

巻線コイルに圧縮成形を適用した低渦電流損失 地上コイルの開発

鈴木 正夫* 高橋 紀之*
饗庭 雅之** 太田 聡*

Development of Ground Coils with Low Eddy Current Loss by Applying the Compression Molding Method after the Coil Winding

Masao SUZUKI Noriyuki TAKAHASHI
Masayuki AIBA Satoru OTA

In a magnetically levitated transportation (MAGLEV) system, stable performance and reduced cost are essential requirements for the ground coil development. On the other hand, because the magnetic field changes when the superconducting magnet passes by, an eddy current will be generated in the conductor of the ground coil and will result in energy loss. In the study presented in this paper, we examined a low eddy current loss ground coil using the round stranded wire intended to reduce the running costs of the system. Consequently, we confirmed that it was able to improve the size accuracy of the winding coil and uneven thickness of molded resin by applying a compression molding after winding.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，渦電流損失，圧縮成形

1. はじめに

磁気浮上式鉄道において、軌道の全線に亘って必要となる地上コイルは、膨大な数が対象となる。従って、地上コイルの開発においては、安定した性能に加えコスト低減が不可欠な命題となっている。また、巻線コイル導体には、車上の超電導磁石通過時の変動磁界により渦電流が生じ損失となる。これは車両走行時の磁気抗力となるばかりでなく、コイル導体の不要な発熱を招くため、システムのランニングコスト低減や地上コイルの温度上昇抑制の観点から、渦電流損失の低減化は極めて重要である。一方、地上コイル導体に生ずる渦電流を低減させるには、素線断面を細分割化する方法が最も一般的であり、巻線コイルの剛性や導体の占積率、モールド樹脂の含浸性等を総合的に考慮し、適切かつ効果的な分割を選択する必要がある。また、分割素線間（パラ間）の環流による損失を無くすため、分割素線を一定ピッチで転位させ、超電導磁石からの鎖交磁束を均一化する必要がある。ところが、これらの条件を巻線用線材に求めつつ、巻線コイルの寸法精度を維持するのは容易でなく、冒頭に

述べた地上コイルのコスト低減とは相反する結果を招く可能性がある。

本開発では、PLG (Combined Propulsion, Levitation and Guidance System) と呼ばれる推進・浮上・案内機能兼用型地上コイル（以下、PLGコイルと称す）を対象に巻線コイルの寸法精度を向上させつつ、渦電流損失を低減させる手法を検討した。また、定置試験により各種線材サンプルの渦電流損失に関する定量比較を行い、巻線用線材として円形撚り線を選定し、低渦電流損失地上コイルを試作した。試作に際し、巻線コイルに圧縮成形を適用することにより、層間絶縁強度を低下させることなく、巻線コイルやモールド偏肉の寸法精度が改善できる見通しを得た。

2. 地上コイルの構造と磁気抗力

地上コイルは在来方式鉄道には無く、超電導磁気浮上システムにおいて新たに開発・導入されたものであり、車両の一部でありながら電力設備と構造物の両面的性格を持ち、従来の産業分野には例を見ない工業製品である。また、コイルの構造面においても、車上の超電導磁石との間に働く繰り返し電磁力を安定的に保持するために、空芯の巻線コイルを樹脂で一体モールドする必要があるなど、地上コイル特有の開発要素を有している¹⁾。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁路技術研究室

** 浮上式鉄道技術研究部 電磁路技術研究室 (現 総務部 広報課)

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

2.1 コイル導体

地上コイルの巻線用導体には、コスト、重量、モールド樹脂の線膨張係数に加え、巻線コイルの寸法精度やその作業性を考慮し、一般的に電気用アルミニウム平角線が用いられる。また、導体断面積については超電導磁石との電磁力特性を考慮し、列車運行に基づくコイルへの通電条件に対し、温度上昇値がモールド材料の許容範囲内となる最小値が選定される。

