

Thin-Gauge and High-Strength N-added High-Strength Tin Mill Blackplates with Good Canning Properties



登坂 章男
Akio Tosaka
技術研究所 薄板研究
部薄板研究室 主任研
究員(課長)



荒谷 昌利
Masatoshi Aratani
技術研究所 薄板研究
部薄板研究室



久々湊 英雄
Hideo Kuguminato
工業製鉄所 管理部缶
用鋼板管理室 主査
(課長)

要旨

3ピース缶胴の成形時の外観不良であるフルーティング(折れ)の発生に及ぼす素材要因、成形要因について調査した。N添加アルミキルド鋼連続焼鈍材のように固溶Nを強化元素として活用した時効性を有する鋼を用いた場合であっても、実製缶工程におけるフレクサー機能と高速度の成形プロセスによりフルーティングの発生は抑制され実用的な問題は生じない。さらに、固溶強化を利用した鋼板は、成形時は軟質化し優れた成形性・形状凍結性を示すとともに、缶としての使用時は歪み時効により高い缶強度を維持できるため、缶用鋼板の薄肉化に適している。

Synopsis:

The effect of mechanical properties and deformation conditions on the occurrence of fluting (a kind of Luders strain) at 3-piece can-body making was investigated. Nitrogen added Al-killed continuously annealed steel sheets are applicable without occurrence of fluting and they have good formability. Both of flexor treatment and high speed forming rate of real production device are advantageous for preventing fluting at roll forming. In that case the steel is soft after flexor treatment so that the precision of the shape is improved, but after assembly the proof strength of can body is increased by strain-aging of this steel. Thus this steel is suitable for a thinner gauge can use.

1 緒 言

1994年度の日本の缶詰生産量は約385億缶で、国民一人当たり、年間で約308缶が消費され、その94%を飲料缶が占める¹⁾。しかし、この時点でまだ米国の約半分の消費量であり、製缶業は今後とも前年比3~5%は伸びるといわれている成長産業分野の一つである。金属容器には、その構造様式により2ピース缶と3ピース缶がある。2ピース缶は、ぶりきやティンフリースチールの缶用鋼板より各種プレス加工法で成形された缶体と天蓋の二つの部分で構成されたもので、3ピース缶はロールフォーミングで円筒状に加工した後、各種接合法で製胴した胴部と天蓋及び底蓋の三つの部分で構成された容器である^{2,3)}。

缶用鋼板は、その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る非時効性の軟質薄鋼板。
- (2) 低炭素 Al キルド鋼で冷間圧延後、連続焼鈍を施すひずみ時効硬化性を有する硬質薄鋼板。
- (3) 低炭素 Al キルド鋼で冷間圧延後、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、加工硬化で高強度化した高強度・極薄鋼板⁴⁾。

なお、近年、(3)の方式において素材に極低炭素 Al キルド鋼も実用化が開始された⁵⁾。

大量に消費される飲料缶には、食品の保存という基本性能の他に、合理化のための技術開発が積極的に行われ実用化されている。例えば、軽量化のために鋼板の薄肉化や、ネックイン加工の活用があり、これらの合理化を満足できる鋼板が必要になった。したがって、軽量化を達成するために、従来から使用されていた鋼板よりも板厚を薄くするとともに、缶体強度を確保するための高硬質性能と高ネックイン加工性能という相反する特性を兼ね備えたものが要求されだした^{6,7)}。

3ピース缶に使われる硬質極薄鋼板においても、合理化の目的で高硬化化が進んでいる。例えば190g飲料缶の胴板には、従来は調質度T4、板厚0.20mmであったものが、最近では調質度T5、板厚0.18mmが適用されている。

鋼板の強化法には大別して(1)固溶強化、(2)結晶粒微細化強化、(3)析出強化、(4)変態組織強化、(5)加工強化があり、実用鋼においては、これらが組み合わされて用いられている。缶用鋼板における強化法を検討するに際しては、次の制約条件があり、採用できる強化法が限定された。まず、鋼に含有できる元素には各々に

* 平成7年8月21日原稿受付

上限が規制されており (JIS G 3303)、特殊元素の添加による強化はあまり期待できず、従来から使用されてきた C, Mn, N などを規制範囲内で制御するにとどまった。この条件下では (3) および (4) の強化法を採用することは難しかった。また、缶用鋼板は美観な印刷を施して使われることから、平坦度に優れていることが前提になり、そのうえ板厚が薄いため圧延作業自体が基本的に難しいことなどから、圧延時に顕著に硬質化する C, Mn を多量に添加した鋼板も敬遠される傾向にあった。したがって、缶用鋼板の素材としては圧延時は軟質で、圧延後の熱処理などで硬質になる鋼板製造法が望まれ、(1) の固溶強化法を主体とした鋼板の開発が急務となった⁹⁾。

一方、鋼中に C, N などの侵入型固溶成分を固溶状態で残存させると時効性が劣化し、引張試験においてはストレッチャーストレインが発生する。外観を重視し、プレス加工時のストレッチャーストレインの発生を非常に嫌う自動車用鋼板等においては、非時効性鋼板を使うことが常識化している¹⁰⁾。また、曲げによる円筒加工を行う場合も類似の現象として円筒形状が折れ線状に屈曲するフルーティング現象が発生することが知られていて、ここでも固溶成分の残存量をできるだけ少なくする製法が取られてきた。

