

2軸引張応力下におけるIF鋼板および低炭素鋼板の加工硬化挙動

池田 聡*・桑原 利彦*²

Work Hardening Behavior of IF and Low Carbon Steel Sheets under Biaxial Tension

Satoshi IKEDA and Toshihiko KUWABARA

Synopsis : Work hardening behavior of IF and low carbon Al-killed steel sheets (SPCE and SPHC) under biaxial tension is investigated using biaxial tension tests and hydraulic bulge tests. The test materials have different r -values: an average r -value, \bar{r} , is 1.87 for the IF steel, and 1.76 and 0.95 for SPCE and SPHC, respectively. In the biaxial tension tests detailed measurements are made of the initial yield locus, contours of plastic work for different levels of work hardening, and the directions of the incremental plastic strain vectors for linear stress paths. Only the IF steel and SPCE, which have relatively large r -values, exhibit the differential hardening, while SPHC work-hardens almost isotropically. The results are consistent with the author's earlier research. True stress-logarithmic thickness strain curves measured in the bulging tests are also consistent with the biaxial tension test results. Accordingly, it emerges that the differential hardening is characteristic of steel sheets with large r -values (about 1.5 or more). The work-hardening behavior of the test materials predicted using Yld2000 yield function (Barlat *et al.*, *Int. J. Plasticity*, **19** (2003), 1297) agrees closely with the observations.

Key words: material testing; low carbon steel sheet; plastic deformation; yield criterion; r -value; differential hardening.

1. 緒言

高精度な成形シミュレーションを行うためには、当該材料の弾塑性変形挙動をできるだけ忠実に再現できる材料モデルを用いることが必要不可欠である¹⁾。このような問題意識のもとに、著者らは、金属薄板の2軸引張試験法²⁻⁴⁾および平面ひずみ引張試験法^{5,6)}を考案し、2軸引張応力下における各種鋼板の加工硬化特性を明らかにした。これらの一連の研究において、筆者らは、 r 値の大きさにより鋼板の加工硬化特性に違いがあることに気付いた。すなわち、平均 r 値がおよそ1.5以上の鋼板の塑性流動応力は、数%以下の相当塑性ひずみ域においては、Hillの2次降伏関数⁷⁾による計算値より小さいが、塑性ひずみの増加に伴い、Hillの2次降伏関数による計算値に徐々に近づくという、異方硬化挙動を示すことを見出した。一方、平均 r 値が1に近い鋼板では、等塑性仕事面はほぼ相似形状を保ち、異方硬化挙動はほとんど観察されなかった。

一方、筆者らが得た上記の知見は、過去の研究者のものとは異なることも指摘した²⁻⁶⁾。過去の研究者が行った穴拡張試験⁸⁾、液圧バルジ試験⁹⁻¹¹⁾や平面ひずみ引張試験¹²⁾の結果によれば、平均 r 値が1以上の鋼板であれば、その塑性変形挙動はHillの2次降伏関数に基づく計算値と概ね一致すると報告されているのである。

過去の研究者と筆者らの研究知見の相違の原因として、

加工硬化特性を測定した際のひずみの大きさが異なることが挙げられる²⁻⁶⁾。すなわち、過去の研究者⁸⁻¹²⁾は、数%~50%程度の大きな相当塑性ひずみ域における鋼板の加工硬化挙動を観察しているのに対し、著者らは、2軸引張試験²⁻⁴⁾では4~6%以下の、平面ひずみ引張試験^{5,6)}では10%以下の比較的小さな相当塑性ひずみ域を観察対象としているのである。

そこで本研究では、降伏初期から40%程度の塑性ひずみ範囲を対象として、2軸引張応力下におけるIF鋼板および低炭素鋼板の加工硬化特性を系統的に解明することを目的とする。試験法としては、降伏初期から数%以下のひずみ域に対しては十字形試験片を用いた2軸引張試験法を、数%以上のひずみ域に対してはひずみ速度制御液圧バルジ試験法を用いる。さらに、異方性降伏関数を用いて鋼板の異方硬化挙動を定式するための手法とその妥当性についても論ずる。

2. 実験方法

2.1 供試材

IF鋼板(板厚1.2 mm, 平均 r 値 $\bar{r}=1.87$, 0.0026 mass% C), 低炭素アルミキルド冷延鋼板SPCE(板厚1.0 mm, $\bar{r}=1.76$, 0.045 mass% C), 低炭素アルミキルド熱延鋼板SPHC(板厚1.6 mm, $\bar{r}=0.95$, 0.037 mass% C)の三種類を用いた。そ

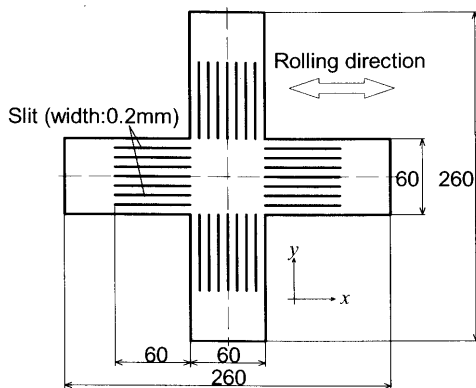
Table 1. Mechanical properties of test materials.

Tensile direction	$\sigma_{0.2}$ /MPa	c^* /MPa	n^*	α^*	r^{**}
IF steel-0°	136	607	0.347	0.011	2.02
-45°	150	629	0.340	0.013	1.56
-90°	146	632	0.376	0.018	2.34
SPCE-0°	177	563	0.256	0.008	1.98
-45°	188	620	0.277	0.011	1.40
-90°	180	552	0.254	0.010	2.26
SPHC-0°	213	575	0.248	0.016	0.76
-45°	211	582	0.278	0.024	1.07
-90°	220	643	0.321	0.033	0.89

Upper, middle and lower lines indicate the mechanical properties in the 0°, 45° and 90° directions from the rolling direction of the material, respectively.

