

産業用ロボットを用いる金属箔の摺動加工システム*
(第1報, 実験装置の作製と基礎実験)原田 博之^{*1}, 孫 亜 卓^{*2}, 坂本 裕 平^{*2}
丸 茂 康 男^{*1}, 阮 立 群^{*1}Slide-bending Formation of Thin Metal Sheet by
Using an Industrial Robot
(1st Report, Development of an Experimental System and Results of Experiment)Hiroshi HARADA^{*3}, Ya Zhuo SUN, Yuhei SAKAMOTO,
Yasuo MARUMO and Liquan RUAN^{*3} Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

This paper describes slide-bending formation of thin metal sheet by using an industrial robot. The formation of parts made of very thin sheets has become increasingly important following the miniaturization of industrial products. The thinning of sheet thickness causes several problems on the formability and accuracy of the products. In order to solve such problems in bending, one of the authors proposed a new method called a slide bending formation. However, in order to form more precise products, it is necessary to construct a system which can be controlled more precisely. The authors have made an automatic slide-bending formation system which consists of a force sensor, a CCD camera and an industrial robot. The slide-bending forming tool was mounted on the top of the robot. The reactive forces in the normal and the horizontal direction were measured by the force sensor attached on the wrist. The trajectory of the robot was controlled so that the reactive force was kept constant. The bending angle of the sheet was measured by the CCD camera. From the results of the experiment, it is shown that the larger the reactive force, the larger the bending angle of the thin metal sheet.

Key Words: Bending, Slide-bending Process, Sliding Tool, Bending Angle, Industrial Robot, Force Sensor

1. ま え が き

電子機器, 情報通信機器や精密機器などの分野を中心として, 機器の小型化および軽量化が進み, これらに用いられる部品に関してもさらなる小型化や薄肉化が要求されている。成形技術の面においても, ニーズの多様化, 製品の成形性, コストの低減等に対する要求が一段と厳しくなっている。こういった状況の中, これらの分野において塑性加工の対象として多くの部分を占める板材加工部品については, 極薄板材料や箔材料を用いた極薄肉部品の成形が重要となってきた。この場合, 極薄板化にともなう生じる成形上の新たな問題の克服や新たな加工法の開発が望まれており, 多くの研究や報告がなされている^{(1)~(19)}。

金属箔の成形加工に関しては, ダイスの超音波振動を利用した深絞り法の開発⁽⁸⁾, しごき加工⁽³⁾, スピニング加工⁽⁵⁾ およびインクリメンタル成形⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾等に関する報告がなされている。曲げ加工においては, レーザー光を利用した曲げ, 板材表面に生じる火花放電による局所的で瞬間的な加熱で熱応力を発生させて曲げ加工を行なうスパークフォーミング法, 常温の真空雰囲気中で超塑性金属箔をこれと等質の金属シートにより挟まれた状態で密封し, 超塑性成形を行なう方法, ダイの中にヒータを内蔵し, パンチの側圧で金属箔を曲げる V 曲げ法などに関する報告がされている。筆者らも極薄肉微細曲げ加工部品の成形を目標として, エッジ状の工具を金属箔の表面に押し当て, 工具を水平方向に摺動させてしごくことで金属箔を曲げる摺動曲げ加工の基本特性を検討している⁽¹⁶⁾。この加工法は, 単純なエッジ状工具を摺動させるだけで様々な曲

* 原稿受付 2007 年 3 月 22 日。

^{*1} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)。^{*2} 熊本大学大学院自然科学研究科。

