熱処理後の目標硬さは150HVである。熱処理は、

高周波電源で条件を変化させて溶体化処理を行った後、電気炉で時効処理を行った。溶体化処理温度は530℃と一定にして、保持時間を0秒から最大で600秒まで変化させた。また、比較のため、530℃に設定した電気炉に1800秒保持した試験片を用意した。時効処理条件は、処理温度180℃で保持時間は180分と一定にした。熱処理後の試験片は、切断して中央部の硬さを測定すると共に、電子顕微鏡 (SEM) による断面観察、エネルギー分散型X線マイクロアナライザ (XMA) による元素分析を行った。

現状の生産工程で問題となっている割れの原因を調査する目的で、電気炉を用いて溶体化と時効処理を行っている試験片について、割れが発生したものとしなものを各々用意した。これらの試験片の表面に形成している残留応力をX線微小部応力測定装置 (線リガク Automate) で測定した。測定位置を図3に、測定条件を表1に各々示す。割れ発生の原因究明の目的から、測定方向は円周方向とした。

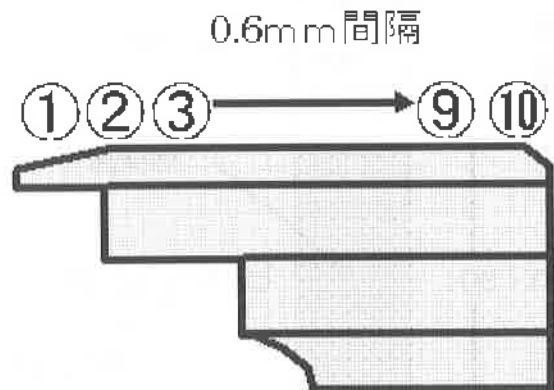


図3 残留応力測定位置

表1 X線応力測定条件

X線源	Co K α
管電圧	40kV
管電流	40mA
回折面	Al 420
X線の応力定数	-70.36 MPa /deg
測定法	並傾法
サンプリング幅	0.1 deg
計数時間	36 sec
軸揺動	2 deg
ピークサーチ法	半価幅法

2-2 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

表2に用いた試験片の物性値を、図4に解析に用いたモデルを示す。解析に用いたモデルは2次元軸対象モデルである。

表2 解析に用いた物性値

熱伝導率 [W/m・K]	196
比熱 [J/kg・K]	0.896×10^3
透磁率 [S/m]	26.1×10^6
密度 [kg/m ³]	2700
B-H特性	S45Cの特性を使用
試験片融点	550°Cと仮定(固定加熱) 570°Cと仮定(移動加熱)
外気温度および試験片初期温度 [°C]	20

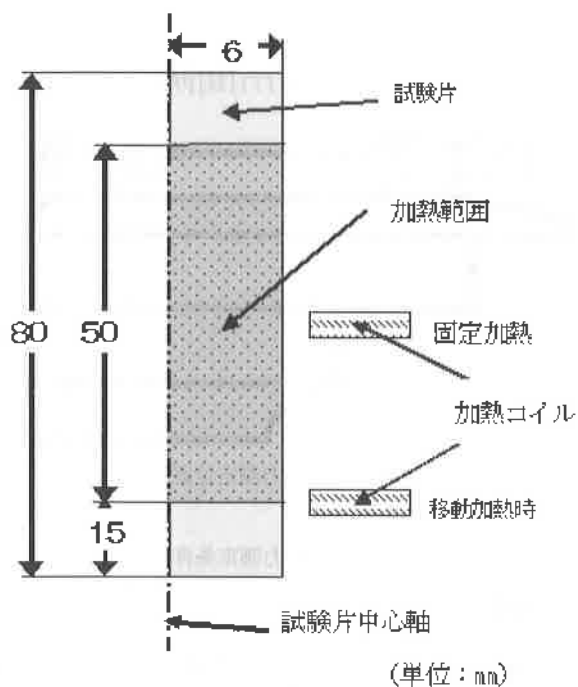


図4 解析モデル

モデルの材質はA6061アルミニウム合金を想定し、試験片直径は実際に熱処理を行っている試験片と同様の12mmとした。また、解析時間の関係から試験片全長は80mmとし、焼入れ長さは試験片中央部の50mmの範囲とした。

