材料から見た磁気浮上列車

中 島 洋*

1. はじめに

超電導磁石を使用して浮上する反発式の磁気浮上式鉄道は、浮上高さが約 10 cm と大きくすることが可能なため、最高速度 500 km/h (140 m/s) を目標とした低公害の超高速鉄道に有望な方式であるとして注目を受けている。

国鉄では、昭和 30 年代の後半から新幹線の次に達成すべき高速鉄道の開発目標として何らかの方法で浮上し、摩擦に頼ることなく推進することのできる輸送手段を目指して、研究を進めてきた。この中には、浮上のため的手段として空気を噴出して浮上させる空気浮上方式や永久磁石同士の反発を利用する磁気浮上方式も含まれていた。これらの浮上方式は、実際には騒音の問題や浮上力の不足等種々の欠点もあり、昭和 40 年代の半ばには行き詰まりを迎えていたと言える状態であった⁽¹⁾。

また、推進方式については専らリニアモータが研究されていたが、当初はリニアインダクションモータと呼ばれる方式であった。これは十分な推力を発生することは可能であるが、移動側と固定側の隙間を小さくしないと性能が十分に発揮できないという悩みを持っていた。

車両が浮上して高速で安定して走行するための必要条件として、直感的にもまず地上の走行路が平坦であることが要求されることは明らかであるが、実際の走行路を東京から大阪まで理想的な正確さで布設することは現実には不可能なことである。たとえ、できたとしてもそのための建設費は膨大なものとなり、またそれを維持するための保守費も大変な額となる。実際に、新幹線でも線路の保守は大変に重要な役割を担っており、あれだけの安全の実績を確保している背景には夜間に行う線路の保守が緑の下りの力持ちとして貢献をしている。

乗物の安全性を考える場合、または車両の乗心地を検討するときには、走行路は一定の起伏を持つことを前提として検討せざるを得ない事柄である。これは、すべての高速で走行する乗物に対して同じことが言える。

鉄道車両を考える場合も、この走行速度と軌道の平坦度との関係は究めて大切な要因となり、速度の高い程厳しい精度が要求されることになる。このときに問題となる走行路の精度は例えば 100 m の距離で数 mm の上下または左右の狂いが対象となってくる。逆に、軌道の精度が低くてもなお安全でよい乗心地が得られる方式がより優れた輸送システムであるということになる。

超電導磁石を使用した磁気浮上式鉄道では、浮上高さならびに案内の空隙を大きくとることができるが、さらに推進にリニアシンクロナスマータを組み合わせることにより、この空隙を生かしたまま浮上走行することができるようになっている⁽²⁾。

このように本方式で採用している浮上式鉄道は、高速に適した方式であるというすばらしい特徴を有している。しかしながらその反面、車上に超電導磁石を使用する必要がある等新しい開発課題を多く持っていた⁽³⁾⁽⁴⁾。

ここでは、現在の実験車両の簡単な紹介をするとともに、開発を進めるに当たり性能を左右する各種材料の使用状況について紹介する。

2. 浮上式鉄道の原理と現状

(1) 実験線の紹介

浮上式鉄道の開発は、最初から浮上走行する車両で実験を行ったわけではなく、1970 年(昭和 45 年)から暫くのあいだは定置の実験設備で各種の確認をおこなってきた。その代表的な実験では、超電導磁石を回転する円板の上方に固定し、この円板上に浮上用のコイルを設置して回転させる構成で行った。この実験の目的は、地上に相当する設備(この場合は円板)を動かして、走行状態を模擬することで、これによって主として浮上特性が計算と合うか否かを調査したものである。

これに続いて、1971 年に中央線の国立駅の近くにあ

* 日本国有鉄道鉄道技術研究所主任研究員
Materials Used in Magnetically Levitated Train;
Hiroshi Nakashima (Railway Technical Research
Institute, Japanese National Railway, Kokubunji)
Keywords: superconducting magnet, levitated train,
high speed train, materials, cryogenics
1986 年 10 月 21 日受理

