



3 鉄道工学への誘い

社団法人日本地下鉄協会 リニアメトロ推進本部

安藤正博 首席調査役

リニアモーターで 鉄道の 新技術を開発

このコーナーでは、私たちの社会や生活に身近な研究テーマを分かりやすく紹介する。第一線で活躍なさっている研究者の研究内容を中心に、学問の仕組みや今後の可能性などについて、インタビューする。

リニアモーターカーというと、多くの人はJR東海が山梨県などで実験している、未来の鉄道としての磁気浮上型の高速度鉄道を思い浮かべるに違いない。しかし、実はすでにリニアモーターカーは実用化されているのだ。日本でも地下鉄に採用され、リニアメトロとして営業運転が行われている。ここではリニアメトロの仕組みや、他の地下鉄にないメリットとともに、鉄道工学における技術開発の一端を紹介する。

鉄道の最大の欠点「摩擦」を解決する リニアモーターカー

リニアモーターカーを説明する前に、鉄道の技術的な面を考えてみましょう。鉄道はレールを敷いた専用の線路（軌道）の上を、専用の車両が走ることによって、安全性と高速性を保つシステムになっています。

それを支える技術で、鉄道工学の最大の発明ともいえるのが「踏面勾配」です。鉄道車両の車輪がレールに接する面は水平ではなく、外側にいくほど直径が小さくなる傾斜がつけられているのです。この傾斜のことを踏面勾配といい、揺れや振動などで車輪が左右にずれたときに、自動的に車輪を元の位置に戻してくれます。

また、鉄道車両はステアリングも自動です。ステアリングとは舵をとる装置のことで、自動車はハンドル（ステアリング・ホイール）で、進む方向を決めています。鉄道車両は軌道上を走りますし、レール上の細かなずれは踏面勾配によって自動的に修正されるため、ステアリ

ングは全自動です。こうした技術特性によって鉄道車両は極めて安全性が高く、実際、無人で運行されている路線もあります。

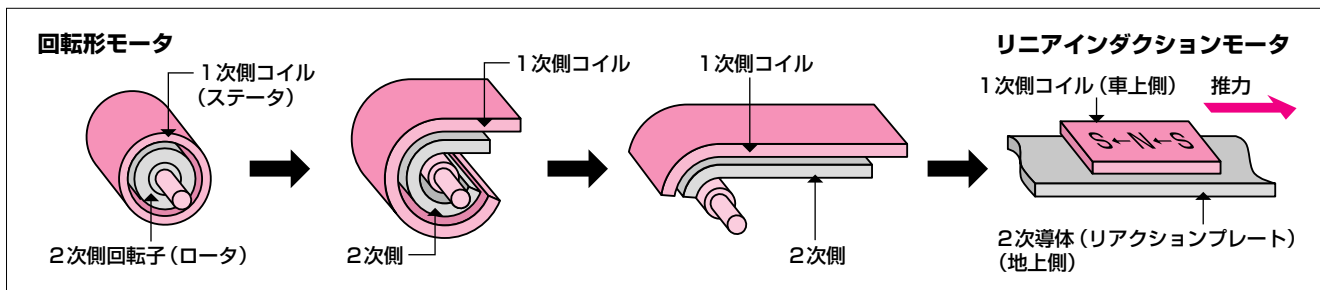
一方で、従来の鉄道には、どうしても超えられない技術的な壁があります。それは、鉄道車両の直接の推進力が、車輪とレールの摩擦力であるという点です。自動車はタイヤと地面の摩擦力によって推進力を得ていますが、鉄道車両の場合、車輪もレールも鉄ですから、その摩擦力は自動車のようにゴムと道路面ほど高くありません。つまり鉄道車両は鉄の車輪で鉄のレールの上を走行するため摩擦力は低くなり、基本的には滑りやすいのです。急勾配の線路は登れませんし、雨や雪でレールが濡れるとスリップしやすくなり、ブレーキをかけてから停止するまでの制動距離も長くなります。

鉄道工学は、この摩擦の問題に大きな力を注いできました。しかし、車輪を回転させて推進力を得ようとする限り、どうしても摩擦の問題から逃れられることはできません。そこで登場したのが、リニアモーターカーです。車輪とレールの摩擦力が小さいことが問題なら、摩擦力に頼らない推進方法を考えればいいのです。鉄と鉄の摩擦力ではなく、磁力で推進力を得る——これがリニアモーター開発の直接の動機でした。

回転モータを展開したような構造で 車両そのものが磁力で推進

リニアモータの原理そのものは単純です。磁石のN極やS極に働く吸引力や反発力を利用して、水平方向に、直線的（リニア）な推進力を得ようというものです。従来の電車に使われている回転モータは誘導電動機といい、この原理を利用して磁力を回転運動として取り出したものです。ですから、もともとの考え方としては、回転モータよりリニアモータの方が先だったのです。リニ

