

同期絞りスピニング加工に関する研究

杉田 栄彦

システム情報工学研究科

筑波大学

2015年 3月

概 要

本論文では、板材から異形断面形状を有する筒形状を成形できることを特徴とした、同期絞りスピニング加工を扱う。

近年の日本の製造業は、より高い付加価値を求め、細かなニーズに対応する製品や研究開発を目的とした特注品または試作品などの生産、すなわち少量多品種生産を中心に行うようになった。塑性加工分野においては、スピニング加工は少量多品種生産に適した加工技術と言われている。

スピニング加工とは板材や管材を回転させながら、ローラを押し付け、逐次的に所望の形状に成形する塑性加工である。近年では、回転軸が傾斜した軸や偏心した軸、非回転体形の断面をもつ形状、すなわち異形断面形状と呼ばれる形状のスピニング加工が研究されてきた。

しかし、それらの手法では底付箱型形状のような形状は成形できず、電池ケースや液体容器、電気機器の筐体などのニーズには応えることができなかった。

そこで本研究では、板材から円筒形状を成形できる絞りスピニング加工と、主軸の回転に同期した工具軌道で異形断面形状の成形を行う同期スピニング加工を組み合わせた同期絞りスピニング加工を開発し、その評価を行った。

第2章では、同期絞りスピニング加工の方法について述べる。絞りスピニング加工では加工ローラを金型表面付近から素板外周まで往復させる必要があるが、異形断面形状の成形には主軸の回転に同期した3次元的な非常に複雑な工具軌道が必要になる。この問題に対し、本加工法の工具軌道は、絞りスピニング加工の工具軌道を、異形断面形状の金型や板材の外周形状に合わせて補正することにより算出する。従来手法で成形できる形状に加えて、新たに2種類の異形断面形状の筒形状の成形に成功した。

第3章では、同期絞りスピニング加工の加工限界の調査を行った。絞りスピニング加工には金型表面付近から素板外周まで工具を往復させる工具軌道を、成形可能なように設定するためには未だ高い熟練を必要とするという問題がある。そこで工具軌道には加工条件に応じた程度自動的に算出されることが求められる。算出手法には、工具軌道や金型形状などの加工条件と成形性の関係性を明らかにする必要がある。そこで、工具軌道の定量的な評価を行った。そこで、3種類の基本となる工具軌道を設定し、それらの加工限界を調査した。

第4章では、工具軌道の自動算出を目指し、金型高さ方向に過不足ない工具軌道を算出するため、素板直径と金型形状の関係から成形可能な寸法を算出する方法について検討した。金型断面形状から金型の表面積を算出し、素板の表面積と比較を行うことで、得られる成形品の高さを算出する。

第5章では、得られた知見をまとめ、今後の課題を考察する。

目 次

目 次	i
図目次	iv
表目次	vii
記号表	viii
第1章 序 論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 スピニング加工とへら絞り	1
1.1.2 絞りスピニング加工とパスプログラミング	4
1.1.3 しごきスピニング加工	5
1.2 異形断面形状のスピニング加工に関する先行研究	6
1.2.1 同期スピニング加工	6
1.2.2 力制御スピニング加工	6
1.2.3 予備成形されたワークを用いるスピニング加工法	7
1.2.4 傾斜しごきスピニング加工による垂直壁の成形	7
1.3 直交多軸逐次成形機による角筒形状の成形	9
1.4 研究の主眼	10
1.5 研究の構成	11
第2章 同期絞りスピニング加工法の開発	12
2.1 研究目的	12
2.2 加工法の基本構想	13
2.3 工具パスプログラミング	14
2.3.1 工具軌道の表現方法	14
2.3.2 金型断面形状の計測	16
2.3.3 工具軌道算出のアルゴリズム	17
2.4 実験環境	19
2.4.1 スピニング加工機	19
2.4.2 形状測定装置	20
2.5 円筒形状の成形実験	22
2.5.1 金型と素板	22
2.5.2 パスセットの設定	23
2.5.3 成形結果と肉厚分布	24

2.6	角筒形状の成形実験	26
2.6.1	金型形状	26
2.6.2	成形実験と成形品外形	27
2.6.3	金型と成形品の表面間距離の算出	28
2.7	その他種々の成形品	32
2.7.1	3種類の金型と素板	32
2.7.2	3種類の形状に対するパスセット	34
2.7.3	楕円錐体形状の成形結果	34
2.7.4	傾斜軸を持つ錐体形状の成形結果	35
2.7.5	偏心軸を持つ異形断面形状	36
2.8	凹輪郭を有する筒形状の成形品	38
2.8.1	金型の設計	38
2.8.2	円形素板での成形実験	39
2.8.3	非円形素板	40
2.8.4	非円形素板での成形実験	41
2.9	同期絞りスピニング加工の開発に関するまとめ	43
第3章	パスセットに関する加工限界の調査	44
3.1	研究目的	44
3.2	加工法の基本構想	46
3.3	種々のパスセット	47
3.3.1	パスセットの組み合わせ方	47
3.3.2	パスの素板外周側の計算方法	48
3.4	実験環境と加工条件	50
3.5	円筒形状の加工限界	53
3.5.1	円筒形状の金型と素板	53
3.5.2	回転パスセット	53
3.5.3	移動パスセット	55
3.6	角筒形状の加工限界	58
3.6.1	角柱形状の金型と素板	58
3.6.2	回転パスセット	58
3.6.3	角筒形状の移動パスセット	60
3.6.4	角筒形状の回転移動パスセット	62
3.7	円筒形状、角筒形状の比較	65
3.8	考察	66
3.9	要約	67
第4章	成形高さの算出方法に関する検討	68

4.1	研究目的	68
4.1.1	パスプログラミングにおける成形高さと成形不良	68
4.1.2	幾何モデルを用いた円筒形状における算出手法	69
4.1.3	同期絞りスピニング加工における成形高さの算出手法の基本方針	69
4.2	成形高さの算出手法	71
4.2.1	計測された金型断面形状から実際の金型形状への復元	71
4.2.2	金型表面積の算出	72
4.2.3	成形高さの算出	73
4.3	定量的評価	75
4.3.1	算出に用いたパラメータ	75
4.3.2	計算結果	76
4.4	要約	78
4.5	今後の課題	78
第5章	結論	80
5.1	知見	80
5.2	技術的考察	81
5.3	展望	82
	謝辞	83
	参考文献	84
	研究発表	86
付録A.	先行研究の特長と本研究の位置付け	87
付録B.	凹輪郭を有する形状の金型の図面	88
付録C.	プログラム	91
C.1	パスセットの自動生成を行うプログラム	91
C.2	金型断面形状の計測結果から成形高さを求めるプログラム	97

目次

Fig. 1-1 スピニング加工	1
Fig. 1-2 加工法による単価の比較 : (a) 円筒形状, (b) 錐体形状, (c) 皿形状	3
Fig. 1-3 口絞り加工	4
Fig. 1-4 回転しごき加工	4
Fig. 1-5 絞りスピニング加工	5
Fig. 1-6 しごきスピニング加工	5
Fig. 1-7 同期スピニング加工におけるローラの往復運動	6
Fig. 1-8 力制御スピニング加工	7
Fig. 1-9 予備成形されたワークを用いるスピニング加工	7
Fig. 1-10 傾斜しごきスピニング加工	8
Fig. 1-11 一般的な逐次張り出し成形	9
Fig. 1-12 治具と金型を用いた逐次絞り成形	9
Fig. 1-13 工具軌道面の方向制御を用いた逐次張り出し成形による角筒形状の成形	9
Fig. 1-14 研究の構成	11
Fig. 2-1 同期絞りスピニング加工の基本構想	12
Fig. 2-2 工具軌道算出手法の概要	13
Fig. 2-3 曲線パスの形状	15
Fig. 2-4 インピーダンス制御を基にした力制御	15
Fig. 2-5 金型断面形状の計測方法	16
Fig. 2-6 金型断面形状の計測結果の例	17
Fig. 2-7 工具軌道の算出手順	18
Fig. 2-8 スピニング加工機	19
Fig. 2-9 形状測定装置	20
Fig. 2-10 円柱形状の金型	22
Fig. 2-11 直径 130 mm の素板	23
Fig. 2-12 同期絞りスピニング加工の検証に用いたパスセット	23
Fig. 2-13 円筒形状の成形品	24
Fig. 2-14 円筒形状の成形品と金型のそれぞれの外周半径	25
Fig. 2-15 円筒形状の成形品の肉厚分布	25
Fig. 2-16 円筒形状の成形品のスプリングバック	25

Fig. 2-17 角柱形状の金型	26
Fig. 2-18 直径 120 mm の円形素板	26
Fig. 2-19 角筒形状の成形品外観	27
Fig. 2-20 角筒形状の成形品の断面	27
Fig. 2-21 四角形を印した素板による角筒形状の成形	27
Fig. 2-22 成形品および金型断面の形状計測結果	28
Fig. 2-23 角の表面間距離の算出方法	31
Fig. 2-24 成形品と金型の表面距離	31
Fig. 2-25 楕円の錐体形状の金型	32
Fig. 2-26 傾斜軸を持つ錐体形状の金型	33
Fig. 2-27 垂直壁と偏心軸を持つ錐体形状の金型	33
Fig. 2-28 共通して用いたパスセット	34
Fig. 2-29 楕円錐体形状の成形品	35
Fig. 2-30 楕円錐体形状の成形品の肉厚分布	35
Fig. 2-31 傾斜錐体形状の成形品	36
Fig. 2-32 傾斜錐体形状の成形品の肉厚分布	36
Fig. 2-33 偏心軸と垂直壁を持つ形状の成形品	37
Fig. 2-34 偏心軸と垂直壁を持つ形状の成形品の肉厚分布	37
Fig. 2-35 凹輪郭を有する形状の金型の図面	38
Fig. 2-36 円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品	39
Fig. 2-37 円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品の肉厚分布	39
Fig. 2-38 素板のプロット	40
Fig. 2-39 切り出された素板	40
Fig. 2-40 非円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品	41
Fig. 2-41 高さ方向に均一でないフィードマーク	41
Fig. 2-42 非円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品の肉厚分布	42
Fig. 3-1 テンプレートをを用いた葉山の研究	44
Fig. 3-2 加工限界の調査の目的	45
Fig. 3-3 回転パスセットのモデル	47
Fig. 3-4 移動パスセットのモデル	48
Fig. 3-5 回転移動パスセットのモデル	48
Fig. 3-6 パスの素板外周側の計算方法	49
Fig. 3-7 実際のパスセット	52
Fig. 3-8 回転パスセットによる円筒形状の成形品	54
Fig. 3-9 回転パスセットによる円筒形状の成形結果	54
Fig. 3-10 回転パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分布	54

Fig. 3-11 初期角度 80 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形結果.....	55
Fig. 3-12 破断箇所（移動量 0.06、成形高さ 45 mm）	55
Fig. 3-13 初期角度 62 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形品.....	56
Fig. 3-14 初期角度 62 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形結果.....	56
Fig. 3-15 移動量 0.10 の移動パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分布	57
Fig. 3-16 成形高さ 60 mm の移動パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分 布.....	57
Fig. 3-17 回転パスセットによる角筒形状の成形品	59
Fig. 3-18 回転パスセットによる角筒形状の成形結果	59
Fig. 3-19 回転パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布	59
Fig. 3-20 移動パスセットによる角筒形状の成形品	60
Fig. 3-21 移動パスセットによる角筒形状の成形結果	60
Fig. 3-22 初期角度 80 deg の移動パスセットによって破断した角筒形状の成形品	61
Fig. 3-23 初期角度 80 deg の移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布	62
Fig. 3-24 初期角度 62 deg の移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布	62
Fig. 3-25 回転移動パスセットによる角筒形状の成形品一覧	63
Fig. 3-26 回転移動パスセットによる角筒形状の成形結果	64
Fig. 3-27 回転移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布	64
Fig. 4-1 不適切な成形高さの設定による破断やしわの発生	68
Fig. 4-2 幾何モデルによる円筒形状の成形高さ	69
Fig. 4-3 成形高さの算出手法の概要	70
Fig. 4-4 実際の金型形状の算出	72
Fig. 4-5 金型表面積の算出	73
Fig. 4-6 成形高さの算出	75
Fig. 4-7 計測された金型断面形状と算出された金型の表面位置	77
Fig. B-1 凹輪郭を有する金型全体	88
Fig. B-2 凹輪郭を有する金型本体	89
Fig. B-3 凹輪郭を有する金型用の押さえ金.....	89
Fig. B-4 凹輪郭を有する金型用の留め金.....	90

表目次

Table 1-1 主な塑性加工技術	2
Table 1-2 スピニング加工の大別	4
Table 2-1 スピニング加工機の仕様（200W AC サーボモータ）	19
Table 2-2 XY ステージおよび回転ステージの仕様	20
Table 2-3 レーザ変位計の仕様	21
Table 3-1 絞りスピニング加工の加工条件	46
Table 3-2 スピニング加工機の仕様（400W AC サーボモータ）	50
Table 3-3 共通する加工条件	51
Table 3-4 変更させた加工条件	51
Table 3-5 円筒形状のための回転パスセットのパラメータ	53
Table 3-6 円筒形状のための移動パスセットのパラメータ	55
Table 3-7 角筒形状のための回転パスセットのパラメータ	58
Table 3-8 角筒形状のための移動パスセットのパラメータ	60
Table 3-9 角筒形状のための回転移動パスセットのパラメータ	62
Table 3-10 成形実験結果の比較	65
Table 4-1 算出に用いたパラメータ	75
Table 4-2 金型断面計測で計測されたローラの位置	76
Table 4-3 算出された金型表面位置	76
Table A-1 異形断面形状のスピニング加工の比較	87

記号表

記号

α	成形型の半角 第3章では、正規化されたパスセットにおける金型高さ方向の移動量	[rad]
D	素板の直径	[mm]
t_0	素板の板厚	[mm]
t	被加工部の肉厚 第2.3.1項では、正規化されたパスの制御時間	[mm]
θ	第3章では、パスの立ち上がり角 第4章では、円錐の展開図における扇形の中心角	[rad] [rad]
p	工具の1回転当たりの送り量（送りピッチ）	[mm/rev]
F	ローラにかかる加工力	[N]
ρ	ローラの先端丸み半径	[mm]
ρ_M	金型の先端丸み半径	[mm]
d	金型の直径	[mm]

添え字（記号を a とする）

a_d	制御変数 a に対する目標値	
a_i	i 番目の金型断面に関する変数 a	
\dot{a}	a の1階の時間微分 da/dt	[1/s]
\ddot{a}	a の2階の時間微分 d^2a/dt^2	[1/s ²]

第1章 序 論

本章では、本研究の基礎となる塑性加工法の「スピニング加工」に関する概要を示す。次に本研究に関わる先行研究を紹介した後、本研究の主眼と構成を示す。

1.1 研究背景

1.1.1 スピニング加工とへら絞り

スピニング加工 (Metal spinning) とは円形の板材や管材を旋盤に固定し、回転させながらローラを押し当てて所望の形状に成形する塑性加工 (Plastic forming) の1種である(**Fig. 1-1**) [1-4]。板材の場合、成形型を用いることが多い。一般的に、素材となる板材は素板 (Blank disk) と呼び、成形型はマンドレル (Mandrel) と呼ばれる。

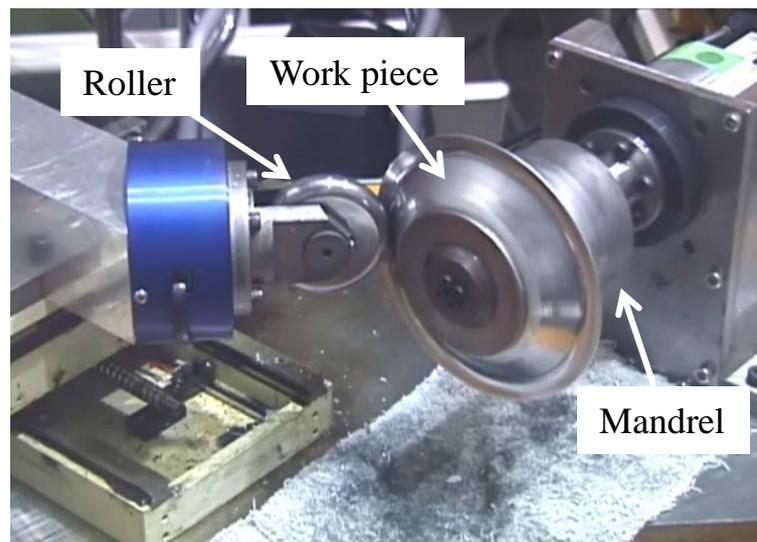


Fig. 1-1 スピニング加工

また、スピニング加工は、ローラと素材の接触点で逐次的に成形が行われるため、逐次成形の1種として位置付けることもできる。特に、回転する棒状工具を板材に押し付け、板材を張り出させる逐次張り出し成形 (Incremental forming) [20-23]とも関連がある。逐次張り出し成形は、フライス盤のような機械に板材を取り付け、工具を等高線状に動かすことにより、所望の形状に成形する加工法である。

人力によるスピニング加工は「へら絞り」と呼ばれる。かつて先端がへら状の棒状の工具

で板材を絞っていたことから、その呼び名で呼ばれてきた。しわや破断を生じさせぬよう、適切に工具動かす必要があり、高度な技量を必要としてきた。

塑性加工とスピニング加工

金属材料に大きな力を加え、塑性変形によって所望の形状を得る加工技術は塑性加工と呼ばれる。塑性加工は **Table 1-1** のようにさらに分けられる。圧延加工 (Rolling) や押し出し加工 (Extrusion)、引き抜き加工 (Drawing) は材料を送り、金型に沿った直線的な形状を成形する手法である。この手法では、板材や管材、ビーム材などの比較的単純な形状を成形する。一方、鍛造加工 (Forging) やプレス加工 (Press working)、転造加工 (Form rolling) は金型で材料を挟み込むことで所望の形状に成形を行う。ただし、鍛造加工はハンマーなどで叩いて成形を行うものもある。これは自由鍛造と呼ばれる。

そして、材料に工具を押し当ててながら動かし成形するスピニング加工や逐次張り出し成形は逐次成形 (Incremental forming) に分類される。

Table 1-1 主な塑性加工技術

単純な形状を成形する加工法	圧延加工
	押し出し加工
	引き抜き加工
金型で挟み込む、またはハンマーで叩く加工法	鍛造加工
	プレス加工
	転造加工
工具で変形させる加工法 (インクリメンタルフォーミング)	スピニング加工
	逐次張り出し成形

スピニング加工での成形品

スピニング加工は様々な回転体形状の製品の成形に用いられてきた。具体的には、家庭用品では鍋やボウル、皿などが、航空宇宙産業ではロケットのノーズコーンや燃料ノズル、探査機のカプセルなどが挙げられる。また、パラボラアンテナや照明機器の反射板の製造にも用いられている。さらに自動車産業では、触媒管やホイール、マフラーなど非常に多くの部品の製造に用いられている。その他、ラッパやトランペットの楽器類や、擬宝珠、トロフィーなどの工芸品も、スピニング加工によって作られてきた。

スピニング加工はそれ単体で使われることは少なく、他の加工法と織り交ぜて行われることもある。例えば、自動車のホイールは、鋳造された形状から、回転しごき加工 (後述) によって、所望の肉厚と高さに成形される。

スピニング加工と少量多品種生産

スピニング加工は、同じ塑性加工法であるプレス加工に比べて、使用する金型が少ないことが長所であるが、逐次成形のため加工時間が長い点が短所として挙げられる。加工時間の長さはすなわち時間当たりの生産量が少ないことを意味する。

スピニング加工とプレス加工の単価の比較図を **Fig. 1-2** に示す。この図は文献[4]を参考に作成した。文献[4]は 1970 年代のデータであり、現在の数値とは多少異なるものの、その傾向は概ね同じであると考えられる。このデータによると、(a)筒形状と(c)皿形状は、生産量 2000 個未満の時はスピニング加工の単価の方が小さいが、それ以上は、プレス加工の単価が下回る。プレス加工は、雄雌の金型を複数用いるため、それ自体の費用とアライメントのため、初期費用が大きい。しかし、1 製品あたりの加工時間は短いため、製品数を増やすことでその単価は小さくなる。

(b)の錐体形状は生産数が増えても、スピニング加工のほうが単価を抑えられている。この形状は、スピニング加工では工程数が特に少なく、一方、プレス加工では工程数が多い。

このようにスピニング加工は、プレス加工に比べて初期コストが抑えられるという特徴があるため、形状とその求められる生産量に応じて加工法が選ばれる。

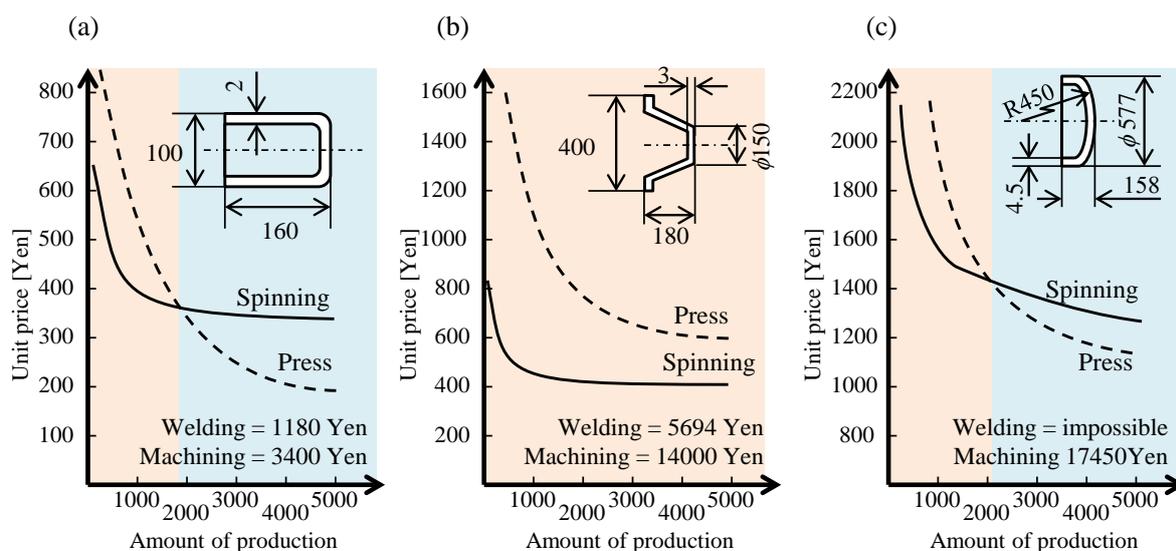


Fig. 1-2 加工法による単価の比較：(a) 円筒形状、(b) 錐体形状、(c) 皿形状

(文献[4]を元に作成)

スピニング加工の分類

スピニング加工は扱う材料の形状や変形形態の違いから **Table 1-2** のように分類される。

板材を用いるスピニング加工は「絞りスピニング加工」(Conventional multipass spinning) [5-11]と「しごきスピニング加工」(Shear spinning) [12-13]に大別される。本研究では、これらの違いは重要であるため、詳しくは後述する。

また、管材を用いるスピニング加工は、**Fig. 1-3** のように管材の縮径を行う「口絞り加工」

(Necking) や、**Fig. 1-4** のように長い薄肉管を作る回転しごき加工 (Flow forming) などが挙げられる。口絞り加工は、管端をローラで繰り返し押し込み、徐々にその直径を小さくしていく加工である。管材は板材に比べ、剛性が高いため、金型を用いずに行われることもある。

Table 1-2 スピニング加工の大別

素材形状	大分類	成形品形状
板材、皿形状	絞りスピニング加工	錐体形状、筒形状
板材、皿形状	しごきスピニング加工	錐体形状
管材、管形状	口絞り加工 (ネッキング)	管形状 (縮径)
管材、管形状	回転しごき加工 (フローフォーミング)	管形状 (肉厚減少)
	その他 (カーリング加工、 トリミングなど)	

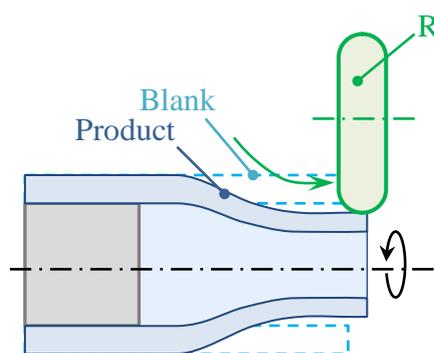


Fig. 1-3 口絞り加工

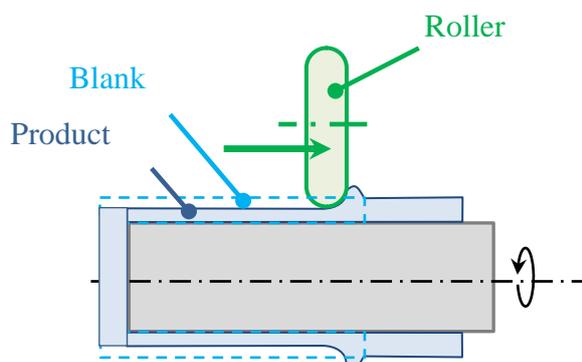


Fig. 1-4 回転しごき加工

1.1.2 絞りスピニング加工とパスプログラミング

絞りスピニング加工とは、金型に取り付けた板材を、繰り返し往復するローラで徐々に成形型の形状に成形する加工法である (**Fig. 1-5**) [5-11]。古くから、職人の手で行われてきたへら絞りはこれに相当する。成形品の形状によっては、1 パスのみで成形が行える場合もあり、そのような場合は、特に「単純絞りスピニング加工」(Simple pass spinning) と呼ぶ。

絞りスピニング加工は、しわや破断を生じぬよう、最も効率的な工具軌道を設定することが課題として挙げられる。

手動の絞りスピニング加工では、テンプレートと呼ばれるガイドを利用して工具を動かすが、このテンプレートの形状は様々ある。葉山[8]によると、凹型テンプレート、すなわち、金型周辺では金型に沿い、素板外周につれてその角度を大きくしていく工具軌道がしわに対して安定に、成形を行えると報告されている。

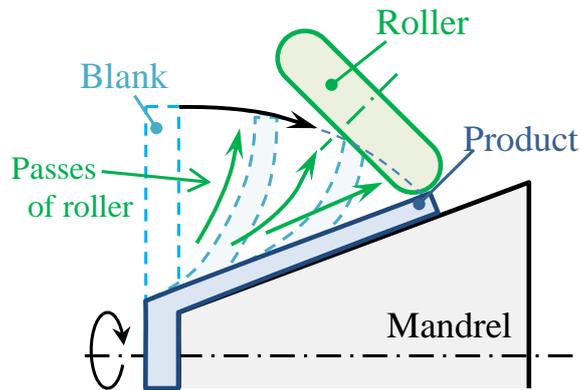


Fig. 1-5 絞りスピニング加工

1.1.3 しごきスピニング加工

しごきスピニング加工は、素板中央から金型に沿うようにローラを動かし、素板を金型形状に張り出させる加工法である (Fig. 1-6) [12-13]。このとき素板の外周形状は変形を起こさない点が絞りスピニング加工と異なる。また、外周の縁を曲げる、またはジグを用いて固定するなどして、外周部に十分な剛性を持たせた場合は、金型を用いずに成形することが可能である。これをダイレススピニング加工 (Die-less spinning) と呼ぶ。

しごきスピニング加工による成形品の壁部の肉厚は、塑性加工分野で言われる体積一定の法則により、sine 則 (式(1-1)) に従う。 t は成形後の肉厚、 t_0 は素板の板厚、 α は円錐半角である。

$$t = t_0 \sin \alpha \quad (1-1)$$

逆に言えば、所望の壁部の肉厚 t に対し、sine 則によって素板の板厚 t_0 を決定することができる。しごきスピニング加工はこの sine 則によって肉厚が決定されるため、非常に高精度な製品が期待される。

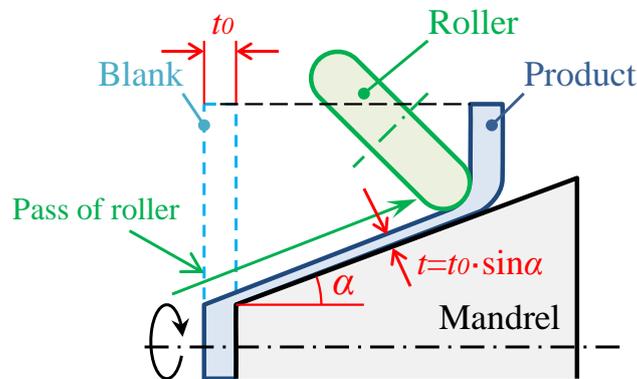


Fig. 1-6 しごきスピニング加工

1.2 異形断面形状のスピニング加工に関する先行研究

近年のスピニング加工は、加工機の発展により、主軸に対し傾斜した軸や偏心した軸を持つ、または非回転体形状の断面を持つ形状、すなわち異形断面形状と呼ばれる形状が成形可能なスピニング加工技術が研究開発されている。本稿では特に本研究に関連が深いものを紹介する。

1.2.1 同期スピニング加工

同期スピニング加工は、ワークの回転に同期してローラの位置を制御し、非軸対称の断面をもつ形状を成形する加工法である (Fig. 1-7)。

天野と田村[14]は、異形断面形状の金型とローラの接触点を幾何的に求め、ローラのカム機構で制御することにより、この加工法を実現した。これら研究では、ローラは主軸に対して垂直に取り付けられているため、ローラの接触点は主軸の角度と円錐半角によって求めた。本手法では、ローラを素板中央から外周に向かって動かし、しごきスピニング加工が実現されていた。

荒井ら[15]は数値制御を用いて、管材の同期スピニング加工を実現した。複数のローラを管材の回転に同期して数値制御することで、非軸対称の断面をもつ管材の成形を実現した。円形断面の素管を非軸対称断面に成形する際、素管断面形状から目標とする最終形状の間を、ローラの往復数に合わせて途中形状を補間する。

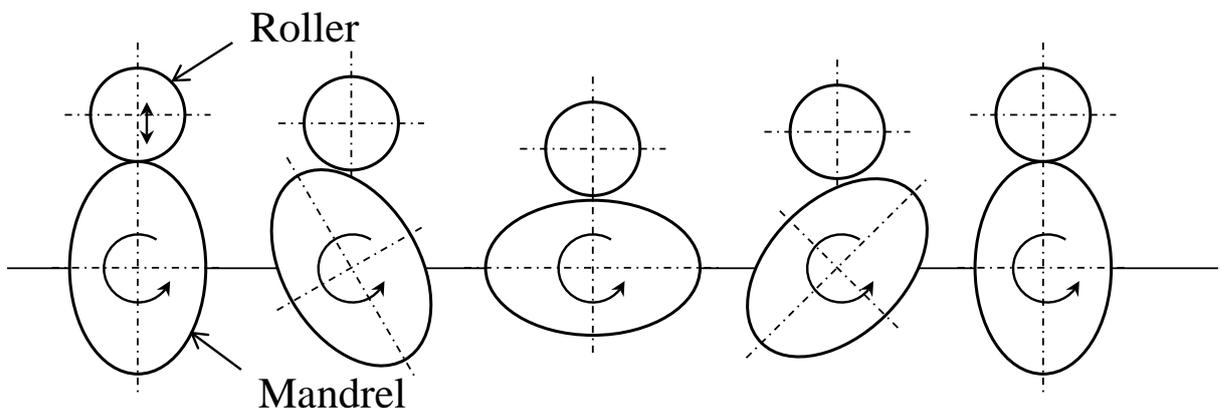


Fig. 1-7 同期スピニング加工におけるローラの往復運動

(文献[14]を元に作成)

