

## 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ミクロボイドの影響\*

山本 裕介 \*\*, 浅野 峰生 \*\*, 吉田 英雄 \*\*\*, 小林 正和 \*\*\*\*, 戸田 裕之 \*\*\*\*\*

### Effect of Micro-Voids on Crack Initiation and Propagation in Bending Deformation of Al-Mg-Si Alloy Sheets\*

Yusuke 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 a 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 investigated. In this study, the effect of second phase particle distribution on the formation of micro-voids, and the effect of the micro-voids on crack initiation and the 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 the coarse particles nearby the outer surface. In particular, coarse micro-voids were formed around the coarse particles with high aspect ratio on the shear-bands. At a large cracking part, the coarse micro-void was observed at the outmost layer section as a crack initiation site, and coarse micro-voids and a sheared fracture surface were observed at a crack propagation site. At a 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 the shear-bands, therefore propagation of cracks did not occur at the small cracking area.

**Keywords:** Al-Mg-Si alloy, bending, micro-void, second phase particle, crack propagation, X-ray tomography

#### 1. 緒言

近年、CO<sub>2</sub>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ー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ターパネルは、縁でインナー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易くなる<sup>1)</sup>。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<sup>2)~6)</sup>。浅

\* 本稿の主要部分は、軽金属, 63 (2013), 452-457に掲載

The main part of this paper has been published in Journal of Japan Institute of Light Metals, 64 (2013), 452-457.

\*\* (株)UACJ 技術開発研究所 名古屋センター 第三部

No. 3 Development, Nagoya Center, Research & Development Division, UACJ Corporation

\*\*\* (株)UACJ 技術開発研究所

Research & Development Division, UACJ Corporation

\*\*\*\* 豊橋技術科学大学機械工学系

Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology

\*\*\*\*\* 九州大学工学研究院機械工学部門

Department of Mechanical Engineering, Kyushu University

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(2 μm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<sup>2)</sup>。

- 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

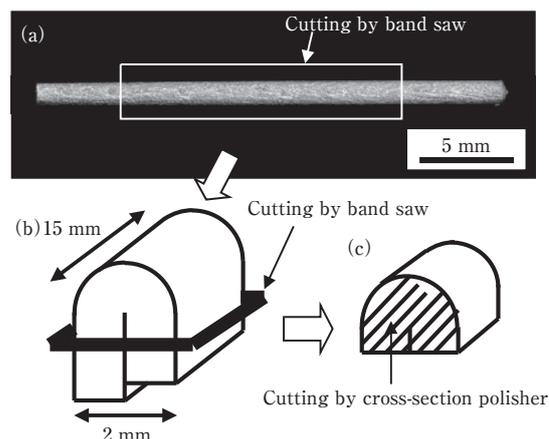
曲げ加工中に形成されたマイクロボイドの形成状態の観察は、一般的に樹脂埋め、研磨された試料を用いた光学顕微鏡観察もしくは走査型電子顕微鏡観察により行う。しかし、前述の方法では数μm以下のマイクロボイドの形成状態を正確に捉えることが非常に難しいため、マイクロボイドの形成状態に及ぼす第2相粒子分布の影響や曲げ割れ初期の亀裂発生に及ぼすマイクロボイドの影響は十分には明らかにされておらず、推測の域を脱していない。近年、大型放射光施設を利用した3D/4D観察技術の発展に伴い、1 μm程度のマイクロボイドの観察が実現可能となってきた<sup>7), 8)</sup>。そこで、本研究では、SPring-8を利用した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

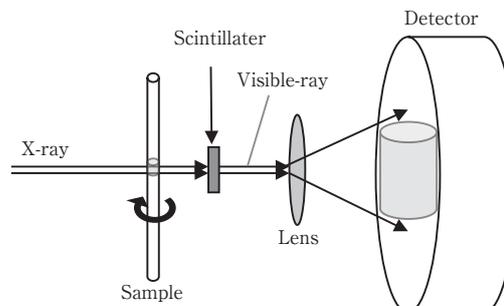
**Table 1**に示す化学成分を有するAl-Mg-Si系合金鋳塊を均質化处理、熱間圧延、冷間圧延、溶体化処理により0.9 mmのT4板材とした。曲げ試験は、圧延方向に対して0°方向の押曲げ法(JIS Z2248)により、内側曲げ半径0 mmの180°曲げ試験(密着曲げ試験)を行った。曲げ試験片の外観および模式図を**Fig. 1**に示す。**Fig. 1 (b)**に示すように曲げ試験片の先端から1辺約2 mmの棒状試料を切り出し、大型放射光施設SPring-8のBL20XUにおいて、マイクロボイドおよびAl-Fe-Si系粒子の観察を行った。**Fig. 2**に示すようにサンプルをセッティングし、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 μm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

