

浮上式鉄道用地上コイルのリサイクル・リユース手法の検討

饗庭 雅之* 太田 聡* 池田 遼平* 高橋 紀之*

Study on the Method of Recycle and Reuse of Ground Coils for Maglev

Masayuki AIBA Satoru OTA Ryohei IKEDA Noriyuki TAKAHASHI

Because ground coils that are enormous in number in maglev systems will be updated after the end of the predetermined period, it is necessary to consider the treatment of the removed ground coils. If the components of the ground coil can be recycled, there is a possibility of finding merit in terms of environmental loads and costs. Therefore, we studied a recycling method for the ground coil composed of a metal conductor and mold resin, and calculated environmental loads in the application of the recycling method. In addition, we studied a reuse method by partial repair. As a result, we found conditions under which a metal conductor can be separated from mold resin in the ground coil by the normal pressure melting method, and established a chemical recycling method. And based on the application of this recycling method, we estimated environmental loads by LCA (Life Cycle Assessment) and showed that it has advantages in terms of CO₂ emissions. In addition, the improvement of the fatigue strength of the mold resin of the ground coil was anticipated by proper repair treatment using thermosetting resin, and we got a prospect of the reuse of the ground coils.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，リサイクル，リユース，環境負荷

1. はじめに

磁気浮上式鉄道においては，車両が走行する全線に地上コイルを敷設する必要があるため，その数は莫大なものとなる。加えて，地上コイルは屋外，振動，高電圧などのさまざまな負荷が複合した環境で使用されるあまり例をみない機器であるため，これらの負荷に対する性能や信頼性の確保と，効率的な保守手法の適用，製造時や運用時におけるコスト低減が求められる。一方，地上コイルは30年を超える長期間の運用が想定されるものの，所定の運用期間の終了後は更新することになるため，ガイドウェイから取り外す必要がある。これらの取り外した地上コイルの処置についても検討する必要があるが，もし地上コイルの構成部材を自用途または他用途に転用（リサイクル）することができれば，環境負荷やコストの面でメリットを見いだせる可能性がある¹⁾。

本稿では，金属導体とモールド樹脂で構成される地上コイルのリサイクル手法を検討し，同手法を適用した際の環境負荷低減効果についての試算結果，および部分補修によるリユース手法を検討した結果について述べる。

2. 地上コイルのリサイクル手法の検討

2.1 交換後の地上コイルの処置の検討

地上コイルは所定の運用期間の終了後，コイルヤードなどの作業のできる場所に運搬された後，ガイドウェイから取り外される。その後の地上コイルには用途がないため，速やかに何らかの処置が施される必要がある。その際に適用される処置として，次の3つを想定した。

- (1) 破碎し，埋め立てる。
- (2) 破碎し，再利用可能な部材を再利用する。
- (3) 破碎以外の方法で構成部材を分離し，地上コイルの一部として再利用する。

それぞれの処置において必要な設備，投入されるエネルギーなどが異なり，環境負荷やコストの面で優劣があるものと想定された。そのため，今回はそれぞれの処置の適用可能性，とくに(3)の処置の適用可能性について検討し，部分モデルを用いた分離のための試験を実施した。

2.2 常圧溶解法の適用による地上コイル構成部材の分離

金属導体をモールド樹脂で一体成型して構成されるモールドコイルにおいては，金属導体には電気用アルミニウム，モールド樹脂にはエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂が用いられることが多い。これらの構成部材

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

を分離することができれば、他の製造物の資源として活用することができ、環境負荷やコストの低減に貢献できると考えられる。とくに、前節で述べたうち(2)の処置ではなく、(3)の処置が可能であれば、地上コイルの部材のうちコイル部分を、新製する地上コイルの金属導体に転用することができる可能性がある。

そこで、電力用モールドコイルや航空機用構造材のリサイクル手法として適用が検討されている、ベンジルアルコールを溶解液とし、リン酸三カリウムを触媒として機器を溶解する常圧溶解法²⁾の地上コイルへの適用を検討した³⁾。

