

自動巻線機によるコイル製造工程の不良発生メカニズム調査 第二報

富田 洋文* 岡田 真* 青木 邦知*

1. はじめに

有限会社旭電機製作所では、月間約 400 個のコイルを生産している。図 1 に示すように、コイルは自動巻線機を用いて、銅線を芯材に巻き付けて製造される。

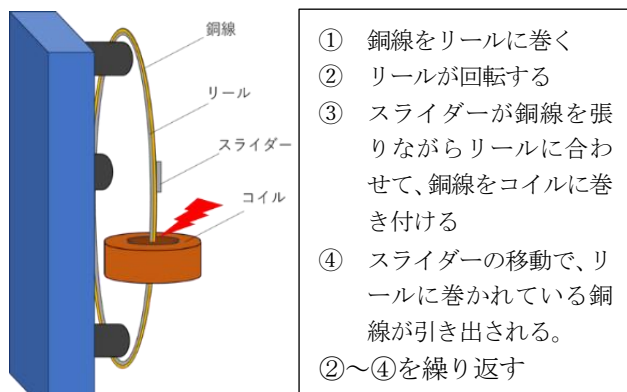


図1 自動巻線機によるコイルの巻線の手順

その製造過程において、コイル製品に不良が不定期に連続して発生する事象が確認された。

作業者は、コイルとスライダーとの接触を回避するよう、通常、適宜調整を行っているが、巻数の増加に伴い、両者間のクリアランスが縮小するので、コイルとスライダーの接触が発生しやすくなる。このため、作業者が認識しない状態で、スライダーと巻きつけた銅線が接触したと考えられる。その原因を究明するため、当センターに相談があり、技術的支援を実施した。

令和6年度の共同研究では、接触を検知するセンサーの設置位置、サンプリング周波数の仕様決定、マイクロスコブを用いた接触痕の観察を実施した¹⁾。その結果、加速度センサーをコイルの支柱部に取り付け、サンプリング周波数を 1.0 kHz 以上にすれば、接触検知が可能であることが分かった。また、その接触時の度合に応じた接触痕の特徴を捉えることができたので、接触度合の大きさが異常品発生に関与している可能性があるかと推察した。

しかし、この共同研究で用いた機材は高価なため、有限会社旭電機製作所での導入が難しく、自社内での検証が困難であった。また、同機材で接触の振動データを取得した後、手動で波形を確認する必要があった。この手間がかかるため、振動データと紐づいたコイル試料の製造数が少なくなり、効率よく不良発生の原因を究明することが難しかった。

2. 目的

令和7年度の共同研究では、高価格機材に依存しない振動測定装置を新たに開発した。また、接触検出および振動データ収集の自動化を図り、検証の効率化およびデータ取得数の増加を実現した。これにより、多

数のコイル試料を確保し、接触信号の解析値とコイルの電気的性能との比較解析を通して、不良原因の究明をおこなった。以下に本研究の内容を示す。

- ・「振動取得用加速度センサーの選定」と「専用ケースの製作」
- ・「自動接触検知」および「接触前後の振動データ収集」を自動化するシステム構築
- ・「接触信号の解析値」と「コイルの電気的性能評価値」との相関性の調査

3. 振動取得用加速度センサーの選定およびハードウェア装置の製作

3.1 振動取得用加速度センサーの選定

本研究では、接触に伴う振動を検出するため、加速度センサーを用いた計測方式を採用した。

センサーの選定には、以下の点に留意した。

- ・1.0 kHz 以上のサンプリング周波数を有する
- ・組み込み用の計測機へ直接接続可能であること
- ・コスト面を考慮したセンサー

その結果、Mini IMU (MPU6886)、ADXL355、および ICM-42688-P の3種類を候補とした。これらのセンサーの仕様を表1に示す。

表1 候補となる3種類の加速度センサーの仕様一覧

項目	Mini IMU (MPU6886)	ADXL355	ICM-42688-P
通信方式	SPI / I ² C	SPI / I ² C	SPI / I ² C
レンジ	±2 G ~ ±16 G	±2 G ~ ±8 G	±2 G ~ ±16 G
最大サンプリングレート	約 1.6 kHz (有効帯域 ≤800 Hz)	4 kHz (有効帯域 ≤1.5kHz)	32 kHz (有効帯域 ≤8 kHz)
ノイズ密度	約 400 μg/√Hz	約 25 μg/√Hz	約 60 μg/√Hz
温度ドリフト	中程度	小さい	小さい
用途	簡易振動測定	精密振動・FFT解析	ドローン・産業機器
価格帯(*)	約 ¥1,000	約 ¥9,000 ~ ¥11,000	約 ¥1,000
ケース	有	無	無

