高張力鋼板の塑性異方性に及ぼす 引張ひずみと引張ひずみ速度の影響

和田 肇* 上原 一剛*

岡本 尚機** 小幡 文雄*

Effects of Tensile Strain and Tensile Strain Rate on Plastic Anisotropy of High-Tensile Steel Sheets

Hajime WADA, Kazutake UEHARA

Hisaki OKAMOTO and Fumio OBATA

(Received on October 29, 2004)

Problems related to differences in product dimensions occur in each case of the trial press working, the actual press working and the actual press working at different speeds. There are large differences in product dimensions of high-tensile sheet steels compared with that of SPCC (Cold-reduced carbon steel sheets). This study is based on the supposition that the cause of product dimension differences depends on changes in the material properties due to the working quantity and the working speed. To understand the actual conditions of this problem, the working quantity was replaced with strain and the working speed was replaced with strain rate, and effects of strain and strain rate on the r and n values were investigated. Three kinds of high-tensile sheet steels with SPCC were then compared. A uniaxial tension test was used, with specimens cut from the sheet at 0, 45 and 90 degrees to the rolling direction. A digital video camera was used to record every moment of change in the rectangle pattern printed on the specimens. An important result from the investigation showed that DP (Dual Phase) sheet steels have a larger dependence of strain on the n value compared with SPCC.

Key words : tension test, high-tensile sheet steel, strain rate, anisotropy, r value, work-hardening, n value

1. 緒 言

自動車業界においては、燃費の向上や安全性の確保のために車体の軽量化と高張力化が指向されている。この動向に呼応して、材料メーカーは鋼板の高張力化を推進している。一般冷間圧延鋼板の引張強さは 270 MPa 程度であるが、1370 MPa クラスの高張力鋼板がすでに実用化^{1),2)}されており、自動車業界にはそれをさらに超える強さの要望もある。

しかし、鋼板の高張力化は塑性加工を一段と困難にし、成形余裕度低下による鋼板の割れやしわ発生の増加³⁾、弾性回復量の増大による寸法精度低下⁴⁾が大きな問題となっている。これらの問題に対して、破断の特性についての研究⁵⁾や形状凍結性予測の研究⁶⁾などがなされている。

このような状況下、鋼板を用いた部品の代表的加工法であるプレス加工は高張力化に対応できているとは言えないのが現状であり、試行錯誤を必要とする場合が多い。

その中で、プレス加工試行時、実加工時および実加工において加工時間を変更した場合とで部品寸法に違いが生じ

るという問題がある。とくに高張力鋼板においてその違いが大きく、原因究明が望まれている。その原因として鋼板塑性特性の加工量や加工速度依存性が考えられる。そこで本報では、鋼板の塑性ひずみ比 r 値と加工硬化指数 n 値に及ぼすひずみとひずみ速度の影響を検討した。また、その検討は SPCC と高張力鋼板を比較し行なった。

2. 供試材料および実験方法

2. 1 供試材料

Table 1 Mechanical properties of steel sheets used in experiments

Material		Yield stress / MPa	Tensile strength / MPa	Elongation / %
SPCC		253	350	39.1
DP	JSC590Y	390	630	27.9
	JSC980Y	660	1010	16.0
TRIP		410	620	38.7

* 鳥取大学大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101

** 鳥取大学地域共同研究センター 〒680-8550 鳥取市湖山町南4丁目101

Table 1 は、実験に用いた鋼板の機械的特性を示す。SPCC(一般冷間圧延鋼板)以外は高張力鋼板である。高張力鋼板のうち、JSC590Y, JSC980Y は DP(Dual Phase) 鋼で、日本鉄鋼連盟規格による冷間圧延低降伏比型鋼板である。変態誘起塑性を利用した TRIP(Transformation Induced Plasticity) 鋼は強さと延性のバランスに優れている^{6),7)}。

Fig. 1 は、単軸引張試験に用いた試験片の形状を示す。JIS Z 2201 の 13 号 B 試験片では平行部長さを約 60 mm と定めているが、本試験では同一引張速度下で実加工速度に近い高ひずみ速度を得るため、平行部長さは 30 mm とした。

