

フレキシブルスピニング加工法の開発

京都大学大学院 工学研究科

教授 島 進

(平成 8 年度研究開発助成 AF-96020)

キーワード：スピニング、フレキシブル塑性加工

1. 研究の背景と目的

塑性加工は工業の発展と共に生産速度の向上や設備の大型化、生産効率の向上がはかられ大量生産時代の中心的役割を担ってきた。しかし、近年消費者のニーズの多様化にともない、変種変量の要求が高まっている。しかし板材成形の多くは、プレス加工に代表されるように、それぞれの形状ごとに専用の金型を使用する。そのため、多種類の形状のものを作るには多くの金型が必要となり、変種変量に不向きである。これに対して、近年、変種変量に適応する塑性加工技術として、インクリメンタルフォーミングの研究が注目を集めている。

インクリメンタルフォーミングについては、インクリメンタル張り出し成形¹⁻⁴⁾、ハンマリングの研究⁵⁾などが挙げられる。我々はこのようなインクリメンタルフォーミングに属する加工法の中でも、古くからあるスピニング加工に注目した。

スピニング加工とは回転加工法の一つであり、回転する素材をローラーでマンドレルに押し付けることによって成形する加工法である。本研究で取り扱うフレキシブルスピニングは、従来のスピニング加工よりマンドレルを取り除き、一對のローラーで被加工材を挟み、そのローラーをある軌跡で動かすことにより所望の成形品を創成する加工法である。

本研究では、より定量的な結果を得るため、実験に加えて有限要素法動的陽解法による解析を取り入れた。本研究では、これらの結果から、形状、応力、ひずみ、及び成形に必要な加工力について検討し、その基本的変形特性から、様々なパラメータの一般化を試みる。

2. 実験

2.1 実験装置

本研究で開発したフレキシブルスピニングでは、図 1 に示すように、マンドレルを使用せず一對のローラーで加工を行うスピニング加工法である。回転する被加工材を二つのローラーでブランク両面より挟み、目的とする成形品形状に応じた経路(ローラーパス)に沿ってローラーを移動させることにより、所望の形状にブランクを成形する。この加工法ではローラーパスを変化させることにより、被加工材を同一の工具で様々な形状に成形することが可能であると考えられ、従来のスピニングと比較し、よりフレキシビリティに富んだ加工法であるといえる。

図 2 に示すように、外ローラーを工業用ロボットハンド

に取り付けた L 型ブロックに固定して、内ローラーをエアシリンダーに取り付け、内ローラーからのみ空圧で挟むようにした。加工によるローラーへの負荷は、外ローラーへの負荷が増加しても、内ローラーへの負荷はほとんど変化しない。本研究では、挟み力が制御可能な実験装置で実験を行い、最適な加工条件を求めることを試みた。

2.2 実験方法

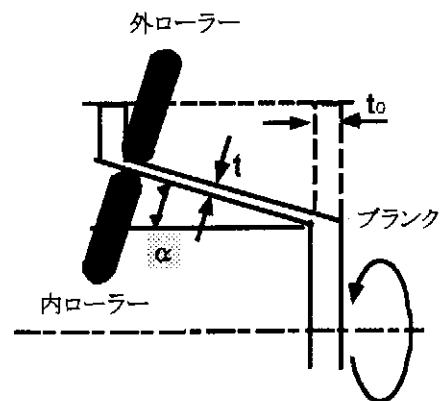


図1 フレキシブルスピニングの原理

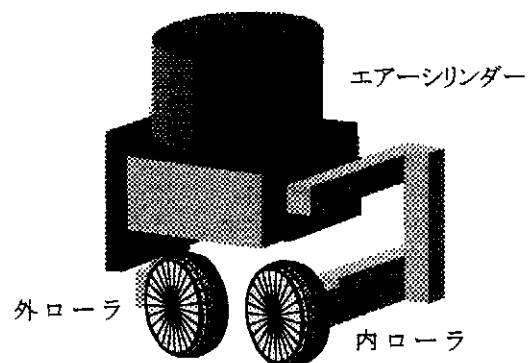


図2 ローラー対

スピニングには、大きく分けてしごきスピニングと絞りスピニングの二つの加工形態がある。その中で、一つのローラーパスで加工する、しごきスピニングの場合について検討する。成形する形状としては、最も簡単な円錐台形を採用した。

