表面あれの除去による金属薄板の成形限界の向上*

高倉章雄^{*1}, 山口克彦^{*1}, 福田正成^{*1}

Improvement of the Forming Limit of Sheet Metals by Removal of Surface Roughening with Plastic Strain

Norio TAKAKURA, Katsuhiko YAMAGUCHI, and Masayoshi FUKUDA

Surface roughening of sheet metals with plastic strain is once removed at a given strain during the forming process and its effect on the improvement of the forming limit is investigated. As a preliminary examination to estimate how the onset of localized necking is delayed by the removal of surface roughness, a rigid-plastic FEM simulation is first made. Experiments for soft aluminium and copper sheets are also carried out and the increase in forming limit strain is examined for a few strain paths. It is shown that the improvement of the forming limit is considerable in the stretch forming region where the major and minor strains in the plane of a sheet are positive. For balanced biaxial stretching, for example, the forming limit strain can be increased up to about one and a half times as large as that for ordinary in-plane stretching.

Key Words: Sheet Metal Forming, Surface Roughness, Forming Limit, Strain Path, FEM Simulation

1. 緒 言

金属材料の塑性加工を行う場合、工具に接していない板の自由表面は変形の進行に伴って粗くなる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。このような板材の粗面化現象は、薄板の場合には、板厚に厚い部分と薄い部分といった微視的不均一さ⁽⁵⁾が生じることを意味しており、成形限界を低下させる原因にもなる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

著者ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、これまで、このような板材表面の粗化が成形限界に対していかなる影響を及ぼすかを把握するために、剛塑性有限要素法による表面あれのシミュレーションを行ってきた。その結果、表面あれが大きくなると表面凹凸の凹部に変形が集中し始め、やがてこの部分が局部くびれへと進展していく様子が確かめられた。

上述のようなシミュレーションの結果は、見方をかえれば、板材の成形限界向上に関して有益な示唆を与えているように思われる。すなわち、局部くびれ発生のかっかけとなる板表面の凹凸を、変形の途中段階で除去しながら成形を進めていけば、その結果として成

形限界が向上するのではないかと考えられる。

本報は、このような考えに基づいて、金属薄板の成形限界向上に対する表面あれの除去効果を検討したものである。従来、金属板の成形限界向上に関しては多くの研究がなされているが、本報のように、表面あれの除去という新しい観点から検討を加え、その有効性を確かめた研究は見当たらない。

2. 剛塑性有限要素シミュレーションによる 表面あれ除去効果の検討

成形の途中段階でいったん板表面の凹凸を除去した場合、それ以後の表面粗さの発達状況はどのようなか、また成形限界はどれほど向上しうるかといった点について予備的な検討を行うために、実験に先だって、まず剛塑性有限要素法によるシミュレーションを行った。シミュレーションでは、前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾までの取扱いと同様に、面心立方構造をもつアルミニウム薄板を対象にし、擬三次元要素を用いた剛塑性有限要素法⁽¹⁰⁾を使用した。

2.1 板材モデル シミュレーションに用いた板材モデルを図1に示す。これは、一辺 $d (=20 \mu\text{m})$ の立方体の結晶粒が X , Y 軸方向にそれぞれ4個ずつ規則正しく配列したものである。計算を容易にするため

* 昭和62年3月13日 関西支部第62期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年10月3日。

*¹ 正員、京都工芸繊維大学工学部 (〒606 京都市左京区松ヶ崎)。

に、Z軸方向(板厚方向)に含まれる結晶粒の個数は1個とした。このように板厚方向に含まれる結晶粒の個数が1個である単層の多結晶モデルは、はくのような極薄板の場合を除き、一般の板材に対しては必ずしも妥当なものではないが、ここでは、表面あれ除去の効果を大略把握することを目的として、図1に示すモデルを近似的に使用した。ただし、図1において、材料内の微視的な不均一さ⁽¹⁾の影響を考慮することができるよう、個々の結晶粒の変形抵抗は異なるものとした。すなわち前報の場合と同様に、各結晶粒には、結晶の配向をランダムに与え、それぞれ異なった変形抵抗を与えた。図2に計算に用いた各結晶粒のF値(120~195 MPa)を示す。

2.2 シミュレーションの方法 図1の板材モデルに、数種類の単純変形経路(板面内のひずみ比 $\beta = \epsilon_y/\epsilon_x$ が一定)のもとで、いろいろな大きさの変形を与えた。そして、変形の途中でいったん表面あれを除去し(計算上は、各要素の板厚を表面凹凸のうち最も低い谷部の板厚にそろえた)、その後の表面あれの発達状況ならびに局部くびれの発生状況を計算した。計算では、各結晶粒をさらにXY面内で16個の要素に分割した。そして、板厚の中心軸に対する対称性から板厚の1/2の部分についてのみ計算を行った。なお、板

