

## 技術報告

60kgf/mm<sup>2</sup> 級熱延複合組織鋼板の製造と品質杉沢精一\*・浜松茂喜\*・菊池浩平\*・国重和俊\*<sup>2</sup>Production and Quality in Hot Rolled 60kgf/mm<sup>2</sup> Class Dual Phase Steel

Seiichi SUGISAWA, Shigeki HAMAMATSU, Kohei KIKUCHI, and Kazutoshi KUNISHIGE

## Synopsis:

Manufacturing factors and properties of hot rolled 60 kgf/mm<sup>2</sup> class dual phase (DP) steels by two producing methods, which were suitable for mass production, were discussed.

(1) As rolled extra low temperature coiling method developed using three step cooling pattern, called as "Inline controlled quenching (ICQ) method" was suitable for massproduction of DP steel with low alloying component (1.5%Mn and low Si content less than 0.15%). It was important for stabilization of mechanical properties to control the temperature and period of the second air cooling stage between water cooling stages according to variation of chemical composition.

(2) The continuous annealing (CA) method as the heat-treated type process was fit for the case that low yield ratio was especially required.

(3) As the result of investigation about formability, bake hardenability and weldability, it was proved that the hole expansion ratio of DP steel was remarkably improved with inclusion shape control by calcium-addition, bake hardenability of ICQ-DP steel was larger than the CA steel due to higher solute nitrogen content, and that weldability was excellent except flash-butt welding for auto wheel rim.

(4) DP steels were successfully applicable to auto wheel disc and most parts made of hot rolled mild steels and their applications have been useful for weight reduction.

## 1. 緒 言

自動車用車体の軽量化を目的とした熱延高張力鋼板の使用は、1973年の第1次石油危機を契機に活発化し、すでに国内で年間約15万tの消費をみるにいたっているが、さらにここ3~4年来米国での燃費規制法問題にともない急速にその適用拡大の動きが高まっている。

これまでの熱延高張力鋼板の適用部品はバンパー補強材、ドアガード材、フレーム材などの比較的加工度の低いものに限られていたが、最近ではホイールディスクをはじめとする形状の複雑な部品へ適用されはじめている。このため従来にも増して深絞り性、張り出し性、形状凍結性などの成形性にすぐれた材料でかつスポット溶接をはじめとする溶接性にすぐれ、さらに特性が安定しており変動が少ないことが要求されている。

このようなニーズにあう材料として、組織をフェライトとマルテンサイトやベイナイトなどの低温変態生成物との混合組織とした複合組織鋼板が注目され、すでに実用されるにいたっている。この熱延複合組織鋼板の製造方法および性能については多くの報告がなされているが、主として研究段階での製造条件の検討・適用実験段

階での性能評価にとどまっております。量産製造状況に関する報告は少ない。

本報告では、実機ミルにおいて量産製造を行つている60 kgf/mm<sup>2</sup> 熱延複合組織鋼板（以下60 kgf/mm<sup>2</sup> 級DP鋼板と略す。）の製造方法および製造条件の性能への影響、性能評価および適用例について報告する。

## 2. 製 造 方 法

これまで知られている熱延DP鋼板の製造法は大別すると(1)熱処理型、(2)熱延まま高合金系低温巻き取り型、(3)熱延まま低合金系極低温巻き取り型の3種に分けられている。その具体的方法については数多くの報告があり、著者らもすでに各方法についての実験・現場試作結果を報告しているが<sup>1)~4)</sup>、その長所・短所を検討した結果、自動車用鋼板としての必要条件である(1)高性能、(2)安定性、(3)大量生産性、(4)経済性の4点より次の2つの方法を採用している。

## 2.1 熱延まま低合金極低温巻取法（インライン急冷法）

Fig. 1にこの方法での製造工程を示す。我々はこの製造方法を“インライン急冷法”と称しており、以下はこの表現を用いる。インライン急冷法の特徴は、その言

昭和56年10月22日受付 (Received Oct. 22, 1981)

\* 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Oaza-Hikari Kashima-cho Kashima-gun 314)