* Approximated using $\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n$ at $\epsilon^p = 0.001 \sim 0.09$

** Measured at uniaxial plastic strain $\epsilon^p = 0.1$

Fig. 1. Cruciform specimen for biaxial tension test.²⁾

これらの機械的性質を Table 1 に示す。 r 値の測定においては、JIS13号B型試験片に10%伸びひずみを与えた後、試験片長手方向の伸び量（標点距離10mm）および幅方向の縮み量（標点距離12.5mm）を工具顕微鏡により1 μ mオーダーで測定し、各方向の塑性ひずみ ϵ_w^p 、 ϵ_l^p をそれぞれ求め、 $r = -\epsilon_w^p / (\epsilon_l^p + \epsilon_w^p)$ を使って算出した。IF鋼板とSPCEは平均 r 値がほぼ同程度で比較的大きいが、SPCEの炭素含有量はIF鋼板の約17倍である。一方、SPHCはIF鋼板やSPCEと同じ軟質系フェライト単相鋼板であるが、平均 r 値はIF鋼板およびSPCEのほぼ1/2、炭素含有量はIF鋼板の約14倍、SPCEと同等である。

2.2 材料試験方法

初期降伏曲面および数%以下のひずみ域における加工硬化特性を2軸引張試験により、数%以上のひずみ域における加工硬化特性を液圧バルジ試験により測定した。

2.2.1 2軸引張試験

十字形試験片の形状を Fig. 1 に示す。圧延方向を x 軸、圧延直角方向を y 軸にとる。腕部にはスリットを7.5mm間隔に入れ、応力測定部である60mm×60mmの正方形領域の変形拘束を極力小さくしている。

油圧サーボ制御2軸引張試験機²⁾を用いて、十字形試験片に2軸引張荷重を負荷した。各軸の荷重は時間軸に対して直線的に増加させた。荷重比はIF鋼板およびSPHCで

$F_x:F_y$ （圧延方向：圧延直角方向）=4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4の7通りとした。SPCEでは2:1, 1:1, 1:2の3通りとした。また、JIS13号B型試験片を用いた圧延方向および圧延直角方向の単軸引張試験により、それぞれ荷重比0:1および1:0における加工硬化特性を測定した。単軸および2軸引張試験の公称相当ひずみ速度は、IF鋼板で $0.75 \times 10^{-3}/s$ 、SPHCで $1.7 \times 10^{-3}/s$ 、SPCEで $1.0 \times 10^{-3}/s$ であった。

各軸方向の垂直ひずみ成分は、試験片中心から約10mm離れた中心線上に塑性ゲージを貼り付けて測定した。垂直応力成分は、荷重の測定値をその瞬間の断面積（面内塑性ひずみの測定値を用いて体積一定則より算定）で除した真応力として算定した。またひずみを試験片の中心軸上で計測しているため $\sigma_{xy} = 0$ とみなした。

2軸引張応力下における鋼板の加工硬化特性を定量的に評価するため、前報²⁻⁴⁾同様、等塑性仕事面^{13,14)}を測定して、実験値を整理した。等塑性仕事面は、以下手順により求めた。まずJIS13号B型試験片を用いた圧延方向の単軸引張試験より、既定の対数塑性ひずみ ϵ_0^p に達するまでになされた塑性仕事 W を求める。さらに十字形試験片を用いた2軸引張試験により、 W と等量の塑性仕事を与える応力点 (σ_x, σ_y) を求め、主応力空間にプロットして、各 ϵ_0^p に対する等塑性仕事面とした。

2.2.2 液圧バルジ試験

本研究で用いた液圧バルジ試験機のダイ穴直径は150mm、ダイ肩半径は8mm、素板直径は220mmである。

バルジ頂部の曲率半径 ρ は自作の3点式曲率計を用いて測定した。曲率半径の測定区間は40mmとした（この区間内では曲率半径はほぼ一様である）。バルジ頂部のひずみは、2枚の塑性域ゲージを試験片中心から5mmの位置に、圧延方向と圧延直角方向にそれぞれ貼り付けて測定した。板厚ひずみがおおよそ-0.2に達した時点で試験を中断し、ひずみゲージを張り替え、実験を継続した。

液圧バルジ試験によって鋼板の加工硬化特性を精度よく同定するためには、試験中のひずみ速度を一定に制御する必要がある¹⁰⁾。そこで本実験では、油圧サーボフィードバック制御により、試験中のひずみ速度をほぼ一定に維持し、かつ公称相当ひずみ速度が単軸および2軸引張試験と同じ値になるように設定した。バルジ頂部の等2軸引張応力 σ_b は次式より求めた。

$$\sigma_b = \frac{P\rho}{2t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで P は液圧である。 t はバルジ頂部の板厚であり、ひずみゲージによる面内主ひずみの測定値から、体積一定条件を用いて算定した。

3. 理論—異方性降伏関数—

本節では、鋼板の加工硬化挙動を定量的に評価するための異方性降伏関数についてその概略を記す。以下、圧延方向および圧延直角方向の r 値を各々 r_0, r_{90} 、各方向の単軸引張塑性流動応力を各々 σ_0, σ_{90} と表記する。

