

DI缶の製缶特性に及ぼす鋼組成および二次圧延の影響

奥田 金晴*・登坂 章男*・古君 修*・佐藤 覚*²・久々湊 英雄*²

Effect of the Chemical Composition and Double-cold-reducing on the DI Canmaking Properties.

Kaneharu OKUDA, Akio TOSAKA, Osamu FURUKIMI, Kaku SATO and Hideo KUGUMINATO

Synopsis : The DI (Drawn and Ironed) canmaking properties (the effect of the load of DI canmaking, the dome inversion pressure and the load of neck forming) was measured in the 350ml 211 (66mm) diameter size DI canmaking with many kinds of steels prepared in the laboratory. The chemical composition, especially carbon content, was widely varied from 0.05 to 0.0010wt%. The following points were clarified.

1) The DR (double-cold-reduced) ultra-low carbon steel tinplate is advantageous for preventing the wrinkles at the necking by reducing the strength of the expected necking part.

2) The bottom reverse pressure depends on both thickness and YS of the tinplate. The pressure increment is evaluated experimentally to be 0.074MPa/0.02mm in thickness and 1.7MPa/10MPa in YS, respectively. As the results, the application of the ultra-low carbon steel, adequately hardened by the cold reducing after annealing, may be advantageous for reducing tinplate thickness without deterioration of necking formability.

Key words : beverage can; DI can; low carbon steel; ultra low carbon steel; tinplate; bottom reverse pressure; wrinkle; neck formability.

1. 緒言

飲料缶の国内生産量は、年間350億缶にのぼり、その中でも、2ピース缶は年々着実にその比率を伸ばしている^{1,2)}。その主たるDI (Drawn and Ironed) 缶は、スチールとアルミとの競合が激しく、缶の厚みが薄くなれば資源の節約になり、軽量化できるため、素材のゲージダウン (薄肉化) が進んでいる³⁾。現在、素材となるブリキの板厚は約0.25mmであるが、今後0.22mm, 0.20mmへと進んでいくと推定される。また、缶蓋は高価であるため口絞り部 (以後ネックイン部と呼ぶ) の縮径化も指向されている。現在国内では206径 (60mmφ) が主流であるが、欧州では、202径 (54mmφ) のスチール製DI缶が開発され、すでに生産されている⁴⁾。

DI缶の縮径化およびゲージダウン化の問題点としては、(1) 耐圧強度の低下 (軸方向、底部)、(2) 縮径化のためのネックイン成形時のしわの発生、(3) ボトムしわの発生、が挙げられる⁵⁾。(1)を考慮すると素材を高強度化することが有効であり、(2)を考慮するとネックイン部はできるだけ低強度であることが有効である。このように、相矛盾した特性を両立する必要がある。

本報では、DI缶成形試験機を用いて、従来からDI缶用素材として用いられていた低炭素鋼と、成形性に優れる極低

炭素鋼^{6,7)}とのDI成形性の比較を中心に研究を行った。今回特に、焼鈍後の二次圧延により強度を調整した成形性に優れる極低炭素鋼板の有効性が明らかとなったのでその結果について述べる。また、ネックイン成形性についてはFEM解析を行った結果についても述べる。

2. 実験方法

2・1 供試材

Table 1に組成を示す真空溶解鋼を供試材とした。炭素量は低炭素鋼から極低炭素領域まで変化させ、極低炭素鋼については、Nb量により炭素の固溶量を変化させた。また、固溶強化元素の影響を見るためにMn, N量を変えた材料も試験に供した。これらのスラブを1250°Cで1h加熱し、900°Cで仕上げ圧延により、3.5mmの板厚とした後、620°Cにて1hの巻取相当処理を行った。これを研削して、1.8~2.5mmとしたのち、圧下率84~92%で一次冷間圧延を施し、再結晶焼鈍を行った。焼鈍温度は、低炭素系は700°C、極低炭素系は750°Cとした (加熱速度: 約3°C/s, 均熱時間: 50s, 冷却速度: 約-5°C/s)。その後、1~35%の二次圧延を施した後、実験的に#25相当 (2.8g/m²) の目付けて電気錫めっきし、ブリキ供試材を作製した。

平成8年10月22日受付 平成9年5月16日受理 (Received on Oct. 22, 1996; Accepted on May 16, 1997)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition of tinplate (mass%).

