
薄鋼板研究 10 年の歩み

Recent Activities in Research of Steel Sheets

古君 修(Osamu Furukimi)

要旨：

薄鋼板研究のここ 10 年間の歩みについて、特に新熱間圧延設備を活用した新製品開発を中心に述べる。(1) 超高 r 値冷間圧延鋼板：連続・温間潤滑圧延技術を活用して、 r 値 3.0 の冷間圧延鋼板を開発し、難成形部品へ適用している。(2) 590 MPa 級複合組織熱間圧延鋼板：千葉製鉄所第 3 熱間圧延工場の高精度冷却制御技術を適用し、熱間圧延薄物複合組織鋼板を開発した。従来鋼に比較して組織の微細化が図られ、伸び特性が向上した。(3) ハイブリッド強化型複合組織鋼板：上記複合組織鋼の開発思想にさらにフェライト相の TiC による析出強化を組み合わせ、穴拡げ性と耐疲労特性に優れるハイブリッド強化型複合組織鋼板を開発した。(4) 高成形性缶用鋼板：固溶 N を強化元素として活用した高成形性極薄缶用鋼板を開発した。

Synopsis：

The research and development activities of sheet steel in the last decade are reviewed by focusing mainly on a viewpoint of newly installed No. 3 hot strip mill at Chiba Works. The new products developed by using No. 3 hot strip mill are as follows: (1) Ultra high r -value cold-rolled sheet steel: Newly developed continuous and warm rolling technique combined with lubrication lead to marvelously high r -value ($r \geq 3.0$) cold rolled sheet steel. This steel has been applied to extra deep drawn shape parts. (2) TS/590 MPa hot-rolled dual phase sheet steel: Subdivided control valves in water cooling zone enabled to control cooling pattern precisely, which lead to new hot-rolled high strength dual phase sheet steel. Mechanical properties, especially total elongation, have been much improved because of fine grains. (3) Hybrid dual phase sheet steel: Combination of the above mentioned dual phase steel and precipitation strengthening by using TiC in ferrite phase lead to hybrid dual phase sheet steel. Hole expanding property and fatigue property have been greatly improved. (4) Highly formable thin steel for can use: Very thin and highly formable cold rolled sheet steel for can use has been developed using solute N. Improved product accuracy in strip gauge and crown using No. 3 hot strip mill backed up the development of the new products.

本文は次のページから閲覧できます。

Recent Activities in Research of Steel Sheets



古君 修
Osamu Furukimi
技術研究所 薄板研究
部門長・工博

要旨

薄鋼板研究のここ 10 年間の歩みについて、特に新熱間圧延設備を活用した新製品開発を中心に述べる。(1) 超高 r 値冷間圧延鋼板：連続・温間潤滑圧延技術を活用して、 r 値 3.0 の冷間圧延鋼板を開発し、難成形部品へ適用している。(2) 590 MPa 級複合組織熱間圧延鋼板：千葉製鉄所第 3 熱間圧延工場の高精度冷却制御技術を適用し、熱間圧延薄物複合組織鋼板を開発した。従来鋼に比較して組織の微細化が図られ、伸び特性が向上した。(3) ハイブリッド強化型複合組織鋼板：上記複合組織鋼の開発思想にさらにフェライト相の TiC による析出強化を組み合わせ、穴拡げ性と耐疲労特性に優れるハイブリッド強化型複合組織鋼板を開発した。(4) 高成形性缶用鋼板：固溶 N を強化元素として活用した高成形性極薄缶用鋼板を開発した。

Synopsis:

