

自動車パネル用 Al-Mg-Si 合金の曲げ加工性に及ぼす成分および溶体化処理条件の影響

高木康夫・竹添 修

神鋼アルコア輸送機材株式会社

Effect of Chemical Composition and Solution Heat Treatment on Bendability of Al-Mg-Si Alloys for Automobile Body Panels

Yasuo Takaki • Osamu Takezoe

The bendability of Al-Mg-Si alloys containing 0~0.95 wt% excess Si and solution treated at 510~550 was studied. Bendability decreased with an increase in Si and a solution temperature rise even though elongation increased. The decrease in bendability was caused by a higher strain concentration by increasing the yield strength and decreasing the n-value and by the growth of grain boundary precipitates which reduced the fracture limiting strain. Bendability characteristics were the opposite of bake hardenability characteristics when the Si content and solution temperature were varied. It was concluded that for actual industry purpose alloys bendability and bake hardenability had to be balanced properly.

まえがき = Al-Mg-Si 系合金は、ベークハード（塗装焼付け硬化）性を有すること、また SS マークが発生しないことなどから、近年自動車パネル材として注目されている。自動車パネル用のアルミニウム合金として要求される成形性には、プレス成形性ととも曲げ加工性があるが、Al-Mg-Si 系合金の曲げ加工性については、ミクロ組織の面から粒界析出粒子の影響が報告されているものの定量的な検討はされていない¹⁾。また、曲げ加工性と機械的性質との相関性はほとんど明らかにされていない。

いっぽう、ベークハード性の面からは Mg₂Si 化学量論組成よりも過剰に Si を含む Si 過剰型合金が有利であり、さらに国内における自動車パネルの焼き付け塗装のような比較的低温かつ短時間の熱処理において高い強度をえるためには、直接予備時効処理が有効である²⁾。

そこで、本研究では異なる Si 量を含む Al-Mg-Si 合金について、機械的性質および析出組織に大きく影響する溶体化処理条件を種々に変化させた場合の曲げ加工性に及ぼす成分、溶体化処理条件の影響について調査し、曲げ加工性の支配因子について検討した。

1. 実験方法

1.1 供試材

実験に供した合金の化学組成を第 1 表に示す。約 1wt% の Mg₂Si に過剰 Si 量がバランス組成から約 1wt% までの 4 水準となるように添加した。これらの合金を溶製し、540 で 4 時間の均質化熱処理を施した後、厚さ 2.5 mm まで熱間圧延した。次いで中間焼鈍を加えた後、冷間圧延にて厚さ 1.2mm とした。溶体化処理はソルトバスにより 510 530 540 550 の各温度にて 30 秒間保持し、その後 50 の水中に焼き入れてそのまま 2 時間保持する直接予備時効処理を施して T4 材とし、実験に供した。

1.2 曲げ加工法および機械的性質の測定

曲げ加工性は、各供試材から圧延方向に対し直角方向（LT 方向）に 30 × 200mm の試験片を採取し、プレス成形を想定して 2% の予歪みを加えた後、180 度曲げ試験

(R = 0.5mm) をおこない、割れ発生程度を目視にて下記のように 5 段階で評価した。

劣 4, 3, 2, 1, 0, 優

機械的性質の測定は、やはり LT 方向に JIS 5 号引張試験片を採取し、治具間変位速度 10mm/min で引張試験をおこなった。また、n 値の測定は引張試験結果から公称歪み 10%、20% における応力と歪みより算出した。

ベークハード性は引張試験片に 177 × 30min のベーク処理を加えた後引張試験をおこなって耐力値により評価した。

1.3 組織観察

各試料の両面を厚さ 0.1mm まで研磨した後、ジェットポリッシュにより薄膜を作成し、透過型電子顕微鏡により析出物の観察をおこなった。

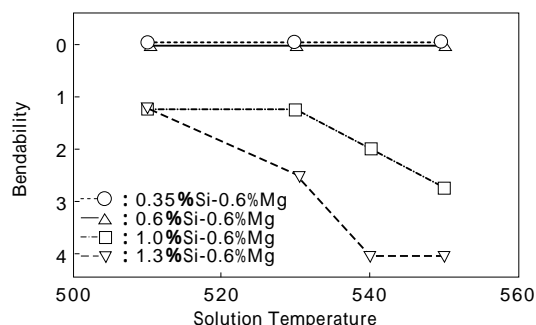
2. 実験結果

2.1 曲げ加工性

第 1 図に各供試材の曲げ試験の結果を示す。0.35wt%Si

第 1 表 供試材の化学組成
Table 1 Chemical composition of specimens

Sample No.	Chemical Composition wt%				
	Si	Mg	Al	Mg ₂ Si	ex Si
	0.35	0.6	Bal.	0.95	-
	0.6	0.6	"	"	0.25
	1.0	0.6	"	"	0.65
	1.3	0.6	"	"	0.95



