エアハンマー鍛造における実働荷重と型面圧の測定

米山 猛* 三吉 宏治** 楯 智樹**

Measurement of Actual Load and Contact Stress
in Air-Stamp Hammer Forging

Takeshi YONEYAMA*, Koji MIYOSHI** and Tomoki TATE**

(Received on June 13, 2019)

The actual punch load, contact pressure, and frictional stress on the punch surface has been measured in air-stamp hammer forging. An example of stamping where the punch is inserted into the center of a circular cylinder in a circular die with flash land has been chosen for the detection of contact stress on the punch. The punch load was detected by fitting strain gauges on the side wall of the inner hole machined on the bottom surface of the punch. Pressure and friction sensors were installed on the top flat surface of the punch, the corner of the punch, and the flash land surface. In the stamping process where the work material is only pressed by the punch top, the pressure on the punch was nearly equal to the punch load divided by the top area of the punch. When the compressed bulged material came into contact with the outer side surface and the deformed material came into contact with the bottom of the punch, the friction on the corner of the punch increased. The punch load increased rapidly when the material filled the die cavity. The pressure and friction applied on the flash land surface increased as the flash thickness and temperature decreased with the progress of stamping.

Key words: forging, air-stamp hammer, load, pressure, friction.

1. 緒言

エアハンマー鍛造は、空気圧の補助を受けながら、ハンマーを落下させて熱間鍛造を行う歴史の長い技術である¹⁾。一つの金型を用いて、繰り返し打撃を行い、単純な形状の素材を変形させて最終形状までの製作を行う。最初の形状から最終形状に至るまでの打撃操作の習熟には 10 年を要すると言われている。作業者の習熟に依存した加工法であるが、設備コストが安いことから、現在でも熱間鍛造の大きな割合を占めている。

エアハンマー鍛造は、エアハンマーによる打撃を通じて加工を行うため、金型に対する負荷が高く、金型の損傷や摩耗が著しい^{2)~4)}。しかし、エアハンマー鍛造における加工荷重について計測されたものはなく、さらに加工時に金型にはたらく圧力や摩擦応力を計測した例もなかった。

そこで筆者らは、エアハンマー鍛造において実際にはたらく荷重や面圧（圧力と摩擦応力を含めて金型表面にはた

らく応力を面圧と呼ぶ）を測定することを目的として、熱間鍛造における金型面圧を計測するセンサを開発する⁵⁾とともに、据込み鍛造における型面圧の計測を行った⁶⁾。本研究ではさらにリング状部品の鍛造を対象として、エアハンマー鍛造時の荷重と工具面にはたらく圧力・摩擦応力の実測を行う。リング状の部品を取り上げた理由は、実際にエアハンマープレスを用いて鍛造を行う部品として基本的な形状を有していること、またポンチを円柱ピレットに押込む加工であるため、コーナ部に摩擦応力が大きくはたらくと考えられ、これを計測することで、コーナ部の摩耗に関わる何らかの知見が得られると期待したからである。またバリを出しながら鍛造を行うことから、バリランド部の面圧を計測することも試みた。

本報告では、リング形状部品のエアハンマー鍛造打撃において金型にはたらく荷重と金型表面にはたらく圧力・摩擦応力測定の結果を示し、鍛造過程にもなって発生する荷重や金型面圧と変形過程との関係について分析するとともに、バリ出し鍛造の特徴についても検討する。

2. 実験システム

2.1 鍛造対象と金型

鍛造対象としたリング状部品の寸法を Fig. 1 に示す。円柱状の素材に上下からポンチを押込みリング状の部品とす

* 金沢大学 設計製造技術研究所 〒920-1192 金沢市角間町
Advanced Manufacturing Technology Institute, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan.
E-mail: yoneyama@se.kanazawa-u.ac.jp

** コマツ生産本部 生産技術開発センタ 〒573-1011 大阪府枚方市上野3-1-1
Manufacturing Engineering Development Center, Komatsu Ltd.
3-1-1 Ueno, Hirakata-shi, Osaka 573-1011, Japan.

