

薄板材料のプレス成形における成形限界の予測と加工硬化特性の影響

顧 莉薇*・田中 昭徳*²・田中 研治*³・中島 浩衛*⁴

Prediction of Forming Limit Diagram (FLD) and Effect of Work Hardening Property on FLD of Sheet Metals

Liwei GU, Akinori TANAKA, Kenji TANAKA and Koe NAKAJIMA

Synopsis : The necking limit diagram NLD and the forming limit diagram FLD under the wide-range bi-axial tensile stress conditions were obtained by using various sheet metals of steels, Al-alloys and a copper. The good correlation between the limited strain values of NLD and FLD and the mechanical properties of total elongation and r -value etc. were obtained. Moreover, the strain dependency of the work hardening coefficient n -value in higher strain area was different according to each material. The complex value of n -value and r -value was defined as the equivalent work hardening coefficient n_{eq} -value in higher strain area. And when the n_{eq} -value was substituted to Gotoh's modeling of localized necking limited strain, FLD that accuracy is high was able to be predicted.

Key words: necking limit diagram; forming limit diagram; mechanical property; r -value; n -value; equivalent work hardening coefficient; FLD prediction.

1. 緒言

薄板材料のプレス成形における成形不良現象には、各種形態の破断および面形状性としてのしわやひけなど、さらに寸法精度を支配するスプリングバックなどのさまざまなものがある。それらのなかでも破断としわなどの不良現象の発生は、プレス成形過程で一つの成形品の中に共存している典型的な不良現象であるとされている。とくに、成形品の破断・われなどは、成形工程の最終的段階で修正ができないため、各種材料に対してこれらの不良現象が生じない成形可能な限界範囲を、あらかじめ明確に把握しておく必要がある。

一般に、薄板成形の成形限界に至るまでの変形には、およそ次の4つの段階があるとされている¹⁾。すなわち、成形がほぼ一様に変形する第1段階、次いで特定の部分の変形が最大となるような不均一変形(変形の局所化)の第2段階、さらに変形が進み、一部が他よりも薄くなる局所くびれ変形の第3段階、さらに負荷が増大すると、局所くびれの狭い領域に板厚方向にわたってせん断ひずみが集中し破断に至る第4段階がある。このように、それまでの変形様式から違った変形様式へと変わっていく現象が、いわゆる分岐現象である。第3段階の分岐が局所くびれ限界(Localized Necking Limit Diagram, 以下NLDと略称)に相当し、この局所くびれが発生すると、それ以降はこの部分

に変形が限定されて第4段階の分岐の破断による成形限界(Forming Limit Diagram, 以下FLDと略称)に至る。

薄板材料のプレス成形過程におけるFLD²⁻⁷⁾は、広範な2軸応力条件下で破断部の最大ひずみと最小ひずみを成形限界値とする線図によって表され、データベースも蓄積されつつある。また、成形限界線図を求める試験法に関しても、国際的に共通の試験法²⁾が検討されている。また、FLDへのStören-Riceの局所くびれ理論⁸⁾(以下S-R理論と略称)の適用研究が行われており、くびれ現象を別の観点から見ると、板表面の肌荒れ現象^{5,6)}や板厚の不整(局部くぼみ)現象^{9,10)}が、破断の前兆現象として観察されている。

S-R理論⁸⁾は、Hillの理論¹⁴⁾を拡張して、第3段階の分岐すなわち局所くびれの発生をもって、FLDを評価している。すなわち、材料の局所くびれの発生を破断発生のきっかけとなる前兆現象として位置づけ、局所くびれの発生条件によってFLDを予測することになる。そこで、破断の前兆現象としての局所くびれが発生してから破断に至るまでの変形量が問題となるので、本研究では、局所くびれの発生の定量化を行って局所くびれ発生の分岐理論のFLDへの適応性とその評価に関する研究を行った。

本研究では、各種の薄板材料として高張力鋼板を含めた薄鋼板、各種アルミニウム合金薄板および銅薄板を用いて、NLDおよびFLDを求め、また、各種材料の高ひずみ領域における加工硬化指数 n 値を求めて、NLDおよびFLDを

平成13年3月26日受付 平成13年11月14日受理 (Received on Mar. 26, 2001; Accepted on Nov. 14, 2001)

- * 大同工業大学大学院生 (現:コンドーセイコー(株)) (Graduate Student, Daido Institute of Technology, now Kondo Seiko Co., Ltd.)
- * 2 大同工業大学大学院生 (現:イズミ工業(株)) (Graduate Student, Daido Institute of Technology, now Izumi Kogyo Co., Ltd.)
- * 3 大同工業大学大学院生 (現:(株)青山製作所) (Graduate Student, Daido Institute of Technology, now Aoyama Co., Ltd.)
- * 4 大同工業大学 (Daido Institute of Technology, 10-3 Takiharu-cho Minami-ku Nagoya 457-8530)

支配している材料特性要因を明らかにする。さらに、局所くびれ限界理論^{12,13)}を基本とした後藤のFLDの予測式を用いて、FLDへの適合性と予測値の精度評価を行う。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材料

供試材料として、板厚0.8 mmおよび1.0 mmの軟鋼板(SPCC, SPCE)、高張力鋼板(SPFC)、アルミニウム合金薄板(A1100, A5000系(a, b, c), A6000系)および銅薄板の合計9種類を用いて、FLDを求める成形実験を行った。供試材の機械的性質の平均値をTable 1に示す。

