Al–Mg–Si系合金の曲げ変形初期の亀裂発生および
伝播に及ぼすマイクロボイドの影響山本 裕介*・浅野 峰生*・吉田 英雄*
小林 正和**・戸田 裕之***Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 63, No. 12 (2013), 452–457
© 2013 The Japan Institute of Light MetalsEffect of micro-voids on crack initiation and propagation
in bending deformation of Al–Mg–Si alloy sheetsYusuke YAMAMOTO*, Mineo ASANO*, Hideo YOSHIDA*
Masakazu KOBAYASHI** and Hiroyuki TODA***

The crack initiation and the propagation during bending have been considered to be affected by second phase particles with micro-voids and shear-band. However, the effect of second phase particle distribution on formation of micro-voids, and the effect of micro-voids on crack initiation and propagation during bending have not been fully investigation. In this study, the effect of second phase particle distribution on formation of micro-voids, and the effect of micro-voids on crack initiation and propagation during bending were investigated by using the largest synchrotron radiation facility “SPRING-8” and FE-SEM/EBSD. With increasing the bending ratio, micro-voids were increased around coarse particles nearby outer surface. In particular, coarse micro-voids were formed around coarse particles with high aspect ratio on shear-bands. At large cracking part, the coarse micro-void was observed at outmost layer section as crack initiation site, and coarse micro-voids and sheared fracture surface were observed at crack propagation site. At small cracking part with no propagation, Cube orientation grains were located under the small crack. It was considered that these cube orientation grains inhibited the formation of shear-bands, therefore propagation of cracks did not occur at small cracking area.

(Received July 11, 2013 Accepted September 1, 2013)

Keywords: Al–Mg–Si alloy, bending, micro-void, second phase particle, crack propagation, crack initiation, cube orientation

1. 緒 言

近年、CO₂排出量削減の観点から自動車の軽量化を目的として、自動車ボディパネル等へのアルミニウム合金板の適用が拡大している。自動車ボディパネル用アルミニウム合金板材として、主にAl–Mg系合金およびAl–Mg–Si系合金が使用されており、プレス成形時にストレッチャストレインマークが発生しないこと、塗装焼付硬化性を有することなどから、Al–Mg–Si系合金のT4調質材が主流となっている。フードやドア等のアウトパネルは、縁でインナパネルをかしめる曲げ加工（ヘミング）を行うが、Al–Mg–Si系合金のT4調質材は室温時効の進行に伴って曲げ加工性が低下し、曲げ加工時に割れが発生しやすくなる¹⁾。そのため、曲げ加工性の改善が強く望まれており、曲げ割れ発生メカニズムの解明に向けた研究がなされてきた^{2)–6)}。浅野らは、Al–Mg–Si系合金板において、曲げ加工によるせん断帯の形成と全第2相粒子

数（2μm以上）が共に多い場合、曲げ加工性が低下することを報告しており、以下の曲げ割れメカニズムを提案している²⁾。

- ① 曲げ加工度の増加に伴って、第2相粒子周りでのマイクロボイドの形成が進行
- ② 曲げ加工度の増加に伴って、せん断帯の形成が進行
- ③ せん断帯とマイクロボイドに沿って割れが伝播

曲げ加工中に形成されたマイクロボイドの形成状態の観察は、一般的に樹脂埋め、研磨された試料を用いた光学顕微鏡観察もしくは走査型電子顕微鏡観察により行う。しかし、前述の方法では数μm以下のマイクロボイドの形成状態を正確に捉えることが非常に難しいため、マイクロボイドの形成状態に及ぼす第2相粒子分布の影響や曲げ割れ初期の亀裂発生に及ぼすマイクロボイドの影響は十分には明らかにされておらず、推測の域を脱していない。近年、大型放射光施設を利用した3D/4D観察技術の発展に伴い、1μm程度のマイクロボイ

*株式会社UACJ 技術開発研究所（〒455-8670 愛知県名古屋市中区千代3-1-12）。Research and Development Division, UACJ Corporation (3-1-12 Chitose, Minato-ku, Nagoya-shi, Aichi 455-8670). E-mail: yamamoto-yusuke@uacj.co.jp

**豊橋技術科学大学機械工学系（豊橋市）。Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology (Toyohashi-shi, Aichi).

***九州大学工学研究院機械工学部門（福岡市）。Department of Mechanical Engineering, Kyushu University (Fukuoka-shi, Fukuoka).

Table 1 Chemical composition of specimens (mass%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1.0	0.17	0.02	0.07	0.52	Tr.	0.19	0.02	Bal.

