

# 温間鍛造によるAl-Zn-Mg合金の 耐応力腐食割れ性改善

## *Improvement of Resistance to Stress Corrosion Cracking of Al-Zn-Mg Alloy by Warm Forging*

和田林良一\*                      木下 俊行\*  
Ryoichi Wadabayashi          Toshiyuki Kinoshita  
白川 信彦\*                      五十嵐宏明\*\*  
Nobuhiko Shirakawa          Hiroaki Igarashi

(1997年10月30日受理)

Al-Zn-Mg alloy requires a special heat treatment (T6 treatment) after forging to secure the best mechanical strength, but the products from this process have high susceptibility to stress corrosion cracking. This paper deals with reducing the susceptibility of the alloy by application of warm forging. The T6 pretreated material was forged at warm temperature range, which caused the material good forgeability at the temperatures over 200°C. Resistance to stress corrosion cracking of the products from this process was remarkably improved, and also the strength of the products was higher than that from the usual process. These originate in the effect of over aging and the work-hardening simultaneously occurred during warm forging.

キーワード：Al-Zn-Mg合金，応力腐食割れ，温間鍛造，鍛造性，機械的特性

### 1. 緒言

機械構造物の軽量化指向とともに高強度アルミニウム合金の使用が増大している。特に、Al-Zn-Mg系(JIS-7000系)合金は適当な熱処理によって抗張力が500MPa以上に達するものもあり、その需要増が見込まれている。しかしこの合金の欠点は、強度を高めるために施される通常の時効処理(T6処理)状態で海水などの腐食環境にさらされた場合に応力腐食割れが生じやすいことである。この応力腐食割れ特性を改善するため、いろいろな熱処理法が試みられている<sup>1)</sup>が、いずれも処理工程が複雑であり厳密な管理を要するなど制約が多い。

近年、塑性加工の分野では加工時に組織を制御することによって、優れた特性を有する素形材を得る試みが活発に行われており、「加工熱処理法」はその一種である。

鋼の精密鍛造などで有効に利用されている温間鍛造も加工熱処理法として種々の材料に応用され、その効果が報告されている<sup>2)</sup>。本研究では、温間鍛造による加工熱処理を代表的なAl-Zn-Mg合金であるA7075材に適用して、耐応力腐食割れ性の改善を試みた。

### 2. 供試材料とその熱処理

用いた材料は、JIS規格のアルミニウム合金中最も高強度を得ることのできるA7075材で、その組成は表1のとおりである。この材料は現在、航空機部品やスポーツ用品などに使用されているが、さらに自動車部品などへの需要拡大が見込まれている。この材料の鍛造は一般に385~435°Cの熱間温度域で行われる。そして強度を上げるための標準的な熱処理として、460~470°Cに加熱後水冷する溶体化処理と115~125°Cで24時間以上保持する時効硬化処理が施される。この熱処理を施された素材あるいは加工品をT6(処理)材と呼ぶ。これに対し、T6材における応力腐食割れ特性を改善する方策として過時効処

\* 生産技術部塑性加工グループ

\*\* 草川鉄工 (株)

理が行われるが、この場合はT6材に比べ強度の低下が避けられない。過時効処理は種々の条件で実施されており、例えば溶体化処理後に110~115°Cで6~8時間と175~180°Cで8~10時間保持する処理法はT73処理と称されている。また、RRA処理<sup>3)</sup>という特殊な処理で強度をT6材と同等に維持したまま応力腐食割れ特性を改善する方法も提案されている。これは、T6処理されたものをさらに180~240°Cで数分間保持(復元処理)した後、再度、標準の時効処理を施す少し複雑な処理となる。

本実験は、過時効処理やRRA処理における復元処理がいずれも200°C前後の温度で行われることに着目し、予めT6処理を施した素材を温間鍛造することによって過時効処理やRRA処理と同じ効果をもたらせることをねらったものである。従来行われている工程、および本実験で行った温間鍛造工程における加工および熱処理の流れを図1に示す。

なお、T6素材としては、A7075の押し材で溶体化処理後引張り加工により1~3%の永久ひずみを与えて残留応力を除去し、さらに標準の時効処理を行った市販のT6511材の丸棒を用いた。

### 3. 実験方法

#### (1) 鍛造性試験

T6材の種々の温度における鍛造性を明らかにするために、直径14mm×高さ21mmの円柱状試験片を用いて、常温から400°Cまでの温度における据込み加工限界および圧縮変形抵抗を端面拘束圧縮試験法<sup>4)</sup>により求めた。比較のために、素材を410°Cで2時間焼なまし処理を行ったO材の冷間鍛造性についても同様の方法で求めた。使用した加圧装置は1.5MN油圧プレスで、加圧速度は7.5mm/secで一定とした。試料の加熱は電気炉で行い、炉内保持時間は所定の温度までの昇温時間と均熱時間を

表1 供試材の化学成分 (mass%)  
Chemical composition of the material used

材質・質別	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr	Al
A7075-T6511	0.12	0.25	1.6	0.24	2.5	0.20	5.6	0.02	0.03	bal.