第 1 図 曲げ加工性に及ぼす溶体化条件の影響
Fig. 1 Effect of solution temperature on bendability

(バランス合金), 0.6wt%Si 合金については, いずれの溶体化条件においても割れは見られず, 良好な曲げ加工性を示した。Si 量の大きい 1.0wt%Si 合金, 1.3wt%Si 合金については, 溶体化処理温度の上昇にともなって曲げ加工性が低下し, 割れが大きくなる傾向が見られた。また, 同一溶体化処理条件においては, Si 量の増加にともなって曲げ加工性は低下した。この結果より, 曲げ加工性の点からは Si 量が小さく, かつ溶体化処理温度は低いほうがよい。

2.2 機械的性質

第 2 図に各供試材の引張試験結果を示す。Si 量の大きい合金ほど耐力および引張強さが高く, またこれらの合金では溶体化温度の上昇にともなって耐力, 引張強さが増加する傾向が顕著に見られた。また, 伸び値についても Si 量および溶体化処理温度の上昇にともなって増加する傾向が見られるが, この傾向は耐力, 引張強さ程明確ではない。

第 3 図に各供試材の 177 × 30min ベーク後の耐力を示す。やはりベーク後耐力についても過剰 Si 量が大きく, 溶体化処理温度の高いほうが高い強度がえられる。

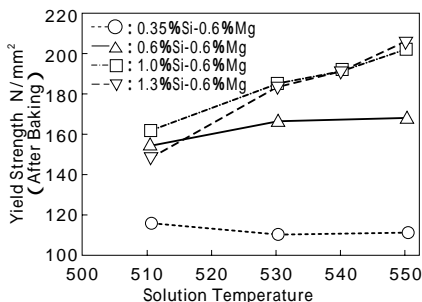
以上のように, 曲げ加工性とベーク後耐力とは, 成分および溶体化処理条件に対し相反する変化を示す。したがって, 実用 Al-Mg-Si 合金では, 曲げ加工性およびベーク後耐力の双方を考慮して成分および溶体化処理条件の適正化を図る必要がある。実用 Al-Mg-Si 合金としては, 国内にて一般的にもちいられているパネル用 Al-Mg 系合金との比較から約 160N/mm² 以上のベーク後耐力が要求され, この点から 1.0wt%程度の Si 添加とし, 曲げ加工の程度に応じて溶体化温度を選定することが妥当である。

3. 曲げ加工性に対する考察

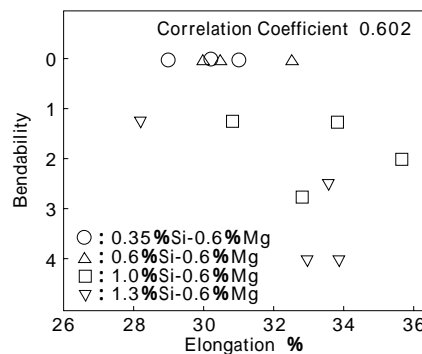
3.1 曲げ加工性と機械的性質との相関

第 4 図に伸び値と曲げ加工性との相関を示す。一般にプレス成形時の破断限界は伸び値が高い程良好であり, 曲げ加工性についても伸び値との相関がもっとも大きいと考えられた。しかし, 第 4 図に示されるように伸び値の増加にともなう曲げ加工性の向上は認められず, むしろ逆の傾向を示した。この結果は伸び値の増加とともに曲げ加工性を低下させる因子がより強く働いたことによるものと思われる。

