

論文

絞り加工における摩擦力の評価方法

中村 健太*¹⁾, 水垣 裕介*²⁾

Evaluation method of the friction force in deep drawing

Kenta Nakamura*¹⁾, Yusuke Mizugaki*²⁾

From the view point of environmental protection and industrial safety-and-health, chlorine-free type lubricants was developed and used for deep drawing. The friction force between tools and blank is an important parameter for developing new lubricants and new lubrication systems. In general, the friction force is determined with the mold used in product line. However, the results from such an evaluation only serve to indicate whether deep drawing using a new lubricants or lubrication systems is possible or not. Therefore, a way to measure the friction force without requiring a new measuring instrument was proposed. The friction force can be determined by making use of a full-lubrication condition. A full-lubrication condition on the die tool surface was made by a polyethylene sheet and a lubricant. Using this measuring method, the friction force between the die tool and the blank can be measured. In addition, it was found that the friction force between die-flange part as well as die-radius part can be determined separately. Moreover, the study also suggested the possibility of evaluating the changes in the friction force due to adhesion using this method.

キーワード：深絞り加工, 摩擦力, 潤滑剤, ステンレス鋼板

Keywords: Deep drawing, Friction force, Lubricants, Stainless steel sheets

1. はじめに

絞り加工は飲料缶やフライパンのように、板材から立体的な形状を得る加工である。絞り加工は、板材をパンチでダイに押し込むことで、自動車のドアの外板のように比較的複雑な形状を一つの加工で製造できるため多用されている。また近年では、生産効率向上の観点から、従来溶接とプレス加工を組み合わせて得られた製品は、鍛造要素を含んだ絞り加工で製造されるようになってきている。つまり、従来のプレス加工に比べて凝着が生じやすい条件で、絞り加工が行われている。

絞り加工において、特に鍛造要素が含まれる場合、潤滑剤に含まれる添加剤や工具にコーティングされた硬質膜が、摩擦力の低減と耐凝着性の向上を担っている⁽¹⁾。ところが、添加剤や硬質膜の性能は、製品を加工する金型を用いて評価されることがほとんどであり、添加剤やコーティングの処方ば専門メーカーの知識と経験に頼っているのが現状である。

絞り加工における潤滑剤の性能を調べた研究は、春日ら⁽²⁾や河合ら⁽³⁾による例があるが、提案された手法を生産用金型に適用するのは困難で、現場レベルでの評価が難しい。また、水野ら⁽⁴⁾により、絞り加工の潤滑条件を仮定した解析と

実験結果を組み合わせて、潤滑剤が加工のどの段階で作用するかを検討した例もあるが、解析に用いた潤滑状態に関わる仮定が、実際の現象と一致していないことが指摘されている。つまり、従来の方法を用いて、生産用金型で潤滑剤や硬質膜の性能を評価することは容易ではない。一方、村木ら⁽⁵⁾はポリテトラフルオロエチレンのシートと加工油を併用した完全潤滑を利用し、これにより材料の変形抵抗力を無視できると仮定し、絞り加工時のダイと被加工材間に作用する摩擦力を容易に導出する方法を提案した。

本報では、村木らの手法を応用して、絞り加工における、潤滑剤や硬質膜の作用機構や性能の評価を、実験や加工の現場で容易に行えるようにするための手法を提案し、検証した結果について報告する。

2. 絞り加工における摩擦力の導出

2.1 加工力と摩擦力 図1に、絞り加工中に被加工材あるいは工具に作用する力を示す。加工中に検出される加工力 P は次式で与えられる。

$$P = R + (F_p + F_h + F_d) \dots \dots \dots (1)$$

式中、 R は材料が絞られる時に生じる、工具の形状と、被加工材の形状と材質に依存する変形抵抗力、 F は被加工材と工具間で作用する摩擦力である。ここで、パンチー被加工材間の摩擦力には添え字の p を、しわ押えー被加工材間の摩擦力には添え字の h を、被加工材ーダイ間の摩擦力には添

事業名 平成 26 年度 基盤研究, 産業交流 (提携先学生受入)

