
自動車用加工性高張力冷延鋼板

High Strength Cold Rolled Steel Sheets with Good Formability for Automobiles

大橋 延夫 (Nobuo Ohashi) 高橋 功 (Isao Takahashi) 橋口 耕一 (Koichi Hashiguchi) 古川 幸夫 (Yukio Furukawa)

要旨：

成形性の良い高張力冷延鋼板の製造方法について述べた。特別な焼鈍工程を用いない場合の鋼の強化は、おもに鋼の化学成分の調整により行われる。それには固溶硬化と析出硬化を利用する2つの方法がある。Si, Mn, P, Nb, Vなどの元素を添加した鋼板の降伏強度、引張強さと延性の関係を調べた。そして成形性と点溶接性を考慮して、引張強さ40～60kg/mm²の冷延鋼板(APFC40～60)の化学成分系は、T.S.40, 45kg/mm²級は低C-Si-Mn系、T.S.50kg/mm²以上は低C-Si-Mn-Nb系とした。新しく開発した時効硬化型高張力冷延鋼板の性質についても報告する。

Synopsis：

Methods are discussed for the manufacture of high strength cold rolled steel sheets with good formability. Steels that have not been subjected to any special annealing process can be strengthened by controlling their chemical compositions. For this purpose, solid solution and precipitation hardenings are employed. The relations between yield strength, tensile strength and ductility are investigated on the steels to which Si, Mn, P, Nb, Ti, V, etc. are added. When taking into consideration of formability and spot weldability, the chemical compositions of cold rolled sheets having tensile strengths of 40-60kg/mm² (APFC40-60) have been determined as follows; Low C-Si-Mn as the steels of T.S. 40, 45kg/mm², low C-Si-Mn-Nb as the steels of T.S. $\geq$ 50kg/mm². The properties of newly developed age hardenable high tensile strength cold rolled steel sheets are also discussed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

自動車用加工性高張力冷延鋼板

High Strength Cold Rolled Steel Sheets with Good Formability for Automobiles

大 橋 延 夫*

Nobuo Ohashi

高 橋 功**

Isao Takahashi

橋 口 耕 一***

Koichi Hashiguchi

古 川 幸 夫****

Yukio Furukawa

Synopsis:

Methods are discussed for the manufacture of high strength cold rolled steel sheets with good formability. Steels that have not been subjected to any special annealing process can be strengthened by controlling their chemical compositions. For this purpose, solid solution and precipitation hardenings are employed.

The relations between yield strength, tensile strength and ductility are investigated on the steels to which Si, Mn, P, Nb, Ti, V, etc. are added.

When taking into consideration of formability and spot weldability, the chemical compositions of cold rolled sheets having tensile strengths of 40-60kg/mm² (APFC40-60) have been determined as follows: Low C-Si-Mn as the steels of T. S. 40, 45kg/mm², low C-Si-Mn-Nb as the steels of T. S. ≥ 50 kg/mm².

The properties of newly developed age hardenable high tensile strength cold rolled steel sheets are also discussed.

1. ま え が き

安全自動車の構想を契機として、高張力薄鋼板に対する関心が高まってきた。さらに排気ガス規制の実施とともに、車体強度の上昇のみならず車体重量の軽減のため高張力薄鋼板の利用が以前にもまして真剣に検討されつつある。最近日本自動車工業会より、自動車用加工性冷間圧延（熱間圧延）高張力薄鋼板の規格¹⁾が発表された。

一般に自動車部品は複雑な形状に成形され、かつその多くが溶接構造物として使用されるため、高張力薄鋼板といえども成形性、溶接性を兼備した特性が要求される。

筆者らはこのような観点から、鋼板の高強度化に伴って劣化する延性を最小限に抑えるとともに溶接性をも考慮した高張力薄鋼板の開発を行ってきた。

本報告はこの開発経過を報告するとともに、当社の高張力冷延薄鋼板の特性を紹介する。

* 技術研究所薄板研究室室長・工博

*** 技術研究所薄板研究室

** 技術研究所薄板研究室主任研究員

**** 千葉製鉄所管理部薄板管理課

2. 冷延鋼板の高強度化要因

高張力冷延鋼板を開発するうえで重要な因子は、化学成分と冷間圧延および焼鈍条件である。しかし現実には、高張力冷延鋼板の製造のために新たな設備を設置することは考えられず、一般冷延鋼板と同じ設備で製造することが前提になる。通常の箱焼鈍は A_1 変態点直下で長時間の焼鈍を行うため鋼板の軟化には有効であるが、高強度化には不利である。したがって、箱焼鈍を利用する場合には化学成分の検討が必要となる。

一方、高温から急冷して得られる変態組織により高強度化を図る連続焼鈍法もあり、これを利用した開発結果も種々発表されている²⁻⁵⁾。しかし現実にはそれに適した設備が普及しておらず、また製造できる板の寸法(厚み, 幅)にも限界がある。そこでこの問題の検討は別の機会に譲るとして、ここでは通常の冷延鋼板の製造工程である箱焼鈍による高張力冷延鋼板の開発を中心に述べることにする。