る。外径 118 mm，高さ 60 mm で，中央には先端直径 55.4 mm，テーパ角 14° の円錐台状のくぼみが上から深さ 29.9 mm，下から深さ 22 mm まで入ったものとなっている。材質は SCM420 である。

Fig. 1 Forging target

この部品を鍛造する金型構造を **Fig. 2** に示す。金型は上型と下型とに分かれ、厚さ 2 mm のバリランドを設けてある。上型を中心部のポンチと外側のポンチホルダとに分割した。これは、ポンチ先端部に圧力・摩擦センサを内蔵した後に出力検定が可能であり、またセンサ出力とポンチ荷重とを照合しやすいからである。ポンチにかかる荷重は、ポンチの根元中心部に円筒状の穴を加工し、この円筒穴の側面にひずみゲージを軸方向と周方向に 2 枚ずつ貼り付けて、4 ゲージ法で測定する。本研究でエアハンマー鍛造の実働荷重として、このポンチ部にかかる荷重を検出する。

Fig. 2 Punch with sensors and lower die

一方、ポンチ表面部には、ポンチの先端平面部とコーナ部（図で示した 19° の傾きのところ）に圧力・摩擦センサを内蔵した。上型のポンチホルダのバリランド部にも圧力・摩擦センサを取り付け、バリランド部に到達した材料によってかかる面圧を測るようにした。

圧力・摩擦センサを上型側につけたのは、複数回の打撃の間被加工材が下型上に留まるのに対し、上型は断続的な短い接触であるため、金型温度の上昇が下型に比べて低いと考えられ、センサの耐熱温度（約 250℃）を上回るおそれがないと考えたからである。

2.2 圧力・摩擦センサ

金型表面に組み込んだ圧力・摩擦センサの基本構造とひずみゲージを貼って配線した様子を **Fig. 3** に示す。センサブロックは直径 8 mm、高さ 8 mm の円筒ピンの背面から、直径 4 mm の穴を底面から 2.3 mm まであけた後、管状の掘

り込みを工具表面から 2.3 mm の位置まで入れ、さらに 2.4 mm×3 mm の横穴をセンサピンの側面から貫通させたものである。

Fig. 3 Pressure and friction sensor

その結果、工具表面の厚さ 2.3 mm の平板の背面に 2 本のビームが突き出ている、その 2 本のビームの先端を厚さ 0.4 mm の薄板でつなげた構造となっている。センサブロックの材質は SKD61 とした。この薄板表面の根元部に一枚ずつひずみゲージを貼り付けて 1 ゲージ法でそれぞれのひずみを計測する。ひずみゲージには、共和電業製 KFH-02-120-C11-11H4M3(耐熱温度 250 °C) を使用した。ひずみゲージからのリード線は 3 線式となっており、リード線の抵抗を相殺して、リード線の長さの影響を排除する。

このセンサの圧力と摩擦応力の検出原理を **Fig. 4** に示す。圧力に対しては二つのひずみゲージが縮み、二つのひずみゲージ出力の和を取って、圧力に換算する。摩擦応力に対しては、片方のひずみゲージが伸び、他方のひずみゲージが縮むので、二つのひずみゲージの差を取って摩擦応力に換算する。センサの詳細については、文献 5) を参照されたい。

Fig. 4 Detection principle of the sensor

2.3 圧力・摩擦センサの検定

圧力・摩擦センサの出力の検定装置を **Fig. 5** に示す。センサの受圧面にアルミニウムブロックを押し付けて加圧し、その状態で側方に引張荷重をかけて摩擦応力を付加するのである。垂直にかけた荷重を加圧ブロックの面積で割った値を付加した圧力とし、この圧力とセンサの出力との関係から換算係数を求める。摩擦荷重はセンサの受圧面と垂直に加圧しているピンの上面と垂直方向ロードセルとの間にも発生するので、垂直方向ロードセルを2方向ロードセル