円錐台形を成形する場合の実験条件のパラメータとしては以下のものが挙げられる。加工条件に関しては、挟み力(以下グラフ中もしくは文章中で F と表記)、送りピッチ (p)、円錐半角 (θ)、ブランクの回転速度が挙げ

られる。ブランクに関しては、板厚 (t)、外径 (D)、内径 (d) である。ローラの形状としては、丸み半径 (ρ_r)、ローラ径 (ϕ) である。これらのパラメータについての加工特性が分かれば、円錐台形のみならず、あらゆる所望の形状を創成することができると考えられる。

ここでは F の違いが成形品に与える影響に特に注目して実験を行った。ローラ形状は、外ローラに $\rho_r=6\text{mm}$ 、 $\phi=80\text{mm}$ のものを使用した。内ローラには、 $\rho_r=6\text{mm}$ 、 $\phi=50\text{mm}$ のものを使用した。ブランクには工業用純アルミニウムの焼鈍材 (A1050, 0 材) を用いた。

3. 実験結果

3.1 外ローラのみでの加工

まず F が成形品に与える影響を調べる前に、内ローラで挟まず外ローラのみで加工を行った場合、つまり $F=0$ の状態で実験を行った。成形品を評価する指標として、成形後の板厚としごきスピニングの sine 則とのずれを採用した。その評価基準として、成形品の断面形状のある二つの地点を円筒座標で表し、その位置での成形後の板厚 t と初期板厚 t_0 によって、以下の式で算出される値を [S 値] として定めた。

$$S = t/t_0 \sin \theta, \quad \theta = \tan^{-1}\{(r_1 - r_2)/(z_1 - z_2)\}$$

S 値が 1 であればしごき加工が行われたことになり、1 より小さければ過剰しごき加工、1 より大きければ絞り加工がそれぞれ行われたことになる。

図 3 は $F=0$ で、 $p=0.02\sim 0.5\text{mm}$ と変えて加工を行ったときの加工状態の違いを示したもので、縦軸は S 値、横軸は半径方向座標である。 $r_1=50\text{mm}$ ぐらいまでは、いずれの p の場合にもほとんど $S=1$ になっており、しごき加工が行われていることがわかる。そして $r_1=50\text{mm}$ 以上になると、送りピッチが比較的大きい 0.5mm や 0.2mm の場合は、 $S>1$ となり、絞り加工になっているのがわかる。また、送りピッチの小さい 0.1mm や 0.05mm 、 0.02mm の場合にも、一度は過剰しごき加工となるが、それから絞り加工になっている。この半径方向距離による変形状態の違いは、フランジ部の剛性によるものと考えられる。加工初期ではフランジ部が大きいいためその剛性が高く、円周方向、半径方向に変形しにくい。そのためしごき加工になる。加工末期になるとフランジ部が小さくなるため剛性が低くなり、円周方向に圧縮ひずみが生じやすくなるため、絞り加工になると考えられる。また、 $p=0.5\text{mm}$ 、 0.2mm の

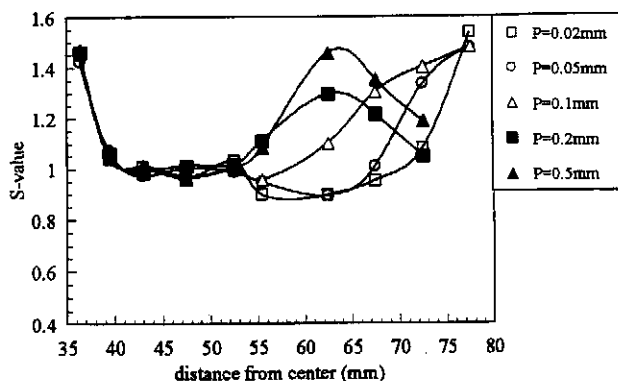


図3 送りピッチによる S 値の変化

場合に、 $r_1 \sim 65\text{mm}$ 以降で S 値が小さくなっている。これは、前述の考察と矛盾するようであるが、 p が大きいときには、外周部付近で大きいしごき加工が発生する。そのため形状がローラパスから大きくずれ、円錐半角が大きくなるからである。 p による影響に関しては、 p が大きくなるほど、絞り加工状態になる時期が早くなっているのがわかる。これは p が大きいほど、ブランク一回転あたりの変形量が増え、フランジ部に生じる円周方向の圧縮応力も大きくなるためと考えられる。

