

変形経路変化下の加工硬化挙動と破断予測

米村 繁*・上西 朗弘*・樋渡 俊二*²・鈴木 規之*²・臼田 松男*³

Forming Limit Prediction and Work-hardening Behavior under Strain-path Changes
Shigeru YONEMURA, Akihiro UENISHI, Shunji HIWATASHI, Noriyuki SUZUKI and Matsuo USUDA

Synopsis : The work-hardening behavior under strain path changes for dual phase (DP) steel has been investigated by using simple shear sequences, in comparison with that for interstitial free (IF) steel. The results show that a strong hardening followed by softening in an orthogonal path change, which is normally seen in IF steel, is not significant in DP steel. Based on these results, analytical approaches to predict forming limit strain and stress in monotonic and orthogonal paths by using Hill criterion have been conducted. It is known that stress based forming limit curves are path independent, while strain based forming limit curves are strongly path dependent. For IF steel, the localized necking is started just after the second loading in orthogonal sequence, which thus shows that even stress based forming limits are path dependent in IF steel. On the other hand, DP steel exhibits localized necking at the same amount of total strain both for monotonic and orthogonal paths and thus the stress based forming limits are path independent, which reflects differences in work-hardening under strain path changes in DP and IF steels. It might be pointed out that these differences are originated in the microstructural evolution of both steels.

Key words : sheet metal forming; forming limit; dislocation structure; anisotropic work-hardening; strain-path change.

1. 緒言

衝突安全性と軽量化の要請から、自動車車体への高強度鋼板の適用拡大が急速に進展しつつある。これら高強度鋼板は板厚を増加させることなく、衝突時の吸収エネルギーや強度を高めることができる。しかし、鋼板の高強度化にともなう延性の低下は、プレス成形や衝突変形時の破断の危険性も高めるため、FEM解析による材料の破断予測とその高精度化のニーズは益々高まってきている。

破断に対する余裕度は、一般に、板厚減少率やFLD (Forming Limit Diagram)を用いて判断される。このうち、FLDは変形経路に依存し変化することが多くの実験や数値解析から明らかになっている¹⁻³⁾。複雑形状のプレス成形やその後の衝突変形では材料の受ける変形経路が大きく変化することが多く、実験から得られる破断限界線を用いて破断を評価する場合、変形経路に応じて無数の限界線を準備せざるを得ない。従って、破断の評価は予測精度を犠牲にしても、実用上、比例負荷経路に対する破断限界線を用いることとなる。

しかしながら、最近、応力空間内での破断限界表示が注目されている⁴⁻⁸⁾。吉田ら^{6,7)}は、アルミニウム合金を対象とした押し出し円管の実験やMarciniak-Kuczynski法による数値解析により、応力空間内で表記された破断限界線を用いると変形の経路によらず、破断限界をほぼ一義的に表現

できることを確認している。すなわち、変形経路によらず相当応力と相当塑性ひずみの関係が一定の等方性材料の場合、2つの比例負荷を組み合わせたひずみ経路変化に対する破断限界応力は、変形経路によらず一致することを報告している。

一方、自動車パネルに用いられている深絞り用のフェライト単相鋼は、ひずみ経路変化によっては相当応力と相当ひずみの関係が比例負荷の場合と異なり、加工硬化挙動に異方性が生じることが知られている⁹⁻¹³⁾。吉田ら⁸⁾は鋼管の押し出し実験により、様々な複合負荷経路における破断限界応力と加工硬化挙動を測定し、交差効果により加工硬化率が低下するような変形経路変化の場合、応力空間での破断限界は一致しないことを報告している。しかし、吉田らの研究は、様々な変形経路変化に対して高い精度で実験を行い、加工硬化挙動と破断限界応力の関係を整理している点で興味深い。これら一連の研究は、アルミニウム合金や軟鋼板に関するものであり、高強度鋼板に対する知見はない。

そこで本研究では、まず単純せん断試験¹⁴⁾により引張強さが異なる270MPa級のフェライト単相のIF (Interstitial Free)鋼板と590MPa級の複合組織鋼板の加工硬化挙動、特に直交負荷経路での交差効果の特徴を明らかにする。続いて、2次変形が単純せん断試験の場合の応力-ひずみ曲線を基にして、比例負荷経路と直交負荷経路でのくびれ発生

平成18年8月15日受付 平成18年10月30日受理 (Received on Aug. 15, 2006; Accepted on Oct. 30, 2006)

* 新日本製鐵(株) 君津技術研究部 (Kimitsu R&D Laboratory, Nippon Steel Corporation, 1 Kimitsu Kimitsu 299-1141)

* 2 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corporation)

* 3 金沢大学工学部人間・機械工学科 (Department of Human & Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University)

