

---

衝突エネルギー吸収特性とプレス成形性に優れた TS590 MPa 級薄物熱間圧延鋼板  
TS590 MPa Grade Hot Rolled Thin Gauge Sheet Steels with Excellent Crashworthiness  
and Formability

清水 哲雄(Tetsuo Shimizu) 金本 規生(Norio Kanamoto) 福井 義光(Yoshimitsu  
Fukui)

---

要旨 :

衝突エネルギー吸収特性、プレス成形性に優れた TS590 MPa 級 dual phase 熱延鋼板の開発を目的として、高速変形時のエネルギー吸収特性に及ぼす組織の影響を調べた。単位面積当たりのフェライト・マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、歪み速度  $2.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 30% までの吸収エネルギー、歪み量 10% での  $n$  値が増大する。これはマルテンサイトを微細分散させることによって高速変形時の内部応力が高まるためと考えられる。上記の結果をもとに仕上げ圧延後の高精度冷却技術を活用して実機製造した板厚 1.4~2.0 mm の薄物 dual phase 鋼板は従来材と比較して、降伏比が低下し、全伸びが向上し、優れた衝突エネルギー吸収特性とプレス成形性を合わせ持つ。

---

Synopsis :

The effect of microstructure on absorbed energy at high strain rate has been investigated to develop 590 MPa TS grade hot-rolled dual-phase sheet steels with excellent crashworthiness and formability. Increase of ferrite-martensite perimeter led to higher absorbed energy of up to 30% strain and higher  $n$ -value at 10% strain during  $2.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  strain rate deformation. This is attributed to the dispersion of fine martensite which enhances internal stress during high strain rate deformation. On the basis of the above described result, a hot rolled dual phase steel of from 1.4 to 2.0 mm in thickness with low yield ratio, high elongation, excellent crashworthiness and formability can be developed with a new precisely cooling process after finishing rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

# 衝突エネルギー吸収特性とプレス成形性に優れた TS590 MPa 級薄物熱間圧延鋼板\*

川崎製鉄技報  
31 (1999) 3, 176-180

## TS590 MPa Grade Hot Rolled Thin Gauge Sheet Steels with Excellent Crashworthiness and Formability



清水 哲雄

Tetsuo Shimizu

技術研究所 薄板研究  
部門 主任研究員(課  
長)



金本 規生

Norio Kanamoto

千葉製鉄所 管理部薄  
板管理室 主査(掛長)



福井 義光

Yoshimitsu Fukui

千葉製鉄所 熱間圧延  
部熱間圧延課 チーフ  
ラインマネージャー  
(主席掛長)

### 要旨

衝突エネルギー吸収特性、プレス成形性に優れた TS590 MPa 級 dual phase 熱延鋼板の開発を目的として、高速変形時のエネルギー吸収特性に及ぼす組織の影響を調べた。単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 30% までの吸収エネルギー、歪み量 10% での  $n$  値が増大する。これはマルテンサイトを微細分散させることによって高速変形時の内部応力が高まるためと考えられる。上記の結果をもとに仕上げ圧延後の高精度冷却技術を活用して実機製造した板厚 1.4~2.0 mm の薄物 dual phase 鋼板は従来材と比較して、降伏比が低下し、全伸びが向上し、優れた衝突エネルギー吸収特性とプレス成形性を合わせ持つ。

### Synopsis:

The effect of microstructure on absorbed energy at high strain rate has been investigated to develop 590 MPa TS grade hot-rolled dual-phase sheet steels with excellent crashworthiness and formability. Increase of ferrite-martensite perimeter led to higher absorbed energy of up to 30% strain and higher  $n$ -value at 10% strain during  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  strain rate deformation. This is attributed to the dispersion of fine martensite which enhances internal stress during high strain rate deformation. On the basis of the above described result, a hot rolled dual phase steel of from 1.4 to 2.0 mm in thickness with low yield ratio, high elongation, excellent crashworthiness and formability can be developed with a new precisely cooling process after finishing rolling.

