論文

軽金属薄板へのボス成形における ひけの発生特性と抑止策

村上 碩哉* 佐々木文吾* 米岡 進**

大竹 尚登* 安原 鋭幸*

Method for Preventing Dimple Defects on Light Sheet Metal in Boss Forming

Hiroya MURAKAMI, Bungo SASAKI, Susumu YONEOKA

Naoto OHTAKE and Toshiyuki YASUHARA

(Received on April 5, 2006)

Press forging is a method for forming bosses by extruding a thin sheet metal into small holes of a die. Bosses formed on cases made of a light sheet metal make it possible to decrease the weight of mobile devices, for example, mini-disc players and digital cameras. However, when the material is too thin, dimple defects often appear on the reverse surface of the boss, which becomes the design surface, shortly after the beginning of the forming process. In this study, we investigate the deformation properties of bosses and dimples by experimental observations and finite element analysis, and methods for preventing dimple generation are described. When a boss is formed with a diameter of 5 mm on a sheet metal with a thickness of 1.2 mm, the maximum boss height without dimple defects is improved from 0 to 2.5 mm.

Key words: boss forming, press forging, weight reduction, dimple, light metal

1. 緒言

モバイル機器の筐体・ケースは質量の全体に占める割合が高いため、その軽量化は大きな課題である。筐体の軽量化と部品点数の削減のために、軽金属薄板を面内で加圧して薄肉化するとともに、余肉でボスを成形するプレスフォーミング法が開発されている¹⁾。プレスフォーミング法の利点として、以下の点が上げられる。

- ・ボスなどの一体成形により、他の部品との位置決めや締結が容易
- ・薄肉加工による軽量化が可能
- ・シャープなコーナー成形による意匠性の向上
- ・コーナーの材料充満による剛性向上

Fig. 1 にプレスフォーミングにより成形された筐体を示す。筐体の内部にボスが成形されているのが見てとれる。しかし、プレスフォーミングを用いて薄板にボスを成形する場合に、板厚とボスのサイズに応じてボスの裏面にひけが発生する。筐体は意匠製品であり、ひけ発生を抑止は重要である。これまでに実用化された製品ではひけの発生する範囲外であったり、表面処理でひけを消していたものと思われる。

このひけに関しては、鍛造品については工藤²⁾ によって

Fig. 1 Example of bosses applied for mobile device cases

報告されており、また近藤³⁾ らはひけを利用してフランジ付き中空品を鍛造で得る方法を示している。また、森⁴⁾、小坂田ら⁵⁾ は、ひけの発生を実験とシミュレーションで報告している。しかし、その発生条件やその抑止法に関しては検討されていない。このひけは筐体などの外装部品の場合には意匠上大きな問題となるが、筐体の薄肉化に伴って、ひけはますます発生しやすくなる。

本報告はひけの発生条件を明確にし、ひけを低減させる方法を提案するものである。

2. 実験、解析方法

Fig. 2 に本研究で用いるボス成形実験用金型の加工部の概略図を示す。内径20mm のコンテナ内に直径5mm の穴のあいたダイを挿入している。離型の容易さを考慮して、ダイには10° のテーパを設けてある。パンチとダイの間に挿入した直径20mm、板厚1.2mm の試験片を加圧し、ボス

*東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1
Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

**NTT ファシリティーズ 〒108-0023 東京都港区芝浦 3-4-1
NTT FACILITIES, 3-4-1 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023

Fig. 2 Schematic of experimental unit

Table 1 Experimental condition

Test piece material	A1050-O
Test piece diameter	ϕ 20 [mm]
Test piece thickness	1.2 [mm]
Boss diameter	ϕ 5.0 [mm]
Lubricant	G6216FA (1.2 [mm ² /s])

Table 2 Analysis condition

Analysis software	DEFORM-2D
Number of mesh	1000
Punch speed	1.0 [mm/s]
Time step	0.01 [s]
Friction condition	Shearing friction $m=0.3$

を成形する。電子機器の筐体としてはマグネシウムの利用を想定しているが、ここではモデル材料としてアルミニウムを選択した。実験条件を Table 1 に示す。また、成形品の評価には、ボス高さ（ダイ面からの押し出し高さ）とひけ深さの関係を求めた。

解析には有限要素法解析プログラム DEFORM-2D (SFTC 社) を用い、軸対称モードとした。摩擦条件を決定するために摩擦係数を変更して解析を行い、実験結果と比較した。その結果を Fig. 3 に示す。実験結果はほぼ $m=0.3$ に一致しており、以下の解析では摩擦条件をせん断摩擦とし、せん断摩擦係数 $m=0.3$ とした。解析条件を Table 2 に示す。

3. 平板のボス成形におけるひけ発生特性

3.1 実験結果

Fig. 4 に板厚 1.2mm におけるボスとひけの外観を、Fig. 5 にボスの断面を示す。ボスの裏面に U 字状の大きなひけが生じている。ひけは加工開始直後から発生する。ボス高さが 3.0mm のときひけ深さは約 2.5mm である。

