製品設計と型設計の統合最適化による フライホイールの低パンチ荷重ネットシェイプ加工法

中西 賢二* 松田 豪彦**

上谷 俊平* 牟禮 雄二**

Low-Punch-Load Net Shape Forging of Flywheel Achieved by Integrated Optimization in Product Design and Die Design

Kenji NAKANISHI*, Takehiko MATSUDA**,

Shunpei KAMITANI* and Yuji MURE**

(Received on April 28, 2008)

A small flywheel can be formed directly from a cylindrical workpiece by cold axisymmetric upsetting with lateral extrusion. The authors found that an effective material flow for fulfilling a die cavity in the above die forging can be generated by placing a stepwise cavity on the bottom die plane at the peripheral section. When the dimensions of the hollow plane formed on the disk product by the above die configuration are optimized in the shape and die designs of a flywheel, the net shape forging of a flywheel can be achieved by semi-core forging with the above improved material flow. The advantage of the above forming technology is that no severe increase in punch load, observed in core forging at the final stage of the forming process, occurs, and die life can be elongated in net shape forging. The surface condition and inner strain condition of the product were also investigated by observing the products and FEM, and sufficiently good conditions were confirmed

Key words: tool/die, closed-die forging, optimum design, upsetting with lateral extrusion, net shape forging.

1. 緒言

回転ノブ、フライホイールなどの回転体機能部品は、冷間側方押し鍛造加工法を適用することにより円柱素材からプレス1工程で成形加工できる。同加工法の問題点は成形過程終期に型と材料間摩擦拘束が顕著となり、塑性流れの閉塞による成形品外縁角部における材料未充填および型寿命低下に関連するパンチ荷重上昇が起こる可能性を持つ点である。このことに関して、筆者らは冷間平面ひずみおよび軸対称側方押し鍛造加工の実験・解析を行い、型の内部底面外縁部に適切な段差空間を設けることにより前記問題点が解決できることを報告した^{1),2)}。

上記段差空間を有する型で成形した円板形状品に成形される窪み面はフライホイールの軽量化設計³⁾で考慮するホイール内周部の窪み面に相応させることができる。また、成形品外縁角部の材料充填が良好となる塑性流れの特徴を活かして、角部面取り形状を型で転写成形するかわりに塑性流動中の材料自由表面で創成すると、型の負荷を低減したネットシェイプ加工^{4),5)}が実現できると考える。

本研究では、上記観点にもとづいた製品設計と型設計の統合最適化により、小型機器用フライホイールの低パンチ荷重ネットシェイプ加工を実現した。

2. 側方押し鍛造加工装置と成形品形状の特徴

軸対称側方押し鍛造加工装置、円柱状素材および円板形状成形品の概略図をFig.1に示す。同装置はパンチg、割型aおよびb、クランプcおよびdで構成されている。割型を組み合わせたとき、型内部直径 D_o (mm)、側壁高さ H_o (mm)の円筒形状型空間が形成される。fは半径 R_i (mm)、厚さ H_i (mm)の塑性流れ制御用円板である。同円板は型底面外縁部に円環状段差空間を形成して成形品外縁角部への材料充填を良好にする役割を持つ^{1),2)}。パンチ直径、フライホイールボス部直径および円柱素材の直径は型・工具設計上の微小なすきま分を除くと同一径 d_o (mm)である。

型に装填した直径 d_o (mm)、高さ L_o (mm)の円柱状素材は、油圧プレスを用いたパンチの加圧押し込みによって、型空間内で直径 D_o (mm)、厚さ H_o (mm)のフライホイール本体部分に成形加工される。

上記加工装置はSKD11で製作し、所定の熱処理を施した。本加工装置による成形品形状の特徴を以下に記す。

型内部底面が平坦な場合と型内部底面に塑性流れ制御用円板を設置して底面外縁部に円環状段差空間を設けた場合

* 鹿児島大学工学部 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40
Faculty of Engineering, Kagoshima University
1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan.