The research and development activities of sheet steel in the last decade are reviewed by focusing mainly on a viewpoint of newly installed No. 3 hot strip mill at Chiba Works. The new products developed by using No. 3 hot strip mill are as follows: (1) Ultra high r -value cold-rolled sheet steel: Newly developed continuous and warm rolling technique combined with lubrication lead to marvelously high r -value ($r = 3.0$) cold rolled sheet steel. This steel has been applied to extra deep drawn shape parts. (2) TS/590 MPa hot-rolled dual phase sheet steel: Subdivided control valves in water cooling zone enabled to control cooling pattern precisely, which lead to new hot-rolled high strength dual phase sheet steel. Mechanical properties, especially total elongation, have been much improved because of fine grains. (3) Hybrid dual phase sheet steel: Combination of the above mentioned dual phase steel and precipitation strengthening by using TiC in ferrite phase lead to hybrid dual phase sheet steel. Hole expanding property and fatigue property have been greatly improved. (4) Highly formable thin steel for can use: Very thin and highly formable cold rolled sheet steel for can use has been developed using solute N. Improved product accuracy in strip gauge and crown using No. 3 hot strip mill backed up the development of the new products.

1 緒 言

薄鋼板は自動車、建材、電気機器および容器用などとして広範囲に使用されており、板厚、板幅、表面の仕上げ状態および機械的性質など、要求される特性が極めて多様化している。それと同時に、各産業分野からはより高機能を有する鋼板の開発が望まれている。一方、鋼板製造プロセスについてみると連続鋳造、連続焼鈍および連続熱間圧延など連続化技術が急速に発展してきた。本報告では、主に連続熱間圧延プロセスを適用した薄鋼板の機械的性質の改善に焦点を合せて、ここ 10 年の技術開発の流れを振り返る。

2 製造工程の連続化

近代鉄鋼業において、技術革新の主要課題の 1 つは「連続化」である。これは省エネルギー化、地球環境保全という大きな潮流に従っており、製鉄-製鋼-熱間圧延-冷間圧延-表面処理という製造工程を貫くものである。

その 1 つは連続鋳造法の確立であり、これは熱エネルギーの節約の面のみではなく、鋼成分の変動を極めて小さくできるということから、材質制御面でも大きな利点がある。

次に連続焼鈍技術の確立が挙げられる。これまでの箱焼鈍に比較して、連続焼鈍プロセスを用いることにより、極めて高能率に、均質でかつ表面性状に優れた薄鋼板が安定して製造できる。さらに、連続焼鈍工程の特徴である急速加熱・急速冷却の熱履歴を適用することで高張力冷間圧延鋼板を初めとする特徴ある製品が開発された。フェライト-マルテンサイト複合組織鋼に代表される低降伏