3.2 挟み力が成形品形状に与える影響

次に、他の条件を一定として、 F を $0\sim 160\text{N}$ と変えて実験を行い、 F が成形品形状に与える影響について検討した。図 4 は縦軸に S 値、横軸に半径方向座標をとっている。 $F=100\text{N}$ 、 160N のときには、 0N のときとは逆に外周部にいくほど過剰しごき加工になっている。加工中一定の F で加工を行うと、外周部へいくほどフランジ部が小さくなり、変形に対する拘束が小さくなるためと考えられる。

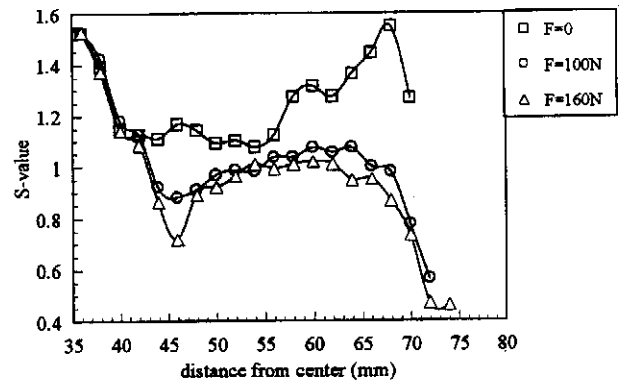


図4 挟み力による S 値の変化

図 5 は断面形状を表したもので、それぞれの曲線はグラフ内に図示した円錐台形の丸で囲まれた部分に相当する。 $F=0\text{N}$ の場合には、半径が大きいほど円錐半角が大きくなり、ローラパスの 45° から徐々に離れている。そして $F=100\text{N}$ 、 160N の場合をみると、 $F=160\text{N}$ のときには特に顕著であるが、外周部付近では円錐半角が 45° よりも小さくなり、 $F=0\text{N}$ の場合とは逆にローラパスとのずれがみられる。 S 値と形状との関係を考察すると、絞り加工になると円錐半角がローラパスより大きく、過剰しごき加工になると円錐半角がローラパスより小さくなる。このように、しごき加工からの加工状態のずれは、

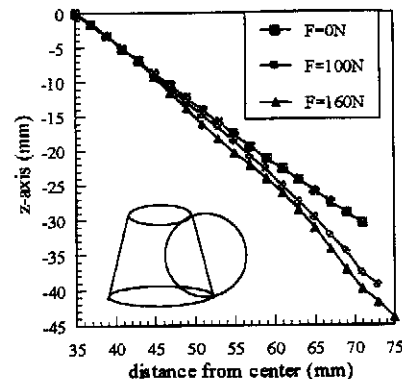


図5 挟み力による成形品形状の変化

形状の悪化の原因になるといえる。

しごき加工状態を得るためには、フランジ部の剛性を考慮して、加工中 F , p を変える必要があることが分かった。フレキシブルスピニングは連続的な加工を行うので、このような加工条件を実験だけで調べるのは容易でない。そこで次に述べるようにシミュレーションを取り入れることにした。

4. 解析

フレキシブルスピニング加工において、被加工材は非常に複雑な変形をする。そこで解析手法として、大変形解析に適した汎用の動的陽解法の解析コードである pam-crash を用いた。

ブランクには要素数 2128 個の四角形 shell 要素を用い、指数硬化型の弾塑性体、ローラには剛体要素を用い、形状は実験の場合と同じで、 $\rho_f=6\text{mm}$, $\phi=80\text{mm}$ とした。

4.1 外ローラのみによる加工

本節では外ローラのみで、円板形状から円錐台形状に加工されるときの変形状態について考察する。ブランクは要素数 1680 個のシェル要素、ローラは、 $\rho_f=6\text{mm}$, $\phi=80\text{mm}$ の剛体要素とした。加工終了までのブランクの回転回数は 18 とした。

図 6 に加工開始から加工終了までのブランクの r - z 平面での断面形状を示す。曲線の上に示された数字は、ブランクの回転回数、点線はローラパスを示している。加工の進行に応じて、外周が小さくなっており、絞りが生じている。最終的な形状としては、外周に近いほど外側に反り返った形状となった。実験においても同様の結果が得られた。外周付近では、ローラパスより外側に形状がずれているが、内周付近では、逆にローラパスよりも内側に形状のずれがみられる。既に加工された領域が仮にローラパスに沿った所望の形状に加工されていたとしても、より外周に近い領域が加工されているときに、ローラの負荷によって既加工領域にモーメントがかかり、ローラパスより内側に曲げられる。このように既加工領域にも変形が及ぶということは、従来のスピニングに比べ、フレキシブルスピニングの欠点と言える。

