

高温超伝導コイル巻線試作機の開発状況

○田上 裕之^{A)}、野口 博基^{A)}、森内 貞智^{A)}、尾花 哲浩^{B),C)}

^{A)} 核融合科学研究所 技術部、^{B)} 核融合科学研究所 研究部、^{C)} 総合研究大学院大学

1. 概要

核融合科学研究所の超伝導マグネット研究棟では、高温超伝導 (HTS) 線材を用いた磁場コイルの研究開発を行っている。本研究開発を効率的に進めるため、棟内にて HTS コイルの試作、性能試験を一元的に実施できる体制の構築を進めている。2024 年度より HTS コイル巻線試作機の開発に着手し、テープ線材をモーター制御にて一定の張力でパンケーキ巻き出来る環境を構築したため、これまでの一連の設計活動、試運転結果に加え、技術的に苦労した点を報告する。

2. 巻線時の張力制御方法

一般的に、コイル巻線時にテープ線材を一定の張力に維持するには、ブレーキ、即ち巻き取る方向とは逆向きにトルクを与える必要がある。本制御を実現する機器として、(1)パウダクラッチ/ブレーキ、(2)モーターの2種類が考えられた。(1)は、特殊な磁性粉体を介して摩擦力をかけてトルクを伝達・制御する機器であるが、比較的高価なこと、粉体劣化による定期保守が必要なことに加え、所内での取り扱い経験も乏しいことから、(2)モーターの内、トルク特性上巻き取り、ブレーキに適したトルクモーターを選択した。

コイルをパンケーキ巻きする場合、コイル直径がターン数に応じて増加するため、一定のトルクを出

力し続ける単純なモーター制御では、張力維持は実現できない。そのため、質量計等に利用されているロードセルを用いてテープ線材の張力をモニタし、モーターのトルクをフィードバック制御することとした。

3. 巻線試作機的设计

図1に、コイル巻線試作機本体の3次元モデルを示す。2台のトルクモーター（オリエンタルモーター、Kシリーズ）にてテープ線材の巻き取り及びブレーキ、即ち逆トルク付与をそれぞれ行う。トルクモーターの仕様決定にあたり、巻き終わり時のコイル直径を100mm、質量350g、巻き送り速度15mm/s、巻線張力3Nとした。各モーターは縦置きにしてコイルのボビンを水平にすることで、ボビン径の空間的な制限を低減しているが、それに伴い、ロードセルによるテープ線材の張力測定機構が複雑になる。当初、張力測定器は市販品を調達することを考えたが、最低でも10万円程度と高価かつ高性能であり、さらに今回のような水平方向のテープ巻線に適さない構造のものが大半であったため、自作するに至った。図1(A)に、張力測定器の設計モデルを示す。縦方向に設置した2台のモーターの間に張力検出用のロードセル(緑色)を片持ち状態で垂直に設置し、テープ線の張力を測定する。具体的には、水平方向に台座が移動するスライドバック(桃色)を準備し、そ

