

# 地上コイル用モールド樹脂リサイクル手法の検討

高橋 紀之\* 鈴木 正夫\*\*

## Examination of the Mold Resin Recycling Technique for Ground Coils

Noriyuki TAKAHASHI Masao SUZUKI

Because the number of the ground coils laid over the whole length of a maglev line is enormous, it seems that recycling becomes important in future. At first we crushed mold resin (Epoxy resin, SMC molding resin, RIM molding resin) of ground coils and confirmed the condition of the crush. Then, we mixed the crushed resin with concrete and performed an examination on its strength. As a result, we confirmed that the strength of SMC resin increased. As another examination, we dissolved resin by the depolymerization under ordinary pressure, and we confirmed the condition of the dissolution. As a result, we were able to dissolve epoxy resin. However, it has been known to us that in order to dissolve SMC resin and RIM resin, it is necessary to raise temperature and pressure because they are hard to melt.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，モールド樹脂，リサイクル

### 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道において、地上コイルは全線にわたって敷設されるため、その数は膨大なものになる。地上コイルが計画更新等により定期的に新しい地上コイルと交換を行うことになった場合、新しい地上コイルを製作した分だけ不要となる地上コイルが継続的に発生することになる。近年、生活環境の保全および資源の有効利用の観点から、循環資源のリユース・リサイクルを社会全体で取り組むことが求められている。また、資源の枯渇や温暖化など地球規模の環境・資源問題がクローズアップされ、地上コイルについてもリサイクルを前提とした最適な構成が求められつつある。

そこで鉄道総研では、地上コイルのモールド樹脂に着目し、その樹脂を化学的処理あるいは破碎等の物理的処理を行い、再資源としての利用あるいはモールド樹脂としての再利用の可能性について研究している。

ここでは、現有地上コイルを破碎処理し、得られたモールド樹脂を骨材としたコンクリート供試体を作成し、評価試験を行った。一方、化学処理の一手法として常圧溶解法を用いてモールド樹脂の溶解状況を確認し、その問題点を検証したのでその結果を報告する。

### 2. 地上コイルリサイクルの考え方

地上コイルリサイクルのイメージを図1に示す。ひと

\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

\*\* 浮上式鉄道技術研究部 山梨実験センター

つは地上コイルのモールド樹脂を破碎処理して粒状化し、これをリサイクル資源とする。もうひとつは常圧溶解法や亜臨界処理などの化学的処理により樹脂を溶解・分解処理しリサイクル資源とする。これらリサイクル資源を他製品の原材料として有効活用することを想定している。

この考え方に基づき、以下のリサイクルに関する試験・測定等を行った。

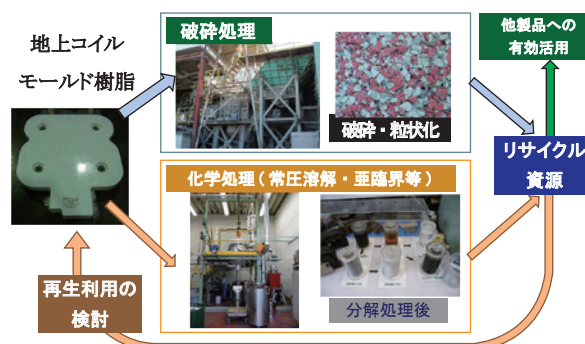


図1 地上コイルリサイクルのイメージ

#### (1) 現有地上コイルの破碎試験

- 破碎処理：現有する地上コイルについて、破碎作業を行い、樹脂部・アルミ導体部・その他部材（締結部・導体接続部）との分離状況を確認する。
- 分別・粒度調整：破碎した地上コイルを樹脂部・アルミ導体部・その他部材に分離し、樹脂部については粒度の調整を行う。粒度はコンクリート供試体に添加する際に適当となる径で調整を行う。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

(2) 添加コンクリート試験

- (a) コンクリート供試体作成：粒度調整した樹脂をコンクリートに添加した供試体を作成する。
- (b) コンクリート供試体強度試験：作成したコンクリート供試体について、材齢 28 日における強度試験を実施する。