2.2 渦電流損失

地上コイルに発生する磁気抗力は、浮上走行時の定常的な電磁力を伴う磁気抗力と走行に無効な磁気抗力に大別できる。前者は、車両に電磁誘導に基づく浮上力や案内力を発生させるループ電流によるものに対し、後者は導体素線に生ずる渦電流や分割した素線間に流れる環流による磁気抗力である。ここでは、地上コイルが一定ピッチで連続的に配置されている場合に、地上コイル導体に生ずる渦電流により車両が受ける平均磁気抗力について検討する²⁾。ここで、地上コイル1個に働く力を $f(t)$ とする。地上コイルの敷設ピッチ分だけ車両が走行するのに要する時間を Δt とすると、時刻 T にて車両が受ける磁気抗力の瞬時値 $F(T)$ は

$$F(T) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t+n\Delta t) \quad (1)$$

ここで、 n ：地上コイルの番号

となるため、 Δt 時間の力の平均値 F_a は次のようになる。

$$F_a = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} F(T) dt \quad (2)$$

式(1)を式(2)に代入すると

$$F_a = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t+n\Delta t) dt \quad (3)$$

ここで、 $\int_t^{t+\Delta t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t+n\Delta t) dt$ は

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt \quad \text{である。}$$

よって、(3)式は

$$F_a = \frac{1}{\Delta t} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt \quad (4)$$

となり、地上コイルに働く磁気抗力を時間積分することにより、車両が受ける平均的な磁気抗力を求めることができる。

3. 渦電流損失の定量比較

低渦電流損失地上コイルの開発に先立ち、素線に生ずる渦電流損失を定量的に評価し、線材の選定を行った。

3.1 渦電流損失評価試験装置の開発

これまで、地上コイルや締結部材（金属）等に生ずる渦電流損失を定量的に評価するためには、実験線における車両走行により供試体に働く磁気抗力を実測せざるを得なかった。ところが、現地試験では試験が大がかりになるばかりでなく測定精度においても課題があり、渦電流損失を定置で評価できる試験装置が望まれていた。そこで、コイル線材の選定に先立ち、線材サンプルの渦電流損失を定量的に評価が可能な定置試験方法を検討した。超電導磁石が高速通過する際の変動磁場を模擬する手法を種々検討した結果、線材サンプルを固定した円板を強磁場中にて高速回転させる機構を有する渦電流損失評価試験装置を開発した（図1参照）。本装置では、渦電流損失の発生原理が実走行と同様となるよう、超電導磁石を模擬した2極の電磁石と地上コイル線材との相対運動により渦電流が発生する構成とした。また、磁気抗力については、電磁石の励磁の有無により渦電流損失以外の回転抵抗がトルク計にて容易に切り分けられるよう考慮した。図2は、電磁石の磁極間中央平面（ $Z=0$ ）における励磁時（定格電流：60A）の発生磁場の分布を示す。磁極中心（ $X=0, Y=0$ ）を原点とした半径約27mmの円内で1Tを超え、55mmの円内で0.8Tを超えている。表1に、試験装置の主な仕様を示す。

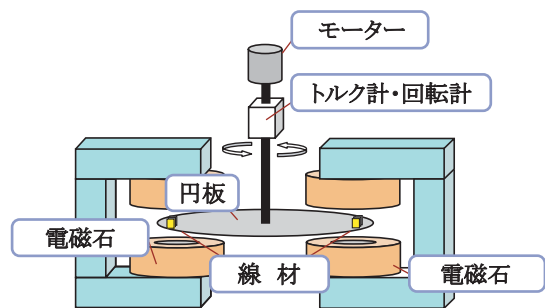


図1 渦電流損失評価試験装置構成

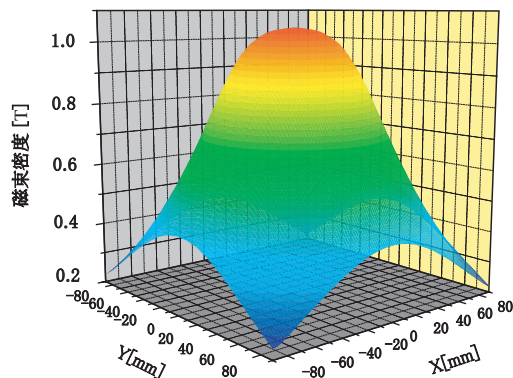


図2 磁極間中央平面における磁束密度分布

表1 渦電流損失評価試験装置仕様

電磁石の数	2
磁石中心間距離 (mm)	884
磁極ギャップ (mm)	60
最大磁束密度 (T)	1.0 (at 60A)
円板の直径 (mm)	1000
円板の材質	CFRP
供試体取付箇所数	16
最大回転数 (rpm)	3000

