

飲料缶用アルミニウム合金板の開発における集合組織の解析と制御*

工藤 智行**

Analysis and Control of Textures on Development of Aluminum Alloy Sheets for Beverage Cans*

Tomoyuki Kudo**

1. はじめに

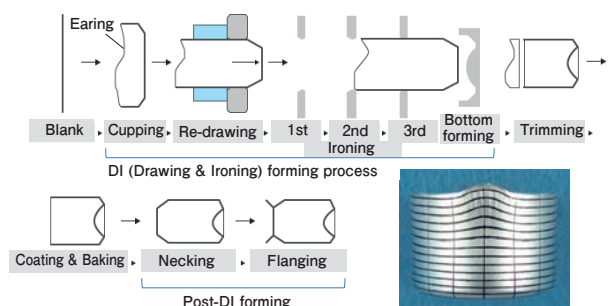
アルミニウム飲料缶の成形は、使用されるアルミニウム合金冷間圧延板の集合組織の影響を強く受ける。例えば、缶胴部はFig. 1 (a)のように深絞り成形、しごき成形(まとめてDI成形と呼ぶ)により缶壁が成形されるが¹⁾(※1)、深絞り成形では冷間圧延板の集合組織に起因し、カップの縁に耳(高さの周方向ばらつき)が生じる。耳が部分的に高すぎると、成形中に当該部分が破断したり(耳切れ)²⁾、缶体の寸法が搬送ラインと適合せずジャミングを起こすことがある。また、ボトル缶や飲料容器用キャップの工程においても深絞り成形が行われる。キャップ材はあらかじめ成形前に塗装、印刷されており、耳が大きい材料で成形するとFig. 1 (b)のように文字やデザインがゆがむことがある。そのため、缶胴材以上に均一な耳形状の制御を求められる³⁾。これらに缶蓋材も含めた飲料缶用材料にとって、

耳の制御は材料の品質を決める重要な因子である。本報では缶胴材およびキャップ材の製造工程において、集合組織の解析事例とそれを用いた耳制御の考え方を説明する。

一方、飲料缶用材料の開発においては材料の集合組織だけでなく、成形中の変形集合組織にも注目する必要性を感じている。それは複数の工程から成る飲料缶の成形において、変形集合組織がしごき成形やその後の加工の成形性に影響することが分かってきたためである。ここでは著者らの研究事例から、結晶方位分布関数(ODF: Crystallite Orientation Distribution Function)の解析で明確にした缶壁の変形集合組織の発達挙動を解説する。また、DI成形以降の後加工(例えばネック成形、フランジ成形)で見られる異方性とそれに起因する不良を実験結果から示し、成形途中の変形集合組織を解析する必要性を議論する。

2. 缶材料の集合組織と耳形状の制御

はじめに缶材の集合組織、耳形状とそれらを制御するための工程の考え方を説明する。缶胴材、キャップ材の合金成分および製造工程の一例をTables 1, 2に示す。現在、大部分の缶胴材は3104合金の鋳塊を均質化処理、熱間圧延し、途中焼鈍することなく製品板厚まで冷間圧延する工程で製造している⁴⁾。熱間圧延の終了温度を上げて、コイルに巻き上げた後に余熱で再結晶させるため、自己焼鈍工程と呼ばれる。熱間圧延では再結晶集合組織としてcube方位{100}<001>が多く集積し、それ以降の冷間圧延では圧延集合組織の β -fiber (Cu {112}<111> ~S {123}<634> ~Brass {110}<112>)



(a) Procedure for can body production (b) Ear and distortion of cup

Fig. 1 Procedure for beverage cans production.

脚注* 1

(株) UACJ: <https://www.uacj.co.jp/products/sheeting/aa-packaging.htm>

* 本稿の主要部分は、ぶらすとす, 6 (2023), 29-33 に掲載

The main part of this paper has been published in the Bulletin of the Japan Society for Technology of Plasticity, 6 (2023), 29-33.

** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&D センター 缶材料開発部

Can Stock Development Section, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation

Table 1 Composition of typical alloy for beverage can.
Upper row: lower limit, Lower row: upper limit (mass%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
3104	–	–	0.05	0.8	0.8	–	–	–	Bal.
	0.6	0.8	0.25	1.4	1.3	–	0.25	0.10	
3105	–	–	–	0.30	0.20	–	–	–	Bal.
	0.6	0.7	0.30	0.8	0.8	0.20	0.40	0.10	

Table 2 Examples of production process of material for beverage can.