**Table 1** Chemical compositions of specimens. (mass%)

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



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



**Fig. 2** Schematic diagram of a sample setting for the tomography measurement.

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ッシャー(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

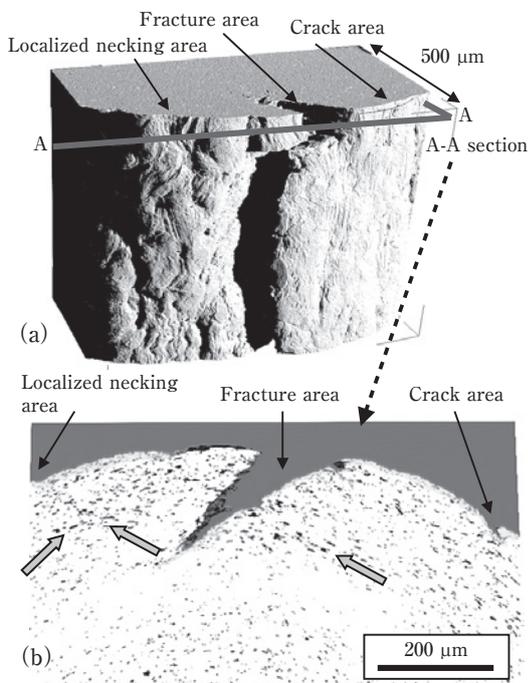
### 3.1 ミクロボイドの形成

**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 μmを重ね合わせた像であり、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

