

アルミニウム DI 缶壁の変形集合組織の研究と後加工への応用*

工藤 智行**, 田中 宏樹***

Research on Deformation Texture in Aluminum DI Can Wall and Its Application to Post-Processing*

Tomoyuki Kudo** and Hiroki Tanaka***

1. はじめに

現在広く普及している飲料缶の多くは、3104アルミニウム合金冷間圧延板を絞り成形 (Drawing) してカップを成形した後、カップ壁部をしごき成形 (Ironing) することにより成形されている (まとめてDI成形と呼ばれる)。冷間圧延板が持つ材料の異方性は成形後の缶開口部に耳 (開口部高さのばらつき, Fig. 1) として現れ、これが大きいと様々な不良を引き起こすことがあるため、材料組織を適切に制御している。冷間圧延板の集合組織と形成される耳形状の関係については、これまで多くの研究がなされている。例えば冷間圧延板の cube 方位や, cube 方位がRD (圧延方向) 軸回転した RD rotated cube, Goss 方位, およびGoss 方位がND (圧延面法線方向) 軸に 0° - 15° 回転したND rotated Goss が $0^\circ/180^\circ$ 耳の形成に寄与し^{1)~3)}, 圧延集合組織 (β -fiber, Cu~S~Brass 方位) は 45° 耳を形成することが確認されている¹⁾。そのため材料メーカーは合金成分, 熱間圧延の条件および冷間圧延の加工度をコントロールし, 冷間圧延板の cube~Goss 方位や β -fiber のバランスを制御することで耳形状を調整している^{4)~5)}。一方, これまでDI成形後における缶壁の変形集合組織に着目した研究例は多くない。これは複雑な成形を経るため, 解析の煩雑さが予測されることや, 缶壁の高密度の加工組織を観察することが難しいことが理由として考えられる。

しかし, 著者らは, ネック成形に代表されるDI成形の後工程で発生する不良のメカニズム解明や, 材料の成形性を把握するためには, 缶壁の変形集合組織を把

握することが必要になると考えている。特にボトル缶など縮径率の高い成形では, ネック成形による異方性が生じ, 缶品質に大きく影響する⁶⁾。実際, ボトル缶の不良の多くはネック成形以降で発生する。このような後工程の成形性の考察には, 本質的に缶壁の変形集合組織を開始点として解析するべきと考える。

本報では, 3104アルミニウム合金冷間圧延板を絞り成形, しごき成形した後の変形集合組織と, その発達メカニズムに関する著者らの研究^{7)~8)}を紹介する。また, ボトルネッカーを使った後加工で発生する不良の例や, 缶壁の集合組織の考え方を応用して材料の集合組織を制御することで, それらの不良を改善した例も紹介する。

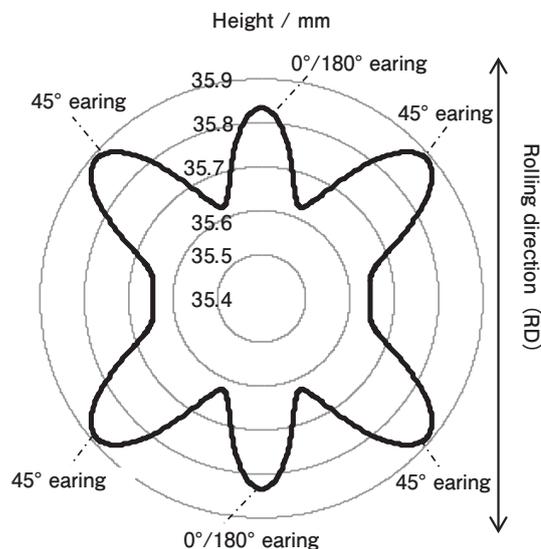


Fig. 1 Earing profile of drawn cup.

* 本稿の主要部分は, ぶらすとす, 4-40(2021), 222-226 に掲載。

The main part of this paper has been published in Bulletin of the Japan Society for Technology of Plasticity, 4-40 (2021), 222-226.

** 株式会社 UACJ R&D センター 第一開発部

Development Department I, Research & Development Division, UACJ Corporation

*** 株式会社 UACJ R&D センター 第一研究部, 博士 (工学)

Research Department I, Research & Development Division, UACJ Corporation, Dr. Eng.

