実験と解析による逆曲げロール位置の導出 (眼鏡フレーム用チタン合金線材の高精度ロール曲げ)

佐々木 善教^{*1}, 大津 雅亮^{*2}, 松村 正三^{*3}, 森下 和幸^{*4}

田中 大樹^{*4}, 八木 秀樹^{*5}, 関根 雄一郎^{*6}, 浅川 基男^{*7}

Deriving position of inverse bending roll by experiment and analysis (High precision roll bending of titanium alloy wire for glasses frame)

Yoshinori SASAKI^{*1}, Masaaki OTSU^{*2}, Masami MATSUMURA^{*3}, Kazuyuki MORISHITA^{*4},
Taiki TANAKA^{*4}, Hideki YAGI^{*5}, Yuichiro SEKINE^{*6} and Motoo ASAKAWA^{*7}

^{*1,*4} Industrial Technology Center of Fukui Prefecture

61 Kawaiwashiduka-cho, Fukui-shi, Fukui 910-0102, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, University of Fukui

3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507, Japan

^{*3} Department of Technical Development, Fukui Industrial Support Center

61 Kawaiwashiduka-cho, Fukui-shi, Fukui 910-0102, Japan

^{*5} Miwa Kikai Co., LTD.

72-5 Mitome-cho, Fukui-shi, Fukui 910-3608, Japan

^{*6,*7} Department of School of Fundamental Science and Engineering, University of Waseda

3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Received 12 May 2015

Abstract

In forming of glasses frame, bending and inverse bending of rim wires with 4 rolls are usually employed. Only an inverse bending roll, the 4th roll, can change the position to control the curvature of the rim wire. A deriving method of inverse bending roll position is proposed in this study. The proposed method requires not the computational simulations but only some simple steady inverse bending experiments to obtain a relationship between inverse bending roll position and bent curvature which depends on machine condition and bent wire. The experimentally obtained relationship is used in the formulation of deriving the inverse bending roll position. To validate the proposed method, a real glasses frame shape is formed by the proposed and conventional methods. The difference between the designed and formed shapes is evaluated by a sum of absolute shape deviation. The value by the proposed method is smaller up to about 75% than that by the conventional method.

Key words : Titanium alloy, Bending, Positioning, Numerical control, Accuracy

1. 緒 言

眼鏡フレームには生体適合性の優れたチタン系材料が使われている(山内, 2004). 図1(佐々木他, 2014)に眼鏡フレームの名称(財団法人日本規格協会編, 2006)と線材の断面形状を示す. 眼鏡のレンズを保持するためのリ

No.15-00264 [DOI:10.1299/transjsme.15-00264], J-STAGE Advance Publication date : 10 November, 2015

^{*1} 正員, 福井県工業技術センター (〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10)

^{*2} 正員, 福井大学 大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

^{*3} ふくい産業支援センター 技術開発部 (〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10)

^{*4} 福井県工業技術センター

^{*5} (株) 三輪機械 (〒910-3608 福井県福井市三留町 72-5)

^{*6} 正員, 元早稲田大学 基幹理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

^{*7} 正員, フェロー, 早稲田大学 基幹理工学研究科

E-mail of corresponding author: y-sasaki@fklab.fukui.fukui.jp

ング状の部品をリムとよび、その線材断面はレンズを保持するための溝が加工されている。リムの3次元曲線は2つの二次元曲線（加工順に、曲げ・逆曲げによるS字状の曲線と、該S字状曲線をリング状にする曲線）の合成曲線である（次節参照）。チタン系材料はスプリングバック量が大きく高精度な加工は難しい（社団法人日本チタン協会編, 1996）。職人が時間をかけて試行錯誤しながら加工機の調整を行っており、調整工程の省力化が求められている。

曲げ・逆曲げが生じる線材の曲げ加工の研究として、川田ら（川田, 戸澤, 1975）（川田, 戸澤, 1980）は、プレスにより薄板を円環状に曲げ加工する過程において、材料を弾直線硬化材とした場合の解析方法を提示している。永井（Nagai, 1987）は、板材のプレス加工によるU曲げ加工において、U曲げされた成形品のフランジ端への加圧と曲げ・逆曲げ変形の影響について報告している。線材を連続搬送しながら一様円弧を成形するロール曲げ・逆曲げ加工において、渡辺ら（渡辺他, 2013）はFEM解析により成形不良の主要因を、岩永ら（岩永他, 2013）は実際に加工を行い渡辺らのFEM解析の検証を報告している。しかしながら、線材を連続搬送するロール曲げ・逆曲げ加工において、曲率変化のある設計形状を得るためのロール位置の指針に関する研究報告例は非常に少ない。