解析ソフトウェアにおいて誘導加熱解析に必要であるB-H特性(磁気特性)は非磁性であるアルミニウムの場合存在しないため、実測された炭素鋼(S45C)の値を用いて解析を行った。この特性は誘導加熱による発熱領域の解析に用いられるため、試験片内部の伝熱状態に

関しては影響を及ぼさない。

コイル厚み t はシミュレーションにおける電圧値パラメータを一定にした場合でも解析結果に影響を及ぼすため、今回の解析ではコイル厚み t およびコイル幅 b は $t=3\text{ mm}$ 、 $b=6\text{ mm}$ と一定にした。

試験片の加熱は固定加熱および移動加熱にして解析を行った。固定加熱については試験片中央付近にコイルを固定し、コイルギャップ cg をパラメータとして、 $cg=0.75\text{ mm}$ 、 1.00 mm 、 1.25 mm 、 1.5 mm について熱分布の解析を行った。移動加熱については試験片下部15mmの位置を加熱開始位置として、コイルギャップ $cg=1.0\text{ mm}$ 、試験片の移動速度は、 4.0 、 4.5 、 5.0 mm/sec について解析を行った。また、固定加熱および移動加熱の電圧値パラメータはシミュレーション上において取り扱いが難しいため、それぞれについて一定とした。

3. 結果および考察

3-1 アルミニウムへの熱処理

図5に溶体化処理における保持時間と硬さとの関係を示す。

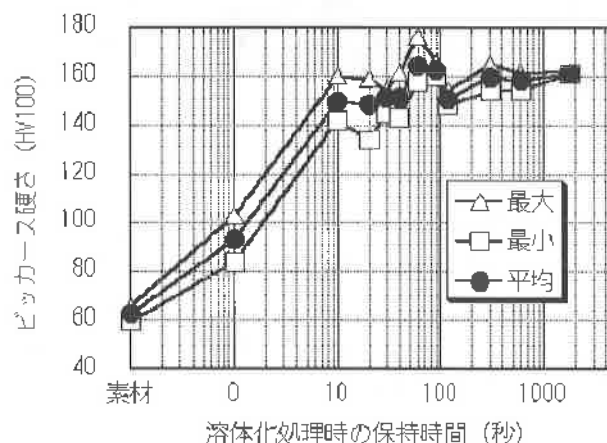
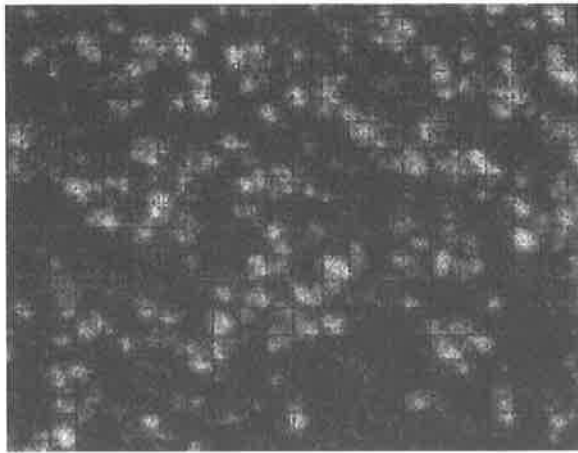


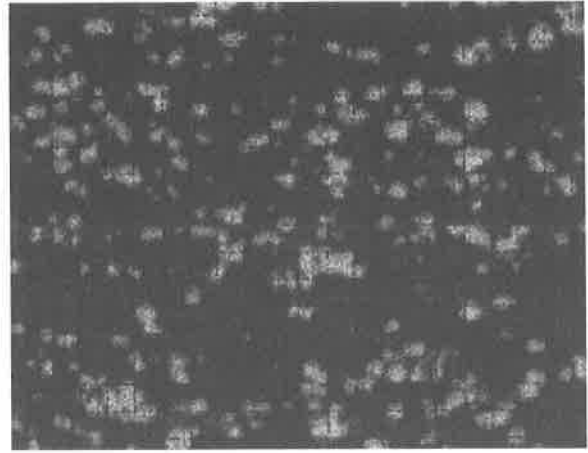
図5 溶体化処理時の保持時間と硬さとの関係

受入状態の試験片では、約60HVの硬さであった。溶体化処理を行うと、保持時間の増加と共に硬さは増加した。保持時間が10秒で試験片の平均硬さが目標値である150HVとなり、60秒では、最小値も150HV以上となった。このことから、高周波加熱で安定した溶体化処理を行うためには、ある程度の保持時間が必要であり、本実験の場合、目標温度までの到達時間が7秒と合わせて67秒で処理が終了することが判明した。この処理時間は、現状行われている電気炉の処理時間1800秒と比較すると約3.7%に過ぎず、高周波熱処理を導入することで製造工程における熱処理時間の大幅な短縮が可能になると考えられる。