2. 絞り成形，しごき成形後の変形集合組織

著者らは絞り成形による変形集合組織の発達挙動を把握するために、Fig. 2のように冷間圧延板，絞りカップ缶壁，再絞りカップ缶壁からサンプルを切り出し，XRD (X線回折法) で $\{100\}$ ， $\{110\}$ ， $\{111\}$ 不完全極点図を測定し，反復級数展開法⁹⁾を用いてODF (結晶方位分布関数) を求めた。なお，サンプルを採取した缶壁の角度は，解析や考察が比較的容易だと考えられる冷間圧延板の圧延方向と一致させた。また，缶壁の集合組織を議論するためには，独自にオイラー空間の回転軸の取り方を定義する必要がある。本研究ではDI方向 (缶高さ方向) を圧延方向，缶壁表面を圧延面と仮定して冷間圧延板と同様に集合組織を定義している。Fig. 3は測定位置に対応する絞り比を横軸にし，集合組織の主要方位の方位密度を縦軸にプロットしたものである。絞り比に応じてGoss方位およびCu方位の方位密度が著しく増加することが分かる。一方，cube方位密度は減少傾向にある。缶壁のGoss方位およびCu方位の方位密度は他に比べて非常に大きいことから，絞り成形後はこの2つの結晶方位に安定すると考えられる。

次に，絞り成形によって生じた格子回転を視覚化する

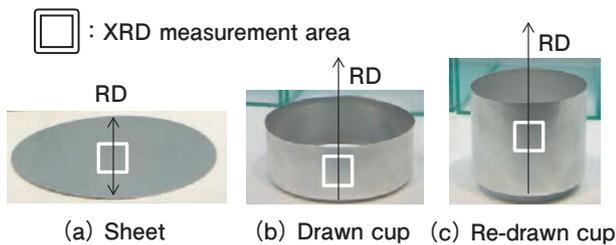


Fig. 2 XRD measurement area of cold rolled sheet and cup wall.

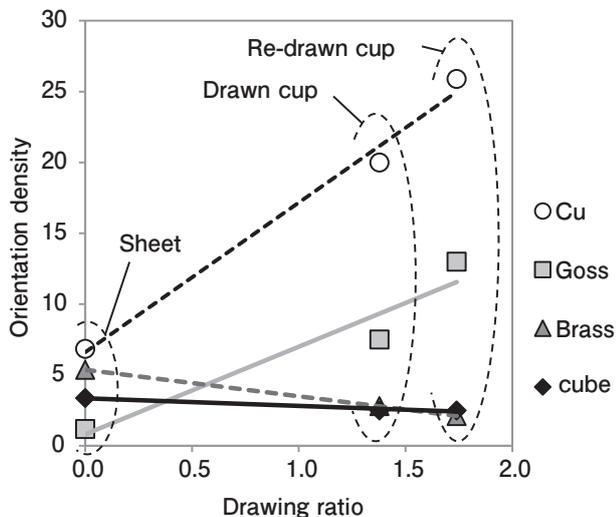


Fig. 3 Relationship between drawing ratio and orientation density of measure orientations of cold rolled sheet and cup wall.

ることを試みた。すなわち単位絞り比あたりのODFの変化率をオイラー空間上にコンター図で示し，方位密度が最も減少している方位から，最も増加している方位を結ぶ最短経路が絞り成形による格子回転であると考えた。Fig. 4にその結果を示す。暗色は絞り成形によって方位密度が減少した結晶方位，逆に，明色は方位密度が増加した方位である。すなわち暗色から明色への格子回転が生じたと考える。 $\varphi_2=0^\circ$ 断面ではBrass方位からGoss方位に向かう格子回転が見られた。一方， $\varphi_2=45^\circ$ 断面ではcube方位とCu方位の中間にあたる方位 (以降K方位と呼ぶ) から，Cu方位への格子回転が見られた。Table 1に示すように，これらに共通するのはおおよそ φ_1 回転，すなわち板面法線方向を軸にして結晶が約 40° 回転していることである。これはFig. 5のように絞り成形時の塑性流動を考えると理解できる。すなわち，絞り成形時はフランジ部にしわ抑え圧が付与されるため板面法線方向 (板厚方向) への塑性流動が抑制されると考えられる。そのため，面内方向の塑性流動が主となり，板面法線方向を軸とした格子回転が起こると解釈される。