2.2 成形限界実験方法

成形限界線図FLDを求める試験法として、Fig. 1に示す“Nakajima's Specimen”法の球頭ポンチ型成形試験を行った。試験片として圧延方向に採取した幅W12.5~125 mm (12.5, 30, 40, 60, 80, 92, 100, 108, 120)×長さ165 mm, 125×125 mmの10種類を使用した。また、成形限界試験はダイス直径82φ mm, ポンチ直径80φ mmであり、ブランクの拘束条件としては、ビード付きダイス(ビード直径102φ mm)を用いて、ブランク押さえ力を58.8 kN (6 ton)一定にて行った。潤滑油は、工作油#620を用い、ポンチ表面に塗布して実験を行った。また、等2軸張出し成形の場合のみ同潤滑油#660-1とポリエチレンシートを併用して行った。

成形後のひずみの測定は、成形前の試験片にあらかじめスクライブドサークル(半径の1/2シフトした直径5φ mmの複合サークル)を専用インクで刻印し、成形後セロテープに転写して最大ひずみ ϵ_x と最小ひずみ ϵ_y の測定を行っ

Table 1. Mechanical properties of used materials.

| materials | t [mm] | Y.P. [MPa] | T.S. [MPa] | T.El. [%] | \bar{n} value | \bar{r} value | \bar{U} value |
|-----------|-------------|---------------|---------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SPCC | 0.80 | 204 | 329 | 36 | 0.217 | 1.39 | 0.126 |
| SPCE | 0.80 | 146 | 275 | 46 | 0.259 | 1.87 | 0.168 |
| SPFC | 0.80 | 232 | 370 | 34 | 0.215 | 1.46 | 0.128 |
| A1100 | 1.00 | 60 | 99 | 35 | 0.200 | 0.59 | 0.074 |
| A5000(a) | 0.80 | 122 | 284 | 33 | 0.338 | 0.69 | 0.138 |
| A5000(b) | 1.00 | 117 | 276 | 30 | 0.322 | 0.73 | 0.136 |
| A5000(c) | 0.80 | 116 | 265 | 29 | 0.304 | 0.94 | 0.147 |
| A6000 | 1.00 | 151 | 260 | 26 | 0.225 | 0.54 | 0.079 |
| Cu | 0.84 | 153 | 227 | 42 | 0.185 | 1.04 | 0.094 |

$$\bar{U} = \{ \bar{r} / (1 + \bar{r}) \} \times \bar{n}$$

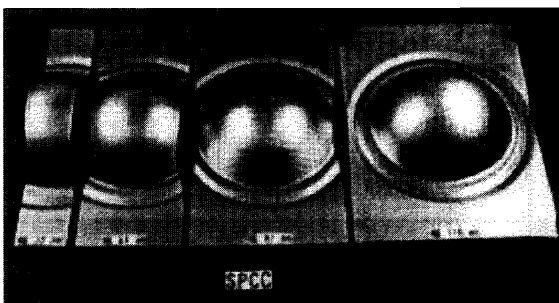


Fig. 1. Testing method for forming limit diagram.

た。破断が発生した部分は、ほぼいずれかのサークルに入るので、転写法でひずみを測定するとき、破断による開口部を差し引いた長さを変化量とした。

2.3 高ひずみ領域の加工硬化指数 n 値の測定方法

薄板の引張り試験による加工硬化指数 n 値を求める方法は、最大荷重点までの均一伸び変形領域内で求めるのが一般的である。しかしながら、荷重不安定点を超えた高ひずみ領域までの加工硬化指数 n 値を求める方法として、次のような方法を工夫して行った。すなわち、Fig. 2に示すように、あらかじめ2 mm間隔の格子を電解腐食によりマーキングした試験片を用いて引張り試験を行った。最大荷重点までは通常の方法で引張り試験を行い、荷重不安定点以降は、8段階程度に途中止めしながら、荷重とひずみの測定を行うことによって n 値を求めた。ただし、途中止め試験であるため、弾性変形量の修正を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 くびれ限界および成形限界と材料特性との関係

3.1.1 くびれ限界線図と破断による成形限界線図

(1) 変形経路とFLD

成形限界試験において、最初に破断限界値を求めてFLDを得た後、再度他の試験片を用いて、途中止めしつつ破断に至るまで成形過程における最大ひずみ ϵ_x 、最小ひずみ ϵ_y の測定を行って変形経路を求めた。測定値を成形限界線図上にプロットして求められるFLDとそれに至る変形経路の測定例をFig. 3に示す。本実験の場合、変形経路はほぼ直線的な変形経路となっていることを示している。厳密には、 $\epsilon_x \geq 0$ 、 $\epsilon_y \leq 0$ の変形領域(一方が縮み変形を伴う領域および平面ひずみ条件の領域)では直線的な変形経路であり、 $\epsilon_x > 0$ 、 $\epsilon_y > 0$ の変形領域(張出し変形領域)では、途中までは直線の変形経路であるが、変形終了域近傍で近似的に平面ひずみ条件となっていることが観察された。

(2) 局所くびれの測定値とNLD

成形限界試験において、局所くびれが発生する点を求めるため次のように測定を行った。全体成形性を表す指標として、成形プロフィール全体の平均伸びひずみ ϵ_{av} と、や

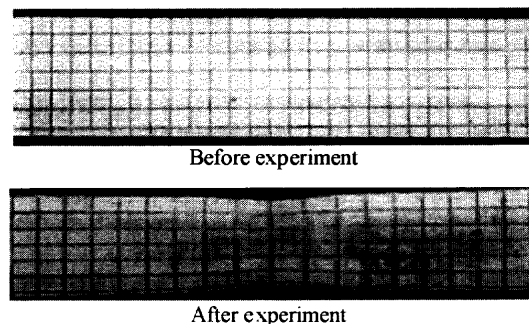


Fig. 2. Specimen of tensile testing for work hardening coefficient n value in higher strain area.

