

焼付硬化性鋼板の2ピース缶軽量化への適用

丸岡 邦明*・河野 彪*²・山下 康彦*³

Application of Bake Hardenable Tinplate to 2 Piece Can

Kuniaki MARUOKA, Tsuyoshi KAWANO and Yasuhiko YAMASHITA

Synopsis : The possibility was fundamentally investigated, that the demand to light weight DWI can could be satisfied by bake-hardenable and thin gauge tinplate which had excellent DWI formability at the stage of DWI forming before baking and had high pressure resistance after baking due to such bake-hardenability as automotive steel sheets.

At first, change of mechanical property of continuous annealed tinplate with controlled amount of solute carbon due to forming was experimentally investigated by simulating DWI forming by cold rolling. Such tinplate showed increase of yield strength due to bake-hardening following cold rolling corresponding to bottom forming, and that was expected to improve dome pressure resistance. At the same time, since tensile strength of bake-hardenable tinplate cold rolled up to 70% was not higher than that of conventional tinplate, DWI formability of bake-hardenable tinplate was expected to be equivalent to that of conventional one.

Then model cans were experimentally manufactured from 2 types of tinplate, and the improvement of dome pressure resistance in bake-hardenable tinplate was proved.

Finally it was discussed that dome was fully reinforced by structural design and that the burst of dome was considered a kind of plastic collapse.

Key words : low carbon steel ; cold rolled product ; tinplate ; DWI can ; 2 piece can ; bake-hardening ; continuous annealing ; pressure resistance ; light weight ; formability.

1. 緒言

食缶やエアゾール缶、イーザーオープン缶には、すずめっきされたブリキやクロム酸処理されたティン・フリー・スチールが多く用いられている。

これらの缶には、古くからある3ピース缶と、その後開発された2ピース缶とがある。3ピース缶は、あらかじめ塗装および印刷を施された後、円筒状に加工された胴部に底板および蓋板が取り付けられたもので、この缶用には連続焼鈍された比較的硬質の缶用鋼板が主に用いられている。

2ピース缶は深絞り加工により胴と底とが一体化された缶である。そのひとつ、1945年Willen Van Leerが開発したDWI (Drawn and Wall Ironed) 缶は、1965年にアメリカにおいてアルミニウム板を用いた缶の製造に際し、初めて実用化された¹⁾。その後、クラウン・コーク・アンド・シール社とアメリカン・キャン社とが、それぞれ1971年および1972年に、相次いで鋼板からDWI缶を工業生産することに成功した²⁾。DWI法は3ピース缶と同じくらい深い缶を安く製造できるので、DWI缶の生産量は次第に増加し、現在では食缶の約半数に達しており、さらに伸びる傾向にある²⁾。

DWI缶用鋼板には、DWI加工性、座屈強度、缶体となったあとの耐圧強度などに優れていることが要求される。DWI加工性とは、DWI加工において、金型の摩耗が小さく、金型による板のかじりの発生が少なく、加工エネルギーが小さい性能をいう。座屈強度とは、しごき加工後のネッキング加工の際、軸方向に加わる荷重に缶体が耐える性能をいう。耐圧強度とは、蓋が巻締められた後、内圧によって缶体の弱い部分が外側に突き出してしまうバックリング現象が生じる臨界の缶内圧をいう。缶の内圧に弱いのは缶底および蓋であり、耐圧強度も缶底および蓋の力学的強度に支配されることが多い。

缶の胴部をポンチとダイスとによりしごき加工する際のポンチ荷重を小さくするためには、鋼板の変形抵抗が小さい方がよいが、出来上がった缶の耐圧強度を高めるには、加工後の鋼板の降伏応力が大きいことが求められる。このように相反する要求を満たすため、従来は、板厚が十分大きいバッチ焼鈍された軟質鋼板が使用されていた。

しかし、近年、省資源、省エネルギー、および原材料費の低減のため、缶の軽量化が進められており、素材である缶用鋼板の板厚が減少する傾向にある。

平成6年4月13日受付 平成6年9月2日受理 (Received on Apr. 13, 1994; Accepted on Sep. 2, 1994)

* 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

* 2 新日本製鉄(株)八幡技術研究部(現:(株)日鉄テクノリサーチ) (Yawata R&D Lab., Nippon Steel Corp. now Nippon Steel Techno Research Corp.)