る鉄道技術研究所の中に初めて実験用の走行路を建設し、実際に走行する小型の車両を用いて実験を行った。これによって、世界ではじめての浮上走行に成功したが、さらにこれに引き続いて、1972年には、鉄道が100周年を迎えた年であったこともあり、さらに所内に約400mの実験線を建設し、ML100と名付けた車両を走行させ、一般公開も行いその可能性を実証した。

最初の実験車両は超電導磁石を収納した極低温容器(クライオスタット)にただ台枠と車輪を付けて走行させるだけというような簡単なものであったが、ML100では超電導コイルは合計で4個も搭載し、かつ車両としてのイメージを十分に出すように、内部にシートまで4席設けたものとなった⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

このような実験を経て十分な見通しを得ることができたので、これ以上の開発を進めるにはどうしても長距離の実験線を建設することが必要となってきた。宮崎の実験線はこうした状況の中で、種々検討が重ねられた結果として建設場所が選ばれ、宮崎県の日向市に建設されたものである。図1⁽⁹⁾はこの実験線の概要を示したもので、全長約7kmのなかには勾配区間と曲線区間が設けられており、将来の実用時に必要となる各種の確認が可能となるようになっている。

実験線が建設されたのは1977(昭和52年)年度であるが、この建設と共にML500と名付けられた実験車両が製作された。この車両は、図2に示すような外観のもので、名前の示すように時速500kmで走行させることを目的

図1 宮崎実験線の概要。

図2 実験車両 ML500。

として製作され、単車で人の乗るスペースは用意していなかった。

この ML500 による実験は順調に進み、1979年12月には時速517kmという世界記録を樹立し、超電導磁石を使用する浮上式鉄道が将来の高速鉄道として有望であることを実証した⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁶⁾。

図3は、現在宮崎の実験線で走行実験に供されている試験車両 MLU001の外観を示す。この車両の特徴はML500が高速での走行の可能性を中心に追究することを目的としたのに対して、乗客を乗せて輸送する乗物としての特性を確認することに重点をおいたことである。そのため、図4⁽¹⁷⁾に示す断面の構造となっており、内部に人の試乗するためのスペースと座席が取り付けられている。シート数は、3両合計で32席設けている。

もう1つの重要な特徴は、車両を連結して走行した時の各種の特性が試験できるように、最大で3両編成になることである。鉄道車両の大きな特徴のひとつがこの連結できるということで、これによって大量の乗客を安全に輸送することができることになるため、連結状態での試験確認は将来に対して重要な意味を持つことになる。

MLU001は、図4に示すように車体と台車に分かれており、その間を空気バネ(2次バネ)でつないだ構造と

図3 実験車両 MLU001。

図4 MLU001 断面構造。

なっている。これはすべての乗物がそうであるように、車両の安定性と乗心地を良くすることを目的としている。この方式の浮上式鉄道の最も大きな特徴である超電導磁石は、台車の両側面に取りつけているが、1つの車両には合計で8個のコイルが搭載されている。代表的な超電導磁石の概念図を図5⁽¹⁷⁾に示す。図に示した例は、コイル2個を1つの容器にまとめた方式のもので、全長が約4mで高さは約1.2m程のものである。内部に収納しているコイルは図に示すようにレーストラック形のコイルで長さが約1.7mで幅が約0.5mの大きさのものである。上部には液体ヘリウムタンクが設けられており、全体を真空槽(外槽)の内部に収納して熱侵入が少なくなるように構成している。

図5 超電導磁石概念図。

(2) 浮上式鉄道の原理

ここで簡単に浮上式鉄道の原理について説明しておく。前にも記したようにこの浮上式鉄道の特徴は車上の超電導磁石が重要な役割を持っている点であるが、この超電導磁石の役割はあくまで強力な磁石を提供することにある。

地上側に配置された浮上および推進案内用のコイルは図4に示すような位置に配置されており、これらのコイルと超電導コイルとの間の電磁気的な相互作用によって必要な力を発生させることになる。たとえば、浮上について話を絞って説明すると、車両が走行すると車上の超電導磁石が地上に配置した浮上用のコイルの上を次々と通過していくことになる。地上の浮上用コイルは単なる閉コイルで、外部とは全くつながりのないコイルであるが、強力な磁石がその上を通過するときこの浮上用コイルに磁束が交叉する。すると浮上用コイルには、これを阻止しようとする方向に電流が流れるが、これは良く知られた現象である。ここに流れる電流と、超電導磁石との間で反発力が発生するが、これが浮上力となる。