Application	Process
Can body	Homogenization → Hot Rolling → Cold rolling
Closure	Homogenization → Hot Rolling → Cold rolling → Recrystallization → Cold rolling → Stabilization

が集積する。缶胴材の耳は主に、圧延方向(RD)に対して0°/90°耳に寄与するcube方位と、45°耳に寄与するβ-fiberから形成される⁵⁾。

異なるcube方位密度を持つ3104合金の熱間圧延板を使用し、実験室で冷間圧延した際の圧下率と耳の関係をFig. 2に示した。Fig. 3には熱間圧延板および冷間圧延板(圧下率80%)の集合組織の方位密度を示す。ここで耳形状の指標として式(1)から計算されるEaring balanceを用いた。 h_{p0} 、 h_{p45} 、 h_v はそれぞれ0°/180°山高さ、45°山高さ、谷高さの平均値である。値が正であれば0°/180°耳が優位であり、負であれば45°耳が優位であることを示す。すなわちcube方位、β-fiberのバランスを推し測ることができる。

$$(h_{p0} - h_{p45}) / h_v \times 100 (\%) \quad (1)$$

熱間圧延板の時点ではcube方位密度が高く、0°/90°耳が発達していることが分かる。材料間で比較すると、cube方位密度が比較的低い材料Aは0°/90°耳が発達しているものの、0°~90°間の谷が小さく、材料Bに比べると0°/90°耳は先鋭化していない。冷間圧延後はcube方位が減少し、β-fiberが集積することが分かる。それに伴い45°耳が発達し、0°/45°-6山の耳形状になる。ここでcube方位が減少しているにも関わらず、0°/180°耳が90°耳に対して比較的高いことが分かる。田中らは6016合金冷間圧延板の集合組織と耳の関係を結晶塑性モデルを用いた有限要素法により解析し、cube方位がRD軸回転した $\{hk0\} \langle 001 \rangle$ が0°/180°耳の形成に寄与することを報告している^{6)~7)}。Fig. 3(a)のように缶胴材においても、Goss方位 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 近くは冷間圧延後の大きな減少が見られない。そのため90°耳に比べて0°/180°耳が高く残りやすいと考えられる。それでもEaring balanceで見ると、熱間圧延板の

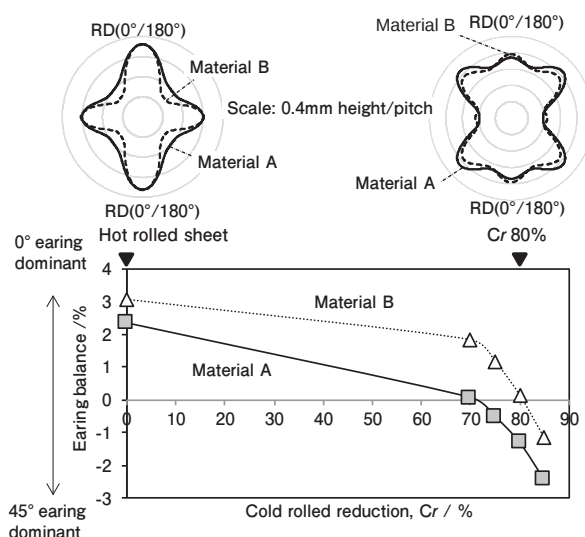


Fig. 2 Earing profile and balance in each hot rolled and cold rolled sheets for can body materials.

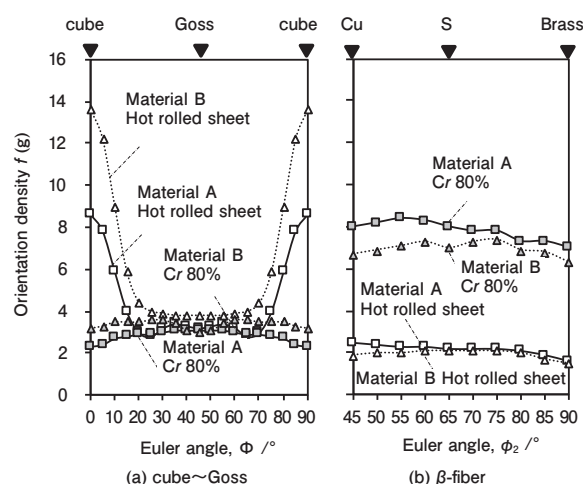


Fig. 3 Orientation density of texture in hot rolled and cold rolled sheets for can body materials.

