2 本ピンコイルリング方式におけるコイルリングピンの垂直変位の 圧縮コイルばねの寸法に及ぼす影響*

吉田 寛之^{*1}, 對馬 一憲^{*2}, 久納 孝彦^{*2}

Effect of Vertical Displacement of Coiling Pin on Dimension of Helical Compression Springs Formed by Two Coiling Pin System

Hiroyuki YOSHIDA, Kazunori TSUSHIMA^{*3} and Takahiko KUNOH

^{*3} Faculty of Science and Technology Keio University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223 8522 Japan

In this paper, it is the purpose to clarify the effect of a vertical displacement of the coiling pin as the influencing factors on the dimension of helical compression springs, and moreover to obtain the instruction to set up a vertical displacement of the coiling pin for forming them with highly dimensional accuracy. First, the effects of a vertical displacement of the coiling pin on the dimension of helical compression springs and on the initial tension of solid coil springs are analyzed by the differential geometry. Next, the experiments of forming springs are carried out in order to confirm the analyzed results. As the results, it is confirmed that the experimental results qualitatively agree with the analytical ones. Moreover, it is obtained the instruction to set up a vertical displacement of the coiling pin for forming helical compression springs with highly dimensional accuracy. Namely, helical compression springs can be formed with highly dimensional accuracy by setting up a vertical displacement of the coiling pin in the constant range of the initial tension of solid coil springs.

Key Words: Machine Element, Numerical Control, Accuracy, Helical Compression Spring, Vertical Displacement, Coiling Pin, Coiling Machine, Free Height

1. 緒 言

近年製品の小型化に伴い、機械部品に多く利用されている圧縮コイルばねの寸法精度に対する要求が厳しくなってきた。しかし圧縮コイルばねの寸法精度に影響を及ぼす要因がいまだ充分に明らかにされていないため、実際の圧縮コイルばね生産現場において熟練作業者の経験や勘に頼った作業が多いのが現状である。よって圧縮コイルばねの寸法精度に影響を及ぼす要因の解明が急務となっている。この要因を解明することは、寸法精度の高い圧縮コイルばねを成形し、かつ作業の標準化を図るために必要不可欠である。

圧縮コイルばねの寸法精度に影響を及ぼす要因として機械的要因や材料的要因などが考えられているが、一般に機械的要因が大きく影響すると考えられている⁽¹⁾。この機械的要因のうち、伊藤ら⁽²⁾はフィードローラの線送りによる寸法精度への影響を明らかにしているが、コイルリングピンの位置の変化による寸法精度への影響に関してはいまだ明らかにされていない。そこで本論文では、圧縮コイルばねの寸法を調整する際に現場でよく行われるコイルリングピンの垂直方向の調整（以下垂直変位とする）に着目し、この垂直変位が圧縮コイルばねの寸法（平均径および自由長）に及ぼす影響を明らかにする。

さらに高い寸法精度の圧縮コイルばねを成形するためのコイルリングピンの垂直変位に関する設定指針を示す。

2. 幾何学的解析

本章では、コイルリングピンの垂直変位と圧縮コイルばねの寸法（平均径および自由長）および密着巻きコイルばねの初張力の関係を明らかにするために行った解析について述べる。

2.1 コイルリングピンの垂直変位と線に作用するねじりモーメントの関係

図 1 にコイルリング中の線に作用する力の関係を示す。なお、線は出口側ワイヤガイドを通過後、2 本のピンに接触し曲げ加工が施され、さらにピッチツールと接触しピッチが付けられる。

同図において原点回りに作用する線のねじりモーメント T_Δ は、

$$T_\Delta = F_{p1}(\mu_{p1} \cos \theta_{p1} - \sin \theta_{p1})\Delta_{p1} + F_{p2}(\cos \theta_{p2} + \mu_{p2} \sin \theta_{p2})\Delta_{p2}$$

$$= k_1 \Delta_{p1} + k_2 \Delta_{p2} \quad \cdots (1)$$

ただし、 F [N] : コイルリングピンのピン荷重

μ : コイルリングピンの動摩擦係数

θ [rad] : コイルリングピンの X 軸に対する傾き

Δ [mm] : コイルリングピンの垂直変位

また添字の p_1, p_2 はそれぞれ 1 番ピン, 2 番ピンを示す。

* 原稿受付 1999 年 3 月 18 日。

^{*1} 学生員, 慶應義塾大学大学院 (〒223 0061 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