条件に対応するひずみや応力を推定する。さらに、これらを応力空間上にプロットし、応力空間上で一意に表現できない経路変化について示すとともに、応力空間内に表記された破断限界応力を破断判定に用いるときの適用限界について考察する。

2. 単純せん断試験による鋼板の加工硬化挙動

これまでの一連の研究では⁴⁻⁸⁾、応力空間内に表記された破断限界線を用いると変形の経路によらず、破断限界をほぼ一義的に表現できることを実験と解析で検証している。理論的には Hill や Swift のくびれ発生条件は応力と加工硬化率の関係式で与えられているため、変形経路によらず相当応力と相当塑性ひずみの関係が一定の等方性材料を仮定する限り、応力空間での破断限界は一意に定まることになる。一方、変形経路変化にともなう加工硬化挙動の遷移が破断限界に影響することが示唆されている^{2,3)}。すなわち、比例負荷時の加工硬化率は変形とともに単調に減少するのに対し、予ひずみ材では予ひずみの大きさとひずみ経路変化の組み合わせに応じて、負の加工硬化率が観察されることがある。このような変形経路を経た材料は経路変化直後に破断することがあり、応力空間での破断限界は一義に表現できないことが予想される。

さらに、加工硬化挙動におよぼす2段階ひずみ経路の影響は、Schmittら¹⁵⁾が提案したパラメータに基づき、推定できるとされている。

$$\cos\theta = \mathbf{A}^1 : \mathbf{A}^2 = A_{ij}^1 A_{ij}^2$$

ここで \mathbf{A}^1 と \mathbf{A}^2 はそれぞれ1次変形、2次変形の塑性ひずみ速度モードテンソルであり、その ij 成分をそれぞれ A_{ij}^1, A_{ij}^2 とした。また、塑性ひずみ速度モードテンソル \mathbf{A} は塑性ひずみ速度テンソル \mathbf{D} 、その ij 成分 D_{ij} を用いて

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}\mathbf{A}, \quad D = \|\mathbf{D}\| = \sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D}} = \sqrt{D_{ij} D_{ij}}$$

で定義される。2次変形の降伏応力は $\cos\theta=1$ となる比例負荷経路に比べ $\cos\theta=0$ となるひずみ経路が直交する経路(直交負荷経路)で最も増加し(交差効果)、 $\cos\theta=-1$ となる逆負荷で最も減少する(Bauschinger効果)。さらに、直交負荷経路では予ひずみの大きさに応じて、降伏後に加工硬化が減少することが知られている。

薄板の場合、通常の試験法では反転負荷時の座屈や引張試験でのくびれの発生により広範囲の変形経路変化下での加工硬化挙動の測定は難しい。これに対して、単純せん断試験は板材の加工硬化挙動をくびれや座屈の発生なく観測できる¹⁴⁾。そこで本研究では、鈴木ら¹⁴⁾やBouvierら¹⁶⁾が報告している単純せん断試験の結果を基にして、比例負荷経路と直交負荷経路でのくびれ発生条件に対応するひずみや応力を推定する。

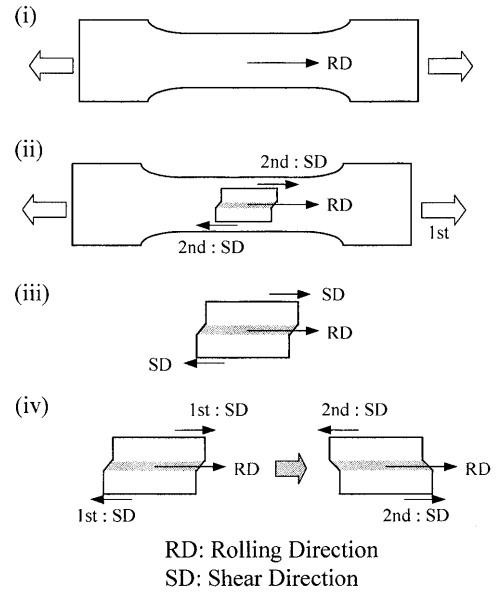


Fig. 1. Experimental procedures. (i) Uniaxial tensile tests along the RD; (ii) simple shear tests after tensile prestrain in the same direction (orthogonal tests); (iii) monotonic simple shear tests along the RD; (iv) reversed simple shear tests after 10, 20 and 30% forward shear (Bauschinger tests).