1.2.2 力制御スピニング加工

力制御スピニング加工は、ローラにかかる加工力を制御することにより、金型に沿う工具

軌道を自動的に生成し、異形断面形状を成形する手法である (Fig. 1-8)。この手法では、必然的にローラが金型に沿って移動するため、しごきスピニング加工が実現される。

Awiszus ら[17]はばねを利用して、荒井[16]は力フィードバック制御を用いてこの手法を実現した。

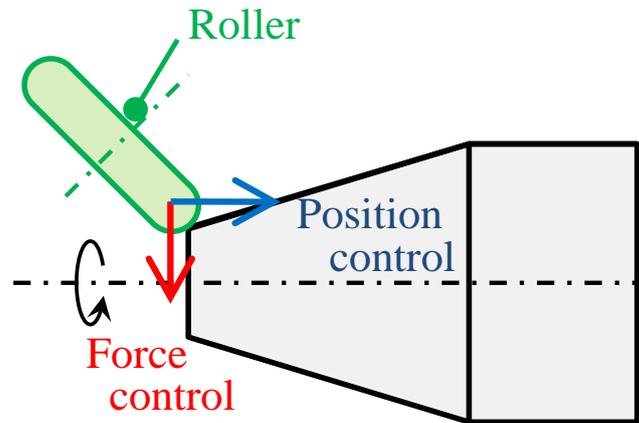


Fig. 1-8 力制御スピニング加工

1.2.3 予備成形されたワークを用いるスピニング加工法

Härtel ら[18]は、円形素板から円錐形に成形した後に、トライポッド型に追加工する手法を提案した。板材から大きく変化する形状は成形不良が生じるため、予備成形を行うことで、最終形状であるトライポッド型を得ることに成功した。

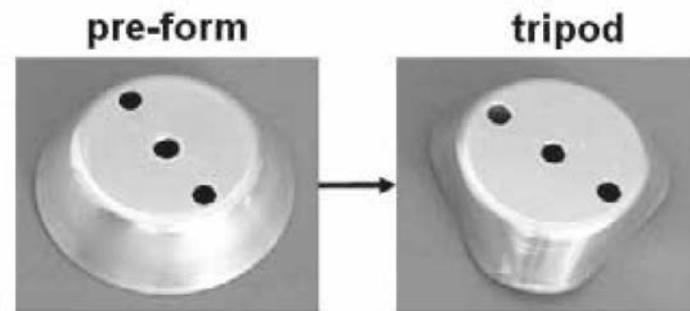


Fig. 1-9 予備成形されたワークを用いるスピニング加工
(文献[18]から引用)

1.2.4 傾斜しごきスピニング加工による垂直壁の成形

通常、しごきスピニング加工は sine 則によって、底面に対して垂直な壁面を成形することはできない。しかし、関口ら[19]は、素板を底面に対して傾斜させることで、しごきスピニング加工でありながら、底面に対して垂直な壁面の成形を実現した。

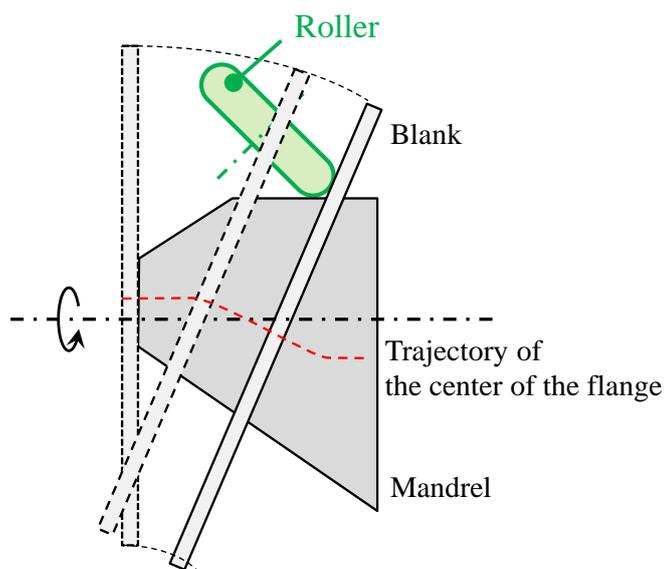


Fig. 1-10 傾斜しごきスピニング加工

1.3 直交多軸逐次成形機による角筒形状の成形

直交多軸逐次成形機による逐次張り出し成形は、多軸 NC フライス盤の主軸に取り付けた棒状工具を数値制御しながら金属板に押し付けることで、金属板を所望の形状に張り出させる加工法である (Fig. 1-11)。一般的な逐次張り出し成形は金型を用いず、板材の外周を固定し、中央部を張り出させる。このため、しごき変形となり、成形後の壁面の肉厚は、sine 則に従う。すなわち、外周部に対して垂直に張り出させることができない。

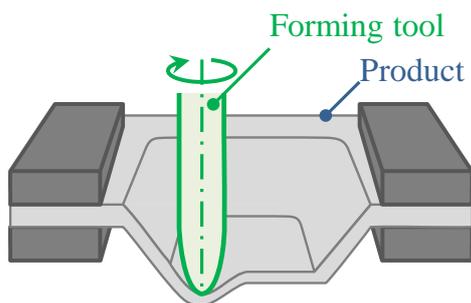


Fig. 1-11 一般的な逐次張り出し成形

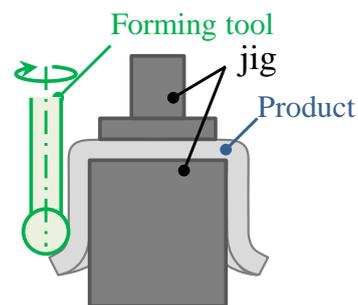


Fig. 1-12 治具と金型を用いた逐次絞り成形

しかし、丸山ら[22]は、まず作業工程を分割して逐次張り出し成形を行うことで、浅い垂直壁を持つ形状の逐次張り出し成形を実現させた (Fig. 1-12)。そして、さらに深い角筒形状を成形するために、金型と専用の治具を用いて板材を固定し、その外周部を押し倒す方法を考案した。これにより「逐次絞り成形」を実現した。

また、市川ら[23]は、工具を等高線状に動かすのではなく、工具軌道を傾斜させた面で張り出させることで、垂直壁を有する形状の成形を実現させた。特に、角筒形状は、まず四角錐に張り出させた後 (Fig. 1-13(a)) に、その壁面を底面とする三角錐を張り出させ (Fig. 1-13(b))、さらに傾斜している壁面を繰り返し張り出させることで成形できることを示した。この手法は、成形後の板厚が予測できるが、壁部の位置によってひずみや板厚が異なる特徴がある。これは張り出させられた回数だけ肉厚が薄くなるためである。

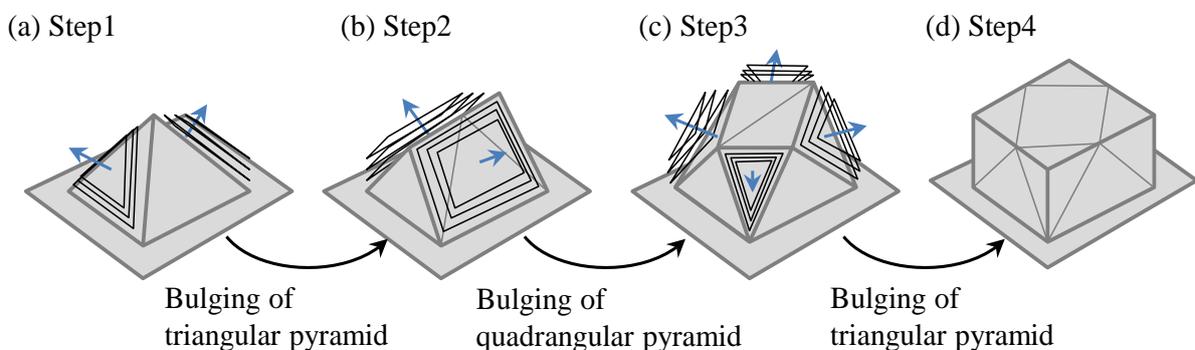


Fig. 1-13 工具軌道面の方向制御を用いた逐次張り出し成形による角筒形状の成形
(文献[23]を元に作成)

1.4 研究の主眼

本研究の主眼は、異形断面形状が成形可能な同期絞りスピニング加工のインテリジェント化、フレキシブル化を目指すところにある。本研究は、同期絞りスピニング加工に関して、開発から段階的に行った。

- (1) 同期絞りスピニング加工の開発
- (2) 工具軌道に関する加工限界の調査
- (3) 成形高さの計算手法の検討

(1)に関しては、電池ケースや電気機器の筐体などで箱型形状、すなわち底面を持つ、非回転体形状の筒形状の成形はニーズがある一方で、これまでのスピニング加工では対応できなかった。そこで、本研究では絞りスピニング加工に異形断面形状の成形手法を適用し、同期絞りスピニング加工の開発を行った。

(2)と(3)に関しては、職人のノウハウに依存しない絞りスピニング加工、すなわち工具軌道の自動生成手法の開発を目指している。異形断面形状は回転体形状に比べて、加工中にしわや破断が生じやすく、工具軌道の設定が一層難しい。成形可能な工具軌道を実験的に模索することは、初期コストを大きくする要因になるため、好ましくない。そのため、所望の形状に合わせて、ある程度自動的に工具軌道が設定されることが望ましいと思われる。

特に、工具軌道に注目した加工限界の調査は、生産性につながることから産業的価値の他、学術的知見を含め、意味があるものと言える。

1.5 研究の構成

Fig. 1-14 に本研究の構成を示す。本研究は同期絞りスピニング加工の開発とその工具軌道に関するものである。同期絞りスピニング加工の開発から、その成形性について発展的な研究を行った。

第2章では、同期絞りスピニング加工の開発について述べる。同期絞りスピニング加工は、絞りスピニング加工と同期スピニング加工を組み合わせることによって、実現される。

しかし、同期絞りスピニング加工は、絞りスピニング加工同様、工具軌道の自由度が多く、その設定方法に作業者の勘と経験を必要とする。特に、異形断面形状は変形形態が複雑になることから、より一層工具軌道の設定が難しくなるという問題があった。そこで、工具軌道は、求められる成形品の仕様（寸法や肉厚）から自動的に算出されることが望ましい。

そこで、第3章では、同期絞りスピニング加工の加工限界について調査を行い、工具軌道と成形性の関係について、定量的な評価を行った。

第4章では、工具軌道の自動算出のために成形高さを求める方法について、基本となる検討を行った。

第5章では、本研究で得た知見をまとめる。そして、今後の展望と本研究結果を述べる。

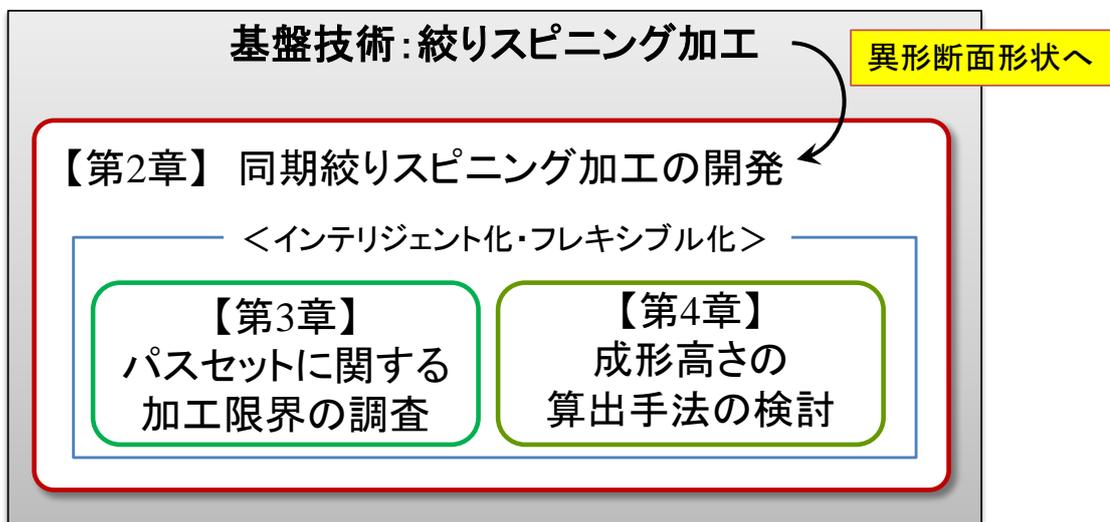


Fig. 1-14 研究の構成

第2章 同期絞りスピニング加工法の開発

本章では、同期絞りスピニング加工の開発について説明する。

2.1 研究目的

絞りスピニング加工はプレス加工に比べて、側面から成形するため、深い底やくびれをもつ形状を比較的簡単に成形できる点が利点である。一方、成形可能な形状は回転体形状に限られるという欠点があった。しかし、電池ケースや電気機器の筐体などで非回転体の断面形状を持つ深い筒形状のニーズは多い。従来、そのような形状は深絞り加工、すなわち雄雌の金型セットを複数用いて、板材から徐々に成形を行われてきた。しかし、それは多くの金型を用いるため、初期費用が大きく、試作や特注品のコストを大きくしている要因の1つである。そこで、少量多品種生産に有利なスピニング加工でそのような形状を成形できることが望まれる。

よって、本研究では、断面が非回転体形状の筒形状の成形可能なスピニング加工を開発することを目的とする。筒形状が成形可能な絞りスピニング加工と、異形断面形状を成形する同期スピニング加工を組み合わせた同期絞りスピニング加工の開発を目指す (Fig. 2-1)。

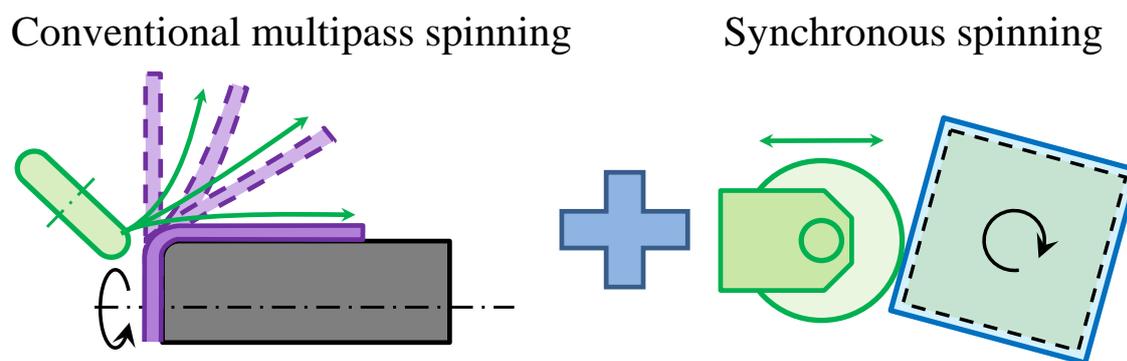


Fig. 2-1 同期絞りスピニング加工の基本構想

2.2 加工法の基本構想

多サイクルパスの絞りスピニング加工の、繰り返し外周ごと素板を変形させる工具軌道は、工具軌道すなわち加工時間が長いものの、段階的に変形していくため、加工限界の観点から成形可能な形状が多いという特徴がある。そのため、多サイクルパスを採用したい。

また、異形断面形状を成形するために、主軸に同期した工具軌道を採用したい。しかし、金型付近から素板外周まで往復する工具軌道を前提とするため、金型付近では金型に沿う工具軌道、外周付近では素板外周に沿う軌道が求められる。これは、金型付近では素板を金型に密着させる必要があり、素板外周付近では素板外周を均等に変形させる必要があるためである。

よって、以上の観点から、工具軌道の算出には次のことを満たす必要がある。

- ・工具軌道は簡単に変更することができる
- ・金型表面付近では金型表面に沿う軌道になる
- ・素板外周付近では素板外周形状に沿う軌道になる

さらに、絞りスピニング加工の比較的長く、かつ主軸に同期した工具軌道をオフラインで設定する場合、工具軌道のデータは非常に複雑で大量になり、現実的ではないと考えられる。そこで、この工具軌道を比較的少ないデータ量と計算量で求める必要がある。このことから、工具軌道は正規化された座標で与えられる工具軌道に沿って、金型と素板の間を線形補間することによって求めることにする。(Fig. 2-2)

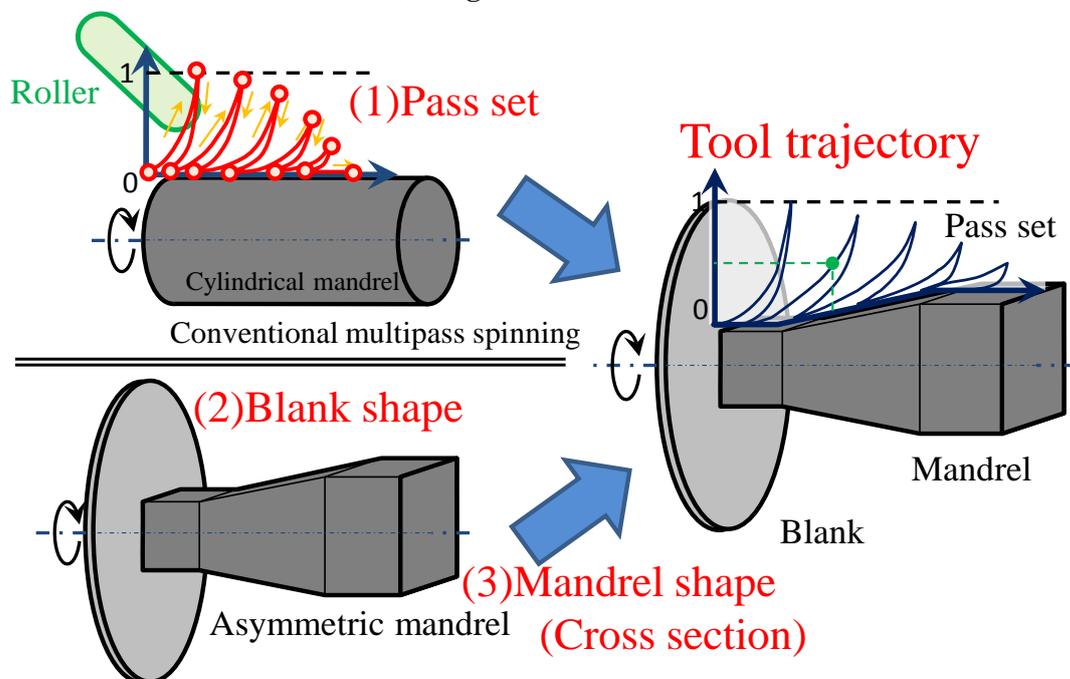


Fig. 2-2 工具軌道算出手法の概要

2.3 工具パスプログラミング

2.3.1 工具軌道の表現方法

パスは、金型高さ方向と金型半径方向に正規化された二次元座標において、始点と終点とその補間方法で定義される。パスを複数組み合わせ、最終的な加工を行う多サイクルのパス群をパスセットと呼ぶ。補間方法は、位置制御を行う直線パスと曲線パス、力制御を行う力制御パスを組み合わせ設定する。

直線パスおよび曲線パスは、始点の座標 (q_{xs}, q_{ys}) と終点の座標 (q_{xe}, q_{ye}) 、主軸角速度、送りピッチで設定される。ただし、工具軌道は連続でなくてはならないため、2 パス目以降の始点は直前のパスの終点とする。

直線パスは、始点と終点間を直線で補間する。曲線パスは、**Fig. 2-3** に示すように、始点と終点の間を円弧の一部を伸縮した曲線で補間する。金型付近から素板外周へ向かうときは式(2-1)を、その逆は式(2-2)を用いる。 t は各パスにおける制御時間である。従来の絞りスピニング加工では、平面上の素板を金型付近においては金型表面に近い角度で押し倒し、外周に近づくにつれてその角度を大きくしていく。この曲線を参考に曲線パスには円弧を採用した。

$$\begin{cases} s_x(t) = q_{xs} + (q_{xe} - q_{xs}) \frac{\cos \alpha - \cos((\beta - \alpha)t + \alpha)}{\cos \alpha - \cos \beta} \\ s_y(t) = q_{ys} + (q_{ye} - q_{ys}) \frac{\sin((\beta - \alpha)t + \alpha) - \sin \alpha}{\sin \beta - \sin \alpha} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\begin{cases} s_x(t) = q_{xs} + (q_{xe} - q_{xs}) \frac{\sin((\beta - \alpha)t + \alpha) - \sin \alpha}{\sin \beta - \sin \alpha} \\ s_y(t) = q_{ys} + (q_{ye} - q_{ys}) \frac{\cos \alpha - \cos((\beta - \alpha)t + \alpha)}{\cos \alpha - \cos \beta} \end{cases} \quad (2-2)$$

$$(\alpha = 15 \text{ deg}, \beta = 75 \text{ deg})$$

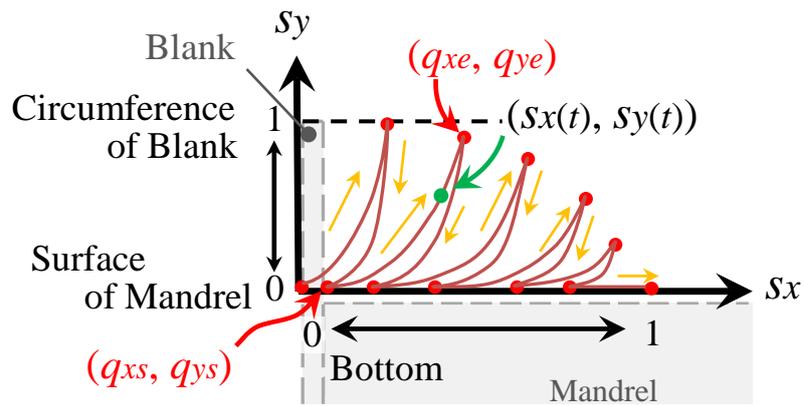


Fig. 2-3 曲線パスの形状

力制御パスは、金型高さ方向に一定の速度で送りつつ、金型半径方向に力制御を行うパスである。力制御はインピーダンス制御を基にし、式(2-3)に示す制御則で行った。 \ddot{y}_d は金型半径方向の目標加速度であり、計測された F_y と目標力 F_{yd} 、仮想減衰項 B_v 、仮想慣性項 M_v から算出される (Fig. 2-4)。そして、この目標加速度 \ddot{y}_d を積分することによって、モータへの出力指令である速度 \dot{y}_d を求める。

この制御則では目標位置 Y_d がないため、力制御パスでは工具が金型に沿う軌道となる。よって、設定内容としては終点の q_{xe} 、目標押し付け力 F_{yd} 、主軸角度、送りピッチとした。

$$\begin{aligned} \ddot{y}_d &= (F_y - F_{yd} - B_v \cdot \dot{y}_d) / M_v \\ \dot{y}_d &= \int \ddot{y}_d dt \end{aligned} \quad (2-3)$$

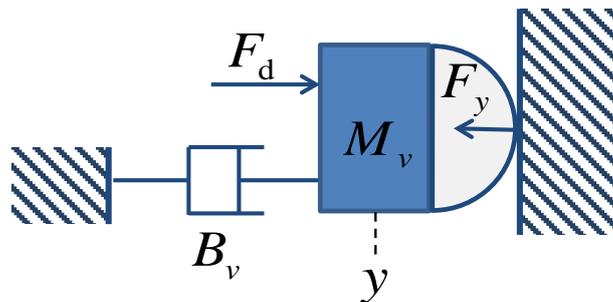


Fig. 2-4 インピーダンス制御を基にした力制御

2.3.2 金型断面形状の計測

素板を金型に密着させるように位置制御を行うためには、金型に沿う軌道が必要になる。非球面体ローラと異形断面形状の金型との接触モデルを一般的に定義することは難しい。加えて、金型の取り付け時の誤差を小さくする必要がある。

そこで、実際にローラを押し当て、金型断面形状を計測することを考える。それによって次の利点がある。

- ・非球面体形状のローラと異形断面形状の金型の接触モデルが不要である。
- ・金型の位置決め誤差が自動的に考慮される。
- ・計測用の専用装置が不要である。

ローラを金型半径方向に力制御、金型高さ方向に位置制御し、弱い力でローラを押し付けた状態から金型を低速で回転させ、その押し返されるローラの位置を計測する手法で行う (**Fig. 2-5**)。制御則は力制御パスと同じである。

この方法で計測できる k 番目の金型断面形状を $y_p(k, \theta)$ と置く。

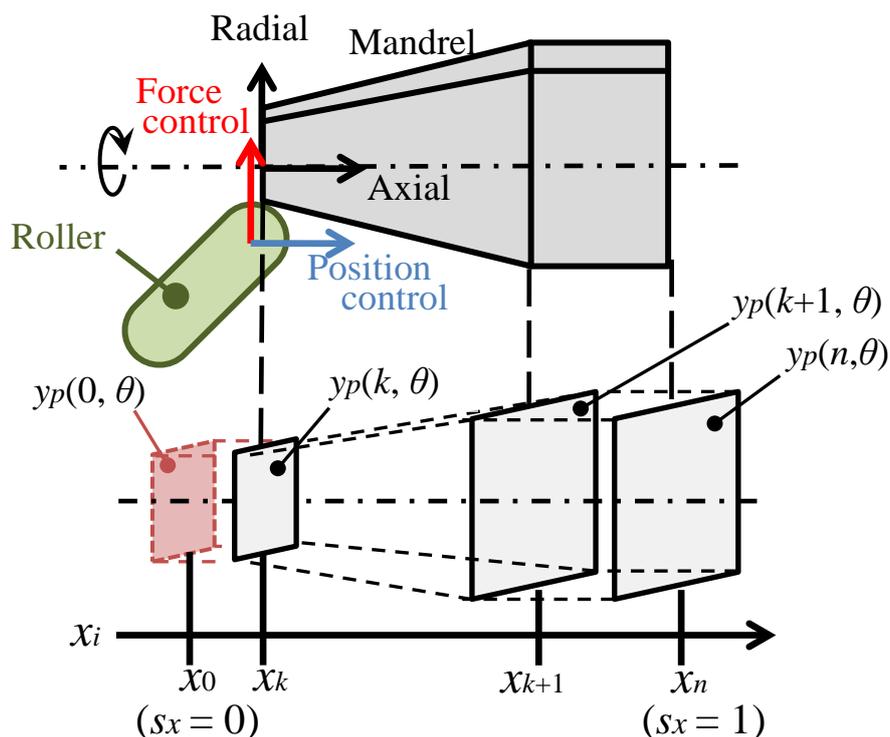


Fig. 2-5 金型断面形状の計測方法

異形断面形状の計測結果の例として、底面 60 mm 四方の角柱形状の金型を計測したときの金型断面形状を **Fig. 2-6** に示す。**Fig. 2-6** では、1 周を 100 分割し、計測したものである。灰色で塗りつぶした領域が実際の金型形状であり、青の点群が計測された金型断面形状である。非球面形状のローラと異形断面形状の金型の複雑な接触軌道が計測された。

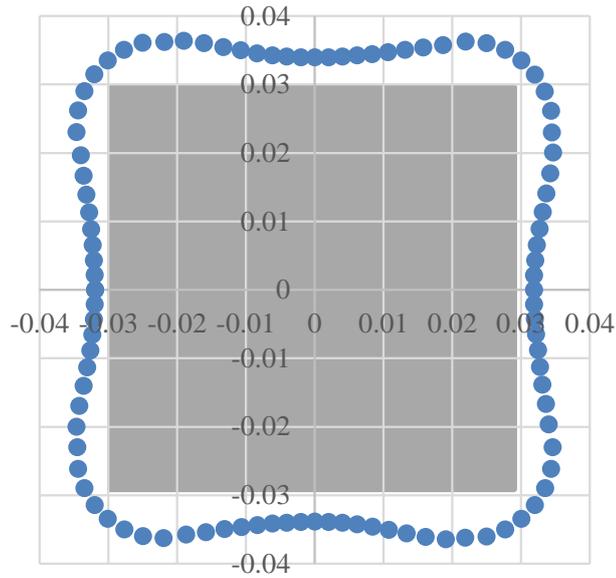


Fig. 2-6 金型断面形状の計測結果の例

2.3.3 工具軌道算出のアルゴリズム

設定したパスセットと計測で得られた金型断面形状、素板外周形状から工具軌道の算出手順を次に示す。(Fig. 2-7)

- (1) 金型高さ方向の工具位置 x_t を求める。パスで与えられる $s_x(t)$ から、式(2-4)により求める。また、算出した x_t とそれを挟む計測された金型断面位置 x_k, x_{k+1} から、金型断面間における補間係数 s_k を式(2-5)により求める。

$$x_t = x_0 + (x_n - x_0) \cdot s_x(t) \quad (2-4)$$

$$s_k = \frac{x_t - x_k}{x_{k+1} - x_k} \quad (2-5)$$

- (2) x_t における金型半径方向の工具位置 y_t を求めるため、まず、 x_t における金型断面形状をその前後の計測断面 $y_p(k, \theta)$ と $y_p(k+1, \theta)$ の線形補間、式(2-6)から求める。

$$y_p(x_t, \theta) = s_k y_p(x_{k+1}, \theta) + (1 - s_k) \cdot y_p(x_k, \theta) \quad (2-6)$$

- (3) パスから与えられる $s_y(t)$ を用いて算出した金型断面形状 $y_p(x_t, \theta)$ と、素板外周形状 $y_b(\theta)$ の線形補間、式(2-7)より求める。

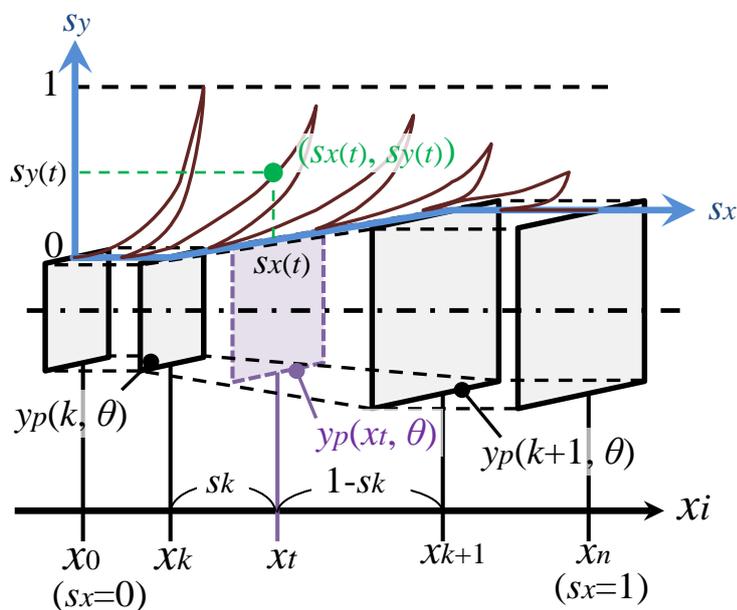
$$y_t = s_y(t) y_b(\theta) + (1 - s_y(t)) \cdot y_p(x_t, \theta) \quad (2-7)$$