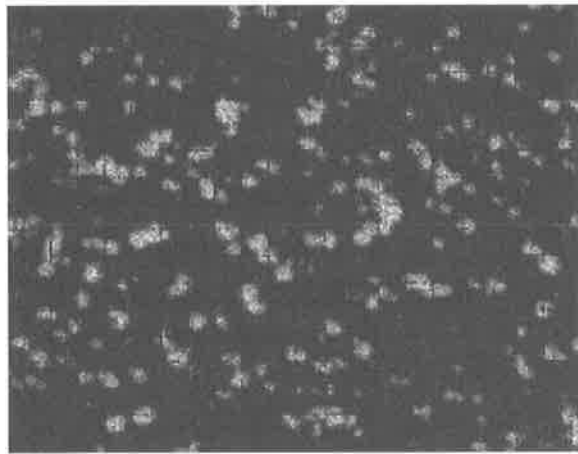
図6に熱処理後の各種試験片断面に存在するシリコ



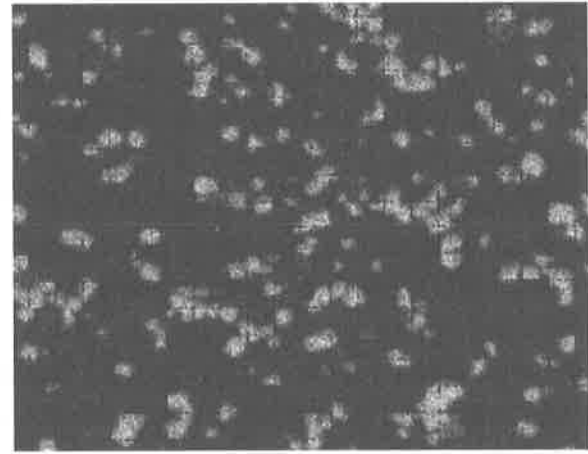
(a) 素材のまま



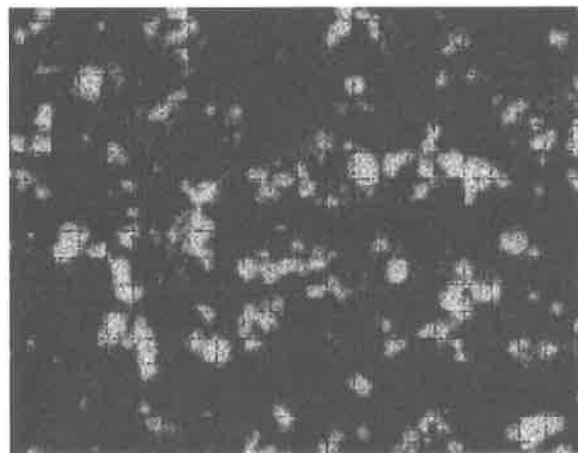
(b) 溶体化処理時の保持時間10秒



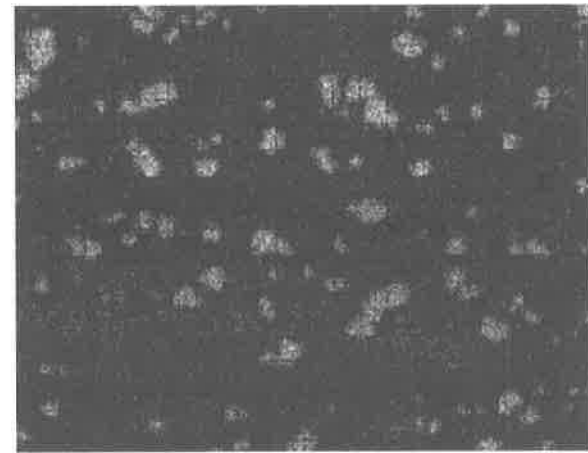
(c) 溶体化処理時の保持時間60秒



(d) 溶体化処理時の保持時間300秒



(e) 溶体化処理時の保持時間600秒



(f) 溶体化処理時の保持時間1800秒 (電気炉)