2-1 化学成分

冷延鋼板の強度を高くしかつ延性の低下が少ない化学組成を求めるため、Table 1 に示す成分範囲の多数の鋼を溶製した。これらを 1200°C に加熱後 2.0mm まで熱間圧延し、熱延条件の差を消去するため、あらかじめ 950°C で 5min の焼ならし後 0.8mm に冷間圧延した。ひきつづいて $3\% \text{H}_2$ を含む Ar 雰囲気中において 20°C/hr で昇熱し、 700°C で 15hr の焼鈍を行った。JIS 5 号引張試片を圧延方向と直角方向に採取し、引張速度 10mm/min で引張試験を行い、降伏点 (Y.S.), 引張強さ (T.S.) および伸び (El.) を求めた。

これらの測定結果にもとづいて、Y.S., T.S., El.

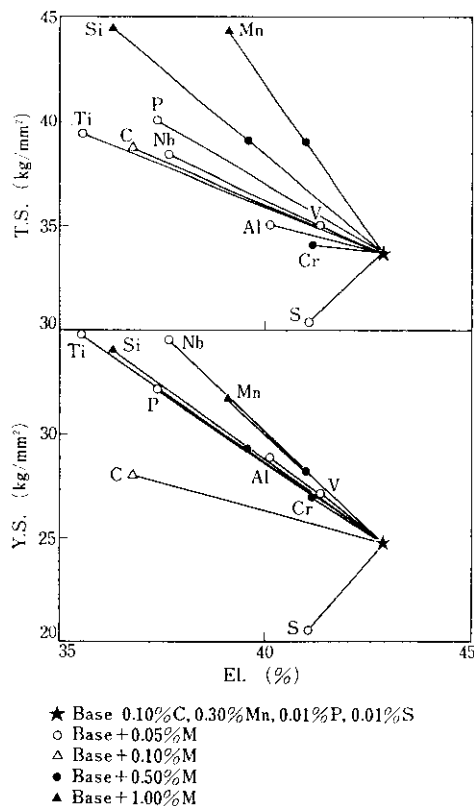


Fig. 1 Effects of chemical compositions on tensile properties as box annealed cold rolled sheet

をそれぞれ従属変数とし、化学成分を独立変数として重回帰分析を行った。寄与率はそれぞれ 0.84 , 0.95 , 0.74 であった。この計算結果を用いて引張性質におよぼす各成分の影響を求めた結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 は $0.1\% \text{C}$ - $0.3\% \text{Mn}$ - $0.01\% \text{P}$ - $0.01\% \text{S}$ を基本成分とし、それに C , Si , Mn などの元素をそれぞれ単独添加した場合の引張性質の変化を示している。

S は伸び、強度とも低下させるが、その他の元素は Y.S., T.S. を増加させ El. を減少させる。こ

Table 1 Range of chemical compositions of specimens used for regression analysis on tensile properties

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V	Cr
0.04 ~0.20	~1.0	0.20 ~1.50	0.003 ~0.05	0.006 ~0.07	~0.04	~0.04	~0.04	~0.4	~0.8

のように合金元素の添加は強度を増加させ、かつ延性を劣化させるが、伸びの劣化に対する強度上昇の割合は元素の種類により異なっている。

El.とT.S.の関係でみると、El.の低下に対するT.S.上昇の割合($\Delta T.S./-\Delta El.$)のもっとも大きい元素はMnで、ついでSi、Pなどの固溶硬化型の元素である。Nb、Ti、Vなどの析出硬化型の元素は少量の添加でT.S.を著しく増加させるが、伸びの劣化が大きく、 $\Delta T.S./-\Delta El.$ は固溶硬化型元素より小さい。またもっとも安価な強化元素であるCは、析出硬化型元素と同様の効果をもつが、後述する点溶接性に悪影響をおよぼすので、その上限が規制される。したがって、伸びの低下を少なくしT.S.を高くするには、Mn、Siなどの固溶硬化型元素の添加が有効であるが、単位添加量に対するT.S.の増加が小さいため多量の添加を必要とするのが難点となる。

一方、El.とY.S.の関係をみると、El.の低下に対するY.S.上昇の割合($\Delta Y.S./-\Delta El.$)はNbがもっとも大きい。TiはNbについて $\Delta Y.S./-\Delta El.$ が大きい。Nbと同じ添加量ではEl.の低下が大きい。T.S.を上昇させるのに有効であるMn、Siは、 $\Delta Y.S./-\Delta El.$ はNbやTiのそれとほぼ等しいが、多量の添加を必要とする。したがってY.S.を上昇させるには析出硬化型元素がより有効であることがわかる。