E-mail: hiroshi@mech.kumamoto-u.ac.jp

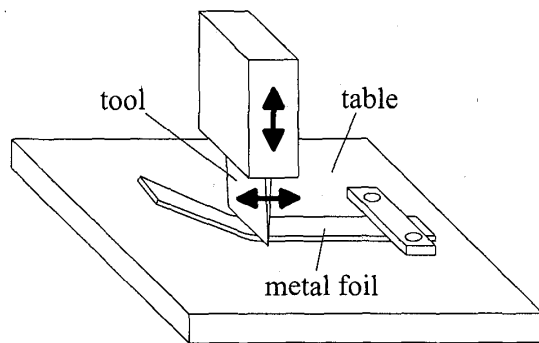


Fig. 1 Schematic illustration of jig and tool

げ角度や曲げ曲率を有する部品の成形が可能であり、専用の曲げ金型を必要しないという特徴を有している。筆者らは xy テーブルとロードセルからなる摺動加工装置を試作し、垂直荷重、摺動回数、潤滑剤の有無などの加工条件が金属箔の曲げ角度に与える影響について研究を行った⁽¹⁶⁾。しかし、押し込み荷重の制御や摺動方向の反力の検出、エッジ状工具姿勢の任意角度設定などに関して、いくつかの重要な問題点が未解決のままであった。

そこで筆者らは、これらの問題点を克服し、荷重や工具角度設定等の制御が可能な産業用ロボット、6軸力覚センサおよび CCD カメラから構成される摺動加工システムを作製した。本論文では、作製した摺動加工システムを用いて、金属箔に加わる荷重を一定に保つようにロボットの軌道を制御し、様々な条件で摺動加工の実験を行った結果を示す。

2. 摺動加工法の概要

摺動加工システムは、図 1 のようにエッジ状の上工具と金属箔を固定するための下工具により構成される。摺動加工法の概要は以下のとおりである。まず、図 2 (a) に示すように、短冊状の金属箔試験片の一方の端を下工具に固定する。つぎに、図 2 (b) のように上工具を金属箔に垂直に当て、試験片に一定の垂直荷重を加えながら図 2 (c) のように上工具を横方向に摺動させて試験片にしごき加工による変形を与える。このとき、試験片は板厚方向に圧縮されると同時に、摺動方向に引張りを受けることになる。上工具を所定の距離だけ摺動させた後、図 2 (d) のように金属箔試験片から離し、図 2 (a) の初期位置に戻す。この一連の手順を繰り返すことにより、試験片に所定の曲げ角度あるいは曲げ曲率を与えることができる。摺動曲げ加工方法においては、上工具押し込み荷重、上工具先端形

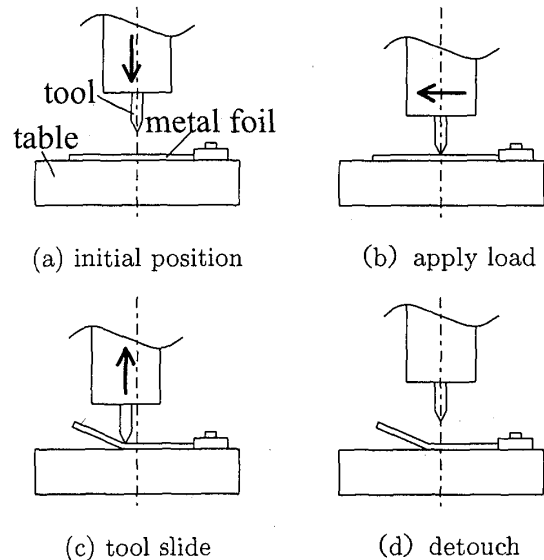


Fig. 2 Slide bending procedure

状、摺動距離、摺動回数、工具と被加工材料間の摩擦係数及び上下工具材質等を変更することにより、金属箔試験片の曲げ角度や曲率半径等を変更・調整することができる。

3. 実験装置

提案された摺動加工法により金属箔を任意の曲げ角度に加工するためには工具と金属箔間に働く荷重を制御する必要がある。そこで本研究では、産業用ロボットを使用した摺動加工システムを作製し、金属箔に加える荷重と曲げ角度の関係を実験的に求める。

図 3 に本研究で作製した実験装置の概略図を示す。実験装置は産業用ロボットと力覚センサ、CCD カメラにより構成される。マニピュレータは 5 自由度を有しており、その先端には力覚センサが取り付けられている。摺動加工用工具は治具により力覚センサに固定されており、工具と金属箔の接触点に作用する反力を検出する。摺動加工により変形した金属箔は CCD カメラにより撮影され、その画像を処理することにより金属箔の曲げ角度を求める。また、金属箔を固定している下工具はターンテーブルに固定されている。