本手法は、溶解槽の中に処理対象である地上コイルを入れ、溶解液と触媒を規定量入れて所定の時間溶解反応を起こさせ、最終的に残った金属物を取り出すものである。

溶解液中に溶解した樹脂についても大半を分離することができるため、金属物は分離してリサイクル、樹脂は燃料としての利用が期待される。本手法を地上コイルに適用するため、地上コイルのモールド樹脂を用いて溶解試験を実施した。溶解試験を実施した2種類の地上コイルの構成部材を表1に、溶解試験の試験条件を表2に示す。

溶解試験結果を図1に示す。所定の処理温度を適用することで、2種類の地上コイルのどちらもモールド樹脂を十分に溶解できることがわかった。また、推進コイル用モールド樹脂であれば溶解槽内への窒素の送気による攪拌、浮上案内コイル用モールド樹脂であれば溶解槽の密閉による加圧（浮上案内コイル断面ブロック試験時における最大圧力は1.58MPa）を併用することで、樹脂の溶解率をより上げられることがわかった。

表1 溶解試験を実施した地上コイルの構成部材

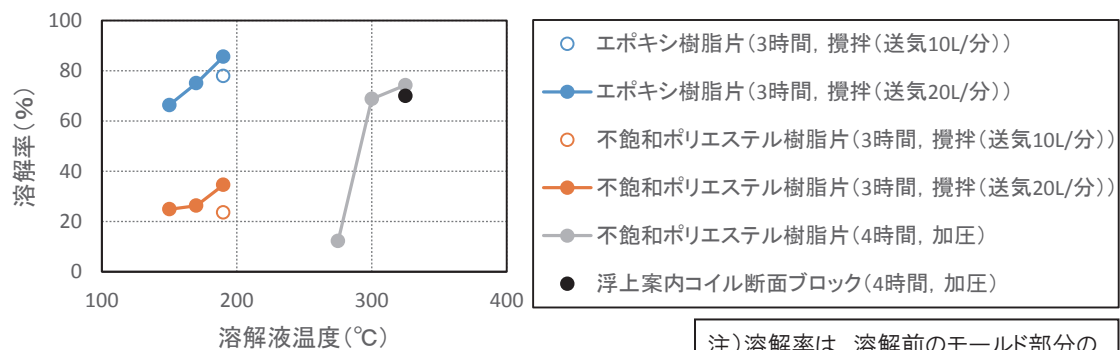
コイル種別	部位	材料
浮上案内コイル	モールド部分	不飽和ポリエステル樹脂 無アルカリガラス 炭酸カルシウム
	金属	電気用アルミニウム 銅
推進コイル	モールド部分	エポキシ樹脂 シリカ
	金属	電気用アルミニウム ステンレス鋼

表2 溶解試験条件

コイル種別	温度・時間	
浮上案内コイル	溶解液温度	275℃, 300℃, 325℃
	溶解時間	4時間
推進コイル	溶解液温度	150℃, 170℃, 190℃
	溶解時間	3時間