Fig. 2 は、試験片の両端に 2 kN の一様引張力を作用させたときの試験片長さ方向中心線上の応力分布を有限要素法を用いて解析した結果を示す。平行部の長さが 30 mm であれば、**Fig. 1** 中にプリントパターンで示したひずみ測定部は単軸応力状態となっている。いずれの供試材料の試験片もその長手方向が圧延方向に対して 0°, 45°および 90°の 3 種類の方向に切り出して製作した。

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen used in tension tests

Fig. 2 Stress distribution on specimen at 2 kN load

2. 2 実験方法

実験は、インストロン型引張試験機を使用し、100, 400 および 1000 mm·min⁻¹ の 3 種類のクロスヘッド移動速度で行った。最大荷重点までの真ひずみを到達時間で除し、さらに各材料および各方向の平均値をひずみ速度とした。各クロスヘッド移動速度に対応するひずみ速度は 0.04, 0.16, 0.32 s⁻¹ で、そのばらつきはそれぞれ 0.03~0.05 s⁻¹, 0.15~0.17 s⁻¹, 0.29~0.34 s⁻¹ であった。なお、本報では以降は特に断らない限りひずみは真ひずみを意味する。

引張試験中における変形挙動の連続的な観察や最大荷重点におけるくびれ発生の確認と破断形状の確認を行うため、**Fig. 1** 中に示した 20 mm×10 mm のプリントパターンの形状変化を 1/30 s のサンプリング間隔でデジタルビデオカメラを用いて撮影した。ひずみ測定はビデオの静止画上でプリントパターンの寸法を読取る方法で行った。撮影した画像のプリントパターンに対するピクセル数は 182 × 89 であ

った。パターン域でのレンズのひずみの影響は 0.1 pixel 程度であり無視した。本測定方法における試験初期での長さ方向と幅方向の相対誤差はそれぞれ 0.55 および 1.1 % で、 r 値に及ぼす相対誤差は 1.7 % 以下であった。なお、引張試験機とビデオカメラ間のデータの同期を取るため、以下に示すような補正処理を行った。

Fig. 3 は、荷重-時間曲線の一例を示す。引張試験機で得られた生データを黒丸印で示すが、試験開始後試験片に荷重が作用するまでに時間遅れがあるため、0.1 s~0.35 s の間を直線近似した後、引張り開始点が原点に一致するよう全体を平行移動させた。

Fig. 4 は、プリントパターンの画像データに補正処理を行って得られた公称ひずみ-時間特性の一例を示す。読み取りによる公称ひずみのばらつきを少なくするため、曲線近似によるスムージング処理を行った。**Fig. 4** 中の曲線はその結果で、読取り値との相関係数は 0.9 以上であった。

Fig. 3 Revise on tension test data

Fig. 4 Examples of smoothing with approximate curves

3. 実験結果および考察

3. 1 平均 r 値と r 値の面内異方性

r 値は塑性ひずみによって定義されたものであり、弾性ひずみを含まない。しかし、例えば **Fig. 4** 中のデータには弾性ひずみが含まれている。そこで、鋼板の弾性係数を 200 GPa、ポアソン比を 0.29 として計算により弾性ひずみを除くことにより塑性ひずみを求め、幅方向のひずみと板厚方向のひずみの比である r 値を計算した。

垂直異方性係数である平均 r 値 $\bar{r}$ および r 値の面内偏差を示す面内異方性 Δr は、それぞれ次の式で与えられる^{8),9)}。

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (1)$$

$$\Delta r = (r_0 + r_{90})/2 - r_{45} \quad (2)$$

Fig. 5 Effects of tensile strain rate $\dot{\epsilon}$ on both $\bar{r}$ and Δr

式(1), (2)中の添字は, 試験片の長手方向と材料の圧延方向とのなす角度(°)を示す. なお, $\bar{r}$ と Δr の計算は, 弾性域のデータとくびれが発生する最大荷重点以降のデータを除いて行った. 一般に, 限界ひずみが大きく, かつカップ成形で耳発生が抑制されるためには $\bar{r}$ は大きく, $|\Delta r|$ は小さい方がよいといわれている⁹⁾.

Fig. 5は, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が0.04, 0.16および0.32 s⁻¹に対応する各供試鋼板の $\bar{r}$, Δr とひずみ ϵ の関係を示す.

