研究論文

遊星ボールダイスによる6063アルミニウム合金の
縮管加工力に及ぼす摩擦の影響

金山 公三*・吉岡 紘二**
重松 一典*・平井 幸男*

Effect of friction on the processing force in tube reducing
of aluminum alloy by using planetary ball die

Kouzou KANAYAMA*, Kouzi YOSHIOKA**
Ichinori SHIGEMATSU* and Yukio HIRAI*

In order to reduce required thrust in tube reducing, a planetary ball die (PBD) which consisted of retainer and steel balls was developed. The required thrust was reduced to less than 60% of that for ordinary conical die. However, those value were in excess because effect of friction on the required force was neglected in analysis. To evaluate the required force exactly, analysis based on the energy method had been carried out considering the frictional energy. The thrust and torque obtained from that analysis agreed well with the experimental results. The increasing of the coefficient of friction led to remarkable increasing of thrust and few increasing of torque. When the value of reduction rate and/or of the feeding speed increased, the thrust and torque increased. The thrust and torque increased with the decreasing in ball diameter.

Keywords: aluminum alloy, tube reducing, planetary ball die, friction, energy method

(Received June 13, 1991)

1. 緒 言

遊星ボールダイスは、局所的な加工の累積によってパイプを加工するので、コニカルダイスの場合に比較して所要加工力が小さくパイプ破断の危険が少ない^{1),2)}。また、個々のボールには軸および軸受けを組込む必要がなく、構造が簡単で軽量化できるので、3ロール法³⁾に比べて工具交換や加工速度の高速化において優れており^{4),5)}、工業的に有用である。ところが、従来の解析法では、実際の加工力に比べて計算値ははるかに小さいという問題がある²⁾。これは、ボールとパイプは転がり接触をするので、摩擦力が無視できるという仮定に原因があると思われる。そこで本報告では、摩擦仕事を考慮してエネルギー法による所要加工力の解析を行った。また、

摩擦係数の異なる潤滑剤を用いて、アルミニウム合金の縮管加工実験を行って解析値と比較した。

2. 実験方法

Fig. 1に遊星ボールダイスの概略を示す。スチールボールの直径は、12.7, 25.4, 38.1, 50.4 mmに変化させた。個数は3個で、相互の位置関係は保持器⑦によって120度間隔に保たれている。縮管率 ϕ_d は内径の異ったアウトレースを使用することによって、5.5, 10.0, 14.5%に変化させた。供試材料は、 n 値、 F 値および耐力が各々0.10, 370 MPaおよび200 MPaのアルミニウム合金引き管 (A6063-TD) を用いた。肉厚は2 mm、外径は22 mmである。

潤滑剤は、マシン油もしくは二硫化モリブデン (モリ

* 名古屋工業技術試験所 (名古屋市). Government Industrial Research Institute, NAGOYA (Nagoya-shi, Aichi).

** 京都府立高等学校 (京都府). MINAMI KYOTO High School (Souraku-gun, Kyoto).

Fig. 1 Cross-section of planetary ball die. ①③: Cover plate (SNC2, HRC35), ②: Outer-race (SKD11, HRC55), ④: Support plate (SKD11, HRC55), ⑤: Steel ball, ⑥: Thrust bearing, ⑦: Ring for retaining balls (Brass), ⑧: Tubular workpiece.

コート G ペースト) を使用し, リング圧縮試験⁶⁾で求めた各々の摩擦係数は0.16および0.12である。

縮管実験は小型旋盤を利用し, チャックで遊星ボールダイスをつかんで回転させ, 工具台上に固定したロードセルの先端でつかんだパイプを, 自動送りによって押込んで加工を行い, 軸方向推力とトルクを測定した。ダイスの回転速度は毎分140, ダイス1回転あたりのパイプの送り量は, 1, 2, 3 mm/rev に変化させた。