図6 熱処理後の試験片断面に存在したシリコンの面分析結果

ンのXMAによる面分析結果を示す。

溶体化処理の保持時間が300秒までは明確な違いは認められなかったが、600秒以上になるとシリコン粒子が成長し、粗大化している様子が観察された。図6に示した各断面について、各々10個のシリコン粒子を無作為に抽出して計測し、これらの平均粒径を算出した。その結果を図7に示す。

素材の状態では、平均粒径は約 $2\mu\text{m}$ であったが、保

持時間の増加と共に粒径は増加した。上記の硬さ測定結果において、処理後の目標硬さに到達する60秒の保持時間では、粒子の成長は少なく約 $3\mu\text{m}$ であった。それに対し、保持時間が600秒では約 $5\mu\text{m}$ に増加した。電気炉による溶体化処理では、平均粒径は $7\mu\text{m}$ 程度まで成長し、高周波電源による60秒保持の処理と比較すると、2倍以上となった。また、電気炉による溶体化処理は最大粒径がより大きくなる傾向であるが、この場合、

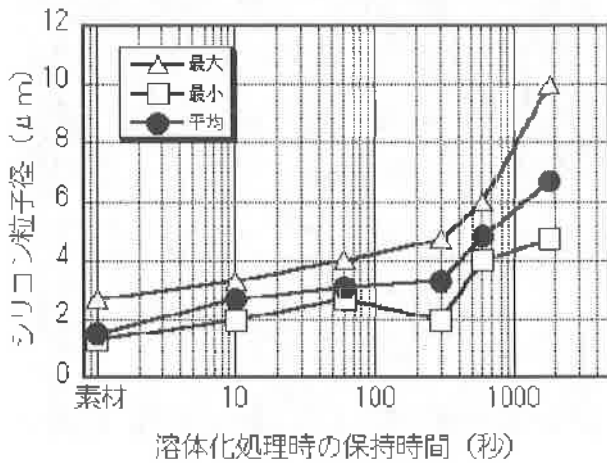


図7 溶体化処理時の保持時間とシリコン粒子径の関係

強度低下への影響は非常に大きいものと考えられる。

図8に試験片表面における残留応力分布の測定結果を示す。

試験片の外周端部用において、良品、不良品共に、き裂の発生の原因となる大きな引張応力は認められなかった。測定位置②~⑩の間では、全ての試験片において-40MPa程度の弱い圧縮応力が形成していた。良品と不良品との間に明確な差は認められないことから、試験片に発生する割れの原因は、溶体化処理時に水中へ投入する際に発生する熱衝撃であると考えられる。

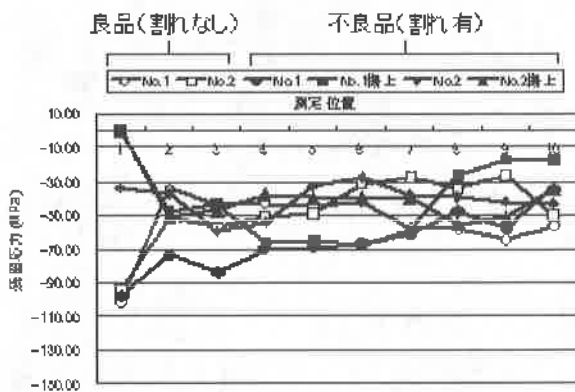


図8 試験片表面の残留応力分布

3-2 シミュレーションによるコイル開発と熱処理条件の最適化

3-2-1 コイルギャップが加熱に与える影響

図9にコイルギャップ cg が加熱に与える影響について解析した結果をまとめたものを示す。グラフ縦軸は試験片表面から2.1mmの位置における温度(°C)、横軸は加熱時間(sec)である。 $cg=0.75\text{mm}$ では昇温レートが $74.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ と最も高い結果となったが、6.9sec後に試験片最表面が溶融温度に達してしまっ