\*<sup>2</sup> 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

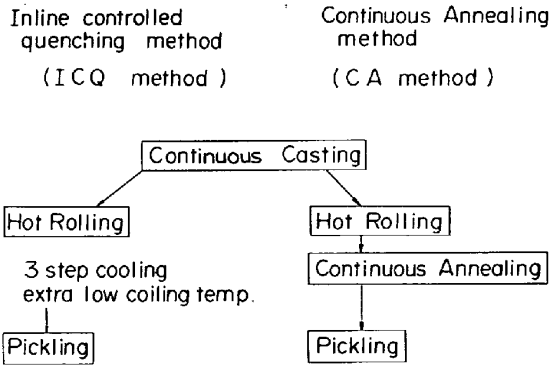
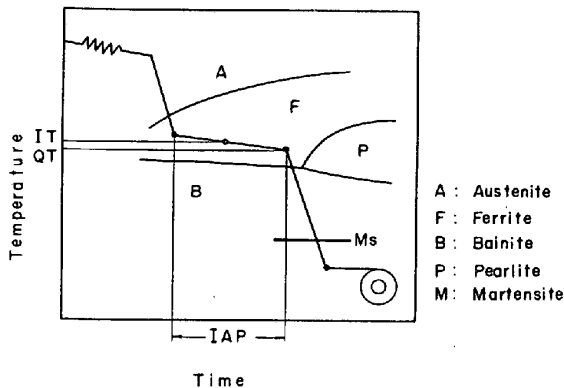


Fig. 1. Manufacturing process.



IT : Intermediate temperature, QT : Starting temperature of 2nd step rapid cooling, IAP : Intermediate air-cooling period  
Fig. 2. Cooling pattern of ICQ method.

葉どおり仕上げ圧延後ホットランテーブル上で急冷し、Ms 点近傍以下の極低温で巻き取ることにより、Si-Mn 鋼又は Mn 鋼などの比較的低い成分系で熱処理なしに短期間に製造できることにある。

現在用いているインライン急冷法の圧延およびその後の冷却のヒートパターンは Fig. 2 に示すとおりである。すなわち仕上げ圧延を Ar<sub>3</sub> 点以上の完全再結晶温度域の下限付近で完了し、その後ホットランテーブル上で1段目の水冷を行い適切な中間温度で適切な時間空冷を行つたのち2段目の水冷を行い Ms 点以下で巻き取りを行う、いわゆる3段冷却パターンである。この冷却パターンを用いることにより通常 DP 鋼板で必須の元素といわれる Si 量を低く抑えて DP 鋼板の製造が可能となるもので、その冶金的意味は次のとおりである。

仕上げ圧延後の1段目の水冷は仕上げ圧延出口に近いスプレーバンクを用いることにより、オーステナイト(γ)が圧延再結晶後粒成長することを防止するもので、その1段急冷後の温度は熱処理 CCT 図を用いて材質ごとに求めパーライト変態を生じない範囲で極力低い温度に設定される。中間空冷域は過冷されたγ(一部フェライトを含む)から微細なフェライト(α)を短時間に大

量に析出させ、同時に残つたγ中に炭素の濃化を生じさせて二段目急冷時の焼入性を確保する重要な過程で、その中間空冷時間は2段目急冷後のαと低温変態生成物の割合が適当な比率となるように急冷前のα+γ組織を調整し、また一方パーライトの生成を生じることのないように一定の範囲に管理される。また二段目急冷開始温度は中間温度計により管理される。

Fig. 3, 4 に 60 kgf/mm<sup>2</sup> 熱延 DP 鋼板 (Table 1 鋼種 A) の中間空冷時間および中間温度の引張特性への影響を示す。中間温度が650°C 以上ではα析出が不十分のため、低温変態生成相の比率が多く強度が高く延性不足となり、また一方 550°C 以下では一段急冷時にパーライト組織を生じ同様に延性不足となる。また中間温度が650~550°C の範囲でも中間空冷時間が短い場合にはαの析出が十分でなく低温変態生成相が多くなり高強度・低延性となり、長すぎる場合にはパーライトを生成し YR が高くなる。

熱延まま極低温巻き取り法での圧延および冷却の方法については、古川ら<sup>5)</sup>の熱延仕上げ時点でα+γの二相組織となるように仕上げ圧延を行いその後ただちに急冷する方法と、細谷ら<sup>6)</sup>の Ar<sub>3</sub> 点以上で圧延を完了しその後 750°C まで徐冷する過程でα変態を起こさせたのち急冷する方法とが報告されている。前者はフェライトの生成には有効な方法であるものの現場での量産製造上低温圧延を行うことは圧延作業上困難であるばかりでなく能率の低下を招く。さらに性能上異方性が大きくなり

