

小型旋盤式コイリングマシンの開発と教材化の検討

The Development of Small Lathe Type Coiling Machine and the Study to Create a Teaching Material from it

北 正彦 (東海職業能力開発大学校)
 塩田 泰仁 (職業能力開発大学校名誉教授)
 Masahiko Kita, and Yashuhito Shiota

著者らは、曲がり穴加工用マイクロロボットの開発¹⁾を目指しており、その主要部品となる形状記憶合金 (SMA : Shape Memory Alloy) 製コイルばねは、最適化の過程で寸法解が複数存在し多様な形状を要求される。しかしながら、それらは流通量が少なく標準化が進んでいないことから、市販品から仕様を満足するものを見出すことは極めて難しい。そこで、これらの解決を目的に独自の小型旋盤式コイリングマシンの開発を行い、SMA 製コイルばねの寸法形状、および変態温度、ばね定数などのある程度の範囲で選択、調整できる製作環境を構築した。本稿では装置の開発と、それを利用した SMA 製コイルばねの製作、および検証について報告し、あわせて開発装置の訓練課題、教材としての展開を考察する。
 キーワード：小型旋盤式コイリングマシン、ニチノール、形状記憶合金ばね、ばね設計法、教材開発

1. はじめに

ばねは、物質の持つ基本的性質である弾性を最大限に利用した機械要素として、形状を変形させたり、荷重を受け止めさせたり、エネルギーを蓄積させたりする場面で用いられる。ばねは板材、棒材、線材を素材として、弾性を最大限に利用するための多くの形状があり、代表的な形状として、金属を板状に用いた板ばねや皿ばね、細い金属線を螺旋状に巻き付けたコイルばねなどが JIS によって標準化され、設計法が規定されている。さらに、ばねの製造形態は単品の生産から高品質製品の多量生産に至るまで幅広く、用途も締結、防振、エネルギーの蓄積などを目的に、工業製品のみならず鍵やおもちゃなどの日用品に広く用いられている。このように、ばねは設計、製造およびその用途において関連する技術の裾野は大変広く、技能に関してのノウハウも多彩である。

著者らは、曲がり穴加工用マイクロロボットの開発¹⁾を目指しており、その主要部品となる形状記憶合金 (SMA : Shape Memory Alloy) 製コイルばねは、最適化の過程で寸法解が複数存在し、多様な形状を要求される。しかしながら、それらは流通量が少なく標準化が進んでいないことから、市販品から仕様を満足するものを見出すことは極めて難しい。一方、製作を企業に依頼する場合は、採算面からのまとまった発注の要求や長い納期が問題となる。そこで、これらの解決を目的に構造を小型化、簡素化した独自の小型旋盤式コイリングマシンの開発を行い、SMA 製コイルばねの寸法形状、および変態温度、ばね定数などのある程度の範囲で自ら調整できる製作環境を構築した。本稿では装置の開発と、それを利用した SMA 製コイルばねの製作、および検証について報

告する。あわせて、開発した装置が一連のものづくりの流れのもとに製作されていること、製作対象がものづくり教材としてすぐれた素養をもつばねであることに注目し、訓練課題、教材としての展開を考察する。

2. 製作対象の SMA 製ばねについて

製作対象となる SMA 製ばねは、温度変化によって動作するアクチュエータである、バイアス式二方向性素子の主要部品として利用される。図 1 にそれら構造を示す。アクチュエータは SMA 製ばね、鋼製バイアスばね、筐体、円盤シャフトで構成され、SMA ばねと鋼製ばねが円盤を挟んで互いに力を及ぼし合うように組み付けられて