(3) 常圧溶解法を用いた樹脂溶解試験

- (1) で得られた破碎された樹脂を使用して、常圧溶解法により樹脂の溶解状況を確認し、溶解状況や問題点を整理する。

3. 現有地上コイルの破碎試験

3.1 破碎の検討

地上コイルのリサイクルを考えた場合、部材の適正な分離が必要となる。地上コイルの場合大きく分けて、モールド樹脂、アルミ導体、その他の部材に大別される。これらに分別する方法として、地上コイルを破碎機などを使用して破碎後、分離することが考えられる。破碎の方法としては、(1) 破碎機による破碎 (2) 重機による破碎 (3) 粉碎機による破碎 (粉碎) (4) 減容・圧縮がある。

今回は、破碎処理を行うコイル数量が少なく、試験的に地上コイルを破碎すること、産廃処理業者の施設を使用することから、少量の破碎に適した (2) の重機による破碎と、設備を有している (1) の破碎機により破碎作業を行うことにした。

3.2 破碎処理

3.2.1 重機による一次破碎

破碎処理は、表 1 に示す地上コイルについて行った。破碎用アタッチメントを装着した重機を使用して、地上コイルのモールド樹脂とアルミ導体部、それ以外の部材に分別ができる程度に破碎した。

重機による作業の状況を図 2 に示す。分別については、樹脂と導体部については密着・接着性からの懸念があったが、比較的容易に樹脂、アルミ導体、その他の部材に分けることができた。アルミ導体部に含浸している樹脂についても、図 3 に示すように容易にアルミ導体と剥離することが可能であった。エポキシ樹脂について、重機による破碎後に、モールド樹脂、アルミ導体部、その他部材に分別した様子を図 4 に示す。アルミ導体部は比較的樹脂との分離が出来ており、有価物としての再利用が可能である。

コイル 1 個あたりの重機による破碎に掛かる時間は、PLG コイルが約 4 分、RIM ならびに SMC コイルが 6～7 分であった。RIM ならびに SMC コイルに時間が掛かったのは、ガラス繊維が混ざっているため、アタッチメント部に食い込む樹脂が多いこと、割れても樹脂の影響で細

かな破碎にさらに時間を掛ける必要があったためである。

表 1 破碎処理を行った地上コイル


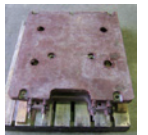

コイル名称	SMCコイル	RIMコイル	PLGコイル
コイル種別	浮上案内コイル		推進・浮上案内兼用コイル
重量	約50kg	約50kg	約100kg
使用樹脂	不飽和 <sup>1)</sup> ポリエステル	DCPD樹脂 <sup>2)</sup>	エポキシ樹脂 <sup>1)</sup>
本稿での呼称	SMC成形樹脂	RIM成形樹脂	エポキシ成形樹脂
ガラス繊維	あり(短繊維)	あり(長繊維)	なし
外観			



図 2 重機による破碎状況



図 3 導体と樹脂の剥離状況



図 4 PLG コイルの破碎後分別状況

3.2.2 破碎プラントによる粒度調整 (二次破碎)

重機による破碎後、分別した樹脂について粒度調整を行った。これは、振動ふるい機 (□ 10mm 網目、粒径 0～10mm 通過) により振るい分け、概ね粒径 10mm 程

度以下のものとに分別するためである。この 10mm 以下に粒度調整されたものをコンクリート用補強材として使用することを検討した。

粒度調整に使用した破砕機（プラント設備、図 5 参照）は、コンクリート・アスファルト塊の破砕再生に日常的に使用されている設備である。

2 次破砕によって得られた樹脂（ふるいを通過したもの）を図 6 に示す。

エポキシ樹脂については、角が丸く噛み砕いた形状の樹脂が多く見られるが、RIM 成形樹脂については樹脂の赤色の部材とガラス繊維と思われる白色の部材とが混ざり合っている。いずれも針のような尖った形状をしている。SMC 成形樹脂についてはガラス繊維と思われる針状の部材が大半であり、この形状から空気を含んだ綿のような感じになっている。



