

銅合金板材の端子成形における 曲げ割れ予測技術

Prediction Technique for Bending Cracks in Terminal Forming of
Copper Alloy Sheets

境 利郎*
Toshiro Sakai

高木 涼真
Ryoma Takagi

古川 欣吾
Kingo Furukawa

藤本 誠
Makoto Fujimoto

丹治 亮
Toru Tanji

奥村 宗一郎
Soichiro Okumura

車載コネクタ用端子は小型化が進み、端子用銅合金は薄肉、高強度化している。端子は主に曲げ加工によって成形され、銅合金の高強度化によって曲げ割れが起きやすくなっている。従来は経験に基づいたトライアンドエラーにより対策されていたが、近年の短い開発期間に対応するためCAEによる曲げ割れの予測技術が求められている。過去に曲げ割れの予測技術としては金属の結晶性を反映した特殊な弾塑性解析が報告されているが、実際の端子用銅合金への適用は困難であった。そこで、我々は曲げ割れの発生メカニズムから板厚方向のせん断に対する変形抵抗が曲げ割れ発生に大きく影響すると考え、薄板材の板厚方向のせん断試験方法を開発した。その測定結果を用いることで一般的な弾塑性解析で曲げ割れをシミュレーションで予測することが可能となったので紹介する。

As terminals for automotive connectors become smaller, the copper alloys used for the terminals are becoming thinner and stronger. Terminals are formed mainly by bending, but the higher strength of copper alloys makes bending cracks more likely to occur. In the past, this problem was handled by trial and error based on experience, but in order to cope with the recent short development period, a technique for predicting bending cracks using CAE is required. Although special elasto-plastic analysis reflecting the crystallinity of metals has been reported as a conventional prediction technique for bending cracks, it has been difficult to apply this technique to actual copper alloys for terminals. Therefore, based on the occurrence mechanism of bending cracks, we considered that shear deformation resistance in the thickness direction has a significant influence on the occurrence of bending cracks, and developed a shear test method for thin sheets in the thickness direction. Based on the measurement results, it becomes possible to predict the occurrence of bending cracks by simulating bending cracks using the general elasto-plastic analysis.

キーワード：車載コネクタ用端子、銅合金板、曲げ加工、曲げ割れ、シミュレーション

1. 緒 言

近年、自動車の高機能化、自動化が進み、自動車に搭載されるセンサー等の電子部品の数が増大している。これら電子部品の小型化も進んでおり、電子部品同士を接続する自動車用ワイヤーハーネスのコネクタは小型、多極化している。その結果、車載端子も小型化し、適用される銅合金は薄肉、高強度化している⁽¹⁾。一般に、強度と加工性はトレードオフの関係にあるため、高強度化により曲げ加工時に曲げ部に亀裂が生じる曲げ割れが起きやすくなっている。車載端子の多くは箱型で、主に曲げ加工により成形されるため、曲げ割れは端子の寸法不良や性能低下につながる。そのため、組織制御等により曲げ加工性を改善した高強度銅合金の適用や^{(2)、(3)}、金型や工程の変更、製品形状の変更等の対策を担当者の経験に基づいたトライアンドエラーで行っており、対策に多くの時間と費用を要していた。一方、近年は製品のライフサイクルが短くなってきており、開発期間の短縮が求められている。シミュレーションによって曲げ割れを予測できれば、曲げ割れの起点や工程等を可視化でき、原因の特定と対策の検討が容易になる。さらに、シミュレーションで対策を検証すれば試作回数を減らすことができ、製品開発の期間短縮とコストダウンが期待できる。

そこで、我々はシミュレーションによる曲げ割れ予測技術を確立するため、その発生メカニズムを考察し、板厚方向のせん断変形に着目した。そして、端子用銅合金の薄板での板厚方向の単純せん断試験方法を新たに開発し、その試験結果を材料モデルに適用することで、有限要素法^{*1}による弾塑性解析^{*2}（以下、CAE）で曲げ割れの予測が可能となった。本論文ではその技術について簡単に紹介する。

2. CAEによる曲げ加工予測の課題

多くの車載端子に適用されている7-3黄銅（以下、黄銅）と車載用小型端子に広く採用されている高強度銅合金のCu-Ni-Sn-P系合金（以下、合金A）を180°に曲げた後の曲げ部の外観と断面を図1に示す。比較に純銅材の180°曲げ部も同様に合わせて示す。以下では圧延方向をRD (Rolling Direction)、圧延方向と直交する方向をTD (Transverse Direction)、板厚方向をND (Normal Direction) とする。図1中のRDまたはTDは曲げた方向を意味する。黄銅と合金Aのどちらも純銅に比べて曲げ部の表面に大きな筋状の模様が見られる。これを「しわ」と呼ぶ。断面から分かるように、しわは表面が局部的に窪むことで発生してい