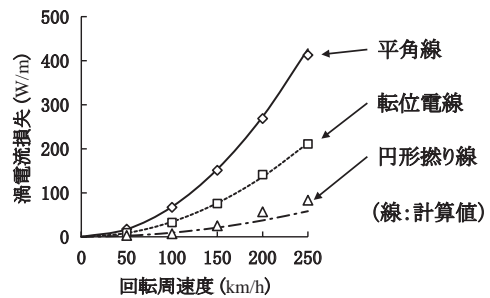


図5 渦電流損失定量比較結果

3.2 線材サンプルによる定量比較

巻線コイルに生ずる渦電流損失を抑制するためには、素線を細分割かつ転位させる必要がある。線材の選定に際し、等価断面積を有する3種類（平角線：3パラ、転位電線：15パラ、円形撚り線：19パラ）の素線サンプル（図3）を準備し、渦電流損失の定量比較を行った³⁾。試験装置へのサンプルの取付は、図4に示すように、電磁石の磁極中心を通過する回転円板の周方向（表裏両面）に22.5度ピッチで32本の試料をFRP板とFRPボルトにて挟み込む要領で締結した。また、円形撚り線以外は鎖交する磁束方向に対し断面形状が非対称であるため、線材のエッジ方向とフラット方向の2条件についても比較対象とした。なお測定は、サンプルを固定した円板を高速回転させ、円板に鎖交する直流磁場発生装置の励磁の有無による回転トルクの差分から渦電流抗力を抽出し、低減効果を確認した。試験結果から、円形撚り線では従来の3パラ平角線の約1/5程度に低減できる見通しが得られた（図5）。

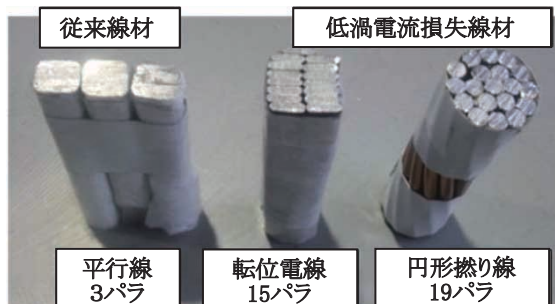


図3 渦電流損失定量比較用素線サンプル

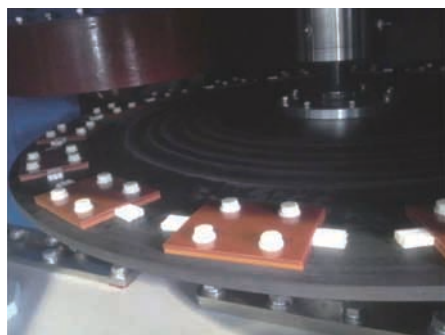


図4 素線サンプル設置状況

4. 巻線コイルへの圧縮成形の適用

浮上式鉄道用地上コイルは、車上の超電導磁石との電磁的相互作用により車両に推進、浮上、案内力を提供する重要な役割を担っている。特に推進系地上コイルにおいては、外部からの電力供給が前提となり、樹脂モールドによる空芯コイルの機械的強度確保に加え、特別高圧機器としての電気絶縁機能を担保する必要がある。そのため、樹脂モールドは地上コイルの製造において最も重要な工程となっている。また、地上コイルの渦電流損失低減策としては、導体素線の細分割化を前提に、素線分割平角線や転位電線、平角成形撚り線等の適用が検討されている⁴⁾。ところが、巻線コイルとしては、前述の通り並列導体数の増加に加え分割素線の転位が必須であることから、線材自体に撚り癖が残る、巻線コイルの寸法精度が確保し難い点が課題として残っている。これは、巻線コイルを樹脂にて一体成形した際のモールド偏肉（対地絶縁厚みの不均一）として顕在化し、対地の電気絶縁性能に影響を及ぼす結果となる。

そこで、地上コイルの渦電流損失を低減すると同時に、線材コストを極力抑制しつつ巻線コイルの寸法精度を向上させる方法として、細線化した円形撚り線にて巻線を行った後に圧縮成形を施し、所定の寸法形状にする方法を検討した。巻線コイルを断面方向から見た圧縮成形の概念を図6に示す。巻線コイルを巻枠から外すこと無く、そのまま圧縮成形用治具として流用できる点が作業効率面での特徴であり、油圧プレスにて所定の形状に圧縮成形することにより、占積率の向上や寸法精度の改善を狙った。