*¹⁾ 機械技術グループ

*²⁾ 芝浦工業大学材料工学科

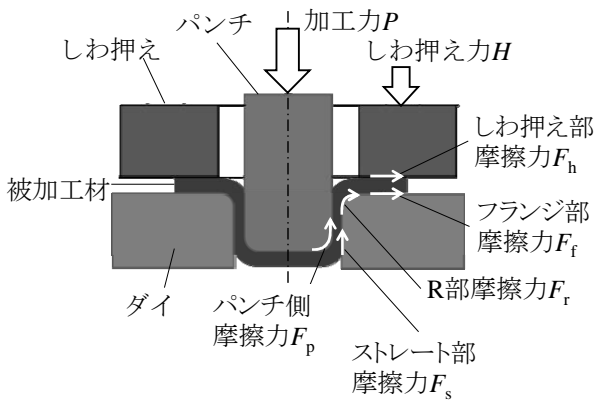


図1. 絞り加工の概略と加工中に生じる力

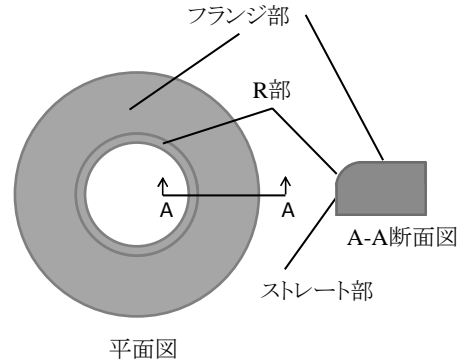


図3. 円筒絞り加工摩擦発生箇所

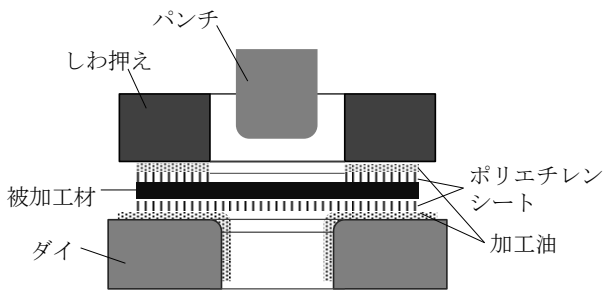


図2. 変形抵抗力測定時の実験条件

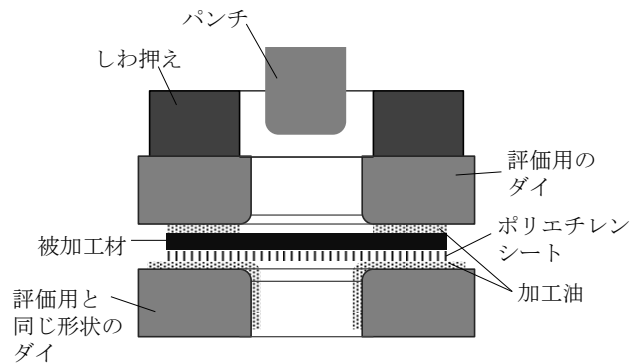


図4. フランジ部の摩擦力の測定方法

え字の d を付した。

2.2 摩擦力の導出 式 (1) によれば、 P から R を引くことで F を得ることができる。ところで、 R は被加工材の材質や製品の形状により異なるため、実際に使用する金型を用いた加工で得ることが望ましい。式 (1) によれば、加工中に生じる F を無視できる程度に小さくすることで、 R を導出することができる。そこで、図2のように、しわ押え-被加工材間ならびに被加工材-ダイ間を、ポリエチレンシートを挟み込んで潤滑する完全潤滑状態にして R を導出する。

ここで、実際の加工においては、製品の高さを得るためにパンチ-被加工材間は潤滑されないため、被加工材やパンチが同一であれば、摩擦力 F_p は一定とみなすことができる。したがって、 F_p も変形抵抗力の一部と仮定し、 R に F_p を加えた R' を変形抵抗力とした。

2.3 ダイ表面における摩擦力の分離 ダイと被加工材の接触部は、図3に示すようにフランジ部、被加工材を絞るためのR部、絞り工程後のストレート部から構成される。つまり、摩擦力 F_d は次式のように分離される。

$$F_d = F_f + F_r + F_s \dots\dots\dots (2)$$

式中の添え字は、フランジ部が f 、R部が r 、ストレート部が s とした。フランジ部の摩擦力を求める場合には、R部とストレート部を完全潤滑状態とする必要があるが、絞り加工は連続的な加工であるためできない。ところで、しわ押え-被加工材間の接触状態は、フランジ