次に、加工力の変化について考察する。図 7 にブランクの回転角度と加工力との関係を示す。feed 方向, grip

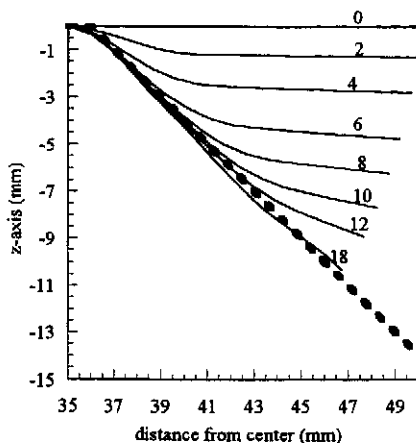


図6 成形品形状

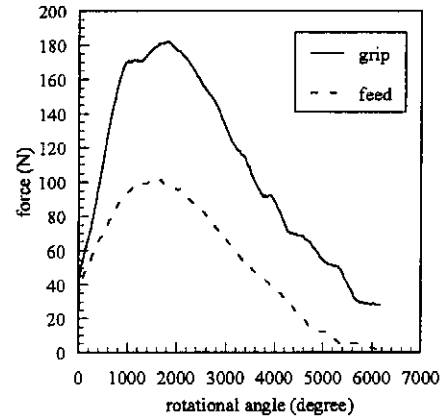


図7 加工力の推移

方向ともにブランクが約 4 回転するまで徐々に加工力があがり、その後徐々に減少している。そして、ブランク約 4 回転後は加工終了まで加工力が減少している。

4.4 solid 要素解析モデル

前章で説明したように、しごき加工は最も安定した、基本となる加工状態である。そこで、どのような F を与えれば、しごき加工状態が得られるかに注目して解析を行う。加工途中での変形状態を想定した解析モデルをつくり、そこからの変形状態を解析する。このモデルは、しごき加工が行われ、軸方向と半径方向での単純せん断によって変形が進んだと仮定したものである。

内ローラは、実験においては力 F で制御しているが、この解析では、外ローラとの隙間が常に板厚の \sin 則の値となるように強制変位により移動させることにした。このときの、内ローラにかかる力を調べることによって、しごき加工に必要な F が分かると考えられる。図 8 に有限要素モデルを示す。このモデルは $L=100\text{mm}$, $d=58\text{mm}$ のものである。ブランクには要素数 1360 個の六面体 solid 要素を用いた。ローラには剛体要素を用い $\rho_f=6\text{mm}$, $\phi=80\text{mm}$ とした。

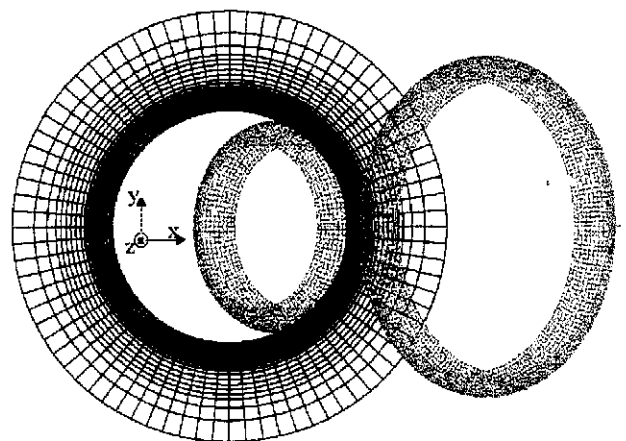


図8 有限要素モデル

4.5 フランジ巾の影響

すでに述べたように、フランジ部の剛性は加工領域の形状に大きい影響を与える。フランジ部は外径をほぼ一定とすると、その剛性は内径が小さい程高い。そこでフランジ部の剛性を表す指標として、フランジ部の半径方

向の中に注目した。フランジ巾 L_f を変えたときの加工力の変化について検討する。 d を 56mm で一定とし、 D を 80 から 140mm と変えて解析を行った。このとき L_f は、約 5.8mm から約 35.8mm となる。内ローラの grip 方向力については、 L_f が大きくなるほど、小さくなった。 L_f が小さくなるほど、二つのローラの grip 方向力の差は小さくなり、内ローラへの依存が大きくなった。