図2 溶解試験の状況



注)溶解率は、溶解前のモールド部分の質量に対する溶解後の減少割合であり、モールド樹脂が完全に溶解しても溶解率は100%とならない。

図1 溶解試験結果

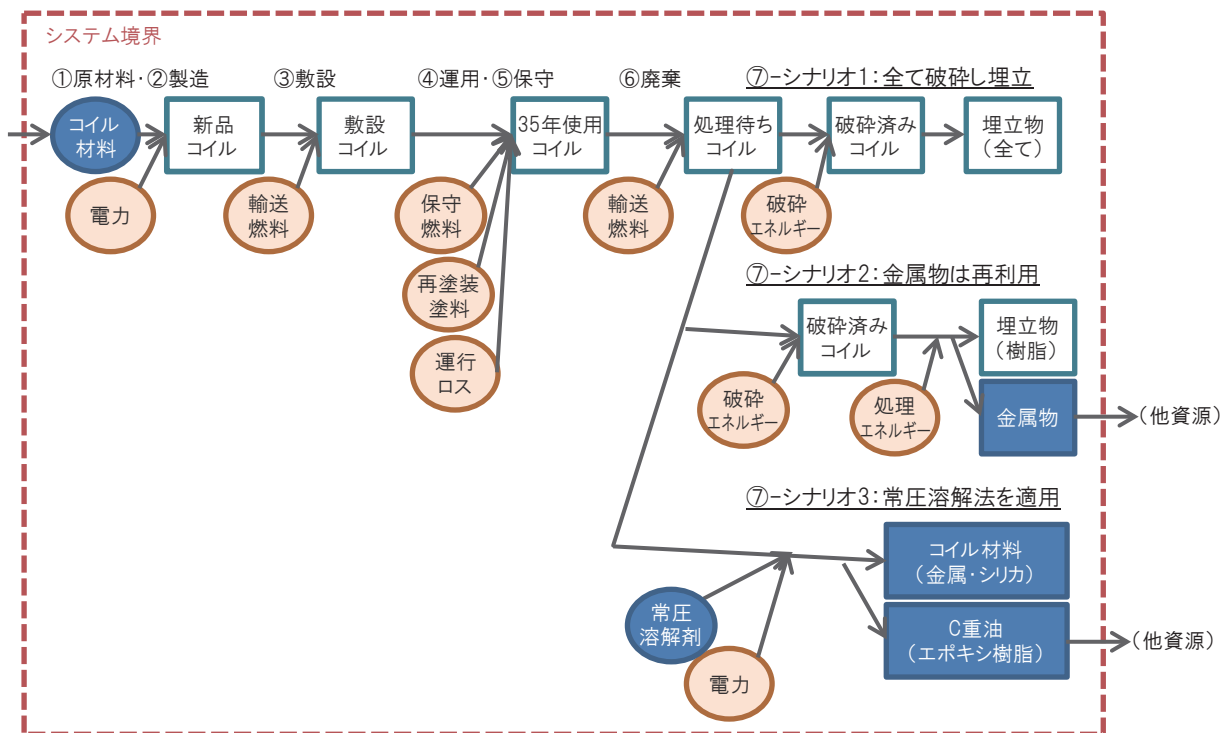


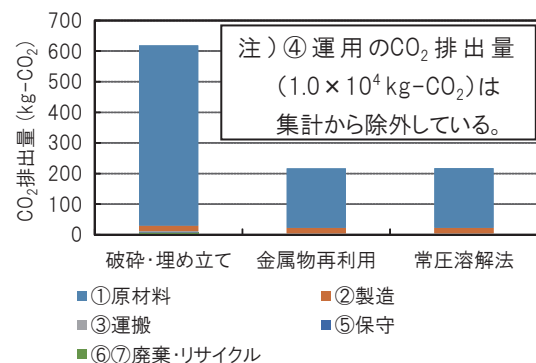
図3 LCAのシナリオ

図2に浮上案内コイルのカットモデルを用いた溶解試験の状況を示す。図2に示すように、浮上案内コイルの構成部材から金属導体、ガラス繊維（無アルカリガラス）を分離することができた。分離後にこれらの部材を洗浄、乾燥することで、地上コイルの他の用途へ再利用することができると考えられる。ただし、本手法による処理温度（325℃または190℃）は地上コイルにとっては非常に高温で、地上コイルの使用想定最高温度（80℃）や推進コイルの導体絶縁被膜の耐熱温度（140℃）を大幅に超過するものであり、金属導体の再利用については再被覆などの課題もあり現状では困難であると考えられる。

