傾斜しごきスピニング加工による肉厚分布の制御

関口 明生* 荒井 裕彦**

Control of Wall Thickness Distribution by Oblique Shear Spinning Methods

Akio SEKIGUCHI* and Hirohiko ARAI**

(Received on February 1, 2010)

A flexible method of forming circumferentially variant wall thickness distributions on the same shape is attempted using two oblique sheet spinning processes. The fundamental strategy entails the inclination of the flange plane of the workpiece during forming. In one type of synchronous dieless spinning, edge-hemmed aluminum blanks of 186 mm diameter and 1.5 mm thickness are formed for truncated cone shells of 30 degrees half-angle, by synchronizing the motion of the spherical head roller in the axial and radial directions with the angle of the general purpose mandrel fixed on a bidirectionally rotating spindle. On the other hand, in the other type of force-controlled shear spinning, flat aluminum discs of 150 mm diameter and 1.0 mm thickness are formed by feeding perpendicularly to the flange plane of the workpiece and maintaining the thrust force along the plane via the roller tool, exerted onto the rotating truncated-cone-shaped die of the same half-angle of 30 degrees. The estimated wall-thickness distribution based on a simple shear deformation model nearly conformed to the measured thickness distributions of the products formed at several inclination angles of up to 15 degrees in the forming and both spinning methods.

Key words: shear spinning, sine law, sheet metal forming, thickness distribution control, deformation behavior.

1. 緒言

へら絞りとは人間ならではの高度な職人技術として知られるが、研究開発による機械ならではのスピニング加工¹⁾のフレキシブル化も進んでいる。たとえば、専用の成形型を用いず板材を成形する方法^{2),3)}、偏心・傾斜管⁴⁾、微細管⁵⁾、異形断面形状管^{6),7)}を成形する方法、板材から湾曲・傾斜した異形断面形状を成形する方法⁸⁾⁻¹¹⁾などがある。

本稿では加工中にワークのフランジ部を傾斜させながら成形することで製品の肉厚分布の制御を試みる。

いままでに軸方向の肉厚分布を調整する方法として絞りスピニング¹²⁾とフローフォーミング¹³⁾がある。しかし、周方向の肉厚分布を変化させるには、あらかじめ変肉した素材を用いたり、成形品の壁部を切削したりする必要があった。一様な板厚の素板を用いても、ソフトウェアの変更次第で周方向の肉厚分布を調整できるならば、肉厚変化による重量対強度の簡易的な最適化や、被加工部面内のネジ穴長さの確保などの要求に低コストで対応できるため、工業的に有用である。

2. 基本構想と変形モデル

しごきスピニングで成形された円錐台形状の製品の壁部の肉厚 t は、素板の板厚 t_0 と円錐の半角 α により sine 則

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

に従う。この関係は、フランジを平面に保ったまま成形型を用いず加工する場合も、成り立つことが知られる^{2),3)}。

筆者らの成形事例¹⁰⁾において、湾曲した円錐台形状をスピニングで成形した際には、製品の肉厚分布を予測するために素板の変形をフランジ面に垂直な方向のせん断変形により近似するモデルを提案し、実際の製品の肉厚分布と比較した。このモデルによれば、Fig. 1 のように加工の途中でフランジ面の傾き角 ϕ を変化させることによって、同じ形状であっても肉厚分布の異なった製品ができると考えられる。Fig. 1 の左側と右側における肉厚 t_L, t_R を幾何学的に求めると、以下のように単純に表すことができる。

$$\begin{cases} t_L = t_0 \sin(\alpha - \phi) \\ t_R = t_0 \sin(\alpha + \phi) \end{cases} \quad (2)$$

この式によれば、 $t_R/t_0 = \sin(\alpha + \phi) \leq 1$ であるから、被加工部の肉厚を素板の板厚より厚くするのは不可能である。

本稿では、主軸の回転に同期して工具を動かす同期ダイレススピニング加工⁸⁾において、Fig. 2 のように、途中の A, B 点を中心にワークのフランジ面を角度 ϕ だけ傾けながら加工することにより、(a)から(e)の順でワークを変形させて、成形を行う。加工中のワークは主軸によって回転す

* 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 〒305-8571 つくば市天王台 1-1-1

Graduate student, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennohdai, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan.