* 3 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition (weight %) and manufacturing condition.

Sample	Temper grade	C	Si	Mn	P	S	Al	N	FT	CT	Annealing	Temper reduction
RE	T-1BA	0.060	0.021	0.27	0.015	0.008	0.104	0.0036	891°C	669°C	640°C-4h	1.26%
BH	T-1CA	0.026	0.018	0.20	0.008	0.008	0.062	0.0022	885°C	680°C	698°C-50s+Overageing; 400°C-120s	1.2%

FT: Hot finishing temperature CT: Hot coiling temperature Product thickness=0.32mm

本研究は、2ピース缶の軽量化に際して求められるDWI加工性と底部耐圧強度との両立の可能性を検討するため、適度の固溶炭素を含有する連続焼鈍缶用軟質鋼板の加工度と機械的性質の変化との間の関係性を求め、その結果を、同鋼板を用いて試作されたモデル缶の耐圧強度の実測結果の解析に適用し、DWI缶用鋼板の具備すべき機械的性質を明らかにしたものである。

2. 冷間加工による機械的性質の変化

2.1 実験方法

Table 1は実際の工場で製造された供試鋼板の化学組成と製造条件を示す。試料REは、従来からDWI缶用鋼板として実際に使用されていた調質度T-1のバッチ焼鈍鋼板で、焼付硬化性がほとんどない。試料BHは、過時効処理付の連続焼鈍法で製造された新しい鋼板であり、REと同じ調質度を持ち軟質でしかも焼付硬化性があるという特徴を持つ。これら両試料はいずれもダル状表面を持つ原板に電気めっきラインですずめつきされたままのもので、その表面はすず溶解処理されていない艶消し状態のものである。この表面仕上げはDWI加工での潤滑性を高めるために通常用いられるものである。

DWI加工された缶体からは引張試験片を採取することができないので、DWI加工の代わりに冷間圧延を試料に施した。冷間圧延された試料は、DWI加工とは歪履歴が異なるため、破断やしわの評価はできないが、加工硬化と焼付硬化の簡便な評価は可能であろうと考えた。耐圧強度が問題となる底部は約3%、最も板厚の薄くなる壁部は約70%前後の通常歪を、それぞれDWI加工によって受けるので、冷間圧延の圧下率を0%から70%の範囲で変化させた。次に、塗装乾燥工程に相当する熱履歴を与えるため、油浴で200°C-10minの熱処理を2回行った。

その後Fig. 1に示される形状の引張試験片を切り出し、引張試験を行なって、降伏強さおよび引張強さを求めた。こ

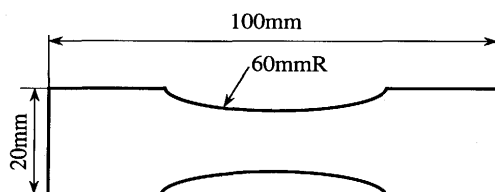


Fig. 1. Specimen for tensile test.

のような形状の引張試験片を用いた理由は、試料に冷間加工歪が入っていて伸びが極端に小さいため、通常の平行部を持つ引張試験片では適切な破断位置が得られないからである。この試験片形状を採用することにより、形状的応力集中から試験片長さのほぼ中央で破断が起こるようになるが、それでも通常の引張試験に比べてばらつきが大きい。したがって、引張試験値は10本の平均をとった。

2.2 実験結果

Fig. 2は冷間加工後の降伏強さに及ぼす加工歪量の影響を示す。この図の横軸（加工歪量）は、冷間圧延後の板厚の実績から計算した板厚減少率実績を表わす。以下の図においても同様である。Fig. 3は缶底の歪に相当する低い歪域を拡大して表示したものである。冷間加工ままでは、試料RE

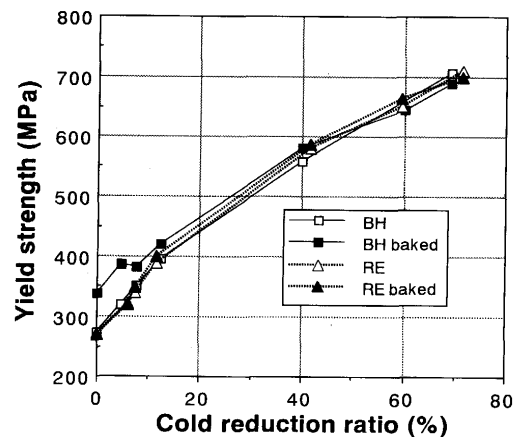


Fig. 2. Effect of cold rolling strain on yield strength of non-melted sheets (whole range).

