
面内異方性の小さいツーピース缶用高強度・極薄鋼板

Ultra-Thin-Gauge and High-Strength Tin Mill Blackplates with Less Planar Anisotropy of r -Value for Two-Piece Can Use

久々湊 英雄(Hideo Kuguminato) 阿部 英夫(Hideo Abe) 小野 高司(Takashi Ono)
登坂 章男(Akio Tosaka) 泉山 禎男(Yoshio Izumiyama) 大川 順弘(Yoshihiro Ohkawa)

要旨：

ツーピース缶用鋼板として、高強度、極薄であるとともに、深絞り性 (r 値) に優れ、かつ面内異方性の小さいDRD缶 (drawn and redrawn can) およびDWI缶 (drawn and wall ironed can) 用鋼板を開発した。DRD缶用TFS(調質度DR8)は、C量を低減し、CTは中温、冷延圧下率は1回目、2回目とも低く押さえることにより深絞り性 (r 値 1.1以上) とノンイアリング性を両立させた。また、DWI缶用鋼板 (調質度T4) は連続焼鈍を用い、固溶N量を多く残存させ、C量を適切な範囲に調整し、CTを中温に仕上げることにより、深絞り性 (r 値 1.3以上) とノンイアリング性を両立させるとともに、ふずみ時効現象を利用し、成形後の熱処理で硬質化できる。

Synopsis :

The authors have developed sheet steels for two-piece cans, drawn and redrawn (DRD) cans and drawn and wall ironed (DWI) cans which have ultra-thin gage for high strength use, excellent deep drawability expressed by high r -value, and less planar anisotropy. Both good drawability (mean r value is higher than 1.1) and the non-earring property can be given to tin free steels (TFS) with a temper grade of DR8 for the DRD can be using low carbon content, controlling the coiling temperature during the hot rolling process to be adequate, and employing lower cold rolling reductions in both cold rolling processes before and after continuous annealing. Steels for the DWI can use with a temper grade of T4 have high nitrogen content and are processed in the continuous annealing line. The good deep drawability expressed by the average r -value of more than 1.3 and non-earring properties of the steels are achieved by adjusting carbon content in a proper range and controlling the coiling temperature during the hot rolling process to be adequate. The steels can be hardened by baking after cup forming due to strain aging caused by solute atoms.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Ultra-Thin-Gauge and High-Strength Tin Mill Blackplates with Less Planar Anisotropy of r -Value for Two-Piece Can Use



久々湊 英雄
Hideo Kuguminato
千葉製鉄所 管理部缶
用鋼板管理室 主査(課
長)



阿部 英夫
Hideo Abe
鉄鋼研究所 鋼材研究
部長



小野 高司
Takashi Ono
千葉製鉄所 管理部薄
板管理室



登坂 章男
Akio Tosaka
鉄鋼研究所 薄板研究
部薄板研究室 主任研
究員(課長補)



泉山 禎男
Yoshio Izumiya
千葉製鉄所 管理部薄
板管理室長(部長)



大川 順弘
Yoshihiro Ohkawa
千葉製鉄所 管理部缶
用鋼板管理室長(部長)

1 緒 言

缶詰容器は構造方式によりスリーピース缶とツープース缶に分類される。スリーピース缶は、ぶりきやティンフリースチール(chromium plated tin free steel, TFS, JIS G3315)の缶用鋼板をロールフォーミングで円筒状に加工した後、各種接合法(はんだ法、ナイロン接着法、電気シーム溶接法)で接合した胴部および底部と蓋部の3部品で構成された容器である¹⁾。一方、ツープース缶はプレス加工で一体成形された胴部と底部および、蓋部の2部品で構成された容器である²⁻⁴⁾。そのプレス加工法によって、SD缶(shallow-drawn can), DRD缶(drawn and redrawn can), DTR缶(drawn and thin redrawn can)^{5,6)}, DWI缶(drawn and wall ironed can)がある。

ツープース缶はスリーピース缶に比較して、

- (1) 鋼板の使用量が節減できる。

要旨

ツープース缶用鋼板として、高強度・極薄であるとともに、深絞り性(r 値)に優れ、かつ面内異方性の小さいDRD缶(drawn and redrawn can)およびDWI缶(drawn and wall ironed can)用鋼板を開発した。DRD缶用TFS(調質度DR8)は、C量を低減し、CTは中温、冷延圧下率は1回目、2回目とも低くおさえることにより深絞り性(\bar{r} 値1.1以上)とノンイアリング性を両立させた。また、DWI缶用鋼板(調質度T4)は連続焼鈍を用い、固溶N量を多く残存させ、C量を適切な範囲に調整し、CTを中温に仕上げることにより、深絞り性(\bar{r} 値1.3以上)とノンイアリング性を両立させるとともに、ひずみ時効現象を利用し、成形後の熱処理で硬化化できる。

Synopsis:

The authors have developed sheet steels for two-piece cans, drawn and redrawn (DRD) cans and drawn and wall ironed (DWI) cans which have ultra-thin gage for high strength use, excellent deep drawability expressed by high r -value, and less planar anisotropy.

Both good drawability (mean \bar{r} value is higher than 1.1) and the non-earring property can be given to tin free steels (TFS) with a temper grade of DR8 for the DRD can by using low carbon content, controlling the coiling temperature during the hot rolling process to be adequate, and employing lower cold rolling reductions in both cold rolling processes before and after continuous annealing.

Steels for the DWI can use with a temper grade of T4 have high nitrogen content and are processed in the continuous annealing line. The good deep drawability expressed by the average r -value of more than 1.3 and non-earring properties of the steels are achieved by adjusting carbon content in a proper range and controlling the coiling temperature during the hot rolling process to be adequate. The steels can be hardened by baking after cup forming due to strain aging caused by solute atoms.

- (2) 缶体重量の軽量化が容易である。
(3) 鋼板から缶体まで能率的に連続生産が可能である。
(4) 胴部に接合がないので蓋との巻き締めが単純である。
などの優れた特徴⁴⁾をもち、それらを活かして伸びてきた。一方、缶詰の需要は国民所得の向上や自動販売機の普及とともに著しく拡大し、生産量も飛躍的に伸びてきた⁷⁾。

このような状況のもとで、缶詰容器に対して食品の保存という基本性能の他に、軽量化のための技術開発が積極的に行われた⁸⁻¹⁰⁾。

* 平成4年10月19日原稿受付

例えば、缶詰容器の主要部をなす胴部の薄肉化^{4,11)}や、蓋部を小径化するためのネックイン加工¹²⁾の活用である。

缶用鋼板は、製法と機械的性質により、次のような3種類に分類され、用途により使い分けられている。

- (1) 低炭素 Al キルド鋼を素材に冷間圧延後、箱焼鈍を施す深絞り加工性に優れた非時効性の軟質鋼板。
- (2) 素材は同じで冷間圧延後、連続焼鈍を施すひずみ時効硬化性を有する硬質鋼板。
- (3) 素材は同じで冷間圧延後、連続焼鈍を施し、その後、数十パーセントの圧下率で2回目の冷間圧延を行い、板厚を薄くするとともに、加工硬化を施した高強度・極薄鋼板¹³⁾。