Steel	C	Mn	S	Al	N	Nb
1	0.0009	0.16	0.002	0.033	0.0022	0.005
2	0.0027	0.17	0.002	0.037	0.0018	0.004
3	0.0025	0.16	0.002	0.038	0.0016	0.020
4	0.0027	0.49	0.003	0.041	0.0018	0.004
5	0.0027	0.50	0.002	0.037	0.0021	0.019
6	0.0019	0.18	0.005	0.022	0.0130	0.004
7	0.0020	0.50	0.005	0.017	0.0129	0.004
8	0.0082	0.21	0.002	0.036	0.0027	<0.001
9	0.0120	0.14	0.006	0.095	0.0020	<0.001
10	0.0230	0.21	0.010	0.039	0.0016	<0.001
11	0.0310	0.18	0.005	0.035	0.0021	<0.001
12	0.0480	0.21	0.002	0.038	0.0011	<0.001

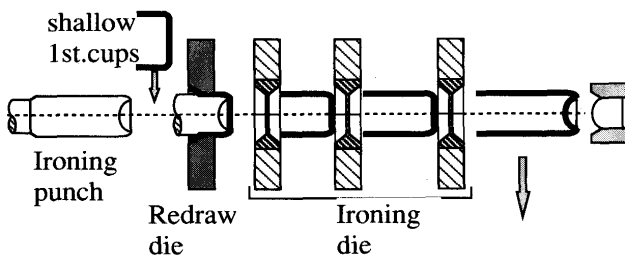


Fig. 1. Schematic illustration of the canmaking for DI forming.

2・2 DI缶成形試験

まず、アイダエンジニアリング製カップングプレス機で浅絞りカップを作製した。ブランク径は140mm、カップ径88.9mm、カップ高さは約35mmとした。潤滑にはクエロール 150-3Kを13%に希釈した油を用い、しわ押さえ圧は0.35N/mm²とし、50spm(stroke per minute)の速度で成形を行った。

このカップを三菱マテリアル製高速製缶試験機でDI成形した。Fig. 1にDI工程の模式図を示すが、カップは、再絞り、3段しごき、底成形からなる連続一工程で成形した。製缶速度は150spm、再絞りのしわ押さえ圧力は約10kN(油圧; 3.5Nmm⁻²)とし、潤滑は、カップ成形に用いたものと同種の油をイオン交換水で2%に希釈して使用した。成形缶の胴厚は85μm、フランジ厚は135μmである。

また、鋼No. 3, 11については、DI工程の各段階である再絞り、一段しごき、二段しごきおよび三段しごきまで各々行った段階缶の形状および胴部の引張強さを調べ、DI加工時の材料の加工硬化挙動の解析に供した。

2・3 ネックイン成形性

上記の缶を123mmの高さでトリミングした後、三菱マテリアル製ネッカーフランジャー試験機にて4段のダイネックイン成形を行った。成形荷重は、ネックングダイ側に組み込んだロードセルにて測定した。

また、ネックイン相当部の缶円周方向より、平行部長さ60mm、幅15mmの引張試験片を採取し、引張強さを測定し

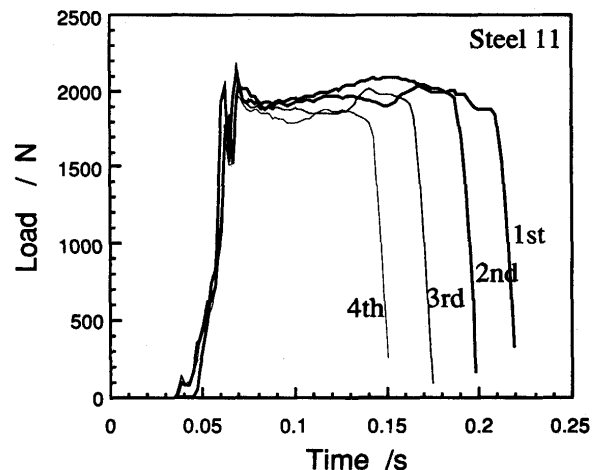


Fig. 2. Load-time diagram in necking.