絞り成形による結晶の安定性を考察するためにPickusとMathewsonの考え方を援用した¹⁰⁾。Pickusらは，FCC (面心立方格子) 金属の圧延集合組織の安定性に関して，パラメータ $P=m\cos\psi$ を定義し， P が大きくなる結晶方位に格子回転することを説明している。ここで， m はシュミット因子， ψ は結晶のすべり方向と塑性流動方向のなす角である。すなわち，塑性流動方向へのすべり量が大きくなる向きに結晶が回転することを意味する。本研究においても， $\varphi_2=0^\circ$ ， 45° 断面のうち，Goss方位とCu方位を含み，かつ，面指数の等しい (すなわち Φ が一定の) オイラー空間上の直線の各結晶方位に対して，それぞれ全12通りの独立なすべり系の P を計算し，その最大値 P_{max} を求めた。Fig. 6はオイラー角 φ_1 に対して P_{max} をプロットしたものである。いずれにおいても，格子回転の始点 (Brass方位，およびこの直線上でK方位に最も近いK'方位) で P_{max} は極小に近く，格子回転の終点 (Goss方位およびCu方位) で P_{max} は極大を示した。したがって，塑性流動方向へのすべり量が最も小さい結晶方位が，それよりもすべり量が大きい結晶方位に向かって回転し，極大を示す結晶方位で変形集合組織として安定することが示された。このことから，絞り成形においても塑性流動方向に影響される格子回転 (板面法線方向を軸にした回転) が起こると言える。

絞り成形と同様に，しごき成形後の圧延方向DI缶壁の集合組織も測定した。各測定位置に対応する絞り比，

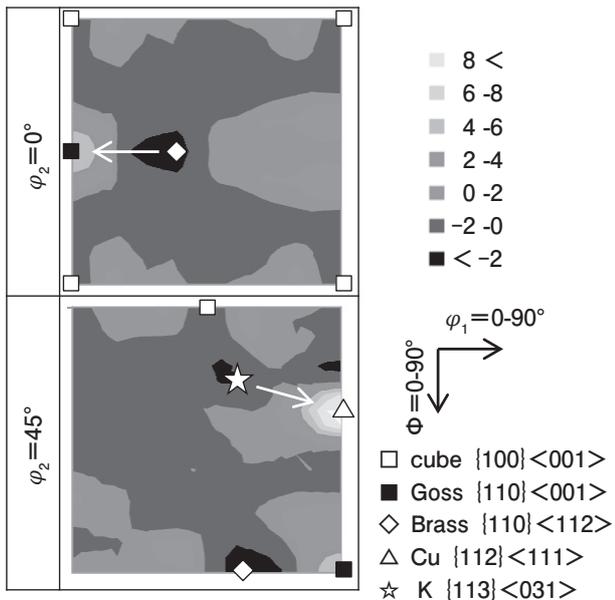


Fig. 4 Change in ODF by deep drawing. Arrows indicate direction of lattice rotation by deep drawing.

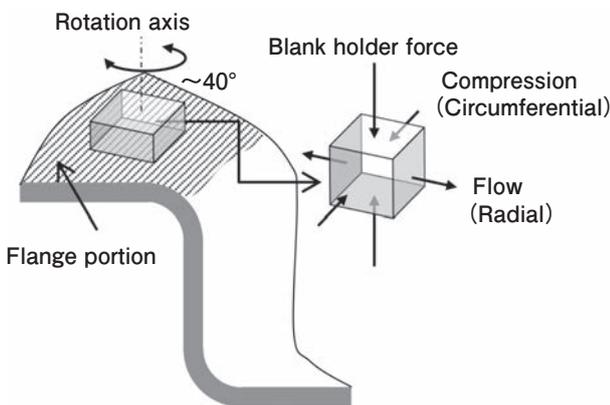


Fig. 5 Schematic illustration of plastic deformation and lattice rotation by deep drawing.