3・1 Hosfordの高次降伏関数^{15,16)}

平面応力状態を仮定し、素板の圧延方向を x 軸、圧延直角方向を y 軸にとる。相当応力 $\bar{\sigma}$ -相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ 曲線を圧延方向の単軸応力ひずみ曲線に一致させるとき、Hosfordの降伏関数は次式で与えられる。

$$r_{90}\sigma_x^M + r_0\sigma_y^M + r_{90}r_0(\sigma_x - \sigma_y)^M = r_{90}(1+r_0)\bar{\sigma}^M \dots\dots\dots (2)$$

FCC金属に対しては $M=8$ が、BCC金属に対しては $M=6$ が推奨されている。式(2)は、 $M=2$ のときHillの2次降伏関数⁷⁾に一致する。

材料が板厚異方性のみを有する場合、液圧バルジ試験における試験片頂部の対数塑性板厚ひずみ ϵ_t^p と面内の等2軸引張応力 σ_b は、相当応力 $\bar{\sigma}$ -相当塑性ひずみ曲線 $\bar{\epsilon}^p$ と r 値(\bar{r})を用いて次式から計算できる。

$$|\epsilon_t^p| = \left(\frac{2}{1+\bar{r}} \right)^{1/M} \bar{\epsilon}^p, \quad \sigma_b = \left(\frac{1+\bar{r}}{2} \right)^{1/M} \bar{\sigma} \dots\dots\dots (3)$$

鋼板の等塑性仕事面ならびに塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、Hosfordの降伏関数による計算値と比較的精度よく一致するので²⁻⁶⁾、本報でも供試材の加工硬化挙動を定量的に評価するための異方性降伏関数の一つとして用いることとする。

3・2 Yld2000降伏関数¹⁷⁾

Yld2000降伏関数は次式で与えられる。

$$|X'_1 - X'_2|^M + |2X''_2 + X''_1|^M + |2X''_1 + X''_2|^M = 2\bar{\sigma}^M \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\bar{\sigma}$ は相当応力である。 X'_i, X''_i ($i=1, 2$)はテンソル \mathbf{X}' , \mathbf{X}'' の主値であり、次式より計算される。

$$X'_i = \frac{1}{2} \left(X'_{xx} + X'_{yy} \pm \sqrt{(X'_{xx} - X'_{yy})^2 + 4X'^2_{xy}} \right) \dots\dots\dots (5-1)$$

$$X''_i = \frac{1}{2} \left(X''_{xx} + X''_{yy} \pm \sqrt{(X''_{xx} - X''_{yy})^2 + 4X''^2_{xy}} \right) \dots\dots\dots (5-2)$$

$\mathbf{X}', \mathbf{X}''$ は、テンソル $\mathbf{L}', \mathbf{L}''$ を用いてCauchy応力 $\boldsymbol{\sigma}$ を線形変換($\mathbf{X}' = \mathbf{L}'\boldsymbol{\sigma}$, $\mathbf{X}'' = \mathbf{L}''\boldsymbol{\sigma}$)して得られる。ここで、 $\mathbf{L}', \mathbf{L}''$ は、材料の異方性パラメータ $\alpha_1 \sim \alpha_8$ を用いて次式より計算される。

$$\begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6-1)$$

$$\begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6-2)$$

本研究では $\sigma_{xy}=0$ であるので α_7, α_8 は不要となる。

$\alpha_1 \sim \alpha_6$ を決定するために必要な材料特性値は、 $\sigma_0, \sigma_{90}, \sigma_b, r_0, r_{90}, r_b$ の6個である。ここで r_b は等2軸引張における塑性ひずみ増分比 $d\epsilon_y^p/d\epsilon_x^p$ である。

4. 実験結果

4・1 2軸引張試験結果

等塑性仕事面の測定結果をFig. 2に示す。応力成分は、各 ϵ_0^p に対応する圧延方向単軸引張応力 σ_0 で無次元化している。また、Hillの2次、HosfordおよびYld2000の高次降伏曲面も併記している。HosfordおよびYld2000降伏関数の次数は $M=6$ とした。

IF鋼板(Fig. 2(a))とSPCE(Fig. 2(b))の等塑性仕事面は $0.0005 \leq \epsilon_0^p \leq 0.02$ のひずみ範囲において、顕著な異方硬化挙動^{13,14)}を示した。すなわち、等塑性仕事面は、降伏直後($\epsilon_0^p=0.0005$)においてvon Misesの降伏曲面近傍に位置するが、ある程度加工硬化が進むとHosfordの降伏曲面にほぼ一致し($\epsilon_0^p=0.002$)、さらに加工硬化が進むとHillの2次降伏曲面に近づく傾向を示した。一方、SPHC(Fig. 2(c))も $0.0005 \leq \epsilon_0^p \leq 0.02$ のひずみ範囲でわずかに異方硬化挙動を示すものの、IF鋼板やSPCEと比べると、その度合いは小さい。実際、 $\epsilon_0^p \geq 0.02$ のひずみ範囲では、等塑性仕事面の形状はあまり変化せず、異方硬化挙動はほとんど見られない。SPHCにおいてはHillとHosfordの降伏曲面の差異は小さいが、応力比 $\sigma_x : \sigma_y = 1:4$ 以外では、全般的にHosfordの降伏曲面の方が等塑性仕事面との一致の度合いはよい。

Yld2000は、いずれの鋼板の等塑性仕事面とも比較的よく一致しており、異方硬化挙動を精度よく再現できている。これは、Yld2000の異方性パラメータは、 r_0, r_{90}, r_b に加えて3つの応力値 $\sigma_0, \sigma_{90}, \sigma_b$ を用いて決定されているためであり、当然の結果である。しかし逆に言えば、異方硬化挙動を正確に記述するためには、 σ_b をも係数決定に用いるような降伏関数が必要となることを意味する。