た。

2・4 ボトム耐圧強さ

専用治具で缶を固定して缶内部に水を充填させた後、水圧を徐々に上げ、内圧と、缶底接地部の変位を同時に測定した。耐圧強度は、缶ドーム部の反転する内圧とした。

3. 実験結果

3・1 ネックイン成形

3・1・1 ネックイン成形荷重曲線

4段ダイネックの成形荷重曲線をFig. 2に示す。荷重曲線は複雑で、成形初期段階にピークが2つ観察される。また、ネックイン成形段階が進むに従い、押し込み量が少なくなり、成形時間が短くなるとともに、荷重も減少する。Table 1に示したSteel 5, 9, 11について成形エネルギーに相当する成形荷重曲線の面積とネックイン相当部TSとの関係をFig. 3に示す。各段階ともにネックイン強度の増加とともに成形エネルギーは増加する。

3・1・2 ネックイン成形時のFEM解析

汎用FEMソフトMARCを用いて、ネックイン成形のFEM

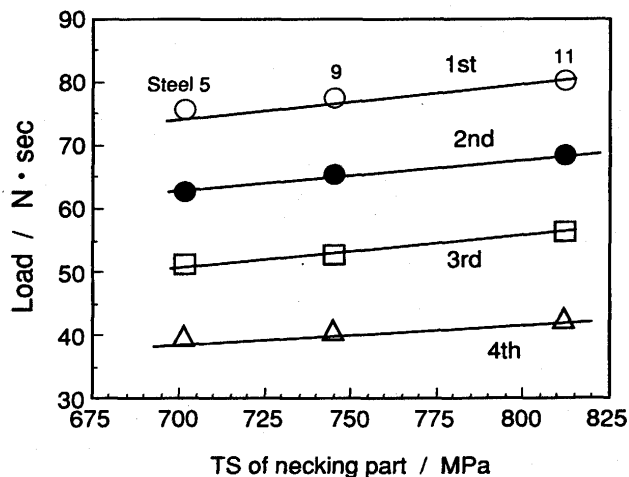


Fig. 3. Relation between integrated load in neck-in forming and TS of neck-in part.

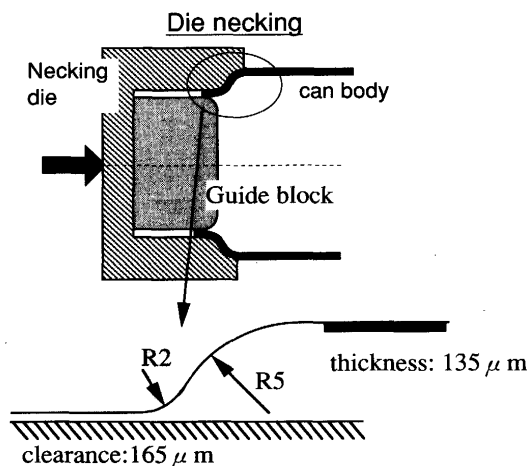


Fig. 4. Geometry of die-necking simulation, and movements of die and can body.

計算を行った。計算に用いた缶フランジ部と金型の配置図をFig. 4に示す。ヤング率を210GPa, ポアソン比を0.3, フランジ板厚を135 μ m, 加工硬化は無とし, YSを変化させて計算を行った。また, 押し込み量は0.05mm/stepとして300stepの計算を行った。

ネッキングダイにかかる成形荷重の計算値をFig. 5に示す。図中の最初のピークAは, 先端部が最初に折れ曲がる時に対応し, 2番目のピークBは, 内側の中子金型に先端部が衝突する荷重に対応する。計算値はFig. 2の実際の荷重曲線と比較的よく対応している。以上に示したFEM計算を用いることで, 精度よく実際の成形をシミュレートすることが可能である。

フランジ先端部の円周方向応力の計算値をFig. 6に示す。変形初期に圧縮応力がフランジ部先端にかかり, これが金型の間に入り込むと応力絶対値は減少し一定値を示す。この最大円周方向圧縮応力とフランジ部の強度との関係をFig. 7に示す。両者はほぼ直線関係にある。