材モデルの端面はすべて平面のまま変形するものとした。また、一段の変形で生じるX軸方向のひずみ増分 $\Delta\epsilon_x$ は0.01とした。

2.3 成形限界の向上に対する表面あれ除去の効果

図3は、変形中の表面あれを除去しない場合[(a)→(b)→(c)]と、変形の途中段階(b)($\epsilon_x=0.15$)でいったん表面粗さを除去したのち、再び(d)→(e)と変形を進めた場合における表面粗さの発達状況を比較した一例である。また図4は、図3(a)~(e)の各時点に対応する要素の変形状態を示したものである。各要素の変形状態は、一段の計算における要素の相当ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_E$ と板材モデル全体の巨視的な相当ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}$ の比 $\Delta\bar{\epsilon}_E/\Delta\bar{\epsilon}$ で表されており、図中の白い部分は変形が極めて小さい要素、黒い部分は変形が大きい要素を示している。

図3、4より、次のことがわかる。変形中に表面粗さを除去しない場合には、(c)の段階($\epsilon_x=0.2$)になると、一部分の要素のみに変形が集中していく。これは、表面凹凸が激しくなり、変形が凹部に集中して局部くびれが形成され始めたことに対応する。一方、変形の途中段階(b)で表面粗さを除去した場合には、 $\epsilon_x=0.2$ の時点においてはまだ各要素の変形はほぼ一様であり、ひずみ集中の開始時期が遅れることがわかる。

図1 シミュレーションに用いた板材モデル

図3 変形の途中で表面粗さを除去した場合の表面凹凸の発達状況($\beta=0$)

(MPa)				
120	127	157	140	158
137	195	140	156	127
120	120	128	156	131
155	124	135	135	133
155	137	130	145	120

図2 各結晶粒の変形抵抗(F値)の分布($\sigma = F_{en}$)

図4 表面粗さの除去によるひずみ集中時期の遅れ($\beta=0$)

図5は、平面ひずみ ($\beta=0$) 以外の二、三の変形様式についても同様の計算を行い、得られたくびれ発生限界をまとめて示したものである。ここで、くびれ発生限界は、前報の場合と同様に $\Delta\epsilon_s/\Delta\epsilon \leq 0.1$ となる要素が現れた時点のひずみとした。図より、いずれの変形様式の場合でも、表面あれ除去の効果が期待できることがわかる。また、粗さ除去時のひずみ ϵ_s が大きいほどくびれ発生限界が大きくなること、およびくびれ発生限界の向上は等二軸引張り ($\beta=1$) 側に近づくほど大きくなることわかる。

3. 実験結果および考察

以上のようなシミュレーションの結果から、板表面の凹凸を除去しながら成形を進めていけば、成形限界をある程度向上させることが可能になるものと推測される。そこで、このようなシミュレーションの結果を確かめるために、市販のアルミニウム板 (板厚 0.8 mm) を用いて成形実験を行った。

3.1 実験方法 実験に使用したアルミニウム板の引張特性値 (圧延方向に対して 0° , 45° , 90° 方向の平均値) を表1に示す。

板幅とフィレット半径が異なる試験片を用いて平頭ポンチ張出し⁽⁵⁾を行い、ポンチ頭部の平らな板面上に等二軸引張り ($\beta=1$) から一軸引張り ($\beta=-0.45$) までの範囲内でひずみ比が異なる二、三の変形経路を作り出し、成形限界の向上に対する変形様式 (ひずみ比 β) の影響を調べた。具体的には、まず成形の途中で半成形成品をいったん取りはずし、板の両面に生じている表面凹凸を #200~#1000 の紙やすりで研磨して、素板の初期粗さ ($R_{max}=1.6 \mu\text{m}$) とほぼ同じ程度の粗さに仕上げた。次に、再び同一ひずみ比のもとで成形を進めていき、その後の表面粗さの発達状況と成形限界の向上程度を詳細に調べた。

板面内のひずみは、試験片の中央部に 2 mm 間隔の標線を描き、変形前後の標線間隔の変化をデジタル顕微鏡で測定して求めた。また、試験片に破断が生じた場合には、破断部に隣接する標線間のひずみを測定し、これを破断ひずみ ϵ_f とした。

表面粗さの測定には、触針式表面形状測定機を用い試験片中央の自由表面部分を、最大主ひずみ ϵ_x 方向に測定した。

3.2 成形限界に対する表面あれ除去時期の影響

成形中のどの時期に表面粗さを除去すれば成形限界が最も大きく向上するかを知るために、表面粗さ除去時のひずみをいろいろと変化させ、その後の粗さの発達状況と成形限界ひずみを測定した。得られた結果の数