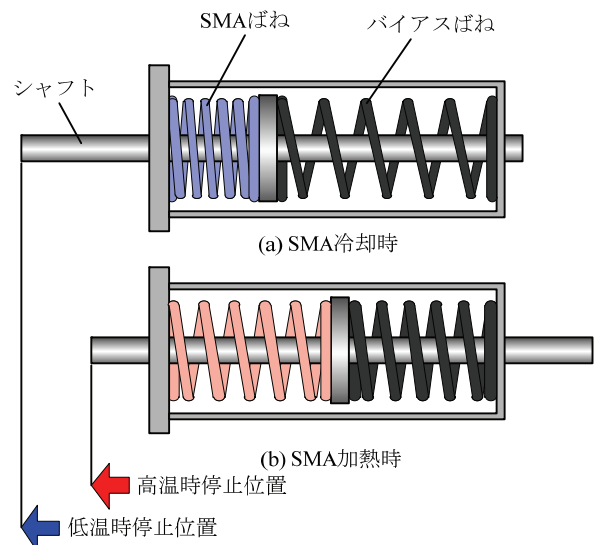


図 1 バイアス二方向性素子の構造と動作

いる。温度によって両ばねの釣合い状態が変化することで、シャフトが所望の動作範囲で直線運動を行う。静的な釣合いをもとにした設計方法²⁾により、両ばねの主要寸法、ばね定数などを見出し、アクチュエータの動作範囲を決定できる。あわせて、ばね素材に形状記憶効果を目的とした実用材である、Ti-Ni系SMAのニチノールを用いた。SMAにおいて成分比は変態温度を決める因子となるが、ニチノールは同一径で成分比の異なる線材がラインアップされており、それらを選択することで変態温度を調節することが可能となる。

3. SMAばねの製作工程

通常のコイルばねの成型は、一般に線材を素材としてつる巻き状に塑性加工する。その工程をコイルリング(Coiling)という³⁾。SMAコイルばねの製造工程も、第一工程で、通常のばね成形と同様にコイルリングによる成形を行ない、次の第二工程で、SMAばねの機能として重要となる形状を記憶するための熱処理を行う。その後の第三工程で、ばねの端面形状の成形を行い、最終工程である検査を経て完成する。SMAコイルばねに形状を記憶させる方法として、中温処理が一般的である。中温処理は、その処理工程として目標の形状に成型、拘束されたSMAコイルばねを、オーステナイト相となる400~500℃の適当な温度で一時間程度保持し、その後、水で急冷して拘束時の形状を記憶させる⁴⁾。

図2に冷間加工における一般的なコイルリングの方法を示す。冷間加工でのコイルリングは、図2(a)に示す線材をコイルリングピンにより芯金に押付けて成形するコイルリングピン方式と、図2(b)に示す線材を巻芯金に巻きつける旋盤式コイルリング方式(以後、旋盤式コイルリングマシン)がある。前者は成形専用機として大量生産に適しており、後者は試作、受注生産の場面で多様な形状に対応できる。今回製作するSMA引っ張りコイルばねは、実験装置の主要部品として設計上の寸法解が複数存在する。すなわち要求形状が多様となる。さらに、設計時に想定したばね定数、変態温度などの特性を、現状において設計値の通りに製作することは難しく、このため、同一条件で複数本のばねを製作し、その中から設計値により近いものを選び出す再選択を行う必要がある。したがって、装置仕様として、ばねの諸寸法やTi-Ni合金比の異なる材料への変更が容易であり、かつ、10個程度の単位で同一形状のばねを製作できることが要求される。旋盤式コイルリングマシンはこれらの要求を十分に満たしており、かつ、今回の製作対象が小径ばねであることから要求される出力は小さく、装置構造を小型化、簡素化することによって、比較的容易に製作することが可能と考えられる。SMAばねのばね特性を、ある程度の範囲で選択、調整できる製作環境を整えるメリットは大きく、よって、成形装置を独自に開発することとした。

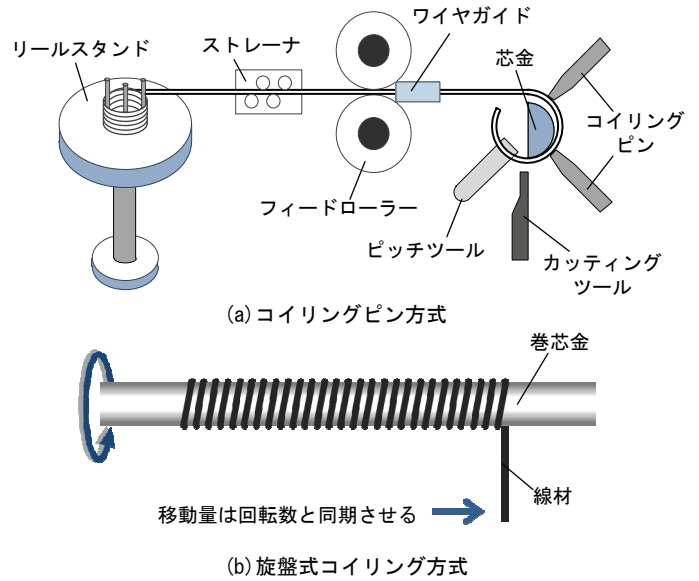


図2 冷間加工時におけるコイルリング方法

表1 SMAばねの仕様

成分比	素材径	ばね定数 40℃ 80℃	コイル 有効径	ピッチ	有効 巻き数
Ni (55.01%) Ti (44.99%)	1mm	1.45N/mm 4.44N/mm	6.0 mm	2.5mm	3