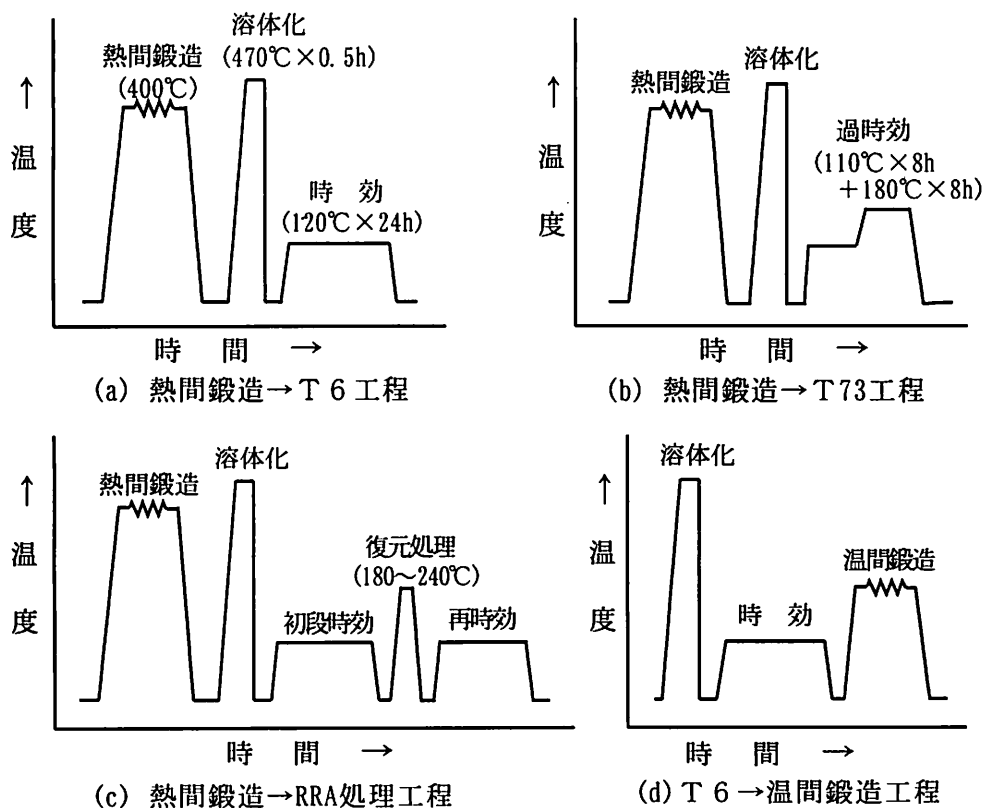


図1 各加工と熱処理工程の流れ図

Schematic diagrams showing a sequence of forging and heat treatment process  
 (a) Hot forging → T6 treatment (b) Hot forging → T73 treatment  
 (c) Hot forging → RRA treatment (d) Warm forging of T6 pretreated material

考慮して20~30分とした。また、金型の加熱は行っていないが、鍛造中の温度降下は変形熱による温度上昇に比べて小さいと考えられるのでこの影響は無視した。

(2) 応力腐食割れ試験

試験片の加工は後方せん孔押し鍛造によるものとし、直径20mm、長さ20mmの素材を用いて外径20mm、内径17mmのカップ状に成形した。このときの断面減少率は72.25%である。T6材を200℃で温間鍛造したままのもの、400℃で熱間鍛造後T6処理およびT73処理したものの3種を取り上げ、これらについて応力腐食割れ試験を行った。

試験方法はJIS H8711の「アルミニウム合金材料の応力腐食割れ試験方法」にもとづいた。試験片寸法およびジグの形状を図2に示す。各鍛造品の押し部から19mm長さの管を切り出して60°の開口部を作り、その開口部が閉じるまでジグのねじを締め付けることによって応力を負荷した。これを3.5%の塩化ナトリウム溶液に浸せきして割れ発生の状況を調べた。割れの発生の有無は24時間ごとに試験片を溶液から取り出し、目視により観察した。また、溶液は1週間ごとに交換した。各条件で作製した鍛造品についてそれぞれ3個ずつ試験し、割れ発生が認められた時までの経過時間の平均値で耐応力腐食割れ性を評価した。試験は2400時間まで継続して行った。

