

缶胴のボトムしわ発生に及ぼす アルミニウム合金板の材料特性の影響

Effect of Material Properties of Aluminum Alloy Sheet on Bottom Wrinkling of Can Body

鈴木 覚
Satoshi Suzuki

藤田 和子
Kazuko Fujita

概要 飲料用缶は製缶技術の進歩とともに軽量化され、缶胴用材の薄肉化もこれに伴って進行してきた。この場合、缶胴の製造工程における再絞り工程においてボトムしわと呼ばれる現象が発生しやすくなる。このボトムしわ発生を抑制するには素材強度の低下が効果的であると従来から考えられてきたが、缶体強度の観点からそのような対応には限界がある。また素材特性と耐ボトムしわ性の関係についての報告は少ないが、加工硬化性の増大によりボトムしわが発生しにくくなるという報告がある。本報告では3004合金板のMnの固溶析出状態を変化させて加工硬化性と耐ボトムしわ性への影響を調査し、さらに両特性間の相関について検討した。特にMn固溶量を増加させた場合の加工硬化性の増大、それに伴うボトムしわ発生の抑制が顕著であった。Mn固溶量の多い材料はしわ発生域での軸方向のひずみが大きくなっている事が確認され、再絞り時の縮径化による余肉が軸方向の変形に吸収されてしわ発生が抑制されているものと考えられた。

Abstract: Weight reduction of aluminum cans has been achieved along with technical progress, and the downgauging of material has continued simultaneously. But in this case, bottom wrinkling tends to occur easily during the redrawing process of the can body. So far, lowering of material strength has been thought to be an effective measure to prevent bottom wrinkling, but there are limits to such an approach, because the can strength is reduced. A few papers have discussed the relationship between material properties and bottom wrinkling. In some reports, it is said that increasing the work-hardening rate prevents bottom wrinkling. In this paper, we investigated the effect of the solid solution and precipitation state of Mn in A3004 alloy on the work-hardening rate and bottom wrinkling, and examined the correlation between the two properties. It was found that an increase of Mn solid solution content causes an increase of the work-hardening rate and a marked improvement of bottom wrinkling. It was verified for a material of high Mn solid solution content that the axial strain is large in the wrinkling-prone area. It was thought that wrinkling is suppressed because the excess thickness caused by diameter reduction when redrawing is absorbed by the axial deformation.

1. はじめに

飲料用アルミニウム缶は技術の進歩と共に軽量化が進み、これに使われる缶胴材も薄肉化が行われてきている。この場合缶胴の製造プロセス途中の再絞り工程においてボトムしわと呼ばれる成形不具合が発生しやすくなる。図1に缶胴の一般的な成形プロセスとボトムしわの発生状況を示す。このしわが発生した場合、直接缶体特性を損なうものではないが、美観上好ましくない上、製

造ライン上の検査機によりリジェクトされて生産性に非常に大きな悪影響を与える。この耐ボトムしわ性改善のためには素材の低強度化が効果的であると思われてきたが、この場合、缶体強度特に耐圧強度が低下してしまう事になり、薄肉高強度化が求められる場合には、この対応では限界がある。

缶胴材の耐ボトムしわ性に関しては報告が少なく、Shenによる安定化焼鈍の影響の解析¹⁾、Bettsによる成形条件、材料特性の影響の調査²⁾、水谷らによる成形力

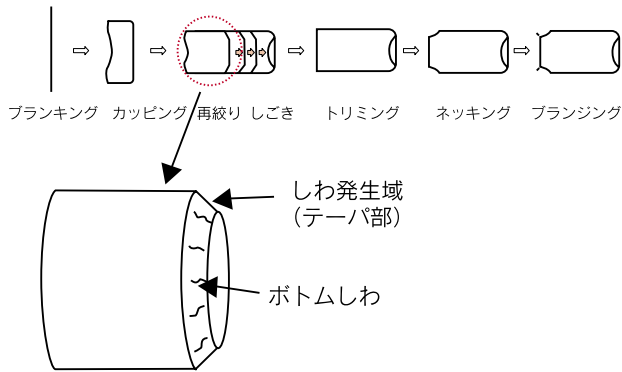


図1 缶胴の成形工程とボトムしわ
Fig.1 Schematic of forming processes of can body and bottom wrinkling.