図 5 粒度調整プラント設備



エポキシ樹脂 RIM成形樹脂 SMC成形樹脂

図 6 粒度調整後の樹脂

#### 4. 破砕樹脂添加コンクリート供試体試作・強度試験

骨材に比べ、比重の小さいエポキシ樹脂を使用することで軽量化が図れること、SMC 成型樹脂、RIM 成形樹脂に含まれるガラス繊維が強度向上に寄与する可能性がある。そこで、破砕し、得られた樹脂（以下、破砕モールド樹脂）をコンクリート用補強材として添加し、強度試験を行った。

##### 4.1 コンクリート供試体試作

コンクリートの配合については、ベースコンクリート（破砕モールド樹脂添加なし）のフレッシュ性状としてスランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  を目標とした。また、破砕モールド樹脂の添加方法は基準コンクリートと同じ配合に対し、エポキシ樹脂は骨材との置換率（%）、SMC 成形樹脂ならびに RIM 成形樹脂については容積に

よる外割添加率（%）とした。添加率については、各樹脂数 5% 程度と、エポキシ樹脂については大幅に置換したものを、さらにエポキシ樹脂と SMC 成形樹脂を複合添加したものを条件として選定した。供試体の配合条件を表 2 に示す。配合の際、SMC 成形樹脂、RIM 成形樹脂についてはスランプ量の大幅な低下（＝流動性が悪い）が見られたため、両者については添加率を最大 5% までとした。

表 2 供試体配合条件

種別	添加率または置換率 (%)	条件数
ベース コンクリート	添加・置換なし	1
エポキシ樹脂 (置換)	1.4 5.0 7.0 10.0 13.9 31.9*	6
SMC 成形樹脂 (添加)	0.6 1.1 2.0 2.5 2.8	5
RIM 成形樹脂 (添加)	0.5 0.9 1.5 1.8 4.4	5
エポキシ樹脂(置換) + SMC 成形樹脂(添加)	31.9* (エポキシ) + 3.0 (SMC)	1

\*粗粒度の大きい粗骨材相当のみを置換した（粗骨材に対する置換率は 90%）

#### 4.2 強度試験ならびに結果

作成した供試体について、材齢 28 日目に強度試験を行った。各樹脂の置換率、添加率と圧縮強度ならびに曲げ強度（材齢 28 日）の関係について整理したものを図 7～図 9 に、試験状況を図 10 に示す。