** 鹿児島県工業技術センター 〒899-5105 霧島市隼人町小田 1445-1
Kagoshima Prefectural Institute of Industrial Technology
1445-1 Oda, Hayato, Kirishima City, Kagoshima 899-5105, Japan.

a,b: Split dies/c,d: Clamp/e: Stepwise cavity
f: Flow guide plate/g: Punch

Fig. 1 Schematic sketch of the forging apparatus, workpiece and product

の成形品写真および成形品外縁角部（上角部 A, 下角部 B）拡大写真を **Fig.2** に示す。成形品の素材は工業用純アルミニウム(A1050)焼なまし材（焼なまし後の硬さ HV=22.4）で、直径 $d_o=16$ mm（型内径とのすきまを考慮した実直径 15.9 mm）、長さ $L_o=40$ mm（Fig.1 参照）の円柱形状である。

成形に用いた型の内部寸法は $d_o=16$ mm, $D_o=30$ mm, $H_o=10.4$ mm あるいは $H_o=7.4$ mm であり、塑性流れ制御用円板の寸法は $R_i=13.2$ mm, $H_i=3$ mm である（Fig.1 参照）。成形時のパンチ速度は約 4.6 mm/s であった。また、パンチ、型および材料間の潤滑剤としてパラフィン系鉱油を用いた。

Fig.2 の(a) は $H_o=10.4$ mm で型底面が平坦面の型による成形品の写真を示す。成形品側方押し部外縁上角部 A 及び下角部 B に型と材料間の摩擦拘束に由来する欠肉箇所が残存することがわかる。(a)の場合、加工終期にパンチがほとんど停止状態でパンチ荷重が急増する塑性流れの閉塞状態が認められた。なお、パンチ荷重が 125 kN になるまで加圧したが、成形品外縁上部の充填は進行しなかった。

(b)は $H_o=7.4$ mm で型底面が平坦面の型による成形品の写真である。前出の(a)と比較して側壁高さ H_o が短く、型と材料間の摩擦拘束が少なくなり、成形品側方押し部外縁上下角部の素材充填は (a) の場合よりも良い。

(c)は側壁高さ $H_o=10.4$ mm の型空間に半径 $R_i=13.2$ mm（直径 26.4 mm）、厚さ $H_i=3$ mm の塑性流れ制御用円板を設置した型による成形品写真を示す。この場合、型の側壁高さが(a)と同じ 10.4 mm にもかかわらず、成形品外縁上下角部の素材充填が極めて良い。また、成形加工品型底面側に半径 R_i 、深さ H_i の窪み面が成形される。上記(b)および(c)の場合、成形終了時に観測されるパンチ荷重最大値は 105 kN であり、塑性流れの閉塞状態は認められなかった。

以上の実験結果を参照して、下記 2 要件のもとでフライホイールの形状設計と型設計の統合最適化をはかり、型の負荷を低減させたネットシェイプ成形加工を実現した。

要件 1. 成形品角部の面取り形状を型による転写で成形

Fig. 2 Mutual comparisons of the outer profiles of product (Lower photographs show the enlarged corners, A and B.)

するかわりに、型空間角部に向かう材料の塑性流れを良好にして、塑性流動中の材料自由表面によって創成する。

要件 2. 型空間角部に向かう材料の塑性流れを良好にするために型底面に設置する塑性流れ制御用円板によって成形品型底面側に成形される窪み面をフライホイールに軽量化を目的として設ける窪み面に相当させる。

3. 成形品設計と型設計の統合最適化による型の負荷を低減させたネットシェイプ加工の実現

フライホイールの部品設計と型設計の統合最適化手順のフローチャートを **Fig.3** に示す。

手順①の仕様書策定に關係する主要な式³⁾を式(1),(2)に示す。フライホイールは回転機械の入・出力トルクの変動を平滑化する機能を持つ円板形状部品で、式(1)で計算する慣性モーメント I を満足する必要がある。

$$I = \frac{\Delta E}{\omega_o^2 \delta}, \quad \text{ここで } \omega_o = (\omega_1 + \omega_2)/2 \quad (1)$$

式中、 ΔE は回転角速度線図において、1 サイクルの中で、最大回転角速度 ω_1 となる回転角度と最小回転角速度 ω_2 となる回転角度間におけるエネルギー変動量、 δ は速度変動率を意味する。 δ は 1/15~1/200 の範囲で適切な値³⁾に設定する因子であり、値が小さいほど回転は平滑となる。

フライホイールの慣性モーメント I を計算する式を式(2)に示し、式中の変数を説明する図を **Fig.4** に示す。

$$I = \int_{r_1}^{r_2} r^2 dm = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi \rho b r^3 dr \quad (2)$$

式中、 r は半径、 dm は微小領域の質量、 ρ は素材の密度、 b は半径 r におけるフライホイール厚さを意味する。

ここでは、アルミニウム素材（ $\rho=2690$ kg/m³）で製作できる、慣性モーメントが $I=2.048 \times 10^{-6}$ kg・m² で直径 30 mm、厚さ 9.5~11.0 mm の小型機器用フライホイールの設計・製作を対象とした製品設計と型設計の統合最適化を行った。

フローチャートの手順①で定めるボス付フライホイールの設計仕様書を **Table 1** に示し、成形品形状を **Fig.5** に示す。手順②~④で得た計算および実験結果を **Fig.6** に示し、内容を以下に説明する。

手順②では、設計仕様書に準じて所要慣性モーメント値

Procedure ①

Determination of the specifications, involving the moment of inertia, dimensions and material, of the flywheel with boss part.
(The flywheel has the hollow area with a constant depth, so required moment of inertia is satisfied with less weight.)