### 1 緒 言

近年、乗用車の衝突安全基準が厳しくなりつつあるが、その一方で地球環境の保護の観点から燃費向上、CO<sub>2</sub> 排出削減を目的とした車体軽量化の要求が高まっている。鋼板の強度レベルを高めることによって、部材の強度特性を向上させると同時に鋼板板厚を減少させて軽量化を図ることが可能であることから、高強度鋼板の適用による軽量化と耐衝突安全性向上の相反する特性の両立が検討されている。

従来、耐衝突部材の衝突エネルギー吸収特性は降伏強度の 0.5 乗と板厚の 2 乗の積に比例する<sup>1)</sup>として経験的に見積もられてきた。しかし、上述のように耐衝突安全性の向上と軽量化を同時に満足させる車体の最適設計が求められてくると、鋼板強度の歪み速度依存性を金属組織学的に把握し、強度の歪み速度依存性が高い高強度鋼板を適用する必要性が生じる。

このような背景から川崎製鉄では、各種強化機構をもつ高強度鋼

板の強度の歪み速度依存性を研究した。その結果、軟質なフェライト相の中に硬質なマルテンサイト相を分散させた組織である dual phase 鋼は強度の歪み速度依存性が高く、衝突エネルギー吸収特性が優れることを見い出した<sup>2-4)</sup>。

一方、鋼板板厚を減少させて車体軽量化を図るためには、薄い鋼板が要求される。ところが、熱延鋼板が薄くなるほど、熱間圧延工程において仕上げ圧延直後の冷却制御が難しくなり、dual phase 鋼の理想的な組織を安定して得るのは困難となる。その結果、成形性の指標の一つである伸びの値が低くなり、さらに衝突エネルギー吸収性能も低下する。そのため、板厚 2.0 mm 以下の薄物 dual phase 鋼板は、熱間圧延後にさらに冷間圧延-連続熱処理の工程を追加して製造する必要があり、製造工程が複雑となる問題点を抱えていた。

川崎製鉄では熱間圧延工程の仕上げ圧延後の高精度冷却制御技術を適用することにより、上記問題の解決を試みた。

本論文では、dual phase 鋼の衝突エネルギー吸収特性を向上させるための組織制御の考え方、高精度冷却制御技術を適用した薄物熱延 dual phase 鋼板の機械的特性とプレス成形性に関して述べる。

\*平成11年6月4日原稿受付

## 2 dual phase 鋼の衝突エネルギー吸収特性に及ぼす組織の影響

### 2.1 実験方法

Table 1 に示す組成の熱延鋼板を種々の条件で冷間圧延・焼鈍し、引張強度が 590 MPa 級になるようにマルテンサイトの体積率を 4~6.5% の範囲に調整しながらマルテンサイトの粒径を変化させ、単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さの変化が高速変形特性に及ぼす影響を調べた。

4%ピクリン酸アルコールと 2%ピロ硫酸ナトリウムを 1 対 1 に混合した腐食液でマルテンサイトのみを白く現出させた組織写真を用い、マルテンサイトの占積率と形態を画像処理にて定量化した。測定されたマルテンサイトの個数と総面積から、その形状を同面積の円と仮定して、マルテンサイトの平均粒径とフェライト-マルテンサイト境界長さの総和を算出した。ここでは、得られたフェライト-マルテンサイト境界長さの総和を  $1\mu\text{m}^2$  当たりに換算した値を単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さとして定義する。

高速変形特性はホプキンソン棒法を応用した衝撃引張試験機<sup>9)</sup>を用いて歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  の条件にて測定した。引張試験片形状は平行部幅 2.5 mm、ゲージ長 3.8 mm とした。また、歪み速度  $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  の変形特性は同様の平行部幅、ゲージ長をもつ試験片を用いて、インストロン型引張試験機にて測定した。