3.2 解析結果

Fig. 6 に板厚 1.2mm の解析結果を示す。ひけの形状は Fig. 5 に示した実験結果とよく似ている。

ボス高さとひけ深さについて、実験結果と解析結果の比較を Fig. 7 に示す。解析結果は実験結果に比較的良好に一致している。この結果から FEM 解析はひけ抑止の検討（パラメータサーベイ）に有効であることが期待される。

そこで、以下では FEM 解析にてひけの抑止法の事前評価を行い、実験にて確認を行う。

Fig. 3 Identification of friction coefficient by comparison with experimental result

Fig. 4 Boss and dimple defect

Fig. 5 Cross-section of formed boss

Fig. 6 Calculated results of cross-section in boss forming

Fig. 7 Comparison between experiment and calculation (t=1.2mm)

Table 3 Dimensions of preformed cone

Cone diameter d [mm]	Cone height h [mm]
7.0	3.6
8.0	2.8
10	1.8

Fig. 8 Die for preform

4. ひけ抑止策

4.1 予備成形を用いた二段階成形

ひけはボスに相当する材料が不足するためであろうとの考えから、あらかじめボスの反対側を予備成形により盛り上げておき、反転してボスを成形する方法を検討した。予備成形の形状は円錐形状とし、形状は **Table 3** に示すように、円錐直径 d を 7, 8, 10mm, 円錐高さ h はそれぞれ 3.6, 2.8, 1.8mm とした。この円錐の体積は、目標とする直径 5 mm, 高さ 3 mm のボスの体積に一致させている。予備成形も **Fig. 8** に示す実験型のダイを交換して、プレスフォーミングにより行った。

Fig. 9, **Fig. 10** に実際に予備成形を行った試験片の外観と断面の写真を示す。予備成形を行うことにより, **Fig. 9(b)** に示すように円錐の裏面にひけが発生する。しかし、このひけは実際の製品の内側の面であり、意匠上の問題とはならない。

Fig. 11 に直径 $d=8\text{mm}$ の円錐を予備成形した後ボス成形を行った解析結果を示す。ひけが発生することなくボス高さ約 2.0mm まで成形ができており(b), 予備成形はひけ抑止に効果がある。しかし、材料がボス成形部を除くコンテナ内に充満すると同時にひけが発生している(c)。

予備成形を行った後ボス成形を行った実験結果を **Fig. 12** に示す。ボス高さ 2.0mm まで成形された段階では表面中央部にひけはほとんど観察されない。なお、予備成形の跡がリング状に残っているが、これは今回 **Fig. 8** に示す円錐の肩の半径, R_p を 1 としたためで、この R を大きくすることで解決すると考えられる。例えば、 $R_p=4$ としてボス成形を行った試験片を **Fig. 13** に示す。リング状の模様は残っているが、リング状の成形痕は消えている。

Fig. 14 にこのときのボス高さとひけ深さの関係を予備成形なしのものと比較して示す。ボス高さ 2.0mm までひけはほとんど発生せず、またボス高さ 3.0mm おいても予備成形がない場合は 2.5mm あったひけ深さが 0.07mm に留まっており、予備成形を行うことはひけの抑止に大きな効果があることが確認された。

(a) Preform side

(b) Back side of preform

Fig. 9 Formed specimen with preform $d=\phi 8$ **Fig. 10** Cross section of preforming (Preform $d=\phi 8\text{mm}$)

(a) Boss height : 0mm, dimple depth : 0mm

(b) Boss height : 1.11mm, dimple depth : 0mm

(c) Boss height : 2.18mm, dimple depth : 0.047mm

(d) Boss height : 3.08mm, dimple depth : 0.07mm

Fig. 11 Calculated results of boss forming with preform

予備成形を行うことでひけを低減できることが確認されたが、ボス成形部を除くコンテナ内に材料が充満すると同時にひけが発生している。この理由を検討するために半径方向の圧縮応力に着目した。 **Fig. 15** にパンチストローク

(a) Boss side (b) Back side of boss

Fig. 12 Experimental results of boss forming with preform ϕ 8 (Boss height : 3.1mm)

と半径方向圧縮応力の解析結果を示す。ひけの発生とともに圧縮応力が急増しており、ひけはこの半径方向の圧縮応力により中央部の材料が座屈することによって発生すると考えられる。

Fig. 16 に予備成形の径を変更したときの実験結果を示す。何れの径においてもひけの低減効果が認められるが、径の小さいものがよりひけが小さくなっている。これは、円錐の径が大きいものはボスの外へ流れる材料が多くなるためであると考えられる。