る。さらに、合金AのTD曲げの断面を見るとしわの底から亀裂が発生し、割れている事が分かる。これを「割れ」と呼ぶ。このように、しわが大きくなると割れが生じる。

次に合金Aの180°曲げをCAEで解析した結果を図2に示す。曲げ部の幅中央断面を想定した2次元解析であり、材料モデルは合金AのRDの引張試験で得た応力-ひずみ曲線を反映した等方性材料^{※3}としている。主ひずみ^{※4}分布を示しており、曲げ頂点の近傍でひずみが大きくなっていることが分かる。しかし、実際の曲げで見られたしわのような局所的な窪みは再現できていない。このように、従来CAEでは割れの前段階であるしわを再現できず、曲げ割れの予測は困難であった。そのため、過去には結晶塑性解析と呼ばれる金属の結晶性を反映した特殊な解析方法による曲げしわ、割れの予測技術が報告されている^{(4),(5)}。しかし、これは特殊な解析方法であり、実際の端子用銅合金材への適用には課題があるため、従来のCAEによる曲げしわ、割れの予測技術の確立が求められていた。

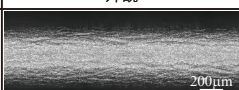
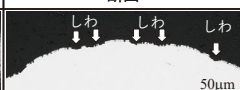
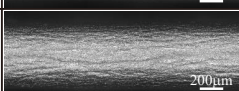

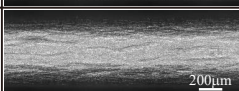
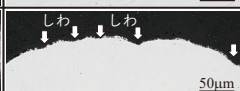
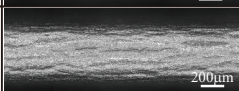

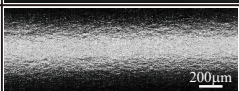

材料	方向	外観	断面
黄銅	RD		
	TD		
合金A	RD		
	TD		
純銅	RD		

図1 黄銅及び合金Aと純銅の180°曲げ部外観と断面

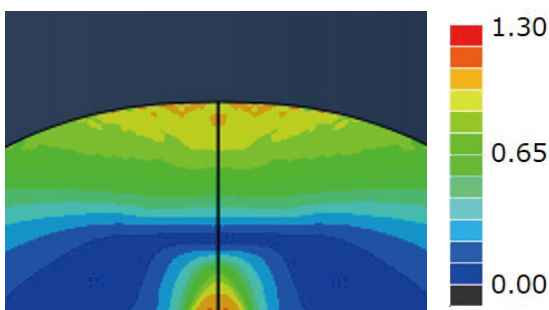


図2 従来CAEによる曲げの解析結果 (主ひずみ分布)

3. 曲げしわ、割れの発生メカニズム

従来のCAEで曲げしわを再現できない原因として、しわの発生に関与している物性値を材料モデルに反映できていないことが考えられる。そこで、まず曲げしわの発生メカニズムについて考察した。図3に合金Aの180°曲げ (TD) で発生した曲げしわ近傍をEBSD^{※5}によりTD方向の結晶方位分布を解析した結果を示す。図中の白点線によって区切った領域は周囲に比べて結晶粒が微細になっており、結晶粒が特定の方向に伸長していることが分かる。これは局所的に変形が集中した箇所、せん断帯と呼ばれている。曲げしわはせん断帯により形成され、曲げ割れはせん断帯に沿って生じることが分かっている^{(6),(7)}。せん断帯は特定の方向に伸長した結晶粒群からなることから、次のような発生メカニズムによってせん断帯が発生していると考えた。

通常、曲げは図4(a)に示す変形が起きており、中立面の外側では曲げ方向の引張、内側では圧縮の塑性変形が主である。板厚方向のせん断等の塑性変形は微小なため、板表面に大きな凹凸は生じない。しかし、せん断に対する変形抵抗が小さい材料も存在し、板厚方向のせん断に対する変形抵抗が小さい材料では、板厚方向のせん断応力による局所的な塑性変形が起きやすくなる。この時、図4(b)に示すように中立面より外側では板厚方向のせん断応力と曲げ方向の引張応力が負荷され、内側は板厚方向のせん断応力と曲げ方向の圧縮応力が負荷されているため、変形方向は板厚方向から傾斜する。この局部変形によってせん断帯が生じていると考えられる。さらに、同様のメカニズムによってせん断帯が複数発生すると、図4(c)に示すような局所的な窪み、しわが形成されると考えた。