著者らはこれまで、線材の三次元曲げにおけるねじれの要因について報告（Sekine et al., 2012）しており、線材の非対称性やロールに対する接触角度の影響を明らかにしてきた。また、直線の線材を曲率変化のあるリング状に加工する3ロール曲げによる一方向の二次元曲げについて報告（佐々木他, 2014）しており、モーメントアームや曲げに寄与する操作量に着目することで加工精度が向上することを明らかにした。本報では、3ロール曲げによる一方向の二次元曲げで用いた手法の、4ロールによる曲げ・逆曲げへの適用を行い、S字状の曲率が反転する形状を得るための簡易で実用的なロール位置の導出方法を提案する。加工形状を従来方法と比較することで提案方法の効果を検証する。

2. 眼鏡フレームの構造と曲げ加工機

2・1 眼鏡フレームの定義

リムの各種曲線を図2に示す。正面から見たときのリムの二次元形状をレンズ球面上に投影したものがリムの三次元形状となる。各々を周方向に展開すると、二次元形状は直線に、三次元形状はS字状のカーブとなる。S字状のカーブを「レンズカーブ」、展開された線を展開前の状態に巻くためのカーブを「リム巻きカーブ」と定義する。前報（佐々木他, 2014）の研究対象は、図2右（佐々木他, 2014）の展開平面上で赤色で示す線材へのリム巻きカーブを付与である。一方、本報の研究対象は、図2右の展開平面上で赤色で示す線材へのレンズカーブの付与である。なお、レンズカーブの曲率の正負を、図2において上に凸の曲率を負の曲率、下に凸の曲率を正の曲率とする。

Fig. 1 Names of glasses frame parts and sectional shape of wire (Sasaki et al., 2014)

Fig. 2 Definition of rim and lens curves (Sasaki et al., 2014)

2・2 レンズカーブ加工部

眼鏡フレーム専用の曲げ加工機の装置全体を図3(a), 加工部の全ロール配置を図3(b), y 方向および z 方向から見た加工部の配置図を図3(c)に示す. 曲げモーメントが作用していない線材送り方向を x 軸, 線材厚み方向を y 軸, 線材幅方向を z 軸と定義する. 上流側から順番に線材に対して y 軸方向に作用するロールに数字を, z 軸方向に作用するロールにアルファベットの名前をつける. ロールC以降は, 全体が z 方向へのスライドと, ロールCを中心に回転する構造となっており, さらにロール8については y 軸方向にスライドする構造となっている (以後, ロールC以降を可動部と呼ぶ). リムの三次元曲げ加工は, ロールC以降全体の z 方向へのスライド位置を固定したのち, 線材の送り量, ロールCを中心とした回転角度, ロール8の押込み量を数値制御することで三次元曲げを行っている.

本論文の研究対象であるレンズカーブ加工の概要を図4に示す. 図4(a)は, レンズカーブ加工部に直線の線材を通過させた状態の模式図である (数字を割り当てたロールは省略している.). ロールC, Dの中心間 x 方向距離を a , z 方向距離を b とする. 図4(b)に示すように加工前の調整工程において, ロールDと線材とが接しない状態で線材が送り出されたとき, スプリングバック後の曲率半径が所定の曲率半径となるよう, 可動部中心の z 方向の位置を調整のうえ固定する. 調整完了後, リムの三次元曲げ加工は, 図4(c)に示すようにロールCを中心とした可動部の回転角度を制御することで, ロールB, CおよびDにより逆曲げを行う. このようにして線材は, S字状の所要のレンズカーブ形状に加工される. つまり, レンズカーブ加工時はロールA, BおよびCの中心位置は固定されており, ロールDのみがロールCを中心に回転の自由度を持つ. ロールDを逆曲げロールと定義し, 本論文では設計形状加工のための角度の導出方法を示す. 図4においてロールA, BおよびCによる曲げは, 図2において上に凸に対応し, 負の曲率となる.