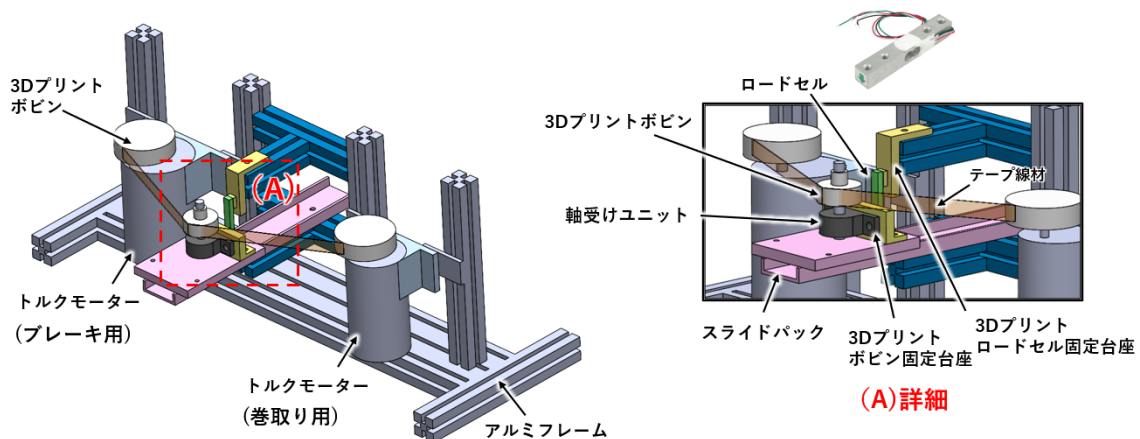


図1 コイル巻線試作機本体の3次元モデル

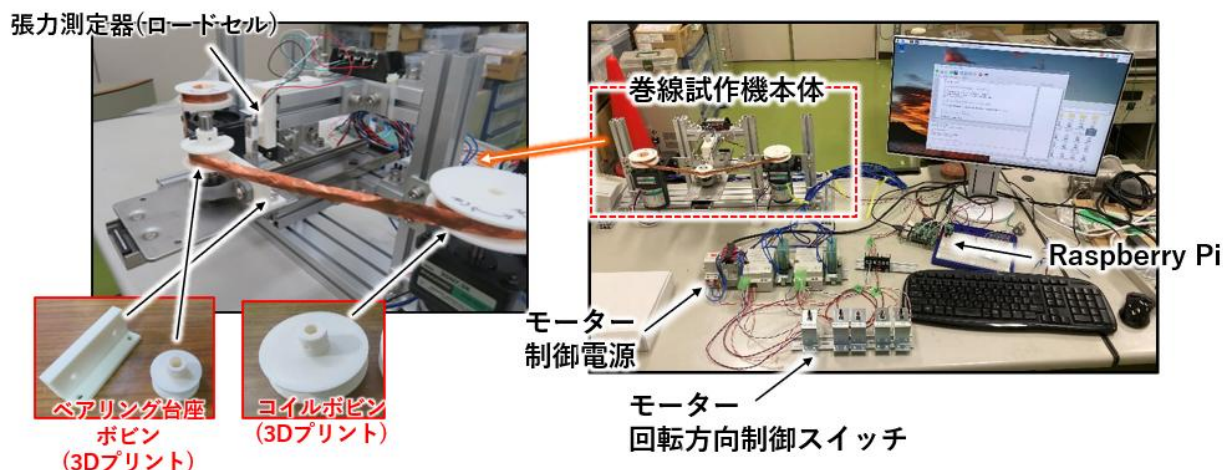


図2 コイル巻線試作機の製作結果

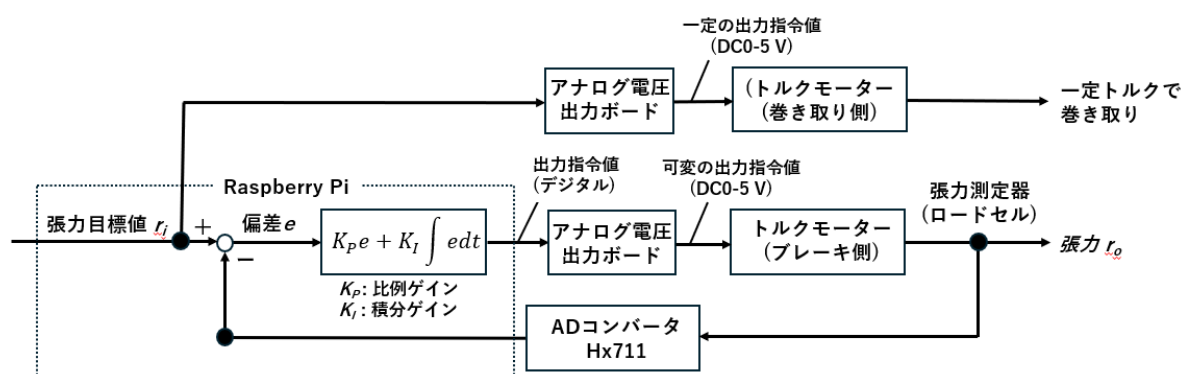


図3 テープ線の張力フィードバック制御ブロック図

の台座上にボビンを立ててテープ線材を受けとめ、台座ごとロードセルまでスライドすることで張力を伝える方式とした。

ロードセル自体も一般的な産業応用品の場合高額であるが、Raspberry Pi(ラズパイ)等のマイコン用として、500 円程度と極めて安価かつ良好な計測精度(誤差 0.5 %以下)を有するものを調達できた。当該品は別売りの AD コンバータ(Hx711)と組み合わせることで使用するが、こちらも 500 円程度で購入可能である。ラズパイ用の Hx711 のサンプル制御プログラムは、GitHub にて無償公開されている。

4. 巻線試作機の製作

図2に、製作した試作機全体の写真を示す。本機器は巻線機本体、モーター制御電源、モーター回転方向制御スイッチ、トルク制御用ラズパイからなり、全体の製作費は予算である 10 万円以内に収まった。テープ線材は、試運転用として幅 10 mm の銅テープを用いた。巻線試作機本体中央に設置された張力測定器の支持構造物やコイルのボビンは、3D プリント

ーにて安価かつ軽量に造形しており、モーターの負担を抑えている。3D プリントしたコイルのボビンとトルクモーターのシャフト間の接続は、ボビンに所定のキリ穴を設けた状態で造形した上で、イモネジでタップを立てつつシャフトまで貫通させることで達成した。

図3にテープ線の張力フィードバック制御のブロック図を示す。ラズパイに張力目標値 r_i を入力すると、ラズパイ用アナログ電圧出力ボード(AO ボード),(CPI-AO-1602LC, 2CH)より DC0-5 V 信号が 2 台のトルクモーターの制御電源に出力され、トルク制御される。運転開始時にブレーキ側のモーターと、巻き取り側のモーターそれぞれに所定の初期トルク指令値を AO ボードから入力した後、巻き取り側は一定トルク、ブレーキ側はフィードバックトルク制御を行う。フィードバック制御は、張力測定器から得られた計測データを AD コンバータを介してラズパイに取り込み、その値と張力目標値 r_i を用いて PI フィードバックプログラム計算したトルク出力指令値を、ラズパイから AO ボードに発信する形となる。

```

Shell x
>>> %Run ao_tension_rev.3 20251016_pi_contr.py

Wellcome to the Pilot Coil Winding Control System. Now initializing...