3.1 力覚センサによる反力の測定 図 4 に力覚センサと治具により固定された上工具の写真を示す。実験に使用した力覚センサは x, y, z 軸方向の反力 F_x, F_y, F_z および x, y, z 軸まわりのモーメント M_x, M_y, M_z の測定が可能な 6 軸力覚センサである。本研究では、加工される金属箔は水平な台の上に固定され、上工具は金属箔に垂直に荷重を加える。このため、力覚センサの座標軸は x 軸を鉛直下向き、 z 軸

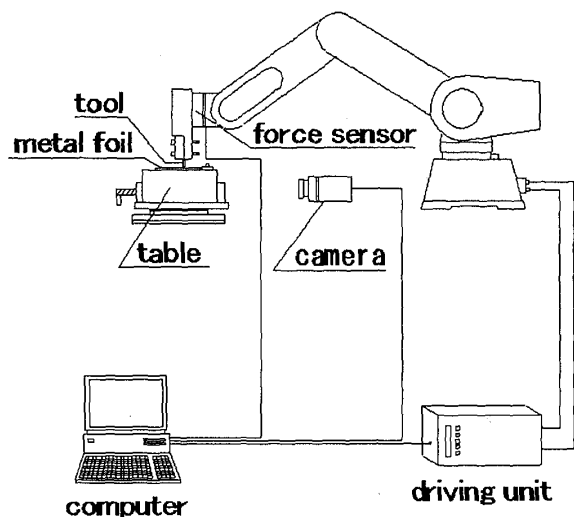


Fig. 3 Schematic configuration of the automatic slide-bending formation system

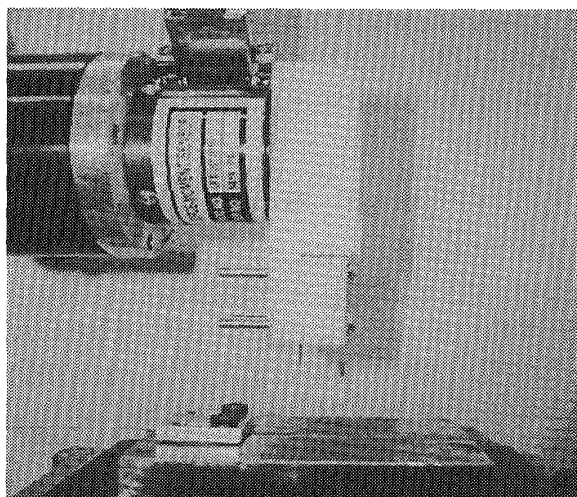


Fig. 4 Photograph of the upper tool and the force sensor

を上工具を摺動させる水平方向にとり、 y 軸は x, z 軸と右手系をなす方向にとった。上工具から鉛直下向きに金属箔に一定の荷重を加え、上工具を z 軸方向に動かすとき、力覚センサにより測定した反力は図 5 のようになる。図中で R_x, R_z は力覚センサにより測定された x, z 軸方向の反力であり、 F_n は上工具から金属箔への荷重、 F_t は上工具が z 軸方向へ動くときに働く運動摩擦力である。このとき、力覚センサにより検出された x 軸および z 軸方向の力 F_x, F_z は以下のように表される。