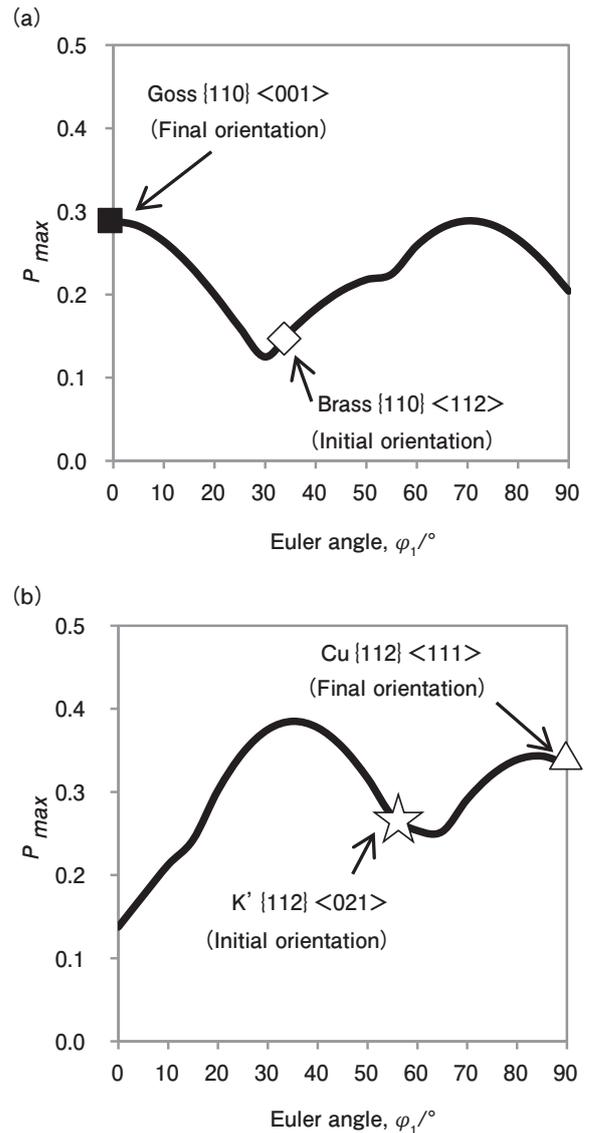


Fig. 6 Relationship between stability parameter P_{max} and Euler angle ϕ_1 in (a) $\Phi = 45^\circ$ and $\phi_2 = 0^\circ$ cross section, (b) $\Phi = 35^\circ$ and $\phi_2 = 45^\circ$ cross section respectively.

Table 1 Orientations in rotation path by deep drawing.

Orientation	$\phi_2 = 0^\circ$ Cross section		$\phi_2 = 45^\circ$ Cross section	
	Initial orientation (Brass)	Final orientation (Goss)	Initial orientation (K)	Final orientation (Cu)
Euler angle	$\phi_1 = 35^\circ$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 55^\circ$	$\phi_1 = 90^\circ$
	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 25^\circ$	$\Phi = 35^\circ$
	$\phi_2 = 0^\circ$	$\phi_2 = 0^\circ$	$\phi_2 = 45^\circ$	$\phi_2 = 45^\circ$
Miller index	{011} $\langle 211 \rangle$	{011} $\langle 100 \rangle$	{113} $\langle 031 \rangle$	{112} $\langle 111 \rangle$
Rotation Angle	35° around $\langle 011 \rangle$ axis		43° around approximately $\langle 112 \rangle$ axis	

しごき率を説明変数に、各集合組織の方位密度を目的変数として重回帰分析をしたところ、高い相関が得られた。Fig. 7にしごき率を横軸とした回帰直線と決定係数を示す。絞り成形で発達したGoss方位、Cu方位は、その傾きこそ小さいが、しごき率に対応して減少、もしくは増加した。しかし、しごき成形後も依然としてこの2つの主要方位が他に比べて集積が大きかっ

た。冷間圧延板およびDI缶壁の主要方位の方位密度比較をFig. 8に示す。冷間圧延板ではcube~Goss方位、 β -fiberの集積が見られるのに対し、圧延方向DI缶壁の変形集合組織は意外にも単純であり、Goss方位、Cu方位の2方位が他に比べて著しく集積することが確認された。