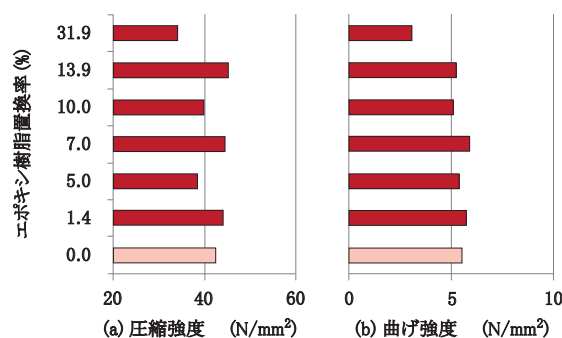


図 7 エポキシ樹脂置換の強度（材齢 28 日）

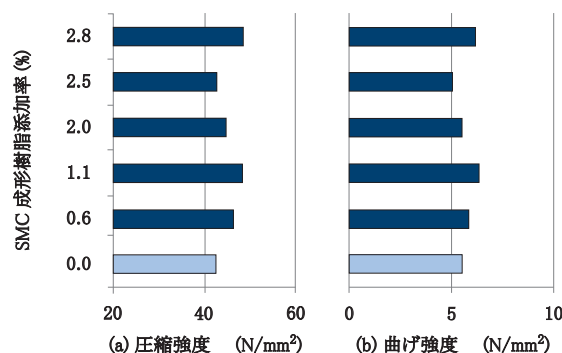


図 8 SMC 成形樹脂添加の強度（材齢 28 日）

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

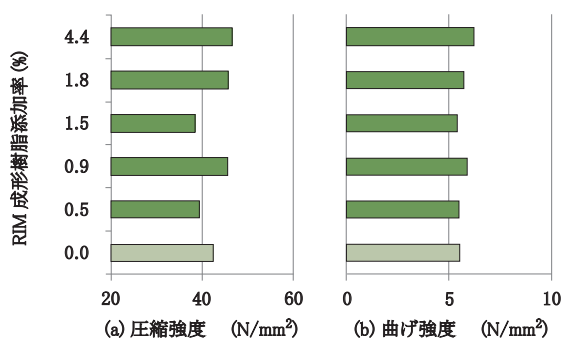
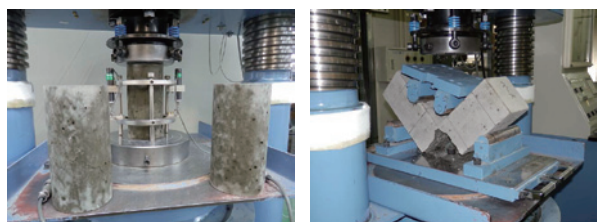


図9 RIM成形樹脂添加の強度 (材齢 28日)



(a) 圧縮試験 (φ10×20cm) (b) 曲げ試験 (10×10×40cm)

図10 強度試験状況

エポキシ樹脂については、13%程度までの置換率における強度は、ベースコンクリートとあまり差が出なかった。ただし、粗骨材に対する置換率を32%まで上げると、20%程度の強度の低下が確認された。これは、①エポキシ樹脂そのものの有する強度が粗骨材に比べて劣ること、②エポキシ樹脂がコンクリート材料に比べ軽いため、打設時に配合にムラが生じた、等が考えられる。

SMC成形樹脂、RIM成形樹脂については、ベースコンクリートに比べ同程度、あるいは最大で20%程度の強度増加が確認された。これは、樹脂に配合されるガラス繊維が強度増加に大きく影響していることが考えられる (エポキシ樹脂の場合はガラス繊維が含まれない)。一方で、ガラス繊維量が増えるとスランプ量の低下等の流動性に影響するため、むやみに増やすことは難しい。

エポキシ樹脂と破砕した主にガラス繊維を含むSMC成形樹脂を併せて添加した強度試験の結果を図11に示す。エポキシ樹脂のみ約32%置換した場合、20%程度の強度低下が確認されたが、同じエポキシ樹脂量の配合

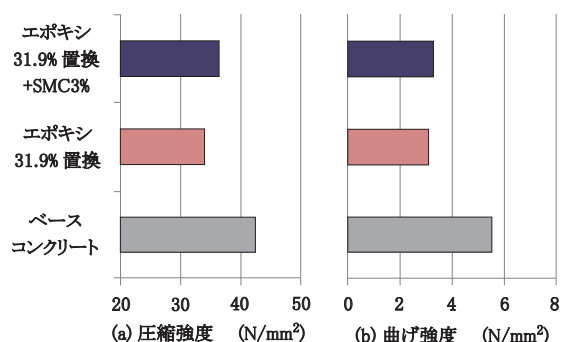


図11 エポキシ樹脂約32%置換の強度試験結果

にSMC成形樹脂を添加すると、5%ほどの強度増加が確認された。本試験はこの配合のみの試験であったが、エポキシ樹脂量とSMC成形樹脂に含まれるガラス繊維を適正に添加すれば、ベースコンクリートより強度を高めることは可能であると思われる。

### 4.3 樹脂の混合状況

丸型供試体底部、および曲げ試験で破断した断面の状況を図12に示す。

矢印で示す箇所が混合した樹脂である。SMC成形樹脂は若干見づらいが、繊維状のものが確認できる。エポキシ樹脂置換率を31.9%まで高めた供試体以外は偏ることなくほぼ均等に分布しており、樹脂だけが剥離することもなく、コンクリートに対する密着性は良好であった。