cube方位密度が高い材料Bの方が、同じ圧下率で比較した場合0°/180°耳が優位であることが分かる。このように缶胴材は熱間圧延で発達する再結晶集合組織と、冷間圧延で発達する圧延集合組織のバランスで製品板の耳形状が決まる。

再結晶集合組織の制御において、cube方位以外に発達する結晶方位を考慮する必要がある。晶出物など円相当径が1μmを超えるような第二相粒子の周りには圧延により変形帯が形成され、再結晶核が生成することが知られている(PSN: Particle Stimulated Nucleation)^{4)~5)}。PSNの再結晶粒は特定の優先方位を持たないランダム方位である。粗大な第二相粒子が多く、かつ圧下率が大きくて蓄積するひずみ量が高い場合、PSNの頻度が高くなり相対的にcube方位の方位密度が減少する。Fig. 4に材料A、BのAl-Fe-Mn-Si系晶出物のサイズ分布を示す。材料Aの熱間圧延板の方が1~10μmの粗

大な晶出物が多いことが分かる。それによりPSNの起点が増加してよりランダムな再結晶集合組織となったと考えられる。以上から、集合組織および耳形状の制御には第二相粒子の分散状態も考慮する必要がある。

キャップ材は例えば、Tables 1, 2に示すように低強度の3105合金の鋳塊を均質化処理、熱間圧延した後、途中に焼鈍工程を挟んで製品板厚まで冷間圧延する。缶胴材の製造工程と異なる部分として、冷間圧延途中の中間焼鈍がある。この工程では、最初の冷間圧延で蓄積されたひずみを利用して再結晶処理され、より山谷の小さい耳形状とする。中間焼鈍の効果を示すため、熱間圧延板を実験室で冷間圧延、中間焼鈍、最終冷間圧延し、各工程で耳と断面組織およびcube方位密度を測定した(Fig. 5)。なお、ここでの耳率は山谷の最大高低差をカップ平均高さで除した値であり、耳の大きさを表す。最初の冷間圧延後はひずみが蓄積し、圧延組織となっている。そのため45°耳が発達し、耳率が

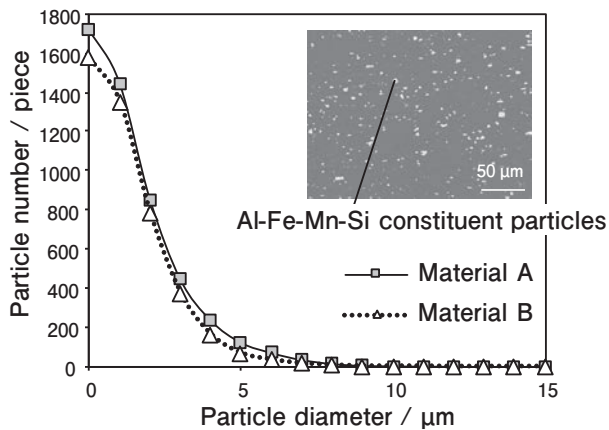


Fig. 4 Distribution of Al-Fe-Mn-Si constituent particles in can body materials.
(Number of particles which diameter is larger than the figure shown in the horizontal axis.)

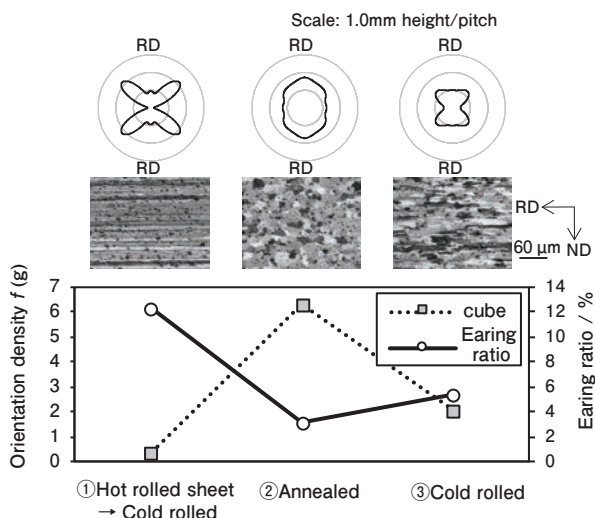


Fig. 5 Transition of cube orientation, earing profile/ratio, and grain structure of can body material by intermediate annealing.