(*)令和8年2月時点

今回の選定にあたり、1)測定レンジ、2)分解能、3)ノイズ密度、4)最大サンプリングレート、5)通信方式、6)温度特性、7)費用コスト、の7つの観点から総合的に評価した。その結果、本共同研究では、ICM-42688-Pを採用した。本センサーは、必要とされる 1.0 kHz 以上の帯域を十分に満たしつつ、低コストで実装可能であることから、本共同研究の目的に最も適していると判断した。

*IT・マテリアルグループ

3.2 加速度センサー用基板の作製

本研究で使用する加速度センサー ICM-42688-P の基板を作製するにあたり、計測機(Raspberry Pi 4)との通信方式を検討した。本研究で構築するシステムは、サンプリング周波数 1.0 kHz 以上でデータを収集し、リアルタイムな接触検知を行うので、通信速度およびデータ安定性を考慮し、SPI 通信を採用した。

SPI 通信では、SCLK、MOSI、MISO、CS に加え、電源(VDD) および GND を含む計 6 本の配線を用いてセンサーと計測機を接続する。ICM-42688-P 単体では、直接計測機へ接続することはできない。そのため、ICM-42688-P から必要な信号線を引き出すための専用基板を作製した。配線概要図を図 2 に、作製した基板の外観を図 3 に示す。

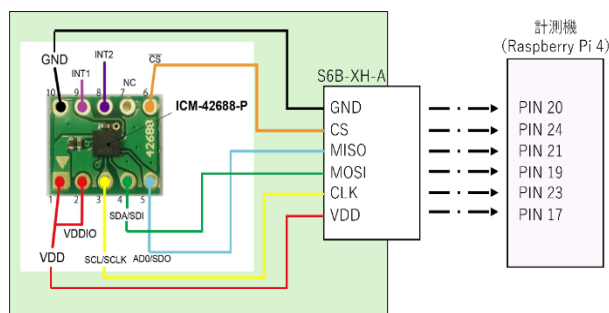


図 2 加速度センサー ICM-42688-P と計測機の配線

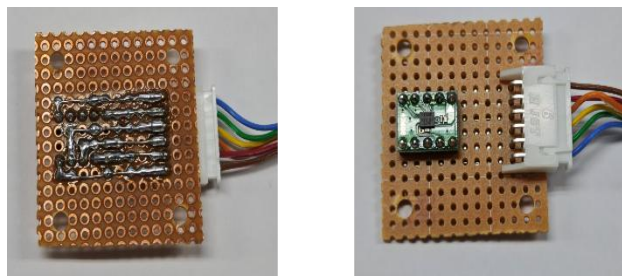


図 3 作製した基板と配線の様子

3.3 加速度センサー用ケースの設計および製作

次に、作製したセンサー基板を保護し、自動巻線機に設置するため、専用ケースを設計して製作した。

専用ケースの設計方針を、以下に示す。

- ① サンプリング周波数 1.0 kHz 以上の振動計測に対応可能な高剛性構造とすること…高剛性
- ② 測定対象の振動伝達を阻害しないよう、軽量構造とすること…軽量化