た。 $cg=1.0\text{mm}$ では 36°C とおおよそ半分程度の温度勾配を持つことが判明した。

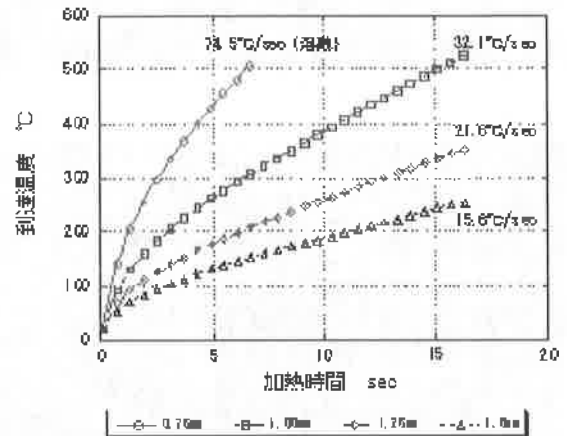


図9 コイルギャップが昇温曲線におよぼす影響

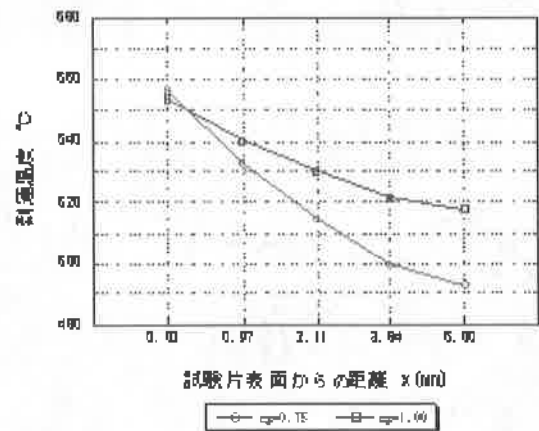


図10 コイルギャップが試験片温度分布におよぼす影響

3-2-2 移動条件が加熱に与える影響

移動加熱では、加熱と同時に移動を開始すると、加熱開始点および移動後においても温度が十分に上昇しなかった。そこで、予熱として10.0sec、表面温度 512°C に到達したところで移動を開始するようにした。なお、同じコイルギャップを用いたにもかかわらず、固定加熱時より大きな昇温レートが得られたのは、固定加熱の場合、コイルが試験片中央にあるため、アルミの良好な熱伝導により上下に熱が拡散していくが、移動加熱の場合、コイル位置が試験片端面に近い場合、コイル位置(加熱部)以下の熱が拡散しないためである。

移動速度を $4.0\text{mm}/\text{sec}$ 、 $4.5\text{mm}/\text{sec}$ 、 $5.0\text{mm}/\text{sec}$ の3

段階に変化させて解析を行ったところ、移動速度4.0mm/secでは移動開始後より試験片表面から内部へ向けて温度勾配を持ちながら移動した。しかし、移動速度が遅いため、途中より試験片上部へ伝わり蓄積した熱により温度が上昇を始め、最終的には加熱開始より40mmの位置で試験片表面が溶融する結果となった。移動速度4.5mm/secでは加熱範囲が減少し、試験片表面の溶融もなかったが、試験片上部に熱がやや蓄積する傾向が見られる。また、移動速度5.0mm/secでは4.0mm/secおよび4.5mm/secに比べ加熱範囲が大幅に減少し、試験片上部の熱の蓄積もあまり起きないが、試験片中間の温度が500℃以下に下がってしまうという結果になった。

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) 適切な温度条件を設定することで、高周波熱処理によって目標とする硬さが得られた。
- 2) 合金成分の状況を分析した結果、現状の電気炉を利用した熱処理より、新規開発した高周波熱処理のほうが成分は微細に分散されていた。
- 3) 残留応力を測定したところ、熱処理の各工程間で有意差は認められなかった。
- 4) コイルと試料との間隙の影響を解析した結果、間隙が増加するほど温度上昇率が低下した。
- 5) アルミニウムは熱伝導率が大きく、試料移動で均一加熱が困難になることが明らかとなった。このため、加熱から試料移動までの間に余熱時間を設けることで均一な加熱が可能となることを見いだした。

参考文献

- 1) 八代浩二他：山梨県工業技術センター研究報告, No.21, p.60-63 (2007)