図9は F を 0 として解析を行ったときの、 $r_f=40\text{mm}$ での円周方向ひずみとフランジ巾 L_f の関係を表している。 L_f が小さいほど円周方向の圧縮ひずみが大きく、絞り傾向が現れている。

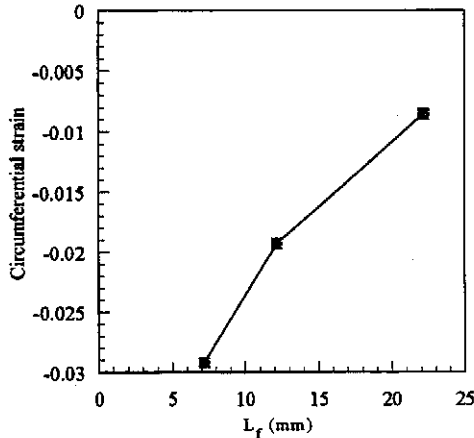


図9 円周方向ひずみと L_f との関係

以上のように、 L_f が小さくなるほど、フランジ部の剛性が小さくなり絞り傾向になるので、しごき加工状態にするためには、フランジ部の剛性を補うために、より大きな内ローラの加工力が必要になる。また、加工末期でフランジ部がほとんどなくなると、圧延加工に近い状態になるため両方ローラによる grip 力に差はなくなる。フランジ部が小さくなるにつれて、その状態に近づくため、3二つのローラによる加工力の差が小さくなる。

4.6 送りピッチの影響

送りピッチ $p=0.5\sim 3\text{mm}$ として解析を行った。図10は F を 0 として解析を行ったときの送りピッチ p と外周部での円周方向応力(実線)、及び円周方向ひずみ(点線)の関係を表している。 p が大きいほど円周方向の圧縮応力と圧縮ひずみが大きくなっている。すなわち、 $F=0$ の場合、 p が大きいほど絞り傾向となる。

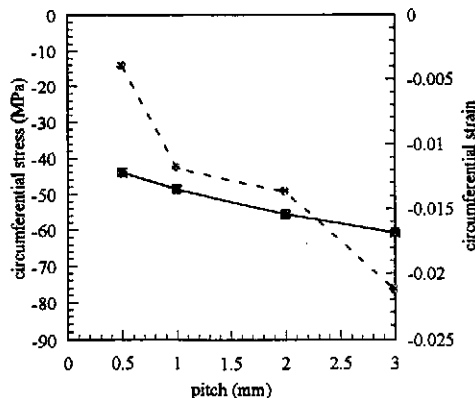


図10 円周方向応力またはひずみと送りピッチとの関係

ところで、前述の単純せん断理論では、加工力は p に比例する。しかしながら解析結果では、加工力と p は線形関係にはなっていない。この理由としてローラの形状が考えられる。ブランクは、ローラの送り方向に押し出されるだけでなく、送り方向と逆側に流れる材料もある。 p がローラの丸み半径に較べて大きい場合は特にその量が大きくなるものと考えられる。そのため、 p が大きくなるにつれて、加工力の増加量が減少するものと考えられる。特にフレキシブルスピニングの場合、ローラが二つであるため、ローラの送り方向と逆側に流れる材料が多くなり、加工力と p は、より線形関係から離れるものと考えられる。

4.7 円錐半角を変えた場合

円錐半角 $\alpha=30\sim 60^\circ$ として解析を行った。図11は加工力と円錐半角の関係を表したものである。各々の α につき、ブランクの回転数が3回転目の加工力の平均値をグラフに示している。 α が小さいほど、加工力が大きくなる。これは、同じ p では α が小さいほど、ブランク一回転あたりに生じるひずみが大きいためである。