- (4) (1)~(3)の工具位置の計算をパスに沿って逐次行い、工具軌道の算出を行う。

この方法ではパスが 0~1 の正規化されたデータで設定されているので、パスセット、金型、素板を独立して扱え、かつ比較的少ないデータ量および計算量で工具軌道を算出でき

るという特長がある。このため、一旦成形可能なパスが得られると、類似の形状であれば、金型形状、素板外周形状のデータを交換するだけで成形が可能になると考えられる。

- (1) Calculate x_t from $s_x(t)$
- (2) Generate cross-section at x_t by interpolation



- (3) Calculate $y_t(\theta)$ from $y_p(x_t, \theta)$ and $y_b(\theta)$

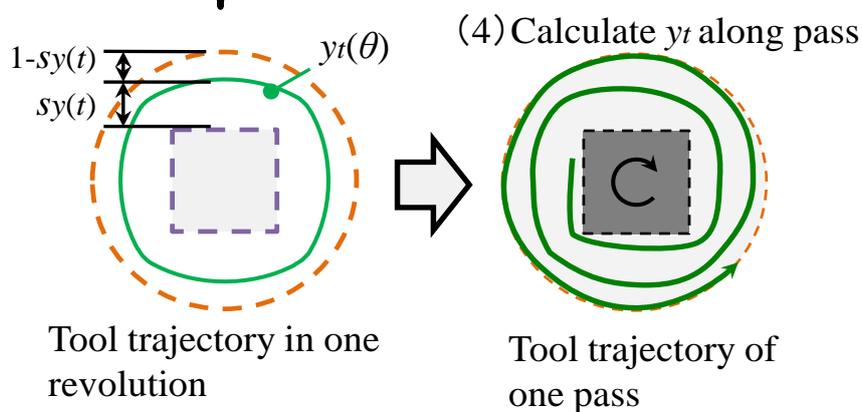
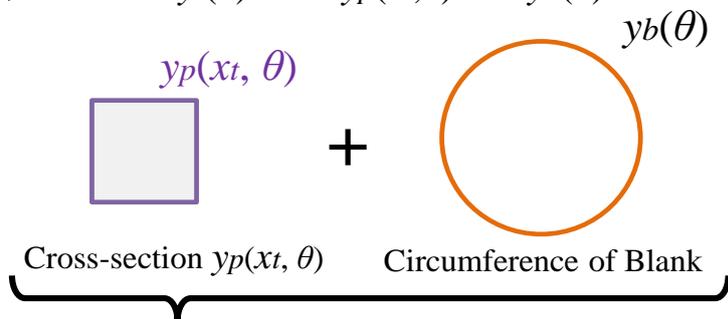


Fig. 2-7 工具軌道の算出手順

2.4 実験環境

2.4.1 スピニング加工機

実験に用いたスピニング加工機の概略図を **Fig. 2-8** に、仕様を **Table 2-1** に示す。

加工ローラは 6 軸力センサを介して、45 deg の角度をなすように XY テーブルに取り付けられている。XY テーブルは 5 mm ピッチのボールねじで構成され、ロータリエンコーダ付きの 200 W の AC サーボモータで制御される。主軸は減速比 21 の遊星歯車機構を介して、XY テーブルと同等の AC サーボモータで制御される。この AC サーボモータに取り付けられているシリアルエンコーダの分解能は 8192 ($=2^{13}$) に設定した。

6 軸力センサやエンコーダの信号は IO ボードを介して、パーソナルコンピュータ (CPU: Pentium II, 450 MHz, OS: MS-DOS) に取り込まれる。サーボモータへの電圧指令は D/A ボードを介して、モータドライバに送られる。制御周期は 1 ms である。

ローラは直径 70 mm、丸み半径 8 mm、材質は SKD11 である。

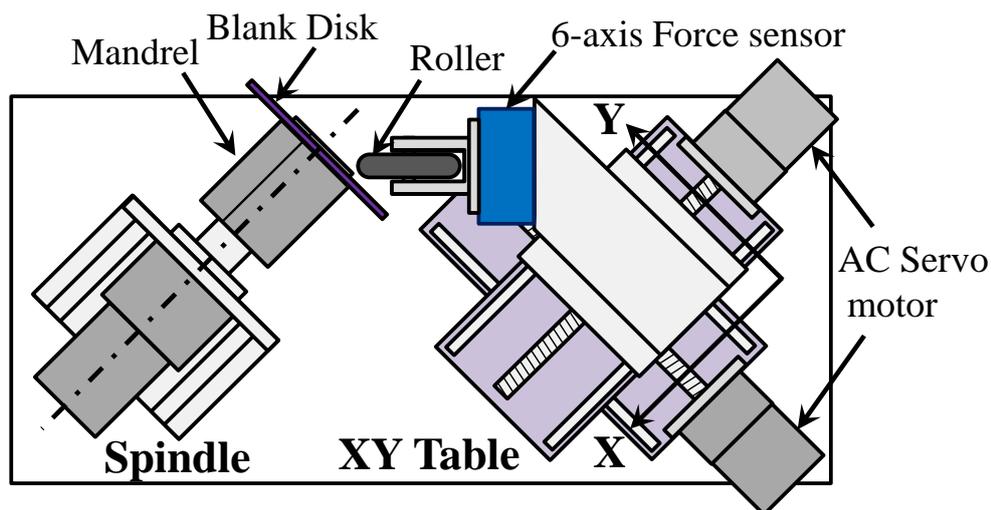


Fig. 2-8 スピニング加工機

Table 2-1 スピニング加工機の仕様 (200W AC サーボモータ)

	X,Y 軸	θ 軸
定格推力/トルク	800 N	13.4 Nm
定格速度	0.25 m/s	142.9 rpm
移動量	150 mm	-

2.4.2 形状測定装置

成形品の形状を計測するための、レーザ変位計を用いた形状測定装置を **Fig. 2-9** に示す。この形状測定装置は、主に XY ステージと回転ステージおよびレーザ変位計で構成される。それぞれの仕様を **Table 2-2** と **Table 2-3** に示す。XY ステージと回転ステージはステッピングモータで駆動される。XY ステージはボールねじで構成され、回転ステージに対して金型高さ方向および金型半径方向に取り付けられている。レーザ変位計は主軸に対して垂直になるように XY ステージに取り付けられている。このレーザ変位計は測定範囲が±40 mm となっている。測定対象の形状によっては、この測定範囲を超えてしまうため、測定箇所が測定範囲の中央になるため、レーザ変位計の位置、すなわち XY ステージを制御する。

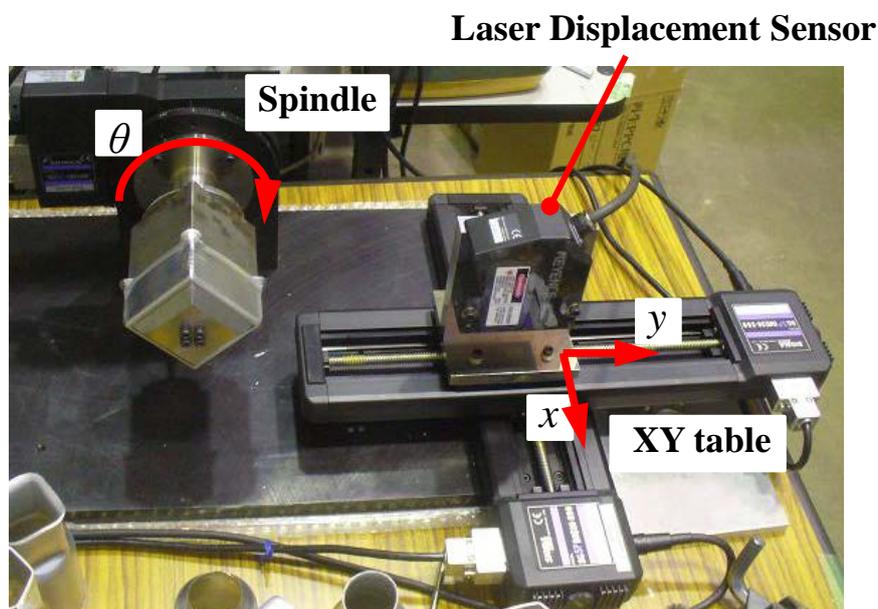


Fig. 2-9 形状測定装置

Table 2-2 XY ステージおよび回転ステージの仕様

	XY Table	Spindle
型式	SGSP26-200	SGSP-120YAW
移動量	200 mm	—
最大移動量	30 mm/s	30 deg/s
繰り返し位置決め精度	0.025 [※] μm	0.02 deg

※設定により、0.008～2 μm 可変

Table 2-3 レーザ変位計の仕様

型式	LK-G150
基準距離	150 mm
測定範囲	± 40 mm
光源	赤色半導体レーザー
繰り返し精度	0.5 μm
スポット径	φ 120 μm

2.5 円筒形状の成形実験

絞りスピニング加工が実現できていることを確認するため、円筒形状の成形実験を行った。

2.5.1 金型と素板

円筒形状を成形するために、**Fig. 2-10** に示す円柱形状の金型を用いた。直径は 85 mm、高さは 90 mm、材質は S45C である。角は R2 で丸められている。また、押さえ金は、直径 80 mm、厚さ 3 mm である。

素板は直径 130 mm、厚さ 1 mm、材質純アルミニウム (A1100-H24 材) を用いた。中央部には 20 mm の穴が開いている。実験装置には芯押し台がないため、素板中央部の穴を利用して、押さえ金で挟み込むようにねじ止めする。

金型断面形状の計測は金型先端付近 2 か所と、加工終了地点 1 か所で行った。加工終了地点は金型の先端から 29 mm の位置である。これは金型と素板の形状から葉山[8] の成形高さの計算式より、成形品の高さは 29 mm と求まるため設定した。

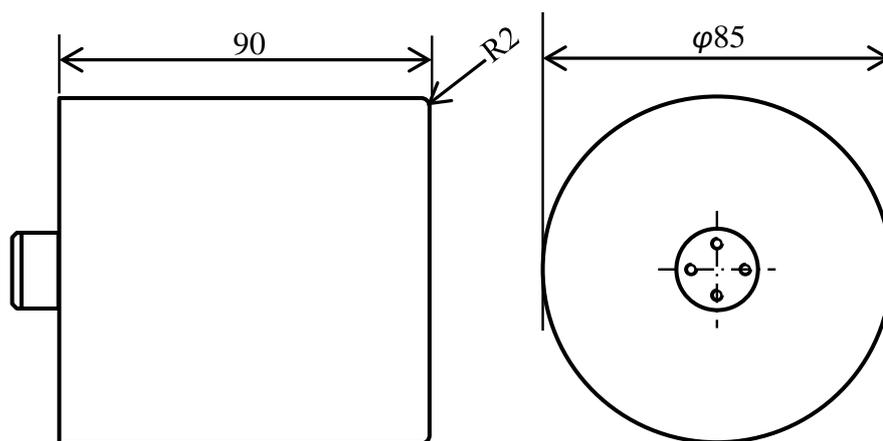


Fig. 2-10 円柱形状の金型

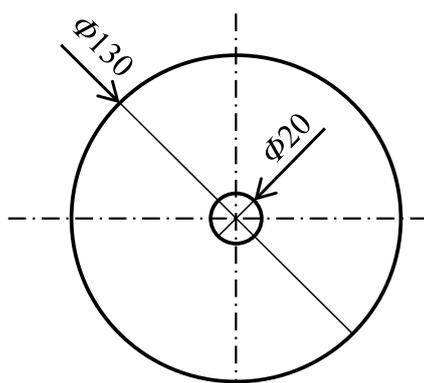


Fig. 2-11 直径 130 mm の素板

2.5.2 パスセットの設定

パスセットは、しわや破断が生じないように実験的に模索し、**Fig. 2-12** のように設定した。このパスセットは 23 往復で、初めは曲線パスで素板を絞っていき、16 往復目からは力制御パスと曲線パスを交互に織り交ぜながら成形を行うパスセットである。

主軸速度は曲線パスのとき 15 rpm、力制御パスは 7.5 rpm とした。力制御パスでは金型とローラが接触するため、制御の応答の観点からやや遅めに設定した。ローラの送りピッチは、素板外周に向かう曲線パスは 1.5 mm/rev、金型表面に向かう曲線パスは 3.0 mm/rev、力制御パスは 0.5 mm/rev とした。今回のパスセットでは、主に素板外周に向かう曲線パスで加工を行うため、金型表面に向かう曲線パスの送りピッチを大きくした。

力制御パスでの押しつけ力は 500 N とした。

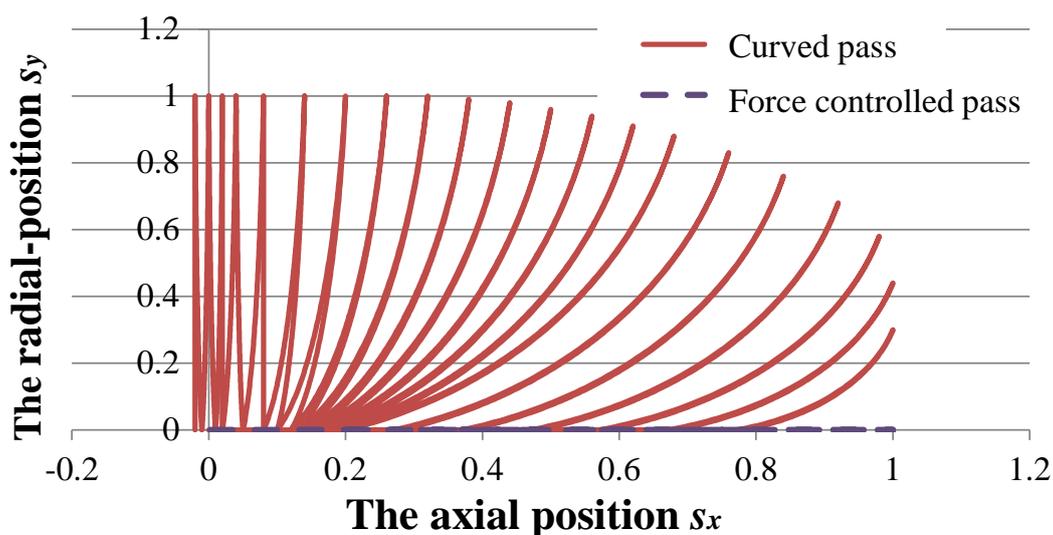


Fig. 2-12 同期絞りスピニング加工の検証に用いたパスセット

2.5.3 成形結果と肉厚分布

以上の加工条件での成形品の外観を **Fig. 2-13** に示す。金型計測は約 1 分 10 分程度、加工時間は 21 分 35 秒であった。表面は光沢があり、またローラの接触痕であるフィードマークが残った。これは素板の材質よりもローラの材質が硬いためである。裏面には、金型が転写されており、金型と密着して成形を行えたことがわかる。成形高さは約 35 mm であった。**Fig. 2-13** 中の成形品下側、すなわち開口端側では圧延方向に対して 45 deg の 4 方向にわずかに伸びが見られ、これは板材の異方性によるものと思われる。

成形品の評価として、成形品と金型の外径や肉厚分布の計測を行った。成形品と金型の外周半径は形状測定装置を用いて計測した。主軸角度 90 deg、底面から距離 1 mm から 27 mm までの測定結果を **Fig. 2-14** に示す。底面から 20 mm 程度のところまではほぼ平行であるが、それ以降は大きく開いていることがわかる。

また、マイクロメータで 2 mm 間隔で計測した肉厚分布を **Fig. 2-15** に示す。肉厚は底面付近を最大にして減少していき、20 mm のところで最小値を迎えた。その後、また増加していった。

成形品と金型の外周半径の差から肉厚を引いたものをスプリングバックとして計算したものを **Fig. 2-16** に示す。スプリングバックは、底面付近からほぼ単調に増大していった。最大で 0.3 mm 程度であった。



Fig. 2-13 円筒形状の成形品

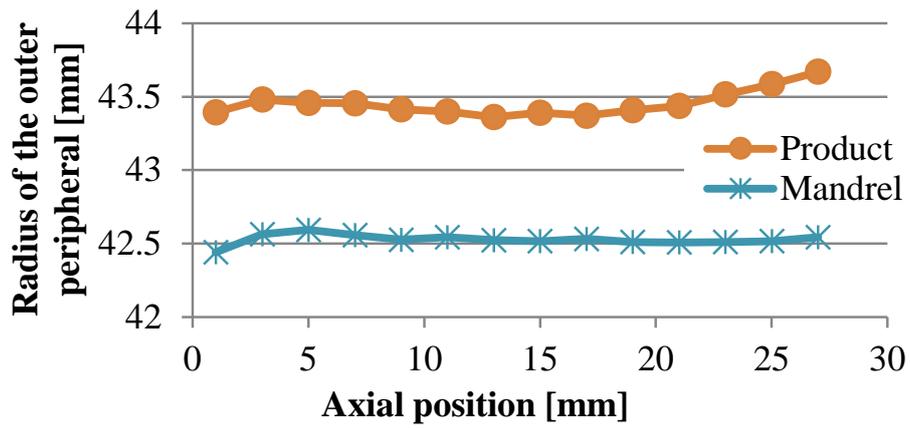


Fig. 2-14 円筒形状の成形品と金型のそれぞれの外周半径

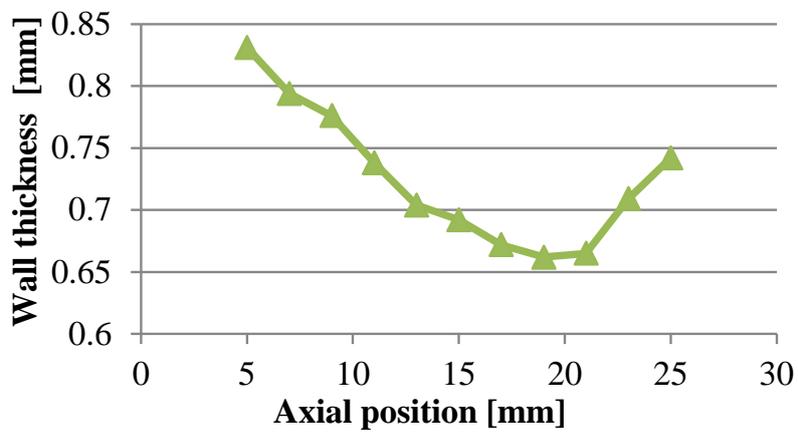


Fig. 2-15 円筒形状の成形品の肉厚分布

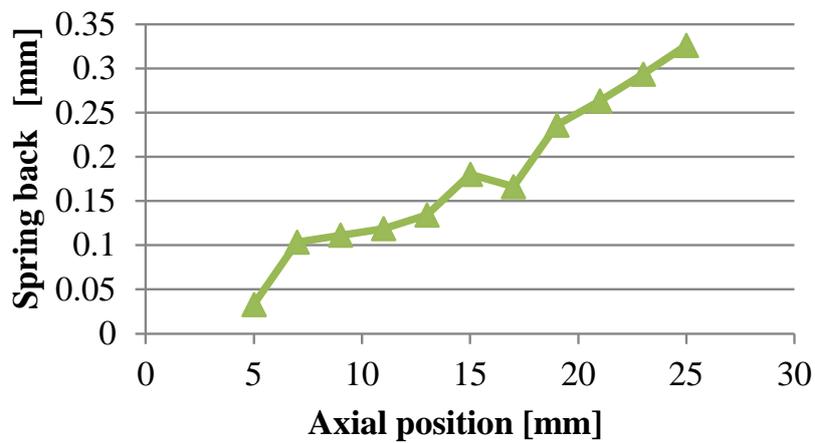


Fig. 2-16 円筒形状の成形品のスプリングバック

2.6 角筒形状の成形実験

垂直壁を有する異形断面形状が成形可能であることを検証するため、角筒形状を成形した。

2.6.1 金型形状

角筒形状を成形するための金型を **Fig. 2-17** に示す。本金型は底面が 60 mm 四方の正方形、高さ 90 mm、材質 S45C の角柱形状である。角は R1 で丸められている。押さえ金は 54 mm 四方である。

素板は直径 120 mm、厚さ 1 mm の純アルミニウム (A1100-H24) を用いた (**Fig. 2-18**)。円筒形の成形と直径以外は同じである。

異形断面形状の場合、成形品の高さを予測することは難しい。そこで、底面の辺の部分では素板がそのまま折りたたまれると仮定して、成形高さを $(120 - 60)/2 = 30$ mm とした。よって、金型断面形状の計測は、金型先端付近 2 か所と、金型の先端から 30 mm 離れた位置を加工終了地点として 1 か所で行った。

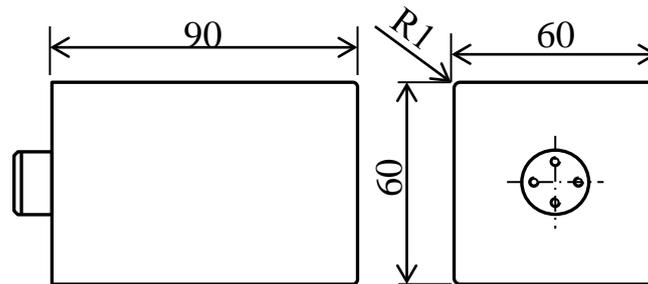


Fig. 2-17 角柱形状の金型

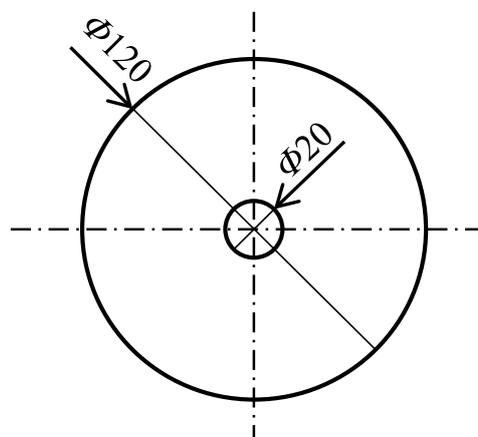


Fig. 2-18 直径 120 mm の円形素板

2.6.2 成形実験と成形品外形

パスセットは、第 2.5.2 項に示した円筒形の成形実験のものと同じものを用いた。

成形品の外観を **Fig. 2-19** に示す。加工時間は約 29 分 10 秒であった。円筒形状同様、表面には光沢があり、フィードマークがついている。裏面には、金型の転写跡があり、金型に密着したことがわかる。フランジ部を含む成形品の高さは 37mm 程度であった。角には膨らみがあり、開口部分まで材料が余っている。

底面からの 15 mm の部分で周方向に断面を切断すると、肉厚が比較的あることが確認できる (**Fig. 2-20**)。一方、辺の中央部分の肉厚はマイクロメータで計測することが可能であるため、計測したところ 0.75 mm であり、肉厚をある程度維持していた。これは金型形状に絞られていく過程において、角に素材が寄ったためであると考えられる。そこで **Fig. 2-21** のように素板に正方形を書き、角筒形状の成形実験を行った。辺の部分は変化が少ないものの、角において線が急激に湾曲しており、やはり角において大きな材料流動が見られた。

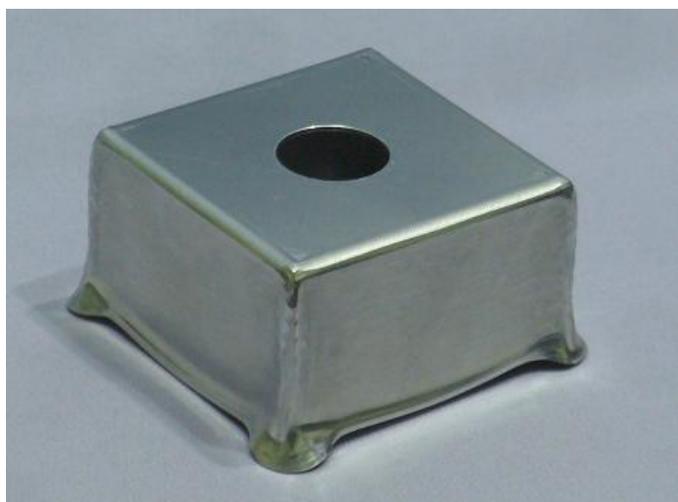
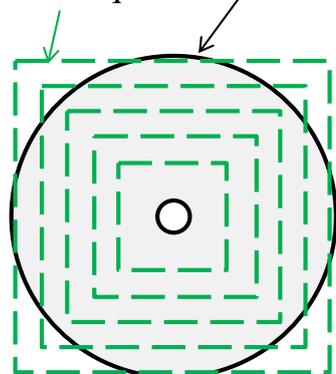


Fig. 2-19 角筒形状の成形品外観



Fig. 2-20 角筒形状の成形品の断面

Drawn squares Blank shape



【Before forming】

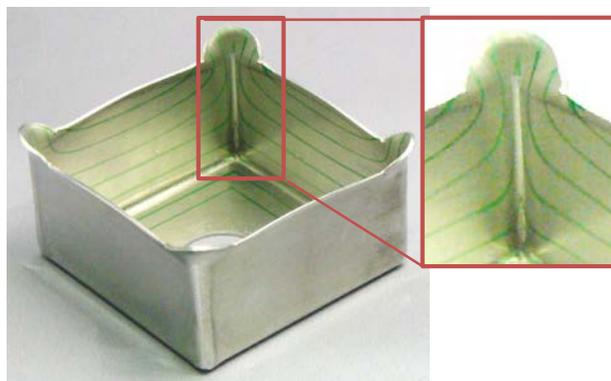


Fig. 2-21 四角形を印した素板による角筒形状の成形

2.6.3 金型と成形品の表面間距離の算出

形状測定装置を用いて、成形品と金型の外形を計測した。底面から高さ 15 mm における主軸角度 0 deg から 180 deg の区間の計測結果を Fig. 2-22 に示す。角の部分が大きく膨れ上がっていることが確認できる。

この角の膨らみを計測するために、金型と成形品の表面距離を求めたい。しかし、マイクロメータやノギスではヘッドが安定してアクセスできないという問題がある。よって、この計測結果をもとに表面間距離、特に角に関して求める手順を次に示す (Fig. 2-23)。

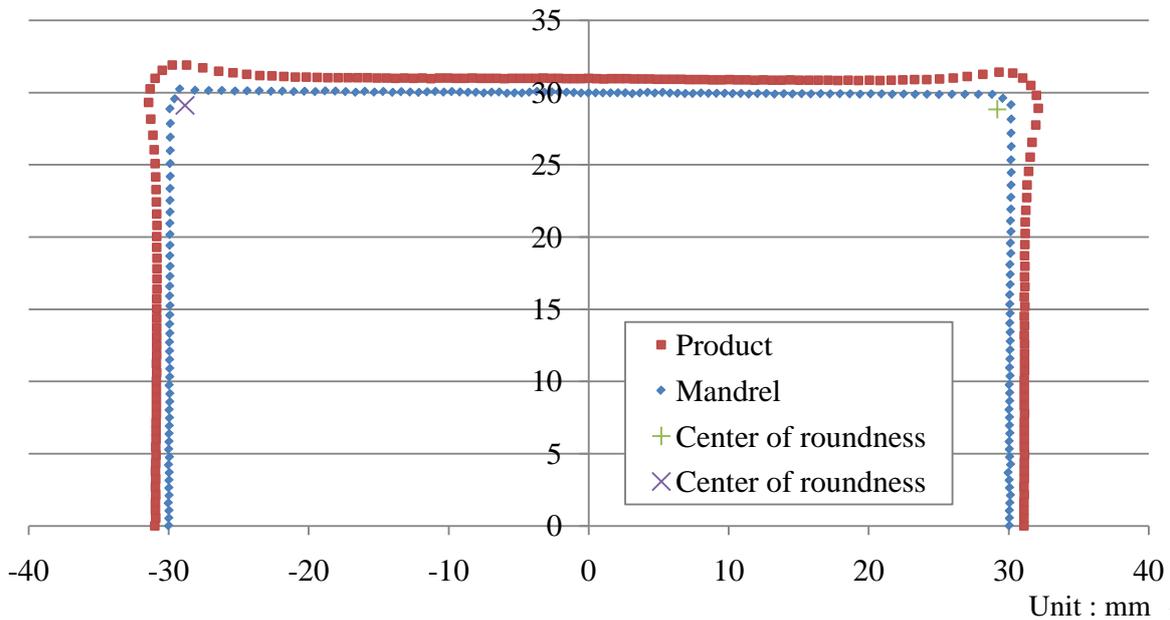


Fig. 2-22 成形品および金型断面の形状計測結果

- (1) 金型の辺 (直線 L_1 , L_2) を、最小二乗法により求める。このとき、 L_1 の傾きが発散するため、45 deg 傾けた状態で各直線を求めた。

$$L_j : y = \bar{a}_j x + \bar{b}_j \quad (j=1,2) \quad (2-8)$$

$$\bar{a}_j = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

ただし、

$$\bar{b}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2-9)$$

- (2) L_1 , L_2 の交点 $P_1(x_{p1}, y_{p1})$ を求める。

$$\begin{aligned}
x_{p1} &= -\frac{\bar{b}_1 - \bar{b}_2}{\bar{a}_1 - \bar{a}_2} \\
y_{p1} &= -\frac{\bar{a}_2 \bar{b}_1 - \bar{a}_1 \bar{b}_2}{\bar{a}_1 - \bar{a}_2}
\end{aligned} \tag{2-10}$$

- (3) 金型の設計上の丸み半径 R_m 分移動させた点、すなわち交点 P_1 を中心とする半径 R_m の円 C_1 と L_1, L_2 の交点 $P_2(x_{p2}, y_{p2})$ と $P_3(x_{p3}, y_{p3})$ を求める。

$$\begin{cases} C_1 : (x - x_{p1})^2 + (y - y_{p1})^2 = R_m^2 \\ L_1 : y = \bar{a}_1 x + \bar{b}_1 \end{cases}$$

より

$$\begin{aligned}
x_{p2} &= \frac{-\bar{a}_1(\bar{b}_1 - y_{p1}) - \sqrt{\bar{a}_1^2(\bar{b}_1 - y_{p1})^2 - (1 - \bar{a}_1^2)((\bar{b}_1 - y_{p1})^2 + x_{p1}^2 - R_m^2)}}{(1 - \bar{a}_1^2)} \\
y_{p2} &= \bar{a}_1 x_{p2} + \bar{b}_1
\end{aligned} \tag{2-11}$$

$$\begin{cases} C_1 : (x - x_{p1})^2 + (y - y_{p1})^2 = R_m^2 \\ L_2 : y = \bar{a}_2 x + \bar{b}_2 \end{cases} \tag{2-12}$$