E mail: tsushima@mech.keio.ac.jp

と表せる。ただし F_{PZ1} , F_{PZ2} は F_{P1} , F_{P2} と比較して微小なので無視する。ここでコイルリングピンのピン荷重は、コイルリングピンの位置によらず一定であると仮定すると、

$$k_1, k_2 = \text{const.} \quad \cdots(2)$$

となり、 T_d はコイルリングピンの垂直変位に比例することとなる。

Fig.1 Coiling process by coiling machine

2.2 コイルリングピンの垂直変位と圧縮コイルばねの寸法の関係

成形される圧縮コイルばねのれい率 τ_c は、コイルリングピンの垂直変位が 0 の場合 ($\Delta_{P1} = \Delta_{P2} = 0$) に与えられるれい率とコイルリングピンの垂直変位により与えられるれい率の和で表される。ここで、 $\Delta_{P1} = \Delta_{P2} = 0$ の場合に与えられるれい率はピッチツールによるねじりモーメントによるもののみであることから、 τ_c は、

$$\tau_c = \frac{(T_d + T_p)}{GI_p} \quad \cdots(3)$$

ただし、 T_p [Nmm] : ピッチツールによるねじりモーメント

G [N/mm²] : 線の横弾性係数

I_p [mm⁴] : 線の断面 2 次極モーメント ($= \frac{\pi d^4}{32}$)

のように表せる。

また微分幾何学より、成形される圧縮コイルばねのれい率 τ_c は、

$$\tau_c = \frac{2\pi p_c}{\pi^2 D_c^2 + p_c^2} \quad \cdots(4)$$

ただし、 p_c [mm] : 成形される圧縮コイルばねのピッチ
 D_c [mm] : 成形される圧縮コイルばねの平均径
 で与えられる⁽³⁾。

式(4)を p_c について解くと、

$$p_c = \frac{\pi}{\tau_c} \left(1 - \sqrt{1 - \tau_c^2 D_c^2} \right) \quad \cdots(5)$$

となる。よって式(3)を代入することにより、

$$p_c = \frac{\pi GI_p}{(T_d + T_p)} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{(T_d + T_p) D_c}{GI_p} \right)^2} \right) \quad \cdots(6)$$

を得る。

いま $\frac{(T_d + T_p) D_c}{GI_p} \ll 1$ とし、

$$\sqrt{1 - \left(\frac{(T_d + T_p) D_c}{GI_p} \right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{(T_d + T_p) D_c}{GI_p} \right)^2 \quad \cdots(7)$$

とおくと、式(6)は、

$$p_c = \frac{16}{Gd^4} (T_d + T_p) D_c^2 \quad \cdots(8)$$

ただし、 d [mm] : 線径

と簡化される。

次に成形される圧縮コイルばねの曲率 κ_c は微分幾何学より、

$$\kappa_c = \frac{2\pi^2 D_c}{\pi^2 D_c^2 + p_c^2} \quad \cdots(9)$$

のように表せる⁽³⁾。

ここで式(1)、(6)および(9)を用いて整理すると、成形される圧縮コイルばねの平均径 D_c は、

$$D_c = \frac{2\kappa_c G^2 (\pi d^4)^2}{1024(k_1 \Delta_{P1} + k_2 \Delta_{P2} + T_p)^2 + \kappa_c^2 G^2 (\pi d^4)^2} \quad \cdots(10)$$

と表せる。

また、式(8)に式(10)を代入すると、成形される圧縮コイルばねのピッチ p_c は、

$$p_c = \frac{64(k_1 \Delta_{P1} + k_2 \Delta_{P2} + T_p)}{Gd^4} \times \left(\frac{\kappa_c G^2 (\pi d^4)^2}{1024(k_1 \Delta_{P1} + k_2 \Delta_{P2} + T_p)^2 + \kappa_c^2 G^2 (\pi d^4)^2} \right)^2 \quad \cdots(11)$$

のように表せることから、成形される圧縮コイルばねの自由長 H_0 は、

$$H_0 = 3d + N_a \frac{64(k_1 \Delta_{P1} + k_2 \Delta_{P2} + T_p)}{Gd^4} \times \left(\frac{\kappa_c G^2 (\pi d^4)^2}{1024(k_1 \Delta_{P1} + k_2 \Delta_{P2} + T_p)^2 + \kappa_c^2 G^2 (\pi d^4)^2} \right)^2 \quad \cdots(12)$$