Fig. 5 (a)は, 一般冷間圧延鋼板 SPCCの結果を示す. 通常, r 値は10~20%のひずみを与えた試験片から唯一の値として求められている. しかし, 本研究結果によれば, r 値は ϵ に依存し, $\bar{r}$ は ϵ の増加に伴い大きくなった. また, $\bar{r}$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ にも依存し, $\dot{\epsilon}=0.16$ s⁻¹のとき最大となった. 一方, Δr は $\dot{\epsilon}=0.16$ s⁻¹を除き ϵ の増加に伴い大きくなる傾向を示した. また, $\bar{r}$ と同様 Δr もひずみ速度に依存し, $\dot{\epsilon}=0.16$ s⁻¹のとき最大となった. このことは, $\dot{\epsilon}=0.16$ s⁻¹では加工性は良いが, 耳が発生し易い条件であることを示唆する.

Fig. 5 (b)~(d)は, 高張力鋼板の結果を示す. いずれの材料も SPCC に比べて $\bar{r}$ に及ぼす ϵ , $\dot{\epsilon}$ の影響は小さく, $\bar{r}$ は総じて0.5~1であった. Δr については, Fig. 5(b)に示した JSC590Y の場合, 低ひずみ速度で低ひずみの領域を除いて $|\Delta r| < 0.5$ であった. 一方, Fig. 5(c)に示した JSC980Y の場合, いずれの $\dot{\epsilon}$ でも ϵ が大きくなれば $|\Delta r|$ は小さくなった. とくに, $\epsilon > 0.05$ においては $|\Delta r| < 0.5$ であった. しかも, ϵ が大きくなるにつれて $|\Delta r|$ は0に近づく傾向を示した. このことから JSC980Y の場合 $\epsilon > 0.05$ で耳が発生しにくくなることが予想される. Fig. 5(d)に示した TRIP 鋼の場合, $|\Delta r|$ は DP 鋼よりも全般的に大きく, $\Delta r = 0.1 \sim 1.8$ であった.

Fig. 6は, 各種鋼板の $\bar{r}$ に及ぼす $\dot{\epsilon}$ の影響を示す. なお, 鋼板によって均一な塑性ひずみの範囲が異なったので, $\bar{r}$ は各鋼板の最大荷重時の ϵ の約80%, すなわち SPCC と JSC590Y では $\epsilon=0.14$, JSC980Y では $\epsilon=0.09$, また TRIP では $\epsilon=0.17$ を用いた. $\dot{\epsilon}$ の影響は SPCC で大きく, 高張力鋼板で小さかった. また, SPCC と比較して高張力鋼板の $\bar{r}$ が小さいことから, 高張力鋼板は深絞り加工が困難であることがわかる. なお, SPCC の場合, $\bar{r}$ が最大となるひずみ速度があることから, 加工速度に最適値があることがわかる.

Fig. 6 Effects of tensile strain rate $\dot{\epsilon}$ on $\bar{r}$ at near maximum tension load

3. 2 加工硬化指数 n の加工速度依存性

Fig. 7 は, n 値のひずみ速度に対する変化を示す。なお, n 値は, JIS Z 2253「薄板金属材料の加工硬化指数試験方法」に基づき, n 乗硬化則の式(3)に最大荷重点までの引張応力 σ と引張ひずみ ε の実験データを代入し最小二乗法により求めた⁹⁾。

$$\sigma = F\varepsilon^n \quad (3)$$

式(3)中の F は塑性係数である。Fig. 7 中の各値は圧延方向に対して 0° , 45° および 90° の 3 方向の n 値の単純平均値である。ひずみ速度の増加に伴って n 値は増大し, 特に JSC980Y で大きかった。高張力鋼板の n 値は SPCC の n 値のおおむね 2 倍を超えた。

Fig. 7 Effects of cross head speed on n

3. 3 平均 n 値と n 値の面内異方性

均一塑性ひずみ全域を使用して n 値を求める JIS Z 2253 の方法では n 値に及ぼすひずみ ε とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の影響は解明できない。そこで, 式(4)で与えられる瞬間 n 値 n^* でそれらの影響を検討した⁹⁾。

$$n^* = \frac{d\sigma/\sigma}{d\varepsilon/\varepsilon} \quad (4)$$

ここに, $d\sigma$, $d\varepsilon$ は引張試験データのサンプリング間隔 50 ms での引張応力と引張ひずみの変化分である。また, 3.1 節で示した, 平均 r 値と r 値の面内異方性と比較するため, 3 方向の平均瞬間 n 値 $\bar{n}^*$ と瞬間 n^* の 3 方向の板面内偏差である面内異方性 Δn^* をそれぞれ, 式(5), (6) で求めた。

