

医療用の高矩形比断面素線からなる 小径コイルばね成形方法の開発

電気通信大学 機械知能システム学専攻
教授 久保木 孝

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016007)

キーワード：マニピュレータ，関節，高矩形比，ばね

1. 研究の目的と背景

マニピュレータを用いた腹腔鏡手術は、医療分野において適用拡大が進みつつある。腹腔鏡手術では、開腹することなく、マニピュレータの挿入孔を身体にあけるだけで短時間にて手術ができる。この挿入孔の縮小化が患者への身体的負担低減の鍵であるが、マニピュレータの関節部が存在するため挿入孔径を小さくすることができない。関節部のコンパクト化を目的として、東京医科歯科大学の川嶋健嗣教授らは手術用マニピュレータを開発している¹⁾。開発のポイントは、関節部に従来用いられている機械構造部品を、シンプルなばねで置き換えることである。この関節用ばねには、「小径である」こと以外に、「曲げやすい」と「ねじり剛性が高い」との一見矛盾した特性が求められているが、図 1 に示す高矩形比断面を有するばねによって実現可能である²⁾。しかしながら、現状では切削加工によって製造されているため高コスト化が避けられない。

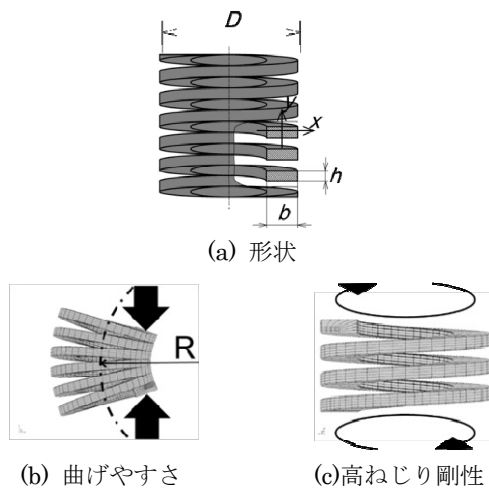


図 1 高矩形比断面を有するばねの特徴

本報では、手術用マニピュレータに用いることを想定した高矩形比ばねの塑性加工による成形方法を提案する。提案する方法では、円形素線を小径にコイル加工した後、

コイルを軸方向に圧縮加工する。コイル加工において小径化を実現し、すえ込み圧縮加工によって高矩形比を実現する。ここでは基本的な考え方を示し、すえ込み加工において求められる加工条件を検討した。

2. 加工法概要

2.1 求められるばね特性

これまで切削加工で製作されているマニピュレータ用ばねの形状の仕様は大凡、以下の通りである。

ばね形状の仕様：コイル直径 $D=10\text{mm}$ ，素線幅 $b=2.25\text{mm}$ ，矩形比 $A=b/h=3$

「曲げやすい」特性は、図 1 (a)中の x-y 座標における原点に関する素線の断面極二次モーメントを小さくする、つまり、素線厚さ h を小さくすることによって得られる。一方、「ねじり剛性が高い」特性は、y 軸に関する断面二次モーメントを大きくする、つまり、素線幅 b を大きくすることによって得られる。

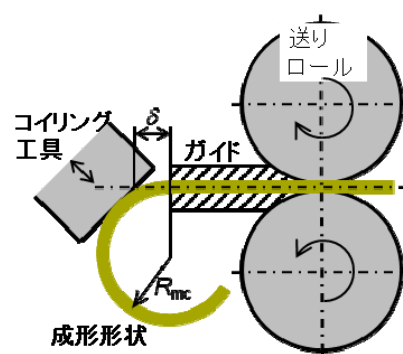
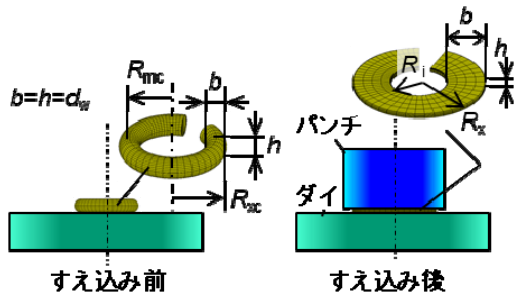