供試材として270 MPa級のIF鋼板(板厚0.8 mm, 降伏応力 σ_p : 127 MPa, 引張強さ σ_u : 279 MPa)と590 MPa級の複合組織鋼板(Dual Phase鋼, 板厚1.2 mm, 降伏応力 σ_p : 355 MPa, 引張強さ σ_u : 634 MPa)を用いた。実験は、(i)単一方向への単軸引張り、(ii)単軸引張りで20% (IF鋼)と10% (複合組織鋼)の予ひずみを施した後に、単軸引張りの方向と同一方向へ単純せん断、(iii)単一方向への単純せん断試験、(iv)単純せん断試験により、予ひずみ量を変化させた3水準の反転負荷を行った。実験方法の概略をFig. 1に、様々な変形経路に対する単純せん断試験と単軸引張試験の結果をFig. 2に示す^{14,16)}。その結果、鋼種によらず反転負荷時($\cos\theta=-1$)には2次変形の降伏応力が低下するBauschinger効果が現れるが、引張り予ひずみ後に同一方向へ単純せん断を施した場合($\cos\theta=0$)には、IF鋼にのみ2次変形の降伏応力が増加する交差効果が観測された。

IF鋼の直交負荷経路での硬化挙動は、2次変形の開始とともに高い応力で再降伏し、その後は加工軟化を観測した後、加工硬化が停滞し、さらにその後、緩やかに再硬化する。Fig. 3にIF鋼に対し、単軸引張りで10%の予ひずみを施した後に、同一方向へせん断ひずみを20%与えたときの転位下部組織を示す¹²⁾。直交経路変化後に観測される降伏応力の増加は、現活動すべり系とひずみ経路変化により活動できなくなった転位セル壁との相互作用、特に、転位セル壁を横切ってせん断変形が局所化した微視的せん断帯(microband)に起因する。このmicrobandは巨視的単純せん断軸と平行または垂直で、単軸引張りの1次変形で生成した転位壁を切ることがあり、そこには段差が生じている。すなわち、microbandが1次変形で導入された転位壁を

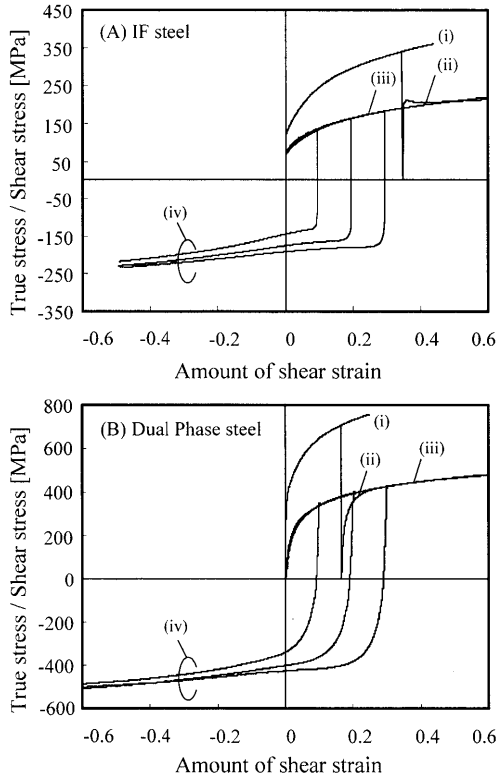


Fig. 2. Stress-strain curves under strain-path changes for (A) IF steel¹⁶⁾ and (B) Dual Phase steel¹⁴⁾: (i) uniaxial tensile tests; (ii) simple shear tests after tensile prestrain of 20% (IF steel) and 10% (Dual Phase steel) in the same direction (orthogonal strain tests), (iii) monotonic simple shear tests; (iv) reversed simple shear tests after 10, 20 and 30% forward shear (Bauschinger tests).

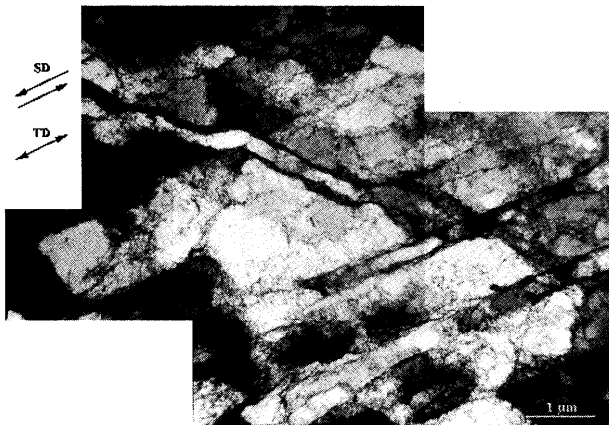


Fig. 3. Intragranular dislocation structures resulting from 10% tensile true strain in the RD, followed by 20% amount of shear strain in the same direction (orthogonal strain-path change). Microbands are clearly distinguishable from the previous tension microstructures.¹²⁾