再絞りで成形される DRD 缶にも薄肉化の目的で2回圧延鋼板が使われるようになったが、2回圧延を行うと、プレス加工後のカップの高さが不揃いになる、いわゆる耳発生が大きくなり、改善が必要であった。また、深絞り、しごき加工で成形される DWI 缶を薄肉化するためには、飲料に含まれる炭酸ガスの内圧に耐えられる缶底の耐内圧強度および、缶詰が運搬中に潰れないための軸荷重強度を確保する必要があった¹⁴⁾。そのために缶底の形状を工夫して強度の増加を図るとともに、高強度薄鋼板が適用されたが、耳発生が大きくなるという問題があった。また、缶高さの大きい飲料缶に用いられるので、加工時は少しでも軟質で加工性に優れ、その後の熱処理で硬質化が進むのが望まれた。

以上のように、薄肉化のために製缶法の改善が積極的に進められ、鋼板には缶強度を維持でき、プレス加工性にも優れた高強度・極薄材が求められた。

本論文では代表的なツーピース缶として、Table 1 に示す特性が必要で、2回圧延 TFS が使われる DRD 缶と1回圧延ぶりが使われる DWI 缶をとりあげ、高強度・極薄鋼板を開発した結果について述べる。

Table 1 Usage and required materials for DRD and DWI cans

	DRD cans		DWI cans	
	Conventional	Light-weight	Conventional	Light-weight
Usage	Tuna cans Pet food cans		Beverage cans	
Can-manufacturing methods	Drawn & redrawn		Drawn & wall ironed	
Plating methods	Chromium plated tin free steel		Matte finish tinplate with an unmelted tin coating	
Required materials				
Temper grade	T4	DR8	T1	T4
Rockwell hardness T scale (HR30T)	61	73	49	61
Proof stress (MPa)	340	550	250	340
Thickness (mm)	0.21	0.17~ 0.20	0.30	0.24
\bar{r} value	≥ 1.1	≥ 1.1	≥ 1.3	≥ 1.3
Δr	0 (aim)	0 (aim)	0 (aim)	0 (aim)

2 DRD 缶用高強度・極薄鋼板の開発

DRD 缶はツーピース缶なので真空状態を保持しやすく、缶の内圧差に強い。そのため食品を充填後、真空巻締、レトルト殺菌処

理を施す用途に適しており、ツナ缶やペットフード缶などの高さの低い缶に使われている。

従来は、板厚 0.21 mm、調質度 (JIS G3315) T4 (ロックウェル T 硬さ (HR30T) 61, 耐力 340 MPa) のひずみ時効性を有する硬質な TFS が使われていた。現在は製缶技術の向上にともなって、2回圧延製品の高強度・極薄 TFS、板厚 0.17~0.20 mm, DR8 (HR30T 73, 耐力 550 MPa) が使用されている。DRD 法では塗料密着性に優れた TFS に事前に塗装を施し、塗膜の潤滑効果を利用し、連続製缶されている³⁾。したがって、DRD 缶に適した鋼板としては、少ない回数での絞り加工でカップが成形できるように、深絞り性の指標である r 値の高いものが要求された。しかしながら、高 r 値であっても極薄鋼板のために曲げ剛性が低下し、絞り加工においてしわが発生しやすくなった。さらに、しわを抑制するために、しわ押さえ力を大きくすると破断しやすくなるので、必要な缶高さを1回のみの深絞りで仕上げずに、再絞りで仕上げようになった。この結果、 \bar{r} 値は約 1.1 以上と、とくに高いものは要求されず、むしろ下記の理由により、耳発生の小さいこと、すなわち r 値の面内異方性 (Δr) の小さいノンイアリング性が必要になった¹⁵⁻¹⁷⁾。

薄鋼板を円板に打ち抜いて、円筒深絞り加工でカップを成形する際の変形は、単純には半径方向の伸びと円周方向の圧縮である。とくに外周部では著しく圧縮変形し、その変形分は板厚および半径方向へのひずみとなって現れる。 r 値の定義は単軸引張状態下における板幅方向と板厚方向のひずみ比である。 Δr の大きい鋼板が絞り加工を受けると、 r 値の低い方向は高い方向に比べて圧縮変形が小さく、板厚の変形が大きいため、材料の流入が進み耳の谷部を形成する。それに対し r 値の高い方向は、圧縮変形が大きく、材料流入が進まないため耳の山部を形成する。また、円周方向の板厚変動が大きく、円筒径の精度が悪くなる。したがって、 Δr の大きい鋼板では耳が大きくなり、必要な缶高さが得られなくなるので、元の円板径を大きくせざるを得ず、歩留りが悪くなる。また、絞り加工で耳部が強圧下されてナイフ・エッジ状になり、鉄片が生じ、それが金型に付着して缶表面を傷めるなどの問題が発生しやすくなる。さらに円筒径の精度が悪くなると、ネックイン加工で円周座屈 (しわ) が発生しやすく、ネックイン加工率を大きくすることが難しかった⁴⁾。

r 値に影響を及ぼす因子としては (1) 炭化物や窒化物など析出物の再結晶過程における析出挙動や分散状態¹⁸⁻²²⁾、(2) 熱間圧延温度²³⁾、(3) 冷間圧延の圧下率²³⁾、(4) 焼鈍条件²⁴⁻²⁶⁾ などがある。 r 値の向上、 Δr の低減には、これらの因子を最適化することが重要であるが、缶用鋼板の製造においては板厚が薄いために、次のような制約がある。 r 値に大きく影響を及ぼす冷間圧延の圧下率を最適にするため、熱延仕上げ板厚の選択は重要である。しかし、製品板厚が薄いので冷延圧下率を能力上限の約 90% (深絞り用冷延鋼板では約 75%) に高くしても熱延仕上げ板厚が 2~3 mm と薄くなる。その結果、熱間圧延時間が長くなり、圧延中の温度低下が大きくなって、材質が不均一になりやすくなる²⁷⁾。したがって、冷延圧下率以外の因子で深絞り性を向上させることが望ましい。熱間圧延巻取温度 CT (coiling temperature) を高温にすれば、再結晶、粒成長が容易になり、深絞り加工性の向上に好ましい (111) 再結晶集合組織を発達させることができる²⁸⁾。しかし、CT を高温にするとコイル前後端部の温度低下にとまらぬコイル内部との材質差が大きくなりやすくなる。したがって、CT は熱延板の全幅・全長での材質の均一性が安定して確保できる中温以下で、そのうえ、できるだけ結晶粒径を大きくできる温度が必要である。また、連続焼鈍炉においては、板厚が薄く通板が難しいので、焼鈍温度はできるだけ低温が望ましい²⁹⁾。

2.1 カッピングテスト法の確立

耳発生の大きさを直接測定し、鋼板の評価を行うためには、ツーピース缶相当のカップにプレス成形することが不可欠である。しかし、従来の軟質鋼板を対象に行ってきたカッピングテスト条件で高強度・極薄鋼板を成形しても、破断やしわが発生し、耳の大きさを評価するのに必要な十分な高さのカップをつくるのが難しかった。

