

第 103 回

浮上式鉄道の 浮上案内システム

はじめに

鉄道車両が安定して走行するには、車両全体の重量を支える機能のみならず、線路に沿って走るための案内機能も備えていることが必要です。また、その際、車両を止める力（抗力とか走行抵抗とよびます）はできるだけ小さいことが望まれます。超電導磁気浮上式鉄道においては、宮崎実験線の後半から現在の山梨実験線に至るまで、側壁浮上案内方式というシステムが、この浮上（車両の重量の支持）および案内機能を担っています。ここではこれらについて歴史的な経緯も交えながら述べたいと思います。

超電導誘導反発浮上方式の採用

新幹線開業前の1962年から始まっ

た500km/h程度の最高速度を目指す超高速鉄道の検討において、磁気浮上方式、空気浮上方式（ホバークラフトのような原理で浮上）、新幹線の技術的な延長である鉄車輪方式の3方式があげられ、磁気浮上方式が選定されました。この磁気浮上方式に関しても大きく分けて、

- ・超電導誘導反発浮上方式
- ・常電導吸引浮上方式

の2案が代表的な選択肢として考えられました。

まず、図1に常電導吸引浮上方式の概念図を示します。本方式は、車両側電磁石と地上側鉄心の間の吸引力を使って浮上力を得る方式です。既存技術の延長で実現可能ですが、実用的なギャップ（地上側と浮上走行する車両の間の空隙のこ）は10mm程度といわれています。

他方、超電導誘導反発浮上方式は、

電磁誘導という現象を使います。図2に示したように、棒磁石を短絡コイル（1本の導線を何回もぐるぐる巻きにしたうえで導線の二つの端子をつないで短絡したもの）に近づけるとコイルに電流が誘導され、短絡コイルも一時的に磁石になります。すると、これら