$$F_x = mg - R_x = mg + F_n \quad (1)$$

$$F_z = R_z = -F_t \quad (2)$$

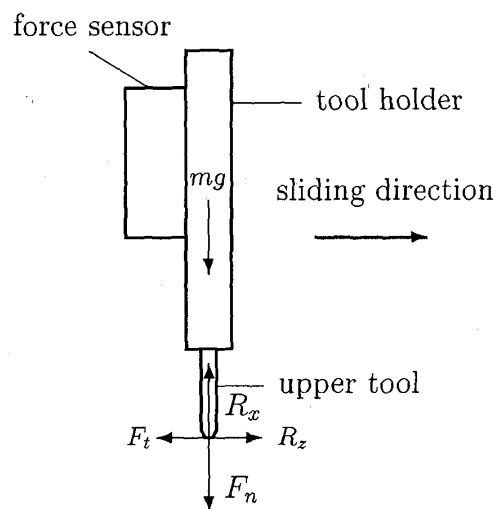


Fig. 5 Relation between the reactive force and the measured force

ここで、 m は上工具を固定するための治具と上工具の質量であり、 mg はこれらに働く重力項である。しかし、実際の測定に関しては、荷重を加えない場合の力覚センサの出力が 0 となるように重力項の補償を行うため、重力項 mg は無視できる。したがって、工具に働く垂直方向の荷重 F_n および動摩擦力 F_t と力覚センサの出力の関係は次式のようなになる。

$$F_n = F_x \quad (3)$$

$$F_t = -F_z \quad (4)$$

工具と金属箔の間の摩擦係数 μ は、摺動加工法において重要なパラメータである。この摩擦係数 μ は垂直方向の反力 F_n と水平方向の動摩擦力 F_t を用いて次式より求められる。

$$\mu = F_t / F_n \quad (5)$$

3.2 CCD カメラによる曲げ角度の測定 摺動加工された金属箔の曲げ角度 θ は CCD カメラにより撮像された画像を用いて以下のように測定された。まず、図 6 に CCD カメラにより撮像された下工具および金属箔の像を示す。摺動加工により曲げられた金属箔試験片の像は図 6 の長方形で囲まれた部分を抽出することにより容易に得られる。得られた金属箔の画素数を $N_x \times N_y$ とし、その濃度値を $p(i, j) (0 \leq i \leq N_x - 1, 0 \leq j \leq N_y - 1)$ とする。実験では背景を単色としているので、式 (6) のようにこの画像の行で隣接する画素の濃度値の差分を計算することにより、金属箔の輪郭の抽出が可能となる。

$$p_d(i, j) = p(i, j) - p(i, j - 1) \quad (6)$$

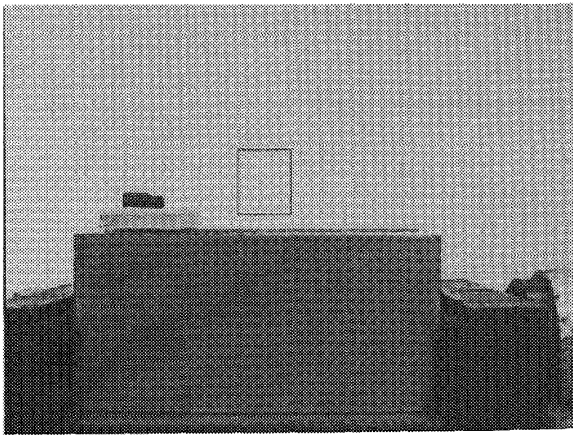


Fig. 6 An image of a deformed metallic sheet and the lower tool

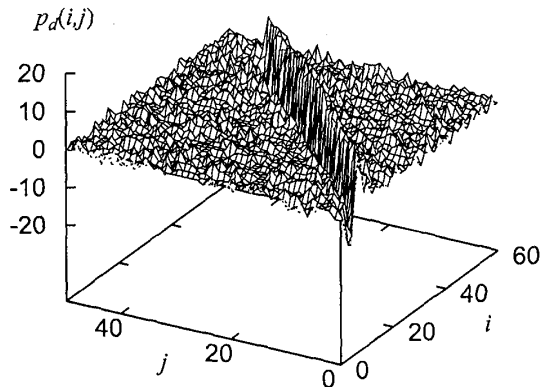


Fig. 7 Differation image of a deformed metallic sheet

図7は図6に示した CCD カメラの画像から金属箔の部分を取り出し、行方向の差分をとった画像である。

図より背景の方が金属箔より明るいいため金属箔の境界において、差分画像が最小値、最大値をとることがわかる。図7に示した差分画像の各行よりその最大値および最小値をとった位置を抽出し、プロットしたものが図8である。図より、差分画像が最大値および最小値を取る点をはほぼ直線上に存在することが明らかである。したがって、これらの点を最小2乗近似し得られる2本の直線と水平方向とのなす角度を金属箔の曲げ角度 θ の推定値 $\hat{\theta}$ とすることができる。