Procedure ②

Calculation of the weight and thickness of a flywheel with regard to radius of the hollow area with a constant depth.
Determination of the optimum values of the above radius and thickness satisfying the required moment of inertia with less weight.

Procedure ③

Experimental forming simulation corresponding to the procedure ②
(The radius and thickness of a flow control disk placed in a die correspond to the radius and depth of the hollow formed in a product.)
Measurement of the details of outer profiles of the products, forming loads, and calculation of the values of weight and thickness of the flywheel satisfying the required moment of inertia.

Procedure ④

Integrated optimization of the product design and die design referring to the results of the procedure ② and procedure ③

Procedure ⑤

Determination of the dimensional details of the product and the die achieving the net shape forming with low punch load.

Fig. 3 Flow chart explaining the procedures of integrated optimization in product design and die design achieving the net shape forming with low punch load

Fig. 4 Some parameters in the eq.(2)

$I=2.048 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ を満足すると同時に、軽量化を目的とした一様深さの円形窪み面を持ったフライホイールの形状設計³⁾を行った。ここでは、円板外縁角部 (Fig.5 の A および B 部分) の面取り寸法を $C=0.5 \text{ mm}$ として、深さ $H_i=3 \text{ mm}$ で半径 $R_i(\text{mm})$ が 5, 9.5, 10.3, 10.9, 11.5 および 13.2 の各円形窪み面を設けたフライホイールの質量 $W(\text{g})$ と厚さ $H_o(\text{mm})$ を算定した。上記条件で定めたボス付フライホイールの軸方向縦断面図を Fig.6 (a) に示す。なお、 $R_i=0 \text{ mm}$ はフライホイールに窪み面を設けないことに相当する。

窪み面を設けたフライホイールの質量 $W(\text{g})$ を窪み面を設けない場合の質量 $W_o(\text{g})$ との比、すなわち相対質量 (W/W_o) で評価して軽量化を確認した。相対質量 (W/W_o) とくぼみ面半径 R_i の関係を Fig.6 (c) の (I) に実線で表す。なお、 $R_i=14 \text{ mm}$ の破線は、フライホイール外縁円環部分 C が設計仕様書で 1 mm 以上に指定されていることから、 R_i の最大値を表す。フライホイールの厚さ H_o と窪み面半径 R_i の関係を Fig.6 (c) の (II) に実線で表す。図中の $H_o=9.5 \text{ mm}$ と 11.0 mm の破線は設計仕様書に示すフライホイール厚さの最小値と最大値を表し、 $R_i=14 \text{ mm}$ の破線は R_i の最大値を

Table 1 Specifications of the flywheel with boss part

The terms attached the mark, *, are optimization parameters.

Moment of inertia	$I = 2.048 \times 10^{-6} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
Material	Aluminum
Bulk part	Diameter: $D_o = 30 (\text{mm})$, Thickness*: $H_o = 9.5^{+1.5}_0 (\text{mm})$
Hollow part	Radius*: $R_i < 14 (\text{mm})$, Depth: $H_i = 3 (\text{mm})$
Boss part	Diameter: $d_o = 16 (\text{mm})$, Thickness: $H_b = 2 (\text{mm})$
Axle	Diameter: $A_x = 6 (\text{mm})$
Corners A and B in Fig. 5	Corner cut*: Within $C1.2 (\text{mm})$
Peripheral circular section C	Flat circular side*: $C_p > 1 (\text{mm})$, Side wall height of the hollow*: $C_h > 1 (\text{mm})$ Tapered connecting zone C_z *: Free formation by plastic flow

Fig. 5 Dimensions of the flywheel

表す。Fig.6 (c) の (I) から、窪み面半径 R_i が $10.5 \sim 11.5 \text{ mm}$ の範囲で、フライホイールが最も軽量となることがわかる。また、Fig.6 (c) の (II) から、フライホイール厚さ H_o は R_i が $10.5 \sim 11.5 \text{ mm}$ の範囲で $H_o=10.2 \sim 10.5 \text{ mm}$ の範囲となることがわかる。