Fig. 1 Appearance and schematic diagram of bending test sample. (a) Appearance of sample surface. (b) and (c) Schematic diagram for sample preparation. (b) For tomography measurement. (c) For SEM observation.

ドの観察が実現可能となってきた^{7),8)}。そこで、本研究では、SPring-8を利用したX線CT観察を行った後、同一試料にてSEM観察を行い、マイクロボイドの形成状態に及ぼす第2相粒子の影響を調査した。その結果を基に、曲げ割れ初期の亀裂発生に及ぼすマイクロボイドの影響について考察した。

2. 実験方法

Table 1に示す化学成分を有するAl-Mg-Si系合金鋳塊を均質化処理、熱間圧延、冷間圧延、溶体化処理により0.9mmのT4板材とした。曲げ試験は、圧延方向に対して0°方向の押曲げ法（JIS Z2248）により、内側曲げ半径0mmの180°曲げ試験（密着曲げ試験）を行った。曲げ試験片の外観および模式図を**Fig. 1**に示す。**Fig. 1(b)**に示すように曲げ試験片の先端から1辺約2mmの棒状試料を切出し、大型放射光施設SPring-8のBL20XUにおいて、マイクロボイドおよびAl-Fe-Si系粒子の観察を行った。**Fig. 2**に示すようにサンプルをセッティングし、透過X線を可視光に変換した後、レンズで拡大してから可視光の強度を検出した。これにより、1 μ m程度の微小なマイクロボイドやAl-Fe-Si系粒子を観察することができる。CT断層像から特徴的な断面を選択し、該当断面が得られるよう、**Fig. 1(c)**に示すようにクロスセクションポリリッシャ（CP）を用いてArイオンにより切断した。この切断面において、SEM観察およびEBSD解析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 ミクロボイドの形成

Fig. 3に曲げ試験片先端部の3次元再構成像およびCT断層像を示す。板厚内部まで伝播した割れ（Fracture）、局所的なくびれ（Localized necking）や微小な割れ（Crack）、曲げ加

Fig. 2 Schematic diagram of sample setting for tomography measurement. **Fig. 3** 3D perspective views and 3D rendered tomographic volumes of bending test sample. (a) Perspective views. (b) Rendered tomographic volumes. Black points are micro-voids.

工部外面に現れた変形帯が観察された。A-A断面におけるCT断層像は、厚さ5 μ mを重ね合せた像であり、黒点がマイクロボイドである。マイクロボイドは、表層近傍で顕著に形成されており、**Fig. 3(b)**中に矢印で示すように特に局所くびれ領域の延長上で粗大なマイクロボイドが形成されていた。詳細は後述するが、局所くびれ領域の延長上ではせん断帯が形成されており、せん断帯上でマイクロボイドの形成が顕著であった。

また、マイクロボイドの板厚方向の分布に着目すると、マイクロボイドは表層近傍で多く、板厚1/4部で減少した後、板厚中心部で再度増加した。**Fig. 4**に曲げ部の全板厚における反射電子像を示す。EDS分析の結果、黒点がマイクロボイド、白点がAl-Fe-Si系粒子であった。**Fig. 3**に示したCT断層像と

Fig. 4 SEM image through gauge of bending test sample. Black points are micro-voids. White points are particles.

Fig. 5 Relation with histogram of Al-Fe-Si particles and histogram of micro-voids. (a) X area in Fig. 4. (b) Y area in Fig. 4.