3. エネルギー法による加工力の解析

3.1 ボールとパイプの接触状態

Fig. 2(a)にボールとパイプの軸方向の位置関係を示す。破線で示したFHが前に通り過ぎたボールによって加工された形状で, 軸方向に1ピッチ $m(=EF)$ だけ送られてきた次のボールによって実線EGのように加工される。同図(b)は, 任意の点Cを含む軸直角断面である。また, 同図(c)は接触領域ELGEの立体図と座標系を示している。この接触領域の x, y および z 方向への投影面積 S_x, S_y および S_z は, 図中の微小部分(陰影部)の面積を dS とすると次式で表される。

$$S_x = \int_S \sin \phi \cos \eta \, dS \quad (1)$$

$$S_y = \int_S \cos \phi \, dS \quad (2)$$

$$S_z = \int_S \sin \phi \sin \eta \, dS \quad (\eta \geq 0) \quad (3)$$

なお, 図中の1ピッチ m とダイス1回転あたりのパイプの押し込み量 f_D (工具台の送り)との関係は,

$$m = \frac{2(r_1 + r_B)f_D}{(r_1 + 2r_B)n} \quad (4)$$

Fig. 2 Schematic illustrations of deformation of tube by planetary ball die. (a) Section in y - z plane. The broken line profile shows the deformation of the tube at one pass before. (b) Section in x - y plane including an arbitrary point C. (c) Three dimensional figure showing position and dimension of fan-shaped element.

で近似できる⁴⁾。ここで r_1 は加工後のパイプ半径, r_B および n はボールの半径および個数である。

3.2 パイプのひずみ状態

Fig. 2(a)において, ボールの弧EGになじむ形にパイプは変形するが, 弦ERで近似することにする。また, **Fig. 2(b)**においても, 接触弧DCを弦DCで近似する。さらに, 肉厚方向のひずみ分布は無視し, 肉厚方向中心位置の値によって代表されるものとする。なお, 従来の解析²⁾では外表面の値で代表していたので, 実際のひずみよりも小さく評価していた。添字については, z, θ, t は, パイプの軸方向, 円周方向, 肉厚方向を表すものとする。これらの定義および仮定より, 入り口E, 出口Rにおける軸方向の付加的せん断は,

$$(\gamma_{zt})_E = (\gamma_{zt})_R = \tan \alpha \quad (5)$$

$$d\gamma_{zt} = 0 \quad (6)$$

$$\tan \alpha = \frac{r_{0s} - r_{1s}}{\sqrt{r_B^2 - (r_t - r_0)^2}} \quad (7)$$

ここで, パイプの平均半径の加工前後における値 r_{0s}, r_{1s}

およびボールの軌道半径 r_t は、加工前のパイプの外半径および肉厚を r_0 および t_0 、加工後の外半径を r_1 とすると、

$$r_{0s} = r_0 - t_0/2 \quad (8)$$

$$r_{1s} = \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 - r_0^2 + (r_0 - t_0)^2}}{2} \quad (9)$$

$$r_t = r_1 + r_B \quad (10)$$

点 D, C における付加的せん断は、

$$(\gamma_{t\theta})_D = \tan \beta_D \quad (11)$$

$$(\gamma_{t\theta})_C = \tan \beta_C \quad (12)$$

$$d\gamma_{t\theta} = 0 \quad (13)$$

$$\beta_D = \xi/2 + \zeta \quad (14)$$

$$\beta_C = \xi/2 \quad (15)$$

パイプ上の点は何回かの加工の繰返しによって、半径 r_{0s} から r_{1s} に縮管されるが、ここでは簡単のために一度で加工が行われるとすると、

$$\xi = \cos^{-1} \left(\frac{r_{Bs}^2 + r_t^2 - r_{0s}^2}{2r_{Bs}r_t} \right) \quad (16)$$

$$\zeta = \cos^{-1} \left(\frac{r_{0s}^2 + r_t^2 - r_{Bs}^2}{2r_{0s}r_t} \right) \quad (17)$$