部におけるダイ-被加工材間の接触状態と同じとみなせる。そこで、図4に示すように、被加工材-ダイ間を完全潤滑状態にして、評価対象となるダイをしわ押えと被加工材の間に供した状態で得られる加工力 P_h から R' を引くことで F_f を導出する。したがって、式 (1)、式 (2) より、 $F_r + F_s$ は次式により導出される。

$$F_r + F_s = P - R' - (F_f + F_h) \dots\dots\dots (3)$$

式中の F_h は、しわ押え-被加工材間と被加工材-フランジ間の潤滑状態が同じであれば F_f となり、潤滑状態が異なる場合は F_f の導出と同じ手法で求めることができる。次章で述べる実験方法で、ポリエチレンシートのみで潤滑した場合の F_h は、加工力 P に比べてずっと小さく、無視できる程度であった。

なお、R部あるいはストレート部のみを完全潤滑とすることが困難であるため、 F_r と F_s を実験的に分離することはできない。そこで、ストレート部の摩擦力は、後述するように、パンチストロークと被加工材の形状から分離することにした。

3. 摩擦力の分離試験

3.1 絞り加工試験機 試験に用いたのは、外観を図5に示す荷重能力 100 kN の油圧式万能試験機を改造した絞り加工試験機である。装置は、油圧ポンプと制御部、試験部、データ収集部から構成されており、試験部はクロスヘッド

部にパンチ制御ユニットとしわ寄せ制御ユニットが組み込まれている。クロスヘッドとパンチの上下方向の移動は同一の油圧ポンプで制御され、しわ寄せは別系統の油空圧ポンプによって制御されている。また、試験機の台座部にはダイを固定するための治具を設置できる。加工力はパンチと同一軸上に設けた荷重計で検出し、パンチに作用する力をデータロガーにより収集する。

3.2 工具と被加工材, 試験条件 絞り加工に用いる工具は、パンチ、ダイともにダイス工具鋼 (JIS SKD11) で、熱処理により表面硬度をロックウェル C スケール硬さで 60 前後に仕上げた。パンチは円筒形状で、直径 29.2 mm、先端の角部は曲率半径 3 mm とした。ダイはドーナツ形状で、外形 66 mm、内径 30 mm、R 部は曲率半径 3 mm とした。被加工材には、直径 60.0 mm、厚さ 0.3 mm のステンレス鋼板 (JIS SUS304 BA) を用いた。

試験は、パンチの押込み速度 5 mm/s、しわ寄せ面圧 4 MPa の条件で行った。加工油には、合成炭化水素油にオレイン酸を 0.5mass% 添加したものを用いた。基本となる加工では、加工油は被加工材-ダイ間に供給し、しわ寄せ側の表面の状態と摩擦力を一定とするために、しわ寄せ-被加工材間にはポリエチレンシートのみを供した。摩擦力を分離する時は、2章で述べたように、ポリエチレンシートと加工油を供する部位を変えた。

3.3 試験結果 図 6 に加工力 P と変形抵抗力 R' 、フランジ部だけの摩擦を再現した時の加工力 P_h の、パンチストロークに対する変化を示す。加工力は加工の進行に伴って増大し、押込み量 15 mm のあたりで最大となり、その後減少に転じる。変形抵抗力も加工力と同様の曲線となるが、最大値は加工力よりも小さく、減少に転じる押込み量も小さい。

ここで、パンチストロークに対する被加工材の変形と加工力の変化について説明する。まず、パンチの移動に伴って被加工材はダイの R 部に沿うように変形し、ダイと被加工材の接触面積が最大となり、加工力が最大となる。その後、パンチによる押込み力がフランジ部 (ダイとしわ寄せに被加工材が挟まれている部分) および R 部と被加工材間

に作用している摩擦力に打ち勝ち、被加工材が R 部に流入し始めると加工力の低下が始まる。

また P_h は、 F_f が作用する加工条件のため R とは挙動が異なる。すなわち、 R' が P よりも小さくなる押込み量から R' よりも大きくなり、最大値を過ぎてから減少し、 R' と重なるように試験終了に至る。