### 2.2 実験結果

歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  の条件にて測定した応力-歪み曲線の一例を Fig. 1 に示す。変形開始直後にピークが認められるが、このピークは装置の振動、装置中を伝播する応力波の分散もしくは降伏現象の影響に起因すると考えられる。これらの影響を応力-歪み曲線から分離するのは困難であるので、降伏強さをピークの上端、下端、上端と下端の平均値の三つに仮定した場合の引張試験結果を比較した。いずれの場合もほぼ同様の傾向を得たので、以下、ピークの平均値を降伏強さとした結果を示す。

歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 30% までの吸収エネルギー

Table 1 Chemical composition of steels (mass%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.05	0.96	1.35	0.99	0.010	0.004

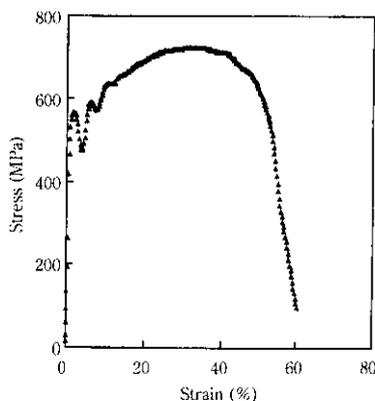


Fig. 1 Stress-strain curve of dual phase steel at a strain rate of  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

は、応力-歪み曲線を積分して求めた。吸収エネルギーと単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さとの関係を Fig. 2 に示す。単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するに従って、吸収エネルギーが増大する。

歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 10% での  $n$  値と単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さとの関係を Fig. 3 に示す。単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、歪み量 10% での  $n$  値も増大する。

### 2.3 考察

以上の実験結果から、dual phase 鋼の歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  の高速変形時の吸収エネルギーは、単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、すなわちマルテンサイトが微細分散することにより、増大することが明らかとなった。これは、マルテンサイトが微細分散することにより  $n$  値が増大することによる。一方、ここでは図にて示してはしていないが、歪み速度  $2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  では単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが変化しても吸収エネルギー、 $n$  値とも変化が認められなかった。

dual phase 鋼は、準静的な歪み速度、たとえば  $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  では、変形中の内部応力の蓄積のため変形初期には  $n$  値が大きいが、変形量の増大につれて内部応力の緩和が起こり  $n$  値は減少すると考えら