と表される。以上コイルリングピンの垂直変位と圧縮コイルばねの寸法（平均径および自由長）の関係が導かれた。

2.3 コイルリングピンの垂直変位と密着巻きコイルばねの初張力の関係

一般にコイルリングマシンによって圧縮コイルばねを成形する場合には、圧縮コイルばねの寸法の安定化のためにまずコイルリングピンによって密着巻きコイルリングし、その後ピッチツールによってピッチ付けを行う。したがって密着巻きコイルリングした際の密着巻きコイルばねの初張力の大きさが圧縮コイルばねの寸法にどのような影響を及ぼすかを明らかにする必要がある。そこで本節では、コイルリングピンの垂直変位と密着巻きコイルばねの初張力の関係を 2.2 節で得られた解析結果を用いて求める。

密着巻きコイルばねの初張力 P_i は

$$P_i = \frac{Gd^4}{8N_a D^3} (-p + d) \quad \cdots(13)$$

ただし、 N_a : 有効巻数
 p [mm] : 逆ピッチ

で与えられる。

ここで、密着巻きコイルばねの場合、線に与えられるねじりはコイルリングピンにより与えられるねじりのみであることから、式(10)および(11)において $T_p = 0$ とし、それぞれを式(13)に代入することにより、

$$P_i = \frac{Gd^4}{8N_a} \left(\frac{1024(k_1\Delta_{p1} + k_2\Delta_{p2})^2 + \kappa_\Delta^2 G^2 (\pi d^4)^2}{2\kappa_\Delta G^2 (\pi d^4)^2} \right)^3 \times \left(-\frac{64(k_1\Delta_{p1} + k_2\Delta_{p2})}{Gd^4} \left(\frac{\kappa_\Delta G^2 (\pi d^4)^2}{1024(k_1\Delta_{p1} + k_2\Delta_{p2})^2 + \kappa_\Delta^2 G^2 (\pi d^4)^2} \right)^2 + d \right) \quad \cdots(14)$$

を得る。以上コイルリングピンの垂直変位と密着巻きコイルばねの初張力の関係が導かれた。

2.4 解析結果の数値計算例

本節では 2.2 節および 2.3 節で得られた解析結果(式(10)、(12)および(14))において表 1 に示すようなばね仕様の値を代入した場合の数値計算結果を示す。

2.4.1 圧縮コイルばねの平均径および自由長の数値計算例

2 番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と圧縮コイルばねの平均径 D_c および自由長 H_0 の関係の数値計算結果を図 2 および図 3 に示す。

図 2 に示すように D_c は、 Δ_{p2} の増加に伴い、単調に減少することがわかる。さらに変曲点が存在している。また図 3 に示すように H_0 は、 Δ_{p2} の増加に伴い、2 次曲線的に変化し、極小値を持つことがわかる。なお、 D_c の変曲点の位置と H_0 が極小値となる位置は、どちらも、

$$T_\Delta = \frac{\kappa_\Delta G \pi d^4}{32\sqrt{3}} - T_p \quad \cdots(15)$$

となり一致する。このことは D_c の変曲点の位置および H_0 が極小値となる位置のどちらかを明らかにすること

によってコイルリングピンの垂直変位に関する設定指針が得られることを示している。

2.4.2 密着巻きコイルばねの初張力の数値計算例

2 番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と密着巻きコイルばねの初張力 P_i の関係の数値計算結果を図 4 に示す。 Δ_{p2} の増加に伴い、 P_i は単調に増加する傾向にあることがわかった。

Table 1 Example of coil specifications

Diameter of wire	d [mm]	1.00
Shearing modulus	G [N/mm ²]	76×10^3
Spring index	$c (=D/d)$	15
Vertical displacement of 1st. coiling pin	Δ_{p1} [mm]	0
Vertical displacement of 2nd. coiling pin	Δ_{p2} [mm]	Variable
Number of active turns	N_a	8
Curvature of coil	κ_c [1/mm]	1.14×10^{-3}
Torsional moment of pitch tool	T_p [rad/mm]	0.02
Coefficient	k_i [N]	2

Fig.2 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on mean diameter of helical compression spring

Fig.3 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on free height of helical compression spring

Fig.4 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on initial tension of solid coil spring