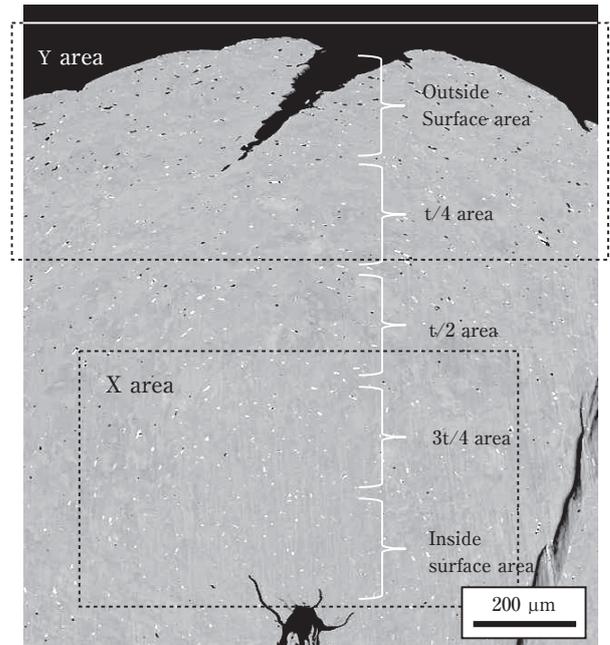
が形成されており、せん断帯上でマイクロボイドの形成が顕著であった。

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。

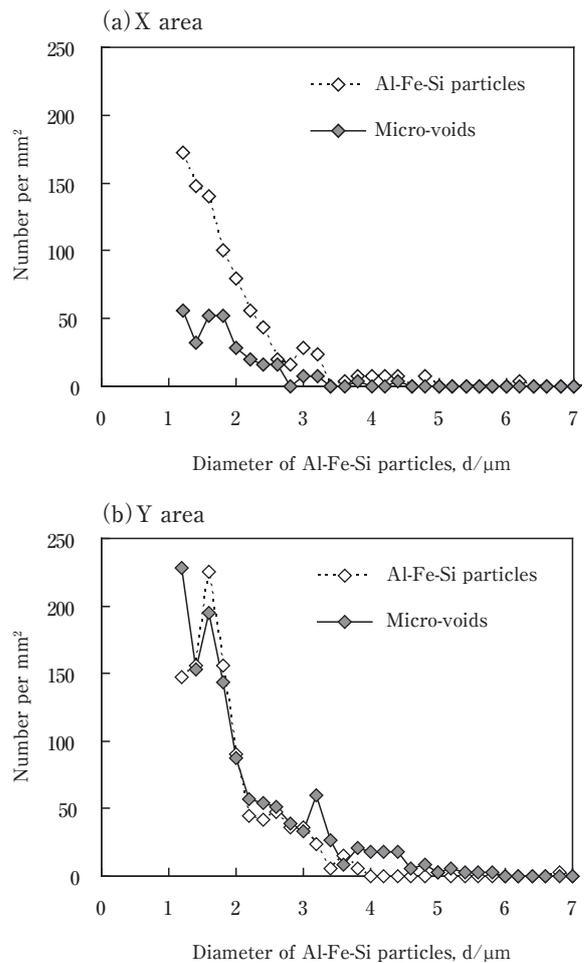
Fig. 4中のX領域、Y領域においてAl-Fe-Si系粒子とマイクロボイドの粒度分布を画像解析により計測した。その結果をFig. 5に示す。Al-Fe-Si系粒子について、X領域よりもY領域の方が2  $\mu\text{m}$ 以下の粒子数が多かった。一方、マイクロボイドについて、X領域よりもY領



**Fig. 3** 3D perspective views and 3D rendered tomographic volumes of the bending test sample.  
(a) Perspective views.  
(b) Rendered tomographic volumes.  
Black points are micro-voids.



**Fig. 4** SEM image of the bending test sample through the gauge.

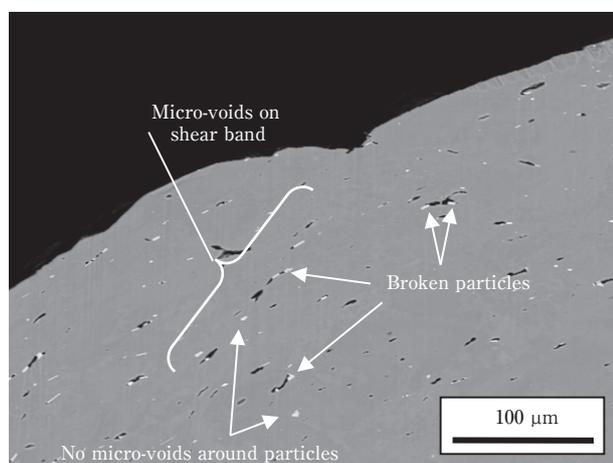


**Fig. 5** Relation with histogram of Al-Fe-Si particles and histogram of micro-voids.  
(a) X area in Fig. 4. (b) Y area in Fig. 4.

域の方が3  $\mu\text{m}$ 以下のポイド数が多く、Al-Fe-Si系粒子とマイクロポ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)におけるマイクロポイドの形成は、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。

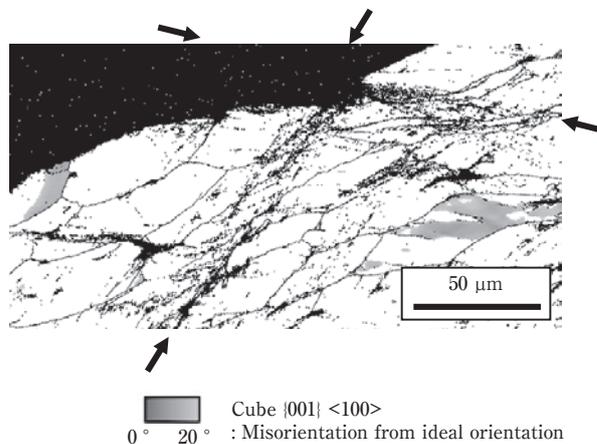
**Fig. 6**にFig. 3中の局所くびれ領域の反射電子像を示す。マイクロポイドの両端もしくは片側の端部にAl-Fe-Si系粒子が存在している様子が多く観察された。以上のことから、曲げ加工度の増加に伴い、①Al-Fe-Si系粒子が割れ、その隙間にマイクロポイドが形成された、もしくは②Al-Fe-Si系粒子と母相の界面が剥離し、剥離面でマイクロポイドが形成されたと考えられる。ここで、複数のCT断層像を用いてAl-Fe-Si系粒子とマイクロポイドの形成状態を確認したが、両端にAl-Fe-Si系粒子が存在するマイクロポイドが多く見られたこと、マイクロポイドの形成を伴わない粗大なAl-Fe-Si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ポイドが曲げ加工度の増加に伴って大きくなる、④Mg<sub>2</sub>Siまたはシリコン粒子に関連してマイクロポ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<sub>2</sub>Siおよびシリコンに関して回折を利用したトモグラフィ<sup>9)</sup>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、矢印部のように带状かつ断