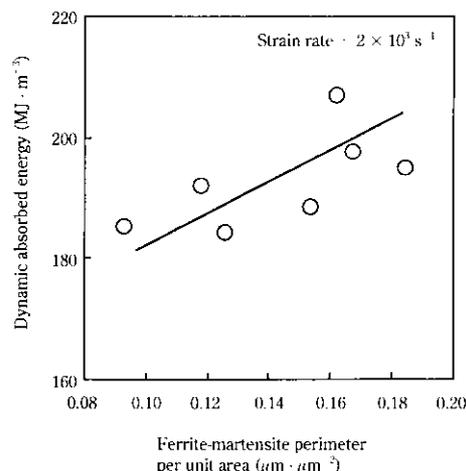


Fig. 2 Effect of ferrite-martensite perimeter on dynamic absorbed energy

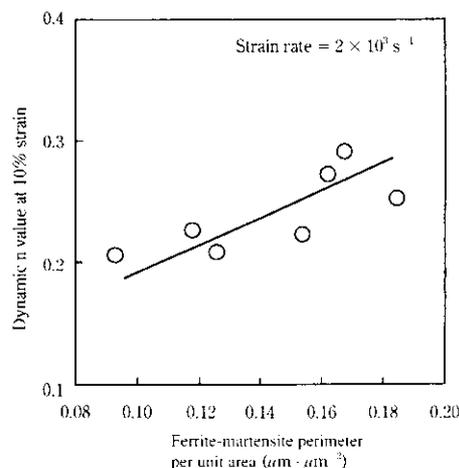


Fig. 3 Effect of ferrite-martensite perimeter on dynamic  $n$  value

れている<sup>9)</sup>。

ところが、歪み速度の上昇は転位の運動に対する熱振動のエネルギーの寄与を減少させるため、高速変形時には内部応力の緩和がおこりにくくなると考えられる。そのため、歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  では変形初期の  $n$  値が増大し、さらに変形量が増大しても  $n$  値が低下しないものと考えられる。したがって、マルテンサイトを微細分散させることによって高速変形時の内部応力がさらに高まり、 $n$  値が増加し、吸収エネルギーが増大するものと考えられる。

以上の結果から、dual phase 鋼において衝突エネルギー吸収特性を向上させるためには、マルテンサイトを微細分散させることが有効である。

### 3 高精度冷却制御技術適用の薄物熱延 dual phase 鋼板の機械的特性

dual phase 鋼においてマルテンサイトを微細分散させることにより、衝突エネルギー吸収特性が向上することが明らかとなった。熱間圧延工程における dual phase 鋼板の製造のキーポイントは仕上げ圧延後の巻取までの冷却制御にある<sup>7)</sup>。

しかしながら、板が薄くなるほど通板速度が上昇し、冷却制御のばらつきが大きくなるため、薄物においてフェライト相とマルテンサイト相だけからなる dual phase 組織を工業的に安定して製造することは困難となる。そのため、フェライト相とマルテンサイト相の他にベイナイト相が出現する混合組織となり機械的特性、特に伸

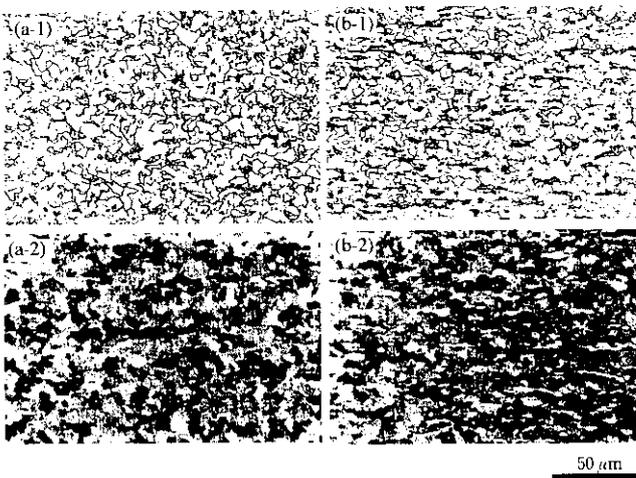


Photo 1 Microstructures of steel, produced via new precisely cooling process, consisting of ferrite and martensite phases (a-1), (a-2) and steel, produced via conventional cooling process, consisting of ferrite, martensite and bainite phases (b-1), (b-2) ((1) nital etching, (2) picric acid etching), thickness: 1.4 mm

び特性が低下する。

今回、川崎製鉄では、仕上げ圧延後の高精度冷却技術<sup>8)</sup>を開発し、この技術を板厚 1.4~2.0 mm の薄物 dual phase 熱延鋼板の製造に適用した。

Photo 1 (a-1), (b-1) に板厚 1.4 mm の高精度冷却適用鋼と従来冷却制御適用鋼のマイクロ組織の一例を示す。Photo 1 (a-2), (b-2) には 4% ピクリン酸アルコールと 2% ピロ硫酸ナトリウムを 1対1に混合した腐食液でマルテンサイトのみを白く現出させた組織写真を示す。従来冷却制御適用鋼ではフェライト相とマルテンサイト相の他にベイナイト相が認められるのに対し、高精度冷却適用鋼ではフェライト相とマルテンサイト相だけからなる dual phase 鋼となっており、さらにマルテンサイト相は微細に分散している。