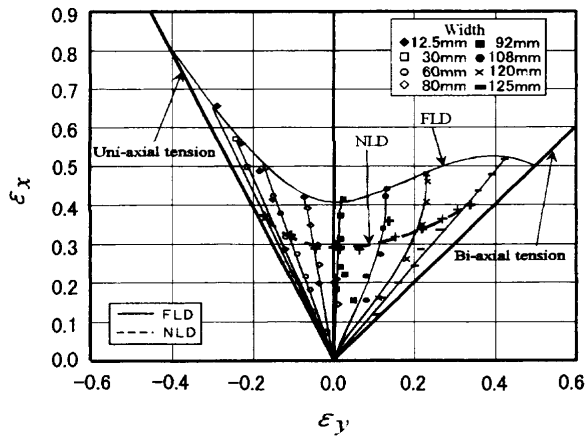


Fig. 3. Deformation path and NLD in FLD of steel sheet (SPCC).

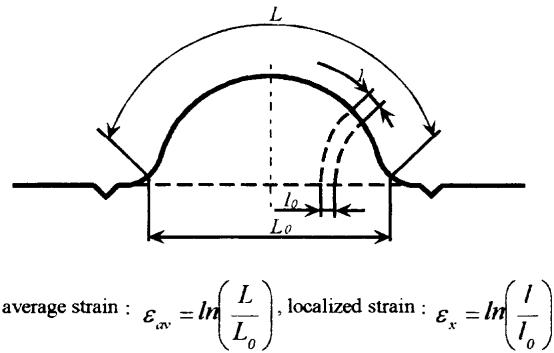


Fig. 4. Definition of average strain and localized strain in forming test.

がて破断が発生する局所のひずみ ϵ_x の関係から、局所に変形の集中が始まる点を局所くびれの発生点と考えた。すなわち、Fig. 4に示すひずみの定義に従って、成形過程で途中止めしながら求めた。このときの平均ひずみ測定の基準寸法 L_0 は 80.5 mm、局部伸びひずみのゲージ l_0 はサークル径 5ϕ mm を使用した。成形試験片の幅 W が 30 mm の場合の ϵ_x と ϵ_{av} との関係から (Fig. 5)、成形過程において局所ひずみ ϵ_x が急激に増加する点が認められ、この折れ点を局所くびれの発生点と定義した。これらの測定結果から、局所くびれ点のひずみ NLD を、Fig. 3 の変形経路と FLD の関係図に併せて示した。

(3) 局所くびれによる NLD と破断による FLD

成形限界試験によって、局所くびれによる NLD と破断による FLD が得られる。Table 1 に示した各種供試材の薄鋼板グループ、およびアルミニウム合金薄板と銅薄板グループの両者に分けて、FLD と NLD を Fig. 6 に示した。

各種材料の種別間で明瞭な FLD の差が現れており、厳密には3つの変形領域、すなわち、① $\epsilon_y < 0$ の領域 (縮み変形を伴う領域)、② $\epsilon_y = 0$ の領域 (平面ひずみ領域)、③ $\epsilon_y > 0$ の領域 (2軸張出し領域) のようにに分けて考察すべきであるが、ここではとくに②の平面ひずみ条件の領域における FLD の傾向について述べる。

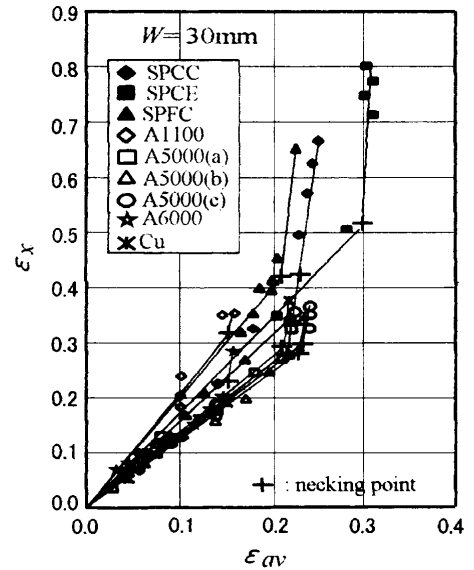
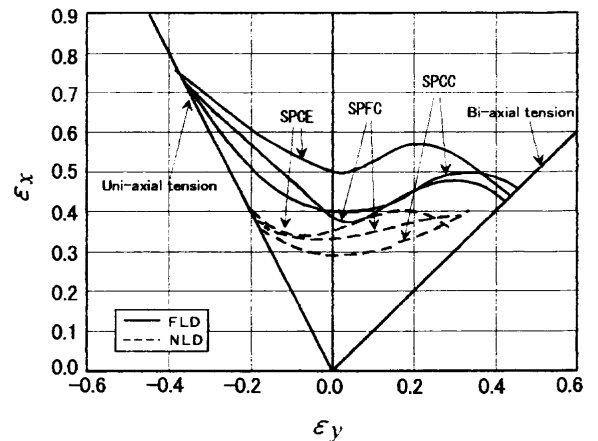


Fig. 5. Necking deformation in FLD testing with specimen width of 30 mm.