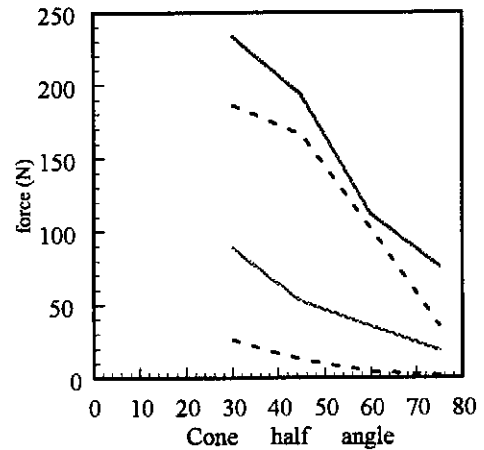


図11 加工力と円錐半角の関係

4.9 形状の悪化についての検討

4.3 で述べた、既加工部分のブランクの形状の悪化について、外ローラのみで加工した場合と、二つのローラで加工した場合とを比較する。図12(a)は外ローラのみで加工した場合の $r-z$ 平面でのブランク断面形状の上表面を表したものである。図12(b)は二つのローラで加工し、しごき加工を行った場合の断面形状である。曲線の上に

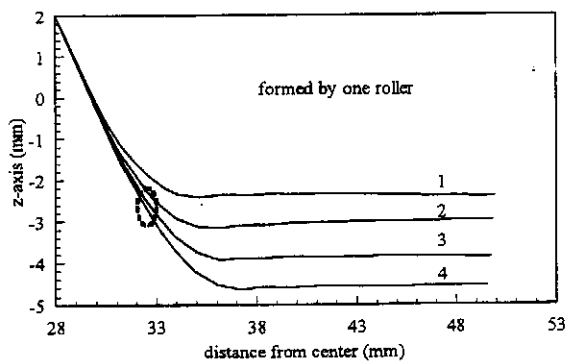


図12(a) 成形品の形状 (1ローラー)

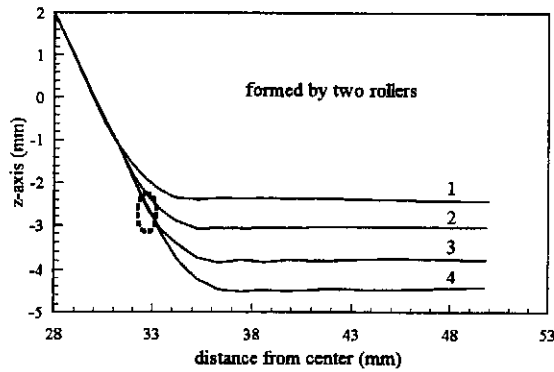


図 12(b) 成形品の形状 (2 ロールー)

示された数字はブランクの回転数を表す。どちらのグラフからも、ブランクが回転することにより、円錐形状への変形が進行しているのが分かる。図 12(a)と図 12(b)の点線の楕円で囲まれた部分はローラが既に通過した既加工部分になるが、ここに注目すると、図 12(a)の場合は既加工部分の変形が進行しているのに対し、図 12(b)の場合は既加工部分の変形が少ない。これは、内ローラがマンダレルの役目を果たし、外ローラのみでの加工の場合のように、既加工部分にモーメントがかかるのを抑えるためである。このように、しごき加工状態に保つことによって、形状の悪化が軽減されるといえる。

5. 実験

5.1 実験方法

フレキシブルスピニング加工の実験を行い、前章に述べた解析結果の検証を行うとともに、最適な加工条件について検討した。これまでの結果から、加工が進むにつれフランジ巾が減少していくことにより、加工中常に加工状態が変わることが分かった。そのため、加工中 F , p 一定の加工では、所望の加工状態を得ることは出来ない。そこで、前章で定義したフランジ巾 L_f を新たな実験パラメータとして採用した。実験の方法を図 13 を参考にしながら説明する。

まずブランクを半径方向にいくつかの領域に分ける。図では、a, b, c, d, e の半径方向位置によって、4 領域に分けたものを示した。例えば b~c(あるいは c~d)の領域で

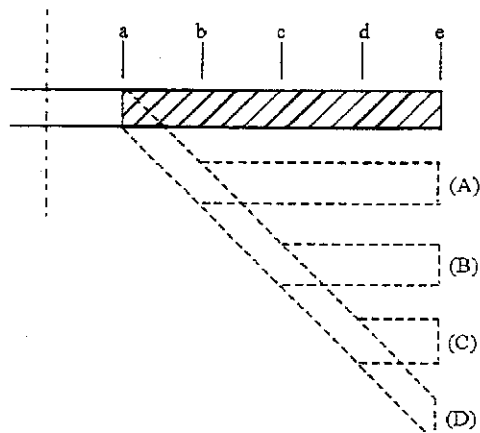


図 13 実験方法

- 1) ロールーの先端部が bc に至るまでは、 F を与えなくてもしごき加工が得られるような小さい p で加工をする。
- 2) b(c) で送りピッチを大きくし、それと同時に内ローラで挟み、 F を加える。
- 3) c(d) で加工終了となり、速やかに F をゼロにし二つのローラをブランクから離す。成形品は図 13 の(B) (図 13 の(C)) に示す形状となる。