そこで、板厚 0.18 mm、調質度 DR8 の TFS を用いてカッピングテスト条件の検討を行った。この結果、Table 2 に示す深絞り加工条件であれば、絞り比 (D_B/d_p) 1.8 のカップを成形することが可能になり、耳発生の評価も正当に行えることを見出した。おもな改良点は (1) 絞り成形中に、しわ押さえ力を変化させる。(2) ダイとポンチのクリアランスを適正に設定する³⁰⁾、(3) 潤滑剤を選定し、塗布量を適正にする、の 3 点である。しわ押さえ力についてはフランジしわの発生を抑制するのに必要な計算上のしわ押さえ力を参考にした³¹⁾。その例を Fig. 1 に示す。しわ押さえ力を絞り過程で連続的に変化させることが望ましく、とくに成形ストロークの終期に低減しないと最後までダイス面上に残った耳部に過度のしわ押さえ力が集中し、その場所の耳のみが異常に大きくなるのがわかった。なお、実用的には 2~3 段の切替え程度で十分で、以下の絞り成形評価はこの条件で行った。

Table 2 Conditions of cupping test for evaluating double cold-reduced tin free steel

Diameter of die cavity	d_d (mm)	33.45
Radius of die profile	r_d (mm)	3.00
Punch diameter	d_p (mm)	33.00
Radius of punch profile	r_p (mm)	4.50
Clearance/Thickness	cl/T_0	1.25
Diameter of initial blank	D_B	59.00
Lubricant		High viscosity mineral oil
Blank holding force ^a	BHF (N)	1 962~6 867

^a BHF is controlled as shown in Fig. 1

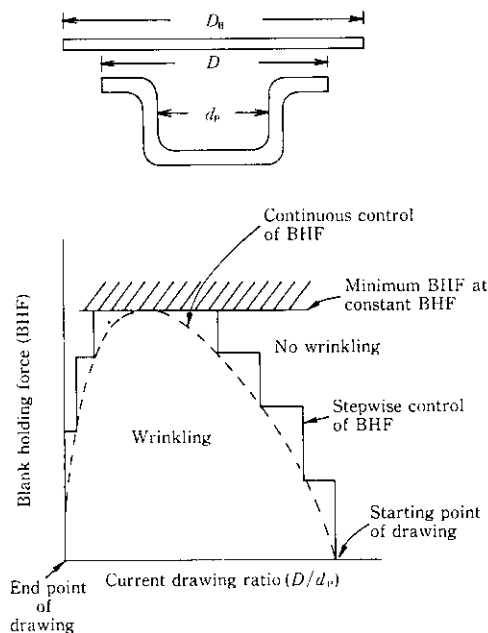


Fig. 1 Blank holding force required to avoid flange wrinkle

2.2 r 値測定法の検討

一般に、薄鋼板の r 値は塑性ひずみ法で測定される。しかし、伸びが約 10% 以下と小さい高強度・極薄鋼板には適用できない。

そこで、測定が簡単で迅速に行える固有振動法 (JIS G3135) の適用³²⁾を試みた。この測定法は短冊状試験片に励振コイルで高周波を印加し、検出コイルで周波数 (f) を検出し、 f からヤング率 (E) の面内各方向の平均値 (\bar{E}) と異方性 (ΔE) を求め、つぎの実験回帰式から \bar{r} と Δr を算出する。なお、 ΔE は圧延方向に対して 0° (L)、 90° (T) および 45° (D) 方向で E を測定し、下記の式により求めた。

$$\bar{r} = \frac{101.44}{(\bar{E} - 38.83)^2} - 0.564$$

$$\Delta r = 0.031 - 0.323 \Delta E$$

$$\text{ただし、} \bar{E} = (E_L + E_T + 2E_D) / 4$$

$$\Delta E = (E_L + E_T - 2E_D) / 2$$

この測定法で求めた Δr とカッピングテスト法でつくった各カップに生じた平均耳高さ $\Delta \bar{H}$ (定義は Fig. 2 に示す) の関係を Fig. 3

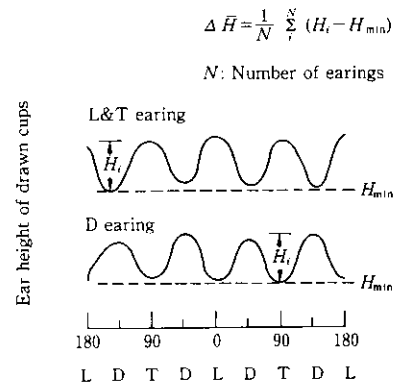


Fig. 2 Definition of the mean ear height ($\Delta \bar{H}$) of drawn cups (0° (L), 90° (T), and 45° (D) directions to the rolling direction)

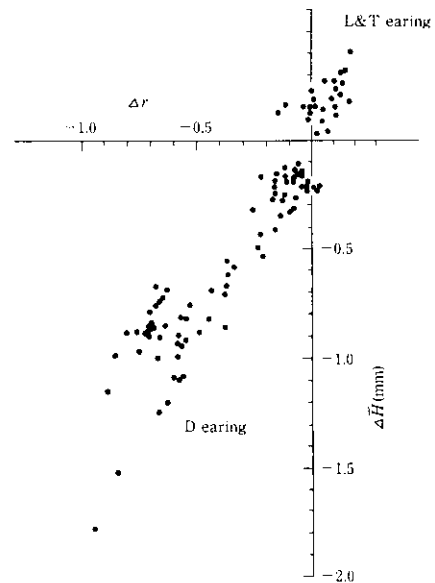


Fig. 3 Relation between Δr -value measured by modul- \bar{r} drawability tester and the mean ear height of drawn cups

に示す。なお耳高さは、耳の発生方向を Δr と対応させるため、圧延方向に対して 0° 方向に発生したものをL耳、 90° 方向をT耳とし正值で、 45° 方向に発生したものをD耳とし負値で読み取った。図から明らかなように、 Δr は $\Delta \bar{H}$ とよく対応しており耳発生の評価に十分適用できることがわかった。したがって、以下の \bar{r} 値と Δr の測定にこの方法を採用した。

2.3 耳発生に及ぼす熱間圧延温度の影響

素材に低炭素 Al キルド鋼を用い、熱間圧延における熱延仕上温度 FDT (finishing delivery temperature) を低温 (A_{r3} 変態温度点以下) と高温の2水準、CT を低温と中温の2水準に変化させる実験を行った。1回目の冷間圧延で板厚 0.244 mm に薄くした後、連続焼鈍を施した。2回目の冷間圧延で加工硬化を施し板厚 0.183 mm (圧下率 25.0%) で原板を仕上げ、TFS とした後、評価を行った。

Table 3 Relation between hot rolling temperature, mechanical properties and morphology of ferrite grain in double cold-reduced materials

Hot rolling temperature		Mechanical properties				Ferrite grain	
FDT (°C)	CT (°C)	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HR30T)	G.S. No.	Aspect ratio
770	545	0.183	573	0	77	11.5	11.3
770	618	0.183	560	3	76	11.0	10.7
850	550	0.184	596	1	77	11.3	11.5
845	620	0.182	605	2	78	10.7	11.0