手順③では、手順②におけるフライホイールの軽量化設計に相応させた一連の成形加工実験を行い、成形過程におけるパンチ荷重を計測した。同時に、成形品形状、特に成形品外縁角部の輪郭形状 (Fig.5 の角部 A, B の形状および外縁部 C の形状を規定する C_p, C_h) を計測した。

実験装置、加工素材、パンチ速度およびパンチ、型および材料間の潤滑剤は前記 2 章に述べた通りである。塑性流れ制御用円板の厚さ H_i と半径 R_i は手順②で定めた軽量化が顕著に認められる窪み面形状を参照して、 H_i を 3 mm として $R_i(\text{mm})$ を 10.3, 10.9, 11.5, 13.2 の 4 種類に変化させた。

上記の型を用いた側方押し鍛造加工実験で得た成形品形状を Fig.6 (b) の (b)-1 に示す。なお、図中の $R_i=0 \text{ mm}$ は塑性流れ制御用円板なしの型を用いた実験結果である。同図 (b)-1 において、側方及び斜め方向から見た成形品写真を (I) に示し、成形品の輪郭形状 (中心軸縦断面形状) を (II) に示す。成形時の最大パンチ荷重 P_m は $R_i=0 \text{ mm}$ の場合 $P_m=125 \text{ kN}$ 、また、 $R_i=10.3 \sim 13.2 \text{ mm}$ の場合 $P_m=105 \text{ kN}$ であった。なお、加工終期における塑性流れの閉塞現象が $R_i=0 \text{ mm}$ の型を用いた成形加工のパンチ荷重-パンチストローク曲線に認められたが、塑性流れ制御用円板を設置した型による成形加工では上記現象は認められなかった。

以上の実験で明らかにした、塑性流れ制御用円板の半径

Fig. 6 Calculation and experimental data involved in the procedures of integrated optimization in product design and die design achieving the net shape forming with low punch load

R_i が成形品外縁角部 A および外縁部 C (Fig.5 参照) の形状に及ぼす影響を Fig.6 (b)の(b)-2 に示す. なお, 成形品外縁角部 B (Fig.5 参照) の軸方向縦断面形状は $R_i=10.3\sim 13.2\text{mm}$ の塑性流れ制御用円板を設置した型による成形加工では直角であった. すなわち, 角部 B の形状は $R_i=10.3\sim 13.2\text{mm}$ の全ての範囲で設計仕様書の規定値を満足する.

成形品外縁角部 A の形状は成形円板面に沿った半径方向直線上と側面に沿った直線上で計測した $x\text{ (mm)}$ と $y\text{ (mm)}$ で表記した. x と y のそれぞれと R_i の関係を(b)-2 の(I)に示す. 図中, $x=y=1.2\text{mm}$ の破線は設計仕様書に示された面取り寸法上限値を示す. これから, x および y は R_i が $11.2\text{mm}\sim 14\text{mm}$ の範囲で設計仕様書の面取り寸法 $C\leq 1.2\text{mm}$

を満足することがわかる.

外縁部 C の輪郭形状を規定する $C_p\text{ (mm)}$ および $C_h\text{ (mm)}$ のそれぞれと R_i の関係を (b)-2 の(II) に示す. 図中, $C_p=C_h=1\text{mm}$ の破線は設計仕様書に示された下限値を示し, $R_i=14\text{mm}$ の破線は R_i の最大値を示す. これから, C_p および C_h はいずれも R_i が 12.3mm 以下であれば設計仕様書に合致することがわかる. なお, Fig.5 の C_z 部は C_p と C_h で規定する端面平坦部と窪み部側面を塑性流れによる綺麗な自由曲面で連結した形状となる.

以上, 成形品外縁角部 A, B および外縁部 C の面取り形状は, 図 (b)-2 の(I) および (II) から塑性流れ制御用円板の半径 R_i を $11.2\sim 12.3\text{mm}$ に設定すると, 材料の変形面が設

計仕様書の面取り寸法に相応する形状となることがわかった。次に、実験で取得した輪郭形状（とくに外縁角部 A, B および外縁部 C の輪郭形状）のフライホイールが所要慣性モーメントを満足するために必要なフライホイール厚さ H_0 (mm) およびフライホイール質量 W (g) を算定した。

以上の実験・解析で定めたフライホイール質量 W (g) を窪み面の無いフライホイール質量 W_0 (g) との比で表した相対質量(W/W_0) とフライホイール厚さ H_0 (mm) を縦断面形状とともに Fig.6 (b) の (b)-3 に示す。さらに、上記実験・解析で得たフライホイールの相対質量(W/W_0)および厚さ H_0 のそれぞれと塑性流れ制御用円板半径 R_i の関係を Fig.6 (c) の (I) と (II) に丸印プロット点で表す。