大きい。この材料に中間焼鈍を施すと、再結晶組織となりcube方位密度が増加する。それに伴い0°/90°耳が発達するが、Fig. 2の熱間圧延板と比較するとより周方向で均一な耳形状となっており、耳率が小さくなる。これは最初の冷間圧延でひずみが蓄積し、PSNによるランダム方位粒の核が多く発生したためと考えられる。その後、最終の冷間圧延により45°方向の耳や強度が調整される。このようにキャップ材においては熱間圧延、冷間圧延に加えて焼鈍工程を入れることで、再結晶組織(cube, ランダム方位)、圧延組織(β -fiber)のバランスを柔軟に制御し、周方向で均一な耳形状となるよう制御されている。

3. 変形集合組織と成形性の関係

飲料缶用材料において集合組織制御は主に、耳形状およびそれに起因する不良の抑制を目的とするものであり、材料の集合組織のみに着目した研究が多い。一方、複数の工程から成る飲料缶の成形性を考える際は、材料の集合組織を開始点として成形途中の変形集合組織の発達挙動を把握する必要があると考えている。DI成形によって材料の集合組織は圧延方向に対して0°~90°に変形し、缶壁の変形集合組織を形成する。そのため缶壁には高さ方向・周方向で変形集合組織の分布が生じる(Fig. 6)。缶壁変形集合組織は各種の成形性と密接に関連している可能性がある^{8)~9)}。

例えば、しごき成形性には材料の加工硬化性や金型との潤滑が影響することが知られている^{10)~11)}。一方、井上らはしごき成形性に及ぼす塑性異方性の影響を調査した結果、しごき成形途中(2段目のしごき加工後)における缶壁のr値の周方向異方性が小さいほど、3段目のしごき成形の破断限界が向上することを報告している⁸⁾。ここで缶壁のr値の周方向異方性とは、缶周方向角度ごとに缶壁から引張試験片を採取し、測定したr

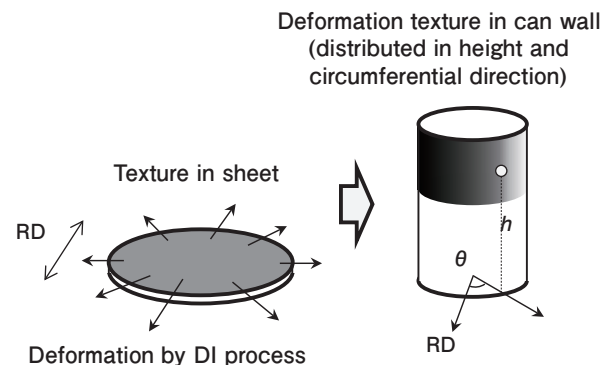


Fig. 6 Development of deformation texture in can wall by DI process.

値の分布を指す。缶壁の r 値の周方向異方性は、素板の r 値の面内異方性とは異なる分布になるため、複数の工程から成る成形では各工程後の数値を考慮する必要性が述べられている。 r 値は集合組織に強く依存するため、この事実はDI成形中に発達した缶壁の変形集合組織の周方向分布が成形性に影響していることを示唆している。

また、缶壁集合組織の分布は、ネック成形やフランジ成形に代表されるDI成形以降の後加工に影響すると考えられる。**Fig. 7**はDI成形後の缶の耳をトリミングして高さを平滑化した後に、ボトル缶形状のネック成形をしたときの壁厚の推移と開口部高さのプロファイル（すなわち耳）である。この例のようにネック成形途中から 0° 方向の壁厚が他の角度よりも増肉する。それ

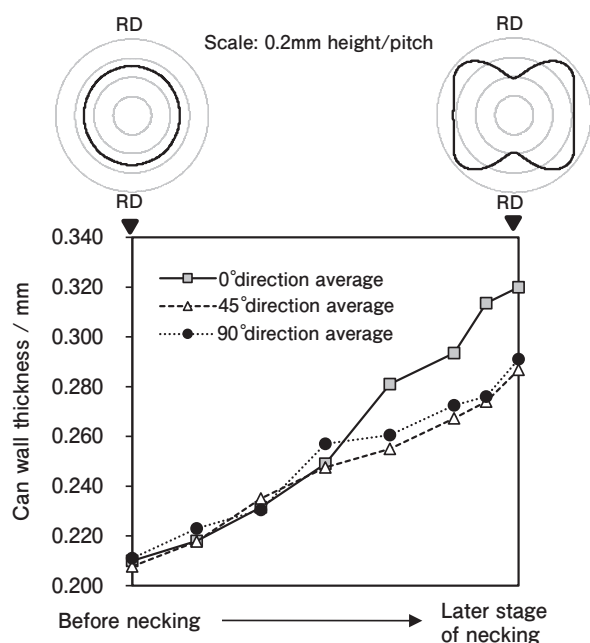


Fig. 7 Anisotropic increases in can wall thickness and transition of earing profile by necking process.