** 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1

Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science of Technology, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564, Japan.

るので、Fig. 3 に示すように、工具は回転に同期して軸方向・半径方向に動く。製品の形状は簡単のため円錐台形状とした。

ただし、式(2)による肉厚の予測値は、加工ローラの先端が一定の丸み半径を持つために、せん断変形が起こっていると仮定する点をどこに定めるかにより変化する。予備実験の結果、この点の位置はフランジ面と目的形状の交線上の点とすると、傾斜角度の変化に対して比較的良好に予測できることがわかった。

ところで、加工中にフランジ面を傾けること自体は、用いる加工ローラの構造・成型の要否・加工機の制御方法の違いはあるものの、力制御しごきスピニング加工⁹⁾によっても可能である。本稿では、これら2種類のスピニング加工において、円錐台形状の製品をおのおの成形することで、肉厚の変化を調べると同時に、その違いを考察する。

3. 同期ダイレススピニング加工による肉厚分布の制御

3.1 加工装置と試供材

同期ダイレススピニング加工による成形には、ワークとマンドレルを回転させる主軸とローラを移動させるXYテーブル2組からなる5軸NC加工機⁹⁾の片側1ローラを用いた。工具は先端丸み半径 $\rho_R = 8$ mmの球頭状ローラを主軸に平行に用いた。材質は工具鋼 (SKD11, 焼入) で、根元は軸受けにより自由回転するように支持した。マンドレルは、直径が50 mmで肩部の丸み半径が1 mmのものを用いた。ブランクは、公称板厚が $t_0 = 1.5$ mmで直径が200 mmの純アルミニウム板 (A1100P-H24) である。引張試験の結果をTable 1 に示す。素板は、圧延方向がフランジの傾斜

Fig.1 Relationship among the α , ϕ and wall-thickness, illustrated with the oblique shear deformation model

Fig.2 Schematic of the experiment of wall thickness distribution control in the synchronous die-less spinning

方向に一致するように、マンドレルの頂部に金具を介してねじで固定する。ただし、加工中のフランジ面を平面に保つために、縁7 mmをあらかじめ90°に縁曲げた。加工前には汎用潤滑剤CRC5-56を素板に噴霧した。

3.2 加工方法と加工条件

工具の運動は、筆者らが従来の研究¹⁰⁾で用いたNCコード生成プログラムを変更して、Fig. 2の加工に適した工具軌道が与えられるようにした。すなわち、目的の円錐台形状に対する球頭状工具の接触点の軌道が、フランジ部中心の移動する仮想的な湾曲軸に対して螺旋を描くようなデータ列をNCコードとして利用し、工具を動かす。計算時に所要成形時間も同時に算出される。

成形する円錐半角 α は、大きすぎると被加工部が長くとれず、小さすぎると円錐台の上部での局所的な引張により破断が発生したので、 $\alpha = 30^\circ$ とした。円錐台の高さ h は80 mm、初期加工高さ h_0 は15 mm、傾斜加工部の高さ h_1 は55 mmとした。加工中にフランジ部を傾斜させるA点とB点の位置は、成形しようとする円錐の外側になるようおの $r_0, r_1 = 50, 80$ mmに設定した。また、フランジ部中心

Fig.3 Synchronous motion of the tool over the course of one round of the spindle

Table1 Results of tensile test of the aluminum sheet of 1.5-mm thickness using specimen #6 of JIS 2201

Rolling direction /deg	0	45	90
Elastic modulus /GPa	3.21	2.75	2.85
Proof strength /MPa	96.2	97.8	106
Tensile strength /MPa	122	111	119
Break Elongation /%	21.8	24.5	24.1

Fig.4 Comparison of the truncated cones of different inclination angles ϕ of the flange at the die-less forming