Fig. 3 Bending machine

Fig. 4 Bending of lens curve

3. 定常逆曲げ実験および参照データの作成

3・1 線材の材質と形状

供試材には JIS4650 の 61 種に相当する 3Al-2.5V チタン合金で幅 2.0 mm×厚み 1.0 mm の平角線と金属眼鏡フレームとして最も利用されている幅 2.0 mm×厚み 1.0 mm のリム線材を用いた。JIS4650 の 61 種の化学成分を表 1 (財団法人日本規格協会編, 2012) に示す。

Table 1 Chemical composition of used Ti alloy

[mass %]							
N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
≤0.03	≤0.08	≤0.015	≤0.25	≤0.15	2.50~3.50	2.00~3.00	Bal.

3・2 定常逆曲げ実験

定常逆曲げ実験の概要を図 5 に示す。線材とロール A, B, C および D との接点を、接点 A, B, C および D とする。特に断りがなければ曲率半径は中心線の曲率半径を指し、スプリングバック後の変数には ' を付けて表す。ロール A, B および C による曲げ加工中の接点 B の曲率半径を ρ_1 , スプリングバック後の曲率半径を ρ'_1 , ロール B, C および D による逆曲げ加工中の接点 C の曲率半径を ρ_2 , スプリングバック後の曲率半径を ρ'_2 とする。ロール C を中心とした可動部の回転角度は図 4(a) に示すように、ロール C, D が設置される基材の長辺が x 軸方向となる状態を 0 度とし, x 軸方向に対して時計回りを正, 反時計回りを負とする。

図 5 (a) は初期状態で, $|\rho'_1|=81\text{mm}$ となるようロール C 中心の z 方向位置が固定された状態である。初期状態から図 5 (b) に示すように可動部の回転角度 θ を固定し, 図 5 (c) に示すように曲率半径 ρ'_2 が一定になるまで十分に線材を送る (この状態を「定常状態」と呼ぶ)。以上の手順で求めた定常逆曲げ実験結果を図 6 に示す。横軸は固定した回転角度 θ , 縦軸は定常状態の曲率 $1/\rho'_2$ である。丸印はリム線材, 四角印は平角線の実験結果である。どちらも設定した 20 度以下では概ね線形となった。従来方法では, この図 6 を参照して設計曲率に対応した角度を加工時の角度に設定している。

なお, 定常逆曲げ実験は, 一樣円弧の内径あるいは外径をノギス等により計測することで中心線の曲率半径 ρ'_2 を求めることができ経済的負担も少ないため, 実際の加工現場で容易に実施可能である。

Fig. 5 Steady bending diagram

Fig. 6 Relationship between curvature $1/\rho'_2$ and rotation angle θ

3・3 逆曲げに寄与する回転角度

定常状態におけるロール A 以降の線材長さ L と曲げモーメント分布および曲率分布の概要を図 7(a) に示す。青色で示すモーメント分布は、接点 B を最小とするロール A, B および C による負のモーメントである。同様に、緑色で示すモーメント分布は、接点 C を最大とするロール B, C および D による正のモーメントである。

これら 2 つを合算した赤線で示すモーメントが接点 A から接点 D 間の線材に作用する。接点 C から接点 D 間の曲率は、作用する曲げモーメントに応じて $1/\rho_2$ から $1/\rho'_2$ の範囲となる。それらの線材も、順次送り出されて接点 D を通過するとスプリングバックが完了し曲率は $1/\rho'_2$ となる。ここで、定常状態において線材の送りを止め、図 7(b) に示すように、回転量を増加させていきロール D と線材が接触し、かつ、ロール B, C および D による正のモーメントが発生しない状態を仮定する（この状態を「無負荷接触状態」と呼ぶ）。逆曲げのモーメントがなくなるため接点 C から接点 D 間の線材は、接点 D を通過した線材と同様スプリングバックが完了し、曲率半径は ρ'_2 となる。よって接点 C 以降は曲率半径 ρ'_2 の一樣円弧となる。無負荷接触状態の可動部の回転角度を接触のための角度 θ_c とする。定常逆曲げ実験において固定した可動部の回転角度 θ から接触のための回転角度 θ_c を引いた角度 $\Delta\theta = \theta - \theta_c$ が、線材の逆曲げに付与する回転角度とみなせる。図 6 に示した定常逆曲げ実験結果について、縦軸を曲率 $1/\rho'_2$ 、横軸を逆曲げに寄与する回転角度 $\Delta\theta$ としたときの関係を図 8 に示す。

次章で説明する設計形状を加工するための加工部の回転角度の導出において、関数化された図 8 を参照し、設計形状の各点毎の曲率に対応した逆曲げに寄与する回転角度 $\Delta\theta$ を取得する。