(a) Steel sheets



(b) Al alloy sheets and Cu sheet

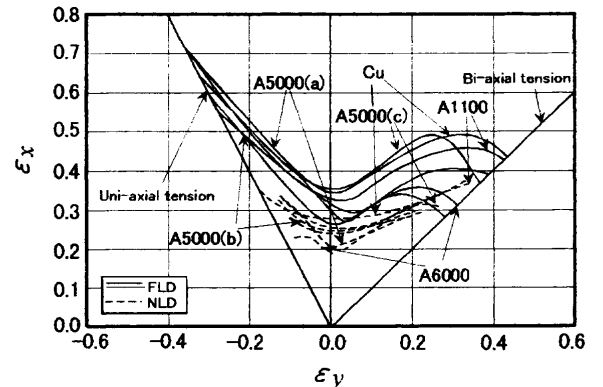


Fig. 6. FLD and NLD of various sheet metals.

すなわち、SPCE材が突出して高いFLD値を示しており、次いでSPCC材、SPFC材となっている。薄鋼板材に次いで銅薄板材、アルミニウム合金薄板材 (A1100 > A5000系 > A6000系) の順となっている。ここで、アルミニウム

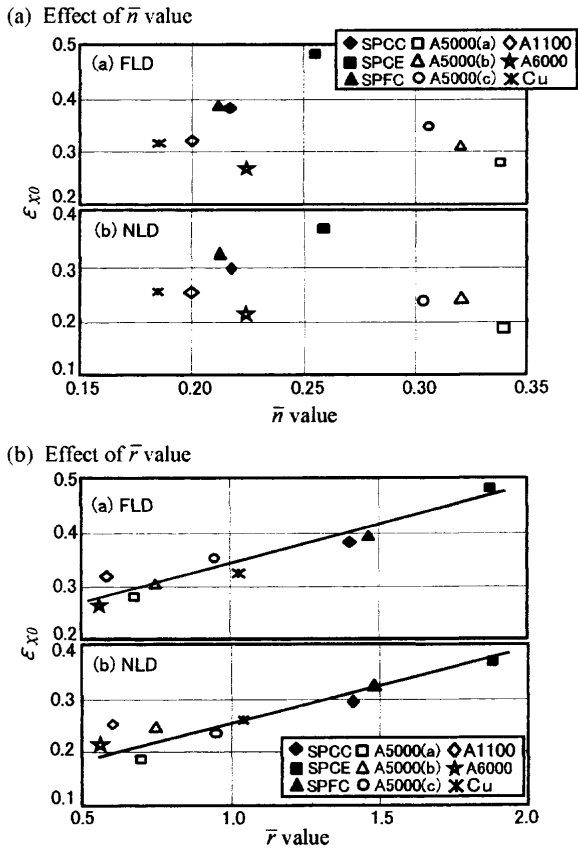


Fig. 7. Effect of \bar{n} value and \bar{r} value on the strain ϵ_{x0} in FLD and NLD.

Table 2. Various n values of used materials.

| materials | \bar{n} value | n^* value | n_{cv}^* value | n_f^* value |
|-----------|-----------------|-------------|------------------|---------------|
| SPCC | 0.217 | 0.183 | 0.337 | 0.476 |
| SPCE | 0.259 | 0.178 | 0.248 | 0.408 |
| SPFC | 0.215 | 0.185 | 0.241 | 0.391 |
| A1100 | 0.200 | 0.263 | 0.250 | 0.263 |
| A5000(a) | 0.338 | 0.301 | 0.250 | 0.212 |
| A5000(b) | 0.322 | 0.288 | 0.229 | 0.190 |
| A5000(c) | 0.304 | 0.250 | 0.179 | 0.128 |
| A6000 | 0.225 | 0.188 | 0.157 | 0.137 |
| Cu | 0.185 | 0.239 | 0.220 | 0.189 |

3.1.2 FLDおよびNLDと材料特性との関係

$\epsilon_y=0$ の平面ひずみ条件におけるFLDおよびNLDのひずみ ϵ_{x0} 値と材料特性との関係について調査を行った。材料特性値として、YP, TS, TEL, \bar{n} 値, \bar{r} 値, $\bar{U}=\{\bar{n}\bar{r}/(1+\bar{r})\}$ 値などとFLDおよびNLDのひずみ ϵ_{x0} 値との相関関係を求めるとTEL, \bar{r} 値, \bar{U} 値との間に相関関係が得られた。Fig. 7に \bar{n} 値および \bar{r} 値とFLDおよびNLDとの関係を示すように、 \bar{r} 値との間には非常に良い相関関係が認められるが、 \bar{n} 値との間には全く相関関係が得られなかった。本来、局所くびれを破断の前兆現象とするNLDおよびFLDは、 \bar{n} 値と密接な関係があることが予想されるが、鋼材、アルミニウム合金材および銅材などの異種材料にもかかわらず、とくに \bar{r} 値との間に非常に良い相関関係があることは注目される。