より

$$\begin{aligned}
x_{p3} &= \frac{-\bar{a}_2(\bar{b}_2 - y_{p1}) + \sqrt{\bar{a}_2^2(\bar{b}_2 - y_{p1})^2 - (1 - \bar{a}_2^2)((\bar{b}_2 - y_{p1})^2 + x_{p1}^2 - R_m^2)}}{(1 - \bar{a}_2^2)} \\
y_{p3} &= \bar{a}_2 x_{p3} + \bar{b}_2
\end{aligned} \tag{2-13}$$

- (4) 点 P_2 を通り L_1 に平行な直線 $L_1' : y = \bar{a}_1 x + \bar{b}_1'$ と、点 P_3 を通り L_2 に平行な直線 L_2'

$y = \bar{a}_2 x + \bar{b}_2'$ の交点 $P_4(x_{p2}, y_{p2})$ を得る。

P_2 を通ることから、 \bar{b}_1' は、

$$\bar{b}_1' = -\bar{a}_1 x_{p2} + y_{p2} \tag{2-14}$$

P_3 を通ることから、 \bar{b}_2' は、

$$\bar{b}_2' = -\bar{a}_2 x_{p3} + y_{p3} \tag{2-15}$$

よって、 L_1' 、 L_2' の交点 P_4 は、

$$\begin{cases} L_1': y = \bar{a}_1 x - \bar{a}_1 x_{p2} + y_{p2} \\ L_2': y = \bar{a}_2 x - \bar{a}_2 x_{p3} + y_{p3} \end{cases} \quad (2-16)$$

より、

$$\begin{aligned} x_{p4} &= -\frac{-\bar{a}_1 x_{p2} + y_{p1} - (-\bar{a}_2 x_{p3} + y_{p3})}{\bar{a}_1 - \bar{a}_2} \\ y_{p4} &= -\frac{\bar{a}_2 \bar{b}_1 - \bar{a}_1 \bar{b}_2}{\bar{a}_1 - \bar{a}_2} \end{aligned} \quad (2-17)$$

- (5) より正確な丸み半径を算出するため、点 P_1 と (a_i, b_i) の平均距離 \bar{R}_m を算出する。ただし、丸み部の判定は、式(2-19)および式(2-20)を用いる。

$$\bar{R}_m = \frac{1}{n} \sum_i^n \sqrt{(a_i - x_{p4})^2 + (b_i - y_{p4})^2} \quad (2-18)$$

$$\arctan\left(\frac{b_i - y_{p4}}{a_i - x_{p4}}\right) > \frac{\pi}{4} \quad (2-19)$$

または、

$$\arctan\left(\frac{b_i - y_{p4}}{a_i - x_{p4}}\right) < \frac{3\pi}{4} \quad (2-20)$$

- (6) 点 P_1 から各点 (x_i, y_i) の距離から、 \bar{R}_m を引いた値を算出する。

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{p4})^2 + (y_i - y_{p4})^2} - \bar{R}_m \quad (22)$$

また、辺に関しては、点と直線の距離から算出した。

$$d_i = \frac{|\bar{a}_j x_i - y_i + b_j|}{\sqrt{\bar{a}_j^2 + 1}} \quad (23)$$

この手順によって算出された表面間距離を **Fig. 2-24** に示す。このグラフから辺の部分では **0.95mm** 程度とほぼ一定であるが、角の部分において **1.9 mm** 程度までの急激な増加が確認できた。

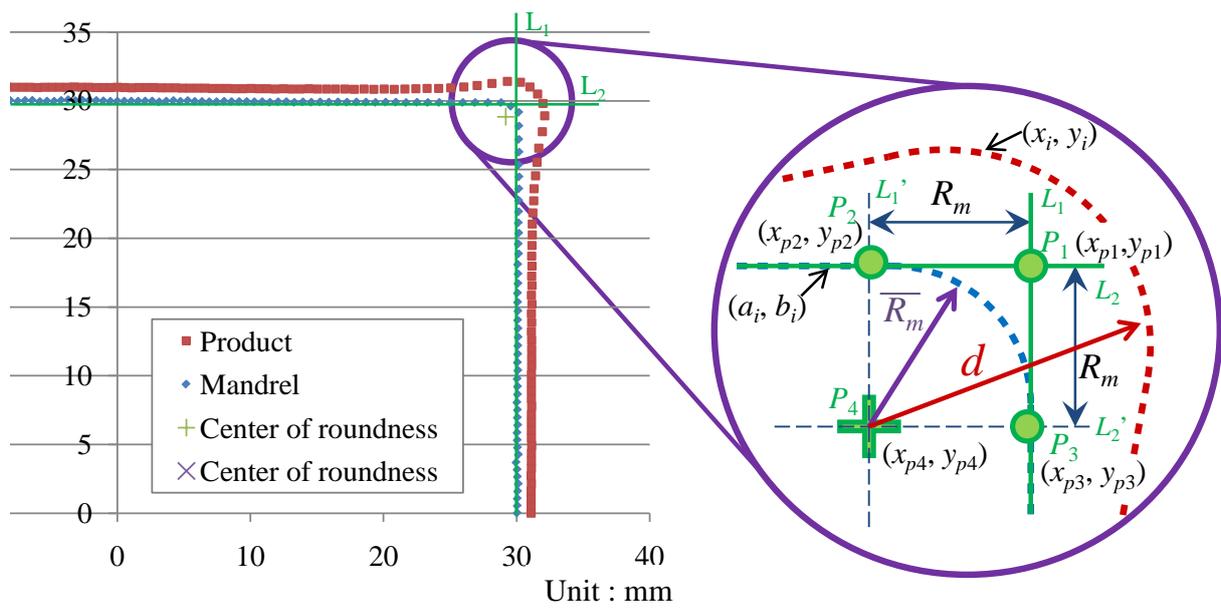


Fig. 2-23 角の表面間距離の算出方法

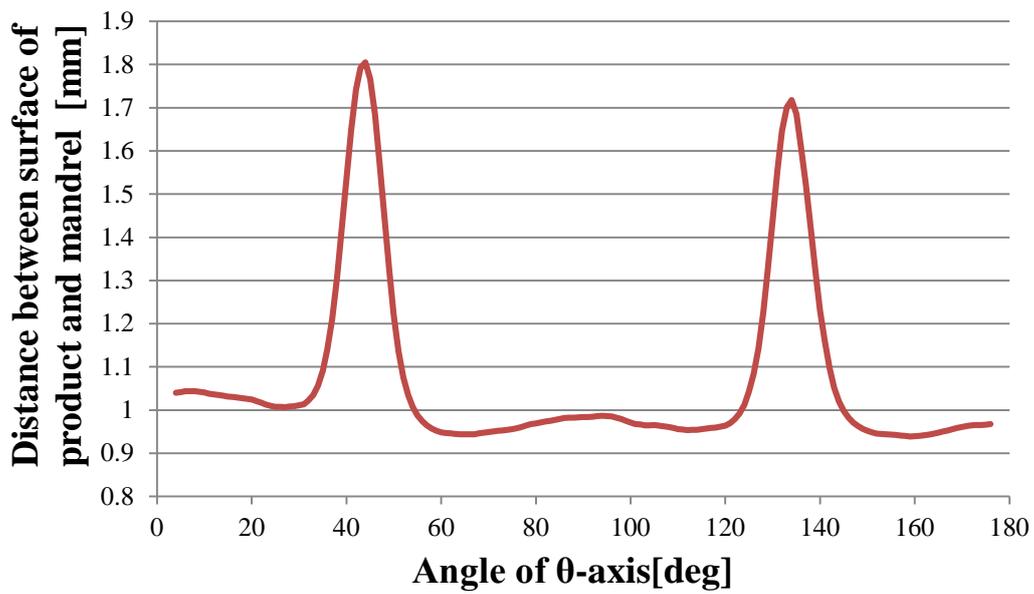


Fig. 2-24 成形品と金型の表面距離

2.7 その他種々の成形品

2.7.1 3種類の金型と素板

筒形状以外にも異形断面形状の成形ができることを確認するため、次の3種類の形状に関して成形実験を行った。この実験では、素板とパスセットを共通したものを使用し、金型形状のみを変更して行った。これにより、金型形状を独立して扱えることも検証した。

(金型 A) 上面が直径 55 mm の円形、底面が長径 130 mm、短径 90 mm の楕円の錐体形状 (Fig. 2-25)

(金型 B) 半角 30 deg の円錐形状を 10 deg 傾斜した面で、頂部と底部を切断した形状 (Fig. 2-26)

(金型 C) 中心が回転軸に対し 5 mm 偏心し、さらに垂直壁を持つ形状 (Fig. 2-27)

これらの形状は異形断面形状のしごきスピニング加工の研究に使われた形状である[16][19]。

材質は、金型 A と金型 B が炭素鋼 S45C、金型 C はステンレス鋼 SUS304 である。

金型計測箇所は、金型 A と金型 B はまっすぐな形状であるため、金型の先端 2 か所と加工終了地点 1 か所で行った。金型 C は金型先端 2 か所と加工終了地点 1 か所に加え、垂直になる部分 2 か所、合計 5 か所で行った。

素板には直径 120 mm、肉厚 1 mm の円形、純アルミニウム A1100-H24 材を用いた。

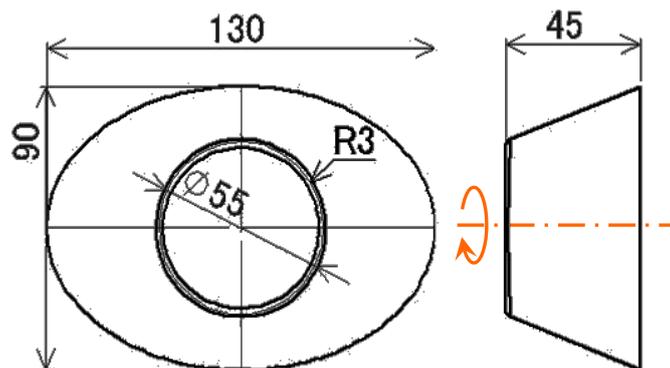


Fig. 2-25 楕円の錐体形状の金型

2.7.2 3種類の形状に対するパスセット

パスセットは **Fig. 2-28** に示すものを共通して使用した。このパスセットは曲線パスで 17 往復したのちに、力制御パスで成形品を金型に馴染ませる。それぞれのパスは長めに設定した。主軸速度や力制御パスでの押しつけ力は 2.5.2 項のときから変更していないが、材料のねじれを軽減するために、ローラが素板外周に到達するごとに主軸の回転方向を反転させている。

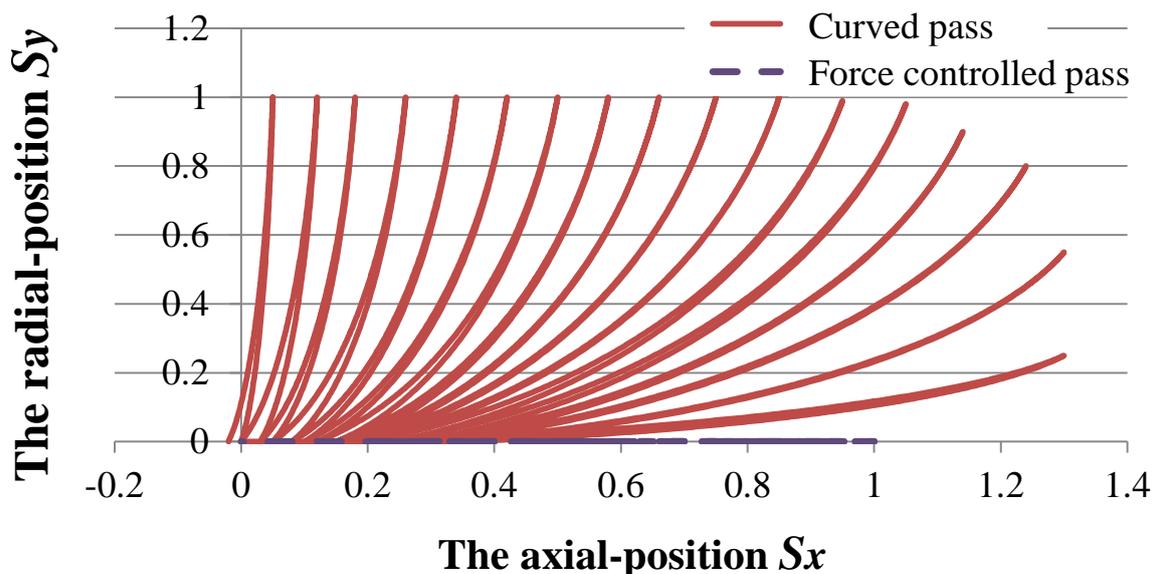


Fig. 2-28 共通して用いたパスセット

2.7.3 楕円錐体形状の成形結果

楕円錐形状の成形品を **Fig. 2-29** に示す。通常の力制御による細かいフィードマークの他に、主軸の反転に伴う大きなフィードマークが残っている。また、長径側に比べ短径側に素材が残っている。

両球面マイクロメータで計測した肉厚分布を **Fig. 2-30** に示す。この肉厚分布は、底面より 2 mm 置きに側面に沿って計測したものである。この肉厚分では、長径方向 (0 deg、180 deg) で 0.85 mm、短径方向 (90 deg) で 0.75 mm 以上の肉厚を維持していた。円錐半角が長径方向で約 40 deg、短径方向で約 22 deg になることから、しごきスピニング加工の場合、sine 則により、肉厚はそれぞれ 0.64 mm、0.3 mm になると考えられる。それに比べ、本手法では肉厚を維持したまま成形することができた。

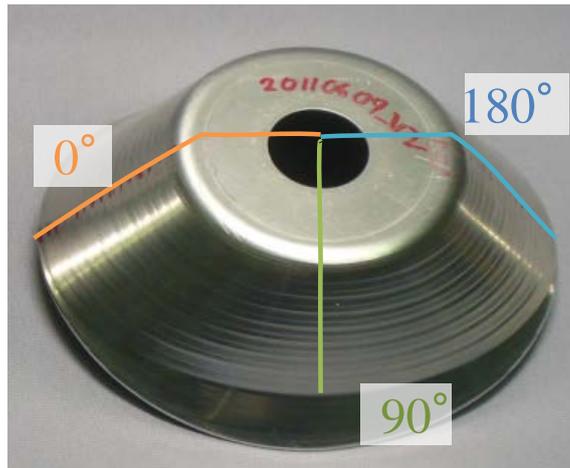


Fig. 2-29 楕円錐体形状の成形品

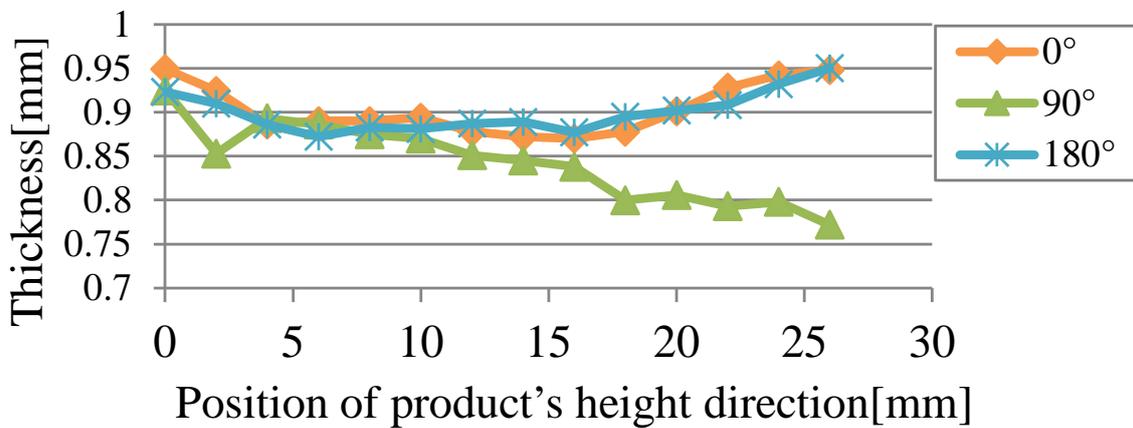


Fig. 2-30 楕円錐体形状の成形品の肉厚分布

2.7.4 傾斜軸を持つ錐体形状の成形結果

この金型は半角 30 deg の円錐形状を 10 deg 傾斜した面で頂部と底部を切断した形状であるため、傾斜軸かつ偏心している。回転軸に直交する断面は楕円形となる。回転軸に対する傾きは、Fig. 2-31 における 0 deg の方向で最大の 40 deg、180 deg の方向で最小の 20 deg となる。文献[16] ではこの金型を用いて、肉厚 0.78 mm のアルミニウム素板を力制御スピニング加工した。円錐半角 40 deg の方向で 0.50~0.52 mm になり、円錐半角 20 deg 方向は頂点付近で 0.30~0.35 mm、フランジ付近では 0.20~0.22 mm になったと報告されている。この肉厚減少を肉厚 1 mm の素板で換算すると、円錐半角 40 deg の方向で 0.64~0.67 mm、円錐半角 20 deg の方向の頂部で 0.38~0.45 mm、フランジ付近で 0.25~0.28 mm になると考えられる。

本加工法での成形品の肉厚分布を Fig. 2-32 に示す。最小肉厚は 180 deg 方向（円錐半角 20 deg）で 0.75 mm 程度維持された。0 deg、90 deg 方向はバスタブ型の肉厚分布になったが、180 deg 方向は単調減少している。

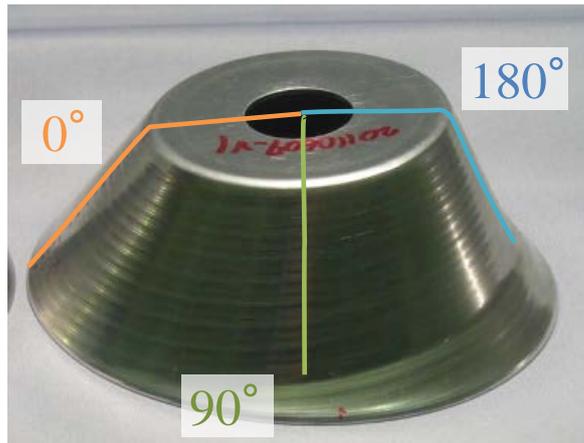


Fig. 2-31 傾斜錐体形状の成形品

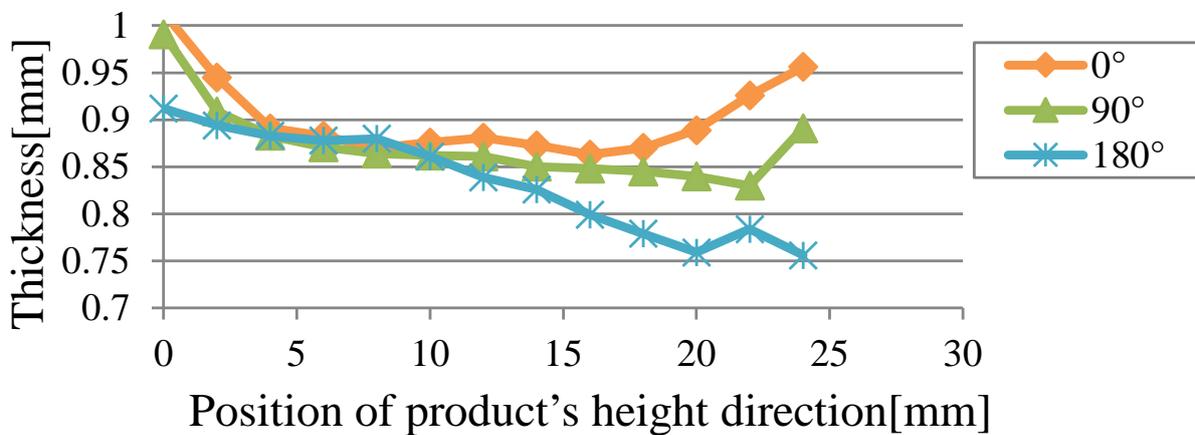


Fig. 2-32 傾斜錐体形状の成形品の肉厚分布

2.7.5 偏心軸を持つ異形断面形状

本加工法の成形品を Fig. 2-33 に示す。全体的に金型になじんだ形状をしており、成形できている。垂直壁側 (0 deg 方向) はフランジが余っているが、錐体形状の方向 (180 deg 方向) では余りなく成形されている。

文献[19] では、成形後の肉厚分布は報告されていないものの、素板のフランジ面を 20 deg ~22.5 deg に傾斜させていることから、板厚 1 mm の素板が 0.35 ~0.40 mm 程度に減少していると考えられる。

本加工法での成形品の肉厚分布を Fig. 2-34 に示す。90 deg 方向、180 deg 方向は、頂部から肉厚が減少しているが、その後は比較的平らな肉厚分布になった。0 deg 方向に関しては、他の方向と同様であるが、錐体部と垂直壁部に切り替わるところで、一時的に肉厚が減少している。これは、金型断面形状を線形補間で算出しているため、角の部分で金型に食い込む軌道が算出されてしまったためであると考えられる。

一時的に肉厚が減少している部分を含めても、最小肉厚は 0.70 mm 程度は維持されている。

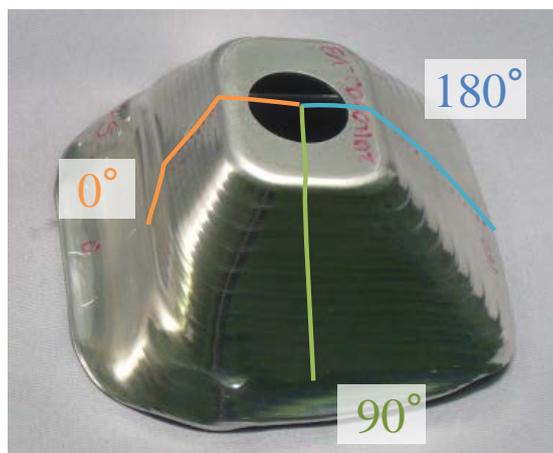


Fig. 2-33 偏心軸と垂直壁を持つ形状の成形品

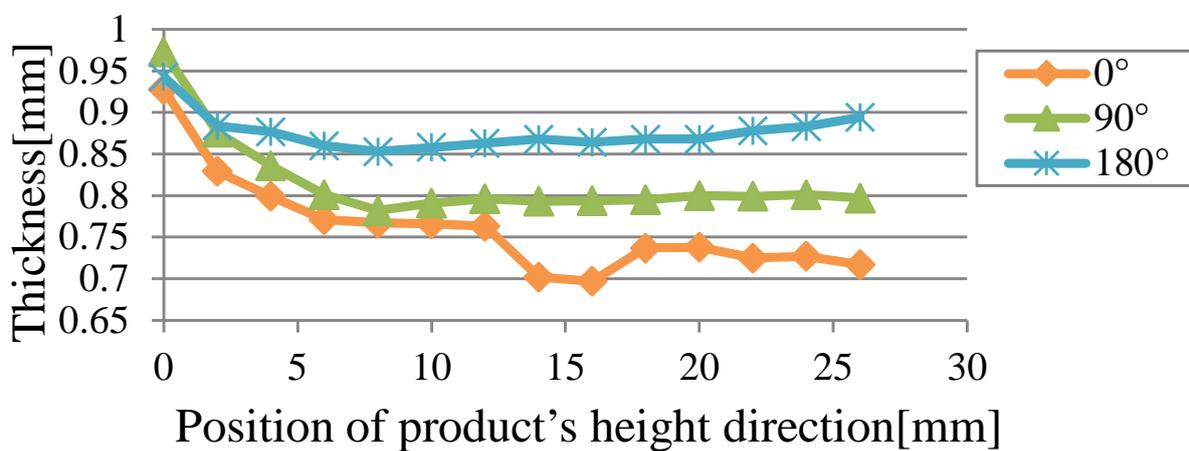


Fig. 2-34 偏心軸と垂直壁を持つ形状の成形品の肉厚分布

2.8 凹輪郭を有する筒形状の成形品

正方形よりもさらに大きな凹みのある断面形状に関しても同様に成形実験を行った。この成形実験では、非円形素板を利用した成形実験も行った。

2.8.1 金型の設計

金型は **Fig. 2-35** に示すように、直径 80 mm の円柱の中央から 70 mm 離れた位置を中心にして、半径 52 mm と半径 82 mm の円周で切り落とし、さらにその角を半径 10 mm で丸めた形状である。この凹輪郭の部分は、前述のスピング加工機においてローラが接触を保ったまま 1 回転させることが可能なように設計した。底面は半径 1 mm で丸められている。材質は SUS304 である。

また、押さえ金は底面より 3mm ずつ内側に入った形状である。

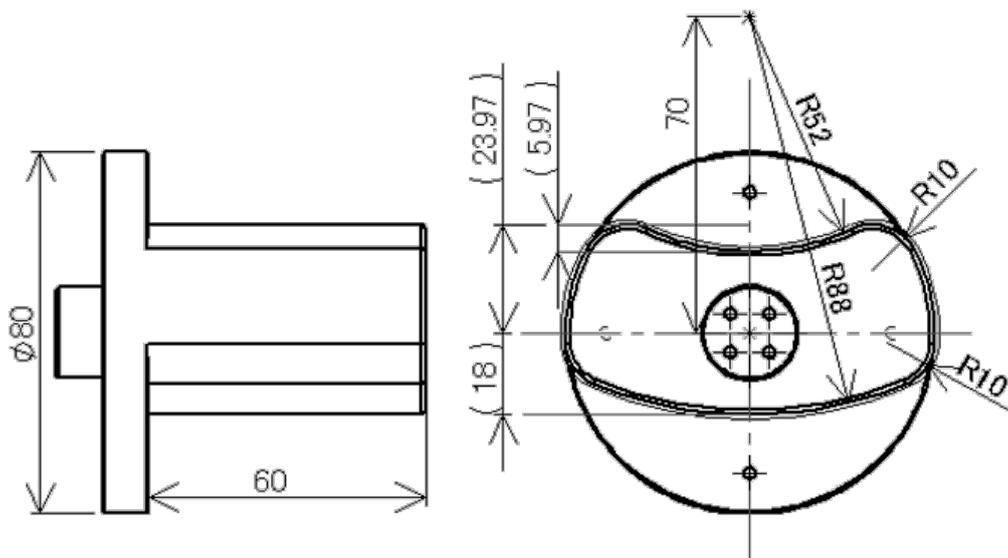


Fig. 2-35 凹輪郭を有する形状の金型の図面

2.8.2 円形素板での成形実験

パセットは、第 2.7.2 項と同様のものを使用した。成形品を **Fig. 2-36** に示す。これまでの成形品同様に、フィードマークが付き、光沢がある。また、内側は金型と接触した部分は、金型の模様が転写され、光沢がある。

Fig. 2-36 の 0 deg と 180 deg 方向には素板の外周部が余り、特に 0 deg の方向は内側に折れ曲がるような形状になった。また、底面部の凹輪郭の部分は 2 mm 程度の膨らみが生じている。

両球面マイクロメータで計測した、底面から開口側への肉厚分布を **Fig. 2-37** に示す。肉厚が最も減少したところでも、約 0.65 mm は維持できていた。外周部分が余らない方向 (77 deg 方向) では中間の肉厚が減少する傾向が見られ、外周が余る方向では高さが増すにつれて肉厚が減少していく傾向が見られた。ただし、0 deg 方向は最後に肉厚の回復していた。51 deg と 103 deg の方向は底面側で 1mm を超えていた。

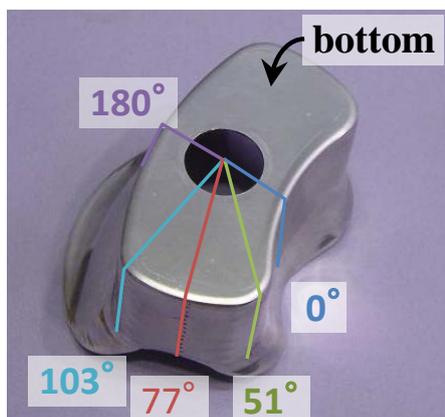


Fig. 2-36 円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品

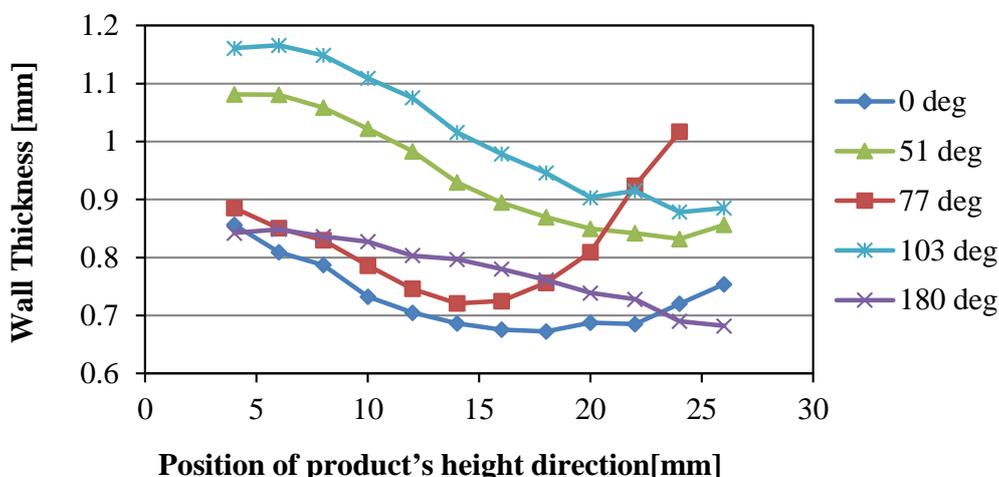


Fig. 2-37 円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品の肉厚分布

2.8.3 非円形素板

凹輪郭を有する形状は、方向によって素材の外周部分が大きく余る方向と不足する方向が顕著であった。その過不足はしわや破断の発生に影響を及ぼすことが考えられる他、歩留りを低下させる要因となる。このため、不要な部分を予め切除した円形以外の板材においても同期絞りスピニング加工が有効であることを検証した。

まず不要な部分を調べるために、素板に 10 deg 毎に放射状の線と半径 5 mm 毎に同心円を描き (Fig. 2-38 の青線)、成形実験を行った。成形品は、金型に接触している部分は金型の模様が転写され、光沢があるが、接触していない部分は光沢が少なく、境界線がはっきり確認できる。この境界線と放射状の線または同心円が交わる点を結び、Fig. 2-38 の点線で示す曲線を得た。そして、その曲線で切り出すことで、Fig. 2-39 に示す非回転体の素板を作成した。Fig. 2-39 では、紙面上部が凹輪郭部分にあたる。