5. 実スケール地上コイルの開発

実スケール地上コイルの開発に先立ち、1/2スケールの巻線モデルコイルを試作し、各種試験結果から円形撚り線を用いたコイル巻線や巻線コイルへの圧縮成形が、地上コイルの製法として成立する見通しを得た⁵⁾。そこで、巻線モデルコイルの試作結果を踏まえ、実スケールの低渦電流損失地上コイルを開発した。以下に、コイル

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

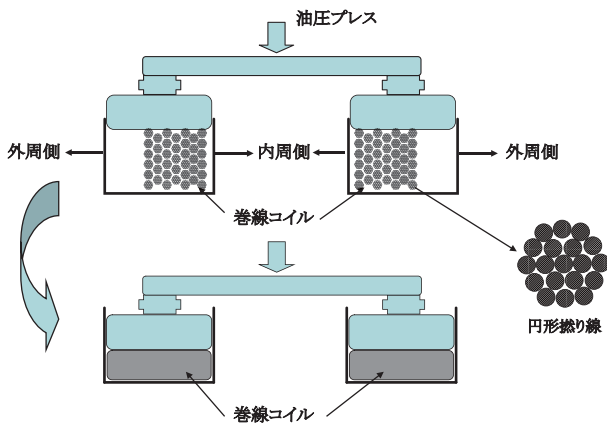


図6 巻線コイルへの圧縮成形の適用概念

の試作条件並びに、各試作過程における評価結果について概説する。

5.1 巻線および圧縮成形条件

巻線用線材には、絶縁被覆材として耐熱ホルマールを使用した円形撚り線（直径2.5mm×19本）を用い、圧縮成形後の巻線コイルが樹脂モールド前の所定の寸法となるよう巻線条件や圧縮成形条件について事前検討を行った。圧縮成形前の巻線作業においては、図7に示すように、巻始めと巻き終わりの捨て巻線を除き各層の巻数が奇数、偶数の交互となるように設計した。このように各層の巻線を俵積み状にすることにより、線材間の凹部が次の層を巻く際のガイドとなり、円形断面の線材でありながら巻線作業を容易にしているのが特徴である。本巻線方式はクレーンのワイヤー巻き取りと同様であり、将来、巻線作業を自動化する際にも優位であると考えられる。圧縮荷重については、上下単位コイルの非対称性を考慮し、上単位コイル12MN、下単位コイル14MNを標準として複数コイルの試作により仕上がり寸法と再現性を確認した。表2に巻線コイルの仕様を示し、図8に各工程の作業状況をそれぞれ示す。

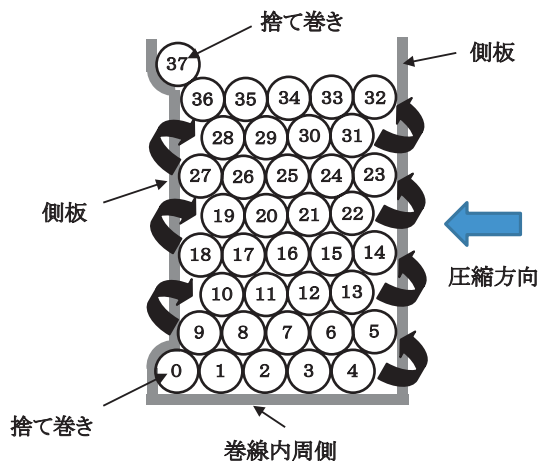


図7 巻線順序および構成

表2 実スケール巻線コイルの仕様

上コイル中心間寸法	755mm×230mm
下コイル中心間寸法	755mm×370mm
導体断面寸法	100mm×40mm
コーナー部中心曲げ半径	100mm
コイル巻数	36回