の影響についての解析³⁾がある程度である。このうち材料特性に関しては、強度以外のパラメータとしては加工硬化性の影響が報告されている。齊藤らも素材耐力、素材伸びよりも加工硬化性の方が耐ボトムしわ性との相関が高いと報告している⁴⁾。また、Bettsもn値(加工硬化指数)が高いほど耐ボトムしわ性が良好で、その影響は板厚が薄いほど顕著であると報告している²⁾。Shenは安定化焼鈍の付与による耐ボトムしわ性の向上現象を、しわ発生部の加工軟化を抑制し結果としてその部分の強度を高め、圧縮応力に対する耐座屈性を向上させたものと解釈している¹⁾。

本稿では、3004缶胴用アルミニウム合金板のMnの固溶析出状態を変化させ、加工硬化性と耐ボトムしわ性への影響を調査した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験材の製造工程

工業的に生産された3004合金の厚さ2.2mmの熱間圧延板を素材として使用した。その合金組成を表1に示す。

表1 実験材の化学成分
Table 1 Chemical composition of the alloy.

合金名	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
3004	0.27	0.38	0.21	1.0	1.0	bal.

実験材の製造工程を図2、図3に示す。熱間圧延板に所定の熱処理を施した後冷間圧延し、最終焼鈍を施す工程となっている。最終板厚は0.3mmとした。図2の工程はMnの固溶量を変化させること、図3の工程は同一固溶度で析出物の分布が異なる状態とすることを目的としたものである。

2.2 ボトムしわ高さ、n値の測定方法

表2に示す条件でカップングプレスにより1次絞りを施した後、ボディメーカにより再絞り缶を作製した。これは通常の350ml用の缶相当のもので再絞り缶の直径

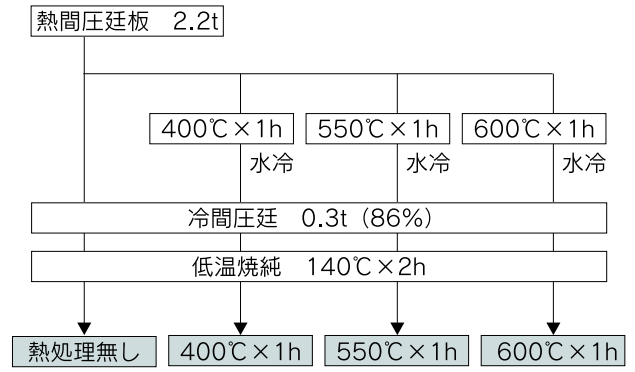


図2 実験材の製造工程(固溶Mn量の影響)
Fig.2 Manufacturing process of specimens (Effect of Mn solid solution content).

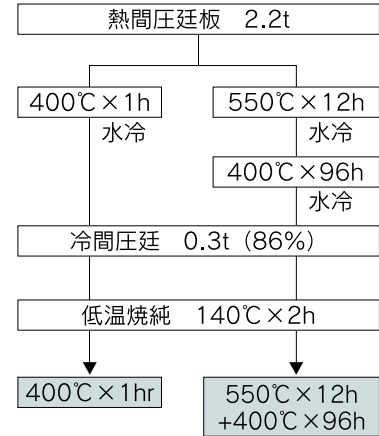


図3 実験材の製造工程(析出物分布の影響)
Fig.3 Manufacturing process of specimens (Effect of distribution of Mn precipitates).

表2 成形条件
Table 2 Forming conditions.