しかし、固溶成分を固溶状態で残した鋼板では、3 ピース溶接缶法において、円筒加工時のフルーティング現象が発生しなくなる条件がある。そのうえ、そのような固溶強化を利用した鋼板では真円度が高くなるので、0.4 mm 程度と非常に小さく設定される溶接部のオーバーラップ代を全長にわたって安定して確保ができるとともに、缶強度が大きくなり実用化に適していることが分かった。さらに、時効性を積極的に利用して軽量化に役立てることが検討された。いっぽう 2 ピース DWI (drawn and wall ironed) 缶においては、極薄硬質化にともなって、缶体強度の維持のため非時効性鋼板に代わって時効性鋼板を用いざるを得なくなったが、懸念されたストレッチャーストレインの発生もなく製缶加工ができることが分かり、商品化された¹⁰⁾。

以上の背景から、これまで缶用鋼板には時効性のマイナス面のみから常識として使われていなかった C, N を固溶強化元素として積極的に活用する方式を開発・実用化した。

本論文では、代表的な 3 ピース缶用鋼板として、溶接缶製法におけるフルーティングの発生現象の解明および、その防止法と固溶強化鋼板の優位性について述べる。

2 フルーティング現象について

実際の 3 ピース缶の製缶工程で生じたフルーティングの外観を Photo 1 に示す。缶胴が円筒でなく多角形状に変形していることがわかる。これを簡易的にシミュレーションする目的で Fig. 1 に示す器具による簡易試験を種々の材料について実施した。また、この同種材料を実機製缶機にて円筒成形して以下のような結果となった。

- (1) 非時効性軟質鋼板では、フルーティングは発生せず、真円度の高い缶胴が成形できたが、缶体強度は低い。
- (2) 固溶 N で強化した鋼板は、簡易試験ではフルーティングを生じたが、缶体強度は高い。しかし、実機にて成形した結果はフルーティングの発生はなく、高い真円度の缶胴が成形でき、缶体強度も高い。
- (3) 2 次冷延を付与し加工硬化で強化した鋼板は、いずれの試験でもフルーティングは発生しないが、スプリングバック量が多い。この鋼板を実用化するには円筒成形技術上の工夫が必要

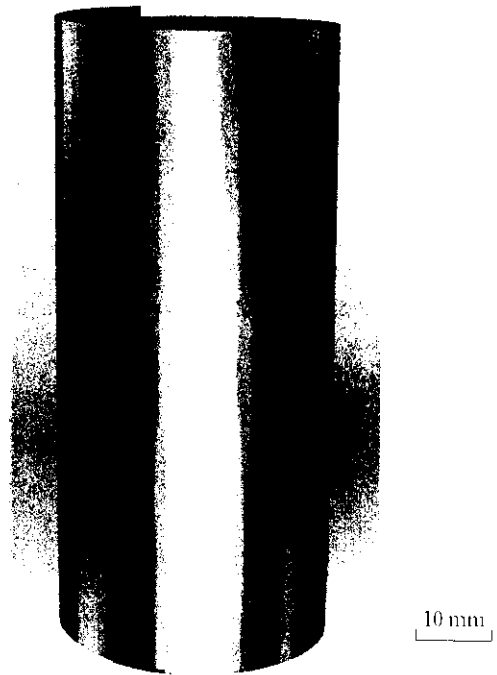


Photo 1 Appearance of the fluting defect at 3-piece can body making

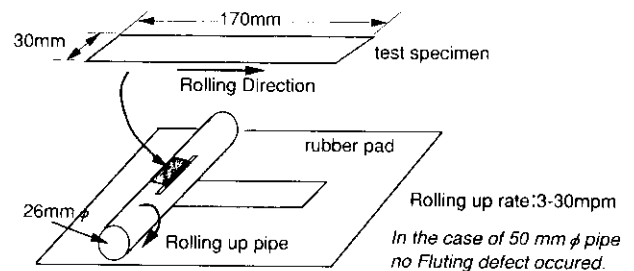


Fig. 1 Simulation of 3-piece can body making with rolling up the specimen

であることが明らかになった。

以上のようにフルーティングの発生が鋼板の時効性のみでは規定されないことと、製造法の違いに基づく成形性の相違が明らかとなった。

3 時効性鋼板の実機製缶におけるフレクサー加工の影響

3.1 3 ピース缶胴成形と機械的性質の変化

3 ピース缶胴の成形装置の一例を Fig. 2 に模式的に示す。塗装・焼付け後、スリット加工された素材が左方向から右方向にロールにより搬送され、途中、フレクサーとよばれる機構で素材に軽度の曲げ・曲げ戻し加工が付与され、その後ある角度に設定された工具に衝突することによって強制的に曲げ加工を付与され円筒状に缶胴が成形される。このフレクサーが鋼板の機械的性質の変化に及ぼす効果について調査した結果を述べる。