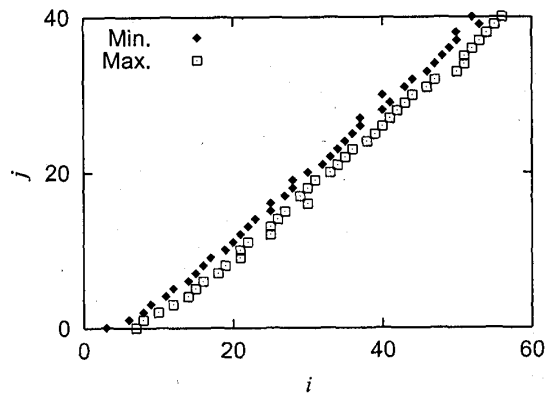


Fig. 8 Maximum and minimum point of the image

4. 実験結果

実験に使用した機器の仕様および実験手順は以下のとおりである。産業用ロボットは三菱電機マイクロロボット MOVEMASTER EX RV-M1 であり、5 自由度垂直多関節型で、最小移動距離は 0.1mm である。ロボットのドライブユニットとパソコン間は RS-232C インターフェイスで接続されている。力覚センサはニッタの 6 軸力覚センサ UFS-1012A-05 を使用した。この力覚センサの定格値は x, y 軸方向が 19.6 N, z 軸方向が 39.2 N であり、その分解能は定格値の $1/2^{12}$ である。また、許容過負荷は定格値の 500% である。CCD カメラは SONY の XC-77BB であり、撮像された画像の画素数は 256×256 であり、濃度レベルは 256 である。また、加工対象となる金属箔は厚さ 30 μm および 40 μm のステンレスを用いた。上工具としては、市販のカッターナイフの刃を研磨したものを使用した。図9に本論文で使用した上工具の断面形状を光学顕微鏡（キーエンス VF-7510）により測定した結果を示す。図中の点線間の間隔は 100 μm である。図より上工具先端断面の曲率半径は約 100 μm と推定される。

つぎに、力覚センサにより垂直方向、水平方向の反力を測定し、荷重を一定に保つようにロボットの軌道を以下のように制御した。まず、工具に加える荷重を設定し、垂直荷重が設定荷重に達するまで工具を試験片に押し付ける。反力が設定値に達した後は、工具が一定距離 0.2 mm だけ水平方向に移動するたびに力覚センサの出力を読み込み、垂直荷重および水平方向の反力を測定している。本論文で作製した実験装置では、一回あたりの上工具の移動距離が 0.2mm と短いため、工具の移動速度を変化させ、摺動加工への影響を調べることは困難であった。

