

誘導加熱による急速局所加熱を利用した非鉄軽金属の高機能化

鈴木 大介・星野 昌子・勝又 信行・斎藤 修
中山 栄浩^{*1}・杉田 良雄^{*2}・齊藤 基樹^{*3}・久保田勝彦^{*4}

Functionalization of Light Metals by Induction Heat Treatment

Daisuke SUZUKI, Shoko HOSHINO, Nobuyuki KATSUMATA, Osamu SAITO,
Yoshihiro NAKAYAMA^{*1}, Yoshio SUGITA^{*2}, Motoki SAITO^{*3} and Katsuhiko KUBOTA^{*4}

要 約

アルミニウム合金の熱処理に、誘導加熱の特徴である急速短時間加熱による熱処理を行い、熱処理条件が材料特性に与える影響について検証を行った。この結果、同温度条件下における電気炉を用いた一般的な溶体化、時効処理を行ったものに比べ約30%高い350MPa程度の耐力値を得た。また、誘導加熱によるチタン合金の熱処理において、熱処理中の温度制御を行うために、放射温度計を用いた加熱中のチタン合金の表面温度測定、ならびに表面放射率の計測を実施した。この結果、大気中の加熱では750℃付近で表面酸化による放射率の変動が生じ、測温値が大きく変化した。この改善には、離型剤の塗布が有効であることが確認された。

1. 緒 言

近年、自動車を代表とした各産業において、非鉄軽金属部材が多く用いられている。このような部材は、成型加工後熱処理を行うことが多いが、そのほとんどは熱処理炉による間接加熱を利用している。しかし、熱処理炉による処理では処理品が熱にさらされる時間が長く、それによる金属結晶の成長など、素材強度などへの影響がある。これらの解決には、急速加熱による熱処理が有効な手段であり、これにより高強度・低変形といった高機能化が実現できるものと考えられる。

そこで本研究では、アルミニウム合金やチタン合金などの非鉄軽金属材の熱処理に、誘導加熱の特徴である急速短時間加熱による熱処理を行い、熱処理条件などが各材料特性に与える影響を調査することで、上記高機能化の実現を目的とする。

本年度は、A6061アルミニウム合金に対し、誘導加熱による溶体化熱処理を行った。誘導加熱による溶体化熱処理は、既存の手法では得難い急速昇温、温度の安定性、温度分布が得られることが判明している^{1),2)}。このことから、熱処理対象材料の固相線直下を含めた高温での溶体化熱処理が機械的強度に及ぼす影響について、共同研究者らの実験³⁾に基づき報告する。

次に、加熱中のTi-6Al-4V合金の表面放射率の測定を行った。チタン合金の誘導加熱による熱処理において、熱処理中の温度制御を行うことにより、昇温速度や到達温度などが材料特性に与える影響を調査することができる。これには、アルミニウムの溶体化処理時と同様に放射温度計を用いて行うが、この場合、加熱中のチタン合金の表面放射率の設定が必須となる。本報告では、熱電対により放射温度計の放射率を校正した結果について報告する。

2. 実験方法

2-1 A6061アルミニウム合金の機械的特性

溶体化熱処理に用いた装置を図1に示す。アルミニウム合金への溶体化熱処理として、工業的に広く利用されているA6061押出合金を用いた。試験片形状は直径 $d=10\text{mm}$ 、長さ $l=100\text{mm}$ の丸棒とした。化学成分は表1に示すとおりである。この試験片に対し、図2に示した加熱コイルを用いて260℃から590℃まで変化させて溶体化熱処理を行った。溶体化時間はすべての温度条件において5分である。溶体化温度の測定は放射温度計（レック株製、IGA）を用いて行った。溶体化熱処理後、電気炉にて180℃、8時間の時効熱処理を行った。

これらの試験片について、ビッカース硬さ測定および図3に示す形状に加工後、引張試験を行い、0.2%耐力について評価を行った。引張試験速度は1 mm/minである。

*1 国立大学法人山梨大学

*2 ワイエス電子工業株式会社

*3 浅川熱処理株式会社

*4 有限会社丸真熱処理工業

表1 試験片の化学成分 (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
試験片 (A6061)	0.67	0.30	0.31	0.13	1.00	0.19	0.08	0.02	bal
JIS (標準)	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