次に、塑性変形の進展(ϵ_0^p の増加)に伴う、塑性ひずみ増分ベクトル方向の測定結果をFig. 3に示す。本図はIF鋼板の結果である。塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、いずれの応力比においても、 $\epsilon_0^p \geq 0.005$ ではほぼ一定である。2回の実験における測定値のばらつきは最大でも $\pm 3^\circ$ であった。

同図には、各降伏関数に基づく計算値(降伏曲面の外向き法線ベクトル方向)も併記されている。Yld2000は応力

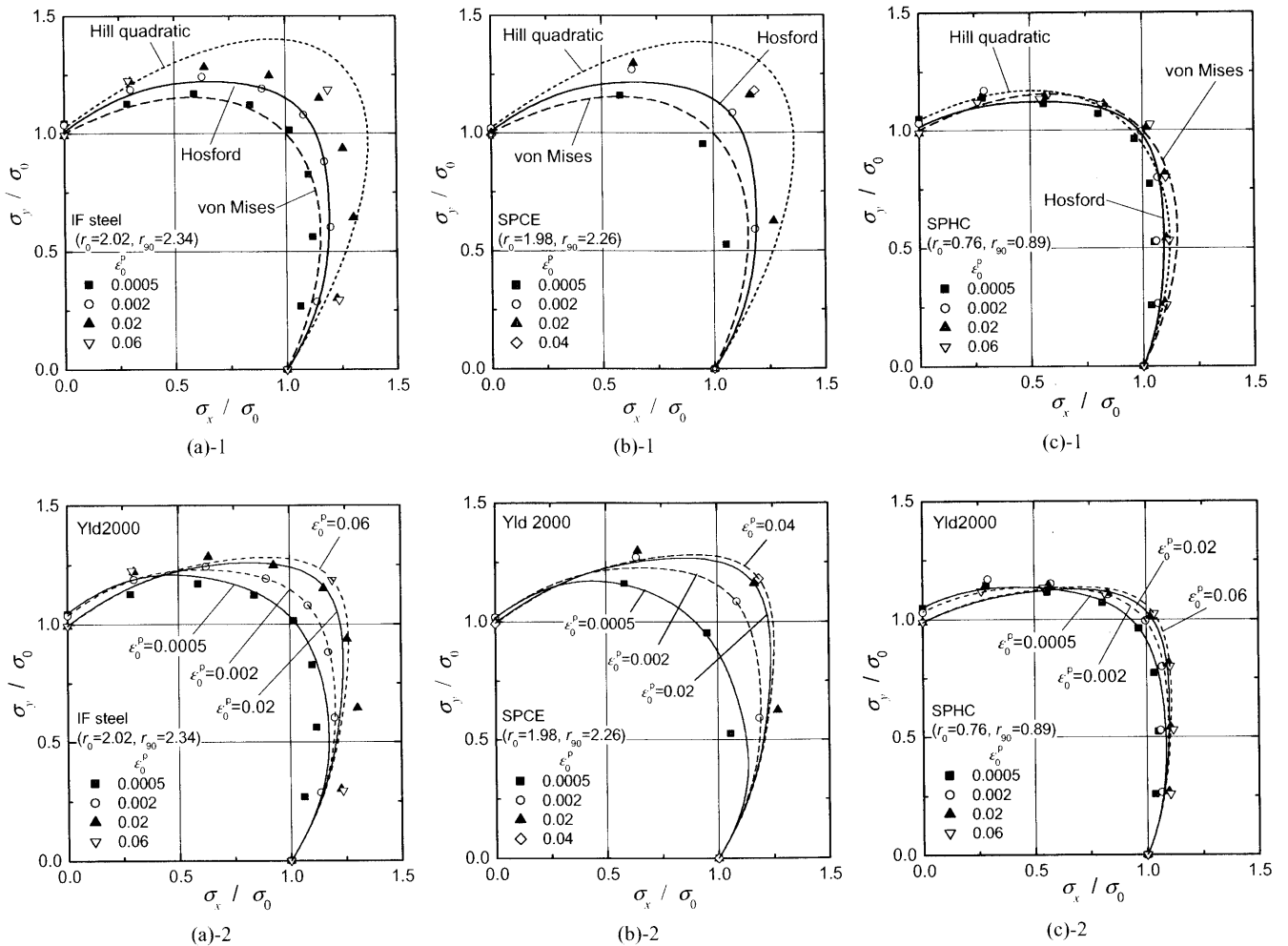


Fig. 2. Experimental data comprising contours of plastic work compared with the Hill quadratic, Hosford and Yld2000 yield loci for (a) IF steel, (b) SPCE and (c) SPHC.

比 $\sigma_x : \sigma_y = 4:1, 1:1, 1:4$ においては実験値と最もよく一致しているが、その他の応力比ではむしろ Hosford の降伏関数による計算値の方が実験値により近い (SPCE についても同様の傾向であった)。Hill の 2 次降伏関数による計算値は、Yld2000, Hosford の降伏関数に比べて測定値との差が大きい。特に平面ひずみ引張に近い応力比 $\sigma_x : \sigma_y = 2:1, 1:2$ において、最大で 13° の差があった。

以上の結果をまとめると、Yld2000 降伏関数は各鋼板の異方硬化挙動を最も精度よく再現できる。ただし、塑性ひずみ増分ベクトルの予測精度の観点からいえば、Yld2000 が最良の材料モデルであるとは必ずしも言えないことがわかった。ちなみに Yld2000 の計算値と実験値との最大誤差は、応力比 $\sigma_x : \sigma_y = 4:3$ で 12° であった。