3. 地上コイルリサイクルによる環境負荷低減³⁾

前章で述べた地上コイル使用後の3つの処置案に対して、環境負荷やコストの面で得失を比較した。環境負荷評価の一環としてのLCA（Life Cycle Assessment）を行った結果を示す。LCAでは、PLGコイル⁴⁾で想定されるライフサイクルの各ステージ（①原材料・②製造・③運搬・④運用・⑤保守・⑥撤去・⑦廃棄）についてシナリオを立て、廃棄のステージでは前章で示した3つの処置に岐分させた（図3）。評価指標はコイル1個あたりのCO₂排出量とし、ライフサイクルの各ステージで投入される電力や燃料を評価の指標とした。LCAによるCO₂排出量の試算結果を図4に示す。

図4に示すように、何らかの形で部材を再利用できれ

図4 LCAによるCO₂排出量の試算結果

ば、CO₂排出量の面では利点があることがわかった。

4. 地上コイルの使用期間延伸の検討

4.1 地上コイルの使用期間延伸とその利点

浮上式鉄道用地上コイルでは、構造体と絶縁体の役割を果たすモールド樹脂の表面や締結部近傍が、使用期間中に疲労劣化または環境劣化するために、それら負荷環境を基に使用期間が仕様として定められる。とりわけ、締結部近傍の樹脂の疲労寿命は、地上コイルの使用期間を決定づける重要な性能の一つである。そこで、疲労劣化・環境劣化したモールド樹脂の締結部近傍や表面の性能がある程度回復するような補修を行い、使用期間を延伸することができれば、単位期間当たりの製品の必要数

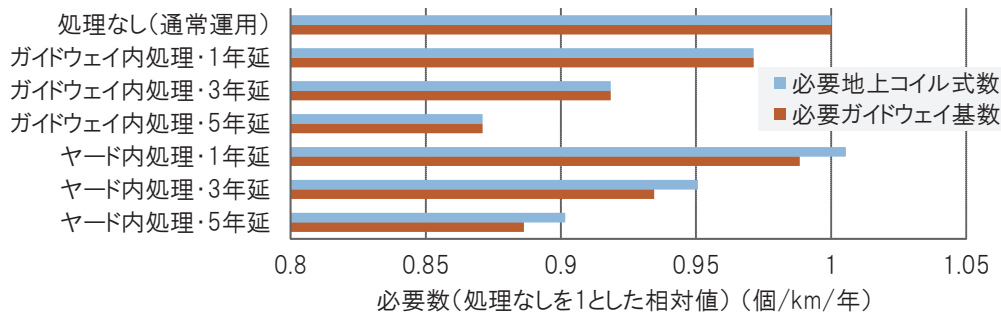


図5 使用期間延伸による地上コイルとガイドウェイ必要数

が減り、環境負荷やコストの面でメリットが出てくる可能性がある。環境負荷低減施策の3R施策（リデュース、リユース、リサイクル）の中では、この手法はリデュースやリユース施策とも捉えることができ、広義の環境負荷低減手法と考えることができる。

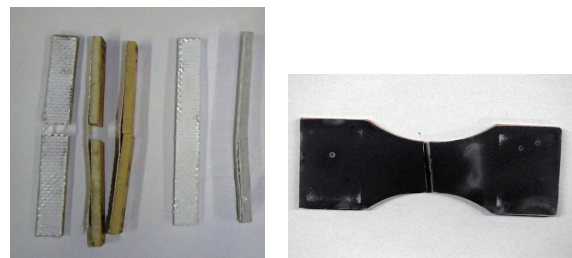
それらの例として、何らかの処理を施すことで地上コイルの使用期間を延伸することが可能となった場合のメリットについて検討する。この中で、

- ・ ガイドウェイ内（またはコイル作業ヤード内）での処理作業
 - ・ 処理に伴うガイドウェイや地上コイルの運搬・清掃・再取り付け
 - ・ 処理に伴う予備ガイドウェイや地上コイルの確保
- を考慮して地上コイルとガイドウェイの必要数を精査し、使用期間延伸可能年数ごとに比較したものを図5に示す。使用期間の延伸により、地上コイルとガイドウェイ必要数を低減することができれば、コスト低減に繋がるだけでなく、製造に関する環境負荷の面でもメリットがあると考えられる。