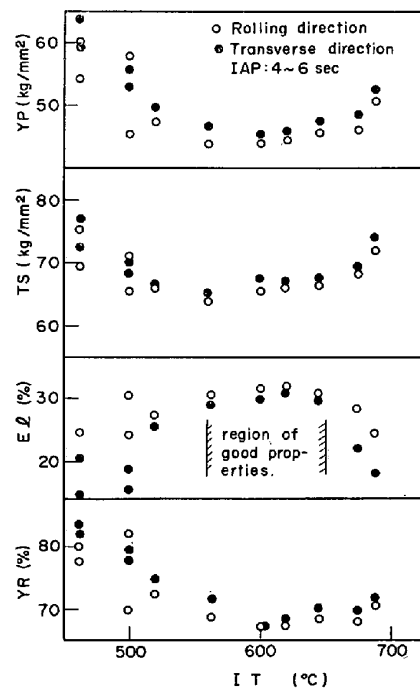


Fig. 3. Effect of intermediate temperature (IT) on tensile properties of 60 kgf/mm<sup>2</sup> class DP steels.

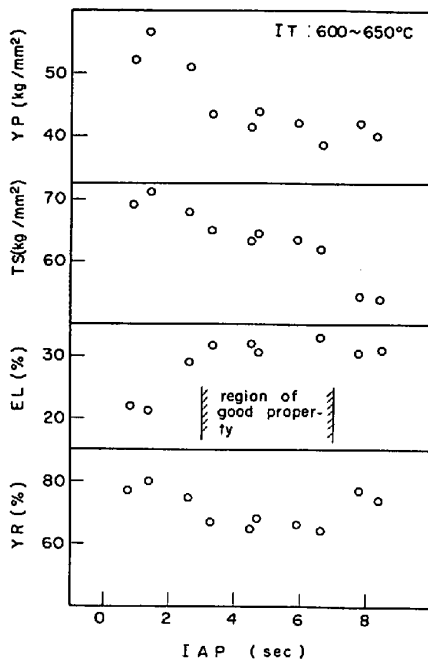


Fig. 4. Effect of intermediate air-cooling period (IAP) on tensile properties of 60 kg/mm<sup>2</sup> class DP steels.

やすく圧延直角方向の延性が大幅に劣化する。また製品の平坦度が不十分となるなどの問題がある。一方後者では前者のような問題がなく異方性の小さい材料が得られるが、現場的には仕上げ圧延後の徐冷時間を十分とる必要があるためその後の水冷に要する時間を加えるとホットランテーブル上での滞在時間を長くする必要があり非効率あるいは実操業が不可能な条件となる場合が多い。また成分的に高温で $\alpha$ 変態を起しやすくするためSiの添加量を多くする必要がある。したがってコスト上不利である上に多量のSi添加により表面に島状スケールを生じ製品外観を損なうだけでなく化成処理性の劣化、スポット溶接時の散り発生限界電流の低下を招く。

Siは強度-圧延バランスを向上させフェライトの析出を促進するためこれまでDP鋼に必須の元素と考えられていたが、このような弊害があるため低SiでDP鋼を作る方法として3段冷却パターンインライン急冷法を開発したものである。この方法では1段目急冷後フェライトノーズの温度域を空冷するため $\alpha$ を微細にかつ短時間で析出させることができる。このため仕上げ圧延温度を800°C以上の圧延が容易な温度にとることが可能であり低SiでDP鋼を製造できるという特長がある。

巻き取り温度はほぼ常温での巻き取りを行っている。実験室的には巻き取り温度をMs点近傍とするのが強度-圧延バランス上好ましいということが判明している<sup>4)</sup>が実生産上はこの温度域でのコントロールは現状では困

難であり今後の検討課題として残っている。

圧延後の精整工程については、スキンスパロールによる平坦度修正のための圧下はDP鋼では著しい降伏点上昇を招くため原則としてスキンスパロールを行わずレベラーでの平坦度修正を行っており、レベラーだけで修正できないものについて軽荷重でのスキンスパロールを行っている。