次に、 P 、 R' 、 P_h から 2 章に示した方法で導出した摩擦力 F_f と F_r+F_s を図 7 に示す。図中に、基本となる加工を任意の押込み量で止めて、被加工材とダイの接触状態を観察した結果の概略も示す。まず F_f は、押込み量の増加に伴って徐々に増大し、9 mm のあたりで最大値を示し、その後減少に転じ、20 mm あたりで 0 になる。一方、 F_r+F_s は押込み量 5 mm のあたりから増大し、23 mm のあたりで最大値を示し、減少に転じる。一方、摩擦力の推移と押込み量ごとの接触状態が一致したことから、ダイ表面における摩擦力の分離ができたといえる。

4. ダイへの被加工材の凝着と摩擦力

絞り加工において摩擦力の増大の要因となるのは、被加工材の凝着である。摩擦力の測定は、3 章で述べた基本となる加工で、加工力を連続で 21 回測定し、その後、摩擦力を分離するための加工を連続で 21 回行った。基本となる加工では潤滑は、加工ごとにしわ寄せ-被加工材間のポリエチ

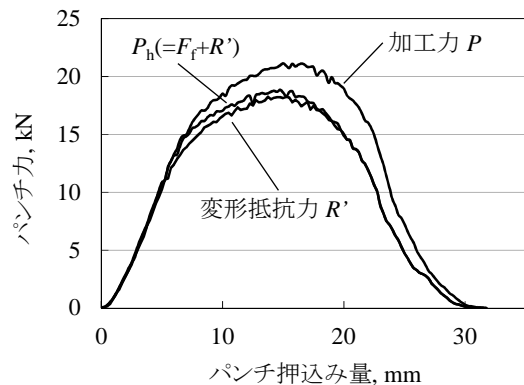


図 6. P , R , P_h の測定例

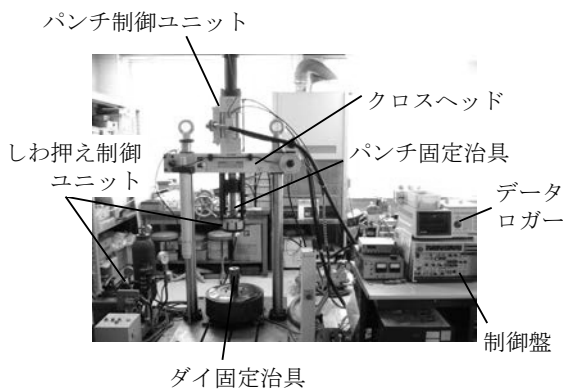


図 5. 試験機の外観と構成

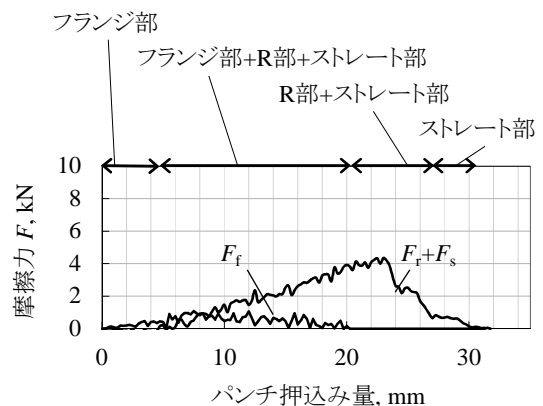


図 7. 絞り加工中のダイ表面における摩擦力の推移

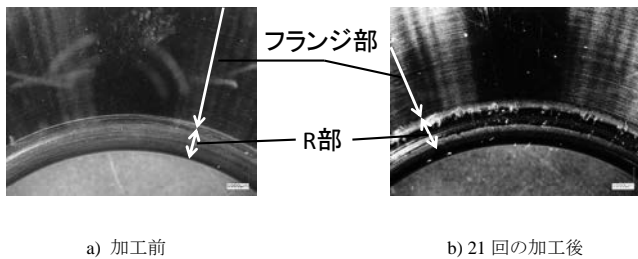


図 8. 連続加工前後のダイ表面

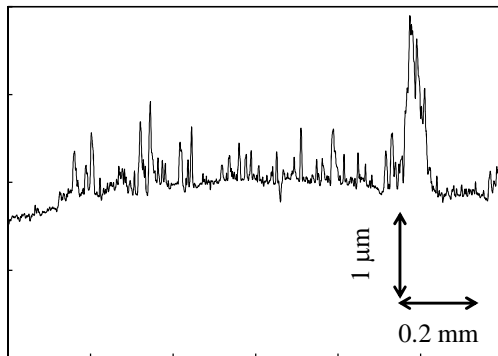


図 9. 連続加工後のダイの表面形状

レンシートを新しくし、被加工材-ダイ間に加工油を供給した。また、摩擦力を分離する実験では、被加工材-ダイ間を完全潤滑状態にし、図 4 のしわ押え側のダイのフランジ部には、加工ごとに加工油を供給した。なお、R はダイ側の表面の状態に依存しないため、1 回目の加工を行う前に測定した結果を利用した。