の湾曲軸上の送りピッチ p を $0.3 \text{ mm} \cdot \text{rev}^{-1}$ 、製品と工具の接触点の相対速度 F を $10000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ に設定した。本加工法においては、Fig. 2(b), (d) の、加工中にフランジ部の傾斜角度を変化させる区間で、A 点側・B 点側側面のフィードマークが軸上の送りピッチに対して粗あるいは密になることが構造的に避けられない。しかし、従来のダイレススピニングにおいて、軸方向の送りピッチ p の変化は肉厚にほとんど影響しないことから類推すると、傾斜部内外壁の送りピッチの粗密による肉厚変化は、基本的に無視できると考えられる。ただし、ダイレススピニング加工では、素材が金型によって支持されるしごきスピニングとは異なり、接触部における加工力により既成形部がねじられることがある。これを防ぐために、主軸の回転方向は 6 回転半ごとに逆向きに切り替えた¹¹⁾。この結果、取付け時のブランクと加工後のフランジ面は、どの条件でも主軸に対してねじられずに成形された。

3.3 外観と形状

加工中のフランジ面の傾斜角度を $\phi = 0^\circ, 15^\circ$ に設定して成形した製品の写真を Fig. 4 に示す。成形時間は $\phi = 15^\circ$ の場合で 13 分 30 秒を要した。加工ローラによってなぞられた製品外表面には光沢が現れたが、主軸の回転方向切り替えに伴う位置決め誤差によりフィードマークを生じた。フランジ部の偏心は、Fig. 1 のように、加工中にフランジが

Fig.5 Normal deviation of the outer profile of the product of $\phi = 15^\circ$ to the desired profile at the half round

Fig.6 Axial distribution of wall thickness ratio on thicker/thinner sides at each inclination angle ϕ up to 15°

起き上がる方向に発生し、傾斜角度を大きくするほど顕著である。フランジを傾斜させて成形した場合であってもフランジ部（未加工部分）は元の肉厚を保つので、フランジの偏心方向の壁部は、偏心した分だけ少ない材料で成形されていることがわかる。

式(2)に円錐半角 α が含まれること考慮すると、肉厚を正しく評価するためには、フランジ面を傾斜させて成形しても製品は同じ形状に成形される必要がある。傾斜角度が $\phi = 15^\circ$ の製品の外形をレーザ変位計で測定し、目的の円錐形状に対する肉厚方向の偏差を計算した結果を Fig. 5 に示す。スプリングバックによる形状のずれを工具軌道に考慮せずに成形しているため、製品の基部では肉厚方向におよそ 1 mm 浮き上がって成形されている。とはいえ、外形の周方向のばらつきはおおよそ 0.3 mm 以内に抑えられている。この傾向は、 $\phi = 0^\circ$ を含む今回実験したすべての条件に共通であった。

3.4 軸方向の肉厚分布

Fig. 6 は、傾斜角度が $\phi = 0, 5, 10, 15^\circ$ の場合について、円錐の傾斜部内外の肉厚 t の分布を素板板厚 t_0 に対する製品壁部肉厚比 t/t_0 で整理した結果である。Fig. 2 の A 点側を黒塗り、B 点側を白塗りで表している。測定には両球面マイクロメータを用いた。傾斜角度が $\phi = 0^\circ$ の場合、肉厚比は $t/t_0 = \sin 30^\circ = 0.5$ となるが、傾斜角度が大きくなるほど、おのおのの側面で sine 則に対して減肉が促進・抑制

Fig.7 Circumferential distribution of wall thickness ratio on half rounds of the cone at each axial position ($\phi = 10^\circ$)

Fig.8 Relationship between the obliquity angle ϕ and decentering amounts of the flange, r_e

されている。減肉促進側の $z = 15 \text{ mm}$ 近辺と減肉抑制側の $z = 65 \text{ mm}$ 近辺において肉厚が急激に変化する挙動を示しているのは、Fig. 2 の A, B 点近くで、素板の材料が過剰にしごかれるためである。また、Fig. 6 中の点線は、加工の際に設定した工具の軌道を式(2)にあてはめて算出した肉厚比の予測値である。実際の製品の肉厚は、予測値ほど急峻な変化はしないようであるが、ほぼ予測値通りに分布する傾向がみられる。ゆえに、ある点で所望の肉厚比 t_d/t_0 が与えられるなら、

