引張予変形した Al-Mg-Si 系合金板材の曲げ加工性に 及ぼす合金組成の影響

伊藤 吾朗*・飯村 友明**・伊藤 伸英*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 9 (2008), pp. 443-448

Effects of alloy compositions on the bendability of pre-stretched Al-Mg-Si alloy sheets

Goroh ITOH*, Tomoaki IIMURA** and Nobuhide ITOH*

Recently, the reduction of exhausted carbon-dioxide has been seriously required to avoid global warming. Naturally, this is an issue of great interest in the automobile industry. To achieve a sufficient reduction, lightening the autobody by converting the conventional steel sheets to aluminum alloy sheets is regarded as an effective and feasible method. Some Al-Mg-Si alloys have already been applied to a part of autobodies because these alloys have hardenability during paint baking and do not cause a stretcher strain pattern. However, their bendability is significantly poor compared to that of steels. In this study, the bendability has been assessed in terms of the macroscopic and microscopic appearance of the tension-side surface and measured surface roughness, as a function of the alloy composition, i.e., amount of Mg_2Si , amount of excess Si and addition of Cu and Cr. Specimens were solutionized, air-cooled or water-quenched and then naturally aged for 7 d. Before the bending test the specimens were stretched by 10%, since such straining is frequently carried out in the actual autobody sheets prior to the bending process. The results obtained were compared with those obtained in the previous report where stretching prior to bending had not been performed. The effects of the amounts of Mg_2Si and excess Si and of the Cu addition were similar to those in the specimen series without prior stretching, that is, bendability was decreased when the amounts of Mg_2Si and excess Si were increased, while it was slightly improved by the Cu addition of 0.34%. The effect of Cr addition of 0.21% did not coincide with that in the previous report, that is, Cr addition deteriorated surface roughness and tended to cause cracking despite an improvement in the bendability in terms of macroscopic appearance assessment in the present study, while it totally improved the bendability in the previous study.

(Received February 4, 2008 Accepted June 12, 2008)

Keywords: bendability, Al-Mg-Si alloy, composition effect, cooling rate, prior straining

1. 緒 言

地球温暖化防止のため二酸化炭素の排出量削減が緊急の課題となっている。特に日本の二酸化炭素排出量の 20% を占める自動車に対する排出削減の要求は厳しい。二酸化炭素排出削減の方法としては車体の軽量化が有効であり、特にアルミニウム化はこれまでもある程度進められており、環境全体に与える負荷も小さいといわれている。そして塗装焼付け硬化性を有することや、ストレッチャーストレイン模様が発生しないことなどの利点を生かして、Al-Mg₂Si 系合金がボディ材として一部使用され始めている。しかしこの合金は従来の鋼材に比べ成形性（特に曲げ性）に劣る。そこでこれまで、この合金の曲げ性についてある程度の研究がなされてきており、例えば高木ら¹⁾は曲げ性と 0.2% 耐力が負の相関を示すと主張し、一方、清水ら²⁾は、極限局部伸びが曲げ性とよい相関を示すと考えた。さらに浅野らは結晶粒界や粒内を貫通するせん断帯の生じやすく、粒界・粒内に粗大第二相粒子が

存在する条件で、曲げ割れが発生・伝播しやすくなるとしている³⁾。一方、日比野らは第二相の分散状態・および合金元素の固溶状態の影響を明らかにしている⁴⁾。また、著者らは前報において、18 種類の合金を用いて、T4 材の曲げ加工性について、合金組成、溶体化処理温度からの冷却速度、引張特性との関係で幅広く調べ、Cr 添加により曲げ性が向上し、過剰 Si 量の増加により曲げ割れが発生しやすくなること、中間の冷却速度（空冷）において曲げ性が最も低くなること、曲げ性と引張特性との相関については、0.2% 耐力とは特に負の相関を示さず、破断伸びと正の相関を示すこと、などを報告した^{5),6)}。本報では、実際の曲げ加工がしばしば引張変形を与えた後に行われる⁷⁾こと、引張予変形後の曲げ加工のほうがより条件が過酷であると推測されることを考慮し、Al-Mg₂Si 系合金 T4 調質板材の引張予変形後の曲げ加工性に及ぼすおもに合金組成の影響を調べた。そして曲げ性と引張性質との相関についてさらに広く実験結果を収集するとともに、曲げ性改善の指針につながる基礎データを得ることを目