本素板形状は実験的に得られた形状であるため、素板形状の入力方法として、金型断面計測と同様に力制御を用いて計測を行った。この時、押し付け力を 10 N に設定して計測した。ただし、10 N とした時でも素板が曲がってしまうが、さらに弱い力で計測を行うと、素板から離れてしまうため、押し付け力を小さくできない。そこで、切り出した素板を 2 枚重ねることで補強した。

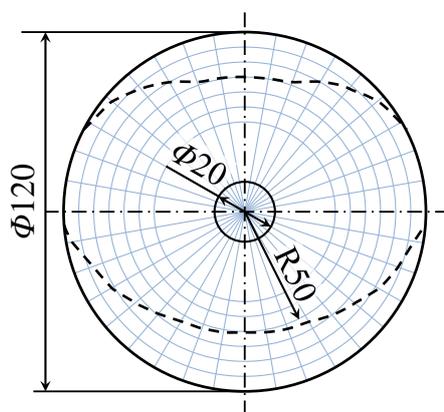


Fig. 2-38 素板のプロット

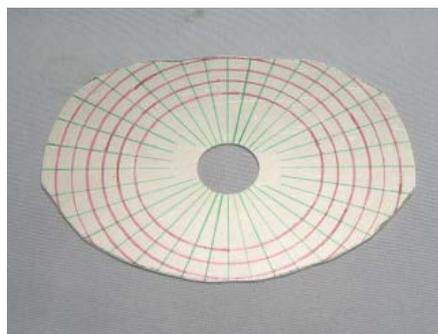


Fig. 2-39 切り出された素板

2.8.4 非円形素板での成形実験

パスは円形素板での成形実験のもの、すなわち第 2.7.2 項のものを利用した。成形品を **Fig. 2-40** に示す。素板の余りは概ね解消されたが、小さな耳は存在している。これは、非球体ローラと凹輪郭を有する金型が接触する点の軌跡が金型高さ方向に均一ではなく、**Fig. 2-41** に示すような経路であるためである。底面部の膨らみは同様に存在している。

肉厚分布を **Fig. 2-42** に示す。全方向に関してバスタブ型の肉厚分布になっており、51 deg、103 deg、180 deg 方向は異なった傾向が見られた。これはフランジの有無が影響しているものと考えられる。また、円形素板の時と同様に、51 deg と 103 deg の時に素板の板厚 1 mm より増加する結果が得られた。

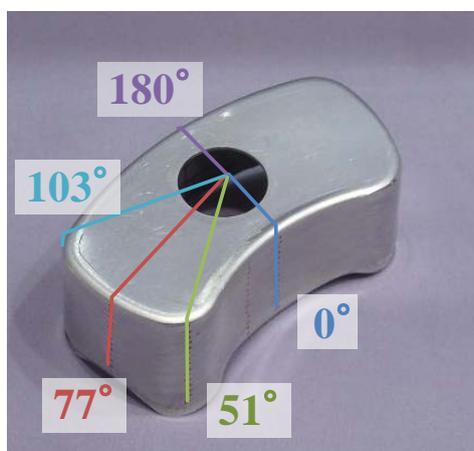


Fig. 2-40 非円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品



Fig. 2-41 高さ方向に均一でないフィードマーク

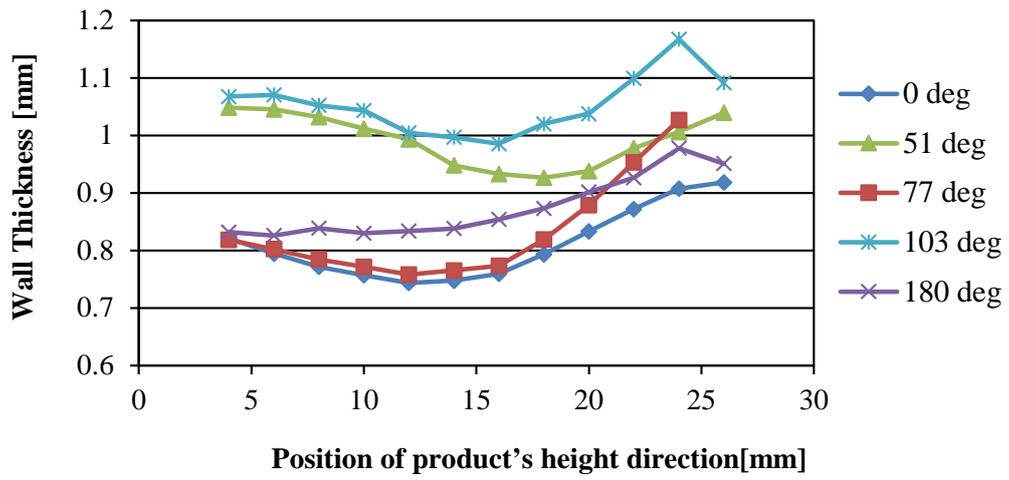


Fig. 2-42 非円形素板から成形された凹輪郭を有する形状の成形品の肉厚分布

2.9 同期絞りスピニング加工の開発に関するまとめ

本章では、板材のスピニング加工において、

- ・ 異形断面を持つ形状が成形できる
- ・ 垂直壁を持つ形状を成形できる
- ・ 工具軌道の設定を簡単に行える

という特長を持った同期絞りスピニング加工法を開発した。種々の成形実験を通して、同期絞りスピニング加工では、従来の絞りスピニング加工と同様の円筒形状に加えて、異形断面形状の錐体形状や筒形状の成形が行えることを確認した。いずれの形状も過度な肉厚減少は見られず、絞り変形していることが確認された。これより、同期絞りスピニング加工の開発によって、スピニング加工で成形できる形状を広げることができたとと言える。

本加工法の工具軌道はパスセットや金型断面形状、素板外周形状の線形補間で求めている。それらの要素は、種々の成形実験を通し、独立して扱えることを確認した。これにより、ある形状において成形可能なパスセットが見つかった時、その類似形状であれば同一のパスセットが利用できることなどが考えられる。

しかし、パスセットの設定は作業者が実験的に与えるしかないのが現状である。角筒形状のような局所的に曲率の大きい部分がある形状や凹輪郭を有する形状のような周方向に材料の余り具合が大きく異なる形状などは設定が難しい。パス数を増やし、加工を慎重に行えば、成形はしやすくなるが、加工時間の観点から有用な対策ではない。このため、加工限界や成形後の肉厚分布など加工の特性からパスセットが与えられるようになれば、試作実験が減り、1 製品当たりのコストがさらに小さく抑えられると考える。そのため、次章では、加工限界の調査を行う。

第3章 パスセットに関する加工限界の調査

本章では、同期絞りスピニング加工における工具軌道、特にパスセットが加工限界に与える影響について調査結果を報告する。

3.1 研究目的

先進国における製造業では、少量多品種生産のための技術が注目されてきた。スピニング加工も少量多品種生産に有利な加工法の1つであり、近年では管材のスピニング加工や板材のしごきスピニング加工における異形断面形状のための手法を中心に開発されてきた。それらスピニング加工の中でも、同期絞りスピニング加工は、絞りスピニング加工で非軸対称形状が成形できる点が新しい。しかし、従来から絞りスピニング加工が持つ、工具軌道の設定が難しく、古くから職人の技能が必要とされているという問題は解決していない。特に異形断面形状は周方向の応力や接触点が複雑になるため、解析的な加工限界を予測することが難しい。また、有限要素法を用いた数値計算によるシミュレーションを用いる手法も考えられるが、その計算に非常に多くの時間を必要とするのが現状である。

円筒形状の絞りスピニング加工における加工限界については、1980年代に葉山[8]が調査を行っている。葉山はテンプレート（パス）の形状とその移動方法ごとに加工限界を明らかにした。

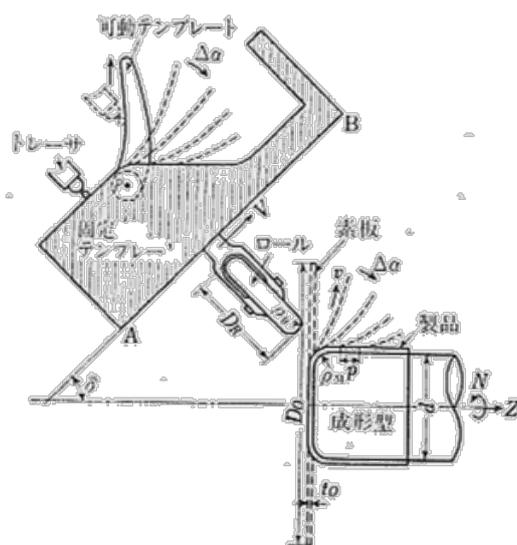


Fig. 3-1 テンプレートを用いた葉山の研究
(文献[8]から引用)

同期絞りスピニング加工においても、工具軌道に着目し、異形断面形状の加工限界の調査を行う。同期絞りスピニング加工は成形品が類似形状であればパスセットが使いまわせる可能性があるところに着目すると、異形断面形状に関する成形性のデータベース化し、作業者個人のノウハウに依らない工具軌道の設定が行えることが期待される。そのため、本加工限界の調査を行った (Fig. 3-2)。

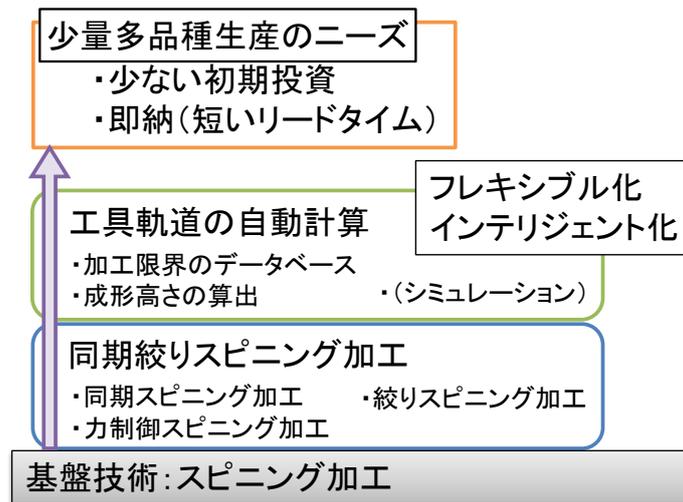


Fig. 3-2 加工限界の調査の目的

3.2 加工法の基本構想

葉山[9]によると、加工条件は **Table 3-1** のように分類される。固定加工条件とは、図面や仕様に合わせて選定される条件であり、最初に決定される加工条件である。固定加工条件を選定した後に、しわや破断が生じないように設定される加工条件を流動加工条件と呼ぶ。そのうち、加工条件決定の順序として先に決めなければならないものを流動加工条件 I と呼ぶ。加工条件 I には、ローラ形状と主軸の回転数がある。そして、次に選ばれる加工条件 II には、ローラのパス形状と送り速度がある。

Table 3-1 絞りスピニング加工の加工条件

加工条件の大別	加工条件
固定加工条件	成型型
	素板形状
	すきま
流動加工条件 I	ローラ直径
	ローラ丸み半径
	素板回転数
流動加工条件 II	パス形状
	ローラの送り速度

葉山によると、ローラの直径は素材直径に対して、重要な影響を及ぼさない。ローラの丸み半径は、大きすぎるとしわが発生しやすくなり、小さすぎると破断が生じやすくなると報告されている。また、角隅部の成形に十分な小ささを持っていることが求められる。

素板回転数に関しては、素板回転数よりも素材一回転あたりのローラの移動量、すなわち送り速度が重要視されており、機械構造や作業者の安全を配慮して設定される。よって、ローラ形状（直径と丸み半径）と素板回転数は流動加工条件 I とされている。

同期絞りスピニング加工におけるローラ形状は、周方向に対しても、金型に密着できる大きさのローラが選定される。また、素板回転数は、ローラの制御の応答が遅れない程度の速度で設定されるため、円筒形状のスピニング加工よりも非常に遅い速度で設定される。よって、同期絞りスピニング加工においても、ローラ形状と素板回転数は流動加工条件 I として扱える。

そして、本研究では、流動加工条件 II において、最も成形性に影響を及ぼすと思われるパス形状、すなわちパスセットに注目して加工限界の調査を行った。

3.3 種々のパスセット

3.3.1 パスセットの組み合わせ方

加工限界を調査するにあたり、葉山の研究[8]を参考に基本となる3種のパスセットを採用した。

- ・回転パスセット (Fig. 3-3)
- ・移動パスセット (Fig. 3-4)
- ・回転移動パスセット (Fig. 3-5)

回転パスセットは、パスの始点を固定して、初期角度 θ_0 から1パスごとに角度 $\Delta\theta$ ずつ減らしていくパスセットである。

移動パスセットは、初期角度 θ_0 のパスの始点を $\Delta\alpha$ ずつ移動させていくパスセットである。始点を移動する際、金型に沿った、素板を押し延ばすような工具軌道が入る。

回転移動パスは、回転パスセットと移動パスセットの組み合わせであり、1パスごとに角度を減らしつつ、始点を移動させていくパスセットである。

パスを組み合わせる際、素材のねじれを防ぐため、パスセットは外周部で折り返すたびに主軸の回転方向を反転させている。

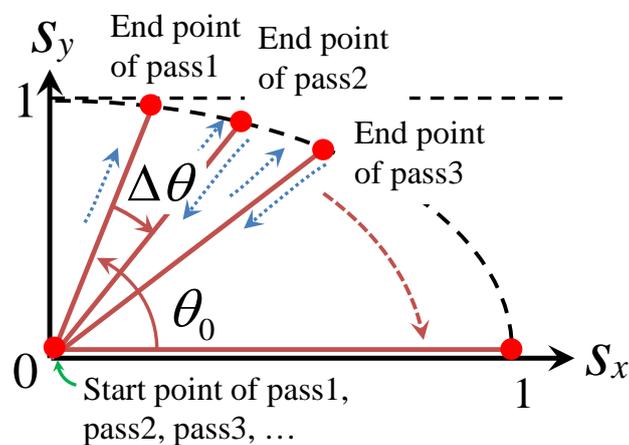


Fig. 3-3 回転パスセットのモデル

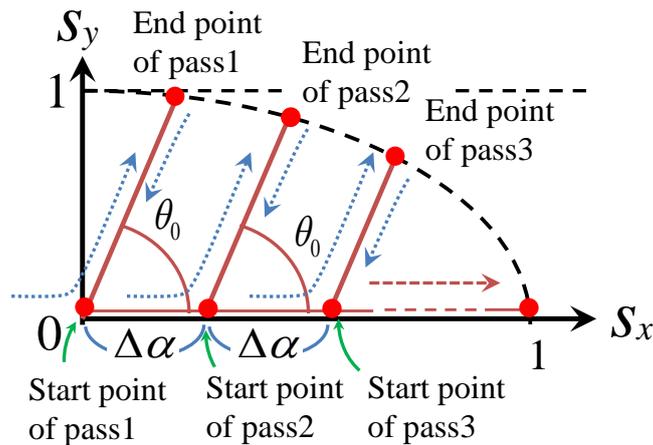


Fig. 3-4 移動パスセットのモデル

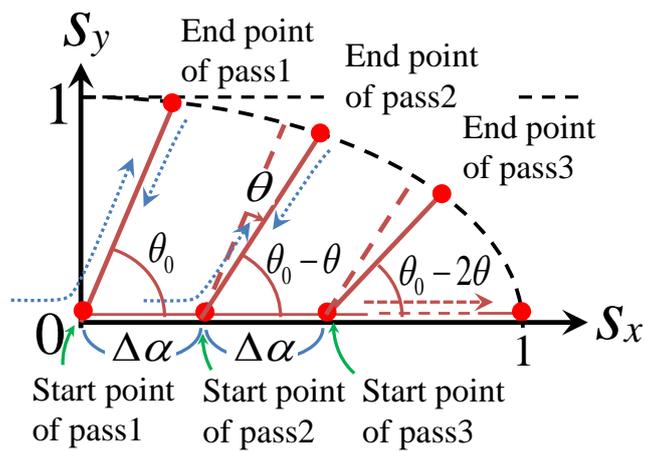


Fig. 3-5 回転移動パスセットのモデル

3.3.2 パスの素板外周側の計算方法

各パスの金型付近の始点は、パスセットの種類と初期位置によって定義される。また、加工前の素板外周位置は $(S_x, S_y)=(0, 1)$ であり、加工終了時の位置は $(S_x, S_y)=(0, 1)$ である。しかし、加工中のパスの素板外周側の終点はこれだけでは定義することができない。特に、加工中の素板外周形状は、工具軌道や素板形状、金型形状に依存する上に、異形断面形状の場合は周方向にも異なり、モデル化することが困難である。そこで、外周部分は円弧として仮定して計算することにした。

その結果、パスの終点は原点を中心とする半径1の円弧と、点 $(\alpha, 0)$ を通りかつ傾き $\tan\theta$ の直線の交点を式(3-2)から求める (Fig. 3-6)。

$$\begin{cases} Sx^2 + Sy^2 = 1 \\ Sy = \tan \theta \cdot Sx + \alpha \tan \theta \end{cases} \quad (3-1)$$

より、

$$\begin{cases} Sx = \frac{\alpha \tan^2 \theta \pm \sqrt{-\alpha^2 \tan^2 \theta + \tan^2 \theta + 1}}{\tan^2 \theta + 1} \\ Sy = \frac{-\alpha \pm \sqrt{-\alpha^2 \tan^2 \theta + \tan^2 \theta + 1}}{\tan^2 \theta + 1} \tan \theta \end{cases} \quad (3-2)$$

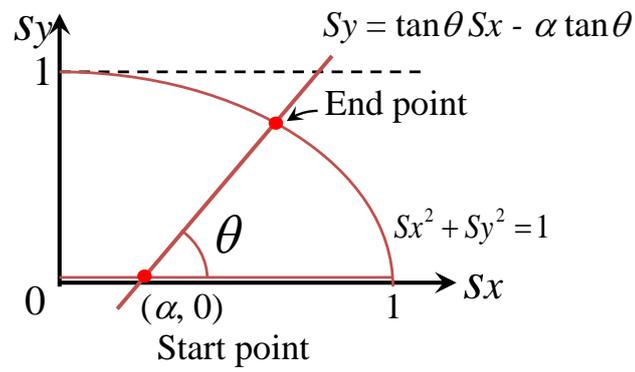


Fig. 3-6 パスの素板外周側の計算方法

3.4 実験環境と加工条件

第 3.3.1 項ではパスセットの組み合わせ方、第 3.3.2 項ではパスの外周部の終点位置の決定方法を示した。本節では、加工限界を調べるために共通させた加工条件を示す。

まず、実験装置は第 2.4.1 項で示したスピニング加工機を用いた。ただし、モータは 400W の AC サーボモータに変更した。換装後のスピニング加工機の仕様を **Table 3-2** に示す。

ローラは直径 70 mm、丸み半径 8 mm のものを使用した。金型および素板は後述する。素板回転数は、角筒形の力制御パスにおいては 15 rpm としたが、それ以外はすべて 30 rpm とした。

位置制御のパスはすべて曲線パスにした。実際に設定されたパスセットの例を Fig. 3-7 に示す。曲線パスで角度 0 deg または $S_x=1$ に到達した後は、 $S_x = 0.18$ から $S_x=1.00$ までの力制御パスを行う。この力制御パスの目標加工力は 500 N とした。また、送りピッチは加工時間と表面粗さに影響を与えるため、ある程度大きい綺麗な見える 1 mm/rev とした。以上より、固定する加工条件は **Table 3-3** のように設定した。

一方で、変化させたパラメータを **Table 3-4** に示す。ここで、成形高さとは、最初の金型断面の計測位置と最後の金型断面の計測位置である。すなわち、 $S_x=0$ と $S_x=1$ の実際の距離である。 $S_y=0$ の位置は金型表面位置、 $S_y=1$ の位置は素板外周位置、 $S_x=0$ の位置は金型先端位置によって定まるが、 $S_x=1$ は成形品の仕様によって定まる。本研究では、成形品の高さを特に設定せず、可変なパラメータとして、実験を行った。

Table 3-2 スピニング加工機の仕様 (400W AC サーボモータ)

	X,Y 軸	θ 軸
定格推力/トルク	1600 N	26.7 Nm
定格速度	0.25 m/s	142.9 rpm
移動量	150 mm	-

Table 3-3 共通する加工条件

固定加工条件	成形型	円柱形状 / 角柱形状
	素板形状	円形 直径 150 mm / 120 mm
	すきま (素板板厚)	1 mm
流動加工条件 I	ローラ直径	70 mm
	ローラ丸み半径	8 mm
	素板回転数	30 rpm / 15 rpm
流動加工条件 II	パス形状	曲線パスと力制御パス
	目標加工力	500 N
	送りピッチ	1 mm /rev

Table 3-4 変更させた加工条件

初期角度	θ_0
角度増分	$\Delta\theta$
初期位置	α_0
移動量	$\Delta\alpha$
成形高さ	h

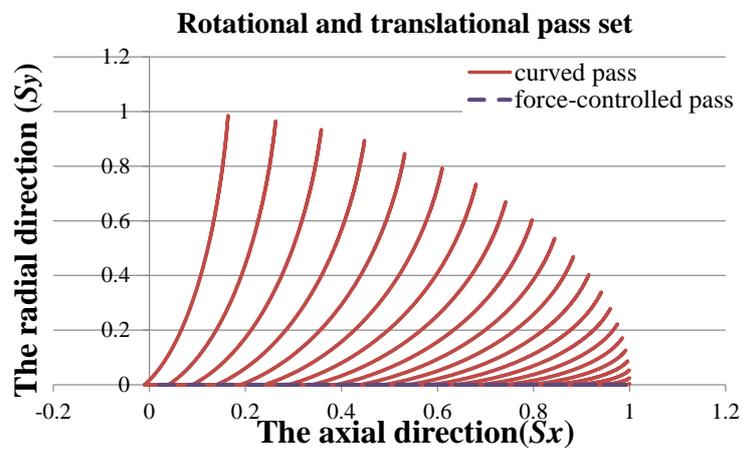
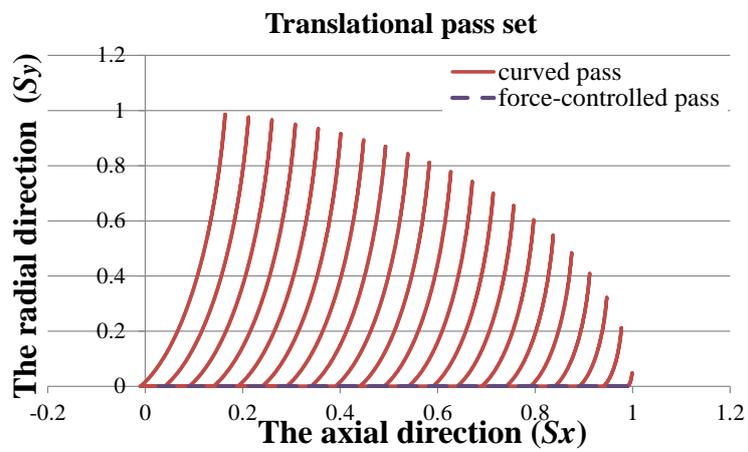
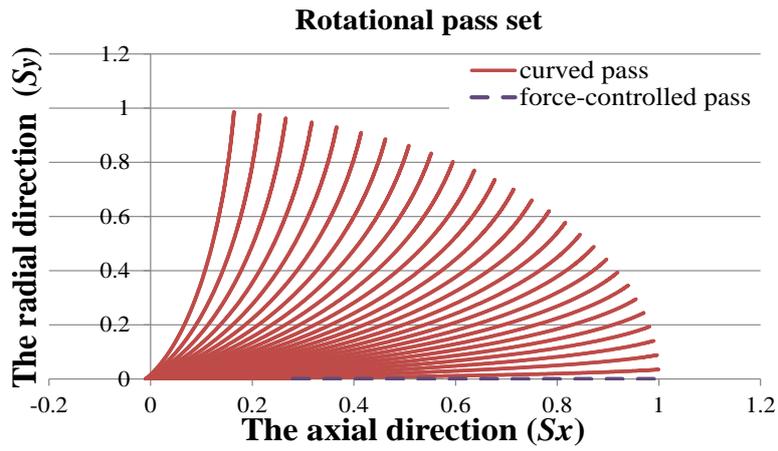


Fig. 3-7 実際のパスセット

3.5 円筒形状の加工限界

本手法の妥当性を検証するため、まず円筒形状の加工限界を調査した。

3.5.1 円筒形状の金型と素板

円筒形状の金型は第 2.5.1 項の **Fig. 2-10** に示した、円柱形状のものを使用した。直径 85 mm であり、角が R1 で丸められている。素板は、直径 150 mm、厚さ 1 mm、材質純アルミニウム (A1100-H24 材) を用いた。

素板直径を D 、金型直径を d とすると、絞り比 Z は式(3-3)より、約 1.76 となる。

$$Z = D/d \quad (3-3)$$

3.5.2 回転パスセット

回転パスセットの加工限界の調査は、**Table 3-4** に示すパラメータで行った。初期位置は-0.01、初期角度は 80 deg に統一し、角度増分を 2 deg 毎に設定してその成形可否を確認した。

Table 3-5 円筒形状のための回転パスセットのパラメータ

初期位置	α_0	-0.01
初期角度 [deg]	θ_0	80
角度増分 [deg]	$\Delta\theta$	6, 8, 10, 12
移動量	$\Delta\alpha$	0
成形高さ[mm]	h	45, 50, 55, 60, 65

成形品の 1 例を **Fig. 3-7** に示す。成形品の高さは、最大でも概ね 60 mm 程度であった。成形可否の結果を **Fig. 3-8** に示す。角度増分の最大値は、成形高さ 55 mm までは 10 deg まで、成形高さ 60 mm 以上は 8 deg になった。

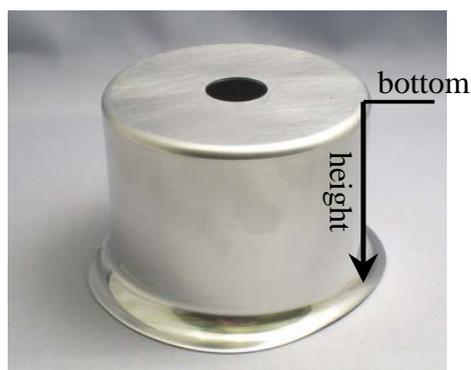


Fig. 3-8 回転パスセットによる円筒形状の成形品

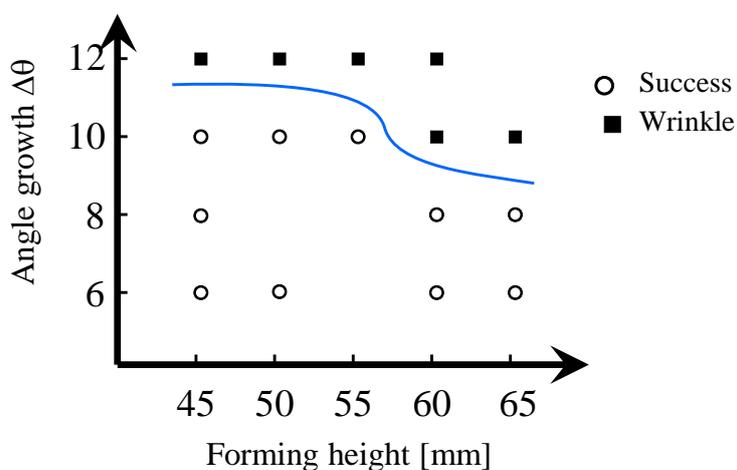


Fig. 3-9 回転パスセットによる円筒形状の成形結果

角度増分 10 deg の成形品の肉厚を Fig. 3-9 に示す。これも両球面マイクロメータで計測したものである。いずれもバスタブ型をしており、開口側付近を除き、ほぼ同じような結果になった。回転パスセットではほとんど同じような成形結果になった。

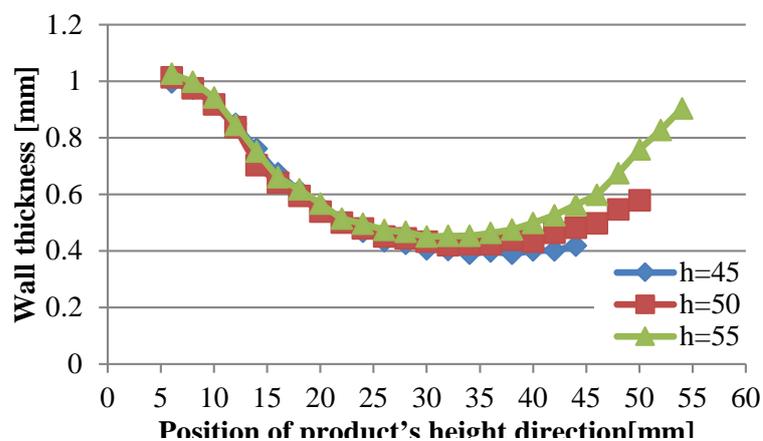


Fig. 3-10 回転パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分布

3.5.3 移動パスセット

円筒形状の成形実験に用いた移動パスセットのパラメータを **Table 3-4** に示す。

Table 3-6 円筒形状のための移動パスセットのパラメータ

初期位置	α_0	-0.01
初期角度 [deg]	θ_0	80, 62
角度増分 [deg]	$\Delta\theta$	0
移動量	$\Delta\alpha$	0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15
成形高さ[mm]	h	45, 50, 55, 60

初期角度 80 deg の時の成形結果を **Fig. 3-10** に示す。初期角度 80 deg のときは移動量 0.06 でも、破断が生じ、成形ができなかった。破断の例を **Fig. 3-11** に示す。**Fig. 3-11** より、素板外周が反り返り、素板が立ったまま成形されたことがわかる。素材の伸びに対して工具軌道が短く、外周部を加工できなかったため、しごきスピニング加工のような変形が生じたものと考えられる。

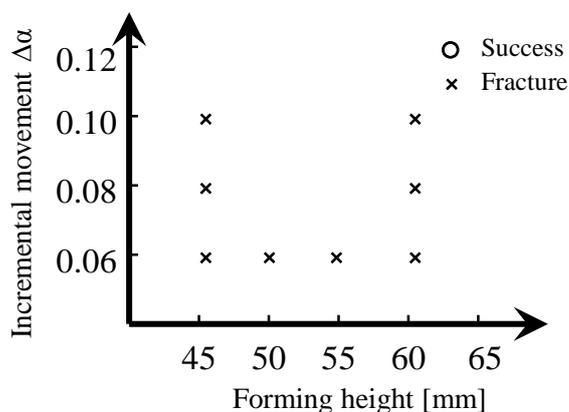


Fig. 3-11 初期角度 80 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形結果



Fig. 3-12 破断箇所（移動量 0.06、成形高さ 45 mm）

そこで、初期角度を 62 deg まで減らし、移動パスセットの成形性を調べた。成形品の 1 例

を **Fig. 3-12** に示す。移動パスセットにおいても、回転パスセットと同じような外観をしている。成形結果を **Fig. 3-13** に示す。過度な移動量では破断が生じることが分かった。成形高さが大きいほうが成形性はよく、0.12 まで成形出来た。成形高さ 55 mm、移動量 0.12 の時は、成形するごとに破断が生じる場合と成形できる場合があった。

