3D プリンターで印刷したコイルばねのばね定数の予測

齋藤優

要旨　本研究では, 3D プリンターで印刷したコイルばねのばね定数を設計段階で予測することを目的とした。中心径と巻き数を一定にし線径のみを変えた pla 樹脂のコイルばねを 3D プリンターを用いて作製し，分銅をばねに吊るして伸びを測定した。その結果，フックの法則が成立し、線径が大きいほどばね定数が増加することが確認された。しかし線径をもとにしたばね定数の近似では誤差が大きくなったため，断面におけるインフィルとシェルの面積比に着目して再検討したところ，ばね定数はインフィルとシェルの面積比を指数とする数に比例する関係が得られた。以上より，内部構造を考慮することでばね定数のより精度の高い予測が可能であると示唆された。

キーワード：3D プリンター、ばね定数、コイルばね、pla 樹脂

Ⅰ. はじめに

ばねといえば金属で作られたものが一般的であるが，近年になって 3D プリンターが普及すると，3D プリンターでばねを作ることが可能になった。しかし，このようなばねのばね定数などの性質を定量化した文献は私が調べた限り無かったので，3D プリンターで印刷したコイルばねの性質がその線径などのパラメータによってどう変化するかを調べることにした。3D プリンターでの印刷で設定できるパラメータにはインフィル充填率などの印刷設定と，3DCAD で設計する際に決める線形や中心径、巻き数などのパラメータがあるが，今回は 3DCAD で決められる線径について調査することにした。

ここで，金属のコイルばねの場合，ばね定数 k [N/mm]は横弾性係数 G [GPa]，線径 ϕ [mm]，有効巻き数 N，コイル中心径 R [mm]を用いて

$$k = \frac{1000G\phi^4}{8NR^3}$$

となることが知られている(1)。しかし、3D プリンターで印刷したオブジェクトの中には空洞を設けることが多く，その構造はシェルという壁とインフィルという内部の空洞が多い部分に分けられる。この 3D プリンター特有の構造から，この関係は完全には成り立たないと予想した。

本研究ではコイルばねの線径とばね定数の関係を調べ, 3DCAD での設計の段階でコイルばねのばね定数を予測することを目的として研究を行った。

Ⅱ. 手法

1 実験器具

3D プリンター製コイルばね(ばねは中心径 30 mm，巻き数は 3 回で統一して，線径を 3 mm,4 mm,5 mm,6 mm,7 mm の 5 種類で製作した。)
スタンド，分銅，タコ糸，物差し
なお，3D プリンターは Bambu Lab A1 mini を，フィラメントは Bambu Lab PLA Basic (白)を使用した。