AioInit Ret = 0 正常終了
AioResetDevice Ret = 0 正常終了
AioSetAoRangeAll Ret = 0 正常終了
AIO_Output_Range = 51(0-5[V])
CH.No. 0:tension contr, 1:winding speed contr.
Winding speed voltage as CH1(V)? (0.1-2.0 V ): 0.8 ← 巻き取り側初期トルク指令電圧値(V)
Initial tension contrl voltage as CH0(V)? (0.1-2.0 V ): 0.8 ← ブレーキ側初期トルク指令電圧値(V)
Tension set value? (N) You can input between 0-5 N : 3 ← 目標張力値(3N)
Coil winding time? (s) You can input between 0-100 s : 10 ← 巻線時間(s)
/home/pi/contec/caio/config/hx711.py:17: RuntimeWarning: This channel is already in use, conti
nuing anyway. Use GPIO.setwarnings(False) to disable warnings.
  GPIO.setup(self.PD_SCK, GPIO.OUT)
Hx711 initializing...Tare done! Add weight now...
If you want to quit control, please input (q)

tension=-0.178N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.91288

tension=-3.691N ← 巻線開始1秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7507724955677987

tension=-4.017N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7059615142440796

tension=-3.537N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.708381853106022

tension=-3.233N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7132633723497391

tension=-3.233N ← 巻線開始5秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7059647799348832