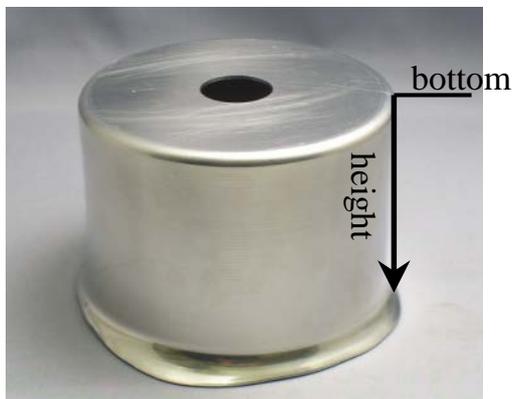


Fig. 3-13 初期角度 62 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形品

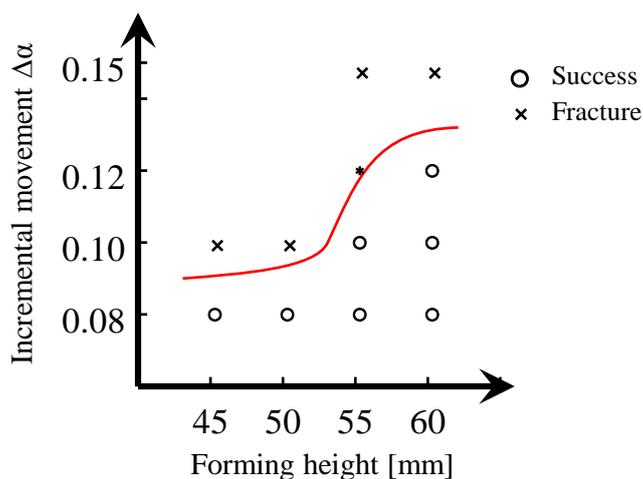


Fig. 3-14 初期角度 62 deg の移動パスセットによる円筒形状の成形結果

移動量 0.10 の時の成形品の肉厚分布を **Fig. 3-14** に示す。両方ともバスタブ型になり、最小肉厚は 0.4 mm 程度まで減少した。成形高さは肉厚分布に与える影響は小さいと思われる。

成形高さ 60 mm の時の成形品の肉厚分布を **Fig. 3-15** に示す。移動量を大きくすると、開口側付近で肉厚がわずかに減少する。

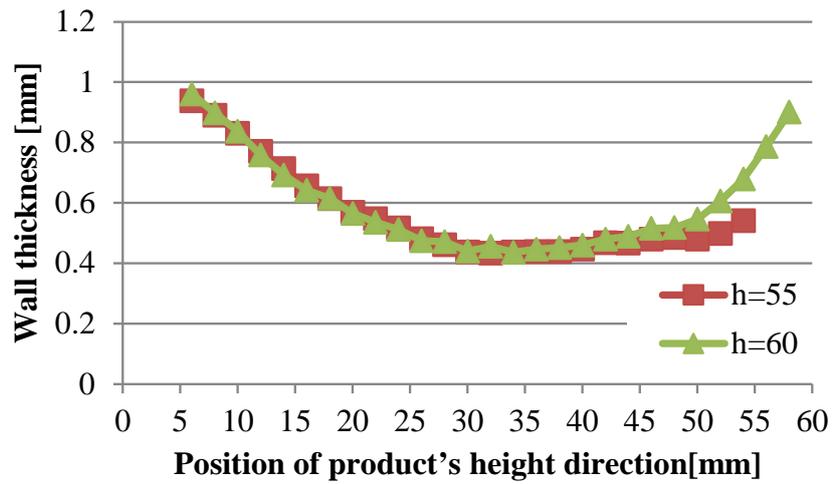


Fig. 3-15 移動量 0.10 の移動パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分布

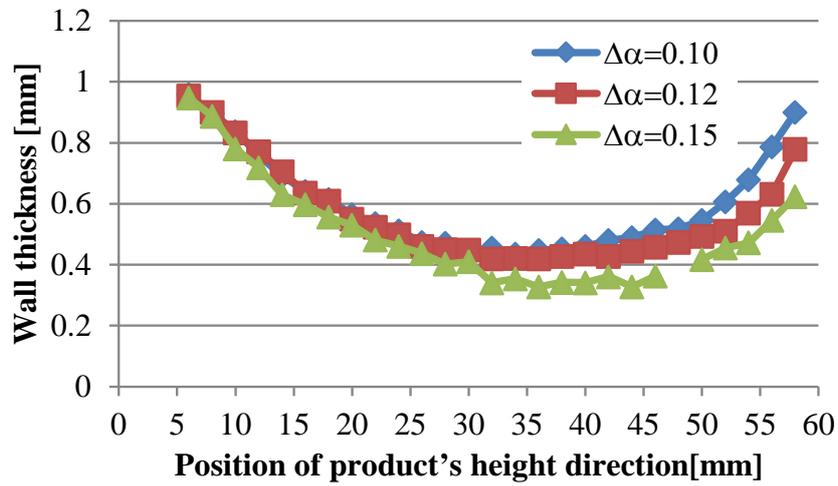


Fig. 3-16 成形高さ 60 mm の移動パスセットによる円筒形状の成形品の肉厚分布

3.6 角筒形状の加工限界

3.6.1 角柱形状の金型と素板

角筒形状の金型は第 2.6.1 項の **Fig. 2-17** に示した、角柱形状のものを使用した。60mm 四方の正方形の底面を持ち、角は R1 で丸められている。素板は、直径 120 mm の純アルミニウム (A1050-H24 材) を用いた。

絞り比は、非回転体形状のため定義できないが、参考までに求めるとするならば、対角線方向は 1.41、辺の方向は 2.00 になる。

3.6.2 回転パスセット

回転パスセットの評価に用いたパラメータを **Table 3-6** に示す。初期位置、初期角度は円筒形状同様であるが、角度増分や成形高さは有効な結果を得るために調整した。

Table 3-7 角筒形状のための回転パスセットのパラメータ

初期位置	α_0	-0.01
初期角度 [deg]	θ_0	80
角度増分 [deg]	$\Delta\theta$	3, 4, 5, 6
移動量	$\Delta\alpha$	0.00
成形高さ[mm]	h	25, 30, 35, 40

成形品の 1 例を **Fig. 3-16** に示す。角の伸びは小さく、比較的小さな成形品となった。辺の中央部分は底面から 33 mm 程度までにしかなかった。

成形実験の結果を **Fig. 3-17** に示す。成形高さが小さいほうが角度増分を大きくできることが分かった。成形高さ 25mm の時は、初期角度 80 deg で角度増分の最大が 5 deg であることから、最小でも 17 往復は必要である。



Fig. 3-17 回転パスセットによる角筒形状の成形品

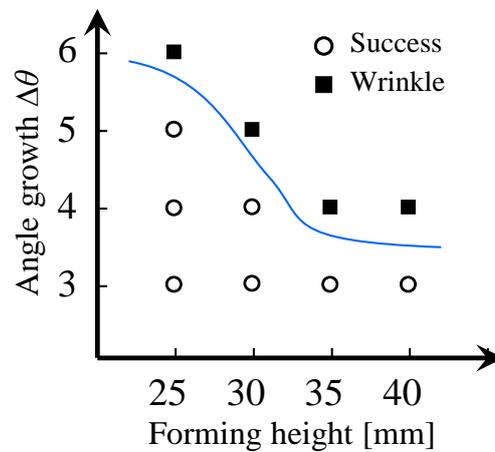


Fig. 3-18 回転パスセットによる角筒形状の成形結果

角度増分 3 deg の時の肉厚分布を Fig. 3-18 に示す。いずれの成形高さにおいても大きな違いはなく、いずれも肉厚がほとんど維持したまま成形できている。

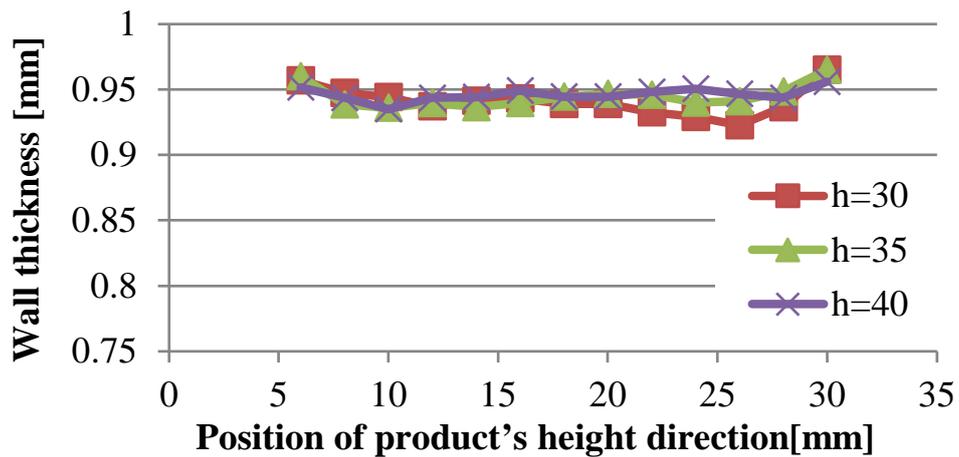


Fig. 3-19 回転パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布

3.6.3 角筒形状の移動パスセット

角筒形状の移動パスセットの評価に用いたパラメータを **Table 3-7** に示す。円筒形状のときと同様に、初期角度を 80 deg と 62 deg に設定し、それぞれ成形実験を行った。

Table 3-8 角筒形状のための移動パスセットのパラメータ

初期位置	α_0	-0.01
初期角度 [deg]	θ_0	80, 62
角度増分 [deg]	$\Delta\theta$	0
移動量	$\Delta\alpha$	0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15
成形高さ[mm]	h	25, 30, 35, 40

初期角度 80 deg の時の成形品の 1 例を **Fig. 3-19** に示す。成形品の外周部は、回転パスセットの時に比べて、非常に大きく伸びている。一方で、角の部分の肉厚増加は抑えられている。また、成形実験の結果を **Fig. 3-20** に示す。



Fig. 3-20 移動パスセットによる角筒形状の成形品

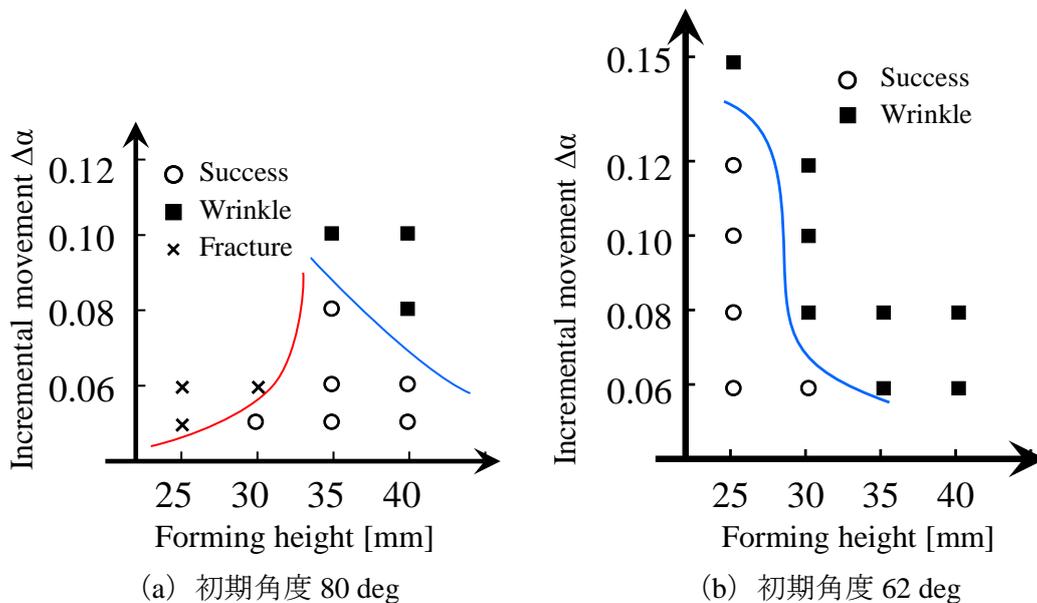


Fig. 3-21 移動パスセットによる角筒形状の成形結果

初期角度 80 deg の時は、成形高さ 35 mm の時が最も成形しやすく、それ以下の場合破断が生じ、それ以上の場合しわが発生するという結果が得られた。破断した成形品 (**Fig. 3-21**) を観察すると、外周部が反り立ったまま成形されており、その外周部手前で亀裂が生じていた。これより材料の伸びに対して、工具軌道が短く、外周部まで成形出来なかったため、しごきスピニング加工のような変形が生じ、破断が生じたと考えられる。また、成形高さを大きくすると、より積極的に材料を押し倒そうとするため、しわが生じたものと考えられる。

初期角度 62 deg の場合、成形高さが 25 mm のとき最も成形性がよいが、成形高さを増やすと急激に成形ができなくなった。素板外周部の反り立ちは、成形中にしわの発生を抑制する働きがあると考えられる。



(成形高さ 30 mm、移動量 0.06)

Fig. 3-22 初期角度 80 deg の移動パスセットによって破断した角筒形状の成形品

初期角度 80 deg、移動量 0.05 の時の肉厚分布を **Fig. 3-22** に、初期角度 62 deg、移動量 0.06 の時の肉厚分布を **Fig. 3-23** に示す。いずれの肉厚分布もバスタブ型をしているが、初期角度 80 deg のときは極めて大きな肉厚減少を起こしており、最も薄いところで 0.035 mm 程度まで減少した。一方で初期角度 62 deg の時は移動量が大きいにも関わらず肉厚減少は抑えられている。成形高さが小さいほうが肉厚減少を起こしているという共通点が見られた。

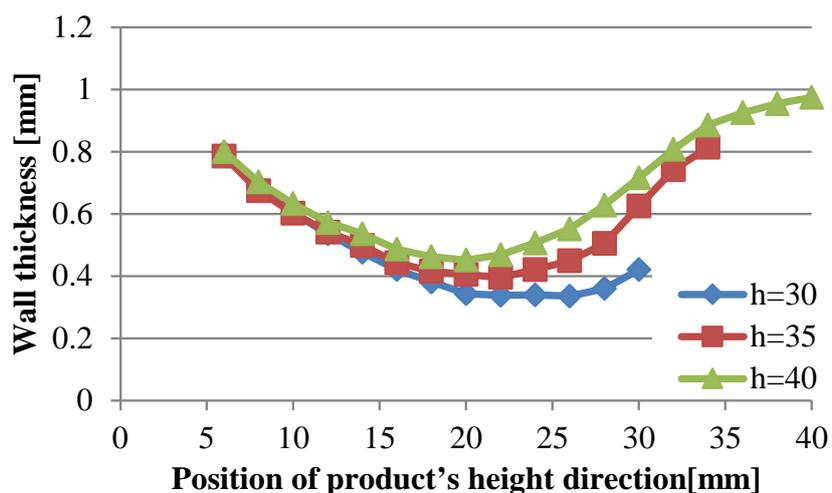


Fig. 3-23 初期角度 80 deg の移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布

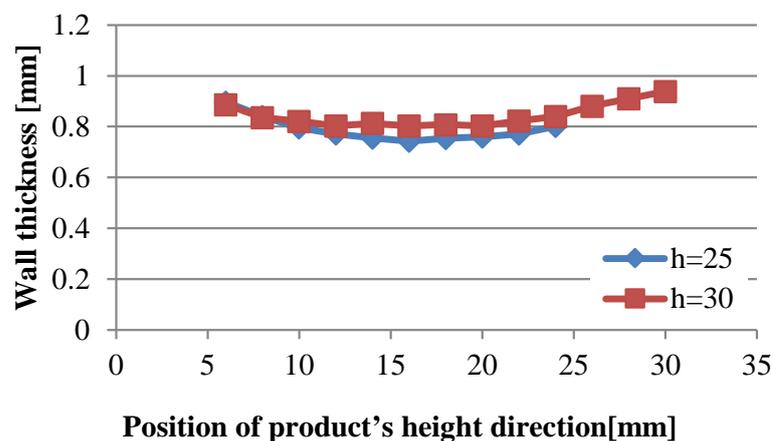


Fig. 3-24 初期角度 62 deg の移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布

3.6.4 角筒形状の回転移動パスセット

角筒形状の回転移動パスセットの評価に用いたパラメータを **Table 3-8** に示す。本実験では、初期角度 80 deg、成形高さ 30 mm に固定して、角度増分と移動量を様々設定し、その成形実験を行った。角度増分を固定して移動量を徐々に増やし、その破断やしわの発生の有無を調べた。一部の条件においては、成形可能なことが自明になるため、行っていない。

Table 3-9 角筒形状のための回転移動パスセットのパラメータ

初期位置	α_0	-0.01
初期角度 [deg]	θ_0	80
角度増分 [deg]	$\Delta\theta$	0 ~ 8 (1 deg刻み)
移動量	$\Delta\alpha$	0.00 ~ 0.09 (0.01刻み)
成形高さ [mm]	h	30

成形品の外観をそれぞれ **Fig. 3-24** に示す。移動量が 0.00 すなわち回転パスセットである **Fig. 3-24 (a)** は角度増分 5 deg でしわが発生しているが、移動量を 0.01 にした **Fig. 3-24(b)** では角度増分 7 deg でもしわや破断の発生なく成形が完了した。成形に成功している **Fig. 3-24(b)** と **Fig. 3-24(d)** を比較すると、素材の伸びが異なっている。これは **Fig. 3-24(b)** は回転パスセット、**Fig. 3-24(d)** は移動パスセットの影響が強いためである。

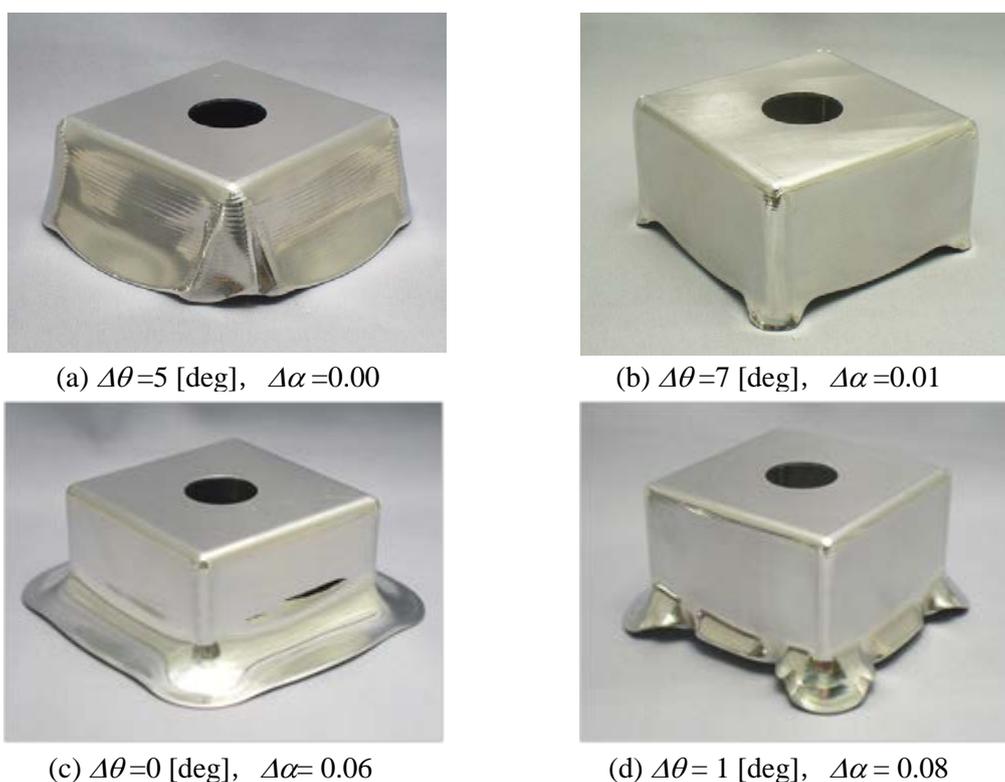


Fig. 3-25 回転移動パスセットによる角筒形状の成形品一覧

成形結果を **Fig. 3-25** に示す。**Fig. 3-25** では、横軸上は移動パスセット、縦軸上は回転パスセットの成形結果になる。角度増分が 0 deg と 1 deg の場合を比較すると、角度増分が小さくても破断を抑制し、移動量を大きく取ることができることが分かった。また、移動量に関しても同様に、0.00 の時と 0.01 の時では成形可能な角度増分が異なり、0.01 では角度増分は 7 deg まで取ることができた。移動量を増やすにつれて、成形可能な角度増分は右肩下がりになっていった。

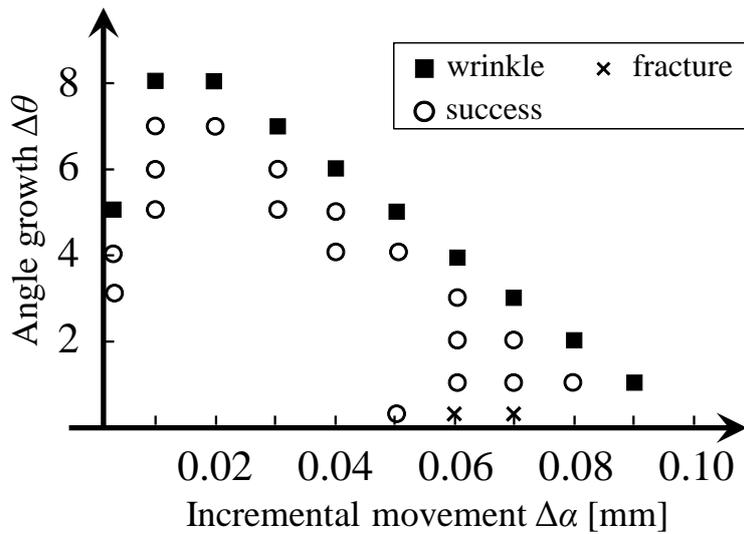


Fig. 3-26 回転移動パスセットによる角筒形状の成形結果

Fig. 3-26 に、各成形品の肉厚分布を示す。角度増分の大きいパスセットで成形を行ったものは肉厚減少を抑えられているが、浅いバスタブ型になっている。移動量が大きくなるにつれて、バスタブは深くなる。

成形時間は $\Delta\alpha = 0.01$, $\Delta\theta = 7$ のもので約 31 分、 $\Delta\alpha = 0.05$, $\Delta\theta = 4$ のもので約 30 分、 $\Delta\alpha = 0.08$, $\Delta\theta = 1$ のもので約 18 分であった。成形時間は移動量を大きくすることで短縮できることが分かった。

以上の結果から、肉厚分布の仕様と成形時間のトレードオフによって、パスセットを設定しなくてはならないと言える。

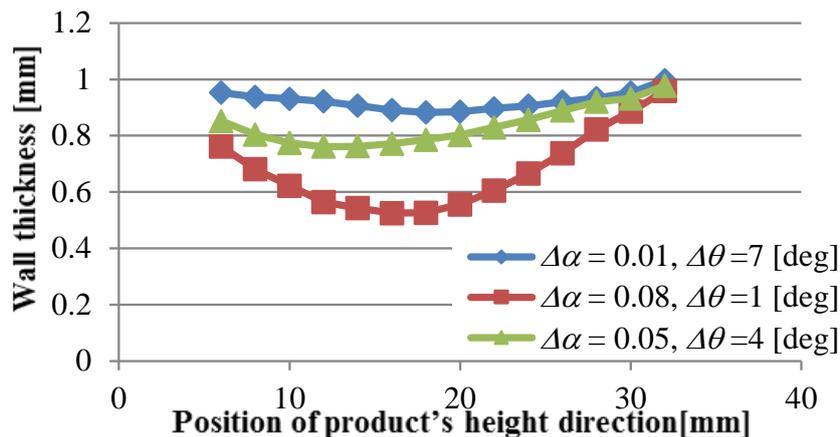


Fig. 3-27 回転移動パスセットによる角筒形状の成形品の肉厚分布

3.7 円筒形状、角筒形状の比較

ここでは円筒形状と角筒形状の成形性に対してパスセットが与える影響の比較をまとめる (Table 3-9)。

円筒形状においては、回転パスセットによる成形品と移動パスセットによる成形品ではほとんど差異は見られなかった。一方で、角筒形状では回転パスセットと移動パスセットでは大きな違いが見られた。特に角筒形状の場合の肉厚分布の差は顕著であり、それは回転パスセットにおいて円筒形状と角筒形状では変形形態が異なることを示唆している。円筒形状は素材全体で絞り変形が起こるが、角筒形状の辺の部分はそのまま板材が折りたたまれたような変形が起こったと考えられる。

移動パスセットにおいては、円筒形状ではすべて破断による成形不良であったが、角筒形状ではしわが発生する場合もあった。これは、角筒形状は接触点の高さ方向の位置や周方向の変形が異なるため、しわが発生しやすいと考えられる。

Table 3-10 成形実験結果の比較

成形品形状	パスセット	最小往復数	成形不良	肉厚分布
円筒形状	回転パスセット	9	しわ	バスタブ型
	移動パスセット	9	破断	バスタブ型
角筒形状	回転パスセット	21	しわ	一定
	移動パスセット	14 / 9	しわ / 破断	バスタブ型
	回転移動パスセット	10	しわ	バスタブ型

3.8 考 察

円筒形状に対して、回転パスセットは成形高さが小さいほうが角度増分を大きくでき、パス数が減らせることが分かった。一方で、移動パスセットは、成形高さが大きいほうが移動量を大きくでき、パス数が減らせることが分かった。成形高さが小さいと材料の伸びに対して、十分に長い工具軌道が与えられないためである。

角筒形状に関しては、回転パスセットや移動パスセット、回転移動パスセットのそれぞれについて、成形可否と肉厚分布を報告した。回転パスセットは、成形高さが小さいほうが角度増分を大きくでき、パス数を減らせることが分かった。初期角度 80 deg の移動パスセットでは、成形高さ 35 mm のときに最も移動量を大きくでき、それ以下だと破断が、それ以上だとしわが発生することが分かった。初期角度 62 deg の移動パスセットでは、しわが発生しやすく、素板外周部の反り立ちがしわの抑制に影響することが分かった。

これらの結果から、適切な長さの工具軌道の設定、すなわち成形高さの設定が不可欠であることを示している。短すぎる工具軌道は外周部を押し倒せず、破断が生じる一方、長すぎる工具軌道は外周部の角度が小さくなるため、しわが発生しやすくなる傾向が見られると言えるからである。また、往復数が少ないすなわち積極的な工具軌道はしわが発生する。このため、素板の伸びに対して、素板の外周まで到達する十分な工具軌道の長さ、すなわち成形高さの設定は重要と考えられる。

回転移動パスセットの実験結果では、角度増分や移動量を加えると、成形可能な範囲が広がることが示された。移動量を大きくすると加工時間は短縮される一方、肉厚減少は大きくなることが分かった。この結果は、角度増分や移動量を調整することで、肉厚分布と加工時間を調整可能なことを示唆している。

3.9 要 約

本章では、円筒形状と角筒形状において、パスセットが成形性に与える影響について調査した。同期絞りスピニング加工のパスセットとその成形性をデータベース化し、工具軌道設計に関するプログラムのノウハウを定量的に評価することが目的である。本研究では、基本的なパスセットのパラメータと成形高さを様々に設定し、そのしわや破断の発生の有無、すなわち成形可否を確認した。

円筒形状に関しては、回転パスセットと移動パスセットのそれぞれについて、成形可否と肉厚分布を報告した。また角筒形状に関しては、回転パスセットや移動パスセット、回転移動パスセットのそれぞれについて、成形可否と肉厚分布を報告した。これらの実験結果より角度増分や移動量を調整することで、肉厚分布と加工時間を調整可能なことが示唆された。これらの実験より、パスセットのパラメータと成形結果をデータベース化することで、プログラムのノウハウのための試作を減らし、よりリードタイムや初期コストの小さい加工になることが期待される。

一方、成形高さの設定が成形可否に影響することがわかった。適切な成形高さの設定は重要と考えられる。

第4章 成形高さの算出方法に関する検討

ここでは回転体形状のスピンニング加工を題材に、成形品の高さを予測する方法について検討した。

4.1 研究目的

4.1.1 パスプログラミングにおける成形高さと成形不良

工具軌道の自動生成を目指し、第3章では様々なパスセットと成形高さからその加工限界を調査した。このときは成形高さの設定は特に決め方がなく、さまざまな設定値で行った。その結果、成形高さを不十分な長さで設定したときは破断を生じさせることになることや、過剰に長く設定した場合はしわを発生させる原因になることが分かった (**Fig. 4-1**)。また、過剰に長く設定した場合は成形不良の他にも、加工時間も長く、生産性が悪くなる不都合が生じる。特に成形品の所望の高さが得られる素板直径を把握するためにも、素板直径と成形品の高さの関係を算出可能にしておく必要がある。

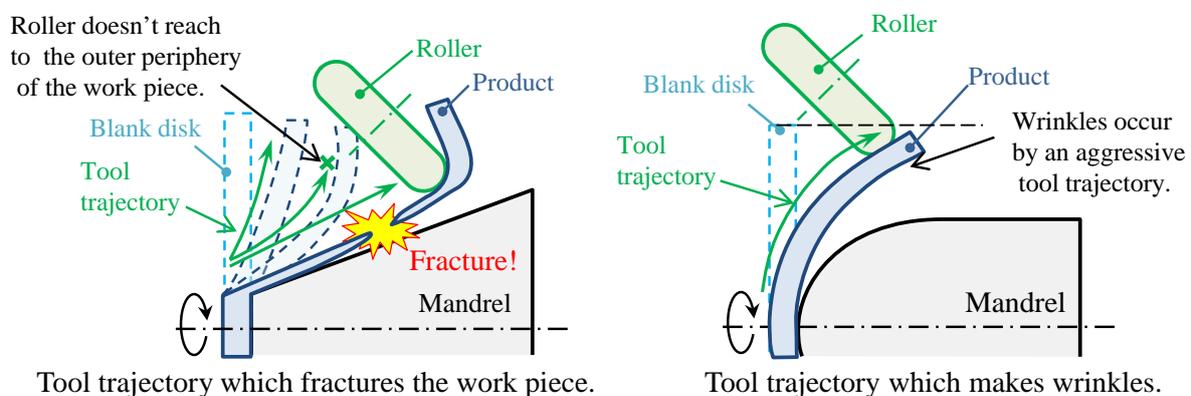


Fig. 4-1 不適切な成形高さの設定による破断やしわの発生

4.1.2 幾何モデルを用いた円筒形状における算出手法

葉山[10]は工具パスプログラミングの基礎の一環で、円筒形状における成形高さの算出方法を示している。葉山は **Fig. 4-2** の幾何モデルにおいて、体積一定の条件から、最小の製品高さ h_m を式 (4-1) から求めている。

$$\frac{h_m}{d} = \frac{\rho_M + t_0}{d} + 0.25 \left(\frac{t_0}{c} \right) \left(\frac{d}{\bar{d}} \right) \left\{ \left(\frac{D_0}{d} \right)^2 - \left(1 - 2 \frac{\rho_M}{d} \right)^2 - 2\pi \left(\frac{\bar{\rho}_M'}{d} \right) \left(1 - 2 \frac{\rho_M}{d} \right) - 8 \left(\frac{\bar{\rho}_M'}{d} \right)^2 \right\} \quad (4-1)$$