表 1 印刷設定（抜粋）

インフィル充填率[%]	15
インフィルパターン	グリッド
レイヤー間隔[mm]	0.20
線幅[mm]	0.42
シェル面層数	2

補足　インフィル充填率とは内部構造をどれだけ材料で満たすかという項目，インフィルパターンとは内部の構造であり，グリッドでは内部を四角

に区切って壁を作ったような構造である。レイヤー間隔とは一層の高さ，線幅とは押し出した材料の幅，シェル面層数は外側の壁の厚みである。

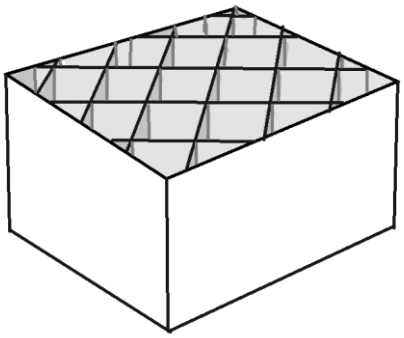


図 1 インフィルパターン(グリッド)の図

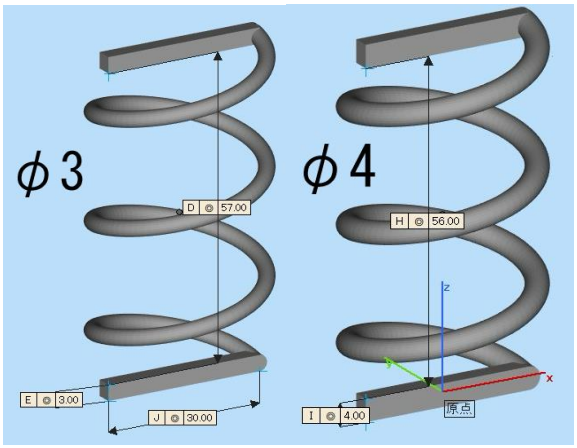


図 2.1 ばねの寸法(3mm)　図 2.2 ばねの寸法(4mm)

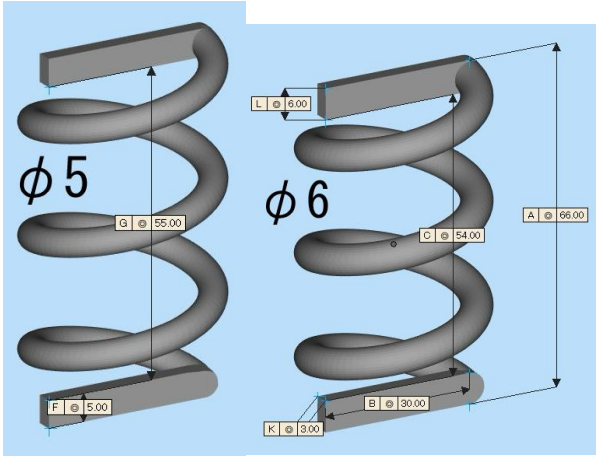


図 2.3 ばねの寸法(5mm)　図 2.4 ばねの寸法(6mm)

2 実験方法

スタンドにコイルばねを図 3 のように固定する。ばねの下部にタコ糸を取り付け，そこに分銅を吊るして自然長からの伸びを測定する。

なお，測定時はあらかじめコイルばねの下端に基準点を設け，その位置の物差しの目盛りを読むことでコイルばねの自然長からの伸びを測定した。

実験において，物差しで伸びを測るため，目視で判別できる変化になるよう，適当な重さの分銅をそれぞれ使用した。また計測した後には自然長に戻し，可塑変形が起こらず弾性変形の範囲内だったことを確かめた。