$$\bar{n}^* = (n^*_{0^\circ} + 2n^*_{45^\circ} + n^*_{90^\circ})/4 \quad (5)$$

$$\Delta n^* = (n^*_{0^\circ} + n^*_{90^\circ})/2 - n^*_{45^\circ} \quad (6)$$

なお, 式(5), (6)の右辺における n^* 値の添字は, 試験片の長手方向と材料の圧延方向とのなす角度を示す。

n 乗硬化則の仮定では, ひずみ ε が n 値に一致したときにくびれが発生するとともに引張荷重も最大となる¹⁰⁾。その時のくびれを拡散くびれ¹¹⁾と称し, n 値の大きい鋼板ほど大きな均一変形が可能となる。

Fig. 8 は, 最大引張荷重までのデータを用いて求めた, $\bar{n}^*$, Δn^* に及ぼすひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ とひずみ ε の影響を示す。Fig. 8(a) は, SPCC の結果を示す。 $\bar{n}^*$, Δn^* とともに ε , $\dot{\varepsilon}$ の影響をほとんど受けなかった。また, $\bar{n}^*$ は 0.15~0.19,

Δn^* はほぼ 0 であった。

Fig. 8(b), (c) は, DP 鋼である JSC590Y, JSC980Y の

(a) SPCC

(b) JSC590Y

(c) JSC980Y

(d) TRIP

Fig. 8 Effects of tensile strain rate $\dot{\varepsilon}$ on both $\bar{n}^*$ and Δn^* (Arrow: Coincided point between $\bar{n}^*$ and ε)

結果を示す。いずれの $\bar{n}^*$ も ε の増大に伴って減少したが、その程度は JSC590Y では 0.3 から 0.16 へと徐々にあったのに対し、JSC980Y では 0.4 付近から 0.1 付近へ急激に減少した。このことは、 n 値はくびれを生じる ε と等しいことから、DP 鋼では高張力になれば加工の進行に伴って均一変形伸びの範囲が小さくなることを示す。 $\dot{\varepsilon}$ が大きいほど $\bar{n}^*$ は大きくなったが、この傾向は高張力の JSC980Y の方が強かった。いずれの DP 鋼とも Δn^* は ε の増大に伴って 0 に近づいた。 $|\Delta n^*|$ は、 ε の増大により JSC590Y の場合は 0.1 から 0 に、また JSC980Y の場合は 0.2 から 0 にそれぞれ変化したが、いずれの場合も $\dot{\varepsilon}$ の影響は小さかった。

Fig. 8(d) は、TRIP 鋼の結果を示す。 $\dot{\varepsilon}=0.04, 0.16 \text{ s}^{-1}$ では ε の影響は小さく $\bar{n}^*=0.24$ であった。 $\dot{\varepsilon}=0.32 \text{ s}^{-1}$ の $\bar{n}^*$ は低ひずみ速度である $\dot{\varepsilon}=0.04 \text{ s}^{-1}$ よりも高く 0.31~0.24 であり、 ε の増大により徐々に減少した。 $|\Delta n^*|$ は ε と $\dot{\varepsilon}$ のいずれの影響も受けずほぼ 0 で、SPCC と同様に圧延方向による n 値の差がほとんどなかった。

n 乗硬化則の理論では最大引張荷重ではひずみ ε と n 値は一致する。Fig. 8 (a)~(d) 中の破線はひずみ ε の値と平均瞬間 n 値 $\bar{n}^*$ の値が一致する線 ($\bar{n}^*=\varepsilon$) である。Fig. 8 中に矢印で示すように、最大荷重点における ε は $\bar{n}^*$ とほぼ一致した。一方、Fig. 7 に示した JIS Z 2253 に基づいて計算した n 値は SPCC を除いて最大荷重点の ε より大きな値となり一致しない。

注目すべきは、SPCC と異なり高張力鋼板はひずみの増大にともない $\bar{n}^*$ 値が低下したことである。その原因は、本試験で適用したひずみ速度下での変形による試験片温度の上昇は高張力鋼板の方が大きいため、転位の熱活性化運動過程に関係し転位が動きやすくなったことにあると考えられる。しかし、これについては今後検討が必要である。