Fig. 7 Geometric relations of contact state with rolls and wire

Fig. 8 Relationship between curvature $1/\rho'_2$ and rotation angle for inverse bending $\Delta\theta$

4. 設計形状を加工するための可動部の回転角度の導出

設計形状のある点 n がロール C と接している場合に注目して、加工部の回転角度の決定方法を説明する。定常曲げ実験で定義した各種変数と区別するため、点 n の曲率半径を $\rho'_2(n)$ 、点 n を加工するための可動部の回転角度を $\theta_w(n)$ 、無負荷接触状態の可動部の回転角度を $\theta_c(n)$ 、逆曲げに寄与する回転角度を $\Delta\theta(n)$ とする。

無負荷接触状態の可動部の回転角度 $\theta_c(n)$ について、図 9 および図 10 を用いて求め方を説明する。また、流れを図 11 に示す。

手順 1：図 9 の赤色の破線で示す設計形状の中心線を、ロール C 半径と線材幅の半値だけロール C の通過するサイドにオフセットし、青色の破線で示すロール C が通過するトラック C を描画する。

手順 2：同様にして黒色の破線で示すロール D が通過するトラック D を描画する。（ロール C がトラック C 上を、ロール D がトラック D 上を移動する場合、各ロールと線材とは接することになる。）

手順 3：点 n における垂線とトラック C との交点をロール C の中心とする。

手順 4：赤色の一点鎖線で示すように、ロール C を中心に、ロール C、D の中心間距離を半径とする円弧を描画し、該円弧とトラック D との交点をロール D の中心とする。

手順 5：可動部基材の長辺とロール C、D の中心間の線分とのなす角度は $\tan^{-1}(b/a)$ であることから、可動部基材の長辺方向を求める。

手順 6：点 n における接線と可動部基材の長辺とのなす角度 $\varphi(n)$ について CAD 等を用いて求める。

手順 7：式 (1) に示すように、 $\varphi(n)$ と図 10 に示す調整工程の接点 C における線材の角度 ψ の和を無負荷接触状態の可動部の回転角度を $\theta_c(n)$ とする。

以上により、ロール C、D の中心位置から無負荷接触状態の可動部の回転角度 $\theta_c(n)$ を作図により求める。

逆曲げに寄与する回転角度 $\Delta\theta(n)$ は、点 n の曲率 $1/\rho'_2(n)$ を、3・3 節で作成した図 8 の曲線の関数に代入して求める。式 (2) に示すように、逆曲げに寄与する回転角度 $\Delta\theta(n)$ と無負荷接触状態の可動部の回転角度 $\theta_c(n)$ の和を、点 n を加工するための可動部の回転角度 $\theta_w(n)$ とする。

$$\theta_c(n) = \varphi(n) + \psi \quad (1)$$

$$\theta_w(n) = \Delta\theta(n) + \theta_c(n) \quad (2)$$

Fig. 9 Position relations between design shape and movable part in contact state

Fig. 10 Angle of tangent at roll C without inverse bending

Fig. 11 Derivation procedure of rotation for contact $\theta_c(n)$

5. 実証実験と評価

5・1 実験方法

$\rho'_1 = -81\text{mm}$ に設定した装置により、図 12 に示す実際のリム形状を半径 87 mm の球面に投影した場合の長さ 142.27mm のレンズカーブについて、2 種類の方法により加工部の回転角度を導出し曲げ加工を行った。赤点で示すリム上側中央を加工開始点とし、コーナを順番に第 1、第 2、第 3 および第 4 コーナとする。

方法 1 は今回提案する 3、4 章で説明した方法である。比較対象となる方法 2 は従来方法によるもので、図 6 に示す定常逆曲げ実験の可動部の回転角度 θ と曲率 $1/\rho'_2$ の関係を設計形状の各点の曲率に対応させる方法である。具体的には、設計形状の曲率が 0.02mm^{-1} の点には $\theta_w = -15^\circ$ 、 0.01mm^{-1} の点には $\theta_w = -3^\circ$ 、 -0.01mm^{-1} の点には $\theta_w = 22^\circ$ とする方法である。図 13 に方法 1 および方法 2 について逆曲げロール位置の導出の流れを示す。

加工形状の評価には三次元形状測定器（株ミットヨ製 Super QV606-Pro）を用いた。リム 2 周分のレンズカーブを連続加工した線材の輪郭形状を測定し、その座標データを CAD ソフトウェアに取り込み、中心線および 0.1mm 毎に中心線上の曲率を求めた。