Fig. 5 Calibration test equipment

Fig. 6 Calibration methods

ルとして、摩擦付加荷重からこのロードセルの面にかかる横荷重を引いた値をセンサの受圧面にかかる摩擦荷重として、この荷重を接触面積で割った値を付加した摩擦応力として、センサ出力との間の換算係数を求める。

センサの出力検定は、Fig. 6 に示すように、まずセンサブロックをホルダに入れた状態で出力を調べ、次にポンチに組み込んでコーナ面にそって表面を研削加工して、工具表面とセンサ表面を同一面に合わせた後の表面にアルミニウムブロックを押し付けて検定した。コーナ部では、接触面が曲面であるが、押し付けたアルミニウムブロックに残った圧痕の面積から圧力と摩擦応力を算出した。ポンチに組む前と後で、センサの出力に大きな違いはなかった。

この検定装置を用いて付加した圧力と摩擦応力、それに対するセンサの出力例を Fig. 7 に示す。まず圧力を付加すると、二つのひずみゲージに圧縮ひずみの出力が発生する。次に圧力を付加した状態で摩擦応力を付加する。その時付加していた圧力荷重が多少減少するため二つのひずみゲージの出力も下がるが、摩擦応力に対して、片方のひずみゲージは引張ひずみを、他方のひずみゲージは圧縮ひずみを出力していることがわかる。

Fig. 7 Example of the output of the sensor

三つのセンサにおけるそれぞれのひずみ出力 $\varepsilon_1, \varepsilon_2/10^{-6}$ から、圧力 p_1, p_2, p_3 /MPa, 摩擦応力 f_1, f_2, f_3 /MPa に換算する式を次に示す。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -0.475(\varepsilon_1 + \varepsilon_2), & f_1 &= 1.005(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \\ p_2 &= -0.475(\varepsilon_1 + \varepsilon_2), & f_2 &= 0.9(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \\ p_3 &= -0.475(\varepsilon_1 + \varepsilon_2), & f_3 &= 0.746(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3. 鍛造実験

鍛造実験は、株式会社山崎機械製作所室戸工場で行った。使用したエアハンマープレスは、大谷機械製作所 DIE-MAX150(1.5 ton ハンマ)である。センサを組み込んだ上型と上型をプレスに組み込んだ様子を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 Attachment of the dies to the air-stamp hammer

鍛造品の初期素材は、金型の外でエアハンマープレスによって円柱素材を高さ 58 mm 程度、直径 100 mm 程度（六角柱状）に荒打ちしたものである。この素材に対し、通常よりは低い落下高さで打つ打ち方（これを低落下打撃と呼ぶ）で 6 回打撃して鍛造する場合と、通常の落下高さで打つ打ち方（これを高落下打撃と呼ぶ）で 4 回打撃して鍛造する場合の二通りを行った。また打撃途中の形状を調べるため、低落下打撃においては第 1 打から第 6 打までそれぞれの打撃で止めたサンプル、高落下打撃においては、第 1 打から第 4 打までそれぞれの打撃で止めたサンプルを採取した。

ポンチの荷重センサ、圧力・摩擦センサの出力はキーエンス NR600 システムを用いて、サンプリングタイム 0.05 ms で収録した。また高速度カメラを設置し、ポンチの落下画像から打撃速度を算出した。サーモビューア R300SR-H（日本アビオニクス製）を用いて、打撃直前（荒打ち後）の被加工材温度、および打撃後ポンチを上げた時に見える被加工材上部の温度を計測した。また鍛造後の成形品の 3 次元形状を 3D スキャナ VXELEMENTS(CREAFORM)で測定し、Geomagic Design X (3D Systems) を用いて 3 次元データとした。

4. 実験結果

4.1 低落下打撃における形状変化と荷重・面圧

低落下打撃における各打撃で止めたサンプルの形状を Fig. 9 に示す。第 1 打で軽いくぼみをつけた後、第 2 打で

Fig. 9 Change in the shape during air-stamp hammer forging with low drop height

Fig. 10 Punch load and acting pressure with friction during air-stamp hammer forging with low drop height