カップング	一次絞り比	1.61
	潤滑油	エマルジョン系合成油
リドロ	再絞り比	1.31
	しわ押さえ力	3,100N
	潤滑油	エマルジョン系合成油

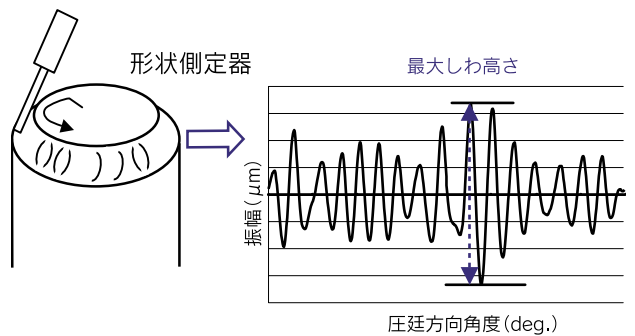


図4 ボトムしわ測定方法の模式図
Fig.4 Schematic of measuring method of bottom wrinkling.

は66mmである。

ボトムしわは、図4に示すように再絞り缶のテーパ部表面の凹凸を形状測定機により測定し、その最大しわ高さとして定義した。各サンプルはn=5の測定とした。

加工硬化性については、実験材からJIS5号引張試験片を圧延方向と平行方向に切り出し、引張試験の結果から最小自乗法により加工硬化指数n値(圧延方向と平行方向)を算出した。

3. 結果および考察

3.1 Mn固溶処理の影響

図5に実験材の導電率測定結果を示す。本系合金ではMn固溶量が多いほど導電率が低いことが知られており、Mn固溶量の多少を推定するため代用特性として導電率を測定した。400℃熱処理材は熱処理無し材に比べて若干導電率が高く、Mn固溶量はやや減少(=すなわちMnが析出)しているものと推定される。また550℃、600℃と熱処理温度が高くなるにつれて導電率は低下しており、Mnの固溶が進んでいることが推定される。

図6には熱間圧延板に熱処理を加えた後の時点での透過電子顕微鏡による析出物観察結果を示す。Mnの析出処理にあたる400℃熱処理材では析出物の数に大きな差は無いが、導電率は高くなっており、Mnの析出は主に既存の析出物の粗大化によって起こっているものと思われる。より高温の550℃、600℃熱処理材は微細な析出物が減少すると共に導電率が低下しており、Mnの固溶が微細な析出物の消失によって起こっている事がわかる。なお、これらの析出物はいずれも $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ であることを電子線回折とEDXS分析により確認した。

図7にこれらの実験材の引張試験結果を示す。Mnの析出処理にあたる400℃熱処理材では強度変化はほとんどないが、Mnの固溶処理に当たる550℃、600℃材では強度(引張強さと耐力)が大きく増加していることがわかる。

図8には再絞り缶の外観を、図9にはボトムしわ高さの評価結果を示すが、Mn固溶量が多い高温熱処理材の

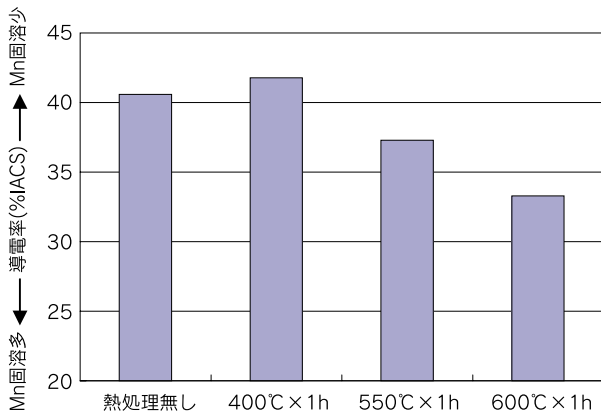


図5 実験材の導電率(固溶Mn量の影響)
Fig.5 Electrical conductivity of specimens (Effect of Mn solid solution content).