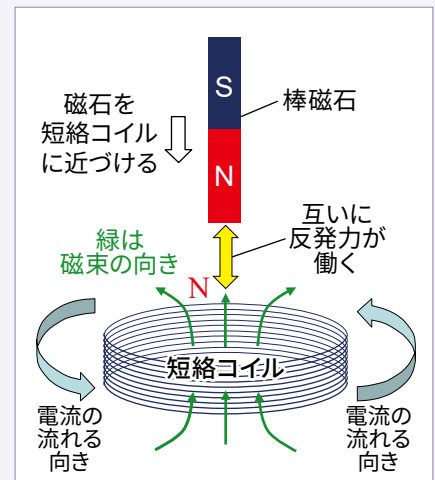


図2 誘導反発浮上方式の概念（電磁誘導）

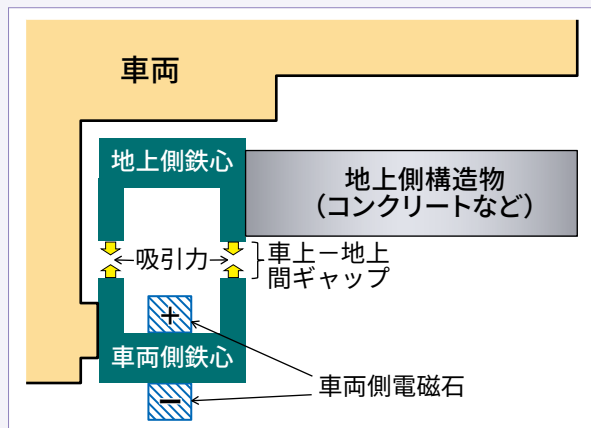


図1 常電導吸引浮上方式の概念

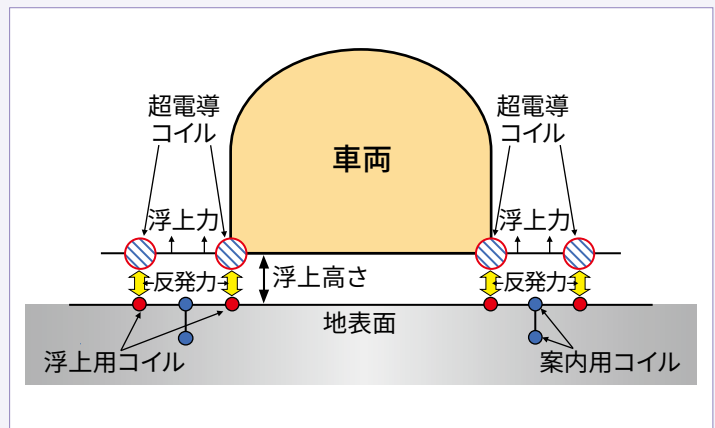


図3 パウエルとダンビーが提案した超電導誘導反発浮上方式¹⁾

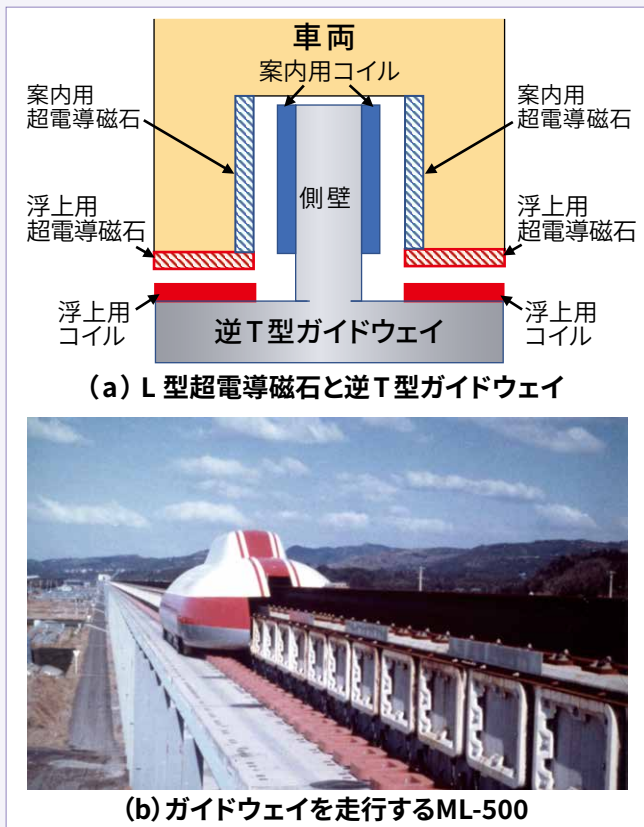


図4 L型超電導磁石と逆T型ガイドウェイ

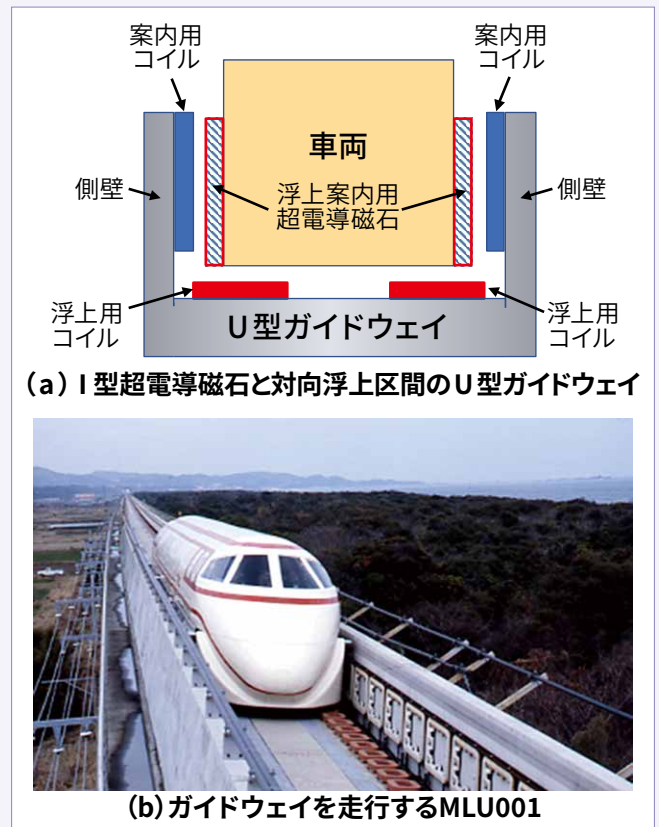


図5 I型超電導磁石と対向浮上区間のU型ガイドウェイ

磁石どうしに反発力が働きますが、この反発力を浮上力として用いるのが誘導反発浮上方式です。しかし、棒磁石では大きな力が得られないので、これに代えて超電導磁石を用いるのが、“超電導”誘導反発浮上方式です。超電導磁石は電気抵抗が0のため、大電流を損失なく流すことができ、強力な電磁石となって棒磁石などよりけた違いの力（浮上力および案内力）を得ることができます。こちらについては“軽量の超電導磁石の開発”という技術的なハードルはありますが、1桁大きいギャップ（100mm程度）が実現可能と考えられました。