* 平成10年11月6日原稿受付

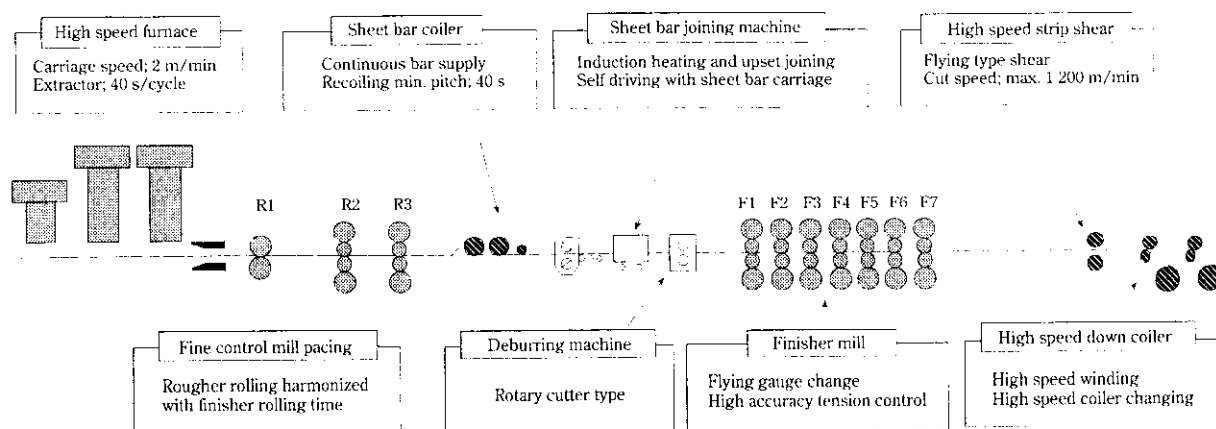


Fig. 1 Schematic representation of endless hot strip rolling equipments

比鋼板¹⁾、耐時効特性と焼付け硬化性をあわせもつ深絞り用冷間圧延鋼板²⁾などがその例である。

連続焼鈍に続く「連続化」は、最近、熱間圧延プロセスにおいて実現されることとなった。熱間圧延プロセスは、極めて高い生産性を有するタンデム式のホットストリップミルに代表される。熱間圧延プロセスにおける連続化の第1は、CC-DR（連続鋳造・直接圧延）、DHCR（直接温片挿入・圧延）に代表される製鋼・熱間圧延工程の連続化と同期化である。さらに、この連続化プロセスを活用することにより高度な炭窒化物の析出現象を制御することが可能となり、材質を改善できる。

連続化の第2は、熱間圧延の連続化である。熱間圧延は粗圧延機と6～7段の仕上げ圧延機を連続して通過させるが、基本的にはスラブを1枚ずつ圧延するものである。しかし、仕上げ熱間圧延プロセスにおける連続化を川崎製鉄千葉製鉄所は1996年の初頭に世界に先駆けて実用化した。粗圧延を終了したシートバーを仕上げ圧延機の入側で接合することで、連続的に仕上げ圧延を行なう技術であり、この設備の概略をFig. 1に示す^{3,4)}。この熱間圧延の連続化は薄鋼板の材質を飛躍的に向上させる技術である。

3 新熱間圧延設備を活用した新製品

前項で述べたように、熱間圧延の連続化は機械的性質の向上の上でも重要な役割をはたす。本項ではこの技術を活用したいくつかの製品を紹介する。

3.1 超高 r 値冷間圧延鋼板

鋼板の r 値が大きい程深絞り成形性は良好となり、この現象は結晶組織の配向と密接な関係にあることが知られている⁵⁾。これまで、Cをはじめとして鋼中の不純物元素を極限まで低減し、さらにNb、Tiなどの微量元素を添加してCおよびNを析出物として固定した極低炭素IF（interstitial atom free）鋼を素材とし、最適な冷間圧延および連続焼鈍サイクルを組み合わせることで、鋼板の集合組織の配向を(111)に高度に制御して、 r 値を向上させてきた。この方法で工程的に製造されている鋼板の r 値の最高は、2.4程度である。しかし、自動車パネル一体成形化の指向に対応して、さらに r 値の高い鋼板の開発がここ10年来要求されてきた。一般に冷間圧延・焼鈍後の r 値は冷間圧延前の母板の r 値と正の相関があることが知られている⁶⁾。

鋼板製造の通過工程である熱間圧延では、圧延後にオーステナイトからフェライトへの変態が生じるため、結晶構造が変化すること

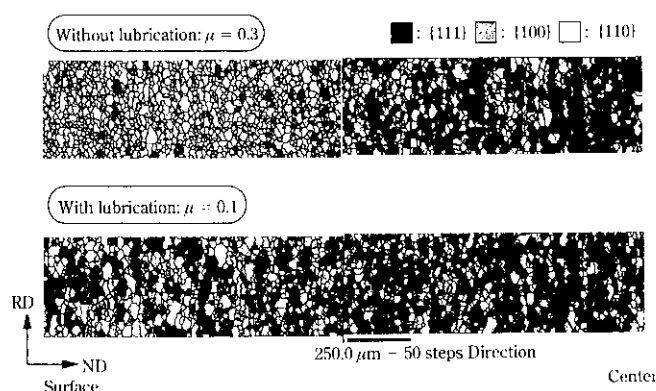


Fig. 2 Effect of lubrication on the texture of hot-rolled steel sheet, measured with EBSD (electron back scattering diffraction)