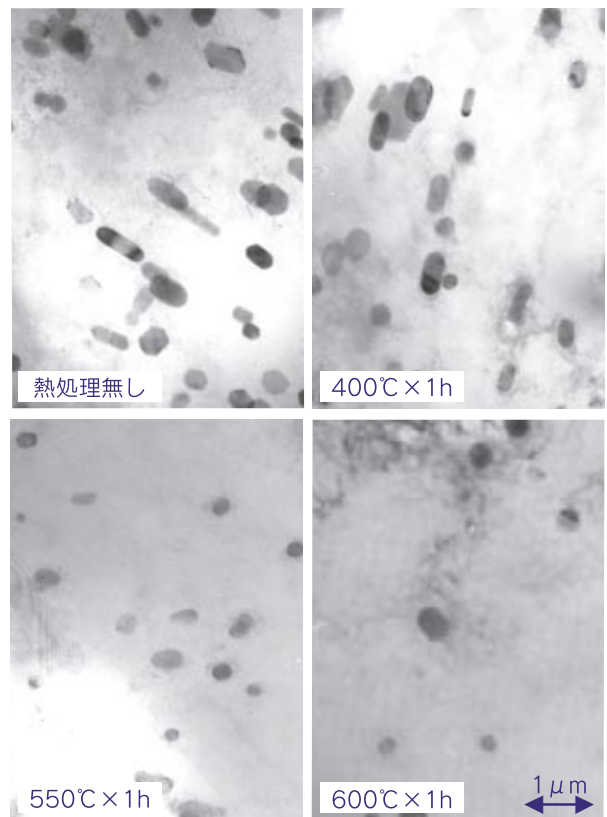


図6 熱処理後の熱延板のTEM像(固溶Mn量の影響)
Fig.6 TEM micrographs of hot-rolled sheet specimens after heat treatment (Effect of Mn solid solution content).

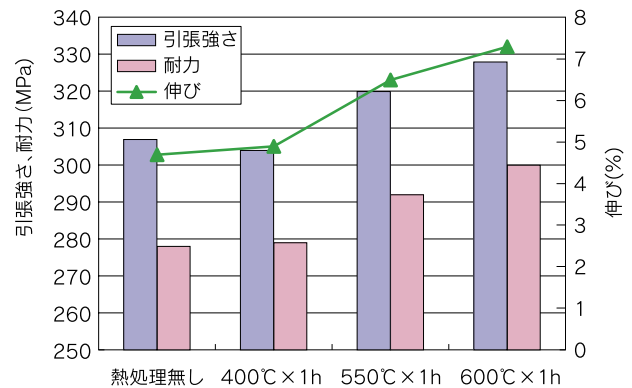


図7 実験材の機械的性質(固溶Mn量の影響)
Fig.7 Mechanical properties of specimens (Effect of Mn solid solution content).

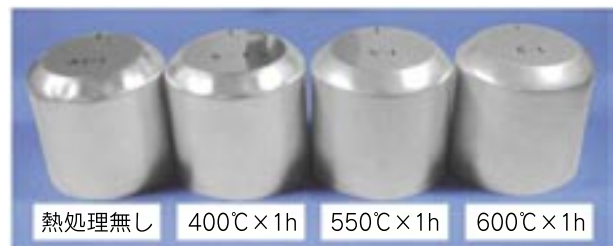


図8 再絞り缶の外観写真(固溶Mn量の影響)
Fig.8 Appearance of redrawn cup (Effect of Mn solid solution content).

耐ボトムしわ性が良好である。図10には各実験材のn値のひずみ量依存性を示すが、熱処理温度が高くMn固溶量が多いものは高いn値を示している。n値自体は冷間

圧延率が非常に高いため、値としては非常に低いところでの変化ではあるが、耐力が20MPaも上昇しているにもかかわらず、耐ボトムしわ性が著しく向上する事は興味深い。

3.2 Mn析出物の分布状態の影響

Mn固溶量は一定として析出物の分布状態のみを変え、400℃×1hの一段熱処理と、550℃×12h+400℃×1hの二段熱処理の二種類の熱処理をおこなった(図3)。これは、二段目の温度を同じ400℃とすることで、Mn固溶量を揃えようとしたものである。

その結果、導電率はいずれも41.8%IACSであり、Mn固溶量はほぼ同等の水準にすることができた。図11には熱処理後の透過電子顕微鏡による析出物観察結果を示す。一段熱処理材と二段熱処理材はほぼ同等のMn固溶量であるが、二段熱処理材の方が析出物の数が少なく比較的大きな析出物が粗に分布する状態となっている。