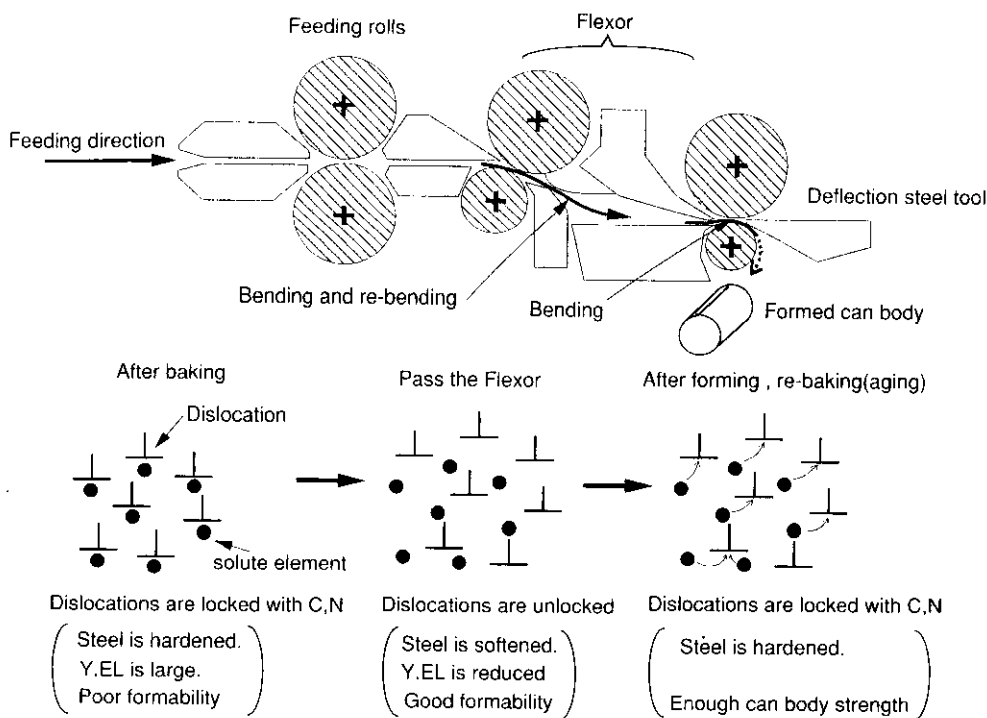


Fig. 2 Schematic illustration of the device for 3-piece can body maker

3.1.1 実験方法

Nを約100 ppm添加した低炭素アルミキルド鋼を素材とし、実機にて製造したふりき板を使用した。通常の塗装・焼付け（約210℃にて20分の時効に相当）を行った後、スードロニック社製製缶装置にてフレクサー加工までを行い、円筒に成形する直前で試料を採取し、時効の進行を防止するためにドライアイス中で保管した。比較のため塗装・焼付け後の同種供試材についてフレクサー加工にかえてラボにて調質圧延をほどこした試料を作製し同様の調査に供した。

上記の両供試材に対して、40℃の恒温槽中で0、1、7、30日の時効処理を行い、JIS 5号試験片に加工しインストロン型引張試験機により10 mm/minのクロスヘッド速度で室温にて引張試験を行った。またFig. 1に示す簡易試験も実施したが、その際の成形速度は約3 m/minと30 m/minの2水準とした。これらの試験工程では恒温槽における制御した時効以外は進行しないよう、試料はドライアイス中で保管した。

3.1.2 実験結果と考察

引張特性に及ぼす時効の影響をFig. 3に示す。塗装・焼付けのままで降伏応力(YS)は440 MPa以上、降伏点伸び(Y. El)は8%以上であるが、フレクサー通過直後はこれが各々、400 MPa、3%に減少する。この効果はその後の時効の進行とともに減少し、40℃7日の時効でほぼフレクサー通過前と同一の値となった。ここで特にYSの低下はスプリングバック量の低減に有利であると考えられる¹⁾。比較として調査した調質圧延材についてもほぼ同様の効果が得られており、両者が類似した作用を及ぼしていることが推定される。すなわち、塗装・焼付け処理が行われ時効が進んでいる状態では、転位はほぼ完全にC、Nにより固着されており、可動転位が極めて少ない。このため、いわゆる降伏点現象が発生し、その結果として、YSが高く、Y. Elは大きい。しかし、フレクサーにより曲げ・曲げ戻しを受けることにより転位が固着原子の固着より解放される結果、可動転位密度が増加し、YSおよびY. Elの顕著な低

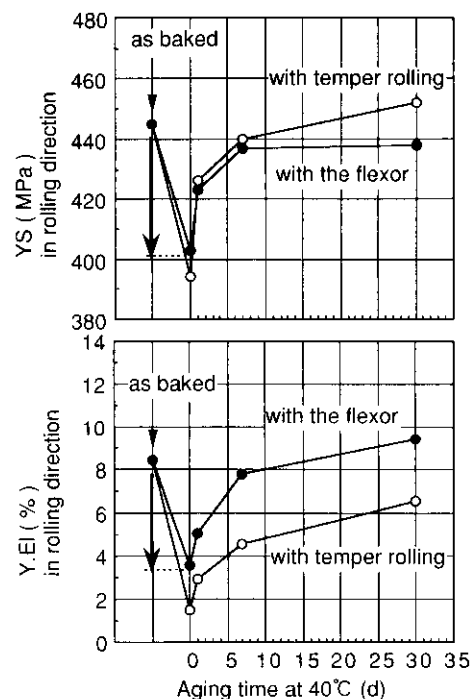


Fig. 3 Effect of aging after leveraging treatment with flexor on mechanical properties

下がもたらされる。しかし、付加される歪み量自体が小さいため比較的短時間の時効によりC、Nが拡散し、初期の固着状態に復帰するものと考えられる²⁾。ついで、簡易成形試験の結果は、50 mmφの円筒での成形では塗装・焼付けまま材でのみ若干の折れが生じたのみであったが、26 mmφの円筒での成形の場合は、Fig. 4に示すように、折れの間隔は素材のY. Elの増加に伴って減少する。また、成形速度の効果も認められ、フレクサー加工直後のもの