(a)エポキシ樹脂 (b) SMC成形樹脂 (c) RIM成形樹脂

図12 各供試体の破断面

## 5. 常圧溶解法における溶解試験

### 5.1 常圧溶解法の概要

常圧溶解法の概要を図13に示す。溶剤 (ベンジルアルコール) と触媒 (リン酸三カルウム) を用いて樹脂を加熱・溶解し、内容物を分離・回収し再利用する技術である<sup>3)</sup>。その名の通り、圧力を加えず、また熱媒温度も200℃以下のため安全な処理プラントを構築できることが特徴である。また、溶剤・触媒は化学変化を起こすことが少ないので分離後何度でも処理に供することが可能である。溶解物は金属・シリカ類、樹脂の溶液・硬化剤等に分離・分別され、金属、シリカ類は再び原材料として再利用され、樹脂の溶液・硬化剤は固化後燃料化することが可能である。

今回はエポキシ樹脂、SMC成形樹脂、RIM成形樹脂について試験を行った。

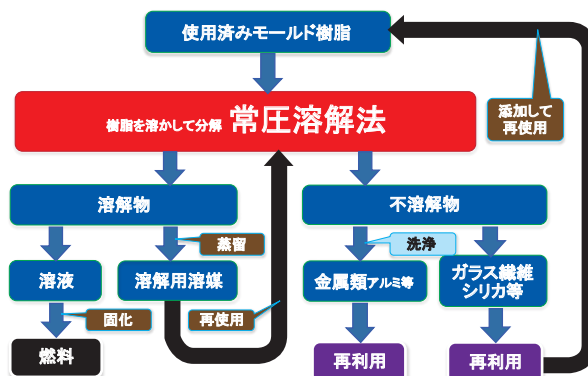


図13 常圧溶解法の概要

5.2 試験片による常圧溶解試験

5.2.1 試験条件

溶解試験には、エポキシ樹脂、SMC成形樹脂、RIM成形樹脂について曲げ試験等を行う試験片（長さ150×厚さ10×幅15mm）を使用し、長さを20～40mm程度に加工し重量を測定した。

試験条件として、熱媒温度を175℃、190℃、205℃の3段階とした。攪拌用に溶液内に窒素を送り込み、溶解時間は各条件とも3時間とした。試験後60℃まで冷却しアセトン洗浄を行った後、乾燥炉で100℃、3時間の乾燥を行った後、重量を測定した。

5.2.2 試験結果

試験前後の重量測定を行い、整理した結果を図14に、SMC成形樹脂の溶解状況を図15に示す。エポキシ樹脂についてはある程度の溶解が確認されたが、SMC成形樹脂、RIM成形樹脂についてはほとんど重量変化がないことが確認された。図15より、SMC成形樹脂については3時間程度ではほとんど変化が生じていない。このため、さらに時間を掛けて溶解試験を行ったが、樹脂が膨潤し、膨らんでいるが溶解には至らなかった。

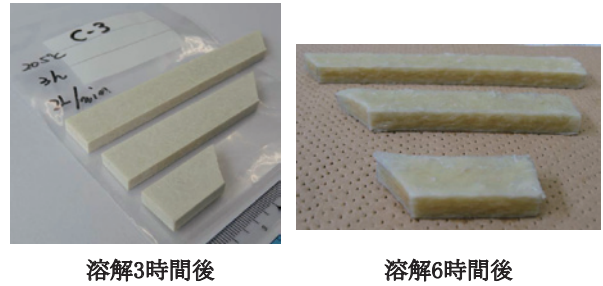


図15 試験片による常圧溶解試験状況(SMC成形樹脂)

を用いて、SMC成形樹脂とRIM成形樹脂については5.2節のテストピースを小型の破砕機で破砕した樹脂を用いて常圧溶解試験を行った。

試験条件は5.2節と同じとし、熱媒温度は150℃、170℃、190℃の3条件、攪拌用エア（窒素）の送気量を20L/minとし、溶解時間はいずれも3時間とした。

5.3.2 試験結果

溶解率を整理した結果を図16に示す。いずれの樹脂についても試験片で溶解を行った5.2節の試験に比べ、溶解率が向上していることが分かった。予め破砕処理を施すことと溶解時の送気量を多くすることにより溶解率の向上に効果があることがわかった。また、いずれの樹脂についても溶液温度が高いほど溶解率が向上していることがわかる。エポキシ樹脂についてはほぼ所定の溶解、分離ができており、リサイクルとしての処理が期待できる。ただし、SMC成形樹脂とRIM成形樹脂については破砕処理を行っても30%程度の溶解率にとどまるため、このままではリサイクルを目的とした処理には適さないと考える。