この現象は丁度浮上用のコイルに超電導磁石が近づこうとするのを浮上用のコイルが妨げるような形で働くことになる。従って、超電導磁石が動いていない時、または速度が低い時には浮上力は発生しない。

この現象は、普通の永久磁石でも簡単に実験して確認することができる。たとえばアルミニウムの円板を回転させ、その上に永久磁石を前後に動かないように紐で引っ張りながら持って行けば、磁石が浮いた状態で保たれることになる。

車両の案内も全く同じ原理を利用しているが、異なるのは走行路の中心を走っているときには力を発生させる必要性は無いので、中心からずれたときのみもとへ戻すための電流が流れるように工夫してある。

このように、浮上も案内も単に地上に電気コイルを配置するだけで構成可能であり、特別な制御を必要としない能動的なシステムとして成立していることが大きな特徴となっている。

浮上式鉄道の推進には、やはり電磁気的な力が利用されており、地上に設置した推進用のコイルに電流を流すことによって移動磁界をつくり、これに同期して車両が走行するようになっている。これは、リニアシンクロナスマータと呼ばれているが、普通のシンクロナスマータと原理は全く同じものである。

3. 使用する材料の特徴

以上述べてきたように、浮上式鉄道の最大の特徴は、車上に超電導磁石を使用していることである。これまでにも種々の応用として超電導磁石の実用化が話題となっているが、残念ながら本当の意味で実用化されたものがないのが現状である。

特に浮上式鉄道の研究がはじまった当初は超電導磁石の応用そのものが、まだ夢のような話だとする考え方が強く、担当した我々としても半信半疑のところがあったが、この開発が現在の状態まで来た背景には、浮上式鉄道は必ず成り立ち、かつ、有用な輸送機関になるという推進者の強烈な信念に基づいていたといえる。

こうした状態のなかでの開発が進められたために、あらゆる部分で新しい技術的検討を行って来た。多くの開発がそうであるように、新しいハードをまとめるためには使用し得る材料の存否が全体の成否を大きく左右する。結果的にそれまでに開発が進められてきた材料の恩恵に浴しながら、検討が進められることになる。

たとえば、飛行機が今日のように巨大なものとなり、大量の乗客が安心して乗れるようになった背景には、周知のように金属のみならず各種の新しい材料の進歩があったことが大きく貢献している。

全く同じ意味で、浮上式鉄道も広い分野で優れた材料

が有るか無いかによって、その構成が大幅に左右される
ところであり、同時により良い材料の開発を切望してい
る分野であるといえる。

今回は、材料の専門の方々に読んで頂くことになるが、
残念ながら筆者はその道の専門ではないため、ここでは
浮上式鉄道がどのような材料開発の恩恵に浴しているか
を材料開発の先人に感謝の意を込めつつ紹介したいと思
う。また、併せて材料開発に対する欲張った期待値をも
記して見たいと思う。

(1) 金属材料関係

(i) 超電導材料

浮上式鉄道の開発において、使用している材料のなか
で何と言っても特徴のあるものは超電導に関する材料と
いうことになる。周知のように種々の超電導材料が発見
されているが、浮上式鉄道の要求する超電導磁石は、軽
量であることと小さい断面のなかに十分な電流を流し得
ることが条件となる⁽¹⁸⁾。

使用している超電導磁石の線材には専ら Nb と Ti を
主とした合金系材料が用いられているが、このほかにも、
Nb₃Sn を用いた化合物系線材も比較的手易くなっ
ており、これまでも試作的に使用はしている。浮上式
鉄道用の超電導磁石では特に高い磁場を必要としない
ので、現在は前者のほうが主流になっている。

使用している NbTi の線材は、ベースとなる銅と
NbTi の割合をほぼ 1 対 1 にまで小さくして線材の質量
軽減をねらったもので、代表的線材の断面は約 1.8 mm×
0.9 mm の寸法で、この中に約 1200 本の素線が入っ
ている。このような微細構造の線材が出来て初めて浮上式
鉄道に使用可能な超電導磁石が製作できるようになって
いる。こうした線材開発の努力は、各線材のメーカーに
よってなされてきているが、これら各所の努力が結果さ
れて浮上式鉄道というシステムが成り立っていることを
示す代表的な例である。