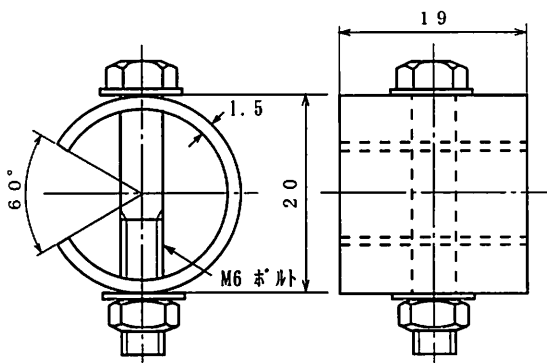


図2 応力腐食割れ試験の試験片およびジグ形状  
Geometry of test piece and jig for the stress corrosion cracking test

(3) 鍛造材の機械的特性の評価

直径14mmの丸棒素材を半径方向に圧縮し、厚さ7mmの板状に成形して機械的特性を試験するための鍛造材とした。鍛造温度および熱処理の条件は前項の後方せん孔押し鍛造の場合と同一とした。また、比較のために熱間鍛造のままのものやO材の冷間鍛造後にT6処理したのものについても試験を行った。各鍛造材から幅10mm、標点距離20mmの引張り試験片(JIS5号相似形試験片)を

ワイヤカット放電加工によって作製した。同一条件の試験片各3個について、ロックウェル硬さおよび引張り試験による引張り強さと破断伸びの測定を行い、その平均値によって機械的特性の評価を行った。

4. 実験結果と考察

(1) T6材の各温度における鍛造性

図3は、常温から400℃までの各温度における据込み加工限界を示す。T6材は常温では据込み率25%程度までしか据込み加工が出来ないが、200℃以上に加熱すれば、据込み率75%以上すなわちO材の常温加工と同程度の加工が可能であることがわかる。

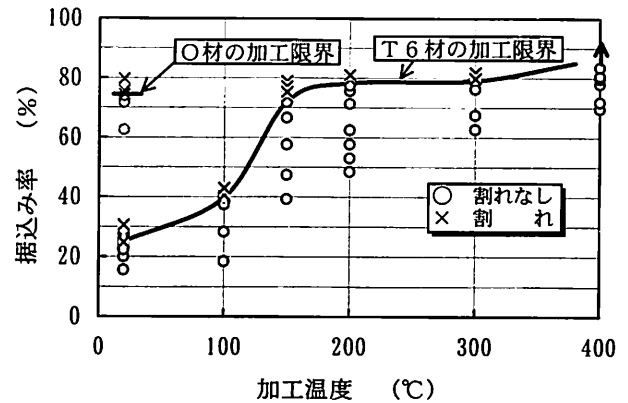


図3 各温度における加工限界  
Upsetting limits at different temperatures

図4は、端面拘束圧縮試験で求めた平均対数ひずみと変形抵抗の関係である。200℃以下の加工では、ひずみの小さい範囲で加工硬化による変形抵抗の上昇が見られるが、ひずみが0.2~0.25(据込み率にして15%程度)以上になると変形抵抗が下がる傾向となる。この傾向は、O材の常温加工やT6材の300℃以上の加工ではわずかで