わずかなバリのはみ出しを伴いながらポンチを押込み、第 3 打で隅部を残して金型内に材料を充填している。第 4 打で隅部への充填も終わり、第 5 打および第 6 打ではバリを押込みながら成形品寸法に近づけている。ポンチを上げた時に見える鍛造品上部の温度はほぼ 1000 °C であった。

低落下打撃の各打撃におけるポンチ荷重と面圧を Fig. 10 に示す。各図の左側に示した形状変化は、各打撃で止めたサンプル形状データのものであり、荷重・面圧測定を行った成形品と同一品ではないが、ほぼ同様な形状変化をしていると考え、形状変化と荷重・面圧との関係を照合するために示している。各打撃における荷重の縦スケールは同一ではないので注意されたい。

第 1 打 (a) では、初期材料高さから約 19 mm 押込み、押込み時間は約 15 ms である。ポンチ荷重は 300 kN となっている。ポンチ先端平面部の圧力 p_1 はほぼ平坦で、約 120 MPa となっている。コーナ部の圧力 p_2 は、初期に 220 MPa 程度のピークを示した後、約 160 MPa となっている。どちらにおいても摩擦応力は発生していない。コーナ部の圧力が平面部の圧力よりも高いのは、ポンチ押込み外周部で応力集中が生じるからではないかと考えられる。

第 2 打 (b) は、押込み変位 24 mm でポンチの押込みを進める過程である。ポンチ荷重は約 350 kN で、第 1 打よりも少し大きくなっている。ポンチ先端平面部の圧力 p_1 は、150 MPa から 200 MPa へ徐々に増加している。コーナ部の圧力 p_2 は約 200 MPa で、後半で摩擦応力が発生している。

第 3 打 (c) は、押込み変位は 4.5 mm であるが、後半からポンチ荷重が 500 kN から 1400 kN へと急増しており、ポンチ先端から流動した材料がポンチ底面に達して、材料が密閉状態になってきたことがわかる。ポンチ先端平面部の圧力 p_1 は徐々に増加し、300 MPa に達している。一方コーナ部の圧力 p_2 は 150 MPa 程度に留まっており、摩擦応力が 50 MPa から 80 MPa へと徐々に増加している。

第 4 打 (d) では、押込み変位 2.2 mm で、バリを出しながら金型内の隅部への充填を進めている。ポンチ荷重は 3300 kN に達している。ポンチ先端平面部圧力 p_1 は 240 MPa 程度、コーナ部圧力 p_2 は 180 MPa である。摩擦応力の出力は激しく正負の方向へ振動したため、示していない。一方、バリランド部の圧力 p_3 が 120 MPa 程度発生し、摩擦応力も 50 MPa となっている。

第 5 打 (e) では、ポンチ荷重と面圧は第 4 打と同様である。サンプルにおける押込み変位は 0.3 mm で、わずかな変形を与えたのみである。

第 6 打 (f) では、ポンチ荷重が 4000 kN に達し、バリランド部における圧力が 450 MPa、摩擦応力が 200 MPa に達している。

4.2 高落下打撃におけるポンチ荷重と面圧

高落下打撃における各打撃で止めたサンプルの形状を Fig. 11 に示す。初期形状は低落下打撃の時と同じため省略した。第 1 打のポンチの押込みは低落下打撃より大きく、第 2 打ではほぼ金型内に材料を充填し、第 3 打および第 4 打ではバリを押込みながら成形品寸法に近づけている。ポンチを上げた時に見える鍛造品上部の温度は 1060 °C であった。