Nbの結晶粒微細化効果と析出硬化は熱延鋼板について報告されている⁶⁾が、冷延鋼板において

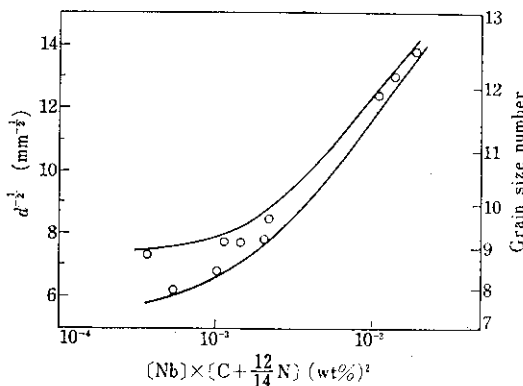


Fig. 2 Effect of Nb content on grain size of box annealed cold rolled sheet

も Fig. 2 に示すように著しい細粒化効果が認められた。同図は、C、N、Nb 量の異なる鋼塊を 65%冷間圧延後 700°C で 15hr の焼鈍を行った試片の結晶粒径 (d) と $[Nb] \times [C + \frac{12}{14}N]$ との関係を示したものである。 $[Nb] \times [C + \frac{12}{14}N]$ が約 $2 \times 10^{-3}(\text{wt}\%)^2$ 以上で急激に結晶粒が微細化することがわかる。

以上の基礎的実験から、箱焼鈍で製造する高張力冷延鋼板の基本成分としては、C、Si、Mn および Nb を適切に組合わせればよいことがわかる。これらの実験結果を総合的に検討した結果、引張強さを重視する場合は Si-Mn-(Nb) 系、降伏点を重視する場合は Mn-Nb 系とすることとした。

Si-Mn 系と Mn-Nb 系高張力鋼板は、焼鈍による特性変化を調べた結果挙動が異なることがわかった。Fig. 3 に両成分系の焼鈍中の硬度変化を示す。Si-Mn 系は 550°C 付近で硬度が著しく低下するが、Mn-Nb 系は 650°C 付近であり、Nb による再結晶抑制効果が著しいことを示している。さらに硬度変化に対する 700°C での保持時間の影響も Mn-Nb 系の方が大きい。

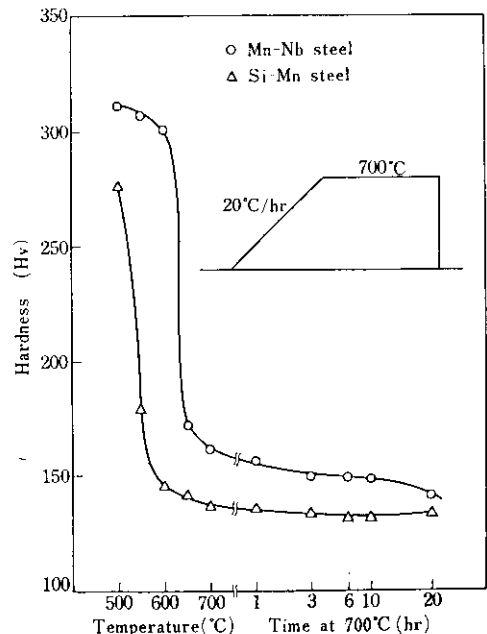


Fig. 3 Change in hardness of specimens during recrystallization annealing

Table 2 Planar anisotropy in tensile properties of Si-Mn steel and Mn-Nb steel

	Y.S. (kg/mm ²)			T.S. (kg/mm ²)			El. (%)		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Si-Mn steel	30.7	33.0	30.3	43.6	45.1	43.7	38	35	37
Mn-Nb steel	37.6	36.6	39.6	44.3	43.3	44.9	34	38	34

一般の冷延鋼板は600°~700°Cの温度で焼鈍されるが、Mn-Nb系高張力鋼板の再結晶温度がこの温度範囲にあるため、同一組成であっても焼鈍条件を変えることによって種々の強度レベルの鋼板を製造できる可能性がある。

700°Cで20hr焼鈍した試片について調べた引張特性の面内異方性をTable 2に示す。Si-Mn系は45°方向の強度が高く、一般の冷延鋼板と同様の面内異方性を示すが、Mn-Nb系は45°方向の強度がもっとも低くSi-Mn系と逆の面内異方性を有している。Nb添加鋼の r 値の面内異方性も一般の冷延鋼板と異なることが報告されており^{7,8)}再結晶集合組織の差に起因することが明らかにされている。

2.2 冷間圧延および焼鈍

合金元素を用いないもっとも簡便な強化方法として冷間圧延による強化方法があるが、延性の劣化が著しいのでプレス加工用には適用できない。そこで冷間圧延後不完全焼鈍することによって実用化しうる高張力鋼板が製造できるかどうかを検討した。