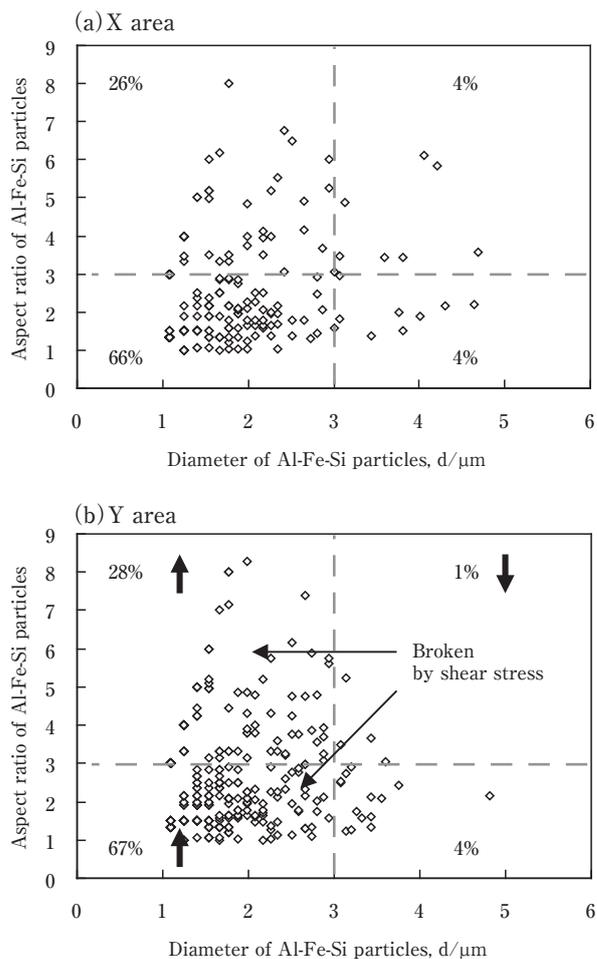


**Fig. 6** SEM image of the localized necking area.

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およびFig. 6に見られるようにせん断帯上でマイクロポ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ポイドの形成が顕著であった



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



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

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、マイクロボイドの形成され易さに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  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ 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いだけでなく、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様に考えられる。

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近くで微小なマイクロボイドが形成され、外表面に露出しているが、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近くで粗大なマイクロボイドが形成され、これが外表面に露出することで割れの発生起点になった。さらに、この起点から割れがせん断帯上に形成されたマイクロボイドに沿って板厚

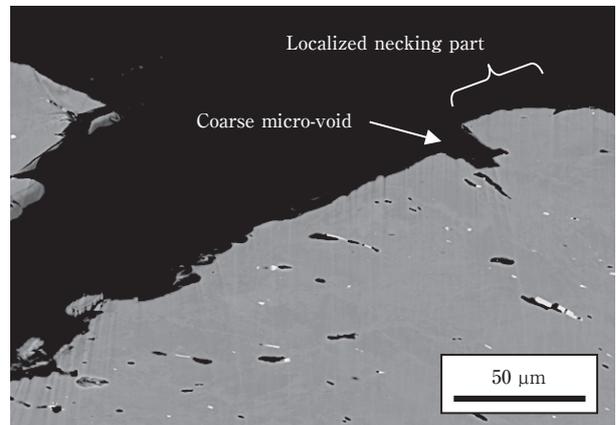


Fig. 9 SEM image of the fracture area.

