



アルミニウム合金の二段時効

—自動車用アルミニウム合金のBH性に関連して—

● シリーズ

● 材料の素顔に迫る

新日鐵住金ステンレス(株)技術アドバイザー

(元・九州大学 鉄鋼リサーチセンター 教授) 工学博士 菊池 正夫

はじめに

筆者は、鉄鋼メーカーと九州大学で、鉄鋼材料に関する研究開発・教育に携わってきたが、それ以前には、大学でアルミニウム合金の時効析出の研究を12年間行い、鉄鋼メーカーでも、自動車のアルミ化に対応するため、アルミニウム合金の研究開発にも従事してきた。本稿では自動車用アルミニウム合金に関する重要な課題である「アルミニウム合金の二段時効挙動」について紹介する。

自動車ボディ用アルミニウム合金の多くは熱処理型の6000 (Al-Mg-Si) 系合金である。これは、本系合金の析出硬化性を利用し、塗装焼付けによるバークハード (BH) を期待したものであるが、車の製造工程で果たしてBH性が確保できるかが課題であった。板を製造後、BH処理前に常温に保持されるため、時効が二段階で進行するいわゆる「二段時効」となるためである。筆者の学生時代に、この「二段時効」に関する議論が盛んになされていた¹⁾が、まさに、この問題が自動車へのアルミニウム合金適用のキーテクノロジーであった。

アルミニウム合金の二段時効に関して、Al-Zn-Mg系合金が「正の効果」を示すのに対し、Al-Mg-Si系合金が「負の効果」を示すことが良

く知られており、その機構についても種々議論されてきた¹⁾。

本稿では、アルミニウム合金における時効析出の原理および二段時効現象について解説し、さらに、自動車ボディパネルへのAl-Mg-Si系合金適用の課題とその対策について述べる。

アルミニウム合金における時効析出の原理

アルミニウム合金の時効析出現象は、1906年のA.Wilmによる「ジュラルミン」の発明²⁾によって知られるようになった。

合金が時効析出を起こすには、温度低下に伴い固溶度が減少する平衡状態図を示す必要がある。図1のように、固溶体の一相領域で溶体化処理し、ここから室温以下に急冷(焼入れ)する。これにより、溶体化温度での溶質濃度が凍結された過飽和固溶体となる。過飽和固溶体は平衡固溶度以上の溶質を含むため、最終的には平衡相を析出した状態に移行しようとする。平衡固溶度と過飽和固溶体の溶質濃度差(過飽和度)が析出の駆動力となる。しかし、平衡相の析出には溶質原子の長範囲拡散が必要のため、直ちに平衡状態には至らず、図2に示す過程を経て平衡相となる。すなわち、過飽和固溶体

から平衡相に変化する前駆段階で、クラスター、G.P.ゾーン、中間相などの準安定相が析出する。クラスターやG.P.ゾーンは、独自の結晶構造を持たず、マトリックスの格子上に偏析した溶質原子の集合体である。

なお、過飽和固溶体には過飽和な溶質原子の他に、凍結原子空孔や転位も含んでおり、これらも準安定相の析出過程に大きな役割を果たす。凍結原子空孔は溶質原子の拡散を助けるため、低温でもクラスターやG.P.ゾーンの析出が可能となり、転位は中間相などの析出核を与える働きをする。

アルミニウム合金の二段時効挙動

アルミニウム合金の時効処理には常温時効と高温時効(100~200℃)がある。高温時効で、溶体化処理・焼入れ後、直ちに時効する場合を「直接時効」、焼入れ後、低温で保持した後高温時効する場合を「二段時効」と呼ぶ(図3)。二段時効により、直接時効よりも機械的性質が向上する場合(正の効果)と低下する場合(負の効果)がある。「正の効果」を示すAl-Zn-Mg系合金では、図4(a)のように、直接時効より、二段時効の方が常に高い硬さを示す。これに対し、「負の効果」を示すAl-Mg-Si系合金では、図4(b)のように、溶体化処理・焼入れ後の常温時効(予