表2 小型旋盤式コイルリングマシンの仕様

対応 素材径	対応 有効径	最大 成形長さ	ピッチ	ピッチ 中途変更
0.5~1.5 mm	5.0~7.0 mm	15mm	任意値	可

4. 小型旋盤式コイルリングマシン

4.1 小型旋盤式コイルリングマシンの概要

小型旋盤式コイルリングマシンの仕様を決めるにあたり、製作対象となる曲がり穴加工用マイクロロボットに使用するコイルばねについて、アクチュエータの動作範囲、横弾性係数などの諸条件から設計計算を行い、ばね仕様とした。仕様を表1に示す。次に、表1を基にピッチ幅の任意値設定、成形途中のピッチ変更などの機能を加味し、今回製作する小型旋盤式コイルリングマシンの仕様を検討した。表2に本機の仕様を示す。

図3に開発した旋盤式コイルリングマシンの模式図を示す。本装置は、SMA素線をコイル状に成形するための回転軸ユニット、その軸に沿って平行に移動する直動軸ユニット、およびそれらを固定するベースで構成されている。回転軸ユニットにおいて、巻芯金は両端をベアリングで支持されてハウジングに取り付けられ、ガイド軸は

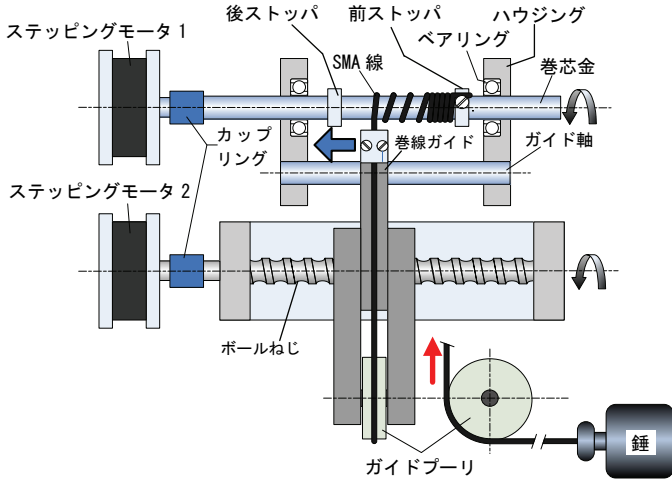


図3 旋盤式コイルリングマシンの模式図

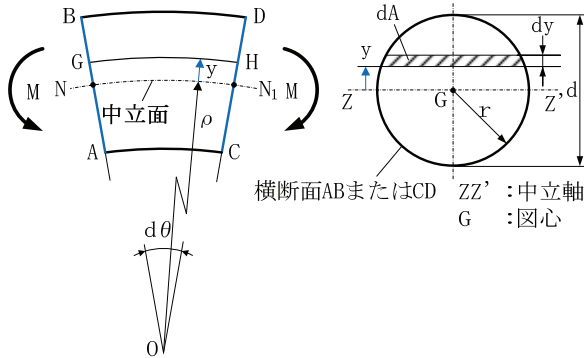


図4 巻付けによる SMA 素線の変形

それと平行の位置関係になるように固定されている。さらに、巻芯金には製作するコイル長さで始端固定ジグと終端固定ジグが配置され、カップリングを介してステッピングモータ 1 に接続されている。直動軸ユニットにおいて、ボールねじおよびリニアガイドが巻芯金と平行になるように配置され、カップリングを介してステッピングモータ 2 に取り付けられている。ボールねじ上には巻線ガイドおよびガイドプーリが取り付けられ、さらに、巻芯金と精密な平行関係を維持できるように、巻線ガイドの片端はリニアブッシュを介して回転軸ユニットのガイド軸に組み付けられている。両ユニットのステッピングモータは、所望のピッチ角を生成するようマイコンと駆動制御回路により同期制御される。成形原理として、SMA 線の片端に錘を吊り下げ、それをモータに直結した巻芯金に巻き付けてコイル状に成形する。