3.2 高ひずみ領域における加工硬化特性値と限界ひずみとの関係¹¹⁾

3.2.1 材料の種別による変形に伴う n 値特性

最大荷重点以降の高ひずみ領域における n 値の測定を行った結果をFig. 8に示した。薄鋼板材グループ（体心立方格子系）とアルミニウム合金薄板材および銅薄板材グループ（面心立方格子系）によって、 n 値のひずみ依存性の傾向が全く異なっている。

薄鋼板材グループの n 値は、最大荷重点まではひずみの増加とともに若干低下するが、最大荷重点を過ぎるとひずみの増加とともに急激に増大し、鋼種によってその増加傾向が異なっている。アルミニウム合金薄板材および銅薄板材の n 値は、低ひずみの変形段階では、ひずみの増加とともにやや増加傾向がみられるが、それを過ぎるとひずみの増加とともに単調に低下し、最大荷重点を過ぎても減少傾向にある。ただし、A1100系のアルミニウム薄板材の n 値は、全ひずみ領域でほぼ一定であった。

3.2.2 各変形領域における n 値の表示

そこで、これらの高ひずみ領域における n 値を、それぞれ最大荷重点で n^* 値、最大荷重点以上の高ひずみ領域の平均値を n_{cv}^* 値および破断近傍の n_f^* 値として区別した。これらの高ひずみ領域の加工硬化指数を、通常の n 値と比較してTable 2に示す。

ここで、実験で得られた平面ひずみ条件におけるNLDおよびFLDの限界ひずみ ϵ_{x0} 値と高ひずみ領域の加工硬化

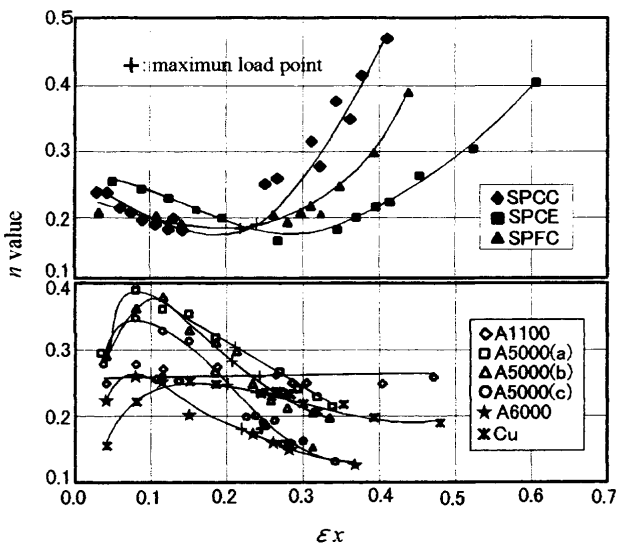


Fig. 8. Strain dependency of coefficient of work-hardening \bar{n} values.

合金薄板材のなかで r 値が比較的高いA5000系(C)材($\bar{r}=0.94$)が銅薄板材と同等以上のFLDとなっていることが注目される。また、この $\epsilon_y=0$ におけるFLDとNLDのひずみ ϵ_{x0} 値の範囲は、薄鋼板グループでは約0.37~0.50および約0.30~0.37、アルミニウム合金および銅薄板グループでは約0.26~0.36および約0.20~0.28の範囲であった。

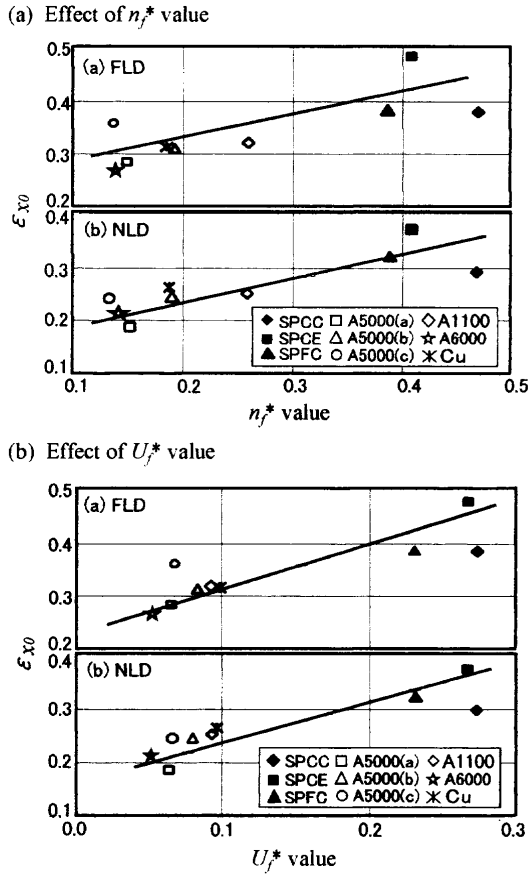


Fig. 9. Relationship between FLD strain ϵ_{x0} and n_f^* value and U_f^* value.