これらの要件を実現するケースの開発フローを、図 4 に示す。なお、ハンマリング試験の内容は本報告書では省略する。

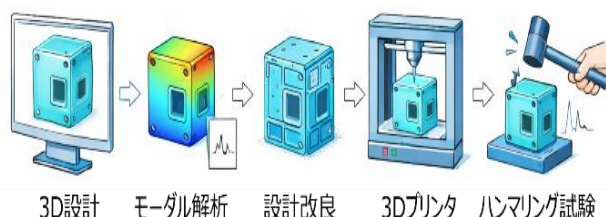


図 4 ケースの開発フロー

本研究で製作するケースは、SolidWorks を用いて開

発した。搭載する加速度センサー基板の図面を基に、寸法および設置構造を決定した。初期試作設計における外形図および断面図を、図 5 に示す。

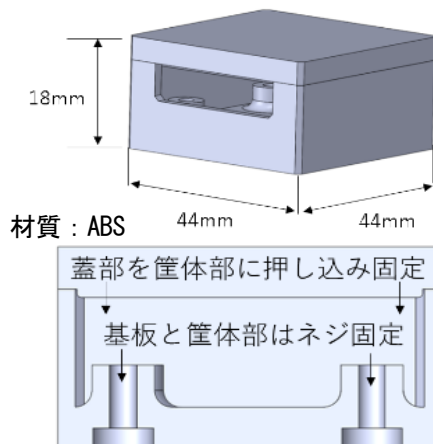


図 5 ケース外形図と断面図

初期試作では、装着作業の簡便性を考慮し、フタ部と筐体部の締結部について、押し込みによる嵌合構造を採用した。嵌合部は、接触面積を大きく確保できるオスメス形状とし、組付け時の位置決め精度および保持力の向上を図った。また、基板と筐体の固定については、振動伝達特性および剛性を確保する観点から、ネジ固定方式を採用した。なお、重量増加を抑制するため、金属ネジではなく樹脂製ネジを使用した。これにより、軽量性を維持しつつ、必要な固定強度を確保する構造とした。

設計したケースの振動特性を把握するため、3D-CAE を用いたモーダル解析を実施した。モーダル解析では、構造物の固有振動数および各固定モードにおける変形形状を求めることができる。無拘束条件における固有振動解析の結果を図 6 に示す。

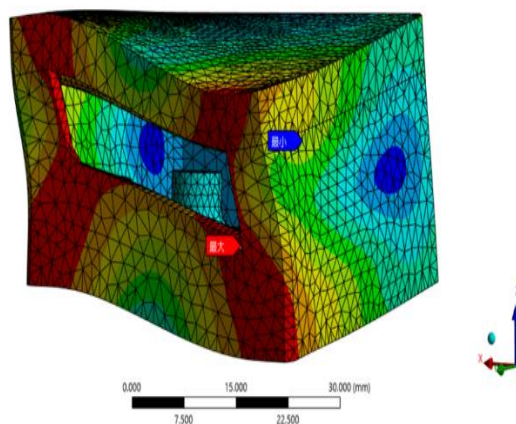


図 6 モーダル解析結果

解析の結果、固有振動数は約 3.0 kHz であった。また、このときの装置の重量は約 30 g であり、令和 6 年度の共同研究で使用していたセンサーと比較して重量が 30 倍程度となった。このため、ケースを小型かつ軽量の構造とする改良が必要となった。

図 7 に再設計したケースを示す。

- ・内部にリブ構造を追加して断面係数を向上させ、曲

げ剛性の増大を図った。

- ・固有振動特性に影響しない部位は、板厚を低減し、全体の軽量化を図った。
- ・当初品は筐体部と基板のみで剛性を確保するようにしていたが、再設計では蓋部も構造部材として機能させる構成へ変更し、全体剛性の向上を図った。

この結果、固有振動数は約 3.5 kHz に向上し、かつ約 10 g の軽量化を可能とした。この設計内容をもとに、3D プリンタで製作したケースを図 8 に示す。

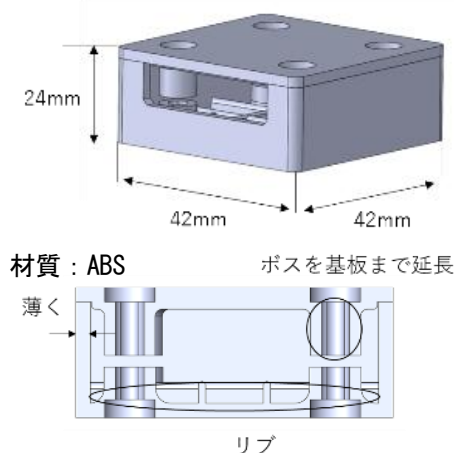


図 7 フィードバック後のケース



図 8 実際に作製したケース

4. リアルタイム接触検知と自動振動データ収集のソフトウェア構築

本研究で作製した装置を用い、自動接触検知システムに必要なソフトウェアを構築した。自動巻線機のスライダがコイルに接触した際に、リアルタイムで接触を検知するとともに、接触前後の約 10 秒間(30,000 サンプル)の振動データを自動収集することを目的とした。