Table 3 に熱間圧延温度 (FDT, CT) と引張特性、硬さおよび結晶粒径との関係を示す。Fig. 4 に、 \bar{r} 値、 Δr 、および $\Delta \bar{H}$ に及ぼす熱間圧延温度の影響を示す。Photo 1 に成形したカップの外観を示す。また、 r 値の面内異方性に関する代表的な結晶面として、圧延面に平行な (222)、(211)、(200) および (110) の4面のX線回折強度比を測定した結果を、熱間圧延温度に対してプロットしたものを Fig. 5 に示す。結晶粒径の大きさは FDT, CT で異なるが、引張強度や硬さへの影響は小さい。これは、2回圧延による加工硬化が機械的性質を大きく支配しているためと考えられる。 r 値についてみると FDT が高温で、CT が中温の条件で \bar{r} 値が大きくなり、なおかつ Δr 、 $\Delta \bar{H}$ が小さい。このことは FDT が高温で、CT が中温の条件で (222) 面強度が増大し、(110) 面強度が減少するという集合組織の明確な傾向と対応している。カップの外観をみると FDT および CT が低温のものは耳の発生が大きく、カップ壁のしわも多いが、FDT が高温で、CT が中温のものは耳、しわともに少なく美しく仕上がった。

r 値が熱間圧延温度により改善された理由は以下のように考えら

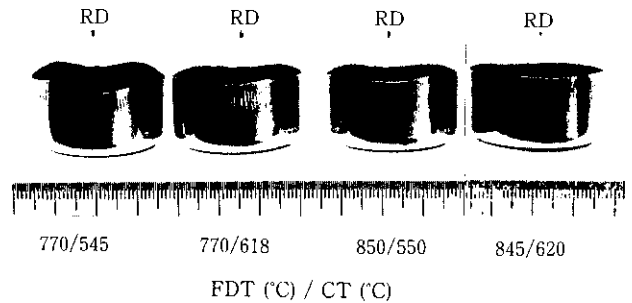


Photo 1 Appearance of the drawn cups

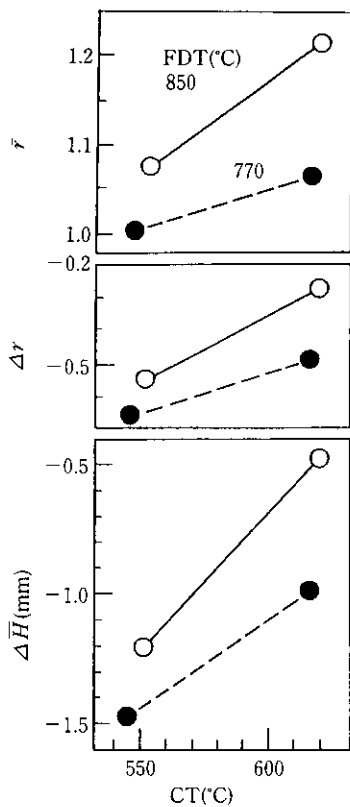


Fig. 4 Effect of the hot rolling temperature on \bar{r} -values, planar anisotropies (Δr) and the mean ear height ($\Delta \bar{H}$) of drawn cups

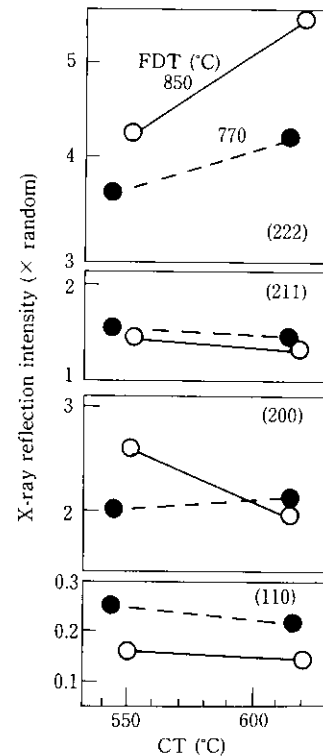


Fig. 5 Relation between hot rolling temperatures and the textures in double cold-reduced materials

れる。FDTが A_{r3} 変態点以下の場合、熱延板で{110}〈001〉方位が強く、これを冷間圧延後、焼鈍を行うと{110}方位が残り、{111}方位の発達を阻害する²³⁾。しかし、FDTが A_{r3} 以上の高温であれば、熱延板でランダム方位に近づき、焼鈍で{111}方位が発達し、{110}方位が抑制されるため r 値が向上し、 Δr および $\Delta \bar{H}$ が小さくなる。また、CTを中温にすると、炭化物が凝集し、結晶粒径が大きくなるとともに、AINの析出も促進されるので、固溶C、Nが減少し、地鉄が清浄化される。その結果、冷延、焼鈍後の{111}方位が発達したと考えられる。

2.4 耳発生に及ぼす冷延圧下率の影響

2回目の圧延は平坦度および、板面粗度を調節するとともに、高強度に仕上げるため、調質圧延としては高圧下率で行われる。 r 値に及ぼす焼鈍前の冷延圧下率の影響はよく知られている²³⁾。しかしながら、焼鈍後に行う2回目の冷延圧下率と r 値の関係についてはよく知られていない。2回目の冷延圧下率によって r 値が変化することが予想された。そこで、DRD任用として、耳発生の小さいノンイアリング性鋼板を得るために、1回目と2回目の冷延圧下率の影響を調査した。

耳発生を改善する目的でC量を低減したAlキルド鋼を用い、FDTを高温、CTを中温の条件で熱間圧延を行った。1回目の冷延圧下率を88%と86%の2水準で行った。2回目の冷延圧下率は0~40%の範囲で変化させた。また、比較のために2回圧延鋼板の板厚仕様から外れるが、1回目の冷延圧下率が70%と低く、箱焼鈍法で仕上げた深絞り用冷延鋼板も用いた。なお、調査項目に耳プロフィールの評価を加えた。

Fig. 6に2回圧延の圧下率と $\Delta \bar{H}$ との関係を、Fig. 7に耳プロフィールの測定結果を示す。2回圧延鋼板の $|\Delta \bar{H}|$ は圧下率が0~20%までわずかに増大するが、25%を超えると顕著に増大した。しかし、1回目の冷延圧下率の低い深絞り用冷延鋼板は、圧下率の増加にともなって、 $|\Delta \bar{H}|$ は減少し、ノンイアリング性に近づく傾向が認められた。

2回圧延鋼板での耳プロフィールは、焼鈍後の状態でD方向に4個の耳が発生し、圧下率が増加しても同じD耳であった。これに対

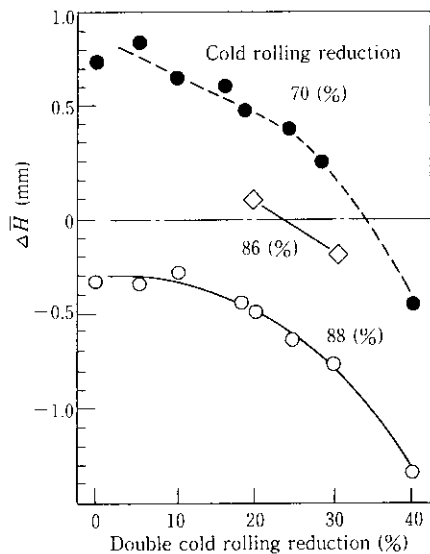


Fig. 6 Relation between double cold rolling reduction of sheets and the mean ear height ($\Delta \bar{H}$) of the drawn cups