$$\phi = \alpha - \sin^{-1} \left(\frac{t_d}{t_0} \right) \quad (3)$$

によって設定する傾斜角度 ϕ を定めることができる。

3.5 周方向の肉厚分布

フランジの傾斜角度 $\phi = 10^\circ$ の製品において、頂部から軸方向に $z = 10, 25, 40, 55 \text{ mm}$ の位置における、半周分の肉厚比 t/t_0 を測定した結果を Fig. 7 に示す。 $z = 40 \text{ mm}$ における周方向の肉厚比は、最大値と最小値が $\sin(\alpha \pm \phi)$ になり、その間を三角関数状につなぐように分布する。 $z = 25, 50 \text{ mm}$ では、周方向にフランジの傾斜角 ϕ が異なる区間があり、その部分で $z = 40 \text{ mm}$ より肉厚変化が少なくなる。このように本法では、傾斜部内外の肉厚分布が制御できるだけで周方向の肉厚分布は詳しく指定できないが、その最大値・最小値は式(2)により計算できる。

3.6 フランジの偏心量

フランジの偏心量は、減肉が抑制される壁部に沿った肉厚の積分から sine 則による肉厚分を差し引いたものを、素板の板厚で割った値である。この偏心量が予測できれば、あらかじめブランクを偏心して取り付けすることで、歩留まりを向上できる。製品のフランジの偏心量を測定した結果を Fig. 8 に示す。図中の点線は、Fig. 2 のフランジ部中心の予測移動線から幾何学的に求めた偏心量であり、次のようにあらわすことができる。今回の実験の範囲では、フランジ部分の偏心量はほぼこの予測値に従った。

$$r_e = \left\{ h_1 - (r_0 + r_1) \tan \frac{\phi}{2} \right\} \sin \phi \quad (4)$$

4. 力制御しごきスピニング加工による肉厚分布の制御

4.1 加工装置と試供材

Fig. 9 のような、力制御しごきスピニング加工による成形には、ワークをマンドレルに取り付けて回転させる主軸と、ローラを移動するための XY テーブルからなる加工機を用いる。工具は先端丸み半径 $\rho_R = 8 \text{ mm}$ で直径 70 mm の円盤状ローラを主軸に対して $\delta = 30^\circ$ 傾けて用いた。材質は工具鋼 (SKD11) であり、加工ローラの根元部には押付け力を計測するための 6 軸の力センサを備えた。マンドレルはステンレス鋼で半角が $\alpha = 30^\circ$ 、頂部の直径が 40 mm 、肩部の丸み半径が 1 mm の円錐台形状のものを用いた。加工機の連続最大推力が各軸 800 N 程度と比較的小さいことから、素板は公称板厚が $t_0 = 1.0 \text{ mm}$ で直径が 150 mm の純アルミニウム板 (A1100P-H24) を用い、圧延方向がフランジの傾斜方向に一致するように、金型を介してねじで固定す

る。引張試験の結果は Table 2 の通りであった。加工前には素板に汎用潤滑剤 CRC5-56 を噴霧した。

4.2 加工方法と加工条件

工具の運動は、筆者らが従来⁹⁾で用いた制御プログラムを変更して、Fig. 9 の加工に適した工具軌道が与えられるようにした。この方法では、加工ローラの先端を常にフランジ平面上に拘束するように位置制御しながら、平面に平行で軸と交差する方向の押付け力 F_Y を一定に保つように力制御して軸方向に送り、加工を進める。ワークは主軸により回転するため、Fig. 10 に示すように、加工ローラの位置制御方向と押付け力制御方向はフランジにあわせて揺動する。加工ローラは金型に倣って動くので、加工の際に工具軌道のデータを用意する必要がない。

円錐半角は同期スピニングの場合と同じ $\alpha = 30^\circ$ 、傾斜加工高さは $h_1 = 50 \text{ mm}$ である。素板とマンドレルの大きさから、加工の高さが $h = 60 \text{ mm}$ と低いので、初期加工高さ h_0 も 10 mm と短めにした。また、主軸の回転速度を 30 rpm 、フランジが直線的な移動をする区間の送りピッチを $p = 0.4 \text{ mm} \cdot \text{rev}^{-1}$ 、傾斜角度が変化する区間の送りピッチを $p_A, p_B = 0.5, 0.4^\circ \cdot \text{rev}^{-1}$ 、A, B 点の位置を $r_0, r_1 = 40, 70 \text{ mm}$ と設定した。ただし、初期加工のうち最初 4 mm は位置制御により成形し、加工中の主軸の回転方向は切り替えなかった。加工ローラの押付け力は、従来の成形事例¹⁴⁾を参考にして $F_Y = 550 \text{ N}$ に設定した。