図12には引張試験結果を示す。強度については二段熱処理材の方がやや低めになっていた。図13にはボトムしわ高さの評価結果を示す。二段熱処理材の方が耐ボトムしわ性は良好であった。図14にはn値のひずみ量依存性を示すが、わずかに二段熱処理材の方がn値は高めになる傾向があった。これについては6000系のO材で

報告されているような微細析出物が転位の局在化を促進し、加工軟化しやすくなるような現象⁵⁾が関与している可能性も考えられるが、今回の実験材のような超硬質材ではさほど明確ではなかった。また、耐ボトムしわ性に関しても、二段熱処理材の耐力がやや低くなっているため、必ずしも析出物の分布だけを反映した実験とはなっていない。

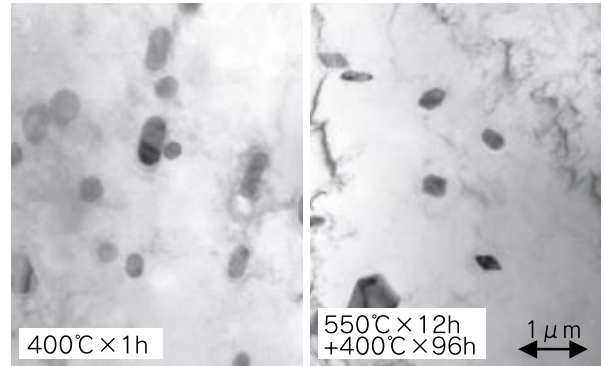


図11 熱処理後の熱延板のTEM像(析出物分布の影響)
Fig.11 TEM micrographs of hot-rolled sheet specimens after heat treatment (Effect of distribution of Mn precipitates).

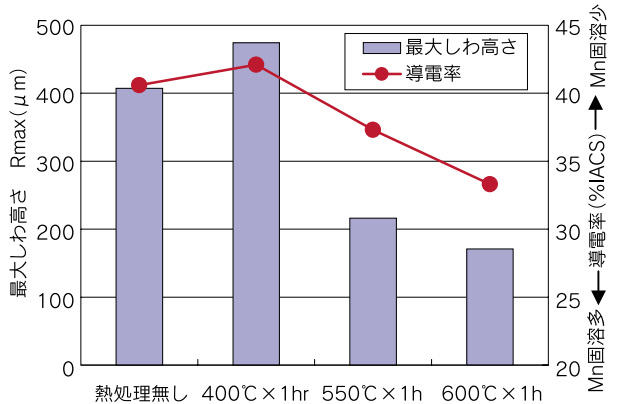


図9 ボトムしわ高さに及ぼすMn固溶量の影響
Fig.9 Effect of Mn solid solution content on bottom wrinkling.

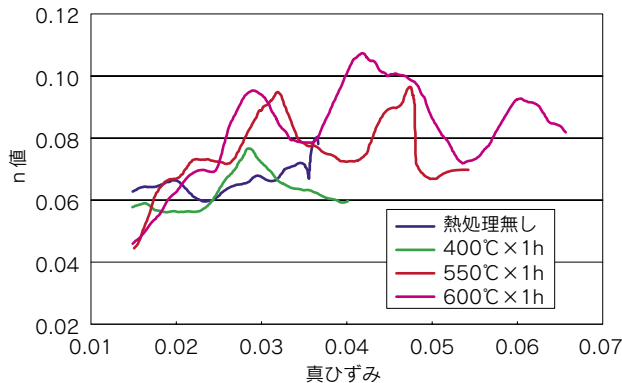


図10 n値のひずみ量依存性に及ぼすMn固溶量の影響
Fig.10 Effect of Mn solid solution content on n-value.