同様に、マイクロボイドは表層近傍で多く、板厚1/4部で減少した後、板厚中心部で再度増加した。さらに板厚3/4部から内側表層部（内側曲げ部）にかけて、マイクロボイドはほとんど観察されなかった。このようなマイクロボイドの分布状態から、板厚中心部で形成されたマイクロボイドは、曲げ加工の歪

Fig. 6 SEM image of localized necking area.

Fig. 7 Crystal orientation map at localized necking area. Black lines are large angle grain boundaries $>15^\circ$. Black area is the area of CI value <0.1 .

分布が主原因ではなく、鋳造時に形成されたマイクロボイドが圧延後も残存していたものと考えられる。しかし、板厚中心部のマイクロボイドは曲げ割れの発生には直接影響しないため、形成原因の詳細については今後の研究課題とした。

Fig. 4中のX領域、Y領域においてAl-Fe-Si系粒子とマイクロボイドの粒度分布を画像解析により計測した。その結果をFig. 5に示す。Al-Fe-Si系粒子について、X領域よりもY領域の方が $2\mu\text{m}$ 以下の粒子数が多かった。一方、マイクロボイドについて、X領域よりもY領域の方が $3\mu\text{m}$ 以下のボイド数が多く、Al-Fe-Si系粒子とマイクロボイドの粒度分布が近い値を示した。このことから、曲げ加工部の外側領域（引張変形領域）におけるマイクロボイドの形成は、Al-Fe-Si系粒子の粒度分布が影響を及ぼしていると推測される。

Fig. 6にFig. 3中の局所くびれ領域の反射電子像を示す。マイクロボイドの両端もしくは片側の端部にAl-Fe-Si系粒子が存在している様子が多く観察された。以上のことから、曲げ加工度の増加に伴い、①Al-Fe-Si系粒子が割れ、その隙間にマイクロボイドが形成された、もしくは②Al-Fe-Si系粒子と母相の界面が剥離し、剥離面でマイクロボイドが形成されたと考えられる。ここで、複数のCT断層像を用いてAl-Fe-

Fig. 8 Scatter diagram of Al-Fe-Si particles. (a) X area in Fig. 4. (b) Y area in Fig. 4.

Si系粒子とマイクロボイドの形成状態を確認したが、両端にAl-Fe-Si系粒子が存在するマイクロボイドが多く見られたこと、マイクロボイドの形成を伴わない粗大なAl-Fe-Si系粒子も存在することから、①の機構が優位であると考えられる。このほか、③元々材料中に存在したマイクロボイドが曲げ加工度の増加に伴って大きくなる、④ Mg_2Si またはシリコン粒子に関連してマイクロボイドが形成されるケースも考えられる。これらの点を確認するためには、アルミニウムとX線吸収係数の差が小さい Mg_2Si およびシリコンに関して回折を利用したトモグラフィ⁹⁾を行うなど、より精度の高い測定を行うことが必要であり、今後の課題としたい。

Fig. 7に局所くびれ領域のEBSD解析結果を示す。方位差 15° 以上の大角領域を黒線で示し、CI値（同定された方位の信頼値、最大値は1）0.1以下の領域は黒点で表示した。理想方位から 20° 以内のCube方位粒はグレーで表示した。CI値が0.1以下となるケースは、歪が局在化している、測定点に疵や異物、第2相粒子が存在していると考えられるが、矢印部のように帯状かつ断続的に存在している場合、歪が局在化している部分、すなわち、せん断帯が形成されている部分と考えられる。Fig. 3, Fig. 6に見られるようにせん断帯上でマイクロボイドが顕著に形成されていることから、せん断帯上ではAl-Fe-Si系粒子の内部応力が上昇しやすく、粒子の割れに伴うマイクロボイドの形成が顕著であったと考えられる。このように粒子の割れに伴ってマイクロボイドが形成されるのであれば、粒子のサイズだけでなく形状によっても、マイクロボイド

Fig. 9 SEM image of fracture area.