図 2 コイル加工

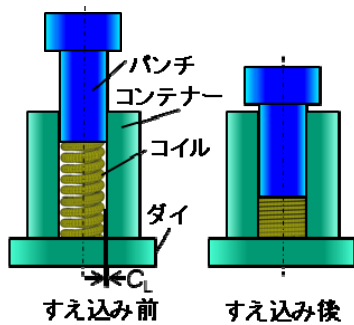
2.2 高矩形比ばねの成形法

高矩形比ばねの成形法を図 2 と図 3 に示す。図 2 に示す第一工程であるコイル加工において円形素線を小径コイルに成形する。引き続き図 3 に示す第二工程であるすえ込み圧縮加工において素線断面形状を高矩形比に加工

する。通常のコイルリング加工だけでも、ある程度の矩形比までであれば、コイルリング加工することは可能であるかもしれないが、矩形比が高くなると素線の曲げ剛性が高くなるため小径コイルの成形は困難となる。図3(a)のように1リングに適用すると、ワッシャ状のリングが得られる。図3(b)のように複数リングに適用すると高矩形比断面を有するばねが得られる。



(a) 1リング加工



(b) 複数リング加工

図3 すえ込み加工

具体的な成形形状を図4に示す。1リングの場合において、単一曲げ半径とすると、(a)C形状、途中でコイルリング工具の押込み方向を変化させると(b)S形状、コイルリング工具の位置を徐々に変化させると曲げ半径も同時に変化するために(c)渦巻き型の形状を成形することが可能である。複数リングに適用すると目的とする医療用マニピュレータ用の関節部に適用可能な高矩形比断面を有するばねが得られる。

3. 実験手順

3.1 コイルリング

コイルリングの様子を図5に示す。素材としてアルミニウム A1050 の熱処理材を選択した。生体との反応性の低いチタンなどがより好ましいが、樹脂などのコーティングによりアルミニウムも十分に適用可能である。素線として、ワイヤに加えて、チューブを用いる場合も検討する。チューブとすることによって、高矩形比が容易になると期待される。

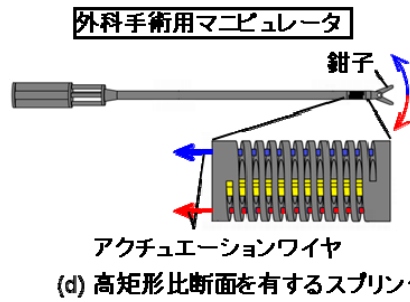


図4 本加工法によって成形される形状

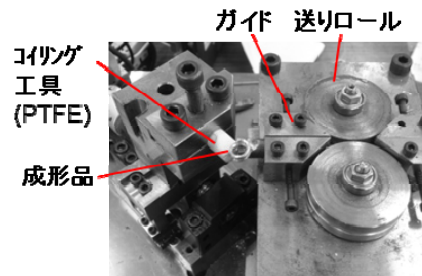


図5 試作機によるコイルリングの様子

3.2 すえ込み

本報では、すえ込み条件が成形後の形状に及ぼす影響について報告する。加工条件を表1に示す。基本的な特性を調査するため図3(a)に示す通り1リングの加工も実施し、その場合は、曲げ半径を5~22mmまで変化させた。図3(b)に示すばねの場合は、曲げ半径を5mmとした。

表1 加工条件

素線	材質	アルミニウム合金 A1050
	断面	中実/中空
	直径 d_w /mm	2.0
	肉厚 t /mm	1.0(中空時)
コイルリング	外半径 R_{xc} /mm	5-22(1リング) 5(10リングばね)
	輪の数	1, 10
すえ込み	すえ込み率	0-0.8
加工	潤滑	なし
	摩擦係数 μ	0.1 (FEM)
その他	要素サイズ(mm)	0.25-0.5(素線半径方向) 0.2-0.4(周方向) 0.44-1.23(軸方向)

すえ込み時の挙動を調査するため弾塑性有限要素解析を行った。解析には Rockfield 社製の汎用コード ELFEN を用いた。静的陰解法と動的陽解法、両方の実施が可能であるが、実験結果との形状の比較より、高精度な結果が得られた静的陰解法を採用した。8 節点 6 面体要素を用いた。