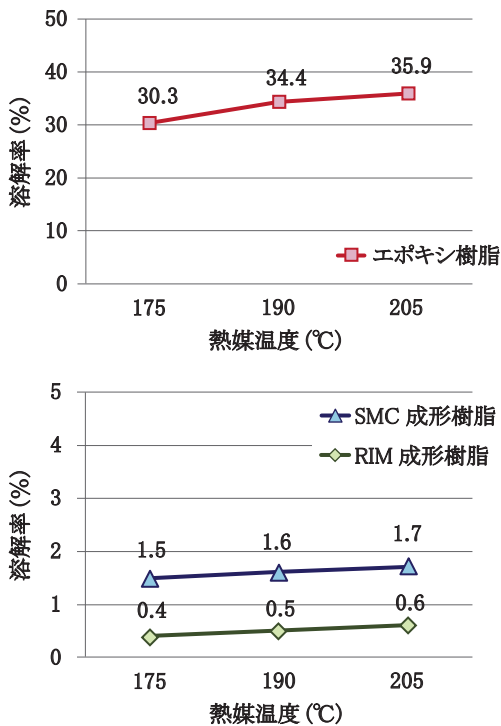


図14 試験片による常圧溶解試験結果

5.3 破砕樹脂による常圧溶解試験

5.3.1 試験条件

5.2節での試験結果を踏まえ、ある程度破砕した樹脂を用いることによる処理時間・溶解率の向上を目的として、破砕樹脂を用いた溶解試験を行った。エポキシ樹脂については3.2節のモールド樹脂の破砕で得られた樹脂

5.4 加温・加圧による溶解試験

SMC成形樹脂、RIM成形樹脂については、溶解率が低いことがわかったため、同じ溶解処理について高温・高圧下での試験を行った。

5.4.1 試験条件

試験管タイプの加圧容器を用い、テストピースから切り出した約1g（10×15×5mm程度）のSMC成形樹脂、RIM成形樹脂の各試験片を溶液内に投下し、容器を250℃～350℃に加温した。設定温度での処理時間は0.5時間とし、試験終了後残存物の状況を把握した後、乾燥機で一定時間乾燥の後、重量を測定、溶解率を算出した。

5.4.2 試験結果

試験結果を図17に示す。また、溶解処理後に試験容器から取り出し、乾燥処理した状況を図18に示す。図17においてRIM成形樹脂の溶解率がマイナスになっているのは、試験前の試験片に比べ、重量が増加していることを示している。

