リニアモーターカー方式に 要求される高分子材料 応用開発事例と可能性

大石 不二夫

Fujio Ohishi, 鉄道総合技術研究所

昨年8月、運輸省は“リニアモーターカー・マグレブ”の実用化のため、約50 km 延長の実験線の建設を決定した。当研究所がおよそ四分の一世紀にわたり続けてきた研究開発が、いよいよナショナルプロジェクトとして実現に向けて大きく前進することとなった。オリジナリティに乏しいと言われてきたわが国の技術界にあって、しかも超電導フィーバーが定着しつつある今日、この画期的な新技術の開発は transportation の分野だけでなく、土木・電気・電子・機械・制御・材料ほかほとんどの技術分野に関連し、テクノロジージャンプの好機でもある。

このシステムは昭和35年頃、当時の鉄研の宇佐美吉雄主任研究員の自発研究に始まり、筆者らは42年頃から参画し、新幹線や在来線の研究開発とともに、今日まで当研を中心に研究開発されてきたものである。本展望では、リニアモーターカー方式に関して筆者らが行った約十件の研究開発^{1)~3)}の中から代表例を紹介しながら、高分子材料へのニーズを提示してみたい。

1. リニアモーターカー方式の原理と特徴

リニアモーターカー方式（ここではLM式と略す）の原理は、これまでのモーター（ロータリー方式）を切り開いて直線方向に拡げ、回転子を車上側に、固定子を地上側に置き、N極とS極との吸引・反発作用の電磁力を利用して、推進・案内・浮上をさせるものである。

これまでの鉄車輪-鉄レール間の摩擦力による推進・案内・非浮上方式の鉄道と比べると、高速化の限界が高く、非接触であるため、振動・騒音が低く、材料の摩耗がないなど画期的な特徴を有している。

LM式のリニアモーターは誘導式と同期式とに大別

写真=マグレブ宮崎実験車用支持タイヤ

Polymeric Materials for Linearmotor Car Systems—
Developments and Applications

され、さらに常電導方式と超電導方式とに分かれる。

現在世界で開発が進められているLM式のうち、超電導磁気浮上リニアモーターカー方式（マグレブと略記）は時速 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ で東京～大阪間1時間を目指して鉄道総研で研究開発が続けられ、JR方式とも呼ばれている。一方ALPS（Automated Linear-motor Pneumatictire System）は、時速 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 程度で大都市圏内用や空港アクセス用を目指して、鉄道総研で要素技術の研究とシステム開発が行われたものである。ここでは、これら2方式の開発の一環として進めた研究開発事例を紹介し、材料へのニーズを展望してみる。なお、リニアモーターカーの概要については、文献^{4),5)}が参考となる。

2. マグレブ超電導コイル用断熱荷重支持材の開発

超電導コイル（車上極低温槽内）に生じた電磁力（推進・案内・浮上）を車体へ伝える必要があるが、熱は伝えたくない。そこで液体ヘリウム（4.2 K）と車体の間を断熱しながら、極低温においても強度・剛性に卓越した部材が不可欠となってくる。

そこで、当所の浮上式鉄道研究室中島洋氏と共同で神戸製鋼所（株）浅田基礎研究所などの協力により開発を進めた。当時入手し得る内外のACM（先進複合材料）の中から、十数種の試料を選定し、極低温から常温までの熱伝導率と強度特性を調べた。ボロン・アラミド・カーボン・ガラス繊維とポリエステル・エポキ

大石不二夫（財）鉄道総合技術研究所（185 国分寺市光町2-8-38）主幹研究員、工博
1963年都立大工学部工業化学科卒、1963年日本国有鉄道入社、1964年鉄道技研へ配属。有機化学ユニットリーダーを経て現在、主幹研究員（理事長直属）。高分子材料の耐久性の研究、高分子材料の鉄道への応用開発を専攻。