Fig. 4 に板厚 1.4~2.0 mm の高精度冷却適用鋼と従来冷却制御適用鋼の降伏比（降伏応力/引張強度）と全伸びの関係を示す。ここで、全伸びは各板厚毎の JIS5 号試験片の値をオリバーの関係式を用いて板厚 2.0 mm に補正した値を用いた。第 2 相を微細分散したマルテンサイト相のみとすることにより降伏比が低下し、全伸びが向上する。

Table 2 に高精度冷却適用鋼と従来冷却制御適用鋼の高速変形特性の比較を示す。前述の実験室での研究結果の通り、マルテンサイトを微細分散させることにより高速変形時のエネルギー吸収特性が向上する。

## 4 プレス成形性の評価

### 4.1 実験方法

高精度冷却制御技術を適用して製造した薄物熱延 dual phase 鋼板の成形性を評価する目的で、冷延 dual phase 鋼板との相対的な

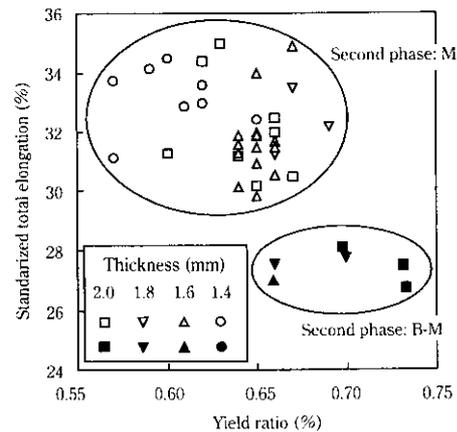


Fig. 4 Influence of structure in second phase on elongation and yield ratio

Table 2 Static and dynamic mechanical properties of developed steel

	Structure	Strain rate: $2 \times 10^{-2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$		Strain rate: $2 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$		
		YS (MPa)	TS (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	Absorbed energy (MJ · m <sup>-3</sup> )
Produced via new precisely cooling process	F + M	420	642	598	775	210
Produced via conventional cooling process	F + M + B	469	647	606	745	204

F: Ferrite, M: Martensite, B: Bainite

比較を球頭張出し成形試験、円筒深絞り成形試験にて実施した。

Table 3 に示す機械的性質の板厚 1.4 mm の高精度冷却制御技術適用 dual phase 熱延鋼板と冷延 dual phase 鋼板を供試材とした。

Fig. 5 に張出し成形試験概要を示す。直径 100 mmφ、肩 R50 mmφ のポンチを使用し、試験片寸法は 160 mm × 160 mm とした。鋼板表面に KS5 潤滑油を塗布して  $n$  数 3 で成形試験を行った。破断せずに成形可能な最大高さ (limit dome height: LDH) を測定し、張出し成形性を評価した。

Fig. 6 に深絞り成形試験概要を示す。直径 50 mmφ、肩 R3.25 mm のポンチを使用し、試験片寸法を 90 mmφ とした。鋼板表面に KS5 潤滑油を塗布して  $n$  数 3 で成形試験を行った。成形高さを 25 mm と一定にし、しわ押さえ荷重を変化させる成形試験を行い、しわ、割れ発生なく成形可能なしわ押さえ荷重を測定し、成形可能範囲により深絞り性を評価した。

また、液圧バルジ試験 (工具形状: 150 mmφ 円状)、球頭張出し試験 (工具形状: 100 mmφ 球頭ポンチ、潤滑油: KS5)、引張試験により成形限界曲線を作成した。特に球頭張出し試験において、さまざまな歪み比を得るために、試験片形状を 160 mm × 160 mm から 160 mm × 100 mm まで短冊状に変化させた種々の寸法の試験片を準備した。破断部の歪みの測定には直径 6 mm のスクライブドサークルを用いて行った。