4.2 地上コイルの使用期間延伸のための処理方法

地上コイルの締結部は、超電導磁石通過時の電磁力などを保持し、最終的にガイドウェイに伝達する地上コイルにおいて重要な箇所である。また、地上コイル表面は、紫外線や水による環境負荷の影響を最も受けるため、絶縁性能への影響に対して考慮すべき箇所の一つである。そこで、これらの箇所に適切な補修処理（高負荷箇所の負荷低減をするか、劣化箇所を覆う形で保護するか）を施すことで、性能をある程度保持させて使用期間を延伸

できないかを検討した。処理の方法に関しては、図6に示す4種類の処理方法を検討した。これらの処理方法は、特別な治具や機器を必要としない簡易な方法と、治具または設備が必要となる可能性がある方法に大別できる。図6の中で、③と④の処理を行ったモールド樹脂試験片に、処理後に環境負荷と機械的負荷を与えて破断させた際の状況を図7に示す。簡易処理方法では、樹脂表面と補修処理材の界面の接着強度が十分ではなかったため、母材と補修材が一体とならず、期待した耐環境性能や機械強度が得られなかった。これに対して、治具や設備が必要となるものの、熱硬化性樹脂による適切な処理を行えば、母材と補修材が一体となり、耐環境性能や機械強度を向上できる可能性がある。



(a) 処理③（FRP補強材） (b) 処理④（熱硬化性樹脂）

図7 屋外環境と機械的負荷を与えた後の破断状況

4.3 熱硬化性樹脂による補修の効果の評価

今回の熱硬化性樹脂による補修処理の効果を評価するため、モールド樹脂に用いられることの多いエポキシ樹脂を対象として、屋外環境試験と疲労試験を実施した。

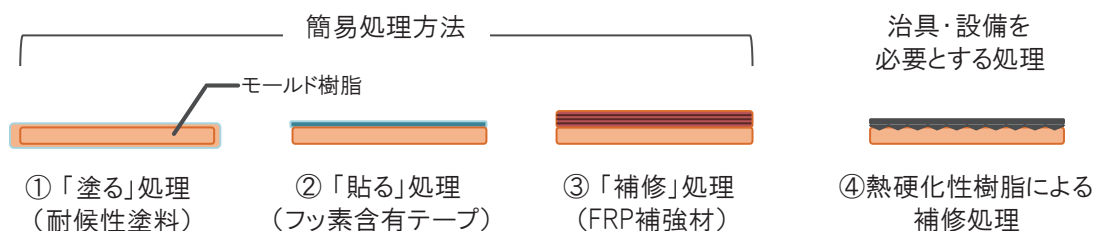


図6 検討した処理方法の概念図

試験にはエポキシ樹脂の疲労試験片を用いた。屋外環境試験の条件を表3に、疲労試験の条件を表4に示す。屋外環境試験の中間または終了後に、図7(b)に示したモールド樹脂表面への補修処理を実施した。処理条件を表5に示す。補修処理では、処理を行う箇所、タイミング、熱硬化性樹脂の硬化温度や硬化処理時間について検討した。これは、地上コイル用樹脂の使用想定最高温度が仕様として定められると考えられること、また、ガイドウェイ内で夜間の間合いで処理作業を実施する場合、実施に許容される時間（5時間程度）が設定されると想定されるためである。事前に得た接着強度と硬化温度、硬化時間に関する特性（図8）を根拠として、加熱温度と時間の組み合わせを決定している。