ただし、 $\bar{\rho}_M' = \bar{\rho}_M + \frac{t_0}{2}$ 、 $\bar{d} = d + c$

なお、 ρ_M は金型の角の丸み半径、 c はすきま、 D_0 は素板の直径、 d は金型の直径、 t_0 は素板の板厚である。

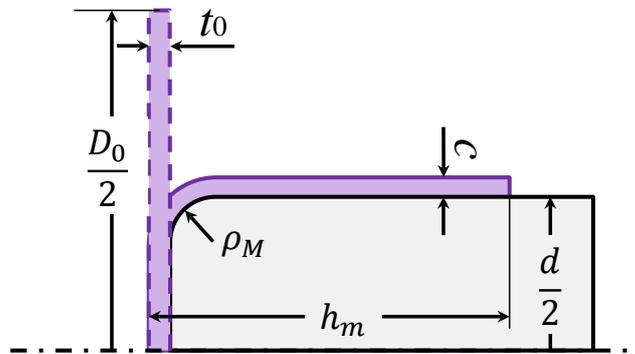


Fig. 4-2 幾何モデルによる円筒形状の成形高さ

4.1.3 同期絞りスピニング加工における成形高さの算出手法の基本方針

葉山は式(4-1)を用いてパスプログラミングを提案していたが、回転体形状に限っても錐体形状や半球形状、錐体を複数個組み合わせた形状など様々な金型形状が考えられる。しかし、それら金型に対応する成形高さを一般的に算出することは不可能と言える。また、金型ごとに幾何モデルを立て、成形高さを算出することは、作業者に多大な苦勞を強いることになる。

同期絞りスピニング加工は、工具軌道の計算過程において、ローラを用いて金型断面形状の計測を行う。具体的には、金型高さ方向に位置制御、金型半径方向に力制御をかけたローラを金型に接触させ、その金型を回転させたときのローラの位置を計測する。そして、その断面間は線形に補間される。

本研究ではこの断面形状の計測結果を利用し、金型表面積を算出する。そして、その算出した金型表面積と素板表面積を比較することで、成形高さとする (**Fig. 4-3**)。この手法の検証として、まず足掛かりとして、円筒形状の金型を前提として検討することにした。

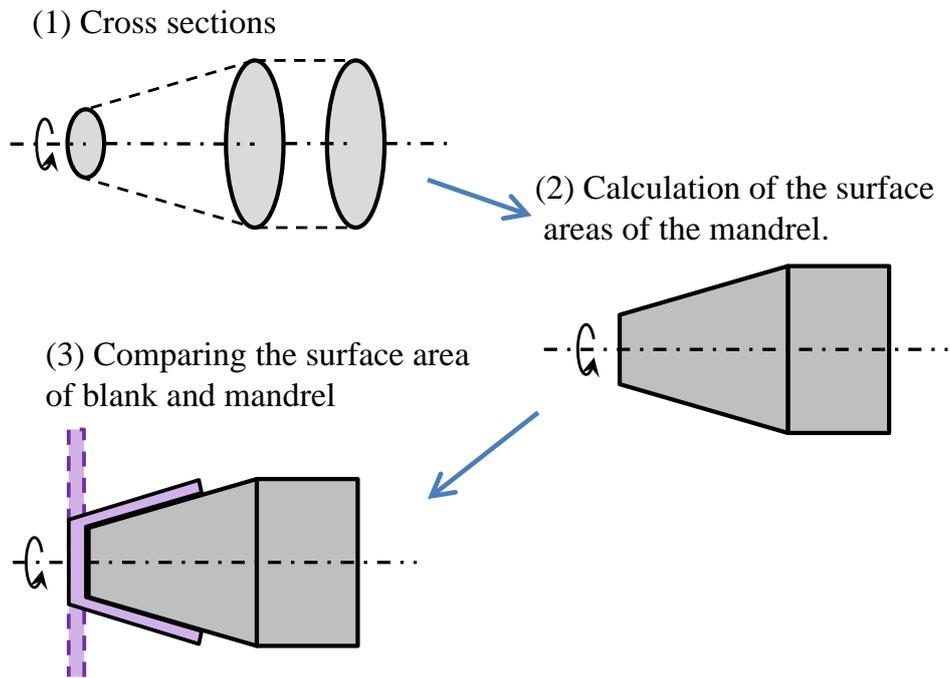


Fig. 4-3 成形高さの算出手法の概要

4.2 成形高さの算出手法

4.2.1 計測された金型断面形状から実際の金型形状への復元

同期絞りスピニング加工の金型断面形状の計測は、ローラが金型に沿う軌道を直接得るための手法であった。すなわち、計測された金型断面形状は実際の金型断面形状とは異なっている。よって、計測された金型断面形状から、実際の金型断面形状を算出する必要がある。しかし、様々な金型の予備知識を持たずに、その金型と非球体のローラの接触点を特定することは難しい。そこで、ローラ的位置はローラの丸み半径の中央として扱うことにする。これによって、金型とローラの接触点は計測された位置から丸み半径分離れた点であることが分かる。

金型断面形状の計測結果から得られた位置 $P_k(x_k, y_p(k, \theta))$ から実際の金型形状、すなわち金型の表面位置の点 $P'_k(x'_k, y'_p(k, \theta))$ を算出するためには、次の手順で行った (Fig. 4-4)。

- (1) $k-1$ 番目の金型断面の接触位置 $P_{k-1}(x_{k-1}, y_p(k-1, \theta))$ と k 番目の金型断面の接触位置 $P_k(x_k, y_p(k, \theta))$ を結んだ直線 L_k と、 k 番目の金型断面の接触位置 P_k と $k+1$ 番目の金型断面の接触位置 $P_{k+1}(x_{k+1}, y_p(k+1, \theta))$ を結んだ直線 L_{k+1} を得る。

$$L_k : y = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}(x - x_{k-1}) - y_{k-1} \quad (4-2)$$

$$L_{k+1} : y = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}(x - x_k) - y_k \quad (4-3)$$

- (2) 直線 L_k と L_{k+1} からローラ丸み半径 ρ_r だけ平行移動した直線 L'_k と L'_{k+1} をそれぞれ求める。これは点 $P_k(x_k, y_p(k, \theta))$ から直線 L'_{k-1} に下ろした垂線の長さがローラ丸み半径 ρ であることから、点と直線の距離により求める。直線 L'_k は直線 L_k と平行であるので傾きはそれぞれ等しい。直線 L_k の傾きすなわち円錐半角 α を用いると、式(4-6)、式(4-7)のように表すことができる。

$$L'_{k-1} : y = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}x - y_{k-1} + \frac{1}{\cos \alpha} \rho \quad (4-4)$$

$$L'_k : y = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}x - y_k + \frac{1}{\cos \alpha} \rho \quad (4-5)$$

すなわち

$$L'_k : y = A_k x + B_k \quad (4-6)$$

$$L'_{k+1} : y = A_{k+1} x + B_{k+1} \quad (4-7)$$

ただし、 $A_{k+1} = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}$, $A_k = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}$,

$B_{k+1} = -\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} x_k - y_k + \frac{1}{\cos \alpha} \rho$, $B_k = -\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} x_{k-1} - y_{k-1} + \frac{1}{\cos \alpha} \rho$ である。

- (3) 最後に直線 L_k' と L_{k+1}' の交点 $P'_k(x'_k, y'_k(k, \theta))$ を求める。この交点群が金型形状になる。
2 直線 L_k' と L_{k+1}' の交点は式(4-6)と式(4-7)から、式(4-8)で求めることができる

$$x_k = \frac{B_{k+1} - B_k}{A_{k+1} - A_k}, \quad y_k = \frac{A_k B_{k+1} - A_{k+1} B_k}{A_{k+1} - A_k} \quad (4-8)$$

ただし、末端の点 $P_0(x_0, y_p(0, \theta))$ に関しては、直線 L'_0 に垂線を下ろした時の交点を用い、
 $P_n(x_n, y_p(n, \theta))$ に関しては直線 L'_{n-1} に垂線を下ろした時の交点を用いる。

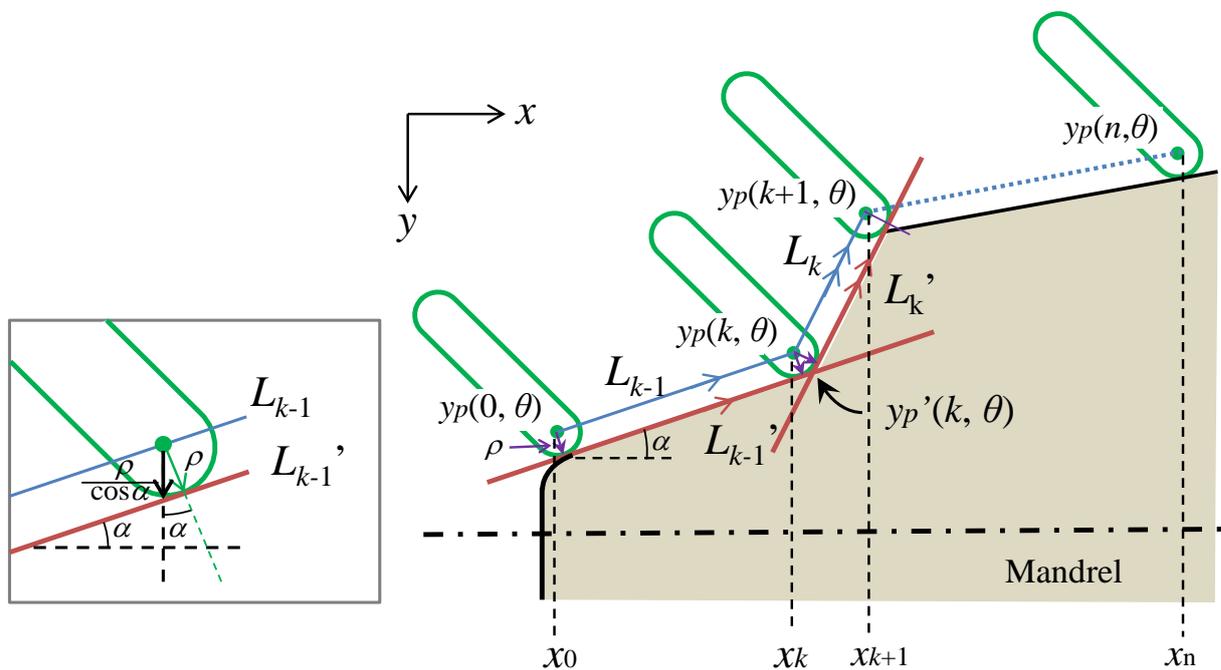


Fig. 4-4 実際の金型形状の算出

4.2.2 金型表面積の算出

計算された金型断面形状から、断面間ごとに金型の表面積を算出する。ここで、金型は回転体形状を仮定しているため、直円錐体の先端を底面と平行な面で切断した形状と見なすことができる (Fig. 4-5)。

直円錐の側面は展開すると、扇形になる。扇形の側面積 S は底面の半径を r 、弧の長さを l 、中心角を θ とすると、式(4-9)により求まる。

$$S = \frac{1}{2} rl = \frac{1}{2} r^2 \theta \quad (4-9)$$

よって、直円錐体の先端を底面と平行な面で切断した形状の側面積 S_k は式(4-10)で求まる。

$$S_k = \frac{1}{2}(r_2 + r_1)^2 \theta - \frac{1}{2} r_1^2 \theta \quad (4-10)$$

ここで、 $r_1 : r_2 = l_1 : l_2$ より、

$$r_1 = \frac{l_1}{l_2 - l_1} r_2 \quad (4-11)$$

また、

$$\theta = lr = \frac{l_2}{r_2 + r_1} \quad (4-12)$$

さらに、 l は半径円弧であるため、

$$l_1 = 2\pi d_{k-1} \quad (4-13)$$

$$l_2 = 2\pi d_k \quad (4-14)$$

式(4-11)から式(4-14)より、式(4-10)は式(4-15)のように変形できる。

$$S_k = \pi r_2 (d_k - d_{k-1}) \quad (4-15)$$

この計算を、各金型断面間に対して行いながら、その金型表面積の総和と素板の面積を比較する。金型表面積の総和が素板面積を上回るまで行い、その上回った時の断面 $k-1$ を求める。

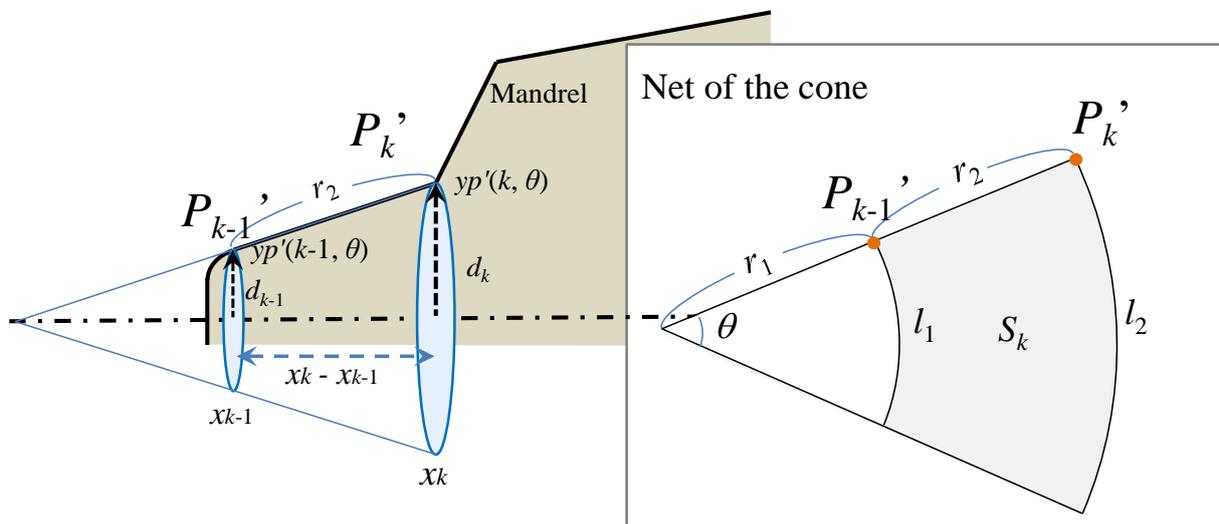


Fig. 4-5 金型表面積の算出

4.2.3 成形高さの算出

前節において素板が尽きる断面間まで求めた。本節では、素板の残りを考慮して成形高さを求める (Fig. 4-6)。

まず素板の表面積 S_b は、素板直径 D より、式(4-16)より求める。

$$S_b = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (4-16)$$

また、成形品の底面 S_{M0} は、金型先端側の算出直径 d_0 を用いて、式(4-17)で求められる。

$$S_{M0} = \pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \quad (4-17)$$

よって、 k 番目の金型断面における残りの素板の表面積 S_{bk} は、式(4-18)で求められる。

$$S_{bk} = S_b - S_{M0} - \sum_1^{k-1} S_i \quad (4-18)$$

ところで、 k 番目における金型断面から母線の長さ h_k の錐体形状の側面積 S_M は、式(4-19)で求められる。

$$S_M = \frac{1}{2} (r_1 + h_k)^2 \theta - \frac{1}{2} r_1^2 \theta \quad (4-19)$$

ここで、式(4-11)から式(4-14)より、式(4-19)は式(4-20)のように書き換えられる。

$$S_M = \pi \frac{d_k - d_{k-1}}{r_2} h_k^2 + 2\pi d_{k-1} h_k \quad (4-20)$$

これより、残りの素板の表面積 S_{bk} と、母線長さ h_k においたときの金型の表面積 S_M が等しいことを用いて、母線長さ h_k を式(4-23)から求める。

$$S_{bk} - S_M = 0 \quad (4-21)$$

$$S_{bk} - \left\{ \pi \frac{d_k - d_{k-1}}{r_2} h_k^2 + 2\pi d_{k-1} h_k \right\} = 0 \quad (4-22)$$

$$h_k = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4aS_{bk}}}{2a}$$

$$\text{ただし、 } a = \pi \frac{d_k - d_{k-1}}{r_2} \text{、 } b = 2\pi d_{k-1} \text{ である。} \quad (2-23)$$

以上より、成形高さ h_{sum} は式(2-24)より求めることができる。

$$h_{sum} = (x_k - x_0) + \frac{1}{\cos \alpha} h_k \quad (4-24)$$

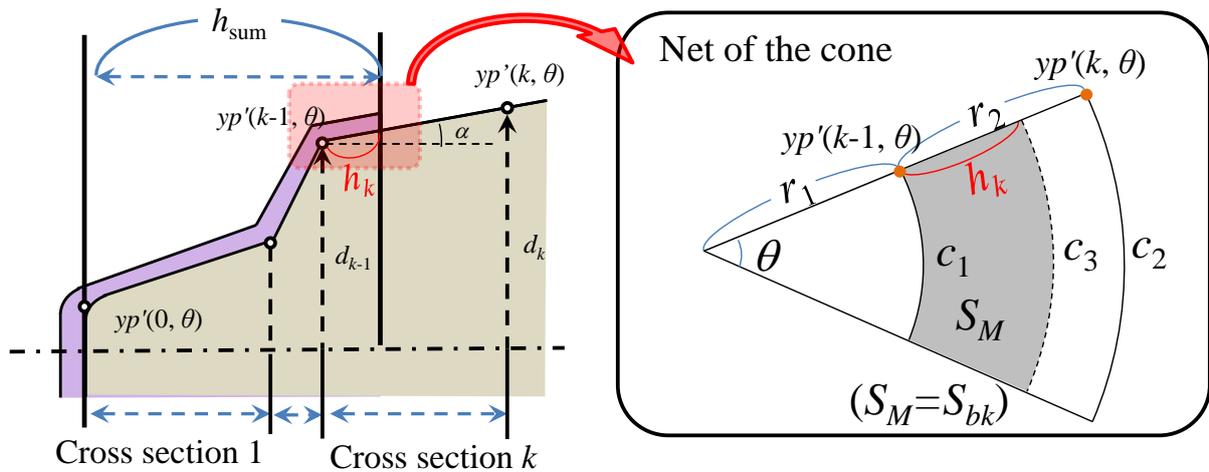


Fig. 4-6 成形高さの算出

4.3 定量的評価

本節では、円筒形状の金型を用いて、幾何モデルによる式(4-1)と本手法による算出結果を比較し、本手法の妥当性を検証する。

4.3.1 算出に用いたパラメータ

成形高さの算出手法に用いたパラメータを **Table 4-1** に示す。このパラメータは第 3.5 節に示した金型および素板の条件である。比較のし易さからこの条件を選択した。ただし、金型直径の値は式(4-1)でのみ用い、本手法、すなわち第 4.2 節で示した算出方法では、**Table 4-2** に示す値から金型の直径を求める。

Table 4-1 算出に用いたパラメータ

ローラの丸み半径	ρ	8 mm
金型直径 (設計値)	d	85mm
金型丸み半径	ρ_M	2 mm
素板肉厚	t_0	1 mm
素板直径	D	150 mm
隙間 (成形後の肉厚)	c	1 mm

Table 4-2 金型断面計測で計測されたローラの位置

金型断面番号	金型断面計測値 P_k	
	x_k	$y_k(x_k, \theta)$
0	0.024201	0.068716
1	0.025201	0.068716
2	0.031201	0.065943
3	0.092201	0.065709

4.3.2 計算結果

幾何モデルによる式(4-1)に **Table 4-1** のパラメータを代入した結果は $h_m = 0.045490$ 、すなわち最小の製品高さは約 45.5 mm である。

一方、**Table 4-2** の各点から、本手法で算出された金型表面位置を **Table 4-3** に示す。これら値を主軸原点からの距離に直すと、**Fig.4-7** のようになる。**Fig.4-7** は横軸を金型の主軸とし、縦軸は金型の根本としている。すなわち、紙面左側が金型先端方向である。

Table 4-3 算出された金型表面位置

金型断面番号	金型断面計測値 P_k		算出された金型表面位置 P_k'		$P_k - P_k'$ 間距離
	x_k	$y_k(x_k, \theta)$	x_k'	$y_k'(x_k, \theta)$	
0	0.024201	0.068716	0.027557	0.075978	0.008005
1	0.025201	0.068716	0.028557	0.075978	0.008000
2	0.031201	0.065943	0.032975	0.073936	0.008187
3	0.092201	0.065709	0.092232	0.073709	0.008000

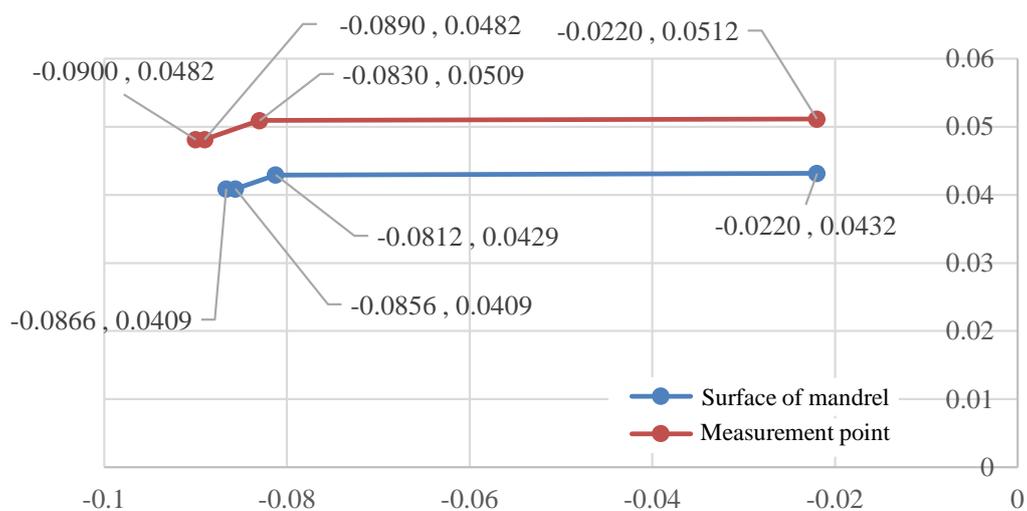


Fig. 4-7 計測された金型断面形状と算出された金型の表面位置

これによって算出された成形高さは、 $h_{sum} = 0.043546 \text{ mm}$ となった。幾何モデルに対し、約 2 mm 程度短い結果になった。この誤差は、金型先端側で生じたのではないかと考えられる。金型先端側は金型の丸みや素板の押さえ金が接触するため、やや理想的でない接触が生じえるためである。

4.4 要 約

本章では、同期絞りスピニング加工で成形される製品の高さ、すなわち成形高さを算出する方法を検討した。成形高さの設定は前章で示された通り、成形可否に関する重要なパラメータである一方、様々な形状に対して作業者がそれぞれ幾何モデルを立てて、成形品の高さを計算することは、非常に煩雑である。

本研究では、同期絞りスピニング加工の金型断面計測を利用して、成形高さを算出する方法を検討した。金型断面形状から算出された金型の表面積と素板の表面積を比較し、それらが一致するときの高さを算出する手法を提案した。

実際に与えられた円柱形状の金型に対して、幾何モデルとその算出手法で得られる最小となる製品の高さをそれぞれ比較した。本手法のモデルは若干小さめに計算されたが、概ね近い計算結果になった。

4.5 今後の課題

本研究では基本的な傾向を確認するために円筒形に限って考えたが、同期絞りスピニング加工は異形断面形状を成形することが目的であるため、本計算手法も異形断面形状を含めて行う必要がある。

金型形状の復元に関して

主軸に対して斜めに取り付けられた非球体形状のローラと異形断面形状の金型の接触軌道を幾何的に求めることは難しく、金型断面形状から金型の表面積を得ることは単純な計算手法では不可能と思われる。**Fig. 4-8** に実際の金型断面形状を灰色の領域で、計測された金型断面形状を点で示す。**Fig. 4-8** のように異形断面形状の場合は、ローラと金型が複雑な接触をしていることが確認されている。また、実際に、第 2.8 節では凹輪郭を有する筒形状の成形実験を行ったときに、**Fig. 2-41** に示したような高さ方向に均一でない接触点が得られている。このように、主軸に対して斜めに取り付けられた非球体形状のローラと異形断面形状の金型は半径方向および高さ方向において、複雑な接触をしている。

そこで、力センサを用いて方向を検出する方法が考えられる。金型断面形状の計測には力制御、すなわち力センサを用いることになる。金型断面形状の計測中、ローラの位置の他にローラにかかる 3 方向の力、金型高さ方向、金型半径方向、金型周方向を計測することで、接触方向がわかる可能性がある。

金型表面積の算出に関して

金型を回転体形状に限定した場合、その表面積は円錐形として扱うことができた。しかし、

異形断面形状に拡張する場合はそのように扱うことができない。そこで、金型高さ方向と主軸周方向に細分化されたメッシュで、表面積を求める手法が考えられる。この手法では、円形も多角形として扱われるため、誤差を評価する必要がある。

肉厚減少の考慮

第 4.3 節における定量的評価において、幾何モデルや本手法ではそれぞれ 45mm 程度の成形高さが算出されたが、実際の成形結果では第 3.5 節で報告した通り、高さが 60 mm 程度の成形品となった。これは成形中に肉厚減少が起こり、材料が伸びたためである。このように金型形状や工具軌道によって大きな伸びが生じるため、単純に最小の成形高さだけでなく、肉厚減少を考慮した成形高さを算出する手法も検討する必要がある。

第5章 結 論

本章では、本研究の主体である同期絞りスピニング加工に関して、得られた知見や利点、課題をまとめる。最後に、その課題に対する今後の展望を述べる。

5.1 知 見

本論文は、異形断面形状が成形可能な絞りスピニング加工である、同期絞りスピニング加工についてまとめたものである。

第2章では、同期絞りスピニング加工の開発について、その実現方法、すなわち工具軌道の算出方法を示した。種々の成形実験を行い、その有効性について確かめた。第3章以降では、その同期絞りスピニング加工の更なる発展を目指し、工具軌道の自動生成手法の開発を目指した。工具軌道には所望の形状が成形できることが当然求められるため、成形性の調査と最小の成形品の高さ（成形高さ）の算出手法について検討した。

第3章では工具軌道の重要な要素であるパスセットについて、そのパラメータと成形可否について調査を行った。第4章では成形品の高さを求める算出手法の1つを提案した。

柔軟な工具軌道

同期絞りスピニング加工では、金型に沿う軌道、素板外周形状、パスセットの3要素を組み合わせて工具軌道を算出する。パスセットは当然変更可能であるが、本研究では、金型のみを変えた場合、素板を非円形状に変えた場合などでも成形に成功し、それらが独立して扱えることが示された。特に第2.8節の凹輪郭を有する形状において非円形素板の実験は、予備成形された素材に対しても有効であることを示しており、同期絞りスピニング加工は複合加工でも有効であることや歩留まりの向上を示唆している。これは産業的にも価値があると言える。

異形断面形状の材料流動

同期絞りスピニング加工は非回転体形状の底を持ち、かつ異形断面形状の筒形状が成形できる点に学術的新規性がある。よって、スピニング加工における、板材から角筒形状や凹輪郭を有する形状への変形過程は新しい現象の1つである。角筒形状では角の部分に、凹輪郭を有する形状では曲率の小さいところに材料が集中し、肉厚が増加する結果が得られた。

加工特性

第3章では、基本的な3種類のパスセットを設定し、様々なパラメータで成形実験を行った。特に角筒形状の成形に関する結果は様々な特徴がみられた。特に、移動パスセットは初期角度や移動量、成形高さでそれぞれしわが生じやすい条件や破断が生じやすい条件などが見られ、学術的に興味深い結果が得られた。

また、回転移動パスセットは、回転パスセットや移動パスセットよりも加工が成功できる領域が広い上に、加工時間が短縮できるということも明らかになった。このような基本となる工具軌道と成形可否の結果をデータベースとして公開することは、他の作業者の参考になり、生産性の向上が見込める。

5.2 技術的考察

本節では、同期絞りスピニング加工における技術的特徴と課題を今一度まとめる。

同期絞りスピニング加工は、異形断面形状の筒形状を一体成形できるという新規性がある。これは素板の肉厚を維持した成形できるため、流体の漏れを敬遠する圧力容器や電池ケースの製造法として期待される。

考えられる問題点を次に示す。これらはいずれも絞りスピニング加工特有の問題点である。

- (1) しごきスピニング加工に比べて、加工精度が劣る
- (2) 加工時間が長い
- (3) 工具軌道の設計法が明らかでない

(1) に関しては、成形後の板厚が \sin 則 (式(1-1)) に従うしごきスピニング加工に比べ、絞りスピニング加工の肉厚は工具軌道やローラの押し付け力に依存する。また、第2章と第3章の肉厚分布の計測結果より肉厚が均一である場合も少ない。また、円筒形状の成形実験結果 (第2.5.3項) ではスプリングバックも生じることがわかった。このため、肉厚の自由度と引き換えに、加工精度が保障されていない。

(2) に関しては、金型付近から素板外周まで繰り返し往復する工具軌道で成形を行うため加工時間が長い。回転体形状の絞りスピニング加工であれば、単位時間あたりの主軸の回転数、すなわち角速度を大きくすることで、ローラの送り速度が上げられ、加工時間を短くすることができる。しかし、異形断面形状の場合、主軸の回転に合わせてローラの金型半径方向の位置を制御しなくてはならない。このため主軸の回転数を極めて大きくすることができない。したがって、異形断面形状の同期絞りスピニング加工は加工時間の短縮のために、最適な工具軌道を設定するしかない。

(3)の問題は、工具軌道と成形品の形状の関係性が未だに確立されておらず、実験的に評価

せざるを負えないのが現状である。絞りスピニング加工は、先でも述べたように、工具軌道の自由度が高いため、そのトレードオフとしてこの問題が残ってしまう。

5.3 展 望

同期絞りスピニング加工には、主に工具軌道に関する課題が残っている。工具軌道は所望の形状に合わせて、自動的に設定されるべきである。工具軌道の自動生成手法を開発する必要がある。そのために、加工限界の調査や成形高さの算出手法の検討を行った。よって、次に工具軌道の自動生成手法の開発が望まれる。

最終的な将来のビジョンとして、塑性加工分野においても、切削加工のマシニングセンタのようなシステム、すなわち、作業者は所望の形状をした CAD データを入力後、いくつか設定をするだけで、工具軌道の自動生成から加工までを行う加工システムが誕生することが望まれる。このような加工システムが誕生することで、より低コストに、より柔軟に試作品の製造が行え、製造業の発展が期待される。

謝 辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程および後期課程に在学中、連携大学院ロボットものづくり研究室において行った研究をまとめたものです。

同専攻の連携大学院教授であり、産業技術総合研究所先進製造プロセス部門難加工性材成形グループの主任研究員である荒井裕彦先生には指導教員として、ご指導を頂きました。荒井先生にはいつも優しい言葉で励まして下さいました。心より感謝しております。

同専攻の准教授である相山康道先生と連携大学院教授である神徳徹雄先生には、副指導教員として、お忙しい中研究の助言を頂きました。特に相山先生には、卒業論文の時に指導教員としてお世話になり、研究の基本を学ばせていただきました。また、神徳先生には研究の不備を鋭く指摘いただきました。自分の至らなさを実感し、努力の糧になりました。

同専攻の准教授である望山洋先生と連携大学院准教授である原田研介先生は副査を引き受けてくださいました。望山先生は研究室の先輩の副指導教員であったこともあり、日ごろからいつも気にかけていただきました。原田先生は新しく研究を見て下さいました。非常に有難く存じます。

また、研究の拠点となった産業技術総合研究所の難加工性材成形グループでは、グループ長の松崎邦男主任研究員を始めとするグループの皆様と日常的な雑談を通じて、多くの知識や示唆を頂きました。

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の助成により行われました。研究費の支援によって、研究を続けることができました。

研究室のメンバーとしては博士前期課程の1年間と短い時間ではありましたが、関口明生氏（現・木更津高専助教）には研究室の先輩としてのお世話になりました。研究活動全般的に参考にさせて頂きました。

最後に、後輩や友人そして博士後期課程まで長い学生生活を支えてくださった親族に心からの感謝をいたします。

このように本論文は非常に多くの方々の支援により執筆されました。支えてくださった皆様に今一度、心からの感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

参考文献

スピニング加工全般

- [1] 葉山益次郎, “回転塑性加工学”, 近代編集社, p. 255, 1981.
- [2] H. Palten, D. Palten, “Metal Spinning - From Ancient Art to High-Tech Industry MetalForming Magazine”, vol. 36, No.9, pp. 30-34, 2002.
- [3] O.Music, J.M. Allwood, K. Kawai, “A review of the mechanics of metal spinning”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, No. 3-23, 2010.
- [4] 日本塑性加工学会, “スピニング加工技術”, 日刊工業新聞社, pp. 55-73, 1984-6.