高落下打撃の各打撃におけるポンチ荷重と面圧を Fig. 12 に示す。各打撃の図の縦スケールは同一ではないので注意

されたい。

第 1 打 (a) のポンチ荷重は 400 kN で、低落下打撃の第 1 打の荷重よりも大きく、第 2 打の荷重に近い。押込み変位も 34 mm と大きくなっている。ポンチ先端平面部の圧力 p_1 は 170 MPa、コーナ部の圧力 p_2 は、約 200 MPa で、これらも低落下打撃の第 2 打に近い。

第 2 打 (b) では、ポンチ荷重が 800 kN に達し、材料がポンチ底面に達して密閉状態になる直前まで押込んでいる。ポンチ先端平面部の圧力 p_1 は 300 MPa まで達し、コーナ部の圧力 p_2 は、約 250 MPa であるが、摩擦応力が 100 MPa まで増加している。この変化は低落下打撃における第 3 打の状況と似ている。

第 3 打 (c) は、金型内の材料が閉じ込められた後、バリを出す工程となっている。ポンチ荷重が 5000 kN に達し、ポンチ先端平面部圧力 p_1 は約 500 MPa 程度、コーナ部圧力 p_2 は約 300 MPa まで達している。コーナ部における摩擦応力も変動があるものの 100 MPa から 200 MPa に達している。さらにバリランド部の圧力が 500 MPa を超えており、100 MPa 程度の摩擦応力が発生している。

第 4 打 (d) もポンチ荷重は約 5000 kN で、金型内のポンチ先端平面部圧力 p_1 は 350 MPa 程度、コーナ部圧力 p_2 は約 200 MPa であるが、バリランド部の圧力が 1000 MPa、摩擦応力が 400 MPa と、大きな圧力・摩擦応力が発生している。

5. 実験結果の考察

5.1 ハンマー鍛造における実働荷重について

鍛造における荷重は、材料がポンチの底面に到達し、金型内に充填してくると急増している。さらにバリを出してバリランド部での加圧が加わってくるとさらに荷重が増加していると考えられるが、本実験では、上型を分割してポンチ部にかかる荷重だけを検出し、バリランド部を加圧する荷重(パンチホルダ側にかかる荷重)は検出していない。したがってバリ出し後の総荷重はポンチ荷重よりもさらに大きいはずである。ポンチ底面に達する前の荷重 400 kN をポンチ平面部(直径 55.4 mm)の面積で割ると、平均圧力は 166 MPa、ポンチ底面に達した後の荷重 4000 kN をポンチ面積(直径 118 mm)で割ると、平均圧力は 366 MPa となる。

材料がポンチ底面まで達しない第 1 打における荷重と変位から求められる変形エネルギーと、打撃質量(2600 kg)と打撃直前のポンチ速度から求められる打撃エネルギーとはほぼ一致している。

5.2 ポンチにはたらく面圧について

ポンチ先端平面部にはたらく圧力は、材料がポンチ底面に達する前に 100~200 MPa、材料がポンチ底面に達して型内に材料が充填した後に 300~400 MPa で、ポンチ荷重から求めた平均圧力とほぼ一致した。

コーナ部にはたらく圧力は材料がポンチ底面に達する前は、ポンチ先端平面部の圧力よりも高く、コーナ部に応力集中が起こっていると考えられる。一方、材料が型内に充填した後の圧力は、ポンチ荷重から求められる平均面圧よりも低めであった。これは後述のセンサ出力の検討でも述べるように、センサ本体に側方から荷重がはたらいた影響

ではないかと考えている. コーナ部にはたらく摩擦応力は, 低落下打撃の第3打, 高落下打撃の第2打と第3打で大きく発生した. いずれも材料がポンチ底面に到達する前後の段階で, 金型内の圧力が上昇しながら, 金型内の隅部への材料流動が進む過程でコーナ部に高い摩擦応力がはたらいたと考えられる. 型表面にはたらく摩擦応力は材料のせん断降伏応力を超えることはないと考えるのが一般的であり, 材料の圧縮変形抵抗が第1打においてポンチ平面部にはた

Fig. 11 Change in the shape during air-stamp hammer forging with high drop height