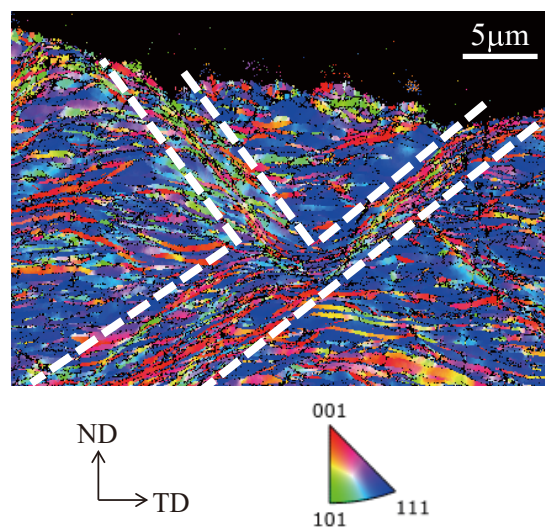


図3 合金AのTD180°曲げのしわ部の結晶方位分

以上のように、曲げしわ、割れの原因であるせん断帯は板厚方向のせん断変形によって発生すると考えられることから、板厚方向のせん断に対する変形抵抗を測定し、CAE の材料モデルに反映することが曲げしわ、割れの予測に必要であると考えた。

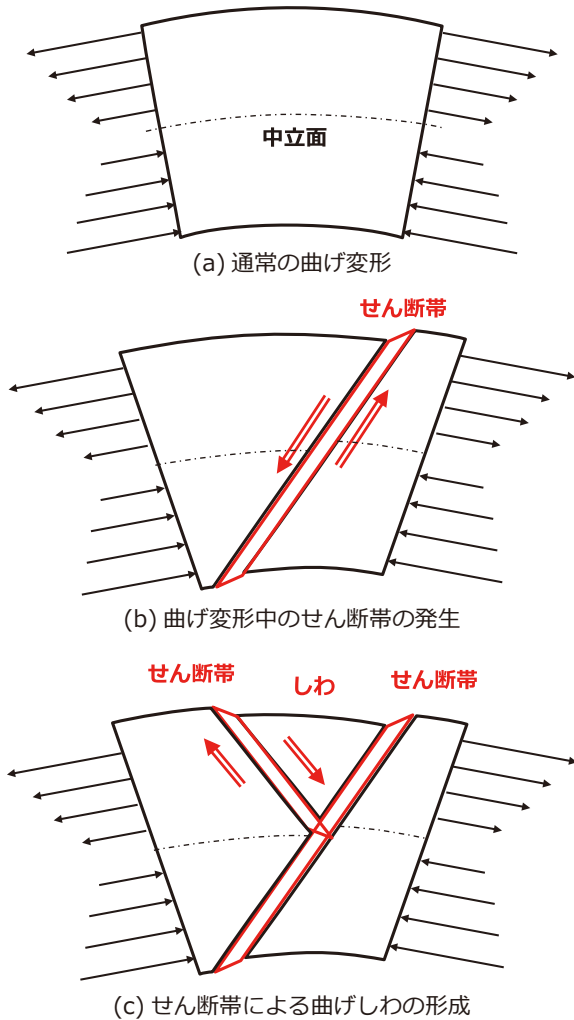


図4 曲げ変形中の板厚方向のせん断応力によるせん断帯の発生とせん断帯によるしわの形成メカニズム

4. 変形抵抗の測定方法

板厚方向のせん断に対する変形抵抗を測定するには板厚方向のせん断試験が必要である。しかし、金属材料向けの面内方向のせん断試験は ASTM B831 等で規定されているが、金属材料向けの板厚方向のせん断試験に関する規定は無い。さらに、端子用銅合金の板厚は 0.25mm 程と非常に薄いため、複合材や樹脂向けのせん断試験は適用が困難であった。そこで、我々は端子用銅合金向け板厚方向の単純せん断試験方法を新たに構築した。以下にその概要を紹介する。