3. 実験

本章では、第2章で述べた解析の妥当性を確認するために密着巻きコイルばねおよび圧縮コイルばねの成形実験を行った。実験は2本ピン方式NCコイルリングマシン(PC-15型、(株)板屋製作所製)を用いて行った。以下に $D/d=15$ で1番ピンの垂直変位 Δ_{p1} を0, ± 0.05 [mm]とした場合の結果例を示す。なお密着巻きコイルばねおよび圧縮コイルばねの仕様を表2に、実験条件を表3に示す。

3.1 密着巻きコイルばねの初張力 P_i

$D/d=15, \Delta_{p1}=0$ [mm]とした場合の2番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と密着巻きコイルばねの初張力 P_i の関係を図5に示す。なお図中のプロットは同一条件下で成形した密着巻きコイルばね3個の平均値を表し、図中の曲線は最小二乗法による回帰曲線である。 Δ_{p2} の増加に伴い P_i は3次関数的に単調増加し、ほぼ一定となる区間が存在する。解析結果(図4参照)と比較すると、単調増加する点において定性的に一致している。しかしながら実験結果においてはさらに増加する傾向がみられる。このことは、解析において材料力学的な要因を考慮していないためであると考えられる。また D/d を一定とし $\Delta_{p1}=0.05$ [mm](図6参照)および $\Delta_{p1}=-0.05$ [mm](図7参照)とした場合においても同様の傾向が見られた。すなわち P_i が一定となる範囲は $(\Delta_{p2} - \Delta_{p1})$ で比較すると、3条件とも一致する。さらに上述の傾向は $D/d=12, 18$ の場合でも同様であった。

Table 2 Coil specifications
(Solid coil springs and helical compression springs)

	Solid	Helical
Spring index c	12, 15, 18	
Material	SWOSC-V $\phi 1.0$ [mm]	
Number of active turns N_a	—	8
Number of end turns N_e	—	2

Table 3 Experimental condition

Loading force of feed roller F_{fr} [N]	980		
Feed velocity of wire V_{fw} [m/min]	45		
Vertical displacement of 1st. coiling pin Δ_{p1} [mm]	-0.05	0	0.05
Vertical displacement of 2nd. coiling pin Δ_{p2} [mm]	0.05 0.35	0.05 0.45	0.10 0.45
Lift of pitch tool P_{lift} [mm]	4.00 5.00	4.45 5.45	4.95 5.85

Fig.5 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on initial tension of solid coil springs($D/d=15, \Delta_{p1}=0$ [mm])

Fig.6 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on initial tension of solid coil springs($D/d=15, \Delta_{p1}=0.05$ [mm])

Fig.7 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on initial tension of solid coil springs($D/d=15, \Delta_{p1}=-0.05$ [mm])

3.2 圧縮コイルばねの平均径 D_c および自由長 H 。 (ピッチツールのリフト量 P_{lift} を変化させた場合)

まずピッチツールのリフト量 P_{lift} を変化させた場合の2番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と圧縮コイルばねの平均径 D_c の関係($D/d=15, \Delta_{p1}=0$ [mm])を図8に示す。なおピッチツールのリフト量とは、圧縮コイルばねのピッチ部を成形する際のピッチツールの移動量を表す。また図中のプロットは、同一条件下で成形した圧縮コイルばね10個の平均値を表し、図中の直線は最小二乗法による回帰直線である。本実験の範囲内では、 Δ_{p2} の増加に伴い D_c は単調減少し、回帰直線の傾きの変化する点が存在する。この実験結果は解析結果(図2参照)と定性的に一致している。

次に2番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と圧縮コイルばねの自由

長 H_0 の関係($D/d=15, \Delta_{p1}=0[\text{mm}]$)を図9に示す。本実験の範囲内では、 Δ_{p2} の増加に伴い H_0 は比例的に減少し、ある Δ_{p2} を境にして比例的に増加する傾向に変化する。すなわち H_0 には極小値が存在する。この実験結果は解析結果(図3参照)と定性的に一致している。さらに D_c の回帰直線の傾きの変化する点および H_0 の極小となる点が実験結果においても一致しており、解析結果との定性的な一致が見られた。

一方 D/d を一定とし、 $\Delta_{p1}=0.05[\text{mm}]$ (図10および11参照)および $\Delta_{p1}=-0.05[\text{mm}]$ (図12および13参照)とした場合においても D_c 、 H_0 ともに同様の傾向が見られた。さらに D_c の回帰直線の傾きの変化する点および H_0 の極小となる点は($\Delta_{p2}-\Delta_{p1}$)で比較すると3条件ともに一致し、3.1節で述べた結果と同様なものが得られた。また上述の傾向は $D/d=12, 18$ の場合でも同様であった。