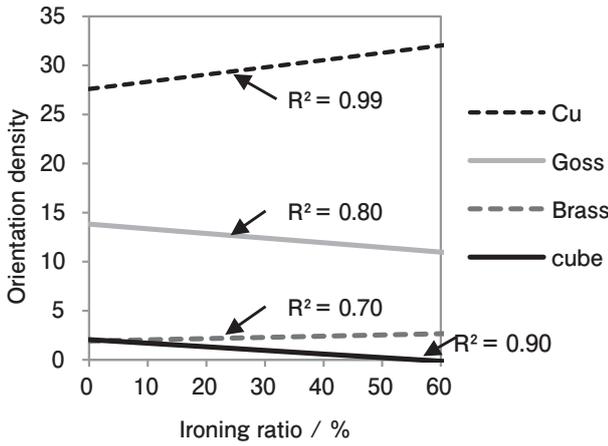


Fig. 7 Relationship between ironing ratio and orientation density of measure orientations of cup and DI can wall.

3. 後加工 (ボトルネッカー加工) への応用

ここまでは、3104アルミニウム合金冷間圧延板のDI成形で発達する変形集合組織とそのメカニズムを説明した。前述のように絞り成形によって、主にGoss方位とCu方位が缶壁に集積するが、これらに着目して解析することでDI成形後の後加工において発生する不良の原因解明と成形性向上への応用が期待される。通常の製缶工程では、DI成形後に耳をトリミングし、洗浄、塗装、焼付工程を経たのち、ネック成形に進む。特にボトル缶では缶胴径から飲み口径への大きな縮径(例えばφ66mm→φ38mm)が必要になるため、複数の段階に分かれたネック成形工程が採用されている。また、ネック成形後に拡管成形、ネジ切り成形、飲み口成形(カール成形)等が行われ、ボトル缶が成形される。前述のように、これらの後工程でも様々な不良が起こることが知られている。当社ではボトル缶のネック成形以降の工程で発生する不良の原因究明や材料のネック成形性を把握するため、量産仕様に近いボトルネッカー(株式会社G&P社製)をR&Dセンターに導入している(Fig. 9)。

Fig. 10はボトルネッカーで再現された不良の一例である。カール成形時に飲み口部が破断するカール割れや、ネック成形途中にテーパ部が座屈するショルダーダメージが挙げられる。これらはそれぞれ、材料の圧延方向に対して0°、45°での発生頻度が高いため、冷間圧延板の集合組織と相関があることが推定される。しかし、これらの不良が発生するのは最終工程に近いところであり、それまでの複数の工程で与えられた加工により材料組織は複雑に変化している。冷間圧延板の組織だけを考慮しては本質的な要因や材料組織との関係を特定することは難しく、絞り成形、しごき成形、

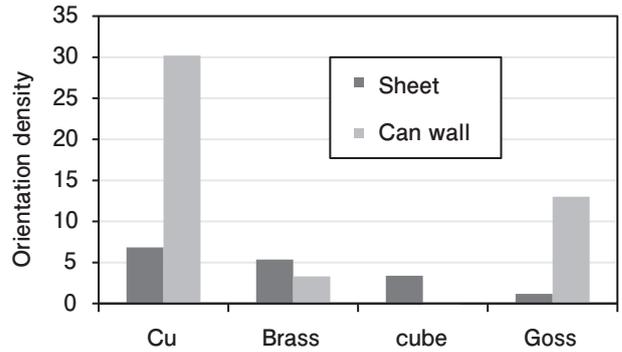


Fig. 8 Comparison of orientation density of major orientations between cold rolled sheet and DI can wall.