4-1 単純せん断試験方法

図5に我々が設計した試験治具外観とその概要図を示す。試験片は幅5mm、長さ10mmの矩形とした。この試験治具を引張試験機に取り付け、試験中の荷重をロードセルで計測することでせん断応力を算出した。一方、ひずみを試験機のストローク変化から算出する方法は試験機や治具の弾性変形の影響が大きく、正確なひずみの測定が困難であった。そのため、試験中に試験部端面をデジタルマイクロスコープで撮影、録画し、デジタル画像相関法^{*6}で解析することでひずみを計測した。図6に黄銅のND-TD断面にて本試験方法で得たひずみの例を示す。図中のShearはせん断ひずみ、ND及びTDは各方向の引張または圧縮ひずみを示している。試験の進行とともにせん断ひずみのみ増加しており、狙い通りの単純せん断試験が出来ていると考えられる。

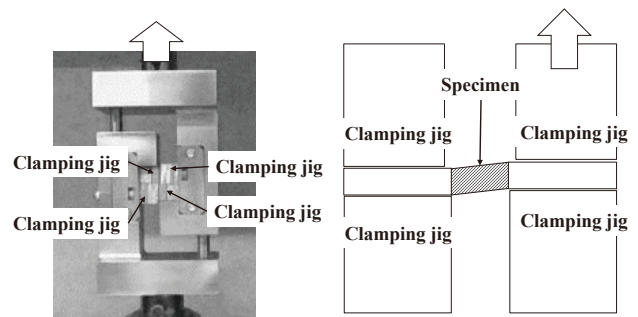


図5 単純せん断試験の治具外観とその概要

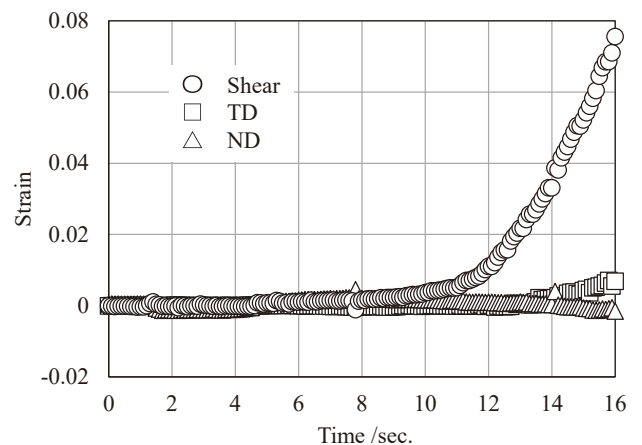


図6 デジタル画像相関法で得られた単純せん断試験のひずみ (黄銅、ND-TD断面)

4-2 せん断試験結果

これまで述べてきたように、曲げ割れの原因であるせん断帯の発生に板厚方向のせん断変形が関与しており、曲げ変形中の材料は曲げ方向の引張及び圧縮応力とともに板厚

方向のせん断応力が負荷されている。つまり、RD 曲げでは RD の引張及び圧縮の変形と RD-ND 断面でのせん断変形が起きている。このことから、曲げしわ、割れの予測には板厚方向の単純せん断試験と面内方向の引張試験が必要である。図7に黄銅と合金AのRDの引張試験とRD-ND断面の単純せん断試験から得た応力-ひずみ曲線を示す。

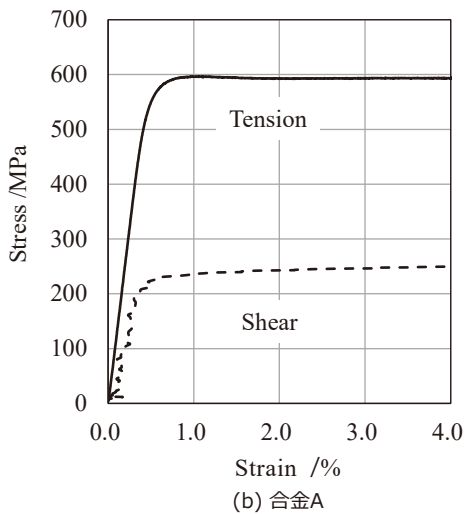
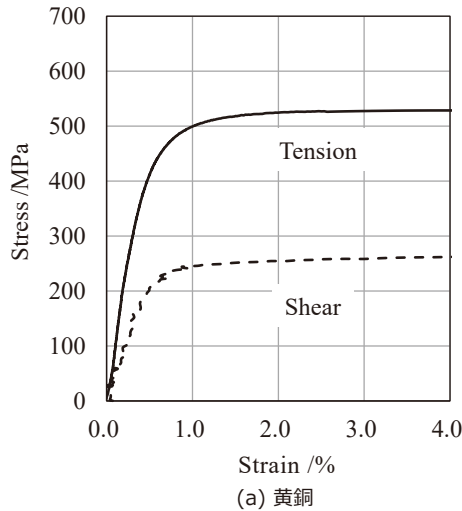