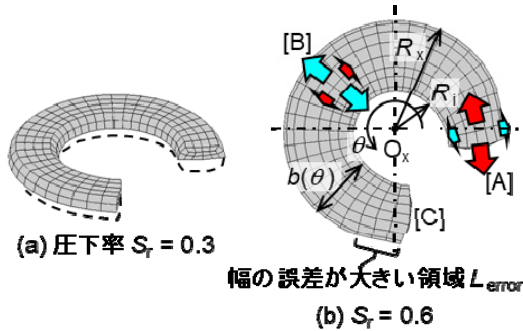


図6 1リングのすえ込み加工時の形状変化 (FEM, 素線:ワイヤ, コイリング時外半径 $R_{xc}=5\text{mm}$)

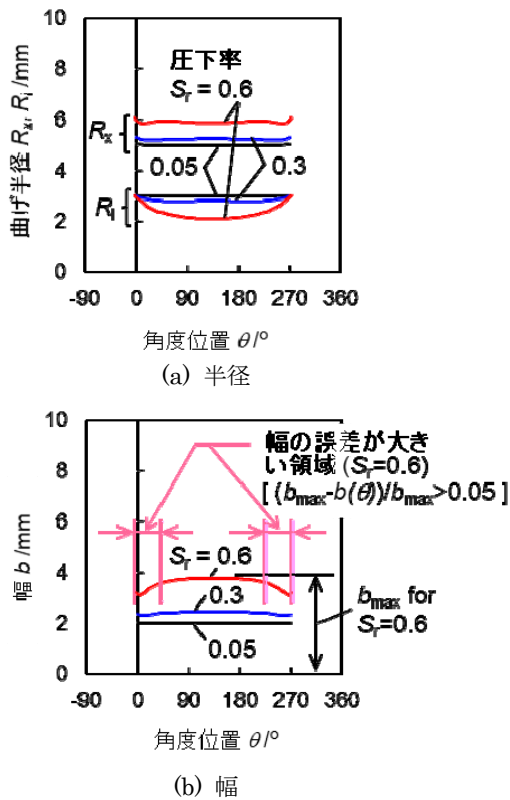


図7 1リングのすえ込み加工時の曲げ半径と幅の変化 (FEM, 素線:ワイヤ, コイリング時外半径 $R_{xc}=5\text{mm}$)

4. 解析および実験結果

4.1 1リングのすえ込み加工

ワイヤを素線とする1リングのすえ込み加工の形状に関する解析結果を図6に示す。対称性を考慮して、上半分を解析の対象としている。ここで、リングの外側輪郭の近似円の中心 O_x を求め、 O_x からの距離として外曲げ半径

R_x や内曲げ半径 R_i を定義する。圧下率 S_r が大きくなると、 R_x と R_i の差である幅 b のバラツキが大きくなる。中央部 [B] では摩擦が前後の材料の移動を妨げるために、軸方向への伸びが抑制される。体積は一定となるため幅が拡大する。先端部 [A] や [C] では、軸方向への拘束が小さく、材料が伸びやすいため、幅広がり小さい。

圧下率 S_r が形状に及ぼす影響を図7に示す。圧下率 $S_r \leq 0.3$ では幅のバラツキは小さいが、 $S_r=0.6$ では幅のバラツキは大きくなり、幅の誤差が最大幅に対して 95% 以下となる領域を考えると、その領域が大きい。

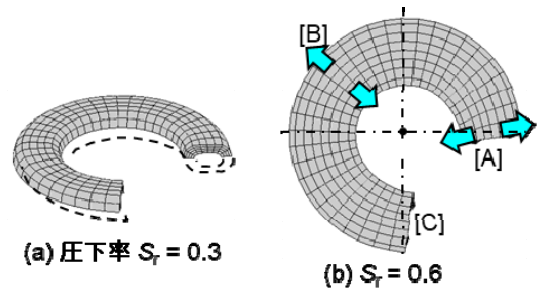


図8 1リングのすえ込み加工時の形状変化 (FEM, 素線:チューブ, コイリング時外半径 $R_{xc}=5\text{mm}$)