ネックしわは一種の座屈現象⁸⁾であり, フランジ先端部

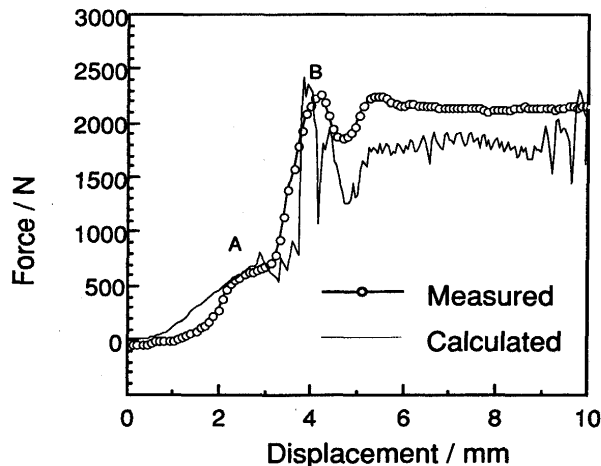


Fig. 5. Result of FEM simulation of load-displacement curve.

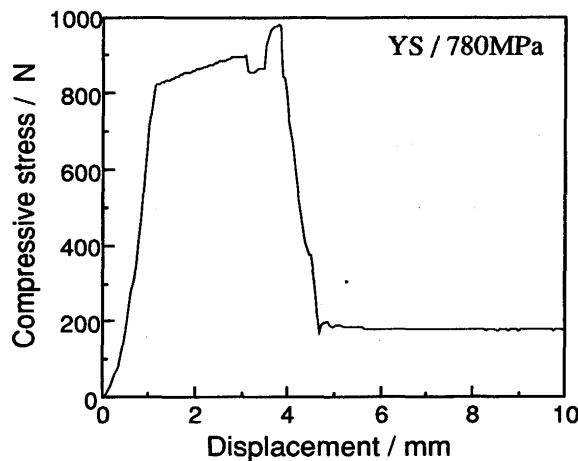


Fig. 6. Circumferential compressive stress of necking part (FEM simulation).

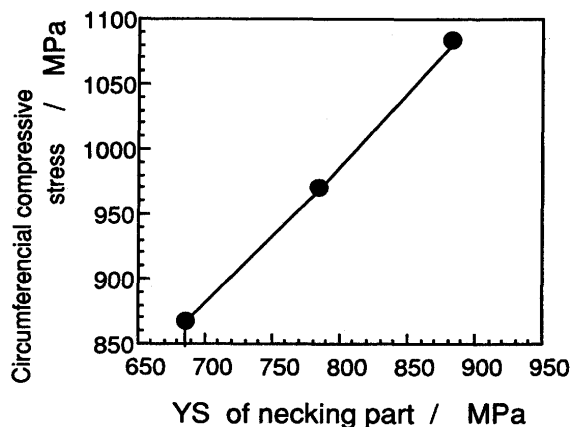


Fig. 7. Relation between circumferential compressive stress and YS of necking part.

に発生する円周方向圧縮応力が, 金型の形状や材料のヤング率などにより決定される臨界応力値を越えると面外変形(座屈)すると考えられる。また, 文献9)では, ネックしわ発生率とネックイン相当部の硬さとの相関性を実験的に示

している。以上のことから、本研究では、ネックイン成形性をネックイン相当部の降伏強度で評価することにした。

3・1・3 ネックイン相当部の引張強度

Fig. 8 (a) は、Table 1 の鋼のSR材について素材の降伏強度とネックイン部TSとの関係を示したものである。素材強度とともに、ネックイン部TSはほぼ直線的に増加する。このことは、DI加工中の材料の加工硬化が鋼の成分によって変化しないことを示唆しており、ネックイン成形性を向上させるためには、焼鈍時に軟質な鋼板を得ることが重要であると結論できる。

つぎに、二次圧延(Double Reduced; DR)による素材の高強度化とネックイン部強度との関係をFig. 8 (b)に示す。二次圧延により素材を加工硬化させても、ネックイン部TSが変化しない。ただし、十数%以上になると、ネックイン部TSが若干増加する。

以上より、極低碳素鋼板を二次圧延して、その強度を調整すれば、従来の低碳素鋼と同等の調質度を有しながら、ネックイン成形性の優れた鋼板を得ることができると考えられる。

3・2 ボトム耐圧強度

塑性ひずみ5%における流動応力とボトム耐圧強度との関係をFig. 9に示す。両者には良い相関が認められ、流動応力とともに耐圧強度が増加する。図より流動応力が100