超電導誘導反発浮上方式は、米国のパウエルとダンビーによってその原型が提案されました（図3）¹⁾。その基本的なアイデアは、前述のように車両側に強力な超電導磁石（図2の棒磁石の替わり）を搭載し、その車両が動く

きに地上側に設置された短絡コイル（図中の浮上用コイルおよび案内用コイル）に誘導される電流との間に働く力で、車両を持ち上げたり案内したりするものです。当時の国鉄の技術陣は両者の得失を勘案し、地震国である日本では大きなギャップが必要であるとして、また、超電導技術の将来性にも着目し、超電導誘導反発浮上方式を選択しました。

ガイドウェイ形状の変遷

旧国鉄の鉄道技術研究所構内（現在の鉄道総研国立研究所）での小規模な試験を経て、浮上式鉄道宮崎実験線が建設されました。

当初のガイドウェイ（構造物と各種コイルを合わせたもの）はその断面形状から逆T型ガイドウェイとよばれました（図4）。車両側の浮上用および案

内用超電導磁石を車両側面と底面の2面に配置し（その形からL形超電導磁石といいます）、地上側では車両と対向する路面上に浮上用コイルを配置する対向浮上方式を、案内にはガイドウェイ側壁に案内用コイル（推進用コイルとしても兼用）を配置する方式を用いていました。

しかし、このままでは乗客のスペースがないため、ガイドウェイをUの字形へ改造するとともに超電導磁石が縦横2組必要だったL型から1組だけでのI型へ集約されました（図5）。この変更（集約）は、超電導磁石の高起磁力化（たくさんの電流を流すこと）が達成されたため可能となったものです。一方、浮上・案内の原理は基本的に変わらず、浮上の機能は浮上用コイルで、案内の機能は推進用コイルとしても使われる案内用コイルにより別々に担われていました。

対向浮上方式の限界

ところで、対向浮上方式では、とくに低速での抗力が大きいという課題がありました。また、宮崎実験線での走行試験と並行して、実用線の検討も開始されましたが、その過程でさらに検討しなければならない別の課題も浮上してきました。超電導磁石の上部は客室として使いにくいいため、また、超電導磁石はそれを冷却するための冷凍機などいくつかの付帯設備を必要とするため、超電導磁石の個数を減らすことが実用線で提案されました。宮崎実験線では製作のしやすさもあり超電導磁石を車両の下部に敷き詰めていました（超電導磁石連続配置）が、車両長が長くなる実用線では進行方向に超電導磁石を連続してではなく間欠的に集約することとし、定員の増加を図りまし

た。あわせて空気抵抗の削減のため、前後2台の超電導磁石にまたがるように車両を配置して高さを低くする、いわゆる連接台車方式が提案されてきました（図6）。この方式では、車両と車両の間に配置された少数の超電導磁石で浮上力（案内力も）を支持するため、超電導磁石1個当たりで受けもつ浮上力は、これまでの宮崎実験線の3～4倍の大きさとなります。しかし、浮上効率の低い対向浮上方式ではこの要求に応えることができませんでした。

側壁浮上案内方式の誕生

これらの諸課題の解決のため、車両側超電導磁石を側面にI型に配置する構成はそのままで、地上コイルの方の大幅な変更が提案されました。すなわち、対向浮上方式ではガイドウェイに別々に配置されていた浮上用コイル

および案内用コイルが一つに集約され、側壁の上に垂直に浮上案内用コイルとして配置する側壁浮上案内方式の誕生です（図7(a)）。

図8を用いて本方式の浮上の原理を説明します。同図上および中に示したように、側壁浮上コイルは、上下に配置された二つの矩形コイルにより構成されています。この二つのコイルは両者の合わせ部でひねって接続されており、図中の矢印で示すように合わせて8の字型の電流が流れるような回路になっています。同図下左のように、もし超電導コイルがちょうど上下のコイルの中心を通ると、上下のコイルに誘起される電圧が打ち消し合って8の字回路には電圧が誘起されず（このような回路構成のことをヌルフラックス回路といいます）、したがって、電流も流れませんので車上の超電導磁石には力が働きません。他方、図下右側のよ