貫通するまでは高い変形応力を観測するが、貫通後は microband 内に変形が局所化し、急速に応力が低下する^{10,12)}。

一方、590 MPa 級の複合組織鋼の場合、IF 鋼で観測された交差効果は現れず、流動応力は単調に増加する。この結

果は、Gardey ら¹⁷⁾の複合組織鋼を用いた実験結果の傾向を再現している。さらに彼らは、ひずみ経路変化時の流動応力と加工硬化率の観測と同時に転位下部組織の観察も行っている。それによると、経路変化後の2次変形で結晶粒内に生成する転位下部組織には microband が観測されず、これら微視的構造の変化の違いにより複合組織鋼では交差効果が現れないと考えられている。

3. くびれ発生条件での応力とひずみの推定

2次変形が単軸引張りと同面ひずみ引張りの場合を想定し、Hillの局部くびれ理論によりくびれ発生条件に対応する応力とひずみを推定する。ここでは、2次変形が単純せん断試験の場合のせん断ひずみ-せん断応力の関係 (Fig. 2の(ii)と(iii))と等方性の仮定を用いた。さらに、加工硬化率を以下のように定義すると、

$$\Theta = \frac{1}{1+\rho} \frac{d\sigma_{11}}{d\varepsilon_{11}}$$

Hillの局部くびれ条件は $\sigma_{11} = \Theta$ で表せる¹⁸⁾。ここで、 ρ はひずみ増分比 $\rho = d\varepsilon_{22}/d\varepsilon_{11}$ であり、2次変形の単軸引張りに対しては-0.5、同面ひずみ引張りに対しては0である。

本研究では、比例負荷経路と直交負荷経路でのくびれ発生条件に対応するひずみや応力を検討するため、以下の変形経路を想定した。比例負荷経路は(1)単軸引張りと同面ひずみ引張り、直交負荷経路は(3)同面ひずみ引張りに後に負荷方向を90°変化させ単軸引張り、(4)単軸引張りに後に負荷方向を90°変化させ同面ひずみ引張りを施す場合である。なお、(1)と(2)のひずみ経路は2段階経路変化を特徴付けるパラメータ $\cos\theta$ は1である。また、(3)と(4)は $\cos\theta=0$ となるように2次変形モードを選んだ。以下、パラメータ $\cos\theta$ の計算方法を示す。単軸引張り予ひずみ材の場合、板面内の直交する2方向を x_1 および x_2 とし、板面法線方向を x_3 と定義すると、1次変形の塑性ひずみ速度テンソル \mathbf{D}^1 は、等方性を仮定し、次式で与えられる。

$$\mathbf{D}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}$$

続いて、1次引張方向と2次引張方向の挟角を α と定義し、2次変形として同面ひずみ引張りを施した場合を想定する。2次変形の塑性ひずみ速度テンソル \mathbf{D}^2 はテンソルの回転則を用いて次式で与えられる。

$$\mathbf{D}^2 = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{R}^T, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

従って、変形経路変化を特徴付けるパラメータ $\cos\theta$ は、

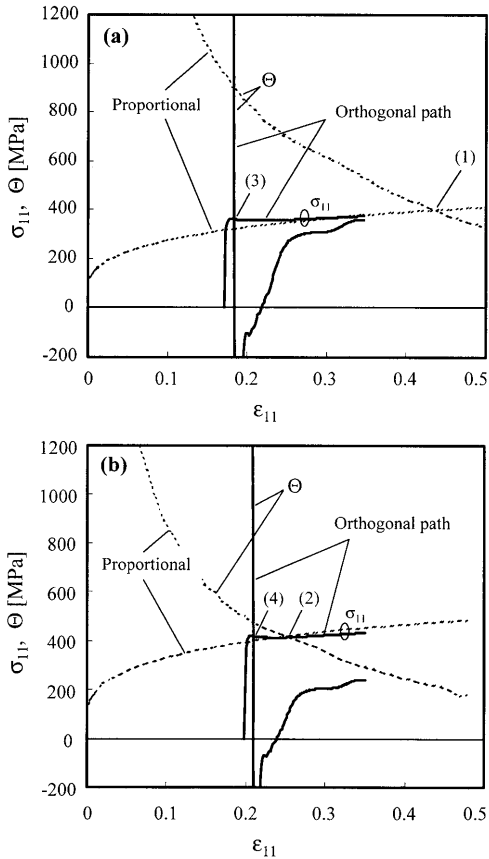


Fig. 4. Flow stress σ_{11} and work-hardening rate Θ of IF steel obtained by simple shear tests, which are presented in Fig. 2(A). The second loading paths are assumed as (a) uniaxial tension and (b) plane-strain stretching. The predicted localized necking points are shown by the (1) uniaxial tension in proportional path, (2) plane-strain stretching in proportional path, (3) uniaxial tension in orthogonal path and (4) plane-strain stretching in orthogonal path.