## 2.2 連続焼鈍法

この方法の製造工程はFig. 1に示すとおりで、熱間圧延後スキンスパロールでの平坦度修正を行ったのち、ステンレス用の連続焼鈍ラインで熱処理を行うものである。この連続焼鈍ラインにおいては、 $\alpha+\gamma$ 二相域の温度に加熱後、連続加熱炉出側に設置された水冷帯において水冷開始温度を調整後水冷することにより目標の強度に相当する適当なマルテンサイト比率を有するDP鋼板の製造を行っている。

加熱温度は、 $A_{c1}$ 直上に加熱後すぐに水冷を行うよりも $A_{c3}$ 直下としその後適当な時間強制空冷を行ったのち水冷を行う場合の方が良好な強度-延性バランスが得られる。この理由はマイクロ組織上フェライトとマルテンサイトが微細分散して局部延性が向上する上にフェライト地中の固溶C量が減少してフェライト地の延性向上を生じる<sup>2)</sup>ためとみられる。

熱処理後のコイルは酸洗されインライン急冷法の場合と同じくレベラーにより平坦修正される。

## 3. 製品性能

### 3.1 化学成分

熱延60 kgf/mm<sup>2</sup> DP鋼板の化学成分の代表例をTable 1に示す。60 kgf/mm<sup>2</sup>級はスポット溶接性の観点から炭素量を低く抑え、主な適用用途であるホイールディスクでは表面性状が良好であることが要求されるので、Si量を0.15%以下とし、孔上げ性を中心とする成形性向上のため用途によりCa処理による介在物球状化処理を行っている。

### 3.2 引張特性とマイクロ組織

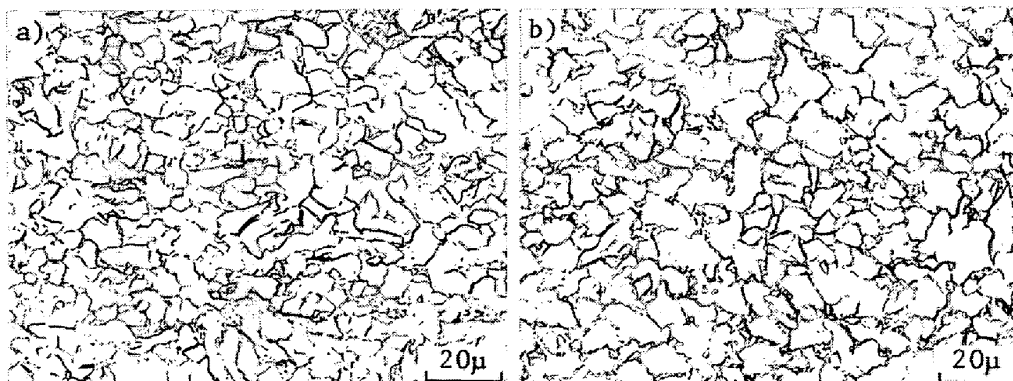
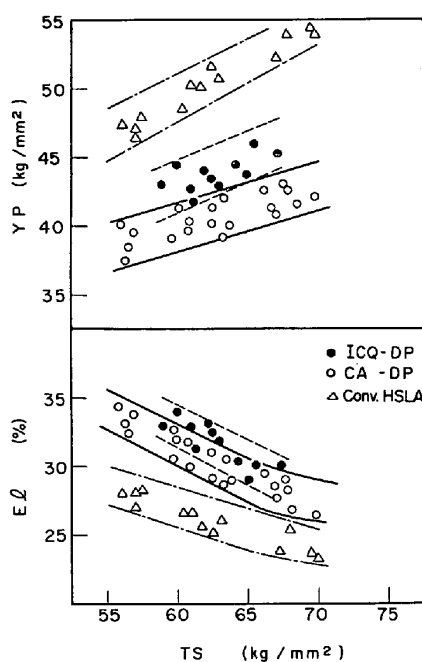
引張り、曲げ性能の代表例をTable 2に示す。いずれも低降伏比で良好な強度-延性バランスを示しているが、インライン急冷法と連続焼鈍法とを比較すると、Fig. 5

Table 1. Examples of chemical composition of 60 kgf/mm<sup>2</sup> class DP steel.