し、深絞り用冷延鋼板では焼鈍後の状態でLとT方向に4個の耳が生じ、圧下率の増加にともなってL、T耳が減少し、40%からはD耳が現れた。

主要4面のX線回折強度比と2回圧延の圧下率との関係をFig. 8に示す。2回圧延鋼板では、圧下率の増加にともなって(222)面強度が単調に減少し、(110)面強度も減少した。また、深絞り用冷延鋼板では、2回目の圧延前で(222)面強度が高く2回目の冷延圧下率の増加にともなってさらに、(222)面強度が増加した。一方、(110)面強度は2回目の冷延圧下率の増加により減少した。したがって、耳発生の変化は(222)面強度の変化とよく対応している。また(222)面強度の上昇は、相対的にL、T耳の要因となる{110}

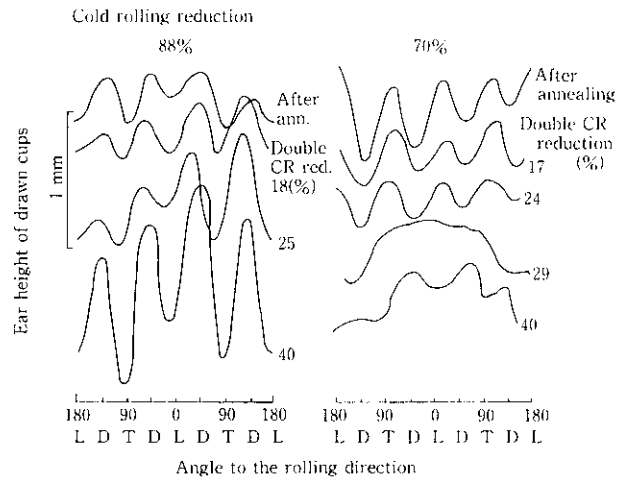


Fig. 7 Relation between the rolling direction, double cold rolling reduction and ear height of the drawn cups

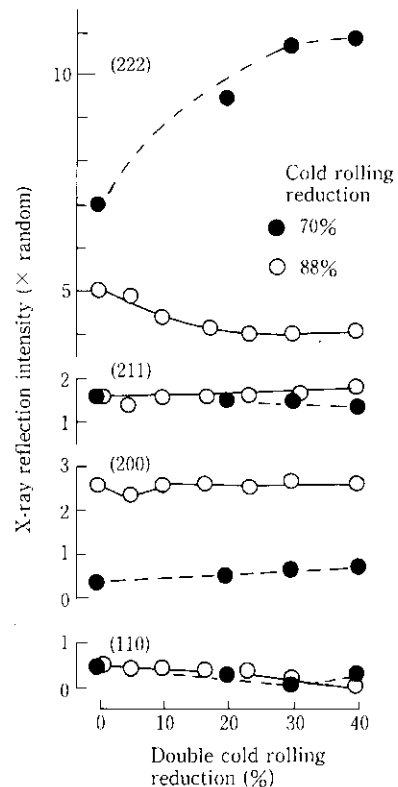


Fig. 8 Relation between the textures and double cold rolling reduction

<001> 方位およびD耳になる {100} <011> 方位の低下をもたらすと考えられる。

Fig. 6 に示すように 2 回圧延鋼板仕様では冷間圧下率を 86% と低くしたもので耳発生が著しく改善された。これは、焼鈍まで見られる L, T 耳と、その後の圧延で生ずる D 耳とが互いに打ち消し合うことによって、ノンイリング性に近づいた結果と考えられる。

ヤング率, r 値およびそれらの面内異方性は、鋼板の集合組織に強く依存することはよく知られている。2 回圧延鋼板について調べた本研究でも、絞り加工で生ずる耳の大きさは集合組織と強い関係があることがわかった。

北川³³⁾ が計算した、単結晶における方位 (Fig. 9 にオイラー角の定義を示す) と r 値との関係を Fig. 10 に、方位とヤング率との関係を Fig. 11³⁴⁾ に示す。高強度・極薄鋼板では、円板から絞り成形を行うに際し、板面内いずれの方向から試片を採取し、 r 値を測定しても、 r 値が変動しない等方的材料が望ましい。{111} 集合組織は r 値が高く、 Δr が小さく、絞り成形を行っても耳が小さくなる最も望ましいものであることがわかる。一方、{110} 集合組織は r 値が零から無限大まで変化するので異方性は著しく大きくなり、好ましくない。しかし、{100}, {110} 集合組織でも、軸方位が板面内にランダムであれば理論上、 r 値も異方性を有しないが、実際には面方位のみ特定し、軸方位のみをランダムにすることは難しい。したがって、{111} 面強度が強く、{110} 面強度の弱いものが耳発生抑制に適している。

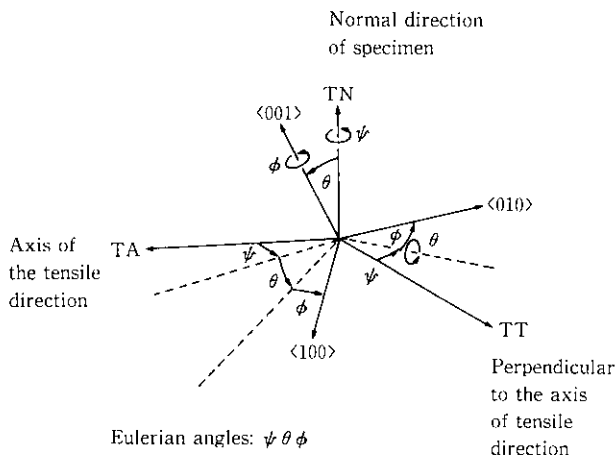


Fig. 9 Definitions of Eulerian angles

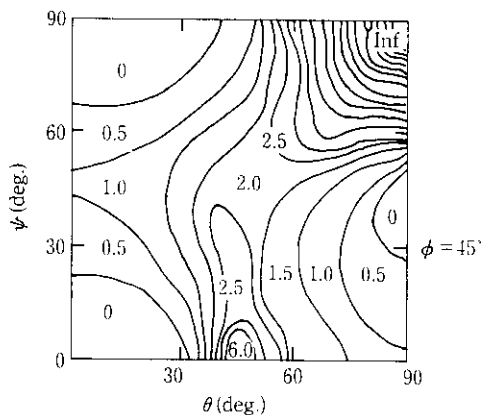


Fig. 10 Relation between orientations and r -values in single crystal of low-carbon steel sheets