低炭リムド鋼(SPCC)の熱延母板の冷間圧下率を80%まで変え、さらに焼鈍温度を450°~700°C(焼鈍時間8hr)に変化させたときのT.S.とEl.の関係をFig. 4に示す。冷間圧延のままでは圧下率の増加にともないT.S.は増加するがEl.の低下が著しく、たとえば20%圧延するとT.S.は50kg/mm²になるがEl.はわずか10%である。またそれ以上の圧延でT.S.は60kg/mm²以上を得ることができるがEl.は高々数パーセントである。圧延後各温度で焼鈍することにより、たとえばT.S.が50kg/mm²でEl.が20%、40kg/mm²で

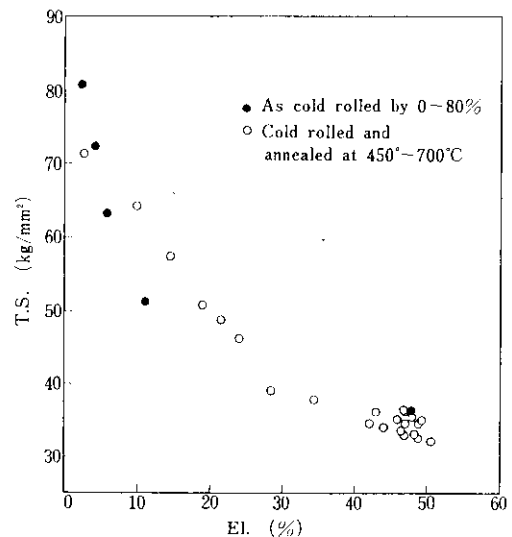


Fig. 4 Relation between El. and T.S. of cold rolled or cold rolled and annealed low carbon rimmed steel

El.が28%となる。

熱延母板の引張強さが36kg/mm²、45kg/mm²および50kg/mm²の試片について、冷間圧延率と焼鈍温度を変化させたときのT.S.とEl.の関係をFig. 5に示す。熱延母板の強度が高いほど冷延焼鈍板の強度と伸びの関係が良好となることがわかる。すなわち、同一強度でEl.の高い冷延鋼板を得るには熱延板の強度を高くする必要がある。

このような不完全焼鈍によって得られる高張力冷延鋼板は、プレス加工されるような部品には適さないが、単に曲げ加工だけを行う部品などには使用できるものと考えられる。しかし鋼板の特性が焼鈍温度により大きく左右されるため、安定した操業が困難である。したがって加工用高張力冷延鋼板の製造に本方法は用いないことにした。

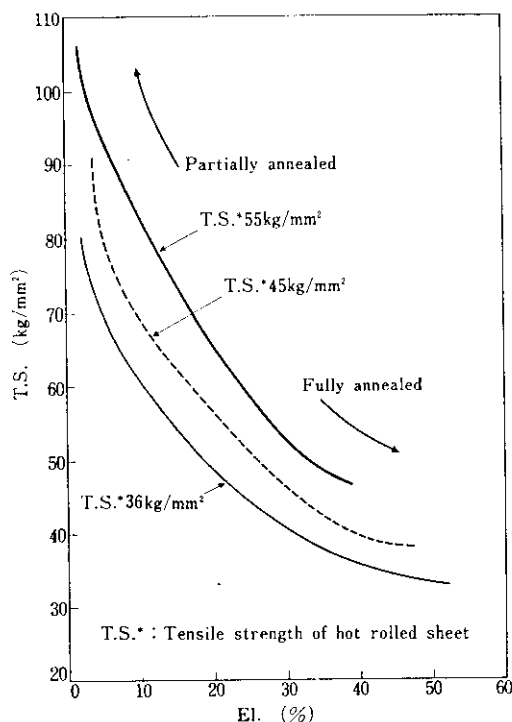


Fig. 5 Relation between El. and T.S. of cold rolled or cold rolled and annealed steel sheets

3. 点溶接性

自動車車体をはじめ薄鋼板を素材として成形加工された部品の組立には点溶接が広く用いられており、これら高張力冷延鋼板も成形性のみならず良好な点溶接性を備えていることが必要である。そこで軟鋼板を含め種々の高張力冷延鋼板の点溶接性を調べた。溶接条件はそれぞれの鋼板での最適条件で行ったが、この最適条件は鋼板強度の増加につれて高加圧力、低電流側に移行する^{9,10)}。

C含有量と溶接ナゲット部の硬度の関係をFig. 6に、C含有量と延性比(十字引張荷重/剪断引張荷重)の関係をFig. 7に示す。試片はSi, Mn, P, Nbなど種々の元素を含んでいるが、ナゲット硬度はほぼC含有量のみ依存していることがわかる。これは点溶接の場合、冷却速度が非常に早く完全に焼きがはいること、この場合のマルテンサイトの硬度はC含有量によってきまる¹¹⁾ためである。またC含有量が0.10~0.20%の