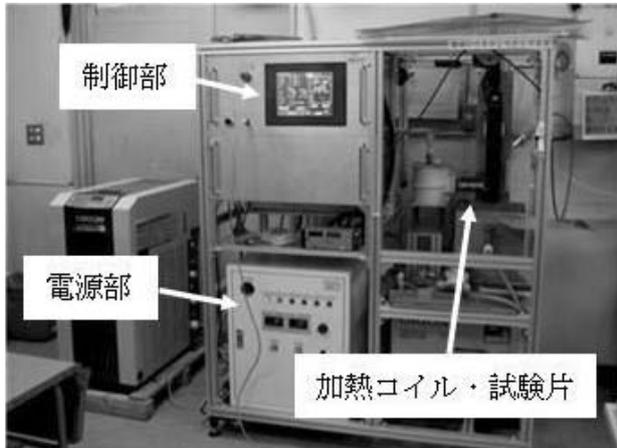


図1 誘導加熱熱処理装置

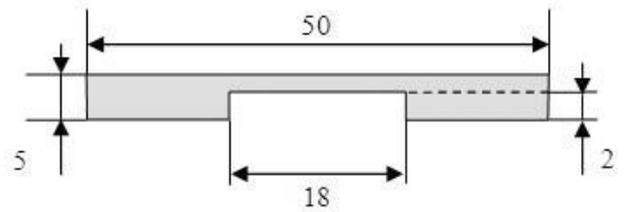


図4 チタン合金試験片形状

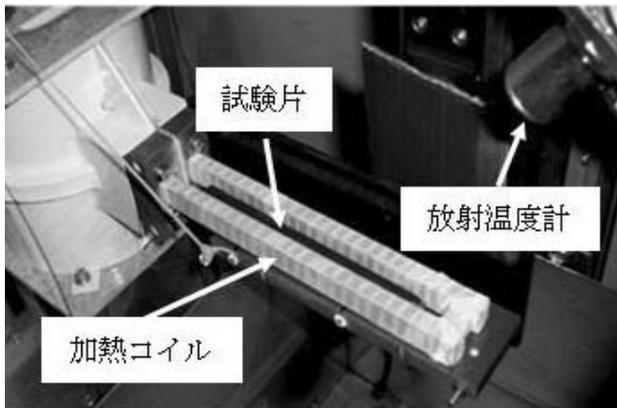


図2 溶体化熱処理中の試験片

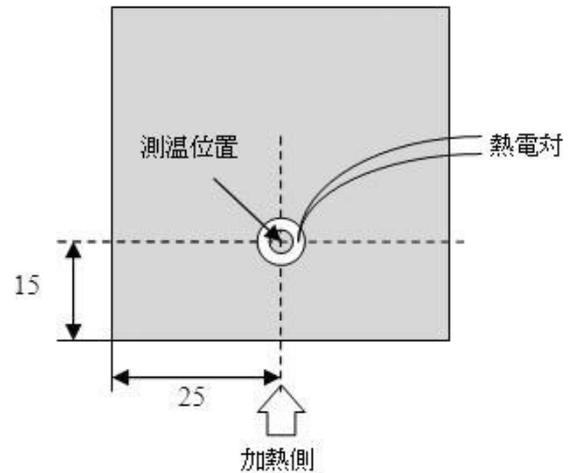


図5 温度測定位置概略図

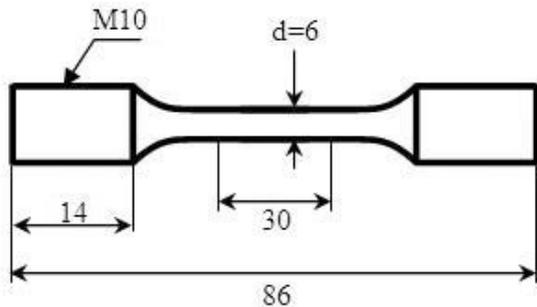


図3 引張試験片形状 (単位: mm)