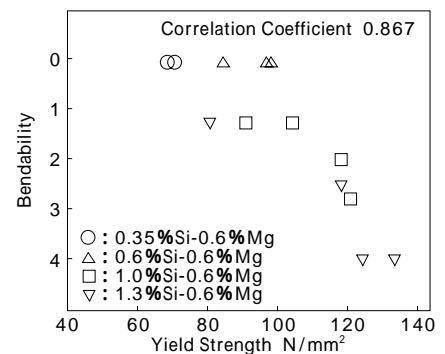
第 5 図に耐力と曲げ加工性との相関を示す。曲げ加



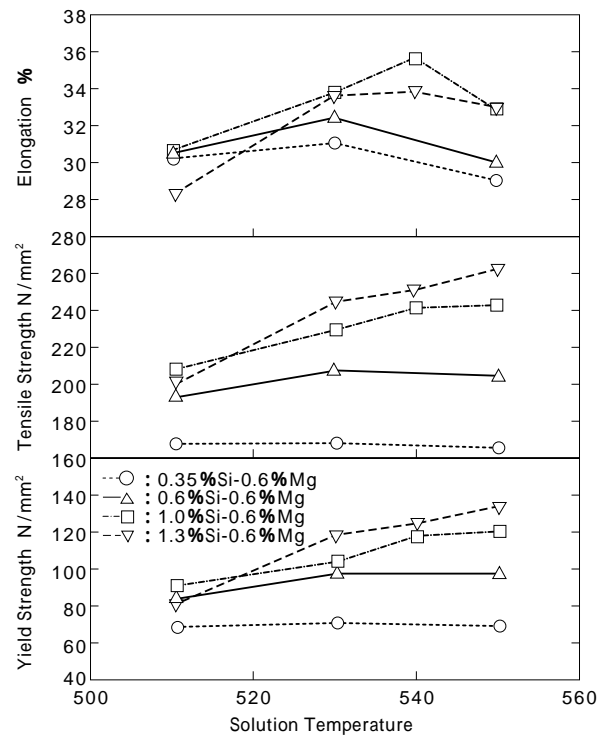
第 3 図 ベーク後耐力に及ぼす溶体化処理温度の影響 (ベーク条件: 177 × 30 min)
Fig. 3 Effect of solution temperature on yield strength after baking (Baking condition: 177 × 30 min)



第 4 図 伸びと曲げ加工性との関係
Fig. 4 Relationship between elongation and bendability



第 5 図 耐力と曲げ加工性との関係
Fig. 5 Relationship between yield strength and bendability

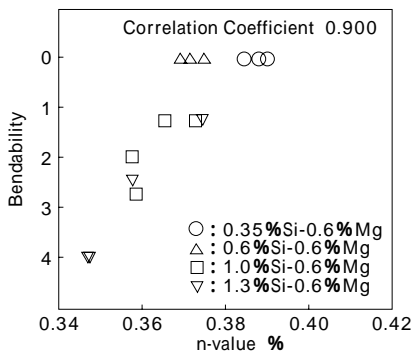


第 2 図 機械的性質に及ぼす溶体化条件の影響
Fig. 2 Effect of solution temperature on mechanical properties

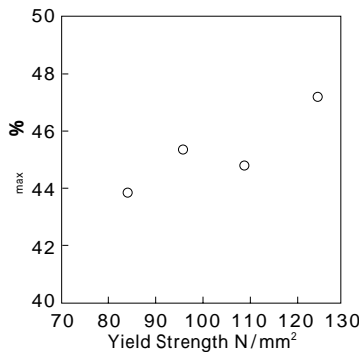
工性は耐力と強い相関を示し, 1.0wt%Si 合金および 1.3 wt%Si 合金において, 耐力の増加にともなって曲げ加工性が低下する傾向が明確に見られた。また, 良好な曲げ加工性を示した Si 量の少ない 2 合金と Si 量の多い合金で溶体化処理を比較的低温でおこなったものでは, いずれも耐力がほぼ同等で低く, 100N/mm² 以下であった。

第 6 図に n 値と曲げ加工性との相関を示す。耐力の場合と同様に強い相関が見られ, Si 量の大きい二つの合金において, n 値の低下にともなって曲げ加工性は低下した。また, 割れの発生しなかった Si 量の小さい合金では, これらよりも高い n 値を示した。

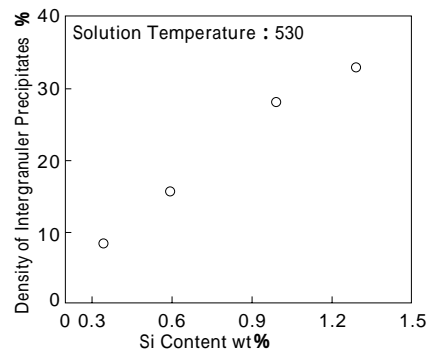
以上の結果より, 曲げ加工性は伸び値よりも耐力および n 値に強く依存し, 耐力の増加および n 値の低下にともなって低下することが示された。ただし, この場合耐力と n 値は独立に変化しておらず, いずれの影響であるかは明確ではない。しかしながら実用 Al-Mg-Si 合金の範囲では n 値の変化は小さく, 耐力の影響がより大きいものと考えられる。