予備成形の径をさらに小さくした場合は、円錐の体積を一定としているため円錐の高さが高くなり、プレスフォーミングにより予備成形を行うことが成形荷重の点などから困難になると予想される。また、本成形を行う際にもせん断が生じ、ボスを成形することができないと予想されるため、円錐の径は 7mm 程度が適当であると考えられる。

4.2 プラトー

ボス成形部を除くコンテナ内に材料が充填することにより、半径方向の圧縮応力が急増し、ひけが発生する。そこで、ボスの周囲にリング状の盛り上がり（プラトー）を設けることにより、材料の逃げを確保しコンテナ内への充填を遅らせることにより、ひけの抑止が期待できる。

プラトーの寸法を **Fig. 17** に示す。内径はボス径と同じ 5mm、外径は予備成形の円錐の径と同じ 8mm、高さは 0.4mm とした。また、各稜には 0.5mm の R がついている。

Fig. 19 に解析結果を予備成形のみの結果と合せて示す。プラトーを用いることによりボス高さ 2mm までひけが発生していないが、その後急激にひけが成長し、プラトーがない場合よりもひけは大きくなっている。これはプラトーによってボス周囲の板厚が薄くなったためであると考えられる。

Fig. 20 に実験結果を▼印で示す。解析結果と同様にひけの発生が遅れており、ボス高さ 2.5mm でひけ深さは約 0.015mm と浅いが、その後急激に成長する可能性がある。

4.3 下穴付きボス

ボスの使用用途の一つとして、筐体の組み合わせのためのねじ山があげられる。このねじ山として用いる場合には、ボス中央部の体積は不要となる。そこで、ボスにねじの下穴を同時成形することにより、材料の座屈変形を抑制しようとした。

円錐状予備成形と下穴付きボスを組み合わせて実験を行った。下穴はボス成形用ダイの中に下穴成形用のコマを挿入し、ボスと同時に成形する。成形品のボス断面を **Fig.**

Fig. 13 Back side of boss with $R_p=4mm$ **Fig. 14** Effects of preform on relationship between dimple depth and boss height **Fig. 15** Transition of radial compression stress **Fig. 16** Effects of preform shape on boss height

18 に示す。このときのボス高さとしひけ深さの関係を **Fig. 20** に▲印で示す。ボス高さ 2.5mm でひけ深さは約 0.015mm と予備成形のみの場合の約 2 分の 1 に低減されており、ボスに下穴を同時成形することはひけの低減に効果が認められる。

Fig. 17 Dimension of plateau

Fig. 18 Cross section of boss with hole for screw

Fig. 19 Calculated results of plateau

Fig. 20 Effects of method for preventing dimple defects

Fig. 21 Effects of backward extrusion on radial compression stress

4.4 後方押し出し

ひけの発生原因と考えられる半径方向の圧縮応力を低減するために、パンチ径を 20mm から 18mm に変更することによってボスを成形しながら外周部の材料を軸方向(後方)に押し出し成形する場合を検討した。後方押し出しにより、材料の外周部に逃げを設けることになり、圧縮応力が低減されると予想される。

解析結果では、ひけの発生は確認されなかった。Fig. 21 に、このときのパンチストロークと半径方向圧縮応力の関係を予備成形のみのものと比較した結果を示す。後方押し出しを用いることにより、圧縮応力の急増が抑制されている。この圧縮応力が低減されたことによりひけの発生が抑制されたものと考えられる。

実験結果を Fig. 20 に■印で示す。ひけ深さは 0.02mm 程度まで減少しており、後方押し出しを行うことはひけの抑止に大きな効果がある。

5. 結 言

1. プレスフォーミングを用いてボスを成形する際にはボスの裏面にひけが発生する。板厚 1.2mm の薄板に高さ 3mm のボスを整形した場合には、ひけ深さは 2.5mm に達する。
2. 円錐形状の予備成形を行うことで、ひけ深さを 0.07mm 程度まで減少させることができる。
3. ひけは半径方向の圧縮応力が急増することにより材料が座屈変形することにより発生する。よって以下の方法を用いることによりひけを低減することができる。
 - 1) ボスの周囲にリング状の盛り上がり(プラトー)を設けることにより圧縮応力の急増を遅らせる。
 - 2) ボスにねじの下穴を同時成形することにより材料の座屈変形を拘束する。
 - 3) 後方押し出しを行うことにより半径方向の圧縮応力を低減する。

参 考 文 献

- 1) 関伊佐夫・山谷賢二・関新治・発地豊・宮里邦彦・山浦秀樹：素形材, **44**-12(2003), 15-18.
- 2) 工藤英明：東大航研集報, **1**-4(1959), 192-244.
- 3) 近藤一義・平岩正至・中村保・松井達彦・大石孝治：機論 C, **47**-421(1981), 1224-1231.
- 4) 森謙一郎：塑性と加工, **40**-464(1999), 642-846.
- 5) 小坂田宏造・花見眞司・荒井直人：同上, **41**-477(2000), 1026-1030.