で結晶配向がランダム化し、高い r 値が得られない。また、変態による結晶組織のランダム化を避けるべく、より低温のフェライト域で圧延した場合には、鋼板と圧延ロールの間に生ずる大きな摩擦のために鋼板の表層部に強いせん断変形が付与され、表面の(111)集合組織形成が阻害され、 r 値を低下させる要因となる⁷⁾。この解決法は、潤滑圧延による表面せん断層の低減である。潤滑圧延を施すことにより、表面のせん断組織が低減し、その結果、Fig. 2に示すように板厚中心部のみでなく表面部にも(111)面が配向するようになる。一方、冷間圧延・焼鈍を2回行なうことで超高 r 値を有する鋼板の製造も可能であるが、製造ラインの板厚の規制から、2.4程度の r 値が限界であった。

川崎製鉄では千葉製鉄所新熱間圧延工場（95年5月稼働）において96年1月から世界で初めて完全連続熱間圧延の操業「エンドレス・ホットストリップ圧延」を開始した^{3,4)}。このプロセスは、仕上げ圧延機の入側で約30mm厚みのシートバーを接合することにより7スタンドからなるタンデム圧延を各スラブごとではなく連続して行なうものである。完全連続熱間圧延の実現により、従来の熱延設備では圧延中の鋼板の蛇行、スリップなどの圧延の不安定性の問題から適用できなかった、フェライト域での強潤滑・強圧下圧延が可能となった。この技術開発により、従来のフェライト域圧延では避けられなかった摩擦による鋼板表面の付加的なせん断変形が抑制され、熱間圧延母板の段階でも高度な結晶組織制御が可能となり、従来のレベルを超える超高 r 値、 $r=3.0$ の冷間圧延鋼板の製造が可能となった^{8,9)}。超高 r 値鋼板の代表的な特性を従来の最高レベ

Table 1 Typical mechanical properties of high r -value steel sheets

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	$\bar{r}$ -value
Newly developed high r -value steel sheet	150	280	55	3.0
Conventional high r -value steel sheet	150	280	55	2.4

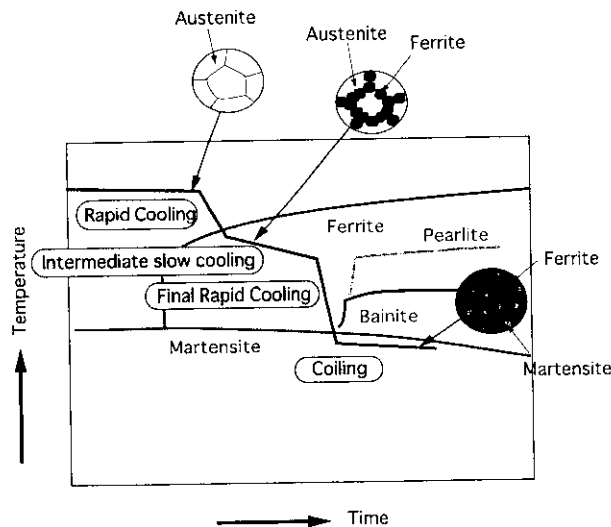


Fig. 3 Schematic illustration of cooling pattern for manufacturing hot rolled dual phase steel sheets

ルの高 r 値冷延鋼板と比較して Table 1 に示す。これらの鋼板は、オイルパンなどの超深絞り成形部品に広く適用可能である。

3.2 引張強さ 590 MPa 級複合組織熱間圧延鋼板

複合組織 dual phase 鋼は軟質なフェライト母相中に硬質なマルテンサイトを島状に分散させたものであり、降伏比（降伏強さ (YS)/引張強さ (TS)）が小さく成形性に優れ、かつ高延性という特徴を有する¹⁰⁾。複合組織鋼板は自動車用として、特に薄物化による部品軽量化への応用が期待されている。当初は冷間圧延工程で製造されていたが、その後、熱間圧延までの鋼板開発が進められた。この際、製造技術面では形状・寸法を自動車用プレス部品への使用に耐えるように高精度に維持すべく、変形抵抗の高い材料の圧延技術が、また材質の制御の観点では加工-熱履歴を総合的に見た高精度冷却制御技術の確立が重要となる。