Steel	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Ca	N
A	0.09	0.12	1.50	0.019	0.002	0.020	—	0.0049
B	0.08	0.14	1.48	0.021	0.001	0.037	0.0031	0.0061

Table 2. Mechanical properties of DP steel A shown in Table 1.

Manufacturing method	Thickness (mm)	Direction	Y P (kgf/mm <sup>2</sup> )	T S (kgf/mm <sup>2</sup> )	E l (%)	Y R (%)	Y P E (%)	n-value 5~15%	r-value 15%	Bendability 0 t
ICQ	2.9	L	42. <sup>0</sup>	62. <sup>8</sup>	32. <sup>0</sup>	66. <sup>9</sup>	0	0.181	0.77	Good
		T	43. <sup>5</sup>	63. <sup>1</sup>	31.6	68.9	0	0.178	0.79	Good
CA	2.9	L	40. <sup>2</sup>	63.7	30. <sup>8</sup>	63. <sup>1</sup>	0	0.183	0.72	Good
		T	41. <sup>3</sup>	64.2	30. <sup>1</sup>	64. <sup>3</sup>	0	0.179	0.73	Good

Photo. 1. Microstructures of 60 kg/mm<sup>2</sup> class DP steels produced by a) ICQ, b) CA method.Fig. 5. Relation between tensile strength and yield strength or elongation in 60 kgf/mm<sup>2</sup> class DP steels.

に示すようにインライン急冷法の材料が同一引張強さで全伸びが1%程度高く、降伏比は5%前後高くなっている。全伸びについてはPhoto. 1に示すマイクロ組織にみられるように、連続焼鈍材ではポリゴナルで比較的大きいフェライト粒とマルテンサイトの混合組織であるのに対し、インライン急冷材では微細なフェライト粒をもつためと考えられる。またインライン急冷材の降伏比が高くまた後述する焼付硬化性が大きいのは低温巻取りのため固溶N量が多くなることにもとづく<sup>4)</sup>。

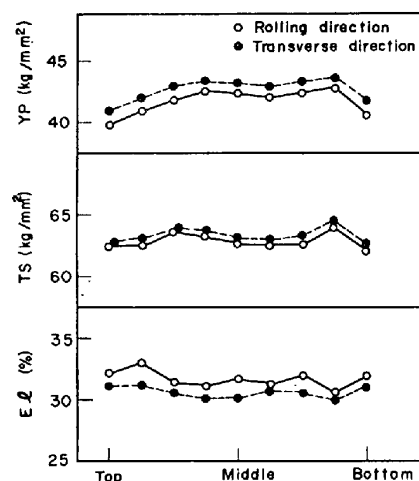


Fig. 6. Variation of tensile properties with position of coil.

コイル長手方向の引張特性の変動はFig. 6に示すとおり少なく良好である。

次にマイクロ組織中の低温変態生成物と引張強さの間には、Fig. 7に示すようにほぼ直線関係があり低温変態生成相の分率を $V_M$ とすると次の関係式が成り立つことがみとめられた。

$$\begin{aligned} TS(\text{kg/mm}^2) &= 53.0 + 100 \times V_M \\ &= 53.0 \times (1 - V_M) + 153 \times V_M \end{aligned}$$

$V_M$ が15%以上となると成形性が不十分となるため、当社60 kgf/mm<sup>2</sup> DP鋼板では $V_M$ を10%前後としている。

### 3.3 成形性

60 kgf/mm<sup>2</sup> DP鋼板の成形限界曲線図を析出硬化型

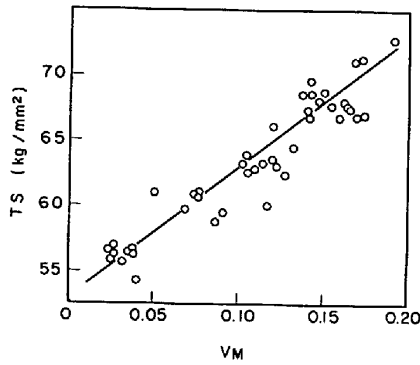


Fig. 7. Effect of volume fraction of low temperature transformed phase ( $V_M$ ) on the tensile strength in 60kgf/mm<sup>2</sup> class DP steels by CA method.