絞りスピニング加工

- [5] 葉山益次郎, 室田忠雄, “スピニング加工の研究(第1報)”, 精密機械, Vol.29, No. 340, pp. 369-376, 1963.
- [6] 葉山益次郎, 室田忠雄, “スピニング加工法の研究(第2報)”, 精密機械, Vol. 29, No. 341, pp. 427-435, 1963.
- [7] 高石和年, 大澤紀美雄, 山田貴之, “軸対称容器の数値制御スピニング加工技術の開発”, 塑性と加工, No. 45, pp. 54-59, 2004.
- [8] 葉山益次郎, 工藤洋明, 篠倉恒樹, “絞りスピニング加工のパススケジュールの研究”, 日本機械学会誌, Vol. 73, No. 614, pp. 363-370, 1970.
- [9] 葉山益次郎, 中村正彦, 渡辺哲哉, 浜野裕之, “数値制御スピニング機械によるロールパスプログラミング”, 塑性と加工, Vol. 27, pp. 1053-1059, 1986.
- [10] 葉山益次郎, “新回転加工 一理論と応用一”, 近代編集社, pp. 169-239, 1992
- [11] 寺田耕輔, 高橋進, 田口直人, “絞りスピニング加工における破断発生メカニズムとその予測手法”, 塑性と加工, Vol. 51, No.592, pp. 47-52, 2010.

しごきスピニング加工

- [12] M.Hayama, T. Murata, “Theoretical Study of Shear Spinning”, Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 8, no. 31, pp. 460-467, 1965.
- [13] H. Arai, “Robotic Metal Spinning - Shear Spinning Using Force Feedback Control - “, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3977-3983, 2003.

新しいスピニング加工法（異形断面形状の成形）

- [14] T. Amano, K. Tamura, “The study of an elliptical cone spinning by the trial equipment”, Proceedings of the 3rd International Conference of Rotary Metalworking Processes, pp. 213-222, 1984.
- [15] 荒井裕彦, 藤森昭造, 岡崎功, “同期スピニング加工による非軸対称断面管の成形”, 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, pp. 687-688, 2005.
- [16] H. Arai, “Robotic Metal Spinning - Forming Non-axisymmetric Products Using Force Control -“, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2702-2707, 2005.
- [17] Awiszus B., Meyer F., ”Metal Spinning of Non-circular Hollow Parts”, Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, pp. 353-355, 2005.
- [18] Härtel S., Awiszus B., ”Numerical and Experimental Investigations of Production of Non-Rotationally Symmetric Hollow Parts Using Sheet Metal Spinning”, Proceeding of the 13th International Conference on Metal Forming, No. 9, pp. 998-1001, 2010.
- [19] 関口明生, 荒井裕彦, “垂直壁のある形状の力制御しごきスピニング加工”, 平成 22 年度塑性加工春季講演会論文集, pp. 321-322, 2010.

逐次張り出し成形

- [20] 田中 繁一, “インクリメンタルフォーミング : 金型レス・CNC フレキシブル塑性加工の新展開”, 日本機械学会誌, Vol. 211, No. 1059, pp. 142, 2007.
- [21] 井関日出男, 加藤和典, 坂本誠一郎, “ボールローラによるフレキシブルな逐次張り出し成形に関する研究”, 日本機械学会論文集, Vol. 58, No. 554, pp. 3147-3155, 1992.
- [22] 丸山英彰, 坂井修, 相田収平, “逐次張り出し成形機と成形法に関する研究”, 新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, 2004.
- [23] 市川智也, 田中繁一, 早川邦夫, 中村保, “工具パス面の方向制御を用いた垂直壁のインクリメンタルフォーミング成形”, 第 62 回塑性加工連合講演会論文集, pp. 427-428, 2011.

研究発表

1. 査読付き学術雑誌論文

- 1.1 杉田栄彦, 荒井裕彦: 異形断面形状を成形する同期絞りスピニング加工法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 767 (2012), pp. 1004-1012.
- 1.2 Y. Sugita and H. Arai: Formability in synchronous multipass spinning using simple pass set, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 217, pp. 336-344.

2. 国際会議における発表

- 2.1 Y. Sugita and H. Arai, "Synchronous multipass spinning with automatic calculation of pass set", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, August, 2013, pp. 1654-1651.
- 2.2 Y. Sugita and H. Arai, "Effect of pass-set shape on formability in synchronous multipass spinning", Proceeding of 11th International Conference on Technology of Plasticity 2014, Nagoya, October, 2014, vol. 81, pp. 2373-2378.

3. 口頭発表

- 3.1 杉田栄彦, 荒井裕彦, 「同期絞りスピニングによる異形断面形状の成形実験」, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月, G150034.
- 3.3 杉田栄彦, 荒井裕彦, 「同期絞りスピニング加工による凹輪郭を有する形状の成形実験」, 第 62 回塑性加工連合講演会, 2011 年 10 月, pp. 415-416.
- 3.3 杉田栄彦, 荒井裕彦, 「同期絞りスピニング加工の工具軌道が角筒形状の加工限界に及ぼす影響」, 平成 26 年度塑性加工春季講演会, 2014 年 6 月, 421.

4. その他諸報告 (ポスタ発表)

- 4.1 杉田栄彦, 荒井裕彦, 「異形断面形状の絞りスピニング加工法の開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011 年 5 月, 1A1-F06.

5. 受賞・表彰

- 5.1 Yoshihiko Sugita, Hirohiko Arai, 2014 ICTP Best Paper Award, 2014 年 10 月 (発表 2.2)

付録A. 先行研究の特長と本研究の位置付け

異形断面形状のスピニング加工における先行研究は、管材のスピニング加工やしごきスピニング加工によるものがほぼすべてで、多サイクルパスの絞りスピニング加工によるものは発見できなかった。その時点である程度は差別化されているものの、それぞれ利点があるため、具体的に異なる点を **Table A-1** でまとめる。

Table A-1 異形断面形状のスピニング加工の比較

著者・年	素材	元となるスピニング加工	特徴
天野ら 1984	板材	しごきスピニング加工	カム機構を用いた位置制御
荒井ら 2005	管材	口絞り加工	数値制御を用いた位置制御
荒井 2005	板材	しごきスピニング加工	力制御を用いた一定の加工力
Awiszus ら 2005	板材	しごきスピニング加工	ばねを用いた一定の加工力
Härte ら 2010	板材	しごきスピニング加工	予備成形された素材を利用
関口ら 2010	板材	しごきスピニング加工	湾曲軸。片面が垂直壁を持つ形状
本研究 2010	板材	絞りスピニング加工	異形断面形状の底付き筒形状

付録B. 凹輪郭を有する形状の金型の図面

本研究において新しく設計した、凹輪郭を有する形状の金型の図面を示す。図面には、材料は S45C と記載されているが、実際に実験に用いた金型の材質は SUS304 である。金型の他に押さえ金 (Fig. B-3, Fig. B-4) を示す。素板は金型と押さえ金に挟み込むように固定され、押さえ金は金型にボルトで固定される。

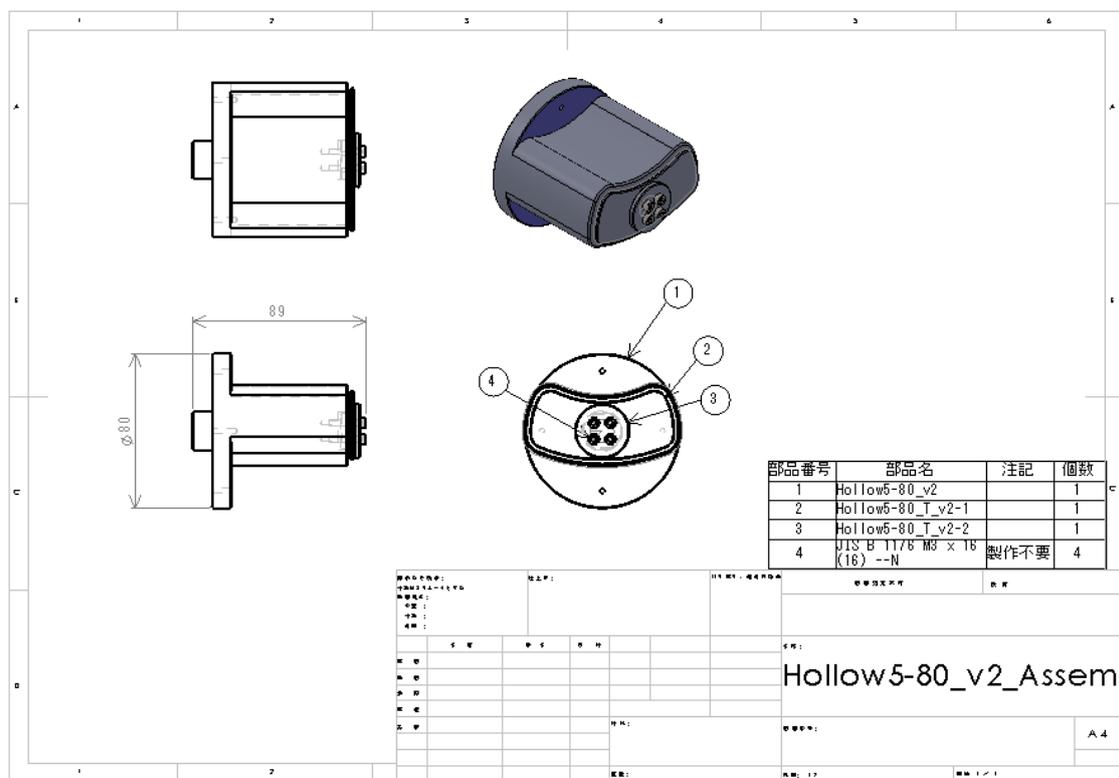


Fig. B-1 凹輪郭を有する金型全体

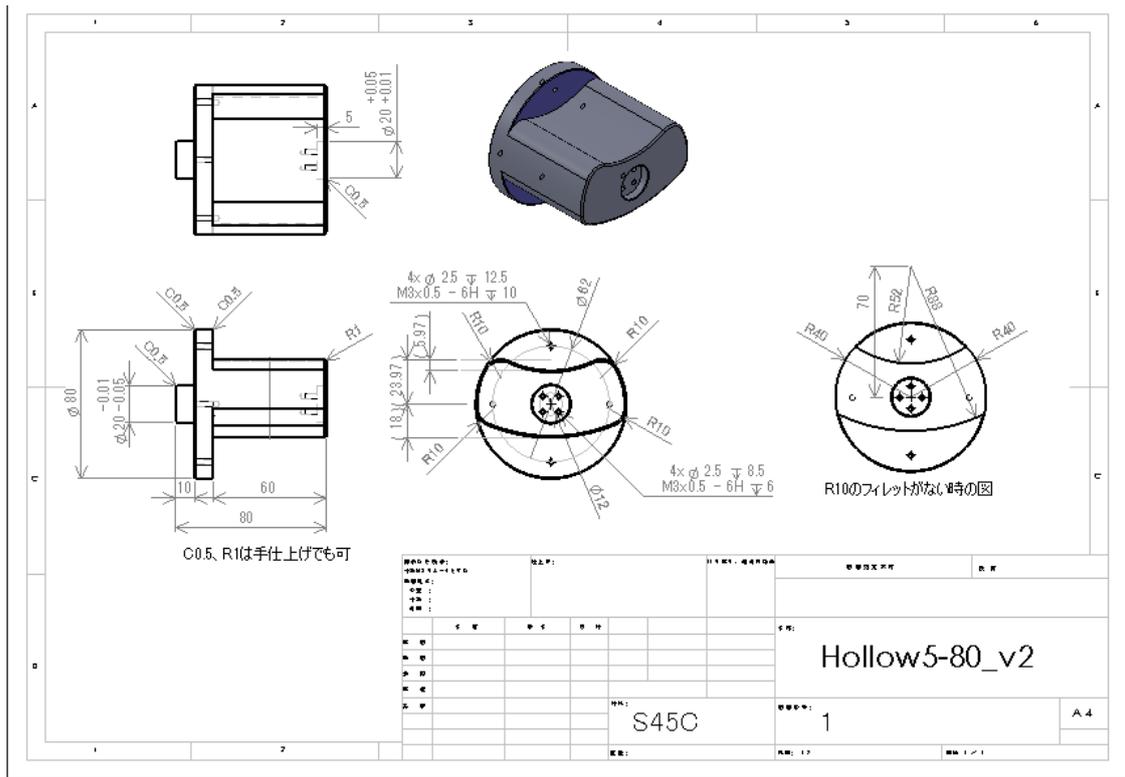


Fig. B-2 凹輪郭を有する金型本体

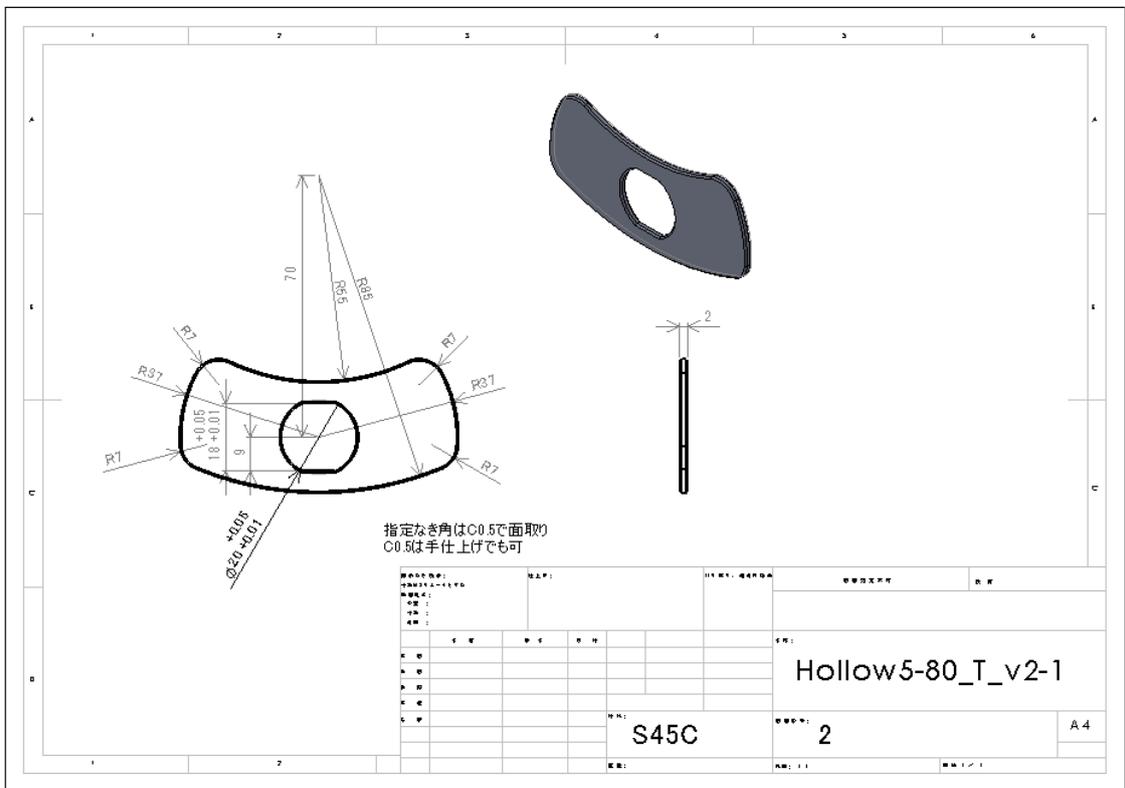


Fig. B-3 凹輪郭を有する金型用の押さえ金

付録C. プログラム

本論文で示した計算手法からプログラムを実装し、研究に用いた。本付録では、実装したプログラムを添付する。添付するプログラムを次に示す。

C.1: 第 3.3 節で示したパスセットの自動生成を行うプログラム

C.2: 第 4.2 節で示した金型断面形状の計測結果から成形高さを求めるプログラム

これらプログラムはすべて Visual studio 2010 を用いて、C 言語で作成したものである。

C.1 パスセットの自動生成を行うプログラム

第 3.3 節では、パスセットを 3 種類提案し、それぞれの組み合わせ方を示した。本節では、そのパスセットを生成するプログラムをリスト C-1 に示す。また、このプログラムは、リスト C-2 に示す、パスセットの生成に必要なパラメータが書かれているファイルを読み込む。

リスト C-1 パスセットの自動生成を行うプログラム

```
#include<stdio.h>
#include<string.h>
#include<stdlib.h>

#define _USE_MATH_DEFINES
#include<math.h>

struct path{
    int m;
    double x;
    double y;
    double p;
    double v;
    int next; // next path
};

struct path Outer[128];
struct path Inner[128];
struct path List[256];

void strclr(struct path hoge){
    hoge.m = 0;
    hoge.x = 0.0;
    hoge.y = 0.0;
    hoge.p = 0.0;
    hoge.v = 0.0;
    hoge.next = 0;
}
```

```

int main(){
    double alfa0, dalfa, alfa;
    double th0, dth, th;
    int thmode, alfamode;
    double pitch, vrev;
    double x, y; // position
    double x_buf = 0.0, y_buf = 1.0; // position
    double r, r_buf = 1.0;
    int pass; // 1: Shigoki, 2: Shibori
    int turn; //
    int dir = 0; // direction of mandrel(0: CW, 1: CCW)

    double a, b, c;
    int i=0, j=0, pathnum;
    FILE *fpin, *fpout;
    char buf[64], str[16];
    double value;

    /* initialize */
    for(i=0; i<128; i++){
        strcpy(Inner[i]);
        strcpy(Outer[i]);
        strcpy(List[i]);
        strcpy(List[i*2]);
    }

    /* file open & read */
    if((fpin = fopen("PathSetting.txt", "r"))==NULL){
        printf("File open error : %s\n", "PathSetting.txt");
        getchar();
        return -1;
    }

    while(fgets(buf, sizeof(buf), fpin)){
        sscanf(buf, "%s %lf", str, &value);
        if(0 == strcmp("pass:", str)){
            pass = (int)value;
        }else if(0 == strcmp("th0:", str)){
            th0 = value * M_PI/ 180.; // deg -> rad
        }else if(0 == strcmp("dth:", str)){
            dth = value * M_PI/ 180.; // deg -> rad
        }else if(0 == strcmp("thmode:", str)){
            thmode = (int)value;
        }else if(0 == strcmp("alfa:", str)){
            alfa0 = value;
        }else if(0 == strcmp("dalfa:", str)){
            dalfa = value;
        }else if(0 == strcmp("alfamode:", str)){
            alfamode = (int)value;
        }else if(0 == strcmp("pitch:", str)){
            pitch = value;
        }else if(0 == strcmp("vrev:", str)){
            vrev = value;
        }else if(0 == strcmp("reverse:", str)){
            turn = (int)value;
        }
    }
}

```



```

// a*x^2 + 2b*x + c = 0;
if(thmode == 0){
    th = th0 - dth * (double);
}
else if(thmode == 1){
    th = th0 - ((double)i*((double)i+1.0)*dth)/2.0;    // arithmetic progression
}
else{
    th = th0 - dth * (double);
}

//alfa = alfa0 + dalfa * (double);
alfa = Inner[i].x;

if(th < 0.0){
    th = 0.0;
}
else{;}

// 解の公式

r = 1.0;
a = 1.0 + tan(th)*tan(th);
b = -1.0 * tan(th)*tan(th)*alfa;
c = alfa * alfa * tan(th) * tan(th) - 1.0;

x = (-1.0 * b + sqrt(b*b - a*c))/a;
y = sqrt(1.0 - x*x);

printf("%f\n", th * 180.0/M_PI);

Outer[i].m = pass;
Outer[i].x = x;
Outer[i].y = y;
Outer[i].p = pitch;
Outer[i].v = vrev;

if( alfa + dalfa >= r || th <= 0.0){
    break;
}
else{;}

};

for(i = 0; Outer[i].m != 0; i++){
    printf("%1d, %5.4lf, %5.4lf, %5.4lf\n",
        Outer[i].m, Outer[i].x, Outer[i].y, Outer[i].v = vrev);
}
printf("\n");
printf("Outer OK;\n");

//
int inneri, outeri;
j=0;i=0;

List[j].m = Inner[i].m;
List[j].x = Inner[i].x;
List[j].y = Inner[i].y;
List[j].p = Inner[i].p;

```

```

List[j].v = Inner[i].v;
j++;

for(i=0; Inner[i].m != 0 && Outer[i].m != 0 ; j++){
    List[j].m = Outer[i].m;
    List[j].x = Outer[i].x;
    List[j].y = Outer[i].y;
    List[j].p = Outer[i].p;
    List[j].v = Outer[i].v;

    if(List[j].x >=1.0 && List[j].y <=0.0){
        break;
    }

    j++;
    List[j].m = Inner[i].m;
    List[j].x = Inner[i].x;
    List[j].y = Inner[i].y;
    List[j].p = Inner[i].p;
    List[j].v = Inner[i].v;

    i++;
    if(dalfa != 0.0 ){
        j++;
        if(Inner[i].m == 0 ){
            printf("break: %d, %d \n",i,j);
            break;
        }else{;}

        List[j].m = Inner[i].m;
        List[j].x = Inner[i].x;
        List[j].y = Inner[i].y;
        List[j].p = Inner[i].p;
        List[j].v = Inner[i].v;

    }else{;}
}

if(Outer[i].x >= 1.0 && Outer[i].y <= 0.0){
    List[j].m = 1;
    List[j].x = 1.0;
    List[j].y = 0.0;
    List[j].p = pitch;
    List[j].v = vrev;
}

printf("(i, j): %d, %d \n",i,j);
pathnum = j;

/* Output */
if((fpout = fopen("Path.csv","w")) == NULL){
    fprintf(fpout,"File open error : %s", "Path.csv");
    getchar();
    return -1;
}

```

```

    }

    for(i=0; List[i].m != 0 ; i++){
        fprintf(fpout, "%1d, %4.3lf, %4.3lf, %5.4lf, %5.4lf\n",
                List[i].m, List[i].x, List[i].y, List[i].p, List[i].v);
        printf("%1d, %4.3lf, %4.3lf, %4.3lf, %5.4lf, %5.4lf\n",
                List[i].m, List[i].x, List[i].y, List[i].p, List[i].v);
    }

    fprintf(fpout, "999\n");

    fprintf(fpout, "\n\n");
    fprintf(fpout, "pass, %1d\n", pass);
    fprintf(fpout, "th0, %5.4lf\n", th0*180.0/M_PI);
    fprintf(fpout, "dth, %5.4lf\n", dth*180.0/M_PI);
    if(thmode == 0)
        fprintf(fpout, "thmode, %1d, fix\n", thmode);
    else if (thmode == 1)
        fprintf(fpout, "thmode, %1d, arithmetic progression\n", thmode);
    else
        ;
    fprintf(fpout, "alfa, %5.4lf\n", alfa0);
    fprintf(fpout, "dalfa, %5.4lf\n", dalfa);
    fprintf(fpout, "pitch, %5.4lf\n", pitch);
    fprintf(fpout, "vrev, %5.4lf\n", vrev);

    fclose(fpout);

    return 0;
}

```

リスト C-2 パスセット生成のためのパラメータ例

```

pass: 2
th0: 80
dth: 4
thmode: 0
(0: fix, 1: arithmetic)
alfa: -0.01
dalfa: 0.00
alfamode: 0
(0: fix, 1: arithmetic)
pitch: 0.001
vrev: 3.1416
reverse: 2

```

C.2 金型断面形状の計測結果から成形高さを求める

プログラム

第 4.2 節では、計測された金型断面形状から、成形高さを算出する手法を示した。本節ではその実装を行ったプログラムをリスト C-3 に示す。本研究では、オフライン作業で完結していたため、金型断面形状の計測値はプログラム中で与えてある。

リスト C-3 成形高さを算出するプログラム

```
#include <stdio.h>
#define _USE_MATH_DEFINES
#include <math.h>

#define ROLL_ROW (0.008)          // Round of roller [m]
#define MAND_ROW (0.002)          // Round of mandrel
#define BLANK_DIAM (0.150)        // [m]

#define BLANK_T (0.001) // thickness[m]
#define PRODUCT_T (0.001) // thickness[m]

double hayamamethod(double row, double t0, double D0, double d, double c);

typedef struct ST_POINT{
    double x;
    double y;
};
struct ST_POINT p[10][120];
struct ST_POINT p_[10][120];
struct ST_POINT org;

int main(int argc, char **argv){
    double mand_diam = 0.085, mand_bottom_diam;
    double s_blank, s_bottom;
    double height;
    double len1, len2, lenr;
    double tmp_a, tmp_b, s_m3_1;

    int i;
    double th; //
    double a, b, a_, b_; // y=ax+b

    org.x = 0.114201472;
    org.y = 0.116869586;

    p[0][0].x = 0.024201; // 素板接触位置
    p[1][0].x = 0.025201; // 金型接触位置
    p[2][0].x = 0.031201; // 金型乗る位置
    p[3][0].x = 0.092201; // 終点
```

```

p[0][0].y = 0.068716; // 素板接触位置
p[1][0].y = 0.068716; // 金型接触位置
p[2][0].y = 0.065943; // 断面2つめ
p[3][0].y = 0.065709; // 断面3つめ

for(i=0;i<4; i++){          fprintf(stderr, "p[%d] : (x, y) = (%f, %f)\n", i, p[i][0].x, p[i][0].y); // debug

/* 金型に全体が乗る点 */
a = p[3][0].y - p[2][0].y; // 負の値
b = -(p[3][0].x - p[2][0].x); // 負の値
fprintf(stderr, "a= %10.5f, b=%10.5f\n", a, b);

p_[2][0].x = p[2][0].x - a/sqrt(a*a + b*b)*ROLL_ROW;
p_[2][0].y = p[2][0].y - b/sqrt(a*a + b*b)*ROLL_ROW;

/* 終点 */
p_[3][0].x = p[3][0].x - a/sqrt(a*a + b*b)*ROLL_ROW;
p_[3][0].y = p[3][0].y - b/sqrt(a*a + b*b)*ROLL_ROW;

/* 丸みの前 */
th = (p_[3][0].y - p_[2][0].y)/(p_[3][0].x - p_[2][0].x);

p_[1][0].x = p_[2][0].x - MAND_ROW*(1.0 - sin(atan(th)));
p_[1][0].y = p_[2][0].y + MAND_ROW*cos(atan(th));

p_[0][0].x = p_[1][0].x - BLANK_T;
p_[0][0].y = p_[1][0].y;

for(i=0;i<4; i++){          fprintf(stderr, "p[%d] : (x, y) = (%f, %f)\n", i, p[i][0].x, p[i][0].y); // debug

mand_diam = 2.0*(org.y - p_[3][0].y);
fprintf(stderr, "mand_diam = %f\n", mand_diam);
mand_bottom_diam = 2.0*(org.y - p_[1][0].y);
fprintf(stderr, "mand_bottom_diam = %f\n", mand_bottom_diam);

/* */
s_blank = (BLANK_DIAM/2.0)*(BLANK_DIAM/2.0);
s_bottom = (mand_bottom_diam/2.0)*(mand_bottom_diam/2.0);

len1 = 2.0*M_PI*(org.y - p_[2][0].y);
len2 = 2.0*M_PI*(org.y - p_[3][0].y);
lenr = sqrt((p_[2][0].x - p_[3][0].x)*(p_[2][0].x - p_[3][0].x) + (p_[2][0].y - p_[3][0].y)*(p_[2][0].y - p_[3][0].y));

tmp_a = (1.0/2.0)*((org.y - p_[3][0].y) - (org.y - p_[2][0].y))/lenr;
tmp_b = 2.0*(org.y - p_[2][0].y);
s_m3_1 = (s_blank - s_bottom);

fprintf(stderr, "(a, b, Sm3-1) = (%f, %f, %f)\n", tmp_a, tmp_b, s_m3_1);

height = (-tmp_b + sqrt(tmp_b*tmp_b + 4.0*tmp_a*s_m3_1))/(2*tmp_a);

```

```

fprintf(stderr, "s_blank = %f\n", M_PI*s_blank);
fprintf(stderr, "s_bottom = %f\n", M_PI*s_bottom);
fprintf(stdout, "height = %f\n", height);

height = hayamamethod(MAND_ROW, BLANK_T, BLANK_DIAM, 0.085, PRODUCT_T);
fprintf(stderr, "height(hayama) = %f\n", height);

getchar();
return 0;
}

double hayamamethod(double row, double t0, double D0, double d, double c){
    return (row + t0)+(1.0/4.0)*(t0/c)*(1.0/(d+c))*(D0*D0
-(d-2.0*row)*(d-2.0*row)-2.0*M_PI*(row+(t0/2.0))*(d-2.0*row)-8.0*(row+(t0/2.0))*(row+(t0/2.0)));
}

```