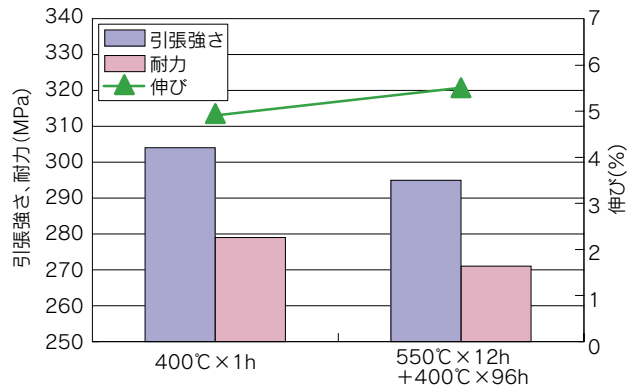


図12 実験材の機械的性質(析出物分布の影響)
Fig.12 Mechanical properties of specimens (Effect of distribution of Mn precipitates).

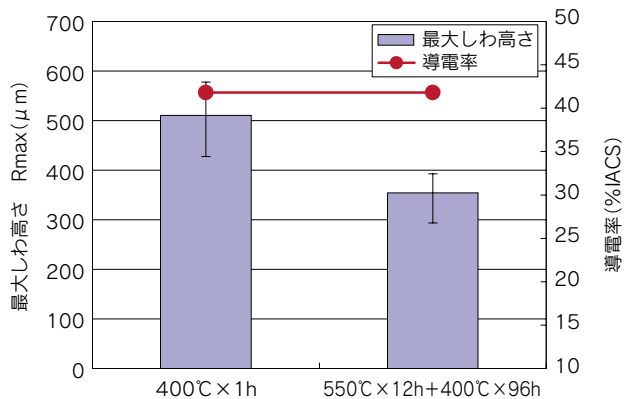


図13 ボトムしわ高さに及ぼす析出物分布の影響
Fig.13 Effect of distribution of Mn precipitates on bottom wrinkling.

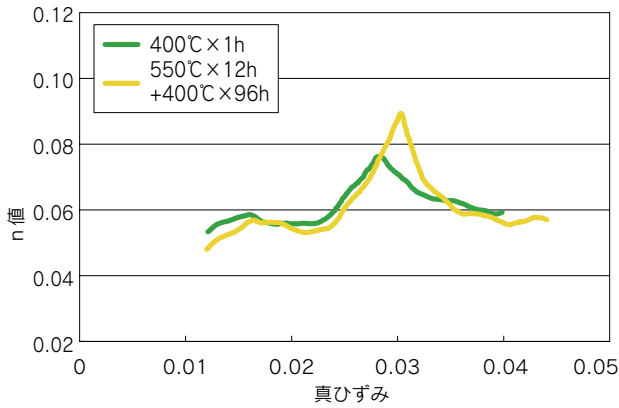


図14 n値のひずみ量依存性に及ぼす析出物分布の影響
Fig.14 Effect of distribution of Mn precipitates on strain dependence of n-value.

3.3 耐ボトムしわ性とn値の関係

上述のようにMnの固溶析出状態を変化させる事で耐ボトムしわ性が変化する事が示唆された。特にMn固溶量の増大により高強度のまま耐ボトムしわ性の改善ができることは、冒頭に述べた薄肉高強度化への対応としては非常に都合が良い。

一般的にはボトムしわは成形条件との相関が非常に高いことが知られており、ボトムしわを低減する成形条件の方向としては、

- ・カップホルダ圧の上昇
- ・工具と材料間の摩擦係数の増大
- ・再絞りダイスのRを小
- ・再絞り比の増大

が挙げられる。これらはいずれも成形力を増し、再絞り缶成形時のテーパ部の張力を増す方向といえる。実際にカップホルダ圧のボトムしわ高さへの影響については、水谷らは成形力を増加させることで、再絞り缶のテーパ部における円周方向の圧縮ひずみを軸方向のひずみへ転換しボトムしわが低減されるとしている³⁾。