4.2 巻付けに必要なモータトルクの算出

巻付けに要するモータトルク M を、以下の手順で算出して選定の目安とした⁵⁾。図4にSMA素線の変形の様子を示す。モータトルク M は、中立軸からの距離 y 、SMA素線の降伏点応力 σ_e より次の式で表される。

$$M = \sigma_e \int_A y dA \quad (1)$$

図4より $dA = 2\sqrt{r^2 - y^2}dy$ となり、 $r^2 - y^2 = u$ とおくと式(1)は以下となる。

$$M = -2\sigma_e \int_{r^2}^0 \sqrt{u} du = \frac{\sigma_e d^3}{6} \quad (2)$$

求めた式(2)に $d=1.0\text{mm}$ 、 $\sigma_e=294\text{MPa}$ を代入し、 $M=4.9\text{N}\cdot\text{cm}$ を得る。

5. ピッチ角の生成方法

図5に任意のピッチ角をもった圧縮コイルばねの三次元螺旋形状とそれを二次元平面に展開したグラフを示す。展開した形状は任意の傾きを持った直線となっており、図のように横軸を回転軸ユニットの移動量、縦軸を直動軸ユニットの移動量に対応させると、その傾きは横軸と縦軸の移動量の比となる。このことから、コイルばねを任意のピッチ角で三次元螺旋形状に成形する動作は、二次元平面の横軸、縦軸に置かれたステッピングモータを互いに協調制御して、任意の傾きを持った直線を描く直線補間法に帰着される。本装置の補間法として、主に二次元プロッタで利用されている、デジタル差分解析器 (Digital Differential Analyzer : DDA) を用いた⁶⁾。移動の様子を図6に示す。ステッピングモータの1パルスあたりの移動量は十分に小さいので、DDAにより移動量を適切に配分し与えることで、基準直線にほぼ一致させた移動が可能となる。信号配分の処理の流れを以下に述べる。

- (1) x 方向、 y 方向の差分 dx 、 dy を定義し、値として x 、 y 方向の移動総パルス数 $P_{\Sigma x}$ 、 $P_{\Sigma y}$ を代入する。図6において $dx=P_{\Sigma x}=9$ 、 $dy=P_{\Sigma y}=5$ を代入する。
- (2) dx 、 dy の値から常時移動させる方向を決める。 $dx > dy$ の場合 x 方向を、 $dx < dy$ の場合 y 方向を常時移動させる方向とする。図6において $dx > dy$ となるので、 x 方向を常時移動させる方向とする。
- (3) 常時移動させない方向の差分値 d_s 、および累積誤差 e_n を定義し、 e_n の初期値 e_0 に d_s を代入する。図6において移動させない方向は y 方向となるので、 $e_0=d_s=dy=5$ を代入する。
- (4) 常時移動させる方向に1パルス移動させる。図6において x 方向に1パルス移動させる。
- (5) d_s を用いて累積誤差 e_n を求める。 e_n を求める式は $e_n=e_{n-1}+d_s$ で表される。図6において常時移動させない方向は y 方向なので差分値は $d_s=dy$ となる。よって $x=1$ の時、 $e_1=e_0+dy=5+5=10$ となる。
- (6) 常時移動する方向の差分 d_m を定義し、 e_n と d_m の大きさを比較する。 $e_n \geq d_m$ の場合、 e_n-d_m を行ってその値を e_n に再代入し、かつ y 方向に1パルス移動させる。すなわち、両方向に1パルス移動させることとなる。