#### 4.2 実験結果および考察

Fig. 7 に球頭張出し試験により測定した成形限界高さを示す。成形限界高さは開発鋼と冷延 dual phase 鋼とは同等である。

Table 3 Mechanical properties of steels used for formability tests

	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$r$ -value	$n$ -value	Frictional coefficient
Newly developed hot rolled dual phase steel	405	627	31.9	0.78	0.19	0.146
Cold rolled dual phase steel	361	634	32.0	0.94	0.19	0.151

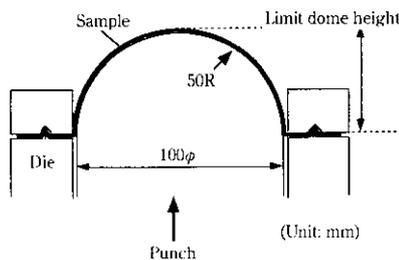


Fig. 5 Stretch forming test with dome punch

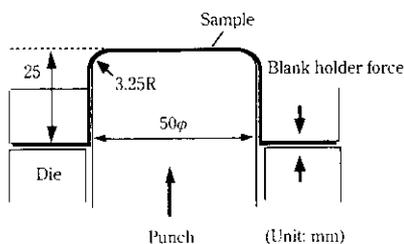


Fig. 6 Deep drawing test with circular punch

材料の張出し性は歪み分布の均一性と変形限界歪みに支配される。したがって、張出し性に大きな影響をおよぼす因子としては、材料特性として  $n$  値、伸び、さらに球頭張出し成形の場合では材料と工具の接触面上に作用する摩擦抵抗と関連の深い摩擦係数の 3 要素が挙げられる。 $n$  値、伸びおよび摩擦係数が冷延 dual phase 鋼と比較してほぼ等しい開発鋼は同等の張り出し性を有するものと考えられる。

Fig. 8 に成形高さを 25 mm に一定とし、しわ押さえ荷重を変化させて円筒深絞り成形を行い、しわ、割れの発生しない成形可能範囲を測定した結果を示す。開発鋼の成形可能範囲は冷延 dual phase 鋼の範囲よりわずかに狭い。

円筒深絞り成形における破断の原因はフランジ部の絞り込み力が破断部の破断耐力を上まわるためであり、パンチ頭部で  $\alpha$  破断し、応力経路が引張・引張の応力状態で単調に変化するものが特徴である。

また、円筒成形は縮みフランジ変形をともなう典型的な深絞り成形であるため、深絞り成形が可能かどうかは深絞り成形力と材料の破断荷重 (絞り途中で破断する際の荷重) の大小関係に依存する。つまり、成形荷重は低く、破断荷重が高い方が深絞り性に優れる。深絞り成形力は縮みフランジ抵抗、摩擦力およびダイ肩半径部の入口と出口での曲げ・曲げ戻し変形に必要な力の和である。縮みフランジ抵抗は  $r$  値に比例し、摩擦力はダイと板との間の摩擦係数としわ押さえ荷重に比例する。したがって、深絞り性に大きな影響を与える因子は、 $r$  値、強度および摩擦係数である。 $r$  値の定義から自明のように、 $r$  値が高くなるほど縮みフランジ変形では引張方向と垂直な方向に縮みやすく、フランジ部での材料の流入が容易となる。また破断危険部の破断耐力に影響を与えるのは主に材料強度である。