指数の n^* 値, n_{av} 値および n_f^* 値などとの間の相関関係について整理した。 ϵ_{x0} 値と n^* 値, n_{av}^* 値との間には相関関係は認められなかった。しかしながら, Fig. 9 に示すように, 破断近傍の n 値である n_f^* 値および n 値と r 値の複合特性値である $U_f^*(=n_f^*r/(1+r))$ との間に比較的良好な相関関係が認められた。

3.2.3 高ひずみ領域の n 値特性について材料面からの考察

Fig. 8 に示すように, 薄鋼板材グループとアルミニウム合金薄板材および銅薄板材グループの種別によって, 変形の進行に伴う n 値の変化特性が著しく異なる点について, 材料面からの若干の考察を行った。一般に, 引張り試験において, 変形量の増加に伴って材料の強度が増加するが, 真ひずみの増分に対する真応力の増分比が加工硬化指数 n 値である。最大荷重点までの均一伸び変形領域内においても, 微視的には変形が均一に進行するのではなく, 材料内部の軟質の箇所や, 形状的に応力が集中する場所が優先的に変形するが, 一般に変形した箇所は加工硬化して転位が動きにくくなるため, 次の変形は硬化した領域の隣接する場所に起こる。

最大荷重点までは, 試験片平行部はほぼ均一に伸びるが, 最大荷重点を過ぎると, 局所的な変形が起こり, 応力の集

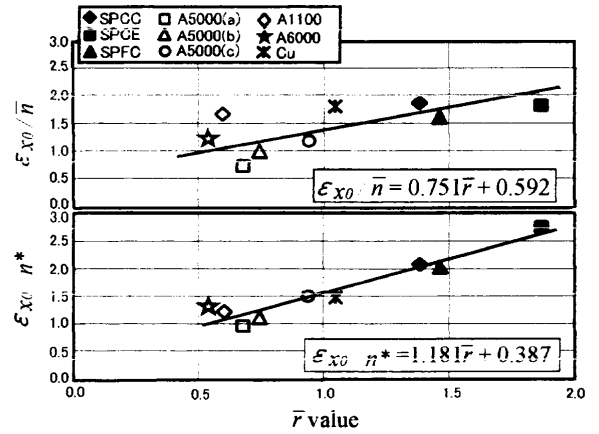


Fig. 10. Relationship between ϵ_{x0}/\bar{n} , ϵ_{x0}/n^* and \bar{r} value.

中によって加速度的に局所の変形が進む。応力の増加に伴って, 転位の増殖がますます進行し急激な加工硬化が起きる¹⁵⁾ことが知られており, 薄鋼板材グループがその代表例である。一方, アルミニウム合金薄板材および銅薄板材グループ(面心立方格子系)の材料の塑性変形を担うすべり系が, 薄鋼板材グループ(体心立方格子系)に比べて比較的単純であり, 変形が最大荷重点を超えると応力集中などによって急激に破断に至る傾向があり, その結果局部伸びが比較的小さい。このように両材料の塑性変形挙動の違いが, 変形の進行に伴う n 値の変化特性と密接な関係があるものと推測される。

3.3 平面ひずみ条件における成形限界ひずみ(ϵ_{x0})を支配する等価加工硬化指数 n_{eq} 値の決定

FLDの予測式として, S-R理論の予測式⁸⁾や, それを基本として導いた後藤理論の予測式¹²⁾などがあるが, いずれも局所くびれの発生を破断の前兆現象として捉えて近似的にFLDを求めている。FLDを予測するときの境界条件として, 平面ひずみ条件における限界ひずみ ϵ_{x0} 値が加工硬化指数 n 値に等しいと仮定し, また, 等2軸張出し条件の限界ひずみ値として実験値を用いている。各種材料に対して, 統一的にFLDの予測値と実測値が一致する結果は, まだ得られていない¹²⁾。また, 吉田ら¹³⁾は, S-R理論の予測式に一致するように n 値を仮定してFLDを求め, そのときの n 値を等価 n 値と呼んでいる。

そこで, FLDの予測式の境界条件としての平面ひずみ条件におけるFLDの ϵ_{x0} 値を支配している等価加工硬化指数(以下 n_{eq} 値と略称)を決定することを試みた。すでにFig. 7およびFig. 9に示したように, 実験から求められた各種材料のFLDの ϵ_{x0} 値と \bar{r} 値との間には非常に良い相関関係が得られていることから, 次のようにして n_{eq} 値を決定した。すなわち, Fig. 10に示すように, (ϵ_{x0}/\bar{n}) および (ϵ_{x0}/n^*) と \bar{r} 値との間の相関関係を求めると, 全供試材を含めて良い相関関係が得られた。これらの相関関係を, 近似的な実験式として式(1)および式(2)のように表すことができる。

FLDの予測式の計算に必要な加工硬化指数の n_{eq} 値を、式(3)によって求めることができる。式(1)を用いる場合は、式(2)よりも推定精度が劣る。

$$\epsilon_{x0}/\bar{n}=0.751\bar{r}+0.592 \dots\dots\dots(1)$$

$$\epsilon_{x0}/n^*=1.181\bar{r}+0.387 \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_{x0}\equiv n_{eq}\equiv(1.181\bar{r}+0.387)n^* \dots\dots\dots(3)$$

3.4 FLDの予測と実験結果との比較

3.4.1 FLDの予測式の適合条件

3.1.2で述べたように、平面ひずみ条件におけるFLDの限界ひずみ(ϵ_{x0})の実測値は、通常の \bar{n} 値との間に相関関係は得られず、むしろ \bar{r} 値との相関が強く認められた。そこで、付録に示す後藤のFLDの予測式¹²⁾を用い、加工硬化指数として n_{eq} 値を代入してFLDの予測を行うため、予測式の適合条件について比較検討を行い、次の結果が得られた。