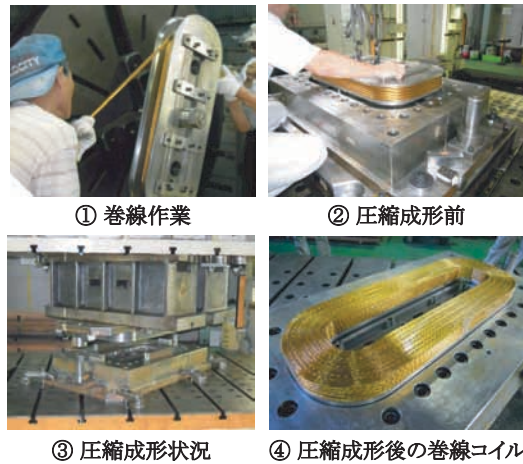


図8 圧縮成形コイル試作状況

5.2 巻線コイルの性能評価

巻線コイルの圧縮成形前後に各種試験を行い、圧縮による巻線コイルへの影響を調査した。

5.2.1 寸法精度

圧縮後の巻線コイルは、圧縮成形時の塑性変形により圧縮金型に依存した仕上がり寸法となり、圧縮を前提としない通常の巻線コイルが設計値に対し±1~2mm程度の誤差が生ずるのに対し、±0.5mm程度まで寸法精度が改善された。但し、厚さ寸法に関しては、圧縮荷重による空間内の素線密度に依存し、コイルの占積率を左右する指標となった。また、本圧縮成形コイルの試作により、当初目標としたコイル導体の占積率80%を概ね達成することができた。図9に圧縮成形前後における上単位コイルの圧縮荷重による各部寸法比率を示し、図10に同一条件にて導体断面寸法から算出した導体占積率の変化を示す。載荷荷重12MN以上で約83%を達成することができた。

5.2.2 巻線の健全性

圧縮成形による巻線コイルへのダメージを確認するため、圧縮成形前後の巻線コイルを対象に素線間の健全性調査を行った。調査は、コイル両端の撚り線（19本）の絶縁被覆を剥ぎ取り、撚り線相互間および巻線間（層間）の電気的導通を確認し、断線や短絡の有無を抽出した。その結果、圧縮条件を絞り込む初期段階の圧縮成形コイルにて、撚り線の一部に断線または短絡を生じた以外は健全であった。損傷の原因は、最外周のリード部がコイルの巻枠を兼用した側板（圧縮成形時の加圧治具）の外周溝加工部（37ターン目の捨て巻き部）のエッジにて強

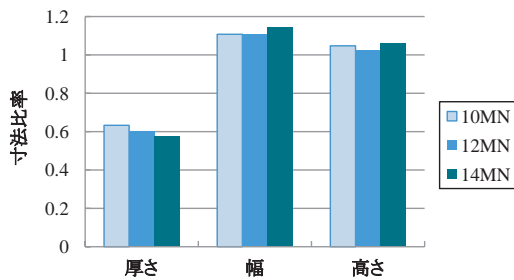


図9 圧縮前後の巻線コイル各部寸法比率

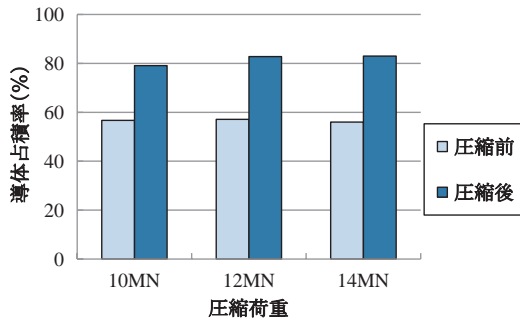


図10 圧縮前後の導体占積率

圧されたためと断定できた。その後、加圧用側板のエッジ部にR加工を施し、同様な圧縮成形を継続した巻線コイルにおいては、短絡や断線が回避できた。また、圧縮成形前後の巻線コイルにおける電気抵抗の変化は、約5%であり、安定した性能を示した。さらに、圧縮成形後の巻線コイル両端にモデルコイルの際と同様に衝撃電圧を印加し、層間絶縁破壊強度を測定した。その結果、複数コイルの平均値で上単位コイルが5.3kVp、下単位コイルが7.5kVpであった。電圧印加時の放電光や放電音から表面層で発生する気中放電と推定され、次工程の樹脂モールドにより封止可能であると判断した。

5.2.3 モールドコイルの性能評価

巻線コイルに圧縮成形を適用したモールドコイルの性能として最も着目すべき点は、推進系地上コイルとしての層間絶縁の健全性である。本評価では、モールドコイルの層間及び対地間の絶縁破壊強度を測定した後、切断による断面調査を行った。