3. 4 $\bar{r}$, Δr および $\bar{n}^*$, Δn^* に及ぼす ε と $\dot{\varepsilon}$ の影響のまとめ

Table 2 Effects of ε and $\dot{\varepsilon}$ on plastic anisotropy and work-hardening exponent

	Material	$\bar{r}$	$ \Delta r $	n	$\bar{n}^*$	$ \Delta n^* $
ε	SPCC	○	○	—	×	×
	DP	JSC590Y	△	—	△	△
		JSC980Y	△	—	○	○
	TRIP	△	○	—	△	×
$\dot{\varepsilon}$	SPCC	○	○	×	×	×
	DP	JSC590Y	△	△	△	△
		JSC980Y	△	○	○	△
	TRIP	△	△	△	△	△

○: high dependence △: middle dependence

×: slight or no dependence

Table 2 は、本実験で得られた $\bar{r}$, $|\Delta r|$, n , $\bar{n}^*$, および $|\Delta n^*|$ に及ぼすひずみ ε とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の定性的な影響を

まとめたものである。○印は依存性が大きかったことを、×印は依存性が小さいことを、また△印はそれらの中間であったことを示す。DP 鋼では高張力になるほど $\bar{n}^*$ に及ぼす ε , $\dot{\varepsilon}$ の影響が大きくなる。したがって、高張力鋼板をプレス加工する場合は被加工物各部での ε の差を小さくするようコーナー部の半径を大きくするとか、試行時と実加工時のプレス速度を同一にすることが望まれる。これにより割れの発生を防止したり、加工速度の違いに起因する被加工物の寸法の違いを小さくしたりできる。

4. 結 言

高張力鋼板の r 値, n 値に及ぼすひずみとひずみ速度の影響を SPCC と比較し検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 垂直異方性係数である平均 r 値および r 値の面内異方性 Δr はひずみ速度のみならずひずみに依存し、その程度は材料によって異なった。SPCC と比較して、DP 鋼や TRIP 鋼の平均 r 値に及ぼすひずみ速度とひずみの影響は小さかった。また、DP 鋼はひずみの増大に伴って Δr は小さくなった。
- (2) SPCC と異なり高張力鋼板の平均瞬間 n 値 $\bar{n}^*$ はひずみ依存性を示し、 ε が大きくなると $\bar{n}^*$ は小さくなると共に DP 鋼については Δn^* は 0 に近づいた。JSC980Y はひずみ速度依存性もあり、 $\dot{\varepsilon}$ が高くなると $\bar{n}^*$ が大きくなった。
- (3) DP 鋼の場合、被加工物のコーナー部半径を大きくするとか、試行時と実加工時のプレス速度を同一にすることで割れを防止したり被加工物の寸法の違いを小さくしたりできる。
- (4) SPCC の n 値と比較して DP 鋼および TRIP 鋼の n 値はひずみ速度が高くなると大きくなる傾向が強かった。

参 考 文 献

- 1) 山崎雄司：塑性と加工, 44-506 (2003-3), 240-244.
- 2) 中俊樹・後藤貢一・谷口裕一・山崎一正：新日鉄技報, 第 378 号 (2003), 12-14.
- 3) 加藤勝人：塑性と加工, 35-405 (1994-9), 1060-1064.
- 4) 大屋邦雄・鈴木秀人・西野創一郎・高田和泰・正木郁也：塑性と加工, 43-492 (2002-1), 40-44.
- 5) 岩谷二郎・田中福輝・白沢秀則・宮原征行：塑性と加工, 35-404 (1994-9), 1122-1127.
- 6) 杉本公一・早川祥・北條智彦・橋本俊一・池田周之：鉄と鋼, 89-12 (2003), 51-57.
- 7) Chang Gil LEE, Tea-Ho LEE and Chang-Seok OH: ISIJ International, 44-4 (2004), 737-743.
- 8) 後藤學：塑性と加工, 43-495 (2002-4), 270-277.
- 9) 中川威雄：プレス成形難易ハンドブック, (1997), 423-457, 日刊工業新聞社.
- 10) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎, (1997), 118, 共立出版.
- 11) 山田嘉昭：塑性力学, (1965), 5-6, 日刊工業新聞社.