(ii) ステンレス鋼

超電導コイルを収納する容器は 4.2 K (約 -269°C) と
いう極低温に維持されることが必要条件となるために、
液体ヘリウムを用いて冷却するが、これを収納する容器
は磁性を持たないことと、低温において十分な強度と靱
性を有することが要求される。

この条件に合う材料として、液体ヘリウムを使用する
容器の殆どにステンレス鋼が用いられている。浮上式鉄
道においても同様であり、超電導コイルをとりまく容器
には専ら SUS304L が用いられている。

ステンレス鋼は、溶接性が良く精度の高い容器が製作
し易いことも採用する理由の 1 つとなっているが、質量
の点では必ずしも満足できる材料ではない。そのため、
これに代わるものとしてチタン合金等の採用も検討され

たこともあるが、現在では構造の簡略化を進めることに
よって、ステンレス鋼の使用量を制約し、軽量化を図っ
ている。

(iii) アルミニウム合金

浮上式鉄道の車両全体を軽量化するという課題から、
当然のことながら各所にアルミニウム合金を使用してい
る。

その代表的な例として、超電導磁石の外槽がある。外
槽は高度の真空を維持することができる真空容器である
とともに、電磁氣的な外乱を内部の超電導コイルに及ぼ
さないためのシールドの役割をも有している。

このために、要求される条件としては強度があり、軽
量で、かつ、電気伝導率の良いことが挙げらる。残念な
がらこのような条件を単一の材料ですべて満足させてく
れるものがなく、現実には強度を必要とする部分と電気
抵抗を小さくする部分とは別々の材料を用いて構成する
ようにしている。たとえば、構造材料として A5083 を
採用し、電気抵抗の小さい材料として A1100 のような
純アルミニウムを採用する等の組み合わせを行っている
のが現状である。もし、単一の材料でこの条件を満たす
ものがあれば非常に有り難いことになる。

アルミニウム合金はこの外にも、車体の各所に使用さ
れているが、基本的には軽量で剛性ならびに強度が大き
いことが要求される。このため、車体の外板には超ジュ
ラルミンを、また磁石を取り付ける台枠には溶接性を重
視して A7000 番台を採用している。

地上に設置する浮上用並びに案内推進用の電気コイル
はすべてアルミニウム合金を使用しているが、これは強
度もさることながら、電気抵抗の小さいことが要求され
た結果である。特性上からは銅合金等の方が優れている
が、経費との兼ね合いで材料の選択をした結果である。

アルミニウム合金の使用箇所として、もう 1 つの代表
例に冷凍機の熱交換器がある。ヘリウムを液化すること
を目的とする冷凍機では非常に優れた熱交換器を必要と
するが、このために浮上式鉄道では積層形熱交換器とい
う特殊な熱交換器の開発を行ってきた。これはアルミニ
ウムの多孔板と ERP のスペーサとを交互に配置して、
接着剤で固めたもので熱交換器内のガスの流れに対して
直角方向の熱伝導が良く、縦方向の熱伝導を悪くなるよ
うに構成したものである。

(iv) 銅 合 金

超電導線材そのものに銅が採用されていることはすで
に記したとおりであるが、超電導磁石を永久電流モード
で使用する上に最も重要な永久電流スイッチがある。こ
れに使用する線材は若干異なっており、超電導状態でな
い場合の電気抵抗を大きくする目的で CuNi をベース
にした線材を使用している。

また、超電導線材以外に重要な銅合金の使用箇所とし

て超電導コイルに電流を供給するためのパワーリードがある。普通のリード線と違う最大の特徴は、電気抵抗が小さくて、かつ、熱伝導率の小さいことが要求される点である。実際にはこんな都合の良い条件に合う材料はなく、殆どの金属は電気抵抗が小さければ熱伝導率は良くなってしまふ。したがって、電気伝導率に比して熱伝導率が低い金属材料を選択することになるが、その結果として現在最も多く採用しているのが隣脱酸銅である。実際のリード線は、周囲に低温のガスヘリウムを流して冷却しリード線の温度が上昇して焼損等を起こさないような構造としている。