図7 単軸引張と単純せん断の応力-ひずみ曲線

どちらもひずみの小さい弾性域では応力とひずみは直線関係となった。この時の傾きを引張試験ではヤング率（縦弾性係数）と言い、単純せん断試験では剛性率（横弾性係数）と言う。黄銅で測定されたヤング率は102GPa、剛性率は43GPa、合金Aのヤング率は120GPa、剛性率は40GPaと、両材料とも銅合金として妥当な値が得られた。これら応力-ひずみ曲線から変形抵抗の指標として0.2%耐力を得た。表1に引張試験と単純せん断試験から得た0.2%耐力を示す。表中の試験方向のRDはRD曲げに關するRDの引張とRD-ND断面の単純せん断の試験結果であり、TDも

同様である。ここで、引張及び圧縮の変形抵抗に対するせん断の変形抵抗の大きさが、せん断帯発生の指標になると考え、耐力比（せん断/引張）と曲げ加工性を合わせて示す。なお、等方性材料ではこの耐力比は0.57 ($1/\sqrt{3}$) となる。今回測定した端子用銅合金板は全て0.50を下回っており、等方性材料に比べて板厚方向のせん断変形が起きやすいことが分かる。特に曲げ割れが発生した合金AのTD曲げでは、耐力比が0.40と等方性材料に比べて30%減と小さかった。このことから、合金AのTD曲げは板厚方向のせん断変形が起きやすく、曲げの早い段階でせん断帯が発生し、せん断帯が発達した結果、曲げ割れに至ったと考えられる。以上の結果は、板厚方向のせん断変形が曲げしわ、割れの原因となるせん断帯の発生に關与していることを支持する結果であり、板厚方向の単純せん断試験は曲げしわ、割れ発生を予測する上で重要であると言える。

表1 黄銅と合金Aのせん断と引張の0.2%耐力と耐力比（せん断/引張）と曲げ加工性

材料	方向	0.2%耐力 MPa		耐力比	曲げ加工性
		せん断	引張		
黄銅	RD	233	473	0.49	しわ
	TD	217	457	0.48	しわ
合金A	RD	251	560	0.45	しわ
	TD	230	583	0.40	割れ

5. CAEによる曲げしわ、割れの予測

以上の結果から、従来CAEの材料モデルは等方性を前提としているため、曲げしわ、割れの発生を予測できなかったと考えられる。そこで、実際に端子用銅合金で測定した引張試験とせん断試験の結果をCAEの材料モデルに反映することで曲げしわ、割れを予測できるか検討した。

端子用銅合金で見られたような引張及び圧縮の変形抵抗に比べてせん断の変形抵抗が小さくなる挙動を反映するため、本検討ではHillの二次降伏関数を材料モデルに適用した。この異方性降伏関数は多くのソルバーで使用でき、比較的簡便に扱うことができる。図8に合金Aの引張試験とせん断試験から得た0.2%耐力を材料モデルに反映して解析した結果を示す。図8(a)がRD曲げ、(b)がTD曲げで、主ひずみ分布を示している。実際の合金Aの曲げ同様に、ひずみが直線上に局在化したせん断帯の発生を再現できている。さらに、複数のせん断帯によって表面に窪みみが形成されており、曲げしわを再現することができた。また、RD曲げとTD曲げの差も表現できており、実際に曲げ割れが発生したTD曲げではせん断帯がRDに比べて発達していることが分かる。