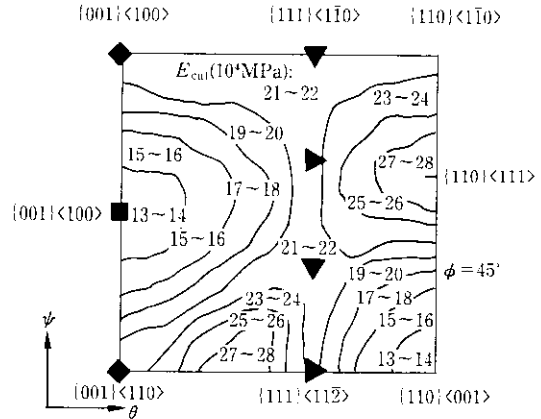


Fig. 11 Relation between orientations and Young's modulus (E_{cat}) in single crystal of low-carbon steel sheets

2.5 DRD 缶への適用

C 量を低減した低炭素 Al キルド鋼を用い、FDT を高温、CT を中温で熱間圧延を行い、さらに冷延圧下率を 1 回目と 2 回目ともに低めに制御することにより、高強度・極薄で、深絞り性とノンイリング性を有する DRD 缶用素材を開発することができた。

本鋼板は、調質度 DR8 (HR30T 73)、耐力 550 (MPa) 以上の高強度で、板厚 0.18 mm の極薄で、そのうえ深絞り性 (r 値 1.1 以上) に優れ、ノンイリング性を備えている。

本素材を用いることにより、従来材に比べ空缶重量で約 14% の軽量化が図れる。

3 DWI 缶用高強度薄鋼板の開発

DWI 缶用鋼板には、絞りとしごき加工性を容易にする目的で、ダル状表面の原板にすずめっき後、硬質な Fe-Sn 合金を生成させないために、すずの熔融処理 (電気すずめっき後、すずを短時間で熔融させ、急冷を施す熱処理) を省略したマット表面仕上げ (matte finish, JIS G3303) のぶりきが使われている。缶高さの大きい飲料缶をつくるために、素材は優れた絞り、しごき加工性、ネックイン・フランジ加工性などが要求される。一方、缶底の耐内圧強度および缶胴の軸荷重強度などを確保するために高強度も兼備する必要がある。

DWI 缶の製造開始当初のぶりきは加工性が優先されたので、すず付着量が多く、板厚の厚い軟質材が使用されていた^{35,36)}。たとえば、すず付着量が #50 (5.6 g/m²)、板厚 0.34 mm、調質度 T1 (HR30 T49) が一般的であった。その後、製缶技術の進歩により、すず付着量が #25 (2.8 g/m²)、板厚 0.24 mm までに減少したが、薄肉化して缶強度を維持するために、調質度の高い硬質ぶりきを使わざるを得なくなった。しかし、従来の硬質ぶりきは軟質材に比べて r 値が低く、さらに Δr も大きく、イリング性に劣った。その結果、(1) 耳が大きく、(2) 円周座屈 (しわ) が発生しやすく、(3) しごき加工後、缶体をポンチから分離する際に、端部にロールバック現象を誘発し、抜け性不良になるので生産性が阻害された⁴⁾。

したがって、DWI 缶用高強度薄鋼板の材質としては、DWI 加工時はできるだけ軟質で、 r 値が約 1.3 以上で、 Δr の小さいノンイリング性ととともに、その後の熱処理工程で強度が増加する性能が必要になった。

3.1 耳発生に及ぼすC量の影響

DWI 缶用ぶりに使われてきた軟質鋼板は、C、Al および N 量を適切に調整した低炭素 Al キルド鋼を素材とし、熱間圧延でセメントサイトを微細に析出させ、フェライト粒度を微細にし、Al と N を固溶させた熱延板に仕上げ、回復、再結晶の初期段階で微細な AlN を析出させる箱焼鈍法で製造されていた。その結果、焼鈍でパンケーキ型展伸粒が形成され、{111} 再結晶集合組織が発達するので深絞り加工性に優れた鋼板になった¹⁸⁻²⁶。また、高温で長時間の焼鈍を施すため、結晶粒径が大きく、N は AlN として固定された。さらに冷却速度は約 20°C/h と非常に遅いので、高温で固溶状態にあった C は冷却過程でほとんどセメントサイトとして析出し、固溶 C 量は 1 ppm 以下に減少する。したがって、固溶 C、N の残存量が少なく、非時効性の軟質鋼板に仕上がるので軽量・薄肉缶に適用するのは難しかった。

一方、連続焼鈍法は鋼帯を巻き戻しながら行い、必要な熱量を必要な時間だけ常時安定して与えられるので、均一な材質の鋼帯を数分で仕上げることができるという品質および経済的有利性がある。缶用鋼板は板厚が薄いので高温焼鈍に限度があり、結晶粒径は小さくなるとともに、{111} 集合組織の発達が遅れるので深絞り性に劣る鋼板になりやすい。しかしながら、加熱速度および冷却速度とも速いので、固溶 C、N が多く残存し、ひずみ時効硬化性を有した硬質鋼板に仕上げることが容易であり、軽量・薄肉用の薄鋼板を製造するには適している。

そこで、薄鋼板で缶強度を維持できて、深絞り性に優れたノンイアリング性を有する硬質ぶりを、連続焼鈍法で製造する条件を検討した。硬質化の方法としては、C 量を多くして結晶粒径の極微細化と、固溶 C の残存を同時に図る方法と、N を多く添加して固溶 N を多く残存させる方法、およびそれらを適切に組み合わせる 3 通りの方法が考えられる³⁷。高 C として結晶粒径を小さくする方法は、冷間圧延性を劣化させるので実用的でなかった。一方、N を増量しても冷間圧延性への影響は小さいと予想されたので、N 添加による硬質化を基本に、深絞り性とノンイアリング性を向上させる方法を追求した。

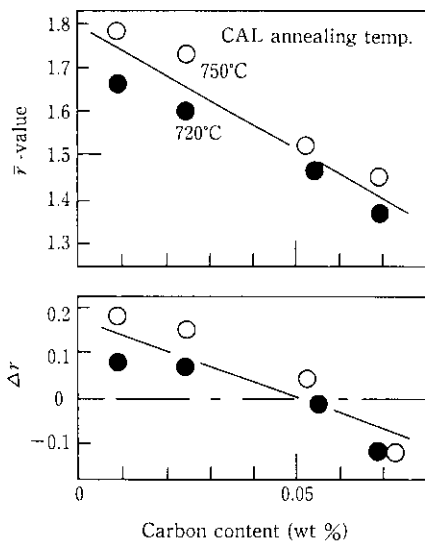


Fig. 12 Effect of carbon content and continuous annealing temperature on \bar{r} -values and their planar anisotropy (Δr) of tinplates

供試鋼はひずみ時効性を高めるために、固溶 N 量を多く残存させる目的で、低 Al、高 N の低炭素 Al キルド鋼を基本成分とした。冷間圧延性と r 値におよぼす C 量の影響を調べるために、C 量を 0.01~0.07% に変化させた。熱間圧延において、 r 値を改善させるため FDT は A_1 変態点直上、CT は中温とした。冷間圧延後、連続焼鈍の熱サイクルは結晶粒をできるだけ大きくする目的で A_1 変態点直上の中温焼鈍 (750°C) と、安定した通板ができる低温 (720°C) の 2 水準とした。調質圧延はダブル状表面で、圧下率 1.5% で行った後、すず付着量を 2.8 g/m²、すずの溶融処理を施さないマット表面に仕上げた。