$$r_{Bs} = r_B + t_0/2 \quad (18)$$

次に、パイプはほとんど伸縮しないので⁷⁾、

$$d\epsilon_z = 0 \quad (19)$$

さらに、体積一定の条件より、

$$d\epsilon_t = -d\epsilon_\theta \quad (20)$$

また、パイプのねじれ変形は円周方向ひずみに比例すると仮定すると、

$$d\gamma_{t\theta} = a \, d\epsilon_\theta \quad (21)$$

この比例定数 a は、縮管率を ϕ_d とすると実験値より⁷⁾、

$$a = \frac{0.0514\phi_d r_1}{\ln(r_1/r_0)} \quad (22)$$

以上より、相当ひずみ増分 $d\epsilon_{eq}$ は、

$$\begin{aligned} d\epsilon_{eq} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ (d\epsilon_t - d\epsilon_\theta)^2 + (d\epsilon_\theta - d\epsilon_z)^2 + (d\epsilon_z - d\epsilon_t)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{2} (d\gamma_{t\theta}^2 + d\gamma_{\theta z}^2 + d\gamma_{zt}^2) \right\}^{1/2} \\ &= \sqrt{\frac{4+a^2}{3}} (d\epsilon_\theta)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 ϵ_θ は円周方向の対数ひずみであるから、

$$\epsilon_\theta = \ln \left(\frac{r_{1s}}{r_{0s}} \right) \quad (24)$$

となり、負の値である。

3.3 加工に費やされる仕事

今回用いた材料は、変形抵抗については異方性の影響が少ないので⁸⁾、等方性とする。さらに、降伏応力 Y の剛完全塑性体とすると、単位体積あたりの理想変形仕事

w_1 は、

$$\begin{aligned} w_1 &= Y \int_V d\epsilon_{eq} \\ &= Y \int_0^{\ln(r_{1s}/r_{0s})} \sqrt{\frac{4+a^2}{3}} (-d\epsilon_\theta) \\ &= Y \ln(r_{0s}/r_{1s}) \sqrt{\frac{4+a^2}{3}} \end{aligned} \quad (25)$$

ただし、ここで用いる降伏応力 Y の値は、耐力 Y_1 と、

$$\epsilon_{eq} = \ln(r_{0s}/r_{1s}) \sqrt{\frac{4+a^2}{3}}$$

として n 乗硬化則によって求めた変形抵抗 Y_2 の平均である。すなわち、

$$Y = (Y_1 + Y_2)/2 \quad (26)$$

次に、ミーゼスの説に従うとすると、せん断降伏応力は $Y/\sqrt{3}$ なので、単位体積あたりの付加的せん断仕事 w_2 は、

$$\begin{aligned} w_2 &= \frac{Y}{\sqrt{3}} \{ (\gamma_{zt})_E + (\gamma_{zt})_R + (\gamma_{t\theta})_D + (\gamma_{t\theta})_C \} \\ &= \frac{Y}{\sqrt{3}} \{ 2 \tan \alpha + \tan(\xi/2 + \zeta) + \tan(\xi/2) \} \end{aligned} \quad (27)$$

次に摩擦仕事は、パイプの送り方向にはボールはまったく転がることなく滑るものとして求めることにした。これは、製造現場において全長5,000 m のパイプの引抜き加工を行った後にダイスを分解すると、ボールには **Fig. 3** に示すような、はちまき状の偏摩耗が観察されたためである。摩擦係数を μ 、ボール個数を n で表し、ボールとパイプの接触面圧は一律に p と仮定し、**Fig. 2** に示すように記号を定めると、1 ピッチ m だけ送られたときの摩擦仕事 W_3 は、

$$W_3 = mn\mu p \int_S \frac{\sin \eta}{\sqrt{\sin^2 \eta + \tan^2 \phi}} dS \quad (28)$$

ここで、本加工では η は $\pi/2$ に近いので、 $\sin \eta = 1$ と近似すると、

$$\begin{aligned} W_3 &= mn\mu p \int_S \cos \phi \, dS \\ &= mn\mu p S_y \end{aligned} \quad (29)$$