* 茨城大学工学部機械工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)。Ibaraki University, the College of Engineering, Department of Mechanical Engineering (4-12-1 Naka-Narusawa, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511). E-mail: gitoh@mx.ibaraki.ac.jp

** 茨城大学大学院生 [現在: ユニバーサル製缶(株)]。Graduate Student, Ibaraki University [Present: Universal Can Corp.]

Table 1 Chemical composition and bendability of the alloy specimens used in this study in mass%. The specimens were cold-rolled to 1 mm in thickness, solution-treated at 540°C for 1 h, air-cooled (A.C.) or water-quenched (W.Q.), pre-stretched by 10% and finally bent by 180° with inner radius of 0.5 mm. Tensile directions both for the pre-stretching and bend-deformation are identical to the transverse, LT, direction

No.	Si	Fe	Cu	Mg	Mn, Zn	Cr	Mg ₂ Si	Excess Si	Bendability Grade	
									A.C.	W.Q.
A1	0.28	0.02	<0.01	0.46	<0.01	—	0.73	0.01	0	0
A2	0.44	0.02	<0.01	0.70	<0.01	—	1.10	0.04	3	2
A3	0.62	0.03	<0.01	0.97	<0.01	—	1.53	0.06	2	2
A4	0.76	0.03	<0.01	0.71	<0.01	—	1.12	0.35	3	3
A5	1.06	0.03	<0.01	0.69	<0.01	—	1.09	0.66	2	2
A6	0.29	0.02	0.32	0.44	<0.01	—	0.69	0.04	1	1
A7	0.45	0.03	0.33	0.68	<0.01	—	1.07	0.06	2	1
A8	0.62	0.03	0.34	0.95	<0.01	—	1.50	0.07	1	0
A9	0.76	0.03	0.34	0.70	<0.01	—	1.10	0.36	1	1
C1	0.29	0.20	<0.01	0.50	<0.01	0.21	0.79	0.01	0	0
C2	0.45	0.20	<0.01	0.72	<0.01	0.21	1.14	0.03	1	1
C3	0.61	0.21	<0.01	0.97	<0.01	0.21	1.53	0.05	1	2
C4	0.76	0.20	<0.01	0.73	<0.01	0.21	1.15	0.34	1	2
C5	1.09	0.21	<0.01	0.74	<0.01	0.21	1.17	0.66	2	2
C6	0.29	0.20	0.34	0.49	<0.01	0.21	0.77	0.01	0	0
C7	0.45	0.20	0.34	0.73	<0.01	0.22	1.15	0.03	1	1
C8	0.60	0.21	0.34	0.96	<0.01	0.21	1.51	0.05	1	0
C9	0.76	0.20	0.34	0.72	<0.01	0.21	1.14	0.34	2	1

的とした。

2. 試料

試料は既報と同じく、溶解・鋳造→均質化処理→熱間圧延→中間焼なまし→冷間圧延のプロセスで製造された計 18 組の Al-Mg₂Si 系合金の長さ 1000 mm、幅 200 mm、厚さ 1 mm の板材であり、**Table 1** にこれら試料の化学組成を示した。**Table 1** には曲げ試験結果も併記されているが、これについては後述する。これらの板材から 35×200 mm の材料を、長手方向が元の板材の幅 (LT) 方向になるように切出した。その後、試験片を大気中 540°C で 1 h 溶体化処理し、水冷または空冷の後、25°C で 7 d 時効し、T4 材とした。自然時効処理は素材製造・熱処理後、ボディの成形が行われるまでの期間を想定したものである。その後、油圧式試験機を用いて材料の長手方向 (元の板幅方向) に約 $5.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で 10% の塑性ひずみを与えた。変形後の試験片から 15×50 mm の短冊状試験片を長手方向と引張予変形の方向が一致するように切出し、曲げ試験片とした。すなわち引張予変形も、曲げ変形も、元の板幅方向が張力方向に一致するようにした。