第 1 コーナの曲率ピークを基準に位置合わせを行い、他のコーナの曲率ピークの位置偏差およびリム 1 周分の曲率偏差の絶対値総和を数値的評価とした。

Fig. 12 Design shape

Fig.13 Flow of derivation of inverse bending roll position by proposed method 1 and conventional method 2

5・2 実験結果および考察

加工物の形状を図 14 に、曲率のグラフを図 15 に、曲率ピークの位置偏差および曲率偏差の絶対値総和を表 2 に示す。従来方法により加工した線材は、概観については全体として曲率プラス側に反った形状となった。また曲率ピークの位置偏差については、2, 3 および 4 番目のピークの偏差が -1.6mm, -3.8mm および -7.2mm, 曲率偏差の絶対値総和は 12.90 mm⁻¹ であった。一方、提案方法により加工した線材は、おおむね設計形状に近い形状となった。曲率ピークの位置偏差についても、2, 3 および 4 番目のピークの偏差が -0.1mm, 0.0mm および 0.4mm, 曲率偏差の絶対値総和は 3.23mm⁻¹ であった。提案方法は従来方法と比較してピークの偏差は約 1/20, 曲率偏差の絶対値総和は約 1/4 となり大幅に改善された。

従来方法である方法 2 では、L=130mm 近辺においてロール D が線材から離脱し、 $\rho_2' = \rho_1'$ となる状況が生じたのに対し、提案方法である方法 1 では、ロール D が線材から離脱することなく接触しながら線材を曲げることを確認した。このことが設計形状からの大きな逸脱を抑え、加工精度の向上に寄与したと考えられる。

村田らの研究報告(村田他, 1994)のパイプベンダーは1回のみの曲げ加工で三次元曲げを行っている。一方、リムの三次元曲げでは、最初にレンズカーブが付与され、順次下流側に送られ、ロール7を通過時にロール8の押込みによりリム巻きカーブが付与される。つまり、ある点nを基準にするとリム巻きカーブとレンズカーブは異なる箇所で、かつ異なるタイミングで付与される。ところが設計形状のリム巻きカーブとレンズカーブの曲率ピーク位置は一致するため同期させる必要がある。そのため先に付与されるレンズカーブ曲率のピーク位置が正確であることは非常に重要となる。提案方法を用いることでレンズカーブの加工精度が向上し、リムの三次元曲げにおける調整工程の大幅な省力化が期待できる。提案方法は、線材のヤング率、耐力、線材の断面形状、および実機における定常逆曲げ実験データにより実施できるため実用性が高い。

Fig. 15 Curvatures of bent wire by proposed method 1 and conventional method 2

Table 2 Deviations of curvature peak position and sum of absolute deviations

deviation	2 nd peak [mm]	3 rd peak [mm]	4 th peak [mm]	Sum of absolute deviation [mm ⁻¹]
Method 1 (Proposed)	0.1	0.0	0.4	3.23
Method 2 (Conventional)	-1.7	-9.0	-7.2	12.9

6. 結 言

眼鏡フレームの製造工程で用いられる 4 ロールによる曲げ・逆曲げ加工において、FEM 解析等を用いることなく簡単な予備実験を用いて、チタン合金線材を高精度に S 字状の形状に曲げ加工することのできる逆曲げロール位置の導出方法を提案した。提案方法について検証実験を行ったところ、従来方法と比較して設計形状に近い加工形状を得た。数値的評価では、曲率偏差の絶対値総和は約 1/4 に、曲率ピーク位置の最大偏差は約 1/20 に低減し、提案方法が有効であることを確認した。