備時効)で硬さは一旦上昇し、その後の高温時効でしばらくほぼ一定値を示した後上昇するが、ピーク硬さにおいても直接時効より低い値を示す³⁾(なお、Mg₂Si量が約1%以下のAl-Mg-Si系合金になると「正の効果」を示す⁴⁾)。

図5および図6に、Al-Zn-MgおよびAl-Mg-Si系合金における直接時効と二段時効後の析出組織をそれぞれ示す³⁾。Al-Zn-Mg系合金で析出するη'相(MgZn₂)は、二段時効により微細高密度になるのに対し、Al-Mg-Si系合金で析出するβ''相(Mg₂Si)は、二段時効により粗大低密度になる。

二段時効の機構は必ずしも明確ではないが、Al-Zn-Mg系合金の「正の効果」は、予備時効で析出したG.P.ゾーンのうち臨界核以上のものが高温時効で中間相η'の析出核になるというR.B.Nicholson⁵⁾の説で一応、説明される。一方、Al-Mg-Si系合金の「負の効果」については、まだ明確な説はないが、里ら⁶⁾によると、予備時効で析出するクラスターには2種類あり、常温で析出するクラスター(1)(低温クラスター)は比較的安定で、最終時効でも残存したまま、新たにβ''相が核生成するため、その分布が粗となり、強度上昇は小さい。一方、100℃付近の比較的高温で析出するクラスター(2)(高温クラスター)はβ''に遷移しやすいため、β''の分布が密になり、強度上昇が大きくなる。

自動車ボディパネルへのAl-Mg-Si系合金の適用

図7に自動車ボディの製造工程と材料の温度の関係を示す。素材は溶体化処理・焼入れ状態で自動車メーカーに納入され、プランキングから塗装までの間は、納入前の在庫期間も含めて常温に保持され、その後170℃付近で20分程度の焼付け処理が行われる。そのため、材料は二段時効と同様の熱履歴を受け、通常の製造条件では「負の効果」が現れ、強度上昇は期待できない。また、常温での保持中に強度が上昇してプレス成形性にも劣る。

これを回避するため、種々の方法が提案されているが、筆者ら⁷⁾は、素材の製造工程で、溶体化処理・焼入れ後、比較的高温で予備時効することにより、前述の高温クラスターを析出させ、β''への遷移を容易にしてBH性を向上させるとともに、常温保持中での低温クラスターの析出を抑え、成形性も確保することを提案した。図8⁷⁾に、常温(20℃)および70℃で予備時効後、175℃×20分のバーク処理をした時の硬さの変化を示す。常温予備時効では、常温保持中に硬さが上昇し、BH後の硬さ上昇もほとんどなく、BHの効果が認められないのに対して、高温予備時効では、常温での硬さ変化が抑えられ、BH後の硬さ上昇が大きくなっていることが分かる。

おわりに

自動車ボディパネルにAl-Mg-Si系合金を適用するに当たった重要な課題である二段時効挙動について紹介した。

Al-Zn-Mg合金の二段時効による「正の効果」は工業的にも有意義であり、実用されている。一方、Al-Mg-Si合金の「負の効果」は、自動車用途での大きな課題であり、これまでも盛んに議論されてきたが、その機構についてはいまだ明確とは言えず、さらなる検討が必要であろう。

<参考文献>

- 1) 討論「時効性アルミニウム合金とその二段時効」：軽金属、17(1967)、398.
- 2) A.Wilm: Metallurgie, 8(1911)、225.
- 3) 里達雄：誰でもわかる技術、日本鑄造工学会 関東支部、(2014)、12.
- 4) 「アルミニウムの組織と性質」：軽金属学会、(1991).
- 5) G.W.Lorimer and R.B.Nicholson: Acta Met., 14(1966)、1009.
- 6) 山田健太郎、里達雄、神尾彰彦：軽金属、51(2001)、215.
- 7) 佐賀誠、佐々木行雄、菊池正夫、日比野旭、松尾守：軽金属、53(2002)、516.