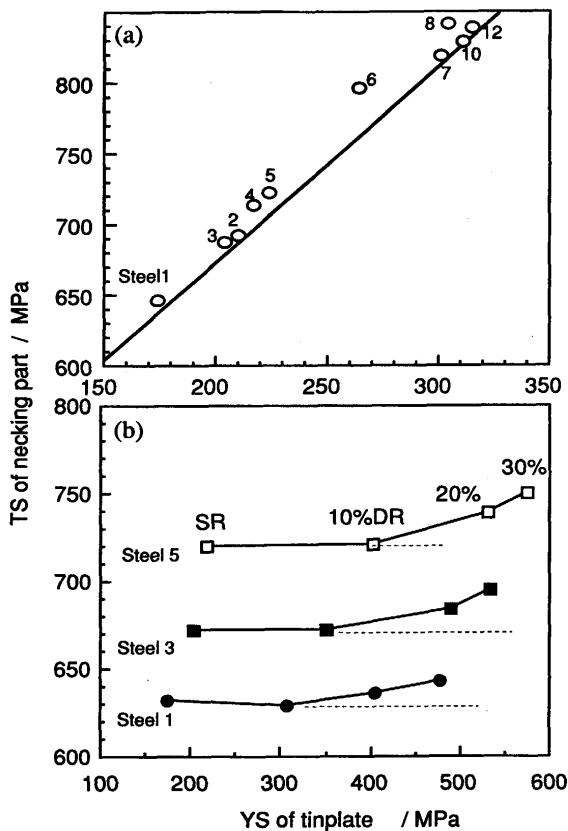


Fig. 8. Relations between TS of necking part before neck-in forming and YS of tinplate before DI forming. (a) single reduced steel (b) double reduced steel.

MPa増加すると、耐圧強度が0.17MPa上昇する。また、Steel 11について、耐圧強度と板厚および素材降伏強度との関係をFig. 10に示す。ここで、素材降伏強度は、二次圧延による加工硬化により変化させた。図のように二次圧延による加工硬化でも耐圧強度は増加するが、Fig. 9と比較すると、SR材に比べて素材降伏強度の変化に対する耐圧強度増加量が少ない。これは、ボトム成形時の加工量とドーム反転時のひずみ量に関係していると考えられる。つまり、素材降伏強度が同じでも、これらの加工による硬化量はDR材の方が小さく、その結果DR材の耐圧強度増加量が少なくなったと推測される。また素材降伏強度だけでなく、板厚の影響も大きく、0.02mmの板厚の減少により耐圧強度が約0.08MPa減少する。

以上のように、ゲージダウンした場合、薄肉化による耐圧強度減少量を、素材強度で補う必要があるが、その場合、C, N, Mnなどで固溶強化したSR材は、ネックイン部TSを

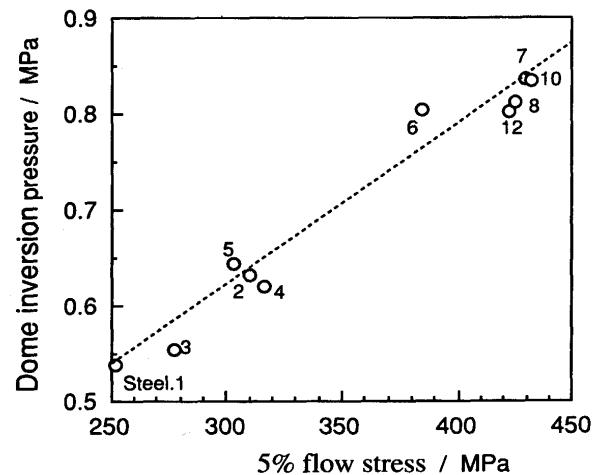


Fig. 9. Relation between the 5% flow stress of tinplate and the dome inversion pressure in single reduced steel.

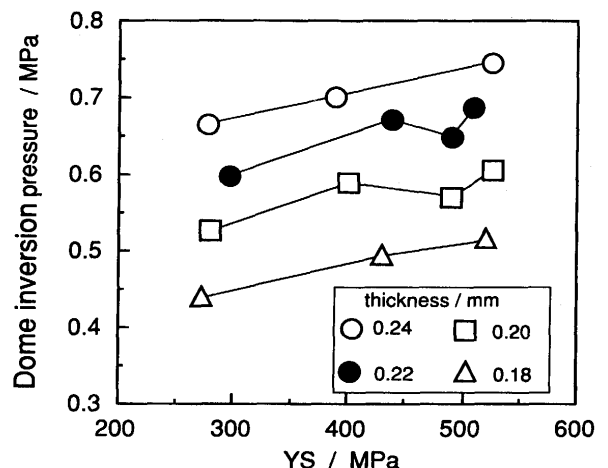


Fig. 10. Relation between the YS of tinplate before DI forming and the dome inversion pressure in double reduced steel 11.