3. 実験方法

曲げ試験は JIS Z 2248 に準拠し、内側半径 0.5 mm、曲げ角 180° で曲げた後、張力面を目視観察することにより行った。評価は、竹島ら⁷⁾ の判定基準に従った。この方法では目視評価点 (0 から 4 までの 5 段階) が少ないほど曲げ性がよいことになるので、本報告の図中においては評価点が少ないほどプロットが上になるようにした。このほかに、曲げ試験後の張力面の SEM 観察や接触式の粗さ計を用いた張力方向の表面粗さ測定も行った。

4. 実験結果および考察

Fig. 1 に曲げ加工性に及ぼす溶体化温度からの冷却条件の影響を、Cr 無添加の A 系列、Cr 添加の C 系列に分けて、各組成について示した。プロット点が重なり、個々のデータが見にくいので、既出の **Table 1** に各試料、各冷却条件の曲げ評価点を併記した。**Fig. 1** より、まず、冷却条件による影響では、C 系列では差がないが、A 系列では水冷の方が曲げ性がややよい。これは空冷においては冷却中に Mg₂Si などの化合物が析出し、割れが発生または伝播しやすくなるためと推測される。C 系列において冷却速度の影響が見られないのは、割れの発生箇所や伝播経路に関係すると推察される。割れの発生・伝播については後報で詳しく検討する予定であるが、ここでは、冷却速度が遅くなれば粒界上析出により粒界割れしやすくなるにもかかわらず、C 系列では結晶粒が微細なため粒界割れが起こりにくかったものと考えている。Cr 添加による結晶粒の微細化はよく知られた現象であり、本研究では使用したすべての試料について結晶粒径を測定しなかったが、曲げ変形前 (引張予変形後) の結晶粒径に及ぼす Cr 添加の影響を試料 A5 と C5 を用いて調べ、**Table 2** に示した。Cr 添加によりとくに板厚方向の粒径が細かくなることが確認される。Cr 添加により、集合組織が変化しせん断帯が発生しにくくなったために、曲げ性が向上した可能性もあるが、本研究では集合組織を評価しなかったため、この点は検証できない。水冷よりも空冷の場合のほうがわずかながら Cr 添加の効果が顕著であることから、ここでは主因として結晶粒微細化の影響を挙げた。

Fig. 2 には、**Fig. 1** および **Table 1** の曲げ性のデータを、予ひずみなしの前報^{5),6)} の結果と比較し、予ひずみの有無の影

Fig. 1 Correlation between bendability and cooling condition from the solution temperature of the two series of specimens. (a): alloy series without Cr addition, (b): with Cr addition.

Table 2 Grain sizes of the specimens A5 and C5 prior to the bending test showing the effect of Cr addition on the grain size. D_{LT} and D_{ST} : mean intercept length in LT and ST directions, respectively

	A5	C5
$D_{LT}/\mu\text{m}$	135	103
$D_{ST}/\mu\text{m}$	198	68

Fig. 2 Effect of 10% pre-strain on the bendability as a function of cooling condition from the solution temperature and chromium addition.

響がわかりやすくなるように示した。図では、予ひずみの有無以外に、Cr添加の有無および冷却条件により曲げ試験結果を大別し平均値をプロットした。予ひずみを与えずに評価した場合、Cr添加により曲げ性が向上することがわかる。しかし、A系列では予ひずみによる影響はほとんどないのに対し、Crを添加したC系列では、予ひずみ付与により評価がわずかながら下がっている。本研究では引張予変形の方法も曲げの張力方向も同じとしているが、板厚方向における応力分布が異なるため、各結晶粒の変形も引張と曲げとで異なると思われる。一方、既報で述べたように、Crを添加していないA系列の試料では、結晶粒単位の粒内すべり系の違いに基づく凹凸も曲げ性を低下させる一因であった。このような状況にお

Fig. 3 Relationship between the bendability grade and flow stress at a true strain of 0.1, σ , of the specimens before stretching. The σ will be representative of the yield stress after stretching. ○: A1, ●: A2, △: A3, ▲: A4, □: A5, ■: A6, ▽: A7, ▼: A8, ◇: A9, ◎: C1, ○: C2, △: C3, ▲: C4, □: C5, ■: C6, ▽: C7, ▼: C8, ◇: C9.