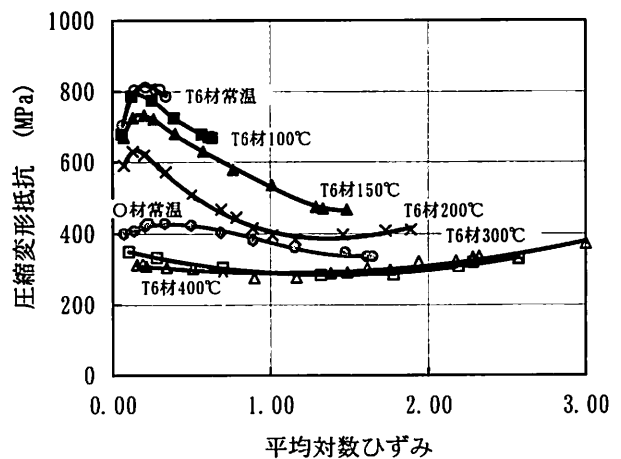


図4 各温度における変形抵抗  
Flow stress curves at different temperatures

あるが、T6材の200°C以下での冷・温間加工では比較的大きく認められることから、変形の進行にともなう変形熱の発生によるものと考えられる。

(2) 鍛造品の耐応力腐食割れ性

応力腐食割れ試験のための押し鍛造品および試験で発生した割れの状況を図5に示す。また、図6は各鍛造品の割れ発生までの時間を示す。鍛造後にT6処理を施した試験片はすべて220~520時間で割れが発生し、他のものより極端に耐応力腐食割れ性が劣ることがわかる。T73処理材は3試験片のうち1個が2200時間前後で割れがみとめられたが他の2個は2400時間経過後も割れは発生しなかった。なお、T6材で発生した割れはいずれも図5のように明確な貫通割れであったが、T73材の割れ

は表面荒れから微細なクラックに発達したものであった。これらに対し、温間鍛造品は3試験片とも2400時間の試験範囲内で割れは見られなかった。

図7は、鍛造および熱処理を施した各試験片のマイクロ組織である。200°Cで温間鍛造したものはT73材と同様に、T6材に比べて析出物が粗大化している。応力腐食割れ特性とマイクロ組織との関係については明確に解明されていないが、一般的に、T6処理では微細であった析出物が、過時効処理あるいは復元処理によって凝集粗大化し、特に粒界析出物の適当な粗大化が耐応力腐食割れ性の改善に寄与するとされている<sup>1)</sup>。このことから、本実験で行った温間鍛造プロセスによる耐応力腐食割れ性の改善は、過時効または復元処理と同様の微視的組織

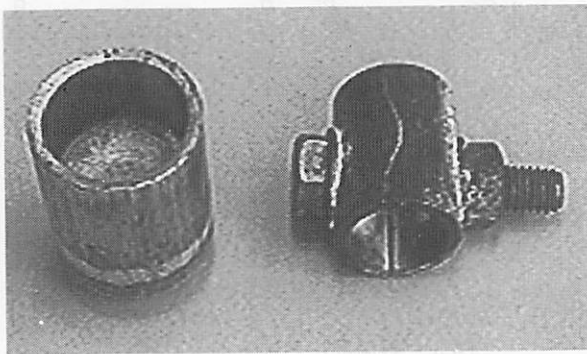


図5 応力腐食割れ試験用の鍛造品と試験によって生じた割れの状況

Forged product and crack occurred during the stress corrosion cracking test

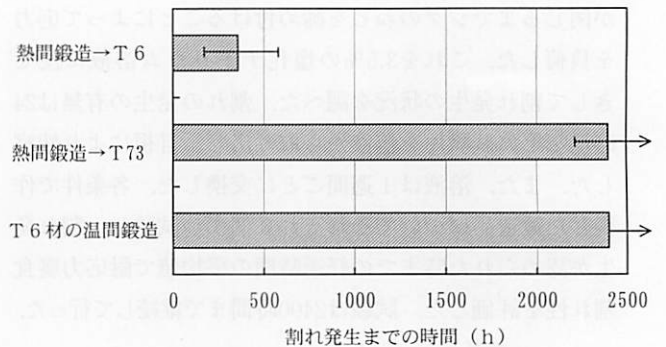
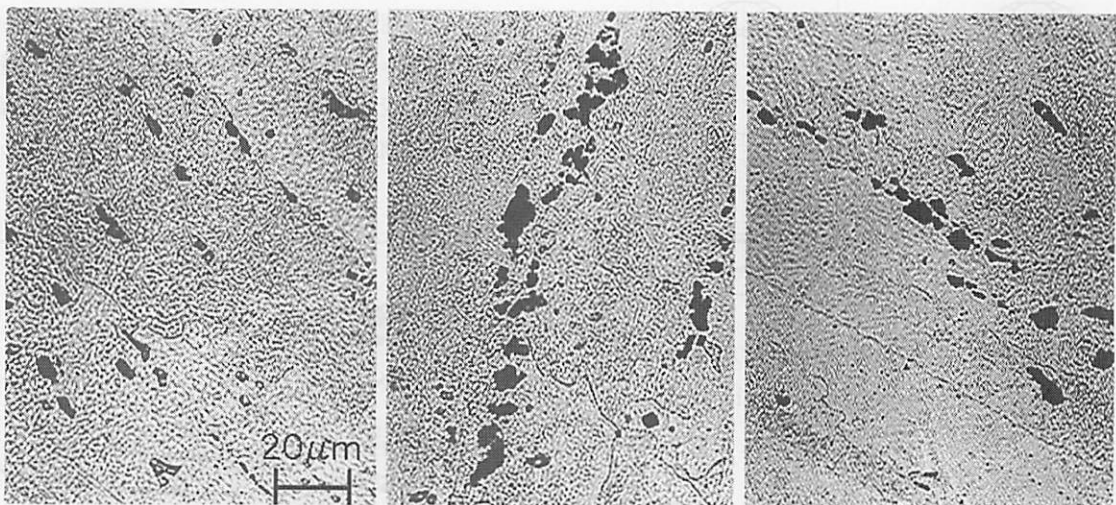