本システムは、Z 軸方向の加速度をリアルタイムで監視し、設定した閾値を超過した場合に「接触」と判定する。その際、接触時を基準として前後一定区間の振動データを保存する。これにより、振動データの解析を通じて、接触時や接触前後の波形特性の解析を可能とした。振動データは、本システムで必要とされる 1.0 kHz を十分に上回る 2.8 kHz のサンプリング周波数で取得した。

本ソフトウェアの仕様を以下に示す。

- ・SPI クロック周波数：8 MHz
- ・サンプリング周波数：2.8kHz

- ・加速度レンジ：±16 G
- ・接触トリガ条件：Z 軸加速度の絶対値が N[G] 以上
(トリガの閾値は、後述で決定)
- ・保存データ数：30,000 サンプル
(接触前後合計約 10.7 秒分)
 - トリガ前データ：15,000 サンプル
 - トリガ後データ：15,000 サンプル
- ・出力形式：CSV ファイル

5. 自動接触検知システムの設置および検知閾値調査

実際のコイル製造工程において、接触検知および振動データの自動収集が可能であるか、本研究で開発した自動接触検知システムを検証した。図 9 に製作した装置を自動巻線機に設置した様子を示す。

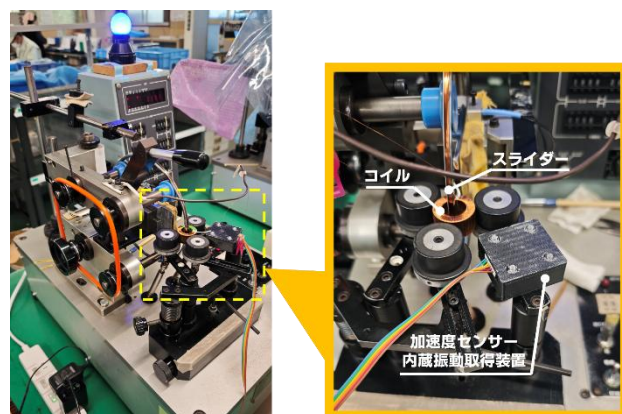


図 9 自動巻線機と設置したセンサーの配置

製作した装置の設置位置は、令和 6 年度の共同研究結果を踏まえ、コイルを支持する支柱部に取り付けた。本実験で、有限会社旭電機製作所の作業員に通常のコイル製造作業を実施してもらい、その過程でスライダを意図的にコイルへ接触させた。

振動データの収集の前に、自動巻線機のスライダとコイルとの接触発生を検知する閾値の設定が必要となる。図 10 に接触時の振動波形を示す。この波形はコイル製造中にスライダと接触した際に取得した振動(加速度)データであり、図中の 15,000 サンプル付近で接触があった。接触前の波形は、最大振幅値が 0.6 G 程度であるが、接触時には 1.0 G を超える振幅が確認された。このことから本研究では、接触検知における振動(加速度)の閾値を 1.0 G に設定した。

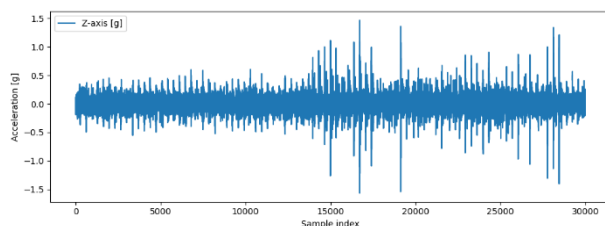


図 10 接触時の振動波形の様子

また、接触前後の波形データを解析することで、各波形の最大振幅値や実効値、そして波形中のピークの突出度を表すクレストファクタといった 3 つの指標を

算出することが可能となった。これらの指標と製造されたコイル試料の電気的性能を比較することで、自動巻線機のスライダーとコイルとの接触が不良発生の原因であるかを調査できる。