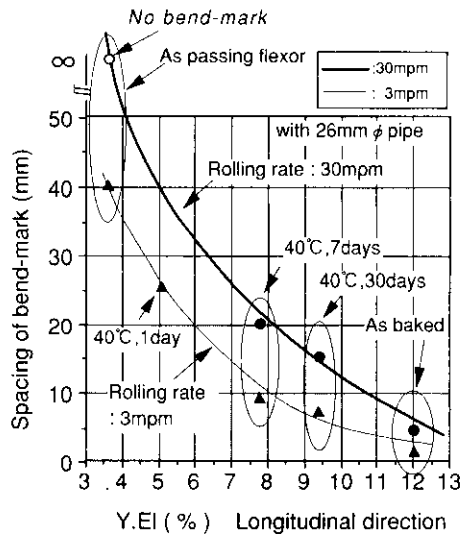


Fig. 4 Relation between yield point elongation and spacing of bend-mark at the rolling up test

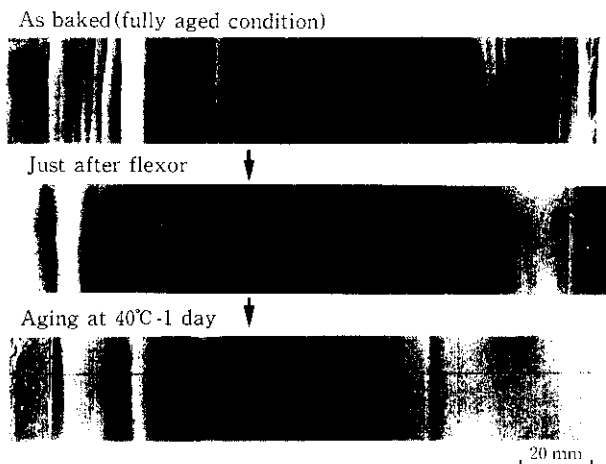


Photo 2 Effect of aging on the appearance of the specimen after the rolling up test

を高速で成形した場合は折れは発生しないが、時効が進行した場合、あるいは低速度で成形した場合は折れが発生する。簡易成形試験後の試験片外観を Photo 2 に示す。

以上のようにフレクサー加工は鋼板の折れ(フルーティング)発生の防止、スプリングバック量の低減と形状凍結性の向上に有効であり、レベラー加工と類似の効果をもっている。またこれらに及ぼす成形速度の影響も示唆された。この簡易試験では成形速度に限界があり、成形様式も実製缶と異なっている点がある。そこで、より実製缶に近いシミュレーションが可能な装置を作製し、上記の詳細な調査を行った。

4 フルーティング発生におよぼす成形速度の影響

プレス成形における歪み速度効果の重要性は古くから指摘されているが主として割れの発生防止に関するものであり、素材の機械的性質の変化のみでなく、潤滑条件の変化の影響も大きいとされている^(12,13)。したがって、フルーティング発生あるいはより広い意味でストレッチャーストレインの発生に対する成形速度の影響についての報告は少ない。

4.1 実験方法

Fig. 5 に示すような一對のロールと出側に曲げ加工を付与する治具を設置した装置を作製した。なお、ロール周速は 0~200 mpm の範囲で無段階に変化できるようにした。供試材は低炭素アルミキルド鋼に N を添加したものであり、上記 3.3 で使用したものと同一である。調質度は T5 相当である。種々の成形速度のもとで曲げ加工治具の角度・位置の設定を変化させて種々の曲率に成形した後、成形後のサンプルの表面に生ずる折れの状況を調査した。

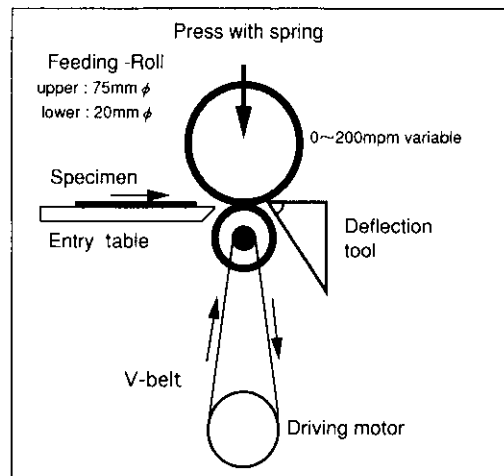


Fig. 5 Schematic illustration of the device for the simulation of 3-piece can body making

4.2 実験結果と考察

成形後の曲率・円筒径に及ぼす成形速度の影響は軽微であり、曲げ加工治具の設定で円筒径が決定された。以下はおおむね、実際の 190 g 飲料缶に近い寸法に成形した結果を述べる。折れ発生に及ぼす Y. El の影響を Fig. 6 に示す。5%以上の Y. El で折れが発生するが、この値は板厚、曲げ半径および成形速度などに依存すると考えられる。折れ発生状況におよぼす成形速度(ロール周速)の影響を Fig. 7 に示す。低速度の成形では顕著な折れが発生するが、高速度の成形では折れは消滅する。そのサンプルの外観写真を Photo 3 に示す。低速度の場合は鮮鋭な折れが生ずるが、より高速度の成形になるほど、これが不鮮明になり、ついには目視では判別できないようになる。しかし、この折れのピッチはマクロには変化しておらず、成形後の円筒径が約 45 mm で一定であったことと対