図6 各加工品の応力腐食割れ寿命

Stress corrosion cracking life of products from different processes



(a) 鍛造後T6処理材

(b) 鍛造後T73処理材

(c) T6材の温間鍛造品

図7 各加工および熱処理材のマイクロ組織

Microstructures of the samples from different processes

(a) Hot forging → T6 treatment

(b) Hot forging → T73 treatment

(c) Warm forging of T6 pretreated material

がもたらされたことに起因すると考えられる。

(3) 鍛造材の機械的特性

図8は、素材および各鍛造品の硬さおよび引張り強さと破断伸びの測定結果である。T6処理をすることによって鍛造品の強度が著しく向上することは明らかである。またT73処理はT6処理より強度をわずかに低下させている。一方、T6処理された素材を温間鍛造したものは、鍛造後にT6処理した従来のプロセスのものよりも強度が高い。これは前項で述べたように、温間鍛造時の熱的効果によって過時効あるいは復元処理と同様の組織的な変化が生じるが、同時に鍛造でもたらされる加工硬化の現象が重畳されるためと考えられる。

5. 結言

Al-Zn-Mg合金の耐応力腐食割れ性を改善するために、予めT6の熱処理を施した材料を温間鍛造するプロセスの適用を試みた。T6材の限界据込み率は、200℃の加工温度でO材の冷間鍛造と同程度となるので、温間鍛造が充分可能であることがわかった。そして温間鍛造品の耐応力腐食割れ性は、熱間鍛造後にT6処理を施す通常のプロセスのものに比べ大きく改善された。これはマイクロ組織の観察から、温間鍛造によって過時効状態あるいは復元処理状態と同様の析出物の凝集粗大化が生じたことに起因すると推察された。また、このプロセスでの鍛造品は過時効処理を施した場合のような強度低下がなく、

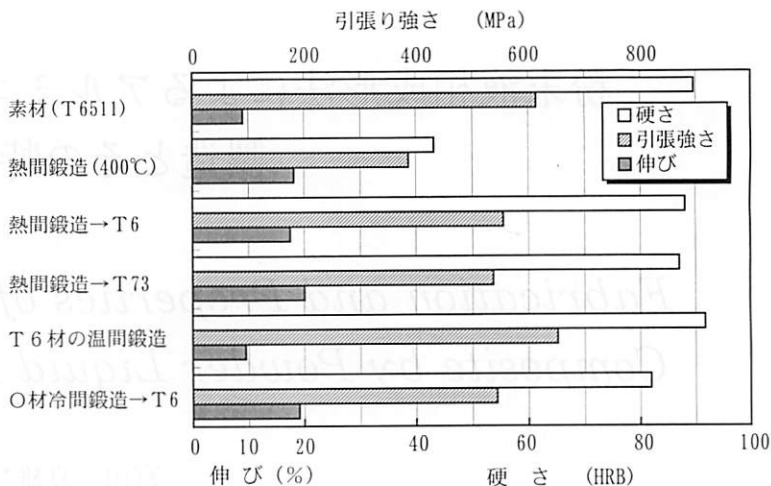


図8 各加工品の機械的特性  
Mechanical properties of products from different processes

逆に温間鍛造による加工硬化が加わるため素材のT6材よりも強度は上昇する傾向が見られ、従来のプロセスよりも有利であると考えられる。

本報で試みたプロセスは、面倒なT6処理が予め材料メーカーで施された素材を使用することで代替でき、成形後の熱処理によるひずみ発生を抑えることができることなど、実用性が非常に高いと思われる。

参考文献

- 1) 大西忠一, 塩田秀昭, 軽金属, 36, 647 (1986)
- 2) 関口秀夫, 宮川松男, 塑性と加工, 27, 45 (1986)
- 3) 大西忠一, 熱処理, 32-2, 83 (1992)
- 4) 日本塑性加工学会編, 鍛造, コロナ社, 1995, P.154