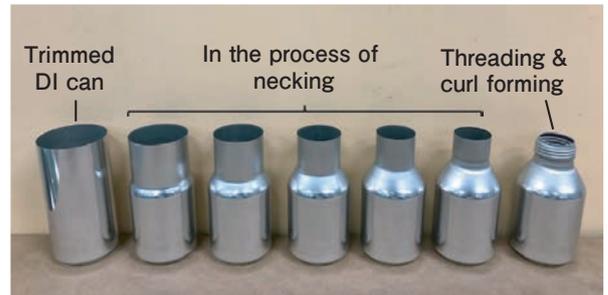
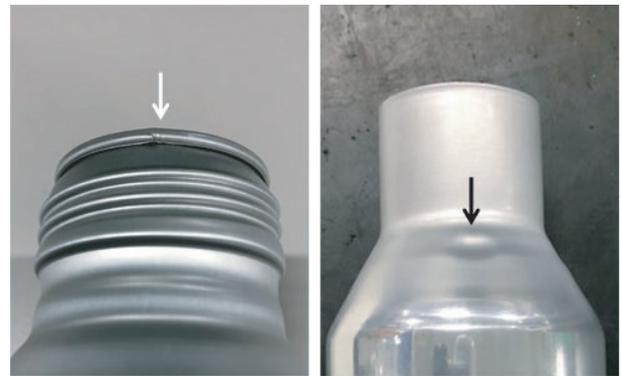


Fig. 9 Bottle can necker (Upper picture) and process of post forming (Lower picture).



(a) Crack of curl portion (b) Dent in shoulder portion
Fig. 10 Defects that occur in the process of post forming.

および後加工における集合組織変化を考える必要が出てくる。Figs. 11, 12はボトルネッカーで成形したボトル缶の周方向のネック耳形状および壁厚分布である。ネック成形前に一度耳はトリミングされているが、ネック成形でも耳が発達し、壁厚も周方向でばらつきが生じた。およそ45°方向の耳が発達し、圧延方向は比較的耳が低くなった。また、それに応じて圧延方向の壁厚が急激に厚くなった。このとき圧延方向壁厚の断面を観察すると、表層に結晶粒サイズの微小な溝、もしくは亀裂が見られた (Fig. 13)。これがカール成形時に伸びフランジ応力下でカール割れの起点になると考えている。これらは特に圧延方向で多いため、前述の圧延方向の急激な増肉、缶周方向の圧縮応力増大により表層が粗面化すること、もしくはせん断帯が発達することで発生すると考えている。このようなネック成形の異方性は、ネック成形の開始点、すなわちDI成形後の缶壁集合組織の周方向ばらつきが要因の一つと考えられる。著者らはDI成形後の缶壁に集積したGoss方位、Cu方位集合組織の結晶粒の状態をそれぞれFE-SEM (電解放出型走査電子顕微鏡) を用いてEBSD

(電子後方散乱回折法) 解析し、ネック成形前後で比較することで、それらが異なる変形挙動を示すことを確認している。これはFig. 14に示すように、缶壁のGoss方位、Cu方位の活動しやすいすべり系の向きが異なるであろうことから理解できる。この研究の詳細に関しては別の機会に報告したい。また、冷間圧延板の集合組織を制御することで、周方向缶壁のGoss方位、Cu方位分布が変化し、ネック成形の異方性を軽減することも分かっている。Fig. 15において、冷間圧延板の強度を同等に維持し、集合組織を大きく変えてボトル缶を成形し、微小溝およびカール割れの発生頻度を比

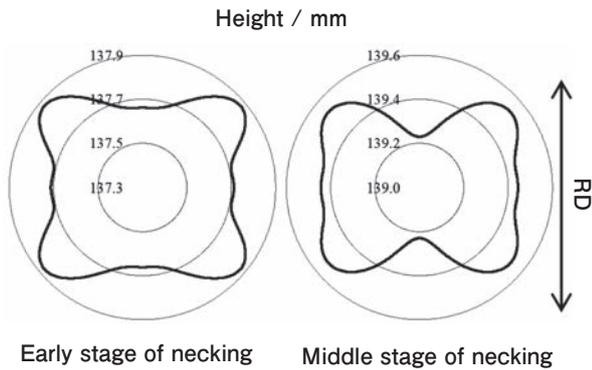


Fig. 11 Earing profile after necking.