以上のように、板厚方向の単純せん断試験の結果と異方性降伏関数を用いることで、一般的なCAEで曲げしわ、割れが予測できるようになった。

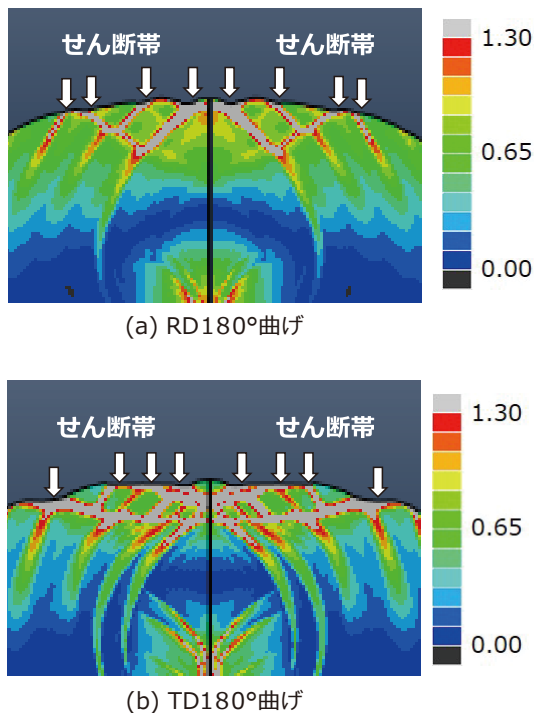


図8 せん断試験結果を反映した材料モデルを用いたCAEによる180°曲げの解析結果（主ひずみ分布）

6. 結 言

車載コネクタ用端子に用いられる銅合金の曲げ加工によるしわ、割れの発生についてCAEによる予測を可能とするため、板厚方向の単純せん断試験方法を新たに構築した。そして、せん断試験で得られた結果を材料モデルに適用することでCAEによる曲げしわ、割れの予測が可能となった。

現在、開発中の端子へ本技術を展開しており、開発期間の短縮、端子の信頼性向上、不良低減による生産性の向上に繋げている。

今後は本技術を他の金属材料、他製品への展開や、新規の加工方法、材料の開発に繋げていく。

7. 謝 辞

本研究を進めるにあたりサンプルの提供、調査にご協力いただきました(株)神戸製鋼所に感謝の意を表します。

用語集

※1 有限要素法

構造物を複数の有限個の要素（メッシュ）に分割して数値解析を行う解析手法。

※2 弾塑性解析

弾性と塑性の性質を合わせもつ弾塑性体の応力、ひずみ状態を非線形性の数値モデルを使い解析する手法。

※3 等方性材料

方向によって機械的性質が変わらない材料。

※4 主ひずみ

物体内の任意点における引張または圧縮ひずみ（垂直ひずみ）は方向によってその大きさが変化するが、垂直ひずみが極値となるような互いに直交する方向が必ず存在し、そのような方向の垂直ひずみを主ひずみという。

※5 EBSD

電子線後方散乱回折（Electron Back Scattered Diffraction pattern）。電子線を照射して試料表面の回折電子から生じた後方散乱回折を解析して、試料の結晶粒の方位を解析する分析方法。

※6 デジタル画像相関法

CCDカメラ等で撮影された画像から測定対象の変位を求め、ひずみを計測する手法。

参 考 文 献

- (1) 野村幸矢、「コネクタ用高性能銅合金板条の技術動向と当社の開発戦略」、神戸製鋼技報、vol.54、No.1、pp.2-8 (April, 2004)
- (2) 高維林、菅原章、木村崇、「析出強化型銅合金の集合組織制御の開発」、まてりあ、vol.52、No.1、pp.26-28 (2016)
- (3) 伊藤優樹、牧一誠、小林敬成、小林慎也、「強度と導電性に優れた車載端子用固溶型銅合金「MSP5」の開発」、まてりあ、vol.55、No.2、pp.67-69 (2016)
- (4) Ming Dao, Ming Li, "A micromechanics study on strain-localization-induced fracture initiation in bending using crystal plasticity models," Philosophical magazine A, vol.81, No.8, pp.1997-2020 (2001)
- (5) Mitsutoshi Kuroda, Viggo Tvergaard, "Effects of texture on shear band formation in plane strain tension-compression and bending," International journal of plasticity, vol.23, No.2, pp.244-272 (2007)
- (6) Hiroshi Kaneko, Tatsuya Morikawa, Masaki Tanaka, Hirofumi Inoue, Kenji Higashida, "Recrystallization texture and shear band formation in bending," Materials transactions, vol.58, No.2, pp.218-224 (2017)
- (7) Hiroki Takeda, Akira Hibino, Ken Takata, "Crystal orientations on the bendability of an Al-Mg-Si alloy," Materials transactions, vol.51, No.4, pp.614-619 (2010)

執 筆 者

境 利郎* : (株)オートネットワーク技術研究所
グループ長



高木 涼真 : (株)オートネットワーク技術研究所



古川 欣吾 : (株)オートネットワーク技術研究所
室長



藤本 誠 : エネルギー・電子材料研究所



丹治 亮 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長
博士 (科学)



奥村宗一郎 : 解析技術研究センター 主査



* 主執筆者