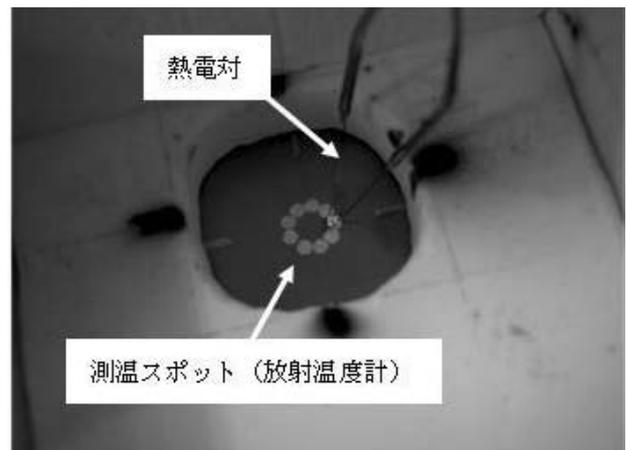


図6 実際の温度計測風景

2-2 Ti-6Al-4Vチタン合金の表面温度計測
 試験片として、熱処理可能である $\alpha + \beta$ 型チタン合金の中でも最も一般的なTi-6Al-4Vチタン合金を用いた。試験片寸法は50mm×50mm、厚み $t = 5$ mmである。
 加熱方法は、これまでの報告²⁾より、誘導加熱によ

り生じるノイズが熱電対に影響を与える可能性があるため、ガスバーナーによる直接加熱とした。また、直接加熱のため、加熱効率を向上させる目的で、試験片中央18mmの部分を図4のように2 mm板厚とした。
 表面温度の計測は、チタン合金表面にスポット溶接し

た熱電対と、放射温度計を用いた。図5に放射温度計の温度測定位置を、図6に実際の温度測定風景を示す。熱電対のスポット溶接位置は放射温度計の計測領域のごく近傍とした。これにより、放射温度計により得られた測温値と、熱電対により得られた測温値が一致、もしくはその差が小さくなるように、放射温度計の放射率を変化させることで、放射温度計の校正を行う。放射温度計はアルミニウムの測温に用いたものと同じであり、測温スポット径は約1mmである。

3. 結果および考察

3-1 A6061アルミニウム合金

260℃から590℃の溶体化熱処理温度範囲において、溶体化処理後(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査した。

図7に溶体化熱処理温度とビッカース硬さの関係を示す。溶体化処理温度が400℃以下の場合、溶体化処理温度の上昇に伴い溶体化処理後(図中表記:ST)の硬さは低下した。一方、400℃以上の溶体化処理温度では、溶体化処理温度の上昇に伴い硬さは上昇した。時効処理後の硬さは、前者では硬さの変化が見られず、後者では硬さが上昇していることが確認された。

400℃以下の溶体化処理温度域では、溶質原子の母相への固溶が起こらず、時効生成物の成長・粗大化が進行したためであると考えられる、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。

400℃以上の溶体化処理温度域では、時効処理に伴う硬さの増加が明確である。これ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によるものであると考えられる。

図8に溶体化、時効熱処理後の0.2%耐力について、溶体化温度毎にまとめたものを示す。400℃以下の溶体化温度域では、溶体化処理温度の上昇に伴い0.2%耐力は低下した。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。

前者の0.2%耐力の低下は、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ものであると考えられる。また、同様に後者の0.2%耐力の増加は溶質原子の固溶量の増大に起因する現象であると考えられる。

時効処理を行った試験片において、400℃以下で溶体化処理温度を行った試験片は、時効処理を加えても耐力はほぼ一定である。これは先述のように400℃以下の低温での溶体化処理が過時効状態への移行を促進する熱処理に相当したため、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であると考えられる。

400℃以上で溶体化処理を行った試験片では、時効処理に伴い耐力が増大している。中でも、530℃で溶体化処理を行った試験片では、350MPaの耐力を示した。これは、同温度条件下における電気炉を用いた一般的な溶体化、時効処理を行った試験片の260MPaよりも高い強度を示している。これは、これらの温度条件下において時効処理に伴い微細析出物が形成されたことによるものと考えられる。なお、590℃の溶体化処理温度では、耐力が図8に示されるように二極化される傾向が確認された。現在、この傾向の原因については調査・検証を行っている。また、電気炉を用いた溶体化処理では、処理温度に到達するまでに約30分を要することから、より詳細な検討を行うために、溶体化処理温度に達するまでの時間、すなわち昇温速度が時効処理後の耐力に及ぼす影響について検討を行っている。