Fig. 12 にぶりの \bar{r} 値と Δr に及ぼす C 量と連続焼鈍温度の影響を示す。 \bar{r} 値は C 量が減少するに従って改善された。また、 Δr については、C 量が少ないほど、負値から正値へ変化し、零になる条件が存在した。なお、連続焼鈍温度の効果は小さかった。また、硬さは 58~62 (HR30T) で、調質度は T4 相当であった。一方、冷間圧延性については、C 量 0.07% 以下では通常の生産性と同等であった。以上の実験結果から、C 量 0.04~0.06% 鋼を用い、高 FDT、中 CT で熱延し、冷間圧延後の連続焼鈍温度を A_1 点直下で行うと、高 \bar{r} 値 (約 1.5) で、かつノンイアリング性を有する硬質薄鋼板が得られることが明らかになった。

3.2 製缶工程における缶底の耐内圧強度の向上

つぎに、固溶 N 量を多く残存させた硬質ぶりについて、缶強度の向上効果を調べた。Fig. 13 に板厚 0.24 mm のぶりをを用い、内容量 350 g の飲料缶を DWI 法で製造する工程において、しごき加工直後、温水洗浄および表面処理相当の熱処理 (50°C) 後と塗装・印刷焼付け相当の熱処理 (210°C) 後での缶底の耐内圧強度の変化を、箱焼鈍材と連続焼鈍材で比較して示す。箱焼鈍材は軟質・非時効性なので、しごき加工直後の強度は小さく、熱処理を施しても強度はほとんど増加しなかった。しかし、連続焼鈍材における強度は加工直後で大きく、その後も順次増加し、バックリングを防ぐのに必要な耐内圧強度 (0.74 MPa) を上回った。また、缶の高さ方向のつぶれを防ぐのに必要な軸荷重強度は 1470 N 以上といわれ

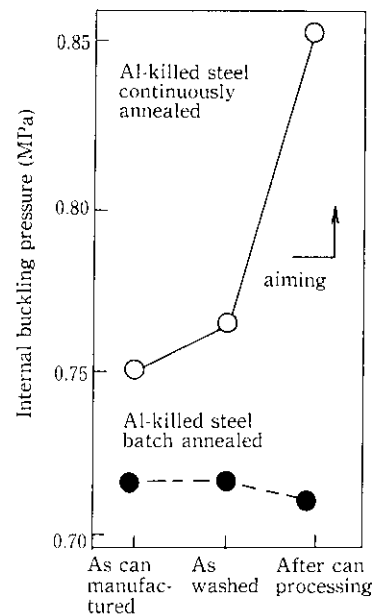


Fig. 13 Effect of annealing process on the internal buckling pressure of can bottom processed in DWI can manufacturing

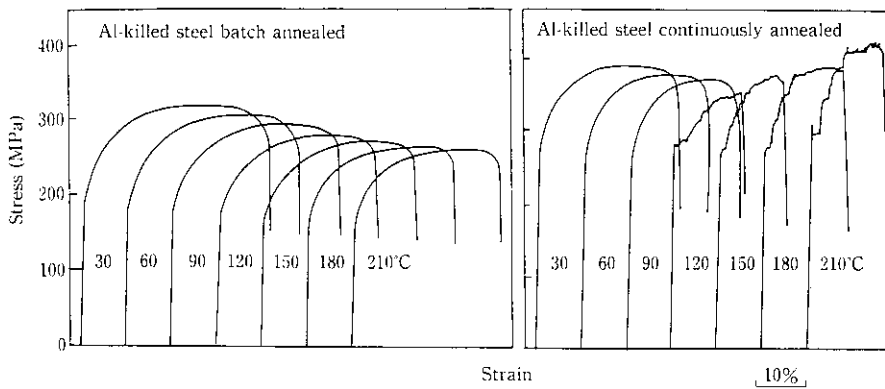


Fig. 14 Stress-strain curves observed in high-temperature tensile test

ているが、箱焼鈍材が1950 Nに対して連続焼鈍材は2300 Nで十分の強度があることもわかった。

加工した金属材料を室温以上で熱処理すると、降伏点や硬さが増加したり、降伏点伸びが現れる現象はひずみ時効 (strain aging) として知られている。加工直後の金属結晶中には塑性変形により導入された転位が多く存在する。これらの転位は相互に弾性応力場を形成するが、短範囲のすべり運動は容易であり、変形はしやすい状態にある。ところが、転位の分布がほとんど変わらないが、固溶C、Nは移動できる低温で時効処理を施すと、CおよびN原子は転位に拡散し、コットレル雰囲気 (Cottrell atmosphere) を形成するので、転位が動きにくくなり、金属材料は硬質になる。

3.3 飲料充填工程における缶底の耐内圧強度の向上

DWI缶は炭酸ガスを含む飲料を充填できる缶として商品化された。しかし、1982年に液体窒素充填技術が開発され³⁸⁻⁴⁰⁾、無炭酸飲料缶にも使われた。炭酸飲料の充填温度は低温であるが、無炭酸飲料の大部分は90°C以上で、さらに、お茶類は115~125°Cの高温でレトルト殺菌される。その際、板厚を薄くした缶底が強度不足のためバックリングするものがあつたので⁴¹⁾、高温時の缶底の耐内圧強度とぶりきの材質の関係を調べた。

軟質および硬質ぶりきについて高温引張特性を調査した。高温引張試験はインストロン型引張試験機に赤外線加熱炉を組み合わせて行った。試験温度は室温から塗装焼付温度に相当する210°Cの範囲で行った。試験片は平行部の幅10 mm、長さ30 mmとし、引張速度10 mm/minで行った。明瞭な降伏点の現れないものについては、0.5%耐力を降伏応力とした。

高温引張試験時の応力-ひずみ曲線をFig. 14に示す。箱焼鈍材では降伏点が現れず、温度の上昇とともに降伏応力、最大応力とも単調に減少した。連続焼鈍材では降伏点および多重降伏現象 (serration) が現れ、応力は温度の上昇とともに増加した。したがって、高温時も缶底の耐内圧強度を維持するためには、固溶C、Nを含む硬質ぶりき有利であることがわかった。

塑性変形は転位が外部より加えられた応力によって、すべり運動することで生ずる。転位の運動に対する抵抗力として、金属結晶の原子配列そのものに起因するパイエルス力⁴²⁾がある。これ乗り越えて転位が運動するためには、熱的に活性化される必要がある。したがって、高温では転位の運動が容易となり、変形応力は低下する。固溶C、Nがほとんど残存しない非時効性鋼板は、熱活性により転位が動きやすくなり、変形応力が低下し、高温充填やレトルト殺菌の熱処理で缶底の耐内圧強度が低下し、バックリングが発生しやすくなったと考えられる。

一方、特定の温度、固溶原子量、変形速度などの条件下では温度上昇により変形抵抗が増加することがある。固溶C、Nを多量に含む鋼板において、約100°C以上の温度で変形した場合に、転位の固溶C、Nによる固着と変形中に新しい運動転位が生ずることが同時に生じて、変形応力が上下する多重降伏現象が現れる。その際、変形応力は増大する。この現象は変形速度が小さいほど、また固溶C、Nが多いほど低温で生じ、青熱脆性として知られている。