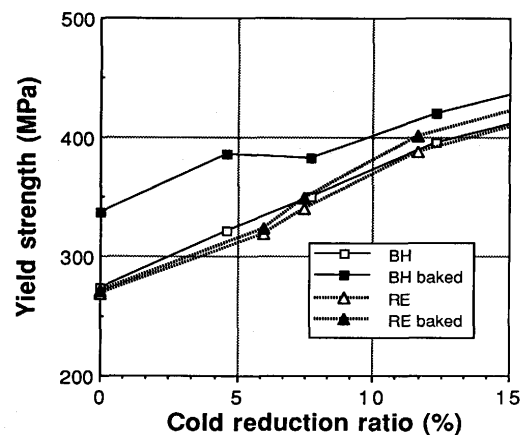


Fig. 3. Effect of cold rolling strain on yield strength of non-melted sheets.

およびBHとも加工歪の増大につれて加工硬化し、両者の差はほとんどない。しかしこれを時効させると、試料REの降伏強さがほとんど変わらないのに対し、焼付硬化性のある試料BHの降伏強さは、缶底部に相当する約3%前後の歪域では約70MPaも上昇する。

次に、通常のぶりきで行なわれるはず溶融処理の影響を調べるため、一部の試料に油浴（浴温度210℃）に25s浸漬後水冷する熱処理を施してみた。Fig. 4ははず溶融処理をした鋼板の結果を示す。全体としてはFig. 3と同様の傾向を示している。しかし、試料BHの降伏強さが、冷間加工までははず溶融処理をしない鋼板より高く、時効後では逆にはず溶融処理をしない鋼板より低い。すなわち焼付硬化量が、はず溶融処理のない鋼板より小さい。

したがって、焼付硬化性を利用して耐圧強度を上げるには、はず溶融処理をしない方が望ましいことがわかる。DWI缶用鋼板には、しごき加工時の潤滑性のために通常はず溶融処理を行なわないので、これは都合がよい。

Fig. 5ははず溶融処理をしない鋼板の冷間加工後の引張強さに及ぼす加工歪量の影響を示す。加工歪が大きいほど加

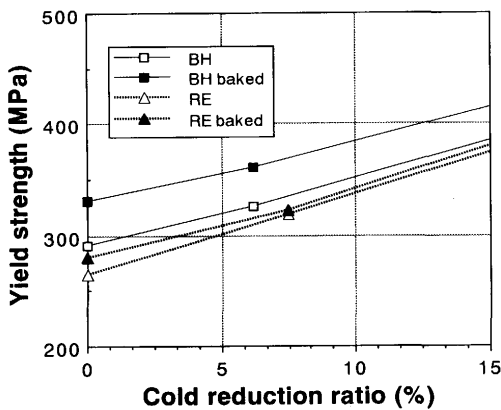


Fig. 4. Effect of cold rolling strain on yield strength of tin melted sheets.

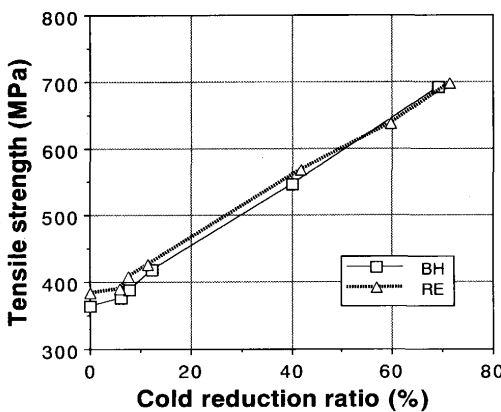


Fig. 5. Effect of cold rolling strain on tensile strength of non-melted sheets.

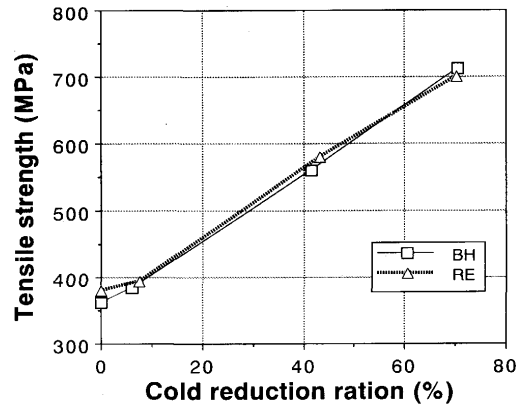


Fig. 6. Effect of cold rolling strain on tensile strength of tin melted sheets.