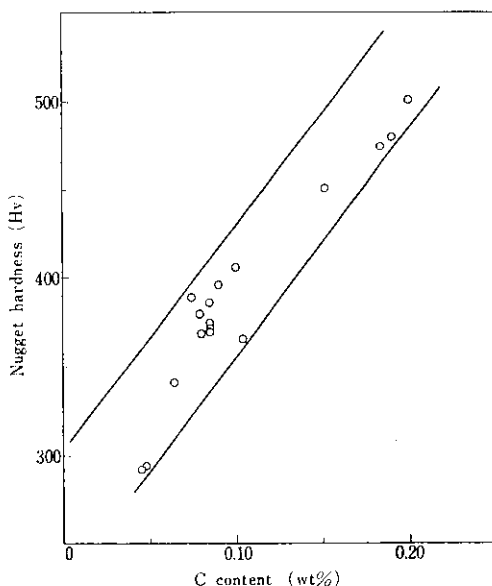


Fig. 6 Effect of carbon content on the nugget hardness of spot welds of cold rolled steel sheets

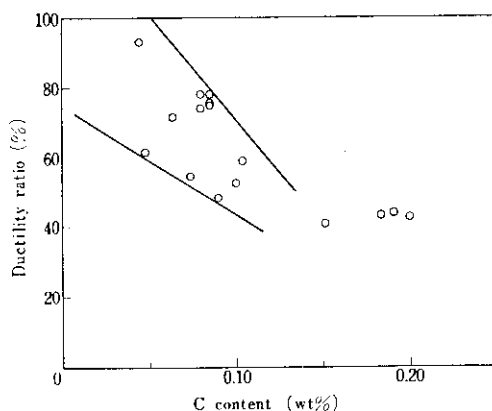


Fig. 7 Effect of carbon content on the ductility ratio (cross tension strength/tensile shear strength) in tensile properties of spot-welded high strength cold rolled steel sheets

鋼板の延性比は40%程度であるが、0.10%以下ではC含有量の減少とともに向上する。したがって点溶接性の面から、高張力冷延鋼板のC含有量の上限は約0.10%にすることが望ましいといえる。

4. 当社の高張力冷延鋼板

前節までの実験室の研究に基づき、完全箱焼鈍を行うことを前提として各強度レベルの高張力冷延鋼板の適正成分を決定するとともに、現場工程での製造実験を行い、Table 3 に示す材料を開発した。同表には昭和50年1月に制定された日本自動車工業会の「自動車用加工性冷間圧延高張力鋼板および鋼帯」の規格を対比して示した。当社の規格体系も自動車工業会規格に準じ、引張強さを 5kg/mm^2 ごとに区分している。APFC40, 45は $0.08\%\text{C}-0.40\%\text{Si}-0.80\%\text{Mn}$, APFC50, 55, 60は $0.08\%\text{C}-0.80\%\text{Si}-1.40\%\text{Mn}-0.04\%\text{Nb}$ を基本成分として製造されている。これら APFC シリーズは十分自工会規格を満たしており、その降伏応力と引張強さの比（降伏比：Y.R.）は60～70%である。

一方、強度部材の衝撃座屈吸収エネルギーは降伏応力によって支配されるため^{12,13}、バンパーやドアのガードバーなどの強度部材には降伏比の高い鋼板が有利である。このような目的のため、APFCシリーズと別に降伏応力 35kg/mm^2 級の当社規格 DH35 が Mn-Nb 系で製造されている。これら

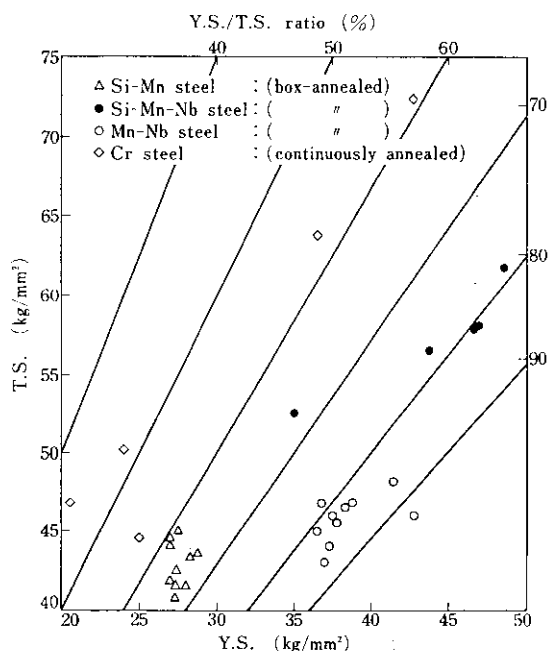


Fig. 8 Relation between Y.S. and T.S. of high strength cold rolled steel sheets

の鋼板の Y.S. と T.S. の関係を Fig. 8 に示す。Si-Mn 系では降伏比が60～70%であるのに対し、Mn-Nb 系では80～90%である。APFC45とDH35

Table 3 Typical properties of formable high strength cold rolled steel sheets produced as commercial grades