1 ピッチ送られたときに加工される体積 V は、

$$V = m\pi \{ r_{0s}^2 - (r_0 - t_0)^2 \} \quad (30)$$

以上の式を用いると、パイプが1 ピッチ m だけ送られたときの仕事 W_m は、

$$W_m = V(w_1 + w_2) + W_3 \quad (31)$$

この仕事はトルク T と押し込み力 F によってなされる。そして、 T および F は変形やせん断に必要な T_p および F_p と、摩擦に費やされる T_μ および F_μ とからなる。ところが、パイプの円周方向について考えると、ボールとパイプの接触面で差動滑り⁹⁾が発生し、摩擦力の向きが

Fig. 3 Example of wearing-out circular mark on surface of steel ball.

中立点をはさんで逆転して、接触面全体としては摩擦力が相殺されていると考えることができる。そこで、

$$T = T_p \quad (32)$$

$$F = F_p + F_\mu \quad (33)$$

パイプが1ピッチmだけ送られて加工された仕事と、TおよびFのした仕事が等しいとおくと、式(31), (32), (33)より、

$$V(w_1 + w_2) = mF_p + (2\pi/n)T_p \quad (34)$$

$$W_3 = mF_\mu \quad (35)$$

が得られる。次に、Fig. 2(c)の記号を用いると、

$$F_p = n \int_S p \sin \phi \sin \eta \, dS = npS_z \quad (\eta \geq 0) \quad (36)$$

$$T_p = n \int_S (p \sin \phi \cos \eta \overline{BM} + p \cos \phi \overline{AB}) \, dS \\ = np(r_1 + r_B)S_x \quad (37)$$

式(36), (37)より、

$$F_p = \frac{S_z T}{(r_1 + r_B)S_x} \quad (38)$$

また、接触面圧pは、式(36), (38)より、

$$p = \frac{T}{n(r_1 + r_B)S_x} \quad (39)$$

式(38)を(34)に代入すると、トルクは、

$$T = T_p = \frac{V(w_1 + w_2)}{\frac{mS_z}{(r_1 + r_B)S_x} + \frac{2\pi}{n}} \quad (40)$$

Fig. 4 Influence of feeding speed of tube on required thrust. $n=3$, $r_B=19.05$ mm, $\phi_d=10.0\%$, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm, n : Number of balls, r_B : Radius of ball, ϕ_d : Rate of reduction, r_0 : Initial radius of tube, t : Thickness of tube.

Fig. 5 Influence of feeding speed of tube on required torque. $n=3$, $r_B=19.05$ mm, $\phi_d=10.0\%$, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm

次に軸力Fは、式(33), (38), (35), (29), (39)より、

$$F = F_p + F_\mu \\ = \frac{(S_z + \mu S_y)T}{(r_1 + r_B)S_x} \quad (41)$$

式(40)および(41)で、加工に必要なトルクと軸力が求められる。

4. 実験値と計算値の比較

Fig. 4およびFig. 5に、ダイス1回転あたりのパイプの送り量 f_D と押し込み力FおよびトルクTの関係を示す。実験点は3回の実験値の平均値をプロットしたものである。 f_D の増加とともに、いずれの摩擦係数の場

Fig. 6 Effect of rate of reduction on required thrust. $n=3$, $r_b=19.05$ mm, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm, $f_D=1$ mm/rev, f_D : Feeding speed of tube.

Fig. 7 Effect of rate of reduction on required torque. $n=3$, $r_b=19.05$ mm, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm, $f_D=1$ mm/rev

合にも F および T が増大する。摩擦係数 μ が大きくなると、 F の実験値および計算値は大きくなるが T はほとんど変化しない。このことは、差動滑りによって、パイプの円周方向の摩擦力は相殺されるという仮定を支持している。

F の計算値は、摩擦を無視していた従来の値に比べると大きくなり、実験値に近づいている。 f_D が小さい領域で実験値に比べて計算値がかなり小さくなるのは、付加的せん断仕事の過小評価の影響と考えられる。本解析では、計算の簡略化のために、式(16)、(17)に示したように、1回のボール通過で縮管が行われるものとして計算している。しかし実際には、繰返してボールが通過して少しずつパイプ径を縮小していき、そのたびに付加的せん断を受ける。そして、 f_D が小さく、それに比例し