工硬化によって引張強さは上昇し、その挙動は試料REとBHであまり差がない。ただ歪が60%未満では、BHの方がやや低い傾向を示す。

Fig. 6ははず溶融処理をした鋼板の結果を示す。全体としてFig. 5と同様の傾向を示している。

2・3 考察

缶底の耐圧強度 P_c は、材料の降伏強さ（または耐力）を σ_y 、缶底板厚を t 、缶底接地径を b 、缶底形状で決まる定数を K とすると、

$$P_c = K(t/b)^2 \sigma_y \dots\dots\dots (1)$$

で表わされると言われている³⁾。このように耐圧強度は降伏強さに依存するので、試料BHは焼付硬化性によって耐圧強度の上昇することが期待される。

また、DWI加工性は、しごき加工に要する力の小さい方が優れるが³⁾、しごき加工時のポンチ荷重 P_i は材料の引張強さを σ_B 、しごき加工後の壁の断面積を A 、加工の効率を η 、引張強さで規格化された変形仕事量を C とすると、

$$P_i = CA(\sigma_B/\eta) \dots\dots\dots (2)$$

で表わされると言われている⁴⁾。

最も大きい加工を受ける壁部の歪履歴を考えると、DWI加工前の歪は0%であり、しごき加工の進行に伴って連続的に歪が増加し、最終的に約70%程度の加工を受ける。これは、Fig. 5の横軸を0%から出発して約70%まで連続的に動くことに対応する。その間材料はこの図の引張強さに対応する変形抵抗を順次受けつつ加工される。ここで、ポンチ荷重は(2)式によって引張強さに依存し、ポンチの変位は加工歪量と対応するので、しごき加工に要する仕事量、すなわちポンチ荷重とストロークの積は、引張強さを歪量で積分した量に依存すると考えられる。したがってこの図の引張強さの線と横軸の間の面積が、DWI加工性の目安となる。このことから、試料BHのDWI加工性はREよりやや優れることが期待される。

3. 耐圧強度および座屈強度に関する考察

3・1 実験方法

試料REおよびBHの鋼板から、実験室のDWIプレス機で350ml (cm³) 缶のカップ状の缶体(胴部直径66mm, ドーム曲率半径78mm)を各3個ずつ成形し, トリミング機で開口端の高さを揃えた後, 塗装乾燥工程に相当する熱履歴を与えるため, 油浴で200°C-10minの熱処理を2回行った。次にフランジヤ機でフランジ加工を行なった後, Fig. 7が示す装置で耐圧強度を測定した。

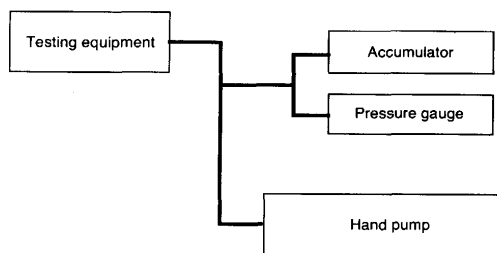
この装置は, 缶体を開口端を下にしてテーパ部にかぶせ, Oリング付の固定治具で缶体内部が密閉されるように固定し, 内部に徐々に油圧を誘導して, 缶体内部圧力の時間変化を記録計に記録する仕組みになっている。缶底部にバックリングが生じると缶体内圧が急激に下がるので, バックリングが発生する直前の内圧を耐圧強度と定義した。なお, この測定は室温で行なった。

3・2 耐圧強度の実験結果

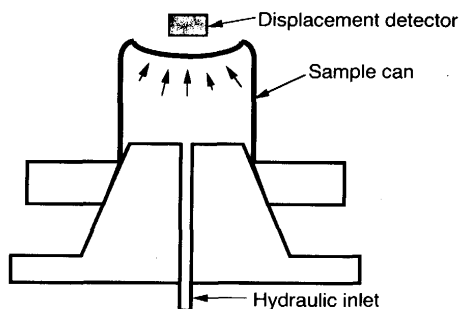
Table 2は3缶を平均した耐圧強度の測定結果を示す。試料BHの耐圧強度はREに比べて有意に高く, 焼付硬化性による耐圧強度の上昇効果を確認することができた。なお, 加工前のそれぞれの鋼板の時効後降伏強さを参考のため同表に合わせて示す。

3・3 耐圧強度に関する考察

式(1)によれば, 耐圧強度は降伏強さに比例する。しか



(a) Block diagram of hydraulic system



(b) Schematic sketch of testing equipment

Fig. 7. Measurement equipment of pressure resistance.