塑性ひずみ速度テンソルをそのノルムで規格したテンソルの内積で計算できる。ゆえに、(4)の変形経路変化の場合、引張方向変化角 α は 90° であり、 $\cos\theta$ は 0 となる。また、(3)の変形経路変化の場合も同様の手順で計算でき、 $\cos\theta$ は 0 となる。

Fig. 4(a)に 270 MPa級の IF鋼を対象に、2次変形が単軸引張りを想定した場合の応力 σ_{11} -ひずみ ϵ_{11} の関係と加工硬化率 Θ を示す。ここでは、Fig. 2(A)の(ii)単軸引張りで 20%の予ひずみを施した後に、単軸引張りの方向と同一変更へ単純せん断を施した直交負荷経路と(iii)単一方向への単純せん断を施した比例負荷経路のせん断ひずみ-せん断応力の関係と等方性の仮定を用い、単軸引張りの応力 σ_{11} とひずみ ϵ_{11} 、加工硬化率 Θ を計算した。また、応力 σ_{11} -ひずみ ϵ_{11} 曲線と加工硬化率-ひずみ曲線の交点はHillの局部くびれ条件 $\sigma_{11} = \Theta$ が成立するときであり、(1)と(3)は比例負荷経路と直交負荷経路でのくびれ発生条件に対応する。比例負荷時の加工硬化率は変形とともに単調に減少するのに対し、直交負荷経路の加工硬化率は2次変形の開始とともに急激に減少し負の値を示す。すなわち加工軟化を

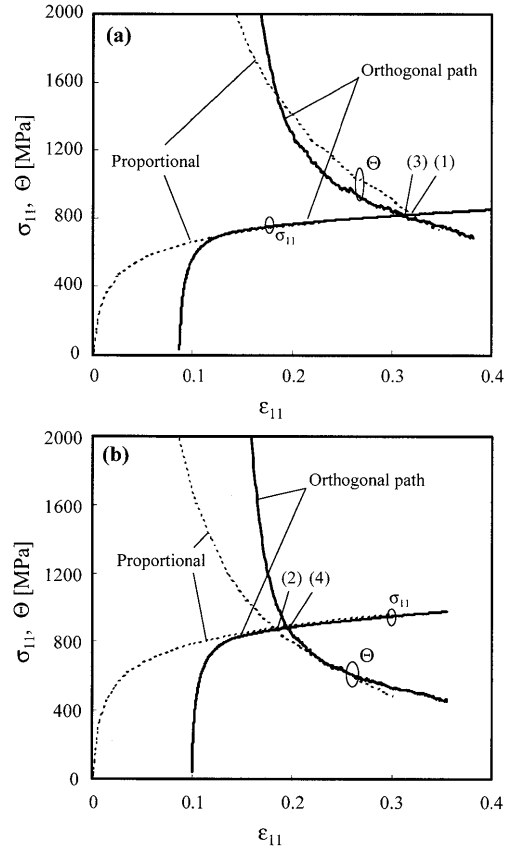


Fig. 5. Flow stress σ_{11} and work-hardening rate Θ of Dual Phase steel obtained by simple shear tests, which are presented in Fig. 2(B). The second loading paths are assumed as (a) uniaxial tension and (b) plane-strain stretching. The predicted necking points are shown by the (1) uniaxial tension in proportional path, (2) plane-strain stretching in proportional path, (3) uniaxial tension in orthogonal path and (4) plane-strain stretching in orthogonal path.

観察し、その後増加に転じる。また、比例負荷経路の場合には、 $\epsilon_{11} = 0.439$ 、 $\sigma_{11} = 400$ MPaでくびれ条件が満たされるが、直交負荷経路の場合には2次変形の開始直後にこの条件が満たされることから経路変化直後 ($\epsilon_{11} = 0.181$ 、 $\sigma_{11} = 365$ MPa)にくびれにいたると予測される。

続いて、Fig. 4(b)に平面ひずみ引張りを想定した場合の(2)比例負荷経路と(4)直交負荷経路の応力-ひずみの関係と加工硬化率を示す。平面ひずみ引張りの応力 σ_{11} とひずみ ϵ_{11} 、加工硬化率 Θ は、Fig. 2(A)の(ii)と(iii)のせん断ひずみ-せん断応力の関係と等方性の仮定を用いて計算した。比例負荷経路の場合には、 $\epsilon_{11} = 0.255$ 、 $\sigma_{11} = 421$ MPaでくびれ条件が満たされるが、直交負荷経路の場合には2次変形の開始直後に $\epsilon_{11} = 0.207$ 、 $\sigma_{11} = 422$ MPaでくびれにいたる。

Fig. 5(a)に 590 MPa級の複合組織鋼を対象に、単軸引張りを想定した場合の(1)比例負荷経路と(3)直交負荷経路の応力-ひずみの関係と加工硬化率を示す。ここでは、Fig. 2(B)の(ii)単軸引張りで 10%の予ひずみを施した後に、