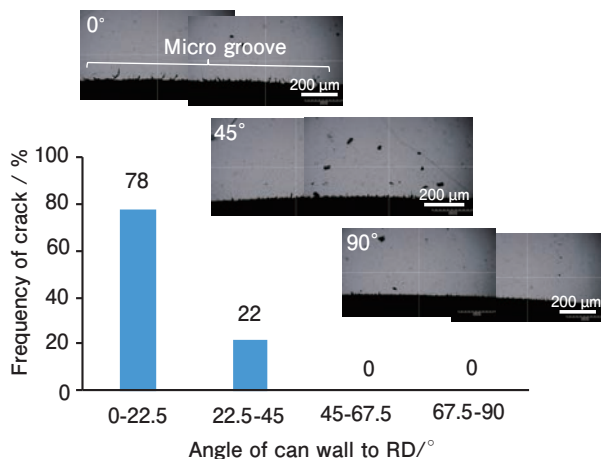


Fig. 8 Frequency of flange crack against angle of can wall to RD. Cross sectional figures show the micro grooves observed after necking process.

に伴い、 0° 方向では高さが低くなり、逆に $45^\circ \sim 60^\circ$ 方向付近の耳が大きく発達することが多い。

上記のような異方性に起因して、ネック成形やフランジ成形では多様な不良が発生する^{9), 12)}。例えばボトル缶のような縮径率の高いネック成形をした後に、飲み口をフランジ成形（カール成形）すると割れが発生することがある。**Fig. 8**は缶周方向の角度と割れの頻度を示したものである。 0° 方向付近に割れが集中していることが分かる。 0° 方向のフランジ部断面を観察すると表面に微小な溝や亀裂が見られるが、 90° 方向に進むにつれてその程度と数が減少していく。この溝はネック成形後の時点で見られ、これがフランジ成形時に亀裂の起点となると考えている。ネック成形は縮径成形であるため、缶周方向に圧縮応力がかかり**Fig. 7**のように壁厚が増肉する。異方性によって 0° 方向は特に増肉が大きくなる傾向のため、強い圧縮応力によって表面が粗面化して溝が形成され则认为られる。

4. 変形集合組織から考察する後加工の異方性

以上のように、DI成形の後加工でも材料の圧延方向を基準とした異方性の影響を強く受ける。ではなぜこのような塑性異方性が生じるのだろうか。この問いに対して、理論的には材料の集合組織からだけでは説明できない。あくまで後加工の開始点は缶壁であるため、まずは缶壁の特性から要因を考察しなければならないと考える。

著者らは3104合金冷間圧延板の深絞り成形、しごき成形後の変形集合組織の発達挙動を調査している^{9), 13)}。3104合金冷間圧延板から深絞り、再絞り成形し、各工程缶の圧延 $0^\circ/180^\circ$ 方向の缶壁の変形集合組織をX線回折法（XRD）で測定した。その結果、深絞り成形後には絞り比（測定箇所の高さ）に応じて缶壁にCu方位、およびGoss方位が著しく発達した（**Fig. 9**）。ここでは缶高さ方向を圧延方向、缶壁表面を圧延面とし、圧延板と同様に結晶方位を定義した。しごき成形後も深絞り成形で発達したCu方位、Goss方位が多く残存した。圧延方向に加えて周方向 23° 、 56° 、 90° のDI缶壁のCu方位およびGoss方位の方位密度を**Fig. 10**に示す。缶周方向で方位密度は一定ではなく、分布を持つことが分かる。井上らの報告に見られる缶壁 r 値の周方向の異方性や、後加工での異方性は、このように缶壁変形集合組織が周方向で分布を持つために生まれるとされる。