このようにして得られた成形品の、それぞれの領域での板厚、形状を測定することによって、フランジ巾が成形品に及ぼす影響について調べることができると考えられる。

5.2 しごき加工を得るための条件について

ブランクに $D=140\text{mm}$, $d=60\text{mm}$ のものを使用し、半径方向位置で $30\text{mm}\sim 40\text{mm}$ (以降、領域 A とする), $40\text{mm}\sim 50\text{mm}$ (以降、領域 B とする), $50\text{mm}\sim 60\text{mm}$ (以降、領域 C とする), $60\text{mm}\sim 65\text{mm}$ (以降、領域 D とする) の 4 領域に分けた。領域 A では、ローラ固定用のジグとローラが干渉し、内ローラでブランクを挟むことができないため、常に前述の 1) の加工をすることにした。ここで、 F を与えなくてもしごき加工が得られる p として 0.01mm を採用した。

図 14 は横軸に送りピッチ p 、縦軸に S 値をとり、 L_f ごとにグラフにプロットしたものである。 $F=180\text{N}$ で一定とした。 S 値は各半径方向の領域での板厚分布の平均値から算出した。また L_f については、ローラの最下端部の半径方向位置を各領域での中央位置として算出した。領域 B では $L_f=25\text{mm}$ 、領域 C では $L_f=15\text{mm}$ 、領域 D では $L_f=7.5\text{mm}$ となる。送りピッチが大きいほど S 値が大きく、絞り加工になっているのが分かる。また、 L_f が小さいほど S 値が大きくなっている。これらは、解析結果と定性的に一致している。ここで図 14 より、しごき加工となり $S=1$ となる時の送りピッチを比例配分より算出し、それを図 15 にまとめた。しごき加工を得るためには、 F 一定で加工をする場合、加工が進行し L_f が小さくなるほど p を小さくする必要があることが分かる。また、 F が大きいほど p を大きくでき、加工時間を短縮できると考えられる。また、しごき加工を得るためには、 p 一定で加工をする場合、加工が進行し L_f が小さくなるほど F を大きくする必要があることが分かる。

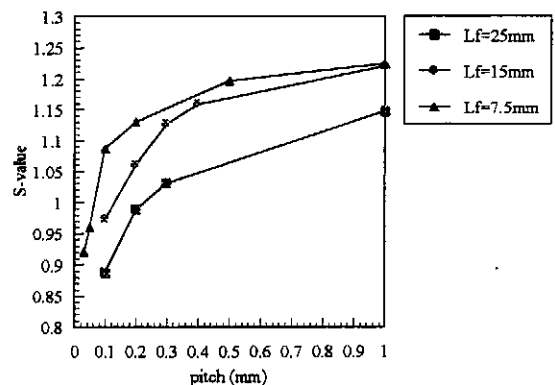


図 14 S 値とローラピッチとの関係

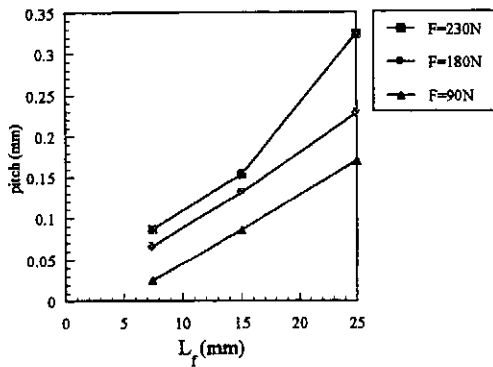


図 15 ローラーピッチと L_f との関係

次に α が変わった場合について検討する。 α を $35^\circ \sim 60^\circ$ と変えて実験を行った。 $F=180\text{N}$, $L_f=15\text{mm}$ (領域 C) とした。図 16 は横軸に p , 縦軸に S 値をとり, 各 α ごとにグラフにプロットしたものである。同じ α の場合, 送りピッチ p が大きいほうが S 値が大きくなっている。これよりしごき加工を得るためには, α が大きいほど, より大きな F か, より小さい p が必要になると考えられる。