- (a) Block diagram of hydraulic system
- (b) Schematic sketch of testing equipment

Table 2. Dome pressure resistance.

	BH	RE	Ratio=BH/RE
Dome pressure resistance	99.96N/cm ²	90.45N/cm ²	1.105
σ_y after baking	346MPa	259MPa	1.34
$\sigma_y^{0.56}$	26.42	22.46	1.18

し, Table 2に見えるように, 試料BHの時効後の降伏強さはREの約1.34倍であるのに, 試料BHの耐圧強度はREの1.105倍しかない。式(1)は, 耐圧強度の板厚および材質依存性を評価する式として製缶業界において有名であるが, もともとアルコア社がアルミニウムDWI缶について完成したもので, その適用範囲や機械力学的意味については必ずしも明らかでない。そこで, 基本に立ち返って耐圧強度の板厚および材質依存性を検討してみる。

耐圧強度は缶底形状に大きく依存する。缶底は, ドーム(Dome)と呼ばれる球殻状の部分と, それを取り巻き, ドームと壁部をつなぐノーズ(Nose)と呼ばれる円周状の部分とに大別できる。これらの形状はきわめて複雑で, ひとつの缶底形状を特徴付けるには20個以上のパラメータが必要となる⁵⁾。したがって, 耐圧強度を理論的に予測することはむずかしく, これまでの耐圧強度の研究は, アルミニウムDWI缶の耐圧強度に及ぼす形状の効果を有限要素法などによる弾塑性解析で求めるものがほとんどであった⁶⁾。すなわち, 材質の影響を検討した研究はほとんど行なわれていない。

今, 簡単のために缶底形状を内側に凸の球殻の一部と仮定すると, 耐圧強度は球殻が内圧で圧壊する限界圧力と考えることができる。

このような周辺固定の部分球殻の圧壊圧力としては, 古典的線型理論に基づくKaplanなどの式⁷⁾があるが, 実験値と余りにも違いすぎるという問題がある⁷⁾。そこで全ポテンシャル・エネルギーの保存原理に基づいた式が提案されている⁸⁾。この式は実験値に近い圧壊値が得られるが, 式(1)に比べてはるかに複雑で, しかも材料特性としてはヤング率, ポアソン比および板厚にのみ依存し, 強度依存性を説明することができない。しかるに耐圧強度が缶底形状だけでなく材料の強度にも依存することは, 製缶業者においては経験的によく知られており, それが式(1)が広く信じられているゆえんでもある。