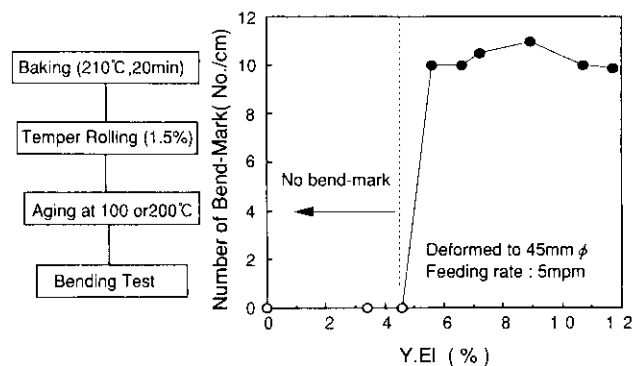


Fig. 6 Effect of yield point elongation on the density of bend-mark

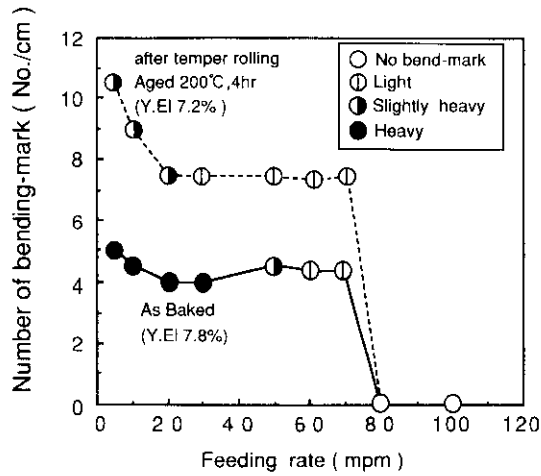


Fig. 7 Effect of feeding rate on the appearance and the number of bend-mark

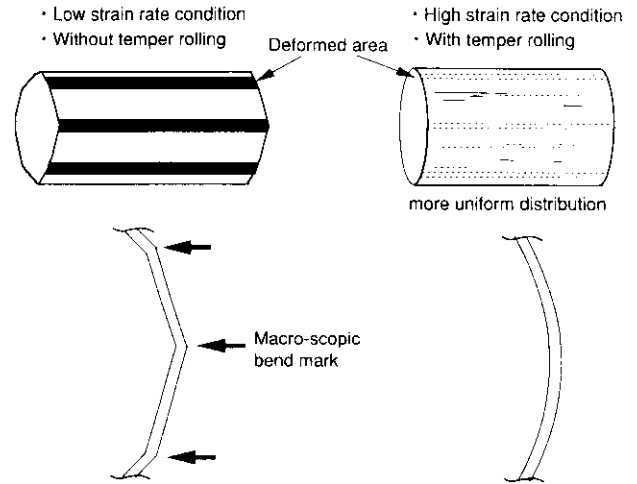


Fig. 9 Schematic illustration of the effect of deformation rate on the appearance of bend-mark

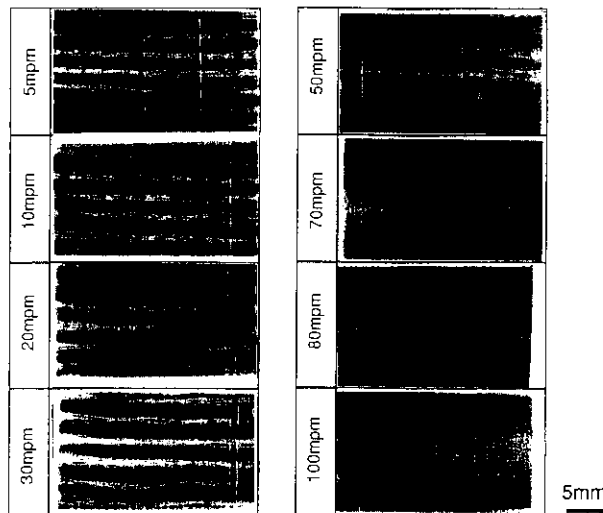


Photo 3 Effect of deformation rate on the appearance of the bend-mark on as-baked N-added steel

応している。ここで行った曲げ試験では、通常の引張試験と異なり、マクロな歪み量が板厚と円筒径の比でほぼ決定されている点に特徴がある。成形後の形状を非接触式の形状センサーで測定した結果を Fig. 8 に示す。高速で成形した場合は比較的均一な曲率変化

を示すが、低速度で成形した場合は局部的な曲率の変動が認められる。また反射光の量の測定結果では頂点部分からの反射光量が明らかに減少しておりこれが「折れ」として認識されることが考えられる。また、調質圧延を付与した場合も外観上は折れがより不鮮明になる傾向がある。これら、変形速度と調質圧延付与の影響を模式的に Fig. 9 に示す。

4.3 各種製缶法の成形速度

前節で述べたごとく、製缶時の折れの発生に対しては速度の影響がきわめて重要であり、ある臨界値以上の高速度の成形条件では外観不良と認識されるような折れが発生しないことが明らかとなった。本検討においては一方に曲げモーメントを付与する変形であったが、円筒深絞り成形においても、低速度の成形では顕著なストレッチャーストレインが発生するのに対して、高速度の変形においてはこれが実質的に消滅する。これを Photo 4 に示す。また種々の製缶法において、各々の成形歪みを相当1軸歪みに換算し、成形速度を製缶数などから推定して評価した歪み速度の比較を Fig. 10 に示す。通常の引張試験に比していずれも十分に大きな歪み速度を有していることが明らかであり、これが時効性の大きな鋼板を使用した場合でも、外観不良を生じないという現象の一つの原因と考えられる。