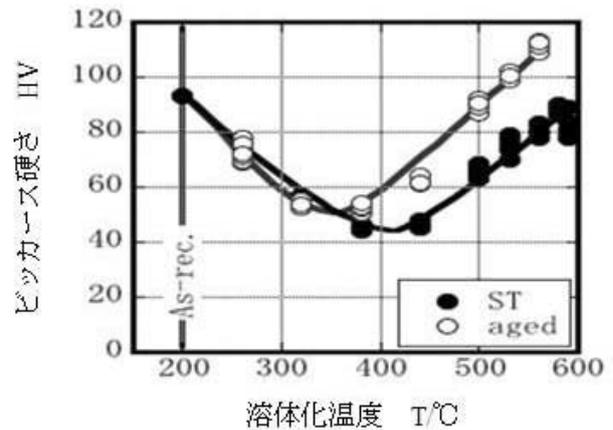


図7 溶体化処理温度とビッカース硬さの関係

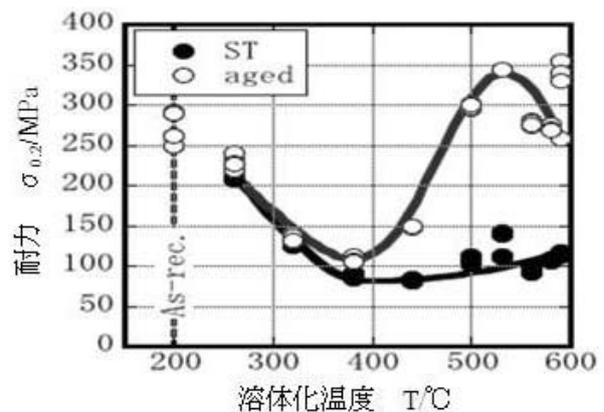


図8 溶体化処理温度と0.2%耐力の関係

3-2 Ti-6Al-4Vチタン合金

図9に、放射率 $\epsilon = 0.65$ における放射温度計と熱電対の測温結果を示す。図中RTは放射温度計による測温値であり、TCは熱電対による測温値である。(以後、RT、TCと表記。)この図は、縦軸に放射温度計による

測温値を、横軸に熱電対による測温値をとったものである。したがって、図左下600℃と、図右上1000℃を結ぶ45度線上が、放射温度計と熱電対の温度指示値が一致するところである。この線上より上方に計測値が位置すれば、放射温度計の測温値が熱電対より高く、逆にこの線上より下に計測値が位置すれば、放射温度計の測温値が熱電対より低いことになる。

放射率 $\epsilon = 0.65$ では、600℃から約750℃にかけて、放射温度計の測温値は熱電対の測温値より高いものの、その差は約30℃程度で推移した。その後、750℃付近から急激に放射温度計の指示値は下がり、ばらつきながら850℃まで推移した。850℃から950℃までの間では、熱電対と放射温度計の測温値はおおむね一致しているが、950℃以上では、それぞれの測温値のばらつきが非常に大きくなった。

純チタンを高温の大気下（700℃）で加熱を行った場合、温度が高いほど酸化膜は成長し、酸化膜の成長速度は初期に大きく、その後遅くなるとの報告⁴⁾がある。このことから、約750℃付近で放射温度計の値が大幅に下がったのは、大気中で加熱したことで、表面酸化が生じ、酸化膜の成長により表面放射率が大幅に変化したことによるものと考えられる。また、950℃以上で非常に大きい測温値がばらつく原因は、酸化膜とともに、チタン合金表面にスポット溶接された熱電対が一部剥離したことによると考えられる。

このことから、700℃から1000℃にかけて放射温度計により温度をできる限り正確に測温するためには、表面酸化を抑えるか、表面酸化を無視できるような手段を講ずる必要があると思われる。

そこで、本研究では、熱電対をスポット溶接後、試験片表面酸化の抑制ならびに表面状態を一定にする目的で、BN（ボロンナイトライド）の耐熱離型・潤滑剤を試験片表面に塗布した。不活性雰囲気化での加熱も検討したが、実験設備や試験方法の制約から今回は行わなかった。

図10に、BN耐熱離型・潤滑材を塗布した場合の熱電対と、放射率 $\epsilon = 0.65, 0.25, 0.18$ における放射温度計の測温結果を示す。（以下、BN耐熱離型・潤滑剤については、BNスプレーと表記する）

BNスプレー塗布後、放射率 $\epsilon = 0.65$ での測温値は、図9に示した測定値よりも放射温度計は熱電対よりも低い値を示した。放射率 $\epsilon = 0.25$ に設定した場合、700℃以下では熱電対との測温値の差が放射率 $\epsilon = 0.18$ に設定した場合は、放射温度計の測定値は熱電対よりも約50℃高い測温値を示した。また、いずれの放射率下においても、BNスプレーを塗布しなかった場合の750℃付近に存在した測温値の変動は解消されている。