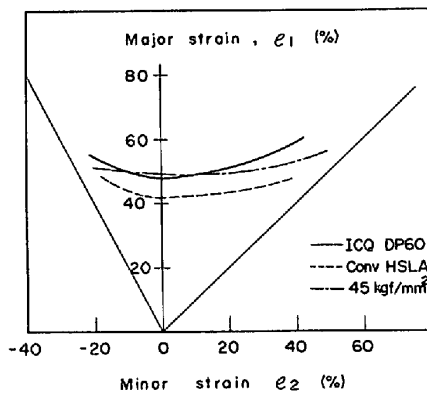


Fig. 8. Forming limit diagrams (FLD<sub>s</sub>) of DP steel in comparison with other steels.

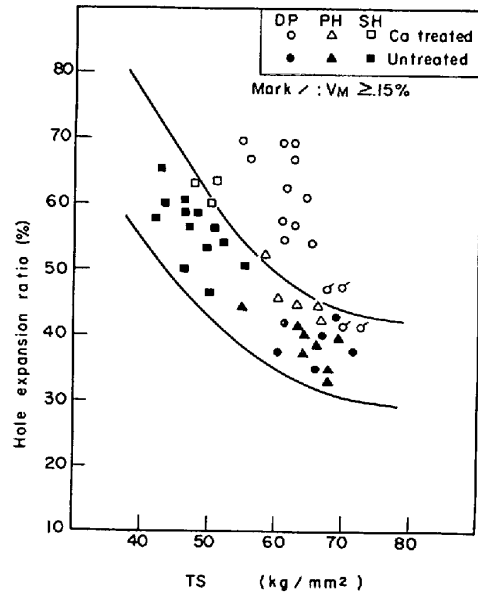
Table 3. Tensile properties of various steels tested for forming limit diagrams.

Type of steel	Thickness (mm)	Direction	Tensile properties		
			Y P (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS (kgf/mm <sup>2</sup> )	E1 (%)
ICQ 60DP	2.6	L	42.5	63.1	32.5
Conv HSLA	2.6	L	50.5	63.5	26.7
45 kgf/mm <sup>2</sup>	2.6	L	34.1	47.0	35.2

60 kgf/mm<sup>2</sup> 級, 45 kgf/mm<sup>2</sup> 材と比較して Fig. 8 に示す(これら3種の材料の引張特性を Table 3 に示す.)

DP 鋼は析出硬化型 60 kgf/mm<sup>2</sup> 材に比べてすべての範囲において高い限界値を示しほぼ 45 kgf/mm<sup>2</sup> 材と同等の成形性を有することがみとめられた。

一般に DP 鋼は張り出し性や複合成形性にすぐれているが、自動車足回り用途で特に問題となることが多い伸びフランジ性については優位性がみとめられないといわれているが<sup>9)</sup>、本調査の結果 Ca 処理による介在物形状制御を行うことにより 45 kgf/mm<sup>2</sup> 材並の良好な伸びフランジ性が得られることを見出した。打ち抜き孔拡げ率は Fig. 9 に示すように Ca 処理を行っていない材料では TS の上昇ともない減少するが、Ca 処理を行うことにより DP 鋼の孔拡げ率は顕著に向上しその向上



(PH : Precipitation hardened steel, SH : solution hardened steel)

Fig. 9. Effect of calcium treatment on hole expansion ratio.

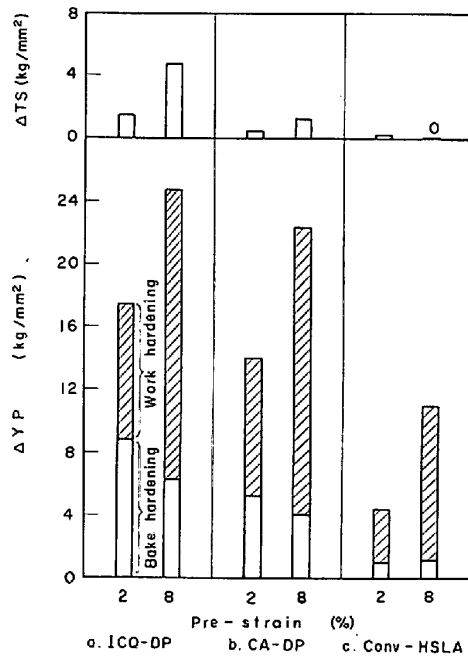


Fig. 10. Bake hardenability of DP steels in comparison with conventional HSLA steel.