手順④では、設計仕様書を満足する最も軽量のフライホイールを成形するための塑性流れ制御用円板の半径 R_i (厚さ H_i は 3 mm) と型の側壁高さ H_0 を決定した。すなわち、Fig.6 (c) の (I) に示す実線および丸印プロット点の両データから、(W/W_0)値が最も低くなる塑性流れ制御用円板の半径 R_i は 11.5 mm であることがわかる。また、Fig.6 (c) の (II) から R_i が 11.5 mm の場合、型の側壁高さ (フライホイール厚さ) H_0 は 10.7 mm であることがわかる。次に、成形品外縁角部形状を Fig.6 (b)-(2)の(I)および(II)を参照して定めた。すなわち、 $R_i=11.5$ mm における角部 A の面取り形状 x, y の各値は (b)-(2) の (I) から、 $x=1.0$ mm, $y=0.6$ mm となり、外縁部 C における C_p, C_h の各値は (b)-(2) の (II)から、 $C_p=1.6$ mm, $C_h=2.0$ mm と定まる。以上の x, y, C_p および C_h の各値はいずれも設計仕様書の条件を満足する。

手順⑤では、製品形状と型形状の詳細を確定した。すなわち、前出 Fig.1 に示す型の各設計寸法および Fig.5 に示す成形品の各設計寸法を Table 2 に示す。

Table 2 の寸法で製作した型によるネットシェイプ加工の実証実験を行った。素材の寸法は前記手順で寸法形状を定めた成形品の体積から体積不変の条件で算定した。直径 16 mm (型内径とのすきまを考慮した実直径 15.9 mm), 高さ 34 mm の素材および型から取り出した成形品の外観写

Table 2 Design parameters determined by the integrated optimization in the product design and die design, (unit: mm)

Design parameters in the die (refer to Fig.1)
$D_0=30, H_0=10.7, d_0=16, R_i=11.5$ and $H_i=3$
Design parameters in the product (refer to Fig.5)
$D_0=30, H_0=10.7, R_i=11.5, H_i=3, R_{0.8} \pm 0.2$ (at A), $C_h=2.0$ and $C_p=1.6$ (at C)
C_z (at C) and R (at B) are not necessary to define.

Fig. 7 Photographs of the workpiece and product

Fig.8 Punch load and punch stroke curve

Fig. 9 Effective strain distribution in the product calculated by FEM analysis program (DEFORM-3D™) with referring to the experimental results

真を Fig.7 に示す。成形品はバリの発生がほとんど無く、寸法形状実測値はすべて Table 2 の値に合致することを確認した。成形過程のパンチ荷重-ストローク曲線を Fig.8 に示す。成形は最大パンチ荷重 115 kN で完了した。また、成形品内部ひずみ分布を FEM 解析ソフト (DEFORM-3D) を用いて算定した。ここで、材料の変形抵抗は素材の常温変形抵抗試験データによって規定し、型と材料間の摩擦せん断係数 m の値は、計算で得る成形品形状が実形状と同じとなる、 $m=0.12$ を採用した。計算結果を Fig.9 に示す。同図から内部ひずみは良好な分布状態であることがわかる。

4. 結 言

側方押し鍛造加工法を適用した小型機器用フライホイールのプレス 1 工程による低パンチ荷重ネットシェイプ成形加工法を明らかにした。

本加工法では、型底面に設置した塑性流れ制御用円板により型空間角部に向かう材料の塑性流れを良好にして、成形品角部面取り形状を型で転写成形するかわりに塑性流動中の材料自由表面によって創成する。これにより最大パンチ荷重を低減させることができた。前記円板はフライホイール内周部に軽量化のための窪み面を成形する型となることから、設計仕様条件を満足する最も軽量のフライホイールの形状とその成形に用いる型を製品設計と型設計の統合最適化手順によって定めた。上記手順の実証実験を行い、良好なネットシェイプ成形品が得られることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 植村眞一郎・中西賢二・上谷俊平・山下康平：塑性と加工, **46**-532 (2005), 402-406.
- 2) 松田豪彦・中西賢二・上谷俊平・亀村佑輔：同上, **48**-555 (2007), 298-302.
- 3) 井澤實：増補版 機械要素の設計解析, (1980), 251-257, 山海堂.
- 4) 近藤一義：塑性と加工, **38**-438 (1997), 605-610.
- 5) 小坂田宏造：同上, **41**-477 (2000), 971-980.