(1) 層間絶縁破壊強度

電気学会 電気規格調査会標準規格：JEC-0202「インパルス電圧・電流試験一般」に準拠し、供試コイルの層間絶縁破壊試験を実施した。雷インパルス電圧発生器には、一般に多段式インパルス電圧発生器が使用され、本試験の等価回路を図11に示す。図中のGは放電ギャップ、 R_s は発生器の各段に挿入された制動抵抗の総和、Cは各段コンデンサの直列総合等価静電容量、 R_0 は放電抵抗、Lは波頭調整用インダクタンスを示す。本試験回路にて、一端接地でコイル端子間に雷インパルス電圧e(負極性)を波高値20kVから50kVまでは5kV刻み、波高値50kV以上は10kV刻みで各3回印加し、絶縁破壊値を

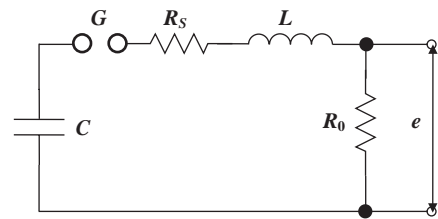


図11 層間絶縁強度試験回路

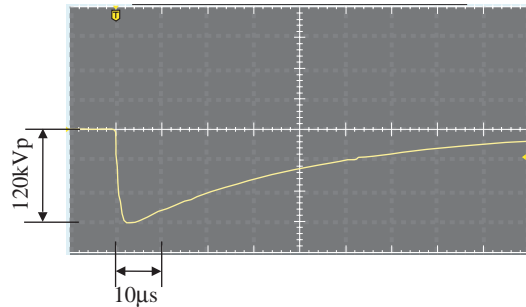


図12 衝撃電圧印加時の健全波形例

測定した。一方、JEC-0202で定められた雷インパルス電圧波形は、波高値の30%と90%波高点を結ぶ直線が時間軸と交わる点を原点とし、原点から直線上で100%波高점에到達するまでの時間を波頭長、減衰波が波高値の50%に到達するまでの時間を波尾長と呼び、それぞれ時間が規定されている。因みに、印加電圧により絶縁破壊が生じた場合は、波高値が所定の電圧に到達しないことが多く、予め供試体の定数を基に調整した波尾が変形することにより、容易に判定ができる。ここで供試コイル2体を対象とした試験の結果、耐電圧基準値(35kV)の2~3倍の破壊値(90kVp, 130kVp)を有し、層間絶縁耐力に問題のないことを確認した。絶縁破壊前の健全波形例を図12に示す。

(2) 対地絶縁破壊強度

所定の耐電圧試験に基づく健全性を確認した後、JEC-0201「交流電圧絶縁試験」の電圧上昇法に準拠し、対地絶縁破壊強度試験を実施した。供試体は層間絶縁破壊試験後の上記2体を対象に試験用ケーブルを介して導体~コイルシールド層間に商用周波交流電圧(実効値)を0kVから1kV/s程度の速さで昇圧し、絶縁破壊値を測定した。その結果、99.2kV, 122.4kVにてそれぞれ破壊した。破壊部位は両者とも上単位コイルの側壁面側で、前者がコイル外周側、後者がコイル内周側であった。公称電圧33kVの仕様で設計した本PLGコイルの短時間耐電圧基準値は、印加電圧70kVにて1分間耐えることであり、ほぼ満足できる試験結果であった。因みに、地上コイルの対地絶縁強度評価では、商用周波電圧による定速上昇法に加え、衝撃電圧である雷インパルスによる耐電圧試験を併用している。但し本評価では、絶縁破壊試験に供し得るコイル数の制約から、破壊箇所の特定が容易

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

な商用周波電圧による破壊試験を選定した。

(3) コイル断面調査

一連の評価試験終了後、供試コイルを解体し、導体部の断面観察を行った。圧縮状況については、曲線部にて巻線コイルの外周と内周に若干の粗密が認められるが、線材がほぼ均等に圧縮され、わずかな隙間にはエポキシ樹脂が充填されていることを確認した。曲線部に生じた粗密の原因は、巻線時の線材への張力により当該部の撚り線断面が変形し、直線部に比べ高密度に仕上がったためと想定される。また、モールド樹脂の肉厚に関しては、超電導磁石との電磁力特性やコイルのコストを考慮し、対地間の絶縁強度や空芯コイルとしての機械的強度が維持できる最小厚さであることが望ましい。ところが、対地間の絶縁強度は樹脂厚に依存するため、コイル断面に設計上の樹脂厚が確保されても局所的な偏肉が存在すると、絶縁上の信頼性が著しく損なわれる。本圧縮成形コイルでは、圧縮後の巻線コイル寸法精度が功を奏し、偏肉の小さい良好な成形状況であった。なお、通常の検査では渦電流式または超音波式ギャップセンサにより、非破壊にて各部の偏肉測定を実施している。図13に上単位コイル切断面（直線部、コーナー部）の外観を示す。