いて、A系列では異なる変形様式をもたらす引張の予ひずみが結果的に凹凸を低減させ、わずかながら曲げ性を向上させるのではないかとと思われる。この点については、表面様相の観察結果とともに後述する。これに対してCr添加のC系列では結晶粒がA系列より細かいために、もともと結晶粒単位の凹凸が発生しにくい。予ひずみを与えた後、曲げ変形すれば張力面の引張ひずみの合計は当然予ひずみなしの場合より多くなり、割れが発生しやすくなるので曲げ性が低下したと思われる。この総ひずみの増加の影響は、当然A系列の試料の場合にもはたらくが、結果的に既述の凹凸の低減の効果と相殺されたのであろう。

さて緒言で述べたように、本合金の曲げ性と引張性質の関係については以前から多数の報告がある。その中で一般的に測定しやすい指標として曲げ変形前の降伏応力 (0.2% 耐力) がある。本研究では引張予ひずみの負荷を曲げ試験片についてのみ行ったので、予ひずみ負荷後の降伏応力の測定を行えなかった。そこで予ひずみ負荷前の空冷板材についての真応力・真ひずみ曲線から、真ひずみ 0.1 における流動応力を求め、これを引張予ひずみ負荷後の降伏応力の代用とすることにして、Fig. 3 にその流動応力と曲げ評価点との関係 (試験回数は各条件 1 回) を示した。わずかながら流動応力

の増加とともに曲げ性が低下する傾向はあるが、相関係数を取ったところ -0.12 となり、負の相関は極めて弱いことが明らかになった。この傾向は、予ひずみなしの前報^{5),6)}の結果と同様である。ただし、本研究結果は組成の異なる試料について得られたものであり、同一組成で耐力を変化させた高木らの報告¹⁾とは耐力を変える手法が異なっている。

Fig. 4 は、予ひずみ負荷前、予ひずみ負荷後、曲げ試験後の曲げ変形による中心線平均粗さの変化を各組成において、A 系列と C 系列、水冷と空冷の平均値で示した。なお、測定結果は、目視評価と対応するように粗さの値が小さいほど、すなわち滑らかなほど、上方に位置するようにプロットしてある。予ひずみ負荷前は冷間圧延板の溶体化処理後の状態であるので、各組成においてほとんど変化はなく、凹凸も少ないことが確認される。また、予ひずみ負荷後においては負荷前と比較すると、変形により凹凸が発生し、多少粗くなっていることがわかる。曲げ試験後では、予変形に比べてはるかに大きな凹凸が現れ、また試料の違いによる凹凸の差も大きくなっており、一部の試料で割れが発生していることが推察される。試料番号 1 から 3 と Mg_2Si 量が増加しているが、それに伴って粗くなっている。また、試料 2 に過剰 Si をそれぞ

Fig. 4 Variations in average surface roughness, Ra , by bending tests. The four roughness values for the specimens of A and C series and water-quenched and air-cooled are averaged in each alloy number.