このようにして設計し製作したリード線には 700 A 程度の電流を流すが、冷却効果を期待して細く作られているので、電流を流さない時の熱侵入量はおよそ 0.5 W 程度に少なくなっている。

銅合金は比較的重い材料であるため、このように低い電気抵抗を必要とするときにのみ使用している。

逆に、低温領域への熱侵入を少なくする目的で、最近の超電導磁石では内部に設けたセンサーからのリード線(直径で 0.2 mm 程度の細い線)でも、従来のように銅線を使わずに熱伝導率の小さい材料によるリード線を使用するような細かい配慮をしている。

(v) 異種金属間接合材

上に記したように、極低温容器に使用している材料は内槽がステンレス鋼で外槽がアルミニウム合金となっているため、内部に使用する配管の多くはこの両者を結ぶことになる。

容器は高度の気密性能が要求されるために溶接によって組み上げるが、両者の金属間の優れた接合材が必要となってくる。幸いにして摩擦圧接によって作られた接合材が十分に信頼性の高いものとして入手可能となっており、超電導磁石内部に多く採用されている。これは超電導磁石の構造を左右する要素として、大きく役立っている材料の 1 つと言える。

(2) 非金属材料

(i) 樹脂材料

最近の種々の設備がそうであるように、浮上式鉄道の車両においても樹脂材料が多く使われているが、その代表的な対象として、やはり超電導磁石関係の機器が挙げられる。その中でも最も大切な超電導コイルは、前記の超電導線材を巻いた後にエポキシ樹脂で含浸して固めたものである。ここでの樹脂の役割は極めて大きく、超電導線材を巻枠に巻いたものを確実に固定することで、常温では勿論のこと低温においてもその接着力・強度を失わないことが大切な条件となる。この樹脂による固定が確実でないと超電導線材本来の特性が十分に発揮できないことになる。

この外にも、接着剤としての樹脂材料は冷凍機の熱交換器を製作する時にも使用されている。前述のように熱交換器は積層形熱交換器という方式で金属の多孔板と FRP のスペーサを交互に重ねて接着して構成するもので、両者の間の接着が低温においても強度的のみならず気密的にも確実なものであることが要求される。ここに使用する接着剤もエポキシ系統のものが使用されており、十分に条件を満たしている。

このほかに樹脂の重要な使用箇所は冷凍機の弁がある。極低温で作動する弁には作動の確実さを保つためにテフロン系統の樹脂を使用しているが、これは低温で若干の可撓性を持っていることが採用する大きな理由となっている。

(ii) セラミック

セラミックにも最近は何種類かがあるが、超電導磁石でも重要な役割を担うところに使用される例がある。

これは主として、パワーリード関係の絶縁材料として使用するものである。単に絶縁をするだけなら他のものでも良いが、超電導磁石の内部では低温で気密を保ちながら絶縁することが必要となる場合がある。このようなとき気密を保つための相手材料は殆どの場合が、ステンレス鋼のような金属材料となり、従って、金属材料と十分な強度で接合し、かつ電氣的絶縁が可能なものが必要となるが、これに適合するものとしてセラミックを選択することになる。幸いにして最近のセラミックは金属との接合技術も進み、安心して使用可能になってきている。極一部に使用するだけではあるが、超電導磁石の構造を左右する大きな役割を持っている。

(iii) 複合材料

FRP(繊維強化プラスチック)に代表される複合材料は、あらゆる分野で不可欠なものとなってきているが、浮上式鉄道でも当然のことながら各所にその特性を有効に利用している。

超電導磁石関係で代表的な使用箇所として、断熱荷重支持材がある。これは、極低温の内槽と常温の外槽を接続し、超電導コイルに働く力を伝達する役割のものであるが、強度があつてかつ熱伝導率の小さいことが必要条件となる。

最近の超電導磁石では、この断熱荷重支持材にガラス繊維を使用した GFRP や炭素繊維を使用した CFRP を組み合わせて使用している。こうした材料を使用することによって、超電導磁石の熱侵入量を大幅に低減することに成功している。