まず、摺動加工中に測定された垂直方向の反力 F_n

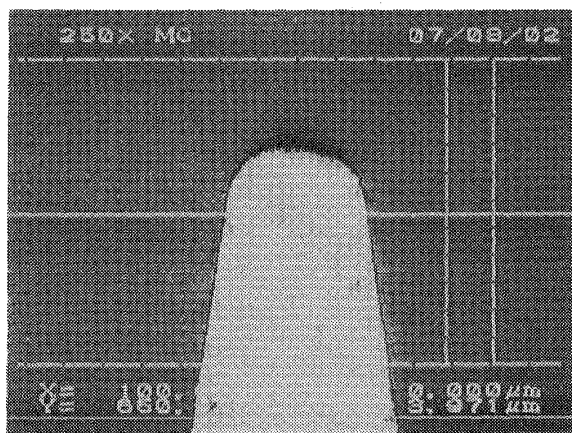


Fig. 9 Section of an upper-tool measured with a microscope

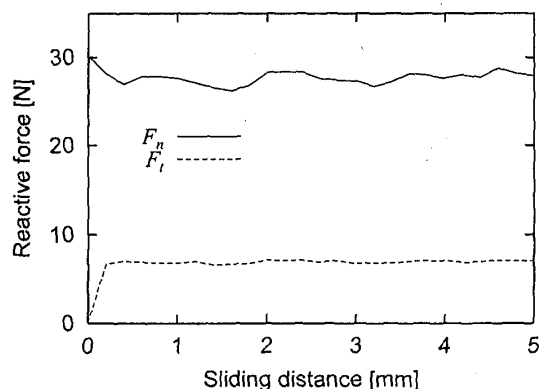


Fig. 10 Measured reactive force during the slide-bending forming

および水平方向の動摩擦力 F_t を示した一例が図 10 である。ここで、垂直方向の設定荷重 F_d を 24 N としており、摺動距離 L は 5mm である。図より、金属箔に接触する初期状態を除いて、マニピュレータによる摺動加工が行われている間、垂直方向の荷重 F_n はほぼ設定値に保たれており、反力の制御が良好に行われていることがわかる。また、水平方向の反力 F_t もほぼ一定値であり、安定な摺動加工が行われている。

つぎに、設定荷重を 6 N から 30 N まで変化させ、設定荷重と摩擦係数 μ の関係を求めた結果が図 11 である。図 11 より、摩擦係数 μ は設定荷重が 18 N 以上になると減少する傾向がみられた。また、設定荷重が同じ場合、金属箔の厚さが厚いほど摩擦係数 μ が大きくなる傾向にある。さらに、設定荷重が大きくなるほど摩擦係数 μ の分散が小さくなり、安定した摺動加工が行われる。なお、この実験では潤滑剤は使用していない。

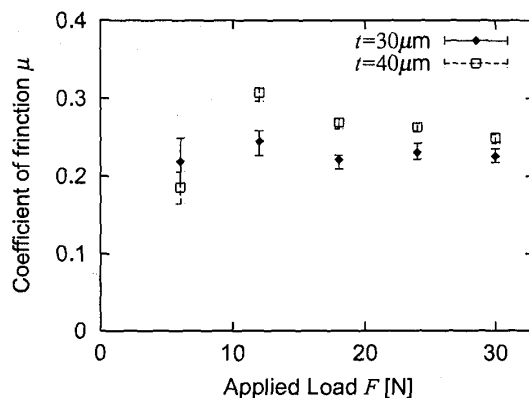


Fig. 11 Relation between the coefficient of friction and the applied force

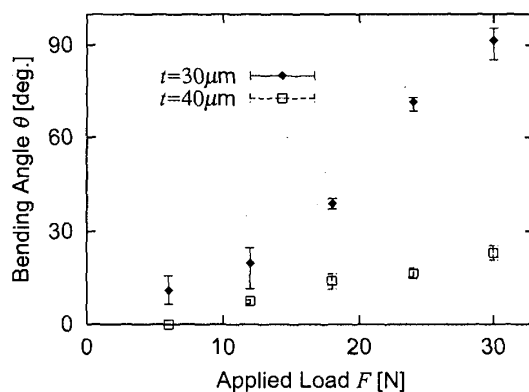


Fig. 12 Relation between the applied load and the bending angle

加工後の金属箔の曲げ角度は CCD カメラにより得られた画像を前述の方法で処理することにより、測定された。設定荷重 F_d と金属箔の曲げ角度 θ の関係を図 12 に示す。図より、金属箔が薄く、設定荷重が大きいほど摺動加工による曲げ角度 θ が大きいことがわかる。また、荷重が大きくなるほど、箔の曲げ角度の分散が小さくなり、安定した加工が行われている。

摺動加工法では、摺動距離 L も箔の曲げ角度 θ に影響を及ぼす重要なパラメータである。図 13 は設定荷重を変化させ、摺動距離 L と箔の曲げ角度 θ の関係を実験により求めた結果である。ここで、用いたステンレス箔の厚さは 40 μm である。また、上工具は図 12 とは別のものを使用している。図より、すべての荷重において、摺動距離 L が長くなると金属箔の曲げ角度 θ が大きくなることがわかる。また、同じ摺動距離 L に対しては、負荷荷重が大きいほど金