徳川⁹⁾は, 外圧を受ける球殻の半径をr, 板厚をt, ヤング率をEとすると, 球殻の形状因子を

$$x = 4.17 \left(\frac{t}{2r} \right)^{1.5} \dots \dots \dots (3)$$

で規格化したうえで, 球殻の圧壊応力 σ_c が

$$\sigma_c = 1.2Ex \dots \dots \dots (4)$$

で表わされることを理論的に導き, Fig. 8のように実験でこれを確認した。この式でもやはり圧壊応力は形状因子とヤ

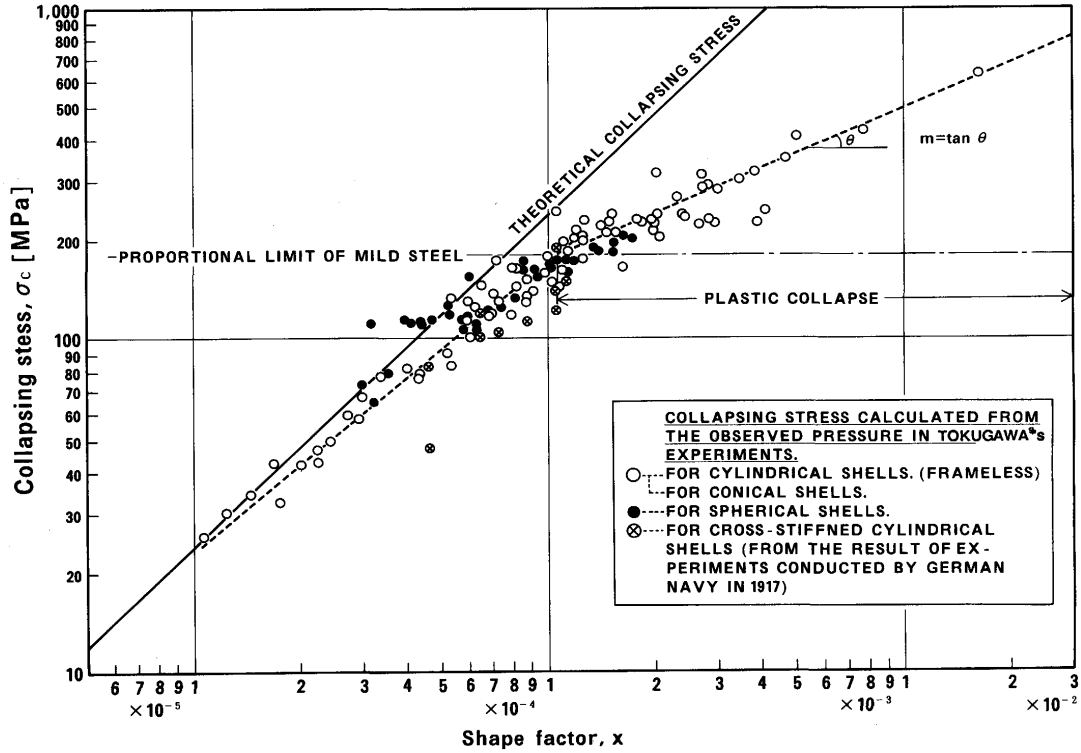


Fig. 8. Experimental results of collapsing stress by Tokugawa⁹⁾.

ング率にのみ依存し、材料の降伏強さには依存しない。

しかし徳川は論文⁹⁾の中で、圧壊応力が材料の比例限を越えると、塑性圧壊が始まるために、式(4)の理論値からはずれざることを指摘している。すなわち、圧壊には弾性圧壊と塑性圧壊があり、これまでの式は弾性圧壊応力のみを扱っていたために強度に依存しないということがうかがわれる。そこで徳川の式を拡張して塑性圧壊応力の評価を試みた。

Fig. 8の実験結果から、塑性圧壊領域においても圧壊応力と形状因子は、弾性圧壊領域と別の傾きを持った直線関係にあることが観察される。そこで弾塑性遷移点の応力を σ_e 、塑性圧壊領域の直線の傾きを m とすると、塑性圧壊領域の圧壊応力 σ_c^* は

$$\sigma_c^* = (1.2E)^m \sigma_e^{1-m} x^m \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。 m の値を図から求めると $m=0.44$ となるので、

$$\sigma_c^* = 1.08E^{0.44} \sigma_e^{0.56} x^{0.44} \dots\dots\dots (6)$$

$\sigma_e = \sigma_y$ と仮定し、形状因子 x を式(3)に従って書き戻し、式(6)を形状の項と材料の項に分けると、塑性圧壊応力は結局次のように表わされる。

$$\sigma_c^* = (0.809/r^{0.66}) E^{0.44} \sigma_y^{0.56} t^{0.66} \dots\dots\dots (7)$$

このように塑性圧壊領域では、材料の降伏強さへの依存性が現れ、圧壊応力は降伏強さの0.56乗に比例する。試みに試料BHとREの降伏強さを式(7)に代入し、BHとREの

塑性圧壊応力の比を計算すると、Table 2に示すように1.18倍となり、式(1)から期待される1.34倍より実測の耐圧強度比に近い。

徳川の式は完全球殻について解いたものであって、周辺固定の部分球殻ではない。また、耐圧強度を周辺固定の部分球殻の圧壊と考えた仮定には、缶底の複雑な形状による構造力学的強化を無視しているという問題がある。したがって、式(7)が式(1)に匹敵する汎用性を持つか否かは疑問が残る。現に、Table 2の実験に用いられた缶の形状因子 x を、式(3)から単純に計算すると、約 4×10^{-4} となり、これをFig. 8に当てはめると弾性圧壊領域となる困難がある。しかし、缶底形状が構造力学的に強化されればされるほど、Fig. 8の形状因子は大きい値となり、塑性圧壊領域の方向に動く。これらを考え合わせると、実際のDWI缶の缶底形状は、弾性圧壊が起こらないほど構造力学的に十分強化されており、バックリングは塑性圧壊で生じていると考えられる。