また、缶壁の主要方位であるCu方位およびGoss方位がネック成形中に異なる変形挙動を示すことを確認

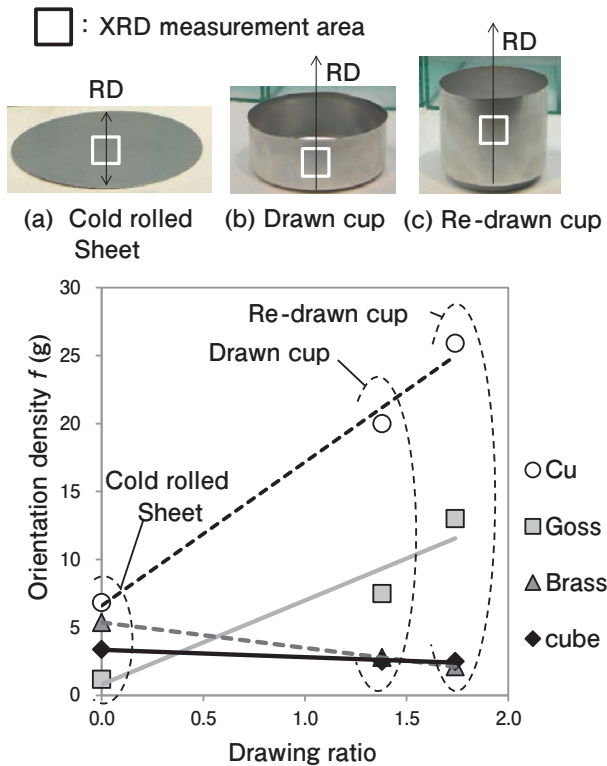


Fig. 9 Relationship between drawing ratio and orientation density of measured orientations of cold rolled sheet and cup wall⁹⁾.

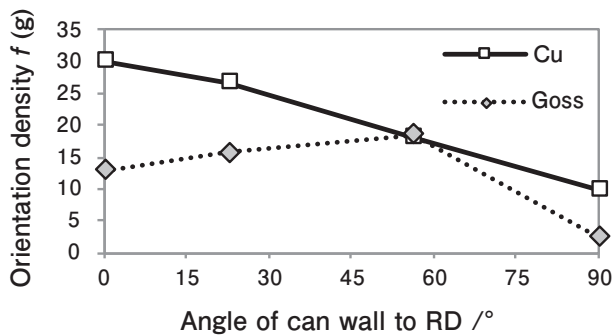


Fig. 10 Orientation density of Cu and Goss orientations against angle of DI can wall (115mm height) in circumferential direction.

している¹⁴⁾。Fig. 11のようにFE-SEM-EBSDでネック成形前後の缶壁断面の変形集合組織を分析し、Cu方位およびGoss方位のみを抽出した。Cu方位は壁厚方向に伸長しているのに対し、Goss方位は等方的に変形しているように見える。これは缶壁のCu方位およびGoss方位の{111}すべり面を考えると説明できる。すなわちCu方位は等価なすべり面の半分は缶壁断面と並行であるのに対し、Goss方位は缶壁断面と並行なすべり面を持たない。Fig. 10で示したように、Cu方位は0°方向で最も集積する。このことがネック成形において0°方向缶壁を最も増肉させ、表面の溝形成およびフランジ割れに影響している可能性がある。

実験的には、材料の集合組織と缶壁の変形集合組織、

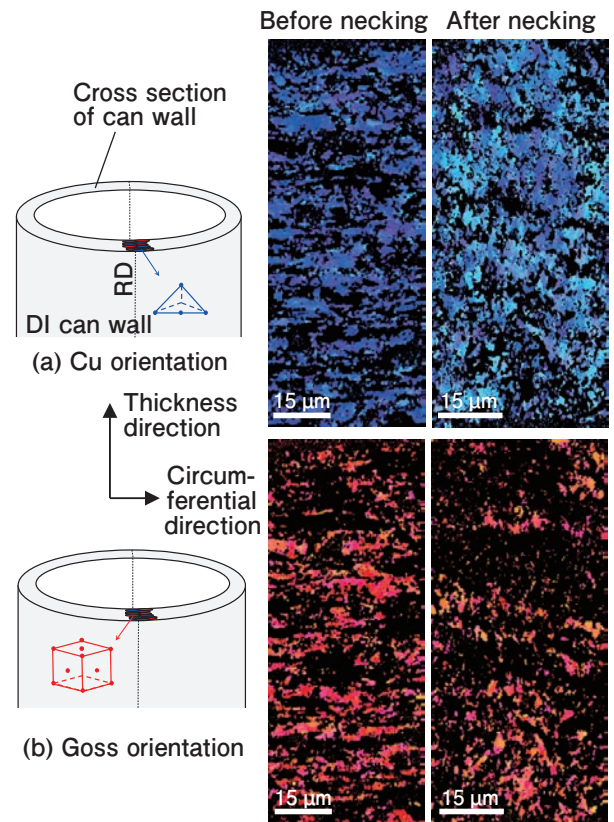


Fig. 11 Deformation behavior of Cu and Goss orientations in DI can wall by necking^{9), 14)}.