4.2 液圧バルジ試験結果

ひずみ速度制御バルジ試験より得られた、 $\sigma_0 - |\epsilon_0^p|$ 曲線の測定結果を Fig. 4 に示す。同図には、Hill および Hosford の降伏関数による計算値 (式 (3)) も併記している。計算で用いた相当応力 $\bar{\sigma}$ - 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ 曲線は、圧延方向から $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向の単軸引張試験から得られる真応力-対数塑性ひずみ曲線を平均化して算定した。

IF 鋼板 (Fig. 4(a)) と SPCE (Fig. 4(b)) はほぼ同じ異方硬化挙動を示した。すなわち、 $\epsilon_0^p \leq 0.03$ のひずみ範囲において実験値は、Hosford の降伏関数による計算値とほぼ一致するが、加工硬化とともに Hill の 2 次降伏関数による計算値に漸近し、 $\epsilon_0^p \geq 0.2$ において両者はほぼ一致した。

SPHC (Fig. 4(c)) では、Hill および Hosford の降伏関数による計算値の差異はほとんど無く、 $\epsilon_0^p \leq 0.05$ のひずみ域で実験値と計算値はほぼ一致する。しかしさらに加工硬化が進むと、 σ_0 の実験値は計算値より徐々に大きくなり、わずかではあるが異方硬化挙動を示した。ただし異方硬化の度合いは IF 鋼板や SPCE に比べて小さく、 $|\epsilon_0^p| = 0.3$ においても実験値と計算値の差異は塑性流動応力の数%である。

以上まとめると、液圧バルジ試験で観察された三つの供試材の加工硬化特性は、2 軸引張試験の実験結果、すなわち IF 鋼板と SPCE のみが顕著な異方硬化挙動を示し、SPHC の異方硬化の程度は小さいという Fig. 2 の観察結果と附合することが確認された。

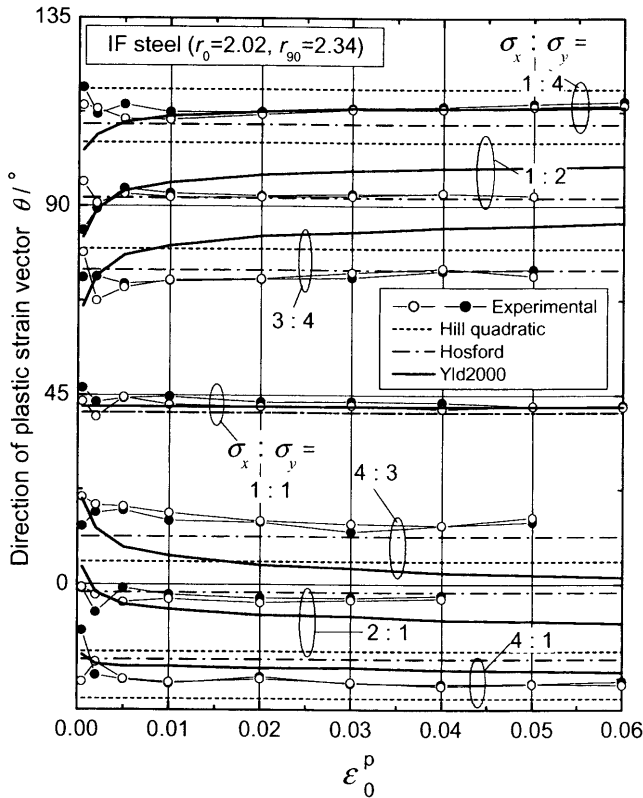


Fig. 3. Comparison of directions of incremental plastic strain vectors measured for IF steel with those predicted using the Hill quadratic, Hosford and Yld2000 yield criteria.

5. 考察

5.1 異方硬化挙動とr値の関係

Fig. 2およびFig. 4の実験結果を総括すると、r値が比較的大きいIF鋼板($\bar{r}=1.87$)およびSPCE($\bar{r}=1.76$)のみが顕著な異方硬化挙動を示した。r値が比較的小さいSPHC($\bar{r}=0.95$)も異方硬化挙動を示したものの、その程度はIF鋼板、SPCEに比べて僅かであった。IF鋼板(0.0026 mass% C)はSPCE(0.045 mass% C)に比べ炭素含有量の約1/17と少ないにもかかわらず、両材料とも異方硬化挙動を示す。このことから、少なくとも本研究で用いた鋼板においては、異方硬化挙動の有無は、炭素含有量よりも、むしろr値の大小と相関があることがわかった。実際、これまでに筆者らが行ってきた、r値の異なる各種鋼板の二軸引張試験²⁻⁴⁾においても、平均r値が1.5以上の鋼板だけが異方硬化挙動を示しており、本実験結果と附合する。

鋼板のr値は、結晶塑性解析によりおおむね予測可能である⁴⁾。これはr値は集合組織によってほぼ決まることを示している。したがって、平均r値が1.5以上の鋼板だけが異方硬化挙動を示すという上記の観察結果は、異方硬化の有無は集合組織と相関があることを示唆している。異方硬化の材料学的な発生メカニズムについては今後の研究課題としたい。