6. 収集した振動データの解析値とコイル試料の電気的性能評価との比較解析結果

本研究で構築した自動接触検知システムを用いて、合計 26 個のコイル試料の接触時の振動データを収集した。表 2 に 26 個のうち先頭 5 個の収集した振動データの解析結果を示す。実験の結果、すべてのサンプルにおいて接触を検知できることを確認した。

また、有限会社旭電機製作所の電気的性能評価装置を用いて、コイル試料の性能評価を実施した。振動データの収集実験後、各コイル試料を最終工程まで製造し、評価装置により抵抗値、3 次電流、位相および電流誤差を測定した。評価結果を表 3 に示す。

表 2 接触実験の波形解析結果

試料 No.	最大振幅値 (peak)	実効値 (RMS)	クレストファクタ
01	1.20	0.124	9.64
02	1.07	0.130	8.27
03	1.51	0.118	12.7
04	1.94	0.127	15.2
05	2.49	0.133	18.7

表 3 コイル性能評価の結果

試料	抵抗値	3 次電流	位相	電流誤差 (%)
	95 Ω	0.0025A	180.0deg	
01	104.74	0.00248	179.6	-0.676
02	104.06	0.00247	179.2	-0.992
03	104.93	0.00248	179.11	-0.896
04	103.54	0.00248	179.29	-0.68
05	異常			

評価の結果、試料 05 のみが「異常」と判定され、その他の試料はすべて「正常」であった。試料 05 のコイルを詳細に観察したところ、スライダーが接触した箇所に断線が確認された。表 2 のように、試料 05 の最大振幅値とクレストファクタが非常に高く、5 つ試料の中で最大であった。

以上の結果から、最大振幅値やクレストファクタが極めて高い場合には、断線を引き起こし、電気的性能に異常を生じさせる可能性があることが確認された。

また、振動データの解析値とコイルの電気的性能評価値との関係について、正常と判定された試料を対象に相関係数を算出した。その結果を表 4 に示す。

表 4 接触振動評価とコイル性能評価の相関結果

		電気的性能		
		抵抗値	3 次電流	位相
振動解析	最大振幅値	-0.227	-0.007	-0.496
	実効値	-0.160	-0.278	0.079
	クレストファクタ	-0.222	0.070	-0.575

表 4 の結果より、抵抗値とすべての振動解析値との間には弱い負の相関が確認されたものの、その関係は限定的であった。また、電流値との間には実効値を除いて無相関であった。一方、位相については、最大振幅値およびクレストファクタとの間に中程度の負の相関が確認され、特にクレストファクタとの相関係数は -0.575 と、本実験において最も大きな相関係数を示した。

この結果より、コイル製造時におけるスライダーの単発な接触では、抵抗値および電流値への影響は小さいと考えられる。一方で、クレストファクタが強くなるにつれて、インピーダンス特性を示す位相に影響を及ぼす可能性が示唆されたが、その変化は正常範囲内であり、異常判定となる水準ではないと考えられる。

以上より、本研究で構築した自動接触検知システムによる調査結果として、最大振幅値やクレストファクタの値が高い場合は、断線といった異常を発生させる可能性がある。一方、軽微な接触に関しては電気的性能に影響を及ぼすものではないことが確認された。

7. まとめと今後の課題

本研究では、自動巻線機によるコイル製造工程において、コイルとスライダーの接触をリアルタイムで検知し、その前後の振動データを自動収集する自動接触検知システムを構築した。

本システムを用いて、コイル製造における接触検知と振動データ収集を実施し、コイル試料の電気的特性評価と比較した。その結果、接触度合が非常に強い場合には、異常品が発生する可能性が確認された。一方、ある程度の強い接触であっても、単発の接触であれば、ただちにコイルの電気的性能に大きな影響を及ぼさないことが示された。

今後、複数回の断続的な接触がコイル性能にどのように影響を及ぼすのか、また今回開発したシステムが断線以外の潜在的な欠陥を検出する可能性について、調査をしていく予定である

8. 参考文献

- 岡田真、富田洋文、青木邦知、自動巻線機によるコイル製造工程の不良発生メカニズム調査、茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告 第 53 号、pp. 27-28、2025