増加させネックイン成形性を低下させるので、二次圧延で強化したDR材を用いることが有効であると考えられる。

3・3 ボトムしわ

板厚が薄くなると、ボトムしわと呼ばれる缶底部のしわが発生しやすくなり、ゲージダウンの1つの問題点となっている。Fig. 11に、Steel 5の板厚0.18mmのSR材の缶底部の外観写真を示す。このしわは、DI加工の再絞りのときに発生する。Steel 5, 11を素材とし、板厚と強度を変化させたブリキをDI成形し、ボトムに発生したしわの本数を測定した。ボトムしわと素材降伏強度(YS)の関係をFig. 12に示す。ボトムしわは、素材YSがある臨界値以上になると発生し始め、その臨界の素材YSは、板厚が薄くなるほど低くなる。この臨界素材YSと板厚との関係をFig. 13に示す。ボトムしわの発生し始める素材YSと板厚はほぼ直線関係にある。低炭素鋼に比べて、極低炭素鋼はしわ発生限界YSが高く、0.22mmでは約100MPaの余裕がある。

4. 考察

4・1 DI加工時の材料の加工硬化挙動

3・1節では、二次圧延による加工硬化は、ネックイン成形性には影響が小さいことがわかった。これについてさらに研究するため、DI成形の各工程(2段の絞り成形+3段のしごき工程)での途中段階のカップと缶を作製し、胴部の板厚、引張強度を測定した。この各段階缶の板厚分布をもとに、絞り過程としごき過程のひずみ量を積算し、焼鈍後の二次圧延と、ブランキングから1stカップ、再絞り、しごきと各段階での一軸相当ひずみ¹⁰⁾を計算し、各段階でのひずみ量を見積った。これと各缶の胴部の引張試験結果から、DI加工における材料の加工硬化挙動を評価した結果をFig. 14に示す。鋼種が変化しても、加工硬化指数にはあまり大きな差は見られないものの、極低炭素鋼に比べて低炭素鋼の加工硬化率がやや低い。極低炭素鋼のSR, DR(14%)材を比較すると、ほぼ同じような加工硬化挙動を示す。1stカップ

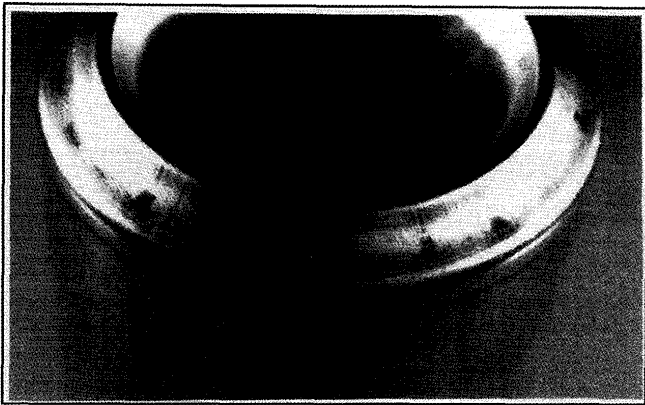


Fig. 11. The appearance of the typical wrinkle in the can bottom.

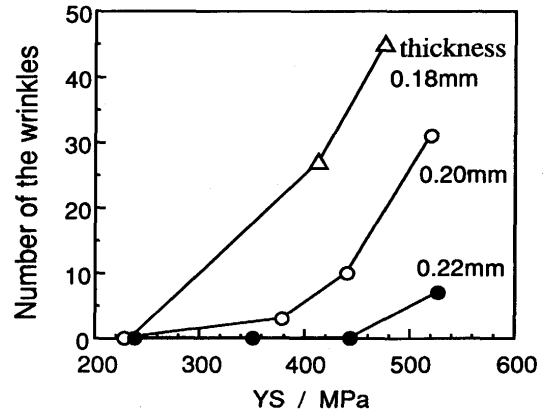


Fig. 12. The effect of the YS and the thickness of the tinplate on the number of the wrinkles that is generated at can bottom during DI canmaking (Steel 11).