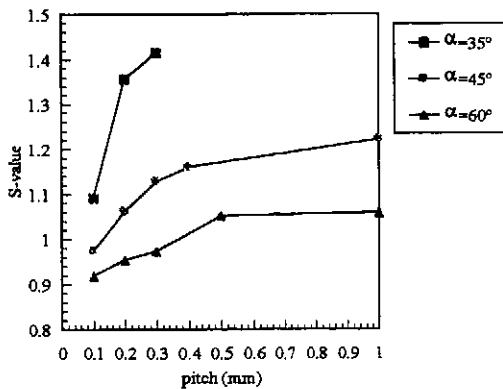


図 16 S 値とローラーピッチとの関係

5.3 形状について

形状を評価する指標として, $\Delta\alpha/\alpha$ (ローラバスの円錐半角と実際の成形品の円錐半角との差 α) を考える。この値が 0 であればローラバス通りの形状に成形されたことになり, 0 から離れるほどローラバスと成形品形状との差が大きく, 形状が悪化していることになる。図 17 は $\Delta\alpha/\alpha$ と p との関係をプロットしたものである。

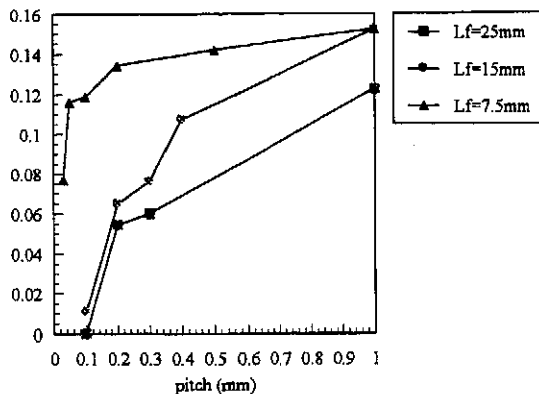


図 17 $\Delta\alpha/\alpha$ とローラーピッチとの関係

$F=180\text{N}$ で一定である。送りピッチが大きいほど ($\Delta\alpha/\alpha$) が大きくなっているのが分かる。また, L_f が小さいほど ($\Delta\alpha/\alpha$) が大きくなり, 絞り傾向が大きい条件では, 形状が悪化している。

以上のように, L_f が小さい場合や, α が小さい, 若しくは p が大きい場合など, 大きな加工力を要する条件では形状の悪化が起こる。これはフランジ部の剛性に対して, 加工力が大きくなると, フランジ部のたわみが大きくなり, 形状のずれも大きくなるためと考えられる。このことより, 形状のずれを考慮に入れて, ローラバスを設定する必要があるといえる。また, 絞り傾向が大きくなる条件で, 形状が悪化していることについては, 絞り傾向になるのも, 形状の悪化についても, その主たる原因がフランジ部の剛性という同一のものであることより説明できる。

6. 結言

フレキシブルスピニングにおいて, 任意の形状を創成するために必要な条件について, 従来の実験に加えて解析を導入し, その基本的変形特性に注目して調べた。目標としていたパラメータの一般化, 定量化には至らなかったが, その一步を踏み出すことが出来た。得られた成果は, 次の通りである。

- 1) 送りピッチ, 挟み力などのパラメータが, 成形品形状に与える影響について検討し, 実験と解析で定性的な一致を得ることができた。
- 2) フランジ部の剛性が変形状態に大きな影響を及ぼすことから, フランジ巾をパラメータとして考慮に入れ, 絞り傾向, 形状の悪化の原因について考察した。
- 3) 最適な加工条件について検討した結果, しごき加工状態を保つには, 加工が進むにつれて, p を小さくする, 若しくは F を大きくする, などの工夫が必要であり, また成形品形状のローラバスとのずれを考慮に入れて, ローラバスを設定する必要があることが分かった。

参考文献

- 1) 北澤君義, 西林: 49 回塑加連講論, (1998), 508.
- 2) 松原茂夫: 塑性と加工, 35-406(1994), 1258-1263.
- 3) 井関日出男, 久門統: 塑性と加工, 35-406(1994), 1336.
- 4) 松原正基, 田中繁一, 中村保: 塑性と加工 35-406(1994), 1330.
- 5) 長谷部, 岡田, 今井田: 49 回塑加連講論, (1998), 516.