単軸引張りの方向と同一変更へ単純せん断を施した直交負荷経路と(iii)単一方向への単純せん断を施した比例負荷経路のせん断ひずみ-せん断応力の関係と等方性の仮定を用い、単軸引張りの応力 σ_{11} とひずみ ϵ_{11} 、加工硬化率 Θ を計算した。比例負荷、直交負荷経路ともに加工硬化率は単調に減少し、比例負荷経路の場合には、 $\epsilon_{11}=0.323$ 、 $\sigma_{11}=824$ MPaでくびれ条件が満たされ、直交負荷経路の場合は $\epsilon_{11}=0.311$ 、 $\sigma_{11}=819$ MPaでくびれにいたると予測される。すなわち、交点(1)と交点(3)はほぼ同じ値を示した。続いて、Fig. 5(b)に平面ひずみ引張りを想定した場合の応力-ひずみの関係と加工硬化率を示す。その結果、比例負荷経路と直交負荷経路でのくびれ発生条件に対応するひずみと応力はほぼ同じ値を示した。

4. ひずみ空間と応力空間での破断限界の対応

2次変形が単軸引張りと平面ひずみ引張りの場合について、前述した方法で求めた破断限界をひずみ空間と応力空間にプロットした。なお、Hillの局部くびれとSwiftの拡散くびれモデルにより予測したひずみ空間のFLDとこれを応力空間へ変換した破断限界を破線でプロットした。

IF鋼の単純せん断試験の応力-ひずみ曲線を基にして、くびれ発生条件に対応したひずみや応力をひずみ空間と応力空間にプロットした結果をFig. 6に示す。ひずみ空間での破断限界は、(3)や(4)の直交負荷経路の場合、経路変化直後にくびれが生じる。一方、応力空間にプロットした破断限界は、2次変形が単軸引張りの場合、比例負荷経路(1)と比較し直交負荷経路(3)の破断限界応力は小さく($\sigma_{11}=400$ MPaから $\sigma_{11}=365$ MPaへ低下)、2次変形が平面ひずみ引張りの場合は(2)と(4)の破断限界応力が一致した。これら応力空間での破断限界応力の特徴はFig. 4の応力 σ_{11} -ひずみ ϵ_{11} と加工硬化率 Θ の関係から考察できる。比例負荷経路(1)と(2)の加工硬化率は変形とともに単調に減少するが、直交負荷経路(3)と(4)の加工硬化率は2次変形の開始とともに急減し、2次変形の開始直後にHillの局部くびれ条件が成立する。従って、2次変形が単軸引張りの場合の破断限界応力(1)と(3)は一致せず、(3)は(1)より小さい。一方、2次変形が平面ひずみ引張りの場合、直交負荷経路(4)の予ひずみの大きさと比例負荷経路でのHillの局部くびれが成立するひずみの大きさが近い値を示したため、(2)と(4)の応力は一致した。

さらに、応力FLDのこの特徴はFig. 7に示した加工硬化率-応力と $\sigma_{11}=\Theta$ の交点からも確認できる。ここで(1)~(4)は、(1)単軸引張りを想定した比例負荷経路での加工硬化率 $\Theta_{(1)}$ -応力曲線と傾き0.5の直線との交点、(2)平面ひずみ引張りを想定した比例負荷経路での $\Theta_{(2)}$ - σ_{11} 曲線と傾き1の直線との交点、(3)平面ひずみ引張りに後に荷重方向を90°変化させた単軸引張りを想定した

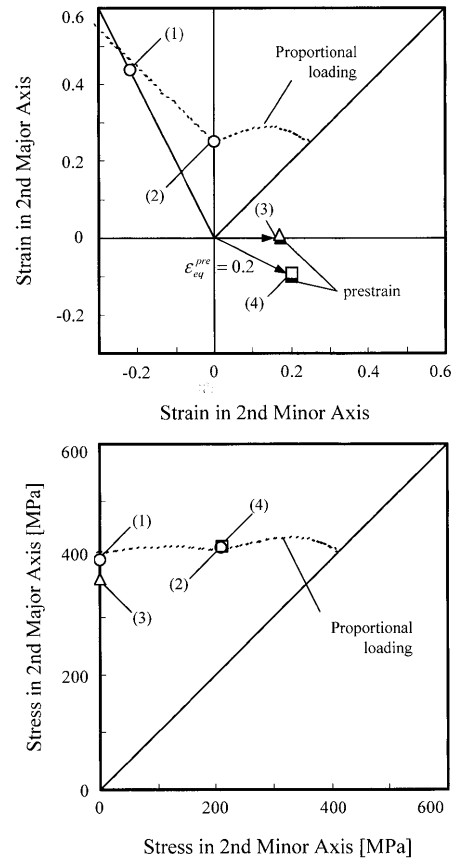


Fig. 6. Strain based FLDs and stress based FLDs for IF steel: (1) uniaxial tension (proportional path); (2) plane-strain stretching (proportional path); (3) plane-strain stretching followed by uniaxial tension along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path); (4) uniaxial tension followed by plane-strain stretching along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path). Limit strains and stresses presented in Fig. 4 are used.