```

図 4 試運転時の PI フィードバック制御画面

5. 試運転結果

図 4 に、ラズパイの PI フィードバック制御画面を示す。入力パラメータは、1)巻き取り側とブレーキ側のトルクモーターの初期トルク指令電圧値、2)目標張力値(N)、巻き線時間(s)である。試運転の結果、巻線動作自体は良好で、目標張力 3 N に対して 3.2 N 程度に制御することができたが、本制御のための適切な初期トルク指令電圧値や PI フィードバック制御の比例ゲイン K_P 、積分ゲイン K_I を見出すことに予想以上に苦労することが判明した。本パラメータスタディを進める上での留意点を以下に示す。

- A) フィードバックの応答性を高めすぎると、2 台のモータートルク同士の力関係が崩れ、巻線が逆回転する。
- B) 巻線終了時にトルクモーターの回転速度が速いと、停止指令を与えても慣性力でしばらくモーターが回転し、テープの張力が緩む。
- C) 張力目標値に応じて初期トルク指令値、比例ゲイン、積分ゲインを変更する必要がある。

留意点 A)については、トルクモーター同士のトルク指令値の差分が一定数以下にならないよう制限を設ける、B)については、巻き終わり時に巻き取り側のモーターのトルクを徐々に下げ、減速するプログラムを組み込むことで対応予定である。C)については、今後も様々な設定パラメータで体系的な調査を行う。

6. まとめと今後の開発計画

HTS テープ線材によるコイル巻線試作機の製作を



図 5 3D プリントした HTS 導体ボビンとトルクモーター間の接続治具

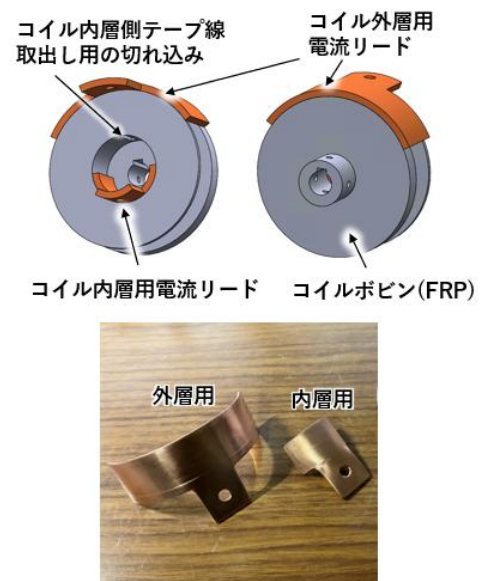


図 6 HTS コイルボビン用電流リードの製作結果

通して、トルクモーター制御、張力計測、張力フィードバック制御等、巻線制御に必要な要素開発を安価かつ着実に進めることができた。今後は、3 節で記述した留意点に対応しつつ、HTS テープ線を用いた試作機による実際のコイル巻線、通電試験を行う予定である。3 節で述べた試運転では、一度銅テープ線材を 3D プリントしたコイルボビンに手動で巻き取った上で巻線を行ったが、HTS テープ線材では納品されたボビンを、図 5 のようにそのまま別途 3D 造形する接続治具を介してトルクモーターと連結、巻線する。当該接続治具は、HTS テープ線ボビンに設けられたキー溝と、接続治具のキーが噛み合わせることでモーターのトルクがボビンに伝わって回転する仕組みとなっている。巻取り側のボビンは液体窒素環境にも耐えられる素材として FRP を機械加工にて製作し、別途製作した銅の電流リードを接着剤にて取り付ける予定である。本ボビンは、図 6 で示すようにコイルの内層側のテープ端を外部に取り出すために、ボビンの表面に長方形の切れ込みを入れ、内層用電流リードと接続できるようにした。現在、これらの部品の製作が完了し、巻線試作機への組み込みを進めている。この HTS コイル製作を経て得られた知見を実機の巻線機製作時に反映予定である。