1050アルミニウム板の成形限界曲線 に対する変形経路および板厚の影響*

小原 嗣朗**・勝田 基嗣***・青木 頭一郎***

Effects of strain path and sheet thickness on
forming limit curves of 1050 aluminum sheets

UDC : 669. 71-12 : 539. 375 : 621. 983

Shiro KOHARA*, Mototsugu KATSUTA** and Kenichiro AOKI**

Two stage strain path deformation increases the limit strains to a greater degree than single strain path deformation. The equibiaxial straining followed by uniaxial straining (two stage strain path I) increases the limit strain in the range of the plane strain deformation. The uniaxial straining followed by biaxial straining (two stage strain path II) increases the limit strains in the range of stretch-forming. The sheet thickness has an indistinct effect on the forming limit curve, if the difference in thickness is within 10 per cent.

(Received February 19, 1981)

1. ま え が き

近年, 金属材料の薄板の成形性の研究に, 成形限界曲線 (Forming Limit Curve, FLC) が用いられている。この方法は, 特に薄板の張出し領域の成形性を評価するのに適した方法といえる¹⁾。これまでに, 1050アルミニウム板に関する, 成形限界曲線の特質, 前加工および熱処理の影響などについて報告した^{2), 3), 4)}。一般に, 成形限界曲線は実験的に決定されるが, その場合の変形は, 単一変形経路によるものである。成形限界曲線は, 実際の成形加工において生じる問題の解決に有用であるが, そこで問題になることは, 実際の成形加工のような2段階以上の変形経路による成形限界は, 単一変形経路によつて求めた成形限界と異なるのではないかということ, および実際には各種の厚さの板が用いられるが, 異なる厚さの板で実験的に求めた成形限界曲線を, どの程度まで適用できるかということである。

この研究は, 変形経路の差による成形限界曲線の変化, および板厚による成形限界曲線の変化を, 明らかにするために行なつたものである。

2. 実験方法

実際の薄板の成形加工においては, 何段階かの成形過程を経て製品が製造される場合が多い。しかし, 実際の成形過程に対応するすべての変形経路を実験することは困難である。それで, この研究では, 一次変形と二次変形の2段の過程に分けて, それぞれ異なつた変形過程を組合せた複合変形経路による成形限界曲線と, 単一変形経路による成形限界曲線を比較して, 変形過程の組合せによつて生じる成形限界曲線の変化を明らかにすることを目的とした。一次変形は, 等二軸引張り変形または一軸引張り変形のいずれかを用いた。これは, 成形限界曲線の両極限の変形である¹⁾。そして, 二次変形は, 等二軸引張り変形には一軸引張り変形を, また一軸引張り変形には二軸引張り変形を組合せた。したがつて, この実験は,

	(一次変形)	(二次変形)
(I)	等二軸引張り変形	+ 一軸引張り変形
(II)	一軸引張り変形	+ 二軸引張り変形

の2通りの変形経路による成形限界曲線を求めることとなる。

* 工業用アルミニウム板の成形限界(5)

** 東京大学工学部境界領域研究施設(東京都)。Institute of Intredisciplinary Reseach, University of Tokyo (Tokyo).

*** 日本大学生産工学部(習志野市)。College of Industrial Technology, Nihon University (Narashino).

試験方法の実際を具体的に述べると、**Fig. 1** に示すように、(I)は、最初に液圧バルジ成形によって作ったカップから、試験片を切出して引張り試験を行ない、(II)は、最初一軸引張り変形を与えた板からブランクを切出して、液圧バルジ試験を行なうのである。この場合、円形ダイスを用いれば等二軸変形となり、楕円ダイスを用いれば、不等二軸変形となる。**Photo. 1**に、(I)の試験片の例を示す。

異方性のある板材では、一軸引張り変形の方角と、板の圧延方向との相対的な関係を考慮しなければならないが、各種の組合せを作ると条件が複雑になるので、この実験では一軸引張り方向はつねに一定にして、板の圧延方向と一致させた。また、二次変形で楕円ダイスによって変形させる場合は、楕円ダイスの向きと板の一次変形の方角の相対的な関係を考慮しなければならない。この場合は、楕円ダイスの短軸と一次変形の引張り方向が一致する場合を 0° 、また、直交する場合を 90° として区別した。