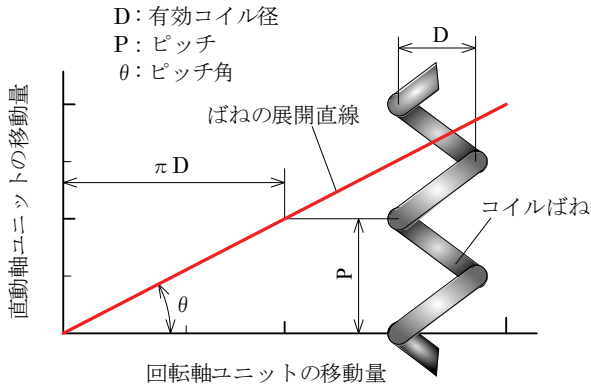


図5 コイルばねの展開と両ユニットの移動量

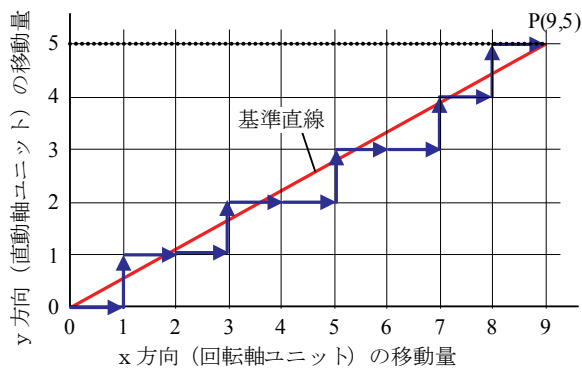


図6 DDA による移動の様子

$e_n < d_m$ の場合、 e_n はそのままとし、かつ y 方向も移動させない。すなわち、 x 方向のみ 1 パルス移動させることとなる。図6において x 方向が常に移動し、その差分 d_m は $d_m = dx = 9$ となる。 $x=1$ の時、 e_n 、 $d_m (=d_x)$ の関係は $10 \geq 9$ 、すなわち $e_1 \geq d_m$ となるので、 e_1 の入替え $e_1 \leftarrow e_1 - d_m = 10 - 9 = 1$ を実行し、 y 方向に 1 パルス移動させる。

(7) (4)に戻る。

DDA の処理はワンチップマイコン(PIC16F873)で実行され、生成された入力パルスが、各々の 2 相ステッピングモータ用駆動回路に供給される。

6. SMA ばねの製作

完成した本装置の外観を図7に示す。全体の大きさは縦250mm×横400mm×高さ80mm、質量は約5kgとなった。本装置によるSMAばね成形の流れを以下に述べる。任意の長さで切断したSMA素線の片端を、巻心金に取り付けた前ストップに固定し、他方を巻線ガイド、ガイドプリーに通した後、巻付け時の張力を発生させる錘を吊り下げる。次に巻心金を回転させてSMA素線を巻き取る。このときDDA処理によって同期したパルス信号が2台のステッピングモータに送られ、巻線ガイドが所望のピッチ幅で移動して目的のばね形状を生成する。巻取りが完了

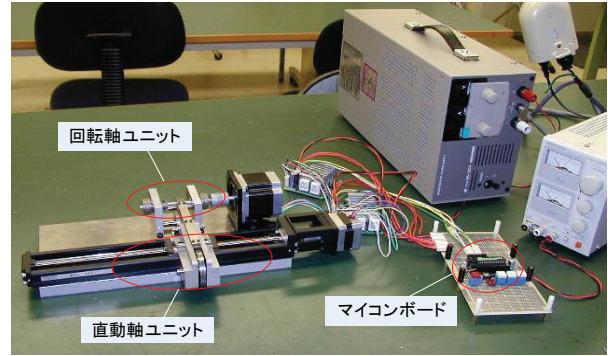
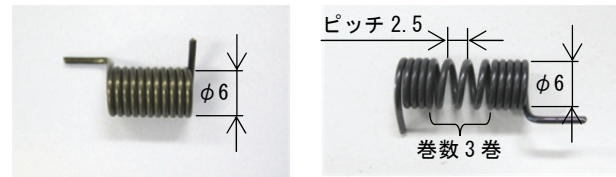


図7 完成したコイリングマシン



(a) 密着 (b) ピッチ変更

図8 完成した SMA ばね

した後は、終端固定ジグである後ストップによって巻心金に拘束し余りを切断する。成形後、形状を記憶させる目的で電気炉による熱処理を行う。具体的には、成形したSMA素線を巻心金ごと本装置から取り外し、拘束されたままの状態ですぐに電気炉に投入して430℃の環境下に一時時間置き、冷水により冷却した。冷却後、取り外したSMAばねの各寸法をノギスにより測定し、ほぼ表1で示す仕様通りの寸法であることを確認した。図8に完成したSMAばねを表す。図8(a)は密着形状のばね、図8(b)はピッチを途中で変更し、表1で示した仕様で成形したばねを示す。さらに、形状記憶効果を確認するため、常温で変形させたのち80℃以上の湯中に投入し、形状が元通りに復帰することを確認した。