図 1 低温用断熱支持材料の平均熱伝導率

シ樹脂・ポリイミドなどとの組み合わせについて得られたデータから、平均熱伝導率 $\bar{\kappa}$ を図 1 に、引張強度 σ を図 2 に示す。

図 1 に示すように、CFRP（カーボン繊維-エポキシ樹脂、一方向圧縮成形品）は常温側では熱を伝えやすいが極低温側では熱伝導率が極めて小さいことが見出された。ことに CFRP-T60（カーボン繊維 60%）は、極低温での熱伝導率が最小で、しかも引張強さが $100 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ を越えるほど大きく、 $\sigma/\bar{\kappa}$ の値が 71.4 (77~4.2 K 間) と最大である。一方、常温側では GFRP-P（ガラス繊維 75%-ポリエステル・エポキシ混成樹脂、一方向連続引抜成形品）が、熱伝導率が比較的小さく、引張強さが $84 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 以上と大きく、 $\sigma/\bar{\kappa}$ は 10.5 (77~300 K 間) とこの温度域では最大である⁹⁾。

そこで、真空層と輻射熱反射のためのアルミニウム管も含めた複層管構造として、極低温の液体ヘリウム側の外層を CFRP 製管、常温の車体枠側の内層を GFRP 製管とするハイブリッド構造とする提案を行った。この方式はステンレス鋼に代わって、宮崎実験線の実験車 MLU-001、-002 などに適用されている。

3. ACM の車体軽量化への応用

車両の軽量化は、省エネルギー化のみならず、高架

図 2 FRP の引張強さの温度依存性

橋など構造物の簡易化に有効でしかも振動・騒音の低減にも効果がある。とりわけリニアモーターカーのマグレブは浮上するため必須であるが、ALPS も支持用ゴムタイヤの使用限度を示す限界 WS 値が輪重に比例することから、とくに重視される。

そのため当所において車両の軽量化に関する研究開発が種々なされてきているが、ここでは筆者らが参画した ALPS のシステム開発の一環として進めた、車両構体への ACM の応用⁹⁾を紹介する。なおこの研究は ALPS 車両に限らず、マグレブやスーパー新幹線車両などへも応用できるものである。

ALPS はゴムタイヤの荷重負担を 2 t/輪以下にする

図 3 ALPS 用 1/12 サイズ車両構体模型

表 1 同一曲げ剛性における比較

種 別	材 質	パネル厚 さの比	重量比	破壊荷 重の比	コス ト比
普通鋼版	SS 41	1	1	1	1
アルミ板	A 5083	1.5	1/2	1.1	2.5
アルミ表面 アルミハニカム	A 5052 1/4-3003-002	2.5	1/10	4.5	6
CFRP 表面 ノーメックス ハニカム	P 201 HRH-10-3/16-6.0	2	1/20	1.7	20
GFRP 表面 アルミハニカム	SPG-100 A 1/8-5052-002	3.5	1/8	7	10

図 4 AP-P, BSL-P タイヤの限界特性

必要があり、車両の構体を従来の鋼製（最近ではアルミニウムも一部適用されている）に代わる軽量材料の候補として、各種 ACM を探索し、図 3 に示す 1/12 サイズの構体模型を試作した。この模型製作から成形性や経済性を評価し、試験体と合わせて強度特性や接合部の疲労などを調べた。とくに構体材料として重要な曲げ剛性について、現用の鉄鋼と同等にしたときの比較を表 1 に示す。これらの結果と諸特性から評価を下し第 1 案としてアルミニウムコア-アルミニウム表面板のハニカムサンドイッチ構造を提案し、第 2 案のノーメックスコア-CFRP 表面板のハニカムも一部に用いて、実物大断面、長さ 6 m の車両構体が試作され、有用性が確認された⁷⁾。