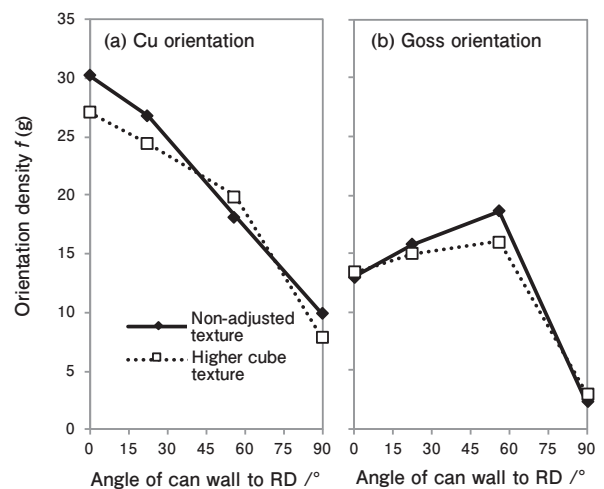


Fig. 12 Circumferential distribution of orientation density of Cu and Goss orientations in DI can wall (115 mm height) formed from materials with different texture.

および後加工での変形挙動は密接に関連していることを確認している。例えばcubeの方位密度が高い材料から成形した缶壁は、Cu方位、Goss方位の周方向分布が比較的均等になった (Fig. 12)。別材料を用いた後加工の実験では材料の集合組織を変化させることで、ネック成形後の耳高さが均等化することや (Fig. 13)、後加工での不良発生率が改善することを確認している⁹⁾。

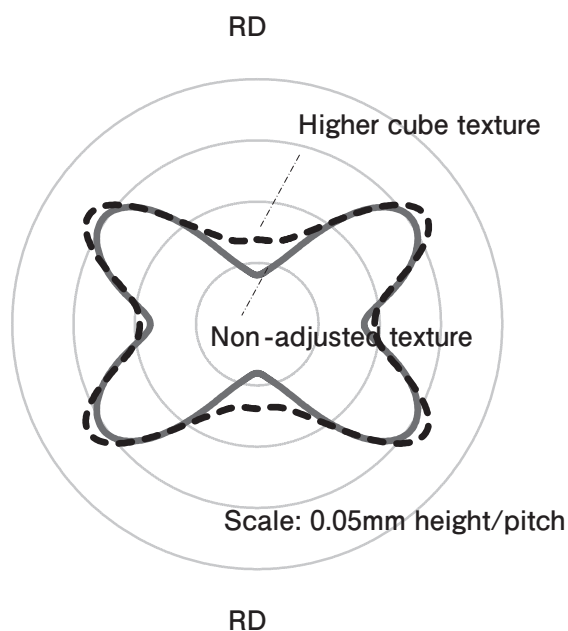


Fig. 13 Earing profile of can wall after necking formed from materials with different texture.

すなわち材料の集合組織を変化させることで、缶壁の変形集合組織の分布が制御でき、後加工での異方性を軽減して不良を改善することができる。

5. 今後の課題

上記を理論的に検証するためには、周方向の缶壁変形集合組織の発達メカニズムの理解、および結晶塑性解析等によって缶壁集合組織から後加工での変形挙動を再現することが必要となる。つまりFig. 14のように、材料の集合組織から成形途中の変形集合組織を導き、そこからさらに後加工での変形挙動を予測して不良の要因を特定する。本質的にはこのプロセスが確立して初めて、後加工にとって最適な材料の集合組織を導出できる。また、好適な変形集合組織に制御するた