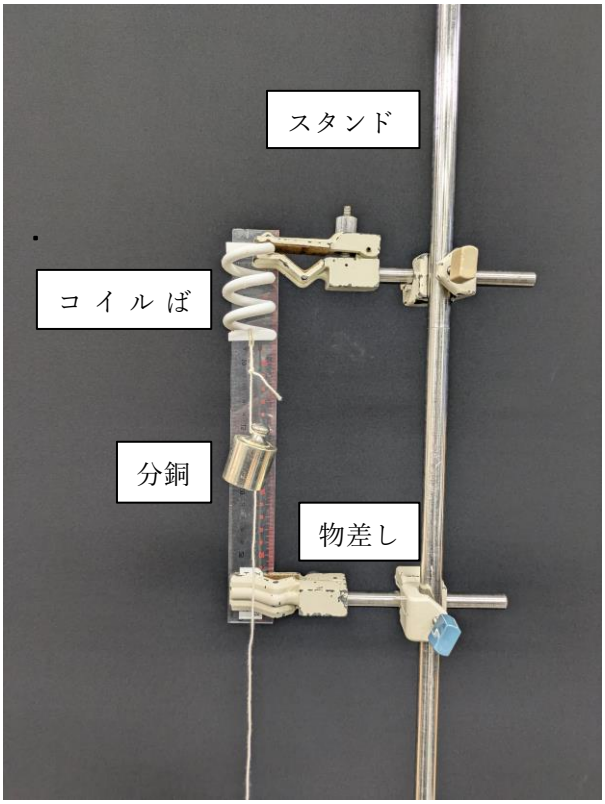


図 3 実験時の写真

III. 結果

表 2 分銅の質量とばねの伸びの関係

分銅の質量 [g]	ばねの伸び(ϕ=3) [cm]	ばねの伸び(ϕ=4) [cm]	ばねの伸び(ϕ=5) [cm]	ばねの伸び(ϕ=6) [cm]
0	0	0	0	0
10	0.1	-	-	-
20	0.2	0.1	-	-
50	0.6	0.2	0.1	-
70	0.9	-	-	-
100	1.3	0.5	0.3	0.2
150	2.2	0.8	-	-
200	2.9	1	0.5	0.3
300	-	1.5	0.8	0.4
400	-	2	1	0.5
500	-	-	1.3	-
600	-	-	-	0.8
800	-	-	-	1