4. リニアモーターカー用ゴムタイヤの試作評価

マグレブは浮上方式であるが、車両走行により地上の浮上用コイルに誘導される磁場を用いるため、時速 150 キロ程度までの低速用と緊急用（停電などコイル異常時）の支持・案内にはゴムタイヤが用いられる。一方、ALPS は常用の支持・案内がゴムタイヤ方式である。これら両方式用のゴムタイヤの試作、評価を行った。マグレブ用はブリヂストン(株)⁷⁾、ALPS 用は

これに住友ゴム工業(株)と横浜ゴム(株)が加わり、共同で試作、評価を進め、完成することができた⁸⁾。

ゴムタイヤの使用限度を示す限界 PV 値（常用最高の輪重×時速）は、既存のタイヤでは 300 tf・km・h⁻¹ 以下であるが、試作評価を重ねた結果、図 4 に示すように、400 を越え 500 に近づくタイヤを作ることができた。これらはいずれもトレッドゴムを薄くしてゴムの粘弾性発熱を抑制し、トレッドパターンを除いたブレインタイヤである。宮崎実験線のマグレブ用としては、輪重約 3 t・400 km・h⁻¹ で短時間走行が可能であり、500 km・h⁻¹ からの緊急着地 3 回まで可能な支持、案内タイヤを完成し、実験線で使用されてきた⁷⁾。ただ耐磨耗性の向上など実用化に向けての研究は今日も続いている。ALPS 用には（アラミドコードの適用など）約十種の支持、案内用タイヤを試作評価し、支持用には AP-P タイヤ、案内用（小形）には、GK-P タイヤ（アラミドコード製カーカス）を提案することができた⁹⁾。

5. 雪氷固着防止コーティングの応用開発

新幹線の降雪による遅れをはじめとして、鉄道の雪氷害は深刻である。リニアモーターカーの降雪や積雪による被害を防ぐ対策が必要である理由は、たとえ約 10 cm 浮上しても、ガイドウェイの底面や側面の着雪が氷結して固着すると除雪装置（別途開発中）の移動が困難となる。また低速・緊急用の支持、案内タイヤの昇降装置（車体側）に降雪が侵入して氷結すると作動に支障が出るおそれがある。これらマグレブ関係だけでなく、広く鉄道の雪氷害を防ぐため、新しい機能性高分子を応用した雪氷固着防止コーティングの開発を、関西ペイント(株)技術研究所の村瀬平八氏らと共同で進めてきた⁹⁾。

その結果生み出された新コーティング材の例を示す。まず着雪は氷結する場合が圧倒的に多いことに着目し、着氷力を極端に下げた試作⑥が生れた。これは Li イオンをシリコンポリマーに結合させて、水分子の H-O-H の結合角が、氷となるときの 104° から 109° へ拡大するのを抑制して、脆弱な氷を界面に生成させる機能をもたせたものである。この着氷力は着氷しにくいとされている四フッ化エチレン樹脂や海外

図 5 札幌実物大模型ガイドウェイにおける除雪性試験

の類似コーティング材と比べ極めて小さい値となっている。また最近の試作⁹⁾はフッ素-シリコンポリマーであり、分子設計の結果、表面の水滴の接触角が 155° と極めて大きく、着氷力や着雪力が最も小さい。この塗装板は札幌における自然降雪の中に立て掛けられてもほとんど着雪せず、当所の塩沢雪害実験所の天然雪を用いる風洞実験においても、乾き雪はほとんど付着せず、水を含ませた濡れ雪では着雪するが、容易に除雪しやすいことが確認された。また人工着雪装置でも最小の除雪力を示した。そこで、図5に示すように、マグレブガイドウェイ実物模型を用いて、除雪の容易さを実地で調べている⁹⁾。

6. その他の応用開発例

以上の4例のほかに LM 式に関して、筆者らが行った応用開発課題を次に列挙し、リニアモーターカー方式の高分子材料への要求を示す。

◇「リニアインダクションモーター (LIM) 方式のポリウレタン製ガイドローラーの開発」：リニアモーター参画の最初のテーマであり、注型ウレタン (ゴム硬度 JIS-A98) で試み、輪重 1 t - 500 km/h 条件のソリッドタイヤを試作し、高速高荷重特性を調べた。