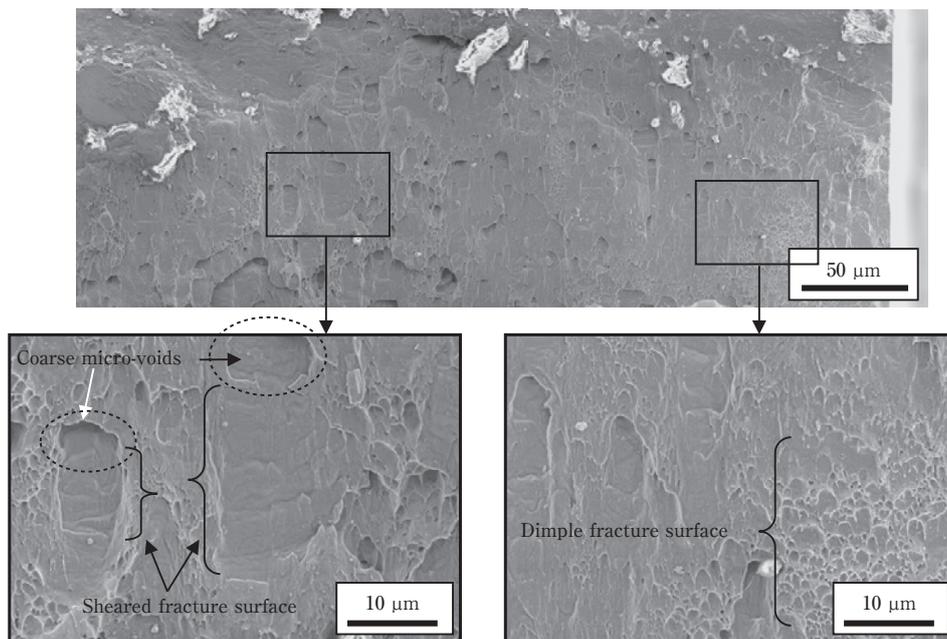


Fig. 10 Fracture surface morphology at the fracture area.

内部に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、最表層近くの粗大なマイクロボイドが外表面に露出し、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

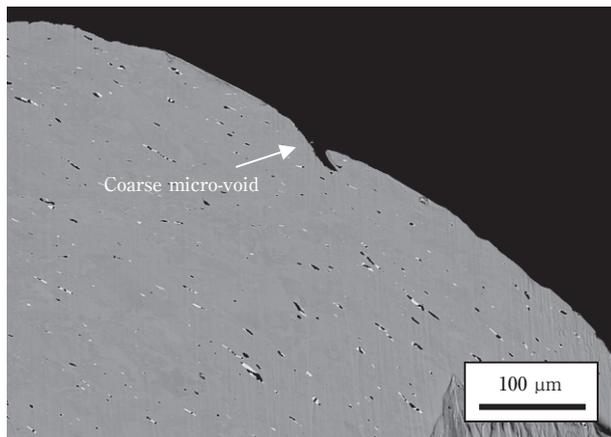


Fig. 11 SEM image of the crack area.

断帯に沿った割れが伝播し難く、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<sup>5)</sup>らおよび竹田ら<sup>6)</sup>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難く、曲げ割れが発生し難い結晶方位

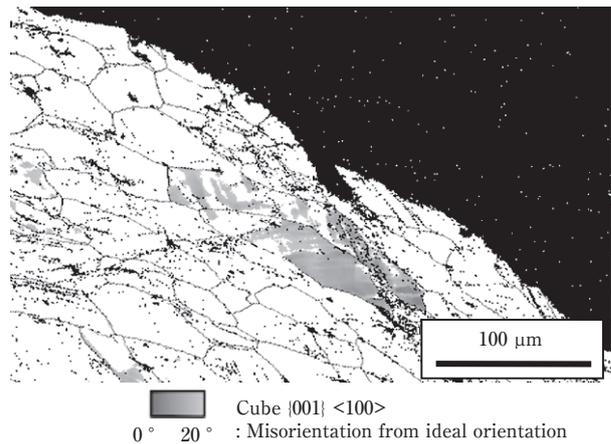


Fig. 12 Crystal orientation map at the crack area. Black lines are large angle grain boundaries  $>15^\circ$ . Black area is the area of CI value  $<0.1$ .