複合組織熱間圧延鋼板の製造にあたり、仕上げ圧延後の冷却パターンの制御は、特に重要な因子の一つである。Fig. 3 に示すように、まず圧延後の急速冷却とそれに続く徐冷によりフェライト変態を促進して、未変態のオーステナイト中に C を濃化させ、その後の急冷処理でオーステナイトを有効にマルテンサイトに変態させるものである。千葉製鉄所新熱間圧延設備を適用することにより、この複雑な冷却を高精度に制御することが可能となった。Table 2 に代表的な引張特性とその特徴を従来の複合組織鋼板と比較して示す。30% を超える良好な伸びと 50% 程度の低い降伏比に特徴がある。また、最近の研究開発の結果、Fig. 4 に示すようにフェライトとマルテンサイトを微細化することにより優れた衝撃吸収特性を有することが明らかとなった^{11, 12)}。この技術も千葉製鉄所新熱間圧延設備

Table 2 Typical mechanical properties of TS590 MPa grade hot-rolled dual phase steel sheets

YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	El (%)	n -value	$\bar{r}$ -value
304	617	49	31	0.23	~1.0

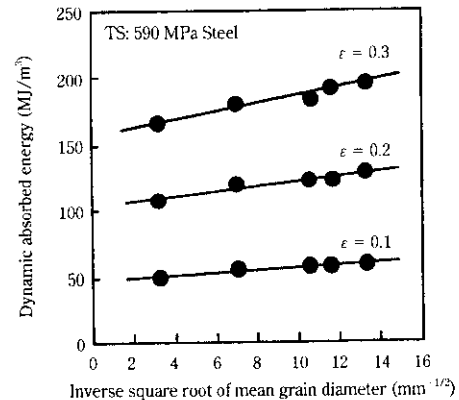


Fig. 4 Influence of the grain diameter of dual phase steel on dynamic absorbed energy

の適用が背景にある。

3.3 ハイブリッド強化型複合組織鋼板¹³⁾

自動車車体のさらなる軽量化のために、引張強さ 780 MPa 級高強度鋼板が要求されている。開発にあたり、組織強化鋼と析出強化鋼の材質上の利点を組み合わせるべく、微視組織をフェライトとマルテンサイトからなる複合組織としたうえでフェライト相を析出強化させる方法で開発を行なった（ハイブリッド強化型鋼板）。その狙いは以下の 4 点である。

- (1) フェライト相を析出強化することで、硬質相であるマルテンサイトとの強度差を小さくし、フェライト相への歪みの集中を抑制し、局部伸びを向上させるとともに伸びフランジ性を改善する。
- (2) 複合組織鋼の有する低降伏比と大きな一様伸びの特長を確保する。
- (3) 析出強化したフェライト相と硬質第 2 相であるマルテンサイト相が共存することで疲労亀裂に対する伝播抵抗を高め、疲労特性を改善する。
- (4) 溶接部が組織強化鋼のように異常硬化せず、かつ析出強化鋼のように HAZ 部軟化も生じない中庸的溶接部硬化特性をもたせる。

以上のような微視組織を形成させるための概念図を、Fig. 5 に示す。特に熱間圧延後の冷却工程で、2 つの反応を進めることが重要である。第 1 はオーステナイトからフェライト変態直後のフェライト粒に析出強化能を持つ微細な TiC を速やかに形成させることであり、第 2 は TiC として消費されなかった余剰の C を、その時点で残留するオーステナイト相側に濃化させ、以降の冷却でマルテンサイトを形成しやすくさせることである。

以上の考え方にに基づき、TS690 MPa 級と 780 MPa 級のハイブリッド強化型複合組織熱間圧延鋼板を千葉製鉄所新熱間圧延設備で製造した。Table 3 に本鋼の化学成分、Table 4 に機械的性質、また Photo 1 に透過型電子顕微鏡による微視組織観察結果を示す。フェライトとマルテンサイトからなる複合組織であることに加えて、フ