直交負荷経路での $\Theta_{(3)}$ - σ_{11} 曲線と傾き0.5の直線との交点、(4)単軸引張りに後に荷重方向を90°変化させた平面ひずみ引張りを想定した直交負荷経路での $\Theta_{(4)}$ - σ_{11} 曲線と傾き1の直線との交点をそれぞれ示している。Hillの局部くびれ限界は応力-加工硬化率曲線と傾き $1+\rho$ の直線との交点で与えられるため、変形履歴によらず応力と加工硬化率の関係が一定の等方性材料の場合、ひずみ増分比 ρ に応じて、常に同一の応力 σ_{11} で局部くびれが発生する。ところが、IF鋼ではひずみ経路によっては応力と加工硬化率の関係が異なる。従って、2次変形モードが同じであっても、変形経路に依存し、応力 σ_{11} -加工硬化曲線 $\Theta_{(1)}$ と $\Theta_{(3)}$ は同一の曲線を描かない。その結果、(1)と(3)の交点は一致せず、局部くびれが生じる応力 σ_{11} は異なる。これに対し、2次変形が平面ひずみ引張りの場合、交点(2)と交点(4)はほぼ同じ値を示している。これは、前述したように、予ひずみの大きさと比例負荷経路でのHillの局部くびれが成立するひずみの大きさが近い値を示したためであり、このことは応力 σ_{11} -加工硬化曲線 $\Theta_{(2)}$ と $\Theta_{(4)}$ の交点が傾き

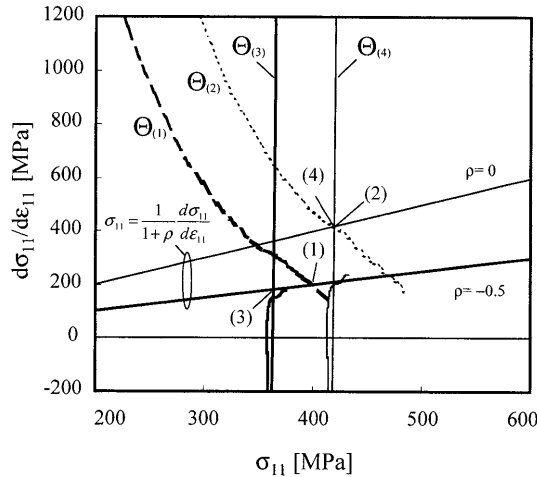


Fig. 7. Relationship between flow stress σ_{11} and work-hardening rate Θ of IF steel obtained by simple shear tests. The intersections (1), (2), (3) and (4) show the onsets of localized necking in the Hill criterion and are in the conditions of (1) uniaxial tension (proportional path), (2) plane-strain stretching (proportional path), (3) plane-strain stretching followed by uniaxial tension along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path) and (4) uniaxial tension followed by plane-strain stretching along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path), respectively.

1の直線と同じ点で交わっていることから解釈できる。

一方、複合組織鋼板を対象に、ひずみ空間での破断限界と応力空間での破断限界をプロットした結果をFig. 8に示す。応力空間にプロットした破断限界は変形経路によらず一致した。すなわち、2次変形が単軸引張りの場合、(1)と(2)は一致し、2次変形が平面ひずみ引張りの場合、(2)と(1)は一致した。

5. 結言

Hillの局部くびれ発生条件や2軸引張りでのSwiftの拡散くびれ発生条件に対応する応力と加工硬化率の関係を破断のクライテリアと仮定する場合、相当応力-相当ひずみの関係がひずみ経路や応力経路によらず一定であれば、主応力空間にプロットした破断限界は経路によらない曲線で表せる。しかしながら、IF鋼ではひずみ経路変化によっては相当応力-相当ひずみの関係が比例負荷の場合と異なる。例えば、1次変形のひずみ速度モードテンソル A^1 と2次変形のひずみ速度モードテンソル A^2 の内積 $\cos\theta = A^1 : A^2$ が0に近い場合(ひずみ経路が直交する場合)、加工硬化率は2次変形の開始とともに激減し、前述のくびれ発生のクライテリアを用いると、経路変化直後にくびれにいたると予測される。従って、IF鋼のように交差効果が観測されるひずみ経路の場合、応力空間での破断限界は一義に表現できない。一方、590 MPa級の複合組織鋼では交差効果が観測されず、応力空間での破断限界は一義に表現できる。この