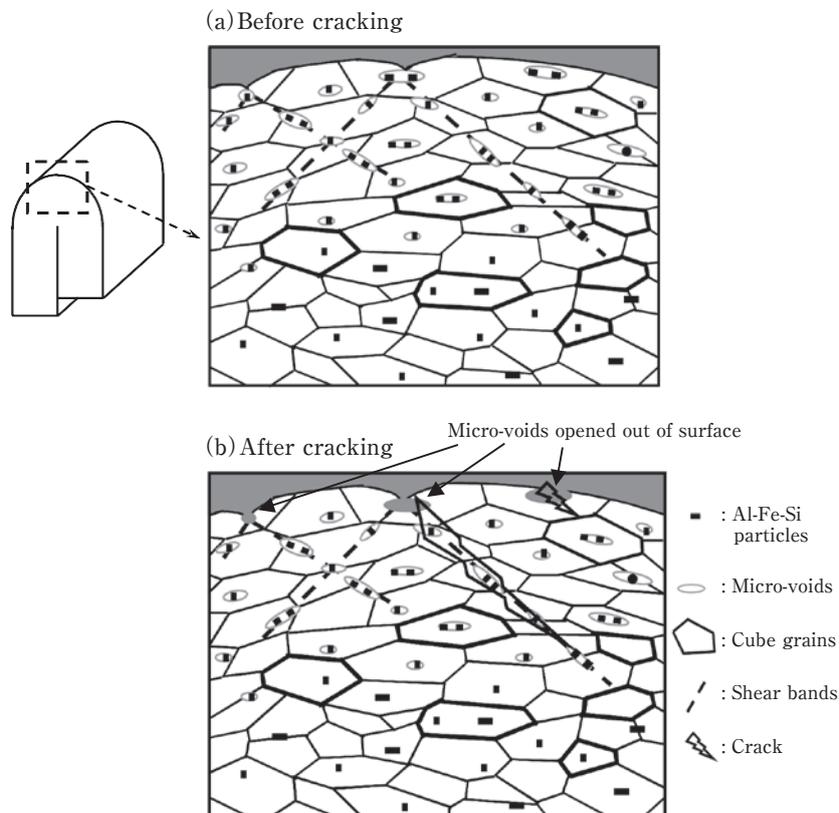


Fig. 13 Schematic diagrams showing cause of the crack by the bending process.  
 (a) Before cracking.  
 (b) After cracking.

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、割れが伝播し難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最表層近くのマイクロボイドが外表面に露出し、割れの起点(crack)になる(Fig. 13(b))
- ④マイクロボイドの露出部に歪が局在化し、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難いため割れが伝播し難い

Fig. 13に示した模式図は平面図(2D)として簡略化したものであり、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、最表層近くの外表面に露出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、概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) マイクロボイドの形成

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。せん断帯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近くに存在するマイクロボイドが外表面に露出し、割れの起点になる。この部分に歪が局在化し、せん断帯上のマイクロボイドに沿って割れが伝播する。ただし、マイクロボイドの露出部(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難いため、割れが伝播し難くなる。

## 謝 辞

本研究の一部は、(財)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、SPring-8を用いたシンクロトロン放射光実験(研究成果番号:2011B1111)を行った公益財団法人高輝度光科学研究センター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回春期大会概要集, (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, 他2名: 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, 他2名: 軽金属学会第111回秋期大会概要集, (2006), 243-244.
- 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: Physical Review Letters, **100**, No.11 (2008), 115505.



山本 裕介 (Yusuke Yamamoto)  
(株)UACJ 技術開発研究所 名古屋センター  
第三部



浅野 峰生 (Mineo Asano)  
(株)UACJ 技術開発研究所 名古屋センター  
第三部



吉田 英雄 (Hideo Yoshida)  
(株)UACJ 技術開発研究所



小林 正和 (Masakazu Kobayashi)  
豊橋技術科学大学機械工学系



戸田 裕之 (Hiroyuki Toda)  
九州大学工学研究院機械工学部門