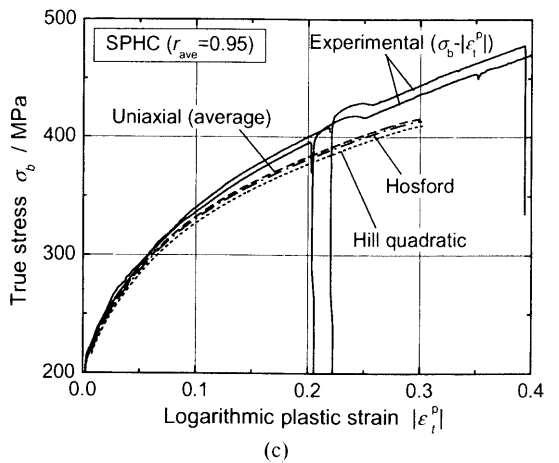
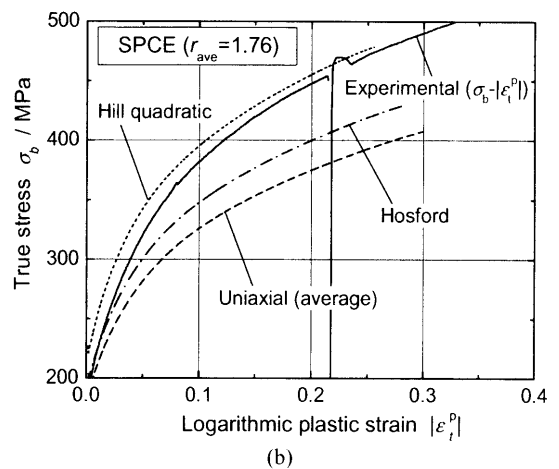
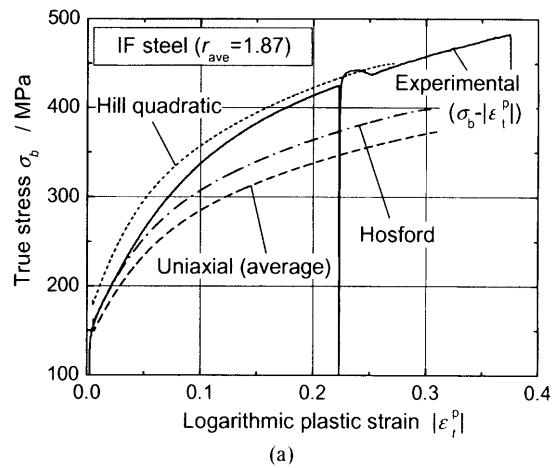


Fig. 4. True stress–logarithmic thickness strain curves measured in bulging tests for (a) IF steel, (b) SPCE and (c) SPHC, compared with those predicted using the Hill quadratic and Hosford yield criteria.

5.2 異方硬化挙動の定式について

降伏関数を用いて異方硬化挙動を定式するためには、異方性パラメータを塑性仕事もしくは ϵ_0^p の関数として変化させる方法が考えられる。例えばYld2000のように、塑性仕事もしくは ϵ_0^p の関数として σ_b/σ_0 の値を変化させることができれば、等塑性仕事面の形状変化が表現できる。実際、その効果はFig. 2から明らかである。

等塑性仕事面の形状変化をr値の変化として定式するこ

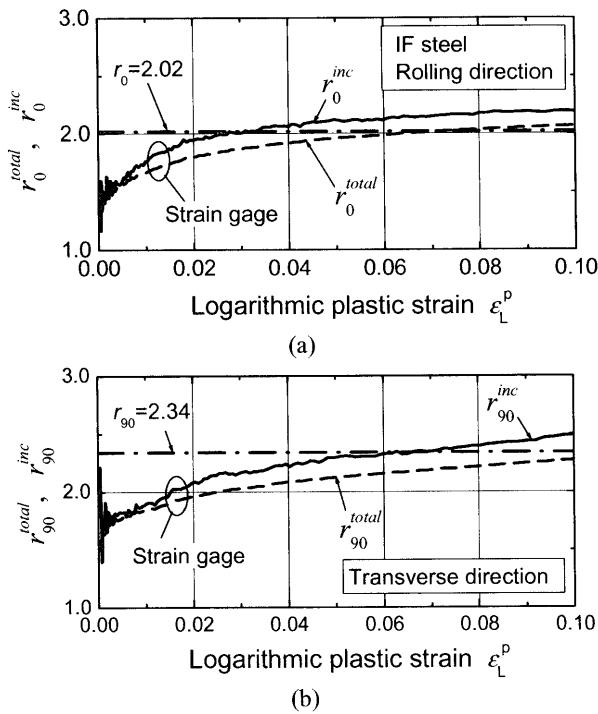


Fig. 5. Variation of (a) r_0^{total} , r_0^{inc} and (b) r_{90}^{total} , r_{90}^{inc} with plastic strain, measured using strain gages.

とも可能である。なぜなら、降伏曲面が塑性ポテンシャルに一致すると仮定すると、 r 値の定義と法線則より、降伏曲面の形状は、 r_0 が大きくなるほど x 軸正方向に張り出し、 r_{90} が大きくなるほど y 軸正方向に張り出すからである^{3,4)}。

そこで、等塑性仕事面が膨張し、異方硬化挙動を示したIF鋼板を用いて、圧延方向および圧延直角方向の単軸引張試験を行い、塑性変形の進展にともなって、実際に r 値が大きくなるかどうかを確認する実験を行った。測定方法として、JIS13号B型試験片の裏表に塑性ゲージ（長手方向2枚、幅方向2枚、計4枚）を貼り付け、長手方向、幅方向ひずみ ϵ_L^p , ϵ_w^p 、および各方向の塑性ひずみ増分 $d\epsilon_L^p$, $d\epsilon_w^p$ を測定し、時々刻々の r 値をそれぞれ次式より求めた。

$$r^{total} = \frac{-\epsilon_L^p}{\epsilon_L^p + \epsilon_w^p} \dots\dots\dots(7-1)$$

$$r^{inc} = \frac{-d\epsilon_L^p}{d\epsilon_L^p + d\epsilon_w^p} \dots\dots\dots(7-2)$$