らいた圧力 150 MPa だと考えるとせん断降伏応力は 80~100 MPa 程度であると考えられるが, それを前後する摩擦応力がはたらいっている. 金型内の材料の充满直前でコーナ部の摩擦が大きくなったのは, それまでポンチ先端部による圧縮過程で材料が横にふくらむ流動であったのに対し, 金型内に材料が拘束されて, コーナ部に沿って隅部への流動が生じたからではないかと考えられる. 金型内に材料が充满した後の, 低落下打撃の第4打以降および高落下打撃の第4打では, コーナ部に明確な摩擦応力が発生しなかったのは, この部分での材料流動がほとんど生じなかったからだと考えている.

なお摩擦応力の大きさを圧力と比較して摩擦係数として表したり, せん断降伏応力と比較して m 値として表したりする考え方が一般的であるが, 本論文では, 実測値そのもので検討する. 圧力と摩擦応力との関係を見れば, ポンチ先端平面部では, 高い圧力 p_1 が発生するのに対し, 摩擦応力は発生していない. コーナ部の圧力 p_2 に対して摩擦応力 f_2 は必ずしも比例していない. 圧力によって界面での実質的な接触面積が増加すると考えられるが, さらに界面に沿った材料の流動が大きくなると実質的な接触面積がさらに増加して摩擦応力が大きくなるのではないかと推測する.

Fig. 12 Punch load and acting pressure with friction during air-stamp hammer forging with high drop height

5.3 バリランド部にはたらく面圧について

バリランド部の圧力はバリが発生した低落下打撃の第 4 打, 5 打, 6 打で発生しており, その値はバリの厚さが薄くなるほど高くなっている。また摩擦応力も圧力と連動して高くなっている。高落下打撃では, 第 3 打から高い圧力が発生し, 第 4 打では, 圧力 1000 MPa, 摩擦応力 400 MPa に達している。第 3 打後のバリ部分の材料表面温度は, サーモビューアの画像から約 800 °C と低下し, 瞬発的な変形のためひずみ速度も大きく, 材料の変形抵抗は 200~300 MPa 程度に増加し⁷⁾, さらに, 厚さ 2 mm という薄い材料を加圧して外へ押し出すことから高い圧力が発生すると考えられる。400 MPa という高い摩擦応力の発生が正しいかどうか, 検討が必要であるが, 界面には酸化スケール等, 被加工材以外の材料が介在しているはずであり, これらの影響を考える必要があると思われる。

5.4 エアハンマー鍛造における打撃エネルギーと変形仕事

本研究ではポンチ部の荷重を検出したが, 上型全体の荷重は計測していないため, バリ部の圧力からポンチホルダにはたらく荷重を推定して, 材料を変形させた仕事とポンチが持っていた打撃エネルギーとを比較する。高落下打撃の第 3 打において, バリ部にはたらく圧力 500 MPa, バリ外径 180 mm から, バリ部にかかる荷重は 7250 kN となる。ポンチ荷重 5000 kN と合わせると 12250 kN で, この荷重が変位 1.3 mm の間はたらく続けるとすると, 変形仕事は 15925 J となる。一方, ハンマーの落下質量 2616 kg で, 高速度カメラから求めた打撃直前の速度 5.5 m/s とから, 落下質量が持つ運動エネルギー (打撃エネルギー) は, 39567 J であり, 変形仕事は打撃エネルギーの 40 % となる。打撃エネルギーの残りの 60 % は, 被加工材を通してハンマーと下台とが弾性衝突して飛散するエネルギーとなっている。

低落下打撃におけるハンマーの打撃直前の速度は第 3 打~第 6 打で約 4 m/s, 高落下打撃におけるハンマーのそれは, 第 2 打~4 打で約 5.5 m/s である。合計の打撃エネルギーは低落下打撃の方が小さいにも関わらず, 現場の通常の打ち方として高落下打撃が選ばれるのは, 鍛造時間の短縮とともに, 回数が少ないほどバリ部の温度低下も小さく, バリ部の変形を促進して鍛造品の寸法を出すことができるからであろう。