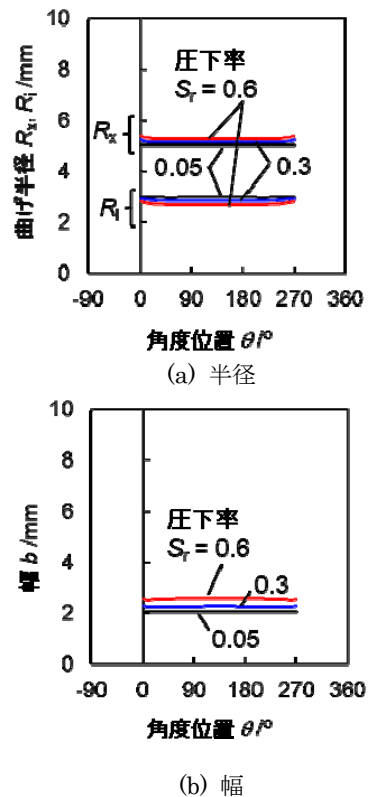
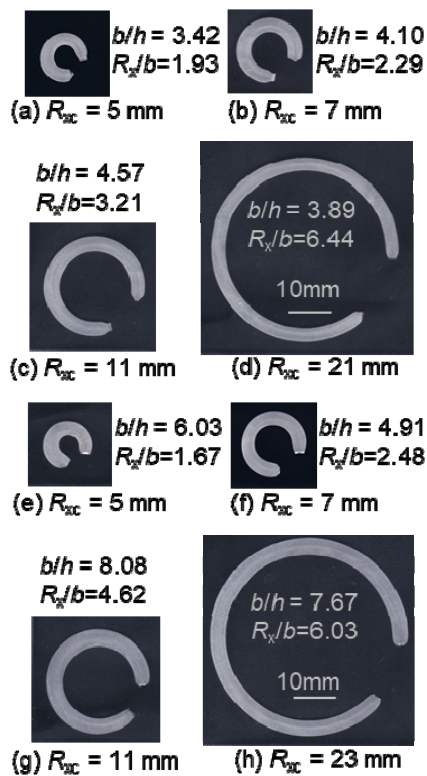


図9 1リングのすえ込み加工時の曲げ半径と幅の変化 (FEM, 素線:チューブ, コイリング時外半径 $R_{xc}=5\text{mm}$)

チューブを素線として用いた結果を図8と図9に示す。ワイヤを素線として用いた場合に比べて、幅のバラツキを大幅に抑制できた。チューブを圧縮する場合、リングの長手方向へ材料が延伸することなく、チューブ内壁の上面と下面の距離が近づくことによって成形される。この結果、図8にて示す端部[A][C]や中央部[B]において等しく幅方向に材料が流動する結果、幅のバラツキは抑制される。

上記のFEMの結果に基づき、すえ込み加工した結果を図10に示す。素線をチューブとするリングに対しては、大きな幅のバラツキを生じることなく、より高い圧下率を付与することができた。曲げ半径・幅比 R_x/b が1.67と非常に小さい状況下で、非常に高い矩形比 $b/h=6.03$ を達成した。



(a)-(d): ワイヤ, 圧下率 $S_r=0.55$, 成形後肉厚=0.9mm
 (e)-(h): チューブ, 圧下率 $S_r=0.70$, 成形後肉厚=0.6mm
 図10 1リングのすえ込み加工時の形状変化 (実験)

4・2 ばねのすえ込み加工

ばねに対してすえ込み加工を実施し、高矩形比断面を有するばねを成形した結果を図11に示す。圧下率の増加にともない矩形比 b/h は増大する。同時に、曲げ半径・幅比 R_x/b は少しずつ低下する。これによって、高矩形比断面を有し、かつ、直径の小さいばねの成形が可能となる。同じ圧下率の場合は、ワイヤを素線としたほうがより効率的に矩形比 b/h を効率的に大きくすることができる。しかしながら、ほぼ同一形状のワイヤを素線とする[S1]とチューブを素線とする[H1]を比べると、ワイヤを素線とする場合には、断面形状のバラツキが大きくなってしまふ。したが

って、チューブを素線とするほうが形状精度の面で優れている。

ワイヤを素線とする場合、顕著に下方の矩形率が上方の矩形率に比べて小さくなっているが、これは、コンテナ平面とばねの摩擦の影響と考えられる。FEMの結果を用いた模式図を図12に示す。面圧の上昇にともなって、圧縮力に抗するように摩擦力が上昇する。この結果、圧縮力が下方まで伝播しないために、下方の矩形率は小さくなってしまふ。