圧延方向の r 値 r_0^{total} , r_0^{inc} および圧延直角方向の r 値 r_{90}^{total} , r_{90}^{inc} の測定結果をFig. 5に示す。圧延方向、圧延直角方向ともに、降伏直後の値は、10%伸びひずみで測定された値（2・1節参照、 $r_0=2.02$, $r_{90}=2.34$ 、以下 $r_{(0.1)}$ と記す）の半分以下でしかないが、ひずみの増加とともに漸増することがわかった。塑性変形の進展に伴うこのような r 値の増大傾向は、無次元化等塑性仕事面が徐々に膨張する異方硬化挙動と定性的に附合する。

次に、Fig. 5の測定結果に基づいて、塑性変形(ϵ_0^p)の増加に伴い r 値を変化させて降伏曲面を逐一計算し、等塑性

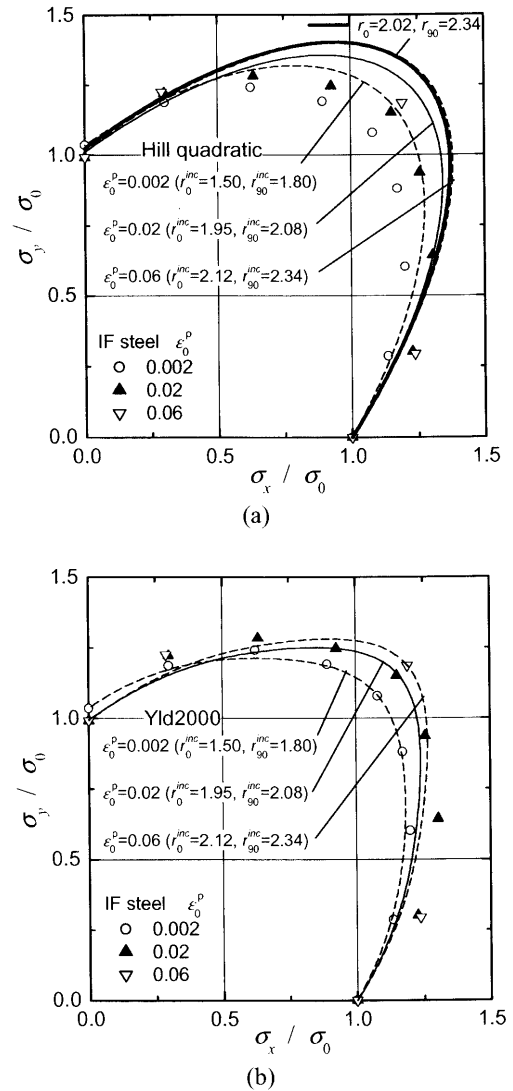


Fig. 6. Experimental data comprising contours of plastic work compared with the (a) Hill quadratic and (b) Yld2000 yield loci, in which the variation of r -values with ϵ_0^p as shown in Fig. 5 is considered.

仕事面の形状変化を再現可能かどうか検証した。IF鋼板に対する計算結果をFig. 6に示す。なお本計算では、 r_0^{inc} および r_{90}^{inc} を用いた。Hillの2次降伏曲面(Fig. 6(a))は、塑性変形の進展に伴い、降伏曲面が平面ひずみ引張から等2軸引張の領域で膨張し、 $r_{(0.1)}$ で算定した降伏曲面に近づく傾向を示す。しかし、塑性変形の進展に伴う r 値の変化を考慮してもなお、Hillの2次降伏曲面は $\epsilon_0^p \leq 0.06$ のひずみ範囲において等2軸引張方向の塑性流動応力を依然として過大に評価している。一方、Yld2000に基づく降伏曲面を見ると(Fig. 6(b))、 r 値の変化を無視した場合(Fig. 2(a)-2)に比べて、単軸引張から平面ひずみ引張の領域で降伏曲面が実験値に近づき、精度が向上した。ちなみに、 r_0^{total} , r_{90}^{total} を用いて同様の計算を行ったが、ほぼ同じ結果を得た。

最後に、Fig. 6で得られたYld2000降伏関数から、各応力比における法線ベクトルを計算し、測定された塑性ひずみ増分ベクトルの方向と比較した。結果をFig. 7に示す。

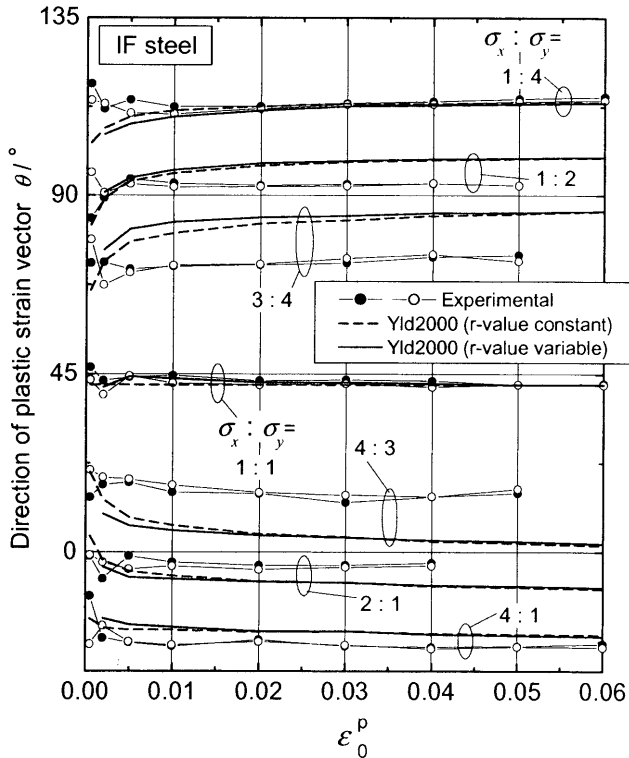


Fig. 7. Comparison of directions of incremental plastic strain vectors measured for IF steel with those predicted using the Yld2000 yield criterion.