【図1】回転式モータからリニアモータの展開



出典：社団法人日本地下鉄協会「LINEAR METRO—21世紀の都市交通システムへの提言」

アメトロの場合は、この回転モータの一部を切り開いて、直線上に展開したような形をしています【図1】。

回転モータは、1次側のコイルに交流電流を流すと磁界が発生し、2次側も鉄芯に誘導電流が流れ磁界が発生するため、1次側と2次側の磁界との間で吸引・反発の磁力が発生し、交流電源によって交互に極性が変わり、2次側が回転する仕組みです。この回転モータを切り開いているリニアモータは、論理的には無限の半径を持つ誘導電動機だということです。

実際には、2次側にはアルミと鉄でできた「リアクションプレート」を使います。リアクションプレートを2本のレールの間に設置し、その上にリニアモータの1次側のコイルが来る形にすれば、リアクションプレートに誘導電流が流れ、そこに発生する磁界との間に連続的な磁力が生まれ推進力になるわけです【図2】。

磁力を水平方向の推進力に変えるリニアモータカーには、大きく2つの種類があります。1つはJRなどが進めている「磁気浮上式」で、磁気の反発力を利用して車

体を地上から浮かせると同時に推進力や制動力を得ようというものです。もう1つは「鉄車輪支持式」で、通常の鉄道車両のように車体は鉄の車輪と車軸で支えますが、推進力と制動力に磁気力を使おうというものです。

ちなみに、海外では、リニアモータカーというと、一般的にはリニアメトロに代表される鉄車輪支持式を指し、磁気浮上式はマグレブ (Maglev = magnetic levitation : 磁気空中浮揚) と呼ばれています。マグレブ方式はまったく新しい鉄道車両なので、開発には長い時間を要し、現在でもまだ実用化試験段階にありますが、鉄車輪支持式は従来の鉄道工学で培った鉄車輪の技術と経験を利用できます。

鉄車輪支持式リニアモータカーは、1840年頃にはイギリスで実験が行われていました。当時は、周辺技術が未熟だったため実用化には至りませんでした。1970年代になると半導体とマイクロコンピュータにより、大電流を制御する技術が見え始めてきました。そこで私は、鉄車輪支持式のリニアモータカーを構想し、一足先に実用化を目指すことにしました。それが地下鉄において実現したために「リニアメトロ」と呼ばれているのです。

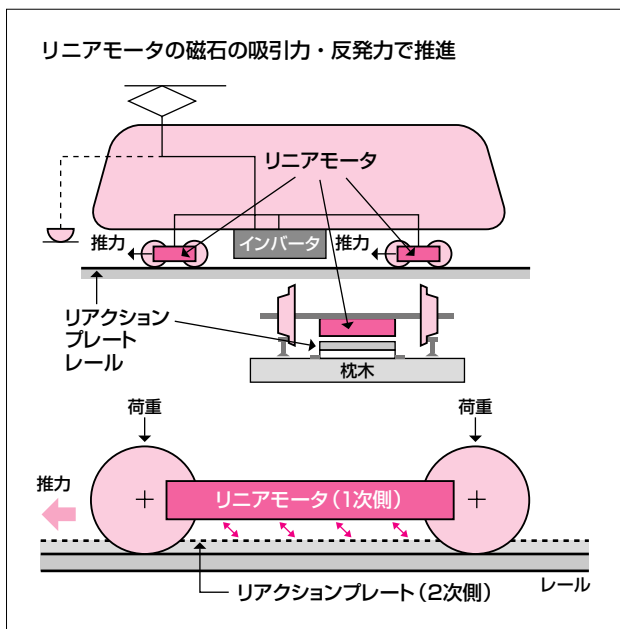
PROFILE



安藤正博 (あんど まさひろ)

社団法人日本地下鉄協会
リニアメトロ推進本部首席調査役
1938年新潟県生まれ。1963年山形大学工学部電気工学科卒、日立製作所入社。システム事業部輸送システム部長、交通システム事業部主管技師長などを経て、現在はトータルソリューション事業部公共・社会システム本部社会システム部主管技師長。リニアモータ方式の地下鉄の開発と普及に貢献し、電気工業技術功績賞、市村産業賞、文部科学大臣賞(科学技術功労賞)を受賞。「ミスターリニアメトロ」の異名をとる。3部門(機械、電気電子、総合技術監理)の技術士でもある。