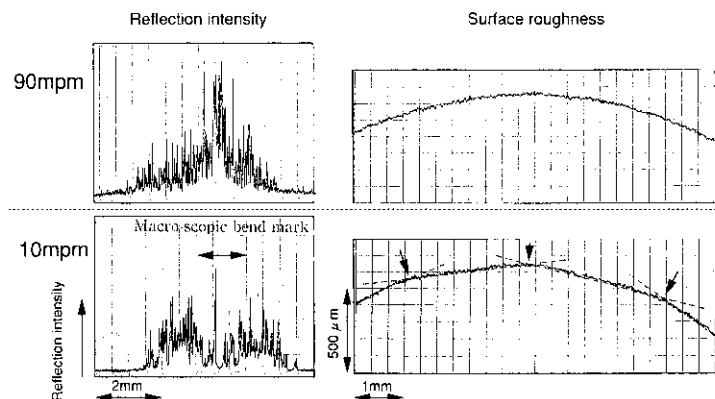


Fig. 8 Effect of feeding speed on the surface profile

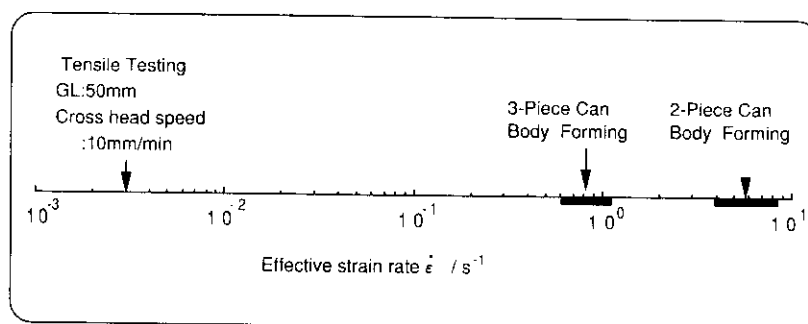


Fig. 10 Comparison of effective strain rate among some canning process

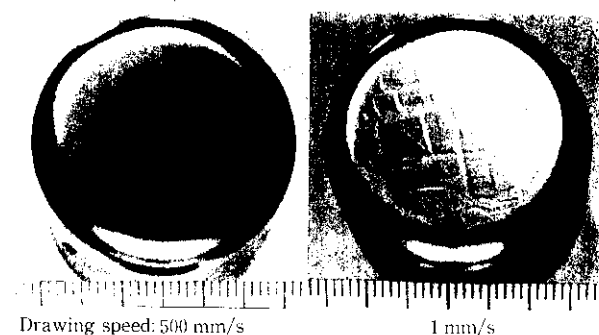
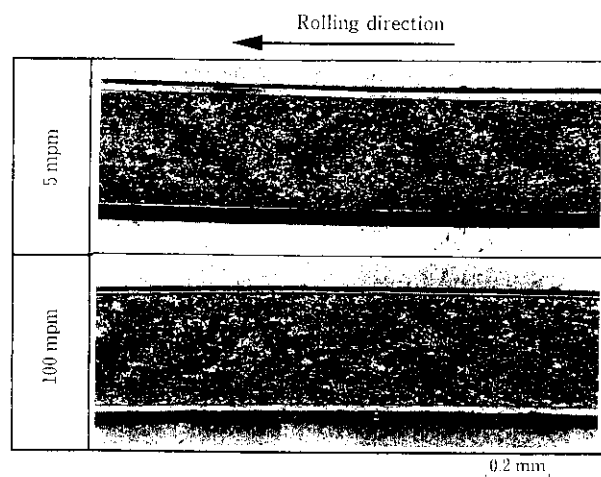
Photo 4 Effect of strain rate on the appearance of deep drawn cup (sheet thickness, 0.21 mm; punch diameter, 33 mm ϕ ; blanking diameter, 68 mm ϕ ; and drawing ratio, 2.06)

Photo 5 Effect of feeding speed on the strain distribution in the cross-section parallel to cylindrical deformation

4.4 成形速度とリュース帯の形態

ストレッチャーストレインの形態の差異はその境界すなわちリュース帯の前線の運動に支配されていると考えられる。

n 本のリュース帯前線の平均速度を v_L 、降伏点伸びを ϵ_L とすると外部より与えられる単位時間当りの歪み量 A は次式で表わされる。

$$n \cdot v_L \cdot \epsilon_L = A \quad (1)$$

応力歪曲線の形状から下降伏応力 σ_L と ϵ_L の間に(2)式が導かれ、これは経験的によく実験事実と合致することが知られている⁹⁾。

$$\sigma_L = B + C \log \epsilon_L \quad (2)$$

ここで B 、 C は定数。

(1)および(2)式より ϵ_L を消去すると(3)式が得られる。

$$1/(n \cdot v_L) = (D/A) \cdot \exp \sigma_L \quad (3)$$

ここで D は定数。

(3)式よりリュース帯前線速度と下降伏応力が相反する関係にあることがわかる。一方、リュース帯前線速度はある有限の値をとると考えられるため、外部からあたえる歪み速度が十分に大きい場合(A が大きい場合)は、 v_L が必要十分な値まで増加できず、 σ_L が増大し、これによる応力集中により n が増加する。すなわち幅の狭い、複数個のリュース帯が活動する形態をとるものと考えられる。