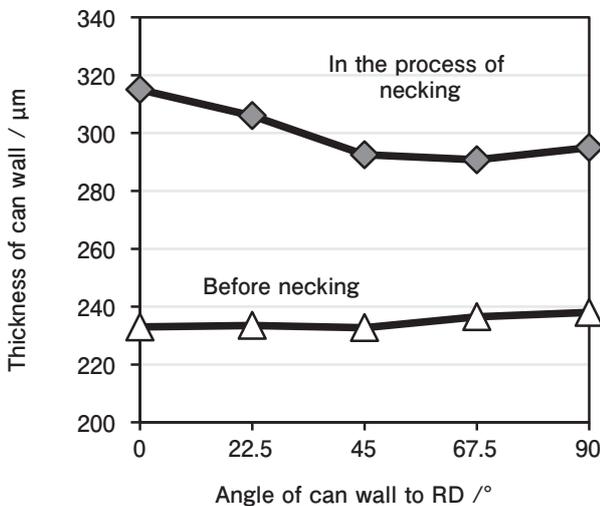


Fig. 12 Circumferential thickness distribution of can wall before and after necking.

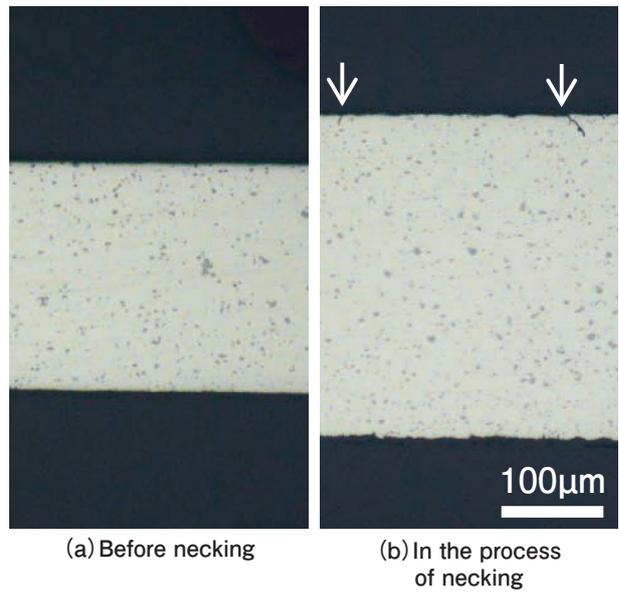


Fig. 13 Micro groove or crack generated by necking.

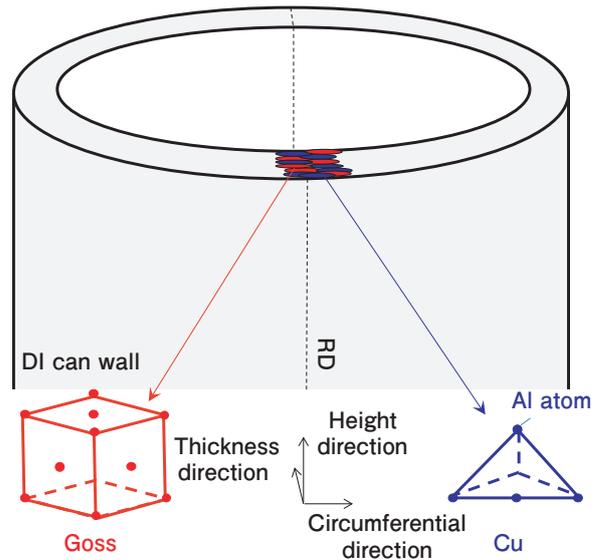


Fig. 14 Lattice direction of Goss and Cu orientation in can wall. (Orientations in can wall were defined considering height direction of can as rolling direction and can wall surface as rolled sheet surface.)

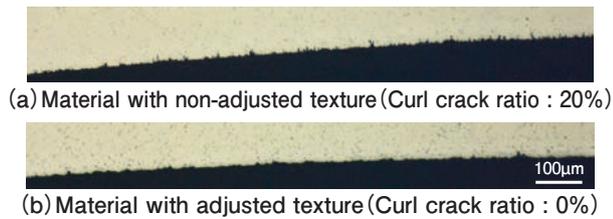


Fig. 15 Improvement of micro groove and curl crack by adjusting textures of cold rolled sheet.