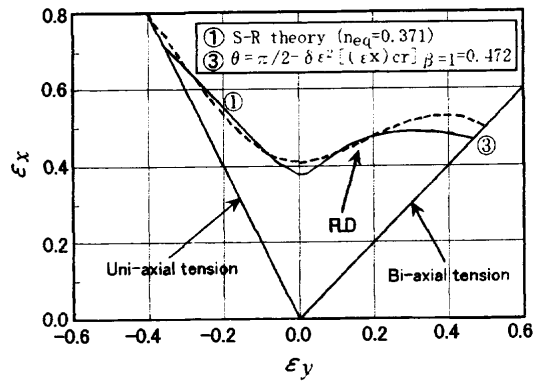
- ① r 値が1とするときの付録の式(A-2)の場合、 $\epsilon_y \leq 0$ の変形領域において実験値と良い一致が得られた。
- ② r 値(塑性異方性)を考慮した付録の式(A-1)の場合、 $\epsilon_y > 0$ 、 $\epsilon_y < 0$ の全変形領域で実験値よりも高めの値であった。
- ③ 局所くびれ発生の角度が直角($\phi = \pi/2$)とする付録の式(A-4)と式(A-5)の場合、 $\epsilon_y \geq 0$ の変形領域において実験値と良い一致が得られた。
- ④ 局所くびれ発生の角度が材料によって異なる付録の式(A-3)と式(A-5)の場合、 $\epsilon_y \geq 0$ の変形領域において③のケースよりもやや低めとなる結果が得られた。

したがって、FLDの予測式を変形領域によって区分し適用することで、比較的高精度のFLDを得られることがわかった。すなわち、 $-1/2 \leq \epsilon_y \leq 0$ の変形領域に対してはケース①の付録の式(A-2)を、 $0 \leq \epsilon_y \leq 1$ の変形領域に対してはケース③の付録の式(A-4)と式(A-5)を適用すれば、実験値とほぼ一致した実用的FLDを求められることが明らかとなった。供試材の軟鋼板SPCCとアルミニウム合金材A6000の例をFig.11に示すように、等価加工硬化指数 n_{eq} 値を使用したFLDの計算値と実験値が非常によく一致することを示している。

3.4.2 FLDの予測精度の評価

FLDの予測にあたり、ひずみ比を $\beta = \epsilon_y/\epsilon_x$ とするとき、 $-1/2 \leq \beta \leq 0$ の変形領域に対しては付録の式(A-2)、 $0 \leq \beta \leq 1$ の変形領域に対しては付録の式(A-4)と式(A-5)を用いて、2つの変形領域に分けて計算を行った。全ひずみ条件におけるFLDの ϵ_{x0} 値の計算値と実験値との相関関係をFig.12に示すように、予測値の方が実測値よりも平均して約2.5%程度高めとなっているが、実用的には十分使用できる精度であるといえる。予測を行うにあたっての境界条件として

(a) Steel sheet SPCC



(b) Al alloy sheet A6000

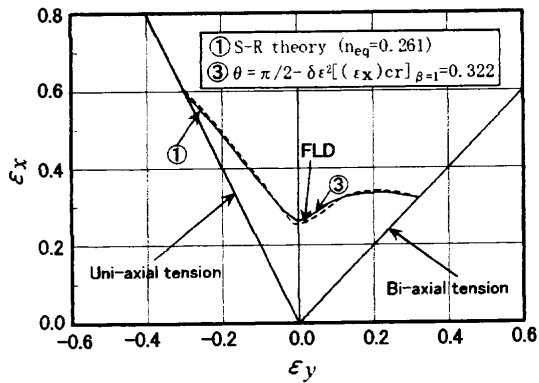


Fig. 11. Experimental FLD and calculated FLD of new modeling induced by Gotoh's theory.

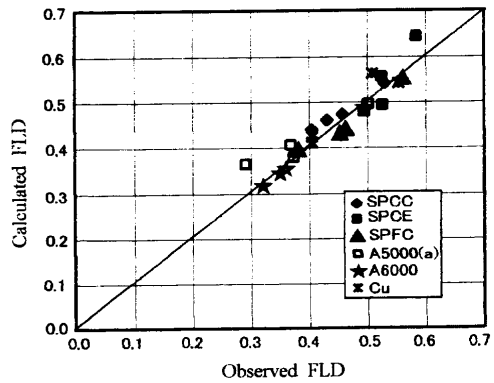


Fig. 12. Correlation between observed FLD values and calculated FLD values of various materials.