効果は析出硬化型材よりも大きいことが判明した。析出硬化型材では DP 鋼に比べて全伸びが低いため介在物に起因するよりもせん断加工後の延性不十分により割れを生じるのに対し、全伸びがすぐれた DP 鋼板では介在物形状制御により孔拡げ性が向上すると考えられる。

しかしこの効果も低温変態生成物の分率が高く高強度低延性の DP 鋼では小さいことがわかった。

### 3.4 塗装焼付硬化性

自動車用鋼板として用いられる場合にプレス成形後焼

付塗装の工程で硬化する現象は塗装焼付硬化性 (BH 性 = Bake-Hardenability) と呼ばれるが, Fig. 10 に示すように DP 鋼は BH 性が大きくインライン急冷材は 2% 引張歪みで 8 kg/mm<sup>2</sup> もの大きな BH 量を示し, プレス後の製品の強度向上に有効である. さらに注目すべき点は引張強さも上昇することで, 製品疲労強度面への寄与も期待できる.

### 3.5 溶接性

スポット溶接性能は, 成分的に炭素量を 0.12% 以下と低く抑えており, かつ Si 量も 0.10% 前後と低いため良好である. 散り発生限界電流は Si 量の上昇に伴い固有抵抗が上昇するため低下することが知られており<sup>9)</sup>, 当材料はこの点散り発生電流が高く良好である.

また十字引張強度は Fig. 11 に示すとおり析出強化型材よりもすぐれており 45 kgf/mm<sup>2</sup> 級材と比べてハイテン化による効果は十分得られている.

フラッシュバット溶接は熱延鋼板においては, 主にホイールリム成形に用いられる. ハイテン材を使用した場合のリム成形時の欠陥としては, HAZ 部ネッキング割れと溶接突き合わせ界面に酸化物が残存し溶接後のロール成形およびエキスパンド工程時に割れとなつて開口する場合とが主である. 後者の割れについては Fig. 12 に示すように Si 量と割れ発生率との間の相関が高いことを見出し, この面からも Si 量を抑えており適正溶接条件下ではこの種の割れは生じない. 一方 HAZ 部ネッキング割れについては DP 鋼板では HAZ 部軟化を生じやすく<sup>10)</sup> 未解決の問題として残っている. しかし最近著者の一部は HAZ 軟化挙動が単にマルテンサイトの焼もどしによる変化だけでなくフェライト中の固溶 C, N

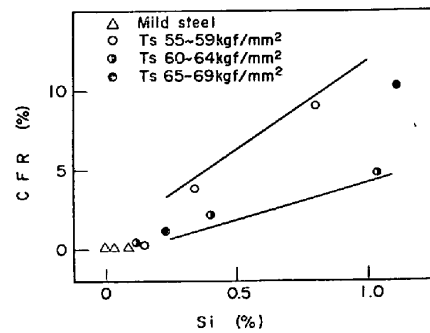


Fig. 12. Effect of silicon content on crack frequency ratio (CFR) of weld joint in wheel rim forming.

の挙動に強く影響されていることを見だし, HAZ 軟化の少ない DP 鋼を製造できる可能性を見いだしており<sup>11)</sup>, 自動車メーカーサイドでの溶接面での検討とあわせて成果が期待できる.

その他手溶接, CO<sub>2</sub>・MIG・TIG 溶接での溶接性については問題なく良好であり, 若干の HAZ 部軟化を生じるものの強度上の問題はない.

## 4. 適用状況

上述のとおりすぐれた性能と経済性とをあわせもつ熱延 60 kgf/mm<sup>2</sup> 級 DP 鋼板について, 多くの自動車メーカー・加工メーカーでのトライアルテスト・共同研究を行つた結果, ほとんどの足回り部品に適用が可能であることが判明し, 現在ホイールディスク, エンジンマウンティングブラケットなどに量産製造をおこなっている.