溶解率についてSMC成形樹脂は325℃から急激に向

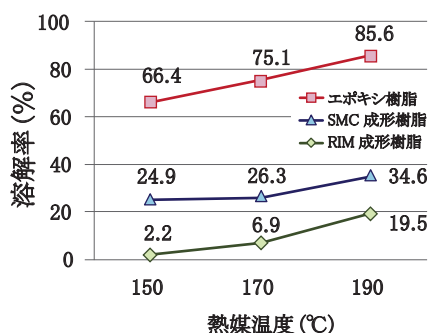


図 16 破碎樹脂による常圧溶解試験結果

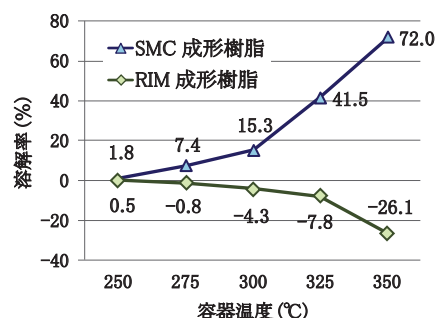


図 17 容器温度と溶解率の関係

上している。図 18 の溶解状況を見ても、325°Cから溶解が急激に進み、原形をとどめていない。一方、RIM 成形樹脂は逆に溶解率が低下した。これは樹脂が膨潤して溶液が吸湿効果により樹脂層へ侵入、試験片の質量が増加したものと考えられる。SMC 成形コイルについては 350°Cにおいて、ほぼガラス繊維のみが残存物として残っており、ガラス繊維としての再利用の可能性ががあると思われる。RIM 成形樹脂については、膨潤効果までは確認できたが溶解には至らず、さらなる検討が必要である。

## 6. まとめ

地上コイルモールド樹脂リサイクル手法の一環として、現有地上コイルを破碎処理し、得られたモールド樹脂を骨材としたコンクリート供試体を作成し、評価試験を行った。また、常圧溶解法を用いたモールド樹脂の溶解試験を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 重機、破碎プラントを使った破碎・粒度調整により、モールド樹脂とアルミ導体、その他の部材とに比較的容易に分別し、任意の粒度に調整できることを確認した。
- (2) 地上コイルモールド樹脂について、破碎・粒度調整したものをコンクリートに添加し、強度試験を行った。その結果、SMC 成形樹脂について圧縮強度の増加がみられ、補強材としての効果が期待できることを確認した。
- (3) 常圧溶解法において、モールド樹脂の溶解状況を確認

し、エポキシ樹脂については溶解処理できることを確認した。

- (4) SMC 成形樹脂について、高温・加圧下での溶解試験を行ったところ、325°C以上で溶解しやすくなり、ガラス繊維の抽出が可能であることを確認した。

今後は、モールド樹脂のみの検討から、導体部を含む地上コイル、モールド成形品のリサイクル手法について検討を行うことを計画している。

なお、本研究は国土交通省からの国庫補助を受けて実施した。

## 謝辞

常圧溶解法の試験にあたり、明電ケミカル株式会社、日立化成株式会社に多大なご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

## 文献

- 1) 吉川高雄, 相原直樹, 佐藤勉, 諏訪博: 浮上式鉄道地上コイル用モールド樹脂の耐久性評価, 鉄道総研報告, Vol.8, No.10, pp.35-40, 1994
- 2) 鈴木正夫, 吉川高雄, 諏訪博, 藤本健: RIM 成形法による地上コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol.7, No.9, pp.53-58, 1993
- 3) 前川一誠, 柴田勝司, 岩井満, 遠藤頭: 常圧溶解法による FRP リサイクル技術, 日立化成テクニカルレポート, No.42, pp.21-24, 2001.1

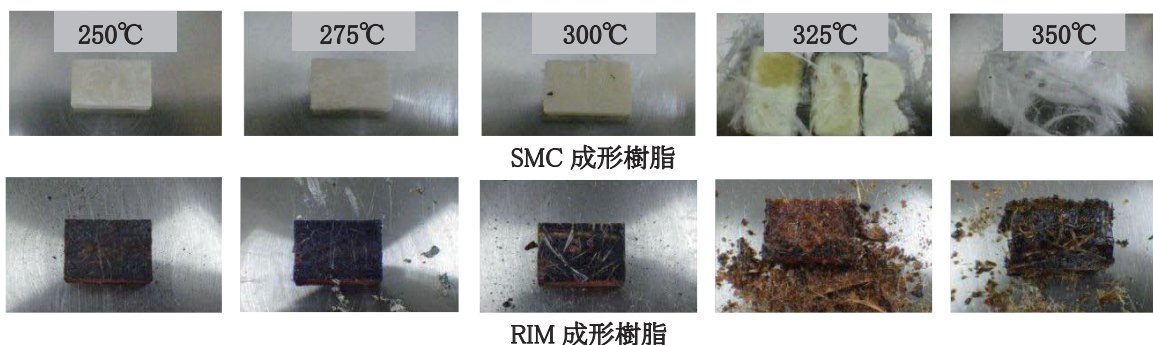


図 18 各温度における溶解状況 (洗浄後)