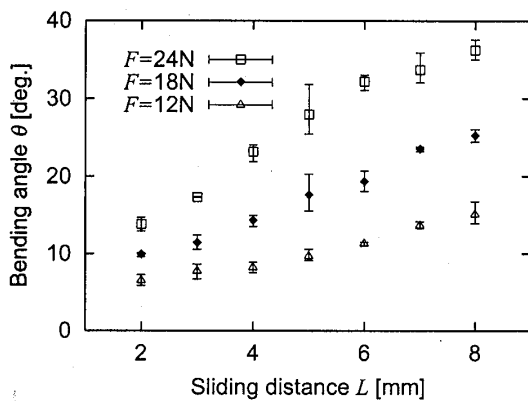


Fig. 13 Relation between the sliding distance and the bending angle

属箔の曲げ角度 θ が大きくなることも明らかである。これらの実験結果より、金属箔に加える荷重 F_d および摺動距離 L を制御することにより、金属箔を設定した角度に曲げることが可能であることが示された。

5. 考察と今後の研究課題

第2章でも述べたように、提案する摺動加工法はしごき加工により金属箔に曲げ変形を生じさせる加工法である。このため、加工後の金属箔の厚さ t_f はもとの厚さ t_0 に比べて減少する。そこで、光学顕微鏡を用いて加工前後の箔の厚さを計測し、次式で定義された金属箔の断面減少率 R を求めた。

$$R = \frac{|t_f - t_0|}{t_0} \times 100[\%] \quad (7)$$

しかし、実験で使用したステンレス箔では、加工前後の箔の厚さの変化は小さく、断面減少率の精密な評価は困難であった。そこで、図14に厚さ $t_0 = 20 \mu\text{m}$ の銅箔を摺動加工した場合の設定荷重 F と断面減少率 R の関係を示す。ただし、これらの銅箔の実験結果は文献(16)で用いた装置により測定されたものである。図より、設定荷重を大きくするほど、断面が減少率が大きくなっていることがわかる。なお、加工後の箔の板厚変化は負荷荷重の影響を受けるが、摺動距離には影響されない。

摺動加工法においては、上工具の形状、特に先端の曲率半径は曲げ角度の大きな影響を与える。これは、図12と図13の同じ荷重を加えた結果を比較すればよくわかる。われわれは、高硬度の工具を3次元的に精度よく加工する技術を持たないため、本論文で行った実験では市販のカッターナイフの刃を研磨したものを上工具として使用した。このため本論文では、同一

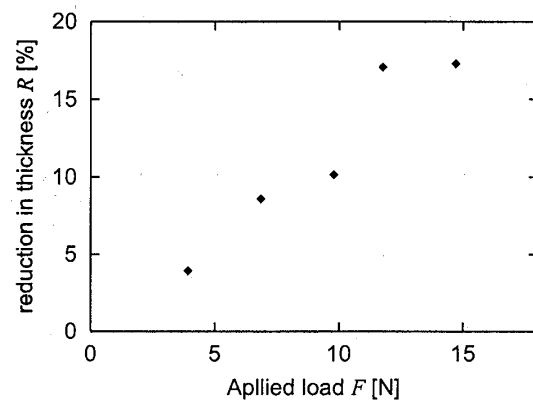


Fig. 14 Relation between the applied load and the reduction in thickness

工具を用いた場合の金属箔の曲げ角度の再現性を重点的に検討した。摺動加工に用いる上工具の精度の良い作製方法の確立およびその3次元形状の精密な計測は今後の研究課題である。

6. あとがき

本研究では、産業用ロボットと力覚センサ、視覚センサを用いる金属箔の摺動加工システムを構築した。作製した加工システムでは、工具と金属箔の間の荷重は力覚センサにより測定され、金属箔の曲げ角度はCCDカメラにより測定された。構築したシステムを用いて一定の荷重で摺動加工を行い、安定な摺動加工が可能であることが示された。今後は、本論文で作製した摺動加工システムを改良し、極薄肉微細部品を任意の形状に曲げ加工する手法の開発を行う予定である。