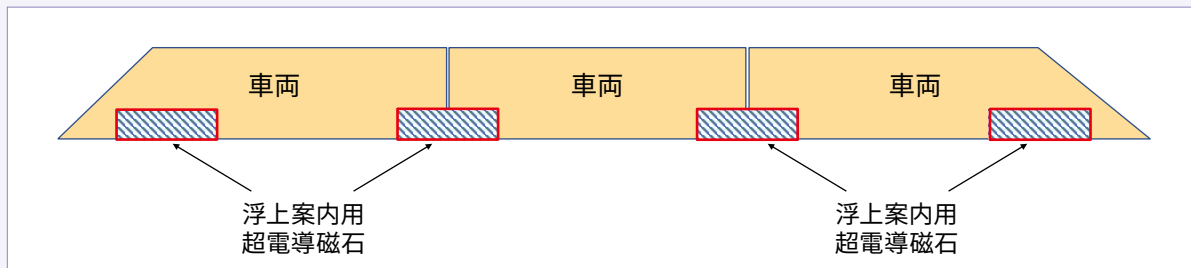


図6 集中台車方式ならびに連接台車方式

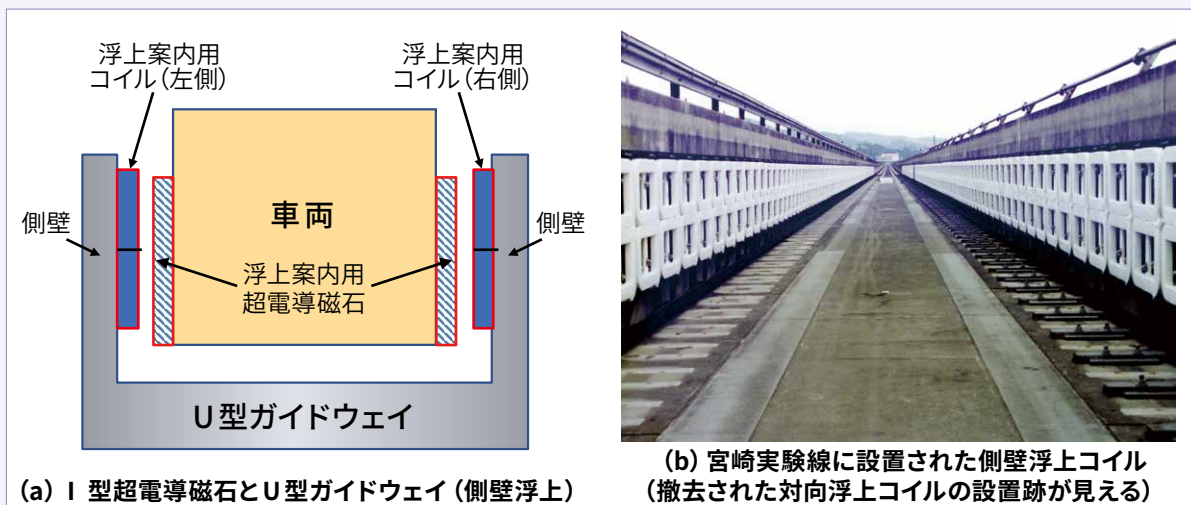


図7 I型超電導磁石とU型ガイドウェイ

うにそこから超電導コイルが下方に沈み込むと、その分だけ上下のコイルに誘導される電圧に差が生じ、その結果、8の字回路に電流が流れます。ここで□は紙面から手前に向かって、⊗は手前から紙面に向かって電流が流れることを示しています。そうすると、図中に示したように8の字コイルの上下コイルには互いに逆向きの電流が流れるため、それにともなって現れる磁極も逆向きになります。上側のコイルのS極と超電導磁石側のN極は異極同士ですから互いに吸引しあい、同極同士である下側のコイルのN極と超電導磁石側のN極は反発しあいます。このとき、8の字コイルの上下のコイルからの力はいずれも沈み込んだ超電導磁石を引き上げる方向に働くことがわかります。側壁浮上方式はこのように効率よく浮上力を発生でき、それが抗力を小さくすることに寄与しています。

さて、側壁浮上案内方式のもう一つの特徴は、上下一組のコイルで浮上力だけでなく案内力も発生できることです。詳しい説明は省略しますが、浮上機能の場合と同様に側壁部の左右のコイル(図7(a)の浮上案内コイル(左側)と同(右側))を結び案内力発生用回路を構成します。これもヌルフラックス回路となっており、車両がちょうど左右の中心を走っているときには案内回路に電圧が誘起されないため電流は流れませんが、車両が左右どちらかに偏ると電圧・電流が発生し、それを元に戻す方向の力、すなわち案内力が発生して、車両をガイドウェイの中央に戻します。