4.3 外観と形状・加工力

加工中のフランジ面の傾斜角度を $\phi = 0, 15^\circ$ に設定して成形した製品の外観を Fig. 11 に示す。成形時間は $\phi = 15^\circ$ の場合で 5 分 10 秒であった。製品の外面は比較的きれいに仕上がりに、内面もマンドレルに押し付けられて滑らかになったが、A, B 点近くの表面はやはり過剰にしごかれて窪

Fig. 9 Schematic of the experiment of wall thickness distribution control in the force-controlled shear spinning

Fig. 10 Motion of the roller and thrusting direction at a revolution in the force-controlled shear spinning

だ。また、フランジ面は成形前に比べて $12^\circ \sim 15^\circ$ 程度、ローラの移動方向に対して後方にねじれていた。

Fig. 12 は傾斜角度が $\phi = 10^\circ$ の製品の外形とマンドレルの形状をおおの測定し、肉厚方向の差を計算により求めた結果である。後述する軸方向の肉厚分布の測定結果 (Fig. 14 の $\phi = 10^\circ$) と比べると、sine 則に対する減肉が抑制される側面 ($\theta = 0^\circ$) と促進される側面 ($\theta = 180^\circ$) のワークの内面はマンドレルに密着して成形されていることがわかる。製品の外形を基準とする前章の同期ダイレススピニング加工法と異なり、力制御しごきスピニングでは金型形状が製品形状の基準になるため、外形の差は壁部の肉厚に応じて変化するものの、成型さえあれば目的の形状を得やすい。

フランジ面と回転軸の交点がマンドレルの頂部から $z = 30$ mm の位置にあるときの、目標とするフランジ面に対する偏差と加工力を **Fig. 13** に示す。演算の都合上、加工ローラの先端部は球で近似して制御されているが、位置偏差の振幅はおおよそ $100 \mu\text{m}$ 以内に抑えられており、成形中のワークフランジ面を平面に保つ分には、いまのところ問題ない。また、面に平行な方向の押付け力 F_Y はほぼ目標の 550 N に保たれ、垂直な方向にはおおよそ 800 N がかかっている。

4.4 軸方向の肉厚分布

傾斜角度が $\phi = 0, 5, 10, 15^\circ$ の場合について、円錐の傾斜部内外の肉厚 t の分布を、素板の板厚 t_0 に対する製品壁部肉厚比 t/t_0 で整理したものが **Fig. 14** である。点線は、加工条件から計算した式(2)による肉厚比の予測値である。同期スピニングによる結果に似て、傾斜角度が $\phi = 0^\circ$ の場合、肉厚比は $t/t_0 = 0.5$ となるが、傾斜角度が大きくなるほど、おおのの側面で sine 則に対して減肉が促進・抑制される。

Table 2 Results of tensile test of the aluminum sheet of 1.0-mm thickness using specimen #6 of JIS 2201

Rolling direction / deg	0	45	90
Elastic modulus / GPa	3.44	3.54	3.40
Proof strength / MPa	85.2	83.3	88.9
Tensile strength / MPa	121	109	117
Break Elongation / %	23.0	22.8	26.5

Fig. 11 Comparison of the truncated cones of different inclination angle ϕ of the flange at the shear spinning

また、Fig. 9 の A, B 点の近く ($z = 8, 53$ mm 近辺) で壁部が過剰にしごかれて急激に減肉する部分がある。

しかし、前章の結果 (Fig. 6) に比べて、実際の肉厚は予測値より遅れて変化し、特に減肉が促進される側面では過

Fig. 12 Normal margin between the profile of a product of $\phi = 10^\circ$ and the mandrel at the half round

Fig. 13 Position error of the roller to the desired plane of the flange and thrust forces, at a round of the spindle

Fig. 14 Axial distribution of wall thickness ratio on thicker/thinner sides at each inclination angle ϕ up to 15°

剩に肉厚が減少する部分がみられる。これには、材料がローラとマンドレルによって半強制的に軸方向に流動させられることや、肉厚が比較的薄く成形された既加工部がその後の加工力により引っ張られることが影響していると考えられる。