◇「LIM ガイド用高分子軌条の開発」：LIM 用や ALPS の案内タイヤ用に、軽合金車輪と走行路面側への高硬度ポリウレタンライニングとの組み合わせを試み約 20 m の鉄桁上に試験施工し、十年以上屋外暴露して変状を調べ、可能性をつかんだ⁷⁾。

◇「マグレブの支持タイヤ走行路面材の検討」：宮崎実験線の建設時に、樹脂舗装材を提案したがコスト上採用されなかった。その後、ゴムタイヤの摩耗低減のため走行路面材が再び検討されている。

◇「マグレブのガイドウェイ用プラスチック筋材の開発」：宮崎実験線建設時に、磁気の影響を除くためコンクリートの鉄筋の代りに、FRP の連続引抜筋 (凹凸を長手方向に形成) を開発し、提案したがコスト上、非磁性鋼が採用された。その後当所の涌井一主任

研究員らにより FRP 製筋材・緊張材の開発が進められている。

◇「マグレブ地上コイルのコンクリート内埋込材の開発」：推進、案内兼用と浮上用のコイルをコンクリートスラブ内埋込式とするために、2次絶縁を兼ねたエポキシ樹脂モルタル等を日立化成工業 (株) の協力で開発した。最近では1次絶縁も兼ねる埋込材の研究も進められている。

◇「マグレブ地上コイルのケーブルソケットの簡易化」：推進、案内兼用の地上コイルそれぞれへ電気を供給するための端末ソケットは、 5.8 kV - 900 A と高圧高電流を絶縁するために高価となる。これを簡易化、コストダウンさせるためにシリコンゴム等のシユリンクチューブを提案した。

7. LM 式の実用化に向けての高分子材料へのニーズ

以上、LM 式に関連して筆者らが進めた応用開発を十例提示したように、ニーズが求める開発の多くは既に着手されている。これらの課題をさらにブレイクスルーしたり、深度化をはかることが求められている。それらも含めて、マグレブや ALPS のニーズの強いものを列挙すると、次のようになる。

“超電導コイル用断熱荷重支持材” “ヘリウム液化冷凍器用断熱接着剤、弁” “車上、地上コイルの絶縁材” “地上コイルのコンクリート埋込絶縁材” “超軽量構体、車体枠” “車両内装材” “車両用防振、防音材” “空気抵抗低減材” “推進、案内コイルの簡易ソケット” “耐摩耗性ゴムタイヤ” “タイヤ走行路面材” “雪氷害防止材” “案内、表示等旅客サービス用材料” 等。

おわりに、マグレブ等新しい鉄道システムのクリエイションは、新しい材料システムの創造により実現することを強調しながら結びたい。

引用文献

- 1) F. Ohishi: *Applications of Advanced Composites to Advanced Railway Systems, Proc. MRS'88* (1988)
- 2) F. Ohishi: *Applications of Polymeric Materials to Railways, Proc. Rubber Con'88* (1988)
- 3) F. Ohishi: *Developments and Applications of Polymeric Materials to Railways, Proc. 2nd International Plastics Conference* (1989)
- 4) 松岡孝一: RRR, **45**, [4] 12 (1988)
- 5) 鉄道総研, 浮上式鉄道開発推進本部: リニアモーターカー・マグレブ, 清文社 (1988)
- 6) 中島 洋, 大石不二夫, 川平剛雄他: 第15回低温工学研究発表会, 前刷 (1975)
- 7) U 研究グループ: 鉄研報告 No.7 (1972)
- 8) ALPS-B102 研究班: 鉄研報告, No.1200 (1981)
- 9) 大石不二夫, 村瀬平八, ほか: 雪氷, **49**, 1 (1987)