測温値が下がったのは、BNスプレー塗布後の表面が白色に近く、一般的に放射温度計の測温時に理想とされる黒色（ $\epsilon = 1.0$ ）と対極であり、これにより表面放射率が0に近くなるためである。

750℃付近の測温値の変動が解消されたことについては、BNスプレーを塗布したことで、表面状態が高温加熱下においても一定の状態を保つことができたことによると思われる。また、950℃以上の測温値において、前述のようなばらつきは見られなかった。このことから、誘導加熱による熱処理の際も、BNスプレーの塗布により、安定した測温が可能であると期待できる。

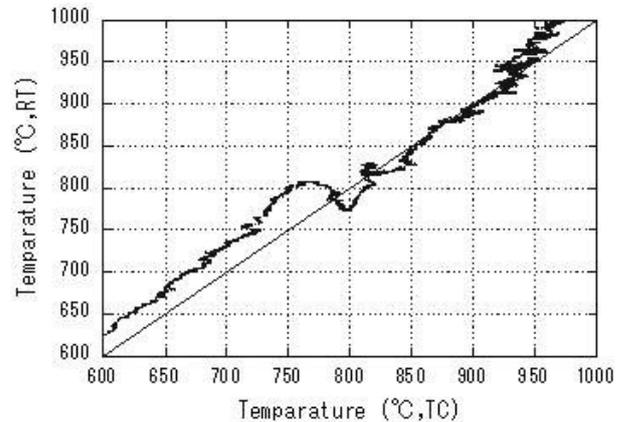


図9 放射率 $\epsilon = 0.65$ における温度校正結果

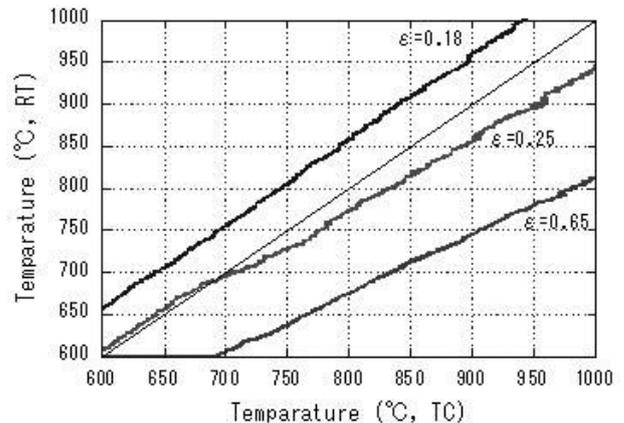


図10 放射率 $\epsilon = 0.65, 0.18$ における温度校正結果

4. 結 言

A6061アルミニウム合金に対し、誘導加熱による溶体化熱処理を行い、溶体化熱処理が機械的強度に及ぼす影響について検証を行ったところ、以下の結論を得た。

- (1) 溶体化処理を行った試験片の時効処理後の硬さは、400℃以下の溶体化処理温度では硬さの変化は見られず、400℃以上の溶体化処理温度では硬さの上昇が確認された。
- (2) 400℃以上で溶体化処理を行った試験片では、時効

処理に伴い耐力が増加した。

- (3) 530℃で溶体化処理後、時効処理を行った試験片では、350MPaの耐力を示した。これは、同温度条件下における電気炉を用いた一般的な溶体化、時効処理を行った試験片の耐力値である260MPaを上回った。

また、加熱中のTi-6Al-4Vチタン合金の表面放射率の測定を行い、熱電対により放射温度計の放射率を校正した結果、以下の結論を得た。

- (4) 大気下のチタン合金の加熱では、放射温度計による測温をする場合、約750℃において表面酸化膜によると思われる大きな測温値の変動がある。
- (5) BNスプレーを表面に塗布することで、750℃付近の測温値の変動を抑えることができ、安定した測温をすることが可能になることが確認された。

参考文献

- 1) 商 芳妮, 関谷 英治, 中山 栄浩: 軽金属学会 第113回秋季大会講演概要, p.87-88 (2007)
- 2) 商 芳妮, 関谷 英治, 中山 栄浩: 軽金属学会 第115回春季大会講演概要, p.291-292 (2008)
- 3) 商 芳妮, 関谷 英治, 中山 栄浩: 軽金属学会 第116回春季大会講演概要, p.281-282 (2009)
- 4) 屋敷 貴司, 上窪 文生: 軽金属, Vol.50, No.11, p.577-583 (2000)