実験には、厚さ1.0 mmの1050-O材を使用した。一次変形が二軸引張り変形の場合は、 $\phi 100$ mmの円ダイスを用い、液圧バルジによって5段階の高さのカップを張出し、それぞれのカップから**Photo 1**に示すような試験片を切出して、各試験片を引張り試験によって破断に至るまで変形させて、成形限界曲線を求めた。また、一次変形が一軸引張り変形の場合は、 400×200 mmの板を引張り試験機によって、約2.5、5.0、7.5、10.0および12.5%それぞれ引張った後、円形のブランクを切出し、 $\phi 100$ mmの円ダイスおよび長軸と短軸の比が1 : 0.85、1 : 0.75、1 : 0.65の3種類の楕円ダイスを用いて、液圧バルジによって、破断に至るまで張出しを行なつて成形限界曲線を求めた。各ダイスで張出した試験片を、**Photo. 2**に示す。局部ひずみの測定は、サークルパターン法により、直径2.5 mmのサークルを用いた。

つぎに、成形限界曲線に対する板厚の影響を明らかにするために、0.8、1.0および1.5 mmの3種類の厚さの1050-O材を用いて、カット試験片法²⁾と楕円ダイス法³⁾を併用して、それぞれの厚さの板に対する成形限界曲線を決定し、得られた曲線を比較した。この場合も、ひずみ測定には、直径2.5 mmのサークルパターンを用いた。

3. 実験結果

2段階成形(I)の場合の成形限界曲線を、**Fig. 2**に示す。図は、一次変形として5段階の等二軸引張り変形を与え、さらに二次変形として一軸引張り変形を行なつて破断した場合で、それぞれの変形経路を矢印で示してある。また、比較のために、単一変形経路で求めた成形限

Fig. 1 Schematic drawing of test methods for two stage strain path (I) and (II).

Fig. 2 Forming limit curves for 1050-O aluminum sheet with two stage strain path (I) (solid line) and with single strain path (dotted line).

Photo. 1 Test specimen for two stage strain path (I).

界曲線を破線で示した。2つの成形限界曲線を比較すると、等二軸変形に近い領域では単一変形経路の方が成形限界が高いが、平面ひずみ変形に近い領域では複合変形経路の方が成形限界が高い。さらに、一軸引張り変形に

Photo. 2 Test specimens for two stage strain path (II).

近い領域では、ほとんど差がなくなる。

このことは、平面ひずみ変形に近い領域の成形加工を行なう場合は、単一変形経路によつて成形するよりは、一度適当な量の等二軸引張り変形を行なつた後、一軸引張り変形によつて成形する方が、破断するまでにより大きいひずみを与えることができる。すなわち、成形限界が増大することを意味している。

つぎに、2段階成形(II)の場合の成形限界曲線を、Fig. 3 に示す。図は、一次変形として5段階の一軸引張り変形を与え、さらに二次変形として不等二軸変形を行なつて破断した場合である。同じ量の一次変形に対して何種類もの二次変形が対応して図が複雑なため、変形経路は代表的な例のみを矢印で示した。同じ量の一次変形に対応する測定点は同じ記号で示してある。また、楕円ダイスの短軸と一次変形の引張り方向が平行な場合を(//)、直交する場合を(⊥)とした。比較のために、単一変形経路によつて求め成形限界曲線を、破線で示してある。

この場合は、楕円ダイスの短軸の方向が一次変形の引張り方向と平行なときは成形限界が増大するが、直交するときは成形限界が著しく減少している。また、この実験の範囲では、一次変形の量が大きいほど成形限界が増大している。楕円ダイスによる変形は、短軸方向の方が長軸方向より変形ひずみが大きい²⁾から、これは、不等二軸変形でひずみが最大の方向、すなわち主ひずみ方向が一次変形の引張り方向と一致する場合の方が、直交する場合より成形限界が大きくなるということを意味する。したがつて、このような2段階成形を行なうことによつて、材料を破断することなくより大きいひずみを与えることが可能になる。

成形限界曲線に対する板厚の影響を Fig. 4 に示す。図は、厚さ0.8, 1.0および1.5 mm の板を用いて決定した成形限界曲線であるが、成形限界曲線の全体の形状は、板厚によつてそれほど変化しない。そして板厚が増すと、成形限界曲線は上方に移動し、成形限界は増大する。

Fig. 3 Forming limit curves for 1050-O aluminum sheet with two stage strain path (II) (solid line) and with single strain path (dotted line).

Fig. 4 Forming limit curves for 1050-O aluminum sheets having different thickness.