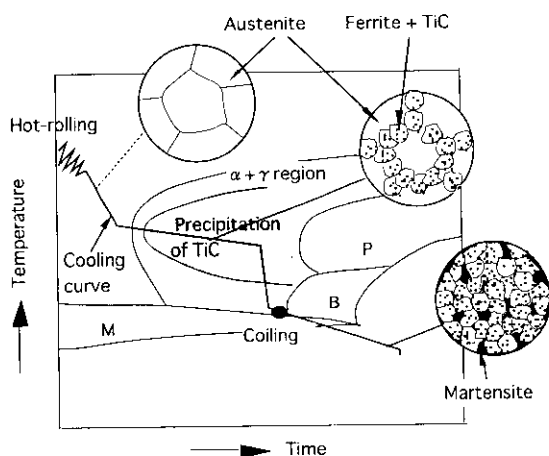


Fig. 5 Schematic illustration of cooling pattern for manufacturing of hybrid-type high strength steel sheets

Table 3 Chemical compositions of hybrid-type steel sheets (mass%)

TS grade	C	Si	Mn	Ti	P	S	Al
690 MPa	0.06	1.25	1.45	0.08	0.010	0.001	0.030
780 MPa	0.08	1.50	1.80	0.10	0.010	0.001	0.030

Table 4 Mechanical properties of hybrid-type steel sheets

TS grade	YS (MPa)	TS (MPa)	YS/TS (%)	El (%)	Fatigue limit (MPa)	
					As hot-rolled	Surface grinded
690 MPa	516	688	75	25	319	392
780 MPa	558	828	67	21	343	462

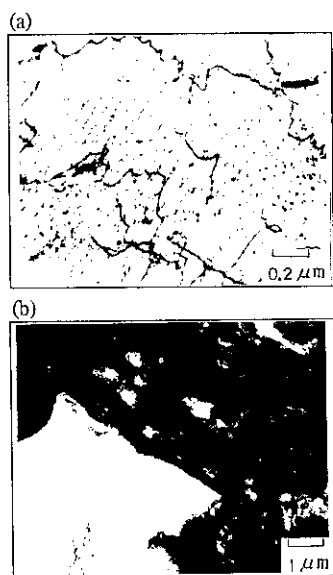


Photo 1 TEM images of newly developed hybrid-type steel sheets (a) Ferrite grain with TiC precipitates, (b) Martensite phase (dark contrast)

フェライト相には微細 TiC が列状に析出しており、目標とした微視組織が形成されていることがわかる。

本鋼の穴げら率は Fig. 6 に示すとおり既存の dual phase 型複合

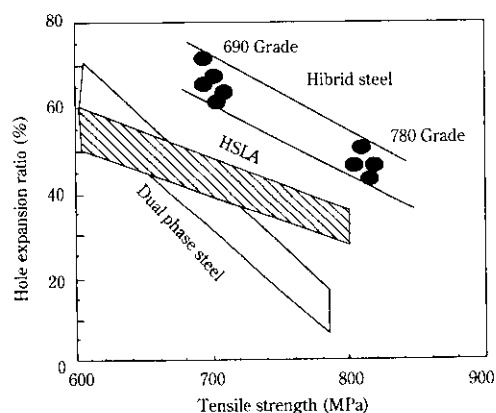


Fig. 6 Relation between the hole expansion ratio and the tensile strength of conventional and newly developed hybrid-type high strength steel sheets