れ 0.35, 0.66% 添加したものが試料 4, 5 であり、5 において著しく粗くなっている。試料 6~9 は試料 1~4 に Cu を約 0.3% 添加したものであり、Cu 無添加の試料と比較するとほぼ同等の表面粗さを示している。

次に、目視評価および中心線平均粗さに及ぼす組成の影響を詳しく検討する。**Fig. 5** には、冷却速度の違いや Cr 添加、Cu 添加の有無にかかわらず Mg_2Si 量の同じ試料の目視評価および粗さを平均し、 Mg_2Si 量に対してプロットした。予ひずみを与えない場合^{3),4)}と異なり、0.73% から 1.10% に Mg_2Si 量が増加した場合に、目視評価がかなり低下することがわかる。中心線平均粗さにおいても同様の傾向が認められるが、1.10% から 1.53% に増加した場合には、目視ではほとんど変化しないが、表面は 0.73% から 1.10% の場合と同様に粗くなることがわかる。**Fig. 6** には Cr や Cu を含まない合金の水冷材の張力面の SEM 写真を示した。Fig. 5 の結果に対応し、 Mg_2Si 量が増加するほど割れが顕著に現れている。

Fig. 7 には、Fig. 5 と同様な手法でまとめた目視評価および表面粗さに及ぼす過剰 Si 量の影響を示した。0.35% までは、過剰 Si 量の増加とともに目視でも中心線平均粗さでも粗くなる。しかし、さらに過剰 Si 量が増加すると、中心線平均粗さでは粗くなるにもかかわらず、目視では逆にわずかながら滑らかになると評価される。このような目視と中心線平均粗さとの評価結果の違いの原因について次に述べる。**Fig. 8** に Fig. 6 と同様の Cr, Cu 無添加の水冷材の SEM 組織を示した。過剰 Si 量の増加とともに単調に割れが顕著になり、中心線平均粗さによる評価と対応している。一方、**Fig. 9** には比

Fig. 5 Effect of Mg_2Si content on the bendability.

Fig. 6 Surface morphology of the specimens A1, A2 and A3 water-quenched, pre-stretched by 10% and finally bent. Rolling, L, and transverse, LT, directions of the sheets are indicated in the figure.

較のため、試料 A2 の水冷材について既報（予ひずみなし）の SEM 組織を示した。既報では平均粗さ測定を行っていないので、定量的な比較は困難であるが、予ひずみなしの Fig. 9 のほうが結晶粒単位の凹凸が激しいように見受けられる。なお Fig. 9 の条件の目視評価点は 3 であったので、割れが発生していないにもかかわらず、Fig. 8 の同じ試料（Table 1-A2-W.Q., 目視評価点 2）よりも目視評価での曲げ性が低いことになり、上記の表面様相に関する考察と対応する。

Fig. 5, Fig. 7 と同様に Cu 添加の影響を空冷、水冷に分けて Fig. 10 に示す。水冷においては Cu 添加により曲げ性が向上し、空冷においても添加により曲げ性が低下することはない。全体に中心線平均粗さでは目視よりも Cu 添加の効果は少なく評価される。Fig. 11 に張力面の SEM 組織を示したが、目視による評価や粗さによる評価と定性的に一致する。すなわち水冷では割れが明らかに抑制されているのに対して、空冷では無添加との差がほとんどない。Cu 添加は、 Mg_2Si や過剰 Si の増量と同様に最終塗装焼付け後の強度を増加させるが、 Mg_2Si や過剰 Si の増量が曲げ性を低下させるのに対して、水冷の場合に曲げ性を向上させ、空冷の場合でも曲げ性を低下させない点が注目される。この原因についてはまだ明確になっていないが、現在境界上析出相との関係で検討中であり、後に詳しく報告したい。なお、Table 3 に A 系列の各試料の溶体化処理後の平均結晶粒径を示した。全体に Cu 添加によりわずかに結晶粒が細くなる傾向にあるが、Fig. 11 に示した A2 と A7 を比べると、粒径にはほとんど差がない。したがって Cu 添加による曲げ性の向上（水冷の場合）は結晶粒微細化以外に主因があると考えられる。

Fig. 7 Effect of excess Si on the bendability.

Fig. 8 Surface morphology of the specimens A2, A4 and A5 water-quenched, pre-stretched and bent.