1.0 mm と0.8 mm の板では、板厚は20%の差があるが、Major strain 方向の限界ひずみの差は、張出し領域では大体0.022~0.024%に達する。また、1.0 mm と1.5 mm の板では、板厚の差は50%であるが、 e_1 方向の限界

ひずみの差は、張出し領域で大体0.044~0.053%程度である。ただし、どちらの場合も平面ひずみ変形領域では、前者が約0.030%、後者が約0.0644%である。いずれにしても、板厚の差と限界ひずみの差の間の定量的な関係を求めることは困難であると思われる。

4. 考 察

これまでに、金属材料の塑性挙動が、試片に与えられた予ひずみによつて変化することが報告されている^{5),6)}。したがつて、そのような現象をうまく利用することによつて、材料の成形限界を広げることが可能になる。

この研究で用いた複合変形経路に対応する応力状態を図示すると、**Fig. 5** のようになる。ただし、図の二次変形における応力 σ_1 と σ_2 は、 $\sigma_1 > \sigma_2$ であるとする。

(I) は、一次変形として等二軸引張り変形を与えた後に、二次変形の一軸引張り変形を行なう場合である。この場合は、等二軸引張り変形量が大きいと、成形限界は単一変形経路の場合より減少するが、等二軸引張り変形量が適当な大きさであると、成形限界は増大する。これは、二次変形が一軸引張り変形であるため、横方向に収縮を生じるが、一次変形で生じた等二軸引張りひずみが横方向では収縮によつて緩和されるために、引張り方向における破断ひずみが増加するものと考えられる。しかし、等二軸引張り変形量がある程度より大きいと、引張り方向のひずみがすぐに限界を越えて破断を生じるの

で、成形限界が低くなるのであろう。

(II) は、一次変形として一軸引張り変形を与えた後に、二次変形の二軸引張り変形を行なう場合である。この場合は、二次変形が楕円ダイスによる不等二軸変形であるため、楕円ダイスの短軸の方向と一次変形の引張り方向の関係によつて2つの応力状態になる。(II) // は、楕円ダイスの短軸が一次変形の引張り方向と平行な場合で、単一経路の変形より成形限界が増大する。(II) ⊥ は、短軸と一次変形の引張り方向が直交する場合で、単一経路の変形より成形限界は減少する。図の応力状態から考えると、一次変形の一軸引張りによつて横方向に収縮を生じ、これが二次変形で受ける引張り変形によつて緩和されると考えられる。この二次変形における横方向の変形量が適当な大きさのときひずみの緩和が最大となり、成形限界が最も大きくなる。(II) ⊥ の場合は、横方向の変形量が大き過ぎるために、すぐに限界を越えて破断を生じるので、成形限界が低くなるものと思われる。

この点に関連して、試験片の破断部近傍のひずみの状態を調べてみた。その1例を、**Photo. 3** に示す。写真は、楕円ダイスの短軸方向を横方向に向けて撮ったもので、用いたダイスの軸比を示してある。これらの写真から明らかなように、楕円ダイスを用いた変形では短軸方向のひずみが最大になるため、クラックはすべて短軸方向に垂直に発生している。しかし、クラックの近傍のひずみには大きい差があり、一次変形と二次変形の適当な組合せの場合に、限界ひずみが著しく増大することを明瞭に示している。

ここで、一次変形の方法は、この実験では圧延方向でもあるので、これを圧延方向と考えると、クラックの方向は、板の異方性に関係があるのではないとも考えられる。それで、用いた板の機械的性質の方位による変化を測定した。その結果を、**Table 1** に示す。これによると、元の板の引張り強さ (σ_b) の方位による差はそれほど大きくなく、また伸び (e_b) は90°方向が必ずしも小さくない。したがつて、これらの塑性特性値の方位による差としては簡単には説明できないと思われる。

このような変形経路の差による成形限界の変化は、Hill の理論のようなマクロ的な異方性理論によつて説明することは困難である。Keeler ら⁷⁾は、材料の変形能には一定の限度があるとして、各段階の変形経路のひずみの緩和が一定値に達する限界があるとしている。もし、そのようなことが成立つとすれば、単一変形経路によつて決定した成形限界曲線から、異なる変形経路の成形限界曲線を求めることができるはずである⁸⁾。しかし、成形限界が、必ずしも各変形経路のひずみの和に一致するとは限らないことが、実験的に示されている^{9),10)}。これは、異なつた変形経路を組合せると、先行

Fig. 5 Schematic drawing of stress states for two stage strain path (I) and (II).