参考値として r 値の変化を考慮しない場合の計算値 (Fig. 3 中の実線と同じ) を破線で示す。両者の差異はわずかであり、 r 値の変化を考慮しても、塑性ひずみ増分ベクトルの方向の予測精度は向上しないことがわかった。

以上の結果を総括すると、異方硬化を定式化する上で、応力の計算精度の点から言えばYld2000の使用は有効であるといえる。しかし、塑性ひずみ増分ベクトルの方向については、概してHosfordの降伏関数の方が実験値との一致の度合いはよいことがわかった。すなわち、IF鋼板および低炭素鋼板の材料モデルとして、加工硬化とひずみ増分の予測精度の両面において、Yld2000が最良の降伏関数であるとは必ずしも言えない。また、少なくとも今回の供試材においては、 r 値の変化を考慮して異方性パラメータを決定しても、塑性ひずみ増分ベクトルの方向の予測精度は向上しないことがわかった。

6. 結論

IF鋼板 (平均 r 値 $\bar{r}=1.87$)、低炭素アルミキルド冷延鋼板SPCE ($\bar{r}=1.76$)、低炭素アルミキルド熱延鋼板SPHC ($\bar{r}=0.95$)を対象として、2軸引張応力下における加工硬化特性を明らかにした。その結果、以下の知見を得た。

(1) r 値が比較的大きいIF鋼板とSPCEの無次元化等塑

性仕事面は塑性変形の進展に伴い膨張し、異方硬化挙動を示した。一方、 r 値がほぼ1に等しいSPHCは、わずかに異方硬化挙動を示すものの、IF鋼板やSPCEと比べると、その度合いは小さい。これは、異方硬化挙動の有無には集合組織が強く関与していることを示唆している。

(2) IF鋼板およびSPCEの異方硬化挙動は、次数6のYld2000を用いて比較的精度よく再現できる。ただし、塑性ひずみ増分ベクトルの方向の予測精度は、Hosfordの降伏関数の方が概して勝っており、加工硬化とひずみ増分の予測精度の両面において、Yld2000が最良の降伏関数であるとは必ずしも言えない。

(3) ひずみゲージを用いてIF鋼板の時々刻々の r 値変化を測定した結果、降伏直後の値は、10%伸びひずみで測定された値の半分以下でしかないが、ひずみの増加とともに漸増する傾向が観察された。この現象はIF鋼板の異方硬化挙動 (無次元化等塑性仕事面の膨張) と定性的に附合する。

(4) Yld2000の異方性パラメータの決定に際して、 r 値の変化を考慮しても、塑性ひずみ増分ベクトルの方向の予測精度は向上しない。

本研究に関して御議論を頂いた山形大学黒田充紀助教授ならびに新日本製鐵株式会社樋渡俊二博士、上西朗弘博士に厚く御礼申し上げます。実験をお手伝い頂いた吉澤彰夫君 (現在、日産自動車株式会社)、吉田健吾君 (現在、東京農工大学大学院博士後期課程) に御礼申し上げます。また供試材を御提供下された新日本製鐵株式会社に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) T.Kuwabara: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **44** (2003), 234.
- 2) T.Kuwabara, S.Ikeda and T.Kuroda: *J. Mater. Process. Technol.*, **80-81** (1998), 517.
- 3) T.Kuwabara, S.Yamada, E.Iizuka and T.Hira: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 198.
- 4) T.Kuwabara, A. Van Bael and E.Iizuka: *Acta Mater.*, **50** (2002), 3717.
- 5) T.Kuwabara and S.Ikeda: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 334.
- 6) S.Ikeda and T.Kuwabara: Proc. NUMISHEET '02, KSTP and KAIST, Jeju, Korea, (2002), 97.
- 7) R.Hill: *Proc. R. Soc. (London)*, **A193** (1948), 281.
- 8) A.Parmar and P.B.Mellor: *Int. J. Mech. Sci.*, **20** (1978), 707.
- 9) A.N.Bramley and P.B.Mellor: *Int. J. Mech. Sci.*, **8** (1966), 101.
- 10) A.J.Ranta-Eskola: *Int. J. Mech. Sci.*, **21** (1979), 457.
- 11) P.B.Mellor and A.Parmar: *Mechanics of Sheet Metal Forming*, ed. by D.P.Koistinen and N.-M.Wang, Plenum Press, New York, (1978), 53.
- 12) R.H.Wagoner: *Metall. Trans. A*, **12A** (1981), 877.
- 13) R.Hill, S.S.Hecker and M.G.Stout: *Int. J. Solids Struct.*, **31** (1994), 2999.
- 14) R.Hill and J.W.Hutchinson: *J. Appl. Mech.*, **59** (1992), S1.
- 15) W.F.Hosford: Proc. 7th North Amer. Metalworking Res. Conf., SME, Dearborn, Michigan, (1979), 191.
- 16) R.W.Logan and W.F.Hosford: *Int. J. Mech. Sci.*, **22** (1980), 419.
- 17) F.Barlat, J.C.Brem, J.W.Yoon, K.Chung, R.E.Dick, D.J.Lege, F.Pourboghrat, S.H.Choi and E.Chu: *Int. J. Plast.*, **19** (2003), 1297.