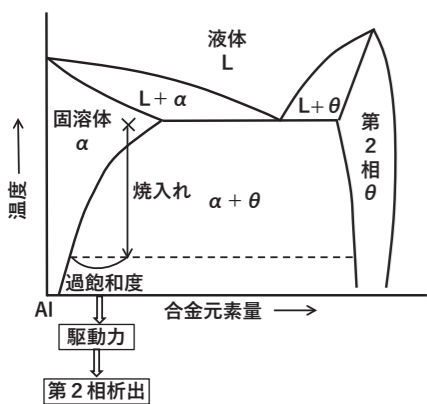


図1 アルミニウム合金における析出の原理

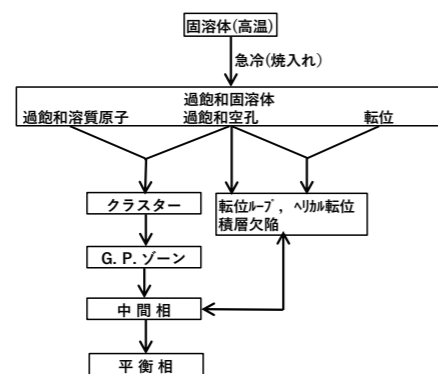


図2 アルミニウム合金における析出過程

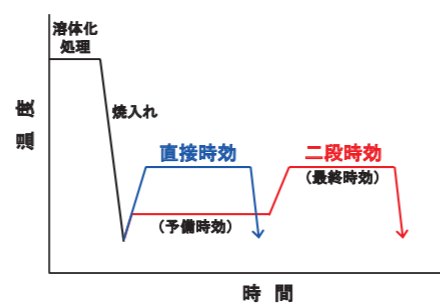


図3 二段時効の温度サイクル

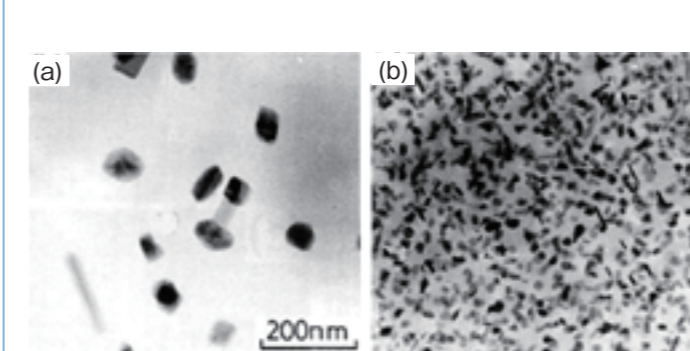


図5 Al-5% Zn-2% Mg合金の直接時効と二段時効後の組織 (a)150℃×605ks、(b) 50℃×30s→150℃×605ks

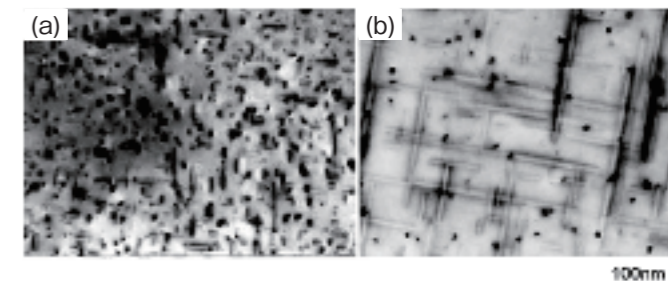


図6 Al-Mg-Si系合金の直接時効と二段時効後の組織 (a)直接時効(180℃ピーク硬さ)、(b)二段時効(RT×1d.→180℃ピーク硬さ)