したがって、固溶C、Nを多く含んでいるひずみ時効性ぶりきは約100~200°Cの温度範囲で変形応力が大きくなるので、バックリングは発生しにくくなったと考えられる。

3.4 DWI缶への適用

低炭素Alキルド鋼を用いて、FDTは高温、CTは中温で熱間圧延を行い、連続焼鈍を低温で行い、固溶N量を多く残存させることにより、缶高さの高いDWI缶用鋼板を開発した。本鋼板は、調質度がT4、耐力340(MPa)の硬質ぶりきで、深絞り性 (\bar{r} 値: 1.3以上)に優れ、ノンイアリング性を有しているとともに、製缶後の熱処理工程で強度が増加して、缶強度を維持できるひずみ時効性も兼ね備えたものである。

本素材を用いることにより、従来材に比べ空缶重量で約20%軽量化が図れる。

4 結 言

DRD (再絞り) 缶および、DWI (絞り、しごき) 缶を薄肉化するのに適した高強度・極薄鋼板の材質を検討した。

(1) DRD 缶用素材

- (a) C量を低減して、中CTとし、冷延圧下率を1回目と2回目とも低めにおさえることにより、深絞り性とノンイアリング性が両立できることを見出した。
- (b) 本鋼板により、調質度がDR8の高強度TFSであるとともに、 \bar{r} 値が約1.1以上で、 d_r の小さいノンイアリング性のDRD缶用素材の供給が可能となった。
- (c) 従来材に比べ、空缶重量で約14%の軽量化が図れる。

(2) DWI 缶用素材

- (a) 連続焼鈍法を用いて、C量を適切な範囲に調整し、CTを中温に制御することで、 \bar{r} 値と d_r を改善することができる。さらに、固溶N量を多く残存させることによるひずみ時効現象を利用し、成形後の熱処理で硬質化し、缶底の耐内圧強度を上昇させることができる。
- (b) 本鋼板は調質度がT4の硬質ぶりきで、 \bar{r} 値が約1.3以上

で、 d_r の小さいノンイアリング性を有しているとともに、缶強度を維持するためのひずみ時効性を兼備しており、缶高

さの高いDWI缶用素材に適している。
(c) 従来材に比べ、缶空重量で約20%の軽量化が図れる。

参 考 文 献

- 1) 東洋鋼板: 「ぶりきとティンフリースチール」, (1974), [機アグネ]
- 2) W. Panknin, Ch. Schneider, and M. Sodei: "Plastic Deformation of Tinsplate in Can Manufacturing", *Sheet Metal Ind*, Aug (1976), 137
- 3) 「What's new in food packaging?」, *Food in Canada*, Feb. (1982), 26
- 4) 今津勝宏: プレス技術, 22 (1984) 12 69
- 5) F. L. Church: *Modern Metals*, April (1986), 28
- 6) F. L. Church: *Modern Metals*, Jan. (1987), 73
- 7) 堀田久志: 「製缶用資材としての鉄鋼材料の位置づけとその問題点」, 西山記念技術講座, (1987), 165
- 8) 今津勝宏, 清水孝志: 第32回塑性加工連合講演会, (1981), 439
- 9) 飯岡俊明, 今津勝宏: 第33回塑性加工連合講演会, (1982), 87
- 10) 今津勝宏, 宮坂寿雄: 日本機械学会誌, 84 (1980) 748, 256
- 11) 鶴丸迪子: 包装技術, 21 (1983) 7, 490
- 12) 今津勝宏: 食品工業, 27 (1984) 16, 55
- 13) 周藤悦郎: 塑性と加工, 11 (1970) 112, 351
- 14) 今津勝宏: 塑性と加工, 28 (1987), 944
- 15) 堀田 孝, 青木 至: 塑性と加工, 21 (1980) 231, 277
- 16) 阿部英夫, 中川吉左衛門: 塑性と加工, 13 (1972) 143, 949
- 17) 堀田 孝, 青木 至: 「極薄鋼板による円筒容器成形」, 昭和51年度塑性加工春季講演会 (1976), 119
- 18) 久保寺治朗, 稲垣裕輔: 日本金属学会報, 7 (1968) 7, 383
- 19) 寺崎富久長, 金子輝雄: 鉄と鋼, 58 (1972) 12, 1674
- 20) R. L. Solter and C. W. Beattie: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 191 (1951), 721
- 21) 花井 論, 竹本長靖, 水山弥一郎, 佐直康則: 鉄と鋼, 57 (1971) 2, 386
- 22) 市山 正, 吉田育之, 江島瑞男, 松村 理: 鉄と鋼, 58 (1972) 1, 93
- 23) R. L. Whiteley and D. E. Wise: "Relationship Among Texture, Hot Mill Practice and the Deep Drawability of Sheet Steel," AIME 4th Mechanical Working Conference, Chicago (Jan., 1962)
- 24) J. T. Michalak & R. D. Schoone: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 242 (1968), 1149
- 25) 白岩俊男, 寺崎富久長, 小玉 強: 日本金属学会誌, 35 (1971) 1, 20
- 26) 高橋政司, 岡本篤樹: 鉄と鋼, 61 (1975) 9, 2246
- 27) 潮田浩作, 小山一夫, 高橋 学: 鉄と鋼, 76 (1990) 9, 1536
- 28) W. T. Lankford, S. C. Snyder, and J. A. Bausher: *Trans. ASM*, 42 (1950), 1197
- 29) 佐々木徹, 比良隆明, 阿部英夫, 柳島章也, 下山雄二, 田原紘一: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 1, 37
- 30) 阿部英夫, 北村邦雄, 中川吉左衛門, 久々湊英雄: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 1, 42
- 31) 宮川松男: 日本機械学会誌, 67 (1964) 542, 466
- 32) Mould, P. R., & T. E. Johnson: *Sheet Metal Industries*, 50 (1973) 1, 328
- 33) 北川 孟: 材材, 29 (1980) 322, 691
- 34) 北川 孟, 片山道雄: 鉄と鋼, 62 (1976) 10, 1339
- 35) 飯田義治, 上田典弘, 江見俊彦, 垣生泰弘, 阿部英夫, 角南秀夫, 芳賀雄彦, 久々湊英雄: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 1, 1
- 36) 大村英雄, 中島 厚, 岡野博行, 田辺博一: 鉄と鋼, 69 (1983) 13, S1236
- 37) 久々湊英雄, 泉山慎男, 角南秀夫, 柳島章也, 中里嘉夫, 小原隆史: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 62
- 38) Reynolds Metals Co.: "Food Processing", Oct. (1985), 137
- 39) 山下二郎: 食品と容器, 24 (1983), 430
- 40) 井上舜一: *Beverage Japan*, 90 (1989) June, 30
- 41) 堀川伸晴: 「DI缶とその材料—現状と将来—」, 第2回軽金属テクノフォーラム, (1990)
- 42) 鈴木秀次: 「転位論入門」, (1976), [機アグネ]