Grade	Chemical composition (wt%)							Tensile properties				Y.S.* (kg/mm ²) min.	T.S.* (kg/mm ²) min.	El. (%) * min.	
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Thick- ness (mm)	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El. (%)			Thickness (mm)	
APFC40	0.07	0.38	0.76	0.021	0.013	0.03	—	0.8	30.6	44.1	34	24	40	30	31
APFC45	0.08	0.45	0.82	0.022	0.011	0.04	—	0.8	31.2	47.0	33	28	45	26	27
APFC50	0.08	0.80	1.43	0.017	0.008	0.06	0.032	0.8	36.5	53.7	31	32	50	23	24
APFC55	0.09	0.84	1.51	0.016	0.005	0.06	0.040	0.7	48.0	58.0	28	36	55	20	21
	0.09	0.83	1.50	0.017	0.005	0.05	0.045	0.8	45.7	58.4	27				
	0.08	0.84	1.51	0.017	0.006	0.05	0.044	1.6	47.7	58.6	30				
APFC60	0.09	0.85	1.57	0.017	0.005	0.07	0.048	0.8	50.3	63.1	27	40	60	—	—
DH35	0.08	—	0.79	0.014	0.010	0.05	0.032	0.8	36.4	45.4	31	—	—	—	—

* Specification of Japan Automobile Manufacture Association

の組織を **Photo. 1** に示す。

またこれらの“規格鋼”とは異なり、出荷状態では低降伏点であることを特徴とする特殊な高張力冷延鋼板の Y.S. と T.S. の関係も同図に示した。これは低 C-Mn 系の鋼に Cr を添加したもので、 A_{c1} 変態点以上の温度で焼鈍しその温度から急冷して得られるものである。その引張特性の一

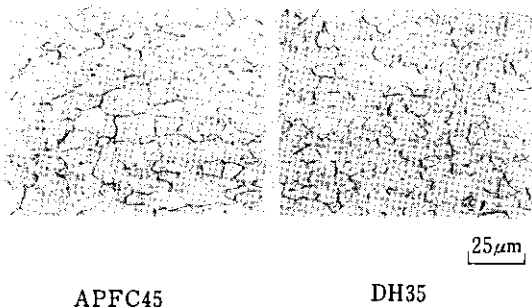


Photo. 1 Microstructures of high tensile cold rolled steel sheet APFC45 and DH35

例を **Table 4** に示す。降伏比がいずれも60%以下であり、T.S. が高いわりには **Fig. 9** に示すようにプレス成形の際のスプリングバック量が小さいため、形状凍結性が良好である。さらに **Fig. 10** に示すように歪時効による強度上昇が著しく、成形後塗装ラインなどで時効される部品などに好適である。この鋼板については別の機会に詳しく報告する予定である。

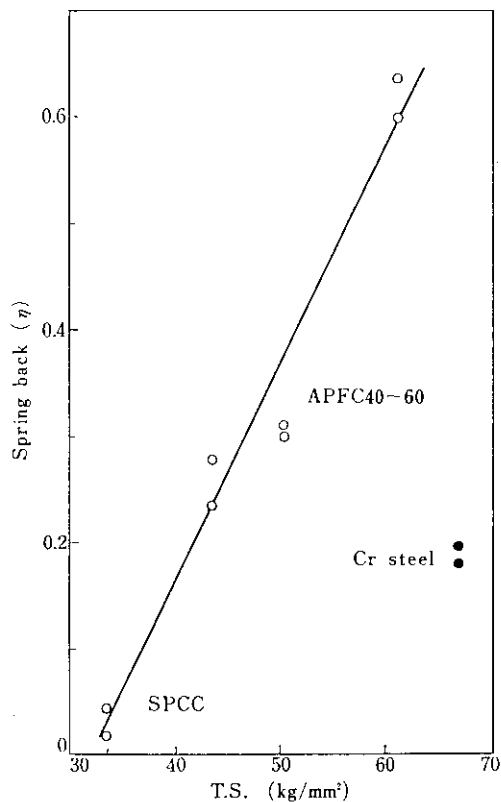


Fig. 9 Relation between tensile strength of sheet and the spring back (η) after press forming

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$$

ρ_0 : Curvature radius (1029mm) of punch bottom

ρ : Curvature radius of pressed part

Table 4 Tensile properties of age-hardenable special high strength cold rolled steel sheets with low yield strength

Grade	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Y.R. (%)	El. (%)	Y.El. (%)
CH40	25.0	44.5	56.2	37	0
CH45	20.6	46.8	44.0	38	0
CH50	24.0	50.2	47.8	35	0
CH60	36.5	63.8	57.2	28	0
CH70	42.7	72.4	59.0	25	0