素材の機械的性質の影響としては、一般的に耐力の増加は耐ボトムしわ性を悪化させると言われている。耐力が高い場合は再絞り時にテーパ部への材料の流れ込みが大きくなり、より高い圧縮応力を発生させるものと考えられる。n値に関してはshenによる解釈もあるが¹⁾、むしろ水谷らの報告にあるように成形力の増大との相関も考えられる³⁾。例えば一般的に安定化焼鈍により耐ボトムしわ性は向上することが知られているが、この時には耐力の低下と回復に伴う加工硬化性の増大、さらには時効硬化による加工硬化性の増大が伴っているものと考えられる。この様に安定化焼鈍を施した場合はいずれもボトムしわ発生抑制に有利な状態となっている。これに対し3.1項の実験材ではMn固溶量の増大により耐力の上昇、加工硬化性の増大が同時に起きている。この場合の再絞り缶のテーパ部のひずみがどのようになっている

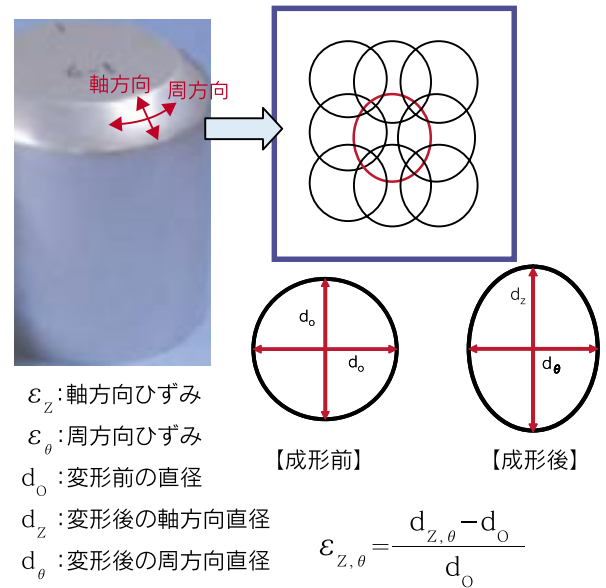


図15 ひずみ量測定の様式図
Fig.15 Schematic of measurement of strain.

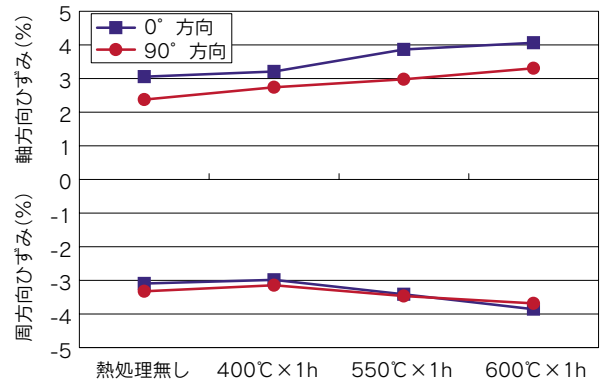


図16 ひずみ量測定結果
Fig.16 Strain measurement at the bottom of redrawn cup.

のか調査した。

図15に測定方法の様式図を示す。スクライブドサークルをエッチングにより描き、3.1項と同一条件下で成形を行い、変形量を投影機にて測定した。測定は圧延方向に対し0°位置と90°位置で行っている。図16に測定結果を示す。軸方向のひずみはn値が高く耐ボトムしわ性が良好であった実験材の方が大きい傾向が見られた。縮径化による肉余りを軸方向に変形する事で吸収できていると思われる。

従来、強度が高いほど耐ボトムしわ性には不利と考えてきていたが、固溶Mn量の増加のような強度とともに加工硬化性が増大する手段であれば上記のような状態が実現でき、高強度化と耐ボトムしわ性が両立できる事が示唆される。

このボトムしわ現象については円錐絞り時のボディしわと本質的には同様であると考えられ、n値と同様にr値の影響も大きい可能性がある。今回の実験材については集合組織的には大差は無く、よってr値も大きな変化

はしていないものと考えられるが、今後 r 値の影響等についても検討していきたい。

以上のことから、加工硬化性の変化とボトムしわの変化について図17を用いて整理すると、下記のように考えられる。すなわち、材料の加工硬化性が増すことにより再絞り工程におけるリドローダイのR部付近での曲げ・曲げ戻し抵抗が増すため、成形力が増加する。この成形力がテーパ部形成時の張力となり、縮径による余肉分が軸方向に変形する事で吸収される事になり、結果としてボトムしわが抑制されるものと考えられる。このような考え方は成形条件を変化させ、テーパ部形成時の張力を増すことでボトムしわが抑制される機構と全く同様であると考えられる。