高速度と低速度の両条件で曲げ成形したサンプルの曲げ方向に平行な断面をFry氏液で腐食して観察した結果をPhoto 5に示す。

板厚45°方向に黒く現出されるリュース帯の密度を比較すると、成形速度の増加でより多くのリュース帯が活動し、歪み分布の均一化が起きていることがわかる。

4.5 調質圧延の効果

缶用鋼板では一般冷延鋼板に比して板厚比でより大きな調質圧延率が適用されるが、これはリュース帯の発生核を増加させ、発生するリュース帯の数を増すことで、より均一な変形を起こさせ耐フルーティング性を向上させるには有効であるといわれている。しかし、鋼板の加工強化をはかるべく調質圧延圧下率を高くしたDR材では顕著に転位密度が増加する結果、これら転位同士の間相互作用が大きくなる。すなわち、成形前のフレクサーなどによるレベリング加工が行われても、転位同士の強い拘束のため転位が長距離にわたる自由な運動ができず降伏応力の低下は生じない。このため、この時点での成形性の改善は期待できない。したがって、フルーティングの発生を回避でき、かつ成形前のレベリングにより降伏応力の低下と成形性の改善が可能な範囲で調質圧延率を設定することが望ましい。

5 強化元素としてのC、Nの比較

CとNはFig. 11に示すようにMnなどの他の元素に比べてより強力な固溶強化能をもち、両者はほぼ同等の強化能を示す。フェ

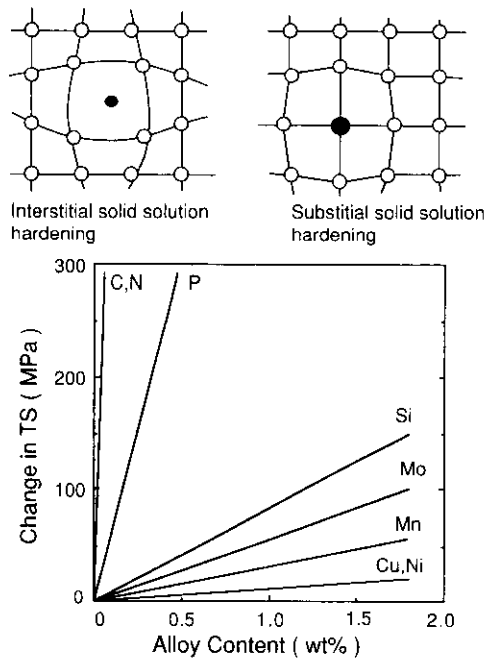


Fig. 11 Comparison of solid solution hardenability of various elements in ferrite steel

ライト相における平衡溶解度は Fig. 12 に示すように、N のほうが大きく、添加された元素がより固溶状態で残存しやすい^{14,15)}。言い方をかえれば析出物を形成しにくい。Table 1 に平衡する炭化物・窒化物と溶解度を示すが、窒化物の方が形成されにくい。一般に析出物は結晶粒の成長を抑制する効果があり、組織の微細化には C 添加が有効である^{16,17)}。しかし、微細な析出物は破壊につながるボイドの発生起点となることが多いと考えられるので、析出物を形成しやすい C のほうが N よりも延性の劣化が大きい可能性がある。

以上より、強度と延性のバランスの改善という観点では N の固溶強化を用い、加工熱処理法の工夫によって組織の微細化を図るのが望ましいと考えられる。

室温あるいは帯用鋼板の使用環境に相当するような温度範囲での両者の拡散速度はほぼ同等であるので(やや N のほうが大きいとされているが)、ひずみ時効現象においての差異は小さいと予想される。

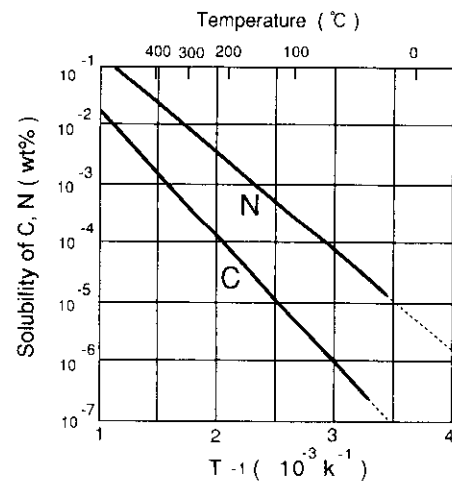


Fig. 12 Solubility of C, N in pure iron

Table 1 Solubility of C, N in ferrite phase at several temperatures (ppm)

Element	Temperature (°C)						
	20	100	200	300	400	500	700
C(Fe ₃ C)					6.3	23.2	168
C(Fe ₃ C) [Cal.]			0.007	0.21	2.3	13	160
N(Fe ₁₆ N ₂)	0.14	5.2	88	500	(2000)		
N(Fe ₄ N)				(34)	250	550	
N(N ₂ 1atm)						9.0	24

6 硬度に及ぼす N の影響と最適製造条件

製造条件を種々に変化させて、ふりきの硬度におよぼす N 量の影響を調査した結果を Fig. 13 に示す。(N_{total} - N_{as AlN}) で示す固溶 N 量の増加が硬度の増加に寄与していることがわかる。このように、通常の低炭素 Al キルド鋼に N を添加した組成の鋼を素材とし、工程条件の制御で固溶状態の N を残存させることで、鋼の強度を増加させることができる。