例を図6に示す。図から明らかなように、表面粗さ除去後においても、 R_{max} は変形の進行に伴って単調に増大する。そして、粗さの増加割合は粗さ除去前後でほとんど変わらない。ただし、粗さが急増し始める (局部くびれの開始に対応する) ひずみは、粗さ除去時のひずみが大きいほど大きくなる傾向を示す。

いま、表面粗さ除去時のひずみを ϵ_s 、表面粗さを除去した場合としない場合の成形限界ひずみ (破断時のひずみ) をそれぞれ ϵ_f^* , ϵ_f とし、 ϵ_f^*/ϵ_f と ϵ_s/ϵ_f の関係を示すと図7のようになる。等二軸引張り ($\beta=1$) および平面ひずみ引張り ($\beta=0$) の場合には、粗さ除去時のひずみ ϵ_s が大きいほど成形限界が向上し、その効果は破断ひずみ ϵ_f の約 80 % 程度のひずみで粗さを除去した場合に最大になる。しかし、一軸引張り ($\beta=-0.45$) の場合には、どの時点で粗さを除去しても成形限界はほとんど変わらず、表面粗さ除去の効果はほとんど見られなかった。

3.3 成形限界の向上と変形様式に関連 図8は、等二軸引張りから一軸引張りまでの各種変形様式下において、表面粗さ除去の効果が最も大きく現れた場合の結果を取り出して示したものである。図には、比較のために表面あれを除去しない従来の成形法に対する成形限界線も併示してある。図より、表面粗さの除去による成形限界の向上は、 $\epsilon_x > 0$, $\epsilon_y \geq 0$ のいわゆる張出し領域において特に顕著であることがわかる。このような傾向は、図5に示したシミュレーションの結果と同様である。

最後に、銅板 (板厚 1 mm, $n=0.46$, $r=0.96$) を使用

表1 アルミニウム板の引張特性値 ($\sigma=F_{en}$)

F	(MPa)	185
n		0.30
r		0.84
Ultimate tensile strength	(MPa)	95
Total elongation (%)		42

図5 くびれ発生限界に対する表面粗さ除去の影響 (計算結果)

図6 ひずみの進行に伴う表面粗さの発達 (実験結果)

図7 成形限界に対する表面あれ除去時のひずみ ϵ_s の影響

図8 表面粗さを除去した場合の成形限界の向上

図9 表面粗さを除去した場合の成形限界の向上

して同様の実験を行ってみた。その結果、図9に示すように、アルミニウムの場合と同様の効果が期待できることがわかった。

4. 結 言

以上、アルミニウム薄板の平頭ポンチ張出しを対象にして、成形限界の向上に対する表面あれ除去の効果を剛塑性有限要素法によるシミュレーションと実験の両面から検討した。その結果、次のことがわかった。

成形の途中段階でいったん表面粗さを除去したのち再び成形を進めていけば、表面粗さを除去せずに成形を続けていく場合よりも、成形限界をかなり向上させることができる。成形限界の向上は張出し領域において顕著であり、特に等二軸引張状態に近づくにつれて大きくなる。

終わりに、有益なご討論をいただいた本学 森謙一郎助手、および実験に協力された卒研 小畑誠司〔現・ソニー(株)〕、中村純一郎〔現・日本電装(株)〕、藤

田昭人〔現・ブラザー工業(株)〕、吉中忠明〔現・東洋紡(株)〕の諸氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 小坂田・大矢根, 機論, 36-286 (昭45), 1017.
- (2) 小林・村田・石垣・阿部, 塑性と加工, 11-114 (昭45), 495.
- (3) 福田・山口・坂野・高倉, 塑性と加工, 15-167 (昭49), 994.
- (4) 河合・中村・鶴飼, 機論, 51-468, C (昭60), 2100.
- (5) 山口・西村・高倉・福田, 塑性と加工, 21-231 (昭55), 351.
- (6) Yamaguchi, K., Nishimura, S., Takakura, N. and Fukuda, M., *Proc. 4th ICPE*, (1980), 155.
- (7) Wilson, D. B., Robert, W. T. and Rodrigues, P. M. B., *Metall. Trans.*, A, 12-9 (1981), 1595.
- (8) 高倉・山口・小畑・福田・森, 機論, 51-461, C (昭60), 172.
- (9) 高倉・山口・小畑・福田, 機論, 51-469, C (昭60), 2364.
- (10) 木下・森・山口・福田, 第32回塑加連合講演会講演論文集, (昭56-11).
- (11) 阿部・長岐・赤瀬, 機論, 50-454, A (昭59), 1236.