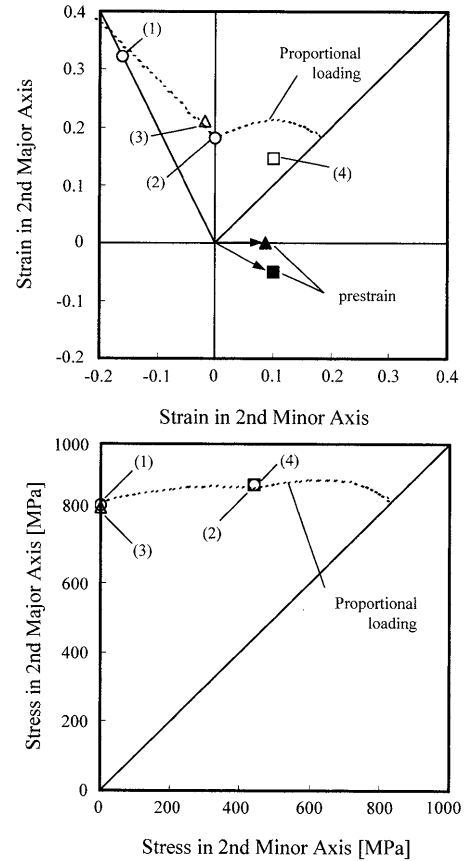


Fig. 8. Strain based FLDs and stress based FLDs for Dual Phase steel: (1) uniaxial tension (proportional path); (2) plane-strain stretching (proportional path); (3) plane-strain stretching followed by uniaxial tension along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path); (4) uniaxial tension followed by plane-strain stretching along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path). Limit strains and stresses presented in Fig. 5 are used.

ように、変形経路変化をともなう破断を予測する際には、経路変化に応じた加工硬化挙動の再現が重要であると考えられる。また、このような応力FLDの特徴を熟知したうえで活用すれば、汎用性の高い破断予測手法として実用性が期待できる。

文 献

- 1) K.Nakazima, T.Kikuma and K.Hasuka: *Yawata Tech. Rep.*, No. 264, (1968), 8517.
- 2) A.B. da Rocha: *Forming Limit Diagrams: Concepts, Methods, and Applications*, ed. by R.H.Wagoner *et al.*, A Publication of The Minerals & Materials Society, Warrendale, 275.
- 3) S.Hiwatashi, A.Van Bael, P.Van Houtte and C.Teodosiu: *Int. J. Plast.*, **14** (1998), 647.
- 4) T.B.Stoughton and X.Zhu: *Int. J. Plast.*, **20** (2004), 1463.
- 5) P.D.Wu, A.Graf, S.R.MacEwen, D.J.Lloyd, M.Jain and K.W.Neale: *Int. J. Solids Structur.*, **42** (2005), 2225.
- 6) K.Yoshida, T.Kuwabara, Narihara and S.Takahashi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **45-517** (2004), 123.
- 7) K.Yoshida, T.Kuwabara and Kuroda: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **46-537** (2005), 982.
- 8) K.Yoshida and T.Kuwabara: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 36.
- 9) E.Aernoudt, J.Gil Sevillano and P.Van Houtte: *Constitutive Relations*

- and Their Physical Basis, Proceedings of 8th Riso Int. Symp. on Metallurgy and Materials Science, ed. by S.I.Andersen *et al.*, Risø National Laboratory, Roskilde, (1987), 1.
- 10) E.F.Rauch and J.-H.Schmitt: *Mater. Sci. Eng.*, **113** (1989), 441.
 - 11) C.Teodosiu and Z.Hu: *Proc. NUMIFORM'95*, (1995), 173.
 - 12) E.V.Nesterova, B.Bacroix and C.Teodosiu: *Metall. Mater. Trans. A*, **32A** (2001), 2527.
 - 13) S.Yonemura, S.Hiwatashi, A.Uenishi and M.Usuda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 8, 516.
 - 14) Suzuki, S.Hiwatashi, A.Uenishi, Kuwayama, Kuriyama, X.Lemoine and C.Teodosiu: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.* **46-534** (2005), 636.
 - 15) J.H.Schmitt, E.Aernoudt and B.Baudelet: *Mater. Sci. Eng.*, **75** (1985), 13.
 - 16) S.Bouvier, H.Haddadi and C.Teodosiu: Identification of the Microstructural Model. Report of the Brite-Euram Contract No.BRPR-CT97, (2000), 0492.
 - 17) B.Gardey, S.Bouvier, V.Rchard and B.Bacroix: *Mater. Sci. Eng. A*, **A 400-401** (2005), 136.
 - 18) R.Hill: *J. Mech. Phys. Solids*, **1** (1952), 1.