7. 教材化の視点

教材開発に視点をおいた考察を、以下述べる。

(1) 本装置は関連する技術領域が広く、かつそれらを結びつける手法を具体的に学べる。

本装置はメカトロニクス機器であることから、必要とする技術領域も機械分野に止まらず、モータ制御、センサ、マイコンなどの電気、情報分野の知識が必要とされ、かつそれらを結びつけるインターフェース技術も合わせた一連の習得が可能である。

(2) 装置の目的、仕様が明確で、かつ設計から製作までの各段階で決定されるべき事柄が明確である。

本装置の開発を課題とするためには、‘製品’という視点でみた目的、仕様を明確に示せることが必須となる。本装置の製造対象がコイルばねであること

から、その仕様は要目表より明確となり、本装置の目的、仕様も明確となっている。

- (3) 一貫性ある機械設計の考え方と方法に基づき諸条件の決定がなされている⁷⁾。

本機は設計過程において、一貫性ある機械設計の考え方と方法に基づき、機能、機構、寸法の決定がなされている。これらの設計プロセスを意識づけることは、特に設計経験の乏しい学生や新入社員に対して必要であり、一連のプロセスを踏襲していくことで、広く設計手法を学ぶ課題としての効果が期待できる。

- (4) 製造装置の設計・製作だけでなく、製造対象の設計・製作に関連した知識を学べる。さらに、製造対象の出来具合から、だれもが納得する形で装置の評価を行える。

製造装置の評価は、その目的から“製造対象が仕様通りに製作されている”という、だれもが納得する明確な評価基準が存在する。さらに、それを実現するためには、製造対象の設計・製作に関して幅広い知識が要求される。

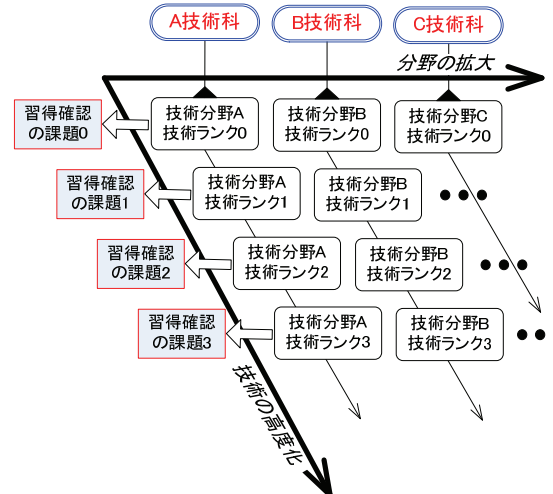
- (5) 本装置は、旧来から機械工学を学ぶ上で有用な課題と認められている“ばね”を製造対象としている⁸⁾。

ばねが機械工学を学ぶ上で有用な課題となる論拠として、第一に、ばねは機械として求められる重要な性質や機能を実現する機械要素である。第二に、フックの法則、単振動など力学で重要な諸法則を具体的に体現する機械要素である。よって、ばねを取り扱う作業の繰り返し、物理的センスを身に付けるよい訓練機会になりうる。第三に、ばね設計の基礎理論は材料力学であり、単純なはり、曲げ、ねじり、あるいはその組み合わせとして格好の教材となりうる。第四に、ばねは製造するうえでも切断・成形、熱処理、表面処理など、製品製造にかかわる工程をすべて網羅している。