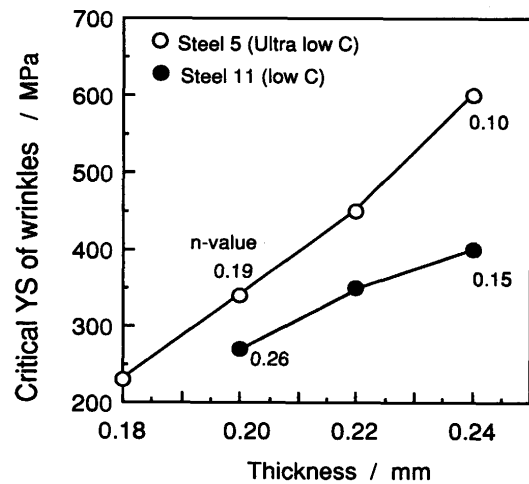


Fig. 13. Effect of the thickness on the critical YS in generating the wrinkles.

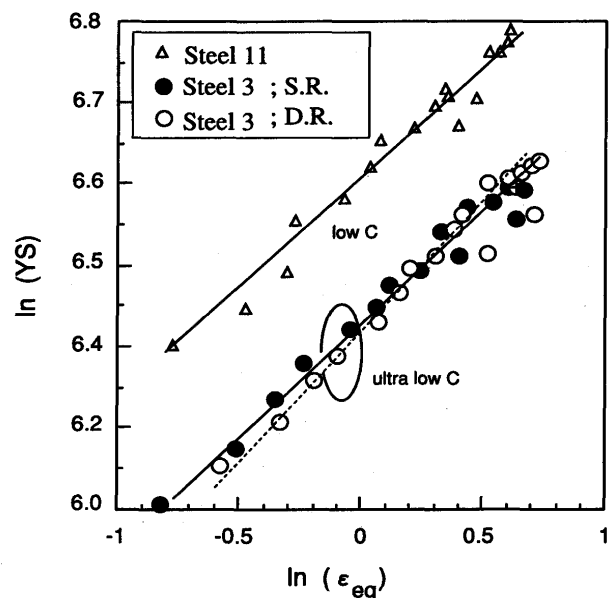


Fig. 14. Relation of the equivalent strain and the YS of the sample from each step of DI canmaking.

の胴部中央部について、SR材とDR材の真ひずみの対数値の差は0.19であり、ネックイン相当部のそれは0.08と小さい。これはDI加工によるひずみ量が高くなると、初期の二次圧延によるひずみ量の差がなくなっていくことを示す。これより、成形荷重(特にしごき段階)および、ネックイン部の強度が二次圧延によって変化しなかつたことが説明できる。二次圧延率が10%程度であれば、ネックイン部の強度を増加させることなく、適度にボトム耐圧強度を上昇できることからゲージダウン用の素材の製造にあたり、非常に有効な手段であることが示唆される。

4.2 ボトムしわ

ボトムしわは、再絞りの初期段階に発生し、円錐台成形に現れるボディーしわに類似する。

阿部ら¹¹⁾は、ボディーしわに関する塑性力学的検討を行い、r値、YS、n値がボディーしわに影響することを示した。つまり、

1) r値: r値が大きいものほどオーバーハング部の板厚減少が小さく、板の曲げ剛性も増大し、ボディーしわ発生限界成形高さHcrが増大する。

2) YS: 降伏強度が高くなると、発生する応力が大きくなる一方、板の曲げ剛性には無関係となり、Hcrが急激に減少する。

3) n値: $n_{10-20\%}$ が大きいものほどHcrが増大する。

4) 板厚: 板厚の増加は板の曲げ剛性を高め、Hcrを顕著に増大させる。

焼鈍板のr値は、Steel 5 ; 1.7, Steel 11 ; 1.2 と極低炭素鋼板が高く、しわ抑制に有利である。しかしながら、Fig. 13では、極低炭素鋼板のしわ発生限界は低炭素鋼板に比べて高いものの、板厚が厚い場合には低炭素鋼板との差が大きく、薄くなると差が小さくなる傾向が認められ、r値以外の影響があると考えられる。