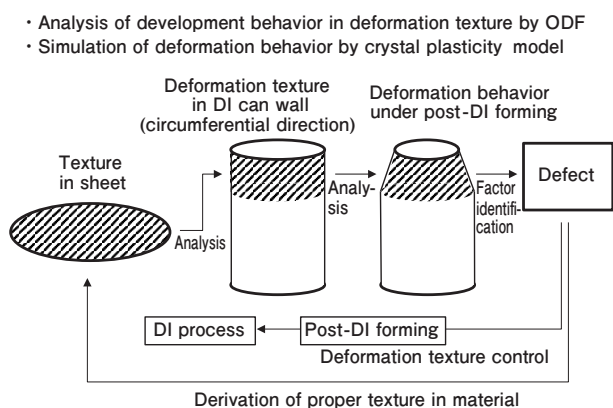


Fig. 14 Analysis process and its problem for improvement of the post-DI formability for beverage can material.

めの成形法開発にも繋がる可能性がある。これらは非常に複雑な解析を要するが、飲料缶の成形自由度の向上、用途拡大のため、変形集合組織を考慮した開発は新しいアプローチとして今後取り組むべき課題としたい。

6. おわりに

飲料缶用アルミニウム合金板における集合組織の解析とその制御に関する考え方、および今後の課題を説明した。これまで多くの耳形状と集合組織に関する基礎研究や、材料・成形法の開発が成され、それらの積み重ねが現在の高品質な飲料缶の普及に貢献している。一方で、近年制定されたSDGs (Sustainable Development Goals) の達成に向けた取り組みとして、世界中で気候変動対策が推進されており、飲料缶のサプライチェーンでもよりCO₂排出量を削減し環境負荷を小さくすることが求められる。大きな課題として1) さらなる缶の軽量化^{1), 15)}、および2) 缶由来リサイクル原料 (Used Beverage Can : UBC等) の活用最大化¹⁶⁾があり、それらの技術開発が進んでいる(*2)。材料面の対策では、いずれも大量生産・安定供給が求められる飲料缶の成形を難しくする。例えば缶を薄肉軽量化するためには高い材料強度が必要になるが、冷間圧延の圧下率増加が避けられず材料の異方性が大きくなる。同時に靱性が低下し、割れの感受性も高くなる。また、リサイクル原料の配合比率を高くするために不純物元素の許容濃度を高くすると、同様の課題に直面する。最も環境負荷の小さい容器の一つとしてアルミ缶が選ばれ続けるために、これらの課題解決と製品化に材料・成形両面から取り組まなければならない。そのため新しい塑性加工の知見に対する期待は大きく、飲料缶用材料の分野においても上記の課題解決に繋がる集合組織の解析・活用を検討していく必要があると考えられる。

謝 辞

本解説の執筆にあたり、引用文献の著者の方々、並びに実験データ掲載に協力頂いた(株)UACJの池田幸将氏、吉田智徳氏、吉田日向氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋成也：軽金属，67 (2017)，79-86.

脚注*2

東洋製罐(株) : <https://tokyopack2021.tskg-hd.com/cbr/>

- 2) 野口雅敏：軽金属, **38** (1988), 414-425.
- 3) 馬場義雄：軽金属, **32** (1982), 261-273.
- 4) 鈴木 覚, 松本英幹, 田尻 彰, 村松俊樹：Furukawa-Sky Review, **1** (2005), 3-8.
- 5) 日比野旭：軽金属, **52** (2002), 530-535.
- 6) 田中宏樹, 伊川慎吾：軽金属, **62** (2012), 99-103.
- 7) Tanaka, H. & Ikawa, S.: Material Transactions, **53-11** (2012), 1852-1857.
- 8) 井上祐志, 山口正浩：軽金属, **70** (2020), 422-428.
- 9) 工藤智行, 田中宏樹：ふらすとす, **4** (2021), 222-226.
- 10) 碓井栄喜, 稲葉 隆：軽金属, **34** (1984), 317-324.
- 11) 土田 信, 田中宏樹：住友軽金属技報, **31** (1990), 268-282.
- 12) 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.
- 13) 小林亮平, 工藤智行, 田中宏樹：軽金属, **69** (2019), 387-392.
- 14) 工藤智行, 小林亮平：特許第7111563号.
- 15) 横井 洋, 岡田峰光：住友軽金属技報, **54** (2013), 327-335.
- 16) 小出政俊, 鶴田淳人：神戸製鋼技報, **55** (2005), 75-80.



工藤 智行 (Tomoyuki Kudo)
(株)UACJ マーケティング・技術本部
R&D センター 缶材料開発部