文 献

- 岩永洋志, 渡辺雄満, 浅川基男, 自動車ピストンリングの高精度形状化への実験による究明 (第 2 報), 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集(2013), pp. 145-146.
- 財団法人日本規格協会編, 眼鏡光学—眼鏡フレーム—用語 JIS B7280, 第 1 刷 (2006), pp. 4-5.
- 財団法人日本規格協会編, チタン及びチタン合金—棒 JIS H4650, 第 1 刷 (2012), p. 5.
- 社団法人日本チタン協会編, チタンの加工技術, 初版 3 刷 (1996), p. 69.
- 川田勝巳, 戸澤康壽, 円環成形における変形過程の弾硬化性材料に対する解析—薄板の円環成形に関する基礎的研究 IV—, 塑性と加工, Vol. 16, No. 179 (1975), pp. 1132-1138.
- 川田勝巳, 戸澤康壽, 成形品の形状に関する解析—薄板の円環成形に関する基礎的研究 VII—, 塑性と加工, Vol. 21, No. 230 (1980), pp. 234-240.
- 村田眞, 山本理, 鈴木秀雄, 管材の CNC 曲げ加工機の開発, 塑性と加工, Vol. 35, No. 398 (1994), pp. 262-267.
- 永井康友, 中厚板の高精度 U 曲げ加工, 塑性と加工, Vol. 28, No. 313 (1987), pp. 143-149.
- 佐々木善教, 大津雅亮, 松村正三, 森下和幸, 田中大樹, 八木秀樹, 関根雄一郎, 浅川基男, 実験と解析による曲げロールの押込み量の導出 (眼鏡フレーム用チタン合金線材の高精度ロール曲げ), 日本機械学会論文集, Vol.80, No.816 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0222.
- Sekine, Y., Asakawa, M., Kato, N., Takebe, Y., Matsuo, S., Sasaki, Y. and Matsumura, M., High-precision roll-bending of titanium alloy wire for glasses, The Conference Proceedings for the 83rd Annual Convention of the Wire Association International (2013).
- 社団法人日本塑性加工学会編, 曲げ加工—高精度化への挑戦—, 初版 1 刷 (1995), pp. 13-20.
- 渡辺雄満, 岩永洋志, 浅川基男, 自動車ピストンリングの高精度形状化への弾塑性 FEM 解析による究明 (第 1 報), 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集(2013), pp. 143-144.
- 山内鴻之祐, 眼鏡用金属材料と加工技術, 塑性と加工, Vol. 45, No. 516 (2004), pp. 13-18.

References

- Iwanaga, H., Watanabe, Y. and Asakawa, M., Roll bending technologies for highly accurate piston ring shape of automobile engine using experimental method, The proceedings of the 64th Japanese joint conference for the technology of plasticity(2013), pp. 145-146 (in Japanese).
- Japanese Standards Association ed., Ophthalmic optics —Spectacle frames — vocabulary and lists of equivalent terms JIS B 7280 (2006), pp. 4-5 (in Japanese).
- Japanese Standards Association ed., Titanium and titanium alloys-Rods and bars JIS H 4650 (2012), p. 5 (in Japanese).
- Japan titanium society ed., manufacturing technology of Titanium (1996), p. 69 (in Japanese).
- Kawata, K. and Tozawa, Y., Analysis of deformation process in forming of tube for elastic, work hardening material —Study of the press forming of a circular tube from sheet IV—, Journal of JSTP, Vol. 16, No. 179 (1975), pp. 1132-1138 (in Japanese).
- Kawata, K. and Tozawa, Y., Analysis of profile of the blank after O-forming —Study of the press forming of a circular tube from sheet VII—, Journal of JSTP, Vol. 21, No. 230 (1980), pp. 234-240 (in Japanese).
- Murata, M., Yamamoto, S. and Suzuki, H., Development of CNC machine for tube bending, Journal of JSTP, Vol. 35, No. 398 (1994), pp. 262-267(in Japanese).
- Nagai, Y., High precision U-bending technique for moderately thick plate, Journal of JSTP, Vol. 28, No. 313 (1987), pp. 143-149(in Japanese).
- Sasaki, Y., Otsu, M., Matsumura, M., Morishita, K., Tanaka, T., Yaghi, H., Sekine, Y. and Asakawa, M., Deriving position of

bending roll by experiment and analysis (High precision roll bending of titanium alloy wire for glasses frame),
Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.816 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0222.

Sekine, Y., Asakawa, M., Kato, N., Takebe, Y., Matsuo, S., Sasaki, Y. and Matsumura, M., High-precision roll-bending of titanium alloy wire for glasses, The Conference Proceedings for the 83rd Annual Convention of the Wire Association International (2013).

The Japan society for technology of plasticity ed., bending — Approach to high accuracy — (1995), pp. 13-20 (in Japanese).

Watanabe, Y., Iwanaga, H. and Asakawa, M., Roll bending technologies for highly accurate piston ring shape of automobile engine using elasto-plasticity FEM analysis, The proceedings of the 64th Japanese joint conference for the technology of plasticity (2013), pp. 143-144 (in Japanese).

Yamauchi, K., Metal for glasses and manufacturing technology, Journal of JSTP, Vol. 45, No. 516 (2004) , pp. 13-18 (in Japanese).