4.5 周方向の肉厚分布

Fig. 15 は、 $\phi = 10^\circ$ の製品において頂部から軸方向に $z = 20, 35, 45$ mm の位置における、半周分の肉厚比 t/t_0 を測定した結果である。やはり全体的な傾向は前章の場合と類似する。すなわち、肉厚の振幅が $\sin(\alpha + \phi)$ と $\sin(\alpha - \phi)$ で決まり、 ϕ に応じて肉厚変化の抑えられる区間がある。ただし、肉厚は $z = 35$ mm の周方向 150° 近辺で最も薄く、 30° 近辺で比較的厚くなっている。これは、円錐に対して傾斜した楕円断面において、フランジ平面がねじられながら押しつけられていることが原因と考えられる。

4.6 フランジの偏心量

Fig. 16 は製品のフランジの偏心量を、円錐の軸に対するフランジ部の縁までの距離の（最大値－最小値）/2 により測定した結果である。図中の点線は式(4)による予測値であり、実験値にはほぼ一致する傾向がみられる。よって、力制御しごきスピニングにおいて、フランジがねじれて成形されても、傾斜内外の肉厚変化の総量としては、同期ダイレススピニングの場合と変わらないことがわかる。

5. 結 言

同期ダイレススピニング加工と力制御しごきスピニング加工において円錐台形状の製品の成形を行い、肉厚分布とフランジの偏心量をおのおの実験値と予測値で比較した結果、以下の知見を得た。

- (1) どちらの加工法においても、成形中にワークのフランジ面を連続的に傾け、材料の流動を素板に対して垂直なせん断変形と仮定することで、およそ予測値通りの製品の肉厚分布が得られた。フランジの傾斜角は素板の板厚に対する壁部の肉厚の比に作用する。周方向の肉厚分布は詳しく制御できないが、軸方向は sine 則に対する変化量と方向を決めて増減させることができる。
- (2) フランジの偏心量も幾何学的に予測できるので、あらかじめ偏心とねじれを見込んで材料の固定位置・角度をずらせば、素板材料を効率的に用いることができる。
- (3) 2つの加工法による、製品の目的の形状との差 (Fig. 5 と Fig. 12) と、肉厚分布と予測値の差 (Fig. 6 と Fig. 14) を比べると、同期ダイレススピニングのほうが目的の肉厚分布を得やすく、力制御しごきスピニングのほうが目的の製品形状が得やすい傾向がある。

また、加工中にワークフランジ部を傾斜させる本法は、同じく sine 則の成り立つ、板材の逐次張り出し成形においても適用が期待できるなど、工業的利用範囲が広い。

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会編：スピニング加工技術，(1984)，55-73，日刊工業新聞社。
- 2) Kawai, K., Yang, L.-N. & Kudo, H. : J. Mater. Process. Technol., **113** (2001), 28-33.

Fig. 15 Circumferential distribution of wall thickness ratio on half rounds of the cone at each axial position ($\phi = 10^\circ$)

Fig. 16 Relationship between the obliquity angle ϕ and decentering amounts of the flange, r_e

- 3) 島進・井上昭仁・小寺秀俊：塑性と加工，**42**-489 (2001)，1014-1019.
- 4) 新藤健二・石垣賢三・加藤和明・入江徹：第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集，(1999)，173-174.
- 5) 斎藤正美：塑性と加工，**33**-379 (1992)，977-982.
- 6) 荒井裕彦・藤村昭造・岡崎功：第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005)，687-688.
- 7) 田中秀一・清水一郎・多田直哉：日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会講演論文集，(2008)，57-58.
- 8) 関口明生・荒井裕彦：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集，(2009)，2A1-19.
- 9) 関口明生・荒井裕彦：第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集，(2009)，3L2-06.
- 10) 関口明生・荒井裕彦：平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2009)，303-304.
- 11) 関口明生・荒井裕彦：2009 日本機械学会茨城講演会講演論文集，(2009)，207-208.
- 12) 葉山益次郎・工藤洋明・篠倉恒樹，日本機械学会誌，**73**-614 (1970)，363-370.
- 13) 葉山益次郎・室田忠雄：塑性と加工，**4**-30 (1963)，445-452.
- 14) 荒井裕彦：日本ロボット学会誌，**24**-1 (2006)，140-145.