第6図 n値と曲げ加工性との関係
Fig. 6 Relationship between n-value and bendability



第7図 最大歪み量に及ぼす耐力の影響
Fig. 7 Effect of yield strength on maximum true strain



第8図 粒界析出密度に及ぼすSi量の影響
Fig. 8 Effect of Si content on density of grain boundary precipitates

3.2 曲げ加工時の歪み量推定

前節で明らかとなった、耐力およびn値の影響は、耐力の増加およびn値の低下により、曲げ加工の際に歪みを受ける範囲が狭くなり、局部的に集中する歪み量が大きくなった結果と考えられる。前節で述べたように、実用合金範囲では耐力の影響が大きいと考えられることから、耐力の異なる4種のサンプルについてFEM解析をおこない、曲げ加工時に発生する最大歪み量を求めた。その結果を第7図に示す。やはり耐力が高いものほど最大歪み量が大きくなることが示された。

3.3 透過形電子顕微鏡による析出組織観察

各供試材について透過形電子顕微鏡をもちいて明視野観察をおこなった結果、いずれの合金においても粒界および粒内に析出した粒子が観察された。この析出粒子はエネルギー分散法組成分析(EDS)の結果から、主にSi相であることが確認された。

一例として1.3%Si合金の観察結果を写真1に示す。一般に粒界に比較的粗大に析出した粒子は応力集中の起点となって成形性を低下させることが知られており、曲げ加工性についても同様の報告がある¹⁾。そこで透過型電子顕微鏡写真より析出粒子の粒界に占める面積率(粒界析出密度)を求め、この粒界析出密度に及ぼす成分および溶体化処理温度の影響を調査した。

第8図にSi量と粒界析出密度の関係を示す。粒界析出密度はSi量にともなって増加するが、この結果は粒界析出粒子がSi相であることから予測されるものである。この傾向は曲げ加工性の低下と一致しており、やはり粒界析出粒子は曲げ加工性を低下させているものと思われる。しかしながら、この場合、前項で述べた歪み量も変化しており、曲げ加工性に対しいずれの影響であるかは必ずしも明確でない。そこで耐力が同等で粒界析出密度が異なる条件において、曲げ加工性を比較した結果を第2表に示す。この結果より、発生する歪み量がほぼ同等の場合でも、粒界析出密度の増加によって曲げ加工性が低下することが明らかとなった。

曲げ加工においては、引張試験の場合とは異なる破断様式になると推定され、そのために上記のように粒界析出密度の増加による破断限界歪みの低下がより大きくなるものと考えられる。

むすび=異なるSi量を含むAl-Mg-Si合金に対し、溶体



写真1 Al-1.3%Si-0.6%Mg合金のT4における析出粒子(溶体化温度;530)

Photo.1 Transmission electron microscopy of precipitates in Al-1.3%Si-0.6%Mg alloy at T4 (Solution temperature; 530)

第2表 曲げ加工性に及ぼす粒界析出密度の影響

Table 2 Effect of density of grain boundary precipitates on bendability

Alloy	Solution Temp.	YS N/mm ²	Density of GBP %	Bendability
1.0%Si	540	117	29.7	2.0
1.3%Si	530	117	32.3	2.5

GBP : grain boundary precipitates

化処理条件を種々に変化させた場合の曲げ加工性について調査した結果、以下のことが明らかとなった。

1) Si量の増加および溶体化温度の上昇にともなって、伸び値は増加するにもかかわらず、曲げ加工性は低下する²⁾。これはSi量の増加と溶体化温度の上昇によって耐力の増加およびn値の低下が生じ、曲げ加工部の歪みの集中がより大きくなること、および破断限界歪みを低下させるとされる粒界析出粒子の密度がSi量の増加にともなって大きくなることによる。

2) 曲げ加工性とベーク後耐力とは、成分および溶体化処理条件に対し相反する変化を示す。したがって、実用Al-Mg-Si合金としては、双方を考慮して成分および溶体化処理条件の適切化を図る必要があり、パネル用Al-Mg系合金との比較から、1.0wt%程度のSi添加として適切な溶体化温度を選定することが妥当である。

参考文献

- 1) 佐賀 誠ほか：軽金属学会第90回大会講演概要(1996.5) p.285.
- 2) 櫻井健夫ほか：軽金属学会第87回大会講演概要(1994.11) p.185.