無対流加熱炉で熱硬化中の種別Aおよび種別B1の状況を図9に、疲労試験結果を図10に示す。なお、繰り

表3 屋外環境試験条件

項目	条件
試験機名称	超促進耐候性試験装置
試験室光源	メタルハライドランプ
紫外線強度	70.5mW/cm ² (試験開始前の試料台での平均値)
試験室温度	63℃（ブラックパネル温度）
散水	5秒/5分
試験時間	438時間18分

表4 疲労試験条件

項目	条件
試験機名称	繰返し振動疲労試験機
試験規格	JIS K 7118 および K 7119
加振周波数	30Hz
応力水準	15.2MPa ～ 32.5MPa
試験温度	23℃
打ち切り回数	1.0 × 10 ⁷ 回（一部の試験片）

表5 補修処理条件

種別	処理範囲	加熱温度・時間	処理時期
N	なし	—	—
A	部分	80℃・7時間46分	環境試験終了後
B1	全面	90℃・3時間44分	環境試験中間
B2	全面	95℃・2時間38分	環境試験中間

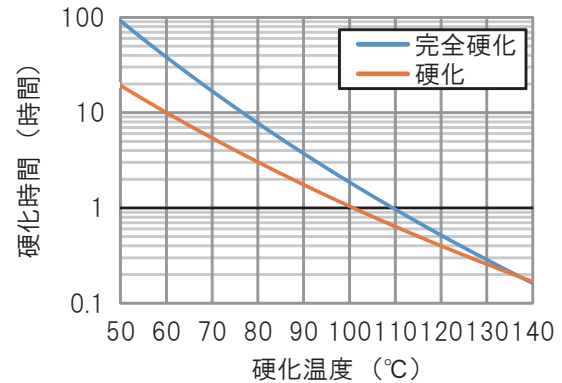


図8 補修処理材の硬化温度と硬化時間の関係

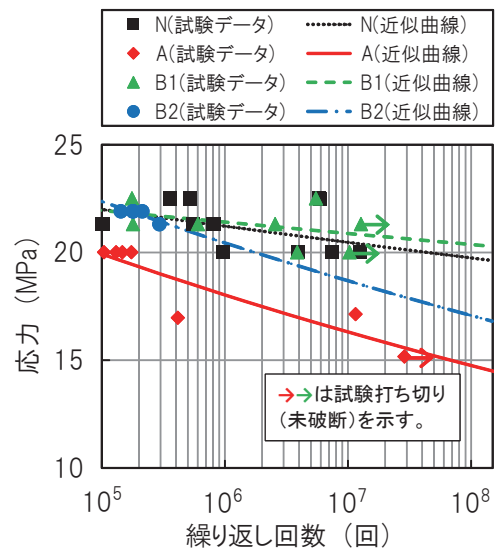


図10 疲労試験結果（S-N線図）

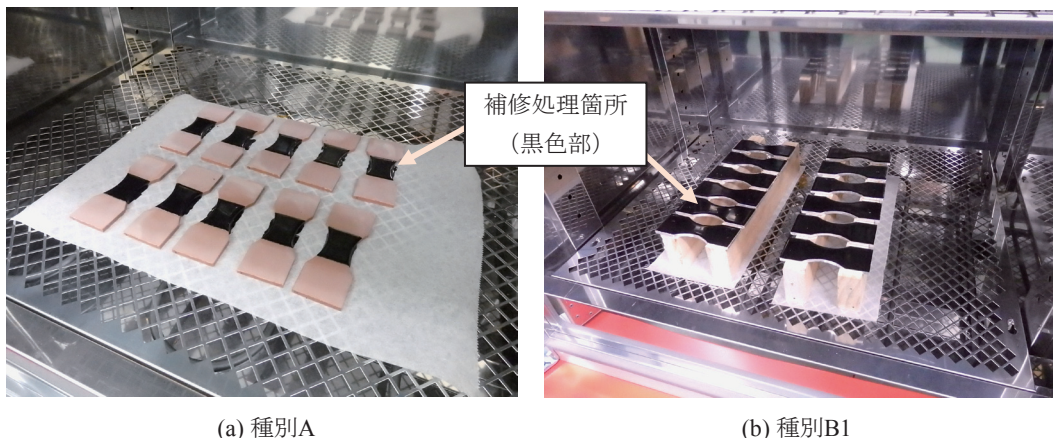


図9 無対流加熱炉で熱硬化中の種別Aおよび種別B1の外観

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

返し回数 1.0×10^5 回付近で S-N 特性の変曲点がみられたため、繰り返し回数 1.0×10^5 回未満の試験結果を除外して整理した。

4.4 補修効果評価試験結果と考察

補修効果評価試験結果について、以下にまとめる。

- ・今回用いた試験片の樹脂種類でも、基礎検討時と同様に良好な接着性が得られており、屋外環境試験でもあまり影響がないことを目視にて確認した。
- ・全面処理を行った試験片の疲労試験では、加熱温度を変えた 2 種類では S-N 特性が異なる結果が得られた。
- ・S-N 線図における 1.0×10^7 回での疲労強度（応力）は、処理なしのもので 20.5MPa、部分処理のもので 16.3MPa であった。一方、全面処理では、処理温度が 90℃ のもので 20.9MPa、95℃ のもので 18.7MPa であった。
- ・熱硬化性樹脂による補修では、補修処理方法と条件を適切に選択することで、疲労強度が同等以上となる組み合わせがあることがわかった。