Fig. 8 Influence of ball diameter on required thrust. $n=3$, $f_D=1$ mm/rev, $\phi_d=10.0\%$, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm

Fig. 9 Influence of ball diameter on required torque. $n=3$, $f_D=1$ mm/rev, $\phi_d=10.0\%$, $r_0=11$ mm, $t=2$ mm

て m が小さいほど、加工の繰返し数は増加し、付加的せん断仕事も増大する。このために、 f_D が減少すると、実験値が計算値に比べて大きくなる傾向を示すと考えられる。

Fig. 6 および **Fig. 7** に、縮管率 ϕ_d と F および T の関係を示す。 f_D の場合と同様に、いずれの摩擦係数でも ϕ_d の増加とともに F および T も増大する。また、摩擦係数が大きいほど F の計算値は大きく実験値に近づく。なお T については、**Fig. 4** および **Fig. 5** の場合と同様に摩擦の影響はほとんど受けない。

Fig. 8 および **Fig. 9** に、ボール径 $2 \cdot r_b$ と F および T の関係を示す。ボール径が大きいほど F および T は小さくなる。しかし、ダイスを高速回転させるとボールの遠心力が急激に増大するので⁵⁾、ボールの大径化は高速

加工には不利である。逆にボール径を小さくすると、ボールとアウトレース内周面の間で滑りが発生し、パイプのまわりを転がることができなくなる。この滑りは、縮管率が一定の場合にはボール径が減少すると発生し、また、ボール径を固定した場合には縮管率が増大すると発生する⁴⁾。この傾向から、ボールがパイプにせん断加工を加えながらパイプのまわりを転がっていくために必要な力が増大し、アウトレース内周面によるトラクションドライブ¹⁰⁾の限界値を超えると滑りが発生すると考えられる。この限界値を大きくするためには摩擦係数を大きくすればよいが、それに伴って加工力も増大することを考慮して潤滑剤を選択する必要がある。

5. 結 言

遊星ボールダイスによる縮管加工に必要な加工力について、摩擦力を考慮してエネルギー法による解析を行った。また、潤滑剤を変化させて実験を行い、解析値との比較を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 摩擦力を無視した従来の解析に比べて、本報の解析値は実験値とよい対応を示した。
- (2) 押込み力は摩擦係数が大きいほど大きくなるが、トルクは摩擦係数の影響をほとんど受けない。

(3) 縮管率および加工速度（軸方向の送り）が大きいほど、押込み力およびトルクは大きくなる。

(4) ボール径が小さいほど、押込み力およびトルクは大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 吉岡紘二, 藤本 孝, 高倉章雄, 福田正成: 第29回塑性加工連合講演会講演, (1978), 393.
- 2) 金山公三, 吉岡紘二, 藤本 孝, 高倉章雄, 福田正成: 塑性と加工, **28** (1987), 825.
- 3) たとえば, 青柳幸四郎, 太田国照: 塑性と加工, **24** (1983), 1039.
- 4) 金山公三, 田崎義男, 福田正成: 塑性と加工, **29** (1988), 1049.
- 5) 金山公三, 田崎義男, 福田正成: 名古屋工技試報告, **37** (1988), 241.
- 6) K. OSAKADA, T. KAWASAKI, K. MORI: Ann. CIRP, **30** (1981), 135.
- 7) 金山公三, 吉岡紘二, 藤本 孝, 高倉章雄, 福田正成: 名古屋工技試報告, **36** (1987), 252.
- 8) 真鍋健一, 西村 尚: アマダ技術ジャーナル, **19-93** (1986), 19.
- 9) たとえば, 松原 清: トライボロジ, 産業図書, (1983), 113.
- 10) たとえば, 相原 了: 精密工学会誌, **56** (1990), 1593.