は、材料特性として r 値、 n_{eq} 値および等2軸張出し限界ひずみ値 $x_1 = [(\epsilon_x)_{cr}]_{\beta=1}$ の3つの特性値が必要となる。FLDの予測もそれほど複雑ではないことから、手間のかかる成形限界試験をしなくても、各種材料のFLDが得られ、十分実用的なFLDの予測方法といえる。

4. 結言

- (1) 各種の薄板材料として高張力鋼板を含めた薄鋼板、各種アルミニウム合金薄板および銅薄板を用いて、等

2軸張出し，平面ひずみ引張り，および単純1軸引張りを
含む広範な2軸応力条件のもとでの成形限界試験を行い，
材料別のFLDとNLDのデータベースが得られた。

(2) FLDおよびNLDにおけるそれぞれの限界ひずみ
値，とくに平面ひずみ条件の限界ひずみ ϵ_{x0} 値と材料特性
値 (TEL, \bar{r} 値, \bar{U} 値) との間に良い相関関係が認められ
た。

(3) 引張り試験法によって，最大荷重点を超える高ひ
ずみ領域までの加工硬化指数 n 値を求め，鋼板系とアルミ
ニウム合金板や銅板系では， n 値のひずみ依存性が異なっ
ている。

(4) FLDの限界ひずみ ϵ_{x0} を支配している材料特性とし
て，最大荷重点の n^* 値と \bar{r} 値との複合特性からなる等価加
工硬化指数 n_{eq} の実験式を得た。

(5) 局所くびれ限界理論から導いた後藤のFLD予測
式¹²⁾を用いて，実測FLDへの適合条件を明らかにし，変
形領域を $-1/2 \leq \beta \leq 0$ と $0 \leq \beta \leq 1$ の2つの領域に分けて計算
する実用的なFLD予測式を得た。また，等価加工硬化指
数 n_{eq} を用いることによって実験値とよく一致することが
わかった。

文 献

- 1) K.Ito: 173rd Symp. Technol. Plast., (1997), 23.
- 2) P.Keeler: Sheet Met. Ind., 48 (1971) 8, 589.
- 3) K.Nakajima, T.Kikuma and K.Hasuka: Seitetsu Kenkyu, 14 (1968), 8414.
- 4) K.Tanaka, L.Gu and K.Nakajima: Proc. Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (1997), 31.
- 5) T.Kobayashi, K.Muraichi and H.Ishigaki: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 10 (1969), 793.
- 6) T.Kobayashi, K.Muraichi H.Ishigaki and T.Abe: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 11 (1970), 495.
- 7) K.Nakajima and T.Kikuma: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 11 (1970), 112.
- 8) S.Stören and J.R.Rice: J. Mech. Phys. Solids, 23 (1975), 421.
- 9) K.Yamakuti: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 27 (1986), 151.
- 10) Z.Marciniak and K.Kuczynski: Int. J. Mech. Sci., 9 (1967), 609.
- 11) K.Tanaka, L.Gu, T.Suzuki and K.Nakajima: Proc. Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2000), 223.
- 12) M.Gotoh: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (A), 47 (1982), 92.
- 13) T.Yoshida, K.Ito, Y.Kuriyama and M.Usuda: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 38 (1997), 985.
- 14) R.Hill: J. Mech. Phys. Solids, 1 (1952), 19.
- 15) 谷野 満, 鈴木 茂: 鉄鋼材料の科学, 内田老鶴園, 東京, (2001), 109.

付 録

1. 板材要素に発生する局所くびれ帯の定義

- σ_x, σ_y : x, y 方向の作用応力
- g : くびれ帯への法線単位ベクトル
- ψ : x 方向応力に対するくびれ帯の法線角度
- t : 板厚

2. r 値 (塑性異方性) を考慮したのFLDの予測式¹²⁾

- $(\epsilon_x)_{cr}$: 局所くびれの限界ひずみ
- $\sigma = F\epsilon^n$: 材料の n 乗硬化則
- $\alpha = (\sigma_y / \sigma_x)$: 応力比
- $\beta = (\epsilon_y / \epsilon_x)$: ひずみ比

$$(\epsilon_x)_{cr} = \frac{(n/2) \times (2+a\beta) \{ 2 + [(2a-1) + (1-a)gn]\beta \} + \{ (4-a^2)\beta^2 / gn \}}{(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \dots (A-1)$$

ただし, $a = 2\bar{r} / (1 + \bar{r})$

$$(\epsilon_x)_{cr} = \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \dots (A-2)$$

ただし, $g=1, r=1$ の場合, S-R理論⁸⁾と一致する。

3. 局所くびれ帯の角度 θ を考慮した予測式¹²⁾

(1) 局所くびれの角度

$$\theta = \varphi - \delta \epsilon^2, \quad gn = \cos \theta / (1 + \cos \theta) \dots (A-3)$$

$$\varphi = \pi/2, \quad n = \delta \epsilon^2 / (1 + \delta \epsilon^2) \dots (A-4)$$

(2) 局所くびれの限界ひずみの予測式

$$(\epsilon_x)_{cr} = x, \quad x^3 - bx^2 - c = 0 \dots (A-5)$$

ただし

$$b = 2n / (2 + \beta)$$

$$c = \frac{2.25n\beta^2}{2\delta(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)}$$

$$\delta = \frac{0.04167n}{x_1^3 - 0.667nx_1^2}$$

$x_1 = [(\epsilon_x)_{cr}]_{\beta=1}$: 等2軸張出し限界ひずみ

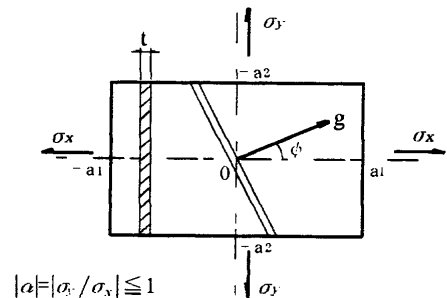


Fig. A1. Localized necking of sheet element under bi-axial stress condition.