材料強度と摩擦係数がほぼ同等であるとする、開発鋼の成形可能範囲が冷延 dual phase 鋼の範囲よりわずかに狭いのは  $r$  値の影響

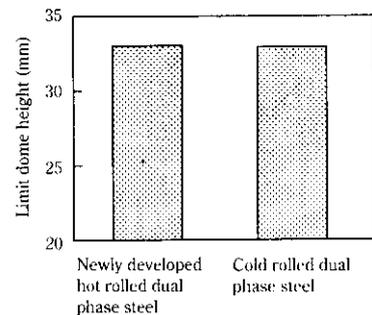


Fig. 7 Limit dome height of each material

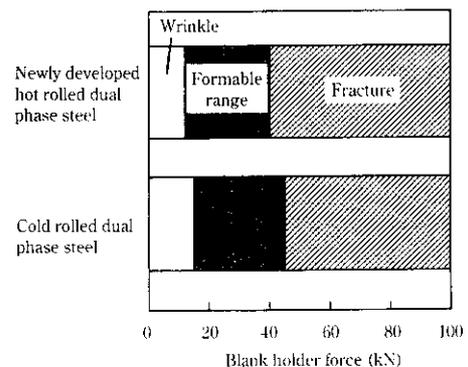


Fig. 8 Formable range of deep drawing test

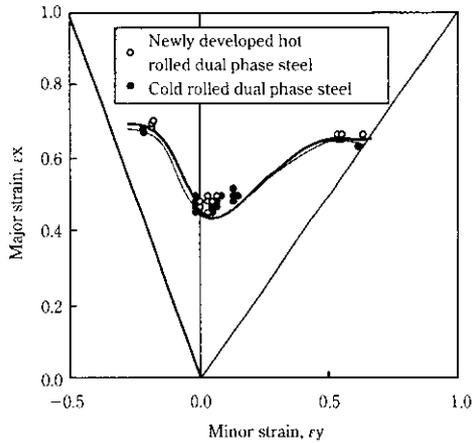


Fig. 9 Forming limit diagram of newly developed hot rolled dual phase steel and cold rolled dual phase steel

であると考えられる。

Fig. 9 に変形中に歪み比が変わらない単純変形経路における破断限界曲線を示す。開発鋼はいずれの歪み領域においても冷延 dual phase 鋼板と比べてほぼ等しい成形性を有している。

## 6 結 言

衝突エネルギー吸収特性、プレス成形性に優れた TS590 MPa 級 dual phase 熱延鋼板の開発を目的として、高速変形時のエネルギー吸収特性に及ぼす組織の影響を調べ以下の結論を得た。

- (1) 単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 30% までの吸収エネルギーが増大する。
- (2) 単位面積当たりのフェライト-マルテンサイト境界長さが増加するにしたがって、歪み速度  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  における歪み量 10% での  $n$  値も増大する。
- (3) これらの結果はマルテンサイトを微細分散させることによって高速変形時の内部応力がさらに高まり、 $n$  値が増加し、吸収エネルギーが増大するためと考えられる。

実験室での結果に基づき、仕上げ圧延後の高精度冷却技術を活用して板厚 1.4~2.0 mm の薄物 dual phase 鋼板を開発した。開発した高強度熱延鋼板は、フェライト相と微細分散したマルテンサイト相からなる dual phase 組織を持ち、従来冷却制御法による熱延 dual phase 鋼板と比較して、降伏比が低下し、全伸びが向上し、優れた衝突エネルギー吸収特性を示す。また冷延 dual phase 鋼板に匹敵するプレス成形性を合わせ持つ。

## 参 考 文 献

- 1) 潮田浩作：「鉄鋼の高強度化の最前線」, 日本鉄鋼協会, (1995), 1
- 2) 高木周作, 飯塚栄治, 三浦和哉, 古君 修, 谷村真治: *CAMP-ISIJ*, **9**(1996), 532
- 3) K. Miura, S. Takagi, O. Furukimi, T. Obara, and S. Tanimura: SAE Technical Paper, 960020, (1996)
- 4) 高木周作, 三浦和哉, 古君 修, 小原隆史, 加藤俊之, 谷村真治: 鉄と鋼, **83**(1997), 748
- 5) 粟生直樹, 谷村真治: 第 2 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 日本機械学会編, 東京, (1994), 17
- 6) 友田 陽, 田村今男: 鉄と鋼, **68**(1982), 1147
- 7) 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), 1297
- 8) 今江敏夫, 野村信彰, 三吉貞行: 川崎製鉄技報, **28**(1996)4, 219