6. まとめ

本研究では、超電導磁気浮上式鉄道におけるシステムのランニングコスト低減や地上コイルの温度上昇抑制の観点から、低渦電流損失地上コイルの開発を進めた。巻線コイルに圧縮成形を適用した本地上コイルは、渦電流損失の低減のみでなく、汎用的線材を利用した製作時の作業効率やコイルの寸法精度においても優位性があり、膨大な数を対象とする地上コイルの新たな製法として有効であると考えられる。また、圧縮成形コイルの層間絶縁を主体とした各種評価試験結果から、上記製法の有効性を裏付けることができた。以下に、本研究により得られた知見をまとめる。

- (1) 定置の渦電流損失評価試験装置を開発し、等価な導体断面積を有する線材サンプルにより渦電流損失の定量比較を行った。その結果、円形撚り線（19パラ）の適用により平角線（3パラ）の約1/5に低減できることを確認し、本研究の地上コイル用線材として汎用的で安価な円形撚り線を選定した。



(上コイル直線部) (上コイルコーナー部)

図13 コイル導体部切断面外観

- (2) 円形撚り線を前提とした地上コイル固有の巻線方法を検討し、各層の巻数が奇数、偶数の交互となるように俵積み状にすることにより、円形断面の線材でありながら巻線作業を容易に行えることを確認した。
- (3) 巻線コイルへの圧縮成形の適用により、コイル導体の占積率が圧縮前の60%未満から圧縮後の80%以上となり、当初の目標値を達成した。また、圧縮後の巻線コイルは、圧縮成形時の塑性変形により圧縮金型に依存した仕上がり寸法となり、圧縮を前提としない通常の巻線コイルと比較し、寸法精度を大幅に改善できる見通しを得た。
- (4) 本研究で最も懸念されたポイントは、巻線コイルへの圧縮成形に対する層間絶縁の健全性であるが、JEC-0202に基づく雷インパルス電圧による層間絶縁破壊試験から、公称電圧33kV機器としての耐電圧基準値を大幅に上回り、2~3倍の裕度を有していることを確認した。
- (5) 成形コイルの対地絶縁破壊強度試験や各種試験後の解体による導体部の断面調査から、巻線コイル圧縮後の寸法精度が功を奏し、導体部のモールド偏肉が小さく、絶縁上の信頼性が高い地上コイルを提供できる見通しを得た。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、コイルの巻線作業や巻線コイルの圧縮成形作業において多大なご協力を頂いた㈱テクノ・イノウエ、曙機械㈱の関係各位に感謝申し上げます。なお本研究は、国土交通省からの国庫補助を受け実施した。

文献

- 1) 鈴木正夫:「超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの耐久性評価」, 材料試験&環境試験の技術情報誌 TEST, Vol.12, pp.3-6, 2009.7
- 2) 藤本 健:「ガイドウェイ金属中の渦電流による磁気抗力の測定」鉄道総研報告, Vol. 5, No.4 pp.3-10, 1991.4
- 3) 鈴木正夫・饗庭雅之・高橋紀之・太田 聡:「巻線コイルに圧縮成形を適用した低渦電流損失地上コイルの開発」J-RAIL2010, pp.157-158, 2010.12
- 4) 小村昭義・古川陽子・福本英士・服部憲一・辻本静夫・鶴賀仁史・寺井元昭・梅木 健:「ストランド線を用いた低損失型浮上コイルの開発と損失評価」, リニアドライブ研究会資料, pp.25-30, LD-98-82, 1998.12
- 5) 饗庭雅之・鈴木正夫:「圧縮成形による浮上式鉄道用地上コイルの低渦電流損失化」, J-RAIL2009, pp.155-156, 2009.12