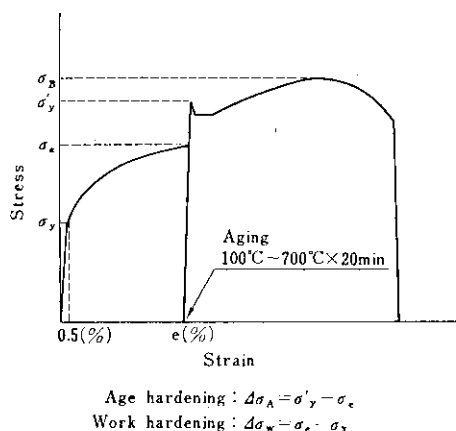


Fig. 10 (a) Schematic diagram of strain-aging treatment

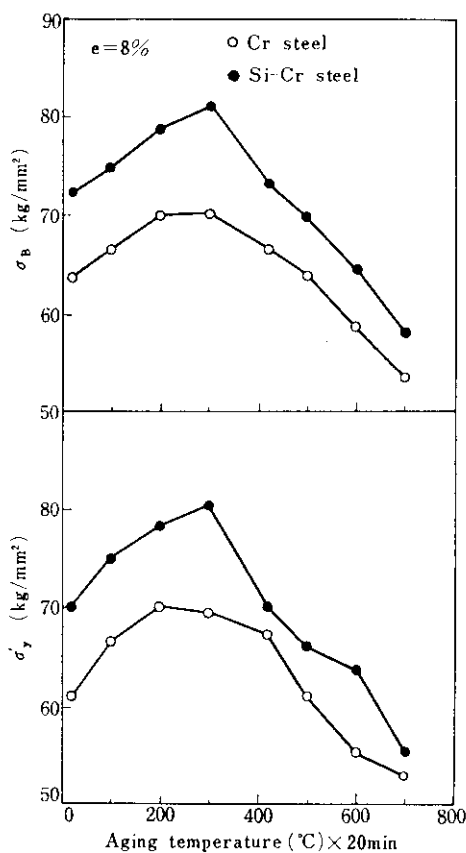


Fig. 10 (b) Strength of Cr steel after strain-aging treatment

5. 成 形 性

加工用冷間圧延高張力鋼板(板厚0.8mm)の引張強さと成形性との関係を Fig. 11, 12 に示す。T.S., El., r 値, n 値はいずれも圧延方向に平行, 45° 方向, 直角方向の平均値である。なお r 値は 15% 伸びでまた n 値は 5 ~ 15% 伸びで測定した。T.S. の増加とともに r 値, n 値, 穴拡り率とも減少し, 一般に報告されているように^{10,14}, 強度の上昇によって成形性が劣化することは避けがたい。また強度が高くなると Fig. 9 に示したようにスプリングバック量も大きくなる。

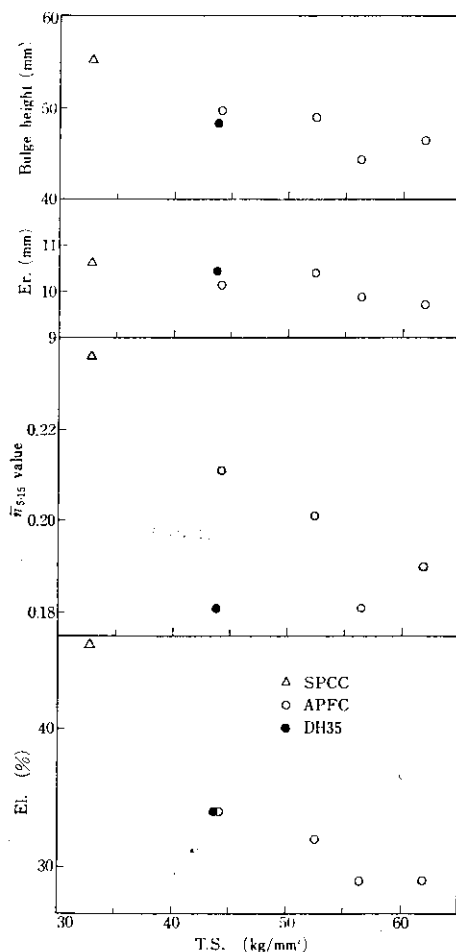


Fig. 11 Relation between T.S. and El., n -value, Er., bulge height of high strength cold rolled steel sheets

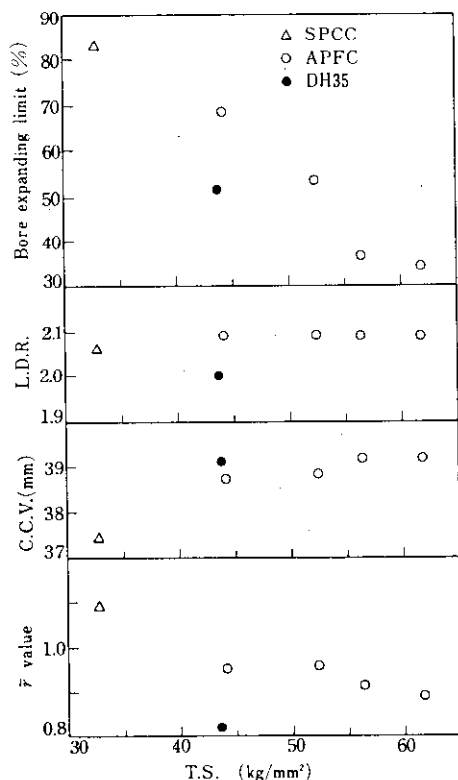


Fig. 12 Relation between T.S. and $\bar{r}$ value, C.C.V., L.D.R., bore expanding limit of high strength cold rolled steel sheets