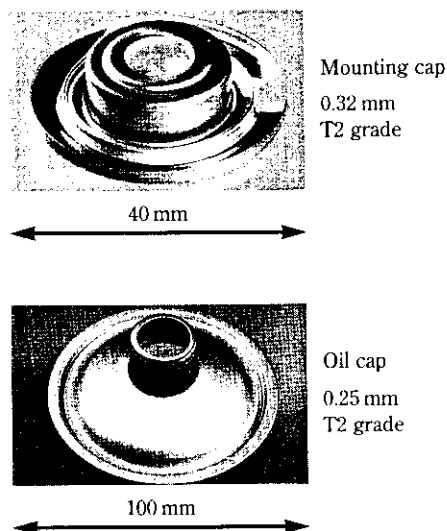


Photo 2 Examples of formed parts using formable thin-gauge steel sheets

組織鋼および析出強化鋼よりも高い。これは上述したようにフェライト相が析出強化されることによって硬質第 2 相であるマルテンサイトとの強度差が小さくなり、加工に際しフェライト粒に歪みが集中することを抑制する効果が生じたためである。

3.4 高成形性缶用鋼板

極薄鋼板と呼ばれる板厚が 0.2 mm 程度の缶用鋼板においても、より高生産性を有し、均一な材質が得られる連続焼鈍の適用が拡大された。調質度が T4~T5 の硬質な鋼板の分野では比較的容易に連続焼鈍が適用されたが、連続焼鈍では冷却速度が大きいため固溶 C が残存しやすく、軟質な鋼板を製造することは困難であった。しかし、素材として C 量が 20 ppm の極低碳素鋼¹⁴⁾を用いることによって連続焼鈍法によっても、従来の箱焼鈍材と同等の軟質な鋼板を得ることに成功し、現在ではこの方法で調質度 T1~T3 の軟質な極薄鋼板およびそのめっき鋼板が量産されている。これらの鋼板は従来の箱焼鈍材以上の高い延性、 r 値を有することから、その用途は拡大しつつある¹⁵⁾。この鋼板の適用事例を Photo 2 に示す。いずれも極めて難成形な部品であるにもかかわらず安定した成形が行なわれている。これらの高成形性缶用極低碳素鋼板の製造工程において、

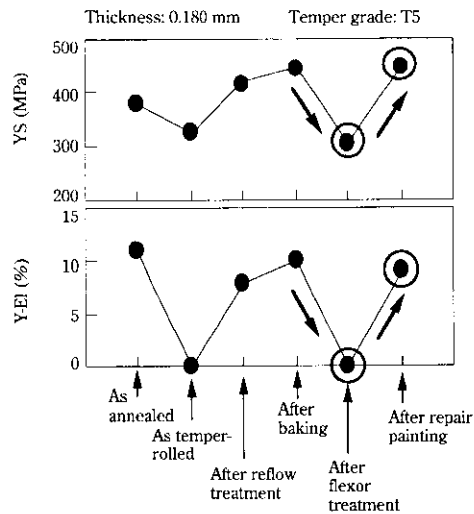


Fig. 7 Change of tensile properties of N solution strengthened thin-gauge steel sheets for can use during can manufacturing process

熱間圧延は熱間圧延母板の板厚が小さいことと従来の低炭素鋼（0.03～0.05% C 含有鋼）に比較して相対的に変態温度が上昇しているため、より厳密な圧延温度制御・鋼板の形状制御などが重要となる。この高精度な熱間圧延条件の制御に新熱間圧延設備が寄与している。

缶用鋼板の分野においても素材の薄肉化を図るため、強度のより高い鋼板の要求がある。これまでも、箱焼鈍材から連続焼鈍材に変えることによる強度上昇で薄肉化が図られてきた。さらなる強度の増加を図るためには、以下に示す方法がある。

- (1) 鋼中の C, Mn などの強化元素を増加させる。
- (2) 焼鈍後にさらに 2 次冷間圧延を付与し加工硬化させる。

しかしながら、(1) の方法では、C, Mn の添加で鋼板製造時の圧延の変形抵抗が顕著に増加する。また、使用する際にも溶接缶用途では溶接部が顕著に硬化し、フランジ加工性が低下するという問題点がある。(2) の方法には鋼板の強化と同時に板厚の低減が図れるという利点があるが、素材の延性が顕著に低下すること、および降伏比の顕著な増加によるスプリングバックの増加という問題点がある。

Table 5 Typical mechanical properties of N solution strengthened thin gauge steel sheets for can use