以上の検討結果をもとに、N を約 100 ppm 添加した鋼を溶製し、連続焼鈍した時の材質を Table 2 に示す。N 添加による引張強度

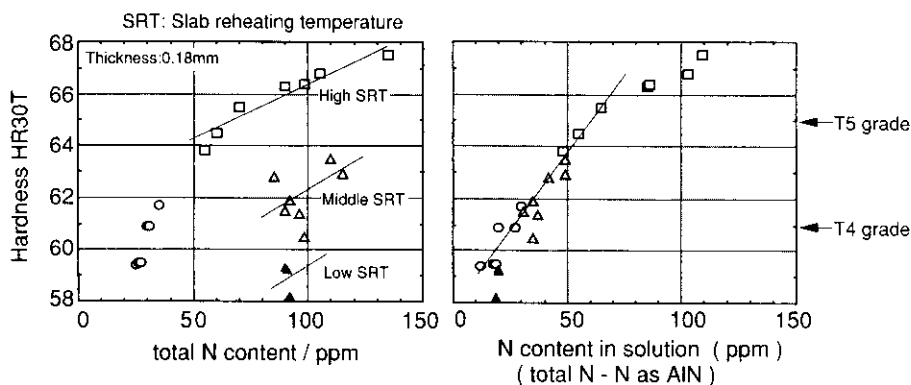


Fig. 13 Relation between hardness, total N content and N in solution

Table 2 Mechanical properties of continuously annealed low C Al-killed steel

Steel	As temper rolled			After aging (at 210°C)		
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
Conventional	314	416	25	402	409	27
With 100ppm N addition	408	454	26	427	445	26

Thickness: 0.18mm JIS No.5 specimen (longitudinal direction)
Base steel: 0.04%C-0.2%Mn-0.04Al

増加は概ね 50 MPa 程度であり、固溶状態で存在する N は化学分析の結果から 30~40 ppm 程度と考えられる。実際は固溶 N による強化のみでなく AlN による析出強化も存在する。しかし大半の AlN が熱延鋼板の段階で生じ、すでに析出物として存在していた AlN は次工程の冷延・焼鈍により、母相フェライトとの整合性を失うため、いわゆる析出強化能は減少するので、その寄与は固溶強化分に比較して小さいと考えられる。

製造条件を制御し、N を固溶状態で残存させ強化元素として用いるには以下の点に配慮する必要がある。

- (1) 鋼中の全 N 量の制御
- (2) 熱延時の再固溶の促進と再析出の防止

スラブ再加熱温度を窒化アルミの平衡溶解温度¹⁰⁾以上とし析出している窒化アルミを再固溶させ、熱延後の急冷および低温の巻取りにより再析出を防止する。

- (3) 低温・短時間の焼鈍

短時間の連続焼鈍工程においても窒化アルミの析出は進行するため再結晶温度直上の焼鈍が望ましい。

7 結 言

低炭素 Al キルド鋼に N を 100 ppm 程度添加した鋼は以下の点で高強度極薄缶用鋼板としての適用性に優れている。

- (1) N による固溶強化が使用でき、さらに歪み時効による強化は高強度化による鋼板の薄肉化に適する。
- (2) 目標強度を得るために必要な 2 次冷延による加工強化量が低減できるため高延性・低降伏比の特性を示す。
- (3) 固溶 N による時効性の増加は、3 ピース溶接缶製胴装置に付随するフレクサー加工により実用上何ら不具合を生じない。
- (4) 上記のフレクサー加工を受けることにより、N 添加鋼のように 2 次冷延圧下率が小さい製造法のものでは、塗装・焼付け処理の完全時効状態であってもレベリング効果が十分に発揮され、成形時の変形抵抗が顕著に低減する。この結果、成形材の真円度の向上、安定した接合ラップ幅の確保および形状凍結性の改善などが期待できる(2 次冷延圧下率が高い DR 材ではこの効果は小さく、成形技術上の対応が必要になる)。
- (5) 溶接缶以外の他の製缶法に適用した場合でも、その成形速度が十分に大きいため、ストレッチャーストレインの発生などの不具合は生じない。
- (6) ストレッチャーストレイン (折れ) の発生による外観不良はリユース帯が低速度変形条件下で幅の広い、不均一性の高い形態を示す場合に発生する。

参 考 文 献

- 1) 今津勝宏、佐藤信行: 「製缶技術の進歩」, 金属, **65**(1995)5, 393
- 2) 今津勝宏: 鉄と鋼, **79**(1993)2, N 103
- 3) 東洋鋼板: 「ぶりきとティンフリースチール」, (1974), [鋼アグネ]
- 4) 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)4, 44
- 5) 菅沼七三雄, 山田純夫, 登坂章男, 久々湊英雄: 金属, **65**(1995)6, 475
- 6) "The hard road to steel cans," The Canmaker, **8**(1995), 38
- 7) 中瀬勝彦: 「アルミニウム飲料缶」, 第 12 回アルミニウムシンポジウム, 軽金属学会, (1993)
- 8) 森 忠洲: 鉄と鋼, **79**(1993)6, 619
- 9) 周藤祝郎: 「ストレッチャーストレイン」, 金属学新書, (1970), [日本金属学会]
- 10) 堀川晴信: バウンダリー, **8**(1992)3, 6
- 11) 吉田清太: 「プレス成形難易ハンドブック」, (1987), 384, [日刊工業新聞]
- 12) 加藤健三: 鉄と鋼, **76**(1990)12, 2065
- 13) 小豆島明: 鉄と鋼, **78**(1992)12, 1768
- 14) F. B. Pickering: "Physical Metallurgy and the Design of Steels," (1978), [Applied Science Publishers Ltd.]
- 15) 今井勇之進: 「鉄の物性と窒素」, (1994), [鋼アグネ]
- 16) 高木節雄: 熱処理, **34**(1994)5, 260
- 17) 大森靖也: 「鉄鋼材料のミクロ組織と破壊力学」, (第 63・64 回西山記念技術講座), 1978, 39, [日本鉄鋼協会]
- 18) F. G. Wilson and T. Gladman: *International Material Rev.*, **33**(1988)5, 221.