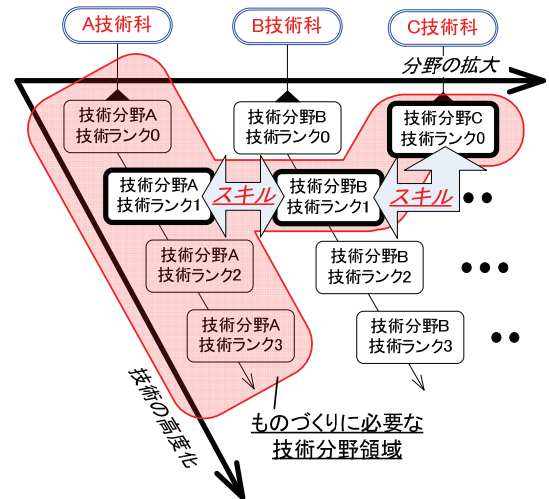
- (6) 素材として、高機能素材の Ti-Ni 系 SMA を利用。

製造対象の素材として、高機能素材として期待されている Ti-Ni 系 SMA を取り上げることで、課題に対し従来技術+ α の魅力を与えている。

図 9 に、ものづくりに必要な技術分野における技術習得の流れ図を示す。横軸は習得分野の拡大を表し、縦軸は技術の高度化を表している。図 9(a)において技術習得の流れは、段階的に技術の高度化を図る方向に進み、主に専門的な知識を高めていく専門課程の技術習得をイメージしている。図 9(b)においてその流れは分野の拡大へ広がる二次元的な広がりとなり、実際には製品づくりを行う過程で周辺知識の結合と統合を繰り返し経験していく、主に総合的なものづくりに必要な技術を高めていく応用課程の技術習得をイメージしている。本課題は(1)~(6)の考察から、分野の拡大、及び技術の高度化に対して長い



(a) 専門課程における技術修得の流れ



(b) 応用課程における技術習得の流れ

図 9 ものづくり分野における技術習得の流れ

流れを見出すことができる、すなわち高度専門課程の訓練教材、在職者訓練教材、あるいは共同研究のテーマを考えるベース素材として適応は可能であり、展開が大いに期待できる。具体的には専門課程における総合製作実習 (180H)、応用課程の標準課題 (180H) および、それらを習得する前段階として、機械設計製図、材料力学、要素設計、シーケンス、油空圧、機械制御等を一連の流れで実施するための統一課題としての利用が考えられる。あわせて(6)の考察から、入校者募集における工学的興味・啓発を狙った利用として、H20 年度に近畿職業能力開発大学校で開催した応用課程入校者募集説明会の体験授業において教材として利用している。

8. おわりに

著者らは、曲がり穴加工用マイクロロボットの開発を目指しており、その主要部品となる SMA 製コイルばねは、寸法解は複数存在し多様な形状を要求される。しか

しながら、市販品から仕様を満足するものを見出すことは極めて難しく、これらの問題を解決するために独自の小型旋盤式コイルリングマシンの開発を行い、それを利用した SMA 製コイルばねの製作および検証を行った。さらに、教材としての展開を考察し、以下の結果を得た。

- (1) 構造を小型化、簡素化した独自の小型旋盤式コイルリングマシンを開発し、SMA製コイルばねの寸法形状、および変態温度、ばね定数などがある程度の範囲で自ら調整できる製作環境を構築した。
- (2) 本装置の製作は、一貫した設計の流れの下、多くの周辺技術の体系的利用があったこと、設計・製図の演習として取り上げるばねを扱っていること、機能性素材であるSMAを扱っていることから高度専門課程の訓練課題、在職者訓練教材、共同研究のテーマ素材としての展開が大いに期待できる。

参考文献

1. 北 正彦、石田 徹、寺本孝司、竹内芳美：精密工学会誌、Vol. 75、 No.11 pp. 1355 (2009)
2. 舟久保熙康、大塚和弘、清水譲一、鈴木雄一、

関口行雄、唯木次男、本間敏夫、宮崎修一：形状記憶合金、産業図書、pp. 145-155

3. ばね技術研究会編、第3版ばね、(1982)、丸善、pp. 464-469、pp. 476-488
4. 宮崎修一、渋谷壽一、佐久間 俊雄：形状記憶合金の応用展開、(2001)、(株)シーエムシー出版、pp. 171-176
5. 中沢 一、長屋二郎、加藤 博：最新機械工学講座材料力学、(1973)、産業図書(株)
6. <http://homepage2.nifty.com/kasayan/basic/graphic2.htm>
7. 実際の設計研究会：続・実際の設計、(1992)、(株)日刊工業新聞社
8. ばね技術研究会編、第3版ばね、(1982)、丸善、pp. 1-11

(原稿受付 2014/01/15、再受付 2014/04/14)

*北 正彦、博士 (工学)

東海職業能力開発大学校、〒501-0502 岐阜県揖斐郡大野町古川 1-2 email:Kita.Masahiko@jeed.or.jp

Masahiko Kita、Tokai Polytechnic College、1-2 Furukawa、Oono-Cho、Ibi、Gifu 501-0502

*塩田 泰仁、工学博士

職業能力開発大学校名誉教授