しかし、従来の構造用高張力鋼板 (HT50) と APFC50 の破断限界曲線を Fig. 13 に比較して示すが、同一引張強さレベルにもかかわらず、APFC50 がすぐれた成形性を示していることがわかる。

このような当社の APFC シリーズ、DH35 は実部品への応用が試みられており、たとえばバンパー、ドアのガードバーなどの強度部材をはじめシートスライド、クッション・ブラケットなどの臓装部品、センターピラー、フローアあるいは外板としてドアアウター、フェンダー類まで多様な実験が進められている。

6. ま と め

加工性、溶接性の良好な高張力冷延鋼板を一般の冷延鋼板と同一設備で製造することを前提に、

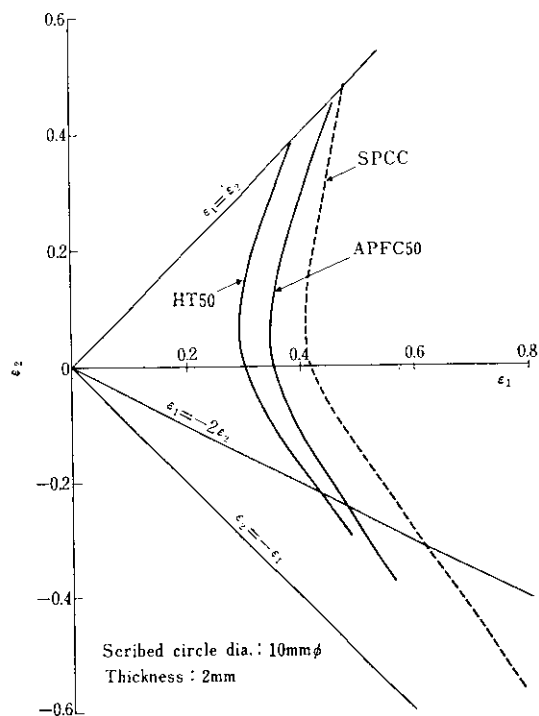


Fig. 13 Forming limit diagram of cold rolled steel sheets having a tensile strength of 50kg/mm²

化学成分を中心として検討した結果、延性の劣化を少なくして引張強さを上昇させるには、Mn, Si, そして降伏点を上昇させるには Nb が有効であることが明らかになった。また点溶接後のナゲット硬度と延性比から C 含有量の上限は約 0.10% が望ましいことがわかった。この結果、当社の自動車用加工性冷延高張力鋼板 APFC40 は低 C-Si-Mn 系で、APFC50 以上は低 C-Si-Mn-Nb 系となっている。また高降伏比を持つ高張力冷延鋼板 DH35 は低 C-Mn-Nb 系である。

さらに、低降伏比 (Y.R. 60% 以下) を有する引張強さ 40~70kg/mm² 級の特種な時効硬化型高張力冷延鋼板が開発されている。この鋼板はプレス成形が容易で形状性がよく、また加工後の時効処理による硬化が著しく大きいことが特徴である。

最後に本稿をまとめるにあたり、資料を提供していただいた技術研究所加工研究室阿部主任研究員に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本自動車工業会材料部品委員会：自動車用加工性高張力鋼板協定規格—1975（昭和50年1月1日）
- 2) 西脇，権藤，武智，難波，増井：鉄と鋼，59（1973）11，S500
- 3) 橋口，高橋，大橋：鉄と鋼，60（1974）11，S488
- 4) 速水，古川，武岡，高橋：鉄と鋼，61（1975）4，S148
- 5) 内田，荒木，福中，小池，栗原：鉄と鋼，61（1975），S149~151
- 6) L. Meyer, H. E. Bühler u. F. Heisterkamp : Thyssenforschung, 3（1971）1+2, 8
- 7) 松藤，大沢，小林：鉄と鋼，61（1975）4，S143
- 8) 小久保，柚島，大池：神戸製鋼技報，24（1974）4，84
- 9) 能勢，佐藤：溶接学会秋季全国大会講演概要，（1973），126
- 10) 花井，佐藤：塑性と加工，15（1974），885
- 11) 別所，松岡，長谷部，保母，川井：住友金属，26（1974）2，26
- 12) 阿部，中川：川崎製鉄技報，5（1973）2，52
- 13) 沢沢，高野，大下：自動車技術，27（1973）5，510
- 14) W. Müschenborn, L. Meyer u. C. Strassburger : Thyssen Technische Berichte, 6（1974）1，22