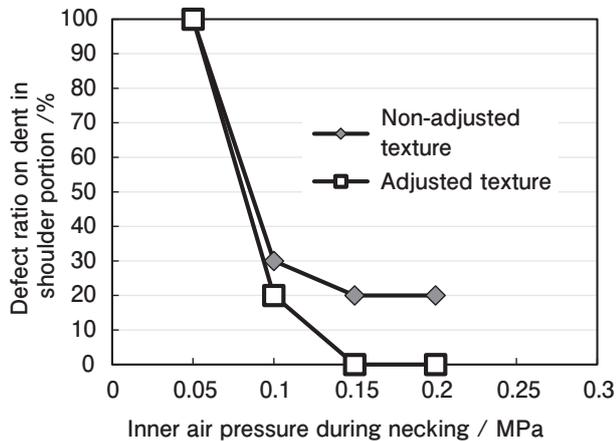


Fig. 16 Improvement of dent in shoulder portion by adjusting textures of cold rolled sheet.

較した。その結果、微小溝、カール割れともに改善することが確認された。また、Fig. 16でも同様に冷間圧延板の集合組織を大きく変更してショルダーダメージの発生頻度を比較した。横軸はボトルネッカーで成形中の全ての缶内部に付加するエアの圧力であり、これが小さいと発生頻度が増加する。しかし、同圧力の条件下では集合組織を変更した材料の方がショルダーダメージの発生頻度が少ないことが確認された。以上から、ネック成形以降の変形挙動は冷間圧延板の集合組織に影響される。それは冷間圧延板の集合組織がDI成形によって発達した缶壁集合組織の周方向分布に影響するためと考えられる。冷間圧延板の集合組織、缶壁の集合組織、およびネック成形における変形挙動の関係はいまだに不明点が多い。また、より厳密にはGoss方位、Cu方位以外の変形集合組織の挙動も考慮が必要と思われる、その場合はより複雑な解析が求められる。しかし、これを解明することが後工程における不良を大きく改善することに繋がると期待している。

4. おわりに

アルミニウム飲料缶のDI成形で発達する缶壁の変形集合組織に関する研究について紹介した。冷間圧延板だけでなく、缶壁の変形集合組織を考慮することで、ネック成形に代表される後加工での変形挙動や不良の原因究明に繋がる。それにより成形性を向上させる材料の開発に寄与すると考えられる。加えて、缶壁の変形集合組織を成形方法で制御することができれば、ネック成形以降の不良を大幅に改善することに繋がるだろう。

昨今の環境意識の高まりから、リサイクル率が高く、環境負荷低減に貢献するアルミニウムDI缶容器の役割が益々重要になると考える。冷間圧延板と、周方向缶壁の集合組織の関係を把握することは複雑な解析が必要になるが、アルミニウムDI缶の不良率低減、形状自由度の向上、ひいてはアルミニウムDI缶容器の用途拡大に貢献するものと考えられるため、今後の研究の発展に期待したい。

参考文献

- Engler, O. & Hirsch, J.: Mater. Sci. Eng. Ser. A, **452-453** (2007), 640-651.
- Tanaka, H. & Ikawa, S.: Mater. Trans, **53** (2012), 1852-1857
- 田中宏樹, 伊川慎吾: 軽金属, **62** (2012), 99-103.
- 鈴木覚, 松本英幹, 田尻彰, 村松俊樹: Furukawa-Sky Review, **1** (2005), 3-8.
- 日比野旭: 軽金属, **52** (2002), 530-535
- 村上博文, 浅井吉夫, 田中成典, 加納義範, 久米治: 軽金属, **68** (2018), 152-158.
- 小林亮平, 工藤智行, 岡田峰光: 軽金属学会 第135回秋期大会講演概要, (2018), 187-188.
- 小林亮平, 工藤智行, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 620-624.
- 井上博史: まてりあ, **40** (2001), 589-591.
- Pickus, M. R. & Mathewson, C. H.: J. Inst. Met., **64** (1939), 273.



工藤 智行 (Tomoyuki Kudo)
(株)UACJ R&D センター 第一開発部



田中 宏樹 (Hiroki Tanaka)
(株)UACJ R&D センター 第一研究部
博士 (工学)