本報では、強度を二次圧下率により変化させて、ボトムしわ発生率を調査した。DR材を素材とした場合のn値は、二次圧延率により変化する。極低炭素鋼板は低炭素鋼板よりも焼鈍板の強度が低く、同じ降伏強度にするために二次圧延率をより高くしなければならない。各鋼についてFig. 14の加工硬化挙動から計算したn値をFig. 13に示す。

板厚が薄い場合、しわが発生しやすく、降伏強度の低い領域で両鋼種のしわ発生限界を比較することになる。この領域では極低炭素鋼板のみ二次圧延する為、n値は低炭素鋼板の方が大きい。他方、板厚が厚いとしわ発生限界強度が高く、両鋼種ともに量の違いこそあれ二次圧延しないとしわが発生しない。そのため板厚の薄い場合に比べて、n値の差は小さくなる。

以上より、極低炭素鋼板はr値が高く、低炭素鋼板に比べてしわ発生限界が高いが、板厚が薄くなると、n値の効果で相殺され、両鋼種のしわ発生限界の差が小さくなった可能

性が考えられる。

本実験では、ボトム形状やしわ抑え圧力は一定条件で行った。素材を薄肉化した場合、缶底耐圧強度を満足させるために素材を高強度化しなければならず、それに応じて成形条件を変化させる必要がある。その結果、n値の差が出にくい高強度レベルで両鋼種を比較することになるので、ゲージダウンしてもボトムしわ抑制に対する極低炭素鋼板の優位性は変わらないと考えられる。

また本考察は非常に定性的であり、今後ボトムしわ発生におよぼすr値、n値の影響を定量的に分離する必要があると考えられる。

5. 結論

DI缶成形試験機を用いて各種鋼板のDI缶としての適性評価を行った結果、以下の項目が明らかとなった。

(1) ネックイン成形についてFEM解析を行い、成形荷重を評価するとともに、ネックしわとネック強度との関係が明らかとなった。

(2) 二次圧延率は、10%程度ならばネックイン成形性、DI成形荷重を変化させずにボトム耐圧強度を上昇できる。しかし、20%以上になると、成形荷重(特に再絞り変形)が上昇する。底部はDI加工のひずみ量が小さく、二次圧延のひずみが材料の強度に効いてくるが、ネックイン部はDI成形により非常に大きなひずみ加わるので二次圧延の効果小さくなる。

(3) ボトム耐圧強度に対する、板厚の影響は0.074MPa/0.02mmと大きい。同じく降伏強度の影響は、0.17MPa/100MPa(SR材)である。

(4) ボトムしわの発生は、素材の降伏強度を大きくし、板厚が薄くなるほど顕著で、特に低炭素鋼よりr値の高い極低炭素鋼はボトムしわ抑制に有利である。

文 献

- 1) 今津勝宏: 鉄と鋼, 79 (1993), N103.
- 2) 今津勝宏: 軽金属学会第6回金属セミナー, (1988), 42.
- 3) 久々湊英雄, 阿部英夫, 小野隆司, 登坂章男, 泉山禎男, 大川順弘: 川崎製鉄技報, 25 (1993), 27.
- 4) The Canmaker, 7 (1994) 3, 33.
- 5) 堀川伸晴, 中瀬勝彦, 宇都宮秀記, 西川澄生: 材料とプロセス, 6 (1993), 524.
- 6) 小原隆史, 坂田 敬, 西田 稔, 久々湊英雄, 秋山知彦, 太田禎男: 鉄と鋼, 69 (1983), S409.
- 7) 久々湊英雄, 加藤寿勝, 西川 廣, 白石昌司, 下山雄二, 藤長千香子: 川崎製鉄技報, 23 (1991), 44.
- 8) S.Timoshenko: 座屈理論, コロナ社, (1953), 219.
- 9) M.Tsurumaru, K.Masuda, I.Otsuka, and K.Nishida: Steel for Tinplate DI Cans, 6th Int. Tinplate conf., London, (1996), 195.
- 10) S.Fukui: Science Papers of the Institute of Physical and Chemical Research 34 (1938), 1422.
- 11) 阿部英夫, 中川吉左衛門: 塑性と加工, 13 (1972), 949.