3.4 座屈強度

DWI缶の座屈強度は、材料力学的には薄肉円筒の圧壊問題と考えることができる。円筒の圧壊は、座屈と破壊の2種類があり、円筒の半径を r 、肉厚を t_w 、ヤング率を E とすると座屈応力 σ_c は実験的に

$$\sigma_c = 0.2Et_w/r \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる¹⁰⁾。代表的な350ml缶の一例として、 $r=33\text{mm}$ 、 $t_w=0.09\text{mm}$ 、 $E=2.12 \times 10^5 \text{MPa}$ とおくと、 $\sigma_c=116\text{MPa}$ を

得る。一方Fig. 5より, $t=0.09\text{mm}$ すなわち約70%の冷間加工を受けた壁部の引張強さは約700MPaもある。すなわち座屈応力は引張強さよりはるかに小さい。したがってDWI缶の座屈強度は弾性力学的座屈強度で決まり, 材料要因としてはヤング率にのみ依存し, その他の機械的性質には依存しない。

このことから, DWI缶用鋼板を試料BHに変更しても缶の座屈強度は変化しないと考えられる。

4. 結言

DWI缶軽量化の要請に対して, 自動車用鋼板と同じように焼付硬化性を用いて, 焼付工程で降伏強さを上昇させ, 焼付前の加工時には軟質で加工しやすく, 焼付後は耐圧強度が上昇することによって, DWI缶用鋼板の薄手化で応える可能性を基礎的に検討した。まずDWI加工を冷間圧延で実験室的にシミュレートすることにより, 適度の固溶炭素を含有する連続焼鈍軟質缶用鋼板の加工後の機械的性質を調べ, DWI加工性と底部耐圧強度の両立が可能か否かを基礎的に検討した。さらに, 実際にモデル缶を試作し, 耐圧強度を実測して基礎検討の結果を確認した。その結果, 次の結論を得た。

(1) 過時効処理付きの連続焼鈍で製造された軟質缶用鋼板は, 缶底部相当の加工歪を受けた後, 焼付硬化性により降伏強さが顕著に上昇し, 耐圧強度の向上が期待される。

(2) 同鋼板からモデル缶を試作した結果, 耐圧強度の向上を実際に確認した。

(3) 上記鋼板の引張強さは, 缶壁部相当の歪履歴において従来のDWI缶用鋼板を上回ることではなく, DWI加工性が少なくとも従来鋼板並みであることが期待される。

(4) 以上より, 過時効処理付きの連続焼鈍で製造された軟質缶用鋼板は, 薄手化に伴う耐圧強度の低下を焼付硬化性で補償することによって, 従来のバッチ焼鈍鋼板で困難であったDWI加工性と耐圧強度の両立をはかり, DWI缶の軽量化に寄与することが可能である。

(5) DWI缶の缶底形状は, 弾性圧壊が起こらないほど構造力学的に十分強化されており, バックリングは塑性圧壊で生じていると考えられる。

文 献

- 1) B.T.K.Barry and C.J.Evans : Tin and Its Uses, (1974) 100, p.12
- 2) 今津勝宏 : 鉄と鋼, 79 (1993), N103
- 3) 川島敏彦 : 軽金属, 40 (1990), p.856
- 4) AIDAプレスハンドブック第2版(アイダエンジニアリング株式会社編), (1978), p.74[アイダエンジニアリング株式会社]
- 5) N.D.Bhakuni, A.B.Trageser, S.Sundaresan and K.Ishii : A.S.M.E.D.E., 32 (1991), p.265
- 6) A.Kaplan and Y.C.Fung : NACA TN 3212 (1954)No.8
- 7) Th.von Karman and H.S.Tsien : J.Aero.Sci., 7 (1939), p.43
- 8) 植村益次 : 航空学会誌, 2 (1954), p.113
- 9) 徳川武定 : 造船協会会報, 67 (1940), p.231
- 10) 第3版機械設計便覧(機械設計便覧編集委員会編), (1991), p.370 [丸善]