Steel	As temper rolled			After aging (at 210°C)		
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
Conventional	322	415	25	381	406	27
With 100 ppm N addition	331	454	26	442	462	27

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

る。

以上の問題点を解決する手段として、従来、積極的には使用されていなかった強化元素である N を SR (single reduce) 材に適用することで、主として 3 ピース缶用素材の研究開発が行なわれた。その結果、該鋼板は当初、N 添加による時効性の増大に対応して予想されたフルーティングの発生なども認められず、むしろ Fig. 7 に示すように、成形時には軟質で、製缶後は急速な歪み時効により有効に高強度化するという極めて優れた特徴を有することが明らかとなった^{16,17)}。この鋼板は製品の段階で添加した N の大部分を固溶状態で残す必要があり、熱間圧延条件をはじめとして各工程の厳密な制御が必要とされる。この点で新熱間圧延設備の高精度な圧延条件制御技術が有効に活用されている。

Table 5 に代表的な特性を従来鋼と比較して示す。塗装後の焼き付けに相当する時効処理後に歪み時効硬化により大きな強度増加を生じている。

5 結 言

最近の 10 年間で、薄鋼板の製造プロセスの連続化は著しく推進され、それに応じてこれらの利点を活かした製品開発を進めた結果、既存品の製品品質の向上のみならず、多くの新製品も開発された。特に最近達成された熱間仕上げ圧延の連続化は鋼板開発の自由度を飛躍的に拡大させる革新的なものであった。今後はこの技術をベースにした幅広い分野での新製品開発が期待される。

参 考 文 献

- 1) 橋口耕一、西田 稔、加藤俊之、田中智夫：川崎製鉄技報，**11** (1979)1, 68-77
- 2) 佐藤 進、入江敏夫、橋本 修：鉄と鋼，**68**(1982)9, 1362-1368
- 3) 小川靖夫、中村武尚、北尾齊治：川崎製鉄技報，**27**(1995)3, 131-135
- 4) 二階堂英幸、磯山 茂、野村信彰、林 寛治、森本和夫、坂本英夫：川崎製鉄技報，**28**(1996)4, 224-230
- 5) R. L. Whiteley: *Trans. ASM.*, (1960)52, 154
- 6) 松藤和雄、下村隆良：鉄と鋼，**55**(1969), S535
- 7) 松岡才二、森田正彦、古君 修、小原隆史：鉄と鋼，**83**(1997), 127
- 8) 角山浩三：まてりあ，**33**(1994), 20
- 9) 坂田 敬、松岡才二、小原隆史、角山浩三、白石昌司：まてりあ，**36** (1997), 376-378
- 10) 間野純一、西田 稔、田中智夫、加藤俊之、青柳信男、山田信男：鉄と鋼，**68**(1982)9, 1297
- 11) 三浦和哉、高木周作、加藤俊之、松田 修、谷村真治：まてりあ，**35** (1996)5, 570-572
- 12) K. Miura, S. Takagi, T. Hira, O. Furukimi, and S. Tanimura: SAE paper No. 980952, (1998)
- 13) 森田正彦、清水哲雄、古君 修、青柳信男、加藤俊之：まてりあ，**37** (1998)6, 513-515
- 14) T. Obara, K. Sakata, K. Osawa, M. Nishida, and T. Irie: "Metallurgical Basis of Producing Continuous-annealed Low-Temper Tinplate", 363-383, in *Technology of Continuously Annealed Cold-rolled Sheet Steel*, Edited by R. Paradhan; TMS AIME, Detroit, (1984)
- 15) 奥田金晴、登坂章男、坂田 敬、古君 修、佐藤 寛、久々湊英雄：鉄と鋼，**83**(1997)9, 569
- 16) 登坂章男、荒谷昌利、小原隆史、久々湊英雄、泉山禎男：まてりあ，**36**(1997)4, 379-381
- 17) 登坂章男、荒谷昌利、久々湊英雄：川崎製鉄技報，**27**(1995)3, 169-176