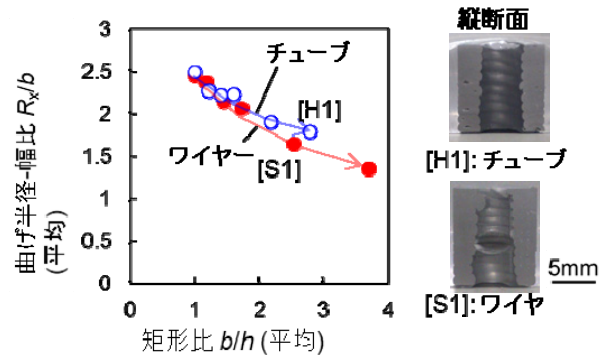


図11 矩形比と曲げ半径・幅比の関係 (初期のコンテナとばね間隙 $C_L=0$ mm)

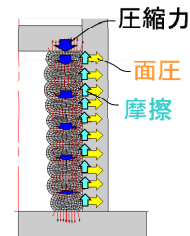


図12 断面バラツキが生じる原因

5. 形状精度の改善

断面のバラツキの抑制策として、素線としてワイヤではなくチューブを選択する他、コンテナとばね間の隙間 C_L を設ける、マンドレルを用いる、素線の断面を円形の代わりに四角形とするなどの方法が考えられる。

コンテナとばね間の隙間 C_L を設けると、図12に示す面圧を抑制することができ、圧縮力が下方まで伝播すると考えられる。素線をチューブとし隙間 $C_L=1$ mmとして成形した結果を図13に示す。確かに、断面のバラツキが改善していることが確認できる。

マンドレルおよび素線断面形状が成形形状に及ぼす影響を図14に示す。素線断面を正方形とすることによる顕著な改善効果は認められない。マンドレルを使用すると、上下端部の2リングを除くと断面形状のバラツキが抑制可能であることがわかる。

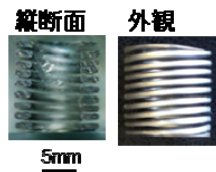


図1-3 コンテナとばね間の隙間 $C_L=1\text{mm}$ としたときの成形結果（素線：チューブ）

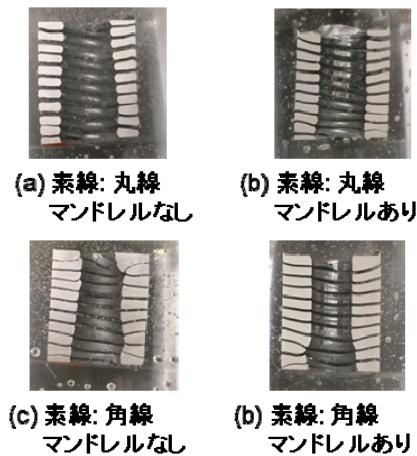


図1-4 素線断面形状とマンダレルがばねの成形形状に及ぼす影響（素線：ワイヤ，コンテナとばね間の隙間 $C_L=0\text{mm}$ ，丸線直径=1mm，角線の縦と横の長さ=1mm）

6. まとめ

医療用マニピュレータの関節部への適用を念頭に、筆者らが提案する高矩形比断面素線からなる小径コイルばねの成形方法に関する研究を行った。提案する方法は2つの

ステップからなり、第一ステップではコインリング加工を実施し、第二ステップではばね軸方向からすえ込み加工をすることによって断面を高矩形化する。

1リングに対して適用した結果、ワイヤを素線とするよりも、チューブを素線とするほうが形状の精度を保つことができ、チューブを素線とする場合には、曲げ半径-幅比 R_s/b が 1.67 と非常に小さい状況下で、非常に高い矩形比 $b/h=6.03$ を達成した。

ばねに適用した結果においても、ワイヤを素線とするよりも、チューブを素線とするほうが形状の精度を保つことができる。精度確保にはコンテナとばねのクリアランス C_L の確保も重要であり、素線をチューブとして $C_L=1\text{mm}$ とすることによって、現在、切削を用いて時間と加工費用をかけて成形されているばねと同等の高矩形比を達成した。また、成形形状のバラツキ抑制には、マンダレルを使用することも有効であることを示した。

謝辞

本研究では公益財団法人天田財団のご援助により、高矩形比断面を有する素線からなるばねの成形法を提案するとともにその有効性を検証することができました。また、さらなる研究を進めるに当たっての有用性に関する目処を得ることができました。ここに公益財団法人天田財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 只野耕太郎・住野亘・川嶋健嗣：日本ロボット学会誌，27-5 (2009)，538-545.
- 2) 原口大輔：日本フルードパワーシステム学会論文集，44-1 (2013)，45-48.