Fig.8 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on mean diameter of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=0[\text{mm}]$)

Fig.9 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on free height of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=0[\text{mm}]$)

Fig.10 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on mean diameter of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=0.05[\text{mm}]$)

Fig.11 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on free height of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=0.05[\text{mm}]$)

Fig.12 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on mean diameter of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=-0.05[\text{mm}]$)

Fig.13 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on free height of helical compression springs ($D/d=15, \Delta_{p1}=-0.05[\text{mm}]$)

3.3 圧縮コイルばねの自由長の標準偏差 σ

2 番ピンの垂直変位 Δ_{p2} と圧縮コイルばねの自由長の標準偏差 σ の関係($D/d=15, \Delta_{p1}=0[\text{mm}]$)を図14に示す。なお図中のプロットはそれぞれ連続成形した圧縮コイルばね150個の標準偏差を表す。また本実験では、どの Δ_{p2} についても圧縮コイルばねの自由長が25mmとなるように初期設定した。 Δ_{p2} の変化とともに、 σ は変化し、 σ が最小かつ一定となる範囲が存在する。この範囲は密着巻きコイルばねの初張力 P_i が一定になる範囲と一致する(図7参照)。この傾向は $\Delta_{p1}=\pm 0.05[\text{mm}]$ とした場合でも同様である(図15および16参照)。したがって P_i が一定になる範囲にコイルピンの垂直変位を設定することにより高い寸法精度の圧縮コイルばねの成形が可能であることを示唆している。

Fig.14 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on standard deviation of free height of helical compression springs ($D/d=15$, $\Delta P_1=0$ [mm])

Fig.15 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on standard deviation of free height of helical compression springs ($D/d=15$, $\Delta P_1=0.05$ [mm])

Fig.16 Effect of vertical displacement of 2nd coiling pin on standard deviation of free height of helical compression springs ($D/d=15$, $\Delta P_1=-0.05$ [mm])

4. コイルピンの垂直変位に関する設定指針

解析結果および実験結果より、コイルピンの垂直変位を変化させると、圧縮コイルばねの平均径および自由長が変化することが明らかになった。さらに圧縮コイルばねの自由長の標準偏差が最小となる範囲は、密着巻きコイルばねの初張力が一定となる範囲と一致することが明らかになった。よって寸法精度の高い圧縮コイルばねを成形するためには、以下のコイルピンの設定手順を経て成形すれば良い。

- (1) 所望の D/d に基づいたコイルピンの垂直変位と密着巻きコイルばねの初張力の関係を調査し、初張力が一定となるコイルピンの垂直変位の範囲を求め、その範囲内にコイルピンの垂直変位を設定する。
- (2) 所望の圧縮コイルばねが成形できるように、コイルピンの面内変位およびピッチツールを微調整する。
- (3) 所望の寸法になったら、圧縮コイルばねを連続成形する。

以上の手順により寸法精度の高い圧縮コイルばねを成形することが期待できる。

5. 結 論

本論文ではコイルピンの垂直変位が圧縮コイルばねの寸法（平均径および自由長）に及ぼす影響を解析により明らかにし、実験によりその解析の妥当性を確認した。以下に本実験の範囲内で得られた実験結果を要約する。

- (1) 2 番ピンの垂直変位の増加に伴い、密着巻きコイルばねの初張力は 3 次曲線的に単調増加し、ほぼ一定となる範囲が存在する。
- (2) 2 番ピンの垂直変位の増加に伴い、圧縮コイルばねの平均径は単調に減少し、自由長の平均値は減少から増加する傾向に変化する。
- (3) 圧縮コイルばねの自由長の標準偏差が最小となる範囲は、密着巻きコイルばねの初張力が一定となる範囲と一致する。

さらに密着巻きコイルばねの初張力が一定となる範囲にコイルピンの垂直変位を設定することにより高い寸法精度の圧縮コイルばねの成形が可能であることが明らかになり、これを設定指針とすれば良いことを示した。

参考文献

- (1) 線ばねの加工法に関する調査・研究委員会、ばね成形時の自由長の変動の要因に関する研究、ばね論文集, No.43(1998), 55.
- (2) 伊藤彰浩・對馬一憲・久納孝彦、フィードローラによる線のねじれの圧縮コイル自由長に及ぼす影響、機論, 64-623, C(1998), 2682.
- (3) 石原繁・竹村由也、微分幾何, (1987), 17, 森北出版.