また、すでに述べた積層形熱交換器のスペーサとして採用しているが、これは薄い FRP の板を複雑な形に打ち抜いて作ったもので、やはり強度とともに低い熱伝導率を持っていることを利用している。

この外に FRP を使用する場所としては、軽量化を図

る目的で車体の一部に、また場合によってはハニカムの表面板としても使用されている。

(iv) そ の 他

非常に特殊な分野として、超電導磁石を冷却するための冷凍機として開発を行っているスターリングサイクル冷凍機の例がある。

国鉄では、1982 年度(昭和 57 年度)から科学技術庁の科学技術振興調整費を受けて、スターリングサイクル冷凍機単独で 4 K レベルの冷凍を可能にしようとする研究を行っている。このためには冷凍機の中に使用する蓄冷材として、熱容量の大きい材料が必要となる。一般に物質の比熱は、温度が低くなればなるほど低下するために、低温で有効な蓄冷器を探すことは非常に難しい問題となる。普通のスターリングサイクル冷凍機では、この蓄冷器に温度の高い領域では銅合金の網を、また温度の低い領域では鉛の小球を使用している。

しかし、10 K 以下の領域を狙ったこの冷凍機では、希土類元素を用いた特殊な材料を使用している。具体的には、GdRh または GdErRh のような材料を使用しているが、これまでに 4 K 台で 2 W 以上の冷凍能力を確認する等の成果を得ている。

4. お わ り に

浮上式鉄道の簡単な紹介と使用する材料について述べてきたが、冒頭にも記したように新たに高速で走行する乗物を開発するためには、種々の分野でこれまでにない技術的挑戦を行う必要がある。このためには、それぞれ

の段階に応じて要求される特性に合った材料の有無が、物の成否を大きく左右することになってくる。

浮上式鉄道の開発が現在のレベルまでに到達するためには、材料面での開発成果の恩恵を数限りなく受けている。そしてなお、より新しい材料の出現を切望している先端技術分野の 1 つと言えると思う。これを機に浮上式鉄道の開発に、より暖かいご支援をお願いする。

文 献

- (1) 奥 猛, 京谷好泰, 佐貫利雄: 超高速新幹線, 中公新書, (1971).
- (2) J.R.Powell and G.R.Danby: ASME Paper 66-WA/RR-5 (1966).
- (3) 京谷好泰: 科学の実験, 30, 7(1979), 25.
- (4) 京谷好泰: 日本機械学会誌, 84, 746(1981), 12.
- (5) 笠井浩三, 有馬一堯: 日本機械学会誌, 83, 742(1980), 1121.
- (6) 田中 壽: 鉄道技術研究資料, 37, 5(1980), 196.
- (7) 岩花武彦, 藤本 健: 鉄研報告, 1171(1981), 153.
- (8) 中島 洋, 関口晴夫, 鈴木栄司, 岩崎一夫, 鈴木幸男, 戸来年樹: 鉄研報告, 1171(1981), 194.
- (9) 石塚素義, 岩花武彦, 岩元雅民, 荻原宏康, 京谷好泰, 北野好幸, 木村 浩, 佐々木拓二, 寺崎政男, 中島 洋, 山田忠利: 低温工学, 16(1981), 5.
- (10) 中島 洋: 鉄研報告, 917(1973), 67.
- (11) 中島 洋, 戸来年樹: 鉄研報告, 1171(1981), 173.
- (12) 岩花武彦, 根本 薫: 鉄研報告, 1134(1980), 103.
- (13) 中島 洋, 戸来年樹, 関口晴夫, 鈴木栄司, 岩崎一夫: 鉄研報告, 1134(1980), 120.
- (14) 岩花武彦, 藤本 健: 鉄研報告, 1134(1980), 92.
- (15) 京谷好泰: 機械の研究, 3(1982), 34.
- (16) Y.Kyotani: Rail International, 4(1981), 155.
- (17) 田中 壽: 日本の科学と技術(超電導), 科学技術館, 23, 216(1982), 44.
- (18) 中島 洋: 浮上式鉄道と使用材料, 鉄と鋼, 72, 9(1986).