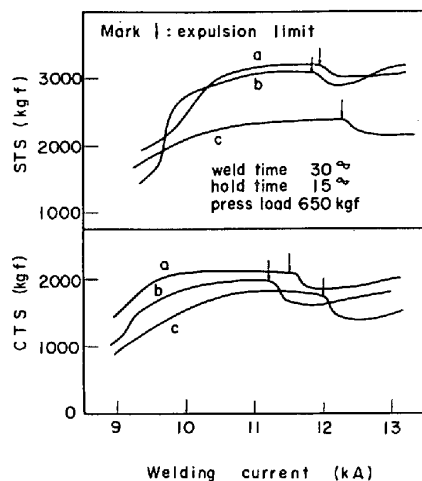
ホイールディスクについては, 張り出し, 絞り加工とも厳しいため 55 kgf/mm<sup>2</sup> または 60 kgf/mm<sup>2</sup> の DP 鋼が用いられ, また特に製品の寸法精度が要求される場合には低降伏比の連続焼鈍材が要求されることもある. ディスクのハイテン化による重量軽減率はディスク形状および成形方法によつても異なるが 9~17% の軽量化が達成されている.

このほか足回り部品についてもシートアッパー・ローアーム・トランスパースリンク・ブラケット類などへ適用可能で, ハイテン化による軽量化をすすめる上での有力な手段として熱延 DP 鋼板が用いられている.

## 5. 結 言

量産製造に適した二種類の製造法による 60 kgf/mm<sup>2</sup> 級熱延複合組織鋼の製造要因とその性能について検討した結果, 次の結論が得られた.

(1) 熱延まま極低温巻き取り法 (インライン急冷法) の冷延パターンを検討した結果 3 段冷延パターンを用いれば 0.15% Si 以下の低 Si 成分系を用いて表面性



(CTS : Cross tensile strength, STS : Shear tensile strength)  
Fig. 11. Tensile strength of spot weld joint of a) 60 kg/mm<sup>2</sup> class ICQ-DP steel, b) 60 kg/mm<sup>2</sup> class conventional HSLA steel and c) 45 kgf/mm<sup>2</sup> class steel.

状のすぐれたしかも良好な性能を有する DP 鋼板を量産下で安定して製造できることが判明した。

(2) この冷却パターンの特徴は 1 段急冷後フェライトノーズ域を空冷することによりフェライトを微細かつ短時間に析出させることにあり、性能を決める要因は中間空冷温度および時間を材質に応じて一定範囲に管理することである。

(3) 連続焼鈍法は上記方法と比べてより降伏比が低いため、特に形状凍結性が要求される場合に適している。

(4) 成形性・塗装焼付硬化性・溶接について検討した結果、DP 鋼の孔拡張性は介在物形状制御により大幅に向上すること、インライン急冷材の BH 性は大きく成形品の強度の向上が期待できること、また良好なスポット溶接性を有することなどが判明した。

(5) 低降伏比ですぐれた成形性を有する材料としてホイールディスクをはじめとするほとんどの足回り部品に適用が可能であることが判明した。

終わりに本研究の遂行に際し御指導を賜った中央技術研究所次長行俊照夫博士ならびに鹿島製鉄所技術部長野

寿徳彦氏をはじめ、御協力いただいた関係各位に厚く感謝致します。

#### 文 献

- 1) 高橋政司, 国重和俊, 長尾典昭, 杉沢精一, 浜松茂善: 鉄と鋼, 65(1979), S 861
- 2) 高橋政司, 国重和俊, 長尾典昭: 鉄と鋼, 66(1980), S 1233
- 3) 国重和俊, 高橋政司, 杉沢精一, 増井淑郎: 鉄と鋼, 65(1979), p. 1916
- 4) 高橋政司, 国重和俊, 長尾典昭, 杉沢精一: 鉄と鋼, 66(1980), S 1234
- 5) 古川 敬, 森川博文, 遠藤道雄: 鉄と鋼, 65(1979), A 189
- 6) 細谷佳弘, 西本昭彦, 中岡一秀: 鉄と鋼, 66(1980), S 581
- 7) 国重和俊, 高橋政司, 長尾典昭: 鉄と鋼, 67(1981), S 1190
- 8) たとえば, 松藤和雄, 大沢紘一, 酒匂雅雄, 下村隆良, 由田征史: 塑性と加工, 21 (1980) 237, p. 890
- 9) 山内信幸, 高 隆夫: 溶接学会, 抵抗溶接委員会資料, RW-166-79
- 10) M. S. RASHID and A. E. RATHKE: SAE paper 810026 (1981)
- 11) 山内信幸, 高 隆夫, 国重和俊, 長尾典昭: 鉄と鋼, 67(1981), S 1191