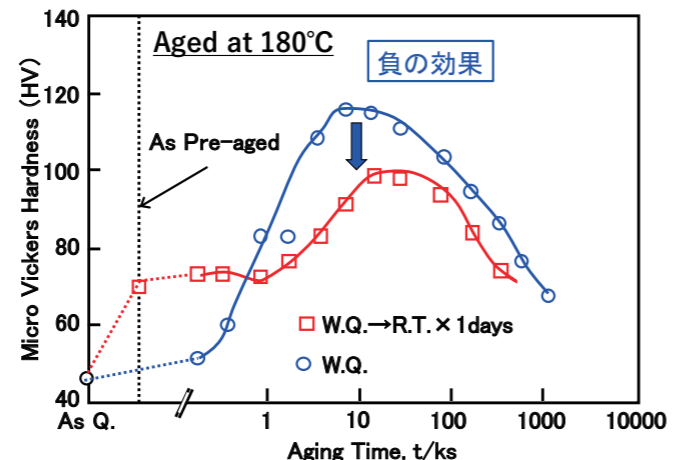
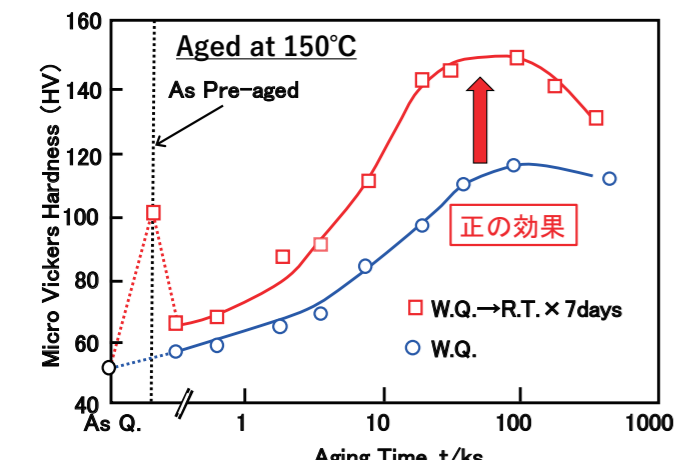


図4 アルミニウム合金の硬さ変化に及ぼす二段時効の効果 (a)Al-Zn-Mg系合金、(b)Al-Mg-Si系合金(文献3)の図44よりデータを抜粋して作成)

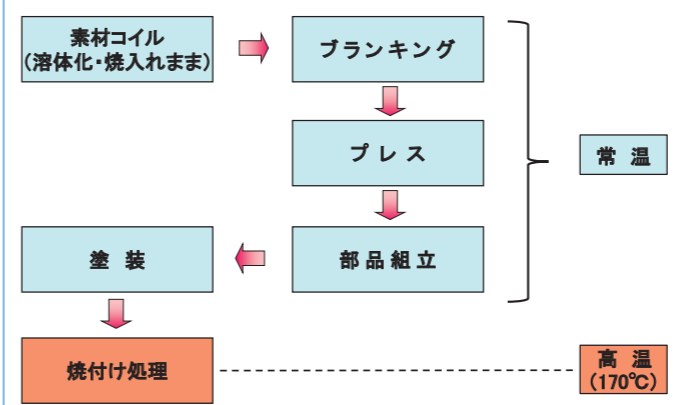


図7 自動車ボディの製造工程と材料の温度

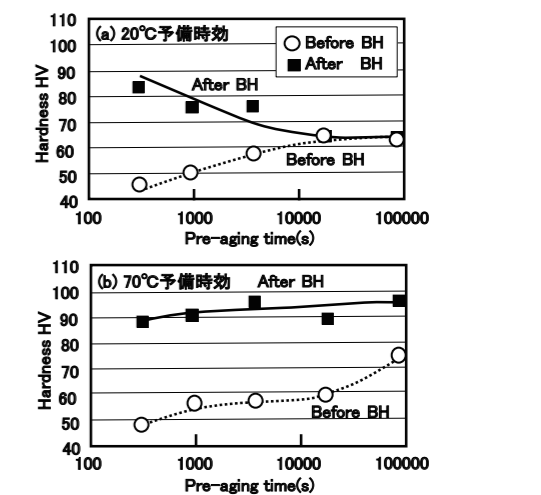


図8 高温予備時効によるBH性改善