ヌルフラックス配置方式の原型を提案したのもパウエルとダンビーですが、彼らのオリジナルの提案が構造的に実現が難しいものであったのに対し、側壁浮上案内方式の方は実現可能な合理的な配置であったといえます。しかし、ヌルフラックス方式の原理を考案した

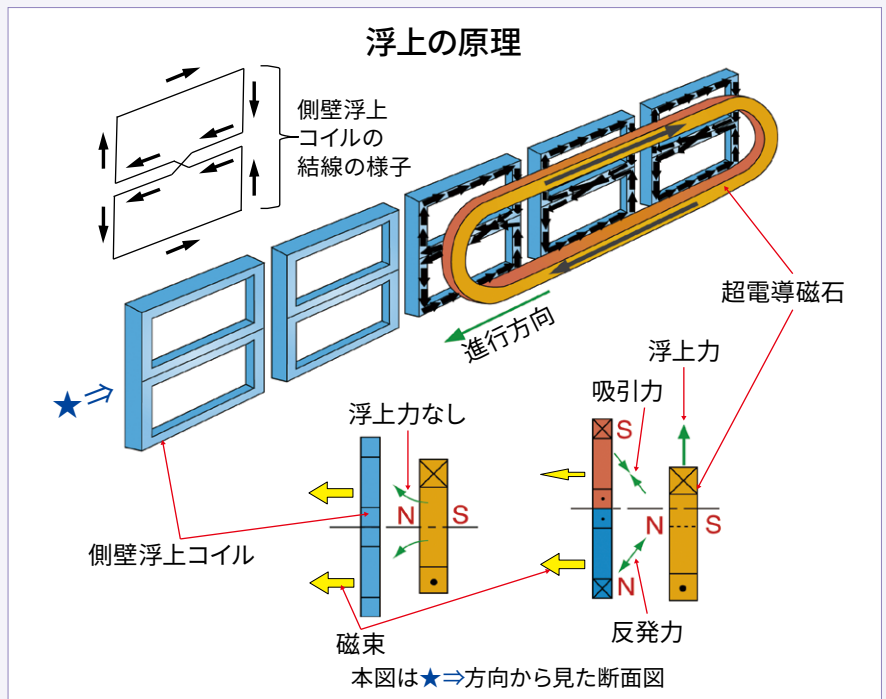


図8 側壁浮上案内方式の浮上の原理

パウエルとダンビーのオリジナルとしての価値は非常に高いといえます。

さて、以上のような経緯を経て側壁浮上案内方式への変更の提案がなされましたが、これまで実績のある対向浮上方式からの変更は当時の関係者一同にとり大きな決断を要する事柄でした。そこで、宮崎実験線の短い区間(500m弱)に実際に側壁浮上案内コイルを設置して性能が検証されることとなりました(図7(b))。本方式を用いることで抗力を小さくできることや、同一のコイルで案内機能も付加できることが実証されました²⁾。とくに低速での抗力低減効果が大きく、対向浮上方式の弱点が改善されていることが実証されました。

さらに側壁に8の字コイルを取り付ける際の工夫なども加えて浮上・案内システムが完成し、山梨実験線にも採用されることとなりました。その後も浮上案内コイルには種々の構造上・巻線上の工夫が施されて今日に至っています。

おわりに

ここでは浮上案内方式の解説を行いました。浮上式鉄道の開発は長い歴史をもちますが、一貫して“大量旅客輸送を大ギャップをもった非接触高速走行で実現する”という基本方針の下に進められてきました。その過程でさまざまな方式が検討されてきたことが、この小文でお伝えできたでしょうか？ この前提条件(最高速度、ギャップ、輸送密度)が変われば、最適なシステムはおのずと変わっていくものと思われます。本解説が皆様の理解の一助となれば幸いです。

(笹川卓／浮上式鉄道技術研究部)

文献

- 1) J. R. Powell and G. T. Danby : High-Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME Winter Annual Meeting, 66-WA/RR-5, 1966
- 2) 藤原俊輔, 藤本健 : 浮上と案内を兼用する誘導反発磁気浮上の特性, 電気学会論文誌D(産業応用部門), 112巻5号, pp.459-466, 1992