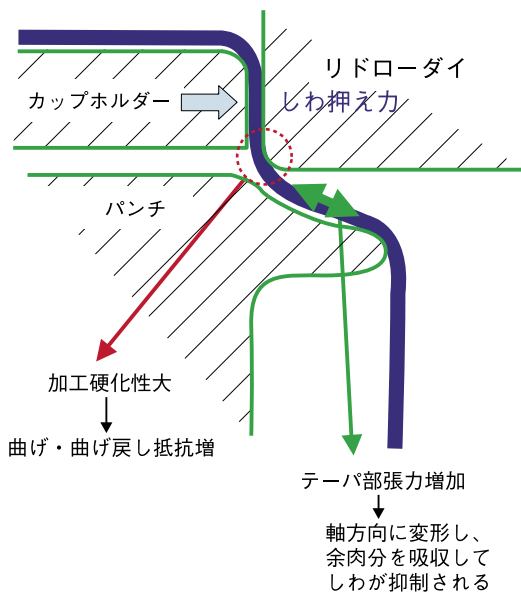


図17 再絞り工程の成形過程の模式図
Fig.17 Schematic of redrawing process.

当然ながら過度の成形力の増大(=過度の加工硬化性の増大)は、成形条件の変更の場合と同様に再絞り割れを引き起こす事になり、さらにはこの後の多段しごき性にも悪影響を与える事になる。よって成形条件に応じた加工硬化性のコントロールが重要である。

以上の知見に基づき、当社では合金成分、製造プロセスの制御により、適度に加工硬化性を増大させたボトムしわ性の良好な高強度缶胴用材を開発しており、製缶メーカー殿より好評価を頂いている。

4. おわりに

缶胴用3004合金板のMnの固溶析出状態を変化させて素材の加工硬化性、耐ボトムしわ性について評価した。さらに耐ボトムしわ性が変化したサンプルについて、しわ発生部のひずみ量の測定を行った。結果は以下の通り

である。

- (1) 熱処理により固溶Mn量を変化させた場合、固溶Mn量の増加と共に素材の耐力、加工硬化性が増加した。それに伴い耐ボトムしわ性は著しい向上を示した。
- (2) 同一Mn固溶量で析出物分布を変化させた場合、析出物分布を大きくかつ疎に分布させた方がわずかながら高い加工硬化性を示し、耐ボトムしわ性も向上した。
- (3) 固溶Mn量の増加と共に、再絞り缶のテーパ部の軸方向のひずみ量が増加した。これにより円周方向の圧縮ひずみが緩和されているものと考えられる。
- (4) 上記現象は、加工硬化性の増大に伴い、リドローダイR部近傍の曲げ・曲げ戻し抵抗が増大し、成形力が増加したためと考えられる。これは成形条件を変化させて再絞り缶のテーパ部形成時における張力を増加させてボトムしわを低減させた場合と同様な効果が起きているものと思われる。
- (5) 上記の知見に基づき加工硬化性を増大させた耐ボトムしわ性の良好な高強度缶胴用材を開発しており、製缶メーカー殿より好評価を頂いている。

参考文献

- 1) T.H.Shen: Aluminum Alloys for Packaging, edited by J.G.Morris et al: TMS,(1993).
- 2) W.M.Betts: Aluminum Alloys for Packaging 2, edited by J.G.Morris et al: TMS,(1996).
- 3) 水谷博之, 土田信, 横井洋: 軽金属学会第91回秋期大会講演概要, (1996), 325.
- 4) 斉藤洋: 軽金属学会第67回シンポジウム, 飲料容器の現状と将来, (2002), 38.
- 5) 内田秀俊, 平野清一, 吉田英雄: 住友軽金属技報, 38(1997), 1.



鈴木 覚 (Satoshi Suzuki)
技術研究所



藤田 和子 (Kazuko Fujita)
技術研究所