5.5 圧力・摩擦センサの性能について

材料が型内の側壁にぶつかってバリ出しに至る過程で, バリランド部のセンサの出力ゼロ点がマイナスにドリフトした。圧力・摩擦センサを縦横 20 mm の角ブロックに挿入して, 側面から摩擦方向に, 荷重を加えたところ, センサにマイナス出力が発生した。センサピンに横荷重が作用して, 受圧部の薄肉平板部が圧縮されると Fig. 13 のようにセンサのひずみゲージに引張ひずみが発生してゼロ点ドリフトを生じたと考えられる。バリランド部のセンサの出力については, ゼロ点ドリフトの大きさとポンチ荷重の大きさとが比例したため, ポンチ荷重からセンサのドリフト分を推定して, そこからの変化を圧力として求めた。

センサに対する横荷重による出力の減少は, 材料が金型内を充填した後のポンチ先端平面部センサおよびコーナ部センサにも発生し, 特にコーナ部センサで検出した圧力がポンチ荷重からの平均圧力よりも下回っていた理由になっ

たことが考えられる。これらのセンサに対する出力ドリフトは圧力負荷と同時に発生するため, ドリフト量を定量的に推定することができなかった。センサ出力性能の今後の課題としたい。一方, 摩擦応力は二つのひずみゲージ出力の差から求めるため, 横荷重による変形の影響をあまり受けないと考えられる。材料が金型内に充填した後のコーナ部のセンサの摩擦応力の出力は激しい上下動を示した。センサは金型と一体化しているため, 金型の弾性衝突による振動が影響したと考えている。

Fig. 13 Effect of side compression on sensor output

6. 結 言

エアハンマー鍛造において, リング形状品の鍛造を実例とし, ポンチにかかる荷重の検出, ポンチ表面にはたらく面圧およびバリランド部にはたらく面圧を測定した。

ポンチにはたらく荷重は円柱ブロックの中心が押込まれて, たる形に変形しているうちは小さいが, 上型および下型の底面に接触し, 金型に閉じ込められてくると急激に増加する。円柱ブロックにポンチを押込む当初はポンチ先端平面部の圧力よりもコーナ部の圧力の方が大きい, その後ポンチ先端平面部の圧力が上回る。コーナ部にはたらく摩擦応力は材料が金型内に拘束されて圧力が高まり, 隅部への流動が続く際に増大した。バリランド部の圧力はバリの肉厚が薄く, 温度が低下するとともに増大し, 大きな摩擦応力が発生した。終盤のエアハンマー鍛造の打撃エネルギーは, 変形仕事のエネルギーよりも, 材料を通した金型の弾性衝突エネルギーに費やされている。

これらの知見は, エアハンマー鍛造における工具摩耗メカニズムの解明やプロセスの改善に役立つと考えている。

本研究を進めるにあたり協力下さった (株) 山崎機械製作所の皆様に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Johnson, W. & Nasmyth, J.: J. Mater. Process. Technol., **32** (1992), 1-42.
- 2) Tsuchiya, Y., Nakanishi, K., Matsui, M., Tanaka, T., Suzuki, T., Nogami, Y. & Akashi, T.: R&D Review of Toyota CRDL, **36-4** (2001), 47-54.
- 3) Nakamizo, T., Kasai, T. & Takasu, I.: Sanyo Technical Report, **9** (2002), 27-34.
- 4) Fujikawa, S.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **56-650** (2015), 225-229.
- 5) Yoneyama, T.: Int. J. of Adv. Manuf. Technol., **90** (2017), 2251-2261.
- 6) Yoneyama, T., Miyoshi, K. & Tate, T.: J. Manuf. Process., **32** (2018), 791-801.
- 7) Sakai, T. & Ohashi, M.: Tetsu-to-Hagané, **67-11** (1981), 134-143.