最後に Cr 添加による影響を Fig. 12 に示す。Cr を添加した試料は、無添加の試料に比べて目視評価は改善されるが、粗さ評価では逆に劣化する。目視評価には、割れについても単なる凹凸についても、その深さではなく張力面における面積率が影響するのに対して、粗さ評価は逆に割れや凹凸の深さに左右されるためと思われる。Fig. 13 に張力面の SEM 写真を示したが、粗さにおいて低く評価された Cr 添加材に、割れがより多く発生している。すなわち割れの程度は、目視評価とは必ずしも対応せず、むしろ中心線平均粗さと比較的良好に対応することがわかった。一方、Cr 無添加の試料では、粗粒であるためと思われるが、結晶粒単位の凹凸が著しくなっており、このことが目視評価に影響したと推察される。なお、前報の結果も本研究結果も Cr 添加合金では無添加合金よりも不純物鉄量が増加しており、このことも Cr 添加（結晶粒微細化）の効果を表にくくしていると思われる。

5. 結 言

Al-Mg-Si 系合金 T4 処理材を引張予変形後に曲げ加工し、曲げ性を目視や表面粗さにより評価した。予変形なしの前報の結果と基本的に同様の傾向となったが、Cr 添加の影響はやや異なった。すなわち予ひずみなしの場合は Cr 添加により曲げ性が向上したが、予ひずみを与えた今回の場合は Cr 添加により表面粗さが低下し、割れが発生しやすくなった。これは無添加の場合は粗大粒組織のために引張予変形により肌荒れが抑制され、曲げ性がわずかに向上するのに対して、Cr 添加材ではもともと細粒組織のため肌荒れがほとんどない状態で、引張予変形により張力面の総ひずみ量が増加したためと考えられる。なお、前報の結果も本研究結果も Cr 添加合

Fig. 9 Surface morphology of the specimens A2 water-quenched and bent without pre-stretching, quoted from reference 6).

Fig. 10 Effect of Cu addition on the bendability. (a): air-cooled, (b): water-quenched.

Fig. 11 Surface morphology affected by Cu addition and cooling condition.

Table 3 Average grain sizes in μm of the A-series specimens prior to the bending test

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
319	215	127	184	161	263	213	107	155

金では無添加合金よりも不純物鉄量が増加していることも Cr 添加の効果を表れにくくしている。また割れの程度は、目視評価とは必ずしも対応せず、むしろ中心線平均粗さと比較的

Fig. 12 Effect of Cr addition on the bendability.

Fig. 13 Surface morphology affected by Cr addition. Specimens were water-quenched and bent.

よく対応することがわかった。

その他の Mg_2Si 量、過剰 Si 量、Cu 添加などの影響はおおむね予変形なしの場合と同様となった。すなわち Mg_2Si 量や過剰 Si 量が増加するほど、曲げ性は低下し、Cu 添加により水冷の場合に曲げ性が向上し、空冷の場合も曲げ性は低下しなかった。

おわりに、本研究遂行に当たり実験に協力していただいた梅津俊太郎君に感謝します。また本研究は軽金属学会粒界近傍の材料物性部会の共同研究の一環として行われたものであり、試料提供ならびに部会運営への財政支援など、参加していただいた企業会員に、厚く御礼申し上げます。さらに、本研究の一部は財団法人軽金属奨学会の研究助成金により賄われたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 高木康夫, 竹添 修, 林 登, 安永晋拓: 軽金属学会第 91 回秋期大会講演概要, (1996), 31-32.
- 2) 清水保史, 小山克己, 戸次洋一郎: 軽金属学会第 102 回春期大会講演概要, (2002), 289-290.
- 3) 浅野峰生, 内田秀俊, 吉田英雄: 軽金属, **52** (2002), 448-452.
- 4) 日比野旭, 村松俊樹, 佐賀 誠, 高田 健: 軽金属, **53** (2003), 534-541.
- 5) G. Itoh, T. Suzuki and K. Horikawa: Mater. Sci. Forum, 396-402 (2002), 1193-1198.
- 6) 伊藤吾朗, 堀川敬太郎: 研究部会報告書 No. 43 「アルミニウム基材料における粒界近傍の材料物性」, 軽金属学会, (2003), 53-58.
- 7) 竹島義雄, 疋田達也, 宇都秀之: 住友軽金属技報, **32** (1991), 39-55.