文 献

- (1) Yamaguchi, K. et al., *An Experimental Study of the Size and Shape of Tension Specimens for Aluminum Foil*, "Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity", Vol.17, No.191 (1976), pp.995-1002.
- (2) Kurosaki, Y. et al., *Yield Stress and Fracture Behaviour of Electronic Copper Foils*, "Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers", Series C, Vol.58, No.550 (1992), pp.1999-2004.
- (3) Saito, M. et al., *Wrinkling Mechanisms during the Ironing Process of Very Thin Wall Aluminum Cups*, "Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers", Series C, Vol.54, No.504 (1988), pp.1919-1925.
- (4) Saito, M., *Plastic Forming of Very Small Tubular Parts*, "Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity", Vol.33, No.379 (1992), pp.923-929.
- (5) Saito, M., *Tube Spinning of Very Small and Thin Tubular Parts of Stainless Steel*, "Journal of the

- Japan Society for Technology of Plasticity", Vol.33, No.379 (1992), pp.977-982.
- (6) Aoki, I., *Micro Peen Forming of Thin Sheet Metals*, "Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity", Vol.33, No.379 (1992), pp.983-986.
 - (7) Suto, S. et al., *Bending of amorphous alloys*, "Journal of Materials Processing Technology", Vol.33, No.3 (1992), pp.215-227.
 - (8) Okazaki, Y. and Kawaguchi, K., *Ultrasonic Deep-Drawing of Aluminum Foil*, "Advanced Technology of Plasticity 1990", Vol.3 (1990), pp.1333-1340.
 - (9) Yokoi, M. et al., *Experimental Study on Deep Drawing of Aluminum Foil by Using Closed Type Hydro Spark Forming Method*, "Journal of the Society of Materials Science, Japan", Vol.44, No.500 (1995), pp.602-607.
 - (10) Kasuga, Y., *Deep Drawing of Ultra Thin Aluminum Sheet with Use of Piezoelectric Actuator*, "Journal of the Japan Society for Precision Engineering", Vol.62, No.12 (1996), pp.1737-1741.
 - (11) Vollersten F. et al., *The Laser Bending of Steel Foils for Micropars by Buckling Mechanism ? A Model, Modelling Simulation*, "Materials Science Engineering", Vol.3 (1995), pp.107-119.
 - (12) Yoshioka, S. et al., *Bending of Fine Metal Wire and Foil with YAG Laser Beam*, "ICALEO '98", 85, Sec. E (1998), pp.161-169.
 - (13) Yoshioka, S. et al., *Laser Forming of Thin Foil by newly Developed sample Holding method*, "Journal of Laser Applications", Vol.12, No.2 (2003), pp.96-100.
 - (14) Otsu M. et al., *Micro-bending of Thin Spring by Laser Forming and Spark Forming*, "Ann. CIRP", Vol.50, No.1 (2001), pp.141-144.
 - (15) Saotome, Y. and Okamoto, T., *An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials*, "Journal of Materials Processing Technology", Vol.113 (2001), pp.636-640.
 - (16) Marumo Y. et al., *Bending Process of Metal Foil Using a Sliding Tool*, "Materials Forum", Vol.29, (2005), pp.129-131.
 - (17) Mori, T. and Nakashima, K., *Development of Ultra-Fine Piercing by Using SiC Fiber Punch*, "Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers", Series C, Vol.65, No.629(1999) pp.369-374.
 - (18) Mori, T. and Nakashima, K., *Improving High Precision and Continuous Process of Ultra-Fine Piercing by Using SiC Fiber Punch*, "Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers", Series C, Vol.68, No.667(2002), pp.275-280.
 - (19) Tanaka, S. and Nakamura, T., *Micro Incremental Forming*, "Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity", Vol.42, No.489 (2001), pp.38-42.
 - (20) Kondoh, K., et al., *Investigation on Peen Forming (first report)* (in Japanese), "Proceedings of the 25th Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity", (1974), pp.221-224.
 - (21) Kondoh, K., et al., *Investigation on Peen Forming (second report)* (in Japanese), "Proceedings of the 1975 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity", (1975), pp.109-112.
 - (22) Kondoh, K. et al., *Investigation on Peen Forming (third report)* (in Japanese), "Proceedings of the 1977 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity", (1977), pp.239-242.