図 8 に連続加工前後のダイ表面の写真を示す。連続加工により、R 部の入口と出口以降に円周方向の筋が観察される。また、R 部の入口に付着物が観察される。図 9 に触針式の形状測定器により、R 部の入口を円周方向に測定した結果を示す。入口には、平滑な所と粗い所が混在しており、特に付着物は凸形状で、周辺に比べて高くなる。また、筋の粗い個所や凸形状の付着物からは、EDS 分析により、被加工材に由来する元素 (Ni) が検出されることがわかった。以上より、連続加工によって、R 部からストレート

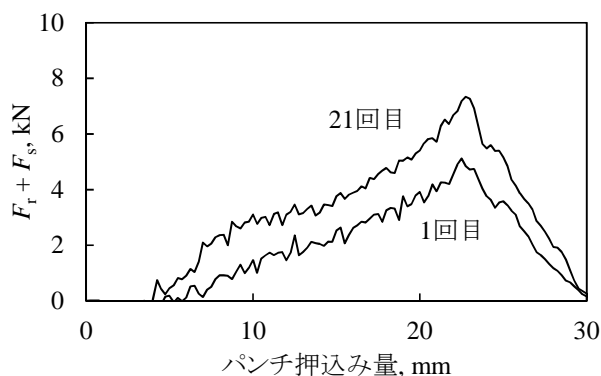


図 10. 凝着による摩擦力の変化

部にかけて被加工材の凝着が発生したと判断できる。

図 10 に R 部とストレート部の摩擦力 $F_r + F_s$ を示す。初回と 21 回目の摩擦力を比較すると、連続加工により摩擦力が増大することがわかる。凝着の位置と摩擦力の推移から、凝着が発生することで摩擦力が大きくなることがわかった。なお、加工中に生じる摩擦力の内、ダイ R 部の摩擦力が支配的になることは、被加工材が異なるものの水野らの研究⁽⁴⁾により見出されており、本研究で得られた結果もこれと一致している。

5. まとめ

絞り加工時の摩擦力を、ポリエチレンシートを用いて実験的に導出する方法を提案した。既報⁽⁴⁾とは異なり、ダイ表面の摩擦力をフランジ部と、R 部とストレート部に分離して測定することが可能になった。また、各部の摩擦力を加工開始から終了まで連続して測定することができた。さらに、摩擦力の測定結果は、ステンレス鋼板の絞り加工時の、凝着による摩擦力の増大を良く表現できることがわかった。

本手法を用いることで、生産に使う金型を用いた実験であっても、特殊な装置を用いずに、潤滑剤やコーティングの性能を、摩擦力といった定量的な指標をもって評価することができるようになる。今後、生産現場における摩擦力評価への適用を検討していく。

(平成 28 年 7 月 11 日受付, 平成 28 年 7 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 中村健太:「工具寿命延長のための潤滑の基礎知識」, プレス技術, Vol.53, No.11, pp.56-61 (2016)
- (2) 春日保男, 山口勝美:「塑性加工における工具面, 材料面間の摩擦および潤滑」, 日本機械学会論文集, Vol.33, No.252, pp.1294-1301 (1967)
- (3) 河合望, 近藤一義, 中村保:「塑性変形金属の表面における摩擦機構」, 塑性と加工, Vol.39, No.326, pp.3181-3189 (1973)
- (4) 水野高爾, 片岡久明:「深絞り加工における潤滑機構」, 塑性と加工, Vol.45, No.398, pp.1173-1181 (1979)
- (5) 村木正芳, 井出英夫, 田川一生, 中村保:「亜鉛めっき鋼板のプレス成形性に及ぼす潤滑油の効果に関する研究 (第 2 報)」, トライボロジスト, Vol.38, No.10, pp.903-910 (1993)