また、これらの結果に対する考察を以下にまとめる。
- ・手作業による表面処理では、サンドペーパーの掛け具合、処理材料の切り出しなど、表面処理の質にばらつきが生じる可能性が高い。
- ・疲労試験では、部分処理した試験片は、処理部と未処理部の境界を起点として破壊するものが多かった。これは、境界部における応力分布の変化や、境界部の凹凸が疲労強度に影響を与えていると推定され、高負荷部位周辺のある程度広い範囲に処理を施した状態でないと効果がない、あるいは逆効果であると考えられる。
- ・全面処理での疲労試験で処理温度を変えた 2 種類の供試体群に対して、S-N 特性が異なる結果が得られたのは、温度が 5℃、処理時間が 1 時間 6 分異なる処理（どちらも完全硬化までの必要時間）であり、この条件が特性に影響を与えた可能性がある。その他の原因とし

ては、表面処理の施工ロットの影響も考えられる。

今回の結果より、熱硬化性樹脂による補修では、適切な補修処理および補修箇所を選定すれば、低応力の領域（実際の地上コイルの応力環境と考えられる領域）で疲労強度の向上が見込めることがわかった。

5. おわりに

浮上式鉄道用地上コイルのリサイクル・リユース手法の検討を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 常圧溶解法により地上コイルからモールド樹脂と金属導体を分離する条件を見だし、化学的なリサイクル手法の適用可能性を示した。
- (2) 常圧溶解法による地上コイルリサイクル手法の適用を前提として LCA により環境負荷を試算し、CO₂ 排出量の面で利点があることを示した。
- (3) 地上コイルのモールド樹脂に対して熱硬化性樹脂により適切な補修処理を施すことにより疲労強度の向上が見込め、リユースが可能となる見通しを得た。

文 献

- 1) 高橋紀之，鈴木正夫：地上コイルモールド樹脂リサイクル手法の検討，鉄道総研報告，Vol.28，No.9，pp.23-28，2014
- 2) 柴田勝司：常圧溶解法による熱硬化性樹脂複合材料のリサイクル技術，日本接着学会誌，Vol.42，No.4，pp.25-29，2006
- 3) 太田聡，高橋紀之，饗庭雅之：磁気浮上式鉄道用地上コイルのリサイクル手法の開発，平成 29 年電気学会産業応用部門大会講演論文集，No.3-24，2017
- 4) 饗庭雅之，鈴木正夫：推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証，鉄道総研報告，Vo.19，No.6，pp.19-24，2005