Photo 3 Strain distributions around the crack in test tension, 10% specimens for two stage strain path (II). Primary strain: uniaxial (1050-O).

Table 1 Plastic properties of test sheet.

direction (°)	σ_b (kgf/mm ²)	c_b	n	r
0	7.76	0.396	0.263	0.626
45	7.89	0.485	0.281	0.710
90	7.66	0.407	0.272	0.850

する変形によつて生じたひずみが、つぎの段階の変形によつて緩和される場合があるので、成形限界が各段階のひずみの代数的な蓄積になるとは限らないためである。そのような例として、Hutchinson ら⁵⁾は、一次変形として引張り変形を与えた試験片を、二次変形で直角方向に引張り変形を行なうと、加工硬化が減少することを報告している。しかし、このような現象については、転位構造やすべり系の変化なども含めたミクロ的な微細構造の変化としては、まだ十分説明されていない。この点については、複合変形経路による金属材料の塑性挙動に関する研究が、さらに必要であると思われる。

実用的な面からみると、このような変形経路による成形限界の変化について一度成形限界曲線を求めておくと、成形加工における難易度の判定、あるいは不良品を出さないための成形工程の変更など¹⁰⁾、実際の成形作業にとって非常に有用であると思われる。

成形限界曲線に対する板厚の影響については、板厚が増せば張出し領域の成形限界が増大することは明らかであるが、両者の関係を定量的に表すことは困難である。これは、成形限界曲線の決定法自体に関連する問題でもある。ポンチ張出しによつて試片を変形する場合は、試

片のポンチに接触する部分は、摩擦による拘束を受けるため自由な変形はできない。したがつて、このような場合は、板厚の増加がすべて板面横方向の変形に寄与するとは限らない。鉄板の場合、1.0 mm と 2.0 mm の板では、成形限界が約 10% 違うという報告がある¹¹⁾が、一方、0.8 mm と 1.6 mm の板で約 10% の差があるという報告もある¹²⁾。このように、板厚の影響についての報告には、かなりの差がある。10% 程度の板厚の差による成形限界曲線の変化は、恐らく測定値のパラツキのなかに入つてしまうであろう。板厚に少なくとも 50% 程度の差があるとき、初めて 2 つの成形限界曲線として分離できると思われる。

5. ま と め

成形限界曲線に対する変形経路および板厚の影響について研究を行なつて、つぎの結論が得られた。

(1) 等二軸引張り変形を行なつた後一軸引張り変形を行なうと、単一変形経路の場合より、平面ひずみ変形領域の成形限界が著しく増大する。

(2) 一軸引張り変形を行なつた後二軸引張り変形を行なうと、二軸引張り変形の最大ひずみ方向が一軸の引張り方向と平行な場合は、張出し領域の成形限界が、単一変形経路の場合より増大する。しかし、両者が直交する場合は、成形限界は減少する。

(3) このように、変形経路を適当に選ぶことによつて成形限界を著しく増大させることが可能である。

(4) 成形限界曲線に対する板厚の影響は、板厚の差が 10% 以下のときは、顕著な変化は現われない。また、板

厚の差と成形限界の差の関係を、定量的に表すことは困難である。

参 考 文 献

- 1) 小原：軽金属, **30** (1981), 44.
- 2) 小原, 勝田, 青木：軽金属, **31** (1981), 90.
- 3) 勝田, 小原, 青木：軽金属, **31** (1981), 169.
- 4) 勝田, 青木, 小原：軽金属, **31** (1981), 261.
- 5) W. B. Hutchinson, R. Arthey, P. Malmström: *Scripta Met.*, **10** (1980), 673.
- 6) A. J. Ranta-Eskola, *Metals Technology*, **7** (1980), 45.
- 7) S. P. Keeler, W. A. Backofen: *Trans. ASM*, **56** (1963), 25.
- 8) H. J. Kleemola, M. T. Pelkkikangas: *Sheet Metal Industries*, **54** (1977), No. 6, 571.
- 9) D. J. Lloyd, H. Sang: *Met. Trans.*, **10A** (1979), 1767.
- 10) 中島：塑性と加工, **11** (1970), 112.
- 11) 川崎製鉄：薄鋼板成形技術研究会資料, No. 35, (1968, 6).
- 12) 日本鋼管：薄鋼板成形技術研究会資料, No. 34, (1968, 6).