の形成されやすさが変化すると考えられる。

Fig. 8にAl-Fe-Si系粒子のサイズとアスペクト比と粒径（円相当直径）の関係を示す。Fig. 4中X領域のAl-Fe-Si系粒子は曲げ加工度の増加に伴う割れがほとんど起こっていない。この部分では、円相当直径が $3\mu m$ 以下かつアスペクト比3以下の粒子が66%存在するが、円相当直径が $3\mu m$ 以上かつアスペクト比3以上の粒子も4%存在する。一方、外側表層部（Fig. 4中Y領域）では、円相当直径が $3\mu m$ 以上かつアスペクト比3以上の粒子の割合のみが大幅に減少している。このことから、曲げ加工に伴う粒子の割れは粒子サイズが大きだけでなく、アスペクト比が高いほど起こりやすいと考えられる。

3.2 曲げ割れ初期の亀裂発生およびその伝播

局所的なくびれ（Localized necking）、板厚内部まで伝播した割れ（Fracture）、微小な割れ（Crack）が発生した各部位におけるSEM観察結果を基に割れの発生および伝播におけるマイクロボイドの役割については以下のように考えられる。

Fig. 6に示した局所くびれ領域のSEM観察結果において、局所くびれ領域の最表層で微小なマイクロボイドが形成され開口しているが、割れは内部まで伝播しなかった。

Fig. 9に板厚内部まで割れが伝播した領域のSEM観察結果を示す。最表層において、局所くびれが発生した痕跡および粗大なマイクロボイドが形成されていた痕跡が観察された。Fig. 10に板厚内部まで割れが伝播した領域の破面観察結果を示す。マイクロボイドの痕跡と思われる粒子状の空洞部とその下にせん断破面が観察された。せん断帯上に形成されたマイクロボイドとせん断帯に沿って割れが伝播したと考えられる。Fig. 10の一部でディンプル状の破面（延性破面）が観察されるが、せん断帯の形成されていない結晶粒が周囲の亀裂伝播応力より引きちぎられて形成されたと考えられる。以上のことから、板厚内部まで割れが伝播した領域では、局所くびれが発生した箇所の最表層で粗大なマイクロボイドが形成され、これが開口することで割れの発生起点になり、さらにせん断帯上に形成されたマイクロボイドとせん断帯に沿って割れが伝播したと考えられる。

Fig. 11に微小割れ領域のSEM観察結果を示す。微小割れ領域では、最表層で粗大なマイクロボイドが開口し、微小割れが形成されていた。この部分では、局所くびれがほとんど発生しておらず、せん断帯の形成およびせん断帯上でのマイクロ

Fig. 10 Fracture surface morphology at fracture area.

Fig. 11 SEM image of crack area.

Fig. 12 Crystal orientation map at crack area. Black lines are large angle grain boundaries $>15^\circ$. Black area is the area of CI value <0.1 .

ボイドの形成も顕著ではなかった。そのため、マイクロボイドとせん断帯に沿った割れが伝播しにくく、板厚内部へ割れが伝播しなかったと考えられる。この領域において、せん断帯の形成が顕著でなかった理由については以下のように考えられる。

浅野⁵⁾らおよび竹田ら⁶⁾は曲げ加工性に及ぼす結晶方位の影響は大きく、特にCube方位は曲げ加工時にせん断帯が形成されにくく、曲げ割れが発生しにくい結晶方位であることを報告している。Fig. 11と同一視野にてEBSD解析を行った結果、Fig. 12に示すように、微小割れ領域の直下ではCube方位粒が存在していた。以上のことから、この領域では、せん断帯の形成が軽微であり、割れが伝播しにくかったと考えられる。

3.3 曲げ割れ発生メカニズム

メカニズムの模式図をFig. 13に示す。3.1, 3.2項で示した結果より、曲げ割れ発生メカニズムは以下のように考えられ

る。

曲げ加工度の増加に伴い、

- ① 変形量の大きい表層近傍でせん断帯が形成（最表面には局所的なくびれが生じる，Fig. 13(a)）。
 - ② 表層近傍で粗大な第2相粒子が割れ，マイクロボイドが形成（せん断帯上でより顕著に形成，Fig. 13(a)）。
- さらに曲げ加工度が増加すると、
- ③ 最表層のマイクロボイドが開口し，割れの起点（Crack）になる（Fig. 13(b)）。
 - ④ ミクロボイドの開口部に歪が局在化し，せん断帯上に形成されたマイクロボイドとせん断帯に沿って割れ（Crack）が伝播（Fig. 13(b)）。