表 2 のデータで横軸に分銅の質量 [g]，縦軸にばねの伸び [cm]を取ったグラフを図 4 に示した。

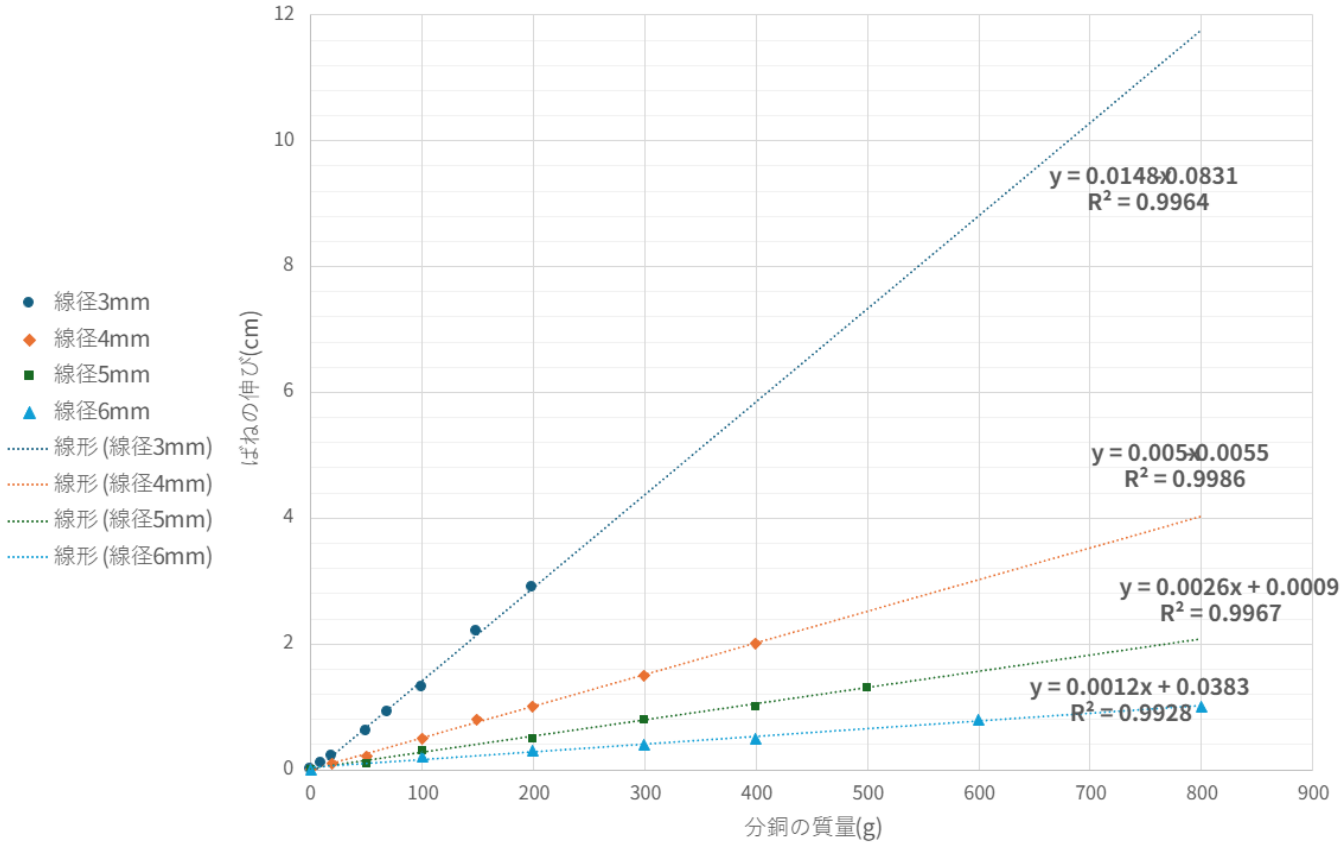


図 4.1 分銅の質量とばねの伸びの関係

以上のデータよりこれらのばねは一般的なばねのようにフックの法則が成り立ち，線径が太くなるほどばね定数は大きくなることがわかる。

IV. 考察

ばね定数は以下の表のようになった。

表 3 線径とばね定数の関係

線径[mm]	3	4	5	6
ばね定数[N/m]	67	196	386	784

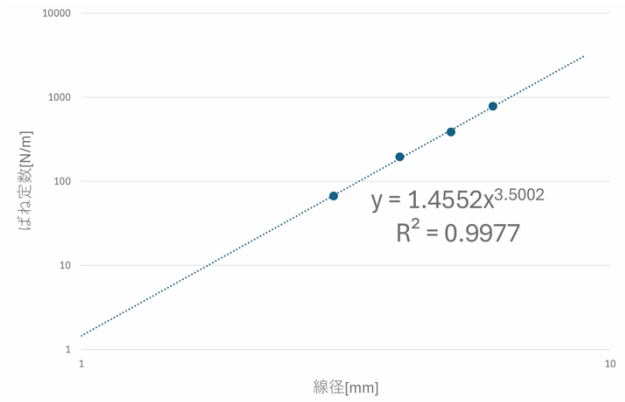


図 5.1 線径とばね定数の関係(両対数グラフ)

また，追実験として線径 7 mm のばねを作成して同じ方法でばね定数を測定した。

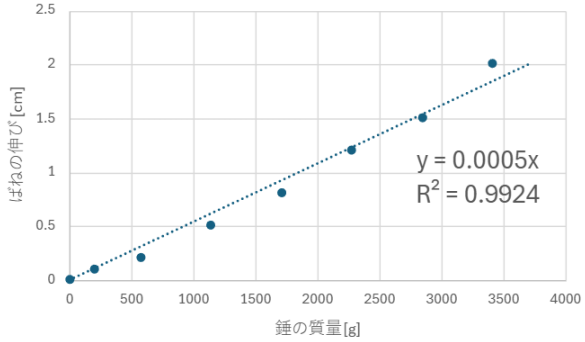


図 6.1 分銅の質量とばね(ϕ7)の伸びの関係

また，線径 7mm のばねのデータを図 5.1 のグラフに付け加えた図が下に示される図 5.2 である。

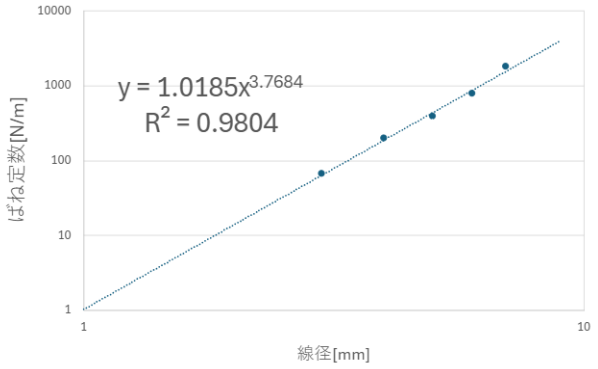


図 5.2 線径とばね定数の関係(両対数グラフ)

図 5.1 と図 5.2 から見て取れるように，新たなデータによって近似式の形が大きく変化してしまったことがわかり，図 5.1 による近似直線から予測されるばね定数と線径 7 mm での実験値の誤差は，理論値が 1320 N/m で，実測値が 1813 N/m のため，37 %以上となっている。よって図 5.1 のようにばね定数と線径を単純に結びつけることは論理的ではない。