【図2】リニアモータの推進力



出典：社団法人日本地下鉄協会「LINEAR METRO—21世紀の都市交通システムへの提言」

1次側と2次側の
ギャップと
モータコントロールが
キーポイント

原理は単純ですが、実際に開発に着手するとたくさん問題が出てきました。鉄道工学は経験工学的な要素が強いのですが、リニアモータを搭載した地



下鉄はまだ世界になく、全て自分たちで解決しなくてはなりませんでした。

最大の問題は、車体側のリニアモータ（1次側）と、リアクションプレートのギャップ（間隔）でした。回転モータでは1次側と2次側のギャップは1mmありませんが、リニアモータの場合、車輪の左右の振動などでギャップが変動しますし、車輪もレールも摩耗します。ギャップをどのくらいに設定したらいいのか、またそのためには車体へのリニアモータの取り付けや、枕木へのリアクションプレートの取り付けをどうしたらいいのか、保守はどうしたらいいのかなど、解決すべき課題が山積みでした。最終的にギャップは12mmに設定しましたが、それを決めるのが最も難しいプロセスでした。

モータコントロールも難しい問題でした。回転モータの場合は、ギアなどによって回転数などを制御できますが、リニアモータの場合は、電流と電圧、そしてN極とS極の切り替えにかかわる周波数を制御しなくてはなりません。これはインバータ技術*を使うことで解決しましたが、この技術開発も大きなポイントでした。

！**勾配や天候の問題を解決し**
！**建設コスト低減にも大きな効果**

こうして完成したリニアメトロには、それまでの地下鉄にはないメリットがたくさんあります。

まず第1に、車輪とレールの摩擦力ではなく磁力で駆動するため、急勾配の線路でも大丈夫だということです。一般の鉄道は勾配3～4%が限度ですが、リニアメトロなら6～8%の勾配でも大丈夫です。理論的にはさらに急勾配でも可能ですが、乗車する人の安全性を考慮してこの程度に設定してあります。また、レールが滑りやすい雪や雨などの悪天候も関係なく、一定の推進力が得られます。

第2に、ギアや複雑な周辺装置を持たない扁平なリニアモータを使うことで、電車の床面までの高さを従来の1.1mから0.7mにまで下げることができる点です。従来の電車と同じ天井高を確保しながら、車両高を低く抑えることができ、車両をコンパクトにできるのです。

第3に、車軸回りの構造が簡単になり、カーブに合わせて車軸の向きを変化させる「セルフステアリング」を用いることで、カーブの半径を小さくし、急カーブに対応できます。また、左右の車輪の回転数の差によるきしり音も小さくできます。

こうした技術上のメリットは、建設コストの軽減にも大きく貢献しています。急勾配、急カーブが可能なので、

【表3】全国のリニアメトロ

都市	路線名	区間	距離(km)
運行中			
東京都	大江戸線	都庁前～光が丘	40.7
大阪市	長堀鶴見緑地線	大正～門真南	15.0
神戸市	海岸線	新長田～三宮・花時計前	7.9
福岡市	七隈線	橋本～天神南	12.0
建設中または建設予定			
仙台市	東西線	動物公園～荒井	14.4
横浜市	4号線	日吉～中山	13.1
大阪市	第8号線	井高野～今里	12.1

参照：社団法人日本地下鉄協会「LINEAR METRO SYSTEM リニアメトロ地下鉄」

駅は地上近くに設置しても、線路自体は河川や他の地下鉄などを避けた大深度地下を利用することが可能ですし、道路幅内で路線計画が立てられるため、道路脇の民有地を買収する費用が不要になります。また、コンパクトな車両になったことで、地下鉄のトンネルの断面積も半分近くになります。実際、建設コストは従来の地下鉄に比べて3分の2程度で済ませることができています。

！**正しい信念を持って買けば**
！**技術は成功し、人びとの生活に役立つ**

現在、リニアメトロは全国各都市で運行されており、700両くらいが稼働しています【表3】。また、今後建設される地下鉄で、在来線と相互乗り入れしない路線については、すべてリニアメトロになる予定です。さらに、世界各地にリニアメトロの技術が輸出されようとしています。

技術で成功するには、正しい信念を持ち続けることが必要です。リニアメトロの構想を打ち出したときは、誰も相手にしてくれませんでした。それから3年間、各方面の説得にあたり、やっと開発に着手してからも完成までに8年間ほどかかっています。私の最大の目的は、鉄道の最大の欠点である摩擦力による駆動から摩擦力によらない自由度の高い電車の開発でしたが、それを貫いたことがリニアメトロの成功に結びついています。

工学は、多くの人に役立つものづくり、システムづくりに貢献できる学問です。そして技術の世界では、定年後にもいろいろな活躍の場が広がっています。工学やエンジニアの世界に進もうとする若者には、ぜひそのことを伝えたいと思います。

*インバータ…交流を直流に変換し、さらに交流に変換する装置。周波数を自在にコントロールするための技術として重要。