ただし、割れの起点が形成された近傍にCube方位粒が存在した場合、せん断帯が形成されにくいため割れが伝播しにくい。

Fig. 13に示した模式図は平面図（2D）として簡略化した

Fig. 13 Schematic diagram for cause of the crack by bending process. (a) Before cracking. (b) After cracking.

ものであり、実際の現象（3D）とは厳密には異なると思われる。特に、割れの発生と伝播に対しては、断面図の奥行き方向の平均情報が重要である。例えば割れの起点と伝播について、最表層の開口したマイクロボイドの分布状態と各方位の結晶粒の分布状態により、歪の局在化の程度が変化し、どの位置から割れが伝播するかどうかが決まると考えられる。

本研究ではFig. 3に示したCT測定部全体の断層像を確認し、おおむね上記のメカニズムに沿うことを確認しているが、客観的にメカニズムの裏づけをとるためには、曲げ加工の前、中、後において、同一視野のCT測定を行い、マイクロボイドとAl-Fe-Si系粒子の分布状態の変化を観察する必要がある、今後の課題としたい。

4. 結 言

樹脂埋め・研磨された曲げ試験片断面の観察では正確に把

握できなかった曲げ割れに及ぼすマイクロボイドの影響について、SPRING-8を用いたX線CT観察と試料調整方法を改善したSEM観察により、以下のことが明らかになった。

(1) ミクロボイドの形成

表層近傍のAl-Fe-Si系粒子が割れた隙間および周りにおいて、マイクロボイドが顕著に形成された。せん断带上でより顕著にマイクロボイドが形成された。

(2) 曲げ割れ初期の亀裂発生およびその伝播

曲げ加工度の増加に伴って最表層のマイクロボイドが開口し、割れの起点になる。この開口部に歪が局在化し、マイクロボイドとせん断帯に沿って割れが伝播する。ただし、マイクロボイドの開口部（割れの起点）の近傍にCube方位粒が存在する場合、せん断帯が形成されにくいいため、割れが伝播しにくくなる。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人科学技術交流財団主催の研究会「X線トモグラフィーを利用した構造材料の信頼性向上」の調査・研究活動に関わるものであり、関係各位に御礼申し上げます。また、シンクロトン放射光実験を行ったSPRING-8（課題番号：2011B1111）に心より感謝します。

参 考 文 献

- 1) 浅野峰生, 箕田 正, 吉田英雄: 軽金属学会第106回春期大会講演概要, (2004), 5-6.
- 2) 浅野峰生, 内田秀俊, 吉田英雄: 軽金属, **52** (2002), 448-452.
- 3) 浅野峰生, 箕田 正, 小関好和, 吉田英雄: 軽金属, **56** (2006), 371-375.
- 4) 日比野旭, 村松俊樹, 佐賀 誠, 高田 健: 軽金属, **53** (2003), 534-541.
- 5) 浅野峰生, 伊川慎吾, 松田公一, 吉田英雄: 軽金属学会第111回秋期大会講演概要, (2006), 3-4.
- 6) 竹田博貴, 日比野旭, 高田 健: 軽金属, **60** (2010), 231-236.
- 7) 戸田裕之, 小林正和, 鈴木芳生, 竹内晃久, 上杉健太郎: 顕微鏡, **44** (2009), 199-205.
- 8) H. Toda, K. Minami, K. Koyama, K. Ichitani, M. Kobayashi, K. Uesugi and Y. Suzuki: Acta Mater., **57** (2009), 4391-4403.
- 9) L. Qian, H. Toda, K. Uesugi, M. Kobayashi and T. Kobayashi: Phys. Rev. Lett., **100** (2008), 115505.