ここで，シェルの厚みは印刷設定によって決められており，線径の半径がわかればシェルがばねの巻き線の断面積に占める割合も計算できる。この視点からばね定数と実験データを関連づけて考えると次のような関係が見えた。

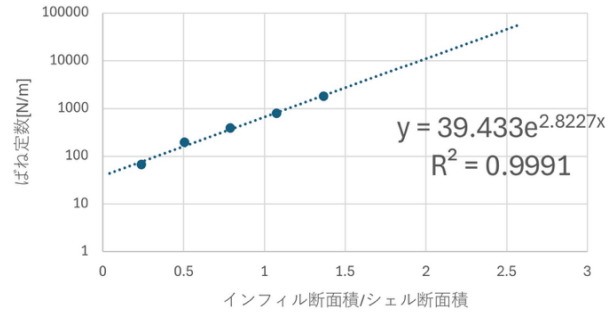


図 7.1 インフィル断面積とシェル断面積の比とばね定数の関係

このインフィルに対するシェルの断面積に占める割合を指数とする数にばね定数が比例するという予測から，ばね定数がある値になると予想できるばねを作成して追実験を行った。使用したばねは図 5.2 の近似式に従うとした場合，そのばね定数が 1200 N/m となる値である線径 ϕ=6.46 mm

のばねである。

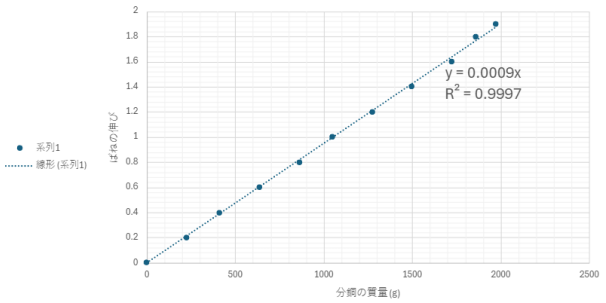


図 6.2 分銅の質量とばね(ϕ6.46)の伸びの関係

この結果から，ばね定数は 1036 N/m と算出できる。これは理論からの誤差が 13.7 %であり，ある程度良い予測と言える。また，これを図 8.1 に付け加えた図は以下のようになる。

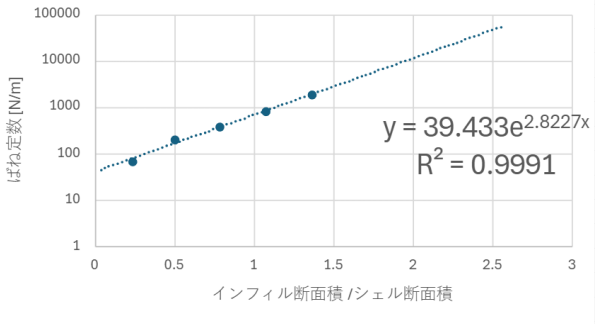


図 7.2 インフィル断面積とシェル断面積の比とばね定数の関係

これはインフィルに対するシェルの断面積に占める割合を指数とする数にばね定数が比例するという予測を支持するものである。

V. 結論

3Dプリンターで印刷したコイルばねのばね定数kは，インフィルに対するシェルの断面積に占める割合 σ を指数とする数に比例していると予想され，

$$k = 39.4 \cdot e^{2.82\sigma}$$

とあらわすことができ，±10%程度の精度でコイルばねを作製することができる。

謝辞

本研究の遂行と論文の執筆にあたり，中川雅斗先生には指導教員として終始多大なご指導を頂きました。心より感謝致します。また，実験に協力していただいた物理科教員の先生方に感謝致します。最後に，本実験の準備をするにあたってお力添えを頂いた生徒の皆様にもお礼申し上げます。

文　献

(1) 東京理科大学の講義用 PowerPoint
https://www.rs.noda.tus.ac.jp/nog/documents/sekkei2/s2-6.pdf